

地層処分低レベル放射性廃棄物の 安全性向上に関する検討

—多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全と
評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念の検討—

2014年6月

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の 安全性向上に関する検討

—多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と
評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念の検討—

2014年6月

原子力発電環境整備機構

2014年6月 初版発行

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

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2014

地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性向上に関する検討
—多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と
評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念の検討—

大井貴夫¹，藤崎淳²，千葉保³，中川辰雄³，椋木敦³，
羽根幸司⁴，川崎大介⁵，関岡靖司⁶，山口耕平⁶

要旨

本報告書は TRU レベル 3 報告書以降の地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の技術開発に関する検討の進捗をまとめたものである。本報告書では、多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示することを目標として、地下水シナリオを対象とした検討を実施した。

この検討の実施においては、「高度化した包括的感度解析手法」を組み込んだ新たな安全評価手順を採用し、その手順に則り、地質環境条件の類型化や廃棄体特性の見直しやそれらに基づく処分場設計の見直しを実施した。また、処分に伴い生起する様々な事象に関する最新の知見とパラメータの変動に対する処分システムの応答の仕組みに基づき、シナリオや解析ケースを選定し、決定論解析の結果と安全裕度の定量的な提示により、安全性の主張を支援する論拠を整備した。

本検討により、主要な影響因子である水理条件に応じた既存の処分概念および高度化対策を採用した場合の安全裕度の違いが提示された。また、高度化対策を採用しなくても既存の工学的対策により安全確保可能な水理条件や、高度化対策、または、さらなる核種移行抑制策が必須となる水理条件などが明らかになり、「多様な地質環境に対して安全性を確保可能な処分概念」をより詳細に提示できた。

処分システムの安全性はすべてのシナリオを対象として実施する必要がある。そのため、本検討の結果のみから、処分システムの安全性を主張することはできない。今後、これらの方策の頑健性を主張するために、本検討で明らかになった既存の工学的対策による安全性確保の可能性の検討や地下水シナリオ以外のシナリオに対する評価を実施する必要がある。

1 原子力発電環境整備機構（現 日本原子力研究開発機構）

2 原子力発電環境整備機構

3 日揮株式会社

4 鹿島建設株式会社

5 株式会社クインテッサジャパン

6 三菱マテリアル株式会社

A study on improving the safety of TRU waste disposal in Japan
—Study on disposal system design aimed at improving disposal safety and the reliability of the assessment of
TRU waste disposal for a range of geological conditions—

Takao Ohi¹, Kiyoshi Fujisaki², Tamotsu Chiba³, Tatsuo Nakagawa³,
Atsushi Mukunoki³, Koji Hane⁴, Daisuke Kawasaki⁵, Yasushi Sekioka⁶,
Kohei Yamaguchi⁶

ABSTRACT

This report describes the progress of the study on TRU waste disposal after the TRU level3 report published by NUMO in 2011. In this study, solutions to issues highlighted in the TRU level3 report were tested and specific disposal system designs that can comply with a range of geological conditions were demonstrated for a reference groundwater scenario.

A new assessment approach incorporating an enhanced comprehensive sensitivity analysis method was applied. According to this approach, geological conditions were classified. Also, waste properties, repository design were reviewed. Based on information on various phenomena caused by disposal and the response properties of the disposal system, assessment scenarios and analytical cases were selected. Furthermore, arguments supporting claim of disposal system safety were also prepared by the results of deterministic analyses and the quantitative safety margins.

This study shows the differences in the level of safety between existing and improved disposal concepts for a range of hydraulic condition which is main influence factor for the safety of the disposal system. Also, the hydraulic conditions, under which the disposal system can maintain its robustness through application of a reasonable design without an improved disposal concept and under which the disposal system requires application of improved the disposal concept and further measures for restricting nuclide migration, were presented based on response properties. Based on the information, reference disposal designs which can enhance disposal safety and the reliability of the safety assessment for a range of hydraulic conditions were demonstrated.

This study was carried out for a reference groundwater scenario. In the future, in order to underline safety of TRU waste disposal and the reliability of the safety assessment, other scenarios as well as the study on the reasonable design should be considered.

¹ Nuclear Waste Management Organization of Japan (Present position: Japan Atomic Energy Agency)

² Nuclear Waste Management Organization of Japan

³ JGC Corporation

⁴ Kajima Corporation

⁵ Quintessa K. K.

⁶ Mitsubishi Materials Corporation

目次

1. はじめに.....	1-1
1.1 本報告書の背景・目標・検討方法.....	1-1
1.2 本報告書の構成.....	1-3
第1章 参考文献.....	1-4
2. 安全評価の方法論.....	2-1
2.1 安全確保の示し方と安全評価の考え方.....	2-1
2.1.1 安全確保の示し方.....	2-1
2.1.2 安全評価の手順.....	2-6
第2章 参考文献.....	2-11
3. 前提条件の整備.....	3-1
3.1 地質環境条件の設定.....	3-1
3.1.1 多様な地質環境の分類の考え方.....	3-1
3.1.2 地質環境条件が処分場に及ぼす影響.....	3-2
3.1.3 地質環境条件の類型化.....	3-5
3.2 廃棄体特性の整理.....	3-6
3.2.1 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分類の見直し.....	3-6
3.2.2 廃棄体グループごとの廃棄体特性の設定.....	3-18
3.2.3 廃棄体グループごとの核種インベントリの設定.....	3-20
3.3 NUMO の処分概念の基本型.....	3-21
3.3.1 目的達成に必要と考えられる処分概念の基本型の設定.....	3-21
3.3.2 設定した検討ケースと実施する主要な検討項目.....	3-24
3.4 処分システムの設計条件の整理.....	3-26
3.4.1 廃棄体特性が処分システムの概念構築に及ぼす影響.....	3-26
3.4.2 廃棄体特性に応じた処分概念の構築.....	3-28
3.5 処分システムの応答特性を把握するための包括的感度解析のケース設定.....	3-91
3.5.1 対象廃棄体グループと対象核種の選定および評価モデルの設定.....	3-91
3.5.2 地質環境条件および設計条件に基づく包括的感度解析のケースの設定.....	3-97
3.5.3 核種移行パラメータの変動範囲の設定.....	3-98
3.5.4 パラメータの相関関係の扱い.....	3-101
第3章 参考文献.....	3-105
4. 処分システムの応答特性と解析条件の類型化および評価の十分性の把握.....	4-1
4.1 処分システムの応答特性の把握.....	4-1
4.1.1 処分システムの応答特性を表す解析解.....	4-1
4.1.2 人工バリアシステムからの核種放出を表す簡略式の意味.....	4-5
4.1.3 核種放出に影響を及ぼす因子に対する人工バリアシステムの応答特性.....	4-12

4.2 評価の十分性の検討.....	4-36
4.2.1 応答特性に基づく解析条件の類型化の考え方.....	4-37
4.2.2 類型化とそれに基づく評価の十分性の検討.....	4-40
第4章 参考文献.....	4-46
5. 包括的感度解析に基づく成立条件の抽出.....	5-1
5.1 成立条件の抽出手順.....	5-1
5.1.1 統計解析.....	5-1
5.1.2 2つの変数から構成される平面上での統計解析の結果の整理.....	5-1
5.1.3 成立条件の算出.....	5-5
5.2 成立条件の抽出結果.....	5-5
5.2.1 包括的感度解析のケースごとの解析条件.....	5-5
5.2.2 感度解析の結果と成立条件.....	5-5
第5章 参考文献.....	5-26
6. 処分システムの状態の理解.....	6-1
6.1 過渡的な場の状態に関する検討.....	6-1
6.1.1 温度.....	6-1
6.1.2 水理（再冠水）.....	6-5
6.1.3 化学（酸化性／還元性）.....	6-7
6.1.4 放射線場（水の放射線分解）.....	6-8
6.1.5 ガス（水素爆発の可能性に関する考察）.....	6-9
6.1.6 まとめ.....	6-11
6.2 長期的な場の状態に関する検討.....	6-11
6.2.1 温度.....	6-11
6.2.2 力学.....	6-18
6.2.3 地球化学（セメントとベントナイトの両立性）.....	6-22
6.2.4 地球化学（硝酸塩とベントナイトの両立性）.....	6-25
6.2.5 ガス.....	6-32
第6章 参考文献.....	6-71
7. 安全評価上重要なシナリオと解析ケースの設定.....	7-1
7.1 安全評価上重要なシナリオ.....	7-1
7.1.1 重要なシナリオの選定.....	7-1
7.2 重要なシナリオに対応する解析ケース.....	7-2
7.2.1 解析ケース設定の考え方.....	7-2
7.2.2 解析ケースの一覧.....	7-3
第7章 参考文献.....	7-11
8. モデル開発と適用.....	8-1

8.1	安全評価に用いる核種移行モデルの設定	8-1
8.1.1	概要	8-1
8.1.2	廃棄体領域モデル	8-2
8.1.3	緩衝材領域モデル	8-4
8.1.4	亀裂性媒体モデル	8-5
8.1.5	多孔質媒体モデル	8-6
8.2	評価対象核種の選定	8-6
8.3	解析ケースごとの解析条件の設定	8-6
8.3.1	廃棄体グループ2における放射化生成物の賦存状況とインベントリ	8-6
8.3.2	廃棄体グループ2における放射化生成物の浸出期間	8-9
8.3.3	処分施設の諸元	8-10
8.3.4	半減期およびインベントリデータ	8-20
8.3.5	核種移行パラメータ	8-20
8.3.6	母岩および断層に関するパラメータ	8-26
8.3.7	線量への換算係数	8-27
第8章	参考文献	8-28
9.	決定論解析と安全裕度	9-1
9.1	決定論解析	9-1
9.1.1	各ケースの最大線量の比較	9-1
9.2	包括的感度解析に基づく安全裕度の検討	9-23
9.2.1	廃棄体グループ1のI-129に関する安全裕度	9-23
9.2.2	廃棄体グループ2のC-14に関する安全裕度	9-28
9.2.3	廃棄体グループ3のI-129に関する安全裕度	9-33
第9章	参考文献	9-38
10.	安全確保可能な処分概念と残された課題	10-1
10.1	降水系還元性地下水・結晶質岩の場合の安全確保可能な処分概念	10-1
10.1.1	廃棄体グループ1の安全確保可能な処分概念	10-1
10.1.2	廃棄体グループ2の安全確保可能な処分概念	10-2
10.1.3	廃棄体グループ3の安全確保可能な処分概念	10-2
10.1.4	廃棄体グループ4の安全確保可能な処分概念	10-3
10.2	廃棄体グループごとの安全確保可能な処分概念と残された課題	10-3
10.2.1	廃棄体グループごとの安全確保可能な処分概念	10-3
10.2.2	残された課題	10-5
第10章	参考文献	10-5
11.	おわりに	11-1
11章	参考文献	11-2

添付-1	高度化した包括的感度解析手法	添付 1-1
添付-2	重ね合せによる温度評価手法.....	添付 2-1
添付-3	近似解析解の簡略式	添付 3-1
添付-4	緩衝材厚さの変化と放出率の関係	添付 4-1

目次

図 2.1.1-1	安全確保構想の全体構成	2-1
図 2.1.2-1	重要な事象などを考慮可能な評価手順	2-9
図 2.1.2-2	高度化した包括的感度解析を組み入れた安全評価手順	2-10
図 3.1.1-1	処分場の建設に適したさまざまな地質環境	3-1
図 3.1.2-1	実測地下水およびモデル地下水の多変量解析	3-5
図 3.2.1-1	人工バリア構成 (例)	3-12
図 3.2.1-2	2 電気透析セルシステム	3-13
図 3.4.1-1	本検討で考慮する発熱性廃棄体の発熱履歴	3-27
図 3.4.2-1	各廃棄体グループの放射エネルギーの経時変化	3-29
図 3.4.2-2	各廃棄体グループの発熱量の経時変化	3-30
図 3.4.2-3	各廃棄体グループの経口摂取換算線量の経時変化	3-31
図 3.4.2-4	高発熱量廃棄体 (Gr.4H) の放射エネルギーと発熱量の経時変化	3-32
図 3.4.2-5	各廃棄体グループの線量評価結果	3-34
図 3.4.2-6	発熱廃棄体の熱解析結果	3-36
図 3.4.2-7	廃棄体近傍におけるセメント系材料の利用	3-38
図 3.4.2-8	温度評価点の考え方 (case 1-0, 1-2)	3-39
図 3.4.2-9	温度評価点の考え方 (case 2-0)	3-40
図 3.4.2-10	温度評価点の考え方 (case 3-0)	3-40
図 3.4.2-11	地下施設の配置方法の考え方	3-46
図 3.4.2-12	地下施設レイアウト (case1-0 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-53
図 3.4.2-13	地下施設レイアウト (case1-0 堆積岩, 深度 500 m)	3-54
図 3.4.2-14	地下施設レイアウト (case1-2 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-58
図 3.4.2-15	地下施設レイアウト (case1-2 堆積岩, 深度 500 m)	3-59
図 3.4.2-16	地下施設レイアウト (case1-3 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-60
図 3.4.2-17	地下施設レイアウト (case1-3 堆積岩, 深度 500 m)	3-61
図 3.4.2-18	地下施設レイアウト (case2-0 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-69
図 3.4.2-19	地下施設レイアウト (case2-0 堆積岩, 深度 500 m)	3-70
図 3.4.2-20	地下施設レイアウト (case2-2 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-77
図 3.4.2-21	地下施設レイアウト (case2-2 堆積岩, 深度 500 m)	3-78
図 3.4.2-22	地下施設レイアウト (case3-0 結晶質岩, 深度 1000 m)	3-86
図 3.4.2-23	地下施設レイアウト (case3-0 堆積岩, 深度 500 m)	3-87
図 3.5.1-1	既存の安全評価における各グループの被ばく線量の例	3-93
図 3.5.4-1	緩衝材の透水係数—有効粘土密度の関係式	3-103
図 4.1.1-1	評価領域と対応する評価モデルの体系	4-1
図 4.1.1-2	近似解析解の簡略式によって表される人工バリアの応答特性	4-3

図 4.1.3-1	人工バリアからの核種放出率 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)	4-17
図 4.1.3-2	天然バリア出口における線量 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)	4-17
図 4.1.3-3	人工バリアからの核種放出率 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)	4-18
図 4.1.3-4	天然バリア出口における線量 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)	4-18
図 4.1.3-5	モデル概念図	4-21
図 4.1.3-6	EDZ 流量と緩衝材厚さの関係	4-28
図 4.1.3-7	緩衝材厚さと EDZ ダルシー流速	4-28
図 4.1.3-8	人工バリア出口フラックスピークの相対比	4-29
図 4.1.3-9	線量ピークの相対比	4-29
図 4.1.3-10	人工バリア出口フラックス (K 一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)	4-30
図 4.1.3-11	線量 (K 一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)	4-30
図 4.1.3-12	人工バリア出口フラックス (K 一定, 水理: $Ref \times 10^3$: $Q'_{th} < Q$)	4-31
図 4.1.3-13	線量 (K 一定, 水理: $Ref \times 10^3$: $Q'_{th} < Q$)	4-31
図 4.1.3-14	人工バリア出口フラックス (L 一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)	4-32
図 4.1.3-15	線量 (L 一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)	4-32
図 4.1.3-16	人工バリア出口フラックス (L 一定, 水理: $Ref \times 10^3$: $Q'_{th} < Q$)	4-33
図 4.1.3-17	線量 (L 一定, 水理: $Ref \times 10^3$: $Q'_{th} < Q$)	4-33
図 4.1.3-18	間隙率の変化に対する内側境界濃度の変化	4-35
図 4.2.1-1	C_K , $EDe'/(L-K)$ 平面上での類型化の概念	4-37
図 4.2.2-1	Q'_{th} と C_K を用いた類型化 (Gr1: I-129: $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)	4-44
図 4.2.2-2	Q'_{th} と C_K を用いた類型化 (Gr1: I-129: $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)	4-44
図 5.1.2-1	2つの影響の大きい因子からなる面の区分の概念	5-1
図 5.1.2-2	個々の区分領域に対応する成立条件の抽出の概念	5-2
図 5.1.2-3	天然バリア中の減衰割合 γ と線量の関係	5-3
図 5.1.2-4	F_N がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果	5-3
図 5.1.2-5	k がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果	5-4
図 5.1.2-6	F_N と k がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果	5-4
図 5.2.2-1	被ばく線量ピークの分布 (ケース A)	5-6
図 5.2.2-2	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース A)	5-7
図 5.2.2-3	順位相関係数 (ケース A および B)	5-8
図 5.2.2-4	成立条件 (ケース A および B, 基準線量 $10 \mu\text{Sv/y}$)	5-9
図 5.2.2-5	成立条件のコンター (ケース A および B, 基準線量 $10 \mu\text{Sv/y}$)	5-10
図 5.2.2-6	被ばく線量ピークの分布 (ケース C)	5-11
図 5.2.2-7	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース C)	5-11
図 5.2.2-8	順位相関係数 (ケース C)	5-12
図 5.2.2-9	成立条件 (ケース C, 基準線量 $10 \mu\text{Sv/y}$)	5-13

図 5.2.2-10	成立条件のコンター (ケース C, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-13
図 5.2.2-11	被ばく線量ピークの分布 (ケース D)	5-14
図 5.2.2-12	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース D)	5-14
図 5.2.2-13	順位相関係数 (ケース D)	5-15
図 5.2.2-14	成立条件 (ケース D, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-16
図 5.2.2-15	成立条件のコンター (ケース D, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-16
図 5.2.2-16	被ばく線量ピークの分布 (ケース E)	5-17
図 5.2.2-17	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース E)	5-17
図 5.2.2-18	順位相関係数 (ケース E)	5-18
図 5.2.2-19	成立条件 (ケース E, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-19
図 5.2.2-20	成立条件のコンター (ケース E, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-19
図 5.2.2-21	被ばく線量ピークの分布 (ケース F)	5-20
図 5.2.2-22	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース F)	5-20
図 5.2.2-23	順位相関係数 (ケース F)	5-21
図 5.2.2-24	成立条件 (ケース F, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-22
図 5.2.2-25	成立条件のコンター (ケース F, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-22
図 5.2.2-26	被ばく線量ピークの分布 (ケース G)	5-23
図 5.2.2-27	主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース G)	5-23
図 5.2.2-28	順位相関係数 (ケース G)	5-24
図 5.2.2-29	成立条件 (ケース G, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-25
図 5.2.2-30	成立条件のコンター (ケース G, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)	5-25
図 6.1.4-1	廃棄体 Gr2 (キャスタ) における水素ガス発生量	6-8
図 6.1.5-1	廃棄体パッケージ内の水素・酸素の体積分率 (Gr2 : CSD-B/C)	6-10
図 6.1.5-2	廃棄体パッケージ内の水素・酸素の体積分率 (Gr4 : 熔融炉など)	6-10
図 6.2.1-1	FEM メッシュ拡大図 (case1-0 : 結晶質岩ケース)	6-12
図 6.2.1-2	FEM メッシュ拡大図 (case1-0 : 堆積岩ケース)	6-12
図 6.2.1-3	FEM メッシュ拡大図 (case2-0 : 結晶質岩ケース)	6-13
図 6.2.1-4	FEM メッシュ拡大図 (case2-0 : 堆積岩ケース)	6-13
図 6.2.1-5	温度分布 (case1-0 : 結晶質岩ケース)	6-14
図 6.2.1-6	温度分布 (case1-0 : 堆積岩ケース)	6-15
図 6.2.1-7	温度分布 (case2-0 : 結晶質岩ケース)	6-16
図 6.2.1-8	温度分布 (case2-0 : 堆積岩ケース)	6-17
図 6.2.2-1	インフルエンスダイアグラム	6-18
図 6.2.2-2	ニアフィールド構造力学評価における取り組み	6-19
図 6.2.2-3	人工バリアの長期挙動評価における課題と課題解決に向けた検討	6-21
図 6.2.3-1	10 万年後のモンモリロナイト残存割合	6-24

図 6.2.4-1	ヨウ素の実効拡散係数の試験結果.....	6-27
図 6.2.4-2	硝酸塩濃度の影響に関する実験結果と透水係数算出式との比較.....	6-28
図 6.2.4-3	解析体系.....	6-30
図 6.2.4-4	緩衝材中のモンモリロナイトの残存量（1 万年後）.....	6-31
図 6.2.5-1	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 1.....	6-37
図 6.2.5-2	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 2（ハル圧縮体）.....	6-38
図 6.2.5-3	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 2（CSD-B/C）.....	6-39
図 6.2.5-4	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr3.....	6-40
図 6.2.5-5	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 発熱性（200ℓドラム）.....	6-41
図 6.2.5-6	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 発熱性（ハル缶，インナーバレル）.....	6-42
図 6.2.5-7	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 低発熱性（200ℓドラム）.....	6-43
図 6.2.5-8	バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 低発熱性（角型容器）.....	6-44
図 6.2.5-9	Gr1, Gr2, Gr4 の処分坑道を含む鉛直断面の解析グリッド.....	6-46
図 6.2.5-10	Gr2 の処分坑道近傍の解析グリッド.....	6-46
図 6.2.5-11	ガス移行評価に用いたバルク（水素）ガス発生量.....	6-55
図 6.2.5-12	ガス移行評価に用いた $^{14}\text{CH}_4$ 発生量.....	6-55
図 6.2.5-13	圧力，温度，飽和度（閉鎖直後）.....	6-57
図 6.2.5-14	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 1 年）.....	6-58
図 6.2.5-15	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 2 年）.....	6-59
図 6.2.5-16	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 5 年）.....	6-60
図 6.2.5-17	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 10 年）.....	6-61
図 6.2.5-18	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 20 年）.....	6-62
図 6.2.5-19	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 50 年）.....	6-63
図 6.2.5-20	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 100 年）.....	6-64
図 6.2.5-21	圧力，温度，飽和度（閉鎖後 475 年）.....	6-65
図 6.2.5-22	各処分坑道断面頂上部における圧力の経時変化.....	6-66
図 6.2.5-23	各処分坑道断面頂上部における温度の経時変化.....	6-66
図 6.2.5-24	ガス圧力上昇による溶存水素の押し出し.....	6-67
図 6.2.5-25	地表面における水素ガスおよび放射性メタン（ $^{14}\text{CH}_4$ ）の放出量.....	6-68
図 6.2.5-26	$^{14}\text{CH}_4$ による経口摂取経路での線量率.....	6-69
図 6.2.5-27	各処分坑道での Rn-222 の生成速度.....	6-69
図 8.3.3-1	処分施設内のセメント系材料の使用部位.....	8-11
図 9.1.1-1	最大線量の比較（降水系還元性地下水・結晶質岩）.....	9-3
図 9.1.1-2	最大線量の比較（海水系還元性地下水・結晶質岩）.....	9-4
図 9.1.1-3	最大線量の比較（降水系還元性地下水・堆積岩）.....	9-5
図 9.1.1-4	最大線量の比較（海水系還元性地下水・堆積岩）.....	9-6

図 9.1.1-5	線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-10}$ m/s)	..... 9-7
図 9.1.1-6	線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-8
図 9.1.1-7	線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-8}$ m/s)	..... 9-9
図 9.1.1-8	線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-10
図 9.1.1-9	線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-10}$ m/s)	..... 9-11
図 9.1.1-10	線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-12
図 9.1.1-11	線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-8}$ m/s)	..... 9-13
図 9.1.1-12	線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-14
図 9.1.1-13	線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-10}$ m/s)	..... 9-15
図 9.1.1-14	線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-16
図 9.1.1-15	線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-8}$ m/s)	..... 9-17
図 9.1.1-16	線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-18
図 9.1.1-17	線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-10}$ m/s)	..... 9-19
図 9.1.1-18	線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-20
図 9.1.1-19	線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-8}$ m/s)	..... 9-21
図 9.1.1-20	線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-22
図 9.2.1-1	成立条件と決定論解析の比較 (Gr1_I-129, 結晶質岩・降水系)	..... 9-24
図 9.2.1-2	成立条件となる母岩の Kd (Gr1_I-129: $k=2.0\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-26
図 9.2.1-3	成立条件となる充填材の Kd (Gr1_I-129: $k=2.0\times 10^{-9}$ m/s)	..... 9-27
図 9.2.1-4	成立条件と決定論解析の比較 (Gr1_I-129, 結晶質岩・海水系)	..... 9-28
図 9.2.2-1	成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(瞬時)結晶質岩・降水系)	..... 9-30
図 9.2.2-2	成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(ジルコイ)結晶質岩・降水系)	..... 9-31
図 9.2.2-3	成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(ステンレス)結晶質岩・降水系)	..... 9-32
図 9.2.3-1	成立条件と決定論解析の比較 (Gr3_I-129(緩衝材無))	..... 9-34
図 9.2.3-2	緩衝材無の条件で成立する充填材の Kd(Gr3_I-129)($k=2.0\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-35
図 9.2.3-3	成立条件と決定論解析の比較 (Gr3_I-129 (緩衝材有))	..... 9-35
図 9.2.3-4	緩衝材有の条件で成立する充填材の Kd(Gr3_I-129)($k=2.0\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-36
図 9.2.3-5	緩衝材有の条件で成立する緩衝材の De(Gr3_I-129)($k=2.0\times 10^{-7}$ m/s)	..... 9-37

表目次

表 2.1.1-1	安全確保ロードマップ（詳細版：概要調査の段階）	2-3
表 3.1.2-1	サイト環境条件による影響と類型化	3-2
表 3.2.1-1	発生量の比較	3-7
表 3.2.1-2	廃棄体の発熱量（基準年，25年後）	3-8
表 3.2.1-3	有害物質の有無	3-9
表 3.2.1-4	幅広い地質環境に対する高度化対策の例	3-10
表 3.2.1-5	廃棄体グループ分類の考え方	3-14
表 3.2.1-6	廃棄体グループの分類（現行の処理処分技術を想定）	3-14
表 3.2.1-7	廃棄体グループの内訳(約 18,100 m ³)	3-15
表 3.2.1-8	廃棄体グループの分類（高度化対策）	3-16
表 3.2.1-9	廃棄体グループの分類（埋設事業区分）	3-17
表 3.2.1-10	廃棄体グループの分類（脱硝技術）	3-17
表 3.2.2-1	地層処分低レベル放射性廃棄物の物量データ（19,000 m ³ ）	3-19
表 3.2.3-1	廃棄物グループごとの核種インベントリ（19,000 m ³ ）	3-21
表 3.3.1-1	処分概念の基本型と主要検討項目	3-23
表 3.3.2-1	各検討ケースにおける人工バリア構成	3-24
表 3.4.2-1	金属製廃棄体パッケージの諸元	3-37
表 3.4.2-2	コンクリート製廃棄体パッケージの諸元	3-37
表 3.4.2-3	発熱性廃棄体におけるセメント系材料の利用	3-39
表 3.4.2-4	設計に用いる廃棄体数量	3-41
表 3.4.2-5	廃棄体パッケージの仕様（金属製）	3-41
表 3.4.2-6	廃棄体パッケージの仕様（コンクリート製）	3-42
表 3.4.2-7	各検討ケースにおける制限温度と温度評価点	3-44
表 3.4.2-8	廃棄体パッケージ定置時のクリアランス	3-45
表 3.4.2-9	処分坑道断面（case1-0 結晶質岩，Gr.1, Gr.2）	3-47
表 3.4.2-10	処分坑道断面（case1-0 結晶質岩，Gr.3, Gr.4L）	3-48
表 3.4.2-11	処分坑道断面（case1-0 結晶質岩，Gr.4H）	3-49
表 3.4.2-12	処分坑道断面（case1-0 堆積岩，Gr.1, Gr.2）	3-50
表 3.4.2-13	処分坑道断面（case1-0 堆積岩，Gr.3, Gr.4L）	3-51
表 3.4.2-14	処分坑道断面（case1-0 堆積岩，Gr.4H）	3-52
表 3.4.2-15	処分坑道断面（case1-2 結晶質岩）	3-56
表 3.4.2-16	処分坑道断面（case1-2 堆積岩）	3-57
表 3.4.2-17	処分坑道断面（case2-0 結晶質岩，Gr.1, Gr.2）	3-63
表 3.4.2-18	処分坑道断面（case2-0 結晶質岩，Gr.3, Gr.4L）	3-64
表 3.4.2-19	処分坑道断面（case2-0 結晶質岩，Gr.4H）	3-65

表 3.4.2-20	処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr.1, Gr.2)	3-66
表 3.4.2-21	処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr.3, Gr.4L)	3-67
表 3.4.2-22	処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr.4H)	3-68
表 3.4.2-23	処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr.1, Gr.2)	3-71
表 3.4.2-24	処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr.3, Gr.4L)	3-72
表 3.4.2-25	処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr.4H)	3-73
表 3.4.2-26	処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr.1, Gr.2)	3-74
表 3.4.2-27	処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr.3, Gr.4L)	3-75
表 3.4.2-28	処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr.4H)	3-76
表 3.4.2-29	処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr.1, Gr.2)	3-80
表 3.4.2-30	処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr.3, Gr.4L)	3-81
表 3.4.2-31	処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr.4H)	3-82
表 3.4.2-32	処分坑道断面 (case3-0 堆積岩, Gr.1, Gr.2)	3-83
表 3.4.2-33	処分坑道断面 (case3-0 堆積岩円形, Gr.3, Gr.4L)	3-84
表 3.4.2-34	処分坑道断面 (case3-0 堆積岩円形, Gr.4H)	3-85
表 3.4.2-35	各ケースの地下施設占有領域	3-88
表 3.4.2-36	処分坑道断面あたりのパッケージ数, 坑道長, 本数 (結晶質岩)	3-89
表 3.4.2-37	処分坑道断面あたりのパッケージ数, 坑道長, 本数 (堆積岩)	3-90
表 3.5.1-1	既存の安全評価での支配核種	3-92
表 3.5.1-2	case1-0 との違いによる評価への影響と評価における考え方	3-95
表 3.5.1-3	C-14 の各モードごとの核種の存在割合とインベントリ	3-97
表 3.5.2-1	包括的感度解析の解析ケース一覧	3-98
表 3.5.3-1	包括的感度解析に用いる母岩特性および水理特性の変動範囲	3-98
表 3.5.3-2	包括的感度解析に用いる人工バリア材特性の変動範囲	3-99
表 3.5.3-3	各ケースにおいて用いるその他のパラメータ条件	3-99
表 3.5.3-4	包括的感度解析における溶解度の設定	3-100
表 3.5.3-5	核種の初期インベントリおよび線量換算係数	3-100
表 3.5.3-6	包括的感度解析における分配係数の変動範囲	3-100
表 4.1.3-1	人工バリアからの拡散による核種放出率に影響を及ぼす因子	4-12
表 4.1.3-2	核種移行解析に用いた入力データ	4-15
表 4.1.3-3	緩衝材の透水性の変化と放出率などの変化との関係 ($k=2\times 10^{-10}$ m/s)	4-15
表 4.1.3-4	緩衝材の透水性の変化と放出率などの変化との関係 ($k=2\times 10^{-7}$ m/s)	4-16
表 4.1.3-5	人工バリアの解析条件	4-26
表 4.1.3-6	緩衝材厚さに応じて変化する Q'_{th} を算出するための条件	4-27
表 4.1.3-7	$Q < Q'_{th}$, $Q'_{th} < Q$ となる透水量係数	4-27
表 4.1.3-8	簡易評価式と数値解の比較 ($Q=ref : Q < Q'_{th}$, K 一定, 瞬時溶出)	4-34

表 4.1.3-9	簡易評価式と数値解の比較 ($Q=10^3$ 倍: $Q'_{th}<Q$, K 一定, 瞬時溶出)	4-34
表 4.1.3-10	簡易評価式と数値解の比較 ($Q=ref:Q<Q'_{th}$, L 一定, 瞬時溶出)	4-34
表 4.1.3-11	簡易評価式と数値解の比較 ($Q=10^3$ 倍: $Q'_{th}<Q$, L 一定, 瞬時溶出)	4-34
表 4.2.2-1	I-129 の K_d および拡散係数などの設定値 (既存の評価)	4-40
表 4.2.2-2	幾何形状の代表値, 線量への換算係数など	4-41
表 4.2.2-3	EDZ の地下水流量 Q , 人工バリア内地下水流量 Q_d	4-41
表 4.2.2-4	$Q''_{th}=Ede'/(L-K)$, C_K , F_N などの比較(Gr1, I-129, $k=2.0\times 10^{-10}$ m/s)	4-42
表 4.2.2-5	$Ede'/(L-K)$, C_K , F_N などの比較(Gr1, I-129, $k=2.0\times 10^{-7}$ m/s)	4-43
表 6.1.1-1	閉鎖後初期段階の温度: 結晶質岩, 廃棄体 Gr2	6-1
表 6.1.1-2	閉鎖後初期段階の温度: 結晶質岩, 廃棄体 Gr4 (発熱性)	6-2
表 6.1.1-3	閉鎖後初期段階の温度: 堆積岩, 廃棄体 Gr2	6-2
表 6.1.1-4	閉鎖後初期段階の温度: 堆積岩, 廃棄体 Gr4 (発熱性)	6-2
表 6.1.1-5	閉鎖後初期段階の温度: 結晶質岩, 廃棄体 Gr2 (case 1-2)	6-3
表 6.1.1-6	閉鎖後初期段階の温度: 結晶質岩, 廃棄体 Gr4(発熱性)(case 1-2)	6-4
表 6.1.1-7	閉鎖後初期段階の温度: 堆積岩, 廃棄体 Gr2 (case 1-2)	6-4
表 6.1.1-8	閉鎖後初期段階の温度: 堆積岩, 廃棄体 Gr4 (発熱性) (case 1-2)	6-4
表 6.1.2-1	再冠水に要する時間: 低透水場(case1-0), 結晶質岩	6-5
表 6.1.2-2	再冠水に要する時間: 低透水場(case1-0), 堆積岩	6-5
表 6.1.2-3	再冠水に要する時間: 高透水場(case2-0), 結晶質岩	6-6
表 6.1.2-4	再冠水に要する時間: 高透水場(case2-0), 堆積岩	6-6
表 6.1.6-1	過渡的な場の状態のまとめ	6-11
表 6.2.5-1	各材料の密度および間隙率	6-33
表 6.2.5-2	金属材料の厚さ	6-33
表 6.2.5-3	金属材料の腐食率設定	6-34
表 6.2.5-4	放射線分解における G 値の設定	6-35
表 6.2.5-5	ガス発生対象の整理	6-36
表 6.2.5-6	各媒体の透過率および間隙率	6-49
表 6.2.5-7	廃棄体領域の間隙率	6-50
表 6.2.5-8	毛管圧に関する設定	6-51
表 6.2.5-9	各媒体の比熱, 熱伝導度および粒子密度	6-51
表 6.2.5-10	Henry 定数	6-52
表 6.2.5-11	液相 298.15K での拡散係数	6-52
表 6.2.5-12	混合気の拡散係数	6-53
表 6.2.5-13	気相標準状態における拡散係数	6-54
表 6.2.5-14	ガス発生による圧力の蓄積	6-67
表 7.2.2-1	決定論解析ケース (結晶質岩・降水系還元性地下水)	7-3

表 7.2.2-2	決定論解析ケース（結晶質岩・海水系還元性地下水）	7-5
表 7.2.2-3	決定論解析ケース（堆積岩・降水系還元性地下水）	7-7
表 7.2.2-4	決定論解析ケース（堆積岩・海水系還元性地下水）	7-9
表 8.1.1-1	GoldSim における核種移行モデルの実装イメージ	8-1
表 8.3.1-1	Gr2 の放射化生成物の存在割合	8-7
表 8.3.1-2	Gr2 の溶出モードごとの初期インベントリ	8-7
表 8.3.2-1	Gr2 のジルカロイからの核種の浸出期間	8-9
表 8.3.2-2	Gr2 のステンレスからの核種の浸出期間	8-9
表 8.3.3-1	安全評価におけるセメント系材料の取扱い	8-11
表 8.3.3-2	各廃棄体における処分施設の諸元(case1-0：低透水性 NBS の Ref)	8-12
表 8.3.3-3	各廃棄体における処分施設の諸元(case1-2：低定置密度)	8-13
表 8.3.3-4	各廃棄体における処分施設の諸元(case2-0：高透水性 NBS の Ref)	8-14
表 8.3.3-5	各廃棄体における処分施設の諸元(case3-0：(コンクリート容器))	8-15
表 8.3.3-6	人工バリア水理パラメータ（case1-0：低透水性 NBS の Ref）	8-16
表 8.3.3-7	人工バリア水理パラメータ（case1-2：低定置密度）	8-17
表 8.3.3-8	人工バリア水理パラメータ（case2-0：高透水性 NBS の Ref）	8-18
表 8.3.3-9	人工バリア水理パラメータ(case3-0：低透水性 NBS(コンクリート容器))	8-19
表 8.3.4-1	核種の半減期および初期インベントリ(Bq)（基準年から 25 年後）	8-20
表 8.3.5-1	核種移行パラメータ（case1：降水系還元性地下水環境）	8-21
表 8.3.5-2	核種移行パラメータ（case 1：海水系還元性地下水環境）	8-22
表 8.3.5-3	高度化対策での Gr3,4 の緩衝材の Kd, De の設定値	8-23
表 8.3.5-4	核種移行パラメータ（降水系：case2-1）	8-24
表 8.3.5-5	核種移行パラメータ（海水系：case2-1）	8-24
表 8.3.5-6	充填材，緩衝材，EDZ の間隙率および真密度	8-26
表 8.3.6-1	母岩に関するパラメータ	8-26
表 8.3.6-2	断層に関するパラメータ	8-26
表 8.3.7-1	線量への換算係数(mSv/Bq)	8-27
表 9.2.1-1	安全裕度（Gr1_I-129，結晶質岩・降水系）	9-24
表 9.2.1-2	安全裕度（Gr1_I-129，結晶質岩・海水系）	9-28
表 9.2.2-1	安全裕度（Gr2_C-14(瞬時)結晶質岩・降水系）	9-30
表 9.2.2-2	安全裕度（Gr2_C-14(ジルカロイ)結晶質岩・降水系）	9-31
表 9.2.2-3	安全裕度（Gr2_C-14(ステンレス)結晶質岩・降水系）	9-32
表 9.2.3-1	安全裕度（Gr3_I-129，結晶質岩・降水系）	9-34
表 10.2.1-1	安全確保可能な処分概念のまとめ	10-4

1. はじめに

1.1 本報告書の背景・目標・検討方法

2005年、電気事業連合会（以下、「電事連」という）と核燃料サイクル開発機構（以下、「JNC」という）は、TRU廃棄物の処分に関する技術報告書、「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―（以下、「第2次TRUレポート」という）」（電事連・JNC, 2005）を公表した。このとりまとめなどに基づき、2007年6月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」という）（法律, 2012）が改正され、地層処分対象のTRU廃棄物（以下、「地層処分低レベル放射性廃棄物」という）が原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）の地層処分事業の対象として含まれるようになった。これを受けてNUMOは、2009年4月、それまでの公募資料を「地層処分低レベル放射性廃棄物の処分」の概括的な解説を取り入れた資料に改訂した。また、2011年1月に、「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ため、公募資料の説明資料である「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（以下、「TRUレベル3報告書」という）」（NUMO, 2011a）を公表した。このTRUレベル3報告書では、地層処分低レベル放射性廃棄物の発生や定義、特徴を紹介するとともに、基本的には高レベル放射性廃棄物の処分と同じ考え方に基づく地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全確保の考え方を提示した。また、第2次TRUレポート以降、変更された廃棄物の種類・物量を対象として、処分施設の設計や安全評価を行い、処分システムの頑健性の程度について把握した。さらに、これらの検討に基づき、より幅広い地質環境に対しても処分システムの頑健性が確保されるような処分システムの代替案の効果やその実現性に関する知見・情報を提示した。これらの検討により、多様な地質環境を想定した場合の地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の事業実現の見通しが示された。また、「廃棄体のグループ分類の見直し」や「短期の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの概念設計」、「それらに基づく処分場の設計の見直し」など、処分事業の安全性をより一層確実に、合理的に行うための重要な課題が明らかにされた。この「廃棄体のグループ分類の見直し」は、発熱性の廃棄体が新たに加えられたことを考慮するためであり、「短期の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの概念設計」は評価の信頼性向上などの観点から抽出された課題である。

現在、地層処分のプロジェクトは、文献調査前の段階にあり、サイト環境条件が特定されていない状況にある。今後想定される概要調査段階以降の評価においては、当該廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めるため、TRUレベル3報告書の課題などを踏まえ、処分の安全性を確保できる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する必要がある。そのため、NUMOでは、TRUレベル3報告書以降も継続して技術開発を行い、地質環境条件ごとのレファレンスとなる処分概念群を提示するための検討を行ってきた。

一方 NUMO では、2011 年に、「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～」(以下「2010 年レポート」という) (NUMO, 2011b) を公表した。これは、2000 年の NUMO の設立から現在までの地層処分技術の整備状況をまとめた報告書で、2008 年の原子力委員会政策評価部会（原子力委員会政策評価部会、2008）における提言を受けて作成されたものである。この 2010 年レポートの目的は、「安全な処分の実施に係る技術的信頼性が向上したことを示し、地層処分事業の安全確保に関する説明の技術的拠り所とする」ことである。このことを具体的に示すため、2010 年レポートでは、安全確保に関する 2 つの目標（閉鎖後長期の安全確保、事業期間中の安全確保）が定められている。また、この安全確保の目標を達成するための方針とその実施方策が定められ、この実施方策の一つとして「事業全体を俯瞰した計画の策定」が示されている。NUMO はこの計画の策定に資するため、地層処分事業を 10 の段階に分け、それぞれの段階における目標、要件、実施事項、必要な技術・知見、成果物としての主要な文書をまとめた「安全確保ロードマップ」を示した。このロードマップは、NUMO が地層処分事業を進めていく際の重要な指標を示すものである。今後、NUMO の活動を具体的に示すためには、このロードマップに基づき、それぞれの段階における技術開発などの計画を具体的に立案し、それに基づく活動の進捗、進展を具体的に示す必要がある。

2010 年レポートにおいて NUMO は、現時点において概要調査の段階で必要な技術が整備できたと考えていることを示した。そのため NUMO は、今後想定される概要調査段階での予備的安全評価に向けて、評価の手順などに関する情報の整備（予備的安全評価の手引書の整備）に着手した。このような手引書の整備においては、地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の技術開発などの進捗に基づき、安全確保ロードマップで示されている概要調査段階での安全確保の目標、要求事項、主要な実施事項などに具体的に応える情報を取りまとめることが重要となる。2010 年レポートでは、概要調査段階での安全確保の目標、要求事項に適合するための主要な実施事項として、レファレンス処分概念の構築とセーフティケースの構築を挙げている。この実施事項の達成を主張するためには、これが達成されたことを容易に判断できるような具体的な目標を設定する必要がある。本報告書では、今後実施することが想定されている上記の実施事項の達成に向けて、試行的に「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」ことを具体的な目標として設定し、それを達成するための検討を実施した。

この検討の実施においては、「高度化した包括的感度解析手法」を組み込んだ新たな安全評価手順 (Ohi et al., 2013) を採用し、評価の信頼性を向上させるため、安全裕度の定量的な提示など、安全性の主張を支援する論拠を整備した。本報告書は、安全評価報告書ではなく、TRU レベル 3 報告書公表以降の技術開発の進捗をまとめた報告書である。そのため、本報告書では、地下水シナリオに特化した閉鎖後の安全評価のみについて示すなど、処分の安全性の提示において求められるすべての内容を網羅してはいない。しかしながら、

本報告書では、概要調査段階での安全確保の目標、要求事項、主要な実施事項などに応えるための基盤となる情報を提供するとともに、さらなる詳細な検討を必要とする項目などを明らかにしている。本報告書は、今後予想される概要調査段階での地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の予備的安全評価などに資する重要な情報になるものと考えている。

1.2 本報告書の構成

本報告では、「高度化した包括的感度解析手法」を組み入れた新たな安全評価手順（Ohi et al., 2013）に基づいた検討を行う。この安全評価手順は、TRU レベル3 報告書において提示された安全評価手順を改良したものである。この手順に沿った報告書の構成は次のとおりである。

「第1章 本報告書の概要」では、本検討の背景、目標・検討方法、構成の説明などを行う。

「第2章 安全確保の示し方と安全評価の考え方」では、NUMO の「安全確保の考え方」に基づき、それを具体的に示す方法と本検討において採用する「安全評価の手順」について説明する。

「第3章 前提条件の整備」では、地質環境条件の整理を行い、その類型化を試みる。また、TRU レベル3 報告書で提示された課題を考慮し、廃棄体特性の整理や廃棄体のグループ分類の見直しを行うとともに、グループごとの廃棄体特性などに基づく基本的な処分概念の設定を行う。さらに、類型化した地質環境条件や基本的な処分概念を踏まえ、地質環境条件ごとの処分概念の基本型を複数（地質環境条件ごとのレファレンス処分概念群）設定し、それらに対する評価検討項目を設定する（検討ケースの設定）。また、処分システムの設計条件の整理を行い、地質環境条件または廃棄体特性が処分システムの概念構築に及ぼす影響やその対策を把握・検討した上で、地質環境条件ごとの短期および長期の熱的制限を考慮した処分場の設計を行う。さらに、パラメータの変動に対する処分システムの応答特性を把握するための包括的感度解析のケース設定も行う。

「第4章 解析条件の類型化と評価の十分性の検討」では、解析解を用いて、処分システムの応答特性を整理し、それに基づき解析条件を類型化する。また、この類型化に基づき既存の評価の十分性について検討する。

「第5章 包括的感度解析に基づく成立条件の抽出」では、既存の入力条件などを参照した包括的感度解析を実施し、ケースごとに成立条件を抽出する。

「第6章 処分システムの状態の理解」では、まず、処分システムの状態を過渡的な状態と長期的な状態とに分け、地質環境条件ごとに、安全評価において重要と考えられる現象などを特定する。その上で、「安全評価において重要と考えられる現象によって影響を受け、変化する処分システムの状態」に関する情報を整理する。

「第7章 安全評価上重要なシナリオと解析ケースの設定」では、4章で把握した処分システムの応答特性や解析条件の類型化情報と6章の「安全評価において重要と考えられ

る現象によって影響を受け、変化する処分システムの状態」に関する情報を統合・整理する。この情報の統合・整理に基づき、地下水シナリオに特化した安全評価上重要なシナリオを論拠とともに抽出する。また、抽出した安全評価上重要なシナリオを対象として、安全評価の対象となる解析ケースを設定する。

「第8章 モデルの開発と適用」では、前項での安全評価上重要なシナリオと解析ケースを踏まえながら、安全評価において適用するモデルおよび使用するデータ（解析条件）を解析ケースごとに整理する。

「第9章 決定論解析と安全裕度」では、決定論解析を実施し、処分システムの安全性を評価する。またこの安全評価と併せて、包括的感度解析の結果得られる成立条件を用いて個々の解析ケースの安全裕度を検討・提示する。

「第10章 安全確保可能な処分概念と残された課題」では、9章の検討の結果を整理し、個々の地質環境条件ごとに設定された処分概念の安全性を論拠とともに提示し、安全性を確保可能な NUMO のレファレンス処分概念を地質環境ごとに提示する。また、今後の課題を提示する。

「第11章 おわりに」において、本検討結果をまとめる。

第1章 参考文献

電事連・JNC (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取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005年9月.

原子力委員会政策評価部会 (2008) : 原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に関する取組の基本的考え方に関する評価について, 2008年9月2日.

法律 (2012) : 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24年6月27日.

NUMO (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 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03, 2011年1月.

NUMO (2011b) : 地層処分事業の安全確保 (2010年度版) ~確かな技術による安全な地層処分の実現のために~, NUMO-TR-11-01, 2011年9月.

Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, T. and Hane, K. (2013): A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margin of the geological disposal system, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol50. No1, pp 80-106.

2. 安全評価の方法論

2.1 安全確保の示し方と安全評価の考え方

2.1.1 安全確保の示し方

NUMO は、2010 年レポート（NUMO, 2011a）において、安全な地層処分を実現するため、「閉鎖後長期の安全確保」と、「事業期間中の安全確保」を目標として設定した。また、これらの確保を確実にするためのそれぞれ 3 つの安全確保策とこの目標を達成するための 3 つの方針（それぞれ 3 つの実施方策を含む）を示した。図 2.1.1-1 にこれらをまとめた安全確保構想の全体構成を示す。

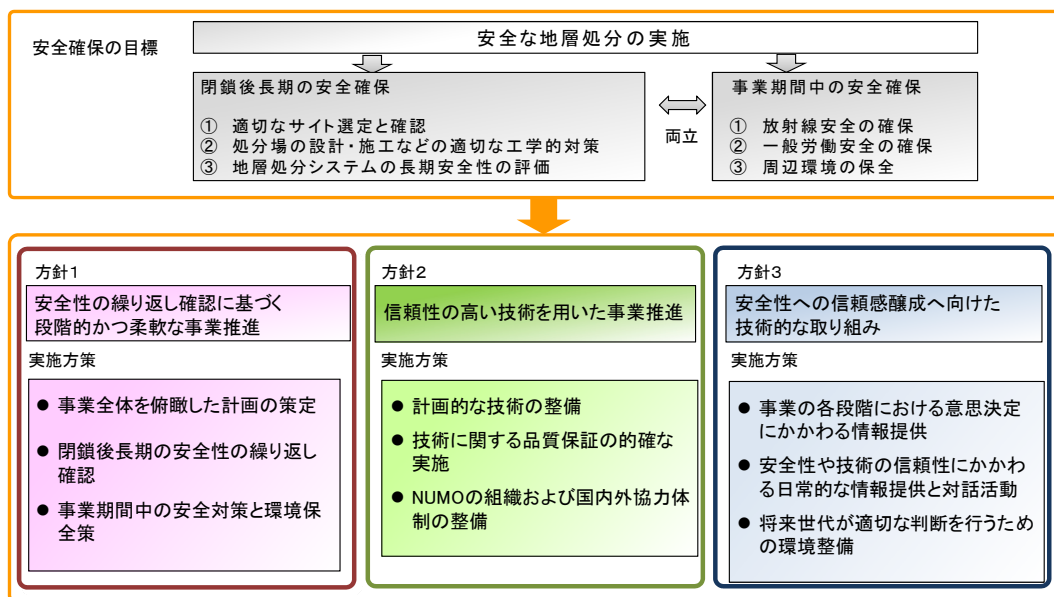


図 2.1.1-1 安全確保構想の全体構成
(NUMO, 2011a)

この安全確保の目標を達成するための方針 1 においては、事業全体を俯瞰した計画の策定を方策として挙げ、2010 年レポート（NUMO, 2011a）においては、この方策に基づき、安全確保ロードマップを作成した。この安全確保ロードマップでは、事業期間を「文献調査の段階」や「概要調査の段階」など、10 段階に分割し、それぞれの段階における目標、要件、主要な実施事項、必要な技術・知見、成果物としての主要な文書を明示している。この安全確保ロードマップは、各段階で設定した目標をクリアしていくことにより、最終的に安全な地層処分が実現できるように構成されている（NUMO, 2011a）。

このような安全確保の考え方に基づく地層処分事業の推進によって、処分の安全性が確保され、評価の信頼性が向上するものと考えられる。このような考え方に基づき地層処分事業を進めていくためには、それぞれの段階において、対象となる段階の実施事項が達成されたことを容易に判断できるような具体的な目標を設定することが有用である。

本報告書では、対象となる段階の実施事項を達成していることを容易に判断できるよう

な具体的な目標を設定し、それに到達するように評価検討を行い、結果をまとめることとする。なお、この際、本報告書では、「閉鎖後長期の安全確保」の3つの対策の中の「処分場の設計・施工などの適切な工学的対策」と「地層処分システムの長期安全性の評価」に着目し、「適切なサイト選定と確認」についての評価検討については、別の報告書に委ねることとする。これらの評価検討を通じて、現状において地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全が確保されることと NUMO の技術開発の進捗、進展を示すこととする。

現在の地層処分事業は、処分候補サイトが特定されない文献調査段階以前の段階にある。このような段階においては、サイト特性に依存しない一般的な条件を対象にした安全評価が行われる。以下に示す既存の安全評価報告書は、この段階の安全評価報告書である。

- ・ 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 - (以下「第2次取りまとめ」という) (JNC, 1999)
- ・ 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 - (第2次 TRU レポート) (電事連・JNC, 2005)
- ・ 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 (TRU レベル3 報告書) (NUMO, 2011b)

今後想定される概要調査段階 (処分候補サイトが特定される段階) では、前述の安全確保ロードマップに明示されている概要調査の段階での目標、要件を達成する必要がある。

表 2.1.1-1 に、概要調査の段階の安全確保ロードマップ (詳細版: 一部概要版の内容を加筆) を示す。

表 2.1.1-1 には、概要調査の段階の安全確保ロードマップ (詳細版) に示されている概要調査の段階での「安全確保に関わる目標」、「目標達成に関わる要件」と①～⑥の「主要な実施事項」を示している。また、「閉鎖後長期の安全確保」のための対策である「適切な工学対策」と「地層処分システムの長期安全性評価」の概要調査段階での実施概要 (安全確保ロードマップ概要版より転記) と実施内容および必要とされる技術・知見も合わせて示す。安全確保ロードマップでは、これらの項目を実施し、その結果を「概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書」にまとめることにしている。

表 2.1.1-1 安全確保ロードマップ（詳細版：概要調査の段階）

(1/2) (NUMO, 2011a, 一部加筆)

段階		精密調査地区選定段階（概要調査の段階）			
事業目標		精密調査地区選定			
安全確保にかかわる目標		・自然現象の著しい影響の回避/・長期安全性確保の見通し/・事業期間中の安全確保の見通し			
目標達成にかかわる要件		<ul style="list-style-type: none"> ・法定要件への適合性 ・精密調査地区選定の環境要件への適合性 ・安全審査基本指針への適合性 ・自主基準（考慮事項含む）への適合性 			
主要な実施事項		<ul style="list-style-type: none"> ①精密調査地区選定上の考慮事項への適合性の確認 ②レファレンス処分場概念（含むセーフティケース）の構築 ③処分施設建設地選定上の考慮事項の作成 	<ul style="list-style-type: none"> ④精密調査計画の作成 ⑤安全審査基本指針への適合性の確認 ⑥セーフティケースの構築 	<p>【本検討において対象とする主要な実施事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> ②, ⑥について検討 ①および③については、考慮事項が最終的に決定されていないことから本検討では対象外とした ④については、現状、概要調査段階にまだ入っていないことから本検討では対象外とした ⑤については、安全審査指針がまだ設定されていないため本検討では対象外とした 	
【本検討の目標】		【多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する】			
安全確保のための実施項目		概要調査段階の実施概要	実施内容	必要とされる技術・知見	【本検討における具体的な実施項目】
閉鎖後長期の安全確保	処分場の設計・施工などの適切な工学的対策	地下施設	<ul style="list-style-type: none"> ・候補母岩を対象に、地質環境特性に応じて、地下施設の坑道仕様を検討、基本レイアウトを設定し、レファレンス処分場概念としてとりまとめる。→② ・安全審査基本指針（あるいは自主基準）に適合するようレファレンス処分場概念の安全機能と長期状態変遷を評価する。→⑤ ・地下施設の閉鎖措置で求められる要件を検討する。→④⑥ ・次段階での処分施設設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④ 	<ul style="list-style-type: none"> ・レファレンス処分場概念を構築する技術（技術上の判断指標と根拠） ・工学的成立性を評価する判断指標とレベル（自主基準） ・不確実性を特定する知見 	<ul style="list-style-type: none"> (1)前提条件として、想定される地質環境条件を整理し、その類型化を試みる。 (2)TRUレベル3報告書において提示された課題などを踏まえ、多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を複数想定する。 (3)類型化した地質環境条件と設定した複数の処分概念とを組み合わせ、地質環境に応じたNUMOの複数の処分概念の基本型（レファレンス処分概念群）を設定する。②
	人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> ・候補母岩を対象に、地質環境特性に応じて、人工バリア仕様を設定し、レファレンス処分場概念として取りまとめる。→②⑥ ・人工バリアの長期変遷を検討することで安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性を確保する。→⑤⑥ ・次段階での人工バリア設計のために取得すべき重要なサイト情報を特定する。→④⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア仕様を設定する技術（安全機能と判断指標） ・工学的成立性を評価する技術（実現性と長期変遷評価） ・安全機能を考慮した長期変質モデルの検証と考古学的な情報の活用 ・効率的な人工バリアおよび廃棄体の搬送・ positioning 技術 ・不確実性を特定する手法と知見 	<ul style="list-style-type: none"> (4)レファレンス処分概念群に対して処分の安全性や実現性を評価するため、具体的な処分場設計を行う。② 	

表 2.1.1-1 安全確保ロードマップ（詳細版：概要調査の段階）
 (2/2) (NUMO, 2011a, 一部加筆)

安全確保の実施項目		概要調査段階の実施概要	実施内容	必要とされる技術・知見	【本検討における具体的な実施項目】
2-4 閉鎖後長期の安全確保	地層処分システムの長期安全性の評価	予備的な評価	<ul style="list-style-type: none"> レファレンス処分場概念に基づく予備的な安全評価を行い、安全審査基本指針（あるいは自主基準）への適合性を見通しを評価する。→②⑤⑥ 評価結果の信頼性を分析し、重要なサイト情報や入力パラメータの不確実性の低減に向けての方策を検討し、結果を精密調査に反映させる。→②④⑥ 得られた情報に基づき、セーフティケースを構築する。→⑥ 	<ul style="list-style-type: none"> 地表環境、地質環境、人工バリアに対するサイト固有の長期変遷を考慮した安全評価技術 母岩不均質性および処分場の設計を考慮した核種移行解析手法 安全評価にかかわる品質保証および不確実性の取扱い手法 セーフティケース構築のための情報整理手法 	<ul style="list-style-type: none"> (5)解析解を用いて、処分システムの応答特性を把握し、安全性への影響の観点から解析条件の類型化を試みるとともに評価の十分性について検討する。⑥ (6)重要な解析条件に関わる事象などに着目し、個別現象の影響によって変化する処分システムの状態に関する最新の情報を整理し、重要な事象、シナリオを把握する。これらの検討の実施においては、熱解析・ガス解析・地球化学解析などの個別現象によって影響を受ける処分システムの状態に関する検討・解析も必要に応じて実施する。⑥ (7)地下水シナリオに特化した評価を行うため、必要なモデル、データを整備する。 (8)決定論解析に基づき、レファレンス処分概念群の安全評価結果を示す。 (9)必要に応じて処分の安全裕度を提示し、処分の安全性の論拠を明示する。⑥ (10)得られた評価を整理し、地質環境条件ごとのレファレンス処分概念群の安全性をとりまとめる。
	安全確保にかかわる主要文書			<ul style="list-style-type: none"> 概要調査に関する法定報告書 概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書 	

本検討では、レファレンス処分場概念の構築とセーフティケースの構築に着目した。これらは、2010年レポートの安全確保ロードマップ（詳細版：概要調査の段階）において概要調査段階での安全確保の目標、要求事項に適合するための主要な実施事項として示されている6つの項目のうちの②と⑥に相当するものである。①、③、④、⑤については、以下の理由から、本検討では対象外とすることとした。

- ①および③：考慮事項が最終的に決定されていない
- ④：概要調査段階に入っていない
- ⑤：安全審査指針が設定されていない

この概要調査段階での主要な実施項目②、⑥を実施し、処分の安全が確保されることと現状における NUMO の技術開発の進捗、進展を示すためには、この②、⑥を達成したことを容易に判断できるように具体的に示す必要がある。

本報告書では、TRU レベル3 報告書（NUMO, 2011b）において示された主要な課題を考慮し、上記の主要な実施項目②、⑥を達成したことを具体的に示すための目標を設定することとした。

TRU レベル3 報告書（NUMO, 2011b）において示された主要な課題は、以下の通りである。

- ・廃棄体のグループ分類の見直し
- ・短期の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの概念設計
- ・上記の2点などを考慮した処分場の設計の見直し

これらの課題の解決を含め、当該廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めるため、本検討においては、以下に示す内容を概要調査段階での主要な実施項目（②レファレンス処分概念の構築と⑥セーフティケースの構築）を達成するための具体的な目標として設定した。

「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」

本検討では、この目標を達成するために、後述する安全評価の手順（2.2参照）を踏まえ、具体的に以下の項目を実施することとした。

- (1)前提条件として、想定される地質環境条件を整理し、その類型化を試みる。
- (2)TRUレベル3報告書において提示された課題などを踏まえ、多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を複数想定する。
- (3)類型化した地質環境条件と設定した複数の処分概念とを組み合わせ、地質環境に応じたNUMOの複数の処分概念の基本型（レファレンス処分概念群）を設定する。(②)
- (4)レファレンス処分概念群に対して処分の安全性や実現性を評価するため、具体的な処分場設計を行う。(②)
- (5)解析解を用いて、処分システムの応答特性を把握し、安全性への影響の観点から解析条件の類型化を試みるとともに評価の十分性について検討する。(⑥)
- (6) 処分システムの応答特性などに基づく情報と個別現象の影響によって変化する処分システムの状態に関する最新の情報を統合整理し、重要な事象、シナリオを把握する。これらの検討の実施においては、熱解析・ガス解析・地球化学解析などの個別現象によって影響を受ける処分システムの状態に関する検討・解析も必要に応じて実施する。(⑥)
- (7)地下水シナリオに特化した評価を行うため、必要なモデル、データを整備する。
- (8)決定論解析に基づき、レファレンス処分概念群の安全評価結果を示す。
- (9)必要に応じて処分の安全裕度を提示し、処分の安全性の論拠を明示する。(⑥)
- (10)得られた評価を整理し、地質環境条件ごとのレファレンス処分概念群の安全性をとりまとめる。

表 2.1.1-1には、この「本検討において対象とする主要な実施事項」と「本検討の目標」および「本検討の目標」を達成するための「本検討における具体的な実施項目」を合わせて示す。

本報告書の評価検討においては、既存の安全評価の考え方に準拠した安全基準を採用し、確実に起こることが想定されている地下水シナリオを対象とした検討を行うこととした。地下水シナリオ以外の地層処分の安全評価シナリオに対する検討については、その発生の取扱いや基準についての検討がなされた後に対応することとする。

2.1.2 安全評価の手順

地層処分の重要な要求事項は、地層処分システムの安全性とその評価の信頼性を確保することである。この要求に応えるため、2000年頃になって、単に安全評価の結果を提示して安全性を主張するだけでなく、その評価が信頼できるものであることを能動的に論理的に提示すること（セーフティケースの構築）の重要性が指摘されるようになった。このような「セーフティケース」は、例えば、「地層処分の安全性や安全性に関する信頼性のレベルを記述、定量化、具体化する論拠、証拠の統合」として定義されている(OECD/NEA, 2004)概念である。

これまでの地層処分の安全評価は、OECD/NEA(1991)によって示された安全評価手順を基本として進められてきた。この手順は「シナリオ構築」、「モデルの開発と適用(モデル、データの設定)」、「総合評価(決定論解析、不確実性解析、感度解析)」、「信頼性の構築(安全性の主張)」からなるものである。この安全評価の手順には、安全性の提示に関する検討・評価方法については示されているが、セーフティケースの構築を意識し、その信頼性のレベルを記述する検討・評価方法については陽的には含まれていない。そのため、今後、地層処分システムの安全性とその評価の信頼性を確保するためには、セーフティケースの構築を意識した安全評価手順を明確に示す必要がある。

上記の定義に基づくセーフティケースの構築に資する具体的な検討・評価方法として、以下の方法が考えられる。

- ・評価の十分性を論拠とともに提示する。
- ・安全性の程度を定量的に提示する。

以下、この評価の十分性と安全性の程度の提示に関する具体的な検討・評価方法について述べる。

評価の十分性の提示においては、安全評価において有意な影響を与えるシナリオや解析ケースを論拠とともに合理的に構築することが求められる。NUMOでは、長期安全性を脅かすような現象を抽出する際に、重大な抜け落ちがないように配慮しつつ、合理的に安全評価シナリオを構築することを目的としたシナリオ構築手法を提案している(NUMO, 2011a)。この手法は、従来のFEP分析に基づくシナリオ構築手法と処分システムの安全機能を基軸としたシステムの状態分析に基づくシナリオ構築手法とを組み合わせたハイブリッドな手法である。ここでFEPは、処分システムの特徴(Feature)や処分システム内で生起する事象(Event)、それによる影響の伝播の過程(Process)を意味する。従来のFEP分析に基づくシナリオ構築手法は、FEP辞書などを活用してボトムアップ的に現象などの相互関係やシステムの状態を分析し、それに基づいてシナリオを構築する手法を意味する。また、安全機能を基軸としたシステムの状態分析に基づくシナリオ構築手法は、ストーリーボードなどを活用することにより、システムの状態を安全機能の変遷の観点からトップダウン的に分析し、それに基づいてシナリオを構築する手法を意味する。

従来のFEP分析に基づくシナリオ構築手法は、FEPなどに着目して、PIDなどを用いてそれらの相互関係や影響を体系的に整理・把握し、処分システムの安全性に影響を及ぼす重要なシナリオを構築するという手法(OECD/NEA, 1992)である。ここで、PIDは、FEP間の相互影響(インフルエンス)と重要性をネットワークで示した図(Process Influence Diagram)を意味する。この手法に含まれるFEP辞書やPIDなどのツールは、現象の理解や評価の網羅性向上の観点から、さまざまな事象を体系的に抜けなく検討するという重要

な役割を担っている。この FEP 分析に基づくシナリオ構築手法に対しては、安全評価上重要な FEP や重要なシナリオの抽出に至るプロセスが複雑で、専門家の判断に頼るなど、必ずしも客観的な論拠を示せない場合があることなどが課題として指摘されている。そのため、作業プロセスの効率化、および作業内容や判断根拠の追跡性と透明性（客観性）の確保・向上が必要とされている（OECD/NEA, 2000 ; JNC, 2005）。

この FEP 分析に基づくシナリオ構築手法に対して、近年、処分システムの安全機能に着目し、処分システムの時間変遷を考慮して安全機能の発揮に係る状態の変遷を整理する考え方が注目されている（ONDRAF/NIRAS, 2001 ; Nagra, 2002 ; ANDRA, 2005 ; SKB, 2006）。このような安全機能を基軸として情報を整理するシナリオ構築の考え方は、FEP の分析からボトムアップ的に安全評価シナリオを構築する考え方に対して、トップダウン的なシナリオ構築手法と見なされている。これはこの考え方が、安全性への影響の観点から安全評価シナリオを構築することに着眼しているためである。この考え方を取り入れることにより、シナリオ構築において着目すべき現象が整理され、シナリオ構築の過程がより明確になること（追跡性の向上）が期待されている。

前述の NUMO が提案する手法は、このトップダウン的な手法の効果の取り入れを狙ったものであり、既存の FEP 分析などにストーリーボードと呼ばれる情報の整理表現手法を加えたハイブリッドな手法である。このストーリーボードを用いた情報整理では、安全機能とその時間的変遷を基軸として、それぞれの時間および空間スケールごとに安全評価上想定する処分システムの将来挙動が整理表現される（NUMO, 2011a）。抜けのない評価を行うためには、長期にわたる環境の変化やそれに伴う処分システムの状態の変遷を詳細に考慮する必要がある。そのため、上記のハイブリッドな手法などにより、シナリオ構築において着目すべき現象を整理することが重要となる。しかし、着目すべき現象を抽出・整理でき、情報の追跡性の向上が図れたとしても、それに関連する客観的な情報収集とそれらの整理を抜けなく行う必要があり、その作業は膨大になる可能性がある。

このような作業を合理的に行うため、解析解に基づく感度解析を活用し、前提条件に応じ、処分システムの応答特性を客観的に把握し、それに基づいて、安全性に重大な影響を与える因子やそれに関連する情報を把握・理解することが考えられる。これらの情報は、上記のハイブリッドな手法により抽出された着目すべき現象に、処分システムの安全性の観点からの重要度に関する情報を客観的に与えるものとなる。このことにより、「処分システムの状態の理解」が深まり、安全評価シナリオや解析ケースの意義の提示、重要なシナリオや解析ケースの絞りこみが可能になる。NUMO では、このような考え方にに基づき、ハイブリッドな手法の提案と並行して、解析解を用いた感度解析によって得られる処分システムの応答特性に基づき、重要な事象などを客観的に考慮することが可能な評価手順を提示した（NUMO, 2011b）。この手順の概念を図 2.1.2-1 に示す。

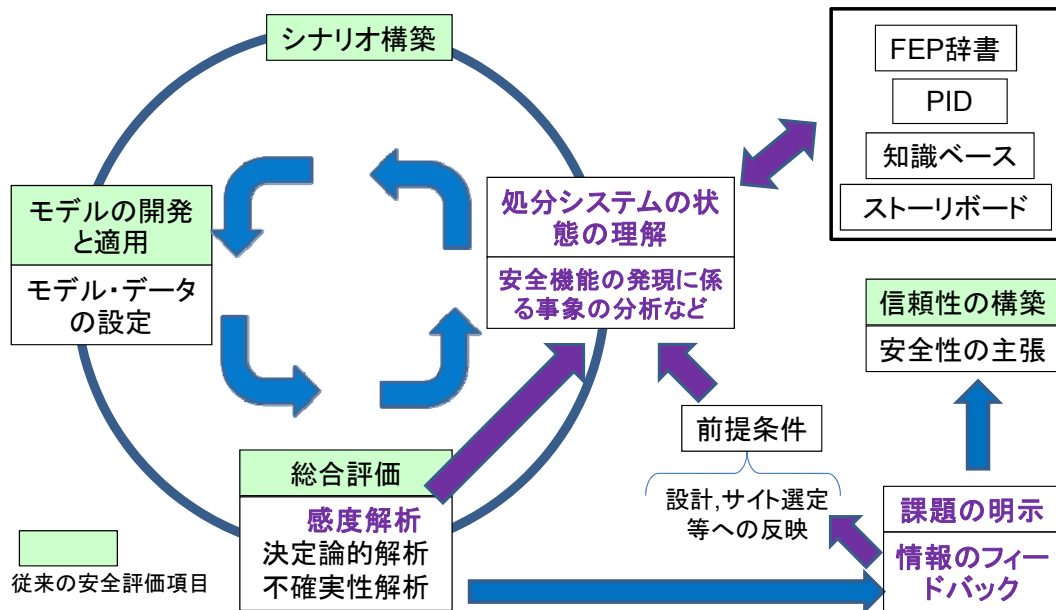


図 2.1.2-1 重要な事象などを考慮可能な評価手順
(NUMO, 2011b)

一方、安全性の程度の定量的な提示に関しては、処分が安全に成立する条件（成立条件）と解析条件とを比較し、その安全性の裕度（安全裕度）を定量的に示す方法が考えられる。

このような成立条件を抽出する手法として、これまで包括的感度解析手法が開発されている（Ohi et al., 2007）。この手法は、近年、より現実的な成立条件を体系的に効率的に抽出するために、解析解と数値解を組み合わせることによって高度化された（大井, 2012；Ohi et al., 2013）（添付1参照）。この高度化した手法は、解析解を用いているため、システムの応答特性の把握・理解を容易にするものである。また、安全評価シナリオや解析ケースの重要性を提示し、論拠を持って評価の十分性を提示することに資するものである。そこで、評価の十分性を提示するとともに安全性の程度（安全裕度）を定量的に提示し、評価の信頼性を向上させるために、この高度化した手法が既存の安全評価手順に組み込まれた（大井, 2012；Ohi et al., 2013）。この手順は、図 2.1.2-1 に示された評価手順の中に示されている「感度解析」を「高度化した包括的感度解析」に置き換えたものである（NUMO, 2012；大井, 2012）（図 2.1.2-2 参照）。この評価手順は、図 2.1.2-2 に示される以下の情報に基づき、処分の安全性と評価の信頼性を提示するものである。

- ① 処分システムの応答特性
- ② 応答特性に基づく解析条件の類型化
- ③ 類型化に基づく評価の十分性
- ④ 成立条件
- ⑤ 重要な解析条件
- ⑥ 安全裕度

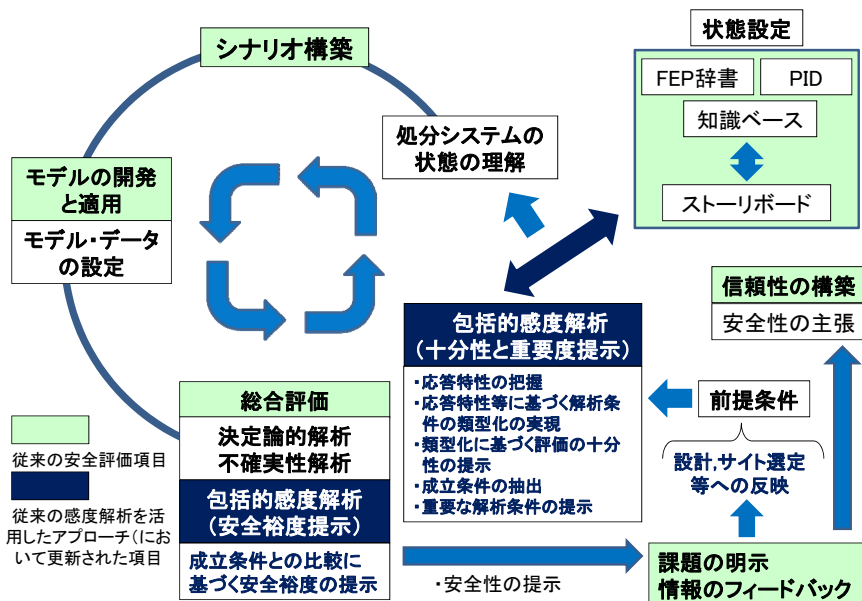


図 2.1.2-2 高度化した包括的感度解析を組み入れた安全評価手順
(NUMO, 2012 ; 大井, 2012)

この手順においては、まず、前提条件として、既存の評価・検討結果を踏まえ、処分サイトの地質環境条件や廃棄体の特性を整理し、それに基づく処分概念を提示する。さらに、これらの情報に基づいて、処分システムの応答特性などを分析するための感度解析の前提条件（対象核種，入力情報，解析ケース）を把握する。

次に高度化した包括的感度解析の実施により、上記の①～⑤の情報を整備し、ハイブリッドなシナリオ解析手法によって得られるシステムの状態に関する情報と統合する。このことにより、システムの状態に関する理解を深め、安全評価上重要なシナリオや解析ケースを同定する。

次に、同定された安全評価上重要なシナリオや解析ケースに対する解析を行うため、モデル開発や解析ケースごとのデータ設定を行う。

そして、整備されたモデルやデータを用いて、決定論解析を行い、解析ケースごとの安全性を定量的に提示する。さらに、高度化した包括的感度解析の結果から得られる上記の④成立条件と解析条件の比較から、安全性の程度を定量的に提示する。また、この情報から、処分システムの安全性の特性（安全性の向上／低下と処分環境条件の変化の関係）を把握し、処分システムの安全性をより高めるため、サイト選定や設計に反映させるフィードバック情報や課題を提示する。

最後に、これらの情報をまとめ、処分システムの安全性を主張する。

本報告書では、この安全評価の手順に沿って、地下水シナリオを対象として処分システムの安全性に関する検討を行うとともに、その結果を整理し、合理的な処分事業の推進を図るための情報を整理することとする。

第2章 参考文献

ANDRA (2005) : Dossier 2005 Argile.

電事連・JNC（電気事業連絡会・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取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005 年 9 月.

JNC（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.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－, 一分冊 3 安全評価手法の開発－, JNC TN 1400 2005-016

Nagra (2002) : Project Opalinus Clay : Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen Switzerland.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011a）：地層処分事業の安全確保(2010 年度版), NUMO-TR-11-01.

NUMO（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, NUMO-TR-10-03.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2012）：技術年報 2011 年度, NUMO-TR-12-02, p31.

OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, Disposal of Radioactive Waste, A Report of the Performance Assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (1992) : Systematic Approach to Scenario Development, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories OECD

OECD/NEA (2000) : Regulatory Review of Assessment of Deep Geological Repositories : Lessons Learnt, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA (2004) : Post-closure Safety Case for Geological Repositories – Nature and Purpose - , OECD/Nuclear Energy Agency.

Ohi, T., Takase, T., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T., Mihara, T., Ebashi, T. and Nakajima, K. (2007) : Application of a Comprehensive Sensitivity Analysis Method on the Safety Assessment of TRU Waste Disposal in JAPAN, Materials Research Society Symposium Proceedings on Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX, Volume 985, pp 129-134.

Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, H. and Hane, K. (2013) : A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margins of the geological disposal system, Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 50, No. 1, pp80–106.

大井 貴夫 (2012) : 包括的感度解析の高度化による地層処分の安全評価の信頼性向上に関する研究, 博士論文, 九州大学, <http://hdl.handle.net:80/2324/25587>.

ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview if SAFIR-2 : Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. ONDRAF/NIRAS Report NIROND 2001-051 E, Belgium.

SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and aluation, Main Report of the SR-Can project, SKB TR-06-09.

3. 前提条件の整備

3.1 地質環境条件の設定

3.1.1 多様な地質環境の分類の考え方

地層処分低レベル放射性廃棄物の処分場が建設可能な地域は様々存在する。図 3.1.1-1 にそのような建設に適した地質環境を示す。これらの環境は高レベル放射性廃棄物の処分場と同様であり、地理（内陸、沿岸など）、地形（山地、丘陵、平野など）、および地質学的（結晶質岩、堆積岩）にさまざまな可能性がある（NUMO, 2009）。

本検討の目標は、2.1 節で示したように、「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」である。このような検討を行うにあたっては、多様なサイト環境の個々の条件を個別に考慮するのではなく、第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）あるいは TRU レベル3 報告書（NUMO, 2011a）で実施されているように、多様なサイト環境条件を類型化・簡略化して取り扱うことが合理的である。そこで、本検討でも、多様なサイト環境条件を類型化・簡略化して取り扱うこととし、わが国におけるサイト環境として代表性を有すると考えられる条件を整理することとする。

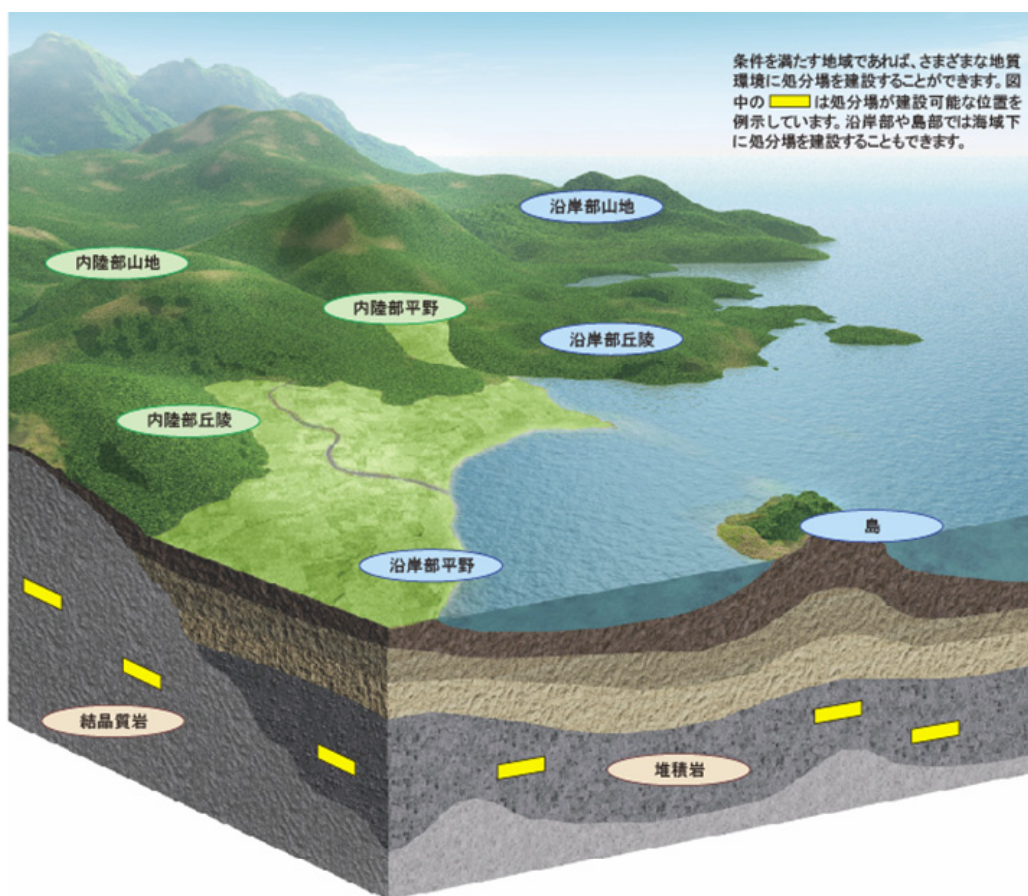


図 3.1.1-1 処分場の建設に適したさまざまな地質環境
(NUMO, 2009)

3.1.2 地質環境条件が処分場に及ぼす影響

サイト環境条件として、

- ・ 地理
- ・ 地形
- ・ 地質
- ・ 地質構造
- ・ 水理
- ・ 岩盤力学
- ・ 地下水化学

を考える。表 3.1.2-1 に、これらの条件が処分場の成立性あるいは安全性に及ぼす影響を概略的に整理し、それに基づいて設定した類型化の考えを示す。以下、個々の条件について説明する。

表 3.1.2-1 サイト環境条件による影響と類型化

サイト環境条件	処分場に及ぼす主な影響	類型化の考え方
地理（内陸，沿岸，島嶼など）	社会条件（インフラ，アクセスなど），核種放出域，核種移行距離・時間，地下水性状およびその変遷	天然バリアの水理，地下水化学あるいは生物圏の条件として表わされ，地理のみで類型化できるものではないため，本検討では直接の類型化は行わない。
地形（山地，丘陵，平野）	社会条件（インフラ，アクセスなど），核種放出域，核種移行距離・時間，水理（動水勾配）	
地質（結晶質岩，堆積岩，岩塩など）	移行モデル（亀裂媒体／多孔質媒体），母岩の強度／収着／拡散など	結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤に類型化
地質構造	移行媒体の多様性，隆起／侵食，断層活動，火成活動	天然バリアの移行モデル，適用するシナリオの区別において重要となるが，本検討においては，既存の天然バリアモデルと地下水シナリオを対象とすることから類型化は行わない。
水理	核種移行距離・時間	低透水場と高透水場に類型化
岩盤力学	処分場設計	地質特性の類型化で考慮
地下水化学	人工バリア材の化学的変質挙動，核種移行における化学パラメータ（溶解度，収着分配係数，実効拡散係数など）	降水系高 pH 型地下水（FRHP）と海水系高 pH 型地下水（SRHP）に類型化

(1) 地理

地理に関するサイト環境条件としては、内陸、沿岸、島嶼などの立地条件が考えられる。

これらの違いにより、廃棄体の輸送やインフラストラクチャの整備などの社会条件が異なり、処分事業の成立性・経済性が影響を受ける。また、これらの違いにより、核種放出域がどこになるのか、核種移行距離・時間がどの程度期待できるのか、地下水性状は降水系なのか海水系なのかなど、安全性に影響を及ぼす因子である天然バリアの水理、地下水化学あるいは生物圏の条件が変化する。地理はこれらの因子の組み合わせによって表わさ

れるものであり、地理の類型化は検討を合理的に行う上での直接的な対象ではない。そのため、地理の項目での類型化は行わない。

(2) 地形

地形に関するサイト環境条件としては、山地、丘陵、平野などの条件が考えられる。

これらの違いにより、廃棄体の輸送やインフラストラクチャの整備などの社会条件が異なり、処分事業の成立性・経済性が影響を受ける。また、これらの違いにより、地理の場合と同様に、安全性に影響を及ぼす因子である天然バリアの水理、地下水化学あるいは生物圏の条件が変化する。地形はこれらの因子の組み合わせによって表わされるものであり、地形の類型化は検討を合理的に行う上での直接的な対象ではない。そのため、地形の項目での類型化は行わない。

(3) 地質

母岩の地質に関するサイト環境条件としては、花崗岩などの結晶質岩、泥岩などの堆積岩などの多様な岩種が考えられる。諸外国では、これら以外に岩塩などの蒸発残留岩 (evaporite) を対象とする事例 (独 Gorleben サイト) もあるが、わが国では分布の観点から代表性がないと考えられる。

母岩領域での核種移行モデルを決定する上で、地質の特性を考慮することが重要である。これは、地質の特性の違いによって、核種の移行経路の特性が異なるからである。たとえば、結晶質岩では、核種の主要な移行経路は亀裂であり、亀裂性媒体として近似したモデルが適用される。堆積岩では、核種の主要な移行経路は亀裂であるとする考え方もある一方で、諸外国の事例では多孔質媒体として近似したモデルによる解析が行われている。堆積岩については、地質特性に応じて亀裂媒体近似／多孔質媒体近似を選択する余地が残されている。さらに、地質の違いによって、岩盤強度、空隙構造、収着性などの特性が異なる。このように、地質の特性の違いは、処分場設計、安全性の両面で影響を及ぼす重要な要因の1つとなりうる。そこで、本検討では、既存の評価に倣い、地質条件を結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤に類型化して表すこととする。

(4) 地質構造

「地質構造」としては、地質に関する母岩の種類以外の情報 (地質層序、形成履歴、長期安定性、隆起沈降傾向、断層との位置関係、マグマ溜まりとの位置関係など) を含めた。

天然バリアでの移行モデルを構築する上で地質層序および断層との位置関係は重要である。通常、複数の地質構造が存在しうる中で最も安全性能の高い母岩が、処分場設置場所の候補となる。そのため、天然バリアにおける主要な移行経路はこのような安全性能が高い母岩となる。しかしながら、それ以外の地質構造・断層も移行経路となりうる。その場合、それらは天然バリアにおける付帯的な移行経路としてモデル化される必要がある。こ

のような断層については、既存の評価において、断層としてモデル化されている。

また、地質構造の長期的な安定性は、いわゆる変動シナリオ（隆起・侵食、断層活動、火成活動など）に基づく安全評価を行う上で、最も重要な因子となる。サイト環境条件としての地質構造に関わるこれらの因子は、天然バリアの移行モデル、適用するシナリオの区別において重要となる。

これらの因子に着目した地質構造の類型化は、変動シナリオの評価を網羅的にかつ効果的に行うために重要である。しかし、本検討では既存の天然バリアモデル（断層を含む）に準じた評価を行うとともに、地下水シナリオに特化した評価を行い、変動シナリオを対象とした評価は行わない。そのため、これらの因子の類型化は検討対象から除いた。

(5) 水理

天然バリアの水理は、核種移行距離・時間を見積もる上で重要である。第2次 TRU レポートや TRU レベル3 報告書などこれまでの研究事例では、通常の地下水シナリオにおいては I-129 が線量を支配する核種（支配核種）となることが示唆されている。I-129 は非収着性で可溶性の核種であるため、通常の評価においては、これらに関連するパラメータには保守値（ $K_d=0$ 、溶解度制限無）が設定されている。そのため、このような状況では天然バリアの水理が安全性に対して最も影響度の高いパラメータとなる。本検討では、既存の評価に倣い、水理環境を低透水場と高透水場に類型化して表すこととする。

(6) 岩盤力学

処分場の建設される母岩の岩盤力学特性は、岩盤の掘削、処分場の設計など、処分場の工学的成立性を吟味する上で重要である。この特性は前述の地質を密接に関連するものである。本検討では、「地質」において、この特性の類型化を考慮することとし、岩盤力学としての類型化は行わない。

(7) 地下水化学

JNC (1999a) では、

- ・実測地下水との比較（図 3.1.2-1 参照）
- ・一般的な深部地下水の特徴との照合

などの検討を行い、わが国における深部地下水性状としては、降水系高 pH 型と海水系高 pH 型とがモデル地下水として代表性が高いことが考えられるとしている。

これら深部地下水の性状は、バリア材の変質挙動（廃棄体固化マトリクスの溶解、セメント/ベントナイトの変質など）評価において重要である。また、核種移行パラメータ（溶解度、収着分配係数、実効拡散係数など）に対しても直接的な影響因子となる。そこで、本検討では、既存の評価に倣い、地下水化学条件を降水系高 pH 型と海水系高 pH 型に類型化して表すこととする。

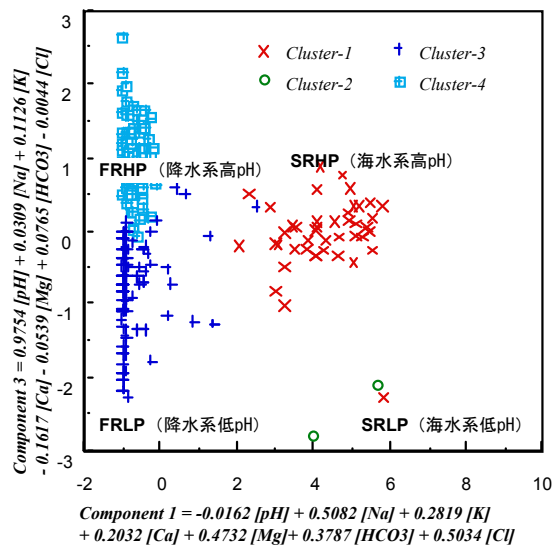


図 3.1.2-1 実測地下水およびモデル地下水の多変量解析
(JNC, 1999b)

3.1.3 地質環境条件の類型化

本検討では、以下のように、地質、水理、地下水化学に着目して類型化することとする。

- ・ 地質：結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤
- ・ 水理：低透水場と高透水場
- ・ 地下水化学：降水系高 pH 型 (FRHP) 地下水と海水系高 pH 型 (SRHP) 地下水

地質については、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤とに類型化する。岩盤の圧縮強度、有効間隙率、実効拡散係数、収着分配係数などの情報もこれらの岩種に応じて設定される。核種移行解析における移行媒体のモデル化について、結晶質岩系岩盤では亀裂媒体近似が基本形となる。堆積岩系岩盤で亀裂媒体近似とするか多孔質媒体近似とするかは、安全評価 (核種移行評価) の項で詳述される。

水理については、相対的に地下水流れの緩慢な低透水場と相対的に地下水流れの速い高透水場とを想定した。前述の通り、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性は、天然バリアでの水理に強く依存すると予想されることから、高透水場では安全性能を高めるための方策 (バリア性能の強化など) が求められる可能性がある。第 2 次 TRU レポートや TRU レベル 3 報告書などの既往の研究を参考に、低透水場では透水量係数 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、高透水場では透水量係数 $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と設定する。

地下水化学については、前項に記述したとおり、降水系高 pH 型 (FRHP) 地下水と海水系高 pH 型 (SRHP) 地下水とに類型化する。地下水性状の相違は、核種移行パラメータ (溶解度、収着分配係数、実効拡散係数など) の設定に影響する。また、地下水性状の相違がバリアシステムの健全性に顕著な影響を及ぼす場合は、バリア設計の見直し、変更といった対応を検討する必要がある。

3.2 廃棄体特性の整理

3.2.1 地層処分低レベル放射性廃棄物のグループ分類の見直し

TRU レベル3 報告書 (NUMO, 2011a) において、地層処分低レベル放射性廃棄物の処分事業の安全性をより一層確実に合理的に行うために、廃棄体グループ分類の見直しが重要課題として抽出された。

本検討では、日本原燃株式会社 (以下「原燃」という) および日本原子力研究開発機構 (以下「JAEA」という)、さらには、海外からの返還廃棄物を対象とし、既存の廃棄体グループ分類の考え方をまとめる。さらに、グループ分類に影響を与える廃棄体の特性などに関する最新の情報を整理し、それらに基づいてグループ分類の見直しを行う。

(1) 既存の廃棄体グループの考え方

地層処分低レベル放射性廃棄物はその種類や内容が多種多様であり、含有する核種濃度や固型化方法などが多岐に亘っている。これらの廃棄物を分類・区分せずに扱うことは、処分システムの安全性を確保・向上させるという点において合理的ではない。

TRU レベル3 報告書では、地層処分低レベル放射性廃棄物を4つのグループに分類し、最終処分廃棄物計画に沿った対象廃棄物の見直し結果などに基づいて廃棄物量などの廃棄体特性に関する情報を整備した。これらの情報のうち、第2次 TRU レポート (電事連・JNC, 2005) での条件から変更された点は、以下の2つである。

- ・ 仏国返還廃棄物の特性
- ・ 対象廃棄物の見直しによる高発熱性廃棄物の追加

仏国返還廃棄物は、再処理委託契約の変更取り決めに基ついて新たに返還されることとなった廃棄物である。この変更取り決めにより、第2次 TRU レポートで想定されていたセメント固化体およびビチューメン固化体に代わり、廃棄体形状が同一であるハルなどの固型物収納体 (CSD-C) と低レベル廃液ガラス固化体 (CSD-B) が返還されることとなった。この低レベル廃液ガラス固化体 (CSD-B) はホウケイ酸ガラスである。ホウケイ酸ガラスは、その特性から、高 pH 環境において溶解が促進されることが指摘されている。そのため、セメント系材料由来の高 pH 浸出液により、溶出特性が影響を受ける可能性がある。そこで、これらの2つの仏国返還廃棄物については、廃棄体形状が同一であることによる作業上の利便性と高 pH の影響を低減させるための化学的緩衝効果を期待し、ベントナイトを敷設した概念である廃棄体グループ2に含めることが適切であると考えた。

新規廃棄物の追加などに起因する対象廃棄物の見直しにおいては、原燃再処理操業の不燃物 I (溶融炉) を高発熱性廃棄物として追加した。これらは従来の発熱性廃棄体であるハル・エンドピースと異なり、性能評価上重要と考えられる C-14 を多量に含有するもので

はない。そこで、TRU レベル 3 報告書では、今後、廃棄体に関する情報の蓄積や処分サイトの環境条件などを考慮し、最適化を念頭においた検討を行うとして、暫定的に廃棄体グループ 4 に含めた。

(2) グループ分類に影響を与える廃棄体の特性など

グループ分類の見直しにおいては、処分場の設計、操業、閉鎖後の安全性など、様々な処分の側面に影響を及ぼす廃棄体の特性などを把握する必要がある。

本検討では、廃棄体の特性などとして、対象廃棄物の発生量、線量を支配する核種の放射エネルギー、発熱量、有害物質の有無、高度化対策、埋設事業区分、脱硝技術を抽出し、これらに関する最新の情報を整理した。

(i) 対象廃棄物の発生量

廃棄体の発生量は、処分場の設計や安全評価に影響を与える重要な特性である。この発生量は、最終処分法の改正に伴う対象廃棄物の見直しと第 2 次 TRU レポート時からの再処理施設などの計画の見直しによって、第 2 次 TRU レポートに比べて約 2/3 になった (NUMO, 2011a) (表 3.2.1-1 参照)。従来の廃棄体グループごとに比較すると、廃棄体グループ 1 を除き発生量は減少した。

表 3.2.1-1 発生量の比較

グループ	廃棄体発生量(m ³)	
	最終処分計画	第 2 次 TRU レポート
1	319	318
2	5,792	6,732
3	5,228	6,175
4	6,745	13,416
合計	18,084	26,641

(出典：TRU レベル 3 報告書)

(ii) 線量を支配する核種の放射エネルギー

既存の評価では、地層処分低レベル放射性廃棄物の線量を支配する主要な核種は、廃銀吸着材 (廃棄体グループ 1) の I-129 とハル・エンドピース (廃棄体グループ 2) の C-14 であった。これらの核種は、半減期が長く、かつ天然バリアでの収着による遅延効果をあまり見込むことができない核種であり、その放射エネルギーは、安全性に影響を与える重要な特性である。物量などの見直しにより新たに整備された TRU レベル 3 報告書での廃銀吸着材の I-129、ハル・エンドピースの C-14 の放射エネルギーは、第 2 次 TRU レポートの場合と比べてほとんど変わらず、有意な減少はみられなかった。そのため、多様な地質環境に対して、処分の頑健性をより一層高めるため、これらの廃棄体に対する人工バリアによる防護の高度化が必要になるものと考えられる。

(iii) 発熱量

処分場の温度は、核種移行挙動やバリア材料の機能の発揮に大きな影響を与える。処分場の設計は、このような温度による影響を可能な限り低減するようになされる。そのため、このような温度を規定する廃棄体の発熱量は、処分場設計を行うために考慮すべき重要な特性となる。廃棄体を発熱性の観点で整理・類型化することは、熱影響を低減するための対策を効率的に実施するために重要である。熱影響を低減するための具体的な対策としては、断面あたりの定置密度の低減（小断面の坑道設計）、閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの採用（閉鎖直後の周辺温度が高い環境下での核種放出を防止）、非発熱性廃棄体との混合定置（熱的緩和）などが考えられる。これらの対策を効率的に実施するため、発熱量の観点から、影響の大きい発熱性廃棄体を同定区別することが重要である。

基準年（廃棄物の発生時点）または、25年後（25年は、処分場に定置・閉鎖されるまでの評価上の想定経過年）の発熱量が 1W/本を越える廃棄体の発熱量データを表 3.2.1-2 に示す（NUMO, 2011a）。

表 3.2.1-2 廃棄体の発熱量（基準年, 25年後）

区分	廃棄体種類	発熱量(W/本)	
		基準年	25年後
原燃再処理操業	焼却灰+ハル缶水	16	2
	ハル・エンドピース*	61	4
	ハル缶水	15	1
	不燃物Ⅰ(GBパネル)	1***	1
	不燃物Ⅰ(機器廃品等)*	13	4
	不燃物Ⅰ(特殊機器廃品等)	1***	<1
原燃MOX操業	不燃物Ⅰ(溶融炉)*	210	60
	不燃物Ⅰ(溶融)	1***	1
	焼却灰(グローブボックス内)	1***	1
原燃再処理解体	焼却灰(二次廃棄物)	1***	1
	系統除染廃液(施設廃止)	1	3
	部分除染廃液Ⅰ(施設廃止)	1	3
原燃MOX解体	不燃物Ⅰ(溶融以外)	1***	1
	焼却灰	1***	1
JAEA再処理操業	可燃物	2	1
	難燃物	3	3
	ハル・エンドピース	23	2
	ハル缶水	7	3
	不燃物Ⅰ(金属Ⅰ)	5	2
	不燃物Ⅱ(金属Ⅱ)	15	1
JAEA再処理解体	不燃物Ⅳ(非金属Ⅱ)*	51	19
	可燃物Ⅰ(二次廃棄物)	3	2
	可燃物Ⅱ(廃棄体化处理)	2	1
	難燃物Ⅰ(二次廃棄物)*	7	8
	難燃物Ⅱ(廃棄体化处理)	3	3
	不燃物Ⅲ(金属(二次廃棄物))	1***	1
	不燃物Ⅴ(金属Ⅰ(廃棄体化处理))	5	2
不燃物Ⅶ(非金属Ⅱ(廃棄体化处理))*	51	19	
JAEA MOX操業	不燃物Ⅰ(金属)	1***	1
JAEA MOX解体	可燃物Ⅰ(一次廃棄物)*	5	6
	可燃物Ⅱ(二次廃棄物)*	7	8
	難燃物Ⅰ(一次廃棄物)*	7	8
	難燃物Ⅱ(二次廃棄物)*	7	8
	不燃物Ⅲ(金属(二次廃棄物))	1***	1
	不燃物Ⅴ(金属(廃棄体化处理))	1***	1
仏国返還廃棄物	固型物収納体(ハル等)*	90**	19
	低レベル廃液ガラス固化体*	90**	10

* 25年後の発熱量が4W/本を越える廃棄体を発熱性廃棄体と定義

** 海外返還固化体の保証値

***インベントリ(Bq)に基づき、NUMOで算出

25年後の発熱量はNUMOで算出

本検討では、基準年から25年経過後での発熱量を目安として選定し、原燃ハル・エンドピースの発熱量(4W/本)を超える廃棄体を発熱性廃棄体として定義する。表3.2.1-2において、発熱性廃棄体を(*)を付けて示す。

(iv) 有害物質の有無

有機物や硝酸塩などの含有量は、核種の溶解度や分配係数に影響を及ぼすことから、評価上重要な特性として扱われている。このような物質を含有する廃棄体を区分することにより、核種移行に対する影響を限定することができる。ただし、処分場のレイアウトの設計では、周辺の人工バリアや地質環境に及ぼす影響をできるだけ排除するような対策(地下水流向に対して下流側もしくは水平方向に離して配置)が必要となる。

有害物質を含む廃棄体とその重量を表3.2.1-3(NUMO,2011a)に示す。硝酸塩は、第2次TRUレポートに比べて重量比で約4%増加した。有機物のうちJAEAハル・エンドピースのセルロースについては、最終処分計画に沿った廃棄体の発生量の見直しに伴い約15%増加した。

表 3.2.1-3 有害物質の有無

区分	廃棄体種類	内容物量(kg/体)		
		硝酸塩	リン酸塩	有機物
原燃再処理操業	低レベル濃縮廃液Ⅰ(分析廃液)	185		
	部分除染廃液Ⅰ(機器更新)	185		
原燃再処理解体	系統除染廃液(施設廃止)	185		
	部分除染廃液Ⅰ(施設廃止)	185		
JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅰ(アスファルト固化体(MA系))	103		0.162 *
	溶媒洗浄廃液Ⅱ(スラリー固化体)	175		
	溶媒洗浄廃液Ⅲ(リン酸廃液固化体)		50	
	ハル・エンドピース			0.5 **
JAEA再処理解体	二次除染廃液スラリー固化体	175		

*TBP等、**セルロース

(TRU レベル3 報告書に一部追記)

(v) 高度化対策

半減期が長いために天然バリアでの収着による遅延効果をあまり見込むことができない核種を含む廃棄体に対しては、人工バリアによる核種移行抑制効果をより一層高める必要がある。既存の検討(NUMO,2011a)においては、性能評価上重要な核種を含む廃棄体に対しては、構造躯体の周りに緩衝材を敷設する処分概念が用いられている。また、性能評価上重要な核種を含まない廃棄体に対しては、緩衝材を敷設せず処分坑道内をセメントで埋め戻す処分概念が用いられている。

TRU レベル3 報告書では、幅広い地質環境に対応して、処分システムの頑健性を確保するため、上記の概念に加えて、さらに、効果的かつ実現性の高い対応策の組み合わせが検

討された（表 3.2.1-4 参照）。この検討例では、幅広い水理環境に対して、代替固化技術による核種溶出抑制、容器の閉じ込め性の向上、緩衝材設置による核種の移行抑制などの高度化対策の例が示された。TRU レベル 3 報告書では、このような対策を取り入れることにより、処分システムの安全性が確保されることが確認されている。

表 3.2.1-4 幅広い地質環境に対する高度化対策の例

対象となる廃棄物グループと核種	対応策	安全性向上の意図
グループ 1 : I-129	代替固化技術による核種の溶出抑制	I-129 の溶出率の抑制
グループ 2 : C-14	容器の閉じ込め性の向上	C-14 の減衰
グループ 3 : I-129	緩衝材の敷設による核種の移行抑制	I-129 の移行抑制
グループ 4 : C-14, Se-79	緩衝材の敷設による核種の移行抑制	C-14, Se-79 の移行抑制
全グループ	短期の核種の放出の抑制	操業安全の確保 処分の信頼性の向上

（出典：TRU レベル 3 報告書）

高度化対策の一つとして検討されている廃銀吸着材に含有されるヨウ素の代替固化技術については、TRU レベル 3 報告書以降も、原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センターという）などによって、岩石固化技術、BPI ガラス固化技術、およびセメント固化技術に関する研究開発が行われている（原環センター，2013）。これらの技術は、閉鎖後長期の安全性を向上させる重要な技術である。

岩石固化技術は、HIP（熱間等方圧加圧：Hot Isostatic Pressing）処理によって、ヨウ素をマトリクス中にヨウ化銀（AgI）の形態で物理的に閉じ込める技術である。ヨウ素の放出には、マトリクスの主成分である α -アルミナの溶解、AgI の溶解、マトリクス空隙中の拡散が関与すると想定されている。浸漬試験の結果から、マトリクスの溶解は pH の影響、AgI の溶解は HS⁻の影響をそれぞれ受けて溶解速度が変化することが確認されている。また、マトリクス溶解や AgI 溶解に伴い固化体の間隙率が増加することも確認されている。こうした知見に基づき、ヨウ素はマトリクスに閉じ込められていると仮定し、マトリクスの溶解速度式に固化体の組成比や間隙率などに対応する浸出係数 R を係数として乗じ、AgI の溶解速度の HS⁻濃度に対する線形依存性を加味したモデル（3.2.1-(1)式）が提案されている。R' は固化体の組成（Al に対する I の存在比など）、マトリクス溶解などに伴う空隙構造の変化、AgI 溶解の HS⁻濃度への依存性を含めた係数であり、環境条件によって変化するものである。dC_{Al}/dt はマトリクスの溶解速度であり、マトリクスの溶解試験の結果から pH および温度の関数として数式化された（3.2.1-(2)式）。

今後、長期浸漬試験に基づき R を導出するとともに、シミュレーションによる検討を進め、理論的な裏付けを整備していくことが求められている。

$$\frac{dC_I}{dt} = R' \left(\frac{dC_{Al}}{dt} \right) \quad 3.2.1-(1)式$$

ここで、 dC_I/dt : ヨウ素の放出速度
 dC_{Al}/dt : マトリクスの溶解速度
 R' : 浸出係数

$$\frac{dC_{Al}}{dt} = k_0 \cdot A \cdot \left(1 - \frac{C_{Al}}{C_{max}} \right) \quad 3.2.1-(2)式$$

$$k_0 = 1.09 \times 10^{-7} \cdot [H^+]^{0.309} \cdot \exp(-27200/(RT))$$

ここで、 k_0 : α -アルミナの溶解速度定数
 A : 表面積 (単位面積あたりの溶解速度を算出するため 1 を代入する)
 C_{max} : その条件での溶解度制限固相の溶解度に達したときの Al 濃度

BPI ガラス固化技術は、無機イオン交換体 $\text{BiPbO}_2\text{NO}_3$ (BPN) にヨウ素を吸着させて BiPbO_2I (BPI) に転換し、低温でガラス熔融固化する技術である。多様な環境条件下で浸漬試験が実施され、ガラスマトリクスの溶解とヨウ素放出が調和的な場合と非調和的な場合に分けられることが確認されている。こうした知見に基づき、ヨウ素放出のモデルとして、HLW ガラス固化体と同様の保守的なモデルだけでなく、ガラス溶解・変質を現象論的に扱うモデルまで幅広い検討が実施されている。経験的な相関式を長期に外挿した結果の信頼性を向上させるため、現在モンテカルロ法による BPI ガラスの溶解・変質シミュレーションが実施されている (原環センター, 2013)。今後、変質の形成過程と関連付けた評価が求められている。

セメント固化技術は、前処理プロセスでヨウ素酸イオン (IO_3^-) に転換し、エトリンガイト (AFt) やモノサルフェート (AFm) の SO_4^{2-} の位置に IO_3^- が置換固溶する性質を利用してヨウ素を固定化する技術である。ヨウ素の放出は、固化体中の AFt や AFm に IO_3^- の形態で置換固溶しているヨウ素が、これらの鉱物の溶解に伴って溶出することを想定してモデル化されている。バッチ式の液交換試験によりモデルの検証が行われ、AFt と IO_3^- の再析出が起こらないこと、 IO_3^- を保持した hidroゲネット (I-HG) が溶解することをモデルに取り入れることで、液相中のヨウ素放出割合や鉱物相の変遷を再現できることが確認されている。また、処分環境を想定して地下水条件を模擬した系での溶解試験データも取得されており、セメント固化体の適用性の確認が行われつつある (原環センター, 2013)。

いずれの固定化方法もヨウ素の完全な閉じ込め対策ではなく、10 万年を目標とした長期にわたる低い割合での一定溶出による影響緩和を目的としたものであり、それぞれの固定化技術に応じた優位性がある。今後、長期評価モデルの確立や信頼性確保に向けた検討とともに、処分環境への適合性についての検討が進められるものと考えられる。こうした状況を鑑み、廃銀吸着材の代替固化技術を適用したときを廃棄体グループの分類の 1 つとし

て考慮することとした。

また、幅広い地質環境に対する対策としては、余裕深度処分と同じく低拡散層を設置することも高度化対策として想定可能である。この場合は、化学的物理的変質などから低拡散場の機能を維持するため、廃棄体グループ3に対しても緩衝材の敷設が必要となる。ここで、緩衝材や低拡散層といった人工バリアを新たに敷設する場合には、バリアの厚さなどの幾何形状の変更を考慮する必要がある。この場合、対象となる岩盤の強度などの性質を考慮して坑道径を設定し、それに依存した処分坑道長の増大や掘削土量などの施工数量の増加といった設計上の対策について検討を行う必要がある。

これらの高度化対策の採用に伴う人工バリア構成の例を図 3.2.1-1 に示す。

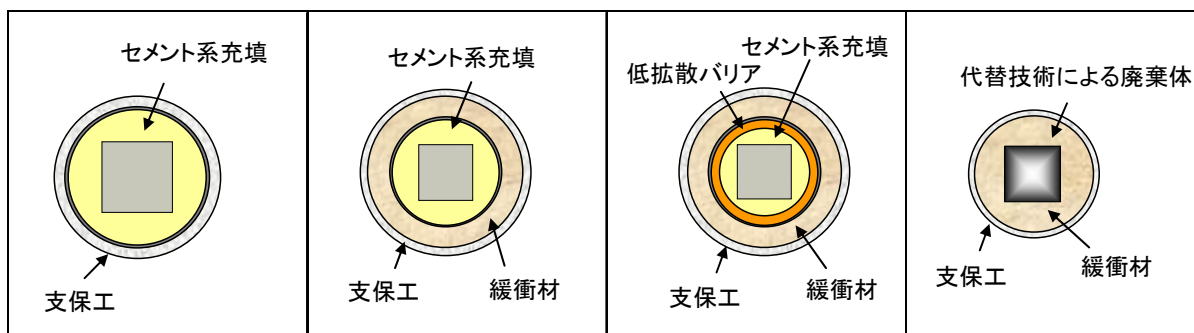


図 3.2.1-1 人工バリア構成 (例)

(vi) 埋設事業区分

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下、「原子炉等規制法」という)(法律, 2012a)と特定放射性廃棄物処分の最終処分に関する法律(以下、「最終処分法」という)(法律, 2012b)とでは放射能濃度の基準値が異なる。そのため、適用する法律によって、地層処分対象廃棄物が異なることになる。地層処分低レベル放射性廃棄物は、最終処分法の適用を前提としているため、原子炉等規制法が適用された場合は、地層処分低レベル放射性廃棄物は、第一種廃棄物埋設と第二種廃棄物埋設に分けられることになる。この場合、区分された廃棄物ごとの事業認可に基づく管理を合理的に行うため、これまでの廃棄物の分類とは別の区分に基づく設計上の検討などが必要となる。

(vii) 脱硝技術

硝酸塩含有廃棄体による硝酸塩影響の不確実性を低減するために、廃液中に含まれる高濃度の硝酸塩を効率的かつ高度に除去する技術開発が進められている(JAEA, 2011)。この技術開発では、廃液中の塩濃度を低減させるためにイオン交換膜を用いた電気透析によって硝酸ナトリウムを分離する技術(膜分離プロセス)を用い、次いで廃液中に残存する硝酸イオンを効率的に分解する技術(分解プロセス)を組み合わせている。膜分離プロセ

スは図 3.2.1-2 に示す 2 つの電気透析セルを備えたベンチスケール（実験室的小規模実験）の膜分離試験措置を用いて、高濃度の硝酸ナトリウム溶液から 90% の硝酸ナトリウムを所定の時間で分離除去することが実証されている。分解プロセスは、活性汚泥（微生物）を用いて生物学的に硝酸イオンを分解させる試験を実施している。これら両装置を用いたベンチスケール規模の試験では、硝酸および亜硝酸イオン濃度を 1,000 mg/l 以下にまで分解できる性能が示されている。

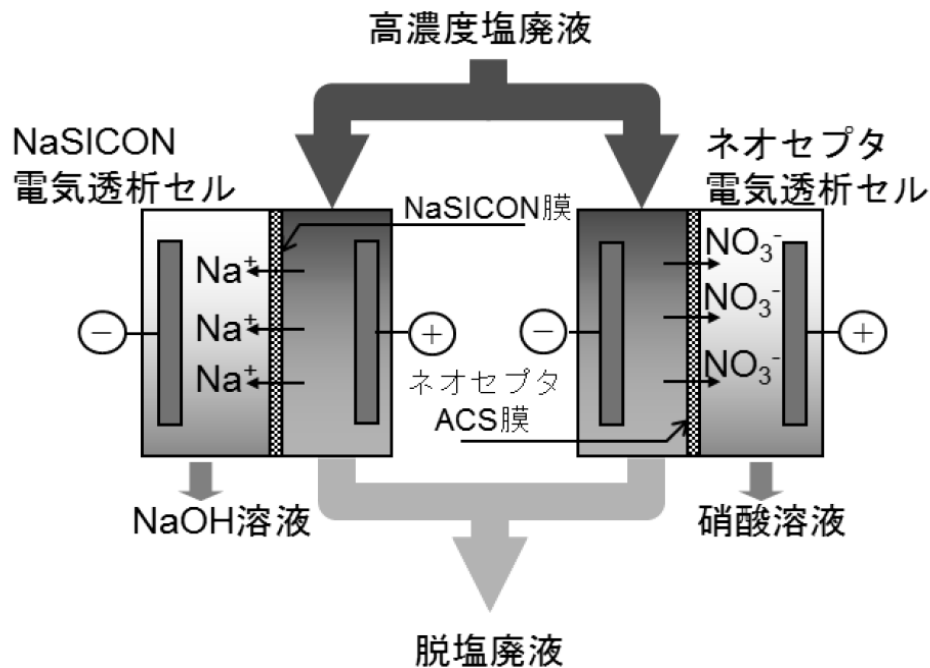


図 3.2.1-2 2 電気透析セルシステム

(JAEA(2012)より)

(3) グループ分類の考え方

前項で整理した特性などのうち、現状の技術において、既存のグループ分類を見直すにあたって重視すべき分類項目として、発熱量と有害物質の有無を考えることとした。高度化対策については、グループごとの人工バリア構成に影響を与えるものではあるが、それによりグループ分類を見直す必要が生じるものではないと判断した。埋設事業区分（第一種／第二種）については、事業管理を合理的に実施する上で重要な分類項目ではあるが、ここでは、設計および安全性への観点に着目した分類を行うこととし、個々の分類の中での付記情報として整備することとした。脱硝技術については、それが達成された場合には、分類の見直しにより、ますます合理的で安全な処分を行うことが可能になると予想されるが、現在検討中の技術であることから、ここでは、分類項目とはしないこととした。対象廃棄物の発生量と線量を支配する核種の放射エネルギーについては、分類見直しの前提条件として扱うこととする。これらの特性に基づく廃棄物グループの分類の考え方を表 3.2.1-5 に示す。

表 3.2.1-5 廃棄体グループ分類の考え方

廃棄体特性	分類の考え方	人工バリア構成	付記情報
対象廃棄物の発生量	分類の前提条件とする。		
線量を支配する核種の放射エネルギー	分類の前提条件とする。	核種移行抑制効果の観点から、1-129 と C-14 を多量に含む廃棄体を区別し、緩衝材を敷設する。	
発熱量	25 年後の発熱量が 4W/本を超える廃棄体を発熱性廃棄体として区分し、熱影響を回避する対策を効率的に実施する。		
有害物質の有無	硝酸塩含有廃物を区分、廃棄体グループ 2 については、有機物の存在による区分はしない。		
高度化対策	グループ分類には影響を与えない。	幅広い地質環境に対応するため、全ての廃棄体に対して緩衝材を敷設する。廃棄体グループ 1 については代替固化技術、廃棄体グループ 2 については、長期閉じ込め容器を採用する。	
埋設事業区分	グループ分類とはせず、付記情報とする。		一種二種の区別
脱硝技術	硝酸塩含有廃棄体に含まれる硝酸塩を除去することにより廃棄体の特性が変化することが想定されるが、検討中の技術であることから、分類の対象とはしない。		

(4) グループ分類の見直し

前項のグループ分類の考え方を踏まえ、現状の処理処分技術を想定した場合については、発熱性、有害物質の有無を考慮して見直しを行うこととした。この見直しの結果、廃棄体グループを表 3.2.1-6 に示すように従来の 4 グループから 5 グループに再編した。

表 3.2.1-6 廃棄体グループの分類（現行の処理処分技術を想定）

グループ分類	主な廃棄体	発生量 (m ³)	グループングの根拠			(参考) TRULレベル3 報告書のグループ
			発熱性	人工バリア構成	有害物質	
グループ1	廃銀吸着材のセメント混練固化体	319	無	緩衝材敷設	無	Gr1
グループ2	ハル・エンドピースの圧縮体返還廃棄体	5,792	有	緩衝材敷設	有	Gr2
グループ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	5,228	無	セメント埋戻	有	Gr3
グループ4 (低発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	5,436	無	セメント埋戻	無	Gr4
グループ4 (発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	1,309	有	セメント埋戻	無	

総発生量 18,084

これは、これまでの廃棄体グループ 4 を比較的発熱性の高い廃棄体「廃棄体グループ 4 (発熱性)」, 比較的発熱性の低い廃棄体「廃棄体グループ 4 (低発熱性)」に分けたことによるものである。表 3.2.1-6 には、現状の処理処分技術を想定した場合の人工バリア構成に関する情報も合わせて示す。5 つの廃棄体グループの内訳を表 3.2.1-7 に示す。

表 3.2.1-7 廃棄体グループの内訳(約 18, 100 m³)

グループ分類	廃棄体情報								
	区分	廃棄体種類	処理方法	処分容器	固化方法	発熱量(W/本)		埋設事業区分	発生量(m ³)
						基準年	25年後		
グループ1	原燃再処理操業	炭酸吸着材	—	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第二種	280
	JAEA再処理操業	炭酸吸着材	—	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第二種	39
								小計	319
グループ2	原燃再処理操業	ハル・エンドピース	圧縮	キャニスタ	キャニスタ充填・密閉化	61	4	第一種	4852
	JAEA再処理操業	ハル・エンドピース	圧縮	キャニスタ	キャニスタ充填・密閉化	23	2	第一種	235
	仏国返還廃棄物	固型物収納体(ハル等)	圧縮	キャニスタ	—	90	19	第一種	699
	仏国返還廃棄物	低レベル廃液ガラス固化体	—	キャニスタ	ガラス固化	90	10	第一種	6
								小計	5,792
グループ3	原燃再処理操業	低レベル濃縮廃液 I (分析廃液)	乾燥・造粒	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	1256
	原燃再処理操業	部分除染廃液 I (機器更新)	乾燥・造粒	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	140
	原燃再処理解体	系統除染廃液(施設廃止)	乾燥・造粒	200ドラム缶	モルタル充填固化	1	3	第一種	63
	原燃再処理解体	部分除染廃液 I (施設廃止)	乾燥・造粒	200ドラム缶	モルタル充填固化	1	3	第一種	97
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液 I (アスファルト固化体(MA系))	—	200ドラム缶	アスファルト固化	<1	<1	第二種	3231
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液 II (スラリー固化体)	核種分離	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第二種	248
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液 III (リン酸廃液固化体)	—	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第二種	119
JAEA再処理解体	二次除染廃液スラリー固化体	核種分離	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第二種	74	
								小計	5,228
グループ4 (低発熱性)	原燃再処理操業	焼却灰+ハル缶水	焼却・濃縮	200ドラム缶	セメント混練固化	16	2	第一種	312
	原燃再処理操業	ハル缶水	濃縮	200ドラム缶	セメント混練固化	15	1	第一種	688
	原燃再処理操業	不燃物 I (特殊機器廃品等)	切断	角型容器	モルタル充填固化	1*	<1	第一種	608
	原燃再処理操業	不燃物 I (GBパネル)	切断	角型容器	モルタル充填固化	1*	1	第二種	48
	原燃再処理操業	不燃物 I (機器更新)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	2
	原燃MOX操業	焼却灰(グローブボックス内)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	1*	1	第一種	244
	原燃MOX操業	焼却灰(二次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	1*	1	第一種	84
	原燃MOX操業	不燃物 I (溶解)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	1*	1	第一種	100
	原燃MOX操業	不燃物 I (機器更新「一次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	328
	原燃MOX操業	不燃物 I (機器更新「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	28
	原燃MOX操業	不燃物 I (溶解以外)	切断	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	16
	原燃MOX操業	不燃物 I (GBパネル)	切断	角型容器	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	48
	原燃再処理解体	不燃物 I (溶解)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	70
	原燃再処理解体	不燃物 I (圧縮)	圧縮	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	98
	原燃再処理解体	不燃物 I (溶解以外)	切断	角型容器	モルタル充填固化	1*	1	第二種	53
	原燃MOX解体	焼却灰	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	1*	1	第一種	118
	原燃MOX解体	不燃物 I (溶解「一次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	496
	原燃MOX解体	不燃物 I (溶解「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	39
	原燃MOX解体	不燃物 I (GBパネル)	切断	角型容器	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	75
	JAEA再処理操業	ハル缶水	蒸発濃縮	200ドラム缶	セメント混練固化	7	3	第一種	5
	JAEA再処理操業	不燃物 I (金属 I)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	5	2	第一種	158
	JAEA再処理操業	不燃物 II (金属 II)	—	角型容器	モルタル充填固化	15	1	第二種	7
	JAEA再処理操業	可燃物	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	2	1	第一種	9
	JAEA再処理操業	難燃物	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	3	3	第一種	3
	JAEA再処理操業	不燃物 III (非金属 I)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	43
	JAEA MOX操業	可燃物	焼却一部溶解	200ドラム缶	セメント混練固化またはモルタル充填固化	<1	1	第一種	97
	JAEA MOX操業	難燃物	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第一種	54
	JAEA MOX操業	不燃物 I (金属)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	1*	1	第一種	436
	JAEA MOX操業	不燃物 II (非金属)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	1	第一種	68
	JAEA再処理解体	不燃物 I (金属「一次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	539
	JAEA再処理解体	不燃物 II (コンクリート「一次廃棄物」)	—	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第二種	17
	JAEA再処理解体	可燃物 I (二次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	3	2	第一種	8
	JAEA再処理解体	不燃物 III (金属「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	1*	1	第一種	21
	JAEA再処理解体	不燃物 IV (非金属「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	12
	JAEA再処理解体	不燃物 V (金属 I「廃棄体処理」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	5	2	第一種	17
	JAEA再処理解体	可燃物 II (廃棄体処理)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	2	1	第一種	7
	JAEA再処理解体	難燃物 II (廃棄体処理)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	3	3	第一種	2
	JAEA再処理解体	不燃物 VI (非金属「廃棄体処理」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	10
	JAEA MOX解体	不燃物 I (金属「一次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	392
	JAEA MOX解体	不燃物 II (コンクリート「一次廃棄物」)	—	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	10
	JAEA MOX解体	不燃物 III (金属「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	1*	1	第一種	23
	JAEA MOX解体	不燃物 IV (非金属「二次廃棄物」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	<1	第一種	5
	JAEA MOX解体	可燃物 III (廃棄体処理)	焼却一部溶解	200ドラム缶	セメント混練固化またはモルタル充填固化	<1	1	第一種	11
	JAEA MOX解体	難燃物 III (廃棄体処理)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	<1	<1	第一種	6
	JAEA MOX解体	不燃物 V (金属「廃棄体処理」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	1*	1	第一種	18
	JAEA MOX解体	不燃物 VI (非金属「廃棄体処理」)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	<1	1	第一種	3
									小計	5,436
グループ4 (発熱性)	原燃再処理操業	不燃物 I (機器廃品等)	溶解	200ドラム缶	モルタル充填固化	13	4	第一種	820
	原燃再処理操業	不燃物 I (溶解炉)	切断	インナーパネル	モルタル充填固化	210	60	第一種	412
	JAEA再処理操業	不燃物 IV (非金属 II)	—	ハル缶	モルタル充填固化	51	19	第一種	15
	JAEA再処理操業	難燃物 I (二次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	7	8	第一種	2
	JAEA再処理解体	不燃物 VII (非金属 II「廃棄体処理」)	—	ハル缶	モルタル充填固化	51	19	第一種	8
	JAEA MOX解体	可燃物 I (一次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	5	6	第一種	17
	JAEA MOX解体	難燃物 I (一次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	7	8	第一種	4
	JAEA MOX解体	可燃物 II (二次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	7	8	第一種	21
JAEA MOX解体	難燃物 II (二次廃棄物)	焼却	200ドラム缶	セメント混練固化	7	8	第一種	10	
								小計	1,309

*インベントリ(Bq)に基づき、NUMOで算出
25年後の発熱量はNUMOで算出

合計 18,084

廃棄体グループの内訳（表 3.2.1-7）と表 3.2.1-3 との比較からわかるように、廃棄体グループ 2 には有害物質と見なされる有機物（セルロース）を含む JAEA 再処理操業のハル・エンドピースと、有機物を含まない廃棄体が混在する。しかし、収納容器がともにキャニスタであることによる操業効率性を重視し、廃棄体グループ 2 中の有機物の存在は無視することとし、有機物を含む JAEA 再処理操業のハル・エンドピースについても従来どおり廃棄体グループ 2 に分類することとした。

本検討で対象とした高度化対策は、グループ分類には影響を与えず、個々のグループの人工バリアの構成を変化させるものである。高度化対策を採用する場合の人工バリア構成に関する情報を付記した結果を表 3.2.1-8 に示す。この高度化対策は、5 グループに分類した廃棄体のうち、廃棄体グループ 1 には代替固化技術による核種溶出抑制効果、廃棄体グループ 2 には容器閉じ込め性の向上、その他のグループには緩衝材敷設による核種移行抑制効果を期待したものである（表 3.2.1-8）。

表 3.2.1-8 廃棄体グループの分類（高度化対策）

グループ分類	主な廃棄体	発生量 (m ³)	グループピングの根拠			
			発熱性	人工バリア構成	有害物質	高度化対策
グループ1	<u>廃銀吸着材(代替固化技術)</u>	319	無	緩衝材敷設	無	<u>代替固化技術による核種溶出抑制</u>
グループ2	ハル・エンドピースの圧縮体返還廃棄体	5,792	有	緩衝材敷設	有	<u>廃棄体パッケージによる閉じ込め性の向上</u>
グループ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	5,228	無	<u>緩衝材敷設</u>	有	<u>緩衝材敷設による核種移行抑制</u>
グループ4 (低発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	5,436	無	<u>緩衝材敷設</u>	無	<u>緩衝材敷設による核種移行抑制</u>
グループ4 (発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	1,309	有	<u>緩衝材敷設</u>	無	<u>緩衝材敷設による核種移行抑制</u>

下線は現行の処理処分技術を想定したケースから変更した部分

埋設事業区分については、5 グループに分類した各廃棄体に対して、原子炉等規制法の濃度上限値を越える第一種廃棄物埋設と、それ以外の第二種廃棄物埋設に区分する埋設事業区分情報を付記情報とした（表 3.2.1-9）。グループ別にみると、廃棄体グループ 3 と廃棄体グループ 4（低発熱性）において第一種と第二種が混在する結果となった。

脱硝技術が採用される場合は、5 グループに分類した廃棄体のうち、有害物である硝酸塩を含む廃棄体グループ 3 が硝酸を含まない廃棄体と見なせるようになる可能性がある。この場合、廃棄体特性（化学的特性、体積など）が変化し、より合理的な処分が可能にな

る可能性がある。しかし、この技術は現在検討中の技術であり、この技術により除去する対象を硝酸イオンのみとするか、硝酸イオンと Na イオンの両方とするかなど、具体的な処理プロセスについてはこれからの検討課題となっている。仮にナトリウムが残される場合は、残存する NaOH により高アルカリ環境となる他、廃棄体近傍の間隙水中のイオン強度は高いまま維持されることになり、核種移行に対する影響の懸念は払しょくされないことになる。そのため、現状においては、硝酸塩を含む廃棄体グループ3は、廃棄体グループ3のままとし、5グループ分類とした（表 3.2.1-10）。

表 3.2.1-9 廃棄体グループの分類（埋設事業区分）

グループ分類	主な廃棄体	発生量 (m ³)	グループングの根拠			
			発熱性	人工バリア構成	有害物質	埋設事業区分
グループ1	廃銀吸着材のセメント混練固化体	319	無	緩衝材敷設	無	第二種
グループ2	ハル・エンドピースの圧縮体返還廃棄体	5,792	有	緩衝材敷設	有	第一種
グループ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	300	無	セメント埋戻	有	第一種
		4,928				第二種
グループ4 (低発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	4,410	無	セメント埋戻	無	第一種
		1,026				第二種
グループ4 (発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	1,309	有	セメント埋戻	無	第一種

下線は現行の処理処分技術を想定したケースから変更した部分

表 3.2.1-10 廃棄体グループの分類（脱硝技術）

グループ分類	主な廃棄体	発生量 (m ³)	グループングの根拠			備考
			発熱性	人工バリア構成	有害物質	
グループ1	廃銀吸着材のセメント混練固化体	319	無	緩衝材敷設	無	
グループ2	ハル・エンドピースの圧縮体返還廃棄体	5,792	有	緩衝材敷設	有	
グループ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	5,228	無	セメント埋戻	無*	硝酸は除去されるが、分解後の二次廃棄物の発生は懸念されることから、従来と同じくグループ3に区分する。
グループ4 (低発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	5,436	無	セメント埋戻	無	
グループ4 (発熱性)	可燃、難燃、不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	1,309	有	セメント埋戻	無	

以上、現時点において想定される条件を考慮した結果、地層処分低レベル放射性廃棄物は5グループの分類が最適である結果となった。今後、開発中の技術（代替固化技術、脱硝技術など）を適用したときの廃棄体特性に関する情報の蓄積、廃棄体パッケージ（金属製、コンクリート製など）の技術的な進展を考慮した上で最適化を目指した検討を継続していく必要がある。

3.2.2 廃棄体グループごとの廃棄体特性の設定

本項では、前項の廃棄物グループ分類の見直しに関する検討結果、すなわち、従来の廃棄体グループ4を新たに廃棄体グループ4（発熱性）と廃棄体グループ4（低発熱性）に細分化するという提案を踏まえ、この新たな廃棄体グループ分類に応じて廃棄体データを整理する。各廃棄体およびその廃棄体に含まれる材料の物量に関するデータを表3.2.2-1に整理する。廃棄物の全体量については、TRUレベル3報告書（NUMO, 2011a）に倣う。すなわち、最終処分計画（経済産業省、2008）における規定である「対象とする廃棄物の発生量約18,100 m³に対して、19,000 m³以上の規模の処分場構築を対象とすること」を満足するために、本検討における廃棄物総量は19,000 m³とする。

表 3.2.2-1 地層処分低レベル放射性廃棄物の物量データ (19,000 m³)
(その1)

グループ	廃棄物種類	廃棄物名称	廃棄体 体積 [m ³ /本]	廃棄体 重量 [t/本]	発生 本数 [本]	発生量 [m ³]	重量 [t]	
1	原燃再処理操業	廃銀吸着材	0.2	0.365	1,470	294	537	
	JAEA再処理操業	廃銀吸着材	0.2	0.365	203	41	75	
	グループ1合計					1,673	335	612
2	原燃再処理操業	ハル・エンドピース	0.194	0.85	26,250	5,095	22,313	
	JAEA再処理操業	ハル・エンドピース	0.194	0.85	1,272	247	1,082	
	仏国返還廃棄物	固型物収納体(ハル等)	0.194	0.85	3,780	734	3,213	
	仏国返還廃棄物	低レベル廃液ガラス固化体	0.194	0.55	30	7	17	
	グループ2合計					31,332	6,083	26,625
3	原燃再処理操業	低レベル濃縮廃液Ⅰ(分析廃液)	0.2	0.43	6,586	1,319	2,832	
	原燃再処理操業	部分除染廃液Ⅰ(機器更新)	0.2	0.43	744	147	320	
	原燃再処理解体	系統除染廃液(施設廃止)	0.2	0.43	327	67	141	
	原燃再処理解体	部分除染廃液Ⅰ(施設廃止)	0.2	0.43	510	102	220	
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅰ(アスファルト固化体(MA系))	0.2	0.28	16,963	3,393	4,750	
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅱ(スラリー固化体)	0.2	0.38	1,299	261	494	
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅲ(リン酸廃液固化体)	0.2	0.32	624	125	200	
	JAEA再処理解体	二次除染廃液スラリー固化体	0.2	0.38	388	78	148	
	グループ3合計					27,441	5,492	9,105
	4(非発熱)	原燃再処理操業	焼却灰+ハル缶水	0.2	0.43	1,634	328	703
原燃再処理操業		ハル缶水	0.2	0.43	3,612	723	1,554	
原燃再処理操業		不燃物Ⅰ(特殊機器廃品等)	3.1	11.5	206	639	2,369	
原燃再処理操業		不燃物Ⅰ(G Bパネル)	3.1	9	17	51	153	
原燃再処理操業		不燃物Ⅰ(機器更新)	0.2	0.88	9	3	8	
原燃MOX操業		焼却灰(グループボックス内)	0.2	0.43	1,281	257	551	
原燃MOX操業		焼却灰(二次廃棄物)	0.2	0.43	446	89	192	
原燃MOX操業		不燃物Ⅰ(溶融)	0.2	0.88	525	105	462	
原燃MOX操業		不燃物Ⅰ(機器更新「一次廃棄物」)	0.2	0.88	1,714	344	1,508	
原燃MOX操業		不燃物Ⅰ(機器更新「二次廃棄物」)	0.2	0.88	147	30	130	
原燃MOX操業		不燃物Ⅰ(溶融以外)	0.2	0.57	89	17	51	
原燃MOX操業		不燃物Ⅰ(G Bパネル)	3.1	9	17	51	153	
原燃再処理解体		不燃物Ⅰ(溶融)	0.2	0.88	369	74	325	
原燃再処理解体		不燃物Ⅰ(圧縮)	0.2	0.57	513	103	293	
原燃再処理解体		不燃物Ⅰ(溶融以外)	3.1	9	18	56	162	
原燃MOX解体		焼却灰	0.2	0.43	618	124	266	
原燃MOX解体		不燃物Ⅰ(溶融「一次廃棄物」)	0.2	0.88	2,601	521	2,289	
原燃MOX解体		不燃物Ⅰ(溶融「二次廃棄物」)	0.2	0.88	202	41	178	
原燃MOX解体		不燃物Ⅰ(G Bパネル)	3.1	9	26	79	234	
JAEA再処理操業		ハル缶水	0.2	0.43	26	6	12	
JAEA再処理操業		不燃物Ⅰ(金属Ⅰ)	0.2	0.88	825	166	726	
JAEA再処理操業		不燃物Ⅱ(金属Ⅱ)	3.1	11.5	3	8	35	
JAEA再処理操業		可燃物	0.2	0.43	48	10	21	
JAEA再処理操業		難燃物	0.2	0.43	13	4	6	
JAEA再処理操業		不燃物Ⅲ(非金属Ⅰ)	0.2	0.5	222	46	111	
JAEA MOX操業		可燃物	0.2	0.55	510	102	281	
JAEA MOX操業		難燃物	0.2	0.43	281	57	121	
JAEA MOX操業		不燃物Ⅰ(金属)	0.2	0.88	2,284	458	2,010	
JAEA MOX操業		不燃物Ⅱ(非金属)	0.2	0.5	355	72	178	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅰ(金属(一次廃棄物))	0.2	0.88	2,828	566	2,489	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅱ(コンクリート(一次廃棄物))	0.2	0.5	89	18	45	
JAEA再処理解体		可燃物Ⅰ(二次廃棄物)	0.2	0.43	39	9	17	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅲ(金属(二次廃棄物))	0.2	0.88	108	23	96	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅳ(非金属(二次廃棄物))	0.2	0.5	59	13	30	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅴ(金属Ⅰ(廃棄体化处理))	0.2	0.88	89	18	79	
JAEA再処理解体		可燃物Ⅱ(廃棄体化处理)	0.2	0.43	36	8	16	
JAEA再処理解体		難燃物Ⅱ(廃棄体化处理)	0.2	0.43	11	3	5	
JAEA再処理解体		不燃物Ⅵ(非金属Ⅰ(廃棄体化处理))	0.2	0.5	49	11	25	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅰ(金属(一次廃棄物))	0.2	0.88	2,057	412	1,811	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅱ(コンクリート(一次廃棄物))	0.2	0.5	52	11	26	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅲ(金属(二次廃棄物))	0.2	0.88	119	25	105	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅳ(非金属(二次廃棄物))	0.2	0.5	23	6	12	
JAEA MOX解体		可燃物Ⅲ(廃棄体化处理)	0.2	0.55	57	12	32	
JAEA MOX解体		難燃物Ⅲ(廃棄体化处理)	0.2	0.43	28	7	13	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅴ(金属(廃棄体化处理))	0.2	0.88	92	19	81	
JAEA MOX解体		不燃物Ⅵ(非金属(廃棄体化处理))	0.2	0.5	16	4	8	
グループ4(非発熱)合計					24,363	5,729	19,972	
4(発熱)	原燃再処理操業	不燃物Ⅰ(機器廃品等)	0.2	0.88	4,310	861	3,793	
	原燃再処理操業	不燃物Ⅰ(溶融炉)	0.38	0.91	1,134	433	1,032	
	JAEA再処理操業	不燃物Ⅳ(非金属Ⅱ)	0.43	1.08	36	16	39	
	JAEA再処理操業	難燃物Ⅰ(二次廃棄物)	0.2	0.43	8	3	4	
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅶ(非金属Ⅱ(廃棄体化处理))	0.43	1.08	18	9	20	
	JAEA MOX解体	可燃物Ⅰ(一次廃棄物)	0.2	0.43	88	18	38	
	JAEA MOX解体	難燃物Ⅰ(一次廃棄物)	0.2	0.43	20	5	9	
	JAEA MOX解体	可燃物Ⅱ(二次廃棄物)	0.2	0.43	109	23	47	
JAEA MOX解体	難燃物Ⅱ(二次廃棄物)	0.2	0.43	52	11	23		
グループ4(発熱)合計					5,775	1,379	5,005	

※1: 溶融用のキャニスタ(セラミック)
※2: コンクリート、ガラス、焼却灰等

表 3.2.2-1 地層処分低レベル放射性廃棄物の物量データ
(その2)

グループ	廃棄物種類	廃棄物名称	廃棄体当たりの内容物量[kg/体]																	
			内容物										固化基材							
			炭素鋼	ステンレス鋼	その他非金属※1	炭素鋼	ステンレス鋼	ジ'ホロイ	インコ	硝酸塩	リチウム	TBP等	NaCl	εD-S	その他※2	セメント	ビ'チウム	エ'キ	ポリイ'チレン	
1	原燃再処理操業	炭素鋼製材																		
	JAEA再処理操業	炭素鋼製材																		
		グループ1合計	30	30												90	245			
			30	30												180	490			
2	原燃再処理操業	ハル・エンドピース		130			240	480												
	JAEA再処理操業	ハル・エンドピース		130			305	391	24					0.5						
	仏国返還廃棄物	筒型物収納体(ハル等)		90.8			116	393	19							231.2				
	仏国返還廃棄物	低レベル廃液ガラス固化体		92.5															457.5	
		グループ2合計		443.3			661	1264	43					0.5		231.2			457.5	
			120	120												1193.275	50	0.162	1450	147
3	原燃再処理操業	低レベル濃縮廃液Ⅰ(分析廃液)																		
	原燃再処理操業	部分除染廃液Ⅰ(機器更新)																		
	原燃再処理解体	系統除染廃液(施設廃止)																		
	原燃再処理解体	部分除染廃液Ⅰ(施設廃止)																		
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅰ(アスファルト固化体(MA系))		30																
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅱ(スラリー固化体)		30																
	JAEA再処理操業	溶媒洗浄廃液Ⅲ(リン酸濃縮固化体)		30																
	JAEA再処理解体	二次除染廃液スラリー固化体		30																
		グループ3合計		120																
			120	120												1193.275	50	0.162	1450	147
4(非発熱)	原燃再処理操業	焼却灰+ハル缶水		30																
	原燃再処理操業	ハル缶水		30																
	原燃再処理操業	不燃物I(特殊機器廃品等)		4800				2000												
	原燃再処理操業	不燃物I(GEハネル)		4800																
	原燃再処理操業	不燃物I(機器更新)		30	140	650														
	原燃MOX操業	焼却灰(グローブボックス内)		30																
	原燃MOX操業	焼却灰(二次廃棄物)		30																
	原燃MOX操業	不燃物I(溶融)		30	140	650														
	原燃MOX操業	不燃物I(機器更新「一次廃棄物」)		30	140	650														
	原燃MOX操業	不燃物I(機器更新「二次廃棄物」)		30	140	650														
	原燃MOX操業	不燃物I(溶融以外)		30			160													
	原燃MOX操業	不燃物I(GEハネル)		4800																
	原燃再処理操業	不燃物I(溶融)		30	140	514														
	原燃再処理解体	不燃物I(溶融)		30			160													
	原燃再処理解体	不燃物I(溶融以外)		4800																
	原燃MOX解体	焼却灰		30																
	原燃MOX解体	不燃物I(溶融「一次廃棄物」)		30	140	650														
	原燃MOX解体	不燃物I(溶融「二次廃棄物」)		30	140	650														
	JAEA再処理操業	不燃物I(GEハネル)		4800																
	JAEA再処理操業	ハル缶水		30																
	JAEA再処理操業	不燃物I(金属Ⅰ)		30	140	325	325													
	JAEA再処理操業	不燃物Ⅱ(金属Ⅱ)		4800				2000												
	JAEA再処理操業	可燃物		30																
	JAEA再処理操業	難燃物		30																
	JAEA再処理操業	不燃物Ⅲ(非金属Ⅰ)		30																
	JAEA MOX操業	可燃物		30	120															
	JAEA MOX操業	難燃物		30																
	JAEA MOX操業	不燃物I(金属)		30	140	325	325													
	JAEA MOX操業	不燃物Ⅱ(非金属)		30																
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅰ(金属「一次廃棄物」)		30	140	325	325													
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅱ(コンクリート「一次廃棄物」)		30																
	JAEA再処理解体	可燃物Ⅰ(二次廃棄物)		30																
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅲ(金属「二次廃棄物」)		30	140	325	325													
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅳ(非金属「二次廃棄物」)		30																
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅴ(金属Ⅰ「廃棄体処理」)		30	140	325	325													
	JAEA再処理解体	可燃物Ⅱ(廃棄体処理)		30																
	JAEA再処理解体	難燃物Ⅱ(廃棄体処理)		30																
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅵ(非金属Ⅰ「廃棄体処理」)		30																
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅰ(金属「一次廃棄物」)		30	140	325	325													
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅱ(コンクリート「一次廃棄物」)		30																
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅲ(金属「二次廃棄物」)		30	140	325	325													
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅳ(非金属「二次廃棄物」)		30																
	JAEA MOX解体	可燃物Ⅲ(廃棄体処理)		30	120															
	JAEA MOX解体	難燃物Ⅲ(廃棄体処理)		30																
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅴ(金属「廃棄体処理」)		30	140	325	325													
	JAEA MOX解体	不燃物Ⅶ(非金属「廃棄体処理」)		30																
		グループ4(非発熱)合計		29580	660	2100	7014	6920												
			150	655	140	514										2136	28100			
4(発熱)	原燃再処理操業	不燃物I(機器廃品等)																		
	原燃再処理操業	不燃物I(溶融炉)		125	140	514														
	JAEA再処理操業	不燃物Ⅳ(非金属Ⅱ)		250																
	JAEA再処理解体	難燃物I(二次廃棄物)		30																
	JAEA再処理解体	不燃物Ⅴ(非金属Ⅲ「廃棄体処理」)		30	250															
	JAEA再処理解体	可燃物I(一次廃棄物)		30																
	JAEA MOX解体	難燃物I(二次廃棄物)		30																
	JAEA MOX解体	可燃物Ⅱ(二次廃棄物)		30																
	JAEA MOX解体	難燃物Ⅱ(二次廃棄物)		30																
	JAEA MOX解体	難燃物Ⅱ(二次廃棄物)		30																
		グループ4(発熱)合計		150	655	140	514													
			150	655	140	514										2136	28100			

※1: 溶融用のキャニスタ(セラミック)
 ※2: コンクリート、ガラス、焼却灰等(ハル缶水の場合はハル缶水の重量)

3.2.3 廃棄体グループごとの核種インベントリの設定

廃棄体グループごとの核種インベントリを表 3.2.3-1 に示す。表 3.2.3-1 において、「基準年」とは廃棄物の発生時点でのインベントリを、「25 年後」とは処分場に定置・閉鎖される時点までの崩壊・生成を考慮したインベントリを示している。

表 3.2.3-1 廃棄物グループごとの核種インベントリ (19,000 m³)

発生本数 (本)	グループ1		グループ2		グループ3		グループ4(低発熱性)		グループ4(発熱性)		総合計	
	1,673		31,332		27,441		24,363		5,775		90,584	
発生量 (m ³)	335		6,083		5,492		5,729		1,379		19,018	
重量 (t)	612		26,625		9,105		19,972		5,005		61,319	
核種	基準年	25年後	基準年	25年後	基準年	25年後	基準年	25年後	基準年	25年後	基準年	25年後
G-14	0.0E+00	0.0E+00	5.9E+14	5.9E+14	7.4E+12	7.4E+12	5.8E+09	5.8E+09	2.7E+12	2.7E+12	6.0E+14	6.0E+14
Cl-36	0.0E+00	0.0E+00	9.2E+12	9.2E+12	3.3E+11	3.3E+11	3.7E+07	3.7E+07	1.3E+07	1.3E+07	9.5E+12	9.5E+12
Co-60	3.3E+06	1.2E+05	1.9E+18	7.2E+16	1.2E+13	4.5E+11	1.0E+17	3.7E+15	4.3E+14	1.6E+13	2.0E+18	7.5E+16
Ni-59	5.5E+03	5.5E+03	7.5E+15	7.5E+15	4.8E+08	4.8E+08	5.9E+13	5.9E+13	4.2E+08	4.2E+08	7.5E+15	7.5E+15
Ni-63	8.6E+05	7.1E+05	1.3E+18	1.1E+18	6.6E+10	5.5E+10	8.8E+15	7.3E+15	5.7E+10	4.8E+10	1.3E+18	1.1E+18
Se-79	3.9E+05	3.9E+05	3.2E+12	3.2E+12	6.7E+09	6.7E+09	1.4E+11	1.4E+11	2.0E+12	2.0E+12	5.4E+12	5.4E+12
Sr-90	6.6E+10	3.7E+10	5.7E+17	3.2E+17	1.2E+15	6.9E+14	2.3E+16	1.3E+16	3.3E+17	1.8E+17	9.3E+17	5.1E+17
Zr-93	1.8E+06	1.8E+06	3.7E+14	3.7E+14	3.1E+10	3.1E+10	7.6E+12	7.6E+12	9.0E+12	9.0E+12	3.9E+14	3.9E+14
Nb-94	3.3E+06	3.3E+06	2.6E+15	2.6E+15	1.9E+06	1.9E+06	4.0E+07	4.0E+07	6.4E+08	6.4E+08	2.6E+15	2.6E+15
Mo-93	3.8E+01	3.7E+01	5.6E+13	5.6E+13	8.1E+06	8.1E+06	5.7E+07	5.7E+07	6.3E+08	6.2E+08	5.6E+13	5.6E+13
Tc-99	0.0E+00	0.0E+00	6.9E+14	6.9E+14	3.9E+11	3.9E+11	3.4E+12	3.4E+12	1.1E+14	1.1E+14	8.0E+14	8.0E+14
Pd-107	1.1E+05	1.1E+05	5.5E+11	5.5E+11	2.5E+09	2.5E+09	3.5E+10	3.5E+10	5.2E+11	5.2E+11	1.1E+12	1.1E+12
Sn-126	7.4E+05	7.4E+05	3.8E+12	3.8E+12	1.1E+10	1.1E+10	2.3E+11	2.3E+11	3.6E+12	3.6E+12	7.7E+12	7.7E+12
I-129	5.9E+13	5.9E+13	2.6E+11	2.6E+11	7.2E+11	7.2E+11	1.2E+08	1.2E+08	4.4E+09	4.4E+09	6.0E+13	6.0E+13
Cs-135	4.3E+05	4.3E+05	3.6E+12	3.6E+12	7.0E+09	7.0E+09	3.1E+11	3.1E+11	2.1E+12	2.1E+12	6.0E+12	6.0E+12
Cs-137	9.4E+10	5.3E+10	7.4E+17	4.1E+17	1.5E+15	8.5E+14	6.9E+16	3.8E+16	4.6E+17	2.6E+17	1.3E+18	7.1E+17
Cm-244	2.1E+09	8.1E+08	1.6E+16	6.0E+15	3.4E+12	1.3E+12	1.3E+15	5.1E+14	1.5E+16	5.7E+15	3.2E+16	1.2E+16
Pu-240	3.7E+08	3.7E+08	2.7E+15	2.7E+15	9.0E+13	8.9E+13	1.1E+15	1.1E+15	6.4E+14	6.6E+14	4.5E+15	4.5E+15
U-236	2.6E+05	2.6E+05	1.0E+12	1.0E+12	2.8E+10	2.8E+10	1.4E+11	1.4E+11	2.2E+11	2.2E+11	1.4E+12	1.4E+12
Th-232	0.0E+00	3.2E-04	0.0E+00	1.3E+03	0.0E+00	3.5E+01	0.0E+00	1.7E+02	0.0E+00	2.7E+02	0.0E+00	1.7E+03
Ra-228	0.0E+00	2.1E-04	0.0E+00	8.1E+02	0.0E+00	2.2E+01	0.0E+00	1.1E+02	0.0E+00	1.8E+02	0.0E+00	1.1E+03
Th-228	0.0E+00	1.8E-04	0.0E+00	6.9E+02	0.0E+00	1.9E+01	0.0E+00	9.1E+01	0.0E+00	1.5E+02	0.0E+00	9.5E+02
Cm-245	2.2E+05	2.2E+05	8.6E+11	8.6E+11	2.1E+09	2.1E+09	1.4E+11	1.4E+11	1.6E+12	1.6E+12	2.6E+12	2.6E+12
Pu-241	9.8E+10	2.9E+10	6.3E+17	1.9E+17	1.0E+17	3.1E+16	1.3E+17	3.8E+16	1.2E+17	3.7E+16	9.8E+17	2.9E+17
Am-241	7.8E+08	3.0E+09	4.7E+15	1.9E+16	6.8E+13	2.4E+15	2.0E+15	4.8E+15	6.1E+15	8.6E+15	1.3E+16	3.5E+16
Np-237	0.0E+00	1.7E+04	2.4E+12	2.5E+12	3.5E+10	4.7E+10	6.7E+11	7.0E+11	2.6E+12	2.6E+12	5.7E+12	5.9E+12
U-233	0.0E+00	7.8E-01	5.3E+09	5.6E+09	1.9E+06	6.2E+06	1.2E+07	8.7E+07	1.7E+07	3.0E+08	5.3E+09	6.0E+09
Th-229	0.0E+00	5.4E-04	0.0E+00	1.3E+07	0.0E+00	9.3E+03	0.0E+00	1.2E+05	0.0E+00	3.7E+05	0.0E+00	1.3E+07
Cm-246	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	1.6E+06	1.6E+06	1.3E+13	1.3E+13	3.7E+11	3.7E+11	2.4E+12	2.4E+12	2.4E+12	2.4E+12	1.8E+13	1.8E+13
U-238	2.2E+05	2.2E+05	8.6E+11	8.6E+11	2.4E+10	2.4E+10	1.6E+11	1.6E+11	2.0E+11	2.0E+11	1.3E+12	1.3E+12
U-234	1.9E+06	1.9E+06	8.1E+12	8.1E+12	3.2E+11	3.2E+11	2.6E+12	2.6E+12	5.0E+12	5.0E+12	1.6E+13	1.6E+13
Th-230	0.0E+00	2.1E+02	0.0E+00	2.5E+08	0.0E+00	2.7E+07	0.0E+00	2.7E+08	0.0E+00	2.5E+08	0.0E+00	8.0E+08
Ra-226	0.0E+00	1.1E+00	0.0E+00	1.1E+06	0.0E+00	1.4E+05	0.0E+00	1.4E+06	0.0E+00	1.3E+06	0.0E+00	3.9E+06
Pb-210	0.0E+00	2.4E-01	0.0E+00	2.0E+05	0.0E+00	2.9E+04	0.0E+00	3.0E+05	0.0E+00	2.7E+05	0.0E+00	8.1E+05
Am-243	1.8E+07	1.8E+07	1.8E+15	1.8E+15	5.5E+11	5.5E+11	1.2E+13	1.2E+13	1.3E+14	1.3E+14	1.9E+15	1.9E+15
Pu-239	2.4E+08	2.4E+08	1.7E+15	1.7E+15	5.7E+13	5.7E+13	8.7E+14	8.7E+14	4.9E+14	4.9E+14	3.1E+15	3.1E+15
U-235	1.5E+04	1.5E+04	6.1E+10	6.1E+10	1.7E+09	1.7E+09	3.2E+10	3.2E+10	2.4E+10	2.4E+10	1.2E+11	1.2E+11
Pa-231	0.0E+00	8.1E+00	0.0E+00	3.2E+07	0.0E+00	9.2E+05	0.0E+00	1.7E+07	0.0E+00	1.3E+07	0.0E+00	6.3E+07
Ac-227	0.0E+00	2.5E+00	0.0E+00	1.0E+07	0.0E+00	2.8E+05	0.0E+00	5.3E+06	0.0E+00	4.0E+06	0.0E+00	2.0E+07

3.3 NUMOの処分概念の基本型

3.3.1 目的達成に必要と考えられる処分概念の基本型の設定

前述の3.1では、多様な地質環境の分類の考え方を整理し、地質環境条件の類型化を行った。また、3.2では、TRUレベル3報告書(NUMO, 2011a)において示された主要な課題である「廃棄物のグループ分類の見直し」を含め、処分場設計・安全評価の前提となる廃棄体特性を整理した。ここでは、これらの議論を踏まえ、以下に示す本検討の目標の達成に必要と考えられる処分概念の基本型を設定する。

「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」

処分概念の基本型の設定においては、検討の要素として「人工バリアの処分概念」と「多様な地質環境条件」を考え、これらの組み合わせによって基本型を設定することとした。設定した処分概念の基本型とそれらの組み合わせからなる検討ケースを表3.3.1-1に示す。

これらの設定においては、「人工バリアの処分概念」と「多様な地質環境条件」をそれぞれ以下のように考えた。

- ・既存の安全評価（電事連・JNC, 2005 ; NUMO, 2011a）によって示されている処分システムの安全性に対して最も影響の大きい水理特性（低透水性と高透水性）に応じて人工バリアの処分概念を変更することとした。また、基本的に TRU レベル3 報告書において指摘された課題である短期（500 年程度）の閉じ込め機能を有するパッケージを採用することとした。
- ・低透水性の地質環境条件においては、既存概念を採用した人工バリアを考え、短期の閉じ込め機能を有する金属製パッケージを採用する概念（case1-0）とこれを採用しない概念（case1-1）に加えて、熱的条件がより厳しい場合など（詳細は 3.3.2 に後述）の影響に対応するための低定置密度埋設を採用する概念（case1-2）を設定することとした。さらに、「第一種廃棄物埋設」と「第二種廃棄物埋設」の区分を適用した場合の処分概念（case1-3）も考慮することとした。また、短期の閉じ込め機能を有するパッケージとして、金属製パッケージの代わりに、コンクリート製パッケージを採用する概念（case3-0）も設定した。
- ・高透水性の地質環境条件に対する処分概念においては、廃棄体グループ 1, 3, 4 に対して金属製の短期の閉じ込め機能を有するパッケージの採用に加えて、TRU レベル3 報告書において提案された以下の高度化対策を採用する概念（case2-0）を設定した。
 - 廃棄体グループ 1 に対する低浸出性廃棄体の採用
 - 廃棄体グループ 2 に対する長期の閉じ込め機能を有するパッケージの採用
 - 廃棄体グループ 3, 4 に対するベントナイト緩衝材の設置
- ・さらに、グループ分類の検討対象項目から除外した「脱硝技術」の影響に着目し、高度化対策を採用した廃棄体グループ 3 に対して脱硝技術を採用する概念（case2-1）を設定した。また、追加的検討として、高度化対策を採用した上で、余裕深度処分において採用している低拡散層を全ての廃棄体グループに敷設する概念（case2-2）を設定した。
- ・多様な地質環境条件については、3.1 で示した「地質環境条件の類型化」の考え方を踏まえ、地質環境条件を水理、岩種、地下水性状によって代表させることとした。
- ・水理特性については、前述のように透水性の違いによって代表させることとし、地質環境条件を低透水性条件（透水量係数： $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ）と高透水性条件（透水量係数： $1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ）の 2 つに区分した。
- ・岩種に関しては、既存の評価において想定されている結晶質岩と堆積岩で代表させることとした。この際、処分深度とセットで考えることとし、結晶質岩の処分深度は 1000 m、堆積岩の処分深度は 500 m と仮定した。
- ・地下水性状については降水系高 pH 型（FRHP）と海水系高 pH 型（SRHP）で代表させることとした。

表 3.3.1-1 処分概念の基本型と主要検討項目

		処分概念の基本型										主要検討項目			備考
検討 ケース	人工バリアの処分概念					多様な地質環境条件					熱 解析	坑道 設計	安全 評価		
	金属製の 短期閉じ 込め容器	短期閉じ込め容器 なし	低定置密度埋設	一種/ 二種の 区別	コンクリート 製の短期閉 じ込め容器	水理		岩種 結晶質岩 /堆積岩	地下水 性状						
						低透水性	高透水性								
1-0	人工 バリア 既 存 概 念	◎					◎		◎	FRHP/ SRHP	●	●	●	レファレンス	
1-1			◎				◎		◎	FRHP/ SRHP	-	-	○	短期閉じ込めなし	
1-2		◎		◎			◎		◎	FRHP/ SRHP	○	○	○	低定置密度	
1-3		◎			◎		◎		◎	FRHP/ SRHP	-	○	-	一種二種区別	
3-0						◎	◎		◎	SRHP	△	○	○	コンクリート製閉じ込め容器	
		人工バリアの処分概念					多様な地質環境条件					熱 解析	坑道 設計	安全 評価	
検討 ケース	金属製の 短期閉じ 込め容器	低浸出性 廃棄体 (Gr1)	長期の閉 じ込め容 器(Gr2)	緩衝材の 敷設 (Gr3, 4)	脱硝技術 (Gr3)	低 拡散層	コンクリート 製の短期閉 じ込め容器	水理		岩種 結晶質岩 /堆積岩	地下水 性状				
								低透水性	高透水性						
2-0	高度 工 化 バ リ ア 概 念	◎	◎	◎	◎				◎	◎	FRHP/ SRHP	●	●	●	レファレンス ガス検討, 安全評価 では水理変動を含む
2-1		◎	◎	◎	◎	◎			◎	◎	FRHP/ SRHP	-	-	△	脱硝技術
2-2		◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎	FRHP/ SRHP	-	○	-	低拡散層

- ◎ 適用条件
- 低透水条件あるいは高透水条件におけるレファレンス検討
- ケーススタディ
- △ 必要に応じて定性的・半定量的判断
- 検討対象外

3.3.2 設定した検討ケースと実施する主要な検討項目

処分概念の検討ケースごとに本検討で実施する主要検討項目を設定した。これらを先述の表 3.3.1-1 に併せて示す。また、各検討ケースにおける人工バリア構成を表 3.3.2-1 に示す。

表 3.3.2-1 各検討ケースにおける人工バリア構成

ケース	グループ分類	処理方法	固型化材	容器	人工バリア構成	処分坑道設計
[case1-0] 低透水NBSのリファレンス ●NBS透水量係数1E-10 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	セメント混練	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	低透水NBSのリファレンス
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)		最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等	ピチューメン、セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
[case1-1] 短期閉じ込めなし ●NBS透水量係数1E-10 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	セメント混練	セメント	従来容器 (閉込担保なし)	最終廃棄体+充填材+緩衝材	金属容器の厚さ減少による定置密度の相対的向上へ検討対象外
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)		最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等	ピチューメン、セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
[case1-2] 低定置密度 ●NBS透水量係数1E-10 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	セメント混練	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	より厳しい温度条件や人為事象への対応に伴う定置密度の相対的低下
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)		最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等	ピチューメン、セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
[case1-3] 一種埋設/二種埋設 ●NBS透水量係数1E-10 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	セメント混練	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	処分において一種/二種を区別する設計思想
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)		最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等	ピチューメン、セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
[case2-0] 高透水NBSのリファレンス ●NBS透水量係数1E-7 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	代替固化	Al2O3、BPIガラス等	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	高透水NBSのリファレンス
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)	代替金属容器 (6万年閉込)	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等 (脱硝しない)	ピチューメン、セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
[case2-1] 脱硝技術の適用 ●NBS透水量係数1E-7 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	代替固化	Al2O3、BPIガラス等	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	廃棄物量変化 (分類の見直し)
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)	代替金属容器 (6万年閉込)	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3 (分類の見直し)	ピチューメン等 (脱硝技術)	ピチューメン、セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	
[case2-2] 低拡散層の適用 ●NBS透水量係数1E-7 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	代替固化	Al2O3、BPIガラス等	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+低拡散層+緩衝材	低拡散層を追加することによる変更
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)	代替金属容器 (6万年閉込)	最終廃棄体+充填材+低拡散層+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等 (脱硝しない)	ピチューメン、セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+低拡散層+緩衝材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+低拡散層+緩衝材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント	500年閉込金属容器	最終廃棄体+充填材+低拡散層+緩衝材	
[case3-0] 低透水NBS(コンクリート容器) ●NBS透水量係数1E-10 m2/s ●結晶質岩(深度1,000m) ●堆積岩(深度500m)	グループ1	セメント混練	セメント	500年閉込RC容器	最終廃棄体+充填材+緩衝材	廃棄体パッケージをコンクリート製とした場合(設計課題成果を反映)
	グループ2	圧縮体等	なし(ガラス)		最終廃棄体+充填材+緩衝材	
	グループ3	ピチューメン等	ピチューメン、セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(低線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	
	グループ4(高線量)	セメント充填	セメント		最終廃棄体+充填材	

本検討においては、検討する主要な項目(主要検討項目)として、熱解析、坑道設計、安全評価など(表 3.3.1-1 参照)を選定した。

検討ケースのうち case1 のシリーズは、水理学的に比較的良好な天然バリアシステム(NBS: Natural Barrier System)を想定するものであり、基本的に現状の処理処分技術を適用することを前提とする。

本検討では、case1-0 を低透水性 NBS 条件のレファレンスケースとした。

case1-1 は、廃棄体パッケージによる短期の閉じ込めを考慮しない、すなわち閉鎖後直ち

にパッケージが開口して核種が瞬時に間隙水に放出されるという、従来の仮定を踏襲するケースである。安全評価では case1-0 との比較によって、短期の閉じ込め期間の安全上の意味を確認する。

case1-2 は、より厳しい熱的制約条件の適用から廃棄体パッケージの定置密度を下げ、処分場全体のフットプリント（投影断面積）を拡大させた状況を想定する。case1-0 のレファレンス条件では、従来の検討のようにセメント系材料では 80°C、ベントナイト系材料では 100°C を最高温度としてこれを超えないような設計とする。これに対して、case1-2 では、例えば核種漏洩が開始する時点での温度を地温程度とするなど、より厳しいと考えられる制約条件を仮定する。

case1-3 は、放射性廃棄物の処分方法としての「第一種廃棄物埋設」（地層処分）と「第二種廃棄物埋設」（地層処分以外）との区別に関して設定された検討ケースである。本検討では TRU レベル 3 報告書の定義に倣い、最終処分法（法律，2012b）に基づいて地層処分対象となる廃棄物を決定している。一方、原子炉等規制法（法律，2012a）では、対象核種（C-14, Cl-36, Tc-99, I-129, 全 α ）の放射能濃度の基準値を示して、これを超えるものの埋設方法を「第一種廃棄物埋設」、それ以外の埋設方法を「第二種廃棄物埋設」としている。その結果、最終処分法で定義されるところの地層処分対象の放射性廃棄物の中には、原子炉等規制法で規定するところの「第一種廃棄物埋設」に相当する廃棄物と「第二種廃棄物埋設」に相当する廃棄物とが混在する結果となっている。従来の地層処分関連の研究では最終処分法に準拠した考え方で検討が進められているが、将来的に原子炉等規制法によって廃棄物をさらに峻別する可能性を考慮して、本ケースではこれらを区別して定置あるいは坑道配置するなどの手当てを施した設計検討を行い、その場合の影響について把握する。

検討ケースのうち case2 のシリーズは、透水性の高い天然バリアシステムを想定するものであり、TRU レベル 3 報告書において提案された高度化された処理処分技術を適用することによって安全性向上を目指すことを前提とする。

case2-0 は高透水性 NBS 条件のレファレンスとなるケースである。高度化処理処分技術としては、廃棄体グループ 1 については 10 万年の浸出期間を提供する代替ヨウ素固化技術を、廃棄体グループ 2 については閉じ込め期間 6 万年を実現する代替パッケージを、廃棄体グループ 3, 4 については新たに緩衝材層を追加することを想定する。ここで、代替ヨウ素固化技術としては、現状、HIP, BPI ガラス、高度化セメントが考えられている。case1-0 と同様に、基本的に短期の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージを想定するが、廃棄体グループ 2 では代替パッケージがそれ以上の性能を有するため、これを想定しないこととする。

case2-1 は、さらなる安全性向上のために、廃棄体グループ 3 について脱硝技術を適用することを想定するケースである。ここでは、廃棄物分類の見直しや脱硝技術採用による廃棄物量の見直し、さらにはそれに伴う設計の見直しは行わず、核種移行パラメータの変更のみによって、これを考慮することにとどめる。

case2-2 は、さらなる安全性向上のために、余裕深度処分と同様の低拡散層を設置することを想定するケースである。地層処分相当の地下深部での長期の低拡散性能に関する検討がなされていないことから、ここでは、余裕深度処分と同様のバリア構成としたときの設計への影響を把握することを目的とし、安全評価は実施しない。case3 は、金属製の廃棄体パッケージを想定した case1 に対して、コンクリート製の廃棄体パッケージを想定したケースである。この場合の設計とそれに基づく安全評価を実施する。

本検討の目的は、「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」である。そのため、主として水理条件の違いに応じて設定した表 3.3-1 に示す 2 つの人工バリアの処分概念の基本型（case1-0 と 2-0）を中心にそれらの適用範囲を把握する。つまり、低透水性概念の場合の廃棄体グループ 1~4 のそれぞれの概念の適用限界（適合する透水性の上限値の同定）と高透水性概念の場合の廃棄体グループ 1~4 のそれぞれの概念の適用限界（適合する透水性の上限値の同定）などを把握する。

3.4 処分システムの設計条件の整理

3.4.1 廃棄体特性が処分システムの概念構築に及ぼす影響

地層処分低レベル放射性廃棄物は、概してその発熱量が小さいため廃棄体を集中して処分することが可能である。また、その発生量が多いことから大断面内に集積して処分するのが合理的である。ただし、3.2 節で廃棄体特性について整理されたとおり、一部の廃棄体では発熱量が比較的大きく、それらに対しては発熱特性を考慮した設計上の対応が必要となる。本検討において発熱特性を考慮する廃棄体の発熱履歴特性を図 3.4.1-1 に示す。

(1) 人工バリアへの有意な熱影響の回避

発熱量の大きい廃棄体については、廃棄体からの放熱に伴う人工バリアの温度上昇によって、ベントナイト系あるいはセメント系バリアが有する安全機能を損なうような変質を生じないようにする必要がある。このため、廃棄体定置後の廃棄体、人工バリア、周辺岩盤などにおける温度の時間的変化を評価し、人工バリアの最高温度が一定の制限温度を下回るように、坑道断面内の廃棄体数を制限しなければならない。また、隣接する処分坑道の離間距離を十分確保することも必要となる。

(2) 閉鎖後安全性評価の観点からの熱影響の考慮

高レベル放射性廃棄物処分においても、バリア材への熱影響回避の観点から緩衝材温度が 100°C を上回らないように処分坑道、処分孔の配置を設定している。これに加え、第 2 次取りまとめ（JNC, 1999b）では、1 万年後までの温度経時変化を示し、閉鎖後安全性評価において、以下の条件を前提としている。

『設計で見込まれるオーバーパックの寿命 1,000 年において、ガラス固化体から生じる熱

および放射線の影響は無視できる程度にまで小さくなり，温度は10,000年以内に処分場周辺岩盤の初期の地温に等しくなる』。

これを地層処分低レベル放射性廃棄物処分場に適用する場合には，廃棄体の発熱の影響を低減する方法として，次の対処が考えられる。

- ・ある一定期間，パッケージにより放射性核種を閉じ込める
- ・廃棄体定置密度を下げる

ここでは，廃棄体パッケージに閉じ込め機能を仮定し，上記観点に着目した検討を実施することとする。

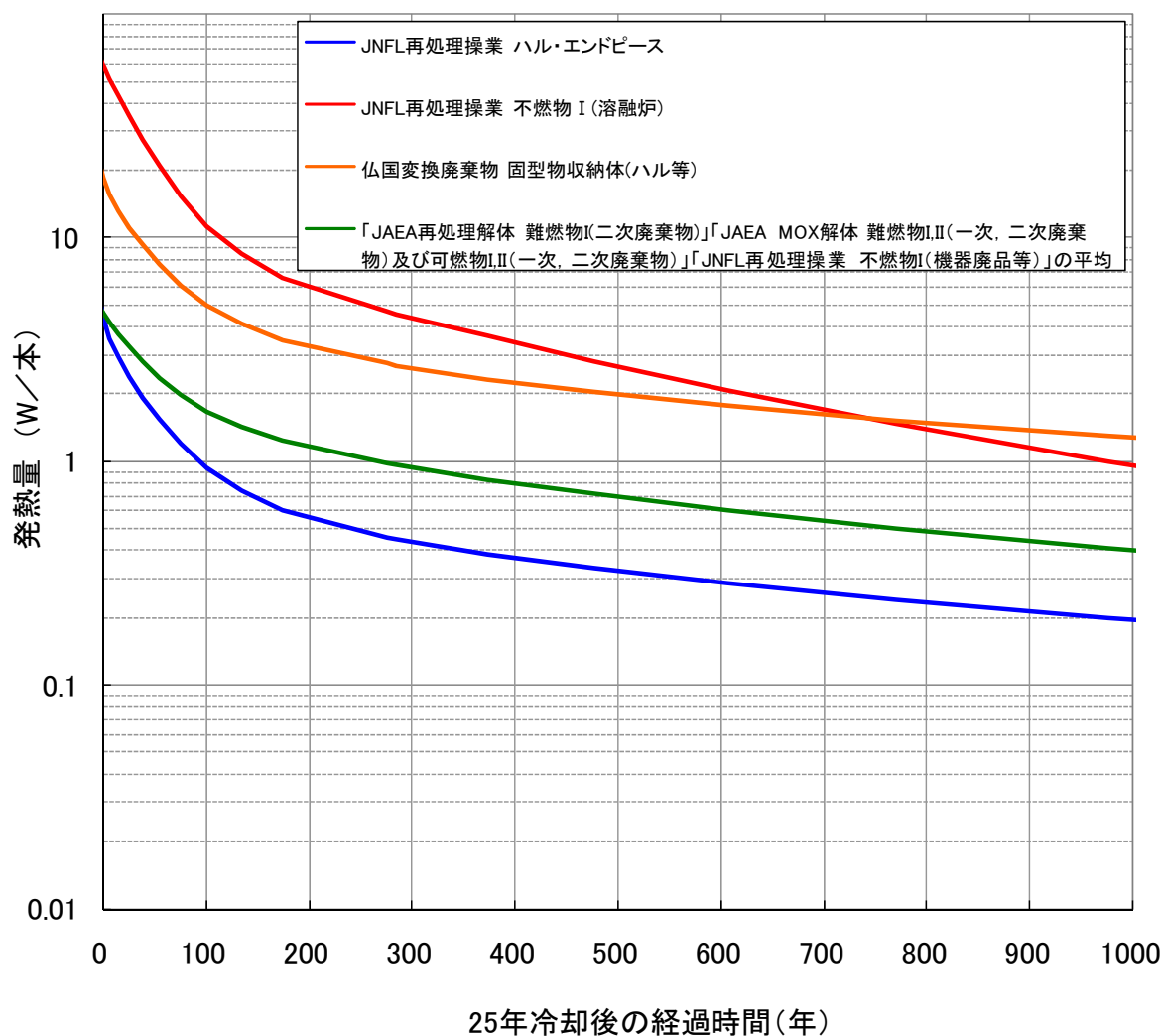


図 3.4.1-1 本検討で考慮する発熱性廃棄体の発熱履歴

3.4.2 廃棄体特性に応じた処分概念の構築

(1) 短期の核種閉じ込め容器の採用について

廃棄体パッケージの長期閉じ込め期間については、高レベルガラス固化体の閉じ込め期間である 1,000 年を上限とし、下記事項について検討して設定することとする。

- ①廃棄体の放射エネルギー、発熱量および毒性（経口摂取換算係数による線量）
- ②地下水移行シナリオの線量評価
- ③処分坑道内の温度評価

(i) 廃棄体の放射エネルギー、発熱量および毒性（経口摂取換算係数による線量）

廃棄体の放射エネルギー、発熱量および毒性（経口摂取換算係数による線量）の経時変化は図 3.4.2-1、図 3.4.2-2、図 3.4.2-3 に示すとおりであり、廃棄体グループごとに特徴がある。

廃棄体グループ 1 は支配核種が長半減期核種である I-129 であるため、その放射エネルギー、発熱量および毒性の経時変化は見られない。

廃棄体グループ 2 は放射エネルギー、発熱量および毒性で支配核種が異なる。放射エネルギーの支配核種は Ni-63, Sr-90, Cs-137, Ni-59 などであり、発熱量および毒性の支配核種は Sr-90, Cs-137, Pu-238/239/240/241 および Am-241 などである。Sr-90 と Cs-137 は半減期が約 30 年であることから、100 年で約 1/10, 300 年で約 1/1,000 に低減する。地層処分低レベル放射性廃棄物の核種のうち、Pu-238 と Pu-241 は半減期が 87.7 年と 14.4 年であるため、放射エネルギーの減衰が期待できるが、それ以外の核種については、1,000 年では有意な放射能減衰は期待できない。

廃棄体グループ 3 の放射エネルギー、発熱量および毒性の支配核種は、Pu-238/239/240/241 および Am-241 などである。放射エネルギーは 100 年で約 1/10, 1,000 年で約 1/50 に低減するが、発熱量は、1,000 年後においても約 1/3 低減するのみである。なお、廃棄体グループ 3 の発熱量は、廃棄体グループ 2 および 4 に比較すれば、十分小さい。

廃棄体グループ 4 は放射エネルギー、発熱量および毒性の支配核種は、Sr-90, Cs-137, Pu-238/239/240/241 および Am-241 などであり、発熱量は数 10 年後から低減しはじめ、500 年後に約 1/10 に低減する。廃棄体グループ 4 の中には、発熱量の高い廃棄物が存在する。JNFL の不燃物 I（溶融炉）と JAEA の不燃物 II（金属 II：溶媒フィルタ）について、放射エネルギーと発熱量の経時変化を図 3.4.2-4 に示す。不燃物 I（溶融炉）が、廃棄体グループ 4 の放射エネルギーと発熱量をほとんど支配している。

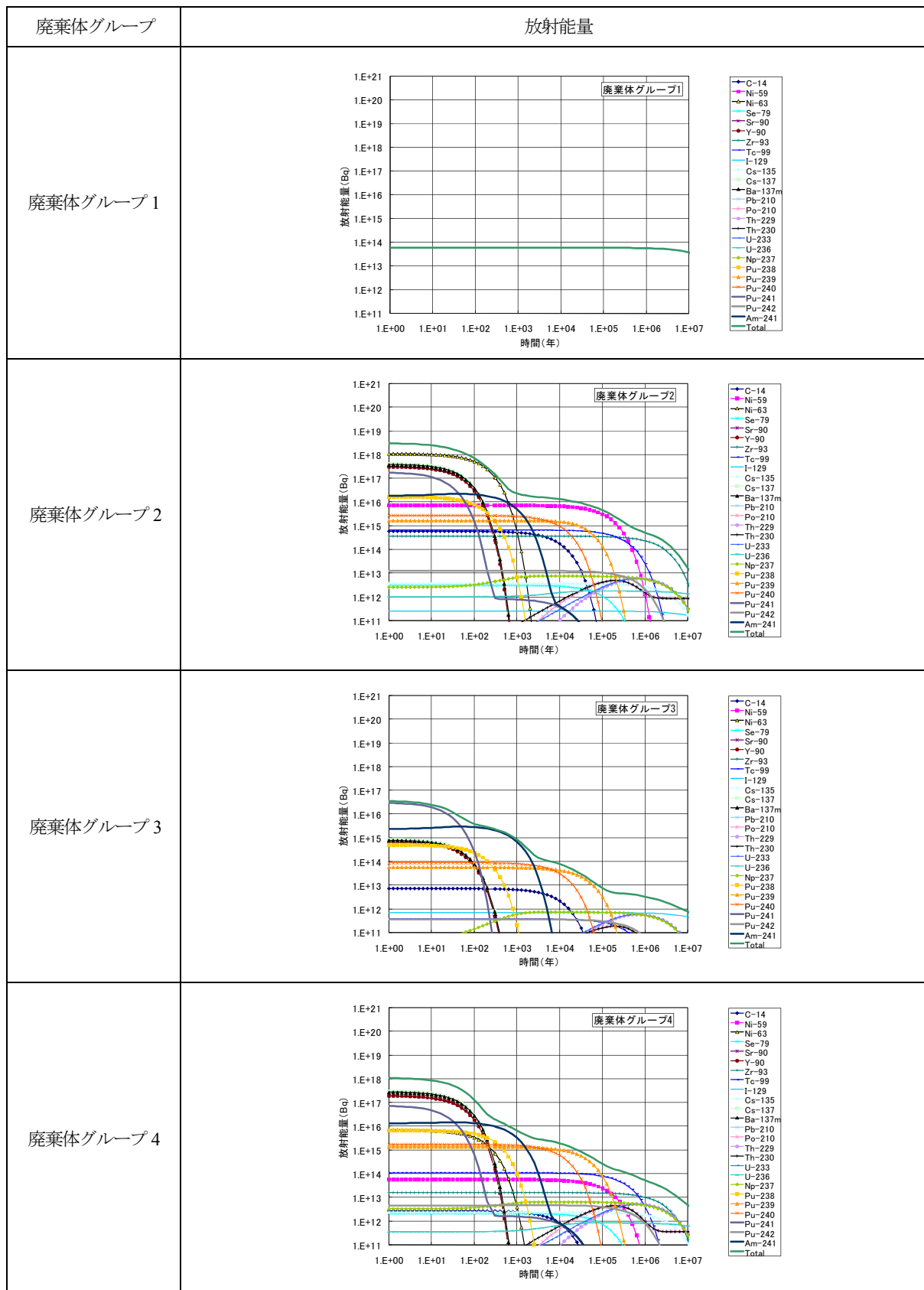


図 3.4.2-1 各廃棄体グループの放射エネルギーの経時変化

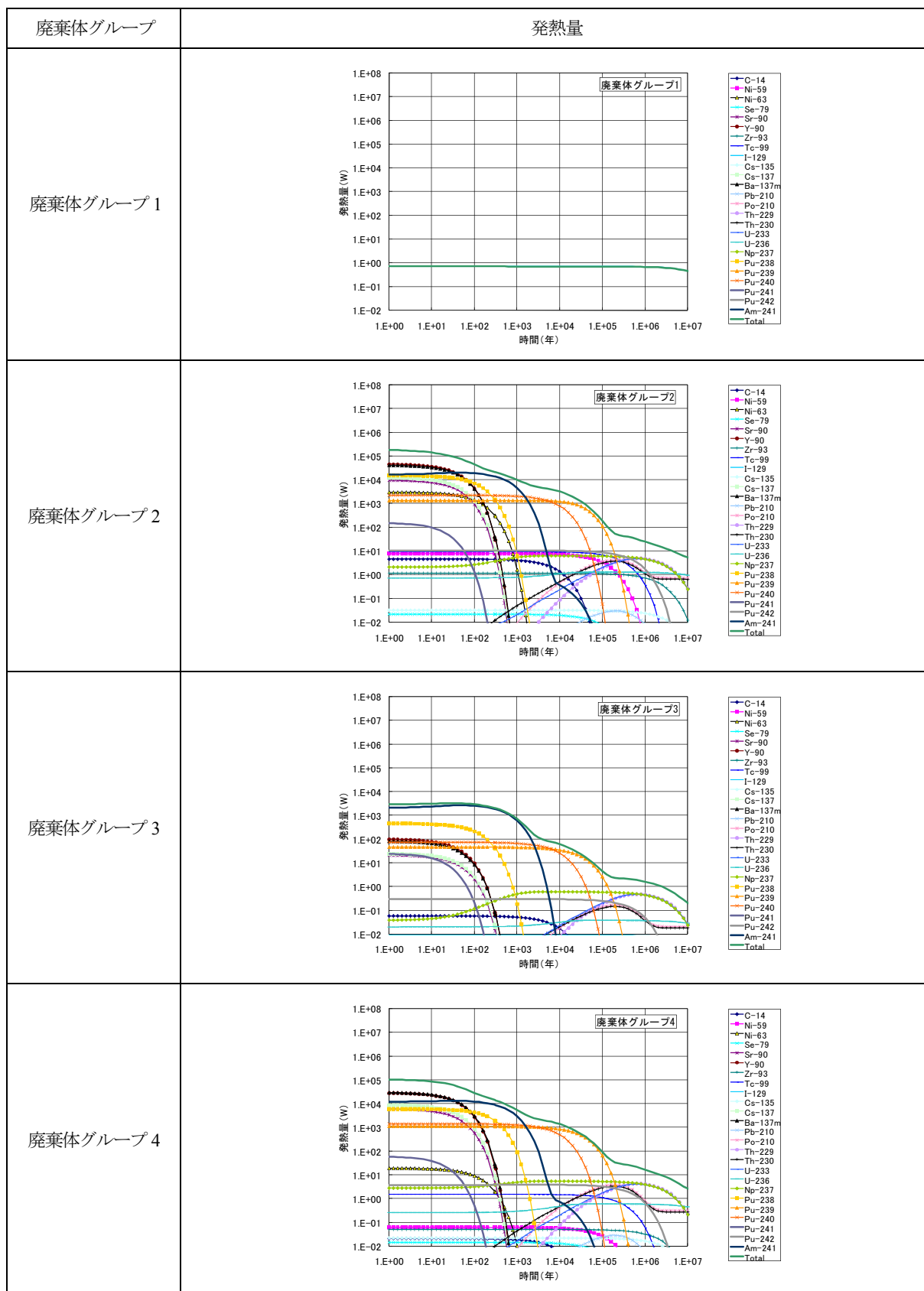


図 3.4.2-2 各廃棄体グループの発熱量の経時変化

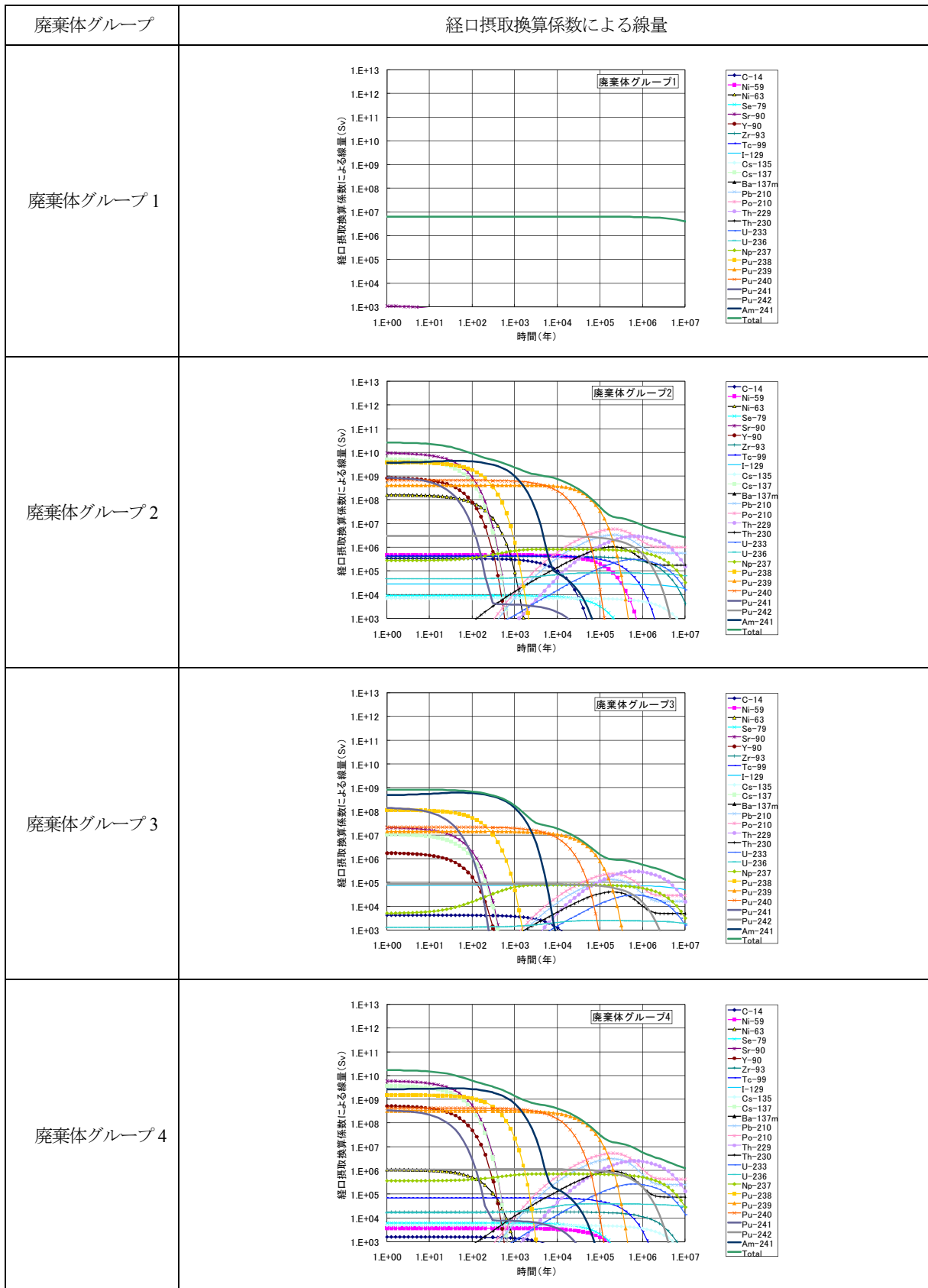


図 3.4.2-3 各廃棄体グループの経口摂取換算線量の経時変化

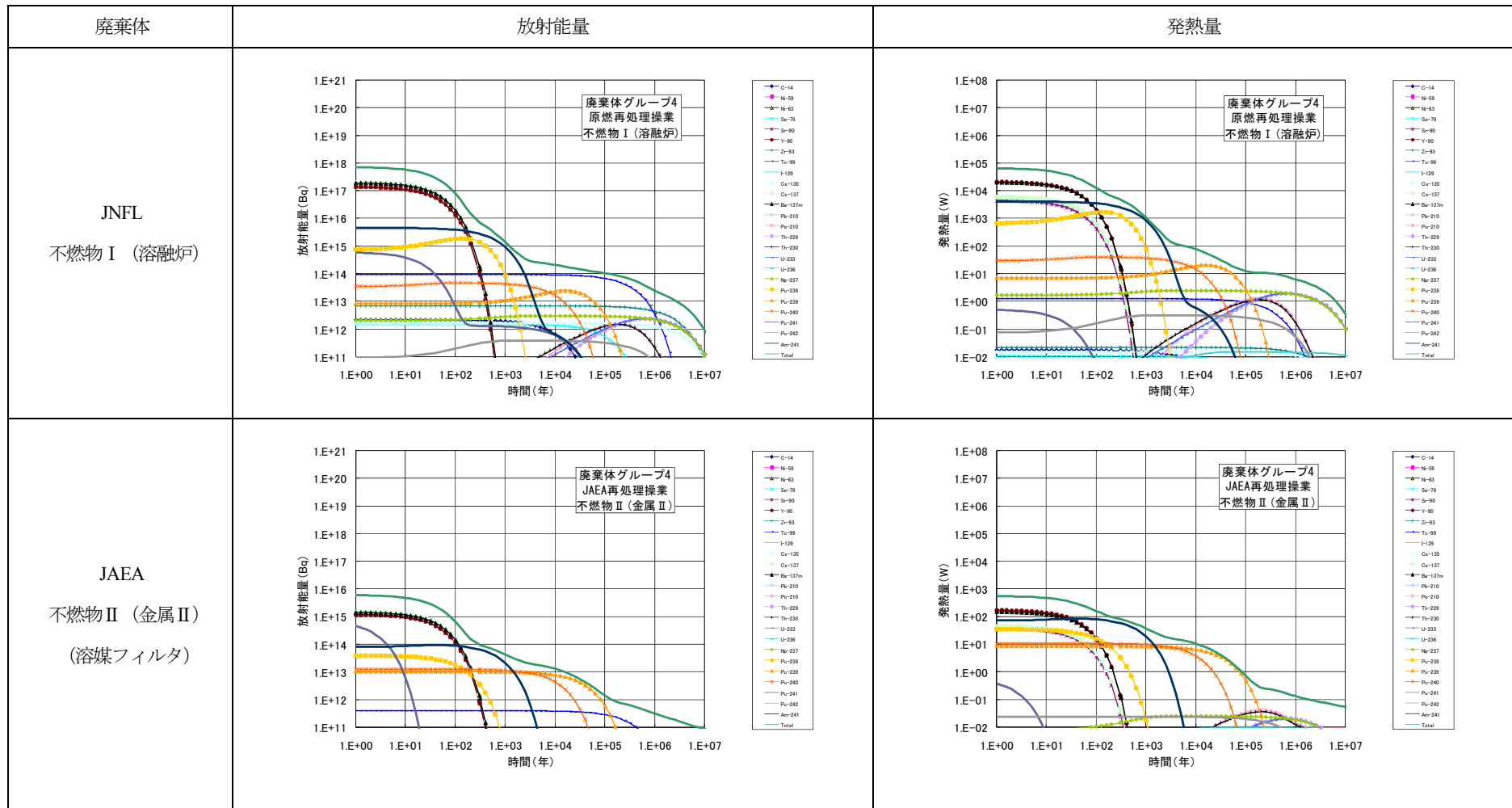


図 3.4.2-4 高発熱量廃棄体 (Gr. 4H) の放射エネルギーと発熱量の経時変化

(ii) 地下水移行シナリオの線量評価

廃棄体グループごとの線量評価結果は、図 3.4.2-5 に示すとおりである。レファレンスケースにおいては、廃棄体パッケージの閉じ込め期間を 100, 300, 500 および 1,000 年としても線量ピークは低減しないが、線量カーブの立ち上がり時期は閉じ込め期間に応じて遅くなる効果はある。

透水係数がレファレンスの 1,000 倍となるケースでは、廃棄体グループ 1 と 3 は支配核種が I-129 であることから線量ピークは低減しない。これに対し、廃棄体グループ 2 と 4 は閉じ込め期間が 100 年を超えると線量ピークが低減し始め、300→500→1,000 年になるにつれて線量ピークは低減するが、500 年と 1,000 年では有意な差異はない。

(iii) 処分坑道内の温度評価

ハル・エンドピース (JNFL 再処理操業ハル・エンドピースおよび仏国返還固型物収納体：ハルなど) と JNFL 不燃物 I (溶融炉) を対象とした場合の、結晶質岩系岩盤の処分深度 1,000 m における処分坑道内の温度評価結果は、図 3.4.2-6 に示すとおりである。この図 3.4.2-6 は、セメント系材料とベントナイト系材料の変質を抑制する観点で設定された制限温度 (それぞれ 80°C と 100°C) を満足する設計に基づいた熱解析の結果である。このように、既存の評価では、坑道内の温度制限値として、バリア材料の変質を抑制するための温度が示されている。しかし、拡散・移流による核種移行への影響の観点からの温度制限値は示されていない。高温環境が予想される状況での核種移行解析の信頼性を向上させるためには、解析の対象とする環境が、使用するデータの適用範囲内である必要がある。ここでは、暫定的に、HLW で示された核種移行開始時の温度 60 度をこのようなデータの適用範囲の制限値とみなし、この温度を目標値として、この温度を超えない設計を行うこととした。図 3.4.2-6 から、発熱性の廃棄体の場合、60 度以下の温度になる処分後の経過時間は、1000 年から数 100 年であることがわかる。この処分坑道内の温度は処分坑道断面および廃棄体定置密度に依存して変化するものである。このことから、本検討では、数 100 年の閉じ込め期間を設定し、廃棄体の発熱率に応じた設計を行うことによって、核種溶出開始時の目標温度 (60°C 程度) 以下にすることが可能であると考えた。

(iv) まとめ

上記の検討結果に基づき、地層処分低レベル放射性廃棄物の性能評価の信頼性を向上させ、かつ、処分施設を合理的に設計するために、廃棄体パッケージの短期閉じ込め期間を 500 年に設定した。

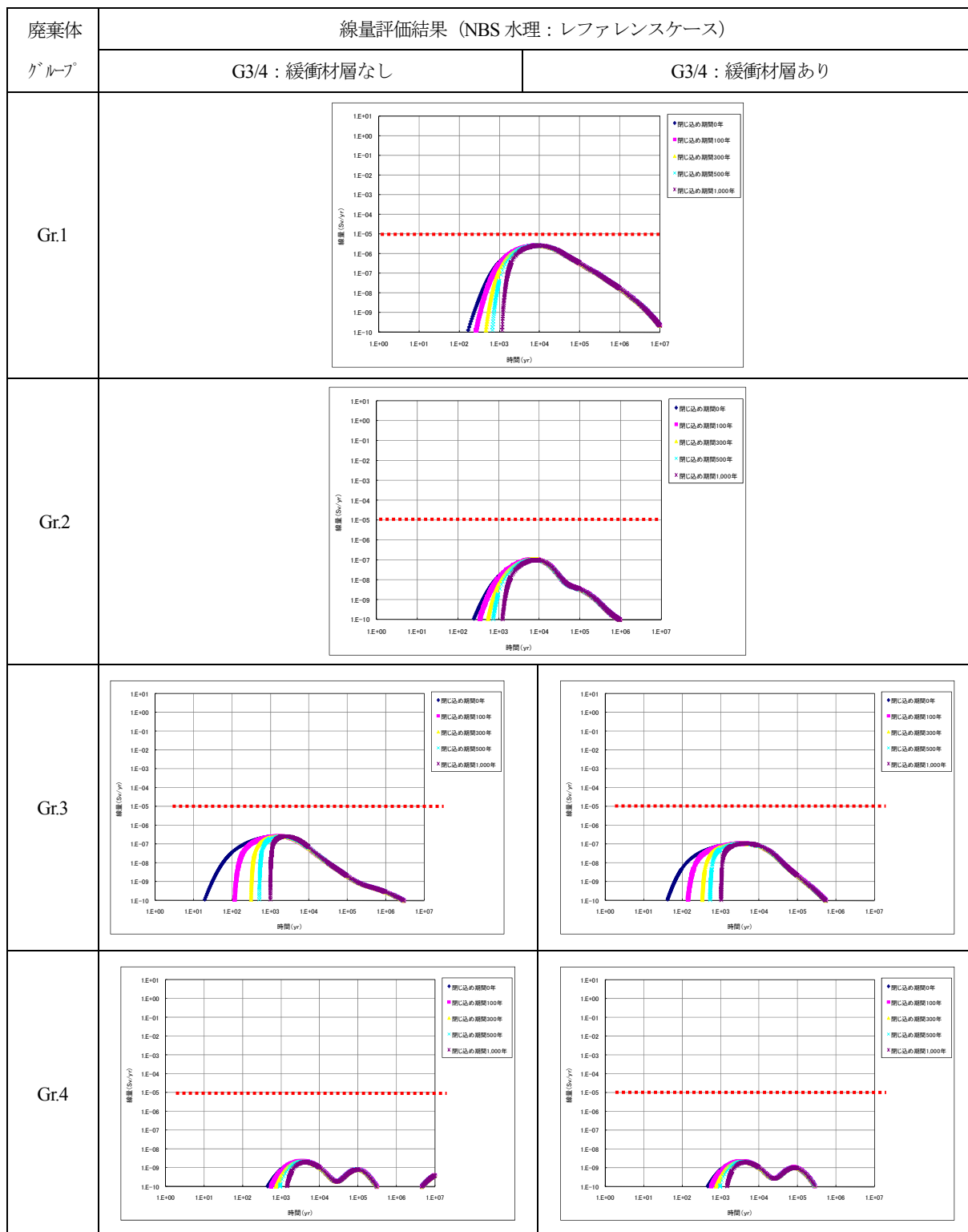


図 3.4.2-5 各廃棄体グループの線量評価結果
(NBS 水理：レファレンスケース)

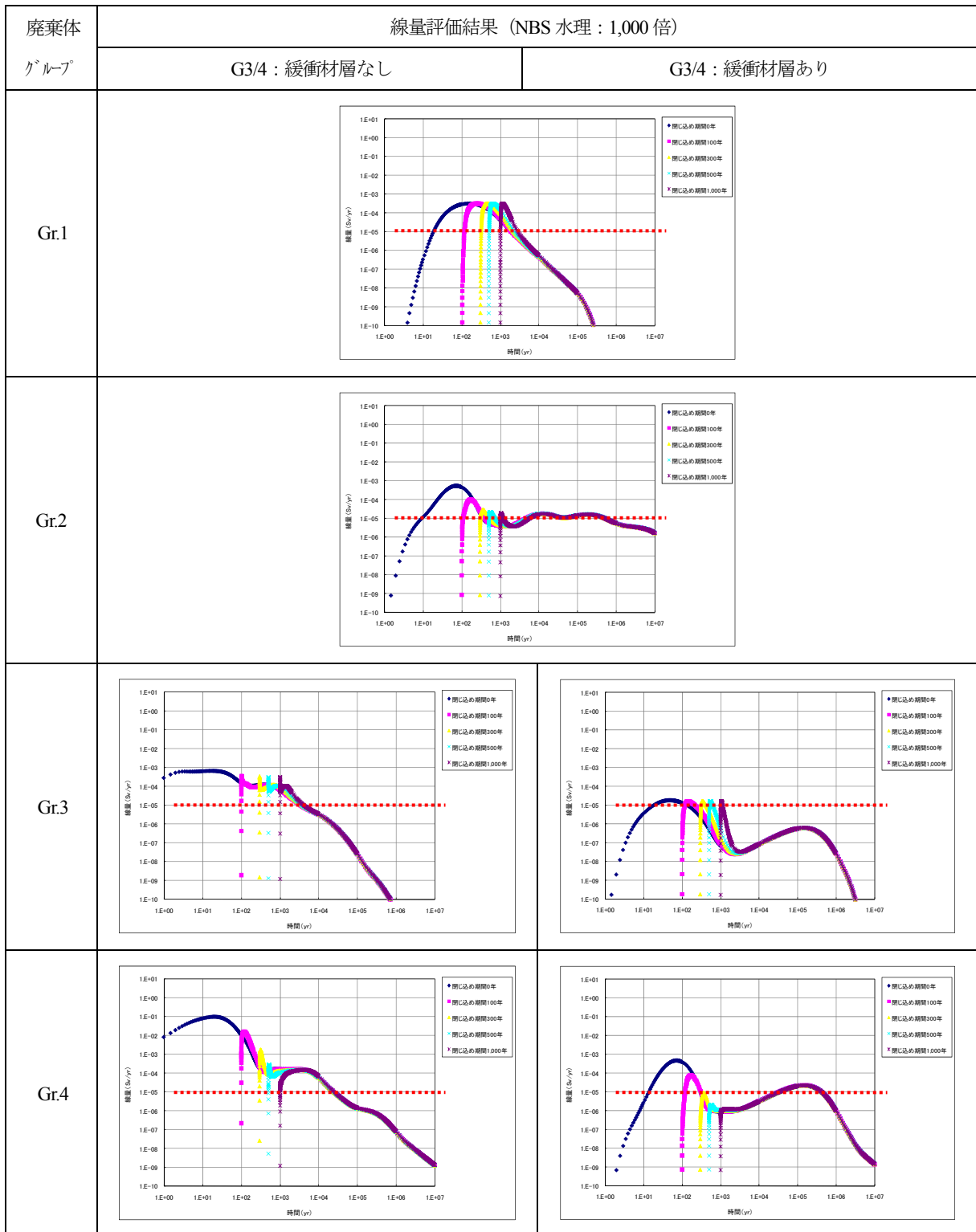


図 3. 4. 2-5 各廃棄体グループの線量評価結果
(NBS 水理 : 1, 000 倍)

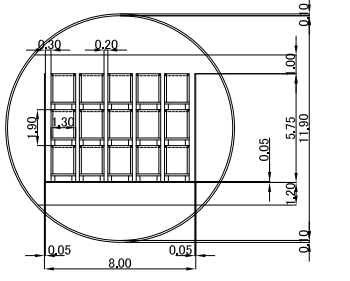
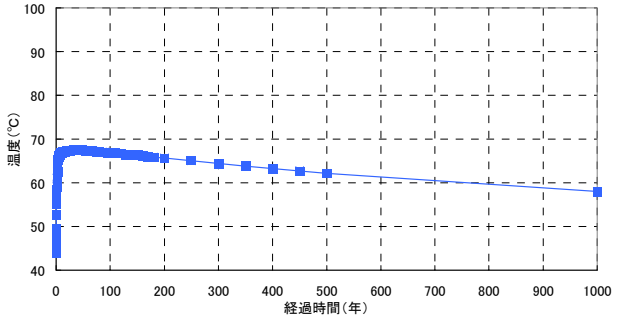
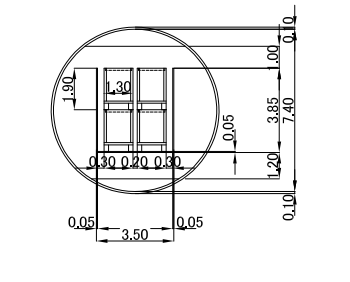
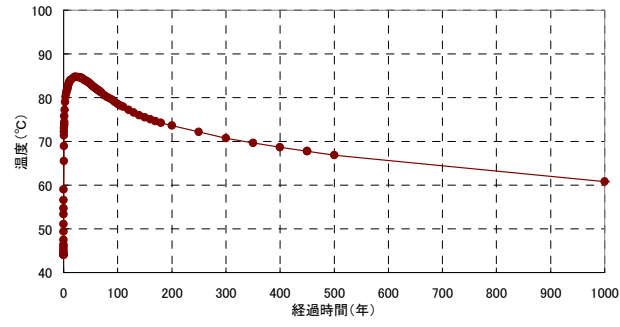
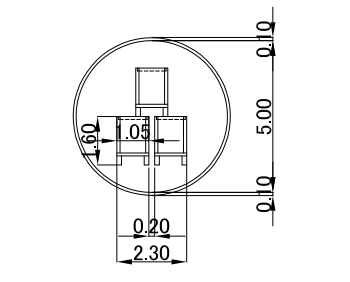
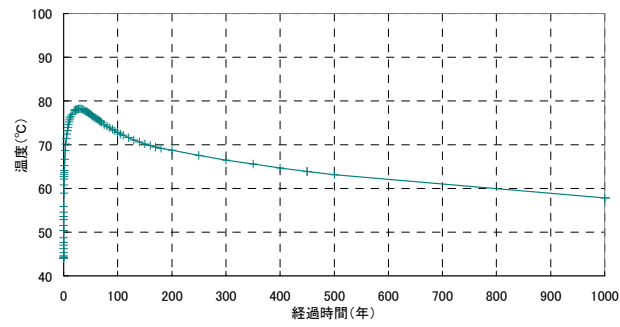
廃棄物	処分坑道断面	熱解析結果
ハル・エン ドピース 上段 (JNFL 再 処理操業 ハル・エン ドピース)		
下段(仏国 返還固型 物収納体 (ハルな ど) CSD-C		
JNFL 不燃物 I (溶融炉)		

図 3.4.2-6 発熱廃棄体の熱解析結果

(2) 廃棄体パッケージの検討

先述のように、本検討では、200ℓドラム缶やキャニスタなどの廃棄体は、廃棄体パッケージに収納されて最終廃棄体となる。本検討での前提として、廃棄体パッケージは閉鎖後500年の核種閉じ込めを実現可能な仕様を有しているものとする。

(i) 金属製パッケージ

200ℓドラム缶用、キャニスタ用、インナーバレル用、ハル缶用、および角型容器用に金属製の廃棄体パッケージの仕様は異なるが、その材質は炭素鋼、10 cmの肉厚を有することは共通とする。各廃棄体パッケージの諸元を表 3.4.2-1 に示す。

表 3.4.2-1 金属製廃棄体パッケージの諸元

対象	廃棄物グループ	収納個数	外寸法(mm)	充填材	全重量
200ℓドラム缶	Gr.1, 3, 4HG, 4LHG	4本	□1600×H1450	モルタル	158 kN
キャニスタ	Gr.2	4本	□1300×H1900	なし (支持格子)	146 kN
インナーバレル	Gr.4HG	2本	1800×1050×H1600	モルタル	124 kN
ハル缶	Gr.4HG	2本	1800×1050×H1600	モルタル	123 kN
角型容器	Gr.4LHG	1体	□1900×H1900	モルタル	300 kN

(ii) コンクリート製パッケージ

コンクリート製の廃棄体パッケージについては、CSD-Cのキャニスタを対象とした閉じ込め機能を有する設計のものと、200ℓドラム缶を対象とした閉じ込め機能のない設計のものとの検討を実施した。廃棄体パッケージの材質は鉄筋コンクリート、閉じ込め機能を有するものでは15 cm、閉じ込め機能のないものでは14 cmの肉厚を有する設計となっている。各廃棄体パッケージの諸元を表 3.4.2-2 に示す。

表 3.4.2-2 コンクリート製廃棄体パッケージの諸元

対象	廃棄物グループ	収納個数	外寸法(mm)	充填材	全重量
キャニスタ 閉じ込め性あり	Gr.2	4本	□1400×H2050	モルタル	106 kN
200ℓドラム缶 閉じ込め性なし	Gr.1, 3, 4HG, 4LHG	4本	□1800×H1500	モルタル	116 kN

(3) 発熱性廃棄体におけるセメント系材料の取り扱い

発熱性廃棄体の近傍にセメント系材料が使用された場合、セメント製作時に取り込まれた水和水や間隙水が高線量条件下で放射線分解され、水素ガスが発生する可能性が懸念される。セメント系材料は、安価で使用実績も豊富な人工バリア材料のひとつであるが、このような理由から発熱性廃棄体近傍での使用には注意が必要である。

図 3.4.2-7 に示すように、廃棄体近傍でのセメント系材料の利用部位としては、①廃棄体中の固型化材料¹³、②廃棄体パッケージ内の充填材、③処分坑道内での廃棄体パッケージ間の充填が考えられる。

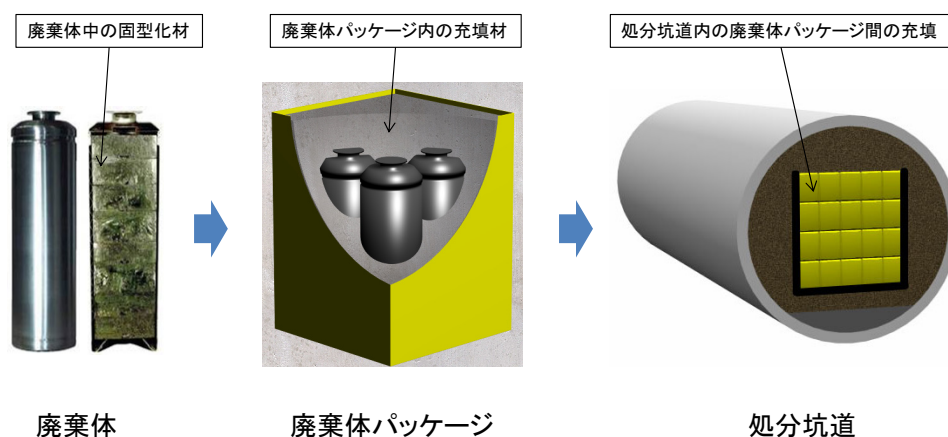


図 3.4.2-7 廃棄体近傍におけるセメント系材料の利用

発熱性廃棄体、すなわち廃棄物グループ 2 および廃棄物グループ 4（発熱性）の人工バリアにおける、これら各利用部位におけるセメント系材料の利用を表 3.4.2-3 に整理する。

廃棄体グループ 2 では、処分坑道内での廃棄体パッケージ間の充填に利用する以外は、キャニスタ内では充填材なし、廃棄体パッケージ内も金属製の支持格子を有する構造として充填材なし、という設計としている。この設計は、発熱性廃棄体近傍でのセメント系材料の使用を可能な範囲で制限するという、上記の考え方を踏襲するものである。

これに対して、廃棄体グループ 4（発熱性）では、いずれの部位においてもセメント系材料を使用する設定となっている。これは、廃棄体グループ 4（発熱性）に分類されるような発熱率の高い廃棄物については、廃棄物発生者側においてもまだ十分な検討がなされているわけではなく、セメント充填することを仮定しているためである。現実的な問題として、高線量の廃棄物に対して、これを払い出す時点でセメント充填固化することが技術的に可能か否かについては課題となっている。そのため、今後、廃棄体グループ 4（発熱性）の廃棄物の仕様、およびそれを収納する廃棄体パッケージの仕様についてはより詳細な再検討が必要である。本検討では、暫定的に、同グループの廃棄体近傍にもセメント系材料の使用を許容する設定とした。

¹³主に解体廃棄物として発生する汚染コンクリートなど、廃棄物そのものがセメント系材料である場合を含む。

表 3.4.2-3 発熱性廃棄体におけるセメント系材料の利用

	固型化材	パッケージ内充填	パッケージ間充填材
廃棄体グループ2	なし	なし (支持格子)	セメント充填
廃棄体グループ4 (発熱性)	セメント充填	セメントモルタル	セメント充填

(4) 発熱性廃棄体における温度評価点の考え方

次項では、廃棄体特性を勘案しながら処分坑道設計および処分場レイアウトの検討を行う。特に発熱性廃棄体では、熱の影響を考慮しながら、熱的制約条件を満足するような仕様 (バリア構成、定置密度、離間距離など) の処分坑道設計が検討されることとなる。

地層処分低レベル放射性廃棄物の人工バリア材として使用されることが予想されるセメント系材料およびベントナイト系材料では、期待される収着性能の発現を確保する条件として、前者では 80°C未満、後者では 100°C未満の熱的制約条件が一般的に設定されている。そこで本項では、セメント系材料の使用箇所と、同材料に対して安全評価において収着媒体としてバリア機能 (収着性) を期待するか否かを勘案しながら、熱解析における温度評価点としてどの部分に注目すべきかを検討した。評価結果を図 3.4.2-8～図 3.4.2-10 に示す。

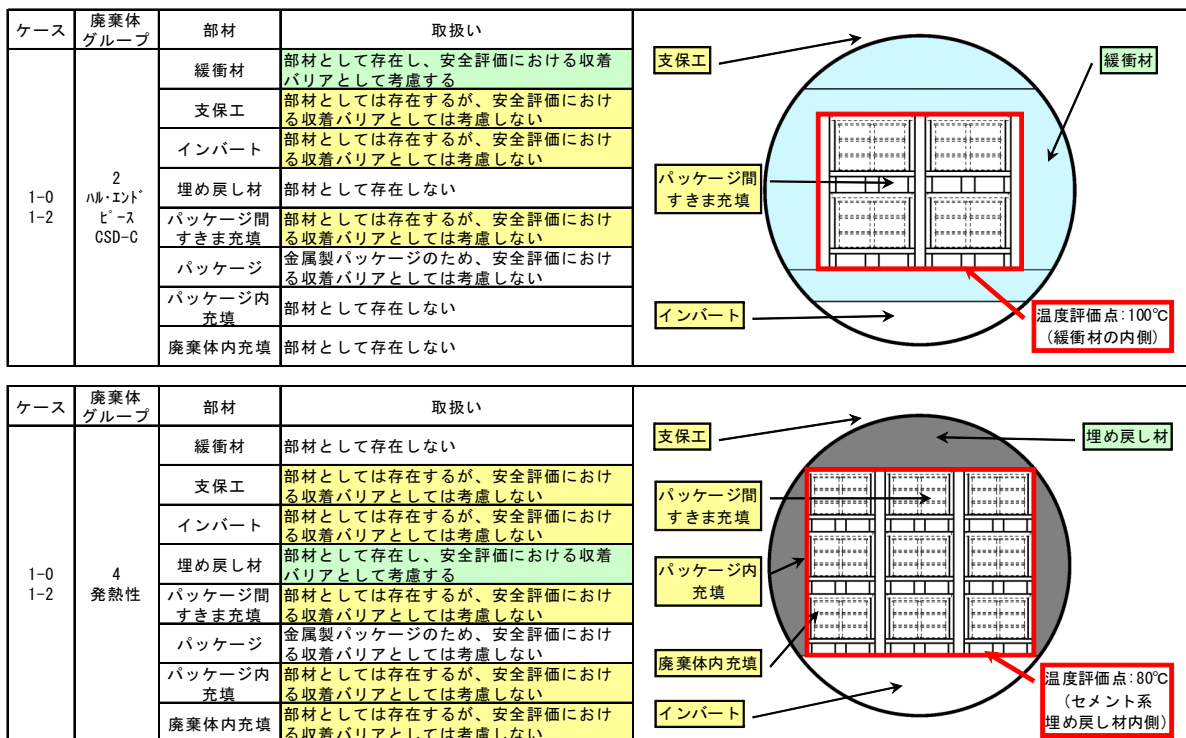


図 3.4.2-8 温度評価点の考え方 (case 1-0, 1-2)

ケース	廃棄体グループ	部材	取扱い
2-0	2 ハル・エント ピース GSD-C	緩衝材	部材として存在し、安全評価における収着バリアとして考慮する
		支保工	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		インバート	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		埋め戻し材	部材として存在しない
		パッケージ間すきま充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ	代替金属製パッケージのため、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ内充填	部材として存在しない
		廃棄体内充填	部材として存在しない

ケース	廃棄体グループ	部材	取扱い
2-0	4 発熱性	緩衝材	部材として存在し、安全評価における収着バリアとして考慮する
		支保工	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		インバート	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		埋め戻し材	部材として存在しない
		パッケージ間すきま充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ	金属製パッケージのため、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ内充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		廃棄体内充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない

図 3.4.2-9 温度評価点の考え方 (case 2-0)

ケース	廃棄体グループ	部材	取扱い
3-0	2 ハル・エント ピース GSD-C	緩衝材	部材として存在し、安全評価における収着バリアとして考慮する
		支保工	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		インバート	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		埋め戻し材	部材として存在しない
		パッケージ間すきま充填	部材として存在し、安全評価における収着バリアとして考慮する
		パッケージ	コンクリートパッケージではあるが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ内充填	部材として存在しない
		廃棄体内充填	部材として存在しない

ケース	廃棄体グループ	部材	取扱い
3-0	4 発熱性	緩衝材	部材として存在しない
		支保工	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		インバート	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		埋め戻し材	部材として存在し、安全評価における収着バリアとして考慮する
		パッケージ間すきま充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ	コンクリートパッケージではあるが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		パッケージ内充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない
		廃棄体内充填	部材としては存在するが、安全評価における収着バリアとしては考慮しない

図 3.4.2-10 温度評価点の考え方 (case 3-0)

(5) 地質環境条件ごとの短期および長期の熱的制限を考慮した処分場設計

(i) 処分場設計の方針

(a) 前提条件

a) グループ分類および廃棄体数量

3.2 節で整理した 5 グループの廃棄体を対象とする。各廃棄体の数量を表 3.4.2-4 に示す。

表 3.4.2-4 設計に用いる廃棄体数量

グループ	廃棄体容器種類	本数	体積 (m ³)
Gr.1	ドラム缶	1,673	335
Gr.2	キャニスタ	31,332	6,083
Gr.3	ドラム缶	27,441	5,492
Gr.4L	ドラム缶	24,076	4,845
	角型容器	287	884
Gr.4H	ドラム缶	4,587	921
	インナーバレル	1,134	433
	ハル缶	54	25

b) 環境条件

処分環境としては、既往検討の設定と同様に以下の条件とする。

結晶質岩：処分深度 1000 m，処分深度における初期地温は 45℃，候補岩体の力学特性は HLW 第 2 次取りまとめの「HR」相当とする。

堆積岩：処分深度 500 m，処分深度における初期地温は 30℃，候補岩体の力学特性は HLW 第 2 次取りまとめの「SR-C」相当とする。

c) 廃棄体パッケージと人工バリア

廃棄体パッケージとして金属製およびコンクリート製パッケージを想定する(表 3.4.2-5 および表 3.4.2-6)。各検討ケースにおける人工バリア構成は前節に示すとおりである。なお、ベントナイト緩衝材を設置するケースでは、拡散場を担保する観点などから、設計厚さとして 1 m を確保し、底部ベントナイトについては、圧密沈下を考慮した余裕代を見込み 1.2 m を確保する。人工バリアとして低拡散層の設置を考える case2-2 では、余裕深度処分の検討を参考に低拡散層の厚さを 60 cm とする。

表 3.4.2-5 廃棄体パッケージの仕様 (金属製)

材質	種類	形状 (外寸法) (mm)	ハンドリング方法
金属製	ドラム缶	□1600×H1450	フォークポケット
	キャニスタ	□1300×H1900	〃
	ハル缶/ インナーバレル	1050×1800×H1600	〃
	角型容器	□1900×H1900	〃

表 3.4.2-6 廃棄体パッケージの仕様（コンクリート製）

材質	種類	形状（外寸法）(mm)	ハンドリング方法
コンクリート製	ドラム缶	□1950×H1600	フォークポケット
	キャニスタ	□1500×H2050	〃
	ハル缶／ インナーバレル	1200×2250×H1700	〃
	角型容器	□2200×H1900	〃

(b) 検討方法

本検討では、処分坑道の形状として単純な円形坑道を対象とする。処分坑道の設計においては、力学的安定性および熱的制約条件を考慮する。本検討で採用した方針を以下に示す。

a) 力学的安定性

力学的安定性としては、掘削時および地震時の安定性を考慮する必要がある。このうち、地震時の応力・ひずみの影響は掘削時に比較して非常に小さいことが示唆されている（NUMO, 2011b）ため、ここでは考慮しない。掘削時の力学的安定性について、ここでは第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）での方針を踏襲し、坑道内径を最大 12 m、坑道離間距離は坑道掘削径の 3 倍以上とることとする。処分坑道の最小径は 5 m とする。

b) 熱的制約

人工バリアへの有意な熱影響を回避する観点から以下の温度条件を設定する。

- ・セメント系材料：最高温度 80℃以下
- ・ベントナイト系材料：最高温度 100℃以下

セメント系材料が発熱性廃棄体の周囲に充填され、ベントナイト緩衝材がその外側に設置される場合、前者の条件が満足されれば後者の条件が満足されることは自明である。そのため、既往検討においては、坑道断面の廃棄体定置領域の中心における最高温度を 80℃以下とすることが熱的制約条件とされてきた。

一方、本検討では廃棄体グループ 2 の発熱性廃棄体に対して、パッケージ内部をセメント系材料で充填しないこととした。また、セメント系材料の収着機能の影響に関する感度検討結果から、安全評価上はパッケージとパッケージの間のセメント充填材の収着機能を保守的に無視することとした。これらのことから、本検討では一律に廃棄体領域中心の温度に着目するのではなく、バリア機能を期待する人工バリアの位置に応じた制限温度を考慮する（表 3.4.2-7 参照）。なお、金属製パッケージについては、製作時の溶接による熱の影響を別途考慮すべきであり、留意が必要である。

① case1-0, case1-2, case2-0 の廃棄体グループ 2 (緩衝材有り)

廃棄体グループ 2 の金属製廃棄体パッケージでは、パッケージ内部にセメントを充填しない。パッケージ間にはセメントを充填するが、安全評価上はパッケージ間の充填材に収着性能を期待しない。したがって、case1-0, case1-2 および case2-0 の廃棄体グループ 2 では、バリア機能を期待する最も内側のバリアである緩衝材の温度に着目し、制限温度を 100°C とする。なお case1-2 では、制限温度に加えて、核種漏洩が始まると想定する 500 年後の許容温度 (HLW の既存の安全評価の考え方に準拠) を地温+15°C (=60°C, 結晶質岩の場合) および地温+10°C (=40°C, 堆積岩の場合) とする。

② case1-0, case1-2 の廃棄体グループ 4 (発熱性) (緩衝材無し)

廃棄体グループ 4 (発熱性) の金属製パッケージでは、パッケージ内部をセメント充填するが、安全評価上は充填材に収着性能を期待しない。したがって、緩衝材を敷設しない case1-0 および case1-2 の廃棄体グループ 4 (発熱性) では、バリア機能を期待する内側のバリアであるセメント埋戻し材 (廃棄体領域の外側) の温度に着目し、制限温度を 80°C とする。なお case1-2 では、制限温度に加えて、核種漏洩を想定する 500 年後の許容温度を地温+15°C (=60°C, 結晶質岩の場合) および地温+10°C (=40°C, 堆積岩の場合) とする。

③ case2-0 の廃棄体グループ 4 (発熱性) (緩衝材有り)

case2-0 の廃棄体グループ 4 (発熱性) では、金属製廃棄体パッケージ内部およびパッケージ間をセメントで充填するが、これら充填材に安全評価上の収着性能を期待しない。したがって、case2-0 の廃棄体グループ 4 (発熱性) では、バリア機能を期待する最も内側のバリアである緩衝材の温度に着目し、制限温度を 100°C とする。

④ case2-2 (緩衝材内側に低拡散層設置)

case2-2 では、緩衝材の内側に低拡散層が設置される。廃棄体グループ 2 ではパッケージ内部はセメント充填されず、廃棄体グループ 4 (発熱性) ではセメント充填される。こうした違いはあるが、case2-2 では廃棄体グループ 2 および廃棄体グループ 4 (発熱性) と同様に、バリア機能として充填材の収着性能を期待しない。case2-2 では最も内側のバリアである低拡散層の温度に着目し、制限温度を 80°C と設定する。

⑤ case3-0 (コンクリート製パッケージ採用)

case3-0 ではコンクリート製パッケージを採用する。バリア機能を期待する部位は金属製パッケージと同様、廃棄体グループ 2 では緩衝材、廃棄体グループ 4 (発熱性) ではセメント系埋戻し材とする。ただし、コンクリート製パッケージに短期の閉じ込め性をもたせるため、ここでは、コンクリートが変質しない温度として従来採用されている 80°C をパッケージ部材の制限温度として適用する。

表 3.4.2-7 各検討ケースにおける制限温度と温度評価点

ケース	岩種	廃棄体 Gr.	人工バリア構成	制限温度[°C]	温度評価点	核種漏洩開始時の許容温度[°C]
case1-0 (低透水性 NBS レファ レンス)	結晶質岩 および 堆積岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	100	緩衝材の内側 ¹⁾	—
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材	80	セメント系 埋戻し材の内側 ²⁾	—
case1-2 (低定置密 度)	結晶質岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	100	緩衝材の内側 ¹⁾	60
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材	80	セメント系 埋戻し材の内側 ²⁾	60
	堆積岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	100	緩衝材の内側 ¹⁾	40
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材	80	セメント系 埋戻し材の内側 ²⁾	40
case2-0 (高透水性 NBS レファ レンス)	結晶質岩 および 堆積岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	100	緩衝材の内側 ¹⁾	—
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	100	緩衝材の内側 ³⁾	—
case2-2 (低拡散層 適用)	結晶質岩 および 堆積岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +低拡散層 +緩衝材	80	低拡散層 の内側 ⁴⁾	—
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材 +低拡散層 +緩衝材	80	低拡散層 の内側 ⁴⁾	—
case3-0 (低透水性 NBS, コン クリートパ ッケージ適 用)	結晶質岩 および 堆積岩	Gr.2	最終廃棄体 +充填材 +緩衝材	80	パッケージ ⁵⁾	—
		Gr.4H	最終廃棄体 +充填材	80	パッケージ ⁵⁾	—

- 1) パッケージ内にセメントを充填しない。パッケージ間にはセメントを充填するが安全評価上のバリア機能は期待しない。バリア機能を期待する最も内側のバリア材料である緩衝材の温度に着目。
- 2) パッケージ内にセメント充填するが、安全評価上のバリア機能は期待しない。バリア機能を期待する最も内側のバリアであるセメント系埋戻し材（廃棄体領域の外側）の温度に着目。
- 3) パッケージ内、パッケージ間にセメント充填するが、これらに安全評価上のバリア機能は期待しないため、バリア機能を期待する最も内側のバリアである緩衝材の温度に着目。
- 4) 緩衝材の内側に低拡散層が設置される。パッケージ内とパッケージ間のセメント充填材にはバリア機能を期待しない。バリア機能を期待する最も内側のバリアである低拡散層の温度に着目。
- 5) 収着性の観点から C-S-H ゲルが結晶化しない制限温度として従来採用されている 80°Cをコンクリート製パッケージに適用。

c) 処分坑道中の廃棄体定置数

処分坑道断面の廃棄体パッケージの配置については、従来通りの集積配置を基本とする。坑道断面内の廃棄体パッケージの定置にあたっては、表 3.4.2-8 に示すクリアランスを考慮する。この設定により、クリアランスを考慮していなかった既往検討 (NUMO, 2011a) に対し、処分坑道長が長くなることが想定される。

表 3.4.2-8 廃棄体パッケージ定置時のクリアランス

方向	箇所	クリアランス
坑道断面方向	パッケージ間	200 mm
	パッケージと構造躯体間	300 mm
坑道奥行き方向	パッケージ間	200 mm
	パッケージと構造躯体間	300 mm

同表中の「構造躯体」は緩衝材を設置するケースにおいて用いられる。緩衝材を設置しない低透水性NBSの廃棄体グループ3および廃棄体グループ4の各ケースの処分坑道では、坑道壁面とパッケージの間隔として200 mm～300 mm程度のクリアランスをとることとする。非発熱性廃棄体のグループに対しては、坑道（最大内径12 m）に収納できる最大のパッケージを定置する。一方、発熱性廃棄体のグループに対しては、熱解析により熱的制約条件を満足することを確認した上で定置数を決定する。

d) 連絡・主要坑道

連絡・主要坑道の仕様はTRU レベル3 報告書 (NUMO, 2011a) に準じる。

e) 地下坑道レイアウト

坑道レイアウトの方法は、従来の方針に準じて以下を基本とする (図 3.4.2-11)。

- ・ 線量が大きい廃棄体グループは、地下水流動方向に対して上流側に配置する。
- ・ 主要坑道は、処分坑道の両端に接続するように配置し、さらに処分坑道全体を囲んで周回するように配置する。
- ・ 廃棄体グループ3の処分坑道は、地下水流動方向に対して他の処分坑道とは平行に離し、かつ下流側に配置する。
- ・ 処分坑道1本の長さは最大200 m程度を目安とする。

(ii) 検討結果

(a) 低透水性天然バリア・金属製短期閉じ込めパッケージ採用ケース (case1-0)

熱解析を踏まえて設定した case1-0 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面を表 3.4.2-9～表 3.4.2-11 および表 3.4.2-12～表 3.4.2-14 に、地下レイアウトを図 3.4.2-12～図 3.4.2-13 に示す。

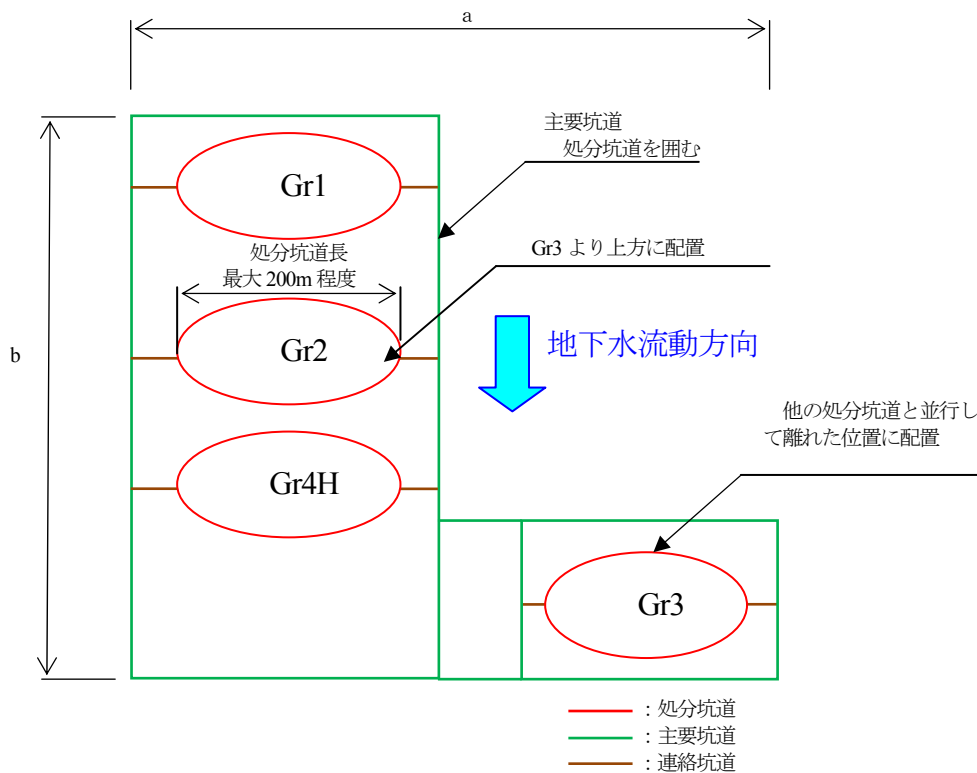


図 3.4.2-11 地下施設の配置方法の考え方

結晶質岩・堆積岩ケースとも、廃棄体の発熱特性を考慮して熱解析を実施した坑道のうち、廃棄体グループ2のCSD-Cと廃棄体グループ4（発熱性）のハル缶・インナーバレルは温度上限により断面当たりの廃棄体定置数が決まっている。一方、廃棄体グループ2のハル・エンドピースと廃棄体グループ4（発熱性）のドラム缶については、最大の坑道径に配置可能な廃棄体を定置しても温度上限値を下回っており、熱的制約条件は廃棄体の定置数の検討において制約条件とはなっていない。

なお、本ケースの坑道断面および地下レイアウトは、安全評価に適用される。

表 3.4.2-9 処分坑道断面 (case1-0 結晶質岩, Gr. 1, Gr. 2)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200 ℓドラム缶 ・パッケージ数 419 個 	16 個/断面	27 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> ・□1300×H1900 ・キャニスタ ・パッケージ数 6881 個 	15 個/断面	459 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・□1300×H1900 ・キャニスタ (CSD-C, CSD-B) ・パッケージ数 953 個 	4 個/断面	239 列

表 3.4.2-10 処分坑道断面 (case1-0 結晶質岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200 ℓドラム缶 • パッケージ数 6861 個 	25 個/断面	275 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200 ℓドラム缶 • パッケージ数 6019 個 	25 個/断面	241 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> • □1900×H1900 • 角型容器 • パッケージ数 287 個 	12 個/断面	24 列

表 3.4.2-11 処分坑道断面 (case1-0 結晶質岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> ・ □1600×H1450 ・ 200 ℓドラム缶 ・ パッケージ数 1147 個 	25 個/断面	46 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・ B1050×D1800×H1600 ・ ハル缶 ・ パッケージ数 27 個 	3 個/断面	9 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・ B1050×D1800×H1600 ・ インナーバレル ・ パッケージ数 567 個 	3 個/断面	189 列

表 3.4.2-12 処分坑道断面 (case1-0 堆積岩, Gr. 1, Gr. 2)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200 φドラム缶 ・パッケージ数 419 個 	16 個/断面	27 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> ・□1300×H1900 ・キャニスタ ・パッケージ数 6881 個 	15 個/断面	459 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・□1300×H1900 ・キャニスタ (CSD-C, CSD-B) ・パッケージ数 953 個 	4 個/断面	239 列

表 3.4.2-13 処分坑道断面 (case1-0 堆積岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200φドラム缶 ・パッケージ数 6861個 	25 個/断面	275 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200φドラム缶 ・パッケージ数 6019個 	25 個/断面	241 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・□1900×H1900 ・角型容器 ・パッケージ数 287個 	12 個/断面	24 列

表 3.4.2-14 処分坑道断面 (case1-0 堆積岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200 φドラム缶 ・パッケージ数 1147 個 	25 個/断面	46 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1050×D1800×H1600 ・ハル缶 ・パッケージ数 27 個 	4 個/断面	7 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1050×D1800×H1600 ・インナーバレル ・パッケージ数 567 個 	4 個/断面	142 列

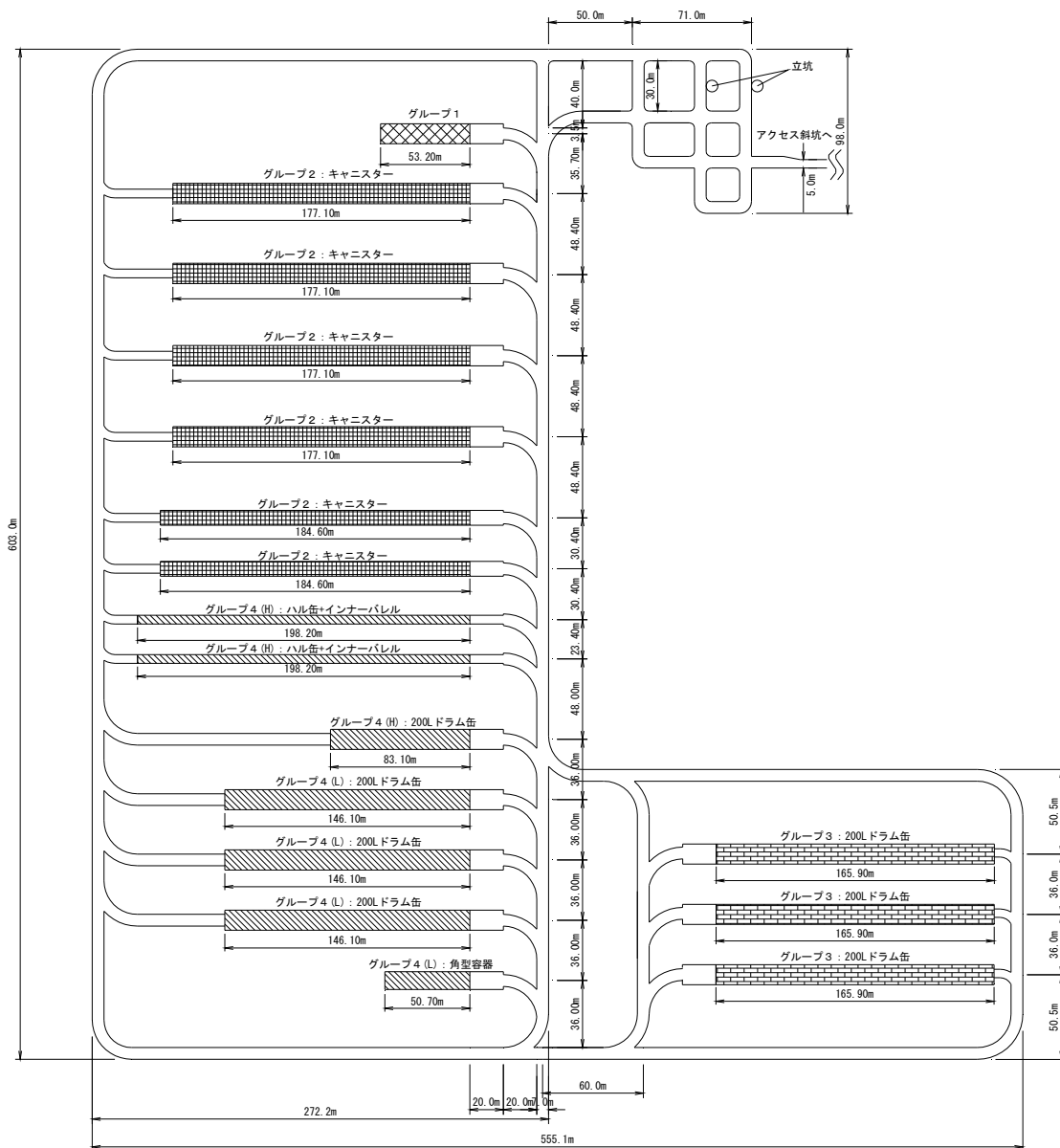


図 3.4.2-12 地下施設レイアウト (case1-0 結晶質岩, 深度 1000 m)

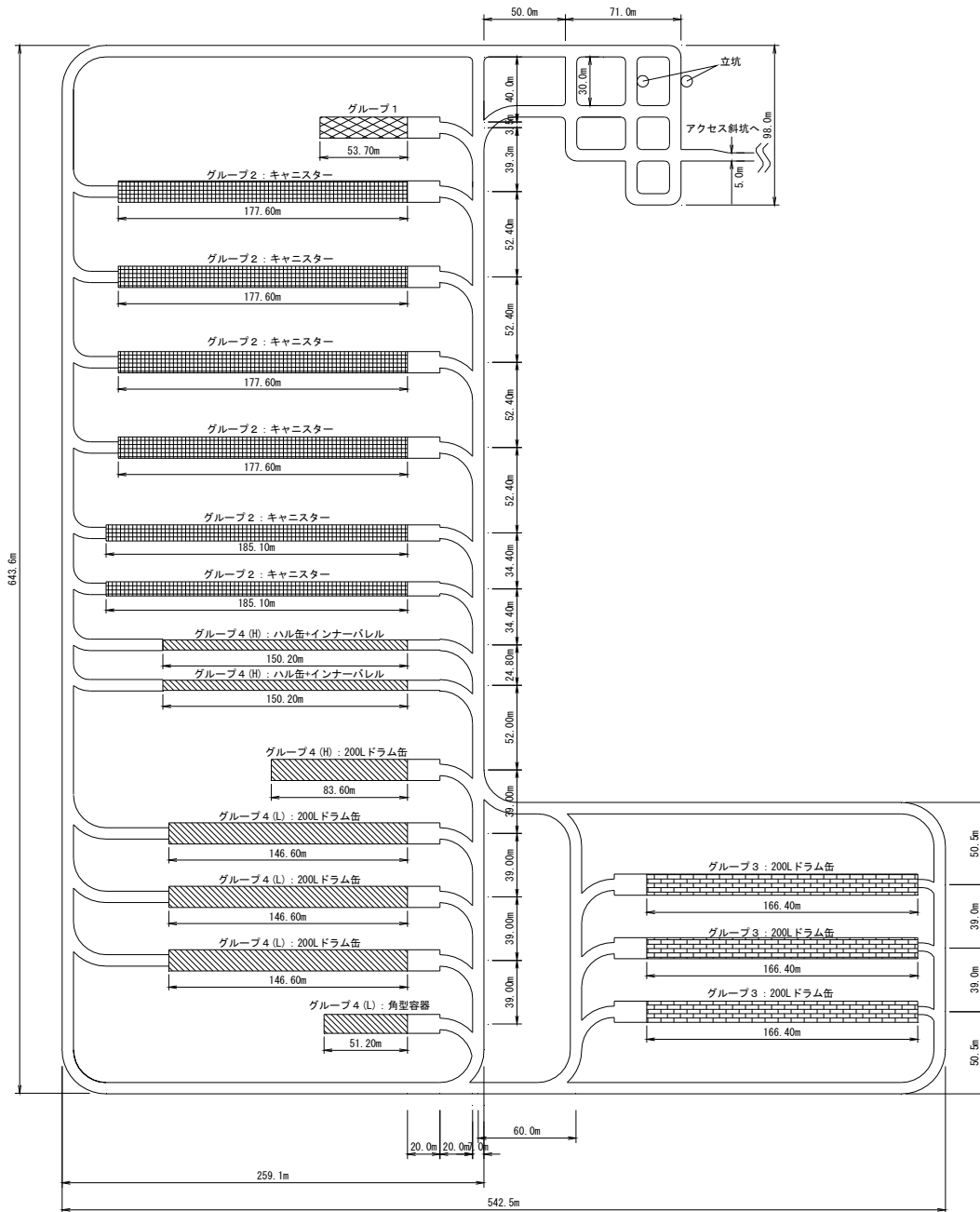


図 3.4.2-13 地下施設レイアウト (case1-0 堆積岩, 深度 500 m)

(b) 低透水性天然バリア・長期熱制約考慮ケース (case1-2)

熱解析を踏まえて設定した case1-2 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面を表 3.4.2-15 および表 3.4.2-16 に、地下レイアウトを図 3.4.2-14 および図 3.4.2-15 に示す。本ケースの坑道断面および地下レイアウトは、安全評価に適用される。

case1-2 は、より厳しい熱的制約条件を適用した検討ケースであり、核種漏洩が開始する時点での温度を初期地温程度にするよう検討した。すなわち、case1-2 では case1-0 の熱的制約条件に加え、500 年後の人工バリアの温度を結晶質岩ケースで 60°C 以下、堆積岩ケースで 40°C 以下となるように坑道断面およびレイアウトを設計した。

結晶質岩ケースでは、case1-0 に対して廃棄体グループ 4 (発熱性) のドラム缶の坑道断面当たりの廃棄体パッケージ数が 25 個から 12 個に減少した。結晶質岩ケースの処分坑道の本数は case1-0 と変わっていない。

堆積岩ケースでは、case1-0 に対して廃棄体グループ 2・CSD-C および廃棄体グループ 4 (発熱性)・ドラム缶の坑道断面当たりの廃棄体パッケージ数がそれぞれ 4 個から 2 個、および 25 個から 12 個に減少した。堆積岩ケースの処分坑道本数は CSD-C が 2 本増加した。

結晶質岩・堆積岩ケースとも、500 年後の温度条件を考慮したことによって、必要となる坑道離間距離が大きくなり、その結果処分場占有面積が case1-0 より大きくなっている。

なお、本ケースでは、レイアウト設計における多数の試行計算を効率的に実施するため、熱解析の線形性を利用した簡便な方法として、単独坑道による熱解析結果を“重ね合わせる”手法を採用した (添付 2 参照)。

表 3.4.2-15 処分坑道断面 (case1-2 結晶質岩)

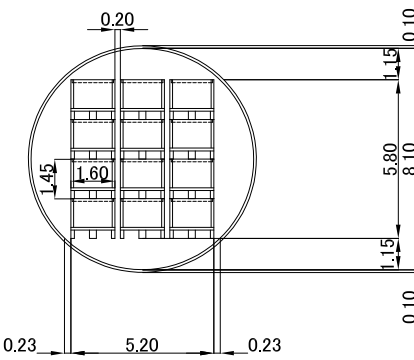
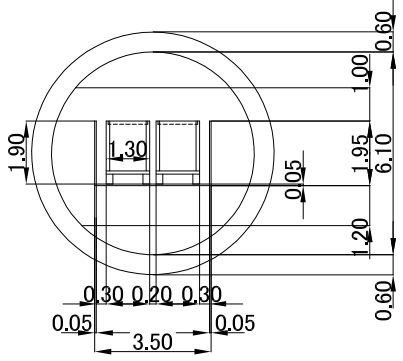
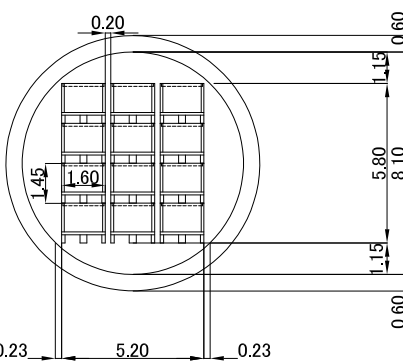
	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列 数
Gr.1 ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.2 ハル・エン ドピース	case1-0 同様			
Gr.2 CSD-C	case1-0 同様			
Gr.3 ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.4L ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.4L 角型容器	case1-0 同様			
Gr.4H ドラム缶		<ul style="list-style-type: none"> ・ □1600×H1450 ・ 200 φドラム缶 ・ パッケージ数 1147 個 	12 個 /断面	96 列
Gr.4H ハル缶・イ ンナーバレル	case1-0 同様			

表 3.4.2-16 処分坑道断面 (case1-2 堆積岩)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列 数
Gr.1 ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.2 ハル・エン ドピース, CSD-B	case1-0 同様			
Gr.2 CSD-C		<ul style="list-style-type: none"> ・□1300×H1900 ・キャニスタ ・パッケージ数 953 個 	2 個/断面	477 列
Gr.3 ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.4L ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.4L 角型容器	case1-0 同様			
Gr.4H ドラム缶		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200 ℓドラム缶 ・パッケージ数 1147 個 	12 個/ 断面	96 列
Gr.4H ハル缶・イ ンナーバ レル	case1-0 同様			

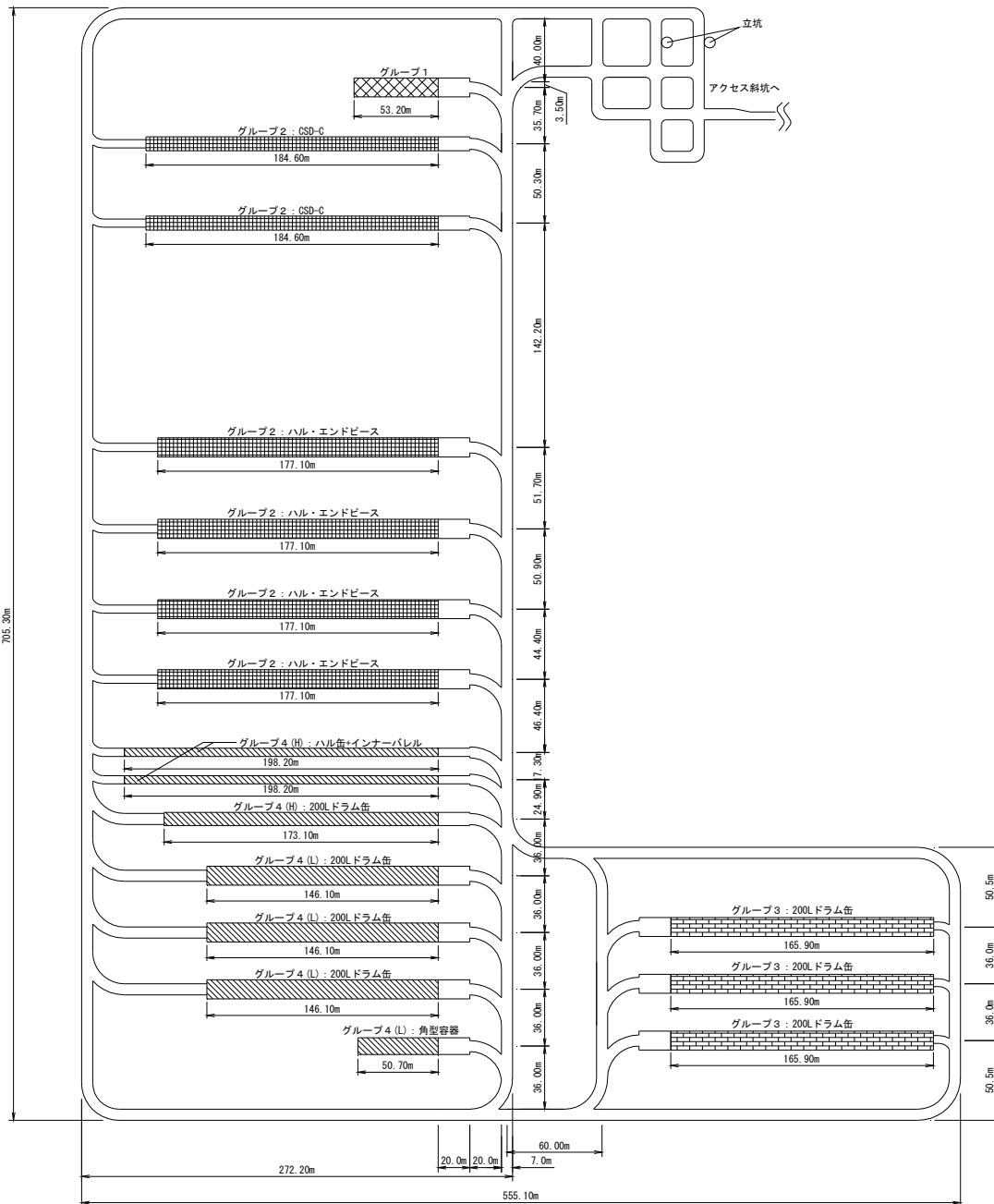


図 3.4.2-14 地下施設レイアウト (case1-2 結晶質岩, 深度 1000 m)

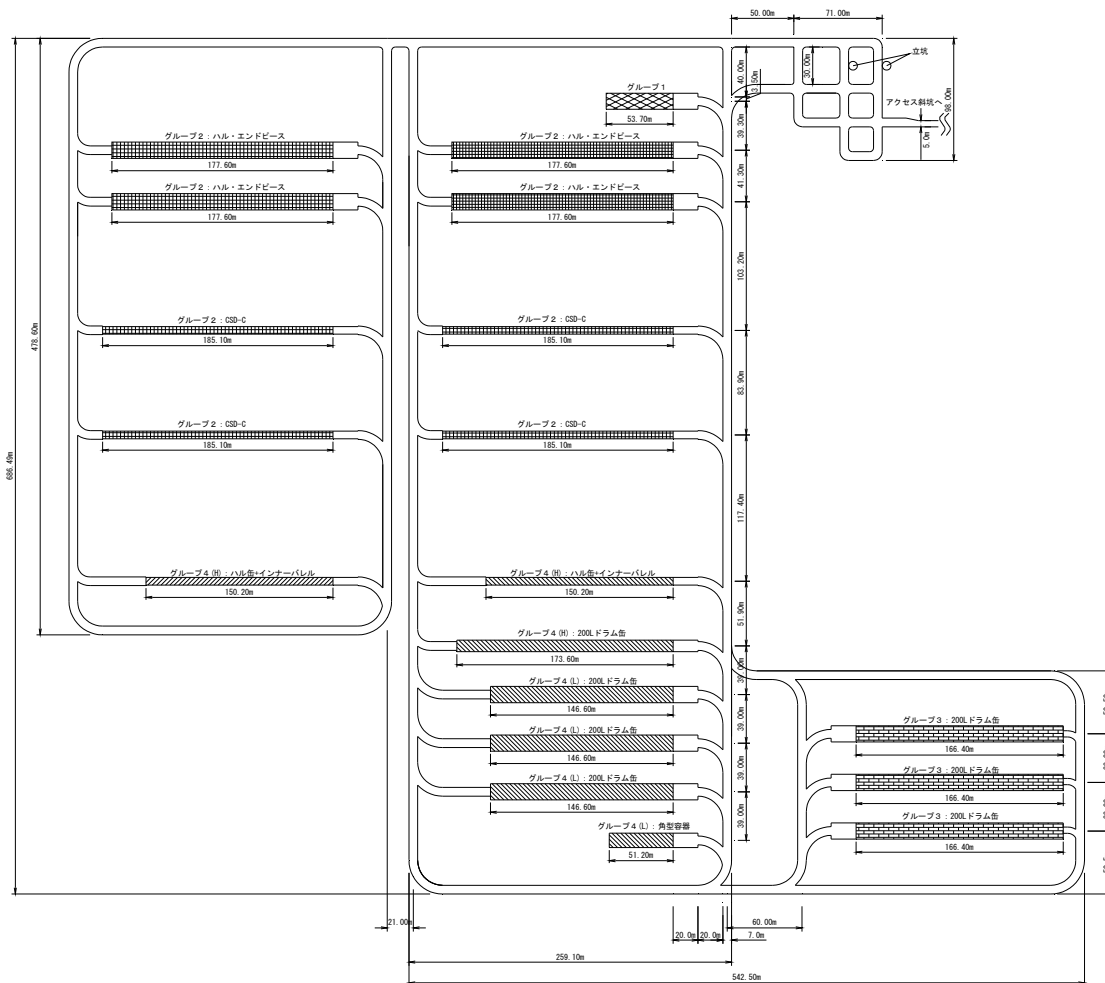
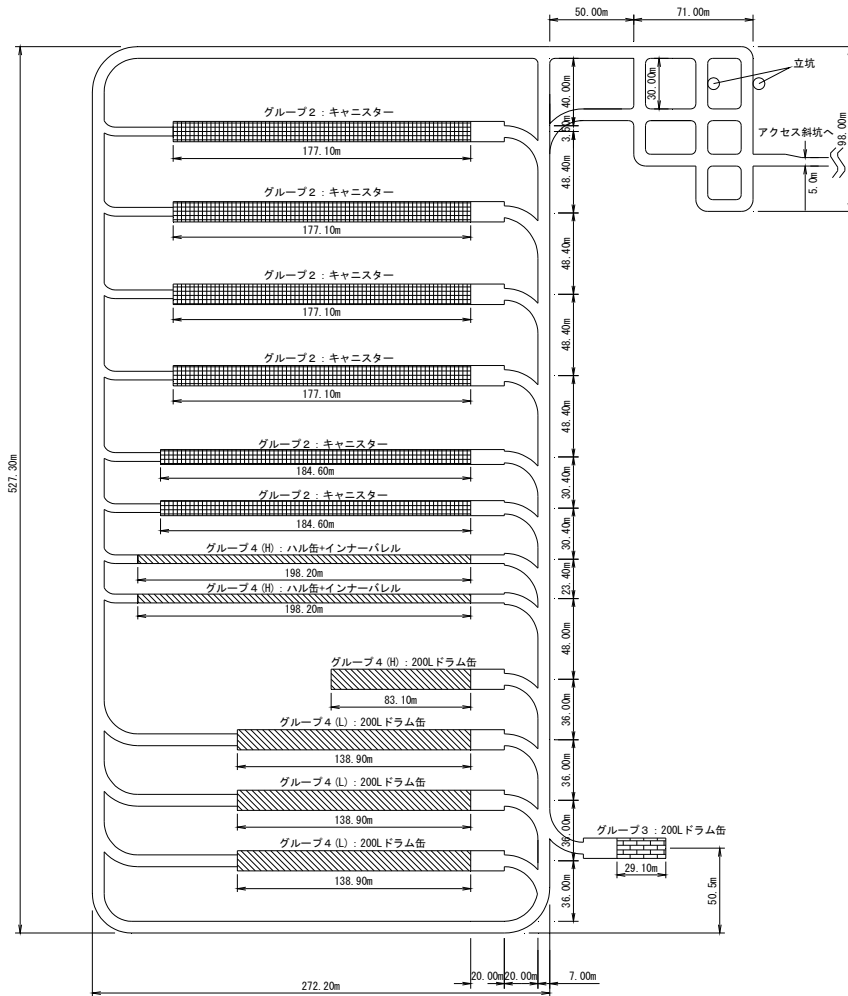


図 3.4.2-15 地下施設レイアウト (case1-2 堆積岩, 深度 500 m)

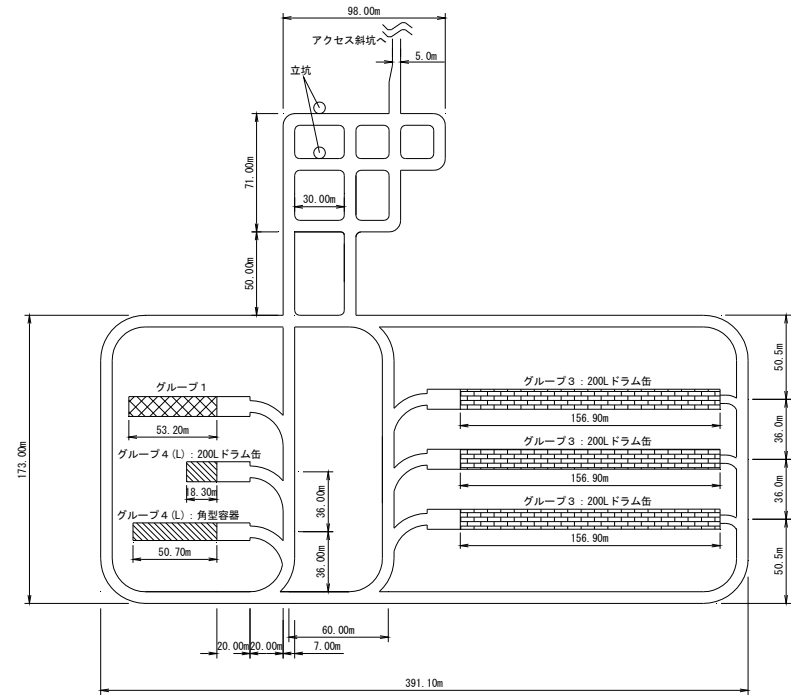
(a) 低透水性天然バリア・1種/2種分離概念ケース (case1-3)

case1-3 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面は case1-0 と同様である。case1-3 の地下レイアウトを図 3.4.2-16 及び図 3.4.2-17 に示す。

case1-3 は、放射性廃棄物の処分方法としての「第一種廃棄物埋設」(地層処分)と「第二種廃棄物埋設」(地層処分以外)との区別に関して設定された検討ケースである。本ケースの検討では、埋設事業区分の相違に対応した地下レイアウトとして幾つか考えられるパターンのうち、異なる安全規制体系に最も柔軟に対応が可能な専属の物流系統を有するレイアウトを採用した。これにより、処分坑道だけでなくアクセス坑道、主要・連絡坑道を第一種と第二種で全て専属に配置させることが可能になり、それぞれの規制に柔軟に対応できるようにした。case1-0 に対して、処分坑道断面の仕様は同じであるが、アクセス坑道、主要・連絡坑道が2系統となったことによって掘削土量は大きく増加した。

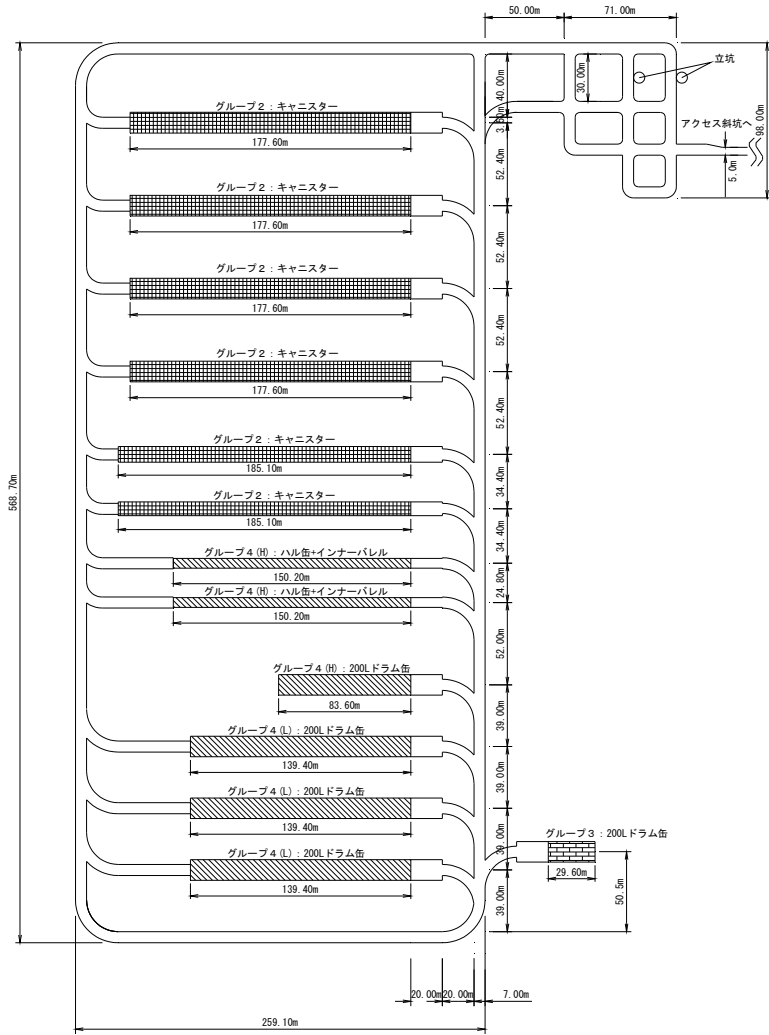


第一種

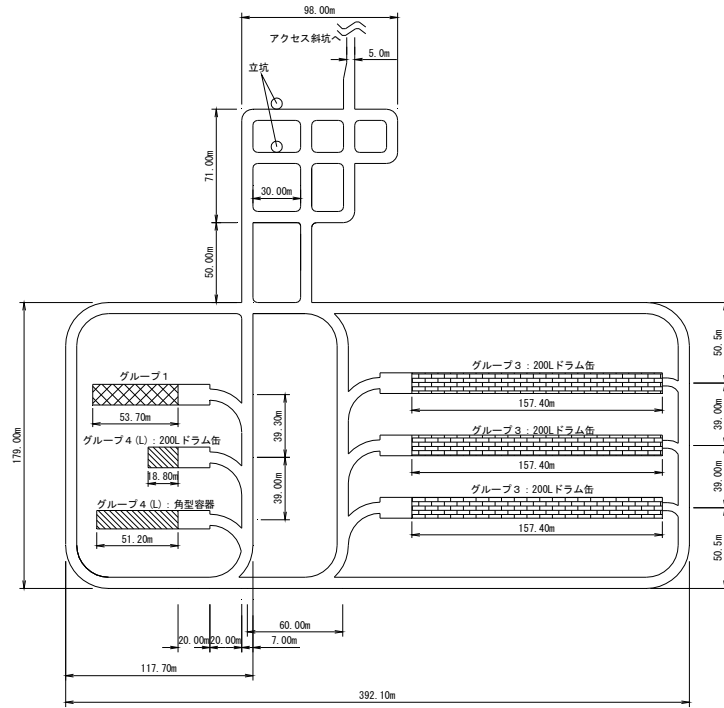


第二種

図 3.4.2-16 地下施設レイアウト (case1-3 結晶質岩, 深度 1000 m)



第一種



第二種

図 3.4.2-17 地下施設レイアウト (case1-3 堆積岩, 深度 500 m)

(b) 高度化対策/金属製短期閉じ込めパッケージ採用ケース (case2-0)

熱解析を踏まえて設定した case2-0 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面を表 3.4.2-17～表 3.4.2-19 および表 3.4.2-20～表 3.4.2-22 に、地下レイアウトを図 3.4.2-18～図 3.4.2-19 に示す。

case2-0 は、高透水性 NBS 条件のレファレンスとなるケースである。本ケースでは、天然バリアが高透水性条件となることを受けて、case1 シリーズに対して以下のような人工バリア構成を設定した。

- ・ 廃棄体グループ 1 では、廃棄体固化処理技術として「代替固化処理」の採用を想定するが、設計では廃棄体数量・パッケージ仕様とも case1-0 同様と想定。
- ・ 廃棄体グループ 2 では、廃棄体パッケージとして代替金属容器を採用。
- ・ 廃棄体グループ 3、廃棄体グループ 4 (低発熱性)、廃棄体グループ 4 (発熱性) においては、廃棄体グループ 1, 2 同様に厚さ 1 m の緩衝材を設置。

上記条件により、case1-0 に対して、廃棄体グループ 1 については仕様の変化がないものの、廃棄体グループ 2 については坑道断面当たりの廃棄体数が変化している。廃棄体グループ 3、廃棄体グループ 4 (低発熱性)、廃棄体グループ 4 (発熱性) については、坑道断面当たりの廃棄体数は大きく減少し、その結果坑道延長が増加している。

表 3.4.2-17 処分坑道断面 (case2-0 結晶質岩, Gr. 1, Gr. 2)

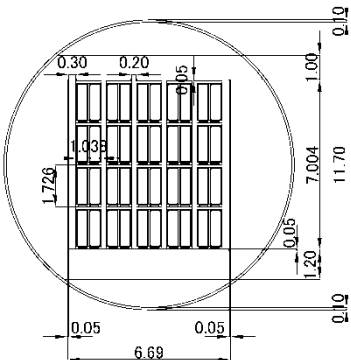
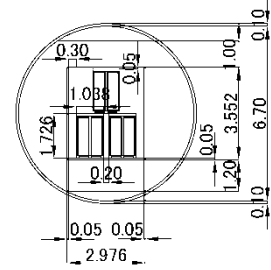
	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1 ドラム缶	case1-0 同様			
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (ハル・エンドピース) • パッケージ数 6881 個 	20 個/断面	345 列
		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (CSD-C, CSD-B) • パッケージ数 953 個 	3 個/断面	318 列

表 3.4.2-18 処分坑道断面 (case2-0 結晶質岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 6861 個 	16 個/断面	429 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 6019 個 	16 個/断面	377 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・□1900×H1900 ・角型容器 ・パッケージ数 287 個 	9 個/断面	32 列

表 3.4.2-19 処分坑道断面 (case2-0 結晶質岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数1147個 	16個/断面	72列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1050×D1800× H1600 ・ハル缶 ・パッケージ数27個 	3個/断面	9列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1050×D1800× H1600 ・インナーバレル ・パッケージ数567個 	3個/断面	189列

表 3.4.2-20 処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr. 1, Gr. 2)

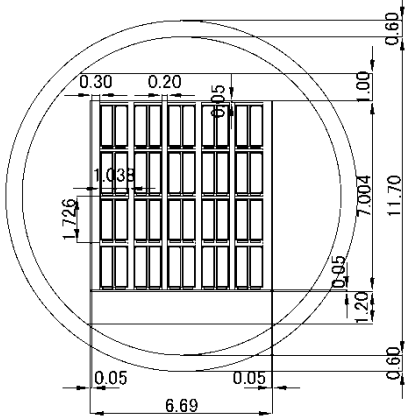
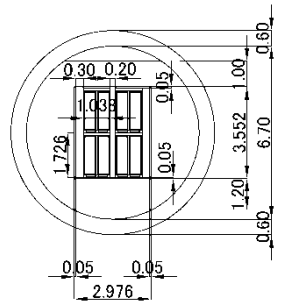
	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1 ドラ ム缶	case1-0 同様			
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (ハル・エンドピース) • パッケージ数 6881 個 	20 個/断面	345 列
		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (CSD-C, CSD-B) • パッケージ数 953 個 	4 個/断面	239 列

表 3.4.2-21 処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> □1600×H1450 200ℓドラム缶 パッケージ数 6861 個 	16 個/断面	429 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> □1600×H1450 200ℓドラム缶 パッケージ数 6019 個 	16 個/断面	377 列
		<ul style="list-style-type: none"> □1900×H1900 角型容器 パッケージ数 287 個 	9 個/断面	32 列

表 3.4.2-22 処分坑道断面 (case2-0 堆積岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200ℓ ドラム缶 • パッケージ数 1147 個 	16 個/断面	72 列
		<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • ハル缶 • パッケージ数 27 個 	4 個/断面	7 列
	<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • インナーバレル • パッケージ数 567 個 	4 個/断面	142 列	

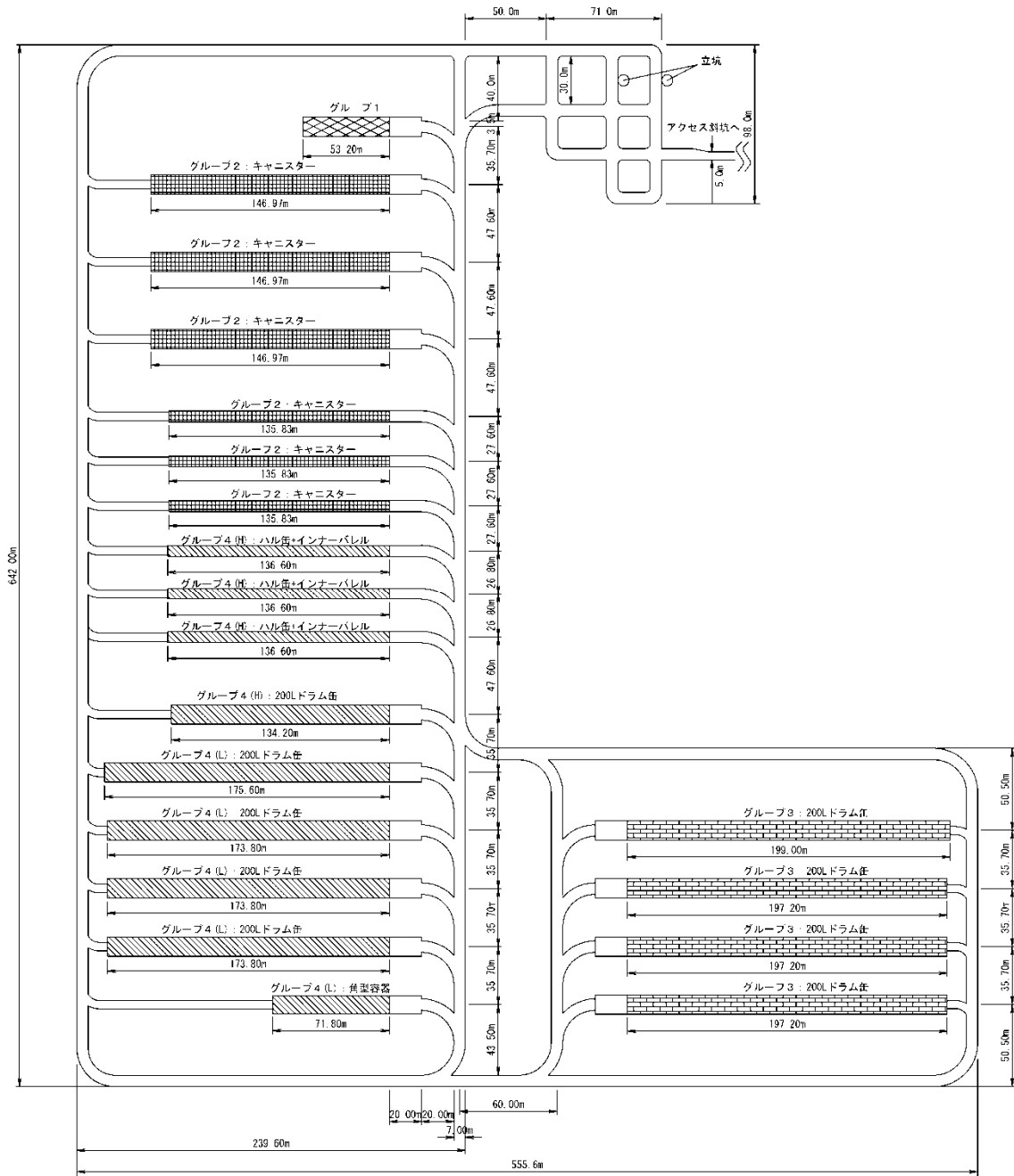


図 3.4.2-18 地下施設レイアウト (case2-0 結晶質岩, 深度 1000 m)

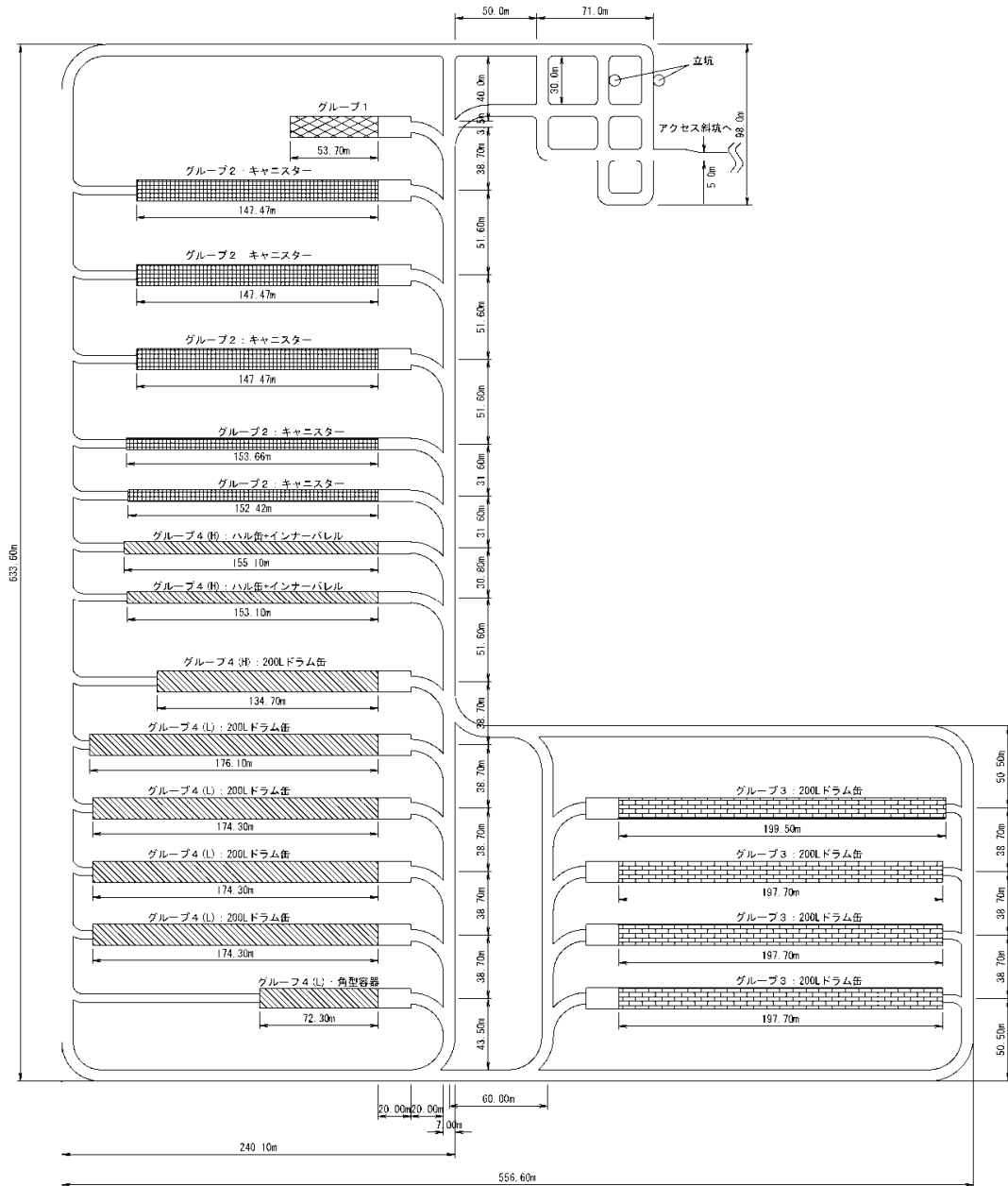


図 3.4.2-19 地下施設レイアウト (case2-0 堆積岩, 深度 500 m)

(c) 高透水性天然バリア・高度化技術/低拡散層適用ケース (case2-2)

熱解析を踏まえて設定した case2-2 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面を表 3.4.2-23～表 3.4.2-25 および表 3.4.2-26～表 3.4.2-28 に、地下レイアウトを図 3.4.2-20～図 3.4.2-21 に示す。

case2-2 は、さらなる安全性向上のために、余裕深度処分と同様の低拡散層を設置することを想定する検討ケースである。本ケースでは、case2-0 に対して、全てのグループで緩衝材の内側に厚さ 60 cm の低拡散層を設置することとした。その結果、全てのグループで case2-0 に対して坑道断面当たりの廃棄体数が大きく減少し、坑道本数が増加している。

表 3.4.2-23 処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr.1, Gr.2)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> □1600×H1450 200ℓ ドラム缶 パッケージ数 419 個 	9 個/断面	47 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> □1038×H1726 キャニスタ (ハル・エンドピース) パッケージ数 6881 個 	12 個/断面	574 列
		<ul style="list-style-type: none"> □1038×H1726 キャニスタ (CSD-C, CSD-B) パッケージ数 953 個 	2 個/断面	477 列

表 3.4.2-24 処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 6861 個 	9 個/断面	763 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 6019 個 	9 個/断面	669 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・□1900×H1900 ・角型容器 ・パッケージ数 287 個 	6 個/断面	48 列

表 3.4.2-25 処分坑道断面 (case2-2 結晶質岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200ℓドラム缶 • パッケージ数 1147 個 	9 個/断面	128 列
		<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • ハル缶 • パッケージ数 27 個 	2 個/断面	14 列
		<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • インナーバレル • パッケージ数 567 個 	2 個/断面	284 列

表 3.4.2-26 処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr. 1, Gr. 2)

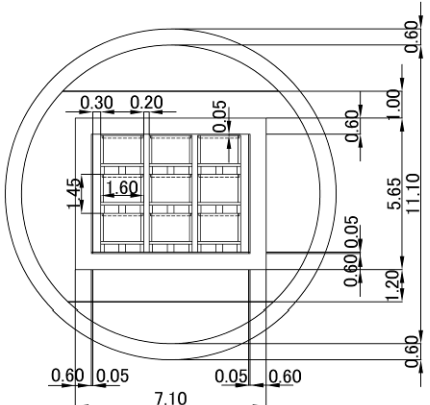
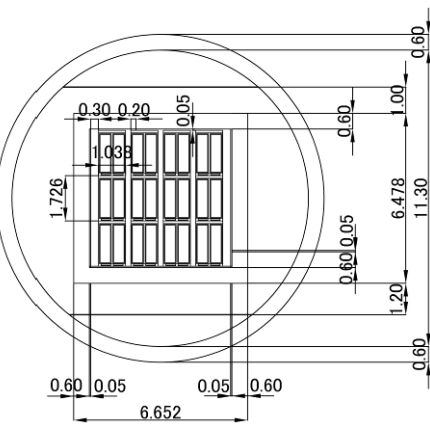
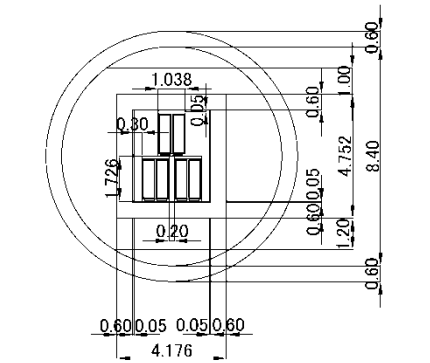
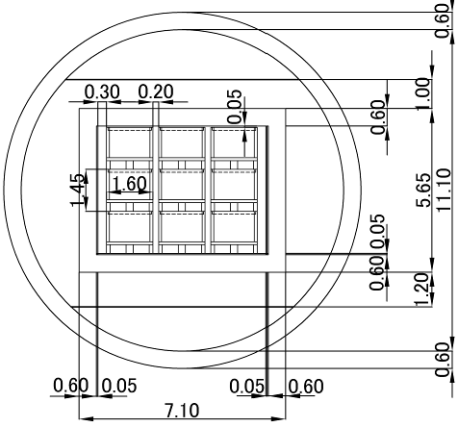
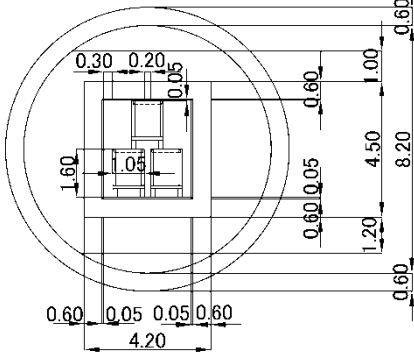
	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200ℓ ドラム缶 • パッケージ数 419 個 	9 個/断面	47 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (ハル・エンドピース) • パッケージ数 6881 個 	12 個/断面	574 列
		<ul style="list-style-type: none"> • □1038×H1726 • キャニスタ (CSD-C, CSD-B) • パッケージ数 953 個 	3 個/断面	318 列

表 3.4.2-27 処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓ ドラム缶 ・パッケージ数 6861 個 	9 個/断面	763 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> ・□1600×H1450 ・200ℓ ドラム缶 ・パッケージ数 6019 個 	9 個/断面	669 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> ・□1900×H1900 ・角型容器 ・パッケージ数 287 個 	6 個/断面	48 列

表 3.4.2-28 処分坑道断面 (case2-2 堆積岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> • □1600×H1450 • 200ℓ ドラム缶 • パッケージ数 1147 個 	9 個/断面	128 列
		<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • ハル缶 • パッケージ数 27 個 	3 個/断面	9 列
		<ul style="list-style-type: none"> • B1050×D1800× H1600 • インナーバレル • パッケージ数 567 個 	3 個/断面	189 列

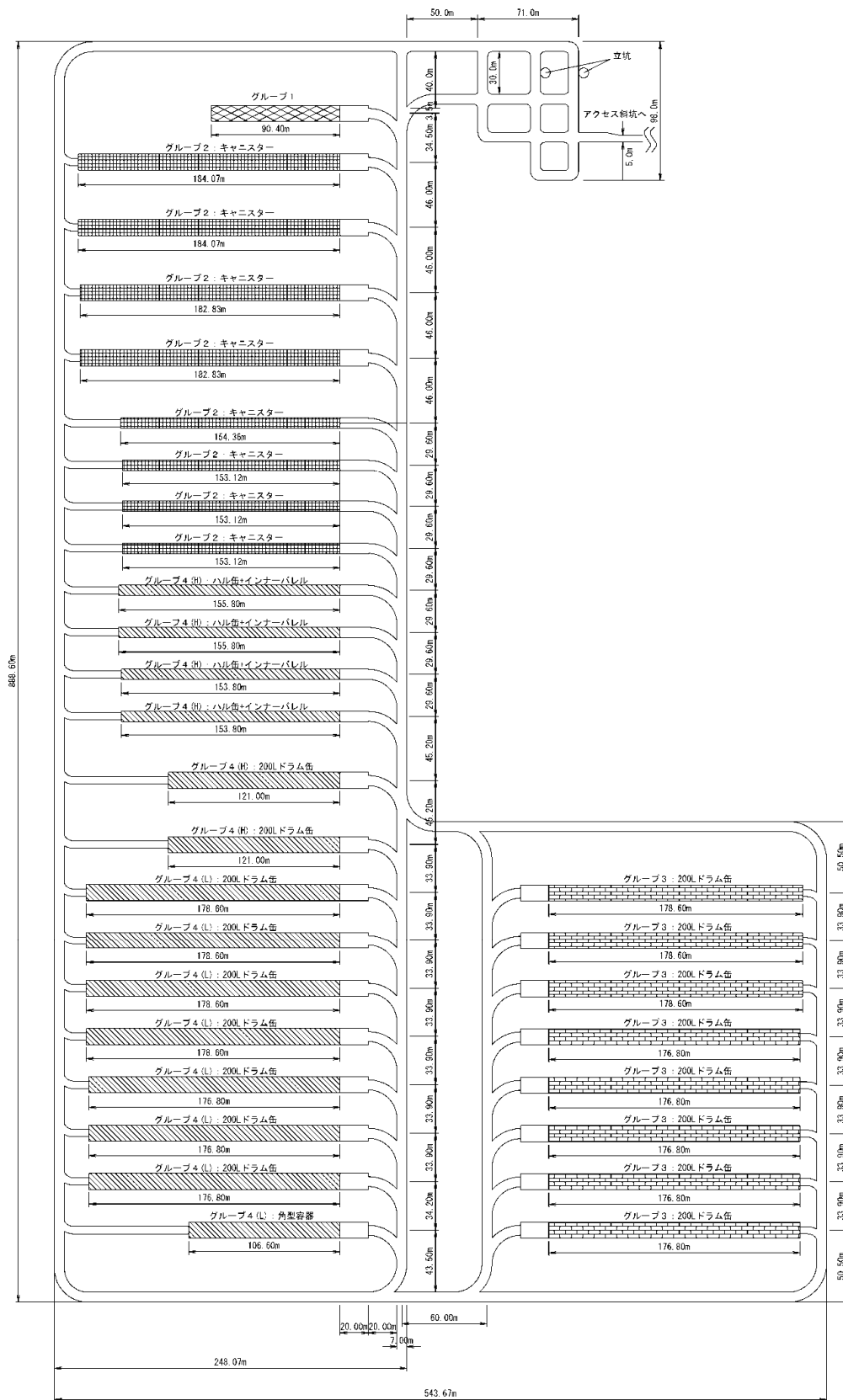


図 3.4.2-20 地下施設レイアウト (case2-2 結晶質岩, 深度 1000 m)

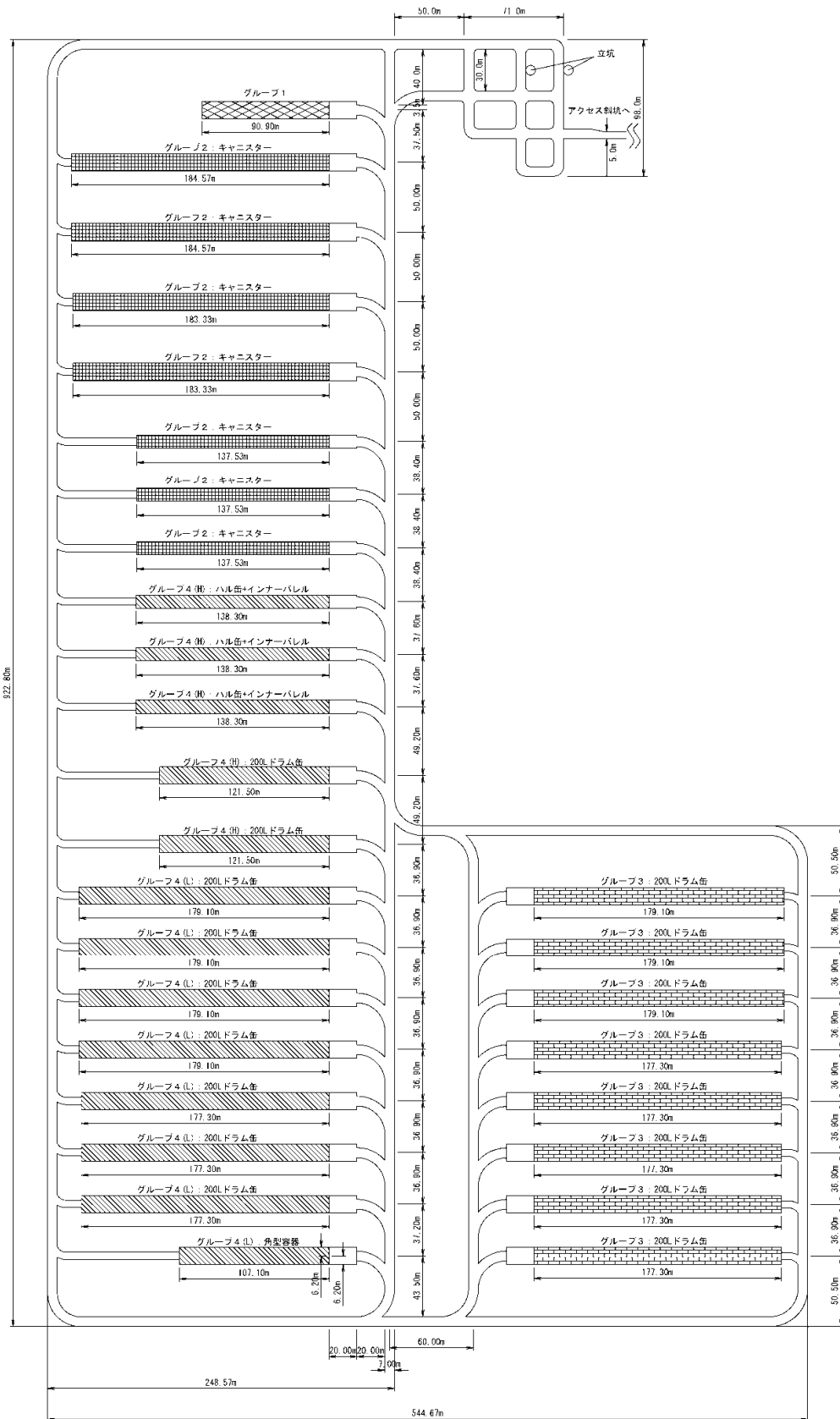


図 3.4.2-21 地下施設レイアウト (case2-2 堆積岩, 深度 500 m)

(d) 低透水性天然バリア・コンクリート製短期閉じ込めパッケージ採用ケース
(case3-0)

熱解析を踏まえて設定した case3-0 の結晶質岩ケースおよび堆積岩ケースの処分坑道断面を表 3.4.2-29～表 3.4.2-31 および表 3.4.2-32～表 3.4.2-34 に、地下レイアウトを図 3.4.2-22～図 3.4.2-23 に示す。

case3-0 は、case1 および case2 シリーズでは金属製の廃棄体パッケージを想定していたのに対し、コンクリート製パッケージの使用を想定するケースである。case3-0 では天然バリア条件として case1-0 同様の低透水性条件を想定する。

case3-0 の断面当たりの廃棄体数の決定要因に関する傾向は case1-0 同様である。すなわち、廃棄体グループ 2 の CSD-C と廃棄体グループ 4 (発熱性) のハル缶・インナーバレルでは断面当たりの廃棄体数は熱的制約によって決まり、それ以外の廃棄体では幾何条件で決まっている。今回採用したコンクリート製パッケージの寸法は、金属製パッケージより大きいことから、廃棄体定置数が幾何条件で決まる坑道ではすべて case1-0 より断面当たりの廃棄体定置数が減少する結果となっている。また、熱的制約で決まる CSD-C とハル缶・インナーバレルでは、金属製より熱伝導性が小さい影響により、case1-0 より結晶質岩ケースの断面あたりの廃棄体定置数が減少している。ただし、地温の低い堆積岩ケースでは温度条件に余裕があるため、CSD-C とハル缶・インナーバレルの断面あたりの廃棄体定置数は case1-0 同様となっている。

表 3.4.2-29 処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr.1, Gr.2)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓドラム缶 パッケージ数 419 個 	12 個/断面	35 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> □1500×H2050 キャニスタ パッケージ数 6881 個 	12 個/断面	574 列
		<ul style="list-style-type: none"> □1500×H2050 キャニスタ (CSD-C, CSD-B) パッケージ数 953 個 	2 個/断面	477 列

表 3.4.2-30 処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓ ドラム缶 パッケージ数 6861 個 	16 個/断面	429 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓ ドラム缶 パッケージ数 6019 個 	16 個/断面	377 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> □2200×H1900 角型容器 パッケージ数 287 個 	12 個/断面	24 列

表 3.4.2-31 処分坑道断面 (case3-0 結晶質岩, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> ・□1950×H1600 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 1147 個 	16 個/断面	72 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1200×D2250×H1700 ・ハル缶 ・パッケージ数 27 個 	2 個/断面	14 列
		<ul style="list-style-type: none"> ・B1200×D2250×H1700 ・インナーバレル ・パッケージ数 567 個 	2 個/断面	284 列

表 3.4.2-32 処分坑道断面 (case3-0 堆積岩, Gr. 1, Gr. 2)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.1		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 ・200ℓドラム缶 ・パッケージ数 419 個 	12 個/断面	35 列
Gr.2		<ul style="list-style-type: none"> □1500×H2050 ・キャニスタ ・パッケージ数 6881 個 	12 個/断面	574 列
		<ul style="list-style-type: none"> □1500×H2050 ・キャニスタ (CSD-C, CSD-B) ・パッケージ数 953 個 	4 個/断面	239 列

表 3.4.2-33 処分坑道断面 (case3-0 堆積岩円形, Gr. 3, Gr. 4L)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.3		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓ ドラム缶 パッケージ数 6861 個 	16 個/断面	429 列
Gr.4L		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓ ドラム缶 パッケージ数 6019 個 	16 個/断面	377 列
		<ul style="list-style-type: none"> □2200×H1900 角型容器 パッケージ数 287 個 	12 個/断面	24 列

表 3.4.2-34 処分坑道断面 (case3-0 堆積岩円形, Gr. 4H)

	処分坑道断面(m)	パッケージ寸法 (外寸:mm) 廃棄体種類 定置総数	断面当り 定置数	総列数
Gr.4H		<ul style="list-style-type: none"> □1950×H1600 200ℓドラム缶 パッケージ数 1147 個 	16 個/断面	72 列
		<ul style="list-style-type: none"> B1200×D2250×H1700 ハル缶 パッケージ数 27 個 	4 個/断面	7 列
		<ul style="list-style-type: none"> B1200×D2250×H1700 インナーバレル パッケージ数 567 個 	4 個/断面	142 列

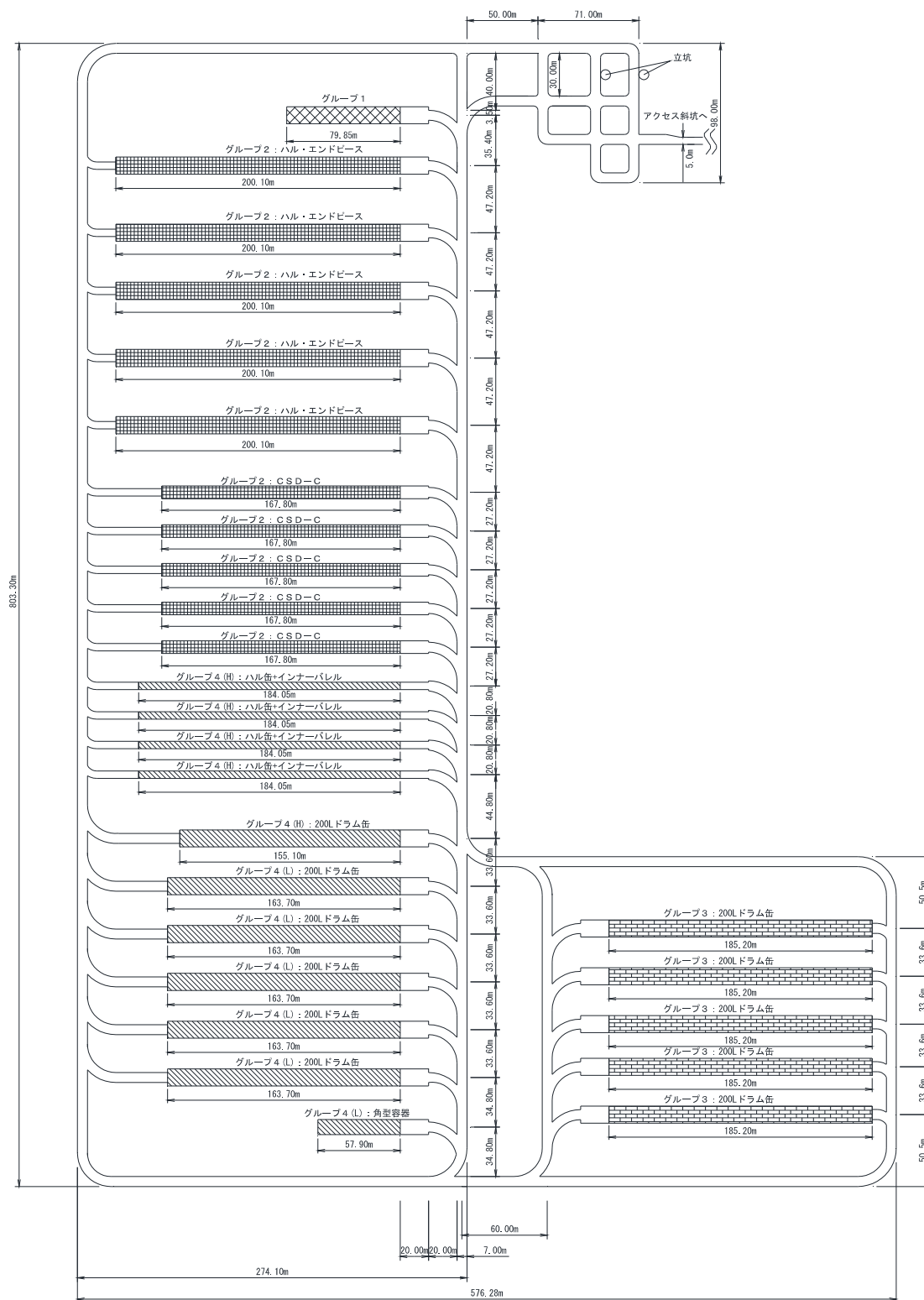


図 3.4.2-22 地下施設レイアウト (case3-0 結晶質岩, 深度 1000 m)

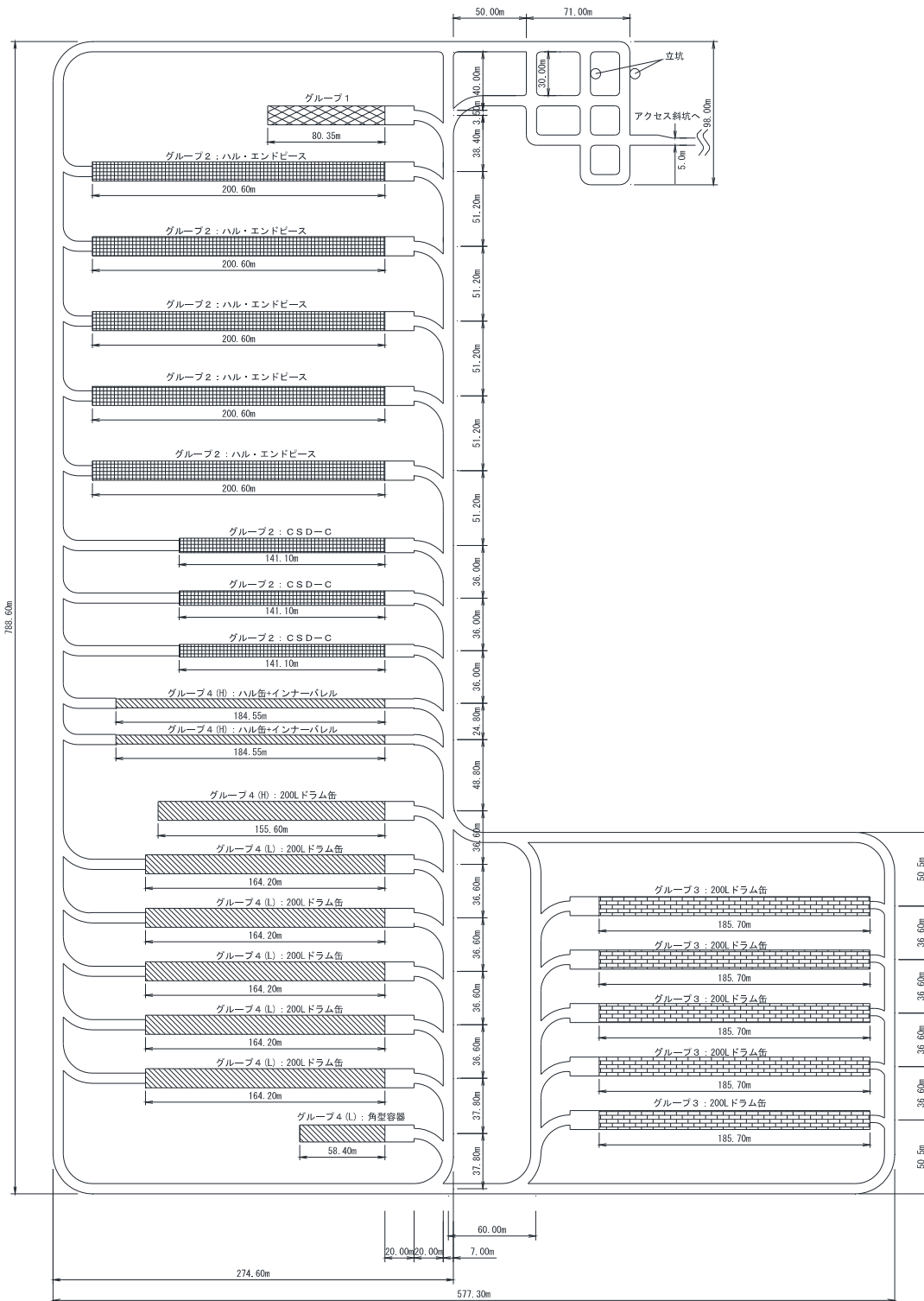


図 3.4.2-23 地下施設レイアウト (case3-0 堆積岩, 深度 500 m)

(e) まとめ

各ケースの設計検討のまとめとして、地下施設の占有領域を表 3.4.2-35 に、処分坑道の仕様（断面あたり廃棄体パッケージ数、坑道長および本数）を表 3.4.2-36～表 3.4.2-37 に示す。

表 3.4.2-35 各ケースの地下施設占有領域

ケース		岩種, 深度	地下施設占有領域
case1-0	低透水性母岩 レファレンス	結晶質岩, 1000 m	555 m×603 m
		堆積岩, 500 m	543 m×644 m
case1-2	低透水性母岩 低定置密度	結晶質岩, 1000 m	555 m×705 m
		堆積岩, 500 m	823 m×686 m
case1-3	低透水性母岩 一種埋設／二種埋設区分	結晶質岩, 1000 m	393 m×527 m (一種) 391 m×294 m (二種)
		堆積岩, 500 m	380 m×569 m (一種) 391 m×294 m (二種)
case2-0	高透水性母岩 レファレンス	結晶質岩, 1000 m	556 m×642 m
		堆積岩, 500 m	557 m×634 m
case2-2	高透水性母岩 低拡散層設置	結晶質岩, 1000 m	544 m×889 m
		堆積岩, 500 m	545 m×923 m
case3-0	低透水性母岩 コンクリートパッケージ	結晶質岩, 1000 m	576 m×803 m
		堆積岩, 500 m	577 m×789 m

表 3.4.2-36 処分坑道断面あたりのパッケージ数, 坑道長, 本数 (結晶質岩)

ケース		Gr.1	Gr.2		Gr.3	Gr.4L		Gr.4H	
		ドラム缶	ハル・エンド ピース	CSD-C	ドラム缶	ドラム缶	角型容器	ドラム缶	ハル缶・イン ナーバレル
case1-0	低透水性母岩 レファレンス	16 個 53 m×1 本	15 個 177 m×4 本	4 個 185 m×2 本	25 個 166 m×3 本	25 個 146 m×3 本	12 個 51 m×1 本	25 個 83 m×1 本	3 個 198 m×2 本
case1-2	低透水性母岩 低定置密度	〃	〃	〃	〃	〃	〃	12 個 173 m×1 本	〃
case1-3	低透水性母岩 一種埋設/二種埋設区分	〃	〃	〃	25 個 29 m×1 本 (一種) 157 m×3 本 (二種)	25 個 139 m×3 本 (一種) 18 m×1 本 (二種)	〃	25 個 83 m×1 本	〃
case2-0	高透水性母岩 レファレンス	16 個 53 m×1 本	20 個 147 m×3 本	3 個 136 m×3 本	16 個 198 m×4 本	16 個 174 m×4 本	9 個 72 m×1 本	16 個 134 m×1 本	3 個 134 m×3 本
case2-2	高透水性母岩 低拡散層設置	9 個 90 m×1 本	12 個 183 m×4 本	2 個 153 m×4 本	9 個 178 m×8 本	9 個 178 m×7 本	6 個 107 m×1 本	9 個 121 m×2 本	2 個 155 m×4 本
case3-0	低透水性母岩 コンクリートパッケージ	12 個 80 m×1 本	12 個 200 m×5 本	2 個 168 m×5 本	16 個 185 m×5 本	16 個 164 m×5 本	12 個 58 m×1 本	16 個 155 m×1 本	2 個 184 m×4 本

表 3.4.2-37 処分坑道断面あたりのパッケージ数, 坑道長, 本数 (堆積岩)

ケース		Gr.1	Gr.2		Gr.3	Gr.4L		Gr.4H	
		ドラム缶	ハル・エンド ピース	CSD-C	ドラム缶	ドラム缶	角型容器	ドラム缶	ハル缶・イン ナーバレル
case1-0	低透水性母岩 レファレンス	16 個 54 m×1 本	15 個 178 m×4 本	4 個 185 m×2 本	25 個 166 m×3 本	25 個 147 m×3 本	12 個 51 m×1 本	25 個 84 m×1 本	4 個 150 m×2 本
case1-2	低透水性母岩 低定置密度	〃	〃	2 個 185 m×4 本	〃	〃	〃	12 個 174 m×1 本	〃
case1-3	低透水性母岩 一種埋設/二種埋設区分	〃	〃	4 個 185 m×2 本	25 個 30 m×1 本 (一種) 157 m×3 本 (二種)	25 個 139 m×3 本 (一種) 19 m×1 本 (二種)	〃	25 個 84 m×1 本	〃
case2-0	高透水性母岩 レファレンス	16 個 54 m×1 本	20 個 147 m×3 本	4 個 153 m×2 本	16 個 198 m×4 本	16 個 175 m×4 本	9 個 72 m×1 本	16 個 135 m×1 本	4 個 154 m×2 本
case2-2	高透水性母岩 低拡散層設置	9 個 91 m×1 本	12 個 184 m×4 本	3 個 138 m×3 本	9 個 178 m×8 本	9 個 178 m×7 本	6 個 107 m×1 本	9 個 121 m×2 本	3 個 138 m×3 本
case3-0	低透水性母岩 コンクリートパッケージ	12 個 80 m×1 本	12 個 200 m×5 本	4 個 141 m×3 本	16 個 186 m×5 本	16 個 164 m×5 本	12 個 58 m×1 本	16 個 156 m×1 本	4 個 185 m×2 本

3.5 処分システムの応答特性を把握するための包括的感度解析のケース設定

3.5.1 対象廃棄体グループと対象核種の選定および評価モデルの設定

既存の安全評価 (JNC, 1999b), (電事連・JNC, 2005), (NUMO, 2011a) から, TRU 廃棄物の安全性を支配する廃棄体グループと核種について, 以下のような知見が得られている。

- ・レファレンスとした概念および入力データの場合は, 廃棄体グループ 1 の I-129 が全体の線量を支配し, 続いて, 廃棄体グループ 3 の I-129, 廃棄体グループ 2 の C-14 が線量を支配する。(表 3.5.1-1, 図 3.5.1-1(a)参照)
- ・地下水水質が海水系の場合は, 廃棄体グループ 1 の I-129 が線量を支配し, 続いて, 廃棄体グループ 2 の C-14 が線量を支配する。(表 3.5.1-1, 図 3.5.1-1(b)参照)
- ・高透水性の水理環境に対応した高度化対策を採用する場合, 廃棄体グループ 3 の I-129 が全体の線量を支配する。(表 3.5.1-1, 図 3.5.1-1(c)参照)

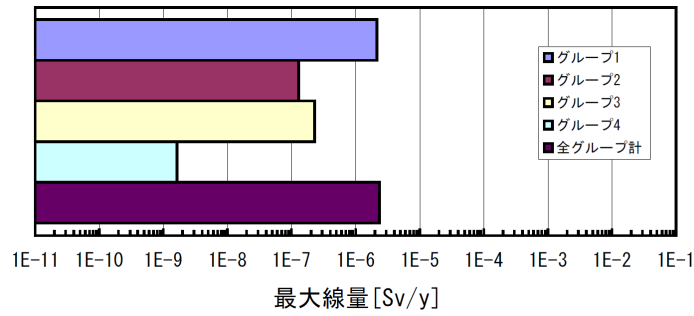
表 3.5.1-1 は, TRU レベル 3 報告書 (NUMO, 2011a) で検討された基本シナリオの解析ケースと各々のケースにおける支配核種を示すものである。廃棄体グループ 1 における支配核種は I-129 であり, 廃棄体グループ 2 では主に C-14, 廃棄体グループ 3 では I-129 に加えて C-14 や Se-79 や Ra-226 などが主要核種となっていることがわかる。レファレンスケース, 地下水タイプ変更ケース, 高度化対策適用ケースにおける各廃棄体グループの被ばく線量の例を図 3.5.1-1(a), (b), (c)に示す。これより, 既存の評価ケースにおいては廃棄体グループ 4 が全体の線量を支配することはないことがわかる。

これら知見に基づき, 高度化した包括的感度解析手法を用いた検討に際しては, 廃棄体グループ 1 の I-129, 廃棄体グループ 2 の C-14 および廃棄体グループ 3 の I-129 を検討対象核種として考えることとする。廃棄体グループ 4 については, 支配的な廃棄体にならないことから, 本検討における解析の対象から除外することとする。

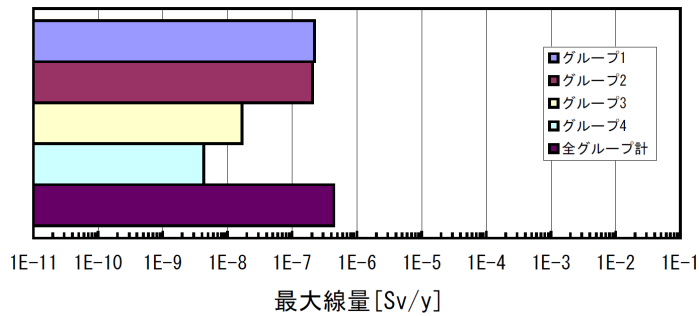
表 3.5.1-1 既存の安全評価での支配核種

シナリオの分類	解析ケースの分類	解析ケースの詳細分類	ケースNo.	合計				グループ1		グループ2		グループ3		グループ4			
				主要核種		主要核種		主要核種		主要核種		主要核種					
基本シナリオ	サブシナリオ	代替ケース	レファレンスケース	1	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14				
			水理環境変更ケース	TRU2からの水理モデルの変更	2-1	I-129		I-129		I-129		I-129		I-129			
					2-2	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					2-3	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					2-4	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
				TRU2からの水理モデルの変更、地下水タイプ変更	3-1	I-129	C-14	I-129		C-14		C-14		C-14			
					3-2	I-129	C-14	I-129		C-14		C-14		C-14			
					3-3	I-129	C-14	I-129		C-14		C-14		C-14			
					3-4	I-129	C-14	I-129		C-14		C-14		C-14			
			人工バリア変質影響ケース	緩衝材の止水性喪失時間変更	4-1	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14	I-129		
					4-2	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
					4-3	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
					4-4	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
			高pHによる母岩変質影響ケース	5	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	Se-79				
			初期酸化性影響ケース	酸化性環境継続時間の変更	6-1	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
					6-2	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
					6-3	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
			コロイド影響ケース	7	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14				
			天然有機物影響ケース	8	I-129		I-129		C-14	Se-79	I-129	C-14	Se-79				
			ガス影響ケース	9	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14				
			人工バリア変質&高pHによる母岩変質ケース	緩衝材の止水性喪失時間変更	10-1	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
					10-2	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
					10-3	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
					10-4	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
			天然有機物影響ケース	水理モデル変更	11-1	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
					11-2	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
					11-3	I-129		I-129		C-14		I-129		Se-79			
			人工バリア変質、高pHによる母岩変質、水理モデル変更ケース	緩衝材の止水性喪失時間変更、水理モデル変更	12-1	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					12-2	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					12-3	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					13-1	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					13-2	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					13-3	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					14-1	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					14-2	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					14-3	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					15-1	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					15-2	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					15-3	I-129		I-129		C-14		I-129		C-14			
					地質環境変更ケース	岩種変更	16-1	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	C-14	
							16-2	I-129		I-129		C-14		I-129	C-14	Se-79	
			16-3	I-129				I-129		C-14		I-129	C-14	C-14			
			16-4	I-129				I-129		C-14		I-129	C-14	Se-79			
			16-5	I-129				I-129		C-14		I-129	C-14	Se-79			
			地下水タイプ変更	17-1		C-14	I-129	I-129		C-14		C-14	I-129	Ra-226			
				17-2		C-14	I-129	I-129		C-14		C-14	I-129	Ra-226			
				17-3		C-14	I-129	I-129		C-14		C-14	I-129	Ra-226			
17-4	C-14	I-129		I-129			C-14		C-14	I-129	Ra-226						
17-5	C-14	I-129		I-129			C-14		Ra-226	Np-237	Ra-226						
17-6	C-14	I-129	I-129		C-14		Ra-226	Np-237	Ra-226								

(NUMO, 2011a, p8-103 「表 8.4.4-1 代替シナリオの支配核種」 より引用)



(a) ケース No.1：レファレンスケース（降水系地下水；母岩透水係数 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ）



(b) ケース No.3-1：地下水タイプ変更ケース
（海水系地下水；母岩透水量係数 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ）

	ケースNo.	母岩透水量係数 [m ² /s]	線量 [Sv/y]						
			1E-9	1E-8	1E-7	1E-6	1E-5	1E-4	1E-3	1E-2
廃棄体グループ1	2-1	1E-10	[Yellow bar: ~1E-6.5, Orange bar: ~1E-6.5]						
	2-2	1E-09	[Yellow bar: ~1E-5.5, Orange bar: ~1E-5.5]						
	2-3	1E-08	[Yellow bar: ~1E-4.5, Orange bar: ~1E-4.5]						
	2-4	1E-07	[Yellow bar: ~1E-3.5, Orange bar: ~1E-3.5]						
廃棄体グループ2	2-1	1E-10	[Yellow bar: ~1E-8.5, Orange bar: ~1E-8.5]						
	2-2	1E-09	[Yellow bar: ~1E-7.5, Orange bar: ~1E-7.5]						
	2-3	1E-08	[Yellow bar: ~1E-6.5, Orange bar: ~1E-6.5]						
	2-4	1E-07	[Yellow bar: ~1E-5.5, Orange bar: ~1E-5.5]						
廃棄体グループ3	2-1	1E-10	[Yellow bar: ~1E-6.5, Orange bar: ~1E-6.5]						
	2-2	1E-09	[Yellow bar: ~1E-5.5, Orange bar: ~1E-5.5]						
	2-3	1E-08	[Yellow bar: ~1E-4.5, Orange bar: ~1E-4.5]						
	2-4	1E-07	[Yellow bar: ~1E-3.5, Orange bar: ~1E-3.5]						
廃棄体グループ4	2-1	1E-10	[Yellow bar: ~1E-8.5, Orange bar: ~1E-8.5]						
	2-2	1E-09	[Yellow bar: ~1E-7.5, Orange bar: ~1E-7.5]						
	2-3	1E-08	[Yellow bar: ~1E-6.5, Orange bar: ~1E-6.5]						
	2-4	1E-07	[Yellow bar: ~1E-5.5, Orange bar: ~1E-5.5]						

(c) 水理環境変更ケースにおける高度化対策の適用

図 3.5.1-1 既存の安全評価における各グループの被ばく線量の例
(NUMO, 2011a を修正)

また、高度化した包括的感度解析手法の対象とする評価対象モデルとして、以下のモデルを考えることとした。評価岩種については、保守的な結果が与えられると考えられている結晶質岩を対象とすることとする。また、高度化した包括的感度解析手法において成立条件を抽出する際の評価対象領域としては、800 m の断層の核種移行特性を保守値で固定し、人工バリアと単一亀裂を有する長さ 100 m の母岩からなる天然バリアを考え、これらバリア機能を変動させて成立条件を抽出することとする。具体的には、以下のように考える

高度化した包括的感度解析手法は、主要変数を母岩の透水係数 k (透水量係数への換算を可能とする)、人工バリアからの核種放出率 F_N 、天然バリア中での核種の減衰割合 γ として、統計解析によりこれらの主要変数の成立条件を求めるものである。さらに、解析解を用いて、求められた成立条件の値を、それらの値を構成する個々のパラメータに分解する方法である (添付 1 参照)。

ここでは、天然バリア中の減衰割合 γ を母岩中での減衰割合 γ_1 と保守的な固定値で表現される断層中での減衰割合 γ_2 で表わすこととして、以下の関係により目標線量 P に相当する k, F_N, γ_1 の組み合わせである成立条件を見出すこととする。

$$P = F_N(k) \times \gamma(k) \times Do = F_N(k) \times (\gamma_1(k) \times \gamma_2) \times Do \quad \text{より,}$$

$$\frac{P}{\gamma_2} = F_N(k) \times \gamma_1(k) \times Do \quad \text{3.5.1-(1)式}$$

3.5.1-1 式は、断層中での減衰割合 γ_2 を既知情報として与え、母岩出口において、 γ_2 の減衰を考慮した目標線量を対象として成立条件を示すことを表している。この場合、3.5.1-1 式の断層中での減衰割合 γ_2 については、定常解析解 (石原ほか, 1999) を用いて算出することが可能である。ここでは、対象とする核種が、非収着性で半減期が長い I-129, C-14 であることから、減衰を無視し、 $\gamma_2=1$ とする。このことにより、成立条件を保守的に抽出することが可能になる。

さらに、3.3 節において規定した検討ケースについて、レファレンスケースである case1-0 との違いによる評価への影響と評価における考え方を表 3.5.1-2 にまとめた。

現状の高度化した包括的感度解析手法においては、溶解度や拡散係数などの核種移行パラメータの変動は容易に扱える。しかし、幾何形状については、関連するパラメータが複雑に解析解に取り込まれているため、その扱いが複雑になる。そこでここでは、解析を容易に進めるため、幾何形状を固定することとする。幾何形状が異なる場合の影響については、別途解析解を用いて幾何形状と放出率の関係について検討し、その影響についてまとめることとする。

表 3.5.1-2 に示すように、廃棄体グループ 1 の I-129, 廃棄体グループ 2 の C-14 については、レファレンスケースである case1-0 の幾何形状を対象とした検討を行う。

表 3.5.1-2 case1-0 との違いによる評価への影響と評価における考え方

Caseの特徴	廃棄体グループ1のI-129	高度化した包括的感度解析での扱い	廃棄体グループ2のC-14(瞬時溶出、ジルカロイ腐食、ステンレス腐食に伴う3つの溶出モードを考慮)	高度化した包括的感度解析での扱い	廃棄体グループ3のI-129	高度化した包括的感度解析での扱い	備考:安全評価(決定論解析または包括的感度解析)での検討対象の有無
Case1-0 短期閉じ込め考慮	既存の概念に対して、短期閉じ込め用の廃棄体パッケージを採用した処分概念に基づく評価を実施。	○	既存の概念に対して、短期閉じ込め用の廃棄体パッケージを採用した処分概念に基づく評価を実施。	○	既存の概念に対して、短期閉じ込め用の廃棄体パッケージを採用した処分概念に基づく評価を実施。	○	○
Case1-1 短期閉じ込めなし	短期の閉じ込めなしと短期の閉じ込めを考慮する場合の概念は、仕様が異なることから幾何形状が異なる。核種の減衰長半減期核種のI-129に関して短期の閉じ込めなしによる核種崩壊の影響はほとんど無視可能。	×*1	短期の閉じ込めなしと短期の閉じ込めを考慮する場合の概念は、仕様が異なることから幾何形状が異なる。長半減期核種のC-14に関して短期の閉じ込めなしによる核種崩壊の影響はほとんど無視可能。	×*1	短期の閉じ込めなしと短期の閉じ込めを考慮する場合の概念は、仕様が異なることから幾何形状が異なる。長半減期核種のI-129に関して短期の閉じ込めなしによる核種崩壊の影響はほとんど無視可能。	×*1	○
Case1-2 低位置密度(核種移行開始時の熱的制限の考慮による幾何形状の変更)	廃棄体グループ1は、非発熱性廃棄体であるため、幾何形状の変更はない。	×	廃棄体グループ2は発熱性廃棄体であるが、対象とする結晶質岩においては、低位置密度の概念設計の対象とはならなかった。	×	廃棄体グループ3は、非発熱性廃棄体であるため、幾何形状の変更はない。	×	○
Case1-3 一種二種区別							×
Case3-0 コンクリート製閉じ込め容器	コンクリート製容器の採用に起因して廃棄体断面あたりの定置数が減少、その分定置領域長さが増加。	×*1	コンクリート製容器の採用に起因して廃棄体断面あたりの定置数が減少、その分定置領域長さが増加。	×*1	コンクリート製容器の採用に起因して廃棄体断面あたりの定置数が減少、その分定置領域長さが増加。	×*1	○
Case2-0 高透水場用高度化概念採用	低浸出性廃棄体の採用による幾何形状の変更はない。低浸出性廃棄体の採用に基づき、核種の溶出率が低下した場合の評価が必要。溶出率は変動パラメータとして考慮可能であるため、case1-0において一括して評価を実施。	×	長期閉じ込め容器の採用により、幾何形状が変更される。10半減期以上の核種の閉じ込めが想定されているため、核種放出の影響は有意ではなくなることが想定される。	×*1	緩衝材の敷設により幾何形状が変更される。緩衝材の敷設によるバリア機能を考慮した評価を実施。	○	○
Case2-1 高度化概念+脱硝技術採用	低浸出性廃棄体の採用による幾何形状の変更はない。また、脱硝技術採用による影響はない。	×	長期閉じ込め容器の採用により、幾何形状が変更される。10半減期以上の核種の閉じ込めが想定されているため、核種放出の影響は有意ではなくなることが想定される。また、脱硝技術採用による影響はない。	×*1	緩衝材の敷設により幾何形状が変更される。緩衝材の敷設によりバリア機能が変更される。また、脱硝技術採用により、硝酸塩の影響を排除した評価が必要。これらの影響を受ける拡散係数、分配係数は変動パラメータとして考慮可能であるため、case2-0において一括して評価を実施。	×*1	△
Case2-2 高度化概念+低拡散層採用							×

○検討対象

×は検討対象外

△は必要に応じて定量的・半定量的判断

*1:幾何形状が放出率に及ぼす影響は、近似解析解を用いて定量的に把握することとし、ここでは、包括的感度解析手法の検討対象外とした。

廃棄体グループ 3 の I-129 については、高度化対策の採用により、幾何形状の変更とあわせて、バリア機能も変化するため、case1-0 の幾何形状と case2-0 の幾何形状の 2 ケースに対する検討を行うこととする。

以上のことから、対象核種ごとに高度化した包括的感度解析手法において考慮する因子は以下のとおりとする。

○廃棄体グループ 1 の I-129

- ・ 水理条件（母岩の透水性とそれに関連する掘削影響領域（Excavation Damaged Zone : EDZ）の地下水流量および人工バリア中の地下水流量，母岩の透水係数： $2.0 \times 10^{-10} \sim 2.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ¹⁴の変動を広めに設定し， $1.0 \times 10^{-10} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ と設定。EDZ の透水係数は，母岩の透水係数の 100 倍とし，間隙率の変化に応じた緩衝材の透水係数を設定し，二次元の円筒座標系の水理の解析解を用いて，EDZ の地下水流量および人工バリア中の地下水流量を算出）
- ・ 核種移行パラメータ（地下水条件として，降水系と海水系地下水を考慮し，それらに対応する収着分配係数，拡散係数の変動範囲を保守的に設定する。）
- ・ 低溶出性廃棄体の採用（溶出期間：瞬時から 100 万年まで）

○廃棄体グループ 2 の C-14

- ・ 水理条件（廃棄体グループ 1 の I-129 と同様）
- ・ 核種移行パラメータ（廃棄体グループ 1 の I-129 と同様）
- ・ 閉じ込め期間（6 万年の閉じ込めを考慮した場合については，有意な放出が起こらないことが想定されるため，包括的感度解析の解析条件としない。）
- ・ 放出モードの変動を考慮した解析を行う。ここでは，既存の評価で使用した総インベントリに対して最新の知見（原環センター，2012）から得られた瞬時溶出分，ジルカロイ中の存在割合，ステンレス中の存在割合を設定し（表 3.5.1-3 参照），3 つの溶出モード（瞬時溶出，ジルカロイの腐食速度に基づく溶出率，ステンレスの腐食速度に基づく溶出率）に対する解析を実施する。比較のために，表 3.5.1-3 に第 2 次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）において用いた値を合わせて示す（ジルカロイについては，瞬時溶出に係る酸化被膜と浸出率に応じた溶出に係る母材とを区別して表記する）。
- ・ 廃棄体グループ 2 に含まれる廃棄体は，その発熱条件に応じて JNFL/JAEA と CSD-B/CSD-C の 2 つに分類される。これらの廃棄体に対する人工バリア幾何形状は，熱的制約条件に適合させるため，異なったものとなっている。EDZ 中の地下水

¹⁴ 指数の表記について， $a.0 \text{ E} \cdot b$ は $a.0 \times 10^b$ を意味する。例： $2.0\text{E} \cdot 7$ は 2.0×10^{-7} を意味する。

流量はこの幾何形状に応じて変化する。そのため、幾何形状が異なる場合は、それぞれ区別して計算する必要がある。このような厳密な計算は、決定論解析において実施するものとし、包括的感度解析においては、主要な廃棄体である JNFL/JAEA の幾何形状と水理条件で代表させて評価することとする。この際、保守的観点から、全インベントリが JNFL/JAEA 廃棄体に含まれるとして評価を行う。

表 3.5.1-3 C-14 の各モードごとの核種の存在割合とインベントリ

C-14総インベントリ(Bq)			5.90E+14			
			存在割合(-)		インベントリ(Bq)	
			TRU2	最新	TRU2	最新
瞬時放出割合	表面付着	0.003	0.13	0.032	7.67E+13	1.89E+13
	ジルカロイ酸化被膜	0.029				
ジルカロイ腐食	ジルカロイ母材		0.53	0.655	3.13E+14	3.86E+14
ステンレス腐食	ステンレス母材	0.276	0.34	0.313	2.01E+14	1.85E+14
	インコネル母材	0.037				

○廃棄体グループ3のI-129

- ・ 水理条件（廃棄体グループ1のI-129と同様）
- ・ 核種移行パラメータ（地下水条件として、降水系と海水系、さらには、硝酸塩影響を考慮し、それらに対応する収着分配係数、拡散係数の変動範囲を保守的に設定する。）
- ・ 高度化対策（ベントナイトの敷設）の考慮（高度化対策の採用の有無ごとに成立条件を抽出する。そのため、それぞれ概念ごとに、水理条件、核種移行パラメータの条件の変動を考慮した解析を実施する。）

3.5.2 地質環境条件および設計条件に基づく包括的感度解析のケースの設定

前項の議論に基づいて包括的感度解析のケースを設定した。前述のように廃棄体グループによって考慮する因子が異なることから、ケース設定については廃棄体グループごとに検討した。また、決定論解析においては、母岩が結晶質岩である場合には核種移行モデルとして亀裂媒体モデルを用い、堆積岩の場合には多孔質媒体モデルを用いる。本検討では、結晶質岩を想定して亀裂媒体モデルを用いた包括的感度解析を実施した。表 3.5.2-1 に設定した包括的感度解析のケースの一覧を示す。

廃棄体グループ1については、降水系地下水を想定した場合に用いる線量換算係数（河川水、温暖、農業従事者）と、海水系地下水を想定した場合に用いる線量換算係数（沿岸海域、温暖、海洋漁業従事者）の2種類について、個別に成立条件を抽出する（ケースA, B）。他の廃棄体グループでは、降水系地下水を想定するケースで代表し、海水系地下水の場合の成立条件は省くことにする。

廃棄体グループ2については、前述のように放出モードを支配するパラメータに関する

成立条件を水理条件、核種移行パラメータの条件の変動を考慮して見出す。そのため、3つのモードごとに個別に成立条件を抽出する（ケースC, D, E）。

廃棄体グループ3および4に関しては、高透水場用高度化対策の採用に当たって緩衝材が敷設されるため、核種移行解析において人工バリアモデルに変更が加わる事となる。このため、廃棄体グループ3の包括的感度解析では、高度化対策の採用の有無によって異なる個別のケースを設定した。

表 3.5.2-1 包括的感度解析の解析ケース一覧

包括的感度解析のケース	廃棄体グループ	核種	対応する検討ケース	溶出期間	緩衝材の有無	母岩	生物圏
A	1	I-129	Case1-0	10 ⁻² 年～10 ⁶ 年	有	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者
B		I-129		10 ⁻² 年～10 ⁶ 年	有	結晶質岩	沿岸海域, 温暖, 海洋漁業従事者
C	2	C-14 (表面付着・ジルカロイ酸化被膜)	Case1-0	瞬時放出	有	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者
D		C-14 (ジルカロイ母材)		10 ³ 年～10 ⁷ 年	有	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者
E		C-14 (ステンレス・インコネル)		10 ² 年～10 ⁶ 年	有	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者
F	3	I-129	Case1-0	瞬時放出	無	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者
G		I-129	Case2-0	瞬時放出	有	結晶質岩	河川水, 温暖, 農業従事者

注: 全ケースで廃棄体からの核種漏えい開始時刻を500年で固定した(短期閉じ込め容器の想定)。

3.5.3 核種移行パラメータの変動範囲の設定

解析に用いるパラメータのうち、幾何形状や閉じ込め期間、廃棄体からの溶出期間および核種インベントリについては、本検討で整理した情報をもとに、それらの値（または変動範囲）を設定した。その他のパラメータの変動範囲などについては、既存の評価（NUMO, 2011a）の設定値を参考に設定した。それらの範囲を表 3.5.3-1～表 3.5.3-6 に示す。

表 3.5.3-1 包括的感度解析に用いる母岩特性および水理特性の変動範囲

パラメータ	単位	分布(※)	水理特性等の変動範囲		
			固定値	下限値	上限値
EDZ透水係数の増倍比		fix	100		
EDZ岩真密度: ρ_m	kg/m ³	fix	2700		
EDZ間隙率: ϵ_m		fix	0.02		
母岩真密度: ρ	kg/m ³	fix	2700		
母岩マトリクス間隙率: ϵ		log		0.003	0.5
母岩マトリクス中の実効拡散係数: De_m	m ² /s	log		9E-14	4E-9
母岩マトリクス拡散寄与面積割合: F		linear		0.1	1
母岩マトリクス拡散深さ: P	m	linear		0.01	1
母岩透水係数: k	m/s	log		2E-11	2E-7
母岩亀裂頻度: 1/m	1/m	fix	2		
母岩亀裂中の移行距離	m	fix	100		
母岩亀裂中の分散長比: α_L		fix	0.1		
動水勾配: i		fix	0.01		

※: 分布欄に表示した「fix」は固定値, 「linear」は線形一様分布, 「log」は対数一様分布を表す。

表 3.5.3-2 包括的感度解析に用いる人工バリア材特性の変動範囲

パラメータ	単位	分布 (※)	人工バリア材特性の変動範囲		
			固定値	下限値	上限値
充填材真密度	kg/m ³	fix	2580		
充填材空隙率		linear		0.04	0.98
充填材中の実効拡散係数	m ² /s	log	空隙率の関数		
充填材の透水係数	m/s	log	空隙率の関数		
緩衝材真密度	kg/m ³	fix	2680		
緩衝材空隙率		linear		0.2	1
緩衝材中の実効拡散係数	m ² /s	log	空隙率の関数		
緩衝材の透水係数	m/s	log	空隙率の関数		

※: 分布欄に表示した「fix」は固定値, 「linear」は線形一様分布, 「log」は対数一様分布を表す。

表 3.5.3-3 各ケースにおいて用いるその他のパラメータ条件

	パラメータ	単位	分布(※)	固定値	下限値	上限値
ケースA およびB (Gr1)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	48.6		
	坑道直径	m	fix	11.7		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	log		1E-2	1E+6
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	1143		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	0		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	0		
	緩衝材厚さ	m	fix	1		
ケースC (Gr2: 付着・酸化被膜)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	688.5		
	坑道直径	m	fix	11.9		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	11312		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	4296		
	緩衝材厚さ	m	fix	1		
ケースD (Gr2: ジルカ ロイ母材)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	688.5		
	坑道直径	m	fix	11.9		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	log		1E+3	1E+7
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	11312		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	4296		
	緩衝材厚さ	m	fix	1		
ケースE (Gr2: ステン レス・インコ ネル)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	688.5		
	坑道直径	m	fix	11.9		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	log		1E+2	1E+6
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	11312		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	4296		
	緩衝材厚さ	m	fix	1		
ケースF (Gr3: Case1- 0)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	495		
	坑道直径	m	fix	11.8		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	30914		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	0		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	0		
	緩衝材厚さ	m	fix	緩衝材なし		
ケースG (Gr3: Case2- 0)	廃棄体定置領域の長さ	m	fix	772.2		
	坑道直径	m	fix	11.7		
	廃棄体からの核種漏洩開始時期	y	fix	500		
	廃棄体からの核種浸出期間	y	fix	0		
	充填材体積(収着機能を見込む)	m ³	fix	18158		
	充填材体積(収着機能を見込まない)	m ³	fix	0		
	廃棄体領域空洞体積	m ³	fix	0		
	緩衝材厚さ	m	fix	1		

※: 分布欄に表示した「fix」は固定値, 「linear」は線形一様分布, 「log」は対数一様分布を表す。

表 3.5.3-4 包括的感度解析における溶解度の設定

包括的感度解析ケース	廃棄体グループ	核種	溶解度に関する設定
A	1	I-129	可溶性
B	1		可溶性
C	2	C-14(有機)	可溶性
D	2		可溶性
E	2		可溶性
F	3	I-129	可溶性
G	3		可溶性

表 3.5.3-5 核種の初期インベントリおよび線量換算係数

包括的感度解析ケース	核種	半減期 [y]	初期インベントリ (I ₀) [Bq]	線量への換算係数(D ₀) [Sv/Bq]	生物圏での想定
A	I-129	1.57E+07	5.9E+13	3.2E-15	河川水, 温暖, 農業従事者
B			5.9E+13	5.7E-17	沿岸海域, 温暖, 海洋漁業従事者
C	C-14	5.73E+03	1.9E+13	6.4E-17	河川水, 温暖, 農業従事者
D			3.9E+14		河川水, 温暖, 農業従事者
E			1.8E+14		河川水, 温暖, 農業従事者
F	I-129	1.57E+07	7.2E+11	3.2E-15	河川水, 温暖, 農業従事者
G			7.2E+11		河川水, 温暖, 農業従事者

表 3.5.3-6 包括的感度解析における分配係数の変動範囲

包括的感度解析ケース	廃棄体グループ	核種	分布	充填材 分配係数[m ³ /kg]				
				感度解析での変動範囲		決定論的解析での設定		
				上限値	下限値	降水系還元性	海水系還元性	降水系酸化性
A, B	1	I-129	log	1	1E-06 (≒0)	0.000125	0	0.000125
C, D, E	2	C14(有機)	log	0	0	0.00025	0	0.00025
F	3	I-129	log	0.1	1E-06 (≒0)	0	0	0
G	3(緩衝材敷設)	I-129	log	0.1	1E-06 (≒0)	0	0	0
包括的感度解析ケース	廃棄体グループ	核種	分布	緩衝材 分配係数[m ³ /kg]				
				感度解析での変動範囲		決定論的解析での設定		
				上限値	下限値	降水系還元性	海水系還元性	降水系酸化性
A, B	1	I-129	log	1E-3 (※1)	1E-06 (≒0)	0	0	0
C, D, E	2	C14(有機)	log	1E-3 (※1)	1E-06 (≒0)	0	0	0
F	3	I-129		緩衝材なし				
G	3(緩衝材敷設)	I-129	log	1E-3 (※1)	1E-06 (≒0)	0	0	0
包括的感度解析ケース	廃棄体グループ	核種	分布	母岩(花崗岩) 分配係数[m ³ /kg]				
				感度解析での変動範囲		決定論的解析での設定		
				上限値	下限値	降水系還元性	海水系還元性	降水系酸化性
A, B	1	I-129	log	0.1	1E-06 (≒0)	0.0001	0	0.0001
C, D, E	2	C14(有機)	log	0.1	1E-06 (≒0)	0.0001	0	0.0001
F	3	I-129	log	0.1	1E-06 (≒0)	0	0	0
G	3(緩衝材敷設)	I-129	log	0.1	1E-06 (≒0)	0	0	0

※1: パラメータの感度を把握するために3桁の変動範囲を設定した。

EDZの厚さは、水理解析において、EDZ中の地下水流量を算出するために使用する。この厚さの関数であるEDZの体積の扱いについては、核種移行解析を保守的に行うため(4章参照)、EDZの収着分配係数を無視することと併せて、その影響が無視できるような小さな値(緩衝材の体積の1/10)とした。また、セメント系材料の透水係数と緩衝材の拡散係数、透水係数については、それぞれの媒体の間隙率との相関関係に基づいて設定することとした。これらの詳細については、次項で記述する。

廃棄体グループ1については、case1-0で想定するセメント混練固化廃棄体およびcase2-0で想定する代替固化技術まで包含するよう、廃棄体からの核種浸出期間の変動範囲を広く設定した。

充填材中でのヨウ素の分配係数の設定においては、既存の研究 (Toyohara et al., 2000) からアルミナセメントに対するヨウ素の分配係数分布の上限値を設定した。緩衝材の分配係数の設定においては、既存の研究 (Tachi et al., 2010) を参照して、文献などに基づく上限値を設定した。溶解度については、対象とした核種はいずれも可溶性の元素であるため設定しない。

3.5.4 パラメータの相関関係の扱い

包括的感度解析では、評価の網羅性を確保するために、基本的には各パラメータを互いに独立に設定する。しかし、既存の研究成果 (電事連・JNC, 2005 ; JAEA・FEPC, 2007 ; NUMO, 2011a) が示すように、各領域における間隙率と実効拡散係数、間隙率と透水係数など、核種移行計算に用いるパラメータの中には相関をもつと考えられる組合せも含まれる。このような相関をもつパラメータが、互いに独立に設定され、組み合わされる場合には、実際には想定できないパラメータ値の組合せが発生する可能性がある。そのため、想定できないパラメータ値の組合せをあらかじめ排除しておくことが、包括的感度解析において適切な成立条件を抽出する上でも、また、計算効率を高める上でも、有用と考えられる。本検討では、上記の研究成果において与えられている相関式を用いて、間隙率と実効拡散係数、透水係数の相関関係を考慮することとした。相関式を適用する間隙率の範囲は、相関関係にある実効拡散係数、透水係数の変動範囲を踏まえて設定した。以下、本検討において採用した関係式を示す。

(1) セメント系材料の間隙率との関係

(i) セメント系材料透水係数－間隙率

セメント系材料透水係数と間隙率の関係については、第2次 TRU レポートにおいて整理されている以下の関係式を用いる。

$$k_c = 4.34 \times 10^{-9} \times \theta^3 (1 - \theta)^{-2} \quad 3.5.4-(1)式$$

k_c : セメント系材料透水係数 (m/s)

θ : セメント系材料の間隙率 (—)

相関式における間隙率 θ の範囲は、セメント系材料の透水係数の変動範囲を考慮して 0.02~0.98 とした。

(ii) セメント系材料拡散係数－間隙率

セメント系材料拡散係数と間隙率の関係については、第2次 TRU レポートにおいて整

理されている以下の関係式を用いる。

$$De=2.27 \times 10^{-9} \times \theta^{3.05} \quad 3.5.4-(2)式$$

De : セメント系材料拡散係数 (m²/s)

θ : セメント系材料の間隙率 (—)

相関式における間隙率 θ の範囲は、セメント系材料の拡散係数の変動範囲を考慮して 0.04~1.0 とした。

以上、セメント系材料の間隙率と透水係数、拡散係数の関係を踏まえ、共通して関係が成立する領域として、セメント系材料の間隙率の範囲を 0.04~0.98 とした。

(2) 緩衝材の間隙率との関係

(i) 緩衝材の実効拡散係数—間隙率

緩衝材の実効拡散係数と間隙率の関係については、第 2 次 TRU レポートにおいて整理されている以下の関係式を用いる。

$$De=2.27 \times 10^{-9} \times \theta^n \quad (n=2.22 \times fs^{0.13}+1) \quad (\text{中性核種}) \quad 3.5.4-(3)式$$

$$De=2.27 \times 10^{-9} \times \theta^n \quad (n=4.72 \times fs^{0.13}+1) \quad (\text{陰イオン : C, Cl, I, Se, Mo}) \quad 3.5.4-(4)式$$

De : 緩衝材実効拡散係数 (m²/s)

θ : 緩衝材の間隙率 (—)

Fs : スメクタイトの含有率 (0.34)

間隙率 θ の範囲は緩衝材の実効拡散係数の変動範囲を考慮して 0.2~1.0 とした。

(ii) 緩衝材の透水係数—間隙率

緩衝材の透水係数は、間隙率との相関性は認められるものの、その傾向はベントナイト系材料の種類 (Na 型, Ca 型) や溶液のイオン強度などに大きく影響される。特にベントナイトの種類については、Na 型と Ca 型で間隙率との相関性が異なることが知られている。低密度領域においては、両者の差異が顕著となり、同じ乾燥密度においても 1~2 桁, Ca 型の方が透水係数が高くなることが知られている (電事連・JNC, 2005 ; JAEA・FEPC, 2007)。包括的感度解析においては、ベントナイトの種類の経時的な変化を考慮していない。そのため、各種ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係を考慮して、全ての試験データを網羅的に包含する領域から緩衝材の透水係数をサンプリングすることとした。具体的には、図 3.5.4-1 に示した青い枠線で囲まれた領域内でサンプリングを行う。なお、有効粘土密度は、緩衝材の間隙率から算出される変動パラメータで、以下の関係式 (電事連・JNC, 2005 ; JAEA・FEPC, 2007) で示される。その範囲は、緩衝材の実効拡散係数—間隙率の関係に基づいて設定された緩衝材の間隙率の変動範囲から算出される。

$$\rho_e = \frac{\rho(1-\theta)(100-Rs)}{\left(100 - \frac{\rho(1-\theta)Rs}{\rho_s}\right)}$$

3.5.4-(5)式

ρ_e : 緩衝材の有効粘土密度 (Mg/m³)

ρ : 緩衝材の真密度

θ : 緩衝材の間隙率 (-)

Rs : ケイ砂混合率(30%)

ρ_s : ケイ砂の土粒子密度 (2700 kg/m³)

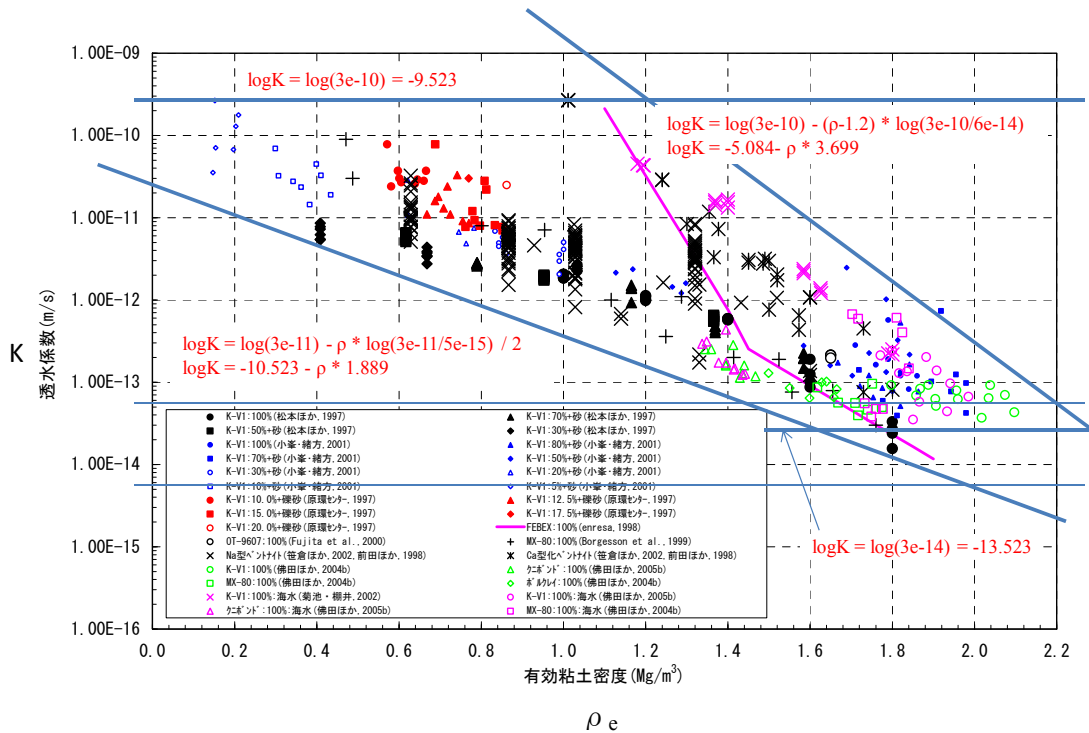


図 3.5.4-1 緩衝材の透水係数－有効粘土密度の関係式

(電事連・JNC, 2005 ; JAEA・FEPC, 2007)

具体的なサンプリング方法は次の通りである。

緩衝材の透水係数値が、青線で囲まれた領域の外側からサンプリングされることを避けるために、以下の手順でサンプリングを行う。まず、有効粘土密度を算出するための緩衝材の間隙率を、設定した変動範囲（一様分布）からサンプリングする。次に、3.5.4-(5)式に基づいて、サンプリングされた緩衝材の間隙率を有効粘土密度に変換して、その値と青線で囲まれた領域との関係に基づいて、透水係数の変動範囲（上限値および下限値）を設定する。本検討では図 3.5.4-1 に基づき、透水係数上限値 k_{\max} [m/s]および透水係数下限値 k_{\min} [m/s]を、有効粘土密度 ρ_e [Mg/m³]の関数として次式のように設定した。

$$\text{Log } k_{\max} = \min\{-9.523, -5.084 - \rho_e \times 3.699\} \quad 3.5.4-(6)\text{式}$$

$$\text{Log } k_{\min} = \max\{-10.523 - \rho_e \times 1.889, -13.523\} \quad 3.5.4-(7)\text{式}$$

図 3.5.4-1 からわかるように、この手法でサンプリングされる任意の有効粘土密度に対する透水係数の分布には偏りが生じる。そのため、分布が均一でないことによるサンプル値の偏りを回避するため、成立条件の抽出においては十分な数の解析を実施することとする。

第3章 参考文献

- 電事連・JNC (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取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02., 2005年9月.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2012) : 平成23年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第3分冊) —放射化金属廃棄物中のC-14の放出挙動—, 平成24年3月.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2013) : 平成24年度 地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第1分冊) —ヨウ素固定化処理技術開発—, 平成25年3月.
- 法律(2012a) : 核原料物質, 核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律, 最終改正 平成24年6月27日.
- 法律(2012b) : 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24年6月27日.
- 石原義尚, 石黒勝彦, 梅木博之(1999) : Se-79の半減期の長期化による地層処分システム性能評価への影響, JNC TN8400 99-086.
- JAEA(日本原子力研究開発機構)(2012) : 平成23年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 硝酸塩処理・処分技術高度化開発 報告書, 平成24年3月.
- JAEA・FEPC (Japan Atomic Energy Agency and The Federation of Electric Power Companies of Japan) (2007) : Second Progress Report on Research and Development for TRU Waste Disposal in Japan -Repository Design, Safety Assessment and Means of Implementation in the Generic Phase-, JAEA-Review 2007-010 FEPC TRU-TR2-2007-01, Japan Atomic Energy Agency and The Federation of Electric Power Companies of Japan.
- JNC(核燃料サイクル開発機構)(1999a) : 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.
- JNC(核燃料サイクル開発機構)(1999b) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次とりまとめ— 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2009) : 処分場の概要, 放射性廃棄物の地層処分事業について～公募のご案内～ 分冊-1.
- NUMO(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, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03, 平成23年1月.
- NUMO(原子力発電環境整備機構)(2011b) : 地層処分施設の耐震性評価, NUMO-TR-10-13, 平成23年3月.
- 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21日, 経済産業省告示台44号.
- Tachi, Y., Suyama, T., Ochs, M. and Ganter, C. (2010) : Development of JAEA Sorption Database

(JAEA-SDB) : Update of Data Evaluation, Functions and Sorption/QA Data, JAEA-Data/Code 2010-031.

Toyohara, M., Kaneko, M., Ueda, H., Mitsutsuka, N., Fujihara, H., Murase, T. and Saito, N. (2000): Iodine sorption onto mixed solid alumina cement and calcium compounds, Journal of Nuclear Science and Technology, 37, 11, pp.970-978.

4. 処分システムの応答特性と解析条件の類型化および評価の十分性の把握

3章において、検討対象とする地質環境条件および廃棄物の特性などが明示された。ここでは、2章で述べた高度化した包括的感度解析を組み入れた安全評価手順に基づき、近似解析解を用いて把握した処分システムの応答特性について記述するとともに、それに基づく解析条件の類型化と評価の十分性の検討について記述する。

4.1 処分システムの応答特性の把握

4.1.1 処分システムの応答特性を表す解析解

拡散・移流による人工バリアからの核種の最大放出率を表す近似解析解が導出されている (NUMO, 2011 ; 大井, 2011 ; 大井, 2012 ; Ohi et al., 2013) (添付1参照)。この近似解析解は、インベントリの枯渇と EDZ 中の地下水流量に応じて決まる外側境界濃度を考慮したものである。一方、天然バリア中の核種移行については、移流/分散, 収着, 母岩マトリクスへの拡散 (有限マトリクス拡散寄与面積比率とマトリクス拡散深さ) および放射性核種の崩壊を考慮した次元亀裂媒体における核種移行の解析解が導出されている (石原ほか, 1999)。これらの評価領域と対応する評価モデルの体系を図 4.1.1-1 に示す。

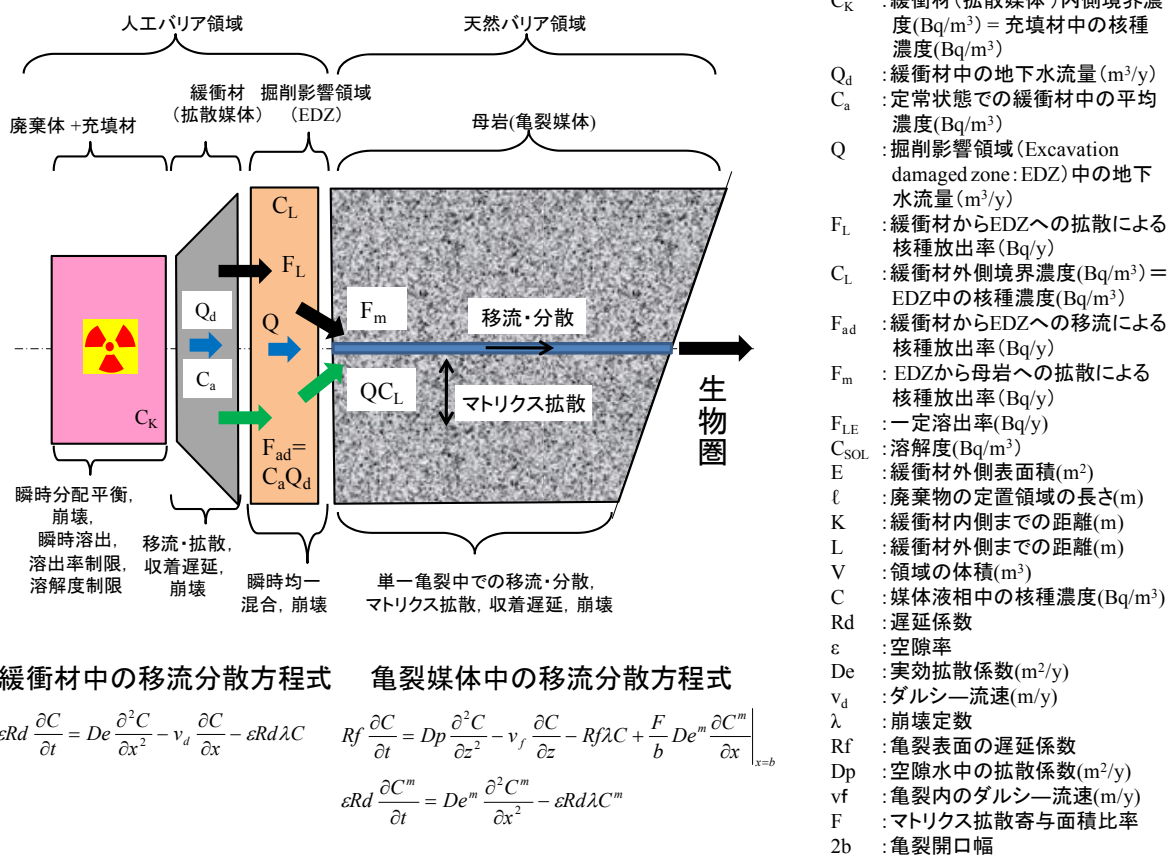


図 4.1.1-1 評価領域と対応する評価モデルの体系

亀裂媒体中での核種移行の応答特性は、石原ほか(1998)により示されている。ここでは、近似解析解に基づく人工バリアシステムの応答特性について示す。

大井が導出した近似解析解(NUMO, 2011; 大井, 2011; 大井, 2012; Ohi et al., 2013)は、既存の評価(JNC, 1999; 電事連・JNC, 2005; NUMO, 2011)に用いられた人工バリアからの核種放出に関する評価モデルに準拠した解析解である。この解析解は、「拡散による核種放出率の最大値は、定常状態での核種放出率によって与えられる」との仮定と「最大放出率を与える状態での人工バリア内の核種量は初期インベントリと等しい」との近似を用いたものである。解の導出においては、上記仮定と近似に基づき、内側境界濃度 C_K と外側境界濃度 C_L を未知数とし、拡散による核種放出の定常解析解と移流による核種放出率の式を用いて、人工バリア内での質量保存の式とEDZでの連続の式を立てた。この2つの式からなる連立方程式を解くことによって、拡散と移流の影響を考慮した場合の内側境界濃度 C_K と外側境界濃度 C_L を与える近似解析解が求められた。この近似解析解は、「緩衝材からの核種放出が拡散によって支配されること」を前提とするものである。そのため、移流による放出率 F_{ad} が拡散による放出率 F_L よりも多くなるなど、移流による影響が無視できない場合は、得られる近似解析解の誤差が大きくなることに留意すべきである。

この近似解析解では、緩衝材から放出された核種が瞬時に均一混合される領域として、EDZを採用している。またこの近似解析解では、インベントリの枯渇と3つの緩衝材内側境界条件(瞬時溶出条件、溶解度制限、溶出率制限)および、EDZ内の地下水流量 Q によって緩衝材外側境界濃度が変化するという外側境界条件を考慮している。インベントリの枯渇については、非定常解析解から得られる放出率の積分値からインベントリ量と等しくなる時間を枯渇時間として算出し、その結果を重ね合わせの原理を用いて放出率の算出に反映させるなどの方法がある。また、インベントリの枯渇を考慮しつつ、多重の人工バリアを均一なバリアと仮定し、拡散、収着などの機能を平均化して解析的に導出した解析解(鈴木ほか, 2009)も存在する。前者は、放出率とインベントリを解析的には示すことはできない。また、後者は、EDZの濃度を0として導出しているため、EDZ内の地下水流量(m^3/y)に依存した緩衝材外側境界濃度を考慮できていない。そのため、本検討で用いる近似解析解は、現状、インベントリの枯渇とEDZ内の地下水流量(m^3/y)に依存した緩衝材外側境界濃度を考慮して、パラメータと放出率の関係を解析的に提示可能な唯一の解析解である。この近似解析解は、数値解析の結果との比較により、その妥当性が確認されている(NUMO, 2011; 大井, 2011)。

この近似解析解は、2次の項までのテーラー展開を用いて崩壊定数を有する項などを近似的に無視することにより、関連するパラメータの変動に対する人工バリアからの核種放出に関する応答特性を示す簡略式を与える。この簡略式ではさらに、人工バリア(緩衝材)中の地下水流量 Q_d を微小量とみなして簡略化が図られている(添付3参照)。そのため、半減期の短い核種の放出率の算出や移流が有意になる条件における核種の放出率の算出においては注意が必要である。この簡略式の意義は、パラメータの変動に対する人工バリア

の応答特性（核種放出率の特性）を簡便な四則演算で表しているため、この簡略式によって、人工バリアの応答特性を容易に把握できることである。

図 4.1.1-2 には、理解を容易にするため、 $Q_d/Q \rightarrow 0$ となる場合の簡略式（添付 3 参照）によって表される人工バリアの応答特性を概念的に示す。また、図 4.1.1-2 の後に、これらの図表に用いられているパラメータの説明を示す。なお、これらの式の物理的意味については、4.1.2 節で示す。

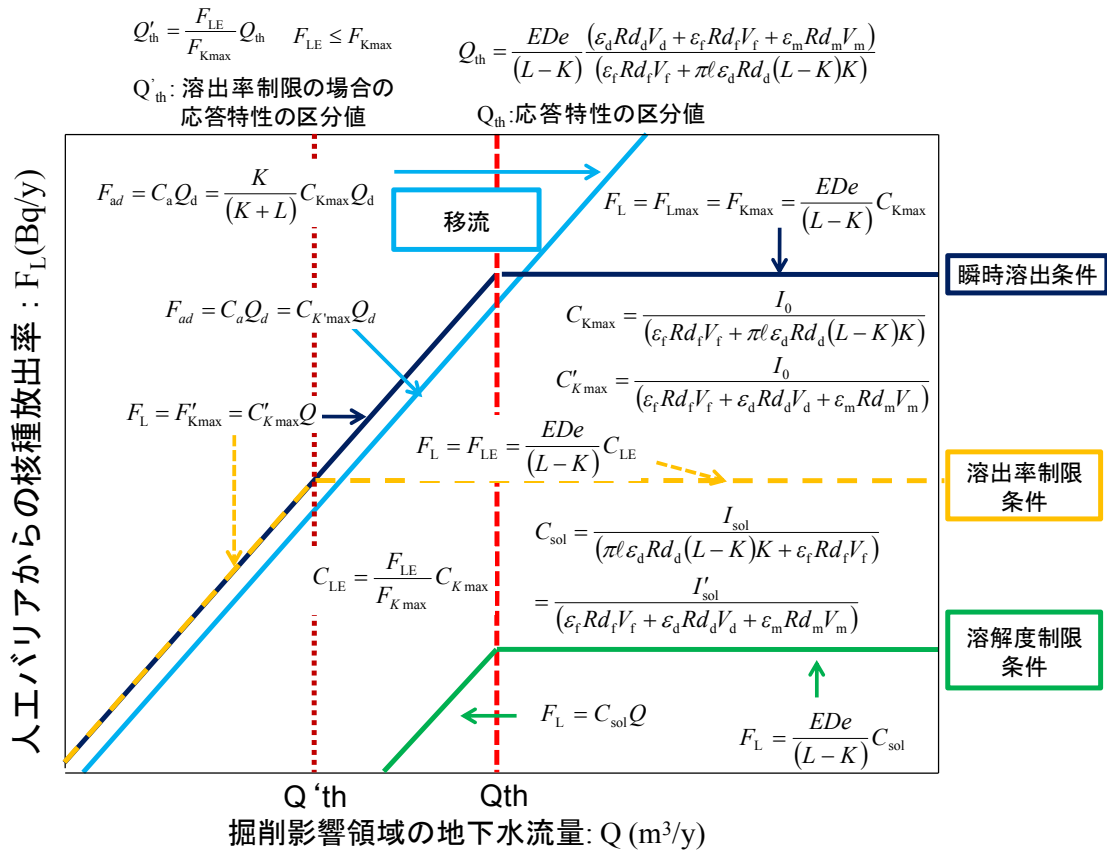


図 4.1.1-2 近似解析解の簡略式によって表される人工バリアの応答特性

パラメータの説明

Q_{th} : 応答特性の区分値(m^3/y) (人工バリアからの核種の放出率が、外側境界濃度 = 0 の場合における核種放出率と等しくなる地下水流量)

Q'_{th} : 内側境界条件が一定溶出率で与えられる場合を考慮した応答特性の区分値

$$Q'_{th} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} Q_{th} \begin{cases} F_{LE} = F_{Kmax} & (\text{瞬時溶出条件及び溶解度制限条件}) \\ F_{LE} < F_{Kmax} & (\text{溶出率制限条件}) \end{cases} \quad (m^3/y)$$

Q : EDZ 中の地下水流量(m^3/y)

I_0 : 初期インベントリ (Bq)

C_{Kmax} : 外側境界濃度が 0 とみなせる条件において、インベントリ I_0 で定常状態になる場合 (瞬時溶出条件) の拡散媒体内側境界濃度の最大値(Bq/m^3)

- F_{Kmax} : 外側境界濃度が 0 とみなせる条件において、インベントリ I_0 で定常状態になる場合（瞬時溶出条件）の廃棄体から拡散媒体への核種の放出率の最大値 (Bq/y) (=人工バリアからの核種の放出率の最大値 F_{Lmax})
- C'_{Kmax} : 外側境界濃度が 0 とみなせない条件においては、インベントリ I_0 の制限のもと（瞬時溶出条件）で人工バリア内が均一濃度になる。この場合の拡散媒体内側境界濃度の最大値(Bq/m³)
- F'_{Kmax} : 外側境界濃度が 0 とみなせない条件において与えられる廃棄体から拡散媒体への核種の放出率の最大値(Bq/y) (=人工バリアから核種の放出率の最大値 F'_{Lmax})。
- F_L : 定常状態での拡散媒体から EDZ への拡散による核種放出率(Bq/y)
- E : 拡散媒体外側の幾何表面積(m²)
- De : 拡散媒体の実効拡散係数(m²/y)
- L : 拡散媒体外側までの半径(m)
- K : 拡散媒体内側までの半径(m)
- F_{LE} : 廃棄体からの核種溶出率(Bq/y)
- C_{SOL} : 溶解度(Bq/m³)($C_{SOL} \leq C_{Kmax}$)
- C_{LE} : 溶出率制限の場合の緩衝材内側境界濃度(Bq/m³)
- F_{ad} : 定常状態での人工バリアからの移流による核種放出率(Bq/y)
- Q_d : 人工バリア（緩衝材）中の地下水流量(m³/y) ($Q_d \leq Q$)
- I_{SOL} : $Q'_{th} < Q$ で、内側境界濃度が C_{SOL} で規定される場合に定常状態になるインベントリ (Bq) ($I_{SOL} < I_0$)
- I'_{SOL} : $Q < Q'_{th}$ で、内側境界濃度が C_{SOL} で規定される場合に定常状態になるインベントリ (Bq) ($I'_{SOL} < I_0$)
- C_a : 定常状態での拡散媒体中の平均濃度(Bq/m³)
- ε : 拡散媒体の間隙率 (-)
- Rd : 遅延係数 $Rd = 1 + \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} Kd\rho$
- Kd : 核種の分配係数(m³/kg)
- ρ : 真密度(kg/m³)
- V : 媒体の体積(m³)
- ℓ : 処分坑道軸方向の拡散媒体の長さ(m)
- m : EDZ の厚さ(m)
- d : 拡散媒体を表す添え字
- f : 充填材を表す添え字
- m : EDZ を表す添え字

4.1.2 人工バリアシステムからの核種放出を表す簡略式の意味

図 4.1.1-2 からわかるように、緩衝材からの核種放出は、EDZ の地下水流量 Q と応答特性の区分値 Q'_{th} の大小関係に応じてその特性が異なる。ここで、応答特性の区分値 Q'_{th} などは以下のように与えられる量である。

$$Q_{th} = \frac{EDe (\varepsilon_f Rd_f V_f + \varepsilon_d Rd_d V_d + \varepsilon_m Rd_m V_m)}{(L-K) (\pi \ell \varepsilon_d Rd_d (L-K) K + \varepsilon_f Rd_f V_f)} \quad 4.1.2-(1)式$$

$$Q'_{th} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} Q_{th} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \frac{EDe (\varepsilon_f Rd_f V_f + \varepsilon_d Rd_d V_d + \varepsilon_m Rd_m V_m)}{(L-K) (\pi \ell \varepsilon_d Rd_d (L-K) K + \varepsilon_f Rd_f V_f)} \quad 4.1.2-(2)式$$

$$\begin{cases} F_{LE} = F_{Kmax} \text{ (瞬時溶出条件及び溶解度制限条件)} \\ F_{LE} < F_{Kmax} \text{ (溶出率制限条件)} \end{cases}$$

$$De' = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} De \quad 4.1.2-(3)式$$

ここで、 F_{LE} は一定溶出率、 F_{Kmax} は、 $Q'_{th} < Q$ の場合に初期インベントリ I_0 や与えられた他の条件の下で示される人工バリアからの核種放出率の最大値である。ここでは、応答特性の理解を助けるため、 $Q_d/Q \rightarrow 0$ の場合を考え、物理的な意味がわかるように、それぞれの内側境界条件ごとに緩衝材からの拡散および移流による放出率を簡便な式で記述する。

(1) 瞬時溶出の場合の拡散による核種放出

$Q < Q'_{th}$ の場合、EDZ から運び去られる核種量よりも、拡散により緩衝材から放出される核種量の方が多くなるため、時間が経過し、定常状態になるときは、人工バリア領域（充填材、緩衝材および EDZ を含む領域）の濃度は均一になっている。図 4.1.1-2 に示すように、この場合の緩衝材内側境界濃度は以下のように与えられる。

$$C'_{Kmax} = \frac{I_0}{(\varepsilon_f Rd_f V_f + \varepsilon_d Rd_d V_d + \varepsilon_m Rd_m V_m)} \quad 4.1.2-(4)式$$

右辺の分母の各項は、人工バリアの個々の領域で収着を考慮した場合の核種の存在体積を表している。初期インベントリをこの値の和で除した値は人工バリア内の均一濃度を表している。この濃度は $Q < Q'_{th}$ の場合の緩衝材内側境界の最大濃度となる。 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、この濃度を EDZ 中の地下水流量 Q が運び去ることで与えられるため、以下のように表わされる。

$$F_L = \frac{I_0}{(\varepsilon_f Rd_f V_f + \varepsilon_d Rd_d V_d + \varepsilon_m Rd_m V_m)} Q = C'_{Kmax} Q = F'_{Kmax} \quad 4.1.2-(5)式$$

4.1.2-(5)式が示すように、 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの核種放出率は、実効拡散係数には依存せず、均一濃度と EDZ 中の地下水流量 Q の積で与えられる。

$Q'_{th} < Q$ の場合、EDZ から運び去られる核種量の方が、拡散により緩衝材から放出される核種量よりも多くなるため、EDZ の濃度は 0 と見なせる濃度になる。図 4.1.1-2 に示すように、この場合の緩衝材内側境界濃度は以下のように与えられる。

$$C_{K_{max}} = \frac{I_0}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \quad 4.1.2-(6)式$$

右辺の分母は、外側境界濃度が 0 の場合の充填材領域と緩衝材領域の収着を考慮した場合の核種の存在体積の和を表している。この式は、4.1.2-(7)式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_0 &= C \varepsilon_f R d_f V_f + \frac{1}{2} C \varepsilon_d R d_d V_d \\ &= C \left(\varepsilon_f R d_f V_f + \frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d \right) \cong C \left[\varepsilon_f R d_f V_f + \frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d 2\pi l \frac{(K+L)(L-K)}{2} \right] \\ &= C \left[\varepsilon_f R d_f V_f + \frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d \pi l (2K + \Delta K)(L-K) \right] = C \left[\varepsilon_f R d_f V_f + \frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d \pi l K \left(2 + \frac{\Delta K}{K} \right) (L-K) \right] \\ &\cong C \left[\varepsilon_f R d_f V_f + \pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K \right] \left(\frac{\Delta K}{K} \rightarrow 0 \right) \end{aligned}$$

4.1.2-(7)式

定常状態では、充填材中の濃度と緩衝材内側境界濃度は等しくなる。4.1.2-(7)式は、この濃度 C と、それぞれの領域の核種の存在体積との積で与えられる核種の存在量の和が初期インベントリと等しいとする関係を示すものである。ここで、緩衝材の体積の算出においては台形公式を用いている。また、外側境界濃度が 0 と見なせる条件において緩衝材中の核種量を算出する場合は、拡散媒体における定常状態での濃度勾配を考慮する必要があるため、平均濃度が内側境界濃度 C の 1/2 で与えられることに留意する必要がある。なお、4.1.2-(7)式中の ΔK は緩衝材厚さ ($=L-K$) であり、「 $\Delta K/K \rightarrow 0$ 」との表記は、必ずしも $\Delta K/K \cong 0$ を意味するものではなく、 $\Delta K/K$ が小さい場合においては評価上 0 とみなすことができる、という意味で用いている。

$Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材領域の濃度差は、緩衝材外側境界の濃度が 0 と見なされることから、緩衝材内側境界濃度で与えられる。緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、この濃度差を用いて、以下のように与えられる。

$$F_{L_{max}} = \frac{E D e}{(L-K)} \frac{I_0}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{E D e}{(L-K)} C_{K_{max}} = F_{K_{max}} \quad 4.1.2-(8)式$$

4.1.2-(8)式が示すように、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの核種放出率は、EDZ 中の地下水流流量 Q には依存せず、拡散による物質の移動量 $E D e / (L-K)$ とこの濃度差との積で与えられる。この 4.1.2-(8)式は Fick の第一法則そのものである。

(2) 溶出率制限の場合の拡散による核種放出

$Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの拡散による放出率は、図 4.1.1-2 に示すように、瞬時溶出条件の場合と同様に 4.1.2-(5)式で与えられる。この場合、緩衝材からの核種放出率は、溶出率に依存せず、均一濃度と EDZ 中の地下水流速 Q の積で表わされる。

4.1.2-(2)式で示されているように、瞬時溶出の場合は $F_{LE} = F_{Kmax}$ であるため、 $Q'_{th} = Q_{th}$ である。一方、溶出率制限の場合は、 $F_{LE} < F_{Kmax}$ であるため、応答特性の区分値 Q'_{th} は Q_{th} よりも小さな値となる。これは、溶出率制限の場合、緩衝材中の拡散量が瞬時溶出の場合に比べて小さくなるため、拡散により緩衝材から放出される核種量と等しくなる EDZ から運び去られる核種量が、瞬時放出条件の場合に比べて、小さくなるためである。この応答は、見かけ上は、実効拡散係数が小さくなった場合の応答と同様である（後述する 4.1.2-(10)式参照後述）。

$Q'_{th} < Q$ の場合、EDZ の濃度が 0 と見なせる濃度になって定常となる。この場合の緩衝材内側境界濃度は、一定溶出率 F_{LE} に応じた値となり、図 4.1.1-2 に示すように、以下のよう表わされる。

$$C_{LE} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} C_{Kmax} \quad 4.1.2-(9)式$$

$Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、図 4.1.1-2 に示すように、緩衝材内側境界濃度 C_{LE} を用いて、4.1.2-(8)式と同様に以下のように与えられ、4.1.2-(3)式を用いることによって、結果として緩衝材からの拡散による放出率が溶出率に等しくなることがわかる。

$$F_L = \frac{EDe}{(L-K)} C_{LE} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \frac{EDe}{(L-K)} C_{Kmax} = \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} F_{Kmax} = F_{LE} = \frac{EDe'}{(L-K)} C_{Kmax} \quad 4.1.2-(10)式$$

4.1.2-(10)式は、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの核種放出率は、EDZ 中の地下水流量 Q には依存せず、拡散による物質の移動量 $EDe/(L-K)$ と 4.1.2-(9)式で表わされる濃度差 C_{LE} との積で与えられることも示している。また、4.1.2-(10)式は、溶出率一定の場合の緩衝材からの核種放出率は、見かけ上、溶出率に応じて低減した拡散係数の条件で瞬時溶出した場合の放出率と等しいことを表している。

(3) 溶解度制限の場合の拡散による核種放出

溶解度制限の場合は、緩衝材内側境界濃度が溶解度に固定される。 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材内側境界濃度は、瞬時溶出条件の場合と同様の仕組みに基づいて与えられるが、その濃度は、溶解度で制限された均一濃度となる。この濃度を与えるためのインベントリは図 4.1.1-2 に示すように、以下の式から与えられる。

$$C_{SOL} = \frac{I'_{SOL}}{(\epsilon_f R d_f V_f + \epsilon_d R d_d V_d + \epsilon_m R d_m V_m)} \quad (I'_{SOL} < I_0) \quad 4.1.2-(11)式$$

この I'_{SOL} と実際の初期インベントリ I_0 の差は定常状態の継続に寄与するものとなる。

$Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、この濃度を EDZ 中の地下水流量 Q が運び去ることで与えられるため、以下のように表わされる。

$$F_L = \frac{I'_{SOL}}{(\varepsilon_f Rd_f V_f + \varepsilon_d Rd_d V_d + \varepsilon_m Rd_m V_m)} Q = C_{SOL} Q \quad 4.1.2-(12)式$$

4.1.2-(12)式が示すように、 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの核種放出率は、拡散係数には依存せず、溶解度と EDZ 中の地下水流量 Q の積で与えられる。

$Q'_{th} < Q$ の場合、EDZ の濃度は 0 と見なせる濃度になる。この場合の緩衝材内側境界濃度を与えるインベントリは、図 4.1.1-2 に示すように、以下のように表わされる。

$$C_{SOL} = \frac{I_{SOL}}{(\pi l \varepsilon_d Rd_d (L-K)K + \varepsilon_f Rd_f V_f)} \quad (I_{SOL} < I_0) \quad 4.1.2-(13)式$$

ここで、 I'_{SOL} と I_{SOL} の関係は以下のように与えられる。

4.1.2-(11)式と 4.1.2-(13)式から、 I'_{SOL} と I_{SOL} の関係は $\pi l \varepsilon_d Rd_d (L-K)K$ と $\varepsilon_f Rd_f V_f$ の大小関係に依存して以下のように関係づけられる。

$$I_{SOL} \cong \frac{1}{2} I'_{SOL} \leftarrow (\pi l \varepsilon_d Rd_d (L-K)K \gg \varepsilon_f Rd_f V_f, \quad \varepsilon_m Rd_m V_m \cong 0)$$

$$I_{SOL} \cong I'_{SOL} \leftarrow (\pi l \varepsilon_d Rd_d (L-K)K \ll \varepsilon_f Rd_f V_f, \quad \varepsilon_m Rd_m V_m \cong 0)$$

ここで、 $\varepsilon_m Rd_m V_m$ で表される収着を考慮した場合の EDZ 領域内の核種の存在体積を 0 とみなした理由は以下の通りである。

*核種移行解析において、EDZ 領域内の地下水流量を保守的に与えるために、EDZ 領域の体積を大きく設定することが考えられる。しかしながら、核種移行解析を保守的に行うためには、内側境界濃度をより高く設定すること、つまり、例えば、4.1.2-(12)式の分母に含まれる項である EDZ 領域の体積 0 とすることが考えられる。そのため、既存の核種移行解析においては、EDZ の体積は緩衝材や充填材の体積に比べて無視できる程度の小さい値 ($\varepsilon_m Rd_m V_m \cong 0$) が設定されている。

$Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、図 4.1.1-2 に示すように、緩衝材内側境界濃度 C_{SOL} を用いて以下のように与えられる。

$$F_L = \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{SOL}}{(\pi l \varepsilon_d Rd_d (L-K)K + \varepsilon_f Rd_f V_f)} = \frac{EDe}{(L-K)} C_{SOL} \quad 4.1.2-(14)式$$

4.1.2-(14)式が示すように、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの拡散による核種放出率 F_L は、EDZ 中の地下水流量 Q には依存せず、拡散による物質の移動量 $EDe/(L-K)$ と 4.1.2-(13)式で表わされる濃度差 C_{SOL} との積で与えられる。

(4) 瞬時溶出の場合の移流による核種放出

$Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材中の平均濃度 C_a は、図 4.1.1-2 に示すように、4.1.2-(4)式で与えられる。そのため、 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの移流による核種放出率 F_{ad} は、この平均濃度 C_a に人工バリア中の地下水流量 Q_d を乗じることによって以下のように表わされる。

$$F_{ad} = C_a Q_d = \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q_d = C'_{K \max} Q_d \quad 4.1.2-(15)式$$

上式は、 $Q_d/Q \rightarrow 0$ であるとの近似によるものであり、 Q_d は Q に比べて無視できるほど小さいとの前提にたっている。すなわち、

$$Q_d \ll Q \quad 4.1.2-(16)式$$

そのため、 $Q < Q'_{th}$ で $Q_d \ll Q$ の場合は、緩衝材からの移流による核種の放出率 F_{ad} と拡散による核種放出率 F_L の関係は以下のように表わされる。

$$F_{ad} = \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q_d \ll \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q = F_L \quad 4.1.2-(17)式$$

4.1.2-(17)式は、 $Q < Q'_{th}$ で $Q_d \ll Q$ の場合は、移流による影響を無視しても緩衝材からの核種放出率の算出においてはほとんど影響がないことを表すものである。ここで、図 4.1.1-1 において対象としているような人工バリアの外側に EDZ が存在するような系においては、人工バリアを通過する地下水流量 Q_d は、透水性がいかに劣化したとしても EDZ を通過する地下水流量よりも小さく、 $Q_d < Q$ の関係となる。4.1.2-(17)式は、 $Q_d \ll Q$ を前提として導出された関係であるため、 $Q_d < Q$ の場合には、誤差が含まれることになるが、概ね $Q < Q'_{th}$ の場合は、安全性への影響の観点からは、ベントナイトの劣化に伴う、透水係数の変化を考慮する必要はなくなる。この検討の詳細については後述する。

$Q'_{th} < Q$ の場合、図 4.1.1-2 に示されている緩衝材中の平均濃度 C_a は、4.1.2-(18)式に示すように、4.1.2-(6)式で与えられる緩衝材内側境界濃度の半分程度 ($L=K+\Delta K$, $\Delta K/K \rightarrow 0$ の場合、 $K/(K+L) \doteq 1/2$) の濃度と等しく与えられる。そのため、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの移流による核種放出率 F_{ad} は、この緩衝材内側境界濃度の半分程度 ($K/(L+K)$) の値に人工バリア中の地下水流量 Q_d を乗じることによって表わされる。

$$C_a = \frac{K}{(K+L)} C_{K \max} = \frac{K}{(2K+\Delta k)} C_{K \max} = \frac{1}{\left(2+\frac{\Delta k}{K}\right)} C_{K \max} \cong \frac{1}{2} C_{K \max} \quad 4.1.2-(18)式$$

ここで、 $C_{K \max}$ と $C'_{K \max}$ の関係は以下のように与えられる。

$$C_{K \max} = \frac{I_0}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{I_0}{\left(\varepsilon_d R d_d \frac{1}{2} V_d + \varepsilon_f R d_f V_f \right)}$$

$$C'_{K \max} = \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}$$

ここで、

$$C_{K \max} \cong \frac{2I_0}{(\varepsilon_d R d_d V_d)} = 2C'_{K \max} \quad (\varepsilon_m R d_m V_m \rightarrow 0, \quad \varepsilon_d R d_d V_d \gg \varepsilon_f R d_f V_f)$$

$$C_{K \max} \cong \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f)} = C'_{K \max} \quad (\varepsilon_m R d_m V_m \rightarrow 0, \quad \varepsilon_d R d_d V_d \ll \varepsilon_f R d_f V_f)$$

よって、 $C'_{K \max} \leq C_{K \max} \leq 2C'_{K \max}$

4.1.2-(19)式

また、瞬時溶出条件で $Q'_{th} < Q$ の場合、 Q'_{th} と Q の関係は以下のように与えられる。

$$Q'_{th} = Q_{th} = \frac{EDe' (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}{(L-K) (\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)}$$

ここで、 $(\varepsilon_m R d_m V_m \rightarrow 0, \quad \varepsilon_d R d_d V_d \gg \varepsilon_f R d_f V_f)$ の場合、

$$Q'_{th} \cong \frac{EDe' (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}{(L-K) \left(\frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_f R d_f V_f \right)} = 2 \frac{EDe'}{(L-K)}$$

$(\varepsilon_m R d_m V_m \rightarrow 0, \quad \varepsilon_d R d_d V_d \ll \varepsilon_f R d_f V_f)$ の場合、

$$Q'_{th} \cong \frac{EDe' (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}{(L-K) \left(\frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_f R d_f V_f \right)} = \frac{EDe'}{(L-K)}$$

$$\text{よって、} \frac{EDe'}{(L-K)} < Q'_{th} < 2 \frac{EDe'}{(L-K)}$$

4.1.2-(20)式

4.1.2-(20)式から、 Q'_{th} は、概ね、拡散による物資の移動量からその倍程度まで範囲を取る値であることがわかる。厳密には、緩衝材や充填材、場合によってはEDZの収着特性を考慮して、4.1.2-(2)式を解く必要がある。

ここで、この変動範囲の値を用いると、 $Q'_{th} < Q$ の場合、すなわち概算で $2EDe'/(L-K) < Q$ の場合において、緩衝材からの拡散による核種の放出率が移流による放出率よりも大きくなり拡散支配となる条件は、4.1.2-(8)式と緩衝材からの移流による核種放出率を表す4.1.2-(18)式と Q_d との積と4.1.2-(8)式を用いて以下のように表わされる。

$$F_{ad} = \frac{1}{2} C_{K \max} Q_d < \frac{EDe'}{(L-K)} C_{K \max} = F_L \quad \Rightarrow Q_d < 2 \frac{EDe'}{(L-K)} \quad 4.1.2-(21)式$$

逆に、4.1.2-(21)式は、 $Q'_{th} < Q$ の場合、すなわち概算で $2EDE'/(L-K) < Q$ の場合において、緩衝材の透水係数の劣化などにより、拡散支配ではなく移流支配となる条件が、 $2EDE'/(L-K) < Q_d < Q$ であることを意味している。そのため、 $Q'_{th} < Q$ の場合、すなわち概算で $2EDE'/(L-K) < Q$ の場合において、 $2EDE'/(L-K) < Q_d$ となる人工バリアの透水係数がどのような値であるかを検討することは、安全性の観点から重要な意味を持つ。この検討の詳細についても後述する。

(5) 溶出率制限の場合の移流による核種放出

$Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの移流による放出率は、瞬時溶出条件の場合と同様に4.1.2-(15)式によって与えられる。瞬時溶出条件の場合と同様、 $Q < Q'_{th}$ の場合は、安全性への影響の観点から、ベントナイトの劣化に伴う透水係数の変化を考慮する必要はなくなる。

$Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材中の平均濃度 C_a は、4.1.2-(9)式で与えられる緩衝材内側境界濃度の半分程度の濃度と等しく与えられる。そのため、 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの移流による核種放出率 F_{ad} は、この緩衝材内側境界濃度の半分程度の値 $(K/(L+K)) C_{LE}$ に人工バリア中の地下水流量 Q_d を乗じることによって以下のように表わされる。

$$F_{ad} = \frac{K}{(L+K)} C_{LE} Q_d = \frac{K}{(L+K)} \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} C_{K \max} Q_d \cong \frac{1}{2} \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} C_{K \max} Q_d \quad 4.1.2-(22) \text{式}$$

(6) 溶解度制限の場合の移流による核種放出

$Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材中の平均濃度 C_a は、図 4.1.1-2 に示すように、4.1.2-(11)式で与えられる均一濃度と等しく与えられる。そのため、 $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材からの移流による核種放出率は、この濃度に人工バリア中の地下水流量 Q_d を乗じることによって以下のように表わされる。

$$F_{ad} = \frac{I'_{SOL}}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q_d = C_{SOL} Q_d \quad 4.1.2-(23) \text{式}$$

4.1.2-(23)式と 4.1.2-(12)式、および4.1.2-(16)式的前提より、以下の条件となる。

$$F_{ad} = C_{SOL} Q_d \ll C_{SOL} Q = F_L$$

前述のように、緩衝材がいかに劣化したとしても $Q_d < Q$ の関係は維持される。そのため、 $Q < Q'_{th}$ の場合は、移流支配になることはなく、拡散による放出率 F_L の算出により、近似による誤差はあるものの、概ね人工バリアからの核種放出率 F_N を見積もることが可能になる。また、安全性への影響の観点からは、ベントナイトの劣化に伴う透水係数の変化を考慮する必要はなくなる。

$Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材中の平均濃度 C_a は、4.1.2-(13)式で与えられる緩衝材内側境界濃度の半分程度の濃度と等しく与えられる。そのため、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材からの移

流による核種放出率は、この緩衝材内側境界濃度の半分程度の値 $(K/(L+K)) C_{\text{SOL}}$ に人工バリア中の地下水流量 Q_d を乗じることによって以下のように表わされる。

$$F_{ad} = \frac{K}{(L+K)} C_{\text{SOL}} Q_d \cong \frac{1}{2} C_{\text{SOL}} Q_d \quad 4.1.2-(24)\text{式}$$

4.1.3 核種放出に影響を及ぼす因子に対する人工バリアシステムの応答特性

前節で示したように、人工バリアからの拡散による核種放出率は、EDZ中の地下水流量 Q と応答特性の区分値 Q'_{th} との大小関係に応じて、以下のような異なる式で示される。

$$F_L = \frac{I}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q = C_K Q \quad (Q < Q'_{th})$$

$$F_L = \frac{E D e'}{(L-K)(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{E D e'}{(L-K)} C_K, \quad D e' = \frac{F_{LE}}{F_{Lmax}} D e \quad (Q'_{th} < Q)$$

内側境界濃度 C_K は溶解度やインベントリ、収着分配係数、間隙率のほか、人工バリアの幾何形状にも依存する。また、EDZの地下水流量 Q は母岩、EDZ、人工バリアの透水性と人工バリアの幾何形状に依存する。拡散係数は間隙率に依存する。また、4.1.2-(3)式から、溶出率制限の場合は、等価な拡散係数を用いることにより、瞬時溶出条件で表現できることがわかる。

以上、 $Q < Q'_{th}$ および $Q'_{th} < Q$ の場合に、人工バリアからの拡散による放出率に影響を及ぼす因子を表 4.1.3-1 にまとめる。

表 4.1.3-1 人工バリアからの拡散による核種放出率に影響を及ぼす因子

		放出率に影響を与える因子
Q < Q'_{th} の場合	C _K	溶解度、インベントリ、収着分配係数、間隙率、人工バリアの幾何形状
	Q	バリアの透水係数、人工バリアの幾何形状
Q'_{th} < Q の場合	C _K	溶解度、インベントリ、収着分配係数、間隙率、人工バリアの幾何形状
	De'	間隙率、溶出率（幾何形状に依存）
	E	人工バリアの幾何形状

表 4.1.3-1 は、人工バリアからの核種放出率に影響を及ぼす因子として、内側境界濃度 C_K 、EDZ中の地下水流量 Q 、拡散係数（溶出率の意味も含む） De' 、さらに、これら3つの因子に影響を及ぼす人工バリアの幾何形状を抽出して示したものである。これらの因子の中で、内側境界濃度 C_K は、水理環境条件に依存せず、常に人工バリアからの核種放出率に影響を及ぼす最も重要な因子である。他の2つは、水理条件によって影響度が変化する因子である。これらの因子と核種の特性的関係から概論として、以下のことが言える。

- ・ I-129, C-14, Se-79 などの可溶性で、収着性の低い陰イオン系の核種の人工バリアからの核種放出を抑制するためには、良好な水理環境、拡散係数の小さいバリア材料、低溶解性の廃棄体を選定すること、さらには幾何形状を最適化することが重要となる。
- ・ U よりも原子番号の大きい TRU 核種などの、溶解度が低く、収着性を期待できる核種は、内側境界濃度が低くなることが期待される。そのため、上記の I-129, C-14, Se-79 において重要な条件となる水理環境が良好でない場合においても、溶解度や収着性能によって、人工バリアからの核種放出を抑制できる可能性がある。さらに、拡散係数や溶出率を抑制する材料などの採用や幾何形状の最適化などの人工バリアの設計により、放出率を効果的に抑制することが可能である。

以下、これらの因子の中の代表的な因子など（因子を構成するパラメータを含む）と放出率の関係についてまとめる。

(1) 溶解度と放出率の関係

核種移行が拡散によって支配される状態では、定常状態の放出率が最大放出率となる。4.1.2-(6)式は、瞬時溶出の場合に定常状態になる内側境界濃度の最大値を与える式である。そのため、この値を超える濃度を充填材領域および緩衝材内側境界において溶解度として設定しても、緩衝材中の核種の移行は定常状態に到達しない。このような場合、緩衝材を移行する過程で核種の濃度勾配が最大にならないで鈍る、いわゆる“鈍り”（4.1.3.(4)の詳述参照）が発生し、結果として、緩衝材中の核種の移行率は、内側境界の最大濃度によって与えられる放出率と近似的に等しい値となる。このことは、溶解度を 4.1.2-(6)式で与えられる内側境界の最大濃度よりも大きな値としたとしても放出率は影響を受けないことを意味する。

4.1.2-(6)式で与えられる内側境界の最大濃度は、充填材領域や緩衝材領域の収着特性に依存して変化する値である。つまり、人工バリアからの放出率に与える影響度の観点からは、与えられた地下水化学条件における収着特性に応じた内側境界濃度の最大値が、安全評価において考慮すべき溶解度の最大値となる。そのため、4.1.2-(6)式により示される内側境界濃度の最大値近傍の値が溶解度として考慮されているか否かが、安全評価における解析ケース設定の十分性を判断する指標になると考えられる。

(2) 溶出率と放出率の関係

4.1.2-(8)式で示される $F_{K_{max}}$ は、瞬時溶出の場合の $Q'_{th} < Q$ の条件における放出率の最大値である。この $F_{K_{max}}$ は、初期インベントリ I_0 や収着特性、幾何形状に応じて変化する値である。定常状態にある場合、崩壊の影響を無視できる条件では、緩衝材へ流入するフラックスと緩衝材から流出するフラックスは等しくなる。このことは、緩衝材からの放出率に影響を与える一定溶出率 F_{LE} の上限値が $F_{K_{max}}$ であることを意味する。この値を超える一定溶出率を廃棄体の特性として設定しても、緩衝材中の核種の移行は定常状態に到達しな

い。このような場合、溶解度の場合と同様に、緩衝材を移行する過程でいわゆる“鈍り”が発生し、結果として、緩衝材中の核種の移行率は、4.1.2-(8)式で与えられる瞬時溶出条件の定常状態での放出率の最大値と近似的に等しい値となる。このことから、緩衝材からの拡散による放出率を低減させるための第一の条件としては、4.1.2-(8)式で与えられる瞬時溶出条件の場合の放出率の最大値よりも低い溶出率を設定することが求められる。

さらに、4.1.2-(5)式が示すように、 $Q < Q'_{th}$ [$Q'_{th} = Q_{th} (F_{LE}/F_{Kmax})$] の条件では、緩衝材からの核種放出率は溶出率に依存せず、均一濃度と EDZ 中の地下水流速 Q の積で表わされる。そのため、溶出率を制限することによって、緩衝材からの放出率を低減させる場合は、与えられた水理環境を考慮して、 $Q'_{th} < Q$ となるように溶出率 F_{LE} を設定する必要がある。

(3) 緩衝材の透水係数の変化と放出率の関係

4.1.2(4)項で示したように、 $Q_d \ll Q < Q'_{th}$ の場合、安全性への影響の観点からは、ベントナイトの劣化に伴う透水係数の変化を考慮する必要はなくなる。

一方、 $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材の劣化などによる透水係数の増大により、 $2EDE'/(L-K) < Q_d < Q$ となるような条件の場合は、拡散支配ではなく移流支配となる。そのため、 $Q'_{th} < Q$ の場合、すなわち、概算で $2EDE/(L-K) < Q$ の場合において、 $2EDE/(L-K) < Q_d$ となる人工バリアの透水係数がどのような値であるかを検討することは、安全性の観点から重要な意味を持つ。

これらの特性を具体的に確認するため、緩衝材の劣化を考慮して緩衝材の透水係数を変化させた場合 (2.0×10^{-12} m/s~ 2.0×10^{-5} m/s) の緩衝材および EDZ 中の地下水流量と、その場合の緩衝材からの核種放出率の変化を解析した。解析においては、TRU 廃棄物の廃棄体グループ 1 の I-129 を対象とするとともに、EDZ 中の地下水流量 Q が少ない場合 (母岩の透水係数 2.0×10^{-10} m/s) と多い場合 (母岩の透水係数 2.0×10^{-7} m/s) の 2 通りを考えた。表 4.1.3-2 に核種移行解析に用いた入力データを示す。なお、緩衝材の劣化により、緩衝材中の核種の実効拡散係数も変化することが予想される。その影響については、緩衝材が健全な場合の実効拡散係数を用いた場合の結果からの類推が可能である。ここでは、緩衝材が健全な場合の実効拡散係数を用いた検討結果を示すこととする。

また、表 4.1.3.3 と表 4.1.3.4 に、母岩の透水性が低い場合と高い場合の各々の条件での緩衝材の透水性の変化と、緩衝材および EDZ 中の地下水流量の変化、人工バリアからの核種放出率 (Bq/y) の変化、天然バリア出口における線量換算値 (Sv/y) の変化との関係を示す。この線量換算においては、既存の安全評価においてレファレンス条件とした条件 (河川への核種の放出、地形を平野、被ばくグループを農業従事者とした生物圏モデル) から得られた線量への換算係数を使用した。表 4.1.3-2 には、設定した入力データを用いて計算した Q'_{th} と $EDE'/(L-K)$ および $2EDE'/(L-K)$ の値を合わせて示す。表 4.1.3-3、表 4.1.3-4 には、EDZ 中の地下水流量 Q や緩衝材中の地下水流量 Q_d と比較するため、これらの値を合わせて記述している。

表 4.1.3-2 核種移行解析に用いた入力データ

パラメータ	記号	単位	入力値
廃棄体	—	—	Gr1
核種名	—	—	I-129
半減期	T	y	1.57E+07
線量への換算係数	DCF	Sv/Bq	3.2E-15
緩衝材中の実効拡散係数	De	m ² /y	1.26E-03
廃棄体定置領域の長さ	ℓ	m	2.55E+01
緩衝材内側までの距離	K	m	5.00E+00
緩衝材外側までの距離	L	m	6.00E+00
緩衝材外側表面積	E	m ²	9.61E+02
充填材の空隙率	ε _f	—	1.90E-01
充填材の遅延係数	Rd _f	—	2.37E+00
充填材のKd	Kd _f	m ³ /kg	1.25E-04
充填材の体積	V _f	m ³	7.17E+02
充填材の真密度	ρ _f	kg/m ³	2.58E+03
緩衝材の空隙率	ε _d	—	4.00E-01
緩衝材の遅延係数	Rd _d	—	1.00E+00
緩衝材のKd	Kd _d	m ³ /kg	0.00E+00
緩衝材の体積	V _d	m ³	8.81E+02
緩衝材の真密度	ρ _d	kg/m ³	2.67E+03
EDZの体積	V _m	m ³	0.00E+00
Q'thの概算値≒EDe/(L-K)	EDe/(L-K)	m ³ /y	1.21E+00
応答特性の区分値	Q'th	m ³ /y	1.69E+00
Q'thの概算値≒2EDe/(L-K)	2EDe/(L-K)	m ³ /y	2.42E+00

表 4.1.3-3 緩衝材の透水性の変化と放出率などの変化との関係 (k=2×10⁻¹⁰ m/s)

透水係数 [m/s]				動水勾配	流量 [m ³ /yr]		EDe/(L-K)	Q'th	2EDe/(L-K)	人工バリアからの核種放出率 [Bq/yr]	最大線量 [Sv/yr]	
充填材	緩衝材	掘削影響領域	母岩		緩衝材 (Q _d)	EDZ (Q)						
2E-12	2E-8	2E-10	0.01	1.35E-05	5.62E-02	1.21E+00	1.69E+00	2.42E+00	4.71E+09	1.98E-06		
2E-11				1.35E-04	5.62E-02						4.71E+09	1.98E-06
2E-10				1.32E-03	5.62E-02						4.72E+09	1.98E-06
2E-9				1.08E-02	5.65E-02						4.76E+09	1.99E-06
2E-8				3.82E-02	5.73E-02						4.90E+09	2.02E-06
2E-7				5.12E-02	5.77E-02						4.97E+09	2.04E-06
2E-6				5.30E-02	5.78E-02						4.98E+09	2.04E-06
2E-5				5.32E-02	5.78E-02						4.98E+09	2.04E-06

表 4.1.3-4 緩衝材の透水性の変化と放出率などの変化との関係 ($k=2 \times 10^{-7}$ m/s)

透水係数 [m/s]				動水勾配	流量 [m ³ /yr]		EDe/(L-K)	Q' _{th}	2EDe/(L-K)	人工バリアからの核種放出率 [Bq/yr]	最大線量 [Sv/yr]
充填材	緩衝材	掘削影響領域	母岩		緩衝材 (Q _d)	EDZ (Q)					
2E-12	2E-5		2E-7	0.01	1.35E-05	5.62E+01	1.21E+00	1.69E+00	2.42E+00	1.16E+11	2.02E-04
2E-11					1.35E-04	5.62E+01				1.16E+11	2.02E-04
2E-10					1.35E-03	5.62E+01				1.16E+11	2.02E-04
2E-9					1.35E-02	5.62E+01				1.16E+11	2.03E-04
2E-8					1.35E-01	5.62E+01				1.22E+11	2.10E-04
2E-7					1.32E+00	5.62E+01				1.78E+11	2.88E-04
2E-6					1.08E+01	5.65E+01				7.77E+11	8.42E-04
2E-5					3.82E+01	5.73E+01				2.78E+12	1.98E-03

図 4.1.3-1 と図 4.1.3-2 には、母岩の透水係数が小さい場合 (2.0×10^{-10} m/s) の人工バリアからの核種放出率 (Bq/y) と天然バリア出口において線量換算した結果 (Sv/y) を示す。さらに、図 4.1.3-3 と図 4.1.3-4 に母岩の透水係数が大きい場合 (2.0×10^{-7} m/s) の人工バリアからの核種放出率 (Bq/y) と天然バリア出口において線量換算した結果 (Sv/y) を示す。

表 4.1.3-3 からは、母岩の透水係数が 2.0×10^{-10} m/s の場合には、EDZ 中の地下水流量 Q は Q'_{th} よりも小さく、さらに、人工バリアの劣化により透水係数が 2.0×10^{-5} m/s まで増加しても緩衝材中の地下水流量 Q_d は Q'_{th} を超えないことがわかる。この場合の核種移行解析の結果を示す図 4.1.3-1、図 4.1.3-2 は、人工バリアからの核種放出率や最大線量がほとんど変化していないことを示している。表 4.1.3-4 からは、母岩の透水係数が 2.0×10^{-7} m/s の場合には、EDZ 中の地下水流量 Q は Q'_{th} よりも大きくなり、人工バリアの劣化により透水係数が 2.0×10^{-6} m/s 以上になると、緩衝材中の地下水流量 Q_d が Q'_{th} を超えることがわかる。この場合の核種移行解析の結果を示す図 4.1.3-3、図 4.1.3-4 は、人工バリアの透水係数が 2.0×10^{-6} m/s 以上になると、人工バリアからの核種放出率や最大線量が有意に増大することを示している。これらの結果は、以下に示す近似解析解から得られた人工バリアの透水係数に対する処分システムの応答特性の妥当性を示すものである。

- $Q_d \ll Q < Q'_{th}$ の場合、安全性への影響の観点からは、ベントナイトの劣化に伴う透水係数の変化を考慮する必要はなくなる。
- $Q'_{th} < Q$ の場合、緩衝材の劣化などによる透水係数の増大により、緩衝材中の地下水流量 Q_d が $Q'_{th} < Q_d < Q$ となる場合がある。このような条件では、拡散支配ではなく移流支配となり、緩衝材の透水係数の変化は安全性に大きな影響を与える。

これらの結果は、4.1.2-(2)式で表わされる Q'_{th} と水理計算の結果を比較することにより、核種移行解析を行わなくても、与えられた水理条件において、移流支配となる緩衝材の透水係数を求められることを意味する。このことは逆に、母岩の透水性が高い条件においても、緩衝材からの核種放出を拡散支配にするために必要となるベントナイトの透水係数を算出できることを意味する。このような定量的な値は、バリアシステムの頑健性を高める設計に資する重要な情報になると考える。

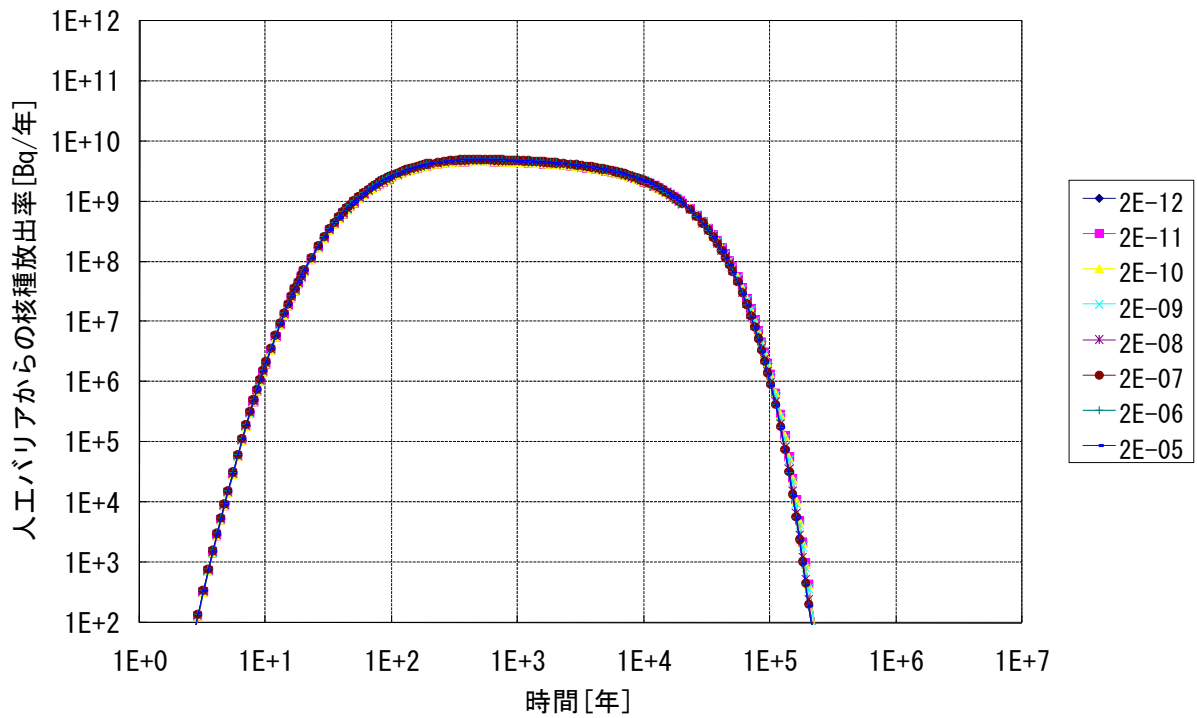


図 4.1.3-1 人工バリアからの核種放出率 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)

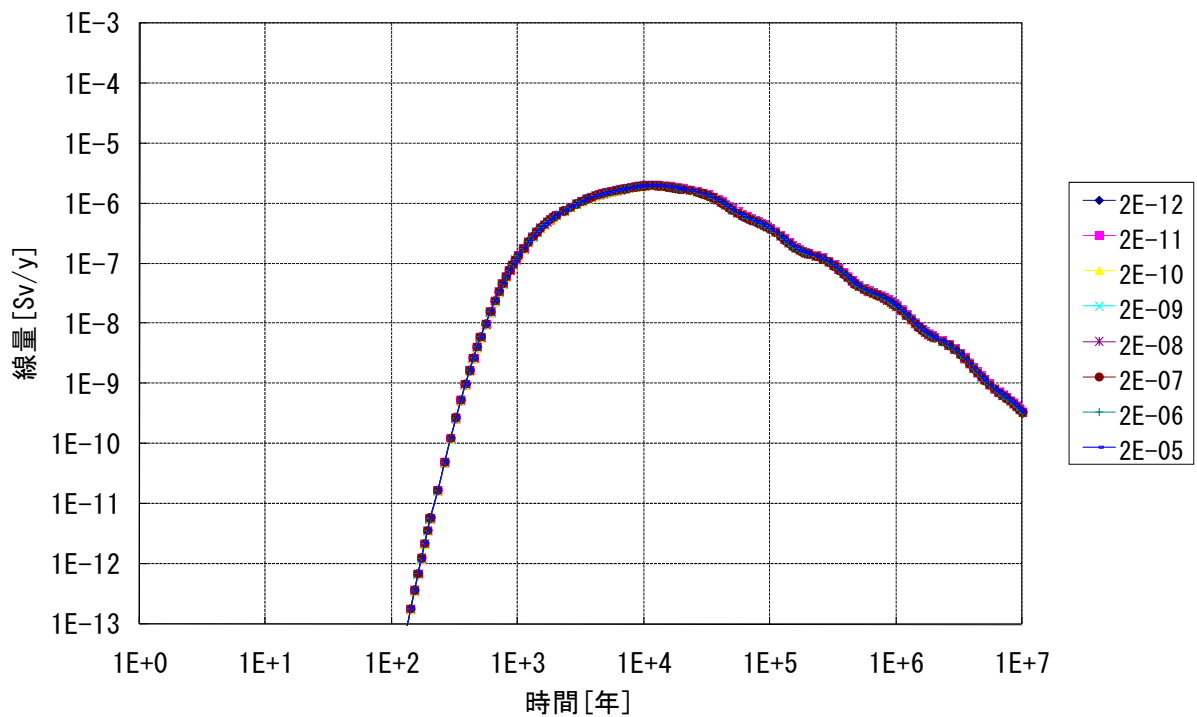


図 4.1.3-2 天然バリア出口における線量 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)

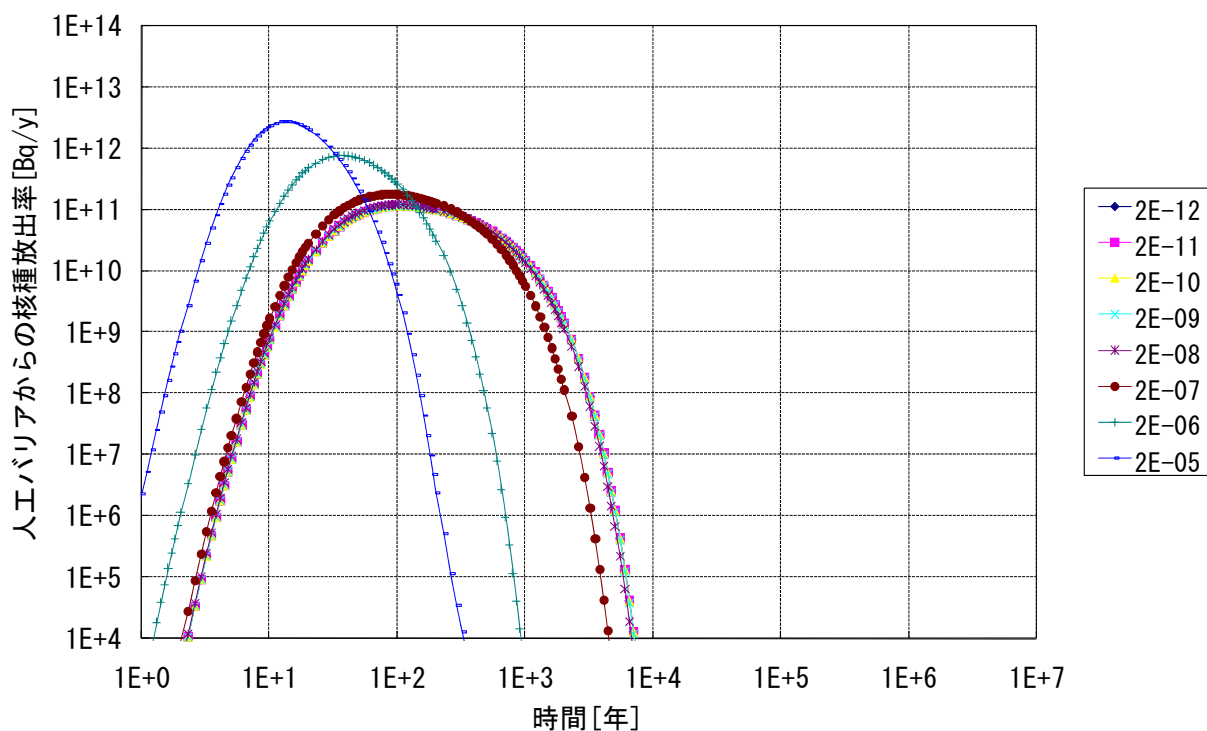


図 4.1.3-3 人工バリアからの核種放出率 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

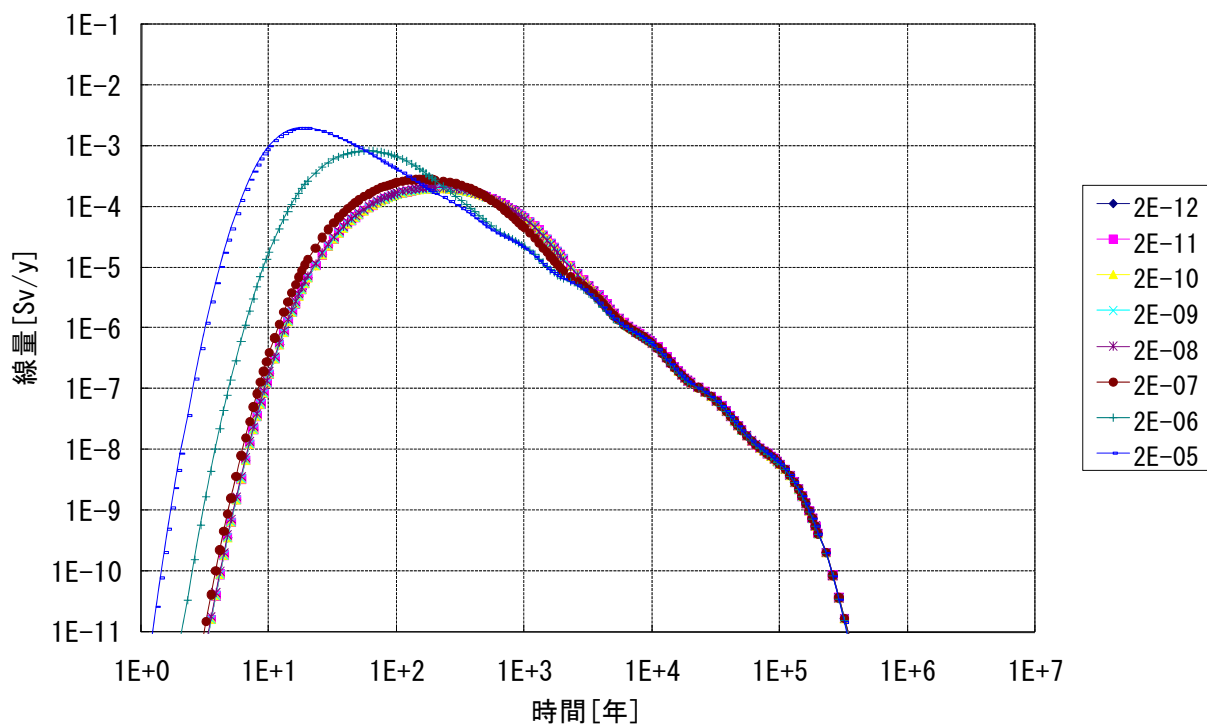


図 4.1.3-4 天然バリア出口における線量 (母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

上記の解析は、緩衝材が健全な場合の実効拡散係数を用いた場合の結果である。前述のように、緩衝材が劣化して、透水係数が増大する場合には、実効拡散係数も増大することが考えられる。実効拡散係数が大きくなる場合は、4.1.2-(2)式で表わされる Q'_{th} がおおきくなり、移流支配となる条件 $Q'_{th} < Q_d < Q$ よりも、むしろ拡散支配となる条件 $Q_d \ll Q < Q'_{th}$ になりやすくなる。そのため、移流支配となる条件は母岩の透水性がより一層高い場合となる。

ここで、確実に移流支配となる緩衝材の透水係数の下限値は、4.1.2-(2)式において、自由水中の拡散係数によって与えられる Q'_{th} よりも大きな緩衝材中の地下水流量 Q_d を与える透水係数である。これに対して、確実に拡散支配となる緩衝材の透水係数の上限値は、 De に依存して変化する Q'_{th} よりも小さな緩衝材中の地下水流量 Q_d を与える透水係数である。実効拡散係数が小さければ小さいほど、 Q'_{th} は小さくなる。そのため、実効拡散係数が小さければ小さいほど、拡散支配となる緩衝材の透水係数の上限値は小さくなる。4.1.2-(10)式で示したように、廃棄体が低溶出性になることは De' が小さくなることと同意であるため、拡散支配を担保することだけに着目すると、廃棄体の溶出性能を向上させる場合には、緩衝材や母岩に対してより低い透水性が求められることになる。

既存の検討においては、緩衝材の劣化に伴う透水係数の変化が核種移行評価上有意な影響を及ぼすと考えられ、解析ケースの設定において透水係数の不確実性を考慮した検討が行われてきた。これは、緩衝材の透水係数の変化により、人工バリア内の核種移行メカニズムが移流支配になることを懸念したペクレ数を用いた検討に基づくものである。

1次元の直交座標におけるペクレ数の評価式は以下のように与えられる。

$$Pe = \frac{v_d(L-K)}{De} = \frac{(k*i)(L-K)}{De} \quad 4.1.3-(1)式$$

ここで、

- Pe : ペクレ数
- v_d : 媒体内のダルシー流速(m/s)
- L-K : 媒体の代表長さ(m)
- De : 媒体内の実効拡散係数(m²/s)
- k : 媒体内の透水係数(m/s)
- i : 媒体内の動水勾配

4.1.3-(1)式を物質の移動量を含む式に換算するため、緩衝材の外側表面積 E (1次元の直交座標における評価式では拡散に寄与する面積と移流に寄与する面積は等しい) をそれぞれ分母分子に乗じると、以下のように表わされる。

$$Pe = \frac{v_d(L-K)}{De} = \frac{v_d}{\frac{De}{(L-K)}} = \frac{Ev_d}{\frac{EDe}{(L-K)}} \approx \frac{Q_d}{\frac{EDe}{(L-K)}}$$

拡散支配となる条件を $Pe < 1$ とすると

$$Pe \approx \frac{Q_d}{\frac{EDe}{(L-K)}} < 1 \Rightarrow Q_d < \frac{EDe}{(L-K)} \quad 4.1.3-(2)式$$

4.1.3-(2)式と 4.1.2-(21)式との比較から、4.1.2-(21)式はペクレ数の式とほぼ同等な関係 (4.1.2-(21)式は右辺の物質の移動量が2倍されている) にあることがわかる。従って、本検討の結果得られた「緩衝材の透水係数の変化と放出率の関係」は、これまでの検討で用いたペクレ数の考え方とほぼ同等な考え方である。

このようなペクレ数に基づく考え方があるにもかかわらず、これまでの検討において、実際には影響を与えないにもかかわらず、透水係数の劣化による放出率への影響が懸念され、シナリオの解析ケースの設定において透水係数の劣化の重要性が指摘されてきた。この理由は、以下の通りである。

* 動水勾配を固定し、透水係数を変化させた条件において人工バリア内のダルシー流速が算出されたため、移流による物質の移動量を過剰に非現実的な値と考えていた。これは、人工バリア内の透水係数の変化に応じた動水勾配の変化が考慮されていなかったためである。4.1.3-(1)式は、1次元の水理場において適用される式であり、考慮される動水勾配は広域の動水勾配とされ一定値となっている。一方、放射性廃棄物を埋設する実際の場合では、EDZ などのような透水係数の大きい領域が緩衝材などの透水係数の小さい領域を取り囲んでいる。このような同心円状の幾何形状で表わされる場においては、緩衝材の透水係数が増大すると、緩衝材内の動水勾配が低下する現象が起こる。このような場においては、透水係数が小さい内側の領域を流れる地下水流量 Q_d は、透水係数が劣化した場合においても、透水係数の大きい外側の領域を流れる地下水流量 Q を超えない。従って、拡散による放出率が EDZ の地下水流量 Q に依存するような水理条件 $Q < Q'_{th}$ の場合は、緩衝材の透水係数の変化は、人工バリアからの核種放出率に影響を及ぼさない。

人工バリア内の地下水流量 Q_d を、母岩の透水性や緩衝材の透水性の変化を考慮して、水理モデルを用いて算出し、 Q'_{th} と比較することにより、人工バリアからの放出率に影響を及ぼす母岩と緩衝材の透水特性を把握することが可能になる。

(4) 幾何形状と放出率の関係

$Q_d/Q \rightarrow 0$ の場合の近似解析解の簡略式に基づき、緩衝材からの拡散による放出率 F_L と緩衝材厚さとの関係を、EDZ 中の地下水流量 Q と応答特性の区分値 Q'_{th} の大小関係ならびに内側境界条件ごとに把握する。ここでは、放出率 F_L と緩衝材厚さとの関係の理解を容易にするため、核種移行解析においては、EDZ の厚さ $\Delta m \rightarrow 0$ (EDZ の体積 $V_m \rightarrow 0$)、充填材領域の体積 $V_f \rightarrow 0$ とし、水理解析においては、EDZ 中のダルシー流速 V_{EDZ} は緩衝材の厚さ ΔK には依存せず一定とする。実際の核種移行解析においては、充填材領域の体積に対して有意な値が与えられる。充填材領域の体積を 0 とする場合は、充填材の存在の寄与を無視することになり、 ΔK の効果を過剰に表現する可能性がある。しかし、ここでは、 ΔK の変化に対する人工バリアからの核種放出率への影響を概略把握するため、上述の設定の下、理解しやすい形で検討を行うこととする。検討対象とする人工バリアモデルの概念を図 4.1.3-5 に示す。

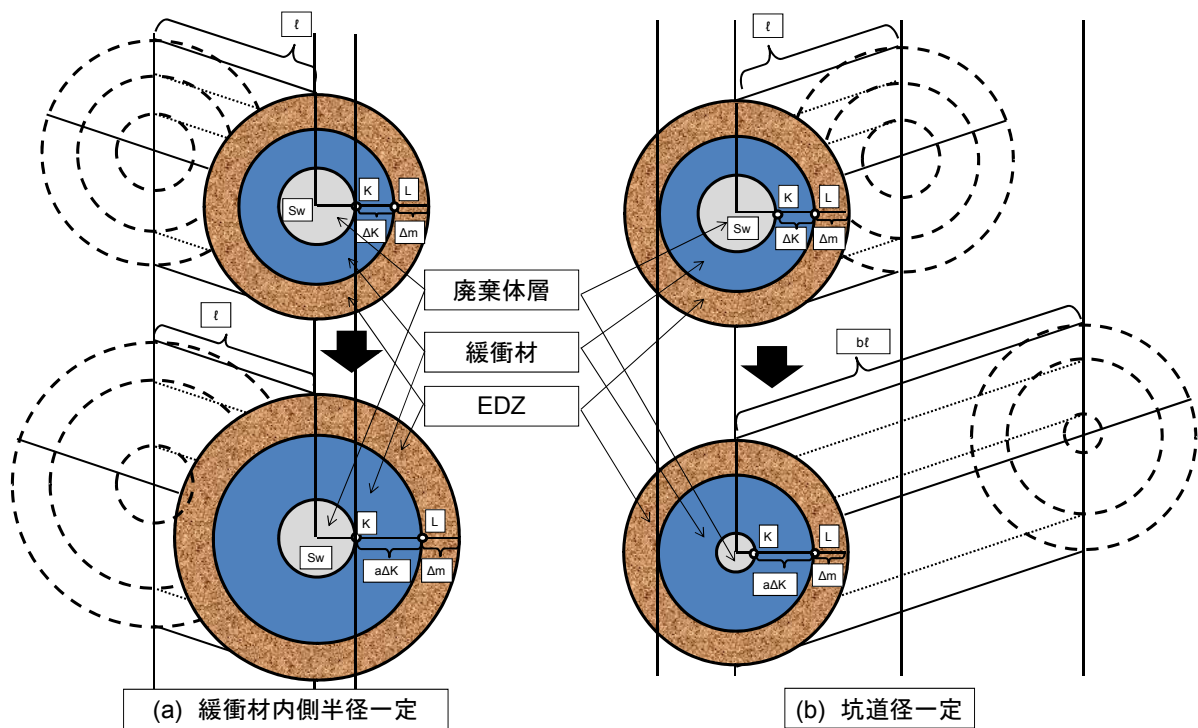


図 4.1.3-5 モデル概念図

この概念においては、廃棄体層、緩衝材、EDZ を処分坑道断面において同心円状に配置し、直交一次元モデルで簡略化した。初期状態で核種を保持している廃棄体層はソースタームとして機能し、その体積は固定とする。ここで、 K は、緩衝材内側半径、 L は、坑道径=緩衝材外側半径、 ΔK は緩衝材厚さ、 ℓ は坑道長さを表す。 S_w は廃棄体層の断面積、 Δm は EDZ の厚さ、 a は緩衝材の変動倍率で、 b は坑道長さの変動倍率を表す。

図 4.1.3-5 の(a)は、緩衝材内側半径 K が一定で、緩衝材外側半径 L が緩衝材厚さ ΔK の増大に応じて増加する場合を表している。この場合、緩衝材の体積 V_d と EDZ の地下水流量 Q 、緩衝材の外側表面積 E はそれぞれ、以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} V_d &= \pi l(K+L)(L-K) = \pi l(K+K+\Delta K)(\Delta K) = \pi l(2K+\Delta K)(\Delta K) \\ &= 2\pi l(K+\Delta K/2)(\Delta K) \end{aligned} \quad 4.1.3-(3)式$$

$$Q = v_{EDZ} \frac{1}{2} E_m = v_{EDZ} \ell \pi(L+\Delta m) \cong v_{EDZ} \ell \pi(K+\Delta K+\Delta m) \quad 4.1.3-(4)式$$

$$E = 2\ell \pi L \cong 2\ell \pi(K+\Delta K) \quad 4.1.3-(5)式$$

ここで、4.1.2-(7)式より、緩衝材中の核種の存在量を表現する体積は、 $\Delta K/K \rightarrow 0$ の場合以下のように表わされる。

$$\frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d \rightarrow \cong \pi \ell \varepsilon_d R d_d (L-K)K$$

上式の右辺は $\Delta K/K \rightarrow 0$ を前提として導出される式であるため、 $\Delta K/K \rightarrow 1$ となる状況では、上記の式の関係を利用することはできなくなる。ここでの検討は $\Delta K/K \rightarrow 1$ となる状況も対象とするため、右辺の式は、左辺の式に置き換え、 $\Delta K/K \rightarrow 1$ の場合の精度も確保した検討を行うこととする。

また、緩衝材内側半径 K が一定であるため、廃棄体層の断面積 S_w は不変となる。そのため、廃棄体定置領域の長さ ℓ は変化しない。

一方、図 4.1.3-5 の(b)は、緩衝材外側半径 L が一定で、緩衝材内側半径 K が緩衝材厚さ ΔK の増大に応じて減少する場合を表している。この場合、緩衝材の体積 V_d と EDZ の地下水流量 Q 、緩衝材の外側表面積 E はそれぞれ、以下のように与えられる。

$$V_d = \pi l(K+L)(L-K) = \pi l(L-\Delta K+L)(\Delta K) = \pi l(2L-\Delta K)(\Delta K) \quad 4.1.3-(6)式$$

$$Q = v_{EDZ} \frac{1}{2} E_m = v_{EDZ} \ell \pi(L+\Delta m) \quad 4.1.3-(7)式$$

$$E = 2\ell \pi L \quad 4.1.3-(8)式$$

また、緩衝材外側半径 L が一定で、緩衝材内側半径 K が緩衝材厚さ ΔK の増大に応じて減少する場合、緩衝材厚さ ΔK の増大に応じて廃棄体層（廃棄体+充填材）の断面積 S_w は減少し、その分、坑道の長さ ℓ は増大する。廃棄体層の体積 V_w を一定値 p とすると、 p は S_w と ℓ を用いて以下のように表わされる。

$$p = S_w \ell = \pi K^2 \ell \rightarrow \therefore \ell = \frac{p}{\pi K^2} = \frac{p}{\pi(L-\Delta K)^2} \quad 4.1.3-(9)式$$

検討においては、緩衝材内側半径 K が一定の場合は、 $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式、または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式に、4.1.3-(3)式から 4.1.3-(5)式を代入して、固定値 K で整理し、緩衝材の厚さが増大した場合の放出率を比較する。ここで、固定値 K での整理においては、前述のように EDZ の体積 $V_m \rightarrow 0$ 、充填材領域の体積 $V_f \rightarrow 0$ とし、水理解析において

は、EDZ 中のダルシー流速 V_{EDZ} は緩衝材の厚さ ΔK には依存せず一定とする。また、4.1.3-(3)式から 4.1.3-(5)式の代入は、それぞれの内側境界条件（瞬時溶出、溶出率制限、溶解度制限）ごとの $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式（4.1.2-(5)式、4.1.2-(5)式、4.1.2-(12)式）または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式（4.1.2-(8)式、4.1.2-(10)式、4.1.2-(14)式）に対して行う。さらに、放出率の比較は、具体的には、 $\Delta K=1\text{ m}$, $K=5\text{ m}$, $L=6\text{ m}$, $\Delta m=3\text{ m}$ の場合の結果と $\Delta K=N\text{ m}$, $K=5\text{ m}$, $L=5+N\text{ m}$, $\Delta m=3\text{ m}$ の場合 ($N=2\sim 5$) のそれぞれの結果の比を用いて行う。これらの詳細を表 添付 4-1～表 添付 4-4 に示す。

これらの結果から、 $Q < Q'_{th}$ で ΔK を厚くして、緩衝材外側半径 L を増大させた場合、瞬時溶出条件と溶出率制限の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に反比例することが示された。一方、緩衝材の厚さ ΔK が増大しても溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することが示された。

一方、 $Q'_{th} < Q$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材外側半径 L を増大させた場合、瞬時溶出条件の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、おおよそ緩衝材の厚さ ΔK の 2 乗に反比例することが示された。

一方、溶出率制限の場合は、 ΔK が増大しても、定常状態となり内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に影響を受けないことが示された。溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大におおよそ反比例することが示された。

緩衝材外側半径 L が一定の場合は、 $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式、または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式に、4.1.3-(6)式から 4.1.3-(9)式を代入して、固定値 L で整理し、緩衝材の厚さが増大した場合の放出率を比較する。4.1.3-(6)式から 4.1.3-(9)式の代入は、それぞれの内側境界条件（瞬時溶出、溶出率制限、溶解度制限）ごとの $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式（4.1.2-(5)式、4.1.2-(5)式、4.1.2-(12)式）さらに、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式（4.1.2-(8)式、4.1.2-(10)式、4.1.2-(14)式）に対して行う。また、放出率の比較は、具体的には、 $\Delta K=1\text{ m}$, $K=5\text{ m}$, $L=6\text{ m}$, $\Delta m=3\text{ m}$ の場合と $\Delta K=N\text{ m}$, $K=6-N\text{ m}$, $L=6\text{ m}$, $\Delta m=3\text{ m}$ の場合 ($N=2\sim 5$) のそれぞれの結果の比を用いて行う。これらの詳細を表 添付 4-5～表 添付 4-8 に示す。

これらの結果から、 $Q < Q'_{th}$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材内側半径 K を減少させた場合、瞬時溶出条件と溶出率制限の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大にほぼ反比例することが示された。

一方、溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することが示された。これは、廃棄体定置領域の長さが緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することによるものである。

一方、 $Q'_{th} < Q$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材内側半径 K を減少させた場合、瞬時溶出条件の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の 2 乗

に反比例することが示された。一方、溶出率制限の場合、 ΔK が増大しても定常状態となり内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に影響を受けないことが示された。溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に比例することが示された。

緩衝材の厚さ ΔK を厚くする場合、緩衝材内側半径 K が一定の場合（坑道半径を増大させる）と緩衝材外側半径 L が一定の場合（緩衝材内側半径を減少させる）との大きな違いは、緩衝材の体積の変動割合である。4.1.2-(5)式や4.1.2-(8)式で示されているように、放出率は媒体の体積に依存して変化する。そのため、坑道半径が大きくなる条件で緩衝材を増加させた場合の方が、緩衝材の内側半径を小さくする条件で緩衝材を増加させた場合に比べて緩衝材の体積の増分割合が大きくなり、結果として、放出率の低減割合は大きくなる。

ここでは、緩衝材の厚さと放出率の関係に着目した検討結果を示したが、廃棄体の体積を一定として、充填材の厚さを変動させる場合についても同様の結果が想定される。遅延性能を考慮した場合の核種の存在体積 ϵVR_d の比較において、緩衝材よりも充填材の方が、この値が大きい場合は、緩衝材の厚さを変動させるよりも、充填材の厚さを変動させる方が、放出率への影響が大きいことが想定される。ただし、この場合、充填材は拡散媒体とは見なしていないため、拡散による物質移動量に対しては影響を及ぼさないことに注意が必要である。

ここで、近似解析解から得られるこれらの人工バリアからの核種放出率と緩衝材の厚さの関係は、必ずしも、天然バリア出口での核種の放出率に比例的に反映されない場合があることに注意が必要である。

例えば、天然バリア入口での核種の流入率が変動したとしても、天然バリア出口の核種の放出率がそれに応じた有意な変動を示さない場合がある。これは、天然バリア中の核種移行が拡散支配で、与えられたインベントリなどの条件では、天然バリア中の核種移行が定常状態に達しない場合に生じる以下のような現象である。

- * 天然バリア中での核種移行が拡散支配となるような水理環境（流速が比較的遅い条件）においては、以下の現象が起こる。
 - 任意のインベントリや天然バリアの収着特性などを前提条件として与える。与えられた前提条件において、人工バリアから天然バリアへの核種の一定の流入が起こる場合、天然バリア出口での核種放出率の最大値は、天然バリア内での核種移行が定常状態になる場合の核種放出率によって与えられる。
 - 定常状態によって与えられる天然バリア出口での放出率は、天然バリア入口における任意の一定の流入率 (Bq/y) が天然バリアの移行特性に応じて決まる最小限の時間 (y) 継続することによって与えられる。この最小限の継続時間と一定流入率の積をインベントリ (Bq) と比較することによって、天然バリア内の核種移行が定常状態になる

か否かを判断することが可能になる。

- ▶ 最小限の継続時間と一定流入率の積が初期インベントリ値を超えない場合は、天然バリア内の核種移行は定常状態になり、一定流入率の増加に応じて天然バリア出口での放出率は有意に増加する。一方、一定流入率が増加することによって、最小限の継続時間と一定流入率の積が初期インベントリ値を超える場合は、定常に到達するために必要な核種が供給されない。そのため、天然バリア内の核種移行は定常状態に到達せず、増加した流入率の寄与が天然バリア出口での放出率に直接反映されなくなる。
- ▶ 核種の半減期や移行媒体の長さなどの影響により、天然バリア中での核種移行が定常状態に達しない場合がある。このような定常状態になっていない条件においては、天然バリア入口における流入率の変動は、天然バリア出口での放出率にほとんど影響を与えないことになる。
- ▶ これは、バリア入口における流入率の変動に応じた濃度勾配の変化が、バリア中の移行過程において鈍り、バリア出口での濃度勾配の変化に反映されないために起こることである。本検討では、このような現象を”鈍り“と称する。
- ▶ 核種移行が拡散によって支配される水理条件においては、より低い流入率を与えることにより、天然バリア中での核種移行が定常状態になるために必要な最小限の継続時間が確保されやすくなる。この場合、天然バリア入口における流入率の変動が、天然バリア出口での放出率に有意な影響を与えるようになる。
- ▶ 石原ほか（1998）は、天然バリア中での核種移行が拡散支配となる条件において、天然バリア中の核種移行が定常状態になる場合の天然バリア入口での核種流入率の最大値を定量的に表す式を求めている。この核種流入率よりも大きな核種流入率（人工バリアからの核種放出率）を与える場合は、天然バリア中の核種移行が定常にならないため、核種流入率の変化が天然バリアからの核種放出率に直接反映されないことになる。

* 天然バリア中での核種移行が移流支配となるような水理環境（流速が比較的速い条件）においては、以下の現象が起こる。

- ▶ 核種の移行が拡散ではなく、移流で伝わる（進行波）ため、天然バリア入口での核種流入率（人工バリアからの核種放出率）の変動は、拡散の場合比べて、直接的に天然バリア出口での核種放出率に反映される。

以上のことから、緩衝材の厚さ ΔK を厚くし、天然バリアからの核種放出率を有意に低減させることを考える場合は、このような天然バリアの特性を把握し、上述の“鈍り”の影響が現れる条件か否かを確認した上で、緩衝材の厚さの変化の効果を検討する必要がある。

これら近似解析解の簡略式によって示された特性を確認するため、同様の解析を数値解析コードを用いて実施し、緩衝材の厚さの変化と核種放出率の変化に関する関係を確認した。この解析においては、瞬時溶出条件を考え、EDZの地下水流量を、 $Q < Q'_{th}$ と $Q'_{th} < Q$ の場合の2通り設定した。人工バリアの条件設定を表 4.1.3-5 に整理する。

表 4.1.3-5 人工バリアの解析条件

モデル化領域	廃棄体層 体積一定	緩衝材領域 内側半径 K, 外側半径 L		EDZ
モデル属性	ソースターム	拡散移行媒体		ミキシングセル
幾何形状・寸法	定置領域長さ ℓ 固定	K=固定, L=変動	厚さ 1 m~5 m	厚さ固定 (3 m)
	ℓ 変動	K=変動, L=固定	厚さ 1 m~5 m	厚さ固定 (3 m)
水理設定	人工バリア内ダルシー流速固定 (3×10^{-6} m/y)			$Q < Q'_{th}$
				$Q'_{th} < Q$

ベントナイト系材料から構成される緩衝材は核種の拡散移行媒体として機能し、その厚さは1mを基準として最大5mまで1mずつ変化させるものとする。坑道掘削時に周辺母岩に形成されるEDZはミキシングセルとして機能し、緩衝材の厚さによって坑道径は変化するが、EDZの厚さは3mで固定とする。緩衝材が拡散支配の場を提供することから、人工バリア内（廃棄体層+緩衝材）でのダルシー流速は非常に小さい値で一定 (3×10^{-6} m/y) とする。これに対してEDZの地下水通過流量については、緩衝材厚さの変化による処分坑道断面の寸法の変化に追従した二次元水理解析結果を引用することとし、 $Q < Q'_{th}$ の場合と $Q'_{th} < Q$ の場合とを考慮することとした。

上記のQの設定においては対象核種、核種移行モデルなどを以下のように設定した。

対象核種は廃棄体グループ1のI-129とし、天然バリアの核種移行モデルは、TRUレベル3報告書(NUMO, 2011)と同様に亀裂媒体の重ね合わせモデルを採用した。天然バリアの亀裂透水量係数の分布および平均値もTRUレベル3報告書と同じ設定のものをレファレンスとした。天然バリアの水理条件を感度解析的に変化させる場合は、レファレンスと同様の透水量係数分布が保持されると仮定し、透水量係数の平均値を変動させることとした。

Q'_{th} については、4.1.2-(20)式の関係 ($De / (L-K) < Q'_{th} < 2EDe / (L-K)$) に基づいて、ここでは、 $Q'_{th} \doteq 2EDe / (L-K)$ と仮定し、表 4.1.3-6 に示すデータを用いて Q'_{th} 値を緩衝材の厚さごとに算出した(表 4.1.3-6 参照)。この結果に基づき、 $Q < Q'_{th} \rightarrow (Q < 2EDe / (L-K))$ 、 $Q'_{th} < Q \rightarrow (2EDe / (L-K) < Q)$ となる透水量係数を表 4.1.3-7 のように設定した。

表 4.1.3-7 から、EDZ の地下水流量が $5.62 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{y}$ 以下（透水量係数の倍率が 10 倍以下）の場合 $Q < Q'_{th}$ の条件となることがわかる。この場合、放出率は地下水流速に応じて変化する。一方、EDZ の地下水流量が $5.6 \text{ m}^3/\text{y}$ 以上（透水量係数の倍率が 100 倍以上）の場合 $Q'_{th} < Q$ の条件となることがわかる。この場合、放出率は地下水流速に依存しない。そのため、透水量係数の倍率が 100 倍と 1000 倍の場合で、放出率はほとんど変化しない。

表 4.1.3-6 緩衝材厚さに応じて変化する Q'_{th} を算出するための条件

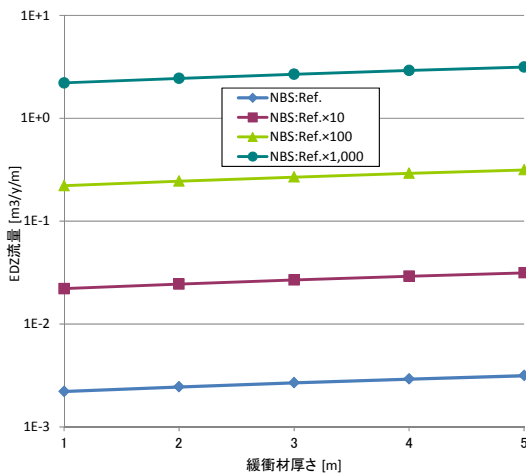
パラメータ	記号	単位	レファレンスの値				
緩衝材厚さ	$L-K=\Delta K$	m	1				
廃棄体設置領域長さ	ϱ	m	25.5				
EDZの地下水流量	Q	m^3/y	5.62E-02				
母岩の透水量係数(中央値)	T	m^2/s	1.00E-10				
人工バリアの透水係数	k	m/s	2.00E-11				
緩衝材内の実効拡散係数	De	m^2/y	1.26E-03				
緩衝材内側半径	K	m	5.00E+00				
緩衝材外側半径	L	m	6.00E+00				
			緩衝材厚さ(m)				
			1	2	3	4	5
緩衝材外側表面積	E	m^2	9.61E+02	1.12E+03	1.28E+03	1.44E+03	1.60E+03
$\div 2EDe' / (L-K)$	Q'_{th}	m^3/y	2.42E+00	2.82E+00	3.23E+00	3.63E+00	4.04E+00

表 4.1.3-7 $Q < Q'_{th}$, $Q'_{th} < Q$ となる透水量係数

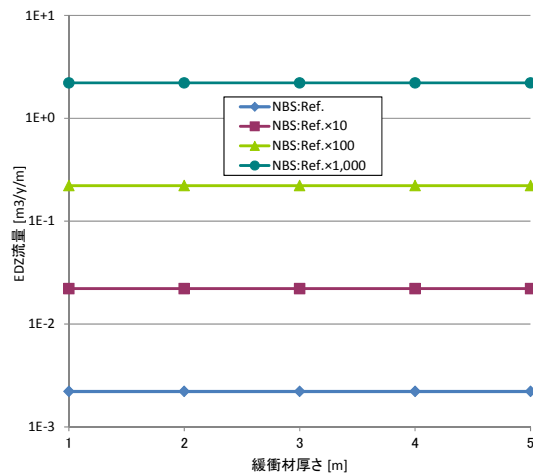
掘削影響領域地下水流量	Q	m^3/y	5.62E-02	5.62E-01	5.60E+00	5.60E+01
母岩の透水量係数 (比例すると仮定)	T	m^2/s	1.00E-10	1.00E-09	1.00E-08	1.00E-07
透水量係数の倍率			Ref.	10倍	100倍	1000倍
			$Q < Q'_{th}$		$Q'_{th} < Q$	

緩衝材内側半径 K を一定とした場合と緩衝材外側半径 L を一定とした場合の EDZ 流量と緩衝材厚さの関係を母岩の透水量係数ごとに図 4.1.3-6 に示す。

緩衝材内側半径 K を一定とした場合は、EDZ 流量が緩衝材厚さの増大（緩衝材厚さ 1 m の場合 $L=6 \text{ m}$ 、緩衝材厚さ 5 m の場合 $L=10 \text{ m}$ ）にほぼ比例して変化することがわかる。これは、緩衝材外側から常に 3 m の幅を持って EDZ が設定されていることから、緩衝材層が厚くなるとともに EDZ の体積も増大することに起因していると考えられる。図 4.1.3-7 に示すように、EDZ でのダルシー流速は緩衝材厚さによらずほぼ一定となっていることは、上記考え方を裏付けるものとなっている。

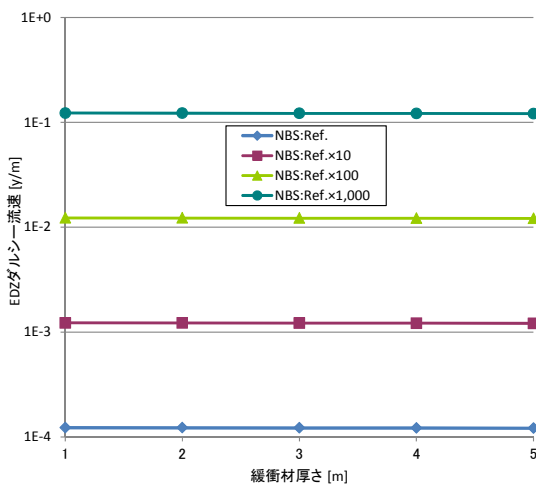


(緩衝材内側半径 K 一定)

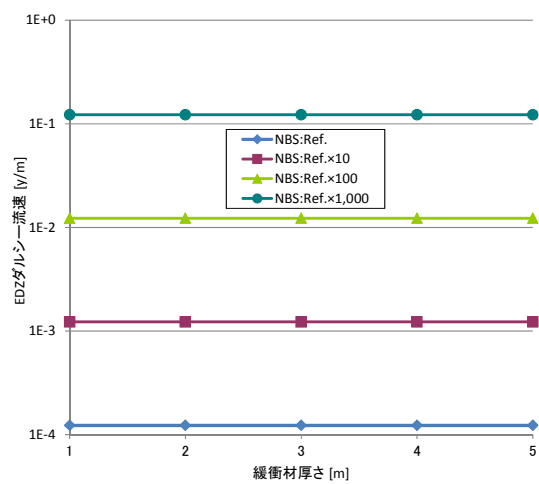


(緩衝材外側半径 L 一定)

図 4.1.3-6 EDZ 流量と緩衝材厚さの関係



(緩衝材内側半径 K 一定)



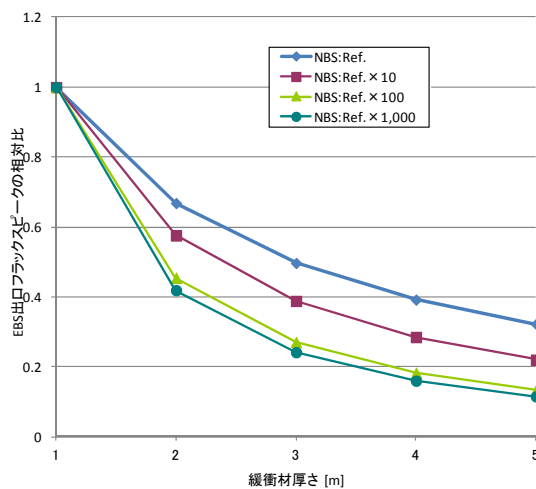
(緩衝材外側半径 L 一定)

図 4.1.3-7 緩衝材厚さと EDZ ダルシー流速

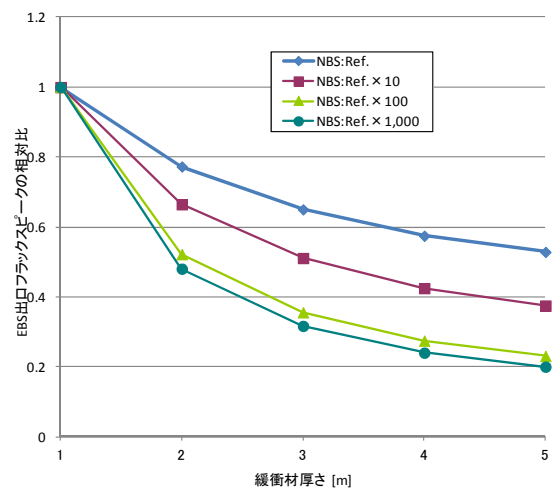
緩衝材厚さ 1m の結果を基準とした時の人工バリア出口フラックスピークを相対比較した結果を図 4.1.3-8 に示す。図から、緩衝材が厚くなるにつれて、人工バリア出口フラックスのピークは減少し、減少傾向は天然バリアの亀裂透水量係数が大きいほど強いこと、緩衝材が厚くなると減少度合いが飽和する傾向があることがわかる。また、緩衝材内側半径 K を一定とした場合に緩衝材厚さを 1m から 5m にすると、比例以上の効果で放出率が低減することがわかる。さらに、緩衝材内側半径 K を一定にする場合と緩衝材外側半径 L を一定にする場合とでは、緩衝材内側半径 K を一定にする場合の方がフラックスピークの減少効果が大きくなっていることがわかる。これは、前述のように、厚さに対する拡散媒体の体積増分の効果の違いによるものと考えられる。また、亀裂透水量係数が 100 倍から 1000 倍になった場合の放出率の低減割合が小さいことがわかる。これは、前述のように、

この水理条件では、放出率が地下水流量に依存しなくなるためである。

緩衝材厚さ 1 m の結果を基準とした時の線量ピークを相対比較した結果を図 4.1.3-9 に示す。図から、緩衝材が厚くなるほど、線量ピークは減少し、減少傾向は天然バリアの亀裂透水量係数が大きいほど強いこと、緩衝材が厚くなると減少度合いが飽和する傾向があることがわかる。また、天然バリアの亀裂透水量係数が小さいほど、線量減少傾向が相対的に低いことがわかる。また、図から、緩衝材内側半径 K を一定とした場合に緩衝材厚さを 1 m から 5 m にすると、比例以上の効果で線量が低減していることがわかる。

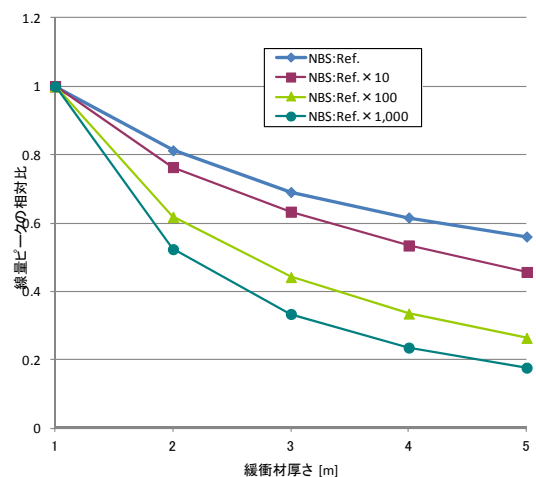


(緩衝材内側半径 K 一定)

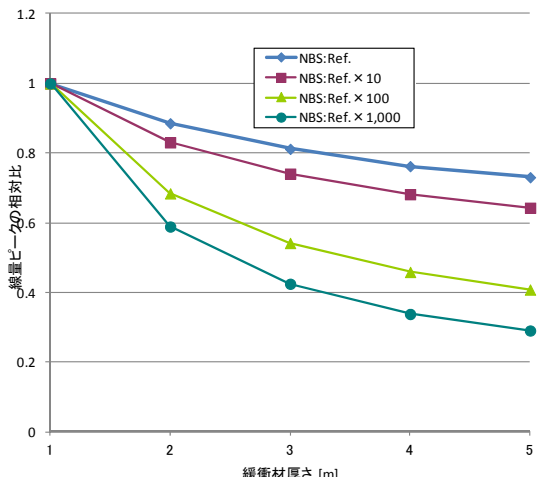


(緩衝材外側半径 L 一定)

図 4.1.3-8 人工バリア出口フラックスピークの相対比



(緩衝材内側半径 K 一定)



(緩衝材外側半径 L 一定)

図 4.1.3-9 線量ピークの相対比

表 4.1.3-6、表 4.1.3-7 に示した解析条件による核種移行解析結果として、 K 一定、NBS 水理がレファレンス条件 (Ref) で $Q < Q_{th}$ の場合の人工バリア出口のフラックスの経時変

化プロファイルと線量の経時変化プロファイルを図 4.1.3-10 と図 4.1.3-11 に示す。また、 K 一定、NBS 水理がレファレンス条件の 1000 倍 ($\text{Ref} \times 10^3$) で $Q'_{th} < Q$ の場合の人工バリア出口のフラックスの経時変化プロファイルと線量の経時変化プロファイルを図 4.1.3-12 と図 4.1.3-13 に示す。さらに、 L 一定、NBS 水理がレファレンス条件 (Ref) で $Q < Q'_{th}$ の場合の人工バリア出口のフラックスの経時変化プロファイルと線量の経時変化プロファイルを図 4.1.3-14 と図 4.1.3-15 に示す。また、 L 一定、NBS 水理がレファレンス条件の 1000 倍 ($\text{Ref} \times 10^3$) で $Q'_{th} < Q$ の場合の人工バリア出口のフラックスの経時変化プロファイルと線量の経時変化プロファイルを図 4.1.3-16~図 4.1.3-17 に示す。

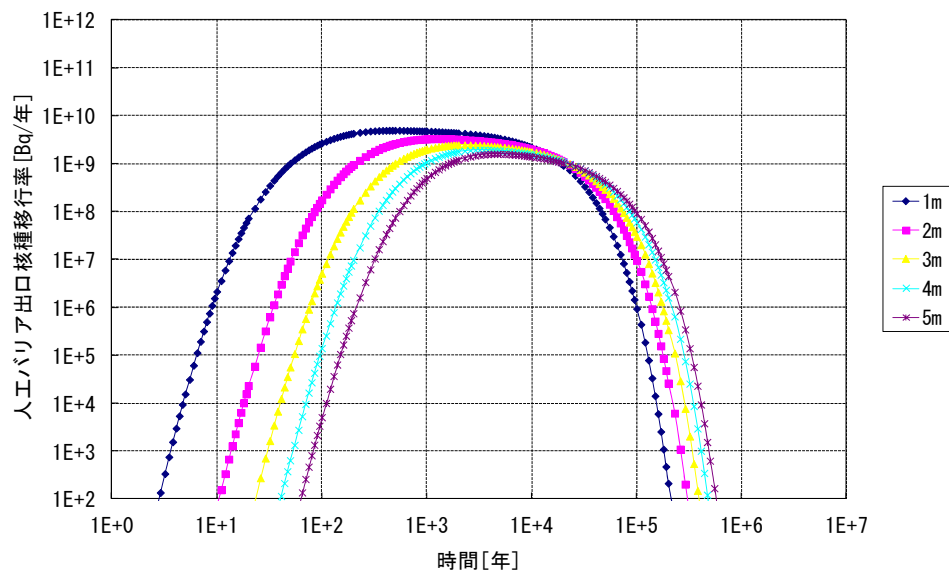


図 4.1.3-10 人工バリア出口フラックス (K 一定, 水理 : $\text{Ref} : Q < Q'_{th}$)

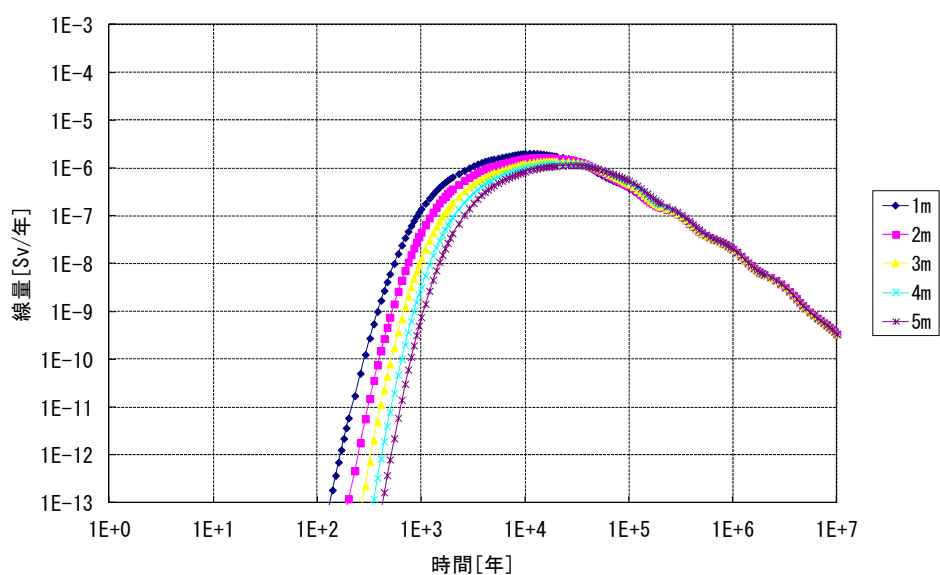


図 4.1.3-11 線量 (K 一定, 水理 : $\text{Ref} : Q < Q'_{th}$)

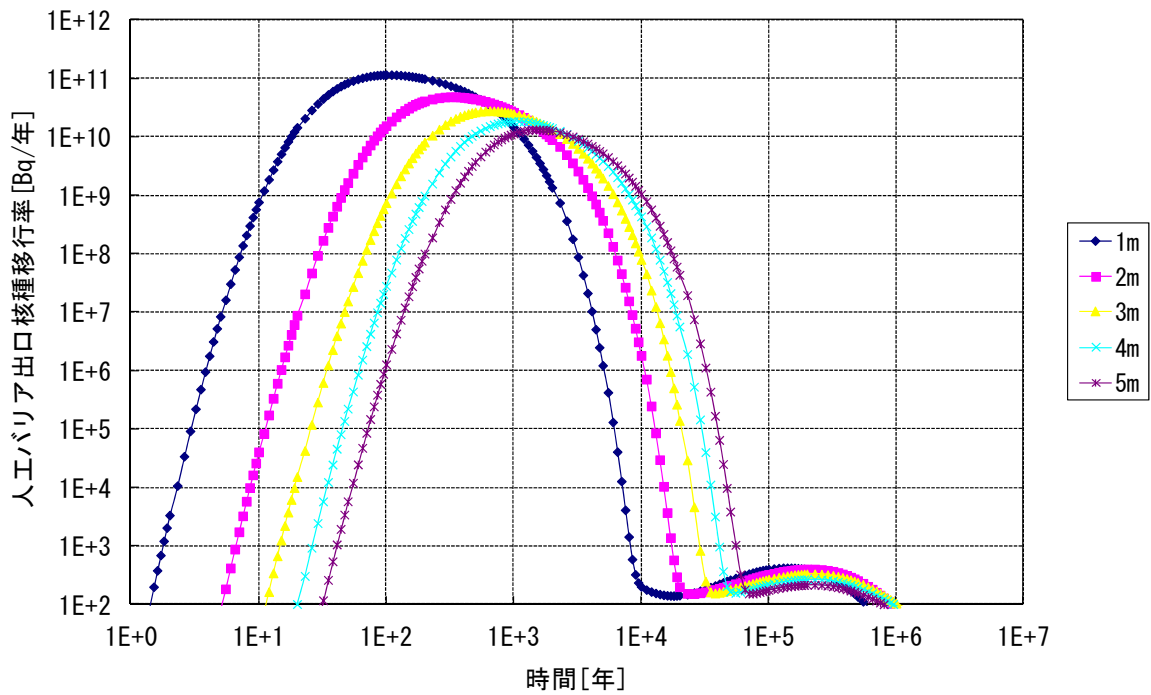


図 4.1.3-12 人工バリア出口フラックス (K一定, 水理: $\text{Ref} \times 10^3 : Q'_{th} < Q$)

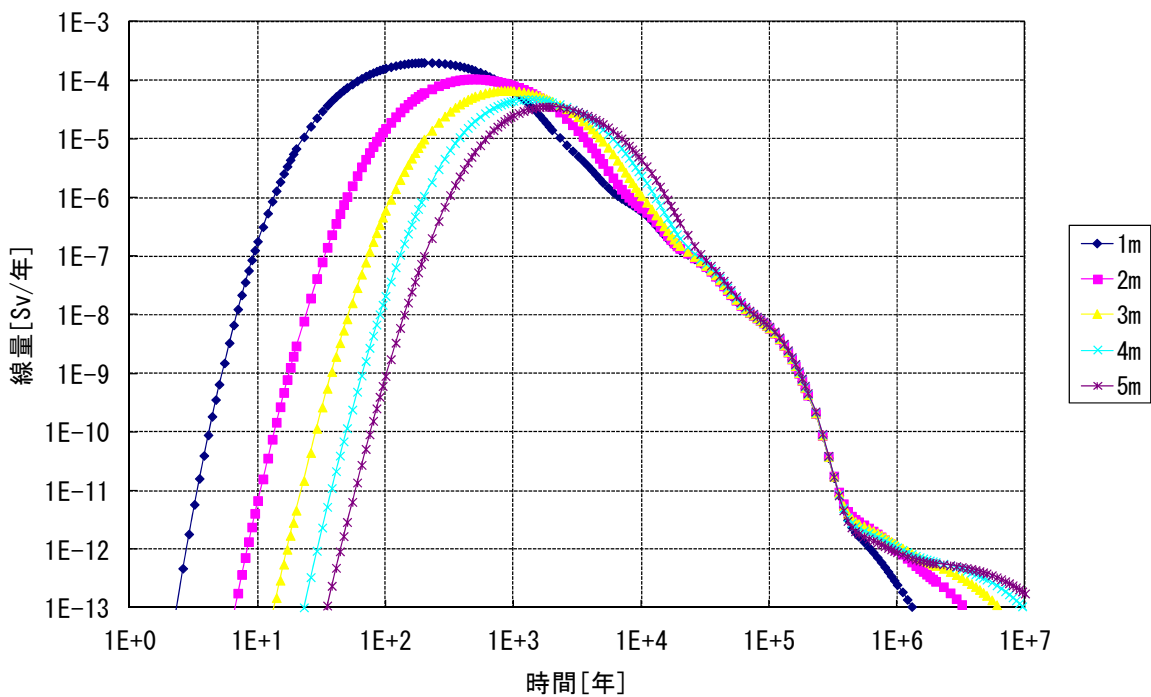


図 4.1.3-13 線量 (K一定, 水理: $\text{Ref} \times 10^3 : Q'_{th} < Q$)

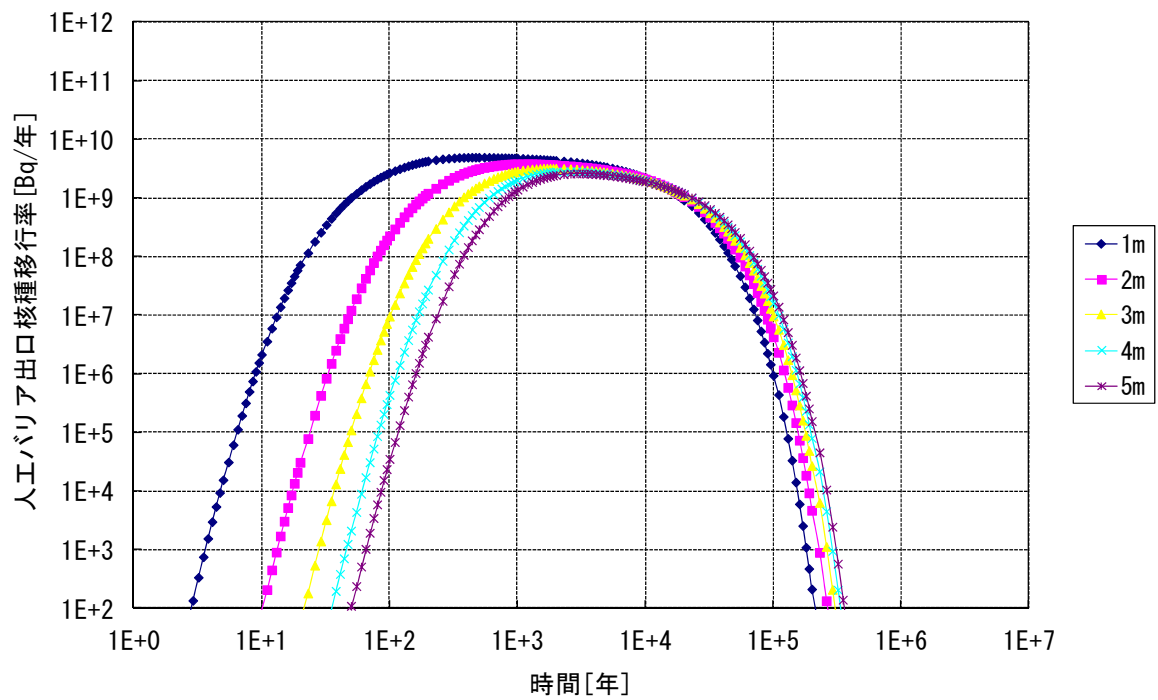


図 4.1.3-14 人工バリア出口フラックス (L一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)

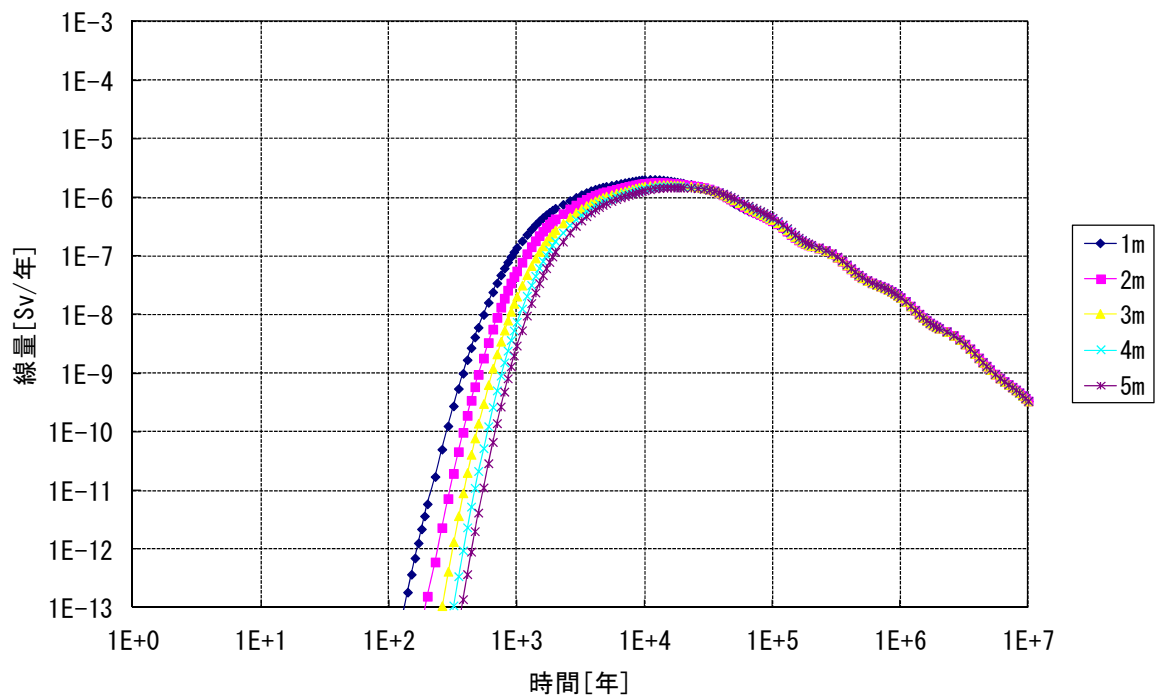


図 4.1.3-15 線量 (L一定, 水理: Ref: $Q < Q'_{th}$)

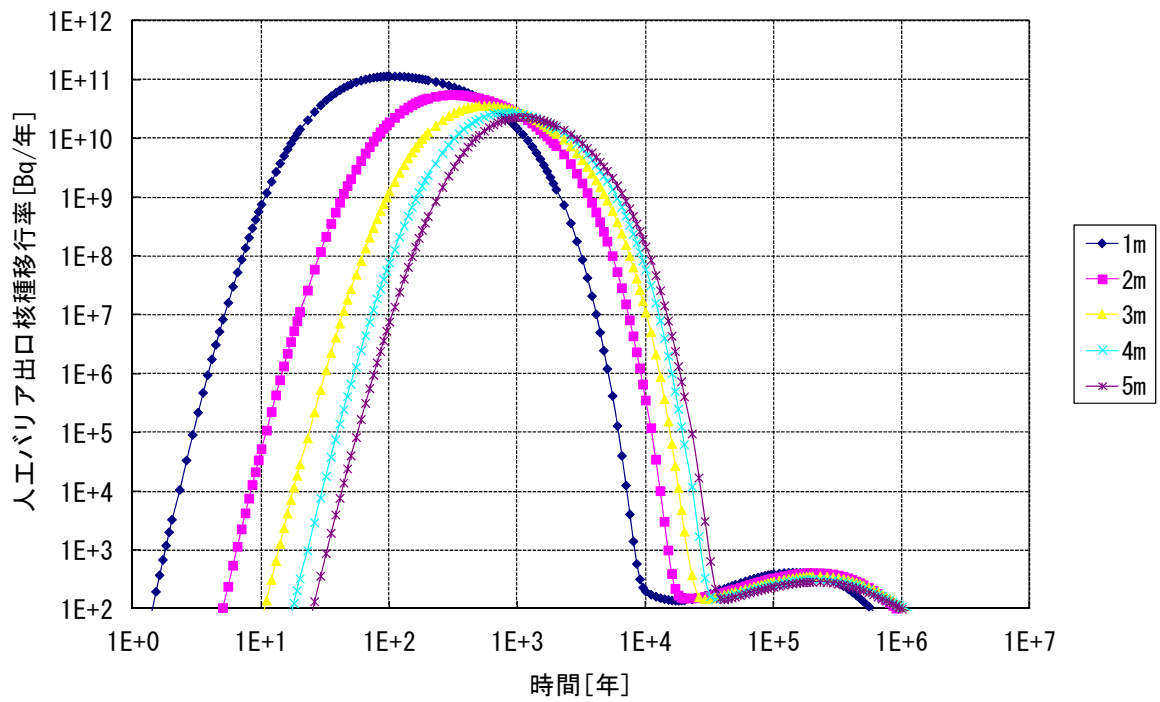


図 4.1.3-16 人工バリア出口フラックス (L一定, 水理: $\text{Ref} \times 10^3 : Q'_{\text{th}} < Q$)

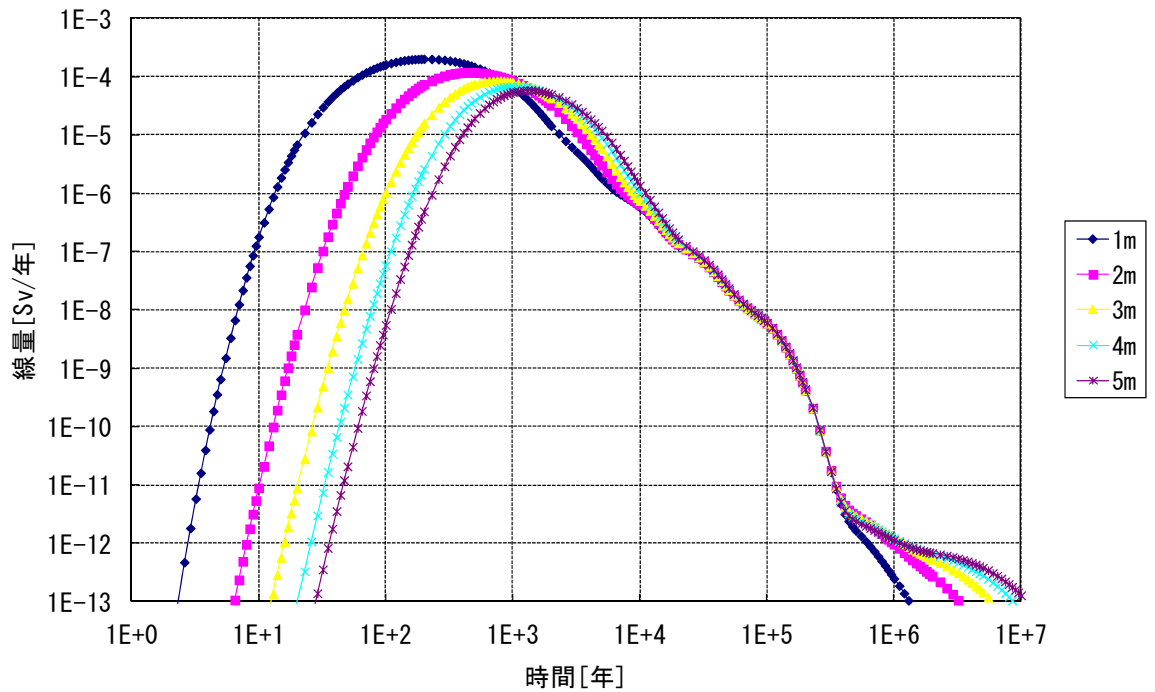


図 4.1.3-17 線量 (L一定, 水理: $\text{Ref} \times 10^3 : Q'_{\text{th}} < Q$)

また、近似解析解から得られる瞬時放出の条件の簡易評価式を用いて、人工バリアからの放出率と緩衝材厚さの関係を求めた結果（添付 表 4-1, 表 4-3, 表 4-5, 表 4-7 の(1)式を用いた計算値）と数値解析から得られる結果の比較を表 4.1.3-8～表 4.1.3-11 に示す。

簡易評価式の結果と数値解の結果の比較においては、K が一定の場合と L が一定の場合の各々について、 $Q < Q'_{th}$ の場合の簡易評価式の結果に対して、レファレンスの水理条件とレファレンスの 10 倍の水理条件の 2 つの数値解の結果を比較した（表 4.1.3-7 参照）。また、 $Q'_{th} < Q$ の場合の簡易評価式の結果に対して、レファレンスの 100 倍の水理条件とレファレンスの 1000 倍の水理条件の 2 つの数値解の結果を比較した。これらの比較結果から、添付 表 4-1, 表 4-3, 表 4-5, 表 4-7 に示す簡易評価式の結果は、定性的には、数値解の結果と整合的な結果を与えていることがわかる。また、定量的には、簡易評価式の結果は数値解析の結果に比べて、緩衝材の厚さの変化に対するシステムの応答を過敏に表現していることがわかる。これは、前述のように、収着を考慮した充填材の体積の影響が無視されているため、緩衝材の厚さの変化の効果が顕在化されているためと考えられる。

表 4.1.3-8 簡易評価式と数値解の比較 ($Q = \text{ref} : Q < Q'_{th}$, K 一定, 瞬時溶出)

Q=Ref: $Q < Q'_{th}$, K一定, 瞬時溶出	K	ΔK	L	$(K + \Delta K + m) / (2K + \Delta K) / \Delta K$	$\Delta K = 1$ で正規化した値	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref)	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 10)
$\Delta K = 1$	5	1	6	0.82	1.00	1.00	1.00
2	5	2	7	0.42	0.51	0.67	0.58
3	5	3	8	0.28	0.34	0.50	0.39
4	5	4	9	0.21	0.26	0.39	0.29
5	5	5	10	0.17	0.21	0.32	0.22

表 4.1.3-9 簡易評価式と数値解の比較 ($Q = 10^3$ 倍: $Q'_{th} < Q$, K 一定, 瞬時溶出)

Q=1000倍: $Q'_{th} < Q$, K一定, 瞬時溶出	K	ΔK	L	$(K + \Delta K) / (\Delta K * \Delta K) / (K + \Delta K / 2)$	$\Delta K = 1$ で正規化した値	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 100)	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 1000)
$\Delta K = 1$	5	1	6	1.09	1.00	1.00	1.00
2	5	2	7	0.29	0.27	0.45	0.42
3	5	3	8	0.14	0.13	0.27	0.24
4	5	4	9	0.08	0.07	0.18	0.16
5	5	5	10	0.05	0.05	0.13	0.12

表 4.1.3-10 簡易評価式と数値解の比較 ($Q = \text{ref} : Q < Q'_{th}$, L 一定, 瞬時溶出)

Q=Ref: $Q < Q'_{th}$, L一定, 瞬時溶出	廃棄体定置 領域長さ l	緩衝材外側 表面積	K	ΔK	L	$(L + m) / (2L - \Delta K) / \Delta K$	$\Delta K = 1$ で正規化 した値	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref)	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 10)
$\Delta K = 1$	25.5	9.61E+02	5	1	6	0.82	1.00	1.00	1.00
2	40.5	1.53E+03	4	2	6	0.45	0.55	0.77	0.66
3	70.5	2.66E+03	3	3	6	0.33	0.41	0.65	0.51
4	157.5	5.93E+03	2	4	6	0.28	0.34	0.57	0.42
5	628.5	2.37E+04	1	5	6	0.26	0.31	0.53	0.37

表 4.1.3-11 簡易評価式と数値解の比較 ($Q = 10^3$ 倍: $Q'_{th} < Q$, L 一定, 瞬時溶出)

Q=1000倍: $Q'_{th} < Q$, L一定, 瞬時溶出	廃棄体定置 領域長さ l	緩衝材外側 表面積	K	ΔK	L	$L / (L - \Delta K / 2) / (\Delta K * \Delta K)$	$\Delta K = 1$ で正規化 した値	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 100)	$\Delta K = 1$ で正規化した 数値解析の結果 (Q=Ref × 1000)
$\Delta K = 1$	25.5	9.61E+02	5	1	6	1.09	1.00	1.00	1.00
2	40.5	1.53E+03	4	2	6	0.30	0.28	0.52	0.48
3	70.5	2.66E+03	3	3	6	0.15	0.14	0.36	0.32
4	157.5	5.93E+03	2	4	6	0.09	0.09	0.27	0.24
5	628.5	2.37E+04	1	5	6	0.07	0.06	0.23	0.20

(5) 間隙率と放出率の関係

人工バリアからの拡散による核種放出率は4.1.2-(5)式および4.1.2-(8)式が示すように、緩衝材内側境界濃度 C_k に依存して変化する。この緩衝材内側境界濃度 C_k は4.1.2-(4)式および4.1.2-(6)が示すように、収着を考慮した場合の媒体の体積の和とインベントリによって与えられる。これらの式を単純化すると以下のように表わされる。

$$C = \frac{I}{\varepsilon R d V} = \frac{I}{\varepsilon \left(1 + \frac{(1-\varepsilon) K d \rho}{\varepsilon} \right) V} = \frac{I}{(\varepsilon + (1-\varepsilon) K d \rho) V} = \frac{I}{(\varepsilon(1 - K d \rho) + K d \rho) V} \quad 4.1.3-(10)式$$

4.1.3-(10)式から、 $K d \rho = 1$ となる場合は、緩衝材内側境界濃度が間隙率に依存しなくなり、 $K d \rho < 1$ と $K d \rho > 1$ の場合で、間隙率の変動に対する濃度の応答が変化することがわかる。

具体的には、 $K d \rho < 1$ の場合は、間隙率の増大に応じて、4.1.3-(10)式の分母は、大きくなり、結果として、内側境界濃度が小さくなり、放出率も小さくなる。 $K d \rho > 1$ の場合は、間隙率の増大に応じて、4.1.3-(10)式の分母は、小さくなり、結果として内側境界濃度が大きくなり、放出率も大きくなる。

緩衝材の真密度として、 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いる場合、 $K d \rho = 1$ となる収着分配係数は $3.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ と見積もられる。従って、緩衝材からの核種放出を考える場合、収着分配係数 $K d$ が $3.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ よりも小さい核種（たとえば、I-129 など）は、間隙率の増加に応じて内側境界濃度が小さくなり、放出率は減少する。一方、収着分配係数 $K d$ が $3.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ よりも大きい TRU 核種などは、間隙率の増加に応じて内側境界濃度が大きくなり、放出率は増加する。この結果を図 4.1.3-18 に示す。

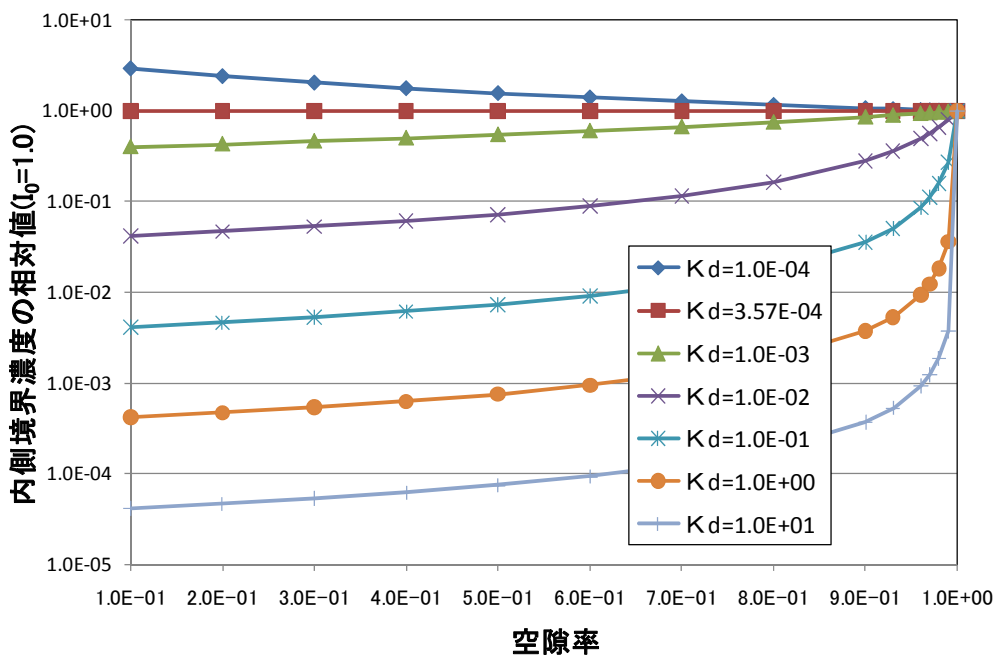


図 4.1.3-18 間隙率の変化に対する内側境界濃度の変化

4.1.2-(5)式および4.1.2-(8)式で示したように、EDZの地下水流量 Q と Q'_{th} の大小関係に応じて、放出率に対して影響を及ぼすパラメータが変化する。

$Q < Q'_{th}$ の場合は、放出率は4.1.2-(5)式で表わされ、拡散係数には依存しないため、緩衝材の劣化などに依存した間隙率の増大が放出率を高めるか低めるかについては、上述の緩衝材中の K_d の大きさに依存して決まることになる。従って、 $Q < Q'_{th}$ の場合、I-129のように K_d が極めて小さい核種については、緩衝材の劣化などにより間隙率が増大する方が、放出率が小さくなるのがわかる。一般的に緩衝材の劣化は放出率を増大させる効果を有していると考えられる。しかしながら、I-129のように K_d が極めて小さい核種については、少なくとも $Q < Q'_{th}$ の場合、緩衝材の劣化は、間隙率と透水係数(4.1.3(3)項参照)への影響の観点からは、放出率を高める作用は有していないことがわかる。

一方、 $Q'_{th} < Q$ の場合は、放出率は4.1.2-(8)式で表わされ、拡散係数に依存するため、緩衝材の劣化などに依存した間隙率の増大の影響は、液相濃度の減少と実効拡散係数の増大との相殺効果に依存して決まることになる。

4.1.3(3)項において述べたように、 $Q'_{th} < Q$ の場合は、透水係数の劣化による人工バリアからの核種放出に対する影響が無視できなくなる。そのため、 $Q'_{th} < Q$ の場合は、緩衝材の劣化による、間隙率と透水係数の増大は、放出率に有意な影響を与えることがわかる。

これらの結果は、設計や個別現象に関する検討などを効率的に実施する観点、さらには、評価の十分性を提示する観点から、緩衝材の劣化が処分システムの頑健性に影響を及ぼす具体的な条件を核種ごとに詳細に把握することの重要性を示すものとする。

4.2 評価の十分性の検討

安全評価の信頼性を高めるためには、安全性を論じる上で十分な評価が行われていることを示す必要がある。評価の十分性は、必要な評価が適切に行われていること、または、評価を行わなくても、そのシステムの応答特性などから、結果が合理的に類推されることを論拠を持って示すことによって提示可能である。ここでは、4.1.3項で示した人工バリアシステムの応答特性に基づき、TRU廃棄物処分の安全性への影響の観点から解析条件を合理的に類型化する。類型化は、解析条件によって示されるパラメータ値が、これ以上厳しい結果を与えないような保守的な条件の範囲に属しているか、あるいは、比較的安全側の結果を与える条件の範囲に属しているかによってなされる。これらの振り分けは、人工バリアシステムの応答特性によって示されるパラメータの影響特性を参考にして実施する。このような類型化の提示により、さらなるパラメータの変動やその要因を考慮した場合に、示された安全評価の結果が、さらに厳しい結果となる可能性を有しているものか、あるいは、安全性が変わらない頑健性の高いものかを提示することが可能になる。本検討では、このよう類型化の提示により評価の十分性の提示が可能になると考え、解析条件の類型化を試みることにする。

4.2.1 応答特性に基づく解析条件の類型化の考え方

図 4.1.1-2 から、人工バリアからの核種放出率に影響を与える主要な因子が拡散による物質の移動量 $EDe'/(L-K)=Q''_{th}$ を含む項と内側境界濃度 C_K であることがわかる。そこで、水理条件ごとに、これらの項を軸とする二次元平面において、解析条件の類型化をおこなう。類型化の概念を図 4.2.1-1 に示す。

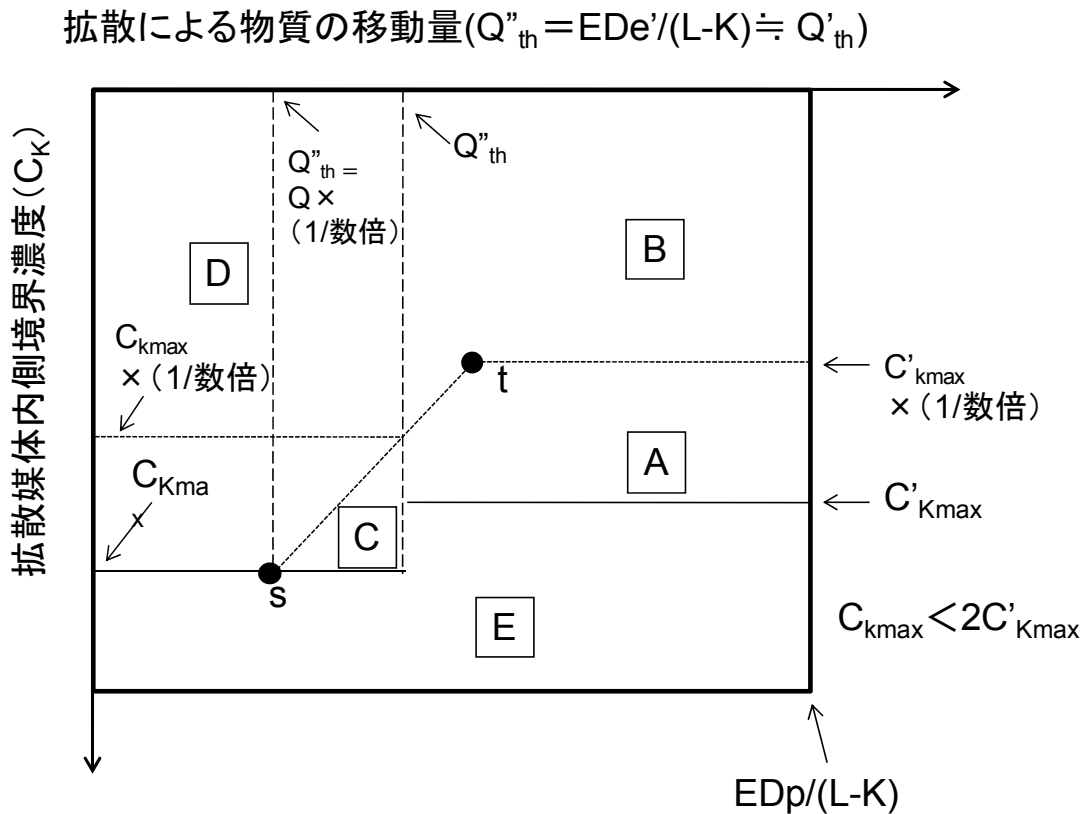


図 4.2.1-1 C_K , $EDe'/(L-K)$ 平面上での類型化の概念

内側境界濃度 C_K については、近似解析解を用いることによって、与えられた条件（水理条件、インベントリ、 K_d 、幾何形状など）において、最も保守的な値（内側境界濃度の最大値 C_{Kmax} ($Q''_{th} < Q$)、または C'_{Kmax} ($Q < Q''_{th}$)：図 4.1.1-2 参照) を求めることが可能である。ここで、 C_{Kmax} と C'_{Kmax} の関係は、以下のような 4.1.2-(19)式で与えられる。

$$C'_{Kmax} \leq C_{Kmax} \leq 2C'_{Kmax} \quad 4.1.2-(19)式$$

そこで、EDZ の地下水流量 Q に相当する拡散による物質の移動量 Q''_{th} を求め、この値を用いて、内側境界濃度 C_K が最大となる C_{Kmax} または C'_{Kmax} となる領域を区分することとする。

図 4.2.1-1 の領域 A, B は、 $Q < Q''_{th}$ で、ともに $C_K < C'_{Kmax}$ となる領域である。この領域では、与えられた水理条件のもと、人工バリアからの核種の放出率は内側境界濃度 C_K のみ

に依存することになる。図 4.2.1-1 の領域 C, D は、 $Q''_{th} < Q$ で、ともに $C_K < C_{Kmax}$ となる領域である。この領域では、人工バリアからの核種の放出率は EDZ の地下水流量 Q には依存せず、内側境界濃度 C_K と拡散による物質の移動量 Q''_{th} に依存することになる。

C_{Kmax} 、または C'_{Kmax} は、与えられた水理条件 ($Q''_{th} < Q$ 、または $Q < Q''_{th}$) において、定常状態に到達し得る内側境界濃度の最大値である。そのため、これら以上の値を設定しても、人工バリアからの放出率は定常にならず、 C_{Kmax} 、または C'_{Kmax} に応じて与えられる放出率を超えることはない。しかし、安全評価においては、これらの内側境界濃度の最大値 C_{Kmax} 、または C'_{Kmax} よりも大きな値となる溶解度が求められ、解析条件として設定されることがある。そこで、このような溶解度が設定される領域を E として区別することとする。

実効拡散係数については、自由水中の拡散係数 D_p を用いることによって、その最保守値が与えられる。そのため、与えられた幾何形状に応じた、拡散による物質の移動量の保守値 $Q''_{th} = ED_p/(L-K)$ を求めることが可能である。安全評価においては、空隙水中の拡散係数の値よりも大きい値を設定することは基本的にはない。そこで、空隙水中の拡散係数から得られる物質の移動量 $ED_p/(L-K)$ を拡散による物質の移動量 Q''_{th} の上限値とする。

さらに、不確実性を有する溶解度などによって与えられる内側境界濃度 C_K の大小に応じて解析条件を区分することを考える。ここでは、まず、保守的解析結果を与える領域を定義するため、 $C'_{Kmax} \times (1/\alpha)$ (例えば、 $\alpha = 2 \sim 3$ 程度) を区分値として考えることとする。

領域 A は、 $Q < Q''_{th}$ の条件において、溶解度 C_K の範囲が C'_{Kmax} から $C'_{Kmax} \times (1/\alpha)$ までの場合を意味する。溶解度がこの領域 A 内にある場合の人工バリアからの放出率は、 C'_{Kmax} の場合に示される放出率の $(1/\alpha)$ 以内に収まることになる。ここでは、領域 A に含まれる溶解度を、与えられた水理条件において保守性が担保される溶解度と見なすこととする。与えられた水理条件において、検討対象とする解析ケースの中に、溶解度が領域 A に含まれる解析ケースが存在する場合は、その結果の提示により評価の十分性を論じることが可能となる。これは、不確実性を考慮して、溶解度をさらに変動させたとしても得られる結果が領域 A に含まれる溶解度によって示される結果を有意に上回らないことを、合理的な論拠に基づいて論証することが可能であるためである。

領域 B は、 $Q < Q''_{th}$ の条件において、溶解度 C_K の範囲が $C'_{Kmax} \times (1/\alpha)$ よりさらに小さい領域を意味する。溶解度がこの領域 B 内にある場合の人工バリアからの放出率は、 C'_{Kmax} の場合に示される放出率の $(1/\alpha)$ よりもさらに小さくなる領域である。ここでは、領域 B に含まれる溶解度を、パラメータの不確実性を考慮した場合に必ずしも保守性が担保されない溶解度と見なすこととする。与えられた水理条件において、検討対象とする解析ケースによって示される溶解度が領域 B のみに存在する場合は、不確実性を考慮した場合などの変動によっては、より大きな影響を示す可能性がある。そのため、その溶解度の設定論拠をより明確に示す必要がある。

$Q''_{th} < Q$ の場合は、人工バリアからの核種放出率は内側境界濃度 C_K と拡散による物質の

移動量 Q''_{th} (実効拡散係数 De に依存) の両方に依存する。そのため、ここでは、保守値である C_{Kmax} と Q''_{th} の場合に比べて人工バリアからの放出率がおおよそ $(1/\alpha)$ (例えば、 $\alpha=2\sim3$ 程度) 以内に収まる領域を、 C_K と Q''_{th} の両方の影響を考慮して、図 4.2.1-1 に示すような左下がりの線分 ts を用いて区分する。

領域 C は、 $Q''_{th} < Q$ の条件において、溶解度 C_K の範囲が C_{Kmax} から $C_{Kmax} \times (1/\alpha)$ 以内および Q''_{th} の範囲が、 Q から $Q \times (1/\alpha)$ 以内の場合を意味する。溶解度と Q''_{th} がこの領域 C 内にある場合の人工バリアからの放出率は、 Q''_{th} と C_{Kmax} の場合に示される放出率のおおよそ $(1/\alpha)$ 以内に収まることになる。ここでは、領域 C に含まれる溶解度と Q''_{th} を、与えられた水理条件において保守性が担保される溶解度と Q''_{th} と見なすこととする。与えられた水理条件および幾何形状などの条件において、検討対象とする解析ケースの中に、溶解度と Q''_{th} (実効拡散係数 De に依存) が領域 C に含まれる解析ケースが存在する場合は、その結果の提示により評価の十分性を論じることが可能となる。これは、不確実性を考慮して、溶解度や実効拡散係数をさらに変動させたとしても得られる結果が領域 C に含まれる溶解度や実効拡散係数によって示される結果を有意に上回らないことを、合理的な論拠に基づいて論証することが可能であるためである。

領域 D は、 $Q''_{th} < Q$ の条件において、溶解度 C_K の範囲が $C_{Kmax} \times (1/\alpha)$ よりさらに小さい領域かつ、 Q''_{th} の範囲が、 Q から $Q \times (1/\alpha)$ よりさらに小さい領域を意味する。溶解度と Q''_{th} がこの領域 D 内にある場合の人工バリアからの放出率は、 Q''_{th} と C_{Kmax} の場合に示される放出率の $(1/\alpha)$ よりもさらに小さくなる領域である。ここでは、領域 D に含まれる溶解度と Q''_{th} を、パラメータの不確実性を考慮した場合に必ずしも保守性が担保されない溶解度と Q''_{th} と見なすこととする。与えられた水理条件および幾何形状などにおいて、検討対象とする解析ケースによって示される溶解度と Q''_{th} (実効拡散係数 De に依存) が領域 D のみに存在する場合は、不確実性を考慮した場合などの変動によっては、より大きな影響を示す可能性がある。そのため、その溶解度と実効拡散係数の設定論拠をより明確に示す必要がある。

領域 E に含まれる溶解度は、前述のように、与えられた条件 (水理条件、インベントリ、 Kd 、幾何形状など) によって示される溶解度の最大値を超える内側境界濃度が溶解度として設定される条件である。溶解度が領域 E に含まれる場合は、その溶解度を導出した現象などに関する検討の安全評価上の意義を再確認する必要があると考える。

本検討では、与えられた解析条件をこれらの 5 つの象限上にプロットすることで、解析条件を類型化することとする。ここで、人工バリアからの核種放出率は近似解析解を用いて、内側境界濃度 C_K と物質の移動量 $EDe/(L-K)$ を 2 軸とする平面上においてプロット可能である。そこで、この平面上での解析条件のプロット位置の安全評価上の意味を明確にするとともに、5 つの象限を区分するための指標として、人工バリアからの放出率として $10 \mu Sv/y$, $100 \mu Sv/y$, $300 \mu Sv/y$ を選び、それらをこの象限上に合わせて示すこととする。

4.2.2 類型化とそれに基づく評価の十分性の検討

3.5節で記述したように、TRU 廃棄物の安全性を支配する I-129, C-14 は、可溶性で、収着性の低い核種である。そのため、既存の安全評価においては、全てのケースで低めの収着分配係数を設定し、溶解度制限は考慮しない評価が行われている。このことは、与えられた幾何形状や初期インベントリの条件のもとでは、I-129, C-14 については、緩衝材内側境界濃度のバラツキが小さいことを表すものである。そのため、これらの核種の評価における重要な変動要因は、バリア材料の劣化による拡散係数の変動や低溶出性となる廃棄体固化技術の採用に伴う廃棄体の溶出率（拡散係数の変動と置き換え可能）の変動、さらには、サイトの地質環境に依存する水理特性の変動となる。このような特性を踏まえ、ここでは、例示的に I-129 の類型化を試みる。

ここでは、これらの類型化が EDZ の地下水流量の変化により、どのように変化するかを確認することとする。

類型化の検討において考慮する解析ケースとしては、上記の因子 (C_K, De') に関連するパラメータ（収着分配係数、拡散係数、溶出率：溶解度については可溶性であるため設定しない）を変動因子として扱い、解析ケースを設定した。この際、高度化対策（低溶出性固化体の採用）を採用するケースも含めることとした。

ここで、概念の変更による幾何形状変更の影響については、4.1.3(4)項の結果で評価可能と考え、ここでは、代表的なケースの幾何形状で統一した。I-129 の K_d および拡散係数などの設定値を表 4.2.2-1 に示す。また、固定パラメータである幾何形状の代表値、線量への換算係数を表 4.2.2-2 にまとめる。さらに、母岩の透水係数ごとの EDZ の地下水流量 Q や人工バリア内の地下水流量 Q_d を表 4.2.2-3 に示す。この EDZ の地下水流量 Q や人工バリア内の地下水流量 Q_d は、二次元の円筒座標系の水理モデルの解析解に基づいて算出したものである。

表 4.2.2-1 I-129 の K_d および拡散係数などの設定値（既存の評価）

I-129(Gr1)		降水系還元性 (河川水, 温暖, 農業従事)	海水系還元性 (沿岸海域, 温暖, 海洋漁業従事者)	降水系酸化性 (河川水, 温暖, 農業従事者)	保守的条件 (河川水, 温暖, 農業従事者)	高度化概念 (河川水, 温暖, 農業従事者)
充填材の K_d	K_{df} m^3/kg	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04
充填材の空隙率	ϵ_f	1.90E-01	1.90E-01	1.90E-01	1.90E-01	1.90E-01
充填材の真密度	ρ_f kg/m^3	2.58E+03	2.58E+03	2.58E+03	2.58E+03	2.58E+03
充填材の遅延係数	R_{df}	1.26E+00	1.00E+00	1.26E+00	1.00E+00	1.26E+00
充填材の拡散係数	De_f m^2/s	8.00E-10	8.00E-10	8.00E-10	8.00E-10	8.00E-10
緩衝材の K_d	K_{dd} m^3/kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
緩衝材の空隙率	ϵ_d	4.00E-01	4.00E-01	4.00E-01	4.00E-01	4.00E-01
緩衝材の真密度	ρ_d	2.67E+03	2.67E+03	2.67E+03	2.67E+03	2.67E+03
緩衝材の遅延係数	R_{dd}	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
緩衝材中の拡散係数	De_d m^2/s	4.00E-11	3.00E-10	4.00E-11	2.27E-09	4.00E-11
インベントリ(25年冷却)	I_0 Bq	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+13
溶出期間	T y	瞬時	瞬時	瞬時	瞬時	1.00E+05
溶出率	F_{LE} Bq/y	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+13	5.90E+08

表 4.2.2-2 幾何形状の代表値, 線量への換算係数など

廃棄体グループ			Gr1
核種名			I-129
パラメータ	記号	単位	入力値
半減期	T	y	1.570E+07
線量への換算係数(レファレンス)	DCF	Sv/Bq	3.200E-15
線量への換算係数(海水系)	DCF	Sv/Bq	5.700E-17
廃棄体定置領域の長さ	ℓ	m	4.860E+01
充填材の体積	V _f	m ³	1.143E+03
緩衝材内側側表面積		m ²	1.480E+03
緩衝材内側までの距離	K	m	4.850E+00
緩衝材外側までの距離	L	m	5.850E+00
緩衝材外側表面積	E	m ²	1.785E+03
緩衝材の体積	V _d	m ³	1.633E+03
EDZの体積	V _m	m ³	0.000E+00

表 4.2.2-3 EDZ の地下水流量 Q, 人工バリア内地下水流量 Q_d

廃棄体グループ			Gr1
核種名			I-129
パラメータ	記号	単位	入力値
母岩の透水係数	k	m/s	2.00E-10
人工バリア内のダルシー流速		m/y	2.76E-06
人工バリア内の地下水流量	Q _d	m ³ /y	2.46E-03
EDZ内の単位坑道あたりの地下水流量		m ³ /m/y	2.18E-03
EDZ内の地下水流量	Q	m ³ /y	1.06E-01
母岩の透水係数	k	m/s	2.00E-09
人工バリア内のダルシー流速		m/y	2.79E-06
人工バリア内の地下水流量	Q _d	m ³ /y	2.49E-03
EDZ内の単位坑道あたりの地下水流量		m ³ /m/y	2.18E-02
EDZ内の地下水流量	Q	m ³ /y	1.06E+00
母岩の透水係数	k	m/s	2.00E-08
人工バリア内のダルシー流速		m/y	2.79E-06
人工バリア内の地下水流量	Q _d	m ³ /y	2.49E-03
EDZ内の単位坑道あたりの地下水流量		m ³ /m/y	2.18E-01
EDZ内の地下水流量	Q	m ³ /y	1.06E+01
母岩の透水係数	k	m/s	2.00E-07
人工バリア内のダルシー流速		m/y	2.79E-06
人工バリア内の地下水流量	Q _d	m ³ /y	2.49E-03
EDZ内の単位坑道あたりの地下水流量		m ³ /m/y	2.18E+00
EDZ内の地下水流量	Q	m ³ /y	1.06E+02

人工バリア内の透水係数は, 4.0E-06m/s, 緩衝材領域の透水係数は, 2.0E-11m/s, EDZの透水係数は母岩の100倍

これらの入力情報と近似解析解を用いて計算した、廃棄体グループ1のI-129に対する拡散による物質移動量 $Q''_{th}=EDe'/(L-K)$ 、緩衝材内側境界最大値 C_K 、核種放出率 F_N などを表 4.2.2-4 ($k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s) と表 4.2.2-5 ($k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s) にまとめる。また、表 4.2.2-4 と表 4.2.2-5 の結果などを用いて、横軸に拡散による物質の移動量 $Q''_{th}=EDe'/(L-K)$ 、縦軸に緩衝材内側境界濃度 C_K をとり、各ケースの結果をプロットし、類型化を試みた結果を母岩の透水係数 $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s と $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s ごとに図 4.2.2-1、図 4.2.2-2 に示す。

表 4.2.2-4 $Q''_{th}=EDe'/(L-K)$, C_K , F_N などの比較(Gr1, I-129, $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s)

パラメータ(グループ1: I-129)	記号	単位	降水系還元性 (レファレンス)	海水系還元性	降水系酸化性	保守的条件 $K_d=0$, 緩衝材の $De=2.27e-09$	溶出期間 1,000年	溶出期間 5,000年	溶出期間 10,000年	溶出期間 50,000年	溶出期間 100,000年
初期インベントリ	I_0	Bq	5.90E+13								
線量への換算係数	DCF	Sv/Bq	3.20E-15	5.70E-17	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15
溶解度	C_{sol}	mol/l	易溶性								
溶出期間	y		1.00E+00				1.00E+03	5.00E+03	1.00E+04	5.00E+04	1.00E+05
溶出率	F_{LE}	Bq/y	5.90E+13				5.90E+10	1.18E+10	5.90E+09	1.18E+09	5.90E+08
分配係数	充填材	K_{df}	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04				
	緩衝材	K_{ds}	0.00E+00				0.00E+00				
	母岩	k_{dm}	1.00E-04	0.00E+00	1.00E-04	0.00E+00	1.00E-04				
充填材間隙率	ϵ_f	—	1.90E-01				1.90E-01				
充填材の実効拡散係数	De_f	m^2/s	8.00E-10				8.00E-10				
緩衝材の実効拡散係数	De'	m^2/s	4.00E-11	3.00E-10	4.00E-11	2.27E-09	1.48E-11	2.96E-12	1.48E-12	2.96E-13	1.48E-13
緩衝材の透水係数	k	m/s	2.00E-11				2.00E-11				
人工バリア内の地下水流速	Q_d	m^3/y	2.46E-03				2.46E-03				
掘削影響領域中の地下水流速	Q	m^3/y	1.06E-01				1.06E-01				
母岩マトリクス中の実効拡散係数	De_m	m^2/s	3.00E-12				3.00E-12				
母岩の透水係数	k_r	m/s	2.00E-10				2.00E-10				
人工バリアからの核種放出率 F_N											
近似解析解に基づく拡散による放出率	F_L	Bq/y	5.04E+09	6.96E+09	5.04E+09	6.98E+09	5.04E+09	5.04E+09	5.04E+09	1.18E+09	5.90E+08
近似解析解に基づく移流による放出率	F_{sd}	Bq/y	1.23E+08	1.66E+08	1.23E+08	1.66E+08	1.23E+08	1.23E+08	1.23E+08	2.87E+07	1.44E+07
近似解析解に基づく放出率(F_L+F_{sd})	F_N	Bq/y	5.16E+09	7.13E+09	5.16E+09	7.15E+09	5.16E+09	5.16E+09	5.16E+09	1.21E+09	6.04E+08
近似解析解に基づく放出率(F_L+F_{sd})	F_N	$\mu Sv/y$	1.65E+01	4.06E-01	1.65E+01	2.29E+01	1.65E+01	1.65E+01	1.65E+01	3.87E+00	1.93E+00
拡散による物質の移動量($EDe'/(L-K)$)	Q''_{th}	m^3/y	2.25E+00	1.69E+01	2.25E+00	1.28E+02	8.32E-01	1.66E-01	8.32E-02	1.66E-02	8.32E-03
Q と Q''_{th} の比較			$Q < Q''_{th}$	$Q < Q''_{th}$	$Q < Q''_{th}$	$Q < Q''_{th}$	$Q < Q''_{th}$	$Q < Q''_{th}$	$Q''_{th} < Q$	$Q''_{th} < Q$	$Q''_{th} < Q$
近似解析解に基づく内側境界濃度	C_K	Bq/ m^3	5.10E+10	6.77E+10	5.10E+10	6.75E+10	5.10E+10	5.10E+10	5.10E+10	1.19E+10	5.96E+09
F_N の分解成分としての内側境界濃度	C_K	Bq/ m^3	5.10E+10	6.77E+10	5.10E+10	6.75E+10	5.48E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10
定常溶出率の最大値	F_{Kmax}	Bq/y	1.60E+11	1.87E+12	1.60E+11	1.41E+13	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11
定常溶出率の最大値	F_{Kmax}	$\mu Sv/y$	5.11E+02	1.06E+02	5.11E+02	4.52E+04	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02
瞬時溶出に相当する溶出期間	y		3.69E+02	3.16E+01	3.69E+02	4.17E+00	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02
内側境界濃度の最大値	C_{Kmax}	Bq/ m^3	7.09E+10	1.11E+11	7.09E+10	1.11E+11	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10
内側境界濃度の最大値	C_{Kmax}	mol/l	8.42E-02	1.31E-01	8.42E-02	1.31E-01	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02
天然バリア中の核種の減衰割合 γ											
解析解に基づく減衰割合	γ	—	9.994E-01	1.000E+00	9.994E-01	1.000E+00	9.99E-01				
γ の分解成分としての移行時間	τ	y	1.36E+04	9.76E+02	1.36E+04	9.76E+02	1.36E+04				
γ の分解成分としてのベクレ数	Pe	—	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01				
天然バリアからの放出率が定常になる人工バリアからの定常放出率の最大値	ϕ (inma)	Bq/y	4.35E+09	6.05E+10	4.35E+09	6.05E+10	4.35E+09				

網掛け領域はレファレンスと異なる値の設定を意味する
 網掛け領域は応答特性の区分値 Q''_{th} と拡散媒体内側境界濃度のプロット図の値との比較を容易にするために強調した部分
 網掛け領域は人工バリアからの核種放出率 F_N を示す

表 4.2.2-4 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s の場合、レファレンス条件および保守的な条件、溶出期間 5 万年における人工バリアからの核種放出率がそれぞれ、17 $\mu Sv/y$, 23 $\mu Sv/y$, 4 $\mu Sv/y$ 程度であることがわかる。レファレンスの条件における生物圏での線量は、天然バリア中の移行により、人工バリアからの放出率に比べて 1/10 程度に低減することが既存の評価から知られている。これらの結果は、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-10}$ m/s の場合、5 万年の溶出期間を確保することにより、人工バリアのみで、線量を 10 $\mu Sv/y$ 以下にすることができることを表している。また、それぞれの解析ケースによって示される放出率 F_N

は、定常放出率の最大値 F_{Kmax} に比べて、およそ2桁程度低い値となっていることがわかる。これは、水理場の変動により放出率が増加する可能性を示唆するものである。このため、評価の十分性を示すためには、水理場の変動を考慮した解析結果を示す必要があることがわかる。

表 4.2.2-5 $Ede' / (L-K)$, C_K , F_N などの比較(Gr1, I-129, $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

パラメータ(グループ1:I-129)	記号	単位	降水系還元性 (レファレンス)	海水系還元性	降水系酸化性	保守的条件 $K_d=0$, 緩衝材の $De=2.27e-09$	溶出期間 1,000年	溶出期間 5,000年	溶出期間 10,000年	溶出期間 50,000年	溶出期間 100,000年
初期インベントリ	I_0	Bq	5.90E+13								
線量への換算係数	DCF	Sv/Bq	3.20E-15	5.70E-17	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15	3.20E-15
溶解度	C_{SOL}	mol/l	易溶性								
溶出期間	y		1.00E+00				1.00E+03	5.00E+03	1.00E+04	5.00E+04	1.00E+05
溶出率	F_{LE}	Bq/y	5.90E+13				5.90E+10	1.18E+10	5.90E+09	1.18E+09	5.90E+08
分配係数	充填材	K_{df}	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04	0.00E+00	1.25E-04				
	緩衝材	K_{dd}	0.00E+00				0.00E+00				
	母岩	k_{dm}	1.00E-04	0.00E+00	1.00E-04	0.00E+00	1.00E-04				
充填材間隙率	ϵ_f	—	1.90E-01				1.90E-01				
充填材の実効拡散係数	De_f	m^2/s	8.00E-10				8.00E-10				
緩衝材の実効拡散係数	De'	m^2/s	4.00E-11	3.00E-10	4.00E-11	2.27E-09	1.48E-11	2.96E-12	1.48E-12	2.96E-13	1.48E-13
緩衝材の透水係数	k	m/s	2.00E-11				2.00E-11				
人工バリア内の地下水流量	Q_d	m^3/y	2.49E-03				2.49E-03				
掘削影響領域中の地下水流量	Q	m^3/y	1.06E+02				1.06E+02				
母岩マトリクス中の実効拡散係数	De_m	m^2/s	3.00E-12				3.00E-12				
母岩の透水係数	k_r	m/s	2.00E-07				2.00E-07				
人工バリアからの核種放出率FN											
近似解析に基づく拡散による放出率	F_L	Bq/y	1.55E+11	1.48E+12	1.55E+11	4.75E+12	5.90E+10	1.18E+10	5.90E+09	1.18E+09	5.90E+08
近似解析に基づく移流による放出率	F_{ad}	Bq/y	8.67E+07	1.41E+08	8.67E+07	1.57E+08	3.30E+07	6.60E+06	3.30E+06	6.60E+05	3.30E+05
近似解析に基づく放出率($=F_L+F_{ad}$)	F_N	Bq/y	1.55E+11	1.48E+12	1.55E+11	4.75E+12	5.90E+10	1.18E+10	5.90E+09	1.18E+09	5.90E+08
近似解析に基づく放出率($=F_L+F_{ad}$)	F_N	$\mu Sv/y$	4.97E+02	8.44E+01	4.97E+02	1.52E+04	1.89E+02	3.78E+01	1.89E+01	3.78E+00	1.89E+00
拡散による物質の移動量($Ede'/(L-K)$)	Q''_{th}	m^3/y	2.25E+00	1.69E+01	2.25E+00	1.28E+02	8.32E-01	1.66E-01	8.32E-02	1.66E-02	8.32E-03
QとQ''thの比較			$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$	$Q<Q''_{th}$	$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$	$Q''_{th}<Q$
近似解析に基づく内側境界濃度	C_K	Bq/ m^3	7.03E+10	1.02E+11	7.03E+10	8.20E+10	2.67E+10	5.35E+09	2.67E+09	5.35E+08	2.67E+08
FNの分解成分としての内側境界濃度	C_K	Bq/ m^3	7.03E+10	1.02E+11	7.03E+10	8.20E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10
定常溶出率の最大値	F_{Kmax}	Bq/y	1.60E+11	1.87E+12	1.60E+11	1.41E+13	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11	1.60E+11
定常溶出率の最大値	F_{Kmax}	$\mu Sv/y$	5.11E+02	1.06E+02	5.11E+02	4.52E+04	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02	5.11E+02
瞬時溶出に相当する溶出期間	y		3.69E+02	3.16E+01	3.69E+02	4.17E+00	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02	3.69E+02
内側境界濃度の最大値	C_{Kmax}	Bq/ m^3	7.09E+10	1.11E+11	7.09E+10	1.11E+11	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10	7.09E+10
内側境界濃度の最大値	C_{Kmax}	mol/l	8.42E-02	1.31E-01	8.42E-02	1.31E-01	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02	8.42E-02
天然バリア中の核種の減衰割合 γ											
解析に基づく減衰割合	γ	—	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.00E+00				
γ の分解成分としての移行時間	τ	y	1.43E+01	1.73E+00	1.43E+01	1.73E+00	1.43E+01				
γ の分解成分としてのベクレ数	Pe	—	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01				
天然バリアからの放出率が定常になる人工バリアからの定常放出率の最大値	ϕ_{inma}	Bq/y	4.12E+12	3.41E+13	4.12E+12	3.41E+13	4.12E+12				

網掛け領域はレファレンスと異なる値の設定を意味する
 網掛け領域は応答特性の区分値 Q''_{th} と拡散媒体内側境界濃度のプロット図の値との比較を容易にするために強調した部分
 網掛け領域は人工バリアからの核種放出率 F_N を示す

表 4.2.2-5 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の場合、レファレンス条件および保守的な条件、溶出期間 5 万年における人工バリアからの核種放出率がそれぞれ、500 $\mu Sv/y$, 15,200 $\mu Sv/y$, 4 $\mu Sv/y$ 程度であることがわかる。この線量は流速が大きいことから、天然バリア中の移行を考慮しても、大きな低減を見込むことはできないと考える。これらの結果は、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の場合、5 万年の溶出期間を確保することにより、人工バリアのみで、線量を 10 $\mu Sv/y$ 以下にすることができることを表している。

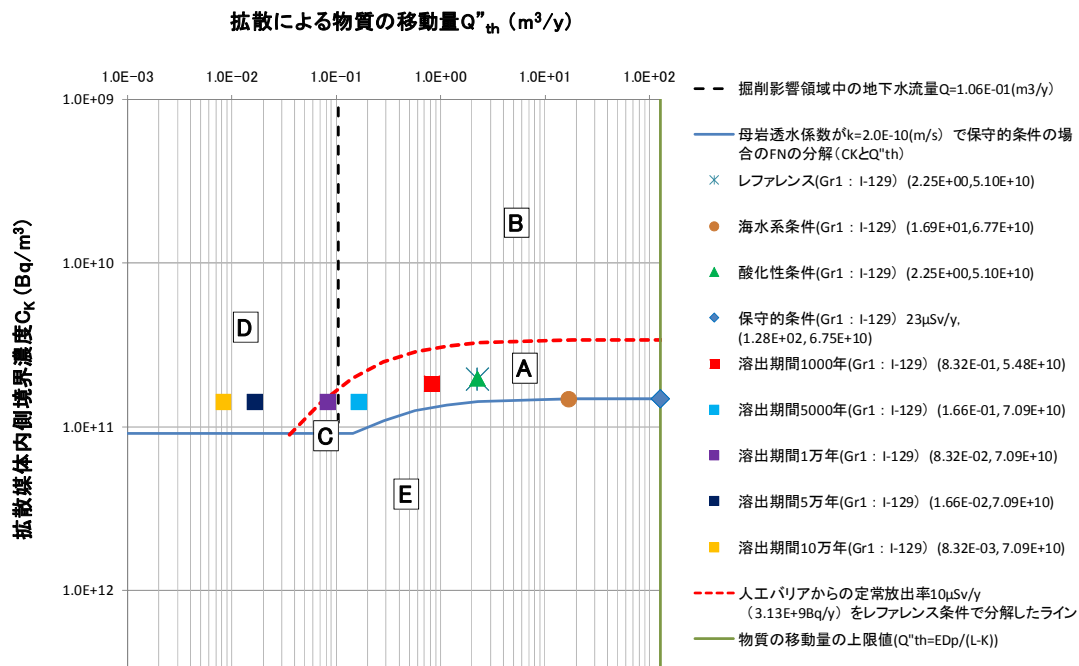


図 4.2.2-1 Q''_{th} と C_k を用いた類型化 ($Gr1 : I-129 : k=2.0 \times 10^{-10} m/s$)

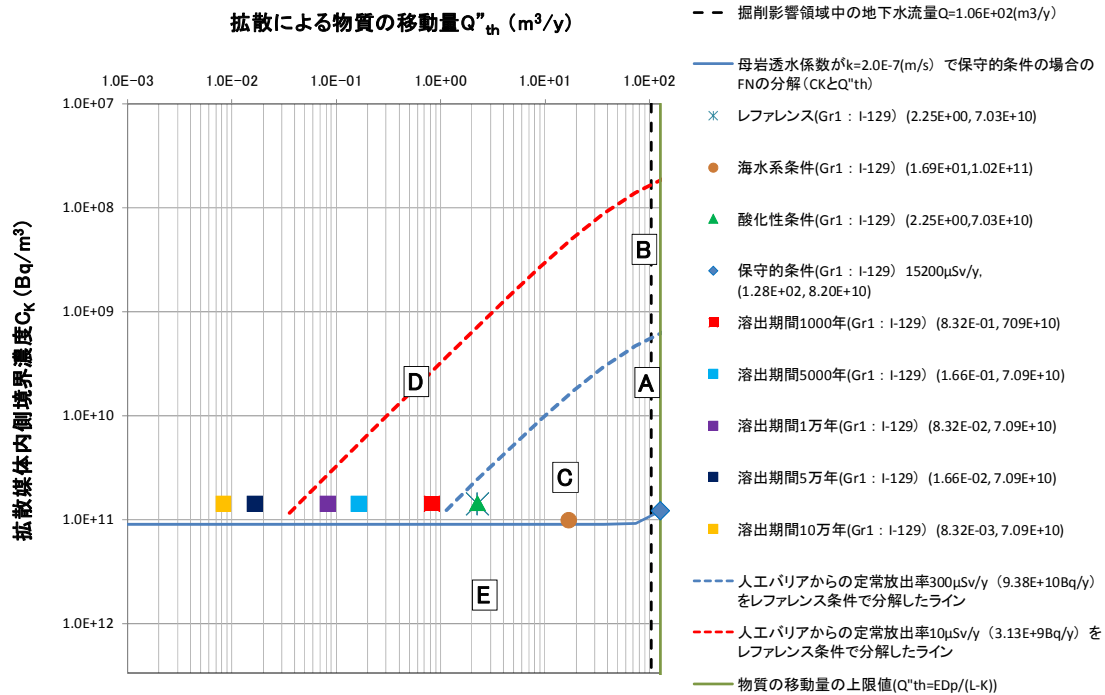


図 4.2.2-2 Q''_{th} と C_k を用いた類型化 ($Gr1 : I-129 : k=2.0 \times 10^{-7} m/s$)

図 4.2.2-1 と図 4.2.2-2 から、レファレンス条件が保守的な条件に分類されていることがわかる。このことから、それぞれの水理条件においてレファレンスケースの解析を実施することにより、評価の十分性を提示できることがわかる。また、図 4.2.2-1 と図 4.2.2-2 から、類型化グループ D の溶出期間 5 万年および 10 万年の解析条件は、水理環境に依らず人工バリアからの放出率が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る条件となっており、安全性を確保可能な条件であることがわかる。

以上の結果から、廃棄体グループ 1 の可溶性で、非吸着性核種である I-129 の評価において、重要な解析条件を以下にまとめる。

- ・廃棄体グループ 1 の I-129：水理条件，溶出率，拡散係数

処分システムの状態理解においては、評価の十分性の提示，または、より頑健なシステム構築のために、上記のパラメータの設定に影響を与える状態に関する詳細な情報整理が重要である。

第4章 参考文献

- 電事連・JNC (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取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02., 2005年9月.
- 石原義尚, 大井貴夫, 石黒勝彦 (1998) : 天然バリア中の核種移行に対するパラメータの影響特性の把握, PNC TN8410 98-084.
- 石原義尚, 石黒勝彦, 梅木博之 (1999) : Se-79 の半減期の長期化による地層処分システム性能評価への影響, JNC TN 8400 99-086.
- JNC (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.
- NUMO (2011) : 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.
- 大井貴夫 (2011) : 放射性廃棄物地層処分の人工バリアシステムの応答特性を把握するための近似解析解の導出, NUMO-TR-10-06.
- 大井貴夫 (2012) : 包括的感度解析の高度化による地層処分の安全評価の信頼性向上に関する研究, 博士論文, 九州大学, <http://hdl.handle.net:80/2324/25587>.
- Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, T and Hane, K. (2013) : A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margins of the geological disposal system, Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 50, No. 1, pp80–106.
- 鈴木俊一, 青木広臣, 川上博人, 畑明人, 木島貴之 (2009) : 多重人工バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設の安全評価手法に関する考察, 原子力バックエンド研究, Vol.15 No.2.

5. 包括的感度解析に基づく成立条件の抽出

5.1 成立条件の抽出手順

高度化した包括的感度解析手法（大井，2012；Ohi, et al., 2013）（添付1参照）と設定したパラメータの変動範囲を用いて，評価ケースごとに成立条件の閉曲面を求める。具体的な手順は以下の通りである。

5.1.1 統計解析

決定論的安全評価に用いる数値解析コードなどを利用して，統計解析を実施する。この統計解析においては，関連するパラメータの変動範囲を設定し，そのパラメータをランダムに抽出・組み合わせ，数千回以上の統計的に十分な量の解析を行う。

5.1.2 2つの変数から構成される平面上での統計解析の結果の整理

図 5.1.2-1 に示すように，天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N に対応する軸をそれぞれ区分し，それらの組み合わせに相当する領域を規定する。

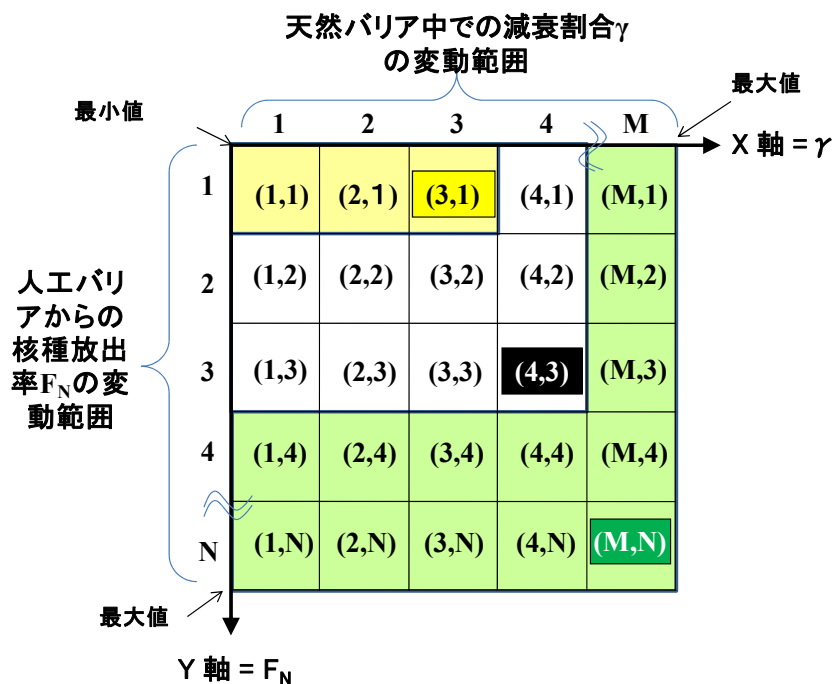


図 5.1.2-1 2つの影響の大きい因子からなる面の区分の概念
(大井，2012 より引用)

図 5.1.2-1 は γ と F_N からなる平面上での領域区分を示している。区分された領域の番号の組み合わせによって F_N と γ の組み合わせを表現し，多数回の統計解析結果の中からその組み合わせに相当する解析結果（線量）を抽出する。これらの結果の抽出においては，十分な数の解析結果を確保するために，以下のような考え方を採用する。

区分領域 (3,1)に相当する結果は、図 5.1.2-1 に示すように、区分領域 (1, 1), (2, 1), (3, 1) に含まれるすべての結果とする。同様に、区分領域 (4, 3) に相当する結果は、図 5.1.2-1 に示すように、区分領域 (1, 1), (2, 1), (3, 1), (4, 1), (1, 2), (2, 2), (3, 2), (4, 2), (1, 3), (2, 3), (3, 3), (4, 3) に含まれるすべての結果とする。各々の領域に対する結果を、横軸を母岩の透水係数 k とし、縦軸を解析結果 (線量) とする二次元平面上にプロットし、線量が目標値以下になる母岩の透水係数 k の最小値を抽出する。図 5.1.2-2 に個々の区分領域に対応する成立条件の抽出の例を示す。抽出された k の値と、この結果を与える区分領域を構成する γ と F_N の値との組み合わせが成立条件となる。この方法により、十分なデータ数が確保されると考える。このような最小値の抽出を γ と F_N からなる平面の全域で行う。

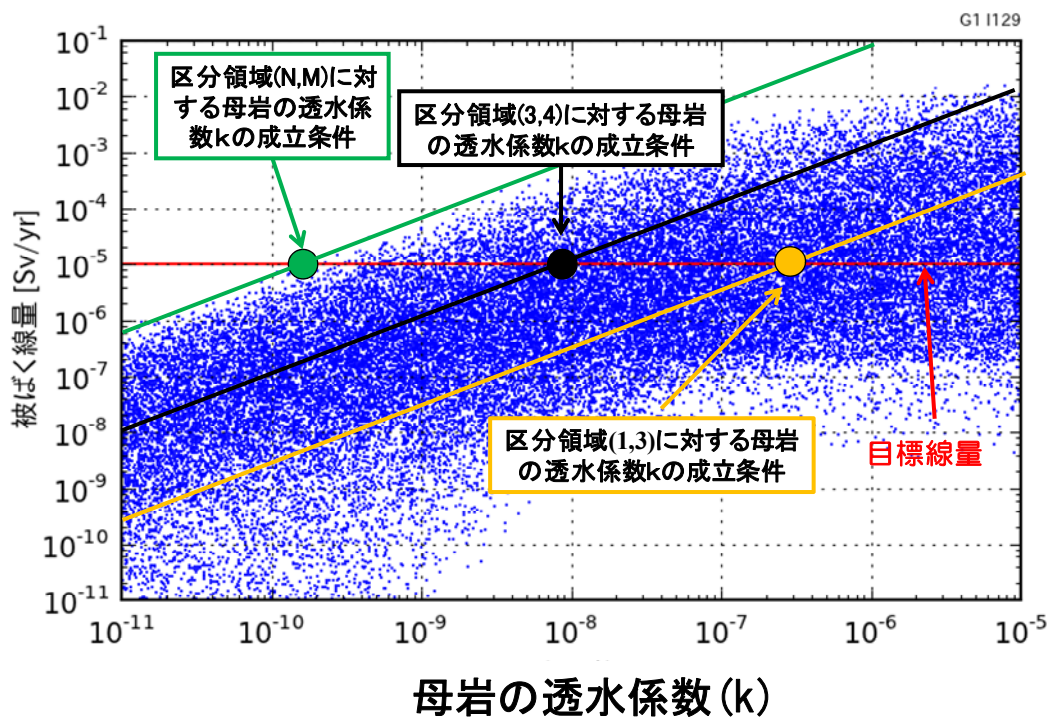


図 5.1.2-2 個々の区分領域に対応する成立条件の抽出の概念
(大井, 2012 より引用)

以下、統計解析の結果を k , γ , F_N を用いて整理することによって、目標とする線量に相当する任意の変数の成立条件を適切に抽出できることを例示的に示す。

図 5.1.2-3 に、横軸を天然バリア中の減衰割合 γ 、縦軸を線量とした場合の γ と線量の関係を示す。この図において示されるデータのばらつきは、この整理においては考慮されていない母岩の透水係数 k の変動や人工バリアからの核種放出率 F_N の変動の影響を反映したものである。

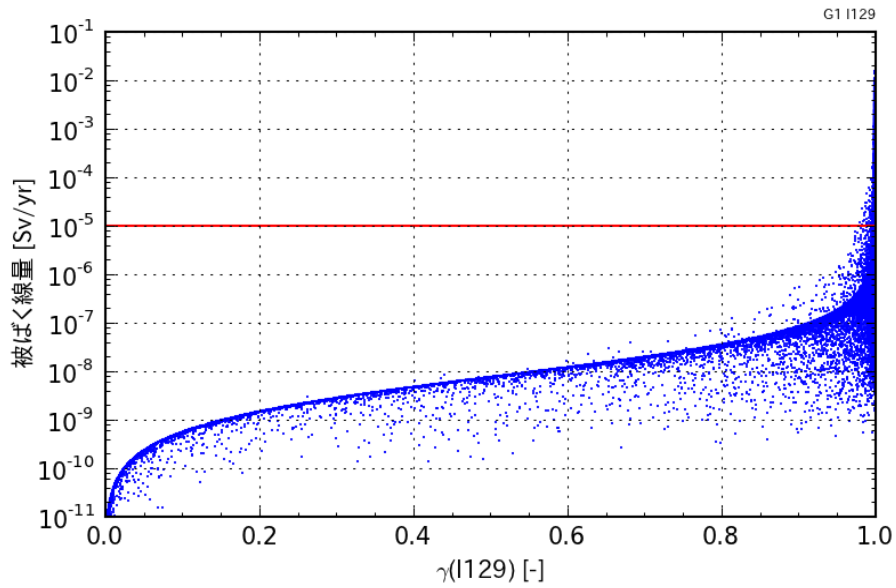


図 5.1.2-3 天然バリア中の減衰割合 γ と線量の関係
(大井, 2012 より引用)

図 5.1.2-4 に、人工バリアからの核種放出率 F_N がレファレンス相当の場合の結果について、天然バリア中の減衰割合 γ を横軸に、線量を縦軸にとって整理した結果を示す。この結果は、母岩の透水係数に依存して決まるパラメータ以外のパラメータがレファレンスケースの解析条件の場合の結果のみを抽出したものである。図 5.1.2-3 に比べて、 F_N が固定されているため、ばらつきが減少していることがわかる。

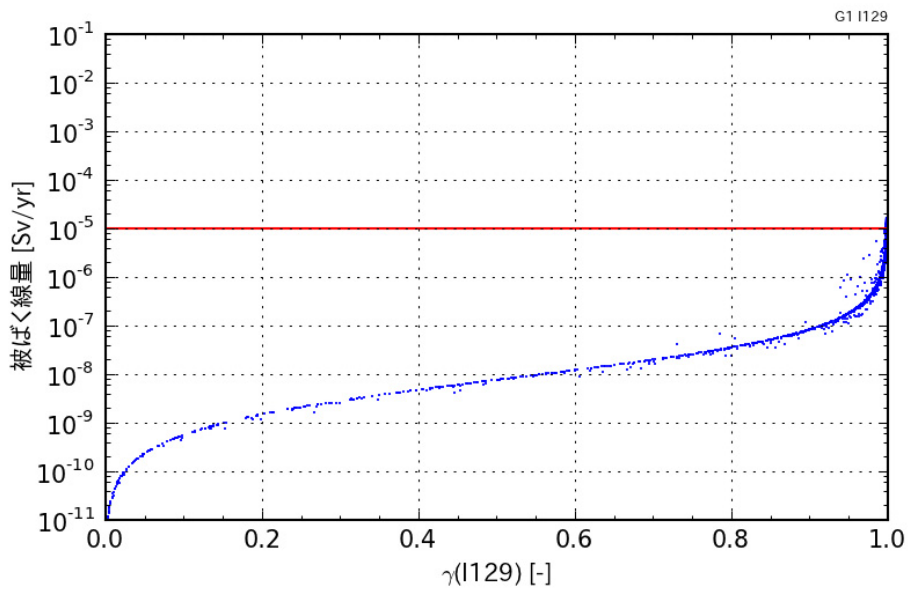


図 5.1.2-4 F_N がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果
(大井, 2012 より引用)

図 5.1.2-5 に、母岩の透水係数 k がレファレンスケースの場合の結果のみを抽出し、横軸に天然バリア中の減衰割合 γ 、縦軸に線量をとって整理した結果を示す。図 5.1.2-3 に比べて、透水係数 k が固定されているため、ばらつきが減少していることがわかる。

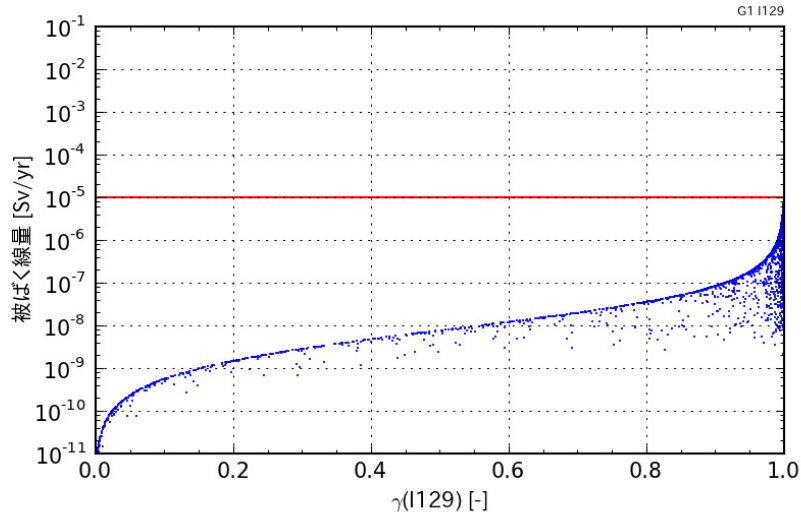


図 5.1.2-5 k がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果
(大井, 2012 より引用)

図 5.1.2-6 に、 F_N と k がレファレンスケースの場合の結果のみを抽出し、横軸に γ 、縦軸に線量をとって整理した結果を示す。2つの変数 F_N と k を固定することにより、データは少なくなるものの、目標を満足する γ の値がばらつきのない条件で求まることがわかる。

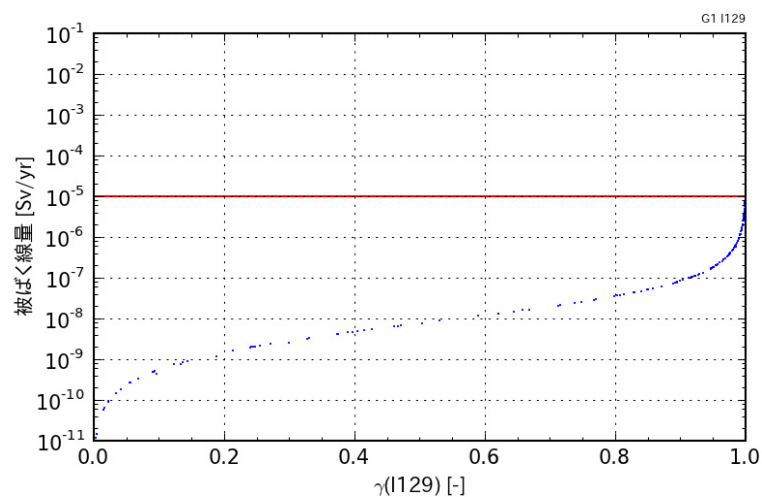


図 5.1.2-6 F_N と k がレファレンスケースの場合の結果を γ で整理した結果
(大井, 2012 より引用)

5.1.3 成立条件の算出

目標とする線量を満足する母岩の透水係数 k の最小値を、天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N からなる平面の鉛直軸にとり、成立条件の曲面を三次元空間で表現する。さらに、三次元で表現された成立条件の曲面と任意の k の値の断面との交線（コンター）を k ごとに求め、それを γ 、 F_N からなる平面上に投影し、二次元平面上で成立条件のコンターを表す。

5.2 成立条件の抽出結果

3.5 節で設定した包括的感度解析のケースごとに成立条件を抽出した。本節では、包括的感度解析の結果と抽出された成立条件を示す。

5.2.1 包括的感度解析のケースごとの解析条件

包括的感度解析のケースの一覧およびパラメータ変動範囲は、3.5 節での設定に基づくものとする。解析ケースの一覧およびパラメータの設定条件を、表 3.5.2-1、表 3.5.3-1～表 3.5.3-6 に示した通りである。

5.2.2 感度解析の結果と成立条件

以下、各ケースごとに、3 万回の解析に基づいた包括的感度解析の結果および抽出された $10\mu\text{Sv/y}$ を下回るための成立条件を示す。

(1) 感度解析ケース A および B（廃棄体グループ 1 (I-129)) の結果

表 3.5.2-1 に示すように、廃棄体グループ 1 については、降水系地下水を想定した生物圏環境（河川水、温暖、農業従事者）の場合と海水系地下水を想定した生物圏環境（沿岸海域、温暖、海洋漁業従事者）の 2 種類（ケース A, B）のケースを設定している。ケース A と B の相違点は線量換算係数のみであるので、表 3.5.3-5 からわかるように、ケース A の被ばく線量に対してケース B では、線量換算係数の比 $(5.7 \times 10^{-17} \div 3.2 \times 10^{-15} = 0.018 \text{ 倍})$ だけ低い線量となる。また、ここでは、溶解度や収着分配係数などの、他のパラメータの変動範囲を両ケースで同じであるとしたため、線量の分布形状やパラメータへの応答特性も同じであり、順位相関係数も両ケースで共通の値をとる。このため、線量ピークの分布（図 5.2.2-1）や応答特性（図 5.2.2-2）については、ケース A についてのみ示すこととする。ケース B については、ケース A の場合の結果において、基準値を $1/0.018 = 55.6 \text{ 倍}$ ($556 \mu\text{Sv/y}$) とした場合の成立条件を求めることによって与えられる。ここでは、具体的な成立条件の抽出については省くこととする。

図 5.2.2-1 に、前述したパラメータ変動範囲からランダムにサンプリングされた 3 万回の解析（青い点 1 つが 1 つが 1 回の解析結果を表す）の結果を表す。図 5.2.2-1 では、今回設定したパラメータの変動範囲の組み合わせにより、横軸で表される経過時間に応じて、

縦軸によって示される線量が数 mSv/y 程度から 10^{-8} mSv/y 以下まで、8桁以上の範囲で幅広く変動することがわかる。これは、たとえば、線量の出現時間や高さに対して影響度の高いパラメータである母岩の透水係数を $10^{-11} \sim 10^{-7}$ m/s の範囲（レファレンス値は 2.0×10^{-10} m/s）において変動させていることなどが原因である。

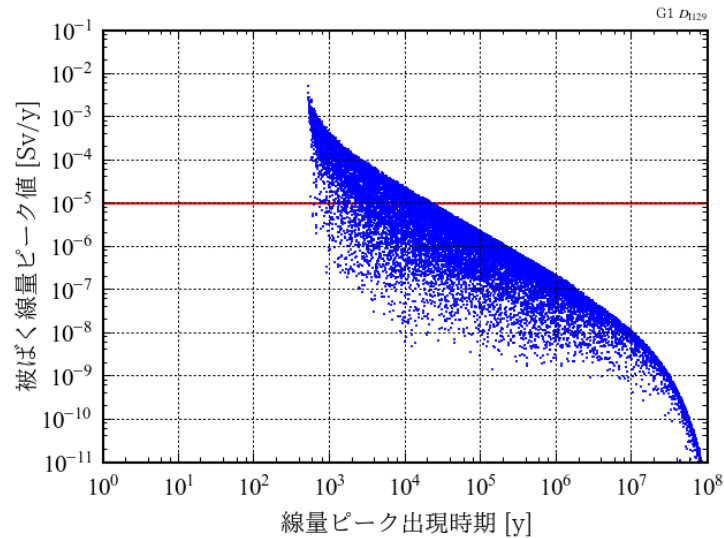


図 5.2.2-1 被ばく線量ピークの分布（ケース A）

包括的感度解析は、このようなパラメータの変動範囲の組み合わせに対して、目標とする基準値（ここでは、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を仮定）を満足する成立条件を抽出するものである。図 5.2.2-2 は、横軸で表される単一のパラメータに対する処分システムの応答特性を表すとともに、これらの単一のパラメータのみを対象とした場合に、目標とする基準値を満足する成立条件を示す結果である。

図 5.2.2-2 においては、影響度が高いパラメータである(a)人工バリアからの放出率 F_N 、(b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ 、(c)天然バリア中の水理パラメータ（母岩の透水係数 k ）、および、(d)核種浸出期間、を対象とした応答特性を示している。(d)は想定する廃棄体グループ 1 で、高度化対策を採用した場合に特に、重要と思われるパラメータである。これらの結果から、個々のパラメータに対する以下の処分システムの応答特性がわかる。

- ・ F_N の変動に対しては線形
- ・ γ に対しては非線形
- ・ 母岩の透水係数に対しては、任意の値まで線形で、それ以上は応答なし
- ・ 浸出期間に対しては、任意の値までは応答なし、それ以上の期間では線形

また、図 5.2.2-2 中の $10 \mu\text{Sv/y}$ を表す赤の実線と交差する解析結果の最保守値が、当該パラメータが単独で、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回るための成立条件となることがわかる。

これらの結果から、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ $3 \times 10^9 \text{ Bq/y}$ であることがわ

かる。同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、おおよそ 0.98、母岩の透水係数 k は、おおよそ 2×10^{-10} m/s、核種浸出期間は、おおよそ 2 万年であることがわかる。

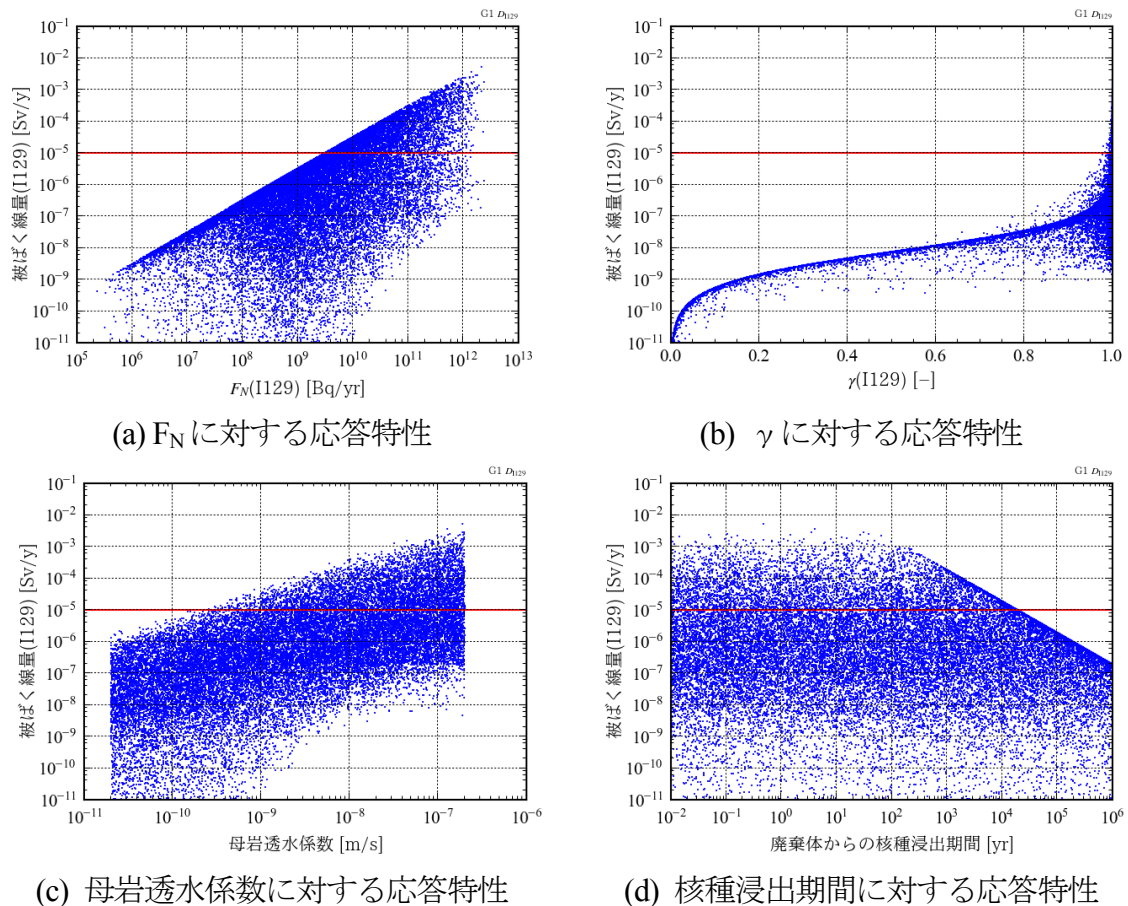


図 5.2.2-2 主要パラメータに対する線量の応答特性（ケース A）

図 5.2.2-3 には、順位相関係数を用いて、線量に対するパラメータの相対的な影響度を示している。この場合、順位相関係数の絶対値が大きいほど当該パラメータに対する線量の感度が高いことを表している。

図 5.2.2-3 より、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N 、(b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ 、(c)天然バリア中の水理パラメータ（母岩の透水係数 k ）が解析ケース A, B の場合においても高い影響度を示すことがわかる。なお、図中の EDZ 透水係数、EDZ 地下水流量の順位相関係数は、母岩の透水係数 k の値とほぼ等しい値となっている。これは、これらのパラメータが母岩透水係数の関数として与えられるためである。

ここで、母岩中のペクレ数や母岩中の平均移行時間 τ は、母岩中の減衰割合 γ の分解成分として与えられるパラメータである（添付 1 参照）。また、応答特性の区分値 $Q'_{th} \equiv$ 拡散による物質の移動量 Q''_{th} や拡散媒体内側境界濃度 C_K は、人工バリアからの核種放出率 F_N の分解成分として与えられるパラメータである（4.2.1 項参照）。

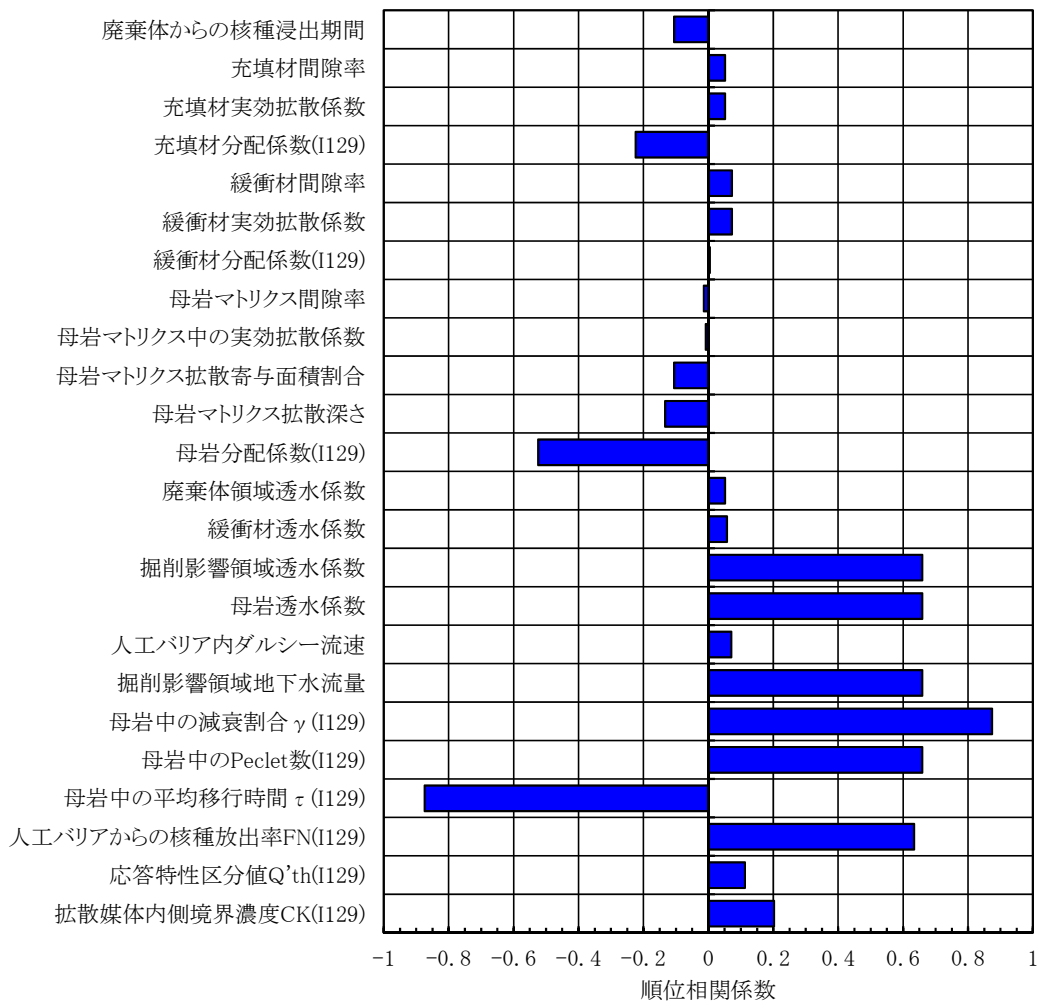
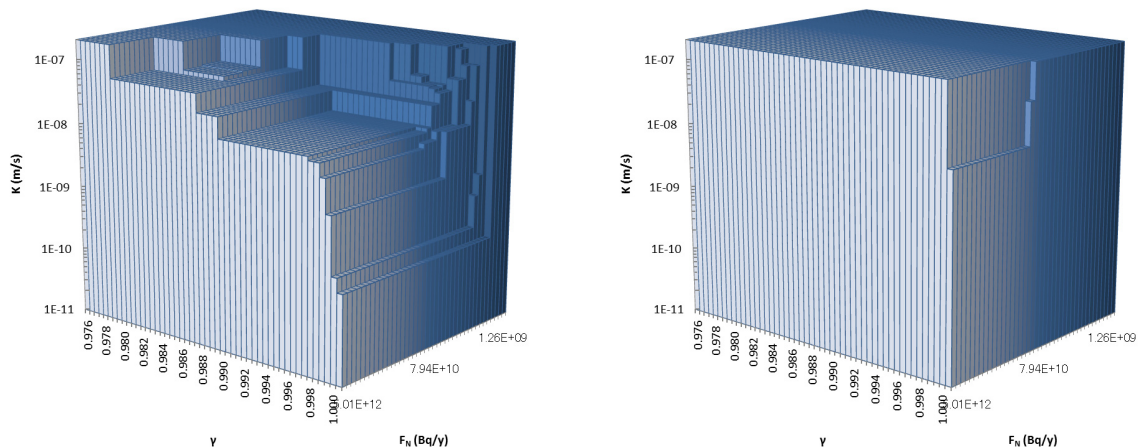


図 5.2.2-3 順位相関係数（ケース A および B）

図 5.2.2-4 は、人工バリアからの放出率 F_N 、天然バリア中での核種の減衰割合 γ を水平面の 2 軸にとり、母岩の透水係数 k を鉛直軸にとって、目標とする線量基準を満足する領域を表した結果である。図中の一連の四角柱の最上面は、天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N で表わされる平面上の個々の領域に対応する、 $10 \mu\text{Sv/y}$ となる母岩の透水係数 k を表している。この値が、縦軸の最大値 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ と一致する場合は $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する値がそれ以上の値であることを表す。評価対象となる人工バリアからの放出率 F_N 、天然バリア中での核種の減衰割合 γ の条件において、評価対象となる透水係数の条件がこの四角柱の最上面より下にプロットされる場合は、線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる。これは、評価対象とする透水係数が、最上面によって示される $10 \mu\text{Sv/y}$ になる透水係数よりも小さい値であるためである。一方、評価対象とする透水係数がこの最上面より上となる領域にプロットされる場合は、評価対象とする透水係数が $10 \mu\text{Sv/y}$ になる透水係数よりも大きな透水係数であるため、線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ 以上になる場合があることを表す。



(a) ケース A

(b) ケース B

図 5.2.2-4 成立条件（ケース A および B, 基準線量 10 μ Sv/y）

図 5.2.2-5 には成立条件の面と母岩の透水係数が 2.0×10^{-10} , 2.0×10^{-9} , 2.0×10^{-8} , 2.0×10^{-7} m/s の断面との交線（成立条件のコンター）を示す。この成立条件のコンターの左上の領域は、コンターが表わす透水係数よりも大きい透水係数で 10μ Sv/y になる領域である。そのため、評価の対象とする解析条件が、その条件の透水係数に相当するコンターのラインより左上にプロットされる場合は、目標を満足する条件となる。一方、右下にプロットされる条件は、目標を満足しない条件である。

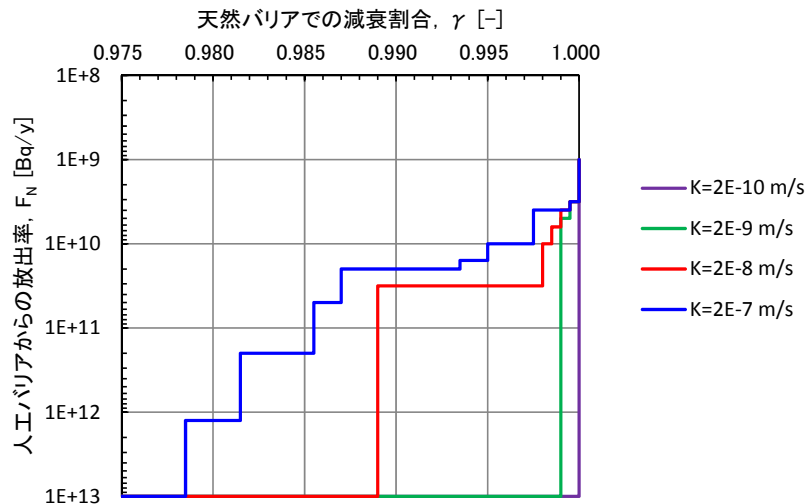
図 5.2.2-2 のケース A の結果では、母岩の透水係数が単独で 10μ Sv/y を満足する場合の成立条件は、おおよそ 2.0×10^{-10} m/s であった。それに対して、図 5.2.2-5(a)からは、それよりも大きな透水係数であっても、目標とする基準を満足する天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N の組み合わせが存在することがわかる。図 5.2.2-5 (a)の結果は、天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N に関わるパラメータが与えられた範囲において変動する場合、母岩の透水係数が大きくなるにつれて、成立条件となる領域が左上の領域に限定されていくことを示している。この左上の領域はより良好な γ と F_N の組み合わせを意味している。たとえば、 γ と F_N の組み合わせ ($0.995, 1.0 \times 10^{12}$) は、母岩の透水係数が 2.0×10^{-9} m/s の場合は成立する領域にあるが、母岩の透水係数が 2.0×10^{-8} m/s の場合は成立しない領域となる。

図 5.2.2-5(b)は、海水系条件の場合で、線量換算係数がケース A に比べて 2 桁程度小さいため、ケース A に比べて余裕のある成立条件となっていることがわかる。

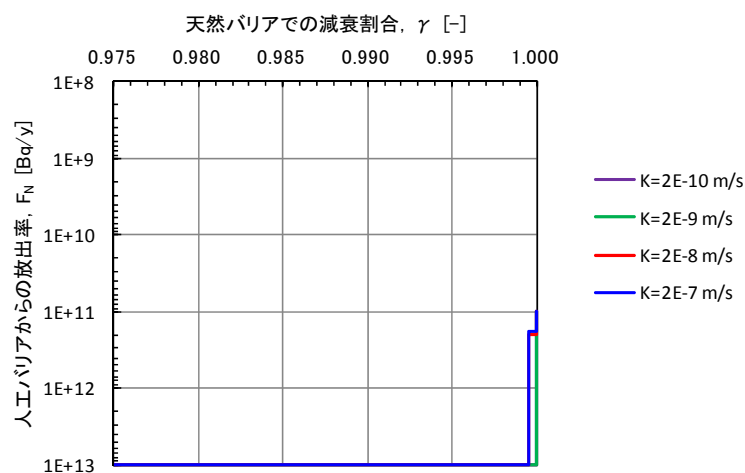
これらの天然バリア中の減衰割合 γ と人工バリアからの核種放出率 F_N の組み合わせは、前述のように、解析解を用いることによって、以下の成分に分解することが可能である。

- ・ 母岩中のペクレ数や母岩中の平均移行時間 τ
- ・ 拡散による物質の移動量 Q_{th} と拡散媒体内側境界濃度 C_K

さらには、これらの分解成分を構成するパラメータに解析的に容易に分解することが可能である。このような分解は、決定論的安全評価の解析ケースとその入力値が与えられたときに、着目するパラメータの安全裕度を算出する際に有用となる。



(a) ケース A



(b) ケース B

図 5.2.2-5 成立条件のコンター（ケース A および B, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$ ）

(2) 感度解析ケース C（廃棄体グループ 2（C-14, 瞬時放出））の結果

廃棄体グループ 2 については、水理条件、核種移行パラメータの条件の変動を考慮して、廃棄体からの核種溶出に関する 3 つのモードごとに成立条件を抽出する（ケース C, D, E）。3 つの溶出モードは以下の通りである。

- ・ 瞬時溶出
- ・ ジルカロイの腐食速度に基づく溶出率での一定溶出
- ・ ステンレスの腐食速度に基づく溶出率での一定溶出

解析ケース C は廃棄体からの核種溶出が瞬時溶出の場合の解析ケースである。このケースに関する一連の包括的感度解析の結果を図 5.2.2-6 から図 5.2.2-10 に示す。

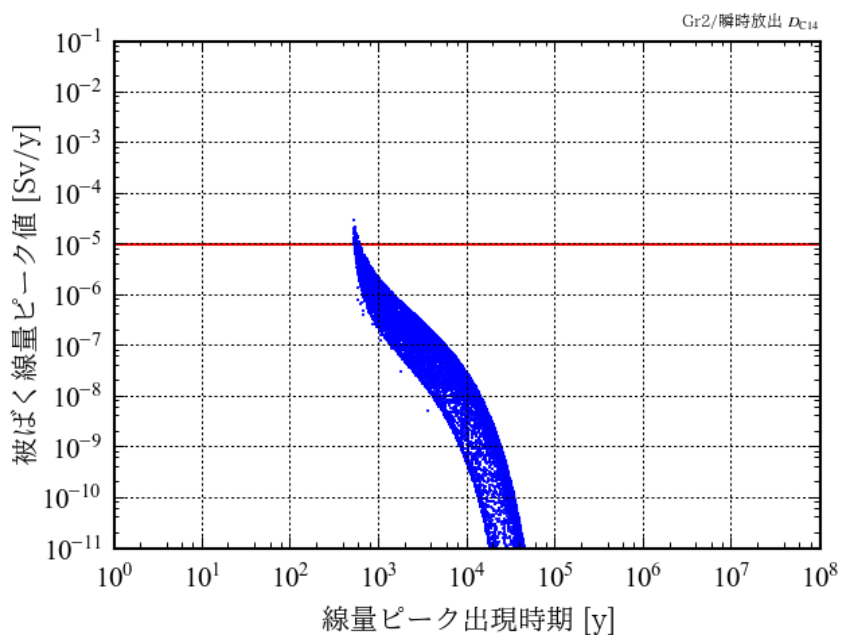
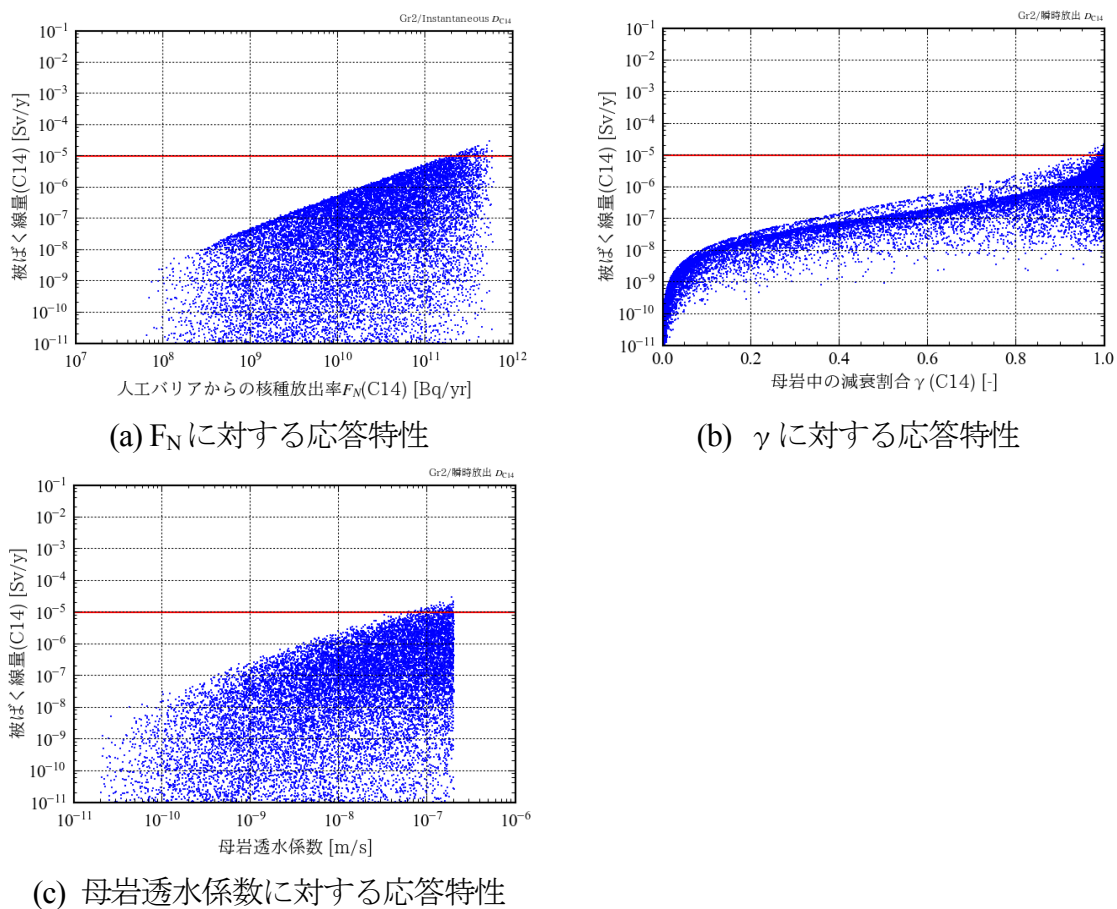


図 5.2.2-6 被ばく線量ピークの分布 (ケース C)



(a) F_N に対する応答特性

(b) γ に対する応答特性

(c) 母岩透水係数に対する応答特性

図 5.2.2-7 主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース C)

図 5.2.2-6 と図 5.2.2-7 の結果から、最新の瞬時溶出相当のインベントリ値（表 3.5.1-3 参照；存在割合 0.032；インベントリ 1.89×10^{13} Bq）（第 2 次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）の場合は存在割合 0.13；インベントリ 7.67×10^{13} Bq）を用いた場合、ごく限られた条件の組み合わせを除くほとんどのケースにおいて、目標値とした $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることがわかった。

具体的には、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ 2×10^{11} Bq/y であることがわかる。

同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、おおよそ 0.96、母岩の透水係数 k は、おおよそ 5×10^{-8} m/s であることがわかる。

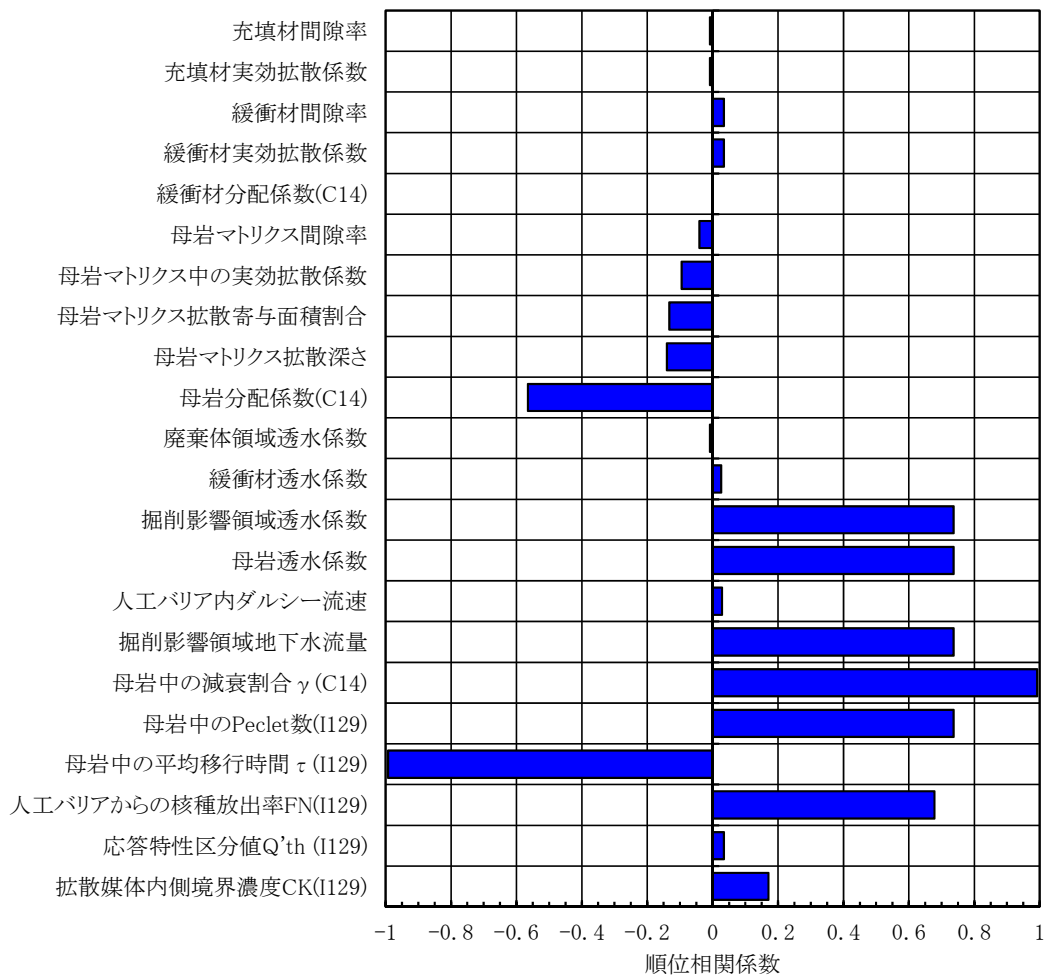


図 5.2.2-8 順位相関係数（ケース C）

図 5.2.2-8 から、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N 、(b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ 、(c)天然バリア中の水理パラメータ（母岩の透水係数 k ）が、解析ケース C の場合においても高い影響度を示すことがわかる。

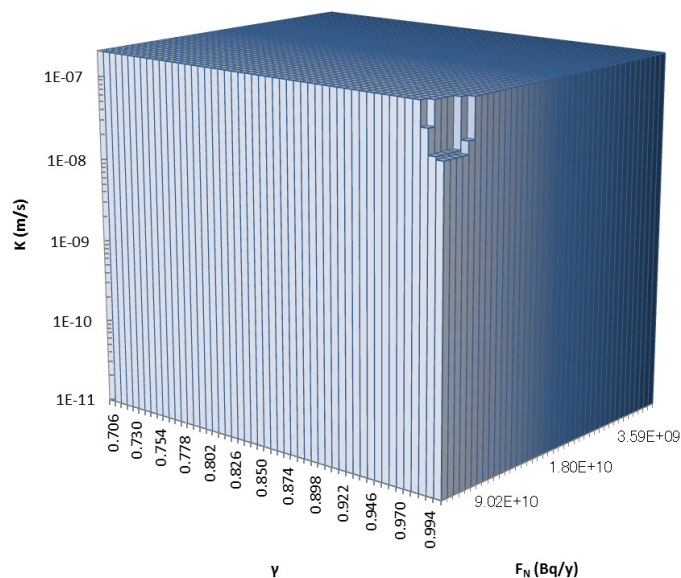


図 5.2.2-9 成立条件（ケース C, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$ ）

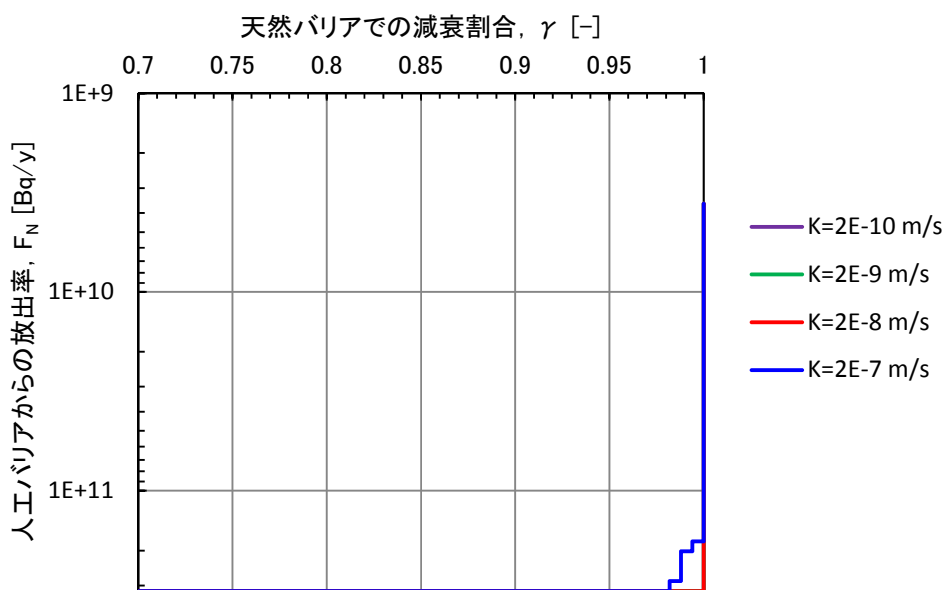


図 5.2.2-10 成立条件のコンター（ケース C, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$ ）

図 5.2.2-9 および図 5.2.2-10 に成立条件の三次元表示と二次元表示の結果を示す。

(3) 感度解析ケース D（廃棄体グループ 2（C-14, ジルカロイ母材））の結果

解析ケース D は、廃棄体からの核種溶出がジルカロイ母材の腐食に応じて決まる溶出率で制限される場合の解析ケースである。このケースに関する一連の包括的感度解析の結果を図 5.2.2-11 から図 5.2.2-15 に示す。

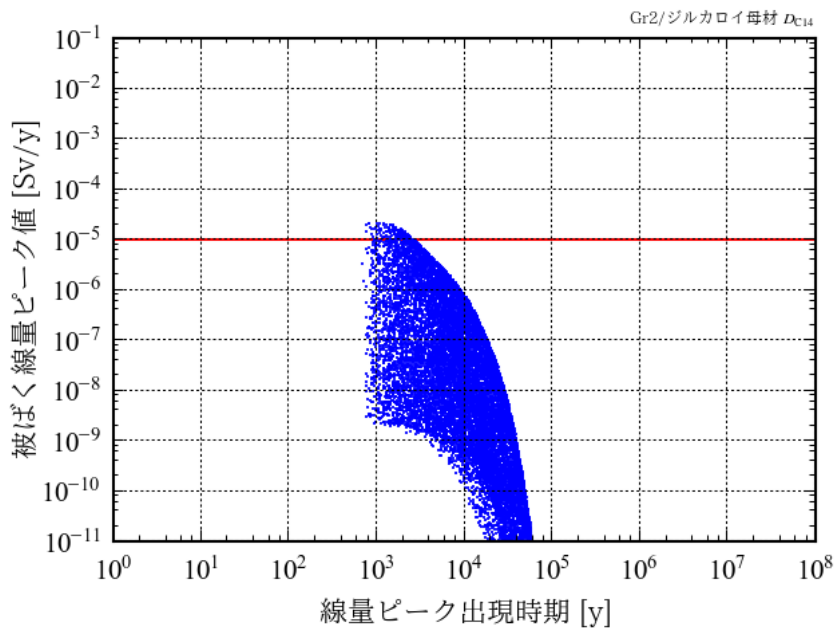
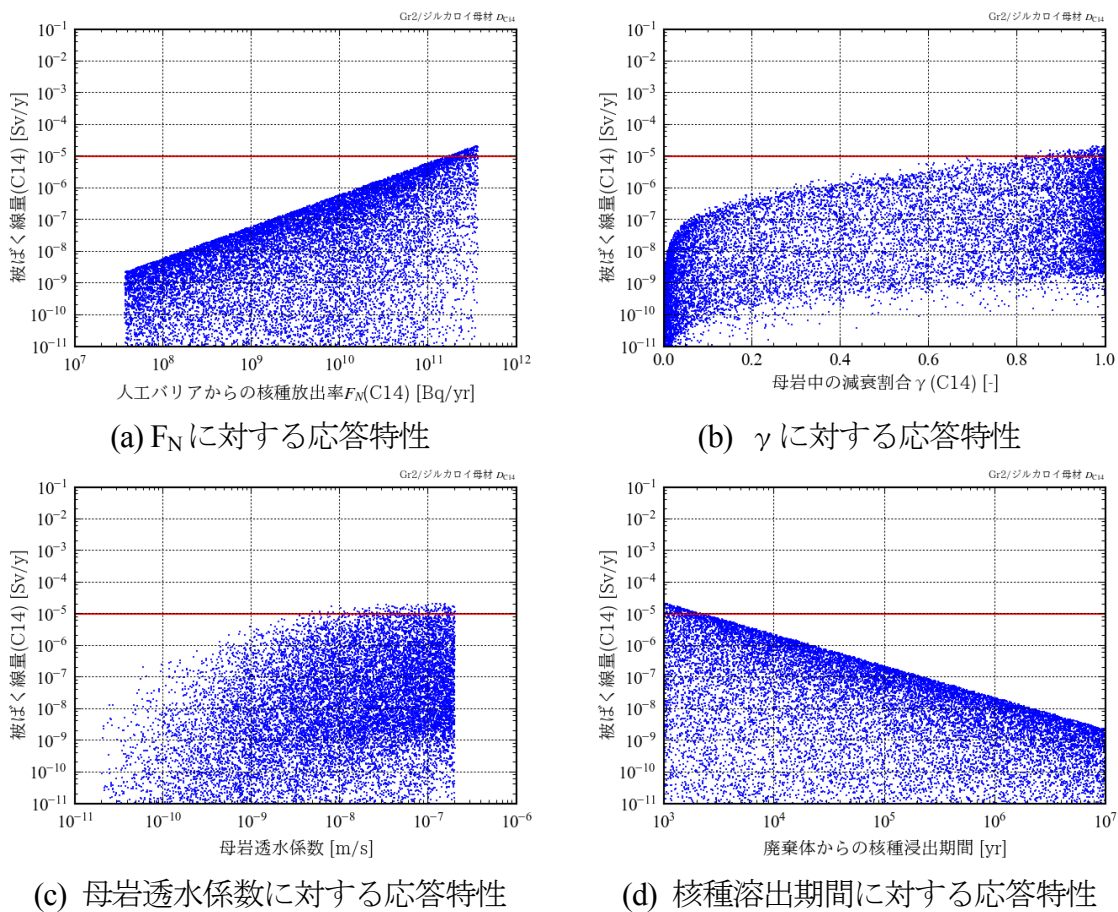


図 5.2.2-11 被ばく線量ピークの分布 (ケース D)



(a) F_N に対する応答特性

(b) γ に対する応答特性

(c) 母岩透水係数に対する応答特性

(d) 核種溶出期間に対する応答特性

図 5.2.2-12 主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース D)

図 5.2.2-11 と図 5.2.2-12 の結果から、最新のジルカロイ母材中のインベントリ値（表 3.5.1-3 参照；存在割合 0.655；インベントリ 3.86×10^{14} Bq）（第 2 次 TRU レポートの場合 は存在割合 0.53；インベントリ 3.13×10^{14} Bq）を用いた場合、ごく限られた条件の組み合わせを除くほとんどのケースにおいて目標値とした $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることがわかった。この場合の最大線量は $20 \mu\text{Sv/y}$ 程度であった。さらに、システムの応答特性として、天然バリア中での核種の減衰割合 γ や母岩の透水係数 k に比べて、人工バリアからの核種放出率による影響が明確であることがわかる。

具体的には、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ 2×10^{11} Bq/y であることがわかる。

同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、おおよそ 0.82，母岩の透水係数 k は、おおよそ 4×10^{-9} m/s，核種溶出期間は おおよそ 2000 年程度であることがわかる。

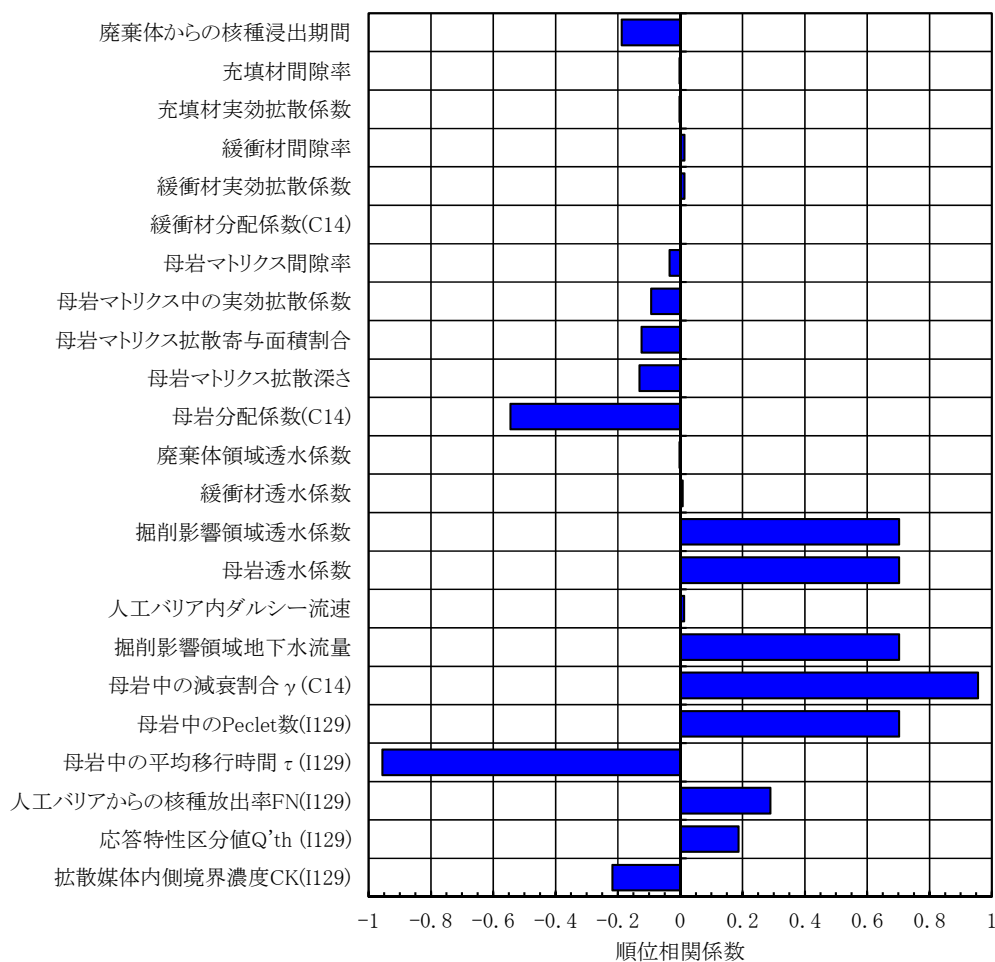


図 5.2.2-13 順位相関係数 (ケース D)

図 5.2.2-13 から、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N ，(b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ ，(c)天然バリア中の水理パラメータ（母岩の透水係数 k ）が、解析ケース D の場合においても高い影響度を示すことがわかる。

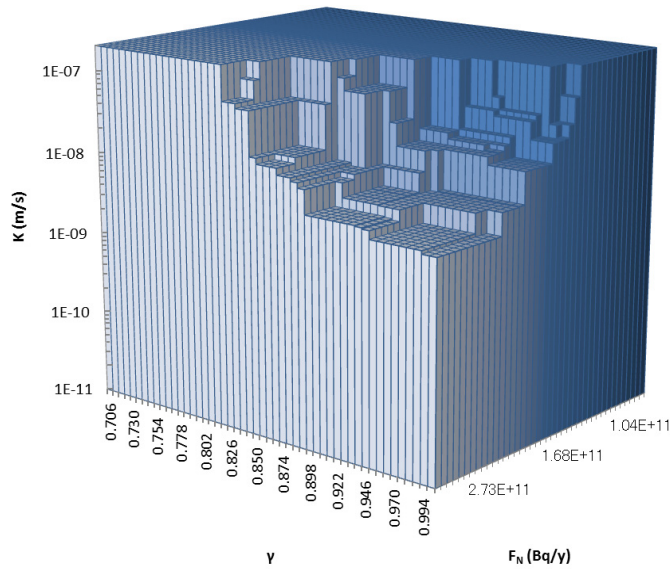


図 5.2.2-14 成立条件（ケースD, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$ ）

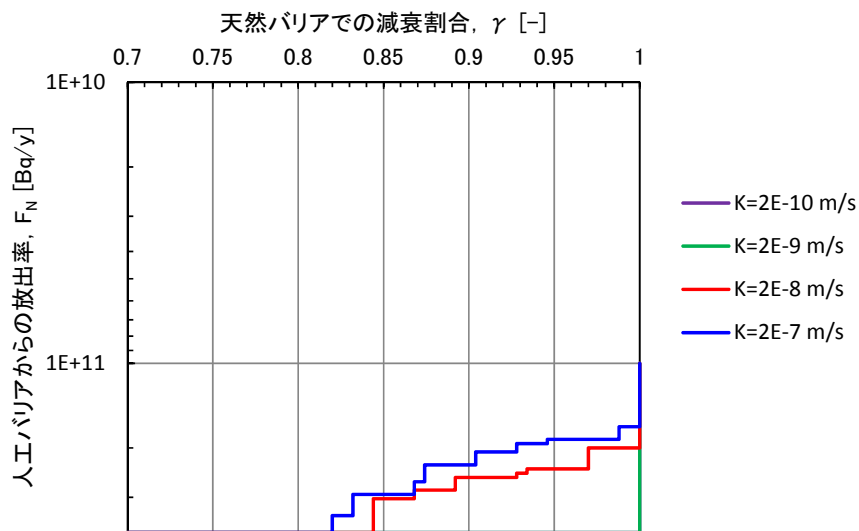


図 5.2.2-15 成立条件のコンター（ケースD, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$ ）

図 5.2.2-14 および図 5.2.2-15 に成立条件の三次元表示と二次元表示の結果を示す。

(4) 感度解析ケースE（廃棄体グループ2（C-14, ステンレス・インコネル））の結果

解析ケースEは、廃棄体からの核種溶出がステンレス母材の腐食に応じて決まる溶出率で制限される場合の解析ケースである。このケースに関する一連の包括的感度解析の結果を図 5.2.2-16 から図 5.2.2-20 に示す。

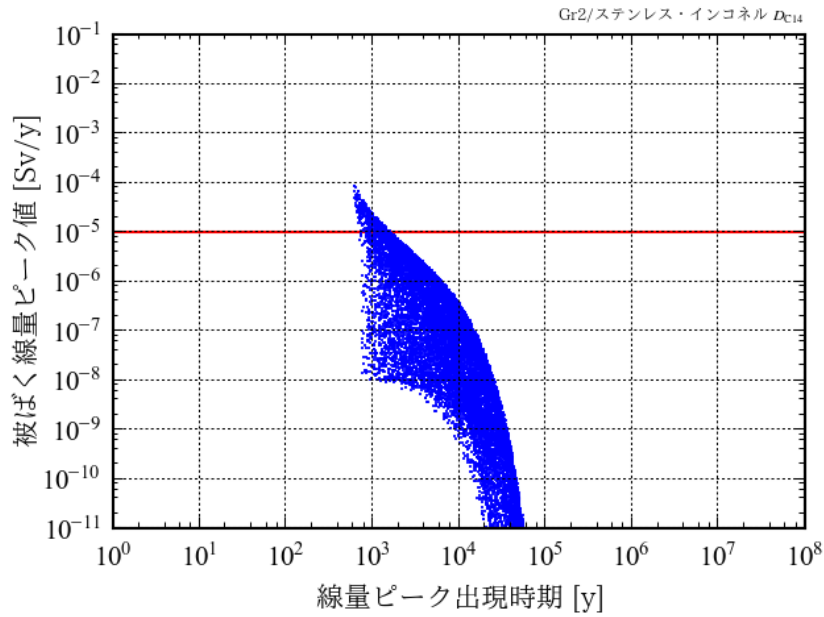
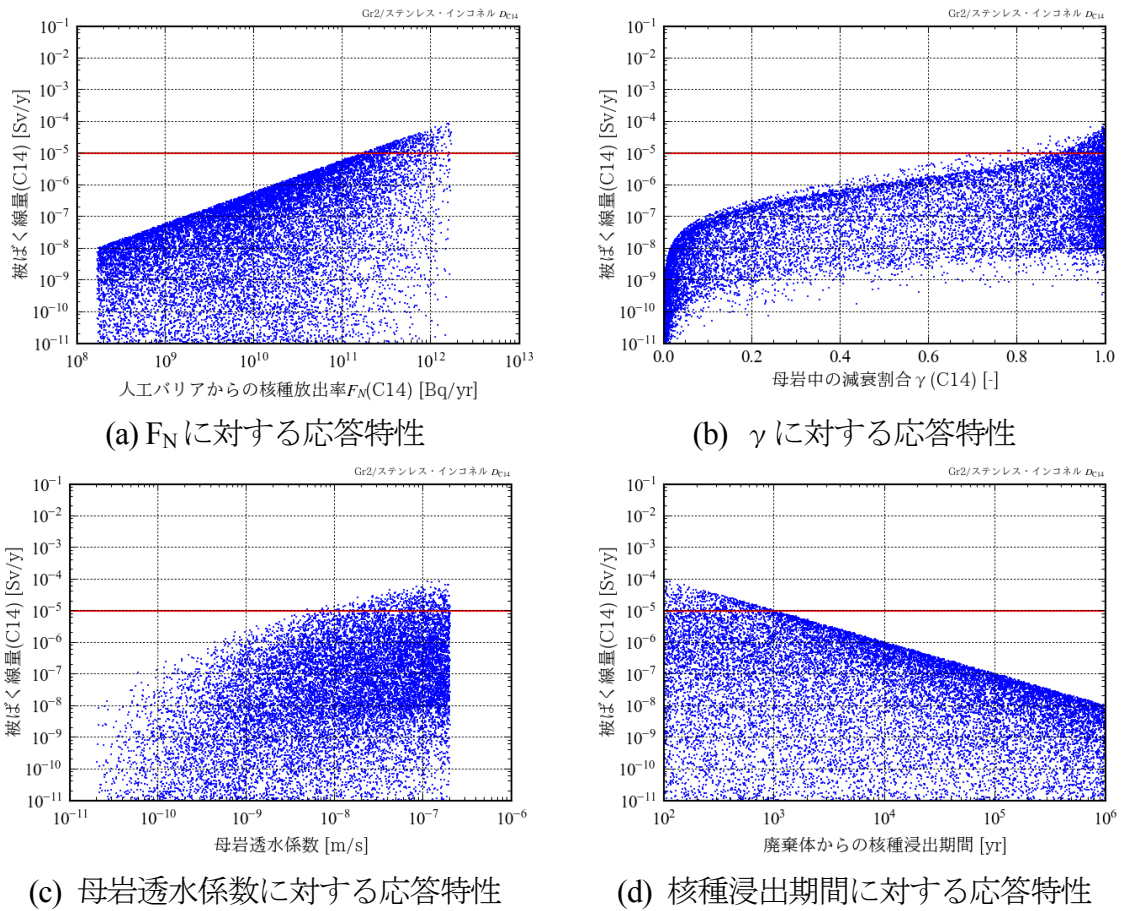


図 5.2.2-16 被ばく線量ピークの分布 (ケース E)



(a) F_N に対する応答特性

(b) γ に対する応答特性

(c) 母岩透水係数に対する応答特性

(d) 核種浸出期間に対する応答特性

図 5.2.2-17 主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース E)

図 5.2.2-16 と図 5.2.2-17 は、最新のステンレス母材中のインベントリ値（表 3.5.1-3 参照；存在割合 0.313；インベントリ 1.85×10^{14} Bq）（第 2 次 TRU レポートの場合は存在割合 0.34；インベントリ 2.01×10^{14} Bq）を用いた場合の最大線量が $100 \mu\text{Sv/y}$ 程度であることとシステムの応答特性を示している。

具体的には、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ 2×10^{11} Bq/y であることがわかる。同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、おおよそ 0.7，母岩の透水係数 k は、おおよそ 4.0×10^{-9} m/s，核種溶出期間はおおよそ 1000 年程度であることがわかる。

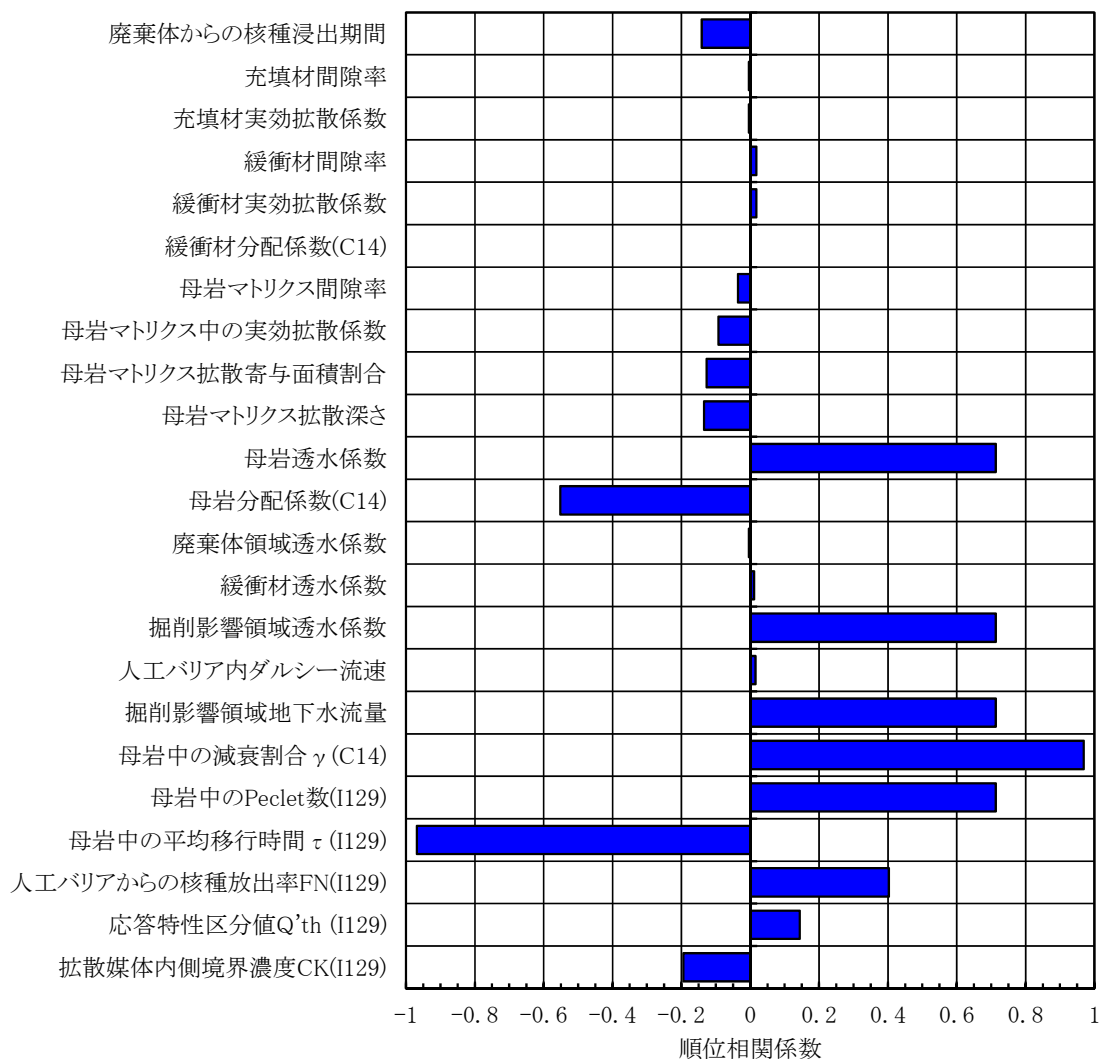


図 5.2.2-18 順位相関係数（ケース E）

図 5.2.2-18 から、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N 、(b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ 、(c)天然バリア中の水理パラメータ（母岩の透水係数 k ）が、解析ケース E の場合においても高い影響度を示すことがわかる。

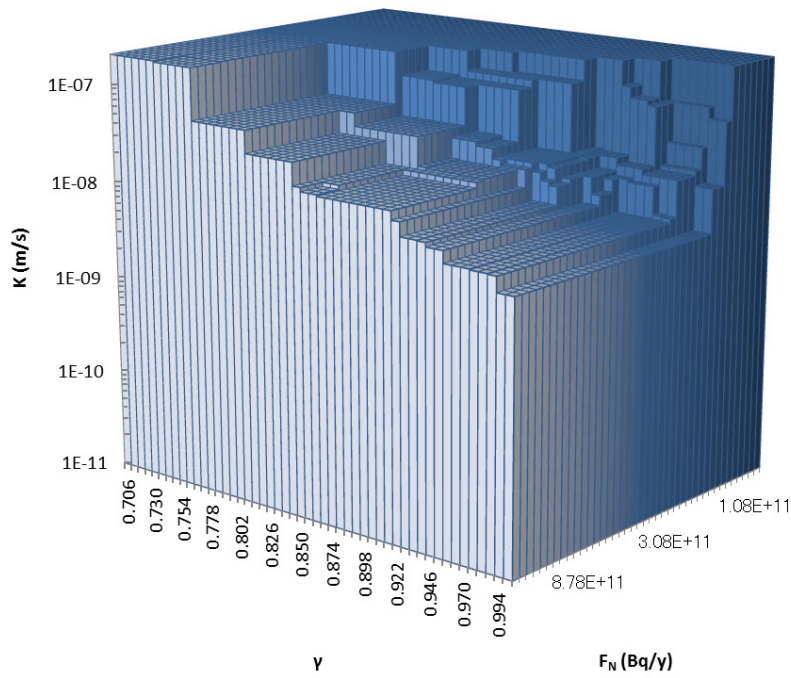


図 5.2.2-19 成立条件 (ケース E, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)

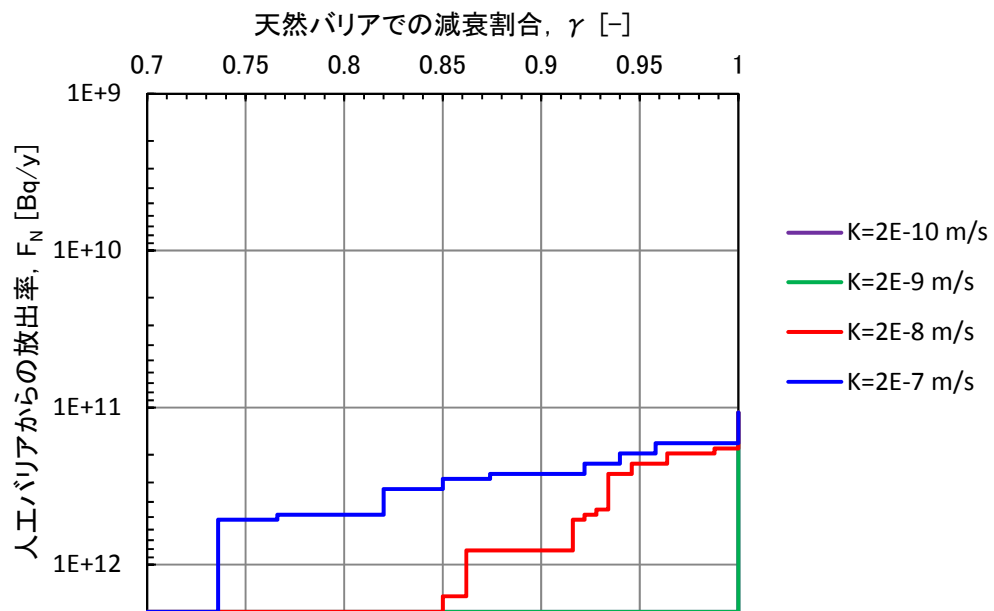


図 5.2.2-20 成立条件のコンター (ケース E, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)

図 5.2.2-19 および図 5.2.2-20 に成立条件の三次元表示と二次元表示の結果を示す。

(5) 感度解析ケース F (廃棄体グループ 3 (I-129)) の結果

解析ケース F は緩衝材を敷設しない概念の廃棄体グループ 3 の I-129 に対する解析ケースである。このケースに関する一連の包括的感度解析の結果を図 5.2.2-21 から図 5.2.2-25 に示す。

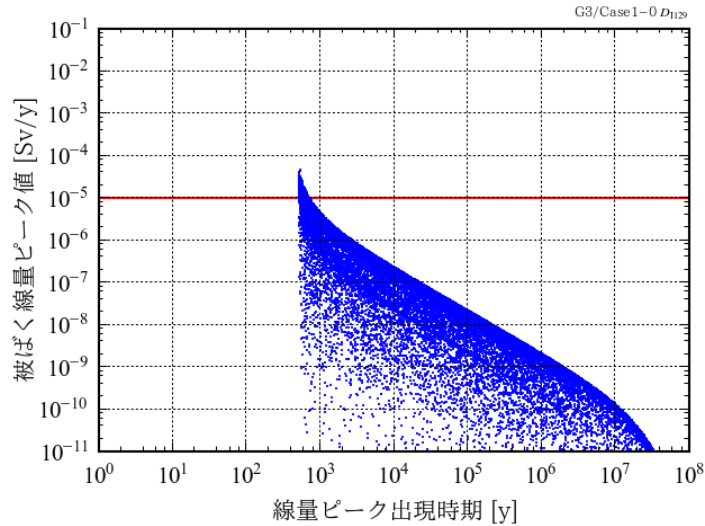
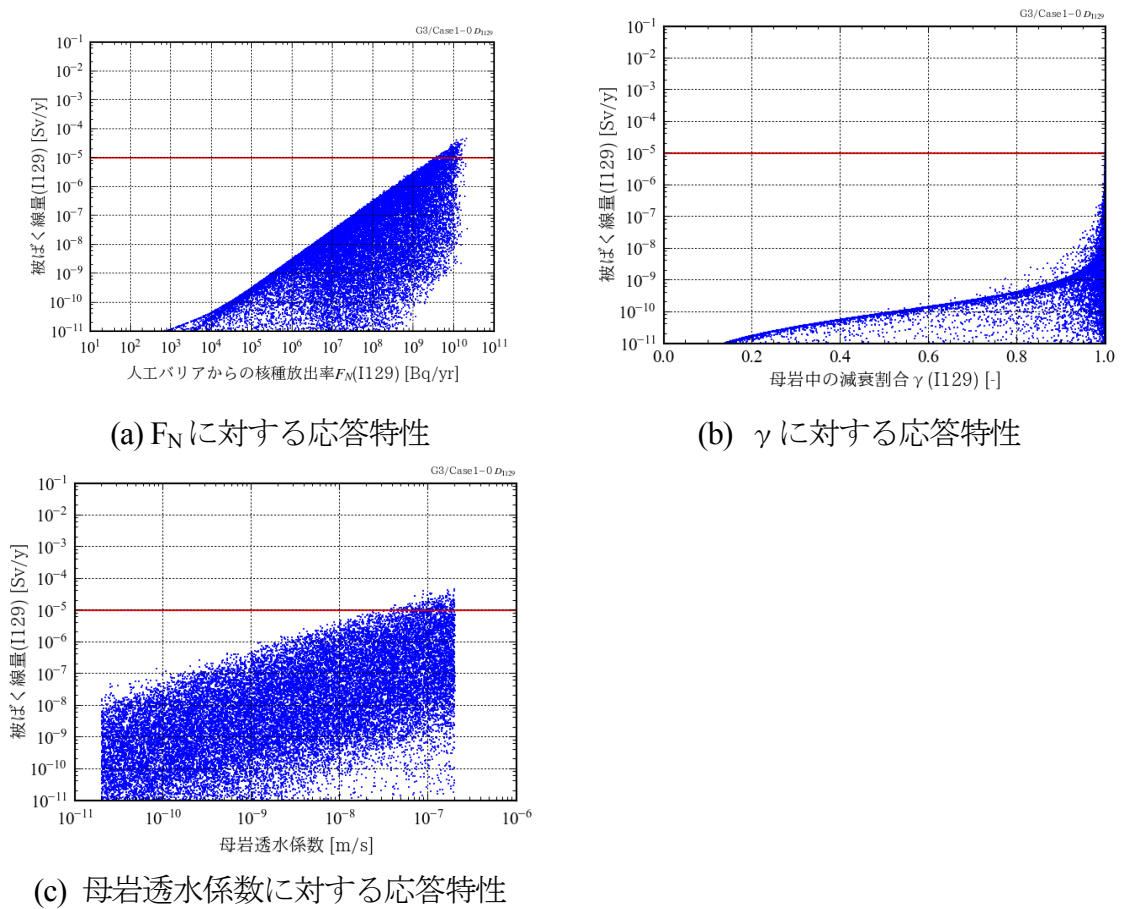


図 5.2.2-21 被ばく線量ピークの分布 (ケース F)



(a) F_N に対する応答特性

(b) γ に対する応答特性

(c) 母岩透水係数に対する応答特性

図 5.2.2-22 主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース F)

図 5.2.2-21 から、ごく限られた条件において、線量が目標値である $10 \mu\text{Sv/y}$ を超え、その最大値が約 $100 \mu\text{Sv/y}$ 程度になることがわかる。図 5.2.2-22 から、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ $3 \times 10^9 \text{ Bq/y}$ であることがわかる。ここで、緩衝材無のケースでは、充填材中の流速が大きくなり、移流支配になると仮定する。そのため、 $F_N \approx F_{ad}$ となることに注意が必要である。

同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、ほぼ 1、母岩の透水係数 k は、おおよそ $9.7 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 程度であることがわかる。

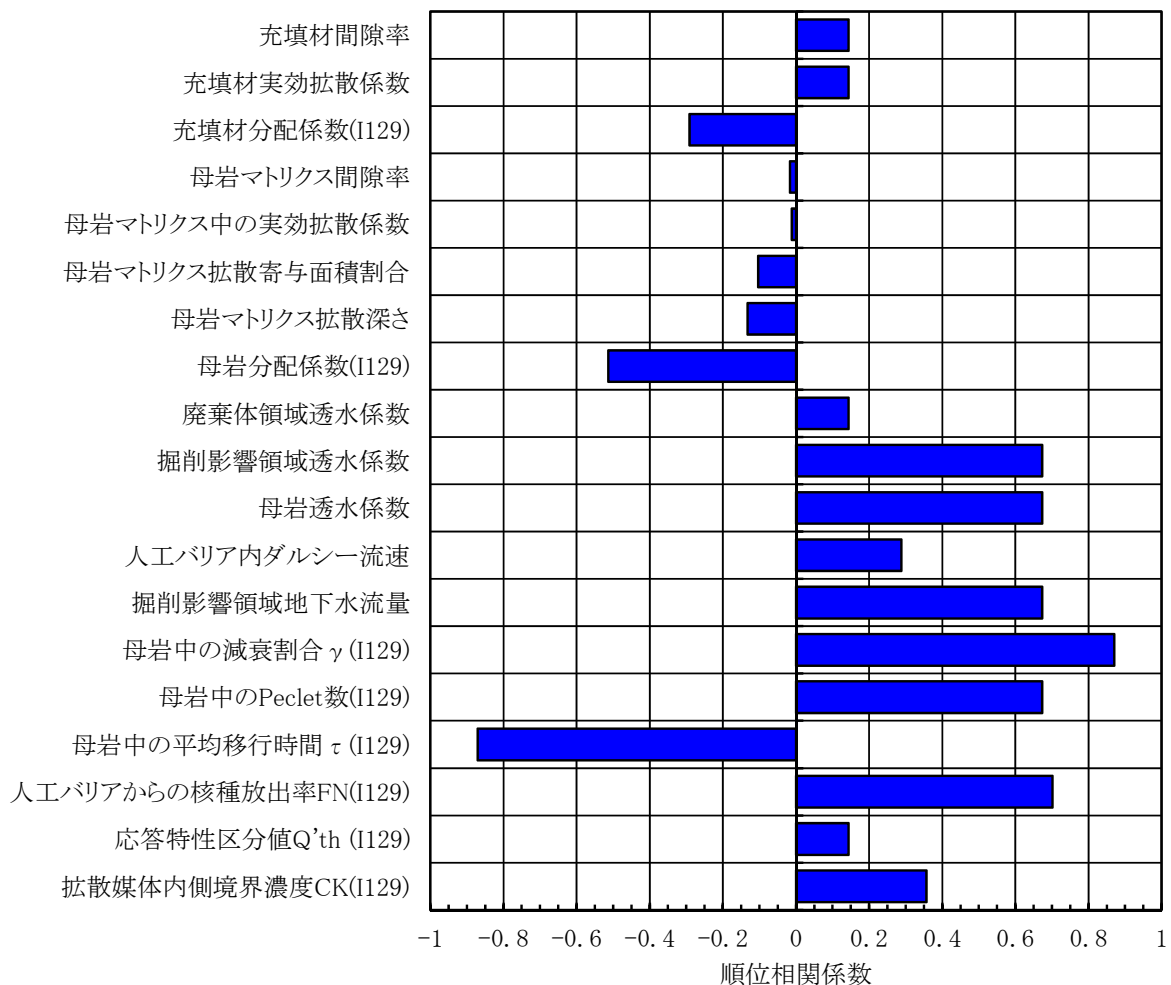


図 5.2.2-23 順位相関係数 (ケース F)

図 5.2.2-23 から、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N , (b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ , (c)天然バリア中の水理パラメータ (母岩の透水係数 k) が、解析ケース F の場合においても高い影響度を示すことがわかる。

図 5.2.2-24 および図 5.2.2-25 に成立条件の三次元表示と二次元表示の結果を示す。

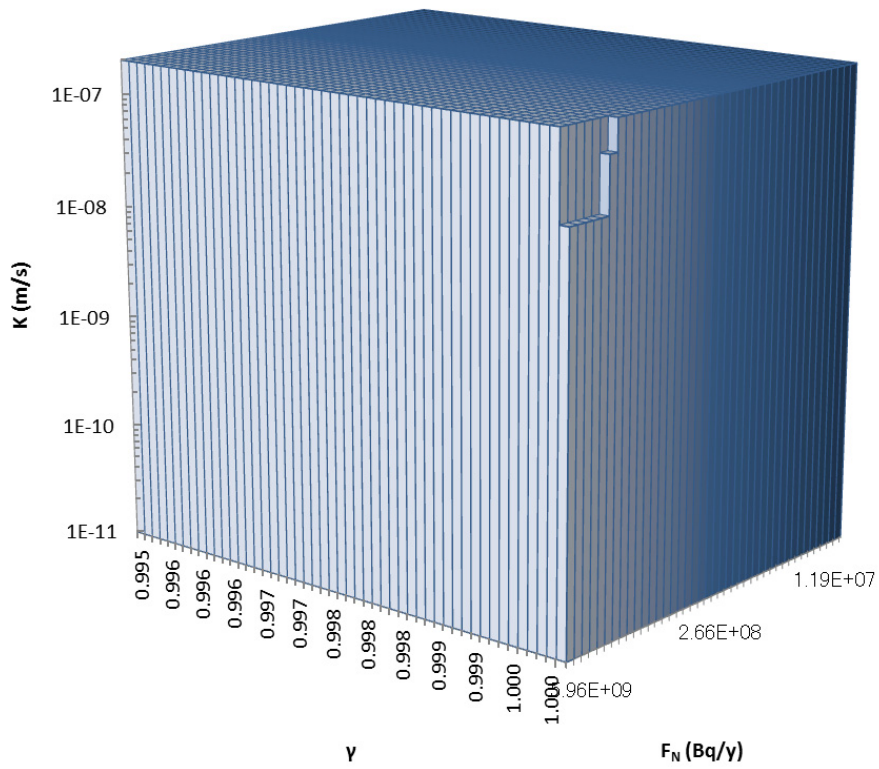


図 5.2.2-24 成立条件 (ケースF, 基準線量 10 μ Sv/y)

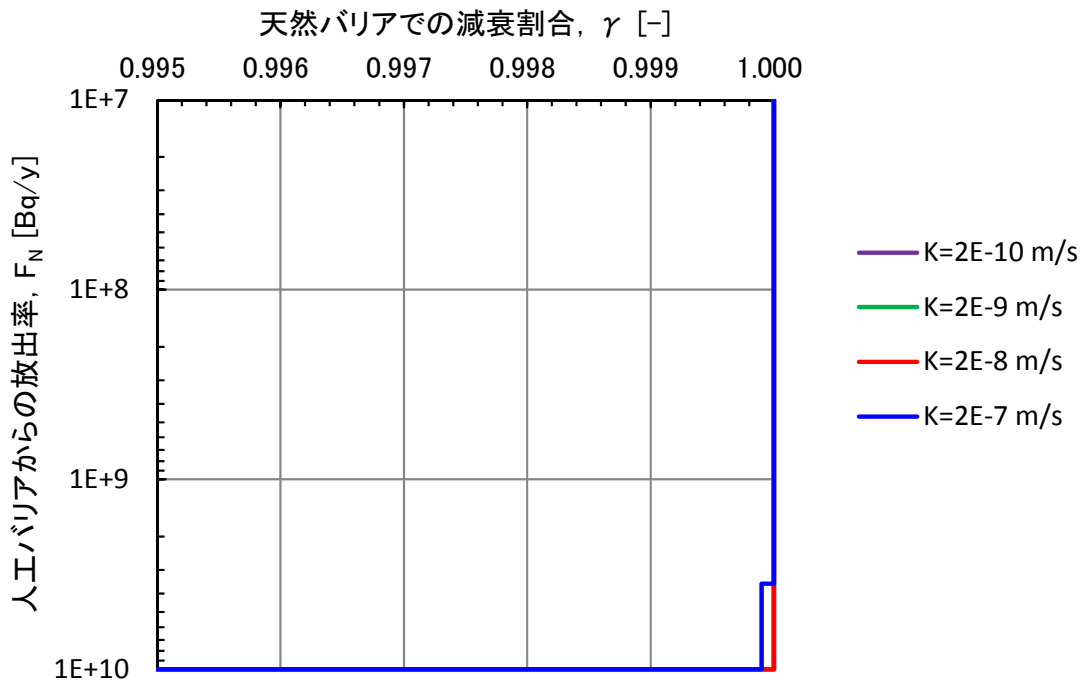


図 5.2.2-25 成立条件のコンター (ケースF, 基準線量 10 μ Sv/y)

(6) 感度解析ケース G (廃棄体グループ 3 (I-129), 緩衝材敷設) の結果

解析ケース G は緩衝材を敷設する場合の廃棄体グループ 3 の I-129 に対する解析ケースである。このケースに関する一連の包括的感度解析の結果を図 5.2.2-26 から図 5.2.2-30 に示す。

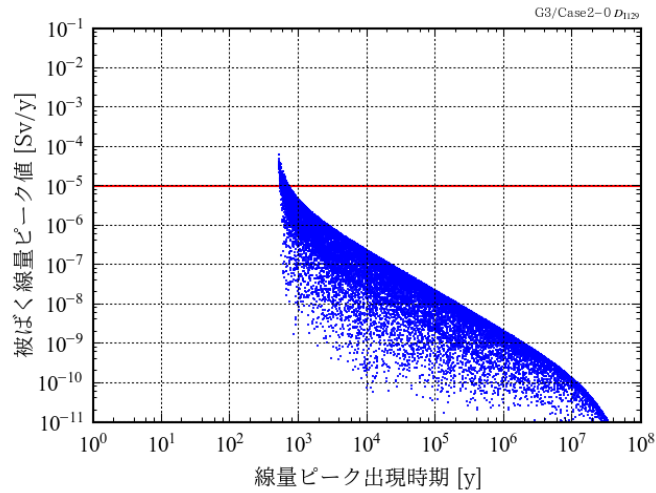
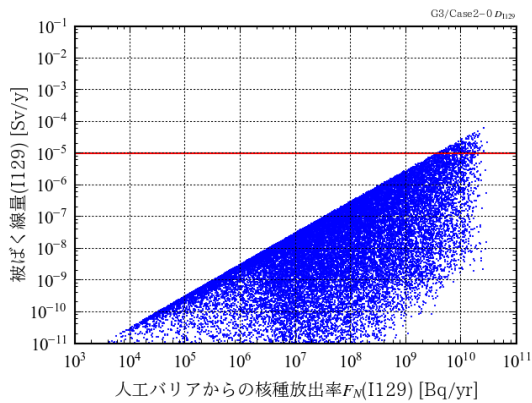
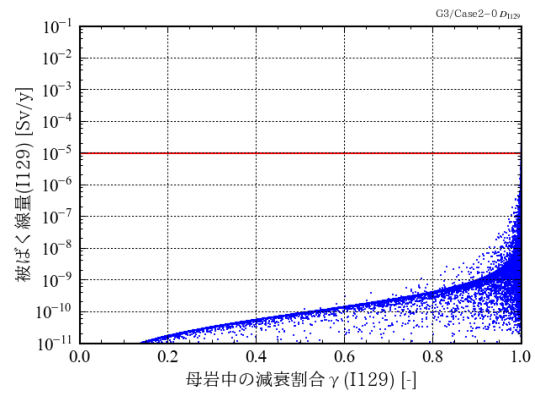


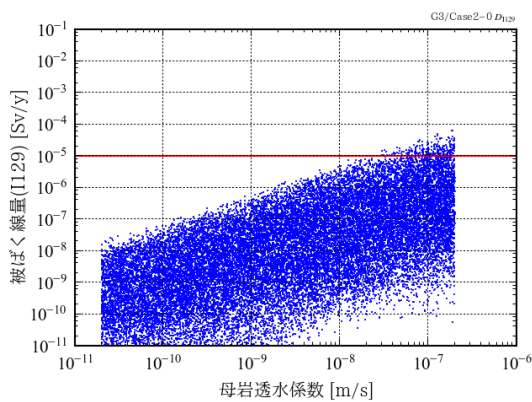
図 5.2.2-26 被ばく線量ピークの分布 (ケース G)



(a) F_N に対する応答特性



(b) γ に対する応答特性



(c) 母岩透水係数に対する応答特性

図 5.2.2-27 主要パラメータに対する線量の応答特性 (ケース G)

図 5.2.2-26 から、ごく限られた条件において、線量が目標値である $10 \mu\text{Sv/y}$ を超え、その最大値が約 $70 \mu\text{Sv/y}$ 程度になることがわかる。図 5.2.2-27 から、設定されたパラメータ範囲に対して、人工バリアからの核種放出率 F_N が単独で $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する場合の成立条件は、おおよそ $3 \times 10^9 \text{ Bq/y}$ であることがわかる。同様に、天然バリア中での核種の減衰割合 γ は、ほぼ 1、母岩の透水係数 k は、おおよそ $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度であることがわかる。

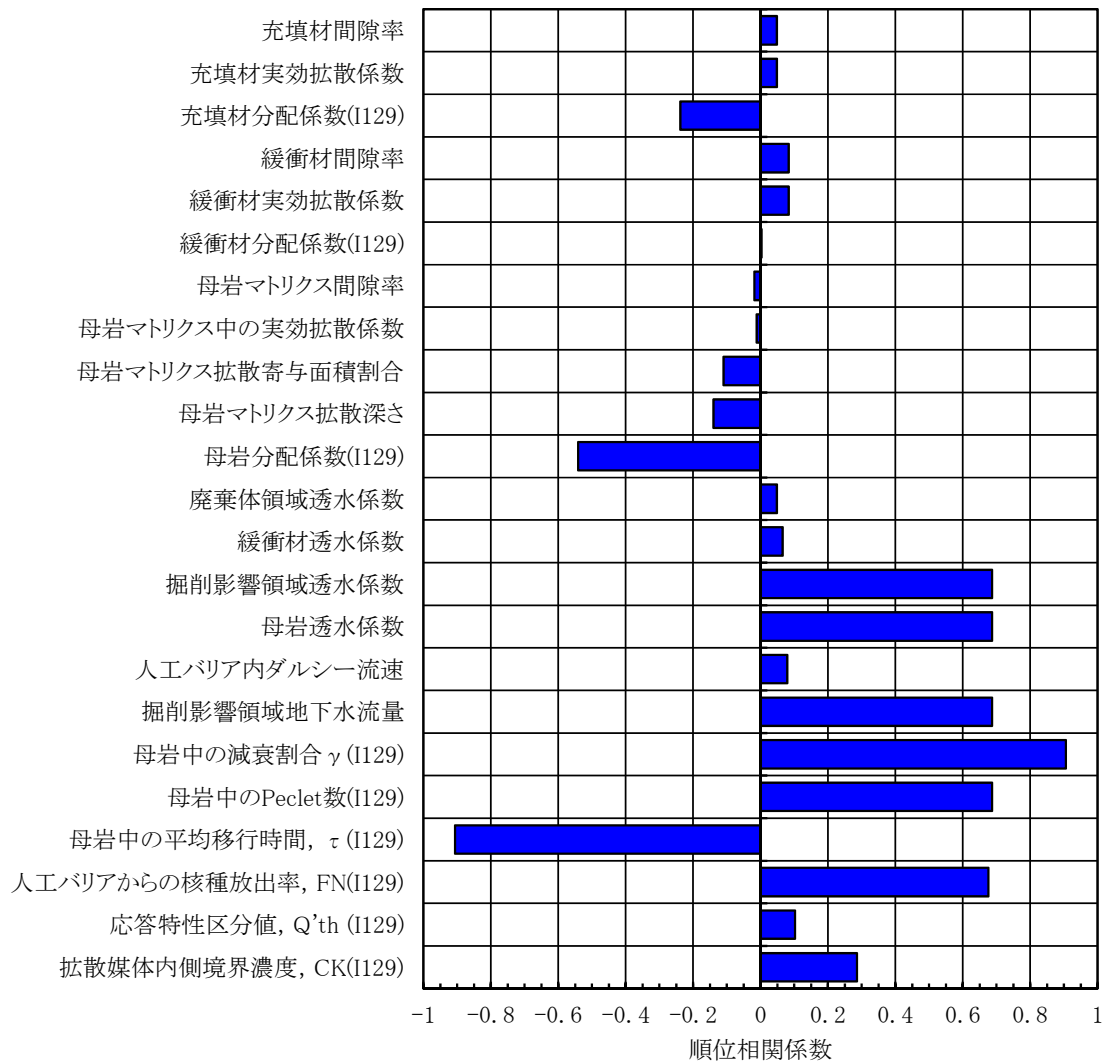


図 5.2.2-28 順位相関係数 (ケース G)

図 5.2.2-28 から、影響度が高いパラメータとして抽出した(a)人工バリアからの放出率 F_N , (b)天然バリア中での核種の減衰割合 γ , (c)天然バリア中の水理パラメータ (母岩の透水係数 k) が、解析ケース F の場合においても高い影響度を示すことがわかる。

図 5.2.2-29 および図 5.2.2-30 に成立条件の三次元表示と二次元表示の結果を示す。

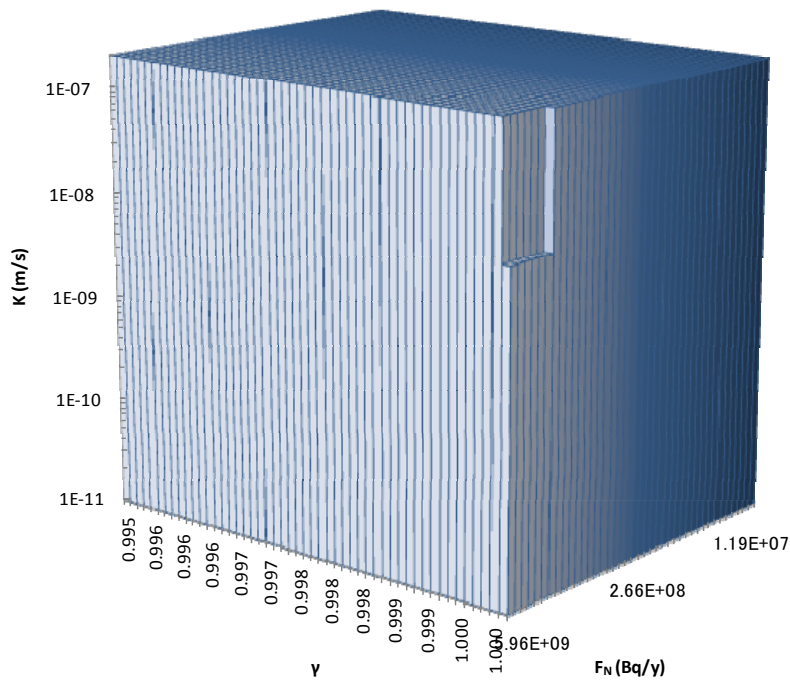


図 5.2.2-29 成立条件 (ケース G, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)

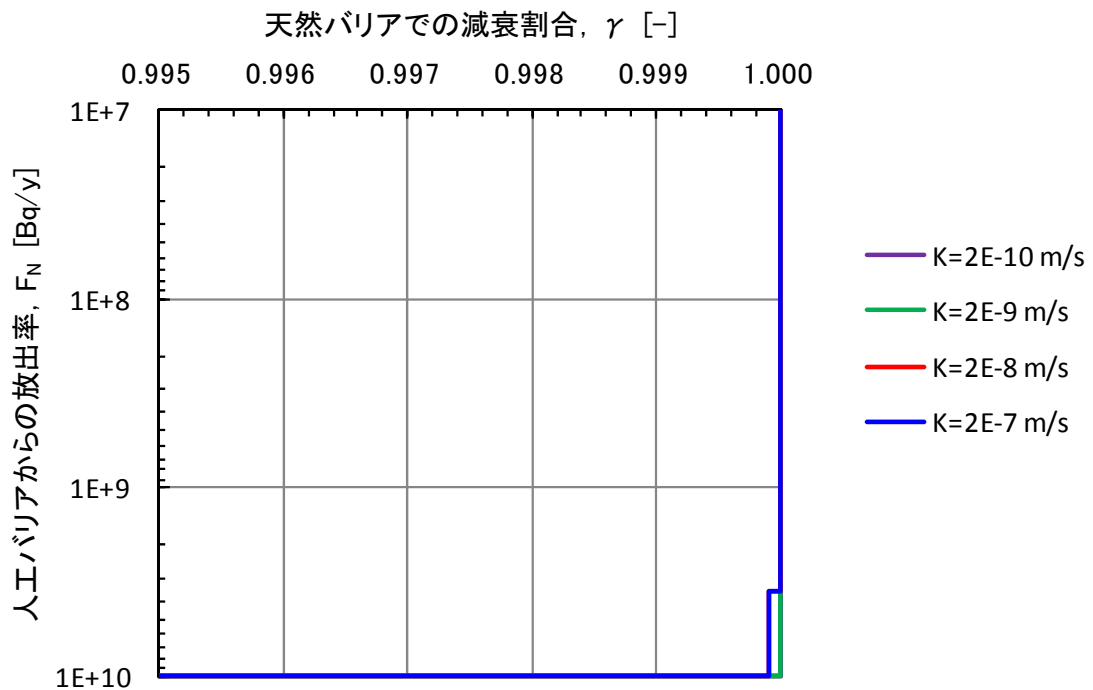


図 5.2.2-30 成立条件のコンター (ケース G, 基準線量 10 $\mu\text{Sv/y}$)

第5章 参考文献

- 電事連・JNC (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取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005年9月.
- Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, T and Hane, K. (2013) : A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margins of the geological disposal system, Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 50, No. 1, pp80–106.
- 大井貴夫 (2012) : 包括的感度解析の高度化による地層処分の安全評価の信頼性向上に関する研究, 博士論文, 九州大学, <http://hdl.handle.net:80/2324/25587>.

6. 処分システムの状態の理解

6.1 過渡的な場の状態に関する検討

TRU 廃棄物と高レベル放射性廃棄物の安全評価上の相違点のひとつとして、処分場閉鎖後の核種放出開始時期が挙げられる。オーバーパックによって閉鎖後 1,000 年間は核種放出が生じない事が担保されている高レベル放射性廃棄物に対して、TRU 廃棄物では、容器に対して閉じ込め機能を設定せず、地下水と接触して瞬時に核種が放出されるものとして評価されてきた。この場合、処分場閉鎖後初期に想定される THMCR (Thermo-Hydro-Mechanical- Chemical-Radiological : 熱-水-力学-化学-放射線学) の過渡的な変遷の影響を受けた状態で核種放出が始まることとなる。

先述のとおり本検討では、500 年間の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの使用を前提とする。これは、廃棄体パッケージによる閉じ込めにより、短半減期核種の減衰や THMCR の過渡的な変遷がこの期間内に終息し、核種移行開始時の環境条件の設定が適切に、または、容易にできるようになることを期待したものである。

そこで本節では、温度、水理 (再冠水)、化学 (酸化性/還元性)、放射線場 (放射線分解) に関する閉鎖後初期段階における環境条件の変遷について検討する。これは、500 年間の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの使用により、核種放出までに環境条件の過渡的な変遷が終息し、核種移行開始時の環境条件の設定が、適切にまたは容易にできるか否かを確認することを目的とするものである。個々の定量解析詳細は、6.2 節に後述する。

6.1.1 温度

発熱性廃棄体である廃棄体グループ 2 および廃棄体グループ 4 (発熱性) の各廃棄体近傍の温度を閉鎖後 1,000 年まで評価した結果を表 6.1.1-1~表 6.1.1-4 に示す。これらの結果は、表 3.3.1-1 で定義した検討ケースの中の case1-0 に相当するものである。

表 6.1.1-1 閉鎖後初期段階の温度：結晶質岩，廃棄体 Gr2

廃棄物分類	廃棄体グループ 2	
廃棄体形状	キャニスタ	CSD-B, CSD-C
温度変化の 評価例		
500 年での廃棄体近傍温度	56.4°C~62.2°C	66.5°C~66.9°C
地温	45°C (地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 1,000 [m])	

表 6.1.1-2 閉鎖後初期段階の温度：結晶質岩，廃棄体 Gr4（発熱性）

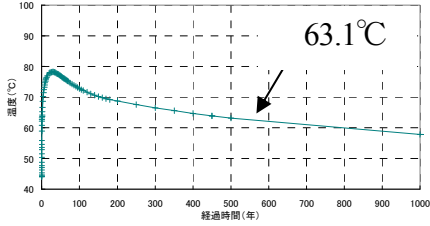
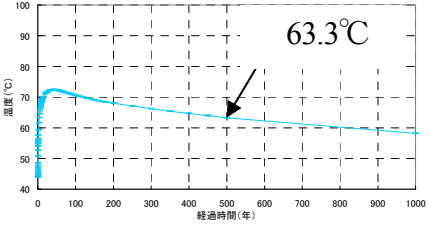
廃棄物分類	廃棄体グループ 4（発熱性）	
廃棄体形状	ハル缶，インナーパレル	200 ℓドラム
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	62.4°C～63.1°C	63.3°C
地温	45°C（地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 1,000 [m]）	

表 6.1.1-3 閉鎖後初期段階の温度：堆積岩，廃棄体 Gr2

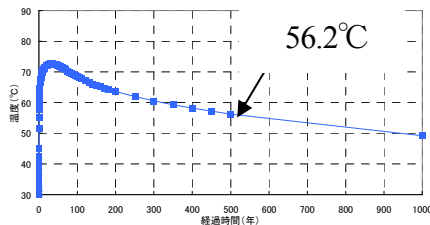
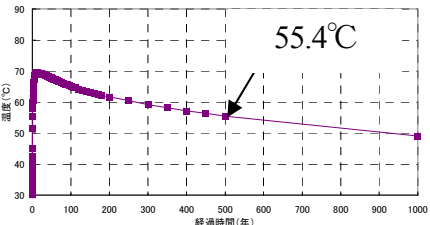
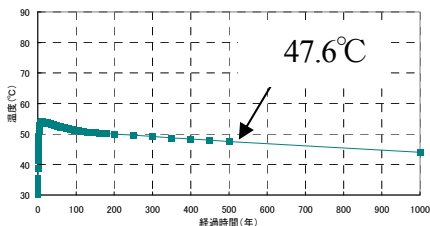
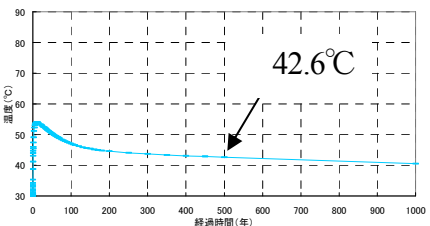
廃棄物分類	廃棄体グループ 2	
廃棄体形状	キャニスタ	CSD-B, CSD-C
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	52.0°C～56.2°C	49.9°C～55.4°C
地温	30°C（地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 500 [m]）	

表 6.1.1-4 閉鎖後初期段階の温度：堆積岩，廃棄体 Gr4（発熱性）

廃棄物分類	廃棄体グループ 4（発熱性）	
廃棄体形状	ハル缶，インナーパレル	200 ℓドラム
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	45.3°C～47.6°C	42.6°C
地温	30°C（地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 500 [m]）	

地表温度を 15°C、地温勾配を 0.03 [°C/m] とした場合、地温は、結晶質岩 (深度 1,000 m) では 45°C、堆積岩 (深度 500 m) では 30°C となる。これに対して評価された廃棄体近傍の温度は結晶質岩で 60°C 以上、堆積岩では 40°C~60°C 程度となっている。「地温程度 (ここでは、地温+15°C 程度を想定、結晶質岩で 60°C 程度、堆積岩で 45°C 程度) にまで温度が下がること」を高温状態の終息と定義するならば、閉鎖後 500 年ではまだ熱的影響による過渡的な変遷は終息していない、と判断されることとなる。ただし、閉鎖後 10,000 年の廃棄体近傍の温度は結晶質岩では 48°C~50°C、堆積岩では 34°C~36°C となり、ほぼ地温程度にまでは下がることが示されている。このことから、発熱性廃棄体の熱的影響による過渡的な変遷が終息するには非常に長い時間を要することがわかる。

今回の評価では、CSD-C については保証値である 90W/本という、他の発熱性廃棄物と比較しても非常に高い発熱率を用いている。そのため、CSD-C の周囲の坑道の温度が高めに評価されている可能性があることに留意する必要がある。また、今回の解析ケース (case1-0) では、処分場のフットプリント (地下において処分施設が占有する面積を地表面に投影した面積) を小さくするように設計されており、相対的に熱が逃げにくい状況になっていることにも注意が必要である。

一方、HLW に比較して相対的に処分場エリアの狭い TRU 廃棄物では、解析ケース case1-2、(表 3.3.1-1 参照) のように廃棄体の定置密度をあえて低くして処分場エリアを拡大させることで、熱的環境を緩和させる方策も可能であると考えられる。

定置密度を低下させた case1-2 の結果を表 6.1.1-5~表 6.1.1-8 に示す。設計対応を施したこのケースでは、閉鎖後 500 年で地温程度になり、核種移行開始時の処分環境条件が極端に高い温度条件とならないことを示している。

表 6.1.1-5 閉鎖後初期段階の温度：結晶質岩、廃棄体 Gr2 (case 1-2)

廃棄物分類	廃棄体グループ 2	
廃棄体形状	キャニスタ	CSD-B, CSD-C
温度変化の評価例		
500 年での廃棄体近傍温度	58.4°C~60.0°C	59°C~60°C
地温	45°C (地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 1,000 [m])	

表 6.1.1-6 閉鎖後初期段階の温度：結晶質岩，廃棄体 Gr4 (発熱性) (case 1-2)

廃棄物分類	廃棄体グループ 4 (発熱性)	
廃棄体形状	ハル缶, インナーバレル	200 ℓドラム
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	59.1°C~59.2°C	58.4°C
地温	45°C (地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 1,000 [m])	

表 6.1.1-7 閉鎖後初期段階の温度：堆積岩，廃棄体 Gr2 (case 1-2)

廃棄物分類	廃棄体グループ 2	
廃棄体形状	キャニスタ	CSD-B, CSD-C
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	39.4°C~40.0°C	39.9°C~40.0°C
地温	30°C (地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 500 [m])	

表 6.1.1-8 閉鎖後初期段階の温度：堆積岩，廃棄体 Gr4 (発熱性) (case 1-2)

廃棄物分類	廃棄体グループ 4 (発熱性)	
廃棄体形状	ハル缶, インナーバレル	200 ℓドラム
温度変化の 評価例		
500年での廃棄 体近傍温度	40.0°C	39.9°C
地温	30°C (地表 15 [°C]+0.03 [°C/m]×深度 500 [m])	

6.1.2 水理（再冠水）

再冠水に要する時間については、低透水性と高透水性の母岩（case1-0 および case2-0）を対象とし、それぞれ、結晶質岩と堆積岩の2通りの条件について検討した。評価結果を表 6.1.2-1～表 6.1.2-4 に示す。

表 6.1.2-1 再冠水に要する時間：低透水場(case1-0)，結晶質岩

処分坑道	緩衝材層	飽和度<1%	飽和度=0%
Gr.1：200 ℓドラム	有	14 y	34 y
Gr.2：キャニスタ（ハル）	有	12 y	102. y
Gr.2：キャニスタ（CSD-C）	有	11. y	63. y
Gr.3：200 ℓドラム	無	2 y	8 y
Gr.4H：ハル缶，インナーバレル	無	2 y	2 y
Gr.4H：200 ℓドラム	無	0.8 y	2 y
Gr.4L：200 ℓドラム	無	2 y	7 y
Gr.4L：角型容器	無	1 y	1 y

表 6.1.2-2 再冠水に要する時間：低透水場(case1-0)，堆積岩

処分坑道	緩衝材層	飽和度<1%	飽和度=0%
Gr.1：200 ℓドラム	有	50 y	188 y
Gr.2：キャニスタ（ハル）	有	74 y	328 y
Gr.2：キャニスタ（CSD-C）	有	49 y	175 y
Gr.3：200 ℓドラム	無	6 y	183 y
Gr.4H：ハル缶，インナーバレル	無	5 y	7 y
Gr.4H：200 ℓドラム	無	2 y	4 y
Gr.4L：200 ℓドラム	無	7 y	14 y
Gr.4L：角型容器	無	4 y	6 y

表 6.1.2-3 再冠水に要する時間：高透水場(case2-0)，結晶質岩

処分坑道	緩衝材層	飽和度<1%	飽和度=0%
Gr.1：200 ℓドラム	有	27 y	83 y
Gr.2：キャニスタ（ハル）	有	34 y	90 y
Gr.2：キャニスタ（CSD-C）	有	23 y	50 y
Gr.3：200 ℓドラム	有	5 y	15 y
Gr.4H：ハル缶，インナーバレル	有	19 y	35 y
Gr.4H：200 ℓドラム	有	7 y	50 y
Gr.4L：200 ℓドラム	有	4 y	21 y
Gr.4L：角型容器	有	3 y	18 y

表 6.1.2-4 再冠水に要する時間：高透水場(case2-0)，堆積岩

処分坑道	緩衝材層	飽和度<1%	飽和度=0%
Gr.1：200 ℓドラム	有	42 y	189 y
Gr.2：キャニスタ（ハル）	有	65 y	309 y
Gr.2：キャニスタ（CSD-C）	有	45 y	163 y
Gr.3：200 ℓドラム	有	19 y	204 y
Gr.4H：ハル缶，インナーバレル	有	35 y	>475 y
Gr.4H：200 ℓドラム	有	11 y	166 y
Gr.4L：200 ℓドラム	有	23 y	309 y
Gr.4L：角型容器	有	19 y	146 y

再冠水までに要する時間の定義として、ガス飽和度1%未満になるまでに要する時間と、ガス飽和度が0%になるまでの時間の2通りを考えた。いずれの条件の場合でも、ガス飽和度1%未満までに要する時間は比較的短く、この場合、想定する閉じ込め期間500年までには再冠水は終息していると思なすことができる。一方、ガス飽和度が0%になるまでに要する時間で判定すると、再冠水時間は長くなり、数100年のオーダーになるケースも生じている。堆積岩の高透水場における廃棄体グループ4発熱性（ハル缶・インナーバレル）では、再冠水時間が475年以上になる可能性が示唆されている。

しかしながら、還元腐食によって水素発生が継続していることを考慮すると、実質的な再冠水の判定はガス飽和度数%程度で十分である。そのため、閉じ込め期間500年までには再冠水は終息し、定常的な環境条件の設定が可能であると考えられる。なお、第2次TRUレポート（電事連・JNC, 2005）においても、安藤ら（2005）の報告を引用し、閉鎖後500年以内で処分移設はほぼ地下水で飽和される、としている。

6.1.3 化学（酸化性／還元性）

第2次 TRU レポートのレファレンスシナリオにおいては、人工バリアおよび処分坑道周辺岩盤（ニアフィールド）の過渡的な変遷の要因として、廃棄体の発熱による熱的影響や再冠水に伴う飽和不飽和状態、金属や鉱物などの酸化反応などを考えている。そして、この過渡的な変遷は、容器が開口し、核種漏洩が始まる時には終息し、飽和／還元雰囲気に戻っているとされている。ニアフィールドの場合が遷移状態にあるときに核種漏洩が開始するとしたケースについては、サブシナリオで扱っている（第2次 TRU レポート）。ここでは、閉鎖後初期の段階における環境条件の変遷について検討し、核種放出までに環境条件の過渡的な変遷が終息し、核種移行開始時の環境条件の設定が、適切にまたは容易にできるか否かを確認する。

高温の場合、人工バリア材として使用されているセメント系材料あるいはベントナイト系材料中の鉱物に変化する可能性がある。ただし、処分場は、セメント系材料の変質が発生しない温度を考慮して設計されている。このような設計における回避対応策がとられていることから、高温状態に起因したセメント系材料の鉱物の過渡的な変遷は起こらず、核種放出時には、定常的な環境条件の設定が可能であると考えられる。

一方、間隙水とセメント系材料あるいはベントナイト系材料が接触することに伴う反応を主要な化学反応として考えた場合、不飽和の過渡的な状態においては、飽和状態と異なる化学反応が進行することが想定される。これは、不飽和の過渡的な状態と飽和状態では、反応に係る条件が異なるためである。この不飽和期間中の化学反応が、核種移行開始の環境条件に影響を及ぼすか否かの検討は、これまで十分なされていない。第2次 TRU レポート以降の原環センターの検討（原環センター、2012a）では、化学・力学連成モデルの構築が進められており、再冠水時の不飽和状態での地化学解析を行う必要があると述べられている。今後、このような解析を通じて、不飽和期間中のセメント系材料の鉱物の変遷などが、核種移行環境にどのような影響を及ぼすかについての検討を行う必要がある。

坑道掘削・操業など、大気解放時には酸化性雰囲気となっていた廃棄体近傍も、閉鎖後は還元性雰囲気に回復することが予想されている。その理由としては、①流入する深部地下水が本来還元性であること、②TRU 廃棄物の場合、金属系の廃棄物が多いこと、③容器・パッケージ・構造躯体・ロックボルトなど金属系の材料が多量に使用されること、④ベントナイト系材料に含有される pyrite (FeS_2) が還元剤として作用すること、などが挙げられる。酸化性雰囲気での酸素消費型の腐食および還元性雰囲気での水素発生型の腐食を考慮したガス発生評価では、閉鎖後数年のうちには、残存酸素が消費されてしまうことを示唆している。還元性雰囲気に復帰するまでにどのくらいの期間を要するかを正確に把握するためにはより包括的な評価が必要であるが、500年の閉じ込め期間のうちには還元性に復帰していることは、十分に確からしいと考えられる。

6.1.4 放射線場（水の放射線分解）

放射線場に関する議論として、第2次 TRU レポートでは、①人工バリア材の照射損傷、②間隙水の放射線分解（酸化種生成による酸化性雰囲気形成の可能性検討）の評価が実施されている。ここでは、放射線場に関する過渡的な変遷として、水の放射線分解による水素ガスの発生に注目する。

廃棄体グループ2（キャニスタ）でのガス発生挙動を図 6.1.4-1 に示す。廃棄体パッケージが開口する 500 年まではその内部には十分な水分がないため、この期間中は水の放射線分解による有意な量のガス発生は生じない（セルロースの放射線分解は生じている）。しかしながら、500 年で廃棄体パッケージが開口した後は、廃棄体パッケージ内部に地下水が速やかに流入し、金属の腐食によるガス発生と水の放射線分解による水素ガス発生が起こり、水の放射線分解による水素ガス発生は、全体のガス発生速度において卓越する。このことから、500 年の時点ではまだ核種は十分に減衰しきっているわけではなく、潜在的には有意な量の水素ガスを生成可能なだけの放射線場を有しており、利用可能な水の有無によって、放射線分解によるガス発生量の変動することがわかる。

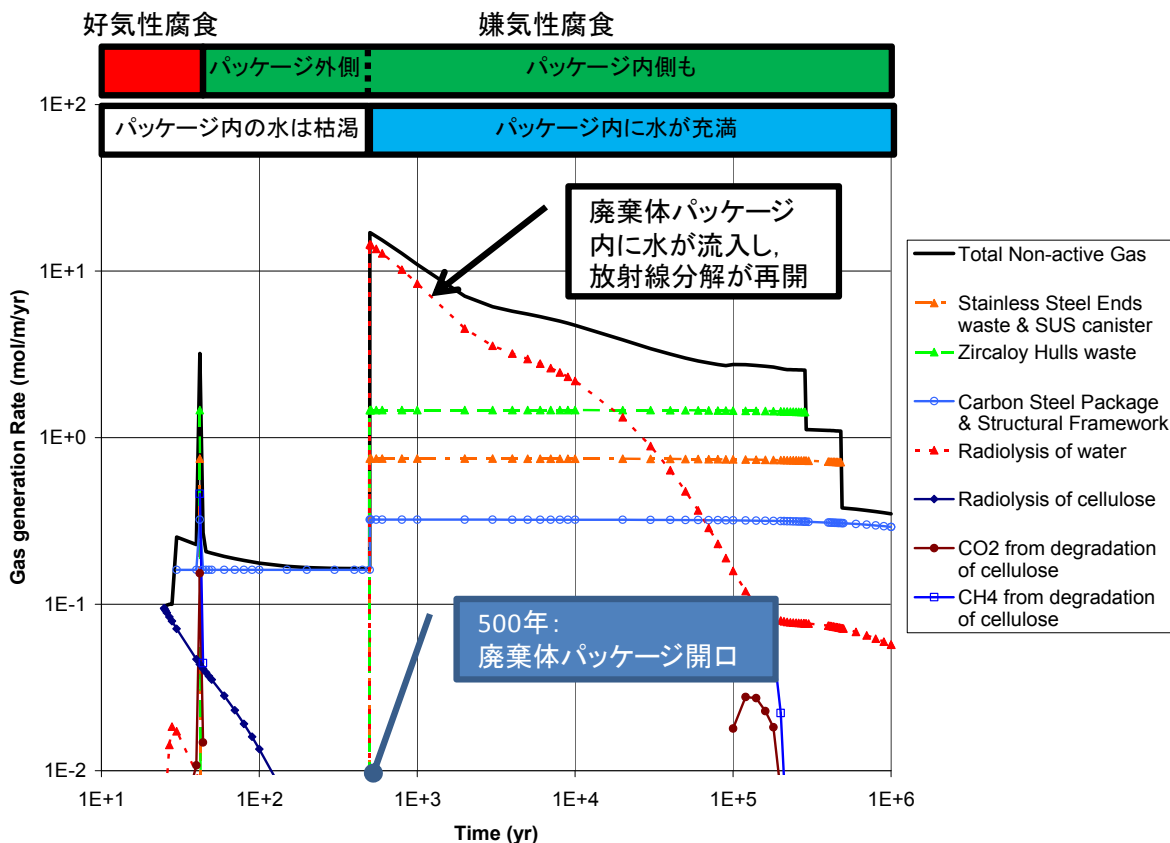


図 6.1.4-1 廃棄体 Gr2（キャニスタ）における水素ガス発生量

6.1.5 ガス（水素爆発の可能性に関する考察）

(1) 概要

建設・操業中に存在し、閉鎖後も残存している酸素の消費については、金属の酸化性腐食の評価から同時に算出することができる（ガス発生評価の詳細は6.2節参照）。本項では、この結果を利用して、閉鎖後における処分場内での水素爆発の可能性について予備的な検討を行った。

水素爆発を引き起こす可能性のある可燃性ガスとして、ここでは水素と酸素の混合気を想定する。水素と酸素の混合気における可燃性ガスとしての下限は、水素は4 vol%以上かつ酸素は5 vol%以上とされている（Zabetakis, 1965）。ここでは、ガス発生評価から水素と酸素の体積分率のみを抜き出して可燃性ガスの生成可能性を判断する。

(2) 評価結果

結晶質系岩盤における廃棄体パッケージ内での水素ガスと酸素ガスの体積分率の経時変化の結果のうち、廃棄体グループ2の小断面坑道（CSD-B/C）と廃棄体グループ4発熱性：小断面坑道（溶融炉など）の場合を、図 6.1.5-1 および図 6.1.5-2 に示す。これらの処分坑道の場合のみ、また閉鎖後初期のごく短期間についてのみ¹⁵、可燃性ガスとなる可能性（水素ガス4 vol%以上かつ酸素ガス5 vol%以上）があることがわかった。可燃性ガスが形成される理由は、放射線分解によるかなり早い段階からの水素ガス発生と（線量率が高い）、腐食による酸素消費が遅い（ジルカロイ、ステンレスが相対的に多い）条件が重なっていることによる。他の廃棄体グループの処分坑道では可燃性ガスの形成はないという評価結果となった。

(3) 考察とまとめ

廃棄体パッケージ内における水素ガスと酸素ガスの混合による可燃性ガスの形成について計算した結果、廃棄体グループ2の小断面坑道（CSD-B/C）と廃棄体グループ4発熱性：小断面坑道（溶融炉など）についてのみ、また閉鎖後初期のごく短期間についてのみ、その可能性があることがわかった。可燃性ガスが形成される理由は、放射線分解によるかなり早い段階からの水素ガス発生と、腐食による酸素消費が遅い条件が重なっていることによる。他の廃棄体グループでは可燃性ガスの形成はない。処分施設そのものは、廃棄体パッケージ内における可燃性ガスの形成については、顕著な影響を及ぼさない。

酸素が存在するうちは腐食による水素ガス発生はないという仮定から、廃棄体パッケージの外側で可燃性ガスが形成されることはない。実際には、ガス生成プロセスの不均一性のために、ある場所で酸素が残存している状態で別の場所では水素が発生している可能性はある。これらが混合された場合、可燃性ガスが形成される可能性はある（同様の状況は

¹⁵ 図ではt=25年が処分場閉鎖時間となる。

廃棄体内部でも想定できる)。しかしながら、閉鎖後においては、廃棄体パッケージの外側でも比較的早期に酸素が消費され、可燃性ガスとみなすほどの有意な量の酸素は残存し難いと考えられることから、このような可燃性ガスの形成可能性は非常に低いと判断する。

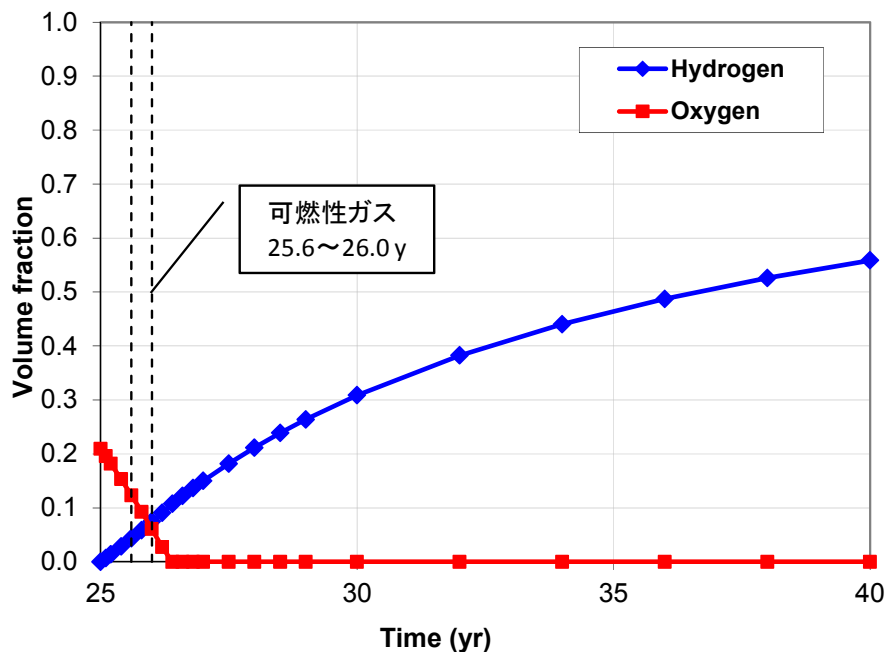


図 6.1.5-1 廃棄体パッケージ内の水素・酸素の体積分率 (Gr2 : CSD-B/C)

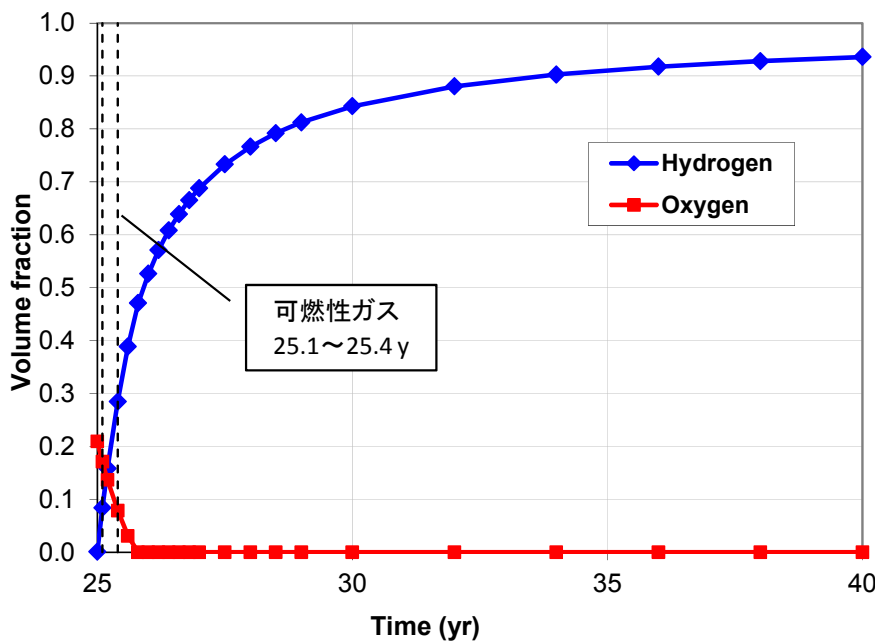


図 6.1.5-2 廃棄体パッケージ内の水素・酸素の体積分率 (Gr4 : 溶融炉など)

6.1.6 まとめ

過渡的な場の状態に関するまとめを表 6.1.6-1 に示す。

表 6.1.6-1 過渡的な場の状態のまとめ

項目	終息までの時間	解説
温度	case1-0 : Gr2 および Gr4H では 500 年以上 case2-0 : 500 年未満	case1-0 (レファレンス設計条件) では、500 年の時点で熱エネルギーは残存し、地温より高い状態にある坑道も存在する。 case2-0 (低定置密度) では、500 年までに地温に復帰する。
水理 (再冠水)	飽和度 1% : 数十年 飽和度 0% : 数百年	処分坑道仕様、母岩特性などによって再冠水までの時間に長短はあるものの、500 年までには実効的な再冠水は終息。
化学 (酸化性/還元性)	Gr.1 : 20 年 Gr.2 : 40 年	金属腐食メカニズムが、酸素消費型の腐食から水素発生型の腐食に転換する時間で判断。
放射線場 (放射線分解)	Gr.2 : 500 年以上	Gr2 では 500 年の時点で放射能は残存しており、十分な水があれば有意な量の放射線分解が進行する。廃棄体パッケージ内に砂などを充填してボイドを減少させる設計対応は有効。
水素爆発の可能性	Gr2 および Gr4H : 閉鎖後数年	可燃性ガスが形成される可能性があるのは、Gr2 (小断面) および Gr4H (小断面) についてのみで、閉鎖後初期の短期間に限定される。

本検討では、廃棄体パッケージの閉じ込め期間として設定している 500 年をひとつの目安として考える。過渡的な現象のうち、水理 (再冠水) および化学 (酸化性雰囲気から還元性雰囲気への変遷) は、上記閉じ込め期間のうちには十分に終息していることを示唆する評価結果となった。水素爆発の可能性についても、可燃性ガスの形成は閉鎖後初期のごく短期間に限定されることがわかった。

一方、温度については閉鎖後 500 年時点でも地温より高い状態にあること、放射線場についても十分な水が存在すれば放射線分解が有意に進行することが示唆された。これに対し、温度については、定置密度を低下させた設計変更 (case1-2) によって、500 年時点で地温程度にする可能性があることが示された。また放射線場については、廃棄体パッケージ内に砂などを充填してボイドを減らすことで影響緩和を図ることが可能と考えられる。

6.2 長期的な場の状態に関する検討

6.2.1 温度

第 2 次取りまとめ (JNC, 1999) に記載される安全評価シナリオに関する記述を踏まえると、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価を高レベルと整合的に実施するためには、数万年後程度までの人工バリアの温度状態の変遷を評価しておく必要がある。ここではその観点から長期の熱解析を実施する。

3 章の施設設計における熱解析では、数十年後に発現する最高温度を評価することがその主目的であったことから、単設坑道のモデル化により、処分坑道が坑道直角方向に無限に存在することを仮定した保守的で簡便な解析モデルを採用した。しかし、長期経過後の温度についてこれと同様な解析モデルを用いると、処分坑道の本数は実際には有限である

ことから、温度が高く見積られる可能性がある。そこで、本項における熱解析では、施設設計で検討された処分坑道レイアウトに基づく複数の連設坑道をモデル化する。

(1) 検討ケース

以下の4ケースを対象に、鉛直断面をモデル化した二次元 FEM 熱解析を行う。

- ・ case1-0 (低透水性 NBS レファレンス), 結晶質岩・処分深度 1000 m
- ・ case1-0 ("), 堆積岩・処分深度 500 m
- ・ case2-0 (高透水性 NBS レファレンス), 結晶質岩・処分深度 1000 m
- ・ case2-0 ("), 堆積岩・処分深度 500 m

(2) 解析モデル

図 6.2.1-1～図 6.2.1-4 に各ケースの FEM 解析メッシュの処分坑道周辺の拡大図を示す。

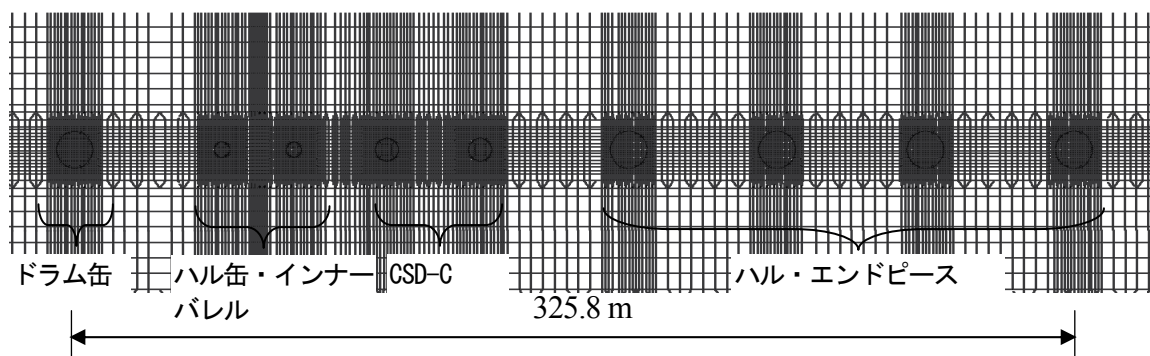


図 6.2.1-1 FEM メッシュ拡大図 (case1-0 : 結晶質岩ケース)

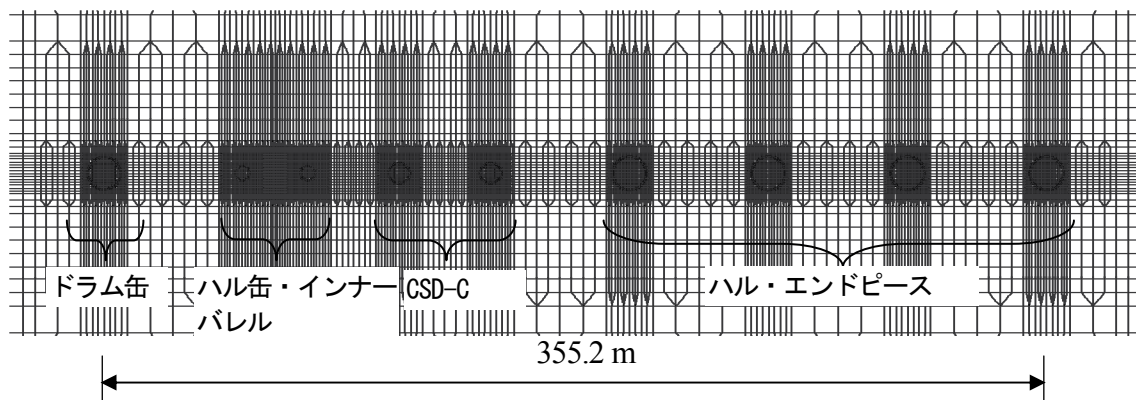


図 6.2.1-2 FEM メッシュ拡大図 (case1-0 : 堆積岩ケース)

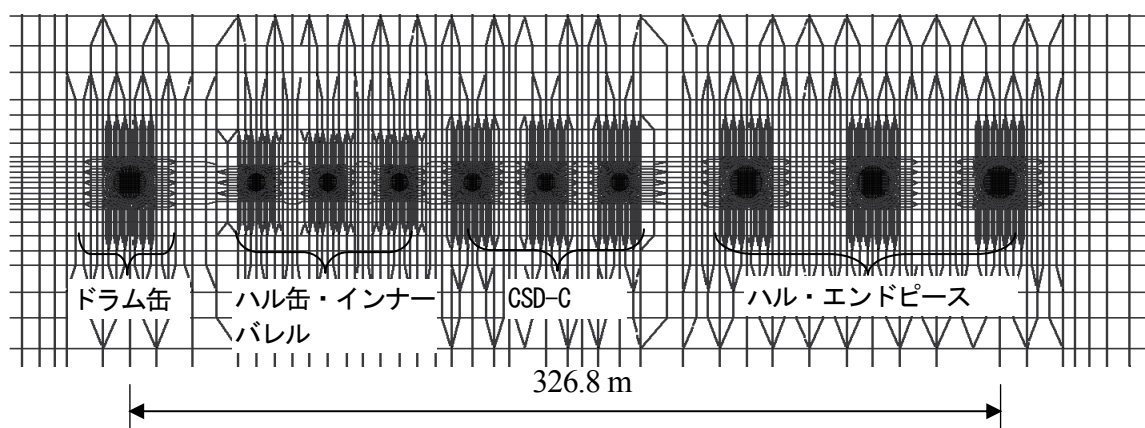


図 6.2.1-3 FEM メッシュ拡大図 (case2-0 : 結晶質岩ケース)

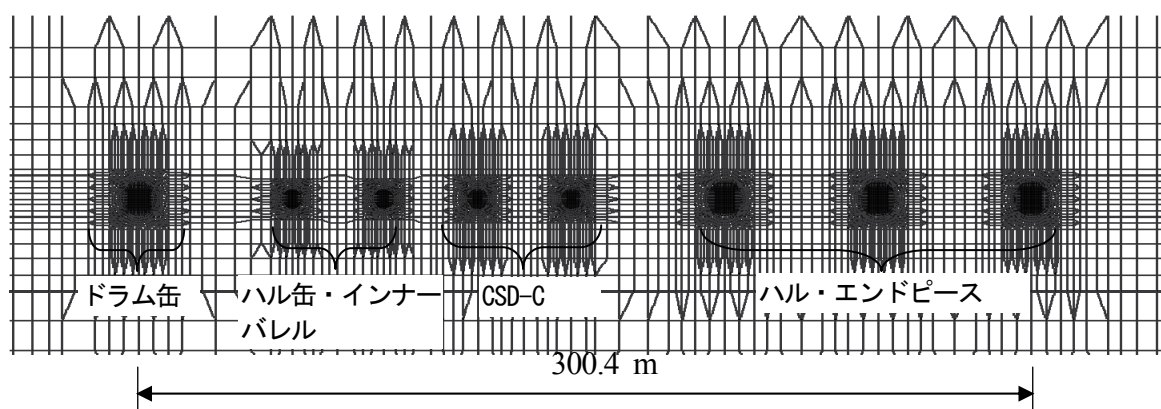


図 6.2.1-4 FEM メッシュ拡大図 (case2-0 : 堆積岩ケース)

(3) 解析条件

初期条件は地表面温度を 15°C 、地温勾配を $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ で設定し、境界条件は地表面とモデル底面およびモデル側面で温度固定境界と設定する。解析物性値および廃棄体の発熱量は TRU レベル 3 報告書 (NUMO, 2011) に準じて設定する。

(4) 解析結果

解析結果として、図 6.2.1-5～図 6.2.1-8 に各ケースにおける代表時刻の温度分布図を示す。安全評価上想定する核種放出開始時刻 (=500 年後) において、処分坑道付近で 60°C (結晶質岩の場合) および 40°C (堆積岩の場合) を超える領域が各図に示されているが、これについては 6.1.1 項で既述した通り、温度を低下させるための設計的な対応が可能である。

また、1 万年後の温度に着目すると、各ケースで処分坑道内の温度は初期地温より $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 高い結果となっているが、概ね初期地温程度とみなすことが可能である。

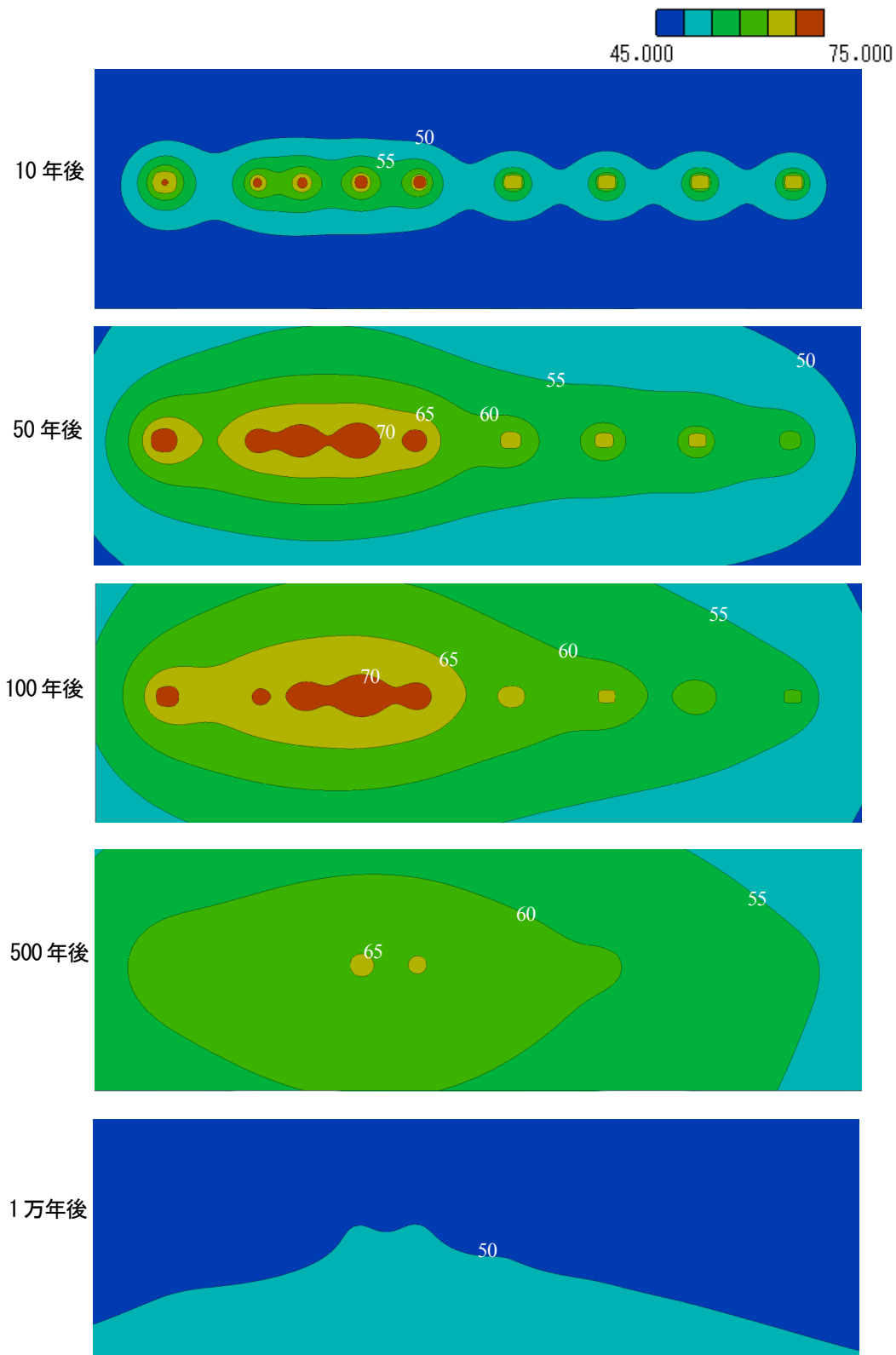


図 6.2.1-5 温度分布 (case1-0 : 結晶質岩ケース)

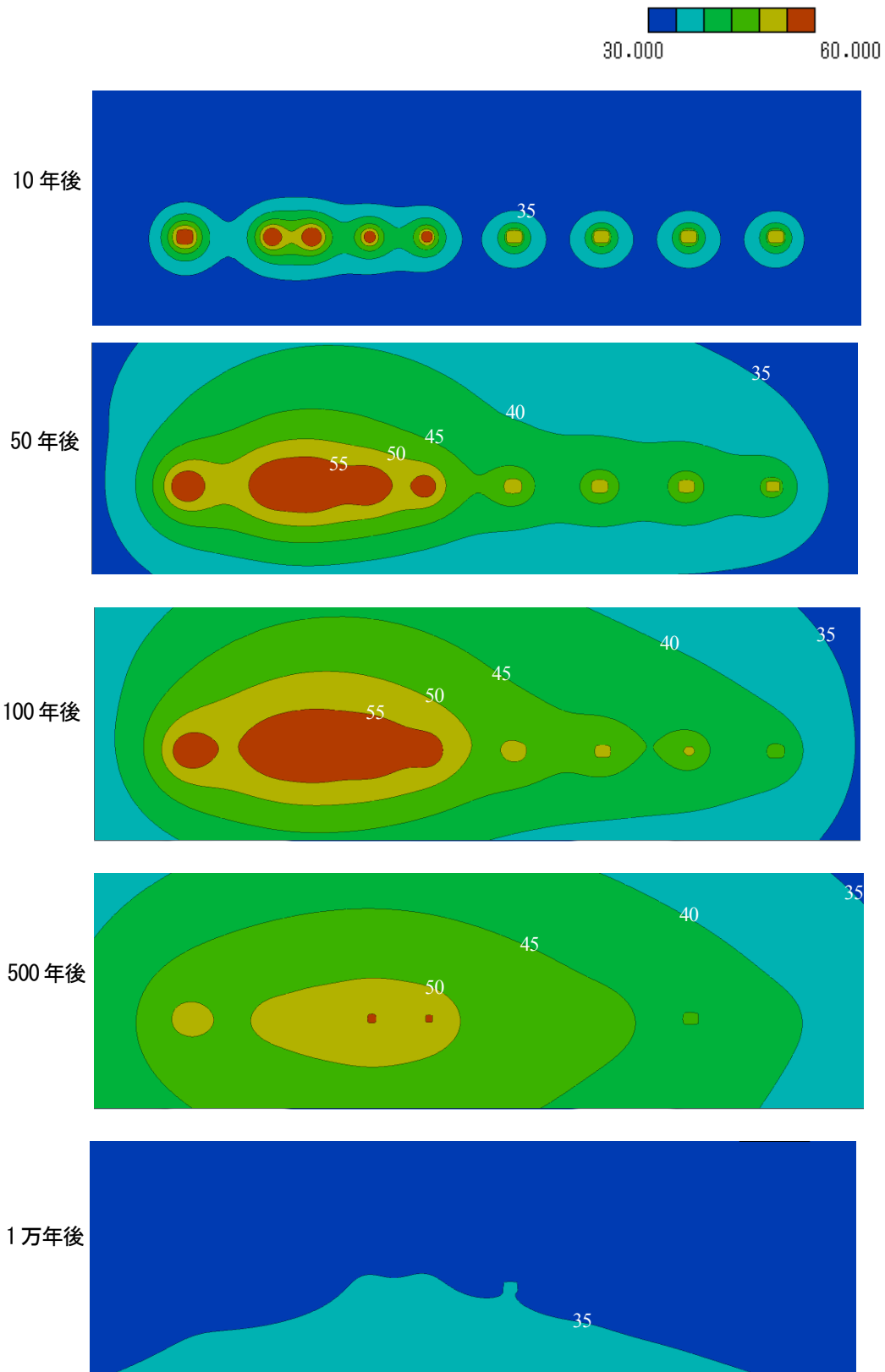


図 6.2.1-6 温度分布 (case1-0 : 堆積岩ケース)

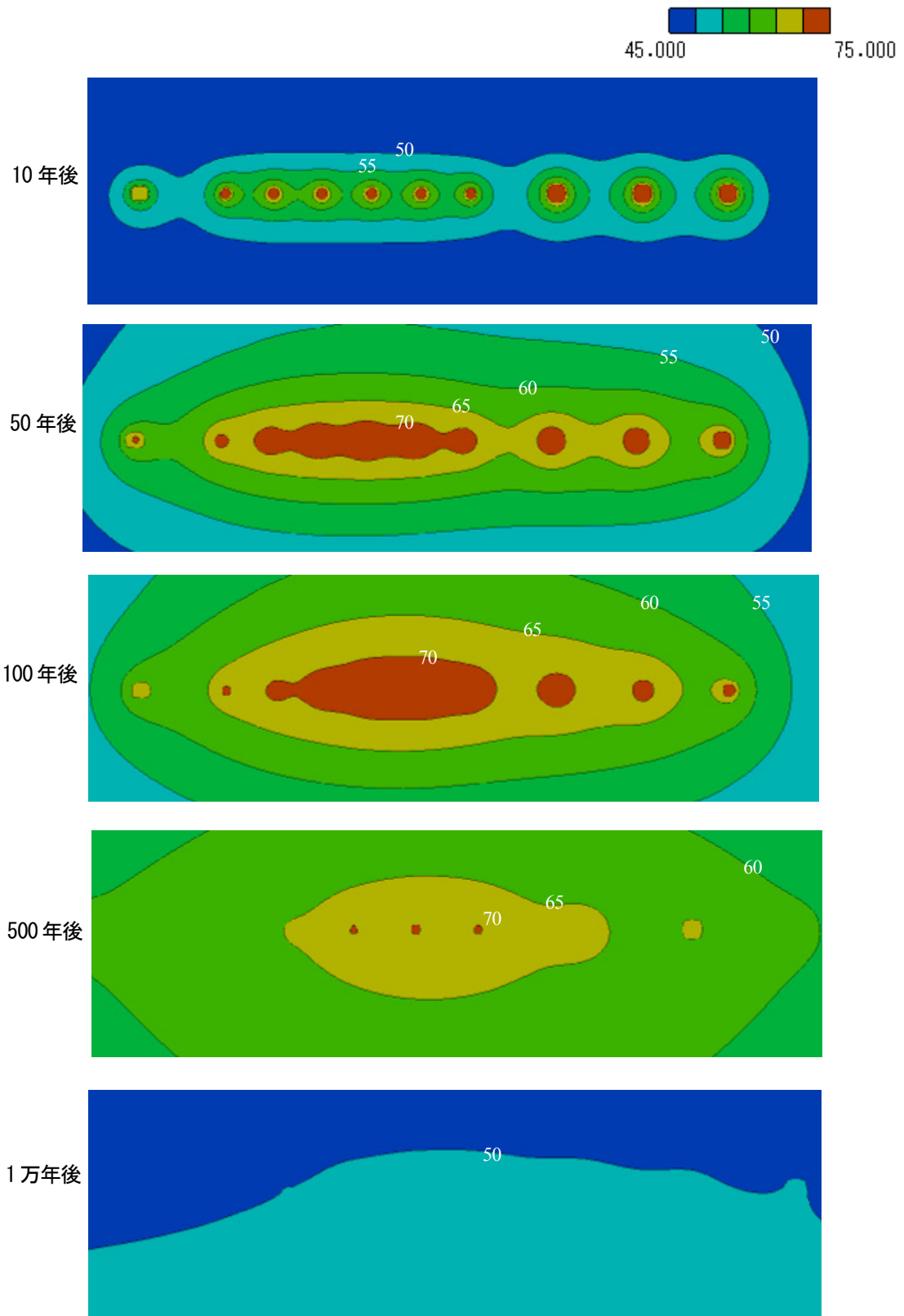


図 6.2.1-7 温度分布 (case2-0 : 結晶質岩ケース)

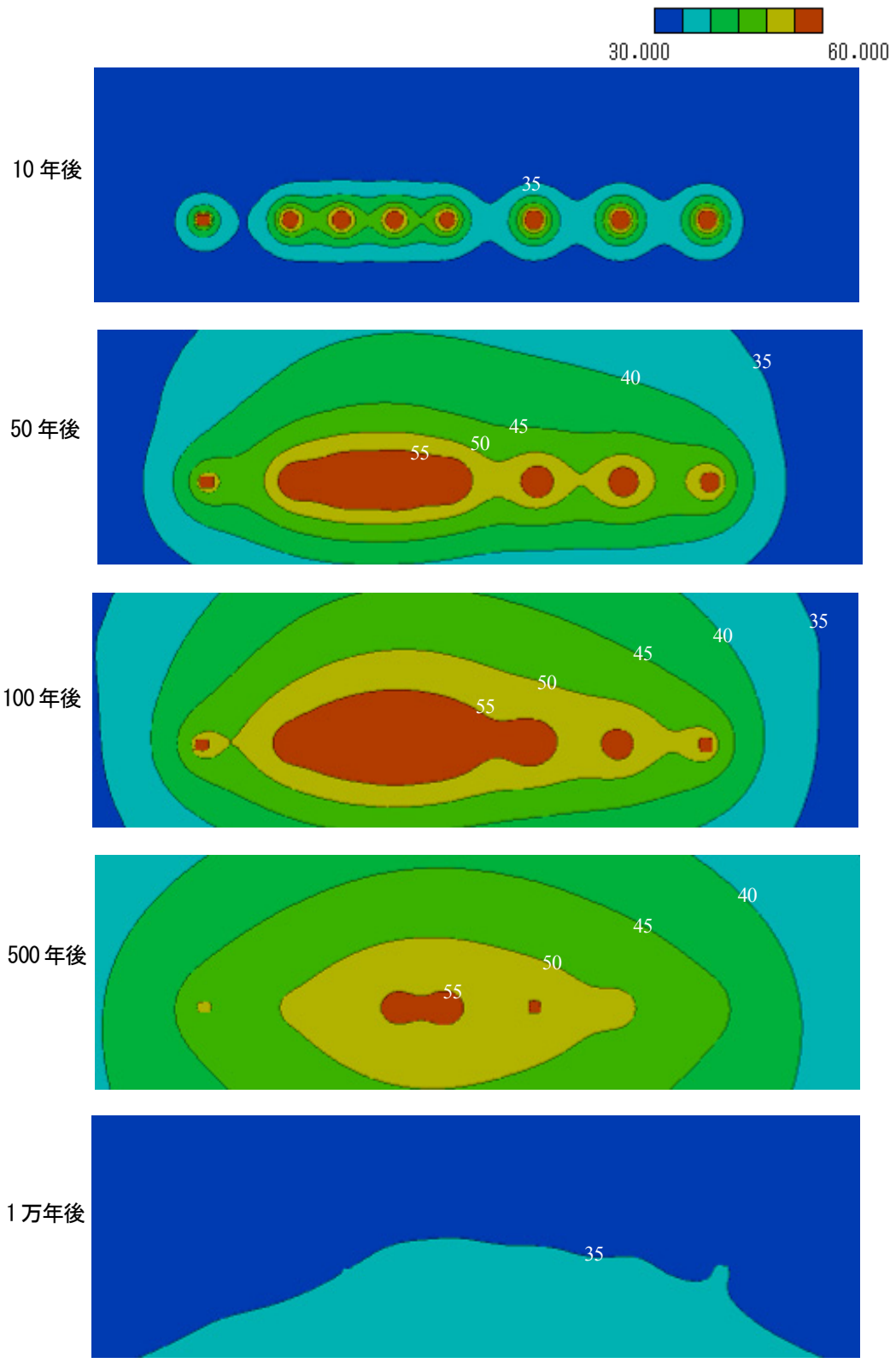


図 6.2.1-8 温度分布 (case2-0 : 堆積岩ケース)

6.2.2 力学

ニアフィールドでは、岩盤クリープによる応力の変化、および人工バリアの変質に伴う剛性低下や緩衝材の膨潤圧の変化などによって、応力状態が経時的に変化することが考えられる。こうした応力の変化により、人工バリアの幾何形状は変化する可能性が考えられる。したがって、坑道閉鎖後長期におけるニアフィールドの力学挙動を検討し、安全評価の前提条件である人工バリアの幾何形状（緩衝材の厚さなど）が長期的に担保されることを評価することが重要となる。

坑道閉鎖後の力学挙動に影響を及ぼす要因のうち、地質環境に関連する要因としては、地下水位の回復、地圧の回復と岩盤クリープ、および地下水とバリア材料の化学反応が挙げられる。また、人工バリア特性に関連する要因としては、廃棄体の発熱、廃棄体に含まれる物質の溶出、金属の腐食によるガス発生や体積膨張、セメント系材料の地下水への溶解、粘性変形、緩衝材の膨潤、および緩衝材の流出が挙げられる。

上述の各要因が発現する時期やその影響の程度はさまざまであり、各要因は相互に影響を及ぼすと考えられる。第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）では、影響度が高いと考えられる事象とそれらの相互影響がインフルエンスダイアグラムとして提示されている（図 6.2.2-1）。緩衝材を設置しない処分坑道の場合は、図中のベントナイトの影響を除いて同様である。

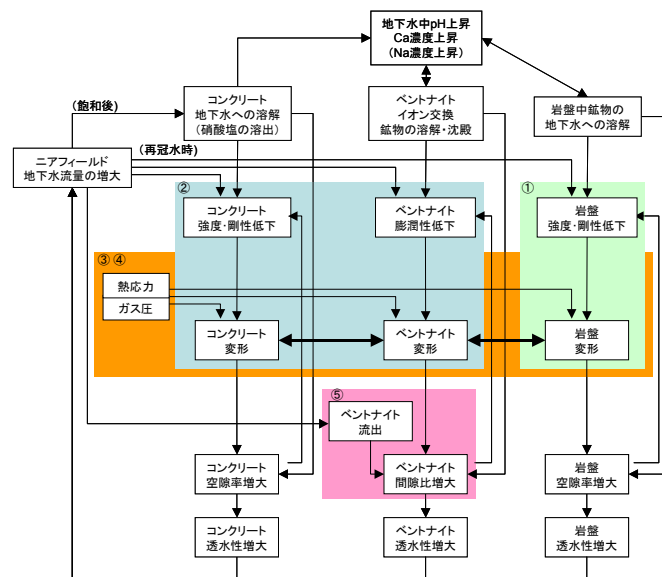


図 6.2.2-1 インフルエンスダイアグラム
(電事連・JNC, 2005)

ニアフィールドの力学変遷に関して、第2次 TRU レポート以降、JAEA と原環センターによって実施されている2つの基盤研究（ニアフィールドの構造力学評価（JAEA）、人工バリアの長期挙動評価（原環センター））の概要について以下に示す。

(1) ニアフィールドの構造力学評価

第2次 TRU レポート以降, JAEA において, ニアフィールド構造力学評価モデルに対して「岩盤クリープモデルの導入」, 「緩衝材の力学モデルの高度化」および「セメント系材料の力学モデルの高度化」が継続的に実施されている (図 6.2.2-2)。

	~H17 年度 (TRU-2 以前)	H18	H19	H20	H21	H22
1.MACBECE の改良 (1)緩衝材の力学モデルの高度化 (2)セメント系材料の力学モデルの高度化 (3)岩盤のクリープモデルの導入	関口・太田拡張モデル	粘性変形モデル導入		ECモデルの導入		
	本島等の非線形弾性モデル					・ひび割れモデル調査 ・腐食膨張挙動の反映手法の調査
			大久保モデル導入			・計算速度の高速化
2.TRU 廃棄物処分施設の長期力学挙動解析	岩盤クリープ, 人工バリア変形挙動評価		改良した力学モデルの検証解析 (人工バリアと岩盤の連成解析)			

図 6.2.2-2 ニアフィールド構造力学評価における取り組み
(亀井ほか, 2012)

(i) 緩衝材の力学モデルの高度化

緩衝材の力学モデルについて, 第2次TRUレポートでは関口・太田による弾塑性構成式を拡張したモデルにより膨潤挙動が評価されていたが, 粘性変形モデルが導入されたことにより, ベントナイトの粘性を考慮した力学解析が可能となった。また, 関口・太田モデルには, 弾性領域と塑性領域の境界を表す曲面 (降伏曲面) において, 数値解析上, 微分不可能な特異点が存在し, 応力条件がその領域に陥ると解析が不安定になることが指摘されていた。これらのモデルを取り込んだ解析コードMACBECE (Mechanical Analysis Considering Chemical Transition of Bentonite and Cement Materials) (三原ほか, 2010) においても同様の問題が生じる恐れがあった。MACBECEは, 人工バリア材料として使用されるセメント系材料やベントナイト系材料, 及び周辺岩盤を含めた力学的な挙動を解析し, 処分施設の変形に関わる評価を行うと共に, それに伴う物質輸送特性の変化を評価することができる解析コードである。上記の問題を解決するため, 降伏局面の特異点をより滑らかな曲面に設定できるモデルがMACBECEに導入され, これによって特異点の問題を低減することができた (亀井ほか, 2010)。

(ii) セメント系材料の力学モデルの高度化

セメント系材料の力学モデルについては、第2次 TRU レポートでは、地盤のひずみ軟化挙動を表現するために本島ほか(1981)が提案した構成モデルが援用されていた。また、時間経過に伴うカルシウムの溶脱率の変化を弾性係数および一軸圧縮強度へ反映させた構造解析(戸井田ほか, 2005)が行われていた。上記に加え、MACBECE に鉄筋の腐食膨張モデルが組み込まれるとともに、セメント中のひび割れによる透水係数の変化を等価連続体モデルとして導出できる見通しが得られた(亀井ほか, 2012)。

(iii) 岩盤クリープモデルの導入

第2次 TRU レポートでは、岩盤クリープによる変形は非線形の非弾性構成モデルである大久保モデル(大久保, 1992)によって評価され、人工バリアの力学挙動は別途解析コード MACBECE を用いて関口・太田モデルの改良モデルにより評価されていた。ここでは、大久保モデルで得られた岩盤変位が人工バリア外側に強制変位として与えられていたため、処分施設内の変形量は過度に評価されている可能性があった。この点を改善するため、MACBECE に大久保モデルを導入して、処分施設と岩盤の力学挙動を連成して解析できるよう改良された。さらに、処分坑道掘削時における岩盤クリープを考慮し、処分施設建設・操業期間における評価も可能となるように改良された(三原ほか, 2010)。このように改良された MACBECE を用いた処分施設の長期力学解析を通じて、岩盤クリープ変形による強制変位を与えて評価する方法(第2次 TRU レポート)は、処分施設内の変形量を過度に大きく見積もる方法であったことが示された(亀井ほか, 2008)。

(2) 人工バリアの長期挙動評価

第2次 TRU レポートおよび「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」(資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構, 2009)では、人工バリア材の長期性能評価の課題として以下が挙げられている。

- ・多様な地質環境および多様な材料への対応、セメント系材料およびベントナイト系材料の変質に伴う人工バリア材性能の変遷に関する評価モデルの構築
- ・セメント系材料とベントナイト系材料の界面近傍での変質挙動の解明
- ・長期間を対象とした評価の信頼性向上のため、長期材齢を経た事例(ナチュラルアナログ)に関するデータの取得

上記課題を受けた基盤研究の取り組みが JAEA および原環センターによって進められている(図 6.2.2-3)。この取り組みとして原環センターにおいて実施した「セメント系材料の長期変質挙動」、「セメント-ベントナイト相互影響」および「人工バリア性能評価」の概要を以下に示す。なお、人工バリア性能の長期変遷として化学～力学の連成現象も研究対象とされているが、連成現象に関する記述は次項「6.2.3 地球化学」に譲り、本項では力学に関する事項のみ簡潔に示す。

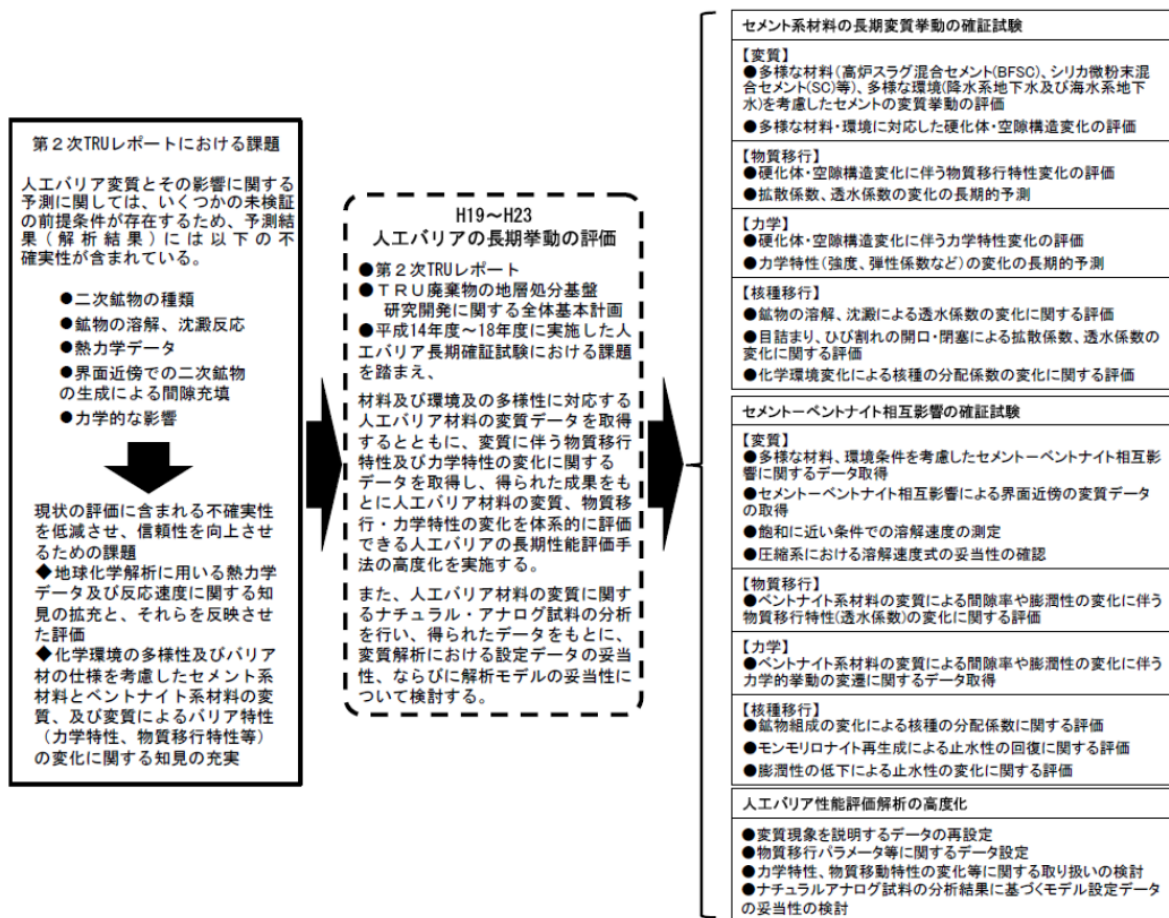


図 6.2.2-3 人工バリアの長期挙動評価における課題と課題解決に向けた検討
(原環センター, 2012a)

(i) セメント系材料の長期変質挙動

多様な材料・環境を考慮した化学的変質に伴う硬化体構造や空隙構造変化のモデル化を目的として、空隙構造モデルを使用した特性評価モデルの高度化、および細孔表面電荷を考慮したセメント硬化体内のイオン移動予測の検討が実施されている。また、長期変質挙動評価の信頼性の担保を目的として、経年コンクリート試料の浸漬試験などが実施されている(原環センター, 2012a)。

(ii) セメントーベントナイト相互影響

セメントーベントナイトの相互影響によるベントナイト系材料の化学的変質に関して、多様なセメント系材料および地質環境を想定した各種試験、および解析的検討が実施されている。また、バリア材料の化学的変質に伴う物質移動特性・力学特性の変化に関する知見の充実を目的に、ベントナイト系材料の変質と物質移動・力学特性の変化を体系的に説明できるモデルの構築に資するデータが取得されている(原環センター, 2012a)。

(iii) 人工バリア性能評価解析

セメント系およびベントナイト系材料について、それぞれの化学的変質と物質移動挙動の変化を考慮した、地球化学反応—物質移動の連成解析の高度化を目的とする検討が進められている。化学環境場の変化を考慮しながら物質移動と力学を連成させた解析により、連成のための手法とその有効性が検討されている（原環センター、2012a）。

以上、ニアフィールドの力学変遷に関して、第2次 TRU レポート以降の2つの基盤研究の状況を概観した。こうした状況をふまえて、安全評価解析の前提となる人工バリアの幾何形状については、第2次 TRU レポートと同様、ニアフィールドの力学的安定性が長期的に保たれるとの考え方を採用し、その経時的な変化を考慮しないこととする。

6.2.3 地球化学（セメントとベントナイトの両立性）

充填材や地下構造物に多用されるモルタルおよびコンクリートなどのセメント系材料が地下水と反応すると、セメント系材料中のセメント水和物が溶解し高アルカリ性の間隙水が生成され、間隙水の化学的条件が変化する。以下、セメント系材料の長期変質挙動、セメント—ベントナイト相互影響、人工バリア性能評価解析についての最新の知見を整理する。

(1) セメント系材料の長期変質挙動

緩衝材が設置されない、セメント系材料のみの施設では、周辺地下水とセメント系材料は接触しやすい状態でありセメント系材料の溶脱は進行しやすい。第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）では、セメント系材料の変質解析を実施し、pH12.5程度のRegion II（ポルトランドイトと平衡となっている状態）が終了する時期をFRHPのケースで7万年程度と例示している。Region IIが継続する期間は、セメント系材料の収着性は初期の状態を保持すると考えられる。第2次 TRU レポート以降においても、セメント系材料から高アルカリ性の間隙水が溶出し周囲の緩衝材や岩盤の安全機能を変化させる可能性に関して、その影響の低減を目指した研究が継続されている。低アルカリ性セメントの観点では、フライアッシュ高含有シリカヒュームセメント（以下、HFSC という）の研究が進められており、普通ポルトランドセメントに比較しHFSC硬化体のpHは低く維持されることが実験で確認されている。普通ポルトランドセメントに比較してCa/Si比が低いHFSCはAlを鉱物に取り込みやすい（亀井ほか、2012）。その結果、液相中に SO_4^{2-} が取り残されOHイオンに代わって陽イオンのカウンターイオンとして作用してpHは低く抑えられていると推測されている（亀井ほか、2012）。

一方、多様なセメント系材料の変質評価を可能とするために、フライアッシュセメント、高炉スラグセメントおよびシリカセメントの浸漬試験を実施し、試験結果と整合性のある初期鉱物および二次鉱物の設定が提案されている（原環センター、2012a）。具体的な二次

鉱物は、C-S-H ゲル、C3ASH4, C2ASH8 (GEHL_HY) , C3AS3 (GROSSULAR) , C4AH13, C4AH19, カルセドニ, カルサイト, ドロマイト, フリーデル氏塩, ブルーサイト, カトアイトである。ここで、C は CaO, A は Al₂O₃, H は H₂O, S は SiO₂ を示す。その結果、液相中の Al 濃度が実測値に近い値をとるようになり、二次鉱物として試験で検出されないハイドロガーネットでなく、カトアイトを考慮することにより固相組成の解析結果も実測値に合う結果となった。これらの鉱物モデルにより処分場の地質環境の多様性に対応した設計の柔軟性が確保できるとしている。さらに、低拡散性能の高緻密コンクリート層として期待されているフライアッシュ混合低熱ポルトランドセメント（以下、FAC という）の低拡散性能について研究が進められている。普通ポルトランドセメント（OPC）と比較し、FAC は陰イオン性のヨウ化物イオンに対して低拡散性能を有することが指摘されている（加藤ほか、2006）。また、FAC の低拡散性能と空隙構造の関係は実験的に調べられ、FAC は拡散試験前後で空隙径分布が小さくなり空隙構造が緻密化することが確認された。この緻密化により収れん度や屈曲度の影響に伴う FAC の低拡散性が認められ、陰イオン (Cl⁻, Br⁻, I⁻) の拡散挙動については、イオン半径が大きいほど拡散しやすい空隙割合が減少する関係が得られている（千田・吉田、2012）。

(2) セメントーベントナイト相互影響

緩衝材を設置した施設では、緩衝材の止水性能により長期にセメント系材料が保持されると考えられる。第 2 次 TRU レポートで実施された緩衝材ーセメント系材料の長期挙動のレファレンスの評価では、緩衝材とセメント系材料の境界付近の空隙が閉塞することに伴い、セメント系材料の領域の pH12.5 以上は 10 万年間継続すると評価された。

地層処分低レベル放射性廃棄物の処分で使用されるセメント系材料から供給される高アルカリ性溶液と、緩衝材の構成鉱物が反応し、緩衝材に期待されている止水性能などが喪失する可能性がある。第 2 次 TRU レポートでは、セメント系材料およびベントナイトの溶解・変質に関する化学反応モデルと、空隙割合の変化に伴う実効拡散係数の変化を考慮した物質移行モデルを組み合わせた解析が実施されている。その結果、10 万年経過後においてもモンモリロナイトが残留し、特に緩衝材の中央部の低変質部分によって 10 万年後においても止水性を保持するものと予想された。

セメント反応水との反応によって生じる緩衝材の鉱物学的変化の過程には、その反応に関して不確実性が存在し、反応経路を一通りに定めることは難しい。そのため、第 2 次 TRU レポートでは生起し得る鉱物学的変遷を緩衝材の鉱物学的変遷シナリオとして抽出している。小田ほか（2011）はこのシナリオに基づいて二次鉱物種を変えた複数の解析ケースを設定し、第 2 次 TRU レポートよりも幅広い pH 条件に適用可能と考えられる溶解速度式を用いて、緩衝材の鉱物学的変化とそれに伴う物質移動抑制機能（低拡散性、低透水性）の変化を評価した。解析結果から、生成する二次鉱物によらず pH の高い状況が 10 万年間継続することが示された。

廃棄体や支保工の近くではモンモリロナイトの変質がより進行するが、緩衝材中央部では抑制されることが示された(図 6.2.3-1)。こうしたモンモリロナイト溶解挙動の時間的、空間的变化は、緩衝材間隙水の液相組成とそれに伴う ΔG が変化した結果であり、熱力学的安定性が異なる二次鉱物の種類と組み合わせによる影響、モンモリロナイトの溶解速度式の形による影響によるものと考えられた。また、解析結果をもとに既往の評価式(第2次 TRU レポートなどで用いた間隙率と実効拡散係数、透水係数との関係式)に従って緩衝材の拡散係数および透水係数を算出しており、10 万年間大きな変化はみられなかった。

いずれの解析ケースにおいてもモンモリロナイト残存率は6割以上であり、二次鉱物の生成により固相体積が補われ間隙割合は長期にわたってほとんど変化していなかった。この場合、中央部のモンモリロナイトは密実(空隙が少なく密な状態)に拘束された状態にあることから、止水性は失われず低拡散場が維持されたとしている。以上の解析結果に基づけば、鉱物学的変遷の不確実性を考慮しても、緩衝材の止水性は10 万年程度保たれ、拡散場が維持されると結論付けている。

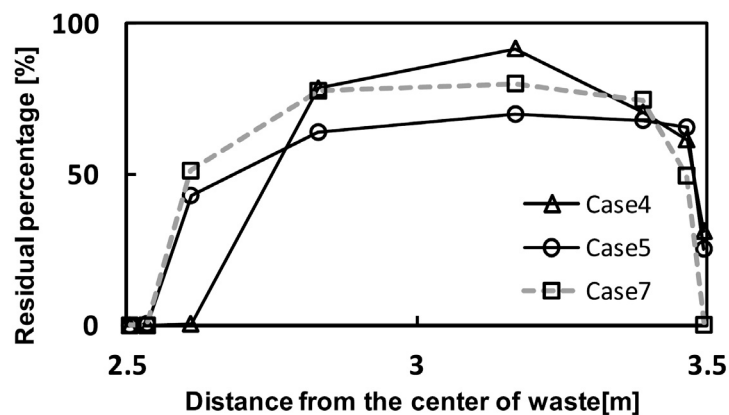


図 6.2.3-1 10 万年後のモンモリロナイト残存割合
(小田ほか, 2011 より)

ベントナイトの主要構成鉱物であるモンモリロナイトは、圧縮を受けることにより結晶に歪みが生じ、溶解が促進される懸念がある。原環センター(2012a)では、圧縮状態でのモンモリロナイト溶解速度を垂直走査干渉計(VSI: Vertical Scanning Interferometer)を用いて算出し、得られた測定データから単位面積あたりの体積(モンモリロナイトのモル量)の時間変化に基づくフラックスを求めている。また、取得したモンモリロナイトの溶解速度について、飽和度、圧力などの観点から整理し、Sato-Camaの式(Sato et al., 2004)をベースに圧力の影響を追加した溶解速度式を提示している。結果として、圧縮圧力が大きなものは遅い溶解速度を示す傾向がみられ、溶解速度が最も速いものであっても分散系に比べて1桁低い溶解速度であった。このことから、圧縮系を考慮したとしても第2次 TRU レポートのモンモリロナイト溶解速度式の保守性は確保されるものと考えられた。

(3) 人工バリア性能評価解析

セメント系材料からの高アルカリ性溶液の影響で、セメント系材料と接触する部分の緩衝材中のモンモリロナイトが溶解し、モンモリロナイト部分密度が減少した結果、緩衝材の中央部分からモンモリロナイトが膨潤によって移動してくる可能性がある。第2次 TRU レポートでは緩衝材領域のモンモリロナイト部分密度を再分配させた1次元物質移行-化学反応連成計算を実施した。その結果、再分配を考慮しないケースと比較し、10万年までの期間において緩衝材の透水係数に大きな相違は見られなかったと報告している。

第2次 TRU レポート以降では、ベントナイト系材料の変質解析手法の高度化を目指し、化学・力学連成モデルの構築が検討されている。ここでは、化学・力学・物質移動特性の変化を連成させるための一次元モデルを設定し、地層処分低レベル放射性廃棄物の処分施設の化学・力学の弱連成解析を実施している（原環センター、2012a）。力学を化学に反映させた連成解析の結果、ベントナイト系材料の透水性などに大きな影響はなかったとしている。ただし、課題として例えば力学解析と化学解析で用いている透水係数の算出の式が異なることなどが挙げられており今後の対応の必要性が指摘されている。

6.2.4 地球化学（硝酸塩とベントナイトの両立性）

(1) 硝酸塩の変遷

再処理プロセスの廃液には、硝酸塩（主に硝酸ナトリウム（ NaNO_3 ））が含まれており、第2次 TRU レポートの処分概念では、硝酸塩を含有する廃棄物は廃棄体グループ3に分類されている。廃棄体グループ3以外の処分坑道には、レイアウトによって硝酸塩影響を排除する対策がなされる。第2次 TRU レポートにおける性能評価では、廃棄体グループ3から溶出するヨウ素には硝酸塩の影響を考慮し、各バリアへの収着分配係数を0に設定した評価をレファレンスケースで実施している。その結果、廃棄体グループ1の線量に次いで、廃棄体グループ3の線量が高い結果となっている。

一方、代替技術として、第2次 TRU レポートや地層処分低レベル放射性廃棄物の処分に関する国の計画である全体基本計画（資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構、2009）において、廃棄物に含まれる硝酸塩の分解、除去に関する研究開発が挙げられる。

第2次 TRU レポートでは合理化に関する検討の一環として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の技術的成立性を検討している。結果として、地層処分低レベル放射性廃棄物の処分場と高レベル放射性廃棄物処分場の間に離間距離を設けることによって、硝酸塩などの相互影響を避けられる見通しを示している。

第2次 TRU レポート以降、併置処分の安全性に対する硝酸イオンの影響を評価することを目的とし、さらに研究が進められている。処分環境における硝酸イオンの鉱物学的な影響に伴う変遷および微生物影響に伴う変遷が試験結果に基づきモデル化され、化学反応-物質輸送計算コードへの実装と試解析が行われている（JAEA、2012）。また、高レベル放射性廃棄物処分への硝酸塩影響を想定し、高レベル放射性廃棄物処分の放射性核種の溶解

度および収着分配係数の設定が進められている (JAEA, 2012)。今後、硝酸塩影響評価システムのプロトタイプの作成が予定されており、同システムを用いた硝酸塩影響下での線量評価と離隔距離の評価が期待されている (JAEA, 2012)。

一方、3.2 節で記述したように、代替技術として廃液中に含まれる高濃度の硝酸塩を分離除去するためベンチスケールの試験装置で技術の開発も進められている (JAEA, 2012)。

(2) 両立性

地層処分低レベル放射性廃棄物の廃棄体グループ 3 の I-129 については、TRU レベル 3 報告書において、幅広い地質環境を考慮した代替ケースにおいて、諸外国で採用されている安全基準 (100~300 $\mu\text{Sv/y}$) に相当する線量が発生することが示されている。TRU レベル 3 報告書において実施されている感度解析などの結果から、廃棄体グループ 3 の I-129 に関しては、天然バリア中での収着遅延が期待できないため、移行中の減衰がほとんど見込めないことが述べられている。そのため、I-129 に対する頑健性を向上させるための対策は、人工バリアからの核種放出の抑制となる。TRU レベル 3 報告書では、I-129 の人工バリアからの放出を抑制するための効果的な手段として、ベントナイトの敷設による核種の移行抑制 (拡散による移行制限) が検討され、解析により、ベントナイトの敷設による線量低下の効果をj確認している。しかし、同時に硝酸塩環境下でのベントナイトの長期安定性については、必ずしも十分に解明されていないとしている。そのため、ベントナイト敷設により廃棄体グループ 3 の I-129 の放出を確実に抑制し、安全性を確保するため、関連する実験などを行うなどして論拠を収集、充実させる必要があると述べている。

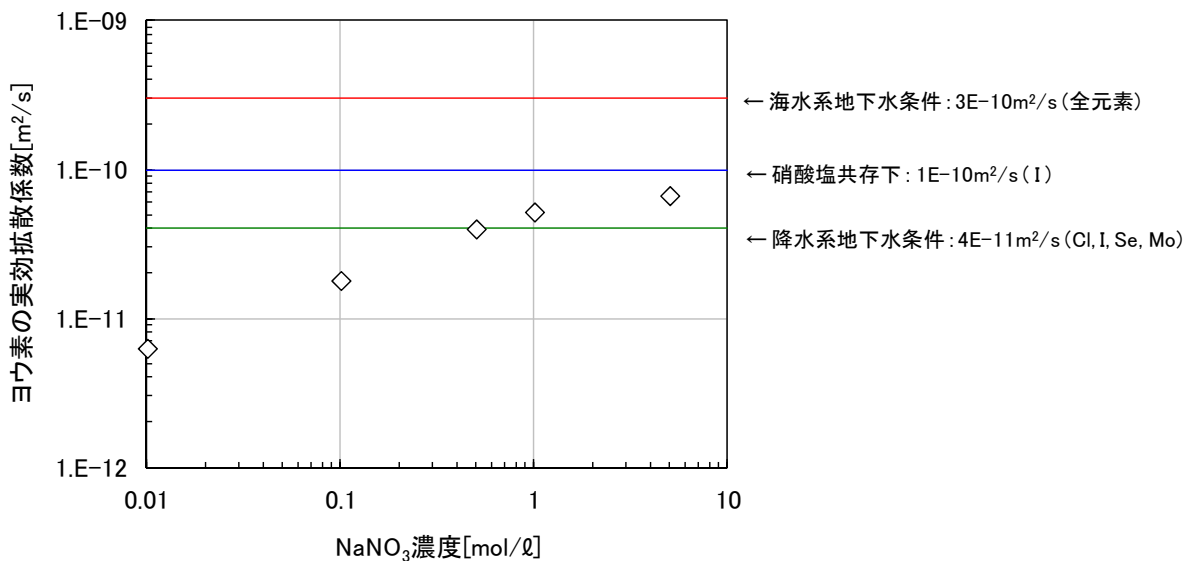
上記の課題を受けて、ここでは硝酸塩環境下でのベントナイトの長期安定性に関する解析的な検討を行い、硝酸塩の及ぼす影響を概略的に把握することとした。そのため、この検討では、硝酸塩の影響が明瞭となる硝酸塩濃度の把握を試みた。

(i) 硝酸塩環境下でのベントナイトの実効拡散係数と透水係数

緩衝材中の拡散係数に関しては、緩衝材の主要鉱物であるスメクタイトの持つ負電荷と陰イオンとの電氣的反発により有効な拡散断面積が小さくなる影響 (陰イオン排除効果) が想定される。そのため、間隙水に硝酸塩が溶解する場合、この陰イオン排除効果が緩和され、拡散係数が増加することが考えられる。

ヨウ化物イオンなどの陰イオン核種を対象として、硝酸ナトリウム濃度を0.01 mol/lから飽和濃度に近い5 mol/lへ増加させることで、実効拡散係数が数倍程度増加する結果が得られている (石寺ほか, 2004, 図 6.2.4-1参照)。図 6.2.4-1には、TRUレベル3報告書において設定したI-129の緩衝材中の実効拡散係数を緑, 赤, 青のラインで示している。この実効拡散係数は、硝酸塩影響がない降水系環境では $4.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, 硝酸塩影響がない海水系環境では $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、硝酸塩影響下の降水系環境では、石寺ほか (石寺ほか, 2004) の結果を参照して $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。図 6.2.4-1から、硝酸ナトリウム濃度が十分低い条

件（例えば、0.01 mol/l程度）であれば、降水系地下水条件の実効拡散係数として設定した $4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (緑のライン) の値が十分裕度をもった保守的な値となっていることがわかる。また、硝酸ナトリウム濃度が飽和に近い条件（例えば、5 mol/l程度）においても、硝酸塩共存下の実効拡散係数として設定した $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (青のライン) が裕度をもった保守的な値となっていることがわかる。海水系地下水条件の場合、電解質が多く含まれるため陰イオン排除効果が失われ、より大きな実効拡散係数になることが想定される。赤のラインで示される海水系地下水条件下での実効拡散係数の値 $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ は、この考えと整合的な値となっている。



第2次TRUレポートの緩衝材と同じ乾燥密度 $1.6 \text{ Mg}/\text{m}^3$ 、ケイ砂混合率30wt%の実験結果(石寺ほか, 2004)

図 6.2.4-1 ヨウ素の実効拡散係数の試験結果

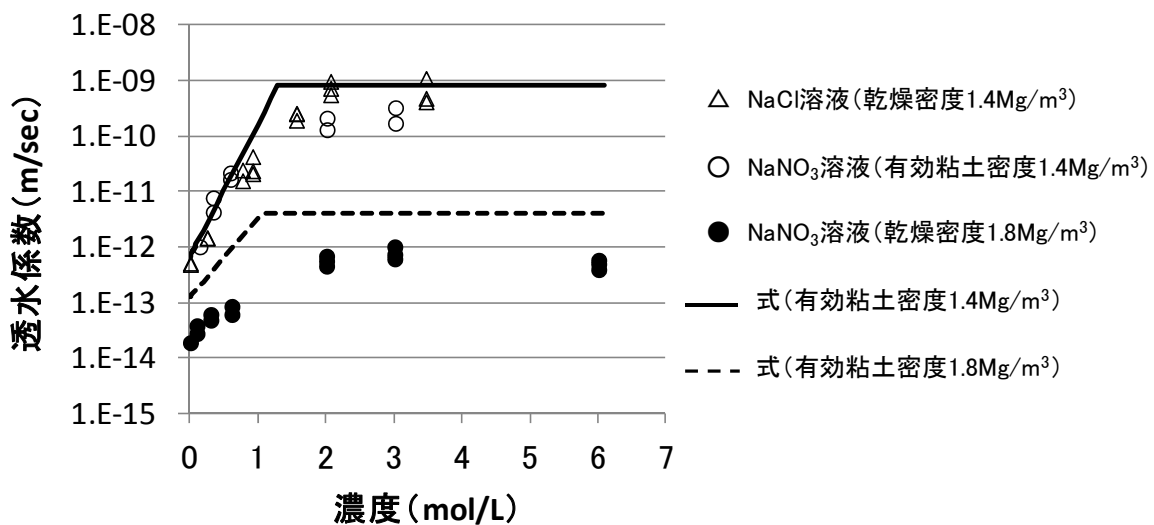
さらに、緩衝材に通水する溶液のイオン濃度が増加するにしたがい、緩衝材の透水係数が上昇することが示されている(伊藤・三原, 2005)。同報告書(伊藤・三原, 2005)では、硝酸ナトリウム以外の溶液も含めて溶液中のイオン濃度の上昇と透水係数の関係について実測値が整理され、透水係数を算出する式が提案されている。本式は第2次TRUレポートにおいて緩衝材の止水性を検討する際に用いられている式である。この式は、乾燥密度 $1.6 \text{ Mg}/\text{m}^3$ 、ケイ砂混合率30wt%の条件で求められたものであり、有効粘土密度は $1.4 \text{ Mg}/\text{m}^3$ となる。一方、硝酸ナトリウム濃度が緩衝材の透水係数に与える影響を実験的に求めた報告がある(三原・小林, 2007)。

ここでは、有効粘土密度は $1.4 \text{ Mg}/\text{m}^3$ の条件で硝酸塩以外の影響も含めて整理したイオン濃度と透水係数の関係式(伊藤・三原, 2005)と、硝酸ナトリウム濃度に対する透水係数の変化を計測した実験結果(三原・小林, 2007)との比較を図6.2.4-2に示す。

硝酸塩溶液の実験結果(有効粘土密度 $1.4 \text{ Mg}/\text{m}^3$)と式(伊藤・三原, 2005)で算出した

透水係数を比較すると、式で算出した透水係数がやや大きい透水係数となっている。

比較の結果、硝酸塩以外の影響も含めてイオン濃度との関係で整理した式（伊藤・三原，2005）で算出した透水係数は、硝酸塩濃度よりもやや大きい透水係数を算出する傾向がある。また、NaCl 溶液（図中の△）と NaNO₃ 溶液（図中の○）の実験結果を比較すると、透水係数の上昇に大きな変化は無く、塩化物イオンと硝酸イオンは透水係数の上昇に関して同等の影響を發揮することがわかる。さらに、実験結果（図中の○）から、透水係数は、硝酸ナトリウム濃度の変化に対して必ずしも線形ではなく、任意の濃度を超えると一定の値（おおよそ 1×10^{-9} m/s 程度）になることがわかる。4.1.3 (3) の結果を踏まえると、 1×10^{-9} m/s の透水係数であれば、高透水場においても拡散場は維持されると考えられる。



(*)実験結果は三原・小林 (2007)、透水係数の算出式は伊藤・三原 (2005) から引用した。△の試験はケイ砂が混合されていないため、乾燥密度 1.4Mg/m^3 は有効粘土密度 1.4Mg/m^3 で同義となる。第2次 TRU レポートの緩衝材は乾燥密度 1.6Mg/m^3 、ケイ砂混合率 30wt%であり、有効粘土密度は 1.4Mg/m^3 である。

図 6.2.4-2 硝酸塩濃度の影響に関する実験結果と透水係数算出式との比較

(ii) 硝酸塩環境下でのベントナイトの長期安定性

硝酸塩共存下でのベントナイトの長期安定性を考えるにあたり、硝酸塩が有る場合と無い場合で、ベントナイトの長期安定性に相違が生じるかどうかに着目することによって、硝酸塩影響を概略把握する。硝酸塩が無い場合においても、ベントナイトはセメント系材料から浸出する高アルカリ性溶液の影響を受けて、ベントナイトの溶解は促進される。ここでは、セメント系材料による高アルカリ性溶液の影響に加えて、硝酸塩が存在した場合に高アルカリ性溶液を上回るような溶解促進があり得るかを解析的に予察検討することとする。

(a) 高イオン濃度における活量補正

第2次TRUレポートの処分概念では、硝酸塩を含有する廃棄物は廃棄体グループ3に分類

されている。発生本数と硝酸塩量から算出すると処分する硝酸塩の総量は硝酸ナトリウム換算で 3.56×10^6 kgである。処分坑道としてcase2-0の廃棄体グループ3の堆積岩の坑道を想定すると¹⁶、坑道長は792.6 mであり、坑道1 m当たりの硝酸ナトリウムの量は約 4.5×10^3 kgとなる。さらに坑道1 m当たりの充填材の体積を廃棄体パッケージの外周から求め、充填材の間隙割合を0.19（第2次TRUレポート根拠資料集4-5のモルタルの間隙割合）とすれば、硝酸ナトリウムの平均濃度は6.1 mol/lとなる。硝酸ナトリウムの溶解度（7.9 mol/l at 298.15 K（日本化学編，2004））より僅かに低い程度である。

このような高イオン濃度では液相中のイオンの活量が増加する現象が起こる。地化学解析などによって高い硝酸塩濃度下での地化学反応を計算する場合には、ベントナイトあるいはセメント系材料の溶解沈殿反応に関連する元素イオンを網羅するように活量補正モデルおよび活量補正パラメータセットを準備する必要がある。比較的高イオン濃度の溶液に適用可能な活量補正モデルとしてSITモデル、あるいはPitzerモデルがある。ここで、SITモデルの優位な点は、必要なパラメータセットがPitzerモデルに比較して少ない点である。一方、SITモデルの不利な点は、第2次TRUレポートの緩衝材の変質解析で用いた化学反応と物質移行を解くことが可能なPHREEQC-TRANSに取り込むことができないことである。そのため、化学反応と物質移行とを連成し、間隙割合の変化を把握することはできない。これらを踏まえ、本検討では、高イオン濃度の溶液に適用可能な活量補正モデルを使用することを優先することとし、SITモデルを用いて高濃度の硝酸塩溶液における地化学解析を実施することとした。硝酸塩がモンモリロナイトの減少に大きな影響を及ぼす場合は、物質移行の考慮の有無にかかわらず、硝酸塩が無い場合と硝酸塩が有る場合で、モンモリロナイトの減少に大きな相違が発生することになる。そこで、本評価においては、化学反応と物質移行の連成は考慮できないが、SITモデルを取り込むことが可能なPHREEQCを使用し、まずは0次近似的に、硝酸塩が無い場合と硝酸塩が有る場合で、モンモリロナイトの減少に大きな相違が発生するか否かを確認することとした。

(b) 解析モデルおよび解析結果

解析モデルの体系は処分坑道の中心から支保の境界まで1次元のモデルとした（図6.2.4-3）。モンモリロナイトの溶解速度式は第2次TRUレポートと同一とし、支保、緩衝材、廃棄物混合体に当たる部分の実効拡散係数は第2次TRUレポートを参照して、以下のように設定した。支保（コンクリート）の実効拡散係数 De については、第2次TRUレポートのモルタルに対する評価式4.4.2.2-1式より算出した。

$$De = D * \varepsilon^{3.05} = 7.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$$

¹⁶ 結晶質岩に比べ、堆積岩の処分概念のほうが支保工の分だけ緩衝材の周囲のセメント系材料の量が多い。ここでは、セメント系材料の影響で緩衝材の変質が進みやすいと考えられる堆積岩の処分概念に対して硝酸塩の影響を加味して緩衝材の変質を評価することとした。

ここで、

D^* : 自由水中の拡散係数 (C_s の値 $4.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ を使用)

ε : 間隙割合 (0.13 : 第2次 TRU レポート表 4.4.2.2-1 より)

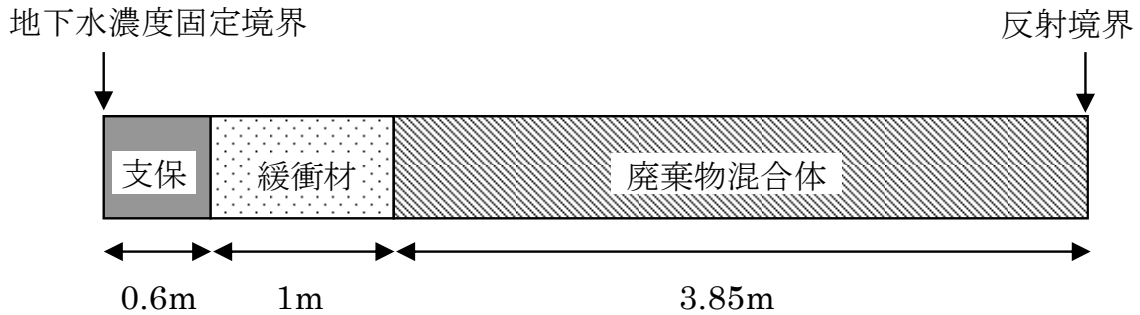


図 6.2.4-3 解析体系

緩衝材の実効拡散係数 De は、第2次 TRU レポートの 4.4.2.2-11 式より算出した。

$$De = 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n = 1.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$n = 2.02 f_b^{0.13} + 1$$

$$n = 2.02 f_s^{0.13} + 1$$

$$f_s = 0.48 f_b$$

ここで、

ε : 間隙割合 (0.4)

f_b : ベントナイトの混合割合 (70wt%)

f_s : モンモリロナイトの含有割合 (48wt%)

廃棄物混合体については、モルタルを想定し、実効拡散係数を第2次 TRU レポートのモルタルに対する評価式 4.4.2.2-1 式より算出した。

$$De = D^* \varepsilon^{3.05} = 2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}$$

ここで、

D^* : 自由水中の拡散係数 (C_s の値 $4.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ を使用)

ε : 間隙割合 (0.19 : 第2次 TRU レポート表 4.4.2.2-1 より)

これらの初期の実効拡散係数は、前述のように SIT モデルを取り込んだ PHREEQC を使用したことから、緩衝材中のモンモリロナイトの溶解を計算している期間中、一定であり、間隙割合の変化に伴う実効拡散係数の変化は考慮できない。

セメント系材料から供給される高アルカリ性溶液と緩衝材が接触し、化学反応を起こす場合、二次的な沈殿物の生成に伴い間隙割合は減少して実効拡散係数が減少することが考

えられる。あるいは、初生鉱物の溶解に伴い、間隙割合が増加し、実効拡散係数が増大することも考えられる。本検討では、初生鉱物および二次的な生成物の量の変化による実効拡散係数の変化を取り込まないモデルを用いて、初期の廃棄物混合体中の硝酸塩濃度が 6.1 mol/l の場合と 0 mol/l の場合の解析を行った。

図 6.2.4-4 に縦軸にモンモリロナイトの濃度、横軸に緩衝材厚さを取った場合の解析結果を示す。ここで、縦軸のモンモリロナイト濃度は、間隙水 1L に対して固相として存在するモンモリロナイトのモル量を表わす。

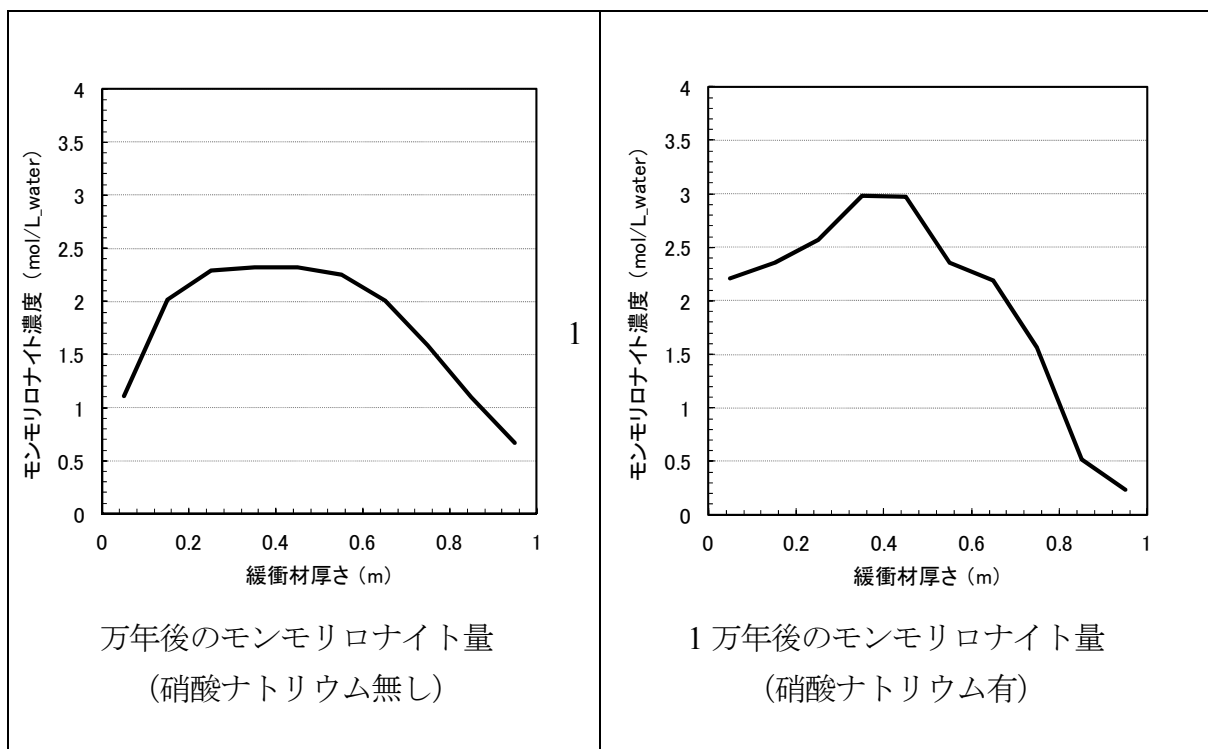


図 6.2.4-4 緩衝材中のモンモリロナイトの残存量 (1 万年後)

硝酸塩が無い場合には、緩衝材の両脇に存在するセメント系材料（支保および廃棄物混合体）からの高アルカリ性溶液によってモンモリロナイトが溶解する。硝酸塩が有る場合には、高アルカリ性溶液に加え、硝酸ナトリウムの影響が加味されている。緩衝材の廃棄物混合体に近い境界部分では、モンモリロナイトの溶解が激しい。一方、緩衝材の中央付近では、硝酸ナトリウムが存在している場合にモンモリロナイトの溶解が抑制されている。これは、硝酸ナトリウムが存在した場合に、高濃度の硝酸ナトリウムが供給される界面近傍においてモンモリロナイトが激しく溶解し、二次鉱物が生成することにより溶存成分が消費され、その結果中央付近のモンモリロナイトの溶解が抑制されたと推測される。硝酸ナトリウムの存在によって極端に溶解が促進される結果とはならなかったが、モンモリロナイトの溶解挙動は異なる挙動を示した。

これらの予察的検討は、間隙割合の変化と実効拡散係数の連成を取り込まない解析コード PHREEQC を用いて、高塩濃度に適用可能な活量補正モデルを用い、硝酸塩がある場合と無い場合の解析を意味する。今後は、間隙割合と実効拡散係数の連成と高イオン濃度での活量補正モデルとを扱える解析コードを利用した検討が必要と思われる。また、高濃度の硝酸ナトリウムによる影響は、二次鉱物の種類へ与える影響、初生鉱物の溶解速度の変化へ与える影響、緩衝材中の実効拡散係数の増加へ与える影響など複数の現象の結果として捉える必要があると考えられる。したがって実現象としての高濃度の硝酸ナトリウム共存下での緩衝材の溶解あるいは二次鉱物の種類と沈殿に関する挙動などを試験で把握する検討が有効と思われる。

6.2.5 ガス

本項では、処分場に含まれる成分・材料に由来する非放射性ガスおよび放射性廃棄物に由来する放射性ガスの発生と移行について検討する。

(1) ガス発生

処分場からのガス発生の要因としては、下記が挙げられる。

- 金属廃棄物あるいは構造部材の腐食
- 有機物の微生物分解（例：セルロース）
- 水および有機物の放射線分解（廃棄体およびその近傍）
- 放射性壊変（例：ラドン）

腐食速度や微生物分解は個々の材料だけではなく処分場環境にも依存する。したがって、処分場からのガス発生を定量的に評価するためには、廃棄物・容器・充填材・緩衝材の物量とそれらが収納される処分坑道の環境条件に関する情報が必要である。最終廃棄体（廃棄物と廃棄体パッケージを含む）の特性に応じて、処分坑道は合理的に設計されることから、ガス発生の評価も最終廃棄体／処分坑道ごとに評価する。

(i) 条件設定

処分坑道に含まれる各種材料・放射性物質のインベントリ、廃棄体・廃棄体パッケージ・処分坑道の形状などは、基本的にこれまでに記述されたデータを用いている。

(a) 材料の密度、間隙率、厚さ

各種材料の密度および間隙率設定を表 6.2.5-1 に示す。また、完全なモルタル充填は困難であるとの判断から、各廃棄体容器および廃棄体パッケージには10%の上部空隙が存在するものとした。

また、金属材料（廃棄物、容器、廃棄体パッケージ）の厚さについては表 6.2.5-2 のように設定した。

表 6.2.5-1 各材料の密度および間隙率

材料	密度 [kg/m ³]	間隙率 [-]
セメント	2,580 (wet)	0.19
緩衝材 ¹⁷	1,600 (dry)	0.40
ホウケイ酸ガラス	—	0.0
ビチューメン	—	0.0
水	1,000	0.0
ステンレス	7,870	0.0
炭素鋼	7,870	0.0
ジルカロイ	6,440	0.0
インコネル	8,500	0.0
セルロース	1,500	0.0

表 6.2.5-2 金属材料の厚さ

部位	名称	厚さ [mm]	備考
廃棄物	エンドピース (SUS)	18.4	第2次 TRU レポートに同じ
	ハル (zircaloy)	0.57	第2次 TRU レポートに同じ
	Gr.4 の金属廃棄物	1.6	200 l ドラムに合わせた
容器	キャニスタ	5	実状に即して設定
	200 l ドラム	1.6	
	角型容器	2	
	インナーバレル	2	
	ハル缶	2	
廃棄体パッケージ	— (炭素鋼)	100	閉じ込め機能 (500 年)

(b) 処分坑道内の状況

発熱性廃棄体を収納する廃棄体グループ 2 および廃棄体グループ 4 (発熱性) の処分坑道では、先述の温度の経時変化の曲線を簡略化して、ガス発生モデルにおける温度依存項に反映した。

閉鎖後初期の時点では処分坑道内の空隙部分には酸素が存在するとした。これが消費されるまでは酸化性条件下での腐食 (および有機物分解) が進行する。

セメントおよび緩衝材は初期状態で飽和度 50% の状態にあり、空隙は大気で満たされているとした。しかしながら、酸素を消費する部位から離れているため、緩衝材空隙は、全体の酸素量の算定にあたっては勘定に入れていない。

¹⁷ バントナイト 70%+砂 30%

初期の水分量について、セメントは初期状態で飽和度50%の状態にあるとして算出した。廃棄体グループ2のように固型化材あるいは充填材にセメントを使用しない場合は、廃棄体パッケージあたり0.01 kgの水分が初期状態で含まれていると仮定した。

地下水流入率は、閉鎖直後は大きく、その後減少して定常状態となる。ここでは、Hoch (2007)と同様の手法によりガス発生量評価における地下水流入率は経時的に変化しないデータとして設定した。この場合、地下水流入率は、閉鎖後初期では過小評価、長期的には過大評価となっている。

(c) ガス生成プロセス

・金属腐食

金属材料の腐食率については、Smart and Hoch (2010)に基づいて、表 6.2.5-3 のように設定した。酸化条件と還元条件とで腐食率の設定値が異なるとともに、酸化条件では温度依存性を考慮して、下記の Arrhenius 式から定まる補正係数 $f(T)$ を基準状態 (20°C) の値に乗じて腐食率を設定する。

$$f(T) = \exp\left[-\frac{E_c}{8.314472}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293.15}\right)\right]$$

E_c : 活性化エネルギー

T : 絶対温度

インコネルについてはジルカロイのインベントリに含めて算出した。一般にインコネルの腐食率は低いため、この仮定がガス発生量評価に大きな影響を及ぼすことはないものと考えられる。

表 6.2.5-3 金属材料の腐食率設定

腐食モード	炭素鋼	ステンレス	ジルカロイ
酸化条件	0.1 [$\mu\text{m}/\text{y}$] (20°C)	0.02 [$\mu\text{m}/\text{y}$] (20°C)	ゼロと仮定
高 pH	$E_c = 19$ [kJ/mol]	$E_c = 50$ [kJ/mol]	
還元条件	0.005 [$\mu\text{m}/\text{y}$]	0.01 [$\mu\text{m}/\text{y}$]*2	0.001 [$\mu\text{m}/\text{y}$] *1
高 pH	温度依存性なし	温度依存性なし	温度依存性なし

*1: 原環センター(2012b)では、 $1.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{y}$ あるいは $4.63 \times 10^{-6} \mu\text{m}/\text{y}$

*2: 原環センター(2012b)では、 $2.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{y}$

・セルロースの分解

セルロースを含む廃棄体グループ 2 に対して、セルロースの分解モデル (Swift and Rodwell, 2006) を適用する。分解抑制ステップとセルロースからグルコースへの分解を仮定して、溶解速度として $4.5 \times 10^{-3} [1/\text{y}]$ を用いる。

・放射線分解

放射線分解における G 値（放射線分解の収量：放射線エネルギー100eV の吸収あたりの生成化学種の個数）の設定を表 6.2.5-4 に示す。水およびセルロースに関するデータ設定は Hoch et al. (2008) による。比較のために、第 2 次 TRU レポートでの設定値を括弧内に示す¹⁸。

本検討で示している G 値は純粋な水に対するものである。実際には、廃棄体は種々の物質の混合物であり、エネルギーの分配を考慮した実効的な G 値は、純粋な水に対するものより小さくなる (Anderson et al., 2000)。今回の評価では水の質量分率（廃棄体種類に依存）は最大で 0.24 であるので、実効的な G 値としては α 線では <0.38 [molecules/100eV]、β γ 線では <0.12 [molecules/100eV] に相当する。

ビチューメンに関する G 値のうち、α 線については USDOE (2002) より低吸収線量でのデータ (20°C~70°C の範囲では温度依存性なし) を、β 線および γ 線については Phillips and Burnay (1991) より 0.2~0.4 の範囲のうち最も保守的なデータを、それぞれ設定した。比較のために、第 2 次 TRU レポートでの設定値を括弧内に示す。

表 6.2.5-4 放射線分解における G 値の設定

対象	G 値 [molecules/100eV]		
	α 線	β 線	γ 線
水	1.6 (0.5)	0.5 (0.05)	0.5 (0.05)
セルロース	1.4	6	3.2
ビチューメン	1.3 (0.72)	0.4 (0.26)	0.4 (0.26)

注：括弧内は第 2 次 TRU レポートでの設定

10 cm の炭素鋼からなる容器壁を持つ廃棄体パッケージについては、容器壁外側での吸収線量の算出にあたって γ 線の減衰を考慮した。質量減衰係数として 0.1 [cm²/g] を用いると 10 cm の炭素鋼外側での減衰は <0.001 となる。そこで 10 cm の容器壁を透過した γ 線のエネルギーについては補正係数として 0.001 を用いた。

(ii) 評価結果

ガス発生評価の対象となる廃棄体/処分坑道の組み合わせは、以下に示すように 8 通りある。【廃棄体グループ 1, 廃棄体グループ 2 (ハル圧縮体), 廃棄体グループ 2 (CSD-B, CSD-C), 廃棄体グループ 3, 廃棄体グループ 4 低発熱性 (200 ℓドラム), 廃棄体グループ

¹⁸ 水の質量分率などを考慮した実効的な G 値としては、α 線では <0.38 [molecules/100eV]、β γ 線では <0.12 [molecules/100eV] に相当する。

4 低発熱性（角型容器）、廃棄体グループ 4 発熱性（200 l ドラム）、廃棄体グループ 4 発熱性（ハル缶、インナーバレル】。各組み合わせに含まれるガス発生対象の材料を表 6.2.5-5 に整理する。ガス発生評価は、これらの廃棄体／処分坑道の組み合わせごとに実施される。

表 6.2.5-5 ガス発生対象の整理

対象	廃棄体	廃棄体パッケージ	その他の人工バリア
Gr.1	廃棄物：廃銀吸着材 固型化材：セメント 容器：200 l ドラム（CS, SUS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：CS 緩衝材：ベントナイト
Gr.2 坑道（大）	廃棄物：ハル圧縮体 固型化材：なし 容器：キャニスタ（SUS）	充填材：なし（支持格子） パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：CS 緩衝材：ベントナイト
Gr.2 坑道（小）	廃棄物：CSD-B, CSD-C 固型化材：なし 容器：キャニスタ（SUS）	充填材：なし（支持格子） パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：CS 緩衝材：ベントナイト
Gr.3	廃棄物：濃縮廃液 固型化材：セメント、ピチューメン 容器：200 l ドラム（CS, SUS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：なし 緩衝材：なし
Gr.4L 坑道（大）	廃棄物：雑固体 固型化材：セメント 容器：200 l ドラム（CS, SUS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：なし 緩衝材：なし
Gr.4L 坑道（小）	廃棄物：雑固体 固型化材：セメント 容器：角型容器（CS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：なし 緩衝材：なし
Gr.4H 坑道（大）	廃棄物：雑固体 固型化材：セメント 容器：200 l ドラム（CS, SUS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：なし 緩衝材：なし
Gr.4H 坑道（小）	廃棄物：雑固体 固型化材：セメント 容器：ハル缶、インナーバレル（SUS）	充填材：セメント パッケージ：CS（10 cm）	埋戻材：セメント 構造躯体：なし 緩衝材：なし

廃棄体グループ 1 におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-1 に示す。

バルクのガス発生速度は閉鎖後 8 万年まで約 0.6 [mol/m/y] でほぼ一定となった。主要な発生要因は容器やパッケージなどの金属材料の還元条件下での腐食である。水の放射線分解による水素発生への寄与は極めて小さかった。閉鎖後しばらくの間は、酸化性条件下で酸素消費型の腐食が継続し、この間はガスを生成しない。パッケージの外側では酸素の消費が相対的に早いため、外側では内側よりも早い時期にガス発生が開始する。

500 年の閉じ込め期間中はパッケージ内部に地下水が外側から浸入することはないが、充填材のセメントに含有される水分が還元条件下での金属腐食のソースとなる。初期水分

量は 500 年分の腐食を維持するのに十分な量であるので、500 年分閉じ込められたとしても金属腐食によるガス発生速度は変わらない。

バルクガスの発生速度は 8 万年以降、いくつかのステップを経て減少してゆく。ステンレスと炭素鋼の腐食速度の相違、各部材の評価上の厚さの相違によって、完全に消費されるのに要する時間が異なってくる。炭素鋼パッケージは 10 cm と厚いため、100 万年経過後でも約 0.2 [mol/m/y] のガス発生速度を維持している。実際には、モデルで仮定しているように均一に腐食するとは限らないので、ガス発生速度もステップ状に低下するよりはスムーズな曲線になることが予想される。

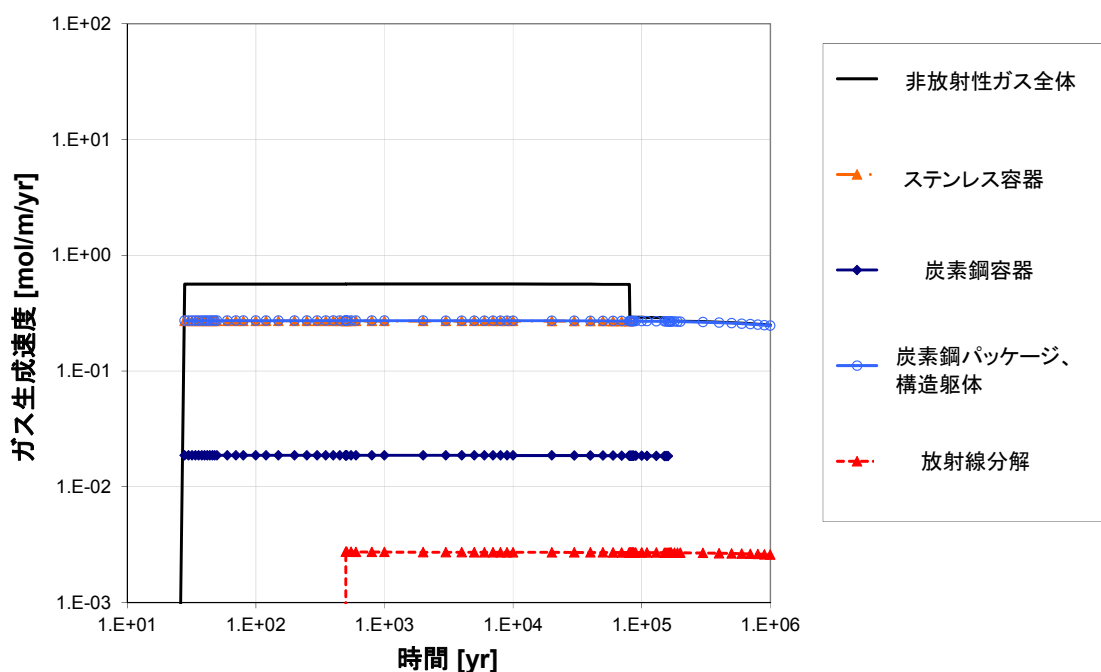


図 6.2.5-1 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 1

廃棄体グループ 2 (ハル圧縮体) におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-2 に示す。

廃棄体グループ 2 の処分坑道では、種々のガス生成機構が様々なタイミングで関与するため、その挙動は複雑である。廃棄体グループ 1 と比較すれば、500 年の閉じ込めが重要な影響を及ぼしており、また 500 年の時点で廃棄体グループ 1 の約 100 倍となる約 20 [mol/m/y] の鋭いピークが生じている。

廃棄体パッケージ内には充填材 (セメント) はなく、大きなボイドが存在するが、500 年までは実質的に地下水の供給はない。しかしながら、初期状態で名目上少量の水がパッケージ内に存在する仮定となっている。閉鎖後酸素が残存している期間中のガス発生は (少量存在する) セルロースの放射線分解によるものが主となっている。その後還元条件下での腐食が始まる。これはまずパッケージの外側から始まり、数年遅れてパッケージ内でも

生起する。還元条件下での腐食が始まるとガス発生速度が上昇し、約 3 [mol/m/y]にまで達する。しかしながら、この腐食反応（およびセルロース分解）は、パッケージ内の少量の水分を 1 年のうちに消費するためすぐに終息して、500 年まではパッケージ外側表面で継続する還元腐食によって 0.2 [mol/m/y]未満のレベルで推移する。

500 年の時点でパッケージが開口し、内部に地下水が浸入すると仮定する。母岩の水理特性と処分坑道の幾何形状の条件下では、地下水の流入は急速であり、数年のうちにはパッケージ内のボイドは完全に地下水で満たされる。多量に存在する地下水のために、この段階での主要なガス発生機構は放射線分解となる。放射能の減衰とともに放射線分解の寄与は減少し、約 1 万年後には腐食による寄与と同程度となり、以降 10 万年程度までは腐食が支配的なガス生成機構となる。

さらに長い期間では、異なる金属部材が完全に腐食・消失することでガス発生速度はステップ状に減少してゆく。薄いハル片（ジルカロイ）が最初に消失し、エンドピース（ステンレス）がこれに続く。その後は、10 cm の炭素鋼パッケージが 100 万年まで主要なガス生成機構として継続する。10 万年頃にセルロースの分解も生じている。バルクのガス発生速度への寄与は小さいものの、この機構で生成するのは（金属腐食の H_2 とは異なり） CH_4 や CO_2 であるため、ガスの種類が問題となる場合には重要である。

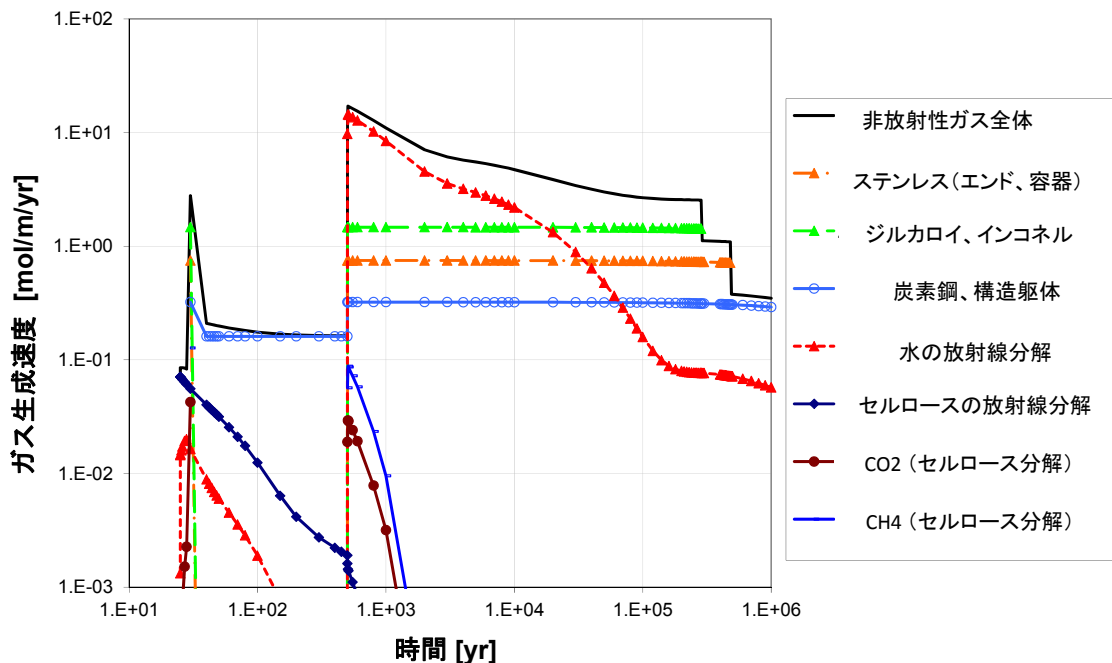


図 6.2.5-2 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 2（ハル圧縮体）

廃棄体グループ 2（CSD-B/C）におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-3 に示す。

ハル圧縮体の場合と比較すると、コンクリートに含まれる水分が初期状態で存在しており、廃棄体パッケージ内部でも腐食が初期から進行することとなる。

初期から 10 万年までは水の放射線分解による水素発生が卓越する。初期の段階（～27 年）で初めのピーク（～6 mol/m/y）を生じ核種の崩壊とともに水素ガス発生も減少する。

500 年で容器が開口すると地下水が廃棄体パッケージ内にも浸入し、第 2 のピークを生じている（～20 mol/m/y）。

廃棄体パッケージ内に存在する水は金属腐食が進行するのに十分な量であり、500 年前後でも、放射線分解によるガス発生に比較すれば少ないながらも、ほぼ一定のガス発生量を生じている。

核種の減衰に伴い 10 万年後以降は金属腐食によるガス発生が卓越する。以降は金属の種類に応じてステップ的に減少してゆく。薄いハル片（ジルカロイ）が最初に消失し、エンドピース（ステンレス）、ステンレス容器がこれに続く。100 万年までには、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食が主要なガス生成機構となる。

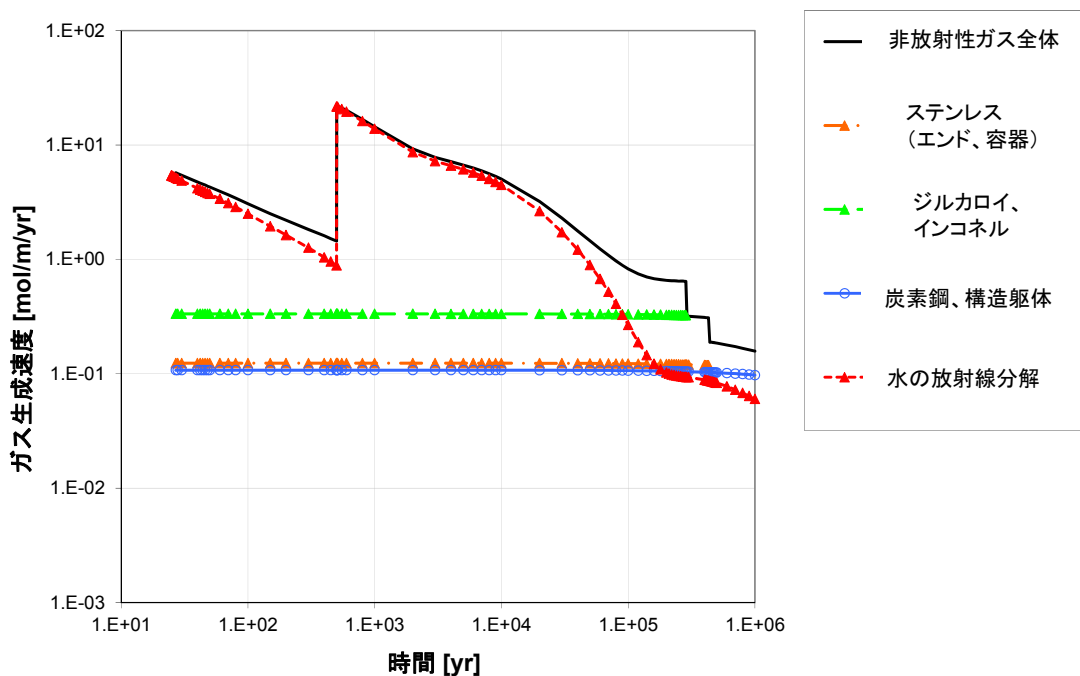


図 6.2.5-3 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr 2 (CSD-B/C)

廃棄体グループ 3 におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-4 に示す。

固型化材として用いられるセメント系材料の水分が初期状態で存在しており、腐食が初期から進行する。

1,000 年までは、ビチューメンおよび水の放射線分解によるガス発生が卓越する。娘孫核種の蓄積により、ガス発生速度はわずかながら増大し、約 60 年にピークとなる。500 年に容器が開口し、廃棄体パッケージ内の空隙が水で満たされることで水の放射線分解によるガス発生速度がピークとなる。その後、核種の減衰とともに放射線分解によるガス発生も減少する。

廃棄体パッケージ内に存在する水は金属腐食が進行するのに十分な量であり、500年前後でも、ほぼ一定のガス発生量を生じている。

核種の減衰に伴い1万年後以降には、ビチューメンおよび水の放射線分解に代わり、金属腐食によるガス発生が卓越する。ステンレス容器は8万年までには完全に腐食し、炭素鋼容器がこれに続く(16万年)。100万年以降は、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食が主要なガス生成機構となる。

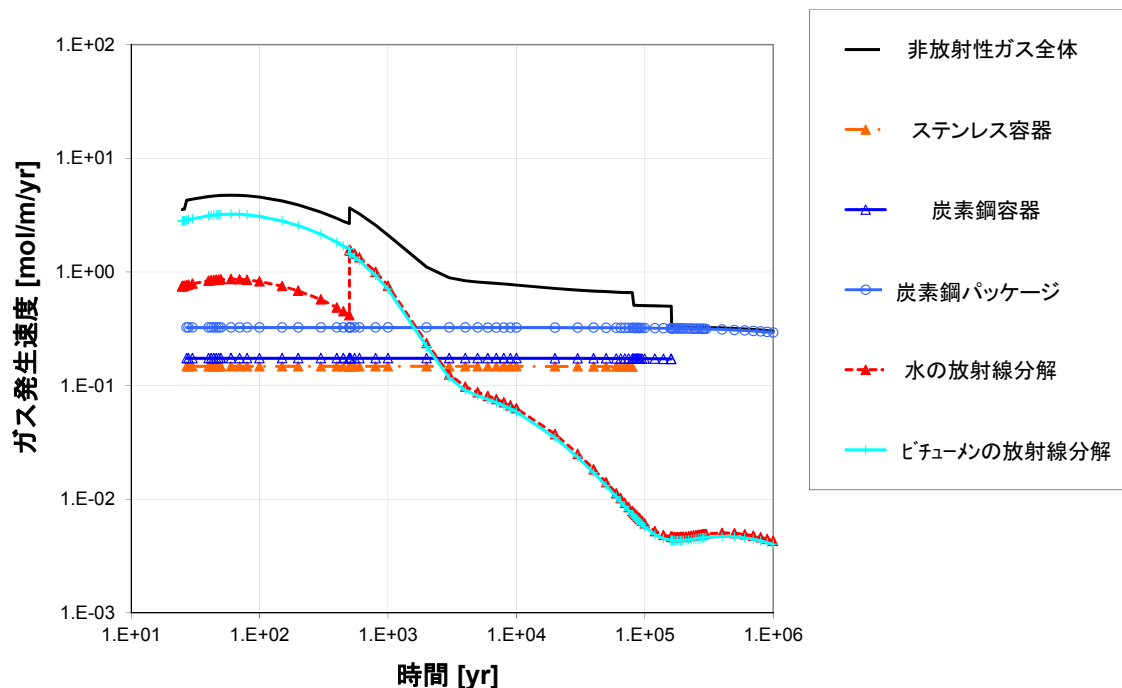


図 6.2.5-4 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr3

廃棄体グループ4 発熱性 (200 l ドラム) におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-5 に示す。

廃棄物あるいは固型化材として用いられるセメント系材料の水分が初期状態で存在しており、放射線分解および腐食が初期から進行する。

初期の200年までは、水の放射線分解によるガス発生が卓越するが、核種の減衰とともに減少し、200年～500年の間は炭素鋼(廃棄物および容器)の腐食によるガス発生が卓越する。

500年に容器が開口し、廃棄体パッケージ内の空隙が水で満たされることで水の放射線分解によるガス発生速度が再び最大値を与えるが、やはり、核種の減衰とともに放射線分解によるガス発生も減少する。

長期的には、金属腐食によるガス発生が卓越する。1万年頃には約6 mol/m/yで最大となった炭素鋼(廃棄物および容器)も約16万年には完全に腐食し、以降は、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食が主要なガス生成機構となる。

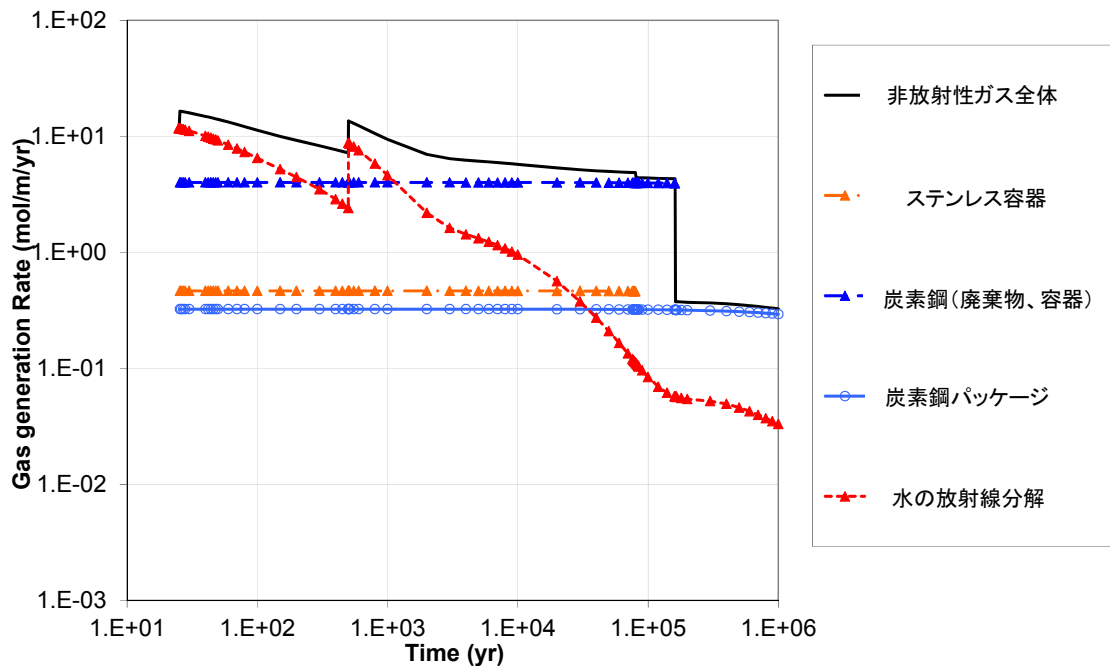


図 6.2.5-5 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 発熱性 (200 ℓドラム)

廃棄体グループ4 発熱性 (ハル缶, インナーバレル) におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-6 に示す。

廃棄物あるいは固型化材として用いられるセメント系材料の水分が初期状態で存在しており、放射線分解および腐食が初期から進行する。

1 万年までは、水の放射線分解によるガス発生が卓越する。25 年で最初のピーク (～14 mol/m/y) を迎えるが、核種の減衰とともに減少する。

500 年に容器が開口し、廃棄体パッケージ内の空隙が水で満たされることで水の放射線分解によるガス発生速度が再び最大値を与える (～4 mol/m/y) が、やはり、核種の減衰とともに放射線分解によるガス発生も減少する。

その間も、ステンレス容器および炭素鋼廃棄体パッケージの腐食が平行して進行している。廃棄体パッケージ内に存在する水は金属腐食が進行するのに十分な量であり、500 年前後も、ほぼ一定のガス発生量を生じている。

3 万年以降は、金属腐食によるガス発生が放射線分解によるガス発生を卓越し、ガス発生速度は金属の消失に伴ってステップ状に変化する。10 万年頃にはステンレス容器は完全に消失し、以降は、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食と水の放射線分解が主要なガス生成機構となる。

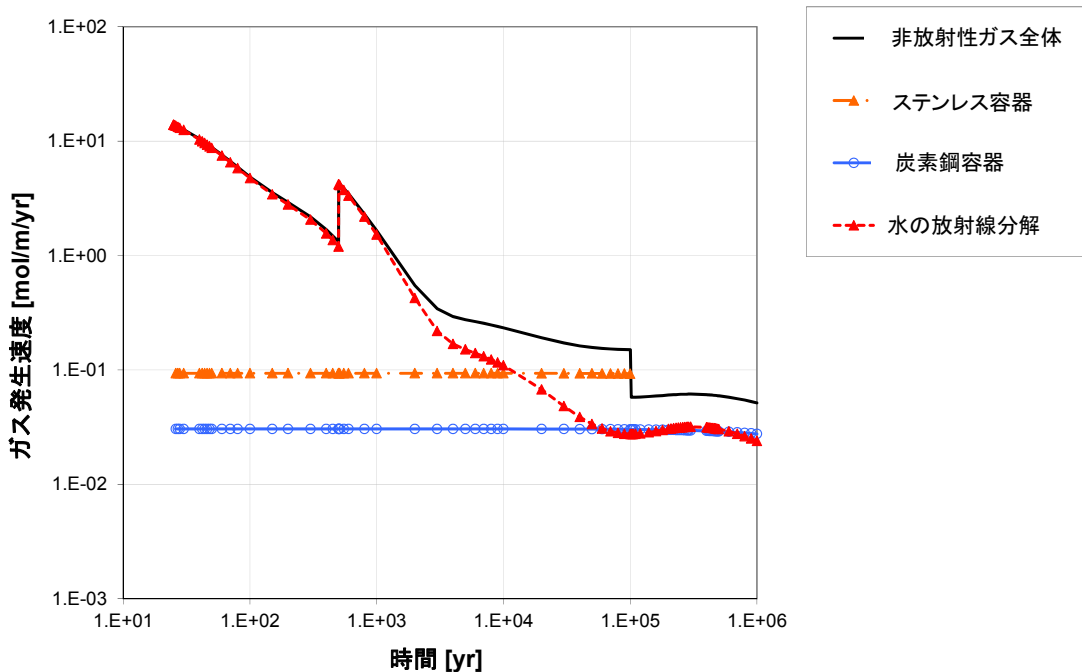


図 6.2.5-6 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 発熱性（丸缶，インナーバル）

廃棄体グループ4低発熱性（200ℓドラム）におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-7 に示す。

廃棄物あるいは固型化材として用いられるセメント系材料の水分が初期状態で存在しており、放射線分解および腐食が初期から進行する。

500年の容器開口までは、水の放射線分解、炭素鋼（廃棄物および容器）、ステンレス（廃棄物および容器）の全てが同様の程度でガス発生に寄与している。25年のピーク（～9 mol/m/y）は水の放射線分解によるものであるが、核種の減衰とともに放射線分解による寄与も減少してゆく。

500年に容器が開口し、廃棄体パッケージ内の空隙が水で満たされることで水の放射線分解によるガス発生速度が再び最大値を与える（～10 mol/m/y）が、やはり、核種の減衰とともに放射線分解によるガス発生も減少する。

その間も、金属腐食が平行して進行している。廃棄体パッケージ内に存在する水は金属腐食が進行するのに十分な量であり、500年前後でも、ほぼ一定のガス発生量を生じている。

2,000年以降は、放射線分解の寄与は減少して、ガス発生の主要な機構はステンレス（廃棄物および容器）および炭素鋼（廃棄物および容器）の腐食となる。以降、ガス発生速度は金属の消失に伴ってステップ状に変化し、ステンレス（廃棄物および容器）は8万年に、炭素鋼（廃棄物および容器）は16万年に消失する。これ以降は、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食が主要なガス生成機構となる。

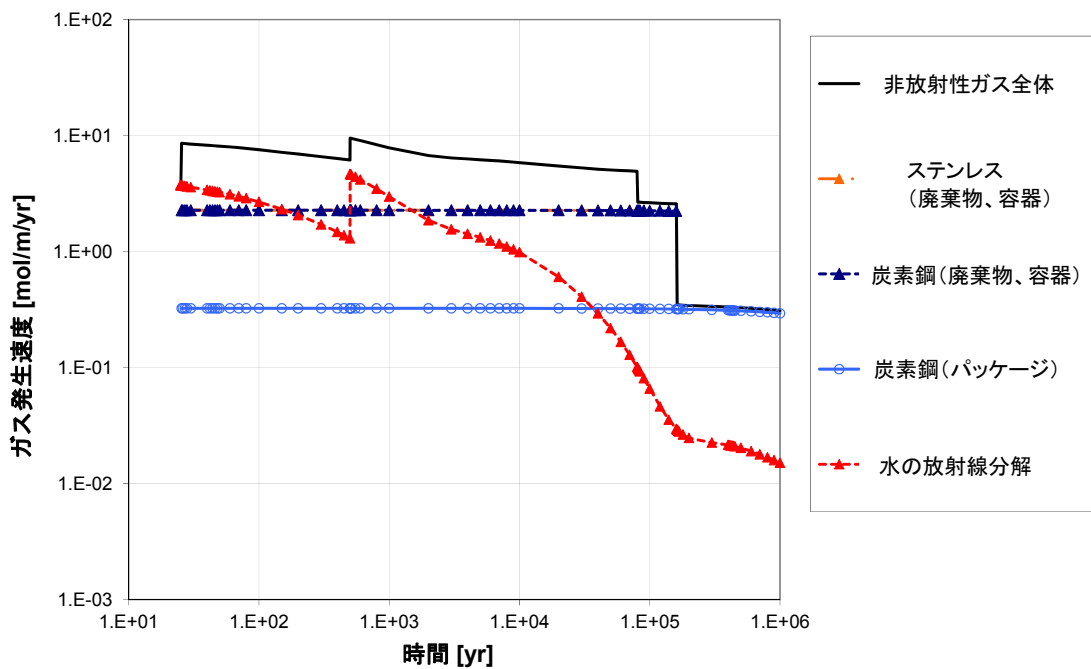


図 6.2.5-7 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 低発熱性 (200 ℓドラム)

廃棄体グループ4低発熱性（角型容器）におけるガス発生の評価結果として、バルクのガス発生速度を図 6.2.5-8 に示す。

廃棄物あるいは固型化材として用いられるセメント系材料の水分が初期状態で存在しており、放射線分解および腐食が初期から進行する。

500 年の容器開口までは、炭素鋼容器、ステンレス廃棄物の腐食が支配的である。他の廃棄体グループ4の категорииの廃棄物とは異なり、この廃棄体グループ4低発熱性（角型容器）の核種インベントリは少ないため、水の放射線分解によるガス発生は評価期間を通じてわずかである。廃棄体パッケージ内に存在する水は金属腐食が進行するのに十分な量であり、500 年前後でも、ほぼ一定のガス発生量を生じている。

500 年の容器開口で廃棄体パッケージ内に地下水が流入することで水の放射線分解による寄与も上昇するが、バルクのガス発生量に影響するには至らない。

長期的には、ガス発生速度は金属の消失に伴ってステップ状に変化し、ステンレス廃棄物は8万年に、炭素鋼容器は20万年に、それぞれ完全に消失する。これ以降は、炭素鋼の廃棄体パッケージの腐食が主要なガス生成機構となる。

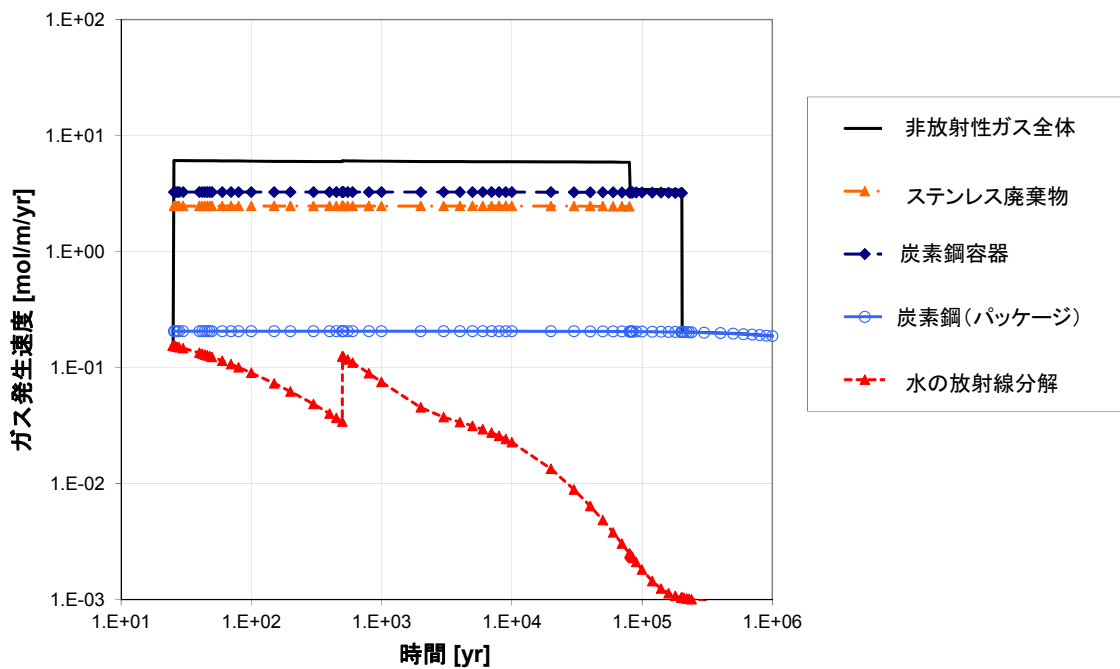


図 6.2.5-8 バルクのガス発生速度：廃棄体 Gr4 低発熱性（角型容器）

(iii) 考察

廃棄体グループ1および廃棄体グループ4低発熱性（角型容器）を除くいずれのケースでも、廃棄体パッケージが開口する500年の時点で、水の放射線分解による水素ガス発生が他のガス発生メカニズムに比較して最も卓越する結果となった¹⁹。この評価結果に対して、以下のように考察する。

- ・ 短半減期核種の十分な減衰という視点から、安全評価における閉じ込め期間500年が導出されていた。しかしながら、熱解析で示唆されているように、当該廃棄物の核種組成・初期インベントリからは、閉鎖後500年という期間は、温度・放射線場の過渡的な変遷が終息するには必ずしも十分な期間ではない。潜在的には熱的にも放射線学的にも周囲に影響を及ぼしうるエネルギーを有していることに留意する必要がある。
- ・ 廃棄体グループ2のパッケージ設計では、その内部でキャニスタは支持格子によって支持されており、充填物はない構造となっている。したがって、500年後にこれが開口した場合、廃棄体パッケージ内のボイド領域に多量の水が存在するため、これが放射線分解による水素ガス発生を助長している側面がある。水和水や間隙水を嫌ってセメント系充填材の利用を忌避したが、ボイド領域を埋めるための代替的な充填材（例えば、砂など）を使用することで、水の放射線分解による影響を緩和することが期待できる。

¹⁹ 廃棄体グループ3ではピッチューメンの放射線分解を含む。

(2) ガス移行

ここでは、ガス発生評価の結果を受けて、ガス移行における評価・解析を行う。ここでの検討成果は、安全評価シナリオのうちガスシナリオの評価において必要となる、下記項目に関する基本情報²⁰を提供するものとなる。

- ガスの蓄圧による人工バリアの力学的損傷の可能性
- ガスによる汚染水の排水
- 放射性ガスの影響

(i) 評価方法

ガス移行解析では、処分場レイアウトを考慮して廃棄体グループ1、廃棄体グループ2、廃棄体グループ4の処分坑道を垂直に横断する鉛直断面（処分坑道14本）と、廃棄体グループ3の処分坑道を垂直に横断する鉛直断面（処分坑道3本）の2断面でモデル化した。図 6.2.5-9 に廃棄体グループ1、廃棄体グループ2、廃棄体グループ4の処分坑道を含む鉛直断面での解析グリッドを示す。結晶質岩では深度1,000 m、堆積岩では深度500 mである。また、図 6.2.5-10 に廃棄体グループ2の処分坑道近傍での解析グリッドを示す。

前項にて実施した各処分坑道からのガス発生速度を境界条件として、上記2D断面でのガス移行解析を行った。計算ツールには、TOUGH2v2.0 (Pruess, 1987 ; Pruess, 1991 ; Pruess et al., 1999) を用いた。

²⁰ 先述の処分施設の再冠水に関する検討もここでのガス移行解析結果に基づいている。

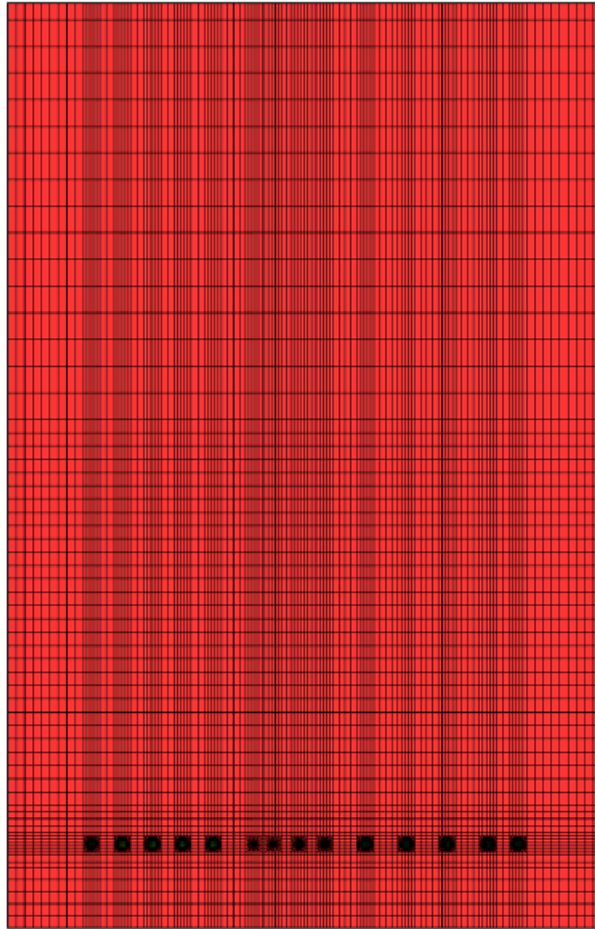
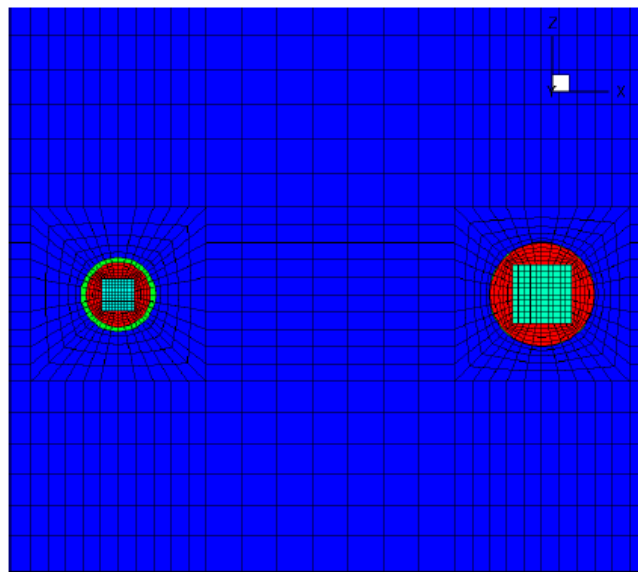


図 6.2.5-9 Gr1, Gr2, Gr4 の処分坑道を含む鉛直断面の解析グリッド



(CSD-B/C)

(JAEA/JNFL ハル)

図 6.2.5-10 Gr2 の処分坑道近傍の解析グリッド

(ii) 支配方程式

処分場まわりでの質量およびエネルギーの保存則は次式にて記述される。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} \vec{F}^k \cdot \vec{n} d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \quad 6.2.5-(1)式$$

V_n : 対象とする流動系の任意の領域 [m^3]

Γ_n : 領域の閉局面境界 [m^2]

M^k : 単位体積当たりの質量あるいはエネルギー ($k=1, \dots, NK$ は物質 (水, N_2 , O_2 , H_2 など), $k=NK+1$ は熱) [kg/m^3] or [J/m^3]

\vec{F}^k : 質量あるいはエネルギーフラックス

\vec{n} : 平面要素 Γ_n から空間要素 V_n の内側への法線ベクトル [-]

q^k : 消滅あるいは湧き出し項 [kg/s] or [J/s]

t : 時間 [s]

質量の蓄積項は流体相 β (=ガス, 液体) ごとの和として表現される。

$$M^k = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad 6.2.5-(2)式$$

ϕ : 間隙率 [-]

S_{β} : β 相の飽和度 (β 相で占められる間隙の割合) [-]

ρ_{β} : β 相の密度 [kg/m^3]

X_{β}^k : β 相中の物質 k の質量分率 [-]

同様に, 熱の蓄積項は, 次式で表現される。

$$M^{NK+1} = (1-\phi) \rho_R c_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad 6.2.5-(3)式$$

ρ_R : 岩の間隙率 [-]

c_R : 岩の比熱 [$J/kg/K$]

T : 温度 [K]

u_{β} : β 相の比内部エネルギー [J/kg]

質量フラックスは, 移流項と分散項から構成される。

$$\vec{F}^k = \vec{F}^k|_{adv} + \vec{F}^k|_{dis} \quad 6.2.5-(4)式$$

移流による質量フラックスは、各相の和となる。

$$\vec{F}^k|_{adv} = \sum_{\beta} \vec{F}_{\beta} X_{\beta}^k \quad 6.2.5-(5)式$$

各相での移流フラックスは Darcy 則で与えられると仮定する。

$$\vec{F}_{\beta} = \rho_{\beta} \vec{u}_{\beta} = -\rho_{\beta} \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \vec{k} \cdot (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \vec{g}) \quad 6.2.5-(6)式$$

\vec{u}_{β} : β 相の Darcy 流速 [m/s]

$k_{r\beta}$: β 相の相対透過係数 [-]

μ_{β} : β 相の粘性 [Pa s]

\vec{k} : 絶対透過係数 [m³]

P_{β} : β 相中の流体の圧力 (基準状態の圧力と毛管圧の和 = $P + P_{c\beta}$) [Pa]

\vec{g} : 重力加速度 [N/kg]

分散による質量フラックスも、各相の和となる。

$$\vec{F}^k|_{dis} = -\sum_{\beta} \rho_{\beta} \vec{D}_{\beta}^k \nabla X_{\beta}^k \quad 6.2.5-(7)式$$

水力学的分散テンソルは、

$$\vec{D}_{\beta}^k = D_{\beta,T}^k \vec{l} + (D_{\beta,L}^k - D_{\beta,T}^k) \frac{\vec{u}_{\beta} \vec{u}_{\beta}}{u_{\beta}^2} \quad 6.2.5-(8)式$$

$D_{\beta,L}^k$: 長手方向の分散係数 [m²/s]

$D_{\beta,T}^k$: 鉛直方向の分散係数 [m²/s]

と書き表せるが、水力学的な分散はこれを無視し、分子拡散のみを取り扱うものとする。分子拡散による質量フラックスでは、分散係数を次のように変形する。

$$D_{\beta,L}^k = D_{\beta,T}^k = \phi \tau_0 \tau_{\beta} d_{\beta}^k \quad 6.2.5-(9)式$$

$\tau_0\tau_\beta$: 屈曲度。 τ_0 は多孔質媒体に、 τ_β は相の飽和度に依存する。 [-]

d_β^k : β 相中での物質kの分子拡散係数 [m^2/s]

したがって、 β 相中の物質kの拡散フラックスは次のように表現される。

$$\vec{F}_\beta^k = -\phi\tau_0\tau_\beta\rho_\beta d_\beta^k \nabla X_\beta^k \quad 6.2.5-(10)\text{式}$$

熱フラックスは、熱伝導と熱対流の和として次のように表現される。

$$\vec{F}^{NK+1} = -\lambda\nabla T + \sum_\beta \vec{F}_\beta h_\beta \quad 6.2.5-(11)\text{式}$$

λ : 熱伝導率 [$\text{J}/\text{K}/\text{m}/\text{s}$]

h_β : β 相の比エンタルピー [-]

(iii) データ設定

本項では、ガス移行解析に用いたデータ設定について記述する。

(a) データ設定

解析体系における各媒体での透過率および間隙率の設定値を表 6.2.5-6および表 6.2.5-7に示す。

表 6.2.5-6 各媒体の透過率および間隙率

媒体	透過率 [m^2]	間隙率 [-]
廃棄体領域	5×10^{-18}	別表参照
セメント	1×10^{-17}	0.19
ベントナイト	1×10^{-19}	0.40
吹き付けコンクリート	1×10^{-18}	0.19
岩 (結晶質岩)	1×10^{-17}	0.02

表 6.2.5-7 廃棄体領域の間隙率

廃棄体	間隙率	
	容器開口前 (500 年以前)	容器開口後 (500 年以降)
Gr.1, 200 ℓ ドラム	0.1472	0.2442
Gr.2, ハルエントビース	0.1228	0.3519
Gr.2, CSD-B/C	0.1066	0.2815
Gr.3, 200 ℓ ドラム	0.0650	0.1338
Gr.4H, 200 ℓ ドラム	0.0243	0.1013
Gr.4H, ハル缶, インナーバレル	0.0031	0.1137
Gr.4L, 200 ℓ ドラム	0.0650	0.1420
Gr.4L, 角型容器	0.0505	0.1482

(b) 相対透過係数と毛管圧

地質媒体に対しては、毛管圧を van Genuchten の形式で定義する (Luckner et al., 1989)。

$$P_c = P_a (S_{ew}^{-1/m} - 1)^{1-m}$$

$$S_{ef} = \frac{S_f - S_{fr}}{1 - S_{fr}} \quad (f = w, g) \quad 6.2.5-(12)式$$

P_a : みかけの入り口ガス圧力 (一定値) [Pa]

m : 毛管圧関数の形状を支配するパラメータ (間隙径分布に関係) [-]

S_{fr} : 流体相 f (水あるいはガス) の残留飽和度 [-]

結晶質岩以外では、相対透過関数はやはり van Genuchten の式を用いて、

$$k_{rw} = \sqrt{S_{ew}} \left[1 - (1 - S_{ew}^{1/m})^m \right]^2$$

$$k_{rg} = \sqrt{S_{eg}} \left[1 - (1 - S_{eg}^{1/m})^m \right]^{2m} \quad 6.2.5-(13)式$$

各媒体における、みかけの入り口ガス圧、形状パラメータおよび残留飽和度の設定を表 6.2.5-8 に示す。

表 6.2.5-8 毛管圧に関する設定

媒体	みかけの入り口ガス圧 [Pa]	形状パラメータ	残留飽和度
廃棄体領域	10 ⁶	0.333	0
セメント	10 ⁶	0.333	0
ベントナイト	3×10 ⁶	0.333	0
吹き付けコンクリート	10 ⁶	0.333	0
岩 (結晶質岩)	10 ²	0.333	0

結晶質岩では、毛管圧は小さい値が設定されているので、相対透過係数は飽和度の関数に対して線形と仮定する。

(c) 比熱と熱伝導度

各媒体の比熱、熱伝導度および粒子密度を表 6.2.5-9 に示す。

表 6.2.5-9 各媒体の比熱、熱伝導度および粒子密度

媒体	比熱 [J/kg/K]	熱伝導度 [W/m/K]	粒子密度 [kg/m ³]
廃棄体領域	970	3.7	2,850
セメント	1,050	2.6	2,500
ベントナイト	590	0.8	2,000
吹き付けコンクリート	1,050	2.6	2,500
岩 (結晶質岩)	1,000	2.8	2,700

(d) Henry 定数

初期の 500 年間は、対象とするガス (N₂, O₂, H₂ など) の逆 Henry 定数は温度の関数として次式にて表現される (Lide, 1995)。

$$k_{inv}(T) = k_{inv}(T^\ominus) \cdot \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\ominus}\right)\right] \cdot \left(\frac{T}{T^\ominus}\right)^C \quad 6.2.5-(14)式$$

k_{inv} : 逆 Henry 定数 ($k_{inv} = x_l^k / P_g^k$, x_l^k は成分 k の液相中のモル分率,

P_g^k は成分 k のガス相での分圧) [1/Pa]

T : 絶対温度 [K]

T^\ominus : 標準温度 (298.15K)

式中の、 B および C はガスの種類によって決まる定数である。

500 年以降は、処分場は定常状態となり、逆 Henry 定数は温度に依存しないパラメータとして取り扱う。

Henry 定数に関する設定を表 6.2.5-10 に示す。

表 6.2.5-10 Henry 定数

パラメータ	N ₂	O ₂	H ₂	CH ₄
逆 Henry 定数 $k_{inv}(T^\ominus)$ [1/Pa]	1.1×10^{-10}	2.3×10^{-10}	1.4×10^{-10}	3.6×10^{-10} *1
定数 B [K]	8632.13	8747.55	5528.45	—
定数 C [-]	24.7981	24.4526	16.8893	—

*1: メタンについては、温度依存性を考慮せず 45°Cでのデータを用いる。

(e) 液相での拡散係数

対象となる成分の液相中の拡散係数を表 6.2.5-11 に示す (Cussler, 1984 ; Han and Bartels, 1996)。

表 6.2.5-11 液相 298.15K での拡散係数

パラメータ	N ₂	O ₂	H ₂	CH ₄
拡散係数 [m ² /s]	1.88×10^{-9}	2.00×10^{-9}	4.50×10^{-9}	1.45×10^{-9}

液相中での拡散係数は、直接的に、そして液相の粘性を通じて温度の影響を受ける。初期の 500 年間は、次式のように表現される温度依存性を考慮する。

$$\frac{D}{\mu T} = \text{const.} \quad 6.2.5-(15)\text{式}$$

D : 拡散係数 [m²/s]

μ : 液相の粘性 [Pa s]

T : 絶対温度 [K]

500 年以降は、処分場は定常状態となり、液相の拡散係数は温度に依存しないパラメータとして取り扱う。

(f) 気相での拡散係数

Marrero and Mason (1972) は等モル混合気の拡散係数を表 6.2.5-12 のように整理している。ここで、

P : 圧力 [Pa]

P₀ : 標準状態での圧力 (=101,325 Pa)

T : 絶対温度 [K]

T₀ : 標準状態での温度 (273.15K)

表 6.2.5-12 混合気の拡散係数

等モル混合気	拡散係数の表現式
N ₂ -O ₂	$1.79 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.724}$
N ₂ -H ₂	$\frac{9.09 \times 10^{-3}}{\left\{ \ln \left(\frac{T}{3.16 \times 10^7} \right) \right\}^2} \exp \left(-\frac{2.80}{T} + \frac{1067}{T^2} \right) \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.548}$
O ₂ -H ₂	$6.92 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.732}$
空気 -H ₂	$6.68 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.750}$
N ₂ -H ₂ O	$2.09 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.072}$
O ₂ -H ₂ O	$2.11 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.072}$
空気 -H ₂ O	$2.09 \times 10^{-5} \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2.072}$

一方、TOUGH2 v2.0 では気相の拡散係数を次式にて表現する。

$$d^k = d_0^k \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^\theta \quad 6.2.5-(16)式$$

d^k : 成分 k の拡散係数 [m²/s]

d_0^k : 成分 k の標準状態における拡散係数 [m²/s]

θ : 定数 [-]

混合気での表現様式を考慮しつつ、拡散係数設定においては次のように簡略化する。

- 定数 θ は 1.75 で共通とする。
- 標準状態での拡散係数を表 6.2.5-13 のように設定する。

表 6.2.5-13 気相標準状態における拡散係数

パラメータ	N ₂	O ₂	H ₂	H ₂ O
拡散係数 [m ² /s]	1.79×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁵	6.92×10 ⁻⁵	2.09×10 ⁻⁵

(g) 屈曲度

先述の通り、拡散フラックスは多孔質媒体に依存する τ_0 と飽和度に依存する τ_β で表現される屈曲度に依存する。

結晶質岩以外の媒体では、 $\tau_0 = 0.25$ とし、飽和度に依存するファクターは飽和度そのものに等しい ($\tau_\beta = S_\beta$) と仮定する。結晶質岩では、 $\tau_0 = 0.50$ とする。

(iv) 初期条件および境界条件

モデル体系は初期条件 (t=25 年) として定常状態にあるとする。また、下記のような Dirichlet 型の境界条件をおく。

- 圧力は静水圧と動水勾配から決まる圧力差の和に等しい。
- ガス飽和度および溶存ガス濃度はゼロとする。
- 温度は地温勾配 (0.03°C/m) と深度から決まる。

評価上は、このような体系中において処分場の建設・閉鎖が瞬時に達成される。

閉鎖後、酸素や水を消費しながら廃棄体パッケージの腐食が進行し、水素や少量ながら他のガスも生成されるとともに、廃棄体の発熱も同時に進行する。これらの現象は廃棄体領域における生成/消滅項としてモデル化される。

ガス移行評価におけるバルクガス発生量を図 6.2.5-11 に示す。これはガス発生量評価結

果から、各処分坑道からの水素ガスの発生量の和（放射線分解，金属腐食，有機物の分解）を示したものである。水素ガス以外にもセルロースの微生物分解によってメタンガスが生じる可能性があるが，ガス発生量評価の項で示したように，水素ガス発生量に対して無視小レベルの発生量である。

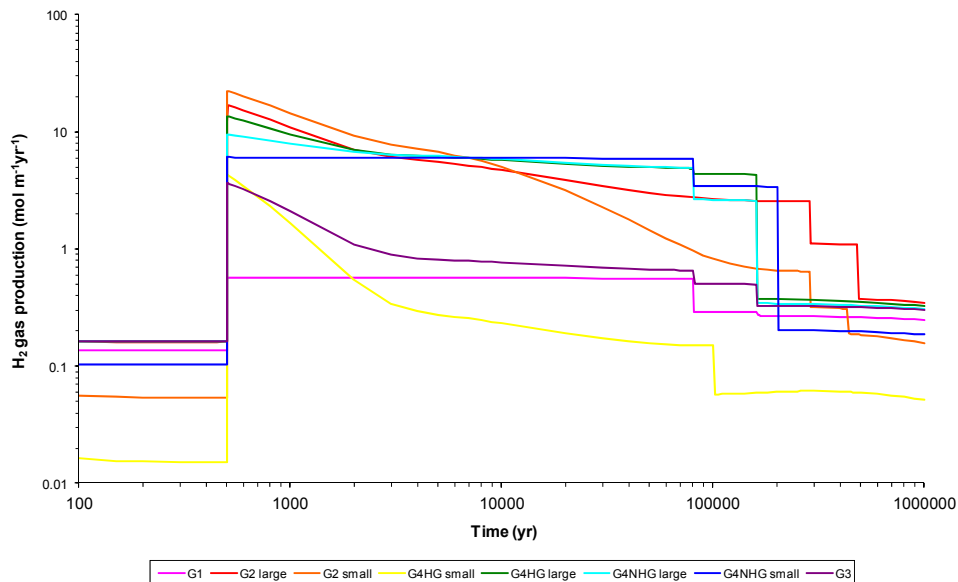


図 6.2.5-11 ガス移行評価に用いたバルク（水素）ガス発生量

ガス移行評価における放射性的 $^{14}\text{CH}_4$ ガス発生量を図 6.2.5-12 に示す。

セルロースの微生物分解によって（必ずしも放射性とは限らない）メタンガスが生じる可能性があるが，ここに示した $^{14}\text{CH}_4$ ガス発生量はそれとは独立に，放射化金属中の C-14 が全てメタンガスの形態で放出されたと仮定した場合の保守的な評価値である。

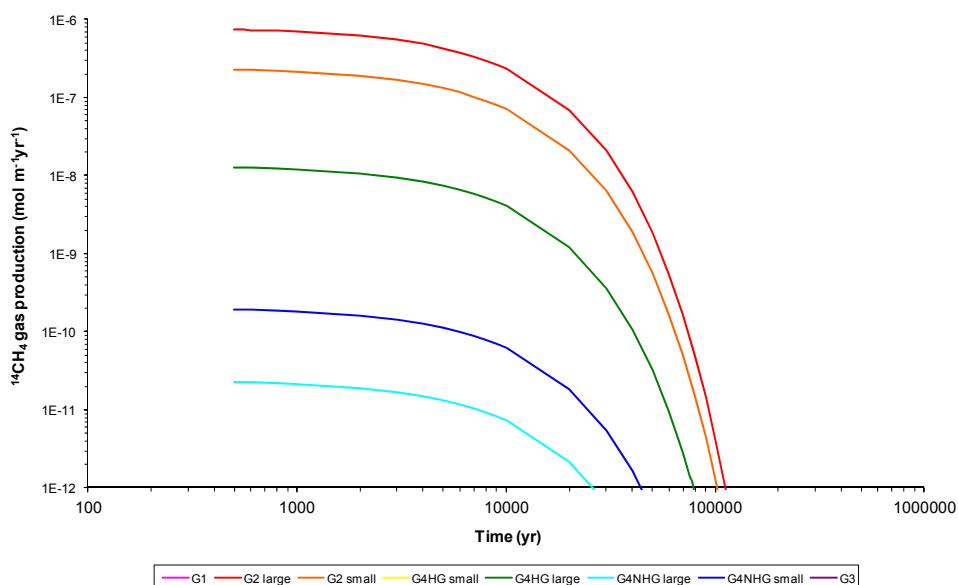


図 6.2.5-12 ガス移行評価に用いた $^{14}\text{CH}_4$ 発生量

(v) 解析結果

ガス移行解析の直接の結果として、広域の解析領域での圧力、温度、ガス飽和度の分布状態の経時変化を図 6.2.5-13～図 6.2.5-21 に示す。これらの図では、上から、(a) 圧力、(b) 温度、(c) ガス飽和度を示している。また、左側は廃棄体グループ 1、廃棄体グループ 2、廃棄体グループ 4 (発熱性) および廃棄体グループ 4 (低発熱性) の処分坑道を含む断面を、右側は廃棄体グループ 3 の処分坑道を含む断面を示している。

廃棄体グループ 4 (発熱性) および廃棄体グループ 4 (低発熱性) の処分坑道近傍の解析断面を、右側は廃棄体グループ 3 の処分坑道近傍の解析断面を示している。

図 6.2.5-13 の(a)の圧力の結果は、閉鎖時点では周辺岩盤は静水圧となっている一方で処分坑道内は 1atm となっており、処分坑道近傍では大きな圧力勾配が生じていることを示している。閉鎖後 1 年から閉鎖後 20 年までの圧力の変化を表す図 6.2.5-13～図 6.2.5-18 は、処分坑道内への地下水の流入が始まり、坑道内と周辺母岩との圧力差が解消されてゆく過程を表している。これらの結果から、閉鎖後、地下水の流入とともにガス発生が開始しているが、発生するガスによる広域的な圧力分布への影響は認められず、地下水流入による影響が支配的であることがわかる。

また、各処分坑道断面の頂上部における圧力の経時変化を図 6.2.5-22 に、温度の経時変化を図 6.2.5-23 に示す。

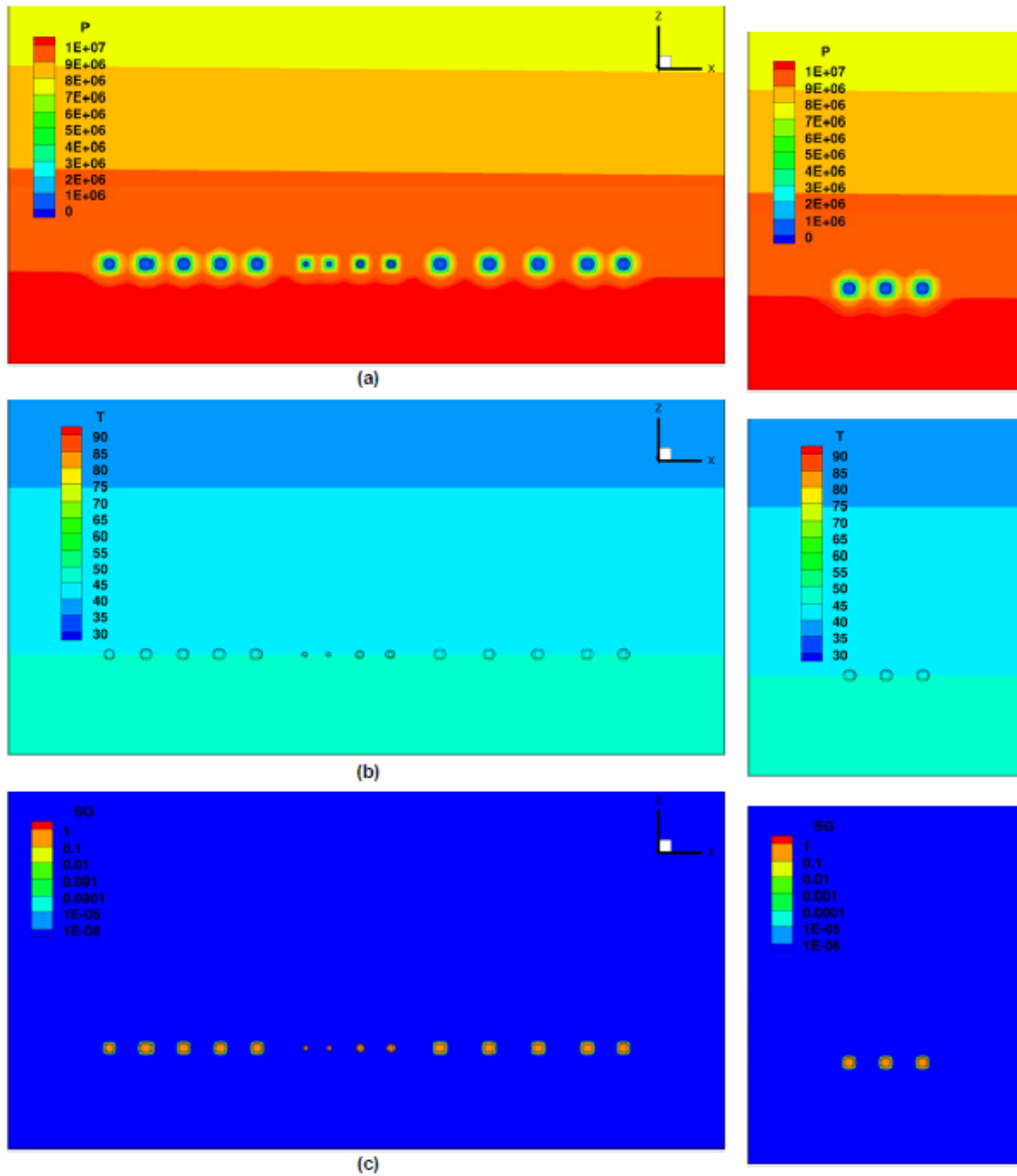


图 6.2.5-13 压力, 温度, 饱和度 (闭锁直后)

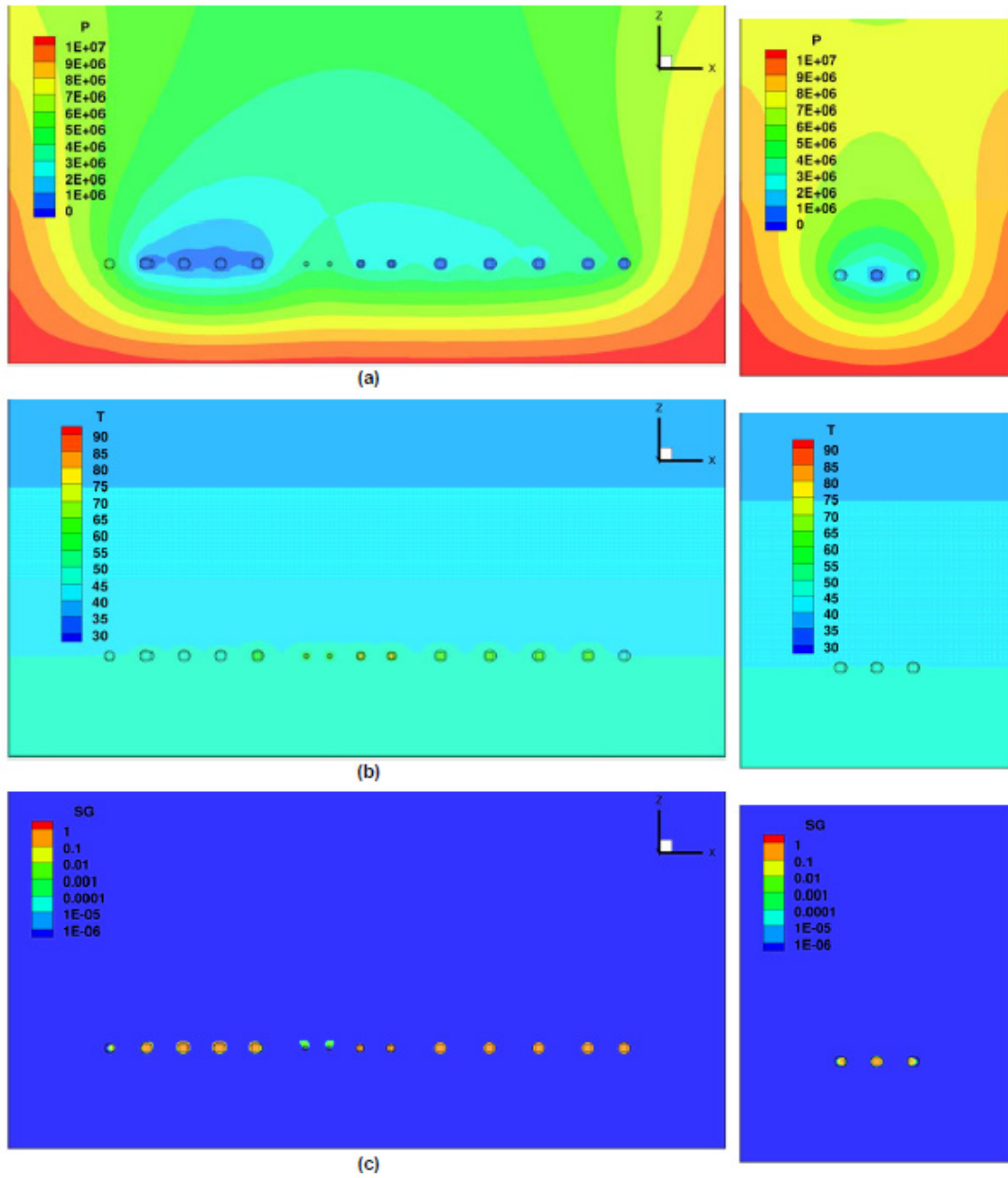


图 6.2.5-14 压力, 温度, 饱和度 (闭锁后 1 年)

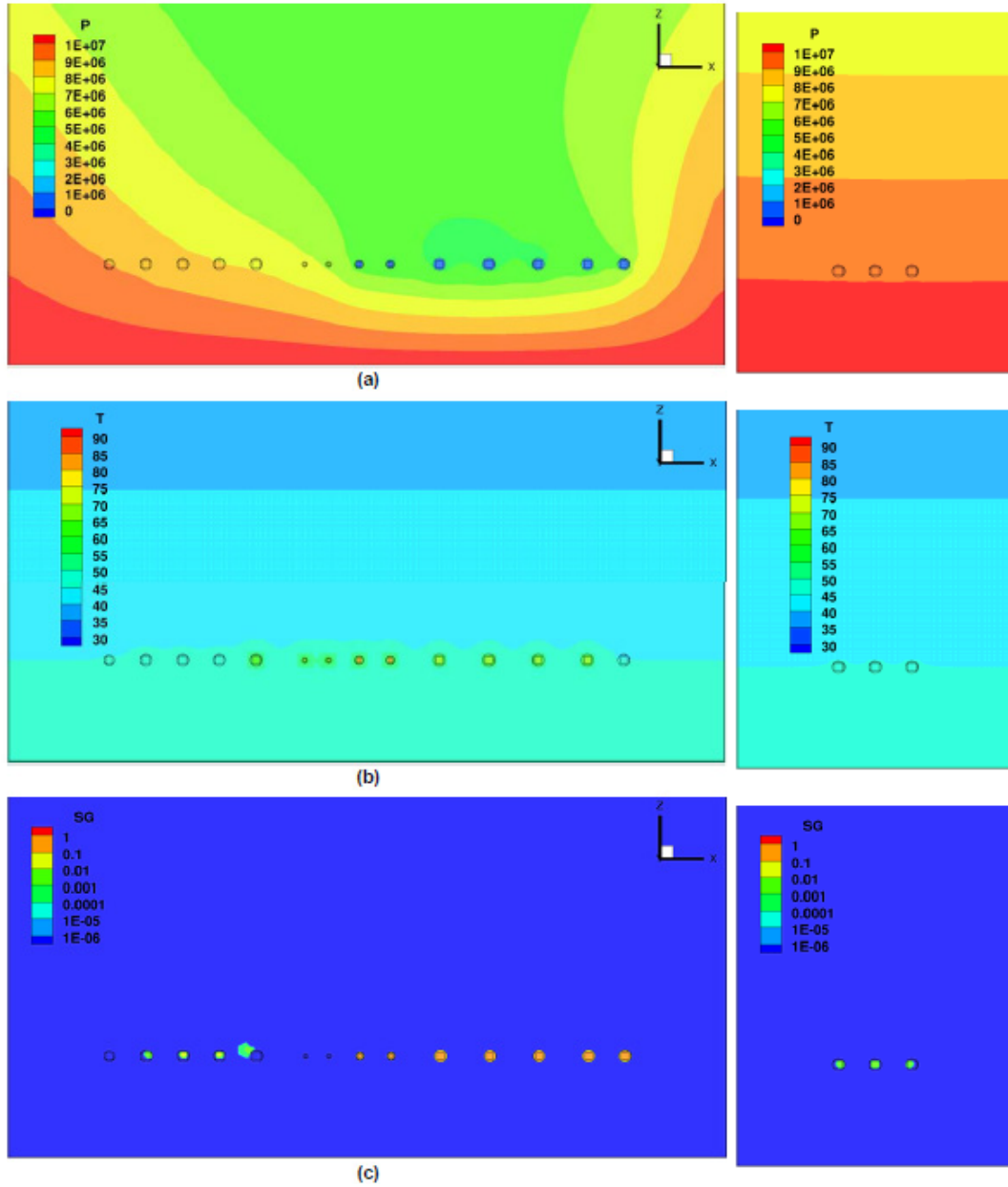


圖 6.2.5-15 壓力, 溫度, 飽和度 (閉鎖後 2 年)

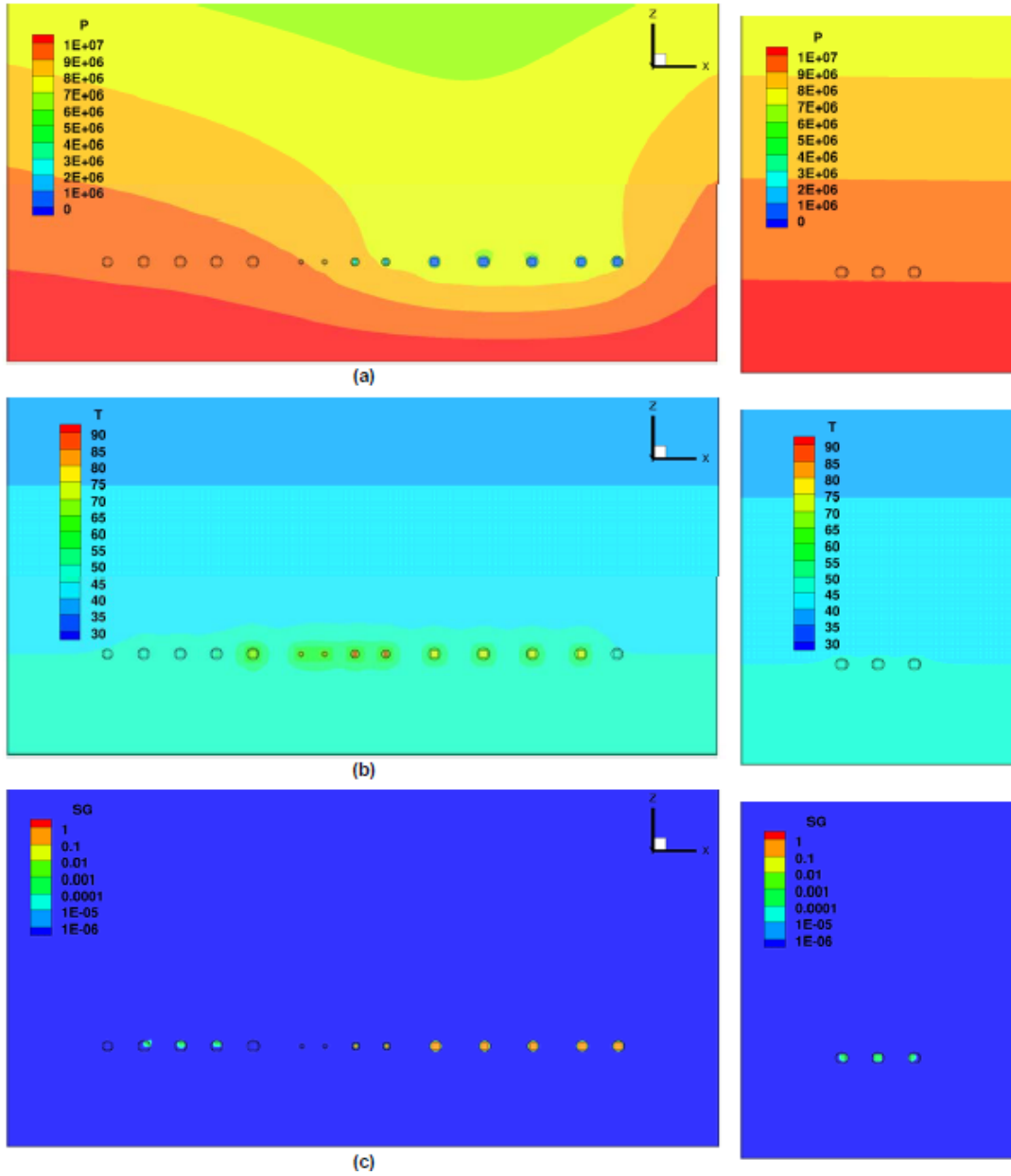


圖 6.2.5-16 壓力, 溫度, 飽和度 (閉鎖後 5 年)

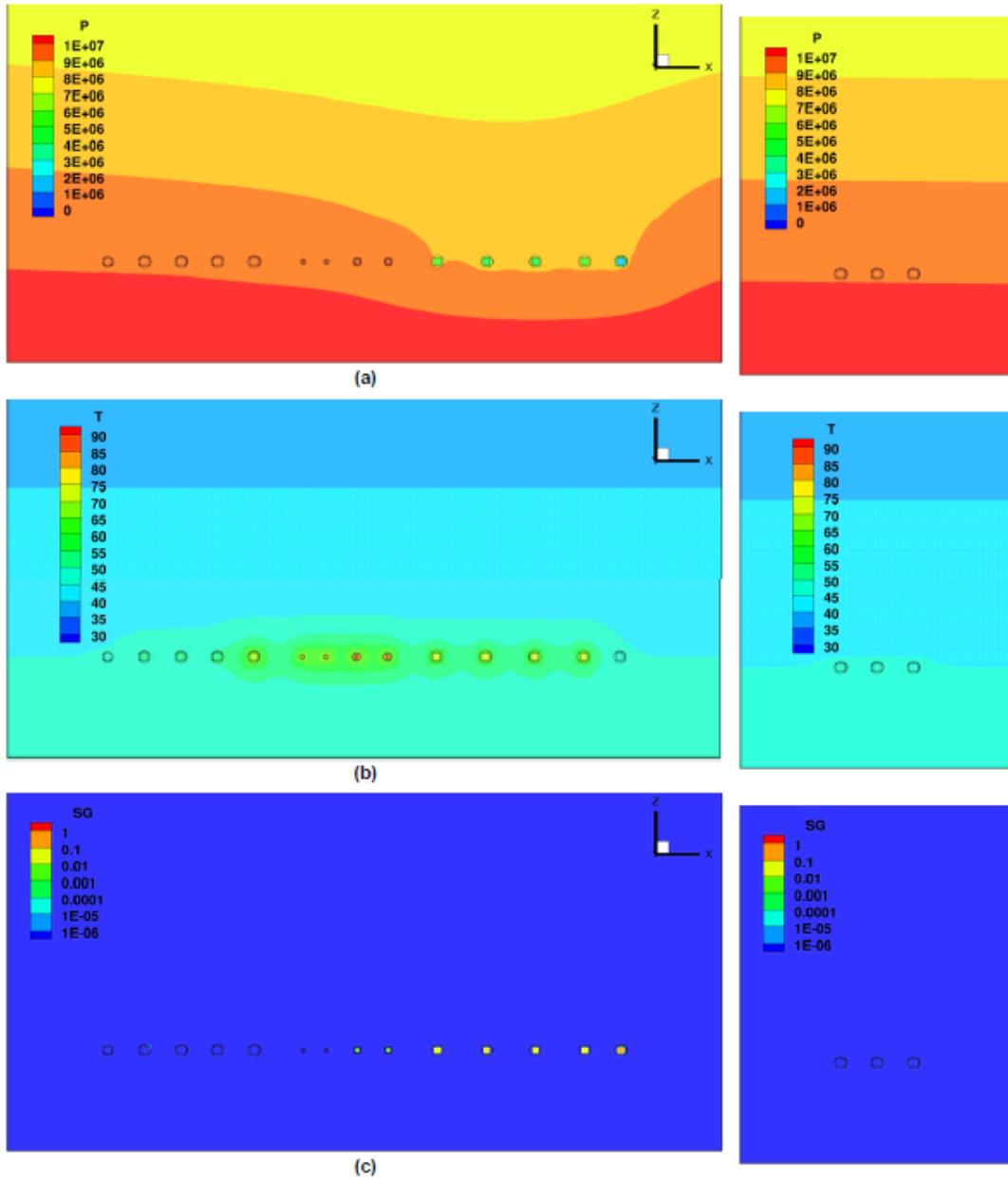


图 6.2.5-17 压力，温度，饱和度（闭锁后 10 年）

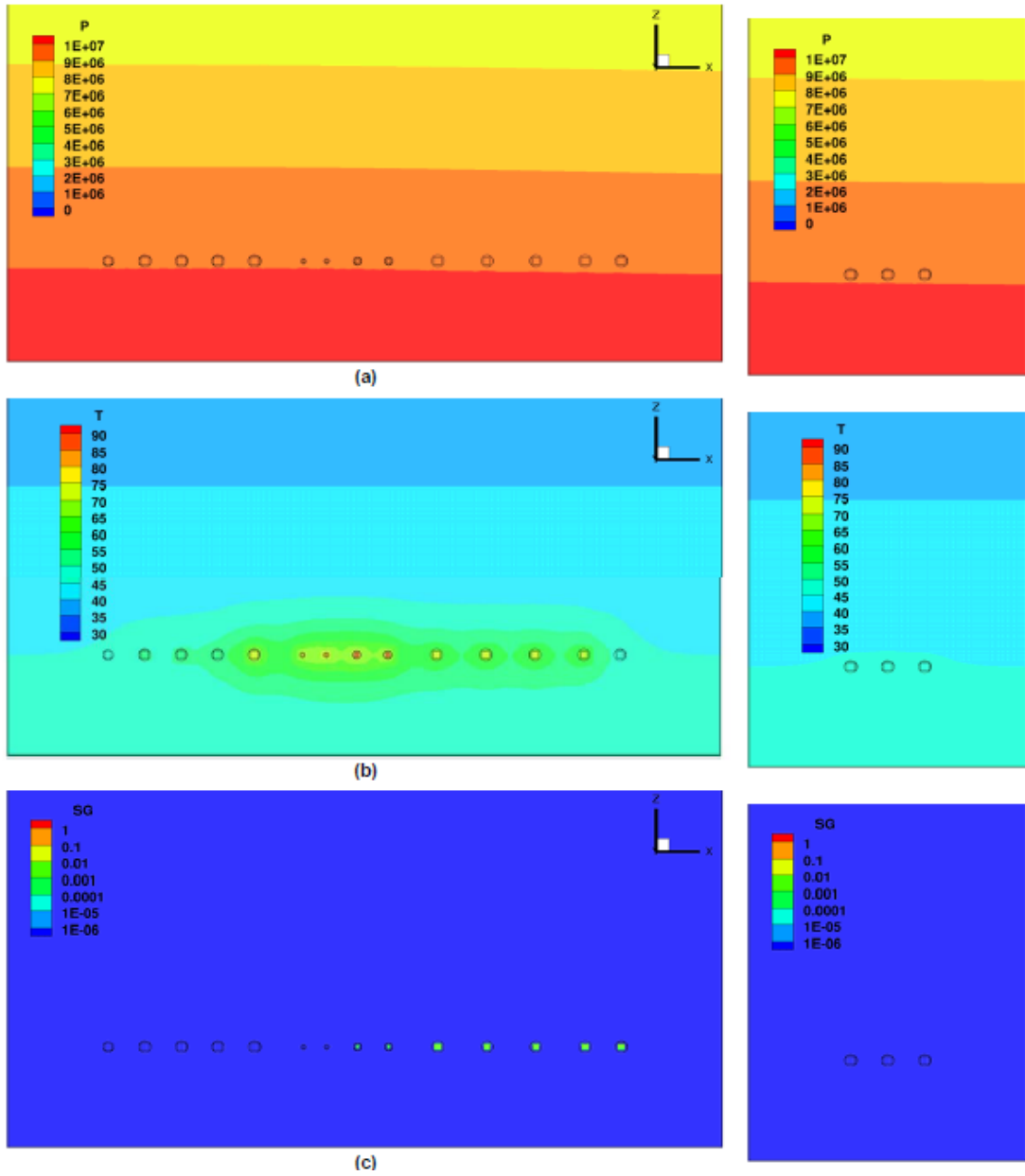


图 6.2.5-18 压力, 温度, 饱和度 (闭锁后 20 年)

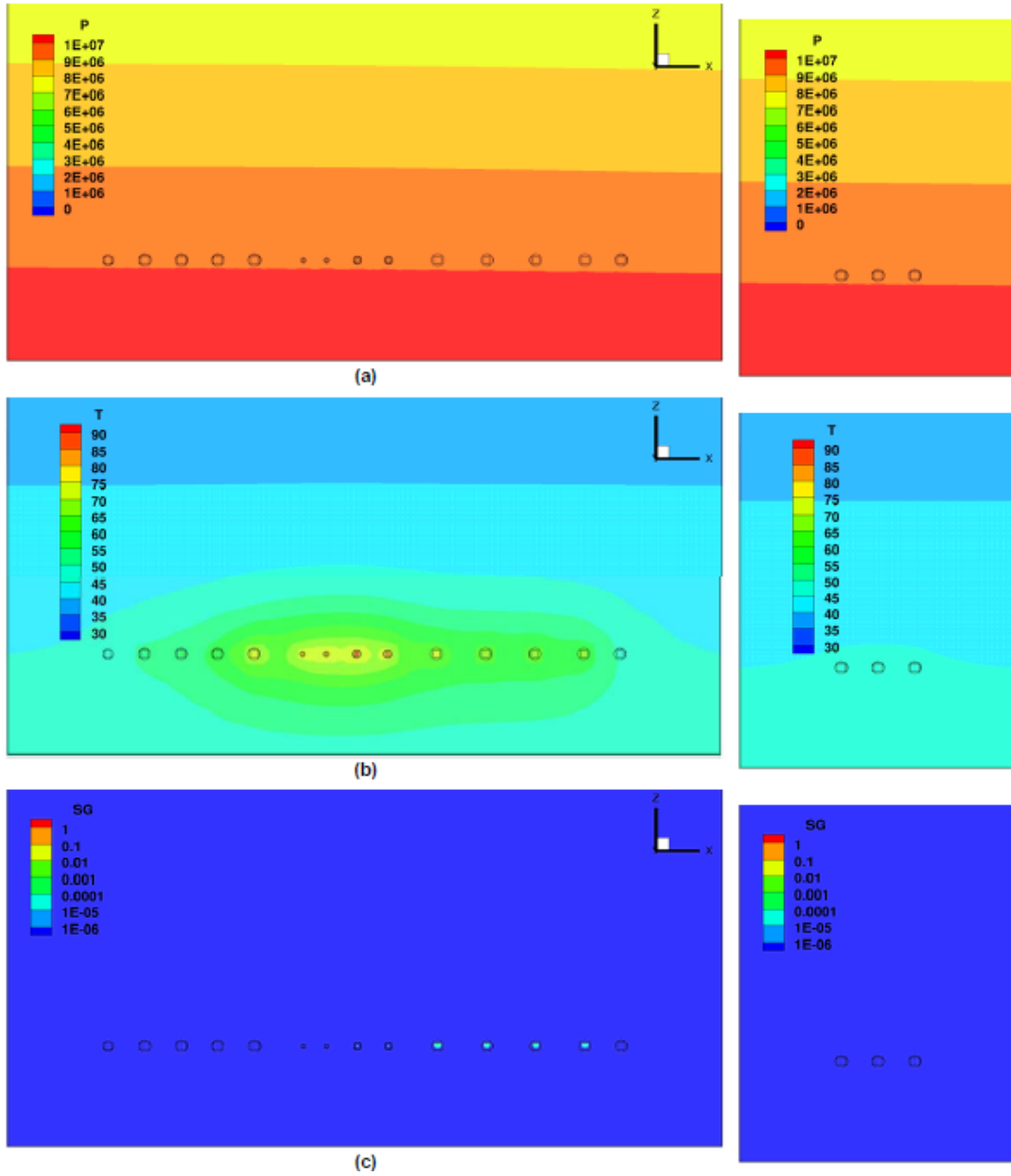


图 6.2.5-19 压力，温度，饱和度（闭锁后 50 年）

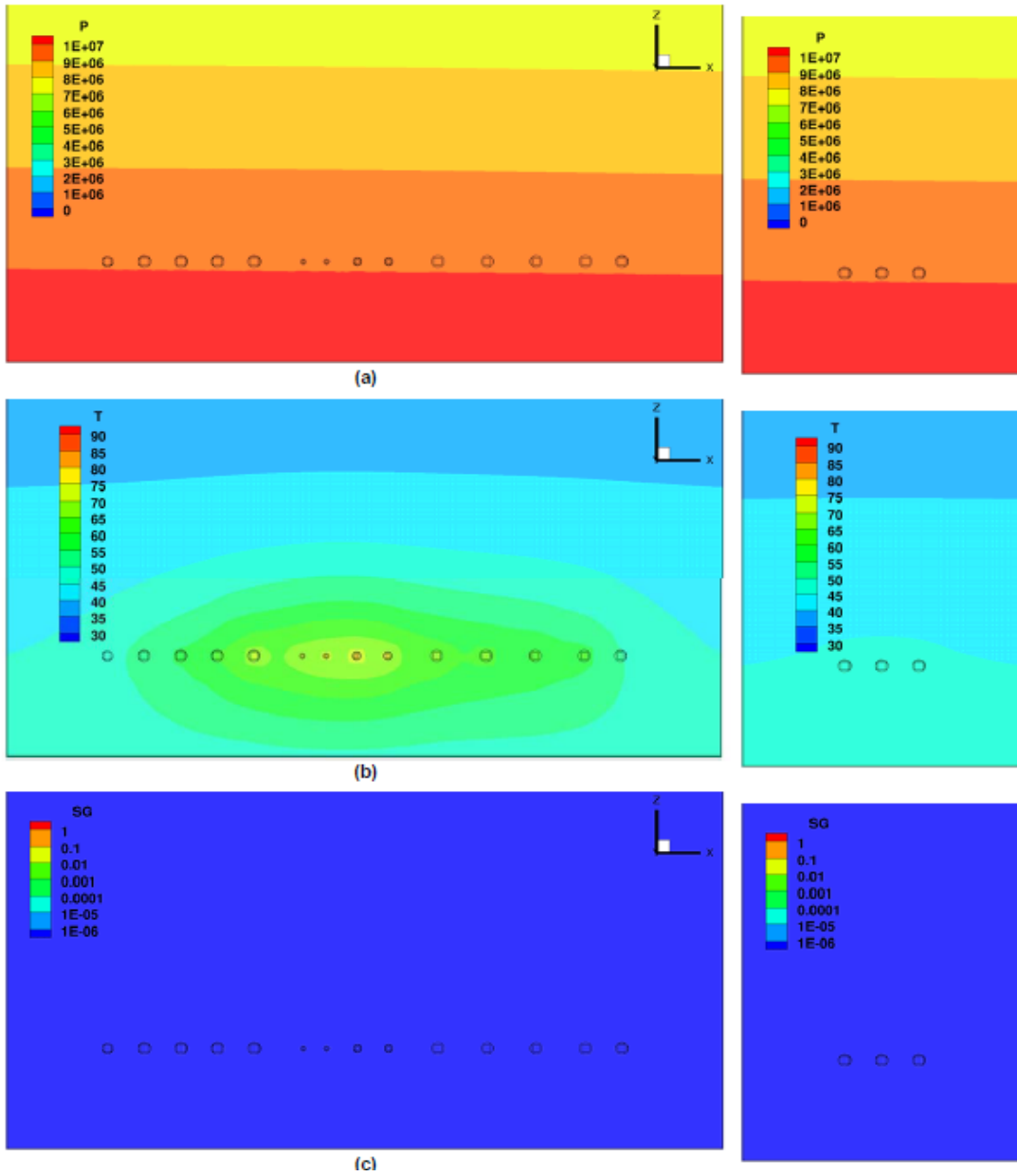


图 6.2.5-20 压力, 温度, 饱和度 (闭锁后 100 年)

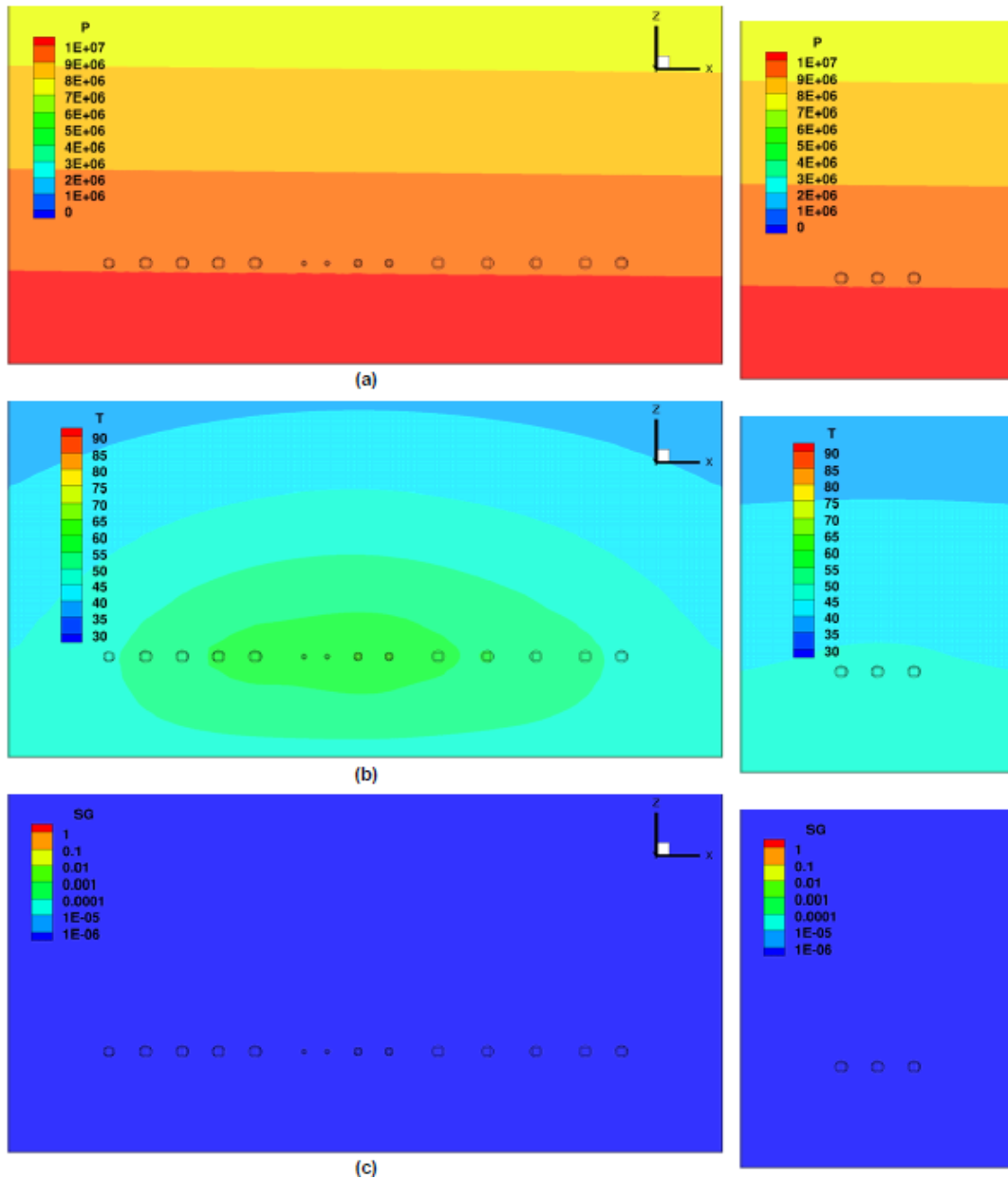


图 6.2.5-21 压力, 温度, 饱和度 (闭锁后 475 年)

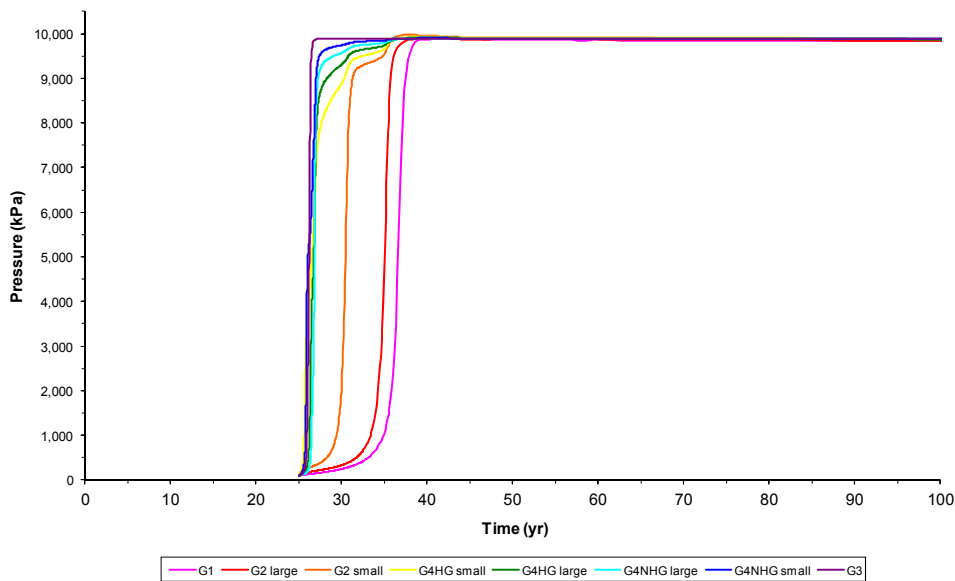


図 6.2.5-22 各処分坑道断面頂上部における圧力の経時変化

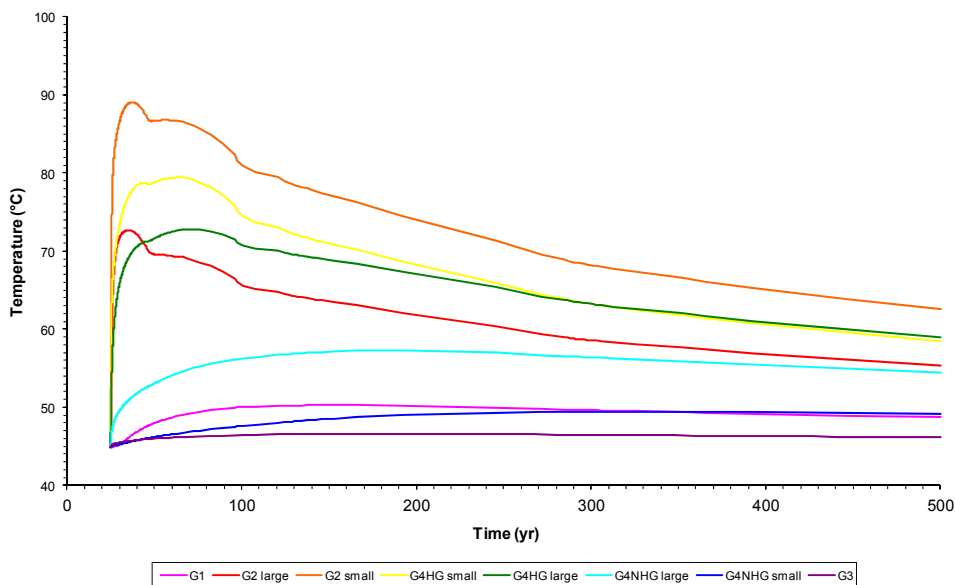


図 6.2.5-23 各処分坑道断面頂上部における温度の経時変化

(vi) ガスシナリオの定量評価のための情報提供

ここでは、安全評価シナリオとしてガスシナリオが選択された場合の、ガス発生・移行が安全性に及ぼす影響に関する情報についてまとめる。

第2次 TRU レポートでは、非放射性ガスによる核種移行評価への潜在的影響として、①圧力蓄積による人工バリア破壊の可能性、および②汚染水の排水が指摘されている。

(a) 圧力蓄積による人工バリア破壊の可能性

ガス発生量の多い廃棄体グループ2 (CSD-B/C)および廃棄体グループ2 (ハル)における圧力の蓄積に関する評価結果を表 6.2.5-14 に示す。深度 500 m/1,000 m では静水圧は 5MPa/10MPa であり、これに耐える人工バリアが設計されることを想定すれば、いずれの場合でも、人工バリアの力学的健全性を損ねるリスクを生じるほどの圧力上昇はないと考えられる。

表 6.2.5-14 ガス発生による圧力の蓄積

	最大圧力	時刻
G2 (CSD-B/C)	静水圧 + 300 kPa	閉鎖後 600 y (容器開口後 100 y)
G2 (ハル)	静水圧 + 200 kPa	閉鎖後 1,100 y (容器開口後 600 y)

(b) 汚染水の排水

汚染水の排水については、各処分坑道断面から排出される溶存水素の量から推測することができる。図 6.2.5-24 に各処分坑道断面からの溶存水素の排出量の経時変化を示す。溶存水素の有意な量の排出が認められるのは、廃棄体グループ 2 (キャニスタ) であることがわかる。ここでの結果は、ガスシナリオにおける汚染水の排水を考慮する場合の基本情報として利用できる。

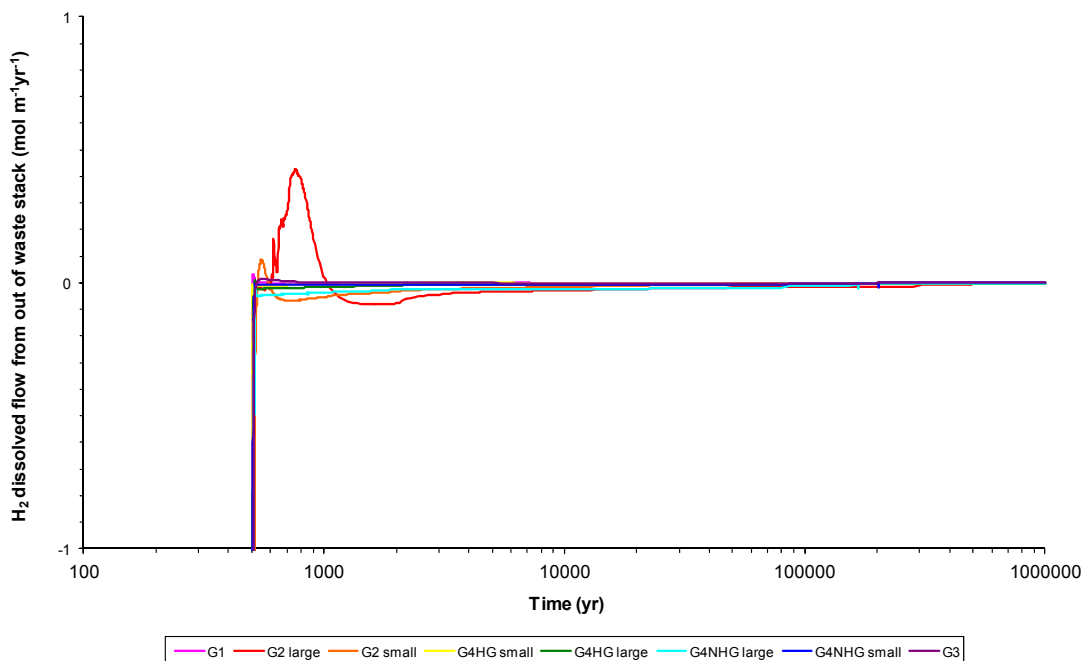


図 6.2.5-24 ガス圧力上昇による溶存水素の押し出し

(vii) 放射性ガスの影響

これまでの、発生するガスとしては主要なものである非放射性ガス（水素など）を中心に議論を進めてきた。ここでは、ガスそのものが放射性物質である場合の影響について予備的な検討を行う。放射性ガスとしては、トリチウムを含む水素ガス³H₂、C-14を含むメタンガス¹⁴CH₄および4N+2系列の放射性壊変生成物であるRn-222を検討対象とする。

(a) トリチウム (H-3)

本検討では廃棄体パッケージによって500年間の閉じ込めを前提としている。したがって、半減期12.32年のH-3は、容器開口までには十分に減衰しており、処分場の長期安全性には有意な影響を及ぼさないと考えられる。

(b) C-14

C-14を含むメタンガス¹⁴CH₄は処分場から放出される可能性がある。ここでは、天然バリア中はガス形態¹⁴CH₄として移動した後、地表の土壤中ではすべて¹⁴CO₂に変換されると仮定する。先のガス移行解析から得られた、地表面での水素ガスおよび随伴する¹⁴CH₄の放出量を図6.2.5-25に示す。

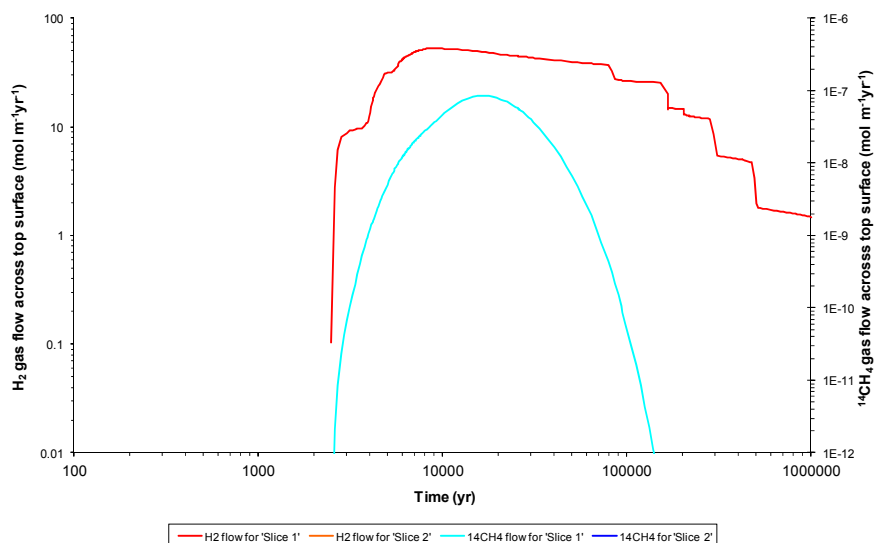


図 6.2.5-25 地表面における水素ガスおよび放射性メタン (¹⁴CH₄) の放出量

ここではさらに保守的に、処分場で発生した¹⁴CH₄ (図6.2.5-12参照)が全て(天然バリアでの移行遅延を受けることなく)地表に到達すると仮定して評価する。

大気中に放出された¹⁴CO₂による人間への影響については、植生を抵抗と見立てたアプローチ (Monteith & Unsworth, 2008 ; Foken, 2008) を用いた。このアプローチでは、地表面の一定エリアから放出された¹⁴CO₂に起因する一定高さにおける¹⁴CO₂濃度を、大気分散および植生の空力抵抗から導出し、それをもとに経口摂取経路による被ばく線量を算出するものである。評価結果を図6.2.5-26に示す。

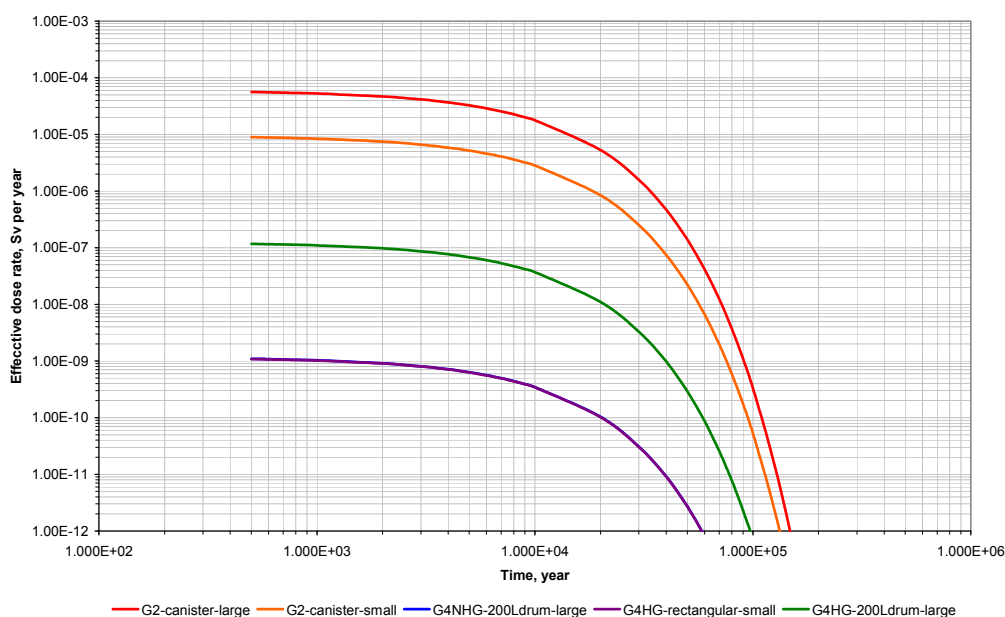


図 6.2.5-26 $^{14}\text{CH}_4$ による経口摂取経路での線量率

(c) Rn-222

Rn-222 は不活性ガスであり、植物や動物での濃集・蓄積がないことから、吸入被ばくのみが検討の対象となる。

廃棄体での Rn-222 の生成速度を図 6.2.5-27 に示す。廃棄体グループ 2 のようにアクチニドを多く含有する廃棄体では Rn-222 の生成量が多いことがわかる。これら生成された Rn-222 が瞬時に全て地表にまで到達したと仮定した場合、高い線量が算出されることが示唆されている。

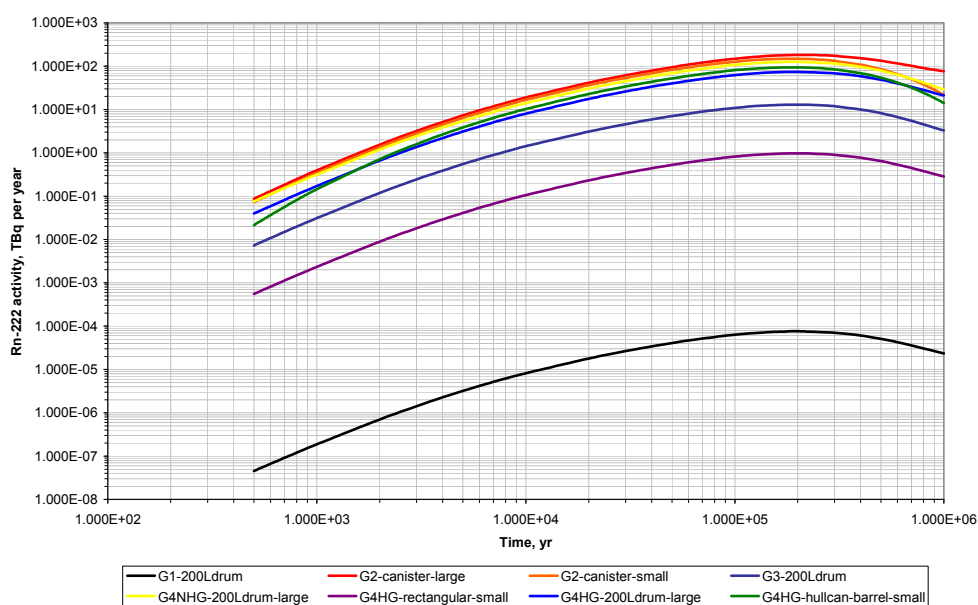


図 6.2.5-27 各処分坑道での Rn-222 の生成速度

(viii) まとめ

廃棄体でのバルクの水素ガス発生量および放射性メタン $^{14}\text{CH}_4$ をガスの生成項として、ガス移行解析を実施した。結果を以下のように整理する。

- 生成したバルクの水素ガスは数千年以降から地表に破過する解析結果となった。しかしながら、天然バリアでのガス移行評価は、実際にはサイト条件に依存するところが大きく（キャップロックや帯水層の存在など）、現在の評価は保守的な仮定をおいたケーススタディであることには注意が必要である。
- 人工バリア内でのガスの蓄積における圧力上昇は、廃棄体グループ 2 のようにガス発生量が多いケースでも 0.2~0.3MPa であり、当該深度での静水圧に比較して小さいことから、ガスによる人工バリアの力学的な破壊は考えにくい。
- ガスによる各処分坑道からの汚染水の排水については、各処分坑道からの溶存水素の排出量の経時変化を示し、安全評価におけるガスシナリオを定量評価するための情報を提供した。
- 放射性ガスについては、 $^{14}\text{CH}_4$ および Rn-222 が潜在的な影響を有することがわかった。しかしながら、その一方で、地下深部で生成したこれらの放射性ガスによる生物圏での放射線学的影響の評価手法はまだ確立されている状況ではなく、今後のさらなる検討が必要である。

第6章 参考文献

- Anderson, B.L., Scheaffer, M.K. and Fischer, L.E. (2000) : Hydrogen Generation in TRU Waste Transportation Packages, Lawrence Livermore National Laboratory Report, UCRL-ID-138352, 2000.
- 安藤賢一, 納多勝, 山本幹彦, 三原守弘 (2005) : TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析, JNC TN 8400 2005-026.
- 千田太詩, 吉田崇宏 (2012) : フライアッシュ混合セメント硬化体中の陰イオン拡散挙動－拡散係数の空隙構造依存性－, 電力中央研究所報告 L11008, 2012 年 5 月.
- Cussler, E.L. (1984) : Diffusion – Mass Transfer in Fluid Systems, Cambridge University Press, 1984.
- 電事連・JNC (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取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- Foken, T. (2008) : Micrometeorology, Springer-Verlag.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2012a) : 平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書 (第 1 分冊)－人工バリアの長期挙動の評価－
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2012b) : 平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 報告書 (第 3 分冊)－放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価－ 平成 24 年 3 月.
- Han, P. and Bartels, D.M. (1996) : Temperature Dependence of Oxygen Diffusion in H₂O and D₂O, Journal of Physical Chemistry, vol. 100, pp. 5597–5602, 1996.
- Hoch, A.R. (2007) : Scoping Calculations to Determine if Gas Generated in an ILW Repository might Migrate to the Biosphere in Solution, Serco Report SA/ENV-0786, 2007.
- Hoch, A.R., Thorne, M., Swift, B. and Bate, F. (2008) : Update of the GPA(03) Assessment of the consequences of gas, Serco Report SA/ENV-0948 Issue 2, 2008.
- 石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び NaNO₃ の影響, JNC TN8400 2004-001.
- 伊藤弘之, 三原守弘 (2005) : ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式 JNC TN8400 2005-029.
- JNC(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.
- JAEA(2012) : 平成 23 年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術硝酸塩処

理・処分技術高度化開発 報告書.

亀井玄人, 本田明, 三原守弘, 小田治恵, 村上裕, 増田賢太, 山口耕平, 松田節郎, 市毛悟, 高橋邦明, 目黒義弘, 山口大美, 榊原哲郎, 佐々木紀樹 (2008) : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 19 年度報告, JAEA-Research 2008-082.

亀井玄人, 本田明, 三原守弘, 小田治恵, 村上裕, 増田賢太, 山口耕平, 松田節郎, 市毛悟, 高橋邦明, 目黒義弘 (2010) : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 20 年度報告, JAEA-Research 2009-046.

亀井玄人, 本田明, 小田治恵, 平野史生, 市毛悟, 栗本宜孝, 星野清一, 赤木洋介, 佐藤信之, 高橋邦明, 目黒義弘 (2012) : TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成 22 年度報告, JAEA-Research 2012-010.

加藤和之, 脇寿一, 齋藤典之, 小野文彦, 大間知行, 尾崎充弘 (2006) : 余裕深度処分の技術的な信頼性構築に向けた検討状況について, 原子力バックエンド研究, 13, No.1, 49-64.

Lide, D.R. (ed.) (1995) : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 75th Edition, CRC Press, Boca Raton, 1995.

Luckner, L., van Genuchten, M. and Nielsen, D. (1989) : A Consistent Set of Parametric Models for the Two-phase Flow of Immiscible Fluids in the Subsurface, Water Resources Research 25, pp. 2187-2193, 1989.

Marrero, T.R. and Mason, E.A. (1972) : Gaseous Diffusion Coefficients, Journal of Physical and Chemical Reference Data, vol. 1, pp.3-118.

三原守弘, 佐藤信之, 大野進太郎, 森川誠司 (2010) : TRU 廃棄物地層処分施設の力学挙動解析コード (MACBECE) の開発, JAEA-Data/Code 2009-026.

三原守弘, 小林一三 (2007) : 圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼす NaNO_3 濃度の影響, JAEA-Research 2007-020.

Monteith, J.L. and Unsworth, M. (2008) : Principles of Environmental Physics, 3rd Edition, Elsevier.

本島睦, 北原義浩, 伊藤洋 (1981) : 残留強度・ひずみ軟化特性を考慮した地盤の耐荷力の評価手法の開発, 電力中央研究所報告 380036.

NUMO (2011) : 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.

日本化学会編 (2004) : 改訂 5 版 化学便覧 基礎編 II, 丸善株式会社.

大久保誠介 (1992) : コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討, 資源・素材学会誌, 108, pp.601-606.

小田治恵, 本田明, 高瀬博康, 小曾根健嗣, 佐々木良一, 山口耕平, 佐藤努 (2011) : セメント系材料由来のアルカリ性条件における緩衝材の鉱物学的変遷シナリオに基づく化学反応・物質移動連成解析, 粘土科学 第 51 巻 第 2 号 p.1-16.

- Phillips, D.C. and Burnay, S.G. (1991) : Polymers in the Nuclear Power Industry, pp 345 to 381 in Irradiation Effects on Polymers eds D.W.Clegg and A.A. Collyer, Elsevier, 1991.
- Pruess, K. (1987) : TOUGH User's Guide, Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-4645 (also Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-20700), 1987.
- Pruess, K. (1991) : TOUGH2 – A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29400, 1991.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G. (1999) : TOUGH2 User's Guide – Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, 1999.
- 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構 (2009) : TRU 廃棄物の地層処分研究基盤開発に関する全体基本計画
- Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004) : Dissolution Mechanism and Kinetics of Smectite Under Alkaline Conditions, Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05.
- Smart, N.R. and Hoch, A.R. (2010) : A Survey of Steel and Zircaloy Corrosion Data for Use in the SMOGG Gas Generation Model, Serco Report SA/ENV-0841 Issue 3, 2010.
- Swift, B.T. and Rodwell, W.R. (2006) : Specification of SMOGG Version 5.0 : a simplified model of gas generation from radioactive wastes, Serco Report SA/ENV-0452, Version 6, 2006.
- 戸井田克, 笹倉剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一 (2005) : 人工バリア材料の力学物性取得試験, JNC TJ8400 2004-036, 2005
- USDOE (2002) : Safety Analysis Report for the RH TRU 72 B Waste Shipping Package, RH TRU 72 B Cask SAR, REV.3, 2002.
- Zabetakis, M.G. (1965) : Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965.

7. 安全評価上重要なシナリオと解析ケースの設定

2章で示したように、処分システムの安全性に有意な影響を及ぼす、または、評価の信頼性を確保するために必要と考えられる重要なシナリオの抽出においては、処分システムの応答特性に関する知見の利用が有用である。本章では、4章で得られた処分システムの応答特性やそれに基づく解析条件の類型化に関する知見と6章の検討で得られた処分システムの状態に関する知見を統合し、安全評価上重要なシナリオや解析ケースの設定を行う。この際、3章でまとめた地質環境に関する類型化情報(表 3.1.2-1 参照)やNUMOの処分概念の基本型(表 3.3.1-1 参照)に基づく処分場の仕様(表 3.4.2-9～表 3.4.2-22, 図 3.4.2-12～図 3.4.2-19)などを前提条件とする。

7.1 安全評価上重要なシナリオ

地層処分の安全評価において対象とされるシナリオとしては、地下水シナリオ、人的行為に関わるシナリオ、さらには発生頻度が稀な天然事象に関わるシナリオなどがあげられる。ここでは、地下水シナリオを対象として、重要なシナリオの抽出を行うこととする。

7.1.1 重要なシナリオの選定

4章で記述したように、TRU廃棄物の安全性を支配する核種は廃棄体グループ1のI-129、廃棄体グループ3のI-129、廃棄体グループ2のC-14である。I-129とC-14は、いずれ可溶性で、非収着性の核種である。そのため、既存の安全評価においても、これらの核種に対して溶解度は設定されず、充填材および緩衝材中の収着分配係数のレファレンス値は極めて小さい値が与えられてきた。一方、既存の安全評価においては、専門家の判断などに基づき、懸念されるシナリオが重要なシナリオとして抽出され評価されてきた。この重要なシナリオの抽出においては、必ずしも定量的な、あるいは明確な論拠に基づいた絞り込みは行われていなかった。そのため、処分において生起する事象やその影響の伝搬の整理(FEP分析)(OECD/NEA, 1992)に基づき、セメント系材料による地下水化学環境の高pH化や、それに伴うベントナイトの変質などの想定される様々な懸念事象による影響が評価対象シナリオとして整備考慮されてきた。しかしながら、前述のI-129やC-14に対する処分システムの応答特性やそれに基づく解析条件の類型化の知見を踏まえることにより、処分システムの安全性に有意な影響を及ぼす重要な事象を、論拠とともに抽出することが可能になった。すなわち、I-129やC-14が支配する処分システムの安全性に関しては、有意な影響を及ぼす重要な事象などとして、天然バリアの水理特性や拡散特性、収着特性の変動が挙げられることがわかった。そのため、TRU廃棄物の地層処分の地下水シナリオを対象とした安全評価において考慮すべき重要なシナリオは、天然バリアの水理特性や拡散特性、収着特性の変動に関連するシナリオになると考えられる。

NUMO の TRU レベル 3 報告書 (NUMO, 2011) では、TRU 廃棄物の安全性を支配する I-129 や C-14 に対する処分システムの応答特性の理解・把握に基づき解析ケースを設定した。この時、主として水理場の変動を中心として、それと天然バリアの収着特性の変化や人工バリアの収着特性の変化に関わるパラメータとの組み合わせを考慮し、その安全性を提示した。その結果、緩衝材の変質・劣化による人工バリアの特性 (透水性) の変化やそれに伴う地球化学環境の変化による溶解度への影響は天然バリアの水理場の変動や収着特性の変動の影響に比べて小さいことが示された。これらのことは、前述のような支配核種である I-129 や C-14 の移行パラメータの変動特性に対する処分システムの応答特性に依存した結果である。天然バリアの収着特性については、その変動範囲が大きく設定されていたため、変動による影響が有意に表れたものである。

本検討では、これらの結果を踏まえ、上述のように、天然バリアの水理特性や収着特性の変動に関連するシナリオを処分システムの安全性に対して重要な影響を与える重要なシナリオとして抽出した。安全評価の信頼性を確保するとの観点からは、たとえ影響が小さいシナリオでも評価の対象とすべきシナリオが存在する可能性がある。本来の安全評価においては、このような観点からも検討する必要があるが、1章で述べたように、本報告書は、TRU 廃棄物の地層処分の安全評価結果の報告書ではなく、TRU 廃棄物の地層処分に関する研究開発の進捗をまとめた報告書である。そこで、本レポートでは、上記の観点からのシナリオ抽出は行わないこととした。以下 7.2 章では、TRU 廃棄物の地層処分システムの安全性に対して重要な影響を与える、天然バリアの水理特性や収着特性の変動に関連するシナリオを評価するための解析ケースについて記述する。

7.2 重要なシナリオに対応する解析ケース

7.2.1 解析ケース設定の考え方

TRU 廃棄物の地層処分システムの安全性に対して重要な影響を与えるシナリオを評価するための決定論解析ケースを、本検討で検討対象としてきたケース (case1-0~case3-0) ごとに、また、廃棄体グループごとに設定した。このシナリオは、天然バリアの水理特性や収着特性の変動に関連するものである。解析ケースの設定においては、地質環境条件の類型化 (表 3.1.2-1 参照) および NUMO の処分概念の基本仕様、さらには、I-129 や C-14 に対する処分システムの応答特性を参照した。これらの解析ケース設定の目的は、「想定される水理条件、地下水化学条件に対して、目標とする安全性のレベルを確保できる概念を個々の廃棄体グループごとに抽出する」である。この目的のもと、多様な水理条件や地下水化学条件を考慮するために、以下の条件を組み合わせる解析ケースを設定した。

- 母岩透水係数 (2×10^{-10} m/s, 2×10^{-9} m/s, 2×10^{-8} m/s, 2×10^{-7} m/s)
- 地下水化学条件 (降水系還元性地下水, 海水系還元性地下水)
- 岩種 (結晶質岩, 堆積岩)

7.2.2 解析ケースの一覧

表 7.2.2-1～表 7.2.2-4 に設定した決定論解析ケースの一覧を示す。ここで、表 7.2.2-1～表 7.2.2-4 の廃棄体グループ 2 の評価においては、核種の浸出期間が最も保守的となる溶出率に設定する場合（※1）と保守的な浸出期間となる溶出率に設定する場合（※2）の 2 通りに分けて検討を行っている。それぞれの設定値については、8 章で詳述する。

表 7.2.2-1 決定論解析ケース（結晶質岩・降水系還元性地下水）

(1/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI								
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩透水性係数 [m/s]	断層透水性係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層									
case 1-0 TRUレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 め	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水								
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	case 1-1 TRUレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 めなし	1	0年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
		2(※1)	0年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		2(※2)	0年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		3	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
4(低発熱性)		0年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
4(発熱性)		0年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
case 1-2 TRUレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 低位置密度 レイアウト	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水								
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															

表 7.2.2-1 決定論解析ケース（結晶質岩・降水系還元性地下水）

(2/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩透水性係数 [m/s]	断層透水性係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層	
case2-0 高度化概念	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case2-1 高度化概念 + 脱硝技術	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case3-0 TRUレベル3 報告書レファ レンス概念 + コンクリート 容器（幾何 形状の変更）	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							

表 7.2.2-2 決定論解析ケース（結晶質岩・海水系還元性地下水）
(1/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩透水性係数 [m/s]	断層透水性係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層	
case1-0 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 め	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case1-1 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 めなし	1	0年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	0年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	0年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	0年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	0年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	0年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case1-2 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 低定置密度 レイアウト	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							

表 7.2.2-2 決定論解析ケース（結晶質岩・海水系還元性地下水）
(2/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI																
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩透水系数 [m/s]	断層透水量係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層																	
case2-0 高度化概念	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層																
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																							
	case2-1 高度化概念 + 脱硝技術	1	500年	10万年	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層								
		2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
		2(※2)	6万年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
		3	500年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
		4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
		4(発熱性)	500年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
		case3-0 TRUレベル3 報告書レファ レンス概念 + コンクリート 容器(幾何 形状の変 更)	1	500年	瞬時放出								●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	結晶質岩（花崗岩）	単一の一次元平行平板亀裂	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
			2(※1)	500年	最も保守的な設定								●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
			2(※2)	500年	保守的な設定								●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
3			500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																						
4(低発熱性)			500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																						
4(発熱性)			500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7																						

表 7.2.2-3 決定論解析ケース（堆積岩・降水系還元性地下水）

(1/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI								
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩 透水係数 [m/s]	断層 透水量係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層									
case1-0 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 め	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水								
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	case1-1 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 めなし	1	0年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
		2(※1)	0年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		2(※2)	0年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		3	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		4(低発熱性)	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		4(発熱性)	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	case1-2 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 低密度置留 レイアウト	1	500年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
		2(※1)	500年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		2(※2)	500年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
3		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
4(低発熱性)		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
4(発熱性)		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															

表 7.2.2-3 決定論解析ケース（堆積岩・降水系還元性地下水）
(2/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩透水系数 [m/s]	断層透水量係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水タイプ	岩種	母岩	断層	
case2-0 高度化概念	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case2-1 高度化概念 + 脱硝技術	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case3-0 TRUレベル3 報告書レファ レンス概念 + コンクリート 容器(幾何 形状の変 更)	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	降水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	河川水
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							

表 7.2.2-4 決定論解析ケース（堆積岩・海水系還元性地下水）
(1/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI								
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩 透水係数 [m/s]	断層 透水量係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水 タイプ	岩種	母岩	断層									
case1-0 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 め	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層								
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
	case1-1 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 短期閉じ込 めなし	1	0年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
		2(※1)	0年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		2(※2)	0年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		3	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		4(低発熱性)	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		4(発熱性)	0年	瞬時放出	×								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	case1-2 TRULレベル3 報告書のレ ファレンス概 念 + 低定置密度 レイアウト	1	500年	瞬時放出	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
		2(※1)	500年	最も保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
		2(※2)	500年	保守的な設定	●								2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
3		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
4(低発熱性)		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															
4(発熱性)		500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7															

表 7.2.2-4 決定論解析ケース（堆積岩・海水系還元性地下水）
(2/2)

検討ケース	廃棄体グループ	人工バリア条件			水理環境条件			地質環境条件		天然バリアモデル		GBI
		廃棄体容器閉じ込め期間	核種浸出期間	緩衝材の有無 (●:有, ×:無)	母岩 透水係数 [m/s]	断層 透水量係数 [m ² /s]	動水勾配	地下水 タイプ	岩種	母岩	断層	
case2-0 高度化概念	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case2-1 高度化概念 + 脱硝技術	1	500年	10万年	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	6万年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	6万年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
case3-0 TRUレベル3 報告書レファ レンス概念 + コンクリート 容器(幾何 形状の変 更)	1	500年	瞬時放出	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7	1E-7	0.01	海水系還元性	新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）	単一の一次元多孔質媒体	単一の一次元平行平板亀裂	沿岸海域堆積層
	2(※1)	500年	最も保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	2(※2)	500年	保守的な設定	●	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	3	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(低発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							
	4(発熱性)	500年	瞬時放出	×	2E-10 2E-9 2E-8 2E-7							

第7章 参考文献

NUMO (2011) : 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.

OECD/NEA(1992) : Systematic Approach to Scenario Development, Safety Assessment of
Radioactive Waste Repositories OECD, 1992.

8. モデル開発と適用

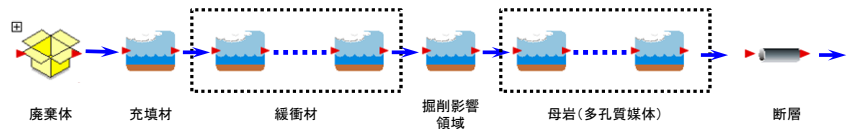

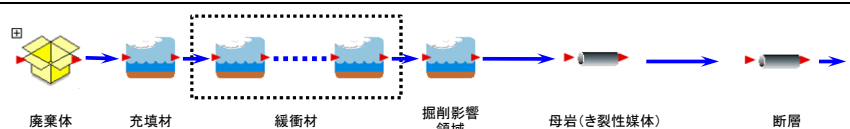
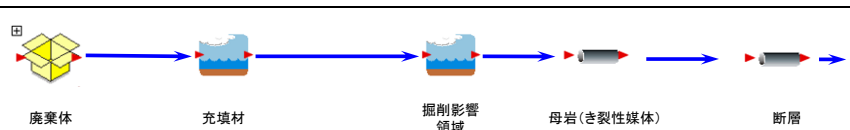
本章では、6章において検討した処分システムの状態に関する知見を反映して、7章で抽出したシナリオを対象に安全評価を実施するためのモデルについて記述するとともに、評価に用いるデータを整理する。

8.1 安全評価に用いる核種移行モデルの設定

8.1.1 概要

表 8.1.1-1 に本検討で用いる核種移行モデルの GoldSim における実装イメージを示す。

表 8.1.1-1 GoldSim における核種移行モデルの実装イメージ

母岩モデル	緩衝材設置の有無	GoldSim におけるモデル化のイメージ
多孔質媒体モデル	有	
	無	
亀裂媒体モデル	有	
	無	

移流分散方程式を基本とする 1次元核種移行モデルでは、地質環境に応じて使い分ける亀裂性媒体モデルおよび多孔質媒体モデルに加えて、廃棄体グループごとの処分概念に応じた緩衝材の有無を考慮し、合計 4 種類の核種移行モデルを準備する。第 2 次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）においては、母岩中の核種移行には透水係数の異なる複数の亀裂からなるマルチチャンネルモデル、断層中では単一チャンネルの亀裂モデルが用いられた。本検討では、母岩には単一チャンネルの亀裂または多孔質媒体モデルを使用することとした。これは、地層処分低レベル放射性廃棄物において線量を支配する I-129 のような、移行過程における崩壊が顕著に表れない、収着性が小さく半減期の長い核種の線量の水理場の違いによる影響を考慮したためである。I-129 のような移行過程においてほとんど崩壊

しない核種の場合は、マルチチャンネルなどにより水理の不均一性を考慮するよりも、均一な水理を想定した方が、ピークの時間的な分散が小さくなり、線量が保守的に評価されることになるのである。さらには、複数チャンネルの設定における不確実性を回避することも考慮した。一方、断層には第2次 TRU レポートと同様に単一の亀裂モデルを使用する。

8.1.2 廃棄体領域モデル

短期の閉じ込め容器の採用の効果を感度解析において考慮するため、廃棄体容器による閉じ込め期間（廃棄体からの核種漏洩開始までの期間）をパラメータとして定義した。この期間は核種は廃棄体から溶出されず、廃棄体中での核種の崩壊・生成による核種インベントリの時間変化のみ起きることを考慮した。

廃棄体容器による閉じ込め期間が完了すると、廃棄体からの核種の溶出が開始する。廃棄体からの核種の溶出モードについては、瞬時溶出モードと設定された浸出期間の間一定の溶出率（ただし、核種インベントリの崩壊・生成を考慮）となるモードの2種類を実装した。廃棄体からの核種浸出期間パラメータをゼロと設定した場合には瞬時溶出モードとなる。以下に、崩壊系列における n 番目の核種（以下、核種 n と呼ぶ）の廃棄体内に残るインベントリに関する支配方程式を示す。

$$\frac{\partial I_n}{\partial t} = -F_n^{w \rightarrow f}(t) - \lambda_n I_n(t) + \lambda_{n-1} I_{n-1}(t) \quad 8.1.2-(1)式$$

I_n : 核種 n の廃棄体内のインベントリ [Bq]

λ_n : 核種 n の崩壊定数 [1/y]

$F_n^{w \rightarrow f}$: 廃棄体から充填材への核種浸出率 [Bq/y]

ここで、 $F_n^{w \rightarrow f}$ は瞬時放出モードの場合には

$$F_n^{w \rightarrow f}(t) = I_n(t) \delta(t - T_0) \quad 8.1.2-(2)式$$

と表され、一方、一定の溶出率が持続する場合には

$$F_n^{w \rightarrow f}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_0 \\ \frac{I_n(t)}{T_{LE} - t + T_0}, & T_0 \leq t < T_0 + T_{LE} \\ 0, & t \geq T_0 + T_{LE} \end{cases} \quad 8.1.2-(3)式$$

T_{LE} : 浸出期間 [y]

T_0 : 廃棄体容器による閉じ込め期間（核種漏洩開始時期） [y]

と表される。

上記支配方程式の初期条件は、初期インベントリによって規定される。

$$I_n(0) = I_{0n} \quad 8.1.2-(4)式$$

I_{0n} : 核種 n の初期インベントリ [Bq]

廃棄体はセメント系充填材（セメントモルタル）で覆われており，廃棄体から溶出した核種は充填材中で沈殿・溶解（瞬時／可逆／同位体間での溶解度の分配を仮定），収着（瞬時／線形／可逆を仮定），移流／分散，拡散する。計算においては，充填材領域は1つの領域としてモデル化しており，充填材領域では瞬時分配平衡を仮定する。また核種の崩壊連鎖を考慮する。

緩衝材が設置される場合には，充填材中の核種は移流と拡散によって緩衝材に移行する。緩衝材が設置されない場合には，移流と拡散によって充填材からEDZに移行する。

$$\frac{dM_n^f}{dt} = F_n^{w \rightarrow f}(t) - F_n^{f \rightarrow b}(t) - \lambda_n M_n^f(t) + \lambda_{n-1} M_{n-1}^f(t) \quad 8.1.2-(5)式$$

$$F_n^{f \rightarrow b}(t) = Q^f C_n^f(t) - 2\pi K \ell De_n^b \left. \frac{\partial C_n^b}{\partial r} \right|_{r=K} \quad 8.1.2-(6)式$$

$$C_n^f(t) = \begin{cases} C_n^{sol}, & M_n^f(t) \geq \sum_i R_n^{fi} \varepsilon^{fi} V^{fi} C_n^{sol} \\ \frac{M_n^f(t)}{\sum_i R_n^{fi} \varepsilon^{fi} V^{fi}}, & M_n^f(t) < \sum_i R_n^{fi} \varepsilon^{fi} V^{fi} C_n^{sol} \end{cases} \quad 8.1.2-(7)式$$

$$M_n^f(0) = 0 \quad 8.1.2-(8)式$$

M_n^f : 充填材中に存在する核種 n の総量 [Bq]

$F_n^{f \rightarrow b}$: 充填材から緩衝材への核種 n の移行率 [Bq/y]

C_n^f : 充填材間隙水中の溶存核種 n の濃度 [Bq/m³]

Q^f : 充填材領域における水の流量 [m³/y]

K : 緩衝材内側半径 [m]

ℓ : 廃棄体定置領域の長さ [m]

De_n^b : 緩衝材における核種 n の実効拡散係数 [m²/y]

C_n^b : 緩衝材間隙水中の溶存核種 n の濃度 [Bq/m³]

C_n^{sol} : 核種 n の溶解度 [Bq/m³]

R_n^{fi} : 充填材における核種 n の収着遅延係数（収着機能を見込む充填材（i=1），

ε^{fi} : 充填材の間隙率

V^{fi} : 充填材領域の体積 [m³]

ただし， R_n^{fi} ， ε^{fi} ， V^{fi} における*i*は，

i=1 : 収着機能を見込む充填材

i=2 : 収着機能を見込まない充填材（ $R_n^{f2} = 1$ ）

i=3 : 廃棄体パッケージ中の空洞（ $R_n^{f3} = 1$ ， $\varepsilon^{f3} = 1$ ）

を表す。

8.1.3 緩衝材領域モデル

廃棄体領域のセメント充填材から移行してきた核種は、緩衝材中で移流／分散、拡散、収着する。第2次 TRU レポートに基づき、不確実性を回避するために緩衝材中での放射性元素の溶解度は設定しない。また核種の崩壊連鎖を考慮する。緩衝材の外側に達した核種は、EDZ を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩へ移行する。EDZ 中の間隙はすべて水で満たされていると仮定し、沈殿、収着は考慮しない。また、支保工での核種移行は保守的に無視する。崩壊連鎖を考慮した円筒座標系に基づく、移流拡散方程式を以下に示す。

$$R_n^b \varepsilon^b \frac{\partial C_n^b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial r} (q C_n^b) + D e_n^b \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_n^b}{\partial r} \right) - \lambda_n R_n^b \varepsilon^b C_n^b(r, t) + \lambda_{n-1} R_{n-1}^b \varepsilon^b C_{n-1}^b(r, t)$$

8.1.3-(1)式

$$C_n^b(K, t) = C_n^f(t), \quad t > 0$$

8.1.3-(2)式

$$C_n^b(L, t) = C_n^m(t), \quad t > 0$$

8.1.3-(3)式

$$C_n^b(r, 0) = 0, \quad K < r < L$$

8.1.3-(4)式

C_n^b : 緩衝材間隙水中の溶存核種 n の濃度 [Bq/m³]

R_n^b : 緩衝材における核種 n の収着遅延係数

ε^b : 緩衝材の間隙率

$q(r)$: 緩衝材中半径 r の円筒断面における平均ダルシー流速 [m/y]

C_n^m : EDZ 中の核種濃度 [Bq/m³]

L : 緩衝材外側半径 [m]

$$R_n^m \varepsilon^m V^m \frac{dC_n^m}{dt} = F_n^{b \rightarrow m}(t) - F_n^{m \rightarrow h}(t) - \lambda_n R_n^m \varepsilon^m V^m C_n^m(t) + \lambda_{n-1} R_{n-1}^m \varepsilon^m V^m C_{n-1}^m(t)$$

8.1.3-(5)式

$$F_n^{b \rightarrow m}(t) = 2\pi L \ell \cdot q(L) C_n^b(L, t) - 2\pi L \ell \cdot D e_n^b \frac{\partial C_n^b}{\partial r} \Big|_{r=L}$$

8.1.3-(6)式

$$F_n^{m \rightarrow h}(t) = Q^m C_n^m(t)$$

8.1.3-(7)式

$$C_n^m(0) = 0$$

8.1.3-(8)式

C_n^m : EDZ 中の核種濃度 [Bq/m³]

R_n^m : EDZ における核種 n の収着遅延係数 (常に 1 に設定)

ε^m : EDZ の間隙率

V^m : EDZ の体積 [m³]

$F_n^{b \rightarrow m}(t)$: 緩衝材から EDZ への核種 n の移行率 [Bq/y]

$F_n^{m \rightarrow h}(t)$: EDZ から母岩への核種 n の移行率 [Bq/y]

Q^m : EDZ の地下水流量 [m³/y]

8.1.4 亀裂性媒体モデル

亀裂性媒体モデルにおいて、母岩亀裂中の核種移行は1本の一次元平行平板モデルで表現される。EDZから母岩へ移行した核種は、亀裂中を移流・分散によって移行する。また、亀裂中の核種は拡散により岩石基質部へ移行（マトリクス拡散）し、岩石基質部へ収着することにより遅延される。母岩中では核種の崩壊連鎖は考慮するが、沈殿は考慮しない。

$$\left. \frac{\partial C_n}{\partial t} = -v \frac{\partial C_n}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2} - \frac{r_d}{b} De^{rm} \frac{\partial C_n^{rm}}{\partial \omega} \right|_{\omega=0} - \lambda_n C_n(t) + \lambda_{n-1} C_{n-1}(t)$$

8.1.4-(1)式

$$R_n^{rm} \varepsilon^{rm} \frac{\partial C_n^{rm}}{\partial t} = De^{rm} \frac{\partial^2 C_n^{rm}}{\partial \omega^2} - \lambda_n R_n^{rm} \varepsilon^{rm} C_n^{rm}(x, \omega, t) + \lambda_{n-1} R_{n-1}^{rm} \varepsilon^{rm} C_{n-1}^{rm}(x, \omega, t)$$

8.1.4-(2)式

$$v \left. \frac{\partial C_n}{\partial x} \right|_{x=0} - D_L \left. \frac{\partial C_n}{\partial x} \right|_{x=0} = F_n^{m \rightarrow h}(t), \quad t > 0$$

8.1.4-(3)式

$$C_n(x, 0) = 0, \quad x \geq 0$$

8.1.4-(4)式

$$C_n^{rm}(x, \omega, 0) = 0, \quad x \geq 0, \quad 0 \leq \omega \leq m_d$$

8.1.4-(5)式

$$C_n^{rm}(x, 0, t) = C_n(x, t), \quad t > 0, \quad x \geq 0$$

8.1.4-(6)式

$$\left. \frac{\partial C_n^{rm}}{\partial \omega} \right|_{\omega=m_d} = 0, \quad t > 0, \quad x \geq 0$$

8.1.4-(7)式

C_n : 母岩亀裂中の核種 n の濃度 [Bq/m³]

v : 母岩亀裂中の地下水流速 [m/y]

D_L : 母岩亀裂中の縦方向分散係数 [m²/y]

r_d : マトリクス拡散寄与面積率

b : 母岩亀裂開口半幅 [m]

De^{rm} : 母岩マトリクス中の実効拡散係数 [m²/y]

C_n^{rm} : 母岩マトリクス空隙中の溶存核種 n の濃度 [Bq/m³]

R_n^{rm} : 母岩マトリクスにおける核種 n の収着遅延係数

ε^{rm} : 母岩マトリクスの間隙率

m_d : 母岩マトリクス拡散深さ[m]

8.1.5 多孔質媒体モデル

多孔質媒体モデルにおいて、母岩中の核種移行は1次元移流・分散・拡散モデルによって表現される。EDZから母岩へ移行した核種は、多孔質媒体中を移流・分散・拡散によって移行する。また、岩石へ収着することにより遅延される。母岩中では核種の崩壊連鎖は考慮するが、沈殿は考慮しない。

$$R_n^{pr} \varepsilon^{pr} \frac{\partial C_n^{pr}}{\partial t} = -q \frac{\partial C_n^{pr}}{\partial x} + D_L^{pr} \frac{\partial^2 C_n^{pr}}{\partial x^2} - \lambda_n R_n^{pr} \varepsilon^{pr} C_n^{pr}(x,t) + \lambda_{n-1} R_{n-1}^{pr} \varepsilon^{pr} C_{n-1}^{pr}(x,t)$$

8.1.5-(1)式

$$q \left. \frac{\partial C_n^{pr}}{\partial x} \right|_{x=0} - D_L^{pr} \left. \frac{\partial C_n^{pr}}{\partial x} \right|_{x=0} = F_n^{m \rightarrow h}(t), \quad t > 0$$

8.1.5-(2)式

$$C_n^{pr}(x,0) = 0, \quad x \geq 0$$

8.1.5-(3)式

C_n^{pr} : 多孔質媒体中の核種 n の濃度 [Bq/m³]

R_n^{pr} : 多孔質媒体における核種 n の収着遅延係数

ε^{pr} : 多孔質媒体の間隙率

q : 多孔質媒体中のダルシー流速 [m/y]

D_L^{pr} : 多孔質媒体中の縦方向分散係数 [m²/y]

8.2 評価対象核種の選定

本検討における決定論的安全評価では、既存の安全評価に従い、TRU レベル 3 報告書 (NUMO, 2011) において評価対象核種となった核種を対象に安全評価を実施した。

8.3 解析ケースごとの解析条件の設定

8.3.1 廃棄体グループ2における放射化生成物の賦存状況とインベントリ

一般に、廃棄物表面に付着している核種では地下水の接触とともにただちに液相側に核種が放出される瞬時放出モデルが適用されるが、放射化生成物についてはその賦存状況に応じてより現実的なソースタームモデルが適用できる。

原環センター (2012) では、C-14 および Cl-36 を対象とした、燃料構造体のタイプ、燃焼履歴、発生量などを反映した現実的なインベントリ・賦存状況を評価するとともに、ジルカロイおよびステンレスの腐食挙動評価を行っている。本評価においてもこの成果を用いて、廃棄体グループ2における放射化生成物のソースタームを定義する。

廃棄体グループ2における放射化生成物の存在割合を表 8.3.1-1 のように設定する。C-14 および Cl-36 については、原環センター (2012) の存在割合の設定を参照した。残りの放

射化生成物 (Co-60, Ni-59, Ni-63, Se-79, Zr-93, Nb-94, Mo-93) は、第2次 TRU レポート (電事連・JNC, 2005) と同じ設定である。

後述するように、これらの賦存状況に応じて放射化生成物のソースタームモデルは3つの放出モデルの和として表現される。表面付着分およびジルカロイの酸化膜分は、地下水の接触と同時に液相側に放出される成分となる (瞬時放出モデル)。ステンレスおよびインコネル分は、ステンレスの腐食に伴って放出される成分となる (腐食による control release モデル)²¹。ジルカロイ母材分は、より緩慢な腐食に伴って放出される成分となる (腐食による control release モデル)。

表 8.3.1-1 Gr2 の放射化生成物の存在割合

核種	付着	ジルカロイ		ステンレス	インコネル
		酸化膜	母材		
C-14	0.003	0.029	0.655	0.276	0.037
Cl-36	0.001	0.028	0.784	0.186	0.001
Co-60	0.01	0.04	0.18	0.77	
Ni-59	0.00	0.00	0.00	1.00	
Ni-63	0.00	0.00	0.00	1.00	
Se-79	0.98	0.00	0.00	0.02	
Zr-93	0.04	0.19	0.77	0.00	
Nb-94	0.00	0.01	0.02	0.97	
Mo-93	0.00	0.01	0.02	0.97	

廃棄体グループ2の解析においては、JNFL, JAEA, CSD-Cの各廃棄体に対して、上記の3つの溶出モード (瞬時溶出, ジルカロイ母材の溶出に伴う核種溶出, ステンレスの溶出に伴う核種溶出) が設定され、CSD-Bに対しては瞬時放出モードのみが設定された。表8.3.1-1の廃棄体グループ2の放射性核種の存在割合と表3.2.3-1の核種の初期インベントリなどを用いて設定した廃棄体グループ2の溶出モードごとの初期インベントリを表8.3.1-2に示す。

表 8.3.1-2 Gr2 の溶出モードごとの初期インベントリ

²¹ インコネルの腐食挙動はステンレス鋼の腐食挙動とは異なる可能性があるが、信頼性のある腐食データが得られていないため、ステンレス鋼に統合して評価されている。

核種	グループ2の解析のサブケース毎の初期インベントリ [Bq]								
	ハル・エンドピース (JNFL, JAEA)				CSD-C				CSD-B
溶出モード	全量	瞬時溶出	ジルカロイ母材	ステンレス	全量	瞬時溶出	ジルカロイ母材	ステンレス	全量 (瞬時溶出)
C-14	4.84E+14	1.55E+13	3.17E+14	1.51E+14	1.06E+14	3.38E+12	6.91E+13	3.30E+13	7.5E+07
Cl-36	9.16E+12	2.66E+11	7.18E+12	1.71E+12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.0E+08
Co-60	4.99E+16	2.50E+15	8.99E+15	3.85E+16	2.17E+16	1.09E+15	3.91E+15	1.67E+16	6.7E+09
Ni-59	7.48E+15	0.00E+00	0.00E+00	7.48E+15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.3E+08
Ni-63	9.38E+17	0.00E+00	0.00E+00	9.38E+17	1.69E+17	0.00E+00	0.00E+00	1.69E+17	0.0E+00
Se-79	2.17E+12	2.13E+12	0.00E+00	4.35E+10	1.04E+12	1.02E+12	0.00E+00	2.08E+10	2.8E+10
Sr-90	1.94E+17				1.21E+17				4.2E+14
Zr-93	3.03E+14	6.97E+13	2.33E+14	0.00E+00	6.84E+13	1.57E+13	5.27E+13	0.00E+00	0.0E+00
Nb-94	2.63E+15	2.63E+13	5.27E+13	2.56E+15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0E+00
Mo-93	5.55E+13	5.55E+11	1.11E+12	5.39E+13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.0E+00
Tc-99	6.48E+14				4.35E+13				7.2E+11
Pd-107	5.48E+11				0.00E+00				0.0E+00
Sn-126	3.84E+12				0.00E+00				0.0E+00
I-129	1.59E+11				1.00E+11				3.9E+07
Cs-135	2.22E+12				1.34E+12				2.8E+10
Cs-137	2.75E+17				1.38E+17				1.5E+15
Cm-244	3.11E+15				2.90E+15				5.1E+12
Pu-240	1.54E+15				1.18E+15				1.7E+12
U-236	1.02E+12				8.72E+08				4.2E+08
Th-232	1.26E+03				5.37E-01				5.2E-01
Ra-228	8.11E+02				2.70E-01				3.3E-01
Th-228	6.86E+02				2.06E-01				2.8E-01
Cm-245	8.58E+11				0.00E+00				3.5E+09
Pu-241	1.03E+17				8.51E+16				3.3E+09
Am-241	1.07E+16				8.09E+15				2.9E+13
Np-237	1.35E+12				7.45E+11				4.5E+11
U-233	5.44E+09				7.88E+07				4.9E+07
Th-229	1.27E+07				9.16E+04				5.8E+04
Cm-246	0.00E+00				0.00E+00				0.0E+00
Pu-242	6.38E+12				6.54E+12				4.5E+09
U-238	8.59E+11				2.54E+04				1.4E+09
U-234	4.31E+12				3.81E+12				1.8E+09
Th-230	1.72E+08				7.93E+07				8.9E+04
Ra-226	7.86E+05				2.90E+05				4.2E+02
Pb-210	1.56E+05				4.91E+04				8.6E+01
Am-243	6.93E+13				1.70E+15				3.0E+11
Pu-239	9.75E+14				6.80E+14				1.3E+12
U-235	6.10E+10				1.67E+07				5.7E+07
Pa-231	3.22E+07				4.42E+03				3.0E+04
Ac-227	1.00E+07				9.72E+02				9.4E+03

また、ハルエンドピース (JNFL, JAEA) と返還固化体 (CSD-C, CSD-B) には、発熱特性の違いにより、異なった人工バリアの幾何形状 (表 3.4.2-9 参照) が設定されている。

5章の廃棄体グループ2のC-14に対する包括的感度解析においては、結晶質岩、降水系地下水の条件において、3種類の放出モードごとに成立条件が抽出された (図 5.2.2-10, 図 5.2.2-15, 図 5.2.2-20 参照)。この成立条件の抽出においては、3.5節で設定された包括的感度解析に関する入力情報が用いられ、それぞれの溶出モードの計算に用いるC-14の初期インベントリとして、表 3.5.1-3 に示されている値が用いられた。また、人工バリアの幾何形状は主要な廃棄体であるJNFL, JAEAの人工バリア幾何形状で代表させた。

廃棄体グループ2の決定論解析においては、処分坑道の幾何形状が異なるハルエンドピース (JNFL, JAEA) と返還固化体 (CSD-C, CSD-B) とを分けて解析を行った。この際、表 8.3.1-2 に示される溶出モードごとの初期インベントリを用いて、瞬時放出モードのみのCSD-Bと3つの溶出モードを有するJNFL, JAEA, CSD-Cの核種放出を別々に解析する。

8.3.2 廃棄体グループ2における放射化生成物の浸出期間

(1) ジルカロイの腐食と浸出期間の設定

原環センター（2012）では、炉外での高温環境下での腐食試験を行い、ジルカロイの長期腐食の予測モデルを複数設定している。そのうち本検討では、腐食量が線形に増大する簡易な3つのモデルを採用した（表 8.3.2-1 参照）。

ジルカロイ母材に含まれる放射化生成物は、この速度で液相側に放出されるものとする。

表 8.3.2-1 Gr2 のジルカロイからの核種の浸出期間

モデル	使用する式	寿命 [y] ²²	備考
TRU 浸出速度 (最も保守的)	$Y = 0.02 \times t$ Y : 腐食量 [μm] t : 時間 [y]	11,400	最も保守的なケースとして、C-14 浸出試験のごく初期の試験結果(0.5年)を基に設定された第2次 TRU レポートの値を設定。
浸出速度1 (保守的)	$Y = 1.44 \times 10^{-3} \times t$ Y : 腐食量 [μm] t : 時間 [y]	158,000	保守的なケースとして、C-14 浸出試験の結果が1/3乗則で推移したときの10年後の浸出速度が一定となるとして設定した。
浸出速度2 (現実的保守的 80°C)	$Y = 4.63 \times 10^{-6} \times t \times a_1$ Y : 腐食量 [μm] t : 時間 [y] a_1 : 加速係数 (=12)	4,110,000	現実的保守的なケースとして、2つ目の遷移点以降の腐食速度を一定になるとして設定した。なお、処分場の温度は80°Cを上限と設定されていることから、全期間に亘り温度は80°C一定とした。

(2) ステンレス・インコネルの腐食と浸出期間の設定

原環センター（2012）では、ガス蓄積型試験（NaOH系、pH12.5、50°C）結果に基づき、ステンレスの腐食速度として $2.6 \times 10^{-3} \mu\text{m/y}$ を設定した。これと併せて、第2次 TRU レポートでの設定の2つのモデルを採用するものとする（表 8.3.2-2 参照）。ステンレス・インコネルに含まれる放射化生成物は、この速度で液相側に放出されるものとする。

本検討における決定論解析においては、ジルカロイ母材とステンレス・インコネルに対する浸出率（浸出期間：寿命）に対して、最も保守的な値（浸出率が大きくなるもつとも浸出期間が短い値：ジルカロイ母材：11,400年、ステンレス・インコネル：8,500年）（表 8.3.2-1、表 8.3.2-2 参照）と保守的な値（ジルカロイ母材：158,000年、ステンレス・インコネル：65,385年）の2通りの溶出率のパターンを設定した。

表 8.3.2-2 Gr2 のステンレスからの核種の浸出期間

²² 燃料被覆管厚さ(0.57mm)から酸化皮膜を除いた実効的な厚さを算出(0.8倍)、これを腐食速度で除し、さらに板状金属の両面からの腐食を考慮して2で除すことで寿命を算出している。

モデル	使用する式	寿命 [y]	備考
TRU 浸出速度 (最も保守的)	$Y = 0.02 \times t$ Y : 腐食量 [μm] t : 時間 [y]	8,500	第2次 TRU レポートの値を設定。
浸出速度1 (保守的)	$Y = 2.6 \times 10^{-3} \times t$ Y : 腐食量 [μm] t : 時間 [y]	65,385 ²³	ガス蓄積型試験 (NaOH 系, pH12.5, 50°C) 結果を反映。海水系、高温では腐食が加速される懸念あり。

8.3.3 処分施設の諸元

処分施設内の個々の構成材料に関する熱的制約条件の考え方については、3章（表 3.4.2-7）にて述べたとおりである。特にセメント系材料については、廃棄体内充填材、パッケージ内充填材、パッケージそのもの（case3-0）、パッケージ間隙間充填材など、検討ケース・廃棄体グループ・場所によっても、核種の収着機能を見込むかどうか異なる。そこで、熱的制約条件を踏まえて、それぞれの検討ケースおよび廃棄体グループについて、セメント系材料の取扱いを整理し、表 8.3.3-1 に示す。処分施設内に存在するセメント系材料の使われる場所について図 8.3.3-1 に整理した。

表 8.3.3-1 に基づき、各検討ケースの安全評価で用いる処分施設の諸元を表 8.3.3-2～表 8.3.3-5 に示す。また、同心円筒形状での水理解析（電事連・JNC, 2005）を処分坑道断面に基づき実施し、人工バリア内ダルシー流速および EDZ 内の地下水流量を算出した。これらの結果を表 8.3.3-6～表 8.3.3-9 に示す。

尚、安全評価で用いる case1-1 における処分施設の諸元および水理パラメータとして、case1-0 と同じ値を用いることとした。

²³ 第2次 TRU レポートから想定されるステンレス鋼の部材厚さを用いて寿命を算出した。

表 8.3.3-1 安全評価におけるセメント系材料の取扱い

セメント系材料の取扱い	グループ1				グループ2							
					ハル・エンドピース				CSD-C・CSD-B			
	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0
支保工	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
インバート	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
埋め戻し材	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
パッケージ間すきま充填	○	○	○	○	△	△	△	△	△	△	△	△
パッケージ	×	×	×	△	×	×	×	△	×	×	×	△
パッケージ内充填	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
廃棄体内充填	△	△	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×

検討ケース

1-0 低透水性NBSのレファレンス

1-2 低定置密度

2-0 高透水性NBSのレファレンス

3-0 低透水性NBS

(コンクリート製廃棄体容器)

セメント系材料の取扱い	グループ3				グループ4															
					低発熱性								発熱性							
					200Lドラム缶				角型容器				200Lドラム缶				ハル缶・インナーバレル			
	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0	1-0	1-2	2-0	3-0
支保工	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
インバート	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
埋め戻し材	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	×
パッケージ間すきま充填	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△
パッケージ	×	×	×	△	×	×	×	△	×	×	×	△	×	×	×	△	×	×	×	△
パッケージ内充填	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△
廃棄体内充填	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△

○：部材として存在し、安全評価における取着バリアとして考慮する。
 ×：部材として存在しない。
 △：部材としては存在するが、安全評価における取着バリアとしては考慮しない。

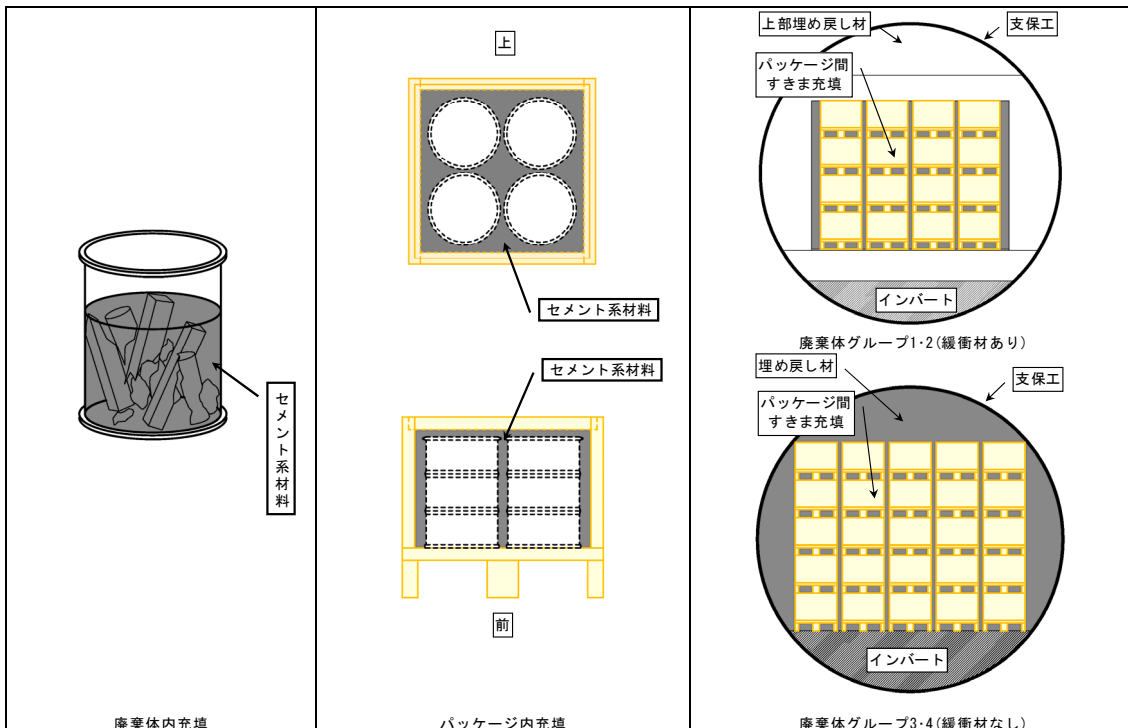


図 8.3.3-1 処分施設内のセメント系材料の使用部位

表 8.3.3-2 各廃棄体における処分施設の諸元(case1-0:低透水性NBSのRef)

	廃棄体グループ		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]	セメント系材料内訳						空洞体積 [m ³]	収着機能を期待しない充填材体積 [m ³]	収着機能を期待する充填材体積 [m ³]	緩衝材厚さ [m]	緩衝材表面積 [m ²]
							廃棄体内充填材 [m ³]	パッケージ内充填材 [m ³]	コンクリートパッケージ充填材 [m ³]	パッケージ間すき間充填材 [m ³]	埋め戻し材 [m ³]	インバート [m ³]						支保工 [m^{3}]
結晶質岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302	159	376		767		479	180		1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL-JAEA	688.5	11.9	5,342	18,727	0	4,296		11,312		7,735	2,596	4,296	11,312	1.0	25,740
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	358.5	7.4	741	5,162	0	597		1,898		554	845	597	1,898	1.0	8,334
	3	200L ドラム缶	495.0	11.8	5,492	18,350	853	5,984		9,691	15,239	7,313	1,851		30,914		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	433.8	11.8	4,845	16,081	1,414	5,244		8,493	13,355	6,409	1,622		27,092		
		角型容器	50.4	10.4	884	1,647	465	215		561	1,200	726	166		1,976		
	4 (発熱性)	200L ドラム缶	82.8	11.8	921	3,069	134	1,001		1,621	2,549	1,223	310		2,622	2,549	
		ハル缶・インナーバレル	396.0	5.0	458	6,220	132	466		567	4,701	952	634		1,033	4,701	
堆積岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302	159	376		767		479	1,127		1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL-JAEA	688.5	11.9	5,342	18,727	0	4,296		11,312		7,735	16,222	4,296	15,608	1.0	25,740
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	358.5	7.4	741	5,162	0	597		1,898		554	5,406	597	2,494	1.0	8,334
	3	200L ドラム缶	495.0	11.8	5,492	18,350	853	5,984		9,691	15,239	7,313	11,570		30,914		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	433.8	11.8	4,845	16,081	1,414	5,244		8,493	13,355	6,409	10,139		27,092		
		角型容器	50.4	10.4	884	1,647	465	215		561	1,200	726	1,045		1,976		
	4 (発熱性)	200L ドラム缶	82.8	11.8	921	3,069	134	1,001		1,621	2,549	1,223	1,935		2,622	2,549	
		ハル缶・インナーバレル	298.0	5.0	458	4,681	132	466		632	2,942	716	3,146		1,100	2,942	

※廃棄体グループ2のパッケージ内充填材量は、キャニスタ用鋼製廃棄体パッケージ図面より算出

廃棄体グループ2においてパッケージ内充填をしないため、安全評価上は空洞中を水が満たすとして考慮する体積

安全評価上、核種収着機能を期待しないセメント系材料の体積。間隙水の体積は考慮する。

安全評価上、核種収着機能を期待するセメント系材料の体積。

表 8.3.3-3 各廃棄体における処分施設の諸元(case1-2：低定置密度)

	廃棄体グループ		廃棄体定置領域長さ [m]	坑道径 [m]	廃棄体量 [m³]	表面積 [m²]	セメント系材料内訳						空洞体積 [m³]	取着機能を期待しない充填材体積 [m³]	取着機能を期待する充填材体積 [m³]	緩衝材厚さ [m]	緩衝材表面積 [m²]	
							廃棄体内充填材 [m³]	パッケージ内充填材 [m³]	コンクリートパッケージ [m³]	パッケージ間すき間充填材 [m³]	埋め戻し材 [m³]	インバート [m³]						支保工 [m³]
結晶質岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302	159	376		767		479	180			1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	5,342	18,727	0	4,296		11,312		7,735	2,596	4,296	11,312		1.0	25,740
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	358.5	7.4	741	5,162	0	597		1,898		554	845	597	1,898		1.0	8,334
	3	200L ドラム缶	495.0	11.8	5,492	18,350	853	5,984		9,691	15,239	7,313	1,851			30,914		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	433.8	11.8	4,845	16,081	1,414	5,244		8,493	13,355	6,409	1,622			27,092		
		角型容器	50.4	10.4	884	1,647	465	215		561	1,200	726	166			1,976		
4 (発熱性)	200L ドラム缶	172.8	8.1	921	4,397	134	1,003		1,544	2,919	773	445		2,546	2,919			
	ハル缶・インナーバレル	396.0	5.0	458	6,220	132	466		567	4,701	952	634		1,033	4,701			
堆積岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302	159	376		767		479	1,127			1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	5,342	18,727	0	4,296		11,312		7,735	16,222	4,296	11,312		1.0	25,740
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	715.5	6.1	741	7,584	0	595		1,894		1,843	9,036	595	1,894		1.0	18,207
	3	200L ドラム缶	495.0	11.8	5,492	18,350	853	5,984		9,691	15,239	7,313	11,570			30,914		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	433.8	11.8	4,845	16,081	1,414	5,244		8,493	13,355	6,409	10,139			27,092		
		角型容器	50.4	10.4	884	1,647	465	215		561	1,200	726	1,045			1,976		
4 (発熱性)	200L ドラム缶	172.8	8.1	921	4,397	134	1,003		1,544	2,919	773	2,834		2,546	2,919			
	ハル缶・インナーバレル	298.0	5.0	458	4,681	132	468		632	2,942	716	3,146		1,100	2,942			

※廃棄体グループ2のパッケージ内充填材量は、キャニスタ用鋼製廃棄体パッケージ図面より算出

- 廃棄体グループ2においてパッケージ内充填をしないため、安全評価上は空洞中を水が満たすとして考慮する体積
- 安全評価上、核種収着機能を期待しないセメント系材料の体積。間隙水の体積は考慮する。
- 安全評価上、核種収着機能を期待するセメント系材料の体積。

表 8.3.3-4 各廃棄体における処分施設の諸元(case2-0 : 高透水性 NBS の Ref)

	廃棄体グループ		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]	セメント系材料内訳						空洞体積 [m ³]	収着機能を期待しない充填材体積 [m ³]	収着機能を期待する充填材体積 [m ³]	緩衝材厚さ [m]	緩衝材表面積 [m ²]	
							廃棄体内充填材 [m ³]	パッケージ内充填材 [m ³]	コンクリートパッケージ [m ³]	パッケージ間すき間充填材 [m ³]	埋め戻し材 [m ³]	インポート [m ³]						支保工 [m ³]
結晶質岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302		376		767		469	180			1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	427.1	11.7	5,342	11,527	0	5,046		6,601		2,324	1,583	5,046	6,601		1.0	15,699
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	393.7	6.7	741	4,982	0	698		2,134		305	841	698	2,134		1.0	8,287
	3	200L ドラム缶	772.2	11.7	5,492	20,695	853	5,975		12,184		7,456	2,863			18,158	1.0	28,383
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	678.6	11.7	4,845	18,186	1,414	5,250		10,707		6,553	2,516			15,957	1.0	24,943
		角型容器	67.2	11.0	884	1,667	465	215		772		473	234			986	1.0	2,322
	4 (発熱性)	200L ドラム缶	129.6	11.7	921	3,473	134	1,003		2,045		1,251	480		3,048	0	1.0	4,764
ハル缶・インナーバレル		396.0	6.5	458	4,831	132	466		2,119		334	821		2,585	0	1.0	8,086	
堆積岩	1	200L ドラム缶	48.6	11.7	335	1,302		376		767		469	1,127			1,143	1.0	1,786
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	427.1	11.7	5,342	11,527	0	5,046		6,601		2,324	9,903	5,046	6,601		1.0	15,699
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	295.9	6.7	741	3,745	0	699		1,160		230	4,071	699	1,160		1.0	6,228
	3	200L ドラム缶	772.2	11.7	5,492	20,695	853	5,975		12,184		7,456	17,903			18,158	1.0	28,383
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	678.6	11.7	4,845	18,186	1,414	5,250		10,707		6,553	15,733			15,957	1.0	24,943
		角型容器	67.2	11.0	884	1,667	465	215		772		473	1,469			986	1.0	2,322
	4 (発熱性)	200L ドラム缶	129.6	11.7	921	3,473	134	1,003		2,045		1,251	3,005		3,048	0	1.0	4,764
ハル缶・インナーバレル		298.0	6.5	458	3,636	132	468		1,205		252	3,988		1,672	0	1.0	6,085	

※廃棄体グループ2パッケージ内充填材量は、長期閉じ込め型金属容器の概念(基本仕様)より算出

- 廃棄体グループ2においてパッケージ内充填をしないため、安全評価上は空洞中を水が満たすとして考慮する体積
- 安全評価上、核種収着機能を期待しないセメント系材料の体積。間隙水の体積は考慮する。
- 安全評価上、核種収着機能を期待するセメント系材料の体積。

表 8.3.3-5 各廃棄体における処分施設の諸元(case3-0 : (コンクリート容器))

	廃棄体グループ		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]	セメント系材料内訳						空洞体積 [m ³]	取着機能を期待しない充填材体積 [m ³]	取着機能を期待する充填材体積 [m ³]	緩衝材厚さ [m]	緩衝材表面積 [m ²]	
							廃棄体内充填材 [m ³]	パッケージ内充填材 [m ³]	コンクリートパッケージ [m ³]	パッケージ間すき間充填材 [m ³]	埋め戻し材 [m ³]	インバート [m ³]						支保工 [m ³]
結晶質岩	1	200L ドラム缶	75.3	11.6	335	1,987	159	347	1,540	1,075		531	277		1,540	1,423	1.0	2,742
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	975.8	11.6	5,342	25,956	0	2,812	20,824	14,227		7,817	3,587	2,812	35,051		1.0	35,561
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	810.9	6.6	741	9,488	0	389	2,884	2,303		2,842	1,707	389	5,187		1.0	16,814
	3	200L ドラム缶	922.4	11.0	5,492	31,874	853	5,676	25,172	13,246	24,770	13,299	3,216		25,172	43,692		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	810.6	11.0	4,845	28,011	1,414	4,988	22,121	11,640	21,767	11,687	2,827		22,121	38,396		
		角型容器	57.6	11.4	884	2,063	465	464	987	742	1,644	1,149	208		987	2,850		
4 (発熱性)	200L ドラム缶	154.8	11.0	921	5,350	134	953	4,225	2,223	4,157	2,232	540		7,400	4,157			
	ハル缶・インナーバレル	730.1	5.0	458	11,468	132	244	1,740	733	6,983	4,126	1,170		2,717	6,983			
堆積岩	1	200L ドラム缶	75.3	11.6	335	1,987	159	347	1,540	1,075		531	1,730		1,540	1,423	1.0	2,742
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	975.8	11.6	5,342	25,956	0	2,812	20,824	14,227		7,817	22,440	2,812	35,051		1.0	35,561
		キャニスタ GSD-C・GSD-B	406.3	7.8	741	6,379	0	390	2,890	2,308		729	6,433	390	5,198		1.0	9,956
	3	200L ドラム缶	922.4	11.0	5,492	31,874	853	5,676	25,172	13,246	24,770	13,299	20,168		25,172	43,692		
	4 (低発熱性)	200L ドラム缶	810.6	11.0	4,845	28,011	1,414	4,988	22,121	11,640	21,767	11,687	17,723		22,121	38,396		
		角型容器	57.6	11.4	884	2,063	465	464	987	742	1,644	1,149	1,303		987	2,850		
4 (発熱性)	200L ドラム缶	154.8	11.0	921	5,350	134	953	4,225	2,223	4,157	2,232	3,385		7,400	4,157			
	ハル缶・インナーバレル	365.1	5.0	458	5,734	132	244	1,740	366	3,200	740	3,672		2,351	3,200			

※パッケージ内充填材量、コンクリートパッケージ体積はコンクリート製パッケージ寸法仕様より算出

- 廃棄体グループ2においてパッケージ内充填をしないため、安全評価上は空洞中を水が満たすとして考慮する体積
- 安全評価上、核種収着機能を期待しないセメント系材料の体積。間隙水の体積は考慮する。
- 安全評価上、核種執着機能を期待するセメント系材料の体積。

表 8.3.3-6 人工バリア水理パラメータ (case1-0 : 低透水性 NBS の Ref)

廃棄体グループ	廃棄体定置領域長さ [m]	坑道径 [m]	緩衝材の有無	母岩透水係数 2E-10m/s			母岩透水係数 2E-09m/s			母岩透水係数 2E-08m/s			母岩透水係数 2E-07m/s				
				人工バリア内ダルシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダルシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダルシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダルシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量			
					単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		
結晶質岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	有	2.82E-06	2.20E-03	1.52E+00	2.86E-06	2.20E-02	1.52E+01	2.86E-06	2.20E-01	1.52E+02	2.86E-06	2.20E+00	1.52E+03
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	358.5	7.4	有	1.52E-06	1.66E-03	5.95E-01	1.52E-06	1.66E-02	5.95E+00	1.52E-06	1.66E-01	5.95E+01	1.52E-06	1.66E+00	5.95E+02
	3	200Lドラム缶	495.0	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.11E+00	1.71E-03	2.24E-02	1.11E+01	1.46E-02	2.23E-01	1.10E+02	5.84E-02	2.21E+00	1.09E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	433.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	9.70E-01	1.71E-03	2.24E-02	9.70E+00	1.46E-02	2.23E-01	9.67E+01	5.84E-02	2.21E+00	9.57E+02
		角型容器	50.4	10.4	無	1.79E-04	2.06E-03	1.04E-01	1.75E-03	2.06E-02	1.04E+00	1.47E-02	2.05E-01	1.03E+01	5.65E-02	2.03E+00	1.02E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	82.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.85E-01	1.71E-03	2.24E-02	1.85E+00	1.46E-02	2.23E-01	1.85E+01	5.84E-02	2.21E+00	1.83E+02
		ハル缶・インナーパレル	396.0	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	5.46E-01	2.01E-03	1.38E-02	5.46E+00	1.56E-02	1.38E-01	5.45E+01	4.81E-02	1.37E+00	5.42E+02
堆積岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	有	2.82E-06	2.20E-03	1.52E+00	2.86E-06	2.20E-02	1.52E+01	2.86E-06	2.20E-01	1.52E+02	2.86E-06	2.20E+00	1.52E+03
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	358.5	7.4	有	1.52E-06	1.66E-03	5.95E-01	1.52E-06	1.66E-02	5.95E+00	1.52E-06	1.66E-01	5.95E+01	1.52E-06	1.66E+00	5.95E+02
	3	200Lドラム缶	495.0	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.11E+00	1.71E-03	2.24E-02	1.11E+01	1.46E-02	2.23E-01	1.10E+02	5.84E-02	2.21E+00	1.09E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	433.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	9.70E-01	1.71E-03	2.24E-02	9.70E+00	1.46E-02	2.23E-01	9.67E+01	5.84E-02	2.21E+00	9.57E+02
		角型容器	50.4	10.4	無	1.79E-04	2.06E-03	1.04E-01	1.75E-03	2.06E-02	1.04E+00	1.47E-02	2.05E-01	1.03E+01	5.65E-02	2.03E+00	1.02E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	82.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.85E-01	1.71E-03	2.24E-02	1.85E+00	1.46E-02	2.23E-01	1.85E+01	5.84E-02	2.21E+00	1.83E+02
		ハル缶・インナーパレル	298.0	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	4.11E-01	2.01E-03	1.38E-02	4.11E+00	1.56E-02	1.38E-01	4.10E+01	2.26E-05	1.77E+00	5.28E+02

※ 人工バリア内の透水係数は、4E-06 m/s(廃棄体・充填材領域)、2E-11 m/s(緩衝材領域(厚さ1m))とし、掘削影響領域(厚さ3m)の透水係数は母岩透水係数の100倍と設定した。

表 8.3.3-7 人工バリア水理パラメータ (case1-2 : 低定置密度)

	廃棄体グループ	廃棄体定置領域長さ [m]	坑道径 [m]	緩衝材の有無	母岩透水係数 2E-10m/s			母岩透水係数 2E-09m/s			母岩透水係数 2E-08m/s			母岩透水係数 2E-07m/s			
					人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		
						単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]	
結晶質岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	有	2.82E-06	2.20E-03	1.52E+00	2.86E-06	2.20E-02	1.52E+01	2.86E-06	2.20E-01	1.52E+02	2.86E-06	2.20E+00	1.52E+03
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	358.5	7.4	有	1.52E-06	1.66E-03	5.95E-01	1.52E-06	1.66E-02	5.95E+00	1.52E-06	1.66E-01	5.95E+01	1.52E-06	1.66E+00	5.95E+02
	3	200Lドラム缶	495.0	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.11E+00	1.71E-03	2.24E-02	1.11E+01	1.46E-02	2.23E-01	1.10E+02	5.84E-02	2.21E+00	1.09E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	433.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	9.70E-01	1.71E-03	2.24E-02	9.70E+00	1.46E-02	2.23E-01	9.67E+01	5.84E-02	2.21E+00	9.57E+02
		角型容器	50.4	10.4	無	1.79E-04	2.06E-03	1.04E-01	1.75E-03	2.06E-02	1.04E+00	1.47E-02	2.05E-01	1.03E+01	5.65E-02	2.03E+00	1.02E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	172.8	8.1	無	1.88E-04	1.77E-03	3.06E-01	1.84E-03	1.77E-02	3.06E+00	1.50E-02	1.76E-01	3.05E+01	5.31E-02	1.75E+00	3.03E+02
		ハル缶・インナーパレル	396.0	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	5.46E-01	2.01E-03	1.38E-02	5.46E+00	1.56E-02	1.38E-01	5.45E+01	4.81E-02	1.37E+00	5.42E+02
堆積岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	688.5	11.9	有	2.82E-06	2.20E-03	1.52E+00	2.86E-06	2.20E-02	1.52E+01	2.86E-06	2.20E-01	1.52E+02	2.86E-06	2.20E+00	1.52E+03
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	715.5	6.1	有	1.21E-06	1.50E-03	1.07E+00	1.21E-06	1.50E-02	1.07E+01	1.21E-06	1.50E-01	1.07E+02	1.21E-06	1.50E+00	1.07E+03
	3	200Lドラム缶	495.0	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	1.11E+00	1.71E-03	2.24E-02	1.11E+01	1.46E-02	2.23E-01	1.10E+02	5.84E-02	2.21E+00	1.09E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	433.8	11.8	無	1.74E-04	2.24E-03	9.70E-01	1.71E-03	2.24E-02	9.70E+00	1.46E-02	2.23E-01	9.67E+01	5.84E-02	2.21E+00	9.57E+02
		角型容器	50.4	10.4	無	1.79E-04	2.06E-03	1.04E-01	1.75E-03	2.06E-02	1.04E+00	1.47E-02	2.05E-01	1.03E+01	5.65E-02	2.03E+00	1.02E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	172.8	8.1	無	1.88E-04	1.77E-03	3.06E-01	1.84E-03	1.77E-02	3.06E+00	1.50E-02	1.76E-01	3.05E+01	5.31E-02	1.75E+00	3.03E+02
		ハル缶・インナーパレル	298.0	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	4.11E-01	2.01E-03	1.38E-02	4.11E+00	1.56E-02	1.38E-01	4.10E+01	1.37E-01	1.99E+00	5.94E+02

※ 人工バリア内の透水係数は、4E-06 m/s(廃棄体・充填材領域)、2E-11 m/s(緩衝材領域(厚さ1m))とし、掘削影響領域(厚さ3m)の透水係数は母岩透水係数の100倍と設定した。

表 8.3.3-8 人工バリア水理パラメータ (case2-0 : 高透水性 NBS の Ref)

	廃棄体グループ	廃棄体定置領域長さ [m]	坑道径 [m]	緩衝材の有無	母岩透水係数 2E-10m/s			母岩透水係数 2E-09m/s			母岩透水係数 2E-08m/s			母岩透水係数 2E-07m/s			
					人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		人工バリア内ダグシー流速 [m/y]	掘削影響領域地下水流量		
						単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]		単位坑道長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体定置領域相当 [m³/y]	
結晶質岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	427.1	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	9.30E-01	2.79E-06	2.18E-02	9.30E+00	2.79E-06	2.18E-01	9.30E+01	2.79E-06	2.18E+00	9.30E+02
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	393.7	6.7	有	1.35E-06	1.57E-03	6.20E-01	1.35E-06	1.57E-02	6.20E+00	1.35E-06	1.57E-01	6.20E+01	1.35E-06	1.57E+00	6.20E+02
	3	200Lドラム缶	772.2	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.68E+00	2.79E-06	2.18E-02	1.68E+01	2.79E-06	2.18E-01	1.68E+02	2.79E-06	2.18E+00	1.68E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	678.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.48E+00	2.79E-06	2.18E-02	1.48E+01	2.79E-06	2.18E-01	1.48E+02	2.79E-06	2.18E+00	1.48E+03
		角型容器	67.2	11.0	有	2.53E-06	2.09E-03	1.41E-01	2.56E-06	2.09E-02	1.41E+00	2.56E-06	2.09E-01	1.41E+01	2.56E-06	2.09E+00	1.41E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	129.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	2.82E-01	2.79E-06	2.18E-02	2.82E+00	2.79E-06	2.18E-01	2.82E+01	2.79E-06	2.18E+00	2.82E+02
	ハル缶・インナーパレル	396.0	6.5	有	1.30E-06	1.55E-03	6.14E-01	1.30E-06	1.55E-02	6.14E+00	1.31E-06	1.55E-01	6.14E+01	1.31E-06	1.55E+00	6.14E+02	
堆積岩	1	200Lドラム缶	48.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.06E-01	2.79E-06	2.18E-02	1.06E+00	2.79E-06	2.18E-01	1.06E+01	2.79E-06	2.18E+00	1.06E+02
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	427.1	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	9.30E-01	2.79E-06	2.18E-02	9.30E+00	2.79E-06	2.18E-01	9.30E+01	2.79E-06	2.18E+00	9.30E+02
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	295.9	6.7	有	1.35E-06	1.57E-03	4.66E-01	1.35E-06	1.57E-02	4.66E+00	1.35E-06	1.57E-01	4.66E+01	2.28E-05	1.78E+00	5.26E+02
	3	200Lドラム缶	772.2	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.68E+00	2.79E-06	2.18E-02	1.68E+01	2.79E-06	2.18E-01	1.68E+02	2.79E-06	2.18E+00	1.68E+03
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	678.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	1.48E+00	2.79E-06	2.18E-02	1.48E+01	2.79E-06	2.18E-01	1.48E+02	2.79E-06	2.18E+00	1.48E+03
		角型容器	67.2	11.0	有	2.53E-06	2.09E-03	1.41E-01	2.56E-06	2.09E-02	1.41E+00	2.56E-06	2.09E-01	1.41E+01	2.56E-06	2.09E+00	1.41E+02
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	129.6	11.7	有	2.76E-06	2.18E-03	2.82E-01	2.79E-06	2.18E-02	2.82E+00	2.79E-06	2.18E-01	2.82E+01	2.79E-06	2.18E+00	2.82E+02
	ハル缶・インナーパレル	298.0	6.5	有	1.30E-06	1.55E-03	4.62E-01	1.30E-06	1.55E-02	4.62E+00	1.31E-06	1.55E-01	4.62E+01	1.45E-01	1.28E+00	3.80E+02	

※ 人工バリア内の透水係数は、4E-06 m/s(廃棄体・充填材領域)、2E-11 m/s(緩衝材領域(厚さ1m))とし、掘削影響領域(厚さ3m)の透水係数は母岩透水係数の100倍と設定した。

表 8.3.3-9 人工バリア水理パラメータ (case3-0 : 低透水性 NBS (コンクリート容器))

廃棄体グループ	廃棄体位置 領域長さ [m]	坑道径 [m]	緩衝材の 有無	母岩透水係数 2E-10m/s				母岩透水係数 2E-09m/s				母岩透水係数 2E-08m/s				母岩透水係数 2E-07m/s			
				人工バリア 内ダ ルシ ー流 速 [m/y]	掘削影響領域地下水 流量		人工バリア 内ダ ルシ ー流 速 [m/y]	掘削影響領域地下水 流量		人工バリア 内ダ ルシ ー流 速 [m/y]	掘削影響領域地下水 流量		人工バリア 内ダ ルシ ー流 速 [m/y]	掘削影響領域地下水 流量					
					単位坑道 長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体 位置領域 相当 [m³/y]		単位坑道 長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体 位置領域 相当 [m³/y]		単位坑道 長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体 位置領域 相当 [m³/y]		単位坑道 長さあたり [m³/y/m]	全廃棄体 位置領域 相当 [m³/y]				
結晶質岩	1	200Lドラム缶	75.3	11.6	有	2.72E-06	2.17E-03	1.63E-01	2.76E-06	2.17E-02	1.63E+00	2.76E-06	2.17E-01	1.63E+01	2.76E-06	2.17E+00	1.63E+02		
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	975.8	11.6	有	2.72E-06	2.17E-03	2.11E+00	2.76E-06	2.17E-02	2.11E+01	2.76E-06	2.17E-01	2.11E+02	2.76E-06	2.17E+00	2.11E+03		
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	810.9	6.6	有	1.32E-06	1.56E-03	1.27E+00	1.33E-06	1.56E-02	1.27E+01	1.33E-06	1.56E-01	1.27E+02	1.33E-06	1.56E+00	1.27E+03		
	3	200Lドラム缶	922.4	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	1.97E+00	1.73E-03	2.13E-02	1.97E+01	1.46E-02	2.13E-01	1.96E+02	5.73E-02	2.11E+00	1.94E+03		
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	810.6	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	1.73E+00	1.73E-03	2.13E-02	1.73E+01	1.46E-02	2.13E-01	1.73E+02	5.73E-02	2.11E+00	1.71E+03		
		角型容器	57.6	11.4	無	1.75E-04	2.19E-03	1.26E-01	1.72E-03	2.19E-02	1.26E+00	1.46E-02	2.18E-01	1.25E+01	5.79E-02	2.16E+00	1.24E+02		
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	154.8	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	3.31E-01	1.73E-03	2.13E-02	3.30E+00	1.46E-02	2.13E-01	3.29E+01	5.73E-02	2.11E+00	3.26E+02		
		ハル缶・インナーパレル	730.1	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	1.01E+00	2.01E-03	1.38E-02	1.01E+01	1.56E-02	1.38E-01	1.00E+02	4.81E-02	1.37E+00	1.00E+03		
堆積岩	1	200Lドラム缶	75.3	11.6	有	2.72E-06	2.17E-03	1.63E-01	2.76E-06	2.17E-02	1.63E+00	2.76E-06	2.17E-01	1.63E+01	2.76E-06	2.17E+00	1.63E+02		
	2	キャニスタ JNFL・JAEA	975.8	11.6	有	2.72E-06	2.17E-03	2.11E+00	2.76E-06	2.17E-02	2.11E+01	2.76E-06	2.17E-01	2.11E+02	2.76E-06	2.17E+00	2.11E+03		
		キャニスタ CSD-C・CSD-B	406.3	7.8	有	1.62E-06	1.71E-03	6.94E-01	1.63E-06	1.71E-02	6.94E+00	1.63E-06	1.71E-01	6.94E+01	1.63E-06	1.71E+00	6.94E+02		
	3	200Lドラム缶	922.4	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	1.97E+00	1.73E-03	2.13E-02	1.97E+01	1.46E-02	2.13E-01	1.96E+02	5.73E-02	2.11E+00	1.94E+03		
	4 (低発熱性)	200Lドラム缶	810.6	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	1.73E+00	1.73E-03	2.13E-02	1.73E+01	1.46E-02	2.13E-01	1.73E+02	5.73E-02	2.11E+00	1.71E+03		
		角型容器	57.6	11.4	無	1.75E-04	2.19E-03	1.26E-01	1.72E-03	2.19E-02	1.26E+00	1.46E-02	2.18E-01	1.25E+01	5.79E-02	2.16E+00	1.24E+02		
	4 (発熱性)	200Lドラム缶	154.8	11.0	無	1.77E-04	2.14E-03	3.31E-01	1.73E-03	2.13E-02	3.30E+00	1.46E-02	2.13E-01	3.29E+01	5.73E-02	2.11E+00	3.26E+02		
		ハル缶・インナーパレル	365.1	5.0	無	2.07E-04	1.38E-03	5.03E-01	2.01E-03	1.38E-02	5.03E+00	1.56E-02	1.38E-01	5.02E+01	1.37E-01	2.04E+00	7.45E+02		

※ 人工バリア内の透水係数は、4E-06 m/s(廃棄体・充填材領域)、2E-11 m/s(緩衝材領域(厚さ1m))とし、掘削影響領域(厚さ3m)の透水係数は母岩透水係数の100倍と設定した。

8.3.4 半減期およびインベントリデータ

解析に用いる 19000 m³ 相当の廃棄物の発生量に対する核種の半減期と初期インベントリ(Bq) (基準年から 25 年経過後) を表 8.3.4-1 に示す。

表 8.3.4-1 核種の半減期および初期インベントリ(Bq) (基準年から 25 年後)

核種	半減期(y)	核種の初期インベントリ [Bq]								
		グループ1	グループ2			グループ3	グループ4 (低発熱性)		グループ4 (発熱性)	
			ハル・エンドピース	CSD-C	CSD-B		200Lドラム缶	角型容器	200Lドラム缶	ハル缶・インターバル
C-14	5.73E+03	0.0E+00	4.8E+14	1.1E+14	7.5E+07	7.4E+12	3.4E+09	2.4E+09	5.3E+11	2.2E+12
Cl-36	3.01E+05	0.0E+00	9.2E+12	0.0E+00	3.0E+08	3.3E+11	3.6E+07	1.1E+06	2.2E+04	1.3E+07
Co-60	5.27E+00	1.2E+05	5.0E+16	2.2E+16	6.7E+09	4.5E+11	3.7E+15	1.4E+10	3.0E+12	1.3E+13
Ni-59	8.00E+04	5.5E+03	7.5E+15	0.0E+00	8.3E+08	4.8E+08	5.9E+13	7.2E+05	8.2E+05	4.1E+08
Ni-63	9.20E+01	7.1E+05	9.4E+17	1.7E+17	0.0E+00	5.5E+10	7.3E+15	8.1E+07	9.4E+07	4.7E+10
Se-79	6.50E+04	3.9E+05	2.2E+12	1.0E+12	2.8E+10	6.7E+09	1.3E+11	1.8E+09	3.9E+11	1.6E+12
Sr-90	2.91E+01	3.7E+10	1.9E+17	1.2E+17	4.2E+14	6.9E+14	1.2E+16	1.7E+14	3.5E+16	1.5E+17
Zr-93	1.53E+06	1.8E+06	3.0E+14	6.8E+13	0.0E+00	3.1E+10	7.6E+12	1.6E+10	1.7E+12	7.3E+12
Nb-94	2.03E+04	3.3E+06	2.6E+15	0.0E+00	0.0E+00	1.9E+06	4.0E+07	8.0E+05	1.2E+08	5.2E+08
Mo-93	3.50E+03	3.7E+01	5.6E+13	0.0E+00	0.0E+00	8.1E+06	5.4E+07	2.5E+06	5.3E+08	9.0E+07
Tc-99	2.13E+05	0.0E+00	6.5E+14	4.3E+13	7.2E+11	3.9E+11	3.4E+12	5.6E+10	1.2E+13	9.7E+13
Pd-107	6.50E+06	1.1E+05	5.5E+11	0.0E+00	0.0E+00	2.5E+09	3.1E+10	4.0E+09	1.0E+11	4.2E+11
Sn-126	1.00E+05	7.4E+05	3.8E+12	0.0E+00	0.0E+00	1.1E+10	2.3E+11	3.3E+09	7.0E+11	2.9E+12
I-129	1.57E+07	5.9E+13	1.6E+11	1.0E+11	3.9E+07	7.2E+11	1.1E+08	1.0E+07	1.5E+09	3.0E+09
Cs-135	2.30E+06	4.3E+05	2.2E+12	1.3E+12	2.8E+10	7.0E+09	3.1E+11	1.9E+09	4.1E+11	1.7E+12
Cs-137	3.00E+01	5.3E+10	2.8E+17	1.4E+17	1.5E+15	8.5E+14	3.8E+16	2.3E+14	5.0E+16	2.1E+17
Cm-244	1.81E+01	8.1E+08	3.1E+15	2.9E+15	5.1E+12	1.3E+12	5.0E+14	9.7E+12	6.7E+14	5.0E+15
Pu-240	6.54E+03	3.7E+08	1.5E+15	1.2E+15	1.7E+12	8.9E+13	1.0E+15	4.8E+12	6.2E+14	3.6E+13
U-236	2.34E+07	2.6E+05	1.0E+12	8.7E+08	4.2E+08	2.8E+10	1.3E+11	3.0E+09	2.2E+11	6.7E+09
Th-232	1.41E+10	3.2E-04	1.3E+03	5.4E-01	5.2E-01	3.5E+01	1.6E+02	3.7E+00	2.7E+02	8.3E+00
Ra-228	6.70E+00	2.1E-04	8.1E+02	2.7E-01	3.3E-01	2.2E+01	1.1E+02	2.3E+00	1.7E+02	5.3E+00
Th-228	1.91E+00	1.8E-04	6.9E+02	2.1E-01	2.8E-01	1.9E+01	8.9E+01	2.0E+00	1.4E+02	4.5E+00
Cm-245	8.50E+03	2.2E+05	8.6E+11	0.0E+00	3.5E+09	2.1E+09	1.4E+11	2.7E+09	1.8E+11	1.4E+12
Pu-241	1.44E+01	2.9E+10	1.0E+17	8.5E+16	3.3E+09	3.1E+16	3.8E+16	1.6E+14	3.6E+16	6.3E+14
Am-241	4.32E+02	3.0E+09	1.1E+16	8.1E+15	2.9E+13	2.4E+15	4.8E+15	2.1E+13	3.9E+15	4.7E+15
Np-237	2.14E+06	1.7E+04	1.4E+12	7.4E+11	4.5E+11	4.7E+10	7.0E+11	3.8E+09	5.2E+11	2.1E+12
U-233	1.59E+05	7.8E-01	5.4E+09	7.9E+07	4.9E+07	6.2E+06	8.7E+07	6.2E+05	7.2E+07	2.3E+08
Th-229	7.34E+03	5.4E-04	1.3E+07	9.2E+04	5.8E+04	9.3E+03	1.2E+05	9.6E+02	1.0E+05	2.7E+05
Cm-246	4.73E+03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	3.87E+05	1.6E+06	6.4E+12	6.5E+12	4.5E+09	3.7E+11	2.4E+12	1.9E+10	2.0E+12	3.9E+11
U-238	4.47E+09	2.2E+05	8.6E+11	2.5E+04	1.4E+09	2.4E+10	1.6E+11	2.5E+09	2.0E+11	5.5E+09
U-234	2.45E+05	1.9E+06	4.3E+12	3.8E+12	1.8E+09	3.2E+11	2.6E+12	2.4E+10	2.4E+12	2.6E+12
Th-230	7.70E+04	2.1E+02	1.7E+08	7.9E+07	8.9E+04	2.7E+07	2.7E+08	2.5E+06	2.4E+08	7.5E+06
Ra-226	1.60E+03	1.1E+00	7.9E+05	2.9E+05	4.2E+02	1.4E+05	1.4E+06	1.3E+04	1.3E+06	3.4E+04
Pb-210	2.23E+01	2.4E-01	1.6E+05	4.9E+04	8.6E+01	2.9E+04	3.0E+05	2.7E+03	2.7E+05	6.9E+03
Am-243	7.38E+03	1.8E+07	6.9E+13	1.7E+15	3.0E+11	5.5E+11	1.2E+13	2.2E+11	1.5E+13	1.1E+14
Pu-239	2.41E+04	2.4E+08	9.8E+14	6.8E+14	1.3E+12	5.7E+13	8.7E+14	3.0E+12	4.8E+14	8.6E+12
U-235	7.04E+08	1.5E+04	6.1E+10	1.7E+07	5.7E+07	1.7E+09	3.2E+10	1.7E+08	2.4E+10	3.9E+08
Pa-231	3.28E+04	8.1E+00	3.2E+07	4.4E+03	3.0E+04	9.2E+05	1.7E+07	9.2E+04	1.3E+07	2.1E+05
Ac-227	2.18E+01	2.5E+00	1.0E+07	9.7E+02	9.4E+03	2.8E+05	5.3E+06	2.8E+04	3.9E+06	6.4E+04

8.3.5 核種移行パラメータ

第2次 TRU レポートで用いた処分概念 (case1) に対する核種移行パラメータを降水系還元性地下水環境と海水系還元性地下水環境に分けて、それぞれ、表 8.3.5-1 と表 8.3.5-2 に示す。

ここで、本検討においては、廃棄体グループ2の充填材(セメント系材料)については、表 8.3.3-1 に示すように、熱的制約条件(80℃)を緩和した設計とするため全ての解析ケースにおいて収着バリアとして考慮しない(Kd=0)こととした。表 8.3.5-1 と表 8.3.5-2 には、従来の期待される性能値を示しているが、決定論解析においては、全ての核種に対して Kd=0 が設定されていることに注意が必要である。これについては、後述する表 8.3.5-4 と表 8.3.5-5 についても同様である。

表 8.3.5-1 核種移行パラメータ (case1 : 降水系還元性地下水環境)

元素名	充填材							緩衝材			結晶質岩(花崗岩)		新第三紀堆積岩(泥質岩・凝灰質岩)	
	分配係数 (m ³ /kg)				溶解度 (mol/m ³)		実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数(m ³ /kg)		分配係数(m ³ /kg)		
	Gr1	Gr2*	Gr3	Gr4L,4H	Gr1	Gr2	Gr1,2,3,4L,4H	Gr1,Gr2	Gr1,Gr2	Gr1,2,4L,4H	Gr3	Gr1,2,4L,4H	Gr3	
C14(無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.1	0.1	8E-10	0	4E-11	0.0001	0	0.0001	0	
C14(有機)	0.00025	0.00025	0	0.00025	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0.0001	0	0.0001	0	
Cl	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	4E-11	0.0001	0	0.0001	0	
Co	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.5	0.5	8E-10	0.05	3E-10	0.01	0.001	0.1	0.001	
Ni	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.5	0.5	8E-10	0.05	3E-10	0.01	0.001	0.1	0.001	
Se	0.0025	0.0025	0	0.0025	0.005	0.005	8E-10	0	4E-11	0.01	0	0.01	0	
Sr	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	5	5	8E-10	0.001	3E-10	0.5	0.05	0.5	0.05	
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	0.05	1	8E-10	1	3E-10	0.1	0.1	1	1	
Nb	0	0	0	0	50	50	8E-10	0.1	3E-10	0.1	0.1	1	1	
Mo	0.0025	0.0025	0.00025	0.0025	1	1	8E-10	0	4E-11	0.0001	0	0.0001	0	
Tc	2.5	2.5	0	2.5	0.001	0.001	8E-10	1	3E-10	1	0	1	0	
Pd	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	溶解性	溶解性	8E-10	0.05	3E-10	0.1	0.1	1	1	
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	500	溶解性	8E-10	1	3E-10	1	1	5	5	
I	0.000125	0.00125	0	0.00125	溶解性	溶解性	8E-10	0	4E-11	0.0001	0	0.0001	0	
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	溶解性	溶解性	8E-10	0.05	4E-10	0.05	0.005	0.1	0.01	
Pb	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	50	50	8E-10	0.05	3E-10	0.1	0.1	1	1	
Ra	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001	8E-10	0.001	3E-10	0.5	0.05	0.5	0.05	
Ac	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5	
Th	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000001	0.00002	8E-10	5	3E-10	1	1	1	1	
Pa	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000005	0.001	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005	
U	0.25	0.0125	0.025	0.25	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005	
Np	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005	
Pu	0.25	0.0125	0.025	0.25	1E-07	0.000002	8E-10	5	3E-10	1	0.05	1	0.05	
Am	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5	
Cm	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5	

*本検討では、熱的制約条件を緩和するため、廃棄体グループ2のセメント系材料に対して、バリア機能を考慮しないこととした。そのため、決定論的解析において充填材中のKd値はすべての核種の対してKd=0が設定された。表中の値は、本来期待される性能値であることに注意が必要である。

※Poの値はPbの値と同じとした。

表 8.3.5-2 核種移行パラメータ (case 1 : 海水系還元性地下水環境)

元素名	充填材							緩衝材		結晶質岩(花崗岩)		新第三紀堆積岩(泥質岩・凝灰質岩)	
	分配係数 (m ³ /kg)				溶解度 (mol/m ³)		実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数(m ³ /kg)		分配係数(m ³ /kg)	
	Gr1	Gr2 *	Gr3	Gr4L,4H	Gr1	Gr2	Gr1,2,3,4L,4H	Gr1,Gr2	Gr1,Gr2	Gr1,2,4L,4H	Gr3	Gr1,2,4L,4H	Gr3
C14(無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	8E-10	0	3E-10	0	0	0	0
C14(有機)	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0	0	0
Cl	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0	0	0
Co	0.025	0.025	0.0125	0.025	0.1	0.1	8E-10	0.01	3E-10	0.001	0.001	0.001	0.001
Ni	0.025	0.025	0.0125	0.025	0.1	0.1	8E-10	0.01	3E-10	0.001	0.001	0.001	0.001
Se	0.000025	0.000025	0	0.000025	0.05	0.05	8E-10	0	3E-10	0.01	0	0.01	0
Sr	0.0025	0.0025	0.00125	0.0025	5	5	8E-10	0.001	3E-10	0.05	0.05	0.05	0.05
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	0.05	1	8E-10	1	3E-10	0.1	0.1	1	1
Nb	0.025	0.025	0	0.025	50	50	8E-10	0.1	3E-10	0.1	0.1	1	1
Mo	0.000025	0.000025	0.000025	0.000025	1	1	8E-10	0	3E-10	0	0	0	0
Tc	2.5	2.5	0	2.5	0.001	0.001	8E-10	1	3E-10	1	0	1	0
Pd	0.025	0.025	0.0125	0.025	溶解性	溶解性	8E-10	0.01	3E-10	0.1	0.1	1	1
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	500	溶解性	8E-10	1	3E-10	1	1	5	5
I	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	溶解性	溶解性	8E-10	0.01	3E-10	0.005	0.0005	0.01	0.01
Pb	0.025	0.025	0.0125	0.025	50	50	8E-10	0.01	3E-10	0.1	0.1	1	1
Ra	0.0025	0.0025	0.00125	0.0025	0.001	0.001	8E-10	0.001	3E-10	0.05	0.05	0.05	0.05
Ac	2.5	0.125	0.25	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5
Th	2.5	0.125	0.25	2.5	0.000001	0.00002	8E-10	5	3E-10	1	1	1	1
Pa	2.5	0.125	0.25	2.5	0.00001	0.0002	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005
U	2.5	0.125	0.25	2.5	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005
Np	2.5	0.125	0.25	2.5	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	0.005	1	0.005
Pu	2.5	0.125	0.25	2.5	1E-07	0.000002	8E-10	5	3E-10	1	0.05	1	0.05
Am	2.5	0.125	0.25	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5
Cm	2.5	0.125	0.25	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5	5	5

*本検討では、熱的制約条件を緩和するため、廃棄体グループ2のセメント系材料に対して、バリア機能を考慮しないこととした。そのため、決定論的解析において充填材中のKd値はすべての核種の対してKd=0が設定された。表中の値は、本来期待される性能値であることに注意が必要である。

※Poの値はPbの値と同じとした。

また、高度化対策を採用した場合 (case2-0) の廃棄体グループ 3, 4 の処分概念 (緩衝材の敷設) に対する解析に必要な緩衝材の分配係数(Kd)および実効拡散係数(De)の設定値を表 8.3.5-3 に示す。表 8.3.5-3 の下部には、 case2-0 における廃棄体グループ 3, 4 の Kd および De の値の設定において、参照した廃棄体グループとその化学環境を示す。これは、硝酸塩影響を受ける廃棄体グループ 3 に対する Kd と De の設定においては、硝酸塩影響を海水環境の影響とみなしていることを意味する。また、表 8.3.5-3 からわかるように、I-129 の緩衝材中の実効拡散係数には、第 2 次 TRU レポートで設定された海水還元性地下水環境下での実効拡散係数の値 $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ が設定されている。TRU レベル 3 報告書 (NUMO, 2011) においては、I-129 の緩衝材中の実効拡散係数としては、既存度実験値 (石寺ほか, 2004) を参照して、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いたが、ここでは、保守性を考慮して、海水系の値を用いた。

表 8.3.5-3 高度化対策での Gr3, 4 の緩衝材の Kd, De の設定値

元素名	分配係数 (m^3/kg)				実効拡散係数 (m^2/s)			
	降水系還元性		海水系還元性		降水系還元性		海水系還元性	
	Gr.3	Gr4L, 4H	Gr.3	Gr4L, 4H	Gr.3	Gr4L, 4H	Gr.3	Gr4L, 4H
C14(無機)	0	0	0	0	3E-10	4E-11	3E-10	3E-10
C14(有機)	0	0	0	0	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Cl	0	0	0	0	3E-10	4E-11	3E-10	3E-10
Co	0.01	0.05	0.01	0.01	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Ni	0.01	0.05	0.01	0.01	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Se	0	0	0	0	3E-10	4E-11	3E-10	3E-10
Sr	0.001	0.001	0.001	0.001	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Zr	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Nb	0.1	0.1	0.1	0.1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Mo	0	0	0	0	3E-10	4E-11	3E-10	3E-10
Tc	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Pd	0.01	0.05	0.01	0.01	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Sn	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
I	0	0	0	0	3E-10	4E-11	3E-10	3E-10
Cs	0.01	0.05	0.01	0.01	3E-10	4E-10	3E-10	3E-10
Pb	0.01	0.05	0.01	0.01	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Ra	0.001	0.001	0.001	0.001	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Ac	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Th	5	5	5	5	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Pa	5	5	5	5	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
U	5	5	5	5	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Np	5	5	5	5	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Pu	5	5	5	5	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Am	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10
Cm	1	1	1	1	3E-10	3E-10	3E-10	3E-10

海水系還元性 Gr1	降水系還元性 Gr1	海水系還元性 Gr1	海水系還元性 Gr1	海水系還元性 Gr1,2	降水系還元性 Gr1,2	海水系還元性 Gr1,2	海水系還元性 Gr1,2
---------------	---------------	---------------	---------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

さらに、脱硝技術を採用した case2-1 における核種移行パラメータを降水系還元性地下水環境と海水系還元性地下水環境に分けてそれぞれ、表 8.3.5-4 と表 8.3.5-5 に示す。

表 8.3.5-4 核種移行パラメータ (降水系 : case2-1)

元素名	充填材							緩衝材		結晶質岩 (花崗岩)	新第三紀堆 積岩
	分配係数 (m ³ /kg)				溶解度 (mol/m ³)		実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	実効拡散 係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	分配係数 (m ³ /kg)
	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4L,4H	Gr1	Gr2	Gr1,2,3,4L,4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H
C14(無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.1	0.1	8E-10	0	4E-11	0.0001	0.0001
C14(有機)	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0.0001	0.0001
Cl	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	4E-11	0.0001	0.0001
Co	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.5	0.5	8E-10	0.05	3E-10	0.01	0.1
Ni	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.5	0.5	8E-10	0.05	3E-10	0.01	0.1
Se	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.005	0.005	8E-10	0	4E-11	0.01	0.01
Sr	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	5	5	8E-10	0.001	3E-10	0.5	0.5
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	0.05	1	8E-10	1	3E-10	0.1	1
Nb	0	0	0	0	50	50	8E-10	0.1	3E-10	0.1	1
Mo	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	1	1	8E-10	0	4E-11	0.0001	0.0001
Tc	2.5	2.5	2.5	2.5	0.001	0.001	8E-10	1	3E-10	1	1
Pd	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	溶解性	溶解性	8E-10	0.05	3E-10	0.1	1
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	500	溶解性	8E-10	1	3E-10	1	5
I	0.000125	0.00125	0.000125	0.00125	溶解性	溶解性	8E-10	0	4E-11	0.0001	0.0001
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	溶解性	溶解性	8E-10	0.05	4E-10	0.05	0.1
Pb	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	50	50	8E-10	0.05	3E-10	0.1	1
Ra	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001	8E-10	0.001	3E-10	0.5	0.5
Ac	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5
Th	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000001	0.00002	8E-10	5	3E-10	1	1
Pa	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.00005	0.001	8E-10	5	3E-10	1	1
U	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	1
Np	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	1
Pu	0.25	0.0125	0.25	0.25	1E-07	0.000002	8E-10	5	3E-10	1	1
Am	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5
Cm	0.25	0.0125	0.25	0.25	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5

*本検討では、熱的制約条件を緩和するため、廃棄体グループ2のセメント系材料に対して、バリア機能を考慮しないこととした。そのため、決定論的解析において充填材中のKd値はすべての核種の対してKd=0が設定された。表中の値は、本来期待される性能値であることに注意が必要である。

※Gr1, Gr2, Gr4L, Gr4HについてはCase2-0とCase2-1で同じ設定である。

表 8.3.5-5 核種移行パラメータ (海水系 : case2-1)

元素名	充填材							緩衝材		結晶質岩 (花崗岩)	新第三紀堆 積岩
	分配係数 (m ³ /kg)				溶解度 (mol/m ³)		実効拡散係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	実効拡散 係数 (m ² /s)	分配係数 (m ³ /kg)	分配係数 (m ³ /kg)
	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4L,4H	Gr1	Gr2	Gr1,2,3,4L,4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H	Gr1,2,3,4L, 4H
C14(無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	8E-10	0	3E-10	0	0
C14(有機)	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0
Cl	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0
Co	0.025	0.025	0.025	0.025	0.1	0.1	8E-10	0.01	3E-10	0.001	0.001
Ni	0.025	0.025	0.025	0.025	0.1	0.1	8E-10	0.01	3E-10	0.001	0.001
Se	0.000025	0.000025	0.000025	0.000025	0.05	0.05	8E-10	0	3E-10	0.01	0.01
Sr	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	5	5	8E-10	0.001	3E-10	0.05	0.05
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	0.05	1	8E-10	1	3E-10	0.1	1
Nb	0.025	0.025	0.025	0.025	50	50	8E-10	0.1	3E-10	0.1	1
Mo	0.000025	0.000025	0.000025	0.000025	1	1	8E-10	0	3E-10	0	0
Tc	2.5	2.5	2.5	2.5	0.001	0.001	8E-10	1	3E-10	1	1
Pd	0.025	0.025	0.025	0.025	溶解性	溶解性	8E-10	0.01	3E-10	0.1	1
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	500	溶解性	8E-10	1	3E-10	1	5
I	0	0	0	0	溶解性	溶解性	8E-10	0	3E-10	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	溶解性	溶解性	8E-10	0.01	3E-10	0.005	0.01
Pb	0.025	0.025	0.025	0.025	50	50	8E-10	0.01	3E-10	0.1	1
Ra	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.001	0.001	8E-10	0.001	3E-10	0.05	0.05
Ac	2.5	0.125	2.5	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5
Th	2.5	0.125	2.5	2.5	0.000001	0.00002	8E-10	5	3E-10	1	1
Pa	2.5	0.125	2.5	2.5	0.00001	0.0002	8E-10	5	3E-10	1	1
U	2.5	0.125	2.5	2.5	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	1
Np	2.5	0.125	2.5	2.5	0.000005	0.0001	8E-10	5	3E-10	1	1
Pu	2.5	0.125	2.5	2.5	1E-07	0.000002	8E-10	5	3E-10	1	1
Am	2.5	0.125	2.5	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5
Cm	2.5	0.125	2.5	2.5	5E-07	0.00001	8E-10	1	3E-10	5	5

*本検討では、熱的制約条件を緩和するため、廃棄体グループ2のセメント系材料に対して、バリア機能を考慮しないこととした。そのため、決定論的解析において充填材中のKd値はすべての核種の対してKd=0が設定された。表中の値は、本来期待される性能値であることに注意が必要である。

※Gr1, Gr2, Gr4L, Gr4HについてはCase2-0とCase2-1で同じ設定である。

なお、本評価においては、緩衝材を敷設する case2-0 および case2-1 においても充填材料領域において溶解度は設定しないこととした。これは、以下の考えに基づくものである。

case2-0（脱硝なしの緩衝材敷設）の充填材領域での廃棄体グループ 3 の溶解度については、硝酸塩影響を考慮する必要がある。この際、Kd の設定の考え方（硝酸塩影響を海水系影響と同等とみなす）に合わせて廃棄体グループ 1 の海水系の溶解度を設定するとの考え方もある。しかし、ここでは、必ずしもその論拠が示されていないことから、硝酸塩の影響を保守的に取り扱うため、溶解度を設定しないこととした。

case2-0（脱硝なしの緩衝材敷設）の充填材領域での廃棄体グループ 4 の溶解度については、硝酸塩影響を考慮する必要がある。そのため、廃棄体グループ 1（廃棄体グループ 2 には有機物影響が含まれているため）の溶解度を設定することも可能であると考え。しかし、発熱の影響など、十分な検討がされていないことから、本評価においては、保守性を優先させて、溶解度を設定しないこととする。

case2-1（脱硝ありの緩衝材敷設）の充填材領域での廃棄体グループ 3 の溶解度については、硝酸塩影響を考慮する必要がある。しかし、廃棄体グループ 3 の残留アスファルト（有機物）の影響について知見が十分でなく、不確実性が存在することから、本評価においては、保守性を優先させて、溶解度を設定しないこととする。

case2-1（脱硝ありの緩衝材敷設）の充填材領域での廃棄体グループ 4 の溶解度については、硝酸塩影響を考慮する必要がある。ここでは、case2-0（脱硝なしの緩衝材敷設）の充填材領域での廃棄体グループ 4 の考えと同様に、保守性を優先させて、溶解度を設定しないこととする。

緩衝材を敷設した際に、廃棄体グループ 1, 2 のように、充填材領域において溶解度を設定しないことは、地下水シナリオの評価に関しては保守的な結果を与える。本検討においては、地下水シナリオのみを対象とするため、上記の考えで保守的な結果を示すことが可能と考える。しかし、将来、接近シナリオの評価を実施する際には、溶解度の設定に関する再検討が必要である。

接近シナリオにおいては、溶解度を設定しない評価は処分場に残留する核種をより小さく評価することになるため、非保守側の評価となる。そのため、特に、Pu, U を HLW 並みに含むことから、廃棄体グループ 2 と同様に接近シナリオの評価においては重要な廃棄体になる可能性がある廃棄体グループ 4 の評価においては、溶解度の設定が評価に影響を与える可能性がある。

地下水シナリオの場合は、廃棄体グループ 4 は、放出率が低いために溶解度の設定の有無は全体の評価に対して影響を与えないと考えられる。そのため、地下水シナリオにおいて使用するデータとの整合性を考慮しつつ、今後実施する接近シナリオを保守的に評価するためには、緩衝材を敷設した場合の充填材領域の溶解度設定が重要になる。このような溶解度の検討は、今後の課題とする。

表 8.3.5-6 に充填材、緩衝材、EDZ、母岩の間隙率および真密度を示す。

表 8.3.5-6 充填材, 緩衝材, EDZ の間隙率および真密度

		充填材	緩衝材	掘削影響領域
間隙率	(-)	1.9E-01	0.4	0.02
真密度	(Kg/m ³)	2.58E+03	2.68E+03	2.70E+03

8.3.6 母岩および断層に関するパラメータ

母岩に関するパラメータを表 8.3.6-1 に示す。また, 断層に関するパラメータを表 8.3.6-2 に示す。

表 8.3.6-1 母岩に関するパラメータ

結晶質岩	
亀裂長さ	100 m
母岩マトリクス間隙率	0.02
母岩マトリクス真密度	2700 kg/m ³
マトリクス拡散寄与面積率	0.5
マトリクス拡散深さ	0.1 m
縦方向分散長	10 m
動水勾配	0.01
亀裂頻度	2 本/m
透水係数	2E-7 m/s, 2E-8 m/s, 2E-9m/s, 2E-10 m/s
透水量係数	1.0E-7 m ² /s, 1.0E-8 m ² /s, 1.0E-9 m ² /s 1.0E-10 m ² /s
母岩マトリクス中の実効拡散係数	3E-12 m ² /s

堆積岩	
移行距離	100 m
間隙率	0.2
真密度	2700 kg/m ³
縦方向分散長	10 m
動水勾配	0.01
透水係数	2E-7 m/s, 2E-8 m/s, 2E-9m/s, 2E-10 m/s
実効拡散係数	9E-12 m ² /s

表 8.3.6-2 断層に関するパラメータ

	結晶質岩	堆積岩
断層長さ	800 m	300 m
断層マトリクス間隙率	0.02	0.2
断層マトリクス真密度	2700 kg/m ³	2700 kg/m ³
マトリクス拡散寄与面積率	0.5	0.5
マトリクス拡散深さ	0.1 m	0.1 m
縦方向分散長	80 m	30 m
動水勾配	0.01	0.01
透水量係数	1E-7 m ² /s	1E-7 m ² /s
断層マトリクス中の実効拡散係数	3E-12 m ² /s	9E-12 m ² /s

8.3.7 線量への換算係数

表 8.3.7-1 に本評価で使用する線量への換算係数を示す。

表 8.3.7-1 線量への換算係数 (mSv/Bq)

元素	河川水・温暖気候 農作業従事者グループ	沿岸海域堆積層・温暖気候 遠洋漁業従事者グループ
C14(無機)	6.4.E-14	2.4.E-14
C14(有機)	6.4.E-14	2.4.E-14
Cl36	4.5.E-14	5.5.E-17
Co60	1.3.E-13	5.3.E-12
Ni59	3.7.E-15	5.4.E-15
Ni63	5.0.E-15	4.5.E-16
Se79	3.2.E-12	6.6.E-14
Sr90	1.1.E-12	7.2.E-14
Zr93	9.6.E-15	4.6.E-14
Nb93m	2.3.E-15	1.2.E-16
Nb94	7.5.E-13	1.1.E-09
Mo93	5.5.E-14	5.0.E-15
Tc99	2.6.E-14	1.9.E-15
Pd107	1.4.E-15	3.1.E-15
Sn126	1.0.E-12	1.4.E-09
I129	3.2.E-12	5.7.E-14
Cs135	1.2.E-13	5.7.E-14
Cs137	5.4.E-13	6.3.E-12
Pb210	2.4.E-11	9.1.E-13
Po210	4.8.E-12	3.2.E-15
Ra226	3.2.E-11	5.4.E-10
Ra228	1.3.E-11	7.2.E-12
Ac227	2.6.E-11	7.1.E-09
Th228	2.6.E-12	1.3.E-12
Th229	2.3.E-11	3.1.E-10
Th230	2.7.E-11	1.0.E-09
Th232	1.5.E-10	3.3.E-09
Pa231	6.5.E-11	1.1.E-09
Pa233	1.8.E-14	4.9.E-15
U233	1.0.E-12	9.6.E-12
U234	9.6.E-13	3.6.E-12
U235	9.3.E-13	1.8.E-11
U236	8.8.E-13	6.8.E-13
U238	9.0.E-13	2.7.E-12
Np237	1.3.E-12	5.5.E-11
Pu239	3.9.E-12	4.5.E-11
Pu240	3.8.E-12	3.4.E-11
Pu241	8.6.E-14	1.9.E-13
Pu242	3.7.E-12	4.8.E-11
Am241	3.3.E-12	5.7.E-12
Am243	5.5.E-12	1.5.E-10
Cm244	2.4.E-12	2.5.E-13
Cm245	1.1.E-11	1.1.E-10
Cm246	7.4.E-12	2.6.E-11

第8章 参考文献

電事連・JNC (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取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02., 2005年9月.

原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2012) : 平成23年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理処分技術 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 報告書(第3分冊)－放射化金属廃棄物中のC-14の放出挙動－ 平成24年3月.

石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト中のC, Cl, Iの拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及びNaNO₃の影響, JNC TN8400 2004-001

NUMO(2011) : 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.

9. 決定論解析と安全裕度

本章では、7章で設定した決定論解析ケースの解析を実施し、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性を提示する。また、その評価結果と4章にて得た成立条件とを比較することにより、TRU廃棄物の地層処分システムの安全裕度や成立条件となるために求められるパラメータの要求値の例を提示する。

9.1 決定論解析

8章で設定した1次元核種移行解析モデルおよびデータセットを用いて、決定論解析を行い、得られた最大線量を、母岩の透水係数の違いに着目して、地下水性状および岩盤のタイプごとに、各解析ケース、各廃棄体グループごとに分けて示す(図9.1.1-1～図9.1.1-4)。また、線量の経時変化を地下水性状、岩盤のタイプ、母岩の透水係数ごとに、各解析ケース、各廃棄体グループごとに分けてまとめる(図9.1.1-5～図9.1.1-20)。

9.1.1 各ケースの最大線量の比較

結晶質岩・降水系地下水環境では、TRUレベル3報告書(NUMO, 2011)での処分概念を採用した場合(case1-0, 1-1, 1-2)においては、母岩透水係数が 2×10^9 m/s以上においてI-129が支配核種となる廃棄体グループ1の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回る結果となった(図9.1.1-1参照)。さらに、母岩透水係数が 2×10^8 m/s以上となると、I-129が支配核種となる廃棄体グループ3の線量も $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回る結果となった。このような廃棄体グループ1に対しては、高度化対策(代替固化技術)を採用すること(case2-0, 2-1)によって、高透水場においても $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることが示された。高度化対策を採用したこれらのケースでは、緩衝材からの核種の放出率が廃棄体からの核種の溶出率で律速されるため、母岩の透水係数に依存せず、母岩の透水係数が大きくなってもほとんど線量に変化しない。一方、廃棄体グループ3については、高度化対策(緩衝材の敷設)を採用しても 2×10^8 m/s以上の母岩透水係数において $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回る結果となった。この廃棄体グループ3については、脱硝技術を採用し、緩衝材や母岩の遅延性能をある程度期待すること(case2-1)によって、母岩透水係数 2×10^7 m/sの高透水場においても $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることが示された(図9.1.1-1, 図9.1.1-7, 図9.1.1-8参照)。

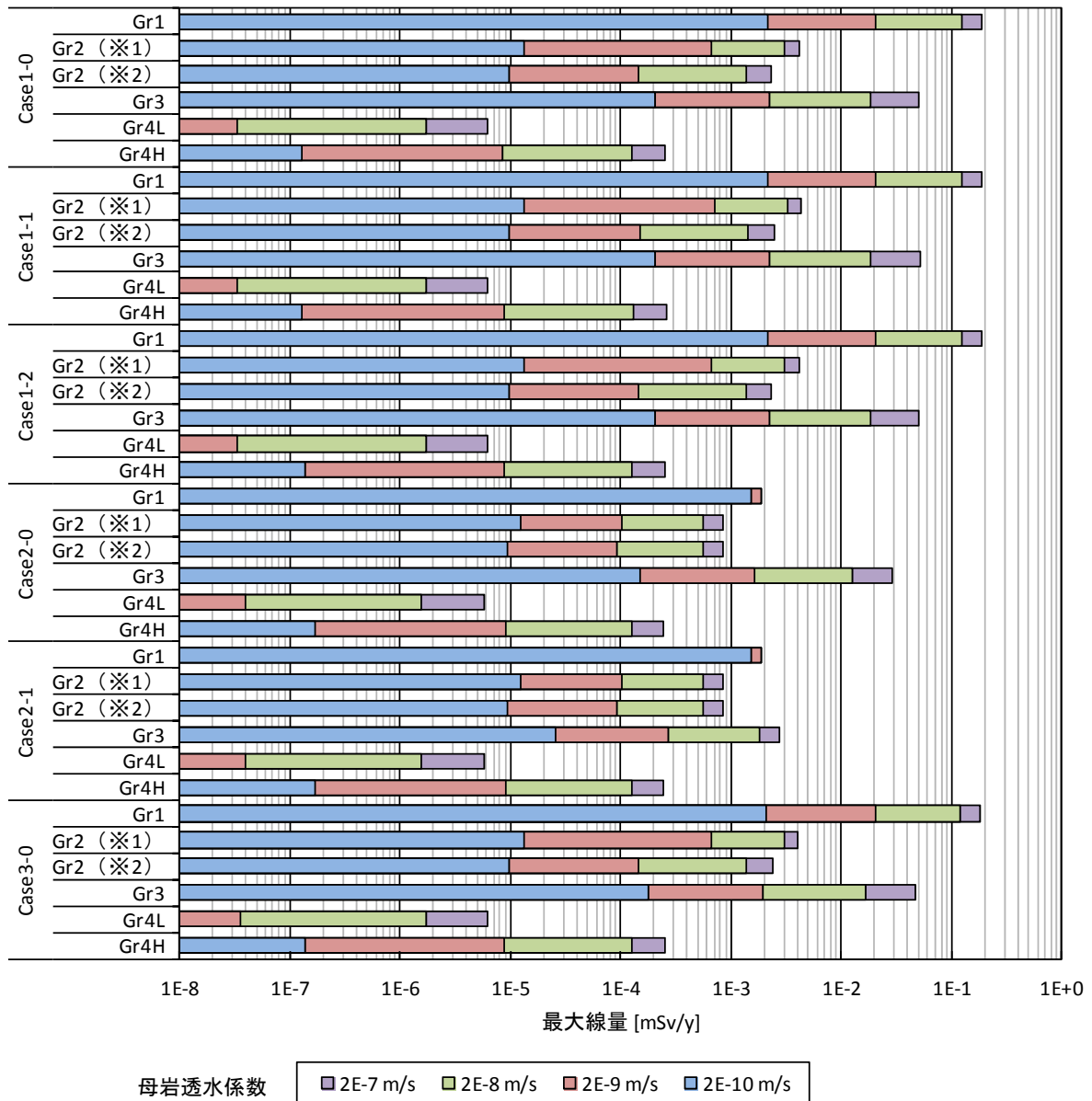
結晶質岩・海水系地下水環境では、TRUレベル3報告書での処分概念を採用した場合(case1-0, 1-1, 1-2)には、母岩透水係数が 2×10^8 m/s以上の条件でI-129が支配核種となる廃棄体グループ1の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回った(図9.1.1-2参照)。前述の降水系環境においては、母岩透水係数が、より小さい 2×10^9 m/s以上の条件でI-129が支配核種となる廃棄体グループ1の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回っている。つまり、海水系地下水環境におけるI-129の線量は、降水系地下水環境に比べて低くなっている。この要因は、それぞれの環境に対して適用するI-129の線量への換算係数の違いによるものである(表4.2.2-2, 表

8.3.7-1 参照)。また、降水系環境においては、廃棄体グループ 1 に次いで線量が高くなる廃棄体グループは I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 3 であったが、海水系環境においては C-14 が支配核種となる廃棄体グループ 2 が廃棄体グループ 1 に次いで線量の高い廃棄体グループとなっていることがわかる。これは、降水系環境と海水系環境において適用する I-129 と C-14 の線量への換算係数の違いの特性を反映したものである。つまり、これらの環境の変化に対して、I-129 は 2 桁程度線量への換算係数が小さくなっているのに対して、C-14 の変動は数分の 1 程度であるためである。その他の廃棄体グループについては高透水場においても $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回ることはなかった。高度化対策（代替固化技術）を採用したケース（case2-0, 2-1）では、高透水場においても I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 1 の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る結果となった（図 9.1.1-2, 図 9.1.1-11, 図 9.1.1-12 参照）。

堆積岩・降水系地下水環境では、結晶質岩・海水系地下水環境の場合と同様に TRU レベル 3 報告書での処分概念を採用した場合（case1-0, 1-1, 1-2）には、母岩透水係数が $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 以上の条件で I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 1 の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回った（図 9.1.1-3 参照）。前述の結晶質岩・降水系地下水環境においては、母岩透水係数がより小さい $2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 以上の条件で I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 1 の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回っている。つまり、堆積岩環境における I-129 の線量は、結晶質岩環境に比べて低くなっている。この要因は、それぞれの母岩中の核種移行特性の違いによるものである。また、結晶質岩環境においては、廃棄体グループ 1 に次いで線量が高くなる I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 3 も $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回る結果となっていたが、堆積岩環境においては廃棄体グループ 3 の線量は、 $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下となった。その他の廃棄体グループについては高透水場においても $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回ることはなかった。高度化対策（代替固化技術）を採用したケース（case2-0, 2-1）では、高透水場においても I-129 が支配核種となる廃棄体グループ 1 の線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る結果となった（図 9.1.1-3, 図 9.1.1-15, 図 9.1.1-16 参照）。

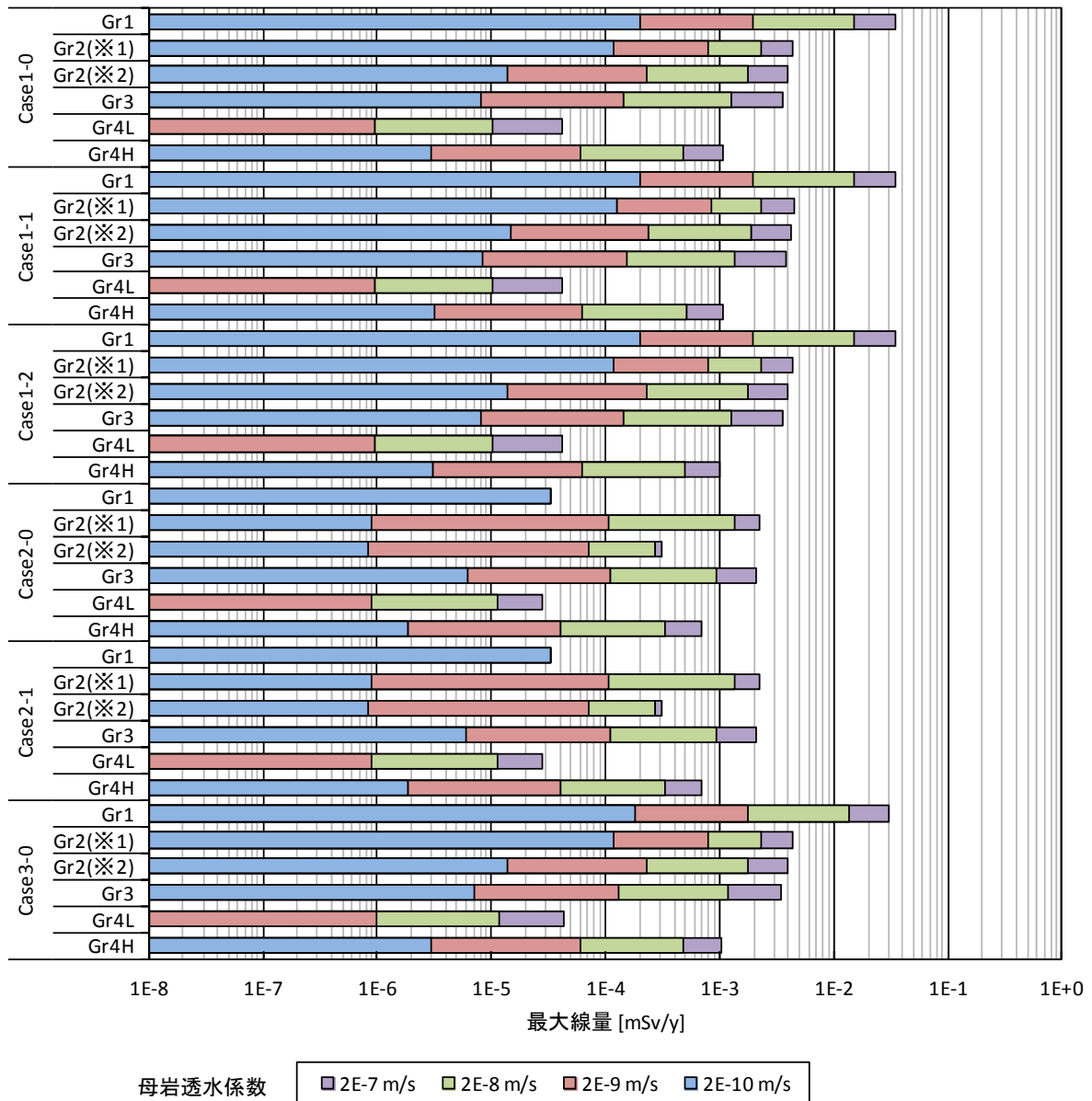
堆積岩・海水系地下水環境では、全ての解析ケースにおいて全ての廃棄体グループの線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回った。

case3-0 で想定したコンクリート製容器の採用の場合は坑道断面やレイアウト、人工バリア材の物量が増えるが、岩種や水質条件によらず、金属製容器を想定する case1-0 と同等の線量評価結果が得られた。



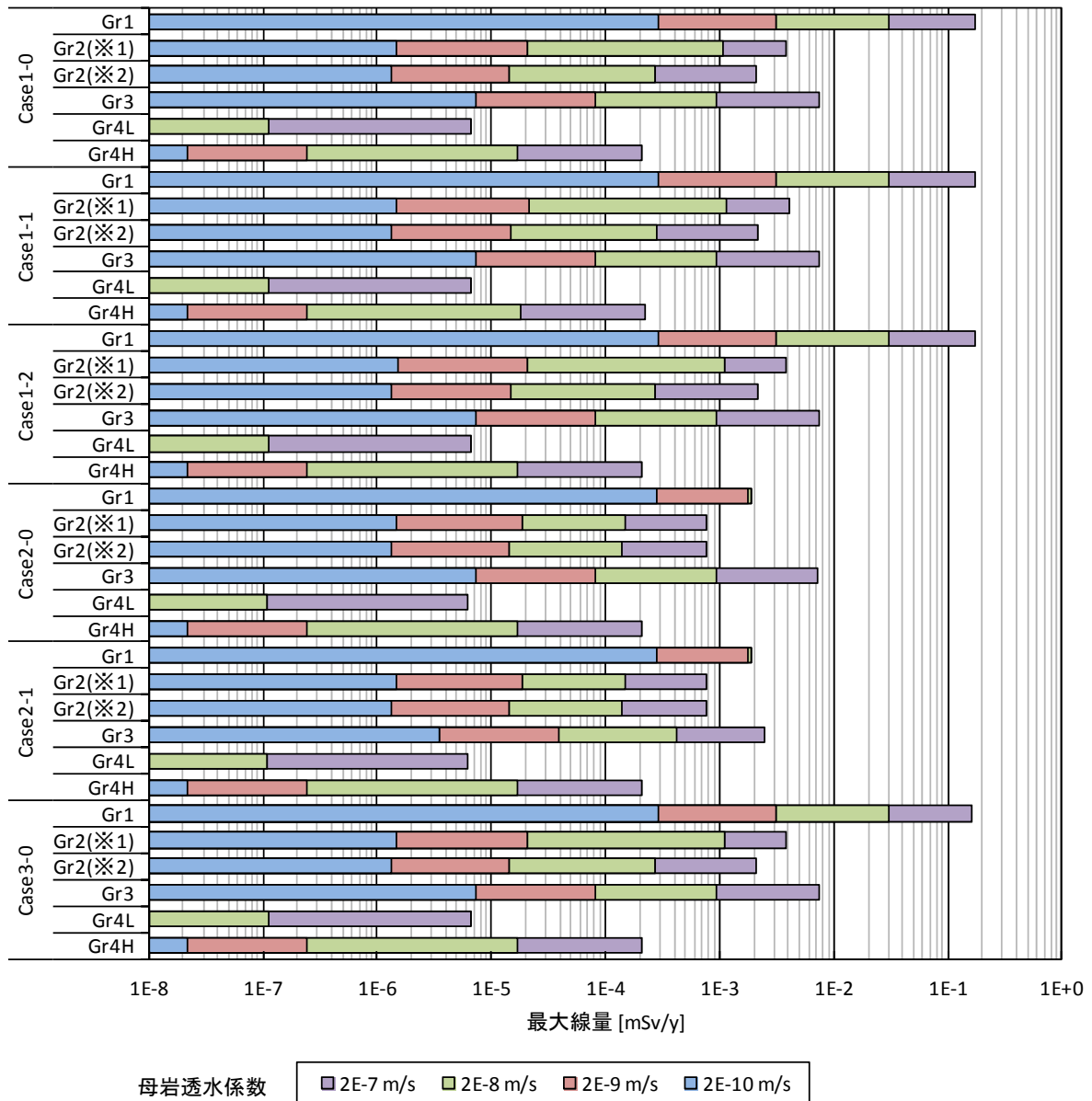
Gr1 : 廃棄体グループ1
 Gr2(※1) : 廃棄体グループ2(最も保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr2(※2) : 廃棄体グループ2(保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr3 : 廃棄体グループ3
 Gr4L : 廃棄体グループ4(低発熱性)
 Gr4H : 廃棄体グループ4(発熱性)

図 9.1.1-1 最大線量の比較 (降水系還元性地下水・結晶質岩)



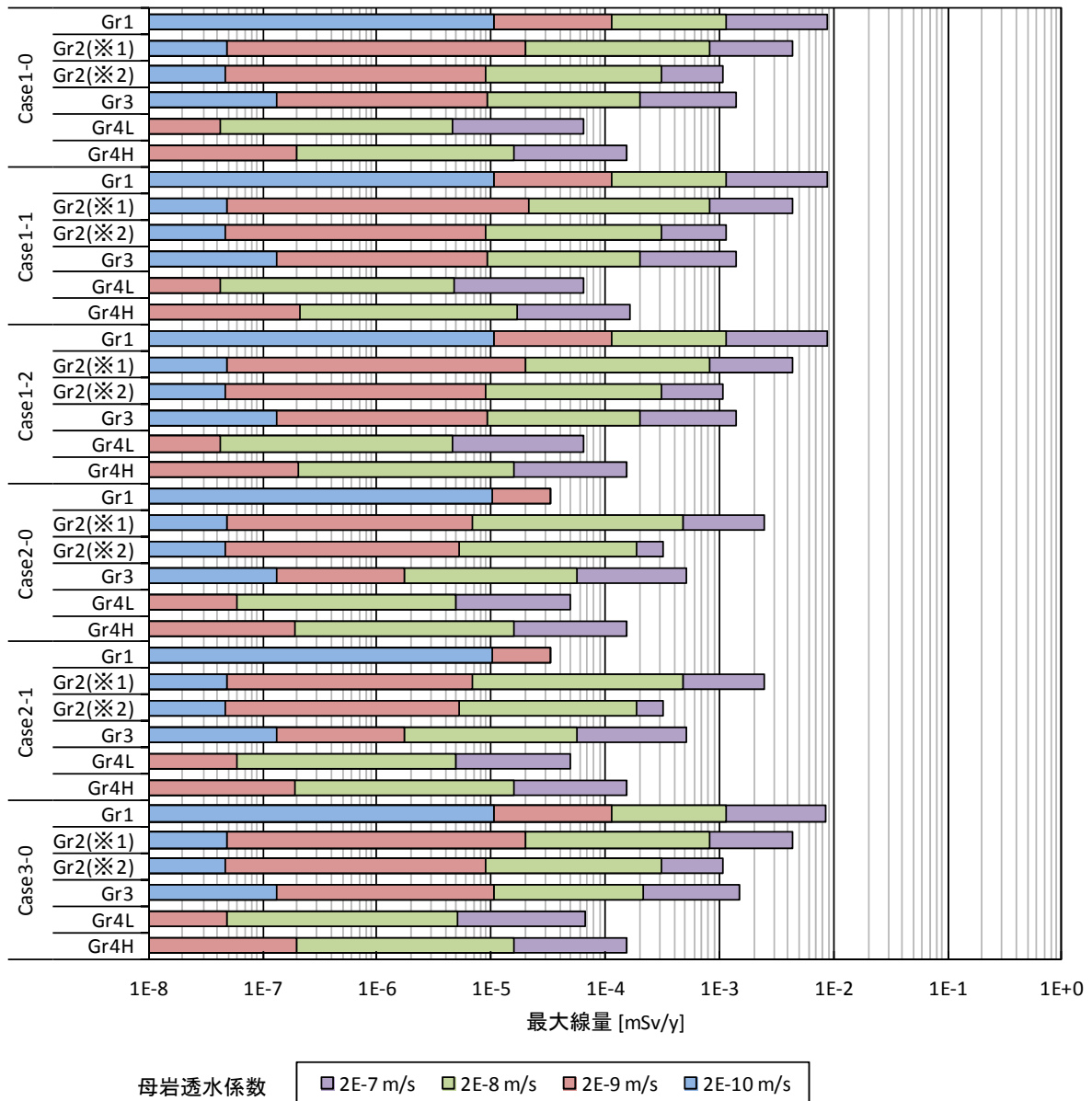
Gr1 : 廃棄体グループ1
 Gr2(※1) : 廃棄体グループ2(最も保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr2(※2) : 廃棄体グループ2(保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr3 : 廃棄体グループ3
 Gr4L : 廃棄体グループ4(低発熱性)
 Gr4H : 廃棄体グループ4(発熱性)

図 9.1.1-2 最大線量の比較 (海水系還元性地下水・結晶質岩)



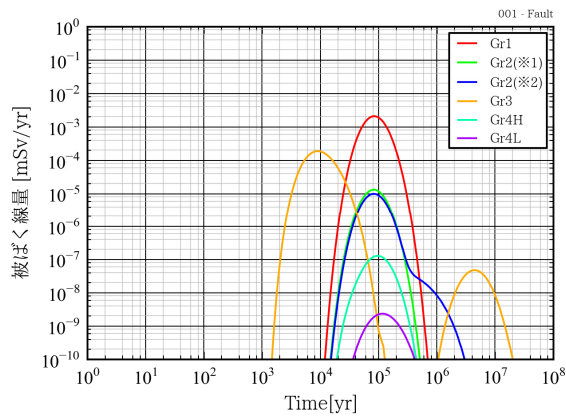
Gr1 : 廃棄体グループ1
 Gr2(※1) : 廃棄体グループ2(最も保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr2(※2) : 廃棄体グループ2(保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr3 : 廃棄体グループ3
 Gr4L : 廃棄体グループ4(低発熱性)
 Gr4H : 廃棄体グループ4(発熱性)

図 9.1.1-3 最大線量の比較 (降水系還元性地下水・堆積岩)

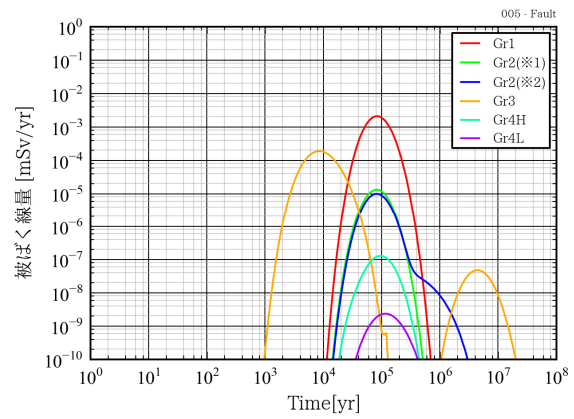


Gr1 : 廃棄体グループ1
 Gr2(※1) : 廃棄体グループ2(最も保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr2(※2) : 廃棄体グループ2(保守的な核種浸出期間を想定した場合)
 Gr3 : 廃棄体グループ3
 Gr4L : 廃棄体グループ4(低発熱性)
 Gr4H : 廃棄体グループ4(発熱性)

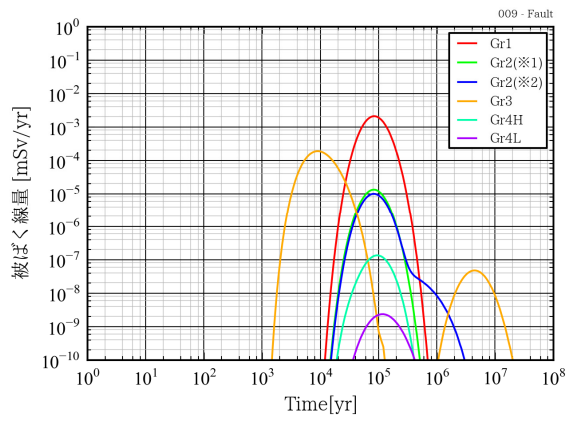
図 9.1.1-4 最大線量の比較 (海水系還元性地下水・堆積岩)



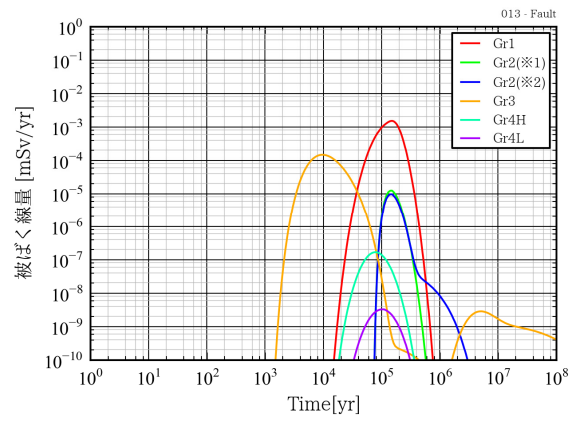
(a) case1-0



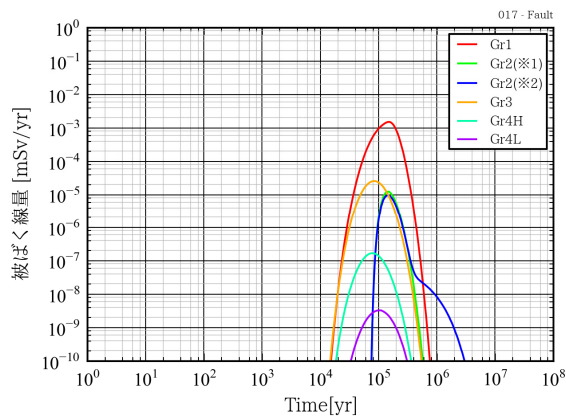
(b) case1-1



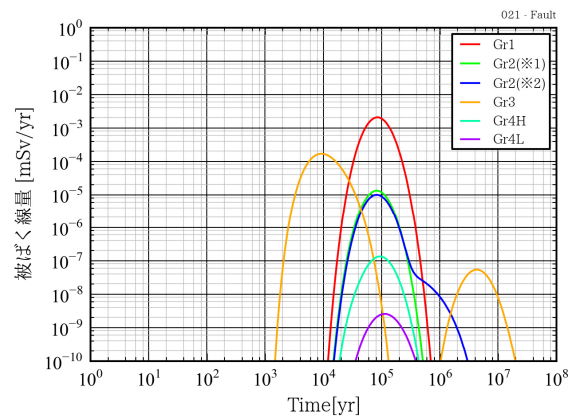
(c) case1-2



(d) case2-0

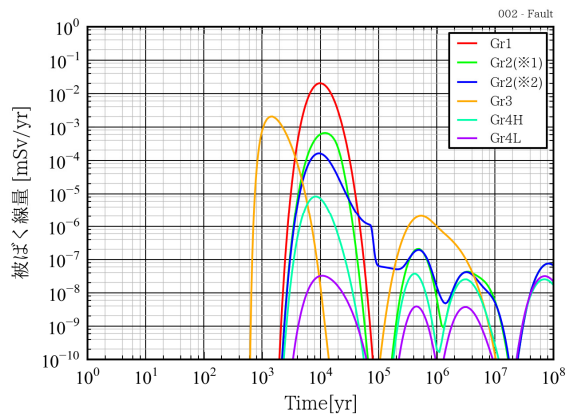


(e) case2-1

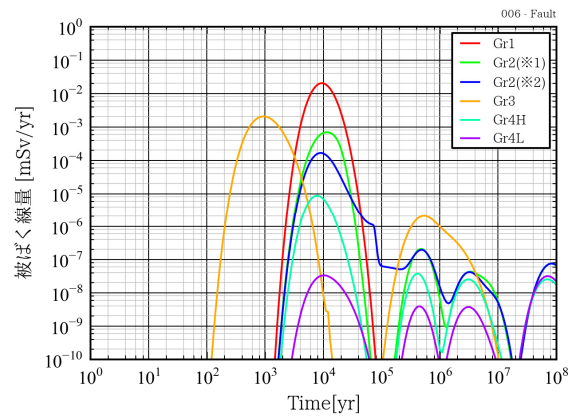


(f) case3-0

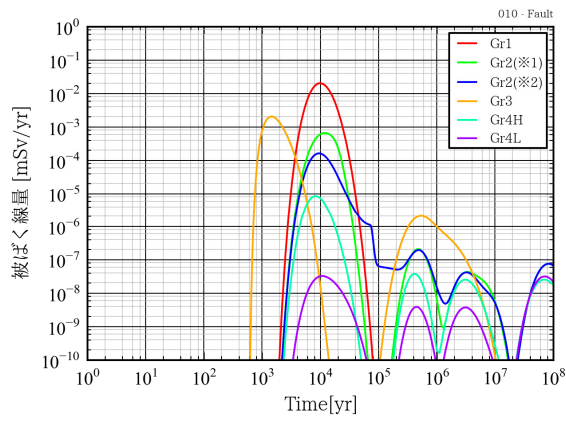
図 9.1.1-5 線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-10}$ m/s)



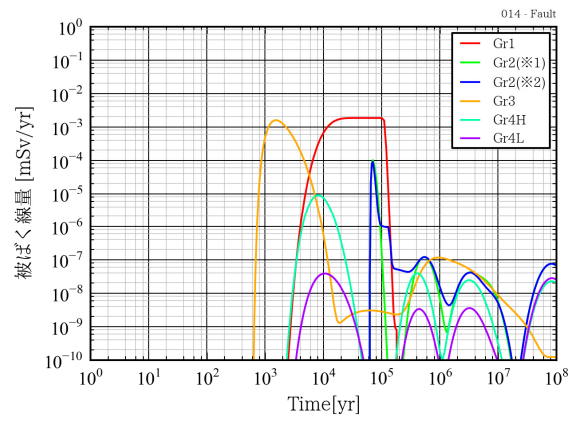
(a) case1-0



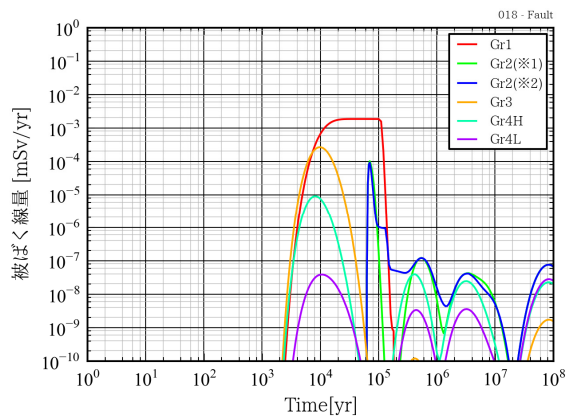
(b) case1-1



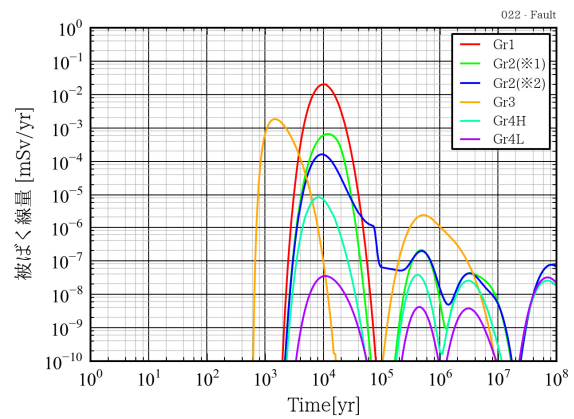
(c) case1-2



(d) case2-0

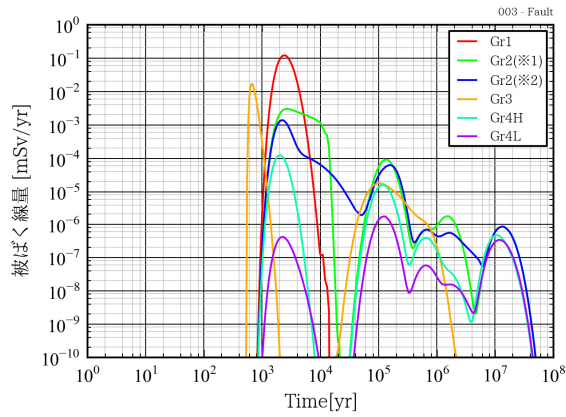


(e) case2-1

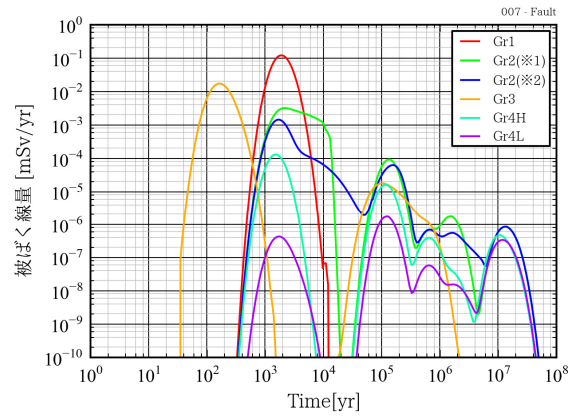


(f) case3-0

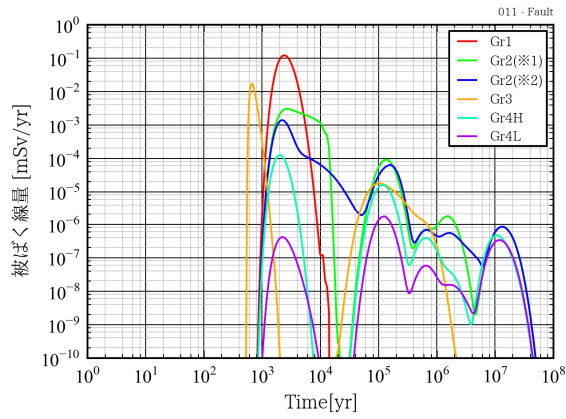
図 9.1.1-6 線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-9}$ m/s)



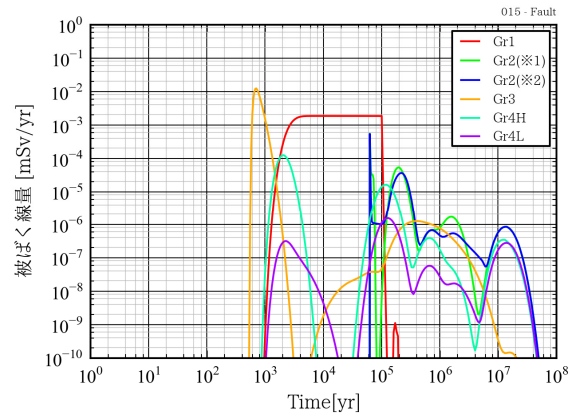
(a) case1-0



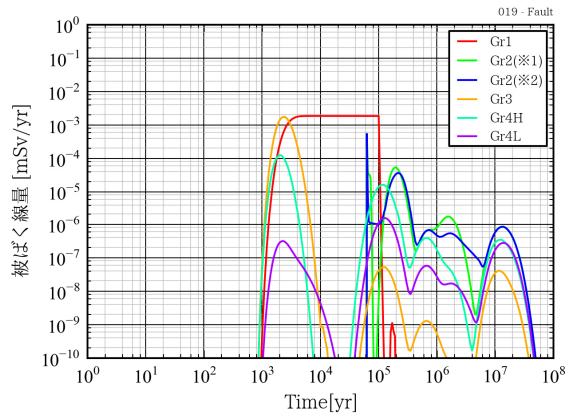
(b) case1-1



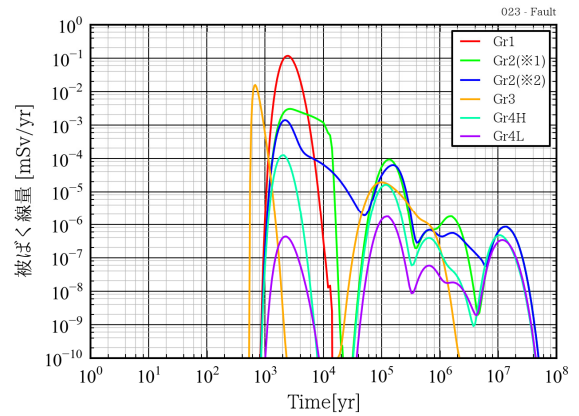
(c) case1-2



(d) case2-0

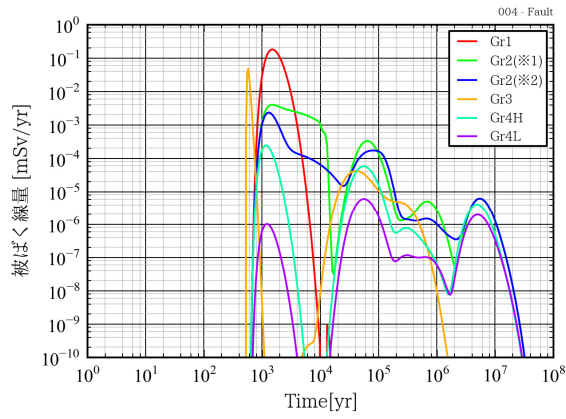


(e) case2-1

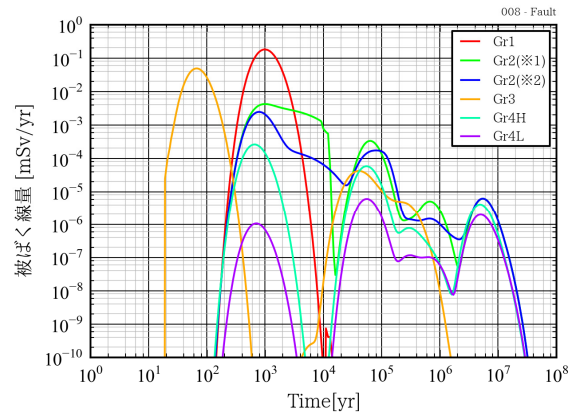


(f) case3-0

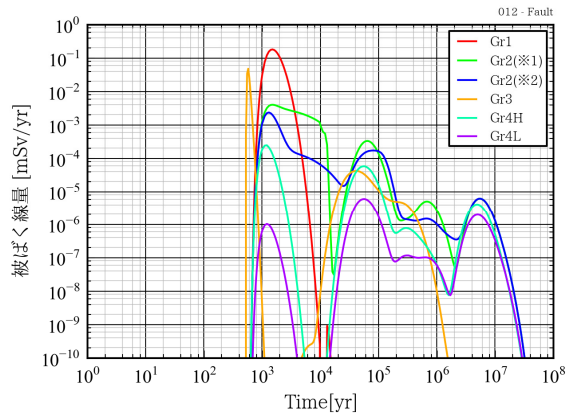
図 9.1.1-7 線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-8}$ m/s)



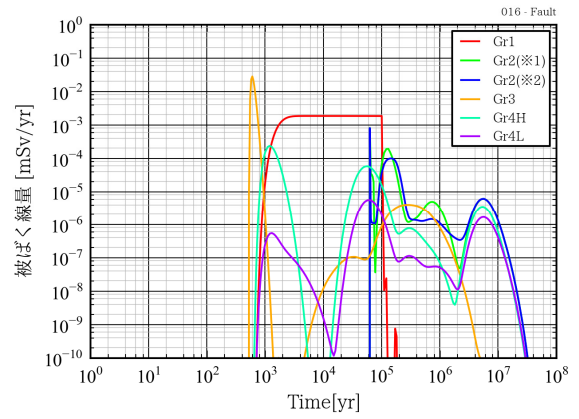
(a) case1-0



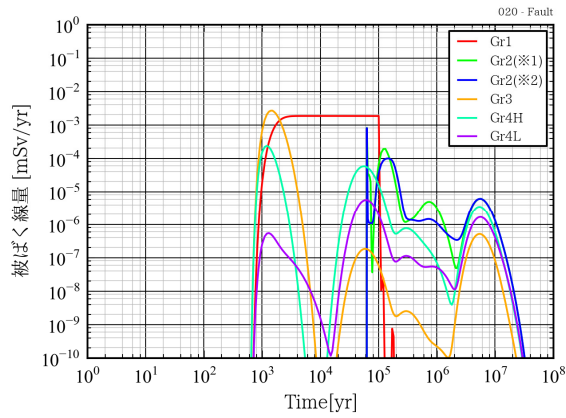
(b) case1-1



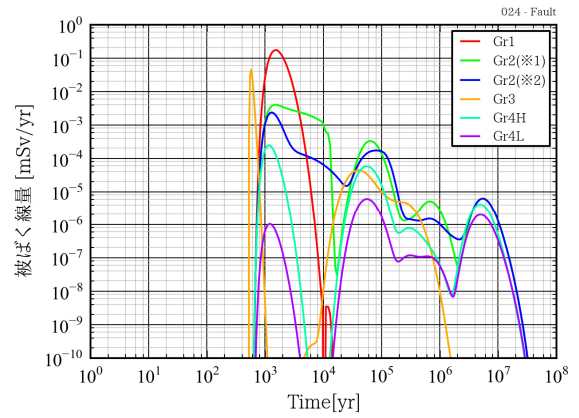
(c) case1-2



(d) case2-0

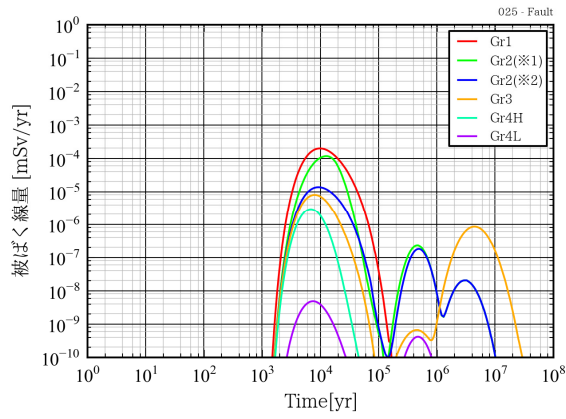


(e) case2-1

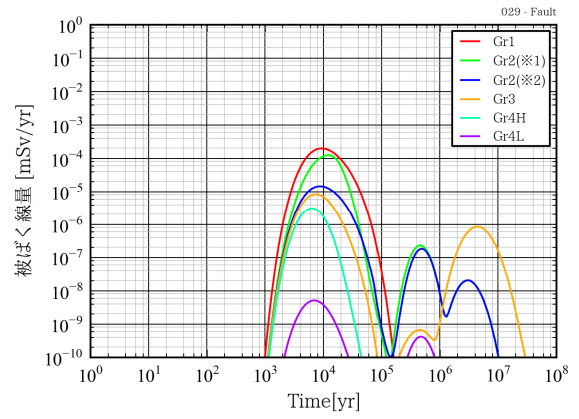


(f) case3-0

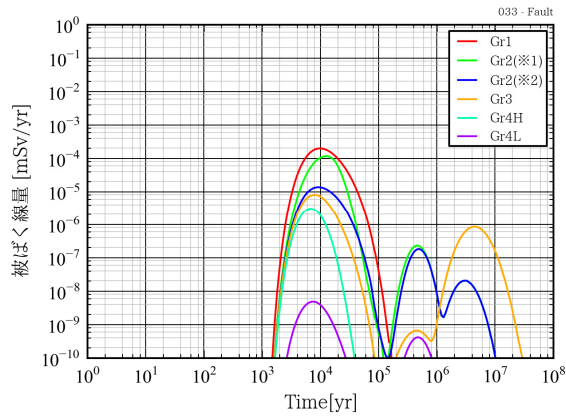
図 9.1.1-8 線量の経時変化 (結晶質岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-7}$ m/s)



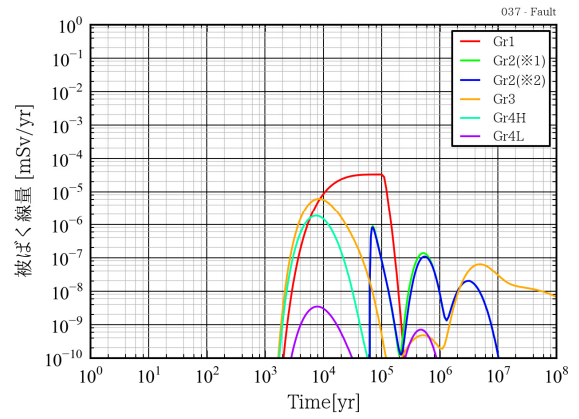
(a) case1-0



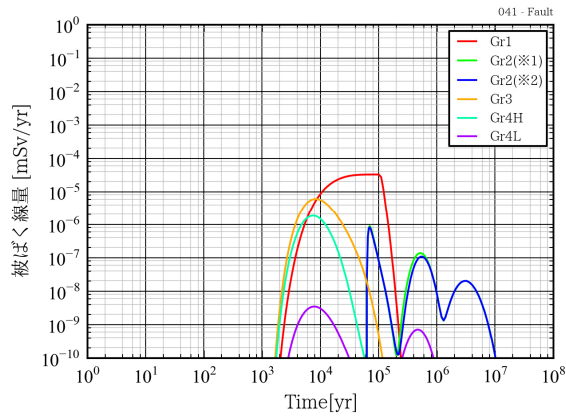
(b) case1-1



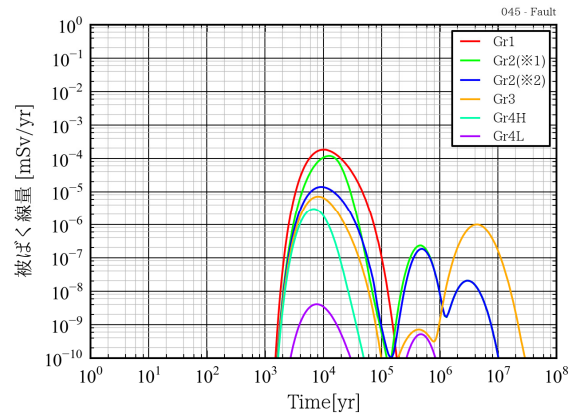
(c) case1-2



(d) case2-0

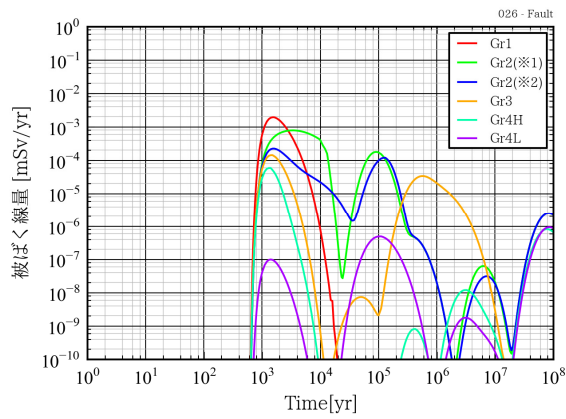


(e) case2-1

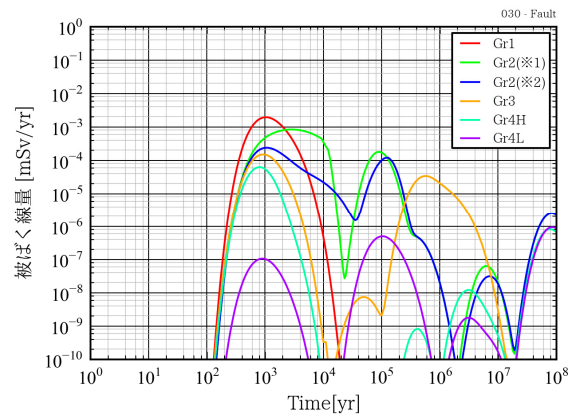


(f) case3-0

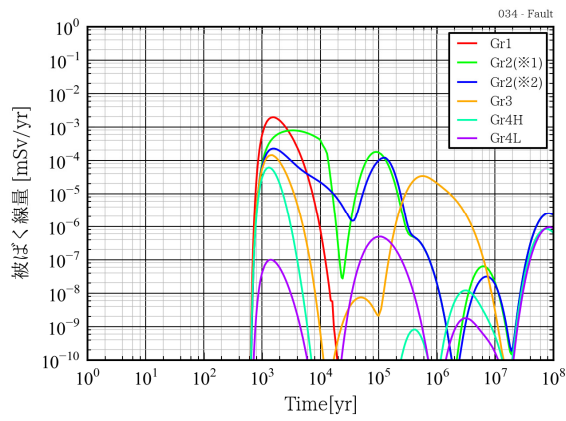
図 9.1.1-9 線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-10}$ m/s)



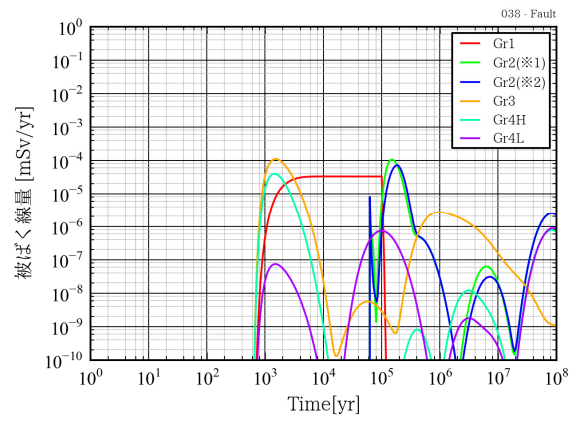
(a) case1-0



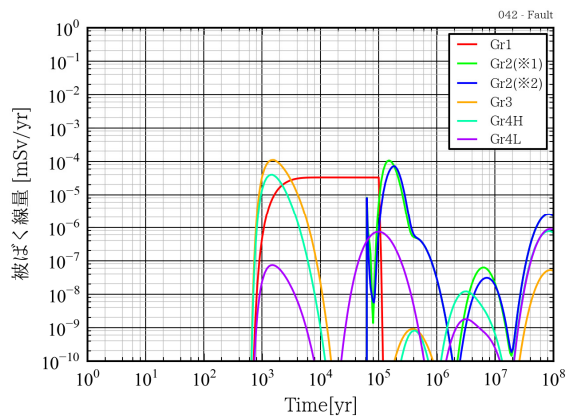
(b) case1-1



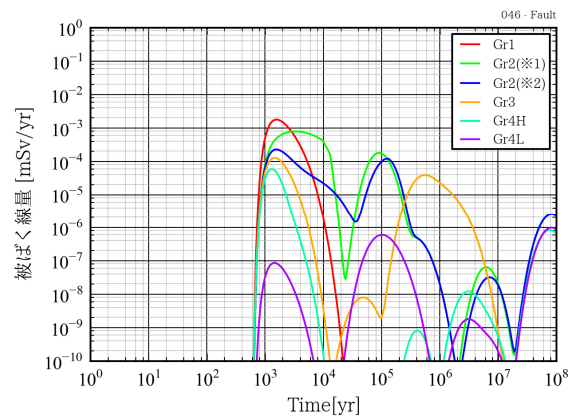
(c) case1-2



(d) case2-0

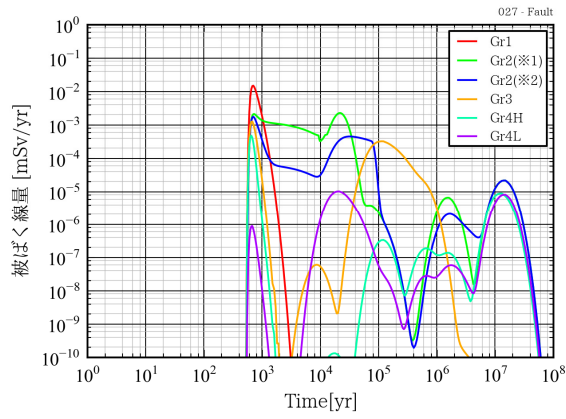


(e) case2-1

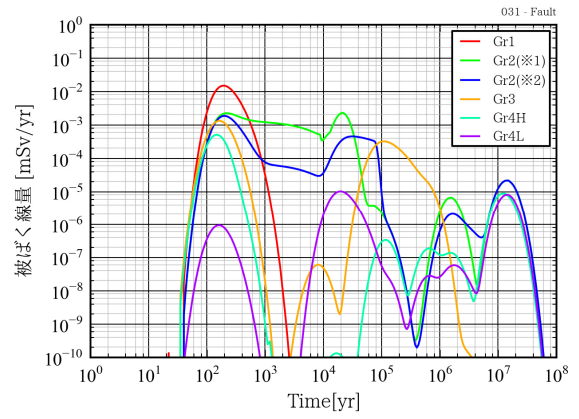


(f) case3-0

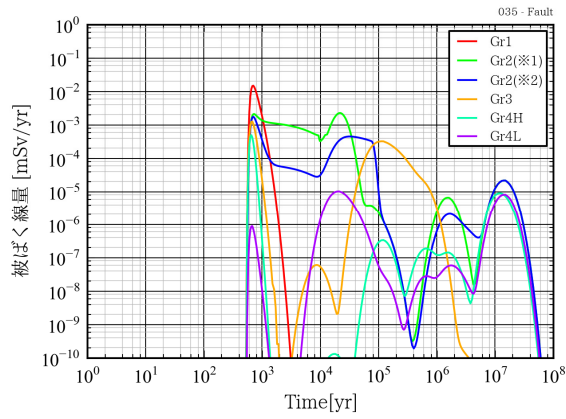
図 9.1.1-10 線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-9}$ m/s)



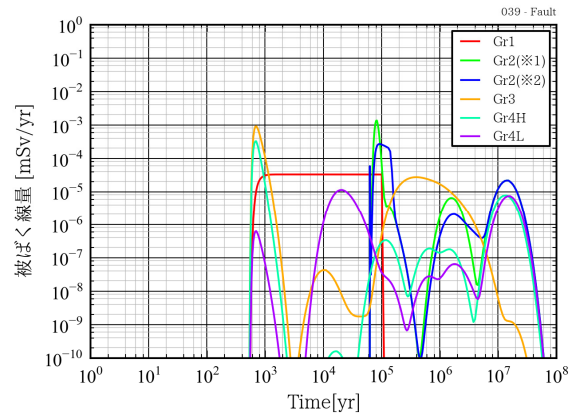
(a) case1-0



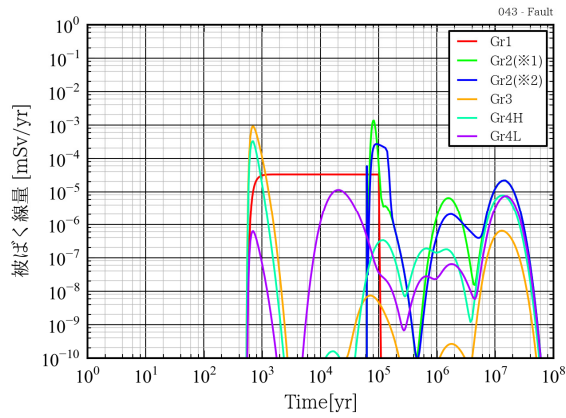
(b) case1-1



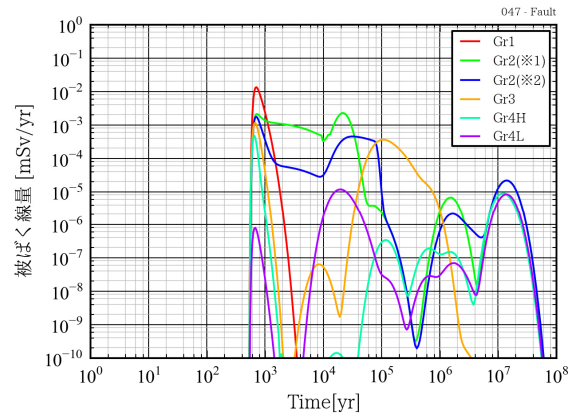
(c) case1-2



(d) case2-0

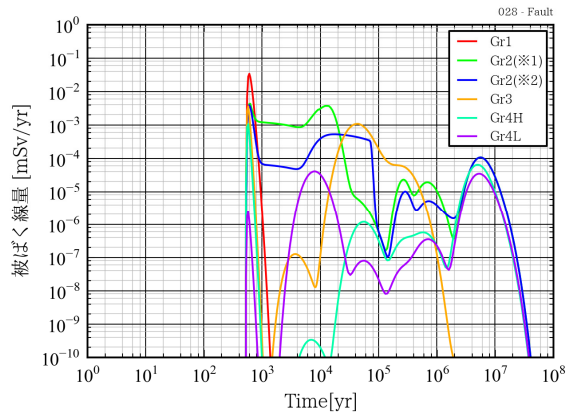


(e) case2-1

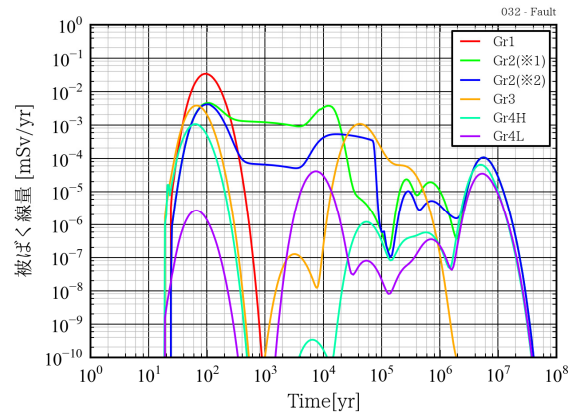


(f) case3-0

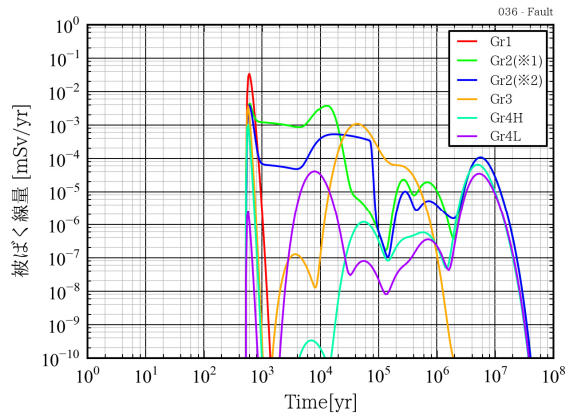
図 9.1.1-11 線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-8}$ m/s)



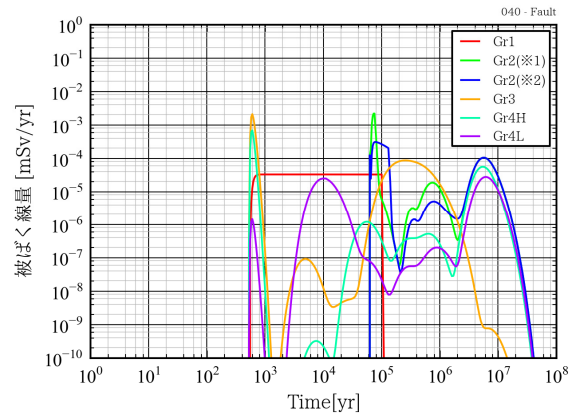
(a) case1-0



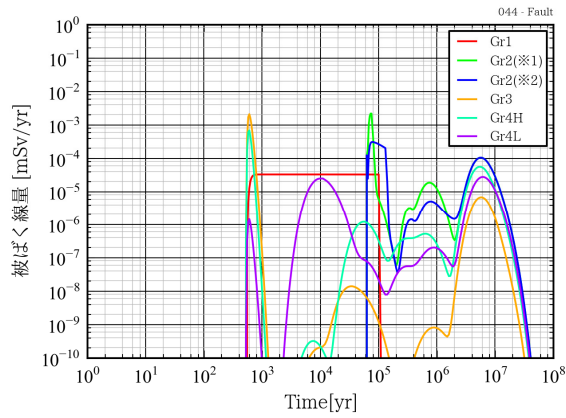
(b) case1-1



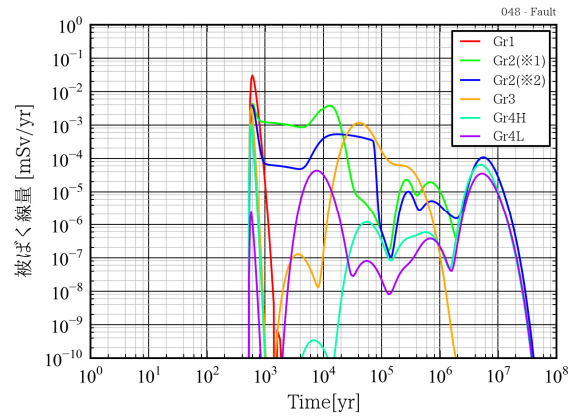
(c) case1-2



(d) case2-0

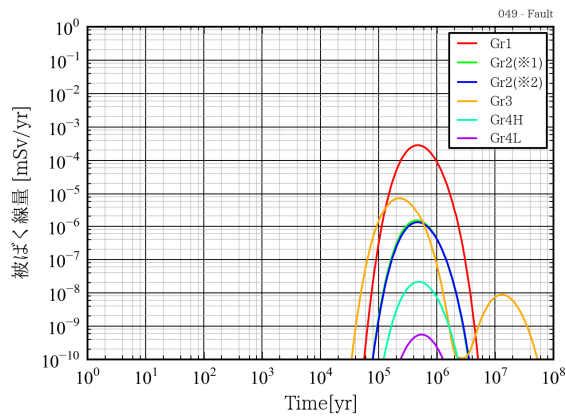


(e) case2-1

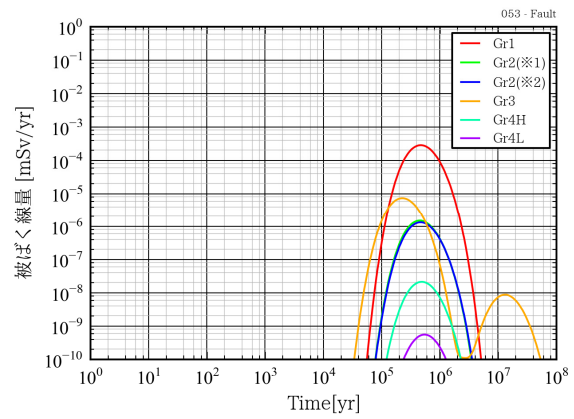


(f) case3-0

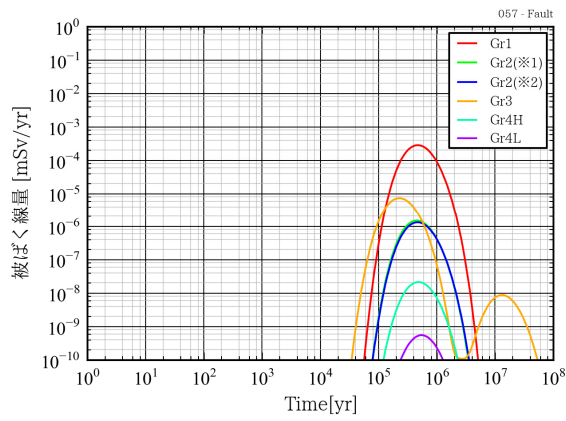
図 9.1.1-12 線量の経時変化 (結晶質岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-7}$ m/s)



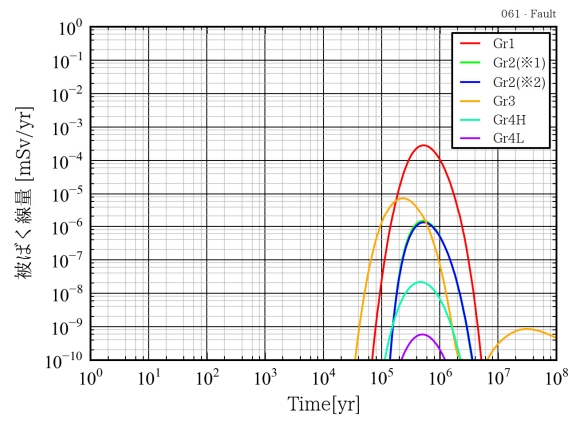
(a) case1-0



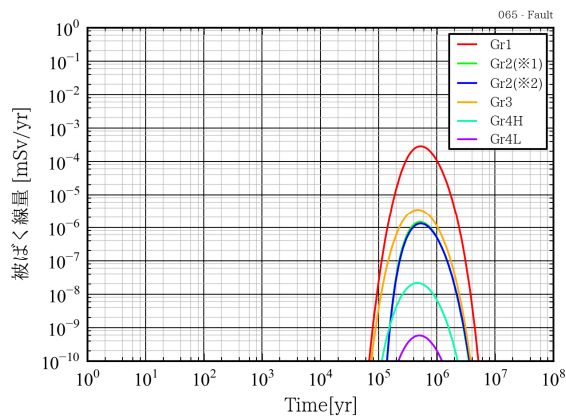
(b) case1-1



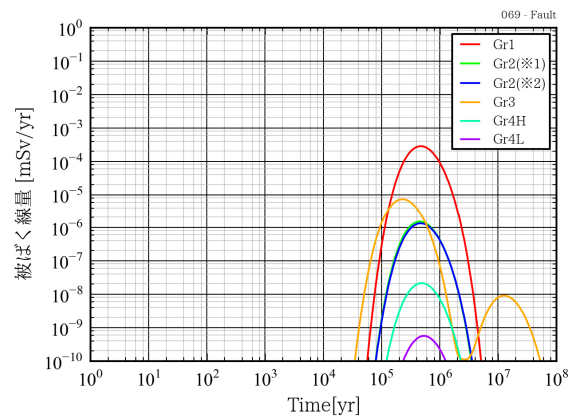
(c) case1-2



(d) case2-0

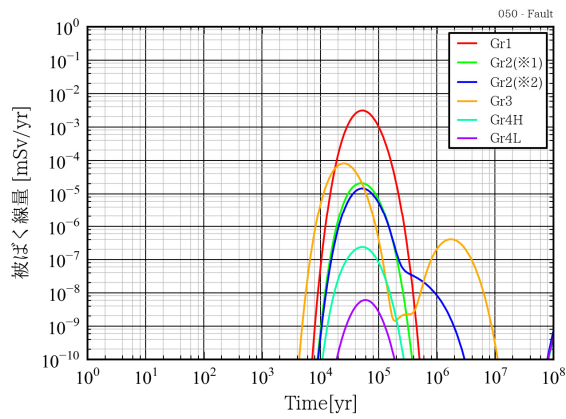


(e) case2-1

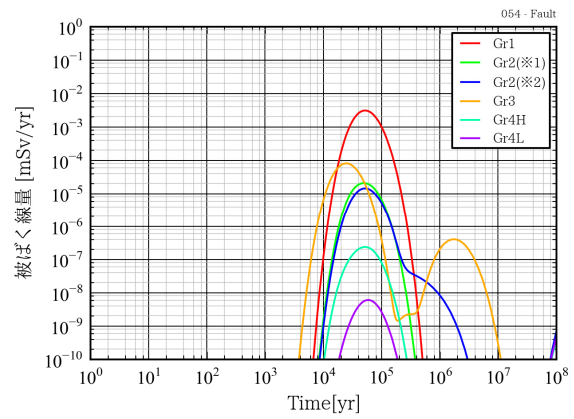


(f) case3-0

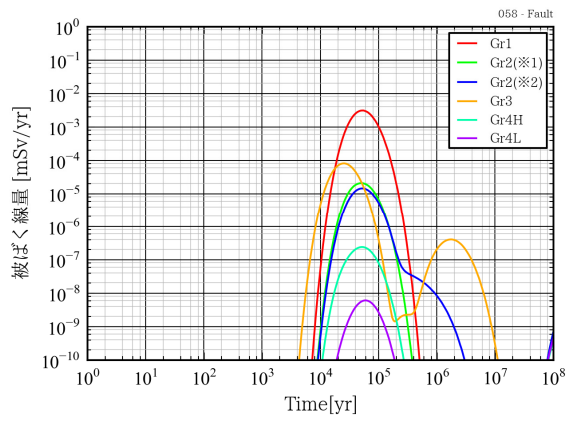
図 9.1.1-13 線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-10}$ m/s)



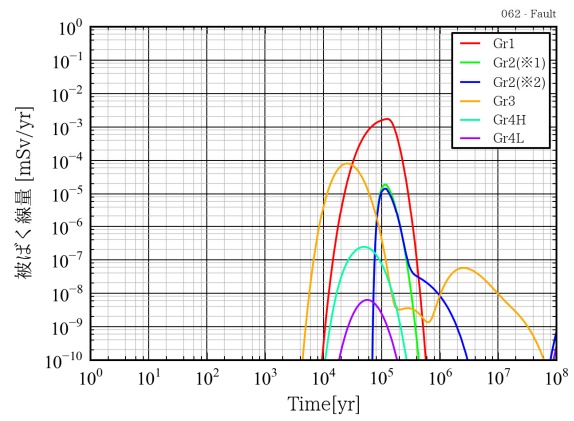
(a) case1-0



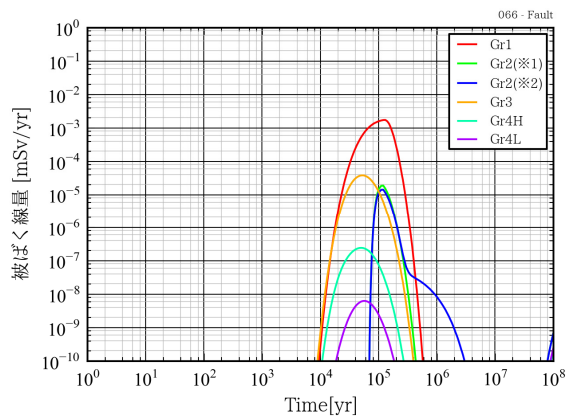
(b) case1-1



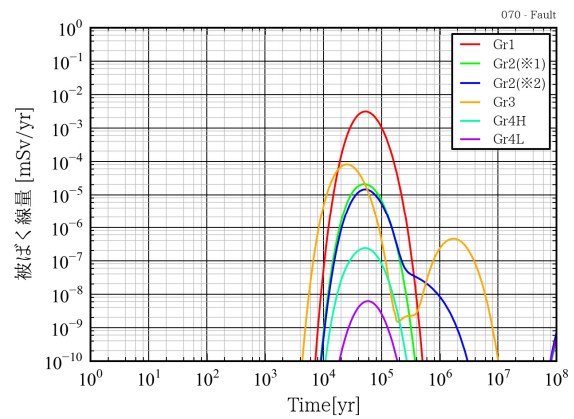
(c) case1-2



(d) case2-0

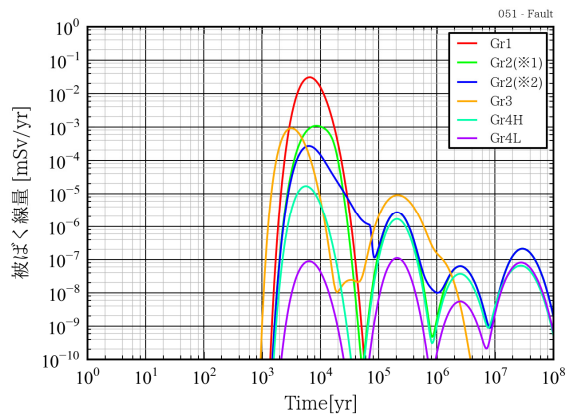


(e) case2-1

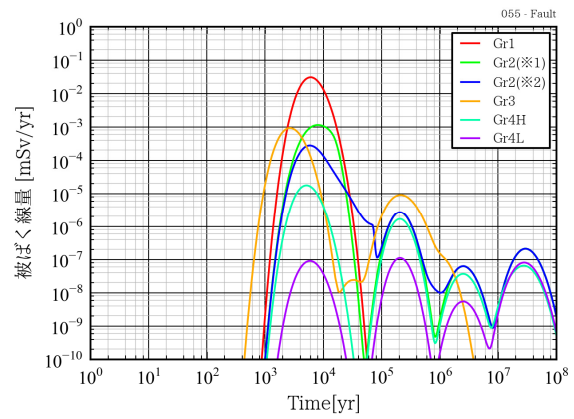


(f) case3-0

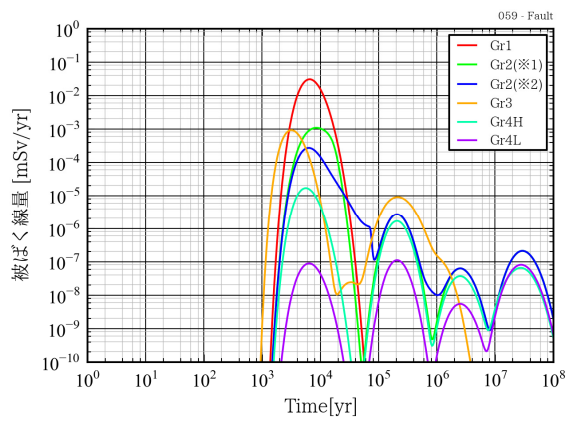
図 9.1.1-14 線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-9}$ m/s)



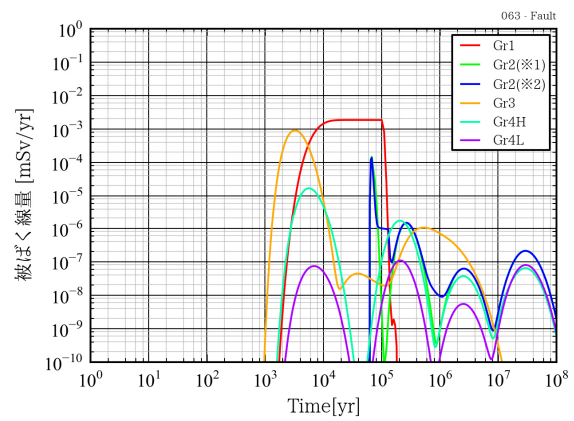
(a) case1-0



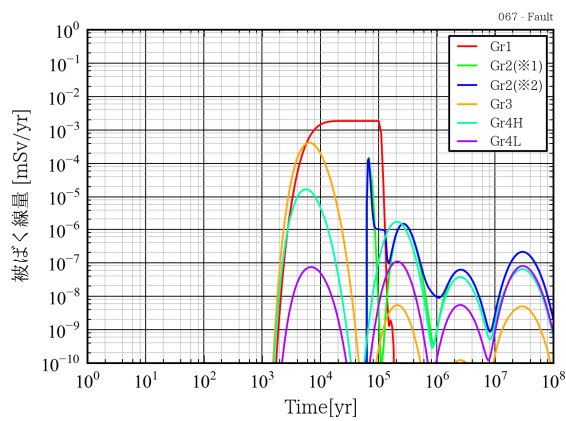
(b) case1-1



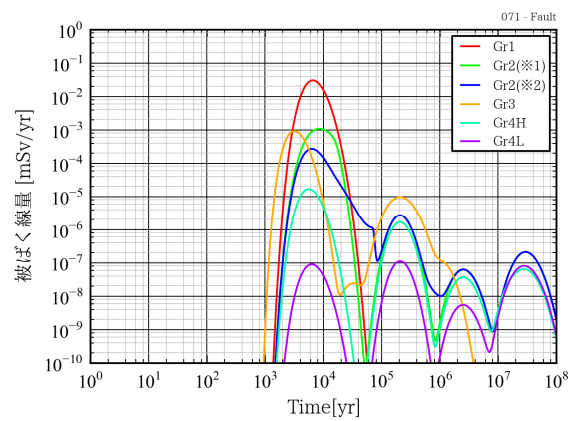
(c) case1-2



(d) case2-0

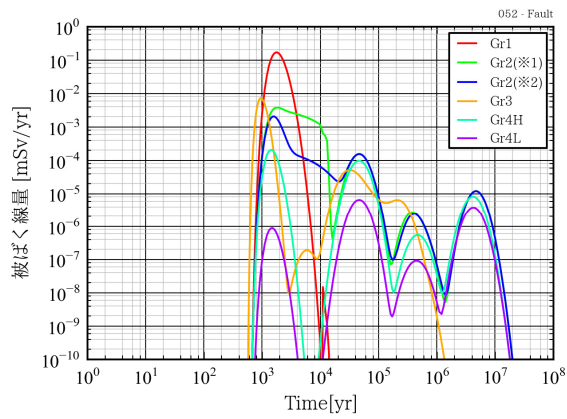


(e) case2-1

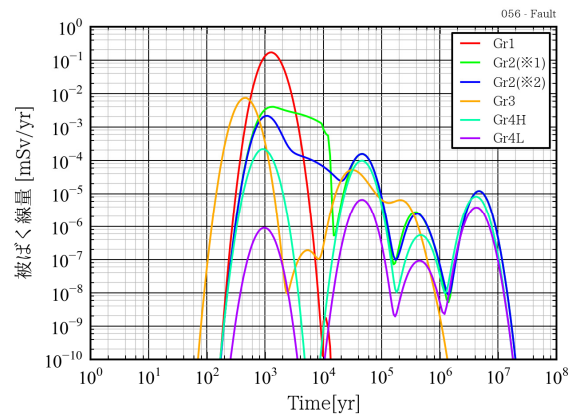


(f) case3-0

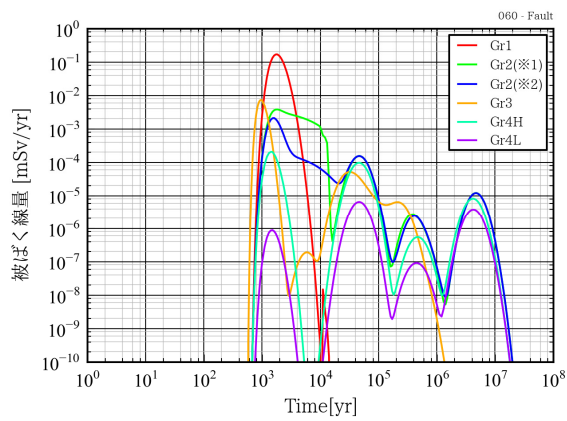
図 9.1.1-15 線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-8}$ m/s)



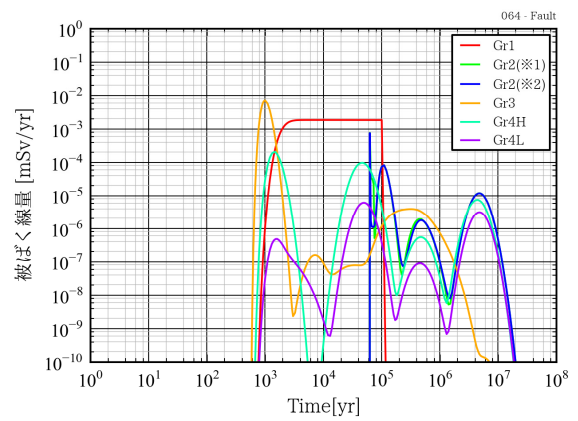
(a) case1-0



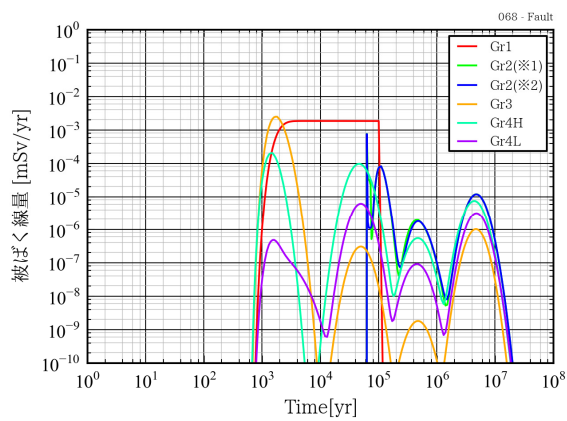
(b) case1-1



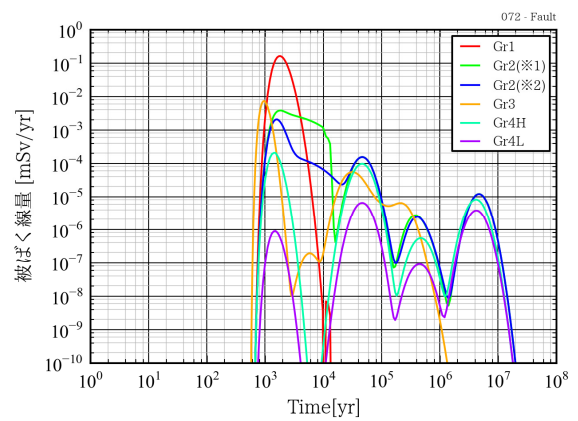
(c) case1-2



(d) case2-0

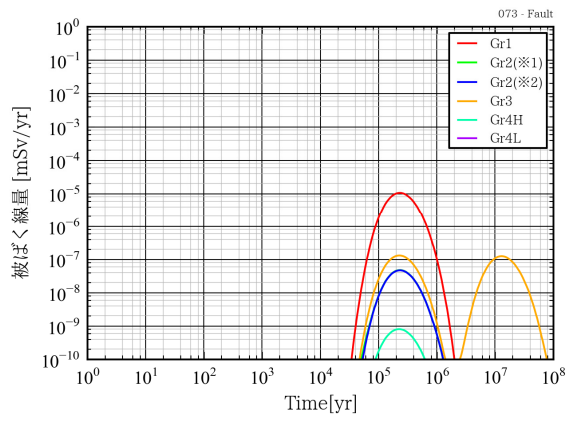


(e) case2-1

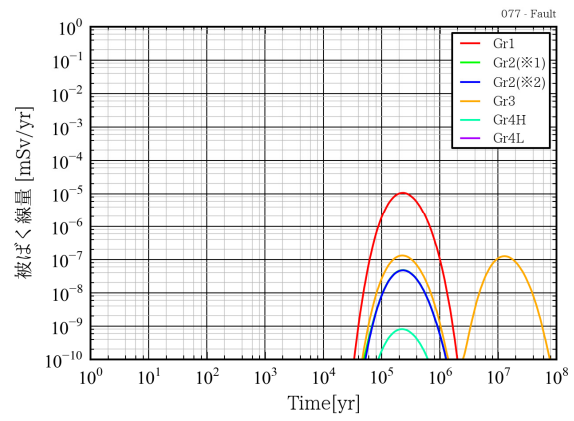


(f) case3-0

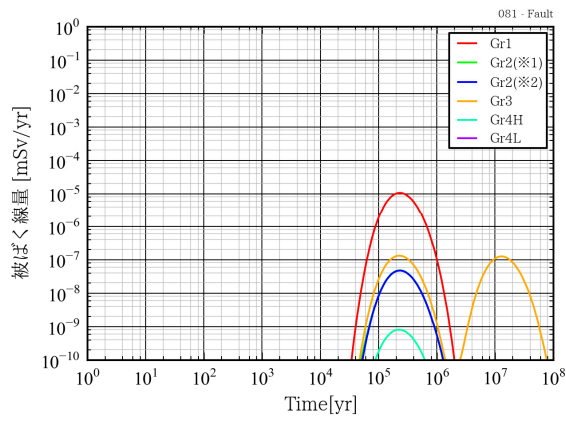
図 9.1.1-16 線量の経時変化 (堆積岩, 降水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-7}$ m/s)



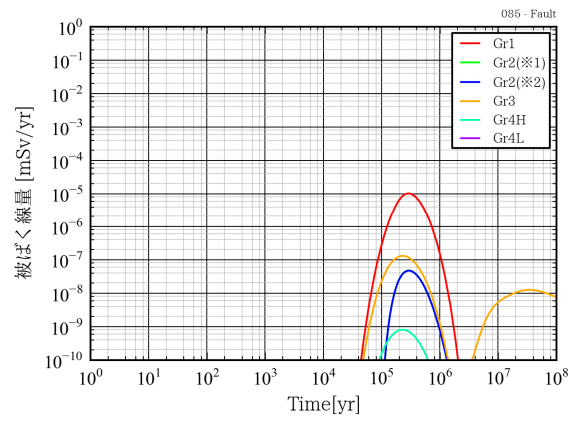
(a) case1-0



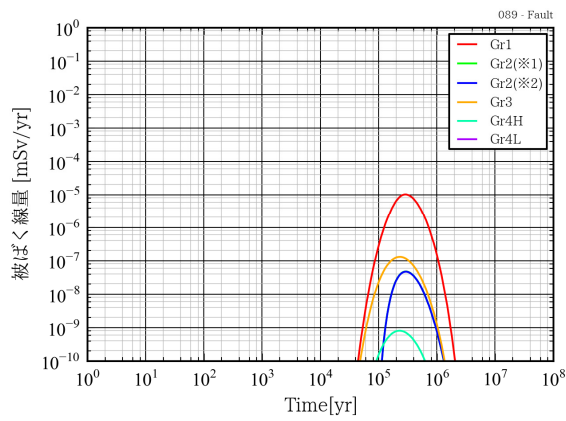
(b) case1-1



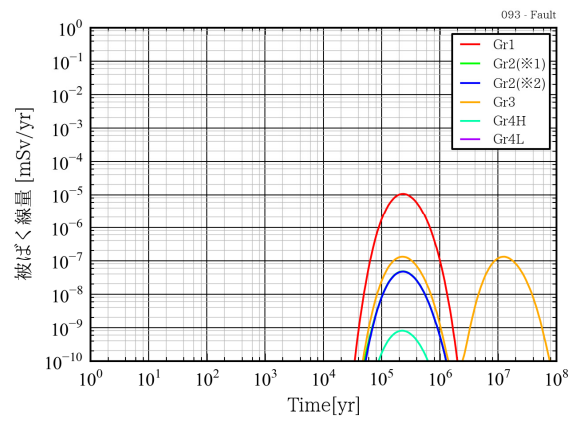
(c) case1-2



(d) case2-0

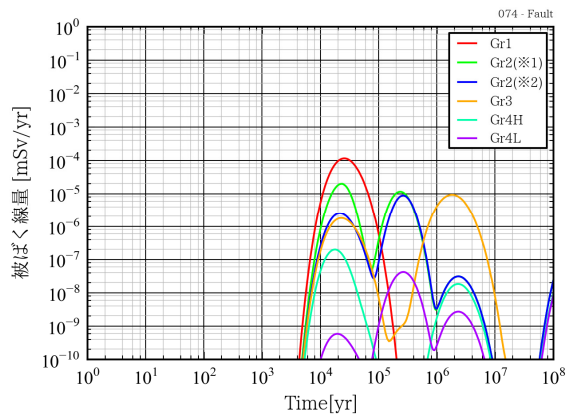


(e) case2-1

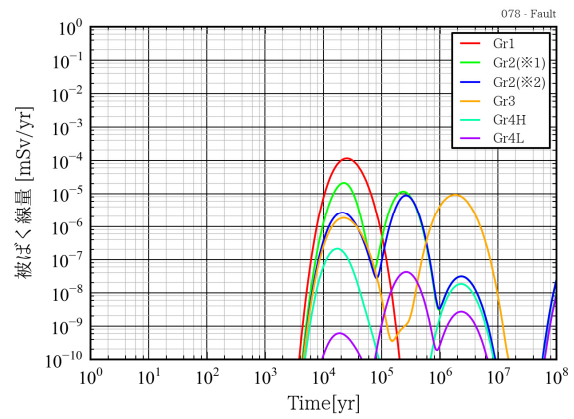


(f) case3-0

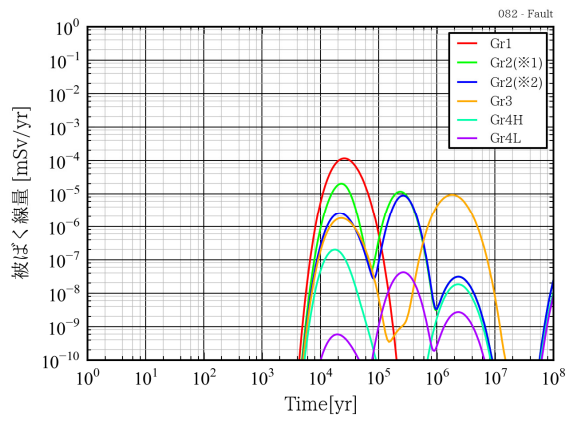
図 9.1.1-17 線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-10}$ m/s)



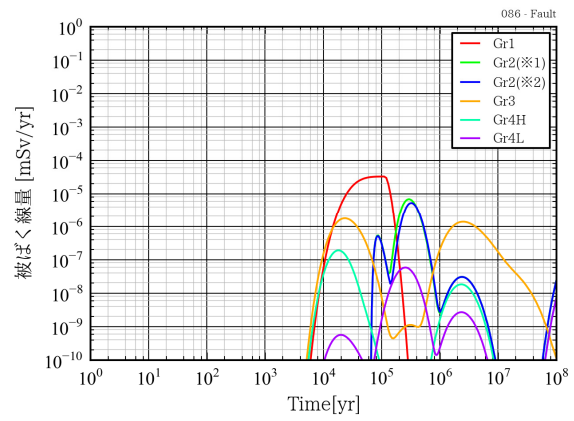
(a) case1-0



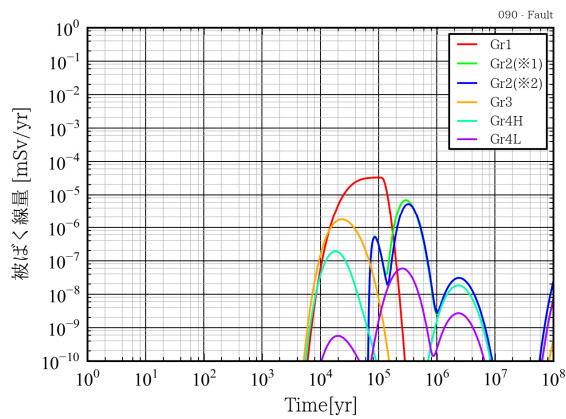
(b) case1-1



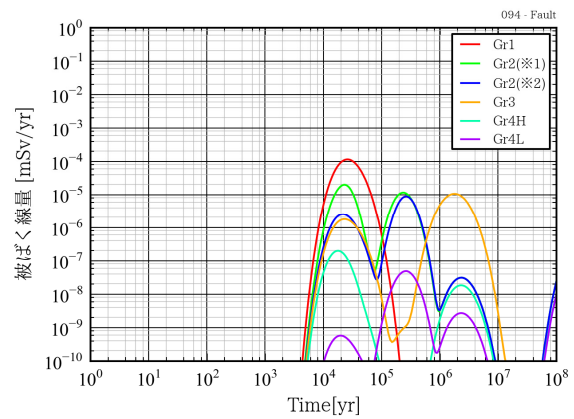
(c) case1-2



(d) case2-0

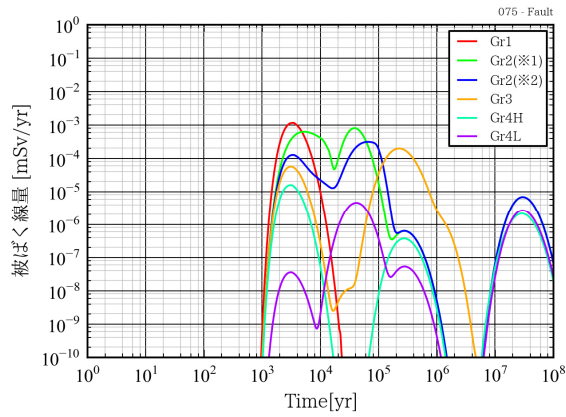


(e) case2-1

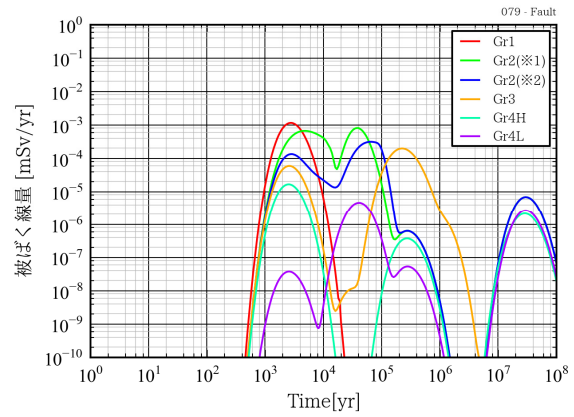


(f) case3-0

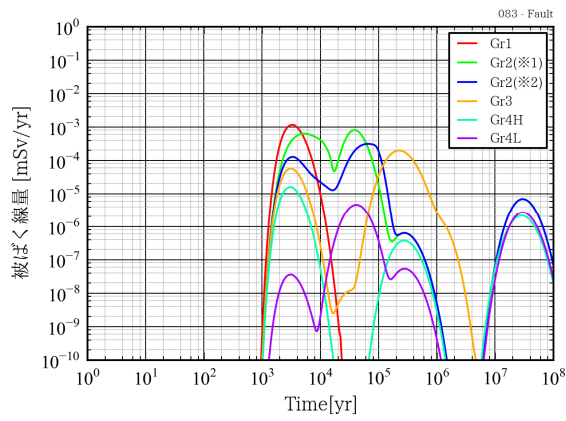
図 9.1.1-18 線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-9}$ m/s)



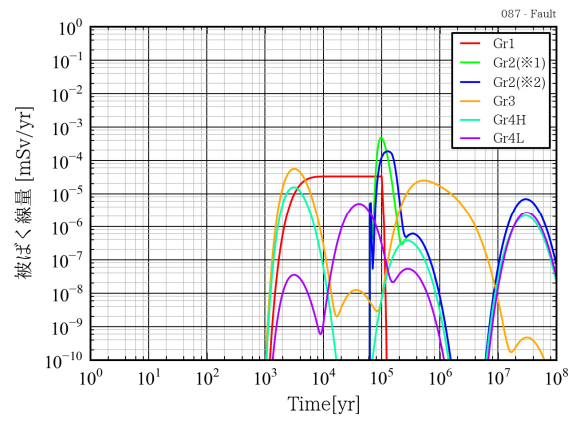
(a) case1-0



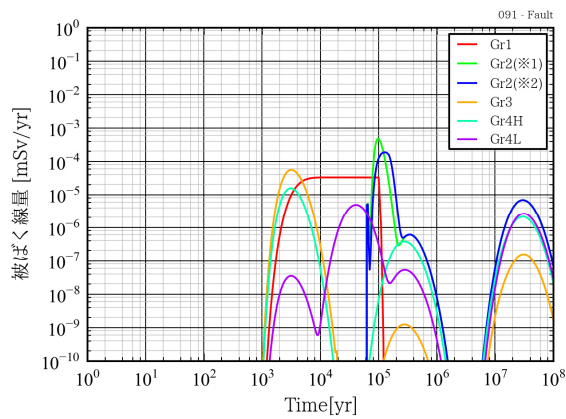
(b) case1-1



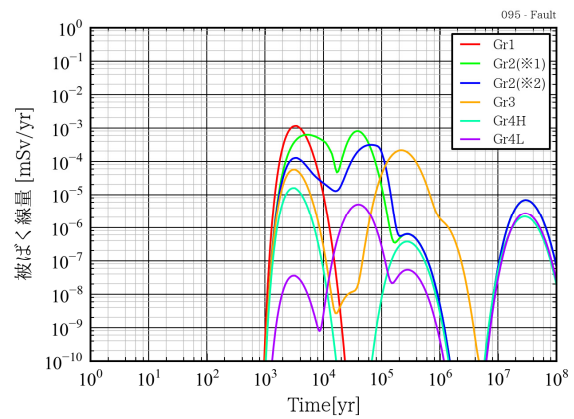
(c) case1-2



(d) case2-0

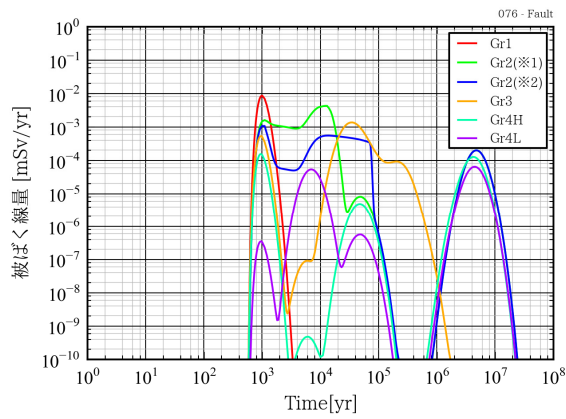


(e) case2-1

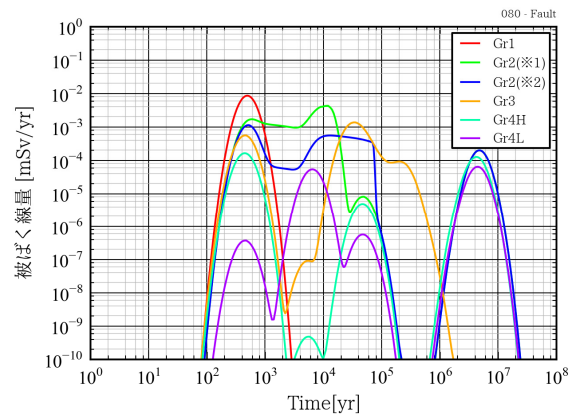


(f) case3-0

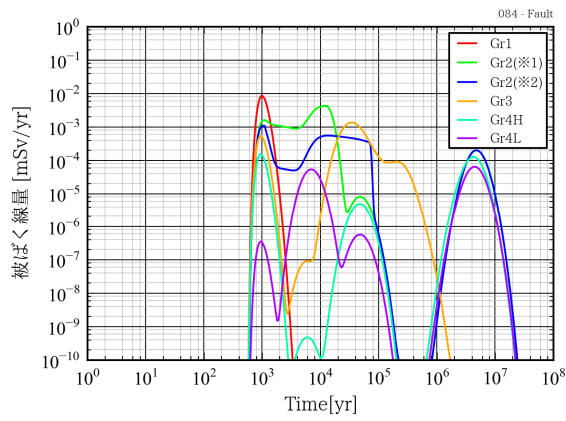
図 9.1.1-19 線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-8}$ m/s)



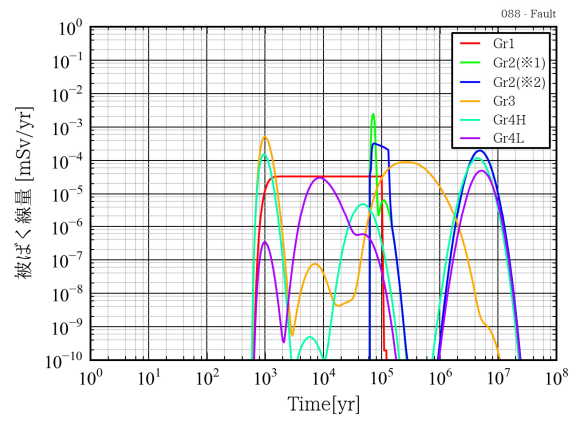
(a) case1-0



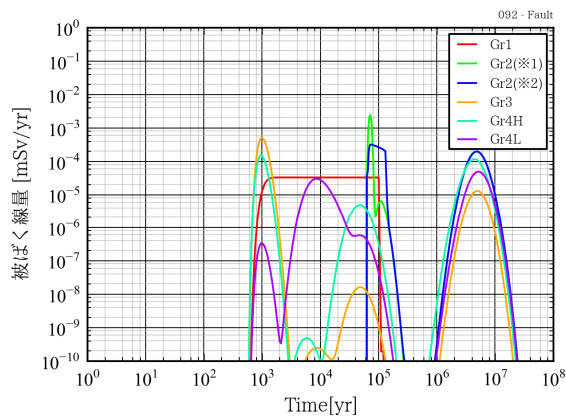
(b) case1-1



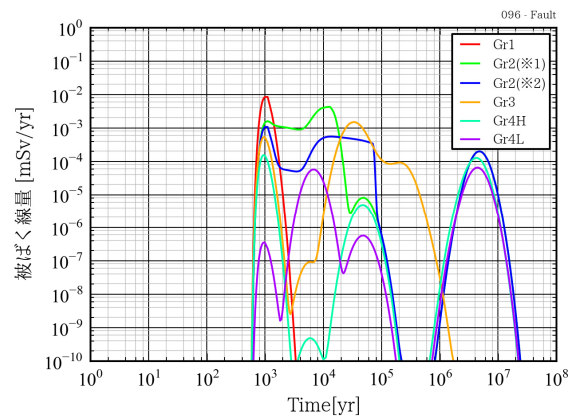
(c) case1-2



(d) case2-0



(e) case2-1



(f) case3-0

図 9.1.1-20 線量の経時変化 (堆積岩, 海水系還元性地下水, $k=2 \times 10^{-7}$ m/s)

9.2 包括的感度解析に基づく安全裕度の検討

包括的感度解析の結果から抽出した $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回るための成立条件（5章参照）と決定論解析ケースの入力条件を用いて得られるパラメータ γ （天然バリア中での核種の減衰割合）および F_N （人工バリアからの核種の定常放出率）を比較した。ここで用いた包括的感度解析の結果は3章で設定した包括的感度解析の解析ケース（表 3.5.2-1 参照）に基づいて実施したものである。この比較により、各々の母岩透水係数において、パラメータ γ および F_N の安全裕度を確認する。また、成立条件になるために求められるパラメータの要求値も合わせて示す。

ここで、本検討で実施した包括的感度解析においては、100 m の母岩のみを考慮し、断層 800 m を無視している（3.5 節参照）。そのため、比較対象とする決定論解析ケースの入力条件を用いて得られる γ の算出においても断層を無視することとした。この場合、算出される母岩の性能の安全裕度、または、成立条件になるために求められる母岩の性能の要求値は、減衰がある程度期待できる断層を無視した条件で求められることになるため、実際よりも厳しい保守的な値となる。これらの安全裕度や母岩の性能に対する要求値は、母岩および断層の取り扱いが違うことから、既存の評価（Ohi et.al., 2013；大井, 2012：母岩と断層を区別せず 900 m の媒体として考慮）と異なることに留意が必要である。

また、決定論解析ケースにおいては、500 年の閉じ込め容器の採用が考慮されている。そのため、人工バリアの幾何形状やそれに依存して変化する人工バリア内の水理条件が既存の評価である TRU レベル 3 報告書や既存の評価（Ohi et.al., 2013；大井, 2012）と異なることに留意が必要である。

9.2.1 廃棄体グループ 1 の I-129 に関する安全裕度

廃棄体グループ 1 の I-129 については、結晶質岩・降水系還元性地下水環境での決定論解析ケースと結晶質岩・海水系還元性地下水環境での決定論解析ケースの 2 種類の安全裕度を示す。それぞれ線量換算係数が異なるため、前者については包括的感度解析ケース A（結晶質岩・降水系還元性地下水環境：表 3.5.2-1 参照）から抽出した成立条件（図 5.2.2-5(a) 参照）と比較し、後者については包括的感度解析ケース B（結晶質岩・海水系還元性地下水環境：表 3.5.2-1 参照）から抽出した成立条件（図 5.2.2-5(b) 参照）と比較した。

図 9.2.1-1 に、包括的感度解析ケース A から抽出した I-129 の成立条件の γ , F_N 平面上でのカウンターと、case1-0 および case2-0 の決定論解析ケースの入力データ（母岩の長さは 100 m, 断層は無視）から与えられる γ および F_N の座標を母岩の透水係数ごとに示す。また、表 9.2.1-1 に、各々の決定論解析ケースの入力データによって与えられる γ （添付 1-17 式より算出）および F_N （添付 1-8 式+添付 1-10 式より算出）の座標 A (γ , F_N) を示す。さらに、座標 A を通り γ と F_N の両軸に平行に引かれるグラフの反対側のそれぞれの軸と成立条件のカウンター上の 2 つ交点 B_1, B_2 の座標 (γ_1, F_N) と (γ , F_{N2}) を示す（図 9.2.1-1

参照)。2つ交点 B_1, B_2 の座標 (γ_1, F_N) と (γ, F_{N2}) と、解析ケースの座標 A (γ, F_N) との比で表される γ_1/γ と F_{N2}/F_1 がそれぞれ γ と F_N の安全裕度を表す。

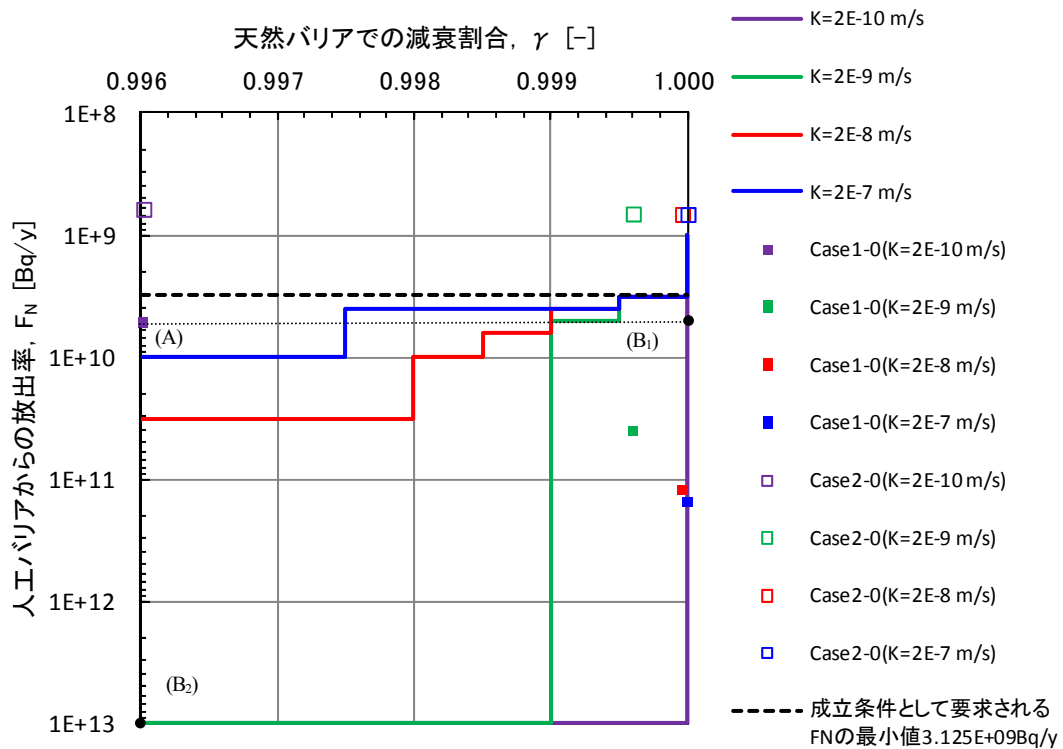


図 9.2.1-1 成立条件と決定論解析の比較 (Gr1_I-129, 結晶質岩・降水系)

表 9.2.1-1 安全裕度 (Gr1_I-129, 結晶質岩・降水系)

母岩透水係数(m/s)		Case1-0	成立条件	γ の	成立条件	F_N の	Case2-0の	成立条件の	γ の	成立条件の	F_N の
		値	のコンター	安全裕度	のコンター	安全裕度	値	コンター	安全裕度	コンター	安全裕度
		A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$	A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$
2E-10	γ [-]	9.960E-01	1.000E+00	1.001	9.960E-01		9.960E-01	1.000E+00	1.0006	9.960E-01	
	F_N [Bq/y]	5.167E+09	5.167E+09		1.000E+13	1935.40	6.112E+08	6.112E+08		5.167E+09	8.454
2E-9	γ [-]	9.996E-01	9.990E-01	0.999	9.996E-01		9.996E-01	1.000E+00	1.0001	9.996E-01	
	F_N [Bq/y]	4.002E+10	4.002E+10		3.160E+09	0.08	6.674E+08	6.674E+08		3.160E+09	4.735
2E-8	γ [-]	1.000E+00	—	—	1.000E+00		1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00	
	F_N [Bq/y]	1.230E+11	1.230E+11		3.160E+09	0.03	6.736E+08	6.736E+08		3.160E+09	4.691
2E-7	γ [-]	1.000E+00	—	—	1.000E+00		1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00	
	F_N [Bq/y]	1.551E+11	1.551E+11		3.160E+09	0.02	6.742E+08	6.742E+08		3.160E+09	4.687

赤字は安全裕度がないことを、すなわち、その条件では、設定した基準を満足していないことを表す。

解析ケースの座標が成立する領域に位置する場合、この安全裕度は1より大きくなる。逆に、解析ケースの座標が成立する領域に位置しない場合は、安全裕度は1より小さくなり、安全性を確保できない状態であることを表す。

ここで、 γ と F_N は、母岩の透水係数と独立ではない。そのため、母岩の透水係数の変化に応じてこれらの値は変化する。各決定論解析ケースの成立性は、任意の母岩透水係数での成立条件コンターと各決定論解析ケースの入力データから与えられる γ および F_N の座標との比較によって確認できる。

図 9.2.1-1 より、決定論解析ケースの case1-0 の母岩透水係数 $k=2\times 10^{-10}$ m/s の γ および F_N の座標 (紫色の■) は、同じ母岩透水係数のコンター (紫色の実線) よりも左上の領域に位置し、成立条件を満たしている ($10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る) ことがわかる。一方で、case1-0 の母岩透水係数 $k=2\times 10^{-9}$ m/s (緑色の■), 2×10^{-8} m/s (赤色の■), 2×10^{-7} m/s (青色の■) の γ および F_N の座標は、それぞれ対応するコンターよりも右下の領域に位置し、成立条件を満たさないことがわかる。高度化対策を採用する case2-0 の解析ケースでは、全ての母岩透水係数において成立条件を満たす領域に位置している。これらの結果は前述した決定論解析による安全評価結果 (図 9.1.1-1 参照) と整合的である。なお、 F_N が 1.0×10^{13} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

図 9.2.1-1 には、 γ が 1.0 の場合に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下になるために人工バリアからの核種放出率 F_N に要求される放出率の最小値 3.125×10^9 Bq/y を合わせて示している。この値は、I-129 の降水系環境の場合の線量への換算係数 3.2×10^{-12} mSv/y (表 8.3.7-1 参照 : 3.2×10^{-15} Sv/y) と、仮定した基準値 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0×10^{-5} Sv/y) から求めた値である。図 9.2.1-1 より、天然バリアのバリア機能が増大し、 γ が 1.0 より小さくなるにつれて、この 3.125×10^9 Bq/y と成立条件のコンターの F_N の値との違いが大きくなることがわかる。この差は、天然バリアのバリア機能の増大により、基準線量を満足するために求められる人工バリアの機能に対する要求が緩和されることを表すものである。表 9.2.1-1 に示されている $\gamma=1.0$ での成立条件コンターの F_N の最小値 3.16×10^9 Bq/y と 3.125×10^9 Bq/y との違いは、主として、天然バリア中の核種移行に関する定常状態を表す解析解の誤差によるものと考えられる。具体的には以下の通りである。

*天然バリア中の核種移行に関する定常解析解はインベントリの枯渇を考慮できない。

そのため、本来はインベントリが枯渇して定常にならない場合でも、定常状態での解を与え、減衰割合 γ を保守的に評価することになる。この場合、この解析解で与えられる $\gamma=1$ は、本来であれば、 $1.0 > \gamma$ の数字となるべき値であり、 3.125×10^9 Bq/y との違いは、 $\gamma=1$ を与える天然バリア条件において示される人工バリアの機能に対する要求量の緩和分である。

表 9.2.1-1 において示された γ と F_N の安全裕度は、それらを与える解析解 (添付 1 参照) と解析ケースによって示されるパラメータの設定値を用いることによって、特定のパラメータに対する安全裕度に容易に分解することが可能である (Ohi et.al., 2013 ; 大井, 2012)。

表 9.2.1-1 において、成立条件のコンターに値が記されず、(－) となっているケースは、そのケースの条件では成立条件を単独では定義できないケースを表している。この場合、 γ か F_N のいずれかの条件、または両方の条件を変えることにより、安全裕度の定義が可能になる。例えば、図 9.2.1-1 の case1-0 ($k=2.0\times 10^{-8}$ m/s) (赤色の■) の場合は、人工バリアの性能が 4 倍程度向上し、 F_N が、 3.0×10^{10} Bq/y 以下になれば、 $\gamma=0.996\sim 0.998$ において、 F_N が 3.0×10^{10} Bq/y 以上であることから、成立条件のコンターと交わることになり、天然バリア中での核種の減衰割合 γ に関する安全裕度の定義が可能になる。

表 9.2.1-1 において、安全裕度が 1 より小さい赤字で記されているケースは、その条件では、必ずしも安全性が確保されないことがあることを表す。このような場合においても、解析解を用いて成立条件になるために求められるパラメータの要求値を求めることが可能である。例えば、図 9.2.1-1 からわかるように、 γ が約 0.9996 から 0.9990 になるような条件のサイトを選ぶことにより、 $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の条件においても処分を安全に成立させることができるようになる。また、 F_N が 4.002×10^{10} Bq/y から 3.160×10^9 Bq/y に低減するように人工バリアを設計する、または、データ設定を行うことができれば、 $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の条件においても処分を安全に成立させることができるようになる。

図 9.2.1-2 に、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の条件において、100m の母岩のみを考慮し、断層 800 m を無視した場合の天然バリア中での核種の減衰割合 γ と母岩の収着分配係数の関係を表す (他のパラメータは case1-0 の降水系の値)。この結果は添付 1-17 式に示される γ に関する計算式を用いて求めたものである。

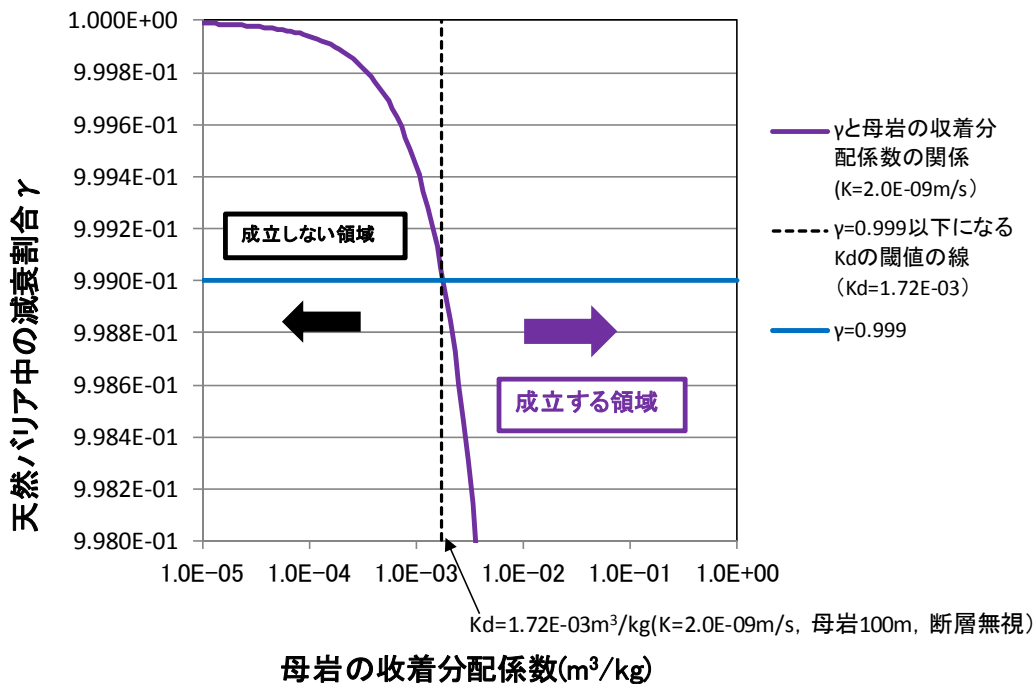


図 9.2.1-2 成立条件となる母岩の Kd (Gr1_I-129: $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s)

図 9.2.1-2 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の場合に、 $\gamma=0.9990$ 以下となり、目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する母岩の収着分配係数は $Kd=1.72 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ であることがわかる。この値は、レファレンスの値 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ の約 17 倍の値である。

また、図 9.2.1-3 に、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の条件における人工バリアからの核種放出率 F_N と充填材の分配係数の関係を表す (他のパラメータは case1-0 の降水系の値)。この結果は、添付 1-8 式と添付 1-10 式の和で表される F_N に関する計算式を用いて求めたものである。

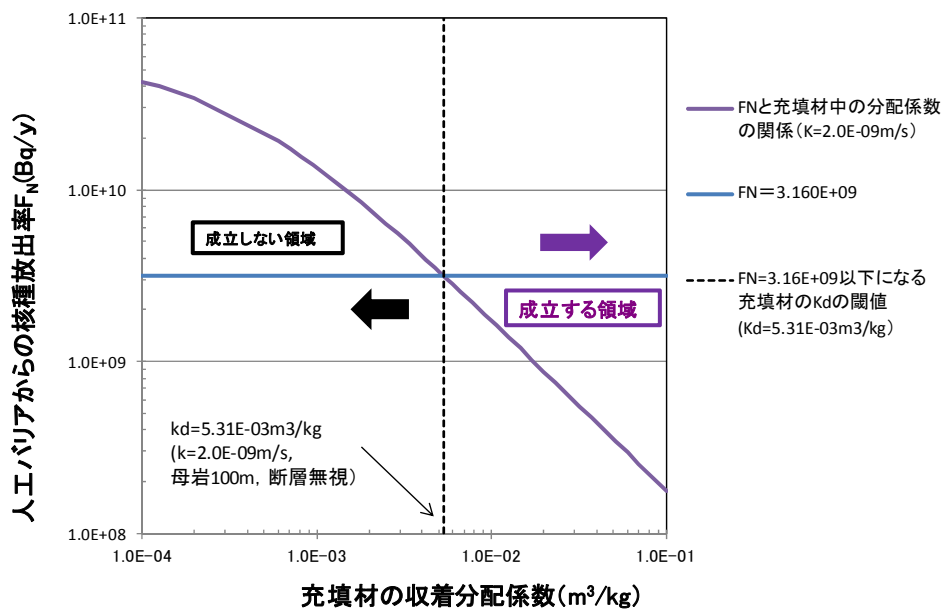


図 9.2.1-3 成立条件となる充填材の Kd (Gr1_I-129: $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s)

図 9.2.1-3 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-9}$ m/s の場合に、 $F_N=3.16 \times 10^9$ Bq/y 以下となり目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する充填材の収着分配係数は $K_d=5.31 \times 10^{-3}$ m³/kg であることがわかる。この値は、レファレンスの値 1.25×10^4 m³/kg の約 42 倍の値である。

次に、図 9.2.1-4 および表 9.2.1-2 に、海水系地下水環境における決定論解析ケースの入力条件から得られる γ 、 F_N と成立条件のコンターの比較結果および安全裕度を示す。

図 9.2.1-4 から、case1-0 の母岩透水係数 $k=2 \times 10^{-10}$ m/s (紫色の■)、 $k=2 \times 10^{-9}$ m/s (緑色の■) の場合の γ および F_N の座標は、対応する母岩透水係数のコンター (紫色の実線および緑の実線) よりも左上の領域に位置し、成立条件を満たしている ($10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る)。一方で、case1-0 の母岩透水係数 $k=2 \times 10^{-8}$ m/s (赤色の■)、 2×10^{-7} m/s (青色の■) の場合の γ および F_N の座標は、それぞれ対応するコンターよりも右下の領域に位置し、成立条件を満たさない (必ずしも $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回らない) ことがわかる。一方、高度化対策を採用する決定論解析ケースの case2-0 では、全ての母岩透水係数において成立条件を満たす領域に位置していることがわかる。これらの結果は前述した決定論解析による安全評価結果 (図 9.1.1-1 参照) と整合的である。

図 9.2.1-4 には、 γ が 1.0 の場合に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下になるために人工バリアからの核種放出率 F_N に要求される放出率の最小値 1.754×10^{11} Bq/y を合わせて示している。この値は、I-129 の海水系環境の場合の線量への換算係数 5.7×10^{-14} mSv/y (表 8.3.7-1 参照: 5.7×10^{-17} Sv/y) と、仮定した基準値 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0×10^{-5} Sv/y) から求めた値である。表 9.2.1-2 に示されている $\gamma=1.0$ での成立条件コンターの F_N の最小値 1.778×10^{11} Bq/y と 1.754×10^{11} Bq/y との違いは、主として、天然バリア中の核種移行に関する定常状態を表す解析解の誤差によるものと考えられる。

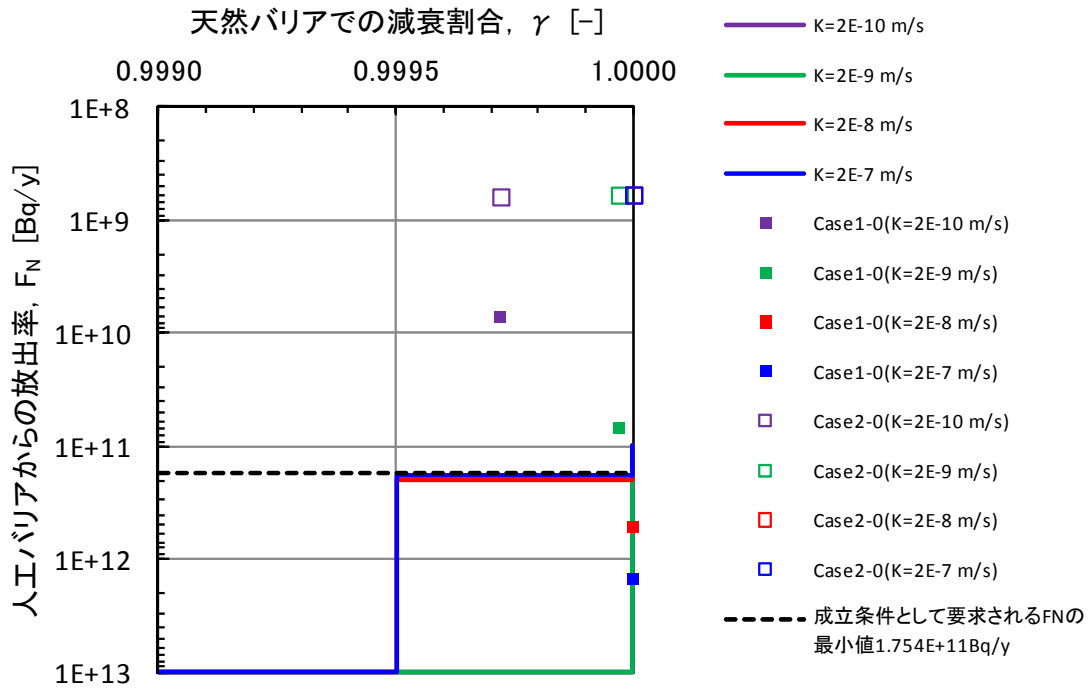


図 9.2.1-4 成立条件と決定論解析の比較 (Gr1_I-129, 結晶質岩・海水系)

表 9.2.1-2 安全裕度 (Gr1_I-129, 結晶質岩・海水系)

母岩透水係数(m/s)		Case1-0					Case2-0				
		成立条件の値	成立条件のコンター	γの安全裕度	成立条件のコンター	F _N の安全裕度	成立条件の値	成立条件のコンター	γの安全裕度	成立条件のコンター	F _N の安全裕度
		A	B1	B1÷A	B2	B2÷A	A	B1	B1÷A	B2	B2÷A
2E-10	γ [-]	9.997E-01	1.000E+00	1.0003	9.997E-01		9.997E-01	1.000E+00	1.0003	9.997E-01	
	F _N [Bq/y]	7.132E+09	7.132E+09		1.000E+13	1402.13	6.695E+08	6.695E+08		1.000E+13	14936.52
2E-9	γ [-]	1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00		1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00	
	F _N [Bq/y]	6.895E+10	6.895E+10		1.000E+13	145.03	7.160E+08	7.160E+08		1.000E+13	13966.48
2E-8	γ [-]	1.000E+00	9.995E-01	0.9995	1.000E+00		1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00	
	F _N [Bq/y]	5.176E+11	5.176E+11		1.995E+11	0.39	7.201E+08	7.201E+08		1.995E+11	277.04
2E-7	γ [-]	1.000E+00	9.995E-01	0.9995	1.000E+00		1.000E+00	1.000E+00	1.0000	1.000E+00	
	F _N [Bq/y]	1.481E+12	1.481E+12		1.778E+11	0.12	7.199E+08	7.199E+08		1.778E+11	246.98

赤字は安全裕度がないことを、すなわち、その条件では、設定した基準を満足していないことを表す。

9.2.2 廃棄体グループ2のC-14に関する安全裕度

廃棄体グループ2のC-14に対する包括的感度解析においては、結晶質岩、降水系地下水の条件において、3種類の放出モードごとに成立条件を抽出した(図 5.2.2-10, 図 5.2.2-15, 図 5.2.2-20 参照)。この成立条件の抽出においては、3.5節で設定された包括的感度解析に関する入力情報が用いられ、それぞれの溶出モードの計算に用いるC-14の初期インベントリとして、表 3.5.1-3 に示されている値が用いられた(500年の崩壊計算は、解析コード内部で実施)。また、人工バリアの幾何形状は主要な廃棄体であるJNFL, JAEAの人工バリア幾何形状で代表された。

上記の包括的感度解析の結果得られた C-14 の成立条件のコンターと比較するため、決定論解析ケース case1-0 と case2-0 の入力データによって与えられる γ および F_N の座標が算出された。この座標の算出は、以下の考えに基づいて行われた。

- ・母岩および地下水：母岩長さは 100 m，断層は無視，結晶質岩，降水系地下水の条件
- ・幾何形状：成立条件の抽出の場合と同様（表 3.5.3-3 および表 3.5.3-5 参照）に，全インベントリが JNFL/JAEA の廃棄体に含まれるものと仮定し，JNFL/JAEA の幾何形状，水理条件で評価した。本来であれば，幾何形状およびそれによって変化する水理条件ごとに評価することが望ましい。しかし，ここでは，保守的観点（上記仮定の場合，廃棄体中の濃度が実際よりも高めに評価され，単位放射能あたりのバリア材料の体積が小さくなり，放出率が高めに評価される）を踏まえ簡略化した。
- ・溶出率：最も保守的な溶出率（ジルカロイ母材：11,400 年，ステンレス：8,500 年）
- ・初期インベントリ：表 3.5.1-3 に示されている値を 500 年崩壊（case1-0）または，6 万年（case2-0）崩壊させた値をそれぞれの溶出モードに適用。
- ・表 8.3.5-1，表 8.3.5-2，表 8.3.5-4 と表 8.3.5-5 において示されるように，廃棄体グループ 2 の充填材の全ての核種の K_d は 0 ($R_d=1$) である。また，充填材領域は空洞の体積 V_1 と収着機能を期待しない充填材体積 V_2 と収着機能を期待する充填材体積 V_3 に分けられている（表 8.3.3-2～表 8.3.3-5 参照）。近似解析解を用いて F_N を与えるためには，充填材領域の体積 V を与える必要がある。

ここでは，以下の液相体積を表す式 εV から充填材領域の体積 V を算出した。

$$\varepsilon V = \varepsilon \times \{ (\text{空洞の全体積 } V_1 / \varepsilon) + \text{収着機能を期待しない充填材体積 } V_2 + R_d \times \text{収着機能を期待する充填材体積 } V_3 \}$$

図 9.2.2-1 および表 9.2.2-1 に，第 2 次 TRU レポートの概念に対する解析ケース(case1-0) および高度化対策（6 万年の閉じ込め）に対する解析ケース(case2-0)の，瞬時放出に関する C-14 の成立条件と決定論解析結果との比較およびそれに基づく安全裕度を示す。

図 9.2.2-1 と表 9.2.2-1 から，瞬時放出条件の場合，case1-0 の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s 以外の条件では，C-14 の決定論解析の結果が成立領域にあること（ $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足している）ことがわかる。この結果は，図 9.1.1-1 に示す決定論解析の結果と一致しない。これは，図 9.2.2-1 の比較が断層を無視し，母岩 100 m の条件でなされた保守的な比較であることに起因する。また，case1-0 と case2-0 の比較から，高度化（6 万年の閉じ込め）により，C-14 のインベントリが 3 桁程度減衰し，C-14 の安全裕度がかなり向上することがわかる。

図 9.2.2-1 には， γ が 1.0 の場合に， $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下になるために人工バリアからの核種放出率 F_N に要求される放出率の最小値 1.562×10^{11} Bq/y を合わせて示している。この値は，

C-14 の降水系環境の場合の線量への換算係数 6.4×10^{-14} mSv/y (表 8.3.7-1 参照: 6.4×10^{-17} Sv/y) と、仮定した基準値 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0×10^{-5} Sv/y) から求めた値である。なお、 F_N が 3.2×10^{11} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

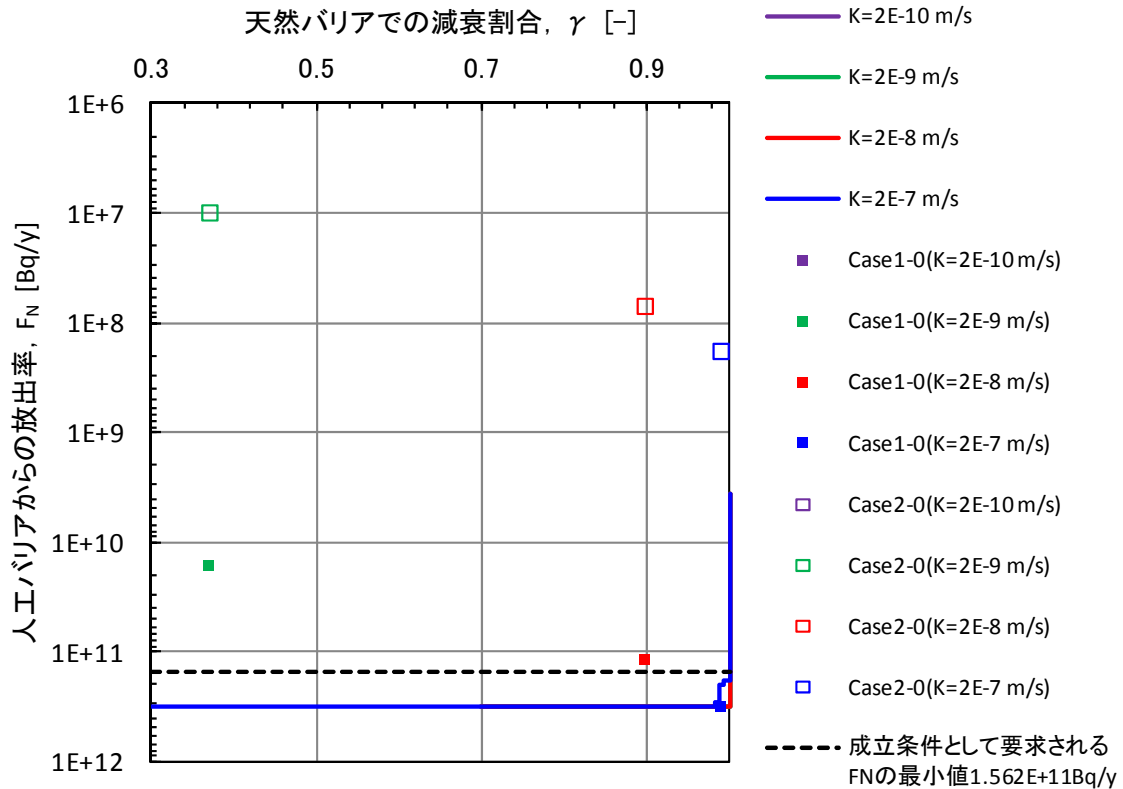


図 9.2.2-1 成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(瞬時)結晶質岩・降水系)

表 9.2.2-1 安全裕度 (Gr2_C-14(瞬時)結晶質岩・降水系)

		Case1-0 の値	成立条件 のコンター	γ の 安全裕度	成立条件 のコンター	F_N の 安全裕度	Case2-0の 値	成立条件 のコンター	γ の 安全裕度	成立条件 のコンター	F_N の 安全裕度	
		A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$	A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$	
母岩透水性係数(m/s)	2E-10	γ [-]	1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03	1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03		
		F_N [Bq/y]	1.69E+09	1.69E+09		3.20E+11	1.02E+06	1.02E+06		3.20E+11	312561.05	
		γ [-]	3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01	3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01		
		F_N [Bq/y]	1.63E+10	1.63E+10		3.20E+11	19.69	9.79E+06	9.79E+06		3.20E+11	32684.08
		γ [-]	8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01	8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01		
		F_N [Bq/y]	1.18E+11	1.18E+11		3.20E+11	2.70	6.97E+07	6.97E+07		3.20E+11	4592.88
	2E-8	γ [-]	9.89E-01	—	—	9.89E-01	9.89E-01	1.00E+00	1.01	9.89E-01		
	F_N [Bq/y]	3.19E+11	3.19E+11		2.02E+11	0.63	1.80E+08	1.80E+08		2.02E+11	1125.35	
	2E-7	γ [-]										
	F_N [Bq/y]											

赤字は安全裕度がないことを、すなわち、その条件では、設定した基準を満足していないことを表す。

図 9.2.2-2 および 表 9.2.2-2 にジルカロイ母材に関する C-14 の成立条件と決定論解析結果との比較とそれに基づく安全裕度を示す。図 9.2.2-2 において、 F_N が 4.0×10^{11} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

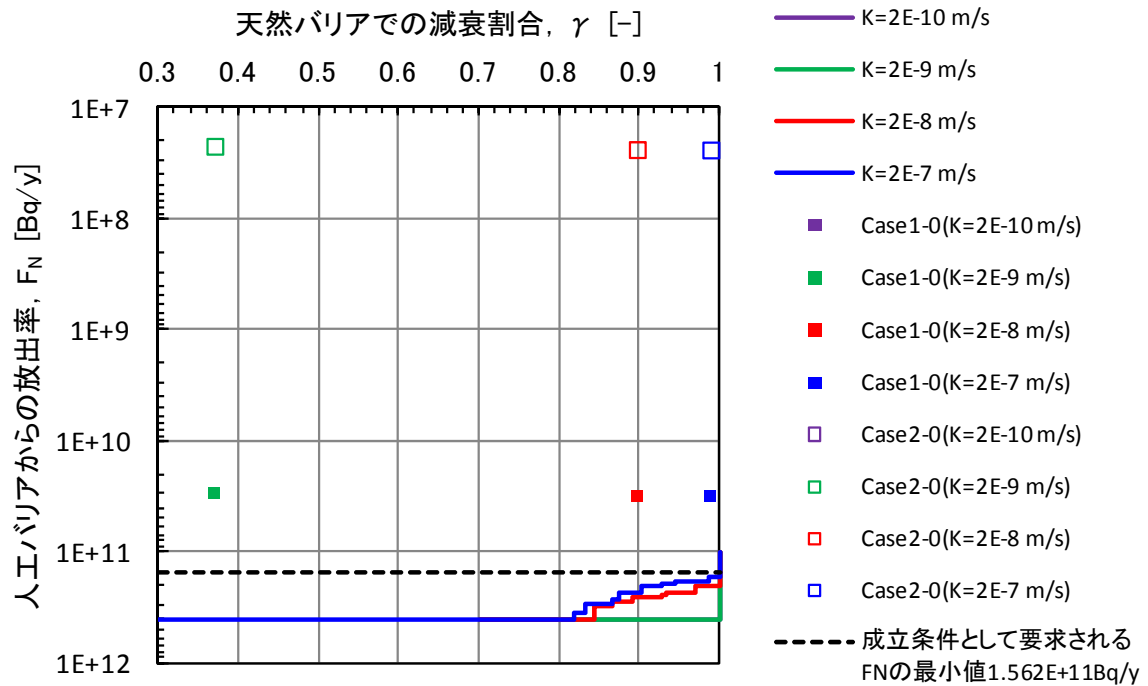


図 9.2.2-2 成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(ｼﾞﾙﾛｲ)結晶質岩・降水系)

表 9.2.2-2 安全裕度 (Gr2_C-14(ｼﾞﾙﾛｲ)結晶質岩・降水系)

母岩透水係数(m/s)		Case1-0	成立条件	γ の	成立条件	F_N の	Case2-0	成立条件	γ の	成立条件	F_N の
		の値	のコンター	安全裕度	のコンター	安全裕度	の値	のコンター	安全裕度	のコンター	安全裕度
		A	B1	B1÷A	B2	B2÷A	A	B1	B1÷A	B2	B2÷A
2E-10	γ [-]	1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03		1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03	
	F_N [Bq/y]	1.78E+10	1.78E+10		4.00E+11	22.52	1.33E+07	1.33E+07		4.00E+11	30007.50
2E-9	γ [-]	3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01		3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01	
	F_N [Bq/y]	2.95E+10	2.95E+10		4.00E+11	13.58	2.21E+07	2.21E+07		4.00E+11	18115.94
2E-8	γ [-]	8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01		8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01	
	F_N [Bq/y]	3.16E+10	3.16E+10		2.55E+11	8.08	2.37E+07	2.37E+07		2.55E+11	10778.44
2E-7	γ [-]	9.89E-01	1.00E+00	1.01	9.89E-01		9.89E-01	1.00E+00	1.01	9.89E-01	
	F_N [Bq/y]	3.18E+10	3.18E+10		1.68E+11	5.29	2.38E+07	2.38E+07		1.68E+11	7060.45

また、図 9.2.2-3 および表 9.2.2-3 にステンレス・インコネルに関する C-14 の成立条件と決定論解析結果との比較とそれに基づく安全裕度を示す。図 9.2.2-3 において、 F_N が 2.0×10^{12} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

これらの結果は、安全裕度に違いはあるものの、瞬時放出とほぼ同様の傾向を示した。

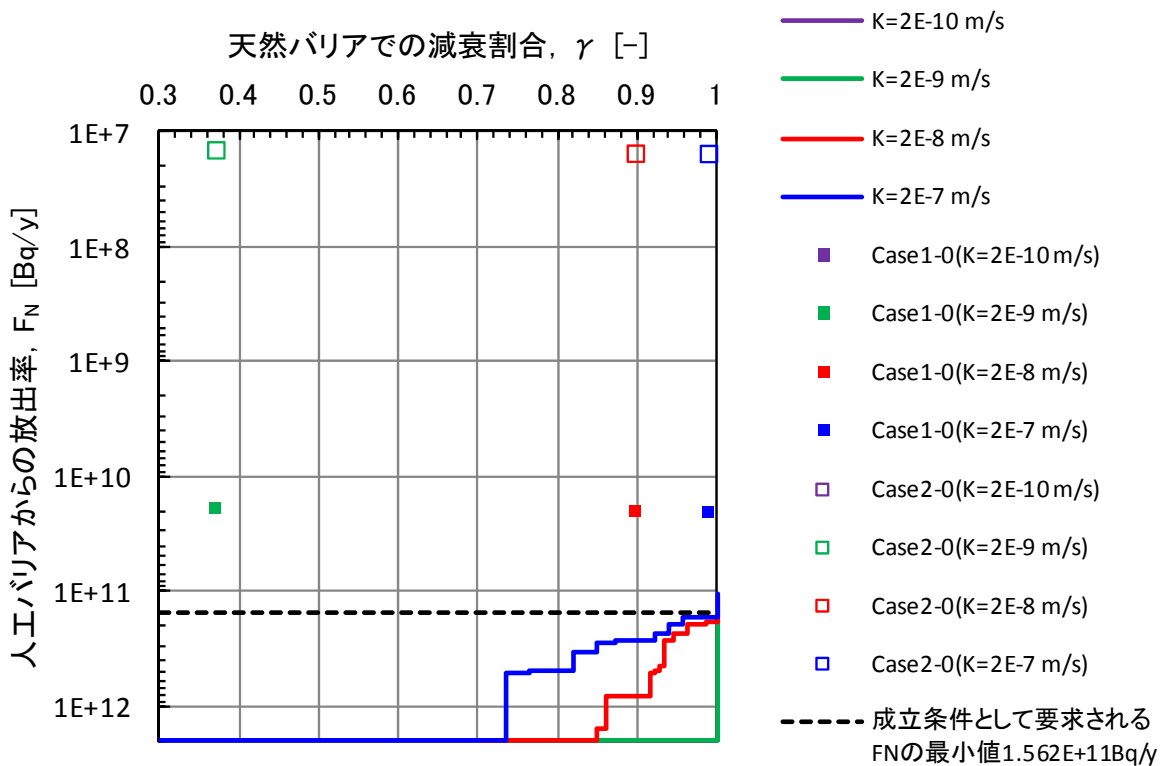


図 9. 2. 2-3 成立条件と決定論解析の比較 (Gr2_C-14(ステンス)結晶質岩・降水系)

表 9. 2. 2-3 安全裕度 (Gr2_C-14(ステンス)結晶質岩・降水系)

母岩透水係数 (m/s)		Case1-0	成立条件	γ の	成立条件	F_N の	Case2-0	成立条件	γ の	成立条件	F_N の
		の値	のコンター	安全裕度	のコンター	安全裕度	の値	のコンター	安全裕度	のコンター	安全裕度
		A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$	A	B1	$B1 \div A$	B2	$B2 \div A$
2E-10	γ [-]	1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03		1.39E-03	1.00E+00	719.94	1.39E-03	
	F_N [Bq/y]	1.14E+10	1.14E+10		2.00E+12	176.21	8.52E+06	8.52E+06		2.00E+12	234796.90
2E-9	γ [-]	3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01		3.70E-01	1.00E+00	2.70	3.70E-01	
	F_N [Bq/y]	1.88E+10	1.88E+10		2.00E+12	106.21	1.41E+07	1.41E+07		2.00E+12	141643.06
2E-8	γ [-]	8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01		8.97E-01	1.00E+00	1.11	8.97E-01	
	F_N [Bq/y]	2.02E+10	2.02E+10		8.14E+11	40.37	1.51E+07	1.51E+07		8.14E+11	53847.88
2E-7	γ [-]	9.89E-01	1.00E+00	1.01	9.89E-01		9.89E-01	1.00E+00	1.01	9.89E-01	
	F_N [Bq/y]	2.03E+10	2.03E+10		1.69E+11	8.32	1.52E+07	1.52E+07		1.69E+11	11098.55

9.2.3 廃棄体グループ3のI-129に関する安全裕度

廃棄体グループ3については、第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）の処分概念に短期の閉じ込めを考慮した case1-0 と高度化対策（緩衝材を敷設）を想定した case2-0 の安全裕度を示す。

5章においては、3章で設定した包括的感度解析ケース（表 3.5.2-1 参照）に基づき、包括的感度解析ケース F（緩衝材無）および G（緩衝材有）の成立条件コンターを個別に抽出した（図 5.2.2-22～図 5.2.2-30 参照）。

図 9.2.3-1 に包括的感度解析ケース F の成立条件コンターと case1-0 の決定論解析ケースの入力条件から得られる γ , F_N の結果の比較を示す。また、包括的感度解析ケース F の成立条件コンターと case1-0 の γ , F_N の結果の比較に基づく安全裕度の算出結果を表 9.2.3-1 に示す。

図 9.2.3-1 から、母岩の透水係数が 2.0×10^{-10} m/s（紫色の■）および 2.0×10^{-9} m/s（緑色の■）の場合は、緩衝材がなくても目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回り、処分が安全に成立することがわかる。一方、母岩の透水係数が 2.0×10^{-8} m/s（赤色の■）および 2.0×10^{-7} m/s（青色の■）の場合は、緩衝材無の概念では必ずしも目標とする線量を満足しないことがわかる。

図 9.2.3-1 には、 γ が 1.0 の場合に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下になるために人工バリアからの核種放出率 F_N に要求される放出率の最小値 3.125×10^9 Bq/y を合わせて示している。この値は、I-129 の降水系環境の場合の線量への換算係数 3.2×10^{-12} mSv/y（表 8.3.7-1 参照： 3.2×10^{-15} Sv/y）と、仮定した基準値 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0×10^{-5} Sv/y) から求めた値である。なお、 F_N が 1.0×10^{10} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

表 9.2.3-1 から、母岩の透水係数が 2.0×10^{-7} m/s の場合においても人工バリアからの核種放出率 F_N が 3.55×10^9 Bq/y（現状の 0.0413 倍）になるような人工バリアの設計、または、データ設定を行うことができれば、緩衝材のない概念においても処分を安全に成立させることができるようになることがわかる。

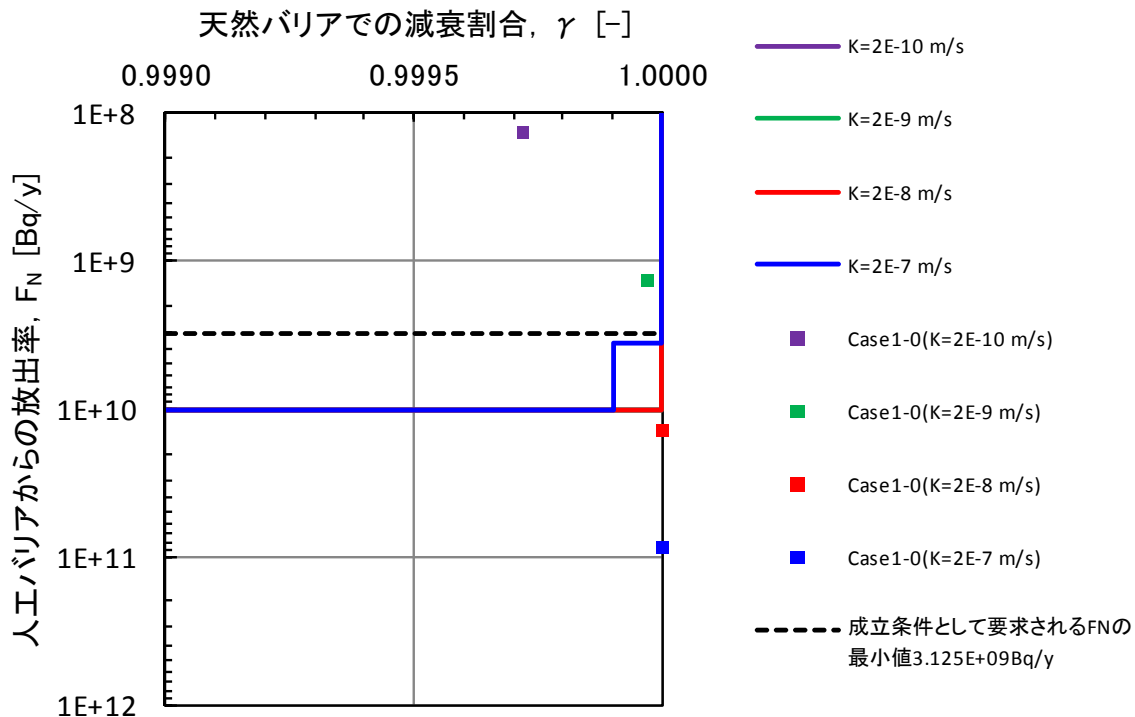


図 9.2.3-1 成立条件と決定論解析の比較 (Gr3_I-129(緩衝材無))

表 9.2.3-1 安全裕度 (Gr3_I-129, 結晶質岩・降水系)

		Case1-0の値					Case2-0の値					
		成立条件の	γ の	成立条件の	F_N の	成立条件の	γ の	成立条件の	F_N の			
		カウンター	安全裕度	カウンター	安全裕度	カウンター	安全裕度	カウンター	安全裕度			
		A	B1	B1÷A	B2	B2÷A	A	B1	B1÷A	B2	B2÷A	
母岩透水係数(m/s)	2E-10	γ [-]	9.9972E-01	1.0000E+00	1.0003	9.9972E-01		9.9972E-01	1.00E+00	1.0003	9.9972E-01	
		F_N [Bq/y]	1.3439E+08	1.3439E+08		1.0000E+10	74.41	8.6443E+07	8.644E+07		1.0000E+10	115.68
	2E-9	γ [-]	9.9997E-01	1.0000E+00	1.0000	9.9997E-01		9.9997E-01	1.00E+00	1.0000	9.9997E-01	
		F_N [Bq/y]	1.3544E+09	1.3544E+09		1.0000E+10	7.38	8.3556E+08	8.356E+08		1.0000E+10	11.97
	2E-8	γ [-]	1.000E+00	—	—	1.0000E+00		1.0000E+00	—	—	1.0000E+00	
		F_N [Bq/y]	1.3895E+10	1.3895E+10		1.0000E+10	0.7197	6.2754E+09	6.275E+09		3.5481E+09	0.57
	2E-7	γ [-]	1.000E+00	—	—	1.0000E+00		1.0000E+00	—	—	1.0000E+00	
		F_N [Bq/y]	8.5992E+10	8.5992E+10		3.5481E+09	0.0413	1.7984E+10	1.798E+10		3.5481E+09	0.20

赤字は安全裕度がないことを、すなわち、その条件では、設定した基準を満足していないことを表す。

図 9.2.3-2 に、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の条件における人工バリア (緩衝材無) からの核種放出率 F_N と充填材の分配係数の関係を表す (他のパラメータは case1-0 の降水系の値)。この結果は、添付 1-8 式と添付 1-10 式の和で表される F_N に関する計算式を用いて求めたものである。

図 9.2.3-2 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の場合に、 $F_N=3.55 \times 10^9$ Bq/y 以下となり、目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する充填材の収着分配係数は $K_d=4.55 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{kg}$ であることがわかる (Gr3 のレファレンス値は 0。Gr1 の I-129 の値は $1.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{kg}$)。

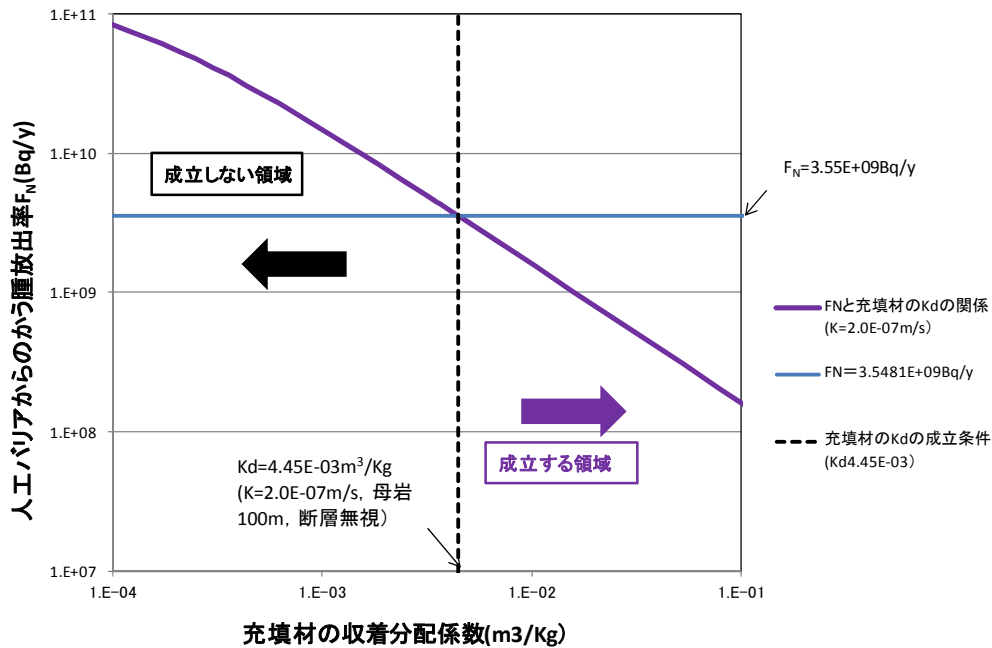


図 9. 2. 3-2 緩衝材無の条件で成立する充填材の Kd (Gr3_I-129) ($k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

高度化対策の採用（緩衝材の敷設）を想定した場合の包括的感度解析ケース G の成立条件コンターと case2-0 の決定論解析ケースの入力条件から得られる γ , F_N の結果の比較を図 9.2.3-3 に示す。また、包括的感度解析ケース G と case2-0 の比較に基づく安全裕度の算出結果を表 9.2.3-1 に示す。

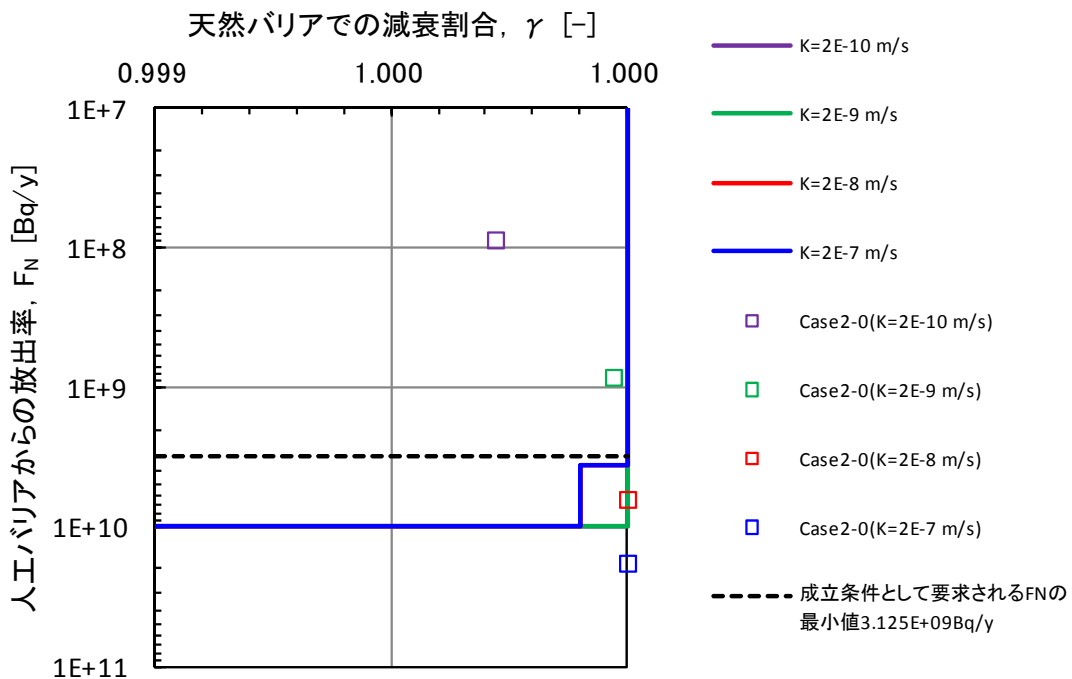


図 9. 2. 3-3 成立条件と決定論解析の比較 (Gr3_I-129 (緩衝材有))

図 9.2.3-3 から、母岩の透水係数が 2.0×10^{-8} m/s の場合は、目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回り、緩衝材有の概念でも必ずしも目標とする線量を満足しないことがわかる。

図 9.2.3-3 には、 γ が 1.0 の場合に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下になるために人工バリアからの核種放出率 F_N に要求される放出率の最小値 3.125×10^9 Bq/y を合わせて示している。この値は、I-129 の降水系環境の場合の線量への換算係数 3.2×10^{-12} mSv/y (表 8.3.7-1 参照: 3.2×10^{-15} Sv/y) と、仮定した基準値 $10 \mu\text{Sv/y}$ (1.0×10^{-5} Sv/y) から求めた値である。なお、 F_N が 1.0×10^{10} Bq/y で最大となっている理由は、解析範囲の設定によるものである。

表 9.2.3-1 から、母岩の透水係数が 2.0×10^{-7} m/s の場合においても人工バリアからの核種放出率 F_N が 0.2 倍 (1/5) になるような人工バリアの設計、または、データ設定を行うことができれば、緩衝材のない概念においても処分を安全に成立させることができるようになることがわかる。

図 9.2.3-4 に母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の条件における人工バリアからの核種放出率 F_N と充填材の分配係数の関係を表す (他のパラメータは case2-0 の降水系の値)。

この結果は、添付 1-8 式と添付 1-10 式の和で表される F_N に関する計算式を用いて求めたものである。図 9.2.3-4 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の場合に、 $F_N=3.55 \times 10^9$ Bq/y 以下となり、目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する充填材の収着分配係数は $K_d=9.93 \times 10^4$ m³/kg であることがわかる (Gr3 のレファレンス値は 0。Gr1 の I-129 の値は 1.25×10^4 m³/kg)。

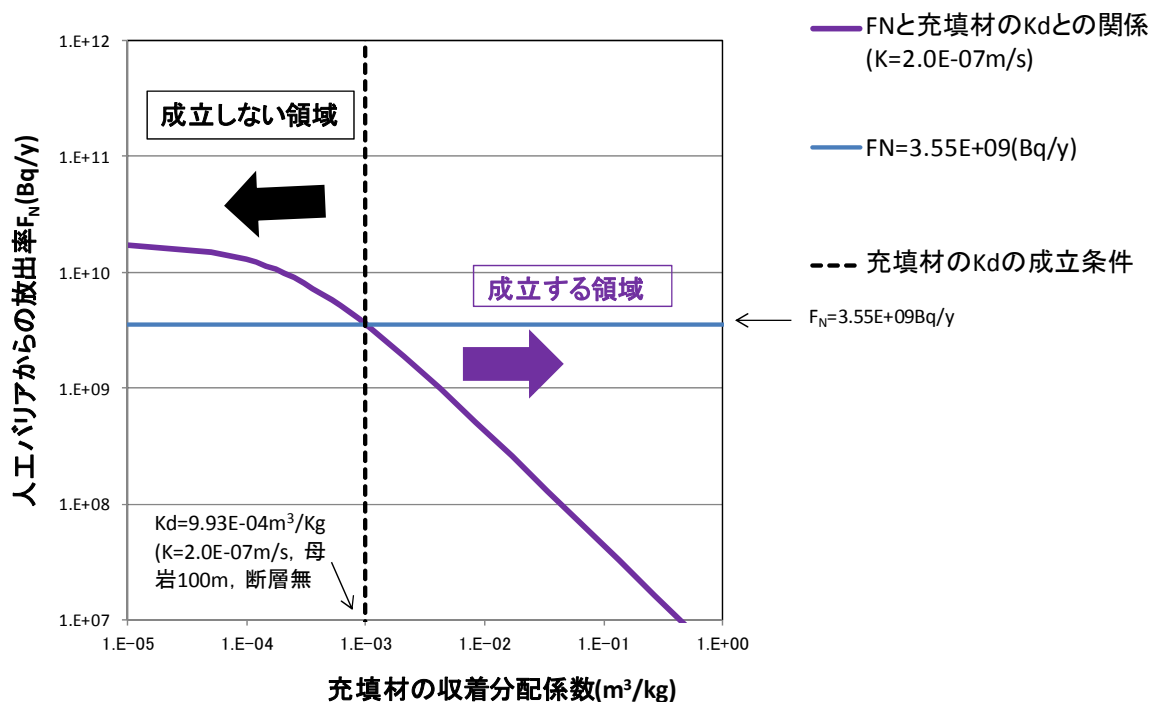


図 9.2.3-4 緩衝材有の条件で成立する充填材の K_d (Gr3_I-129) ($k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

図 9.2.3-5 に母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の条件における人工バリアからの核種放出率 F_N と緩衝材の実効拡散係数の関係を表す (他のパラメータは case2-0 の降水系の値)。

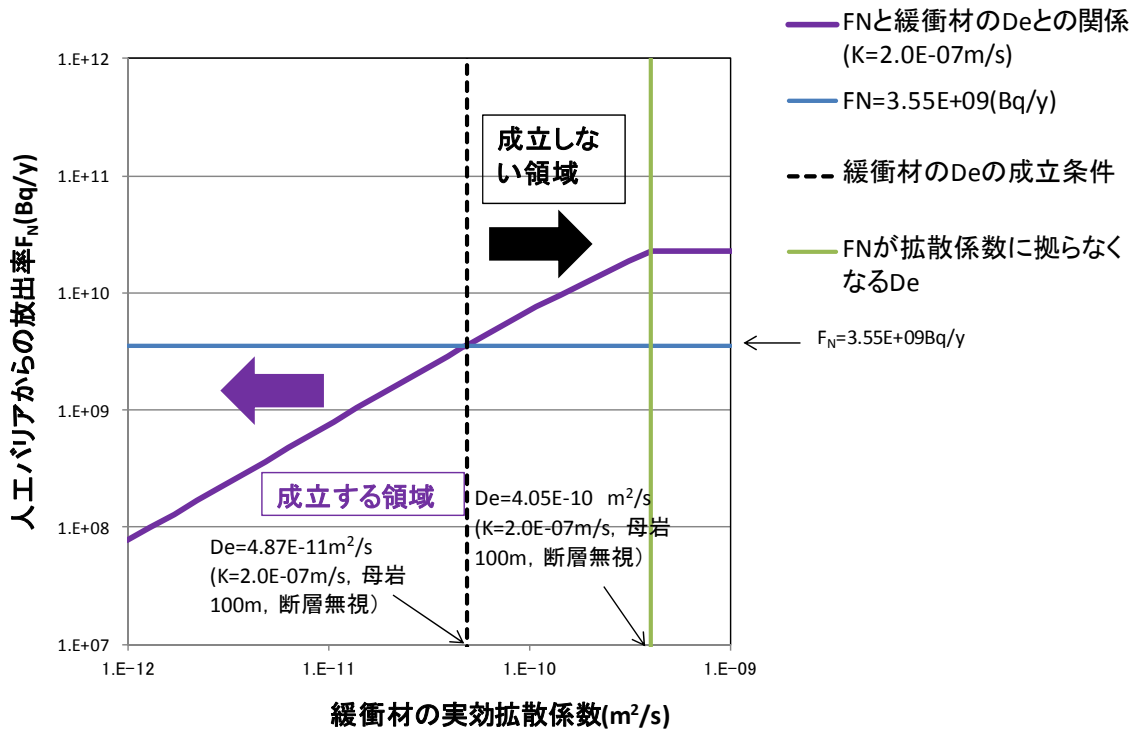


図 9. 2. 3-5 緩衝材有の条件で成立する緩衝材の De (Gr3_I-129) ($k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s)

図 9.2.3-5 から、母岩の透水係数が $k=2.0 \times 10^{-7}$ m/s の場合に、 $F_N = 3.55 \times 10^9$ Bq/y 以下となり、目標とする線量 $10 \mu\text{Sv/y}$ を満足する緩衝材の実効拡散係数は $De=4.87 \times 10^{-11}$ m²/s であることがわかる (Gr3 の I-129 の値は 3.0×10^{-10} m²/s, Gr1 の I-129 の値は 4.0×10^{-11} m²/s)。

第9章 参考文献

- 電事連・JNC (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取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02
- NUMO (2011) : 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.
- Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, T and Hane, K. (2013) : A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margins of the geological disposal system, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Volume 50, No. 1, pp80–106.
- 大井貴夫 (2012) : 包括的感度解析の高度化による地層処分の安全評価の信頼性向上に関する研究, 博士論文, 九州大学, <http://hdl.handle.net:80/2324/25587>.

10. 安全確保可能な処分概念と残された課題

決定論解析の結果と成立条件との比較から得られる安全裕度に基づき、多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する。また、処分システムの頑健性を向上させるための残された課題についてまとめる。

今回の検討においては、結晶質岩・降水系還元性地下水の場合以外の地質条件と地下水化学条件の組み合わせの場合は、高度化対策を施すことによって、考慮した水理条件の範囲（レファレンス条件よりも1000倍高い透水性まで考慮）に対しても安全性を確保することが可能であることが示された。しかし、降水系還元性地下水・結晶質岩の場合に対しては、考慮した水理条件の範囲において安全性を確保するために更なる対策を追加する必要があることが示された。

以下、降水系還元性地下水・結晶質岩の場合を対象として、廃棄体グループごとに安全確保が可能と考えられる処分概念を示すとともに、本検討の結果明らかになった課題をまとめて示す。

10.1 降水系還元性地下水・結晶質岩の場合の安全確保可能な処分概念

10.1.1 廃棄体グループ1の安全確保可能な処分概念

既存の処分概念において安全性を確保できる処分環境条件は母岩の透水係数が好ましい 2.0×10^{-10} m/sの場合で、透水性が1桁以上増加した場合は、目標とした線量 $10 \mu\text{Sv}$ を超えることが示された。これは、既存の安全評価においても指摘されている結果である。

本検討において採用した高度化した包括的感度解析によって求められる成立条件の検討からは、母岩の透水性がレファレンスの条件に対して1桁増加し、 2.0×10^{-9} m/sとなった場合においても、目標とした線量 $10 \mu\text{Sv}$ を超えない主要パラメータの値が示された。具体的には、母岩の吸着分配係数 K_d (1.72×10^3 m³/kg以上、レファレンスの約17倍：他のパラメータはレファレンスの値) や充填材の吸着分配係数 K_d (5.31×10^3 m³/kg以上、レファレンスの約42倍：他のパラメータはレファレンスの値) である。このような成立条件は、本検討において採用した高度化した包括的感度解析手法により、任意のパラメータの組み合わせに対して、容易に求められるものである。様々な条件においてこのような成立条件を整備しておくことは、安全確保を可能とする処分概念の具体的な提示を容易にするものである。

一方、近似解析解を用いた幾何形状と放出率の関係から、水理条件が好ましくない場合、緩衝材厚さにほぼ反比例して、線量が低減することが示された(4.1.3(4)幾何形状と放出率の関係参照)。このことは、母岩の透水性が高い場合は、工学的対策により、ある程度の線量の抑制が可能であることを意味する。この結果を安全評価に反映させるためには、更なる詳細な検討を行い、適用条件などを把握する必要がある。

母岩の透水性がレファレンスの条件に対して2桁以上増加した場合は、既存の処分概念では安全性を確保することは困難であることが今回の検討においても示された。そのため、このような条件においては、廃棄体グループ1に高度化対策（溶出期間10万年の低溶出性廃棄体の採用）を採用する必要がある。この高度化対策の採用により、放出率が溶出率に支配されるようになる。そのため、いかなる水理条件においても、目標とする線量が満足されることになる。

10.1.2 廃棄体グループ2の安全確保可能な処分概念

瞬時溶出割合やジルカロイ母材、ステンレス・インコネルの腐食に伴う核種の溶出率を、最新の知見に置き換えた評価を行った。レファレンスケースにおいては、設定した水理条件の変動範囲において、既存の処分概念においても安全性を確保できることが示された。この結果は、TRUレベル3報告書の結果と同じである。一方、TRUレベル3報告書(NUMO, 2011)の結果では、今回設定した水理条件の変動範囲と母岩分配係数が0となるような条件を複合させた条件において、既存の処分概念における放出率が $10\ \mu\text{Sv}/\text{y}$ を超える結果となっている。しかし、 $10\ \mu\text{Sv}/\text{y}$ を超える程度は1桁以内であり、 $100\ \mu\text{Sv}/\text{y}$ を超える結果は示されていない。前述のように、工学的対策により、ある程度の線量の抑制が可能性である。そのため、廃棄体グループ2に対して高度化対策を適用するか否かを判断するためには、工学的対策による線量抑制効果を確認する必要がある。

10.1.3 廃棄体グループ3の安全確保可能な処分概念

既存の処分概念において安全性を確保できる処分環境条件は母岩の透水係数が10倍の $2.0 \times 10^9\ \text{m}/\text{s}$ までの場合で、透水性が2桁以上増加した場合は、目標とした線量 $10\ \mu\text{Sv}$ を超えることが示された。これは、既存の安全評価においても指摘されている結果である。成立条件の検討からは、母岩の透水性がレファレンスの条件に対して3桁増加し、 $2.0 \times 10^7\ \text{m}/\text{s}$ となった場合においても、目標とした線量 $10\ \mu\text{Sv}$ を超えない充填材の収着分配係数が示された。具体的には、 $K_d = 4.55 \times 10^3\ \text{m}^3/\text{kg}$ 以上（廃棄体グループ3のレファレンス値は0。廃棄体グループ1のI-129の値は $1.25 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{kg}$ ；他のパラメータはレファレンスの値）である。

また、前述のように（4.1.3(4)幾何形状と放出率の関係参照）、工学的対策により、ある程度の線量の抑制が可能性である。そのため、透水性が2桁以上増加した場合の廃棄体グループ3に対して高度化対策（ベントナイトの設置）を適用するか否かを判断するためには、工学的対策による線量抑制効果を確認する必要がある。

母岩の透水性がレファレンスの条件に対して3桁以上増加した場合は、既存の処分概念では安全性を確保することは困難であることが今回の検討においても示された。そのため、このような条件においては、廃棄体グループ3に高度化対策（ベントナイトの設置）を採用する必要がある。今回の検討では、ベントナイトを設置しても放出率は $10\ \mu\text{Sv}/\text{y}$ を上回

り 30 $\mu\text{Sv/y}$ 程度であった。TRU レベル 3 報告書においても同様の結果が示されている。成立条件の検討からは、母岩の透水性がレファレンスの条件に対して 3 桁増加し、 $2.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ となった場合においても、目標とした線量 10 μSv を超えないパラメータの値が示された。具体的には、充填材の収着分配係数 K_d ($9.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{kg}$ 以上、廃棄体グループ 3 のレファレンスは 0。廃棄体グループ 1 の値は $1.25 \times 10^4 \text{m}^3/\text{kg}$: 他のパラメータは case2-0 の値) や緩衝材の実効拡散係数 D_e ($4.87 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 以上、廃棄体グループ 3 の値は $3.0 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 、廃棄体グループ 1 の値は $4.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$: 他のパラメータは case2-0 の値) である。

示された充填材の K_d や緩衝材の D_e が硝酸塩環境下において、評価に適用可能な値かどうかの確認を含め、線量を抑制するため、工学的対策による放出率の抑制効果、あるいは、硝酸塩除去の程度に依存するパラメータ値の変動特性の把握が重要な課題となる。

10.1.4 廃棄体グループ 4 の安全確保可能な処分概念

レファレンスケースにおいては、設定した水理条件の変動範囲において、既存の処分概念においても安全性を確保できることが示された。この結果は、TRU レベル 3 報告書の結果と同じである。一方、TRU レベル 3 報告書の結果では、今回設定した水理条件の変動範囲と母岩分配係数が 0 となるような条件を複合させた条件において、既存の処分概念における放出率が 10 $\mu\text{Sv/y}$ を超える結果となっている。しかし、10 $\mu\text{Sv/y}$ を超える程度は 1 桁以内であり、100 $\mu\text{Sv/y}$ を超える結果は示されていない。前述のように、工学的対策により、ある程度の線量の抑制が可能性である。そのため、廃棄体グループ 4 に対して高度化対策を適用するか否かを判断するためには、工学的対策による線量抑制効果を確認する必要がある。

10.2 廃棄体グループごとの安全確保可能な処分概念と残された課題

10.2.1 廃棄体グループごとの安全確保可能な処分概念

上述の結果をまとめて表 10.2.1-1 に示す。表 10.2.1-1 は、支配核種が I-129, C-14 であることを踏まえ、最も処分システムの安全性に対して影響の大きい水理条件に着目して、対象とした処分概念の安全確保の可能性について半定量的にまとめたものである。

表 10.2.1-1 が示す主要な結果は、以下の通りである。

- ・廃棄体グループ 2, 4 は、高度化対策を採用しない場合に水理条件が 1000 倍以上になると安全性を確保できない可能性がある。それぞれ、6 万年の閉じ込め容器の採用、緩衝材の敷設という高度化対策を採用することにより、このような水理条件においても安全性の確保が可能になる。また、高度化対策を採用しなくても、処分システムの応答特性を踏まえた合理的な設計により、この場合においても安全性を確保できる可能性がある。そのため、これらの廃棄体に関する合理的な設計の効果を確認する必要がある。

- ・廃棄体グループ1は高度化対策を採用しない場合に水理条件が10倍以上になると安全性を確保できない可能性がある。低溶出性固化体という高度化対策を採用することにより、このような水理条件においても安全性の確保が可能になる。また、水理条件が100倍程度までは、高度化対策を採用しなくても、処分システムの応答特性を踏まえた合理的な設計により、安全性を確保できる可能性がある。
- ・廃棄体グループ3は高度化対策を採用しない場合に水理条件が100倍以上になると安全性を確保できない可能性がある。緩衝材を敷設するという高度化対策を採用しても線量はわずかに低下するものの、安全性の向上は小さい。廃棄体グループ3は硝酸塩含有廃棄体であり、硝酸塩の影響により、核種の移行抑制機能が十分に発揮されない状況になっている。そのため、脱硝酸塩技術の採用も考慮し、核種の移行抑制機能に係る充填材のKd, 緩衝材の拡散係数などの主要なパラメータの硝酸塩濃度依存性を検討することにより、確からしいパラメータを用いた評価が重要になる。また、処分システムの応答特性を踏まえた合理的な設計により、安全性を確保できる可能性があるため、廃棄体グループ3に関する合理的な設計の効果を確認する必要がある。

表 10.2.1-1 安全確保可能な処分概念のまとめ
暫定的に10 μ Sv/yと比較

適用性の判断		Rf	10倍	100倍	10 ³ 倍
Gr1	レベル3の評価	○	×	×	×
	既存の概念	○	●	×	×
	高度化対策	—	△○	◎○	◎○
Gr2	レベル3の評価	○	○	○	?
	既存の概念	○	○	○	●
	高度化対策	—	—	—	△○
Gr3	レベル3の評価	○	○	×	×
	既存の概念	○	○	●	×
	高度化対策	—	—	●	◎●
Gr4 (H, L)	レベル3の評価	○	○	○	?
	既存の概念	○	○	○	●
	高度化対策	—	—	—	△○

Rf: レファレンス K=2.0E-10(m/s)
 10倍 K=2.0E-9(m/s)
 100倍 K=2.0E-8(m/s)
 10³倍 K=2.0E-7(m/s)

今回の検討(既存の概念, 高度化対策)ではレファレンス条件と海水系条件のみを考慮

○安全確保可能
 ●設計により安全確保できる可能性がある
 ×安全性確保は困難
 —基本的には不要
 △採用した方が頑健性が高い
 ◎採用が必須
 ? TRUレベル3の他の解析条件(母岩Kd=0)でNG(1桁以内)

10.2.2 残された課題

今後、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全性を評価し、その結果を提示するためには、以下の課題に対する対応が必要と考える。

- ・地下水シナリオ以外のシナリオ（ガス影響を含む）に対する処分システムの応答特性の把握と安全評価
- ・高度化対策の実現性の提示
- ・処分システムの応答特性を踏まえた合理的な設計の可能性に関する詳細検討
- ・処分システムの応答特性を踏まえた合理的な設計と高度化対策の組み合わせによる安全性の向上
- ・高度化対策採用の場合を想定したデータの詳細検討・設定（特に、廃棄体グループ3の評価のための硝酸塩濃度に応じた拡散係数、収着分配係数、溶解度）
- ・廃棄体の受け入れ基準の検討
- ・より精緻な安全裕度の算出（今回求めた安全裕度は断層の性能を無視した保守的な値である。より精緻な安全裕度を求めるためには、母岩中での核種の減衰割合をより詳細（非定常状態での減衰割合を考慮する）に算出する必要がある）

第10章 参考文献

NUMO (2011) : 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.

11. おわりに

TRU レベル3 報告書 (NUMO, 2011) において示された主要な課題は、以下の通りである。

- ・ 廃棄体のグループ分類の見直し
- ・ 短期の閉じ込め機能を有する廃棄体パッケージの概念設計
- ・ 上記の2点などを考慮した処分場の設計の見直し

本検討では、TRU レベル3 報告書において指摘された上記の課題の解決を図るとともに、以下に示す目標を設定し、これを達成するため、地下水シナリオを対象とした検討を実施した。

「多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示する」

本検討においては、I-129 および C-14 を支配核種とする地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を与える代表的な変動要素として、地質条件（結晶質岩と堆積岩）、水理条件（透水性）と地下水化学条件（降水系と海水系）を選定し、地下水シナリオを対象とした解析を実施した。

本検討では、これらの検討の結果を暫定的に定めた基準値（10 $\mu\text{Sv/y}$ ）と比較し、それぞれの条件において、安全確保可能な処分概念を廃棄体グループごとに示した。

検討の実施においては、「高度化した包括的感度解析手法」を組み込んだ新たな安全評価手順を採用し、多様な資質環境の類型化、廃棄体特性などの見直しやそれらに基づく処分場設計の見直しを実施した。また、処分に伴い生起する様々な事象に関する最新の知見を整備するとともに、処分システムの応答特性や成立条件の提示など、安全性の主張を支援する論拠を整備した。さらに、これらの情報に基づき、解析ケースを設定し、決定論解析を行い、安全性を確認するとともに、それらの解析ケースの安全裕度を定量的に示した。本検討では、これらの情報整理などを通じて、多様な地質環境においても地層処分低レベル放射性廃棄物の処分の安全性と評価の信頼性をより一層高めることができる処分概念を地質環境に応じて具体的に例示した。

廃棄体特性などの主要な見直し（3章）としては、第2次 TRU レポート公開後に新たに加えられた発熱性の廃棄体を廃棄体グループ4に分類し、従来の廃棄体グループ4を廃棄体グループ4（低発熱性）と廃棄体グループ4（発熱性）に区分し、全部で5グループとした。処分場の設計の主要な見直し（3章）としては、新たにすべての廃棄体に対して採用することを検討した500年間の閉じ込め容器の幾何形状を考慮した設計を行った。また、廃棄体の発熱によって処分環境が擾乱を受ける期間での核種移行の開始を回避できるようにするため、温度条件を制約条件とした処分場設計の見直しを行った。処分に伴い生起す

る様々な事象に関する最新の知見としては、廃棄体グループ1の低溶出性固化体開発(3章)、廃棄体グループ2の長期閉じ込め金属製容器の開発(8章)、脱硝技術の開発(3章)、処分施設内の応力変形(6章)やベントナイトの変質など(6章)に関する最新の知見を整理した。また、人工バリアからの核種放出に関する近似解析解に基づき、外側境界濃度が0とみなせるEDZの地下水流量と実効拡散係数の関係、放出率に影響を及ぼす溶解度の最大値や溶出率の最大値とインベントリとの関係、緩衝材の透水係数の変化と放出率との関係、人工バリアの幾何形状と放出率との関係、間隙率と放出率との関係を関係式を用いて整理した(4章)。さらに、高度化した包括的感度解析により、廃棄体グループごとに、母岩の透水係数 k 、天然バリア中の核種の減衰割合 γ 、人工バリアからの核種放出率 F_N の組み合わせからなる成立条件を抽出した(5章)。解析においては、処分システムの応答特性や処分に伴い生起する様々な事象に関する知見を考慮して、安全性に対して有意な影響を与える事象を抽出し、それに関連するシナリオ、解析ケースを選定した(7章)。これらに基づく決定論解析を行うため、関連するパラメータ値を設定し(8章)、選定した解析ケースごとに決定論解析を通じて処分の安全性を確認した。また、解析ケースの入力条件を用いて、個々の解析ケースの安全裕度を定量的に示した(9章)。

本検討により、既存の処分概念および高度化対策を採用した場合の、主として水理条件の違いに応じた安全性の違いが明示された。また、処分システムの応答特性に基づいた合理的な設計の実施により、高度化対策を採用しなくても安全性を確保可能な水理条件や、高度化対策やさらなる核種移行抑制策が必要となりうる水理条件を明示した。このことにより、「多様な地質環境に対して安全性を確保可能な処分概念」をTRUレベル3報告書の結果よりも詳細に、論拠をもって提示できた。今後、これらの概念の安全性を主張するために、他のシナリオに対する評価を実施する必要がある。一方、「高度化した包括的感度解析手法」を組み込んだ新たな安全評価手順に則った評価の実施によって、評価の信頼性を向上させるための定量的な情報を提示可能であることがわかった。これらのことから、本検討の結果は、今後想定されている安全評価に資するものと考えられる。

11章 参考文献

NUMO (2011) : 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.

添付1 高度化した包括的感度解析手法

本検討では、パラメータの感度構造の把握、安全性に関する成立条件の検討などに「高度化した包括的感度解析手法（大井，2012；Ohi et al., 2013）」を用いている。ここでは、この高度化した包括的感度解析手法について概説する。

1. 高度化した包括的感度解析手法の概要

地層処分の性能評価の信頼性を向上させるためには、設計オプションや地質環境に関する選択肢が残されている中で、重要な不確実性を明らかにするために感度解析を活用することが重要である。そのような感度解析の手法のひとつとして「包括的感度解析手法」が挙げられる。「包括的感度解析手法」とは、パラメータが有する不確実性に着目した多数の決定論解析（統計解析）の結果から、評価結果に与える影響が大きいパラメータを特定し、それに基づいて設定した性能目標を満足するパラメータ範囲の組み合わせ（成立条件）を抽出する、というものである（大井ほか，2004；電事連・JNC, 2005；Ohi et al., 2007；Ebashi et al., 2008；江橋ほか，2009）。包括的感度解析手法の概要とその利用方法のイメージを図 - 添付1-1 に示す。

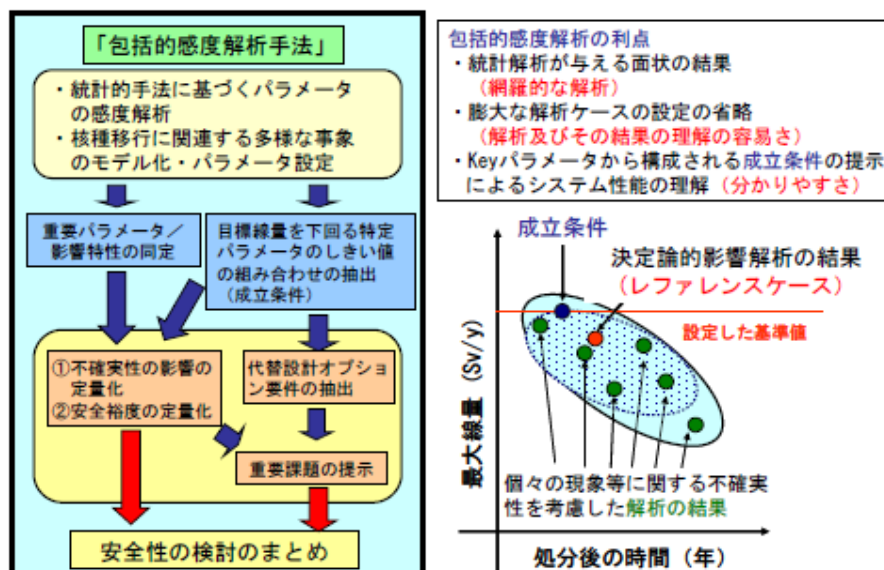


図 - 添付1-1 包括的感度解析手法のイメージ図（第2次 TRU レポート，2005）

高度化した包括的感度解析手法は、人工バリアおよび天然バリア中の核種移行に関する解析解を用いて、既存の包括的感度解析手法を高度化したものである。この手法は、人工バリアからの核種放出率と天然バリア中の核種の減衰割合、さらに母岩の透水係数を主要な変数として選び、これらを主軸とする評価対象空間において成立条件を抽出する方法である。

ここで、天然バリアからの核種放出率は、以下のように表わされる。

$$\Phi_{NOUT} = F_N \times \gamma \quad \text{添付 1-1 式}$$

ここで、

F_N : 人工バリアからの核種の定常放出率(Bq/y)
(= ϕ_{NIN} :天然バリアへの核種の定常流入率)

Φ_{NOUT} : 天然バリアからの核種の定常放出率(Bq/y)

γ : 天然バリア中での核種の減衰割合(-)

ここで、線量への換算係数を Do (Sv/Bq) とすると、目標値 P (Sv/y) を満足する人工バリアと天然バリアの性能の関係は以下のように表わされる。

$$\Phi_{NOUT} \times Do = F_N \times \gamma \times Do = P \quad \text{添付 1-2 式}$$

ここで、

Do : 線量への換算係数

P : 目標とする線量基準(Sv/y)

添付 1-2 式を変形すると以下の式が得られる。

$$F_N = \frac{P}{\gamma \times Do} \quad \text{添付 1-3 式}$$

添付 1-3 式の左辺は、 γ で表わされる任意の天然バリア環境を想定した場合、目標とする線量 P を満足する人工バリアからの核種の定常放出率に関する成立条件を意味する。 γ と F_N がそれぞれ、関係式によって個々のパラメータと関係付けられている場合、その関係式を用いることによって、パラメータレベルでの成立条件を抽出することが可能になる。

実際は、人工バリアと天然バリアの核種移行に関わる性能は独立ではなく、どちらも母岩の水理特性に依存して変化する。そのため、添付 1-3 式の成立条件は以下のように表わされる。

$$F_N(k) = \frac{P}{\gamma(k) \times Do} \quad \text{添付 1-4 式}$$

ここで、

k : 母岩の透水係数 (m/s)

Do : 線量への換算係数は水理特性には依存しないと仮定 (Sv/Bq)

これまで、母岩の透水係数に依存した定常状態における天然バリア中の核種の減衰割合 γ に関する解析解 (Put, 1985 ; Tang et al., 1981 ; Nagra, 1994 ; 石原ほか, 1999) が示されている。この γ の関係式は、天然バリア中での定常状態における核種移行を対象としたもので、母岩の収着特性や、空隙特性、幾何形状 (亀裂を含む) などのパラメータから構成される式で、数値解析において考慮されるパラメータを含む関係式である。この解析解は定常解析解であるため、非定常状態における核種放出率を、保守的に与えることになる。この解析解を添付 1-4 式に適用することによって、任意の水理条件と人工バリア性能の条件下で、目標を満足する天然バリア中の核種の減衰割合を算出し、それに基づいて関連するパラメータの成立条件を抽出することは可能であった。しかし、前述のように、この解析解は保守的な見積を与えるものであり、得られる成立条件も保守的なものになる。この保守性は半減期の短い核種または、収着性の高い核種において顕著にあらわれるものと考えられる。

一方、母岩の透水係数に依存した人工バリアからの核種の定常放出率に関する解析解は、これまで導出されていなかった。そのため、添付 1-4 式を用いて、任意の水理条件と減衰割合を有する母岩性能の条件下で、パラメータレベルの成立条件を抽出することはできなかった。

このような状況において成立条件を網羅的に抽出するため、これまでは、包括的感度解析などの、統計解析の結果に基づく検討が行われてきた。2011 年、大井ほかは、母岩の透水係数に依存した人工バリアからの核種の定常放出率に関する近似解析解を導出した (NUMO, 2011 ; Ohi et al., 2011a ; Ohi et al., 2011b ; 大井, 2011) 。このことにより、解析解を用いて、人工バリアおよび天然バリアに関するパラメータの成立条件を体系的に抽出することが可能になった。この手法は、人工バリアおよび天然バリア中の核種移行に関する解析解と従来利用してきた統計解析の結果を組み合わせるもので、従来の包括的感度解析手法を高度化した手法である。

この手法は、人工バリアからの核種放出率と天然バリア中の核種の減衰割合、さらに母岩の透水係数を主軸とする評価対象空間において、これらの変数のレベルでの成立条件を統計的な解析手法を用いて抽出するものである。さらに、解析解を用いて、主要な変数に対して得られた成立条件を、それらの変数を構成する影響の大きな因子やパラメータのレベルの成立条件に分解して提示する (図 - 添付 1 - 2 参照)。

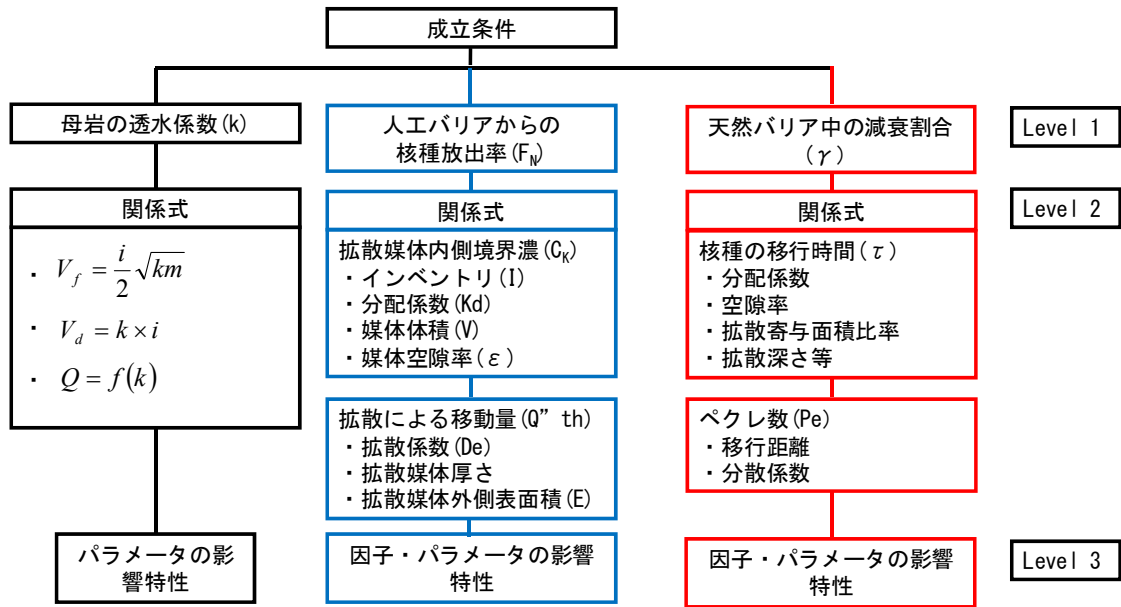


図 - 添付 1 - 2 高度化した包括的感度解析による成立条件の階層的抽出の概念 (大井, 2012)

本検討で用いる天然バリア中の核種移行に関する解析解は、前述のように、非定常状態の放出率を保守的に見積もることになる定常解析解である。そこで、本検討では、成立条件の精度を向上させるために、統計解析の結果を活用している。

ここで、処分システムの安全性に対して大きな影響を与える因子を対象として成立条件を抽出することには、以下のような利点がある。抽出される影響の大きい因子の値が同じ場合は、その因子を構成するパラメータの値が全く異なる組み合わせの場合でも、処分システムの安全性に対して同じ影響を与えることになる。そのため、このような因子に着目することによって、処分システムの安全性に対して同じ影響を与えるパラメータの組み合わせ（解析条件）の類型化が可能となる。このような解析条件は、安全評価シナリオや解析ケースに依存するものであるため、影響の大きい因子に着目した解析条件の類型化により、全く種類などの異なる安全評価シナリオや解析ケースの類型化が可能になる。このことにより、結果として、安全評価シナリオや解析ケースなどの意味や重要性、安全評価の十分性、さらには、検討の対象とする現象などの重要性を論ずることが可能になる (Ohi et al., 2009 ; 大井ほか, 2009)。このような因子は安全評価を効果的に実施する上で重要な因子であり、SKB (2006, 2011) により導入された Safety Function Criteria に相当する因子と考えることができる。

抽出される精度の高い成立条件は、与えられた評価条件との比較により、処分システムの安全裕度を定量的に与える。このような情報を利用することにより、任意の設計条件や核種移行条件を前提条件とした場合の、処分システムの安全性を確保できる地質環境条件をパラメータレベルで提示することが可能になる。さらに、任意の地質環境条件を前提条件とした場合の、処分システムの安全性を確保できる設計条件や核種移行条件をパラメー

タレベルで提示することも可能になる。このことは、処分システムの安全性を定量的に提示するだけでなく、頑健性をより一層向上させることに資する重要な情報となる。

この手法では理解の容易さの観点から、三次元空間を用いて成立条件を抽出する。そのため、母岩の透水係数 k と人工バリアからの核種放出率 F_N 、天然バリア中の核種の減衰割合 γ を主軸とする評価対象空間を考え、それに基づいて成立条件を抽出する。

なお、添付 1-4 式から、成立条件は線量への換算係数に依存することがわかる。線量への換算係数は、地圏から放出された核種放出率(Bq/y)を生物への影響を表す指標(Sv/y)に変換する係数で、地質環境条件に依存する生物圏パラメータに応じて変化する値である。この線量への換算係数によって成立条件が異なる。そのため、成立条件の抽出においては、線量への換算係数ごとに、影響の大きい 3 つの因子からなる評価対象空間を用いた検討が必要である。

以下、本手法で用いる人工バリアと天然バリアの解析解について記述する。

2. 人工バリアと天然バリアの解析解

2.1 人工バリアからの核種放出率を表す近似解析解

人工バリアからの核種放出率を表わす近似解析解 (NUMO, 2011 ; Ohi et al., 2011a ; Ohi et al., 2011b ; 大井, 2011) と人工バリアからの核種放出率を構成する因子について以下に示す。

一次元の直交座標系において、崩壊を考慮した拡散による核種移行を表す支配方程式は、以下のように与えられる。

$$\{\varepsilon_d + (1 - \varepsilon_d)Kd_d\rho_d\} \frac{\partial C}{\partial t} = De \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \{\varepsilon_d + (1 - \varepsilon_d)Kd_d\rho_d\} \lambda C \quad \text{添付 1-5 式}$$

ここで、

- ε : 拡散媒体の空隙率(-)
- d : 拡散媒体を表す添え字
- Kd : 拡散媒体中の核種の分配係数(m^3/kg)
- ρ : 拡散媒体の真密度(kg/m^3)
- C : 拡散媒体の液相中の核種濃度(Bq/m^3)
- t : 時間(y)
- De : 拡散媒体の実効拡散係数(m^2/y)
- x : 距離(m)
- λ : 崩壊定数($1/y$)

既存の研究 (NUMO, 2011 ; Ohi et al., 2011a ; Ohi et al., 2011b ; 大井, 2011) により、人工バリアの応答特性を表す近似解析解が求められている。この近似解析解は、以下の仮定

と近似に基づく近似解析解である。

- ・拡散による核種の移行が支配的である場合，人工バリアからの核種の放出率の最大値は与えられた条件において達成される定常状態の放出率によって与えられると仮定する。
- ・人工バリアからの核種の放出率が定常になるまでの時間に人工バリアから放出される核種量は保守的に無視し，定常状態における人工バリア内の核種存在量を定常状態到達時のインベントリと等しいと近似する。

図 - 添付 1 - 3 にこれらの仮定，近似に基づく近似解析解の導出の概念を示す。

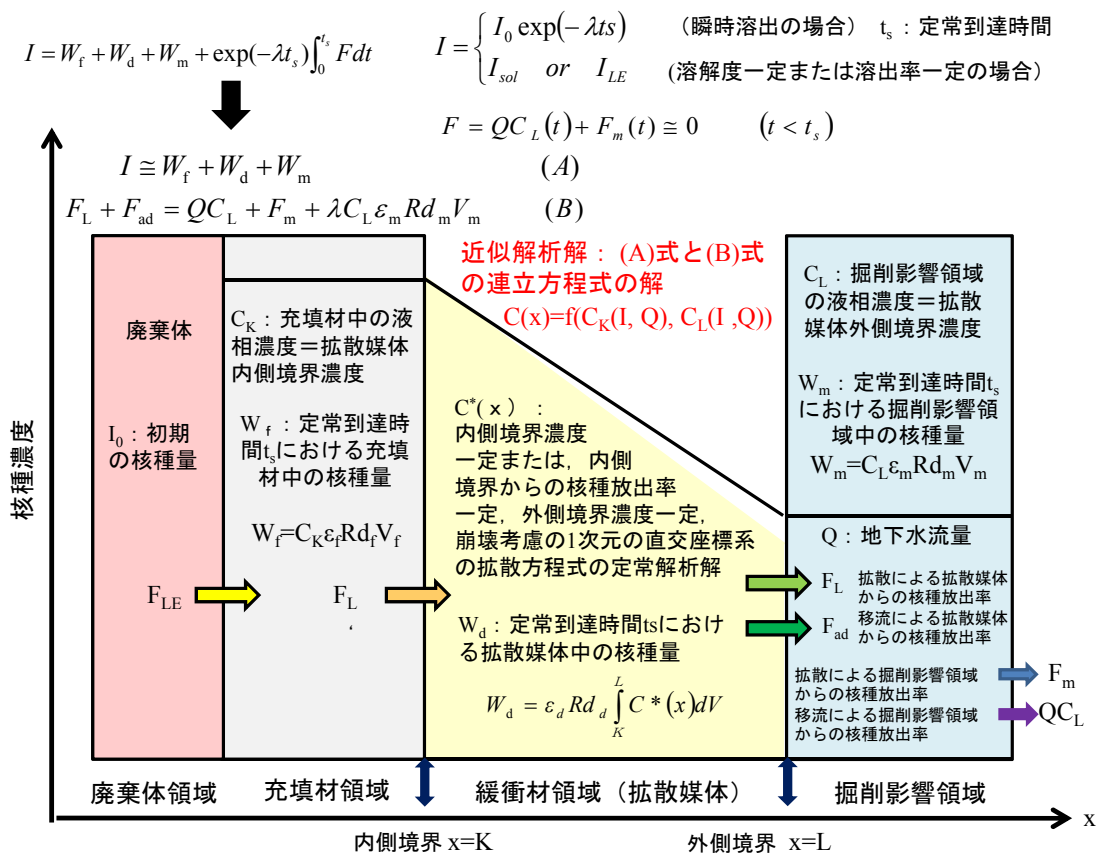


図 - 添付 1 - 3 近似解析解の導出の概念

この近似解析解では，瞬時溶出，溶出率制限，溶解度制限のいずれかの内側境界条件と外側境界濃度が EDZ 中の地下水流量 Q に依存するという外側境界条件が考慮されている。導出された人工バリアからの核種の最大放出率に関する近似解析解を以下に示す。

$$C_K = \frac{I}{(G3G8 + G7)} \left[\left(\frac{G6}{G1} P1 - P2 \right) - \left(\frac{G2G5}{G1} P4 \right) \right] \quad \text{添付 1-6 式}$$

$$C_L = \frac{I}{(G3G8 + G7)} G8 = \frac{I}{\left(\frac{2G4}{P2} + G3\right)G8 + G9} G8 \quad \text{添付 1-7 式}$$

$$F_L = -\frac{I}{(G3G8 + G7)} \left[2G6 - G2G5 \left(2\frac{P4}{P1} + \frac{P2P3}{P1} \right) \right]$$

$$= -\frac{I}{\left(\frac{2G4}{P2} + G3\right)G8 + G9} \left(2G6 - G2G5 \left(2\frac{P5}{P2} + \frac{P1P3}{P2} \right) \right) \quad \text{添付 1-8 式}$$

$$F_k = \frac{I}{\left(\frac{2G4}{P2} + G3\right)G8 + G9} G1 \left(\frac{G2G5}{G1} P5 + P1 - \frac{G6}{G1} P2 \right) \quad \text{添付 1-9 式}$$

$$F_{ad} = C_a Q_d \quad \text{添付 1-10 式}$$

$$C_a = \frac{I}{V_d \varepsilon_d R d_d} \frac{G2}{(G3G8 + G7)} \left(\frac{G6}{G1} P3 - \frac{P2P3}{P1} - 2\frac{P4}{P1} \right)$$

$$= \frac{I}{V_d \varepsilon_d R d_d} \frac{G2}{P2} \left(\frac{G8P5 - P3 \left(\frac{G2G5}{G1} P5 + P1 - \frac{G6}{G1} P2 \right)}{\left(\frac{2G4}{P2} + G3\right)G8 + G9} \right) \quad \text{添付 1-11 式}$$

$$I_{SOL} = C_{SOL} \frac{(G3G8 + G7)}{\left[\left(\frac{G6}{G1} P1 - P2 \right) - \left(\frac{G2G5}{G1} P4 \right) \right]} \quad \text{添付 1-12 式}$$

$$I_{LE} = \frac{F_{LE}}{G1 \left(\frac{G2G5}{G1} P5 + P1 - \frac{G6}{G1} P2 \right)} \left[\left(\frac{2G4}{P2} + G3 \right) G8 + G9 \right] \quad \text{添付 1-13 式}$$

ここで,

$$a = \frac{\lambda \varepsilon_d R d_d}{De}, \quad h1 = \exp(\sqrt{a}K), \quad h2 = \exp(\sqrt{a}L)$$

$$P1 = \left(\frac{h1}{h2} - \frac{h2}{h1} \right), \quad P2 = \left(\frac{h1}{h2} + \frac{h2}{h1} \right), \quad P3 = \frac{(2\sqrt{a}L - P2\sqrt{a}K + P1)}{a},$$

$$P4 = \frac{(2\sqrt{a}K - P2\sqrt{a}L - P1)}{a}, \quad P5 = \frac{(2 - P1\sqrt{a}L - P2)}{a}$$

$$G1 = E\sqrt{\lambda \varepsilon_d R d_d De} = EDe\sqrt{a}, \quad G2 = 2\pi l \varepsilon_d R d_d, \quad G3 = \varepsilon_m R d_m V_m,$$

$$G4 = \varepsilon_f R d_f V_f, \quad G5 = \frac{Q_d}{V_d \varepsilon_d R d_d}, \quad G6 = Q + \frac{De_m E_m}{L_m} + \lambda G3,$$

$$G7 = \left(G2 \frac{P3}{P1} + G4 \right) \left(\frac{G6}{G1} P1 - P2 \right) - \left(\frac{G4G5}{G1} + \frac{2}{P1} \right) G2P4, \quad G8 = \left(\frac{G5G2}{G1} P3 - 2 \right),$$

$$G9 = \left(G2 \frac{P3}{P1} + G4 \right) \left(\frac{G6}{G1} - \frac{P1}{P2} \right) P1 - \left(\frac{G4G5}{G1} + \frac{2}{P1} \right) \frac{P1P5}{P2} G2$$

C_K : 拡散媒体内側境界濃度(Bq/m³)

I : インベントリ(Bq)

$$I = I_0 \exp(-\lambda ts) \quad (\text{瞬時溶出の場合: } I_0 \text{ は初期インベントリ})$$

$$ts = \frac{Rd(L-K)^2}{De}$$

ts (拡散媒体外側境界濃度が 0 と見なせる場合の定常到達時間)

$I=I_{SOL}$ (内側境界濃度が溶解度 C_{SOL} で規定される場合,

$$I_0 \exp(-\lambda ts) \leq I_{SOL} \rightarrow I = I_0 \exp(-\lambda ts)$$

$I=I_{LE}$ (拡散媒体の内側境界から拡散媒体への核種の放出率が廃棄体からの核種の一定溶出率 F_{LE} で規定される場合,

$$I_0 \exp(-\lambda ts) \leq I_{LE} \rightarrow I = I_0 \exp(-\lambda ts)$$

Rd : 拡散媒体の遅延係数(-) $Rd = 1 + \frac{(1-\varepsilon)Kd\rho}{\varepsilon}$

K : 拡散媒体内側までの半径(m)

L : 拡散媒体外側までの半径(m)

C_L : 拡散媒体外側境界濃度(Bq/m³)

F_L : 定常状態での拡散媒体から EDZ への拡散による核種放出率(Bq/y)

F_K : 定常状態での拡散媒体内側境界からの放出率(Bq/y)

F_{ad} : 定常状態での人工バリア(緩衝材)からの移流による核種放出率(Bq/y)

F_m : 定常状態での EDZ から母岩への拡散による核種放出率(Bq/y)

C_a : 定常状態での拡散媒体中の平均濃度(Bq/m³)

Q_d : 人工バリア(緩衝材)中の地下水流量(m³/y) ($Q_d \leq Q$)

C_{SOL} : 溶解度(Bq/m³) ($C_{SOL} \leq C_{Kmax}$)

F_{LE} : 一定溶出率(Bq/y) ($F_{LE} \leq F_{Kmax}$)

(瞬時溶出および溶解度制限の場合は $F_{LE} = F_{Kmax}$)

C_{LE} : 一定溶出率 F_{LE} の場合の拡散媒体内側境界濃度(Bq/m³)

E : 拡散媒体外側の表面積(m²)

ℓ : 拡散媒体の軸方向の長さ(m)

V : 媒体の体積(m³)

m : EDZ を表す添え字

f : 充填材を表す添え字

- Q : EDZ 中の地下水流量(m³/y)
L_m : EDZ の厚さ(m)

ここで、添付 1-8 式で表わされる人工バリアからの放出率は、緩衝材内側境界濃度 C_K と拡散による物質移動量を表す項によって表現され、これらの 2 つの項により放出率を分解して表現できることが示されている (大井, 2012 ; Ohi et al., 2013)。

また、EDZ を流れる地下水流量 Q は、母岩の透水係数 k を関数とする水理モデルにより表すことが可能なパラメータである。本検討では、既存の評価 (電事連・JNC, 2005 ; JAEA・FEPC, 2007) を参照し、処分施設を円筒系で表現できるものとし、EDZ を流れる地下水流量 Q と処分施設内の流速を母岩の透水係数 k を関数として含む二次元の円筒座標系の水理モデルに基づく解析解で求めることとした。

2.2 天然バリア中の核種の減衰割合に関する解析解

天然バリア中の核種の減衰割合を表わす解析解 (Put, 1985 ; Tang et al., 1981 ; Nagra, 1994 ; 石原ほか, 1999) と天然バリア中の核種の減衰割合を構成する因子について以下に示す。

多孔質媒体中での移流/分散, 収着および崩壊を考慮した 1 次元多孔質媒体における核種移行は、以下のように表わされる。

$$\varepsilon R d \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_d \frac{\partial C}{\partial z} - \varepsilon R d \lambda C \quad \text{添付 1-14 式}$$

ここで、

- ε : 多孔質媒体の空隙率
Rd : 多孔質媒体の遅延係数 $\left(R d = 1 + \frac{(1 - \varepsilon) K d \rho}{\varepsilon} \right)$
C : 移行経路内の液相中の核種濃度 (Bq/m³)
Kd : 多孔質媒体の収着分配係数 (m³/kg)
ρ : 多孔質媒体の真密度(kg/m³)

以下に示す初期条件および境界条件を考える。

$$\begin{aligned} C(z, 0) &= 0 \quad (z > 0) \\ V_d C - D_L \frac{\partial C}{\partial z} &= \Phi_{in} \quad (z = 0, \quad t > 0) \\ C(\infty, 0) &= 0 \quad (t > 0) \end{aligned}$$

ここで、

- z : 距離(m)
V_d : ダルシー流速(m/y)
 $V_d = k \times i = V_e \varepsilon$

添付 1-15 式

- k : 透水係数 (m/y)
 i : 動水勾配
 V_e : 実流速 (m/y)
 D_L : 分散係数(m²/s)

$$D_L = \alpha_L L V_d + D_e$$

添付 1-16 式

- α_L : 経路方向の分散比率
 L : 移行距離(m)
 D_e : 実効拡散係数(m²/y)
 Φ_{in} : z=0 における核種の一定流入率(Bq/y)

上記の初期条件および境界条件の下で、多孔質媒体中の移行距離 L における定常状態での核種放出率 Φ_{out} と一定流入率 Φ_{in} の比 γ (天然バリア中での減衰割合) は、以下のよう
 に与えられる (Put, 1985)。

$$\gamma = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} = \exp \left[\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe\lambda\tau} \right]$$

添付 1-17 式

$$Pe = \frac{V_d L}{D_e}$$

添付 1-18 式

$$\tau = \frac{L}{V_d} \varepsilon R d$$

添付 1-19 式

ここで、

- γ : 距離 L における定常状態での核種放出率と母岩入口での核種の一定流入率との比 (天然バリア中での減衰割合)
 Φ_{out} : 距離 L における定常状態での核種放出率(Bq/y)
 Pe : ペクレ数
 λ : 崩壊定数(1/y)
 τ : 核種の移行時間(y)

一方、亀裂媒体中での移流/分散、収着、母岩マトリクスへの拡散、収着、および崩壊を考慮した 1 次元亀裂媒体における核種移行は、以下のように表わされる。

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_f \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda R_f C + \frac{F}{b} \varepsilon D_p^m \frac{\partial C^m}{\partial x} \Big|_{x=b}$$

添付 1-20 式

$$R_d \frac{\partial C^m}{\partial t} = D_p^m \frac{\partial^2 C^m}{\partial x^2} - \lambda R_d C^m$$

ここで、

- Rf : 亀裂表面への収着による遅延係数 $\left(Rf = 1 + \frac{Ka}{b} \right)$
- Ka : 亀裂表面への収着分配係数 (m)
- 2b : 亀裂開口幅 (m) $(2b = 2\sqrt{T} = 2\sqrt{km})$
- T : 透水量係数 (m²/y)
- k : 透水係数 (m/y)
- m : 帯水層の厚さ(m) : 逆数の 1/m は亀裂頻度を表す。
- C : 亀裂中の核種濃度(Bq/m³)
- D_L : 分散係数(m²/s)

$$D_L = \alpha_L LV_f + D_p^m$$

添付 1-21 式

- z : 亀裂方向の距離(m)
- V_f : 亀裂内のダルシー流速 (m/y)

$$V_f = \frac{T \times i}{2b} = \frac{k \times i}{2b} m = \frac{k \times i}{2\sqrt{Km}} m = \frac{i}{2} \sqrt{km}$$

添付 1-22 式

- i : 動水勾配
- F : マトリクス拡散寄与面積比率
- ε : 母岩マトリクスの空隙率
- D_p^m : 自由水中の拡散係数(m²/y)
- C^m : 母岩マトリクス中の核種濃度(Bq/m³)
- Rd : 母岩マトリクスへの収着による遅延係数 $\left(Rd = 1 + \frac{(1 - \varepsilon)Kd\rho}{\varepsilon} \right)$
- Kd : 母岩マトリクスの収着分配係数 (m³/kg)
- ρ : 母岩マトリクスの真密度(kg/m³)
- x : 亀裂に垂直な方向 (マトリクス内) の距離(m)

以下に示す初期条件および境界条件を考える。

$$C(z,0) = 0 \quad (z > 0)$$

$$C^m(x,z,0) = 0 \quad (x > b, \quad z > 0)$$

$$V_f C - D_L \frac{\partial C}{\partial z} = \Phi_{in} \quad (z = 0, \quad t > 0)$$

$$C(\infty,0) = 0 \quad (t > 0)$$

$$C^m(b,z,t) = C(z,t) \quad (t > 0)$$

$$\left. \frac{\partial C^m}{\partial x} \right|_{x=p} = 0 \quad (t > 0)$$

ここで、

Φ_{in} : $z=0$ の亀裂入口における核種の一定流入率(Bq/y)

p : マトリクス拡散深さ(m)

上記の初期条件および境界条件において、マトリクス拡散寄与面積比率が 1 ($F=1$) でマトリクス拡散深さを ∞ ($p=\infty$) とした場合の解析解(Tang et al., 1981)や、 $F=1$ で、 p =有限値とした場合の解析解 (Nagra, 1994), さらには、 F =有限値, p =有限値とした場合の解析解 (石原ほか, 1999) が求められている。

上記の初期条件および境界条件の下で、 F =有限値, p =有限値とした場合、亀裂媒体中の距離 L における定常状態での天然バリア中での減衰割合 γ は、添付 1-17 式と同様に以下のように表わされる (石原ほか, 1999)。

$$\gamma = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} = \exp\left[\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe\lambda\tau}\right] \quad \text{添付 1-17 式}$$

ただし、

$$Pe = \frac{V_f L}{D_L} = \frac{V_f L}{\alpha_L L V_f + D_p^m} = \frac{1}{\alpha_L + \frac{D_p^m}{V_f L}} \quad \text{添付 1-23 式}$$

$$\tau = \frac{L}{V_f} \left[Rf + \frac{F\epsilon R d}{b\alpha} \tanh(\alpha p) \right] \quad \text{添付 1-24 式}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda R d}{D_p^m}} \quad \text{添付 1-25 式}$$

$$\tanh(\alpha p) = \frac{\sinh(\alpha p)}{\cosh(\alpha p)} = \frac{\exp(\alpha p) - \exp(-\alpha p)}{\exp(\alpha p) + \exp(-\alpha p)} = \frac{1 - \exp(-2\alpha p)}{1 + \exp(-2\alpha p)} \quad \text{添付 1-26 式}$$

ここで、距離 L における定常状態での天然バリア中での減衰割合 γ を表す添付 1-17 式は、与えられた母岩の透水係数 k (亀裂内のダルシー流速) と崩壊定数の下、以下に示すように地下水流量によって与えられるペクレ数 Pe と核種の移行時間 τ に分解可能である。ここで、核種の移行時間 τ は、添付 1-24 式で示すように地下水流量および母岩への収着、または母岩マトリクスへの拡散などによって変化するパラメータである。

$$\tau = \frac{\left(\ln \gamma - \frac{Pe}{2}\right)^2 - \frac{Pe^2}{4}}{Pe\lambda} \quad \text{添付 1-27 式}$$

ここで石原ほか（1998）は、添付 1-28 式に示す定常状態になる母岩入口での核種の一定流入率 Φ_{in} の最大値を求めた。この値の算出においては、母岩への一定の流入率によりインベントリが枯渇する時間に、天然バリア中の核種移行が定常に到達するという関係が用いられた。

$$\phi_{in\max} = \lambda \times I_0 \times \frac{\exp(\gamma-1)}{1-\exp(\gamma-1)} \quad \text{添付 1-28 式}$$

人工バリアからの放出率 F_N が添付 1-28 式より求められる $\phi_{in\max}$ よりも小さな値の場合は、天然バリアにおける放出率が定常になるため、添付 1-17 式で与えられる核種放出率 Φ_{out} によって天然バリアからの放出率を精度よく求めることができる。しかし、人工バリアからの放出率が添付 1-28 式より大きな値の場合は、天然バリアにおける放出率は定常にならない。そのため、添付 1-17 式で与えられる核種放出率 Φ_{out} は非定常状態の放出率をインベントリの枯渇を無視して求めた定常状態の解となり保守的な値となる。上記の γ は、このような保守性を有していることに注意が必要である。

添付 1 参考文献

- 電事連・JNC（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書，JNC TY1400 2005-013，FEPC TRU-TR2-2005-02.，2005 年 9 月。
- Ebashi, T., Hwang, Y-S., Lee, Y-M., Ohi, T and Koo, S (2008) : Application of the Comprehensive Sensitivity Analysis Method to a Korean Geological Disposal Concept, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 11, p. 1138 – 1149.
- 江橋健，小尾繁，大井貴夫（2009）：高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示，原子力バックエンド研究，Vol. 15, No.2, pp. 99-115.
- 石原義尚，大井貴夫，石黒勝彦（1998）：“天然バリア中の核種移行に対するパラメータの影響特性の把握”，PNC TN8410 98-084.
- 石原義尚，石黒勝彦，梅木博之（1999）“Se-79 の半減期の長期化による地層処分システム性能評価への影響”，JNCTN8400 99-086.
- JAEA・FEPC (Japan Atomic Energy Agency and The Federation of Electric Power Companies of Japan) (2007) : Second Progress Report on Research and Development for TRU Waste Disposal in Japan -Repository Design, Safety Assessment and Means of Implementation in the Generic Phase-, JAEA-Review 2007-010 FEPC TRU-TR2-2007-01, Japan Atomic Energy Agency and The Federation of Electric Power Companies of Japan.
- Nagra (1994) : TECHNICAL REPORT 93-22, Kristallin – 1 Safety Assessment Report.
- NUMO (2011) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に係る処分の技術と安全性，「処分場の概要」の説明資料，NUMO-TR-10-03.
- 大井貴夫，曾根智之，稲垣学，三原守弘（2004）：包括的感度解析手法を用いた TRU 廃棄

物処分の成立条件の抽出について, サイクル機構技報 No. 25, 2004, 12, pp 69-84, JNC TN 1340 2004-4.

大井貴夫, 稲垣学, 川村淳, 江橋健 (2009) : 放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を与える懸念事象の相対的重要度把握のための体系的評価手法の有用性の例示, JAEA-Research 2008-111.

大井貴夫 (2011) : 放射性廃棄物地層処分の人工バリアシステムの応答特性を把握するための近似解析解の導出, NUMO-TR-10-06.

大井貴夫 (2012) : 包括的感度解析の高度化による地層処分の安全評価の信頼性向上に関する研究, 博士論文, 九州大学, <http://hdl.handle.net:80/2324/25587>.

Ohi, T., Takase, H., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T., Mihara, M., Ebashi, T. and Nakajima, K. (2007) : Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX, Vol. 985, p 129-134.

Ohi, T., Inagaki, M., Kawamura, M. and Ebashi, T. (2009) : A systematic approach to evaluate the importance of concerns affecting the geological disposal of radioactive wastes, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXII, Vol. 1124, p407-412.

Ohi, T., Ueda, H., Hyodo, H., Chiba, T., Takase, T. and Takamura, H. (2011a) : Safety assessment methodology focused on response characteristics of the disposal system and safety assessment for TRU waste in Japan, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXV, (Accepted).

Ohi, T., Chiba, T., Nakagawa, T., Takase, T., Nakazawa, T., Akagi, Y. and Idemitsu, K. (2011b) : Derivation of an approximate analytical solution for understanding the response characteristics of the EBS, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXV, (Accepted).

Ohi, T., Kawasaki, D., Chiba, T., Takase, T. and Hane, K. (2013) : A new assessment method for demonstrating the sufficiency of the safety assessment and the safety margins of the geological disposal system, Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 50, No. 1, pp80-106.

Put, M. J. (1985) : A Unidirectional Analytical Model for the Calculation of the Migration of Radionuclides in a Porous Geological Medium, Radioactive Waste Management and Nuclear Fuel Cycle, Vol. 6, pp.361-390.

SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden.

SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, TR-11-01 SKB, Stockholm, Sweden .

Tang, G. H., Frind, E. O. and Sudicky, E. A. (1981) : Contaminant Transport in Fractured Porous Media. An Analytical Solution for a Single Fracture, Water Resource research, Vol. 17, p.555.

添付 2 重ね合せによる温度評価手法

1. 本手法適用の背景

本文における設計検討では、case1-2 で廃棄体パッケージの閉じ込め期間（500 年）後の温度条件を課している。このように長期経過後の温度を設計で考慮する場合、処分坑道単体をモデル化した解析モデル（処分坑道が等間隔で無限に連続配置されていると仮定し、坑道 1 本を取り出して反射境界を利用した簡便なモデル）による評価では、評価温度が実際より高くなり過度に保守的となる。したがって、より現実的な評価を行うためには、計画される複数の連設処分坑道の配置をモデルで考慮した熱解析を実施することが考えられる。しかしながら、これを二次元 FEM 解析で行うにあたっては相当の規模の解析メッシュが必要となり、設計過程において不可欠となるトライアル検討を考えると作業上の負担が小さくない。

上述のように、ある程度試行錯誤を要する設計検討においては、簡便で効率的な熱解析手法を採用することが望ましい。そこで、連設坑道を考慮した二次元熱解析の多数回の試行を簡便に実施するための「重ね合せ」による計算方法の採用を考え、その適用性を確認した。

2. 理論的根拠

発熱性廃棄体から十分離れた地点の温度は、廃棄体を点熱源とみなして近似的に算出することが可能と考えられる。均質一様媒体中にある一点の熱源による任意地点の温度上昇量は、例えば Hedin ら（Hedin and Kärnbränslehantering, 2004）が引用している通り、以下に示す理論式（Carslaw and Jaeger, 1959）によって算出される。

$$\begin{aligned}\Delta T(R,t) &= \frac{1}{8(\pi\kappa)^{3/2} \rho C_p} \int_0^t q(\tau)(t-\tau)^{-3/2} \exp\left(-\frac{R^2}{4\kappa(t-\tau)}\right) d\tau \\ &= \int_0^t q(t-\tau) \cdot \frac{e^{-R^2/4\kappa\tau}}{(4\pi\kappa\tau)^{3/2} \rho C_p} d\tau\end{aligned}$$

添付 2-1 式

ここに、

- R : 点熱源からの距離 (m)
- t : 時間 (s)
- κ : 媒体の温度伝導率 ($= \frac{\Gamma}{\rho C_p}$) (m²/s)
- Γ : 媒体の熱伝導率 (W/(m·K))
- ρ : 媒体の密度(kg/m³)
- C_p : 媒体の比熱(J/(kg·K))
- q : 点熱源の発熱量 (W)

添付 2-1 式は、無限媒体中の放射状の熱伝導に対する理論解であり、発熱体の深度が 300 m より深い地層処分では、地質媒体を無限とみなすことにより適用が可能と考えられる。

ここで、添付 2-1 式は、点熱源から発する単位発熱量に対する応答を伝達関数とし、点熱源における発熱量経時変化を用いて畳み込み積分したものである。このことは、点熱源による温度上昇量への影響が線形であるとともに、別の熱源が存在する場合には、それによる温度上昇量を足し合わせることによって、ある地点の温度上昇量を求めることが可能であることを意味する。

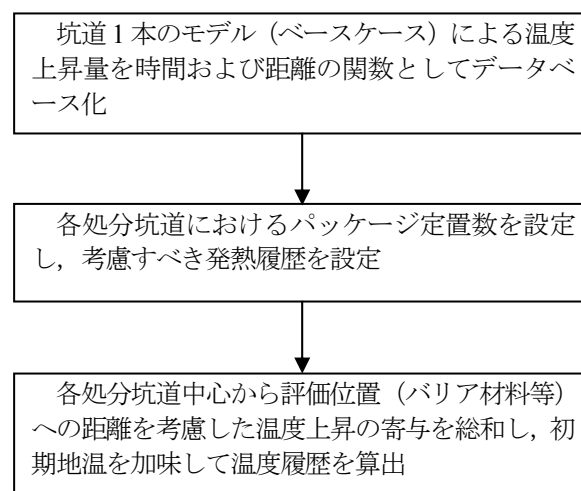
この理論解は、均質一様な媒体中における点熱源の発熱に対するものであるため、厳密な意味では TRU 処分坑道の熱解析にそのまま利用できるものではない。しかし、処分坑道離間距離が数十 m と大きく、処分坑道や発熱性廃棄体の断面積が対象モデル領域からみて相対的に小さいため、上記の原理（＝複数の点熱源によるある地点の温度上昇量が重ね合わせによって算出可能であること）を利用した概算の適用可能性が考えられる。

3. 重ね合せによる温度評価手法の概要と手順

「重ね合せ」による温度評価は、処分坑道単体での熱解析の結果を足し合わせるによって、連設坑道スケールでの温度評価を行う近似手法である。

本手法では、まず隣接する坑道からの熱影響がないものと仮定した処分坑道 1 本が存在する状態での熱解析（以下、「ベースケース」）を実施する。ベースケースの熱解析は、発熱履歴特性が異なる廃棄体の種類ごとに実施する。次に、各処分坑道の断面あたりの廃棄体数量（発熱量に比例）に基づきベースケースで得られた温度の空間分布を比例換算し、これと処分坑道の位置情報に基づく距離を考慮して評価点での温度上昇量を求める。この温度上昇量について、全ての熱源（処分坑道）からの寄与を足し合わせ、さらに初期地温を加えることによって評価点の温度が求められる。

図一添付 2-1 に重ね合せによる温度評価の概略の流れを示す。



図一添付 2-1 重ね合わせによる温度評価の流れ

具体例として、ここでは図-添付 2-2 に示すレイアウト（9本の連設坑道の鉛直断面を切り出したイメージ）に対し、処分坑道③のハル・エンドピースの廃棄体領域中心の温度を重ね合わせによって求める場合について、その手順を以下 ア)～オ) に説明する。

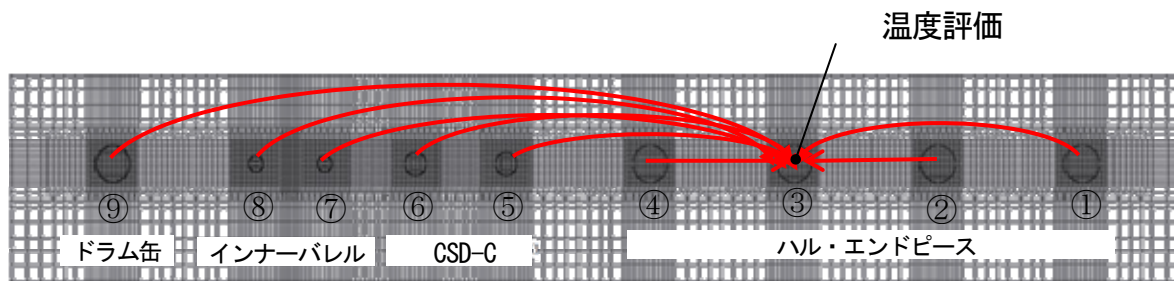


図-添付 2-2 重ね合わせ計算の概念説明図

- ア) ベースケースの解析結果（「ハル・エンドピース」「CSD-C」「インナーバレル」「ドラム缶」それぞれの発熱履歴に対応する4つのデータ）を発熱量および初期地温で補正し、各時刻の温度上昇量の空間分布を離散値としてデータベース化する。
- イ) 配置された処分坑道（図-添付 2-2 の①～②および④～⑨）それぞれの中心点から、評価する処分坑道（図中③）の中心までの距離を求める。
- ウ) 上記イ) で求めた各処分坑道（①～②および④～⑨）からの距離に応じて、評価点での温度上昇分を計算する。なお、ベースケースの解析結果データの距離と一致しない場合には内挿補間により求める。
- エ) 上記ウ) で求めた各処分坑道（①～②および④～⑨）からの温度上昇量の総和を求め、これに評価する坑道（③）自身による評価点の温度上昇分に足し合わせる。さらにこれに初期地温を加算して評価点での温度とする。
- オ) 上記ウ)～エ) の作業を各時刻で行い、評価点における温度の時刻歴を作成する。

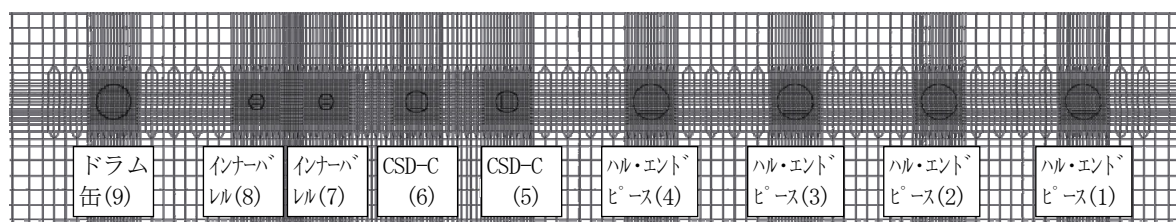
上記手順に沿って評価点の温度履歴を算出するためには、ベースケースの熱解析に加えて、下記情報が必要となるだけである。

- ・各処分坑道の廃棄体パッケージの定置個数（ベースケースに対する発熱量の比）
- ・各坑道の中心から評価点までの距離

したがって、本手法では Excel などの表計算機能を用いた四則演算により簡便な温度評価が可能となる。

4. 適用性確認

重ね合せによる温度評価手法を利用するにあたり、その適用性を確認しておく。ここでは、本文における検討ケースのうち case1-0 の結晶質岩ケースの 9 本の処分坑道（図－添付 2－3）を対象に、これに対する FEM 熱解析の結果と重ね合せによる計算結果を比較した（表－添付 2－1）。比較の結果、重ね合せによる温度評価手法は十分な精度を有しており、本検討の設計に適用可能であると判断できる。



図－添付 2－3 case1-0 結晶質岩ケースの処分坑道断面（FEM メッシュ抜粋）

表－添付 2－1 重ね合せと FEM 解析による評価温度（℃）の比較

		ドラム缶(9)	インナーハレル(8)	インナーハレル(7)	CSD-C(6)	CSD-C(5)	ハル・エントトピース(4)	ハル・エントトピース(3)	ハル・エントトピース(2)	ハル・エントトピース(1)
最大値	重ね合せ	73.9	77.5	79.2	85.9	83.3	68.9	68.4	68.4	68.0
	FEM	73.3	77.2	78.9	85.6	83.0	68.5	68.2	68.2	67.7
500 年後	重ね合せ	64.6	63.7	64.4	68.1	67.8	63.4	61.7	59.9	57.6
	FEM	64.2	63.4	64.1	67.9	67.5	63.2	61.5	59.6	57.3
1 万年後	重ね合せ	49.7	49.4	49.5	50.7	50.7	49.9	49.7	49.4	49.0
	FEM	49.8	49.4	49.6	50.7	50.7	49.9	49.7	49.4	49.1

添付 2 参考文献

Allan Hedin, Svensk Kärnbränslehantering AB (2004) : Integrated near-field evolution model for a KBS-3 repository, August 2004, SKB, R-04-36

Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C. (195): Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press, New York.

添付 3 近似解析解の簡略式

表 添付 3-1 に緩衝材内の地下水流量 Q_d と EDZ 内の地下水流量 Q の比 Q_d/Q が無視できる場合 ($Q_d/Q \rightarrow 0$) の緩衝材内側境界濃度 C_K の簡略式を示す。また, 表 添付 3-2 に拡散および移流による核種放出 F_L, F_{ad} と人工バリアから全放出率 F_N の簡略式を示す(大井, 2012)。さらに, 表 添付 3-3 と表 添付 3-4 に, 緩衝材からの核種放出率 F_N の簡略式を EDZ 内の地下水流量 Q と応答特性の区分値 Q'_{th} の大小関係ごとに, それぞれ瞬時溶出, 溶解度制限, 溶出率制限の場合に分けて示す。また, 表 添付 3-5~表 添付 3-6 には, Q_d/Q が無視できる場合, つまり $Q_d/Q \rightarrow 0$ となる場合について, EDZ 内の地下水流量 Q と応答特性の区分値 Q'_{th} の大小関係ごとに, それぞれの境界条件に対応した拡散による放出率 F_L と移流による放出率 F_{ad} の簡略式を示す。

表一添付 3-1 近似解析解の簡略式 ($Q_d/Q \rightarrow 0 : C_K$)

緩衝材内側境界濃度 C_K の簡略式

$$C_K =$$

$$\frac{I \left[\left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \left(\frac{Q_d}{Q} \frac{L}{(L+K)} \right) \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left[\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{Q_d}{Q(L+K)} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f L - \varepsilon_m R d_m V_m K)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \right]}$$

$$Q_{th} = \frac{EDe'}{(L-K)} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)}, \quad De' = \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} De$$

$$Q'_{th} = \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} Q_{th} = \frac{EDe'}{(L-K)} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)}$$

$Q < Q'_{th}$ の場合

$$\rightarrow C_K = \frac{I \left[\left(\frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \left(\frac{Q_d}{Q} \frac{L}{(L+K)} \right) \right]}{\left[\frac{1}{Q} \frac{EDe'}{(L-K)} (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m) - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{Q_d}{Q} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f L - \varepsilon_m R d_m V_m K)}{(L+K)} \right]}$$

$$\cong \frac{I}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \quad (4.1.2-(7)式, 4.1.2-(20)式参照)$$

ここで,

瞬時溶出の場合 $\rightarrow I = I_0, C_K = C'_{K \max}$

溶出率制限の場合 $\rightarrow I = I_0, C_K = C'_{K \max}$

溶解度制限の場合 $\rightarrow I = I'_{SOL}, C_K = C_{SOL}$

$Q'_{th} < Q$ の場合

$$\rightarrow C_K = \frac{I \left[1 - \left(\frac{Q_d}{Q} \frac{L}{(L+K)} \right) \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f) - \frac{Q_d}{Q} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f L - \varepsilon_m R d_m V_m K)}{(L+K)}}$$

$$\cong \frac{I}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)}$$

瞬時溶出の場合 $\rightarrow I = I_0, C_K = C_{K \max}$

溶出率制限の場合 $\rightarrow I = I_{LE}, C_K = C_{LE}$

溶解度制限の場合 $\rightarrow I = I_{SOL}, C_K = C_{SOL}$

表一添付 3-2 近似解析解の簡略式 ($Q_d/Q \rightarrow 0$: F_L , F_{ad})

拡散による放出率 F_L の簡略式	
$F_L =$	$\frac{I \frac{EDe'}{(L-K)} \left(1 - \frac{Q_d}{Q}\right)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left[\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{Q_d}{Q} \frac{1}{(L+K)} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f L - \varepsilon_m R d_m V_m K)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \right]}$ $\cong \frac{I \frac{EDe'}{(L-K)}}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} \right)}$
移流による放出率 F_{ad} の簡略式	
$F_{ad} =$	$\frac{I \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) Q_d}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left[\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} - \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{Q_d}{Q} \frac{1}{(L+K)} \frac{(\varepsilon_f R d_f V_f L - \varepsilon_m R d_m V_m K)}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \right]}$ $= \frac{I \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) Q_d}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} \right)}$
$F_N = F_L + F_{ad}$ の簡略式	
<p>$(F_{LE} = F_{K \max}$: 瞬時溶出, 溶解度制限) $\rightarrow F_N = F_L + F_{ad}$</p> $= \frac{I \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(1 + \frac{Q'_{th}}{Q} \right)} \quad (1)$	
<p>$(F_{LE} \neq F_{K \max}$: 溶出率制限) $\rightarrow F_N = F_L + F_{ad}$</p> $= \frac{I \left[\frac{EDe'}{(L-K)} + \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} \frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(\frac{F_{LE}}{F_{K \max}} + \frac{Q'_{th}}{Q} \right)} \quad (2)$	

表一添付 3-3 近似解析解の簡略式 ($Q_d/Q \rightarrow 0$: 瞬時溶出, 溶解度制限)

瞬時溶出の場合 ($F_{LE}=F_{Kmax}$, $Q < Q'_{th} \rightarrow C_K=C'_{Kmax}$, $Q'_{th} < Q \rightarrow C_K=C_{Kmax}$)	
表 添付3-2で示される $F_N=F_L+F_{ad}$ の簡略式(1)より,	
$F_N = F_L + F_{ad} = \frac{I \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(1 + \frac{Q_{th}}{Q} \right)}$	
$Q < Q_{th} \rightarrow F_N \cong \frac{I_0 \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{\frac{1}{Q} \frac{EDe}{(L-K)} (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \cong C'_{Kmax} \frac{\left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{\frac{1}{Q} \frac{EDe}{(L-K)}}$ $= C'_{Kmax} (Q + Q_d)$	
$Q_{th} < Q \rightarrow F_N \cong \frac{I_0 \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{K}{(L+K)} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \cong C_{Kmax} \left(\frac{EDe}{(L-K)} + \frac{K}{(L+K)} Q_d \right)$	
溶解度制限の場合 ($F_{LE}=F_{Kmax}$, $C_K=C_{SOL}$)	
表 添付3-2で示される $F_N=F_L+F_{ad}$ の簡略式(1)より,	
$F_N = F_L + F_{ad} = \frac{I \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f) \left(1 + \frac{Q_{th}}{Q} \right)}$	
$Q < Q_{th} \rightarrow F_N \cong \frac{I_{SOL} \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{EDe}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{\frac{1}{Q} \frac{EDe}{(L-K)} (\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \cong C_{SOL} \frac{\frac{EDe}{(L-K)} + \frac{EDe}{(L-K)Q} Q_d}{\frac{EDe}{(L-K)Q}} = C_{SOL} (Q + Q_d)$	
$Q_{th} < Q \rightarrow F_N \cong \frac{I_{SOL} \left[\frac{EDe}{(L-K)} + \left(\frac{K}{(L+K)} \right) Q_d \right]}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K)K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \cong C_{SOL} \left(\frac{EDe}{(L-K)} + \frac{K}{(L+K)} Q_d \right)$	

表一添付 3-4 近似解析解の簡略式 ($Q_d/Q \rightarrow 0$: 溶出率制限)

溶出率制限の場合 ($F_{LE} \neq F_{Kmax}, Q < Q'_{th} \rightarrow C_K = C'_{Kmax}, Q'_{th} < Q \rightarrow C_K = C_{LE}$)	
表 添付 3-2 で示される $F_N = F_L + F_{ad}$ の簡略式 (2) より,	
$F_N = F_L + F_{ad} = \frac{I \left[\frac{EDe'}{(L-K)} + \left(\frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \frac{K}{(L+K)} + \frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{(\pi \epsilon_d R d_d (L-K) K + \epsilon_f R d_f V_f) \left(\frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} + \frac{Q_d}{Q} \right)}$	
$Q < Q'_{th} \rightarrow F_N \cong \frac{I_0 \left[\frac{EDe'}{(L-K)} + \left(\frac{EDe'}{(L-K)Q} \right) Q_d \right]}{\frac{EDe'}{(L-K)Q} (\epsilon_f R d_f V_f + \epsilon_d R d_d V_d + \epsilon_m R d_m V_m)} \cong C'_{Kmax} (Q + Q_d)$	
この式は、瞬時溶出条件の $Q < Q'_{th}$ の場合の結果と同じ結果を与えるものである。	
$Q'_{th} < Q \rightarrow F_N \cong \frac{I_{LE} \left[\frac{EDe'}{(L-K)} + \left(\frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \frac{K}{(L+K)} \right) Q_d \right]}{(\pi \epsilon_d R d_d (L-K) K + \epsilon_f R d_f V_f) \left(\frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \right)} \cong C_{LE} \left(\frac{EDe}{(L-K)} + \frac{K}{(L+K)} Q_d \right)$	
この式は、 F_N を C_{LE} と De に分解して表現する場合の式であり、瞬時溶出条件の $Q'_{th} < Q$ の場合の結果とは、内側境界濃度が異なる結果となっている。	
上式において、	
$C_{LE} = C_{Kmax} \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}}$	
を用いると、	
$F_N = C_{Kmax} \left(\frac{EDe'}{(L-K)} + \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} \frac{K}{(L+K)} Q_d \right)$	
この式は、 $Q'_{th} < Q$ の場合、瞬時溶出条件の場合の拡散係数を $De' = De (F_{LE}/F_{Kmax})$ 、移流の場合の濃度の平均化のための係数 $K/(K+L)$ を $(F_{LE}/F_{Kmax}) K/(K+L)$ と置いた結果と同じ結果となる。	
このことは、 F_N を C_{LE} と De に分解して表現する場合、上記のような置き換えかえにより、 C_{LE} を用いる溶出率制限の解を用いることなく、瞬時溶出の解を用いて F_N を C_{Kmax} と De' に分解して解くことも可能であることを意味している。	

表一添付 3-5 近似解析解の簡略式の F_L, F_{ad} ($Q < Q'_{th}$) ($Q_d/Q \rightarrow 0$)

境界条件	拡散による放出率 F_L と移流による放出率 F_{ad}
瞬時溶出	$F_L = \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q = C'_{K \max} Q = F'_{K \max}$ $F_{ad} = \frac{I_0 Q_d}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} = C'_{K \max} Q_d$
溶解度制限	$F_L = \frac{I'_{SOL} Q}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} = C_{SOL} Q$ $F_{ad} = \frac{I'_{SOL} Q_d}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} = C_{SOL} Q_d$
溶出率制限	$F_L = \frac{I_0}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} Q = C'_{K \max} Q = F'_{K \max}$ $F_{ad} = \frac{I_0 Q_d}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} = C'_{K \max} Q_d$

表一添付 3-6 近似解析解の簡略式の F_L, F_{ad} ($Q'_{th} < Q$) ($Q_d/Q \rightarrow 0$)

境界条件	拡散による放出率 F_L と移流による放出率 F_{ad}
瞬時溶出	$F_{L \max} = \frac{E D e}{(L - K)} \frac{I_0}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{E D e}{(L - K)} C_{K \max} = F_{K \max}$ $F_{ad} = \frac{K}{(L + K)} \frac{I_0}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} Q_d = \frac{K}{(L + K)} C_{K \max} Q_d$
溶解度制限	$F_L = \frac{E D e}{(L - K)} \frac{I_{SOL}}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{E D e}{(L - K)} C_{SOL}$ $F_{ad} = \frac{K}{(L + K)} \frac{I_{SOL}}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} Q_d = \frac{K}{(L + K)} C_{SOL} Q_d$
溶出率制限	$F_L \cong \frac{E D e}{(L - K)} \frac{I_{LE}}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} = \frac{E D e}{(L - K)} C_{LE}$ $= \frac{E D e}{(L - K)} \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} C_{K \max} = \frac{E D e'}{(L - K)} C_{K \max} = \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} F_{K \max} = F_{LE}$ $F_{ad} = \frac{K}{(L + K)} \frac{I_{LE}}{(\pi \ell \varepsilon_d R d_d (L - K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} Q_d = \frac{K}{(L + K)} C_{LE} Q_d$ $= \frac{K}{(L + K)} \frac{F_{LE}}{F_{K \max}} C_{K \max} Q_d$

添付 4 緩衝材厚さの変化と放出率の関係

緩衝材内側半径 K が一定の場合については、 $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式、または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式に、本文 4.1.3-(3)式から 4.1.3-(5)式を代入して、固定値 K で整理し、緩衝材の厚さが増大した場合の放出率を比較する。ここで、固定値 K での整理においては EDZ の体積 $V_m \rightarrow 0$ 、充填材領域の体積 $V_f \rightarrow 0$ とし、水理解析においては、EDZ 中のダルシー流速 V_{EDZ} は緩衝材の厚さ ΔK には依存せず一定とする。また、本文 4.1.3-(3)式から 4.1.3-(5)式の代入は、それぞれの内側境界条件ごと（瞬時溶出、溶出率制限、溶解度制限）の $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式（本文 4.1.2-(5)式、4.1.2-(5)式、4.1.2-(12)式）または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式（本文 4.1.2-(8)式、4.1.2-(10)式、4.1.2-(14)式）に対して行う。

表 添付 4-1 と表 添付 4-2 には、 $Q < Q'_{th}$ の条件において本文 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式から得られる拡散による放出率 F_L と緩衝材厚さ ΔK の関係を内側境界条件ごとに示している。これらの表から、 $Q < Q'_{th}$ で ΔK を厚くして、緩衝材外側半径 L を増大させた場合、瞬時溶出条件と溶出率制限の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に反比例することが示された。一方、緩衝材厚さ ΔK が増大しても、溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することが示された。

一方、表 添付 4-3 と表 添付 4-4 には、 $Q'_{th} < Q$ の条件において本文 4.1.3-(3)式～4.1.3-(5)式から得られる拡散による放出率 F_L と緩衝材厚さ ΔK の関係を内側境界条件ごとに示している。これらの表から、 $Q'_{th} < Q$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材外側半径 L を増大させた場合、瞬時溶出条件の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、おおそ緩衝材の厚さ ΔK の 2 乗に反比例することが示された。一方、溶出率制限の場合は、 ΔK が増大しても、定常状態となり内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に影響を受けないことが示された。溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大におおよそ反比例することが示された。

緩衝材外側半径 L が一定の場合については、 $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式、または、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式に、本文 4.1.3-(6)式から 4.1.3-(9)式を代入して、固定値 L で整理し、緩衝材の厚さが増大した場合の放出率を比較する。ここで、固定値 K での整理においては EDZ の体積 $V_m \rightarrow 0$ 、充填材領域の体積 $V_f \rightarrow 0$ とし、水理解析においては、EDZ 中のダルシー流速 V_{EDZ} は緩衝材の厚さ ΔK には依存せず一定とする。また、本文 4.1.3-(6)式から 4.1.3-(9)式の代入は、それぞれの内側境界条件ごと（瞬時溶出、溶出率制限、溶解度制限）の $Q < Q'_{th}$ の場合の放出率の式（本文 4.1.2-(5)式、4.1.2-(5)式、4.1.2-(12)式）さらに、 $Q'_{th} < Q$ の場合の放出率の式（本文 4.1.2-(8)式、4.1.2-(10)式、4.1.2-(14)式）に対して行う。

表 添付 4-5 と表 添付 4-6 には、 $Q < Q'_{th}$ の条件において 4.1.3-(6)式～4.1.3-(9)式から得
添付 4-1

られる拡散による放出率 F_L と緩衝材厚さ ΔK の関係を内側境界条件ごとに示している。これらの表から、 $Q < Q'_{th}$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材内側半径 K を減少させた場合、瞬時溶出条件と溶出率制限の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大にほぼ反比例することが示された。

一方、溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することが示された。これは、廃棄体定置領域の長さが緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することによるものである。

表 添付 4-7 と表 添付 4-8 には、 $Q'_{th} < Q$ の条件において 4.1.3-(6)式～4.1.3-(9)式から得られる拡散による放出率 F_L と緩衝材厚さ ΔK の関係を内側境界条件ごとに示している。これらの表から、 $Q'_{th} < Q$ で緩衝材の厚さ ΔK を厚くして、緩衝材内側半径 K を減少させた場合、瞬時溶出条件の場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK に反比例することが示された。一方、溶出率制限の場合は、 ΔK が増大しても、定常状態となり内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に影響を受けないことが示された。溶解度制限が成り立つ場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率は、緩衝材の厚さ ΔK の増大に比例することが示された。

表一添付 4-1 F_L と ΔK の関係 ($Q < Q'_{th}$, K 一定 : 瞬時溶出, 溶出率制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L				
瞬時溶出 溶出率制限	<p>本文 4.1.2-(5)式に 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式を代入して固定値 K で整理する。</p> $F_L \cong \frac{I_0 Q}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)}$ $\cong \frac{I_0 Q}{\varepsilon_d R d_d V_d} = \frac{I_0}{\varepsilon_d R d_d \pi l (2K + \Delta K) (\Delta K)} v_{EDZ} \ell \pi (K + \Delta K + \Delta m)$ $= \frac{I_0 v_{EDZ} (K + \Delta K + \Delta m)}{\varepsilon_d R d_d (2K + \Delta K) (\Delta K)} \quad (1)$ $= \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K} \frac{1}{(2 + \Delta K/K)} \left(\frac{\Delta K + \Delta m}{K} + 1 \right) \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{2\Delta K}$ <p style="text-align: center;">← $\left(\frac{\Delta K}{K} \cong 0, \text{ および, } \frac{\Delta K + \Delta m}{K} \cong 0 \text{ の場合} \right) \quad (2)$</p> $= \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K} \frac{1}{(2K/\Delta K + 1)} \left(\frac{K + \Delta m}{\Delta K} + 1 \right) \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K}$ <p style="text-align: center;">← $\left(\frac{K}{\Delta K} \cong 0, \text{ および, } \frac{K + \Delta m}{\Delta K} \cong 0 \text{ の場合} \right) \quad (3)$</p> <p>$\Delta K=1 \text{ m}, K=5 \text{ m}, L=6 \text{ m}, \Delta m=3 \text{ m}$ の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong \frac{I_0 v_{EDZ} (5 + 1 + 3)}{\varepsilon_d R d_d (10 + 1)} = \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{9}{11}$ <p>$\Delta K=N \text{ m}, K=5 \text{ m}, L=5+N \text{ m}, \Delta m=3 \text{ m}$ の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong \frac{I_0 v_{EDZ} (5 + N + 3)}{\varepsilon_d R d_d (10 + N) N} = \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(8 + N)}{(10 + N) N} = \frac{11}{9} F_{L1} \frac{8 + N}{(10 + N) N}$ <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">$N = 2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{10}{24} = 0.501$</td> <td style="width: 50%; border: none;">$N = 3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{11}{39} = 0.345$</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">$N = 4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{12}{56} = 0.262$</td> <td style="border: none;">$N = 5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{13}{75} = 0.212$</td> </tr> </table> <p>(2)式, (3)式は, 緩衝材内側半径 K を固定した場合, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の変化に反比例して減少することを表している。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p>	$N = 2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{10}{24} = 0.501$	$N = 3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{11}{39} = 0.345$	$N = 4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{12}{56} = 0.262$	$N = 5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{13}{75} = 0.212$
$N = 2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{10}{24} = 0.501$	$N = 3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{11}{39} = 0.345$				
$N = 4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{12}{56} = 0.262$	$N = 5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} \frac{13}{75} = 0.212$				

表一添付4-2 F_L と ΔK の関係 ($Q < Q'_{th}$, K 一定: 溶解度制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
溶解度制限	<p>本文 4.1.2-(12)式に 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式を代入して固定値 K で整理する。</p> $F_L \cong \frac{I'_{SOL} Q}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \cong \frac{I'_{SOL} Q}{\varepsilon_d R d_d V_d}$ $= \frac{I'_{SOL}}{\varepsilon_d R d_d \pi \ell (2K + \Delta K)(\Delta K)} v_{EDZ} \ell \pi (K + \Delta K + \Delta m)$ $= C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi (K + \Delta K + \Delta m) \quad (1)$ <p>ここで、ΔK が増大しても、$I'_{SOL} = C_{SOL} \varepsilon_d R d_d \pi \ell (2K + \Delta K)(\Delta K) \leq I_0$ となり、内側境界濃度 C_K が C_{SOL} を維持する場合は、</p> $F_L \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi (K + \Delta K + m)$ $= C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi \Delta K \left(\frac{K + m}{\Delta K} + 1 \right) \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi \Delta K \leftarrow \left(\frac{K + m}{\Delta K} \cong 0 \text{ の場合} \right) (2)$ $= C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi K \left(\frac{\Delta K + m}{K} + 1 \right) \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi K \leftarrow \left(\frac{\Delta K + m}{K} \cong 0 \text{ の場合} \right) (3)$ <p>$\Delta K=1 \text{ m}$, $K=5 \text{ m}$, $L=6 \text{ m}$, $\Delta m=3 \text{ m}$ の場合の放出率を F_{L1} とすると、(1)式より、</p> $F_{L1} \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi (5 + 3 + 1) = 9 C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi$ <p>$\Delta K=N \text{ m}$, $K=5 \text{ m}$, $L=5+N \text{ m}$, $\Delta m=3 \text{ m}$ の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi (5 + N + 3) = (8 + N) C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi = \frac{F_{L1}}{9} (8 + N)$ $N = 2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{10}{9} = 1.111, \quad N = 3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{9} = 1.222$ $N = 4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{12}{9} = 1.333, \quad N = 5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{13}{9} = 1.444$ <p>(2)式と(3)式から、緩衝材の厚さ ΔK を増加させても、内側境界濃度 C_K が C_{SOL} を維持する場合は、緩衝材からの拡散による核種放出率が、緩衝材の厚さ ΔK に応じて微増する可能性を表している。これは外側表面積の増大による地下水流量の増加によるものである。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p> <p>一方、内側境界濃度 C_K を C_{SOL} に維持できない場合、すなわち、$I'_{SOL} = C_{SOL} \varepsilon_d R d_d \pi \ell (2K + \Delta K)(\Delta K) > I_0$ となる場合は、$I'_{SOL} \rightarrow I_0$ となり、瞬時溶出の場合と同じ結果を与える。</p>

表一添付 4-3 F_L と ΔK の関係 ($Q'_{th} < Q$, 一定 : 瞬時溶出, 溶出率制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
瞬時溶出	<p>本文 4.1.2-(8)式に 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式を代入して固定値 K で整理する。</p> $F_{Lmax} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_0}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_0}{\frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d}$ $= \frac{2\pi l (K + \Delta K) De}{\Delta K} \frac{I_0}{\pi l \varepsilon_d R d_d (K + \Delta K/2) (\Delta K)} = \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(K + \Delta K)}{\Delta K^2 (K + \Delta K/2)} \quad (1)$ $= \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K^2} \frac{(1 + \Delta K/K)}{(1 + \Delta K/(2K))} \cong \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K^2} \left\langle \frac{\Delta K}{K} \cong 0 \right\rangle \quad (2)$ $= \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K^2} \frac{(K/\Delta K + 1)}{(K/\Delta K + 1/2)} \cong \frac{4I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K^2} \left\langle \frac{K}{\Delta K} \cong 0 \right\rangle \quad (3)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(K + \Delta K)}{\Delta K^2 (K + \Delta K/2)} = \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(5+1)}{(5+1/2)} = \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{12}{11}$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=5$ m, $L=5+N$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong \frac{2I_0 De}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(5+N)}{N^2 (5+N/2)} = \frac{11}{12} F_{L1} \frac{2(5+N)}{N^2 (10+N)} = \frac{11}{6} F_{L1} \frac{(5+N)}{N^2 (10+N)}$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{6} \frac{(7)}{4(12)} = 0.267 \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{6} \frac{(8)}{9(13)} = 0.125$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{6} \frac{(9)}{16(14)} = 0.074 \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{6} \frac{(10)}{25(15)} = 0.049$ <p>(2)式, (3)式は, 緩衝材内側半径 K を固定した場合, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の変化の 2 乗に反比例して減少することを表している。これは, 緩衝材の厚さの増加による濃度勾配の減少と緩衝材の厚さによる体積の増加によるものである。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p>
溶出率制限	<p>本文 4.1.2-(10)式に 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式を代入して固定値 K で整理する。</p> $F_L = \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{LE}}{(\pi l \varepsilon_d R d_d (L-K) K + \varepsilon_f R d_f V_f)} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{LE}}{\frac{1}{2} \varepsilon_d R d_d V_d}$ $= 2\pi l \frac{(K + \Delta K)}{\Delta K} De \frac{I_{LE}}{\pi l \varepsilon_d R d_d (K + \Delta K/2) (\Delta K)} \quad (1)$ <p>ここで, ΔK が増大しても, $I_{LE} = C_{LE} \pi l \varepsilon_d R d_d (K + \Delta K/2) (\Delta K) \leq I_0$, が確保され, 定常状態に到達する場合は,</p> $F_L = \frac{EDe}{(L-K)} C_{LE} = \frac{EDe}{(L-K)} \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} C_{Kmax} = F_{Kmax} \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} = F_{LE}$ <p>よって, 緩衝材の厚さ ΔK を増加させても, 定常状態となり, 内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は, 緩衝材からの拡散による核種放出率は, 一定の溶出率で変化しないことを表している。</p> <p>一方, ΔK が増加して, $Q'_{th} < Q$ において定常状態が確保されなくなる場合は, 瞬時溶出条件の場合と同じ状態になる。</p>

表一添付 4-4 F_L と ΔK の関係 ($Q'_{th} < Q$, K 一定 : 溶解度制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
溶解度制限	<p>本文 4.1.2-(14)式に 4.1.3-(3)式と 4.1.3-(4)式を代入して固定値 K で整理する。</p> $F_L \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{SOL}}{(\pi\ell\epsilon_d R d_d (L-K)K + \epsilon_f R d_f V_f)} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{SOL}}{\frac{1}{2}\epsilon_d R d_d V_d}$ $= 2\pi\ell \frac{(K + \Delta K)}{\Delta K} De \frac{I_{SOL}}{\pi\ell\epsilon_d R d_d (K + \Delta K/2)(\Delta K)}$ <p>ここで, ΔK が増大しても, $I_{SOL} = C_{SOL} \pi\ell\epsilon_d R d_d (K + \Delta K/2)(\Delta K) \leq I_0$ で, 内側境界濃度が C_{SOL} に維持される場合は,</p> $F_L \cong 2\pi\ell De C_{SOL} \frac{(K + \Delta K)}{\Delta K} \quad (1)$ $= 2\pi\ell De C_{SOL} (K/\Delta K + 1) \cong 2\pi\ell De C_{SOL} \leftarrow \left(\frac{K}{\Delta K} \cong 0 \text{ の場合} \right) \quad (2)$ $= 2\pi\ell De C_{SOL} (K/\Delta K + 1) \cong 2\pi\ell De C_{SOL} \frac{K}{\Delta K} \leftarrow \left(\frac{K}{\Delta K} \gg 1 \text{ の場合} \right) \quad (3)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong 2\pi\ell De C_{SOL} (5 + 1) = 2\pi\ell De C_{SOL} 6$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=5$ m, $L=5+N$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong 2\pi\ell De C_{SOL} \left(\frac{5+N}{N} \right) = 2\pi\ell De C_{SOL} \left(\frac{5}{N} + 1 \right) = \frac{F_{L1}}{6} \left(\frac{5}{N} + 1 \right)$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{7}{12} = 0.583 \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{8}{18} = 0.444$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{9}{24} = 0.375, \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{10}{30} = 0.333$ <p>(2)式, (3)式は, 緩衝材の厚さ ΔK を増加させても, 内側境界濃度 C_K が C_{SOL} を維持する場合は, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の増加に応じて減少することを表している。これは, 拡散に寄与する濃度勾配が大きくなることによるものである。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p> <p>一方, 内側境界濃度 C_K を C_{SOL} に維持できない場合, すなわち, $I_{SOL} = C_{SOL} \pi\ell(K + \Delta K/2)(\Delta K) > I_0$ となる場合は, $I_{SOL} \rightarrow I_0$ となり, 瞬時溶出条件の場合と同じ結果を与える。</p>

表一添付 4-5 F_L と ΔK の関係 ($Q < Q'_{th}$, L 一定 : 瞬時溶出, 溶出率制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
瞬時溶出 溶出率制限	<p>本文 4.1.2-(5)式に 4.1.3-(6)式と 4.1.3-(7)式を代入して固定値 L で整理する。</p> $F_L \cong \frac{I_0 Q}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \cong \frac{I_0 Q}{\varepsilon_d R d_d V_d}$ $= \frac{I_0}{\varepsilon_d R d_d \pi \ell (2L - \Delta K) (\Delta K)} v_{EDZ} \ell \pi (L + \Delta m) = \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K} \frac{(L + \Delta m)}{(2L - \Delta K)} \quad (1)$ $= \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K} \frac{(1 + \Delta m/L)}{(2 - \Delta K/L)} \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(1 + \Delta m/L)}{2 \Delta K} \leftarrow \left(\frac{\Delta K}{L} \cong 0 \right) \quad (2)$ $= \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{\Delta K} \frac{(1 + \Delta m/L)}{(2 - \Delta K/L)} \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(1 + \Delta m/L)}{\Delta K} \leftarrow \left(\frac{\Delta K}{L} \cong 1 \right) \quad (3)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{(6+3)}{(12-1)} = \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{9}{11}$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=6-N$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong \frac{I_0 v_{EDZ}}{\varepsilon_d R d_d} \frac{1}{N} \frac{(6+3)}{(12-N)} = \frac{11}{9} F_{L1} \frac{9}{N(12-N)} = F_{L1} \frac{11}{N(12-N)}$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{20} = 0.55, \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{27} = 0.41$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{32} = 0.344, \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{35} = 0.314$ <p>(2)式, (3)式は, 緩衝材外側半径 L を固定した場合, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の変化に反比例して減少することを表している。これは, 緩衝材の厚さの増加による体積の増加によるものである。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p>

表一添付 4-6 F_L と ΔK の関係 ($Q < Q'_{th}$, L 一定 : 溶解度制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
溶解度制限	<p>本文 4.1.2-(12)式 4.1.3-(6)式と 4.1.3-(7)式, 4.1.3-(9)式を代入して固定値 L で整理する。</p> $F_L \cong \frac{I'_{SOL} Q}{(\varepsilon_f R d_f V_f + \varepsilon_d R d_d V_d + \varepsilon_m R d_m V_m)} \cong \frac{I'_{SOL} Q}{\varepsilon_d R d_d V_d}$ $= \frac{I'_{SOL}}{\varepsilon_d R d_d \pi \ell L (2 - \Delta K/L) \Delta K} v_{EDZ} \ell \pi (L + \Delta m)$ <p>ここで, ΔK が増大しても, $I'_{SOL} = C_{SOL} \varepsilon_d R d_d \pi \ell L (2 - \Delta K/L) \Delta K \leq I_0$ で, 内側境界濃度が C_{SOL} に維持される場合は, $F_L \cong C_{SOL} v_{EDZ} \ell \pi (L + \Delta m)$ となり, 放出率は廃棄体定置領域の長さ ℓ に比例して変化する。ここで,</p> $\ell = \frac{P}{S_w} = \frac{P}{\pi K^2} = \frac{P}{\pi (L - \Delta K)^2} \quad ((L - \Delta K) > 0)$ <p>これは廃棄体定置領域の長さ ℓ が廃棄体定置領域断面積の変化に反比例することを意味している。また, 廃棄体定置領域断面積は, 緩衝材内側半径 K の変化の 2 乗に比例する。さらに, 緩衝材内側半径 K は, 緩衝材厚さ ΔK が増大すれば減少し, 緩衝材厚さ ΔK が減少すれば増大する関係にある。</p> <p>よって,</p> $F_L \cong C_{SOL} v_{EDZ} \pi (L + \Delta m) \ell = \frac{C_{SOL} v_{EDZ} \pi (L + \Delta m) P}{\pi (L - \Delta K)^2} = C_{SOL} v_{EDZ} P \frac{(L + \Delta m)}{(L - \Delta K)^2} \quad (1)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong C_{SOL} v_{EDZ} P \frac{9}{25}$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=6-N$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong C_{SOL} v_{EDZ} P \frac{9}{(6-N)^2} = \frac{25}{9} F_{L1} \frac{9}{(6-N)^2} = F_{L1} \frac{25}{(6-N)^2}$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{25}{16} = 1.56, \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{25}{9} = 2.778$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{25}{4} = 6.25, \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = 25$ <p>上式は, 緩衝材厚さ ΔK が増大しても, 溶解度制限において, 緩衝材内側境界濃度 C_K が C_{SOL} となる場合は, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することを表している。これは, 廃棄体定置領域の長さが緩衝材の厚さ ΔK の増大に応じて増加することによるものである。</p> <p>一方, 緩衝材厚さ ΔK を厚くすることで, 内側境界濃度 C_K を C_{SOL} に維持できない場合, すなわち, $I'_{SOL} = C_{SOL} \varepsilon_d R d_d \pi \ell (2L - \Delta K) (\Delta K) > I_0$ となる場合は, $I'_{SOL} \rightarrow I_0$ となり, 瞬時溶出の場合と同じ結果を与える。</p>

表一添付4-7 F_L と ΔK の関係 ($Q'_{th} < Q$, L 一定 : 瞬時溶出, 溶出率制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
瞬時溶出	<p>本文 4.1.2-(8)式に 4.1.3-(6)式~4.1.3-(9)式を代入して固定値 L で整理する。</p> $F_{Lmax} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_0}{(\pi\ell\epsilon_d R_d(L-K)K + \epsilon_f R_d V_f)} \cong \frac{2\pi\ell LDe}{(L-K)} \frac{I_0}{\frac{1}{2}\epsilon_d R_d V_d}$ $= \frac{2\pi\ell LDe}{\Delta K} \frac{I_0}{\pi\ell\epsilon_d R_d(L-\Delta K/2)(\Delta K)} = \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{L}{\Delta K^2(L-\Delta K/2)} \quad (1)$ $= \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{1}{\Delta K^2(1-\Delta K/(2L))} = \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{1}{\Delta K^2} \left\langle \left(\frac{\Delta K}{L} \cong 0 \right) \right. \quad (2)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1)式より,</p> $F_{L1} \cong \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{L}{\Delta K^2(L-\Delta K/2)} = \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{6}{(6-1/2)} = \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{12}{11}$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=6-N$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong \frac{2DeI_0}{\epsilon_d R_d} \frac{6}{N^2(6-N/2)} = \frac{11}{12} F_{L1} \frac{6}{N^2(6-N/2)} = F_{L1} \frac{11}{N^2(12-N)}$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{11}{40} = 0.275, \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{11}{81} = 0.136$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{11}{128} = 0.086, \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{11}{175} = 0.063$ <p>(2)式は, 緩衝材外側半径 L を固定した場合, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の変化の 2 乗に反比例して減少することを表している。これは, 緩衝材の厚さの増加による濃度勾配の減少と体積の増加によるものである。上記の $N=2\sim 5$ の結果はこの論理的な結果と整合的である。</p>
溶出率制限	<p>本文 4.1.2-(10)式に 4.1.3-(6)式~4.1.3-(9)式を代入して固定値 L で整理する。</p> $F_L = \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{LE}}{(\pi\ell\epsilon_d R_d(L-K)K + \epsilon_f R_d V_f)} \cong \frac{EDe}{(L-K)} \frac{I_{LE}}{\frac{1}{2}\epsilon_d R_d V_d}$ $= 2\pi\ell \frac{L}{\Delta K} De \frac{I_{LE}}{\pi\ell\epsilon_d R_d(K + \Delta K/2)(\Delta K)} \quad (1)$ <p>ここで, ΔK が増大しても, $I_{LE} = C_{LE}\pi\ell\epsilon_d R_d(K + \Delta K/2)(\Delta K) \leq I_0$, が確保され, 定常状態に到達する場合は,</p> $F_L = \frac{EDe}{(L-K)} C_{LE} = \frac{EDe}{(L-K)} \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} C_{Kmax} = F_{Kmax} \frac{F_{LE}}{F_{Kmax}} = F_{LE}$ <p>よって, 緩衝材の厚さ ΔK を増加させても, 定常状態となり, 内側境界濃度 C_K が C_{LE} を維持する場合は, 緩衝材からの拡散による核種放出率は, 一定の溶出率で変化しないことを表している。</p> <p>一方, ΔK が増加して, $Q'_{th} < Q$ において定常状態が確保されなくなる場合は, 瞬時溶出条件の場合と同じ状態になる。</p>

表一添付 4-8 F_L と ΔK の関係 ($Q'_{th} < Q$, L 一定: 溶解度制限)

境界条件	緩衝材からの拡散による放出率 F_L
溶解度制限	<p>本文 4.1.2-(12)式に 4.1.3-(6)式~4.1.3-(9)式を代入して固定値 L で整理する。</p> $F_L \cong \frac{EDe}{(L-K)(\pi\ell\varepsilon_d Rd_d(L-K)K + \varepsilon_f Rd_f V_f)} \frac{I_{SOL}}{I_0} \cong \frac{2\pi\ell LDe}{(L-K)} \frac{I_0}{\frac{1}{2}\varepsilon_d Rd_d V_d}$ $= \frac{2\pi\ell LDe}{\Delta K} \frac{I_{SOL}}{\pi\ell\varepsilon_d Rd_d(L-\Delta K/2)(\Delta K)}$ <p>ここで, ΔK が增大しても, $I_{SOL} = C_{SOL} \pi\ell\varepsilon_d Rd_d \Delta K(L - \Delta K/2) \leq I_0$ となり, 内側境界濃度が C_{SOL} に維持される場合は,</p> $F_{Lmax} = \frac{2\pi\ell LDe}{\Delta K} C_{SOL}, \quad \text{ここで, } \ell = \frac{P}{S_w} = \frac{P}{\pi K^2} = \frac{P}{\pi(L-\Delta K)^2}$ <p>となる。よって,</p> $F_{Lmax} = \frac{2\pi\ell LDe}{\Delta K} C_{SOL} \ell = \frac{2\pi LDe}{\Delta K} C_{SOL} \frac{P}{\pi(L-\Delta K)^2} = 2DeC_{SOL} P \frac{L}{\Delta K(L-\Delta K)^2} \quad (1)$ <p>$\Delta K=1$ m, $K=5$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{L1} とすると, (1) 式より,</p> $F_{L1} \cong 2DeC_{SOL} P \frac{L}{\Delta K(L-\Delta K)^2} = 2DeC_{SOL} P \frac{6}{25}$ <p>$\Delta K=N$ m, $K=6-N$ m, $L=6$ m, $\Delta m=3$ m の場合の放出率を F_{LN} とすると</p> $F_{LN} \cong 2DeC_{SOL} P \frac{L}{\Delta K(L-\Delta K)^2} = \frac{25}{6} F_{L1} \frac{6}{N(6-N)^2} = F_{L1} \frac{25}{N(6-N)^2}$ $N=2 \rightarrow \frac{F_{L2}}{F_{L1}} = \frac{1}{2} \frac{25}{16} = 0.78, \quad N=3 \rightarrow \frac{F_{L3}}{F_{L1}} = \frac{1}{3} \frac{25}{9} = 0.926$ $N=4 \rightarrow \frac{F_{L4}}{F_{L1}} = \frac{1}{4} \frac{25}{4} = 1.56, \quad N=5 \rightarrow \frac{F_{L5}}{F_{L1}} = \frac{1}{5} \frac{25}{1} = 5$ <p>上式は, 溶解度制限において, 緩衝材内側境界濃度 C_K が C_{SOL} となる場合は, 緩衝材からの拡散による核種放出率が, 緩衝材の厚さ ΔK の増加に応じて増大することを表している。これは, 廃棄体定置領域の長さが緩衝材の厚さ ΔK の増加に応じて増大する効果と濃度勾配が低下する効果の相殺によるものである。</p> <p>一方, 内側境界濃度 C_K を C_{SOL} に維持できない場合, すなわち, $I_{SOL} = C_{SOL} \pi\ell\varepsilon_d Rd_d \Delta K(L - \Delta K/2) > I_0$ となる場合は, $I_{SOL} \rightarrow I_0$ となり, 瞬時溶出条件の場合と同じ結果を与える。</p>