

ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討（４）

Study of Subsurface Disposal Concepts for Uranium Waste (4)

石戸谷 公英 中谷 隆良 船橋 英之 佐々木 良一*
高瀬 敏郎* 黒沢 満*

Kimihide ISHITOYA, Takayoshi NAKATANI, Hideyuki FUNABASHI, Ryoichi SASAKI*
Toshio TAKASE*and Mitsuru KUROSAWA*

バックエンド推進部門
廃棄物処分技術開発グループ

Radioactive Waste Disposal Technology Development Group
Nuclear Cycle Backend Directorate

December 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討(4)

日本原子力研究開発機構 バックエンド推進部門 バックエンド技術開発ユニット

石戸谷 公英^{*}、中谷 隆良、船橋 英之、
佐々木 良一^{*}、高瀬 敏郎^{*}、黒沢 満^{*}

(2008年9月29日受理)

ウラン廃棄物は、その主要核種が長半減期のウランであり、また、廃棄体からの放射線の影響をほとんど考慮しなくてよいという特徴を持っている。これまで、このような特徴を考慮に入れて、合理的な余裕深度処分についての検討を実施しており、その中で合理的な余裕深度処分システムの成立性が示唆された。しかし、この検討は特定の環境を想定した限定的なサイト条件評価である。

そこで本研究では、原子力安全委員会が取りまとめた「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」(平成19年7月)に示されたシナリオ区分を参考とし、将来起こると予見される事象として、気候変動及び造構運動に伴う処分施設とその周辺、及び天然バリアへの物理的・化学的变化を考慮してシナリオの検討を行い、各シナリオに対するパラメータ設定及び線量評価を実施した。核種移行に関わるパラメータとしては、従来の研究より被ばく線量は放射性核種の移行時間が大きく関係することから、処分施設からの放射性核種の放出係数、天然バリアの分配係数、地下水流速及び処分施設から河川（放射性核種の流出点）までの距離（移行距離）に着目した整理を行った。評価の結果、放射性核種の流量の増加や天然バリアの塩水性環境への変化により、一部の放射性核種の分配係数が小さくなった場合、 $10\mu\text{Sv/y}$ をやや上回った。“造構運動-隆起・侵食”シナリオでは、条件によっては $10\mu\text{Sv/y}$ を大きく上回ったが、現実的に発生することが考えにくいパラメータの急激な変化を入力条件とした評価手法によることも大きい。本ケースについては、被ばく線量評価において、パラメータの変化が1万～10万年の間に線形的に変化する条件を想定した評価を行ったところ、最大被ばく線量は $10\mu\text{Sv/y}$ を下回った。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員

* 三菱マテリアル株式会社 エネルギー事業センター

Study of Subsurface Disposal Concepts for Uranium Waste (4)

Kimihide ISHITOYA[※], Takayoshi NAKATANI, Hideyuki FUNABASHI
Ryoichi SASAKI^{*}, Toshio TAKASE^{*} and Mitsuru KUROSAWA^{*}

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit
Nuclear Cycle Backend Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 29, 2008)

Uranium waste has characteristics that it is rarely expected to decay its radioactivity and it is not almost necessary to consider external exposure to radiation from waste package. We studied reasonable sub-surface disposal concepts for uranium waste considering the characteristics. It showed feasibility of this system.

In this study, some scenarios for safety assessments were developed. In those scenarios, physical and chemical effects on the repository, near field, and host rock caused by climate change and tectonics were considered. They seemed to be foreseeable phenomena in future. According to each developed scenario, the parameters were set up for dose calculation. Calculated results were analyzed and summarized from the viewpoints of effects of radionuclide migration parameters such as release coefficient, distribution coefficient, ground water velocity and migration distance.

Dose more than 10 μ Sv/y was calculated in some cases. Increase of ground water velocity or decrease of distribution coefficient caused by sea water inflow into migration path influenced slightly on the dose excess. Change of the parameters in “uplifting-erosion” scenario showed big variation on the dose calculation results. In case of rapid change of the parameters, severe influences on the dose excess were observed. But, it wasn’t thought that this rapid change would happen actually. On the other hand, in case of linear assumption of parameter change from 10,000 y to 100,000 y, dose less than 10 μ Sv/y was calculated.

Keywords: Uranium Waste, Sub-surface Disposal Concept, Flow Velocity of Underground Water, Distribution Coefficient of Nuclides

This work was based on the study performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with the Japan Atomic Energy Agency.

※ Collaborating Engineer

* Energy Project & Technology Center, Mitsubishi Materials Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 実施内容	2
2.1 検討項目	2
2.2 検討内容	2
3. ウラン廃棄物余剰深度処分における「基本シナリオ」設定の考え方の検討	3
3.1 基本シナリオの考え方	3
3.2 将来起こりうる確からしいと予見される変化の検討	5
4. 基本シナリオにおける主要なパラメータの変動を考慮した予察的な被ばく線量評価	19
4.1 評価シナリオ	19
4.2 線量評価パラメータの設定	19
4.3 基本シナリオの評価結果	39
4.4 被ばく線量評価のまとめ	59
5. まとめ	61
参考文献	64

CONTENTS

1 . Introduction.....	1
2 . Objectives	2
2.1 List of study	2
2.2 Substance of study.....	2
3 . Study to set-up “basic scenario” for the sub-surface disposal of Uranium waste	3
3.1 Concept of “basic scenario”	3
3.2 Alteration of disposal system seemed to be foreseeable in future	5
4 . Analysis of “basic scenario”	19
4.1 Scenario set-up for dose analysis.....	19
4.2 Parameter set-up for dose analysis	19
4.3 Results	39
4.4 Summary of dose analysis	59
5 . Summary	61
References	64

目 次

図 3.2-1	35 万年前以降の海水準変動(第 2 次取りまとめより抜粋)	7
図 3.2-2	年平均気温と年平均降水量の関係(登坂、2006)	7
図 3.2-3	基準高度分散量から計算した全国の侵食速度の分布 (藤原ほか、1999)	9
図 3.2-4	河川・沢による浸食形態(例).....	9
図 4.2-1	合理化処分概念 C.....	20
図 4.2-2	廃棄体本数 10 万本の場合の処分坑道レイアウト.....	21
図 4.2-3	想定した核種移行評価モデル.....	24
図 4.2-4	地下水移行シナリオにおいて想定される被ばく経路.....	25
図 4.2-5	地下水流速の変化と最大被ばく線量及び被ばく線量ピーク時間との関係	29
図 4.2-6	被ばく線量の経時変化 (地下水流速が 20 万年後に x 倍に変化する場合)	30
図 4.2-7	隆起・侵食に伴う移行経路短縮の模式図.....	31
図 4.3-1	パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S1-C1/C2 シリーズ)	41
図 4.3-2	被ばく線量の経時変化 (S1-C1 シリーズ: 地下水流速 10 倍)	42
図 4.3-3	被ばく線量の経時変化 (S1-C2 シリーズ: 地下水流速 30 倍)	43
図 4.3-4	パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S2/S1-C1 シリーズ)	46
図 4.3-5	被ばく線量の経時変化 (天然バリアの化学的環境変化に関する比較)	47
図 4.3-6	被ばく線量の経時変化 (S2-C1 シリーズ)	48
図 4.3-7	地下水流速が変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S3-C1 シリーズ)	50
図 4.3-8	被ばく線量の経時変化 (S3-C1 シリーズ)	51
図 4.3-9	パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S5-C1/C2 シリーズ)	56
図 4.3-10	被ばく線量の経時変化 (S5-C1-Txx-100m)	57
図 4.3-11	被ばく線量の経時変化 (段階的にパラメータが変更するケース)	58
図 5-1	「基本シナリオ」に関する被ばく線量評価結果.....	63

表 目 次

表 3.1-1	処分システムの状態設定と被ばく経路の組み合わせによるシナリオ分類	5
表 3.2-1	基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (温暖化-降水量増加)	11
表 3.2-2	基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (温暖化-海水準変動 (海進))	12
表 3.2-3	基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (寒冷化-降水量減少)	13
表 3.2-4	基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (寒冷化-海水準変動 (海退))	14

表 3.2-5	基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (造構運動-隆起・侵食)	15
表 3.2-6	パラメータの時間変化に関する設定 (温暖化-降水量増加)	16
表 3.2-7	パラメータの時間変化に関する設定 (温暖化-海水準変動 (海進))	17
表 3.2-8	パラメータの時間変化に関する設定 (寒冷化-降水量減少)	17
表 3.2-9	パラメータの時間変化に関する設定 (寒冷化-海水準変動 (海退))	18
表 3.2-10	パラメータの時間変化に関する設定 (造構運動-隆起・侵食)	18
表 4.2-1	検討対象ウラン廃棄物の核種組成 (放射能比)	19
表 4.2-2	還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出	21
表 4.2-3	各核種の処分施設からの放出係数	22
表 4.2-4	天然バリア中の移行経路に関するパラメータ	23
表 4.2-5	還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出	26
表 4.2-6	還元条件から塩水性条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出	26
表 4.2-7	天然バリアにおける分配係数の設定	27
表 4.2-8	公衆の被ばく線量の算出に関するパラメータ	32
表 4.2-9	農作物及び畜産物の摂取量	33
表 4.2-10	農作物及び畜産物への移行に関するパラメータ	34
表 4.2-11	農耕土壌の分配係数	35
表 4.2-12	内部・外部被ばく線量換算係数	36
表 4.2-13	評価核種の線量換算係数によってその寄与が考慮されている子孫核種	36
表 4.2-14	基本シナリオの基本ケースにおけるパラメータ設定	37
表 4.2-15	“気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオにおけるパラメータ設定	37
表 4.2-16	“気候変動-温暖化-海水準変動 (海進)”シナリオにおけるパラメータ設定	37
表 4.2-17	“気候変動-寒冷化-降水量減少”シナリオにおけるパラメータ設定	38
表 4.2-18	“気候変動-寒冷化-海水準変動 (海退)”シナリオにおけるパラメータ設定	38
表 4.2-19	“造構運動-隆起・浸食-表層剥離等”シナリオにおけるパラメータ設定	38
表 4.3-1	“気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオ評価ケース	39
表 4.3-2	“気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオ評価結果	40
表 4.3-3	“気候変動-温暖化-海水準変動 (海進)”シナリオ評価ケース	44
表 4.3-4	“気候変動-温暖化-海水準変動 (海進)”シナリオ評価結果	45
表 4.3-5	“気候変動-寒冷化-降水量減少/海水準変動 (海退)”シナリオ評価ケース	49
表 4.3-6	“気候変動-寒冷化-降水量減少/海水準変動 (海退)”シナリオ評価結果	50
表 4.3-7	“造構運動-隆起・浸食-表層剥離等”シナリオ評価ケース	53
表 4.3-8	“造構運動-隆起・浸食-表層剥離等”シナリオ評価結果	56
表 5-1	「基本シナリオ」の特徴の整理	61

1. はじめに

ウラン廃棄物の余裕深度処分に関しては H16 年度より昨年度まで下記の検討を実施してきている。H16 年度は、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 3 次中間報告）」（原子力安全委員会、平成 12 年 9 月、以下「第 3 次中間報告」という）をベースとして、廃棄体からの放射線の影響をほとんど考慮しないでよい等のウラン廃棄物の特徴を踏まえて、安全かつ合理的な処分概念の検討を実施した。

H17 年度は、基本的には H16 年度と同様に第 3 次中間報告をベースとして、余裕深度処分の処分施設環境の変化として当初還元環境下にあると考えられるものが、長期的には隆起現象や酸素を僅かに溶存した地下水が徐々に施設内に浸入することにより、還元環境から酸化環境へと変化する可能性があることを踏まえ、環境変化による溶解度や収着分配係数等の変化を踏まえた評価を実施した。その結果、想定した人工バリアに期待しない余裕深度処分概念について、長期間に亘る化学環境の変化（酸化性環境への変化）を考慮しても、一般公衆の被ばく線量は $10 \mu \text{Sv/y}$ を下回ることがわかった。

H18 年度は、現段階でサイトの特徴は不確定であり、実際のサイトにおける人工・天然バリア条件も変動が大きいと考えられることから、核種移行に関するパラメータの不確実性を考慮して、適切に設定したパラメータ範囲の中での包括的感度解析を実施し、被ばく線量とパラメータの相関関係について検討した。その結果、被ばく線量と大きな相関関係にあるパラメータは施設近傍の地下水流速及び天然バリアにおけるウランの分配係数であることがわかった。

今年度は、原子力安全委員会が取りまとめた「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」（平成 19 年 7 月）¹⁾（以下、「安全規制中間報告」という。）において示された、評価シナリオ区分や各シナリオにおける評価の目的、それぞれのシナリオに対する評価上のめやす線量を参考とし、これまで実施してきた安全評価との相違が大きいと考えられる「基本シナリオ」について、ウラン廃棄物余裕深度処分における「基本シナリオ」設定の考え方の検討を実施する。その結果を受けて、本検討で新たに設定した「基本シナリオ」について期間的なパラメータ変動を考慮した予察的な被ばく線量評価を実施し、ウラン廃棄物余裕深度処分の合理化に資する。

2. 実施内容

2.1 検討項目

以下の項目を実施する。

- (1) ウラン廃棄物余裕深度処分における「基本シナリオ」設定の考え方の検討
- (2) 基本シナリオにおける主要なパラメータの変動を考慮した予察的な被ばく線量評価
- (3) まとめ

2.2 検討内容

2.2.1 ウラン廃棄物余裕深度処分における「基本シナリオ」設定の考え方の検討

安全規制中間報告におけるシナリオの分類に関する考え方を参考に、ウラン廃棄物の余裕深度処分において特に重要と考えられる、将来起こることが確からしいと予見される一連の変化、並びに隆起や海水準変動などに起因する長期的な地形の変化、気候変動を考慮した地下水シナリオを検討し、本検討における「基本シナリオ」を整理する。この際、ウラン核種の半減期が長く、実質的に減衰が期待できないことから、特に余裕深度処分施設が地表環境に接近する状況を考慮する。

2.2.2 基本シナリオにおける主要なパラメータの変動を考慮した予察的な被ばく線量評価

「基本シナリオ」の検討結果に基づき設定したシナリオに対して、下記に示すようなパラメータの変動を考慮した予察的な被ばく線量評価を実施する。

- ・ 地表環境への接近時間（速度）
- ・ 移行距離
- ・ 地下水流速
- ・ 化学環境の変化に応じた核種移行パラメータ設定

線量評価モデルは、第3次中間報告のものをベースとする。

2.2.3 まとめ

「基本シナリオ」の検討及び被ばく線量評価をもとに、安全規制中間報告で示された基本シナリオの考え方を取り入れた場合における、人工バリアに期待しない合理的な余裕深度処分概念の成立条件の範囲について考察するとともに、課題を整理する。

3. ウラン廃棄物余裕深度処分における「基本シナリオ」設定の考え方の検討

3.1 基本シナリオの考え方

安全規制中間報告においては、シナリオの設定の考え方及びシナリオ区分が提示されている。その考え方は以下の通りである。

<安全規制中間報告>

長期安全性の評価にあたっては、様々な不確実性を考慮することが重要であり、処分システムの特長、性能に影響を与える可能性のある事象及びこれらによる処分システムの状態の変化に関する要素を体系的に収集・分析することによって、可能な限り網羅的、包括的にシナリオを選定する必要がある。(中略)

選定されたシナリオについて、リスク論的な考え方を踏まえた評価を行うためには、発生の可能性に着目した分類が必要である。すでに述べたように、その可能性を定量的に評価することは難しいが、シナリオの影響の程度を組み合わせた線量/確率分解アプローチにしたがって、3区分のシナリオを以下のように分類することが適当である。

- ① 発生の可能性が高く、通常考えられるシナリオ（以下「基本シナリオ」という。）
—めやす線量：10 μ Sv/y
- ② 発生の可能性は低いが、安全評価上重要な変動要因を考慮したシナリオ（以下「変動シナリオ」という。）
—めやす線量：300 μ Sv/y
- ③ 発生の可能性が著しく低い自然事象または偶発的な人為事象シナリオ（以下「人為・稀頻度事象シナリオ」という。）
—めやす線量：10mSv/y～100mSv/y

また、余裕深度処分に関する最新の動向としては、「総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会」（以下、「安全小委員会」という。）において取りまとめられた「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について（中間報告）」（平成 19 年 3 月）及び「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について（報告書）」（平成 20 年 3 月、以下、「安全小委余裕深度報告」という。）が挙げられる。

安全小委余裕深度報告は、余裕深度処分の事業化に向けて、国際的な安全基準等との整合性や諸外国の安全規制も参考にし、かつ原子力安全委員会の検討動向等も踏まえ、余裕深度処分に係る安全規制制度の検討を行ったものである。概要は以下の通りである。

埋設深度については、事業開始当初において、少なくとも地表面から 50m 以深の安定な地下に埋設することが適当であるとされている。また、埋設施設については、許可された基本設計ないし基本的設計方針で示される機能、性能の要求事項を要件とした基準とすること、事業者は建設時に得られる地質環境に関するデータを採取し、施設が基本設計ないし基本的設計方針通りであることを評価・確認しつつ建設を実現することが重要とされている。

廃棄体については、含まれる放射性物質の種類、量、濃度が許可された値以下であること、廃棄体自体への一定の閉じ込め機能、最終的処分に適した性状であることを求めている。

さらに、安全レビューを定期的に実施し、施設の長期的安全性が最新知見に照らしてもなお担

保される見通しを確認することや、事業者による積極的なモニタリングとデータの蓄積をすべきとしている。

記録の保存等については、事業廃止後においても、記録の保存を行うべきとして、国は有効な保存方法等について今後検討することが必要としている。

このように、放射性廃棄物の余裕深度処分に対して求められる事項が明らかになってきている。本検討の中で注目すべき点として、立地に関しては、少なくとも地表面から 50m より深いこととともに、安定な地下に埋設することが適当とされている。

この点に関連して、平成 19 年 10 月、原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会において、「安全審査の基本的考え方」の改訂に係るより詳細な検討のために、「第二種廃棄物埋設分科会」が設置されている。原子力安全委員会事務局から示された論点の整理（第 2 回分科会資料：二分第 2-1-3 号）によると、基本的立地要件のうち、地質環境の長期的変動の予測（評価）に関連する期間に関して、管理期間終了後、最大の線量が評価されるまでの期間（～約 10 万年）を提示している。分科会において論点に対して示された意見としては、地質環境変動について、過去の履歴に基づき相当な確度で推定が可能な期間は、サイトによって、また天然現象によって異なることから、時間スケールとしては、わが国全体の検討結果から、概ね 10 万年程度をめやすとするとされ、審議の背景となる考え方として整理されている。

3 区分のシナリオについては、同じく論点の整理の中で、下記のように整理されている。

基本シナリオは、深度による生物圏からの隔離が十分であるかどうかを判断する観点から、土地の隆起・侵食や海水準変動に起因する長期的な地形の変化、気候変動を考慮した地下水シナリオ

変動シナリオは、隔離性を維持しなければならない期間における変動要因、例えば隆起・侵食等に起因する地下水移行条件の比較的大きな変動や工学バリア性能の早い劣化などを考慮した地下水シナリオ

人為・稀頻度シナリオは、偶発的な土地の掘削シナリオが考えられるのに加えて、大規模地震等の突発的事象による影響等を念のため考慮した地下水シナリオ

また、日本原子力学会においては、現在、余裕深度処分の安全評価手法に関する学会標準が検討されている。この中では、管理期間終了後の安全評価シナリオを、処分システムに対して起こりうる可能性と関連づけて、表 3.1-1 のようにまとめている。

表 3.1-1 処分システムの状態設定と被ばく経路の組み合わせによるシナリオ分類

被ばく経路 ^{※1} 処分システム	一般的な被ばく経路	可能性の低い被ばく経路	極めて可能性が低い被ばく経路
可能性の高い状態	基本シナリオ	変動シナリオ	人為・稀頻度事象シナリオ
可能性のある変動状態	変動シナリオ	(変動シナリオ) ^{※2}	(人為・稀頻度事象シナリオ) ^{※2}
稀頻度状態	人為・稀頻度事象シナリオ	(人為・稀頻度事象シナリオ) ^{※2}	— ^{※3}

※1：放射性核種が生活環境に放出された後の被ばく経路

※2：()内は、可能性の低い状態となるので、慎重に判断する。

※3：極めて可能性の低い状態の組み合わせとなるので考慮しない。

この考え方に基づき、基本シナリオを設定すると、“一般的な被ばく経路”と、“処分システムに対して起こりうる可能性の高い状態”の組み合わせが基本シナリオとなりうる。

安全規制中間報告の定義によると、基本シナリオとは、過去及び現在の状況から、処分システム及び被ばく経路の特性並びにそれらにおいて将来起こることが確からしいと予見される一連の変化を考慮したものである。ここで、余裕深度処分施設が建設される場所は、基本的に安定な場所であり、10万年間といったオーダーでは、過去の履歴に基づき相当な確度で推定が可能であると仮定すると、数万年といったオーダーにおいては、天然バリアに関するパラメータが安定あるいは限定された幅での変動であると考えられることができる。

数万年といったオーダー以降では、天然バリア条件の大きな変動を伴いうるが、可能性のある変動状態とみなすことができることから、一般的な被ばく経路を「変動シナリオ」として設定することができる。数万年といったオーダー以降の時間軸においては、可能性の低い被ばく経路の取り扱いには慎重に判断する必要がある。

3.2 将来起こりうる確からしいと予見される変化の検討

安全規制中間報告におけるシナリオの分類に関する考え方を参考に、ウラン廃棄物の余裕深度処分において特に重要と考えられる、将来起こることが確からしいと予見される一連の変化、隆起・侵食、海水準変動などに起因する長期的な地形の変化、気候変動等について、10万年といったオーダーで起こる可能性が高い事象を考慮した地下水シナリオを検討し、本研究における「基本シナリオ」を整理する。

本検討において考慮する自然現象としては、過去の検討結果等を考慮して下記の項目を取り上げる。

- ・ 気候変動及び海水準変動
- ・ 隆起・侵食による地形の変動

一方で、処分施設の選定の段階で、過去の履歴に基づき避けることができる自然現象として、下記のを想定し、基本シナリオの検討範囲からは除外する。

- ・ 火山・火成活動
- ・ 地震・断層活動

気候変動及び海水準変動、隆起・侵食による地形の変動として想定しうる変化は、以下のよう
なものである。

気候変動：温暖化、あるいは寒冷化に伴って、気温の上昇(降水量増加)、気温の低下(降水量低
下)が起こると仮定できる。

海水準変動：海進、海退に伴って、水理場や水化学の変化が起こると仮定できる。また、侵食
営力の強さは侵食基準面により支配されるため、海面の変動は侵食速度に影響す
る。

隆起・侵食による地形変動：隆起に伴い、河川の下刻や海食を主要因とした侵食作用が生じる
と予測できる。第二次取りまとめ(JNC, 1999)²⁾によると、河川による下刻速度は
その流域の隆起速度にほぼ相当するとされている。

これらの自然現象は、厳密には異なる周期で繰り返されており、また、地域や元来の地形等によ
って複合的に変動しうるものである。しかし、本検討においては、サイト特性が明らかになっ
ていないことから、これらの自然現象が、評価上重要なパラメータに及ぼす影響を単純化して設
定し、解析ケースとの対応を設定することとする。

このためには、まず、現在から将来に向かってこれらの自然現象に伴って起こりうる影響に関
する一般的な知見を整理する。これらの知見を踏まえた上で、本検討における設定の考え方を示
すこととする。

3.2.1 気候変動(温暖化及び寒冷化)及び海水準変動（海進及び海退）に関する一般的な記述

現在は、間氷期のピークをわずかに過ぎた時期にあるとされる。十万年周期の氷期・間氷期
サイクルが今後も続くものとすれば、数千年以内に次の氷期が始まり、8～10 万年後には氷期
のピークに達すると考えられる。

氷期の環境としては、過去の事例から一般的に以下の様な想定が考えられる。

- ・ 氷期になると日本列島周辺では海面が 100m 程度低下する。(図 3.2-1)
- ・ 年平均気温が 10℃前後低下し、降水量が場所によっては現在の半分程度まで減少する。
- ・ 海岸地域（下流域）では侵食基準面の低下により河床の下刻が進むことや、河川流路が変
化することによって、地下水流動に影響が生じる。

氷期・間氷期サイクルにずれが生ずる、人間活動に伴う温暖化の影響を考慮するなどの場合
には、間氷期が継続することにより以下のような想定が考えられる。

- ・ 現在の海面(あるいは現在よりも 10m 程度高い海面)に向かって海面が上昇する。
- ・ 年平均気温が現在あるいはそれ以上に上昇し、降水量も現在あるいはそれ以上に増加する。
- ・ 海岸地域（下流域）では海進に伴い侵食基準面上昇等が生じ、地下水流動に影響が生じ
る。なお、現在の海水準からの上昇を想定する場合には、10m 程度と想定される。

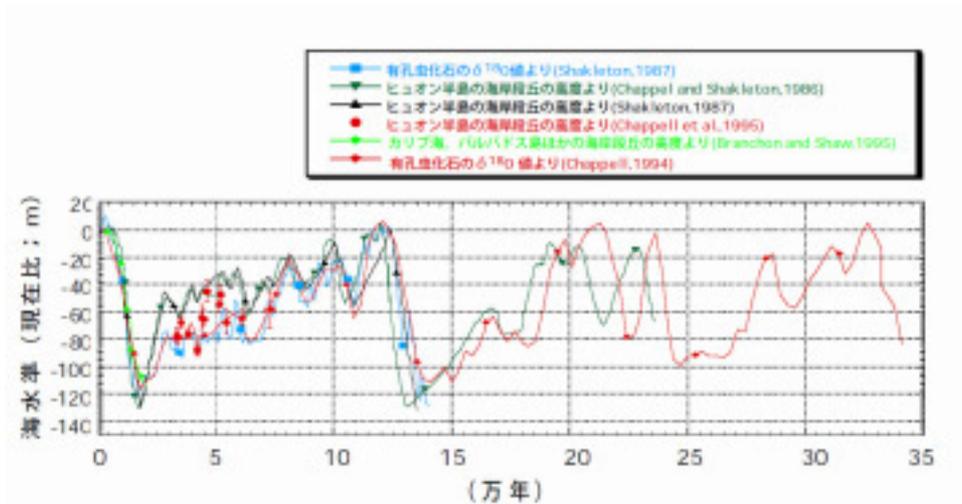


図 3.2-1 35 万年前以降の海水準変動(第 2 次取りまとめより抜粋)

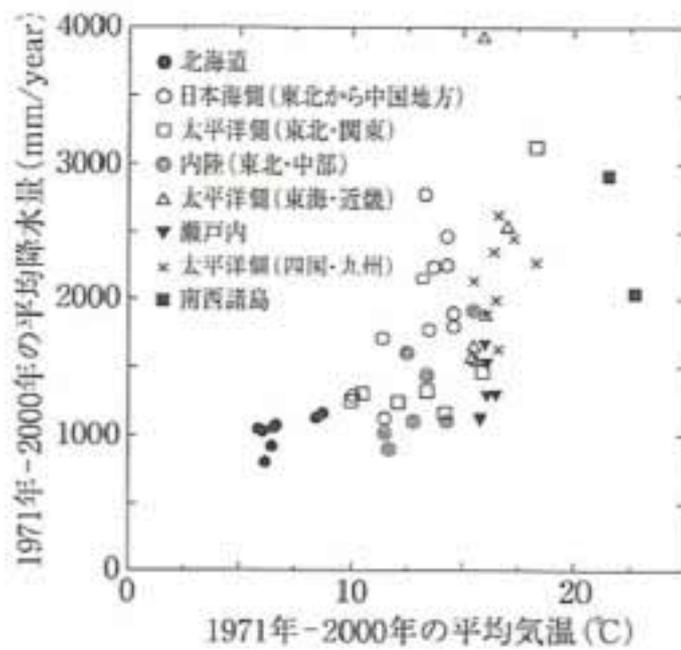


図 3.2-2 年平均気温と年平均降水量の関係(登坂、2006)

3.2.2 隆起・沈降及び侵食に関する一般的な記述

隆起に伴い、河川の下刻や海食を主要因とした侵食作用が生じると予測できる。第二次取りまとめによると、河川による下刻速度はその流域の隆起速度にほぼ相当するとされている。

隆起量と侵食量の関連については、藤原ほか(1999)は、流域全体の平均的な侵食量についてダムの堆砂量と地形面の起伏（基準高度分散量）に基づき検討した。これによると、図 3.2-3 に示すように、侵食量は第四紀以降の隆起量を反映しているとしている。また、その侵食量は、山岳部では 5.0mm/y を超える地域が一部あるものの、大部分の地域において、0.1~1mm/y 程度の幅であると推定できる。また、安定な地域であり、現在平坦な地形である地域に限ると、その侵食速度はさらに小さく見積もることができる。即ち、現在構成されている地形は、過去の河川、海水準変動に伴う侵食の結果形成されていることから、将来も同様の形態で侵食されると想定すると、侵食は現在の河川や斜面地形で卓越することになると考えられる(図 3.2-4)。また、このような侵食を長期間に渡って受けた後の地形は、侵食量が多い部分は沢や河川近くの斜面に、侵食量が比較的少ない部分は緩やかな勾配を持つことになる。

河川の下刻量の知見は、間氷期と氷期を繰り返したおよそ 10 万年間の海水準変動 1 周期間における平均的な下刻速度を示していることから、予測すべき期間がそれよりも短期間の場合は、温暖期（間氷期）もしくは寒冷期（氷期）の継続期間の設定により下刻量が変化する点に留意が必要である。間氷期及び氷期において侵食の観点から起こる現象は以下の通りである。

- ・ 間氷期では、降水量が増加し河川流量が多くなるため、上流域では下刻が進み、下流域ではその土砂が堆積する。
- ・ 氷期では、降水量が減少し、河川流量が少なくなる。上流域から下流域に運搬される土砂量はわずかである。また、現在の下流域に相当する地域では、海水準低下に伴い侵食基準面が低下し、下刻が進む。

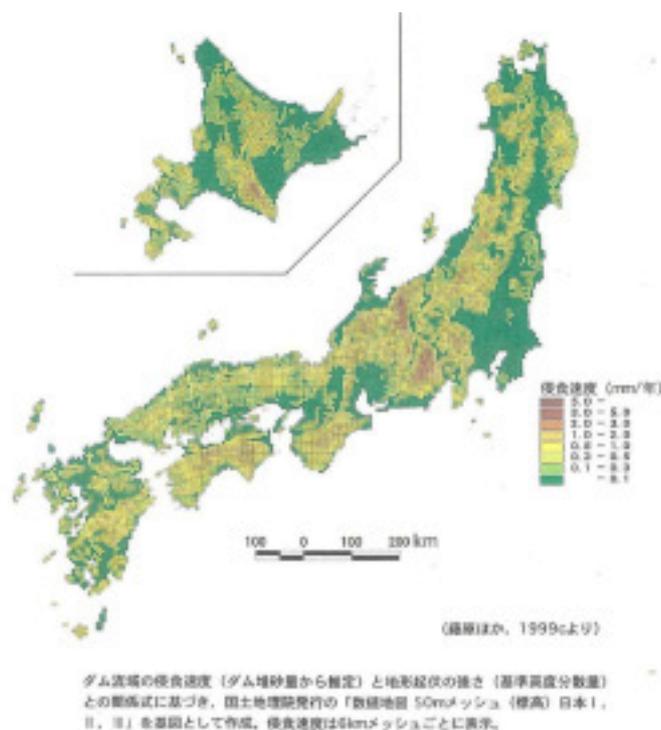


図 3.2-3 基準高度分散量から計算した全国の侵食速度の分布（藤原ほか、1999）

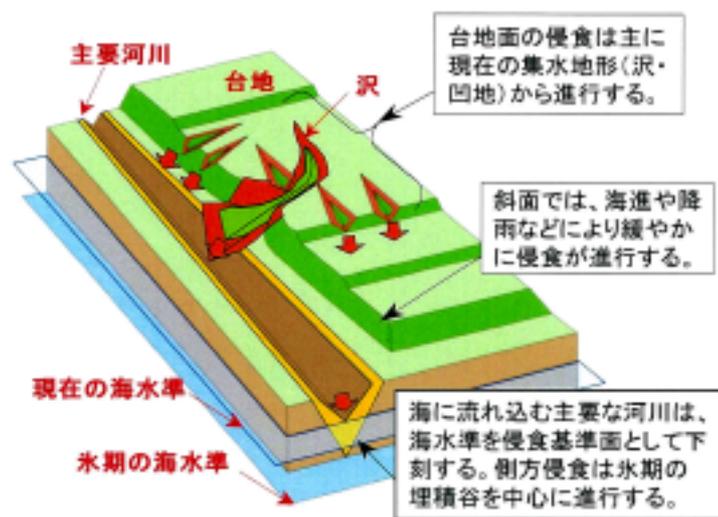


図 3.2-4 河川・沢による侵食形態(例)

3.2.3 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係

本検討において想定するウラン廃棄物の余裕深度処分概念においては、人工バリアにおける個別事象が核種移行パラメータに及ぼす影響は比較的小さい。これは、緩衝材を設置しない、合理的なバリア構成を検討していること、核種の減衰が期待できないことによる。ここで、平成16年度から平成18年度までの検討の結果、処分システムの挙動を検討するためには、熱、

水理、力学、化学、放射線場(THMCR)の環境条件を設定する必要がある。従来の処分システムの性能評価においては、基本となるシナリオでは現在の地質環境及び地表環境が将来にわたって変化しないことを前提にして、これらの環境条件を設定している。

前年度までの検討結果からウラン廃棄物の余裕深度処分において、核種移行に影響を与えるパラメータは、以下のものがあげられる。

- ・ 放射性核種の処分施設からの放出係数
- ・ 天然バリアの分配係数
- ・ 地下水流速(施設近傍及び施設近傍以外)
- ・ 処分施設から河川までの距離

本検討における生物圏の取り扱いは 4.2.5 節で検討する。

本項では、前項で整理した将来起こりうる確からしいと予見される変化、即ち気候変動に伴う降水量の変化及び海水準の変動、並びに隆起・侵食に伴う地形の変動によって、上記の4つのパラメータが受ける影響を単純化して設定し、解析ケースとの関連を整理する。解析ケースとの関連整理は、以下の手順により実施する。

- ① パラメータが受ける影響を設定する。この際、パラメータが受ける影響は単純化した設定を行うが、性能評価パラメータに影響を及ぼすまでの事象の繋がりは、合理的な根拠に基づく必要がある。そこで、それぞれの影響設定に対して、規定した事象の概要を記述する。
- ② 解析ケースの設定を行うためには、パラメータがどのような影響を、どの程度受けるのかを記述する必要がある。ここでは、余裕深度処分施設は、地表から例えば 50～100m 地下の安定な地層に設置されるという前提に基づいて変化の程度を設定する。
- ③ 解析ケースによる取り扱いでは、パラメータへの影響の程度が大きい場合や、化学環境の変化のように、評価上の意味合いが大きいと考えられる場合にはパラメータの変動を考慮する。

以上の手順によって整理した、基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係及び解析ケースでの取り扱いを表 3.2-1～表 3.2-5に示す。

表 3.2-1 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係（温暖化-降水量増加）

現象	変化	影響を受けるパラメータ*	パラメータへの影響	影響として規定した事象の記述	規定した事象によるパラメータの変化の程度	解析ケースでの取り扱い
気候変動	温暖化 降水量増加	放出係数	処分施設からの放射性核種の放出量が増える。	降水量の増加に伴う処分場地下水面上昇により、動水勾配が大きくなり、施設近傍の地下水流速が大きくなる。これに伴い、施設への浸入出水量は増加し、施設の変質は進展する。	岩盤中に隔離された施設に対する変化は小さく、考慮するまでもない。	不変
		天然バリアにおける分配係数	化学的環境の変化に応じて変化する。	降水量の増加に伴う処分場地下水面上昇により、動水勾配が大きくなり、施設近傍の地下水流速が増加する。これに伴い、岩盤（天然バリア）の変質が進展する。	降水の影響は地表近傍において顕著であるが、岩盤に対する変化は小さく、考慮するまでもない。	不変
		施設近傍の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	降水量の増加に伴う処分場地下水面上昇により、動水勾配が大きくなり、施設近傍の地下水流速が大きくなる。	基本的に小さいが増加する。ただし、隔離された岩盤に対する変化は動水勾配及び透水係数の増加の程度に依存する。	増加
		施設近傍以外の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	降水量の増加に伴う処分場地下水面上昇により、動水勾配が大きくなり、地下水流速が大きくなる。	基本的に増加する。ただし、動水勾配の増加に依存する。	増加
		核種移行距離	核種中の移行距離は変化しない。	降水量の変化は施設の位置に影響しない。河川は一時的に増水しても処分場の位置関係は維持される。	核種移行距離は変化しない。	不変

表 3.2-2 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (温暖化・海水準変動 (海進))

現象	変化	影響を受けるパラメータ*	パラメータへの影響の設定	影響として規定した事象の記述	規定した事象によるパラメータの変化の程度	解析ケースでの取り扱い
気候変動	温暖化	放出係数	放射性核種の処分施設からの放出量が変化する。	海岸線が処分施設に近づき、動水勾配が小さくなり、施設近傍の地下水流速が小さくなり、施設の変質が緩やかになる。	岩盤中に隔離された施設内に対する変化は小さく、考慮するまでもない。	不変
		天然バリアにおける分配係数	化学的環境が塩水性環境に近づく。	海岸線が処分施設に近づき、処分場周辺の岩盤 (天然バリア) の地下水が海水の影響を受ける。	隔離された岩盤に対する変化は小さいと考えられるが、塩水性環境に変化したときの影響は大きい可能性がある。	塩水化 (感度確認)
気候変動	海進 (海水準変動)	施設近傍の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	海岸線が処分施設に近づき動水勾配が小さくなり、地下水流速が増加・地下水面上昇で動水勾配が大きくなり、地下水流速が大きくなる。変化は両者の関係のトレードオフになる。	動水勾配の減少と降水量の増加とのトレードオフであるが、流量増加はU及び子孫核種の移行を促進することから、ここでは増加すると想定する。ただし、隔離された岩盤に対する変化は動水勾配及び透水係数の増加の程度に依存する。	増加
		施設近傍以外の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	海岸線が処分施設に近づき、地下水流速が小さくなる。他方、降水量の増加・地下水面上昇で、地下水流速が大きくなる。変化は両者の関係のトレードオフになる。	動水勾配の減少と降水量の増加とのトレードオフであるが、流量増加はU及び子孫核種の移行を促進することから、ここでは増加すると想定する。ただし、動水勾配の増加に依存する。	増加
		核種移行距離	岩盤中の移行距離は変化しない。	海進は施設の位置に影響しないと考える。海岸線が前進しても、河川と処分場の位置関係は維持されると考える。	核種移行距離は変化しない。	不変

表 3.2-3 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (寒冷化-降水量減少)

現象	変化	影響を受けるパラメータ*	パラメータへの影響の設定	影響として規定した事象の記述	規定した事象によるパラメータの変化の程度	解析ケースでの取り扱い
気候変動	降水量減少	放出係数	処分施設からの放射線核種の放出量が減少する。	降水量の減少に伴い処分場近傍の地下水面が下降し、動水勾配が小さくなり、施設近傍の地下水流速が小さくなる。これに伴い、施設への浸入水量は減少し、施設の変質は緩やかになる。	岩盤中に隔離された施設に対する変化は小さく、考慮するまでもない。	不変
		天然バリアにおける分配係数	化学的環境の変化に応じて変化する。	降水量の減少に伴い処分場近傍の地下水面が下降し、動水勾配が小さくなり、施設近傍の地下水流速が小さくなる。これに伴い、岩盤(天然バリア)の変質は緩やかになる。	降水の影響は地表近傍において顕著であるが、岩盤に対する変化は小さく、考慮するまでもない。	不変
		施設近傍の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に小さくなる。	降水量の減少に伴い処分場近傍の地下水面が下降し、動水勾配が小さくなり、施設近傍の地下水流速が小さくなる。	基本的に変化は小さいが減少する。ただし、隔離された岩盤に対する変化は動水勾配の減少の程度に依存する。	減少
		施設近傍以外の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に小さくなる。	降水量の減少に伴い処分場近傍の地下水面が下降し、動水勾配が小さくなり、地下水流速が小さくなる。	基本的に減少する。ただし、動水勾配の減少に依存する。	減少
		核種移行距離	岩盤中の移行距離は変化しない。	降水量の変化は施設の位置に影響しない。河川は一時的に減水しても処分場の位置関係は維持される。	核種移行距離は変化しない。	不変

表 3.2-4 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係 (寒冷化-海水準変動 (海退))

現象	変化	影響を受けるパラメータ*	パラメータへの影響	影響として規定した事象の記述	規定した事象によるパラメータの変化の程度	解析ケースでの取り扱い
気候変動	海退 (海水準変動)	放出係数	放射性核種の処分施設からの放出量が変化する。	海岸線が処分施設から離れ、動水勾配が大きくなり、地下水の循環域が処分場環境に達する。その結果、大気 (酸素) を多く含む降水 (地下水) の影響で施設内が酸化性環境になる。それに伴い、施設の変質劣化も進展する。	岩盤中に隔離された施設内に対する変化は小さいと考えられることから、変化しないとする。	不変
			天然バリアにおける分配係数	分配係数が環境変化に応じて変化する。	海岸線が処分施設から離れ、動水勾配が大きくなり、地下水の循環域が移行経路に達する。その結果、大気 (酸素) を多く含む降水 (地下水) の影響で移行経路が酸化性環境になる。	隔離された岩盤に対する変化は小さいと考えられることから、変化しないとする。
寒冷化	海退 (海水準変動)	施設近傍の領域の地下水流速	地下水流速が変化する。	海岸線が処分施設から離れ、動水勾配が大きくなり、施設近傍の地下水流速が大きくなる。一方で、降水量の減少に伴い処分場地下水面が下降し、動水勾配が小さくなることで、地下水流速が小さくなる。変化は両者の関係のトレードオフになる。	地下水流速は大きくも小さくもなりうる。ここでは、動水勾配に対する降水量減少の影響は、海退の影響より大きいと考え、流速は減少するとする。	減少 (感度確認)
			施設近傍以外の領域の地下水流速	地下水流速が変化する。	海岸線が処分施設から離れ、動水勾配が大きくなり、地下水流速が大きくなる。一方で、降水量の減少に伴い処分場地下水面が下降し、地下水流速が小さくなる。変化は両者の関係のトレードオフになる。	地下水流速は大きくも小さくもなりうる。ここでは、動水勾配に対する降水量減少の影響は、海退の影響より大きいと考え、流速は減少するとする。
		核種移行距離	移行距離は変化しない。	海退は施設の位置に影響しないと考える。海岸線の後退は河川と処分場との位置関係に影響しないと考える。	核種移行距離は変化しない。	不変

表 3.2-5 基本シナリオで考慮すべき自然現象と核種移行に影響を与えるパラメータの関係（造構運動・隆起・侵食）

現象	変化	影響を受けるパラメータ*	パラメータへの影響	影響として規定した事象の記述	規定した事象によるパラメータの変化の程度	解析ケースでの取り扱い
造構運動	隆起・侵食	放出係数	放出係数が施設内環境の変化に応じて変化する。	表層の削剥及び河食等により降水系地下水の循環域が処分場環境に達する。その結果、大気（酸素）を多く含む降水（地下水）の影響で施設内が酸化性環境になる。それに伴い、施設の劣化も進展する。	放出係数が酸化性環境の値に変化する。	酸化性
			天然バリアにおける分配係数	分配係数が環境変化と風化変質に応じて変化する。	表層の削剥及び河食等により降水系地下水の循環域が処分場環境に達する。その結果、大気（酸素）を多く含む降水（地下水）の影響で移行経路が酸化性環境になる。それに伴い、岩盤が風化変質する。	岩盤の分配係数が酸化性環境の値に変化する。
造構運動	表層の削剥側方侵食河食	施設近傍の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	表層の削剥及び河食等により降水系地下水の循環域が処分場環境に達する。その結果、大気（酸素）を多く含む降水（地下水）の影響で移行経路が酸化性環境になる。それに伴い、岩盤が風化変質して透水係数が大きくなる。	基本的に増加する。ただし、離隔された岩盤の動水勾配及び透水係数の増加の程度に依存する。	増加
			施設近傍以外の領域の地下水流速	地下水流速は全体的に大きくなる。	表層の削剥及び河食等により降水系地下水の循環域が深くなり、施設近傍以外でも地下水流速が大きくなる。	基本的に増加する。ただし、動水勾配の増加に依存する。
		核種移行距離	施設深度の変化に応じて変化する。	表層の削剥及び河食等により、処分場と河川の位置関係が短くなる。	核種移行距離は短くなる。	減少

3.2.4 発端事象が処分システム性能に及ぼす影響の時間軸を考慮した整理

ここでは、人工バリア、天然バリアに対して、3.2.3 項で考慮した発端事象（隆起・侵食、気候変動・海水準変動）の有無ごとに、核種移行パラメータの変化に至るような変動が起こりうるか、また、起こる場合には、それは処分後のいつの時期かをマトリックスとして整理する。この際、線量評価モデルは第3次中間報告のものをベースとすることを考慮して、マトリックスへの整理結果は、最終的に上記の4つのパラメータへの影響として整理し、被ばく線量評価のケース設定に用いるものとする。なお、生物圏については、具体的なサイト特性に大きく依存することから、本検討においては安全評価を実施するために、現在の人の生活様式に基づいて典型的と考えられる経路を設定すること、即ち「様式化」することとする。

ケース設定に当たっては、過去の履歴に基づき相当な確度で推定が可能な期間は概ね10万年程度をめやすとできることを前提として、これよりも短い期間においてもパラメータが変動しうることを想定して、1万年後、5万年後にパラメータ変動が生じるケースを想定する。これにパラメータが変動しないケース（基本ケース）及び処分開始直後から変動後のパラメータを設定したケースを加えたパラメータスタディを実施する。

表 3.2-6~表 3.2-10 には、前項で検討した5つの長期的変動による変件事象（温暖化-降水量増加、温暖化-海水準変動（海進）、寒冷化-降水量減少、寒冷化-海水準変動（海退）、造構運動-隆起侵食）について、核種移行に影響を与えるパラメータ毎の変化の有無及び変化の方向について整理した結果を示した。

表 3.2-6 パラメータの時間変化に関する設定（温暖化-降水量増加）

パラメータ	1 万年	5 万年	10 万年
放出係数	不変	不変	不変
天然バリアにおける分配係数	不変	不変	不変
施設近傍の領域の地下水流速	増加	増加	増加
施設近傍以外の領域の地下水流速	増加	増加	増加
処分施設から河川までの距離	不変	不変	不変

表 3.2-7 パラメータの時間変化に関する設定（温暖化-海水準変動（海進））

パラメータ	1 万年	5 万年	10 万年
放出係数	不変	不変	不変
天然バリアにおける分配係数	塩水性	塩水性	塩水性
施設近傍の領域の地下水流速	増加	増加	増加
施設近傍以外の領域の地下水流速	増加	増加	増加
処分施設から河川までの距離	不変	不変	不変

表 3.2-8 パラメータの時間変化に関する設定（寒冷化-降水量減少）

パラメータ	1 万年	5 万年	10 万年
放出係数	不変	不変	不変
天然バリアにおける分配係数	不変	不変	不変
施設近傍の領域の地下水流速	減少	減少	減少
施設近傍以外の領域の地下水流速	減少	減少	減少
処分施設から河川までの距離	不変	不変	不変

表 3.2-9 パラメータの時間変化に関する設定（寒冷化-海水準変動（海退））

パラメータ	1 万年	5 万年	10 万年
放出係数	不変	不変	不変
天然バリアにおける分配係数	不変	不変	不変
施設近傍の領域の地下水流速	減少	減少	減少
施設近傍以外の領域の地下水流速	減少	減少	減少
処分施設から河川までの距離	不変	不変	不変

表 3.2-10 パラメータの時間変化に関する設定（造構運動-隆起・侵食）

パラメータ	1 万年	5 万年	10 万年
放出係数	酸化性	酸化性	酸化性
天然バリアにおける分配係数	酸化性	酸化性	酸化性
施設近傍の領域の地下水流速	増加	増加	増加
施設近傍以外の領域の地下水流速	増加	増加	増加
処分施設から河川までの距離	減少	減少	減少

4. 基本シナリオにおける主要なパラメータの変動を考慮した予察的な被ばく線量評価

4.1 評価シナリオ

第3章における基本シナリオの分析結果より、被ばく線量評価では以下のシナリオについて検討することとした。

- ① “気候変動-温暖化-降水量増加” シナリオ
- ② “気候変動-温暖化-海水準変動（海進）” シナリオ
- ③ “気候変動-寒冷化-降水量減少” シナリオ
- ④ “気候変動-寒冷化-海水準変動（海退）” シナリオ
- ⑤ “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオ

各シナリオ評価で用いるパラメータの設定については、次項で述べる。

4.2 線量評価パラメータの設定

4.2.1 解析手法

解析には、「ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討(3)」³⁾（以下、「H18年度報告書」とする。）と同様に、“GoldSim⁴⁾”を用いた。

4.2.2 廃棄体に関するパラメータ

(1) 対象廃棄物

検討対象廃棄物はウラン廃棄物とし、天然ウランの核種組成を持つものとした。ウラン廃棄物の核種組成を表 4.2-1に示す。

表 4.2-1 検討対象ウラン廃棄物の核種組成（放射能比）

対象ウラン廃棄物	核種	放射能比
天然ウラン	U-234	0.49
	U-235	0.023
	U-238	0.49

(2) 廃棄物物量及び初期インベントリの設定

検討対象とするウラン廃棄物の物量は、「H18年度報告書」と同様に、日本原子力研究開発機構による「平成17年度放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2)」⁵⁾（以下、「JAEA・H17長期的評価手法」とする）を参考に、JAEA（旧核燃料サイクル開発機構・東海事業所及び人形峠環境技術センター、2048年度末まで）、JNFL（2050年度末まで）及びウラン燃料加工事業者（2050年度末まで）において排出されるウラン廃棄物のうち、1Bq/g以上の全てのウラン廃棄物を対象とした場合の物量99,920本（200Lドラム缶換算）を参考に、10万本と設定した。

初期インベントリは、「H18 年度報告書」において廃棄体物量 10 万本の場合もインベントリはそのままとしたため、本年度においても $1.25E+13Bq$ に設定した。

(3) 廃棄体の密度及び空隙率

廃棄体の密度及び空隙率は、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」⁶⁾(以下、「第3次中間報告」とする)を参考に、見かけ密度 $2.5g/cm^3$ 、空隙率 0.2 (施設は周辺地質環境と同等の特性であると仮定する) と設定した。

(4) 解析対象とする核種

解析対象とする核種は、U-238、U-235 及び U-234 と、これらを親核種とする子孫核種とした。半減期が短く親核種と放射平衡として扱える核種については、生物圏評価の被ばく線量算出にあたり、親核種の線量換算係数に娘核種の影響を包含させることで考慮することとした。

解析対象とする核種を以下に示す。包含される子孫核種については、後述する表 4.2-13 に詳細を示す。

- ・ U-238→U-234→Th-230→Ra-226→Pb-210 (Po-210)
- ・ U-235→Pa-231→Ac-227
- ・ U-234→Th-230→Ra-226→Pb-210 (Po-210)

4.2.3 処分施設に関するパラメータ

(1) 処分施設形状

処分施設の設計は「ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討」⁷⁾における合理化処分概念 C (岩盤空洞内トレンチ処分概念) に従うとし、「H18 年度報告書」と同様に廃棄体本数 10 万本における施設寸法を $240m \times 10m \times 10m \times 2$ 本とした。合理化処分概念 C を図 4.2-1 に、廃棄体本数が 10 万本の場合の処分坑道レイアウトを図 4.2-2 に示す。

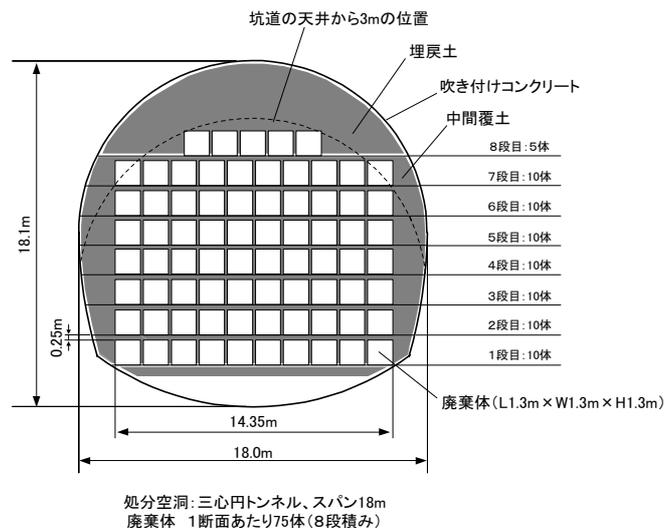


図 4.2-1 合理化処分概念 C

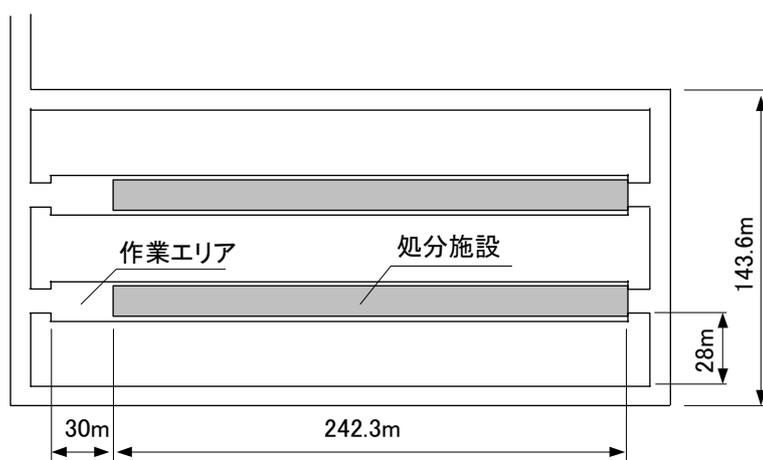


図 4.2-2 廃棄体本数 10 万本の場合の処分坑道レイアウト

(2) 放出係数

処分施設からの放出係数については、第3章で定義した“基本シナリオ”の考え方から、還元性条件下（基本値）及び酸化性条件下（酸化性パラメータ）における値を設定した。

各核種の処分施設からの放出係数の基本値は、「第3次中間報告」を参考に基本値を $3.0E-4$ と設定した。

処分施設が酸化性条件となった場合の放出係数としては、「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」⁸⁾（以下、「TRU2次レポート」とする）を参考とした。基本値に「還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率」を乗ずることで設定した。還元条件については廃棄体グループ1におけるセメントモルタルの分配係数を、酸化条件については廃棄体グループ3（硝酸塩の影響を考慮している）におけるセメントモルタルの分配係数を用いた。変化率の算出方法を表 4.2-2に、また各核種の処分施設からの放出係数を表 4.2-3にまとめる。

表 4.2-2 還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出

核種	①TRU2次レポートにおけるセメントモルタルに関する分配係数 (Gr.1 還元条件) [m ³ /kg]	②TRU2次レポートにおけるセメントモルタルに関する分配係数 (Gr.3 硝酸塩影響) [m ³ /kg]	還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率 ②/①
U	0.25	0.025	0.1
Th	0.25	0.25	1
Ra	0.00125	0.00125	1
Pb	0.0125	0.0125	1
Pa	0.25	0.25	1
Ac	0.25	0.25	1

表 4.2-3 各核種の処分施設からの放出係数

核種	基本値 [-] (分配係数 [m ³ /kg])	酸化条件下の放出係数 [-] (分配係数 [m ³ /kg])
U	3.0E-4 (1.3E+0)	3.0E-5 (1.3E-1)
Th		3.0E-4 (1.3E+0)
Ra		
Pb		
Pa		
Ac		

注：()内は放出係数に相当する「処分施設における分配係数[m³/kg]」を示す。なお、これ以降においては、用語として「処分施設における分配係数」を用いて議論することとする。

(3) 施設侵入水量

「第3次中間報告」における選定方法を参考とした。「第3次中間報告」では、施設は周辺地質環境と同等の特性であると仮定している。“施設近傍の領域”の地下水実流速がリファレンス値 1.0E-3m/d、空隙率 0.2 であるとき、施設への浸入水量は 7.3E-2m/y となる。これを浸入水量のリファレンス値とする。

(4) 溶解度

本研究で検討する地下水移行シナリオにおいては、地下水中に核種が沈殿しないと考えることが保守的な評価となる。一方、跡地利用シナリオでは、地下水中に核種が沈殿し、処分施設に核種が残存していることが保守的な評価となる。本研究で検討するシナリオは、「長期的な地形の変化、気候変動を考慮した地下水シナリオ」であることから、沈殿は発生しないと考えることとした。

4.2.4 天然バリアに関するパラメータ

(1) 移行経路に関するパラメータ

処分施設から浸出した核種の移行経路は、「第3次中間報告」における選定方法を参考とし、“施設近傍の領域”及び“施設近傍以外の領域”内を移動して生物圏に放出されると想定した。想定した評価モデルの概要図を図 4.2-3に、地下水移行シナリオにおいて想定される被ばく経路を図 4.2-4に示す。

移行経路に関するパラメータは、「第3次中間報告」を参考として設定した。それぞれのパラメータ設定値を表 4.2-4に示す。これらのパラメータは、基本シナリオの被ばく線量評価における基本ケースの設定値（基本値）となる。

施設近傍及び施設近傍以外の地下水流速については、第3章で定義した“基本シナリオ”の考え方から、地下水流速が増加及び減少した場合の値を設定した。地下水流速の増加については10倍または30倍とし、減少については0.1倍または0.01倍と設定した。

同様に“基本シナリオ”の考え方から、河川までの距離の減少についても設定した。施設近傍の地下水移行距離については「第3次中間報告」では200mを確保することとなっていることか

ら、この距離は環境の変化においても確保されると仮定し、施設近傍以外の地下水移行距離を100m 及び200m と設定した。

これらのパラメータの設定に関する詳細は、後述する。

表 4.2-4 天然バリア中の移行経路に関するパラメータ

パラメータ	設定値 (基本値)
河川までの距離	500
施設近傍の天然バリア密度 [g/cm ³]	2.6
施設近傍の天然バリア空隙率 [-]	0.2
施設近傍の地下水の実流速 [m/d]	1.0E-3
施設近傍の地下水の移行距離 [m]	200
施設近傍以外の天然バリア密度[g/cm ³]	2.6
施設近傍以外の天然バリア空隙率[-]	0.3
施設近傍以外の地下水の実流速[m/d]	1.0E-2
施設近傍以外の地下水の移行距離[m]	300

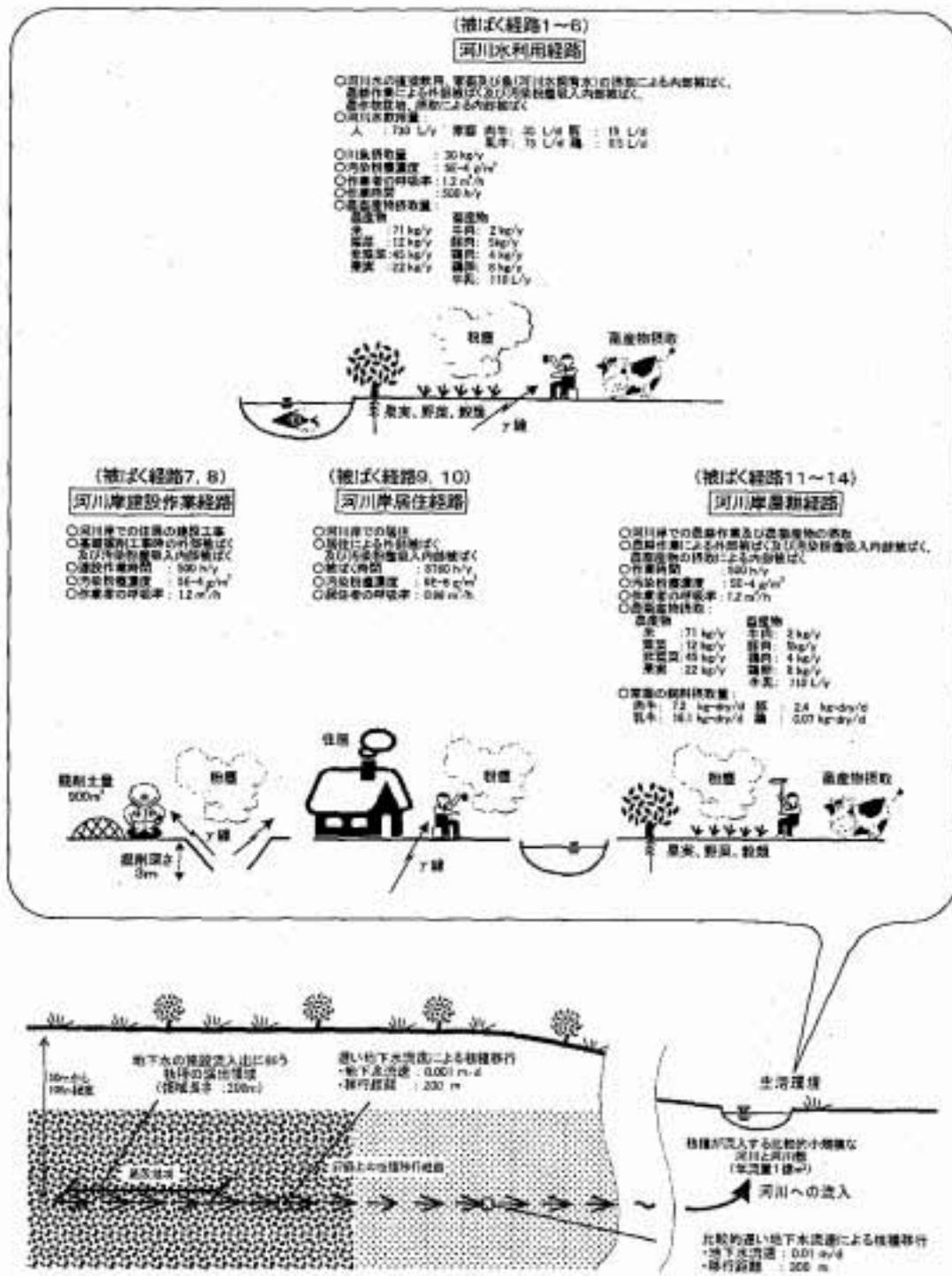


図 4.2-3 想定した核種移行評価モデル

(原子力安全委員会、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について (第3次中間報告)」(平成12年9月14日)より引用)

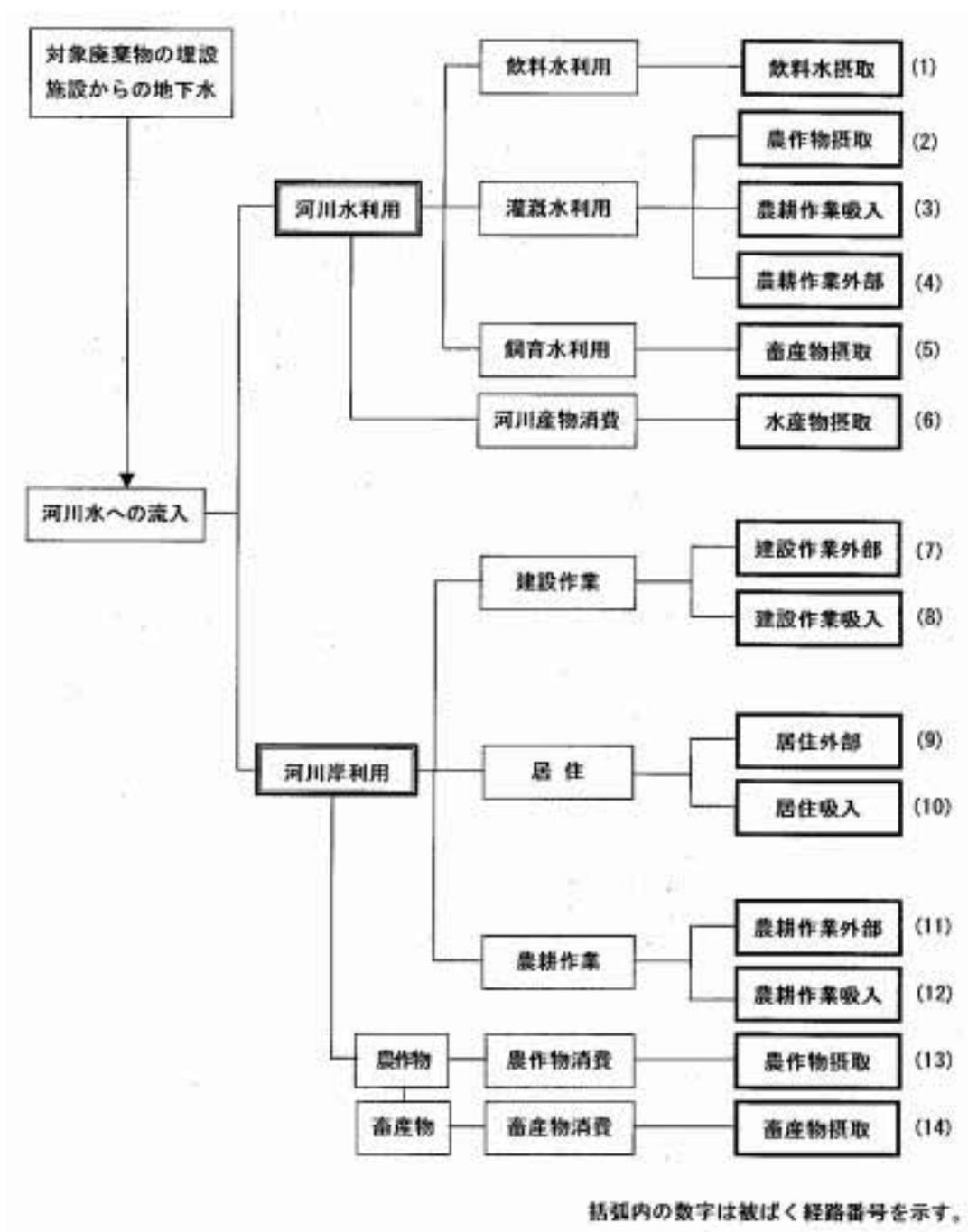


図 4.2-4 地下水移行シナリオにおいて想定される被ばく経路

(原子力安全委員会、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について (第3次中間報告)」(平成12年9月14日)より引用)

(2) 天然バリアの分配係数

天然バリアにおける分配係数については、第3章で定義した“基本シナリオ”の考え方から、還元性である条件(基本値)、酸化条件下(酸化性パラメータ)及び塩水性条件下(塩水性パラメータ)における分配係数を設定した。

分配係数の基本値の設定にあたっては、「H18 年度報告書」と同様に、「平成 16 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2)」⁹⁾ (以下、「JAEA・H16 長期的評価手法」とする) において“政令余裕深度処分評価パラメータ選定手順準拠”として設定された値を参考とした。

移行経路が酸化条件となった場合の分配係数としては、放出係数の場合と同様に「TRU2 次レポート」を参考とし、基本値に「還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率」を乗ずることで設定した。変化率の算出方法を表 4.2-5 にまとめる。

移行経路が塩水性条件となった場合の分配係数としては、旧核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」¹⁰⁾ (以下、「H12 レポート」とする) 参考とし、基本値に「還元条件から塩水性条件へ変化した場合の分配係数の変化率」を乗ずることで設定した。還元条件については降水系における岩盤の分配係数を、塩水性条件については海水系における岩盤の分配係数を用いた。変化率の算出方法を表 4.2-6 にまとめる。

以上より設定した天然バリアにおける分配係数の設定値を表 4.2-7 に示す。

表 4.2-5 還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出

核種	①TRU2 次レポートにおける母岩に関する分配係数 (Gr.1 還元条件) [m ³ /kg]	②TRU2 次レポートにおける母岩に関する分配係数 (Gr.3 酸化条件) [m ³ /kg]	還元条件から酸化条件へ変化した場合の分配係数の変化率 ②/①
U	1	0.005	0.005
Th	1	1	1
Ra	0.5	0.05	0.1
Pb	0.1	0.1	1
Pa	1	0.005	0.005
Ac	5	5	1

表 4.2-6 還元条件から塩水性条件へ変化した場合の分配係数の変化率の算出

核種	①H12 レポートにおける岩盤中分配係数 (降水系) [m ³ /kg]	②H12 レポートにおける岩盤中分配係数 (海水系) [m ³ /kg]	還元条件から塩水性条件へ変化した場合の分配係数の変化率 ②/①
U	1	1	1
Th	1	1	1
Ra	0.5	0.05	0.1
Pb	0.1	0.1	1
Pa	1	1	1
Ac	5	5	1

表 4.2-7 天然バリアにおける分配係数の設定

核種	基本値※ [m ³ /kg]	酸化条件 [m ³ /kg]	塩水性条件 [m ³ /kg]
U	0.1	0.0005	0.1
Th	1	1	1
Ra	0.05	0.005	0.005
Pb	0.1	0.1	0.1
Pa	0.1	0.0005	0.1
Ac	1	1	1

※JAEA：“平成 17 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2) [ウラン・TRU 廃棄物の基準整備に係る調査]” (2006) を参考とした。

(3) 溶解度

処分施設に関するパラメータと同様に、保守的に沈殿は発生しないと考えた。

(4) 地下水流速の変動に関する検討

基本シナリオに関する分析の結果（表 3.2-1～表 3.2-5 参照）、全てのシナリオにおいて地下水流速の変動が関わることがわかった。この結果を受けて、ここでは地下水流速の変動に関する検討を行う。

a. 地下水流速の増加に関する検討

基本シナリオのうち、“気候変動・温暖化”シナリオでは、地下水流速が増加する事象が検討されている。地下水流速が増加する要因としては、以下の 2 つの条件が挙げられる。

- ・ 条件 1：移行経路（岩盤）の透水係数（kw）が大きくなること。
- ・ 条件 2：動水勾配（i）が大きくなること。

本評価においては、kw と i の複合的な変動の結果として、地下水流速の変化率（倍率）が 10 倍となることは十分あり得るため、この変化を想定し、被ばく線量評価の 1 ケースとする（ケース 1：地下水流速 10 倍ケース）。

また、本来「基本ケース」の評価ではサイト特有の条件において想定される変動幅を設定すべきであるが、本評価実施の時点においてサイトが決定されていないことからそれは不可能である。したがって、地下水流速増加の影響を評価するに当たっては、i 及び kw のより大きめの変動を想定し、結果に及ぼす影響を明らかにしておくことは有意義と考えられる。そこで、地下水流速が 10 倍以上となる場合についてどの程度まで考慮すべきかについて検討する。地下水流速が 10 倍以上となるケースとしては、透水係数（kw）または動水勾配（i）のどちらかが 10 倍となり、他方が x 倍となることが条件（一方が y 倍、他方が z 倍となるケースはこれに包含される）となる。例えば、地下水流速が 100 倍まで増加することを想定した場合、i または kw の一方が 100 倍となるか、ともに 10 倍となるケースが考えられる。kw が 10 倍となると想定した場合、施設近傍以外の kw は 3.5E-3cm/sec となり、「地下水ハンドブック」によれば、この値は破碎帯

の岩や砂・シルトの kw に相当する。処分施設周辺の岩が気候変動によって kw を大きくするような影響（風化など）を受けることは考え難い。また、 i の変化については「地層処分研究開発第2次取りまとめ」によれば、 i の分布幅として 0.0001~0.1 であるとされており基本ケースで設定されている 0.01 の 10 倍まで分布しているが、特定されたサイトで降水量増加などによる地下水面上昇により地下水位の高低差が 10 倍になることは考えにくい。よって、地下水流速の変化率を 100 倍とする設定は過剰なものであると考えられる。

そこで、地下水流速の変化率を何倍まで見るのが適当であるかについて、評価結果の有意性を判断の目安として、地下水流速と最大被ばく線量（全核種によるトータル被ばく線量）の関係を確認した。その結果を図 4.2-5 に示す（地下水流速の変化が 20 万年後に起こることを想定した場合の、地下水流速の変化率に関する被ばく線量評価結果である）。これより、地下水流速の変化率が 25 倍程度であるケースを境界として、地下水流速の変化率と最大被ばく線量の関係性（近似曲線の傾き）が変化することがわかった。これより、地下水流速の変化率が 25 倍を境界としてそれ以上、及びそれ以下について線量評価を行うことで、その他の変化率における最大被ばく線量の予測が可能であると考えられた。

以上の検討より、

- ① 地下水流速の変化率を 100 倍とする設定は、本研究の線量評価においては過剰であると考えられること。
- ② 地下水流速の変化率約 25 倍を境界として、最大被ばく線量に対する支配核種が変化すること。（図 4.2-6 参照）
- ③ 地下水流速の変化率約 25 倍以下及び以上においては、代表的な変化率を選択し線量評価を行うことで、地下水流速の倍率に対する最大被ばく線量の値を予測することができる。ということが考えられる。そこで本評価では、最大被ばく線量が明らかに地下水流速 10 倍ケースとは異なる傾向にあり、かつ、前述で過剰と判断した地下水流速の変化率 100 倍に対して「基本シナリオ」で考えられる地下水流速の最大値としてあり得る値として“地下水流速の変化率が 30 倍”をケース 2 として設定することとした。

なお、前述のとおり地下水流速の変化率 25 倍が、最大被ばく線量の傾向が異なる境界となることに関する考察を、以下に示す。

図 4.2-6 に、地下水流速変化率が 1 倍（変化なし）、10 倍及び 30 倍である場合の被ばく線量の経時変化を示す。基本ケースの場合、トータルの最大被ばく線量に対する支配核種は Pb210 [U238]（※例えば U-238 から生成される Pb-210 については、Pb210 [U238] と表記する。以下、全ての核種について同様に表記する。）であった。

地下水流速 10 倍に増加したケースでは、地下水流速の増加により核種の流量が増加し、河川へ流出する核種による被ばく線量のピーク時間が早くなっている。最大被ばく線量に対する支配核種は Pb210 [U238] であったが、これと同じ程度まで Pb210 [U234] の寄与も大きくなっている。これらは、核種の流量の増加から、核種の河川への放出が速くなったことにより、ビルドアップにより増加する U-234 の子孫核種の濃度が大きい移行時間帯で河川に流出するため（河川への流出が遅い場合、U-234 の減衰により U-234 の子孫核種の濃度も減少するため）である。結果と

して、最大被ばく線量も大きくなっている。

さらに地下水流速が大きくなった場合、ここでは 30 倍まで増加したケースでは、トータル
の被ばく線量に対する支配核種は Pb210 [U234]であった。これは地下水流速が 10 倍に増加したケ
ースと同様に、地下水流速の増加により核種流量が増加することで、河川へ流出する核種による
被ばく線量のピーク時間が早くなっている。さらに、そのピーク時間がビルドアップにより生成
される U-234 の子孫核種による被ばく線量が大きい経過時間帯であること、また地下水流速 10
倍ケースよりも U-238 の子孫核種のビルドアップが小さいため(ビルドアップのための十分な移
行時間が取れなかったため)である。

最大被ばく線量に対する支配核種については、前述のとおり地下水流速の変化率が 1 倍の場合
では Pb210 [U238]が支配核種であった。地下水流速の変化率が大きくなるに従って、Pb210
[U234]の寄与が大きくなり、(別途実施した線量評価より)変化率 25 倍程度までは Pb210
[U238]及び Pb210 [U234]が支配核種として同程度の寄与を示していた。変化率が 25 倍程度より
大きくなると、Pb210 [U234]の寄与が卓越するようになり、前述のとおり、変化率 30 倍では支
配核種は Pb210 [U234]であった。このような支配核種の変化から、図 4.2-5 に示されるように、
地下水流速の変化率 25 倍程度を境界として、最大被ばく線量及び最大被ばく線量となる時間の
変化傾向にギャップが見られる結果となった。

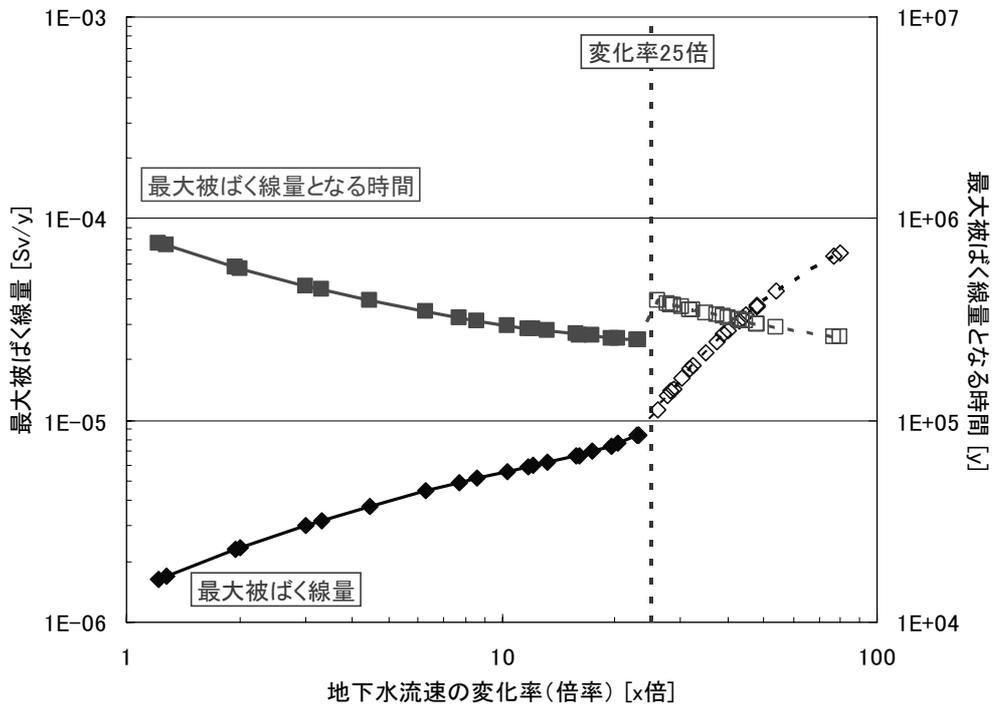


図 4.2-5 地下水流速の変化と最大被ばく線量及び被ばく線量ピーク時間との関係
(20 万年後に地下水流速が変化すると想定。赤破線は地下水流速の変化率が 25 倍のライン。この倍率を境
界に最大被ばく線量及び最大被ばく線量となる時間の傾向が変化している(変化率 25 倍以下の領域◆・■、
25 倍以上の領域◇・□。)

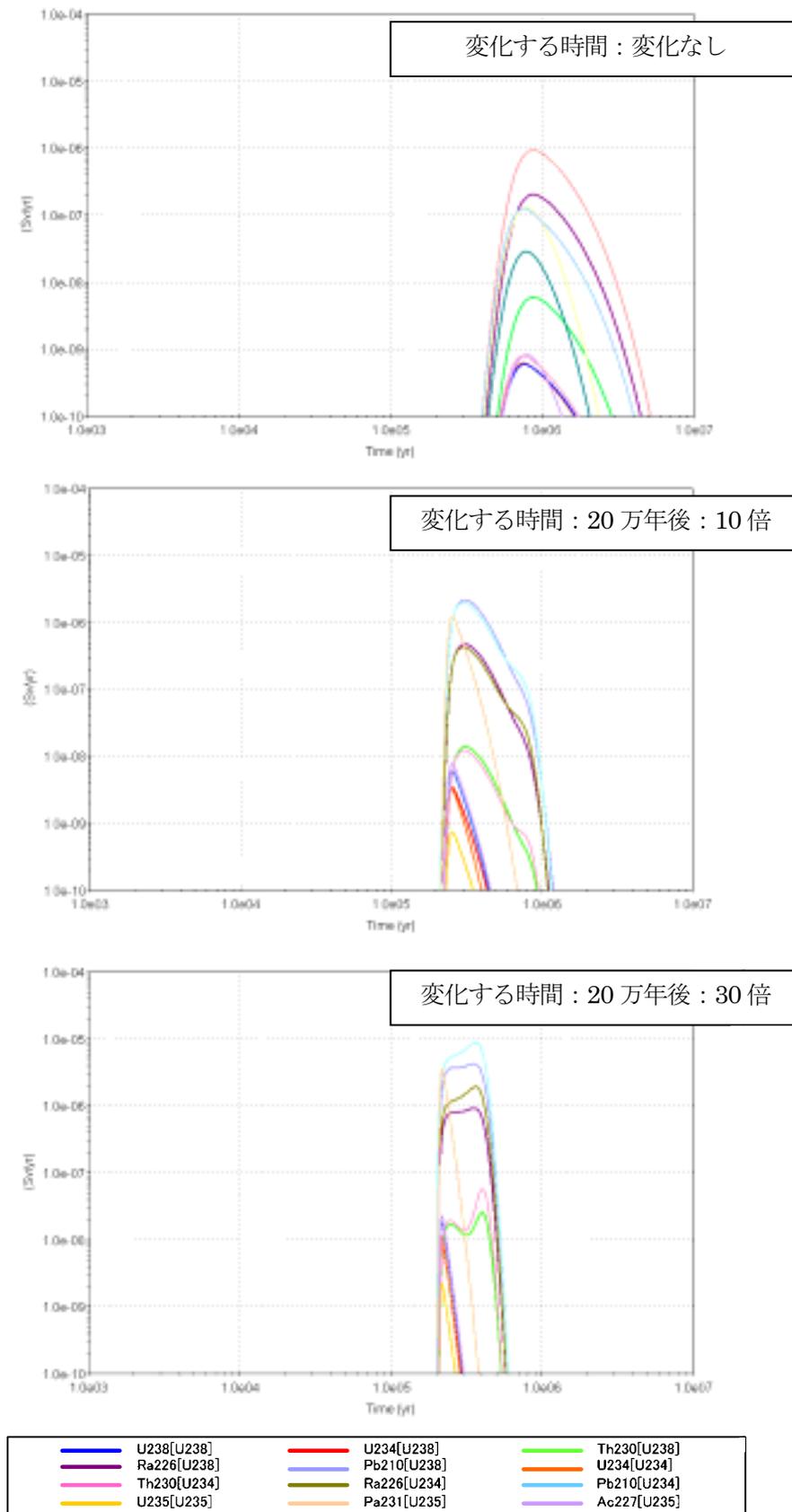


図 4.2-6 被ばく線量の経時変化（地下水流速が 20 万年後に x 倍に変化する場合）

b. 地下水流速の減少に関する検討

基本シナリオのうち、“気候変動・寒冷化”シナリオでは、地下水流速が減少する事象が検討されている。地下水流速が減少する要因としては、以下の2つの条件が挙げられる。

条件1：移行経路（岩盤）のkwが小さくなること。

条件2：iが小さくなること。

前項で示したとおり、動水勾配（i）は0.0001～0.001の幅で変化し得る。これより、地下水流速の減少については0.1倍及び0.01倍となったケースについて検討することとする。なお、“気候変動・寒冷化”シナリオではkwの低下も考えられる。しかし、iの減少を考慮した上でさらにkwの低下を考慮した場合、従来の研究成果より被ばく線量が最大となる時間は約100万年かそれ以降であり、最大被ばく線量も10 μ Sv/yを超えないと予測される。よって、ここでは0.01倍より小さい倍率については検討しないこととする。

(5) 天然バリアにおける移行距離の変動に関する検討

「第3次中間報告」では地下水流速が0.001m/dayの処分施設近傍の領域（移行距離）は200m、地下水流速が0.01m/dayの処分施設近傍以外の領域（移行距離）は300mと設定されている。“造構運動・隆起・浸食・表層剥離等”シナリオにおいては、図4.2-7に示したように移行経路の短縮が予想されるが、侵食を受ける領域は施設近傍以外の領域であり、施設近傍の領域は確保されると想定する。また、施設近傍以外の領域の侵食による移行経路の短縮量は、便宜的に100m（移行距離200m）及び200m（移行距離100m）と設定した。

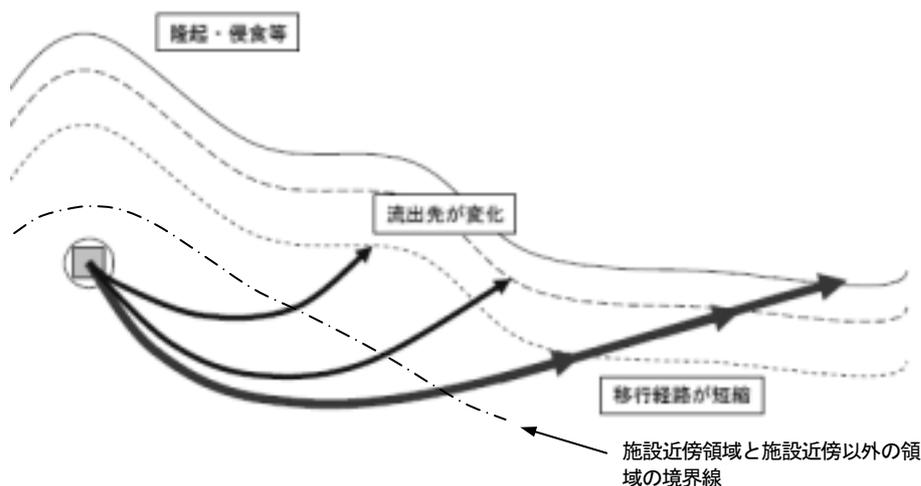


図 4.2-7 隆起・侵食に伴う移行経路短縮の模式図（太矢印線）
 （第二種廃棄物埋設分科会資料、二分第3-2-2号より引用・加筆）

4.2.5 生物圏に関するパラメータ

(1) 評価経路

生物圏は、天然現象の影響の結果として変動することが考えられる。一方で、生物圏における被ばく経路の変動は、具体的なサイトの特性やその地域の生活様式等に大きく依存する。このようなサイト特性は、サイトから近隣の河川までの距離、地形の勾配、海岸線からの距離といった影響を受けた将来の侵食の様態により決定される。また、将来の生活様式は、農作物の摂取量、河川周辺や海岸付近の土地の利用状況などの変化の影響を受けて変化する。よって、生物圏の変動を具体的に記述するためには、まず、生物圏における被ばく経路の変動に寄与する要因のうち、少なくとも主要なものを特定して、現在のサイト特性を反映した被ばく経路を設定する必要がある。将来的な変動は、このような被ばく経路の設定に基づいて検討する必要がある。

したがって、具体的なサイト条件が明らかになっていない現段階における生物圏の設定の位置づけは、安全評価を実施するために、現在の人の生活様式に基づいて典型的と考えられる経路を設定すること、即ち「様式化」することが適切であると考えられる。

以上のことから、本検討においては、「H18 年度報告書」と同様に、「第 3 次中間報告」で想定された地下水シナリオの評価経路のうち、決定経路である「河川岸農耕経路」に係る線量を評価した。

なお、将来的に、具体的なサイト特性が明らかになった時点においては、原子力学会標準「余裕深度処分安全評価手法」等を参考として、そのサイトに応じた評価経路の検討が必要である。

(2) 評価パラメータ

公衆の被ばく線量の算出におけるパラメータは、“農作物及び畜産物の摂取量”、“土壌から農作物・畜産物への移行係数”、“農耕土壌の分配係数”、“被ばく線量換算係数”については、JAEA によるクリアランス評価の最新のデータである「平成 18 年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2)」¹¹⁾における選定方法を参考とした。各パラメータの設定値を表 4.2-8～表 4.2-12 に示す。なお、各核種の内部及び外部被ばく線量換算係数は、親核種と放射平衡として扱える核種の分も含んだものである。本評価における評価核種と、それらの核種の核種線量換算係数に含まれる子孫核種の詳細を表 4.2-13 に示す。

表 4.2-8 公衆の被ばく線量の算出に関するパラメータ

パラメータ	設定値
河川流量 [m ³ /y]	1.0E+8
農耕土壌の密度 [g/cm ³]	2.6
農耕土壌の空隙率 [-]	0.3
汚染土壌混合割合 [-]	1
農耕土壌における年間作業時間 [h/y]	500
農耕作業時の粉塵濃度 [g/m ³]	5.0E-4
農耕作業者の呼吸量 [m ³ /h]	1.2
農耕作業時の遮蔽係数 [-]	1

表 4.2-9 農作物及び畜産物の摂取量

パラメータ		設定値
農作物の年間摂取量 [kg/y]	米	71
	葉菜	12
	非葉菜	45
	果実	22
畜産物の年間摂取量 [(牛肉・豚肉・鶏肉・鶏卵) kg/y] [(牛乳) L/y]	牛肉	8
	豚肉	9
	鶏肉	7
	鶏卵	16
	牛乳	44

表 4.2-10 農作物及び畜産物への移行に関するパラメータ

パラメータ		設定値
家畜の飼料摂取量 [kg-dry/d]	肉牛	7.2
	乳牛	16.1
	豚	2.4
	鶏	0.07
土壌から農作物への移行係数 (米) [(Bq/g-wet) per (Bq/g-dry)]	U	1.1E-3
	Th	1.9E-5
	Ra	6.6E-4
	Pb	4.0E-3
	Po	2.0E-3
	Pa	4.0E-2
	Ac	1.0E-3
土壌から農作物への移行係数 (葉菜・非葉菜・果実) [(Bq/g-wet) per (Bq/g-dry)]	U	2.4E-3
	Th	2.2E-4
	Ra	1.2E-2
	Pb	3.4E-3
	Po	1.5E-3
	Pa	4.0E-2
	Ac	1.0E-3
土壌から農作物への移行係数 (飼料) [(Bq/g-wet) per (Bq/g-dry)]	U	2.3E-2
	Th	1.1E-2
	Ra	8.0E-2
	Pb	1.1E-3
	Po	9.0E-2
	Pa	1.0E-1
	Ac	4.0E-3
飼料・飼育水から畜産物への移行係数 (牛肉) [d/kg]	U	3.0E-4
	Th	1.0E-4
	Ra	9.0E-4
	Pb	4.0E-4
	Po	5.0E-3
	Pa	1.0E-3
	Ac	2.0E-5
飼料・飼育水から畜産物への移行係数 (豚肉) [d/kg]	U	6.2E-2
	Th	4.6E-3
	Ra	3.5E-2
	Pb	3.1E-2
	Po	3.1E-2
	Pa	1.1E-4
	Ac	1.7E-4

農作物及び畜産物への移行に関するパラメータ（つづき）

パラメータ	設定値	
飼料・飼育水から畜産物への移行係数（鶏肉）[d/kg]	U	1.0E+0
	Th	1.8E-1
	Ra	4.8E-1
	Pb	1.2E+0
	Po	1.2E+0
	Pa	4.1E-3
	Ac	6.6E-3
飼料・飼育水から畜産物への移行係数（鶏卵）[d/kg]	U	1E+0
	Th	1.8E-1
	Ra	2.5E-1
	Pb	1.2E+0
	Po	1.2E+0
	Pa	4.1E-3
	Ac	1.6E-2
飼料・飼育水から畜産物への移行係数（牛乳）[d/L]	U	4.0E-4
	Th	5.0E-6
	Ra	1.3E-3
	Pb	3.0E-4
	Po	3.4E-4
	Pa	5.0E-6
	Ac	2.0E-5

表 4.2-11 農耕土壌の分配係数

パラメータ	設定値	
農耕土壌の分配係数 [m ³ /kg]	U	4.0E-1
	Th	8.9E+1
	Ra	2.4E+0
	Pb	2.2E+1
	Po	6.6E+0
	Pa	6.6E+0
	Ac	5.4E+0

表 4.2-12 内部・外部被ばく線量換算係数

パラメータ		設定値
内部被ばく線量換算係数 (経口) [Sv/Bq]	U-238	4.5E-8
	U-234	4.9E-8
	Th-230	2.1E-7
	Ra-226	2.8E-7
	Pb-210	6.9E-7
	Po-210	1.2E-6
	U-235	4.7E-8
	Pa-231	7.1E-7
	Ac-227	1.1E-6
内部被ばく線量換算係数 (吸入) [Sv/Bq]	U-238	2.9E-6
	U-234	3.5E-6
	Th-230	1.4E-5
	Ra-226	3.5E-6
	Pb-210	1.2E-6
	Po-210	3.3E-6
	U-235	3.1E-6
	Pa-231	1.4E-4
	Ac-227	5.5E-4
外部被ばく線量換算係数 [(Sv/y) per (Bq/kg)]	U-238	2.4E-9
	U-234	2.4E-10
	Th-230	7.9E-10
	Ra-226	4.4E-6
	Pb-210	1.6E-9
	Po-210	2.2E-11
	U-235	4.5E-7
	Pa-231	9.6E-8
	Ac-227	1.8E-9

表 4.2-13 評価核種の線量換算係数によってその寄与が考慮されている子孫核種

評価核種	線量換算係数に含まれる子孫核種 (親核種 (評価核種) と放射平衡と見なせる子孫核種)
U-238	Th-234、Pa-234m、Pa-234
U-234	—
Th-230	—
Ra-226	Rn-222、Po-218、At-218、Rn-218、Pb-214、Bi-214、Po-214、Tl-210
Pb-210	Bi-210
Po-210	Hg-206、Tl-206
U-235	—
Pa-231	—
Ac-227	Fr-223、At-219、Rn-219、Po-215、Pb-211、Bi-211、Po-211、Tl-207

4.2.6 変動を考慮するパラメータの整理

基本シナリオの分析（表 3.2-1～表 3.2-5 参照）で示したとおり、被ばく線量評価において各シナリオを差別化するパラメータは地下水流速、処分施設からの核種の放出係数、天然バリアの分配係数及び核種の移行距離である。評価モデルは、各シナリオで「変化する」と判断されたパラメータが任意の時間で基本ケースから各シナリオケースに変化するものとなっている。

各シナリオにおけるパラメータの変化に関する設定を表 4.2-14～表 4.2-19 に示す。

表 4.2-14 基本シナリオの基本ケースにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1
放出係数	—	基本値
天然バリアの分配係数	—	基本値
施設近傍の地下水流速	—	基本値
施設近傍以外の地下水流速	—	基本値
河川までの距離	—	基本値

表 4.2-15 “気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1	ケース 2
放出係数	変化なし	基本値	基本値
天然バリアの分配係数	変化なし	基本値	基本値
施設近傍の地下水流速	増加	基本値×10	基本値×30
施設近傍以外の地下水流速	増加	基本値×10	基本値×30
河川までの距離	変化なし	基本値	基本値

表 4.2-16 “気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”シナリオにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1
放出係数	変化なし	基本値
天然バリアの分配係数	塩水性	塩水性パラメータ
施設近傍の地下水流速	増加	基本値×10
施設近傍以外の地下水流速	増加	基本値×10
河川までの距離	変化なし	基本値

表 4.2-17 “気候変動-寒冷化-降水量減少” シナリオにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1	ケース 2
放出係数	変化なし	基本値	基本値
天然バリアの分配係数	変化なし	基本値	基本値
施設近傍の地下水流速	減少	基本値×0.1	基本値×0.01
施設近傍以外の地下水流速	減少	基本値×0.1	基本値×0.01
河川までの距離	変化なし	基本値	基本値

表 4.2-18 “気候変動-寒冷化-海水準変動（海退）” シナリオにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1	ケース 2
放出係数	変化なし	基本値	基本値
天然バリアの分配係数	変化なし	基本値	基本値
施設近傍の地下水流速	減少	基本値×0.1	基本値×0.01
施設近傍以外の地下水流速	減少	基本値×0.1	基本値×0.01
河川までの距離	変化なし	基本値	基本値

表 4.2-19 “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオにおけるパラメータ設定

パラメータ	パラメータの変化	ケース 1	ケース 2
放出係数	酸化性	酸化性パラメータ	酸化性パラメータ
天然バリアの分配係数	酸化性	酸化性パラメータ	酸化性パラメータ
施設近傍の地下水流速	増加	基本値×10	基本値×10
施設近傍以外の地下水流速	増加	基本値×10	基本値×10
河川までの距離	減少	200m+100m	200m+200m

4.3 基本シナリオの評価結果

4.3.1 “気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオの評価

(1) 被ばく線量評価ケースの設定及び評価結果

“基本シナリオ”のうち、“気候変動-温暖化-降水量増加”の評価ケースを表 4.3-1に示す。

表 4.3-1 “気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオ評価ケース

ケース	パラメータの設定	パラメータ変動時間	備考
S0-C1	表 4.2-14 (基本ケース)	変化なし	基本ケース
S1-C1-T100k	表 4.2-15 の ケース 1	10 万年後	10 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×10
S1-C1-T50k	表 4.2-15 の ケース 1	5 万年後	5 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×10
S1-C1-T10k	表 4.2-15 の ケース 1	1 万年後	1 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×10
S1-C1-T0k	地下水流速 基本値×10	0 年	初期からパラメータ 変動 : 地下水流速×10
S1-C2-T100k	表 4.2-15 の ケース 2	10 万年後	10 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×30
S1-C2-T50k	表 4.2-15 の ケース 2	5 万年後	5 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×30
S1-C2-T10k	表 4.2-15 の ケース 2	1 万年後	1 万年経過後にパラ メータ変動 : 地下水流速×30
S1-C2-T0k	地下水流速 基本値×30	0 年	初期からパラメータ 変動 : 地下水流速×30

評価結果を表 4.3-2に、パラメータが変化する時間に対する最大被ばく線量の推移を図 4.3-1に示す。なお、パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の間接関係を確認するため表 4.3-1に加えてパラメータが変化する時間として 500 年、1,000 年、2,000 年及び 20 万年について評価を行っている。

これより、地下水流速の増加が 10 倍であるケース (S1-C1 シリーズ) の場合、地下水流速が大きくなることで最大被ばく線量は大きくなるが、地下水流速の変化時間に関係なく、最大被ばく線量はほぼ同値であった。前者(線量増加)の要因は、地下水流速が速くなることで河川への核種の流出が早くなるためであり、その結果、Pb210 [U234]の減衰が進行する前に河川へ流出され

るため、基本ケースより最大被ばく線量が大きくなっている。後者(地下水流速の変化時間との関係)の要因は、支配核種である Pb210 [U234]の被ばく線量ピーク時間が 10 万年以降であることより、地下水流速の変化の影響が、地下水流速の変化時間 1 万年後～10 万年後の違いに関わらないためである。

地下水流速の増加が 30 倍であるケース (S1-C2 シリーズ) の場合、地下水流速が速くなることで最大被ばく線量が大きくなり、変化時間が遅い程最大被ばく線量は大きくなっていた。前者の原因は、地下水流速が速くなることで河川への核種の流出が早くなり、Pb210 [U234]の減衰が進行する前に河川へ流出されるためであり、その結果、基本ケースより最大被ばく線量が大きくなっている。後者の要因は、変化時間が遅いほど、核種の移行時間が長くなり、ビルドアップによる子孫核種の濃度増加が大きくなるためである。本評価の場合、地下水流量の変化時間が 1 万年である場合ではピーク時間は 5.7E+4y であり、10 万年である場合では 2.7E+5y となっていた。最大被ばく線量に対する支配核種は Pb210 [U234]であり、この移行時間帯では、変化時間が遅い程 U-234 の子孫核種のビルドアップによる濃度増加が大きくなるため、最大被ばく線量が大きくなる傾向を示す (U-238 の子孫核種もビルドアップにより濃度が増加するが、最大被ばく線量に対する寄与は小さい)。

図 4.3-2 に地下水流速が 10 倍に増加した場合の被ばく線量の経時変化を、図 4.3-3 に地下水流速が 30 倍に増加した場合の被ばく線量の経時変化を示す。ここでは、変化時間が 1 万年後及び 10 万年後の核種毎の被ばく線量の経時変化を示し、また、参考として基本ケースの被ばく線量経時変化も示す。この図より、トータルの最大被ばく線量に対する支配核種は、地下水流速が変化しないケースでは Pb210 [U238]であるのに対し、地下水流速が変化するケースでは Pb210 [U234]となっている。これは、Pb210 [U234]が U234 から生成されるのに対し、Pb210 [U238]は U234 [U238]を経由して生成されるためである。天然ウラン組成では、初期の U238 と U234 が同じ放射能割合で存在することから、U234 はそれが減衰するまでの間は U234 [U238]より多い濃度で存在し、結果として“Pb210 [U234]濃度>Pb210 [U238]濃度”となる。

表 4.3-2 “気候変動-温暖化-降水量増加” シナリオ評価結果

ケース	最大被ばく線量 [Sv/y]	ピーク時間 [y]
S0-C1	1.4E-6	8.6E+5
S1-C1-T100k	5.5E-6	2.1E+5
S1-C1-T50k	5.5E-6	1.6E+5
S1-C1-T10k	5.5E-6	1.3E+5
S1-C1-T0k	5.4E-6	1.2E+5
S1-C2-T100k	1.3E-5	2.7E+5
S1-C2-T50k	9.1E-6	9.6E+4
S1-C2-T10k	8.0E-6	5.7E+4
S1-C2-T0k	7.6E-6	4.8E+4

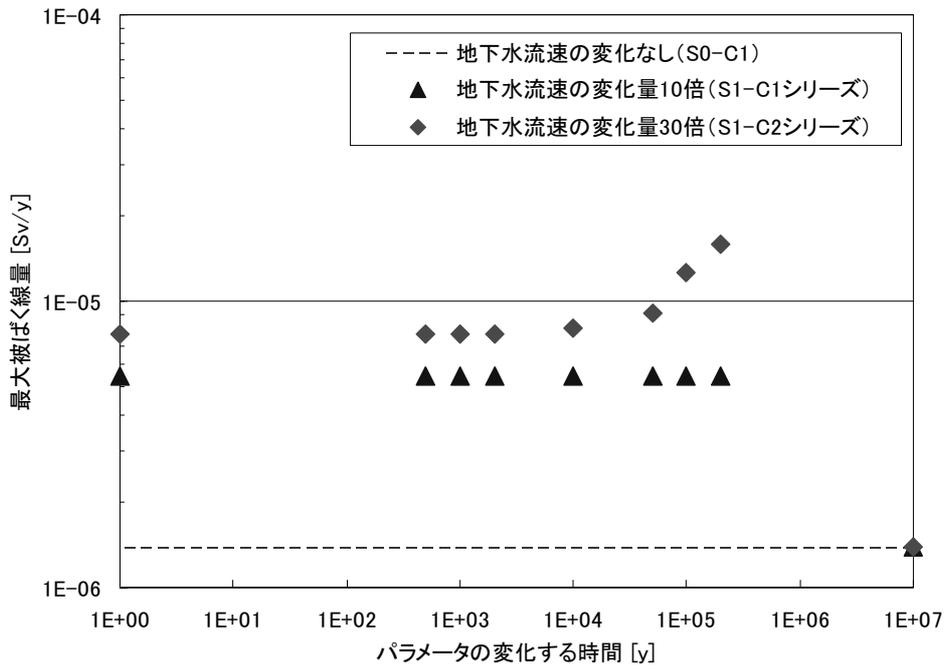


図 4.3-1 パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S1-C1/C2 シリーズ)
 ※評価の最初からパラメータが変化しているケースの評価結果は、地下水流速の変化する時間1年に示している。また、評価の最後までパラメータが変化しないケース (基本ケース) の評価結果は1E+7年に示している。

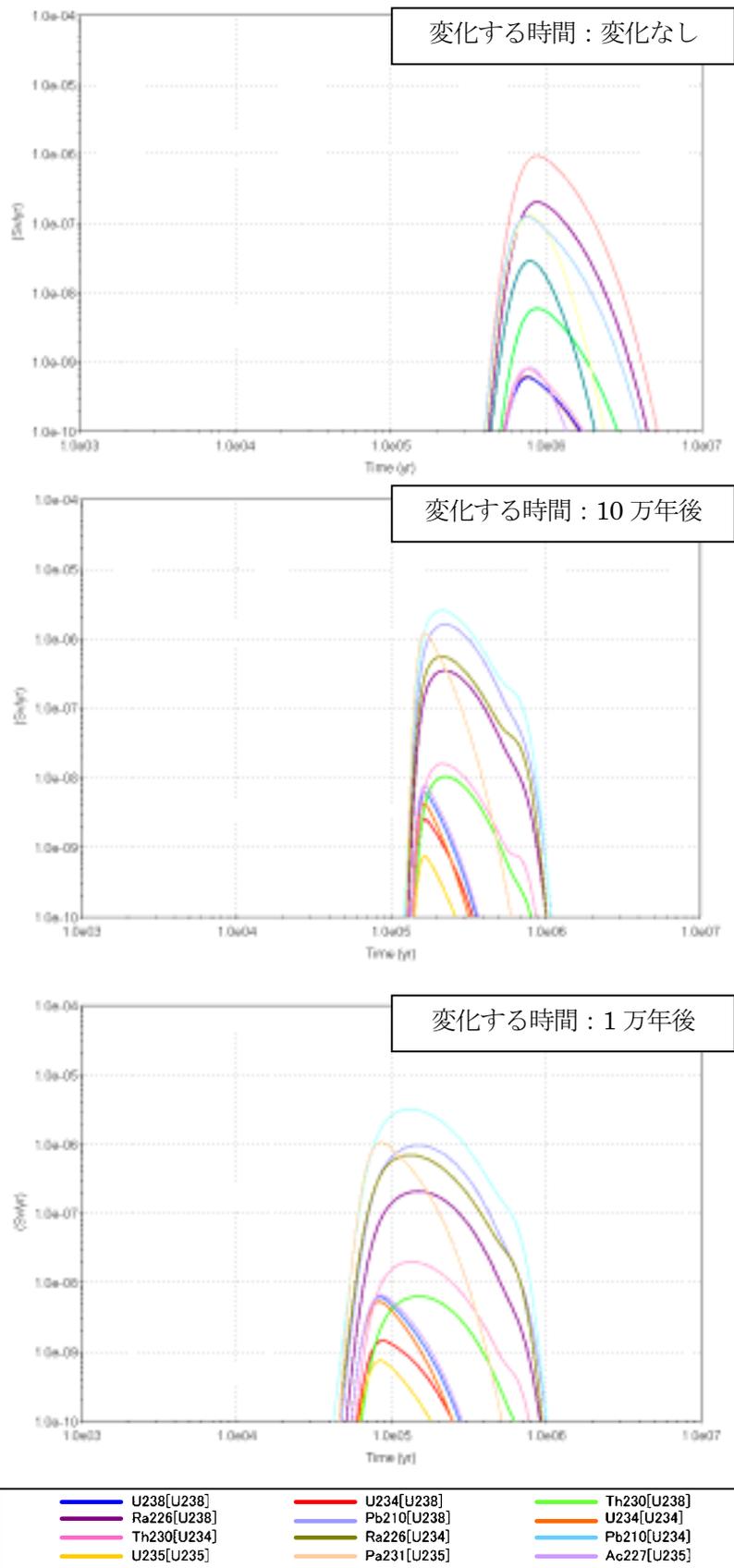


図 4.3-2 被ばく線量の経時変化 (S1-C1 シリーズ：地下水流速 10 倍)

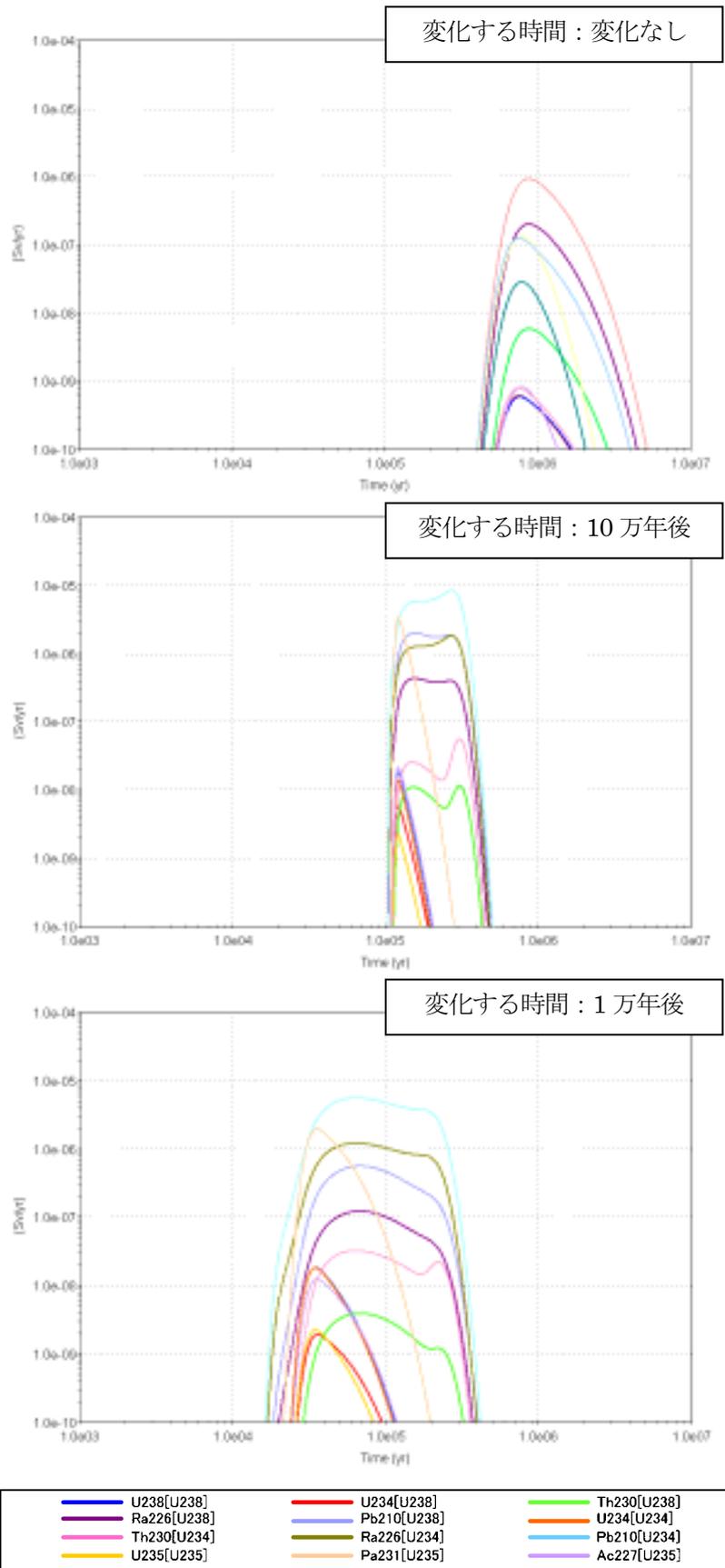


図 4.3-3 被ばく線量の経時変化 (S1-C2 シリーズ：地下水流速 30 倍)

4.3.2 “気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”シナリオの評価

(1) 地下水流速の増加に関する検討

“気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”シナリオは降水量の増加により処分施設付近の地下水水位が上昇し、かつ海岸線の接近により水位が上昇(動水勾配が低下)すること、また塩水が処分施設近傍に影響を及ぼすことを考慮している。このことから、4.2.4(4)a で検討した地下水流速の増加について、i の大きな増加は考え難い。また、4.2.4(4)a で示した理由から、kw についても大きな増大はないと思われる。

以上より、本シナリオで検討する地下水流速の増加については、被ばく線量評価として10倍の増加を考慮する。

(2) 被ばく線量評価ケースの設定及び評価結果

“基本シナリオ”のうち、“気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”の評価ケースを表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 “気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”シナリオ評価ケース

ケース	パラメータの設定	パラメータ変動時間	備考
S0-C1	表 4.2-14 (基本ケース)	変化なし	基本ケース
S2-C1-T100k	表 4.2-16 の ケース 1	10 万年後	10 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×10 天バリ Kd-塩水性
S2-C1-T50k	表 4.2-16 の ケース 1	5 万年後	5 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×10 天バリ Kd-塩水性
S2-C1-T10k	表 4.2-16 の ケース 1	1 万年後	1 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×10 天バリ Kd-塩水性
S2-C1-T0k	地下水流速 基本値×10	0 年	初期からパラメータ変動 : 地下水流速×10 天バリ Kd-塩水性

評価結果を表 4.3-4に、パラメータが変化する時間に対する最大被ばく線量の推移を図 4.3-4 に示す。パラメータの変化時間については、変化時間が遅いほど最大被ばく線量は大きくなっていった。これは、変化時間が遅いほどビルドアップが進行し、子孫核種の濃度が大きくなるためである。ただし、最大被ばく線量の範囲は 1.2E-5～1.5E-5Sv/y であり、値の幅

は小さいものであった。

図 4.3-5 には、天然バリアの分配係数が塩水性である場合の検討のために、天然バリアの分配係数が基本値のケース“S1-C1-T0k”と塩水性のケース“S2-C1-T0k”の評価結果を示す。また、地下水流速が変化することの影響を検討するため、基本ケース“S0-C1”の評価結果についても示す。これより、天然バリア分配係数を塩水性とした“S2-C1-T0k”では、地下水流速が増加することにより、基本ケースと比較して最大被ばく線量が増加していた。さらに、天然バリアの分配係数が塩水性となり Ra-226 の分配係数が小さくなることで、Ra-226 による被ばく線量が大きくなり、Ra226 [U234]が支配核種となっていた。

また、図 4.3-6 に地下水流速及び分配係数の変化時間毎の被ばく線量の経時変化を示す。ここでは変化時間が 1 万年後、5 万年後及び 10 万年後であるケースを示している。これらの比較より、S1-C1 シリーズと同様に変化時間に関わらず最大被ばく線量はほぼ同じである結果となっていた。

表 4.3-4 “気候変動・温暖化・海水準変動（海進）”シナリオ評価結果

ケース	最大被ばく線量 [Sv/y]	ピーク時間 [y]
S0-C1	1.4E-6	8.6E+5
S2-C1-T100k	1.5E-5	1.9E+5
S2-C1-T50k	1.4E-5	1.5E+5
S2-C1-T10k	1.2E-5	1.1E+5
S2-C1-T0k	1.2E-5	1.1E+5

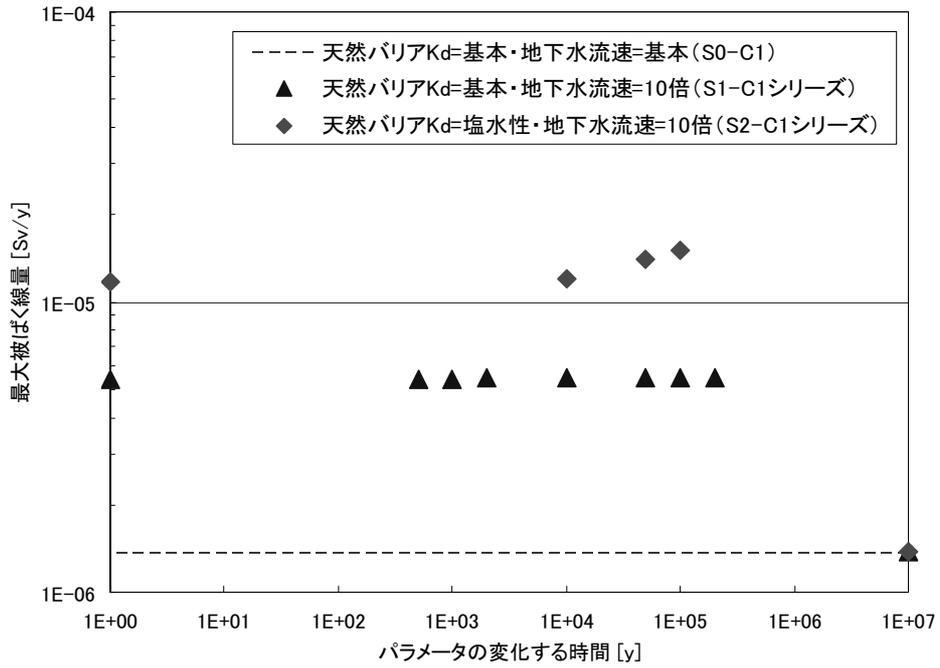


図 4.3-4 パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S2/S1-C1 シリーズ)

※評価の最初からパラメータが変化しているケースの評価結果は、地下水流速の変化する時間 1 年に示している。また、評価の最後までパラメータが変化しないケース (基本ケース) の評価結果は 1E+7 年に示している。

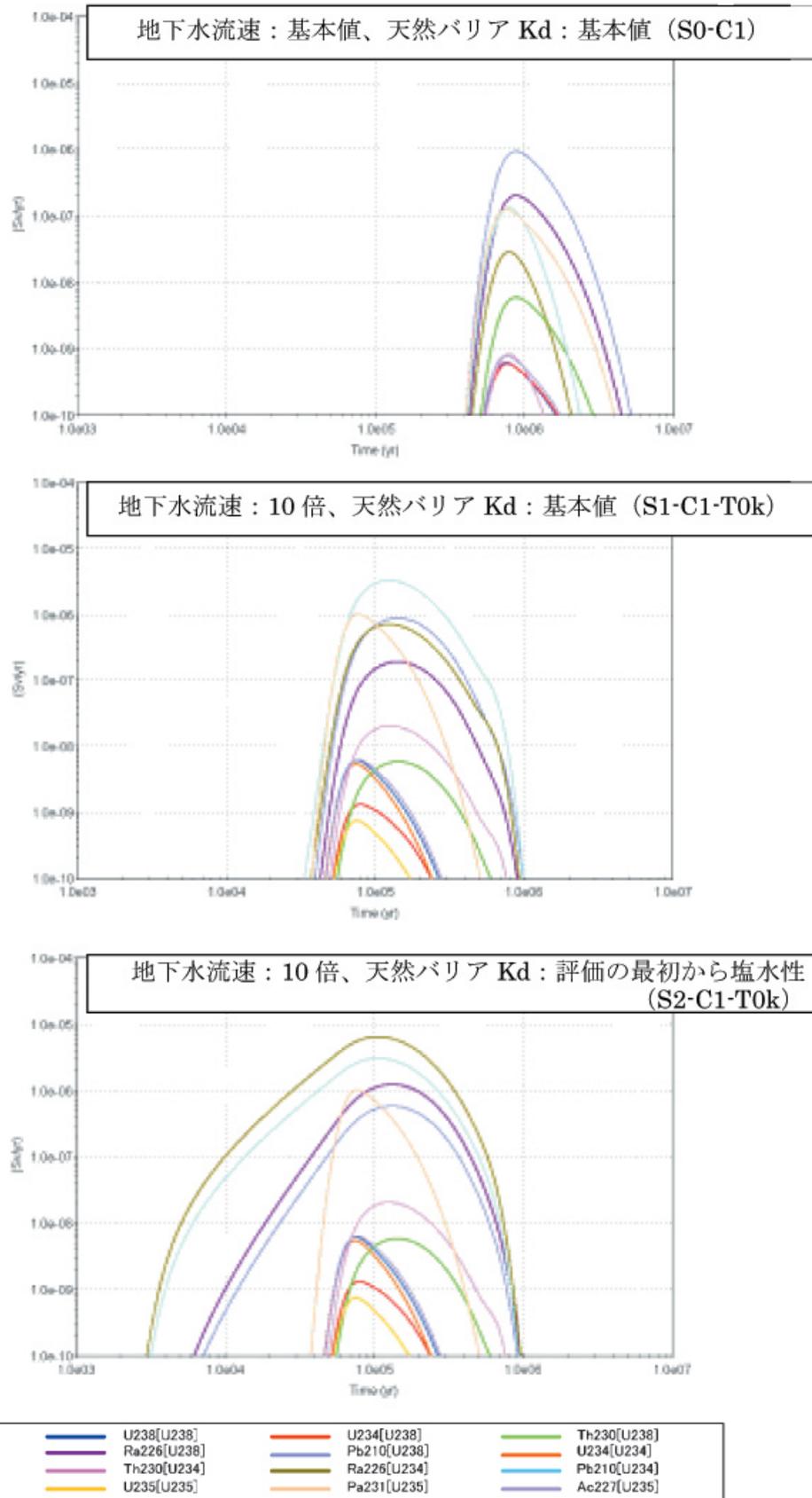


図 4.3-5 被ばく線量の経時変化 (天然バリアの化学的環境変化に関する比較)

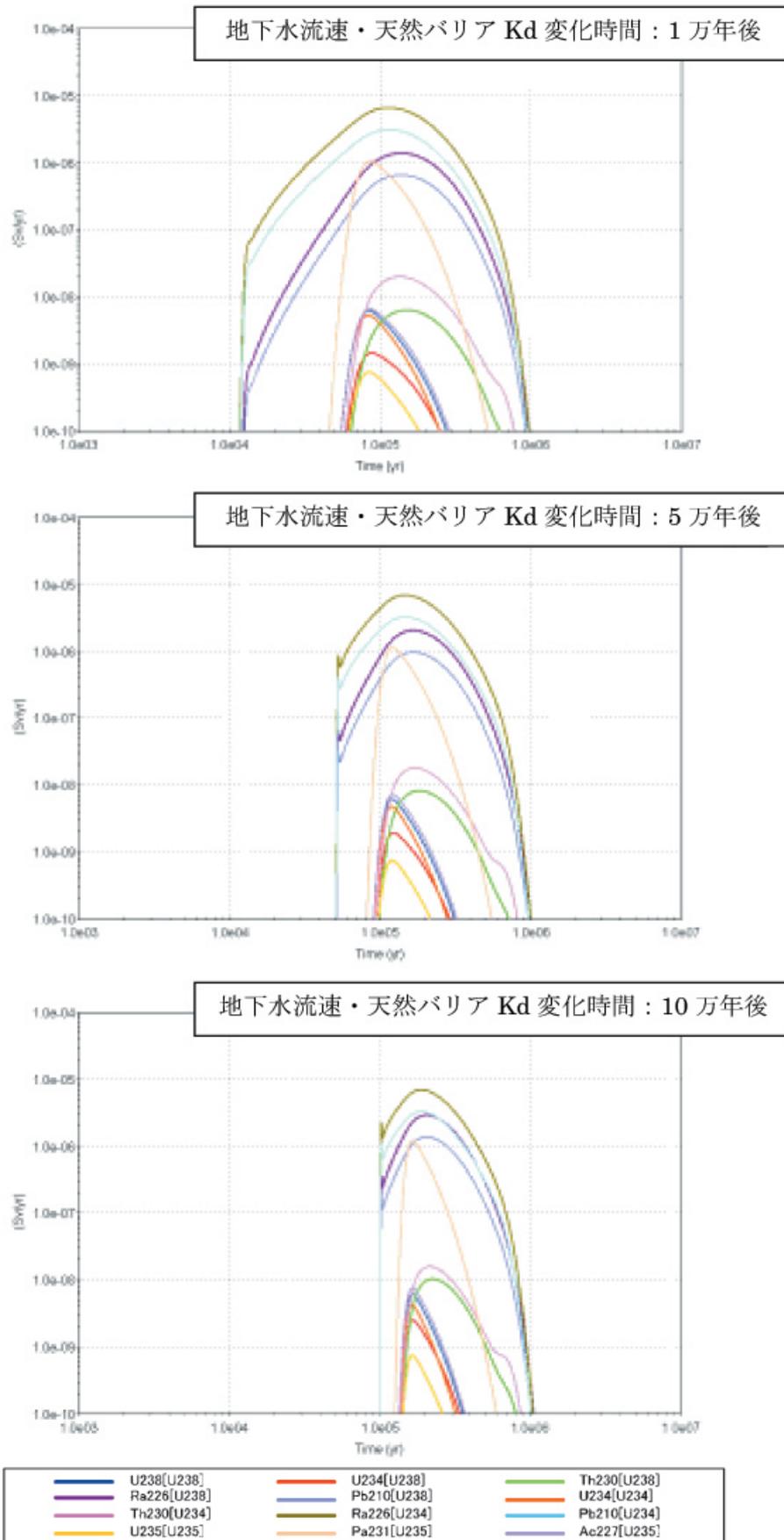


図 4.3-6 被ばく線量の経時変化 (S2-C1 シリーズ)

4.3.3 “気候変動-寒冷化-降水量減少及び海水準変動（海退）”シナリオの評価

(1) 被ばく線量評価ケースの設定及び評価結果

“基本シナリオ”のうち、“気候変動-寒冷化-降水量減少”シナリオ及び“気候変動-寒冷化-海水準変動（海退）”シナリオは、全く同じ評価ケースとなる。評価ケースを表 4.3-5に示す。

表 4.3-5 “気候変動-寒冷化-降水量減少／海水準変動（海退）”シナリオ評価ケース

ケース	パラメータの設定	パラメータ変動時間	備考
S0-C1	表 4.2-14 (基本ケース)	変化なし	基本ケース
S3-C1-T100k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 1	10 万年後	10 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.1
S3-C1-T50k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 1	5 万年後	5 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.1
S3-C1-T10k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 1	1 万年後	1 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.1
S3-C1-T0k	地下水流速 基本値×0.1	0 年	初期からパラメータ変動 : 地下水流速×0.1
S3-C2-T100k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 2	10 万年後	10 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.01
S3-C2-T50k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 2	5 万年後	5 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.01
S3-C2-T10k	表 4.2-17 (または表 4.2-18) のケース 2	1 万年後	1 万年経過後にパラメータ変動 : 地下水流速×0.01
S3-C2-T0k	地下水流速 基本値×0.01	0 年	初期からパラメータ変動 : 地下水流速×0.01

評価結果を表 4.3-6に、パラメータが変化する時間に対する最大被ばく線量の推移を図 4.3-7 に示す。これらより、地下水流速が 0.1 倍となった場合、地下水流速の変化する時間に関わらず最大被ばく線量は 1.6E-7Sv/y と小さい値となっていた。また、地下水流速が 0.01 倍となった場合では、被ばく線量のピークは評価期間 1E+7 年の間には現れず、被ばく線量も 1E-10Sv/y 以上となることはなかった。

図 4.3-8 に地下水流速の変化が 0.1 倍のケース（S3-C1 シリーズ）の、地下水流速変化時

間毎の被ばく線量の経時変化を示す。これより、1 万年後～10 万年後の範囲における変化時間は、最大被ばく線量に対してほとんど影響しない結果となっていた。

表 4.3-6 “気候変動・寒冷化・降水量減少／海水準変動（海退）” シナリオ評価結果

ケース	最大被ばく線量 [Sv/y]	ピーク時間 [y]
S0-C1	1.4E-6	8.6E+5
S3-C1-T100k	1.6E-7	6.8E+6
S3-C1-T50k	1.6E-7	7.2E+6
S3-C1-T10k	1.6E-7	7.6E+6
S3-C1-T0k	1.6E-7	7.7E+6
S3-C2-T100k [※]	1.0E-10 以下	1.0E+7 以上
S3-C2-T50k [※]	1.0E-10 以下	1.0E+7 以上
S3-C2-T10k [※]	1.0E-10 以下	1.0E+7 以上
S3-C2-T0k [※]	1.0E-10 以下	1.0E+7 以上

※ S3-C2 シリーズでは 1.0E+7 年までに被ばく線量のピークが現れず、1.0E+7 年までの被ばく線量の最大値は 1.0E-10Sv/y 以上の有意な値を示さなかった。

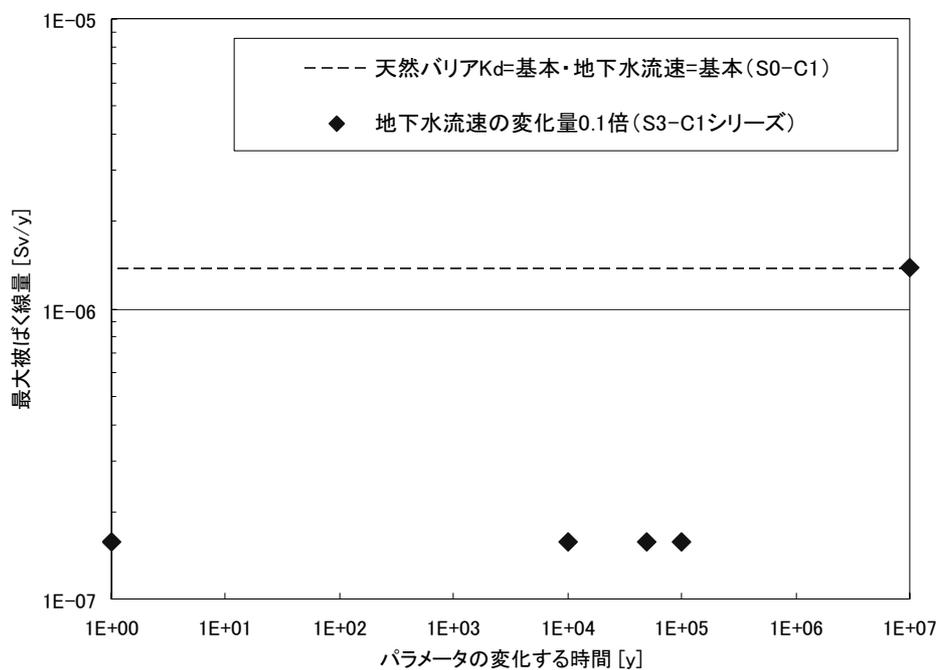


図 4.3-7 地下水流速が変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S3-C1 シリーズ)

※評価の最初からパラメータが変化しているケースの評価結果は、地下水流速の変化する時間 1 年に示している。また、評価の最後までパラメータが変化しないケース（基本ケース）の評価結果は 1E+7 年に示している。

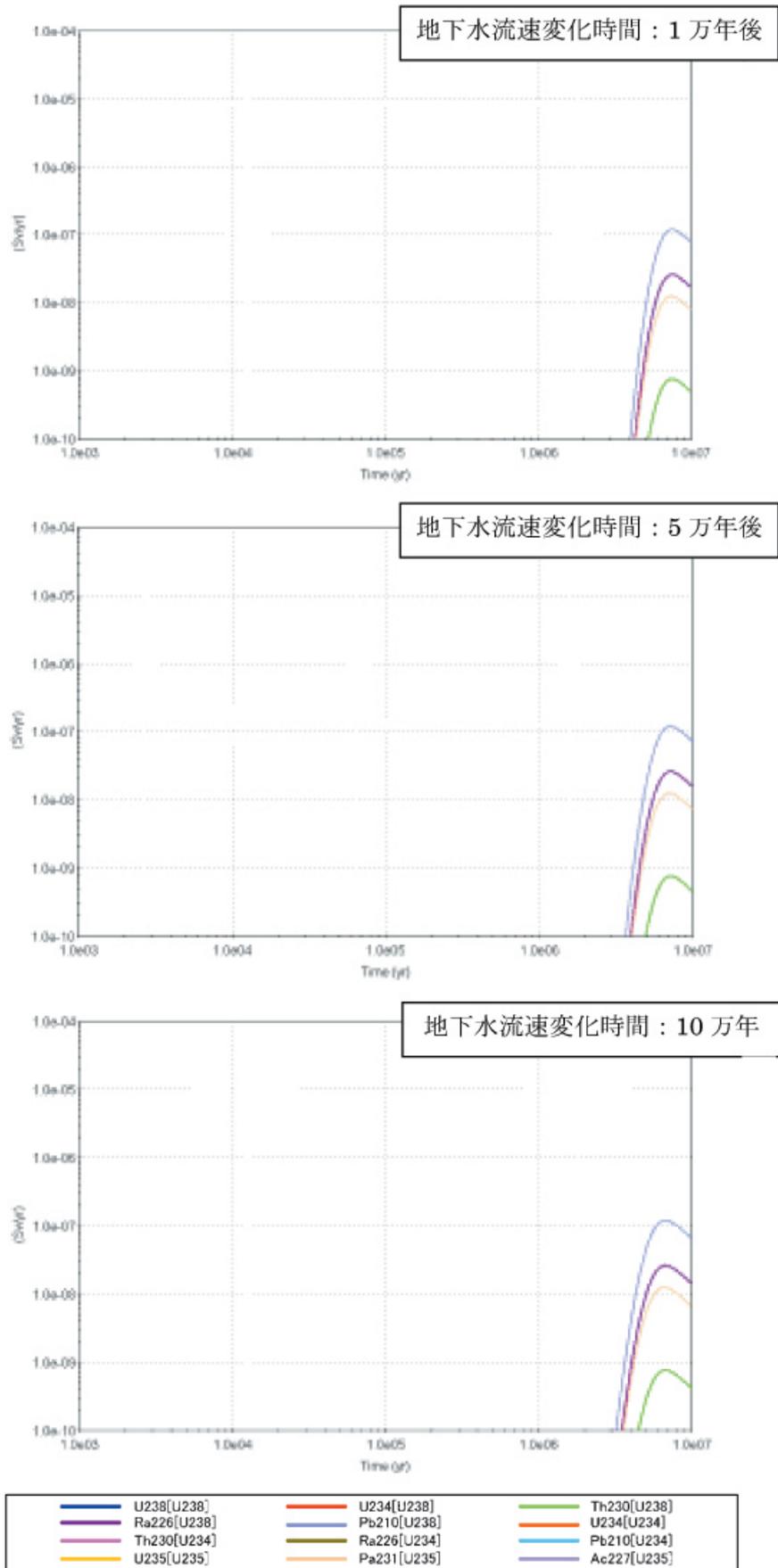


図 4.3-8 被ばく線量の経時変化 (S3-C1 シリーズ)

4.3.4 “造構運動・隆起・浸食・表層剥離等”シナリオの評価

(1) 地下水流速の増加に関する検討

前項までの検討で示したとおり、地下水流速の変化は kw 及び i の変化によって起こる。造構運動による隆起・浸食を想定した場合、それらの運動の結果、処分施設は地表に近くなる。その場合、処分施設及び移行経路は、深部にある場合よりも風化などの kw が大きくなる現象の影響を受け易くなる。一方 i については、処分施設周辺でのみ隆起が起こることを想定した場合、施設と核種の流出点との高度差が大きくなり i は大きくなるかもしれない。対して、処分施設近傍でのみ大きく浸食が起こることを想定した場合、 i は小さくなるかもしれない。このように、造構運動については想定する条件によって地下水流速の増減が変わってくるのが考えられる。

本評価ではここまでの線量評価の結果を踏まえ、被ばく線量が大きくなる可能性のある「地下水流速が大きくなるケース」に着目し、またその増加は感度解析的に 10 倍とした。

(2) 被ばく線量評価ケースの設定及び評価結果

“基本シナリオ”のうち、“造構運動・隆起・浸食・表層剥離等”の評価ケースを表 4.3-7 に示す。

表 4.3-7 “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオ評価ケース

ケース	パラメータの設定	パラメータ変動時間	備考
S0-C1	表 4.2-14 (基本ケース)	変化なし	基本ケース
S5-C1-T100k-100m	表 4.2-19 の ケース 1	10 万年後	<ul style="list-style-type: none"> ・10 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：100m
S5-C1-T50k-100m	表 4.2-19 の ケース 1	5 万年後	<ul style="list-style-type: none"> 5 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：100m
S5-C1-T10k-100m	表 4.2-19 の ケース 1	1 万年後	<ul style="list-style-type: none"> 1 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：100m
S5-C1-T0k-100m	地下水流速 基本値×10	0 年	<ul style="list-style-type: none"> 初期からパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：100m

表 4.3-7 “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオ評価ケース（前頁のつづき）

ケース	パラメータの設定	パラメータ変動時間	備考
S5-C2-T100k-200m	表 4.2-19 の ケース 2	10 万年後	<ul style="list-style-type: none"> ・10 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：200m
S5-C2-T50k-200m	表 4.2-19 の ケース 2	5 万年後	<ul style="list-style-type: none"> 5 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：200m
S5-C2-T10k-200m	表 4.2-19 の ケース 2	1 万年後	<ul style="list-style-type: none"> 1 万年経過後にパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：200m
S5-C2-T0k-200m	地下水流速 基本値×10	0 年	<ul style="list-style-type: none"> 初期からパラメータ変動 ：地下水流速×10 放出係数-酸化性 天バリ Kd-酸化性 ・施設近傍以外の移行距離：200m

評価結果を表 4.3-8 に、パラメータが変化する時間に対する最大被ばく線量の推移を図 4.3-9 に示す。なお、比較のため核種の移行距離が変化しないケース（河川までの距離 200m+300m）についても被ばく線量評価を行った。これらより、処分施設及び移行経路が酸化性環境となることで、最大被ばく線量が大きくなっていた。また、核種の移行距離の変化は、最大被ばく線量に対して大きな影響を与えていなかった。これらのうち、酸化性環境への変化時間が 10 万年のケースでは $100 \mu\text{Sv/y}$ に達していた。

図 4.3-10 に施設近傍以外の移行距離が 100m である場合 (S5-C1-Txx-100m) の、パラメータ変化時間毎の被ばく線量の経時変化を示す。これより、地下水流速及び天然バリアが評価期間中に酸化性環境の条件へと変化する場合、Pa-231 による被ばく線量が急激に増加し、最大被ばく線量が $100 \mu\text{Sv/y}$ 以上となっていた。これは地下水流速が 10 倍となることに加え、Pa-231 の天然バリアにおける分配係数が 0.005 倍となることで、Pa-231 の流量が急激に大きくなるためである。一方、始めから（評価時間 0 時間から）処分施設と移行経路が酸化性環境であった場合、最大被ばく線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下であった。これは、地下水流速の増加や分配係数の低下により Pa-231 等の流量が増加しているものの、移行時間が短くビルドアップの進行が小さいためである。全体的には、天然バリアにおける分配係数が減少する Pa-231 または Ra-226 が、最大被ばく線量に対する支配核種となっている。

図 4.3-10 において、Pa-231 及び Ra-226 による被ばく線量が急激に増加する要因として、地下水流速及び天然バリアにおける分配係数がパルス状に入力されることで、変化が急激になっていることが考えられる。そこで、地下水流速及び天然バリアにおける分配係数が段階的に変化するモデルによる線量評価を行った。評価においては、各パラメータの変化は S5-C1 と同じとし、1 万～10 万年の間に基本値からパラメータ変化値まで線形的に変化するものとした。また、その他の影響を排除するため、（移行距離の影響はほとんどなかったものの）移行距離は変化しない（施設近傍 200m+施設近傍以外 300m=500m）ものとした。その結果を図 4.3-11 に示す。これより、処分施設及び移行経路が徐々に酸化性環境へと変化することを想定した場合、Pa-231 及び Ra-226 による被ばく線量は急激には増加せず、最大被ばく線量は $7.1\text{E-}6\text{Sv/y}$ に留まっていた。実際に処分施設付近の環境が変化する場合、その変化が急激に起こることは考えにくく、パルス状に入力値を変化させる手法は過度な線量評価を導く可能性があるため、注意が必要であると考えられる。

表 4.3-8 “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオ評価結果

ケース	最大被ばく線量 [Sv/y]	ピーク時間 [y]
S0-C1	1.4E-6	8.6E+5
S5-C1-T100k-100m	1.1E-4	1.0E+5
S5-C1-T50k-100m	2.4E-5	1.0E+5
S5-C1-T10k-100m	8.6E-6	2.7E+5
S5-C1-T0k-100m	8.6E-6	2.7E+5
S5-C2-T100k-200m	1.1E-4	1.0E+5
S5-C2-T50k-200m	2.4E-5	1.0E+5
S5-C2-T10k-200m	8.3E-6	2.7E+5
S5-C2-T0k-200m	8.3E-6	2.7E+5

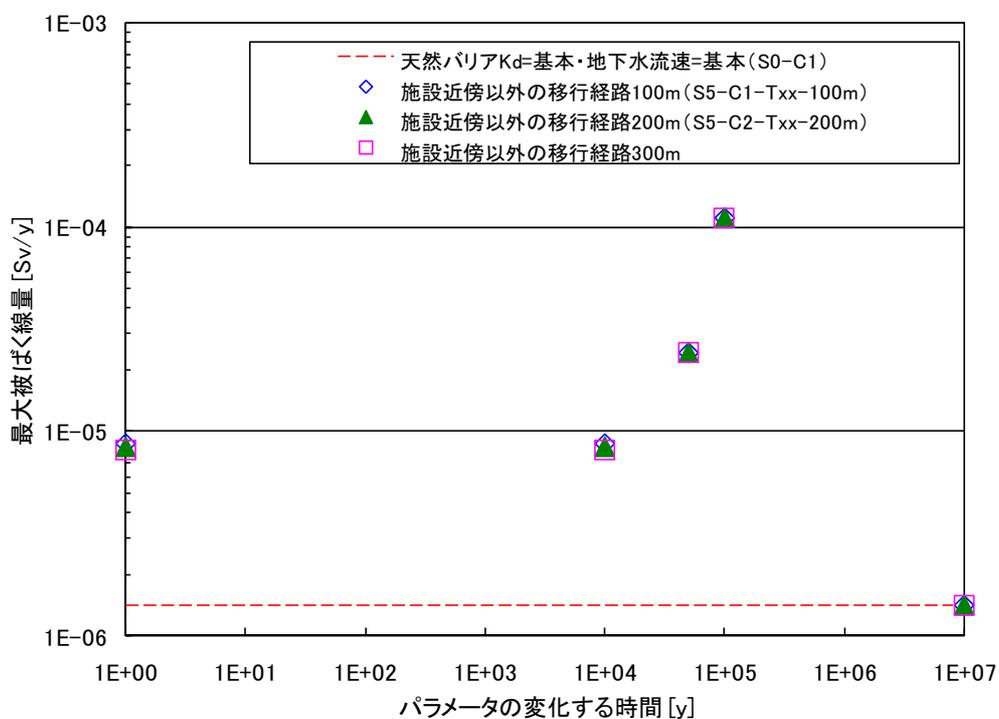


図 4.3-9 パラメータが変化する時間と最大被ばく線量の関係 (S5-C1/C2 シリーズ)

※評価の最初からパラメータが変化しているケースの評価結果は、地下水流速の変化する時間 1 年に示している。また、評価の最後までパラメータが変化しないケース (基本ケース) の評価結果は 1E+7 年に示している。

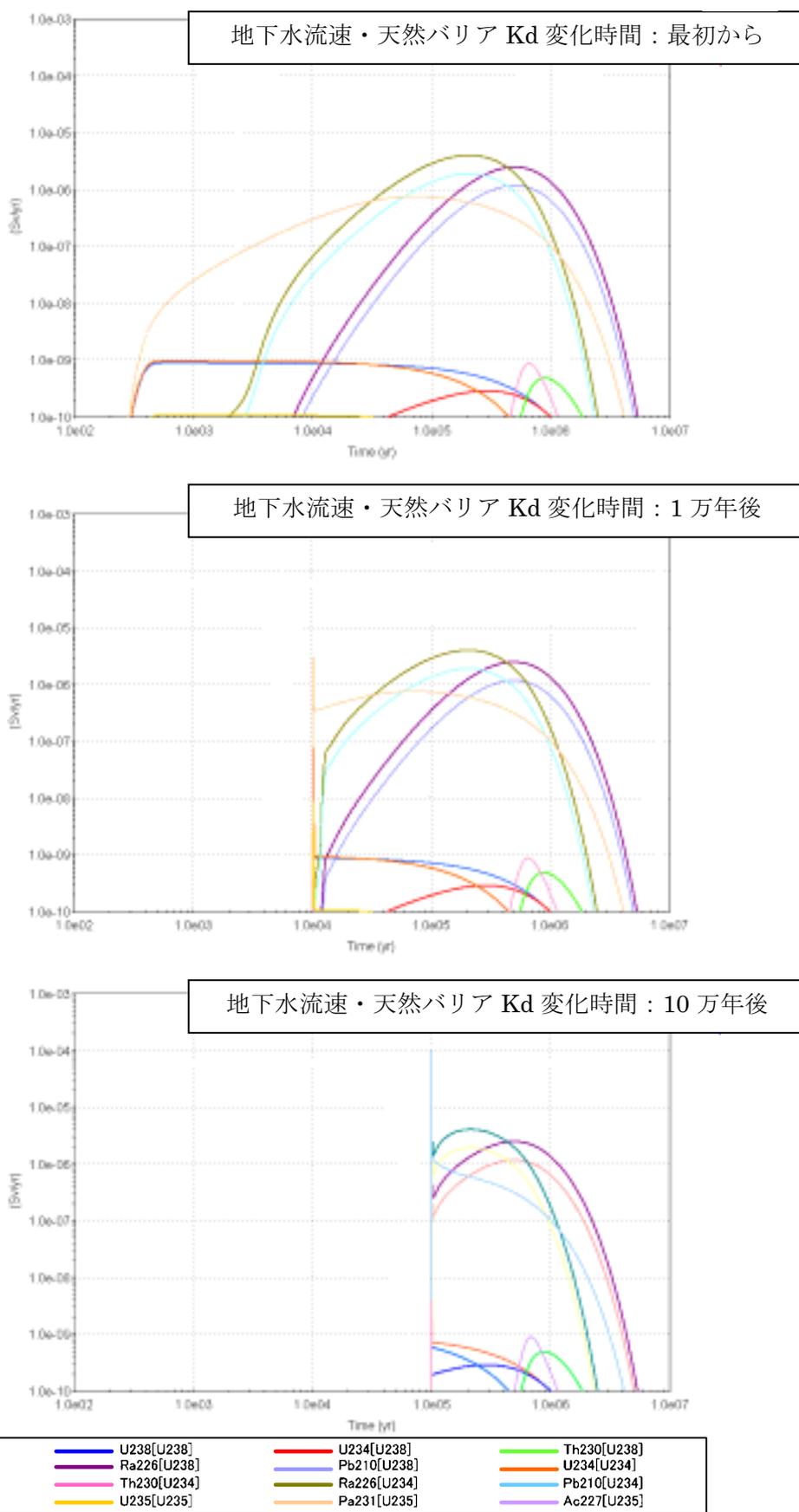


図 4.3-10 被ばく線量の経時変化 (S5-C1-Txx-100m)

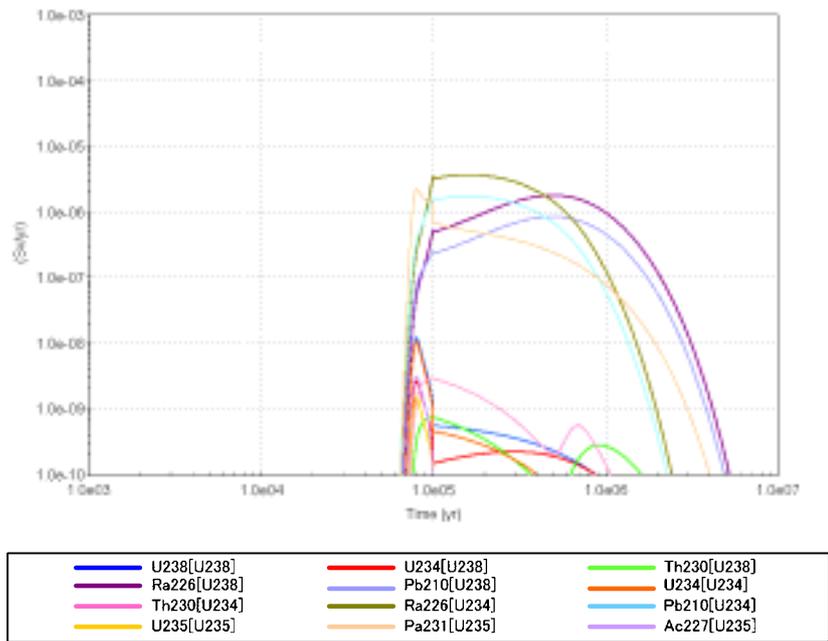


図 4.3-11 被ばく線量の経時変化（段階的にパラメータが変更するケース）
 （地下水流速及び天然バリアの分配係数が1～10万年かけて徐々に酸化性環境パラメータに変化するモデル。ただし移行距離は500mと変化しない。）

4.4 被ばく線量評価のまとめ

(1) “気候変動-温暖化-降水量増加” シナリオ

“気候変動-温暖化-降水量増加”シナリオの被ばく線量評価では、処分から一定時間経過後に、降水量が増加することで地下水流速が増加することを想定した場合の被ばく線量への影響を確認した。地下水流速が増加する時間は、処分から1万年後、5万年後または10万年後と想定し、増加量は10倍または30倍と想定した。

評価の結果、地下水流速が10倍に増加した場合、最大被ばく線量は $1.4\text{E-}6\text{Sv/y}$ から $5.5\text{E-}6\text{Sv/y}$ まで増加したものの、被ばく線量はパラメータの変化時間によらずほぼ一定であり、被ばく線量のピーク時間もほぼ一定であった。

地下水流速が30倍に増加した場合、最大被ばく線量は $7.6\text{E-}6\sim 1.3\text{E-}5\text{Sv/y}$ まで増加し、地下水流速が変化する時間が遅いほど高い被ばく線量となっていた。また、変化時間が遅いほど被ばく線量ピーク時間は遅くなっていた。これは、ビルドアップの進行により濃度が大きくなったウランの子孫核種による被ばく線量が大きくなるためであり、パラメータの変化が遅いほどビルドアップによる濃度増加が大きくなるためである。なお、この傾向は地下水流速が10倍に増加した場合でも見られるが、支配核種であるPb210 [U234]への影響は小さいものであったため、パラメータ変化の時間による最大被ばく線量の変化は小さいものであった。

以上の通り、温暖化により降水量が増加した場合には、最大被ばく線量は増加し、条件によっては $10\mu\text{Sv/y}$ を超過することが考えられる。

(2) “気候変動-温暖化-海水準変動（海進）” シナリオ

“気候変動-温暖化-海水準変動（海進）”シナリオの被ばく線量評価では、処分から一定時間経過後に、降水量が増加することで地下水流速が増加し、かつ海進により塩水の影響を受けることを想定した場合の被ばく線量への影響を確認した。地下水流速が増加する時間は、処分から1万年後、5万年後または10万年後と想定し、増加量は10倍と想定した。また、地下水流速の増加と共に、塩水により天然バリアの分配係数が塩水性環境のものに変化する（Ra-226の分配係数が0.1倍になる。その他の核種は変化しない）ことを想定した。

評価の結果、最大被ばく線量は $1.2\text{E-}5\sim 1.5\text{E-}5\text{Sv/y}$ まで増加し、地下水流速が変化する時間が遅いほど高い被ばく線量となっていた。これは、地下水流速が大きくなることで核種流量が大きくなること、及び塩水性環境ではRa-226の分配係数が小さくなることで最大被ばく線量に対する影響の大きいRa-226とその子孫核種Pb-210の濃度が高くなることによる。

以上の通り、温暖化により降水量が増加及び海進が起こった場合には、最大被ばく線量は増加し、 $10\mu\text{Sv/y}$ を超過することが考えられる。

(3) “気候変動-寒冷化-降水量減少” 及び “海水準変動（海退）” シナリオ

“気候変動-寒冷化-降水量減少”シナリオ及び“気候変動-寒冷化-海水準変動（海退）”シナリオの線量評価は、シナリオの考え方から同じ評価モデルとなった。これらのシナリオの被ばく線量評価では、処分から一定時間経過後に、降水量が減少することで、また海退が起こることで地下水流速が減少することを想定した場合の被ばく線量への影響を確認した。地下水流速が減少す

る時間は、処分から 1 万年後、5 万年後または 10 万年後と想定し、減少量は 0.1 倍または 0.01 倍と想定した。

評価の結果、地下水流速 0.1 倍に減少した場合、最大被ばく線量は $1.4\text{E}-6\text{Sv/y}$ から $1.6\text{E}-7\text{Sv/y}$ まで減少した。この最大被ばく線量の減少は変化する時間には影響されず、ピーク時間もほぼ一定であった。地下水流速 0.01 倍に減少した場合では、最大被ばく線量は $1\text{E}+7\text{y}$ までの間にピークが現れず、最大被ばく線量も $1\text{E}-10\text{Sv/y}$ を上回ることがなかった。

以上の通り、寒冷化により降水量が減少する、または海退が起こった場合には、最大被ばく線量は減少し、 $10\ \mu\text{Sv/y}$ を超過することはないと考えられる。

(4) “造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオ

“造構運動-隆起・浸食-表層剥離等” シナリオの被ばく線量評価では、処分から一定時間経過後に、隆起・浸食などによる風化などで地下水流速が増加し、かつ施設が地表に接近することで酸素の影響を受ける（酸化性環境となる）こと、施設から流出した核種の移行距離が短くなることを想定した場合の被ばく線量への影響を確認した。地下水流速が増加する時間は、処分から 1 万年後、5 万年後または 10 万年後と想定し、増加量は 10 倍と想定した。また、地下水流速の増加と共に、天然バリアの分配係数が酸化性環境のものに変化する（分配係数が U について 0.005 倍、Ra-226 について 0.1 倍、Pa-231 について 0.005 倍になる。その他の核種は変化しない）ことを想定した。核種の移行距離は、施設近傍の領域の 200m は保持されるものとし、施設近傍以外の領域が 300m から 100m または 200m に減少することを想定した。

評価の結果、最大被ばく線量は $8.6\text{E}-5\sim 1.1\text{E}-4\text{Sv/y}$ まで増加し、パラメータが変化する時間が遅いほど高い被ばく線量となっていた。これは、地下水流速の増加による核種流量の増加、及び U、Ra 及び Pa の分配係数が低下することで Pa231 [U235]、Ra226 [U238]、Ra226 [U234] の最大被ばく線量への寄与が大きくなったことによるものである（最大被ばく線量に対する支配核種は Pa231 [U235] となっていた）。なお、核種の移行距離の違いによる被ばく線量の差は見られなかった。

この評価ケースにおいて、被ばく線量が大きくなる要因として、パラメータの変化が急激であることが考えられる。各パラメータが 1 万～10 万年の間に徐々に変化することを想定した場合、最大被ばく線量は $7.1\text{E}-6\text{Sv/y}$ であった。

5. まとめ

本年度の研究では、ウラン廃棄物余裕深度処分の合理化に資することを目的とし、将来、処分施設や処分施設から放出される放射性核種の移行経路（天然バリア）に起こると予見される事象を検討し、「基本シナリオ」を整理した。

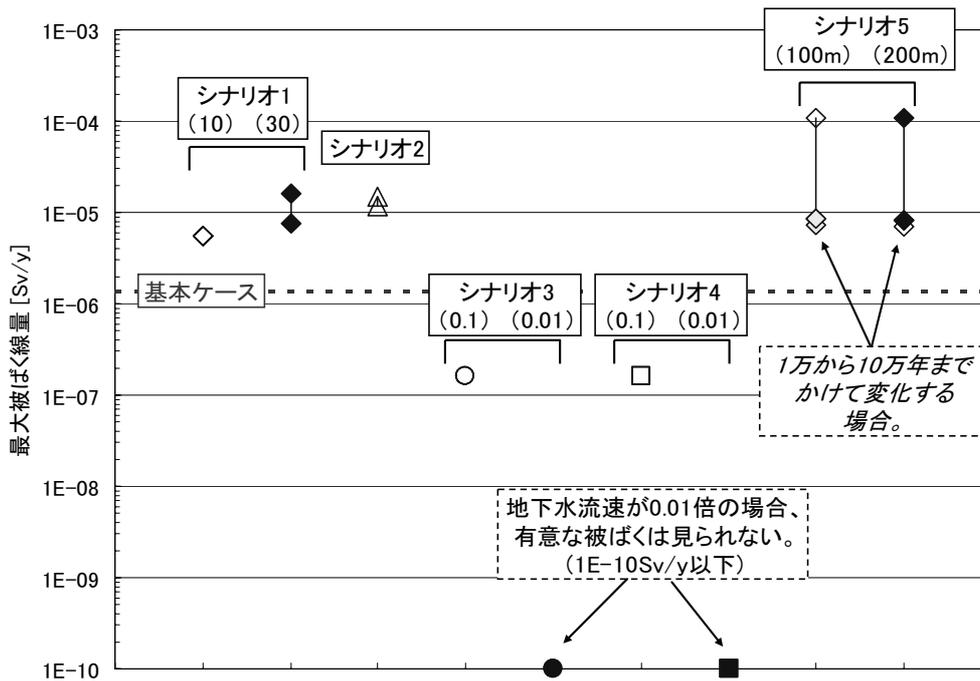
本研究では、将来起こると予見される事象として、気候変動及び造構運動に伴う処分施設とその周辺、及び天然バリアへの物理的・化学的变化を考慮した。従来の研究より被ばく線量は放射性核種の移行時間が大きく関係することから、処分施設からの放射性核種の放出係数、天然バリアの分配係数、地下水流速及び処分施設から河川（放射性核種の流出点）までの距離（移行距離）に着目した整理を行った。検討結果を表 5-1に整理する。

表 5-1 「基本シナリオ」の特徴の整理

	シナリオの概要	変化するパラメータ
基本ケース	将来に亘って、施設及び移行経路を取り巻く物理的・化学的環境は変化せず、現状を維持する。	—
気候変動 -温暖化 -降水量増加	処分施設とその周辺、及び天然バリアは、温暖化による降水量の増加の影響を受ける。降水量の増加は、地下への降雨水浸透量を増加させ、地下水流速に影響を与える。	・地下水流速（増加）
気候変動 -温暖化 -海水準変動 (海進)	処分施設とその周辺、及び天然バリアは、温暖化による降水量の増加と海進の影響を受ける。降水量の増加は、地下への降雨水の浸透量を増加させ、地下水流速に影響を与える。また、海進は施設と天然バリアに塩水性地下水の影響を及ぼす。	・天然バリアの分配係数 (塩水性環境への変化) ・地下水流速（増加）
気候変動 -寒冷化 -降水量減少	処分施設とその周辺、及び天然バリアは、寒冷化による降水量の減少の影響を受ける。降水量の減少は、地下への降雨水浸透量を減少させ、地下水流速に影響を与える。	・地下水流速（減少）
気候変動 -寒冷化 -海水準変動 (海退)	“気候-寒冷化-降水量減少”と同じ。	“気候変動-寒冷化-降水量減少”と同じ。
造構運動 -隆起・侵食 -表層剥離等	処分施設とその周辺、及び天然バリアは、造構運動による隆起・侵食の影響を受ける。隆起・侵食は施設設置深度を上昇させ、施設と天然バリアへの地表の影響を大きくする。	・施設からの放出係数 (酸化性環境への変化) ・天然バリアの分配係数 (酸化性環境への変化) ・地下水流速（増加） ・移行距離の変化（減少）

「基本シナリオ」の整理に基づき、任意の時間に処分施設と天然バリアを取り巻く環境が変化した場合、被ばく線量がどのように変化するのか、被ばく線量評価を行うことで確認した。被ばく線量評価の結果を図 5-1に整理する。

評価の結果、“温暖化-降水量増加”シナリオの地下水流速が10倍となるケース、“寒冷化-降水量減少”シナリオ及び“寒冷化-海水準変動（海退）”シナリオにおいては、最大被ばく線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回った。“温暖化-降水量増加”シナリオの地下水流速が30倍となるケース、及び“温暖化-海水準変動（海進）”シナリオでは、最大被ばく線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ をやや上回った。これは、放射性核種の流量の増加と、天然バリアが塩水性環境に変化したことにより、一部の放射性核種の分配係数が小さくなったためである。“造構運動-隆起・侵食”シナリオでは、条件によっては $10 \mu\text{Sv/y}$ を大きく上回った。これは、地下水流速の増加、施設からの放出係数及び天然バリアの分配係数の酸化性環境への変化（放射性核種が移行しやすくなる変化）の影響が大きいのが、現実的に発生することが考え難いパラメータの急激な変化という評価上の考え方によるところも大きいと思われる。被ばく線量評価において、パラメータの変化が1万～10万年の間に線形的に変化する条件を想定した場合、最大被ばく線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回っていた。なお、本評価における生物圏の設定は、安全評価を実施するために現在の人の生活様式に基づいて典型的と考えられる経路を設定すること、即ち「様式化」を行ったことから、被ばく線量の計算値は具体的なサイト特性を反映したものではない点に留意が必要である。



図中の表記	シナリオ概要	評価結果
シナリオ 1 (10)	<温暖化-降水量増加シナリオ>降水量増加の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が10倍になる。	10 μ Sv/y を超えない。
シナリオ 1 (30)	<温暖化-降水量増加シナリオ>降水量増加の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が30倍になる。	変化時間が遅いと 10 μ Sv/y を超える。
シナリオ 2	<温暖化-海水準変動(海進)シナリオ>降水量増加及び海進の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が10倍に、また天然バリアが塩水性環境になる。	10 μ Sv/y を僅かに超える。
シナリオ 3 (0.1)	<寒冷化-降水量減少シナリオ>降水量減少の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が0.1倍になる。	10 μ Sv/y を超えない。
シナリオ 3 (0.01)	<寒冷化-降水量減少シナリオ>降水量減少の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が0.01倍になる。	10 μ Sv/y を超えない。
シナリオ 4 (0.1)	<寒冷化-海水準変動(海退)シナリオ>降水量減少及び海退の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が0.1倍になる。	10 μ Sv/y を超えない。
シナリオ 4 (0.01)	<寒冷化-海水準変動(海退)シナリオ>降水量減少及び海退の影響で、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が0.01倍になる。	10 μ Sv/y を超えない。
シナリオ 5 (100m)	<造構運動-隆起・侵食シナリオ>表層の剥削や河食などにより、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が10倍になり、処分施設及び天然バリアが酸性環境になる。また、処分施設から河川までの距離が短く(施設近傍以外の領域が300mから100m)になる。	10 μ Sv/y を超える。ただし、ある時点で環境が急変することは考え難く、10 μ Sv/y を超える可能性は小さいと考えられる。
シナリオ 5 (200m)	<造構運動-隆起・侵食シナリオ>表層の剥削や河食などにより、1万年、5万年、10万年後に地下水流速が10倍になり、処分施設及び天然バリアが酸性環境になる。また、処分施設から河川までの距離が短く(施設近傍以外の領域が300mから200m)になる。	10 μ Sv/y を超える。ただし、ある時点で環境が急変することは考え難く、10 μ Sv/y を超える可能性は小さいと考えられる。

図 5-1 「基本シナリオ」に関する被ばく線量評価結果

<参考文献>

- 1) 「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）」、原子力安全委員会、平成19年7月12日
- 2) 「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－分冊1 わが国の地質環境」、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 99-021、(1999)
- 3) 辻村誠一、船橋英之、石橋純、高瀬敏郎、黒沢満：“ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討(3)”、JAEA-Research 2007-030 (2007)
- 4) GoldSim Technology Group LLC：“Monte Carlo Simulation Software for Decision and Risk Analysis”、<http://www.goldsim.com/>
- 5) 日本原子力研究開発機構：“平成17年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2) [ウラン・TRU 廃棄物の基準整備に係る調査]” (2006)
- 6) 原子力安全委員会：“低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)” (2000)
- 7) 山本正幸、石橋純：“ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討”、JNC TJ8440 2005-001 (2005)
- 8) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構：“TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－”、JNC TY1400 2005-013 (2005)
- 9) 日本原子力研究所：“平成16年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2) [ウラン・TRU 廃棄物の基準整備に係る調査]” (2005)
- 10) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊3 地層処分システムの安全評価”、JNC TN1400 99-023 (1999)
- 11) 日本原子力研究開発機構：“平成18年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査(2/2) [ウラン・TRU 廃棄物の基準整備に係る調査]” (2007)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼツタ	Z	10 ⁻²	センチ	cm
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ² ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルクス	lx	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー当量, カーマン線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンと記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb = 1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fem	1 femi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

