

仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを 対象とした隆起・侵食の影響評価手法の例示

Illustration of an Approach to Evaluate the Effect of the Uplift and Denudation for
Groundwater Scenarios of a Geological Disposal Concept in a Hypothetical Sedimentary Rock

江橋 健 川村 淳 稲垣 学 小尾 繁*

柴田 雅博 板津 透 仲島 邦彦* 宮原 要

Takeshi EBASHI, Makoto KAWAMURA, Manabu INAGAKI, Shigeru KOO*

Masahiro SHIBATA, Toru ITAZU, Kunihiro NAKAJIMA* and Kaname MIYAHARA

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2009

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>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

仮想的な堆積岩分布域における地層処分の地下水シナリオを対象とした
隆起・侵食の影響評価手法の例示

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット

江橋 健、川村 淳[※]、稲垣 学[※]、小尾 繁^{*}、柴田 雅博、板津 透[※]、仲島 邦彦^{*}、宮原 要

(2008 年 12 月 19 日 受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、隆起・侵食は、適切なサイト選定や処分場の設計によって処分システムに及ぼす著しい影響を回避することが可能と考えられているものの、この現象が緩慢ながらも極めて長期間に渡って継続することから、現象の過去の履歴と処分システムへ与える潜在的な影響の理解に基づいて、隆起・侵食のシナリオを考慮した性能評価手法の信頼性を向上させることが重要である。

本研究では、具体的な地質環境を対象とした影響評価に反映できるよう、仮想的な堆積岩分布域における地下水シナリオを対象として、概念モデルに基づく処分環境条件の時間変遷パターン、およびその影響解析について例示した。本検討を通じて、概念モデルが、隆起・侵食に係わる場の特徴を取り込んだ処分環境条件の時間変遷の組合せを効果的に抽出可能であることに加え、核種移行モデル・パラメータの設定およびそれに基づく影響解析に対して有効な出発点となりうるとの見通しを得た。さらには、概念モデルに基づく一連の隆起・侵食の影響評価手法は、処分事業の初期段階における具体的な地質環境を対象とした影響評価に対して有効であることを示した。

Illustration of an Approach to Evaluate the Effect of the Uplift and Denudation for Groundwater Scenarios of a Geological Disposal Concept in a Hypothetical Sedimentary Rock

Takeshi EBASHI, Makoto KAWAMURA[※], Manabu INAGAKI[※], Shigeru KOO^{*}
Masahiro SHIBATA, Toru ITAZU[※], Kunihiro NAKAJIMA^{*} and Kaname MIYAHARA

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura Naka-gun Ibaraki-ken

(Received December 19, 2008)

It is considered that it is possible to avoid the effect of the uplift and denudation process on geological disposal system by siting and a repository design. However, since the uplift/denudation continues far into the future, it is important to enhance the confidence of the methodology to evaluate such an effect, based on the understanding of geohistorical information and potential impact on the disposal system.

This paper presents an evolution pattern of the geological environment and the influence analysis in terms of system performance affected by the uplift and denudation process based on the relevant conceptual models for groundwater scenarios of the disposal system for a hypothetical sedimentary rock.

As a result, it is indicated that the conceptual model is capable to identify a specific combination of patterns of system evolution of the geological environment in terms of features on the uplift and denudation process, and also provides technical basis for setting up parameters of nuclide migration model and the subsequent influence analysis. Consequently, it is also indicated that the evaluation methodology applied in this study is valuable to evaluate the uplift/denudation phenomena with specific geological environment, and the results obtained by the analysis could be valuable information for site investigation and/or the prediction of a future change trend for the uplift/denudation.

Keywords : HLW Disposal, Uplift/Denudation, Scenario, Sensitivity Analysis

※ Collaborating Engineer

* NESI Inc.

目 次

| | | |
|---|-----------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | アプローチ | 3 |
| 3 | 解析条件の設定 | 6 |
| 3.1 | 初期条件の設定 | 6 |
| 3.2 | 概念モデルおよび処分環境条件の時間変化パターンの整理 | 7 |
| 3.3 | 核種移行モデル、核種移行パラメータの時間的な変化の設定 | 13 |
| 4 | 解析結果の例示 | 20 |
| 5 | おわりに | 22 |
| 謝辞 | | 22 |
| 参考文献 | | 23 |
| 付録 1 地下水流動解析 | | 25 |
| 付録 2 間隙水組成、溶解度、分配係数、拡散係数、ガラス溶解速度の設定 | | 29 |
| 付録 3 解析コードの確認 | | 35 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1 Introduction | 1 |
| 2 Approach | 3 |
| 3 Analysis condition for the influence analyses | 6 |
| 3.1 Setting of the initial condition | 6 |
| 3.2 Arrangement of the relevant conceptual model and the patterns of time evolution of the disposal condition | 7 |
| 3.3 Arrangement of the nuclide migration modeling and the time variation of the parameters | 13 |
| 4 Illustration of the influence analyses | 20 |
| 5 Conclusion | 22 |
| Acknowledgement | 22 |
| References | 23 |
| Appendix1 Gournd water flow analysis | 25 |
| Appendix2 Setting of porewater, solubility, Kd, De, glass dissolution rate | 29 |
| Appendix3 Confirmation of analysis code | 35 |

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然現象（火山・熱水活動、地震・断層活動、隆起・侵食、気候・海水準変動）の影響を評価する場合、考慮すべき天然現象の発生様式やそれに起因する場の変化の様式、それらの地域性による違いなどを関連付けつつ処分環境・システム性能への影響を定量的に評価することが重要になる。具体的には、天然現象が地質環境条件に影響を与え、その影響が処分環境、さらにはシステム性能へと影響が伝播する道筋をシナリオとして明らかにすること、そして、そのシナリオにしたがって影響を評価するための核種移行モデル・パラメータを整備・検討することが必要となり、これらの内容を含め、天然現象の影響を考慮した核種移行評価を行うことが重要な検討課題として挙げられている（経済産業省 資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構、2006¹⁾）。核燃料サイクル開発機構(2005)²⁾は、天然現象が処分場周辺の地質環境条件¹⁾に与える影響を THMC²⁾のカテゴリーに分けて表現し、表現された地質環境条件に基づいて処分環境条件³⁾を整理したうえで、処分環境条件に与える影響を核種移行パラメータの変化として取り扱うことにより、シナリオを設定して影響評価を実施する方法論を提案した。そのうえで、場所を特定しない段階の検討として、急激かつ局所的な現象であり現象を中心とした広がりを持つことから影響の範囲や強弱をある程度定量的に把握しやすい火山・熱水活動について、その方法論を適用し、現象の理解、処分場周辺の地質環境条件の変化、処分環境条件の変化を例示した（核燃料サイクル開発機構、2005²⁾）。

天然現象のうち、隆起・侵食／沈降・堆積は緩慢かつ広域的な現象であり、過去数十万年程度の地質学的記録を基に将来 10 万年程度の推論は可能であるとして、「過去 10 万年間の隆起の総量が 300m を超えていることが明らかな地域を含めないように、概要調査地区を選定すること」が求められている（原子力発電環境整備機構、2004³⁾）。加えて、「地域的な隆起速度と侵食速度の関連性を考慮した設計により、隆起・侵食が処分システムに及ぼす影響を避けることが可能である」と考えられている（土木学会・原子力土木委員会・地下環境部会、2001⁴⁾）。しかしながら、隆起・侵食／沈降・堆積のプロセスは広域的に生ずる現象であり、長期的には処分システムへの影響の不確実性を完全に排除することは難しいと考えられる。以上の重要な点に対して応えていくためには、隆起・侵食／沈降・堆積が発端となる地質環境、処分環境および処分システムの性能への影響を定量的に評価する必要がある。そのための検討としては、具体的な地質環境の情報を活用し、

- a. 隆起・侵食／沈降・堆積が処分環境に影響を及ぼすプロセスを明らかにすること
- b. その影響を評価するための核種移行モデル・パラメータを整備すること

¹ 地質環境調査に基づいて把握される対象領域の条件

² 熱的・水理学的・力学的・化学的(Thermal-Hydrological-Mechanical-Chemical)の各現象の総称

³ 地質環境条件に基づいて、核種移行評価上取り扱うために設定した対象領域の条件

c. 隆起・侵食／沈降・堆積の影響を考慮した核種移行評価を行うこと

が求められる。隆起・侵食／沈降・堆積は、火山・熱水活動とは異なり、緩慢かつ広域的な変化であることから、現象を中心とした影響の範囲や強弱を定量的に把握することは困難である。そこで、川村ほか(2009)⁴)において、上記のうち a.に関して場所を特定しない段階のジェネリックな検討として、隆起・侵食／沈降・堆積による処分環境条件の時間変化を表現するため、「基本概念モデル」として深度方向の地質環境条件の変化の取扱いについて検討した後、基本概念モデルに対して丘陵、平野、沿岸などの地表環境（以降、本報では「場」とする）の変遷を取り扱うための「場の変遷を考慮した概念モデル（以下、概念モデルという）」を提案した。この概念モデルにより、地史とモダンアナログ的⁴な観点から収集整理した地質環境条件（THMCG⁵）と場の変遷に関する情報を適宜組合せ、それらを追加・変更することにより、隆起・侵食／沈降・堆積の現実在即した取り扱いが可能となった。また、核種移行評価に関わるモデルやパラメータ設定に対する有効な情報を提示可能となった。さらに、場と地質環境条件の変遷を取り扱えることから、具体的な場所が与えられた場合においても、その場所の地史に基づき、地表環境との地質環境条件の将来予測をモダンアナログ的な観点から情報を収集整理することにより、概念モデルは適用可能と考える。

本報では、川村ほか(2009)⁴)に引き続き、先に挙げた a.～c.の課題に応えるため、仮想的な堆積岩分布域における地下水シナリオを対象として、一連の隆起・侵食の影響評価手法について例示した内容について報告する。このような手法の適用性確認は、具体的な地質環境を想定した同様な影響評価に資するものである。さらには、影響評価を通じて得られる知見は、処分事業の初期段階のような情報が限られた場合において、隆起・侵食／沈降・堆積に関する将来予測や地質環境調査に対して、有効なフィードバック情報となりうるものとする。

以下では、第 2 章においてアプローチ、第 3 章において影響解析条件の設定、第 4 章において影響解析結果の例示についてそれぞれ記述する。そして、第 5 章においては、成果をまとめるとともに今後の課題について示す。

⁴ 川村ほか(2009)においては、将来起こり得る天然現象やそれに起因する地質環境条件の変化を、現在の現象やその周辺の地質環境条件から予測する考え方を「モダンアナログ的」と定義づけている。

⁵ THMC に、地質構造や地表面の形状などの幾何形状(G)を加えた総称

2. アプローチ

本章においては、川村ほか(2009)⁵⁾の考え方に基づいて、地下水シナリオに対して、隆起・侵食／沈降・堆積の影響解析を実施するための方法論について記述する。

地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999⁶⁾：以下、第2次取りまとめという）においては、我が国の一般的な地質環境を対象として、隆起・侵食／沈降・堆積に関する簡略的なシナリオおよびその影響評価が例示された（牧野ほか，2000⁷⁾）。

一方、具体的な地質環境を対象として隆起・侵食の影響を評価するためには、その場所における現象の過去の記録および地質環境への影響の理解を活用することが重要である。川村ほか(2009)⁵⁾において提案された概念モデルは、丘陵/平野/沿岸などの地表環境、すなわち場などの具体的な地質環境の情報が初期条件として与えられた場合に、隆起・侵食／沈降・堆積を第2次取りまとめの発展型として、現在の地質環境条件に対して、処分深度の変化（例えば、侵食による処分深度の減少）と、丘陵、平野、沿岸などの処分場直上の地表環境の変化を組合せることにより、核種移行評価における処分環境条件の時間変化パターンを地史に基づいて抽出するものである（前章の a.に相当）。そして、抽出された処分環境条件の時間変化パターンに基づいて、核種移行モデル・パラメータの時間的な変化を設定し、影響解析を実施することが求められる（前章の b～c.に相当）。現在の地質環境条件や隆起・侵食／沈降・堆積の特徴が幅として取り扱われる場合には、処分環境条件および核種移行パラメータの値が変動幅として影響解析に取り込まれることになり、解析ケースが増加することが考えられる。そこで、隆起・侵食に関する影響解析を進める際の初期段階としては、解析ケースの絞込みという観点から、処分環境条件の変化と隆起・侵食／沈降・堆積の特徴については任意の値を設定することとし、それらに基づいて抽出される処分環境条件の時間変化パターンに着目して実施することが必要になると考える。

本検討においては、ある程度の情報がわかっていることを想定した仮想的な堆積岩分布域における地下水シナリオに対して概念モデルを適用し、概念モデルに基づく処分環境条件の時間変化パターン、核種移行モデル・核種移行パラメータの時間的な変化の設定、およびそれらに基づく影響解析について例示する。なお、本検討においては、処分環境条件の値と隆起・侵食の特徴について、任意の値を設定することとした。以下では、本検討における具体的な手順を以下に、概略的なフローを図 2-1 に示す。

初期条件の設定：

初期条件として、対象領域の現在の地質環境条件（場、THMCG の特性など）および処分システムの構成を設定する。本検討においては、対象とする領域として既存の文献（第2次取りまとめ：核燃料サイクル開発機構，2005⁸⁾：太田ほか，2007⁹⁾）に基づいて仮想的な堆積岩分布域を設定し、処分システムの構成として第2次取りまとめにおける処分場の仕様に準拠することとした。

概念モデルおよび処分環境条件の時間変化パターンの整理：

概念モデルは、発生可能性を否定できない処分環境条件の時間変化パターンを列挙するための起点であるとともに、核種移行モデルや核種移行パラメータを設定する際の出発点となるものである。概念モデルおよび処分環境条件の時間変化パターンの整理手順を以下に示す。

- 地史に基づいて、隆起・侵食／沈降・堆積の特徴として、現象の様式（例えば、面的侵食により処分場の深度が一様に浅くなる）、侵食速度に基づく処分場の深度が変化する速度、侵食速度と隆起速度の関係に基づく場の変化（例えば、隆起速度＞侵食速度の場合には処分場直上の地表環境が平野から丘陵に相対的に変化すること）を整理する。
- 現在の地質環境条件 THMCG に基づき、深度と場を軸として対象領域を分割する。
- 分割したマトリクス毎に処分環境条件 THMCG の具体的な値を設定する。
- 隆起・侵食／沈降・堆積の特徴と各マトリクスの処分環境条件を組合せることにより、処分環境条件の時間変化パターンを列挙する。

核種移行モデル、核種移行パラメータの時間的な変化の設定：

- ・ 最初に、隆起・侵食／沈降・堆積が処分システムに与える影響を評価するための基準となる評価体系（モデル、パラメータ）を設定する。本検討においては、第2次取りまとめのレファレンスケースを基準となる評価体系として用いることとし、隆起・侵食が処分システムに与える影響についての種々の想定に対応する解析ケースを、そこからのモデルあるいはパラメータを変化させることで具体化することとした。
- ・ 母岩中の核種移行モデルについて、第2次取りまとめでは透水性の異なる複数の1次元平行平板を重ね合せたモデルが用いられたものの、ここでは、仮想的な堆積岩分布域を対象としていることから、多孔質媒体モデルを用いることとした。
- ・ シナリオとしては、一般に、地下水シナリオと接近シナリオに分類される。地下水シナリオについては、地下水により放射性物質が処分場から人間環境に運ばれる可能性に関するシナリオであり、接近シナリオは、高レベル放射性廃棄物と人間との物理的距離が接近することによって人間環境に影響が及ぶ可能性があるシナリオとそれぞれ定義される（第2次取りまとめ）。地表から数十 m 付近については、遠い将来において、河川の下刻や堆積作用を繰り返しながら変化していく可能性が示唆されていることから（第2次取りまとめ）、接近シナリオとして取り扱う可能性が考えられる。その際、数 km 四方を有する処分場の周辺環境が瞬時に影響を受けることは考えにくく、影響を受ける廃棄体の本数やその時間の想定についても信頼性を向上させることが必要と考える。このため、本検討においては、隆起・侵食／沈降・堆積によって処分場が地表近傍に至る前までの状態を評価の対象とし、評価の指標には、移行距離を 100m とした堆積岩からの移行率（廃棄体 1 本あたり）を設定した。
- ・ 処分環境条件の時間変化については、核種移行パラメータの変更として取り扱うことと

した。このため、まず、分割したマトリクス毎の処分環境条件 THMCG に基づいて、核種移行パラメータ値を設定する。そして、処分環境条件の時間変化パターンに基づいて、マトリクス毎の核種移行パラメータ値を組み合わせることにより、核種移行パラメータの時間的な変化を設定する。

影響解析の実施：

上述の整理に基づいて、決定論的な解析を実施する。本報では、第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて線量を支配した核種のひとつである Se-79、および第2次取りまとめの隆起・侵食に関する解析において線量を支配した Np-237 を対象として解析結果を例示することとした。

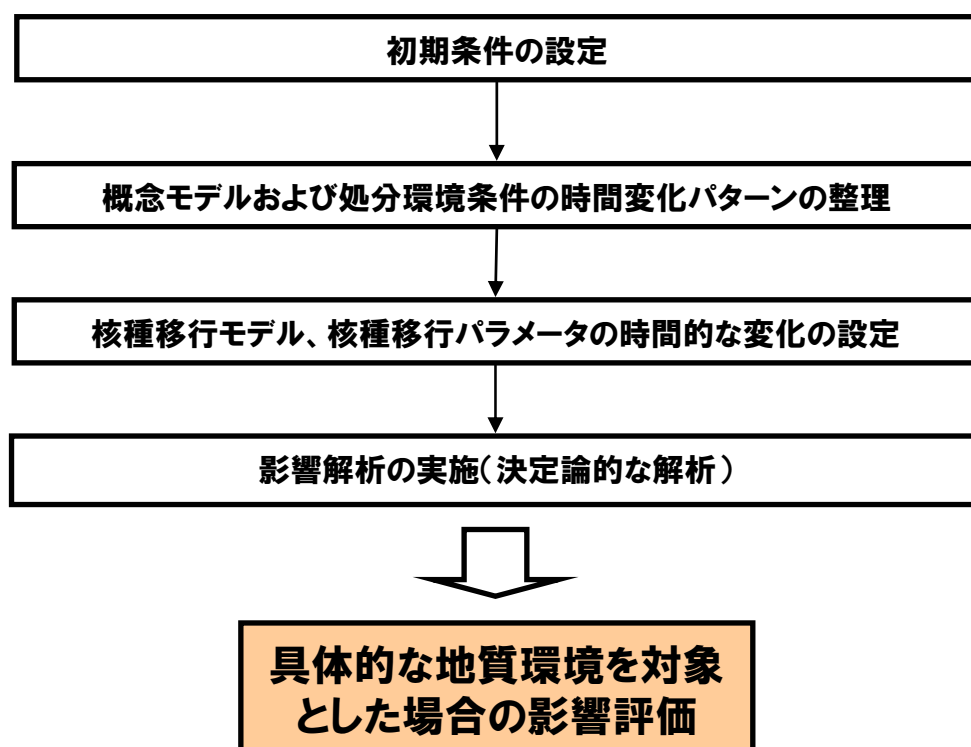


図 2-1 本検討のアプローチ

3. 解析条件の設定

本章においては、2章で示したアプローチに基づいて整理した影響解析の条件について述べる。

3.1 初期条件の設定

本節では、対象領域および処分システムの設定について述べる。

対象領域の設定：

本検討においては、既存の文献（第2次取りまとめ；核燃料サイクル開発機構，2005⁸⁾；太田ほか，2007⁹⁾など）を参考として、仮想的な堆積岩分布域を対象領域に設定して検討を行うこととした。この仮想的な対象領域については、文献調査や数本のボーリング調査などにより、場、地質、現在の地質環境条件、隆起速度の概要に関する情報が得られているものとし、その内容を以下のように設定した。対象領域の概念図を図3-1に示す。

- ・ 場：海に近い領域で、浅海→沿岸（標高 0～3m 程度）→平野（標高 3m 程度～）→丘陵（最大標高 250m 程度）と約 20km の間で単調に標高が高くなる。
- ・ 地質：対象領域の岩盤は均質な堆積岩（塊状均質な泥岩）で構成されており、表層土壌を除くと、表層から深度約 20m までは酸化性・風化帯が形成されていることを想定する。また、顕著な断層や褶曲構造はない。
- ・ 地質環境条件（仮想的な設定）：
 - 温度（T）：気温の擾乱を受ける表層部を除いた対象領域の地温勾配は、2℃/100m 程度である。
 - 水理（H）：透水係数の値（幅）は、「表層の風化帯/平野部の深度 300m 程度まで/沿岸部の深度 100m 程度」と「それ以外」の領域で 2 種類に分類される。また、水理特性に大きな影響を与えるような大規模な割れ目帯などはない。
 - 力学（M）：岩石は堆積岩であり、深度が深くなるにつれて圧密と地温による続生作用を受け硬質になる傾向が認められるが、表層の風化帯を除くと一軸圧縮強度や有効間隙率に大きな差はなく、ほぼ均一な岩盤力学特性を示す。
 - 化学（C）：丘陵部では、淡水（降水系地下水）が分布する。平野部は深度 300m 程度までは淡水であるが、それ以深は化石海水と考えられる塩水が分布する。沿岸ではその境界深度が 100m 程度まで上昇する。浅海域では海水系地下水が分布している。また、表層（風化帯）の地下水は酸化性を示すが、それ以深の健岩部では還元性を示す。岩石を構成する鉱物や粒子については、続生作用、地下水の酸化還元環境の相違で、主にシリカ鉱物、粘土鉱物、黄鉄鉱の量比に差がある。
 - 幾何形状（G）：顕著な断層や褶曲構造はなく、将来的にも処分場の形状や表層の地形に顕著な変化はしない。したがって、本検討においては、環境条件に影響を及ぼす幾何形状の変化はないこととし、以後、本報においては THMCG ではな

く THMC で検討することとする。

- ・ 隆起速度 : 対象領域の隆起・侵食速度は、過去 100 万年前から現在にいたる地史の研究などから 0.1mm/y 程度を設定（第 2 次取りまとめを参考）。

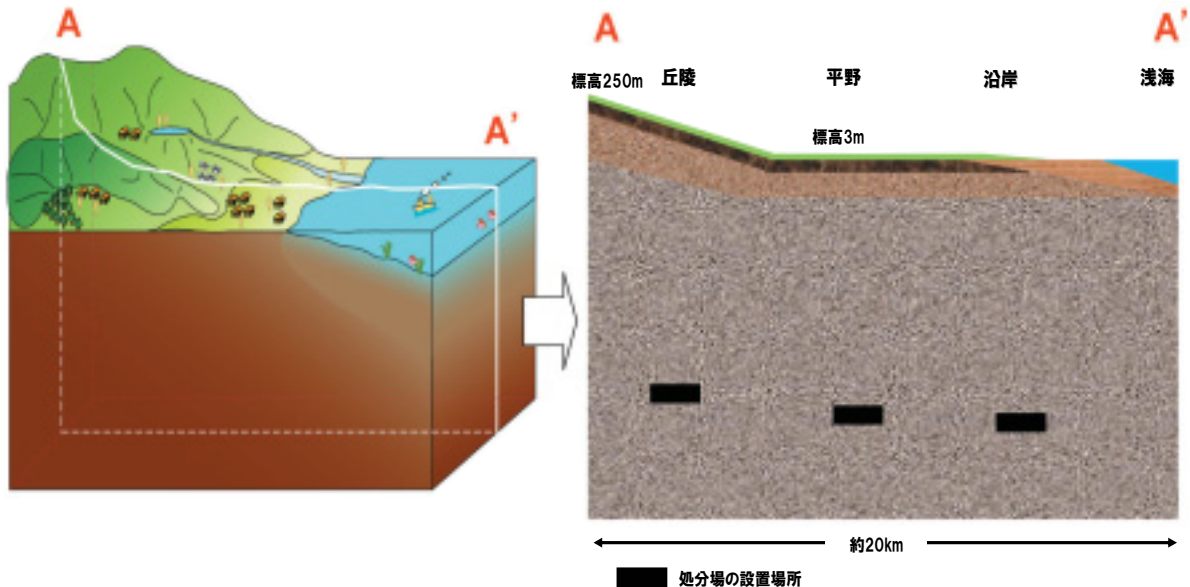


図 3-1 本検討で設定した仮想的な対象領域の概念図

処分システムの構成の設定：

処分坑道や人工バリア構成などの処分場の設計については、第 2 次取りまとめにおける処分場の仕様に準拠することとした。なお、処分深度については、500m を想定することとした。なお、本検討において対象とした処分場の設置場所については、丘陵、平野、沿岸とした（図 3-1）。

3.2 概念モデルおよび処分環境条件の時間変化パターンの整理

本節では、3.1 節で設定した対象領域に基づいて整理した概念モデルおよび処分環境条件の時間変化パターンについて述べる。

隆起・侵食／沈降・堆積の特徴の整理：

隆起・侵食の特徴として、現象の様式、処分場の深度が変化する速度および場の変化について整理する。

1) 現象の様式

現象の様式とは、処分場が地表に対して接近するか遠ざかるのか、また、侵食に関しては、線的か面的かを表すパターンと定義する。本対象領域に関しては、3.1 節に記しているように、地史の研究などから過去 100 万年前から現在にかけて、隆起・侵食が継続してきたとした。このため、今後 10 万年程度まではこのような隆起・侵食が継続される

ものと考えられる。また、将来 10 万年以降についても、将来予測の不確実性が增大すると考えられるものの、対象領域をとりまくテクトニクス場が変動しないと仮定し、隆起・侵食傾向は継続するものとする。また、侵食については、本検討においては、面的侵食により処分場の深度が一様に浅くなることを想定することとした。

なお、沈降・堆積については、処分深度が増すという意味で処分システムにとっては有利な面が大きいと考えられること（土木学会・原子力土木委員会・地下環境部会，2001⁴⁾）、さらに、地表に接近する場合と比較して、地表から遠ざかる場合には処分環境条件 THMC の変動が小さいこと（川村ほか，2009⁵⁾）を踏まえ、ここでは、隆起・侵食のみを検討対象とした。

2) 処分場の深度が変化する速度

3.1 節の設定において、対象領域の隆起速度は、地史の研究などから過去 100 万年前から現在にかけて 0.1mm/y と設定した。将来 10 万年程度においては、過去 100 万年の変動幅を考慮すると 0.1mm/y 程度で隆起・侵食が継続するものと考えられる。そこで、将来 10 万年までの隆起・侵食速度として 0.1mm/y を設定する。一方、10 万年以降については、前述のように将来予測の不確実性が增大すると考えられるが、1) 現象の様式において、対象領域のテクトニクス場が変動しないと仮定したため、隆起速度は不変、すなわち 0.1mm/y と設定する。

3) 場の変化

場の変化とは、隆起およびそれに伴う相対的な海水準の低下（海退）によって平野環境であったものが丘陵環境になる、あるいは沈降およびそれに伴う相対的な海水準の上昇（海進）によって平野環境であったものが沿岸環境になるなどの、地表環境の変化と定義する。将来 10 万年以降については、将来予測の不確実性が増加すると考えられ、隆起・侵食の傾向が変化する可能性がある。例えば、侵食速度が隆起速度よりも大きい場合には、相対的に標高が高くなり、平野が丘陵に変化する可能性がある。その場合においても、沿岸域が急に丘陵部へ変化することは考えにくく、沿岸→平野→丘陵のように変化すると考えられる（Kawamura et al., 2008¹⁰⁾）。すなわち、処分場を設置した場合には、スタートとなる場の環境から隣接する場の環境へ推移することとなる。なお、超長期には沿岸が平野を経て丘陵になる場合が考えられるが、ここでは初期の検討として、スタートとなる場の環境から隣接する場の環境への推移のみを考慮するものとした。抽出した 8 つのパターンを表 3-1 に示す。なお、丘陵から更に標高が高い丘陵あるいは山岳になる変化については、丘陵→丘陵に含めることとした。

表 3-1 環境の推移パターン一覧

| 処分場を設置する場 | 地形の変化 |
|-----------|-------|
| 丘陵 | 丘陵 |
| | 平野 |
| 平野 | 丘陵 |
| | 平野 |
| | 沿岸 |
| 沿岸 | 平野 |
| | 沿岸 |
| | 浅海 |

深度と場を軸とした対象領域の分割：

ここでは、川村ほか(2009)⁵⁾の考え方を 3.1 節で設定した仮想的な堆積岩分布域に適用し、図 3-1 の A-A'線に沿った断面を例として、対象領域を深度と場を軸として分割する。以下では、分割した内容について記述する。

対象領域の分割においては、3.1 節で設定した現在の地質環境条件のうち、核種移行評価上感度が大きい水理（H）と化学（C）に着目し、区分した領域をマトリクスとして定義することとした。

3.1 節で設定した現在の地質環境条件に基づいて、対象領域の水理特性および化学特性を整理した（図 3-2 および図 3-3）。そして、図 3-2 および図 3-3 を踏まえ、水理（H）と化学（C）の特性を表現できるよう対象領域を分割した（図 3-4 の①～⑩）。この際、場の軸としては、丘陵、平野、沿岸、および浅海に分割し、深度の軸については主に化学（C）（丘陵と浅海については、深度 20m 以深において地下水水質に大きな差がないこと、平野と沿岸に関する淡水と塩水の境界深度がそれぞれ 300m と 100m であること、深度 20m は酸化帯であることなど）に基づいて分割した。

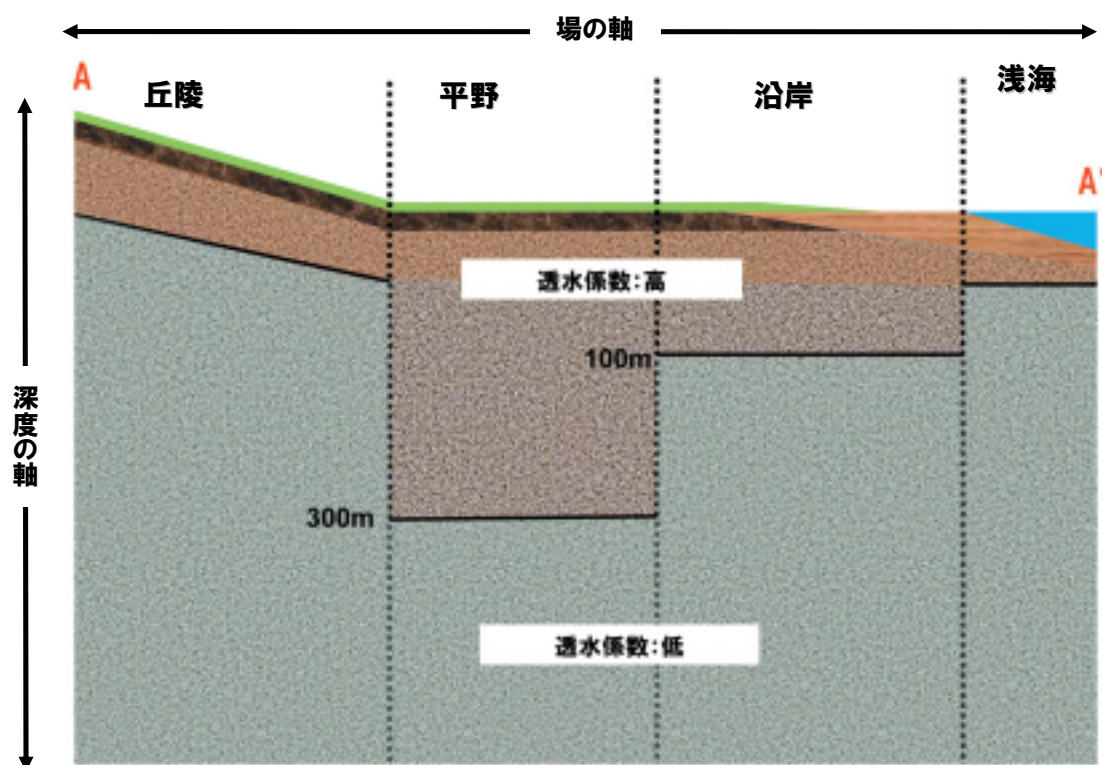


図 3-2 対象領域の水理特性 (A-A' 断面)

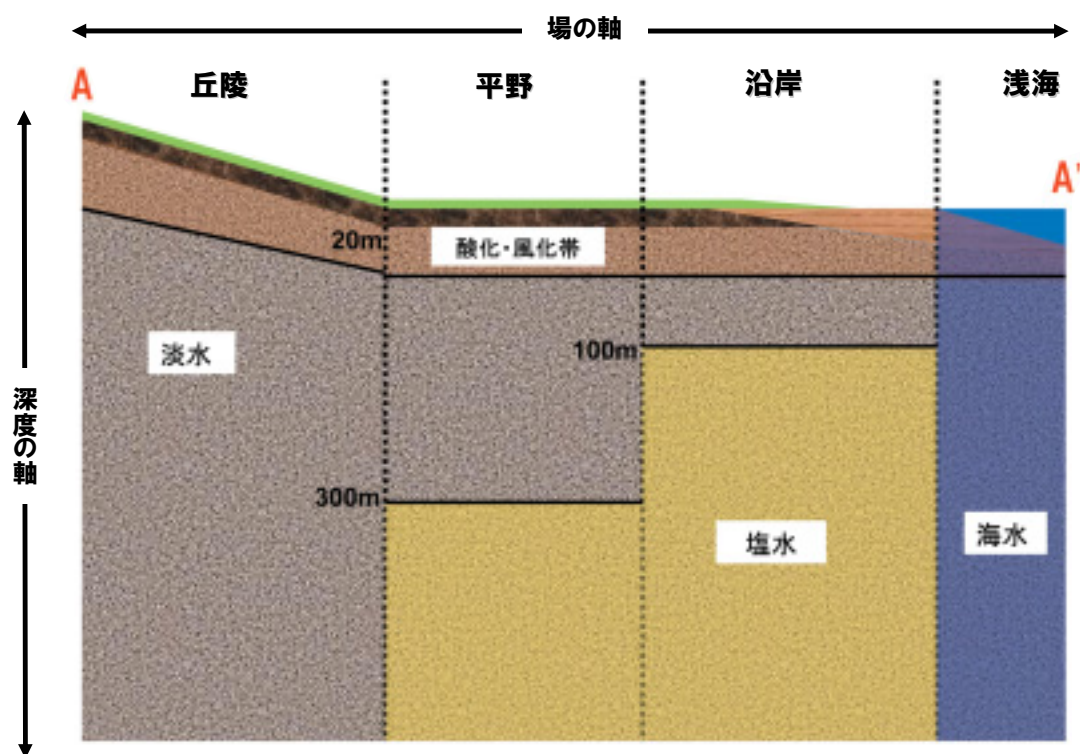


図 3-3 対象領域の化学特性 (A-A' 断面)

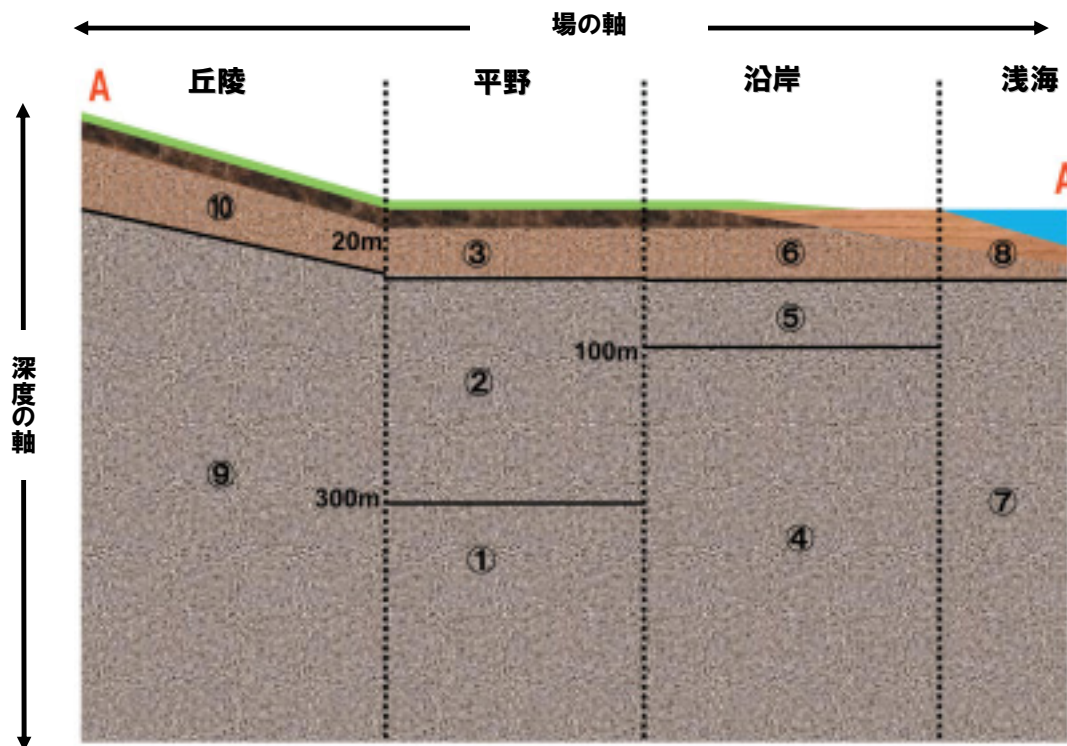


図 3-4 対象領域の分割 (A-A' 断面)

表 3-2 処分環境条件 THMC の具体的な値

| マトリクス | | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | | |
|---------------|---------|-------------------|---|--|--|---|--|--|---|--|---|--|--------|------|
| 処分環境条件 (THMC) | | | | | | | | | | | | | | |
| T | 岩盤温度 | ℃ | 25 | 21 | 15 | 25 | 17 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | | |
| | 温度勾配 など | ℃/100m | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| H | 透水係数 | m/s | 1×10 ⁻¹⁰ ~1×10 ⁻⁷ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | 1×10 ⁻¹⁰ ~1×10 ⁻⁷ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | 1×10 ⁻¹⁰ ~1×10 ⁻⁷ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | 1×10 ⁻¹⁰ ~1×10 ⁻⁷ | 1×10 ⁻⁷ ~1×10 ⁻⁵ | | |
| M | 有効間隙率 | % | 35~45 | 35~45 | 50 | 35~45 | 35~45 | 50 | 35~45 | 50 | 35~45 | 50 | | |
| | 一軸圧縮強度 | Mpa | 10~35 | 10~35 | 10 | 10~35 | 10~35 | 10 | 10~35 | 10 | 10~35 | 10 | | |
| | 真密度 | g/cm ³ | 1.7~1.9 | 1.7~1.9 | 1.7 | 1.7~1.9 | 1.7~1.9 | 1.7 | 1.7~1.9 | 1.7 | 1.7~1.9 | 1.7 | | |
| C | 地下水組成 | pH | - | 7.8~8.5 | 7.5~8.5 | 7.5 | 7.8~8.5 | 7.5~8.5 | 7.5 | 7.8~8.5 | 7.5 | 7.8~8.5 | 7.5 | |
| | | Eh | mV | -340~-280 | -300~-200 | 0~+100 | -340~-280 | -300~-200 | 0~+100 | -340~-280 | 0~+100 | -340~-280 | 0~+100 | |
| | | 塩濃度 | mg/l | [Na+] | 6400 | 2300 | 55 | 6400 | 2300 | 55 | 10000 | 10000 | 2300 | 55 |
| | | | | [K+] | 70 | 20 | 6 | 70 | 20 | 6 | 450 | 450 | 20 | 6 |
| | | | | [Ca2+] | 85 | 30 | 10 | 85 | 30 | 10 | 150 | 150 | 30 | 10 |
| | | | | [Mg2+] | 200 | 20 | 10 | 200 | 20 | 10 | 180 | 180 | 20 | 10 |
| | | | | [Cl-] | 9700 | 2100 | 30 | 9700 | 2100 | 30 | 15000 | 15000 | 2100 | 30 |
| | | 配位子濃度 | mg/l | [HCO ₃ ⁻] | 1100 | 1600 | 47 | 1100 | 1600 | 47 | 3200 | 3200 | 1600 | 47 |
| | | | | [CO ₃ ²⁻] | 500 | 10 | 0.1 | 500 | 10 | 0.1 | 250 | 250 | 10 | 0.1 |
| | | | | [NO ₃ ⁻] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | [SO ₄ ²⁻] | 1500 | 350 | 100 | 1500 | 350 | 100 | 400 | 400 | 350 | 100 |
| | | 有機物 | mg/l | フミン酸 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | | | その他 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | | 鉱物組成 | 粘土鉱物 | % | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 | 1~18 |
| | 雲母 | | ~1 | | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | ~1 | |
| | 緑泥石 | | n.d. | | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | |
| | 方解石 | | 1~5 | | ~1 | <1 | 1~5 | ~1 | <1 | 1~5 | <1 | 1~5 | <1 | |
| | 黄鉄鉱 | | 2~3 | | 2~3 | <1 | 2~3 | 2~3 | <1 | 2~3 | <1 | 2~3 | <1 | |
| その他 | - | | - | | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

分割した各マトリクスにおける処分環境条件 THMC の具体的な情報の整理：

図 3-4 の①～⑩のマトリクスに対して、処分環境条件の具体的な値を設定する。処分環境条件の設定に関しては、具体的な地域が定まっている場合は、その地域の既存文献、具体的な調査データから設定することとなるが、本検討では仮想的な領域を対象としているため、第2次取りまとめ、核燃料サイクル開発機構(2005)⁸⁾および太田ほか(2007)⁹⁾などの情報を参考とすることとした。設定した処分環境条件 THMC を表 3-2 に示す。

処分環境条件の時間変化パターンの整理：

ここでは、これまでに整理した隆起・侵食/沈降・堆積の特徴および各マトリクスにおける処分環境条件を組み合わせることにより、処分環境条件の時間変化パターンを整理する。処分場を設置する場（丘陵、平野、沿岸）を起点として場が表 3-1 に示したように時間変化するとした場合には、図 3-4 にて分割した①～⑩に沿って処分環境条件が変化するものと考ええる。例えば、処分場を設置する場が平野で、地史の研究成果などから今後標高が高くなり丘陵になることが予想される場合、処分環境条件が起点となる①から⑨に変化するものと考えられる。場の軸方向の変動は、気候変動などに起因し複雑な変化を経るものと考えられるが、ここでは検討を単純化するために、場の軸方向の変化は一定として、処分環境条件の変化、すなわち通過するマトリクスをなるべく少なくすることを想定した。例えば、気候変動などによる周期的な変動は除外し、先に挙げた平野から丘陵に至るパターンでは、①→②→⑨というパターンも考えられるが、ここでは単純化のために①→⑨のパターンで代表的に表すものとした。

このような考え方にに基づき、表 3-1 に対応する処分環境条件の時間変化パターンを整理した（図 3-5）。検討に際しては、任意のケースとして、場の軸方向の変化を考慮せずに処分環境条件が変化するケースを V-1～V-3、場の変化を考慮して処分環境条件が変化するケースを T-1～T-4 とそれぞれ設定した。

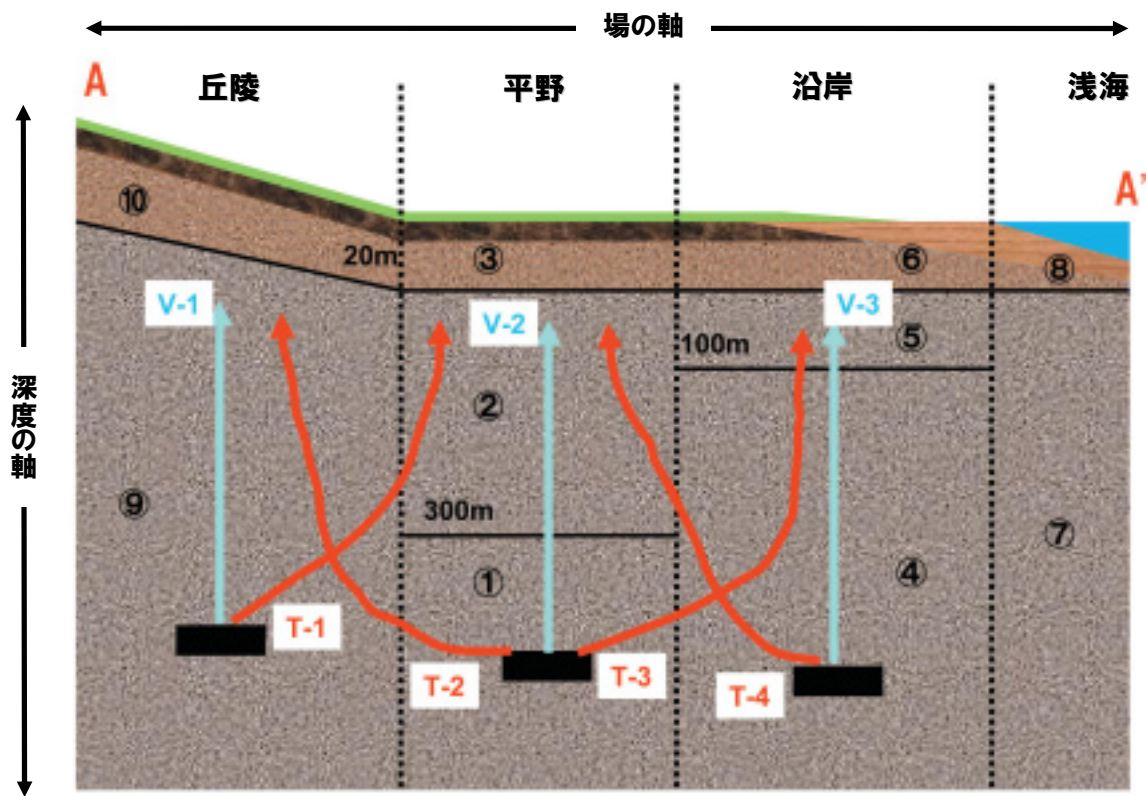


図 3-5 処分環境条件の時間変化パターン

3.3 核種移行モデル、核種移行パラメータの時間的な変化の設定

本節では、核種移行モデル、核種移行パラメータの時間的な変化の設定について記述する。

本報においては、隆起・侵食が処分システムに与える影響についての種々の想定に対応する解析ケースに対して、第2次取りまとめのレファレンスケースの評価体系を基準として、そこからのモデルあるいはパラメータを変化させることで具体化した。

核種移行モデルの設定：

- ・ 第2次取りまとめにおいては、岩盤に対して、透水性の異なる複数の1次元平行平板を重ね合わせたモデルが用いられた。本報では、仮想的な堆積岩分布域を対象としていることから、岩盤の核種移行モデルとして多孔質媒体モデルを用いることとした。この際、多孔質媒体としては、第2次取りまとめにおけるモデル変更ケースで用いられた1次元多孔質媒体モデル（図3-6）を適用することとした。
- ・ 人工バリアのモデルとしては、第2次取りまとめにおいて用いられた1次元円筒座標系のモデルを適用する（図3-7）。
- ・ 評価指標としては、移行距離を100mとした堆積岩からの移行率（廃棄体1本あたり）を設定する。

- ・ 処分場が地表から 50m の深度に到達するまでを評価の対象とする。
- ・ 処分環境条件の変化については、瞬時に起こるものとする。

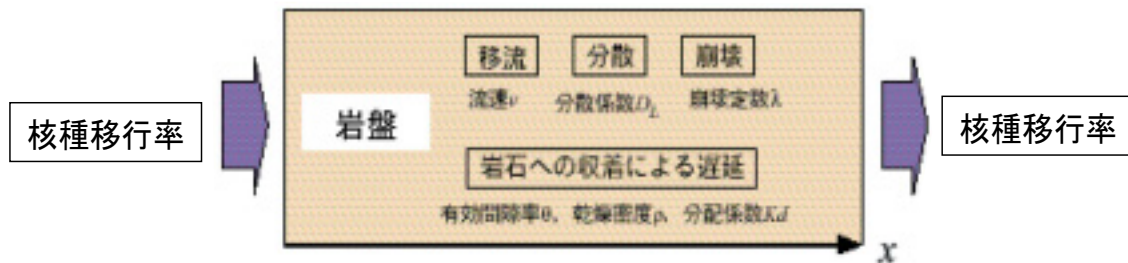


図 3-6 岩盤の多孔質媒体モデルの概念図（第 2 次取りまとめに加筆）

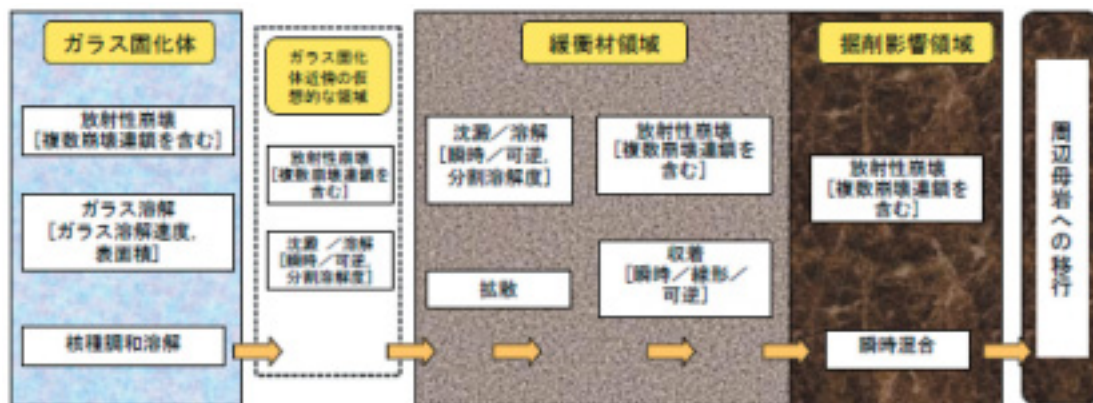


図 3-7 人工バリアモデルの概念図（第 2 次取りまとめに加筆）

核種移行パラメータの時間的な変化の整理：

処分環境条件の時間変化については、核種移行パラメータの変更として取り扱うこととした。

まずは、図 3-5 に示した処分環境条件の時間変化パターンについて、処分場の深度が変化する速度 (0.1mm/y) に基づいて、処分環境条件の変化時間および評価終了時刻を整理した。V-1～V-3 に対する評価終了時刻は約 450 万年であり、V-2 における処分環境条件の変化時間 (①→②) は約 200 万年、V-3 における処分環境条件の変化時間 (④→⑤) は約 400 万年と設定した。T-1～T-4 に対する評価終了時刻および処分環境条件の変化時間については、各パターンにおいて通過するマトリクスを考慮して、約 330 万年～450 万年および約 80 万年～400 万年をそれぞれ設定した。

次に、マトリクス毎の処分環境条件 THMC (表 3-2) に基づいて、本検討で対象とした各マトリクスに対する核種移行パラメータ値を設定した。設定したパラメータ一覧を表 3-3 および表 3-4 に示す。ダルシー流速については、対象領域の地下水流動解析結果に基づいて設定した (付録 1)。溶解度、緩衝材中分配係数、緩衝材中拡散係数、岩盤中分配係数、岩

盤中拡散係数、ガラス溶解速度に対する設定根拠を付録 2 に示す。

なお、人工バリア中の処分環境条件 THMC に関しては、表 3-2 に基づいて以下のように設定した。

- ・ ニアフィールドの温度の変遷については、第 2 次取りまとめにおいて、軟岩系岩盤での処分孔縦置き方式の場合、廃棄体定置後 1,000 年で約 40℃、10,000 年後に初期地温に戻ることが熱解析から示されている。このため、本検討における人工バリア中の温度については、廃棄体定置後 10,000 年までは 40℃、10,000 年以降は分割した地温に応じた温度を想定することとした。このため、温度に影響を受ける代表的な人工バリアパラメータであるガラス溶解速度および緩衝材中拡散係数に対して、温度が 40℃の場合の値を設定した（表 3-5）。
- ・ 人工バリア中の化学特性については、表 3-2 の処分環境条件に基づいて、間隙水組成を設定した。設定した間隙水組成一覧を表 3-6 に、その設定根拠を付録 2 に示す。
- ・ 人工バリア中の水理と力学については、検討の初期段階として、処分環境条件の変化が、人工バリアに対して設計要件を満たさないほどの影響は及ぼさないものと想定した。

さらに、各解析ケースに対して、設定した核種移行パラメータ値を組み合わせることにより、核種移行パラメータの時間的な変化を整理した。ここでは、一例として、ケース V-2 に関する核種移行パラメータの時間的な変化のイメージを図 3-8 に示す。なお、固定したパラメータの一覧を表 3-7 に示す。

表 3-3 分割したマトリクス毎の核種移行パラメータ値一覧（人工バリア）

| | | マトリクス | | | | |
|----------------------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 平野 | | 沿岸 | | 丘陵 |
| | | ① | ② | ④ | ⑤ | ⑨ |
| 溶解度 [mol/l] | Se | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} |
| | Zr | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} |
| | Nb | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-5} |
| | Tc | 4.0×10^{-8} | 4.0×10^{-8} | 4.0×10^{-8} | 4.0×10^{-8} | 4.0×10^{-8} |
| | Pd | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} | 1.0×10^{-9} |
| | Sn | 5.0×10^{-6} | 5.0×10^{-6} | 5.0×10^{-6} | 5.0×10^{-6} | 5.0×10^{-6} |
| | Cs | 可溶性 | | | | |
| | Pb | 2.0×10^{-6} | 2.0×10^{-6} | 2.0×10^{-6} | 2.0×10^{-6} | 2.0×10^{-6} |
| | Ra | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} | 1.0×10^{-11} |
| | Sm | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 4.0×10^{-7} |
| | Ac | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 4.0×10^{-7} |
| | Th | 2.0×10^{-6} | 7.0×10^{-6} | 2.0×10^{-6} | 7.0×10^{-6} | 6.0×10^{-6} |
| | Pa | 2.0×10^{-8} | 2.0×10^{-8} | 2.0×10^{-8} | 2.0×10^{-8} | 2.0×10^{-8} |
| | U | 4.0×10^{-9} | 2.0×10^{-8} | 4.0×10^{-9} | 2.0×10^{-8} | 2.0×10^{-8} |
| | Np | 7.0×10^{-9} | 5.0×10^{-8} | 7.0×10^{-9} | 5.0×10^{-8} | 3.0×10^{-8} |
| | Pu | 3.0×10^{-6} | 5.0×10^{-7} | 3.0×10^{-6} | 5.0×10^{-7} | 4.0×10^{-6} |
| | Am | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 4.0×10^{-7} |
| | Cm | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 6.0×10^{-7} | 5.0×10^{-7} | 4.0×10^{-7} |
| 緩衝材中分配係数 [m ³ /kg] | Se | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Zr | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | Nb | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Tc | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pd | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | Sn | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Cs | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| | Pb | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | Ra | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | Sm | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Ac | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Th | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | U | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Np | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pu | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | Am | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | Cm | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 緩衝材拡散係数[m ² /s] | Cs | 2.0×10^{-10} | 2.5×10^{-10} | 2.0×10^{-10} | 2.3×10^{-10} | 2.7×10^{-10} |
| | Se | 1.2×10^{-10} | 5.5×10^{-11} | 1.2×10^{-10} | 5.1×10^{-11} | 6.0×10^{-11} |
| | Se・Cs以外 | 1.2×10^{-10} | 1.1×10^{-10} | 1.2×10^{-10} | 1.0×10^{-10} | 1.2×10^{-10} |
| ガラス溶解速度[g/m ² /day] | | 8.7×10^{-5} | 6.4×10^{-5} | 8.7×10^{-5} | 4.6×10^{-5} | 8.7×10^{-5} |

表 3-4 分割したマトリクス毎の核種移行パラメータ値一覧（天然バリア）

| | | 領域 | | | | |
|---------------------------------|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 平野 | | 沿岸 | | 丘陵 |
| | | ① | ② | ④ | ⑤ | ⑨ |
| 岩盤中分配係数 [m ³ /kg] | Se | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | Zr | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Nb | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Tc | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pd | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | Sn | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Cs | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.5 |
| | Pb | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Ra | 0.05 | 0.1 | 0.05 | 0.1 | 0.1 |
| | Sm | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Ac | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Th | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | U | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Np | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Pu | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Am | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cm | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 岩盤中拡散係数 [m ² /s] | | 1.2×10^{-11} | 1.1×10^{-11} | 1.2×10^{-11} | 9.8×10^{-12} | 1.2×10^{-11} |
| 間隙率 [%] | | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| 乾燥密度 [kg/m ³] | | 1105 | 1105 | 1105 | 1105 | 1105 |
| ダルシー流速* [m/y] | | 3.0×10^{-4} | 2.1×10^{-2} | 6.4×10^{-5} | 1.1×10^{-2} | 6.6×10^{-4} |

*: 本検討では、設定した仮想的な領域の特徴を踏まえた地下水流動解析に基づいて、ダルシー流速を設定した（付録1参照）。なお、各領域における掘削影響領域通過流量については、保守的にゼロ濃度境界となる値を設定した。

表 3-5 温度が 40°C の場合におけるガラス溶解速度および緩衝材中拡散係数の設定値

| ガラス溶解速度 [g/m ² /day] | 緩衝材中拡散係数[m ² /s] | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Cs | Se | Se・Cs以外 |
| 2.7×10^{-4} | 2.7×10^{-10} | 1.6×10^{-10} | 1.6×10^{-10} |

表 3-6 設定した人工バリア中の間隙水組成

| 項目 | 単位 | マトリクス | | | | |
|----|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 平野 | | 沿岸 | | 丘陵 |
| | | ① | ② | ④ | ⑤ | ⑨ |
| pH | — | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.2 | 7.3 |
| Eh | mV | -245 | -179 | -245 | -179 | -255 |
| C | mol/l | 1.3×10^{-2} | 2.8×10^{-2} | 1.3×10^{-2} | 2.8×10^{-2} | 2.6×10^{-2} |
| Ca | | 3.7×10^{-3} | 7.1×10^{-4} | 3.7×10^{-3} | 7.1×10^{-4} | 6.0×10^{-4} |
| Cl | | 2.7×10^{-1} | 5.9×10^{-2} | 2.7×10^{-1} | 5.9×10^{-2} | 5.9×10^{-2} |
| Fe | | 3.6×10^{-6} | 2.8×10^{-7} | 3.6×10^{-6} | 2.8×10^{-7} | 9.3×10^{-7} |
| K | | 1.2×10^{-3} | 4.5×10^{-4} | 1.2×10^{-3} | 4.5×10^{-4} | 4.4×10^{-4} |
| Mg | | 6.7×10^{-4} | 6.7×10^{-5} | 6.7×10^{-4} | 6.7×10^{-5} | 5.8×10^{-5} |
| Na | | 2.6×10^{-1} | 1.1×10^{-1} | 2.6×10^{-1} | 1.1×10^{-1} | 1.0×10^{-1} |
| S | | 1.2×10^{-9} | 3.7×10^{-3} | 1.2×10^{-9} | 3.7×10^{-3} | 1.5×10^{-9} |
| Si | | 3.0×10^{-4} | 3.2×10^{-4} | 3.0×10^{-4} | 3.2×10^{-4} | 3.2×10^{-4} |

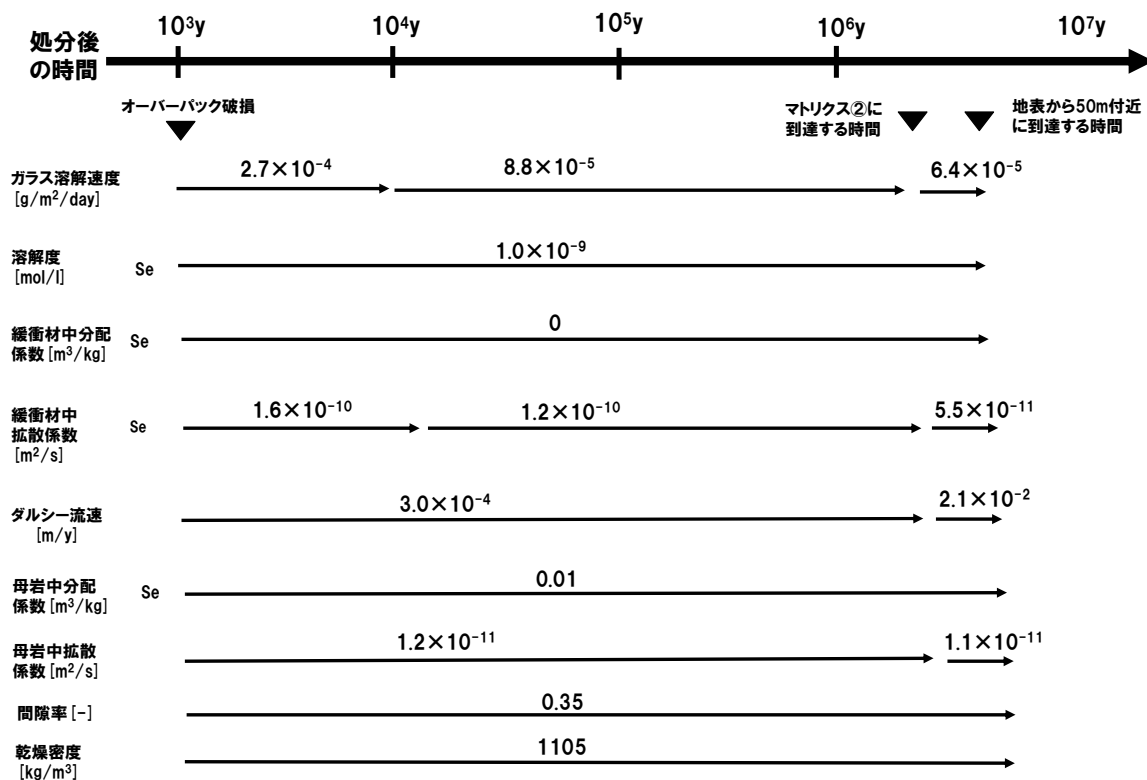


図 3-8 核種移行パラメータの時間的な変化のイメージ (V-2 を例として)

表 3-7 固定したパラメータ値一覧

| パラメータ名 | 単位 | 設定値 |
|--------------------|---------------------|----------------------|
| ガラス表面積(A) | m ² /can | 1.7 |
| 割れの増加率(F) | — | 10 |
| ガラス固化体の初期表面積(A×F) | m ² /can | 17 |
| ガラス固化体の初期体積 | m ³ /can | 0.15 |
| ガラス固化体の初期重量 | g/can | 4.1×10 ⁵ |
| ガラスの密度 | g/m ³ | 2.8×10 ⁶ |
| オーバーパックの破損時期* | y | 1.0×10 ³ |
| 緩衝材内側半径 | m | 0.41 |
| 緩衝材外側半径 | m | 1.11 |
| 緩衝材長さ(高さ) | m | 2.14 |
| 緩衝材間隙率 | — | 0.41 |
| 緩衝材乾燥密度 | Mg/m ³ | 1.6 |
| ガラス固化体近傍の仮想的な領域の体積 | m ³ | 1.0×10 ⁻³ |
| 掘削影響領域に対して設定した体積 | m ³ | 1.0×10 ⁻³ |
| 岩盤の移行距離 | m | 100 |

*: オーバーパック破損時のインベントリについては、処分後1000年時点におけるJNFL仕様のガラス固化体に対する設定値(第2次取りまとめ)を用いることとした。なお、Se-79のインベントリについては、半減期を1.2×10⁶年とした場合の値を用いた。

解析コードについては、シミュレーションプラットフォーム GoldSim (GoldSim Technology Group LLC, 2007¹¹⁾) を用いることとした。本検討に際しては、既存のモデルに対して、多孔質媒体モデルにおける核種移行パラメータの時間的な変化を取り扱うことができるように改良を加えた。この改良したモデルについては、第2次取りまとめにおいて用いられた解析コードのひとつである Tiger との比較検証を行い、その有効性を確認した(付録3)。

本報においては、第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて線量を支配した核種のひとつである Se-79、および第2次取りまとめの隆起・侵食に関する解析において線量を支配した Np-237 に着目することとした。なお、解析に際しては、第2次取りまとめにおいて考慮された全核種を対象とした解析を行い、そこから Se-79 および Np-237 に対する結果を抜き出すこととした。

4. 解析結果の例示

本章においては、3章で設定した解析ケースに基づいて実施した解析結果について記述する。

ケース V-1～V-3 およびケース T-1～T-4 (図 3-5) に対して、決定論解析を実施した。この解析結果に基づいて、岩盤からの Se-79 の移行率および Np-237 の移行率の経時変化を整理した (図 4-1 および図 4-2)。

図 4-1 および図 4-2 より、処分環境条件の時間変化パターンは、Se-79 の移行率および Np-237 の移行率に及ぼす影響が大きいことがわかる。これは、処分環境条件の時間変化パターンにおいて、通過するマトリクスの違いによる処分環境条件の変化の程度 (特に水理) やその変化時間が異なるためと考えられる。

なお、図 4-1 より、Se-79 については、処分環境条件の変化した後、移行率がすみやかに上昇しているケースがあることがわかる。これは、Se は、緩衝材や岩盤に対する分配係数の値が小さい核種であり、処分環境条件の流速の変化に鋭敏であるためと考えられる。

また、図 4-2 より、Np-237 については、Se-79 とは異なり、処分環境条件が変化した後、移行率がすみやかに上昇するわけではなく、ある程度時間が経過した後に移行率が徐々に上昇することがわかる。これは、Np は、緩衝材や岩盤に対する分配係数の値が大きく、処分環境条件の流速の変化に鋭敏ではないものの、親核種からの崩壊により処分システム内での存在量が多くなるためと考えられる。

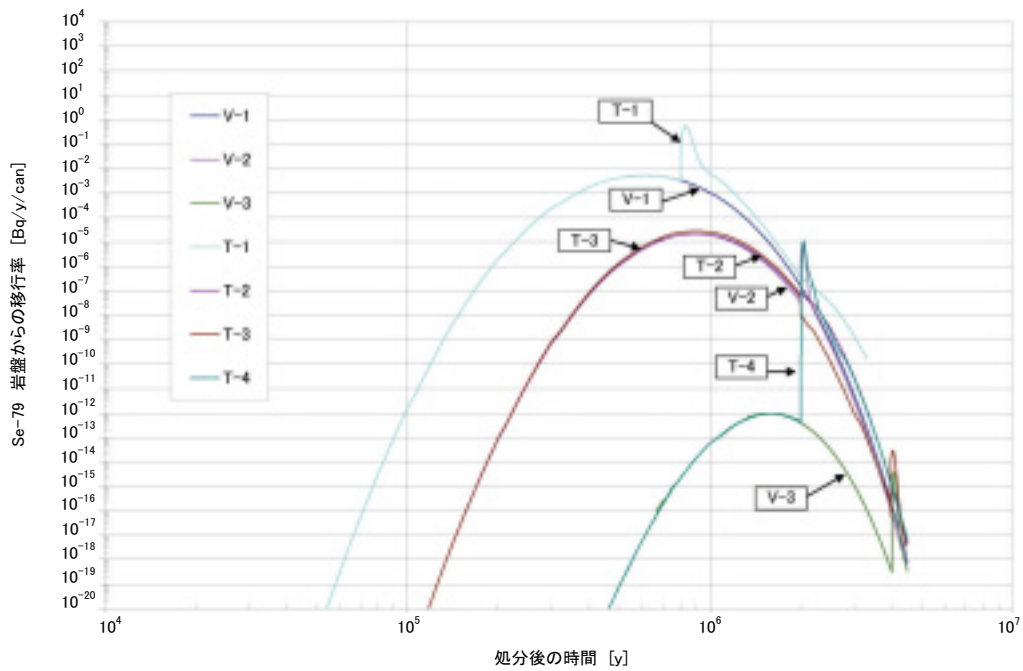


図 4-1 影響解析結果の例（Se-79：廃棄体 1 本あたり）

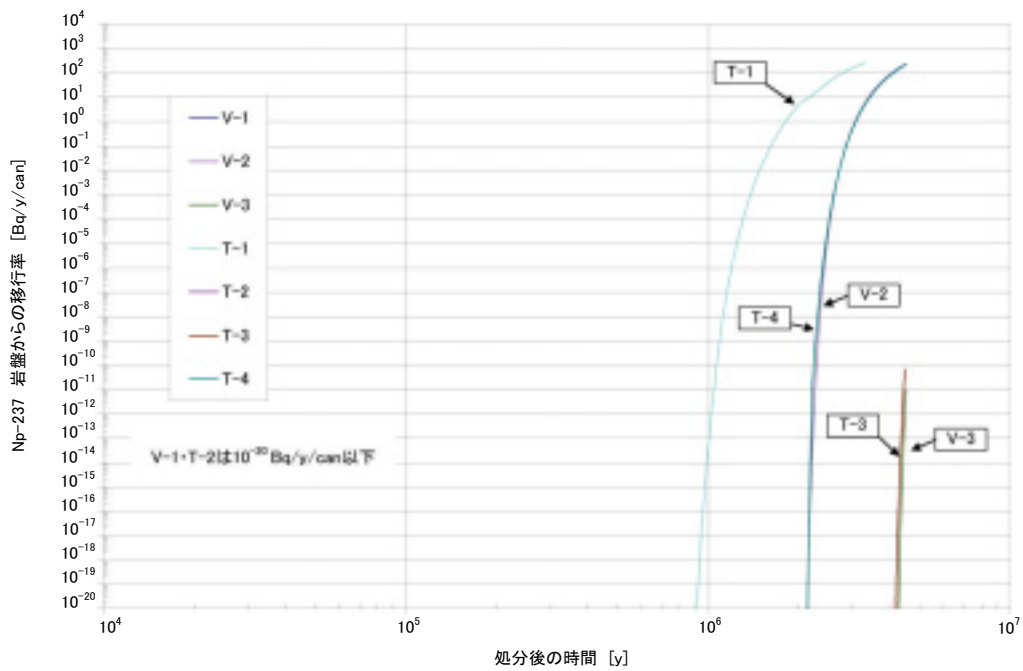


図 4-2 影響解析結果の例（Np-237：廃棄体 1 本あたり）

5. おわりに

本報では、仮想的な堆積岩分布域に対する地下水シナリオに対して、概念モデルに基づく一連の隆起・侵食の影響評価手法について例示した。本検討を通じて、概念モデルが、具体的なデータを活用して処分環境条件の時間変化の組合せを抽出可能であること、核種移行モデル・パラメータの設定およびそれに基づく影響解析に対して有効な出発点となりうることについて見通しを得た。さらに、概念モデルに基づいた影響評価を通じて得られる知見は、地球科学分野の専門家にフィードバックし、隆起・侵食／沈降・堆積の将来予測や地質環境調査の計画立案に反映可能であることについても見通しを得た。

本検討を通じて、概念モデルに基づく一連の隆起・侵食の影響評価手法は、処分事業の初期段階における具体的な地質環境を対象とした影響評価に対して有効であることを示した。なお、本研究の考え方は、緩慢かつ広域的な現象であるという類似性の観点から、気候・海水準変動にも応用できる可能性があると考ええる。

謝辞

本報告書を作成するにあたり、地層処分研究開発部門 ニアフィールド研究グループ 内藤守正グループリーダー、同部門 堆積岩地質環境研究グループ 茂田直孝グループリーダーおよび新里忠史氏には、有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1]経済産業省 資源エネルギー庁、日本原子力研究開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”，2006 年 12 月，pp. II-3-1 – II-3-8 (2006).
- [2]核燃料サイクル開発機構：“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－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-016 (2005).
- [3]原子力発電環境整備機構：“概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠”，NUMO-TR-04-02 (2004).
- [4]土木学会・原子力土木委員会・地下環境部会：“概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方”，土木学会 (2001).
- [5]川村淳、江橋健、牧野仁史ほか：“高レベル放射性廃棄物処分における隆起・侵食／沈降・堆積に起因するシナリオの検討”，JAEA-Research 2008-119 (2009).
- [6]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－ 総論レポート”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-020 (1999).
- [7]牧野仁史，加藤藤孝，宮原要：“天然現象の発生が地層処分システム性能に与える影響についての概略的検討”，JNC TN8400 2000-033 (2000).
- [8]核燃料サイクル開発機構：“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 1 深地層の科学的研究－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014 (2005).
- [9]太田久仁雄，阿部寛信，山口雄大ほか：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書”，JAEA-Research 2007-044 (2007).
- [10]M. Kawamura., K. Yasue., T. Niizato. et al.: “Study on Perturbation Scenario for Uplift and Denudation in Performance Assessment of a HLW Disposal System”, Proceedings of East Asia Forum on Radioactive Waste Management conference, October 20-21, 2008, Japan (2008).
- [11]GoldSim Technology Group LLC: “GoldSim Contaminant Transport Module User’s Guide”, GoldSim Technology Group LLC (2007).

This is a blank page.

付録 1 地下水流動解析

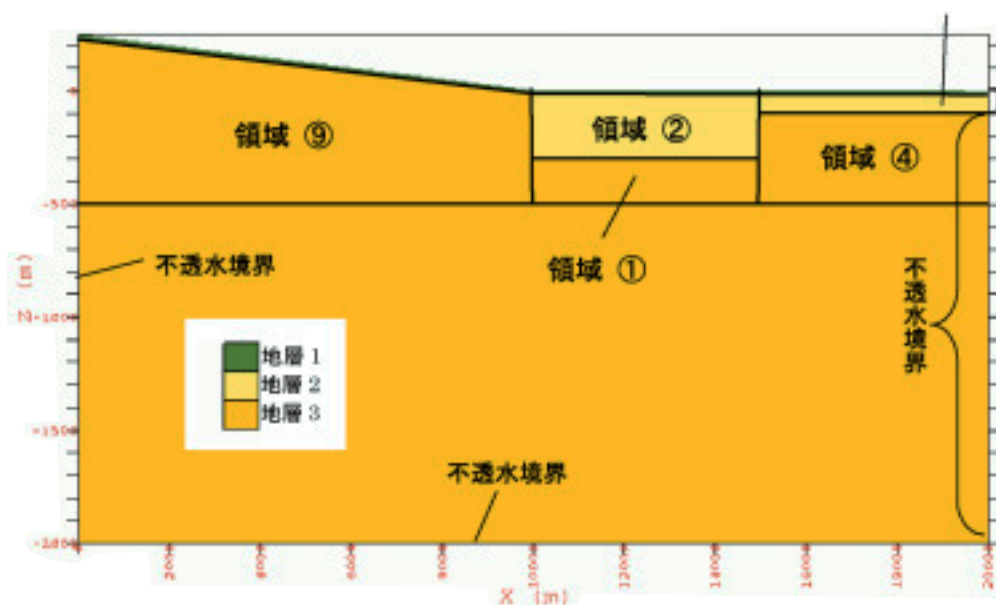
本資料では、想定している仮想的な堆積岩領域が有する地下水の流動傾向を把握することを目的として地下水流動解析を行った。この検討は、核種移行解析において、天然バリアの水理性能を決定付ける入力情報となるものである。地下水流動解析については、Environmental Modeling Systems, Inc.製のソフトウェアである GMS (Groundwater Modeling System) に組み込まれた MODFLOW を用いた。MODFLOW は、USGS (米国地質調査所) によって開発された差分法による地下水流動解析プログラムであり、世界的に汎用性が高いプログラムである。MODFLOW をもとにした粒子移動プログラムや物質輸送プログラムも開発され、先進国だけではなく途上国にも適用された実績を有する (柴崎、2005¹⁾)。

解析モデルは、x 方向に 20,000m、z 方向で 2,250m の大きさをもつ鉛直 2 次元断面で、セル数は 9200 (200×46 層) である (付図 1-1)。解析モデルは、3.1 節および 3.2 節に示された地質構造に相当するようにし、地下水頭については、地表面において地形と一致させた。地層は 3 層に分け、それぞれの領域について、表 3-2 に示された透水係数から中間程度の値を選んで水平透水係数として与えた (地層 1 および 2: 10^{-6} m/s、地層 3: 10^{-9} m/s)。なお、一般に鉛直方向の透水係数は水平方向の透水係数に比べて小さくなるため、本計算では鉛直方向の透水係数は水平方向の透水係数の 1/10 とした。さらに、浅海部分である領域 7 および 8 については、地下水の流出先等の不確実性が大きいため、解析モデルの範囲として含めないこととした。この事は陸域の地下水流速を大きくする方向に作用すると考えられるため、より保守的な結果を導くと思われる。

地下水流動の境界条件を付図 1-1 に示す。左側境界は、丘陵地帯の分水界を想定したため不透水境界とした。地表面は、地下水頭を固定 (地表面と同じ高さ) しているため定水頭境界とした。下側境界は、地下水流動系の下限と考え、不透水境界とした。右側境界に相当する海岸付近は、海底地下水湧出が広範囲な大陸レベルで世界的に認められることもあり (Taniguchi et al., 2002²⁾)、地下水の流出域と考えられる。しかし、塩淡水境界 (海水と地下水の境界) を含めた海水-地下水相互作用を明らかにするには、3 次元地下水ポテンシャル分布の密な測定と 3 次元地下水濃度分布が必要になる (谷口、2001³⁾)。ここでは、そのような詳細な情報が無い場合を想定しており、また深部における海水-地下水相互作用がまだ明らかになっていないこともあるため、海岸境界 (右側境界) のうち透水性が高く表層に近い地層 1 および 2 に相当する部分にはついて海岸への流出入が可能な定水頭境界とし、地層 3 に相当する部分是不透水境界とした。この設定は、海岸境界を全て定水頭境界とするよりは、浅い部分での地下水流出を多くすると考えられ、保守的な評価を導くと言える。

解析においては、定常状態における水頭値を計算した後、その値を用いて各セルのダ

ルシー流速ベクトルを計算した。数値計算を行った解析モデル全体の中から、本検討で対象とした5個の領域を抜き出し（付図 1-1）、流速ベクトルの平均をベクトル足し合わせ計算により求めた。なお、これらの領域は、想定処分場深度（ $z=-500\text{m}$ ）より浅い部分を対象としている。各領域の実流速ベクトル平均の絶対値および流速ベクトルの角度（水平から反時計回りに正とする）を求めた結果について、付表 1-1 に示す。



付図 1-1 地下水流動解析モデル

付表 1-1 計算における領域ごとの平均ダルシー流速および平均流速ベクトルの角度

| | 領域1 | 領域2 | 領域4 | 領域5 | 領域9 |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ダルシー流速 (m/yr) | 3.0×10^{-4} | 2.1×10^{-2} | 6.4×10^{-5} | 1.1×10^{-2} | 6.6×10^{-4} |
| 流速ベクトルの角度(度) | 77 | 50 | 84 | 30 | -27 |

水平透水係数 地層 1 および 2 : 10^{-6} m/s 地層 3 : 10^{-9} m/s

参考文献

- [1]柴崎直明: "地下水シミュレーション—途上国における適用と技術移転—", 地球科学, Volume 59, pp.393-396 (2005).
- [2] Taniguchi ,M., Burnett,W.C., Cable,J.E. and Turner,J.V.:, "nvestigations of submarine groundwater discharge", Hydrological Processes, Volume 16, pp.2115-2129 (2002).
- [3]谷口真人: "「地下水と地表水・海水との相互作用」 4.海水と地下水との相互作用", 地下水学会誌, Volume 43, pp.189-199 (2001).

This is a blank page.

付録2 間隙水組成、溶解度、分配係数、拡散係数、ガラス溶解速度の設定

本解析で用いた、評価対象元素の人工バリア中の溶解度、緩衝材への分配係数、緩衝材中の実効拡散係数については、与えられた地下水組成を対象として、第2次取りまとめ¹⁾における設定方法に準拠して設定を行った。また、母岩における分配係数および実効拡散係数については、第2次取りまとめにおける設定と同様に収着データベースに登録されている分配係数データを活用することを基本として、必要に応じて第2次取りまとめ以降の知見も活用することとした。以下に詳細を述べる。

人工バリア中の間隙水組成の設定

人工バリア中での溶解度、緩衝材への分配係数および緩衝材中の拡散係数を設定するための前提条件として、人工バリア中での間隙水組成の設定を行った。間隙水組成は、第2次取りまとめにおける緩衝材間隙水組成の設定²⁾と同様の方法で行った。すなわち、浸入する地下水に対し、緩衝材中のスメクタイト（モンモリロナイト）のイオン交換反応と表面酸・塩基解離反応、随伴鉱物との平衡反応、およびオーバーパックに由来する鉄腐食生成物との平衡反応を考慮した、地球化学計算により推定した。計算条件の概要を付表 2-1 に示す。

設定された地下水組成（本文 表 3-2）のうち、幅で提示されている pH および Eh については、最大値と最小値の平均値を用いることとした。

計算は、地球化学計算コード PHREEQC³⁾により実施した。熱力学データベースは、JAEA の熱力学・収着・拡散データベースサイト（<http://migrationdb.jaea.go.jp/>）にある、JAEA-TDB(991231c2)⁴⁻⁵⁾を用いた。

付表 2-1 間隙組成計算条件の概要

| | |
|--|---|
| 地下水タイプ | 還元性 |
| 領域番号 | ①、②、④、⑤、⑨ |
| 緩衝材仕様 | ベントナイト（クニゲル V1* ¹ ）（70%）／ケイ砂（30%）、 乾燥密度 1.6g/cm ³ |
| 平衡鉱物 | 随伴鉱物：玉髄、方解石、黄鉄鉱 腐食生成物：磁鉄鉱 |
| 陽イオン交換容量 | 60.1 meq/100g-ベントナイト |
| 初期交換性 陽イオン組成 | Z-Na = 51.4、Z ₂ -Ca = 7.4、Z-K = 0.6、Z ₂ -Mg = 0.7 (Z：陽イオン交換サイト、単位：meq/100g-ベントナイト) |
| イオン交換反応 定数* ² (logK _{G&T}) | 2ZNa – Z ₂ Ca : 0.69、 ZNa – ZK : 0.42 2ZNa – Z ₂ Mg : 0.67、 ZNa – ZH : 1.88 |
| 表面サイト数 | 6.48E-05 mol/g-スメクタイト |
| 表面サイト 有効比表面積 | 29 m ² / g-スメクタイト |
| 表面サイト 酸・塩基解離定数* ³ | log K(-) = -7.92 log K(+) = 5.67 |
| 可溶性塩の取り扱い | 溶解、散逸後を仮定 |

*1：スメクタイト含有量：48%として条件を設定。

*2：イオン交換反応は、Gaines and Thomas (1953)⁶⁾の定式に従う取り扱いとする。

*3：表面酸・塩基解離反応は、Dzonback and Morel (1990)⁷⁾の Generalized two layermodel に従う取り扱いとする。

評価対象元素の間隙水中溶解度

溶解度の設定は、前項に示した方法で計算された間隙水（本文 表 3-6）に対し、第2次取りまとめにおける溶解度設定⁸⁾と同様の手法で行った。すなわち、まず、各間隙水組成に対し、熱力学的安定性や溶解度実験結果から、現実的と考えられる溶解度制限固相を想定し、その固相と間隙水との平衡計算を行い、各元素の間隙水中濃度（＝溶解度）を地球化学計算コード PHREEQC³⁾により計算する。なお、この際、熱力学データは第2次取りまとめの溶解度計算に用いられたものと同じ、JAEA-TDB(991231c2)⁴⁻⁵⁾を用いた。核種移行計算に用いる溶解度の設定は、この溶解度計算結果に加え、利用した熱力学データの整備状況や、溶解度実験の実測値等を考慮し、現実的かつ保守的な値を選定した。

以下に元素毎に設定の背景情報を記す。詳細については、東ほか(1999)⁸⁾も参照されたい。

Se：FeSe₂(cr)を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施。ただし、計算に用いた熱力

学データの信頼性が必ずしも高くはないと考えられることや、計算される溶解度が酸化還元電位に強い依存性を持つが、今回の地下水の酸化還元電位の設定は幅を持ったものであることなどから、計算値を桁で繰り上げて設定した。

Zr : ベントナイト浸漬液中での $\text{ZrO}_2(\text{am})$ の溶解度実験結果に基づき設定した。

Nb : $\text{Nb}_2\text{O}_5(\text{s})$ の溶解度実験結果に基づき設定した。溶解度のpH依存性を考慮した。

Tc : $\text{TcO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施し、計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。

Pd : 用いた熱力学データベースでは、極端に低い溶解度が計算されることから、還元条件で実施された溶解度実験結果に基づき設定した。

Sn : ベントナイト平衡液中での過飽和側からの溶解度実験結果に基づき設定した。

Sm, Ac, Am, Cm : 化学アナログにより、**Am**の熱力学データを用いて、これら元素に同一の溶解度を設定した。溶解度制限固相は $\text{AmOHCO}_3(\text{cr})$ あるいは $\text{Am}_2(\text{CO}_3)_3(\text{cr})$ とし、熱力学的により安定な固相を溶解度制限固相として計算を実施した。pHが低い間隙水（領域番号7、8の間隙水）で、 $\text{Am}_2(\text{CO}_3)_3(\text{cr})$ が溶解度制限固相となっている。

Pb : $\text{PbCO}_3(\text{cr})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施し、計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。

Ra : Caとの簡易な共沈モデルを仮定し設定した。溶解度の違いは、間隙水中のCa濃度の違いを反映している。

Th : $\text{ThO}_2(\text{am})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施し、計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。

Pa : $\text{Pa}_2\text{O}_5(\text{s})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施した。計算に用いた熱力学データの信頼性が必ずしも高くはないと考えられることなどから、計算値を桁で繰り上げて設定した。

U : $\text{UO}_2(\text{am})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施した。計算では、東ほか(1999)⁸⁾と同様に、ウランIV 価のみの熱力学データを用いている。計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。

Np : $\text{NpO}_2(\text{am})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施し、計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。

Pu : $\text{PuO}_2(\text{am})$ を溶解度制限固相とした溶解度計算を実施し、計算結果の2桁目を繰り上げて設定した。**Pu(III)**の濃度が増加することにより、強還元条件の方が高い溶解度を示している。

評価対象元素の緩衝材への分配係数

第2次取りまとめの設定⁹⁾と同じ値を設定した。設定において分配係数に影響を及ぼす因子として、間隙水のイオン強度を考慮した。今回の設定の対象となっている領域の間隙水は、イオン強度 $I > \text{約 } 0.1$ であることから、海水系相当と考え、Csの分配係数

を設定した。

評価対象元素の緩衝材中の実効拡散係数

第2次取りまとめにおける設定方法¹⁰⁾に従うこととした。すなわち、Cs に対しては、クニゲル V1 中の Cs の実効拡散係数 (De) の実測値に基づき設定を行った。Se については、Se の実効拡散係数の実測値が報告されていないことから、同じマイナス 1 価の単純な陰イオンとして存在するヨウ素 (I) の値を代用した。その他の元素については、第2次取りまとめと同様に、トリチウム水 (HT0) の値を選定した。なお、本設定では、間隙水中のイオン強度の影響については、鈴木(2002)等による第2次取りまとめ以降の知見¹¹⁻¹²⁾も考慮し、補正を行った。

なお、拡散係数は、いずれも温度補正を行うこととし、実測値から導出される値を 25℃とし、活性化エネルギーを 15.05kJ/mol とし、アレニウスの式により、与えられた温度に対して補正を行った。

評価対象元素の母岩への分配係数

第2次取りまとめにおける設定方法¹³⁾と同様に、既往のバッチ収着試験データを集めた収着データベースから、データの信頼性や実験条件と与えられた環境条件の類似性等を考慮して、現実的かつ保守的な値を設定した。収着データベースは、JAEA において整備されている最新のもの (<http://migrationdb.jaea.go.jp/>)¹⁴⁾を用いた。なお、Cs および Se については、幌延地域の堆積岩に対する実測値¹⁵⁻¹⁶⁾を優先的に考慮することとした。設定値は、1 または 5×10^n (n は整数) とした。

評価対象元素の母岩中の実効拡散係数

我が国の堆積岩地域の一例として、幌延地域の堆積岩に対して測定されているヨウ素 (I) の実効拡散係数の実測値を参考として設定を行った。下茂 (2007)¹⁷⁾に示されている間隙率と実効拡散係数の値から両者の関係式を導出し、与えられた間隙率での実効拡散係数を導出した。また、拡散係数は、いずれも温度補正を行うこととし、実測値から導出される値を 25℃とし、活性化エネルギーを 15.05kJ/mol とし、アレニウスの式により、与えられた温度に対して補正を行った。

ガラス溶解速度

ここでは、長期的なガラス溶解速度に主要な影響を与える因子として温度に着目し、第2次取りまとめにおける温度とガラスの長期的な溶解速度の回帰直線に、処分環境条件の温度 (T) の値 (17℃、21℃、25℃、40℃) を代入することにより、各温度に対するガラス溶解速度を設定した。

参考文献

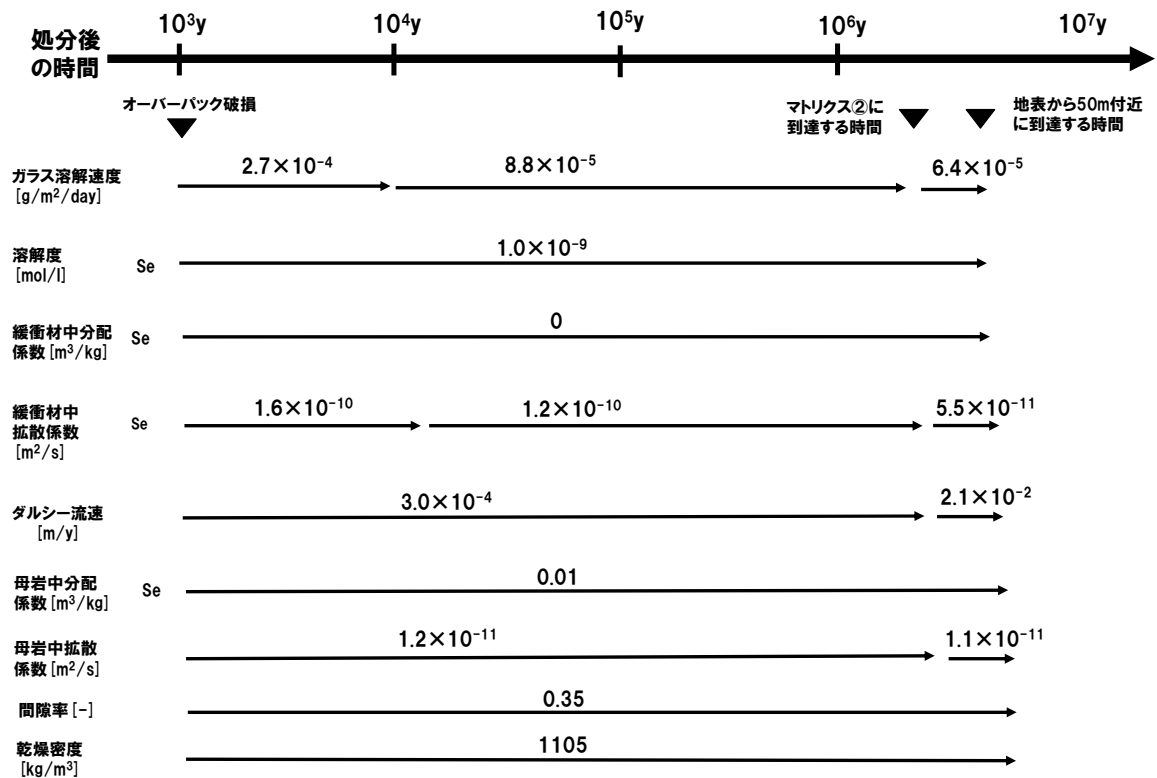
- [1]核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊3 地層処分システムの安全評価”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-023 (1999).
- [2]小田治恵，柴田雅博，油井三和：“地層処分研究開発第2次とりまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-078 (1999).
- [3]Parkhurst, D.L. (1995): “User’s Guide to PHREEQC-A Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations”, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 95-4227 (http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/index.html)
- [4]Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M.: “JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System”, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-070 (1999).
- [5]吉田 泰，柴田雅博：“OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 その2 - Tc, U, Np, Pu, Am および auxiliary の熱力学データの更新 -”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2004-025 (2005).
- [6]Gaines, G.L.Jr. and Thomas, H.C.: “Adsorption Studies on Clay Minerals. II. A Formulation of the Thermodynamics of Exchange Adsorption”, The Journal of Chemical Physics, Vol.21, No.4, pp.714-718. (1953).
- [7]Dzombak, D.A. and Morel, M.M.: “Surface complexation modeling, hydrous ferric oxide”, John Wiley & Sons. Inc. (1990).
- [8]東侍郎，柴田雅博，油井三和，澁谷朝紀，能登屋信，吉田泰：“地層処分研究開発第2次とりまとめにおける放射性元素の溶解度評価”，サイクル機構技術資料JNC TN8400 99-071 (1999).
- [9]柴田雅博，佐藤治夫，小田治恵，油井三和：“地層処分研究開発第2次とりまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-072(1999).
- [10]Sato, H. (1998): “Data Setting for Effective Diffusion Coefficients (De) of Nuclides in the Buffer for Reference Case in Performance Assessment of the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste (I) ”, PNC TN8410 98-097.
- [11]鈴木覚：“人工バリアにおける核種拡散過程に関する研究”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2002-006 (2002).
- [12]石寺孝充，宮本真哉，佐藤治夫：“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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2004-001 (2004).
- [13]澁谷朝紀，陶山忠宏，柴田雅博：“性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数”，

- サイクル機構技術資料, JNC TN8410 99-051 (1999).
- [14] 齋藤好彦, Ochs, M., 陶山忠宏, 北村暁, 柴田雅博, 笹本広: “収着データベースの更新: 信頼性評価に伴う収録データの訂正と公開文献データの追加”, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Data/Code 2007-014 (2007).
- [15] Xia, X., Shibata, M., Kitamura, A. and Kamei, G.: “A systematic Study on Cesium Sorption on a Sedimentary Rock towards Reliable Safety Assessment Methodology for HLW Disposal”, Advances in Nuclear and Radiochemistry: Extended Abstracts of Papers presented at the Sixth International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC-6), 29 August to 3 September 2004, Aachen, Germany, in cooperation with University of Cologne, GDCh, FECS, OECD-NEA and IAEA, edited by Syed M. Qaim and Heinz H. Coenen, pp.779-781 (2004).
- [16] Xia, X., Shibata, M. and Kamei, G.: “海水系地下水条件下での堆積岩に対するセレンの収着”, 日本原子力学会バックエンド部会, 第 20 回バックエンド夏期セミナー資料集, ポスター7.1-7.9 (2004).
- [17] 下茂道人, 熊本創, 前川恵輔: “亀裂を有する軟岩の水理・物質移行特性データの取得・解析”, 日本原子力研究開発機構 JAEA-Research 2007-016 (2007).

付録3 解析コードの確認

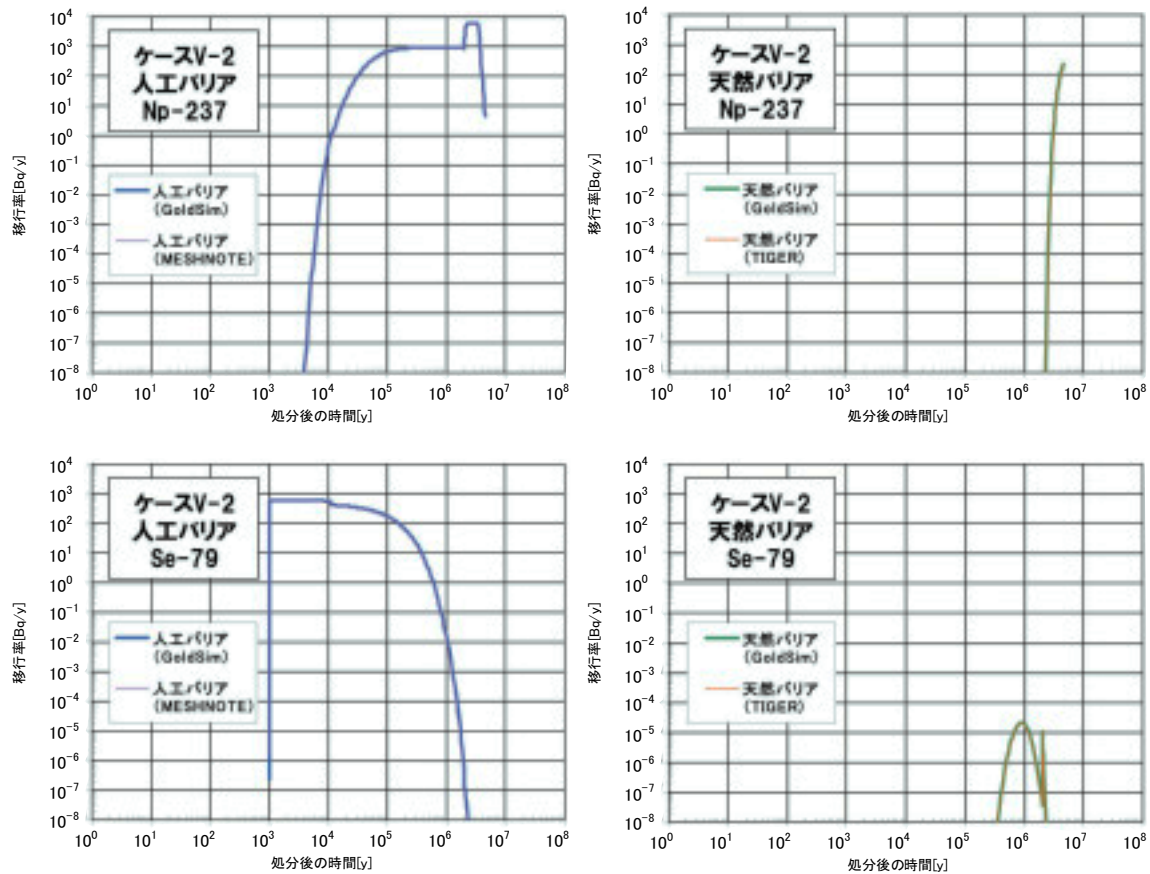
ここでは、本検討において作成した核種移行モデルの検証を行うために、GoldSim (GoldSim Technology Group LLC, 2007¹⁾) を用いて作成した核種移行モデルから得られる移行率と、地層処分研究開発第2次取りまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999²⁾) において用いられた解析コードである MESHNOTE および第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ (電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005³⁾) において用いられた解析コードである TIGER から得られる移行率との比較を行った。人工バリア領域については MESHNOTE コードを、天然バリア (多孔質媒体) 領域については TIGER コードを用いた。

確認ケースとしては、本文におけるケース V-2 を用いた。ケース V-2 のパラメータの時間変化のイメージを付図 3-1 (図 3-8 再掲) に示す。



付図 3-1 ケース V-2 のパラメータの時間変化のイメージ (図 3-8 再掲)

移行率の比較結果を付図 3-2 に示す。その結果、GoldSim を用いて算出した各バリアからの核種移行率が、MESHNOTE (Wakasugi et al, 1999⁴⁾) および TIGER (三原ほか, 2004⁵⁾) から算出した各バリアからの核種移行率とほぼ一致していることを確認した。



付図 3-2 ベンチマーク計算の結果(ケース V-2)

参考文献

- [1]GoldSim Technology Group LLC: “GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide”, GoldSim Technology Group LLC (2007).
- [2]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”, サイクル機構公開技術資料, JNC TN1400 99-023 (1999).
- [3]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—”, 核燃料サイクル開発機構公開技術資料, JNC TY1400 2005-013 FEPC-TR2-2005-02 (2005).
- [4]Wakasugi.K, Makino.H, et al.: “The Development of MESHNOTE Code for Radionuclide Migration in the Near Field”, JNC TN8400 99-095 (1999).
- [5]三原守弘, 大井貴夫: “パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析コード (TIGER) の開発”, サイクル機構技報, No22, pp.27-38 (2004).

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 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度、質量密度 | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | kg/m ² |
| 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 |
| 質量濃度 ^(a) 、濃度 | モル毎立方メートル | mol/m ³ |
| 質量濃度 | キログラム毎立法メートル | kg/m ³ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | cd/m ² |
| 屈折率 ^(b) | (数字の) | 1 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 1 |

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

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 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 ^(b) | rad | 1 ^(b) | m/m |
| 立体角 | ステラジアン ^(b) | sr ^(c) | 1 ^(b) | m ² /m ² |
| 周波数 | ヘルツ ^(d) | Hz | | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | | m kg s ⁻² |
| 圧力、応力 | パスカル | Pa | N/m ² | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール | J | N m | m ² kg s ⁻² |
| 仕事率、工事率、放射束 | ワット | W | J/s | m ² kg s ⁻³ |
| 電荷、電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差（電圧）、起電力 | ボルト | V | W/A | m ² kg 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 s ⁻³ A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメンズ | S | A/V | m ² kg ⁻¹ s ³ A ² |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | Vs | m ² kg s ⁻² A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² | kg s ⁻² A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | m ² kg s ⁻² A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(e) | °C | | K |
| 光束流 | ルーメン | lm | | cd sr ^(c) |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² | m ⁻² cd |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | | s ⁻¹ |
| 吸収線量、比エネルギー分与、カーマ | グレイ | Gy | J/kg | m ² s ⁻² |
| 線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量 | シーベルト ^(g) | Sv | J/kg | m ² s ⁻² |
| 酸素活性 | カタール | kat | | s ⁻¹ mol |

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大さは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。
 (g) 単位シーベルト（PV,2002.70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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 |
| 粘度 | パスカル秒 | Pa s | m ¹ kg s ⁻¹ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m 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 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 s ⁻² K ⁻¹ |
| 比熱容量、比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻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 s ⁻² |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ sA |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² sA |
| 電束密度、電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² sA |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| モルエントロピー、モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg 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 sA |
| 吸収線量率 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg 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 s ⁻³ =kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ⁻³ s ⁻¹ mol |

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 | ゼタ | Z | 10 ⁻² | センチ | c |
| 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 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|-------|------|--|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1 h =60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ′ | 1′=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | ″ | 1″=(1/60)′=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | 1ha=1hm ² =10 ⁴ m ² |
| リットル | L, l | 1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1t=10 ³ kg |

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値 |
|----------|----|--|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J |
| ダルトン | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | 1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m |

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| バール | bar | 1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | 1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バイン | b | 1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ² |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 |
| ベベル | B | |
| デジベル | dB | |

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------------------|-----|--|
| エルグ | erg | 1 erg=10 ⁻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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹ |
| スチルブ | sb | 1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻² |
| フオト | ph | 1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx |
| ガリ | Gal | 1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻² |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb |
| ガウス | G | 1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T |
| エルステッド ^(c) | Oe | 1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹ |

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|-----------|------|--|
| 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 |
| ガンマ | γ | 1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| フェルミ | f | 1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット=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 | 1cal=4.1858J（「15℃」カロリー）、4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー） |
| マイクロン | μ | 1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m |

