

最新の知見に基づいた研究施設等廃棄物浅地中 埋施設からの浸出水量の評価

Evaluation of the Flow Rate of Leachate from Near Surface Waste Disposal
Facilities of Radioactive Wastes from Research, Industrial and Medical Facilities
Based on the Latest Knowledge

北谷 光 小曾根 健嗣 仲田 久和

Hikari KITATANI, Kenji OZONE and Hisakazu NAKATA

バックエンド領域
埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Waste Management Domain

December 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

最新の知見に基づいた研究施設等廃棄物浅地中埋設施設からの浸出水量の評価

日本原子力研究開発機構 バックエンド領域 埋設事業センター

北谷 光、小曾根 健嗣、仲田 久和

(2025 年 9 月 30 日受理)

日本原子力研究開発機構は、研究施設等廃棄物の埋設処分の実施主体として、現在低レベル放射性廃棄物を対象としたトレンチ処分及びピット処分の 2 通りの検討を行っている。

埋設施設の安全評価における被ばく線量評価には、埋設施設の浸透水量データが必要となる。浸透水量の評価には、廃棄物条件や埋設環境などによる不確実性を考慮する必要がある。そのため、本報告では、研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計の設計条件等を基にリファレンスモデルを設定し、先行事業者の申請書を参考に、最新の知見に基づいた安全評価に反映する浅地中埋設施設からの浸出水量を地下水流動解析により算出した。これにより、埋設施設の各層及び周辺土壌の透水係数が浸出水量に及ぼす影響を評価した。

具体的には、有限要素法による二次元地下水流動解析コード（MIG2DF）を用いて、トレンチ埋設施設については、覆土層の経年劣化を想定した評価を行うとともにコンクリートピット埋設施設については、廃棄体に含まれる塩類の影響を想定した評価を行った。

解析の結果、トレンチ埋設施設では、粘土層の透水性が劣化すると廃棄体層への浸入水量が増加し、特に排水層の透水性が低下した場合にはその傾向が一層顕著となった。これは、排水層による水平流路が機能せず、水の粘土層への浸入が促進されるためである。一方、コンクリートピット埋設施設では、粘土層の破断により周辺の流速が上昇し、廃棄体層を通過する水量が増加する現象が確認された。これらの結果は、施設の各層ごとの透水性の変化が、浸出水量にどのような影響を及ぼすかを定量的に示しており、安全評価におけるシナリオ設定や埋設施設の維持管理の方針策定に資する有効な知見といえる。

Evaluation of the Flow Rate of Leachate from Near Surface Waste Disposal Facilities of Radioactive Wastes from Research, Industrial and Medical Facilities Based on the Latest Knowledge

Hikari KITATANI, Kenji OZONE and Hisakazu NAKATA

Radioactive Wastes Disposal Center
Decommissioning and Waste Management Domain
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 30, 2025)

Japan Atomic Energy Agency is responsible for near-surface disposal of research-related low-level radioactive waste and is considering two types of facilities: trench and concrete-pit.

In safety assessment of such facilities, dose evaluation requires data on infiltration water. Evaluating infiltration involves uncertainties due to waste conditions and disposal environment. Therefore, in this report, a reference model was established based on the conceptual design conditions of near-surface disposal facilities, and leachate from the facilities was estimated by groundwater flow analysis, using applications by prior operators as reference and reflecting the latest knowledge for safety assessment. This allowed evaluation of how the hydraulic conductivity of each facility layer and surrounding soil affects leachate.

Specifically, the 2D FEM groundwater flow code MIG2DF was used: trench facilities were evaluated assuming cover degradation, and concrete-pit facilities assuming salt effects in waste packages.

Results showed that in trench facilities, deterioration of clay hydraulic conductivity increased inflow to the waste layer, especially when drainage layer conductivity decreased, as horizontal flow paths failed and infiltration into clay was promoted. In concrete-pit facilities, clay fracturing increased local flow and water through the waste layer. These results quantitatively demonstrate how changes in hydraulic conductivity of each layer affect leachate, providing useful insights for scenario development in safety assessment and for facility management.

Keywords: Trench Disposal, Concrete-pit Disposal, Groundwater Flow Analysis, Low Level Radioactive Waste, Hydraulic Conductivity

目次

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 二次元地下水流動解析の計算方法 | 2 |
| 2.1 本検討で使用するソフトウェア | 2 |
| 2.1.1 モデル作成ソフトウェア | 2 |
| 2.1.2 解析コード | 2 |
| 2.1.3 可視化処理ツール | 2 |
| 2.2 解析フロー | 3 |
| 3. トレンチ埋設施設の地下水流動解析 | 4 |
| 3.1 リファレンスモデルによる評価 | 4 |
| 3.1.1 解析モデル及び解析条件 | 4 |
| 3.1.2 不飽和領域における透水係数 | 5 |
| 3.1.3 解析方法 | 6 |
| 3.1.4 解析結果 | 6 |
| 3.2 覆土の透水係数による浸出水量への影響評価 | 7 |
| 3.2.1 解析条件 | 7 |
| 3.2.2 解析結果 | 8 |
| 4. コンクリートピット埋設施設の地下水流動解析 | 29 |
| 4.1 リファレンスモデルによる評価 | 29 |
| 4.1.1 解析モデル及び解析条件 | 29 |
| 4.1.2 解析方法 | 30 |
| 4.1.3 解析結果 | 31 |
| 4.2 粘土層の透水係数による浸出水量への影響評価 | 32 |
| 4.2.1 解析モデル及び解析条件 | 32 |
| 4.2.2 解析結果 | 33 |
| 5. 検討結果及び今後の課題 | 46 |
| 5.1 トレンチ埋設施設 | 46 |
| 5.2 コンクリートピット埋設施設 | 47 |
| 謝辞 | 49 |
| 参考文献 | 50 |
| 付録 トレンチ埋設施設の涵養量の算出方法 | 52 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Method of Two-Dimensional Groundwater Flow Analysis | 2 |
| 2.1 Software Used in This Study | 2 |
| 2.1.1 Model Construction Software..... | 2 |
| 2.1.2 Analysis Code..... | 2 |
| 2.1.3 Visualization Tools | 2 |
| 2.2 Analysis Flow | 3 |
| 3. Groundwater Flow Analysis for the Trench Disposal Facility | 4 |
| 3.1 Evaluation Using the Reference Model..... | 4 |
| 3.1.1 Analysis Model and Conditions..... | 4 |
| 3.1.2 Hydraulic Conductivity in the Unsaturated Zone..... | 5 |
| 3.1.3 Analysis Method | 6 |
| 3.1.4 Analysis Results | 6 |
| 3.2 Assessment of Cover Soil Hydraulic Conductivity Effects on Leachate Volume | 7 |
| 3.2.1 Analysis Conditions..... | 7 |
| 3.2.2 Analysis Results | 8 |
| 4. Groundwater Flow Analysis for the Concrete-Pit Disposal Facility | 29 |
| 4.1 Evaluation Using the Reference Model..... | 29 |
| 4.1.1 Analysis Model and Conditions..... | 29 |
| 4.1.2 Analysis Method | 30 |
| 4.1.3 Analysis Results | 31 |
| 4.2 Assessment of Clay Layer Hydraulic Conductivity Effects on Leachate Volume. | 32 |
| 4.2.1 Analysis Model and Conditions..... | 32 |
| 4.2.2 Analysis Results | 33 |
| 5. Summary of Results and Future Issues | 46 |
| 5.1 Trench Disposal Facility..... | 46 |
| 5.2 Concrete-Pit Disposal Facility | 47 |
| Acknowledgements | 49 |
| References..... | 50 |
| Appendix Method for Estimating Recharge in the Trench Disposal Facility..... | 52 |

表リスト

| | | |
|--------|--|----|
| 表 3-1 | リファレンスモデルにおける各覆土層のパラメータ | 12 |
| 表 3-2 | 粘土層以外における含水率 θ と不飽和低減係数の対応表..... | 12 |
| 表 3-3 | 粘土層における含水率 θ と不飽和低減係数の対応表..... | 12 |
| 表 3-4 | 粘土層以外における圧力水頭 h_p と含水率 θ の対応表 | 12 |
| 表 3-5 | 粘土層における圧力水頭 h_p と含水率 θ の対応表..... | 12 |
| 表 3-6 | 廃棄体層の浸入・浸出水量（リファレンスモデル） | 13 |
| 表 3-7 | 透水係数の設定（最も可能性が高いシナリオ） | 13 |
| 表 3-8 | 透水係数の設定（最も厳しいシナリオ） | 14 |
| 表 3-9 | 各ケースの涵養量 | 14 |
| 表 3-10 | 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も可能性が高いシナリオ） | 15 |
| 表 3-11 | 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も厳しいシナリオ） | 16 |
| 表 4-1 | 各覆土層の飽和時透水係数及び間隙率 | 37 |
| 表 4-2 | コンクリートピット埋設施設モデルの水位拘束及び動水勾配..... | 37 |
| 表 4-3 | 廃棄体層への浸入及び浸出水量 | 37 |
| 表 4-4 | リファレンスモデルにおける覆土・岩盤へ移行する浸出水量..... | 38 |
| 表 4-5 | ピット検討モデルの各パラメータ（最も可能性が高いシナリオ） | 38 |
| 表 4-6 | ピット検討モデルの各ケースの透水係数設定（最も厳しいシナリオ） | 38 |
| 表 4-7 | 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も可能性が高いシナリオ） | 39 |
| 表 4-8 | 廃棄体層の浸入及び浸出水量（最も厳しいシナリオ） | 40 |
| 表 4-9 | ピット②浸出水の浸出先及び浸出水量（最も可能性が高いシナリオ） | 41 |
| 表 4-10 | ピット②浸出水の浸出先及び浸出水量（最も厳しいシナリオ） | 41 |
| 表付 1 | 各シナリオの涵養量を決定するための各パラメータ | 55 |
| 表付 2 | 関東地方の年平均気温の平均値（平成 3 年～令和 2 年） | 55 |

図リスト

| | | |
|--------|--|----|
| 図 2-1 | 二次元地下水流動解析フロー | 3 |
| 図 3-1 | 解析モデルの概略図 | 17 |
| 図 3-2 | 解析モデルのメッシュ図 | 17 |
| 図 3-3 | 粘土層以外の覆土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係... | 18 |
| 図 3-4 | 粘土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係 | 18 |
| 図 3-5 | リファレンスモデルの圧力水頭分布 | 19 |
| 図 3-6 | リファレンスモデルの全水頭分布 | 20 |
| 図 3-7 | リファレンスモデルの流速及び流向分布 | 21 |
| 図 3-8 | 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-2） | 22 |
| 図 3-9 | 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-5） | 23 |
| 図 3-10 | 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-7） | 24 |
| 図 3-11 | 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-10） | 25 |
| 図 3-12 | 流向・流速図（最も厳しいシナリオ・ケース 2-8） | 26 |
| 図 3-13 | 流向・流速図（最も厳しいシナリオ・ケース 2-10） | 27 |
| 図 3-14 | ケース 2-8 と 2-10 の比較図 | 28 |
| 図 4-1 | 解析モデルの概略図（全体図） | 42 |
| 図 4-2 | 解析モデルの概略図（ピット周辺） | 42 |
| 図 4-3 | 解析モデルのメッシュ図（全体図） | 42 |
| 図 4-4 | 解析モデルのメッシュ図（ピット周辺拡大図） | 43 |
| 図 4-5 | リファレンスモデルの全水頭分布 | 43 |
| 図 4-6 | リファレンスモデルの評価点を通過する流跡線（全体） | 44 |
| 図 4-7 | リファレンスモデルの評価点を通過する流跡線（拡大図） | 44 |
| 図 4-8 | 粘土層破断モデルの概略図 | 44 |
| 図 4-9 | 粘土層の等価透水係数の設定手法 | 45 |
| 図付 1 | 年平均気温と年平均降水量の相関 | 56 |
| 図付 2 | 年平均気温と蒸発散量の相関 | 56 |

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）は、原子力機構法の改正（平成 20 年法律第 51 号）により、原子力機構及び国内の研究施設や医療機関から発生する低レベル放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という。）の埋設処分の実施主体と定められた。その後、「埋設処分業務の実施に関する計画」¹⁾（平成 21 年 11 月 13 日文部科学大臣並びに経済産業大臣の認可）を策定し、研究施設等廃棄物を埋設する事業を開始した。

トレンチ埋設施設及びコンクリートピット埋設施設の安全評価では、放射性廃棄物に含まれている放射性核種の生活圏への移動・拡散及びそれによる被ばく線量の評価が必要となる。安全評価の仮定において、廃棄物中の放射性核種が生活圏へ到達する可能性が最も高いと考えられているシナリオは、地下水による放射性核種の移行である。そのため、地下水の流れ、地下水に溶存する放射性核種の濃度、生活圏へ到達するまでの時間や、到達後に考えられる被ばく経路及び被ばく線量を評価し、施設の安全性を説明する必要がある。

埋設事業センターでは、トレンチ埋設施設及びコンクリートピット埋設施設の被ばく線量評価に用いる浸出水量を算出するため、「研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計」²⁾（以下、「概念設計報告書」という。）に基づいて作成した一般的な立地環境条件における埋設施設の 2 次元モデル及び原子力機構の安全研究センターで開発された解析コード MIG2DF^{3),4)}を使用して解析評価を行ってきた。「研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における覆土の設計検討」（以下、「トレンチ報告書」という。）⁵⁾及び「様々な施設設計条件におけるコンクリートピット施設からの浸出水量の算出」（以下、「ピット報告書」という。）⁶⁾では、施設の設計条件に基づいた各覆土層の厚さや透水係数による浸透水量への影響についてパラメータスタディーにより評価している。

本報告書では、被ばく線量評価に用いる浸出水量を算出するため、原子炉等規制法に沿った先行事業者（日本原子力発電株式会社（以下、「原電」という。）、日本原燃株式会社（以下、「原燃」という。））の申請書を参考にして、最新情報に基づいた解析評価を行った。安全評価の被ばく線量評価では、最も可能性の高い、最も厳しいシナリオを想定した評価が必要である。そのため、浸透水量は、被ばく線量評価のパラメータのひとつとして、各シナリオで設定することが必要である。被ばく線量評価に必要な浸透水量についても、廃棄物条件や埋設環境等による不確実性を考慮した評価が必要である。そのため本解析では、トレンチ埋設施設については、不飽和域の粘土層の解析に新たな不飽和低減係数を用いた解析評価を行うとともに覆土のうち排水層、粘土層の経年劣化を考慮した解析評価を行った。また、コンクリートピット埋設施設については、硝酸塩や硫酸塩を含む廃棄体から漏出する塩類による粘土層の変質及び廃棄体を定置する領域（以下、「廃棄体層」という。）の陥没により、粘土層が部分的に破断したモデルによる解析評価を行った。

2. 二次元地下水流動解析の計算方法

2.1 本検討で使用するソフトウェア

以下に、本報告書で行った二次元の地下水流動解析で用いたソフトウェア及び解析コードを示す。

2.1.1 モデル作成ソフトウェア

(1) Femap

解析モデルは、Femap⁷⁾ (Finite Element Modeling And Postprocessing) を用いて、二次元有限要素モデルを作成した。Femap は Windows 上でジオメトリの作成、メッシュ形成、パラメータ及び境界条件の設定等が可能である。

2.1.2 解析コード

(1) 地下水流動解析コード

地下水流動解析には、原子力機構安全研究センターで開発された MIG2DF を用いた。MIG2DF は、有限要素法を用いた 2 次元地下水流動解析コードであり、飽和・不飽和の地下水流動解析及び移流拡散による核種移行解析を行うことができる。

(2) 地下水流路解析コード

地下水流路解析には、PASS_TRAC⁴⁾を用いた。PASS_TRAC は、MIG2DF の後処理ツールで、MIG2DF で得られた水頭分布を用いて地下水の流路を解析するコードである。出発地点、中間地点または到着地点の座標を入力し、粒子の移動経路を追跡することができる。

2.1.3 可視化処理ツール

解析結果の可視化は以下の 3 つの方法で行った。

(1) PASS_POST 及び AVS/Express

MIG2DF 及び PASS_TRAC の出力を PASS_POST⁴⁾で処理し、汎用可視化ソフト AVS/Express⁸⁾にて全水頭分布及び地下水流路解析の結果の可視化を行った。PASS_POST も PASS_TRAC と同様に、MIG2DF の後処理ツールの一つである。

(2) gnuplot

MIG2DF の出力を gnuplot⁹⁾で読み込めるように株式会社ヴィジブルインフォメーションセンターが作成した Ruby スクリプトを用いて、メッシュごとの地下水の流速及び流向を可視化した。

(3) ParaView

サンディア国立研究所、Kitware 株式会社、ロスアラモス国立研究所らが共同開発したオープンソースのデータ分析・可視化プログラム ParaView¹⁰⁾を用いて地下水の流速・流向等の可視化

を行った。

2.2 解析フロー

本報告における地下水流動解析の作業フローを図 2-1 に示すとともに、具体的な作業内容を以下に述べる。

- ① **Femap** で有限要素モデルを作成し、パラメータ及び境界条件を設定する。
- ② ①で作成した **Femap** の **neutral** ファイルを **PASS_PRE** で **MIG2DF** 用の入力データファイルに変換する。
- ③ **MIG2DF** で解析を実施する。
- ④ 任意の位置を出発地点（中間地点または到着地点）としたときの地下水の動き（流跡）を **PASS_TRAC** にて評価する（コンクリートピット埋設施設のみ）。
- ⑤ 可視化ソフト及びプログラムにて、③で出力された水頭分布や④で出力された流跡線を可視化する。



図 2-1 二次元地下水流動解析フロー

3. トレンチ埋設施設の地下水流動解析

トレンチ埋設施設の安全評価においては、雨水や地下水がトレンチ埋設施設内の廃棄体層に浸入することにより、放射性核種が地下水に移行し生活圏に到達することが想定される。概念設計報告書において、トレンチ埋設施設は地下水位より浅い位置に設置することを想定している。そのため、本検討では施設上部から浸入する水として雨水のみを想定し、トレンチ埋設施設の廃棄体層の上部に排水機能と遮水機能を併せ持つ遮水層を設けた埋設施設の構造としている。

本解析では、初めにトレンチ埋設施設の構造について、粘土層に対する新たな不飽和低減係数の設定を含むリファレンスモデルを設定し、浸出水量の評価を行った。また、その結果を基に、原電における新規制基準への適合性審査会合資料^{11),12)}を参考にして、覆土層の経年劣化の影響を考慮するために、透水係数に関する条件設定を行い、遮水層の透水係数による浸出水量への影響評価を実施した。

3.1 リファレンスモデルによる評価

3.1.1 解析モデル及び解析条件

リファレンスモデルの概略を図 3-1 に、このモデルで設定した各覆土層の飽和時透水係数及び間隙率を表 3-1 に示す。

トレンチ埋設施設周辺の環境条件については、概念設計報告書で設定されている日本における一般的な環境条件を基に設定した。埋設施設周辺の土壌（以下、「土壌層」という。）は、トレンチ埋設施設が設置される地下水位より浅く、岩盤等と比べ透水性の高い地層を想定し、「日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成」¹³⁾で求められた $1.0 \times 10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$ の範囲から、概念設計報告書と同様、透水性の大きい土壌に着目し、透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ と設定した。

トレンチ埋設施設は、概念設計報告書内で設定されている安定型トレンチ埋設施設と同じ大きさ、すなわち、上辺 30.598 m、下辺 14.55 m 及び高さ 4.012 m の四角錐台型とし（図 3-2 参照）、トレンチ埋設施設内の廃棄体層の透水係数は、土壌層と同じ $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ と設定した。

遮水層の透水係数は、概念設計報告書、「研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における遮水機能の設計検討（共同研究）」¹⁴⁾（以下、「トレンチ設計検討報告書」という。）及び『人形峠鉱山夜次鉱さいたい積場上流側「廃砂たい積場」の跡措置』¹⁵⁾（以下、「人形峠報告書」という。）を基に設定した。また、概念設計報告書における安定型トレンチ埋設施設では、設備の経年劣化等による露出を防ぐために施設上部に地表面から 2.5 m の高さの覆土が施されているため、本解析においても同様に施設上部の覆土をモデル化した。遮水層は三層構造とし、各層に以下のような役割を持たせることとした。

- 最上面に設置し、それ以深の覆土や廃棄体層を保護する覆土層（以下、「保護土」という。）
- 保護土の下に設置し、水が廃棄体層を迂回するように流す排水機能を有する覆土層（以下、「排水層」という。）
- 排水層の下に設置し、廃棄体層への浸水を抑制する遮水機能を有する覆土層（以下、「粘土層」という。）

この覆土の設計により、降雨により覆土に浸入した水がトレンチ埋設施設内の廃棄体層を迂回するように流れ、迂回しなかった水は粘土層に浸入するといった機能を期待している。各層の厚さは人形峠報告書を参考に、保護土を 0.3 m、排水層を 0.3 m、粘土層を 0.5 m と設定した。また、透水係数に関しては、保護土は周辺の土壌と同等の透水係数である 1.0×10^{-4} m/s に設定し、排水層及び粘土層はトレンチ設計検討報告書を参考に、それぞれ、 3.0×10^{-4} m/s 及び 1.0×10^{-10} m/s と設定した。なお、粘土層の透水係数は、トレンチ報告書では、 1.0×10^{-9} m/s に設定していたが、本解析では原電の設定値を参考に 1.0×10^{-10} m/s を採用した。また、これらの覆土の下部と廃棄体層の上部に敷設する覆土（以下、「上部覆土」という。）は、粘土層で遮水できず浸入した水を低減するため、周辺の土壌に比べ十分締固めることにより透水係数を低下させることを想定し、透水係数を周辺土壌の透水係数 1.0×10^{-4} m/s の 100 分の 1 の値である 1.0×10^{-6} m/s と設定した。

また、概念設計報告書におけるトレンチ埋設施設の覆土は、水の排水を促すために、施設の中心を頂点とした勾配が設けられており、本検討においても同様に 2.4% の勾配を設けることとした。これらの条件を基に作成した解析用モデルのメッシュ図を図 3-2 に示す。解析用モデルのメッシュ図を作成するに当たり、覆土や廃棄体層など地下水流動を詳細に観察する必要がある、異なる材料同士が接する境界部分のメッシュはより細かく設定し、接合部にはトレンチ報告書⁵⁾を参考にメッシュの分割構造を設けた。

解析を行う領域は、境界条件による流速や流向の影響を受けにくくするため、十分な解析領域を確保するために、左右は保護土の端から 10 m、地表面から深さ 10 m までを解析領域とした。また、トレンチ報告書における設定値を参考に、モデルの上辺と側辺、及び底辺にそれぞれ境界条件を設定した。モデルの上辺には施設への涵養量（地表面への浸入水量）を設定した。上辺の涵養量は、「研究施設等廃棄物の浅地中処分のための基準線量相当濃度の検討（その 1）」¹⁶⁾における設定値を参考に 600 mm/y を設定した。また、モデルの側辺には水位拘束条件を設定した。概念設計報告書における設計条件において、地下水位は地表面から平均 5 m 下部、季節変動を考慮した場合地表面から最大 4 m 下部に位置するとされている。そのため、今回の解析では平均値からやや保守的な設定値として、モデルの地下水位を地表面から 4.5 m 下部に設定した（図 3-1 参照）。モデル底辺は MIG2DF により地下水位 ±0 m 地点（地表面から 4.5 m 下部）からの圧力水頭値を設定した。なお、本解析では単純に地表面から浸入する雨水の影響のみを評価するため、地下水面下での水平方向の流れについては考慮していない。

3.1.2 不飽和領域における透水係数

トレンチ埋設施設は地下水位より浅い地点に設置されるため、周辺土壌は不飽和領域となる。今回の解析で使用した地下水流動解析コードである MIG2DF^{3),4)}による不飽和浸透流解析では、以下の式により不飽和条件下の透水係数 k' を用いて計算をしている。

$$k' = k \cdot K_{\theta} \cdot K_u$$

ここで、 k は飽和時の透水係数、 K_{θ} は不飽和時の帯水層の含水率 θ と圧力水頭 h_p に関する飽和時の透水係数 k に対する割合（以下、「不飽和低減係数」という。）、 K_u は平均流速に関する飽和時の透

水係数 k に対する割合を表す。なお、 K_u は平均流速による透水係数への影響を受けないと考え、本解析では 1 と見なすこととした。

本解析においては、2 種類の不飽和低減係数を採用した。一つは、放射能レベルが極めて低いコンクリート廃棄物をトレンチ埋設施設に埋設する実地試験の報告書である「(平成 10 年度科学技術庁委託事業) 極低レベル固体廃棄物合理的処分安全性実証試験報告書」¹⁷⁾ (以下、「埋設実証試験」という。) で評価された K_θ (平成元年度の測定結果) である (表 3-2 参照)。本解析では、この K_θ を粘土層を除くすべての覆土層に関して採用した。なお、この係数は既往の検討⁵⁾でも採用したものと同一である。

もう一つは、ベントナイト混合率 15 wt% の埋め戻し材の K_θ である。これは、「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 2 地層処分の工学技術」¹⁸⁾ (以下、「H12 レポート」という。) 内で求められた。本解析では、トレンチ報告書で他の覆土層と同じ不飽和低減係数を適用していた粘土層に対する不飽和低減係数として、この K_θ を採用することとした (表 3-3 参照)。

粘土層を除くすべての覆土層に関する圧力水頭 h_p と含水率 θ の関係を表 3-4 に、粘土層における圧力水頭 h_p と含水率 θ の関係を表 3-5 に、粘土層を除くすべての覆土層に関する含水率 θ と不飽和低減係数の関係を表 3-2 に、粘土層における含水率 θ と不飽和低減係数の関係を表 3-3 に示す。また、粘土層以外の覆土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係を図 3-3 に、粘土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係を図 3-4 に示す。

3.1.3 解析方法

トレンチ埋設施設の安全評価では、施設を地下水位面上に設置する関係上、モデル上部から雨水が廃棄体層に浸入し、そこから周辺環境中へ浸出するシナリオを想定して評価を行う。そのため、本解析では、モデル上部から浸入し、遮水のための粘土層を通過した水が廃棄体層に浸入する量を推定するため、トレンチ埋設施設の廃棄体層断面モデル (2 次元) の上辺、側辺及び下辺の 4 辺から廃棄体層内に浸入する水量及び廃棄体層内から浸出する水量を算出した。

3.1.4 解析結果

(1) 水頭分布

図 3-5 に圧力水頭の分布図を、図 3-6 に全水頭の分布図を示す。保護土及び排水層の周辺では、埋設施設を中心付近の全水頭が高く、中心から左右に離れるにつれ全水頭が小さくなっていることから、保護土及び排水層を通過する水は埋設施設を中心から左右に流れていると考えられる。一方、粘土層の全水頭は地表面側が大きく、地下水面側に近づくにつれて小さくなることを確認できる。このことから、粘土層まで浸入した水は、左右ではなく下方の廃棄体層側へ流れていくと考えられる。

(2) 流向及び流速

図 3-7 に、リファレンスモデルのモデル内を通過する水の流速及び流向を示す。なお、図の矢印の色により流速を、矢印の向きにより流向を示す。

モデル内では保護土と排水層において流速が大きく、特に高い透水係数を設定している排水層において、流速も大きくなっていた。また、モデルの中心から左右に向かうにつれ流速が大きくなっていたが、これは覆土層に設けた傾斜により水が埋設施設側面に流れ出す流路がとられているためであると考えられる。トレンチ埋設施設下の土壌層でも、保護土と排水層の端部付近の流速は大きく、端部から離れると流速が小さくなっていることから、覆土層の傾斜に沿って水がモデル左右に浸出していたと考えられる。矢印の方向からも、埋設施設表面の降雨の多くが保護土、排水層を流れて埋設施設の左右に流れ込み、土壌層の中を移動していく様子が確認できる。

一方、粘土層は上層の排水層に比べ流速が小さく、また流向も真下を向いており、水の浸入を大きく抑制し、浸入するものは下方向へ流れている様子が確認できる。また粘土層より下の上部覆土、廃棄体層に関しても流速は粘土層内とほぼ同様に、流向も下方向を向いているのが確認できる。このことから、粘土層は上部からの水の浸入を阻害し、その下部にある覆土層への水の浸入も防いでいることを確認した。

以上のことから、透水係数が高い保護土及び排水層とその下部に透水係数が低い粘土層を設定することで、雨水起源の水の流れを保護土及び排水層中で中心部から周辺方向に向かわせ、廃棄体層への浸入水量を低減させることが可能であると考えられる。

(3) 廃棄体層への浸入・浸出水量

リファレンスモデルにおける廃棄体層への浸入・浸出水量を表 3-6 に示す。浸入に関しては廃棄体層断面の上辺からの浸入水量と左辺・右辺からの浸入水量は大きな差はなく、左右の側辺からの浸入水量の合計は上辺からの浸入水量を上回っていた。このことから、粘土層を通過した水量と同等以上の水量が、粘土層を迂回した流路を通して浸入していると考えられる。また、浸出に関しては、下辺の浸出量が最も少なく、側辺からの浸出量が全体の 4 分の 3 ほどあり、上辺から浸入した水が下方の浸出面から側方面に向かって多く浸出すると考えられる。

3.2 覆土の透水係数による浸出水量への影響評価

3.2.1 解析条件

(1) 透水係数

「第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設地に関する審査ガイド」(以下、「審査ガイド」という。)¹⁹⁾では、低レベル放射性廃棄物埋設施設の廃止措置開始後 1,000 年を想定した線量評価において、最も可能性が高いシナリオと最も厳しいシナリオの二つのシナリオが定義されている。最も可能性が高いシナリオでは、自然事象・人為事象シナリオに基づき科学的に合理的な範囲で最も起こりうる事象やパラメータ設定が用いられる。一方で、最も厳しいシナリオでは、自然・人為事象において科学的に合理的な範囲の中で、最も保守的なパラメータ設定が用いられる。以上に基づき、トレンチ埋設施設を構成する各層に対して、原電における新規制基準への適合性審査会合資料^{20),21)}を参考に、先に設定したリファレンスモデルをベースに最も可能性が高いシナリオとして各層の透水係数を設定した(表 3-7)。また、より保守的な評価結果となるように、粘土層の遮水性能が低下するような透水係数を設定した最も厳しいシナリオのケースも追加し検討を行った(表 3-8)。以下に設定の考え方を示す。

上部覆土、廃棄体層及び土壌層はすべてのケースでリファレンスモデルと同じ値を設定した。

保護土と排水層、粘土層の透水係数の組み合わせによる影響評価を行うため、最も可能性が高いシナリオではケース 1-1～1-10（ケース 1-1 はリファレンスモデルと同じ）に、最も厳しいシナリオではケース 2-1～2-10 に分けた。各層の透水係数の設定パターンを以下に示す。

(i) 保護土

保護土の透水係数は 2 種類の条件設定を行った。一つはリファレンスモデルと同等の透水係数である 1.0×10^{-4} m/s を設定した。もう一つは、原電の設定値²⁰⁾を参考に、より透水係数が小さい 1.0×10^{-5} m/s を設定した。

(ii) 排水層

排水層の透水係数は 3 種類の条件設定を行った。一つ目は、リファレンスモデルと同等の透水係数である 3.0×10^{-4} m/s を設定した。二つ目は、トレンチ報告書の設定値を参考に、透水係数 1.0×10^{-3} m/s を設定した。三つ目は、排水層の目詰まりによる経年劣化を想定し、リファレンスモデルに比べ排水層の透水性が低下する設定値である透水係数 1.0×10^{-5} m/s を設定した。

(iii) 粘土層

粘土層の透水係数は、最も可能性が高いシナリオと最も厳しいシナリオでそれぞれ 2 種類ずつ、合計 4 種類の条件設定を行った。一つ目は、リファレンスモデルと同等の透水係数である 1.0×10^{-10} m/s を設定した。二つ目は、リファレンスモデルに比べ粘土層の遮水性を低下させるための検討として、トレンチ報告書で採用されている透水係数 1.0×10^{-9} m/s を設定した。これら 2 パターンを最も可能性が高いシナリオに適用した。3 つ目と 4 つ目は、原電の会合資料²¹⁾において、最も厳しいシナリオにおける粘土層の透水係数が最も可能性が高いシナリオの約 2 倍に設定されていることを参考に、2 倍の透水係数 2.0×10^{-10} m/s 及び 2.0×10^{-9} m/s を設定した。

(2) 涵養量

表 3-9 に、検討モデルの最も可能性が高いシナリオ及び最も厳しいシナリオにおける涵養量を示す。トレンチ埋設施設の涵養量は、年間降水量から地表面流出量と蒸発散量を引いた値として求めた。年間降水量、地表面流出量は、原電における新規制基準への適合性審査会合資料を参考にして東日本の代表的な気象観測値のデータ²²⁾を基に平均値を求め、蒸発散量はソーンスウェイト法^{23),24)}により求めた。その結果、廃止措置開始後 1,000 年経過した時における最も可能性が高いシナリオでは 692.0 mm/y、最も厳しいシナリオでは 947.6 mm/y と設定した（付録参照）。

3.2.2 解析結果

(1) 流向及び流速

各シナリオ・ケースの流向・流速図の代表例を図 3-8～図 3-13 に示す。

ケース 1-2 は、排水層の透水係数をリファレンスモデルの排水層の透水係数 (3.0×10^{-4} m/s) の約 3.3 倍 (1.0×10^{-3} m/s) に設定したケースである。このケースにおける粘土層から下の覆土層における流速は、 1.0×10^{-2} m/y 以下の流速になっている（図 3-8 参照）。一方、図 3-7 に示すリファレンスモデルの場合には、おおよそ 1.0×10^{-2} m/y 以上の流速であった。このことから、最も可能性が高いシナリオのケース 1-2 では、排水層の透水係数の増加により粘土層以下の流速を

低下させていることが分かった。

ケース 1-5 は排水層の透水係数をケース 1-2 の 100 分の 1 (1.0×10^{-5} m/s) に、保護土の透水係数をリファレンスモデルの保護土の透水係数 (1.0×10^{-4} m/s) の 10 分の 1 (1.0×10^{-5} m/s) に設定したケースである。このケースではケース 1-2 と異なり、粘土層から下の覆土層における流速は、 1.0×10^{-2} m/y 以上の流速になっており（図 3-9 参照）、粘土層以下の流速がリファレンスモデルと同等か、リファレンス以上に上昇していることが確認できた。これは、排水層の透水係数が低下した結果、左右方向への排水機能が低下したためであると考えられる。また、ケース 1-5 では保護土と排水層の透水係数が等しく、図 3-9 を見ると、リファレンスモデルと比較すると保護土中の流速が上昇しており、粘土層と排水層の間に流速の差はほぼ見られなかった。

ケース 1-7（図 3-10 参照）は保護土及び排水層の透水係数をケース 1-2 と同じ値に設定し、粘土層の透水係数をリファレンスモデル等の 10 倍 (1.0×10^{-9} m/s) に設定したケースである。このケースでは、粘土層から下の覆土層における流速は、ケース 1-5 とほぼ同等であり、 1.0×10^{-2} m/y 以上の流速になっていた。これは、排水層の性能はケース 1-2 と同等であり、十分に左右方向への排水が行われている一方で、粘土層の透水係数が増加したことで、粘土層による施設の下方向への遮水性能が低下しているためであると考えられる。

ケース 1-10 は保護土の透水係数をケース 1-7 の 10 分の 1 (1.0×10^{-5} m/s) に、排水層の透水係数をケース 1-7 の 100 分の 1 (1.0×10^{-5} m/s) に設定（ケース 1-5 と同等）し、粘土層の透水係数をリファレンスモデル等の 10 倍 (1.0×10^{-9} m/s) に設定したケースである。このケースは、最も可能性が高いシナリオのすべてのケースの中で最も粘土層から下の覆土層における流速が速くなっていた（図 3-11 参照）。これは、排水層の透水係数低下により左右方向への排水機能が低下したこと、粘土層の透水係数の増加により下方向への水の遮水性能が低下したことの両方によるものであると考えられる。また、これまでのケースでは、水は排水層から左右方向に流れ出たのち廃棄体層側部を迂回してモデル中央下部に収束するような流向を示していたが、ケース 1-10 では全体的に水の流向がモデル下部へ向くように変化していた。これは、排水層による排水機能及び粘土層による遮水機能が低下した結果、粘土層を通過して上部覆土や廃棄体層に浸入する水量が増え、モデル真下方向への流れが強くなったためであると考えられる。

また、最も厳しいシナリオでは、最も可能性が高いシナリオに比べ、すべてのケースで全体的に流速が上昇していることが確認できた。これは、粘土層の透水係数が最も可能性が高いシナリオの 2 倍であり、粘土層の遮水性能が低下しているためであると考えられる。その中でも特に流速が上昇していたのは、ケース 2-8 及びケース 2-10 であった（図 3-12、図 3-13 参照）。

ケース 2-8 及びケース 2-10 はどちらも、排水層の透水係数が 1.0×10^{-5} m/s であり、また粘土層の透水係数がリファレンスモデルの 20 倍の 2.0×10^{-9} m/s である。そのため、ケース 1-10 と同様に排水層による排水機能及び粘土層による遮水機能が低下しており、また可能性が高いシナリオに比べ粘土層の透水係数が増加しているため、より粘土層の垂直方向への遮水機能が低くなっていると考えられる。

また、ケース 2-8 及びケース 2-10 を比較すると、ケース 2-10の方が粘土層以下の覆土層での流速が速くなっていた。ケース 2-8 の保護土の透水係数は 1.0×10^{-4} m/s、ケース 2-10 の保護土の透水係数は 1.0×10^{-5} m/s であり、ケース 2-8 の保護土の透水性がケース 2-10 に比べ高くなっ

ている。また、保護土の下にある排水層が、ケース 2-8 では保護土よりも透水係数が低くなっている ($1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)。そのため、ケース 2-8 の保護土が排水層の様にモデル左右方向への排水を担っており、ケース 2-10 に比べ粘土層以下の流速が低下していると考えられる (図 3-14 参照)。

(2) 廃棄体層の浸入・浸出水量

各シナリオ・ケースにおけるモデルの廃棄体層への単位面積当たりの年間浸入・浸出水量を以下に示す。

(i) 最も可能性が高いシナリオ

最も可能性が高いシナリオにおけるモデルの廃棄体層への浸入・浸出水量を表 3-10 に示す。

最も可能性が高いシナリオにおいては、リファレンスモデルの廃棄体層への浸入・浸出水量を下回ったのはケース 1-2 及びケース 1-4 であった。この 2 ケースは排水層の透水係数がリファレンスモデルの $3.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ よりも大きい $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ に設定されており、また粘土層の透水係数はリファレンスモデルと同じ透水係数に設定されている。このことから、排水層の透水性が増加したことで降雨の左右方向への排水が促進され、廃棄体層への浸入水量が減少したと考えられる。

一方で、ケース 1-2 と保護土・排水層の透水係数が等しいケース 1-7 及びケース 1-4 と保護土・排水層の透水係数が等しいケース 1-9 では、廃棄体層への浸入・浸出水量はリファレンスモデルの約 2 倍となっていた。これは、粘土層の透水係数がリファレンスモデルの 10 倍の $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ になっており、遮水性能が低下しているためであると考えられる。また、各辺の流量を見ると、ケース 1-7 及びケース 1-9 では、ケース 1-2 及びケース 1-4 に比べ上辺からの浸入量が増加しており、他の辺からの浸入量はあまり変化がなかった。このことから、粘土層の遮水性能が低下することにより、上方向から浸入する水が廃棄体層まで通過しやすくなり、合計の浸入水量も増加していると考えられる。

最も可能性が高いシナリオにおいて最大の浸入・浸出水量を示したのはケース 1-10 であり、浸入水量はリファレンスモデルの約 15 倍であった。ケース 1-10 は粘土層の透水係数がリファレンスモデルの 10 倍の $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ であり、また保護土と排水層の透水係数が $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ で同じ値になっている。そのため、排水層によるモデル左右方向への排水機能と、粘土層による遮水機能の両方が弱く、リファレンスモデルに比べ非常に高い廃棄体層への浸出水量を示したと考えられる。

(ii) 最も厳しいシナリオ

最も厳しいシナリオにおけるモデルの廃棄体層への浸入・浸出水量を表 3-11 に示す。

最も厳しいシナリオの各ケース間の浸入・浸出水量の差異は、最も可能性が高いシナリオにおけるものと同傾向であった。また、最も厳しいシナリオにおいてはすべてのケースがリファレンスモデルの合計浸入・浸出水量を上回っていた。特にケース 2-8 及びケース 2-10 の廃棄体層への合計浸入水量は大きく、ケース 2-8 でリファレンスモデルの約 15 倍、ケース 2-10 で約 25 倍を示した。

一方で、ケース 2-8 及びケース 2-10 の両方に共通して、廃棄体層の左辺及び右辺からの浸入水量は、リファレンスモデルと比べて小さく、ほとんどが上辺からの浸入であった。これは、粘土層の遮水性能低下による垂直方向へ流れる水量増加と、排水層の透水係数低下によるモデル左右方向への排水機能低下の両方が作用し、結果として上辺からの浸入水量が大幅に上昇した効果であると考えられる。

(iii) まとめ

今回の検討では、トレンチ埋設施設の覆土層のうち、保護土・排水層・粘土層の三種類の覆土層の透水係数に関する影響評価を行った。その結果、保護土の透水係数に関しては、今回の検討で試験した、リファレンスモデルと同等の 1.0×10^{-4} m/s と、その 10 分の 1 の 1.0×10^{-5} m/s に変化させても、廃棄体層からの浸出水量にほとんど変化が見られなかった。例えばケース 1-7 とケース 1-9 は保護土の透水係数以外は同じ条件であり、廃棄体層からの合計浸出水量はケース 1-7 が $0.045 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ 、ケース 1-9 が $0.046 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ でほぼ同じであった。

一方、排水層に関しては、リファレンスモデルと同等の 3.0×10^{-4} m/s、より透水性が高い 1.0×10^{-3} m/s、逆に、より透水性が低い 1.0×10^{-5} m/s の 3 通りの透水係数を設定した。その結果、排水層の透水係数が大きく、透水性が高いほど廃棄体層からの浸出水量は少なくなる結果となった。例えばケース 2-1 は排水層の透水係数 3.0×10^{-4} m/s、ケース 2-2 は 1.0×10^{-3} m/s、ケース 2-3 は 1.0×10^{-5} m/s であり、廃棄体層からの合計浸出水量はケース 2-2 が最も少なく $0.031 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ 、ケース 2-1 が $0.043 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ 、ケース 2-3 が最も多く $0.069 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ であった。

また、粘土層に関しては、最も可能性が高いシナリオで、リファレンスモデルと同等の 1.0×10^{-10} m/s とより透水性が高い 1.0×10^{-9} m/s の 2 通り、最も厳しいシナリオで、最も可能性が高いシナリオの設定値の 2 倍である 2.0×10^{-10} m/s と 2.0×10^{-9} m/s の 2 通りの透水係数を設定した。粘土層に関しては排水層とは逆に、透水係数が小さく、透水性が低いほど廃棄体層への浸入水量は小さくなる結果を示した。例えばケース 1-1 の粘土層の透水係数は 1.0×10^{-10} m/s、ケース 1-6 の粘土層の透水係数は 1.0×10^{-9} m/s に設定されており、それ以外の条件は同じである。ケース 1-1 の廃棄体層からの合計浸出水量は $0.021 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ 、ケース 1-6 の合計浸出水量は $0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ であり、粘土層の透水係数が減少すると浸出水量も減少していた。

これらの結果から、排水層の透水係数は、2 桁程度悪くなることで、施設の浸出水量は 2～6 倍程度増加することが分かった。また、粘土層の透水係数が 1 桁低下すると、施設の浸出水量は 2～5 倍程度増加することが分かった。これらの結果から、リファレンスモデルの条件に対して、遮水性が劣化した場合において、どの程度浸出水量が増加するか確認した。今後、この値を被ばく線量評価の解析ケースで用いる浸出水量の値として反映する。

表 3-1 リファレンスモデルにおける各覆土層のパラメータ

| | 飽和時透水係数 [m/s] | 間隙率 [%] |
|------|-----------------------|---------|
| 保護土 | 1.0×10^{-4} | 40 |
| 排水層 | 3.0×10^{-4} | 40 |
| 粘土層 | 1.0×10^{-10} | 40 |
| 上部覆土 | 1.0×10^{-6} | 40 |
| 廃棄体層 | 1.0×10^{-4} | 40 |
| 土壌層 | 1.0×10^{-4} | 40 |

表 3-2 粘土層以外における含水率 θ と不飽和低減係数の対応表

| 含水率 θ [%] | 6.09 | 8.04 | 10 | 14 | 40 |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|----|
| 不飽和低減係数 K_θ [-] | 0 | 0.025 | 0.127 | 0.952 | 1 |

表 3-3 粘土層における含水率 θ と不飽和低減係数の対応表

| 含水率 θ [%] | 0.004 | 10 | 16 | 22 | 28 | 32 | 36 | 39.6 | 39.96 | 40 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----|
| 不飽和低減係数 K_θ [-] | 0 | 0.001 | 0.007 | 0.029 | 0.091 | 0.18 | 0.356 | 0.783 | 0.936 | 1 |

表 3-4 粘土層以外における圧力水頭 h_p と含水率 θ の対応表

| 含水率 θ [%] | 6.96 | 8.91 | 10.7 | 20 | 40 |
|------------------|------|--------|--------|--------|----|
| 圧力水頭 h_p [m] | -10 | -0.938 | -0.563 | -0.125 | 0 |

表 3-5 粘土層における圧力水頭 h_p と含水率 θ の対応表

| 含水率 θ [%] | 2 | 4 | 8 | 14 | 28 | 34 | 38 | 39.6 | 39.96 | 40 |
|---------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 圧力水頭 h_p [m] | -433 | -242 | -133 | -79.7 | -34.4 | -22.1 | -12.5 | -5.84 | -2.04 | 0 |

表 3-6 廃棄体層の浸入・浸出水量（リファレンスモデル）

| | 浸入水量 [m ³ /(m ² ・y)] | 浸出水量 [m ³ /(m ² ・y)] |
|----|---|---|
| 上辺 | 0.009 | 0 |
| 下辺 | 0 | 0.005 |
| 左辺 | 0.006 | 0.008 |
| 右辺 | 0.006 | 0.008 |
| 合計 | 0.021 | 0.021 |

注：流量の結果については、項目ごとに小数点以下三桁を四捨五入したものを示している。

表 3-7 透水係数の設定（最も可能性が高いシナリオ）

| ケース No. | 透水係数 [m/s] | | | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 保護土 | 排水層 | 粘土層 | 上部覆土 | 廃棄体層 | 土壌層 |
| ケース 1-1 (リファレンス) | 1.0×10 ⁻⁴ | 3.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻¹⁰ | 1.0×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻⁴ |
| ケース 1-2 | | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 1-3 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 1-4 | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 1-5 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 1-6 | 1.0×10 ⁻⁴ | 3.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻⁹ | | | |
| ケース 1-7 | | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 1-8 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 1-9 | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 1-10 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |

表 3-8 透水係数の設定（最も厳しいシナリオ）

| ケース No. | 透水係数 [m/s] | | | | | |
|----------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 保護土 | 排水層 | 粘土層 | 上部覆土 | 廃棄体層 | 土壌層 |
| ケース 2-1 | 1.0×10 ⁻⁴ | 3.0×10 ⁻⁴ | 2.0×10 ⁻¹⁰ | 1.0×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻⁴ |
| ケース 2-2 | | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 2-3 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 2-4 | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 2-5 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 2-6 | 1.0×10 ⁻⁴ | 3.0×10 ⁻⁴ | 2.0×10 ⁻⁹ | | | |
| ケース 2-7 | | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 2-8 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |
| ケース 2-9 | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻³ | | | | |
| ケース 2-10 | | 1.0×10 ⁻⁵ | | | | |

表 3-9 各ケースの涵養量

| | | 涵養量 [mm/y] |
|-----------|--------------|------------|
| リファレンスモデル | | 600.0 |
| 検討モデル | 最も可能性が高いシナリオ | 692.0 |
| | 最も厳しいシナリオ | 947.6 |

表 3-10 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も可能性が高いシナリオ）

| | | 廃棄体層各辺の流量 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$] | | | | 合計 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$] |
|---------------------|----|--|-------|-------|-------|--|
| | | 上辺 | 下辺 | 左辺 | 右辺 | |
| ケース 1-1 (リファレンス) | 浸入 | 0.009 | 0 | 0.006 | 0.006 | 0.021 |
| | 浸出 | 0 | 0.005 | 0.008 | 0.008 | 0.021 |
| ケース 1-2 | 浸入 | 0.004 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.019 |
| | 浸出 | 0 | 0.004 | 0.007 | 0.007 | 0.018 |
| ケース 1-3 | 浸入 | 0.023 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.036 |
| | 浸出 | 0 | 0.012 | 0.011 | 0.011 | 0.034 |
| ケース 1-4 | 浸入 | 0.004 | 0 | 0.008 | 0.008 | 0.019 |
| | 浸出 | 0 | 0.004 | 0.008 | 0.008 | 0.019 |
| ケース 1-5 | 浸入 | 0.064 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.077 |
| | 浸出 | 0 | 0.032 | 0.021 | 0.021 | 0.073 |
| ケース 1-6 | 浸入 | 0.072 | 0 | 0.006 | 0.006 | 0.084 |
| | 浸出 | 0 | 0.035 | 0.023 | 0.022 | 0.08 |
| ケース 1-7 | 浸入 | 0.032 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.045 |
| | 浸出 | 0 | 0.017 | 0.014 | 0.014 | 0.045 |
| ケース 1-8 | 浸入 | 0.175 | 0 | 0.004 | 0.004 | 0.183 |
| | 浸出 | 0 | 0.081 | 0.046 | 0.046 | 0.172 |
| ケース 1-9 | 浸入 | 0.034 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.048 |
| | 浸出 | 0 | 0.018 | 0.014 | 0.014 | 0.046 |
| ケース 1-10 | 浸入 | 0.334 | 0 | 0.003 | 0.003 | 0.339 |
| | 浸出 | 0 | 0.145 | 0.087 | 0.088 | 0.32 |

注：流量の結果については、項目ごとに小数点以下三桁を四捨五入したものを示している。

表 3-11 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も厳しいシナリオ）

| | | 廃棄体層各辺の流量 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$] | | | | 合計 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$] |
|----------|----|--|-------|-------|-------|--|
| | | 上辺 | 下辺 | 左辺 | 右辺 | |
| ケース 2-1 | 浸入 | 0.024 | 0 | 0.009 | 0.01 | 0.043 |
| | 浸出 | 0 | 0.013 | 0.015 | 0.014 | 0.043 |
| ケース 2-2 | 浸入 | 0.012 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0.031 |
| | 浸出 | 0 | 0.008 | 0.012 | 0.012 | 0.031 |
| ケース 2-3 | 浸入 | 0.055 | 0 | 0.008 | 0.008 | 0.071 |
| | 浸出 | 0 | 0.027 | 0.021 | 0.021 | 0.069 |
| ケース 2-4 | 浸入 | 0.012 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0.032 |
| | 浸出 | 0 | 0.008 | 0.013 | 0.012 | 0.032 |
| ケース 2-5 | 浸入 | 0.125 | 0 | 0.008 | 0.008 | 0.141 |
| | 浸出 | 0 | 0.06 | 0.037 | 0.036 | 0.134 |
| ケース 2-6 | 浸入 | 0.162 | 0 | 0.007 | 0.007 | 0.176 |
| | 浸出 | 0 | 0.077 | 0.045 | 0.045 | 0.167 |
| ケース 2-7 | 浸入 | 0.077 | 0 | 0.008 | 0.009 | 0.094 |
| | 浸出 | 0 | 0.037 | 0.027 | 0.026 | 0.09 |
| ケース 2-8 | 浸入 | 0.348 | 0 | 0.003 | 0.003 | 0.355 |
| | 浸出 | 0 | 0.159 | 0.088 | 0.088 | 0.335 |
| ケース 2-9 | 浸入 | 0.082 | 0 | 0.009 | 0.009 | 0.099 |
| | 浸出 | 0 | 0.04 | 0.028 | 0.028 | 0.095 |
| ケース 2-10 | 浸入 | 0.601 | 0 | 0.002 | 0.002 | 0.605 |
| | 浸出 | 0 | 0.26 | 0.155 | 0.156 | 0.572 |

注：流量の結果については、項目ごとに小数点以下三桁を四捨五入したものを示している。

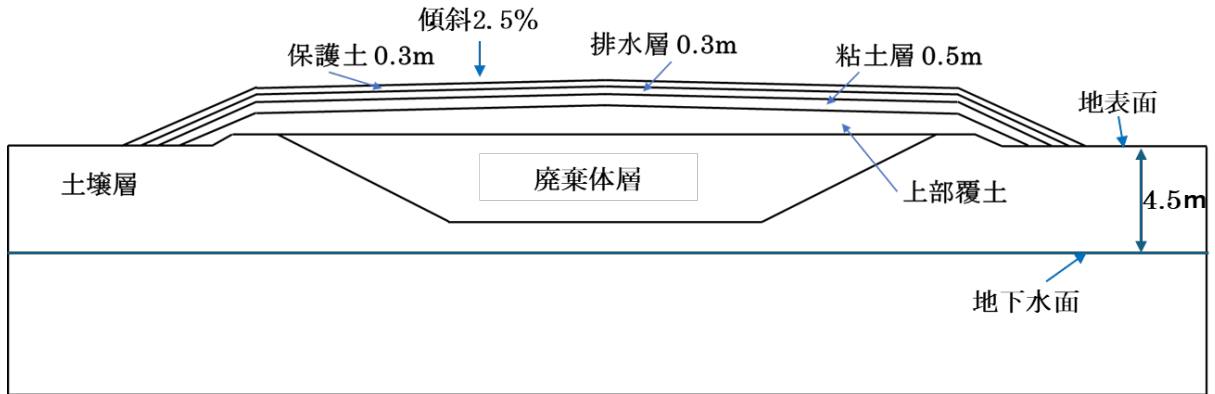


図 3-1 解析モデルの概略図

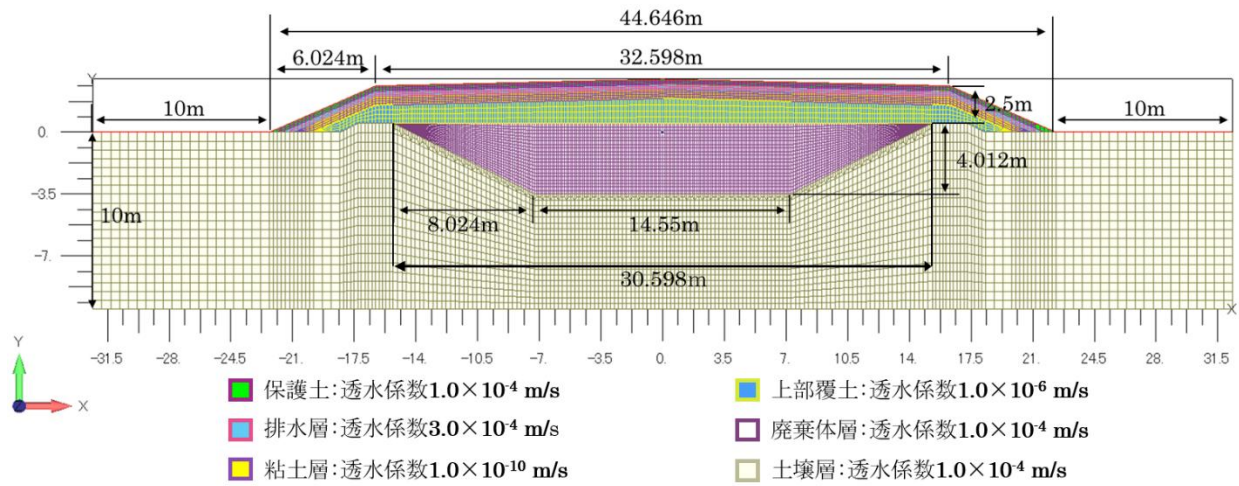


図 3-2 解析モデルのメッシュ図

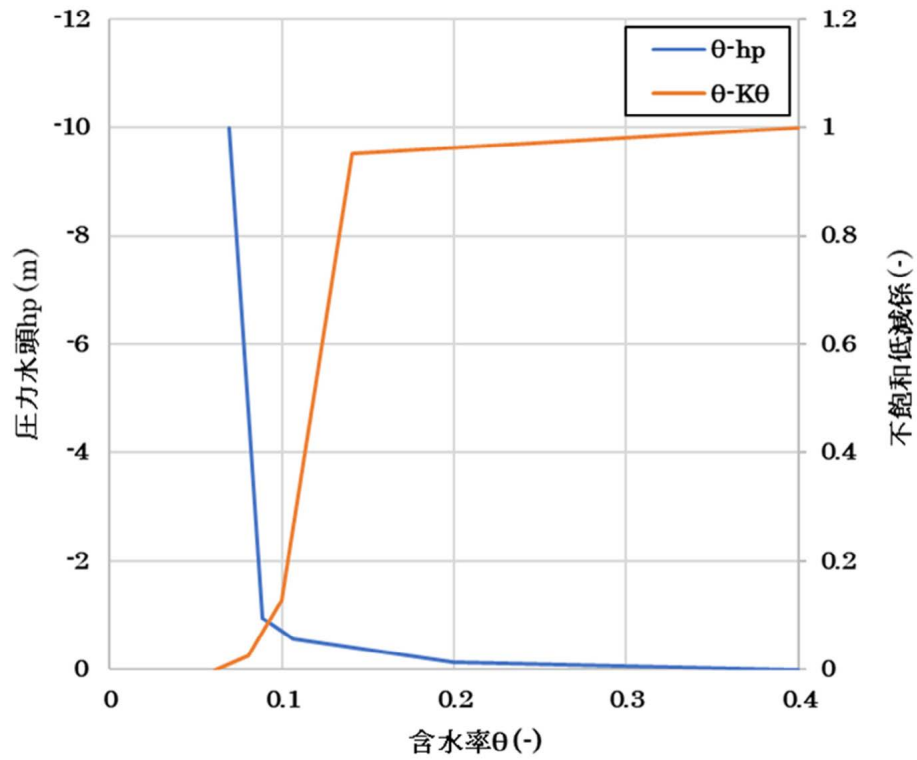


図 3-3 粘土層以外の覆土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係

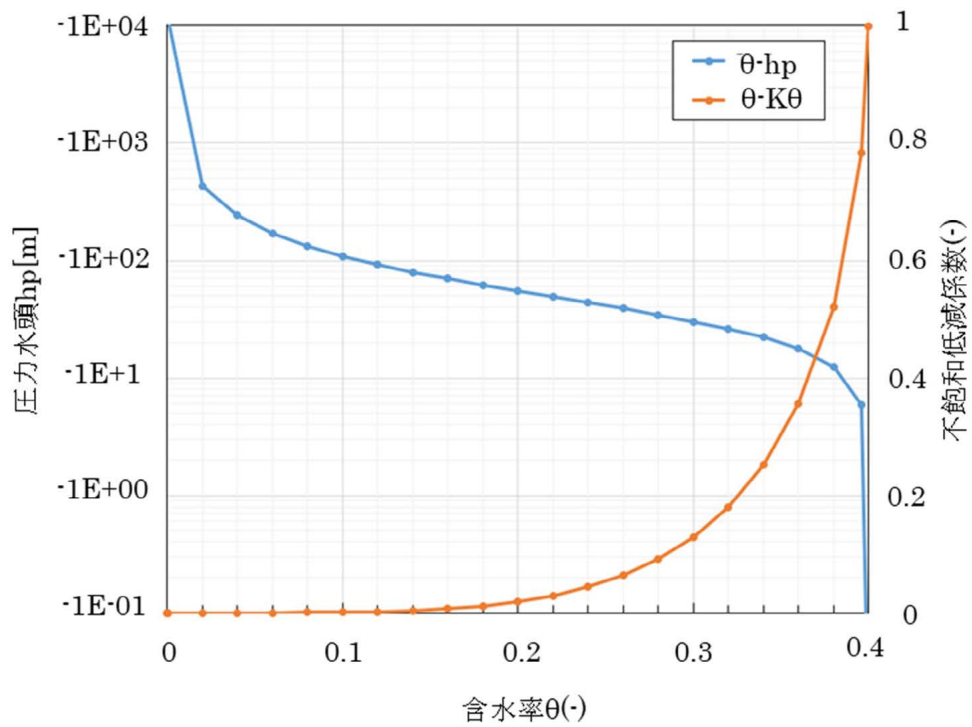


図 3-4 粘土層における圧力水頭-含水率及び含水率-不飽和低減係数の関係

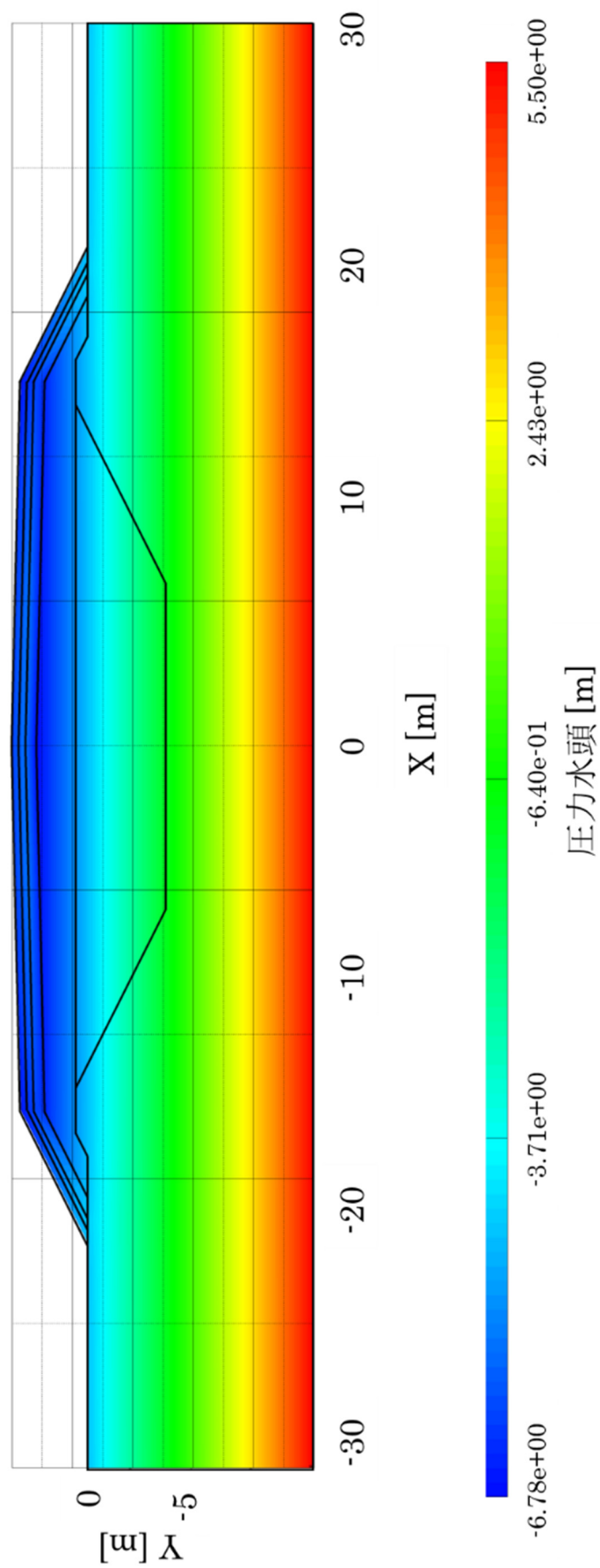


図 3-5 リファレンスモデルの圧力水頭分布

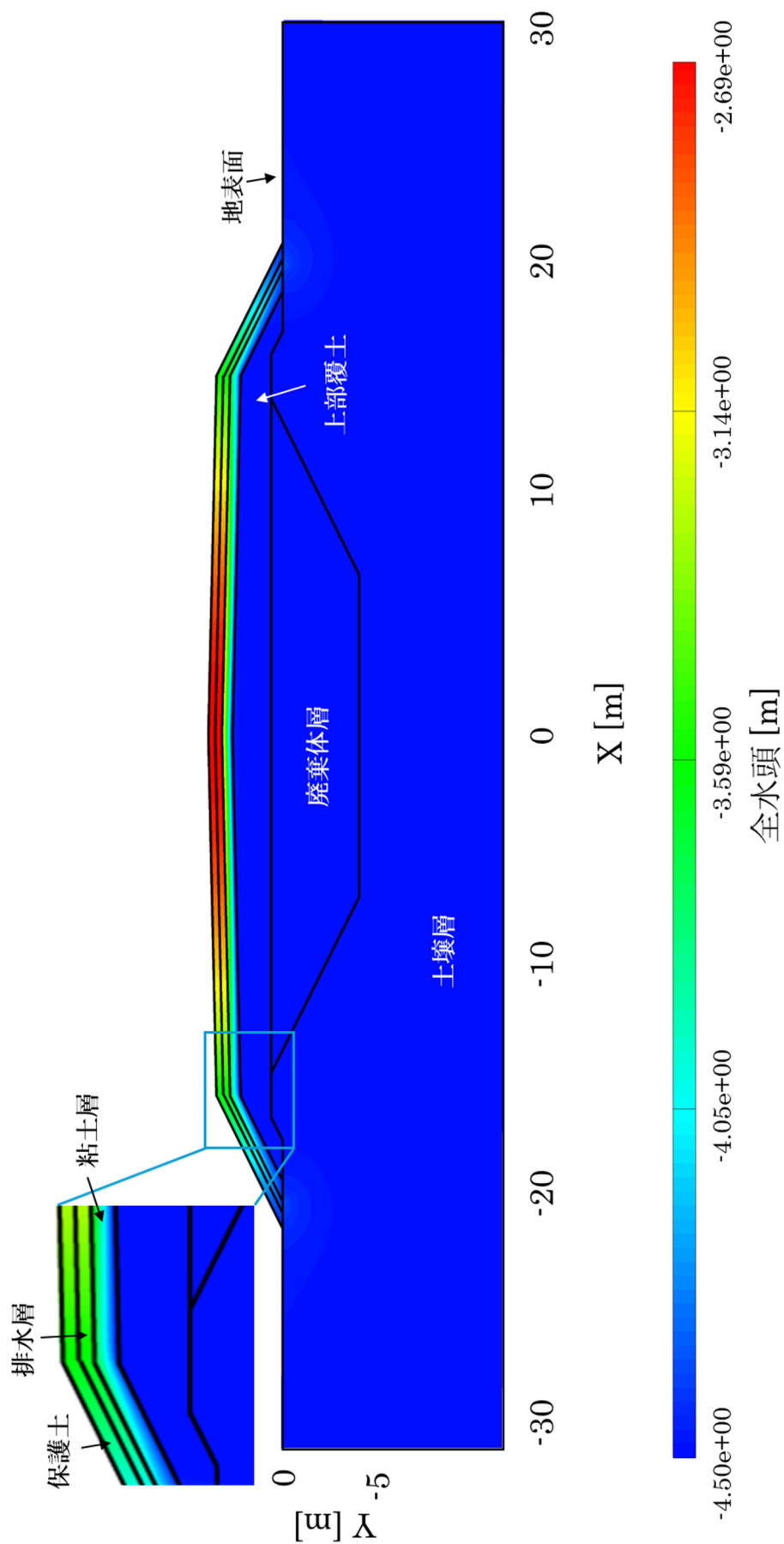


図 3-6 リファレンスモデルの全水頭分布

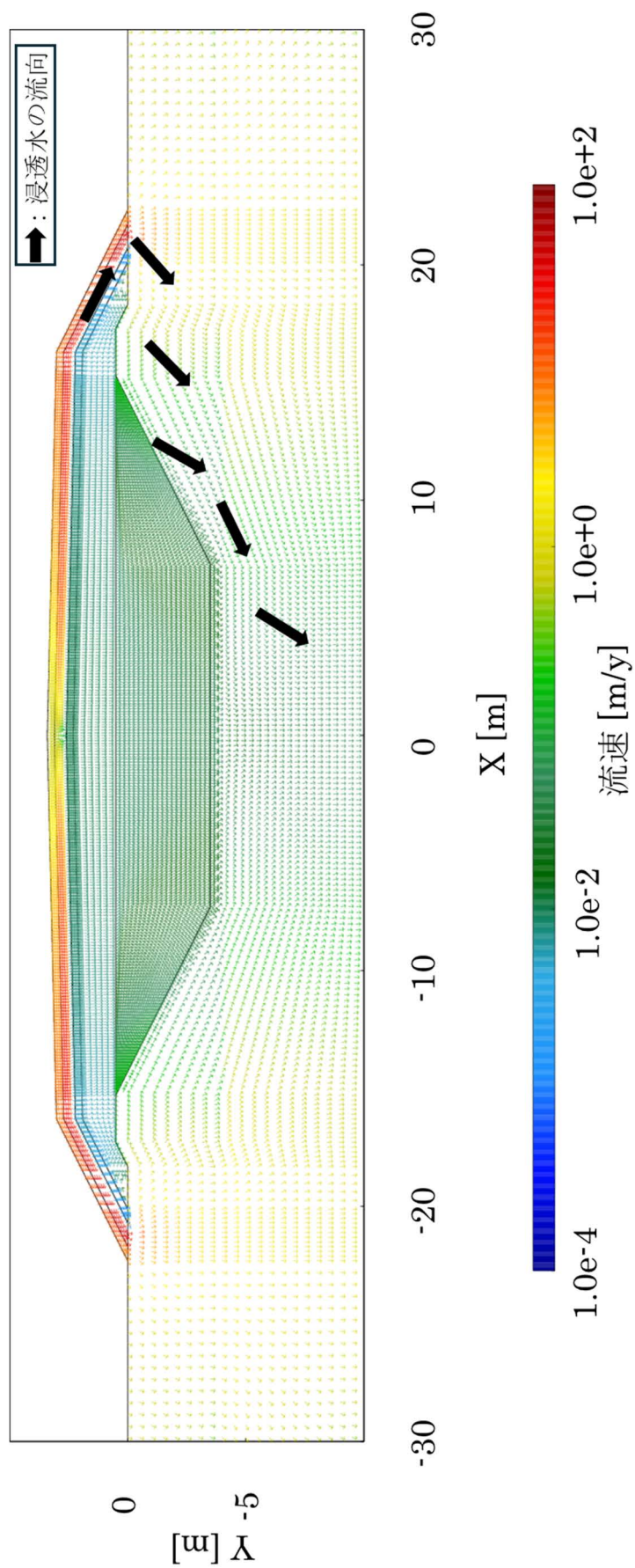


図 3-7 リファレンスモデルの流速及び流向分布

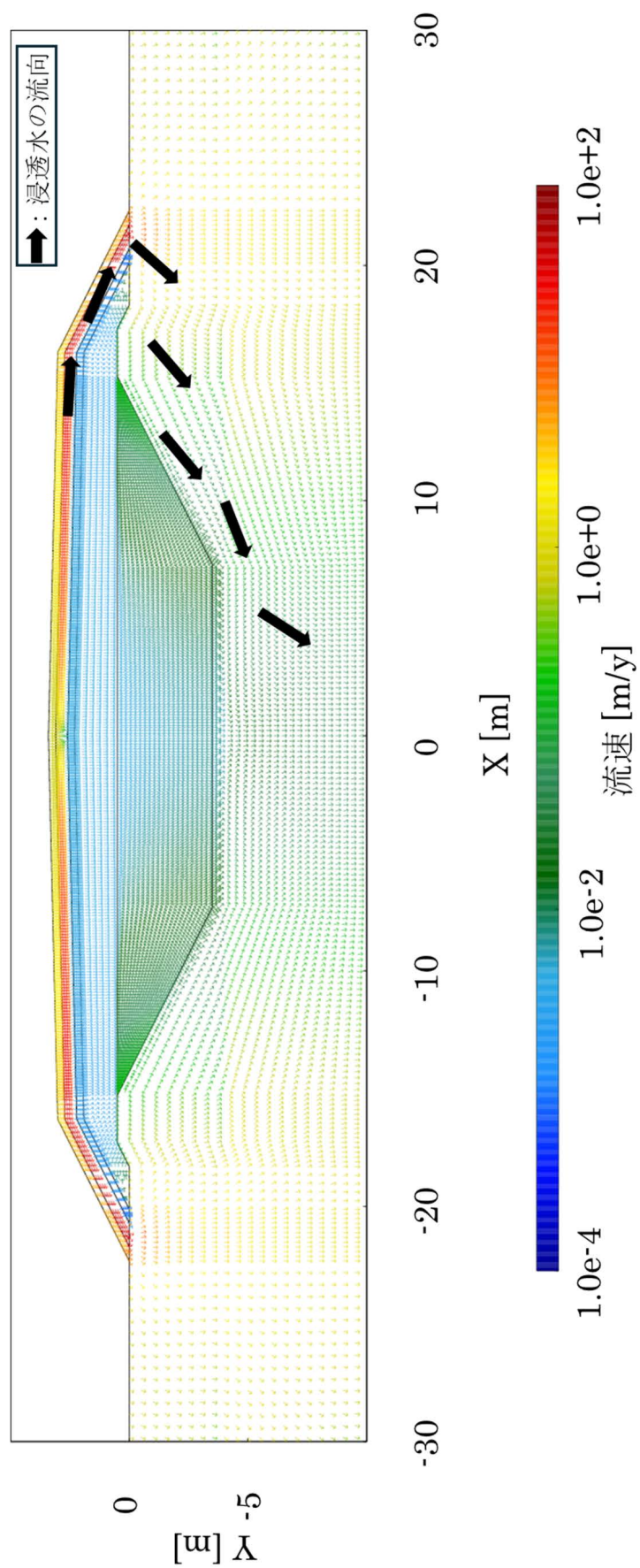


図 3-8 流向・流速図 (最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-2)

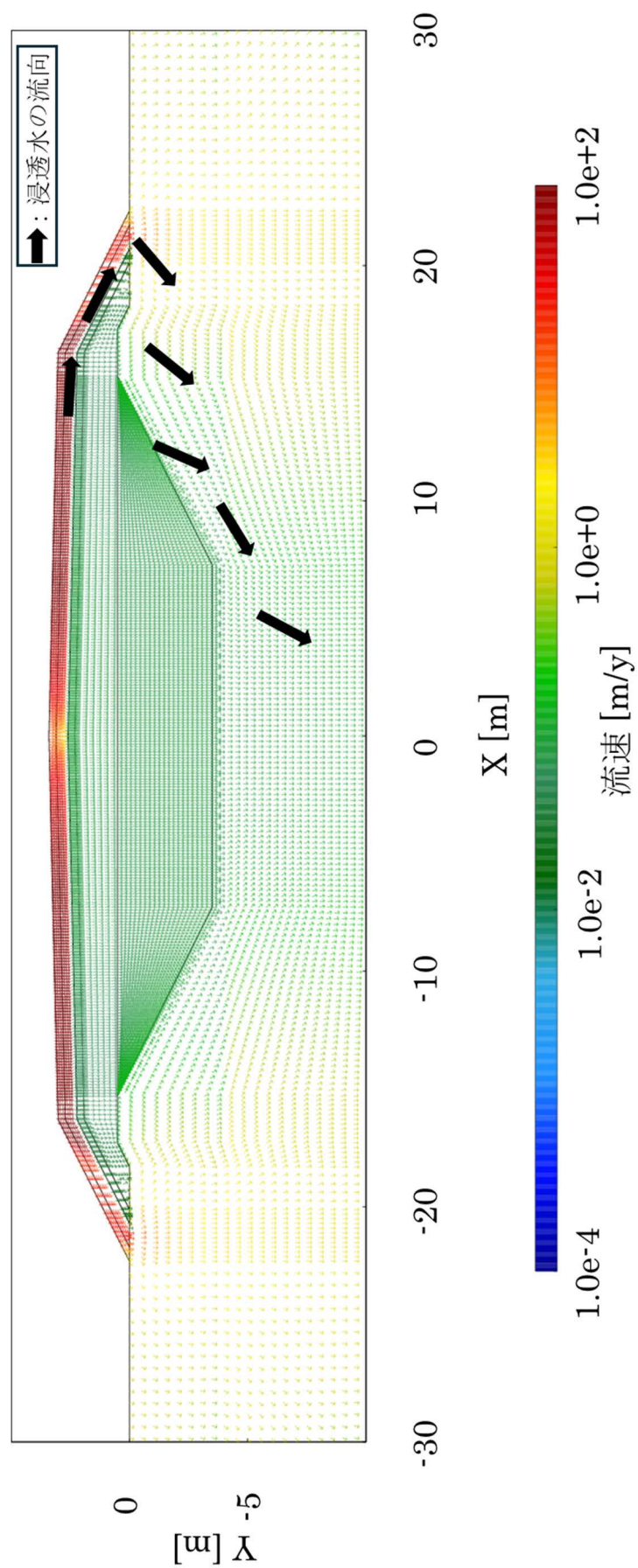


図 3-9 流向・流速図 (最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-5)

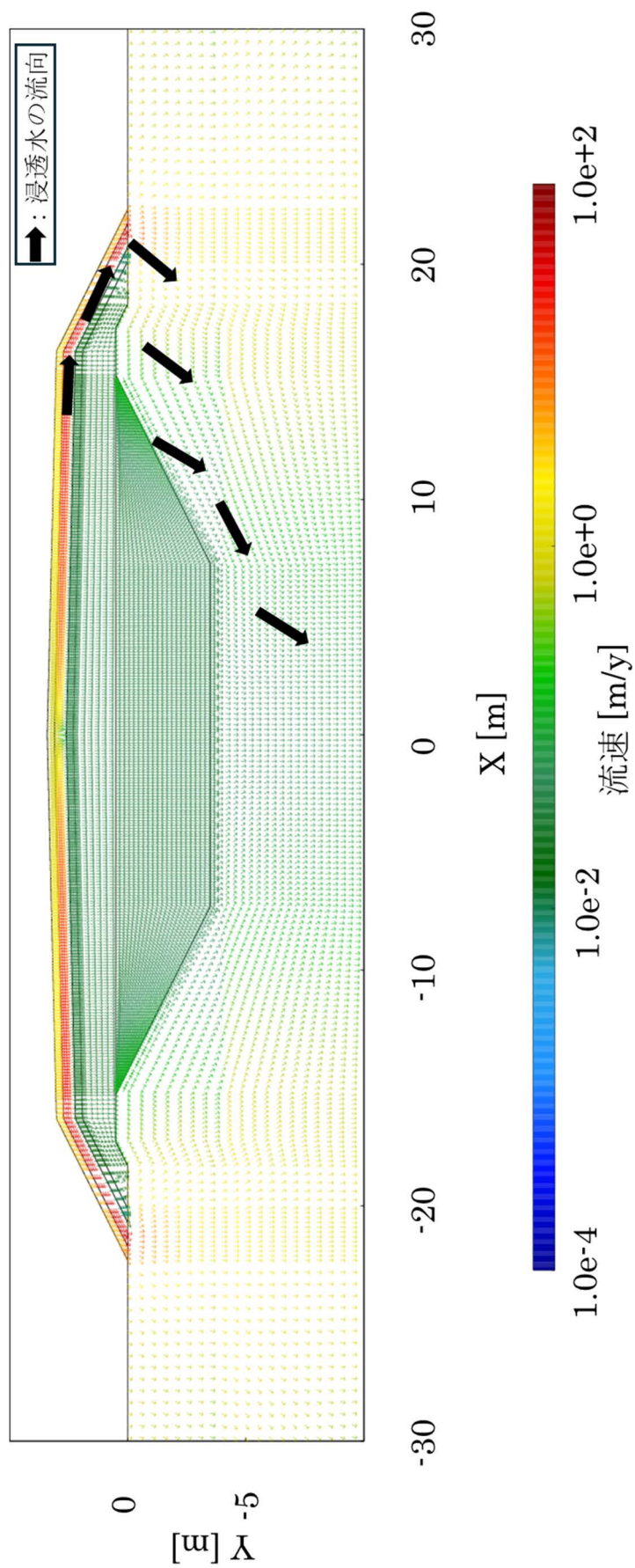


図 3-10 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-7）

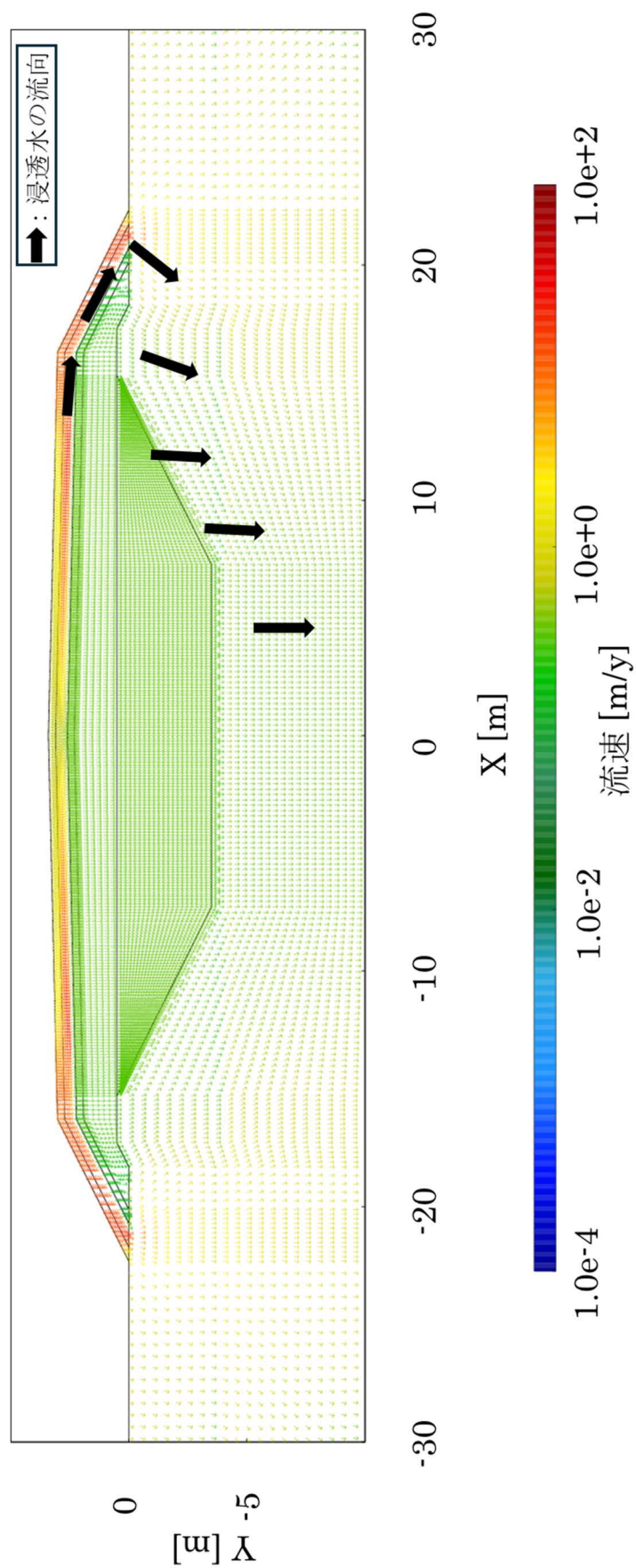


図 3-11 流向・流速図（最も可能性が高いシナリオ・ケース 1-10）

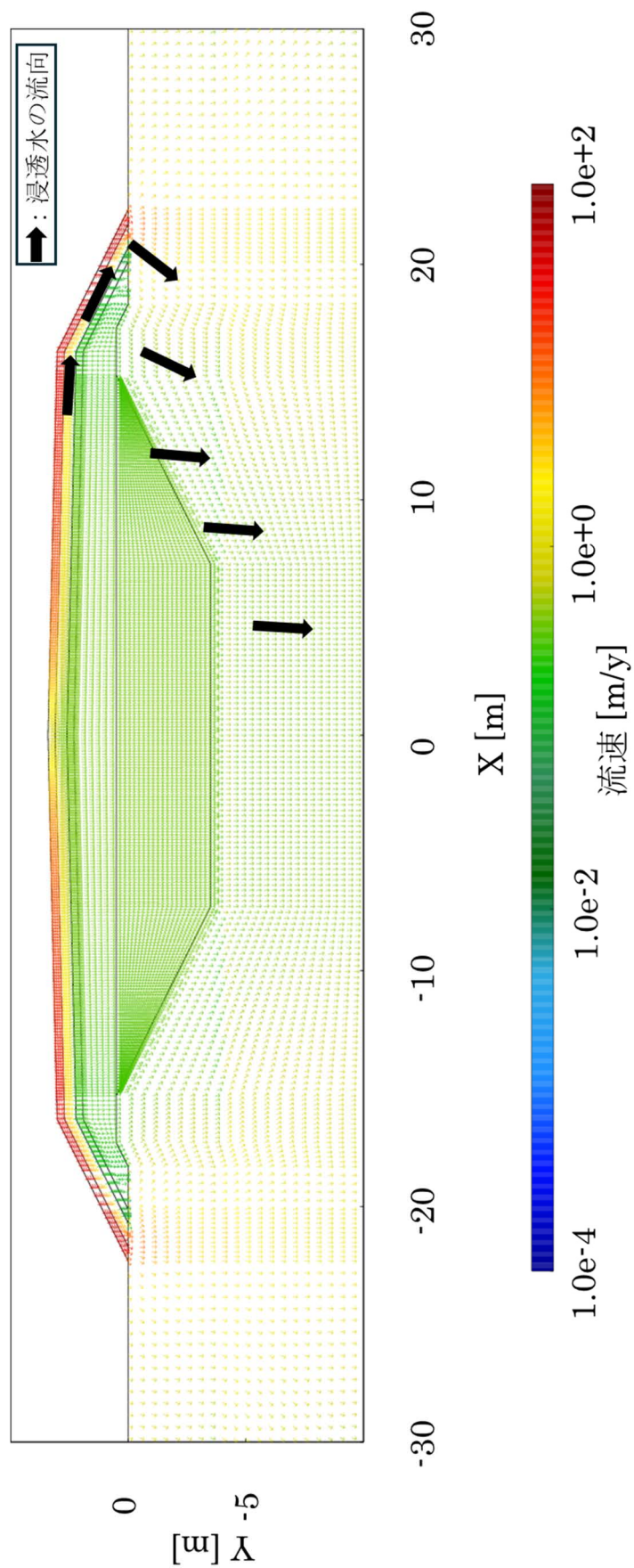


図 3-12 流向・流速図 (最も厳しいシナリオ・ケース 2-8)

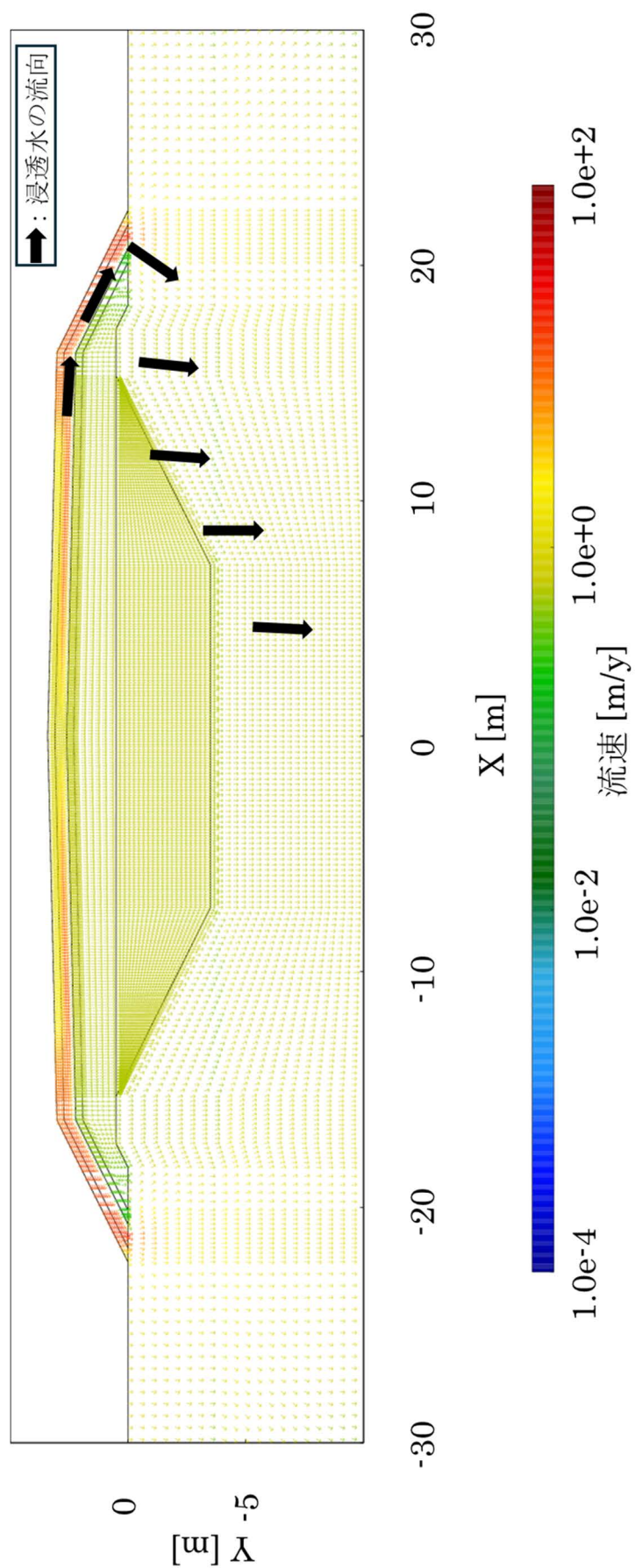


図 3-13 流向・流速図 (最も厳しいシナリオ・ケース 2-10)

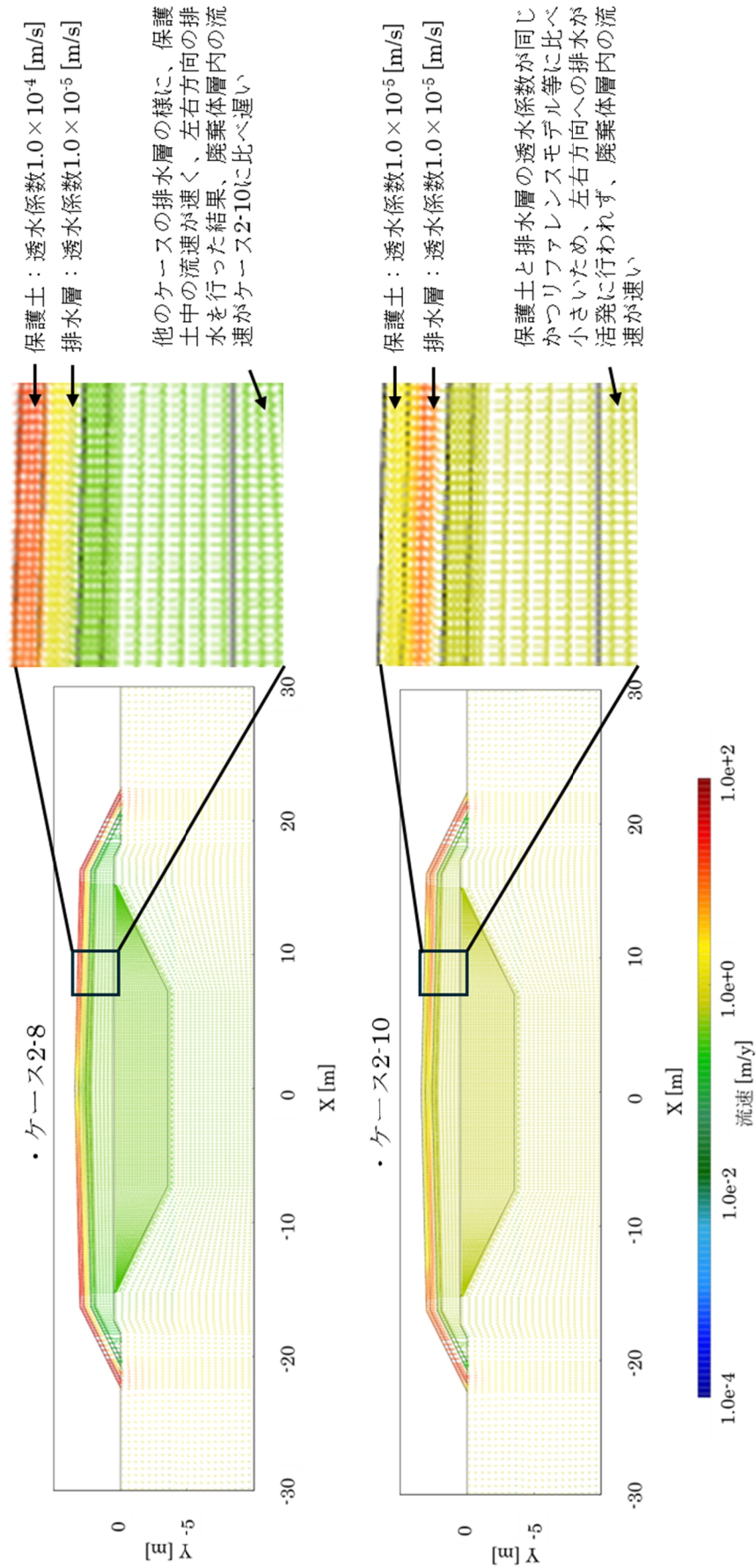


図 3-14 ケース 2-8 と 2-10 の比較図

4. コンクリートピット埋設施設の地下水流動解析

廃棄物埋設施設は、様々な物質を含んだ廃棄物を長期間地盤内に定置する特性上、廃棄物から発生した各種物質による周辺部材の変質・変形等や経年劣化により埋設施設の性能が変化する可能性がある。そのため、コンクリートピット埋設施設の受け入れ対象廃棄物を念頭に、硝酸塩や硫酸塩を含む廃棄体から漏出する塩類の影響を考慮した地下水流動解析が必要である。

本解析では、浸出水量への透水係数の影響として、トレンチ埋設施設と同様にリファレンスモデルを設定し、浸出水量の評価を行った。また、その結果を元に、原燃における新規規制基準への適合性審査会合資料中の化学物質の影響を考慮した検討事例²⁵⁾を参考にして、塩類の粘土層への腐食の影響を透水係数の変化として考慮するために、覆土のうち粘土層に対する条件設定を行い、浸出水量に対する覆土の透水係数の影響評価を実施した。

4.1 リファレンスモデルによる評価

4.1.1 解析モデル及び解析条件

本解析における埋設施設の解析体系は、ピット報告書と同じ設定とした。

本解析で用いるコンクリートピット埋設施設のリファレンスモデルの概略図を図 4-1、図 4-2 に、メッシュ図を図 4-3、図 4-4 に示す。また、各覆土層の飽和時透水係数及び間隙率を表 4-1 に示す。

本解析における施設の周辺環境条件は概念設計報告書に基づき設定した。外周仕切設備であるコンクリートピットの躯体（以下、「ピット」という。）の大きさは1基当たり幅約36 m、高さ約7 m、奥行き約40 mとし、これが1施設当たり、格子状に2基×9基の計18基敷設される。安全評価においては、保守的な評価を行うため、核種の浸出量が最大となるように、地下水の流向に対して施設の長軸が直交し、核種の浸出に係る施設の断面積が最大となる配置でモデル化した（図 4-1 参照）。上流側のピットをピット①、下流側のピットをピット②と呼ぶこととし、ピット間の距離及びピット側面から掘削面までの距離は12 mとした。

掘削法面の傾斜は岩盤新鮮部で30%、岩盤風化部で50%、土壌層で150%に設定した。また、地下水移行を抑制するため、上流側及び下流側ピットの上面及び側面を厚さ2 mのベントナイト混合土で形成された粘土層で覆う設計とした。さらに、ピット及び埋設する廃棄体の重量に耐える強度を持つ地盤に設置する必要があるため、低透水性かつN値が50以上の岩盤層の中に設置することとした。原燃の例に倣い、コンクリートピット埋設施設及び廃棄体の透水係数は初期状態で砂程度まで劣化していると仮定し $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ に設定した。また、粘土層の透水係数は $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ とした。

覆土に関しては、コンクリートピット埋設施設の周囲を上面の高さまで埋め戻した際の領域を「側部覆土」、岩盤風化部と土壌の境界までの層を被覆した際の領域を「覆土」、土壌層と同様の領域を「表層覆土」とした。これら覆土の透水係数は周辺層と同じ値とし、透水係数は側部覆土と覆土に関しては $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、表層覆土は $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ とした。

コンクリートピット埋設施設は、地下水位よりも深い地点に設置される。そのため、施設内が地下水に満たされ、廃棄体層に浸入した地下水に放射性核種が含まれた状態で移行することが想

定される。コンクリートピット埋設施設の安全評価では、このような状態を想定し、放射性核種を含む地下水がコンクリートピット埋設施設から浸出し生活圏へ到達した場合の評価を行うため、本報告では、管理期間終了後の施設内が水で満たされている状態を想定し、廃棄体層を通過して放射性核種を含んでいると思われる水の流量を算出する。

コンクリートピット埋設施設周辺の環境条件に関しては、概念設計報告書で設定されている日本における一般的な立地条件に基づき設定を行った。

(1) 周辺地層

本解析において、コンクリートピット埋設施設周辺の地層は、表層に存在している「土壌層」、廃棄体やピットの荷重に耐えられる目安である「N 値 50 以上」の岩盤層の「岩盤新鮮部」、風化により N 値が 50 以下となっている岩盤層である「岩盤風化部」の 3 層に区分した。これらは表層側から順に土壌層、岩盤風化部、岩盤新鮮部の順で存在し、深度については概念設計報告書を基に、土壌層が深度 0 m～6 m、岩盤風化部が深度 6 m～14 m、岩盤新鮮部が深度 14 m 以深とした。また、各地層の透水係数は、土壌層は 1.0×10^{-4} m/s、岩盤風化部は 1.0×10^{-6} m/s、岩盤新鮮部は 1.0×10^{-7} m/s とした。

(2) 動水勾配

概念設計報告書において、動水勾配は一般的に、小起伏がある山地や丘陵で約 3%、大地や河岸段丘で約 2%とされている。動水勾配が大きいほど流速は大きくなるため安全評価においては保守的といえることから、今回の解析では動水勾配は 3%とした（表 4-2）。

(3) 地下水位

地下水位は、概念設計報告書においては約 5 m と設定されている。本解析では気候による変動が±1 m 程度あるものと考え、保守的に 4 m とした。

4.1.2 解析方法

コンクリートピット埋設施設の安全評価では、施設を地下水位の下に設置する関係上、地下水の流動に伴いピットへ浸入・浸出した水についての評価を行う。本解析では、ピット①及びピット②それぞれの上辺・左右側辺・下辺からの浸入・浸出水量の試算を行い、評価した。その際、動水勾配により地下水の流動方向がモデルの左側から右側への流れとなるため、モデルの左側を上流側、右側を下流側とした。

埋設施設の安全評価を行う際には、放射性核種を含む浸出した地下水がどのくらいの速度で生活圏に到達するかの評価が重要であり、コンクリートピット埋設施設の場合、浸出水量がその後岩盤風化部と岩盤新鮮部のどちらの領域に移行するのにかよって、地下水流速が異なり、生活圏への到達速度も変化する。岩盤風化部の透水係数は 1.0×10^{-6} m/s、岩盤新鮮部の透水係数は 1.0×10^{-7} m/s であり、より透水係数の大きい岩盤風化部に移行した水の方が流速は大きく、結果として生活圏への到達が速くなると考えられる。これを評価するため、モデル下流（右）側のピット（ピット②）からさらに下流側 100 m 地点の岩盤風化部と岩盤新鮮部の境界点を評価点とし、

この評価点を通過する流跡線を PASS_TRAC により求めた。この評価点を通過する流跡線よりも下部を通過する流路は、すべて廃棄体層を経由したのち岩盤新鮮部より深部に浸入する経路とし、また、地表側を通過する流路は廃棄体層を通過後、岩盤風化部から上方の土壌側へ浸出する経路と仮定する。なお、評価点の位置は概念設計報告で定められた、コンクリートピット埋設施設の敷地境界までの距離と同じ設定値とした。また、ピットから浸出した地下水が、以降どのような流路を取るかについて、評価点を通る流跡線を基準に場合分けして計算を行った。その際ピット①を通り、ピット②を通らず評価点に到達する水量が存在する場合があるため、ピット①底辺からの浸出水量からピット②底辺への浸入水量を除いた値が正であった場合のみ、その差分をピット②の浸出水量に加え計算を行った。

4.1.3 解析結果

(1) 全水頭分布

リファレンスモデルの全水頭分布図を図 4-5 に示す。全水頭値はモデル上流側（左側）が高く、モデル下流側（右側）が低くなっていることから、地下水の流れは動水勾配で設定したとおり、モデルの左側から右側へ流れるように計算できている。

(2) 廃棄体層の浸入・浸出水量

コンクリートピット埋設施設への浸入水量及び浸出水量について、ピットの各面ごとに算出した結果を表 4-3 に示す。

側面の水収支に関しては、ピット①、ピット②ともに上流側からの浸入水量がそれぞれ $90 \text{ m}^3/\text{y}$ あるのに対し、浸出水量は $0 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。また、下流側の側面からの浸入水量はピット①、②ともに $0 \text{ m}^3/\text{y}$ であったのに対し、浸出水量は $90 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。このことから、地下水は上流側から下流側に向かって一方的に流れ、逆方向には流れることがないことが分かる。

また、ピット①と②双方において、浸入水量の 88%以上は底面からによるものであった。これは、廃棄体を埋設するコンクリートピット埋設施設の上面及び側面は透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ の粘土層で覆われているのに対し、底面は透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の岩盤新鮮部に接しているため、より透水係数が高い岩盤新鮮部からの水収支の割合が大きくなっていると考えられる。

上面の浸入・浸出水量の割合は全体の 1%程度であったが、これは底面とは逆に透水係数が低い粘土層に覆われていたため、水収支割合が少なくなったものであると考えられる。

ピット①、ピット②それぞれの浸入水量と浸出水量はほぼ同じ値を示していた。これにより、同一ピット内での水収支は成立していたことが分かる。一方で、ピット①の浸入水量合計は $890 \text{ m}^3/\text{y}$ であったのに対し、ピット②の浸入水量合計は $910 \text{ m}^3/\text{y}$ と、ピット①よりも大きい値を示していた。これは、ピット②へ浸入する地下水がピット①から浸出したものに加え、岩盤からピット①を通過せずにピット②に到達したものも含まれているためであると考えられる。

(3) コンクリートピット埋設施設から覆土・岩盤への浸出水量

コンクリートピット埋設施設から浸出した水が岩盤風化部と岩盤新鮮部のいずれに移行するかにより、浸出水量が生活圏へ到達するまでの速度が異なるため、これを評価する必要がある。

コンクリートピットから下流側 100 m 地点の岩盤新鮮部と岩盤風化部の境界点を評価点とし、その評価点を通過する流跡線(図 4-6 の黄色のライン)を示した図について、全体図を図 4-6 に、拡大図を図 4-7 に示す。

モデル内での流跡線のスタート位置は岩盤新鮮部であり、そこから側部覆土、2 つのピットを経由し下流側の岩盤新鮮部を通過して評価点に到達していた。また、評価点に到達したのは、岩盤風化部と岩盤新鮮部の境界部分を通る結果となっていた。

コンクリートピット埋設施設からの浸出水量の合計値と、評価点における浸出水の覆土(岩盤風化部以浅)と岩盤(岩盤新鮮部以深)への移行量の計算結果を表 4-4 に示す。合計水量 900 m³/y に対し、覆土には約 18%、岩盤へは約 82%となった。

4.2 粘土層の透水係数による浸出水量への影響評価

コンクリートピット埋設施設については、原燃の報告書^{25),26),27)}において、廃棄体に含まれる塩類の影響について、腐食による粘土層の変質及び可溶性塩の溶出により廃棄体中に空隙が発生し、廃棄体層自体が陥没し、粘土層が破断するという評価が行われている。そこで、リファレンスモデルをベースとし、廃棄体に含まれる塩類の影響を想定した地下水流動解析を行った。

4.2.1 解析モデル及び解析条件

(1) 粘土層破断モデル

リファレンスモデルでは粘土層はピットの上面及び側面を覆う様に設置されており、厚さは一律に 2 m で設定されている。廃棄体に含まれる可溶性塩の溶出により、廃棄体層が陥没することが最も厳しいシナリオとして想定される可能性がある²⁷⁾。本検討においてはこの陥没によって粘土層を構成するベントナイト混合土が破断し、コンクリートピット埋設施設の上部にある粘土層の両端 1 m がむき出しになると仮定したモデルの作成を行った。モデルの概略図を図 4-8 に示す。ただし、廃棄体層の陥没によるコンクリートピット埋設施設自体の変形は考慮しないものとし、粘土層への影響のみを考慮し設計を行う。またこの変形はピット①、②の両方に同様に起こることとし、ピット上辺に接する粘土層の両端、幅 1 m、高さ 2 m を破断部と設定する。

(2) 透水係数

各覆土層、周辺土壌の透水係数は、ピット報告書における設定値を基に、施設構造が類似する原燃の 1 号廃棄物埋設地の状態設定²⁶⁾を参考に設定した。粘土層及び覆土の透水係数の組み合わせで 6 ケース設定し、また、遮水に重要な粘土層の透水係数に関してリファレンスモデルの透水性を変化させた最も可能性が高いシナリオと、より保守的な結果がもたらされ则认为される最も厳しいシナリオの 2 つの検討を行った。両シナリオにおける各覆土層・周辺土壌の透水係数を表 4-5 及び表 4-6 に示す。

ピット、覆土、表層覆土、側部覆土、土壌層、岩盤風化部、岩盤新鮮部の透水係数はすべてのケース・シナリオにおいてリファレンスモデルと同等の値を設定した。

粘土層の透水係数は、両シナリオにおいて、ケース 1 及びケース 4 では塩類の影響による粘土層の変質のみで破断が生じないと想定し、ケース 2 及びケース 5 では可溶性塩の溶出により廃棄

体層が陥没することによって、粘土層の隅角部に応力が集中し破断したと想定して、粘土層の変質部と破断部の透水係数を個別に設定した。これらのケースでは、ピット上面における地下水の浸入・浸出水量について、破断部からの寄与が支配的となる可能性がある。ケース 3 及びケース 6 では、陥没によってピット上面に接する粘土層が一様に破断したと仮定し、ピット上面に接する粘土層を通過する流量がケース 2 及びケース 5 とそれぞれ同じとなるように等価透水係数 K'_C を設定し、さらに粘土層全体にその透水係数を適用することとした（図 4-9 参照）。

具体的には、粘土層の変質による透水係数への影響は、原燃の 1 号廃棄物埋設地の設定値²⁷⁾を参考に、最も可能性が高いシナリオで健全時の透水係数（ 10^{-10} m/s または 10^{-9} m/s）の 1.5 倍、最も厳しいシナリオでは健全時の 2 倍とした。また、破断部の透水係数は、原燃の設定値²⁷⁾を参考に、塩類の影響による変質と陥没による破断を考慮して、最も可能性が高いシナリオにおいて 1.5×10^{-8} m/s、最も厳しいシナリオでは最も可能性が高いシナリオに比べより厳しい値となるように 1.0×10^{-7} m/s と設定した。

等価透水係数 K'_C の計算例を以下に示す。両シナリオにおけるケース 3 及びケース 6 では、変質部（長さ 34 m）の透水係数（ 1.5×10^{-10} m/s）と破断部（長さ 1 m、2 か所）の透水係数（ 1.5×10^{-8} m/s）をそれらの長さで重みづけした平均値として算出した。

$$K'_C = \frac{34}{36} \cdot 1.5 \times 10^{-10} + \frac{2}{36} \cdot 1.5 \times 10^{-8} \cong 9.8 \times 10^{-10}$$

4.2.2 解析結果

(1) 廃棄体層への浸入及び浸出水量

各シナリオ・ケースの廃棄体層への浸入水量、及び浸出水量を表 4-7 及び表 4-8 に示す。

(i) 最も可能性が高いシナリオ

ケース 1 は粘土層変質部の透水係数 1.5×10^{-10} m/s で、破断部を想定しないケースである。また、ケース 4 は、粘土層変質部の透水係数 1.5×10^{-9} m/s で、ケース 1 と同様に破断部を想定しないケースである。これら 2 ケースの廃棄体層からの合計浸出水量を比較すると、粘土層の透水係数がより大きいケース 4 の方が大きくなっていた。また、廃棄体層の各辺からの浸入・浸出水量を比較すると、粘土層の透水係数が小さいケース 1 の方が岩盤新鮮部に接するピット底面からの浸入水量が大きく、ケース 4 の浸入水量を増加させているのは粘土層を通過する上流側側面及び上辺からの浸入水量が増えたためであった。このことから、粘土層の遮水性が向上すると、粘土層に接する面からの廃棄体層への浸入水量は減少させることができるが、流路が変化することによりわずかに岩盤新鮮部からの浸入水量が増加すると考えられる。

ケース 1 及びケース 2 は、粘土層に破断部が発生しているか否かの対照ケースである。ケース 2 の粘土層破断部の透水係数は 1.5×10^{-8} m/s であり、変質部の透水係数の 100 倍である。粘土層に破断が生じることにより、ピット①及び②への合計浸入・浸出水量は増加し、浸入水量の増加分はほぼすべて破断が生じた部分に接するピット上辺から浸入したものであった。このことから、粘土層の破断は浸入水量の増加を招き、この増加は破断部周辺からの浸入が促進されることにより生じると考えられる。

ケース 2 及びケース 3 は、お互い同程度の粘土層の劣化があると仮定したうえで、一部分の破断が生じるか、全体的に劣化が生じるかを比較するための対照ケースである。ケース 2 の粘土層変質部の透水係数は 1.5×10^{-10} m/s、破断部の透水係数は 1.5×10^{-8} m/s であり、またケース 3 の粘土層の透水係数は劣化が粘土層全体に均一に起こると仮定し 9.8×10^{-10} m/s に設定している。2 ケース間で合計の浸入・浸出水量に大きな差は見られなかったが、破断のあるケース 2 では上辺からの浸入量が増加し、粘土層全体の劣化をさせたケース 3 では上流側の側辺からの浸入量が増加していた。このことから、破断が生じるケースでは同程度の劣化が粘土層全体に生じるケースと比較すると合計の流量は大きく変動はしない一方で、破断部周辺からの浸入水量が局所的に増加すると考えられる。

(ii) 最も厳しいシナリオ

最も厳しいシナリオにおいても、各ケース間の数値の関係は最も可能性が高いシナリオと概ね同様であった。

一方で、最も可能性が高いシナリオのケース 2 と最も厳しいシナリオのケース 2 とを比較すると、粘土層の透水係数の上昇により変質部・破断部両方ともに遮水性能が低下しているため、浸入水量は上流側辺と上辺からの浸入割合が増加し、浸出水量は上辺と下流側面からの浸出割合が増加した。

最も可能性が高いシナリオのケース 2 は、粘土層健全部の透水係数は 1.5×10^{-10} m/s、粘土層破断部の透水係数は 1.5×10^{-8} m/s に設定されている。このケースにおけるピット②からの合計浸入水量は $940 \text{ m}^3/\text{y}$ であり、各辺からの浸入水量の内訳は、下流側辺は $0 \text{ m}^3/\text{y}$ 、底辺は $790 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上流側辺は $100 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上辺は $40 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。また、ピット②からの合計浸出水量は $940 \text{ m}^3/\text{y}$ であり、各辺からの浸出水量の内訳は、下流側辺は $100 \text{ m}^3/\text{y}$ 、底辺は $800 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上流側辺は $0 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上辺は $40 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。

一方で、最も厳しいシナリオのケース 2 は、粘土層健全部の透水係数は 2.0×10^{-10} m/s、粘土層破断部の透水係数は 1.0×10^{-7} m/s に設定されている。このケースにおけるピット②からの合計浸入水量は $1,160 \text{ m}^3/\text{y}$ であり、各辺からの浸入水量の内訳は、下流側辺は $0 \text{ m}^3/\text{y}$ 、底辺は $800 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上流側辺は $110 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上辺は $240 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。また、ピット②からの合計浸出水量は $1,160 \text{ m}^3/\text{y}$ であり、各辺からの浸出水量の内訳は、下流側辺は $120 \text{ m}^3/\text{y}$ 、底辺は $790 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上流側辺は $0 \text{ m}^3/\text{y}$ 、上辺は $250 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。

この 2 ケースを比較すると、浸入水量については、最も厳しいシナリオのケース 2 において、上辺からの浸入水量が最も可能性が高いシナリオに比べ約 6 倍に増加していた。これは、最も厳しいシナリオにおける粘土層健全部の透水係数が、最も可能性が高いシナリオの約 1.3 倍であるのに対し、粘土層破断部の透水係数が最も可能性が高いシナリオの約 6.7 倍に設定されており、上辺に位置する破断部からの浸入水量の割合が大きく増加したためであると考えられる。また、浸出水量に関しても、最も厳しいシナリオのケース 2 において、上辺からの浸出水量が最も可能性が高いシナリオに比べ約 6.3 倍に増加していた。これは、粘土層破断部の透水係数増加に伴い増加した浸入水が、流路に従い主に下流側の破断部から浸出しているためであると考えられる。

(iii) まとめ

すべてのケースにおいて、浸入及び浸出水量が最も多くなったピットの面は底面であった。これは、上面及び側面は遮水性の高い粘土層で覆われている一方で、底面が接している岩盤新鮮部の透水係数は $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ であり、最も厳しいシナリオでは粘土層破断部と同等、最も可能性が高いシナリオにおいては粘土層破断部よりも高い透水係数が設定されている。岩盤新鮮部はコンクリートピット埋設施設と比べ透水係数は低いが、底面以外の面がより透水係数の低い粘土層に覆われていたため水収支割合が最も大きくなっていると考えられる。

すべてのケースにおいて、上流側と下流側の各ピットでの浸入水量と浸出水量はほぼ同じ値を示していることから、水収支が成立していることは確認できたが、一方で、同一ケース内で上流側に存在するピット①と下流側に存在するピット②の浸入水量及び浸出水量を比べると、ピット②の方が浸入水量と浸出水量が大きい値を示していた。これは、ピット②へ浸入した地下水が、ピット①から浸出したものに加え、ピット①を通過せず直接ピット②へ浸入したものも含んでいるためであると考えられる。

(2) コンクリートピット埋設施設から覆土・岩盤への浸出水量

各シナリオ・ケースの下流側のピット②から浸出する水の最終的な浸出先（土壌側か岩盤側）を表 4-9 及び表 4-10 に示す。

すべてのケースにおいて、ピット上面及び下流側面から浸出した水は、評価点に到達するまでに覆土側へ浸出していた。底面から浸出した水は多くが岩盤へ浸出し、一部は覆土側へ流れていた。

最も可能性が高いシナリオにおいて、劣化破断部を設定したケース 2 及びケース 5 のうち、粘土層の透水係数を $1.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ に設定したケース 2 では破断部からの浸出水量が変質部からの浸出水量を上回り、粘土層の透水係数を $1.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ に設定したケース 5 では、破断部からの浸出量と変質部からの浸出量はほぼ同等であった。破断部は変質部と比べ小さい面積であるが、浸出量が同等以上となっていることから、粘土層に生じた破断は、周辺からの水の浸出を誘導すると考えられる。また、破断部が設定されていないケース 3 及びケース 6 では、その他のケースと比較して、ピット上面からの浸出割合は減少したが、側面からの浸出割合がその分上昇していた。すべてのケースにおいて、ピット底面からの浸出割合がすべての浸出面の中で最も多く、合計浸出量の 3 分の 2 以上を占めていた。底面からの浸出水量のうち 1/5 程度が一度岩盤へ浸出したのち、評価点に至るまでに覆土側へ浸出していた。最も可能性が高いシナリオでは、いずれのケースでも、評価点における合計水量のうち約 35%が覆土側に、約 65%が岩盤側に浸出する結果となった。

最も厳しいシナリオにおいて、粘土層の劣化破断部を設定したケース 2 及びケース 5 のうち、ケース 2 ではピット上面からの浸出量のうち、破断部からの浸出量が変質部の約 7 倍となったのに対し、ケース 5 では破断部の浸出量は変質部の約 3 倍程度となった。これは、粘土層の透水係数をケース 5 の方が大きく設定していることにより、変質部を通過する水の割合が増加したためであると考えられる。すべてのケースにおいて、合計浸出水量のうち、評価点に至るまでに覆土側に浸出する水量と岩盤側に浸出する水量の割合は最も可能性が高いシナリオと比べ増加した。

これらのことから、粘土層の性能劣化により、コンクリートピット埋設施設からの浸出水が地下水の流速の大きい地表側へ浸出する量が増加すると考えられる。

本解析では、評価点を通過する流跡線よりも下部を通過する流路は、すべて廃棄体層を経由したのち岩盤新鮮部より深部に浸入する経路とし、また、地表側を通過する流路は廃棄体層を通過後、岩盤風化部から上方の土壌側へ浸出する経路と仮定している。この仮定のもとでは、評価点以深の流路をとる地下水は、放射性核種を含んだとしても、透水性の低い岩盤中を通過するため、生活圏に到達するまでに長い時間を要する。したがって、岩盤側に流出する浸出水の割合が高いほど、埋設施設の長期的な安全性が高いと評価できる。

今回の解析結果では、最も可能性が高いシナリオに比べ、最も厳しいシナリオのほとんどのケース（ケース 1 を除く）で、岩盤側への浸出水の割合が低下していた。さらに、各シナリオ内においても、粘土層の遮水性能の劣化や破断の発生により、地表側（覆土側）への浸出が顕著に増加する傾向が見られた。これらの結果は、粘土層の遮水性能の維持が、周辺環境への放射性核種の移行を抑制するうえで極めて重要であることを示している。具体的には、粘土層の壁厚の増加や粘土層のベントナイト含有割合を増加させることで粘土層の遮水性能を向上させる対策や、廃棄体層と岩盤の間に追加の粘土層を設けて廃棄体層を完全に粘土層で囲む対策などが有効であると考えられる。また、仮に遮水性能の低下が局所的（破断等）であっても、地表側への放射性核種の浸出量に大きな影響を及ぼす可能性があることから、安全評価上の影響は無視できない。

表 4-1 各覆土層の飽和時透水係数及び間隙率

| 覆土層 | 飽和時透水係数 [m/s] | 間隙率 [%] |
|-------|-----------------------|---------|
| 土壌層 | 1.0×10^{-4} | 46 |
| 岩盤風化部 | 1.0×10^{-6} | 46 |
| 岩盤新鮮部 | 1.0×10^{-7} | 47 |
| 表層覆土 | 1.0×10^{-4} | 46 |
| 覆土 | 1.0×10^{-6} | 46 |
| 側部覆土 | 1.0×10^{-6} | 46 |
| 粘土層 | 1.0×10^{-10} | 46 |
| ピット | 1.0×10^{-5} | 35 |

表 4-2 コンクリートピット埋設施設モデルの水位拘束及び動水勾配

| | | |
|------|-------|------|
| 水位拘束 | モデル左端 | 53 m |
| | モデル右端 | 29 m |
| 動水勾配 | | 3% |

表 4-3 廃棄体層への浸入及び浸出水量

| 流量 [m³/y] | ピット① | | ピット② | |
|-----------|------|-----|------|-----|
| | 浸入 | 浸出 | 浸入 | 浸出 |
| 側辺（下流） | 0 | 90 | 0 | 90 |
| 底辺 | 790 | 800 | 810 | 810 |
| 側辺（上流） | 90 | 0 | 90 | 0 |
| 上辺 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 合計 | 890 | 890 | 910 | 910 |

注：流量の結果については、項目ごとに10の位を四捨五入したものを示している。

表 4-4 リファレンスモデルにおける覆土・岩盤へ移行する浸出水量

| 出発面 | 粘土層 | 行先 | 廃棄体層からの |
|-------|------|-------|-------------|
| | | | 浸出水量 [m³/y] |
| ピット上面 | 通る | 覆土 | 10 |
| | | 覆土→岩盤 | 0 |
| ピット側面 | 通る | 覆土 | 90 |
| | | 覆土→岩盤 | 0 |
| ピット底面 | 通らない | 岩盤→覆土 | 60 |
| | | 岩盤 | 740 |
| 合計水量 | | | 900 |

注：流量の結果については、項目ごとに10の位を四捨五入したものを示している。

表 4-5 ピット検討モデルの各パラメータ（最も可能性が高いシナリオ）

| ケース No. | 透水係数 [m/s] | | | | | | | | |
|------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 粘土層 | | ピット | 表層 | 覆土 | 側部 | 土壌層 | 岩盤 | 岩盤 |
| | 変質部 | 破断部 | | 覆土 | | 覆土 | | 風化部 | 新鮮部 |
| 1 | 1.5×10 ⁻¹⁰ | | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻⁴ | 1.0×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻⁷ |
| 2 | | 1.5×10 ⁻⁸ | | | | | | | |
| 3 | 9.8×10 ⁻¹⁰ | | | | | | | | |
| 4 | 1.5×10 ⁻⁹ | | | | | | | | |
| 5 | | 1.5×10 ⁻⁸ | | | | | | | |
| 6 | 2.3×10 ⁻⁹ | | | | | | | | |

表 4-6 ピット検討モデルの各ケースの透水係数設定（最も厳しいシナリオ）

| ケース No. | 透水係数 [m/s] | | | | | | | | |
|------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 粘土層 | | ピット | 表層 覆土 | 覆土 | 側部 覆土 | 土壌層 | 岩盤 風化部 | 岩盤 新鮮部 |
| | 変質部 | 破断部 | | | | | | | |
| 1 | 2.0×10^{-10} | | 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-7} |
| 2 | | 1.0×10^{-7} | | | | | | | |
| 3 | 5.7×10^{-9} | | | | | | | | |
| 4 | 2.0×10^{-9} | | | | | | | | |
| 5 | | 1.0×10^{-7} | | | | | | | |
| 6 | 7.4×10^{-9} | | | | | | | | |

表 4-7 廃棄体層の浸入・浸出水量（最も可能性が高いシナリオ）

| 流量 [m ³ /y] | | | 下流側辺 | 底辺 | 上流側辺 | 上辺 | 合計 |
|------------------------|------|----|------|-----|------|----|-------|
| リファレンス | ピット① | 浸入 | 0 | 790 | 90 | 10 | 890 |
| | | 浸出 | 90 | 800 | 0 | 10 | 890 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 90 | 10 | 910 |
| | | 浸出 | 90 | 810 | 0 | 10 | 910 |
| ケース 1 | ピット① | 浸入 | 0 | 790 | 90 | 10 | 890 |
| | | 浸出 | 90 | 800 | 0 | 10 | 890 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 90 | 10 | 910 |
| | | 浸出 | 90 | 810 | 0 | 10 | 910 |
| ケース 2 | ピット① | 浸入 | 0 | 790 | 100 | 40 | 930 |
| | | 浸出 | 90 | 800 | 0 | 40 | 930 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 100 | 40 | 940 |
| | | 浸出 | 100 | 800 | 0 | 40 | 940 |
| ケース 3 | ピット① | 浸入 | 0 | 780 | 120 | 20 | 920 |
| | | 浸出 | 110 | 800 | 0 | 10 | 920 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 120 | 20 | 940 |
| | | 浸出 | 120 | 800 | 0 | 20 | 940 |
| ケース 4 | ピット① | 浸入 | 0 | 780 | 130 | 40 | 950 |
| | | 浸出 | 130 | 800 | 0 | 30 | 950 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 800 | 130 | 30 | 970 |
| | | 浸出 | 130 | 800 | 0 | 30 | 970 |
| ケース 5 | ピット① | 浸入 | 0 | 780 | 130 | 80 | 990 |
| | | 浸出 | 130 | 800 | 0 | 60 | 990 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 130 | 70 | 1,010 |
| | | 浸出 | 140 | 800 | 0 | 70 | 1,010 |
| ケース 6 | ピット① | 浸入 | 0 | 780 | 150 | 60 | 990 |
| | | 浸出 | 150 | 800 | 0 | 50 | 990 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 150 | 50 | 1,010 |
| | | 浸出 | 160 | 800 | 0 | 60 | 1,010 |

注：流量の結果については、項目ごとに 10 の位を四捨五入したものを示している。

表 4-8 廃棄体層の浸入及び浸出水量（最も厳しいシナリオ）

| 流量 [m ³ /y] | | | 下流側辺 | 底辺 | 上流側辺 | 上辺 | 合計 |
|------------------------|------|----|------|-----|------|-----|-------|
| リファレンス | ピット① | 浸入 | 0 | 790 | 90 | 10 | 890 |
| | | 浸出 | 90 | 800 | 0 | 10 | 890 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 90 | 10 | 910 |
| | | 浸出 | 90 | 810 | 0 | 10 | 910 |
| ケース 1 | ピット① | 浸入 | 0 | 790 | 100 | 10 | 890 |
| | | 浸出 | 90 | 800 | 0 | 0 | 890 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 810 | 90 | 0 | 910 |
| | | 浸出 | 100 | 810 | 0 | 0 | 910 |
| ケース 2 | ピット① | 浸入 | 0 | 770 | 110 | 260 | 1,140 |
| | | 浸出 | 110 | 800 | 0 | 230 | 1,140 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 800 | 110 | 240 | 1,160 |
| | | 浸出 | 120 | 790 | 0 | 250 | 1,160 |
| ケース 3 | ピット① | 浸入 | 0 | 750 | 250 | 170 | 1,160 |
| | | 浸出 | 240 | 800 | 0 | 130 | 1,170 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 790 | 250 | 150 | 1,190 |
| | | 浸出 | 250 | 790 | 0 | 150 | 1,180 |
| ケース 4 | ピット① | 浸入 | 0 | 780 | 150 | 50 | 980 |
| | | 浸出 | 140 | 800 | 0 | 40 | 980 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 800 | 140 | 50 | 990 |
| | | 浸出 | 150 | 800 | 0 | 50 | 990 |
| ケース 5 | ピット① | 浸入 | 0 | 760 | 160 | 300 | 1,220 |
| | | 浸出 | 160 | 790 | 0 | 270 | 1,220 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 800 | 160 | 280 | 1,250 |
| | | 浸出 | 170 | 780 | 0 | 300 | 1,250 |
| ケース 6 | ピット① | 浸入 | 0 | 740 | 290 | 210 | 1,250 |
| | | 浸出 | 280 | 800 | 0 | 170 | 1,250 |
| | ピット② | 浸入 | 0 | 790 | 290 | 190 | 1,270 |
| | | 浸出 | 300 | 780 | 0 | 190 | 1,270 |

注：流量の結果については、項目ごとに 10 の位を四捨五入したものを示している。

表 4-9 ピット②浸出水の浸出先及び浸出水量（最も可能性が高いシナリオ）

| 出発面 | | ピット上面 破断部 | ピット上面 変質部 | | ピット側面 | | ピット底面 | | 合計 |
|---|-------|--------------|--------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----|-------|
| 粘土層 (ベントナイト混合土) | | 通らない | 通る | | 通る | | 通らない | | |
| 移行先 | | 覆土 | 覆土 | 覆土 →岩盤 | 覆土 | 覆土 →岩盤 | 岩盤 →覆土 | 岩盤 | |
| 廃棄 体層 から の 浸 出 水 量 [m³/y] | ケース 1 | | 10 | 0 | 90 | 0 | 150 | 660 | 910 |
| | ケース 2 | 30 | 10 | 0 | 100 | 0 | 150 | 650 | 940 |
| | ケース 3 | | 20 | 0 | 120 | 0 | 140 | 660 | 940 |
| | ケース 4 | | 30 | 0 | 130 | 0 | 140 | 660 | 970 |
| | ケース 5 | 40 | 30 | 0 | 140 | 0 | 150 | 650 | 1,010 |
| | ケース 6 | | 60 | 0 | 160 | 0 | 150 | 650 | 1,010 |

注：流量の結果については、項目ごとに 10 の位を四捨五入したものを示している。

表 4-10 ピット②浸出水の浸出先及び浸出水量（最も厳しいシナリオ）

| 出発面 | | ピット上面 破断部 | ピット上面 変質部 | | ピット側面 | | ピット底面 | | 合計 |
|---|-------|--------------|--------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----|-------|
| 粘土層 (ベントナイト混合土) | | 通らない | 通る | | 通る | | 通らない | | |
| 移行先 | | 覆土 | 覆土 | 覆土 →岩盤 | 覆土 | 覆土 →岩盤 | 岩盤 →覆土 | 岩盤 | |
| 廃棄 体層 から の 浸 出 水 量 [m³/y] | ケース 1 | | 0 | 0 | 100 | 0 | 150 | 660 | 910 |
| | ケース 2 | 220 | 30 | 0 | 120 | 0 | 140 | 640 | 1,160 |
| | ケース 3 | | 150 | 0 | 250 | 0 | 140 | 660 | 1,190 |
| | ケース 4 | | 50 | 0 | 150 | 0 | 140 | 660 | 990 |
| | ケース 5 | 220 | 70 | 0 | 170 | 0 | 140 | 640 | 1,250 |
| | ケース 6 | | 190 | 0 | 300 | 0 | 130 | 660 | 1,280 |

注：流量の結果については、項目ごとに 10 の位を四捨五入したものを示している。

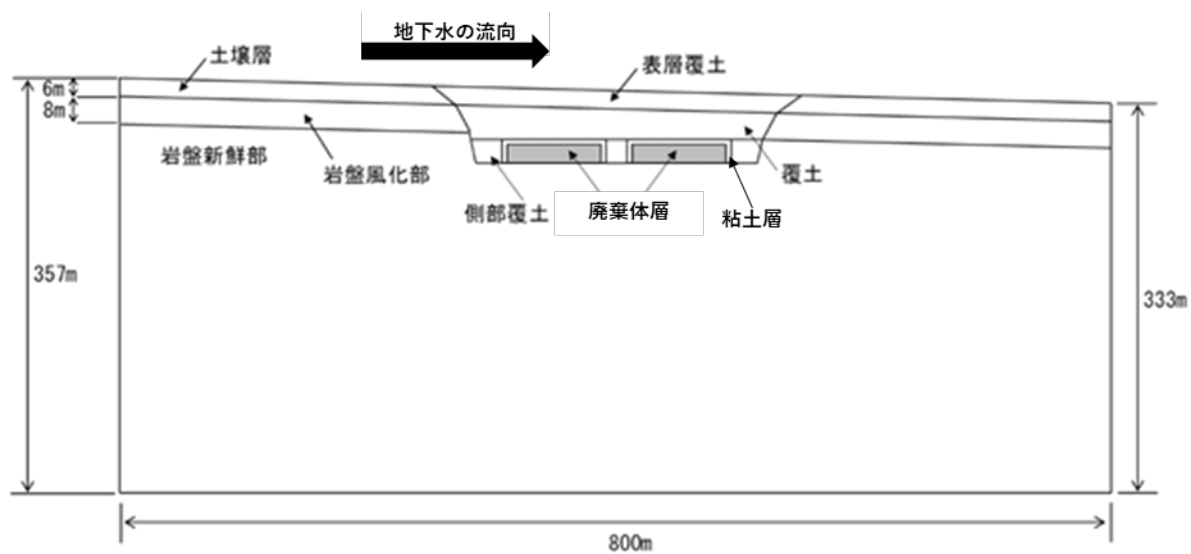


図 4-1 解析モデルの概略図（全体図）

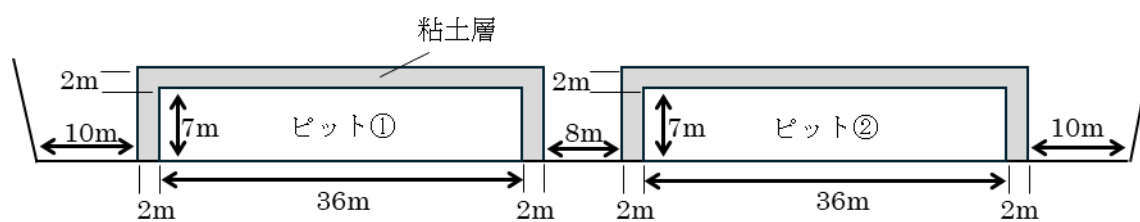


図 4-2 解析モデルの概略図（ピット周辺）

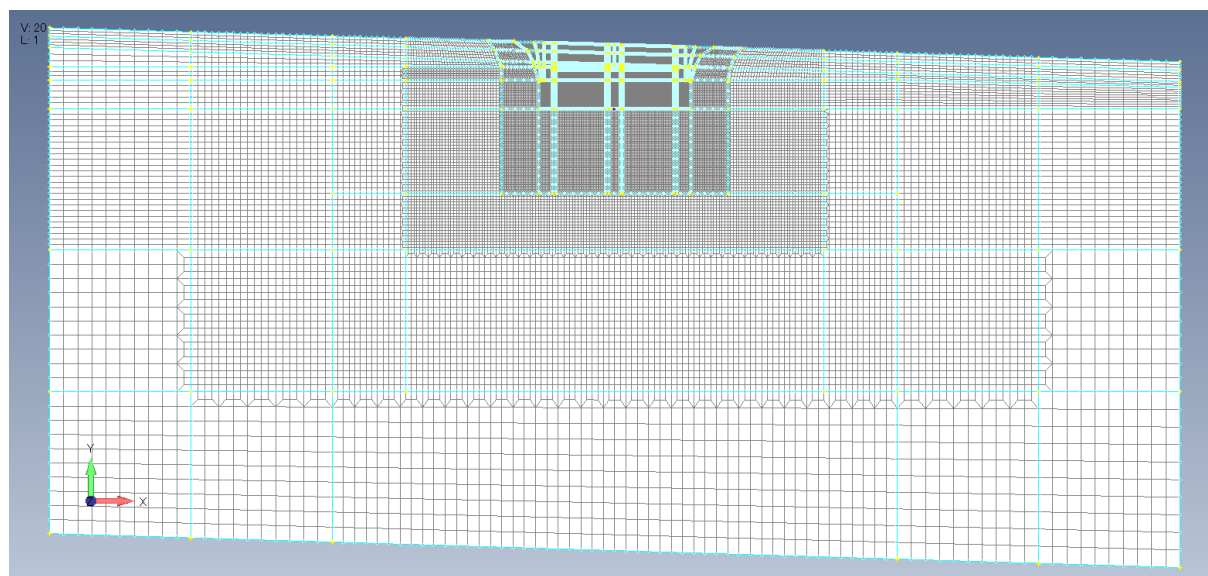


図 4-3 解析モデルのメッシュ図（全体図）

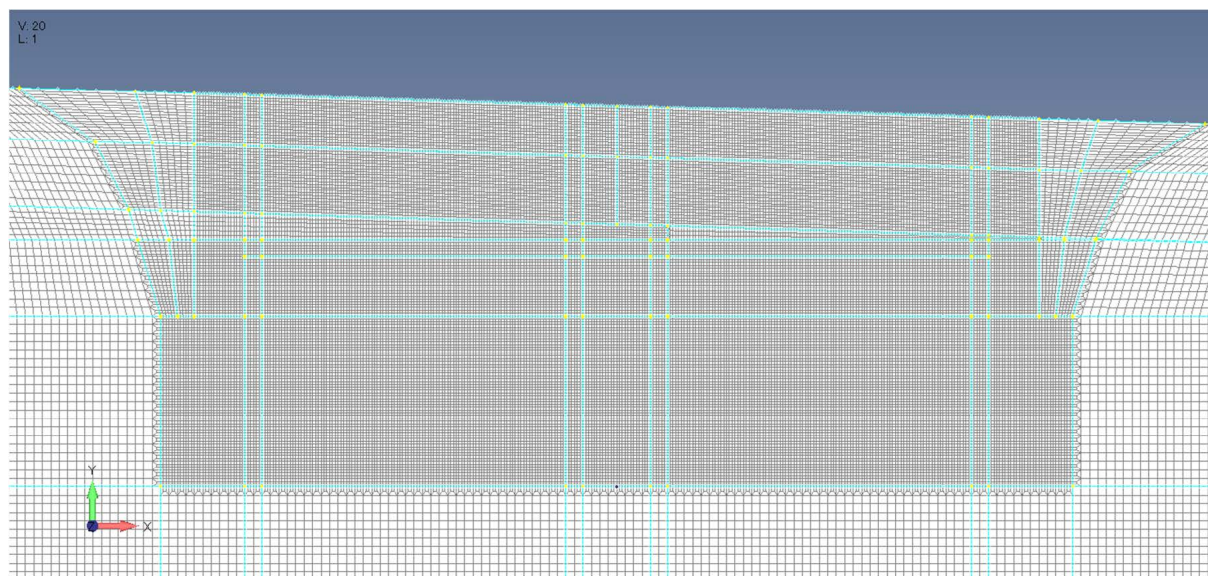


図 4-4 解析モデルのメッシュ図（ピット周辺拡大図）

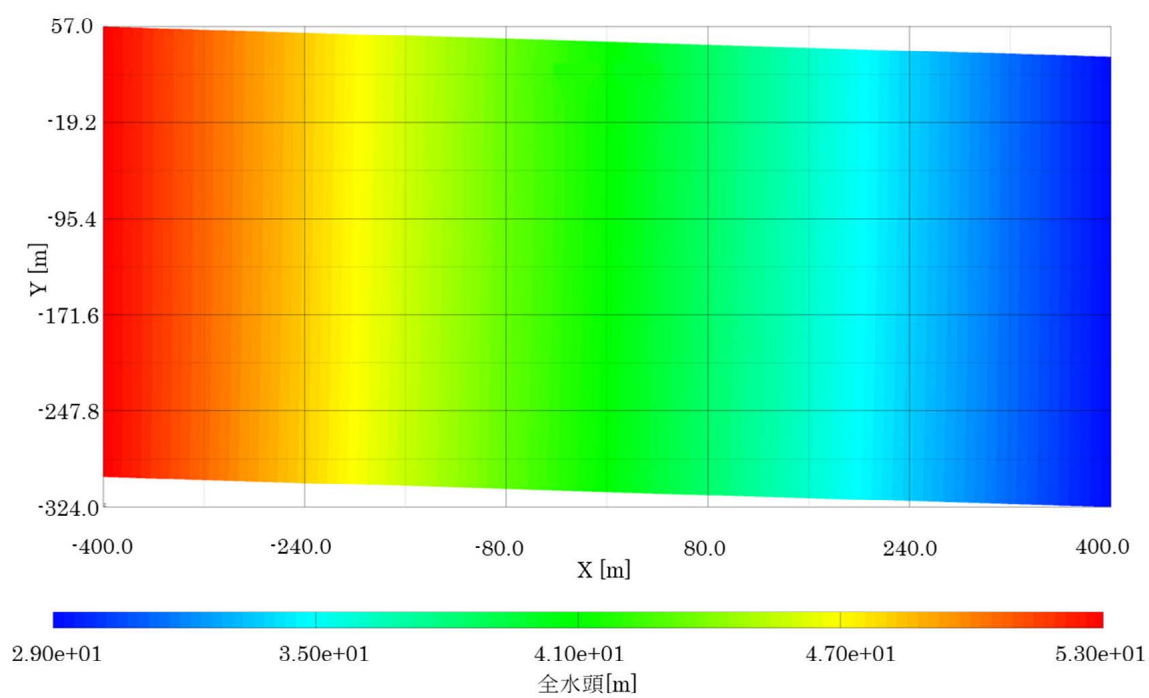


図 4-5 リファレンスモデルの全水頭分布

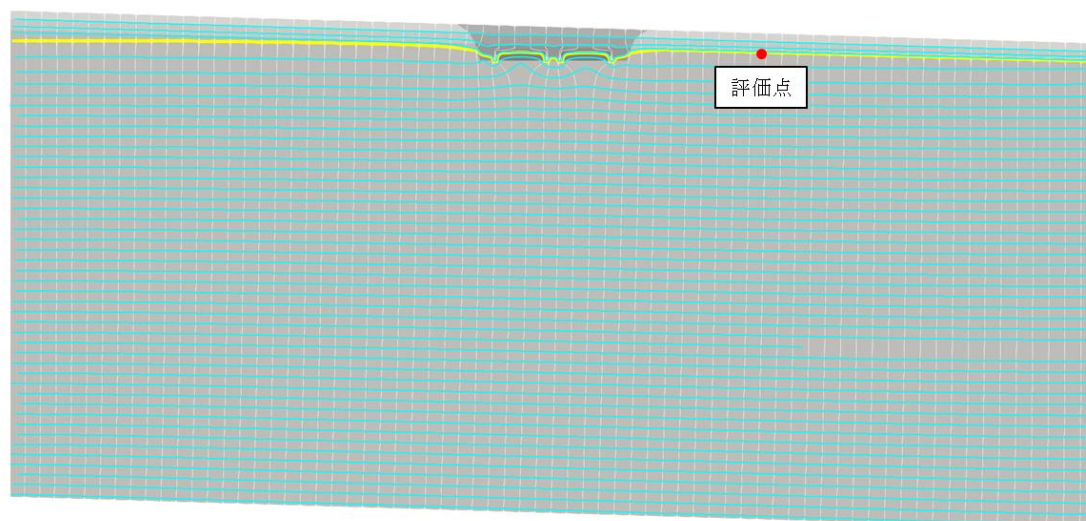


図 4-6 リファレンスモデルの評価点を通過する流跡線（全体）

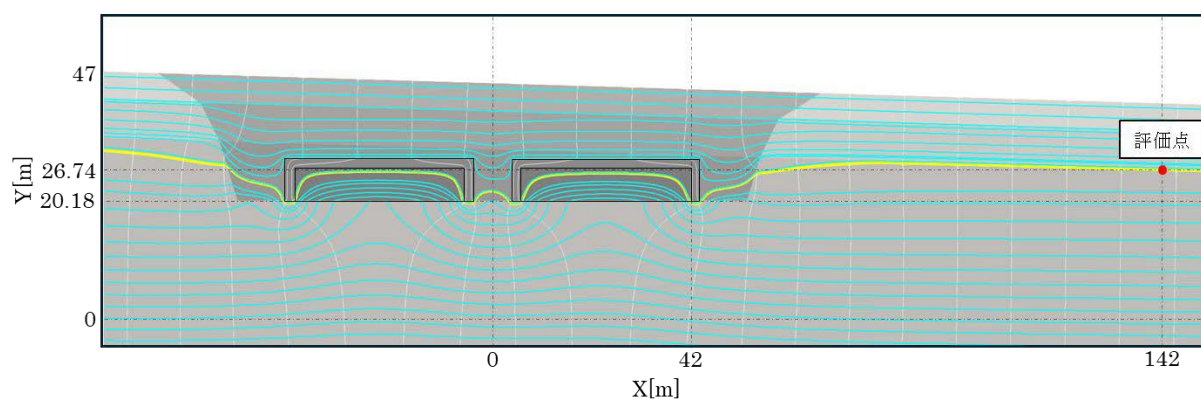


図 4-7 リファレンスモデルの評価点を通過する流跡線（拡大図）

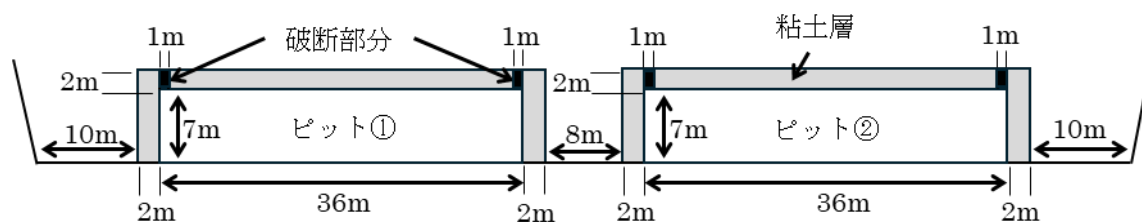


図 4-8 粘土層破断モデルの概略図

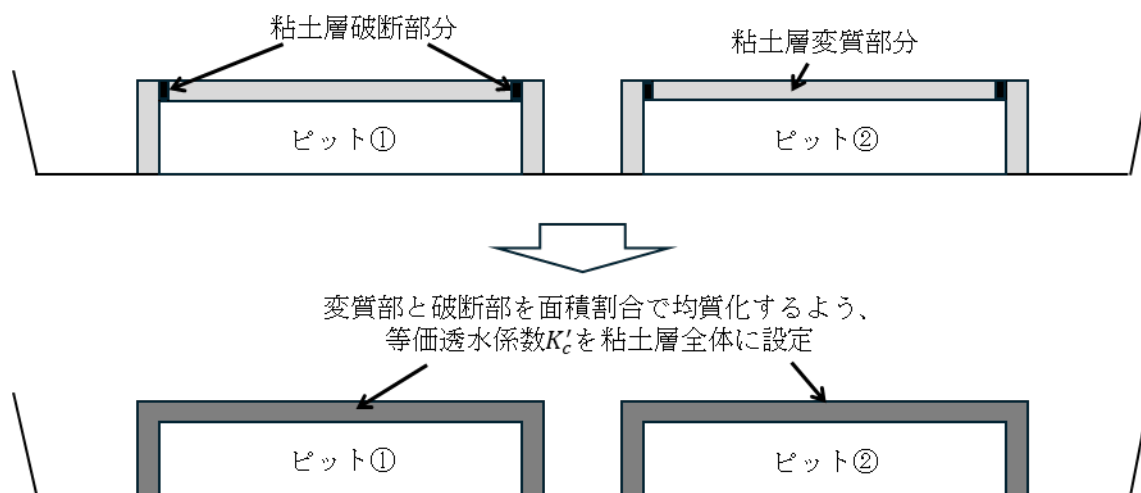


図 4-9 粘土層の等価透水係数の設定手法

5. 検討結果及び今後の課題

本報告書では、トレンチ埋設施設、コンクリートピット埋設施設の被ばく線量評価に用いるため、廃棄物条件や埋設環境等による不確実性を考慮した埋設施設からの浸出水量を算出し、既往の報告及び先行事業者の申請書を参考とした最新情報に基づいた解析評価を行った。以下に、検討結果及び今後の課題を示す。

5.1 トレンチ埋設施設

トレンチ報告書では、各覆土層の透水係数や厚さを変化させ、水の通過を低減するトレンチ埋設施設の設計検討を行っていた。トレンチ報告書における安全評価は、廃棄体層へ浸入する水をモデルの上部のみと仮定し、粘土層を通過した水量の算出を行うため、粘土層と上部覆土の境界の平均流速を算出した。一方、本報告書では廃棄体層の上下左右面からの浸入・浸出水量を求め、トレンチ報告書の手法では求められなかった粘土層以下の覆土層や周辺土壌における左右方向からの流路についての検討も加えて行うことができた。

また、各覆土層の透水係数はトレンチ報告書で設定されていた 1.0×10^{-8} m/s が過度に保守的な値であるということから、本報告書では原電の設定値を参考に 1.0×10^{-10} m/s に設定している。さらに、トレンチ報告書では、すべての覆土層において、埋設実証試験¹⁷⁾で示された不飽和低減係数を用いて地下水流動解析が行われた。しかし、本解析では地下水面より浅い不飽和層において定常降雨が設定されている場合、粘土層は他の覆土層よりも極めて透水係数が低いことから、飽和状態に近い状態になると想定した。そのうえで、粘土層に対してのみ H12 レポート内で示されたベントナイト埋め戻し材の不飽和低減係数を採用し、計算を行った。その結果、本解析のリファレンスモデルとトレンチ報告書の標準モデルの廃棄体層からの浸出水量を比較すると、トレンチ報告書の標準モデルの廃棄体層からの浸出水量は 0.031 m/y であったのに対し、本解析におけるリファレンスモデルの廃棄体層からの浸出水量は 0.021 m/y であった。これは、粘土層の不飽和低減係数を変化させることにより生じる水量の増加と、粘土層の透水係数を低く設定したことによる水量の低下の両方が作用した結果であると考えられる。

また、本報告書では、原電における新規規制基準への適合性審査会合資料^{20),21)}における保護土、排水層及び粘土層のパラメータを参考に透水係数を設定し、解析を行った。本解析におけるリファレンスモデルと検討モデルにおいて、最も可能性が高いシナリオでは、ほぼすべてのケースにおいて廃棄体層からの浸出水量がリファレンスモデルを上回っていた。一方で、排水層の透水係数がリファレンスよりも大きいケース 1-2 のみ、浸出水量がリファレンスモデルを下回っており、また最も厳しいシナリオにおいても同様の条件を与えたケース 2-2 が最も浸出水量が少ない結果となっていた。最も可能性が高いシナリオのケース 1-2 はリファレンスモデルと比べ排水層の透水係数は約 3.3 倍となっており、排水層による左右方向への排水性能はリファレンスモデルと比べて向上していると推察される。このことから、高い遮水性を持つ粘土層による廃棄体層への浸水防止も重要であるが、透水層を左右方向に水が通過することにより廃棄体層への浸水を抑制するトレンチ埋設施設の機構も遮水において非常に重要であることが分かった。また、排水層の透水係数の減少に伴う廃棄体層からの浸出水量の増加割合は、粘土層や保護土の透水係数が非保守

的な条件になるほど大きくなっていった。このことから、覆土の遮水性能は、単体の遮水層の性能により決定されるものではなく、覆土を構成する各遮水層の複合的な遮水機能により決定されると考えられる。そのため、トレンチ埋設施設における覆土の遮水性能の劣化に伴う廃棄体層からの浸出水量の評価を行う際は、単一の覆土層のみの影響を評価するのではなく、複数の覆土層の性能変化を加味した解析を行う必要がある。

本解析においては、廃棄体に含まれる化学物質等の影響に起因した粘土層の破断²⁵⁾は考慮していない。しかし、このような化学物質等の影響に起因する廃棄体層の変形や周辺覆土への影響はトレンチ埋設施設にも同様に発生する可能性はある。この可能性を検討するため、今後は力学解析などを通してトレンチ埋設施設の経年劣化による変形の可能性を検討し、モデルの更新や再解析を通して経年影響の評価を行っていく必要があると考えられる。

また、今回の解析では地下水流動解析用の解析コードとして **MIG2DF** を活用したが、地下水流動解析コードは複数種類存在している。また、新規規制基準に適応したトレンチ埋設施設の構造案として、排水層と粘土層の間に、遮水性能の高いシートを加える案が存在している。これらの今回の解析内容とは異なる条件を使用して今後解析を行っていくことで、さらに埋設施設の安全性に対する信頼性を高められると考えられる。

5.2 コンクリートピット埋設施設

ピット報告書では、ピットのモデル作成の見直しのため様々な設計条件を与えたモデルで影響評価を実施しており、粘土層の長期経過後の劣化による破断を考慮した評価も行われている。また、原燃によってベントナイト劣化を考慮した粘土層破断モデルによる解析も行われていた²⁵⁾。一方、本解析では最新の知見として、塩類の影響による粘土層の変質及び廃棄体層の陥没によって粘土層が部分的に破断したモデルについての検討を行った。

本報告書で作成された粘土層破断モデルのメッシュ構造は、ピット報告書における粘土層破断モデルとほとんど同じであるが、各覆土層、周辺土壌の透水係数設定は異なっている。ピット報告書においては、破断部の透水係数は $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ に設定し、透水係数の影響評価を行った。それに対し、本解析のピット粘土層破断モデルでは、原燃の1号廃棄物埋設地の状態設定²⁶⁾における設定値を参考に、最も可能性が高いシナリオでは $1.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ に、最も厳しいシナリオでは $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ に設定した。

本解析は、ピットの真上にある粘土層の左右端1mずつが破断するという仮定のうえでモデル作成を行った。しかし、実際にどの程度の陥没や破断が生じるか、また破断した部位の透水係数はどのように変化するか等の検討は本解析で使用了モデルに対しては行っていない。そのため、今後は、力学的な解析を行うことで現行のモデルに対する変形様態や破断部の透水係数の変化を評価する必要があると考えられる。

本解析により、コンクリートピット埋設施設の遮水性能に重要な粘土層の劣化や破断の発生によって、地下水の廃棄体層への通過量が増加するとともに、通過する地下水の岩盤風化部より浅い地表側への浸出割合も増加していくことが確認された。地表付近の地層は一般的に地下の岩盤層に比べ透水係数が高く、地下水流速が大きくなるため、地表側へ浸出した水の方が速く周辺住民の生活圏へ到達する可能性が高い。そのため、将来的に実施する安全評価においては、地表側

への浸出量が多いほど周辺環境への影響が大きくなる（例えば、被ばく線量の増加）ことが想定される。よって、物理的影響や化学的影響によるコンクリートピット埋設施設の遮水性低下は安全評価上確実に検討しなければならない課題であるといえる。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、ご指導及び貴重なご意見をいただいた、バックエンド領域 埋設事業センター事業計画室 技術主幹 齋藤龍郎氏、埋設事業センター埋設技術開発室 マネージャー 松井裕哉氏及び技術主幹 菅谷敏克氏に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, 埋設処分業務の実施に関する計画, 2012.
- 2) 天澤弘也ほか, 研究施設等廃棄物浅地中処分施設の概念設計, JAEA-Technology 2012-031, 2012, 338p.
- 3) H.Kimura, The MIG2DF Computer Code User's Manual, 1992.
- 4) 高井静霞ほか, 地下水流動解析コードMIG2DF第2版の開発, JAEA-Data/Code 2020-007, 2020, 174p.
- 5) 小川理那ほか, 研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における覆土の設計検討, JAEA-Technology 2022-010, 2022, 54p.
- 6) 長尾理那ほか, 様々な施設設計条件におけるコンクリートピット施設からの浸出水量の算出, JAEA-Technology 2021-009, 2021, 139p.
- 7) Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., Simcenter Femap, <https://plm.sw.siemens.com/ja-JP/simcenter/mechanical-simulation/femap/> (参照日: 2025年7月1日) .
- 8) Advanced Visual Systems Inc., <https://avs.com/products/express> (参照日: 2025年12月12日) .
- 9) Thomas Williams et al., "gnuplot 6.0, An Interactive Plotting Program", 2024.
- 10) Kitware, ParaView, 2024, <https://www.paraview.org/> (参照日: 2025年7月1日) .
- 11) 日本原子力発電株式会社, 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則への適合性について (第十三条安全評価), 2024.
- 12) 日本原子力発電株式会社, 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則への適合性について (13条1項3号及び4号線量評価パラメータ評価), 2023.
- 13) 梅田浩司, 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, PNC TN7450 96-002, 1996, 77p.
- 14) 坂井章浩ほか, 研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における遮水機能の設計検討 (共同研究), JAEA-Technology 2016-019, 2016, 134p.
- 15) 齊藤宏ほか, 人形峠鉱山夜次鉱さいたい積場上流側「廃砂たい積場」の跡措置, JAEA-Technology 2015-063, 2016, 119p.
- 16) 菅谷敏克ほか, 研究施設等廃棄物の浅地中処分のための基準線量相当濃度の検討(その1), JAEA-Technology 2021-004, 2021, 79p.
- 17) 原子力規制委員会, (平成10年度科学技術庁委託事業) 極低レベル固体廃棄物合理的処分安全性実証試験報告書 平成11年3月, 1999.
- 18) 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2「地層処分の工学技術」, JNC TN1400 99-022,

1999, 704p.

- 19) 原子力規制委員会, 第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設地に関する審査ガイド, 2021.
- 20) 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所, 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則への適合性について (第13条安全評価), 2022.
- 21) 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所, 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則への適合性について (13条1項3号及び4号線量評価パラメータ評価), 2022.
- 22) 国土交通省 気象庁, 国土交通省 気象庁HP, 各種データ・資料,
<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (参照日: 2025年7月1日).
- 23) Thrnthewate C.W, An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, Vol. 38, 1948.
- 24) 中川慎治, 蒸発散に関する研究, 筑波大学水理実験センター報告, No. 15, 1991, pp.99-104.
- 25) 日本原燃株式会社, 廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について 2020年5月, 2020.
- 26) 日本原燃株式会社, JNFL2021Aug 埋計第105号 廃棄物埋設確認申請書の変更について (1号廃棄物埋設地), 2021.
- 27) 日本原燃株式会社, JNFL2020Jul 第10条廃棄物埋設地のうち第4号 廃止措置開始後の評価 廃棄物埋設地の状態設定, 状態変化の評価, 科学的影響, 2020.

付録 トレンチ埋設施設の涵養量の算出方法

表付 1 に、涵養量を決定するための各パラメータを示す。トレンチ施設の涵養量は、年間降水量から表面流出量と蒸発散量を引いた値として求められる。年間降水量及び表面流出量は、気象庁による代表的な気象観測値のデータ¹⁾を基に平均値を求め、蒸発散量はソーンスウェイト法^{2),3)}により求めた。

現在の気温は、気象庁の気温の平年値から設定を行う。関東地方に属する代表的な観測地点のうち、東京都の標高から 100 m 以上の差がある観測地点を除外した地点の平年値を、さらに平均化して求め、15.39℃を現在の気温と設定した（表付 2 参照）。

「IPCC 第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書技術要約」⁴⁾（以下「IPCC 第 6 次技術要約」という。）によると、二酸化炭素の排出が現在の水準で推移し、温室効果ガスの排出が中程度となるシナリオにおいては、1850～1900 年を基準とした場合の世界の平均気温が、2081～2100 年に 2.7℃（中央値、範囲 2.1～3.5℃）上昇すると示されている。そのため、廃止措置開始後 1,000 年後には現在よりさらに気温が上昇すると考えられるが、一方で、2100 年より先の気温の変動については、氷期・間氷期サイクルまたは温暖化のいずれの影響が大きくなるか、不確かである。よって、廃止措置開始後 1,000 年後の気温の上昇値は、IPCC 第 6 次技術要約の評価における 2081～2100 年までの気温の上昇値である、2.7℃（中央値、範囲 2.1～3.5℃）を用いることとした。

これらを基に、最も可能性が高いシナリオにおいての廃止措置開始後 1,000 年後の気温は、現在の気温 15.39℃に加え、予測値の中央値である 2.7℃上昇を採用し、18.09℃に設定した。また、最も厳しいシナリオにおける廃止措置開始後 1,000 年後の気温は、現在の気温に加え予測範囲の最大値である 3.5℃上昇を採用し、18.89℃に設定した。

降水量は気温と正の相関があるとされている⁵⁾ため、北海道・東北地方及び関東地方に所在する観測地点のうち、標高 100 m 未満かつ海（太平洋）までの距離が 50 km 以内の観測地点を選定し、各地点における年平均気温及び年平均降水量を求めた¹⁾。それぞれの相関を示す図及び年平均気温と年平均降水量の相関があるとする近似式を図付 1 に示す。最も可能性が高いシナリオでは、廃止措置開始 1,000 年後の気温を 18.09℃とするため、近似式から降水量は 1,644.5 mm/y と算出された。また、最も厳しいシナリオでは気温は 18.89℃となり、温暖化により降水量が多くなる方向へ変化すると考えられることから、回帰式の変動範囲の上限（95%信頼区間の上限値）である 1,985.5 mm/y に設定した。

ソーンズウェイトの可能蒸発散量は、以下の経験式から算出される。

$$E_p = 0.533D_0 \left(\frac{10T_i}{J} \right)^a$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7}J^3 - 7.71 \times 10^{-5}J^2 + 0.01792J + 0.49239$$

$$J = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

E_p : 可能蒸発散量 (mm/month)

T_i : i 月の平均気温(°C)

D_0 : 可照時間(12h/day を 1 とする)

可能蒸発散量は、地表が植物に覆われた土地において、十分に水を供給した際の蒸発散量である。そのため、可能蒸発散量に補正係数を乗ずることで蒸発散量を設定する必要がある。ソーンズウェイトの方法で算出した可能蒸発散量は、蒸発散量より約 30%大きい値を与えるとされている³⁾ことから、本検討では、補正係数を 0.7 と設定することとした。これらのパラメータから、ソーンズウェイト法の経験式を用い、各地の蒸発散量を算出した。

またソーンズウェイト法で可能蒸発散量を求めるには、気温のほかに、可照時間が必要となる。可照時間を算出するために、降水量を求めるために選定した気象庁の観測地点¹⁾のうち、日照時間と可照率の観測を実施している観測地点を評価対象とした。各観測地点における平均気温と年間の蒸発散量との相関を示すグラフを図付 2 に示す。このグラフと各シナリオにおける気温の設定値から、最も可能性が高いシナリオにおける蒸発散量は 623.6 mm/y、最も厳しいシナリオにおける蒸発散量は 640.8 mm/y と設定した。

地表周辺における水収支には、降雨量や蒸発散量のほか、地表面流出量、貯留水量や地表湧出等の様々な水の流入出が関係する。トレンチ埋設施設は地下水位よりも浅い位置に敷設されるため、地下水からの湧出量はないものと考えられる。また、降雨や降雪以外での水の流入はほとんどないため、地表流入量もないものと考えられる。そのため、トレンチ埋設施設の水収支式は以下の式になると考えられる。

$$P = I + E_t + R$$

P : 降水量 (降雪等も含む)

I : 涵養量

E_t : 蒸発散量

R : 地表面流出量

また、地表面流出量については、降雨量に応じて一定の割合で流出していくものと仮定した。地表面流出量は、土地利用形態により設定することが一般的であることから、流出雨水量の最大

値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示（平成 16 年国土交通省告示第 521 号）⁹から設定する。本検討においては、流出係数を定める告示の別表 4 の「林地、耕地、原野その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地」の流出係数である 0.2 を用いて、降水量に乗じた値を地表面流出量とすることとした。そのため、最も可能性が高いシナリオにおける地表面流出量は 328.9mm/y、最も厳しいシナリオにおける地表面流出量は 397.1mm/y となる。

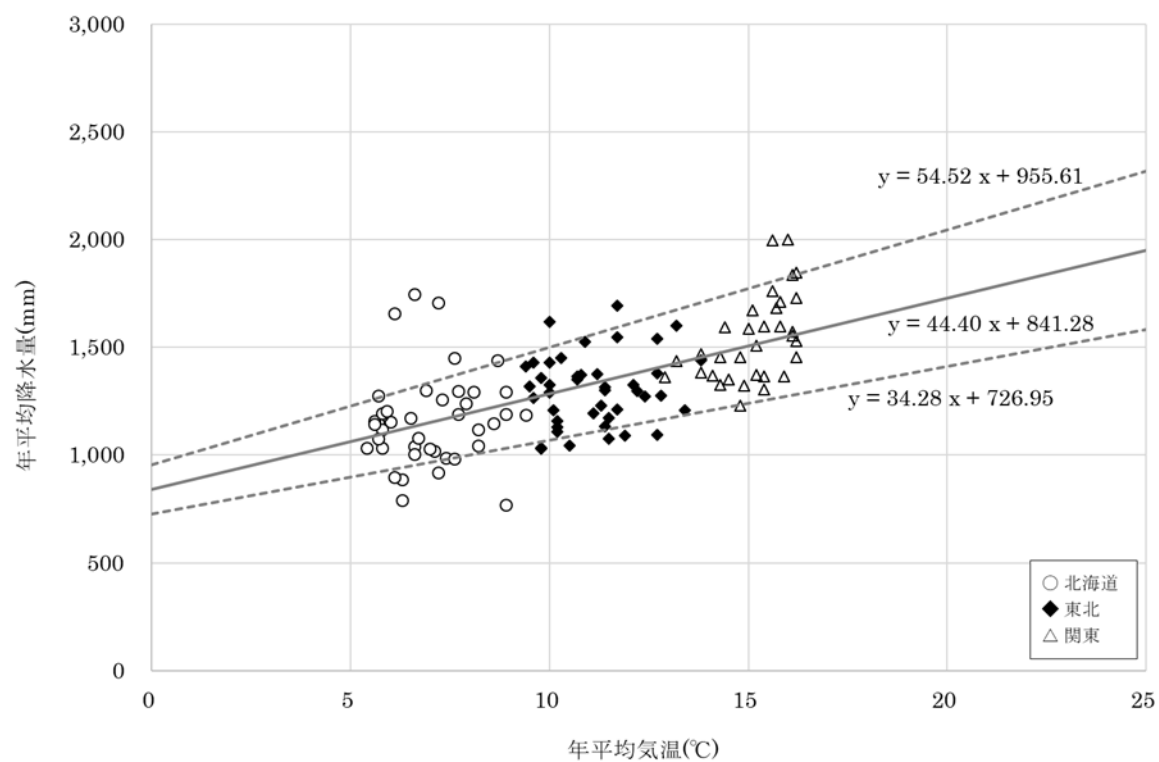
これらの要素から、廃止措置開始 1,000 年後における最も可能性が高いシナリオ及び最も厳しいシナリオを想定した涵養量として、最も可能性が高いシナリオでは 692.0 mm/y、最も厳しいシナリオでは 947.6 mm/y と設定した。

表付 1 各シナリオの涵養量を決定するための各パラメータ

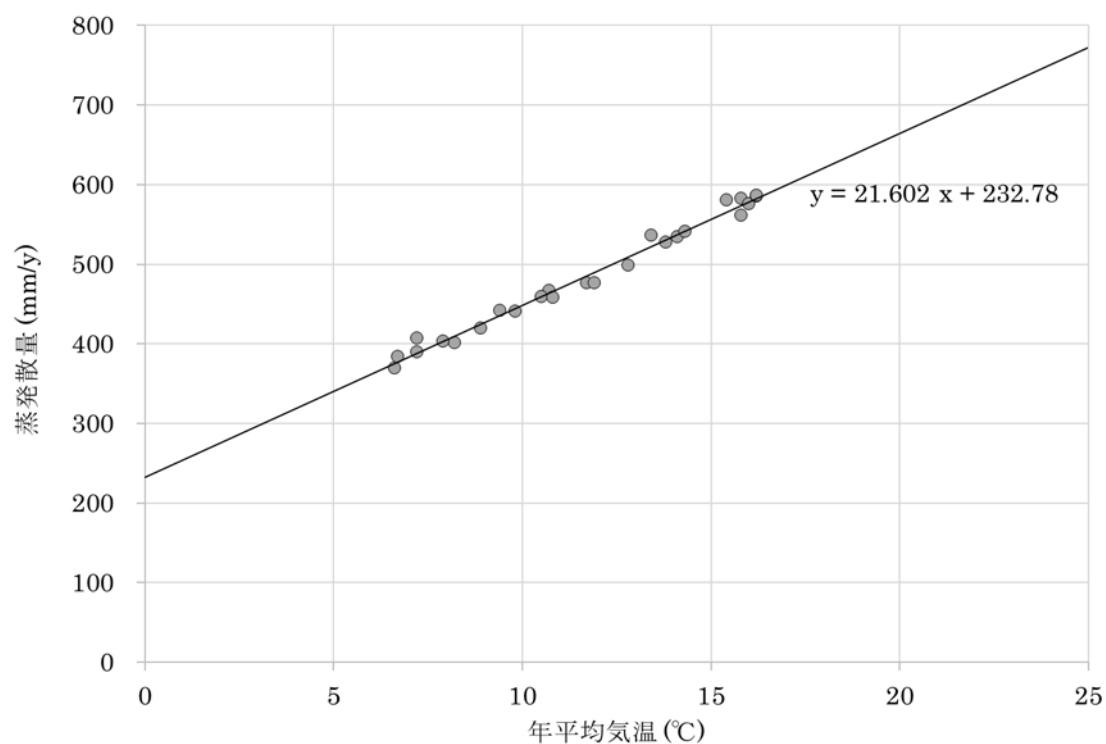
| | 単位 | 最も可能性が 高いシナリオ | 最も厳しいシナリオ |
|--------|------|------------------|-----------|
| 年平均気温 | ℃ | 18.09 | 18.89 |
| 年平均降水量 | mm/y | 1,644.5 | 1,985.5 |
| 蒸発散量 | mm/y | 623.6 | 640.8 |
| 地表面流出量 | mm/y | 328.9 | 397.1 |
| 涵養量 | mm/y | 692.0 | 947.6 |

表付 2 関東地方の年平均気温の平均値（平成 3 年～令和 2 年）

| 観測地点 | 平均気温 (℃) | 観測標高 (m) |
|---------|----------|----------|
| 水戸 | 14.1 | 29 |
| つくば（館野） | 14.3 | 25.2 |
| 宇都宮 | 14.3 | 119.4 |
| 前橋 | 15.0 | 112.1 |
| 熊谷 | 15.4 | 30 |
| 千葉 | 16.2 | 3.5 |
| 銚子 | 15.8 | 20.1 |
| 勝浦 | 16.0 | 11.9 |
| 館山 | 16.2 | 5.8 |
| 東京 | 15.8 | 25.2 |
| 横浜 | 16.2 | 39.1 |



図付 1 年平均気温と年平均降水量の相関



図付 2 年平均気温と蒸発散量の相関

参考文献

- 1) 国土交通省 気象庁, 国土交通省 気象庁 HP, 各種データ・資料,
<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (参照日 : 2025 年 7 月 1 日).
- 2) Thrnhtwate C.W, An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, Vol. 38, 1948.
- 3) 中川慎治, 蒸発散に関する研究, 筑波大学水理実験センター報告, No. 15, 1991, pp.99-104.
- 4) 気象庁, IPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書 技術要約(TS) 暫定訳 (2023年3月9日版) , 2023.
- 5) 登坂博行, 地圏の水環境科学, 東京大学出版会, 2006.
- 6) 国土交通省 河川局 特定都市河川浸水被害対策法関連ページ, 流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示 (平成 16 年国土交通省告示第 521 号) , <https://www.mlit.go.jp/river/kasen/tokuteitoshikasen/portal.html> (参照日 : 2025年7月1日).

This is a blank page.

