

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)

Design Study for Impermeable Function of Trench Disposal Facility for Very Low Level
Waste Generated from Research, Industrial and Medical Facilities
(Joint Research)

坂井 章浩 黒澤 亮平 仲田 久和 岡田 翔太
出雲 沙理 佐藤 亮 北村 洋一 本田 泰丈
高岡 克樹 天澤 弘也

Akihiro SAKAI, Ryohei KUROSAWA, Hisakazu NAKATA, Shota OKADA
Sari IZUMO, Makoto SATO, Yoichi KITAMURA, Yasutake HONDA
Katsuki TAKAOKA and Hiroya AMAZAWA

バックエンド研究開発部門
廃棄物対策・埋設事業統括部

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

October 2016

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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

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)

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 廃棄物対策・埋設事業統括部

坂井 章浩、黒澤 亮平*1、仲田 久和、岡田 翔太、出雲 沙理、
佐藤 亮*2、北村 洋一*2、本田 泰丈*2、高岡 克樹*2、天澤 弘也

(2016年7月29日受理)

日本原子力研究開発機構では、コンクリート、金属などの安定五品目以外の廃棄物をトレンチ処分するため、遮水シートを設置したトレンチ処分施設（以下、「付加機能型トレンチ処分施設」）の設計を進めている。

付加機能型トレンチ処分施設では、遮水シートにより浸出水の浸透防止や集排水機能を果たす設計としているが、重機等の接触による損傷等によりその機能が十分に発揮されない場合も想定される。

本研究では、遮水シート等の遮水層構造に着目し、遮水シート及び低透水性材料等の特性、多層構造の効果及び損傷要因等の外部条件への対応を考慮し、浸出水の漏出及びそれに伴う放射性物質の漏出に関して、抑制機能の高い遮水機能システムについて検討した。その結果、排水層、遮水シート及び低透水性層を組合せた層が、浸出水の漏出抑制に最も有効であることを確認した。また、セシウムを含む廃棄物を処分する場合、セシウム吸着シートの設置を評価した。

本研究で検討した遮水層は、研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設の設計に活用するとともに、放射性物質を含む一般・産業廃棄物の管理型処分等の設計にも適用可能と考えられる。

本検討は、日本原子力研究開発機構と一般社団法人国土環境保全機構との共同研究に基づいて実施したものである。

旧本部事務所:〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松 4-49

*1 株式会社 ヴィジブルインフォメーションセンター

*2 一般社団法人国土環境保全機構

Design Study for Impermeable Function of Trench Disposal Facility for Very Low Level
Waste Generated from Research, Industrial and Medical Facilities
(Joint Research)

Akihiro SAKAI, Ryohei KUROSAWA *¹, Hisakazu NAKATA, Shota OKADA,
Sari IZUMO, Makoto SATO*², Yoichi KITAMURA*², Yasutake HONDA*²,
Katsuki TAKAOKA*² and Hiroya AMAZAWA

Radioactive Waste Management and Disposal Project Department
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 29, 2016)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been developing to design trench disposal facility with impermeable layers in order to dispose of miscellaneous waste other than concrete and metal. Geomembrane liners composing the impermeable layers have functions that prevent seepage of leachant and collect the leachant. However, the geomembrane liner does not necessarily provide the expected performance due to damage generated when heavy equipment contacts with the liner.

Therefore, we studied the impermeable layers having high performance of preventing seepage of leachant including radioactivity taking into account characteristics of geomembrane and low permeable material, effect of multiple layer structure and durability against damage factors.

As a result, we have evaluated that the composite layers composed by drainage layer, geomembrane liner and low permeable layer are most effective structure to prevent seepage of leachant. Taking into account disposal of waste including cesium, we considered zeolite containing sheets for adsorption of cesium were installed in the impermeable layers.

The impermeable layer designed in this study can be utilized for design of not only trench disposal facility for very low level waste but also controlled landfill for municipal and industrial waste including radioactivity material.

Keywords: Trench Disposal, Impermeable Layer, Very Low Level Waste

This work was performed as joint research between JAEA and Japan Civil Environmental Protection Organization.

*1 Visible Information Center, Inc.

*2 Japan Civil Environmental Protection Organization

目次

1. はじめに.....	1
2. 本書の構成.....	2
3. 法令要件等の整理.....	4
3.1. 法令要件等の整理の方法.....	4
3.2. 国内における法令要件の整理.....	4
3.2.1. 廃棄物処理法における法令要件の整理.....	4
3.2.2. 特措法における法令要件の整理.....	4
3.2.3. 原子炉等規制法における法令要件の整理.....	6
3.3. 海外における非放射性的な廃棄物処分場における設計基準.....	6
3.4. 遮水層構造への要件のまとめ.....	7
4. 遮水層の損傷事例調査及び設計対策.....	21
4.1. 遮水システムの損傷に関するアンケート調査の方法.....	21
4.2. アンケートの結果.....	21
4.3. 遮水層の損傷への抵抗性の検討.....	21
5. 遮水層の基本構造の設計.....	25
6. 遮水層の性能評価.....	28
6.1. 遮水層の損傷に対する仕様の検討.....	28
6.2. 遮水層のケーススタディ.....	29
6.2.1. 評価コード.....	29
6.2.2. 遮水層モデル毎の浸透水量のケーススタディ.....	30
6.2.3. 遮水層のパラメータスタディ.....	33
6.3. Cs 吸着層のパラメータスタディ.....	37
6.3.1. 評価ケース.....	38
6.3.2. 排水中の Cs 濃度の評価.....	38
6.3.3. 浸出水が流入する地下水中の Cs 濃度の評価.....	40
7. 上部遮水層（キャッピング）の提案.....	77
8. 設計した遮水システムに基づく環境への影響評価.....	79
8.1. 評価方法.....	79
8.2. 評価条件.....	79
8.2.1. トレンチ処分施設.....	79
8.2.2. キャッピングからの浸出水量.....	80
8.2.3. 評価対象とする放射性物質.....	80
8.2.4. 評価モデル及び経路.....	80
8.2.5. 評価パラメータ.....	81
8.2.6. 評価コード.....	81
8.3. 評価結果.....	81

9. 遮水システムの費用評価.....	92
9.1. 評価条件.....	92
9.2. 部材単価.....	92
9.3. 評価結果.....	92
10. 遮水システムの構成、仕様に関する提案.....	96
11. おわりに.....	99
参考文献.....	100
付録 A 排水層の排水量に関する 2 次元流動解析.....	101
付録 B 廃棄物層及び Cs 吸着マットからの Cs の移行量の評価モデル.....	111
付録 C 設計した遮水層に基づく環境への影響評価で使用するパラメータ.....	114
付録 D 概念設計の P 埋設地の施設建設費の評価.....	128
付録 E 施設建設費の追加計算.....	134

Contents

1. Introduction.....	1
2. Configuration of this report.....	2
3. Investigation of legal requirements	4
3.1 Method for investigation of legal requirements	4
3.2 Investigation of domestic legal requirements	4
3.2.1 Investigation of requirements on Waste Disposal and Public Cleansing Law	4
3.2.2 Investigation of requirements on Act on Special Measures concerning the Handling of Radioactive Pollution.....	4
3.2.3 Investigation of requirements on Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors.....	6
3.3 Overseas design criteria of landfills for non-radioactive waste	6
3.4 Summary of requirements for structure of impermeable layer	7
4. Investigation of damage of impermeable layer and design measures against the factor of damage.....	21
4.1 Method for questionnaire survey about damage of impermeable layer.....	21
4.2 Results of questionnaire survey.....	21
4.3 Consideration of resistance of impermeable layer against damage.....	21
5. Design of fundamental structure of impermeable layer.....	25
6. Performance assessment of impermeable layer.....	28
6.1 Development of specification of design measures against damage.....	28
6.2 Case study of impermeable layers.....	29
6.2.1 Calculation code	29
6.2.2 Case study for seepage water passing through different models of impermeable layers.....	30
6.2.3 Parameter study of impermeable layer.....	33
6.3 Parameter study of cesium adsorption layer	37
6.3.1 Evaluation case	38
6.3.2 Evaluation of radioactivity concentration of cesium in drainage water....	38
6.3.3 Evaluation of radioactivity concentration of cesium in groundwater in which seepage water flows	40
7. Proposal of impermeable layer above waste (capping)	77
8. Environmental impact assessment in the case of utilizing the designed impermeable layer	79
8.1 Assessment Methods	79

8.2 Assessment Conditions.....	79
8.2.1 Trench disposal facility	79
8.2.2 Seepage water passing through the impermeable layer	80
8.2.3 Radionuclides taken into account in the assessment	80
8.2.4 Assessment model and exposure pathway	80
8.2.5 Assessment parameters	81
8.2.6 Calculation code	81
8.3 Assessment result.....	81
9. Cost estimation of impermeable layer.....	92
9.1 Estimation conditions	92
9.2 Unit prices of materials	92
9.3 Estimation results of construction cost	92
10. Proposal of composition of impermeable layer and specification of each component of the layer.....	96
11. Summary.....	99
References.....	100
Appendix A 2-dimensional flow analysis of the volume of water discharged from the drainage layer	101
Appendix B Calculation model for radioactivity of Cs leaching out of the waste layer and the cesium adsorption layer.....	111
Appendix C Parameters used in the environmental impact evaluation of the disposal facility equipped with the designed impermeable layer	114
Appendix D Estimation of construction cost of the disposal facility on P disposal area designed at the conceptual design of the disposal business	128
Appendix E Additional calculation for construction cost of the disposal facility	134

図表リスト

表 3.1	廃棄物処理法の技術基準省令における管理型処分場の技術基準.....	8
表 3.2	管理型処分場における遮水層構造の基準	9
表 3.3	特措法及び廃棄物関係ガイドラインで定義されている廃棄物の種類	10
表 3.4	廃棄物処理法及び特措法による埋立処分基準の概要	11
表 3.5	特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立て処分に関する 技術的な基準の概要.....	12
表 3.6	特定廃棄物の埋立処分基準の概要	13
表 3.7	土壌貯蔵施設 I 型と II 型にかかる指針案の比較.....	14
表 3.8	米国と EU における処分場の設計基準.....	16
表 4.1	管理型処分場における遮水層構造の損傷要因と発生率.....	23
表 4.2	遮水構造の主な損傷要因に対する設計対策の効果	23
表 6.1.1	設計対策の部材に設定した物性.....	42
表 6.2.1	遮水シートの傷及び設置不具合の数の推定値	43
表 6.2.2	遮水シートの設置状態.....	43
表 6.2.3	遮水層構造の種類.....	44
表 6.2.4	評価モデル 1-1：廃棄物処理法（ア）－遮水シート及び粘土層.....	45
表 6.2.5	評価モデル 1-2：廃棄物処理法（ウ）－二重遮水シート層.....	45
表 6.2.6	評価モデル 2-1：遮水層なし	46
表 6.2.7	評価モデル 2-2：低透水土壤層のみ.....	46
表 6.2.8	評価モデル 3-1：二重遮水シート及び低透水層（ベントナイトマット）	46
表 6.2.9	評価モデル 3-2-1 及び 3-2-2：二重遮水シート及び低透水層 （自己修復マット）	47
表 6.2.10	実気象データと疑似気象データの比較.....	47
表 6.2.11	その他の気象データ.....	47
表 6.2.12	処分施設における覆土表層の環境状態の設定	48
表 6.2.13	各層の標準パラメータ	48
表 6.2.14	遮水層からの浸出水量の評価結果：遮水層への 年間平均浸入水量 550mm ケース.....	49
表 6.2.15	遮水層からの浸出水量の評価結果：遮水層への 年間平均浸入水量 1140mm ケース.....	50
表 6.2.16	遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の 感度解析のケース及びパラメータ	51
表 6.2.17	排水層の透水係数=1×10 ⁻³ m/s の感度解析結果： 遮水層からの平均浸出水量.....	52
表 6.2.18	排水層の透水係数=3×10 ⁻⁴ m/s の感度解析結果： 遮水層からの平均浸出水量.....	52
表 6.2.19	低透水層の透水係数と厚さの感度解析の評価モデル	53

表 6.2.20	低透水層の透水係数と厚さの感度解析における各層のパラメータ	53
表 6.2.21	低透水層の透水係数と厚さの感度解析結果： 遮水層からの浸出水量	54
表 6.2.22	遮水層における排水層の厚さと排水量の感度解析における 各層のパラメータ	54
表 6.2.23	排水層の厚さと排水量の感度解析結果	55
表 6.3.1	排水中の Cs 濃度評価の計算条件	56
表 6.3.2	Cs の土壌に対する分配係数の文献値	57
表 6.3.3	排水中における Cs の最大水中濃度	58
表 6.3.4	排水中における Cs の積算放射能	58
表 6.3.5	Cs 吸着マットの厚さの感度解析ケース	58
表 6.3.6	Cs 吸着マットの厚さを変更した場合の排水中の最大水中濃度	59
表 6.3.7	地下水中の Cs 濃度の計算条件	60
表 6.3.8	地下水中における Cs の最大水中濃度	61
表 6.3.9	地下水水中における Cs の積算放射能	61
表 6.3.10	感度解析に用いる浸透水量の条件	61
表 6.3.11	浸透水量の感度解析：地下水中の Cs の最大水中濃度	62
表 8.1	トレンチ処分施設の形状	82
表 8.2	環境中の線量評価の計算ケース	82
表 8.3	概念設計で設定された核種と放射能インベントリ	83
表 8.4	評価経路	84
表 8.5	環境中の線量評価結果（管理期間中からの最大線量）： ケース 1 及び 2（付加機能型トレンチ処分施設による評価）	85
表 8.6	環境中の線量評価結果（管理期間中からの最大線量）： ケース 3 及び 4（トレンチ処分施設全体による評価）	85
表 8.7	環境中の線量評価結果（管理期間終了以後からの最大線量）： ケース 1 及び 2（付加機能型トレンチ処分施設による評価）	86
表 8.8	環境中の線量評価結果（管理期間終了以後からの最大線量）： ケース 3 及び 4（トレンチ処分施設全体による評価）	86
表 9-1	P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基の主要寸法	93
表 9-2	P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基における各部の算出面積	93
表 9-3	各部材の単価一覧	94
表 9-4	各検討ケースにおける遮水シートのみでの直接工事費	95
図 3.1	特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋め立て処分にかかる基準の概要	17
図 3.2	低レベル放射性廃棄物のピット処分及びトレンチ処分の技術基準	18
図 3.3	原子力機構のトレンチ処分施設及び雨水浸入防止用テント	19
図 3.4	原子炉等規制法と廃棄物処理法の処分場の比較	20

図 4.1	アンケート結果における遮水層構造の分類ごとの件数	24
図 4.2	損傷に対する設計対策	24
図 5.1	遮水層の設計検討モデル	27
図 6.2.1	影響評価における水及び放射性物質等の流れの概念図	63
図 6.2.2	HELP コードの概念図	64
図 6.2.3	遮水シートの設置状態の概念	65
図 6.2.4	実気象データ（年降水量、年平均気温及び年平均日射量）	66
図 6.2.5	疑似気象データ（年水量、年平均気温及び年平均日射量）	66
図 6.2.6	実気象データと疑似気象データの月別平均降水量の比較	67
図 6.2.7	実気象データと疑似気象データの月別平均気温の比較	68
図 6.2.8	実気象データと疑似気象データの月別平均日射量の比較	68
図 6.2.9	遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の感度解析： 評価概要図	69
図 6.2.10	排水層の透水係数=1×10 ⁻³ m/s の感度解析結果： 遮水層からの平均浸出水量	70
図 6.2.11	排水層の透水係数=3×10 ⁻⁴ m/s の感度解析結果： 遮水層からの平均浸出水量	70
図 6.2.12	低透水層の透水係数と厚さの感度解析結果	71
図 6.2.13	遮水層における排水層の厚さと排水量の感度解析モデル	71
図 6.2.14	排水層の厚さと排水量の感度解析結果：平均排水量	72
図 6.2.15	排水層の厚さと排水量の感度解析結果：遮水層からの平均浸出水量	72
図 6.3.1	遮水層に設置する Cs 吸着マットの評価概要図	73
図 6.3.2	排水中における Cs の放射能濃度の経時変化	74
図 6.3.3	排水中における Cs 積算放射能の経時変化	74
図 6.3.4	Cs 吸着マットの厚さを変更した場合の排水中の Cs 水中濃度の経時変化	75
図 6.3.5	地下水における Cs の放射能濃度の経時変化	75
図 6.3.6	地下水における Cs 積算放射能の評価	76
図 6.3.7	浸透水量の感度解析：地下水中の Cs 水中濃度の経時変化	76
図 7.1	上部遮水層（キャッピング）の構成案	78
図 8.1	遮水システムに基づく環境中への影響評価モデルの概念	87
図 8.2	概念設計における事業所内の施設配置の概念図	88
図 8.3	評価におけるトレンチ処分施設の配置モデル	88
図 8.4	環境への影響評価の概念図	89
図 8.5	ケース 1：付加機能型トレンチ処分施設の各経路における線量の経時変化 （浸出水量 1mm/y）	90
図 8.6	ケース 2：付加機能型トレンチ処分施設の各経路における線量の経時変化 （浸出水量 550mm/y）	90
図 8.7	ケース 3：トレンチ処分施設全体で評価した際の各経路における線量の 経時変化（浸出水量 1mm/y）	91

図 8.8 ケース 4：トレンチ処分施設全体で評価した際の各経路における線量の 経時変化（浸出水量 550mm/y）	91
図 10.1 提案する遮水システムの構成、仕様	98

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）では、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構法に基づき、原子力機構及び国内の研究施設などから発生する低レベルの放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という）の浅地中埋設処分の実施に向けた検討を進めている。浅地中埋設処分施設として地下水位より上に設置するトレンチ処分施設と透水性の低い岩盤中に設置するコンクリートピット処分施設を想定し、処分施設を含む埋設事業所の概念設計を実施した。¹⁾

研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設において、コンクリート、金属などの安定五品目以外の廃棄物（主に充填固化体又は均質固化体等）については、遮水シートを設置した産業廃棄物の管理型処分場相当のトレンチ処分施設（以下、「付加機能型トレンチ処分施設」）に処分する方法を計画している。産業廃棄物の管理型処分場では、廃棄物層からの浸出水の防止が要求され、これに対して、遮水シートなどのシート系材料を設置する事により十分に対応している。また、福島第一原子力発電所の事故以来、一般・産業廃棄物においても、一部の放射性物質を含む廃棄物を管理型構造の処分場等へ処分する必要性が生じている。

管理型処分場では、浸出水の浸透防止や集排水機能を果たすためシート系材料を設置して対応しているが、重機等の接触によるシート系材料の損傷や材料劣化、さらに施工不良等によりその機能が 100%発揮されない場合も想定される。今後、放射性物質と化学的有害物質の両方を少量含む廃棄物を一緒に処分する処分場が必要となることが予想されることから、これを踏まえた処分場の設計を行うことが重要となると考えられる。

これより、本研究では、遮水シート等の遮水層構造に着目し、遮水シート及び低透水性材料等の特性、多層構造の効果及び損傷要因等の外部条件への対応を検討し、浸出水の漏出及び浸出水の漏出に伴う放射性物質の漏出に関して、抑制機能の高い遮水機能システムについて検討した。

本研究で検討した遮水機能システムを研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設の設計に活用することはもとより、放射性物質を含む一般・産業廃棄物の管理型処分等の設計に役立てることを目的とする。

2. 本書の構成

研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設では、放射性廃棄物のトレンチ処分の要件である放射性物質の環境中への移行抑制機能を有するとともに、管理型処分場として浸入水の浸出防止機能や集排水機能が求められる。浸入水の浸出防止及び集排水機能を満足させるために、従来からシート系材料が用いられてきたが、重機の接触等の外的要因による損傷や材料劣化、さらに施工不良等によりその機能を 100%発揮できない場合があると考えられる。福島第一原子力発電所の事故も踏まえると、今後、放射性物質と化学的有害物質を処分する混合廃棄物処分場が必要となることが予想される。これより、廃棄物の特徴を踏まえた処分場の設計を効率的かつ効果的に行うため、放射性物質や化学的有害物質の環境への移行抑制に重要となる遮水層について検討を行った。遮水層では、遮水シートの機能と役割について着目するとともに、遮水機能及び放射性物質等の移行抑制機能を発揮するために目的の異なる層を追加する多層構造について検討を行った。

これらの遮水層の構造は、研究施設等廃棄物の処分場の設計において有効に寄与するものであり、その他の一般・産業廃棄物、放射性廃棄物及び災害廃棄物にも十分に適用が可能であると考えられる。

本書の構成は、以下の通りである。

① 法令要件、事例等の整理

産業廃棄物の管理型処分に相当する国内及び海外の基準、放射性廃棄物の浅地中処分施設に係わる国内基準、福島第一原子力発電所の事故に由来する汚染廃棄物等の埋立処分に係る基準を調査し、付加機能型トレンチ処分施設等に求められる遮水層の構成等について整理した。

② 遮水層の損傷事例調査及び設計対策

国内の一般・産業廃棄物処分場の遮水層の損傷事例のアンケート調査を実施し、その結果から遮水層の主要な損傷原因とそれに対する設計対策について検討した。

③ 遮水層の基本構造の設計

産業廃棄物の管理型処分場等の技術要件及び損傷に対する設計対策の検討結果から、遮水層構造の設計モデルについて検討した。

④ 遮水層の性能評価

③で検討した設計モデルの各層について、損傷に対する抵抗性を考慮して仕様を設定した。また、複数の遮水層構造を想定し、遮水層を通過する浸出水量のケーススタディを実施し、各遮水層構造による浸出水量の比較を行った。また、遮水層を構成する排水層、低透水層、放射性物質吸着層の各層のパラメータを変化させた浸出水量及び放射性物質の漏出量の感度解析を行った。解析結果に基づき、各層の有効性について検討した。

- ⑤ 上部遮水層（キャッピング）の提案
遮水層の検討結果を踏まえ、キャッピングの構成について検討を行った。

- ⑥ 設計した遮水層に基づく環境への影響評価
設計した遮水層及びキャッピングを設置した付加機能型トレンチ処分施設について、特にキャッピングの遮水機能を考慮して、キャッピングを通過した浸透水によって放射性物質が環境中へ移行した場合の線量評価を行い、キャッピングのないトレンチ処分施設の評価結果と比較した。

- ⑦ 遮水システムの積算
設計した遮水層、キャッピングを含む付加機能型トレンチ処分施設の遮水システムの直接工事費の積算を実施した。

- ⑧ 遮水システムの構成、仕様に関する提案
上記の検討結果を踏まえ、付加機能型トレンチ処分施設における遮水層及びキャッピングの構成、仕様を検討した。

なお、本書では単に遮水層と表現する場合は、処分施設底部の遮水シート、排水層、低透水層を含む遮水層を意味し、処分施設上部の遮水層は、上部遮水層（キャッピング）、処分施設の法面部の遮水層は、法面部遮水層と特定して示すこととする。キャッピング、遮水層及び法面部遮水層を総称する場合は、「遮水システム」ということとする。

3. 法令要件等の整理

3.1. 法令要件等の整理の方法

国内における廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下、「廃棄物処理法」という）及び平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法（以下、「特措法」という）が適用される産業廃棄物の管理型処分施設等、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、「原子炉等規制法」という）が適用される放射性廃棄物のトレンチ処分施設について主に遮水構造等の施設構造に関する法令要求・技術基準を調査し、施設に求められる遮水機能について整理した。

次に、海外の一般・産業廃棄物の処分施設における基準等を調査し、国内施設との相違点・類似点を比較した。

これらを取りまとめ、付加機能型トレンチ型処分施設等に求められる設計及び管理要求を検討した。

3.2. 国内における法令要件の整理

3.2.1. 廃棄物処理法における法令要件の整理

廃棄物処理法では、一般・産業廃棄物の処分場の技術基準が「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令」（以下、「技術基準省令」という）に定められている。研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分場は、管理型処分場に適合させることを計画していることから、技術基準省令における管理型処分場の構造に関する技術基準及び遮水層における技術基準を表 3.1 及び表 3.2 にそれぞれ整理した。

管理型処分場の遮水層は、底部の構造について、表 3.2 に示すように（ア）低透水性（透水係数 $K \leq 10^{-8} \text{m/s}$ 以下）で厚さ 0.5m 以上の土壌の上部に遮水シートを設置した層、（イ）透水係数 $K \leq 10^{-9} \text{m/s}$ 以下で厚さ 0.05m 以上のアスファルト・コンクリートの上部に遮水シートを設置した層、（ウ）2重の遮水シート層の3種類が示されており、遮水シートと低透水性層又はもう一層の遮水シートの組合せが示されている。その他の構造では、埋立地への浸入水を集排水する管渠等の設備を設置することが示されているが、遮水層の上部に設置する透水性の高く集排水管に浸入水を導くような排水層については具体的に書かれていない。また、浸透水を防ぐ廃棄物層のキャッピングについては、具体的な構造が示されていないが、雨水が入らないような措置が講じられた埋立地で、腐敗せず、かつ、保有水が生じない廃棄物のみを埋め立てる処分場は集排水設備を設置する必要がないという記載で言及されている。

3.2.2. 特措法における法令要件の整理

特措法では、対策地域内廃棄物、指定廃棄物、特定廃棄物、除去土壌などが定義され、それぞれの取扱いを特措法及び施行規則に定めるとともに、廃棄物関係ガイドライン²⁾を発行し、それぞれの具体的な取り扱いについて解説している。表 3.3 にそれぞれの廃棄物の定義を整理する。廃棄物関係ガイドラインのうち、埋立処分の基準が示されているのは、

第二部特定一般廃棄物・特定産業廃棄物³⁾（以下、「廃棄物関係ガイドライン第二部」という）及び第六部特定廃棄物関係ガイドライン⁴⁾（以下、「廃棄物関係ガイドライン第六部」という）であり、これらのガイドラインに示された埋立処分の基準を整理した。また、環境省では、福島県で発生した除去土壌等や特定廃棄物等の中間貯蔵施設の指針案を公開しており、指針案に示された貯蔵施設の技術基準についても整理した。

(1) 特定一般廃棄物・特定産業廃棄物の埋立処分の基準

特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物の埋立処分を行う場合には、廃棄物処理法に基づく処理基準及び維持管理基準が適用されるとともに、特措法施行規則で定める特別処理基準及び特別維持管理基準が適用されることが示されている。表 3.4 に廃棄物関係ガイドライン第二部に示された廃棄物処理法に規定される基準と特措法で定める基準について、項目ごとの概要を示す。このうち、特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立処分に係る特徴的な基準の概要は廃棄物関係ガイドライン第二部に図 3.1 のように示されている。

図 3.1 における特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立処分に係る特徴的な基準に対する対策の概要を表 3.5 に示す。

(2) 特定廃棄物の埋立処分の基準

特定廃棄物の埋立処分を行う場合には、施行規則で定められる埋立処分基準が適用される。規則で定められる埋立処分基準は、廃棄物関係ガイドライン第六部に項目で整理されて表 3.6 のように示されている。本報告書では、管理型処分に相当する処分方法を検討しているため、放射性 Cs の放射能濃度が 100,000Bq/g を超えるものの処分施設及び 8,000Bq/kg～100,000Bq/g のものを遮断型相当の処分施設で処分する基準は参照せずに、管理型相当の処分施設の基準について調査した。管理型相当の処分施設のうち、特措法施行規則第 26 条第 2 項第 2 号では、放射性 Cs の溶出量の少ないものは、特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立処分に係る基準と同じであるが、放射性 Cs の溶出量の制限がない特定廃棄物はセメント等で固化化することが求められるとともに、埋設した特定廃棄物を覆うように不透水層（透水係数が 10^{-8}m/s 以下で厚さが概ね 0.3m 以上の土壌等）を設置することが求められる。なお、特措法施行規則第 26 条第 3 項の基準適合特定廃棄物の処分に係る基準は、特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立処分に係る基準と同じである。

(3) 中間貯蔵施設の指針案における貯蔵の基準

環境省では、中間貯蔵施設についての指針を検討している。中間貯蔵施設は、8,000Bq/kg 以下の除去土壌等を貯蔵する I 型の施設と 10^5Bq/kg 以下の特定廃棄物並びに特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物（以下、「特定廃棄物等」という）を貯蔵する II 型の施設について施設構造及び管理の基準案が示されている。表 3.7 に I 型施設及び II 型施設の構造にかかる基準案を示す。表 3.7 によれば、I 型施設は放射線の遮蔽が求められている他、地下水位より低い場所に埋め立てる場合に地下水集排水設備を設けること

が示されているが、遮水工については示されていない。一方、Ⅱ型の施設は、特定廃棄物、特定一般廃棄物・特定産業廃棄物の管理型処分相当の埋立基準が求められ、廃棄物処理法と同じ構造の遮水工の設置が明記されている。

3.2.3. 原子炉等規制法における法令要件の整理

原子炉等規制法では、低レベル放射性廃棄物のピット処分及びトレンチ処分施設の構造について、「核燃料物質又は核燃料物質で汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」（以下、「第二種廃棄物埋設規則」という）及び「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造および設備の基準に関する規則」に示されている。第二種廃棄物埋設規則では、施設の仕様及び要件が一部具体的に示されており、そのピット処分及びトレンチ処分施設への第二種廃棄物埋設規則における要求事項を図 3.2 に整理した。

トレンチ処分では、廃棄物処理法にはない規定として、埋設時において雨水等の浸入水の防止及び埋設地内の埋め戻しの際に有害な空隙が残らないような措置を取ることが求められている。雨水等の浸入水の防止対策として、原子力機構のトレンチ処分施設では、定置作業中の区画にテントを設置する方法が採用された。図 3.3 に原子力機構のトレンチ処分施設及びテントについて示す。一方、トレンチ処分では、コンクリート、金属等の安定五品目に相当する廃棄物が対象であるため、遮水層等の浸出水の防止の措置は規定されていない。この点については、廃棄物処理法における安定型処分場に対応していると考えられる。

ピット処分では、トレンチ処分と共通の技術基準が適用される他、外周仕切設備の規定、内部仕切りの規定があり、これは廃棄物処理法の遮断型処分場における要件と同じである。

ただし、ピット処分施設では、外周仕切設備が目視等により損壊の有無を点検できる構造であるなどの遮断型処分場の技術基準を満足していない項目があると考えられることから、廃棄物処理法では、管理型処分場に対応すると考えられる。

図 3.4 に第 2 種廃棄物埋設施設であるピット処分及びトレンチ処分施設と廃棄物処理法における管理型処分施設と安定型処分施設の対応の概念を示す。また、検討中である安定 5 品目以外の廃棄物を埋設する付加機能型トレンチ処分施設は、遮水層の構造が廃棄物処理法の要件に満足すれば、管理型処分場に対応すると考えられる。

3.3. 海外における非放射性的の廃棄物処分場における設計基準

(1) 米国

米国では、1976 年に資源保護回復法（RCRA）が制定されたことによって、固体廃棄物管理システムが改造され、現在の有害廃棄物管理プログラムの基本枠組みが構築されている。RCRA の枠組みの下、環境省（EPA）では、非放射性的の一般廃棄物の処分の基準を規則 40 CFR part 258⁵⁾ に、非放射性的の有害廃棄物の処分の基準を規則 40 CFR part 264⁶⁾ に示している。40CFR part 258 及び part 264 に示されている処分場の遮水構造の基準を表 3.8 に示す。一般廃棄物の処分場では、処分場底部に遮水シートと低透水土壤層の設置が定められている。有害廃棄物の処分場では、底部に 2 層の遮水構造が求められており、上層は遮水シート、下層は遮水シートと低透水土壤層の複合ライナーが求められている。

一般廃棄物及び産業廃棄物の処分場ともに浸入水集水システムの設置が求められており、有害物質の処分場では、排水層の透水係数や厚さの規定が定められている。

(2) 欧州連合 (EU)

欧州連合 (EU) では指令 (Directive) ⁷⁾ において有害及び非有害廃棄物の処分方法が示されている。加盟国は指令に従って自国の規制に取り入れることとなる。表 3.8 に EU の指令に示された有害及び非有害廃棄物の処分施設の遮水層の基準を示す。底部の遮水層の構成は、日本や米国と類似している。一方、キャッピングとして遮水層や排水層を設置することを推奨している点が日本や EU になく、特徴的と考えられる。

3.4. 遮水層構造への要件のまとめ

廃棄物処理法、特措法、原子炉等規制法、海外の一般・有害廃棄物の処分場における遮水層の構造に関する技術基準等を調査した。

原子炉等規制法のトレンチ処分施設では、遮水層の構造に関する規定はない。廃棄物処理法の管理型処分場、特措法で規定される処分場の遮水層の構造は、以下のように示されている。

- ✓ 地下水等の公共水の汚染を防止の措置を取ることを規定しており、廃棄物処理法の管理型施設では、遮水シート 1 層ともう 1 層の低透水層または遮水シートを組み合わせた遮水層の構造を示して設置を義務付けている。(廃棄物処理法の技術基準省令に定められた (ア) ~ (ウ) の遮水工)
- ✓ 遮水層の耐候性、荷重及び応力からの保護、地盤からの保護
- ✓ 遮水層が損壊した恐れのある場合における修復
- ✓ 浸出水集排水設備の設置

アメリカやヨーロッパにおける一般・産業廃棄物の処分場における底部の遮水層は、日本と同様に遮水シートと粘土層 (例えば技術基準省令 (ア)) の組み合わせであった。一方、アメリカ、ヨーロッパ共に排水層に関する基準が示されており、ヨーロッパでは、キャッピングに関する基準が示されている。

施設の管理期間について、日本の放射性廃棄物のトレンチ処分では、約 50 年である。廃棄物処理法における管理型処分では、2 年以上にわたり、保有水等の水質が排水基準等に適合していることが廃止の基準となっている。したがって、管理型処分では数 10 年以上の長期間の管理を必ずしも必要としない。特措法に関しては、管理期間は明記されていない。中間貯蔵施設では、30 年程度の貯蔵となると推測される。アメリカでは、閉鎖後管理が 30 年間と示されており、EU の指令では、管理期間としては示されていないが、処分施設のコスト評価に閉鎖後の管理を少なくとも 30 年分を含めることが示されている。

表 3.1 廃棄物処理法の技術基準省令*1における管理型処分場の技術基準（処分施設の構造に係る技術基準を抜粋）		
* 埋立地にみだりに人が立ち入ることを防止する囲いを設けること。（第一条 1 項一号）	* 埋立地の周囲には、地表水が埋立地へ流入することを防止できる開渠等が設けられていること。（第一条一項六号）	
* 廃棄物の流出を防止するための以下の要件を備えた擁壁等の設置（同条項四号）	* 囲いはみだりに人が埋立地に立ち入るのを防止することができようようにしておくこと。（第一条二項五号）	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 自重、地震力等に対する構造耐力上安全であること。 ➢ 腐食防止のための措置が取られていること。
* 埋立地からの浸出液による地下水等の汚染防止のための以下の措置が取られていること。（同条項五号）	* 擁壁等が損壊するおそれがあると認められる場合には、速やかに防止のための必要な措置を講ずること。（同条項七号）	
➢ 遮水層を有すること（同条項第五号イ（1）詳細については、表 3.2 を参照）	* 遮水工が損傷する可能性がある場合、廃棄物の定置前に遮水工の表面を砂等で覆う。（同条項八号）	
➢ 基礎地盤は、必要な強度を有し、平らな状態であること。（同条項第五号イ（2））	* 遮水工の遮水効果が低下する可能性がある場合、回復する措置を取る。（同条項九号）	
➢ 遮水層の表面に遮光性の不織布の設置。（同条項第五号イ（3））	* 防凍のための措置の維持（同条項十四号）	
➢ 地下水により遮水工が損傷する恐れのある場合、地下水集排水設備の設置（同条項第五号ハ）	* 開渠等の機能の維持。開渠に堆積した土砂等の除去。	
➢ 保有水等集排水設備の設置。または雨水が入らない措置。（同条項第五号ニ）	* 通気装置の設置。（同条項十六号）	
➢ 保有水等集排水設備が凍結により損壊する恐れのある場合、防凍のための措置（同条項第五号ト）	* 埋立処分が終了した埋立地は、厚さが 50 cm 以上の土砂による覆いをすること。上部の遮水層に不織布を敷設し表面を土砂で覆う。（同条項十七号）	
	* 閉鎖した埋立地の覆いの損壊を防止するための措置（同条項十八号）	

*1：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令

表 3.2 管理型処分場における遮水層構造の基準*1

<p>第一条第1項第五号イ(1) 次のいずれかかの要件を備えた遮水層又はこれらと同等以上の効力を有する遮水層を有すること。 (一般廃棄物の最終処分場と産業廃棄物の管理型処分場に適用)</p>		
<p>(ア) 厚さが0.5m以上であり、かつ、透水係数が10nm/s ($1 \times 10^{-8}\text{m/s}$)以下である粘土その他の材料の層の表面に遮水シートが敷設されていること。</p>	<p>(イ) 厚さが0.05m以上であり、かつ、透水係数が1nm/s以下 ($1 \times 10^{-9}\text{m/s}$)であるアスファルト・コンクリートの層の表面に遮水シートが敷設されていること。</p>	<p>(ウ) 不織布等の表面に二重の遮水シート(二重の遮水シートの間に、双方のシートが同時に損傷することを防止できる不織布等が設けられているものに限る)が敷設されていること。</p>
<p>2. 基礎地盤は、埋め立てる産業廃棄物の荷重等の負荷による遮水層の損傷を防止するために必要な強度を有し、かつ、遮水層の損傷を防止することができる平らな状態であること。</p>		
<p>3. 遮水層の表面を、日射によるその劣化を防止するために必要な遮光の効力を有する不織布又はこれと同等以上の遮光の効力及び耐久性を有する物で覆うこと。</p>		
<p>4. 埋立地には、保有水等を有効に集め、速やかに排出することができる堅固で耐久力を有する構造の管渠その他の集排水設備(保有水等集排水設備)を設けること。</p>		

*1：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令

表 3.3 特措法及び廃棄物関係ガイドラインで定義されている廃棄物の種類*1

用語	説明
対策地域内廃棄物	汚染廃棄物対策地域内にある廃棄物（当該廃棄物が、当該汚染廃棄物対策地域外へ搬出された場合にあっては、当該搬出された廃棄物を含む。また、環境省令で定めるものを除く。）（特措法第 13 条第 1 項）
指定廃棄物	水道施設、公共下水道・流域下水道、工業用水道施設、特定一般廃棄物処理施設又は特定産業廃棄物処理施設である焼却施設及び集落排水施設から生じた廃棄物であって、当該施設の管理者等の調査の結果に基づき、事故由来放射性物質による汚染状態が環境省令で定める要件に適合しないものとして、環境大臣が指定するもの。また、これ以外の廃棄物であっても、その廃棄物の占有者が調査した結果、環境省令で定める要件に適合しないと料される場合には、環境大臣に指定廃棄物として指定することを申請することができる。（特措法第 16 条～第 18 条） また、指定廃棄物が放射能の減衰により 8,000Bq/kg 以下となった場合、環境大臣は、一時保管者や解除後の処理責任者（市町村 又は排出事業者）と協議した上で、指定を解除することができる。（特措法施行規則 14 条の 2）
特定廃棄物	対策地域内廃棄物又は指定廃棄物（特措法第 20 条）
基準適合特定廃棄物	特定廃棄物のうち、Cs-137 と Cs-134 についての放射能濃度の合計が 8,000Bq/kg 以下と認められるもの。
特定一般廃棄物・特定産業廃棄物	対策地域内廃棄物及び指定廃棄物のいずれにも該当しない廃棄物には廃棄物処理法が適用されるが、廃棄物処理法が適用される廃棄物であって、放射性 Cs により汚染され、又はそのおそれがあるものとして、特措法第 23 条において定めるもの
汚染廃棄物等	対策地域内廃棄物、指定廃棄物又は除去土壌（特措法第 46 条）
除去土壌	除染特別地域又は除染実施区域に係る土壌等の除染等の措置に伴い生じた土壌（特措法第 2 条第 4 項）
除去土壌等	除去土壌及び土壌等の除染等の措置に伴い生じた廃棄物（特措法第 31 条第 1 項）
除染廃棄物	廃棄物関係ガイドラインにおいて、特措法第 41 条第 4 項に定める除染特別地域内又は除染実施区域内の土地等に係る土壌等の除染等の措置に伴い生じた廃棄物（特定廃棄物を除く。）を指す。

*1：本報告書に關係する廃棄物について示している。

表 3.4 廃棄物処理法及び特措法による埋立処分基準の概要*1

		廃棄物処理法による基準	特措法による基準（上乘せ）
埋立処分基準	表示等	周囲の囲い 一般廃棄物又は産業廃棄物の処分の場所であることを表示	特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物の処分の場所であることを表示
	方法	地中にある空間を利用する処分の方法により行ってはならない。	—
		—	廃棄物層の下に厚さ 0.5m 以上の土壌を敷設（土壌の層が 2 層以上ある場合はその合計）
		（熱しゃく減量 15%以下に焼却したもの等を除き）廃棄物の一層の厚さが 3m以下で一層ごとに 0.5m の覆土を（土砂）敷設	（熱しゃく減量 15%以下に焼却したもの等について）廃棄物の一層の厚さが 3m 以下で一層ごとに 0.5m の覆土を敷設
		（石綿含有廃棄物の場合） 一定の場所で分散しないように埋立て飛散流出しないように、表面を土砂で覆う等必要な措置を講ずる。	（石綿含有廃棄物に限らず） 一定の場所で分散しないように埋立て
		（汚泥等の場合） あらかじめ焼却又は熱分解を行う、含水率 85%以下にする等の措置を行うこと。	—
		（ばいじん、感染性廃棄物等の場合） あらかじめ環境大臣の定める基準に適合すること。	—
		（ばいじんの場合） ばいじん等が大気中に飛散しないように、あらかじめ、水分を添加し、固型化し、こん包する等必要な措置を講ずること。 埋め立てるばいじん等が埋立地の外に飛散し、及び流出しないように、その表面を土砂で覆う等必要な措置を講ずること。	（ばいじんの場合） 埋め立てたばいじんに雨水が浸入しないように必要な措置を講ずること。
	設備、管理等	浸出液による汚染の防止設備の設置（遮水工、集排水設備、浸出液処理設備、地表水の流入防止）その他の措置（放流水及び周縁地下水の水質維持）	—
		埋立地には、ねずみが生息し、及び蚊、はえその他の害虫が発生しないようにすること。	—
埋立終了時の措置	表面を土砂等で覆い開口部を閉鎖	—	

*1：維持管理基準は割愛した。

表 3.5 特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋立て処分に関する技術的な基準の概要

技術的な基準	基準に対する対応
下部土壌層の設置	Cs は土壌に吸着しやすいことから、特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物を埋め立てる場合においては、放射性 Cs の埋立地周辺への流出を防止するために、廃棄物の下層におおむね 0.5m 以上の土壌層を敷設する必要がある。設置する土の種類には、Cs を吸着する能力があり、かつ、適当な透水性を有する土壌として細粒分含有率が 5%～15%の土壌が推奨されている。
分散の禁止	放射性 Cs 管理の観点から、最終処分場内の一定の場所において、特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物が分散しないように埋立てを行う。これに加えて、埋立位置を管理しやすくするため他の廃棄物と区分し、集積させて埋め立てることが効果的である。そのため、処分場の一面に埋立区画を設け、他の廃棄物との境を土壌で覆って仕切ることが考えられる。この場合、仕切りの土壌としては下部土壌層に用いる土壌と同様に細粒分含有率 5%～15%のもの等を用いる。
層状埋立	溶出した Cs の移動を抑える観点から、廃棄物の性状に関わらず、廃棄物の一層の厚さを概ね 3m以下とし、一層ごとに厚さが概ね 0.5m の土壌で覆う。既に廃棄物処理法の処理基準においては、一部の一般廃棄物及び腐敗性の産業廃棄物について土砂による層状埋立ての規定があるが、特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物の埋立処分に当たっては、土壌を用いて層状埋立てをすることが重要である。埋立層の安定性を向上させ、側面からの水の浸透や Cs が溶出した場合の流出を抑制するために、埋め立てる廃棄物を覆う土壌の幅は、埋立層(廃棄物)の端部から横に 3m以上広げた範囲とすることが考えられる。なお、用いる土壌については、下部土壌層に用いる土壌と同様に、細粒分含有率 5%～15%のもの等を用いる。
ばいじんの埋立処分	<p>ばいじんには Cs の溶出率が高いものがあることから、特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物であるばいじんの埋立処分を行う場合には、雨水と接触して Cs が流出しないよう雨水浸入防止のために埋め立てたばいじんの上面を不透水層(透水性の低い粘性土壌層や遮水シート等の不透水層)で覆う等の措置を講じる必要がある。</p> <p>また、降雨時の表流水を埋立区画の外に排除させるために、不透水層の表面に土壌等で勾配(5%程度。万一沈下した場合であっても2%程度の勾配を確保)を設けることが、効果的である。</p> <p>ばいじんの埋立終了時に用いる不透水層としては、ベントナイト等の粘土層又は合成樹脂系やベントナイト系の遮水シート、水密性アスファルト等が考えられる。</p> <p>粘土層としてベントナイト混合土を使用する場合には、ベントナイト配合率等の管理や十分な締め固めを行うなど、透水係数がおおむね $10^{-8}m/s$ となるよう施工する必要がある。また、合成樹脂系の遮水シートを敷設する場合には、突起物や重機の走行等によるシートの破損の可能性もあることから、不織布等の保護マットの設置や、土壌の敷設等によりシート保護のための措置を講ずる必要がある。さらには、遮水シートの繋ぎ部の接合(融着等)にも注意する必要がある。</p>

表 3.6 特定廃棄物の埋立処分基準の概要

	特措法による埋立基準 【第 26 条】					
	【第 1 項】 100,000Bq/kg を超えるもの	【第 2 項】 8,000~100,000Bq/kg のもの			【第 3 項】 基準適合特 定廃棄物	【第 4 項】基準 適合特定廃 棄 物であって、公 共の水域及び 地下水の汚染 を生じさせる おそれのない もの
		【第 3 号】 公 共の水域及び 地下水と遮断 されている場 所	【第 2 号】 公共の水域及び 地下水と遮断さ れている場所以 外の場所	【第 2 号ホ】 (溶出量が少 ないもの)		
表示等	特定廃棄物の処分の場所であることの表示、周囲に囲い 特定廃棄物の飛散・流出防止。悪臭、騒音又は振動による生活環境の補選上の支障の防止。					
構造等	環境大臣が定める外周仕切設備が設けられ、公共の水域及び地下水と遮断されていること	(遮断型相当)	(管理型相当)	(管理型相当)	(管理型相当)	(安定型相当)
埋立位置	一定の場所で、分散しないように埋め立てる。					
埋立物の前処理	特定廃棄物の種類に応じて前処理(破碎、焼却、固型化等)	同左	特定廃棄物の種類に応じて前処理(破碎、焼却等)セメントその他の結合材により固型化	特定廃棄物の種類に応じて前処理(破碎、焼却、固型化等)	同左	同左
下部土壌層	—	—	廃棄物層の下に、概ね厚さ 0.5m 以上の土壌層を敷設 加えて、不透水性土壌層を敷設	廃棄物層の下に、おおむね厚さ 0.5m 以上の土壌層を敷設	—	—
埋立物表面及び側面	—	—	不透水性土壌層を設置	—	—	—
層状埋立て	—	—	—	一層の厚さが概ね 3m 以下。一層ごとに、表面に不透水性土壌層を設置。	一層の厚さが概ね 3m 以下。一層ごとに、表面を概ね厚さ 0.5m の土壌で覆う。	—
特定ばいじんの埋立	—	—	—	—	雨水浸入防止措置	—
埋立物の収納	—	—	損傷しにくい容器に収納	—	—	—
埋立終了時の措置	放射線障害防止の効果を持った覆いにより開口部を閉鎖することその他の環境大臣が定める措置	環境大臣が定める要件を備えた覆いにより閉鎖することその他の環境大臣が定める措置	概ね厚さ 0.5m 以上の土壌による覆い等で開口部を閉鎖することその他の環境大臣が定める措置。雨水を有効に排水できる勾配を付する等。	同左	概ね厚さ 0.5m 以上の土壌による覆い等で開口部を閉鎖	

表 3.7 土壤貯蔵施設 I 型と II 型にかかる指針案の比較 (1/2)

土壤貯蔵施設 (I 型) に係る指針	土壤貯蔵施設 (II 型) に係る指針	参照条文
第 3 条 除去土壤 (事故由来の Cs-134 と Cs-137 の放射能濃度の合計が 8,000Bq/kg 以下) ただし、地下水等の汚染を生じさせるおそれがあるものについては、II 型の指針が適用される。	第 4 条 特定廃棄物等 (事故由来 Cs134 及び Cs137 の合計が 10 ⁵ Bq/kg 以下、かつ、放射性物質の溶出量が少ないもの) 並びに除去土壤の貯蔵。	
一イ 除去土壤が飛散し、及び流出しないようにすること。	イ 除去土壤又は特定廃棄物等が飛散し、及び流出しないようにすること。	特 26①一イ ※廃 1 四 イ
ロ 貯蔵に伴う悪臭、騒音又は振動に対し、必要な措置を講ずること。	ロ 貯蔵に伴う悪臭、騒音又は振動に対し、必要な措置を講ずること。	特 26①一ロ
ハ 周囲の囲いの設置。除去土壤の貯蔵場所である表示。	ハ 周囲の囲いの設置。除去土壤の貯蔵場所である表示。	特 26①一ハ
ニ 構造耐力上安全であること。施設の法面勾配は「道路土工」も準拠。	ニ 構造耐力上安全であること。施設の法面勾配は「道路土工」も準拠。	※廃 1①四イ
ホ 貯蔵物、地下水等の性状に応じた腐食防止のための措置。	ホ 貯蔵物、地下水等の性状に応じた腐食防止のための措置。	※廃 1①四ロ
ヘ 当該施設からの直接及びスカイシャイン線による敷地周辺の線量に対し、遮蔽等の措置。	ヘ 当該施設からの直接及びスカイシャイン線による敷地周辺の線量に対し、遮蔽等の措置。	※二構 8①
—	ト 特定廃棄物等の貯蔵では、厚さが 50 cm 以上の土壤層を下部に敷設する。	特 26②二イ
—	チ 特定廃棄物等の貯蔵は一定の貯蔵地内とし、分散しないように行う。	特 26①一ホ
	リ (2) 貯蔵する特定廃棄物等の厚さは、おおむね 3m 以下とし、一層ごとに、その表面に不透水性土壤層を設けること。	特 26②二ホ
二 イ (1) 貯蔵地が地下水位より低い場合、堅固で耐久力を有する構造の管渠等の集排水設備の設置。	二 イ (1) 廃棄物処理法のア、イ、ウに掲げる遮水層を設置すること。	特 26②四イ ※廃 1 五
	(2) 基礎地盤は、遮水層の損傷を防止するために必要な強度を有し、かつ、平らな状態であること。	
—	(3) 遮水層の表面を、劣化を防止するため、不織布等の遮光及び耐久力を有する物で覆うこと。	※廃 1①五ハ
	(4) 地下水により遮水工が損傷するおそれがある場合、堅固で耐久力を有する地下水集排水設備の設置	
	(5) 保有水等を堅固で耐久力を有する管渠等の保有水等集排水設備を設置する。	

特：特措法施行規則

※廃：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令

※二構：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

表 3.7 土壤貯蔵施設 I 型と II 型にかかる指針案の比較 (2/2)

土壤貯蔵施設 (I 型) に係る指針	土壤貯蔵施設 (II 型) に係る指針	参照条文
<p>四 除去土壤の埋立てを終了する場合には、厚さがおおむね 50 cm 以上の土壤による覆いにより開口部を閉鎖する。</p>	<p>四 除去土壤又は特定廃棄物等の埋立てを終了する場合 イ 厚さがおおむね 50 cm 以上の土壤による覆いにより開口部を閉鎖すること。 ロ 表面に不浸透性土壤層を設置した場合、雨水を有効に排水できる勾配を付する等不浸透性土壤層の流出を防止する措置を講ずること。</p>	<p>特 26②七</p>
<p>六 通気装置を設けて貯蔵地から発生するガスを排除すること。</p>	<p>六 通気装置を設けて貯蔵地から発生するガスを排除すること。</p>	<p>※廃 1②十六</p>

特：特措法施行規則

※廃：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令

※二構：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

表 3.8 米国と EU における処分場の設計基準

	米国 (40 CFR part 258)	米国 (40 CFR part 264)	EU (EC Directive 1999/31/EC)		日本 (廃棄物処理法)
廃棄物種類	一般廃棄物	有害廃棄物	非有害廃棄物	有害廃棄物	管理型処分対象 廃棄物
廃棄物層 上部	規定なし	規定なし	ガス排出層 難透水土層 排水層>0.5m 上部覆土>1m	人工遮水層 排水層≧0.5m 底部及び側部の難透水土層：透水係数 10 ⁻⁹ m/s 以下、厚さ 1m 以上 (相当する人工的な地盤バリアでもよい。ただし、厚さ 0.5m 以上)	土砂等の覆い≧0.5m
廃棄物層 底部	上層に 0.76mm 以上の遮水シート の設置。(HDPE の場合は、1.5mm 以上) 下層に透水係数 10 ⁻⁹ m/s 未満で厚さ 0.6m の粘土層の設置。 粘土層の直上に直接かつ均等に遮水シートを設置しなければならぬ。	上層にジオメンプレン (遮水シート) 下層に複合シート 上：ジオメンプレン (遮水シート) 下：圧縮粘土 (透水係数 10 ⁻⁹ m/s、厚さ 0.91m 以上)	人工遮水層 排水層≧0.5m 底部及び側部の難透水土層：透水係数 10 ⁻⁹ m/s 以下、厚さ 1m 以上 (相当する人工的な地盤バリアでもよい。ただし、厚さ 0.5m 以上)	人工遮水層 排水層≧0.5m 底部及び側部の難透水土層：透水係数 10 ⁻⁹ m/s 以下、厚さ 1m 以上 (相当する人工的な地盤バリアでもよい。ただし、厚さ 0.5m 以上)	(例)二重の遮水シート上部、間部、下部に不織布、平らな基礎地盤
排水層、集水 設備	浸出水集排水システムの設置。 排水層は、シートの上に溜まる浸出水層の高さが 0.3m 以下となるように設計・設置。	排水層に 1%程度以上の傾斜をつける。 上層ライナーの上部に設置する。シートの上に溜まる浸出水層の高さが 0.3m 以下となるように設計・設置。 また、上下層のライナーの間に多重集排水システムとして設置することもあり、この場合、漏出検知システムとなる。 排水層は、透水係数が 10 ⁻⁴ m/s 以上、厚さ 0.3m 以上の粒状排水材、透水係数が 3×10 ⁻⁵ m ² /s 以上のジオシンセティックス又はジオネット で構成する。	浸出水集排水システムの設置	浸出水集排水システムの設置	保有水集排水設備、調整池

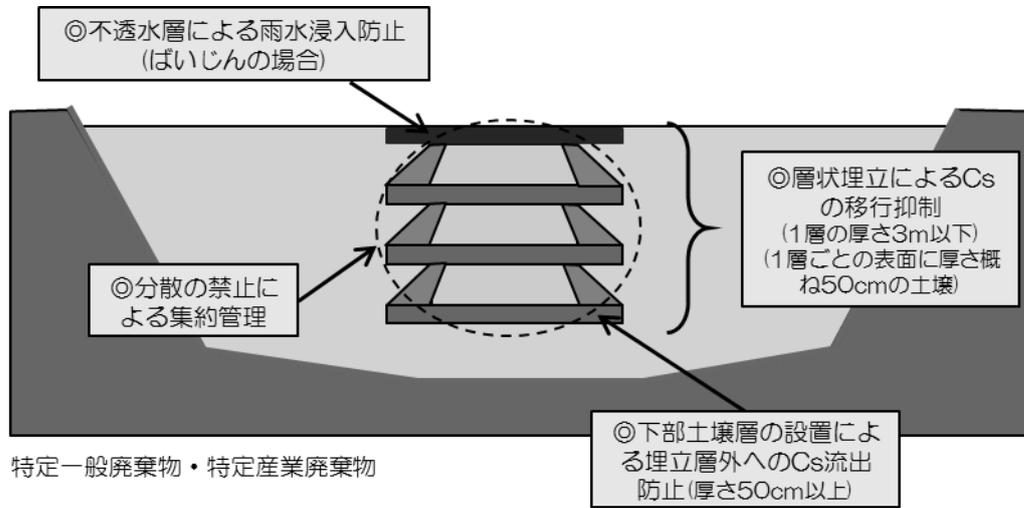


図 3.1 特定一般廃棄物及び特定産業廃棄物の埋め立て処分にかかる基準の概要
(廃棄物関係ガイドライン²⁾に示された図を模倣して作成)

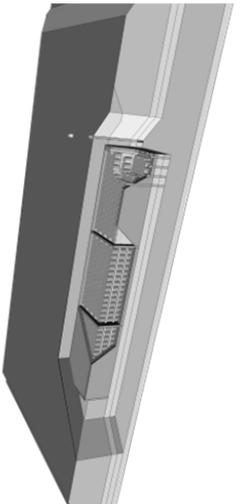
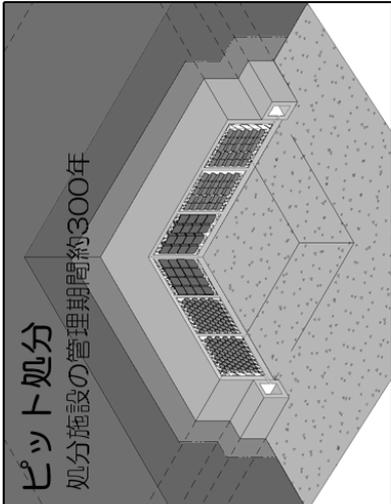
適用対象施設		廃棄物埋設施設の技術上の基準（第二種廃棄物埋設規則）
<p>トレンチ処分 処分施設の管理期間約50年</p> 	<p>ピット処分、トレンチ処分共通の基準</p>	<p>申請書に記載した放射性物質の種類ごとの総放射エネルギーを越えないこと。</p> <p>埋設開始前においては、埋設を行うおとす区画にたまつている水を排除し、埋設時には、当該場所に雨水等が浸入することを防止する措置を講ずること。</p> <p>コンクリート等廃棄物を埋設する場合には、飛散防止のための措置を講ずること。</p> <p>廃棄物埋設地は、土砂等を充てんすることにより、有害な空気が残らないように措置すること。</p> <p>爆発性の物質、他の物質を著しく腐食させる物質その他の危険物を埋設しないこと。</p> <p>埋設物及び埋設設備が容易に露出しないよう土砂等で覆うこと。</p>
<p>ピット処分 処分施設の管理期間約300年</p> 	<p>ピット処分特有の基準</p>	<p>放射線障害防止のため、原子力規制委員会の定める方法により施工すること。</p> <p>外周仕切設備は、次に掲げる要件を備えていること。 イ 自重、土圧、地震力等に対して構造耐力上安全であること。 ロ 地表水、地下水及び土壌の性状に応じた有効な腐食防止のための措置が講じられていること。</p> <p>内部仕切り設備により1区画の面積<math>50\text{m}^2</math>、又は容量<math>250\text{m}^3</math>に区画。</p> <p>漏えいを防止するために必要な措置を講ずること。</p> <p>埋設が終了した区画には、土砂等で覆う前に速やかに、放射線障害防止のため原子力規制委員会の定める方法により施工された覆いをすること。</p>

図 3.2 低レベル放射性廃棄物のピット処分及びトレンチ処分の技術基準

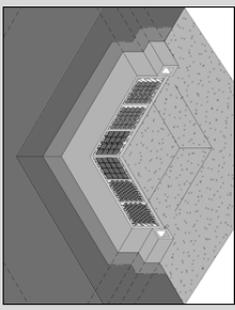
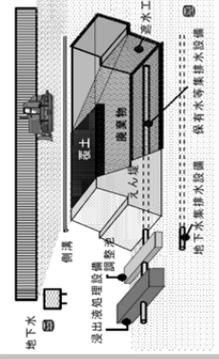
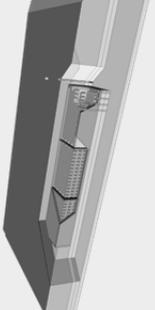
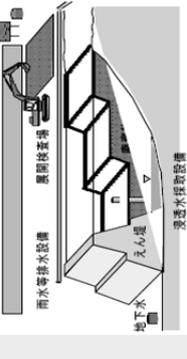


トレンチ施設の埋設区画と雨水浸入防止用テント



雨水浸入防止用テントを設置した埋設区画における廃棄物
定置作業

図 3.3 原子力機構のトレンチ処分施設及び雨水浸入防止用テント

研究施設等廃棄物の埋設施設の概念設計(原子炉等規制法等)		埋設対象物		廃棄物処理法	
埋設方式	放射能濃度	種類、性状及び容器形状	管理型処分場(産業廃棄物)	安定型処分場(産業廃棄物)	
<p>ピット</p> <p>処分施設の管理期間約300年</p> 	<p>トレンチ処分の濃度上限値以上でピット処分の濃度上限値以下のもの【^{137}Cs: 10万Bq/kg以上、100GBq/kg以下】</p>	<p>コンクリート等廃棄物</p> <p>1m³角型金属容器</p> <p>金属等</p> <p>廃棄物</p> <p>2000ドラム缶</p> <p>均質・均一固化体</p>		<p>無害化・安定化した特管物(*1)を含む安定五品目以外の廃棄物</p>	
<p>トレンチ</p> <p>処分施設の管理期間約50年</p> 	<p>トレンチ処分の濃度上限値を超えるもの【^{137}Cs: 10万Bq/kg以下】</p>	<p>コンクリート等廃棄物</p> <p>1m³簡易袋状容器</p> <p>コンクリート等</p> <p>1m³角型金属容器</p> <p>金属等</p>		<p>安定五品目(*2)</p>	

(*1) 化学有害物の溶出を基準値以下に抑えた特別管理産業廃棄物
 (*2) 廃プラスチック類、ゴム屑、金属屑、ガラス屑、コンクリート屑及び陶磁器屑、がれき類

図 3.4 原子炉等規制法と廃棄物処理法の処分場の比較

4. 遮水層の損傷事例調査及び設計対策

4.1. 遮水システムの損傷に関するアンケート調査の方法

既存の一般及び管理型最終処分場における遮水システムの損傷事例に関するアンケート調査を行った。調査結果を集計し、損傷に係る要因の明確化とのそれらの要因への対策を分析することで本研究の遮水システムの設計に反映していく。アンケート調査は、基本的に平成 10 年の廃棄物処理法改訂以降の全国における管理型処分場を中心に全国 573 箇所の処分場に対して行った。アンケート調査の主な内容は以下の通りである。

* アンケート調査の主な内容

◆ 最終処分場の種類

広さ、運転年数、遮水層の仕様（層の構成、種類）

◆ 最終処分場不具合事例について

不具合事例の有無、部位、数、大きさ、発生時期、損傷の様子、損傷の原因、補修方法

4.2. アンケートの結果

全国 573 箇所の処分場に対してアンケートを行い、回答数は 280（回答率は 48.9%）、うち損傷事例があると回答があった件数は 57 件であった。回答数のうち損傷事例があると回答した割合（以下、「損傷率」という）は 20.4%であった。以下にアンケート結果を示す。

* 回答結果

◆ アンケート送付数	573
◆ 回答数	280
◆ 回答率	48.9%
◆ シート損傷件数	57
◆ 損傷率	20.4%

廃棄物処理法が改正された平成 10 年以降の処分場 134 件について、表 3.2 に示す廃棄物処理法の技術基準省令に定められた遮水層（ア）、（イ）、（ウ）の構造ごとに整理した結果、図 4.1 に示すとおり、99 箇所が（ウ）の構造を採用しており、74%と最も多い結果となった。これより、主に（ウ）の構造を基に遮水層構造の設計検討を行った。

表 4.1 にアンケート結果による損傷要因とその損傷発生率の整理結果を示す。損傷要因については、重機作業によるもの、埋立作業によるもの、処分場の地盤すべり・沈下によるもの、遮水シートの接合部不良によるもの、鳥・小動物の侵入によるもの、施工者の注意不足によるものが主であることが調査により明らかとなった。

4.3. 遮水層の損傷への抵抗性の検討

図 4.2 に遮水層に対する主な損傷要因からの影響低減の観点から、遮水層（ウ）の構造

に対して①外部の衝撃からの保護層、②損傷に対して修復機能を持つ層、③地盤への応力の分散など、基礎地盤の補強となるような層を取り入れたモデルを検討した。表 4.2 に各損傷要因に対して、①から③の設計対策の効果を整理した結果を示す。①から③の設計対策を取ることで遮水層の各損傷要因に対して抵抗性が向上すると定性的に判断できると考えられる。

表 4.1 管理型処分場における遮水層構造の損傷要因と発生率
(網掛け部分は、主な損傷要因を示す。)

損傷要因	損傷件数*1	損傷発生率*2
重機	27	9.6%
埋立作業	19	6.8%
地盤すべり・沈下	8	2.9%
接合部不良	6	2.1%
施工者注意不足	5	1.8%
雪害	4	1.4%
紫外線	2	0.7%
木草	2	0.7%
水圧	2	0.7%
廃棄物重量	1	0.4%
台風	1	0.4%
地震	1	0.4%

*1: 1つの処分場で複数の損傷要因が報告された場合は全ての件数を計上している。

*2: 損傷発生率= 損傷件数 ÷ 回答があった処分場の件数

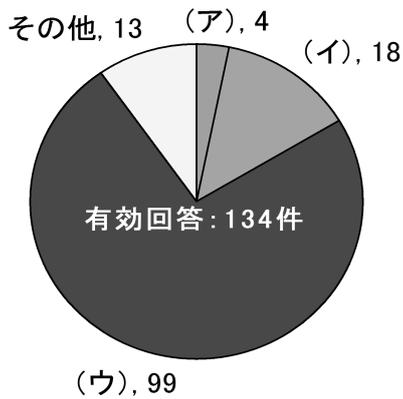
表 4.2 遮水構造の主な損傷要因に対する設計対策の効果

損傷要因	損傷件数		対策とその効果*1
	件数	発生率	
重機	27	9.6%	①外力に備え、最上層に耐圧部材を設置する。 ②遮水層破損時のバックアップとして自己修復層を設置する。 ③荷重等外力の分散を目的に地盤補強シートを設置する。
埋立作業	19	6.8%	①外力に備え、最上層に耐圧部材を設置する。 ②遮水層破損時のバックアップとして自己修復層を設置する。 ③荷重等外力の分散を目的に地盤補強シートを設置する。
地盤すべり・沈下	8	2.9%	③不同沈下、基礎部せん断破壊に備え、地盤補強保護シートを設置する。 (法面地盤すべりに備え、別途法面工法の検討が必要。)
接合部不良	6	2.1%	②遮水層破損時のバックアップとして自己修復層を設置する。 ③荷重等外力の分散を目的に地盤補強シートを設置する。
施工者注意不足	4	1.4%	②遮水層破損時のバックアップとして自己修復層を設置する。 ③荷重等外力の分散を目的に地盤補強シートを設置する。

*1: 各要因に対して対策が共通となるため、表全体で数字を合わせている。

廃棄物処理法に定められた遮水層の分類*1		
(ア) 厚さが 0.5m 以上であり、かつ、透水係数が 10nm/s ($1 \times 10^{-8} \text{m/s}$) 以下である粘土その他の材料の層の表面に遮水シートが敷設されていること	(イ) 厚さが 0.05m 以上であり、かつ、透水係数が 1nm/s ($1 \times 10^{-9} \text{m/s}$) 以下であるアスファルト・コンクリート層の表面に遮水シートが敷設されていること	(ウ) 不織布等の表面に二重の遮水シート(二重の遮水シートの間に、双方のシートが同時に損傷することを防止できる不織布等が設けられているものに限る)が敷設されていること

*1：遮水工の分類結果は、廃棄物処理法が上記内容に改訂された平成 10 年以降を分類



遮水層構造の分類ごとの件数割合

廃棄物処理法 (ウ) の遮水層構造

図 4.1 アンケート結果における遮水層構造の分類ごとの件数

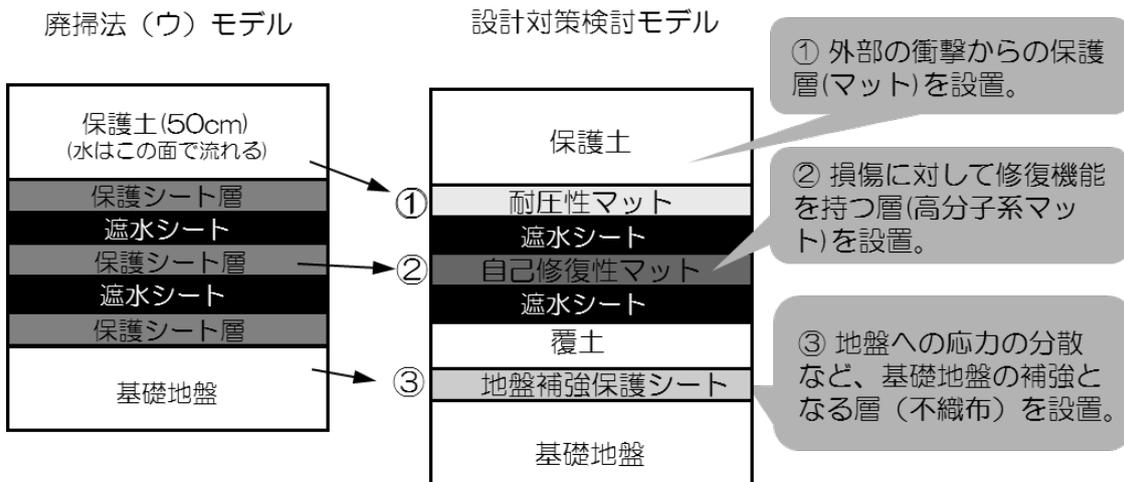


図 4.2 損傷に対する設計対策

5. 遮水層の基本構造の設計

国内では、廃棄物処理法の技術基準省令において、遮水層の構造が規定されており、その構造は、以下の通りである。

- (ア) 上層に遮水シート、下層に厚さが 0.5m 以上で透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下である粘土その他の材料の層
- (イ) 上層に遮水シート、下層に厚さが 0.5m 以上で透水係数が $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ であるアスファルト・コンクリートの層
- (ウ) 不織布等の表面に二重の遮水シート（二重の遮水シートの間に、双方のシートが同時に損傷することを防止できる不織布等が設けられているものに限る）が敷設されていること。

海外の一般・産業廃棄物の処分施設の技術基準を見ると、EU、アメリカともに基本は粘土層または粘土層と遮水シートの組み合わせと考えられ、日本の（ア）又は（ウ）に類似した構造と考えられる。また、EU、アメリカともに、日本の廃棄物処理法では基準となっていない遮水層の上層に排水層を設けることが規定されている。したがって、海外の基準を参考に以下の検討を行う。

- 遮水シートの上層に浸入水を排水する排水層の検討

次に、4章の遮水層の損傷事例調査の結果、国内の（ア）から（ウ）の構造のうち、（ウ）の採用例が多いことがわかった。その（ウ）の遮水層において、損傷の主な原因は、施工及び埋設時の重機によるものや埋設作業によるものである。また、遮水シートの接合部不良による損傷や地盤の滑り・沈下によって遮水シートが損傷する事例が見られている。

このような損傷に対する設計対策の検討結果から、遮水層に対して以下の設計対策を検討する。

- 重機等による外部からの荷重や衝撃に対する保護層（耐圧層）
- 重機等により遮水層が損傷した場合、その影響の低減を図る自己修復層
- 地盤の滑り・沈下による基礎地盤の変形による不均等な応力からの保護対策（地盤補強保護層）

また、放射性廃棄物のトレンチ処分施設は施設の管理期間は 50 年であり、特措法における汚染廃棄物の処分施設では、放射性 Cs の半減期が約 30 年であることから、施設の管理期間が数 10 年以上の長期となることも考えられる。そのような管理期間に浸透水が遮水層を少量ずつ浸透し、浸出水が地下水へ漏出することに伴って放射性物質が地下水へ漏出することが考えられる。このような放射性物質の地下水への漏出の長期的な抑制の観点から、以下の設計対策を検討する。

- 遮水工の劣化、損傷に備え、浸透水量を抑制する低透水層の検討。アメリカの基準を参考に遮水シートの直下に低透水層を設置する。
- 放射性物質が浸透水に伴って移行することを抑制する核種吸着層の検討

以上より、廃棄物処理法における遮水層構造を基に、外部からの衝撃に対する保護、損傷に対する修復性の構造、浸出水の漏出に対する低透水性の構造及び放射性物質の漏出に対して吸着による移行抑制の構造を考慮した遮水層構造について検討する。図 5.1 に廃棄物処理法に示された遮水層構造と本報告書における検討モデルを示す。本検討では、検討モデルにおける耐圧層と排水層、自己修復層と低透水層は既存の製品を考慮し、それぞれ一つの層で検討することとした。

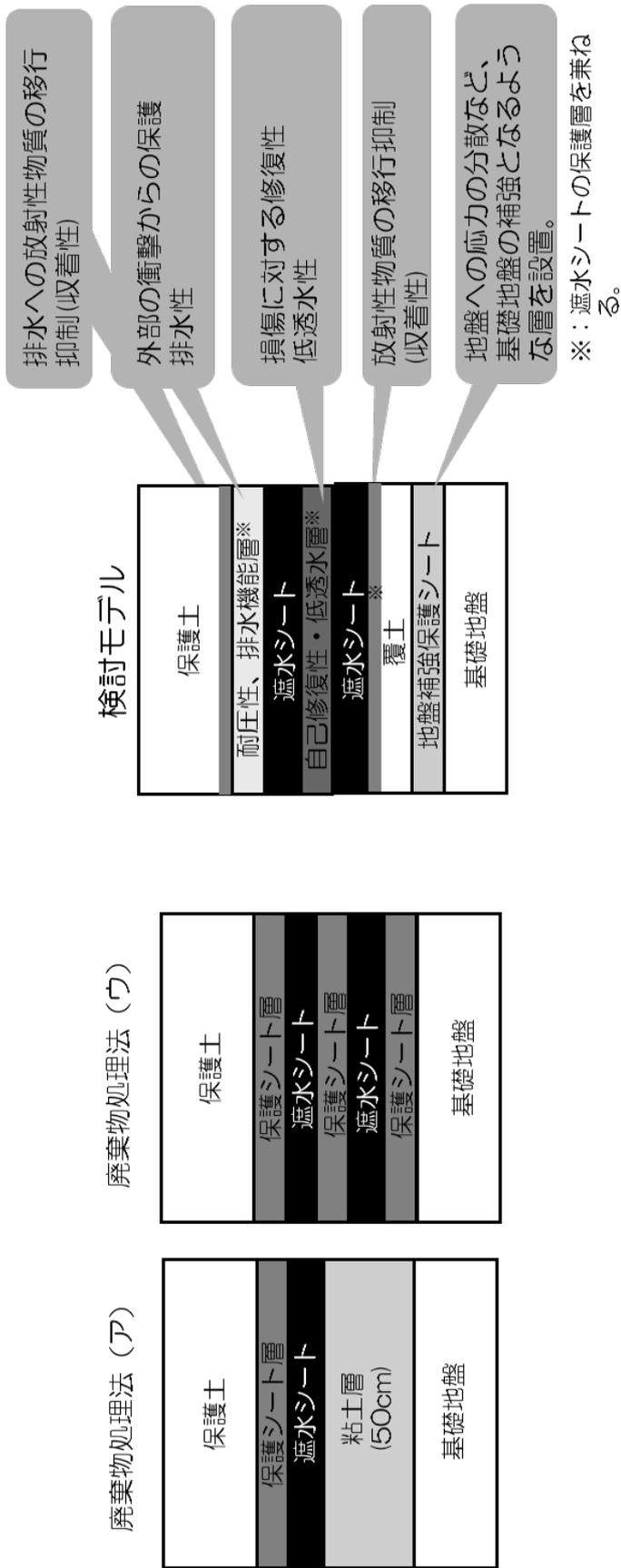


図 5.1 遮水層の設計検討モデル

6. 遮水層の性能評価

設計項目に対応する層を設定し、以下の評価及び感度解析を実施した。感度解析の結果に基づき、各層の有効性を評価するとともに各層の機能の特徴を分析し、遮水層の透水係数や厚さ等の設計にフィードバックした。

- ① 損傷に対する設計対策に関する仕様の検討
損傷に対する個々の設計対策の仕様を設定する。
- ② 遮水層のケーススタディ
遮水層が損傷した場合を想定し、廃棄物処理法の遮水層モデル、設計した遮水層モデルを用いて、遮水層のケーススタディを実施し、浸出水量の低減に有効な層の設定を検討した。
併せて、各層のパラメータスタディを実施し、各層の機能の特徴を把握した。
- ③ Cs 収着層のパラメータスタディ
除染廃棄物の処分及び中間貯蔵施設の場合を例にとり、Cs 収着層を設置した場合、移行抑制機能のパラメータスタディを実施した。

6.1. 遮水層の損傷に対する仕様の検討

損傷に対する個々の設計対策で設置した層の機械的な仕様を検討した。表 6.1.1 に設計対策で設置した層の機械的特性に関する仕様を示す。

- 1) 耐圧性マット（耐圧排水層）
日本遮水工協会において基準は定められてない。一方、保護シートでは貫入抵抗について貫入強度 500N という基準が定められているため、耐圧という観点から 500N を仕様として記載する。引張強度、耐圧性の値については、一般・産業廃棄物処分場で使われている耐圧性マットのカタログ値を示す。
- 2) 自己修復性マット
自己修復性のマットとしては、高分子系材料やベントナイトのマットが考えられる。
自己修復機能に関しては、遮水層の損傷の程度が様々であるため、有効性の基準を決めることは困難であり、本報告では自己修復機能を有する定性的な記載とし、具体的な機能の仕様を決めないこととした。
重量について、高分子系材料のマットの製品カタログ値は、1250g/m² が示されている。一方、遮水シートでは、1.5mm 厚さ×幅 1200mm×長さ 15m で 2,000g/m² 程度であり、この重さは、作業員 1～2 人で運搬から敷設作業ができる目安となっている。この遮水シートの作業性を考慮すると、2,000g/m² 以下が望ましいと考えられ、仕様として設定した。

3) 地盤補強保護シート

現在、仮置き場等では、スパンボンド不織布熱圧着タイプのシートが使用されている。ただし、本来軟弱地盤対策では、土質や荷重条件等にて個別の設計検討が必要であり、引張強度は示さない。

4) 保護シート

検討モデルでは、耐圧性マット、自己修復層及び Cs 吸着マットが遮水シートの保護シートの役割を果たすが、Cs 吸着を考慮しない場合は、遮水シートの保護として、保護シートが必要である。その場合の保護シートの仕様について示す。これまで日本遮水工協会の基準は、貫入強度 500N 以上とされていたが、現在、日本遮水工協会が提案している「中間貯蔵施設遮水工提案 平成 27 年 10 月」では、貫入抵抗 1,000N 以上が示されているため、この値を仕様として示す。

6.2. 遮水層のケーススタディ

付加機能型トレンチ処分施設に埋設された放射性物質及び環境影響物質（以下、「放射性物質等」という）は、処分施設内への浸入水が遮水層から基礎地盤に浸出することに伴って処分施設から漏出すると考えられる。図 6.2.1 に影響評価における水及び放射性物質等の流れの概念図を示す。したがって、遮水層からの浸出水量の低減効果を評価することが重要となる。

本項では、廃棄物処理法の遮水層モデル及び 5 章で設計した遮水層モデル等を設定して、遮水層が損傷した場合を想定し、遮水層を通過して基礎地盤へ浸出する水量のケーススタディを実施した。

6.2.1. 評価コード

浸出水量の評価にあたっては、米国の Risk Reduction Engineering Laboratory で開発された計算コード The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance model⁸⁾（以下、「HELP コード」という）を使用した。

HELP コードは、日単位の実気象データの統計情報を基に γ 分布及びフーリエ級数より関数化して、将来、数 10 年から 100 年間の日単位の降水量、気温及び日射量の疑似的な気象データ（以下、「擬似気象データという」）を作成することができ、気象条件（実気象データ又は疑似気象データのどちらも設定可能）及び一次元の土層モデルを用いて、日別／月別／年別／の表面流出、蒸発散量、横排水量及び浸出水量を計算するコードである。HELP コードの概念図を図 6.2.2 に示す。

また、HELP コードの特徴として、遮水シートからの水の漏洩を評価する事が可能となっている。遮水シートからの水の漏洩量の評価モデルは、遮水シートとその下部の土壌層等との接触状態、遮水シートの損傷状態及び遮水シートの上下層の透水性が考慮されている。遮水シートの傷のない箇所からは拡散により水が漏洩するモデルとなっており、傷の

ある箇所では、遮水シートと下層の設置状態（遮水シートと下層の間のすき間）から浸透水がすき間に広がり、下層の透水性に応じた移流により水が漏洩するモデルとなっている。

傷のある箇所からの漏洩モデルでは、 10^4 (m²) 当たりの傷の個数及び遮水シートと下層の設置状態を設定する必要がある。HELP コードの標準モデルとして定義されている 10^4 (m²) 当たりの傷の個数⁹⁾ 及び遮水シートの設置状態⁹⁾ を表 6.2.1、表 6.2.2 に示す。遮水シートの設置状態の概念図を図 6.2.3 に示す。

6.2.2. 遮水層モデル毎の浸透水量のケーススタディ

想定される遮水層構造を設定し、遮水層に一定の劣化がある場合を想定して、それぞれの遮水層から浸出水量を比較評価した。以下に評価方法及び結果を示す。

(1) 浸出水量の評価方法

浸出水量の評価では、遮水シートの劣化として単位面積当たり一定個数の貫通傷があることを想定し、降雨が処分場に浸透し廃棄体層を通過した水（遮水層への浸入水量）が①遮水層を通過して基礎地盤へ到達する浸出水量（遮水層からの浸出水量）と②排水層を通過して横へ排水される量（排水量）を評価した。遮水層への浸入水量は、降水量から表面流出量及び蒸発散量を差し引いた値として評価した。評価における水の流れの概念を図 6.2.1 に示す。

(2) 遮水層の評価モデル

遮水層の評価モデルは廃棄物処理法の技術基準省令で規定されるモデル（イ）及び（ハ）の構造、低透水土層を 1 層など簡易な構造のモデル及び 5 章で設計した検討モデルを設定した。なお、本検討では遮水層にアスファルト層やコンクリート層の検討を行わないことから、廃棄物処理法技術基準省令（ロ）で規定される構造は対象外とした。評価モデルの一覧を表 6.2.3 に、各評価モデルの構成及び機能を表 6.2.4～表 6.2.9 に示す。

(3) 気象条件

処分場への降水量及び浸透水量を計算するために気象条件を設定する必要がある。現時点では、処分場の場所が決まっていないため、本検討では、気象条件のモデル例として東日本の一地点のデータを用いた。疑似気象データの作成に使用した降水量、気温及び日射量の日単位の実気象データは、農業環境技術研究所が公開している農業環境情報データセンター¹⁰⁾ から 1978 年～2009 年までの 32 年間分を取得した。取得した実気象データの統計情報から HELP コードを使用し、モデル条件として 100 年間分の疑似気象データを作成した。取得した実気象データの経時変化を図 6.2.4 に、作成した疑似気象データを図 6.2.5 に示す。

実気象データと疑似気象データの年間平均降水量、気温及び日射量の比較を表 6.2.10 に示す。表 6.2.10 より、疑似気象データは実気象データの約 2%以内でよく再現していることが分かる。実気象データと疑似気象データの年間月別平均降水量、気温及び日射量の比較を図 6.2.6、図 6.2.7 及び図 6.2.8 にそれぞれ示す。これらの図より、年間月別降水量及び年間月別平均気温の疑似気象データは、実気象データをよく再現しているが、年間月別平均日射量は、実気象では 5 月と 8 月の 2 点でピークを持つが、疑似気象データは 6 月に最高値となりピークは 1 つだけとなっており再現ができていない。2 つのピークを再現できていない理由は、疑似的な気象データを生成する計算モデルが米国の気象環境を対象としているため日本特有の気候である梅雨を考慮しておらず、1 年間の変動をフーリエ級数で表現するのに、1 つのハーモニクスで表現するモデルだからである。ただし、ピーク時期の再現はできていないが、それ以外の時期の再現はできていることが分かる。これらより、作成した疑似気象データは妥当であると考えられ、ケーススタディの評価に使用した。

HELP コードで設定する降水量、気温及び日射量以外の気象データについては、東日本の一地点近傍の気象台で公開されているデータを使用して設定した。設定した気象データを表 6.2.11 に示す。

(4) 土層及び遮水層の評価条件

処分施設の表層状態のパラメータである蒸発ゾーン深さ及び葉面積指数を表 6.2.12 に示す。蒸発ゾーン深さは土中からの蒸発を計算する地面からの深さを指定するパラメータで、葉面積指数は施設の植生状態を示し植物からの蒸散の計算に使用するパラメータである。この 2 つのパラメータを設定する事により、蒸発散量及び表面流出量が計算される。

各遮水層モデルの層の厚さ及び透水係数を表 6.2.13 に示す。表 6.2.13 の他に、排水層の長さを大型の施設も包含できるように 100m に設定した。排水勾配は 2%とした。また、遮水シートの傷の個数及び設置条件は、HELP コードの参照値のうち、保守的に状態の悪い条件を設定した。遮水シートの傷の個数の発生割合は、表 6.2.1 ではランク 2 とランク 3 は同程度と評価されている。本検討では、欠陥が比較的多い条件での浸出量の抑制効果を調べることとし、表 6.2.1 に示す条件でのうち発生割合が大きい中で欠陥が多い条件として、ランク 3 の最大値である 25 個/10⁴m² に設定した。遮水シートの設置条件も、状態の比較的に悪い条件を想定することとし、表 6.2.2 において遮水シートと下層とのすき間が比較的大きいレベル 3 を想定した。

(5) 遮水層への浸入水量

本評価における遮水層への浸入水量は、図 6.2.1 における地中への浸透水量と同じであり、(3) 気象条件及び (4) 施設の環境状態により計算される値である。以下の 2 ケースの条件から遮水層への浸入水量を計算する。

① 遮水層への年間平均浸入水量が 550mm と計算されるケース (以下、「浸入水量 550mm

ケース」という)

処分施設の覆土後を想定し、計算した擬似気象条件及び表 6.2.12 で設定した表層の覆土の条件により HELP コードで計算した結果を使用する。計算の結果、遮水層への年間平均浸入水量は、擬似気象条件の年間平均降水量 (1264mm) から年間平均表面流出量 (86mm) 及び年間平均蒸発散量 (628mm) を引いた 550mm と計算された。この計算に遮水層での浸出計算を接続して、遮水層からの浸出量を計算する。

- ② 遮水層への年間平均浸入水量が約 1140mm と計算されるケース (以下、「浸入水量 1140mm ケース」という)

放射性廃棄物以外の処分場を想定した場合、廃棄物の定置中に降雨が浸透することが考えられる。したがって、浸入水量 550mm ケースにおける計算条件のうち、図 6.2.2 に示す処分施設の覆土表層からの蒸発散量を考慮しないで計算した結果を使用する。計算の結果、年間平均浸入水量は、年間平均降水量 (1264mm) から蒸発散量を考慮しない場合の年間平均表面流出量 (123mm) を差し引いた 1141mm と計算された。この計算に遮水層での浸出計算を接続して、遮水層からの浸出量を計算する。

(6) 排水量及び浸出水量の評価結果

浸入水量 550mm ケースの評価結果を表 6.2.14 に、浸入水量 1140mm ケースの評価結果を表 6.2.15 に示す。表よりモデル 3-1、3-2-1 及び 3-2-2 は、低透水層の透水係数が $5 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 以下と十分に低いため、遮水層からの年間平均浸出水量は約 1mm 以下となり十分に低く評価された。

遮水シートの下に透水係数 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の低透水層を設置したモデル 1-1 と透水係数 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の低透水層だけを設置したモデル 2-2 を比較すると、モデル 1-1 の年間平均浸出水量は、浸入水量 550mm ケースでは 28mm となり、モデル 2-2 の 0.7 倍となっているが、浸入水量 1140mm ケースでは 47mm と浸出水量が大きくなりモデル 2-2 とほぼ同じ水量となっている。これは、モデル 1-1 で設定した排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と透水係数が少し小さく排水能力が大きくないため、浸入水量 1140mm ケースでは、遮水シートの損傷部分にかかる水頭 (水圧) が大きくなった結果、遮水層からの年間平均浸出水量が大きくなったと考えられる。

モデル 1-2 は、遮水シート 2 層のモデルであるが、上層の遮水シートの真下に低透水層がないため、上層の遮水シートを通過した水が遮水シート間に滞留する結果となった。これは、遮水シート間の保護シートの透水係数が $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ と大きいため水が遮水シートから保護シートへ浸出しやすくなっているが、厚さが 0.01m しかないため遮水シート間の水頭が大きくなることで、浸出水が下層の遮水シートを通過せず滞留する結果となったと考えられる。このため、モデル 1-2 では、滞留水がある事により、遮水層からの年間平均浸出水量は約 9mm となった。

モデル 2-1 は遮水層なしのため、各ケースともほぼ遮水層への浸入水量がそのまま基礎地

盤へ浸出する結果となった。

(7) まとめ

遮水層の構造の種類において、遮水シートの直下に低透水性の層を設置する「設計した遮水モデル」のモデル 3-1、3-2-1 及び 3-2-2 が、遮水層からの浸出水量が低く抑えられる結果となった。低透水層の自己修復マット及びベントナイトマットの機能が十分に発揮されている結果となった。

遮水層への浸入水量が多い浸入水量 1140mm ケースでは、遮水層からの浸出水量はモデル 1-1 とモデル 2-2 で同程度となった。これは、モデルの保護土の排水能力が低いことにより、遮水シートの損傷部分にかかる水頭（水圧）が大きくなり、浸出水量が多くなったためと考えられる。これより、遮水層の設置する排水層の排水能力が重要となることが分かった。

ケース 1-2 の遮水シート 2 層のケースで、それぞれ損傷している場合、遮水シート間に設置する保護シート層の透水係数が大きいことにより、上層の遮水シートから水が浸透しやすいが、遮水シート間が狭く水頭が大きくなるため、下層の遮水シートを浸透しにくくなり、結果として、遮水シート間に水が滞留する結果となった。

ケース 3-1、3-2-1 及び 3-2-2 も 2 重遮水シートであるが、シート間に低透水層を設置することで、上層の遮水シートが損傷した場合でも遮水シートを浸透する量が小さいため、滞留水を十分低く抑えられる結果となった。

6.2.3. 遮水層のパラメータスタディ

(1) 評価の概要

6.2.2 項の結果より、表 6.2.3 に示すモデル 3-1、3-2-1 及び 3-2-2 の遮水シート、低透水層及び排水層の組合せの遮水構造が、遮水層からの浸出水量の低減に効果的であり、各層のパラメーターが重要となることから、各層のパラメータスタディを実施した。

1) 遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の感度解析

表 6.2.2 に示す遮水シートの設置状態及び低透水層・排水層の透水係数の感度解析により、低透水層及び排水層で有効となる条件の検討を行う。

2) 低透水層の透水係数と厚さの感度解析

低透水層として設置する低透水性マットの厚さが小さいことを踏まえ、透水係数と厚さの条件の検討を行う。

3) 排水層の厚さと排水量の感度解析

排水層の透水係数及び厚さ条件によって、遮水シートにかかる水頭が変化することに

より、浸出水量が変化することから、排水層の透水係数と厚さの条件による排水量と浸出水量の感度解析を行った。

(2) 遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の感度解析

① 評価方法

評価の概要を図 6.2.9 に示す。排水層の透水係数、遮水シートの設置状態及び低透水層の透水係数のパラメータを変動させて感度解析を行った。

排水層の透水係数は、砂に相当する透水係数 ($1 \times 10^{-3} \text{m/s}$) と砂質土に相当する透水係数 ($3 \times 10^{-4} \text{m/s}$) の 2 種類を設定した。評価モデルは、遮水シートを設置するモデル 1 と遮水シートを設置しないモデル 2 の 2 種類を想定した。遮水シートの傷の個数は、表 6.2.1 に示す条件から発生割合が大きい条件の最大値である 25 個/ (10^4m^2) とした。遮水シートの設置状態は、表 6.2.2 に示すレベル 1～レベル 4 をそれぞれ設定して計算を実施した。レベル 1～レベル 4 に変化させることで、図 6.2.2 に示すように遮水シートと下部の低透水層の隙間における水の広がり方 (界面半径) が異なる。なお、図 6.2.2 にはレベル 4 の状態を示していないが、レベル 4 では遮水シートをそのまま通過するモデルで表される。

低透水層の透水係数は、砂質土から粘土にあたる値 ($1 \times 10^{-5} \text{m/s} \sim 1 \times 10^{-9} \text{m/s}$) に変化させて検討を行った。気象条件は、6.2.2 項と同様とした。遮水層上部からの浸入水量の計算は、「浸入水量 550mm ケース」を使用した。

感度解析のケース表を表 6.2.16 に示す。排水層の透水係数を 2 種類に設定しているため、全ての感度解析は 50 ケースとなる。

② 評価結果

排水層の透水係数が $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合の結果を表 6.2.17 及び図 6.2.10 に示す。結果より、モデル 1 (遮水シート有りのモデル) では遮水シートと低透水層に若干の隙間がある状態 (設置レベル 2) で低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 以下の場合、また、遮水シートと低透水層に一定の隙間がある状態 (設置レベル 3) で低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下の場合において、遮水層からの浸出水量は遮水層への年間平均浸入水量 550mm の約 1/100 程度となることを確認した。モデル 1 の遮水シートが機能していない状態 (設置レベル 4) 及びモデル 2 (遮水シートがないモデル) は、低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合において、遮水層への年間平均浸入水量 550mm の約 1/10 以下となることを確認した。

排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合の評価結果を表 6.2.18 及び図 6.2.11 に示す。評価結果より、モデル 1 では遮水シートの設置レベル 3 以下で低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合において、遮水層からの浸出水量は遮水層への年間平均浸入水量 550mm の 1/10 以下となることを確認した。モデル 1 の遮水シートの設置レベル 4 及

びモデル 2 は、低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合において、遮水層への年間平均浸入水量 550mm の約 1/10 以下となることを確認した。

遮水層のモデルを比較すると、低透水層の透水係数が $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合、モデル 1 の遮水シートの設置レベルが 3 より良好な条件であれば、遮水層からの浸出水量はモデル 2 の約 0.1~0.5 倍となることを確認した。これより、遮水シートの遮水機能が劣化していない状態であれば、遮水シートの下層に低透水層を設置するモデル 1 が有効であることが分かった。

次に排水層の透水係数の違いによる浸出水量を比較すると、モデル 1 において、排水層の透水係数を $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ に設定した場合と $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ に設定した場合では、遮水シートの設置レベルが 3 より良好な条件では遮水層からの浸出水量は、透水係数が大きい $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ のケースが小さくなることを確認した。これは、排水層の透水係数が約 3 倍大きくなっているため、排水量が多くなり遮水シートにかかる水頭（水圧）が低くなるためと考えられる。これより、排水層の透水係数の設定が重要となることが分かった。

(3) 低透水層の透水係数と厚さの感度解析

① 評価方法

低透水層に設置する低透水性マットの透水係数と厚さについて感度解析を行った。評価モデル及び各層のパラメータを表 6.2.19 及び表 6.2.20 に示す。遮水シートの下層に低透水層を設置する遮水構造とした。

低透水層マットの透水係数は、劣化した状態から健全な状態を想定して、 $5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ~ $5 \times 10^{-11} \text{m/s}$ に設定した。厚さは、10mm 以下の場合は 2mm 刻み、10mm からは 4mm 刻みとして、2mm~18mm に設定した。厚さはマットを重ねた場合を想定している。

遮水層への浸入水量の計算は、浸入水量 550mm ケースを使用した。

② 評価結果

評価結果を表 6.2.21、図 6.2.12 に示す。低透水性マットの透水係数と浸出水量の関係は、低透水性マットの透水係数が大きくなるに従って、浸出水量が大きくなる結果が得られた。また、低透水性マットの厚さと浸出水量の関係は、透水係数が $5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ では、厚さが薄くなるに従って浸出水量が大きくなる結果となった。低透水性マットの透水係数が $5 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の場合も 2mm のケースでは、他の厚さのケースと比較して浸出水量が大きくなる傾向が見られた。

低透水性マットの透水係数が $5 \times 10^{-10} \text{m/s}$ より低い場合では、厚さが 2mm 以上のケースで遮水層への浸入水量の変化は見られず、低透水性マットの厚さが薄くても十分に低く抑えられることが分かった。これらの結果より、低透水性マットの透水係数に

応じて厚さを設定する必要があると考えられる。

(4) 排水層の厚さと排水量の感度解析

① 評価方法

遮水層における排水層の透水係数と厚さを変化させて排水量と浸出水量の評価を行い、排水層の透水係数に対して排水量が十分となる排水層厚さについて検討を行った。評価モデル及び各層のパラメータを図 6.2.13、表 6.2.22 に示す。

排水層の透水係数は $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 及び $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の 3 種類を設定した。 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ は保護土に用いられる砂質土の透水係数、 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ は排水層となる砂相当の透水係数、 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ はジオテキスタイルの物性値の事例¹¹⁾ から耐圧集排水層の透水係数をそれぞれ想定して設定した。排水層の厚さは、耐圧集排水層の 0.014m から保護土の 0.5m とした。

遮水層への浸入水量の計算は、550mm ケースを使用した。

② 評価結果

評価結果を表 6.2.23、図 6.2.14 及び図 6.2.15 に示す。結果より、排水層の透水係数が大きくなると排水量が多くなり、遮水層からの浸出水量が少なくなることを確認した。

排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合は、年間平均排水量は排水層の厚さに応じて大きくなり、排水層の厚さが 0.3m 以上で、ほぼ一定となった。遮水層からの年間平均浸出水量は、遮水層の厚さが大きくなるにつれて減少し、排水層の厚さが 0.3m 以上になると約 15mm で一定になった。

排水層の透水係数が $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合は、排水層の厚さが 0.1m 以上で年間平均排水量が約 550mm、遮水層からの年間平均浸出水量は約 4mm で一定になった。

排水層の透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の場合は、厚さが 0.014m 以上で年間平均排水量は約 550mm、遮水層からの年間平均浸出水量は約 2mm でほぼ一定となった。

各排水層の透水係数及び遮水層からの浸出水量が一定になる厚さから算出した透水量係数が約 $1 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ となり、各排水層の透水係数の計算が妥当であることを確認した。なお、透水量係数は以下の式から算出される。

$$T = K \times D \quad (1)$$

ここで、

T : 透水量係数 (m^2/s)

K : 排水層の透水係数 (m/s)

D : 排水層の厚さ (m)

である。

これより、排水層に透水係数の大きい材料を用いることで排水層の厚さを薄くすることが可能であることを確認した。

なお、厚さ及び透水係数の異なる排水層を想定し、排水層内及び上部における排水の流れについて2次元解析を行った。排水層に関する2次元解析の結果について付録Aに示す。

(5) まとめ

遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の感度解析より、遮水シートの上層に排水層を下層に低透水層を設置するモデルが良好な遮水構造であることが分かった。また、低透水層の透水係数が十分に低ければ、遮水シートの若干の破損を考慮しても浸透水量を十分に低く抑えられることが分かった。

低透水層の透水係数と厚さの感度解析より、低透水層の透水係数が十分に低ければ、厚さは薄くても浸透水を十分に低く抑制できることが分かった。また、排水層の厚さと排水量の感度解析より、排水層の透水係数が十分に大きければ、排水層の厚さは薄くても排水能力が発揮されることが分かった。排水層の厚さと透水性によって排水量が異なるため、適正な排水層（透水係数と厚さ）を設置することが必要であると考えられる。

設計モデルにおいて低透水層として検討した自己修復マットは透水係数 $5 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下、評価結果から厚さ 4mm であり、図 6.2.12 から厚さが薄いことによる浸透水量の増加は起こらないと考えられる。また、設計モデルにおける排水層は、透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、厚さ 14mm の耐圧排水層で検討した。透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の排水層における排水量は、図 6.2.13 より、厚さ 10mm 付近では平衡となる時の排水量より少ないが、設計モデルにおける排水層上部の保護土による排水の効果も含めると平衡となる時の排水量を排水できると考えられる。

6.3. Cs 吸着層のパラメータスタディ

トレンチ処分施設からの放射性物質の環境中への流出は、遮水層が損傷することで廃棄体層及び遮水層を通過した浸出水が放射性物質とともに帯水層中へ移行することに起因する。また、福島第一原子力発電所の事故以来、放射性物質、特にセシウムの環境中への流出が問題となっており、福島県内の除染に伴い発生した土壌や廃棄物等の処分・中間貯蔵においても、施設からのセシウムの環境中への流出対策が検討されている。

6.2 節では、遮水層が損傷した場合、遮水層からの浸出水量を低減させる遮水構造を設計した。この対策により、環境中への浸出水量が低減され、放射性物質の流出も低減されることが考えられるが、本節では、更なる環境への長期的な汚染防止の観点から、遮水層の損傷による浸出水中の放射性物質の移行の遅延効果が期待できる収着層について検討した。放射性物質の移行を遅延させることで、放射能が減衰し、結果的に漏出する放射性物質量が

低くなることが期待される。また、排水層の上層に収着層を設置することで、排水中に含まれる放射性物質を低減することにより、排水処理施設における年間処理放射能を低減させる効果について検討を行った。放射性物質は、トレンチ処分施設に埋設され、除染廃棄物においても検討されているセシウムを対象とし、収着層については、セシウムの収着性の高いゼオライトを添加して製作されているシート（以下、Cs 吸着マットという）を対象に検討した。

6.3.1. 評価ケース

Cs 吸着マットにおける移行抑制の評価概要を図 6.3.1 に示す。遮水層のモデルは前節で設計検討した表 6.2.9 に示すモデル 3-2 とした。Cs 吸着マットは図 6.3.1 に示すように、排水層の上層及び低透水層の下層に設置して評価を行った。

排水層の上層に設置した Cs 吸着マットは、遮水層への浸入水中の Cs を吸着することにより、排水中の Cs 濃度の低減のために設置し、その効果についての検討を行った。自己修復マットの下層に設置した Cs 吸着マットは、遮水層が損傷したときのバックアップとして浸出水中の Cs 濃度の低減のために設置し、その効果について検討を行った。これより、Cs 吸着マットのパラメータスタディは以下の 2 ケースについて検討を行った。

- 1) 排水中の Cs 濃度の評価
- 2) 浸出水が流入する地下水中の Cs 濃度の評価

排水及び地下水中の Cs 濃度の評価では、原子力機構で開発された低レベル放射性廃棄物処分の線量評価コード GSA-GCL コード第 2 版（以下、「GSA-GCL」という）¹²⁾ のソースタムモデル式を参考にした。廃棄物層から流出した Cs を含む水が Cs 吸着マットに浸入する。次に、Cs が Cs 吸着マットと浸入した水による分配平衡となり、浸入した水に残った Cs が水の浸出とともに移行するモデルを使用した。使用した計算モデルを付録 B に示す。

6.3.2. 排水中の Cs 濃度の評価

- (1) Cs 吸着マットの分配係数の違いによる排水中の Cs の最大濃度の比較

① 計算条件

排水中の Cs 濃度の計算条件を表 6.3.1 に示す。評価対象核種は半減期が約 30 年と長い Cs-137 とした。Cs-134 は半減期が約 2 年と短く浸出水の移行中に減衰すると考えられるため評価対象外とした。廃棄物の初期濃度は、環境省における中間貯蔵施設安全対策検討会の安全評価例¹³⁾ から Cs の合計濃度を 10^5 Bq/kg を設定した。本評価では、Cs-134 は評価対象外としているため、Cs-137 が 10^5 Bq/kg である状態とした。

トレンチ処分施設の形状は研究施設等廃棄物の概念設計¹⁾（以下、「概念設計」という）の仕様を設定した。遮水層への浸入水量は、6.2.2 (5) 節における浸入水量 550mm

ケースにより計算した。概念設計では、廃棄物層を含む処分施設の Cs の分配係数を IAEA のレポート TRS-364¹⁴⁾ の砂の値を引用して $0.27\text{m}^3/\text{kg}$ に設定されているが、本評価では Cs 吸着マットの効果を評価しやすくするため、一桁低い $0.01\text{m}^3/\text{kg}$ に設定した。なお、IAEA TRS-364 の後に出版された IAEA-TRS-472¹⁵⁾ では、砂層では $9.6 \times 10^{-3} \sim 35 \text{m}^3/\text{kg}$ の範囲で平均値は $0.53 \text{m}^3/\text{kg}$ と示されている。IAEA-TRS-472 のデータ及び国内の文献¹⁶⁾ のデータを表 6.3.2 に示す。

Cs 吸着マットの分配係数は、1、10 及び $100\text{m}^3/\text{kg}$ に値を変化させて設定して Cs 吸着マットの効果について評価した。また、参考として Cs 吸着マットを設置しない場合を想定して、計算モデルの Cs 吸着マットの分配係数を $0\text{m}^3/\text{kg}$ に設定して計算を行い、Cs 吸着マットを設置した場合の結果と比較を行った。

② 評価結果

排水中の Cs-137 の最大水中濃度を表 6.3.3 に、経時変化を図 6.3.2 に示す。結果より、Cs 吸着マットを設置しない場合を想定した分配係数 $0\text{m}^3/\text{kg}$ のときは排水中の放射能濃度は評価開始後すぐに最大となるが、分配係数 1、10 及び $100\text{m}^3/\text{kg}$ のときは、それぞれ 8 年、24 年及び 35 年に放射能濃度のピーク時間が現れ、Cs 吸着マットの分配係数に応じた遅延効果を確認した。

Cs-137 の排水中の最大濃度は分配係数 $0\text{m}^3/\text{kg}$ と比較して、分配係数 $1\text{m}^3/\text{kg}$ の場合はピーク時間が 8 年と早いため初期濃度の約 0.73 倍となり、低減効果はあまり得られなかった。これは、Cs 吸着マットの厚さが 1mm と薄いこと及び浸入水量が年間 550mm と年間平均浸入流量が多いことから、移行の遅延効果が小さいためと考えられる。分配係数 10 及び $100\text{m}^3/\text{kg}$ では、Cs 吸着マットの厚さが 1mm の場合でも、排水中濃度のピーク時間が Cs-137 の半減期である 30 年に近い時期に現れるため、減衰の影響が見られる。その結果、排水中の最大濃度は、Cs 吸着マットを設置しない場合と比較して、分配係数 $10\text{m}^3/\text{kg}$ の Cs 吸着マットを設置した場合では初期濃度の約 0.3 倍となった。分配係数 $100\text{m}^3/\text{kg}$ の Cs 吸着マットを設置した場合では約 1/25 低い値となり、十分な低減効果がある結果となった。

排水により放出される Cs-137 の積算放射能を表 6.3.4 に、経時変化を図 6.3.3 に示す。Cs 吸着マットを設置しない場合の積算放射能と比較して、分配係数 1、10 及び $100\text{m}^3/\text{kg}$ の値はそれぞれ約 0.9 倍、約 0.6 倍及び約 1 桁小さい値となった。分配係数 10、 $100\text{m}^3/\text{kg}$ の場合は Cs 吸着マットを設置したことによる低減効果が現れたが、分配係数 $1\text{m}^3/\text{kg}$ の場合は低減効果が小さかった。これは、最大水中濃度の場合と同様で、Cs 吸着マットの厚さが 1mm と薄いこと及び浸入水量が年間 550mm と多いためと考えられる。

(2) Cs 吸着マットの厚さの検討

前項で、Cs 吸着マットの分配係数を $1\text{m}^3/\text{kg}$ に設定した場合には、放射能濃度及び積算放射能の低減効果が十分に現れないことを確認した。そこで、Cs 吸着マットの分配係数を $1\text{m}^3/\text{kg}$ に固定し、マットを重ねて厚さを $1\text{mm}\sim 10\text{mm}$ に変更した場合における評価を行い、マットが厚くすることによる低減効果を検討した。検討する Cs 吸着マットの厚さを表 6.3.5 に示す。

Cs 吸着マットの厚さを変更した場合における排水中の最大水中濃度を表 6.3.6 に、経時変化を図 6.3.4 に示す。Cs 吸着マットを設置しない場合と比較して最大水中濃度は、厚さが 5mm になると約 0.4 倍となり、 10mm では約 0.3 倍の値となった。厚さ 10mm の結果は、Cs 吸着層を厚さ 1mm 、分配係数 $10\text{m}^3/\text{kg}$ に設定したときの結果と同等となった。これより、Cs 吸着マットを厚くすることで、分配係数を $1\text{m}^3/\text{kg}$ に設定した場合でも低減効果が得られることを確認した。

以上の結果より、廃棄物層中の Cs-137 の放射能濃度から想定される排水中の Cs-137 の放射能濃度の目標値を考慮して、Cs 吸着マットの分配係数及び厚さを設計する必要があると考えられる。

6.3.3. 浸出水が流入する地下水中の Cs 濃度の評価

(1) 計算条件

遮水シートが損傷している場合、遮水層からの浸出水に含まれる Cs 濃度の低減効果を評価することを目的とした。ただし、6.2.2 項で評価したモデル 3-2-1 の場合、廃棄物層を通過した $550\text{mm}/\text{y}$ の浸透水は排水され、 $0.65\text{mm}/\text{y}$ が遮水シートから浸出する。このため、Cs のほとんどが排水に移行するため、浸出水に対する Cs 吸着マットによる Cs 濃度の低減効果が少ない。このため、本評価では、遮水層のキャッピングを想定し、廃棄物層への浸透水を低減させた場合、廃棄物層を通過した浸出水が Cs 吸着マットを通過し、地下水に移行した場合に地下水に含まれる Cs 濃度の評価を実施した。

本評価における遮水層からの浸出水量は、6.2.2 項で評価したモデル 3-2-1 の遮水層からの浸出水量とした。ただし、モデル 3-2-1 の遮水層からの浸出水量は、表 6.2.14 の結果から $0.65\text{mm}/\text{y}$ と十分に低い値である。このため、本評価では保守的に浸出水量を $1\text{mm}/\text{y}$ に設定して計算を行った。また、浸出水が流入する地下水の流量は、遮水層がない場合に処分施設への流入水量である 4.4×10^4 (m^3/y) ($0.55\text{m}/\text{y}\times 400\text{m}\times 200\text{m}$) とした。計算において、上記以外のパラメータは、排水中の Cs 濃度の評価と同様とした。計算条件を表 6.3.7 に示す。

(2) 評価結果

地下水中の Cs の最大濃度を表 6.3.8 に、経時変化を図 6.3.5 に示す。また、浸出した Cs の積算放射能を表 6.3.9 及び図 6.3.6 に示す。結果より、遮水層及び Cs 吸着マットを設置

しない場合（表 6.3.8 の 0-1 ケース）は、評価開始後すぐに放射能濃度が最大となり、最大水中濃度は約 9,800Bq/L となった。遮水層及び Cs 吸着マットを設置するケースで Cs 吸着マットの分配係数 1、10 及び 100m³/kg の場合はピーク時間が約 40 年となり、最大水中濃度は 0-1 ケースと比較して、約 5 桁以上、0-2 ケースと比較して約 2 桁以上小さい値となり十分な低減効果があることが分かった。

排水中の Cs 濃度と異なり、Cs 吸着マットの分配係数を 1m³/kg に設定した場合においても、十分な低減効果があることが分かった。これは、浸透水量が 1mm/y と非常に小さいため、厚さ 1mm の場合でも十分な収着体積となるためと考えられる。

(3) 浸出水量を変化させたときの Cs の放射能濃度の感度解析

Cs 吸着マットを通過する浸出水量が少ないため、Cs 吸着マットの分配係数が 1m³/kg の場合でも、十分な低減効果となることを確認した。そこで、Cs 吸着マットの分配係数 1m³/kg に固定し、Cs 吸着マットを通過する浸出水量を変化させたときの地下水中の放射能濃度を評価した。浸出水量は、表 6.2.14 に示す遮水層からの浸出水量の評価結果におけるモデル 1-1 の 28mm/y、モデル 2-2 の 40mm/y 及びモデル 2-1 の 550mm/y 及び前項で設定した 1mm/y の 4 ケースとした。検討する浸出水量を表 6.3.10 に示す。

地下水中の Cs の最大放射能濃度を表 6.3.11 に、経時変化を図 6.3.7 に示す。結果より、浸出水量が少なくなるにつれて、地下水中の最大濃度となる時間が遅くなり、最大値も小さくなっていることが分かる。浸出水量が 28mm/y の場合、最大水中濃度は浸出水量 550mm/y と比較して約 1/80 になることが分かった。これより、浸出水量が少なくなれば、Cs 吸着マットの厚さが 1mm の場合でも環境中への移行に対する効果が大きくなることが分かった。

表 6.1.1 設計対策の部材に設定した物性

	耐圧性マット (耐圧排水層)	自己修復性マット	地盤補強保護シート	保護シート*1
設定物性	<ul style="list-style-type: none"> - 引張強度 (縦・横) : 500N/2.5cm - 貫入強度 : 500N 以上 - 耐圧性 : $1 \times 10^6 \text{N/m}^2$ 以上 	<ul style="list-style-type: none"> - 厚み : 4 mm - 重量 : 2kg/m^2 以下 - 自己修復性: : 有すること (具体的な基準は設けない) 	<ul style="list-style-type: none"> - 材質 : スパンボンド不織布熱圧着タイプ - 引張強度 (縦・横) : 地盤に依存するため示さない。 	<ul style="list-style-type: none"> - 材質 : 不織布 - 貫入強度 : 1000N

*1: 検討モデルでは、耐圧性マット、自己修復性マット、Cs 吸着マットが遮水シート、Cs 吸着マットが遮水シートの保護層となるが、Cs 吸着マットを使用しない場合もあるため、本表に示す。

表 6.2.1 遮水シートの傷及び設置不具合の数の推定値*1

不具合個数のランク	個数 (個/10 ⁴ m ²)	発生割合 (%)
ランク 1 (Excellent*2)	2 以下	10
ランク 2 (Good*2)	2~10	40
ランク 3 (Fair*2)	11~25	40
ランク 4 (Poor*2)	26~49	10

*1: 文献⁹⁾ に示された評価値を引用

*2: 文献⁹⁾ における表現

表 6.2.2 遮水シートの設置状態*1

設置レベル	状態
レベル 1 (Perfect*2)	全く隙間がない状態
レベル 2 (Good*2)	遮水シートと下層に若干のすき間がある状態
レベル 3 (Poor*2)	遮水シートと下層に一定のすき間がある状態
レベル 4 (Worst*2)	遮水シートが機能していない状態

*1: 文献⁹⁾ で定義されている設置状態を引用

*2: 文献⁹⁾ における表現

表 6.2.3 遮水層構造の種類

モデル		モデル名
廃棄物処理法の 遮水層モデル	1-1	廃棄物処理法（ア）－遮水シート及び粘土層
	1-2	廃棄物処理法（ウ）－二重遮水シート層
簡易な 遮水層モデル	2-1	遮水層なし
	2-2	低透水土壤層のみ
設計した 遮水層モデル	3-1	二重遮水シート及び低透水層（ベントナイトマット）
	3-2-1	二重遮水シート及び低透水層（自己修復マッポーケース1）
	3-2-2	二重遮水シート及び低透水層（自己修復マッポーケース2）

表 6.2.4 評価モデル 1-1：廃棄物処理法（ア）－遮水シート及び粘土層

モデル図	層		機能
	1	保護土	浸透水の排水
	2	保護シート層 ^{※1}	遮水シートの保護
	3	遮水シート	浸出水の閉じ込め
	4	低透水層（粘土層）	浸出水の移行抑制
	5	基礎地盤	—

※1：遮水機能を期待しないため、計算で考慮しない。

表 6.2.5 評価モデル 1-2：廃棄物処理法（ウ）－二重遮水シート層

モデル図	層		機能
	1	保護土	浸透水の排水
	2	保護シート層 ^{※1}	遮水シートの保護
	3	遮水シート	浸出水の移行抑制
	4	保護シート層 ^{※2}	遮水シートの保護
	5	遮水シート	浸出水の移行抑制
	6	保護シート層 ^{※1}	遮水シートの保護
	7	基礎地盤	—

※1：遮水機能を期待しないため、計算で考慮しない。

※2：2層の遮水シートを分離する層として、計算で考慮する。

表 6.2.6 評価モデル 2-1：遮水層なし

モデル図	層		機能
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">保護土(0.5m) (水はこの面で流れる)</p> <hr/> <p style="text-align: center;">基礎地盤</p> </div>	1	保護土	浸透水の排水
	2	基礎地盤	—

表 6.2.7 評価モデル 2-2：低透水土壌層のみ

モデル図	層		機能
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">保護土(0.5m) (水はこの面で流れる)</p> <div style="background-color: #cccccc; text-align: center; padding: 2px;">不透水粘土層 (0.5m)</div> <hr/> <p style="text-align: center;">基礎地盤</p> </div>	1	保護土	浸透水の排水
	2	低透水層（粘土層）	浸出水の移行抑制
	3	基礎地盤	—

表 6.2.8 評価モデル 3-1：二重遮水シート及び低透水層（ベントナイトマット）

モデル図	層		機能
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">保護土(0.5m) (水はこの面で流れる)</p> <div style="background-color: black; color: white; text-align: center; padding: 2px;">遮水シート</div> <div style="background-color: #cccccc; text-align: center; padding: 2px;">ベントナイトマット (保護シート層*1)</div> <div style="background-color: black; color: white; text-align: center; padding: 2px;">遮水シート</div> <hr/> <p style="text-align: center;">基礎地盤</p> </div>	1	保護土	浸透水の排水
	2	遮水シート	浸出水の移行抑制
	3	ベントナイトマット	浸出水の移行抑制
	4	遮水シート	浸出水の移行抑制
	5	基礎地盤	—

*1：施工において必ずしも必要ないが、計算では層に加えた。

表 6.2.9 評価モデル 3-2-1 及び 3-2-2 :
二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マット)

モデル図	層		機能
	1	保護土	(排水層を兼ねる)
	2	耐圧排水層	浸透水の排水
	3	遮水シート	浸出水の移行抑制
	4	自己修復マット*1	浸出水の移行抑制
	5	遮水シート	浸出水の移行抑制
	6	基礎地盤	—

*1 : 高分子系の自己修復性で低透水性マットを想定する。

*2 : 施工において必ずしも必要ないが、計算では層に加えた。

表 6.2.10 実気象データと疑似気象データの比較

	実気象データ (32 年間)	疑似気象データ (100 年間)
年間降水量 (mm)	1234.7	1264.1
年間平均気温 (°C)	13.6	13.5
年間平均日射量 (MJ/m ²)	12.4	12.6

表 6.2.11 その他の気象データ

気象パラメータ	設定値
平均風速 (km/h)	7.9
植物生育期の開始日※	104
植物生育期の終了日※	310
第 1 期相対湿度 (%)	65.0
第 2 期相対湿度 (%)	75.7
第 3 期相対湿度 (%)	81.7
第 4 期相対湿度 (%)	74.3

※ 東日本の一点近傍の気象台に記載されている霜の終日及び初日を設定

表 6.2.12 処分施設における覆土表層の環境状態の設定

パラメータ		根拠
蒸発ゾーン深さ (m)	0.3	HELP コードのマニュアル ⁹⁾ より、砂/砂質土の蒸発ゾーン深さ (約0.1m~0.5m) の中央値を設定
葉面積指数 (-)	2.5	「衛生データを用いた森林の葉面積指数の推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用」 ¹⁷⁾ より畑地/牧草地 (1~5) の中央値から設定

表 6.2.13 各層の標準パラメータ

モデル	保護土 (排水層を 兼ねる)	排水層	遮水シート	低透水層	保護シート	遮水シート	上段：層の厚さ (m)	
							下段：透水係数 (m/s)	基礎地盤
1-1 廃棄物処理法 (ア) 一 遮水シート及び粘土層	0.5 3×10 ⁻⁴	×	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.5 1×10 ⁻⁹	×	×	—	—
1-2 廃棄物処理法 (ウ) 一 二重遮水シート層	0.5 3×10 ⁻⁴	×	0.0015 1×10 ⁻¹¹	×	0.01 1×10 ⁻³	0.0015 1×10 ⁻¹¹	×	—
2-1 遮水層なし	0.5 3×10 ⁻⁴	×	×	×	×	×	×	—
2-2 低透水土壌層のみ	0.5 3×10 ⁻⁴	×	×	0.5 1×10 ⁻⁹	×	×	×	—
3-1 二重遮水シート及び低透水層 (ベントナイトマット)	0.5 3×10 ⁻⁴	×	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.006 5×10 ⁻¹¹	0.01 ^(*)1) 1×10 ⁻³	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.0015 1×10 ⁻¹¹	—
3-2-1 二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マットケース1)	0.5 3×10 ⁻⁴	0.014 1×10 ⁻²	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.004 5×10 ⁻¹¹	0.01 ^(*)1) 1×10 ⁻³	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.0015 1×10 ⁻¹¹	—
3-2-2 二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マットケース2)	0.5 3×10 ⁻⁴	0.014 1×10 ⁻²	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.004 5×10 ⁻¹³	0.01 ^(*)1) 1×10 ⁻³	0.0015 1×10 ⁻¹¹	0.0015 1×10 ⁻¹¹	—

(*1) 本計算は保護シート設定して行った。

表 6.2.14 遮水層からの浸出水量の評価結果：遮水層への年間平均浸入水量 550mm ケース

単位：mm/y

モデル	排水量	遮水層からの浸出水量	遮水層間における滞留水
1-1 廃棄物処理法 (ア) - 遮水シート及び粘土層	5.2×10^2	2.8×10^1	—
1-2 廃棄物処理法 (ウ) - 二重遮水シート層	1.8×10^2	8.7×10^0	3.7×10^2
2-1 遮水層なし	6.9×10^{-1}	5.5×10^2	—
2-2 低透水土壌層のみ	5.1×10^2	4.0×10^1	—
3-1 二重遮水シート及び低透水層 (ペントナイトマット)	5.5×10^2	1.6×10^0	—
3-2-1 二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マット-ケース 1)	5.5×10^2	6.5×10^{-1}	—
3-2-2 二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マット-ケース 2)	5.5×10^2	$< 1.0 \times 10^{-2}$	—

表 6.2.15 遮水層からの浸出水量の評価結果：遮水層への年間平均浸入水量 1140mm ケース

単位：mm/y

	モデル	排水量	遮水層からの浸出水量	遮水層間に おける滞留水
1-1	廃棄物処理法 (ア) - 遮水シート及び粘土層	1.1×10^3	4.7×10^1	—
1-2	廃棄物処理法 (ウ) - 二重遮水シート層	3.9×10^2	8.7×10^0	7.4×10^2
2-1	遮水層なし	1.6×10^0	1.1×10^3	—
2-2	低透水土壌層のみ	1.1×10^3	5.0×10^1	—
3-1	二重遮水シート及び低透水層 (ベントナイトマット)	1.1×10^3	1.6×10^0	—
3-2-1	二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マット-ケース 1)	1.1×10^3	1.0×10^0	—
3-2-2	二重遮水シート及び低透水層 (自己修復マット-ケース 2)	1.1×10^3	$<1.0 \times 10^{-2}$	—

表 6.2.16 遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の
感度解析のケース及びパラメータ

ケース※	モデル	遮水シートの 設置状態	低透水層の透水係数 (m/s)
1	モデル 1 (遮水シートあり)	レベル 1	1×10^{-5}
2			1×10^{-6}
3			1×10^{-7}
4			1×10^{-8}
5			1×10^{-9}
6		レベル 2	1×10^{-5}
7			1×10^{-6}
8			1×10^{-7}
9			1×10^{-8}
10			1×10^{-9}
11		レベル 3	1×10^{-5}
12			1×10^{-6}
13			1×10^{-7}
14			1×10^{-8}
15			1×10^{-9}
16		レベル 4	1×10^{-5}
17			1×10^{-6}
18			1×10^{-7}
19			1×10^{-8}
20			1×10^{-9}
21	モデル 2 (遮水シートなし)	—	1×10^{-5}
22			1×10^{-6}
23			1×10^{-7}
24			1×10^{-8}
25			1×10^{-9}

※ 排水層の透水係数を $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ と $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の 2 種類を設定しているため、感度解析は 50 ケース (25 ケース \times 2 種類) となる。

表 6.2.17 排水層の透水係数=1×10⁻³m/s の感度解析結果：
遮水層からの平均浸出水量

単位：mm/y

低透水層の透水係数 (m/s)	モデル 1				モデル 2
	遮水シートの設置レベル				
	レベル 1	レベル 2	レベル 3	レベル 4	
1×10 ⁻⁵	4.6E+00	6.4E+01	2.3E+02	5.1E+02	5.5E+02
1×10 ⁻⁶	4.0E+00	1.6E+01	6.4E+01	5.1E+02	5.5E+02
1×10 ⁻⁷	4.0E+00	6.1E+00	1.6E+01	5.0E+02	4.9E+02
1×10 ⁻⁸	3.9E+00	4.3E+00	6.1E+00	2.5E+02	2.2E+02
1×10 ⁻⁹	3.9E+00	4.0E+00	4.3E+00	3.3E+01	3.2E+01

表 6.2.18 排水層の透水係数=3×10⁻⁴m/s の感度解析結果：
遮水層からの平均浸出水量

単位：mm/y

低透水層の透水係数 (m/s)	モデル 1				モデル 2
	遮水シートの設置レベル				
	レベル 1	レベル 2	レベル 3	レベル 4	
1×10 ⁻⁵	1.6E+01	1.6E+02	3.8E+02	5.4E+02	5.5E+02
1×10 ⁻⁶	1.4E+01	4.8E+01	1.6E+02	5.4E+02	5.5E+02
1×10 ⁻⁷	1.4E+01	2.1E+01	4.8E+01	5.3E+02	5.3E+02
1×10 ⁻⁸	1.4E+01	1.5E+01	2.1E+01	3.0E+02	2.7E+02
1×10 ⁻⁹	1.4E+01	1.4E+01	1.5E+01	3.9E+01	3.5E+01

表 6.2.19 低透水層の透水係数と厚さの感度解析の評価モデル

モデル図	層		機能
	1	保護土	横への排水
	2	保護シート層 ^{※1}	遮水シートの保護
	3	遮水シート	浸出水の閉じ込め
	4	低透水層 ^{※2}	浸出水の移行抑制
	5	基礎地盤	—

※1：遮水機能を期待しないため、計算で考慮しない。

※2：透水係数と厚さを変動させて計算を行う。

表 6.2.20 低透水層の透水係数と厚さの感度解析における各層のパラメータ

層		設定パラメータ	
1	保護土	厚さ (m)	0.5
		透水係数 (m/s)	3×10^{-4}
2	保護シート層 ^{※1}	—	—
3	遮水シート	厚さ (mm)	1.5
		透水係数 (m/s)	1×10^{-11}
		設置レベル	レベル 3
		傷/不具合の数 (個/ha)	25
4	低透水層	厚さ (mm)	2 ~ 18
		透水係数 (m/s)	$5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-11}$
5	基礎地盤	厚さ (m)	0.5
		透水係数 (m/s)	1×10^{-6}

※1：遮水機能を期待しないため、計算で考慮しない。

表 6.2.21 低透水層の透水係数と厚さの感度解析結果：
遮水層からの浸出水量

単位：mm/y

低透水層の厚さ (mm)	低透水層の透水係数 (m/s)			
	5×10^{-8}	5×10^{-9}	5×10^{-10}	5×10^{-11}
2	1.0E+02	3.1E+01	1.1E+01	1.1E+00
4	7.2E+01	2.5E+01	1.1E+01	1.1E+00
6	6.0E+01	2.3E+01	1.1E+01	1.1E+00
8	5.4E+01	2.2E+01	1.1E+01	1.1E+00
10	5.0E+01	2.1E+01	1.1E+01	1.1E+00
14	4.6E+01	2.0E+01	1.1E+01	1.1E+00
18	4.3E+01	2.0E+01	1.1E+01	1.1E+00

表 6.2.22 遮水層における排水層の厚さと排水量の感度解析における各層のパラメータ

層		設定パラメータ	
1	土壌層	厚さ (m)	0.5
		透水係数 (m/s)	3×10^{-4}
2	排水層	厚さ (m)	0.014 ~ 0.5
		透水係数 (m/s)	3×10^{-4} 1×10^{-3} 1×10^{-2}
		排水層長さ (m)	50
		排水勾配 (%)	2
3	遮水シート	厚さ (mm)	1.5
		透水係数 (m/s)	1×10^{-11}
		設置レベル	レベル 3
		傷/不具合の数 (個/ha)	25
4	低透水層	厚さ (m)	0.25
		透水係数 (m/s)	1×10^{-9}
5	基礎地盤	厚さ (m)	0.5
		透水係数 (m/s)	1×10^{-6}

表 6.2.23 排水層の厚さと排水量の感度解析結果

排水層の厚さ (m)	平均排水量 (mm/y)			遮水層からの平均浸出水量 (mm/y)		
	排水層の透水係数 (m/s)			排水層の透水係数 (m/s)		
	3×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	3×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}
0.014	5.2E+02	5.3E+02	5.5E+02	3.4E+01	2.2E+01	2.0E+00
0.025	5.2E+02	5.3E+02	5.5E+02	3.1E+01	1.6E+01	7.4E-01
0.05	5.2E+02	5.4E+02	5.5E+02	2.5E+01	8.6E+00	2.6E-01
0.07	5.3E+02	5.4E+02	5.5E+02	2.2E+01	6.0E+00	1.5E-01
0.1	5.3E+02	5.5E+02	5.5E+02	1.9E+01	5.0E+00	1.1E-01
0.2	5.3E+02	5.5E+02	5.5E+02	1.6E+01	4.3E+00	1.1E-01
0.3	5.3E+02	5.5E+02	5.5E+02	1.5E+01	4.3E+00	1.1E-01
0.4	5.3E+02	5.5E+02	5.5E+02	1.5E+01	4.3E+00	1.1E-01
0.5	5.4E+02	5.5E+02	5.5E+02	1.5E+01	4.3E+00	9.8E-02

表 6.3.1 排水中の Cs 濃度評価の計算条件

パラメータ	値	備考
対象核種	Cs-137	Cs-134 は半減期が約 2 年と短いため、Cs-137 を評価対象とした。
半減期 (y)	30	
初期値	放射能濃度 (Bq/kg)	1.0×10^5
	放射能 (Bq)	5.8×10^{13}
トレンチ 処分施設	形状 (m)	$400 \times 200 \times 4$
	浸透水量 (mm/y)	550
	分配係数 (m^3/kg)	0.01
Cs 吸着 マット	形状 (m)	$400 \times 200 \times 0.001$
	分配係数 (m^3/kg)	1 10 100 0 (参考)

中間貯蔵施設の概略安全評価の土壌貯蔵施設 (II 型) の初期値 10 万 Bq/kg を設定
 概念設計の安全評価におけるトレンチ処分施設の形状を設定
 6.2.2 項の遮水層への年間平均浸入水量 550mm を設定
 IAEA TRA-364 では Cs の分配係数は $0.27 m^3/kg$ (砂) と記載されているため、保守的に一桁下げた値を設定
 Cs 吸着マットの厚さは 1mm のため
 Cs 吸着マットは Cs 吸着の機能があるため、分配係数は 1、10 及び $100 m^3/kg$ を設定
 分配係数 $0 m^3/kg$ は、Cs 吸着マットを設置しない場合を想定し、比較として参考として評価をした。

表 6.3.2 Cs の土壌に対する分配係数の文献値

(単位: m³/kg)

	土の種類	データ数	Expected*1	Range*2	
				最小値	最大値
IAEA-TRS-364 ¹⁴⁾	Sand	/	2.7E-01	1.8E-03	4.0E+01
	Loam		4.4E+00	3.3E-01	6.0E+01
	Clay		1.8E+00	7.4E-02	4.0E+01
	Organic		2.7E-01	2.0E-04	3.6E+02
	土の種類	データ数	GM*3	GSD*4	
IAEA-TRS-472 ¹⁵⁾	All soils	4.7E+02	1.2E+00	7.0E+00	3.8E+02
	Sand	1.1E+02	5.3E-01	5.8E+00	3.5E+01
	Loam+clay	2.3E+02	3.7E-01	3.6E+00	3.8E+02
	Organic	1.1E+02	2.7E-01	6.8E+00	9.5E+01
	土の種類	データ数	GM*3	GSD*4	Range
わが国の 土壌における 報告値 ¹⁶⁾	Paddy Loam+clay	6.3E+01	2.6E+00	2.8E+00	2.7E-01 5.0E+01
	Upland Loam+clay	7.8E+01	4.2E+00	2.7E+00	3.6E-01 3.6E+01
	All	3.6E+01	1.9E+00	4.1E-01	2.2E-01 4.3E+01

*1: IAEA-TRS364 が最も妥当として評価した値。十分なデータが得られる理想的な場合は、パラメータ分布の 50% フラクタイルに相当する。推奨する値。

*2: 下限 95% 信頼区間 ~ 上限 95% 信頼区間の評価値

*3: 幾何平均値

*4: 幾何標準偏差

表 6.3.3 排水中における Cs の最大水中濃度

Cs 吸着マットの分配係数 (m ³ /kg)	最大水中濃度		比率 [*] (-)
	時間 (y)	値 (Bq/L)	
1	8	7.2E+03	7.3E-01
10	24	2.6E+03	2.7E-01
100	35	3.9E+02	3.9E-02
0	0.1	9.8E+03	—

※ 分配係数 0m³/kg の最大水中濃度との比率

表 6.3.4 排水中における Cs の積算放射能

Cs 吸着マットの分配係数 (m ³ /kg)	積算放射能 (Bq)	比率 [*] (-)
1	1.3E+13	9.3E-01
10	8.0E+12	5.7E-01
100	1.6E+12	1.2E-01
0	1.4E+13	—

※ 分配係数 0m³/kg の最大水中濃度との比率

表 6.3.5 Cs 吸着マットの厚さの感度解析ケース

	Cs 吸着マットの厚さ (mm)
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	10

※ 厚さ 2mm 以降は、Cs 吸着マットを重ねた場合を想定

表 6.3.6 Cs 吸着マットの厚さを変更した場合の排水中の最大水中濃度

Cs 吸着マット		最大水中濃度		比率 (-)
分配係数 (m ³ /kg)	厚さ (mm)	時間 (y)	値 (Bq/L)	
1	1	8	7.2E+03	7.3E-01
	2	12	5.9E+03	6.0E-01
	3	15	5.1E+03	5.2E-01
	4	17	4.5E+03	4.5E-01
	5	19	4.0E+03	4.1E-01
	10	24	2.6E+03	2.7E-01
0	1	0.1	9.8E+03	—

※ 分配係数 0m³/kg の最大水中濃度との比率

表 6.3.7 地下水中の Cs 濃度の計算条件

パラメータ	値	備考
対象核種	Cs-137	Cs-134 は半減期が約 2 年と短いため、Cs-137 を評価対象とした。
半減期 (y)	30	
初期値	放射能濃度 (Bq/kg)	1.0×10^5
	放射能 (Bq)	5.8×10^{13}
トレンチ 処分施設	形状 (m)	$400 \times 200 \times 4$
	浸透水量 (mm/y)	1 (550)
	分配係数 (m^3/kg)	0.01
Cs 吸着 マット	形状 (m)	$400 \times 200 \times 0.001$
	分配係数 (m^3/kg)	1
		10
100		
	0	

中間貯蔵施設の概略安全評価の土壌貯蔵施設 (II 型) の初期値 10 万 Bq/kg を設定

概念設計の安全評価におけるトレンチ処分施設の形状を設定

6.2.2 項で計算したモデル 3-2-1 の遮水層からの年間平均浸出水量 0.65mm (表 6.2.14 参照) から保守的に丸めた値を設定。(550mm/y は、遮水層及び Cs 吸着層を設置しない場合の評価に用いる。)

IAEA TRA-364 では Cs の分配係数は $0.27 m^3/kg$ (砂) と記載されているため、保守的に一桁下げた値を設定

Cs 吸着マットの厚さは 1mm のため

Cs 吸着マットは Cs 吸着の機能があるため、分配係数は 1、10 及び $100 m^3/kg$ を設定

分配係数 $0 m^3/kg$ は、遮水層及び Cs 吸着マットを設置しないケース (0-1 ケース) と遮水層は設置し、Cs 吸着マットを設置しないケース (0-2 ケース) について評価し、他の結果と比較した。

表 6.3.8 地下水における Cs の最大水中濃度

ケース	Cs 吸着マットの分配係数 (m ³ /kg)	最大水中濃度		比率* ³ (-)
		時間 (y)	値 (Bq/L)	
0-2* ¹	0	0.1	1.8E+01	1.8E-03
1	1	43	1.5E-01	1.6E-05
10	10	43	1.6E-02	1.6E-06
100	100	43	1.6E-03	1.6E-07
0-1* ²	0	0.1	9.8E+03	—

*1：遮水層は設置し、Cs 吸着マットを設置しないことを想定したケース（浸透水が 1mm/y のケース）

*2：遮水層及び Cs 吸着マットを設置しないことを想定したケース（浸透水が 550mm/y のケース）

*3：0-1 ケースとの比率

表 6.3.9 地下水における Cs の積算放射能

ケース	Cs 吸着マットの分配係数 (m ³ /kg)	積算放射能 (Bq)	比率* ³ (-)
0-2* ¹	0	3.4E+10	2.4E-03
1	1	7.9E+08	5.6E-05
10	10	8.1E+07	5.7E-06
100	100	8.1E+06	5.7E-07
0-1* ²	0	1.4E+13	—

*1：遮水層は設置し、Cs 吸着マットを設置しないことを想定したケース（浸透水が 1mm/y のケース）

*2：遮水層及び Cs 吸着マットを設置しないことを想定したケース（浸透水が 550mm/y のケース）

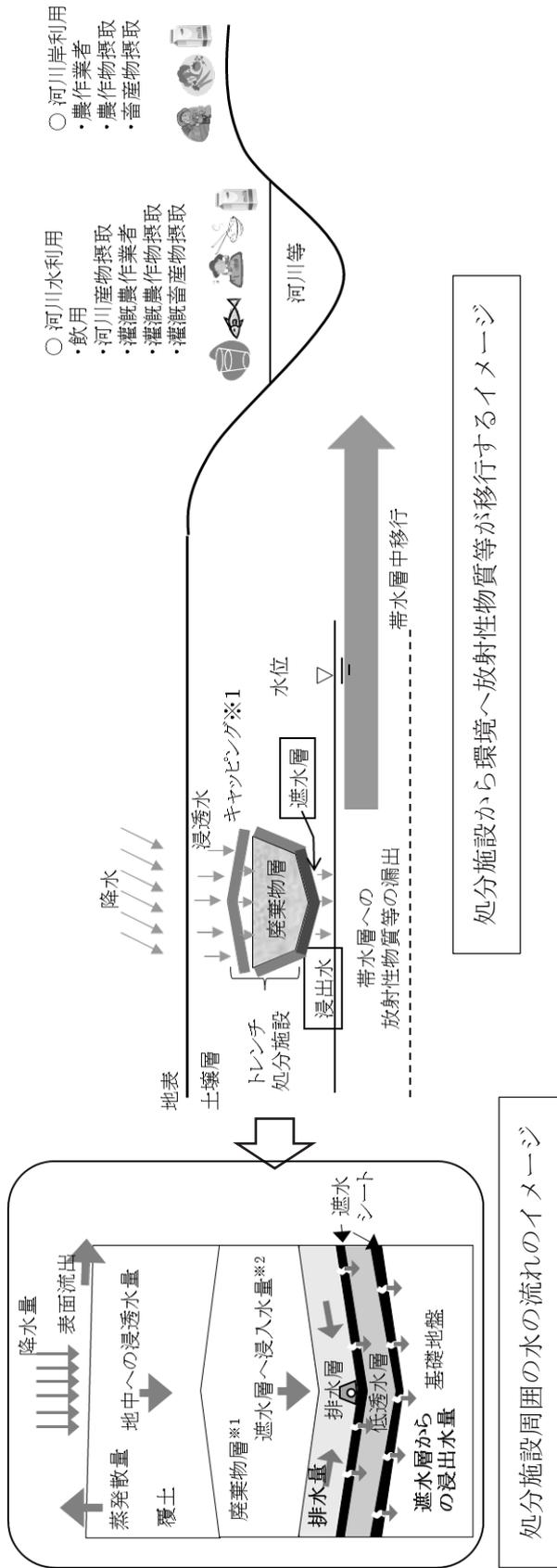
*3：0-1 ケースとの比率

表 6.3.10 感度解析に用いる浸透水量の条件

	年間平均浸透水量 (mm/y)	備考
1	1	表 6.2.14 参照。モデル 3-2-1 の結果から保守的に一桁上げた値を設定。
2	28	表 6.2.14 参照。モデル 1-1 の結果から設定。
3	40	表 6.2.14 参照。モデル 2-2 の結果から設定。
4	550	表 6.2.14 参照。モデル 2-1 の結果から設定。

表 6.3.11 浸透水量の感度解析：地下水中の Cs の最大水中濃度

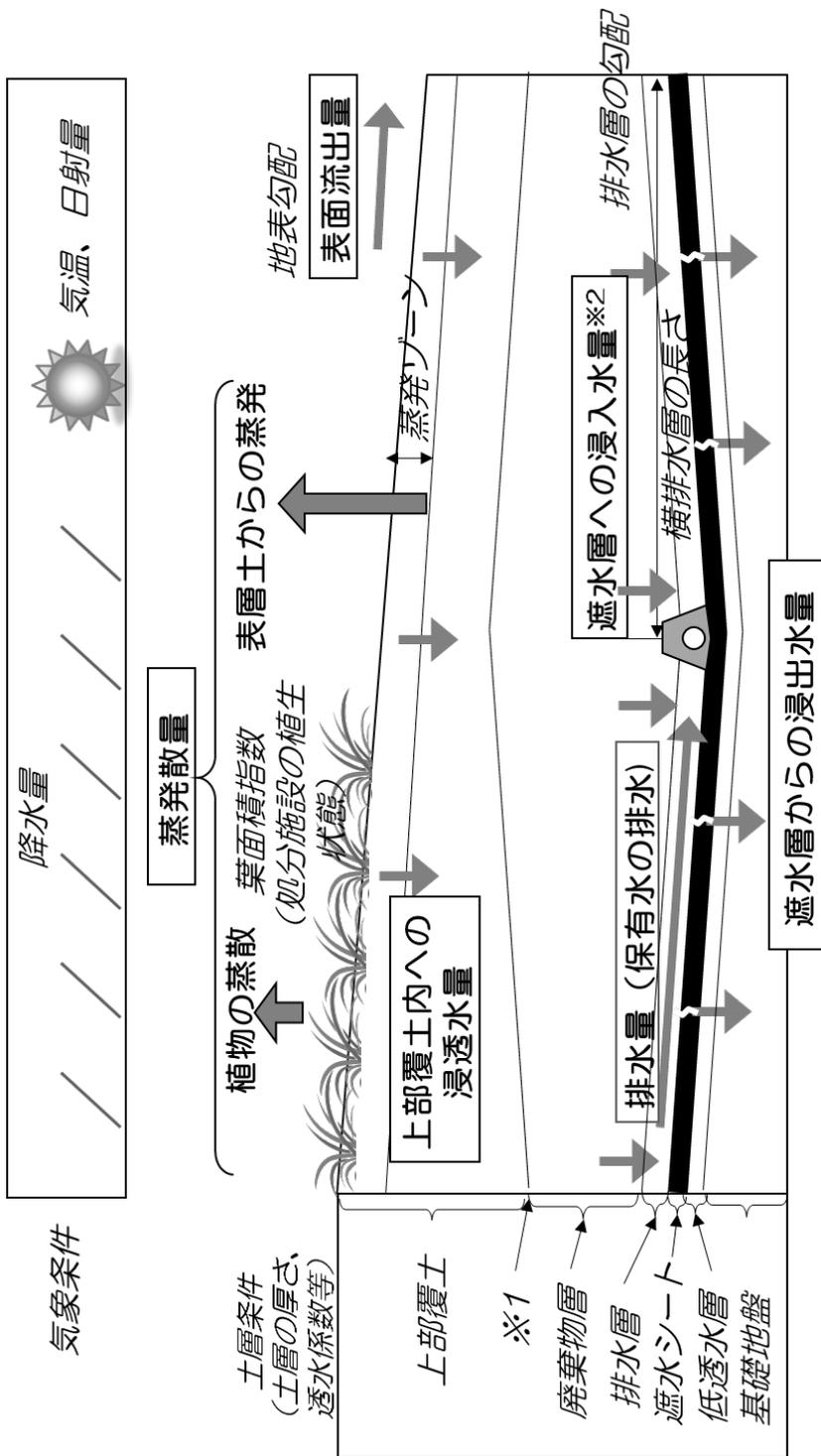
年間平均浸透水量 (mm/y)	最大水中濃度	
	時間 (y)	値 (Bq/L)
1	43	1.5E+01
28	33	9.2E+01
40	30	1.7E+02
550	8	7.2E+03



※1： 6.2節の評価ではキャッピングは想定しない。

※2： キャッピングを想定しないので地中への浸透水量=遮水層への浸入水量とした。

図 6.2.1 影響評価における水及び放射性物質等の流れの概念図

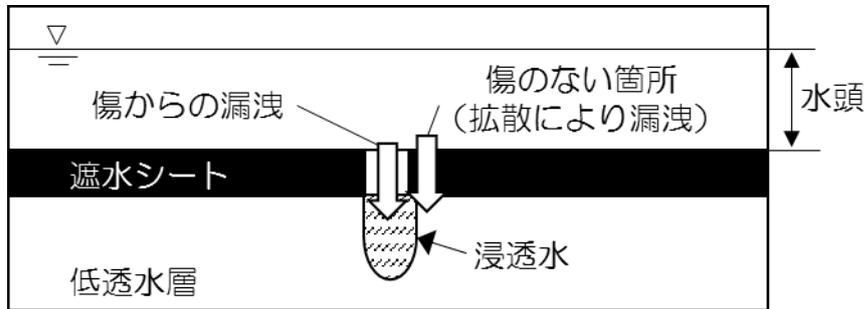


※1：本章の評価では、キャッピングは想定しない。
 ※2：上部覆土と廃棄物層の水の移行は同様とし、遮水層への浸入水量は、上部覆土内への浸入水量と同じとした。

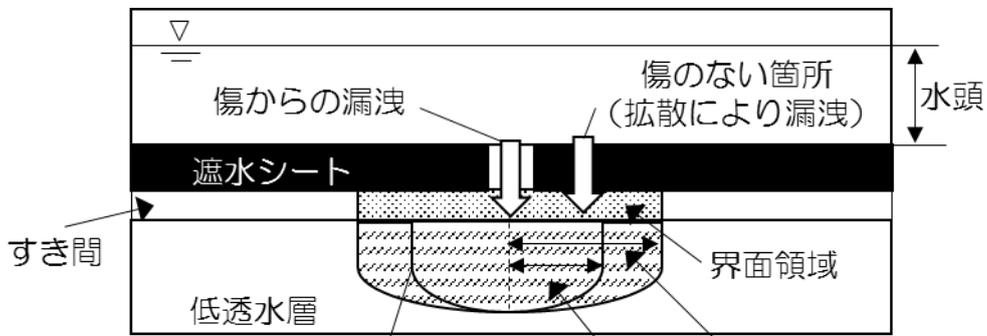
※ イタリック文字：入力値、太文字：出力値

図 6.2.2 HELP コードの概念図

レベル 1：設置状態が良好な場合



レベル 2、3：遮水シート下層にすき間がある場合



レベル2 レベル3
傷からの浸透水がすき間に広がり界面領域が発生し、
下層に浸透する。

図 6.2.3 遮水シートの設置状態の概念

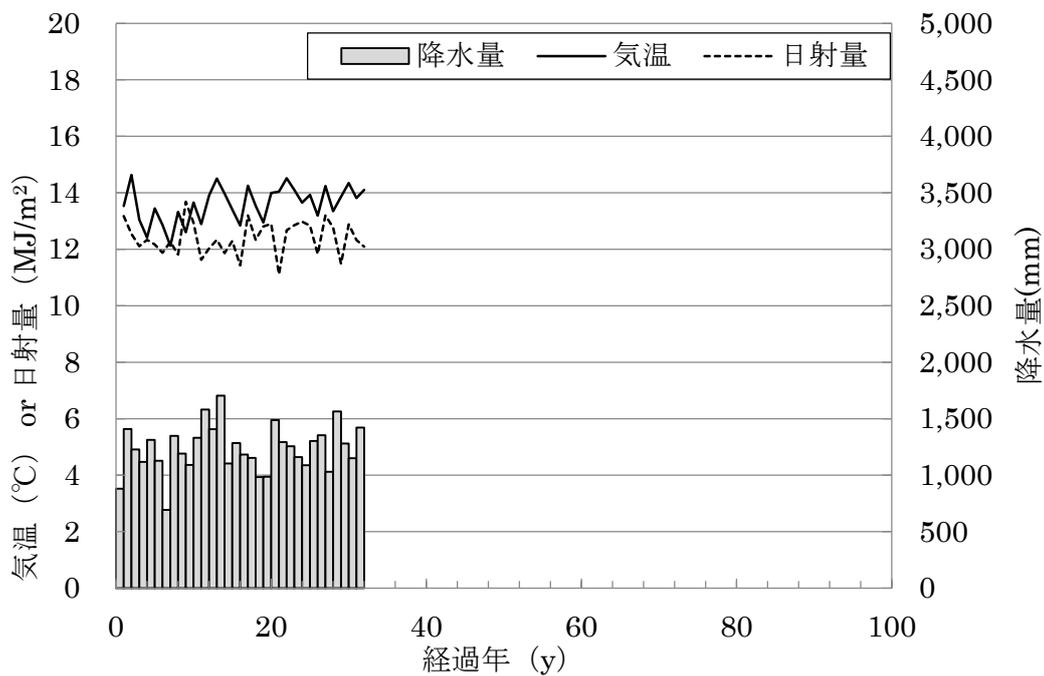


図 6.2.4 実気象データ (年降水量、年平均気温及び年平均日射量)

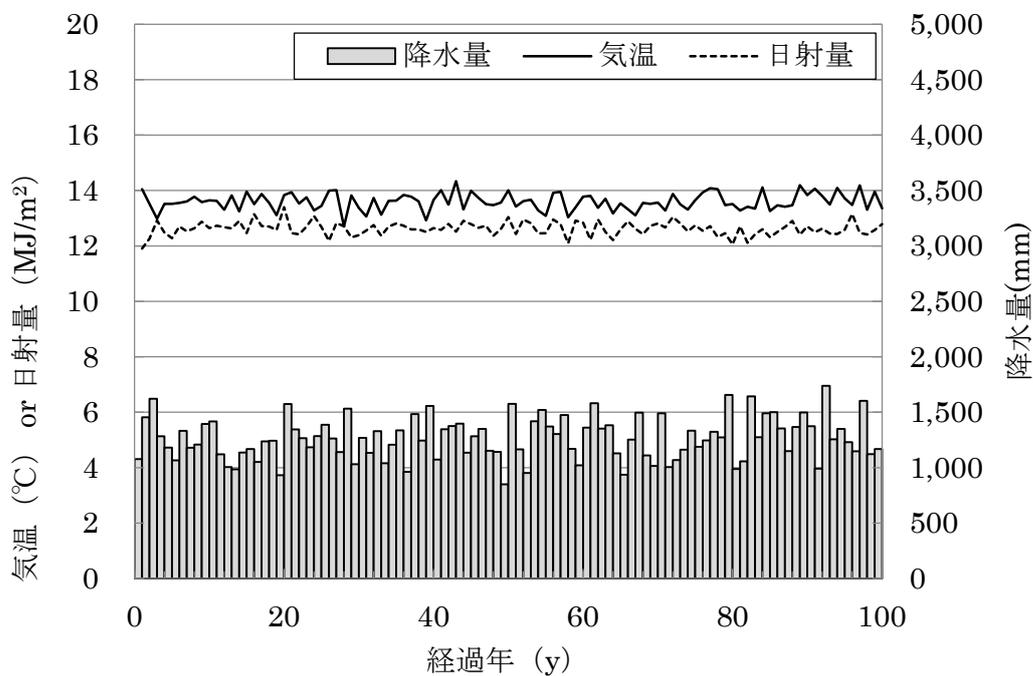


図 6.2.5 疑似気象データ (年降水量、年平均気温及び年平均日射量)

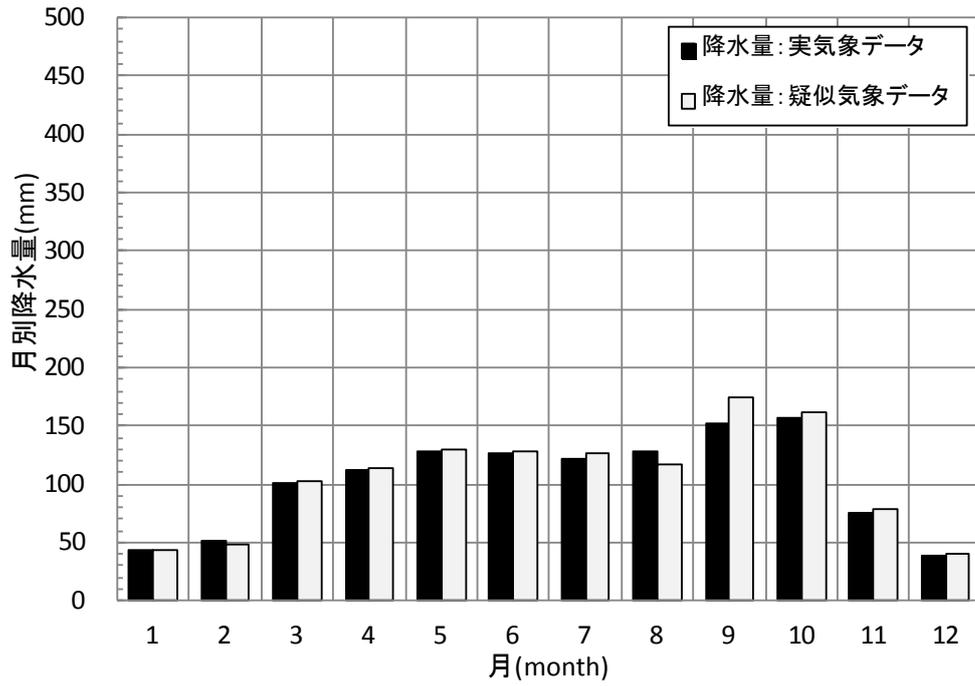


図 6.2.6 実気象データと疑似気象データの月別平均降水量の比較

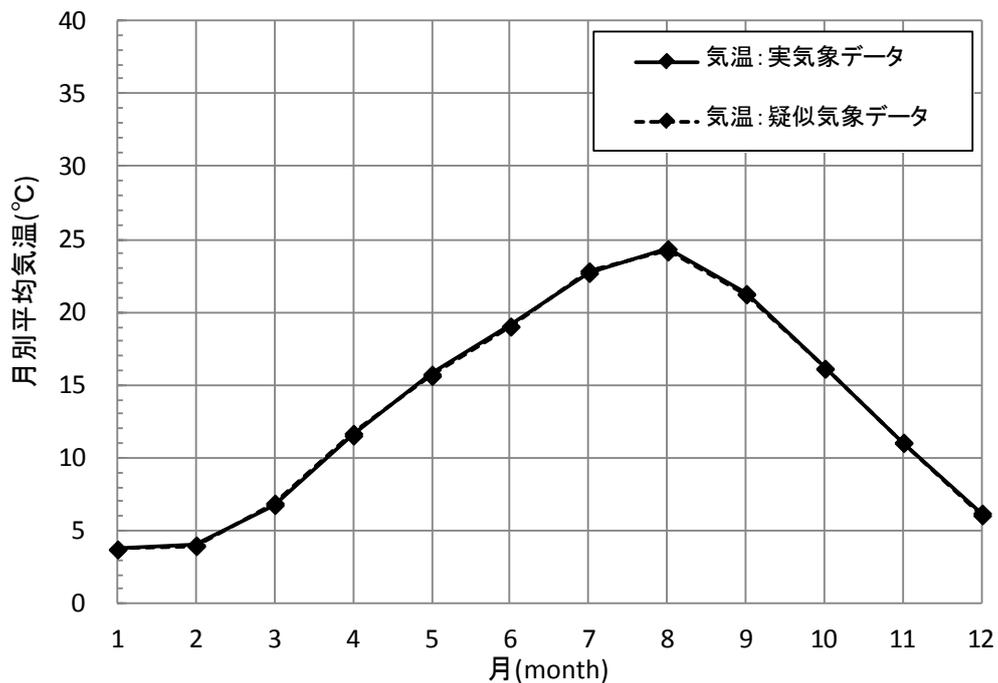


図 6.2.7 実気象データと疑似気象データの月別平均気温の比較

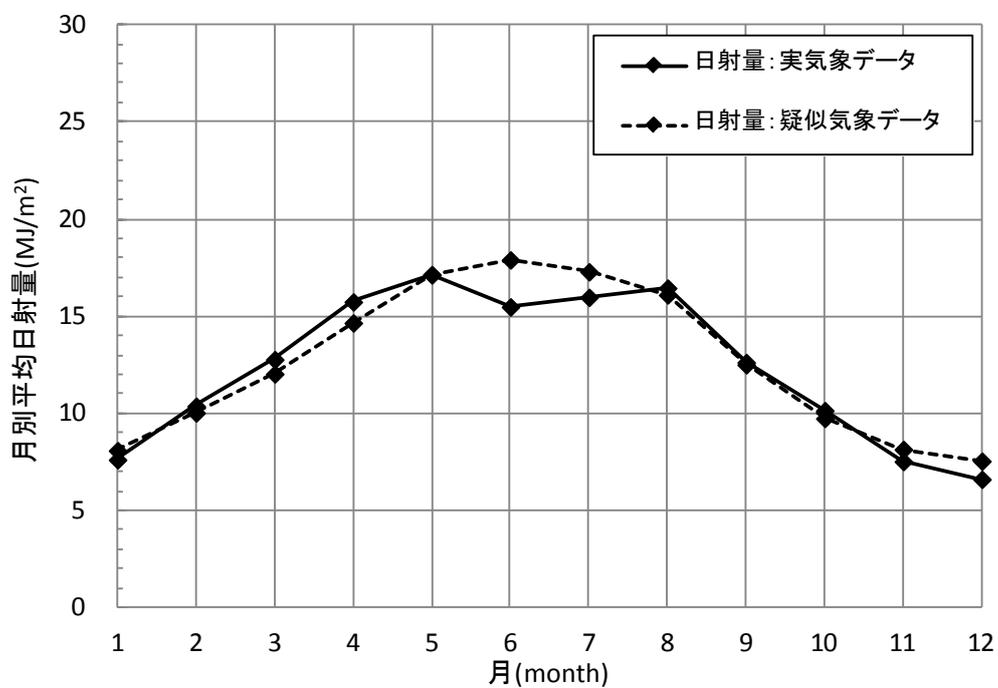


図 6.2.8 実気象データと疑似気象データの月別平均日射量の比較

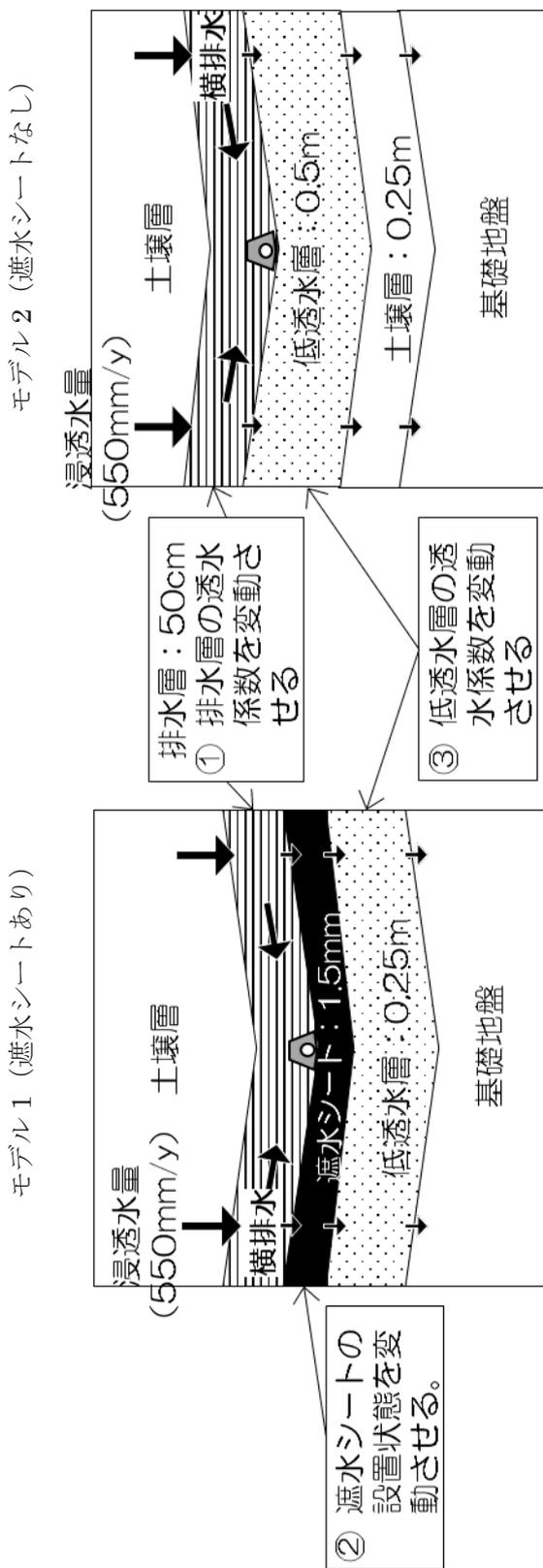


図 6.2.9 遮水シートの設置状態と低透水層・排水層の透水係数の感度解析：評価概要図

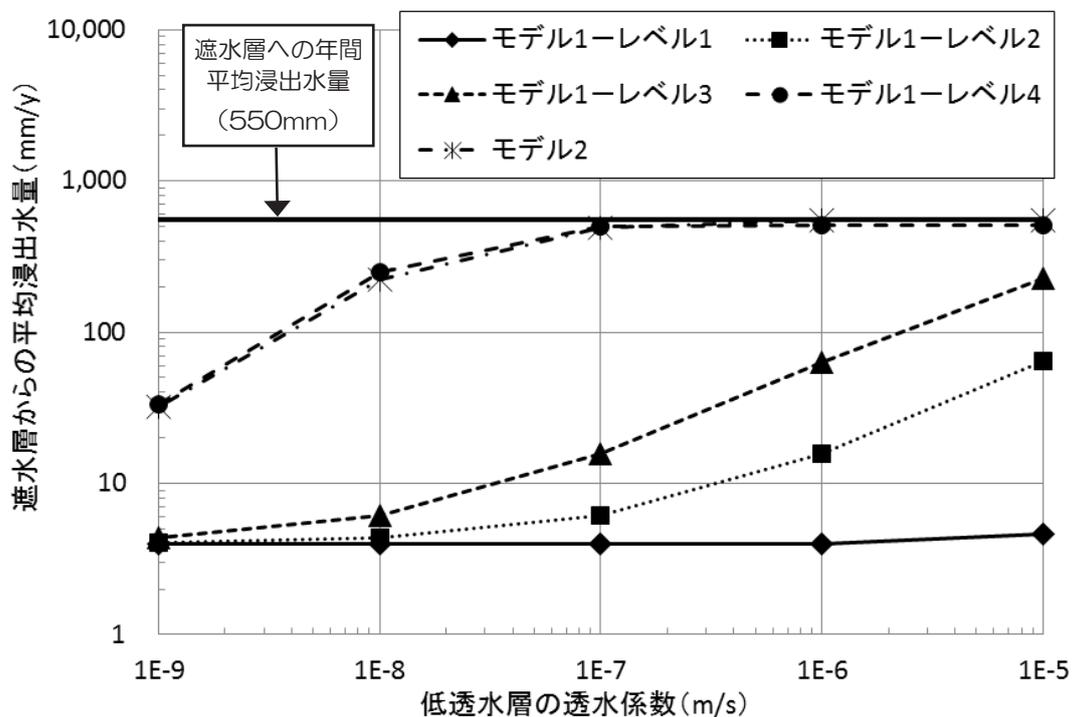


図 6.2.10 排水層の透水係数 = $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ の感度解析結果：遮水層からの平均浸出水量

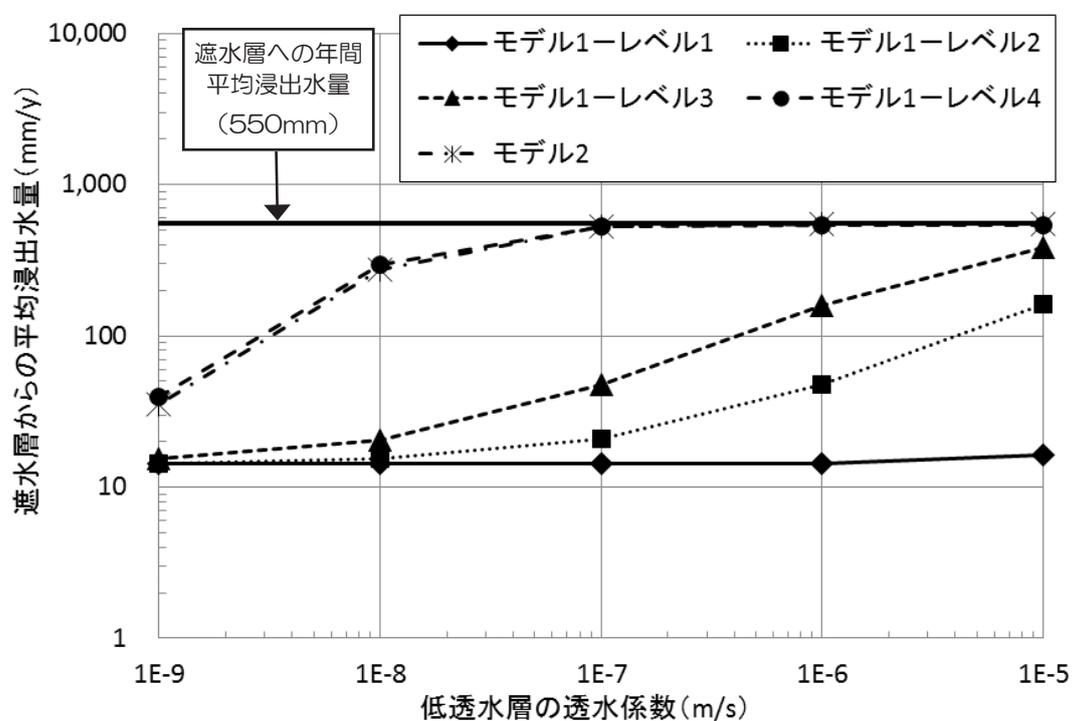


図 6.2.11 排水層の透水係数 = $3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の感度解析結果：遮水層からの平均浸出水量

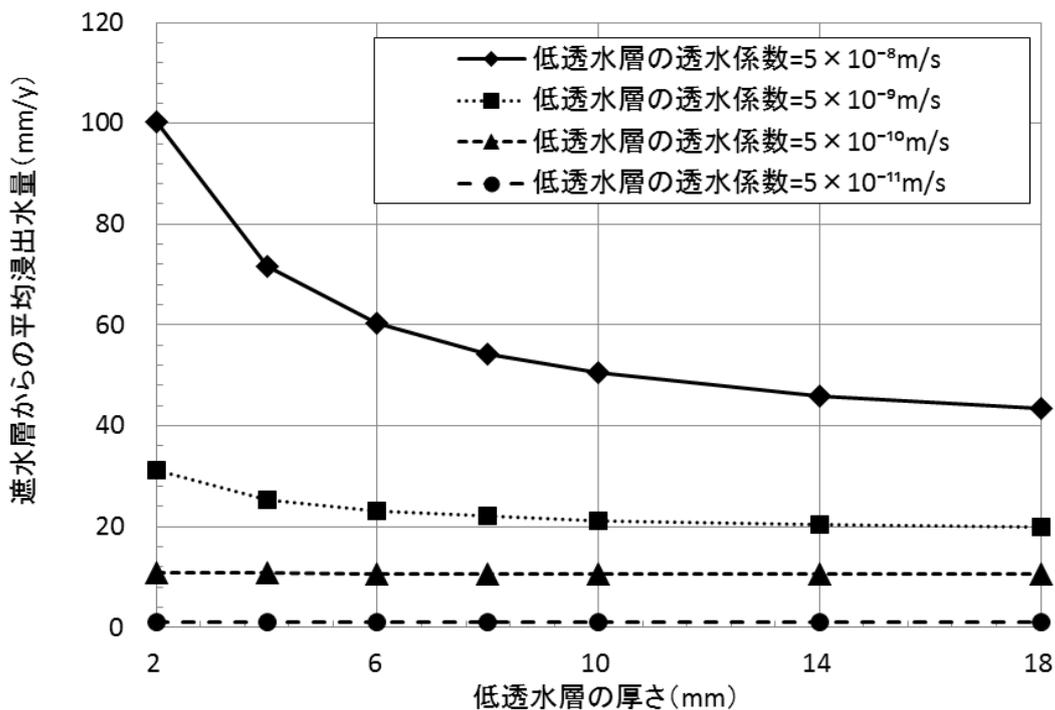


図 6.2.12 低透水層の透水係数と厚さの感度解析結果

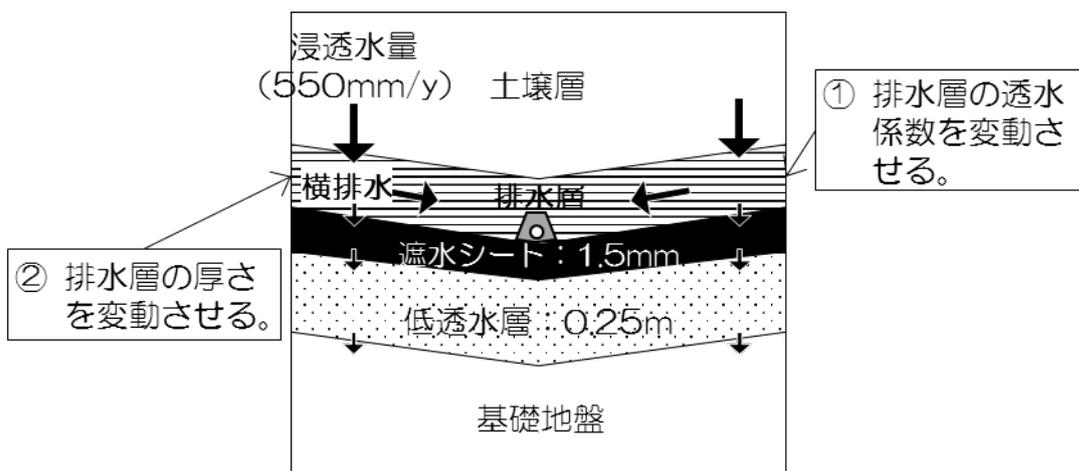


図 6.2.13 遮水層における排水層の厚さと排水量の感度解析モデル

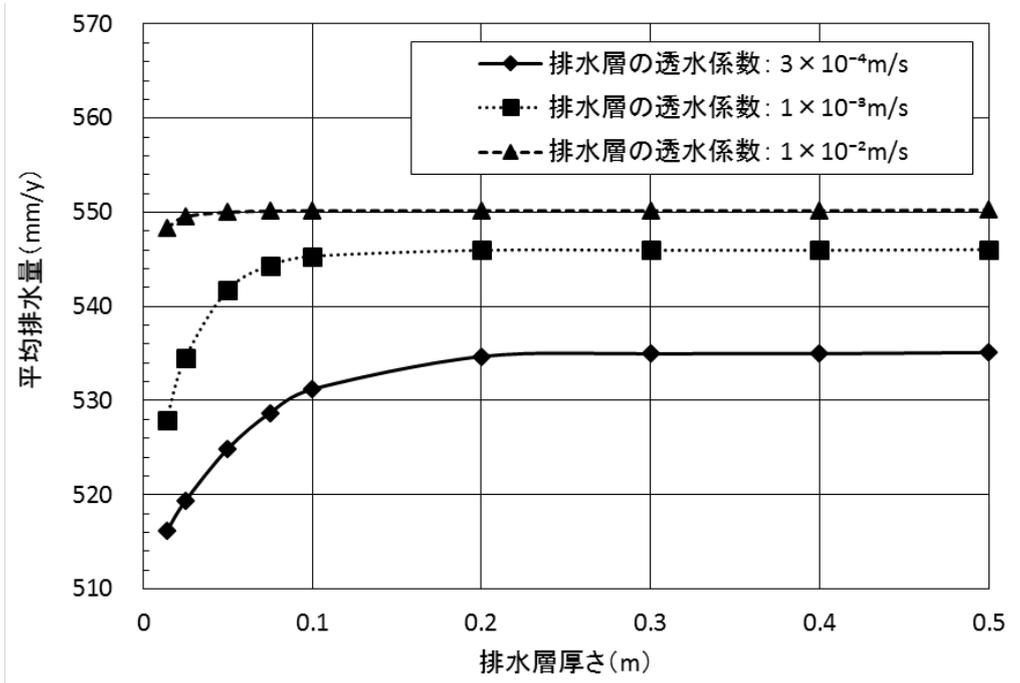


図 6.2.14 排水層の厚さと排水量の感度解析結果：平均排水量

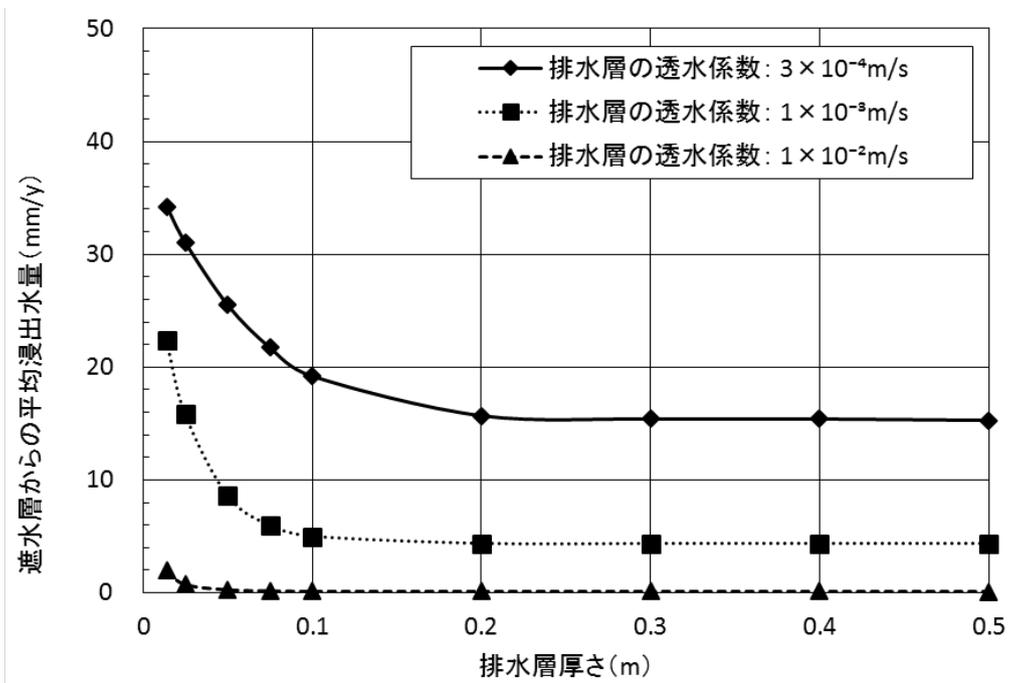


図 6.2.15 排水層の厚さと排水量の感度解析結果：遮水層からの平均浸出水量

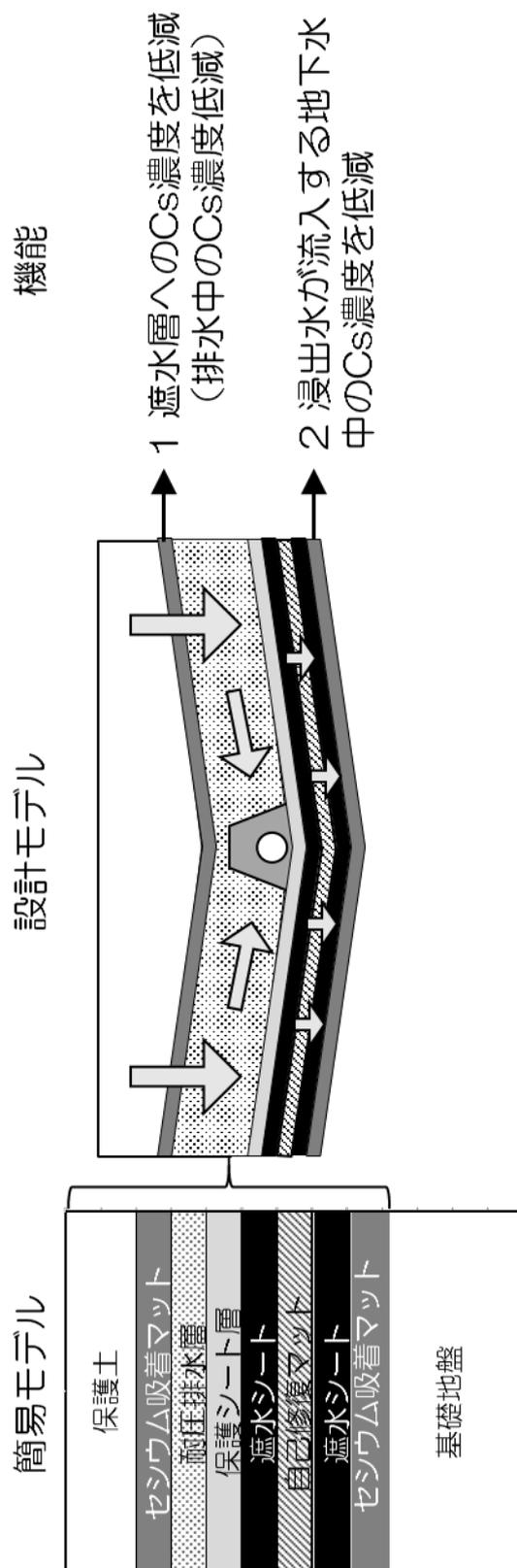


図 6.3.1 遮水層に設置する Cs 吸着マットの評価概要図

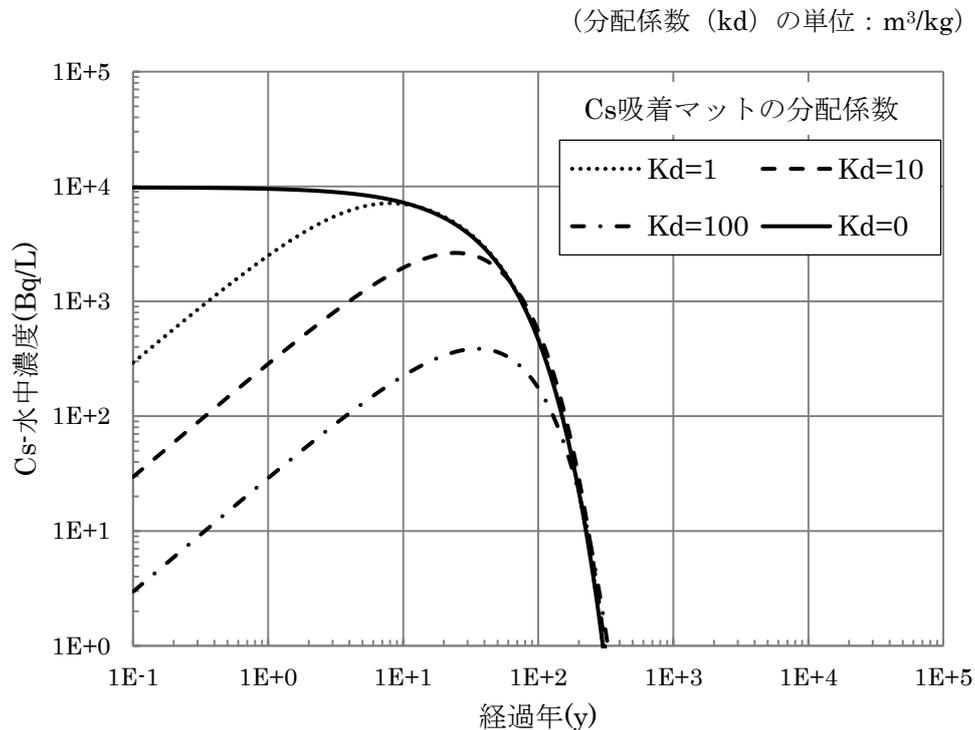


図 6.3.2 排水中における Cs の放射能濃度の経時変化

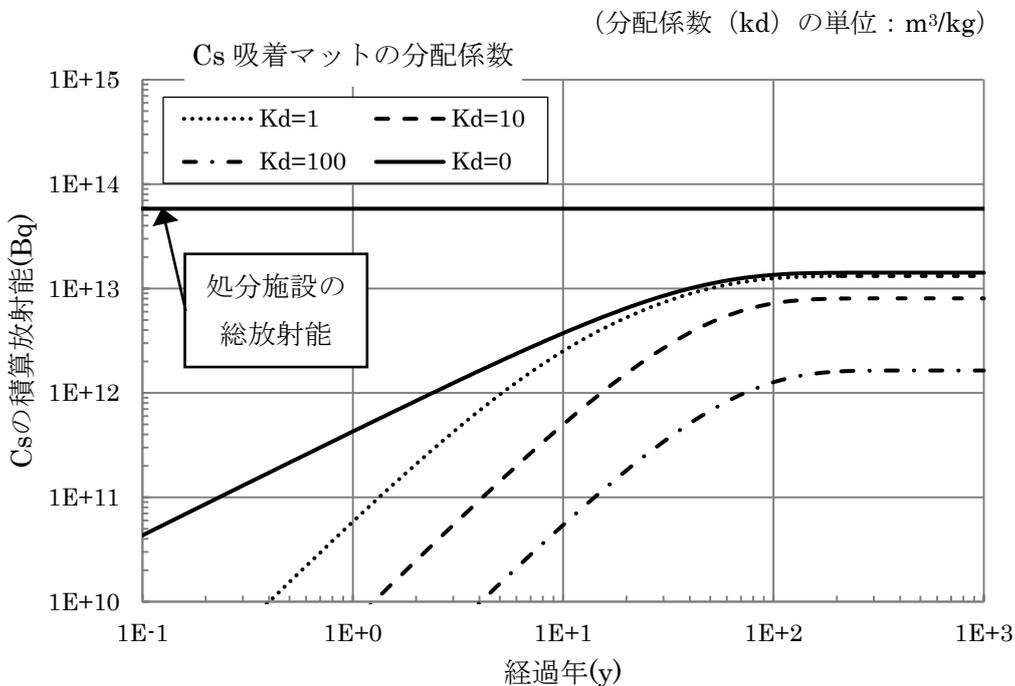
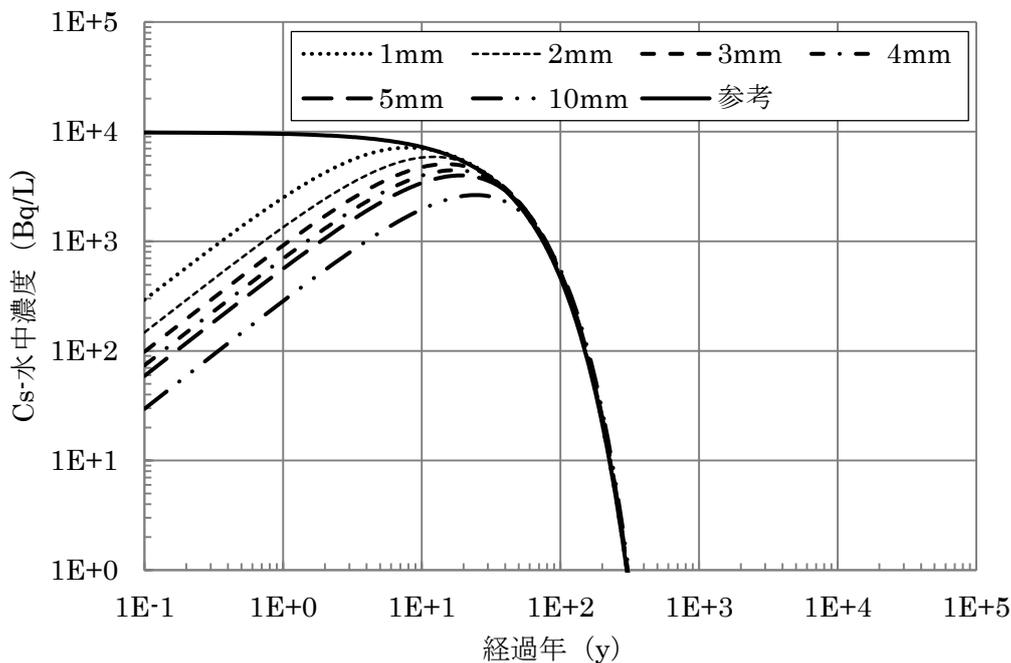


図 6.3.3 排水中における Cs 積算放射能の経時変化



※ 1m~10mm 時の分配係数は $1\text{m}^3/\text{kg}$ に設定したときの結果。参考は Cs 吸着マットの厚さ 1mm、分配係数 $0\text{m}^3/\text{kg}$ 設定したときの結果。

図 6.3.4 Cs 吸着マットの厚さを変更した場合の排水中の Cs 水中濃度の経時変化

(分配係数 (kd) の単位 : m^3/kg)

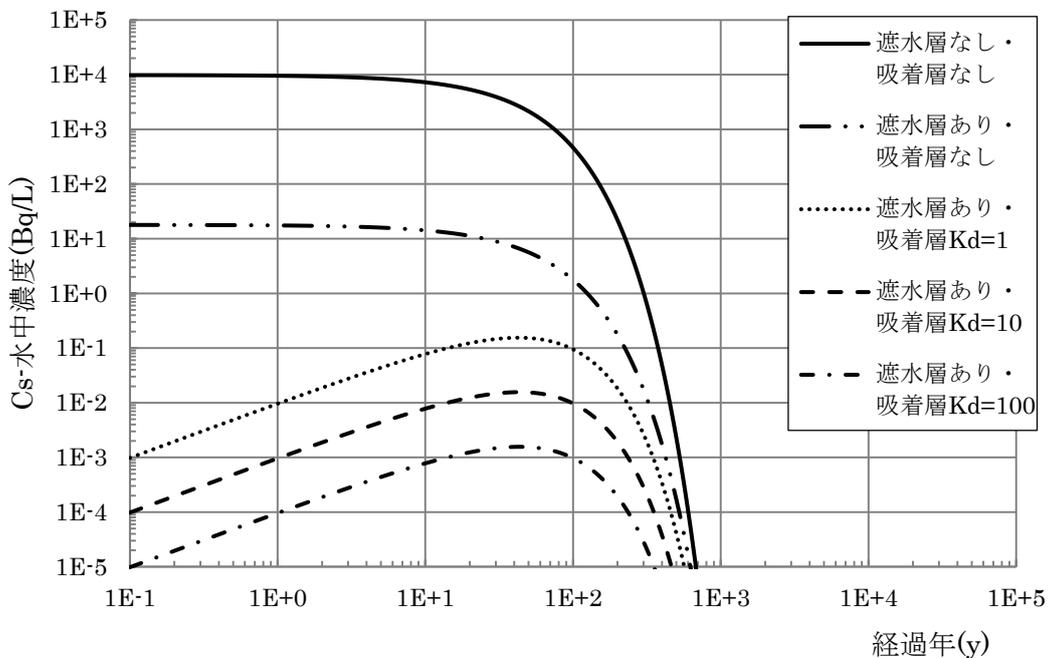


図 6.3.5 地下水における Cs の放射能濃度の経時変化

(分配係数 (kd) の単位 : m³/kg)

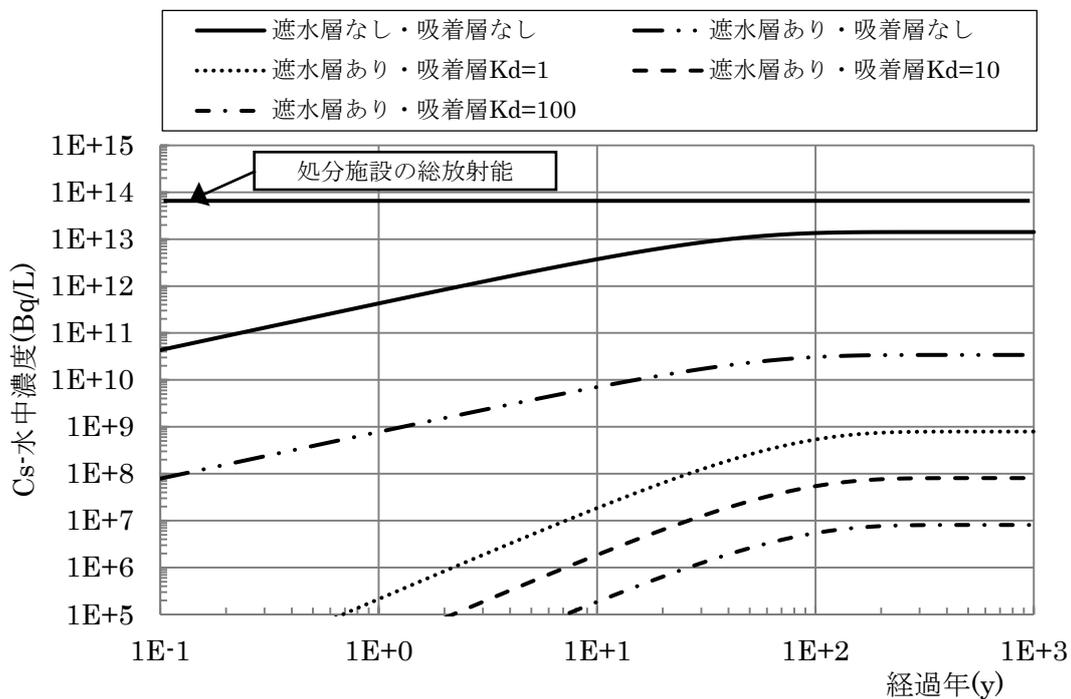


図 6.3.6 地下水中における Cs 積算放射能の評価

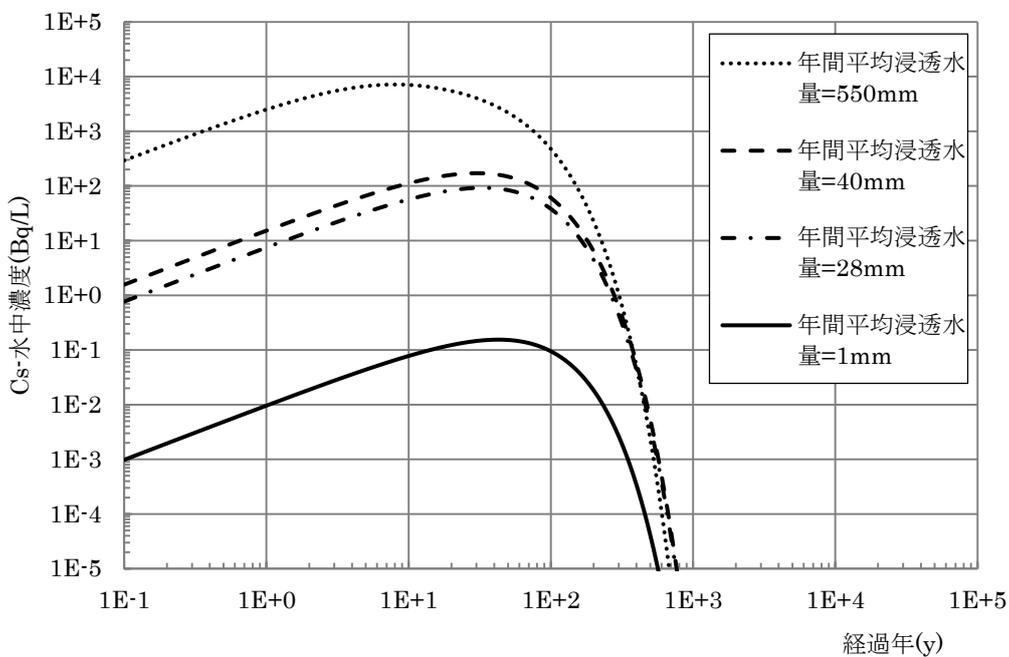


図 6.3.7 浸透水量の感度解析：地下水中の Cs 水中濃度の経時変化

7. 上部遮水層（キャッピング）の提案

研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設において、廃棄物層の底部で集水された浸出水は放射性廃液となると考えられる。浸出水の処理作業は放射性物質を取り扱う作業となるため、処理を行う浸出水量が多いと発生する放射性廃棄物の量が増大すると想定される。これより、浸出水の取扱量を極力低減させるため、廃棄物層の上部に遮水層（キャッピング）を設置することを検討した。

廃棄物層への浸透水量を最小化する観点から、6章までの検討結果を踏まえ、キャッピングは、排水層、遮水シート及び低透水層を組み合わせた構造とすることがよいと考えられる。図 7.1 に想定したキャッピングの構成案を示す。キャッピングは浸入水が廃棄物層上部に滞留することを避けるため、断面形状を山型とし浸入水を端部に排水する構造とした。一方、遮水層は排水設備の効率を考慮し、断面形状を谷型とし浸入水を中心部で排水する構造としている。

6.2.2 及び 6.3.2 の結果から、図 7.1 の構成案 1 に示す遮水シートと低透水性土壌層を設置する構造とすることにより浸透水量を数 mm/y から数 10mm/y に抑制することができると考えられる。また、図 7.1 の構成案 2 に示す遮水シートと自己修復性マット及びベントナイトマットなどの低透水層を設置した場合、浸透水量は数 mm/y 以下と試算され十分低い量となる。

なお、6.2.2 の検討で想定した下部の遮水シートは、上部の遮水シートと低透水性マットが健全であれば、十分に浸透水を抑制できると考えられ、浸透したとしても、底部の遮水層で集水されることから、想定しないこととした。また、キャッピングでは、ガスの排出を考える必要があるが、研究施設等廃棄物では、可燃物は分別して焼却処理をするため、ガスの発生量は少ないと考えられる。したがって、本検討ではガスの排出層は含めないこととした。

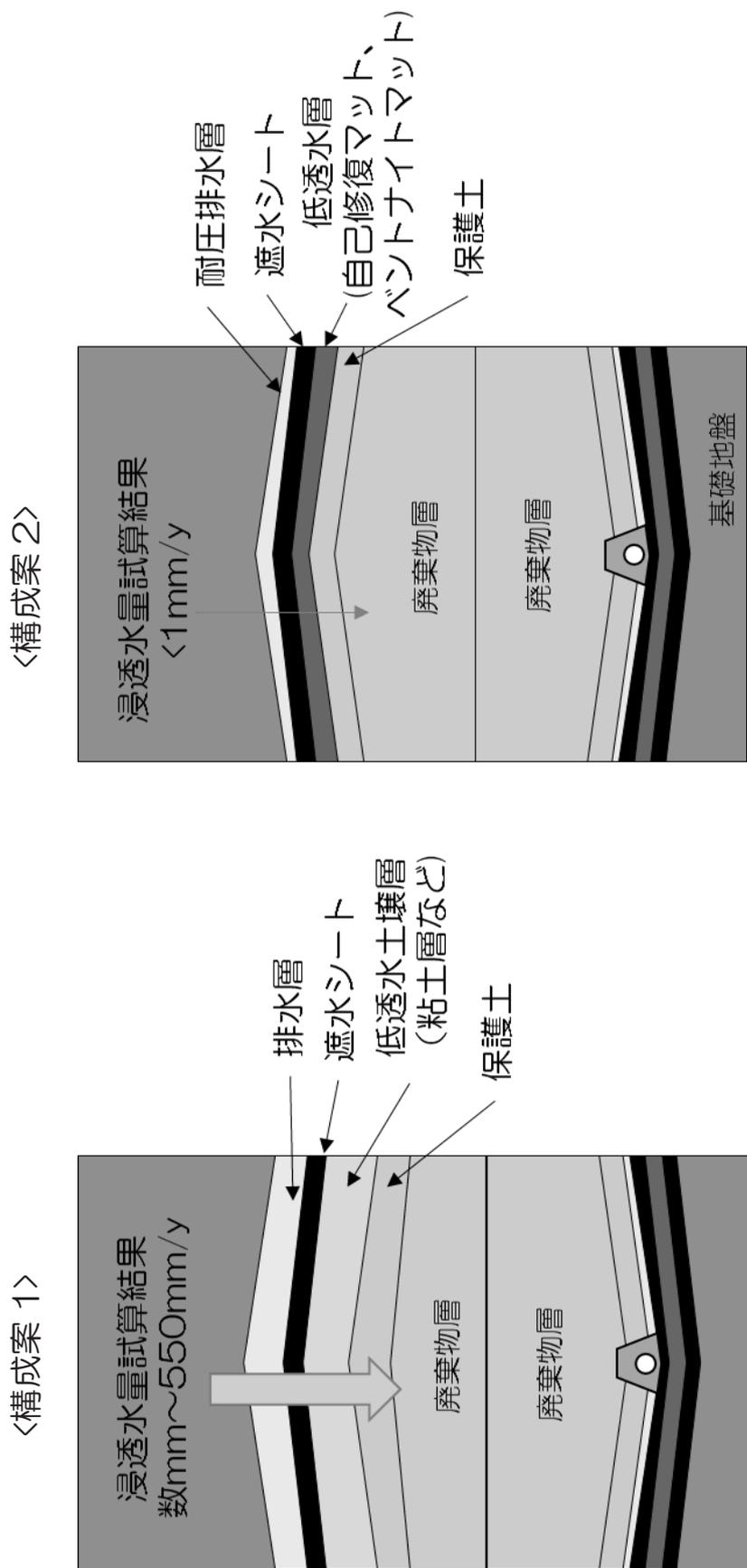


図 7.1 上部遮水層 (キャッピング) の構成案

8. 設計した遮水システムに基づく環境への影響評価

8.1. 評価方法

トレンチ処分施設では、廃棄物層への浸入水に放射性物質が溶出し、汚染した浸入水が地下水に流出することにより、放射性物質が環境へ移行すると考えられる。本章では、設計した遮水層及びキャッピングを設置した施設から放射性物質が環境へ移行した場合の影響を確認するため、処分施設からの浸出水量を設定して、環境中における線量評価を実施した。

本研究における付加機能型トレンチ処分施設の場合、降雨による地中への浸透水がキャッピングを通過して廃棄物層へ浸入し、その浸入水が放射性物質で汚染された後、さらに遮水層を通過した場合に環境中へ流出することとなる。

環境中へ流出する浸出水を評価する際に、廃棄物層への浸入水はキャッピングを通過する際に少量となり、その後遮水層で排水されるため、遮水層を通過する浸出水はさらに少量となり、ほとんど浸出水量が想定されないことが考えられる。このため、本章では、遮水層を想定せず、キャッピングだけを想定した場合の評価を実施することとした。すなわち、6.2.2 で計算した浸出水量を用いて、キャッピングを通過する浸出水量の値を設定し、浸出水が廃棄物と接触して汚染した後、遮水層で収集されずにそのまま地下水へ浸出することを想定した。6.2.2 項では遮水層からの浸出水量を評価したが、キャッピングにおける浸出水量も層の構成がほぼ同じであることから、同程度であることを前提とした。図 8.1 に処分場からの浸出水の評価モデルの概要を示す。

キャッピングの構成は、7 章において提案した構成案 2 を想定した。この場合、キャッピングからの浸出水量（廃棄物層への浸入水量）は、6.2.2 項で評価した「浸入水量 550mm ケース」におけるモデル 3-2-1 の浸出水量の結果である 0.65mm/y を丸めて 1mm/y に設定した。また、評価結果を比較するため、キャッピングを設置しないモデルも設定した。この場合、廃棄物層への浸入水量は 550mm/y とした。

評価に用いる放射性物質の種類と放射能、トレンチ処分場の規模、放射性物質を含む地下水の環境への移行経路は、概念設計¹⁾と同じとした。

8.2. 評価条件

8.2.1. トレンチ処分施設

トレンチ処分施設は、概念設計と同じ想定とした。図 8.2 に概念設計における事業所内の施設配置の概念図を示す。概念設計では、トレンチ処分施設は 2 段階に分けて操業することを想定し、最初に操業する施設を P 埋設地、後から操業する施設を S 埋設地として設計している。概念設計における線量評価では、P 埋設地及び S 埋設地それぞれの廃棄物層だけの体積を考慮して換算し、P 埋設地の廃棄物層の大きさを 200m×400m×4m と S 埋設

地の廃棄物層の大きさを 400m×200m×4m の 2 つの領域に設定している。本評価においても概念設計の埋設施設の大きさの設定方法と同じとして、表 8.1 及び図 8.3 に示す評価モデルとした。このうち、付加機能型処分施設は、P 埋設地及び S 埋設地ともに 3 基ずつであることから、それぞれの廃棄物層の 1/3 の領域として想定した。

安定型トレンチ処分施設は遮水層を設置しないため、図 8.3 の P 埋設地及び S 埋設地の付加機能型構造のトレンチ処分施設だけの放射性物質の流出を評価した線量評価を実施した。ただし、参考に施設規模に係る影響を評価するため、仮想的に安定型トレンチ処分施設も含めて P 埋設地及び S 埋設地全体からの放射性物質の流出を評価した線量評価も実施した。表 8.2 に環境中の線量評価の計算ケースを示す。

8.2.2. キャッピングからの浸出水量

キャッピングは、7 章において提案した構成案 2 を想定した。この場合、キャッピングからの浸出水量（廃棄物層への浸入水量）は、6.2.2 項で評価した「浸入水量 550mm ケース」におけるモデル 3-2-1 の浸出水量の結果である 0.65mm/y を丸めて 1mm/y に設定した。また、評価結果を比較するため、キャッピングを設置しないモデルも設定した。この場合、廃棄物層への浸入水量は 550mm/y とした。なお、概念設計の評価では地下水ハンドブック¹⁸⁾を参照して処分施設への浸入水量は 400mm/y に設定している。

これより、環境中への影響評価の計算は、トレンチ処分施設の設定が 2 ケース及び廃棄物層への浸入水量の設定が 2 通りとして、表 8.2 に示すように 4 ケースについて実施した。

8.2.3. 評価対象とする放射性物質

評価対象とする放射性物質の種類と種類毎の放射能は、概念設計と同じとした。放射性物質の種類と種類毎の放射能を表 8.3 に示す。放射能は、評価対象のトレンチ処分施設が施設全体の場合は概念設計と同様である。付加機能型構造の施設の放射能は、トレンチ処分施設全体の放射能が均一であると想定して、放射性物質毎に全体の 1/3 の放射能を設定した。

8.2.4. 評価モデル及び経路

概念設計と同じ評価モデル及び経路とした。評価モデルの概念を図 8.4 に示す。本評価では、キャッピングからの浸出水がトレンチ処分施設の廃棄物層を通過して地下水の帯水層へ浸出することにより、放射性物質が廃棄物層から帯水層へ流出し、帯水層中を移行して河川に流出するモデルである。

放射性物質は、全ての廃棄物の埋設が終了し、キャッピングも含めて施設が完成した状態から浸出が開始することを想定し、埋設作業中の放射能の減衰は考慮しないこととした。また、本来 P 埋設地と S 埋設地で建設する時期が異なるが、本評価では同時に完成し、放射性物質の浸出開始時期は同時期とした。

帯水層中での放射性物質は、帯水層土壌と地下水で分配平衡を保ちながら地下水の移流により移行するモデルとした。

放射性物質の地下水での移行では、図 8.3 及び図 8.4 に示すように処分施設の地下水流向下流端から河川までの距離を 100m とする。このため、P 埋設地と S 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設で河川までの距離が異なる設定となる。

線量の評価経路は、流出した放射性物質を含む河川水を利用した場合及び河川から周辺の岸（土壌）へ放射性物質が移行した河川岸を利用した場合を想定して、表 8.4 に示す経路を設定して環境への影響評価を行った。

放射性物質は、埋設施設の完成後から浸出を開始するため、トレンチ処分施設の管理期間（50 年間）中から線量を評価することとした。このため、管理期間内からの最大線量と管理期間終了以後からの最大線量を評価した。

8.2.5. 評価パラメータ

評価パラメータは概念設計と同じ値を設定した。評価パラメータについては付録 C に示す。

8.2.6. 評価コード

評価コードは、6 章の Cs 吸着マットのパラメータスタディでも使用した GSA-GCL2¹²⁾ とした。

8.3. 評価結果

付加機能型トレンチ処分施設及びトレンチ処分施設全体から流出した放射性物質による管理期間中からの最大線量を表 8.5 及び表 8.6 に、管理期間（50 年）終了以降の最大線量を表 8.7 及び表 8.8 示す。付加機能型トレンチ処分施設からの各浸出水量による経路毎の線量の経時変化を図 8.5 及び図 8.6 に、トレンチ処分施設全体を想定して評価した場合の線量の経時変化を図 8.7 及び図 8.8 に示す。全ての経路において、管理期間中及び管理期間終了後のケース 1 及びケース 3（浸出水量 1mm/y のケース）の最大線量は、ケース 2 及びケース 4（浸出水量 550mm/y のケース）より約 2 桁から 3 桁小さくなることを確認した。

帯水層土壌中の地下水流速は、透水性の大きい土壌に着目し、100m/y（ダルシー流速）と速く設定し、河川までの距離は、100m に設定している。このため、表 8.5 及び表 8.6 に示すように移行の速い放射性物質による寄与が大きい評価経路（ピーク時期が早い評価経路）の最大線量は、浸出水量の比（1/550）に近い値となっている^(*1)。したがって、浸出水量を小さくすることにより、環境への影響を低減させることができると考えられる。

(*1) 漏出放射能は、残存する放射能に漏洩率を乗じて求めるモデルを採用している。（参考文献 1 参照）これより、浸出水量 550mm/y のケースと浸出水量 1mm/y のケースで漏出放射能の比が時間の経過とともに変化するため、ケース 1 と 2 の最大線量の比は、浸出水量の比とは一致しない。

表 8.1 トレンチ処分施設の形状

評価パラメータ		設定値	単位	根拠
施設形状	施設全体	P 埋設地：200×400×4 S 埋設地：400×200×4	m ³	概念設計の施設の配置設計から設定。
	付加機能型トレンチ処分施設	P 埋設地：200×135×4 S 埋設地：135×200×4	m ³	概念設計における施設配置設計から設定。付加機能型トレンチ処分施設は、施設全体の 1/3 である。

表 8.2 環境中の線量評価の計算ケース

ケース	評価する施設	キャッピングからの浸出水量（廃棄物層への浸出水量）（mm/y）	備考
1	付加機能型トレンチ処分施設だけを対象とする。	1	表 6.2.14 参照。モデル 3-2-1 の結果を切り上げた値を設定。
2		550	表 6.2.14 参照。モデル 2-1 の結果から設定。
3	トレンチ処分施設全体を対象とする。	1	表 6.2.14 参照。モデル 3-2-1 の結果を切り上げた値を設定。
4		550	表 6.2.14 参照。モデル 2-1 の結果から設定。

表 8.3 概念設計で設定された核種と放射能インベントリ

核種名	半減期 (年)	インベントリ (Bq)		核種名	半減期 (年)	インベントリ (Bq)	
		付加機能型 トレンチ処 分施設	施設全体			付加機能型 トレンチ処 分施設	施設全体
H-3	1.2E+01	4.8E+11	1.5E+12	Po-210*	3.8E-01	0.0E+00	0.0E+00
Be-10	1.5E+06	3.3E+06	1.0E+07	Ra-226	1.6E+03	6.5E+01	2.0E+02
C-14	5.7E+03	4.9E+09	1.5E+10	Ra-228	5.8E+00	1.2E+07	3.4E+07
Al-26	7.2E+05	3.9E+06	1.2E+07	Ac-227	2.2E+01	4.4E+02	1.3E+03
Cl-36	3.0E+05	7.6E+07	2.3E+08	Th-228*	1.9E+00	0.0E+00	0.0E+00
Ca-41	1.0E+05	1.4E+08	4.2E+08	Th-229	7.3E+03	6.4E+01	1.9E+02
Co-60	5.3E+00	6.5E+11	1.9E+12	Th-230	7.5E+04	7.7E+03	2.3E+04
Ni-59	1.0E+05	8.1E+08	2.4E+09	Th-232	1.4E+10	3.3E+04	9.9E+04
Ni-63	1.0E+02	1.2E+11	3.5E+11	Pa-231	3.3E+04	1.1E+03	3.2E+03
Se-79	3.0E+05	5.4E+04	1.6E+05	U-232	6.9E+01	4.3E+06	1.3E+07
Sr-90	2.9E+01	4.1E+09	1.2E+10	U-233	1.6E+05	1.1E+05	3.2E+05
Zr-93	1.5E+06	4.6E+05	1.4E+06	U-234	2.5E+05	1.3E+09	3.8E+09
Nb-94	2.0E+04	8.2E+06	2.5E+07	U-235	7.0E+08	5.5E+07	1.7E+08
Mo-93	4.0E+03	2.5E+07	7.5E+07	U-236	2.3E+07	2.9E+07	8.6E+07
Tc-99	2.1E+05	2.6E+08	7.8E+08	U-238	4.5E+09	1.1E+09	3.2E+09
Ag-108m	4.2E+02	7.4E+07	2.2E+08	Np-237	2.1E+06	3.0E+05	8.9E+05
Cd-113m	1.4E+01	3.4E+06	1.0E+07	Pu-238	8.8E+01	1.4E+08	4.2E+08
Sn-126	2.3E+05	4.8E+05	1.4E+06	Pu-239	2.4E+04	1.1E+08	3.3E+08
I-129	1.6E+07	1.4E+03	4.1E+03	Pu-240	6.6E+03	7.2E+07	2.2E+08
Cs-135	2.3E+06	1.3E+06	3.8E+06	Pu-241	1.4E+01	1.1E+07	3.3E+07
Cs-137	3.0E+01	2.1E+10	6.4E+10	Pu-242	3.8E+05	2.4E+05	7.3E+05
Ba-133	1.1E+01	8.2E+08	2.5E+09	Am-241	4.3E+02	1.7E+09	5.1E+09
Eu-152	1.4E+01	8.2E+09	2.5E+10	Am-242m	1.4E+02	4.2E+05	1.3E+06
Eu-154	8.6E+00	1.2E+09	3.6E+09	Am-243	7.4E+03	1.7E+06	5.2E+06
Ho-166m	1.2E+03	1.1E+06	3.2E+06	Cm-243	2.9E+01	1.9E+06	5.8E+06
Hf-182	9.0E+06	8.9E+03	2.7E+04	Cm-244	1.8E+01	2.3E+08	6.9E+08
Pb-210	2.2E+01	2.1E+01	6.2E+01	Cm-245	8.5E+03	1.7E+04	5.1E+04

* 初期インベントリがゼロの核種は埋設処分後、親核種の崩壊連鎖で生成される子孫核種。上記の2核種以外は、線量換算係数で他の系列核種に含まれている。

表 8.4 評価経路

利用形態	経路
河川水利用	飲用
	河川産物摂取
	灌漑農作業
	灌漑農作物（米）摂取
	灌漑畜産物（牛乳）摂取
河川岸利用	農業者
	農作物（葉菜等）摂取
	畜産物（牛乳）摂取

表 8.5 環境中の線量評価結果 (管理期間中からの最大線量) :

ケース 1 及び 2 (付加機能型トレンチ処分施設による評価)

利用形態	評価対象者	ケース 1 浸出水量 1mm/y		ケース 2 浸出水量 550mm/y		最大線量の比率 (ケース 1 / ケース 2)
		ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	
河川水 利用	飲用	2	9.4E-05	2	4.0E-02	2.4E-03
	河川産物摂取	20	5.4E-05	20	2.3E-02	2.3E-03
	灌漑農業者	125,000	2.8E-06	400	1.3E-04	2.1E-02
	灌漑農作物 (米) 摂取	150,000	8.6E-06	2	3.3E-03	2.6E-03
	灌漑畜産物 (牛乳) 摂取	2	5.1E-05	2	2.2E-02	2.4E-03
河川岸 利用	農業者	125,000	3.3E-07	310	1.3E-05	2.4E-02
	農作物 (葉菜等) 摂取	2	1.0E-06	2	4.3E-04	2.4E-03
	畜産物 (牛乳) 摂取	2	1.3E-06	2	5.7E-04	2.4E-03

表 8.6 環境中の線量評価結果 (管理期間中からの最大線量) :

ケース 3 及び 4 (トレンチ処分施設全体による評価)

利用形態	評価対象者	ケース 3 浸出水量 : 1mm/y		ケース 4 浸出水量 550mm/y		最大線量の比率 (1mm / 550mm)
		ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	
河川水 利用	飲用	2	2.8E-04	2	1.1E-01	2.6E-03
	河川産物摂取	20	1.6E-04	19	6.2E-02	2.6E-03
	灌漑農業者	125,000	8.3E-06	660	4.5E-04	1.8E-02
	灌漑農作物 (米) 摂取	150,000	2.6E-05	2	9.5E-03	2.7E-03
	灌漑畜産物 (牛乳) 摂取	2	1.5E-04	2	5.9E-02	2.6E-03
河川岸 利用	農業者	125,000	9.8E-07	310	4.0E-05	2.5E-02
	農作物 (葉菜等) 摂取	2	3.1E-06	2	1.2E-03	2.6E-03
	畜産物 (牛乳) 摂取	2	4.1E-06	2	1.6E-03	2.6E-03

表 8.7 環境中の線量評価結果（管理期間終了以後からの最大線量）：
ケース 1 及び 2（付加機能型トレンチ処分施設による評価）

利用形態	評価対象者	ケース 1 浸出水量：1mm/y		ケース 2 浸出水量 550mm/y		最大線量の比率 (ケース 1 / ケース 2)
		ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	
河川水 利用	飲用	50	8.1E-06	300	1.2E-03	6.6E-03
	河川産物摂取	50	5.3E-05	50	7.9E-03	6.7E-03
	灌漑農業者	125,000	2.8E-06	400	1.3E-04	2.1E-02
	灌漑農作物（米）摂取	150,000	8.6E-06	70	3.2E-04	2.7E-02
	灌漑畜産物（牛乳）摂取	50	5.3E-06	50	2.5E-04	2.1E-02
河川岸 利用	農業者	125,000	3.3E-07	310	1.3E-05	2.4E-02
	農作物（葉菜等）摂取	60	4.3E-07	60	1.9E-04	2.3E-03
	畜産物（牛乳）摂取	50	2.9E-07	50	3.9E-05	7.4E-03

表 8.8 環境中の線量評価結果（管理期間終了以後からの最大線量）：
ケース 3 及び 4（トレンチ処分施設全体による評価）

利用形態	評価対象者	ケース 3 浸出水量：1mm/y		ケース 4 浸出水量 550mm/y		最大線量の比率 (ケース 3 / ケース 4)
		ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	ピーク時期 (y)	最大線量 (μ Sv/y)	
河川水 利用	飲用	50	2.5E-05	300	3.4E-03	7.4E-03
	河川産物摂取	50	1.6E-04	50	2.2E-02	7.4E-03
	灌漑農業者	125,000	8.3E-06	660	4.5E-04	1.8E-02
	灌漑農作物（米）摂取	150,000	2.6E-05	70	1.4E-03	1.8E-02
	灌漑畜産物（牛乳）摂取	50	1.6E-05	50	8.9E-04	1.8E-02
河川岸 利用	農業者	125,000	9.8E-07	310	4.0E-05	2.5E-02
	農作物（葉菜等）摂取	60	1.9E-06	60	8.4E-04	2.2E-03
	畜産物（牛乳）摂取	50	9.4E-07	50	1.5E-04	6.2E-03

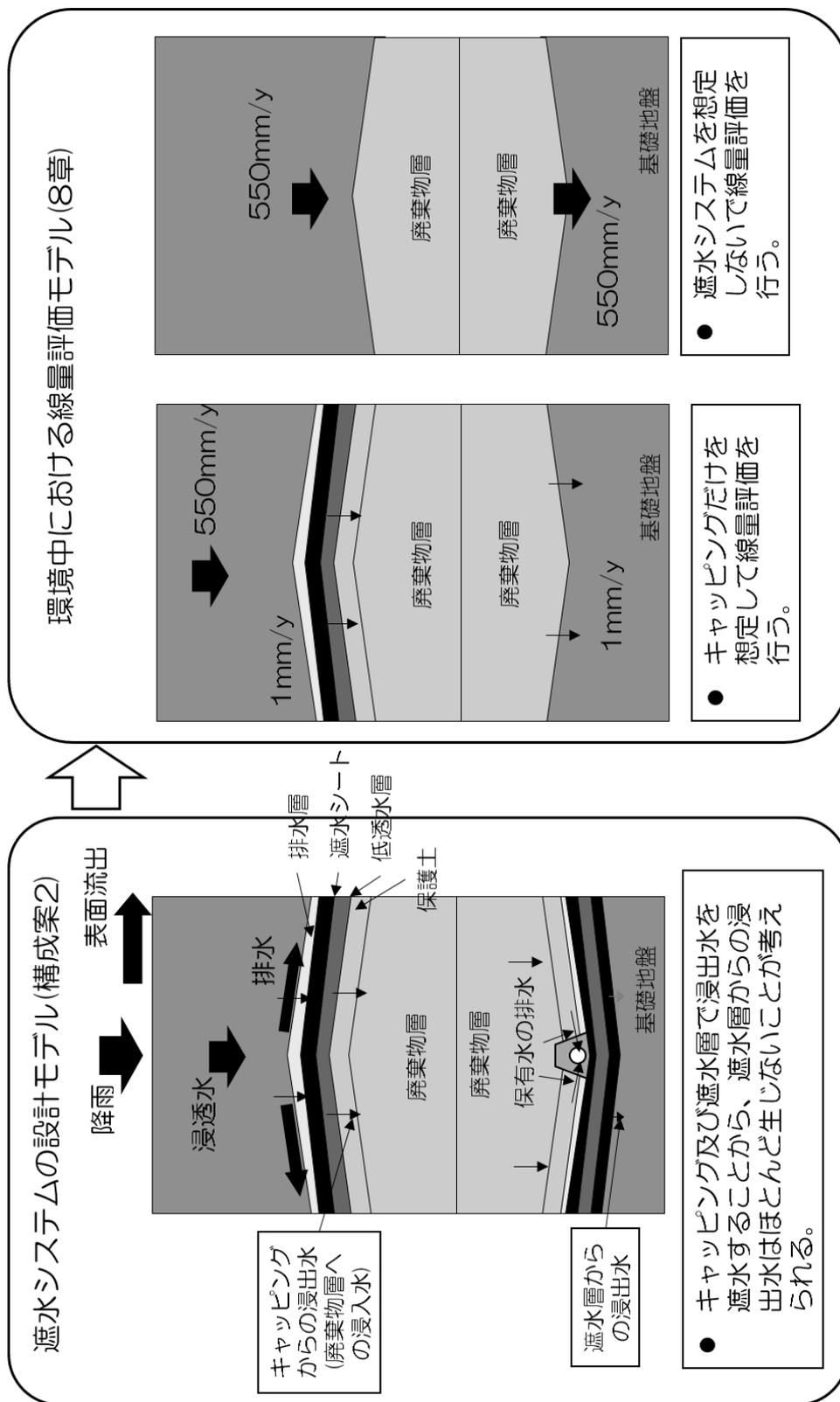


図 8.1 遮水システムに基づく環境中への影響評価モデルの概念

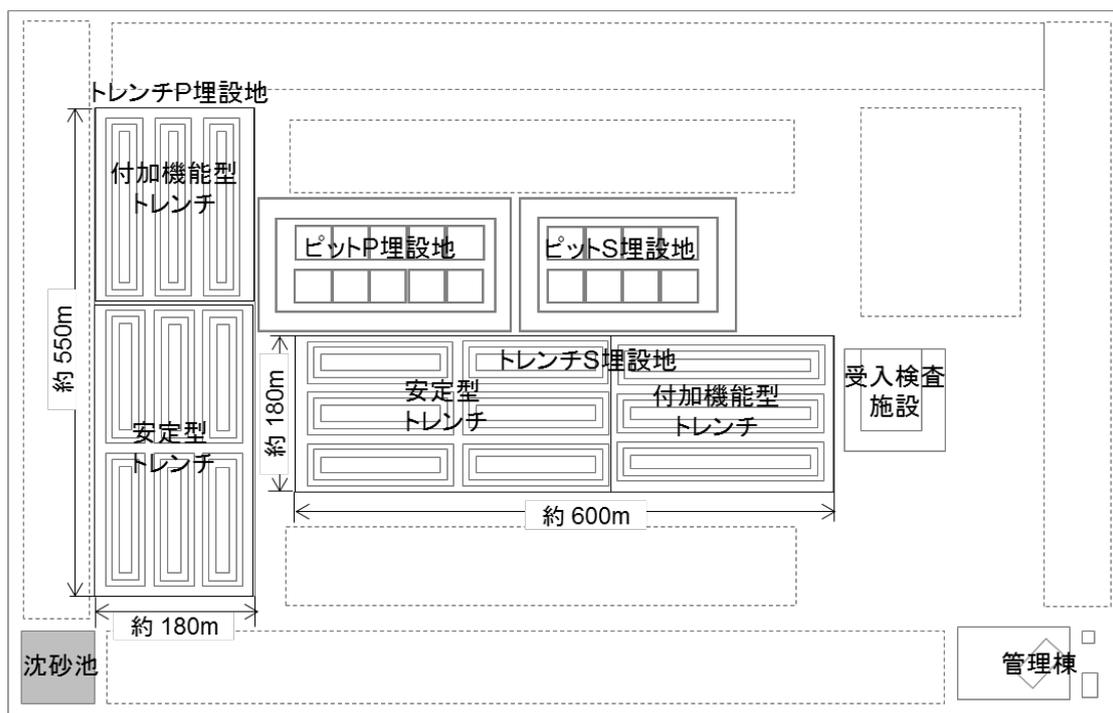


図 8.2 概念設計における事業所内の施設配置の概念図

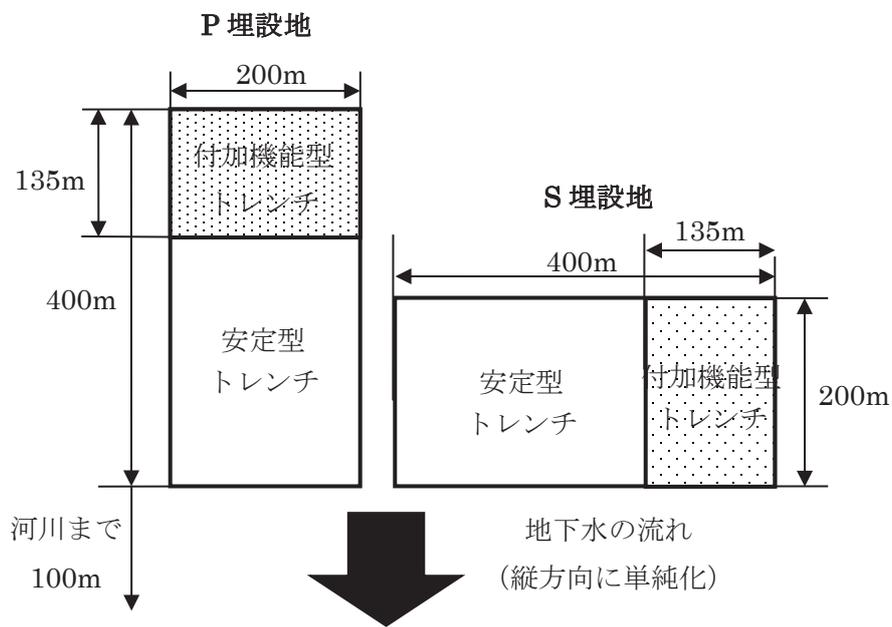


図 8.3 評価におけるトレンチ処分施設の配置モデル

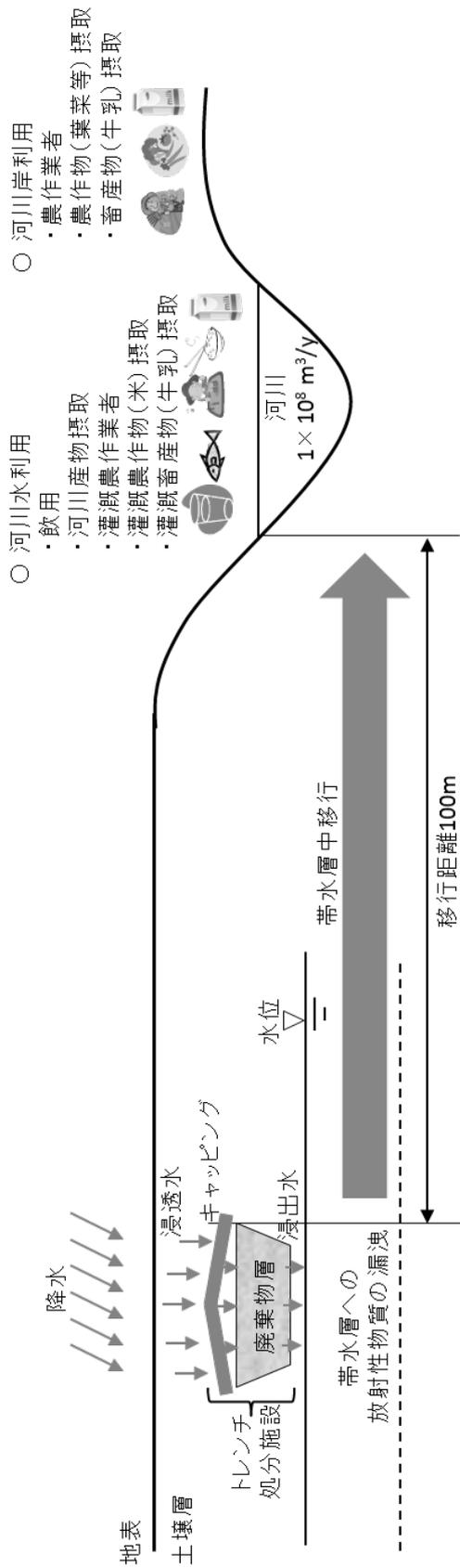
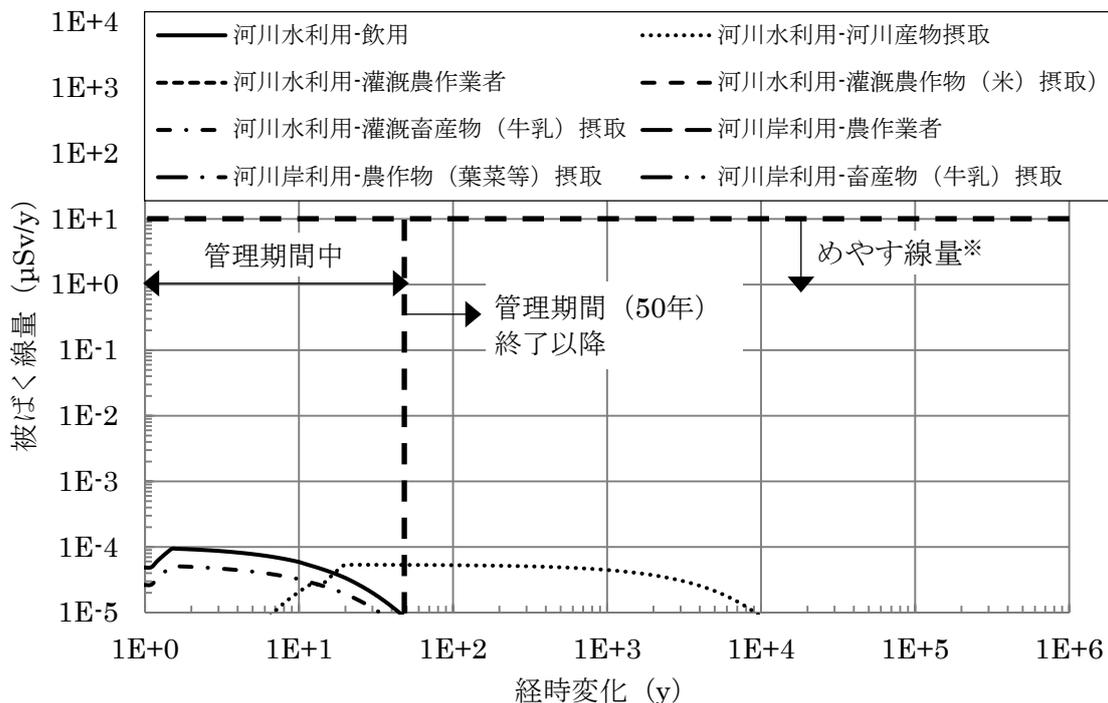
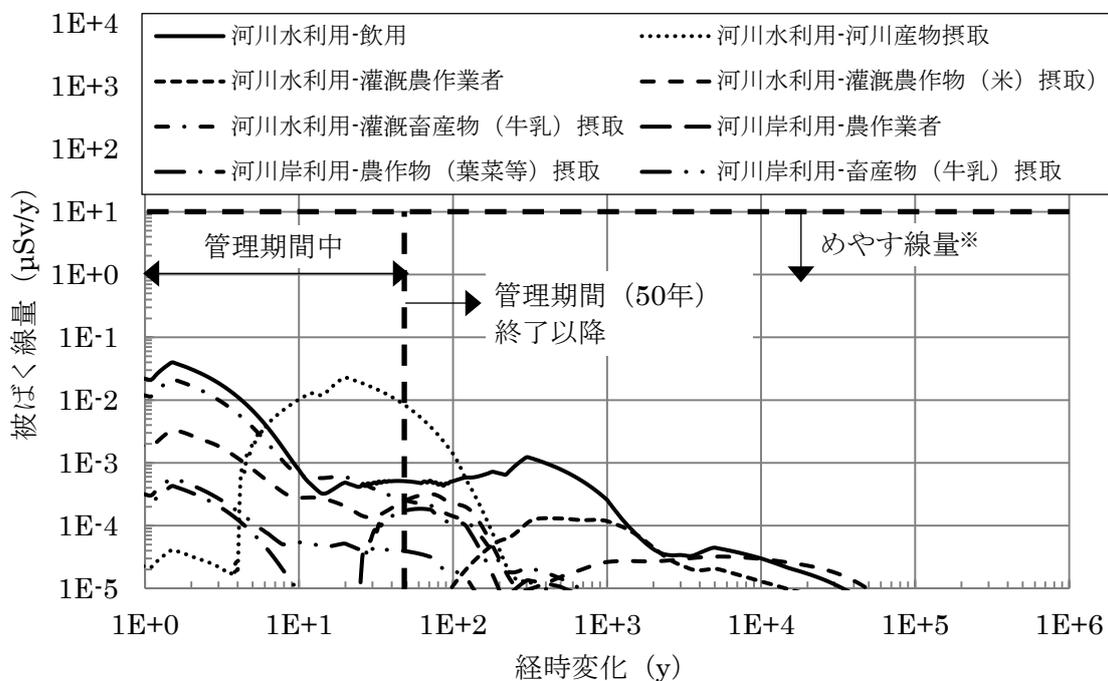


図 8.4 環境への影響評価の概念図



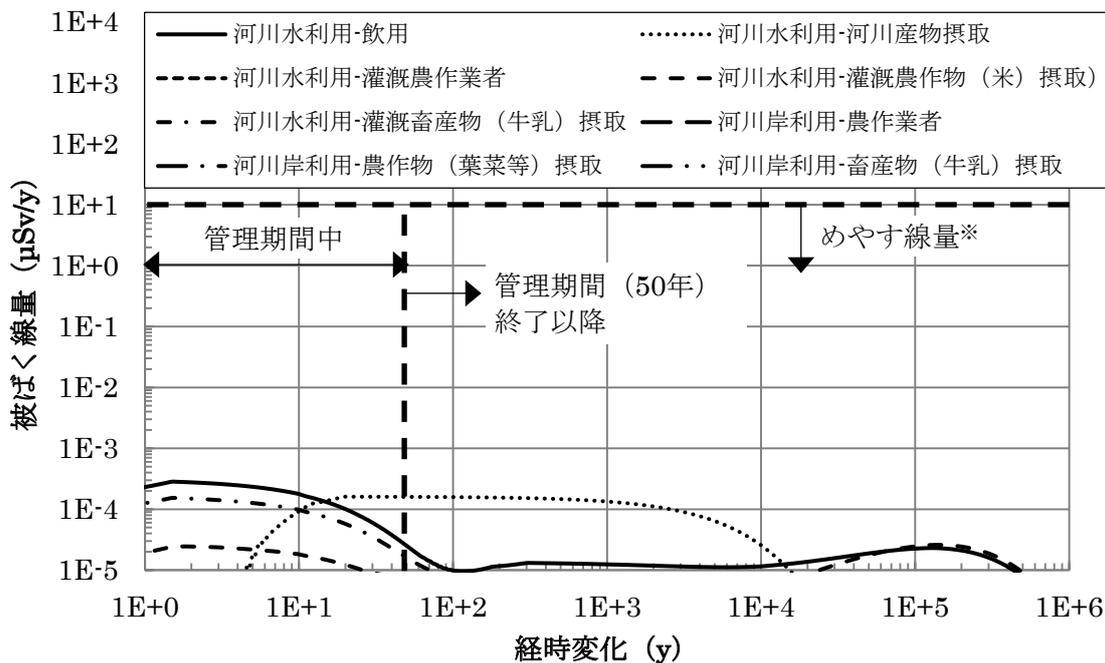
※ 第二種廃棄物埋設事業の基本シナリオのめやす線量 $10 \mu \text{Sv/y}$

図 8.5 ケース 1：付加機能型トレンチ処分施設の各経路における線量の経時変化 (浸出水量 1mm/y)



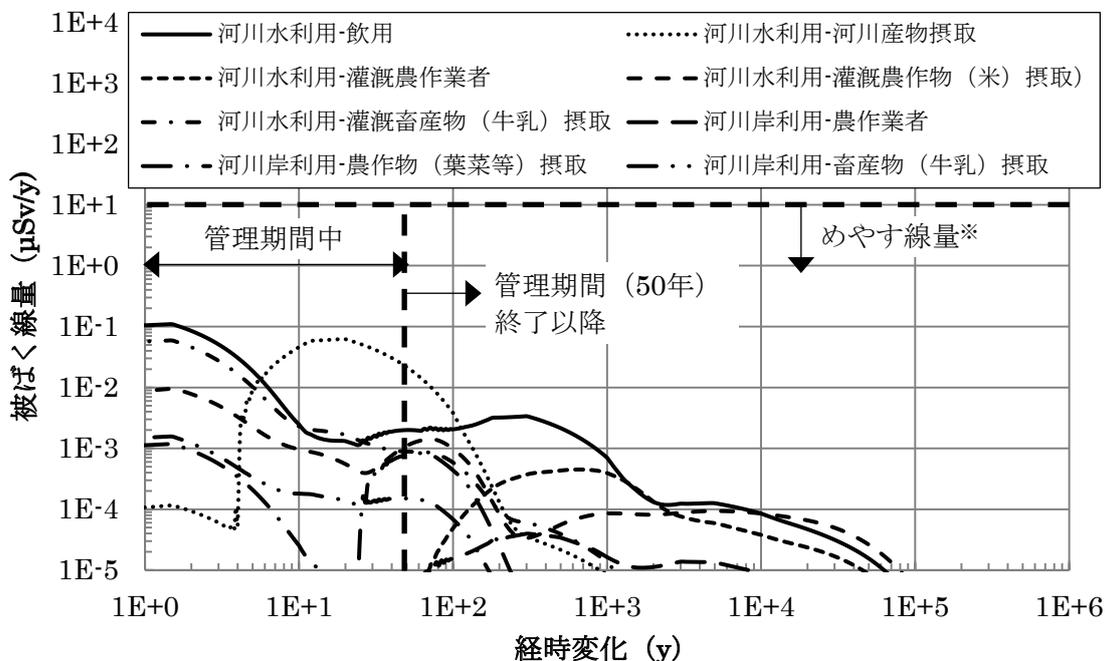
※ 第二種廃棄物埋設事業の基本シナリオのめやす線量 $10 \mu \text{Sv/y}$

図 8.6 ケース 2：付加機能型トレンチ処分施設の各経路における線量の経時変化 (浸出水量 550mm/y)



※ 第二種廃棄物埋設事業の基本シナリオのめやす線量 $10 \mu\text{Sv/y}$

図 8.7 ケース 3：トレンチ処分施設全体で評価した際の各経路における線量の経時変化 (浸出水量 1mm/y)



※ 第二種廃棄物埋設事業の基本シナリオのめやす線量 $10 \mu\text{Sv/y}$

図 8.8 ケース 4：トレンチ処分施設全体で評価した際の各経路における線量の経時変化 (浸出水量 550mm/y)

9. 遮水システムの費用評価

5章で設計した遮水層の検討モデル（図 5.1 参照）の直接工事費の評価を行った。また、概念設計¹⁾の付加機能型トレンチ処分施設の遮水層（以下、「概念設計モデル」という）の費用と比較した。

9.1. 評価条件

検討モデルの遮水層を設置したトレンチ処分施設の主要寸法等の構造は、概念設計における P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設と同じとした。P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基あたりの主要寸法を表 9.1 に、設計仕様・図面を基に算出した底部面積、法面部面積、開口部面積を表 9.2 に示す。P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基あたりの詳細仕様は、付録 D に示す。

検討モデルの遮水層と概念設計モデルの遮水層をそれぞれ設置した付加機能型トレンチ処分施設の費用を比較するため、両方の付加機能型トレンチ処分施設のキャッピング及び法面部遮水層の構造は、概念設計¹⁾における構造に設定した。

9.2. 部材単価

検討モデルの遮水層の費用評価に用いた部材単価を表 9.3 に示す。部材単価はメーカーからの聞き取りによる見積りを用いた。キャッピング及び法面部遮水層の部材単価は概念設計で使用した単価を用いた。また、概念設計モデルの遮水層の部材単価は、概念設計で使用した単価を用いた。

9.3. 評価結果

検討モデルの遮水層を設置した付加機能型トレンチ処分施設 1 基の直接工事費を表 9.4 に示す。検討モデルの遮水層を設置した付加機能型トレンチ処分施設 1 基の直接工事費は、概念設計の P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設の 1.15 倍となった。

このことから、5章で検討した遮水層への変更による費用の増加が大きくないことが確認された。なお、キャッピングを図 7.1 に示す構成案 2 を設置した場合の施設建設費の評価を付録 E に示す。

表 9.1 P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基の主要寸法

項目	仕様	
主要寸法 (掘削底面)	短辺 (m)	13.55
	長辺 (m)	173.05
	深さ (m)	4.2

表 9.2 P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 1 基における各部の算出面積

項目	面積 (m ²)
底部	2,345
法面	3,820
開口部	6,659

表 9.3 各部位の単価一覧 (円/m²)

名称	特記仕様*1	材料費	施工費	合計
耐圧排水層	貫入強度：500N 以上 耐圧性：1×10 ⁶ N/m ² 以上 引張強度 (縦・横)：500N/2.5cm 以上	3,000	590	3,590
保護シート*2	不織布 (反毛フェルト系) T=10mm、貫入強度 1000N	690	280	970
遮水シート	材料：FPA (中弾性、TPO-PP 系) 厚み：1.5mm	2,990	2780	5,770
自己修復マット	透水係数：10 ⁻¹¹ m/s 以下 厚み：4mm 以上	3,335	620	3,955
Cs 吸着マット	セシウム分配係数 (Kd 値)：1m ³ /kg 以上 厚み：1mm 以上 引張強度 (縦・横)：600N/2.5cm 以上	3,220	380	3,600
地盤補強保護シート*3	引張強度 (縦・横)：950N/2.5cm 以上 スパンボンド不織布熱溶着タイプ	736	320	1,056

*1：他仕様は日本遮水工協会規格に準ずる。

*2：保護シートは、検討モデルに含まれていないため、費用評価には用いないが、参考の単価として示す。

*3：地盤補強保護シートは、引張強度 950N/2.5cm 以上に対する単価を示しているが、土質や荷重条件等にて個別の設計検討が必要であるため、費用評価には含めないこととした。

表 9.4 各検討ケースにおける遮水シートのための直接工事費

項目	構造の概要 図表			直接工事費 (100 万円) *1	
	検討ケース	部位	構造	費用	総計
検討モデルを設置した付加機能型トレンチ処分施設 (1基**2)	遮水層	検討モデル	図 5.1	63	184
	法面遮水層	2 重遮水シート層	表 6.2.5	63	
	キャッピング	1 重遮水シート層		58	
概念設計の P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設 (1基**2)	遮水層	2 重遮水シート層	表 6.2.5	39	160
	法面遮水層	2 重遮水シート層	表 6.2.5	63	
	キャッピング	1 重遮水シート層		58	

*1：端数処理のため総計が合わないことがある。

*2：1 基の大きさは、表 9.1 及び付録 D に示す。

10. 遮水システムの構成、仕様に関する提案

本研究は、研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設の遮水層及びキャッピングについて、遮水性、損傷への抵抗性及び損傷した際の対策の観点から検討を行った。

遮水層の設計にあたっては、国内の廃棄物処理法及び特措法の技術基準並びに海外の一般・産業廃棄物の処分場の技術基準を参考とした。また、国内の管理型処分場の施工事例と不具合を調査し、有効な設計対策を検討した。

その結果、遮水層については、廃棄物処理法の技術基準（ウ）の二重遮水シートを設置する構造に対して、

- ① 遮水シートが損傷した場合においても浸出水量を低減させられるよう遮水シートの上部に排水層を設置することと遮水シート間に低透水性層を設置することを検討した。
- ② 遮水シートの破損は、重機や埋設作業に起因することが多いことから、外部からの衝撃を保護する層を遮水層に設置することとした。さらに、損傷への耐久性を高めるため、低透水性層で小さい貫通傷等を自然に修復するような自己修復性の層を設置することとした。耐衝撃性の層は、市販の排水層を兼ねる製品で、自己修復性の層は、遮水シート間の低透水性層を兼ねる製品で検討した。これらの層を設置することで、損傷への抵抗性が向上すると考えられる。
- ③ 遮水シートの損傷事例調査から、処分地の地盤の滑り・沈下によって遮水シートが損傷する事例が見られているため、その基礎地盤の変形による不均等な応力から保護する地盤補強保護層を遮水層の下層に設置することとした。
- ④ 特措法における除去土壌等に含まれる主要な核種は Cs-137、Cs-134 であり、これらの核種の移行を抑制するために、Cs を吸着するシート（Cs 吸着マット）を設置する構造も検討した。

①から④の検討結果に基づいて、図 5.1 に示す遮水層の構成モデル（以下、「設計モデル」という）を設定した。

6.2 では、設計モデルを含め想定されるいくつかの遮水層のモデルを用いて浸出水量のケーススタディを実施した。その結果、設計モデルは、他のモデルと比較して、十分に浸出水量を抑えられることを確認した。個別に排水層の厚さと透水係数、低透水性層の厚さと透水係数を変化させた浸出水量のパラメータスタディを行い、設計モデルの排水層は十分な排水量であると考えられるとともに低透水性層の厚さは浸出水量を増加させる範囲に含まれないことを確認した。

Cs 吸着マットは、排水中における Cs を吸着させる場合と浸出水における Cs を吸着させる場合の 2 ケースを検討した。排水は量が多いため、Cs 吸着マットの分配係数及び厚さを適切に選定することが、排水中の Cs 濃度を下げるために必要である。

また、浸出水の Cs 濃度を低減させるためには、図 6.3.5 より設計モデルにおける浸出水

量は少ないため、Cs 吸着マットの分配係数が $1\text{m}^3/\text{kg}$ の場合、 1mm の厚さでも十分に浸出水中の Cs の放射能濃度を低減させることができると考えられる。

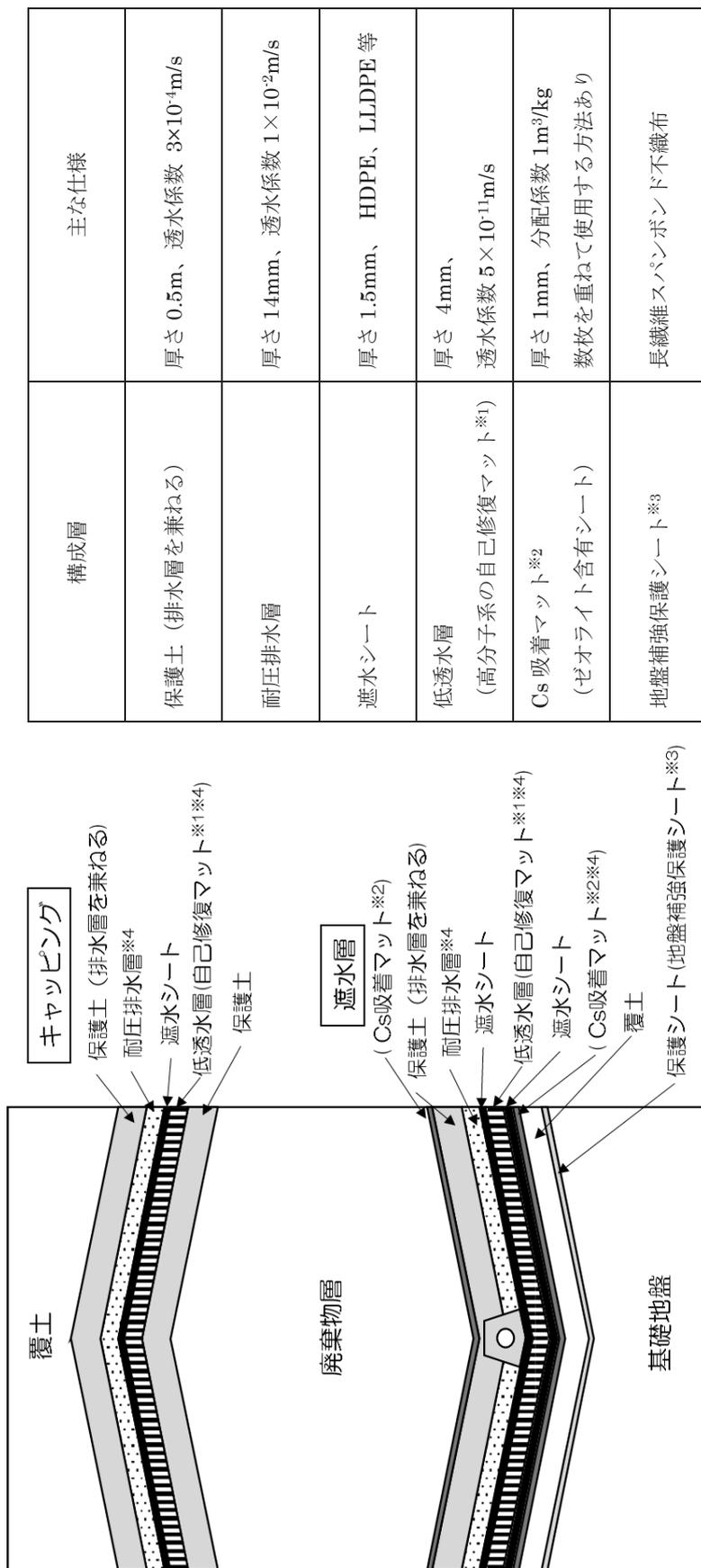
7 章ではキャッピングについて検討し、底部の遮水層と同じ構造が浸出水（廃棄物層への浸入水）を低減するために効果的であると考えられ、傾斜を対称の山型として遮水層と同じ構造を提案した。

8 章では、設計したキャッピングからの浸出水により放射性物質が環境中へ移行することによる線量を試算し、キャッピングを設置しないトレンチ処分施設からの線量と比較した。キャッピングによる浸出水量の低減効果を考慮した場合、キャッピングを設置しないトレンチ処分施設からの線量と比較して、約 2 桁低い結果となり、十分な低減効果が確認できた。

9 章では、遮水システムの費用評価を行い、概念設計において付加機能型トレンチ施設の遮水層として設計した廃棄物処理法（ウ）の 2 重遮水シートの構造の積算と比較したところ、設計モデルの直接工事費は、概念設計における付加機能型トレンチ処分施設の積算の約 1.1 倍であり大きな費用の増加とはならなかった。

以上より、設計した遮水層及びキャッピングの遮水システムは、浸透水量の低減、損傷への抵抗性、放射性物質の環境への移行抑制が考慮され、直接工事費も大きな増大が見られないことから、放射性廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設において、実現性のある安全機能の高い遮水層として提案できると考えられる。図 10.1 に提案する遮水システムの構成を示す。

また、この遮水層は、福島第一原子力発電所の事故に伴い発生した廃棄物の管理型構造の処分施設や除去土壌等の中間貯蔵施設にも適用できると考えられる。



※1：使用可能な層として提案。性能が類似する他の製品でも使用可能である。
 ※2：セシウムで汚染した廃棄物の処分施設等の場合、有効となる。
 ※3：基礎地盤の状況に応じて設置の可否を検討する。また、軟弱地盤対策は、土質や荷重条件等に依存するので本報告書では検討しない。
 ※4：遮水シートの保護シートを兼ねる。

構成層	主な仕様
保護土 (排水層を兼ねる)	厚さ 0.5m、透水係数 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$
耐圧排水層	厚さ 14mm、透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$
遮水シート	厚さ 1.5mm、HDPE、LLDPE 等
低透水層 (高分子系の自己修復マット※1)	厚さ 4mm、 透水係数 $5 \times 10^{-11} \text{m/s}$
Cs 吸着マット※2 (ゼオライト含有シート)	厚さ 1mm、分配係数 $1 \text{m}^3/\text{kg}$ 数枚を重ねて使用する方法あり
地盤補強保護シート※3	長繊維スパンボンド不織布

図 10.1 提案する遮水システムの構成、仕様

11. おわりに

本研究は、研究施設等廃棄物の付加機能型トレンチ処分施設に適用できる遮水層を検討し、耐圧排水層、遮水シート、低透水層の組み合わせから構成されるキャッピングと遮水層を安全機能の高い遮水層として設計した。これらの遮水層について、損傷事例に対する抵抗性の定性的な分析、浸透水量、放射性物質の移行、環境中での線量の解析、遮水層の直接工事費の積算を実施して、設計した遮水層が合理的で安全性が高い遮水層であることを確認した。

本研究は、解析や定性的な評価に基づいて実施したものであることから、今後、施工試験等を行って試験データを取得し、解析で得られた結果の確認、設計の改善を行って信頼性を高めていくことが重要となると考えられる。

参考文献

- 1) 天澤弘也他：“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.
- 2) 環境省：“廃棄物関係ガイドライン 事故由来放射性物質により汚染された廃棄物の処理等に関するガイドライン”，平成 25 年 3 月 第 2 版.
- 3) 環境省：“第二部 特定一般廃棄物・特定産業廃棄物関係ガイドライン”，平成 25 年 3 月 第 2 版.
- 4) 環境省：“第六部 特定廃棄物関係ガイドライン”，平成 25 年 3 月 第 2 版.
- 5) United States：“40 CFR part 258 Criteria for Municipal Solid Waste Landfills”，Electronic CFR data is current of July 1, 2015.
- 6) United States：“40 CFR part 264 Standards for Owners and Operators of Hazardous Waste Treatment, Storage and Disposal Facilities”，Electronic CFR data is current of March 19, 2015.
- 7) European Commission：“Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste”，(1999)
- 8) Paul Schroeder et al.：“The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model. ENGINEERING DOCUMENTATION FOR VERSION 3”，Risk Reduction Engineering Laboratory, (1994) .
- 9) Paul Schroeder et al.：“The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model. USER'S GUIDE FOR VERSION 3”，Risk Reduction Engineering Laboratory, (1994) .
- 10) 農業環境技術研究所：“農業環境情報データベース (gamsDB)”，(online) available from <<http://agrienv.dc.affrc.go.jp/>> (accessed on 2015-11-10) .
- 11) 木幡行宏他：“種々の土質を用いた透水試験によるジオテキスタイルフィルターの目詰まり特性”，ジオシンセティックス論文集，第 21 巻，pp. 327-332, (2006) .
- 12) 武田 聖司，他：“低レベル放射性廃棄物処分に対する濃度上限値評価コード GSA-GCL 第 2 版の開発 (受託研究)”，JAEA-Data/Code 2011-008, (2011), 116p.
- 13) 環境省：“中間貯蔵施設の概略安全評価について”，中間貯蔵施設安全対策検討会 (第 4 回) -資料 6, (2013) .
- 14) IAEA：“Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments”，IAEA Technical Reports Series No.364, (1994) .
- 15) IAEA：“Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments”，IAEA Technical Reports Series No.472, (2010) .
- 16) 内田滋夫，他：“環境における放射性核種の分布と動態：1. 土壌における放射性核種の挙動特性”，日本原子力学会誌，53 (9)，pp. 623-627, (2011) .
- 17) 石井孝：“衛星データを用いた森林の葉面積指数の推定および炭素固定量の算定と水収支解析への応用”，(2007) .
- 18) 建設産業調査会：“改訂 地下水ハンドブック”，(1998) .

付録 A

排水層の排水量に関する 2次元流動解析

1. 評価の概要

本文の 6.2.3 項「遮水層のパラメータスタディ」において、排水層の厚さと排水量の感度解析を行った。感度解析では、排水層の透水係数として $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 及び $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の 3 種類を設定し、各透水係数に対して排水層の厚さによる年間平均排水量及び平均浸出水量の評価を行った。検討結果より、本文の表 6.2.23、図 6.2.14 及び図 6.2.15 に示すように、排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合では厚さ 0.3m 以上で平均排水量がほぼ一定となり、 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の場合では 0.2m 以上、 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の場合では 0.014m 程度以上で平均排水量がほぼ一定となる傾向が得られた。

本付録では、本文に示した結果の妥当性を確認するため、排水層の厚さと排水量についての 2次元流動解析を行った。2次元流動解析コードは、原子力機構が開発した MIG2DF¹⁾ を使用した。

2. 評価条件

2次元流動解析の概要を図 A-1 に示す。遮水層への年間平均浸入水量は 550mm に設定した。計算体系の中央部に排水層を設置し、その下層に遮水シートを設置した。また、本文では遮水シートの傷の個数を設定したが、2次元流動解析では遮水シートに傷はないものと設定した。よって、浸入水は上部の土壌層から排水層に浸入し、排水層中を通過して排水層の側面から浸出して下方へ流れるように設定した。もし、排水層の透水係数に対して排水層の厚さが小さく、排水能力が足りなければ、排水層の上層に流速が発生すると考えられる。

排水層の透水係数は本文と同様に $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 及び $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の 3 種類を、排水層の厚さは 0.05m、0.1m、0.3m 及び 0.5m の 4 種類を設定した。MIG2DF のモデル設定において、排水層の厚さ 0.014m を設定することが困難のため、排水層の厚さの最低値は 0.05m とした。遮水シートの透水係数は本文と同様に $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ とし、遮水シートの設置レベルはレベル 1 とし、遮水シートの傷はなしと設定した。

各層のパラメータを表 A-1 に示す。

3. 評価結果

排水層の各透水係数の圧力水頭を図 A-2、図 A-3 及び図 A-4 に、地下水流速を図 A-5、図 A-6 及び図 A-7 に示す。圧力水頭が 0 となる位置を地下水位と評価した。

排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の圧力水頭の結果では、図 A-2 に示すように排水層の厚さが 0.05m 及び 0.1m のときに地下水位が排水層の上方となる結果が得られた。また、地下水流速の計算結果では、図 A-5 より、排水層厚さが 0.05m 及び 0.1m では排水能力が足りないため排水層中を水が浸透しきれず、排水層の上部でも地下水流速が速い結果となった。

排水層の透水係数が $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ における圧力水頭の結果より、図 A-3 に示すように排水層厚さが 0.05m のときに地下水位が排水層の上方にある結果となった。また、地下水流速の結果では、図 A-6 より、排水層厚さが 0.05m では排水能力が足りないため排水層中を水が浸透しきれず、排水層の下端の上部においても地下水流速が速い結果となった。

排水層の透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の場合では、図 A-4 の圧力水頭の結果より、全ての厚さにおいて地下水位は排水層の上部より下方にある結果となった。また、地下水流速についても、図 A-7 より、排水層の透水係数が大きく排水能力が十分なため、全ての厚さにおいて排水層中を通過して下方へ浸透水が浸出する結果となった。

結果より、2次元流動解析においても、排水層の透水係数が $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ のときでは厚さは 0.3m 、 $1 \times 10^{-3} \text{m}$ のときでは厚さは 0m 、 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ のときでは厚さは 0.05m 程度必要であることが分かった。これらより、本文で検討した水層の厚さと排水量の感度解析の妥当性を確認することができた。

表 A-1 2次元流動解析における各層のパラメータ

層		設定パラメータ	
1	土壌層	透水係数 (m/s)	1×10^{-6}
2	排水層	厚さ (m)	0.05
			0.1
			0.3
			0.5
		透水係数 (m/s)	3×10^{-4} 1×10^{-3} 1×10^{-2}
		排水層長さ (m)	50
		排水勾配 (%)	2
3	遮水シート	透水係数 (m/s)	1×10^{-11}
		設置レベル	レベル 1
		傷/不具合の数 (個/ha)	なし

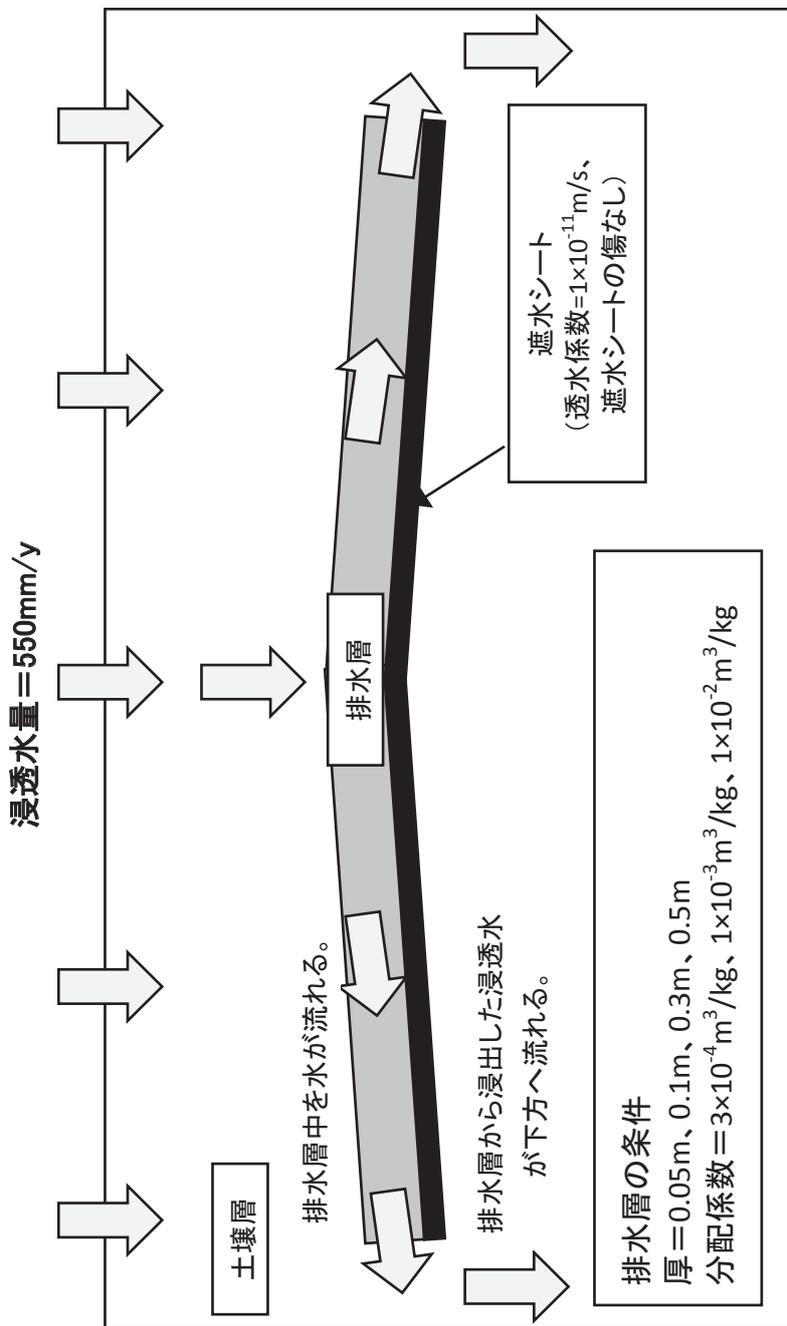


図 A-1 2次元流動解析の概要

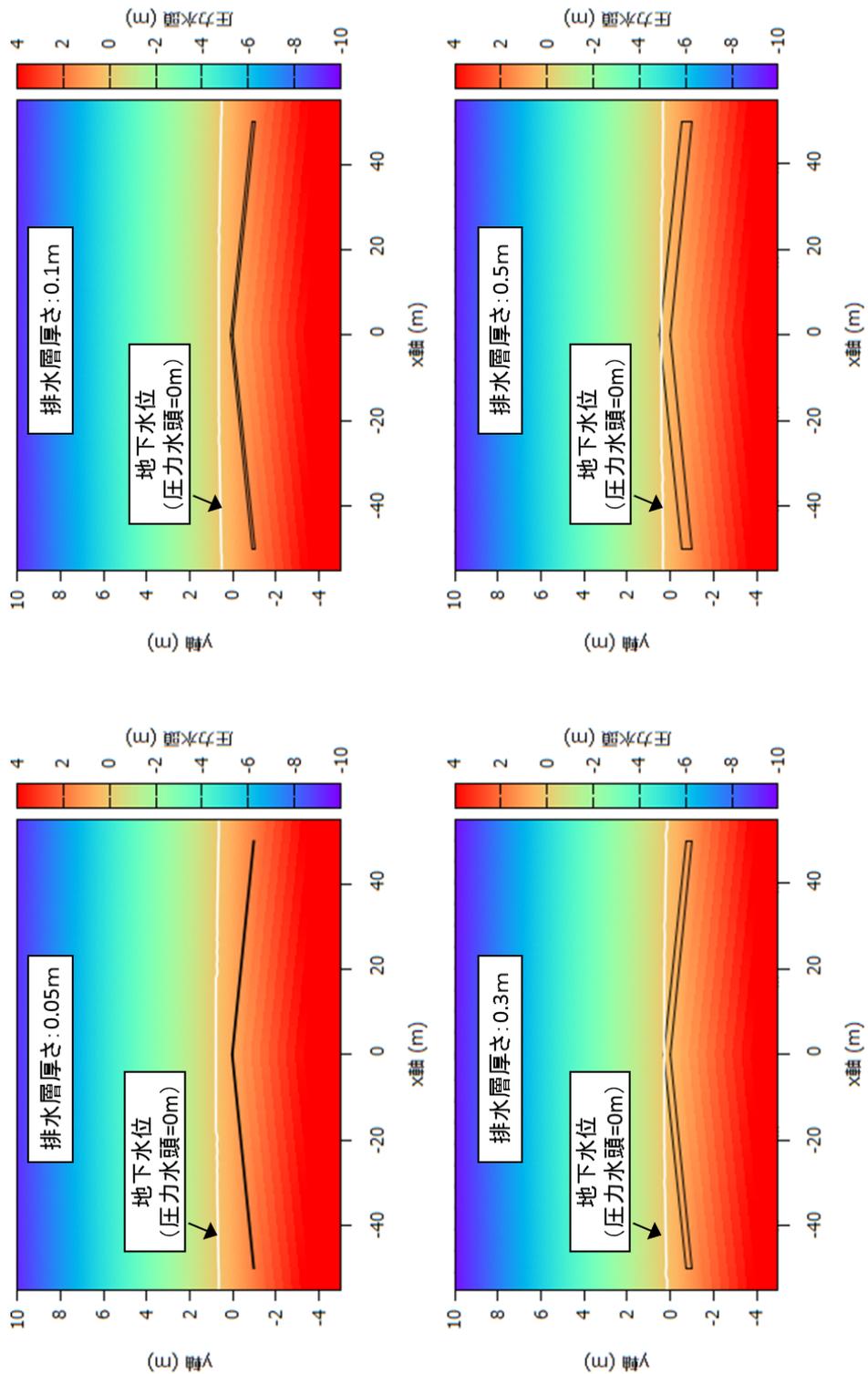


図 A-2 排水層の透水係数 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$: 圧力水頭

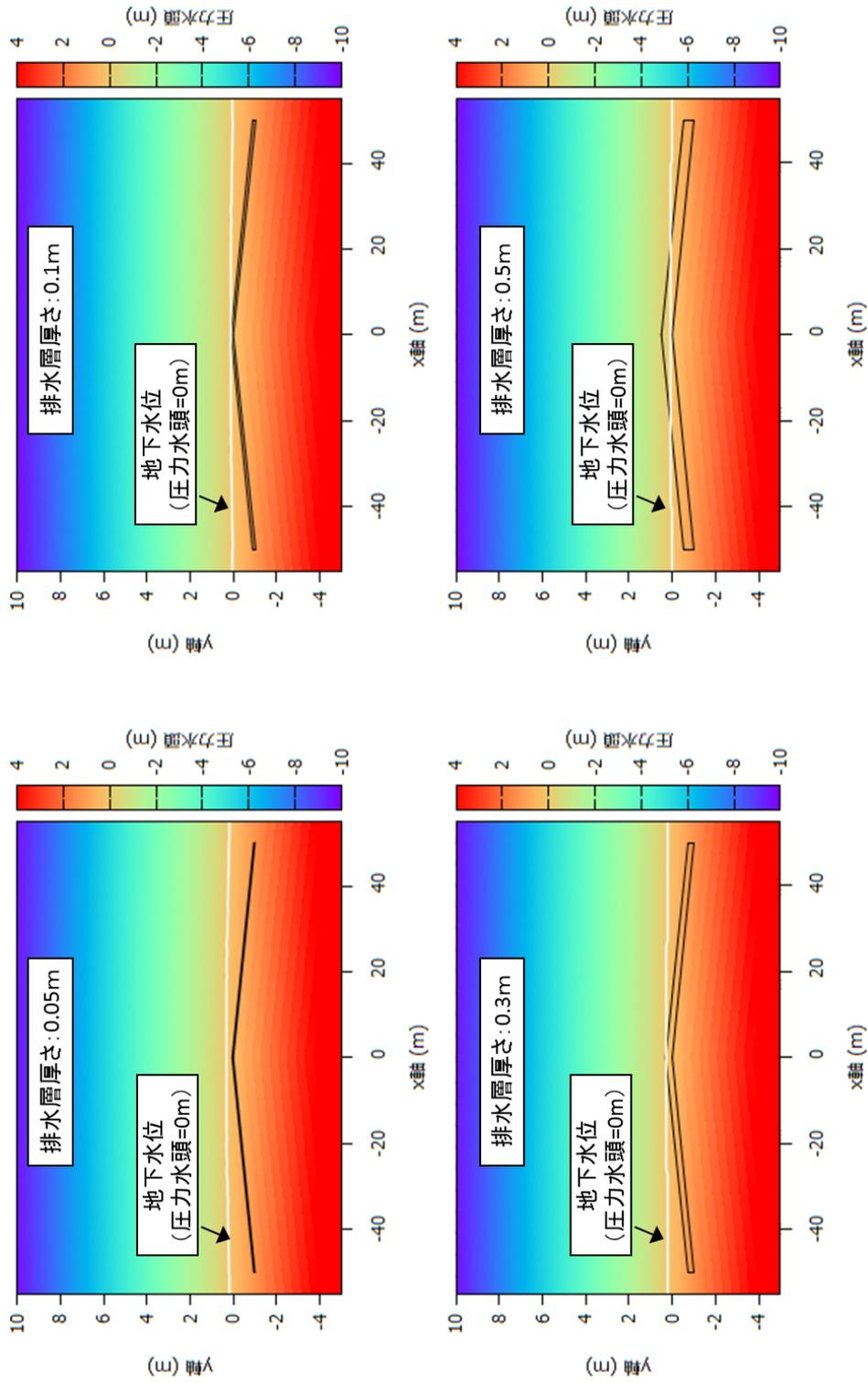


図 A-3 排水層の透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$: 圧力水頭

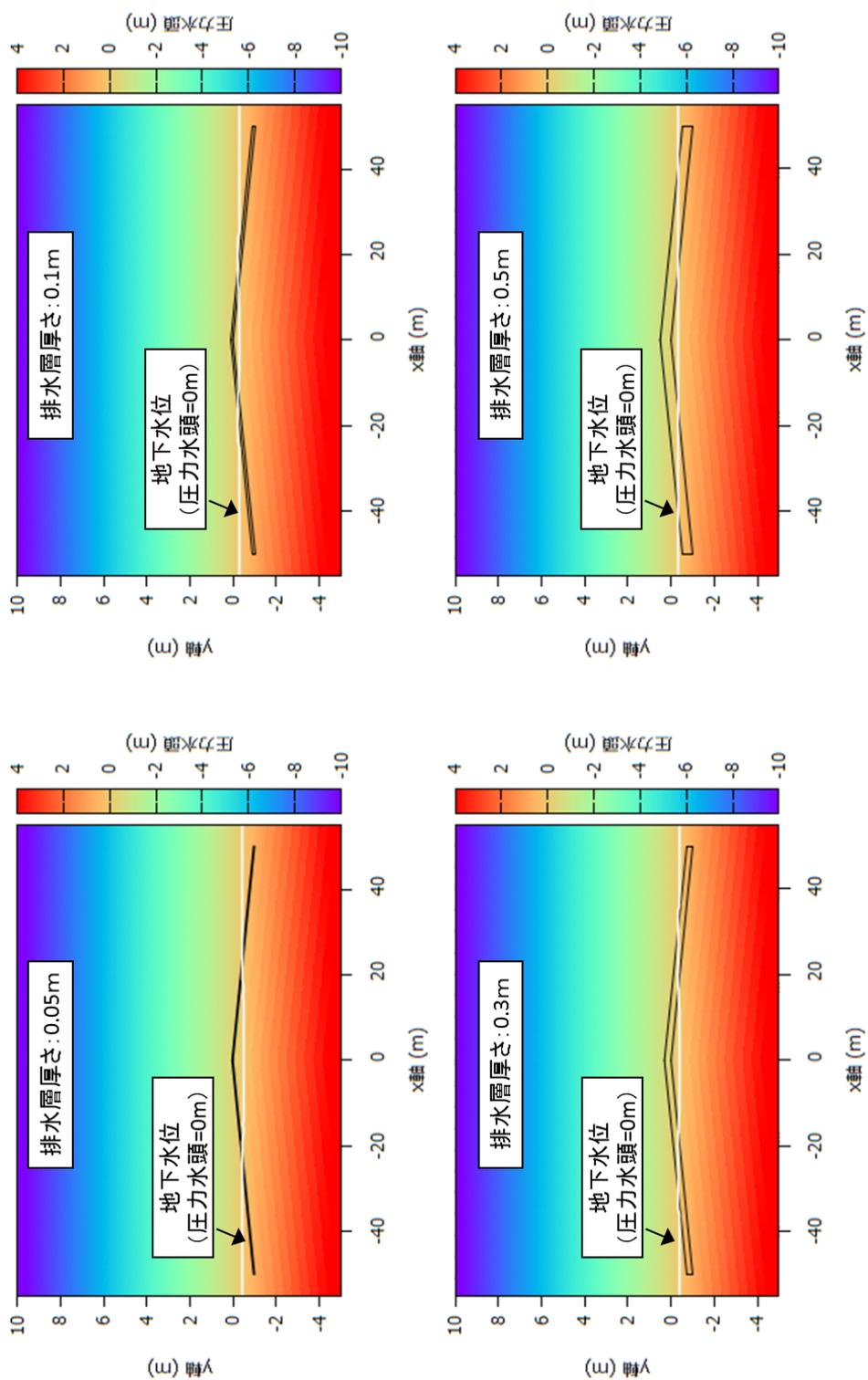


図 A-4 排水層の透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$: 圧力水頭

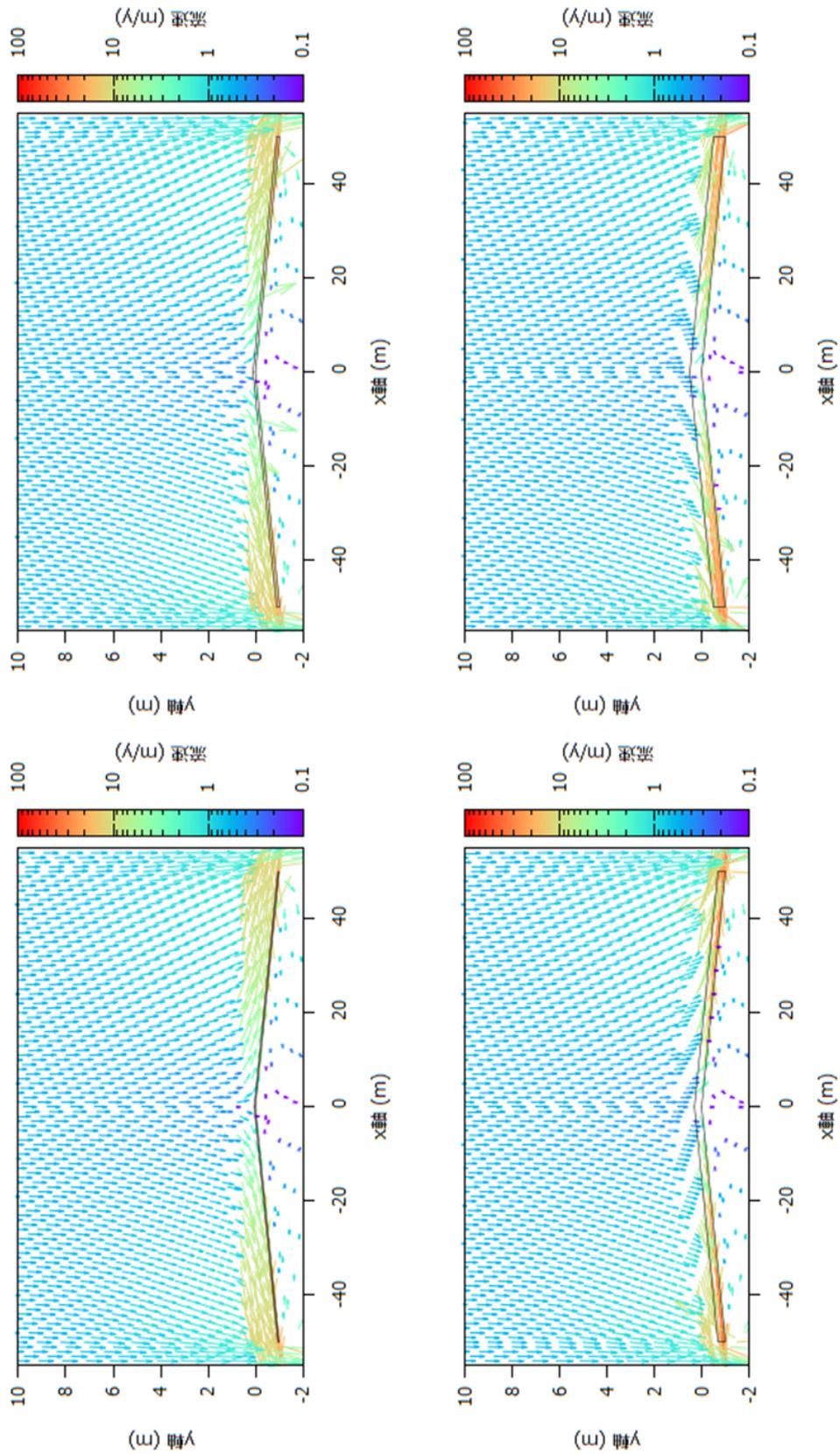


図 A-5 排水層の透水係数 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$: 地下水流速

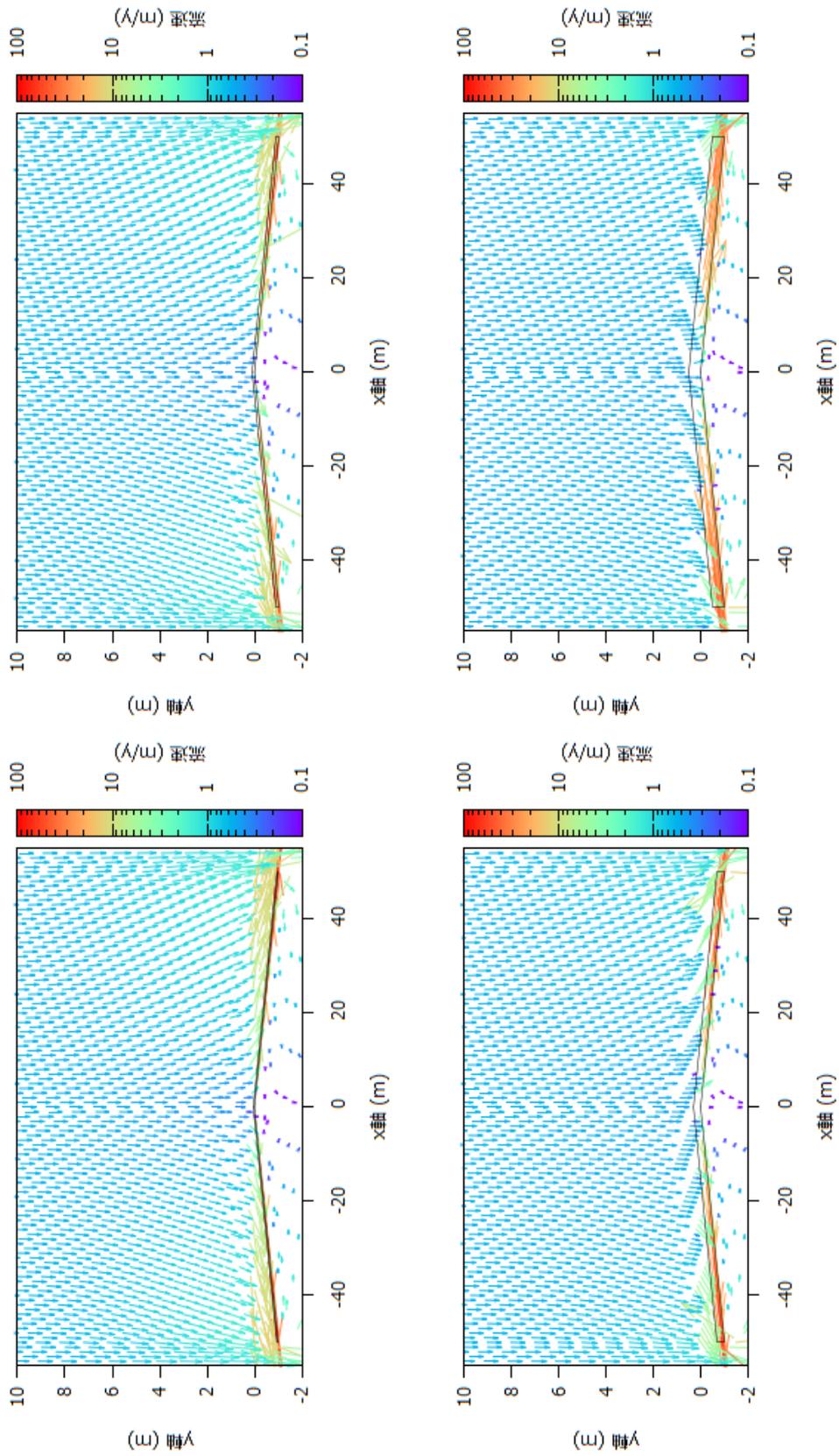


図 A-6 排水層の透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$: 地下水流速

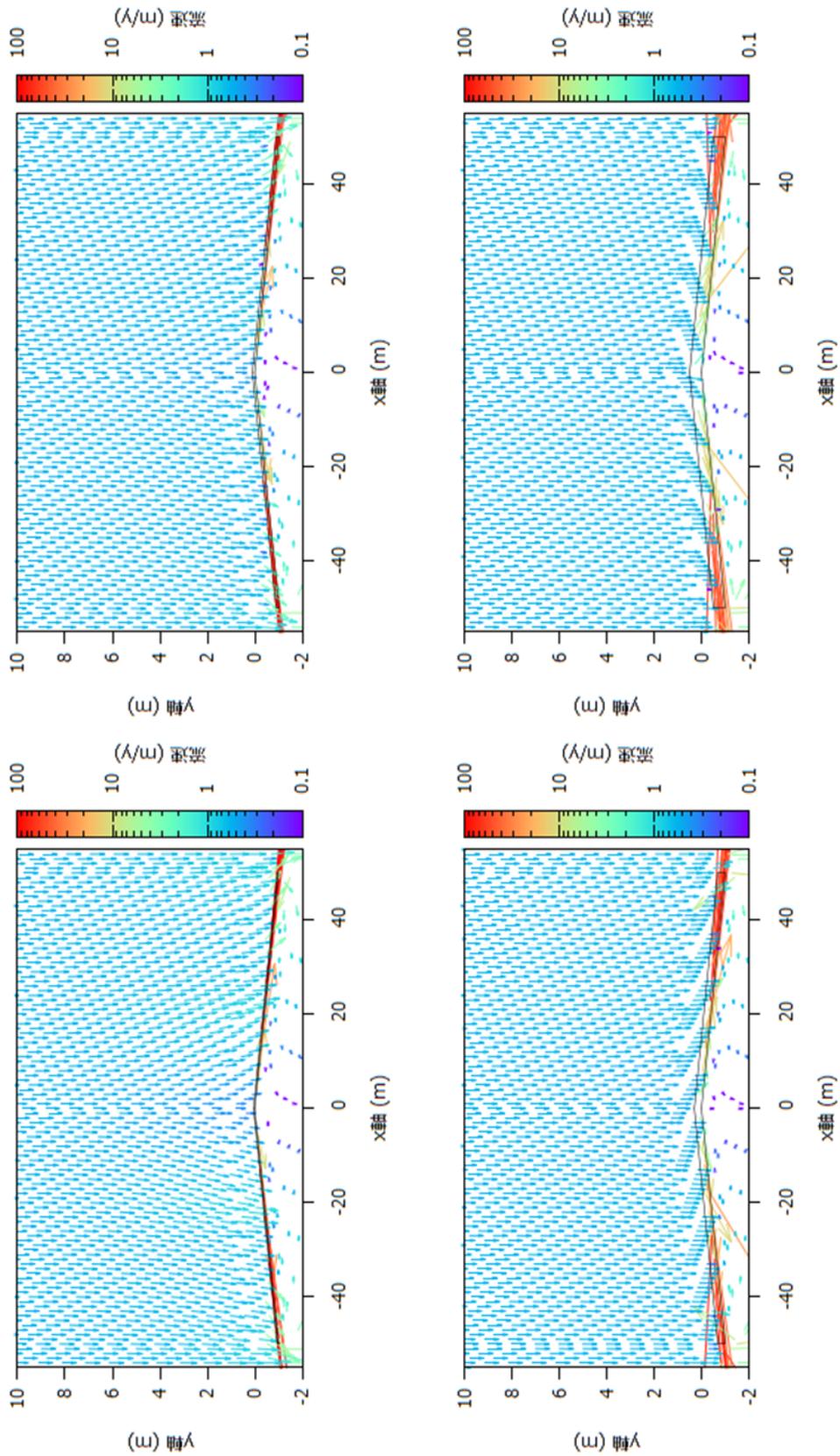


図 A-7 排水層の透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{m/s}$: 地下水流速

参考文献

- 1) H. Kimura : “The MIG2DF Computer Code User’s Manual”, JAERI-M 92-115, (1992), 48p.

付録 B

廃棄物層及び Cs 吸着マットからの Cs の移行量の評価モデル

1. Cs の移行モデル

6.3 章において廃棄物層からの浸出及び Cs 吸着マットから浸出した Cs の放射能は、GSA-GCL コードのソースタームモデルを参考に図 B-1 に示すモデルを用いた。図 B-1 における評価式は以下の通りである。

$$C_i = \frac{A_i}{\varepsilon_i * V_i * R_i} \quad (1)$$

$$J_i = \frac{A_i}{\varepsilon_i * V_i * R_i} * \nu * S = \frac{\nu * A_i}{\varepsilon_i * H_i * R_i} = \eta_i * A_i = \eta_i * \lambda * N_i \quad (2)$$

$$R_i = 1 + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} * \rho_i * Kd_i \quad (3)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda N_1 - \eta_1 N_1 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda N_2 - \eta_2 N_2 + \eta_1 N_1 \quad (5)$$

ここで、 $t=0$ のとき、 $N_1=N_0$ 、 $N_2=0$ とする。

$$(4)式より、N_1 = N_0 * \exp(-(\lambda + \eta_1)t) \quad (6)$$

(5)式と(6)式より、

$$N_2 = \frac{N_0}{\eta_2 - \eta_1} \{ \exp(-(\lambda + \eta_1)t) - \exp(-(\lambda + \eta_2)t) \} \quad (7)$$

ここで、

- C_i : 領域 i における Cs の水中濃度(Bq/m³)
- A_i : 領域 i における Cs の放射能(Bq)
- ε_i : 領域 i の空隙率(-)
- V_i : 領域 i の体積 (m³)
- R_i : 領域 i における Cs の遅延係数(-)
- J_i : 領域 i からの Cs のフラックス(Bq/y)
- ν : 浸透水量 (m/y)
- S : 領域の表面積 (浸透面積) (m²)
- η_i : 領域 i における Cs の浸出率(1/y)
- λ : セシウムの崩壊定数(1/y)
- N_i : 領域 i における Cs の原子数
- N_0 : 廃棄物層における $t=0$ における Cs の原子数
- H_i : 領域 i の高さ(m)
- ρ_i : 領域 i における密度(kg/m³)
- Kd_i : 領域 i における分配係数(m³/kg)

である。

2. 廃棄物層の分配係数を変えた場合の Cs の排水及び地下水中で放射能濃度

6.3.2 項及び 6.3.3 項では、廃棄物層の Cs の分配係数を $0.01 \text{ (m}^3/\text{kg)}$ で計算したが、表 6.3.2 より、Cs の分配係数の平均値は、 $0.1\sim 10 \text{ (m}^3/\text{kg)}$ の範囲である。したがって、廃棄物層の Cs の分配係数を $0.1 \text{ (m}^3/\text{kg)}$ に設定した時の Cs 吸着マットの分配係数の違いによる Cs の排水中濃度及び地下水中濃度を図 B-2 及び B-3 にそれぞれ示す。本文図 6.3.2 と図 B-2 及び本文図 6.3.5 と図 B-3 を比較すると、廃棄物層の分配係数が大きくなったことにより、図 B-2 及び図 B-3 の Cs の放射能濃度が全体的に約 1 桁程度低くなっているが、Cs 吸着マットの分配係数による濃度の差はあまり変わっていない。

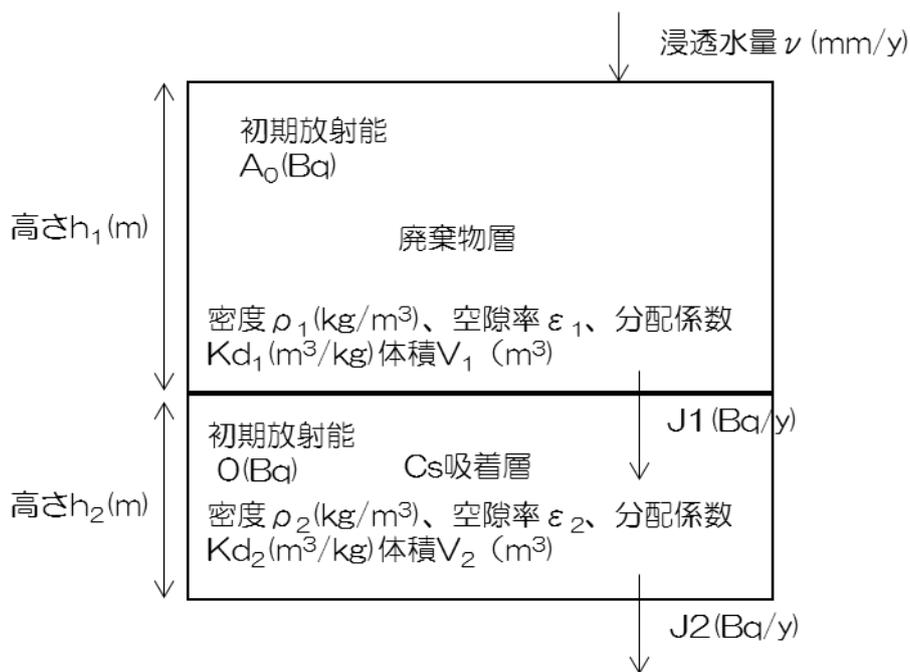


図 B-1 Cs の移行評価モデルの模式図

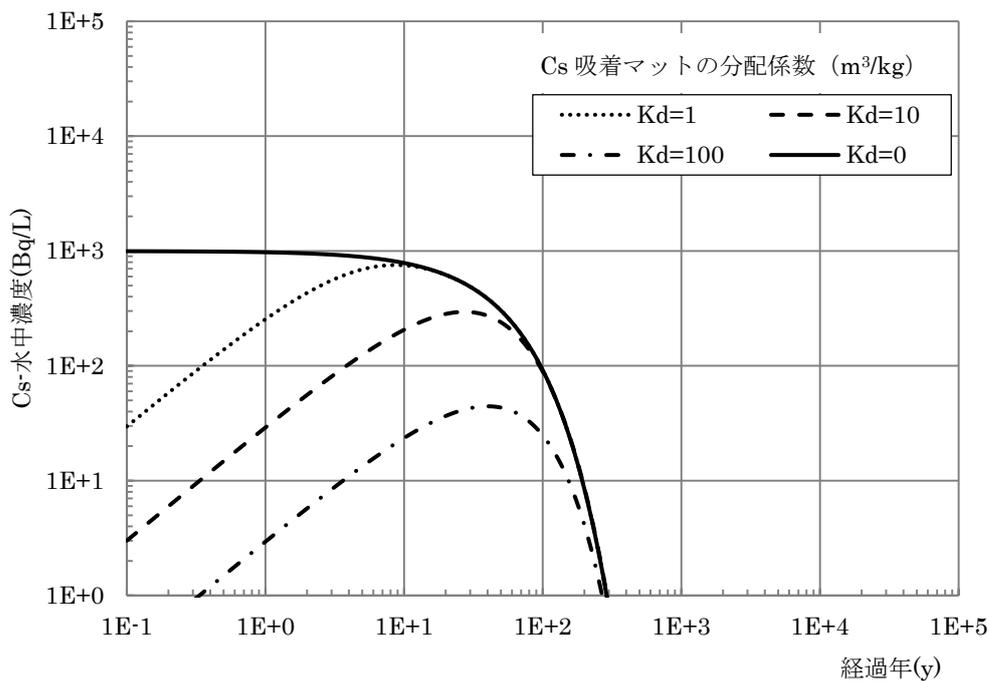


図 B-2 排水中における Cs の放射能濃度の経時変化
(廃棄物層の $K_d=0.1\text{m}^3/\text{kg}$)

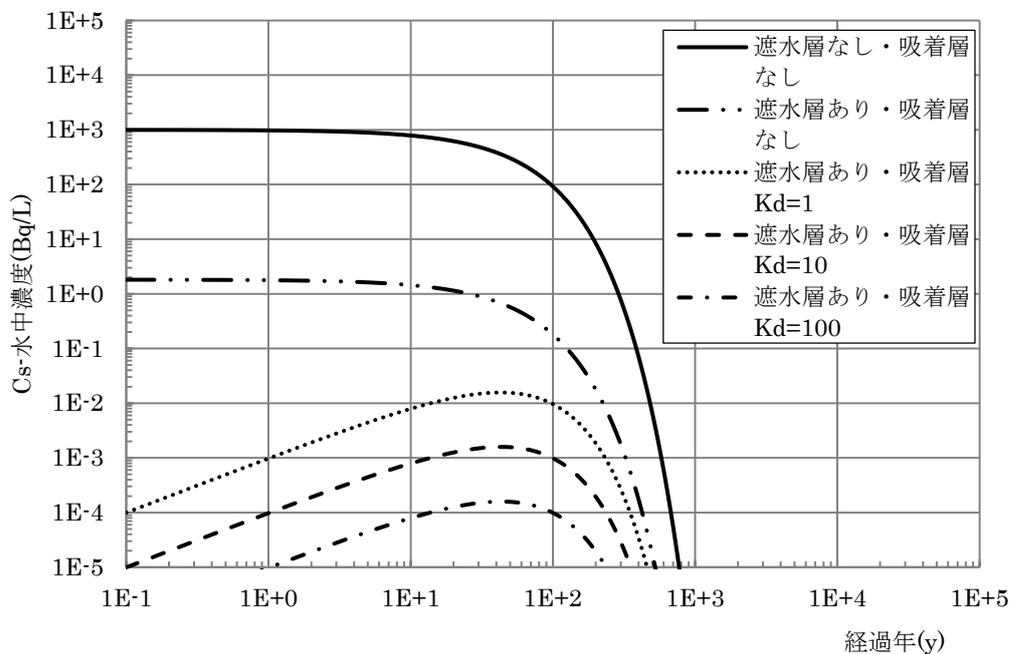


図 B-3 地下水中における Cs の放射能濃度の経時変化
(廃棄物層の $K_d=0.1\text{m}^3/\text{kg}$)

付録 C

設計した遮水層に基づく環境への影響評価で使用するパラメータ

設計した遮水層に基づく環境への影響評価で使用する、評価パラメータは概念設計と同じ値を設定した。トレンチ処分施設、天然バリア及び自然環境のパラメータを表 C-1 に、人間活動及び社会環境のパラメータを表 C-2 に示す。また、元素依存パラメータを表 C-3 から表 C-8 に、核種依存パラメータを表 C-9 に示す。

表 C-1 トレンチ処分施設、天然バリア及び自然環境の評価パラメータ

区分	評価パラメータ		設定値	単位	根拠	
トレンチ 処分施設	施設 形状	管理型構造の施設	P埋設地:200×135×4 S埋設地:135×200×4	m	概念設計の施設配置設計から設定。管理型構造の施設は、施設全体からの1/3となる。	
		施設全体	P埋設地:200×400×4 S埋設地:400×200×4	m		
	施設条件	廃棄体：真密度	2600	kg/m ³	概念設計の施設の配置設計から設定。	
		廃棄体：間隙率	0.3	-	帯水層土壌の真密度と同じとする。	
		廃棄体：分配係数	表 B-3 参照	m ³ /kg	帯水層土壌の間隙率と同じとする。	
		施設浸透水量	本文表 8-2 参照	mm/y	帯水層土壌の分配係数と同じとする。	
	天然バリア 及び 自然環境	帯水層土壌	真密度	2600	kg/m ³	原子炉 CL 報告書 ¹⁾ を参考にする。
			間隙率	0.3	-	原子炉 CL 報告書を参考にする。
			分配係数	表 B-3 参照	m ³ /kg	
			地下水流速（ダルシノー流速）	100	m/y	概念設計の地下水流動解析の結果から設定する。
厚さ			2	m	季節変動を考慮した土壌層中の地下水水位が岩盤面から2mに達することから、2mに設定する。	
流水方向の分散長			0	m	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
河川水	河川水流量	1.0×10 ⁸	m ³ /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	河川までの距離	100	m	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
河川岸土壌	河川岸土壌：真密度	2600	kg/m ³	帯水層土壌の真密度と同じとする。		
	河川岸土壌：間隙率	0.3	-	帯水層土壌の間隙率と同じとする。		
	河川岸土壌：分配係数	表 B-3 参照	m ³ /kg	帯水層土壌の分配係数と同じとする。		

表 C-2 人間活動及び社会環境の評価パラメータ (その1)

区分	評価パラメータ	設定値	単位	根拠		
人間活動及び社会環境	人の年間飲料水摂取量	0.61	m ³ /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	河川産物 (魚類) の年間摂取量	0.6	kg/y	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	河川産物 (魚類) の濃縮係数	別表	m ³ /kg	値については、表 C-4 を参照。		
	作業者の年間被ばく時間	500	h/y	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	作業時の遮へい係数	1.0	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	作業時の粉塵濃度	5.0E-04	g/m ³	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	作業者の呼吸量	1.2	m ³ /h	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	微粒子への濃縮係数 (吸入可能な粒子)	4.0	—	ウランクリアランス報告書 ²⁾ を参考にする。		
	農業、畜産業等食物に関する土地利用の状況	灌漑土壌：真密度	2600	kg/m ³	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
		灌漑土壌：間隙率	0.3	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
		灌漑土壌：分配係数	別表	m ³ /kg	値については、表 C-3 を参照。	
		有効土壌深さ	0.15	m	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
		灌漑水量	田	2.4	m ³ /m ² /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
			畑・牧草地	1.2	m ³ /m ² /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		土壌飽和度	田	1.0	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。
			畑・牧草地	0.2	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		灌漑水の浸透量	0.4	m ³ /m ² /y	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
		放射性物質の土壌残留係数	1.0	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
	放射性核種の農作物 (葉菜、牧草) 表面への沈着割合	1.0	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
	灌漑水年間生育期間	60	d	原子炉 CL 報告書を参考にする。		
Weathering 効果による植物表面沈着放射性物質の除去係数	18.07	1/y	原子炉 CL 報告書を参考にする。			
経根吸収係数	0.1	—	原子炉 CL 報告書を参考にする。			
農作物の栽培密度	2.3	kg/m ²	原子炉 CL 報告書を参考にする。			

表 C-2 人間活動及び社会環境の評価パラメータ (その2)

区分	評価パラメータ		設定値		単位	根拠
	農作物への移行係数	別表	別表	別表		
人間活動及び社会環境	農作物の年間摂取量	米	71	別表	kg/y	原子炉 CL 報告書を参考に、葉菜、非葉菜、果実のすべてに放射性核種が含まれていると想定して摂取量を設定する。
		葉菜	24		kg/y	
		非葉菜	90		kg/y	
		果実	44		kg/y	
		河川水利用－農作物の摂取割合	1.0		－	概念設計 ³⁾ より設定
		河川岸利用－農作物の摂取割合	0		－	概念設計より設定
		農作物の市場係数	0		－	概念設計より設定
		農作物の市場係数	0.5		－	概念設計より設定
		放射性物質を含む飼料混合割合	1.0		－	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		飼料への移行係数	0		d	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		飼料への移行係数	1.0		－	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		家畜 (乳牛) の飼料摂取量	別表		－	値については、表 C-7 を参照
		家畜 (乳牛) の飼育水摂取量	16.1		kg-dry/d	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		飼料及び飼育水から家畜 (乳牛) への移行係数	60		L/d	原子炉 CL 報告書を参考にする。
		畜産物 (牛乳) の年間摂取量	別表		d/L	値については、表 C-8 を参照
		畜産物 (牛乳) の市場係数	44		L/y	原子炉 CL 報告書を参考にする。
	畜産物 (牛乳) の輸送時間	1.0		－	原子炉 CL 報告書を参考にする。	
	畜産物 (牛乳) の輸送時間	0		d	原子炉 CL 報告書を参考にする。	

表 C-3 元素依存パラメータ：帯水層土壌の分配係数

元素名	選定値 (m ³ /kg)	選定根拠
H	0.00E+00	IAEA-TECDOC-401
Be	2.40E-01	IAEA TRS 364 (砂)
C	2.00E-03	IAEA-TECDOC-401
Al	1.50E+00	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Cl	1.00E-03	I と同じ値に設定
Ca	9.00E-03	IAEA TRS 364 (砂)
Co	6.00E-02	IAEA TRS 364 (砂)
Ni	4.00E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Se	1.50E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Sr	1.30E-02	IAEA TRS 364 (砂)
Zr	6.00E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Nb	1.60E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Mo	7.40E-03	IAEA TRS 364 (砂)
Tc	1.40E-04	IAEA TRS 364 (砂)
Ag	9.00E-02	IAEA TRS 364 (砂)
Cd	7.40E-02	IAEA TRS 364 (砂)
Sn	1.30E-01	IAEA TRS 364 (砂)
I	1.00E-03	IAEA TRS 364 (砂)
Cs	2.70E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Ba	6.00E-02	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Eu	3.10E-02	原研事業許可申請書
Ho	2.40E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Hf	4.50E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Pb	2.70E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Po	1.50E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Ra	4.90E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Ac	4.50E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Th	3.00E+00	IAEA TRS 364 (砂)
Pa	5.40E-01	IAEA TRS 364 (砂)
U	3.30E-02	IAEA TRS 364 (砂)
Np	4.10E-03	IAEA TRS 364 (砂)
Pu	5.40E-01	IAEA TRS 364 (砂)
Am	2.00E+00	IAEA TRS 364 (砂)
Cm	4.00E+00	IAEA TRS 364 (砂)
設定手順：①IAEA-TRS-364 ⁴⁾ 砂の値を設定 ②IAEA S.S No.57 ⁵⁾ ③IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ ④上記文献に記載がない元素の設定は下記のとおり Eu：原研事業許可申請書 ⁷⁾ Cl：化学的類似性を考慮して I と同じ値に設定 Al 及び Ba：VLLW 学会標準 ⁸⁾ を参考にし、ORNL-5786 ⁹⁾ より設定		

表 C-4 元素依存パラメータ：河川産物（魚類）の濃縮係数

元素名	選定値 (m ³ /kg)	選定根拠
H	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Be	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
C	5.0E+01	IAEA-TECDOC-1380
Al	5.0E-01	NCRP-123 (VLLW 学会標準)
Cl	5.0E-02	NUREG/CR-3585
Ca	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Co	3.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Ni	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Se	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1000
Sr	6.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Zr	3.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Nb	3.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Mo	1.0E-02	NUREG/CR-3585
Tc	2.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ag	5.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Cd	2.0E-01	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Sn	3.0E+00	IAEA-TECDOC-1380
I	4.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Cs	2.0E+00	IAEA-TECDOC-1380
Ba	4.0E-03	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Eu	5.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ho	2.5E-02	UCRL-50564
Hf	4.0E-02	NCRP-123 (L1 学会標準)
Pb	3.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Po	5.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ra	5.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ac	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Th	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Pa	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
U	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Np	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Pu	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Am	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Cm	3.0E-02	IAEA TRS No.364
選定手順：①IAEA-TECDOC-1380 ¹⁰⁾ ②IAEA SS No.57, ③IAEA-TECDOC-401, ④NUREG/CR-3585 ¹¹⁾ , ⑤UCRL-50564 Rev.1 ¹²⁾ , ⑥IAEA TRS No.364, ⑦IAEA-TECDOC-1000 ¹³⁾ , ⑧IAEA SRS No.19 ¹⁴⁾ , ⑨NCRP-123 ¹⁵⁾		

表 C-5 元素依存パラメータ：灌漑土壌の分配係数

元素名	選定値 (m ³ /kg)	選定根拠
H	0.00E+00	原子炉 CL 報告書
Be	3.00E+00	IAEA TRS 364
C	2.00E-03	原子炉 CL 報告書
Al	1.50E+00	ORNL-5786
Cl	2.70E-02	原子炉 CL 報告書
Ca	1.10E-01	原子炉 CL 報告書
Co	9.90E-01	原子炉 CL 報告書
Ni	1.10E+00	原子炉 CL 報告書
Se	1.80E+00	IAEA TRS 364
Sr	1.50E-01	原子炉 CL 報告書
Zr	7.30E+00	IAEA TRS 364
Nb	2.00E+00	原子炉 CL 報告書
Mo	2.70E-02	IAEA TRS 364
Tc	1.50E-03	原子炉 CL 報告書
Ag	1.50E+01	IAEA TRS 364
Cd	8.10E-01	IAEA TRS 364
Sn	1.60E+00	IAEA TRS 364
I	2.70E-02	原子炉 CL 報告書
Cs	2.70E-01	原子炉 CL 報告書
Ba	6.00E-02	ORNL-5786
Eu	3.10E-02	原子炉 CL 報告書
Ho	3.00E+00	IAEA TRS 364
Hf	5.40E+00	IAEA TRS 364
Pb	2.20E+01	IAEA TRS 364
Po	6.60E+00	IAEA TRS 364
Ra	2.40E+00	ウランクリアランス
Ac	5.40E+00	IAEA TRS 364
Th	8.90E+01	ウランクリアランス
Pa	6.60E+00	IAEA TRS 364
U	4.00E-01	ウランクリアランス
Np	1.20E+00	IAEA TRS 364
Pu	1.80E+00	原子炉 CL 報告書
Am	1.10E+02	原子炉 CL 報告書
Cm	1.20E+01	IAEA TRS 364
設定手順：①原子炉 CL 報告書 ②ウランクリアランス ③IAEA TRS 364 ④ORNL-5786 Al 及び Ba : VLLW 学会標準を参考にし、ORNL-5786 より設定		

表 C-6 元素依存パラメータ：農作物の移行係数

元素名	米 (Bq/g-wet) / (Bq/q-dry)		葉菜、非葉菜、果実 (Bq/g-wet) / (Bq/q-dry)	
	選定値	選定値の選定根拠	選定値	選定値の選定根拠
H	5.0E+00	IAEA-TECDOC-1380	5.0E+00	IAEA-TECDOC-1380
Be	2.0E-03	IAEA-TECDOC-1380	2.0E-03	IAEA-TECDOC-1380 (葉菜)
C	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Al	4.0E-03	NCRP No.129 (VLLW 学会標準)	4.0E-03	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Cl	5.0E+00	NUREG/CR-3585	5.0E+00	NUREG/CR-3585
Ca	5.0E-01	IAEA-TECDOC-1380	5.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Co	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ni	5.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Se	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1000	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1000
Sr	8.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	3.0E+00	IAEA-TECDOC-1380 (葉菜)
Zr	5.0E-03	IAEA-TECDOC-1380	5.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Nb	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Mo	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1000	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1000
Tc	1.0E+01	IAEA-TECDOC-1380	1.0E+01	IAEA-TECDOC-1380
Ag	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1380	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Cd	5.0E-01	葉菜、非葉菜、果実と同じ (VLLW 学会標準)	5.0E-01	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Sn	2.0E-01	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
I	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-01	IAEA-TECDOC-1380
Cs	2.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	3.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ba	5.0E-02	葉菜、非葉菜、果実と同じ (VLLW 学会標準)	5.0E-02	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Eu	3.0E-03	IAEA-TECDOC-1380	3.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Ho	2.6E-03	UCRL-50163 part IV	2.6E-03	UCRL-50163 part IV
Hf	3.0E-03	NCRP-129 (L1 学会標準)	3.5E-03	ORNL-5786 (L1 学会標準)
Pb	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Po	2.0E-04	IAEA-TECDOC-1380	2.0E-04	IAEA-TECDOC-1380
Ra	4.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	4.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Ac	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Th	5.0E-04	IAEA-TECDOC-1380	5.0E-04	IAEA-TECDOC-1380
Pa	4.0E-02	IAEA-TECDOC-1380	4.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
U	1.0E-04	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Np	3.0E-04	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380 (葉菜)
Pu	3.0E-05	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380 (根菜)
Am	1.0E-05	IAEA-TECDOC-1380	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Cm	1.8E-05	IAEA TRS No.364 (シリアル)	2.2E-04	IAEA TRS No.364 (根菜)
選定手順：① IAEA-TECDOC-1380, ② IAEA TRS No.364, ③ IAEA SS No.57, ④ IAEA-TECDOC-401, ⑤ IAEA-TECDOC-1000, ⑥ 上記文献に記載がない元素の設定は下記のとおり Al : NCRP No.129 ¹⁶⁾ (米)、ORNL-5786 (葉菜、非葉菜、果実)、 Cd 及び Ba : IAEA SRS No.19、Cl : NUREG/CR-3585、Ho : UCRL-50163 part IV ¹⁷⁾				

表 C-7 元素依存パラメータ：飼料の移行係数

元素名	選定値 (Bq/g-wet) / (Bq/q-dry)	選定値の選定根拠
H	5.0E+00	第3次中間報告
Be	2.0E-02	第3次中間報告
C	2.8E+00	第3次中間報告
Al	1.0E-01	IAEA SRS No.19
Cl	7.0E+01	第3次中間報告
Ca	3.5E+00	第3次中間報告
Co	1.1E+00	第3次中間報告
Ni	5.1E-01	第3次中間報告
Se	1.0E+00	第3次中間報告
Sr	1.7E+00	第3次中間報告
Zr	2.0E-02	第3次中間報告
Nb	5.0E-02	第3次中間報告
Mo	1.0E+00	第3次中間報告
Tc	7.6E+01	第3次中間報告
Ag	1.0E+00	第3次中間報告
Cd	5.0E+00	IAEA SRS No.19
Sn	1.0E+00	第3次中間報告
I	3.4E-03	第3次中間報告
Cs	5.3E-01	第3次中間報告
Ba	1.0E-01	IAEA SRS No.19
Eu	4.0E-02	第3次中間報告
Ho	5.0E-02	第3次中間報告
Hf	1.0E-02	第3次中間報告
Pb	1.1E-03	第3次中間報告
Po	9.0E-02	第3次中間報告
Ra	8.0E-02	第3次中間報告
Ac	1.0E-01	IAEA SRS No.19
Th	1.0E-02	第3次中間報告
Pa	1.0E-01	IAEA SRS No.19
U	2.3E-02	第3次中間報告
Np	6.9E-02	第3次中間報告
Pu	8.0E-04	第3次中間報告
Am	1.2E-03	第3次中間報告
Cm	1.1E-03	第3次中間報告
選定手順：①第3次中間報告 ¹⁸⁾ ，②IAEA SRS No.19		

表 C-8 元素依存パラメータ：飼料及び飼育水から畜産物（乳牛）への移行係数

元素名	選定値 (d/L)	選定値の選定根拠
H	1.5E-02	IAEA-TECDOC-1380
Be	2.6E-06	IAEA-TECDOC-1380
C	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Al	2.0E-04	ORNL-5786 (VLLW 学会標準)
Cl	1.7E-02	NUREG/CR-3585
Ca	3.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
Co	3.0E-04	IAEA-TECDOC-1380
Ni	1.6E-02	IAEA-TECDOC-1380
Se	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1000
Sr	2.8E-03	IAEA-TECDOC-1380
Zr	5.5E-07	IAEA-TECDOC-1380
Nb	4.1E-07	IAEA-TECDOC-1380
Mo	1.7E-03	IAEA TRS No.364
Tc	2.3E-05	IAEA-TECDOC-1380
Ag	5.0E-05	IAEA-TECDOC-1380
Cd	2.0E-02	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Sn	1.0E-03	IAEA-TECDOC-1380
I	1.0E-02	IAEA-TECDOC-1380
Cs	7.9E-03	IAEA-TECDOC-1380
Ba	5.0E-03	IAEA SRS No.19 (VLLW 学会標準)
Eu	5.0E-05	IAEA-TECDOC-1380
Ho	2.5E-06	PNL-3209
Hf	2.0E-05	NCRP-129 (L1 学会標準)
Pb	3.0E-04	IAEA-TECDOC-1380
Po	3.4E-04	IAEA-TECDOC-1380
Ra	1.3E-03	IAEA-TECDOC-1380
Ac	4.0E-07	IAEA-TECDOC-1380
Th	5.0E-06	IAEA-TECDOC-1380
Pa	5.0E-06	IAEA-TECDOC-1380
U	4.0E-04	IAEA-TECDOC-1380
Np	5.0E-06	IAEA-TECDOC-1380
Pu	1.1E-06	IAEA-TECDOC-1380
Am	1.5E-06	IAEA-TECDOC-1380
Cm	2.0E-05	IAEA SS No.57
選定手順：①IAEA-TECDOC-1380, ②IAEA SRS No.19, ③IAEA TRS No.364, ④IAEA SS No.57, ⑤ORNL-5786, ⑥NUREG/CR-3585, ⑦PNL-3209 ¹⁹⁾ , ⑧IAEA-TECDOC-1000		

表 C-9 核種依存パラメータ：線量換算係数（その1）

核種名	内部被ばく		外部被ばく	放射平衡を仮定した子孫核種
	ICRP Pub.68 ²⁰⁾	ICRP Pub.72 ²¹⁾		
	吸入 (Sv/Bq)	経口 (Sv/Bq)	作業者 (μ Sv/h) / (Bq/g)	
H-3	4.1E-11	4.2E-11	0.0E+00	
Be-10	1.9E-08	1.1E-09	0.0E+00	
C-14	5.8E-10	5.8E-10	0.0E+00	
Al-26	1.4E-08	3.5E-09	3.4E-02	
Cl-36	5.1E-09	9.3E-10	8.5E-07	
Ca-41	1.9E-10	1.9E-10	0.0E+00	
Co-60	1.7E-08	3.4E-09	3.4E-02	
Ni-59	2.2E-10	6.3E-11	9.0E-08	
Ni-63	5.2E-10	1.5E-10	0.0E+00	
Se-79	3.1E-09	2.9E-09	0.0E+00	
Sr-90	7.9E-08	3.1E-08	0.0E+00	Y-90
Zr-93	2.9E-08	1.1E-09	0.0E+00	
Nb-94	2.5E-08	1.7E-09	1.4E-02	
Mo-93	2.3E-09	3.2E-09	0.0E+00	Nb-93m
Tc-99	3.2E-09	6.4E-10	1.1E-10	
Ag-108m	1.9E-08	2.3E-09	1.1E-02	Ag-108
Cd-113m	1.3E-07	2.3E-08	1.1E-10	
Sn-126	1.8E-08	5.1E-09	1.4E-02	Sb-126m,Sb-126
I-129	5.1E-08	1.1E-07	1.4E-13	
Cs-135	9.9E-10	2.0E-09	0.0E+00	
Cs-137	6.7E-09	1.3E-08	4.1E-03	Ba-137m
Ba-133	1.8E-09	1.5E-09	4.1E-03	
Eu-152	2.7E-08	1.4E-09	1.2E-02	
Eu-154	3.5E-08	2.0E-09	1.3E-02	
Ho-166m	7.8E-08	2.0E-09	1.3E-02	
Hf-182	3.6E-07	3.0E-09	1.3E-02	
Pb-210	1.2E-06	6.9E-07	3.6E-11	Bi-210
Po-210	2.2E-06	1.2E-06	7.4E-08	Hg-206,Tl-206
Ra-226	1.2E-05	2.8E-07	2.2E-02	Rn-222,Po-218,At-218,Rn-218, Pb-214,Bi-214,Po-214,Tl-210
Ra-228	1.7E-06	6.9E-07	9.5E-03	Ac-228,Fr-224
Ac-227	6.3E-04	1.1E-06	1.4E-06	Fr-223,At-219
Th-228	3.4E-05	1.4E-07	2.8E-02	Ra-224,Rn-220,Po-216,Pb-212, Bi-212,Po-212,Tl-208
Th-229	6.9E-05	4.9E-07	5.4E-05	
Th-230	2.8E-05	2.1E-07	1.7E-07	
Th-232	2.9E-05	2.3E-07	4.1E-08	
Pa-231	8.9E-05	7.1E-07	1.1E-04	

表 C-9 核種依存パラメータ：線量換算係数（その2）

核種名	内部被ばく		外部被ばく	放射平衡を仮定した子孫核種
	ICRP Pub.68	ICRP Pub.72		
	吸入 (Sv/Bq)	経口 (Sv/Bq)	作業者 (μ Sv/h) / (Bq/g)	
U-232	2.6E-05	3.3E-07	1.5E-07	
U-233	6.9E-06	5.1E-08	4.5E-07	
U-234	6.8E-06	4.9E-08	3.2E-08	
U-235	6.1E-06	4.7E-08	2.3E-04	Th-231
U-236	6.3E-06	4.7E-08	1.1E-08	
U-238	5.7E-06	4.5E-08	9.1E-06	
Np-237	1.5E-05	1.1E-07	7.9E-06	
Pu-238	3.0E-05	2.3E-07	2.5E-09	
Pu-239	3.2E-05	2.5E-07	1.0E-07	
Pu-240	3.2E-05	2.5E-07	9.5E-09	
Pu-241	5.8E-07	4.8E-09	4.1E-09	U-237
Pu-242	3.1E-05	2.4E-07	8.6E-07	
Am-241	2.7E-05	2.0E-07	7.8E-08	
Am-242m	2.4E-05	1.9E-07	3.2E-05	Am-242,Np-238
Am-243	2.7E-05	2.0E-07	2.7E-04	Np-239
Cm-243	2.0E-05	1.5E-07	2.1E-04	
Cm-244	1.7E-05	1.2E-07	1.7E-07	
Cm-245	2.7E-05	2.1E-07	5.0E-05	

参考文献

- 1) 原子力安全委員会：“主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて”，(1999) .
- 2) 原子力安全委員会：“ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて”，平成 21 年 10 月.
- 3) 天澤弘也他：“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.
- 4) IAEA：“Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments”，IAEA Technical Reports Series No.364, (1994) .
- 5) IAEA：“Generic of Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases”，IAEA Safety Series No.57, (1985) .
- 6) IAEA：“Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control – INTERIM REPORT”，IAEA-TECDOC-401 (1987) .
- 7) 日本原子力研究開発機構：“日本原子力研究所東海研究所廃棄物埋設事業許可申請書”，平成 5 年 10 月.
- 8) 日本原子力学会：“極めて放射能レベルの低い放射性廃棄物処分の安全評価手法:2006”，(2006) .
- 9) C. F. Baes III, R. D. Sharp, A. L. Sjoreen, R.W. Shor：“A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture”，ORNL-5786, (1984) .
- 10) IAEA：“Derivation of Activity Limits for the Disposal of Radioactive Waste in Near Surface Disposal Facilities”，IAEA-TECDOC-1380, (2003) .
- 11) U.S.Nuclear Regulatory Commission：“De Minimis Waste Impacts Analysis Methodology”，NUREG/CR-3585, (1984) .
- 12) S.E.Thompson, C.A.Burton, D.J.Quinn, Y.C.Ng：“Concentration Factors of Chemical Elements in Edible Aquatic Organisms”，UCRL-50564, Rev.1, (1972) .
- 13) IAEA：“Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research”，IAEA-TECDOC-1000, (1998) .
- 14) IAEA：“Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment”，IAEA-SRS No.19, (2001) .
- 15) NCRP：“Screening Models for Releases of Radionuclides to the Atmosphere, Surface Water, and Ground”，NCRP No.123, (1996) .
- 16) NCRP, “Recommended Screening Limits For Contaminated Surface Soil and Review of Factors Relevant To Site-Specific Studies”，NCRP No.129, (1999) .
- 17) Ng, Y. C., C. A. Burton, S. E. Thompson, R. K. Tandy, H. K. Kretner, and M. W.

- Pratt. : “Prediction of the maximum dosage to man from the fallout of nuclear devices”, UCRL-50163, (1968) .
- 18) 原子力安全委員会放射性廃棄物・安全基準専門部会: “低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）”, (平成12年9月) .
- 19) B.A.Napier, W.E.Kennedy Jr., J.K.Soldat : “Assessment of Effectiveness of Geologic Isolation System”, PNL-3209, (1980) .
- 20) ICRP : “Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers” , ICRP Publication 68, (1994) .
- 21) ICRP : “Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients”, ICRP Publication 72, (1996) .

付録 D

概念設計の P 埋設地の施設建設費の評価

概念設計における付加機能型トレンチ埋設設備（掘削底面の主要寸法：14m×173m×4m）である施設建設費の積算を行った。積算に用いた P 埋設地の概要、積算する上での条件及び積算の結果は、以下のとおりである。

1. 付加機能型トレンチの概要

1.1 埋設対象物及び放射能濃度

① 埋設対象物

- ・濃縮廃液等を 200ℓ ドラム缶に固型化した均質・均一固化体
- ・雑固体廃棄物等を 200ℓ ドラム缶に固型化した充填固化体

② 放射能濃度

原子炉等規制法で定められるトレンチ処分の濃度上限値を超えないもの

1.2 設備構造等の仕様

概念設計における P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設の埋設設備の仕様を表 D-1 に示す。P 埋設地の短尺断面図を図 D-1 に、長尺平面及び断面図を図 E-2 に示す。

1.3 遮水シート構成

P 埋設地の付加機能型処分施設の遮水層の構成は不織布＋二重遮水シートであり、詳細は次のとおりである。

- | | |
|-----------|--------------------------------------|
| ① 上部保護マット | : 不織布 ; 10mmt |
| ② 上部遮水シート | : 合成樹脂系高密度ポリエチレン (HDPE) シート ; 1.5mmt |
| ③ 中間保護マット | : 不織布 ; 10mmt |
| ④ 下部遮水シート | : 合成樹脂系高密度ポリエチレン (HDPE) シート ; 1.5mmt |
| ⑤ 下部保護マット | : 不織布 ; 10mmt |

2. 費用評価の条件

P 埋設地の積算作業を行うにあたり、条件を以下のとおり設けた。

- ・附属施設（受入検査施設、管理棟、環境分析棟等）は考慮しない。
- ・埋設設備内の道路工事関係（掘削、舗装及び道路灯）は考慮しない。
- ・テント（雨水浸入防止設備）は考慮しない。
- ・廃棄体の定置、中間覆土及び廃棄体間充てん土は考慮しない。
- ・最終覆土後の植栽を考慮する。

3. 施設建設の評価結果

P 埋設地の設備構造の仕様と費用評価条件を基に、P 埋設地の施設建設に係る直接工事費を評価した。費用評価の結果を表 D-2 に示す。P 埋設地の施設建設に係る直接工事費は約 2.1 億円となった。

表 D-1 概念設計における P 埋設地の付加機能型トレンチ処分施設の埋設設備の仕様

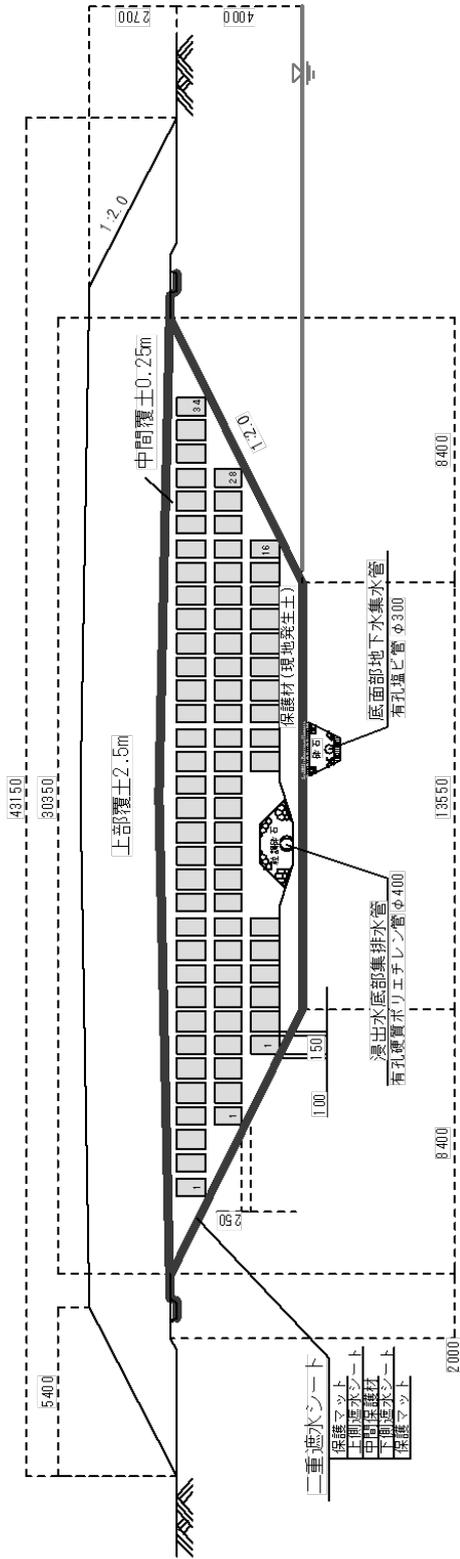
区分	項目	仕様	
P 埋設地	構造	付加機能型 (遮水層敷設)	
	容量 (埋設能力)	200ℓ ドラム缶約：約 17,500 本	
	主要寸法 (掘削底面)	短辺 (m)	13.55
		長辺 (m)	173.05
		深さ (m)	4.2
	遮水システム (キャッピング及び 法面部、底面部遮水 層)	材質	高弾性タイブ (高密度ポリエチレン (HDPE))
		透水係数 (m/s)	1.0×10^{-9}
		型式	二重遮水層
		厚さ (mm)	1.5
	主要設備	テント	延長×幅×軒高 (m) 202.650×37.0×5.0
地下水集排水設備		材質	有孔硬質塩ビ管
		管径 (mm)	300
保有水集排水設備		材質	有孔硬質ポリエチレン管
		管径 (mm)	300
		厚さ (m)	2.5
上部覆土		透水係数 (m/s)	1.0×10^{-4}

表 D-2 P 埋設地の施設建設（1基あたり）に係る直接工事費

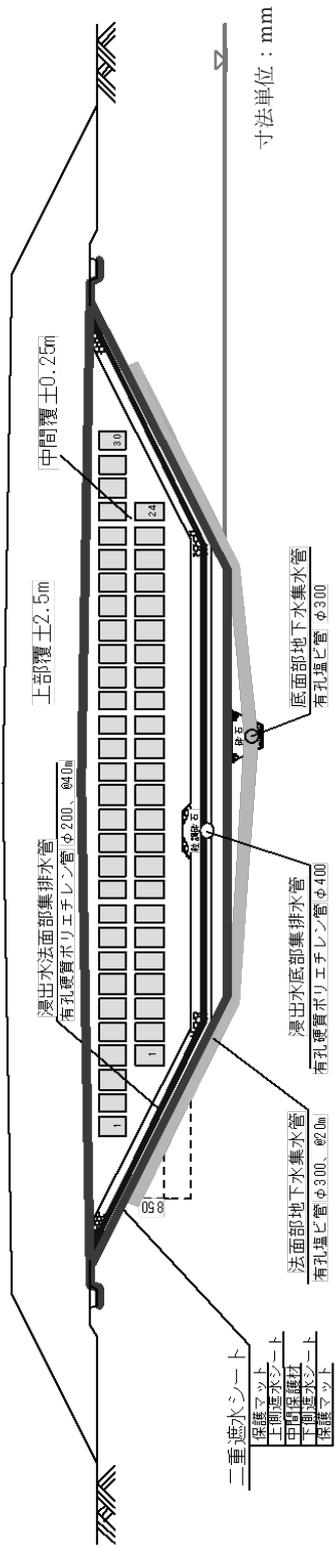
項目		費用 (100万円)*1	備考
建設費	埋設地土木工事費	土工事	埋設地・地下水集排水の掘削
		排水工事	U字溝及び集水柵の設備費用
		本体工事	埋設地内への進入路の盛土及び地表面の舗装費用
		付帯工事	最終覆土への植栽として客土吹き付け費用
		底部遮水構造	底部二重遮水シートの費用
遮水システム	法面遮水構造	63	法面部遮水シートの費用
	上部遮水構造 (キャッピング)	58	上面遮水シートの費用
	固定工	2	遮水シートの固定工
	浸出水・地下水排出処理設備	15	地下水モニタリング用の地下水集排水施設の設備費
合計		211	上記項目の合計

*1：端数処理のため総計が合わないことがある。

a. 幹線部



b. 支線部



寸法単位：mm

図 D-1 P 埋設地の短尺断面図

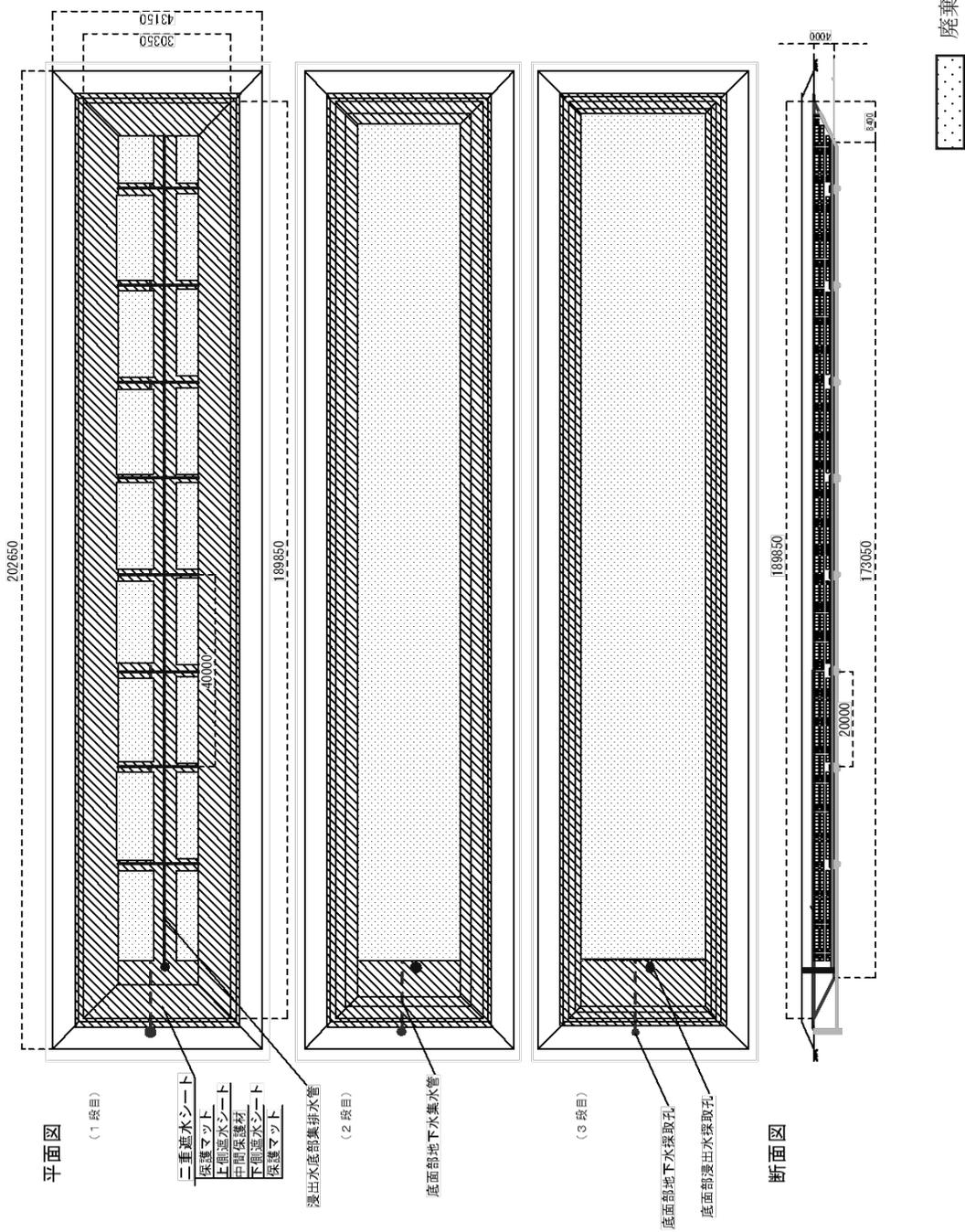


図 D-2 P 埋設地の長尺平面及び断面図

付録 E

施設建設費の追加計算

図 10.1 にて示した遮水システム構成における費用評価を実施した。結果を表 E-1 に示す。提案遮水システムの遮水シートのための直接工事費は、概念設計の P 埋設地における遮水構造の直接工事費の約 1.4 倍となり、単体での経済性は劣る。しかし、埋設完了後の雨水浸入防止機能は高く、浸出水集排水設備の軽減など付加価値の高い構造と期待される。

表 E-1 補強した法面構造による施設建設費の積算

項目					直接工事費 (100 万円) *1	
処分場の構造	検討ケース	部位	構造	図表	費用	総計
概念設計の P 埋設地 (1 基)	提案遮水システム	遮水層	検討モデル	図 10.1	66	218
		法面遮水層	2 重遮水シート層		63	
		キャッピング	構成案 2		89	

*1: 端数処理のため総計が合わないことがある。

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량	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 組立単位	
	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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	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 ^(e)	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	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
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量当量, 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
酸素活性化	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きさは同一である。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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	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
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=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) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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
ストルブ	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 ^(a)	Oe	1 Oe _⊥ =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關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=0.2 g=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	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

