



地上からの調査段階において地下施設周辺母岩の 性能を評価する手法の基礎的検討

Preliminary Study on Development of a Methodology for Evaluating the
Performance of Host Rock for Geological Disposal Based
on Surface-based Investigations

稲垣 学 田中 達也 橋本 秀爾 前川 恵輔
柴田 雅博

Manabu INAGAKI, Tatsuya TANAKA, Shuji HASHIMOTO, Keisuke MAEKAWA
and Masahiro SHIBATA

地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2012

本レポートは独立行政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。

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

地上からの調査段階において地下施設周辺母岩の性能を評価する手法の 基礎的検討

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

稲垣 学^{*1}, 田中 達也^{*1}, 橋本 秀爾^{*1}, 前川 恵輔, 柴田 雅博

(2011年12月19日 受理)

我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は、公募により対象となった地域に対して、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分施設建設地の選定と段階的に進められることとなっている。文献調査により選定された概要調査地区に対しては、トレンチ調査、物理探査、ボーリング調査等の地上からの調査が実施され、これらの調査から得られる限られた情報に基づいて、精密調査地区を対象としたスケールの地質環境モデルを構築し、地上・地下施設の基本レイアウトの設定、人工バリアの工学的成立性の確認、長期安全性に関する予備的な評価を行うことが予定されている。このためには、地上からの調査による限られた情報に基づいて、様々な不確実性や、地質構造や地質環境の不均質性を考慮しながら、評価対象とする地域の水理地質構造モデルをどのように構築していくのか、さらに、処分施設に必要な地下深部の空間的な広がりやを考慮して、処分施設の設置に好ましい岩盤領域（母岩）をどのように把握するのかについて、技術的な見通し（何ができそうか、できそうにないか等）を得るために、具体的なアプローチ、方法論を検討しておくことが重要である。このことは、精密調査地区選定において鍵となる技術基盤を用意することに資するものと考えられる。

本研究は、精密調査地区選定段階において地層処分施設の設置に好ましいということを判断するための具体的な指標について一般的な検討を行い、整理を行った。そして、地上からの調査段階における、水理地質構造の限られた理解に起因する不確実性を考慮した上で、処分施設の設置に好ましいと考えられる地下深部の地層の広がりを、どのような手法と指標で評価することが有効となりえそうかという技術的課題について、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階で取得された調査データを例題として検討を実施し、手法の有効性の確認と課題の抽出を行った。

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

^{*1} 技術開発協力員（平成 22 年 6 月迄）

^{*1} (株)大林組

Preliminary Study on Development of a Methodology for Evaluating the Performance of Host Rock for Geological Disposal Based on Surface-based Investigations

Manabu INAGAKI*¹, Tatsuya TANAKA*¹, Shuji HASHIMOTO*¹,
Keisuke MAEKAWA and Masahiro SHIBATA

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

(Received December 19, 2011)

In Japan, a step-wise site investigation strategy is applied in the site selection process for geological disposal of HLW. Preliminary surface-based investigations such as boreholes and geophysical surveys will be followed by detailed investigations, including construction of, and testing in, an underground characterization facility. The basic repository concept, including underground design and layout, will be discussed at the end of surface-based investigations by using obtained information.

The repository concept will depend on the spatial extent of the candidate rock formation(s) and their barrier performance under site-specific conditions found deep underground. However, information obtained from initial surface-based investigations is inherently limited and includes uncertainties, particularly with regard to the heterogeneity of geological characteristics. It is thus important to assess host rock performance in a manner that explicitly considers uncertainties in the site characterization.

In this study, methodology for evaluation of geological conditions has been developed that focuses on determining the usable volume of host rock with specific performance characteristics.

Initially, multiple performance indices - such as groundwater velocity and solute transport distance - have been defined as key characteristics of the geological environment from the viewpoint of barrier performance. Then the evaluation procedure with these indices is illustrated by using the dataset obtained from the Horonobe Underground Research Laboratory Project.

Finally the proposed procedure is reviewed and future challenges are extracted.

*¹ Collaborating Engineer (until June, 2010)

*¹ OBAYASHI CORPORATION

目次

1. はじめに	1
2. 研究のアプローチ	2
3. 評価指標の検討と整理	3
3.1 閉鎖後の長期安全性に関する評価指標	3
3.2 評価指標の導出方法	4
4. 地質環境調査による場の理解	7
4.1 地質環境調査結果の整理	7
4.2 地質構造発達史の整理	9
4.3 稚内層の分布する透水性割れ目の性状に関する整理	13
5. 水理地質構造モデルの作成	17
5.1 モデル化対象領域の設定	17
5.2 水理地質構造概念の検討	19
5.2.1 基本モデル	19
5.2.2 代替モデル①	20
5.2.3 代替モデル②	20
5.2.4 代替モデル③	21
6. 地下水流動解析	24
6.1 解析条件	24
6.2 解析結果	25
7. 流跡線解析による指標の定量化	27
7.1 解析方法	27
7.2 解析結果	29
8. まとめと今後の課題	34
参考文献	37

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of This Study	2
3. Performance Indices	3
3.1 Performance Indices for Post-closure Safety	3
3.2 Approach for derivation of the indices	4
4. Evaluation of Site Characteristics	7
4.1 Results of Site Investigation	7
4.2 Structural Evolution Model	9
4.3 Hydrogeological Characteristics of Fractures in the Wakkanai Formation	13
5. Construction of Hydrogeological Model	17
5.1 Model Area	17
5.2 Hydrogeological Conceptual Models	19
5.2.1 Base Model	19
5.2.2 Alternative Model 1	20
5.2.3 Alternative Model 2	20
5.2.4 Alternative Model 3	21
6. Analysis of Groundwater flow	24
6.1 Analysis Conditions	24
6.2 Results	25
7. Evaluation of the Performance Indices by Particle Tracing Analysis	27
7.1 Analysis Methods	27
7.2 Results	29
8. Conclusions and Remaining Issues	34
References	37

表目次

表 3-1	母岩の核種封じ込め性能に関する地上からの調査段階での性能指標の例	4
表 4-1	地上からの調査による場の理解	8
表 4-2	稚内層の割れ目帯の整理結果	15
表 5-1	本検討で構築した水理地質構造のバリエーション	19
表 5-2	稚内層健岩部中の小断層帯の確率論的ネットワークモデルの構築方針	22
表 6-1	地下水流動解析で設定した透水性	24
表 6-2	境界条件一覧	24

図目次

図 2-1	本研究のアプローチ	2
図 3-1	評価指標（ダルシー流速，移行距離，流出点，流出点環境）の定量化方法と不確実性の例示【多孔質媒体による評価】	5
図 3-2	評価指標（ダルシー流速，移行距離，流出点，流出点環境）の定量化方法と不確実性の例示【亀裂ネットワークモデルによる評価】	6
図 4-1	幌延深地層研究センター周辺の地質図	7
図 4-2	図 4-1 の A-A' 断面での地質図（新里・安江，石井ほかに基づく）	8
図 4-3	幌延地質構造発達史の概念整理（その 1）	11
図 4-4	幌延地質構造発達史の概念整理（その 2）	12
図 4-5	稚内層の断層帯の分布図	16
図 5-1	3次元水理地質構造モデル化領域【広域スケール及びサイトスケール】	17
図 5-2	3次元地質構造モデル【広域スケール】	18
図 5-3	3次元地質構造モデル【サイトスケール】	18
図 5-4	基本モデルで用いた稚内層における透水係数の深度依存性	20
図 5-5	稚内層健岩部中の小断層帯の空間分布モデル	22
図 5-6	稚内層の透水係数空間分布【小断層帯を考慮した等価透水係数分布モデル】	23
図 6-1	地下水流動解析結果（ダルシー流速分布）	25
図 6-2	地下水流動解析結果（HDB-11 孔における全水頭分布の実測値との比較）	26
図 7-1	評価対象地層の広がり（概念図）	27
図 7-2	パーティクルトラッキングの出発点となる各深度での水理地質構造区分の分布	28
図 7-3	パーティクルトラッキング法による解析結果例（標高-300m 水平断面配置）	29
図 7-4	標高-500m の稚内層水平断面でのダルシー移行時間分布	31
図 7-5	各水理地質構造区分におけるダルシー移行時間の頻度分布（代替モデル③）	32
図 7-6	声問層，稚内層水平断面でのダルシー移行時間分布（代替モデル③）	33

This is a blank page.

1. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は、対象となった地域に対して、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分施設建設地の選定と段階的に進められることとなっている¹⁾。文献調査による概要調査地区の選定段階では、地質の長期安定性等の法定要件を満たす事項に関して評価がなされ、概要調査地区が選定される。これに続く精密調査地区選定段階（概要調査段階）においては、トレンチ調査、物理探査、ボーリング調査等の地上からの調査が実施される。これらの調査から得られる限られた情報に基づいて、精密調査地区を対象としたスケールの地質環境モデルを構築し、地上・地下施設の基本レイアウトの設定、人工バリアの工学的成立性の確認、長期安全性に関する予備的な評価を行うことが予定されている²⁾。このためには、地上からの調査による限られた情報に基づいて、様々な不確実性や、地質構造や地質環境の不均質性を考慮しながら、評価対象とする地域の水理地質構造モデルをどのように構築していくのか、さらに、処分施設に必要となる地下深部の空間的な広がりやを考慮して、処分施設の設置に好ましい岩盤領域（母岩）をどのように把握するのかについて、技術的な見通し（何ができそうか、できそうにないか等）を得るために、具体的なアプローチ、方法論を検討しておくことが重要である。このことは、精密調査地区選定において鍵となる技術基盤を用意することに資するものと考えられる。

本研究は、地上からの調査段階における、水理地質構造の限られた理解に起因する不確実性を考慮した上で、処分施設の設置に好ましいと考えられる地下深部の地層の広がりを、どのような手法と指標で評価することが有効となりえそうかという技術的課題について、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階で取得された調査データ³⁾を例題として、検討を行ったものである。

2. 研究のアプローチ

はじめに、精密調査地区選定段階において地層処分施設の設置に好ましいということを判断するための具体的な指標について一般的な検討を行い、整理を行った。そして、それらの指標の中から、本研究において着目する指標の抽出を行った。

次に、地上からの調査段階で得られる情報に基づいて指標を定量化するために、以下の手順で検討を実施した。

- ① ボーリング調査等の調査結果と同地域の地質構造発達史との整合性を考慮した、物質移行評価上考慮すべきと考えられる水理地質構造の把握と物性値の整理
- ② ①の結果に基づいた、広域（数10km×数10km程度）およびサイトスケール（数km×数km程度）の水理地質構造モデルの作成（複数の水理地質構造の概念を考慮）
- ③ ②で作成した複数の水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析の実施
- ④ ③の結果に基づく、地下深部の検討対象領域を移行開始点とした流跡線解析の実施

最後に、④までで実施した解析結果を“評価指標”の観点で整理し、処分施設の設置に好ましいと考えられる地下深部の地層の広がり、どのような手法と指標で評価することが有効となりえそうかという技術的課題について検討し、課題の抽出を行った。

なお、指標の定量化の検討においては、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階（第1段階）において得られた情報を利用した試行を行うことで、手法の例示とした。

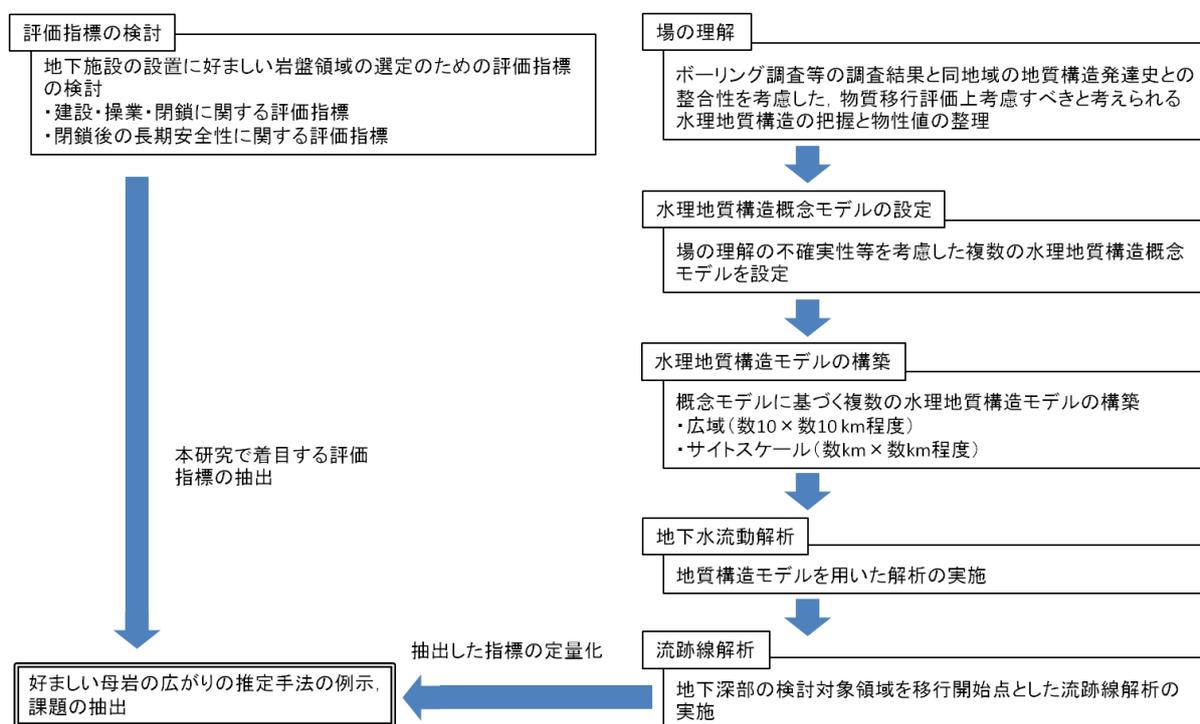


図 2-1 本研究のアプローチ

3. 評価指標の検討と整理

段階的に進められる地層処分事業において、地下の処分施設の建設に適した岩盤領域を選定する際には、長期の安全性に加え、地下施設建設・操業・閉鎖に関する実現可能性、工学的安全性、経済合理性、さらに社会的受容性等、様々な側面から検討がなされ、最終的に適切な岩盤領域選定の意思決定がなされると考えられる。この際、適切な岩盤領域の選定は、処分施設を構成するパネルの配置や、処分施設を構築する岩盤内において、どのような地下水移行経路をプラグやグラウトにより止水するかといった工学的対策の考え方にも大きく依存する。

本検討では、適切な岩盤領域の選定に資する指標として、これらの中から地層処分事業の概要調査段階終了時点を想定し、閉鎖後の長期安全性の観点から評価指標の検討と整理を行った。

3.1 閉鎖後の長期安全性に関する評価指標

閉鎖後の安全性評価において想定される可能性の高いシナリオである「地下水シナリオ」を対象として、これに関与する評価指標について検討を進める。

人工バリアから浸出する核種は、処分場を通過する地下水の流れによって天然バリアである地中を移行し、人間の生活圏（生物圏）に到達する。したがって、評価指標は、人工バリアの安定性や人工バリアからの核種の移行に関与する指標、天然バリアの主要な安全機能となる核種移行遅延に関与する指標、および人間の生活圏（生物圏）へ核種が移行した場合に想定される希釈分散等に寄与する指標とに分けて考えることができる。

人工バリアの劣化および人工バリアからの核種の移行に関しては、地下水化学条件および人工バリア外側での地下水の流量や流速が関与する。天然バリアでの移行遅延は、核種の移行開始点（廃棄物の置かれる地点）から、地中を經由して、生物圏に到達するまでに要する時間として考えることが可能である。この時間を算出するためには、移行開始点から生物圏までの移行経路や移行経路に沿った地下水の実流速、岩石への収着や岩盤への拡散等の評価が必要となり、評価結果には不確実性が伴うこととなる。そのため、より不確実性が低減可能な指標として、移行の開始点となる処分施設近傍の比較的調査密度の高い領域に着目し、移行開始点から一定の移行距離（100m、300m等）に対する地下水の移行時間、あるいは〇〇層といった移行開始点が存在する特定の地層から外に出て行くまでの移行時間といったものを指標とすることも有効と考えられる。生活圏での希釈分散効果に関しては、核種が生物圏に到達する地点によって、人間が核種を摂取するまでの間に、どの程度の希釈が期待できるかが異なる。さらには、核種の摂取を想定する時点での対象となる集団の生活様式も指標の一つとなり得るが、遠い将来における生活様式の仮定には不確実性が大きく⁴⁾、これを母岩の性能を表す指標とすることの適切性については、さらなる検討が必要である。

表3-1に、母岩の核種閉じ込め性能の観点から利用可能と考えられる評価指標をまとめる。これらの指標には、広域の地下水流動特性の把握とモデル化が必要なものと、評価点近傍の情報で評価が可能なもの、あるいは現在の地質環境の情報から判断できるものと、将来に渡る地質環境の時間的変遷に関する情報が必要なものといった、必要となる情報の空間スケールおよび時間が異なるものが混在している。したがって、利用可能な情報の充足度とその不確実性、さらに指標そのものが本来的に有している不確実性を考慮して、優先的に考えるべき指標の選択

が必要となる。

表 3-1 母岩の核種封じ込め性能に関する地上からの調査段階での性能指標の例

評価指標	具体的な指標の設定例
ダルシー流速	・ 評価点でのダルシー流速*1
移行時間	・ 評価点から地表（生物圏）までの移行時間 ・ 評価点からその点が存在する水理地質学的特徴で区分されるある領域（e. g. 特定の地層）から外に出るまでの移行時間 ・ 評価点からある移行距離（e. g. 100m, 300m, 1000m）までの移行時間
移行距離	・ 評価点から地表（生物圏）までの移行距離
流出点および流出点環境	・ 地表（生物圏）での流出点およびその環境
遅延特性（化学特性） 核種の溶解度，収着に影響を及ぼす指標： 酸化還元状態，塩分濃度，炭酸濃度など	・ 評価点の地下水の地球化学特性*2 ・ 移行経路における地下水の地球化学特性
遅延特性（空隙特性）	・ 評価点近傍の岩盤の空隙構造 ・ 移行経路中の岩盤の空隙構造

*1：人工バリアの安定性（緩衝材の流出）の観点でも指標となりえる。

*2：人工バリアの安定性（緩衝材性能の劣化，オーバーパックの腐食）の観点でも指標となりえる。

3.2 評価指標の導出方法

本項では、前項に示した評価指標を導出するアプローチについて検討する。導出のアプローチは、処分サイトの地質環境特性や地層処分全体の事業戦略により大きく異なってくると考えられるので、ここでの検討は、あくまでもアプローチの一例である。

また、評価指標の導出に至るまでには多くの不確実性を伴うことから、評価指標を用いる際にはどこにどのような不確実性があるのかを把握しておくことが重要である。したがって、ここで示す評価指標導出のアプローチに含まれる不確実性についても示すことにした。

地下水流動・物質移行に関する評価指標として示したダルシー流速，移行時間，移行距離，流出点，流出点環境，遅延特性（通過岩種）の導出方法の例とその過程における不確実性を図 3-1 および図 3-2 に示す。ここでは、水理地質構造概念として多孔質媒体モデルを想定した場合と亀裂ネットワークモデルを想定した場合の 2 通りをフロー形式で示した。

ここで示した多孔質媒体モデルと亀裂ネットワークモデルを用いた評価指標の導出方法は大局的には同じであるが、異なる点として対象母岩の水理特性の評価項目が挙げられる。具体的には多孔質媒体モデルでは、母岩を均質な透水特性として取り扱うことから母岩のマトリックスの透水係数を必要とするが、亀裂ネットワークモデルでは、地下水の移行経路として亀裂内を想定するため、亀裂の透水性（透水量係数）が必要になる。また、亀裂ネットワークモデルでは、対象領域内の亀裂の空間的な分布を求めるために亀裂の頻度分布や長さ分布から確率論的なアプローチで水理地質構造モデルを構築することになる。

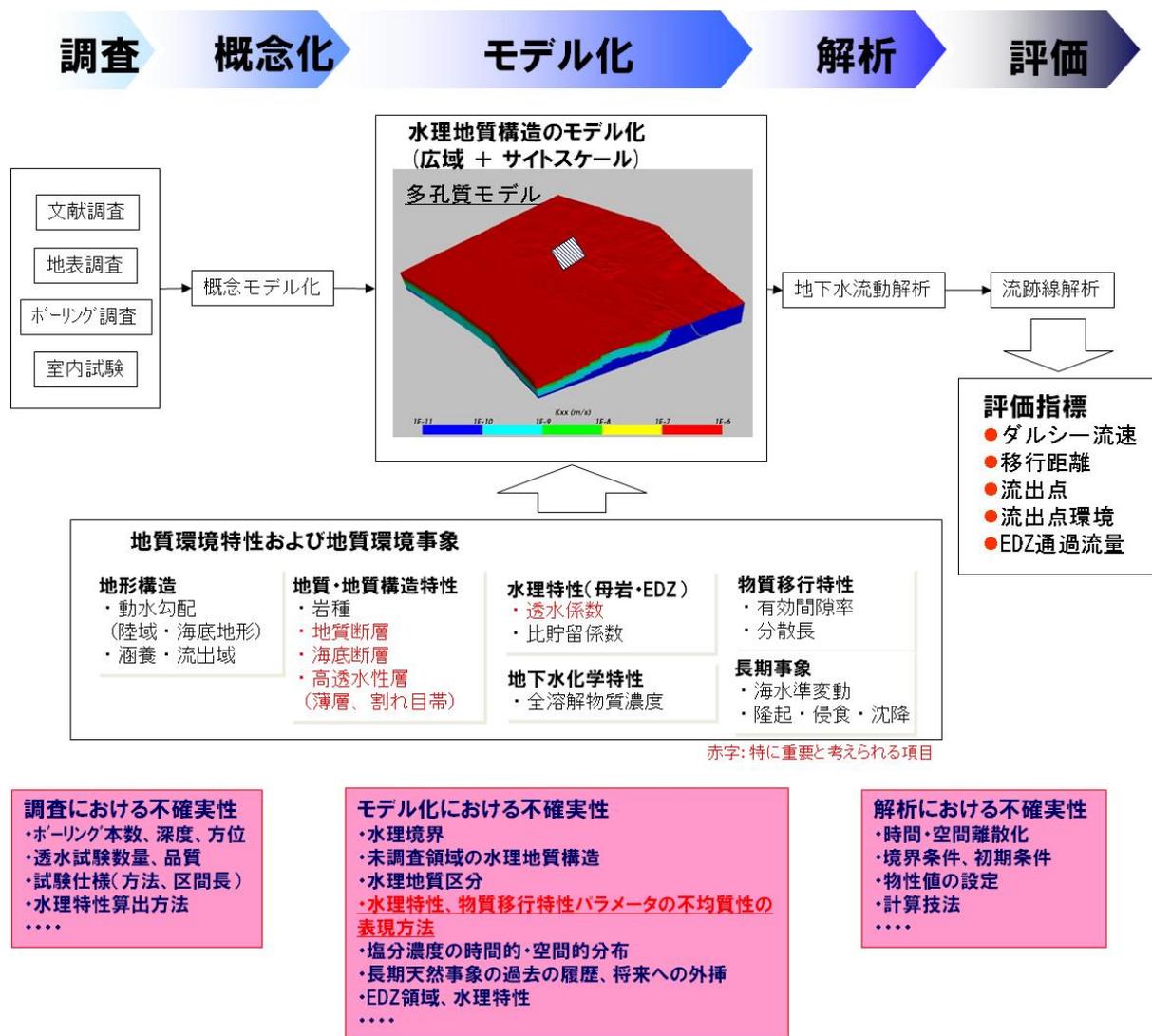


図 3-1 評価指標（ダルシー流速，移行距離，流出点，流出点環境）の定量化方法と不確実性の例示【多孔質媒体による評価】



図 3-2 評価指標（ダルシー流速，移行距離，流出点，流出点環境）の定量化方法と不確実性の例示【亀裂ネットワークモデルによる評価】

以降，4章～7章において，2章および3章に示した手法に従って，幌延深地層研究計画における地上からの調査段階における調査結果を例題として，一部の評価指標について定量化を試行する。

4. 地質環境調査による場の理解

4.1 地質環境調査結果の整理

幌延深地層研究計画における地上からの調査段階における調査結果は、太田ほか(2007)³⁾に詳述されている。図 4-1 には研究所設置地区およびその周辺の地質図を、図 4-2 には地質断面図を示す。

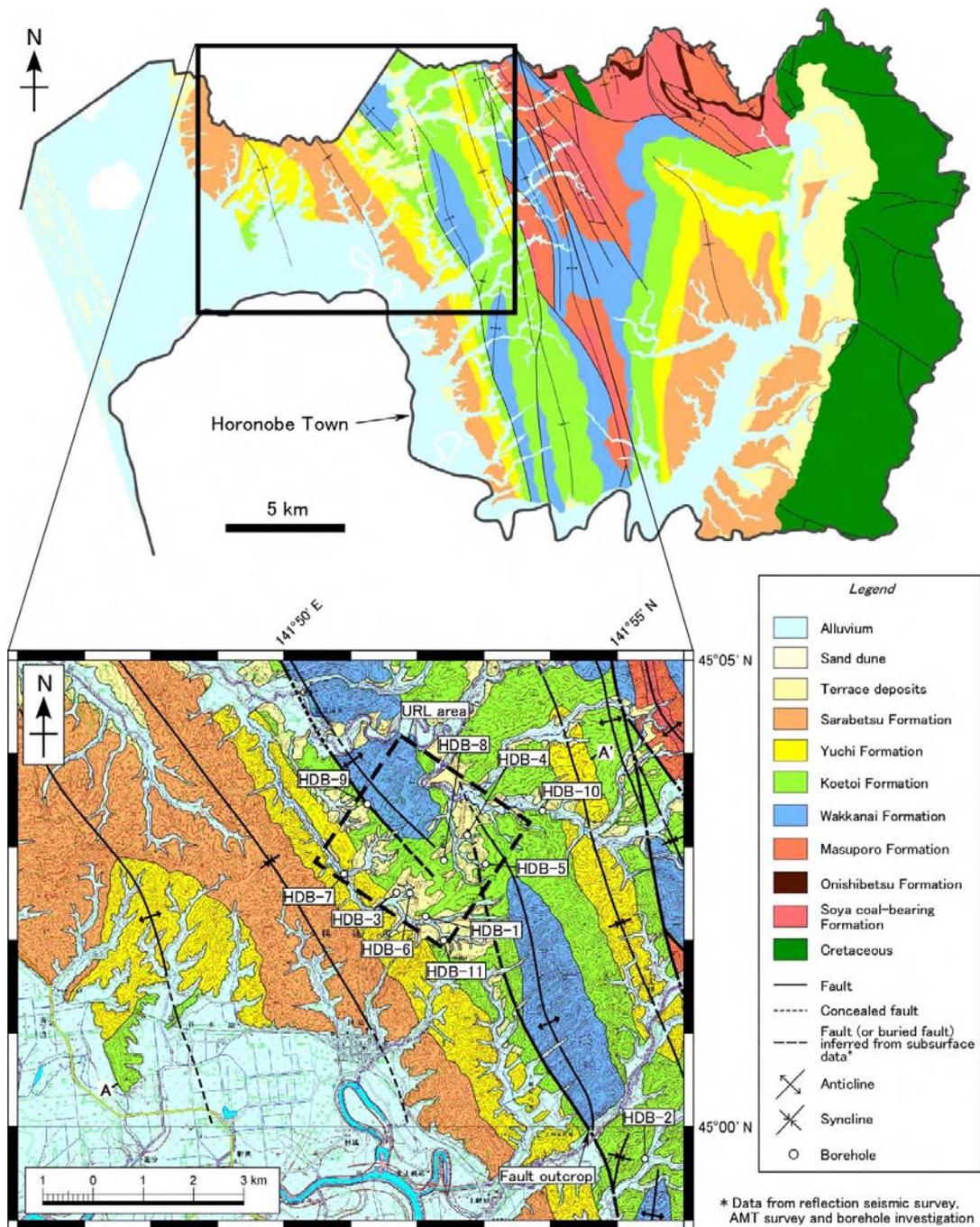


図 4-1 幌延深地層研究センター周辺の地質図

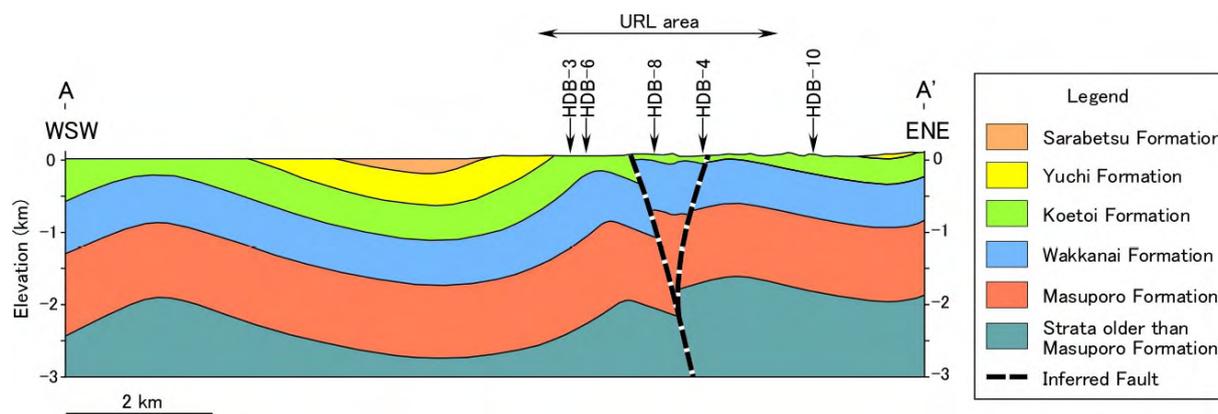


図4-2 図4-1のA-A' 断面での地質図（新里・安江⁵⁾，石井ほか⁶⁾に基づく）

研究所設置地区の地層は、中期中新世前半の増幌層，中期中新世後半～鮮新世の稚内層及び声問層，鮮新世～前期更新世の勇知層及び更別層が分布しており，研究所設置地区のほぼ中央に大曲断層が存在することが推定されている。

水理地質構造モデルを検討する観点で，地上からの調査段階での場の理解を表 4-1 にまとめた。

表 4-1 地上からの調査による場の理解

項目	場の理解
地質・地質構造特性	<ul style="list-style-type: none"> 主に勇知層(砂岩主体)，声問層(珪藻質泥岩主体)，稚内層(珪質泥岩(あるいは珪質砂岩)を主体)が分布する。 地下水流動に影響を及ぼす可能性のある構造として大曲断層が分布する。
水理地質構造特性	<ul style="list-style-type: none"> 勇知層は $8E-10m/s$ の低透水性を有す(2点の試験結果)。 声問層は $3E-07\sim 4E-10m/s$ の透水性を有す。 増幌層の透水特性実測値がない。 稚内層は透水係数のばらつきが大きい($1E-05\sim 1E-12m/s$) 稚内層の透水係数のばらつきは深度依存性で概ね説明できる。 稚内層中に高透水性の断層帯(小断層帯)が分布する。 大曲断層の透水性は $1E-07\sim 1E-08m/s$ オーダである。
物質移行特性	<ul style="list-style-type: none"> 分散長，有効間隙率等のデータはない。
地下水流動概念	<ul style="list-style-type: none"> 地上からの調査地区(想定)を通過する地下水は西側の低地部や河川に流出すると推定される。 地下水は岩盤中の空隙を水みちとして流動する。 ただし，稚内層中の割れ目帯や断層帯が地下水流動を規定している可能性がある。 地上からの調査地区の深部には高い塩分濃度や高水圧のデータが得られている。
地史構造発達史	<ul style="list-style-type: none"> 古気候，隆起速度，侵食量等の長期天然事象に関する情報(文献情報)や調査データが得られている(事項で詳細に検討)。

4.2 地質構造発達史の整理

水理地質構造概念モデルは、検討対象とした地域に対して石井ら⁶⁷⁾により明らかにされた大曲断層近傍の背斜構造の形成時期に基づき、対象地域のテクトニクスを以下の3つの時期の地質環境で代表させ、地質現象と地下水形成に及ぼした影響を整理した。

- ① 堆積盆地の発達過程の 2.2Ma 以前 (1Ma は 100 万年前を表す)。
- ② 堆積盆の最大埋没時期、大曲断層活動開始時期にあたる 2.2~1.0Ma。
- ③ 東西圧縮場での大曲断層の活動、背斜構造の形成から現在 2.2~1.0Ma。

以下にそれぞれの整理内容を示す。

2.2Ma 以前

この時期は堆積盆地の沈降に伴い、珪藻質泥岩の堆積が継続している状態にある。この時期を代表する地質現象についておもに以下の3点を整理した。

① 珪藻質泥岩の堆積

増幌層の上位に不整合を介して珪藻質泥岩が堆積する。

② 初期続成作用

ボーリング調査結果などによると、炭酸塩ノジュールの生成による海水から岩石中への Fe, Mg, Ca, CO⁻ の固定、黄鉄鉱の生成による Fe, S の固定が、また有機物分解が進行し、間隙水中へのメタン、CO₂ の排出が生じたものと考えられる。これらの結果、間隙水の水質の変化、特に Eh は急激に低下したと想定される。

③ 未固結時の変形作用

未固結時に変形したと考えられる小断層が報告されているが、断層面は黒色細粒な破砕物質を介在し固結しており、透水性に対する影響はほとんどないものと推定される。

2.2Ma~1.0Ma

この期間は、堆積盆地の最大埋没時期にあたり、声問層の上位に勇知層が堆積するとともに、大曲断層の活動と褶曲運動が開始された時期と想定されている。以下の6つの事項を重要なプロセスとして整理した。

① 粗粒碎屑物の堆積

② 初期続成作用

③ オパールの相転移 Opal-A→Opal CT+H₂O

④ Opal-CT の結晶度(d101)上昇

⑤ 稚内層深部での断層形成、炭酸塩脈形成性は比較的低い可能性がある。

⑥ 深部での続成作用粘土鉱物の続成 (Smec→Smec/Illite 混合層+H₂O), 有機物熱分解(炭化水素,CO₂), OpalCT→Quartz(trH₂O)

1.0Ma～現在

この期間は、東西圧縮場での大曲断層の活動、背斜構造の形成および隆起運動が生じた。その結果、拘束圧の解放により断層や割れ目が形成されたとされている。とくに、稚内層上部では高透水性の割れ目帯が形成され、地下水流動に影響を与えていると考えられる。

また、隆起活動により地質帯が陸化し、侵食作用を受けるとともに、天水が地下へ浸入し、地下水水質の形成に影響を与えたと考えられる。以下に示す3つの事項を重要なプロセスとして整理した。

- ① 浅部断層沿いの天水の浸入および地下水との混合、炭酸塩、黄鉄鉱の溶解、pH上昇
- ② 隆起・侵食

拘束圧の低下に伴うせんせん断変形の発生、声問層中での断層、割れ目の発達、稚内層上部での連結性の高い破碎帯の形成

- ③ 拘束圧の低下による炭酸塩を伴う破碎帯の再活動

整理した概念図を図 4-3 および図 4-4 に示す。

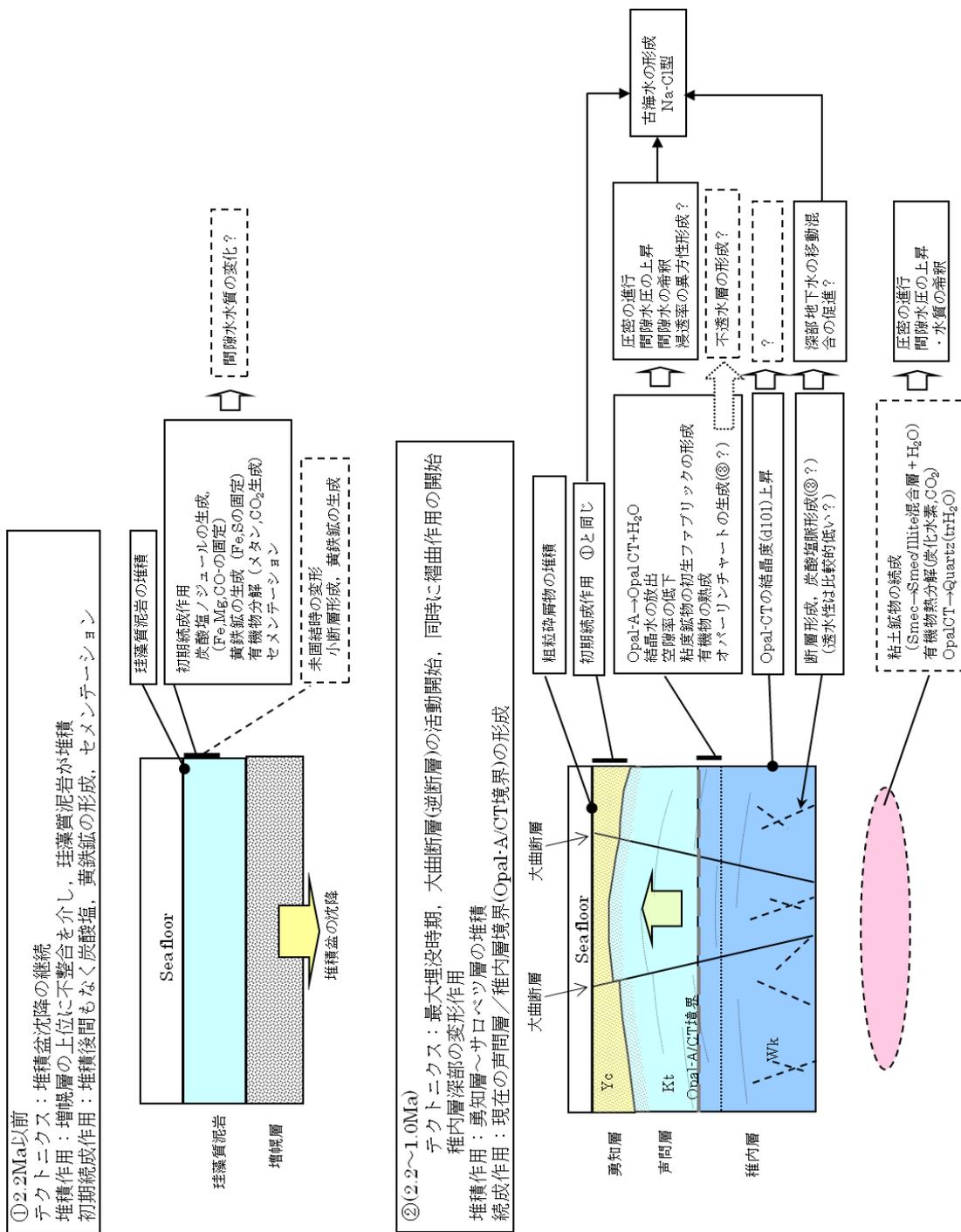


図 4-3 幌延地質構造発達史の概念整理 (その1)

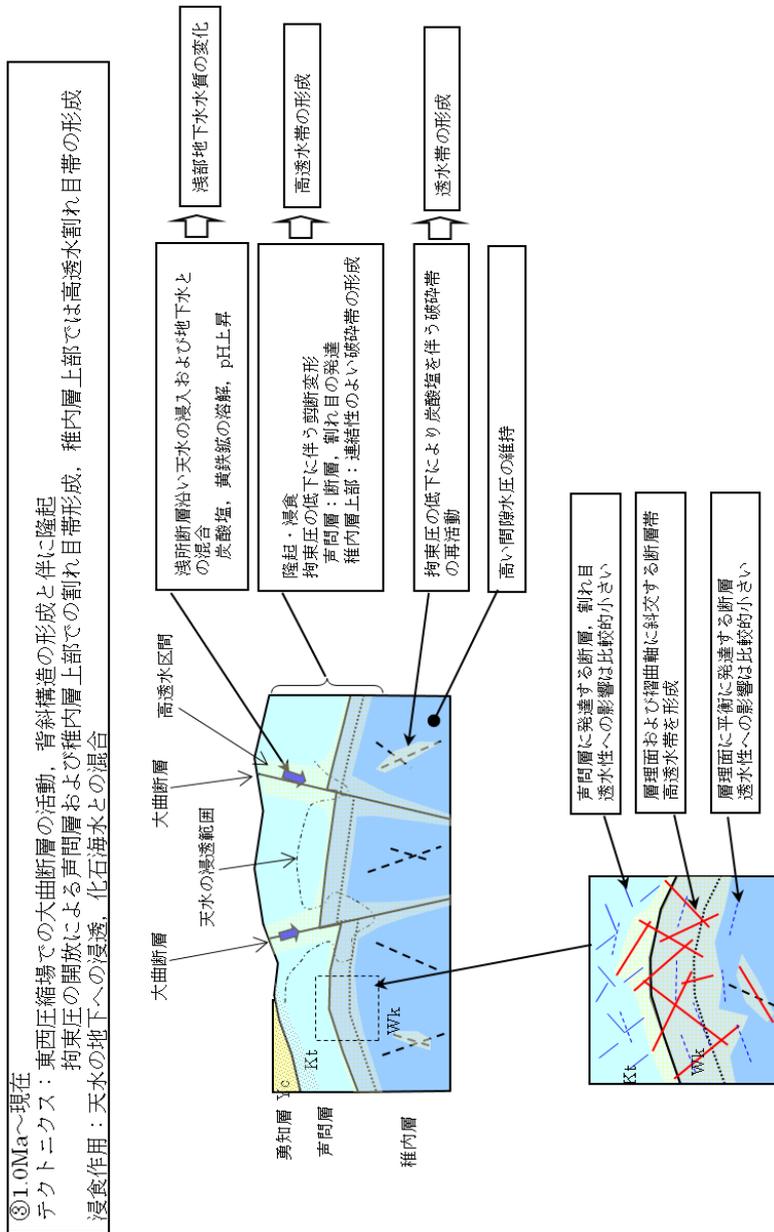


図 4-4 幌延地質構造発達史の概念整理 (その2)

4.3 稚内層の分布する透水性割れ目の性状に関する整理

研究所設置地区を対象としたサイトスケールの水理地質構造モデルの構築において重要となる稚内層の水理地質学的特性について、前述の 4.1 項ではボーリング試錐調査等の結果から稚内層の内部に高透水性の断層帯が不均質に分布することを示し、前項(4.2 項)では、これらの特性を説明しうる地質構造発達史を整理した。この稚内層の水理地質特性を水理地質構造モデルに反映させることにより、より客観的なモデル化が可能であると考えられる。そこで、ここでは、ボーリング調査により得られたコア観察や坑壁画像などの情報をもとに、稚内層の高透水性割れ目についての情報を改めて整理した。

(1) 透水性割れ目帯の性状・規模を整理する手順

一連の断層活動で形成された断層帯(割れ目帯)を認定するとともに、その内部構造を明らかにした上で、断層帯の空間分布を予測していくことが必要である。また、割れ目情報とともに、流体検層や水理試験などの結果とも比較することにより整理を行った。以下に整理の手順を示す。

①断層帯（断層コア+ダメージゾーン）の区間の決定

コア観察や孔壁検層の割れ目データをもとに、単位長さ当たりのボーリング孔に含まれる割れ目の本数（本/m）を割れ目の頻度分布図として作成する。頻度分布図には割れ目の成因ごとの内訳も示す。この頻度分布図から主にせん断割れ目の集中する区間を選定し、断層帯とする。同時に水理試験や FEC 検層（流体電気伝導度検層）などから高透水性と予想される割れ目帯を特定する。

②断層核（主せん断面）の決定

主せん断面は、断層帯の中で変位量の最も大きな面である。すなわち、この主せん断面の傾斜方位が、断層帯全体の傾斜方位を表すことになり、断層帯に関する高透水性ゾーンの分布を推定する上で不可欠の情報となる。

断層帯の内部に複数の断層岩が発達する場合がある。この場合、個々の断層岩の規模や内部構造を比較し、最も変位量が大きいと推定される断層を主せん断面とする。

- ・断層岩の規模：断層の変位が進行するに従い、主せん断面で形成される断層岩の幅も成長することが予想される。
- ・断層岩の内部組織：断層の変位が進行すると断層岩の細粒化が生じると予想される。
- ・断層岩の固結度：最もダメージを受けた面、もしくは最も新しい時代に活動した面は強度低下が生じ、断層岩の固結度に違いが認められることが考えられる。また、その面では孔径拡大が生じる可能性もあるので、孔径検層の結果なども比較する。
- ・割れ目帯に断層岩が存在しない場合：せん断割れ目の集中の程度、母岩の強度低下の状況などをもとに決定する。

③断層帯の傾斜方位の決定

孔壁画像のデータから、②により決定した主せん断面に対応する割れ目を特定し、その傾斜方位を決定する。これによりダメージゾーンの真の幅を決定することができる。

④断層帯を構成する割れ目の幾何学的特徴の整理

コアで観察された割れ目と孔壁画像で読み取られた割れ目を対比させ、せん断割れ目と引張割れ目が主せん断面（断層核）に対してどのような配置で分布しているかを明らかにする。そのために孔壁画像の割れ目の読み取りデータをステレオネットにプロットする。

ステレオネット上で、主せん断面、その他の断層岩およびせん断割れ目などのプロットされる配置を確認する。

(2) 断層帯データの整理結果

上述の割れ目整理の手順に従いボーリング孔の断層帯データを整理した。ここでの検討においては、HDBシリーズのデータに加え、換気立坑先行ボーリング（PB-V01孔）のデータも用いることとし、HDB-6孔⁸⁾とPB-V01孔⁹⁾のデータから、断層帯の割れ目分布、構造などに関する情報を抽出し整理した（表4-2）。

これらの整理結果をもとに、HDB-6孔とPB-V01孔を結んだ鉛直断面において、透水性の断層帯分布図（図4-5）を作成した。両ボーリング孔とも稚内層上部の厚さ100～150m程度は断層帯が集中し、高い透水性を有しているゾーンであることがわかる。また、深部の稚内層は良好な岩盤が連続するが、一部に透水性のある断層帯が分布している。全体に断層帯の幅は数mから最大で24m、平均的には5～10mのものが多い。断層帯の傾斜は22°～71°で、方位は北もしくは西方向が主である。

表 4-2 稚内層の割れ目帯の整理結果

孔名	断層核深度	断層核傾斜方位	断層核傾斜角	断層核の幅(m)	断層帯上端深度(m)	断層帯下端深度(m)	断層帯の幅(m)	引張割れ目	FEC異常
PB-V01	236.19	344	71	0.20	233.7	237.2	1.1	あり	235
	245.21	8	53	1.00	238.5	247.2	5.3	あり	?
	255.45	246	50	0.87	250.1	260.0	6.4	あり	255
	288.09	6	40	0.10	282.8	289.8	5.4	あり	280
	322.26	328	52	—	312.0	338.0	16.0		322
	354.70	342	57	—	354.1	358.7	2.5	あり	358
	363.01	15	36	0.15	363.3	368.5	4.2	なし	365
	470.24	353	45	0.30	467.1	474.7	5.4	なし	—
	518.49	273	29	0.50	513.5	520.0	5.7	あり	—
	296.90	224	30	(数m)	282.0	310.0	24.2	あり	295
HDB-6	320.29	0	65	(剪断割れ目)	318.0	323.3	2.2	あり	320
	370.80	353	53	0.10	362.2	373.5	6.8	あり	—
	393.63	346	56	—	377.4	394.8	9.7	あり	—
	445.66	239	69	0.04	441.0	461.0	7.2	あり	—
	565.61	340	48	0.05	562.3	573.0	7.2	あり	—

5. 水理地質構造モデルの作成

5.1 モデル化対象領域の設定

水理地質構造モデル構築の対象領域は、評価対象を含む広域的な地下水流動を評価するために、約50km×50km×深度5kmの広域スケールとした。モデル境界は分水嶺と想定される地形形状を勘案して設定した。また、サイトスケール（数km×数km）あるいはブロックスケール（数100m×数100m）での地下水流動の評価を主目的とすることを想定して、5km×5km×深度1kmでのモデルを構築することにした。後者の境界条件は、広域スケールでの解析結果を用いることとした。図5-1に数値モデルを構築する領域を、図5-2および5-3にモデル領域の地質構造モデルを示す。

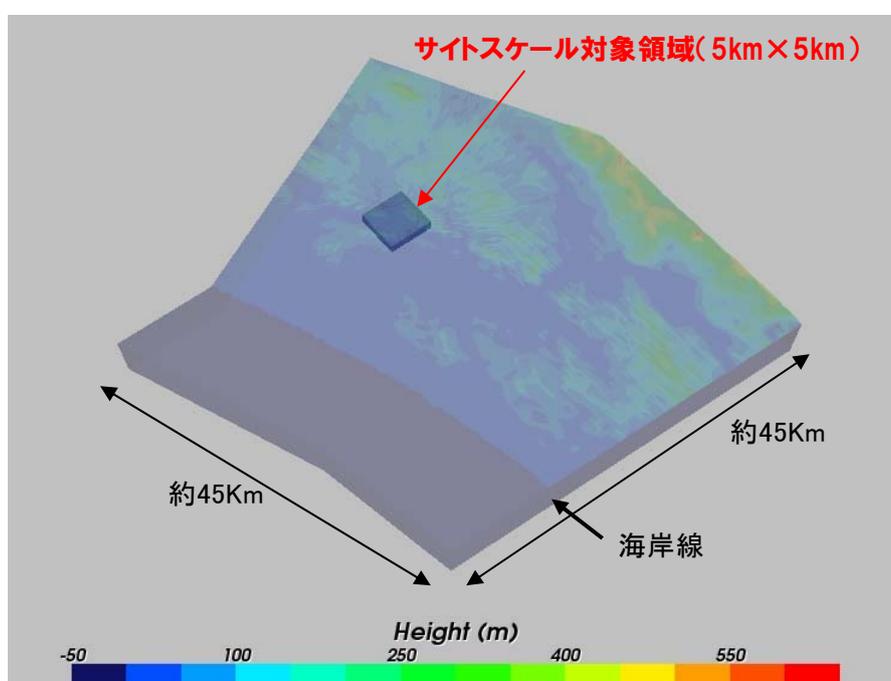


図 5-1 3次元水理地質構造モデル化領域【広域スケール及びサイトスケール】

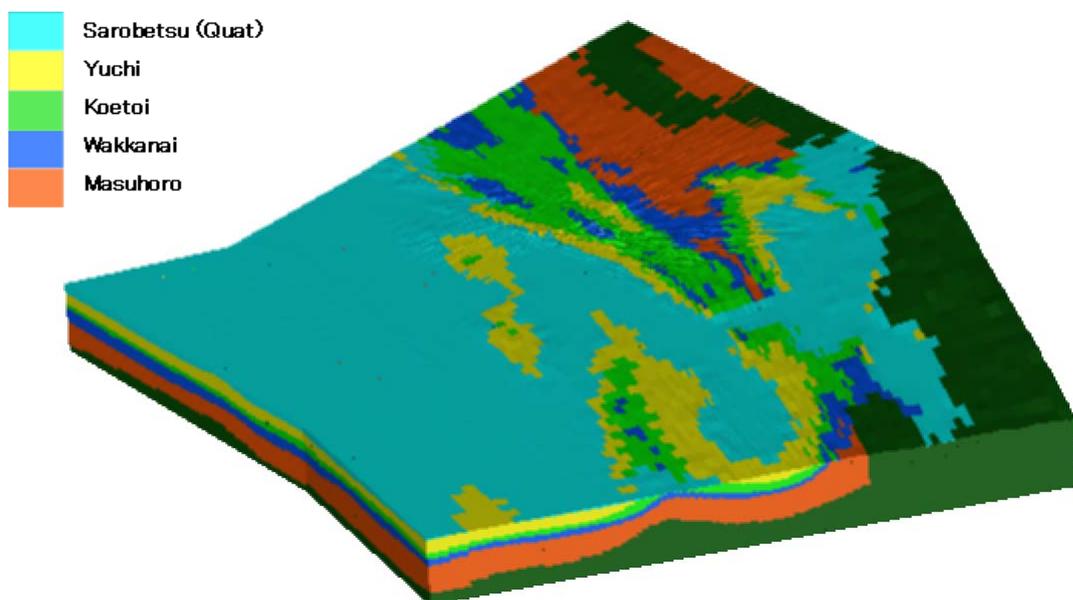


図 5-2 3次元地質構造モデル【広域スケール】

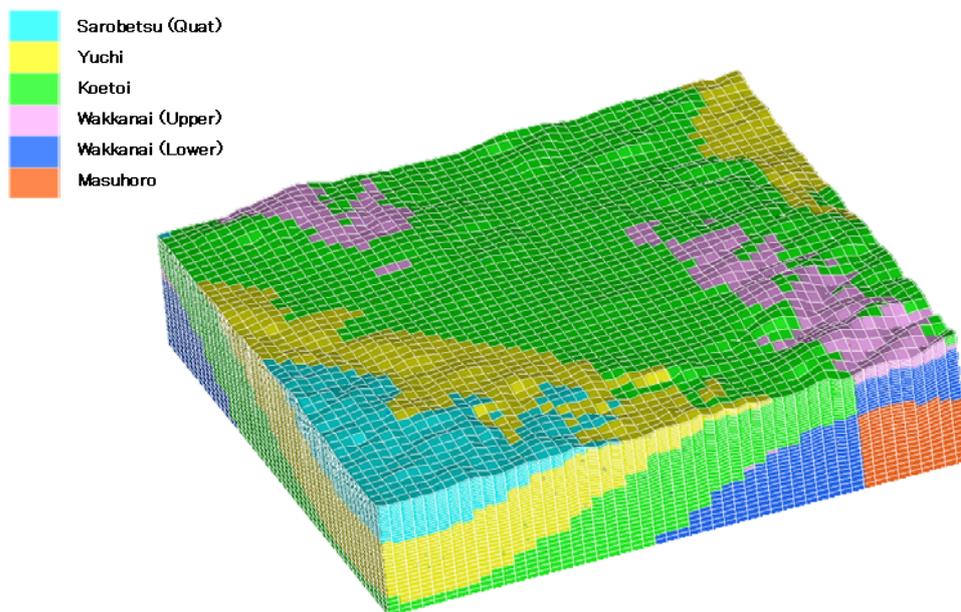


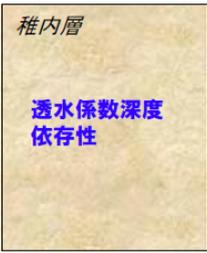
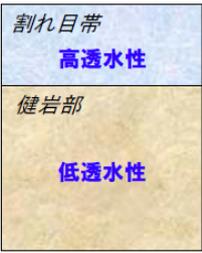
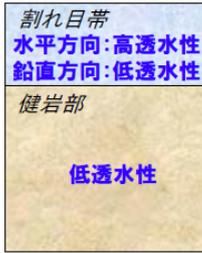
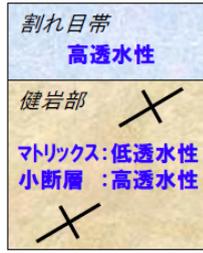
図 5-3 3次元地質構造モデル【サイトスケール】

5.2 水理地質構造概念の検討

サイトスケールのモデル化において重要となる稚内層の三次元水理地質構造モデルについて、前項までの場の理解を基に以下の検討を行った。

水理地質構造モデルとしては、前項までに議論してきた水理地質構造が陽に含まれることが望ましいが、調査の密度等によっては、解釈された構造に対する検証が不十分となる可能性があることから、より簡素化したモデルから詳細化したモデルまで、段階的に想定されるモデルのバリエーションを踏まえ、表 5-1 に示す 4 つのモデルを作成し、性能指標の評価を行うこととした。簡素なモデルによって評価された性能指標の結果が詳細なモデルでの結果と大きな差異を生じないような場合においては、調査における負担を低減することが可能であり、差異が大きな場合には、地上からの調査段階において調査の密度や方法に関して見直しが必要になるものと考えられる。

表 5-1 本検討で構築した水理地質構造のバリエーション

	基本モデル	代替モデル①	代替モデル②	代替モデル③
	透水係数深度依存性	稚内層細区分 +(割れ目帯+健岩部)	稚内層細区分 +割れ目帯K異方性	稚内層細区分 +健岩部小断層帯
概念				
概念説明	透水係数と深度の関係に基づいて、透水係数の深度依存性を想定した。	長期的な地質構造変遷の概念検討結果に基づいて、稚内層の上部に高透水性の割れ目帯を想定した。	稚内層上部に発達する割れ目帯に、透水異方性（水平方向の割れ目の連結性に起因する異方性）を想定した。	長期的な地質構造変遷の概念検討結果や水理試験結果に基づいて、稚内層健岩部中に小断層帯の分布を想定した。
モデル化方法	連続体(多孔質媒体)モデル 稚内層に透水係数-深度相関関数を設定	連続体(多孔質媒体)モデル 稚内層を細区分化	連続体(多孔質媒体)モデル 稚内層を細区分化 割れ目帯に透水異方性を設定	割れ目ネットワークモデル ↓ 等価連続体モデル 稚内層健岩部中に小断層帯を確率論的に発生させ、小断層帯が分布する位置の健岩部の透水性(3次元透水テンソル)を修正

以下に各モデルについて説明する。

5.2.1 基本モデル

基本モデルで設定した水理地質区分は、地質区分と同一と想定し、各地層に対して実測された透水係数データを基に透水係数を設定した。稚内層に関しては、図 5-4 に示すように透水係数の深度依存性が認められたため、深度と透水係数の対数を直線で表した深度依存性の相関関数を設定した。

このモデルは、地上からの調査の後半で明らかになってきた稚内層上部の高い透水性割れ目の存在や地質構造発達史の検討から得られた情報を取り込む前の初期の水理地質構造モデルと言える。

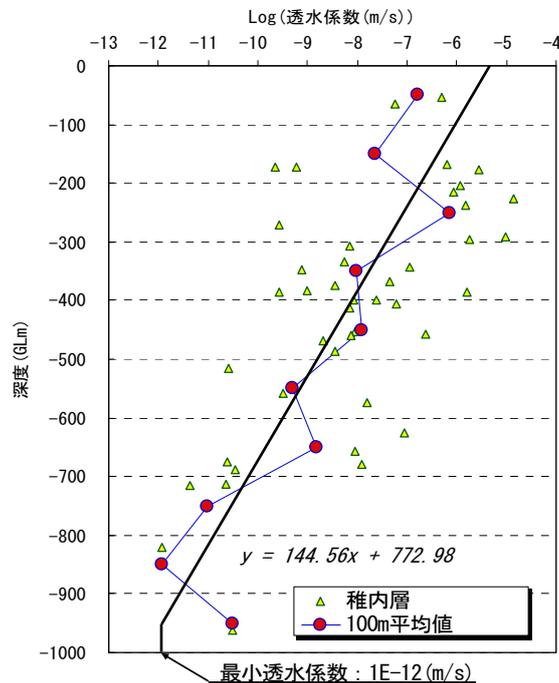


図 5-4 基本モデルで用いた稚内層における透水係数の深度依存性

5.2.2 代替モデル①

調査候補領域の地質調査や水理特性調査結果、あるいは地質構造の長期変遷等の解釈結果に基づき、候補母岩である稚内層の水理地質構造概念の代替モデルを構築した。具体的には、前項の基本モデルで設定した稚内層を上部の割れ目帯が発達する領域とその下位の健岩部に区分する概念である。複数のボーリング調査結果に基づく地質構造的解釈によると、稚内層の上部に発達する割れ目帯は、地表面から深度 600m 程度まで発達すると推定される。また、その水理特性は、下位の健岩部よりも相対的に高透水性を有することが水理試験結果より明らかになっている。

以上のことから、代替モデル①として以下の概念を想定した。

- ・ 稚内層は、地表から深度 600m までの割れ目帯とそれより下位の健岩部に区分できる。
- ・ 上部の割れ目帯の透水性は健岩部よりも高い。
- ・ 下部の健岩部は、一定の透水係数の値を設定した。

5.2.3 代替モデル②

前項の代替モデル①で設定した稚内層中の割れ目帯の水理特性として、透水異方性を想定した。当該割れ目帯中に発達する割れ目は、地質構造的解釈により連結性が良いと推定されており、巨視的には鉛直方向の透水性よりも水平方向の透水性の方が良いことが想定される。透水係数の異方性は岩盤中の地下水の流動に与える影響が想定されることから、ここでは代替モデル②として以下の概念を想定した。

- ・ 稚内層は，地表から深度 600m までの割れ目帯とそれより下位の健岩部に区分できる。
- ・ 上部の割れ目帯の透水性は，巨視的スケールで見ると水平方向の透水性が鉛直方向よりも高い（透水係数の異方性）。
- ・ 下部の健岩部は，一定の透水係数の値を設定した。

5.2.4 代替モデル③

稚内層の健岩部中には，上部の割れ目帯よりも相対的に数は少ないものの層理面に平行に発達する断層帯（ここでは，小断層帯と称す）が分布することが明らかになっている。この小断層帯は，地質構造的解釈によれば規模は小さく連結性も乏しいと推定されている。また，水理特性は低透水性や高透水性を示し，稚内層の水理的な不均質性の一つの要因として考えられている。規模が小さく連結性も乏しいことから，広域スケールの地下水流動評価上は大きな影響はないと考えられるが，サイトスケールやブロックスケールの地下水流動状況を評価する場合には無視できない可能性がある。

したがって，代替モデル③として以下の概念を設定した。

- ・ 稚内層は，地表から深度 600m までの割れ目帯とそれより下位の健岩部に区分できる。
- ・ 上部の割れ目帯の透水性は健岩部よりも相対的に高透水性である。
- ・ 下部の健岩部には規模が小さく連結性に乏しい小断層帯が分布し，その一部に高透水性を有するものが存在する。

ここでは，小断層帯に関するデータや情報量が限られた中で，確率論的に不連続モデル（ネットワークモデル）としてモデル化し，そのネットワークモデルを連続体モデルとして取り扱うマトリクスに取り込むことにより，等価透水係数分布モデルを作成するアプローチを採用した。

(1) 小断層帯の確率論的ネットワークモデルの構築

稚内層健岩部中の小断層帯は地表からのボーリングにより確認されている（図4-5参照）。確率論的にネットワークモデルを構築するためには表5-2に示すようなパラメータを設定する必要がある。各パラメータの設定方針と設定方法は下記のとおりである。

- ・ 5km×5kmのサイト調査領域（サイトスケール領域）に分布する稚内層中において小断層帯が確認された。したがって，ここでは，5km×5kmのサイトスケール領域を評価対象領域とする。
- ・ 傾斜方位，傾斜は，ボーリング孔における孔壁画像データに基づいて算定した。また，卓越方位分布はフィッシャー分布を仮定した。
- ・ 3次元割れ目密度は，実測では算定することができないことから，以下の手順により算定した。

－ 図 5-3 に示すサイトスケールモデル内の稚内層下部層中に確率論的に小断層帯のネットワークモデルを生成し，かつボーリング孔をモデルに設定した。

－ 3次元割れ目密度を感度パラメータとして複数のネットワークモデルを生成し，モデル

に設定したボーリング孔を横断する小断層帯の本数から1次元割れ目密度（モデル値）を求め、実測の1次元割れ目密度を最も再現する3次元割れ目密度を決定した。

- ・ 割れ目の大きさは実測では取得できないため、小断層帯の地質性状やボーリング孔-孔間の分布状況から連続性に乏しいという地質学的な解釈に基づいて、ボーリング孔間距離を勘案し100m×100mの一律の大きさを設定した。
- ・ 小断層帯の透水量係数は、全ての小断層帯に対して1E-06(m²/s)を仮定した。なお、後に求める等価透水係数分布は透水量係数の分布に影響するパラメータであるため、ここで示すようなモデル化方法を適用する場合には、水理試験等のサイト調査によりデータを取得する必要がある。

表 5-2 稚内層健岩部中の小断層帯の確率論的ネットワークモデルの構築方針

特性分類	パラメータ	設定方針
幾何学特性	卓越方位セット (傾斜方位, 傾斜)	・ 孔壁画像データから傾斜方位及び傾斜の平均値を算定する。 ・ データ数が少ないことから1セットとする。
	卓越方位分布	・ フィッシャー分布を仮定する。
	3次元密度	・ 実測の1次元密度に対するコンディショニングにより決定する。
	長さ分布 (割れ目大きさ)	・ 連結性に乏しいことから、ボーリング孔間距離を参考にして一律に設定する(100m×100mを仮定)。
水理特性	透水量係数	・ 透水係数の実測値を参考にして高透水性を想定する(1E-06 m ² /sを仮定)。

以上に示したモデル化方針／方法により、稚内層下部層中に小断層帯のネットワークモデルを構築した（図 5-5 参照）。

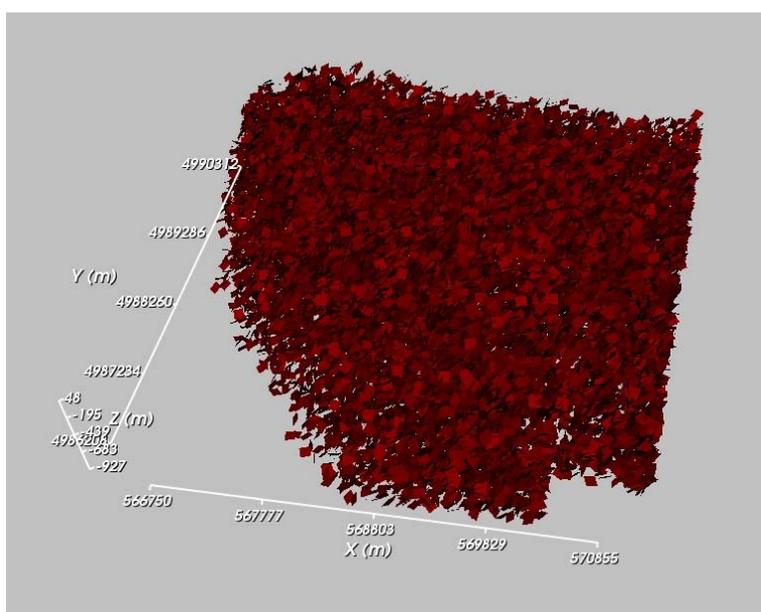


図 5-5 稚内層健岩部中の小断層帯の空間分布モデル

(2) 等価透水係数分布の作成

前項で生成した小断層帯のネットワークモデルを連続体モデルとして構築されている稚内層健岩部に取り込み、等価透水係数分布モデルを構築した。具体的には、小断層帯と交差する（健岩部の）要素の3次元透水テンソルを、当該要素中の小断層帯の方位、体積を考慮して修正した。また、当該モデル領域には大曲断層が分布することから、同様な方法により大曲断層の透水性を考慮した等価透水係数分布とした。稚内層健岩部の等価透水係数分布を図5-6に示す。

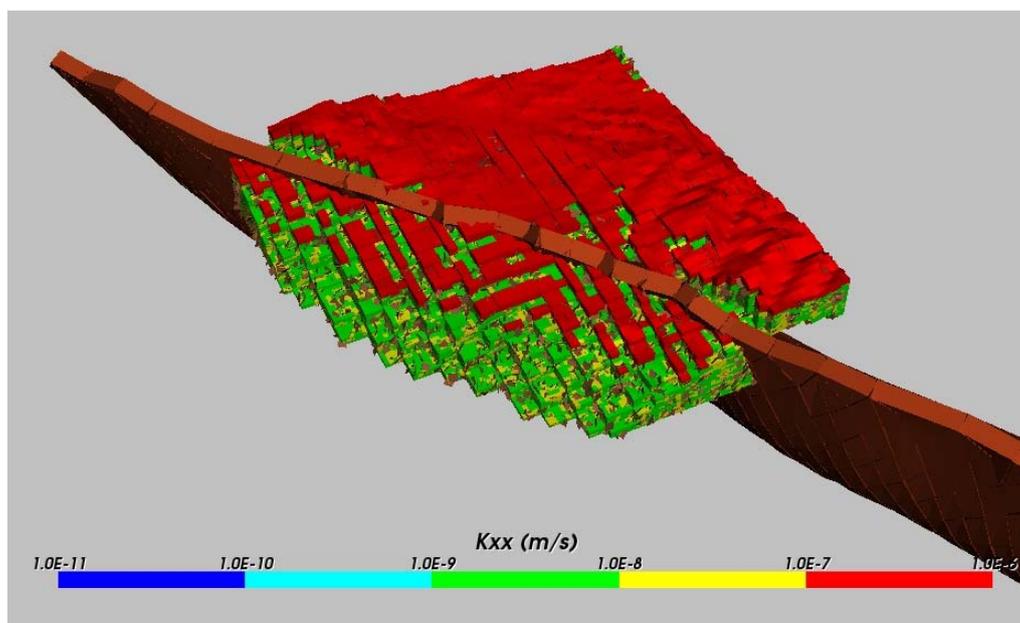


図5-6 稚内層の透水係数空間分布【小断層帯を考慮した等価透水係数分布モデル】

6. 地下水流動解析

6.1 解析条件

解析に用いた各水理地質区分の透水性に関するパラメータを表 6-1 にまとめる。

表 6-1 地下水流動解析で設定した透水性

水理地質区分			透水係数(m/s)の設定			
			基本モデル	代替モデル①	代替モデル②	代替モデル③
第四紀層・更別層			1×10 ⁻⁶			
勇知層			8.1×10 ⁻¹⁰			
声間層			4.9×10 ⁻⁹			
稚内層	割れ目帯		深度依存性を仮定(図 5.4 参照)	1×10 ⁻⁶	水平方向：1×10 ⁻⁶ 鉛直方向：1×10 ⁻⁹	1×10 ⁻⁶
	健岩部	マトリクス		1×10 ⁻⁹		1×10 ⁻⁹
		小断層帯				亀裂を等価多孔質媒体で近似
増幌層			5×10 ⁻¹⁰			
白亜紀層			1×10 ⁻¹¹			
大曲断層, ヌカナン断層, 幌延断層			1.3×10 ⁻⁷			

また、モデル境界に設定した境界条件を表 6-2 に示す。地表面境界は、陸域では地表の標高において水頭固定、海域では海底面（標高）で海水の密度（1030kg/m³）を考慮した水圧を加えた水頭固定境界とした。また、側方および底部境界は不透水境界とした。濃度条件については、地表面を濃度フラックス境界とした（陸域で相対濃度 0 の淡水、海域で相対濃度 1 の塩水が浸透する条件）。また、底部境界はモデル領域内の深部に塩水が存在することを想定して相対濃度 1 で固定した。側方境界は濃度自由境界とした。このような解析条件の下、3次元定常移流分散解析を行った。

表 6-2 境界条件一覧

		圧力/流量条件	濃度条件
地表	陸域	地表面で水頭固定	濃度フラックス境界 $F_c = \begin{cases} (q \cdot n)c & q \cdot n \geq 0 \\ (c - c_0)/\delta & q \cdot n < 0 \end{cases}$ F _c : 濃度フラックス q : ダルシー流速 n : 法線ベクトル (流出方向を正) c : 計算濃度 c ₀ : 流入濃度 (陸域=0, 海域=1) δ : 流速の逆数 (=10 ⁻³)
	海域	海底面で水頭固定 ※海水の密度を考慮	
側方		不透水	濃度自由
底部		不透水	濃度固定 (相対塩分濃度 : 1.0)

※ 相対塩分濃度とは、海水の塩分濃度を 1.0 とした場合の地下水の濃度比を表す。

6.2 解析結果

各モデルを使用して解析により得られた2次元鉛直断面でのダルシー流速分布（流速ベクトル）を図6-1に示す。各モデルで得られたダルシー流速分布から推定される地下水流動状況は下記のとおりである。

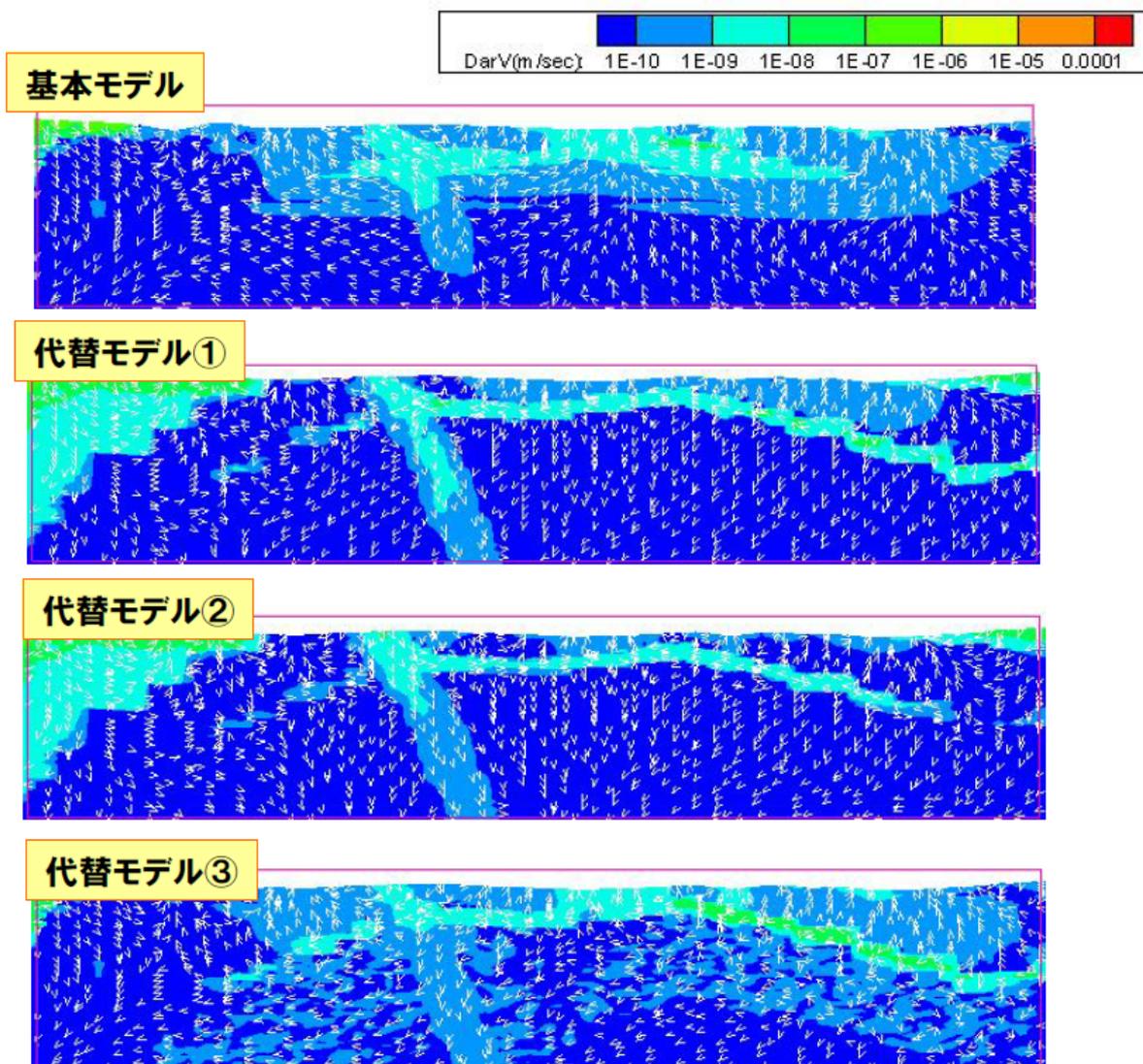


図 6-1 地下水流動解析結果（ダルシー流速分布）

- 基本モデルでは、稚内層の透水係数の深度依存性の影響により比較的浅層部では相対的に流速が大きい。
- 稚内層中に高透水性の割れ目帯を設定した代替モデル①および代替モデル②では、割れ目帯中の流速は相対的に大きく、健岩部では低流速場を示している。また、割れ目帯中は水平方向の流動が卓越している。
- 稚内層中に小断層帯を考慮した代替モデル③では、水理的な不均質性の影響により流速分布も不均質な結果を示している。

図 6-2 には、全水頭分布の比較の例として、HDB-11 孔の実測値と解析結果の比較を示す。標高 -600m 程度までは、実測値と解析結果の傾向はほぼ一致するものの、標高 -600m 以深の水頭には大きな差異が見られた。他のボーリング孔での実測値との比較においても、深部においては実測の間隙水圧と解析値は一致していない。

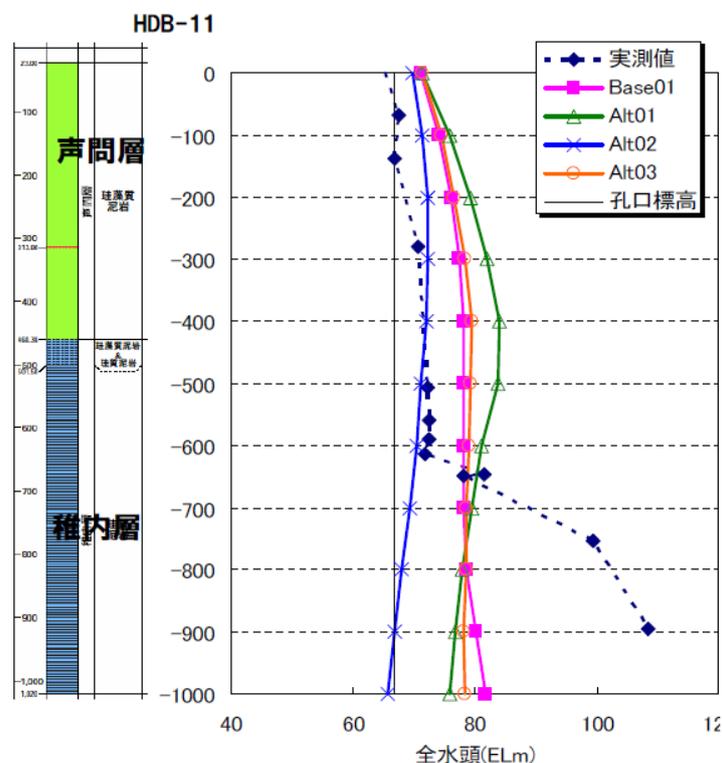


図 6-2 地下水流動解析結果 (HDB-11 孔における全水頭分布の実測値との比較)

全水頭分布は、水理地質構造や水理特性値、場の境界条件、過去から現在に至るまでの天然事象の変動プロセスなどのさまざまなファクターにより形成されているものであり、概念モデルや解析条件には多くの不確実性が含まれる。地下深部の不整合は、2Ma 以前の海底下での堆積作用や隆起に伴う塩水の排水等の過程を解析上考慮していないことも影響していると予想される。これらの不整合は、パラメータに関する感度解析や地質構造発達史を考慮した非定常解析を進めることにより、より整合性の取れたモデルを構築することが可能になると考えられる。

このような作業プロセスを取り込むことにより、水理地質構造や地下水流動、地下水化学に対して理解を深め、より適切な概念モデルを構築、選定することができる。また、概念モデルの構築、選定のために必要なデータ・情報を取得するための調査を、サイト調査計画に反映することが可能になると考えられる。

本検討では、地下施設の建設に適切な岩盤領域の選定手法の検討を目的としているため、構築した複数の水理地質構造モデルによる地下水流動解析が、それぞれに異なる特徴を持った解析結果を示し、また、調査結果を完全には再現出来ていないことを認識の上で、次のステップに進むこととする。

7. 流跡線解析による指標の定量化

7.1 解析方法

3.2 項で議論した性能指標の定量化を目的として、地下水流動解析結果を用いた流跡線解析をパーティクルトラッキング法により実施した。

全体の解析対象領域は図 5-1 に示した通りである。広域スケール水理地質構造モデルの中にサイトスケール (5km×5km×深度 1km) の領域を設け、その中の標高 -300m, -500m, -700m の各深度について、5km×5km の領域を 250m メッシュで区切り、各メッシュの中央を出発点としてパーティクルトラッキングを行った。

評価の対象とする水理地質構造の区分として、声問層、稚内層上部層、稚内層下部層の 3 つに着目することとした。評価対象地層の広がり の概念図を地質構造の概念図に重ねて図 7-1 に示す。また、当該領域内には地下水流動状況に影響を及ぼすことが想定される大曲断層が分布することから、連続した母岩の広がりという観点から、これら 3 つの区分を大曲断層を境にして東側 (断層東側) と西側 (断層西側) に分けた。図 7-2 にパーティクルトラッキングの出発点とする各標高の水平断面での水理地質構造区分の分布を示す。

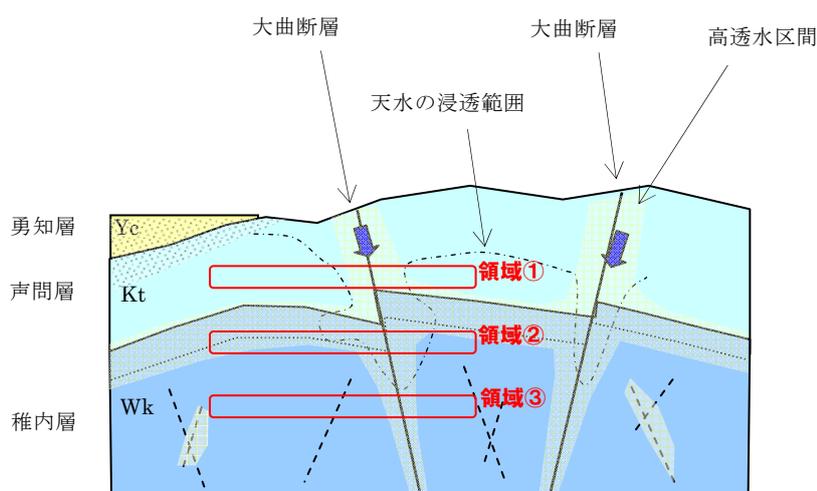


図 7-1 評価対象地層の広がり (概念図)

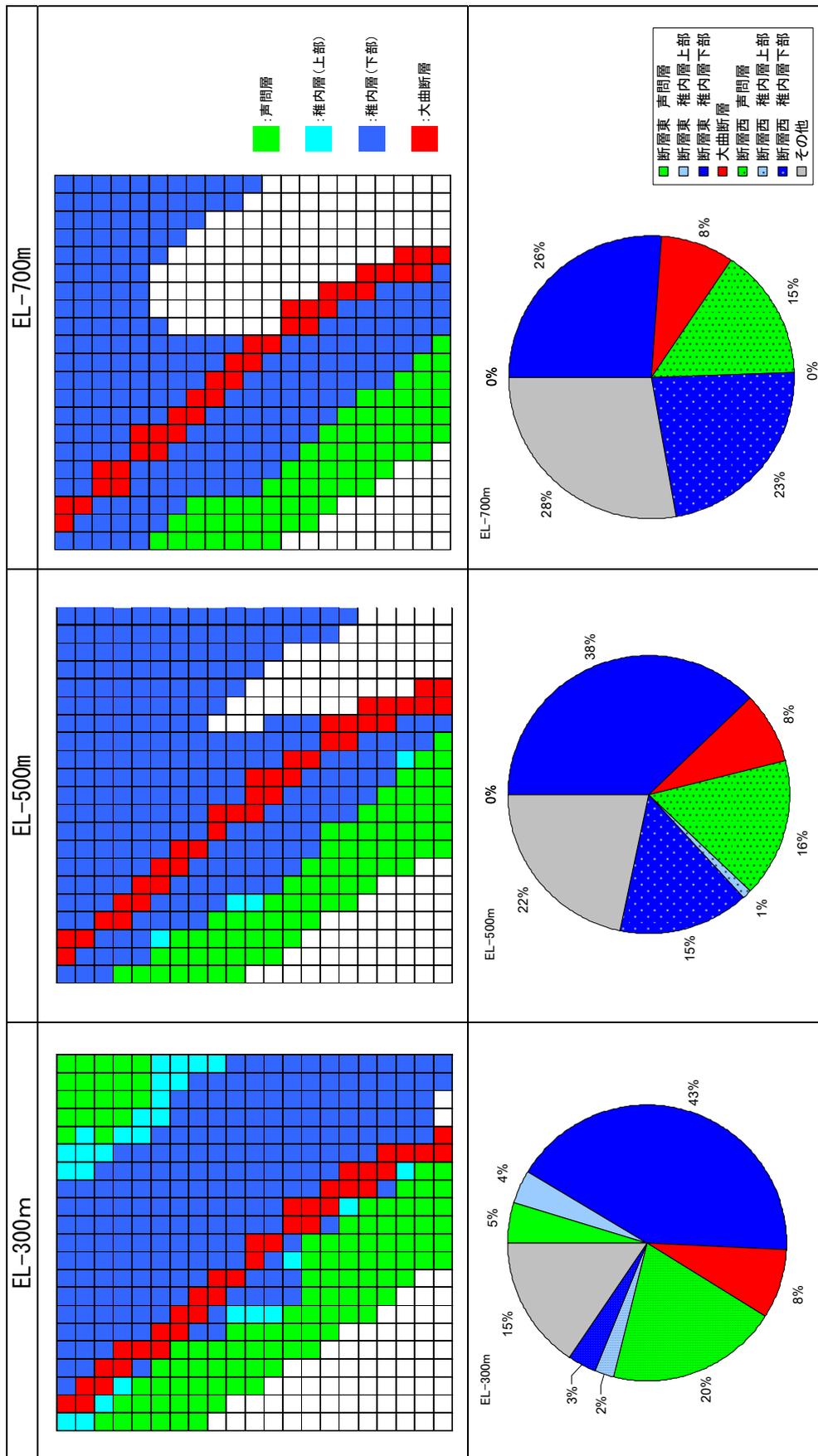


図 7-2 パーティクルトラッキングの出発点となる各深度での水理地質構造区分の分布

7.2 解析結果

図7-3にパーティクルトラッキングによる解析結果の例を示す。地下水流動解析結果を用いた流跡線解析を行うことで、3.2 項（表3-1）で検討を行った性能指標のうち、ダルシー流速，移行時間，移行距離，流出点・流出点環境といった指標を導出することが可能となる。

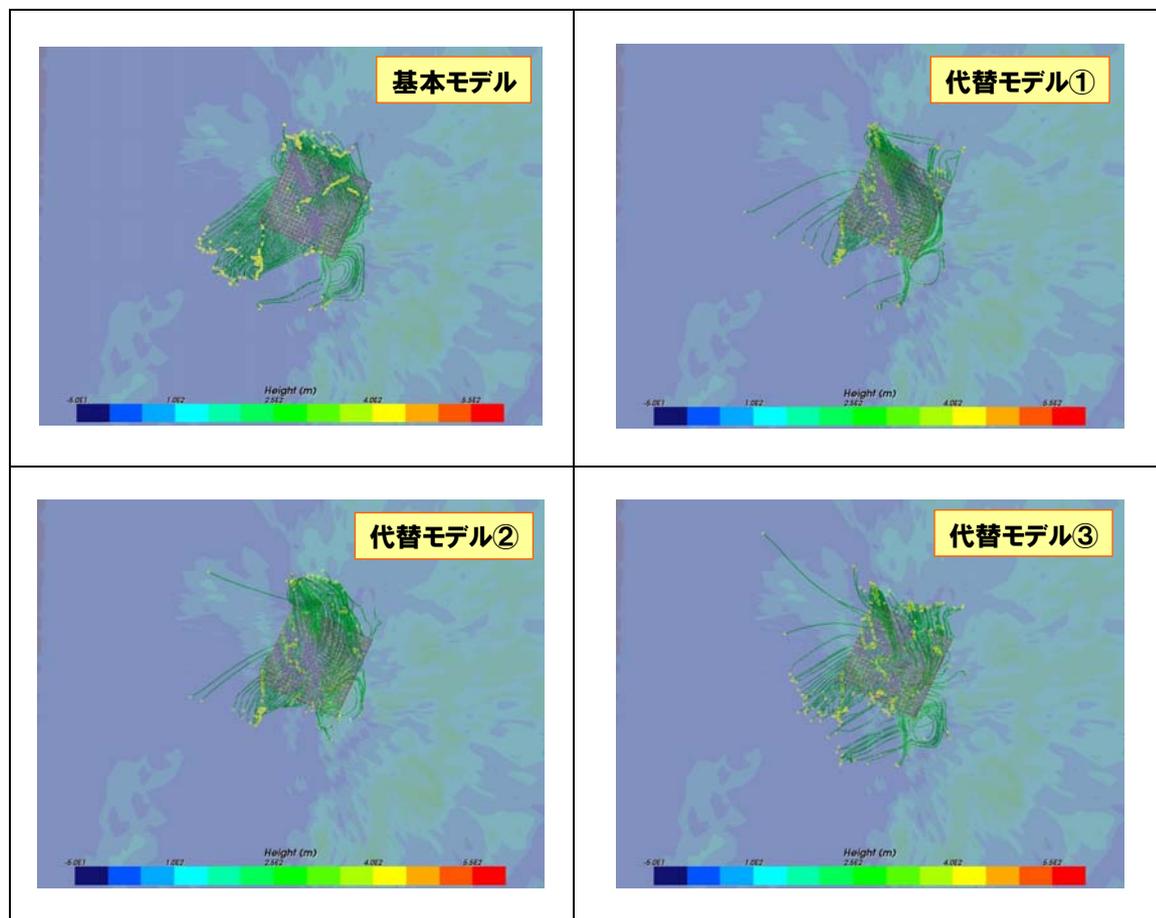


図 7-3 パーティクルトラッキング法による解析結果例（標高-300m 水平断面配置）

図7-3 から、標高-300mを出発点とした場合の流出点については、断層西側を出発点とする粒子は、モデルに依らず、評価対象領域および領域南西近傍の上方の地表に到達する。また、断層東側を出発点とする粒子は、いずれも領域北側近傍の地表に到達する傾向が認められるが、モデル依存性が認められ、代替モデル①および代替モデル②では、大曲断層やその近傍で地下深部に潜り込む粒子も多く認められる。

3.1項に記述したように、流出点の環境を直接的に母岩性能の指標することの適切性については議論があるが、このような検討を通して、流動の出発点として区分した領域毎に、移行経路の特徴を把握することができる。さらに水理地質構造モデルの不確実性が、移行経路や地上への流出点にどのような影響を及ぼしているかを把握することが可能となる。また、移行経路を距離に応じて分析し、モデル不確実性に対する移行経路や移行時間の感度を分析することで、モデル不確実性の影響を受けにくい領域や移行距離を把握することは、母岩選定の重要な参考

情報になるとともに、不確実性低減のための次段階での調査へのフィードバックとすることができる。

次に、3.1項での議論に従い、比較的短い一定距離を対象とした移行時間を評価指標として、解析結果の整理を行う。ただし、この際の移行時間は、ダルシー流速に基づく地下水の移行時間であり、媒体の有効間隙率を考慮した地下水の実流速に基づく移行時間ではないことに留意が必要である。さらに、放射性核種のような溶質の移行を評価する際には、本来、吸着による遅延を考慮した移行速度や移行時間が重要である。

実流速に基づく移行時間の算定には岩盤の有効間隙率が必要であり、限られたデータから不均質性を考慮し、適切に有効間隙率を導く必要が生じる。この作業には、例えば統計的な亀裂（亀裂帯）の発生等の仮定が必要となる。これに対して、ダルシー流速で求める移行時間（以下、ダルシー移行時間と呼ぶ）は、平均的な流速に基づくため、物質の閉じ込め性に関しては実流速に比べ非保守側の結果となるが、水理学的な評価が比較的容易であり、対象となる地層の微視的な水理地質構造や水理学的な条件がダルシー則を満足するものとみなせれば、評価対象とする岩盤の母岩としての性能を相対的に評価する指標として有効であると考えられる。

また、微視的な水理地質構造や収着遅延に関するデータや知見の不足により適切に評価できない場合でも、保守的な仮定を用いてダルシー移行時間から実流速あるいは物質移行速度に変換することは可能であることから、調査段階に応じた一つの指標として、ダルシー移行時間についての整理をすることとした。

以下の検討では、パーティクルトラッキングによる流跡線解析で求めた粒子の移動距離が100mとなるまでのダルシー移行時間を定量的な指標とする。図7-4に、標高-500mの大曲断層東側に位置する稚内層を出発点とした場合の解析結果を示す。ダルシー移行時間は、表5-1に示した4つの水理地質構造モデルに依存せず、いずれも概ね10⁴年を上回る結果となった。これらのモデルの中で基本モデル（稚内層における透水係数の深度依存性を仮定）と代替モデル③（稚内層下部の小断層帯をモデル化）は、稚内層下部を均質化したモデル（代替モデル①および代替モデル②）よりも、1桁程度ダルシー移行時間が短い。また、稚内層下部の不均質構造を陽に取り扱った代替モデル③では、ダルシー移行時間のばらつきが大きな結果となっている。

図7-5に、代替モデル③で評価した、3つの深度に対する水理地質構造区分ごとのダルシー移行時間の頻度分布を示す。各ケースの頻度の総和は、メッシュ面積（0.25×0.25[km²]）で換算可能であり、区分された領域の面積と等価である。単一の水理地質構造区分としては、断層西側の声問層、断層西側の稚内層下部（500m以深）、断層東側の稚内層下部の3つの領域の面積が広いことがわかる。3つの領域間でダルシー移行時間の顕著な差異はないが、大曲断層や稚内層上部の高透水性構造におけるダルシー移行時間に比べ1～2桁程度大きな結果となった。

図7-6は、広い面積を有するこれらの3つの領域におけるダルシー移行時間の水平断面での空間分布を示したものである。4つの水理地質構造モデルのうち、最もダルシー移行時間の幅が大きかった代替モデル③を適用した。この結果では、稚内層の深部ほどダルシー移行時間が

相対的に長いことがわかる。

なお、これらの結果の考察においては、地下水流動解析において観測されている深部の高い地下水圧が十分再現できていないことを考慮すると、深部の地下水移行時間に関する解析結果は、標高-300m や-500m の結果に比べ、相対的に信頼性に劣る可能性が否定できないこと等についても留意が必要となる。

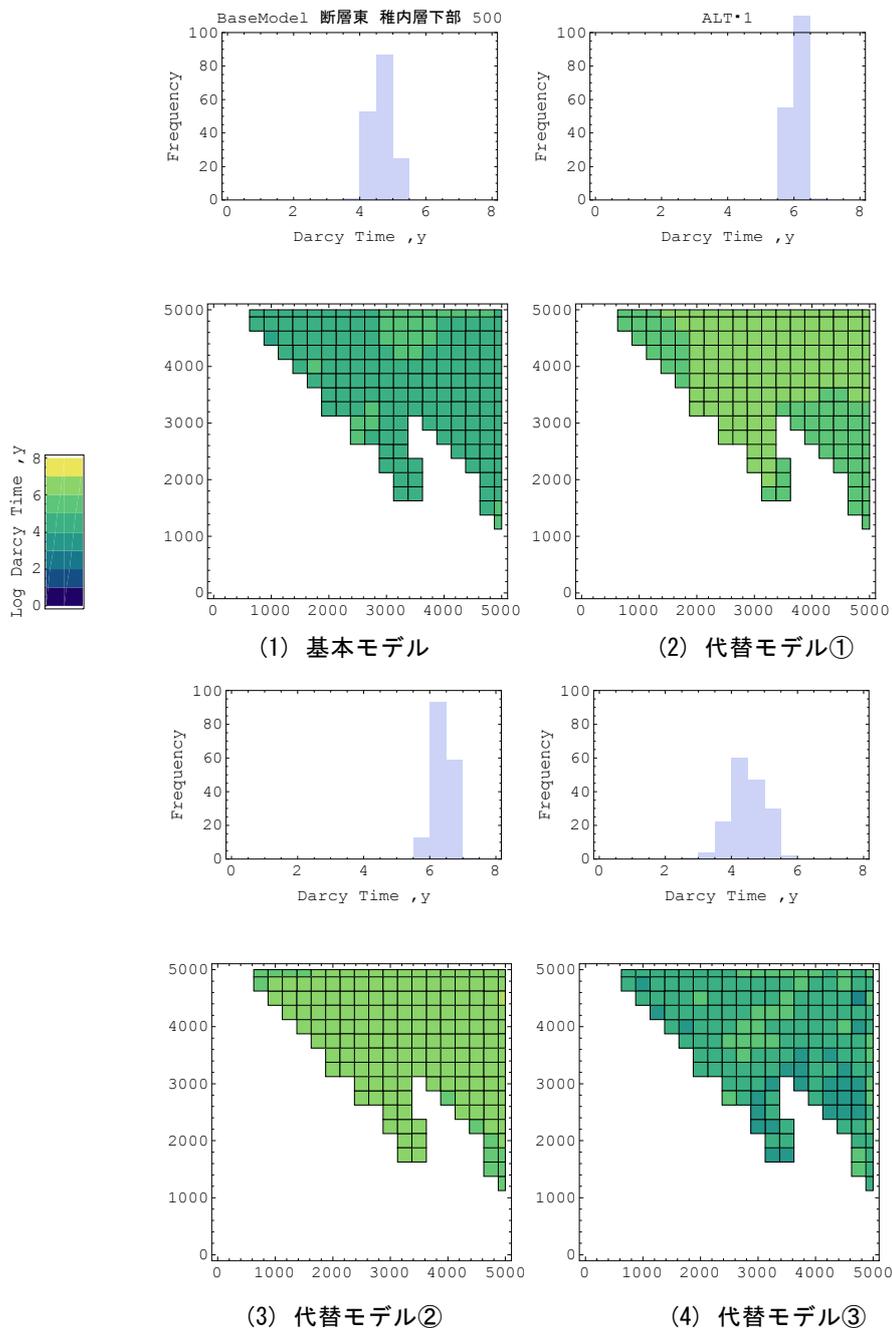


図 7-4 標高-500m の稚内層水平断面でのダルシー移行時間分布

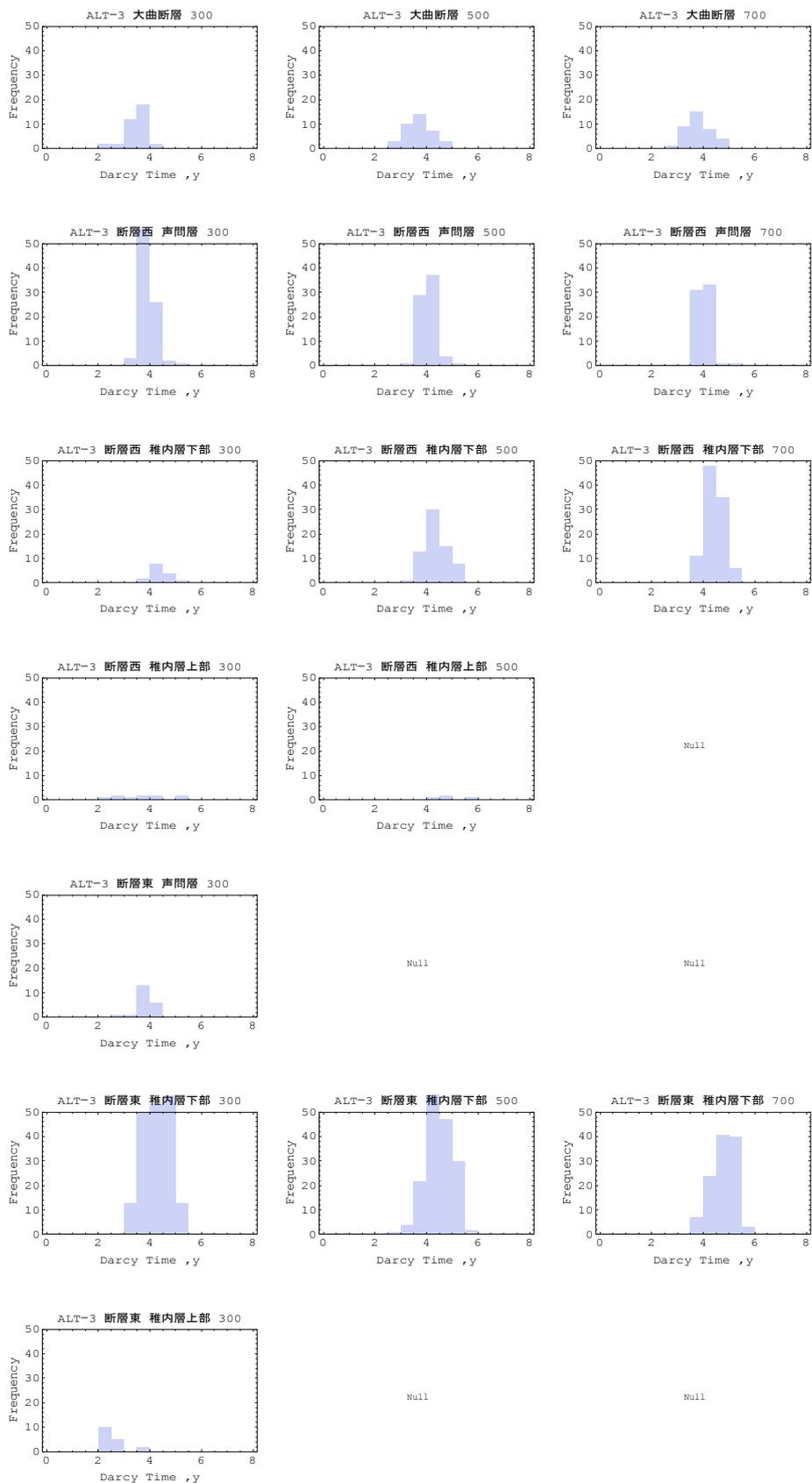


図 7-5 各水理地質構造区分におけるダルシー移行時間の頻度分布 (代替モデル③)

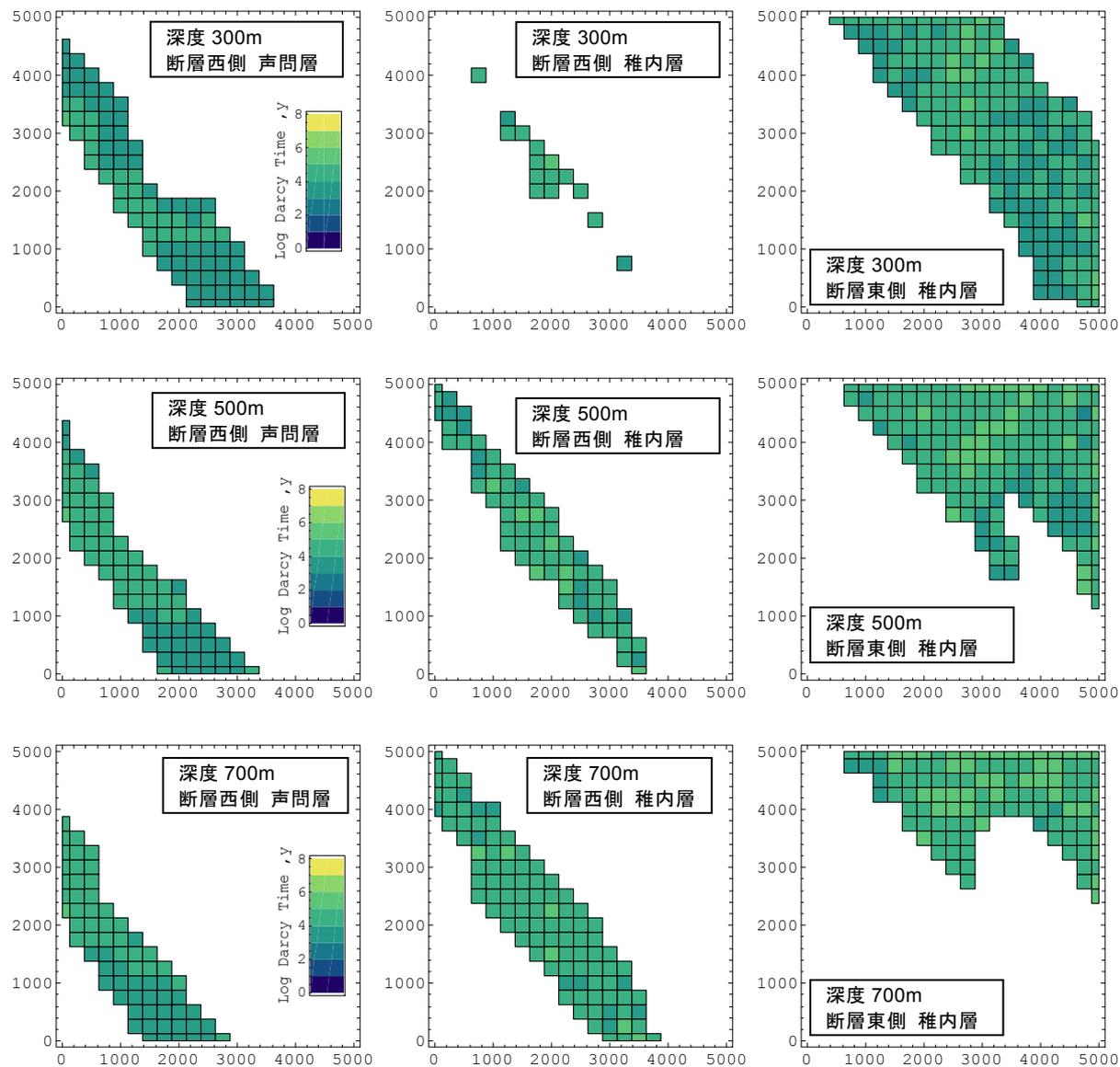


図 7-6 声問層，稚内層水平断面でのダルシー移行時間分布（代替モデル③）

（水平断面，グラフの数値は距離（m））

8. まとめと今後の課題

本検討では、概要調査段階における地上からの調査による限られた情報に基づいて、処分施設の設置に好ましいと考えられる地下深部の地層の広がりや、どのような手法と指標で評価することが有効となりえそうかという技術的課題を取り扱った。本検討では、考えられる様々な評価指標の中から、地下水シナリオにおいて重要となる地下流動・物質移行に関する評価指標に着目することとし、評価指標を抽出した。さらに、指標の定量化を試みるために、水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析および流跡線解析の結果から、地下水の移行経路やダルシー流速、ダルシー移行時間等の指標について、水理地質構造の区分毎に評価を行った。

本検討を通じて、得られた知見と今後の課題を以下にまとめる。

●水理地質構造概念とそれに基づく水理地質構造モデルの構築について

- ・水理地質構造モデルの構築にあたっては、ボーリング調査等によって観測されるデータに加え、地質構造発達史の検討を加えることによって、現在の水理地質構造の概念をより説得性をもって説明することが可能となる。そのため、水理地質構造モデルの構築において地質構造発達史の検討を加えることは重要なプロセスであると言える。また、本検討では、水理地質構造の将来にわたる時間変化については議論を行わなかったが、適切な岩盤領域を選定するにあたっては、評価対象とする岩盤領域の母岩性能の時間変化についても評価指標として考慮すべき点であり、そのためにも地質構造発達史の検討は重要であると考えられる。

- ・今回の検討における、深部（標高-600m以深）における全水頭のように、複数設定した水理地質構造モデルのいずれにおいても実測値を再現できない現象やパラメータが存在する場合には、モデルや設定パラメータの感度解析的検討等を実施することで、この段階で可能な範囲でモデルの修正を行うべきである。あるいは、問題となる現象やパラメータが、後段のステップで実施する評価対象領域の評価指標の評価結果に影響を及ぼすか否かについて、感度解析的検討を行うことも一案である。

- ・情報の不足による（あるいは情報が充足したとしても決定しきれない）水理地質構造概念の不確実性を考慮して、複数の水理地質構造概念に基づく水理地質構造モデルをバリエーションとして設定することは、不確実性への対応として現実的かつ有効な手法である。後段のステップで実施する評価対象領域の評価指標の評価結果が、水理地質構造モデルの違いに感度を持つか否かを確認することで、モデルの簡略化に対する妥当性、不確実性低減の為に次段階のサイト特性調査で実施すべき項目の抽出、性能評価の観点から重要であるがサイトの調査等によって低減が困難な不確実性（次段階の性能評価においても、不確実性としてバリエーションを考慮することが必要な項目）の抽出、といったことが可能となる。

なお、今回の試行事例では、小断層帯の不連続構造を含む稚内層下部に対して、単純に透水係数等の平均値を用いたモデルでは、地層の性能を過大に評価する可能性があることが示されている。そのため、安全評価においては、不均質性をどのように取り扱うかが重要となることが改めて確認された。

●評価指標の妥当性について

・水理地質構造モデルに基づいて、水理地質の特徴の違いにより評価対象の領域を区分し、区分された領域毎に、処分施設の設置に必要な空間的な広がりや、母岩としての性能を評価指標によって評価するというアプローチは、第一段階の検討としては妥当であり有効であることがわかった。

ただし、処分施設を〇〇層と呼ばれるような単一の地層の中に包含することは必須条件ではなく、傾いている複数の地層を横断するような水平面に施設を設置することや、処分施設を複数の深度に分割し多段とする処分施設的设计は有り得る。このような検討のためにも、評価対象領域の地下空間の構成要素として、水理地質の特徴の違いにより区分した領域と、深度で分割し、それぞれの区分された領域に対して母岩としての性能を評価することは有効であると考ええる。

・複数の水理地質構造モデル用い、かつ性能評価の観点からの複数の評価指標の導出を行い、それらの結果を用いた総合的な評価により相対的に母岩としての性能が良い領域を抽出するというアプローチは有効であると考えられるが、以下の点でさらなる検討が必要である。

- 複数の指標の優先度の考え方の整理

今回の試行では、天然バリアとして期待される母岩中での物質移行特性に関する定量的指標のひとつとして移行距離 100m までのダルシー移行時間に着目したが、3.1 項で議論したような性能指標として、何を優先するべきかについては、ニアフィールド母岩のバリア性能に期待するのか、地表までの移行経路全体で安全性を示すのか、といった安全確保の考え方と併せた検討が必要となる。

- 移行経路の複雑さ、水理地質構造モデルに対する感度の考え方

地表までの移行経路が複雑となる領域や、複数の水理地質構造モデルによって評価結果が異なるような領域を、“好ましい領域か？”という観点で、どのように評価すべきかという点も議論のあるところである。すなわち、移行経路が複雑であることは、バリア性能が劣るということではないが、物質移行評価モデル構築の容易さという観点では有利とは言えない。また、複数の水理地質構造モデルによって評価結果が異なるような領域については、その領域の評価結果に対する不確実性が大きいという点で有利とは言えず、その段階で、“自信をもって次段階に進む”と言う観点では、地下施設の候補母岩としての相対的な評価を下げるべきという考え方も成立し得る。これらの側面は、いずれも移行遅延性能の良し悪しではないことに留意が必要であり、この類の性能指標をどのように考慮するべきかについても、さらなる検討が必要である。

- 安全評価により直接的な定量的な評価指標の検討

様々な指標による評価結果の重ね合わせによって、相対的に“好ましい領域”を抽出することは可能である。しかしながら、処分事業の実施の観点からは、相対的な評価のみならず、選定しようとしている精密調査地区および処分施設の設置に適切と考えられる領域の、安全性に関する基準への適合性について確認することで、確信を持って事業を次の段階に進めることが

可能となる。このためには、例えば、ダルシー移行時間に対して、有効間隙率を考慮した地下水の実流速に基づく地下水移行時間など、物質移行を考慮した母岩の不均質性に基づく地下水移行時間を指標とし、定量的な判断基準値と比較することが効果的であると考えられる。しかしながら、情報量の少ない時点において母岩の不均質性を正確に予想することは難しく、不均質性に関して何らかの保守的な取り扱いを想定することとなる。地質環境特性に応じてダルシー移行時間と実流速に基づく移行時間の保守的な上限との関係を把握することができれば、本検討で示したダルシー移行時間と定量的な判断基準値との比較によって、利用可能な領域の範囲が抽出可能となると考えられる。

以上の通り、本検討を通じて、地上からの調査段階の限られた情報で、処分施設の設定に好ましいと考えられる地下深部の地層の広がりや、どのような手法と指標で評価することが有効となりえそうかという技術的課題について、幌延深地層研究計画における地上からの調査段階で取得された調査データを例題として用いることで、具体的な手法を例示するとともに、実際の処分事業の進展において想定される作業での課題を抽出することができた。

参考文献

- 1) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律第百十七号）。
- 2) 安全確保構想2009～安全な地層処分の実現のために～，NUMO-TR-09-05, 2010.
- 3) 太田久仁雄ほか：“幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書；分冊「深地層の科学的研究」”，JAEA-Research 2007-044, 2007.
- 4) IAEA: “Critical Groups and Biospheres in the Context of Radioactive Waste. Disposal, Fourth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal”, IAEA-TECDOC-1077, 1999.
- 5) 新里忠史，安江健一：“幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究－長期安定性の評価・予測における地域特性の考慮－”，原子力バックエンド研究, 11, 2005, pp.125-137.
- 6) 石井英一，安江健一，田中竹延，津久井朗太，松尾公一，杉山和稔，松尾重明：“北海道北部，幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性”，地質学雑誌, 112, 2006, pp.301-314.
- 7) 石井英一，安江健一，大平寛人，古澤明，長谷川健，中川光弘：“北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期”，地質学雑誌, 114 巻, 6 号, 2008, pp.286-299.
- 8) 山本卓也，下茂道人，藤原靖，服部弘通，名合牧人，田所照夫，中垣真一：“幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6,7,8)のうち HDB-6 孔” JNC TJ5400 2005-004, 2004.
- 9) 舟木泰智，常盤哲也，石井英一，羽出山吉裕，松尾重明，津田和康，小泉朗，石川泰己，大條裕一，杉山和稔：“幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング(PB-V01 孔)調査報告書”，JAEA-Data/Code 2008-013, 2008.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	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 ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 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
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。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
比エネルギー	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	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷密度	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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, 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 = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	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 = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm 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 = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

