JAEA-Research 2012-038



ニアフィールド岩盤を対象とした 核種移行遅延性能の評価手法に関する検討

Method Development to Evaluate Retardation Effects of Nuclide Migration in the Near-field Host Rock

> 早野 明 澤田 淳 Akira HAYANO and Atsushi SAWADA

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 C P S

February 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2013

ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法に関する検討

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

早野 明,澤田 淳

(2012年12月13日受理)

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的信頼性を示した「第2次取りまとめ」 では、人工バリアの性能に余裕を持たせた多重バリアシステムによる地層処分の安全性が示され た。そして、リファレンスケースにおける天然バリアの核種移行遅延性能の評価では、ニアフィ ールド近傍の岩盤において大きな遅延性能が期待でき、人工バリアとその周辺の比較的狭い領域 の岩盤の核種移行遅延性能が地層処分の安全評価にとって主要なバリア性能を持つことが示され た。そのような"ニアフィールド岩盤"は、地上からの調査といった調査の初期段階において取 得できるデータが限定されるものの、地下坑道などを活用した調査の段階でより詳細なデータの 取得が期待される。すなわち、ニアフィールド岩盤は、調査の進展に伴って蓄積される地質環境 情報により評価モデルやパラメータ値の信頼性を向上させることが期待できる領域と言える。

上記のことを踏まえ本研究では,調査の進展に応じて構築される地質環境モデルとその不確実 性に柔軟に対応できる評価手法の整備に資することを目的として,ニアフィールド岩盤を対象と した核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価する手法を検討した。検討した評価手法の適用事 例として,超深地層研究所計画の地表からの調査段階において取得された調査データを活用した 核種移行解析を試行した。そして,核種移行の評価結果に影響を与えるパラメータとして透水量 係数に着目した検討の結果,高透水性の移行経路だけではなく低透水性の移行経路の定量的なデ ータが評価結果の信頼性向上に資することなど,地質環境調査へのフィードバックを示した。

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

JAEA-Research 2012-038

Method Development to Evaluate Retardation Effects of Nuclide Migration in the Near-field Host Rock

Akira HAYANO and Atsushi SAWADA

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

(Received December 13, 2012)

The H12 report described the technical reliability for the geological disposal of high-level radioactive waste (HLW) in Japan. The safety of geological disposal was demonstrated by the use of a multi-barrier system to contain the HLW with a high margin for performance in the engineered barrier system. The reference case in the H12 report described a strong retardation effect on nuclide migration in the near-field host rock. The near-field host rock is therefore expected to serve as a major barrier in the performance assessment (PA) of HLW disposal. It can also be expected that geological data relevant to nuclide migration rock would be better obtained from underground, *in-situ* investigations as opposed to extrapolations from surface-based investigations. The accumulation of geological data by step-wise site investigations helps to improve the reliability of PA models and constrain parameter values on which they are based.

The procedures to evaluate retardation effects of nuclide migration in the near-field host rock have been examined to help methods of PA model development, which can accommodate uncertainties of site descriptive models at each investigation step. A template of a simplified calculation method has been prepared to assist this evaluation. The nuclide migration analysis was carried out using data obtained from surface-based investigations as a part of the Mizunami underground research laboratory project to exemplify the application of the method. Special attention was paid to uncertainties in transmissivity values for nuclide migration paths. A future investigation program is necessary to establish quantitative measurements of low permeability migration paths because measurements are currently limited to high permeability migration paths, which can lead to uncertainties in PA model results.

Keywords: Safety Assessment, Near-field Host Rock, Fractured Rock, Nuclide Transport Analysis, Retardation Effects

1.	はじめに	1
2.	本研究の進め方	3
3.	ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法に関する検討	5
4.	ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法の試行	7
4.	1 ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行解析	7
	4.1.1 核種移行モデルおよび解析手法の設定	7
	4.1.2 パラメータの設定	9
	4.1.3 評価対象核種	.14
	4.1.4 解析結果	.14
4.	2 遅延性能が乏しい透水性構造を評価対象から除外した場合の遅延性能の評価	.16
	4.2.1 評価対象から除外する透水性割れ目の抽出方法	.16
	4.2.2 遅延性能が乏しい透水性割れ目を除外した場合における解析結果	.20
5.	考察	.26
5.	1 割れ目の透水量係数分布における不確実性の影響について	.26
5.	2 遅延性能が乏しい透水性構造を除外する場合における不確実性の影響について	.26
6.	まとめ	.28
謝	辞	.30
参	考文献	.31

Contents

1.	Introduction	1
2.	Approach of this study	3
3.	Method development to evaluate retardation effects of nuclide transport in the near-field host	
	rock	5
4.	Exemplification to evaluate of retardation effects of nuclide transport in the near-field host rock	7
4.1	Nuclide transport analysis for the near-field host rock	7
4	4.1.1 Setting of nuclide transport model and analytical method	7
4	4.1.2 Parameter setting	9
4	4.1.3 Nuclides for analysis	14
4	4.1.4 Results	14
4.2	2 Evaluation of retardation effects for exclusion of high permeability structures	16
4	4.2.1 Method to select highly permeable fractures excluded from transmissivity distribution	16
Z	4.2.2 Retardation effects for exclusion of highly permeable structures	20
5.	Consideration	26
5.1	I Impact of uncertainty of transmissivity distribution	26
5.2	2 Impact of uncertainty in case of excluding highly permeable structures	26
6.	Conclusions	28
Ack	xnowledgements	30
Refe	erences	31

表目次

表 1.	本研究の対象となる調査項目とデータ	9
表 2.	透水性割れ目と透水量係数の算出方法	.11
表 3.	パラメーター覧	.14
表 4.	解析結果一覧	.15
表 5.	除外する透水性割れ目の優先順位	.17

図目次

図1.	最大線量の移行距離に対する変化	2
図2.	総合性能評価の枠組みと個別研究テーマの関係	2
図3.	ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能を評価するフローおよび調査、安全確保の考	
	え方,地下施設の設計との関係イメージ	6
図4.	1 次元平行平板モデルの概念図	7
図 5.	補正前後の流入点の透水量係数	12
図 6.	FEC 検層結果に基づく流入点の透水量係数分布(ケース 1)	12
図 7.	FEC 検層の流入点の透水量係数と BTV 検層の結果に基づく割れ目の透水量係数分布	
	(ケース 2)	13
図 8.	水理試験結果とBTV 検層結果に基づく割れ目の透水量係数分布 (ケース3)	13
図 9.	透水量係数の ϕ_{out}/ϕ_{in} に対する感度	16
図 10). DH-2 号孔の地質柱状図	18
図11	1. DH-15 号孔の地質柱状図	19
図 12	2. MIZ-1 号孔の地質柱状図	20
図 13	3. ケース1の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と評価対象から除外する透水性構造	
	の優先順位に含まれる透水性割れ目の数	21
図 14	4. ケース2の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と評価対象から除外する透水性構造	
	の優先順位に含まれる透水性割れ目の数	22
図 15	5. ケース3の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と評価対象から除外する透水性構造	
	の優先順位に含まれる透水性割れ目の数	22
図10	5. 遅延性能の変化(ケース 1, パターン A)	23
図 17	7. 遅延性能の変化(ケース 1, パターン B)	23
図 18	3. 遅延性能の変化(ケース 2, パターン A)	24
図 19	9. 遅延性能の変化(ケース 2, パターン B)	24
図 20). 遅延性能の変化(ケース 3, パターン A)	25
図 21	Ⅰ. 遅延性能の変化(ケース 3, パターン B)	25

This is a blank page.

1. はじめに

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的信頼性を示した「第2次取りまとめ」 では、安定な地質環境を選定したうえで人工バリアの性能に余裕を持たせた多重バリアシステム を構築することによって、人工バリアとその近傍の比較的狭い領域の岩盤からなるニアフィール ドが有する性能に力点をおいた処分概念が示された¹⁾。そして、「第2次取りまとめ」におけるリ ファレンスケースの評価結果では、処分坑道周辺の数十メートル程度のニアフィールド岩盤の範 囲で有意な核種移行遅延性能を有する可能性が示された(図1)。このような処分坑道周辺のニア フィールド岩盤を対象とした水理・物質移行特性に関する情報は地上からの調査といった調査の 初期の段階は限定されるものの、地下坑道などを活用した調査の段階ではより詳細なデータが取 得されることが期待できる。そのため、ニアフィールド岩盤では、天然バリアの中でも主要な遅 延性能が期待されるとともに、調査の進展に伴い地質環境のデータが蓄積されることによる評価 モデルやパラメータ値の信頼性の向上が期待される領域である。

一般に、地層処分の安全性を示す総合性能評価では、地質環境調査・モデル構築、地下施設の 設計、シナリオ評価、天然現象影響評価、生物圏評価などを踏まえて核種移行解析を行い、処分 システムの安全性について総合的な評価を行う。その際、各分野の評価上の前提条件や評価の対 象となる項目が相互に関連し(図2),調査の段階毎の地質環境モデルの不確実性を考慮した性能 評価が行われると考えられるため、その評価手法を事前に一意的に決定することは難しい。地層 処分事業における精密調査地区選定段階(概要調査の段階)では、閉鎖後長期および事業期間中 の安全確保の見通しを得ることを目標として、概要調査において取得した地質環境情報を用いて 法定要件や自主基準等の考慮事項に照らして母岩としての適格性が評価され、候補となる母岩が 選定される。さらに処分場の地下施設の位置、深度、処分パネルやアクセス坑道などの基本レイ アウトは、候補となる母岩の評価・選定の結果、および主要な地下水流動方向などを踏まえた天 然バリア中の放射性物質移行抑制の観点に基づいて設定される²⁾。次段階調査の候補となる母岩 を判断する場合には、総合的な性能評価の結果に基づくものと考えられる。一方、調査の初期の 段階から安全確保にかかわる目標を達成できる岩盤か否かを見通しながら事業を進めるためには, 母岩の選定や地下施設の設計などの検討の過程において調査と性能評価の効率的な連携が不可欠 である。その際、調査の進展に伴い調査データが詳細になると期待できるニアフィールド岩盤に 着目し、任意の領域毎あるいは地質構造毎に核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価し、それ を相対比較できる評価手法が有効であると考えられる。さらに、地質環境モデルの調査段階毎に 異なる不確実性や評価の目的に柔軟に対応可能な評価手法をオプションとして準備しておくこと が肝要である。

そこで本研究では、調査の進展に応じて構築される地質環境モデルとその不確実性に柔軟に対応できる評価手法の整備に資することを目的として、ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価するための手法を検討した。次に、検討した評価手法の適用例を示すために、超深地層研究所計画³⁰における地表からの調査段階において取得された調査データを用いた核種移行解析を試行した。その際、解析結果に基づき地質環境モデルにおける不確実性の影響を考察し、地質環境調査へのフィードバックを示した。



図 1. 最大線量の移行距離に対する変化(JNC, 1999¹⁾に基づく)



http://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/kento iinkai/6-2.pdf)

2. 本研究の進め方

はじめに、ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能を簡便かつ定量的に評価する手 法を検討した。その際、地層処分の安全確保の考え方、事業における調査の進展や地下施設の設 計との関係に留意した(3章)。

次に、3章において検討した評価手法の適用例を示すために、具体的な地質環境から取得され たデータを活用した核種移行解析を試行した。本研究では、具体的な地質環境データとして岐阜 県瑞浪市において進められている超深地層研究所計画³⁰の調査データを活用することとし、研究 所用地およびその周辺において実施された3孔の深層ボーリング調査(DH-2号孔, DH-15号孔, MIZ-1号孔)のデータを用いた(4章)。解析にあたっては、以下の二つの観点に着目した。

- 解析に用いるパラメータのうち割れ目の透水量係数分布の設定においてのみ具体的な地質環境からのデータを用いることとし、設定上における解釈の違いや設定に用いるデータの種類とその組合せの違いから考えられる三つの手法により設定する。
- ② 遅延性能が乏しい透水性割れ目の抽出について、割れ目の透水量係数の高低のみに着目する 場合と調査によって検出できる決定論的な構造毎に抽出する場合の二つのパターンを試行す る。

①に関して、評価対象領域の割れ目の透水量係数分布を設定する際に用いる調査データは、流体検層データのような高透水性構造の抽出を目的としたデータのみならず、評価結果における不確実性を低減するとともに、ニアフィールド岩盤の遅延性能を定量化するために、より低透水性の割れ目も含めて可能な限り詳細なスケールで透水量係数を直接計測したデータであることが望ましい。しかしながら、特に地上からの深層ボーリング調査では、調査の目的、試験期間、コストあるいは調査技術の問題から、ボーリング孔と交差する全ての割れ目の透水量係数を直接計測することは容易ではない。また、調査手法によって異なるが測定可能な透水量係数の下限がある。本研究において用いたボーリング調査データは、孔壁画像検層からの割れ目の分布や開口状態に関するデータ、流体検層からの水みちの位置とその透水量係数、水理試験により計測されたパッカー区間の透水量係数である。これらの調査データを用いて個々の割れ目の透水量係数を算出し透水量係数分布を設定する場合、低透水性割れ目の存在をどの程度仮定するかといった透水性割れ目に関する解釈の違いや使用する調査データの種類と組合せの違いにより複数の代替の設定手法を考えることができる。本研究では、三つの設定手法により割れ目の透水量係数分布を設定した。

②に関して、地層処分事業において地下施設を設計する際には、遅延性能が乏しい高透水性構造が処分パネルや処分坑道などと交差し、評価対象岩盤の遅延性能の低下が懸念される場合、その構造に対して基本レイアウトの変更や工学的対策により対処するものと考えられる。本研究では、母岩の適性を評価するための基準を設定することはできず、また、具体的な地質構造の空間分布を考慮したレイアウトの検討や工学的対策による対処などの諸条件を考慮することはできない。このような前提条件があるものの、ニアフィールド岩盤の遅延性能評価と地下施設の設計の間における情報のやり取りに関して、地質環境モデルの不確実性が及ぼす影響を確認するために、遅延性能が乏しい透水性割れ目を評価対象の母集団から除外した解析を行った。本研究において

割れ目を移行経路として扱わないことを意味する。遅延性能が乏しい割れ目を抽出する際に,割 れ目の透水量係数の高低のみに着目して,その数値が高い順に除外する構造を抽出する方法が, 除外後の解析において,より高い遅延性能を得ることに繋がる。一方,処分場のレイアウトや設 計仕様の設定に資することを目的とする場合,除外対象として抽出する透水性割れ目は,調査に よって決定論的な空間分布が把握されていることが望ましい。そのため本研究では,評価対象か ら除外する構造を抽出する方法として,透水量係数の高低のみに着目して除外する割れ目の優先 順位を設定する方法と,ボーリング調査により空間分布が把握されている割れ目帯や単一割れ目 毎に除外する割れ目の優先順位を設定する方法の二つのパターンを設定した。

最後に、上述の二つの観点に着目した解析および評価の結果に基づいて、地質環境モデルの不 確実性が割れ目の透水量係数分布の設定を通じて評価結果に与える影響を考察し、さらに調査へ のフィードバックを示した(5章)。

3. ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法に関する検討

地層処分事業では、段階的に進められる調査とサイト選定プロセスにおいて必要となる情報を 蕃積・詳細化するとともに、地下における施設の設計や操業時においても同様に地質環境の情報 を更新することにより、安全確保上重要な不確実性を特定して、それを徐々に低減していくこと としている。そして、段階的に更新、拡充される地質環境の情報に基づき、処分場設計の最適化 と安全評価を繰り返し実施することで、地層処分システムの長期安全性と技術信頼性を向上・強 化していくこととしている²⁾。本章ではこのことを踏まえ,調査で取得可能なデータ,安全確保 の考え方、地下施設の設計等との関係に留意して、ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能を対 象にした簡便な解析を通じて、安全性を確保し得る岩盤を評価する方法について検討した(図3)。 地層処分事業におけるニアフィールド岩盤の性能評価は、精密調査地区選定段階(概要調査段階) や引き続く調査段階において、段階的に構築・更新される地質環境モデルに基づいて実施される。 その評価対象領域は、安全確保の考え方・目標に基づく考慮事項に照らして、明らかに不適格な 地域を避けた上で選定される 2)。ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能の観点から母岩として の適格性を評価する場合には、それを評価するための指標を明確化することが、安全評価を進め る上で重要である。評価指標の明確化は、地質環境モデルに基づいたニアフィールド岩盤の遅延 性能に対する適格性を明示することに繋がるだけでなく、安全確保の考え方を整理する上で、地 質環境の調査に基づく地質環境モデルと評価上の重要因子の関係を明示することにも繋がる。こ の評価指標は既存の経験に基づき設定されるが、調査と評価を繰り返し実施しながら適切な項目 へ修正することも可能であり、このことが調査と性能評価の効率的な連携に繋がる。設定した評 価指標に関する解析手法の設定にあたっては、調査の進展に伴い段階的に更新・拡充される地質 環境モデルからの情報を用いることに留意する必要がある。すなわち、地質環境モデルの不確実 性は調査段階によって異なり、その状況に適した解析手法を設定する必要がある。この不確実性 の変化に柔軟に対応するため、オプションを用意しておくことも安全評価を進める上で重要であ ると言える。概要調査などの調査の初期の段階では調査項目や数量が限られるため、例えば、三 次元モデルにおいて空間的な不均質性を十分に考慮できる程度の情報量を得ることは難しい。こ のような調査による地質環境に関する情報量が乏しい段階において三次元モデルを構築する場合、 評価結果に与える影響の大きい不均質性に伴う因子に着目した一次元モデルに基づく解析と併用 することが有効であると考える。また、簡易的に計算可能な解析解を用いるなどの解析手法を採 用することにより、繰り返し解析が容易になり、遅延性能の評価と地下施設の設計の間における 円滑な情報のやり取りに資する。以上の一連の解析と評価を通じて、安全性を確保し得る岩盤を 評価できるだけでなく、評価対象全体の遅延性能に与える影響が大きい構造や不確実性因子を評 価することができる。それらの情報を次段階の調査計画立案にフィードバックすることによって 評価結果に対する不確実性の低減に繋げることができる。



図 3. ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能を評価するフローおよび調査,安全確保の考え方, 地下施設の設計との関係イメージ

4. ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法の試行

3 章において示したニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法の適用例を 示すために、図3に示したフローのうち、地質環境モデルの構築・更新から解析評価に至る一連 の解析を具体的な地質環境の調査データを用いて試行した(4.1項)。2章で述べた通り、本研究 では具体的に遅延性能の低下が危惧される構造の抽出を試行することはできないが、遅延性能評 価と地下施設の設計の間において情報をやり取りする際に、地質環境モデルにおける不確実性が 与える影響を確認するために、遅延性能が乏しい透水性構造に対応する割れ目を評価対象の母集 団から除外した解析を行った(4.2項)。

具体的な地質環境からの調査データとして,超深地層研究所計画における地表からの調査予測 研究段階(第1段階)において取得された調査データを用いた。本研究では,図3に示したフロ ーのうち地質環境モデルからの情報を,研究所用地およびその周辺において実施した一部のボー リング孔(DH-2号孔, MIZ-1号孔, DH-15号孔)を利用した調査により取得したデータとした。 また,評価対象領域の設定では,具体的なレイアウトを想定せずに任意の100m程度の領域を仮 定し,核種移行概念の設定では,第2次取りまとめ¹⁾と同様に核種は崩壊を伴いながら亀裂中を 移流,分散により移行するとともに,亀裂表面からのマトリクス部への拡散と収着により遅延さ れることを仮定した(図4)。



図 4. 1 次元平行平板モデルの概念図 (JNC, 1999¹⁾に追記)

4.1 ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行解析

4.1.1 核種移行モデルおよび解析手法の設定

核種移行モデルの設定については,第2次取りまとめの方法論に準拠して設定した。第2次取 りまとめでは,天然バリア中の核種移行モデルとして,亀裂の透水量係数の不均質性に着目し, 透水量係数の異なる複数の一次元平行平板モデル(図 4)を重ね合わせたモデルを適用した¹⁾。 本研究では,処分坑道から(任意の点から仮想的に)下流側に向かって100mの厚さの岩盤中を 核種が移行し,評価対象領域のすべての透水性割れ目がそれぞれ独立した移行経路であると仮定 したモデルを採用した。全ての移行経路の距離は最短の100mとした。

解析手法については、調査の初期段階から対象領域岩盤の遅延性能を概括的に把握することを

容易に実行できる手法であることが望ましい。また、総合的な性能評価に用いること前提としていないため、人工バリアから移行してくる核種の枯渇などを考慮する必要は無い。よって、一次元平行平板モデルに基づき人工バリアからの核種の一定流入率 ϕ_{in} と、亀裂中の任意の地点における定常状態での核種移行率 ϕ_{out} の比 ϕ_{out}/ϕ_{in} を求める解析解を用いた。その解析解は次式で表わされる ^{4), 5)}。

$\frac{\phi_{out}}{\phi_{in}} = exp\left(\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe}{2}}\right)$	$\frac{Pe^2}{4} + Pe \times \lambda_n \times t \right)$
$Pe = \frac{v \times L}{D_L}$	
$t = \frac{L}{v} \times \left[Rf_n + F \times \frac{\varepsilon}{k} \right]$	$\frac{\times Rd_n}{b \times \alpha} \times tanh(\alpha \times p) \Big]$
$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda_n \times Rd_n}{D_p^m}}$	
Pe	:ペクレ数 [-]
λ_n	: 核種 n の崩壊定数 [1/s]
t	: 核種移行時間 [s]
v	: 亀裂内流速 [m/s]=T×i/2b
Т	: 亀裂の透水量係数[m ² /s]
i	:動水勾配 [-]
L	: 亀裂内の移行距離 [m]
D_L	: 亀裂内分散係数 [m²/s]
Rf_n	: 核種 n の亀裂表面への収着による遅延係数 [-]
F	: 亀裂単位面積あたりのマトリクス拡散に寄与する亀裂面積の割合 [-]
ε	:マトリクス部の空隙率 [-]
Rd_n	: 核種 n のマトリクス部内の収着による遅延係数 [-] (= $1 + \frac{\rho^m K d_n}{\varepsilon}$)
$ ho^m$:マトリクス部の密度 [kg/m³]
Kd_n	:核種nの分配係数 [m³/kg1]
b	: 亀裂開口幅の 1/2 [m]
p	:マトリクス拡散深さ [m]
D_p^{m}	:マトリクス空隙中の拡散係数 [m ² /s]

この解析解は、一定流入率および定常状態を仮定し、崩壊連鎖の効果を扱えないという制約条件があるものの、亀裂中の任意の地点における定常核種移行率に対するパラメータ値の影響特性を簡易的に調べることができる⁵⁾。この解析解によって求められる *φout/φin* を遅延性能の大小を比較するための指標とした。具体的な遅延性能の評価手法としては、割れ目の透水量係数分布の母集団の全ての透水性割れ目を対象に、上記の解析解を用いて透水性割れ目の*φout/φin*を計算し、

その値に一つの透水性割れ目の母集団全体に占める割合を乗じた上で、母集団全ての ϕ_{out}/ϕ_{in} を 足し合わせて得られる値を岩盤の遅延性能とした。

4.1.2 パラメータの設定

4.1.1 に示した解析解に用いるパラメータのうち割れ目の透水量係数分布の設定においてのみ 具体的な地質環境からの調査データを用いることとした。また、割れ目の透水量係数分布を設定 する上で透水性割れ目に関する解釈の違いや個々の割れ目の透水量係数の算出に用いるデータの 種類とその組合せの違いから複数の設定手法を考えることができ、本研究では三つのケースの設 定手法により割れ目の透水量係数分布を設定した。第2次取りまとめでは、割れ目の透水量係数 のばらつきは数桁の範囲にわたっており、また他のパラメータのばらつきの範囲に比べて核種移 行遅延性能に与える影響が大きいことが示されている 5%。そのため、割れ目の透水量係数分布は 性能評価上重要なパラメータのひとつであると考えることができる。その他のパラメータについ ては、第2次取りまとめのリファレンスケースに準拠して設定した。

割れ目の透水量係数の算出には,超深地層研究所計画の第1段階における調査データのうち, 研究所用地およびその周辺において実施した一部のボーリング孔を利用した調査により取得した データを使用した。対象とするボーリング孔は,DH・2号孔(掘削長:501.3m),DH・15号孔(掘 削長:1012.0m)および MIZ・1号孔(掘削長:1300.2m)の3孔とした。調査項目は,孔壁画像 検層(以下,「BTV検層」),電気伝導度検層(以下,「FEC検層」)および単孔式水理試験(以下, 「水理試験」)を対象とした。それぞれの調査項目に対して割れ目の透水量係数分布の設定に用い たデータおよびその引用先を表1に示す。

調査項目	データ		引用文献
71 陕西佐公园	 割れ目の深度分布 割れ目の開口状態に基づく区分 	DH-2	下茂ほか, 2005 ⁶⁾
11 (PTV 检 G)		DH-15	鶴田ほか,2005 ⁷⁾
		MIZ-1	魚住ほか,2005 ⁸⁾
索仁道在於屋	 ・流入点の深度分布 ・流入点の透水量係数(の比率) 	DH-2	竹内ほか, 2005 ⁹⁾
电风灯得度使唐 (FFC 绘屋)		DH-15	松岡ほか,2007 ¹⁰⁾
		MIZ-1	魚住ほか,2005 ⁸⁾
出っキャーまた	 試験区間長とその位置 試験区間の透水係数・透水量係数 	DH-2	竹内ほか, 2005 ⁹⁾
中北大小连武阙		DH-15	竹内ほか, 2005 ⁹⁾
(小正式)例		MIZ-1	竹内・藤田, 2005 ¹¹⁾

表 1. 本研究の対象となる調査項目とデータ

(1) 割れ目の透水量係数分布の設定方法

割れ目の透水量係数の算出にあたっては,調査により検出したすべての割れ目のうち透水性割 れ目として認定する基準を定義し,その基準に基づき割れ目の透水量係数を算出した。本研究で は表1に示した調査データを用いることを前提として,透水性割れ目と認定する基準について以 下の三つのケースを設定した。 ケース1:FEC 検層により検出される流入点(流入点が一つの透水性割れ目)

ケース 2:BTV 検層で検出した「開口割れ目」および「明瞭割れ目」のうち FEC 検層により 検出される流入点から±1m の範囲に分布する割れ目

ケース 3: BTV 検層により検出したすべての「開口割れ目」および「明瞭割れ目」

この3ケースの透水性割れ目の基準に対して、割れ目の透水量係数の算出方法を表2に示す。

ケース1については, FEC 検層により検出した流入点が一つの透水性割れ目であると仮定した。 そのため,割れ目の透水量係数には,FEC 検層結果に基づく数値解析により求められた流入点の 透水量係数をそのまま採用した。

ケース2については、FEC 検層により抽出した流入点が複数の透水性割れ目に対応していると 仮定し、流入点の位置から±1m の範囲に分布する割れ目を対象に割れ目の透水量係数を算出し た。流入点の位置から±1m の範囲に分布する割れ目のうち透水性割れ目として扱う割れ目は、 BTV 検層の結果に基づき決定した。BTV 検層では、孔壁画像から亀裂の開口状態を判断し、「開 口割れ目」、「明瞭割れ目」および「ヘアークラック」の3 種類に区分している。このうち、「開 口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目として扱うこととした。個々の割れ目の透水量 係数の算出にあたっては、流入点の位置から±1m の同一の範囲に分布する「開口割れ目」およ び「明瞭割れ目」はそれぞれ等しい透水量係数であると仮定して、流入点の透水量係数をその± 1m の範囲に分布する「開口割れ目」および「明瞭割れ目」の数で除することにより、割れ目の 透水量係数を算出した。

ケース3については、FEC検層では検出できない低透水性の割れ目がボーリング孔全体にわた って分布していると仮定し、水理試験が実施された区間に分布するすべての「開口割れ目」およ び「明瞭割れ目」を透水性割れ目として扱うこととした。この場合、ケース1およびケース2が 透水量係数データとして FEC 検層の解析結果を用いるのとは異なり、水理試験が実施された区 間に分布する割れ目を対象に、その区間の透水量係数を用いて割れ目の透水量係数を算出した。 水理試験により得られる結果は、試験区間の区間長に対する透水量係数である。本研究において 取り扱う3孔のボーリング孔における水理試験には、比較的長い区間の透水性を把握するために 行われる数+メートルから100m程度の区間長(以下、「長区間」)の水理試験と、FEC検層によ り検出した流入点の位置に基づき試験区間が絞り込まれている数メートル程度の区間長(以下、 「短区間」)の水理試験がある。長区間と短区間の試験区間が重複する場合は、短区間の透水量係 数から短区間の透水量係数を算出し、重複しない残りの区間については長区間の透水量係 数から短区間の透水量係数を差し引いた値を用いて算出した。割れ目の透水量係数の算出方法に ついては、ケース2と同様、試験区間に分布するBTV検層により抽出した「開口割れ目」およ び「明瞭割れ目」がそれぞれ等しい透水量係数であると仮定して割れ目の透水量係数を算出した。

	透水性割れ目の基準	使用データ	透水量係数の算出方法			
L 71	FEC 検層により検出された流入	【FEC 検層】	(透水性割れ目の透水量係数)			
7-71	点が一つの透水性割れ目	- 流入点の透水量係数	= (流入点の透水量係数)			
		【FEC 検層】				
	FEC 検展により検出されて法り	- 流入点の透水量係数				
	FEC 使層により使山される加入	- 流入点の深度分布				
ケース2	Rから上1m の範囲に万布する	【BTV 検層】				
		- 割れ目の深度分布	(加八品から上1mに万布する「用口			
	日」わよい「明瞭割40日」	- 割れ目の開口状態に基づ	割40日」と「明瞭割40日」の数)			
		く区分				
		【水理試験】				
		- 試験区間長とその位置				
		- 試験区間の透水量係数	(透水性割れ目の透水量係数)			
5 70	DIV 使層により抽面した割れ日		= (試験区間の透水量係数)÷			
7-23	のうち「開口割れ目」および「明	【BTV 検層】	(試験区間に分布する「開口割れ目」			
	「「「「「「「」」に区方されした割れ日	- 割れ目の深度分布	と「明瞭割れ目」の数)			
		- 割れ目の開口状態に基づ				
		く区分				

表 2. 透水性割れ目と透水量係数の算出方法

(2) 電気伝導度検層により抽出した流入点の透水量係数の補正

FEC 検層は孔内水を地下水の電気伝導度と異なる水(脱イオン水や塩水など)で置換し、その 後、揚水をしながら孔沿いの電気伝導度を計測することにより、電気伝導度の有意な変化が認め られる位置を流入点として検出する手法である 12)。さらに、流入点の電気伝導度の分布を数値解 析^{13), 14)}によって再現することにより、流入点の透水量係数を算出することができる^{10), 15), 16)}。 本研究で用いる 3 孔の FEC 検層結果に基づく数値解析から求めた透水量係数データのうち MIZ-1 号孔の透水量係数は、他の2孔の透水量係数より低い傾向を示す(図 5a)。この理由につ いては, MIZ-1 号孔が泥水を使用した掘削などのスキン効果の影響によりボーリング孔近傍の透 水性が、岩盤本来の透水性よりも低くなったことによるものと考えられている16。そこで本研究 では、MIZ-1号孔のデータに限り、FEC 検層から得られた流入点の透水量係数を補正した。流 入点の透水量係数は、FEC 検層結果を用いた数値解析により見積もられたそれぞれの流入点の透 水量係数の比に基づいてボーリング孔全体の透水量係数を各流入点に分配する方法により算出さ れる。そのため補正には、スキン効果の影響が排除されたボーリング孔全体の透水量係数が必要 である。MIZ-1 号孔における水理試験では、スキン効果を考慮したモデルを用いて透水量係数が 得られている⁸。その結果を用いてスキン効果の影響が排除されたボーリング孔全体の透水量係 数を求め、その値を用いて流入点の透水量係数を補正した。ボーリング孔全体の透水量係数の算 出にあたっては、物理検層実施時に揚水ポンプ停止後の水位回復データを取得したビルドアップ 試験(深度 123.00~984.17m の区間)の結果と深度 1112.00~1119.92m および深度 1228.00~1280.92m の区間の水理試験の結果を足し合わせた。ただし、深度 123.00m までは仮ケ ーシングが挿入されているため試験の対象とはしておらず、また、算出の際に考慮していない深 度については FEC 検層で顕著な水みちが検出されていないため、全体の透水量係数に影響を及 ぼすほどの割れ目が分布していないと仮定した。補正後の流入点の透水量係数の頻度分布を図 5b に示す。補正後の流入点の透水量係数は、ケース1およびケース2の割れ目の透水流係数の算出 に用いた。



(3) 割れ目の透水量係数分布の算出結果

(1)に示したケース 1~3 の方法で割れ目の透水量係数を算出し、その結果に基づき作成した頻度分布をそれぞれ図 6~8 に示す。



図 6. FEC 検層結果に基づく流入点の透水量係数分布 (ケース 1)



図 7. FEC 検層の流入点の透水量係数と BTV 検層の結果に基づく割れ目の透水量係数分布 (ケー

ス2)



図 8. 水理試験結果と BTV 検層結果に基づく割れ目の透水量係数分布 (ケース 3)

(4) 割れ目の透水量係数分布以外のパラメータの設定

前述のとおり,割れ目の透水量係数分布の設定においてのみ具体的な地質環境からの調査デー タを用いた。それ以外のパラメータの設定では,第2次取りまとめのリファレンスケースに準拠 した。解析に用いるパラメータの一覧を表3に示す。

パラメータ	数值	単位
亀裂内の移行距離	100	[m]
分散長	10(移行距離の 1/10)	[m]
亀裂内分散係数	D _L =v× (分散長) =T/(b×2)×i× (分散長)	$[m^2/s]$
マトリクス拡散寄与面積	50	[%]
マトリクス部密度	2.64	[kg/m ³]
マトリクス空隙率	2	[%]
分配係数	Cs: 0.05, Np: 1	[m³/kg]
亀裂開口幅	2b=2√T	[m]
マトリクス拡散深さ	0.1	[m]
マトリクス空隙中拡散係数	3×10^{-12}	$[m^2/s]$
割れ目の透水量係数分布	「4.1.2(3) 割れ目の透水量係数分布の算出結	$[m^{2/s}]$
	果」を参照	
動水勾配	0.01	
崩壊定数	Cs-135 : 3.01×10^{-7} , Np-237 : 3.24×10^{-7}	[1/y]

表 3. パラメーター覧

4.1.3 評価対象核種

本研究での核種移行解析で考慮する核種ついては、安全評価の対象核種の全てを考慮する必要 はなく、生物圏における線量評価において支配的になる可能性のある核種を対象にすることが効 率的かつ効果的である。そのため、第2次取りまとめの安全評価から得られた知見に基づき、 Cs-135とNp-237のふたつの核種を対象とすることとした。第2次取りまとめのリファレンスケ ースにおける母岩からの核種移行率の線量への換算結果では、処分後の約2万年から約200万年 までは Cs-135 が支配的となり、その後は Np-237 を親核種として、それとほぼ放射平衡の関係 にあると考えられる Th-229 が支配的になっている¹⁾。

4.1.4 解析結果

ケース1~3の割れ目の透水量係数分布に基づく解析結果を表4に示す。

ケース1については、FEC 検層により検出した流入点が一つの透水性割れ目であると仮定し、 FEC 検層の結果に基づく数値解析により求められた透水量係数をそのまま用いて割れ目の透水 量係数分布を作成した。FEC 検層により検出可能な透水性割れ目の透水量係数の下限値は、10⁻⁸ m²/s 程度であることが分かっている¹¹)。本研究において遅延性能の指標とした ϕ_{out}/ϕ_{in} の透水量 係数に対する感度に関する澤田らの結果 ⁵⁾をベースにしたものを図 9 に示す。Np-237 は Cs-135 より収着性が大きく、遅延性能に対する透水量係数の感度に 1 桁程度の差があり、Cs-135 につい ては 10⁻⁸ m²/s 程度、Np-237 については 10⁻⁷ m²/s 程度より低い透水性割れ目の場合に遅延性能が 発現することが示されている。その結果ケース 1 の割れ目の透水量係数のほとんどは 10⁻⁷ m²/s よ り高く、 ϕ_{out}/ϕ_{in} は Cs-135 で 0.997、Np-237 で 0.952 となり、ほとんど遅延性能が示されない 結果となった。

ケース2については、FEC検層で検出した流入点の透水量係数がその±1mの範囲に分布する

複数の透水性割れ目に対応すると仮定した。ケース1と同様,FEC 検層の流入点の透水量係数を 用いたが,流入点の空間解像度を考慮して流入点からケース1より±1mの範囲に分布する透水 性割れ目は等しい透水量係数を有すると仮定し,透水性割れ目の透水量係数を算出した。BTV 検 層により抽出した「開口割れ目」および「明瞭割れ目」を透水性割れ目とし,それぞれの透水性 は等しいと仮定した。したがって,ケース2の透水量係数分布はケース1より低い傾向を示す。 遅延性能については,Cs-135の ϕ_{out}/ϕ_{in} が0.991となりほとんど遅延性能に変化は無いものの, Cs-135より収着性の大きい Np-237の ϕ_{out}/ϕ_{in} は0.881となり,ケース1と比較して遅延性能が わずかに高い結果となった。

ケース3については、 FEC 検層では検出できない低透水性の割れ目がボーリング孔全体にわ たって分布していると仮定し、水理試験が実施された区間に分布するすべての「開口割れ目」お よび「明瞭割れ目」を透水性割れ目として割れ目の透水量係数を算出した。その算出には、FEC 検層などの水みちの検出結果に基づき試験区間が絞り込まれた短区間の水理試験のデータと、ボ ーリング孔全体の透水性を把握するための長区間の水理試験のデータを用いた。そして、ケース 2と同様の仮定で、試験区間に分布する透水性割れ目の数を除することにより、割れ目の透水量 係数を算出した。ケース3には、長区間の水理試験データを用いることにより、検討の対象とす る区間が広くなり,比較的低透水の区間についても割れ目の透水量係数を算出できる特徴がある。 その結果、三つのケースの中で透水性を呈する割れ目の数が最も多く、その結果、割れ目の透水 量係数分布も低透水性側にシフトする傾向を示した。ケース3は最も低透水性の割れ目の存在を 仮定した算出により透水量係数分布を設定したが、Cs-135に対する遅延性能を有する透水量係数 を持った割れ目がほとんど含まれていない。そのため ϕ_{out}/ϕ_{in} は0.915となり、ケース1の結果 とほとんど変わらない。本研究の場合、ケース1~3の透水量係数分布の推定の不確実性がCs-135 の遅延性能の推定に与える影響は小さい結果となった。これは、前述のとおり、Cs-135が遅延性 能を示す 10⁻⁸m²/s より小さな透水量係数の割れ目の割合がケース 1~3 で大きく変化しなかった ためと考えられる。その一方で、Cs-135より収着性の高い Np-237 では、図 21 に示されるよう に 10⁻⁷m²/s 程度の透水量係数の割れ目である程度遅延性能を示し,特にケース 3 ではそれらの透 水性を有する割れ目が多く含まれたため、 *ϕout/ϕin*は 0.743 となり、三つのケースの中では最も 遅延性能を有する結果となった。

	Cs-135 $\bigcirc \phi_{\it out}/\phi_{\it in}$	Np-237 \mathcal{O} ϕ_{out}/ϕ_{in}					
ケース1	0.997	0.952					
ケース2	0.991	0.881					
ケース3	0.915	0.743					

表 4. 解析結果一覧



4.2 遅延性能が乏しい透水性構造を評価対象から除外した場合の遅延性能の評価

遅延性能が乏しい透水性構造を評価対象から除外した場合の遅延性能を評価するために,遅延 性能が乏しい割れ目の抽出方法をあらかじめ設定し,4.1.2 項の(3)に示した割れ目の透水量係数 分布の母集団から除外対象の割れ目に対応する透水量係数を除外して,再度同様の解析を行った。 遅延性能が乏しい割れ目の抽出は段階的に行うこととし,繰り返し解析を行い遅延性能の指標で ある ϕ_{out}/ϕ_{in} を求め,段階的な遅延性能の変化を評価した。

4.2.1 評価対象から除外する透水性割れ目の抽出方法

本研究における評価対象から除外する透水性割れ目を抽出する方法は,以下に示す2つの考え 方に基づくこととし,それぞれパターンA,パターンBとした。

- パターンA:透水量係数の高低に着目し,10⁻⁵m²/s,10⁻⁶m²/s,10⁻⁷m²/sの順にそれより高い 透水量係数の分布から除外する方法
- パターン B: 地質構造モデル上の地質構造区分や調査により検出可能な構造毎に除外する透 水性割れ目の優先順位を設定する方法

パターンAの場合,地質構造区分の属性に関係なく透水量係数の高低だけで除外する割れ目の 優先順位を決定する。一方,パターンBの場合,土岐花こう岩の地質構造区分やボーリング調査 により抽出した局所的な割れ目帯毎に除外する割れ目の優先順位を決定する。超深地層研究所計 画の第1段階では,主な調査対象の地質である土岐花崗岩の地質構造を主に低角度傾斜(0~30°) を有する割れ目の分布密度に基づいて区分し,相対的に高い分布密度の岩盤領域である'上部割 れ目帯 (UHFD)'と相対的に低い分布密度の岩盤領域である'下部割れ目低密度帯 (LSFD)' に区分した。さらに,上部割れ目帯に区分された岩盤領域には低角度傾斜(0~30°)を有する 割れ目の頻度が著しく高い区間があり,この領域を'低角度傾斜を有する割れ目の集中帯(LAFZ)' に細分した¹⁷⁾。また,研究所用地周辺の土岐花こう岩における三つの地質構造区分とは別に,ボ ーリング調査によって断層や割れ目帯などの局所的に割れ目密度が高い箇所が抽出されており, それらの情報はボーリング柱状図に整理されている(図 10~12)。土岐花こう岩の透水性の特徴 として,LAFZ,UHFD,LSFDの順で高い傾向がある。そのため,除外する割れ目の優先度も LAFZ,UHFD,LSFDの順とした。LAFZはUHFDやLSFDと比較して,分布領域が鉛直方向 では狭いため,LAFZに分布する全ての割れ目を優先順位1位とした。UHFDとLSFDについ ては,それぞれの地質構造内に分布する局所的な断層や割れ目帯毎に優先順位を細分した。FEC 検層により検出した流入点とその深度に対応する断層や割れ目帯の関係付けを行うとともに,流 入点の透水量係数に基づき,パターンAと同様10⁵m²/s,10⁶m²/s,10⁷m²/s をしきい値として 除外する優先度を設定した。流入点に対応する断層や割れ目帯がない場合は,その箇所には透水 性の単一割れ目が分布すると仮定して,除外対象に含むこととした。パターンAおよびパターン Bにおける除外する透水性割れ目の優先順位を表5に示す。

優先	~ 2	\mathbf{v}° \mathbf{h} \mathbf{v} \mathbf{p}
順位	$\wedge \not \rightarrow \land A$	
1	10 ⁻⁵ m²/s 以上の透水性割れ目	LAFZ に分布する全ての透水性割れ目
		UHFD に分布する流入点の透水量係数が
2	10 ⁻⁶ m²/s 以上の透水性割れ目	10 ⁻⁵ m²/s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯
		UHFD に分布する流入点の透水量係数が
3	10 ⁻⁷ m²/s 以上の透水性割れ目	10 ⁻⁶ m ² /s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯
		UHFD に分布する流入点の透水量係数が
4		10 ⁻⁷ m²/s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯
		LSFD に分布する流入点の透水量係数が
5		10 ⁻⁵ m²/s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯
		LSFD に分布する流入点の透水量係数が
6		10 ⁻⁶ m ² /s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯
		LSFD に分布する流入点の透水量係数が
7		10 ⁻⁷ m²/s 以上に対応する単一割れ目/
		割れ目帯

表 5. 除外する透水性割れ目の優先順位



図 10. DH-2 号孔の地質柱状図(三枝ほか, 2007¹⁷⁾に基づく)







図 12. MIZ-1 号孔の地質柱状図(三枝ほか, 2007¹⁷⁾に基づく)

4.2.2 遅延性能が乏しい透水性割れ目を除外した場合における解析結果

除外する透水性割れ目の優先順位と,除外する割れ目の数を図 13~15 に示す。これらの図に は、土岐花こう岩の地質構造区分別に示した透水性割れ目を除外する前の割れ目の透水量係数分 布を参考として併記した。パターンAおよびパターンBのそれぞれの優先順位に基づき除外対象 の透水性割れ目を分布から段階的に除外し、同様の定常解析解を用いた解析を行い、遅延性能の 指標である *φout/φin*を求めた。その結果を図 16~21 に示す。

パターン A の結果については、Cs-135 のケース 1 とケース 2 の場合、遅延性能が乏しい割れ 目がほとんどであるため、 ϕ_{out}/ϕ_{in} の変化はほとんどないが、Cs-135 のケース 3 と Np-237 は、 割れ目の透水量係数分布から 10⁻⁵m²/s、10⁻⁶m²/s、10⁻⁷m²/s の順に該当する割れ目を除外するこ とで ϕ_{out}/ϕ_{in} が小さくなる傾向が認められた。

パターン B の結果については、ケース 1 の場合、除外する透水性割れ目の優先順位に基づき、 高透水性の LAFZ や UHFD における割れ目帯/単一割れ目に分布する透水性割れ目を除外するこ とにより、パターン A と同様に ϕ_{out}/ϕ_{in} が小さくなる傾向がみられ、除外対象の割れ目を全て除 外した後の ϕ_{out}/ϕ_{in} は、パターン A と同じ値となった。これは、ケース 1 では FEC 検層により 検出した流入点をそのまま一つの透水性割れ目として扱っており、流入点の透水量係数分布をそ のまま割れ目の透水量係数として設定していることに起因する。パターン B の優先順位は,FEC 検層のデータに基づいており、パターン B についてもパターン A と同様に最終的に $10^{-7}m^{2}/s$ 以上の透水量係数を有する割れ目を除外することを基準としていることから同じ値が得られた。 方、BTV 検層により検出した割れ目の分布を考慮したケース 2 およびケース 3 の場合、パターン B の ϕ_{out}/ϕ_{in} の変化は、パターン A と比較して ϕ_{out}/ϕ_{in} の低減の幅が小さい。むしろケース 3 の 場合、優先順位が 7 番目の LSFD の $10^{-7}m^{2}/s$ 以上の割れ目帯および単一割れ目を除外することによって、 ϕ_{out}/ϕ_{in} が大きくなる結果を得た。ケース 3 はケース 1 と異なり、より低透水性の割れ目の分布を仮定して割れ目の透水量係数分布を設定した。調査により直接把握できる FEC 検層 の流入点の透水量係数に基づいて、ボーリング調査によって把握された割れ目帯毎に割れ目を除外する場合、その割れ目帯に含まれる低透水性として算出された割れ目も含めて除外することになり、このことが ϕ_{out}/ϕ_{in} の低減の幅を小さくする原因となった。



	除外する透水性割れ目の優先順位									
		1	0	0		-	0		除外	合計
		1	2	3	4	Э	6	4	対象外	
各優先順位に	パターン A	23	40	25					8	96
含まれる透水性	$\mathcal{B}^{\mathcal{B}}$	C	10	10	7	0	17	10	0	00
割れ目の数	//у — У В	б	19	19	1	Z	17	18	0	96

図 13. ケース1の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と

評価対象から除外する透水性構造の優先順位に含まれる透水性割れ目の数

JAEA-Research 2012-038



				除外する	透水性	割れ目の	の優先順	位		
		1	2	3	4	5	6	7	除外 対象外	合計
各優先順位に	パターン A	13	167	154					65	399
含まれる透水性 割れ目の数	パターン B	45	125	62	28	5	43	83	8	399

図 14. ケース2の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と

評価対象から除外する透水性構造の優先順位に含まれる透水性割れ目の数



		除外する透水性割れ目の優先順位								
		_		3	4	5	6	7	除外	合計
			2						対象外	
各優先順位に	パターン A	90	174	404					670	1338
含まれる透水性	^o ^b A	104	104	1 20		-			10.0	1000
割れ目の数	лу-у Б	124	178	152	Э	Э	47	337	490	1338

図 15. ケース 3 の地質構造別の割れ目の透水量係数分布と

評価対象から除外する透水性構造の優先順位に含まれる透水性割れ目の数







④ UHFD に分布する流入点の透水量係数が 10⁻⁶m²/s 以上に対応する単一割れ目/割れ目帯 ⑤ UHFD に分布する流入点の透水量係数が 10⁻⁷m²/s 以上に対応する単一割れ目/割れ目帯 ⑥ LSFD に分布する流入点の透水量係数が 10⁵m²/s 以上に対応する単一割れ目/割れ目帯 ⑦ LSFD に分布する流入点の透水量係数が 10⁻⁶m²/s 以上に対応する単一割れ目/割れ目帯 ⑧ LSFD に分布する流入点の透水量係数が 10⁻⁷m²/s 以上に対応する単一割れ目/割れ目帯















5. 考察

5.1 割れ目の透水量係数分布における不確実性の影響について

本研究における核種移行遅延性能の評価の試行では, 亀裂性媒体の地下水移行シナリオを対象 にする際に重要なパラメータとなる割れ目の透水量係数分布に着目し, このパラメータの設定に おいてのみ具体的な地質環境からの調査データを用いた。可能な限り不確実性を低減した割れ目 の透水量係数分布を設定するために, 調査により抽出したすべての割れ目に対して直接計測・解 析することによってそれぞれの透水量係数が取得されていることが好ましい。しかしながら, 調 査の目的やコスト, 調査期間の理由から現実的には上述のようなデータを取得することは難しく, 本研究において用いた調査データも例外ではない。本研究の解析作業を通じて抽出した割れ目の 透水量係数における不確実性の要因を以下の通り挙げる。

- FEC 検層は直接調査によって流入点を検出し、取得したデータを用いた解析によりそれぞれの流入点の透水量係数を得ることができるが、検出できる透水量係数の下限値が 10-8m²/s 程度であり、空間解像度は流入点から±1m 程度である。
- BTV 検層の結果に基づき透水性割れ目を設定する場合,抽出した割れ目のうち「開口」および「明瞭」割れ目を透水性割れ目として扱ったが、それらの割れ目と透水性を関係づけるデータに乏しい。
- 短区間の水理試験は、主要な水みちの把握を目的とした FEC 検層の結果に基づき、検出した流入点を含む数メートルから 10m 程度の区間を対象としていることから、透水量係数が 10-8m²/s より大きい試験区間を対象とする場合がほとんどである。また、試験区間内に分布する透水性割れ目はすべて等しい透水量係数を有するという仮定によりそれぞれの割れ目の透水量係数が算出されている。
- 遅延性能を有する低透水性の区間に分布する透水性割れ目の透水量係数は、数十から100m 程度の試験区間が設けられた長区間の水理試験の結果に基づき、その区間内に分布する透 水性割れ目の透水量係数はすべて等しいという仮定のもと算出されることから、空間的な 不均質性を考慮するためのデータが乏しい。

本研究では、低透水性の割れ目の分布に関する仮定の違いが Np-237 の遅延性能の推定に大き な影響を与えた。本研究における遅延性能の評価手法を前提とする場合、10-8m²/s 程度より低い 透水量係数を有する割れ目の検出とその透水性の定量化が重要である。より低透水性の領域に分 布する割れ目も含めて不確実性を低減した透水量係数分布の設定を行うためには、低透水性の領 域における不均質性を評価できるようなデータ取得が必要となる。例えば、短区間の水理試験に より個々の割れ目や断層の透水性を評価可能な調査を適用するとともに、より低透水性の領域に 分布する透水性割れ目の検出とその透水性の測定が可能となる技術開発が求められる。

5.2 遅延性能が乏しい透水性構造を除外する場合における不確実性の影響について

本研究では、除外する透水性割れ目を抽出する方法として、透水量係数の数値のみ着目する場合(パターンA)と調査により把握することができた地質構造区分やその中の割れ目帯および単 一割れ目毎に抽出する場合(パターンB)の二つのパターンを設定した。レイアウトの検討など の地下施設の設計において避ける構造を検討する際には、単に透水量係数の数値のみに着目する のではなく,避ける構造の空間的な分布が把握できていることが必要となる。本研究の解析のう ちケース1は,調査データから直接的に割れ目の透水量係数分布を設定した場合であり,パター ンAとパターンBは同様の遅延性能を示した。一方,ケース3では,低透水性の割れ目の存在を 仮定したが,低透水性の領域に対しては空間的な不均質性を評価していない。このことが, *φout/φin* の低減を妨げる要因に繋がった。このような不確実性を取り除くためには,前項において示した 調査へのフィードバックと同様,低透水性の領域も含めて可能な限り空間的な不均質性を評価で きる高解像度の調査データに基づき除外する割れ目を抽出する必要があり,そのような調査・評 価技術を整備することが不確実性の低減に繋がると考える。

6.まとめ

調査の進展に応じて構築される地質環境モデルとその不確実性に柔軟に対応できる評価手法の 整備に資することを目的として、ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能を簡便かつ 定量的に評価するための手法を検討した。その際、遅延性能を評価する指標を明確化し、その評 価指標を簡便かつ定量的に評価できる手法として,第2次取りまとめに準拠した手法を採用した。 そして、検討したニアフィールド岩盤の遅延性能の評価手法の適用例を示すために、超深地層研 究所計画における第1段階で取得された調査データを活用した核種移行解析を試行した。具体的 には、DH-2号孔、DH-15号孔、MIZ-1号孔の3孔のボーリング調査の調査データを用いた。核 種移行解析におけるパラメータ値の設定では、割れ目の透水量係数分布においてのみ、調査デー タを用いることとし、それ以外のパラメータ値は、第2次取りまとめのリファレンスケースに準 拠して設定した。割れ目の透水量係数分布の設定では、使用するデータの組み合わせや透水性割 れ目の解釈の違いから考えられる三つのケースの算出方法に基づいた。この三つの割れ目の透水 量係数分布を用いて核種移行解析を行うとともに、遅延性能が乏しい構造を評価対象領域の移行 経路の対象から除いた場合の遅延性能の評価を試行した。評価対象から除外する透水性割れ目の 抽出にあたっては、透水量係数の高低に着目した方法と、実際の調査によってその分布が確認で きる地質構造毎に抽出する方法の二つのパターンを設定した。以上の検討を通じて得られた知見 や課題を以下のとおり整理した。

- 本研究で提案したニアフィールド岩盤を対象とした遅延性能の評価手法は、移行経路の透水量係数の分布に着目した簡便な手法であり、地上からの調査段階などの調査の初期のデータの乏しい段階において岩盤の有する核種遅延性能を概略的に評価可能であることを示した。
- 本研究で活用したデータは FEC 検層などにより取得された 10⁻⁸m²/s 以上の透水性を有す る構造のデータが主であり、収着による遅延効果の小さな Cs-135 は遅延効果が小さい結 果となったが、相対的に収着による遅延効果の大きな Np-237 では一定の遅延効果が示さ れた。
- 割れ目の透水量係数分布の設定手法の不確実性の検討として三つの設定手法を適用した結果、相対的に遅延性能が乏しい Cs-135 のケースでは不確実性が遅延性能の評価結果に与える影響が小さいものの、Np-237 のケースではその影響を定量的に示すことができた。
 また、高透水構造を評価対象から除外することが遅延性能の評価結果に与える影響の評価においても、Np-237 のケースで顕著な低減効果を示すことができた。
- ・ これらの効果は、透水量係数と遅延性能の相関関係と、本研究で対象とした透水量係数分布の関係から説明できる。Cs-135のケースでは10⁹m²/s以下で、Np-237のケースでは10⁸m²/s以下の透水量係数で遅延性能が発現する。本研究の事例で対象とした、FEC検層は高透水性箇所を直接検出できる調査技術であるため、その高透水性箇所に分布する割れ目の透水量係数そのものは比較的不確実性の小さいデータとして取り扱うことができる。しかし、FEC検層により検出できる透水性構造の透水量係数は10⁻⁸m²/s程度を下限値とするため、10⁻⁸m²/sより小さな透水性を有する構造の定量的なデータの不足が透水量係数分布の推定における不確実性の要因となり、それが遅延性能の評価結果に影響を与える結果となった。

- これらの結果は、移行経路の重ね合わせによる簡便な手法や第2次取りまとめに準拠した パラメータ値の設定などに依存した結果であるものの、調査の初期の段階から透水性構造 の抽出とその定量化は岩盤の遅延性能の評価に有効で、より低透水性の構造の抽出と定量 化が求められる。
- 低透水性区間の不均質性が評価できるデータを含めて割れ目の透水量係数分布を設定することは、岩盤の遅延性能を適切に評価する上で重要である。しかし、調査によって直接的に低透水性割れ目の分布特性を計測したデータを用いることができない場合、より低透水の割れ目の分布を仮定して割れ目の透水量係数分布を設定する必要がある。この場合、得られる遅延性能の評価結果には大きな不確実性が含まれる。
- より信頼性の高い評価結果を得るためには、低透水性の領域も含めて割れ目の透水量係数 を高い空間分解能で計測できる調査技術が必要であり、そのような調査技術は基本レイア ウトの検討のような地下施設の設計において除外すべき透水性割れ目を検出する際にも有 効である。

謝辞

本研究は、地質環境調査と性能評価の連携に関する会議(TM1)の場などを活用した議論を踏まえて実施したものである。ここに記して、議論に参加頂いた諸氏に謝意を表する。

参考文献

- JNC: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開 発第2次取りまとめ一",分冊3 地層処分システムの安全評価,核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-023, 1999.
- NUMO: "地層処分事業の安全確保(2010 年度版) 一確かな技術による安全な地層処分の 実現のために-", NUMO-TR-11-01, 原子力発電環境整備機構, 2011.
- JAEA: "超深地層研究所 地層科学研究基本計画", JAEA-Review 2010-016, 日本原子力 研究開発機構, 2010.
- 石原義尚,石黒勝彦,梅木博之: "Se-79の半減期の長期化による地層処分システムの性能 評価への影響",JNC TN8400 99-086,核燃料サイクル開発機構,1999.
- 5) 澤田淳,井尻裕二,坂本和彦,亘真吾:"亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行 解析",JNC TN8400 99-093,核燃料サイクル開発機構,1999.
- 下茂道人、山本肇、城まゆみ、山上順民、文村賢一、熊本創、五十嵐孝文、山本卓也: "DH-2 号孔における地下水の水理学的特性調査"、JNC TJ7440-2005-083、核燃料サイクル開発 機構、2005.
- (B) 鶴田忠彦,藤田有二,鐙顕正,彌榮英樹,冨士代秀之: "広域地下水流動研究におけるボー リング調査(DH-15 号孔)", JNC TN7400 2005-025,核燃料サイクル開発機構, 2005.
- 8) 魚住直己,村上真也,大石保政,村上秀紀: "超深地層研究所計画における試錘調査(MIZ-1 号孔)", JNC TJ7440 2005-091,核燃料サイクル開発機構,2005.
- 竹内真司,天野健治,藤田有二:"広域地下水流動研究における単孔式水理試験データ", JNC TN7450 2005-010,核燃料サイクル開発機構,2005.
- 10) 松岡清幸,竹内真司,新堀雄一:"電気伝導度検層を用いた水みちの検出例",物理探査学 会学術講演会講演論文集 116, pp.149-152, 2007.
- 竹内 真司,藤田有二: "超深地層研究所計画における単孔式水理試験データ", JNC TN7450 2005-011,核燃料サイクル開発機構, 2005.
- 12) Tsang, C.-F., P. Hufschmeid, and F. V. Hale : "Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method", Water Resour. Res., 26(4), pp.561-578, 1990.
- 13) Tsang, C.-F. and C. Doughty : "Multirate flowing fluid electric conductivity logging method", Water Resour. Res., Vol.39 No.12, 1354, 2003.
- 14) Doughty, C., and C.-F. Tsang: "BORE II—A code to compute dynamicwellbore electrical conductivity logs with multiple inflow/outflow points including the effects of horizontal flow across the well", Rep. LBL-46833, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, Calif., 2000.
- 15) Doughty, C., Takeuchi, S., Amano, K., Shimo, M. and Tsang, C.-F.: "Application of multirate flowing fluid electric conductivity logging method to well DH-2, Tono Site, Japan", Water Resour. Res., 41, W10401, doi:10.1029/2004WR003708, 2005.
- 16) Takeuchi, S., Amano, K., Takeuchi, R., Saegusa, H.: "Fluid electric conductivity logging: Useful application for characterization of water-conducting features", Proceedings of 36th IAH Congress, 2008.

 17) 三枝博光,瀬野康弘,中間茂雄,鶴田忠彦,岩月輝希,天野健治,竹内竜史,松岡稔幸, 尾上博則,水野崇,大山卓也,濱克宏,佐藤稔紀,久慈雅栄,黒田英高,仙波毅,内田雅 大,杉原弘造,坂巻昌工: "超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1 段階)研究成果報告書", JAEA-Research 2007-043,日本原子力研究開発機構,2007.

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本ì	単位
基个里	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

	100		
组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m ²
体	積五	立法メートル	m ³
速さ,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	数每	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	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度日	モル毎立方メートル	mol/m ³

第一の「「濃度」」の「ホルー」」の「加加」」 豊度 (a)、濃度 モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度 キログラム毎立法メートル g^{\dagger} 加加/m³ 度 カンデラ毎平方メートル cd/m²折率 (b) (数字の) 1 1 透磁率 (b) (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(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

	SI 組立単位						
組立量	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	ヨラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m			
立 体 牟	コテラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m ² /m ²			
周 波 数	ベルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹			
力	ニュートン	Ν		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	ビュール	J	N m	m ² kg s ⁻²			
仕事率, 工率, 放射束	モワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$			
電荷,電気量	ローロン	С		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	マアラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$			
電気抵抗	ī オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$			
コンダクタンフ	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$			
磁芽	ミウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$			
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹			
インダクタンフ	、ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$			
セルシウス温度	モルシウス度 ^(e)	°C		K			
光 東	モルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd			
照度	レクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd			
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹			
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²			
カーマ		сл <i>у</i>	0/11g	111 5			
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 相	カタール	kat		s ⁻¹ mol			
				0 11101			

(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

(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。
 (o)剤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、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、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、しばしば認った用語で"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

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	接頭語 記号		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	с			
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У			

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	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$				

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 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da			
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²				
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は				
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。				
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])				

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					
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポアフ	(P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≜ (10 ³ /4π)A m ⁻¹					
(a) 2 二変のCCC留位なしCIでは直接比較できないため 第号 [△							

3元系のCGS単位系とSI Cは 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						
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています