

核種移行評価上の岩盤と 緩衝材の境界の取り扱いに関する考察

An Influence of the Conceptualization between Host Rock and Buffer
on Nuclide Migration in Host Rock

澤田 淳 坂本 和彦

Atsushi SAWADA and Kazuhiko SAKAMOTO

バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 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

核種移行評価上の岩盤と緩衝材の境界の取り扱いに関する考察

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター
基盤技術研究開発部

澤田 淳, 坂本 和彦*

(2015年12月1日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性を評価する技術開発の一環として、岩盤と緩衝材の境界における核種移行概念に着目し、その境界のモデル化上の取扱いが核種移行解析結果に与える影響について事例的に検討した。具体的には、既報の報告書（JNC TN1400 99-023、以下「H12 レポート」という）の設定を参考に構築した3次元亀裂ネットワークモデルの中央に処分坑道を模擬した任意の長さの線オブジェクトを設定し、線オブジェクトの長さを H12 レポートと同じ 100m から、50m, 10m, 5m, 3m, 1m と変えて、線オブジェクトから下流側境界へ至る移行経路での地下水移行時間の分布がどのように変化するかについて粒子追跡解析により検討した。また、粒子追跡解析によって得られた地下水移行時間や移行距離などの移行経路情報を用いた核種移行解析により、Cs-135 を事例に、線オブジェクト長さの変化が核種移行の遅延効果の評価結果に与える影響を評価した。その結果、線オブジェクト長さの減少が核種移行率の減少に大きく寄与することがわかった。それに加えて、長さ 1m～10m 程度の空間分解能で透水量係数を測定して、透水量係数が高い区間には廃棄体を設置しないなどの対策を組み合わせることにより、さらに核種移行率が減少することがわかった。

An Influence of the Conceptualization between Host Rock and Buffer on Nuclide Migration in Host Rock

Atsushi SAWADA and Kazuhiko SAKAMOTO✧

Radioactive Waste Processing and Disposal Research Department
Nuclear Backend Technology Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 1, 2015)

An influence of the conceptual model for interface between host rock and buffer upon performance measures defined as the indices for evaluating repository safety was examined, as a part of the safety assessment methodology development programs for high level radioactive waste disposal. Three dimensional discrete fracture network model was made based on the parameters used in a previous report (e.g. JNC TN1400 99-023, hereinafter referred to as "H12 report"), and a line object mimicking disposal tunnel was realized at the center of the model. The groundwater travel time distribution along the migration paths from the line object to the downstream boundary was calculated by the particle tracking analysis. The variation of the groundwater travel time affected by the length of the line object was analyzed, changing from 100m used in H12 report to 50m, 10m, 5m, 3m and 1m, respectively. The influence on the retardation of nuclide migration was also studied. The case study for migration of Cs-135 shows that the shorter line object leads lower nuclide migration rate. Moreover, the nuclide migration rate could be decreased by taking additional measure, that waste package would not be allocated at relatively high permeable location detected by high spatial resolution (1m~10m) hydraulic tests at the pilot boreholes.

Keywords: High-level Radioactive Waste Disposal, Discrete Fracture Network Model, Particle Tracking Analysis, Groundwater Travel Time, Nuclide Migration Rate

✧ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに.....	1
2. 解析条件.....	3
3. 粒子追跡解析結果.....	7
4. 核種移行遅延効果に与える影響に関する考察.....	15
5. おわりに.....	20
参考文献.....	21

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis conditions.....	3
3. Results of particle tracking analysis	7
4. Discussion of an influence on retardation effect of nuclide migration	15
5. Conclusion.....	20
References.....	21

図リスト

図-1	本検討で対象とした亀裂ネットワークモデルの例	4
図-2	解析対象領域の中央に設定した線オブジェクト（青線）の概観図	5
図-3	地下水流動方向の概観図	5
図-4	モデル中央に配置した線オブジェクト（青線）の長さを換えたケース	6
図-5	粒子追跡法による移行経路抽出結果の例	8
図-6	地下水移行時間の累積確率密度 100mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布...	8
図-7	地下水移行時間の累積確率密度 50mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布.....	9
図-8	地下水移行時間の累積確率密度 10mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布.....	9
図-9	地下水移行時間の累積確率密度 5mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布.....	10
図-10	地下水移行時間の累積確率密度 3mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布....	10
図-11	地下水移行時間の累積確率分布 1mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布....	11
図-12	初期5%の粒子が到達する地下水移行時間の累積確率分布の比較	11
図-13	50%の粒子が到達する地下水移行時間の累積確率分布の比較	12
図-14	線オブジェクトを対象に算出した透水量係数と地下水移行時間の関係.....	14
図-15	地下水移行時間の累積分布とそれぞれの移行経路の核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in}	18
図-16	線オブジェクトの長さのケース毎の核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in}	18
図-17	線オブジェクトを対象に算出した透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のリアライゼーションの 地下水移行時間の抽出.....	19
図-18	リアライゼーション毎の線オブジェクトを対象に算出した透水量係数と核種移行率の 関係.....	19

表リスト

表-1	亀裂ネットワークモデル構築に用いたパラメータ値	3
表-2	核種移行解析に用いたパラメータ値一覧	17

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発における第2次取りまとめ[1]（以下では「H12 レポート」と呼ぶ）ではレファレンスケースモデル（一次元平行平板モデル重ね合わせ手法）を構築するために、200m×200m×200mの立方体領域を対象とした亀裂ネットワークモデルを用いた地下水流動解析と核種移行解析が実施されている（核燃料サイクル開発機構，1999，付録C [1]）。具体的には、長さ100mの処分坑道を透水方向に対して直行するようモデル中央に設定して、一定の動水勾配の条件下で定常状態を仮定した地下水流動解析と処分坑道から下流側境界に至る経路に沿った核種移行解析である。その際、処分坑道周辺には、坑道掘削の影響により坑道周辺部に高い透水性を有する領域（掘削影響領域）が一定の厚さで生じると仮定して、緩衝材と岩盤の境界部における水理モデルと核種移行モデルが設定されている。処分坑道の壁面に沿って水理的に連続性を有する透水ゾーンを設け、一定の厚さ（0.5m）で一定の透水係数（母岩の平均的な透水係数 10^{-10} m/s の10倍）を設定している。そして、緩衝材からの核種移行率を用いて処分坑道から下流側境界へ至る亀裂のネットワーク構造を対象に核種移行解析が行われている。その際、廃棄体1本に相当する緩衝材からの核種移行率を100mの長さの処分坑道に定置する廃棄体本数に相当する核種移行率に換算して、掘削影響領域に交差する亀裂部において下流側へ流出する地下水流量の比に応じて核種移行率を分配している。これは、掘削影響領域における核種の移行時間を遅延効果として考慮せず、少なくとも処分坑道100mに沿った方向の遅延効果は無視した設定となっている。また、処分坑道100mに交差する全ての亀裂は、廃棄体からの距離に関係なく核種移行経路として機能する可能性を有していることに相当する。このような設定は、処分場が特定されていない段階において、特に廃棄体の定置場所と母岩中における移行経路の透水性などの空間的な不均質性との関係を考慮せずに、母岩の遅延性能を簡便に評価する手法として優れている。しかしながら、処分坑道内の廃棄体を定置する場所毎の局所的な遅延性能を考慮できず、過度に保守的な設定となっている可能性がある。

スウェーデンの核燃料・廃棄物管理会社（SKB）やフィンランドのポシバ社（Posiva）はKBS-3V（処分孔縦置き）の処分概念に対して、①処分孔に交差する割れ目からの核種移行、②処分孔の上方に位置する坑道底部に発達する掘削影響領域からの核種移行、③坑道に交差する割れ目からの核種移行、の3種類の移行経路を想定して処分孔毎に①～③を抽出して評価する方法論を提示している[2]、[3]。このような手法においては、処分坑道周辺の移行経路として想定される母岩中の亀裂の水理物質移行特性をいかにして調査して個別の処分孔の評価に反映させるかが大きな課題となる[4]が、掘削影響領域における核種の瞬時混合などの仮定を必要とせず、処分孔毎に異なる母岩の性能を評価することが可能となる。そして、処分孔に期待する性能としてのある基準値との比較と、処分孔選別などの施工対策を組み合わせることでより高い安全裕度の確保を目指すことができる。

柴田ほか（2015）は、このような母岩の核種移行特性に対する不均質特性と廃棄体を定置する場所毎の遅延性能の関係について検討することを目的に、上記の亀裂ネットワークモデルに処分坑道を模擬した線オブジェクトを設定して、処分坑道から下流側境界へ至る移行経路を評価している[5]。その評価指標として地下水移行時間を用い、線オブジェクトの長さをH12レポートの設定と同様の100mだけではなく、50m、10m、5m、3m、1mと長さを変えてモデル中央に配置して、線オブジェクトからの地下水移行時間の変化を分析した。これは、100mの処分坑道に交差する全ての亀裂が移行経路として機能する可能性を有するというH12レポートの設定に対して、亀裂と交差する坑道の長さを小さくして廃棄体からの移行経路として機能する可能性を有する亀裂を絞り込んだ場合に、評価指標であ

る地下水移行時間に与える影響を検討したものである。その結果、廃棄体の定置間隔に近い数メートル間隔での移行経路の透水性に着目することで、地下水移行時間が小さくなる区間を識別でき、これらの区間を透水試験などの調査データから抽出できる可能性を示した。

本報告書では、上記の地下水移行時間を指標とした検討に、核種移行率を指標とした検討を加えて再整理したものである。具体的には、定常状態を仮定した核種移行の解析解を用いて地下水移行時間と核種移行率の関係を例示するとともに、その解を用いて上記の解析結果から母岩中における核種移行の遅延効果を推定した。さらに、得られた核種移行率から、処分坑道を模擬した線オブジェクトのスケールが母岩を対象とした核種移行遅延効果に与える影響について分析した。また、廃棄体を定置する場所毎の透水試験などの調査に基づく定置場所の選定などの対策を組み合わせることで、核種移行の遅延性能の評価結果により裕度を持たせる可能性があることを示した。

2. 解析条件

H12 レポートで用いたレファレンスケースモデルの一次元平行平板モデル重ね合わせ手法のベースとして、100mの長さの処分坑道を中央に配置した200m×200m×200mのブロック状領域を対象とした三次元亀裂ネットワークモデルを対象とした核種移行解析が行われている（核燃料サイクル開発機構 [1]; 澤田ほか, 1999 [6]）。亀裂ネットワークモデル構築に用いられたパラメータ値を表-1に、解析コードFracMan (Dershowitz et al., 2011 [7]) を用いて作成した亀裂ネットワークモデルの例を図-1に示す。亀裂ネットワークモデルは各パラメータについて設定された分布モデル（例えば、半径にべき乗分布モデルを設定）に基づき、統計的なサンプリングにより設定した割れ目の密度を満たす数の割れ目を作成する。そのため、設定した分布モデルを統計的には満足する割れ目特性の組み合わせを無限に作成することが可能となるが、本検討では100個の組み合わせ（リアライゼーションと呼ぶ）を作成して、これらを下記の解析に適用することとした。

表-1 亀裂ネットワークモデル構築に用いたパラメータ値

パラメータ	値	備考
割れ目の方位セット数	2セット	
方位分布	フィッシャー分布 セット1 : (tr, pl)=(0, 0), $\kappa=10$ フィッシャー係数=10 セット2 : (tr, pl)=(90, 0), $\kappa=10$	方位は面の法線方向 (pole) の北からの時計回り角度 (tr) と水平面からの傾き (pl) で表す。
半径分布	べき乗分布 べき乗数: 3, 最小半径: 1m	半径 7m~300m の範囲をモデル化
割れ目の密度	$P_{32} = 0.8$	ふたつの亀裂セットの総和
透水量係数	対数正規分布 対数平均: -9.99, 対数標準偏差: 1.07	
開口幅	透水量係数 T に相関 開口幅= $2 \times \sqrt{T}$	

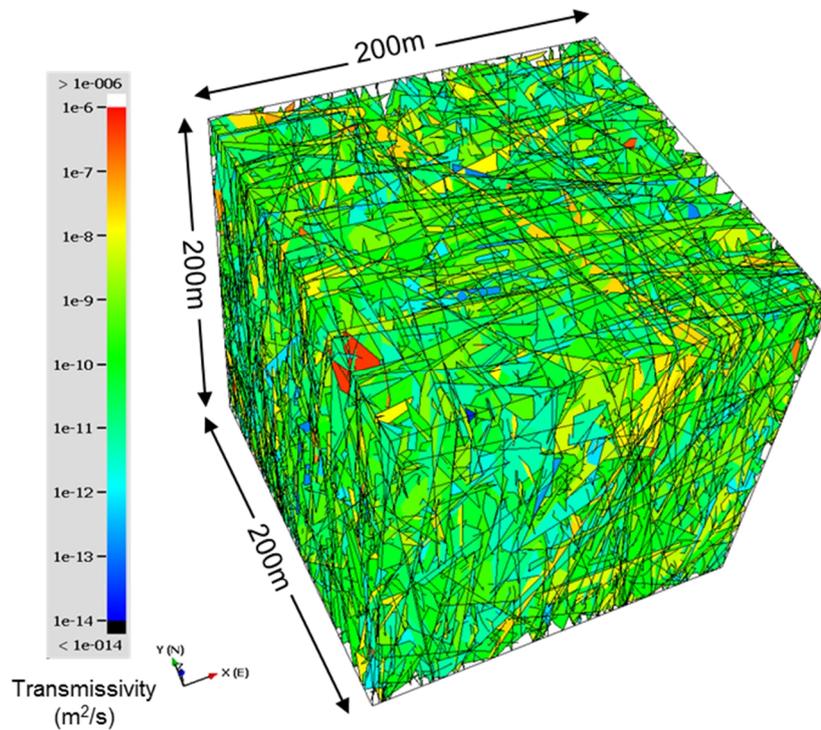


図-1 本検討で対象とした亀裂ネットワークモデルの例

200m×200m×200m の領域を対象とした鳥瞰図，色は割れ目の透水量係数を示す。

H12 レポートでは、200m×200m×200m の領域の中央に配置した 100m の長さの処分坑道に沿って掘削影響領域が発達すると仮定して、一定の物性値（掘削影響領域の厚さ 0.5m、母岩の平均的透水性の 10 倍の透水性）を設定した掘削影響領域をモデルに組み込んだ検討を行っている。本検討においては、単純化のために、処分坑道や処分孔等の形状、大きさ、掘削影響領域の幅や透水性などをモデルに設定しないこととした。代わりに、処分坑道を線オブジェクトでモデル化して、粒子追跡解析の粒子を投入するソース部に設定した（図-2）。すなわち、線オブジェクトに交差する割れ目に一定量の粒子を投入して、粒子追跡解析により下流側境界へ至る地下水移行経路を抽出した。線オブジェクトには 10,000 個の粒子を時間に対してパルス状に注入した。それらの粒子は線オブジェクトに交差する割れ目に分配される。その分配比には割れ目を流れる地下水の流量比を用いた。粒子追跡法では、地下水の流れに沿って経路をトレースするが、経路が枝分かれする場合には分岐点での地下水流量の比に応じて粒子が分配され、結果として粒子が分散する。この経路の枝分かれの流量分配による分散の効果を適切に扱うためには数多くの粒子を用いた解析が必要になる。本検討では、少なくとも線オブジェクトに交差する割れ目の流量差として 3 桁程度の差の影響まで検出できるように、10,000 個の粒子を用いることとした。

地下水流動解析に用いる境界条件は図-3 に示す方向に 0.01 の一定の動水勾配とするように、上流側境界面と下流側境界面のそれぞれに一定の固定水頭値を、残る側方の 4 面を不透水境界に設定した。亀裂ネットワークモデルを対象としたダルシー則に基づく浸透流解析コード MAFIC (Miller et al., 2001 [8]) により定常状態における地下水流動ベクトルを求めた後に、上述の線オブジェクトに 10,000 個の粒子を投入して粒子追跡解析を実施した。その際、線オブジェクトの長さとして図-2 に示す 100m のケースに加えて、50m, 10m, 5m, 3m, 1m と長さを変えた線オブジェクトをモデル中央に配置した

ケースを設定して (図-4), それぞれの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行経路を粒子追跡によって抽出して, それぞれの移行経路の地下水移行時間や移行距離などの情報を整理した。

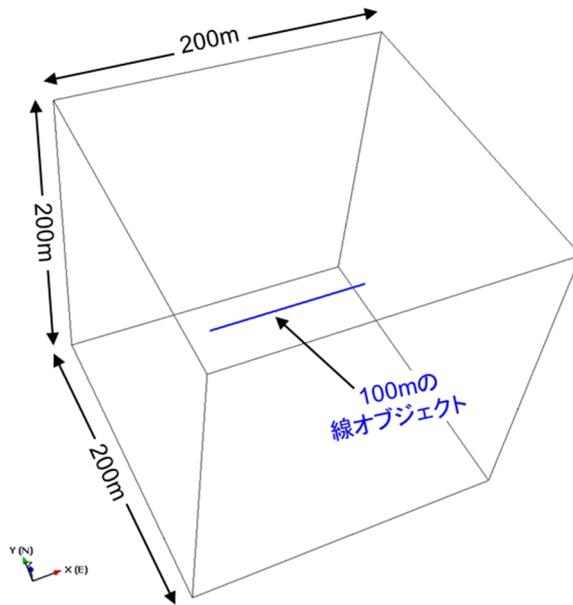


図-2 解析対象領域の中央に設定した線オブジェクト (青線) の概観図

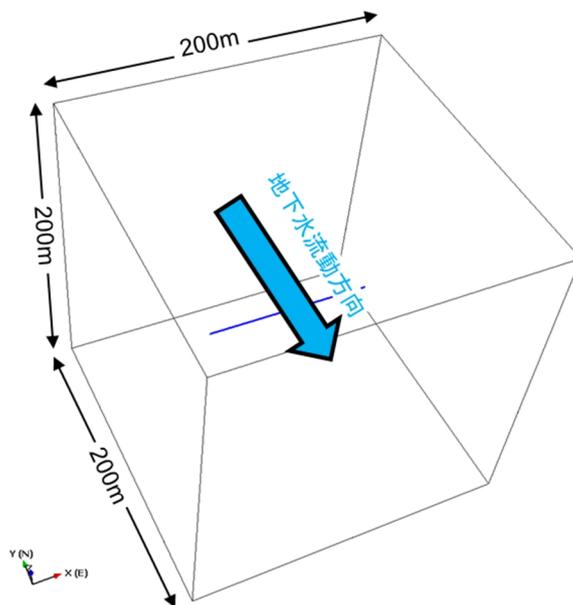
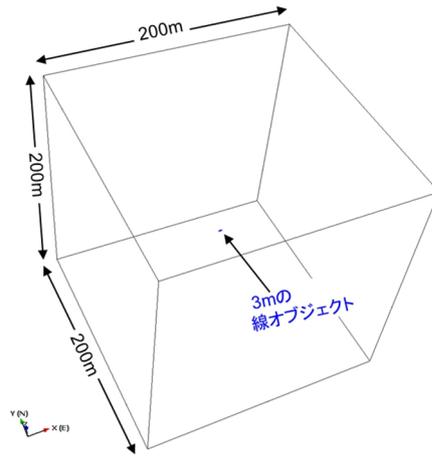
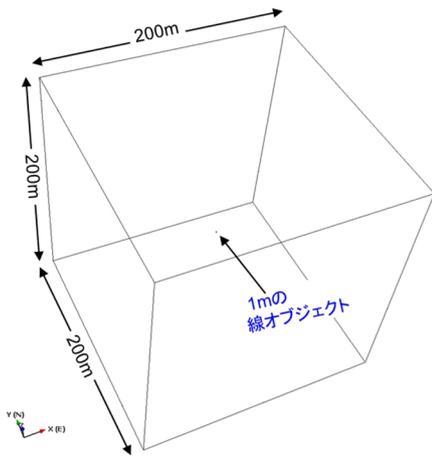
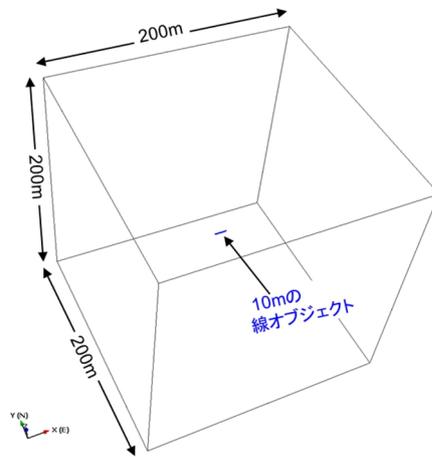
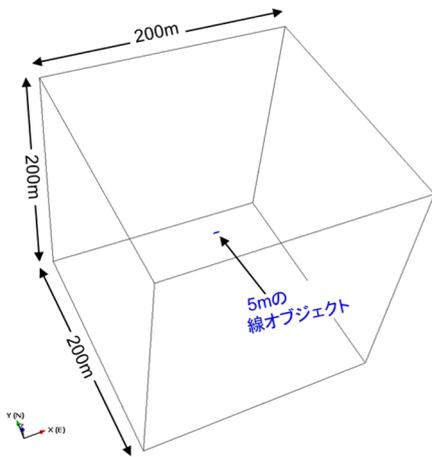


図-3 地下水流動方向の概観図

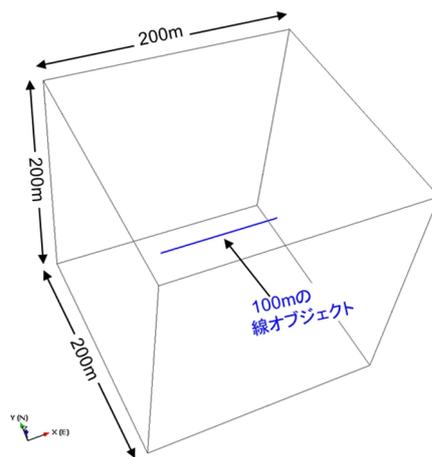
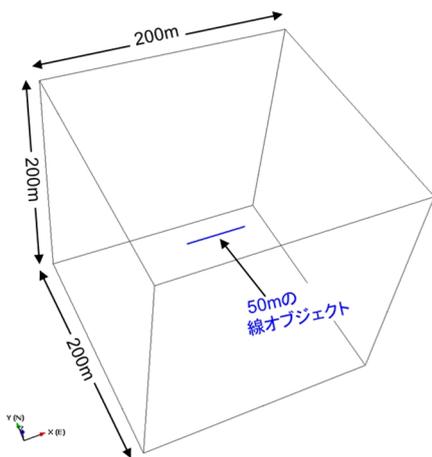
上流側の境界面から下流側の境界面へ0.01の動水勾配を設定, 他の側方の4面は不透水に設定



(a) 線オブジェクト長さ 1m のケース (b) 線オブジェクト長さ 3m のケース



(c) 線オブジェクト長さ 5m のケース (d) 線オブジェクト長さ 10m のケース



(e) 線オブジェクト長さ 50m のケース (f) 線オブジェクト長さ 100m のケース

図4 モデル中央に配置した線オブジェクト（青線）の長さを換えたケース

3. 粒子追跡解析結果

粒子追跡解析の結果の例を図-5 に示す。この図は、ひとつのリアライゼーションを用いて 10,000 個の粒子の粒子追跡解析により抽出した 100m の線オブジェクトから下流側境界へ至る移行経路の移行距離と地下水移行時間を求めた結果を示している。移行距離は百数十メートルから二百数十メートルの範囲に分布するが、地下水移行時間は数年から千数百年の広い範囲に分布していることがわかる。この地下水移行時間の分布に着目して、それを累積確率分布で表現したものが図-6 である。図-6 は解析の対象とした 100 個のリアライゼーションについて、それぞれの地下水移行時間の累積確率分布を図示している。100 個のリアライゼーションのうち 3 リアライゼーションは解析が収束しなかったため図-6 は 97 個のリアライゼーションの結果を示している。赤線は解析が収束した 97 個全てのリアライゼーションの平均値を示している。粒子追跡解析の粒子の出発点に設定している線オブジェクトの長さを 50m, 10m, 5m, 3m, 1m と変えたケースの地下水移行時間の分布を図-7 から図-11 に示す。全てのケースにおいて 100 個のリアライゼーションのうち 3 リアライゼーションは解析が収束しない結果となった。そのうち、線オブジェクトの長さが 10m のケースでは、2 リアライゼーションが 10m の線オブジェクトから下流側境界に至る移行経路が存在しない結果となった。同様に、5m のケースでは 24 リアライゼーション、3m のケースでは 39 リアライゼーション、1m のケースでは 71 リアライゼーションが線オブジェクトから下流側境界に至る経路が存在しない結果であった。これは、線オブジェクトの長さが短くなれば、100m 離れた下流側境界へ連続した経路へ交差する確率が相対的に小さくなるため、本モデルの一次元亀裂密度が約 0.3 本/m であることから線オブジェクトの長さが 3m, 1m のケースで下流側境界へ至る移行経路に交差する確率が極端に小さくなることは容易に想像できる。

また、全てのリアライゼーションの平均値は線オブジェクトの長さが増減しても大きくは変化していないように見えるが、線オブジェクトの長さが 100m から 10m のケースでは地下水移行時間の短い経路を有するリアライゼーションが見られるのに対して、線オブジェクトの長さが 5m 以下になるとそのような地下水移行時間初期のバラツキがなくなっている。図-12 と図-13 はそれぞれ、5%と 50% の粒子が下流側境界に至る地下水移行時間を全てのリアライゼーションで分析してその累積分布を整理して、線オブジェクトの長さを変えたケース毎にプロットしたものである。これらの図から、線オブジェクトの長さの変化は平均的な地下水移行時間（地下水移行時間の中央値）に与える影響は小さい（図-13）ものの、図-12 からは線オブジェクトの長さが 100m や 50m と長いケースでは相対的に早く下流側境界へ到達する経路（5 パーセントイル）の存在が顕在化していることがわかる。前者については、亀裂ネットワークモデルの特徴としてモデル領域を横断する大きさの割れ目が多く、その場合、地下水移行時間に影響を与えるの主要なパラメータは亀裂の透水量係数であることが理由として考えられる。すなわち、線オブジェクトが下流側境界へ到達する移行経路に交差して粒子追跡解析が成立するケースが統計的に十分な数になれば、平均的な地下水移行時間はある分布の幅に収束するためと考えられる。後者については、線オブジェクトの長さが長いケースの方が、統計的に高い透水性を有する移行経路に交差する確率が相対的に高くなり、その影響を受けているためと考えられる。

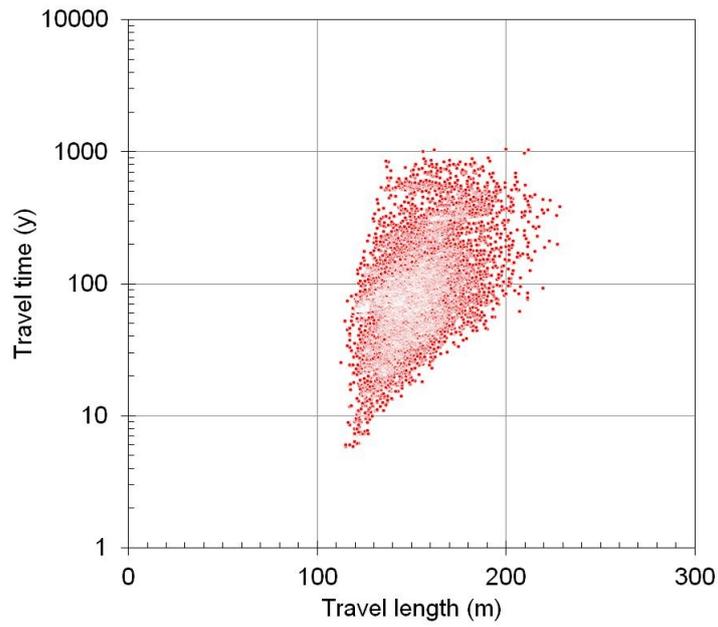


図-5 粒子追跡法による移行経路抽出結果の例
 100m の線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布
 1 リアライゼーションの結果

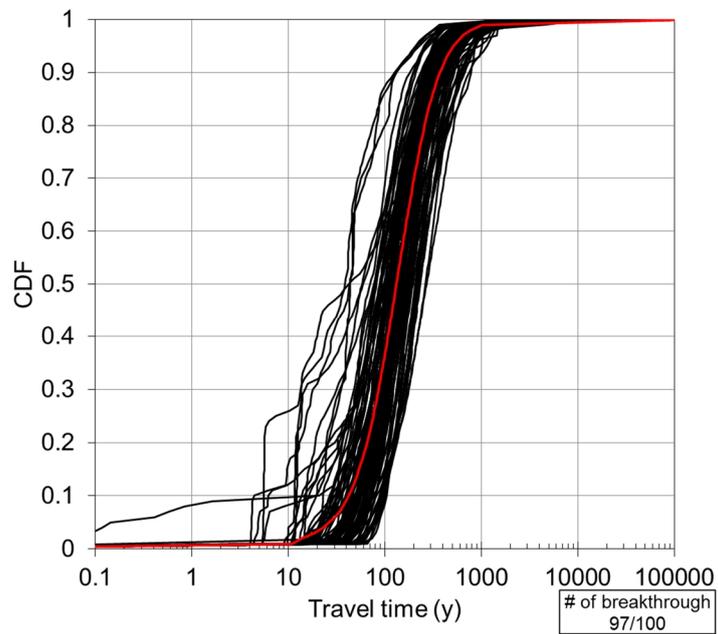


図-6 地下水移行時間の累積確率密度
 100m の線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布
 100 リアライゼーションのうち 97 リアライゼーションの結果
 赤線 : 97 リアライゼーションの平均値

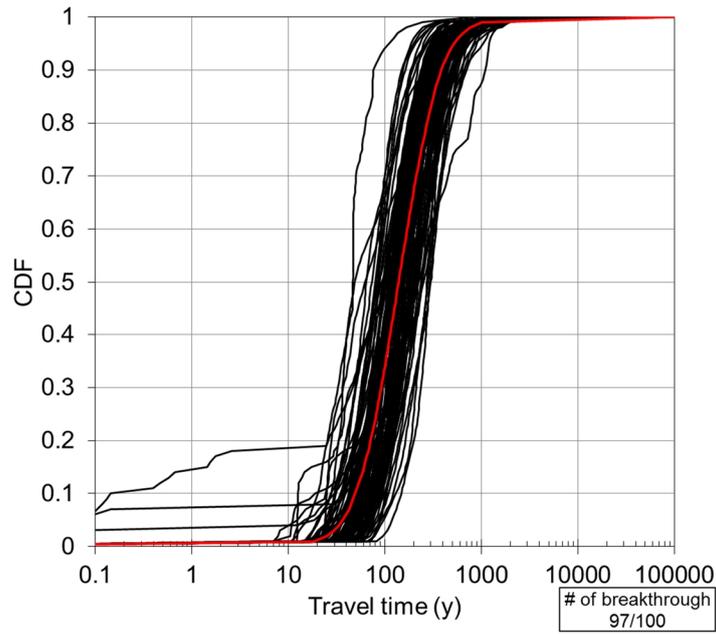


図-7 地下水移行時間の累積確率密度

50m の線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布
 100 リアライゼーションのうち 97 リアライゼーションの結果
 赤線 : 97 リアライゼーションの平均値

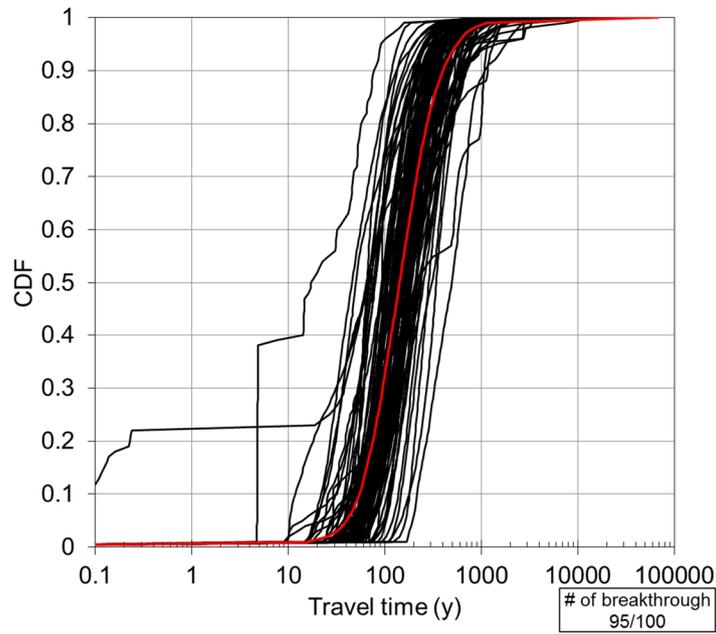


図-8 地下水移行時間の累積確率密度

10m の線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布
 100 リアライゼーションのうち 95 リアライゼーションの結果
 赤線 : 95 リアライゼーションの平均値

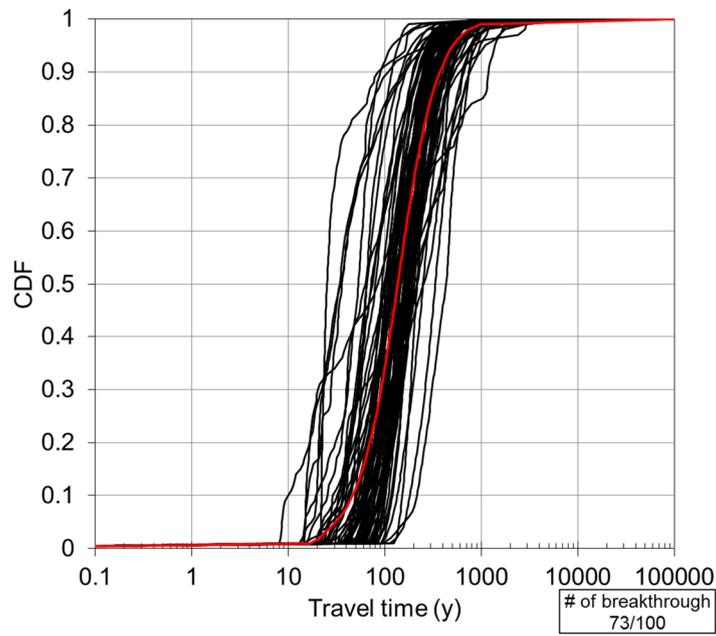


図-9 地下水移行時間の累積確率密度

5mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布

100リアライゼーションのうち73リアライゼーションの結果

赤線：73リアライゼーションの平均値

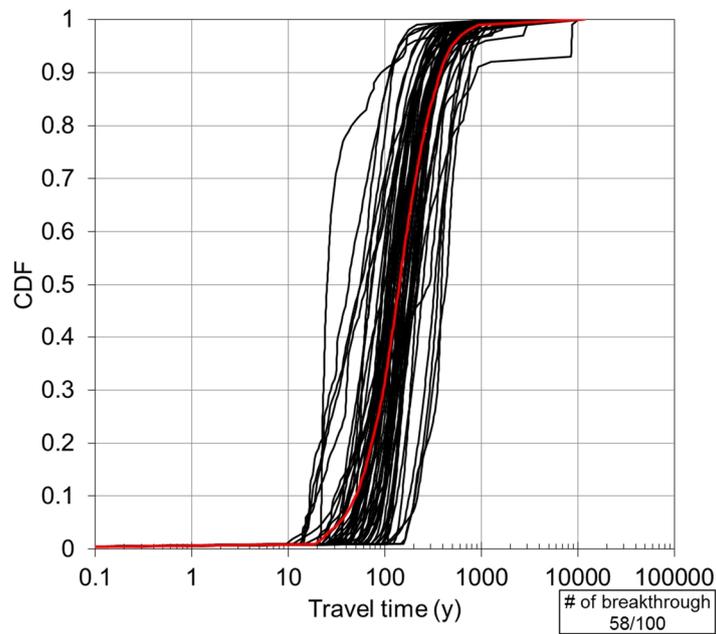


図-10 地下水移行時間の累積確率密度

3mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布

100リアライゼーションのうち58リアライゼーションの結果

赤線：58リアライゼーションの平均値

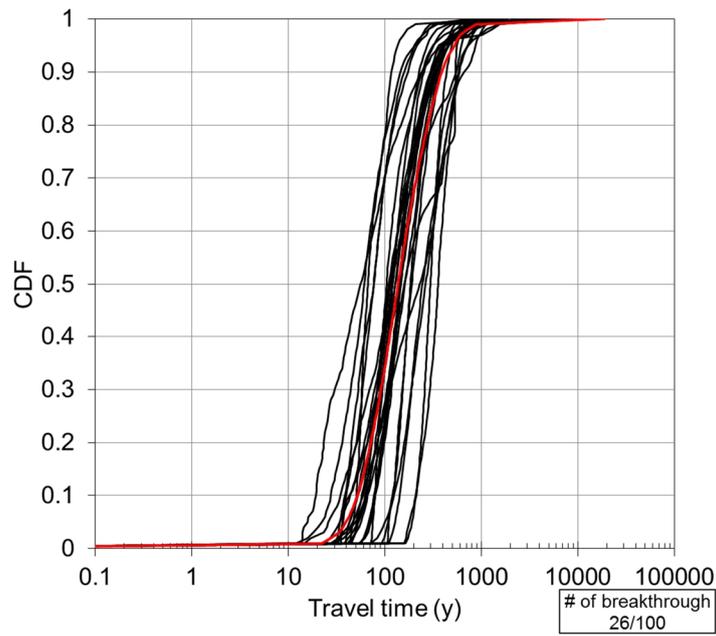


図-11 地下水移行時間の累積確率分布

1mの線オブジェクトから下流側境界へ至る移行距離と地下水移行時間の分布
 100リアライゼーションのうち26リアライゼーションの結果
 赤線：26リアライゼーションの平均値

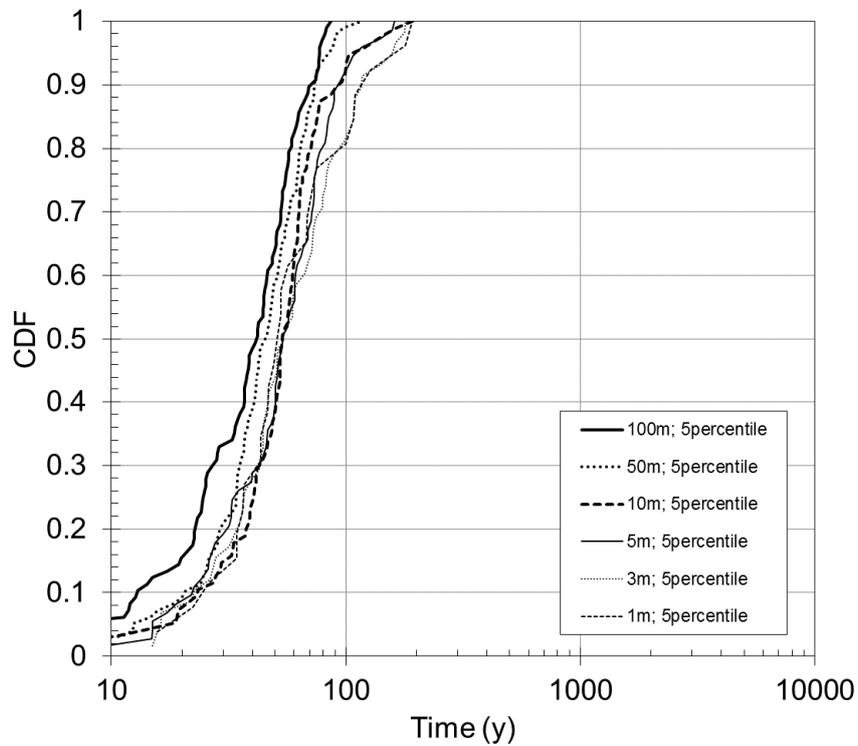


図-12 初期5%の粒子が到達する地下水移行時間の累積確率分布の比較

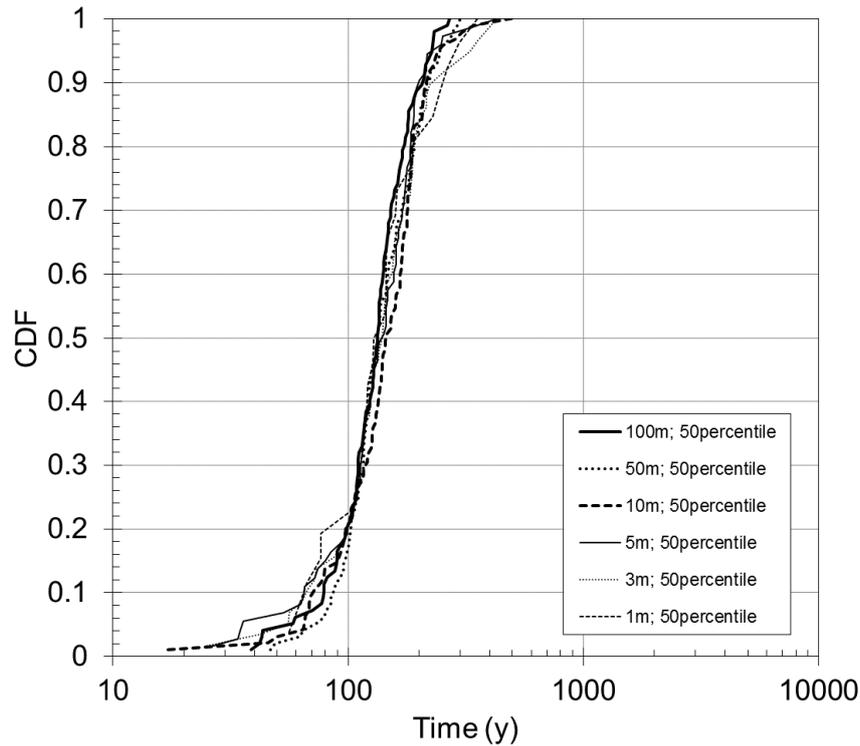


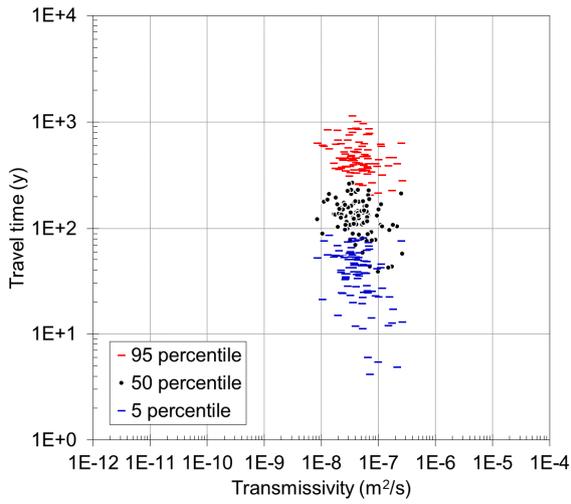
図-13 50%の粒子が到達する地下水移行時間の累積確率分布の比較

それぞれの線オブジェクトに交差する割れ目の透水性を分析するために、1m, 3m, 5m, 10m, 50m, 100m の線オブジェクトを透水試験のボーリング孔に相当すると仮定し、一定の水頭差を与えた模擬的な透水試験から、線オブジェクトに交差する割れ目のネットワーク構造の透水量係数を求めた。具体的には、亀裂ネットワークモデルの全ての外側の境界条件として 1m の水頭を、ボーリング孔と想定した線オブジェクトに 0m の水頭を設定して、定常状態の浸透流解析を行った。ボーリング孔と想定した線オブジェクトへの湧水量 Q と水頭差 Δh から次式の Thiem の平衡式から透水量係数 T を求めた。

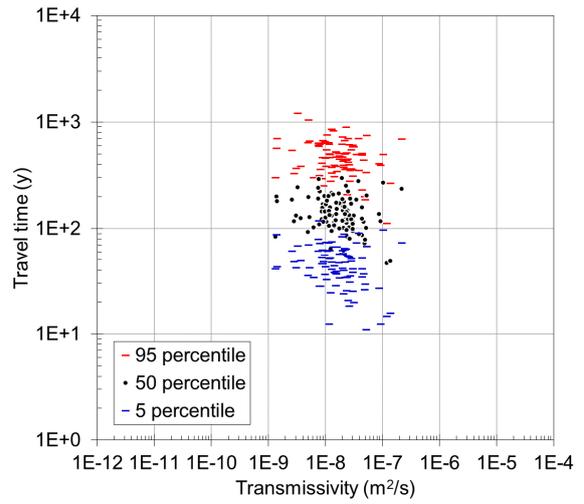
$$T = \frac{Q \ln(R/r)}{\Delta h \cdot 2\pi}$$

ここで、 R は影響半径、 r はボーリング半径を表す。ここで、影響半径 $R=30\text{m}$ とボーリング半径 $r=0.05\text{m}$ を仮定することで $\ln(R/r)/2\pi \approx 1$ が得られ、比湧水量 $Q/\Delta h$ を透水量係数 T に近似できるとした (Sawada et al., 2000 [9])。上記により求めた線オブジェクトに交差する割れ目の透水量係数を用いて、粒子追跡解析により算出した地下水移行時間を分析した。図-14 は、線オブジェクトの長さ毎に線オブジェクトに交差する割れ目ネットワーク構造の透水量係数と線オブジェクトからの地下水移行時間の関係を示している。具体的には、リアライゼーション毎に、線オブジェクトを対象に算出した透水量係数とその線オブジェクトを出発点とした粒子追跡解析による地下水移行時間の 5 パーセンタイル (初期 5% の粒子が下流側境界へ到達する時間)、50 パーセンタイル (50% の粒子が下流側境界へ到達する時間)、95 パーセンタイル (95% の粒子が下流側境界へ到達する時間) の関係をまとめた。線オブジェクトを対象に算出した透水量係数が大きくなると地下水移行時間の 5 パーセンタイルや 50 パーセンタイルが短くなる傾向が見てとれる。また、線オブジェクトが長くなるとリアライゼーション間のバラツキが

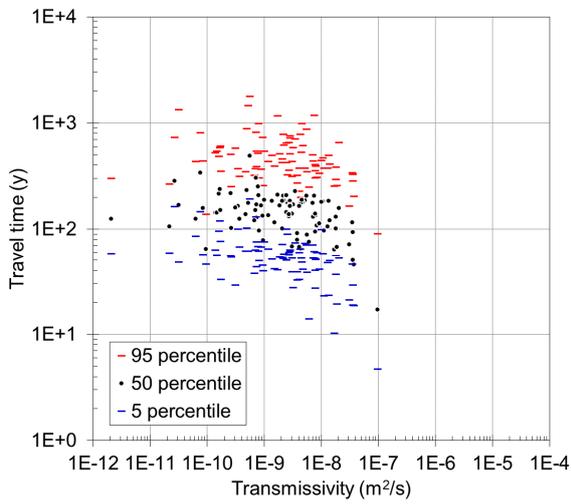
小さくなり 10^{-7} m²/s 前後に収束していくことがわかる。本検討の仮定の下では、長さ 1m~10m 程度の空間分解能で透水量係数を測定して、透水量係数が高い区間を他と区別することで、地下水移行時間が極端に短いケースを減少させることができると考えられる。



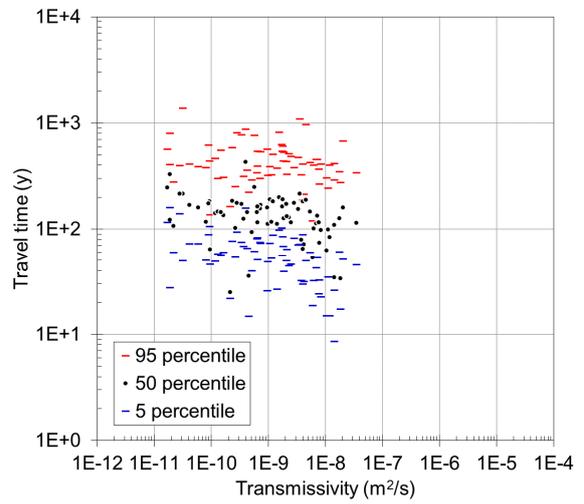
(a) 線オブジェクト 100m の場合



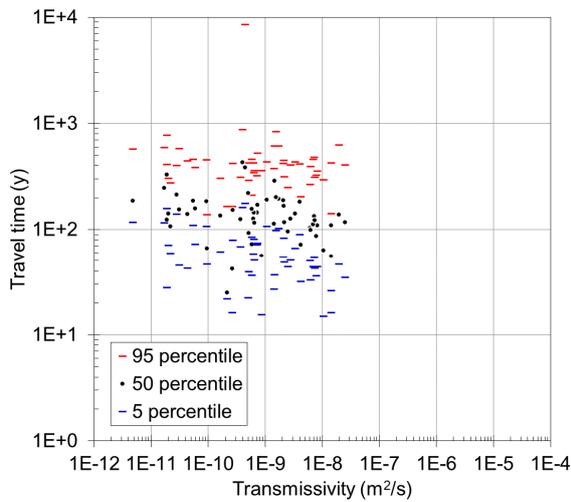
(b) 線オブジェクト 50m の場合



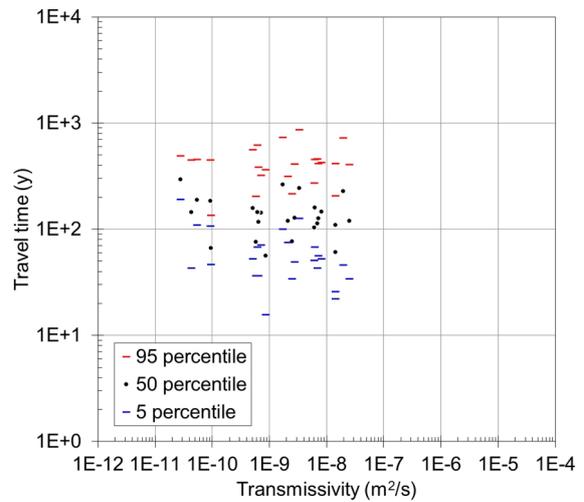
(c) 線オブジェクト 10m の場合



(d) 線オブジェクト 5m の場合



(e) 線オブジェクト 3m の場合



(f) 線オブジェクト 1m の場合

図-14 線オブジェクトを対象に算出した透水量係数と地下水移行時間の関係

4. 核種移行遅延効果に与える影響に関する考察

3章では、粒子追跡解析の結果について地下水移行時間をひとつの指標に分析を試みた。本章は、粒子追跡解析の結果得られた移行経路情報のうち、線オブジェクトから下流側境界へ至る地下水移行時間と移行距離を用いて核種移行遅延効果を推定した。核種移行遅延効果の算出には、亀裂中の移流、分散、マトリクス部への拡散とマトリクス部での核種の収着遅延効果を考慮した核種移行モデルについて、一定の流速やソースから一定濃度の核種の流入といった定常状態を仮定した場合の核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in} を求めた解析解（石原ほか，1999 [10]；澤田ほか，1999 [6]，早野・澤田，2013 [11]）を適用した。

$$\frac{\phi_{out}}{\phi_{in}} = \exp\left(\frac{Pe}{2} - \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + Pe \times \lambda_n \times t}\right)$$

$$Pe = \frac{v \times L}{D_L}$$

$$t = \frac{L}{v} \times \left[Rf_n + F \times \frac{\varepsilon \times Rd_n}{b \times \alpha} \times \tanh(\alpha \times p) \right]$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda_n \times Rd_n}{D_p^m}}$$

Pe	: ペクレ数 [-]
λ_n	: 核種 n の崩壊定数 [s^{-1}]
t	: 核種移行時間 [s]
v	: 亀裂内流速 [$m s^{-1}$]
L	: 亀裂内の移行距離 [m]
D_L	: 亀裂内分散係数 [$m^2 s^{-1}$]
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 [-] ($= 1 + \frac{\rho^m Kd_n}{\varepsilon}$)
ρ^m	: マトリクス部の密度 [$kg m^{-3}$]
Kd_n	: 核種 n の分配係数 [$m^3 kg^{-1}$]
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 [$m^2 s^{-1}$]

定常解析解を用いた核種移行解析では、H12 レポートのリファレンスケースで支配的かつ崩壊連鎖

の影響を受けない Cs-135 を対象とした。解析に用いたパラメータ値一覧を表-2 に記す。粒子追跡解析から求めた移行経路毎の移行距離 L と地下水移行時間から、それぞれの経路の流速を求めて亀裂内流速 v とした。それぞれの移行経路を対象に、核種移行遅延効果を算出した結果の例を図-15 に示す。図-15 は亀裂ネットワークモデルの 100 個のリアライゼーションのうち一つのリアライゼーションを対象に、粒子追跡解析の出発点として設定した 100m の線オブジェクトに 10,000 個の粒子を配置して算出したそれぞれの各移行経路の地下水移行時間、移行距離を解析解に適用して核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in} を求めたものである。図-15 の黒線は地下水移行時間の累積確率分布を、赤点はその地下水移行時間に対応する核種移行率を示す。核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in} が地下水移行時間に対してばらつきを呈しているのは、それぞれの移行経路の距離が一定ではないためである。地下水移行時間が 10 年程度の移行経路では核種移行の遅延効果は小さく核種移行率は 0.1 以上であるものの、地下水移行時間が 20～30 年を超えると核種移行率が 1/10 以下となり、それより遅い移行経路では核種移行率が極端に小さくなること分かる。それぞれの移行経路の核種移行率を積分して移行経路の総数で除するとこのリアライゼーションの核種移行率の平均値 (0.049) を得ることができる。

3 章での線オブジェクトの長さを変えたそれぞれのケースの全てのリアライゼーション (解析が収束した 97 ケース) について、同様に解析解を適用して核種移行率を求め、核種移行率の平均値を求めた。その際、解が収束しなかった 3 リアライゼーションは平均値の算出から除外したが、線オブジェクトから下流側境界へ至る移行経路が存在しないリアライゼーションは「核種の移行が認められない」として核種移行率を 0 と仮定した (すなわち、母岩として最大の遅延性能を発揮していることを仮定)。線オブジェクトの長さを変えた各ケースの核種移行率の平均値を図-16 に示す。線オブジェクトの長さ 100m のケースでは核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in} が 0.034 であったのに対して、50m～10m のケースで 0.018 に減少し、3m のケースで約 1/3 の 0.010、1m のケースで約 1/10 の 0.0036 に減少した。これは、線オブジェクト長さの減少に伴い地下水移行時間が短い移行経路に交差する確率が減少 (図-12 参照) することに加えて、線オブジェクトから下流側境界へ至る移行経路が存在しないリアライゼーション数が増加した効果によると考えられる。3m というスケールは H12 レポートにおける廃棄体の定置間隔 (横置きケースで 3.13m) に近いことを考慮すると、図-16 の結果から、廃棄体毎に核種移行の経路を設定することで H12 レポートに比べて母岩の局所的な不均質性が個々の廃棄体からの核種遅延効果に与える影響を考慮することが可能となり、その結果として核種移行遅延の評価結果により裕度を持たせることが可能になると考えられる。さらに、廃棄体を定置する場所毎の母岩特性の調査結果を考慮した対策を組み合わせることにより、より裕度を高めることが可能になると考えられる。例えば、図-17 は 3m の線オブジェクトのケースについて、線オブジェクトをボーリング孔と想定した透水試験の結果から、透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のリアライゼーション (5 リアライゼーション) を抽出して、図-10 と同様に図示したものである。透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上の移行経路の地下水移行時間を赤線で示した。これら 5 リアライゼーションは相対的に地下水移行時間が短い傾向を表すことがわかる。図-18 に本ケースの全てのリアライゼーションの線オブジェクトを対象とした透水量係数と、そこからの移行経路の核種移行率の関係を示す。両者は緩やかな相関があり、透水量係数が高いほど核種移行率が高くなる傾向を示している。図-18 では、線オブジェクトを対象とした透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上の移行経路を赤点で図示した。これらは、必ずしも核種移行率の最大値グループを示さないが相対的に核種移行率が高く、核種移行の遅延効果が相対的に小さい経路であることがわかる。例えば、透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上の透水量係数を有する区間 (ここでは、線オブジェクトの長さが 3m のケース) には廃棄体を定置しないという対策を仮定して、この対策に該当する 5 つのリアライゼーションには廃

棄体を定置しない場合を想定し、これらの核種移行率を除外して平均値を再計算すると、全ての平均値 0.011 (97 リアライゼーションの平均) に対して、0.0082 (92 リアライゼーションの平均) と核種移行率が約 2 割近く減少する結果となった。つまり、5/97 (約 5%) の確率の廃棄体定置位置に対する対策により約 2 割の核種移行率の減少が示された結果となった。

本検討では、処分坑道を模擬した線オブジェクトの長さを変えた粒子追跡解析から抽出された、移行経路の特性分布 (地下水移行時間の分布) の違いが核種移行率に与える影響について検討した。その結果、線オブジェクト長さの減少が核種移行率の減少に大きく寄与することを示した。これは、線オブジェクトの長さの減少に伴い、線オブジェクトに交差する割れ目のネットワーク構造のうち高い透水性を呈するものの確率が相対的に小さくなり、地下水移行時間が相対的に増えるためである。また、長さ 1m~10m 程度の空間分解能で透水量係数を測定して、透水量係数が高い区間について個別に廃棄体を設置しないなどの対策を組み合わせることさらに核種移行率が減少する可能性があることを示した。より具体的な検討を進めるためには、掘削影響領域の性状 (透水量係数の増加量, 増加範囲, 坑道に沿った連続性の有無など) の原位置での調査技術の整備と地下施設での調査による掘削影響領域の理解の促進に加えて、処分坑道や廃棄体の定置間隔などの具体化, パイロット孔などを活用した処分坑道の透水特性調査技術の整備を進めるとともに、これらの情報をいかに設計施工や処分システムの性能評価に結びつけるかの検討を進める必要がある。

表-2 核種移行解析に用いたパラメータ値一覧

パラメータ	値	備考
崩壊定数	$1.31 \times 10^{-7} \text{ 1/y}$	
分散係数	移行距離の 1/10 倍	
亀裂表面への収着による遅延係数	1	亀裂表面への収着遅延を無視
マトリクス拡散寄与面積率	0.5	
マトリクス部空隙率	0.02	
マトリクス部密度	2646 kg/m^3	$2700 \times (1 - \text{空隙率})$
分配係数	$0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$	
マトリクス拡散深さ	0.1 m	
マトリクス空隙中の拡散係数	$3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	

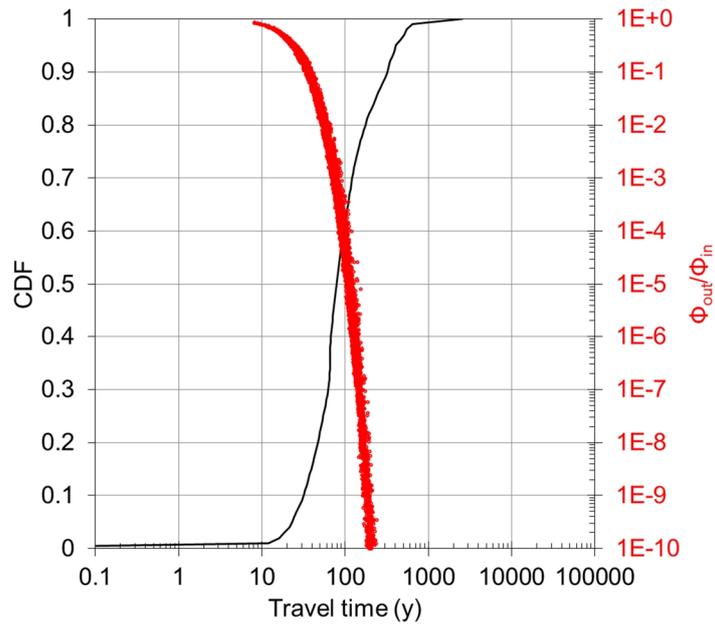


図-15 地下水移行時間の累積分布とそれぞれの移行経路の核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in}
 線オブジェクト 100m のケース
 1 リアライゼーションの結果

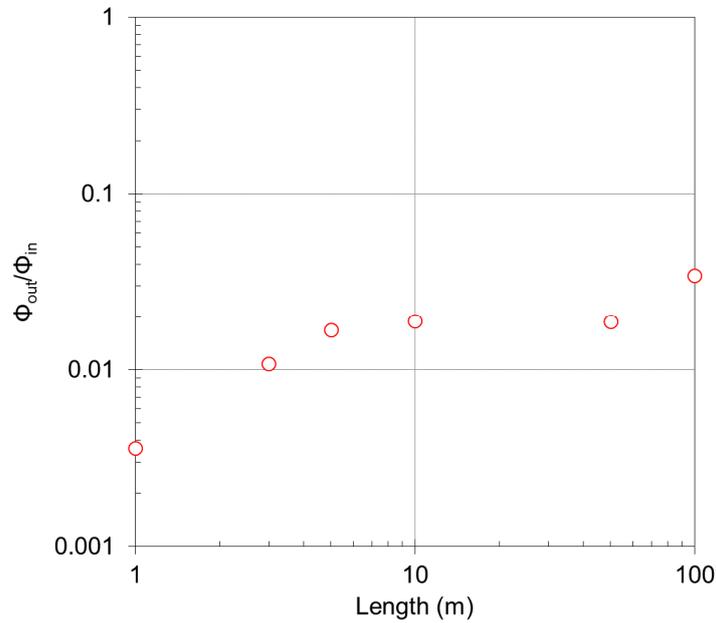


図-16 線オブジェクトの長さのケース毎の核種移行率 ϕ_{out}/ϕ_{in}
 全てのリアライゼーションの平均値

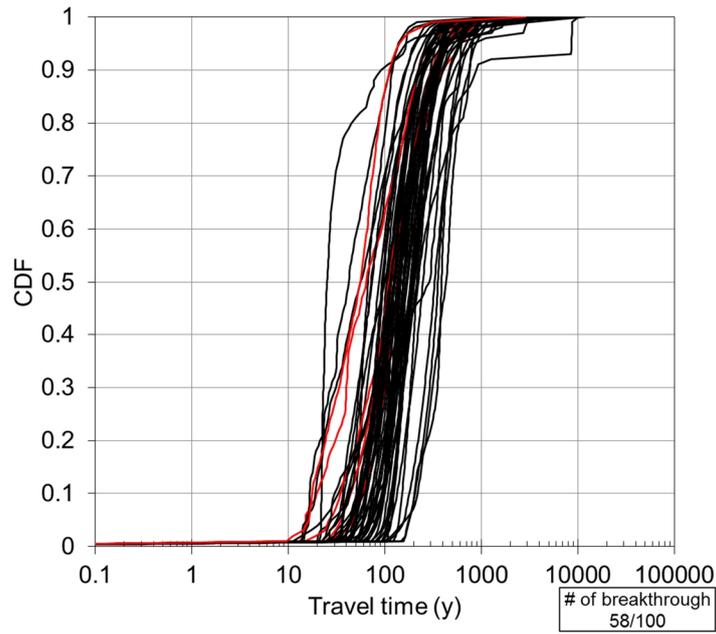


図-17 線オブジェクトを対象に算出した透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のリアライゼーションの地下水移行時間の抽出

線オブジェクト長さ 3m のケース

赤線：透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のリアライゼーション (5 リアライゼーション)

黒線：透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下のリアライゼーション

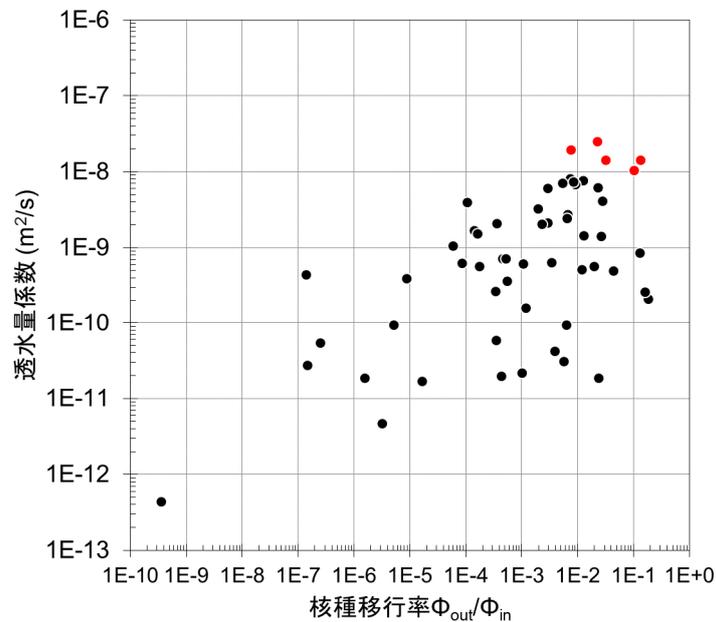


図-18 リアライゼーション毎の線オブジェクトを対象に算出した透水量係数と核種移行率の関係

線オブジェクト長さ 3m のケース

赤丸：線オブジェクトを対象に算出した透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のリアライゼーション

黒丸：透水量係数が $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 未満のリアライゼーション

5. おわりに

H12 レポートの設定を活用して構築した3次元亀裂ネットワークモデルを用いて、「掘削影響領域は坑道に沿って連続しない」仮定の基で、廃棄体の定置間隔などの工学的対策と評価項目の評価値の関係に関する検討事例を示した。具体的には、3次元亀裂ネットワークモデルの中央に処分坑道を模擬した任意の長さの線オブジェクトを設定し、線オブジェクトの長さをH12レポートと同じ100mから、50m、10m、5m、3m、1mと変えて、線オブジェクトに10,000個の粒子を配置した粒子追跡解析により下流側境界へ至る地下水移行時間がどのように変化するかについて検討した。また、粒子追跡解析によって得られた地下水移行時間や移行距離などの移行経路情報を用いた核種移行解析により、核種移行遅延効果に与える影響について検討した。具体的には、亀裂中の移流、分散、マトリクス部への拡散とマトリクス部での核種の収着遅延効果を考慮した核種移行モデルの定常状態を仮定した解析解を適用し、Cs-135を事例に、線オブジェクト長さの変化が核種移行の遅延効果の評価結果に与える影響を評価した。その結果、線オブジェクト長さの減少が核種移行率の減少に大きく寄与することを示した。また、長さ1m～10m程度の空間分解能で透水量係数を測定して、透水量係数が高い区間には廃棄体を設置しないなどの対策を組み合わせることさらに核種移行率が減少する可能性があることを示した。

より具体的な検討を進めるためには、掘削影響領域の性状（透水量係数の増加量、増加範囲、坑道に沿った連続性の有無など）の原位置での調査技術の整備と地下施設での調査による掘削影響領域の理解の促進に加えて、処分坑道や廃棄体の定置間隔などの具体化、パイロット孔などを活用した処分坑道の透水特性調査技術の整備を進めるとともに、これらの情報をいかに効果的に設計施工や処分システムの性能評価に結びつけるかの検討を進める必要がある。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 –地層処分研究開発第2次取りまとめ– 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 526p.
- [2] Selroos, J., Follin, S., SR-Site groundwater flow modelling methodology, setup and results, SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010, 119p.
- [3] Poteri, A., Nordman, H., Pulkkanen, V., Smith, P., Radionuclide Transport in the Repository Near-Field and Far-Field, POSIVA 2014-02, Posiva Oy, 2014, 252p.
- [4] SKB, Framework programme for detailed characterisation in connection with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel, SKB R-11-14, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010, 106p.
- [5] 柴田雅博, 澤田淳, 館幸男, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 三ツ井誠一郎, 北村暁, 吉川英樹, 小田治恵, 石寺孝充, 陶山忠宏, 畑中耕一郎, 仙波毅, 瀬尾俊弘, 亀井玄人, 黒澤進, 後藤淳一, 澁谷早苗, 後藤考裕, 窪田茂, 稲垣学, 守屋俊文, 鈴木覚, 石田圭輔, 西尾光, 牧内秋恵, 藤原啓司, 概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化,3; NUMO-JAEA 共同研究報告書(2013年度)(共同研究), JAEA-Research 2014-030, 2015, 457p.
- [6] 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, 1999, 58p.
- [7] Dershowitz, W., Lee, G., Josephson, N., FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation. User Documentation, Version 7. Golder Associates Inc., 2011, 347p.
- [8] Miller, I., Lee, G., Dershowitz, W., MAFIC, Matrix / fracture interaction code with head and solute transport, User documentation, version 2.0, Golder Associates Inc., 2001, 86p.
- [9] Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H., Doe, T.W., Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi Mine, Northeast Japan, Engineering Geology, vol. 56. 2000, pp.75-96.
- [10] 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性能評価への影響, JNC TN8400 99-086, 1999, 17p.
- [11] 早野明, 澤田淳, 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, JAEA-Research 2012-038, 2013, 32p.

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 ^(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
光照射量	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	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	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	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単位との数値的関係は、 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
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(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「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=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	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

