



人工バリア・天然バリア中の核種移行解析コード  
「TIGER」を不確実性解析に用いるための特性把握

The Property Investigation of the Numerical Code TIGER for the Uncertain Analysis

蛭名 貴憲\* 大井 貴夫

Takanori EBINA\* and Takao OHI

地層処分研究開発部門  
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

本レポートは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/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
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  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

人工バリア・天然バリア中の核種移行解析コード「TIGER」を不確実性解析に用いる  
ための特性把握

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

蛸名 貴憲\*, 大井 貴夫

(2008年1月8日 受理)

多種多様な地質環境において、処分システムの安全性に関する情報を網羅的に把握するためには、時間・空間的な不均一性や知識・情報の不十分さに起因するパラメータの不確実性を考慮した解析が必要となる。

核種移行解析コード「TIGER」は、ある時間で物性値を変化させつつ、ガラス固化体から断層までの核種移行解析を行なうことができる解析コードであり、より複雑な条件での不確実性解析を行なうために、このようなコードの特性を把握しておくことが重要になる。

そこで、本報告書では、まずガラス固化体から断層までの核種移行解析を TIGER で行なう場合に考えられる代表的な処理方法を複数作成し、それぞれの解析を実施し、前処理・後処理の作業量、解析時間などについて比較検討を行い、最適な処理方法に関する知見を整備した。その後、最適と考えられる処理方法を用いて、数百から数千ケースの不確実性解析を想定し、計算精度に関わる数値計算パラメータと解析時間との関係についての検討も行った。

さらに、不確実性解析での使用を想定し、TIGER による不確実性解析の入力ファイル作成支援ツールである「STRIDER」をこの解析用に改良し、動作確認を行った。

これらの検討の結果、複雑な地質環境を考慮した影響評価解析において、TIGER を用いた不確実性解析を実施する場合に最適な処理方法、数値計算パラメータ、ツールに関する知見を整理することができた。

## The Property Investigation of the Numerical Code TIGER for the Uncertain Analysis

Takanori EBINA\* and Takao OHI

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

(Received January 8, 2008)

In order to obtain the information concerning the safety of the geological disposal under various geological environments, the sensitivity analysis that considers the uncertainty of parameters resulting from the insufficiency of knowledge and information plays an important role.

The numerical code TIGER allows the physical and chemical properties within the system to vary with time in the radionuclide migration analysis from vitrified glass to rock and these function is useful for understanding the effect of the property change of each barrier in such sensitivity analysis.

Therefore, at this study, some typical processing methods with the engineered barrier system and the host rock were developed at fast, and through the comparison with the calculation time, the step of preprocessing and postprocessing, the most suitable method was considered.

After this consideration, the interrelation between the calculation accuracy and the calculation time at the most suitable method was examined for the purpose of using this method to the uncertain analysis.

In addition, the STRIDER that was the program to make the input file for the uncertain analysis with setting random parameter and do the preprocessing and the postprocessing, was improved for the uncertain analysis.

Through this consideration, the information of the best processing method, the calculation accuracy, and the analysis tool was arranged for an uncertain analysis using TIGER.

Keywords: HLW Disposal, Performance Assessment, Uncertain Analysis, Tiger

---

\* NESI Inc.

目 次

1. はじめに .....	1
2. 検討の手順とアプローチ .....	2
3. TIGER を用いたガラス固化体から断層までの処理方法について .....	4
4. TIGER で可能な処理方法とその検討 .....	5
4.1 人工バリアと母岩の全ての亀裂の解析を同時に行う処理方法③の検討 .....	11
4.2 処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の解析時間， 計算精度および解析に必要なファイルについての考察 .....	16
4.3 処理方法①および処理方法③（TIGER 本来の機能：図 5）による 流量分割についての検討 .....	21
5. 処理方法①における計算精度と解析時間に関する検討 .....	23
5.1 人工バリアの解析時間・精度に緩衝材の空間メッシュ分割数が与える影響 .....	25
5.2 母岩の解析時間・精度に亀裂本数，各亀裂のメッシュ分割数 およびマトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数が与える影響 .....	27
6. まとめ .....	36
参考文献 .....	38
付録 A 不確実性解析支援ツール「STRIDER」の改良と検証 .....	39
1. 不確実性解析支援ツール「STRIDER」の改良について .....	39
1.1 解析コード .....	39
1.2 評価対象核種 .....	39
1.3 STRIDER で変化させる人工バリアのパラメータ .....	39
1.4 STRIDER で変化させる天然バリアのパラメータ .....	39
1.5 その他のパラメータ .....	40
2. STRIDER での人工バリアと母岩における流速の計算方法 .....	40
2.1 人工バリアと母岩の流速の連成方法 .....	40
2.2 対数正規分布から亀裂の流速を計算するための内部計算式 .....	41
3. STRIDER の入出力ファイル .....	42
3.1 入力ファイル .....	42
3.2 出力ファイル .....	43
4. STRIDER を用いた解析の実行方法 .....	44
5. STRIDER を用いた解析の解析結果の検証 .....	46
5.1 パラメータ設定機能の動作確認 .....	46
5.2 パラメータのランダム設定機能の動作確認 .....	46
付録 B 直列した亀裂における流量のマスバランスを一致させることによる 核種放出率への影響 .....	49

Contents

1. Introduction .....	1
2. The procedure and the approach of the study .....	2
3. The analysis method from the engineered barrier system to the host rock using TIGER code .....	4
4. Study of the method to connect the engineered barrier system and the host rock with TIGER code .....	5
4.1 Study of the method 3 to analyze the engineered barrier system and all channel simultaneously .....	11
4.2 Study for the analysis time, accuracy and the preprocessing and postprocessing on the method 1 to 3(divide by the transmissivity:Fig.11) .....	16
4.3 Study of the method to distribute with flow rate of each channel using method 1 and method 3(divide by the transmissivity:Fig.11) .....	21
5. Study of the concern between the analysis accuracy and the analysis time on the method 1 .....	23
5.1 Study of the concern between the analysis accuracy and the mesh number on the engineered barrier system .....	25
5.2 Study of the concern between the analysis accuracy and the mesh number, the number of crack and the mesh number on the depth of matrix at host rock .....	27
6. Conclusion .....	36
References .....	38
Appendix A The improvement and the study of uncertain analysis supporting tool "STRIDER" .....	39
1. The improvement of uncertain analysis supporting tool "STRIDER" .....	39
1.1 Analytical codes witch "STRIDER" makes input file .....	39
1.2 Nuclides .....	39
1.3 Parameters for the engineered barrier system changed with STRIDER .....	39
1.4 Parameters for the host rock changed with STRIDER .....	39
1.5 Other parameters .....	40
2. The method to calculate the water velocity at the engineered barrier system and the host rock at STRIDER .....	40
2.1 The method for the relational calculation of the water velocity at engineered barrier system and the host rock .....	40
2.2 The formula to calculate the water velocity of each crack at the host rock using lognormal distribution .....	41

3.	The configuration of I/O file at STRIDER .....	42
3.1	Input files .....	42
3.2	Output files .....	43
4.	The analysis method using STRIDER .....	44
5.	The verification of analysis using STRIDER .....	46
5.1	The verification of parameter setting function .....	46
5.2	The verification of parameter random set function .....	46
Appendix B The study of the effect to the nuclide release rate		
	by accord with two channels math balance .....	49

図目次

図 1	検討手順のフロー	2
図 2	H12 レポートにおける核種移行解析モデルを TIGER で行うための処理方法	4
図 3	人工バリアと母岩，断層の解析を個別に行う処理方法①	7
図 4	人工バリアと母岩，断層の解析を別々に 行う処理方法②（母岩のすべての亀裂を同時に解析）	8
図 5	人工バリアと母岩，断層の解析をすべて同時に行う処理方法③	8
図 6	EBS-JUNCTION に複数のチャンネルを並列に接続した場合の人工バリアから チャンネルへの移行量の分割（チャンネルの流量比に応じて分配）	11
図 7	13 本亀裂とした場合の各亀裂の確率密度と透水量係数のグラフ	12
図 8	透水量係数の頻度分布に応じて，人工バリアからの移行量を分配するモデル	13
図 9	透水量係数の頻度分布を Channel A に 流量として与えた場合の検証グラフ（Cs-135）	14
図 10	接続されたチャンネル同士で流量が違う場合の JUNCTION での流量の処理例	15
図 11	亀裂の確率密度に応じて人工バリアからの移行量を分配するモデルの改良版	15
図 12	処理方法①と処理方法③(透水量係数分配：図 11)による 人工バリアからの放出率の比較	17
図 13	処理方法①～③(透水量係数分配：図 11)の母岩外側からの 放出率の比較グラフ（核分裂生成物系列）	18
図 14	計算精度を低くした場合の処理方法①～③(透水量係数分配：図 11)による 母岩外側からの放出率の比較グラフ（核分裂生成物系列）	20
図 15	流量分割を行なった場合の処理方法①と 処理方法③(TIGER 本来の機能：図 5)による解析結果の比較	22
図 16	緩衝材の空間メッシュ分割数の違いによる人工バリアからの 放出率の比較グラフ（核分裂生成物系列のみ）	26
図 17	処分後 2000 年で緩衝材への収着分配係数を 3 桁増加させた解析結果	27
図 18	亀裂本数の違いによる母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	28
図 19	透水量係数を 3 桁遅くした場合の亀裂本数の違いによる 母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	29
図 20	処分後 2000 年で亀裂のダルシー流速を 3 桁減少させた解析結果	30
図 21	亀裂の空間メッシュ分割数の違いによる母岩外側からの 放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	31
図 22	透水量係数を 3 桁遅くした場合のメッシュ分割数の違いによる 母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	32
図 23	処分後 2000 年で亀裂のダルシー流速を 3 桁減少させた解析結果	33



図 24	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数の違いによる 母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	34
図 25	透水量係数を 3 桁遅くした場合のメッシュ分割数の違いによる 母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）	35
付図 A-1	透水量係数分布から頻度分布を求めるための区間分割例	41
付図 A-2	G1A.p および G1B.p のパラメータ設定サンプル	43
付図 A-3	STRIDER の実行から解析までの流れ図	45
付図 A-4	STRIDER が設定した透水量係数分布の対数平均値の一覧	47
付図 A-5	透水量係数分布の対数平均値を-10.99~-9.99 まで変動させた解析結果	48
付図 B-1	処理方法①および処理方法③（TIGER 本来の機能：図 8）による Cs-135 の解析結果の比較(Channel B1~5)	50
付図 B-2	処理方法①および処理方法③（TIGER 本来の機能：図 8）による Cs-135 の解析結果の比較（Channel B6~13）	50
付図 B-3	Channel A のみの解析結果と Channel A と Channel B を接続した場合の Channel A からの放出率の比較(Cs-135)	51
付図 B-4	解析ケース①と解析ケース②における Cs-135 の Channel A からの放出率の比較	52

表目次

表 1	解析に用いた核種 .....	9
表 2	解析に用いた数値計算パラメータの一覧とパソコンのスペック .....	9
表 3	解析に用いた物性値 .....	10
表 4	人工バリアから複数の亀裂への移行率を設定するために, 仮想的なチャンネル Channel A に設定したパラメータ一覧 .....	14
表 5	各処理方法で設定した人工バリアの数値計算パラメータ .....	16
表 6	各処理方法で設定した天然バリアの数値計算パラメータ .....	18
表 7	処理方法①～③(透水量係数分配：図 11)の解析時間の一覧 .....	19
表 8	処理方法①～③(透水量係数分配：図 11)の解析ファイル数の一覧 .....	19
表 9	計算精度を低くした場合の処理方法①～③(透水量係数分配：図 11) による解析時間の比較 .....	21
表 10	人工バリアから亀裂への放出率を流量分割するための物性値 .....	22
表 11	流量分割を行なった場合の処理方法①と処理方法③(TIGER 本来の機能：図 5) による解析時間および解析ファイル数の一覧 .....	23
表 12	計算精度および解析時間に影響を与える数値計算パラメータ .....	24
表 13	時間変化させた物性値と物性値を変化させた時間 .....	25
表 14	緩衝材の空間メッシュ分割数とそれに応じた人工バリアの解析時間 .....	25
表 15	亀裂本数を変化させた場合の解析時間（母岩のみ）の比較 .....	28
表 16	亀裂の空間メッシュ分割数の違いによる解析時間の比較 .....	30
表 17	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数の違いによる解析時間の比較 .....	33
付表 A-1	STRIDER で変化させる人工バリアのパラメータ .....	39
付表 A-2	STRIDER で変化させる天然バリアのパラメータ .....	40
付表 A-3	STRIDER で用いる数値計算パラメータ一覧 .....	40
付表 A-4	STRIDER の入力ファイル一覧 .....	42
付表 A-5	STRIDER の出力ファイル一覧 .....	43
付表 A-6	解析プログラム一覧 .....	44
付表 A-7	解析結果ファイル一覧 .....	44
付表 A-8	各亀裂の流速に関わるパラメータの解析結果と EXCEL による計算結果の比較 .....	46
付表 B-1	Channel B の各亀裂内のダルシー流速, チャンネル断面積および亀裂内流量 .....	49
付表 B-2	解析ケース①および解析ケース②で設定したパラメータ一覧 .....	52

## 1. はじめに

多種多様な地質環境において、処分システムの安全評価に関する情報を網羅的に把握するためには、時間空間的な不均一性や知識・情報の不十分さに起因するパラメータの不確実性を考慮した解析が必要となる。「地層処分研究開発第2次取りまとめ」(核燃料サイクル開発機構, 1999<sup>1)</sup>)以下、H12 レポートという)の安全評価では、地下水シナリオにおける処分システムの長期挙動に関する時間変化については、隆起・侵食などの一部の変動シナリオを除き、時間変化を初めから見込んだ保守的な一定のパラメータの設定により、取り扱うことを基本とした。

一方、今後の評価においては、実際の地質環境の情報に基づく現実的な評価を行なう観点から、時間変化を考慮した不確実性解析手法の適用が求められており、このような対象に対する解析を行なう場合、相当数のパラメータが評価の対象となるため、効果的に精度の高い解析結果が得られる処理方法が必要となる。

核種移行解析コード「TIGER」(Transport In Geochemically Evolving Region) (三原ほか, 2004<sup>2)</sup>)は、ある時間で物性値を変化させつつ、ガラス固化体から主な地下水移行経路となる処分場下流側の鉛直に地表にまで達する大規模断層破碎帯(以下、断層という)までの解析を行なうことができる解析コードであり、これまでの安全評価において多数の実績を有する(例えば H12 レポート<sup>1)</sup>における隆起・侵食などの変動シナリオや、「TRU 第2次取りまとめ」(電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, 2005<sup>3)</sup>)。

また、TIGER では人工バリアや天然バリア、岩石基質部中などの任意の場所における核種量を出力できるため、確率論的シミュレーションプラットフォーム「GoldSim」(Golder Associates, 2001<sup>4)</sup>)によって作成された核種移行解析モデルなど、他の核種移行解析コードと比べて、詳細な評価が行なえるというメリットがある。

この解析コードを、ある時間で物性値が変化するような複雑な条件での不確実性解析に適用するため、特性を把握し効率的に解析を実行できる方法について検討しておく必要がある。

TIGER では、母岩や断層中の移行経路は、チャンネルと呼ばれ、物性値の異なる複数のチャンネルを指定できる特徴がある。さらに、ガラス固化体、人工バリア、掘削影響領域において、別の核種移行解析コードで得られた核種のフラックスを TIGER に取り込んで母岩および断層中の核種移行解析を行うこともできる。これらの解析については、各領域の接続の仕方によって、ガラス固化体から断層まで一度に解析を行うことも、それぞれを個別に行うこともできる。このように、解析領域の接続方法や亀裂の重ね合わせといった処理において柔軟な対応が可能である半面、それぞれの処理方法には利点、欠点がある。例えば、人工バリアと天然バリアを一度の解析で行うような処理方法の場合は、ファイルの管理や解析条件の設定が簡単になる。しかし、異なる特性をもつ人工バリアと天然バリアの解析を同時に行うため、解析の精度をそろえるための時間メッシュの調整などにより、個別に解析を行うよりも解析時間が余計にかかってしまう。このように、TIGER における

処理の簡略化と解析時間はトレードオフの関係にある場合があり、多数のパラメータの変動を考慮した数百ケース～数千ケースといった解析を行う場合は、効率的な解析を実施するための最適な処理方法について十分に検討しておく必要がある。さらに、計算精度に影響する人工バリアや天然バリア、断層といった解析領域の分割数や数値計算パラメータと解析時間もトレードオフの関係にあり、処理方法に合わせたパラメータ設定が重要となる。

そこで、本報告書では **TIGER** の特性を把握するために、このような **TIGER** による処理方法や計算精度に影響を与えるパラメータについての検討を行う。第 2 章に検討手順とアプローチ方法を述べる。

## 2. 検討の手順とアプローチ

図 1 に、検討手順のフロー図を示す。

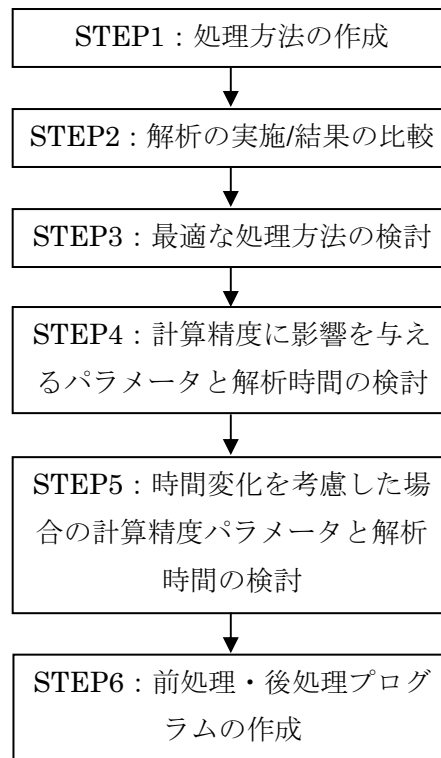


図 1 検討手順のフロー

**STEP1** : **TIGER** を用いたガラス固化体から断層までの核種移行解析の処理方法を複数作成する。

**STEP2** : **STEP1** で作成した処理方法を用いて解析を実施し、正常に解析を行えるか検証する（解析に用いた核種・パラメータについては後述）。

**STEP3** : それぞれの処理方法で、前処理・後処理の作業量、解析時間といった利点・欠点があるため、不確実性解析において重要と考える以下の要件を満たしているか検討を行い、**TIGER** を用いる場合の最適な処理方法に関する知見を整備する。

- 数百～数千ケースの解析を行なう場合に解析時間は十分に許容できる時間か（1 ケースあたり数分程度）？
- 前処理・後処理の作業量（2～3 ステップ程度）、解析に必要なファイル数（1 ケースあたり 100 個、数十 MByte 程度）は少ないか？多い場合、処理プログラムでカバーできるか？
- 不確実性解析における放出率の評価（最大放出率や総線量による評価）において、極端に誤差が大きくなるような解析結果になっていないか？

**STEP4** : これらの検討で得られた不確実性解析に最適と考えられる処理方法について、計算精度に影響を与えるパラメータと解析時間および解析結果の精度の関係について以下の観点から検討を行う。

- 数百～数千ケースの解析を行なう場合に解析時間は十分に許容できる時間か？
- 不確実性解析において想定される放出率の変動範囲内において、最大放出率や総線量の誤差が極端に大きくなるような計算精度になっていないか？

**STEP5** : 物性値を時間変化させる場合の、計算精度に影響を与えるパラメータと解析時間および解析結果の精度の関係について、放出率の変化が大きい増加部分および低下部分と定常状態の 3 箇所物性値を変化させ、**STEP4** と同じ観点から検討を行う。

STEP6 : これらの検討で得られた処理方法を用いた不確実性解析の前処理・後処理を効率的に行なうため、後処理プログラムの作成、 **TIGER** による不確実性解析の入力ファイル作成支援ツールである「**STRIDER**」(小山田ほか, 2000<sup>5)</sup>) (解析コードの入力パラメータをランダムに設定し、指定した数の解析ケースを作成するツール。解析コードや処理方法が変更になった場合はそのモデルに合わせて改良しなくてはならない。) の改良を行い、動作確認を行う。なお、この検討については付録 A に記載する。

### 3. **TIGER** を用いたガラス固化体から断層までの処理方法について

ここでは、H12 レポートと同様の解析体系の対象として、パラメータの時間変化を考慮でき、今後の感度解析での使用が想定される **TIGER** の特性を把握することとする。H12 レポートのレファレンスケースにおいては、ガラス固化体、人工バリア、掘削影響領域の解析は「**MESHNOTE**」(Wakasugi et al, 1999<sup>6)</sup>)を、天然バリアの母岩、断層の解析については「**MATRICES**」(白川ほか, 2000<sup>7)</sup>)を用いている。**TIGER** を用いて同様の体系の解析を行う場合の処理方法の例を図 2 に示すとともに、「**MESHNOTE**」, 「**MATRICES**」との違いを簡便に記述する。なお、**TIGER** での各領域の数学モデルの説明については、「パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析コード(**TIGER**)の開発」(三原ほか, 2004<sup>2)</sup>)に記載されているため、ここでは以後の検討において必要な情報のみを記載する。

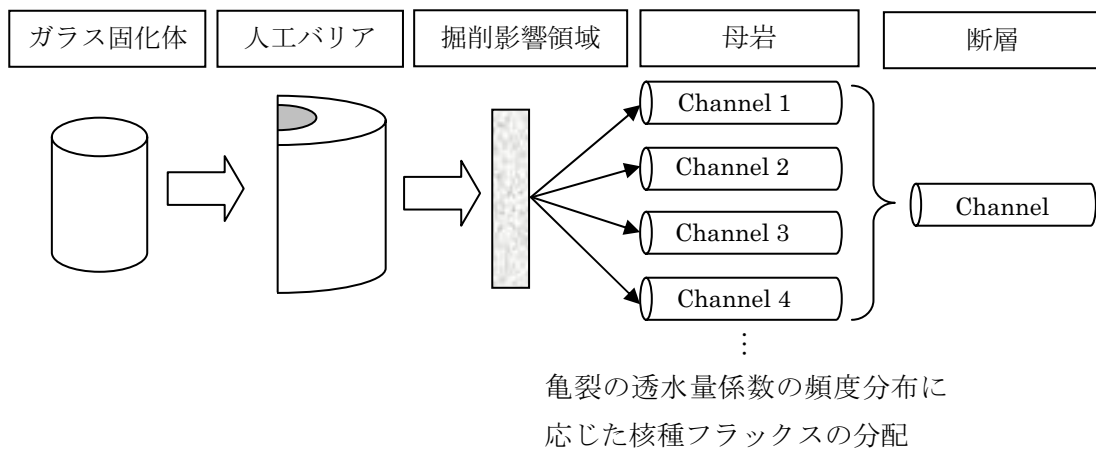


図 2 H12 レポートにおける核種移行解析モデルを **TIGER** で行うための処理方法

#### ○ガラス固化体

**MESHNOTE** ではガラスの溶解速度を設定する。一方、**TIGER** では浸出時間（何年で溶け切るのか）を設定する。

#### ○人工バリア

**TIGER** では、複数の人工バリアゾーンを定義でき、それぞれ半径、外側表面積、空間メ

ッシュ分割数を設定できる。また、ダルシー流速、拡散係数、溶解度、収着分配係数、間隙率、密度といった物性値を個々の領域に個別に設定できるため、オーバーパック腐食領域を考慮した解析などを行うこともできる。

#### ○掘削影響領域 (EDZ)

人工バリアから掘削影響領域に移行した核種は、掘削影響領域の通過流量によって天然バリアへと運ばれる。この領域は、ミキシングセルという 1 つのセルで表現され、人工バリアと天然バリアは、核種の移行率によって接続される。また TIGER では、濃度接続によって解析することも可能である。また、境界条件として掘削影響領域の通過流量を設定する。なお、掘削影響領域での沈殿及び収着は考慮していない。

#### ○母岩

母岩は、一次元平行平板モデルの重ね合わせで表現され、透水量係数が違う複数の亀裂の集合として扱われる。TIGER では、個々の亀裂はチャンネルと呼ばれる移行経路とその周辺の岩盤部で表現できる。各チャンネルにはペクレ数、ダルシー流速、分散長、間隙率、拡散係数、溶解度、収着分配係数、真密度などを、岩盤部については間隙率、密度、拡散係数などを個別に設定できる。TIGER では、人工バリアから母岩の各チャンネルに移行する核種は、各チャンネルの流量比率によって重み付けされるが、H12 の体系では、各チャンネルの透水量係数分布の頻度分布によって重み付けされる。そのため、H12 の処理方法と一致するように TIGER の処理方法を設定する必要がある。

#### ○断層

断層は 1 つのチャンネルとして表現され、母岩から移行してきた核種は断層に流れ込む。母岩の亀裂と同様のパラメータ設定が可能である。

ここで、TIGER ではガラス固化体、人工バリア、掘削影響領域の解析は同時に行わなければならないため、これらの解析にかかわる情報は常に 1 つの解析ファイルで扱う。このため、これ以降はガラス固化体、人工バリア、掘削影響領域の 3 つを合わせて人工バリアと呼ぶことにする。

以降では、図 2 に示した H12 レポートのモデル体系について、人工バリア、母岩（亀裂の重ね合わせ）、断層の接続方法について検討を行っていくこととする。

### 4. TIGER で可能な処理方法とその検討

TIGER は処理方法において柔軟性を有する解析コードである。そのため、人工バリアと母岩の接続、母岩における亀裂の重ね合わせ、母岩と断層の接続方法、さらには、それらを処理するためのファイルの記述方法などについて、複数の処理方法を設定することが可

能である。

そこで、今後の不確実性解析を合理的に行うため、以下に示す TIGER の解析上の特性等を考慮し、3 章に示した H12 レポートの体系に基づく解析を TIGER で行うための代表的な処理方法をいくつか作成し、これらの処理方法ごとに解析を実施し、その結果を比較することにより処理方法に関する知見をまとめることとする。

解析を実施するにあたり、以下に示すような TIGER の特性を考慮した。

- 一つの人工バリアに対して複数のチャンネル（亀裂）を接続し、人工バリアと亀裂中の核種移行を同時に解析する場合、各チャンネルへの核種の移行量はチャンネル内の流量比に応じて按分される。
- 解析結果に関する精度の問題は、空間差分化における精度の問題と時間ステップに関する誤差管理とに分けて考えることができる。
- 収束性の観点から、空間メッシュ数は Peclet 数の半分以上となることが望ましい。空間メッシュ数が少ないほど、「数値分散」効果により精度は低下する。数値分散の影響は、核種の移行率の時間変化に対して、核種量の変化が大きい放出率の「立ち上がり」に特に影響を与える。そのため、空間メッシュ数が少ない場合、半減期が短い核種の最大放出率の出現時刻が半減期に相当する時刻より遅い場合には、「立ち上がり」部分において移流・分散による核種量の変化に加えて崩壊による核種量の変化が生じるため、誤差が大きくなる可能性がある。これを回避するため空間メッシュ数を増大させることは、解析時間を増加させることになる。そのために適切なサイズを検討する必要がある。
- 時間ステップの不適切な設定による計算誤差の増大や解析時間の増大を抑制するため、TIGER では、時間ステップの違いによる結果の違いを比較することにより誤差が許容範囲内となるような時間ステップを自動的に選択する機能が含まれている。手法としては後退オイラー法を一般化した BDF 法（Backward Differentiation Formulae）が採用されている。BDF 法では可変の近似階数と可変のタイムステップのアルゴリズムとの組み合わせにより、次の近似階数とタイムステップが求められ、計算効率が向上される。複数の核種を同時に解く場合は、計算精度は、それらの中で最大の誤差を有した解に依存する。このため、他の核種に関する解の精度が損なわれる可能性がある。

これらの特性を考慮して、以下の 3 種類の処理方法を設定した。



処理方法① 人工バリアと母岩，断層の解析を個別に行う処理方法（母岩の個々の亀裂を個別に解析）

人工バリアの解析と母岩の個々の亀裂，断層の解析を個別に行う。人工バリアから個々の亀裂への核種流入は，H12 レポートの考えに基づき，亀裂の透水量係数の頻度分布に応じて分配することとする。そこで，人工バリアの解析によって得られる人工バリアからの全放出量（放出率）を外部ファイルとして出力し，亀裂の透水量係数の頻度分布に応じて全放出量を按分し，個々の亀裂へ流入する核種量を設定する。

上述の解析方法に基づく解析用ファイルを準備し，上記の処理により与えられた個々の亀裂への流入量を用いて，亀裂中の移行解析を行い，個々の特性を有する亀裂からの核種放出量を積算し，結果を外部ファイルに出力する。断層中の核種移行解析においては，外部ファイルによって与えられる亀裂からの核種放出量の総量を入力とした解析を行う。

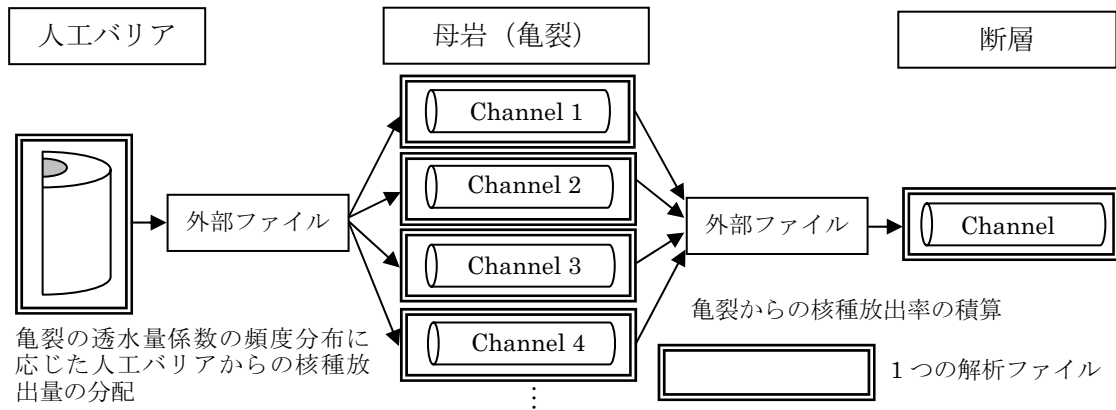


図3 人工バリアと母岩，断層の解析を個別に行う処理方法①

処理方法② 人工バリアと母岩，断層の解析を個別に行う処理方法（母岩のすべての亀裂を同時に解析）

処理方法①では，母岩の各亀裂の解析を個別のファイルで個々に行っているが，この処理方法では，この解析を一つのファイルで一度に行うことで，解析に必要なファイル数を減らす。すなわち，人工バリアからの核種放出率を全ての亀裂に共通に与え，亀裂の特性に応じて得られる亀裂からの核種放出率に亀裂の透水量係数の頻度分布に応じた重み付けを行い，個々の亀裂からの核種放出量を積算し，結果を外部ファイルに出力する。断層中の核種移行解析においては，外部ファイルによって与えられる亀裂からの核種放出量の総量を入力とした解析を行う。

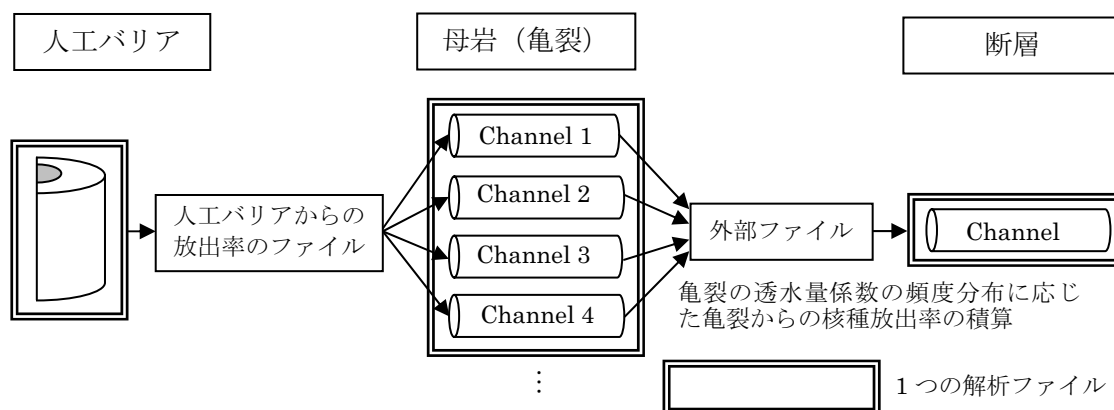


図4 人工バリアと母岩，断層の解析を別々に行う処理方法②  
(母岩のすべての亀裂を同時に解析)

処理方法③ 人工バリアと母岩，断層の解析をすべて同時に行う処理方法

母岩のすべての亀裂を人工バリアに接続し，人工バリアと母岩のすべての亀裂の解析を1つの解析ファイルで同時に行う。この解析処理方法は **TIGER** の本来の機能である。この場合，人工バリアからの放出率は個々の亀裂を流れる流量の割合に応じて按分され，個々の亀裂からの核種量の積算結果が出力されるため，処理方法①，②とは核種量の分配方法が異なることになる。この按分方法を **H12** と同様の方法にするための処理については後述する。断層中の核種移行解析においては，出力ファイルによって与えられる亀裂からの核種放出量の総量を入力とした解析を行う。

この処理方法③は，処理方法①では外部ファイルを用いて行なっていた，透水量係数の頻度分布に応じた核種の分配を **TIGER** で自動的に行なうため，解析に必要なファイル数，作業量，人為的エラーの発生を低減できる。

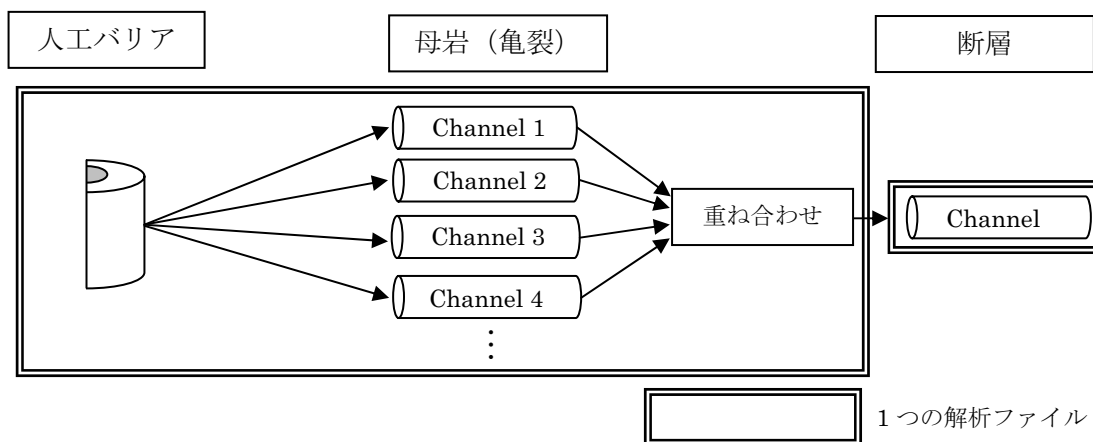


図5 人工バリアと母岩，断層の解析をすべて同時に行う処理方法③

これら 3 つの処理方法について、まず H12 レポートの核種移行解析モデルと同様に、人工バリアから亀裂への核種の移行量の分配を透水量係数の頻度分布によって行なう方法について、解析時間や前処理・後処理の効率性の検討を行う。ただし、断層の解析についてはすべての処理方法で同じであるため、断層の解析を行わず、母岩の重ね合わせ結果までを比較・検討する。

なお、TIGER では崩壊系列や核種毎に解析ファイルを分割して、計算を行った方が解析時間は早くなるが、人工バリアの解析では溶解度分割を行なっているため、崩壊系列毎に解析ファイルを分割することはできない。このため、すべての処理方法の検討において、アクチニド系列と核分裂生成物系列の 2 つに分割し、個別に解析を行うことにした。

表 1 に、解析に用いた核種および系列の一覧を、表 2 に計算に用いたパソコンのスペックと数値計算パラメータを示す。また、物性値はすべて H12 レポートにおけるレファレンスケースの値を用いた (表 3)。

表 1 解析に用いた核種

アクチニド系列			
Pu-240	→ U-236	→ Th-232	
Cm-245	→ Pu-241	→ Am-241	→ Np-237 → U-233 → Th-229
Cm-246	→ Pu-242	→ U-238	→ U-234 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210
Am-243	→ Pu-239	→ U-235	→ Pa-231 → Ac-227
Pb-stable			

核分裂生成物系列			
Sm-151		Pd-107	Sm-stable
Zr-93	→ Nb-93	Sn-126	Zr-stable
Se-79		Cs-135	Nb-stable
Tc-99		Nb-94	Se-stable
			Pd-stable
			Sn-stable
			Cs-stable

表 2 解析に用いた数値計算パラメータの一覧とパソコンのスペック

パラメータ名	値	パソコンのスペック	
緩衝材空間メッシュ分割数	50	OS	WindowsXP
母岩中の亀裂本数	13	CPU	IntelXeonプロセッサ3.6GHz×2
亀裂空間メッシュ分割数	50	メモリ	4GB
マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数	5		
TOLERANCE	1.00E-04		
SCALE	1.00E+00		
MATRIX-REFINEMENT	3		

表 3 解析に用いた物性値

	半減期	インベントリ	溶解度	収着分配係数	
	年	mol		m <sup>3</sup> /kg	
Pu-240	6.54E+03	1.78E-01	mol/m <sup>3</sup>	人工バリア	母岩
U-236	2.34E+07	1.05E-01		0.1	0.1
Th-232	1.41E+10	6.50E-06	1.0E-09	0.01	0.5
Cm-245	8.50E+03	7.26E-03	2.0E-04	1	5
Pu-241	1.44E+01	1.23E-05	5.0E-03	1	1
Am-241	4.32E+02	1.88E-01	2.0E-05	1	1
Np-237	2.14E+06	3.74E+00	8.0E-06	1	1
U-233	1.59E+05	1.17E-03	2.0E-05	1	1
Th-229	7.34E+03	2.51E-06	3.0E-05	10	1
Cm-246	4.73E+03	8.29E-04	2.0E-04	10	5
Pu-242	3.87E+05	1.12E-02	2.0E-04	10	5
U-238	4.47E+09	1.31E+01	3.0E-06	0	0.01
U-234	2.45E+05	1.50E-02	1.0E-03	10	0.1
Th-230	7.70E+04	5.37E-05	1.0E-01	1	0.1
Ra-226	1.60E+03	2.62E-07	4.0E-05	0.1	1
Pb-210	2.23E+01	3.48E-09	1.0E-06	0.1	0.1
Am-243	7.38E+03	4.01E-01	5.0E-03	1	1
Pu-239	2.41E+04	1.60E-01	可溶性	0.01	0.05
U-235	7.04E+08	1.46E-01	2.0E-04	1	5
Pa-231	3.28E+04	2.23E-06			
Ac-227	2.18E+01	1.48E-09			
Sm-151	9.00E+01	3.20E-05			
Zr-93	1.53E+06	8.54E+00			
Nb-93	1.36E+01	7.21E-05			
Se-79	6.50E+04	8.04E-02			
Tc-99	2.13E+05	8.27E+00			
Pd-107	6.50E+06	2.04E+00			
Sn-126	1.00E+05	2.25E-01			
Cs-135	2.30E+06	3.19E+00			
Nb-94	2.03E+04	2.80E-04			

	拡散係数	
	m <sup>2</sup> /y	
	人工バリア	天然バリア
Cs	5.00E-02	4.73E-03
Se	2.00E-02	
その他	3.00E-02	

人工バリアのパラメータ	
内側表面積[m <sup>2</sup> ]	5.51E+00
外側表面積[m <sup>2</sup> ]	1.49E+01
人工バリア厚さ[m]	7.00E-01
間隙率[-]	4.10E-01
真密度[kg/m <sup>3</sup> ]	2.70E+03
ミキシングセル流量[m <sup>3</sup> ]	1.00E-03
LEACH-TIME[年]	7.00E+04

母岩のパラメータ	
母岩移行距離[m]	1.00E+02
マトリクス拡散深さ[m]	1.00E-01
間隙率[-]	2.00E-02
真密度[kg/m <sup>3</sup> ]	2.69E+03

透水量係数分布	
対数平均値	-9.99E+00
対数標準偏差	1.07E+00

ここで、前述のように処理方法③については、個々の亀裂からの核種の総量を算出する方法（モデル）が処理方法①、②と異なる。そこで、処理方法①、②と同一の考え（頻度分配）に基づいて個々の亀裂からの核種量が計算されるように、処理方法③の方法についての検討を行う。その後、処理方法①～③までの結果について比較検討をおこなう。

さらに、処理方法①、②のうち最適と考えられる処理方法と処理方法③を用いて、流量

分割による解析結果の比較検討を行う。

#### 4.1 人工バリアと母岩の全ての亀裂の解析を同時に行う処理方法③の検討

TIGER では、人工バリアとチャンネルを接続するために、EBS-JUNCTION という接合機能を用いる。また、チャンネル同士の接続には JUNCTION という接合機能を用いる。どちらも下流側に複数のチャンネルを並列に接続でき、各チャンネルへの核種の移行量は、図 6 のようにチャンネルの流量比に応じて分配される。

一方、H12 レポートの核種移行解析モデルでは、人工バリアから各亀裂への核種の分配率は、透水量係数の頻度の対数正規分布に応じて核種量の分配を行なっている（図 7 参照）。そのため、まずすべての亀裂に対しては掘削影響領域の通過流量と同じ通過流量となるように、透水量係数から求められるダルシー流速に応じたチャンネル断面積を与えた解析を行い、その結果に分配比に応じた重み付けを行なっている。

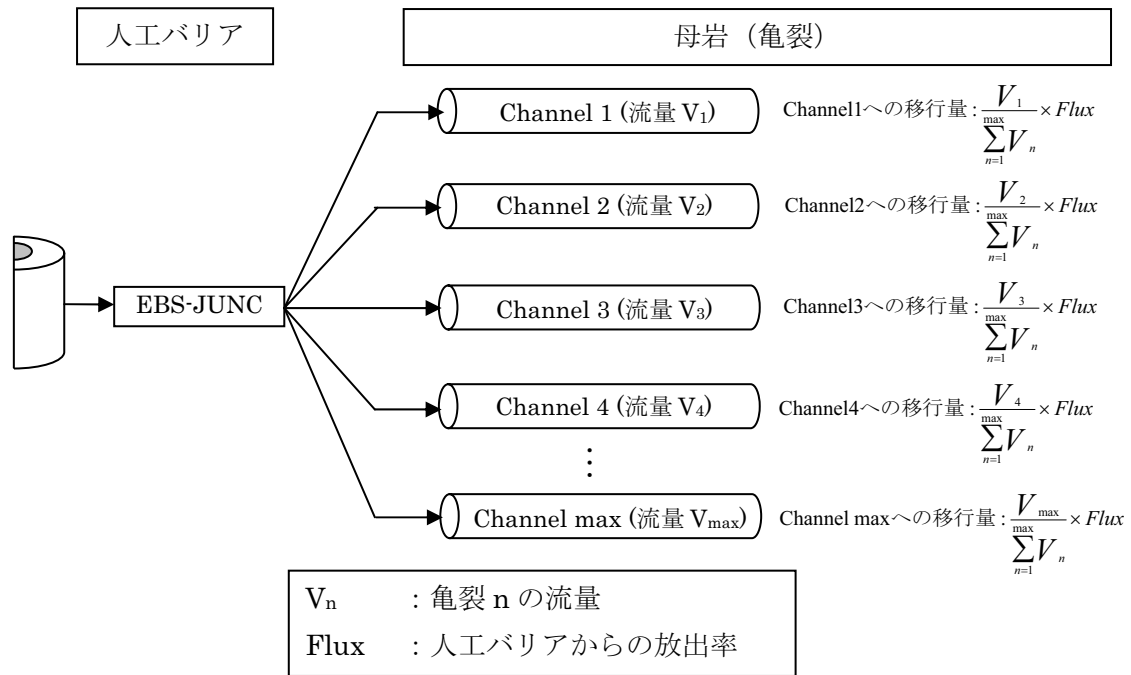


図 6 EBS-JUNCTION に複数のチャンネルを並列に接続した場合の人工バリアからチャンネルへの移行量の分割（チャンネルの流量比に応じて分配）

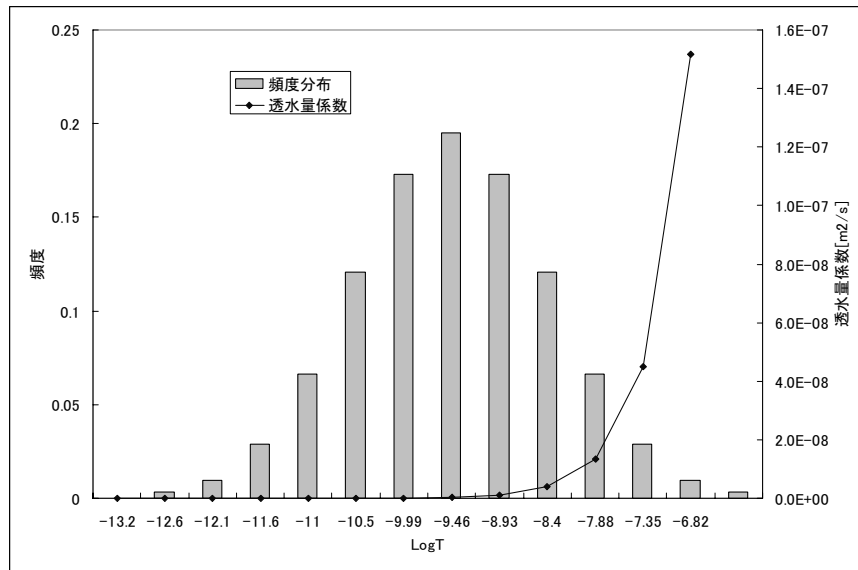


図7 13本亀裂とした場合の各亀裂の確率密度と透水量係数のグラフ

このため、チャンネルの流量比に応じて分配する図6の処理方法（処理方法①，②は外部ファイルを介して，複数のチャンネルと接続しているのに対して，処理方法③（TIGER本来の機能：図5）は直接人工バリアと複数のチャンネルを並列で接続する）を用いて，H12レポートの核種移行解析モデルと同じように透水量係数の頻度分布に応じた核種の分配を行うために，図8のようなモデルを考えた。このモデルでは，まず各亀裂への分配率を設定するための仮想的なチャンネル「Channel A」を設定する。このチャンネルには，チャンネルの特性として，透水量係数の頻度分布に応じた比が流量比となるような情報を与える。このことにより，人工バリアから亀裂に流入する核種量が，透水量係数の頻度分布に応じて配分される。その後，本来の流量などを設定した「Channel B」を用いた解析を行うこととした。

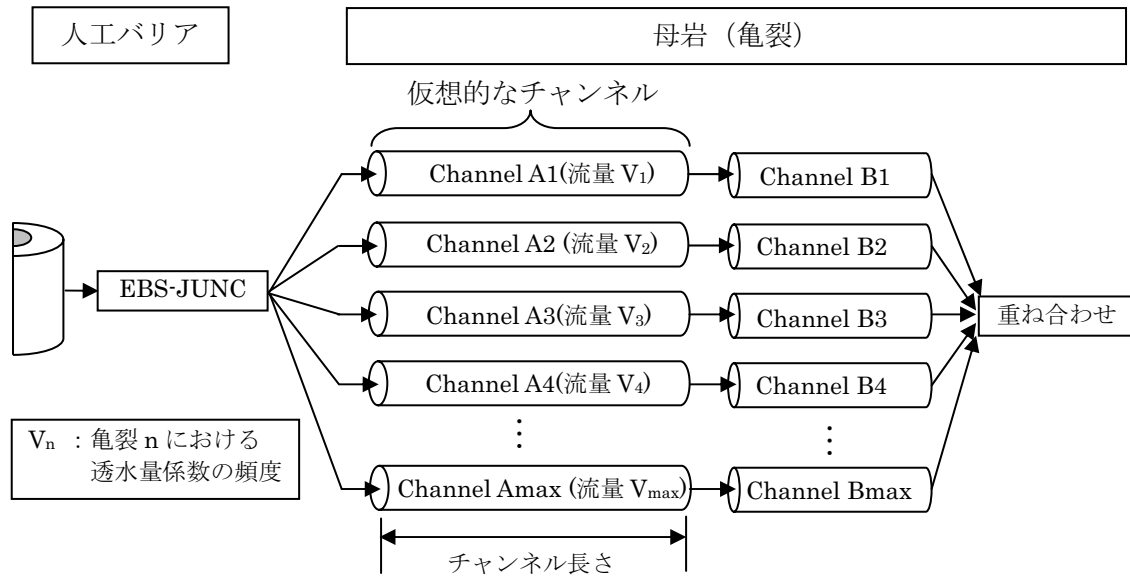


図8 透水量係数の頻度分布に応じて、人工バリアからの移行量を分配するモデル

Channel A に設定したチャンネル毎に異なるパラメータの一覧を表 4 に示す。なお、チャンネルの長さについては、0.1m とした場合でも放出率に影響が出たため、さらに短い 0.01m とした。

ここで、TIGER では亀裂の流量を直接与えることは出来ず、ダルシー流速とチャンネル断面積の積で流量を与えるため、チャンネル断面積を単位断面積 (1.0) とし、ダルシー流速を調整することで、透水量係数の頻度分布から算出した流量を与えるようにした。また、拡散寄与表面積は、式 1 のように透水量係数から求めており、チャンネル毎に異なるため、表 4 に示している。

$$\begin{aligned}
 \text{拡散寄与表面積} &= \frac{\text{FWS} \times \text{亀裂面総面積}}{\text{亀裂部体積}} = \frac{\text{FWS} \times (2 \times L \times W)}{\text{亀裂開口幅} \times L \times W} \\
 &= \frac{2 \times \text{FWS}}{2\sqrt{\text{透水量係数}}} = \frac{\text{FWS}}{\sqrt{\text{透水量係数}}} \dots\dots\dots \text{式 1}
 \end{aligned}$$

FWS : マトリクス拡散寄与表面積率

表 4 人工バリアから複数の亀裂への移行率を設定するために、

仮想的なチャンネル Channel A に設定したパラメーター一覧

亀裂番号	チャンネル長さ [m]	ダルシー流速 [m/y]	チャンネル 断面積[m <sup>2</sup> ]	拡散寄与表面積 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
ChannelA1	0.01	3.30E-03	1.0	2.39E+07
ChannelA2	0.01	9.83E-03	1.0	8.03E+06
ChannelA3	0.01	2.88E-02	1.0	2.74E+06
ChannelA4	0.01	6.65E-02	1.0	1.19E+06
ChannelA5	0.01	1.21E-01	1.0	6.52E+05
ChannelA6	0.01	1.73E-01	1.0	4.56E+05
ChannelA7	0.01	1.95E-01	1.0	4.05E+05
ChannelA8	0.01	1.73E-01	1.0	4.56E+05
ChannelA9	0.01	1.21E-01	1.0	6.52E+05
ChannelA10	0.01	6.65E-02	1.0	1.19E+06
ChannelA11	0.01	2.88E-02	1.0	2.74E+06
ChannelA12	0.01	9.83E-03	1.0	8.03E+06
ChannelA13	0.01	3.30E-03	1.0	2.39E+07

処理方法③（透水量係数分配：図 8）のモデルの検証として、まず人工バリアからの移行率が仮想的なチャンネル「Channel A」で正しく分配されているかを確認するため、Channel A からの核種放出率と人工バリアからの放出率に対して透水量係数の頻度分布をかけた放出率を比較する。図 9 にこれらの解析結果のグラフを示す。

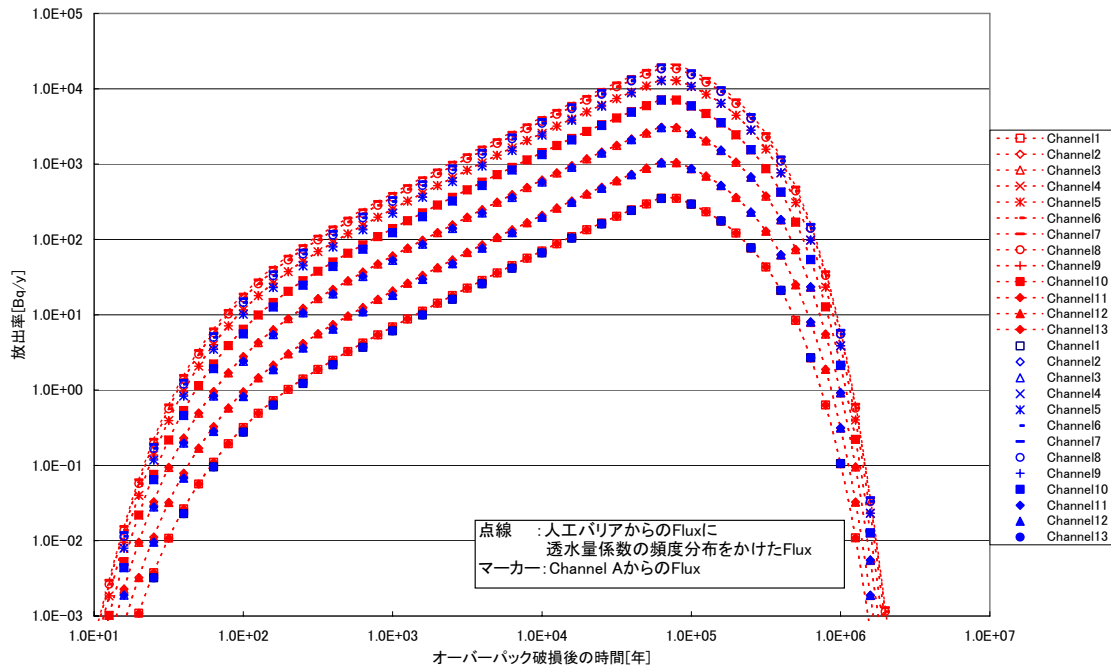


図 9 透水量係数の頻度分布を Channel A に

流量として与えた場合の検証グラフ (Cs-135)



図 9 をみると、これらの解析結果はほぼ一致しており、人工バリアに対して複数のチャンネルを直接並列に接続する場合、仮想的なチャンネルを設定し、透水量係数の頻度分布を各チャンネルの流量比として与えることで、仮想的なチャンネルの出口において、H12 レポートの考え方と同じ移行量の分配を設定できることが証明された。また、人工バリアの解析結果についても、処理方法①とほぼ一致していた。

次に、Channel B を接続した解析を実施する。ここで、TIGER ではチャンネル同士を接続する場合、両方のチャンネルの流量が一致しない場合には、マスバランスを調整するためにチャンネル同士を接続する JUNCTION において流量の調整を行なう (図 10)。

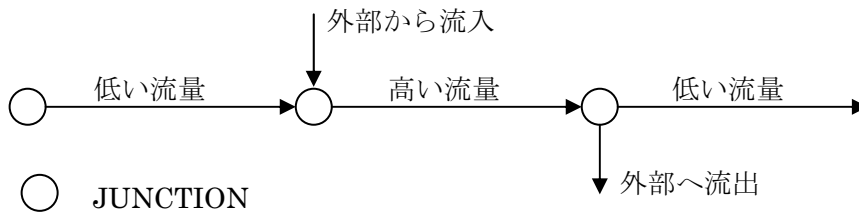


図 10 接続されたチャンネル同士で流量が違う場合の JUNCTION での流量の処理例

このため、Channel B の流量については、亀裂開口幅を調整して Channel A の流量と一致させるなどの操作が必要となる。

このことは、本来の亀裂の特性を有するチャンネル B を通過する地下水の流量とは異なる流量が与えられることになり、亀裂に流入する核種量が適切に分配されたとしても地下水の流れが異なり、適切な核種移行解析が行われない可能性を示唆している (詳細は付録 B 参照)。このため、図 10 における Channel A と Channel B をじかに接続する方法ではなく、Channel A からの放出率を一度外部ファイルに出力し、Channel B の入力とする以下のような対処を講じることとした (図 11 参照)。

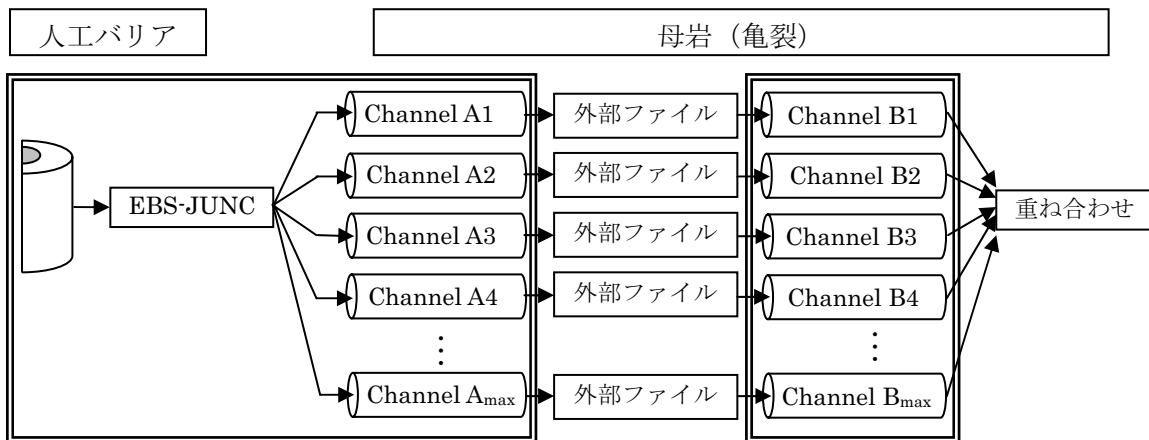


図 11 亀裂の確率密度に応じて人工バリアからの移行量を分配するモデルの改良版

#### 4.2 処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の解析時間，計算精度および解析に必要なファイルについての考察

まず，人工バリアからの放出率の比較・検討を行う。処理方法①および処理方法②の人工バリアの解析はまったく同じ処理方法のため，解析結果，解析時間は同じである。このため，人工バリアの解析結果については処理方法①と処理方法③（透水量係数分配：図 11）の結果を比較することにした。また，表 2 に示した数値計算パラメータを用いた場合，最大放出率に影響は無いものの，放出率の立ち上がり部分での解の振動が大きいいため，人工バリアの空間メッシュ分割数および数値計算パラメータを可能な限り最大に設定した（TIGER では，同時に計算する核種数，物性値や処理方法などによって，設定できる最大精度や空間メッシュ分割数が変わってくる）。表 5 にこれらのパラメータを示す。処理方法③（透水量係数分配：図 11）では，Scale を 1.00E-04 と設定すると計算が異常終了してしまうため，1.00E-03 とした。また，人工バリアの解析においてはマトリクス拡散モデルの詳細さを制御するパラメータである MATRIX-REFINEMENT は影響しないため，表 2 に示した基準値を用いた。

表 5 各処理方法で設定した人工バリアの数値計算パラメータ

	パラメータ	設定値
処理方法①および処理方法②	空間メッシュ分割数	70
	Tolerance	1.00E-06
	Scale	1.00E-04
	MATRIX-REFINEMENT	3
処理方法③ (透水量係数分配: 図11)	空間メッシュ分割数	70
	Tolerance	1.00E-06
	Scale	1.00E-03
	MATRIX-REFINEMENT	3

図 12 に，処理方法①と処理方法③（透水量係数分配：図 11）の人工バリアからの放出率の比較グラフを示す。図 12 を見ると，放出率が低下する部分で多少の差が出ているものの，ほぼ一致している。放出率の低下部分での差は，処理方法③（透水量係数分配：図 11）では流速の違う複数のチャンネルの解析を人工バリアの解析と同時に進めており，このように物性値の違う解析を同時に行う場合には，TIGER 内部で計算ステップがより細かく自動調整されるため，人工バリアを単独で解析した処理方法①とは異なる結果となった。

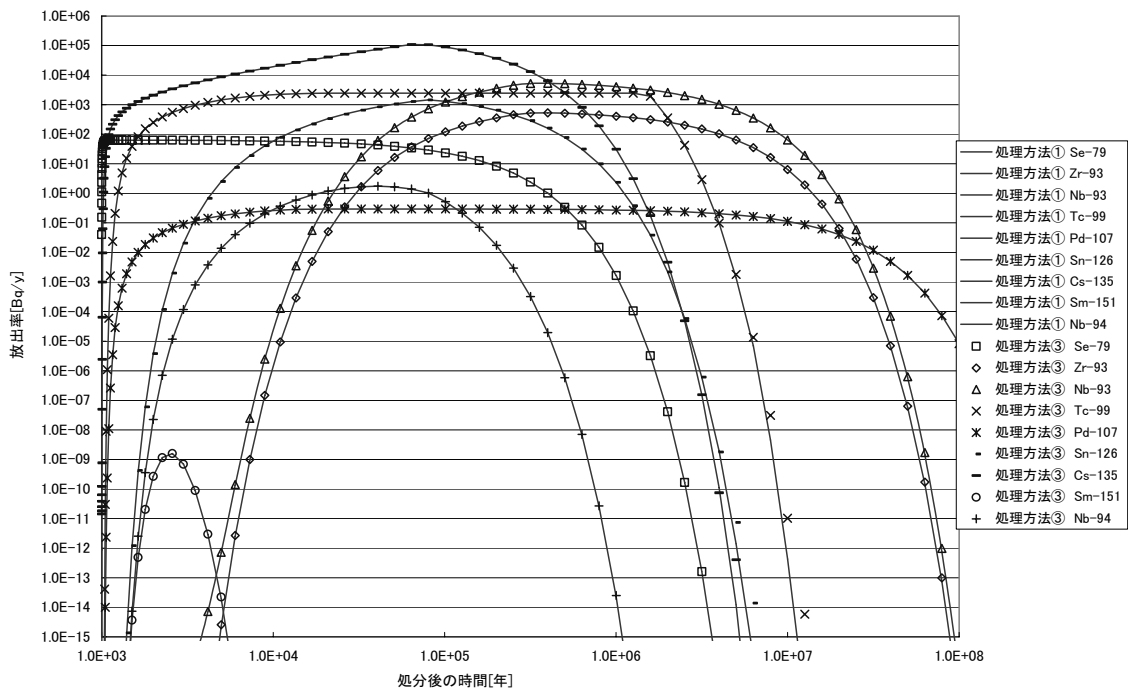


図 12 処理方法①と処理方法③（透水量係数分配：図 11）による

人工バリアからの放出率の比較

次に、母岩外側からの放出率（全ての亀裂からの放出率を重ね合わせた放出率）の比較・検討を行う。図 13 に処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の母岩外側からの放出率の比較グラフを示す。また、表 6 に解析に用いた数値計算パラメータの一覧を、表 7 に処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の解析時間の一覧表を、表 8 に解析に必要なファイル数の一覧表を示す。なお、解析ファイル数については、デバックファイルやダイアログファイルは含めず、入力ファイルと出力ファイル数のみを記載する。

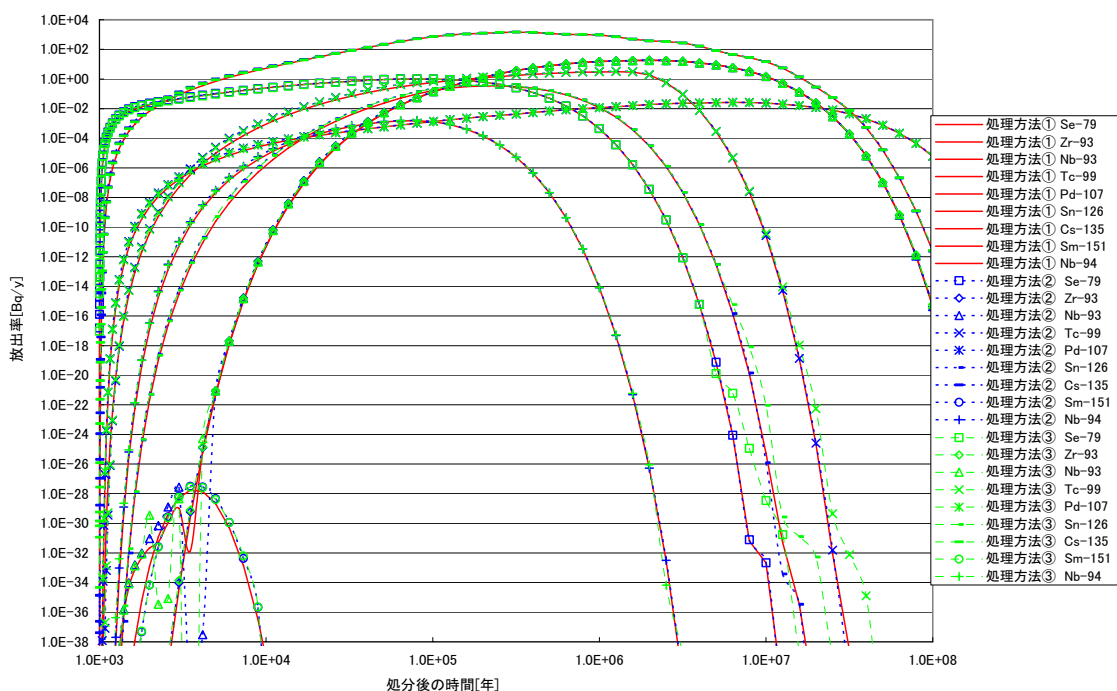


図 13 処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の母岩外側からの放出率の比較グラフ（核分裂生成物系列）

表 6 各処理方法で設定した天然バリアの数値計算パラメータ

	パラメータ	設定値
処理方法①	空間メッシュ分割数	100
	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数	5
	Tolerance	1.00E-07
	Scale	1.00E-05
	MATRIX-REFINEMENT	3
処理方法②	空間メッシュ分割数	100
	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数	5
	Tolerance	1.00E-05
	Scale	1.00E-05
	MATRIX-REFINEMENT	5
処理方法③ (透水量係数分配: 図11)	空間メッシュ分割数	100
	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数	5
	Tolerance	1.00E-05
	Scale	1.00E-05
	MATRIX-REFINEMENT	5

表 7 処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の解析時間の一覧

		解析時間[秒]			総解析時間[時]
		人工バリア	天然バリア	合計	
処理方法①	アクチニド系列	11148.00	72657.20	83805.20	27.53
	核分裂生成物系列	130.63	15179.15	15309.78	
処理方法②	アクチニド系列	10964.00	47958.00	58922.00	19.43
	核分裂生成物系列	179.91	10845.00	11024.91	
処理方法③ (透水量係数分配：図11)	アクチニド系列	1708.50	52963.00	54671.50	20.39
	核分裂生成物系列	179.72	18536.00	18715.72	

表 8 処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）の解析ファイル数の一覧

		解析ファイル数			
		入力ファイル	出力ファイル	合計	全合計
処理方法①	人工バリア	2	2	4	58
	母岩	28	26	54	
処理方法②	人工バリア	2	2	4	8
	母岩	2	2	4	
処理方法③ (透水量係数分配：図11)	人工バリア+ Channel A	2	2	4	34
	母岩	28	2	30	

図 13 を見てみると、放出率の変化が小さい最大放出率の周辺では、放出率はほぼ一致しているが、放出率の変化が大きい増加部分や低下部分および半減期が短く存在量の少ない Sm-151 においては、結果に差がでていいる。これらの差は、人工バリアからの放出率と同様に、処理方法②および処理方法③（透水量係数分配：図 11）では流速の違う複数の亀裂の解析を同時に行っているため、TIGER 内部で計算ステップがより細かく自動調整され、処理方法①とは異なる解析結果となった。

また、処理方法②および処理方法③（透水量係数分配：図 11）の結果の違いは、人工バリアからの放出率の違いが影響しているためである。

ここで、表 6 では、天然バリアの亀裂本数は基準値の 13 本から変更していない。これは、処理方法②および処理方法③（透水量係数分配：図 11）においては空間メッシュ分割数を 100、マトリクス拡散のメッシュ分割数を 5 とした時点で、解析に必要なメモリー空間が 1GB を超え、これ以上細かいメッシュ分割数や亀裂本数を設定するとメモリー不足となり、解析が行なえないためである。さらに、これらの処理方法では複数の核種および複数の亀裂の解析を同時に行なっており、このように物性値の異なる複数の解析を同時に行なう場合に、計算精度を上げると異常終了してしまう。このため、処理方法②および処理方法③（透水量係数分配：図 11）では天然バリア領域の Tolerance の値が処理方法①よりも 2 桁大きくなっている。

これらの結果から、H12 レポートの核種移行解析モデルを **TIGER** で行なうための処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）のすべてにおいて、正常に解析を行なうことが出来ることが証明された。しかし、それぞれの処理方法で解析時間や解析ファイル数といった利点・欠点がある。そのため、これらを考慮し、解析時間や計算精度および解析ファイル数（解析の前後の処理の煩雑さ）など、最優先とする条件に合わせてそれぞれの処理方法を使い分ける必要がある。

本レポートにおいては、パラメータが時間変化する不確実性解析のように、数百～数千ケースといった複雑な系の解析を行うことを前提としている。このような解析においては、解析時間および解析ファイル数が最優先となるが、解析ファイル数については、前処理・後処理プログラムを作成することで対処できる。また、このような解析では解析結果の評価については最大放出率や総線量で評価する場合がほとんどであり、個々の放出率を詳細に評価する必要はない。仮に、個々の放出率を詳細に評価する場合でも、処理方法②および処理方法③（透水量係数分配：図 11）では、複数の核種・複数の亀裂の解析を同時に行なっているため、メモリー容量の不足などによって計算精度をあまり高く設定することができない。このため、表 2 に示した数値計算パラメータを用いた場合の解析結果の比較を行った。図 14 に解析結果の比較グラフを示す。また表 9 に解析時間の一覧を示す。

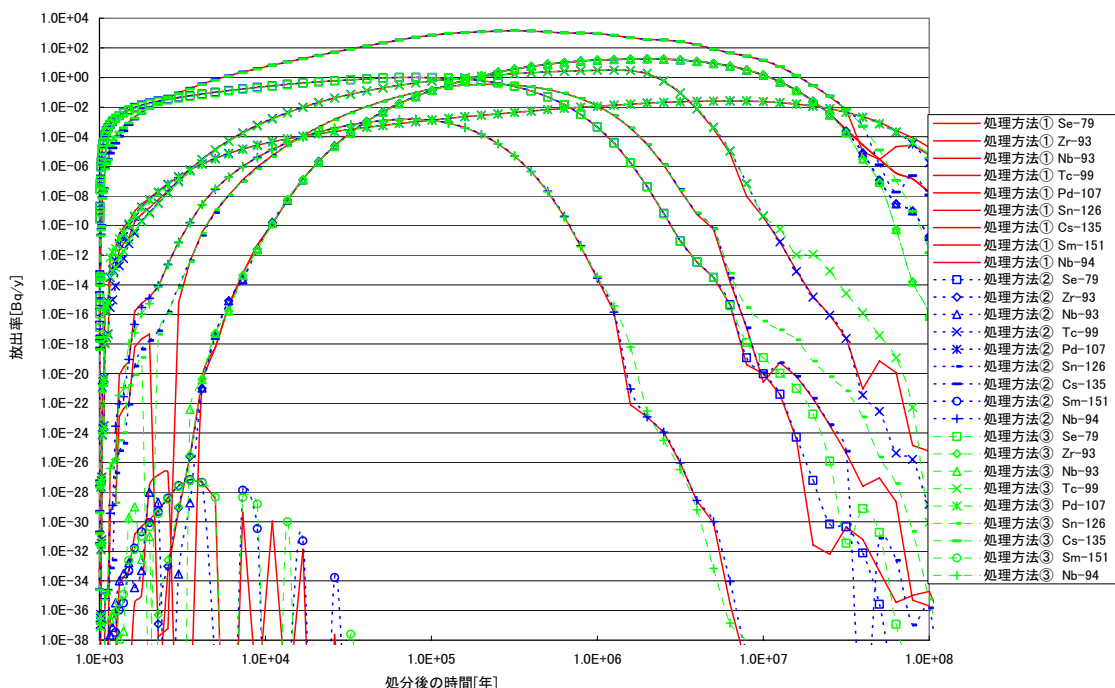


図 14 計算精度を低くした場合の処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）による  
母岩外側からの放出率の比較グラフ(核分裂生成物系列)

表 9 計算精度を低くした場合の処理方法①～③（透水量係数分配：図 11）

による解析時間の比較

		解析時間[秒]				総解析時間[分]
		アクチニド 系列	核分裂 生成物系列	合計		
処理方法①	人工バリア	199.00	10.02	209.02	22.84	
	母岩	871.28	290.30	1161.58		
処理方法②	人工バリア	199.00	10.02	209.02	54.12	
	母岩	2434.10	604.01	3038.11		
処理方法③ (透水量係数分 配: 図11)	人工バリア	429.13	28.12	457.25	41.74	
	母岩	1193.50	853.39	2046.89		

図 14 を見ると、図 13 に比べ放出率の増加部分や低下部分での振動が大きくなっているものの、最大放出率は一致しており、2 章に示した不確実性解析に必要な要件を満たしている。また、解析時間についても処理方法①では 1 ケース 23 分程度であり、現実的な解析時間となった。このため、本検討で対象としたモデル体系においては、処理方法①が最適であると考え、これ以降の検討は、処理方法①をベースとして行っていくこととする。

しかしながら、時間変化を考慮したより複雑な系における不確実性解析を前提とした解析においては、これらの計算精度と数値計算パラメータとの関係は、重要な情報と考える。そのため、解析を始める前に、対象とする解析体系において、最適な計算精度や解析時間を与えるためのパラメータ設定を可能とするような代表的な解析を実施し、効率的な解析を行うための知見を整える必要がある。また、解析に用いるパラメータの範囲や前提条件などの情報から、目的に即した結果を効率的に得られるような知見を取得するための検討を継続して実施していく必要がある。

#### 4.3 処理方法①および処理方法③（TIGER 本来の機能：図 5）による流量分割についての検討

TIGER 本来の機能である処理方法③（TIGER 本来の機能：図 5）では、人工バリアからの放出率は個々の亀裂を流れる流量の割合に応じて按分される。これまでの検討では、透水量係数の頻度分布による核種量の分配については処理方法①が最適であるとの結果となった。ここでは、TIGER 本来の機能である流量比に応じた分配を行なうことを条件とし、そのような条件の下で処理方法①および処理方法③（TIGER 本来の機能：図 5）のどちらがより最適であるか検討を行うこととする。表 10 に設定した各チャンネルの物性値を示す。これ以外のパラメータは、これまでの検証と同じ値を用いた。また、数値計算パラメータについては表 2 に示した値を用いた。

表 10 人工バリアから亀裂への放出率を流量分割するための物性値

	ダルシー流速 [m/y]	チャンネル断面積 [m <sup>2</sup> ]	拡散寄与表面積[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
Channel1	1.00E+00	1.00E+00	7.89E+04
Channel2	2.00E+00	1.00E+00	3.94E+04
Channel3	3.00E+00	1.00E+00	2.63E+04
Channel4	4.00E+00	1.00E+00	1.97E+04
Channel5	5.00E+00	1.00E+00	1.58E+04
Channel6	6.00E+00	1.00E+00	1.31E+04
Channel7	7.00E+00	1.00E+00	1.13E+04
Channel8	8.00E+00	1.00E+00	9.86E+03
Channel9	9.00E+00	1.00E+00	8.77E+03
Channel10	1.00E+01	1.00E+00	7.89E+03
Channel11	1.10E+01	1.00E+00	7.17E+03
Channel12	1.20E+01	1.00E+00	6.57E+03
Channel13	1.30E+01	1.00E+00	6.07E+03

図 15 に、処理方法①と処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) による母岩外側からの解析結果の比較グラフを、表 11 に解析時間と解析に必要なファイル数の一覧表を示す。

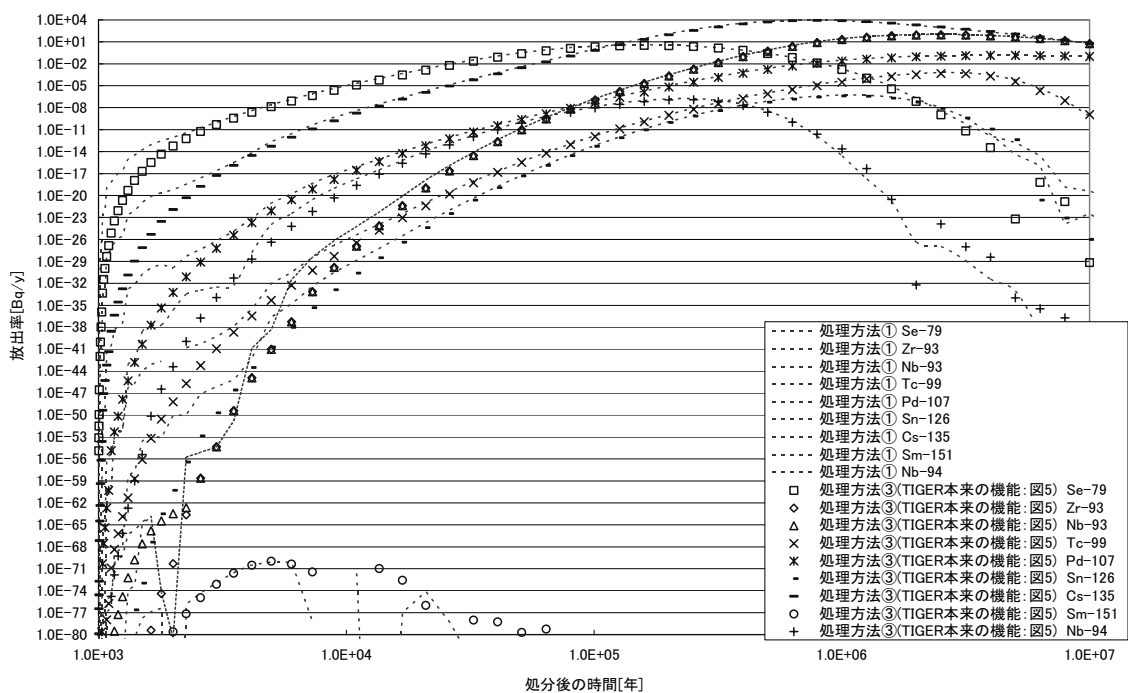


図 15 流量分割を行なった場合の処理方法①と  
処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) による解析結果の比較



表 11 流量分割を行なった場合の処理方法①と処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) による解析時間および解析ファイル数の一覧

解析時間[秒]			
	アクチノイド系列	核分裂生成物系列	総解析時間
処理方法①	1047.74	342.10	1389.84[約23分]
処理方法③(TIGER本来の機能:図5)	93641.00	2265.60	95906.60[約27時間]

解析ファイル数			
	入力ファイル	出力ファイル	全合計
処理方法①	28	28	56
処理方法③(TIGER本来の機能:図5)	2	2	4

図 15 を見ると、透水量係数の頻度分布の場合と同様に、放出率の変化が小さい最大放出率の周辺では解析結果のグラフはほぼ一致しているが、放出率の変化が大きい放出率の増加部分や低下部分では差が出ている。一方、解析時間を見ると、処理方法①が約 23 分程度で終了しているにも関わらず、処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) では 27 時間も解析時間がかかっている。

これは、処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) では流量の違う複数の亀裂の解析を同時に行なっているため、TIGER 内部で計算ステップが自動調整され、より精度の高い解析が行なわれるためである。

さらに計算精度を高くした解析を実施したが、処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 5) ではメモリーを大量に消費するため、計算精度をあまり高くすることが出来ず、母岩のメッシュ分割数を 70、TOLERANCE および SCALE を 1.0E-3、MATRIX-REFINEMENT を 5 とした場合でも、200 時間解析を実施しても計算が終了しなかった。

このように、図 4 の処理方法の方が解析ファイル数は少ないものの、解析時間においては処理方法①が圧倒的に短く、また計算精度を高くした場合でもメモリーの消費量が少なく扱いやすいため、流量分割を行なう場合でも処理方法①が最適である。

### 5. 処理方法①における計算精度と解析時間に関する検討

不確実性解析のように数百～数千ケースといった解析を行なう場合、解析時間が重要になってくる。解析時間と計算精度はトレードオフの関係にあるため、この章では処理方法①における計算精度と解析時間の関係について検討を行う。

ここで、4 章に示したように TIGER では空間メッシュ分割数を少なくすると、半減期の短い核種では放出率の「立ち上がり」部分において誤差が大きくなる可能性がある。また、TIGER の適用限界として、時間的・空間的に急激な変化がある場合には、計算が不安定的になり、解析時間が長くなったり、異常終了する現象が起こりうることが指摘されている。

この「時間的・空間的に急激な変化」とは、例えば核種量が小さく半減期の短い核種や、流速が速い場合、ある時間で物性値を大きく変化させる場合などである。不確実性解析においては、さまざまな流速を設定したり、ある時間で物性値を大きく変化させることが想定されるため、計算精度の設定によっては誤差が大きくなったり、計算が不安定になる可能性が大きい。

しかし、表 1 に示したすべての核種に対して、すべての物性値を変化させ数値計算パラメータの適用範囲を調査するのは現実的ではない。このため、ここではまず表 1 に示したすべての核種を対象に、処理方法①を用いて数値計算パラメータと解析時間の感度を調べ（2章：検討の手順 STEP4）、その後、不確実性解析を実施する場合に重要となる核種に限定し、物性値を時間変化させる場合の数値計算パラメータの適用範囲についての検証を行う（2章：検討の手順 STEP5）。

TIGER を用いて人工バリアおよび母岩の解析を行う場合に、計算精度および解析時間に影響する数値計算パラメータを表 12 に示す。なお、表 12 における基準値は、H12 レポートや TRU 第 2 次取りまとめなどの解析で用いられた値を参考に設定した。ここで、TOLERANCE、SCALE および MATRIX-REFINEMENT については、物性値を時間変化させる場合には解の振動が大きくなる場合があり、状況に応じて更に小さい値を設定する。

また、不確実性解析においては、放出率の時間変化よりも最大放出率で評価することが多いため、ここでは最大放出率に対する影響に重点を置いて検討する。

表 12 計算精度および解析時間に影響を与える数値計算パラメータ

人工バリアのパラメータ	基準値	母岩のパラメータ	基準値
緩衝材の空間メッシュ分割数	50	亀裂本数	48
TOLERANCE	1.00E-06	亀裂の空間メッシュ分割数	50
SCALE	1.00E-04	マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数	5
		TOLERANCE	1.00E-07
		SCALE	1.00E-05
		MATRIX-REFINEMENT	3

解析については第 4 章と同様に、アクチノイド系列と核分裂生成物系列の 2 つに分割し、個別に解析を行うことにした。また、物性値の時間変化については、総線量の支配核種である Np-237、Th-229、Se-79、Cs-135 の 4 核種に限定し、放出率の変化が大きい増加部分および低下部分と定常状態の 3 箇所物性値を上下 3 桁変化させた解析を実施し、検証する。表 13 に時間変化させた物性値と時間の一覧を示す。

表 13 時間変化させた物性値と物性値を変化させた時間

変化させる物性値		物性値を変更した時間
人工バリア	天然バリア	処分後2.0E+03年
拡散係数	拡散係数	処分後5.0E+05年
収着分配係数	収着分配係数	処分後5.0E+07年
溶解度	ダルシー流速	
流量		

### 5.1 人工バリアの解析時間・精度に緩衝材の空間メッシュ分割数が与える影響

人工バリアの解析において、計算精度および解析時間に影響する人工バリアの数値計算パラメータは緩衝材の空間メッシュ分割数である。このため、まず緩衝材の厚さは変えず空間メッシュ分割数だけを変化させた解析を実施し、人工バリア外側からの放出率に対する空間メッシュ分割数の影響を検討した。設定した空間メッシュの分割数と、各分割数での解析時間を表 14 に示す。

表 14 緩衝材の空間メッシュ分割数とそれに応じた人工バリアの解析時間

緩衝材の 空間メッシュ分割数	解析時間[秒]		
	アクチニド系列	核分裂生成物系列	総解析時間
50	780.61	86.62	867.23
20	155.56	49.16	204.72
10	51.06	26.09	77.15

解析結果については、放出率の変化が小さい最大放出率の周辺では、放出率はほぼ一致しているが、放出率の変化が大きい増加部分や低下部分では空間メッシュ分割数の違いによる差が顕著に現れており、空間メッシュ分割数が少なくなるに従って放出率が高くなる傾向にある。また、最大放出率については、半減期が短く存在量の少ない Sm-151 では差が出ているが、それ以外の核種では一致している。図 16 に核分裂生成物系列の比較グラフを示す。

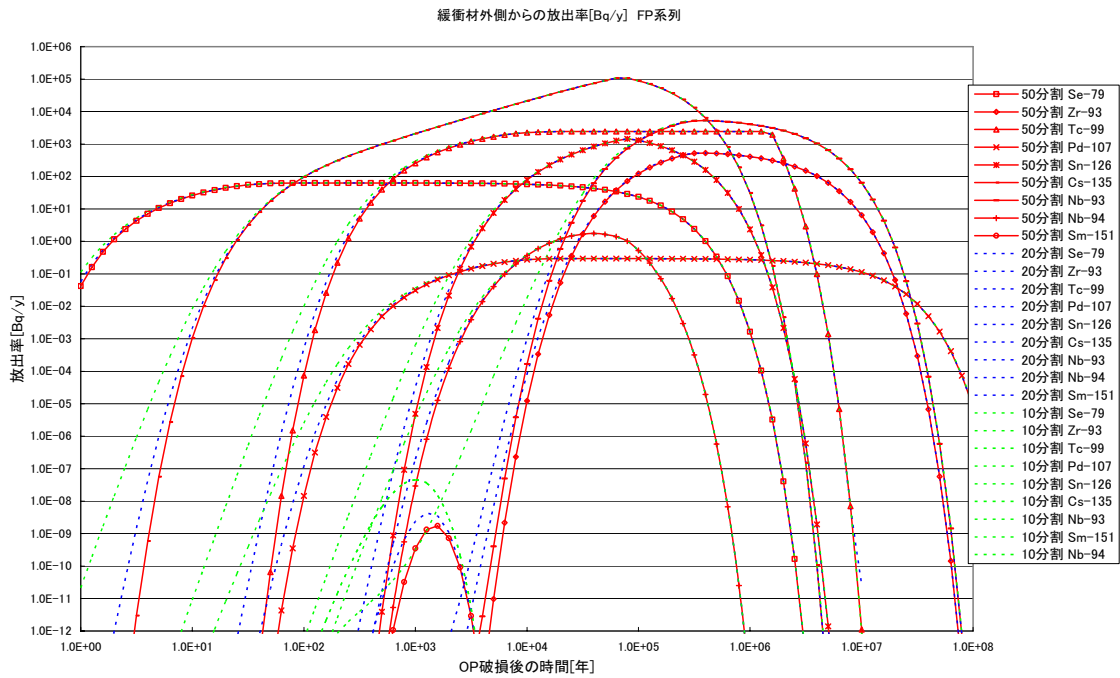


図 16 緩衝材の空間メッシュ分割数の違いによる人工バリアからの放出率の比較グラフ（核分裂生成物系列のみ）

また、EDZ 通過流量を上下 3 桁変動させた解析を実施したが、空間メッシュ分割数の違いによる差については、変化させない場合と同様の結果となった。

さらに、物性値を時間変化させた場合の影響を見るため、緩衝材中の拡散係数、収着分配係数、溶解度、EDZ 通過流量を表 13 に示した時間でそれぞれ上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、放出率が一定となっている時や低下する部分で物性値を変化させても、空間メッシュ分割数の違いによる差はほとんど見られなかったが、放出率の増加部分において、放出率が低下するように物性値を変化させた場合（拡散係数を 3 桁減少させた場合、収着分配係数を 3 桁増加させた場合および EDZ 通過流量を 3 桁減少させた場合）において、空間メッシュ分割数の違いによる差が出ていた。図 17 にもっとも差が大きかった、処分後 2000 年で緩衝材中の収着分配係数を 3 桁増加させた場合の解析結果を示す。

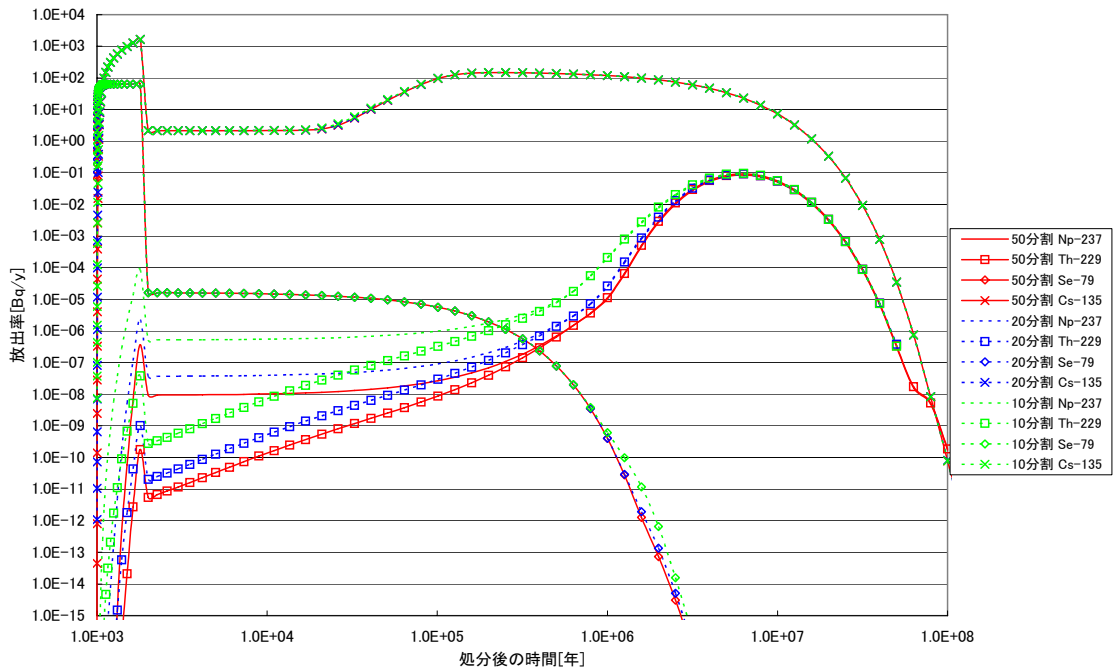


図 17 処分後 2000 年で緩衝材への収着分配係数を 3 桁増加させた解析結果

図 17 を見ると、Np-237 および Th-229 では物性値を変化させる時点より前から放出率に差が出ており、物性値を変化させた後も同程度の差が出ているが、放出率の増加に伴い差は小さくなり、最大放出率は一致している。

## 5.2 母岩の解析時間・精度に亀裂本数、各亀裂のメッシュ分割数およびマトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数が与える影響

母岩の解析において、計算精度および解析時間に影響する数値計算パラメータは、亀裂本数、各亀裂の空間メッシュ分割数、マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数である。これらのパラメータについて、亀裂本数、各亀裂の空間メッシュ分割数、マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数の順にそれぞれ単独で分割数を変化させた解析を実施し、検討を行なった。なお、変化させるパラメータ以外は表 12 に示した基準値で固定した。

### ① 亀裂本数に関する考察

H12 レポートのレファレンスケースでは、解析コードとして Multi-MATRICES を用いて亀裂本数を 48 本としているが、TIGER を用いた天然現象評価では亀裂本数を 9 本としている。さらに、同じく TIGER を用いた TRU 第 2 次取りまとめにおいては 13 本としているため、これら 3 種類と、H12 レポートのレファレンスケースの半分である 24 本を加えた計 4 種類の解析を行い、解析時間および解析結果を検証した。表 15 にこれら 4 ケースの解析時間を示す。

表 15 亀裂本数を変化させた場合の解析時間（母岩のみ）の比較

亀裂本数	解析時間[秒]		
	アクチニド	核分裂生成物系列	総解析時間[時]
48本	65394.30	27828.25	25.90
24本	33498.70	14156.76	13.24
13本	13193.62	5831.44	5.28
9本	11652.38	4863.59	4.59

解析結果については、放出率の変化が小さい最大放出率の周辺では、放出率はほぼ一致しているが、放出率の変化が大きい増加部分では亀裂本数の違いによる差が顕著に現れており、亀裂本数が少なくなるのに従い、放出率が低くなる傾向にある。また、最大放出率については、半減期が短く存在量の少ない Sm-151 では差が出ているが、それ以外の核種では一致している。図 18 に核分裂生成物系列の比較グラフを示す。

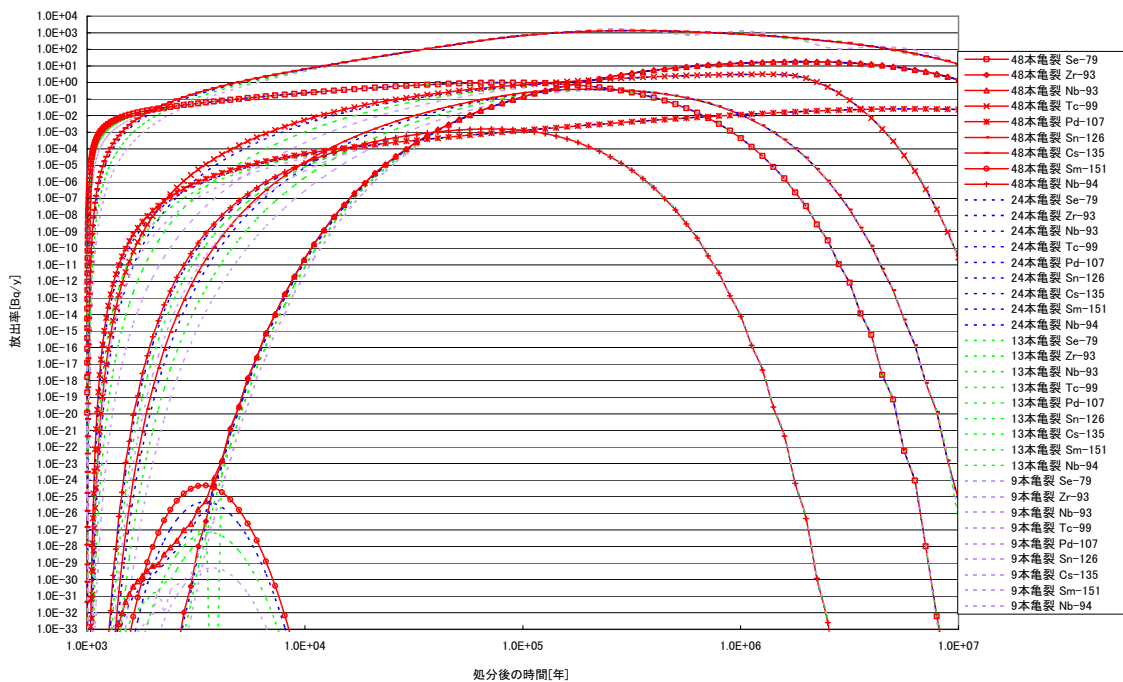


図 18 亀裂本数の違いによる母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）

また、透水量係数を上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、透水量係数を 3 桁速くした場合は亀裂本数の違いによる放出率の差は見られなかったが、3 桁遅くした場合は、放出率が高い Cs-135 の最大放出率でも亀裂本数の違いによる差が出ており、放出率が低くなるに従い、亀裂本数の影響が大きくなることがわかる。図 19 に、透水量係数を 3 桁遅くした場合の解析結果のグラフを示す。

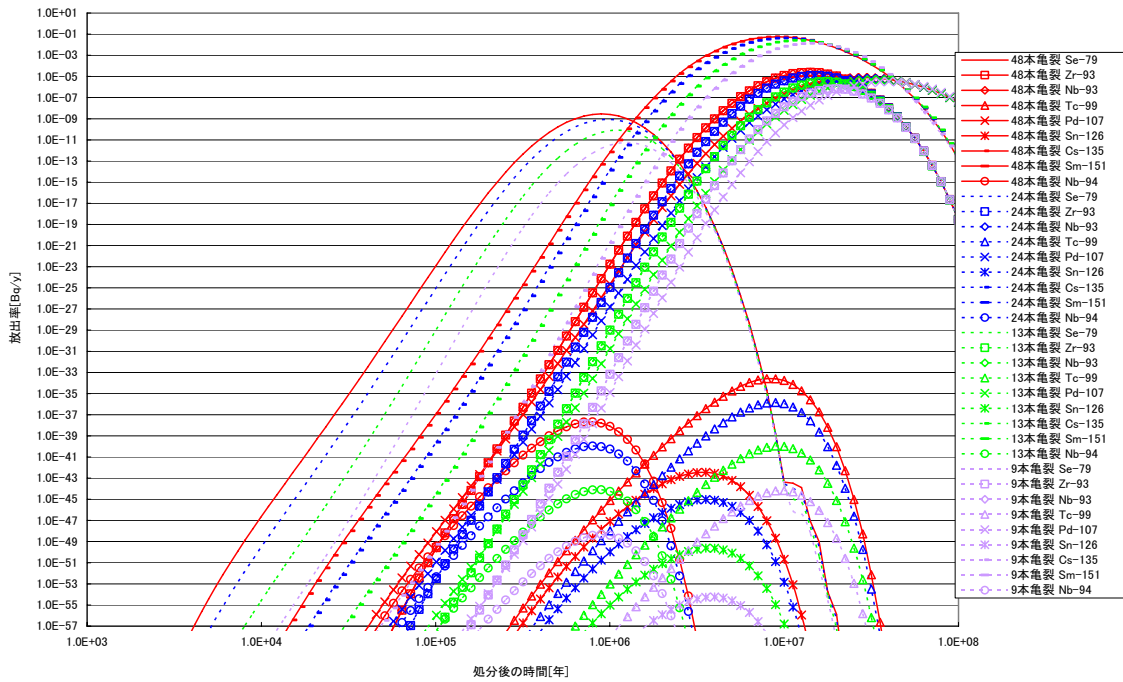


図 19 透水量係数を 3 桁遅くした場合の亀裂本数の違いによる  
母岩外側からの放出率の比較 (核分裂生成物系列のみ)

さらに、物性値を時間変化させた場合の影響を見るため、天然バリアの拡散係数、収着分配係数、ダルシー流速を表 13 に示した時間でそれぞれ上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、放出率が一定となっている時や低下する部分において物性値を変化させても、亀裂本数の違いによる差はほとんど見られなかったが、放出率の増加部分において放出率が低下するように物性値を変化させた場合（収着分配係数を 3 桁上昇させた場合およびダルシー流速を 3 桁減少させた場合）において、亀裂本数によって差が出ていた。図 20 にもっとも差が大きかった、処分後 2000 年でダルシー流速を 3 桁低下させた場合の解析結果を示す。

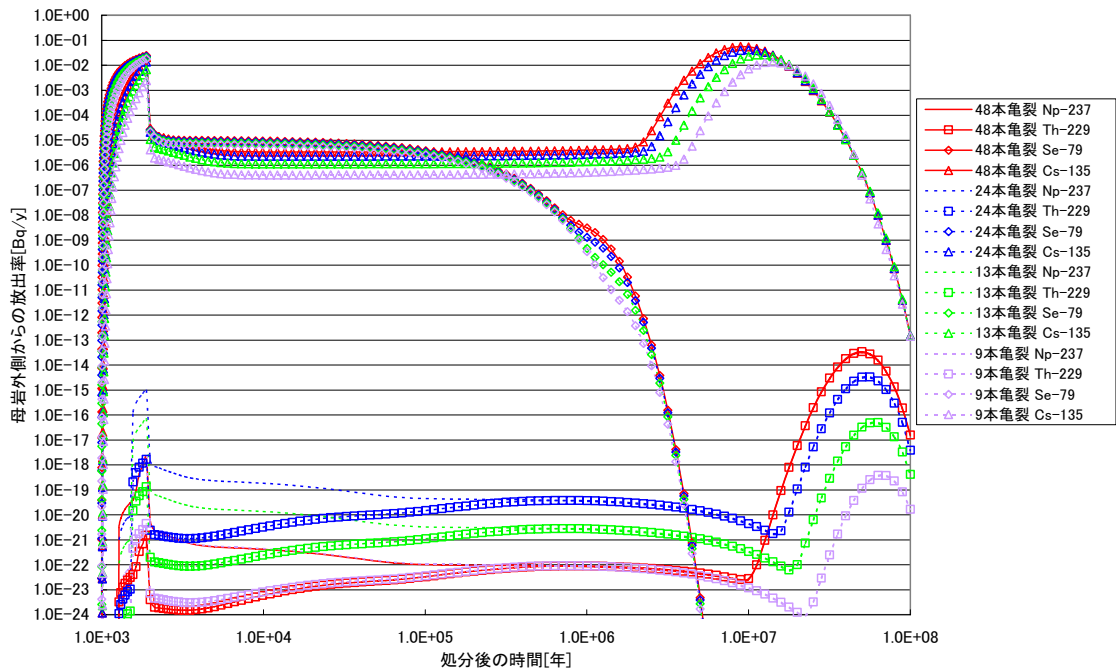


図 20 処分後 2000 年で亀裂のダルシー流速を 3 桁減少させた解析結果

図 20 を見ると、物性値が変化する部分だけでなく、最大放出率においても差が出ており、特に Th-229 と Np-237 においては 3 桁近い差が出ている。これは、母岩においては人工バリアと比べて取り扱う存在量が小さく、またこれらの核種では親核種の崩壊による核種量の移行があり、Se-79 や Cs-135 に比べて各亀裂内の核種量の変動が大きいいため、亀裂本数の違いが大きく影響している。

②亀裂の空間メッシュ分割数に関する考察

亀裂の空間メッシュ分割数については、H12 レポートにおける TIGER での天然現象評価では 50 分割とし、TRU 第 2 次取りまとめでは 10 分割としている。このため、亀裂分割数を 50, 40, 30, 20, 10 分割とした計 5 種類の解析を行い、解析時間および解析結果を検証した。表 16 にこれら 5 ケースの解析時間を示す。

表 16 亀裂の空間メッシュ分割数の違いによる解析時間の比較

空間メッシュ分割数	解析時間[秒]		
	アクチニド	核分裂生成物系列	総解析時間[時]
50分割	65394.30	27828.25	25.90
40分割	46428.29	20981.30	18.72
30分割	29894.16	14768.20	12.41
20分割	12152.89	7259.50	5.39
10分割	6703.26	4428.46	3.09



解析結果については、放出率の変化が小さい最大放出率の周辺では、放出率はほぼ一致しているが、放出率の変化が大きい増加部分ではわずかではあるが、空間メッシュ分割数の違いによる差が現れており、空間メッシュ分割数が少なくなるに従い、放出率が高くなる傾向にある。また、最大放出率については、半減期が短く存在量の少ない Sm-151 では差が出ているが、それ以外の核種では一致していた。図 21 に核分裂生成物系列の比較グラフを示す。

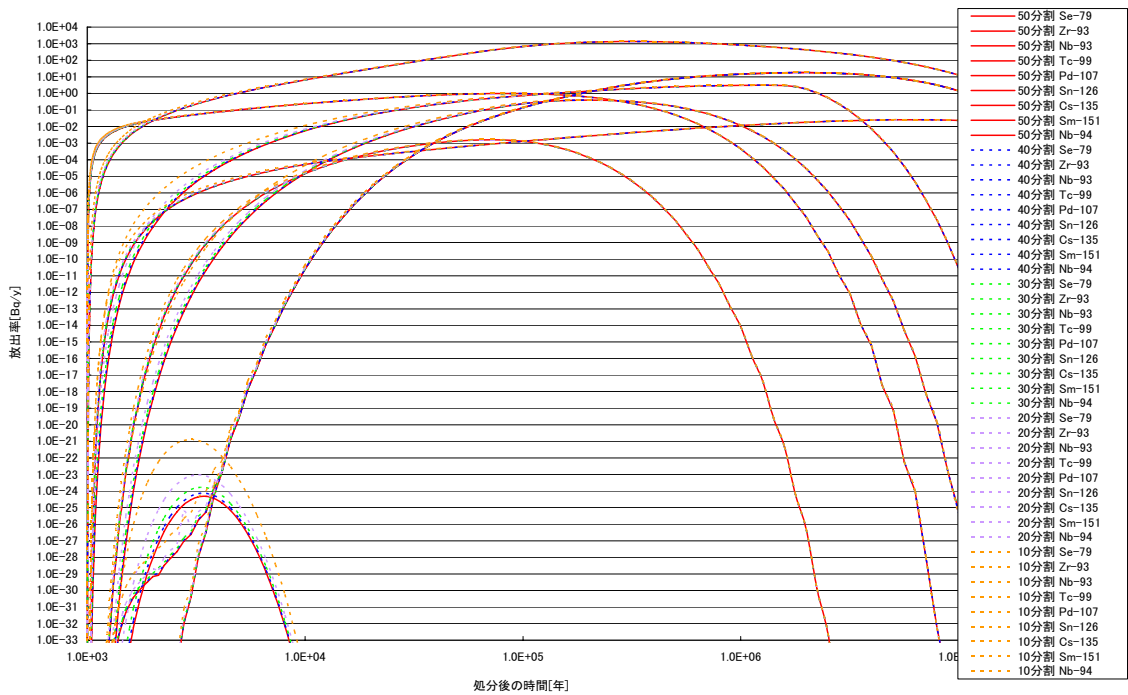


図 21 亀裂の空間メッシュ分割数の違いによる母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）

また、透水量係数を上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、透水量係数を 3 桁速くした場合は空間メッシュ分割数の違いによる放出率の差は見られなかったが、3 桁遅くした場合は、放出率が高い Se-79 の最大放出率でも空間メッシュ分割数の違いによる差が出ており、放出率が低くなるに従い、空間メッシュ分割数の影響が大きくなることがわかる。図 22 に、透水量係数を 3 桁遅くした場合の解析結果のグラフを示す。

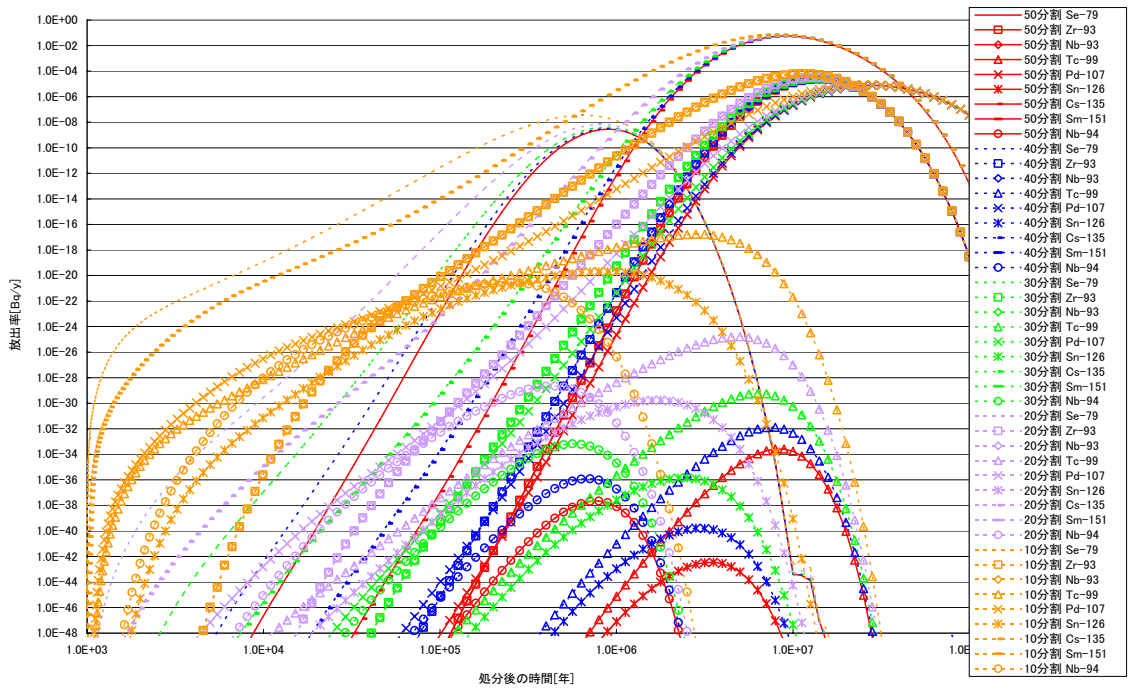


図 22 透水量係数を 3 桁遅くした場合のメッシュ分割数の違いによる  
母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）

さらに、物性値を時間変化させた場合の影響を見るため、天然バリアの拡散係数、収着分配係数、ダルシー流速を表 13 に示した時間でそれぞれ上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、放出率が一定となっている時や低下する部分で物性値を変化させても、空間メッシュ分割数の違いによる放出率の差はほとんど見られなかったが、放出率の増加部分において放出率が低下するように物性値を変化させた場合（収着分配係数を 3 桁上昇させた場合およびダルシー流速を 3 桁減少させた場合）において、空間メッシュ分割数によって差が出ていた。図 23 にもっとも差が大きかった、処分後 2000 年でダルシー流速を 3 桁低下させた場合の解析結果を示す。

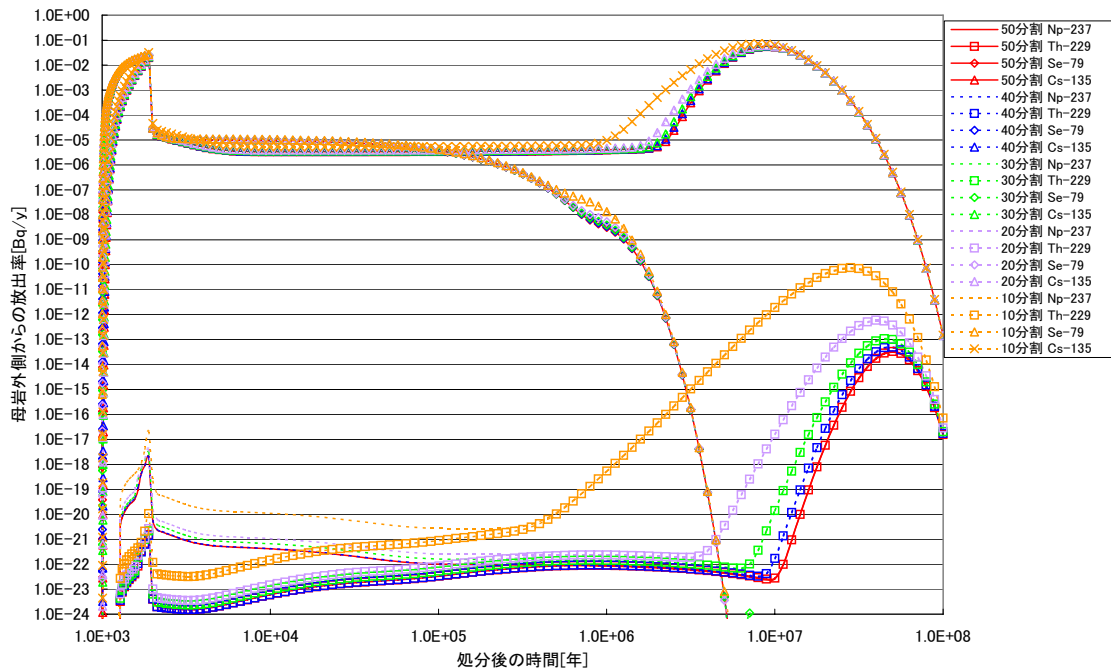


図 23 処分後 2000 年で亀裂のダルシー流速を 3 桁減少させた解析結果

図 23 を見ると、Th-229 および Np-237 においては、ダルシー流速を変化させた部分だけでなく、最大放出率においても差が出ている。これは、前出の亀裂本数の場合と同様に、人工バリアと比べて取り扱う存在量が小さく、またこれらの核種では親核種の崩壊による核種量の移行があり、Se-79 や Cs-135 に比べて各亀裂内の核種量の変動が大きいため、空間メッシュ分割数の影響が大きいためである。

③マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数に関する考察

マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数については、H12 レポートにおける TIGER での天然現象評価では 5 分割とし、TRU 第 2 次取りまとめでは 10 分割としている。このため、空間メッシュ分割数を 20, 10, 5, 1 分割とした計 4 種類の解析を行い、解析時間および解析結果を検証した。表 17 にこれら 5 ケースの解析時間を示す。

表 17 マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数の違いによる解析時間の比較

マトリクス拡散方向の 空間メッシュ分割数	解析時間[秒]		
	アクチニド	核分裂生成物系列	総解析時間[時]
20分割	236681.10	93435.00	91.70
10分割	136839.70	50841.72	52.13
5分割	59005.06	25696.25	23.53
1分割	12981.48	6967.65	5.54

解析結果については、マトリクス拡散方向の分割数を 1 とした場合は、放出率の立ち上がり部分や Sm-151 の放出率が極端に大きくなっているが、5 分割以上とした場合は亀裂本数および亀裂の空間メッシュ分割数に比べて放出率の差は小さい。また、最大放出率については、半減期が短く存在量の少ない Sm-151 では差が出ているが、それ以外の核種では一致していた。図 24 に核分裂生成物系列の比較グラフを示す。

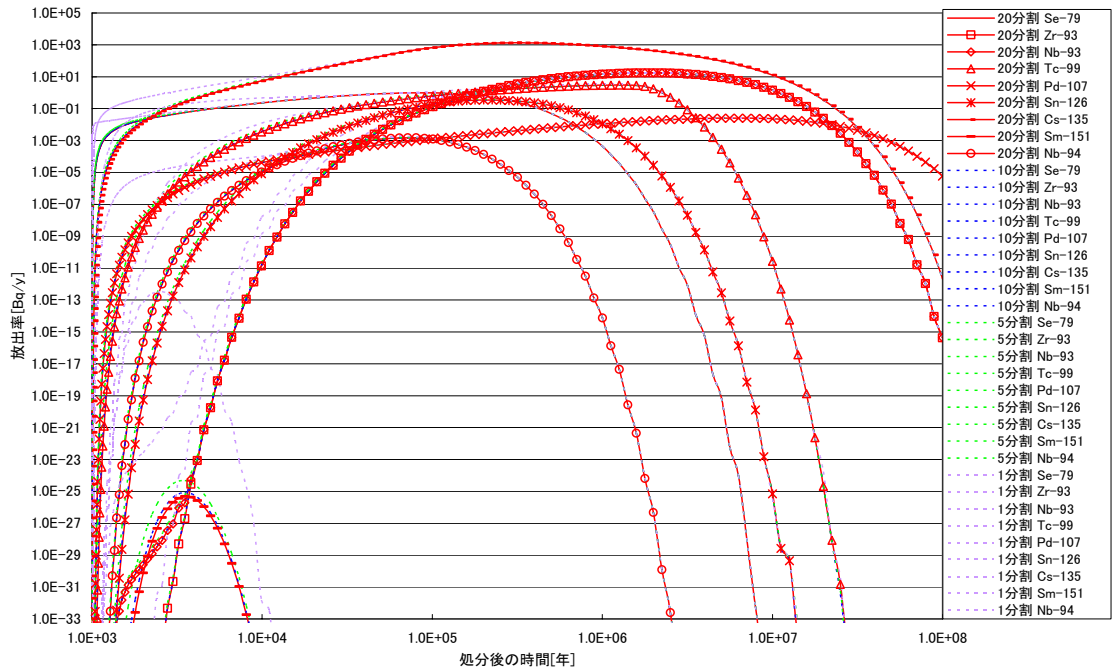


図 24 マトリクス拡散方向の空間メッシュ分割数の違いによる母岩外側からの放出率の比較（核分裂生成物系列のみ）

また、透水量係数を上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、透水量係数を 3 桁遅くした場合はメッシュ分割数の違いによる放出率の差は見られなかったが、3 桁遅くした場合は、放出率が大きい Se-79 や Cs-135 の最大放出率は一致しているものの、それ以外の核種ではメッシュ分割数の違いによる放出率の差が出ており、特にメッシュ分割数を 1 分割とした場合は、極端に大きな差が出ている。図 25 に、透水量係数を 3 桁遅くした場合の解析結果のグラフを示す。

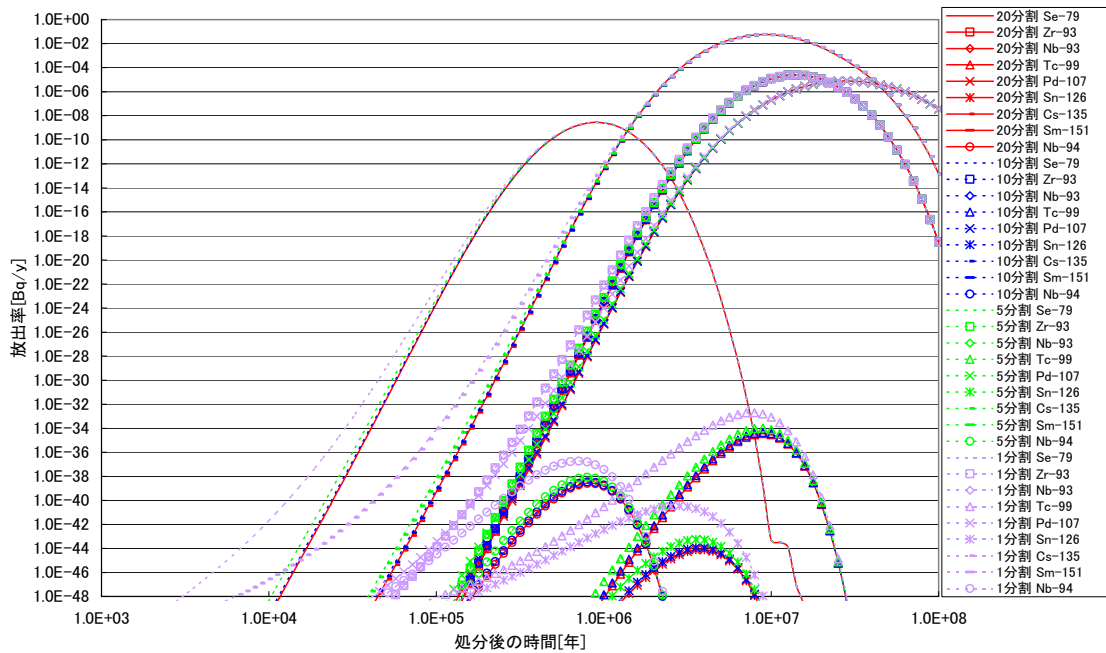


図 25 透水量係数を 3 桁遅くした場合のメッシュ分割数の違いによる  
母岩外側からの放出率の比較 (核分裂生成物系列のみ)

さらに、物性値を時間変化させた場合の影響を見るため、天然バリアの拡散係数、収着分配係数、ダルシー流速を表 13 に示した時間でそれぞれ上下 3 桁変動させた解析を実施した。この結果、放出率の増加部分および低下部分においてはメッシュ分割数の違いによる多少の差はあるものの、どの解析ケースにおいても最大放出率の差は見られなかった。

これらの結果をまとめると、

- ・最大放出率については、放出率の大きい核種は空間メッシュ分割数などの数値計算パラメータを変化させても、ほとんど誤差がでない。一方、Sm-151 のように半減期が短く存在量の少ない核種、放出率の低い核種や物性値の設定によって放出率が低くなる場合は、最大放出率が低くなるに従い数値計算パラメータの影響が大きくなる傾向を示した。
- ・各メッシュ中の核種量が大きく変化するグラフの立ち上がり部分や低下部分においては、数値計算パラメータの違いによって差がでており、放出率が低くなるに従い数値計算パラメータの影響が大きくなる傾向を示した。
- ・物性値を時間変化させる場合、マトリクス拡散方向のメッシュ分割数の影響はほとんど受けない。これ以外の数値計算パラメータについては、放出率の立ち上がり部分において、放出率が低くなるような物性値に変化させる場合には放出率に大きく影響し、放出

率が低くなるに従い数値計算パラメータの影響が大きくなる傾向を示した。

これらの結果から、評価対象核種の存在量がある程度大きい場合や、総線量による評価を行う場合、または解析条件などにより放出率の変動幅がある程度分かっている場合などは、空間メッシュ分割数などを少なくし、解析時間を短縮することが可能であり、例えば総線量に対する物性値の感度特性の把握を行なう場合には、数値計算パラメータを変更し解析時間を短縮することが可能である。

また、この検証を実施するにあたっては、個々の物性値を単独で時間変化させたが、実際の解析では複数の物性値を同時に変化させるため、実際に設定する物性値の最大値を組み合わせて解析を実施し、適切なパラメータ設定を見極める必要がある。

## 6. まとめ

核種移行解析コード **TIGER** の特性を把握し、**TIGER** を用いた効率的な不確実性解析の方法について検討するため、ガラス固化体から断層までの核種移行解析を **TIGER** で行なう場合に考えられる処理方法として①～③を作成し、それぞれ前処理・後処理の作業量、解析時間について比較検討を行った。

この結果、処理方法③(透水量係数分配：図 11)では、人工バリアの解析において、流速の違う複数のチャンネルの解析を人工バリアの解析と同時に行なっており、また処理方法②および処理方法③(透水量係数分配：図 11)では、母岩において流速の違う複数の亀裂の解析を同時に行なっており、このように物性値の異なる解析を同時に行なう場合には **TIGER** 内部で計算ステップがより細かく自動調整されるため、数値計算パラメータを可能な限り最大とした場合でも、放出率の変化が大きい増加部分や低下部分および半減期が短く存在量の少ない **Sm-151** においては解析結果に多少の誤差が生じていた。

こうした計算精度を最大とした解析では、解析時間が 20 時間以上かかっており、本レポートで前提としている、パラメータが時間変化する不確実性解析のように、数百～数千ケースといった複雑な系の解析では、最大放出率での評価がほとんどであること、解析時間および解析ファイル数が最優先であることから、計算精度を低くした解析を実施した。この結果、どの処理方法でも最大放出率は一致しており、解析時間については処理方法①(約 23 分) → 処理方法③(透水量係数分配：図 11)(約 42 分) → 処理方法②(約 54 分) の順に、解析ファイル数については処理方法②(8 個) → 処理方法③(透水量係数分配：図 11)(34 個) → 処理方法①(58 個) の順となった。

さらに、解析ファイル数については、前処理・後処理プログラムを作成することで対処できることから、解析時間がもっとも短かった処理方法①が不確実性解析に最適と考え、この処理方法について計算精度に関わるパラメータと解析時間についての検討を行った。この結果、放出率が低くなるのにしたがって空間メッシュの分割数、母岩の亀裂本数の影響を受けやすく、**Sm-151** のように放出率が低い核種や、物性値の設定によって放出率が低くな

る場合には、数値計算パラメータによる誤差が大きくなるため、ある程度大きなパラメータ設定を行なう必要がある。一方、物性値を時間変化させる場合については、放出率が増加する立ち上がり部分において、放出率が低下するような物性値を設定すると、数値計算パラメータの違いによる誤差が大きくなることがわかった。このため、このような解析を行なう場合には、実際に設定する物性値の最大値を組み合わせて一度解析を実施し、適切なパラメータ設定を見極める必要がある。さらに、上記の検討によって得られた、不確実性解析に最適と考えられる処理方法①と数値計算パラメータを用いた不確実性解析を実行できるように、解析パラメータをランダムに設定する解析支援ツール「STRIDER」の改良と後処理プログラムの作成を行い、これらの動作確認をした結果、正常に動作することを確認した。

これらの結果から、複雑な地質環境を考慮した解析において、TIGER を用いた不確実性解析を実施する場合に最適な処理方法、計算精度、ツールに関する知見を整理することができた。

### 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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99-023（1999）．
- 2)三原守弘，大井貴夫：“パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析コード（TIGER）の開発”，核燃料サイクル開発機構，サイクル機構技報 N0.22 2004.3,JNC TN1340 2003-006(2004).
- 3)電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：“TRU 廃棄物処分技術検討書 ―第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―”，電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構，FEPC TRU-TR2-2005-02，JNC TY1400 2005-013（2005）．
- 4)Golder Associates：“GoldSim Contaminant Transport Module,User’s Guide”，Golder Associates Inc(2001).
- 5)小山田潔，池田孝夫：“核種移行解析の網羅性の確認・評価”，核燃料サイクル開発機構 JNC TJ8400 2000-026(2000).
- 6)K.Wakasugi, H.Makino, Peter Robinson：“The Development of MESHNOTE Code for Radionuclide Migration in the Near Field”，Japan Nuclear Cycle Development Inc, JNC TN8400 99-095(1999).
- 7)白川敏彦，井尻裕二，長坂和佳，松本昌昭：“核種移行解析コード MATRICS による解析の信頼性の検証”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2000-021(2000).



付録

付録 A 不確実性解析支援ツール「STRIDER」の改良と検証

1. 不確実性解析支援ツール「STRIDER」の改良について

STRIDER は、解析コードの入力パラメータをランダムに設定し、指定した数の解析ケースを作成する解析支援ツールである。STRIDER では、解析コードや処理方法が変更になった場合はそのモデルに合わせて改良しなくてはならない。

このため、処理方法①を用いて人工バリアおよび天然バリア（母岩）の解析を連成して実行できるように STRIDER を改良することにした。解析条件を以下に示す。

1.1 解析コード

処理方法①では人工バリアと母岩の解析を個別に行なうため、人工バリアの解析を MESHNOTE で行なうことも TIGER で行なうことも可能である。人工バリアの解析においては、MESHNOTE では初期溶解速度、長期溶解速度などのガラスの溶解速度を変化させることが出来る。一方、TIGER では LEACH-TIME というガラスが溶け切る時間しか設定できないが、MESHNOTE に比べて解析時間が早いというメリットがある。このため、人工バリアの解析を MESHNOTE で行なうバージョンと TIGER で行なうバージョンの 2 種類のプログラムを作成した。

1.2 評価対象核種

評価対象核種としては、総線量の支配核種である Np-237, Th-229, Se-79, Cs-135 の 4 核種とする。ただし、人工バリアの解析においては溶解度分割を考慮しなくてはならないため、アクニチド核種は全系列の解析を行う。

1.3 STRIDER で変化させる人工バリアのパラメータ

人工バリアについては、付表 A-1 に示すパラメータを STRIDER によって変化させる。

付表 A-1 STRIDER で変化させる人工バリアのパラメータ

パラメータ名	備考
緩衝材中の溶解度	核種別に設定
緩衝材への吸着	核種別に設定
緩衝材中の拡散係数	核種別に設定
EDZ通過流量	天然バリアと連動
ガラスの初期溶解速度	MESHNOTEの場合のみ

1.4 STRIDER で変化させる天然バリアのパラメータ

天然バリアについては、付表 A-2 に示すパラメータを STRIDER で変化させる。

付表 A-2 STRIDER で変化させる天然バリアのパラメータ

パラメータ名	備考
亀裂の流速	透水量係数分布の対数平均値を設定
亀裂内の拡散係数	全核種
母岩への吸着	核種別に設定

### 1.5 その他のパラメータ

1.3, 1.4 章で示した以外のパラメータについては, H12 レファレンスケースのパラメータを基準値とする。また, 数値計算パラメータについては, 本文での検証結果を踏まえ, 最大放出率 (または総線量) で評価することを前提に, 付表 A-3 に示した値を用いた。

付表 A-3 STRIDER で用いる数値計算パラメータ一覧

人工バリアのパラメータ	
パラメータ名	値
緩衝材のメッシュ分割数	20
MESHNOTEのTOLERANCE	0.005

天然バリア(母岩)のパラメータ	
パラメータ名	値
亀裂本数	13
各亀裂のメッシュ分割数	20

人工バリア、天然バリアのTIGERのパラメータ	
パラメータ名	値
MATRIX-REFINEMENT	3
SCALE	1
TOLERANCE	1.00E-04

## 2. STRIDER での人工バリアと母岩における流速の計算方法

### 2.1 人工バリアと母岩の流速の連成方法

人工バリアと母岩の連成においては, EDZ 通過流量と母岩の各亀裂の流速を連動して変化させなくてはならない。このため, EDZ 通過流量と各亀裂の流速を以下のようにして求めるようにした。

H12 レファレンスケースでは, EDZ 通過流量を  $0.001[\text{m}^3/\text{y}]$ , 母岩中の動水勾配は  $0.01$ , 亀裂の透水量係数分布は対数平均値 $-9.99$ , 標準偏差  $1.07$  とした対数正規分布に従うとし, 透水量係数分布を亀裂本数で分割した各区間の中央値を各亀裂の透水量係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$ としている。このため, 動水勾配を固定して EDZ 通過流量と亀裂の透水量係数の平均値を連動させて変化させればよいことから, インプットファイルでは亀裂の透水量係数分布の平均値のみを設定させるようにし, プログラム内部で付式 A-1 を用いて設定された亀裂の透水量係数から EDZ 通過流量を求めることにした。

$$Q = 10^{-3+(9.99+\mu)} \dots\dots\dots \text{付式 A-1}$$

$\mu$  : 透水量係数分布の対数平均値

**2.2 対数正規分布から亀裂の流速を計算するための内部計算式**

母岩の亀裂内の流速は、対数正規分布の平均値から上下  $3\sigma$  区間を 13 分割した各区間の中央値を各亀裂の透水量係数として求め、ダルシー流速[m/y]、チャンネル断面積[m<sup>2</sup>]、SPECIFIC-WET-AREA を以下の式で求める。

$$\text{ダルシー流速} = \text{動水勾配} \times \frac{\sqrt{\text{透水量係数}}}{2} \dots\dots\dots \text{付式 A-2}$$

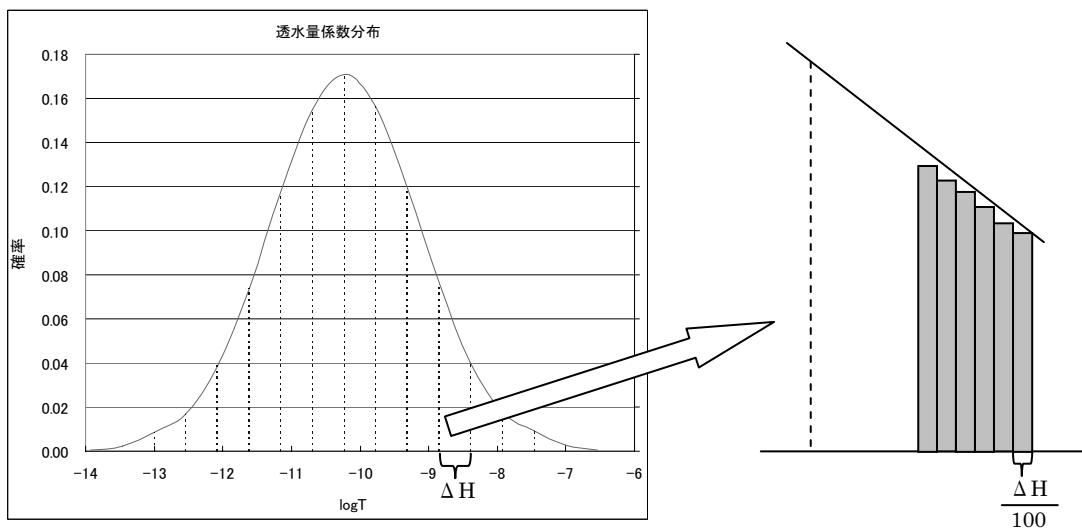
$$\text{チャンネル断面積} = \frac{\text{EDZ通過流量}}{\text{ダルシー流速}} \dots\dots\dots \text{付式 A-3}$$

$$\text{SPECIFIC - WET - AREA} = \frac{\text{マトリクス拡散寄与表面積率}}{\sqrt{\text{透水量係数}}} \dots\dots\dots \text{付式 A-4}$$

また、透水量係数の頻度分布については、付図 A-1 のように、対数正規分布の分割区間  $\Delta H$  をさらに 100 分割し、それぞれの面積を求め足し合わせることで  $\Delta H$  区間の頻度分布を求める。

$$\text{頻度分布} = \sum_{n=1}^{100} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta H_n - \mu)^2}{2\sigma^2}} \times \Delta H \dots\dots\dots \text{付式 A-5}$$

$\sigma$  : 標準偏差



付図 A-1 透水量係数分布から頻度分布を求めるための区間分割例

### 3. STRIDER の入出力ファイル

#### 3.1 入力ファイル

STRIDER の入力ファイルの一覧を付表 A-4 に示す。

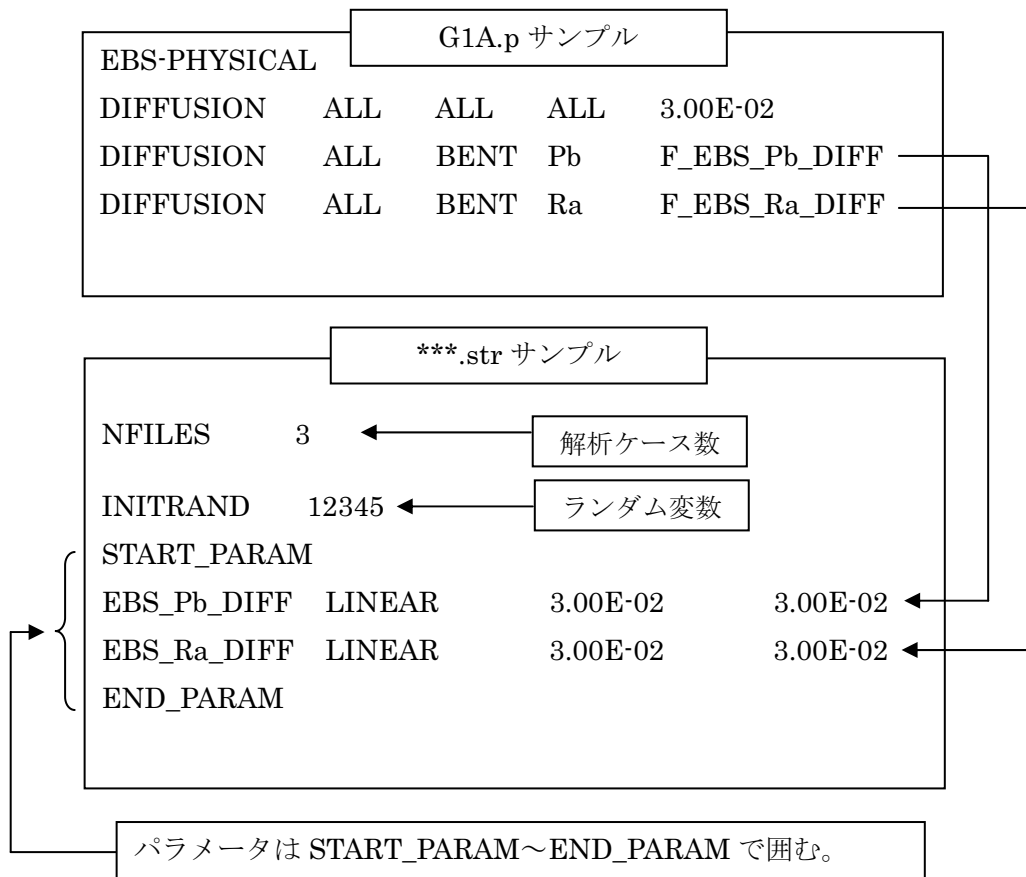
付表 A-4 STRIDER の入力ファイル一覧

G1A.p	人工バリアの入力ファイルのベースファイル
G1B.p	母岩の入力ファイルのベースファイル
***.str	パラメータの定義ファイル

注)\*\*\*は任意の文字列

G1A.p および G1B.p では、変化させるパラメータを F\_パラメータ名の形で記載しておき、\*\*\*.str 内でパラメータ名、LINEAR スケール・LOG スケールどちらで変化させるか、パラメータの変動範囲の開始・終了値を一行で記述する。付図 A-2 に G1A.p と \*\*\*.str のサンプルを示す。

プログラムを実行するには、付表 A-4 に示した 3 つの入力ファイルを STRIDER と同じフォルダに作成しておき、コマンドラインからプログラムを実行する。すると、「\*\* INPUT \*\* TRU-STRIDER FILE ?=」と表示されるので、\*\*\*.str の拡張子 (.str) を除いて入力すると、プログラムが実行される。



付図 A-2 G1A.p および G1B.p のパラメータ設定サンプル

### 3.2 出力ファイル

3.1 章に示した方法でプログラムを実行すると、付表 A-5 に示すファイルが出力される。

付表 A-5 STRIDER の出力ファイル一覧

***_CaseNo.prb	人工バリアの解析ファイル(MESHNOTE時)
***_CaseNo.in	人工バリアの解析ファイル(TIGER時)
***_CaseNo.def	母岩の亀裂の重ね合わせに用いる頻度分布ファイル
***_CaseNo_ChannelNo.in	母岩の各亀裂の解析ファイル
***.bat	解析実行ファイル
***.dsc	***.strのエコー出力ファイル
***.rand	計算されたランダム値の一覧ファイル
***.real	設定されたパラメータの一覧ファイル

\*\*\*\_CaseNo.prb(または\*\*\*\_CaseNo.in)と\*\*\*\_CaseNo\_ChannelNo.in は、STRIDER を実行したフォルダ内の「input」というフォルダ内に作成され、それ以外のファイルは

STRIDER を実行したフォルダ内に作成される。

#### 4. STRIDER を用いた解析の実行方法

解析を実行するには、STRIDER を実行したフォルダにおいてコマンドラインから\*\*\*.bat を実行する。解析用プログラムおよび解析結果ファイルの一覧を付表 A-6 に示す。

付表 A-6 解析プログラム一覧

mesh34.exe	MESHNOTE version 3.4
t16.exe	TIGER version 1.6
marge.exe	核種別に解析したTIGERの解析結果を統合するプログラム
trpost.exe	亀裂の重ね合わせプログラム
getmax.exe	最大放出率とその時間を抽出するプログラム

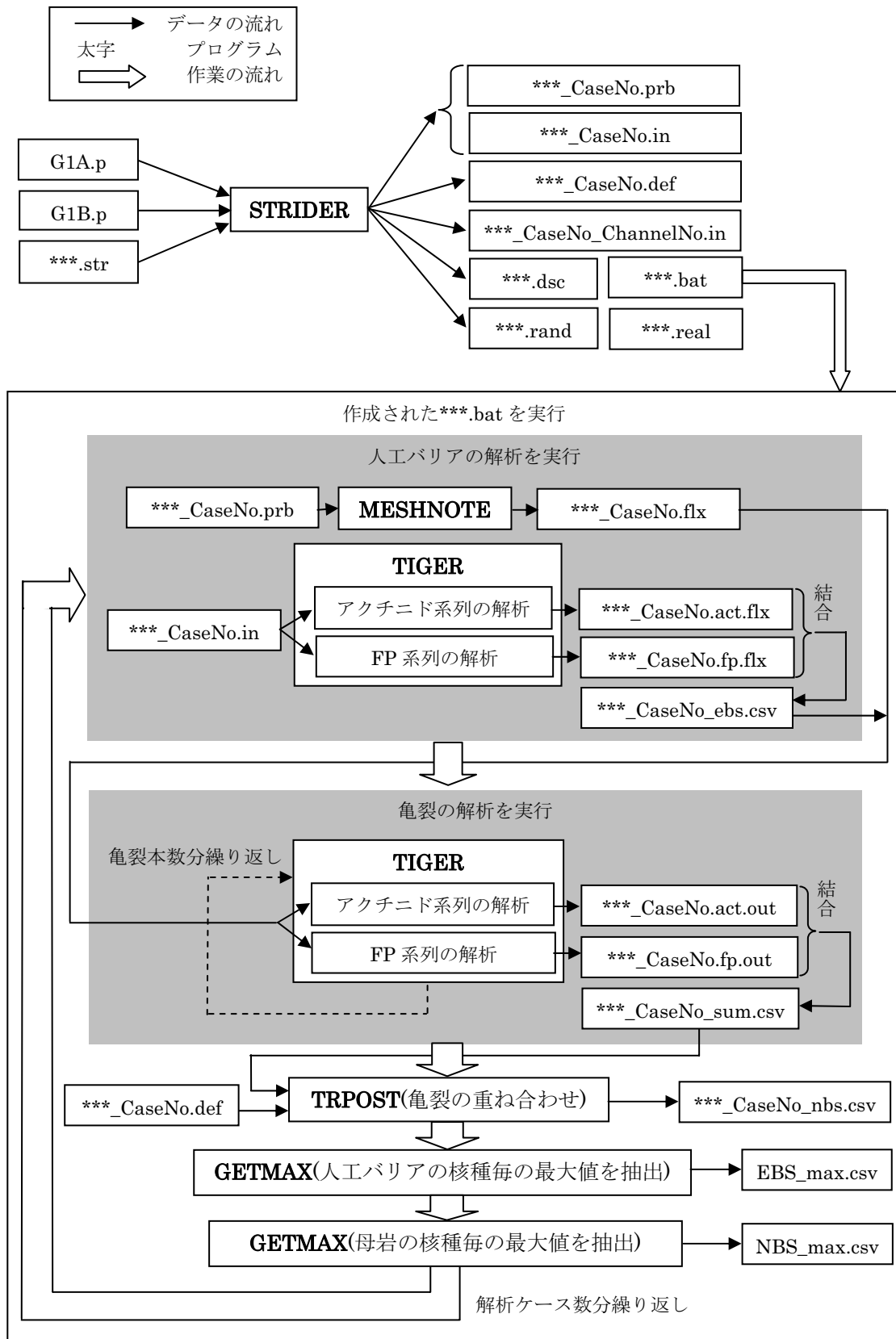
TIGER の解析においては、計算速度を早くするため、TIGER のインプットファイル分割オプション「-sens」を用いてアクチニド核種と FP 核種を別々に計算しており、個別に解析した結果を一つにするためのプログラムが marge.exe である。また、getmax.exe によって、人工バリア、母岩の両方の解析結果から、ケース別に全核種の最大放出率とその時間を抽出する。付表 A-7 に解析結果ファイルの一覧を示す。

付表 A-7 解析結果ファイル一覧

***_CaseNo.flx	人工バリアの解析結果ファイル(MESHNOTE)
***_CaseNo_act.flx	人工バリアのアクチニド核種の解析結果ファイル(TIGER)
***_CaseNo_fp.flx	人工バリアのFP核種の解析結果ファイル(TIGER)
***_CaesNo_ebs.csv	人工バリアの全核種の解析結果ファイル(TIGER)
***_CaseNo_ChainNo_act.out	母岩の各亀裂のアクチニド核種の解析結果ファイル
***_CaseNo_ChainNo_fp.out	母岩の各亀裂のFP核種の解析結果ファイル
***_CaseNo_ChainNo_sum.csv	母岩の各亀裂の全核種の解析結果ファイル
***_CaseNo_nbs.csv	母岩の重ね合わせ後の全核種の解析結果ファイル
EBS_max.csv	全解析結果の人工バリアの最大放出率ファイル
NBS_max.csv	全解析結果の母岩の最大放出率ファイル

\*\*\*\_CaseNo\_ebs.csv , \*\*\*\_CaseNo\_nbs.csv, EBS\_max.csv, NBS\_max.csv はプログラムを実行したフォルダ内の「output」というフォルダに作成され、それ以外のファイルはプログラムを実行したフォルダ内に作成される。

付図 A-3 に STRIDER の実行から解析までの一連の流れを示す。



付図 A-3 STRIDER の実行から解析までの流れ図

## 5. STRIDER を用いた解析の解析結果の検証

### 5.1 パラメータ設定機能の動作確認

解析結果の検証を行うために、まず解析ケース数を 2 つとし、変動パラメータを全て固定した解析を MESHNOTE→TIGER および TIGER→TIGER の両方で行い、パラメータが適切に置き換えられるかを検証する。なお、パラメータは全て H12 レポートのレファレンスケースの値を用いた。

この結果、MESHNOTE→TIGER および TIGER→TIGER のどちらでも、すべてのパラメータが正常に置き換えられていることを確認した。また、各亀裂の流速に関するパラメータについて、EXCEL を用いて計算した結果と比較した結果、これらは一致しており正常に計算されていることを確認した（付表 A-8 参照）

付表 A-8 各亀裂の流速に関わるパラメータの解析結果と EXCEL による計算結果の比較

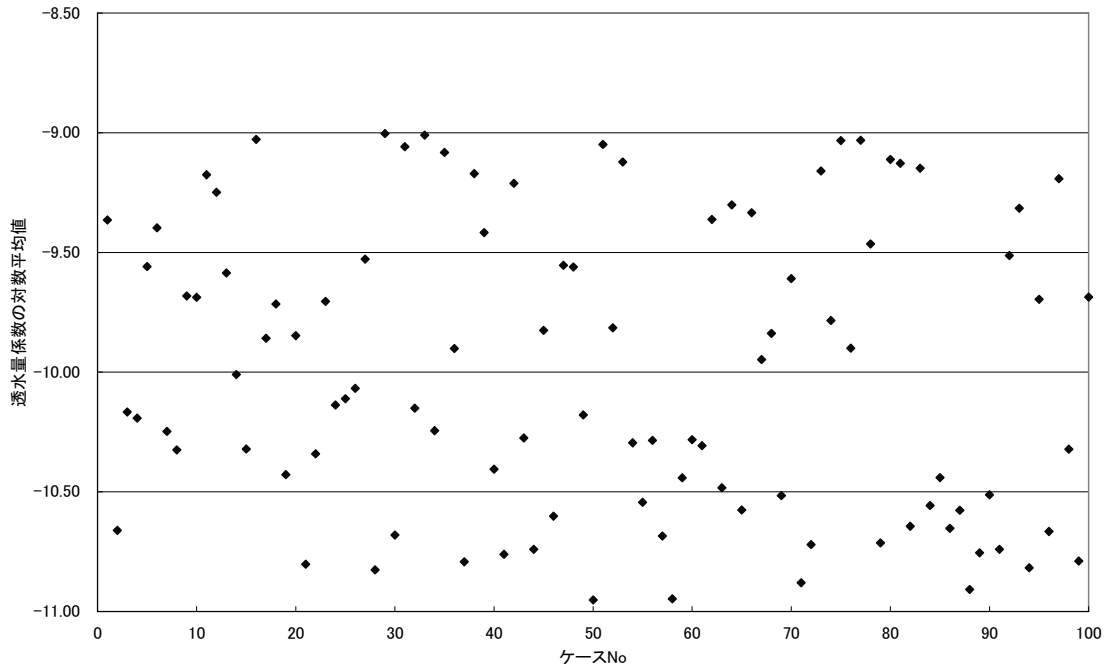
亀裂番号	解析結果			EXCELによる計算結果			
	ダルシー流速[m/y]	チャンネル断面積[m <sup>2</sup> ]	拡散寄与表面積[-]	透水量係数[m <sup>2</sup> /s]	ダルシー流速[m/y]	チャンネル断面積[m <sup>2</sup> ]	拡散寄与表面積[-]
1	4.15E-02	2.41E-02	1.90E+06	6.91E-14	4.15E-02	2.41E-02	1.90E+06
2	7.62E-02	1.31E-02	1.04E+06	2.33E-13	7.62E-02	1.31E-02	1.04E+06
3	1.40E-01	7.14E-03	5.63E+05	7.88E-13	1.40E-01	7.14E-03	5.63E+05
4	2.57E-01	3.89E-03	3.07E+05	2.66E-12	2.57E-01	3.89E-03	3.07E+05
5	4.73E-01	2.12E-03	1.67E+05	8.98E-12	4.73E-01	2.12E-03	1.67E+05
6	8.69E-01	1.15E-03	9.08E+04	3.03E-11	8.69E-01	1.15E-03	9.08E+04
7	1.60E+00	6.27E-04	4.94E+04	1.02E-10	1.60E+00	6.27E-04	4.94E+04
8	2.93E+00	3.41E-04	2.69E+04	3.45E-10	2.93E+00	3.41E-04	2.69E+04
9	5.39E+00	1.86E-04	1.46E+04	1.17E-09	5.39E+00	1.86E-04	1.46E+04
10	9.90E+00	1.01E-04	7.97E+03	3.94E-09	9.90E+00	1.01E-04	7.97E+03
11	1.82E+01	5.50E-05	4.34E+03	1.33E-08	1.82E+01	5.50E-05	4.34E+03
12	3.34E+01	2.99E-05	2.36E+03	4.49E-08	3.34E+01	2.99E-05	2.36E+03
13	6.14E+01	1.63E-05	1.28E+03	1.52E-07	6.14E+01	1.63E-05	1.28E+03

なお、解析時間については、MESHNOTE→TIGER では約 5 分、TIGER→TIGER では約 4 分であった。

### 5.2 パラメータのランダム設定機能の動作確認

次に、MESHNOTE→TIGER を用いて解析ケース数を 100 ケースとし、透水量係数分布の対数平均値を-8.99~-10.99 まで Linear スケールで変化させた解析を行った。付図 A-4 に STRIDER が設定するパラメータの一覧ファイル\*\*\*.real に記述されている透水量係数分布のグラフを示す。この図から、指定した範囲内で適切にパラメータが設定されていることが分かる。





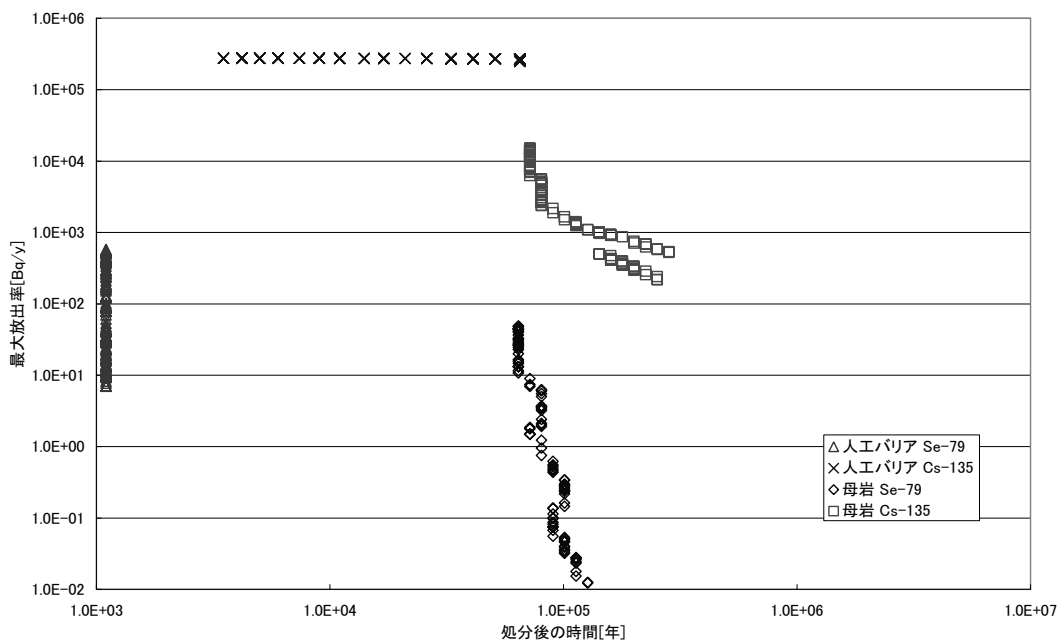
付図 A-4 STRIDER が設定した透水量係数分布の対数平均値の一覧

また、付式 A-1 を用いて上記の透水量係数分布の対数平均値から EDZ 通過流量を求め、求めた値と全ての\*\*\*\_CaseNo.prb に設定されている EDZ 通過流量が一致するかを検証した。この結果、すべて一致しており、EDZ 通過流量についても正常に設定されていることを確認した。

さらに、透水量係数分布に連動したダルシー流速、チャンネル断面積および SPECIFIC-WET-AREA が適切に設定されているか確認しようと考えたが、この解析では亀裂の入力ファイルは 1300 個あり、すべてのファイルの内容を確認すると時間がかかりすぎるため、ランダムに選んだ 10 ケースについてのみ 5.1 章に示した方法と\*\*\*.real に記載された透水量係数分布の対数平均値を用いて確認を行った。この結果、10 ケース全ての亀裂において EXCEL による計算結果と一致しており、正常に設定されていることを確認した。

解析結果については、Se-79, Cs-135 とともに天然バリアにおいてばらつきが見られる（付図 A-5）。Se-79 については、人工バリア中で放出率が最大となる時間の差がわずかな場合でも母岩中の流速の差によって更に差が大きくなっているためであり、Cs-135 については、人工バリア中では  $1.0E+5$  年程度で放出率が最大となる時間が頭打ちとなるが、母岩中では流量の差によって放出率が最大となる時間が同じでも、最大放出率に差が出ているためであり、プログラムの問題ではないことを確認した。

なお、解析時間は 3 時間 52 分であった。



付図 A-5 透水量係数分布の対数平均値を-10.99~-9.99 まで変動させた解析結果

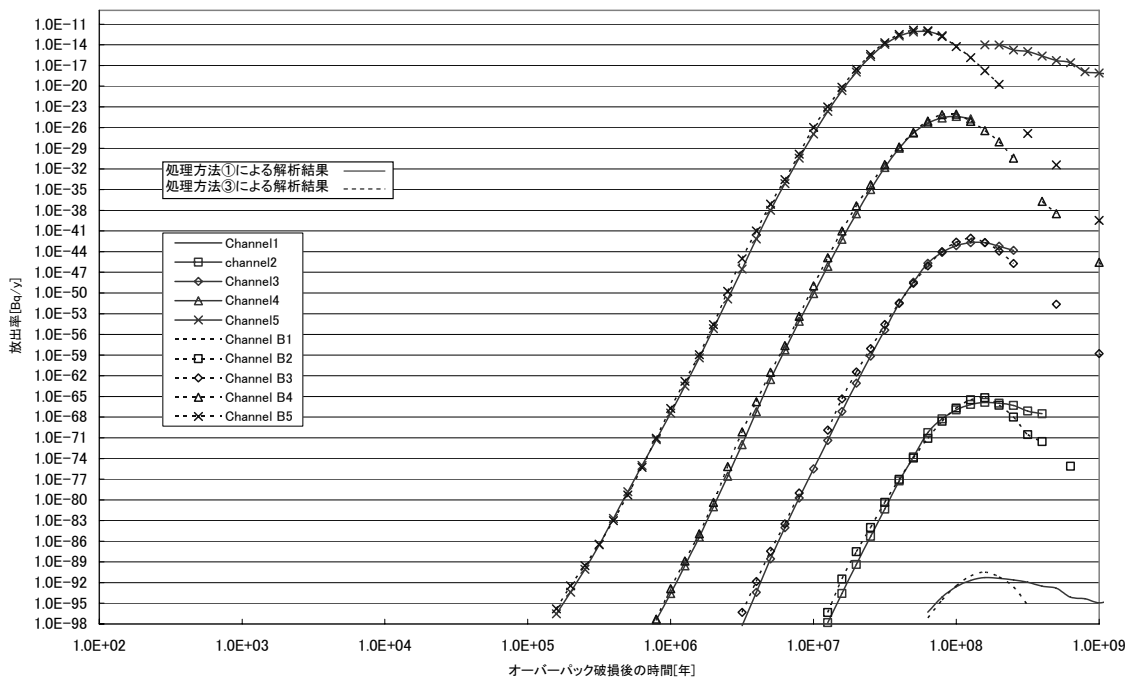
付録 B 直列した亀裂における流量のマスバランスを一致させることによる核種放出率への影響

本文 4.1 章で示した処理方法③ (TIGER 本来の機能: 図 8) について, Channel A と Channel B の流量を一致させた解析を実施し, 意図した結果が得られるか検証した。付表 B-1 に Channel B の各亀裂に設定したパラメータの一覧を示す。

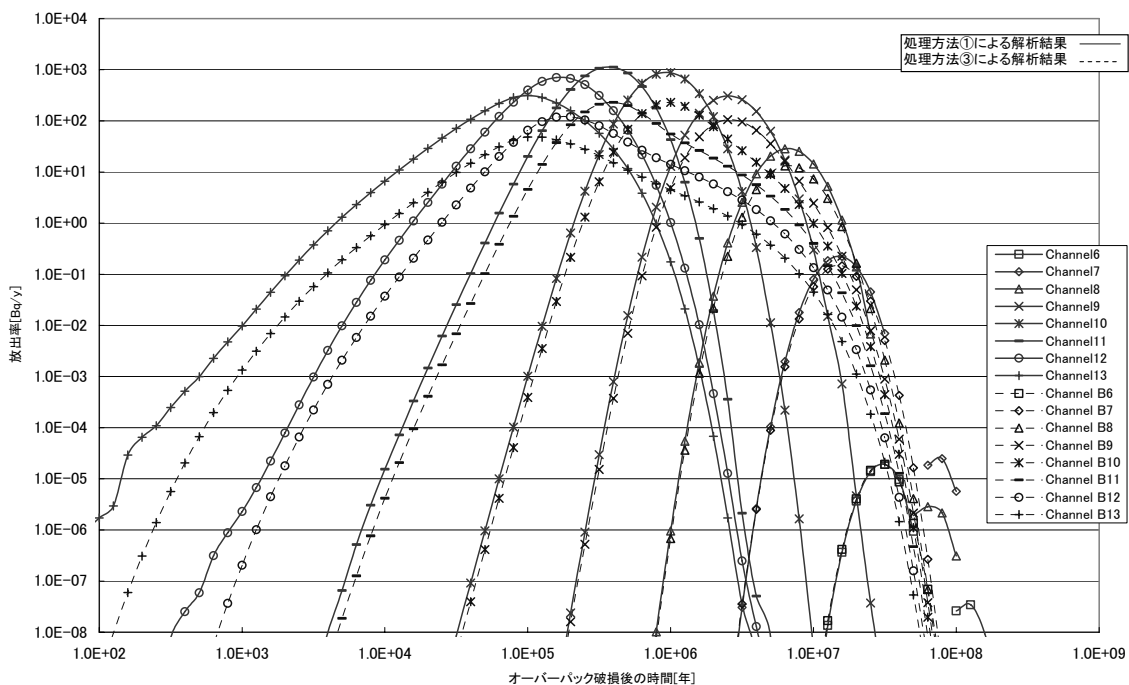
付表 B-1 Channel B の各亀裂内のダルシー流速, チャンネル断面積および亀裂内流量

亀裂番号	ダルシー流速 [m/y]	チャンネル断面積 [m <sup>2</sup> ]	亀裂内流量[m <sup>3</sup> /y]
Channel B1	4.15E-02	7.96E-02	3.30E-03
Channel B2	7.62E-02	1.29E-01	9.83E-03
Channel B3	1.40E-01	2.06E-01	2.88E-02
Channel B4	2.57E-01	2.59E-01	6.65E-02
Channel B5	4.73E-01	2.56E-01	1.21E-01
Channel B6	8.69E-01	1.99E-01	1.73E-01
Channel B7	1.60E+00	1.22E-01	1.95E-01
Channel B8	2.93E+00	5.90E-02	1.73E-01
Channel B9	5.39E+00	2.24E-02	1.21E-01
Channel B10	9.90E+00	6.72E-03	6.65E-02
Channel B11	1.82E+01	1.58E-03	2.88E-02
Channel B12	3.34E+01	2.94E-04	9.83E-03
Channel B13	6.14E+01	5.38E-05	3.30E-03

付図 B-1 および付図 B-2 に, 処理方法①および処理方法③ (TIGER 本来の機能: 図 8) による Cs-135 の Channel B からの放出率の比較グラフを示す。

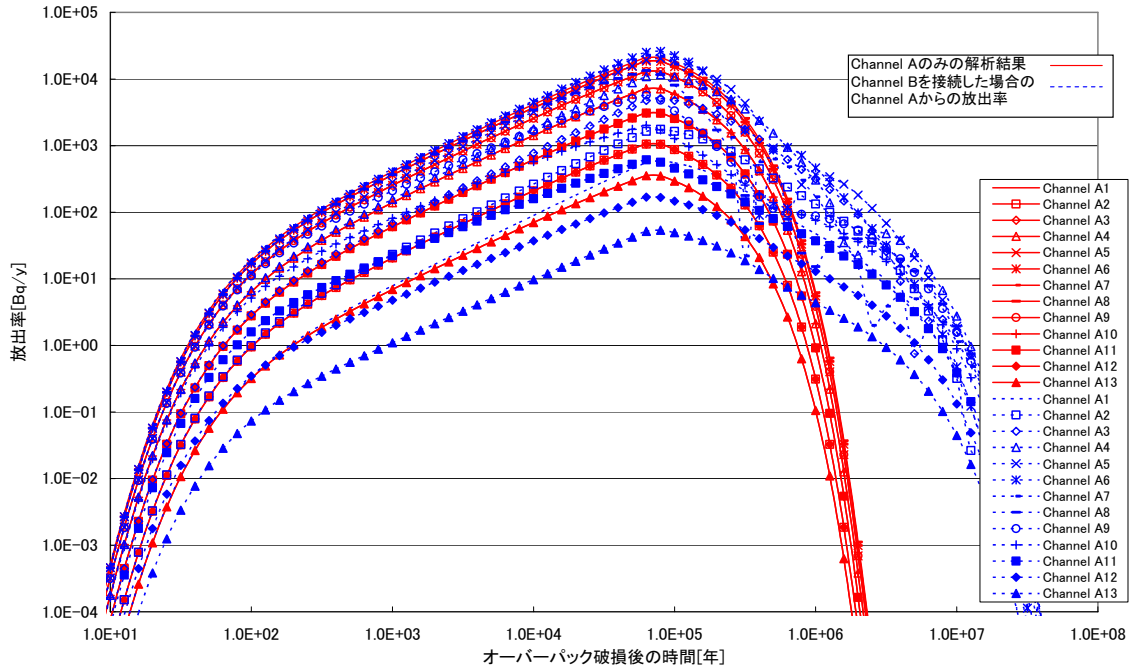


付図 B-1 処理方法①および処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 8) による  
Cs-135 の解析結果の比較 (Channel B1~5)



付図 B-2 処理方法①および処理方法③ (TIGER 本来の機能 : 図 8) による  
Cs-135 の解析結果の比較 (Channel B6~13)

付図 B-1 および付図 B-2 を見ると、Channel 4~6 では放出率がほぼ一致しているが、それ以外のチャンネルでは大きく異なっている。このため、Channel A のみで解析した場合と Channel A と Channel B を接続して解析した場合の Channel A からの放出率を比較したが（付図 B-3）、やはり解析結果は一致しなかった。



付図 B-3 Channel A のみでの解析結果と Channel A と Channel B を接続した場合の Channel A からの放出率の比較 (Cs-135)

これらの結果から、Channel B のなんらかのパラメータが、Channel A における移行量の分配率に影響していることが考えられる。ここで、Channel B において、チャンネル毎に異なるパラメータはチャンネル断面積、ダルシー流速、マトリクス拡散寄与表面積の3つである。マトリクス拡散寄与表面積はチャンネル断面積およびダルシー流速から求められるため、チャンネル断面積とダルシー流速を以下のように変更した解析を行い、Channel A からの放出率がどのように変わるか検証した。

#### 解析ケース①

すべての亀裂に同じダルシー流速を与える。各亀裂の流量はダルシー流速×チャンネル断面積で求められるため、チャンネル断面積はすべての亀裂の流量が Channel A と同じになるように設定する。

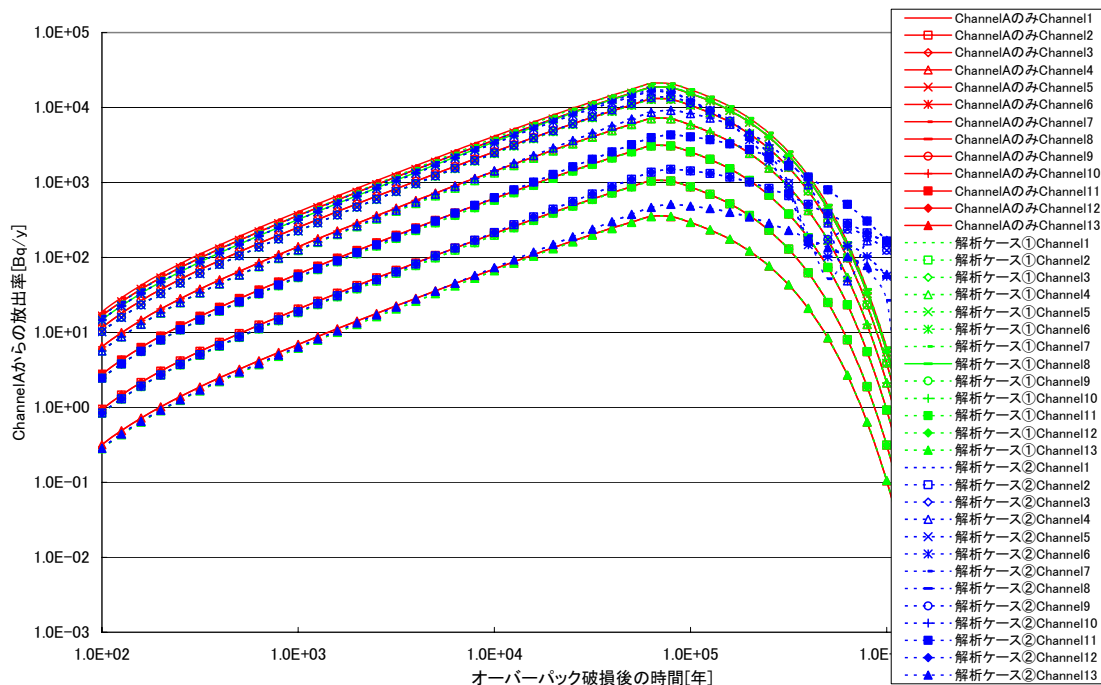
解析ケース②

すべての亀裂に同じチャンネル断面積を与える。各亀裂の流量はダルシー流速×チャンネル断面積で求められるため、ダルシー流速はすべての亀裂の流量が Channel A と同じになるように設定する。

付表 B-2 解析ケース①および解析ケース②で設定したパラメーター一覧

	ChannelAの 流量[m <sup>3</sup> /y]	解析ケース①		解析ケース②	
		ダルシー流速 [m/y]	チャンネル 断面積[m <sup>2</sup> ]	ダルシー流速 [m/y]	チャンネル 断面積[m <sup>2</sup> ]
Channel B1	0.003302312	0.1	0.03302312	0.03302312	0.1
Channel B2	0.009828902	0.1	0.09828902	0.09828902	0.1
Channel B3	0.028821502	0.1	0.28821502	0.28821502	0.1
Channel B4	0.066534188	0.1	0.66534188	0.66534188	0.1
Channel B5	0.120929709	0.1	1.20929709	1.20929709	0.1
Channel B6	0.173067315	0.1	1.73067315	1.73067315	0.1
Channel B7	0.195032142	0.1	1.95032142	1.95032142	0.1
Channel B8	0.173067315	0.1	1.73067315	1.73067315	0.1
Channel B9	0.120929709	0.1	1.20929709	1.20929709	0.1
Channel B10	0.066534188	0.1	0.66534188	0.66534188	0.1
Channel B11	0.028821502	0.1	0.28821502	0.28821502	0.1
Channel B12	0.009828902	0.1	0.09828902	0.09828902	0.1
Channel B13	0.003302312	0.1	0.03302312	0.03302312	0.1

Channel A の各チャンネルからの Cs-135 の放出率の比較グラフを付図 B-4 に示す。



付図 B-4 解析ケース①と解析ケース②における Cs-135 の Channel A からの放出率の比較

付図 B-4 を見ると、解析ケース①による Channel A からの放出率は Channel A 単独で解析した場合と一致しているが、解析ケース②では Channel B の各チャンネルにおけるダルシー流速の比率が Channel A と同じにもかかわらず、Channel A 単独での解析結果とは一致していない。

さらに、解析ケース①からダルシー流速のみ 10 倍、チャンネル断面積のみ 10 倍とした解析を実施したが、これらの解析結果は Channel A 単独で解析した場合と一致していた。しかし、各チャンネルのチャンネル断面積の比率を変えると放出率は一致しなかった。

また、亀裂が一本だけの場合は下流側の流速やチャンネル断面積が上流側へ影響しないことから、処理方法③（TIGER 本来の機能：図 8）のように、1 つのジャンクションに対して複数のチャンネルを接続する場合、上流側と下流側のチャンネルで流量が同じであっても、下流側のチャンネルのダルシー流速やチャンネル断面積が上流側と異なる場合、上流側にも影響することが分かった。

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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>-1</sup> ・m <sup>1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s <sup>1</sup> ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-4</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	Pa・s	m <sup>1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
表角速度	ラジアン毎秒	N/m	kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	m <sup>1</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>1</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎キログラム	W/m <sup>2</sup>	kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup>
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	W/(m・K)	m <sup>1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup>
体積電荷	クーロン毎立方メートル	V/m	m <sup>1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s <sup>1</sup> ・A
誘電率	ファラド毎メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>1</sup> ・A
透磁率	ヘンリー毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	H/m	m <sup>1</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>1</sup> ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>1</sup> ・s <sup>-3</sup>

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G ≅ 10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe ≅ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≅ 10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	X	1 X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> 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	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

