

ファーフールド核種移行解析コードの改良 概要版

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1991年 8 月



日揮株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂 1 - 9 - 13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

ファーフールド核種移行解析コードの改良

中 居 邦 ※
高 瀬 博 ※
※ 浩
※ 康

要 旨

地質環境中の岩体は、多くの場合、亀裂等の高透水性箇所を有し、このため核種移行における遅延効果を現実的に定式化するためには、亀裂中での速い移行と亀裂表面から健全な岩体部への遅い拡散及び吸着の双方を並行的に解析するモデル（二重空隙モデル）を用いる必要がある。

本研究は、動力炉・核燃料開発事業団殿が平成3年度までに実施予定の概括的性能評価の対象となる広範な条件下で、安定な解を導出することを可能とするよう、昭和57年度に開発されたROCKコードの数値解析手法を改良することを目的として実施した。

この目的のため、解析条件の整理、数値解析手法の検討を行い、その中から可能性のある手法を選定し、それをもとに計算コードを改良した。また、改良したコードを用いて計算した結果を検証済の数値解析コードRANCHMD及び解析解の計算結果を比較することによって、計算結果の妥当性を検証した。

数値解析手法としては、主として、対流差分法の導入、不均質媒体に対する一般化、及び、亀裂内と岩体内の差分式の繰り返し計算による連立の3点を改良し、概ね良好で安定な解が導出できることが明らかとなった。

本報告書は、日揮株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：020D0176

事業団担当部課室および担当者： 環境技術開発推進本部 主幹 増田純男

※：日揮株式会社 原子力・高度技術事業本部 S・プロジェクト部

Improvement of the Computer Code Analyzing Nuclide Migration in Far-Field

※
Kunihiro Nakai
※
Hiroyasu Takase

Abstract

In many cases, higher permeable structure such as fracture system may be included in the rock in geosphere. Therefore, in order to express the retardation effect in nuclide migration realistically, it is necessary to use dual porosity model which analyse simultaneously both of fast migration in fracture and slow diffusion and sorption into the fine rock.

This study is performed in order to improve the numerical analysis method of ROCK code developed by PNC in 1982, so that the stable solution can be obtained under the extensive range of conditions used in the general performance assessment which will be performed by PNC until the end of 1991 fiscal year. For this purpose, we performed the review of analytical condition and numerical analysis method, and improved the computer code on these study. The improved computer code was verified by the comparison of the calculated results with those of numerical analysis code RANCHMD and analytical solutions.

The major points of improvement are use of convective-difference scheme, generalization of finite-difference equation for inhomogeneous media and introduction of iteration scheme for system of two equations. As a result of these improvement, accurate and stable solution can be obtained in fairly large domain.

Work performed by JGC Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

P N C Liaison : Radioactive Waste Management Project Sumio Masuda

※ : S Project Department, No.2 Project Operations Division,
Nuclear & Advanced Technology Division, JGC Corporation

目 次

1. 解析条件の整理	1
1.1 対象とする系	1
1.2 数学モデル	1
1.3 解析条件	2
2. 種々の数値解析手法の比較及び最適な手法の選択	3
3. ROCKコードの改良	5
3.1 解析体系	5
3.2 差分方程式	6
3.3 差分方程式の解法及び計算コード	7
3.4 試計算	8
4. 検 証	8
4.1 RANCHMDコードとの比較	8
4.2 解析解との比較	9
5. まとめ及び今後の課題	10
参考文献	18
表4.1 コードの検証にあたって設定した固定計算条件	13
表4.2 コードの検証にあたって設定した計算条件及び計算ケース	14
表4.3 解析解との比較にあたっての計算条件	15
図1.1 亀裂系岩盤に対する解析体系概念図	1
図3.1 媒体の特性と計算点の関係概念図	5
図3.2 プログラムの概略フロー	11
図3.3 $N_p - 237$ の約10000年後の濃度分布	12
図4.1 RANCHMDコードとの比較 (CASE 01)	16
図4.2 RANCHMDコードとの比較 (CASE 02)	17

1. 解析条件の整理

1.1 対象とする系

実際の岩体においては、種々の特性から成る一次空隙、二次空隙が組み合わさったものであるが、亀裂を有する岩体中の核種移行を解析するにあたっては、少なくとも一次空隙及び二次空隙を含むものである必要がある。これら2種類の空隙を考慮したモデルは、Neretnieks等¹⁾によって提案され、本研究においてもこのモデルを用いるものとする。

亀裂を有する岩体に対する最も単純なモデルの概念を図1.1に示す。

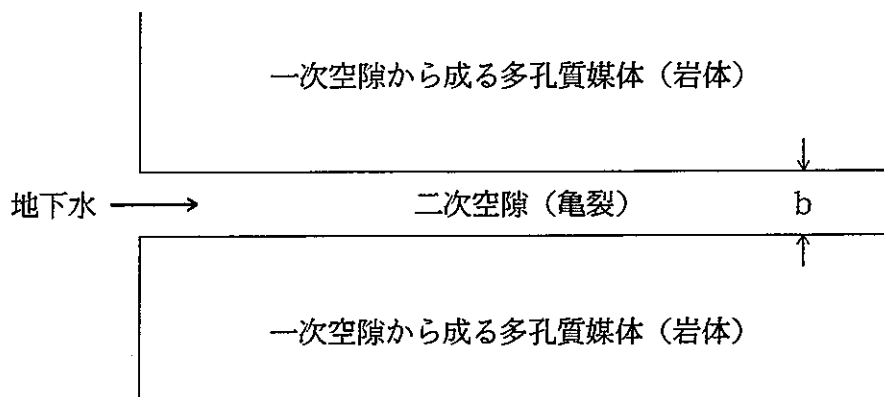


図 1.1 亀裂系岩盤に対する解析体系概念図

1.2 数学モデル

上記の概念モデルにおいて、亀裂断面内では分子拡散と分散によって核種の完全な混合が生じているとの仮定のもとでは、亀裂内及び岩体内部における地下水中の核種濃度について、次式が成立する。

$$\varepsilon_1 R_{1i} \frac{\partial C_i}{\partial t} = \varepsilon_1 D_{1i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \varepsilon_1 V \frac{\partial C_i}{\partial x} - \varepsilon_1 R_{1i} \lambda_i C_i + \varepsilon_1 R_{1, i-1} \lambda_{i-1} C_{i-1} + \frac{2}{b} \varepsilon_2 D_{2i} \frac{\partial M_i}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 R_{2i} \frac{\partial M_i}{\partial t} = \varepsilon_2 D_{2i} \frac{\partial^2 M_i}{\partial y^2} - \varepsilon_2 R_{2i} \lambda_i M_i + \varepsilon_2 R_{2, i-1} \lambda_{i-1} M_{i-1} \quad (2)$$

また、亀裂と岩体の境界面においては、次式によって核種濃度の連続性が記述される。

$$C_i(t, x) = M_i(t, x, 0) \quad (3)$$

上記、(1)～(3)式で用いた記号の意味は、以下のとおりである。

- C_i : 亀裂内間隙水中核種濃度 [Bq/m³]
 M_i : 岩体内間隙水中核種濃度 [Bq/m³]
 t : 経過時間 [y]
 x : 端点からの距離 [m]
 y : 亀裂との境界面から岩体内部への距離 [m]
 ε_1 : 亀裂内充填物の間隙率 [-]
 ε_2 : 岩体の間隙率 [-]
 D_{1i} : 亀裂内間隙水中の拡散係数 [m²/y]
 D_{2i} : 岩体内間隙水中の拡散係数 [m²/y]
 R_{1i} : 亀裂内充填物の遅延係数 [-] ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \rho_1 Kd_{1i}$
 R_{2i} : 岩体の遅延係数 [-] ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \rho_2 Kd_{2i}$
 Kd_{1i} : 亀裂内充填物の分配係数 (ml/g)
 Kd_{2i} : 岩体の分配係数 (ml/g)
 ρ_1 : 亀裂内充填物の粒子密度 (g/cm³)
 ρ_2 : 岩体の粒子密度 (g/cm³)
 V : 亀裂内地下水流速 [m/y]
 b : 亀裂幅 [m]

1.3 解析条件

- (1) 岩体深部の境界条件については、濃度勾配を0とする。
- (2) 亀裂入口における境界条件については、次式で示された濃度で与える方法を用いる。
- (3) 亀裂出口における境界条件については、その濃度を0とする。
- (4) 亀裂特性に関するパラメータ
 - ① 亀裂幅については、解析上考慮すべき範囲は、0.1 mm～1 mm 程度である。
 - ② 亀裂内に充填物が存在するケースは現在のところ想定されていない。
 - ③ 亀裂長さについては、0.1m～10km程度になると考えられる。
 - ④ 亀裂内地下水流速については、1 m/y～1,000 m/y 程度と考えられている。
 - ⑤ 分散長については、概ね 1～100m程度である。
- (5) 岩体特性に関するパラメータ
 - ① 岩体の間隙率については、0.01～0.3 程度の値が設定されている。
 - ② 粒子密度は岩体の種類によってあまり差はなく、2.5～2.7 (g/cm³) 程度である。
 - ③ 全ての核種に対する分配係数の範囲は 0～10000(ml/g) 程度であり、TRU核種につ

いては100 ~10000(ml/g) 程度の分配係数が想定されている。

- ④ 拡散係数としては、屈曲率を考慮すると $1 \times 10^{-11} \sim 3 \times 10^{-10}$ [m^2/s]程度となる
- ⑤ 岩体深部において濃度勾配が0となる浸透深さについては、対象とする系の大きさに応じて以下のように設定されている。

亀裂開口幅 0.1 mm の場合 : 0.05 ~ 5 m

亀裂開口幅 1.0 mm の場合 : 0.5 ~ 50 m

2. 種々の数値解析手法の比較及び最適な手法の選択

核種の移行現象を記述した偏微分方程式を解くための数値解法として、普通用いられているものは、①差分法 (finite-difference method, FDM)、②有限要素法 (finite element method, FEM)、③モンテカルロ法等があるが、亀裂系岩体中の核種移行を解析する手法として最も適合し、かつ、実績のある差分法 (FDM)について検討するものとする。

(1) 空間に対する差分式²⁾

空間に対する差分式は、テイラー展開によって導出され、2次精度の式や4次精度の式がよく適用されている。スイスで開発された RANCHMD³⁾は4次精度の差分式を用いている。

また、格子間隔が不等間隔の場合についても、差分式が導出でき、均等間隔で2次精度の差分式を不等間隔とすると一般に1次の精度となるが、格子間隔が徐々に変化する場合には、2次相当となることが知られている。本コードの改良にあたって不等間隔格子に対する差分式を用いた。

(2) 時間に対する差分²⁾

時間に対する差分法は、大きく陽解法と陰解法に分類され、陽解法の代表的なものとしてはオイラー前進差分法が、陽解法の代表的なものとしてはクランク・ニコルソン法がある。オイラー前進差分法は、既知の値から次の時間ステップの値を直接計算するものであるが、その反面、時間と空間のメッシュについて、クーラン及びハートの安定条件によって厳しく制限される。一方、代表的な陰解法であるクランク・ニコルソン法は、空間及び時間に対して対称となるような差分式であり、ノイマンの安定性判定法によれば、無条件安定となるが、この場合も格子レイノルズ数 ($R = a_2 \Delta x / a_1$) が適度に大きく、かつ、クーラン数 ($C = a_2 \Delta t / \Delta x$) が2を越える時、その係数行列が優対角でなくなるため、解が不安定になることが知られている。これを解決する方法として、Robert-Weiss対流差分

法 (convective-difference scheme) による上流化がある。この方法によれば、

- ① 2次の精度
- ② ノイマンの方法による無条件安定
- ③ 係数行列の優対角の確保

を得ることができるため、本コードの改良にあたっても用いるものとした。

(4) 亀裂と岩体の連立

亀裂系岩体中の核種移行を記述する基礎方程式では、亀裂内と岩体中の2つの1次元の偏微分方程式が水中濃度とフラックスの連続性条件によって連立されている。従来のROCKコードにおいては、亀裂から岩体へのフラックス項以外の項について、時間ステップ $(n+1/2)$ の回りに対称に差分化し、フラックス項については、時間ステップ n の値を用いて、2つの偏微分方程式を連結していた。この方法では、フラックス項が移流項や拡散項に比べて十分小さい場合にしか解が安定しないため、岩体方向の浸透深さ及び分割幅を大きくするとともに、時間ステップを大きくとれない等、現在想定されている解析条件に適用することは極めて困難であった。

一方、スイスで開発されたRANCHMDコードにおいては、(4)式及び(5)式の全ての項について、時間ステップ $(n+1/2)$ の回りに対称に差分化し、亀裂方向の分割数を N 、岩体方向の分割数を M とした等、 $N \times M$ の行列式で差分式を記述するという方法を採用し、行列式を解く効率的な手法を導入し、安定な解を得ることに成功している。

RANCHMDコードにおける連立の方法は最も妥当な方法であるが、巨大な行列式を解く手法の問題を回避するため、従来のROCKコードにおいて、亀裂から岩体へのフラックスとして前ステップの値を用いていた部分を、同一の時間ステップでの計算を収束するまで繰り返すことによって、従来のROCKコードの欠点を克服するという方法を用いる。

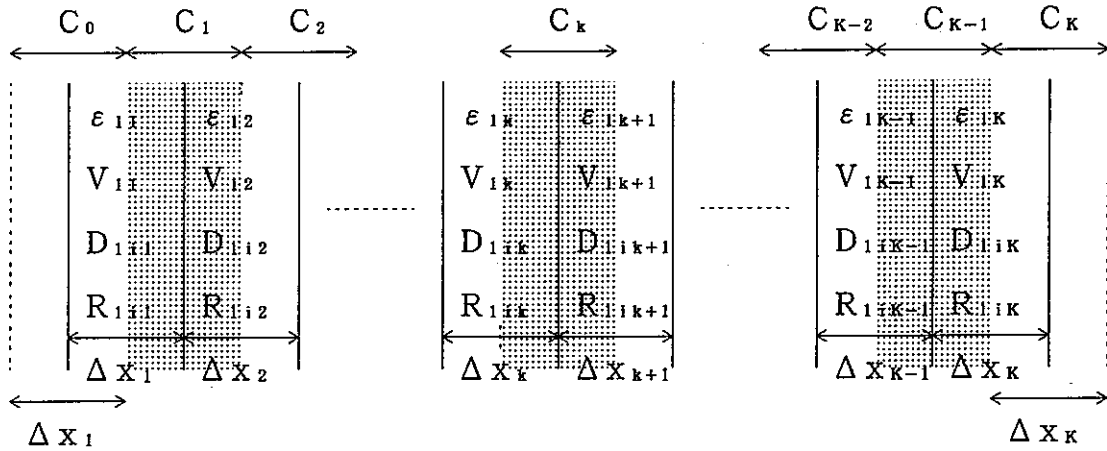
この方法について、パソコンレベルで検討した結果、現在想定されている解析条件においてもある程度安定した解が得られることが確認されたため、この繰り返し計算の方法を用いることにした。

3. ROCKコードの改良

3.1 解析体系

(1) 式及び(2) 式の基礎方程式の差分化にあたって、考慮する計算点と間隙率、遅延係数、拡散係数等の媒体の特性パラメータの関係を図3.1に示す。

[亀裂内]



[マトリクス内]

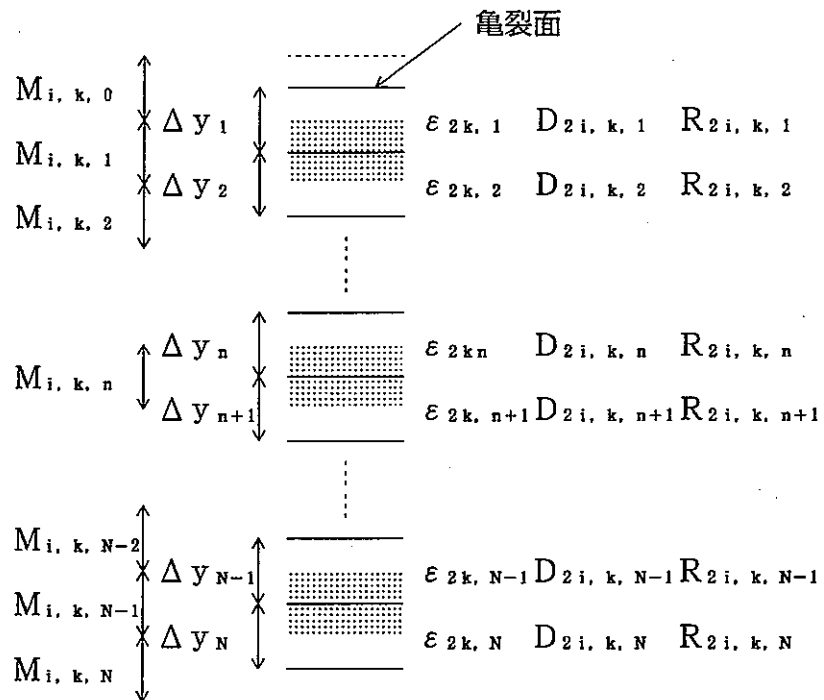


図3.1 媒体の特性と計算点の関係概念図

3.2 差分方程式

図3.1に示したように、差分の1区間ごとに物性値が異なる場合について、一般的に適用できる差分方程式を考える。図中央部の斜線部分における物質収支に基づく Crank-Nicolson 型の差分方程式は次式であらわされる。なお、移流項については、Robert-Weissの対流差分法によって上流化する。

[亀裂内]

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\varepsilon_1 R_{1i,k}} \frac{C_{i,k}^{j+1} - C_{i,k}^j}{\Delta t} \\
 & = \frac{1}{2} \left\{ \frac{D_{1i,k+1} \frac{C_{i,k+1}^j - C_{i,k}^j}{\Delta X_{k+1}} - D_{1i,k} \frac{C_{i,k}^j - C_{i,k-1}^j}{\Delta X_k}}{(\Delta X_k + \Delta X_{k+1}) / 2} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{D_{1i,k+1} \frac{C_{i,k+1}^{j+1} - C_{i,k}^{j+1}}{\Delta X_{k+1}} - D_{1i,k} \frac{C_{i,k}^{j+1} - C_{i,k-1}^{j+1}}{\Delta X_k}}{(\Delta X_k + \Delta X_{k+1}) / 2} \right\} \\
 & - \frac{U}{2} \left\{ \frac{C_{i,k+1}^j - C_{i,k}^j}{\Delta X_{k+1}} + \frac{C_{i,k}^{j+1} - C_{i,k-1}^{j+1}}{\Delta X_k} \right\} \\
 & - \frac{\varepsilon_1 R_{1i,k} \lambda_i}{2} \left\{ C_{i,k}^j + C_{i,k}^{j+1} \right\} + \frac{\varepsilon_1 R_{1i-1,k} \lambda_{i-1}}{2} \left\{ C_{i-1,k}^j + C_{i-1,k}^{j+1} \right\} \\
 & + \frac{1}{b} \varepsilon_{2k,1} D_{2i,k,1}^0 \left\{ \frac{M_{i,k,1}^j - M_{i,k,0}^j}{\Delta y_1} + \frac{M_{i,k,1}^{j+1} - M_{i,k,0}^{j+1}}{\Delta y_1} \right\} \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\varepsilon_1 R_{1i,k} = \frac{\Delta X_k \varepsilon_{1k} R_{1i,k} + \Delta X_{k+1} \varepsilon_{1,k+1} R_{1i,k+1}}{\Delta X_k + \Delta X_{k+1}} \dots\dots\dots (5)$$

$$D_{1i,k} = \varepsilon_{1k} \cdot D_{1i,k}^0 \dots\dots\dots (6)$$

$$U = \varepsilon_{1k} \cdot V_{1k} = \text{一定} \dots\dots\dots (7)$$

[岩体内]

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\varepsilon_{2k,n} R_{2i,k,n}} \frac{M_{i,k,n}^{j+1} - M_{i,k,n}^j}{\Delta t} \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{D_{2i,k,n+1} \frac{M_{i,k,n+1}^j - M_{i,k,n}^j}{\Delta y_{n+1}} - D_{2i,k,n} \frac{M_{i,k,n}^j - M_{i,k,n-1}^j}{\Delta y_n}}{(\Delta y_n + \Delta y_{n+1}) / 2} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{D_{2i,k,n+1} \frac{M_{i,k,n+1}^{j+1} - M_{i,k,n}^{j+1}}{\Delta y_{n+1}} - D_{2i,k,n} \frac{M_{i,k,n}^{j+1} - M_{i,k,n-1}^{j+1}}{\Delta y_n}}{(\Delta y_n + \Delta y_{n+1}) / 2} \right\} \\
 & - \frac{\varepsilon_{2k,n} R_{2i,k,n} \lambda_i}{2} \left\{ M_{i,k,n}^j + M_{i,k,n}^{j+1} \right\} \\
 & + \frac{\varepsilon_{2k,n} R_{2i-1,k,n} \lambda_{i-1}}{2} \left\{ M_{i-1,k,n}^j + M_{i-1,k,n}^{j+1} \right\} \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\varepsilon_{2k,n} R_{2i,k,n} = \frac{\Delta y_n \varepsilon_{2k,n} R_{2i,k,n} + \Delta y_{n+1} \varepsilon_{2,k,n+1} R_{2i,k,n+1}}{\Delta y_n + \Delta y_{n+1}} \quad (9)$$

$$D_{2i,k,n} = \varepsilon_{2k,n} \cdot D_{2i,k,n}^0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.3 差分方程式の解法及び計算コード

上記の差分方程式において、 $M(i,k,1,j+1)$ を除いて $(j+1)$ を含む項を左辺に移行して整理することにより、係数行列が3重対角行列となる連立1次方程式が得られる。これを解くことによって既知の時間ステップ (j) の濃度から次の時間ステップ $(j+1)$ の濃度が順次計算されることになる。ここで問題となるのは、亀裂内の行列式を解くにあたって、本来、解として得られるべき次の時間ステップの未知数 $M(i,k,1,j+1)$ が含まれるということである。そこで、この未知数を決定するために、最初に亀裂内に対する連立1次方程式を解くにあたっては、既に計算されている時間ステップ (j) の濃度 $M(i,k,1,j)$ または0

を用いることによって、亀裂内濃度の第1近似値を求め、これをもとに、岩体内の第1近似値を計算する。こうして得られた未知数 $M(i, k, l, j+1)$ の第 m 近似値をもとに次の亀裂内濃度、続いて岩体内濃度を繰り返し計算し、この手順を未知数 $M(i, k, l, j+1)$ の第 m 近似値と第 $m+1$ 近似値の差が全ての k に対して十分小さくなるまで繰り返すことによって、最終的な解を求める。

計算コードの全体のフローを図3.2に示す。

3.4 試計算

作成したプログラムが正常に作動することを確認するために、サンプル問題を設定して試計算を行った。その結果の一例を図3.3に示す。なお、計算条件については、表4.1のケース1と同様である。図3.3によれば、核種が亀裂内を時間とともに移行していること及び亀裂内に浸透していることが妥当に計算されていることがわかり、改良したROCKコードは、おおむね初期の目的を達成していると考えられる。

4. 検証

4.1 RANCHMDとの比較

改良したROCKコードを検証するにあたって、種々の条件下における妥当性を検討するために、合計22ケースの計算条件(表4.1及び表4.2)を設定して、ROCKコード及びRANCHMDコードによる計算を実施した⁴⁾。改良したROCKコードとRANCHMDコードの計算結果の比較は、亀裂長さの midpoint にあたる亀裂入口から50mの地点における亀裂内濃度の経時変化を同一のグラフに示すことにより行なった。

各ケースの亀裂内濃度の経時変化の比較の一例を図4.1及び図4.2に示す。

- ① 亀裂内の核種の浸透速度が基本ケースと同等かそれより速いケースについては、ROCKコードとRANCHMDコードの結果はほとんど一致している。
- ② 全体的な傾向として、濃度の立ち上がりはROCKコードの方が早く、そのため、その間に減衰してピークの出るAm-243やPu-239については、ROCKコードが過大評価していると考えられる。

この原因は、ROCKコードが亀裂と岩体を完全に連立していないために生じるものと考えられ、収束計算を行なっているものの、岩体への浸透がなければ数年でピー

クが到達する亀裂内濃度の計算において、遠い地点まで到達することに起因すると考えられる。また、空間の差分化の精度（ROCKは2次精度、RANCHMDは4次精度）も関係していると考えられる。

- ③ 亀裂内の核種の浸透速度が基本ケースに比べて遅いケースでは、ピーク値においてその差は2倍以内であるが、ROCKとRANCHMDで差が生じている。この原因としては、十分に収束していないことが考えられ、時間分割を小さくするか、最大繰り返し回数を大きくすることで解決されることが考えられる。
- ④ ROCKコード及びRANCHMDコードとも、核種の半減期に対して時間ステップが大きくなり過ぎた場合に発散していることが伺える。これらは、時間ステップを小さくすることで解決されることが考えられる。
- ⑤ 計算に要する時間については、計算機の性能にも依存するため、正当な比較はできないが、繰り返し計算を必要としない分、RANCHMDコードの方が速いと予想される。

4.2 解析解との比較

改良したROCKコードの検証を行うために、動燃殿が Ahn等の解析解を用いて計算した結果⁵⁾との比較を行った。計算条件をまとめて表4.3に示す。亀裂入口濃度については、崩壊による減衰を考慮したケースと、濃度が一定のケースの2つのケースについて検討した。解析解と最大値を比較した結果は以下のとおりである。

計算条件			最大濃度	最大時間 (y)
入口濃度 減衰	解析解		2.339×10^{-6}	1.7×10^7
	ROCK	境界層なし	2.15×10^{-6}	1.5×10^7
境界層設定		2.05×10^{-6}	1.5×10^7	
入口濃度 固定	解析解		8.66×10^{-6}	3.3×10^7
	ROCK	境界層設定	1.00×10^{-6}	3.3×10^7

上記の結果によれば、濃度の最大値で見ると、解析解とは20%以内の誤差で一致している。一方、濃度の立ち上がり方は、数値解がかなり速く、差分化による計算精度の影響が現れていると考えられる。

5. まとめと今後の課題

RANCHMDコード及び解析解の計算結果と改良したROCKコードによる計算結果を種々の計算条件のもとで比較した結果によれば、概ね良好な結果が得られた。

解析解の利点は、ほとんど数値的な誤差が生じないということであり、その信頼性は極めて高いが、解析解の得られる境界条件は極端に限定される。また、仮に解析解が得られる場合においても、ほとんど計算不可能な解となる場合もある。

現在計算可能な解析解は、岩の浸透深さや亀裂出口の境界に境界条件を設定することが困難であり、また、崩壊連鎖についても扱うことはできない。さらに、亀裂内及び岩体内の媒体が不均質となるような場合についても対応は困難である。

今後の性能評価においては、このような条件での解析が不可欠となってくることは明らかであり、その観点から、亀裂性岩体中の核種移行を計算することができる数値解析コードの重要性はますます高くなると考えられる。

今回改良したROCKコードについては、想定されうる全ての条件に対して適用できていないため、今後本コードを用いる際に新たな問題が生じてくる可能性は否定できないが、現在までの試算の結果、今後改良すべき点として以下の点をあげることができる。

(1) 境界層の設定

境界層という考え方をコードに取り込むことによって、解を安定させる。この考え方を導入することによって、大きく減衰する核種に対する精度は向上すると考えられる。

(2) 種々の境界条件への対応性の向上

現在のバージョンにおいては、境界での濃度を与える方法を適用しているが、フラックスで与えられる場合に対する改良が必要と考えられる。また、亀裂出口における境界条件についても改良の余地があると考えられる。

(3) 入出力の改良

入出力については、計算機のハードウェアに依存する部分が大きく、今後動燃殿のハードウェア環境に合わせて改良する必要があると考えられる。

(4) メモリーの縮小

現在のROCKコードにおいては、全ての核種、時間、空間に対してそれを記憶しているため、比較的多くのメモリー容量が必要となっている。この問題は、出力の方法を目的に応じて設定することによって、大きく改善されると思われる。

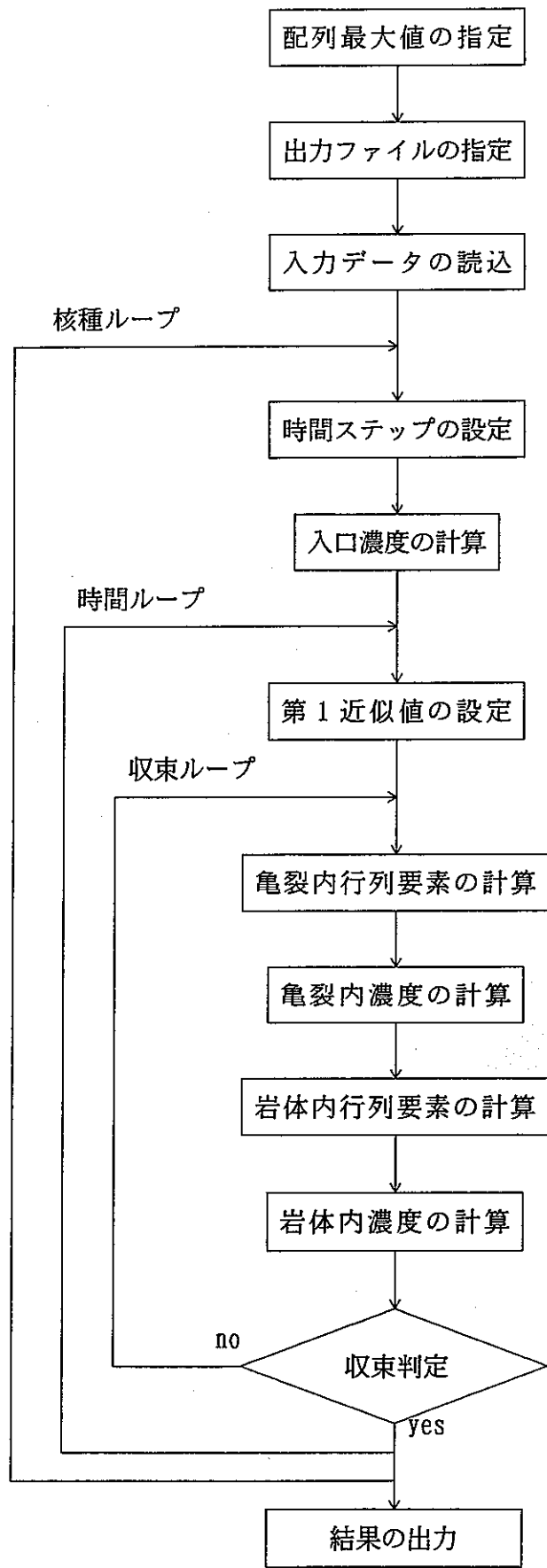


図 3. 2 プログラムの概略フロー

図 3. 3 Np-237 の約 10000 年後の濃度分布

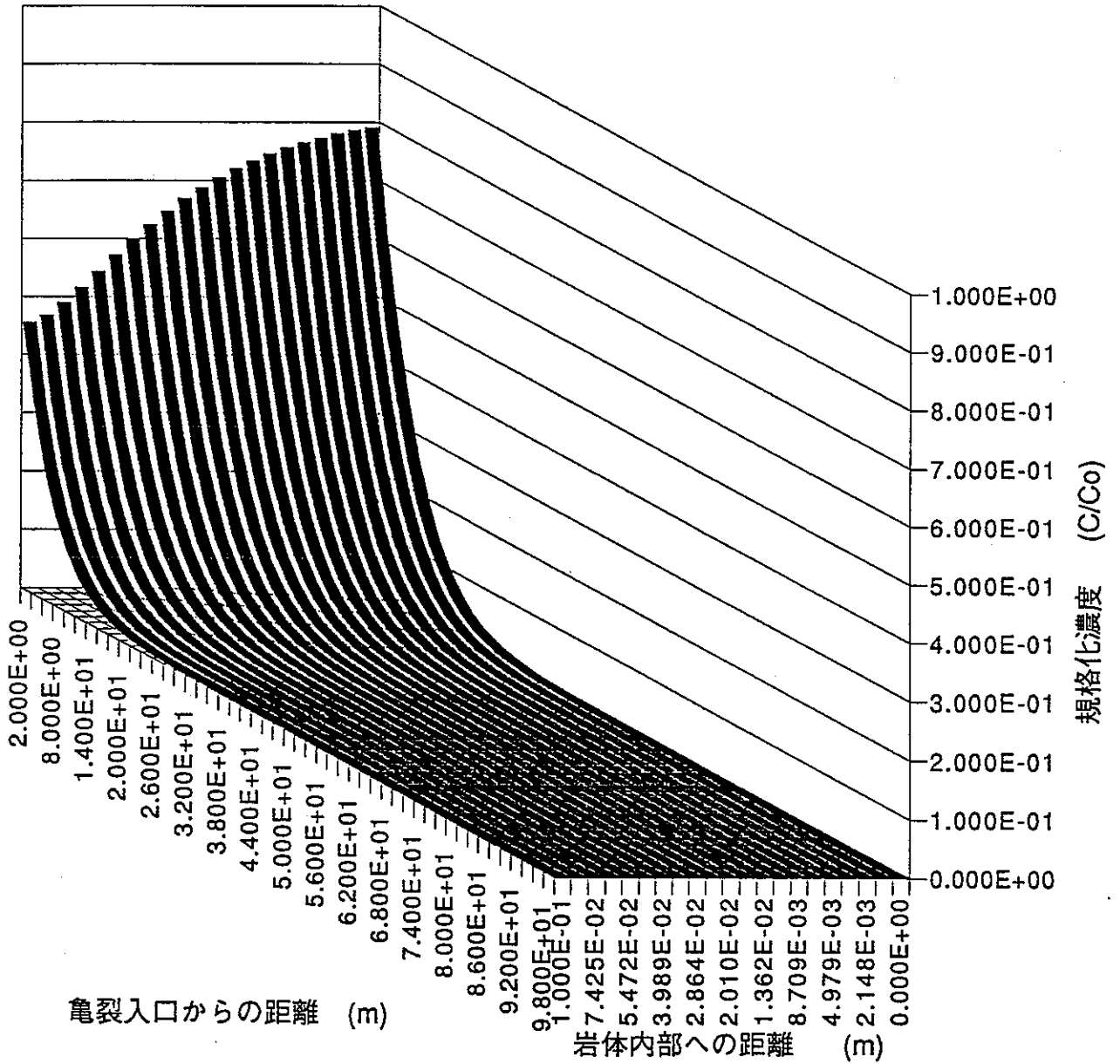


表 4.1 コードの検証にあたって設定した固定計算条件

パラメータ	単位	設定値	
対象核種及び半減期（崩壊系列1）	y	Np-237 U-233 Th-229	2.14×10^6 1.592×10^5 7.3×10^3
対象核種及び半減期（崩壊系列2）	y	Am-243 Pu-239 U-235	7.37×10^3 2.41×10^4 7.038×10^8
亀裂長さ	m	100	
亀裂内間隙率	—	1	
亀裂内粒子密度	g/cm ³	2.6	
亀裂内分配係数	ml/g	全て	0
岩体内間隙率	—	0.05	
岩体内粒子密度	g/cm ³	2.6	
岩体内拡散係数	m ² /s	1×10^{-10}	
亀裂入口の初期濃度（崩壊系列1）	mole/l	Np-237 U-233 Th-229	1 0 0
亀裂入口の初期濃度（崩壊系列2）	mole/l	Am-243 Pu-239 U-235	1 0 0
亀裂入口の濃度変化	—	Bateman 方程式による	

表 4. 2 コードの検証にあたって設定した計算条件及び計算ケース

ケース 番号	計算条件	設定値									
		Kd (kg/m ³)					b	W	V	α_L	
		Np	U	Th	Am	Pu					
1/2	基本ケース	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.1	10	10	
3/4	岩体の分配係数 大	Kd	1	1	10	10	10	0.001	0.1	10	10
5/6	岩体の分配係数 小	Kd	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.001	0.1	10	10
7/8	亀裂の開口幅 大	b	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.01	0.1	10	10
9/10	亀裂の開口幅 小	b	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.0001	0.1	10	10
11/12	岩体への最大浸透深さ 大	W	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	1.0	10	10
13/14	岩体への最大浸透深さ 小	W	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.01	10	10
15/16	亀裂内地下水流速 大	V	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.1	100	10
17/18	亀裂内地下水流速 小	V	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.1	1	10
19/20	亀裂内分散長 大	α_L	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.1	10	100
21/22	亀裂内分散長 小	α_L	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	0.001	0.1	10	1

* ケース番号の奇数は、Np-237→U-233 →Th-229の崩壊系列を、偶数は、Am-243 Pu-239 U-235 の崩壊系列を示す。

表 4. 3 解析解との比較にあたっての計算条件

パラメータ	単位	設定値	
対象核種及び半減期	y	Np-237	2.14×10^6
亀裂長さ	m	20	
亀裂開口幅	m	0.0001	
亀裂内間隙率	—	1	
亀裂内粒子密度	g/cm ³	2.6	
亀裂内分配係数	ml/g	0	
亀裂内地下水流速	m/y	1.45	
亀裂内分散長	m	0.069	
岩体浸透深さ	m	2.5	
岩体内間隙率	—	0.01	
岩体内粒子密度	g/cm ³	2.6	
岩体内分配係数	ml/g	1000	
岩体内拡散係数 (τD_0)	m ² /y	0.001	
亀裂入口初期境界条件	—	1	
亀裂入口濃度条件	—	崩壊減衰 及び 減衰なし	
亀裂方向分割数 (要素数)	—	50	
岩体方向分割数 (要素数)	—	20	
岩体方向最小分割幅	m	0.001	
浸出開始時間	y	0	
浸出終了時間	y	2.74×10^7	
最大繰り返し回数	—	300	
収束判定条件	—	1×10^{-5}	
初期時間ステップ	y	0.01	
浸出終了後の初期時間ステップ	y	1×10^5	
時間ステップ増加率	—	20ステップで1桁増加	

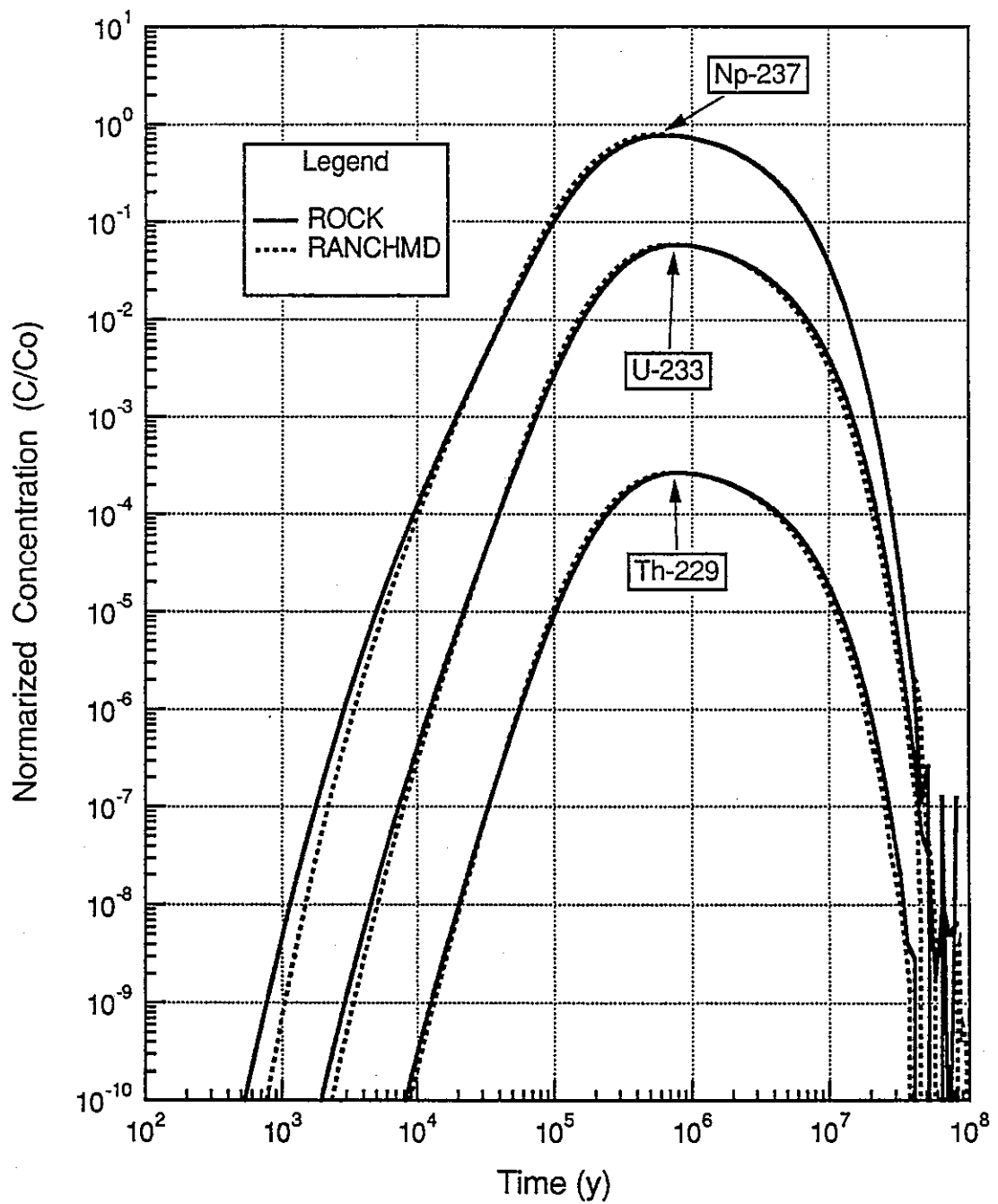


図4.1 RANCHMDコードとの比較 (CASE01)

50mの地点での亀裂内濃度の経時変化

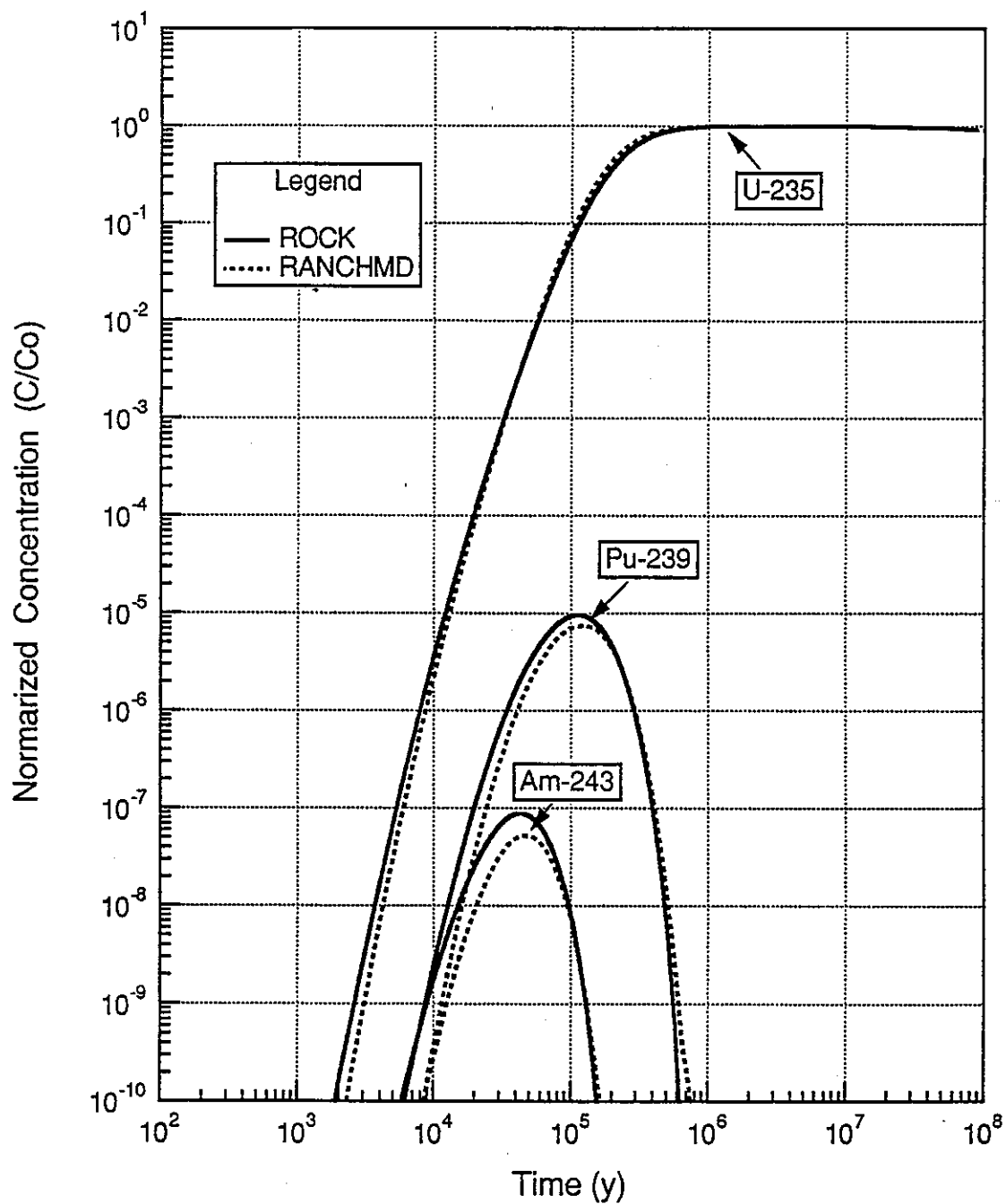


図4.2 RANCHMDコードとの比較 (CASE02)

50mの地点での亀裂内濃度の経時変化

参考文献

- 1) I. Neretnieks, J. Geophys. Res. 85 (1980) 4379
- 2) 日本機械学会編「流れの数値シミュレーション」コロナ社 (1988)
- 3) J. Hadermann, F. Roesel, "Radionuclide Chain Transport in Inhomogeneous Crystalline Rocks: Limited Matrix Diffusion and Effective Surface Sorption", NAGRA Technical Report 85-40 (1985)
- 4) "Calculations of Nuclide Migration in Fractured Rock Using RANCHMD", Colenco Power Consulting Ltd. (1991)
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団 「天然バリア中の核種移行に関する解析-テクニカルレポート-」平成3年3月