

# ニアフィールド水理／核種移行評価モデル の整備・統合化に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書 要約版)

1999年2月

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,  
Japan

ニアフィールド水理／核種移行評価モデルの整備・統合化に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書 要約版)

長坂和佳<sup>※</sup>，中島研吾<sup>※</sup>

要 旨

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の水理／核種移行評価は以下のような手順によって実施されている：

- 三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解く
- 核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出する
- 一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路での核種移行を解析する

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を実施した。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施した。

---

本報告書は株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ

※ 株式会社 三菱総合研究所 原子力システム研究部

Development and Integration of Simulation Models for Nearfield Groundwater Flow and Radionuclide Transport Computation

Kazuyoshi NAGASAKA and Kengo NAKAJIMA\*

Abstract

Groundwater flow and radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media are carried out in the following way using continuum analysis model:

- "TAGSAC" solves three-dimensional saturated/unsaturated groundwater flow equation in nearfield heterogeneous porous media using finite element method (FEM).
- "TR3D" calculates streamlines by randomwalk particle tracking method according to potential distribution provided by TAGSAC
- These streamlines are introduced into one-dimensional radionuclide transport analysis code "CRYSTAL"

In this research, these processes were integrated into one system and all operation including data handling can be automatically done in this system. Pre-processing and post-processing procedure for modeling and visualization were also developed. Groundwater flow and radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media are carried out using this system.

---

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Waste Isolation Research Division, Tokai Works.

※ Mitsubishi Research Institute, Inc.

# 目 次

1. 概 要 .....	1
1.1 研究の目的 .....	1
1.2 研究の範囲 .....	1
1.3 研究の内容 .....	2
2. ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備 .....	4
3. ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備 .....	6
4. 多孔質媒体中の性能評価計算 .....	9
4.1 概 要 .....	9
4.2 解析対象 .....	11
4.3 解析条件 .....	13
4.4 解析結果 .....	17
5. まとめ .....	22

参考文献

## 1. 概要

### 1.1 研究の目的

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の核種移行評価に関連する一連の解析コードの開発と検証によって、これらのコードを体系化したニアフィールド水理／核種移行評価手法として確立されている。すなわち、三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解き、核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出し、一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路上での核種移行を解析することによってニアフィールド水理／核種移行を評価する手法が確立されている。

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を行う。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施する。

### 1.2 研究の範囲

本研究の研究範囲を以下に示す：

- (1) ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備
- (2) ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備
- (3) 多孔質媒体中の性能評価計算

### 1.3 研究の内容

#### 1.3.1 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの整備

一連の多孔質岩盤中のニアフィールド水理／核種移行評価体系における評価解析の精度を向上させるとともに、第2次取りまとめに向けた解析への実用性を向上させるために解析コード間でのファイル受け渡しを自動化した。具体的には、以下の項目を実施した：

- 不均質場発生プログラム「SGSIM」により発生させた差分メッシュ上の不均質場の情報を「TAGSAC」の有限要素メッシュ上の情報に受け渡すためのインタフェースを開発した。
- 既往の文献に基づき透水係数と空隙率の関係式を導き、その関係式に基づいて不均質場発生プログラムより得られた不均質透水係数場に空隙率を割り付けるためのプログラムを作成した。
- 複数の核種移行経路上での「CRYSTAL」解析結果の重ね合せを自動化した。

#### 1.3.2 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのプリ・ポスト環境整備

パブリックドメインソフト「mpeg-viewer」を用いて三次元不均質場の構造と核種移行経路および核種移行経路上での核種の動きをアニメーションにより可視化した。

#### 1.3.3 多孔質媒体中の性能評価計算

1.3.2の成果を踏まえたニアフィールド水理／核種移行評価手法を用いて第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行評価計算を実施した。計算は以下の手順で実施した：

- 既往の文献に基づいて設定された我が国の岩盤における不均質構造の地質統計学パラメータ（SGSIM用）を用いて不均質場を構築した

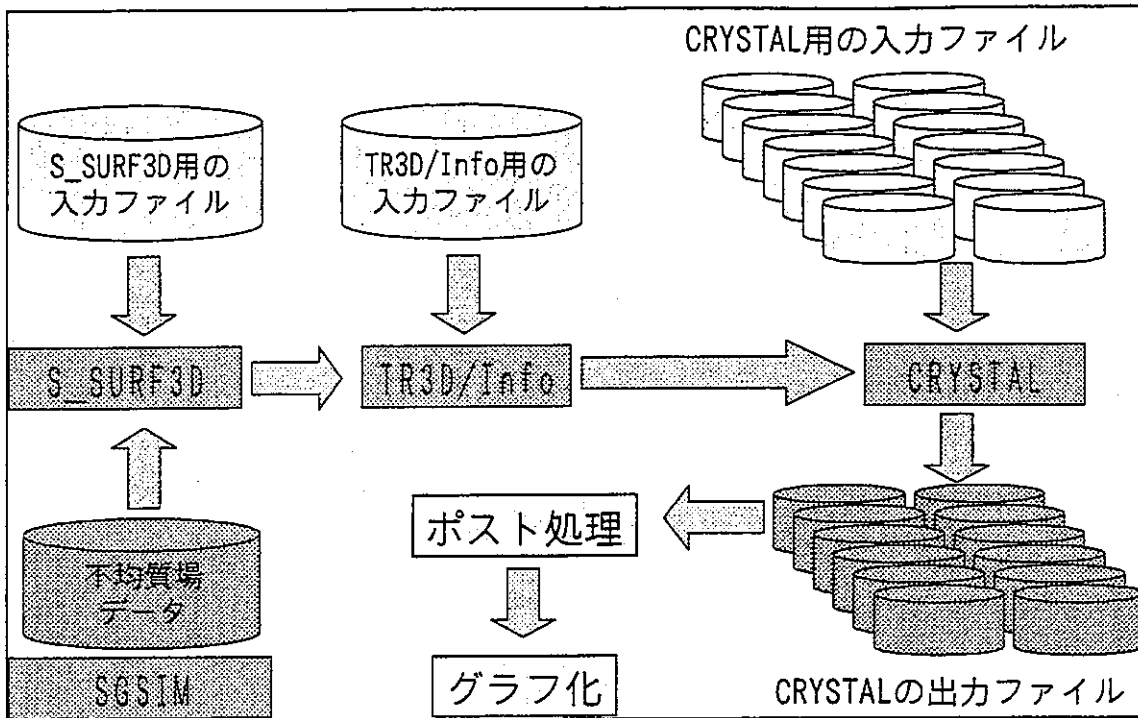
- 同じパラメータに対して構築する不均質場のリアライゼーションの数は、複数のリアライゼーションに対して得られた計算結果を統計処理し、平均値の変動が顕著でなくなる数を同定して決定する方法を開発した。
- 不均質場における移流・分散現象を一次元モデルで表現する際に必要となる核種移行経路の本数と各移行経路への入力ソースへの配分率は、三次元移流・分散モデル「TR3D」との比較解析により同定した。



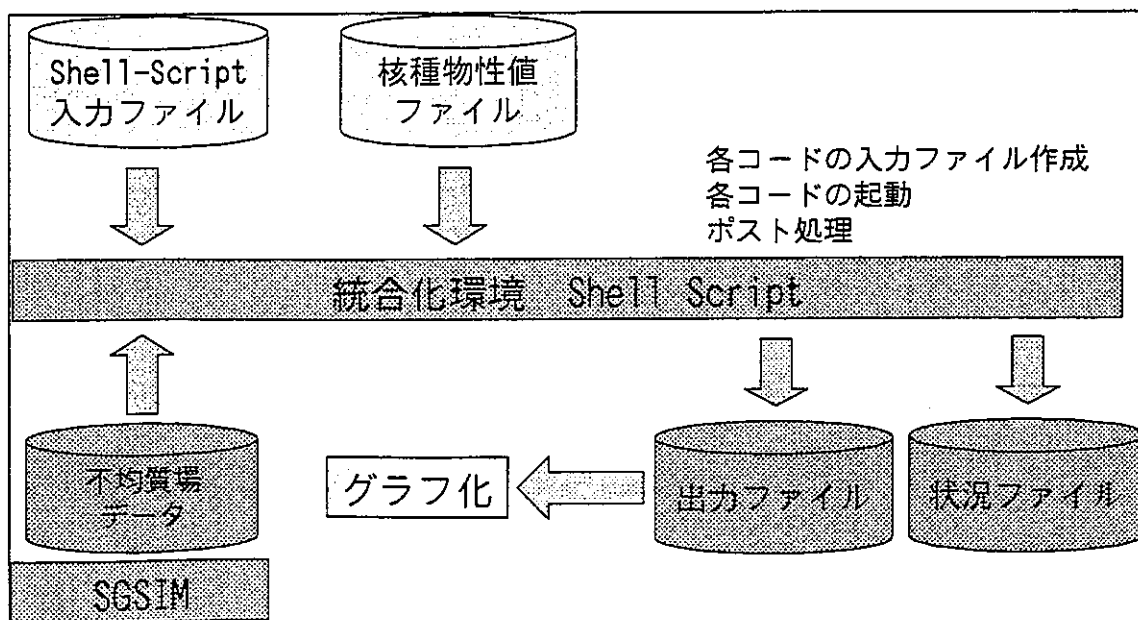
## 2章 ニアフィールド水理／核種移行計算の整備

UNIX上のシェル機能を使用して、核種移行計算に用いている各ツール類の統合化を行った。

図2.1-1に統合化環境以前の性能評価計算手順および統合化環境下での性能評価計算の手順を示す。



従来の性能評価計算手順



統合化環境下での性能評価計算の手順

図 2.1-1 システム概要

### 3章 ニアフィールド水理／核種移行計算モデルのポスト環境整備

パブリックドメインソフト「mpeg-viewer」を用いて三次元不均質場の構造と核種移行経路および核種移行経路上での核種の動きをアニメーションにより可視化した。

以下に作図例を示す。



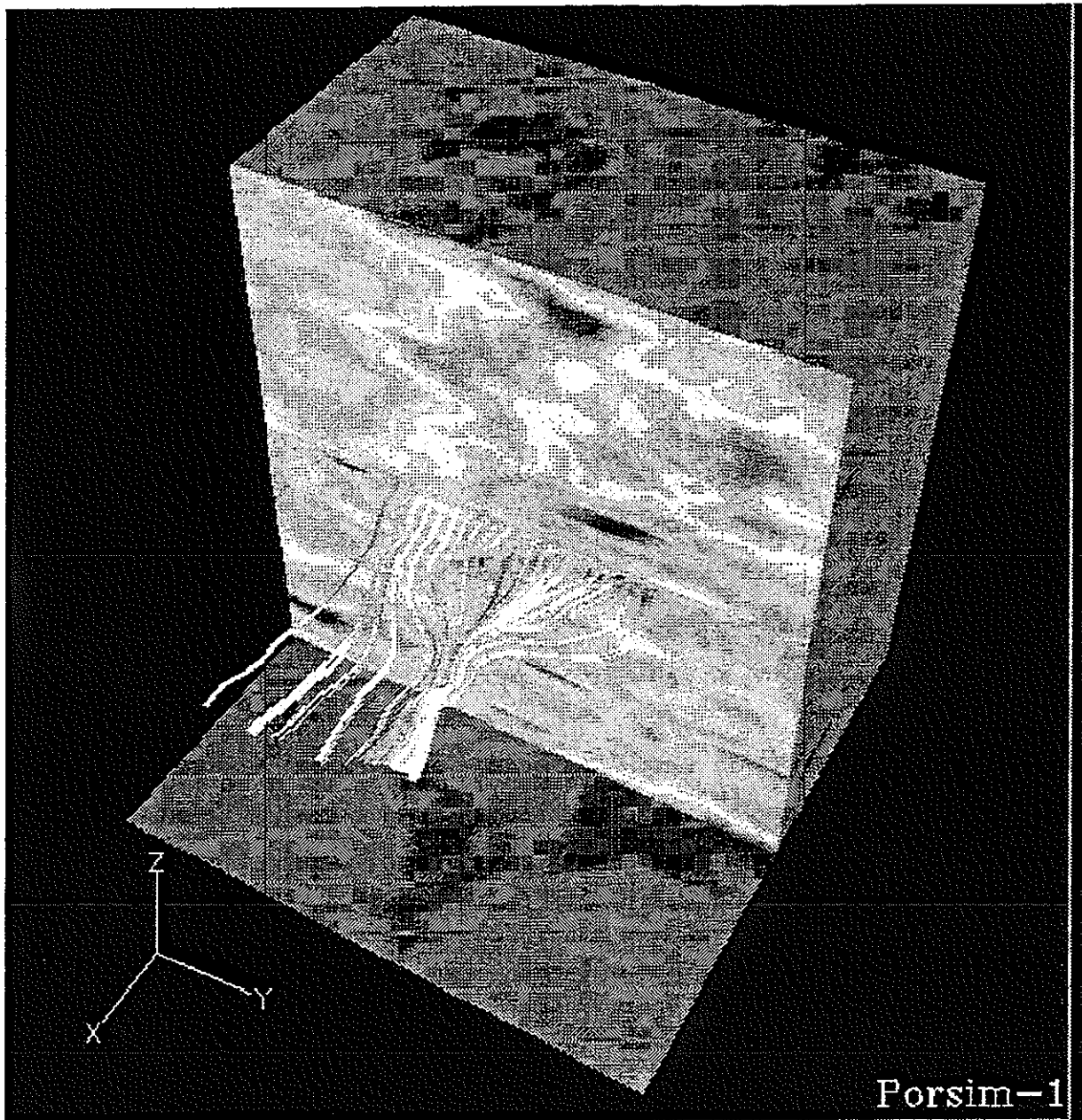


図 3.2-1 多孔質不均質場性能評価モデル（透水係数分布）と TR3D によって算出された流線（SGSIM アルゴリズム（Sequential Gaussian Simulation）によって算出された不均質場使用）

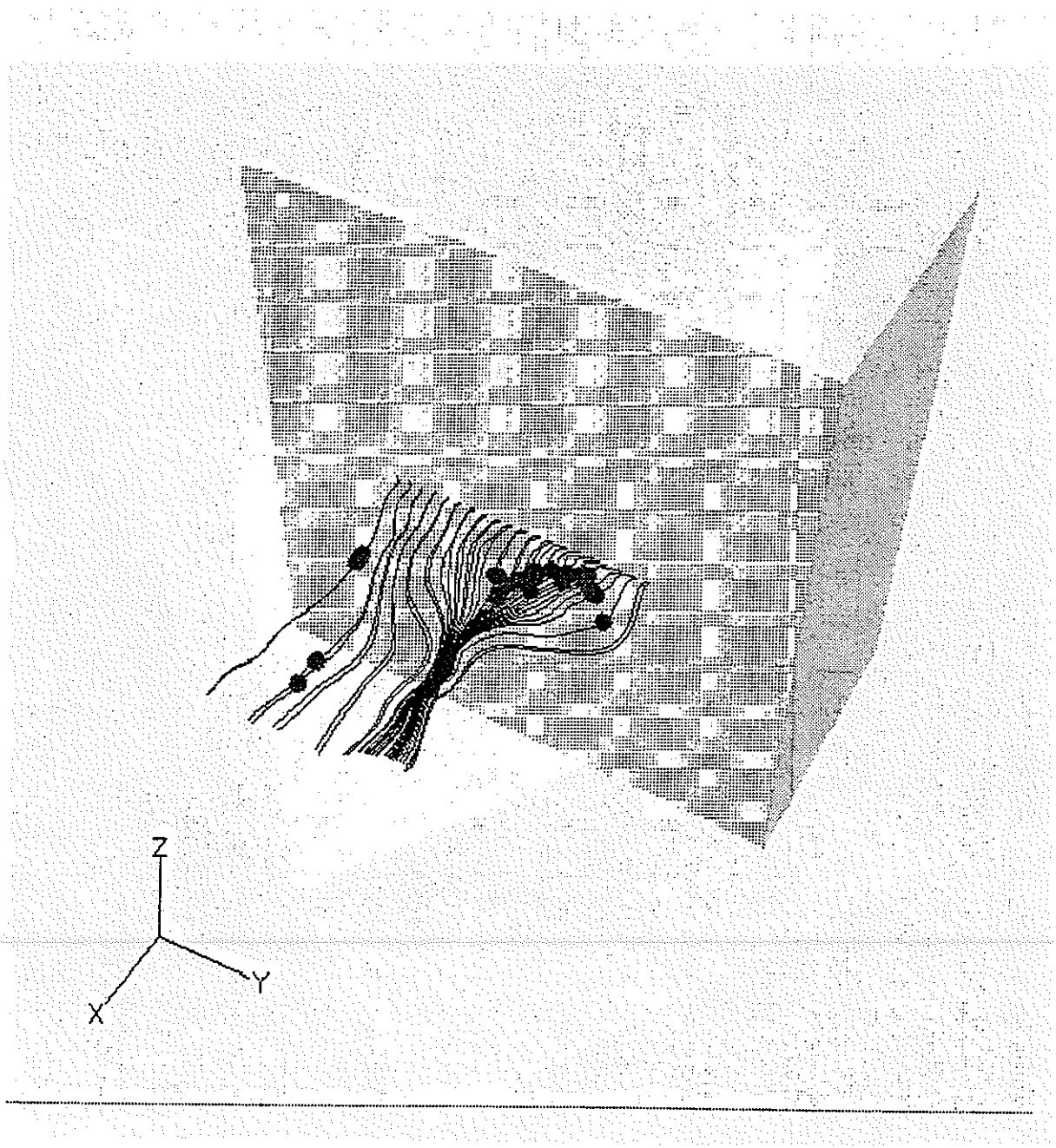


図 3.1-2 多孔質不均質場における TR3D によって算出された流線  
(SGSIM (Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

## 4 章 多孔質媒体中の性能評価計算

### 4.1 概要

多孔質媒体中の性能評価は以下の手順で計算を行う。

① 三次元水理解析(S\_SURF3D)

SGSIM アルゴリズム (Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場を使用して 3 次元の水理解析を行う。

② 流線情報の抽出(TR3D)

三次元水理解析にて求めた流れ場を使用して、追跡粒子によって流線毎の移行経路および移行時間を求める。

③ 一次元核種移行計算(CRYSTAL)

求めた流線情報を使用して一次元の核種移行計算を行う。

図 4.1-1 に解析フローを示す。

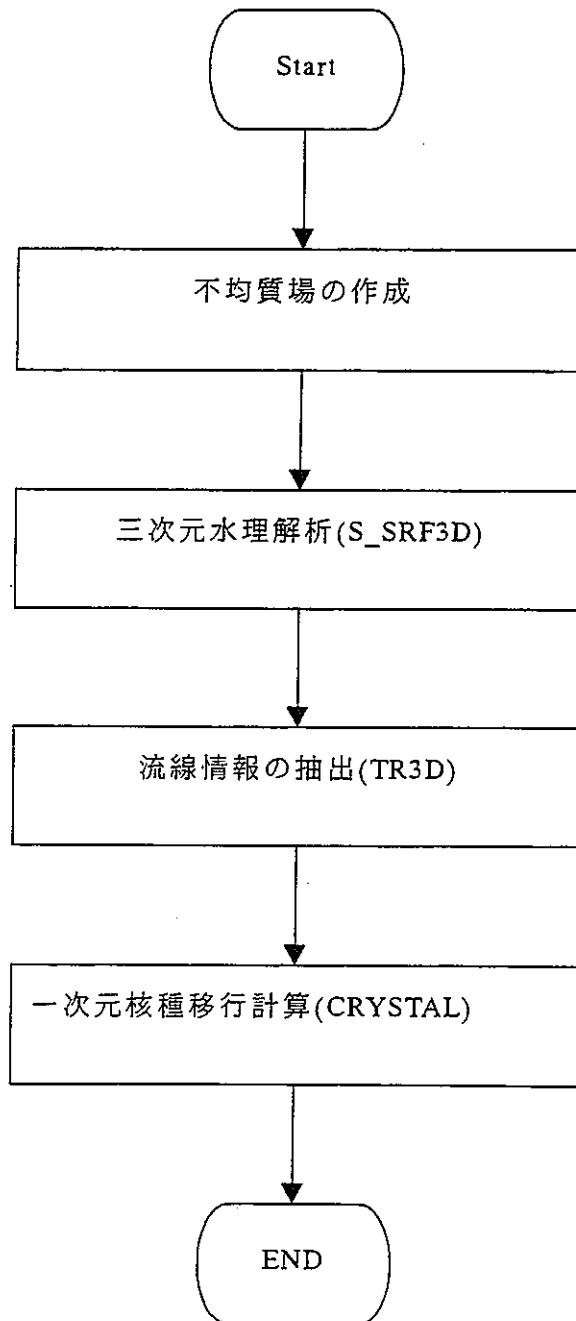


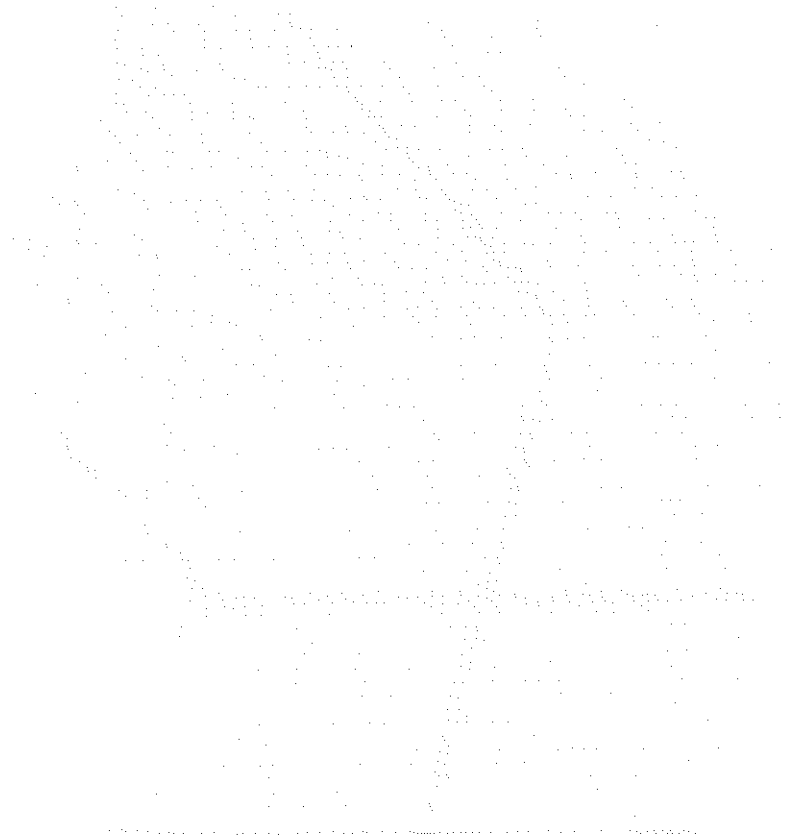
図 4.1-1 解析の流れ

## 4.2 解析領域

三次元水理解析および流線の情報抽出に使用する解析領域は、200m 立方の領域を考慮する。

処分坑道は、領域中央部に位置し、Y 方向に 0~200m までを考慮する。

解析モデルを図 4.2-1 に示す。





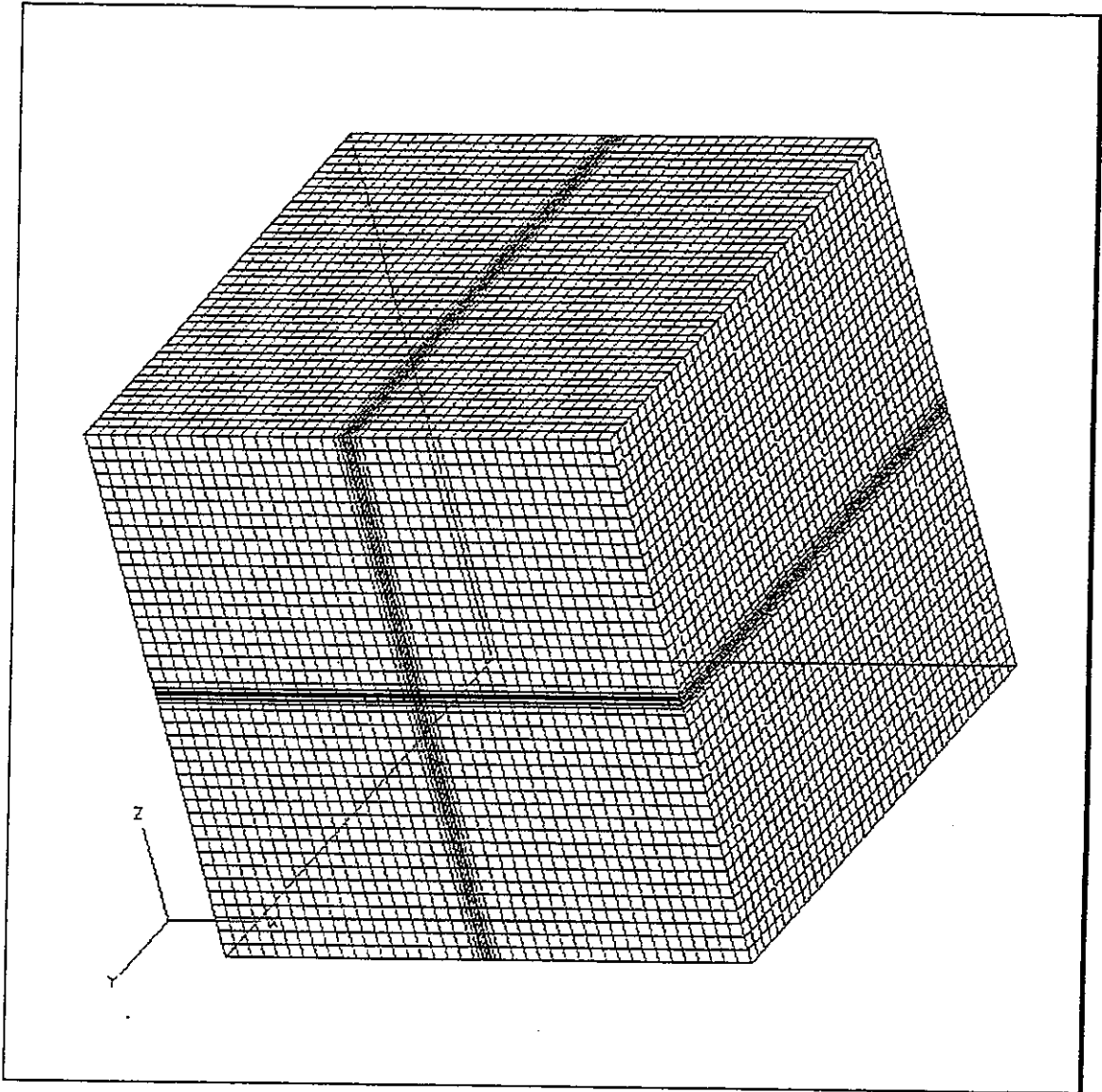


図 4.2-1 三次元水理解析および流線の抽出に使用する解析モデル

### 4.3 解析条件

解析は、SGSIM アルゴリズムによって生成した不均質場を用いて行う。

解析に使用する不均質透水場を図 4.3-1 に示す。

モデル中央部には、処分坑道および緩み域を模擬した領域を仮定する。

各物性は以下のように定義する。

- ・ EDZ 領域（緩み域）は、周りの透水係数に 100 倍した値を使用する。
- ・ ガラス固化体は処分坑道の中央部に位置し、場における最も低い透水係数に  $1.0 \times 10^{-15}$  を掛けた値を使用する。

三次元水理解析で使用する動水勾配は 0.8% とする。

空隙率は、透水係数から算出される値を使用する。

空隙率の算出方法は以下の通りである。

$$\log K = 7.54 \times \log \varepsilon - 3.73$$

算出式で用いている  $K$  および  $\varepsilon$  はそれぞれ透水係数 (m/sec)、空隙率を示す。

ただし、算出された空隙率が 5% 以下の場合は 5% を、また、50% 以上の場合は 50% を用いる。

流線の情報は、処分坑道の表面 50m~150m の位置に 40 個の追跡粒子を配置し、領域出口までの移行経路長さおよび移行時間を求める。

一次元核種移行計算は、TR3D によって算出された流線毎に行う。

考慮する核種および崩壊系列は表 4.3-1 に示す 12 種とする。

各核種の物性値を表 4.3-2 に示す。

表 4.2-1 崩壞系列

系列	
	TC-99
	Sn-126
	Se-79
	Zr-93
	Cs-135
	Sm-151
	Nb-94
	Pd-197
4N0	Pu-240 → U-239 → Th-232
4N1	Cm-245 → Pu-241 → Am-241 → Np-237 → U-233 → Th-229
4N2	Cm-246 → Pu-242 → U-238 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210
4N3	Am-243 → Pu-239 → U-235 → Pa-231 → Ac-227

表 4.3-2 核種物性値

核種名	許容濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	半減期 (year)	分配係数 (m <sup>3</sup> /kg)
Se-79	0.4	6.50E+04	0.001
Zr-93	2.0	1.53E+06	0.1
Tc-99	3.0	2.13E+05	1.0
Pd-107	30	6.50E+05	1.0
Sn-126	0.2	1.00E+05	1.0
Cs-135	0.5	2.30E+06	0.05
Nb-94	10	2.03E+04	0.1
Sm-151	0.7	9.00E+01	5.0
Pu-240	0.001	6.54E+03	1.0
U-236	0.02	2.34E+07	1.0
Th-232	0.001	1.41E+10	1.0
Cm-245	0.02	8.50E+03	5.0
Pu-241	0.001	1.44E+01	1.0
Am-241	0.001	4.32E+02	5.0
Np-237	0.05	2.14E+06	1.0
U-233	0.2	1.59E+05	1.0
Th-229	0.001	7.34E+03	1.0
Cm-246	0.001	4.73E+03	5.0
Pu-242	0.001	3.87E+05	1.0
U-238	0.02	4.47E+09	1.0
U-234	0.01	2.45E+05	1.0
Th-230	0.007	7.70E+04	1.0
Ra-226	0.003	1.60E+03	5.0
Pb-210	0.0007	2.23E+01	0.1
Am-243	0.001	7.38E+03	5.0
Pu-239	0.001	2.41E+04	1.0
U-235	0.02	7.04E+04	1.0
Pa-231	0.0004	3.28E+04	1.0
Ac-227	0.0003	2.18E+01	5.0

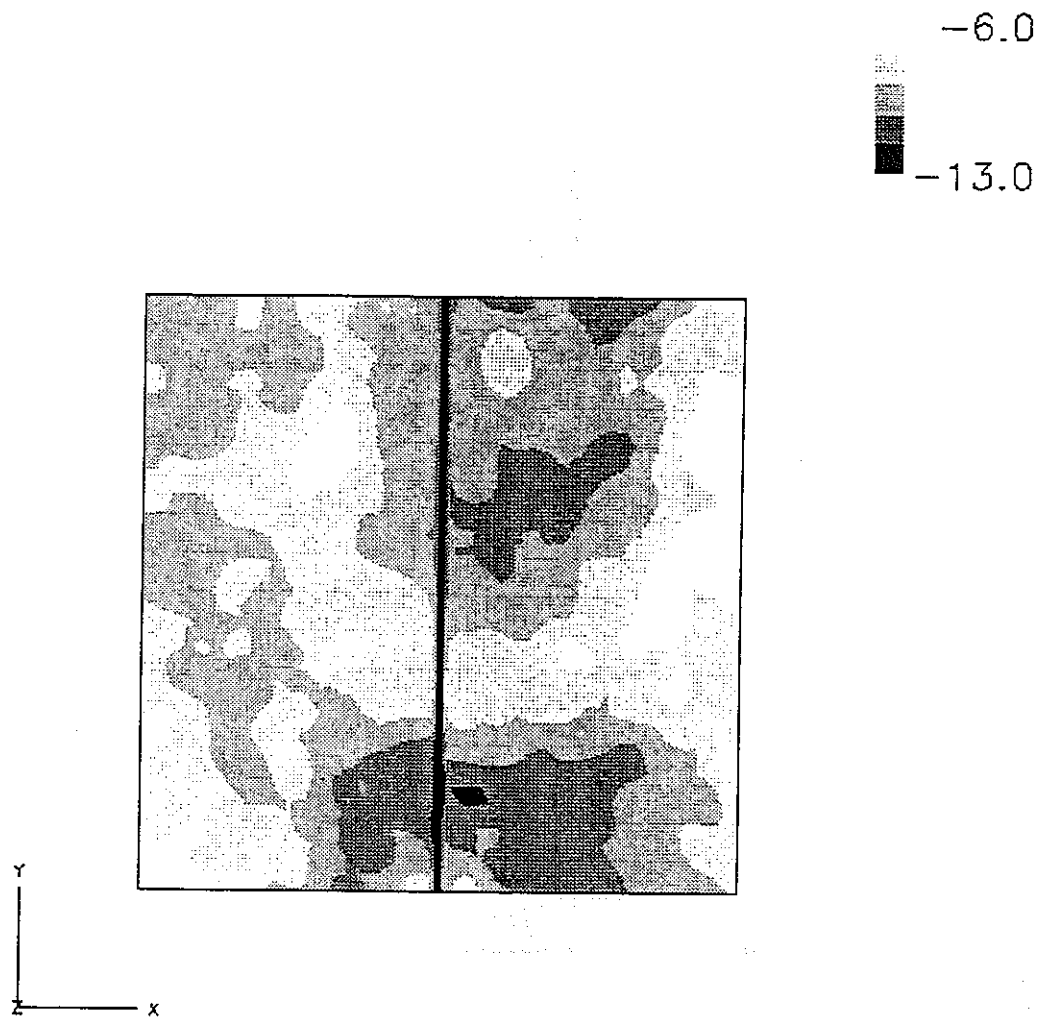


図 4.3-1 不均質透水係数分布 (Z=-100m 断面)  
 ((Sequential Gaussian Simulation) によって算出された不均質場使用)

#### 4.4 解析結果

三次元水理解析および流線の結果を図 4.4-1 に示す。

また、ガラス固化体一体としたケースおよび四方体としたケースでの一次元核種移行計算の結果を図 4.4-2 および図 4.4-3 に示す。

また、図 4.4-4 に不均質場を 30 ケース発生させ線量当量率の平均を代表核種について求めたものを示す。

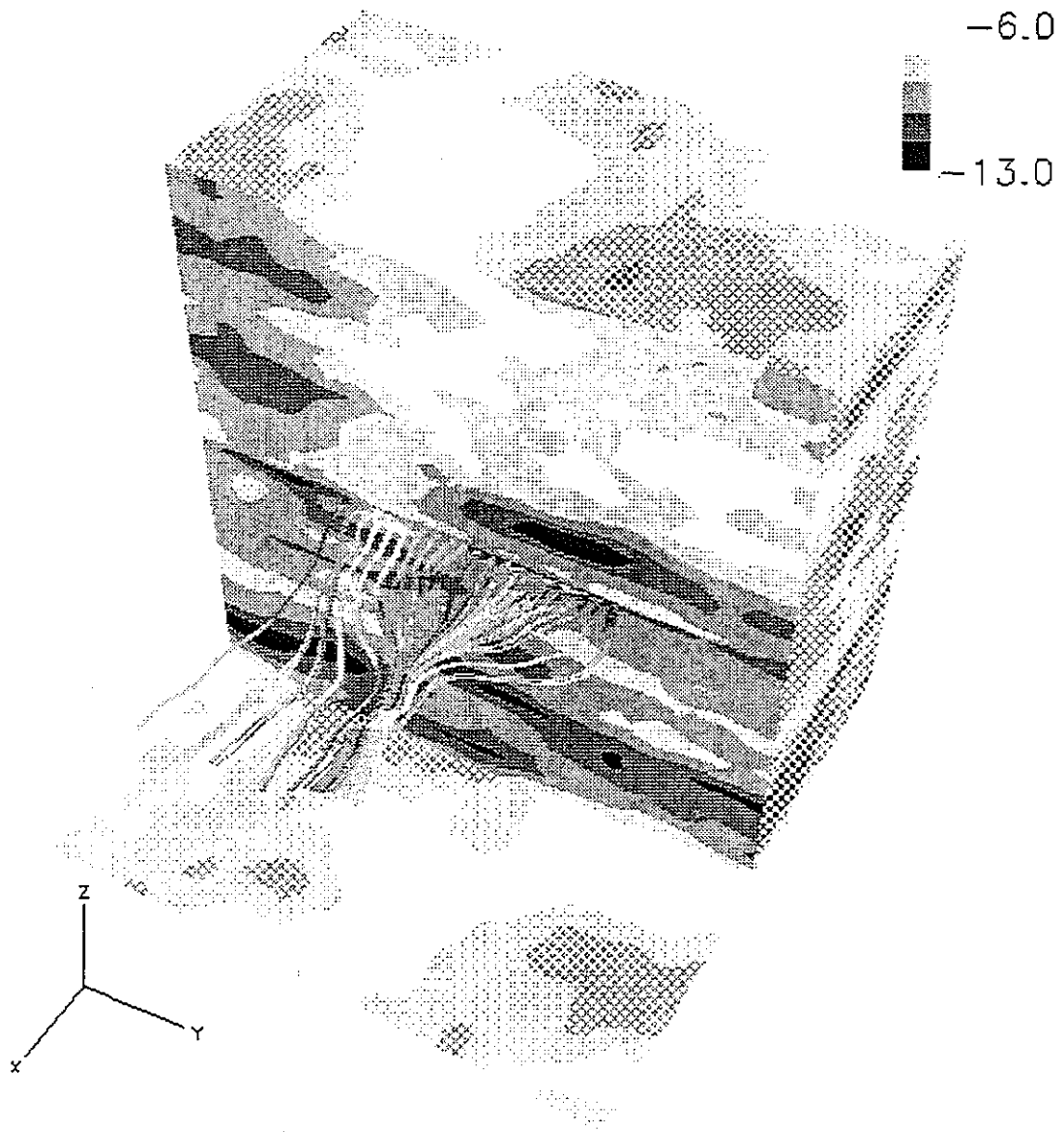


图 4.4-1 三次元水理解析結果及び流線

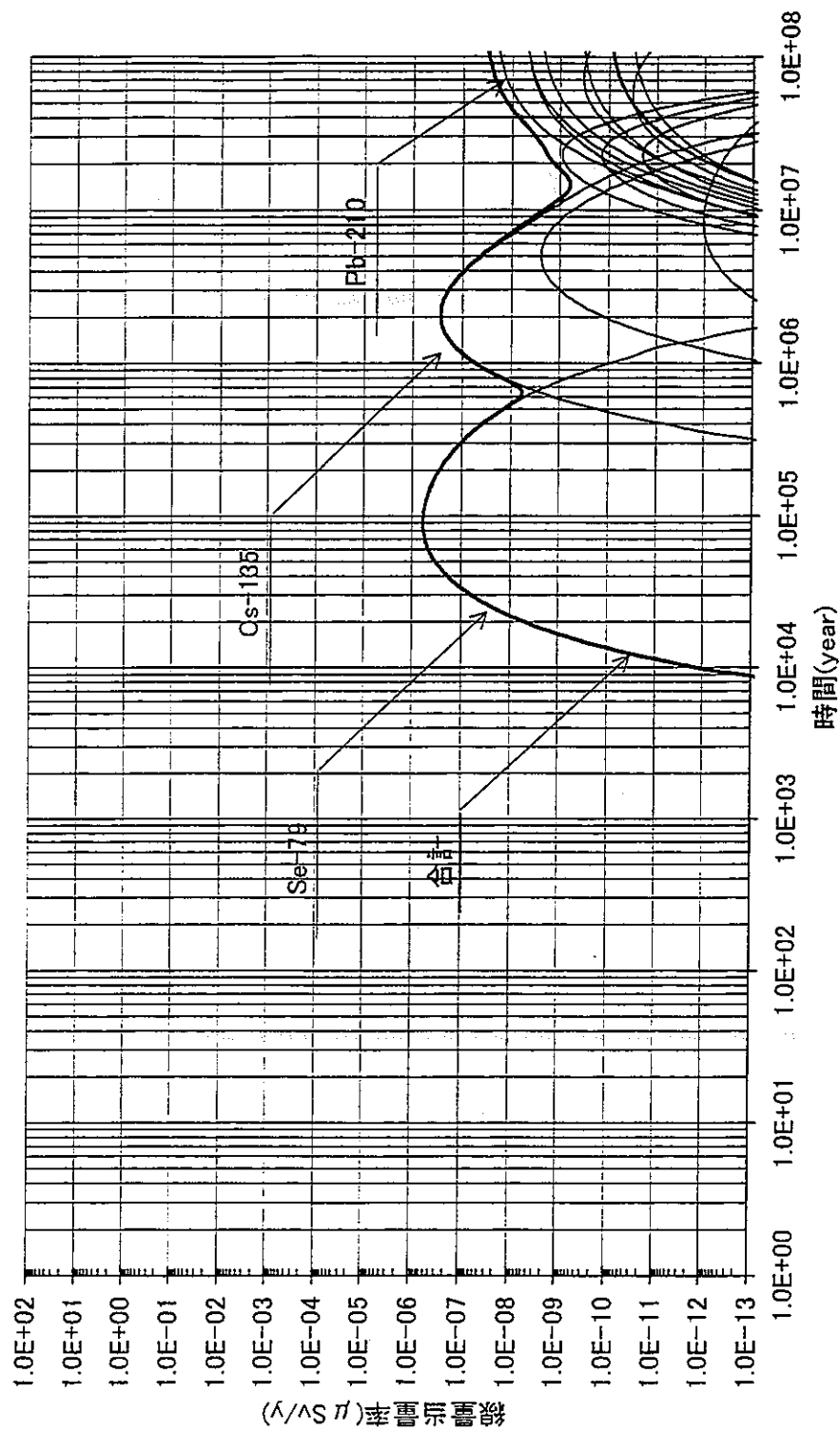


図4.4-2 評価距離100mにおける線量当量率歴  
(ガラス固化体一本)



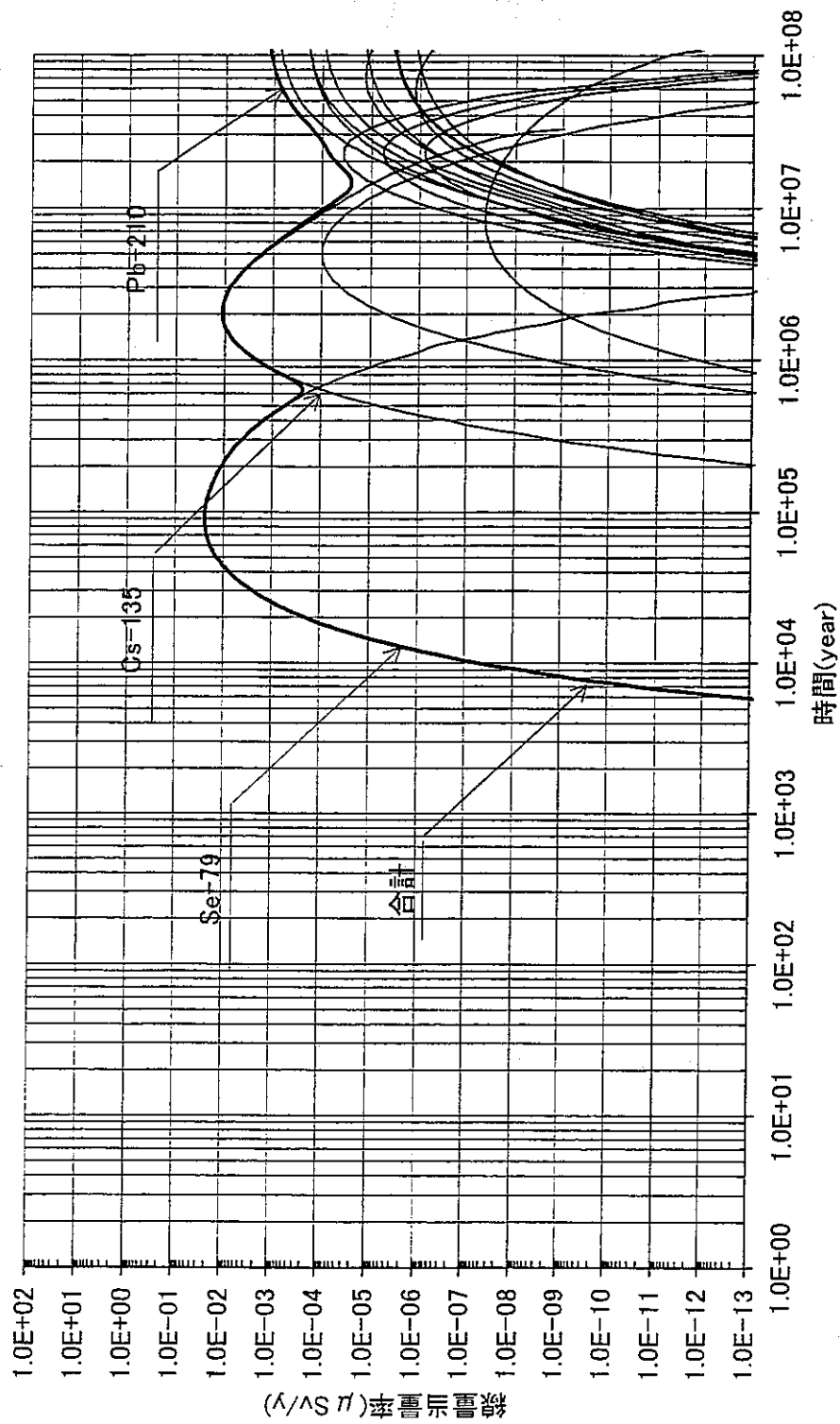


図 4.4-3 評価距離 100m における線量当量率歴  
(ガラス固化体四万本)

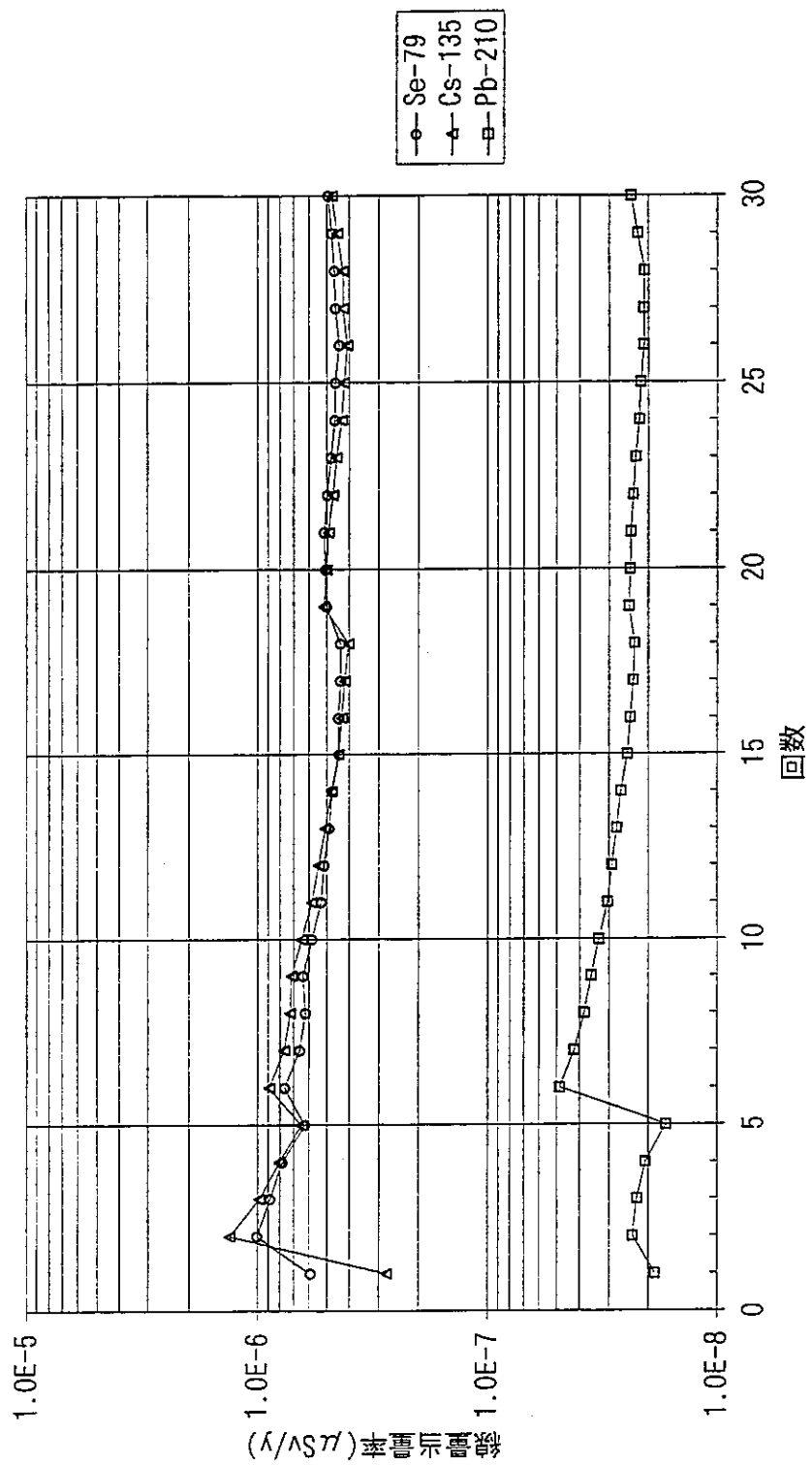


図4.4-4 不均質場30ケースによる代表核種の平均線量当量率

## 5. まとめ

連続体モデルを用いたニアフィールド多孔質岩盤中の水理／核種移行評価は以下のような手順によって実施されている：

- ・三次元飽和・不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」により三次元不均質多孔質岩盤中の地下水流れを解く
- ・核種移行経路抽出コード「TR3D」により流れ場の中から流線に沿った核種移行経路とその経路上の情報を抽出する
- ・一次元核種移行解析コード「CRYSTAL」により抽出した各経路での核種移行を解析する

本研究では、一連の核種移行評価体系を整備・統合化し、各解析コード間でのデータ受け渡しを自動化するとともに、不均質場や移行経路等の可視化のためのプリ・ポスト環境の整備を実施した。また、第2次取りまとめに向けた多孔質岩盤中の核種移行計算を実施した。

GSLIBに含まれるSGSIM法を使用して30ケースの不均質透水係数場を発生させ、それぞれについて核種移行計算を実施した。不均質場は透水係数に関して：

- ・平均値
- ・対数正規分布の標準偏差

については同じものを使用しているが、透水係数の空間的分布によって流線の：

- ・長さ
- ・移動時間

は大きな影響を受けるため結果の評価にあたっては注意が必要である。今回実施した 30 ケースに関して：

- ・ピーク線量
- ・ピーク線量到達時間

に関して、平均値をとったところ、ケース数を増加させることによって一定値に近づいていくことがわかった。したがって今回実施した 30 ケースは解析対象の不均質場のランダム性を考慮するために十分なケース数であると考えられる。

## 参 考 文 献

[1] K.Worgan and P.Robinson, "CRYSTAL: A Model of Contaminant Transport in a Densely Fissured Geosphere 9105-1 Version 1", Intera Environmental Division, 1992.

[2] C.V.Deutch and A.G.Journel, "GSLIB : Geostatistical Software Library and User's Guide 2nd Edition", Oxford, 1998.

[3] 島崎, 新藤, 吉田編「放射性廃棄物と地質科学」, 東京大学出版会, 1995.

[4] 砂原, 石井, 植原, 林「プロフェッショナル・シェル・プログラミング」, アスキー出版局, 1996.