

ニアフィールド水理／核種移行評価における モデルの検証および体系化に関する研究

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託概要)

1998年2月

株式会社 三菱総合研究所

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の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お願いします。

〒107-8445 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

ニアフィールド水理／核種移行評価におけるモデルの検証および 体系化に関する研究

長坂和佳*, 篠崎剛史*, 中島研吾*, 野邊 潤*

要 旨

本研究では、不均質多孔質媒体における信頼性の高いニアフィールドの水理／核種移行計算を行なうために、有限要素法による三次元飽和-不飽和浸透流解析プログラム「TAGSAC」、ランダムウォーク法による核種移行経路抽出プログラム「S-SURF3D/TR3D」、一次元核種移行解析プログラム「CRYSTAL」の一連の解析プログラムを用いた評価モデルについて、三次元水理物質移動モデルとの比較を実施することにより妥当性の検証を行い、また、この評価モデルにおいて三次元水理／核種移行パラメータを一次元パラメータに変換する手法の体系化を実施した。

また有限要素法による三次元水理／核種移行解析プログラム「MIGR96」を対象として、解析結果の信頼性を示すため解析プログラムの内容の調査・確認、解析プログラムの性能解析を実施し、数値解上の問題点を検討し、効率的に高精度な解を得るための指針を示した。また、計算を効率的に実施するために解析プログラムの改良、およびデータ生成機能の整備を実施した。

本報告書は株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号	090D0283
事業団担当部課室	環境技術開発部処分システム解析室
事業団担当者	石黒 勝彦

* 株式会社 三菱総合研究所 原子力システム研究部

Development and Verification of Numerical Model and Evaluation Method for Nearfield Groundwater Flow and Radionuclide Transport Analysis

Kazuyoshi NAGASAKA*, Tsuyoshi SHINOZAKI*
Kengo NAKAJIMA* and Jun NOBE*

ABSTRACT

In this work, highly reliable numerical model and evaluation method for nearfield groundwater flow and radionuclide transport analysis in heterogeneous porous media has been developed and evaluated. This method is executed using 3 codes, which are 'TAGSAC', 'TR3D' and 'CRYSTAL'. TAGSAC solves ground water flow equation using 3D finite element method. TR3D calculates streamlines by randomwalk particle tracking method according to potential distribution provided by TAGSAC. These streamlines are introduced into 1D radionuclide transport analysis code CRYSTAL. This evaluation system has been verified by comparing with 3D convection-diffusion code results and parameter configuration method has been investigated through various types of cases.

3D finite element groundwater flow and radionuclide transport analysis code 'MIGR96' has been tested under various type of conditions and numerical stability and reliability have been evaluated in order to define the best parameters for both efficiency and accuracy. Special preprocessor has been also developed for efficient mesh generation and parameter configuration.

Work performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Cooperation.

Contract Number 090D0283
PNC Liason Katsuhiko ISHIGURO (Isolation System Analysis Section, Waste
Technology Development Division)

* : Mitsubishi Research Institute, Inc., Nuclear Engineering Systems Department.

目 次

要 旨

Abstract

1. 本研究の目的	1
2. ニアフィールド水理／核種移行計算手法の体系化および検証	3
3. 多孔質媒体中の性能評価計算	6
4. ニアフィールド水理／核種移行計算マニュアルの作成	6
5. 「MIGR96」の内容の調査・確認, 性能解析／適用範囲および安定性の検討	12
6. 「MIGR96」の改良	14
7. 「TAGSAC」の改良	15

1. 本研究の目的

人工バリアおよびその周辺岩盤を含めたニアフィールドにおける地下水流れや核種移行の現象を記述するモデルは計算機上でコード化され、解析的／数値的手法によって解かれる。これまで、ニアフィールドにおける水理／核種移行解析を行う解析プログラムがいくつか開発／改良されてきた。それぞれの解析プログラムは、モデルの考え方、モデルの前提条件、解法等により特有の性質を有するため、プログラムの性質の把握および解の信頼性について評価する必要がある。

前年度までに、岩盤中の地下水流れを評価するために三次元飽和－不飽和浸透流解析プログラム「TAGSAC」の開発／改良および解の信頼性評価が実施された。また、岩盤中の流れ場から核種の移行経路を評価するために、核種移行経路抽出プログラム「S-SURF3D/TR3D」が開発された。核種移行解析プログラムとしては、一次元核種移行解析プログラム「CRYSTAL」の解の信頼性評価が実施された。これら一連の解析プログラムを用いた評価モデルによって、ニアフィールド岩盤における水理／核種移行評価が可能となった。

また、一次元人工バリア中核種移行解析プログラムと三次元飽和浸透流／核種移行解析プログラムをカップリングした連成解析プログラム「MIGR96」が別途開発されてきた。この解析プログラムは、評価の保守性が担保された簡便なモデル（評価モデル）の解析結果の安全裕度の確認や処分場全体からの核種放出特性の評価に有用である。また、三次元飽和浸透流／核種移行解析プログラムのモジュールを拡張利用することにより、想定される処分場の幾何形状や媒体の特性の違いを考慮した、より現実に近い詳細な地下水流れおよび核種移行評価が可能である。

本研究では、評価の保守性を担保し信頼性の高いニアフィールドの水理／核種移行計算を行うために「TAGSAC」、 「S-SURF3D/TR3D」、 「CRYSTAL」の一連の解析プログラムを用いた評価モデルについて、三次元水理物質移動モデルとの比較を実施することにより妥当性の検証を行い、また、この評価モデルにおいて三次元水理／核種移行パラメータを一次元パラメータに変換する手法の体系化を行う。ただし、本評価モデルについて、解の保守性または精度、効率性等において問題が生じた場合は解析プログラム／手法の変更を行う。また、妥当性の検証および体系化が確立されたニアフィールドの評価モデルを用いて、多孔質媒体中の性能評価計算を行う。

「MIGR96」については、解析結果の信頼性を示すため解析プログラムの内容の調査・確認、解析プログラムの性能解析を行うことにより、数値解上の問題点を検討し、効率的に高精度な解を得るための指針を示す。また、必要に応じて解析プログラムの改良を行う。

「TAGSAC」については、原位置試験等から得られる測定結果との比較を行うために、任意点における解析結果の算出が可能となるように改良する。また、効率的に、「TAGSAC」を運用するために、

「TAGSAC」の入出力データの作成・表示を支援するプログラムとのインターフェイスを整備する。

以上の目的にしたがって、本研究の範囲を以下の通りとする：

1. ニアフィールド水理／核種移行計算モデルの体系化および検証
2. 多孔質媒体中の性能評価計算
3. ニアフィールド水理／核種移行計算マニュアルの作成
4. 「MIGR96」の内容の調査・確認，性能解析／適用範囲および安定性の検討
5. 「MIGR96」の改良
6. 「TAGSAC」の改良

2. ニアフィールド水理／核種移行計算手法の体系化および検証

人工バリア周辺母岩における水理／核種移行評価手法を体系化し、多孔質媒体中の性能評価計算手法を確立することを目的として実施した。

ニアフィールド水理／核種移行評価計算の手順は次の通りである。

- ① 三次元飽和／不飽和浸透流解析プログラム「TAGSAC」を使用してニアフィールド岩盤における水理計算を実施する。
- ② ①により得られる水理計算結果を用いて、核種移行経路抽出プログラム「S-SURF3D／TR3D」により人工バリアから放出される核種の移行経路および核種移行パラメータを算出する。
- ③ ②により得られる移行経路および核種移行パラメータを用いて一次元核種移行解析プログラム「CRYSTAL」により核種移行計算を実施する。

2.においては、「CRYSTAL」を用いて一次元核種移行解析を実行するための入力パラメータを三次元水理／核種移行パラメータから変換するための手法を確立し、本手法および①～③の一連の解析プログラムを用いた評価モデルの結果の妥当性を三次元水理物質移動モデルと比較することにより検証した。性能評価計算の手順は次の通りである。また、Fig. 2-1に解析フローを示す。

- ① 三次元不均質透水係数場を作成しポテンシャルを解き、処分坑道（緩み域を含む）から断層へ至る物質の移流領域を流線を用いて特定する。
- ② この領域を移流領域とし一次元核種移行計算を実施するために必要なパラメーター（以降、移行パラメータとよぶ）の換算を行う。
- ③ 移行パラメータを三次元の物質移動解析と比較検証した上で、これを妥当と判断した後CRYSTALを用いて一次元核種移行計算を実施する。

移行パラメータの換算法として、以下の2つの手法について検討した。

(手法1)

処分坑道から発生させた流線の平均値から解析領域を一本の流線として取り扱い核種移行計算を行う。

(手法2)

処分坑道から発生させた全ての流線について種移行計算をおこない結果の総和を取る。

ここで、移行パラメータとして最も重要なのは、「縦方向分散率」，「マトリクス拡散係数」および「マトリクス深さ」である。これらのパラメータを三次元解析の結果と整合が取れるように補正法を決める。

(1) 手法1に対する検討

以下の補正法を使用することにより、三次元物質移動解析とCRYSTALの解析結果はほぼ一致することが判った。

- ①マトリクス拡散係数をゼロにする。
- ②マトリクス深さをゼロにする。
- ③縦拡散係数を最大流速の流線によって補正をする。
- ④CRYSTALに使用する流速を補正する。
- ⑤流速を補正する際に使用する上限値はおよそ2~3の範囲である。

(2) 手法2に対する検討

手法2を用いるかぎり、移行パラメータに対して何の補正をすることなく三次元物質移動解析と同等の解を得ることが可能である。ただし、マトリクス拡散係数およびマトリクス深さは十分に小さな値を使う必要がある。

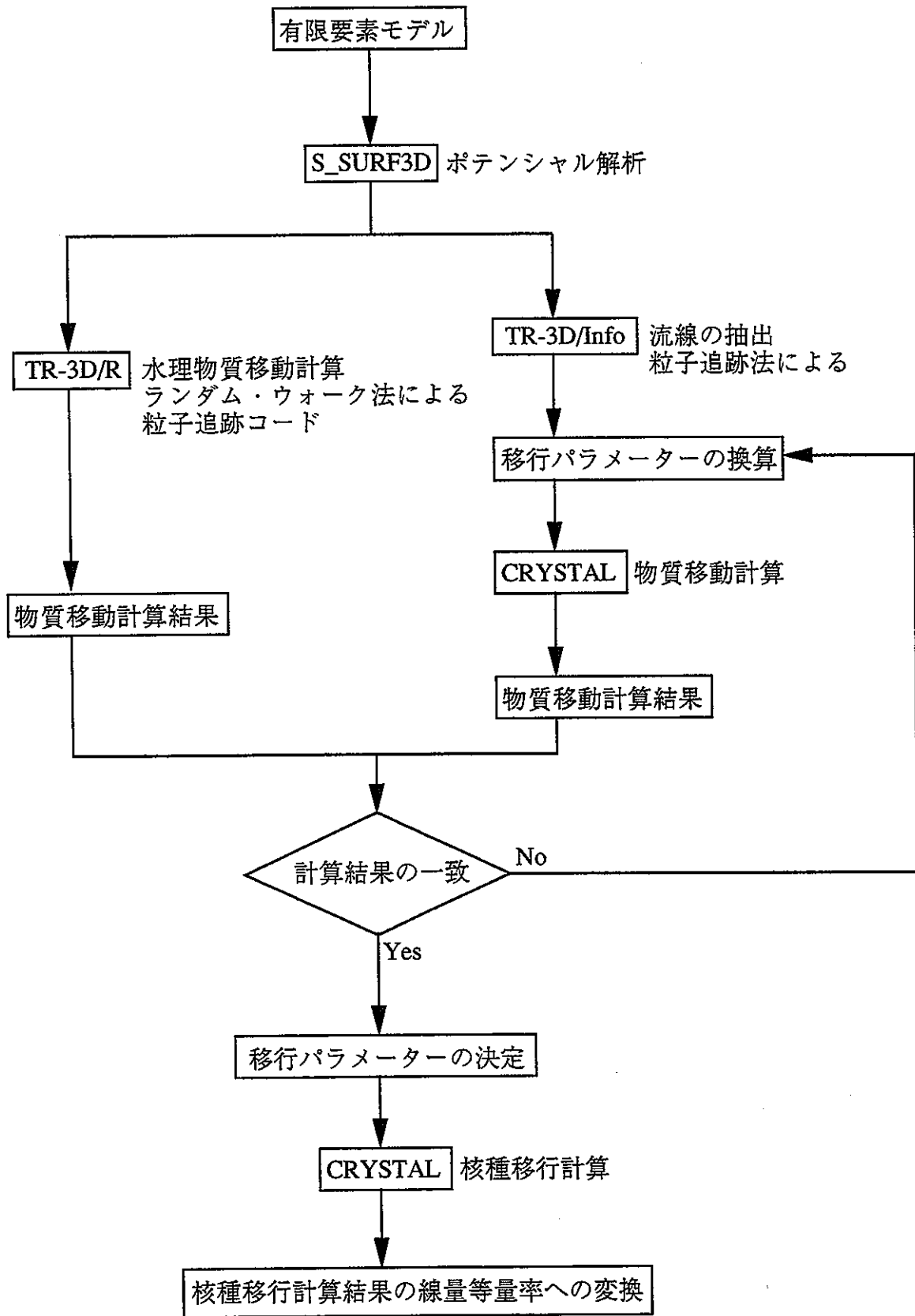


Fig. 2-1 多孔質媒体における性能評価の手順

3. 多孔質媒体中の性能評価計算

本研究においては、2.における研究により体系化された性能評価計算手法を用いて第2次とりまとめに向けた多孔質媒体中の性能評価計算を実施した。

2.における手法1を用いた性能評価計算として、動力炉・核燃料開発事業団殿よりご提供頂いた不均質透水係数場13ケースの内、ケースmmh, ケースmm1の2ケースについて行った。また、手法2を用いた性能評価計算として、)動力炉・核燃料開発事業団殿よりご提供頂いた不均質透水係数場の内リアライゼーションNo.1について行った。

両者の結果を比較した結果以下の知見を得た：

- ①手法2に比べ手法1の方が安全側の評価である。
- ②手法2を用いる際、ソースタームは坑道表面の速度分布から分配すると安全側の評価となる。

4. ニアフィールド水理／核種移行計算マニュアルの作成

2.における研究において体系化されたニアフィールド水理／核種移行計算手法についての利用マニュアルを作成した。Fig.4-1に本作業のフローを示す。

(1) ポテンシャル解析

ポテンシャル解析は、S_SURF3Dによって行う。

ポテンシャル解析において、必要な情報は、

- ① 有限要素モデル
- ② 透水係数情報
- ③ 動水勾配

の3点である。

有限要素モデルおよび透水係数情報は任意に作成する必要がある。ポテンシャル解析によって得られる情報は、有限要素モデルの各節点における速度である。

(2) 流線情報の抽出

流線情報の抽出は、TR-3D/Infoによって行う。

TR-3D/Infoは、任意に配置された粒子を追跡することによって、

- ①粒子の移行経路
- ②粒子の移行時間
- ③粒子の移行距離

を算出する。

流線情報の抽出に必要な情報は、

- ①ポテンシャル解析で得られた速度場データ
- ②追跡粒子の初期位置

である。

(3) 手法1による作業

Tr-3D/Infoによって得られた流線の情報をもとに、

- ①最大流速 V_{max}
- ②平均流速 V_{ave}
- ③平均移行距離 L_{ave}

を算出する。以上の情報をもとに、以下に示す式を用い縦方向拡散係数および修正平均流速を算出する：

$$L_{ave} = V_{ave} t'_{max} + \sqrt{2D_T t'_{max}}$$

$$D_T = \frac{(L_{ave} - V_{ave} \cdot t'_{max})^2}{2t'_{max}}$$

ただし、

$$t_{max} = L_{ave} / V_{max}$$

核種移行計算には、CRYSTALを用いる。CRYSTALは、一次元の崩壊系列を含む核種移行計算を行うコードである。CRYSTALへの入力パラメータは：

- ① 算出された縦拡散係数
- ② 算出された修正流速
- ③ ゼロに近いマトリクス深さ
- ④ ゼロに近いマトリクス拡散係数
- ⑤ 開口幅および拡散幅は解析領域の高さと同値
- ⑥ 亀裂表面積として $=2 \times L \times W \div V$

ただし、

L：モデル幅

W：解析対称処分坑道長さ

V：解析領域全体積

以上の入力パラメータを用い核種移行計算を行う。CRYSTALによって得られる情報は、評価距離における濃度もしくはフラックスである。

(4) 手法2による作業

核種移行計算には、CRYSTALを用いる。CRYSTALへの入力パラメータは、

- ① TR-3D/Infoによって算出された修正された流速
- ② 流速に分散長を掛けた縦拡散係数
- ③ ゼロに近いマトリクス深さ
- ④ ゼロに近いマトリクス拡散係数
- ⑤ 開口幅および拡散幅は解析領域の高さと同値
- ⑥ 亀裂表面積 $=2 \times L \times W \div V$

ただし、

L：モデル幅

W：解析対称処分坑道長さ

V：解析領域全体積

以上の入力パラメータを用い核種移行計算を行う。CRYSTALによって得られる情報は、評価距離における濃度もしくはフラックスである。

手法2による計算、TR-3D/Infoによって求められた流線の数だけ計算を行う必要がある。そのため断面通過量を求める際、各核種移行計算結果を重ね合わせる必要がある。重ね合わせは、同じ核種同士を足しあわせることによって行う。

(5) 核種移行計算結果の線量等量率への変換

線量の計算は、動力炉・核燃料事業団平成3年レポートで採用された方法と同様とする。以下に、算出式を示す：

$$H_w = \sum_j \left[\left\{ \frac{I_j}{(DWC_j \times W)} \right\} \right] \times D_c$$

ここで、

H_w	評価地点における線量等量率[mSv/year]
I_j	評価地点に流入する核種jの放射能[Bq/year]
DWC_j	排水中の濃度限度[Bq/cm ³]
W	評価地点における水量[m ³ /year] (本計算では 1.0×10^4)
D_c	換算係数[mSv · m ³ /cm ³] (1.0×10^{-6} を使用)

である。

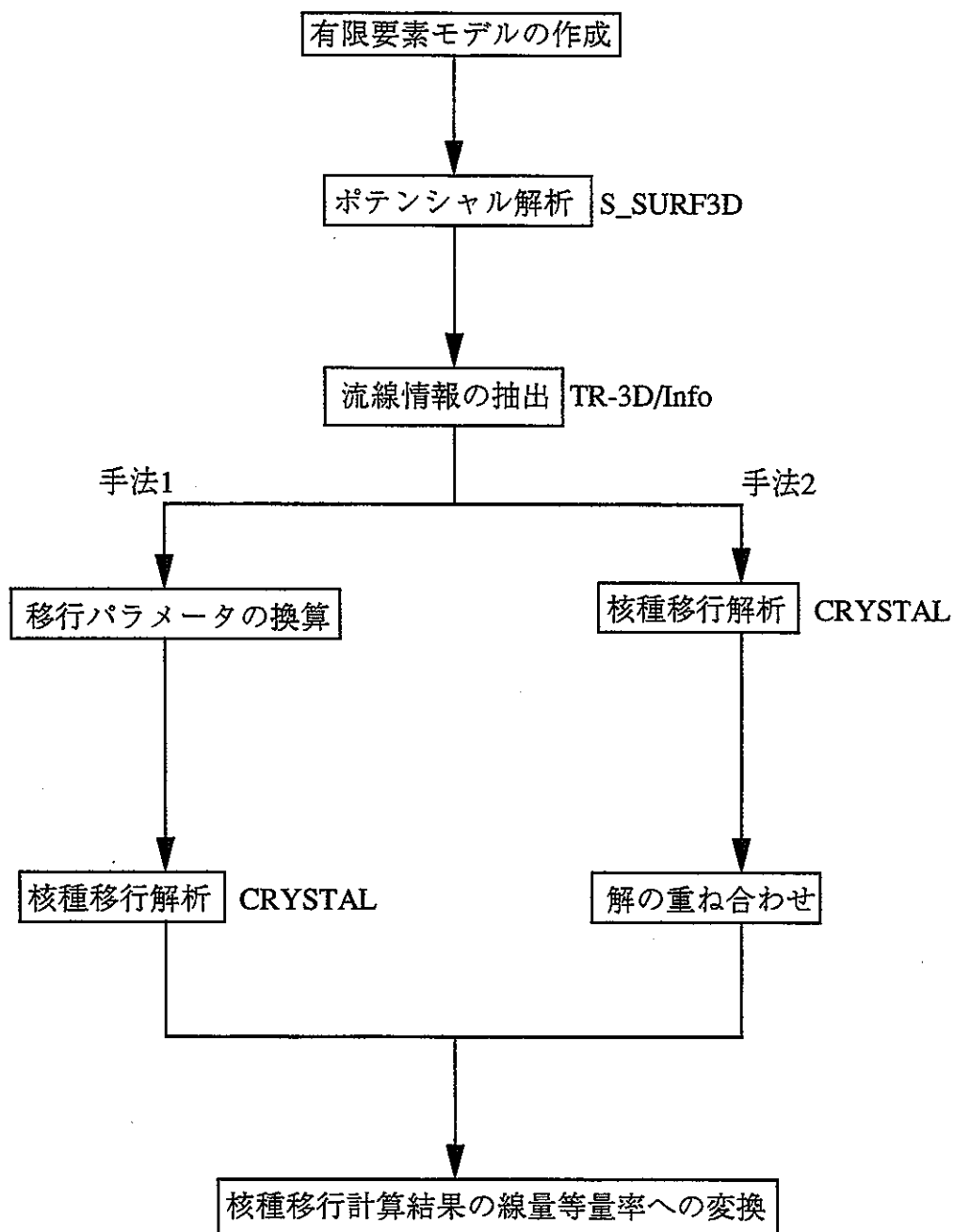


Fig. 4.1 三次元水理解析から核種移行計算にいたる作業フロー

5. 「MIGR96」の内容の調査・確認、性能解析／適用範囲および安定性の検討

多孔質媒体中に緩衝材（拡散（＝不透水）媒体）を伴う複数の廃棄体を配した三次元的な処分場領域中において、核種の崩壊、吸着、沈殿／溶解、複数崩壊連鎖、複数廃棄体の存在、媒体の不均質性等を考慮可能な「MIGR96」を用いて上記の系に対する解析を精度良く、効率的に行うためには、以下の数値解上の問題を解決する必要がある。

- ① 透水係数、吸着係数、拡散係数等の岩体物性値が急激に変化する場合の空間分割手法
- ② 隣接要素で空間分割幅を変化させる場合の最適変化率
- ③ ゆがんだメッシュを使用する場合の安定性
- ④ 最適時間ステップ設定手法

今年度は、以下の（a）～（d）のような解析の組合せに「MIGR96」を適用し、上記の①～④の数値解上の問題を検討することによって、妥当な結果を与える解の安定条件並びに入力パラメータの範囲を示した。

- （a）不透水領域（坑道内）を含む透水性の不均質な領域を対象とした定常地下水流動解析
- （b）複数の核種および岩体物性（吸着、拡散条件等）の不均質性を考慮した核種移行解析
- （c）複数崩壊連鎖（沈殿／再溶解を含む）を考慮した核種移行解析
- （d）複数の廃棄体の存在を考慮した核種移行解析

本年度作業においては、「MIGR96」評価に先だって、プログラムの内容について調査、検討を実施し、ノイマン条件の取り扱いに関して改良を実施した。

続いて、まず予備的評価として：

- ・ Burgers方程式
- ・ 均質場移流／拡散計算

を実施して「MIGR96」の基本的な解析機能について評価を実施した。移流項の離散化にガラーキン法を使用した場合の安定ペクレ数限界が、理論式通り2.0であることを確認した。風上差分法を使用する場合の精度低下に関しても併せて検討を実施した。

つづいて：

- ・不均質場
- ・歪んだメッシュを使用した場合

についてベンチマークテストを実施し、解の安定性について評価した。

6. 「MIGR96」の改良

本コードを効率的に運用していくために必要な機能拡張および改良として、以下の項目を実施した。

(1) 入出力データ作成・表示支援プログラムとのインターフェイス整備

有限要素データの作成、初期条件・境界条件・物性値等を指定する要素（あるいは節点）情報の抽出／設定、および計算結果の出力などには既存の入出力データ作成・表示支援プログラムを用いることが有効である。そのための専用インターフェイスを作成した。

また、「MIGR 96」のファイル入力形式、生成方法は非常に複雑なため、形状情報を外部ファイルとして読み込めるようにファイル形式の検討を実施した。また、坑道周辺の複雑な形状をモデル化するために専用のメッシュジェネレータの開発を実施した。

(2) 出力機能の追加

ニアフィールド性能評価では、人工バリア領域およびニアフィールド領域からの核種移行率を性能指標としている。よって、指定領域からの核種移行率を出力するための機能を追加した。

(3) 時間分割の自動設定機能の追加

「MIGR96」では、タイムステップを解析者側で手動で設定している。精度良く効率的に解析を行うため、自動的に精度を保証しつつタイムステップを設定する機能を追加した。

(4) インベントリ枯渇計算機能の追加

ニアフィールド性能評価では、人工バリア領域およびニアフィールド領域からの核種移行率の最大値が重要な評価指標となる。この最大値はインベントリの枯渇現象と密接な関係がある。よって、岩体側核種移行解析モジュールに対してもインベントリ枯渇計算機能の追加を実施した。

7. 「TAGSAC」の改良

本コードを効率的に運用していくために必要な機能拡張および改良として、以下の項目を実施した。

(1) 任意点における解析結果の出力機能の追加

原位置試験等で得られる測定値は必ずしも、有限要素法解析を実施するときの解析節点と一致しない。したがって、原位置試験等で得られる測定結果と比較するために、既存の解析結果から任意点での結果を出力するための機能を作成した。

(2) 入出力データの作成・表示支援プログラムとのインターフェイス整備

有限要素データの作成、初期条件・境界条件・物性値等を指定する要素（あるいは節点）情報の抽出／設定、および計算結果の出力などには既存の入出力データの作成・表示支援プログラムを用いることが有効である。そのためのインターフェイスを整備した。