



ニアフィールド核種移行挙動の影響解析 —複数の廃棄体の存在を考慮したニアフィールド核種 移行解析コードの開発およびその概略的影響解析—

吉田 隆史 牧野 仁史 大井 貴夫

東海事業所 環境技術開発部

資料番号：103-7

Influence Analysis of the Near-Field Nuclide Migration Behavior

—Development of the Near Field Nuclide Migration Analysis Code Considering Several Waste Sources, and that Roughly Influence Analysis—

Takashi YOSHITA Hitoshi MAKINO Takao OHI
Waste Technology Development Division, Tokai Works

ニアフィールド領域中の核種移行評価をより現実的に行うため、人工バリア領域とその周辺岩体領域の濃度の連続性、および複数の廃棄体の存在を考慮可能な連成解析コードを開発した。また、本コードを用い、地下水流速、岩体の遅延係数、および廃棄体の空間配置等に関する概略的な影響解析を実施した。その結果、濃度の連続性を考慮することによって従来よりも人工バリアからの核種放出率が小さく見積もられること、また、地下水流れと平行に二つの廃棄体を配置した場合、上流側に位置する廃棄体の存在は岩体中の評価地点での核種移行率にほとんど寄与しないこと等が確認された。

In order to make a more realistic evaluation on radionuclide migration through the near-field, we developed the radionuclide migration code which was able to consider continuity of the nuclide concentration at the near-field boundary and several waste sources by coupling two separate codes. By use of this coupled code, we roughly carried out sensitivity analysis on the parameters of the groundwater velocity, the rock retardation factor, and wastes configuration. The result showed the radionuclide release rate from the engineered barrier using the realistic near-field boundary condition was relatively low compared with that based on a previous conservative boundary condition. When two wastes were placed on the same stream line of the groundwater flow, the waste at the upper-stream did not influence radionuclide release in the rock significantly.

キーワード

高レベル放射性廃棄物、地層処分、性能評価、人工バリア、ニアフィールド、核種移行解析、連成解析コード、多重ソース、地下水流速、遅延係数

High Level Radioactive Waste, Geological Disposal, Performance Assessment, Engineered Barrier System, Near-Field, Radionuclide Migration Analysis, Coupled Code, Multi Source, Groundwater Velocity, Retardation Factor

1. はじめに

原子力発電所の使用済み燃料から有用なウランとプルトニウムを回収した後に残る高レベル放射性廃棄物は、まず、取り扱いやすくするために安定なガラス固化体に処理される。そして、30年から50年間地上で貯蔵した後に、地下深い地層に処分すること（「地層処分」と呼ばれる）が考えられている。地層処分では、安全を確保する仕組みとして、人工的に設けられるいくつもの層（ガラ

ス固化体、オーバーバック、緩衝材）からなる安全防護のシステム（「人工バリア」と呼ばれる）が考案されている。さらに、さまざまな安全防護の働きを本来備えている地層（「天然バリア」と呼ばれる）を組み合わせた「多重バリアシステム」による処分方法が提案されている¹⁾。

これらのシステムの個々または全体が有する放射性核種に対するバリア性能（核種の封じ込め機能、核種の溶出・移動の制限機能、地層中での核

種の吸着・希釈・分散機能等)を定量的に示すことが、地層処分システムの安全性能を評価するうえで重要である。この評価においては、対象となる時間が非常に長期にわたること、また想定される現象も緩慢であり、対象となる領域も広大であることから、実験などで直接経験的に処分システムの性能を示すことは困難である。そのため、関連するさまざまな現象を可能な限り取り込んだ数学モデルを作成し、そのようなモデルをプログラム化した計算コードを用いてバリア性能を定量的に示していく方法がとられる。また、評価は、実験結果等、これまで得られている知見と比較して十分に検証・確認を行った計算コードと精度の高いデータを用いて行われる。

地層処分システムの安全性能の評価では、評価の場として、人工バリアとその周辺岩体を含むニアフィールド領域、ニアフィールドの外の天然の地層であるファーフールド領域、および被ばく線量を評価する場となる生物圏領域の三つの領域を考え、ニアフィールドから生物圏までの核種の移行挙動の定量的評価、および生物圏での線量評価を行う。その中で、ニアフィールド領域の核種移行評価の重要性が、日本および諸外国の地層処分システムに関する包括的性能評価報告書から認識されてきている。

このニアフィールド核種移行評価をより詳細に、かつ現実的に行うためには、ニアフィールドで起こる現象をより忠実に考慮していくことが必要である。

これまで²⁾の評価方法の流れを図1に示す。評価では、人工バリア外側境界で設定される数値解的な制約条件(すなわち、境界条件)として、拡散移行が過大に見積もられる条件である濃度ゼロ

を仮定し、人工バリアからの核種放出率を簡略的に見積もってきた。そして、その核種放出率を人工バリア周辺岩体中の核種移行解析のための入力値として用い(すなわち、物質収支は保たれる)、ニアフィールド核種移行評価を行ってきた。このため、評価自体は過大に見積もられるが、人工バリアと周辺岩体との境界部での濃度の連続性は保たれていない評価となっている。

本来、ニアフィールド中の核種の移行は、人工バリアと周辺岩体との境界部において物質収支(核種フラックスの連続性)および核種濃度の連続性を常に保ちつつ、相互に影響を及ぼしあいながら変化するものと考えられる。また、それらの挙動は、地下水流速や岩体の性状、および空間的に配置された周囲の廃棄体からの核種放出等の変化によっても影響を受けると考えられる。

そこで、本研究では、地下水流速や岩体の性状、および空間的に配置された周囲の廃棄体を考慮しながら、人工バリア領域とその周辺岩体領域間の連続的な核種の移行を扱うことのできる解析コードを開発した。そして、この解析コードを用い、これら二つの領域の境界部における濃度の連続性、および複数の廃棄体の存在を考慮することによって生じるニアフィールド核種移行挙動の変化を解析するとともに、関連するパラメータの影響特性を把握した。さらに、得られた結果に対して、従来より用いられてきた手法²⁾との比較検討を行った。

2. 解析コードの開発

ニアフィールド領域における濃度の連続性と地下水流速や岩体の性状、および空間的に配置された周囲の廃棄体の存在を考慮し、ニアフィールド

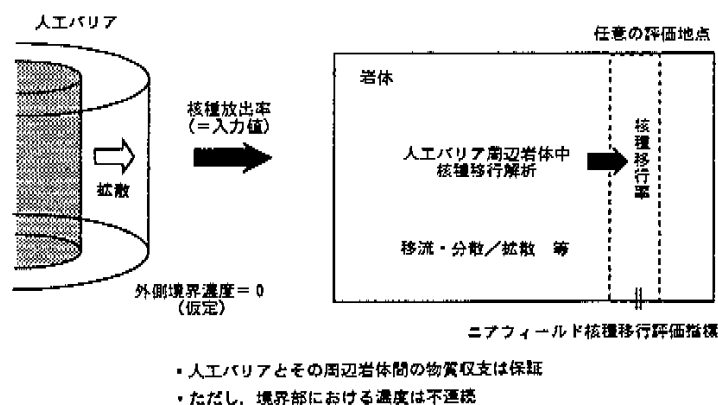


図1 これまでのニアフィールド核種移行評価の流れ

における核種の移行をより現実的に解くための核種移行解析コード(多重ソースコード)を開発した。本解析コードは、これまで人工バリア中核種移行評価コードとして用いられてきたRELEASE³⁾と、多孔質媒体を対象とした三次元的な濃度の広がりや廃棄体の空間配置が考慮可能な核種移行解析コード(MIGR3D)とを連成させた解析コードである。

連成は、人工バリア側(RELEASE)の計算結果である緩衝材からの核種放出率を周辺岩体側(MIGR3D)の核種移行計算のソースターム(点ソース)として受け渡す。同時に、それを受けて周辺岩体側の移行計算を行い、その結果得られる緩衝材外側境界濃度を人工バリア側における境界濃度として渡し返すという方法で行われる。

以下に、RELEASEおよびMIGR3Dならびにその連成手法の概要を示す。

2.1 人工バリア中核種移行解析コードRELEASEの概要

人工バリア中の核種の移行は、緩衝材として用いられるベントナイトの透水性の低さから拡散によって支配されると考えられている。また、核種はベントナイト中を崩壊連鎖、吸着、沈澱/溶解の影響を受けながら移行するものと考えられている。図2に人工バリア中核種移行解析の概念図を示す。

人工バリア中核種移行解析コードRELEASEは、人工バリアの形状の対称性を考慮し、以下に示す一次元円筒座標系の拡散方程式を支配方程式として開発された差分コードである。

緩衝材の内側境界条件は、核種の溶解度で一定、フラックス一定、および一次溶解反応で溶出

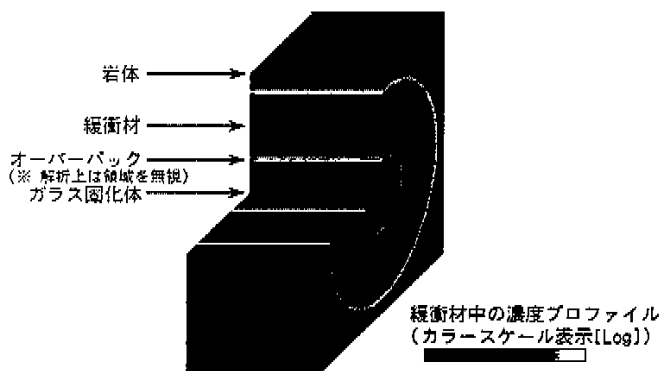


図2 人工バリア中核種移行解析の概念図

するガラスと共に、ガラス中の核種の存在割合に従って核種が溶出する場合の三つの条件のいずれかを指定できる。外側境界条件は、核種濃度ゼロ、境界近傍の岩体中のある領域(ミキシングセル)内で核種濃度が瞬時に一定、および岩体内部の任意の位置で核種濃度ゼロのいずれかを指定できる。

以下にRELEASEの支配方程式を示す。

$$Rd_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = Dp_i \left[\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right] - \lambda_i Rd_i C_i + \lambda_{i-1} Rd_{i-1} C_{i-1} - k_i (C_i - C_i^*) U (C_i - C_i^*, P_i) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = k_i (C_i - C_i^*) U (C_i - C_i^*, P_i) - \lambda_i P_i + \lambda_{i-1} P_{i-1} \quad (2)$$

Rd_i : 核種 i の遅延係数

C_i : 核種 i の液相中の濃度

Dp_i : 核種 i の空隙水中の拡散係数

λ_i : 核種 i の崩壊定数

k_i : 核種 i の沈澱/溶解の反応速度

U : 沈澱の評価式

C_i^* : 核種 i の分割溶解度

$$C_i^*(r, t) = C_i^* I_i(r, t) \quad (3)$$

C_i^* : 核種 i が属する元素の溶解度

I_i : 核種 i の同位体存在比

$$I_i(r, t) = \frac{C_i(r, t)}{\sum C_i(r, t)} \quad (4)$$

P_i : 核種 i の単位体積当たりの沈澱量

r : ガラス固化体中心からの距離

t : 時間

○遅延係数

$$Rd_i = 1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho_0 Kd_i \quad (5)$$

ε : 緩衝材中の空隙率

ρ_0 : 緩衝材の真密度

Kd_i : 核種 i の緩衝材に対する分配係数

○沈澱の評価式

$$U(C_i - C_i^*, P_i) = \begin{cases} 1, & C_i - C_i^* > 0 \text{ or } P_i > 0 \\ 0, & C_i - C_i^* \leq 0 \text{ and } P_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.2 地下水流動・核種移行解析コードMIGR3Dの概要

処分場とその周辺の地質媒体中における核種の移行は、地下水の流れによる移動（移流）とそれによって生ずる機械的分散、および拡散によるものであり、岩体に対する吸着等の相互作用の影響を受けながら進行する現象として考えられている。また、その現象に対する評価は、岩体中の空隙構造に対応して、多孔質媒体と亀裂性媒体とに分けて行われている。地下水流動・核種移行解析コードMIGR3Dは、地質媒体として地下水で飽和された多孔質媒体を想定した三次元有限要素法の核種移行解析コードである。

解析は、最初に地下水流動解析により解析対象期間における地下水流速場を求め、その流速データを参照しながら岩体中の核種移行解析が行われる。地下水流動解析には、飽和多孔質媒体について連続の式およびダルシー則を適用したモデルが用いられる。核種移行解析は、移流／拡散（分散）方程式に対し、崩壊連鎖および吸着反応を考慮したモデルを用いている。ただし、核種の移行を抑制する方向に働く沈澱／溶解反応については、これまでと同様に考慮されていない。

境界条件は、地下水流動解析および核種移行解析の両方ともDirichlet境界（水頭値および濃度固定境界）およびNeuman境界（地下水流および核種フラックス一定境界）のいずれかを指定できる。

以下にMIGR3Dの支配方程式を示す。

○地下水流動

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla H) + Q \quad (7)$$

$$u = \frac{-k \cdot \nabla H}{\epsilon} \quad (8)$$

S : 比貯留係数

H : 全水頭

k : 透水係数

Q : ソースターム（地下水流）

ϵ : 空隙率

u : みかけの地下水流速

○核種移行

$$\epsilon R d_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \epsilon \nabla \cdot D \cdot \nabla C_i - \epsilon (u \cdot \nabla) C_i - \epsilon R d_i \lambda_i C_i + \epsilon R d_{i-1} \lambda_{i-1} C_{i-1} + F_i \quad (9)$$

$R d_i$: 核種 i の媒体に対する遅延係数

C_i : 核種 i の液相中の濃度

D : 空隙水中の拡散（分散）係数

λ_i : 核種 i の崩壊定数

F_i : 核種 i のソースターム

2.3 連成手法の概要

ニアフィールド中に複数の廃棄体が存在する領域を対象とした核種移行解析は、人工バリア内を有限要素で細密に表現することで、MIGR3Dのみでも計算は可能である。しかし、それによって計算に必要な要素数が非常に多くなり、膨大な計算時間を要してしまう。そこで、人工バリア内の計算を既存の一次元コードに置き換えて連成計算する方法を採用した。

人工バリア中核種移行評価コード(RELEASE)と、多孔質媒体を対象とした周辺岩体中核種移行解析コード(MIGR3D)との連成手法について以下に記す。そのアルゴリズムについては図3に示す。

- ① 水理計算の後、人工バリア中の核種移行解析の結果から得られる人工バリア外側からの核種放出率を廃棄体が存在する要素の各節点に均等分割（周辺岩体のソース項とする）して与える。
- ② 与えられた放出率を用いて周辺岩体中の核種移行解析を行って核種濃度分布を計算する。そ

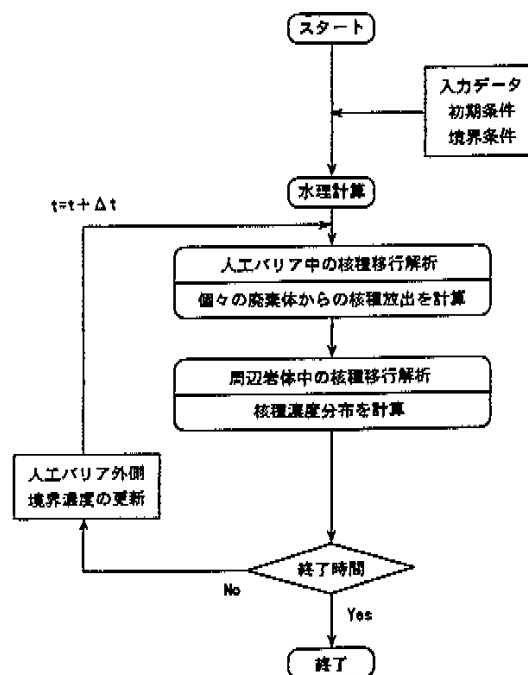
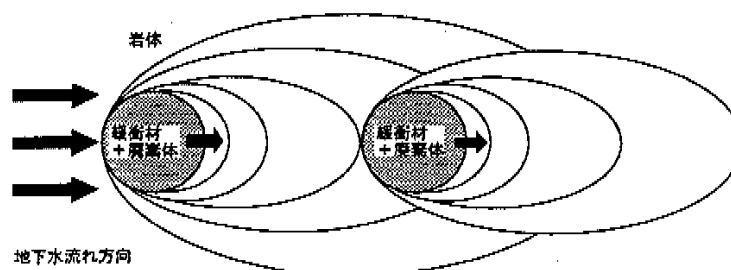


図3 連成解析のアルゴリズム



＜ニアフィールド中の核種の移行挙動に影響を及ぼす要因＞

- ・ 廃棄体の空間的配置
- ・ 岩体の性状及びその不均質性
- ・ 岩体中の濃度分布
- 岩体中の核種移行特性 (拡散係数、分數係数 等)
 - 岩体中の水運特性 (透水係数、空隙率 等)

図4 多重ソースコードによる連成解析の概念図

の後、廃棄体の存在する要素の各節点の平均濃度を人工バリア外側境界濃度に更新する。

- ③ タイムステップを一つ増加させる。
- ④ 一つ前のタイムステップで計算された人工バリア外側境界濃度を用いて、次のタイムステップにおける人工バリア中核種移行解析を行う。

また、図4に多重ソースコードによる連成解析の概念図を示す。

2.4 コード連成の検証

連成機能を検証するため、一次元の拡散問題に対し、領域を半分に区切り、RELEASEとMIGR3Dとを連成させながら計算した場合（連成解析を

行った場合）とRELEASEだけで全領域を計算した場合（連成解析を行わなかった場合）との濃度プロファイルの比較を行った。

両計算結果を比較した結果を図5に示す。両解析結果はほぼ一致し、この問題に対して正しく連成計算されていることが確認された。

3. 影響解析

人工バリアと周辺岩体との境界部における濃度の連続性、および複数の廃棄体の存在を考慮することによって生じるニアフィールド核種移行挙動の変化ならびに関連するパラメータの影響特性について解析した。ここでの検討では、以下の観点で、ニアフィールド核種移行性能指標である人工バリアからの核種放出率、および岩体中の評価地点の核種移行率に対する概略的な影響解析を実施した。

- ① 連成解析を行うことにより人工バリア外側境界濃度はゼロ以上の値を有し、連成解析を行わないで境界濃度をゼロと仮定した場合よりも人工バリアからの核種放出率が小さくなることが予想される。よって、連成解析を行うことによって連成解析を行わない場合よりもどの程度ニアフィールド核種移行性能が小さくなるか確認する。
- ② 人工バリア外側の境界濃度は岩体中の地下水流速が大きいほど濃度ゼロに近づく。それによってニアフィールド核種移行性能がどれだけ大きくなるか確認する。

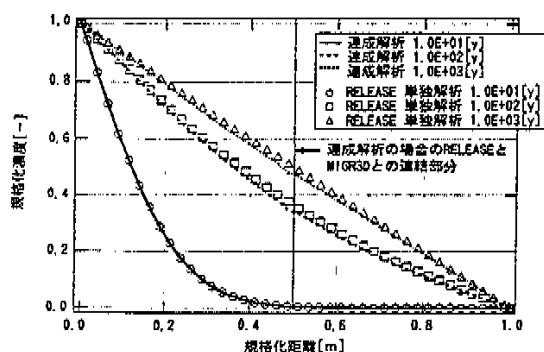
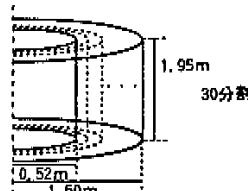
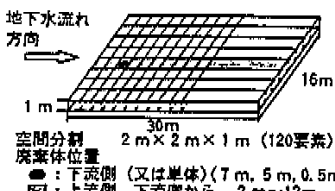


図5 連成機能の検証結果

— 連成解析を行った場合と行わなかった場合の比較 —

表1 核種移行パラメータ値(標準値)

核種条件		解析対象期間	
核種	U-238	1×10^3 [y]	
半減期	4.47×10^9 [y]	時間ステップ	1 [y]
インベントリ	1.94×10^4 [g]	解法: 有限要素法	
溶解度	9.3×10^{-5} [g/m ³]		
人工バリア条件		周辺岩体条件	
拡散係数	2.84×10^{-2} [m ² /y]	地下水流速	1.0×10^{-2} [m/y]
空隙率	0.33 [-]	分散係数	6.3×10^{-3} [m ² /y]
分配係数	1.0×10^1 [m ³ /kg]	拡散係数	5.3×10^{-3} [m ² /y]
緩衝材高さ	1.95 [m]	空隙率	0.3 [-]
緩衝材内側半径	0.52 [m]	遅延係数	1.6×10^1 [-]
緩衝材外側半径	1.50 [m]		
解析対象領域		解析対象領域	
			

- ③ 人工バリア外側の境界濃度は岩体の遅延係数が大いほど濃度ゼロに近づく。それによるニアフィールド核種移行性能の変動挙動を確認する。
- ④ 複数の廃棄体が存在する場合、地下水の流れの上流側に位置する廃棄体から放出された核種が下流域に移行することにより、下流側の廃棄体の境界濃度が上昇する。この程度は、廃棄体間の距離に依存する。よって、廃棄体間距離をパラメータとして上流側廃棄体のニアフィールド核種移行性能に対する影響を確認する。

3.1 解析条件

解析の前提条件は以下のように設定した。

対象核種については、崩壊およびインベントリの枯渇の影響を簡略化するため、U-238の単核種とした。

岩体領域については、濃度の広がり方を単純化するため、二次元均質媒体とし、地下水は一方方向に一定に流れると仮定した。

また、解析に必要な核種移行パラメータについては表1の値を標準値として使用した。それぞれの値は文献²⁾で示されている設定根拠に準拠した。ただし、岩体条件については、文献²⁾での多孔質媒体に対する詳細解析として用いられた値を使用した。また、岩体の遅延係数については、岩体中での核種の広がりを明確にするため、文献²⁾の1/100とした。

3.2 解析ケース

連成解析を行う場合と行わないこれまでの評価

方法との比較、および地下水流速、岩体の遅延係数、廃棄体間の距離をパラメータとした検討を行うため、表2に示す解析ケースを設定した。

連成解析を行わないこれまでの考え方に従った解析では、人工バリア外側境界濃度をゼロとして求めた人工バリアからの核種放出率を連成解析の場合と同じ二次元岩体中の廃棄体存在位置に入力した。

検討のための指標として、人工バリア性能についてはこれまでの評価と同様、人工バリアからの核種放出率を用いた。ニアフィールド性能については、廃棄体に対し、地下水流れの下流側10m離れた地点の単位断面あたりの核種移行率を採用した。廃棄体が二つの場合は、下流側に配置された廃棄体から10m離れた地点を評価地点とした。

表2 解析ケース

連成/非連成	廃棄体数	地下水流速[m/y]	岩体の遅延係数[-]	廃棄体間距離[m]
非連成	1	$1.0E-03$ (標準値)	$1.6E+01$ (標準値)	-
連成	1	$1.0E-04$	$1.6E+01$ (標準値)	-
		$1.0E-03$ (標準値)		
		$1.0E-02$		
		$1.0E-03$ (標準値)	$1.6E+02$	
			$1.6E+03$	
			$1.6E+04$	
			$1.6E+05$	
	2	$1.0E-03$ (標準値)	$1.6E+01$ (標準値)	2
				5
				12

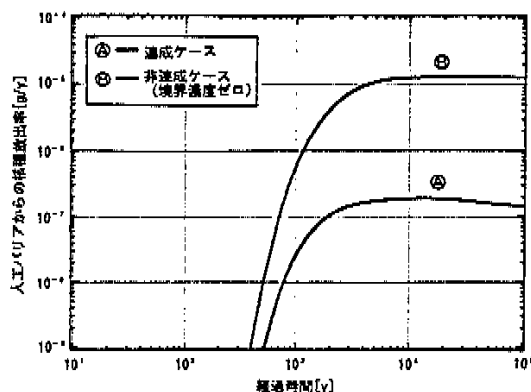


図6 人工バリアからの核種放出率の時間変化
(廃棄体数: 1)

—達成解析を行った場合と行わなかった場合の比較—

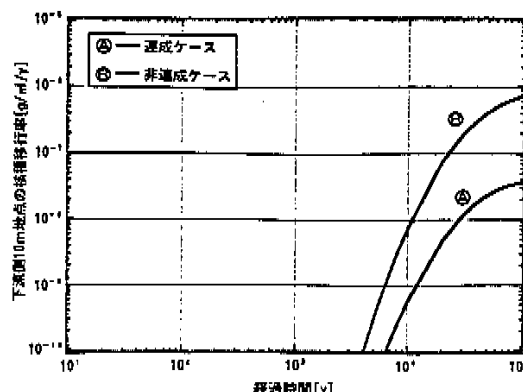


図8 下流側10m地点の核種移行率の時間変化
(廃棄体数: 1)

—達成解析を行った場合と行わなかった場合の比較—

3.3 解析結果と考察

(1) 達成解析と非達成解析との比較

廃棄体が一つの場合について、達成解析を行った場合と行わなかった場合を比較した結果を図6、図7、図8に示す。

人工バリアからの核種放出率(図6)は、達成、非達成の両方とも時間とともに徐々に上昇し、 10^4 年以降は定常に近い放出挙動を示した。しかし、達成解析を行うことにより外側境界濃度をゼロとした非達成解析の場合よりも最終的に放出率が約2オーダー小さくなり、核種放出が抑制された結果となっている。このことから、非達成解析の場合は、人工バリアからの核種放出率に対して過大に評価された結果であることがわかる。

単核種で崩壊がない場合の人工バリアからの定常核種放出率は、解析解(10)式

$$\phi = -\frac{2\pi H \epsilon_b D p_b}{\ln(r_1/r_2)} C_{in} \left[1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \right] \quad (10)$$

ϕ : 定常核種放出率[M/T]

H : 円筒高さ[L]

r_1 : 内側半径[L]

r_2 : 外側半径[L]

C_{in} : 内側境界濃度[M/L³]

C_{out} : 外側境界濃度[M/L³]

によると、人工バリア内側境界濃度と外側境界濃度の差に比例する。よって、定常状態の放出率が外側ゼロ濃度境界の場合よりも約2オーダー小さくなるためには、人工バリア外側の核種濃度が内側境界濃度の約99%になる必要がある。実際、達成解析を行った場合の人工バリア—岩体境界の核種濃度(図7)は、 10^5 年において内側境界濃度($9.3 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$)のほぼ99%($9.19 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$)となっている。

また、図7から、非達成解析の場合、境界の核種濃度、すなわち、人工バリアからの核種放出を受ける岩体地点の核種濃度が溶解度($9.3 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$)を大きく越えていることがわかる。このことから、これまでの評価方法は岩体中の核種濃度について過大に評価した結果を与えうることが確認された。

下流側10m地点の核種移行率(図8)については、達成解析を行った場合と行わなかった場合を比較すると1オーダー程度の差がみられ、その差が徐々に拡大していく傾向を示した。

(2) 地下水流速の違いの影響

達成解析を行った場合について地下水流速をパラメータとして検討した結果を図9、図10に示

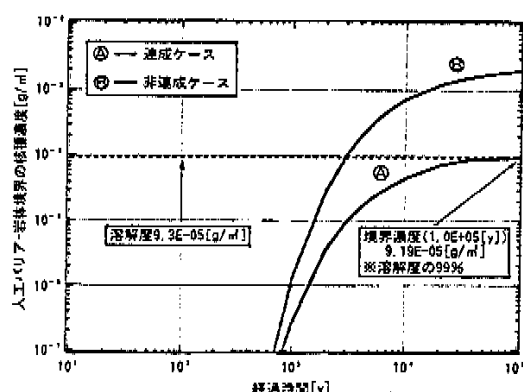


図7 人工バリア—岩体境界の核種濃度の時間変化
(廃棄体数: 1)

—達成解析を行った場合と行わなかった場合の比較—

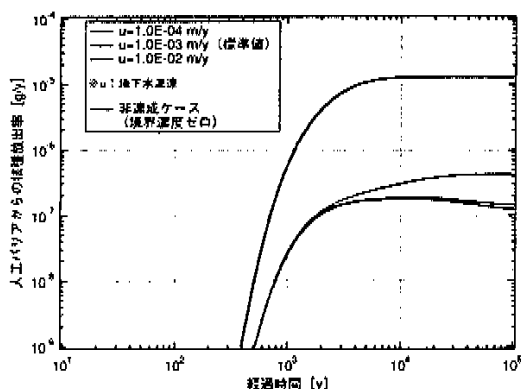


図9 人工バリアからの核種放出率の時間変化
(廃棄体数: 1)
— 岩体中の地下水流速の違いの影響 —

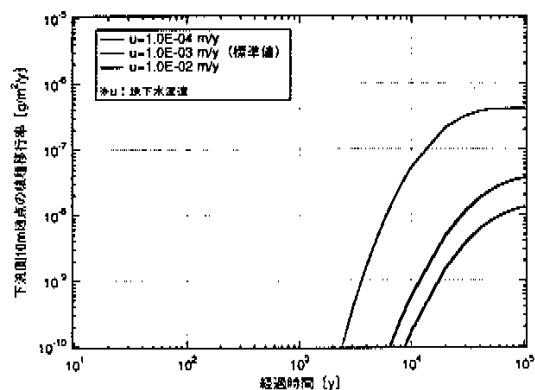


図10 下流側10m地点の核種移行率の時間変化
(廃棄体数: 1)
— 岩体中の地下水流速の違いの影響 (達成) —

す。ここでは、分散係数について、文献²⁾で適用されている以下の式に従い、それぞれの流速に対応する分散係数を採用した。

$$D_L = \alpha_L u + D_p \quad (1)$$

$$\alpha_L = L/10 \quad (2)$$

D_L : 分散係数 [m^2/y]

u : 地下水流速 [m/y]

α_L : 分散長 [m]

D_p : 拡散係数 5.3×10^{-3} [m^2/y]

L : 評価距離 10 [m]

人工バリアからの核種放出率 (図9) については、地下水流速が大きくなると放出率も大きくなる傾向を示している。濃度の連続性を考慮した場合、地下水流速の増加は、人工バリアからの核種放出率に対して境界部から岩体への移流による境界濃度の減少として影響する。(10) 式より、たとえば、外側境界濃度 C_{out} が内側境界濃度 C_{in} の99%から95%に変化したとすると、定常放出率は99%の場合の5倍となることが予測される。図9で、流速の増加にともなって人工バリアからの核種放出率が増加した理由は、これと同様の理由によるもので、流速増加による境界濃度のわずかの減少が核種放出率の増加をもたらしているものと考えられる。

同じく図9より、ある程度地下水流速が小さいところでは、人工バリアからの核種放出率に対する流速の感度が小さくなっている。これは、境界部から岩体への核種移行が拡散によって支配され、境界濃度に対する地下水流の影響がほとんどなくなったためと考えられる。

下流側10m地点の核種移行率 (図10) についても、地下水流速が大きくなると移行率が大きくなる傾向を示している。これは、流速が大きくなったことによって、人工バリアからの核種放出率が増加したことと移流による岩体中の核種移行率の増加に起因するものと考えられる。

(3) 岩体の遅延係数の違いの影響

達成解析を行った場合について岩体の遅延係数をパラメータとして検討した結果を図11、図12に示す。

人工バリアからの核種放出率 (図11) は、岩体の遅延係数 (吸着効果に相当) が大きくなるに従って非定常状態の核種放出率が大きくなり、遅延係数 1.6×10^5 では、達成解析を行わなかった場合とほとんど差がなくなる結果となった。

岩体中での核種の吸着、すなわち、岩体媒体と

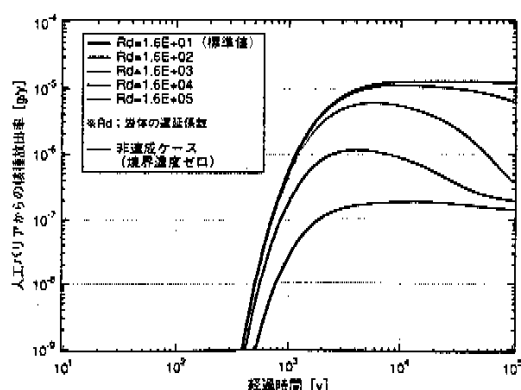


図11 人工バリアからの核種放出率の時間変化
(廃棄体数: 1)
— 岩体中の遅延係数の違いの影響 —

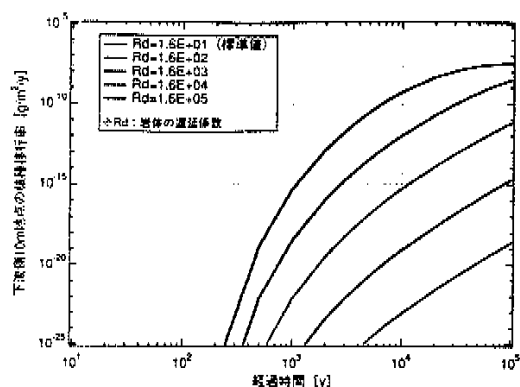


図12 下流側10m地点の核種移行率の時間変化
(廃棄体数: 1)
— 岩体中の遅延係数の違いの影響 (達成) —

水中との核種の分配は、境界部に放出された核種の濃度が上昇するのを遅延する作用として働く。よって、岩体中の遅延係数が大きい場合、放出初期の非定常状態において、人工バリアからの核種放出に対して境界部の濃度がゼロと近似できる期間が長く続く。このため、非定常状態の核種放出率が大きくなる傾向を示したものと考えられる。また、遅延係数が小さいほど境界濃度が早く高くなり、境界濃度ゼロの場合との違いが明確に現れたものと考えられる。

下流側10m地点の核種移行率(図12)は、岩体の遅延係数が大きくなると大幅に減少する傾向を示した。岩体中に放出された核種は、岩体に吸着されながら移行していくため、遅延係数が大きい場合、極端に吸着の影響を大きく受けることがわかった。

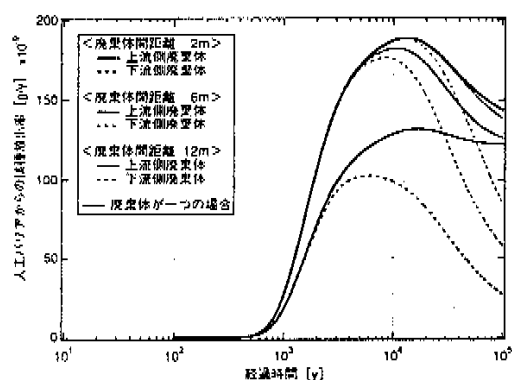


図13 人工バリアからの核種放出率の時間変化
(廃棄体数: 2)
— 二つの廃棄体間の距離の違いの影響 (達成) —

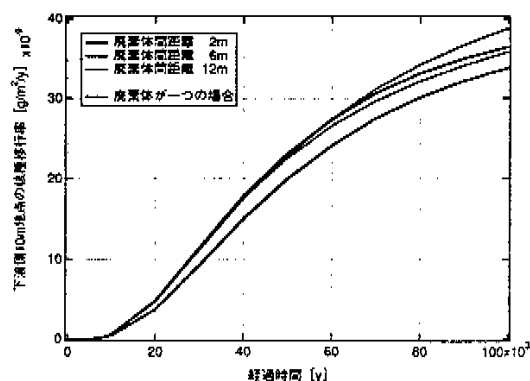


図14 下流側10m地点の核種移行率の時間変化
(廃棄体数: 2)
— 二つの廃棄体間の距離の違いの影響 (達成) —

(4) 二つの廃棄体の廃棄体間距離の違いの影響

二つの廃棄体を地下水流れ方向に配置し、その廃棄体間距離の違いについて検討した結果を図13、図14に示す。

人工バリアからの核種放出率(図13)は、廃棄体間距離が短くなるにつれて小さくなり、廃棄体が一つの場合に対して数10%減少する程度であった。また、上流側廃棄体よりも下流側廃棄体の方が小さくなる傾向を示した。人工バリアからの核種放出率に対し、複数の廃棄体の存在は、お互いの廃棄体の人工バリアー岩体境界部への核種の相互流入による境界濃度の上昇として影響する。よって、廃棄体間距離が近いほど、また、上流側廃棄体よりも下流側廃棄体の方が境界濃度が大きくなり、傾向としてこのような結果になったものと考えられる。

下流側10m地点の核種移行率(図14)についても、廃棄体間距離に対する変動は小さく、廃棄体が一つの場合に対して±10%程度であった。

下流側10m地点の核種移行率の廃棄体間距離に対する変動傾向としては、廃棄体間距離が6mの場合で最大となる傾向を示し、2mおよび12mの場合では、廃棄体が一つの場合よりも移行率が小さくなっている。この傾向については、以下のよう考えることができる(図15)。廃棄体の距離が非常に近い場合(ここでは、2mの場合)、お互いの廃棄体の人工バリアー岩体境界部への核種の相互流入による境界濃度の上昇が大きく、両廃棄体とも人工バリアからの核種放出率が大きく低下し(廃棄体からの核種放出抑制効果として働き)、評価地点の核種移行率が一つの廃棄体の場合よりも小さくなったものと考えられる。また、上流側

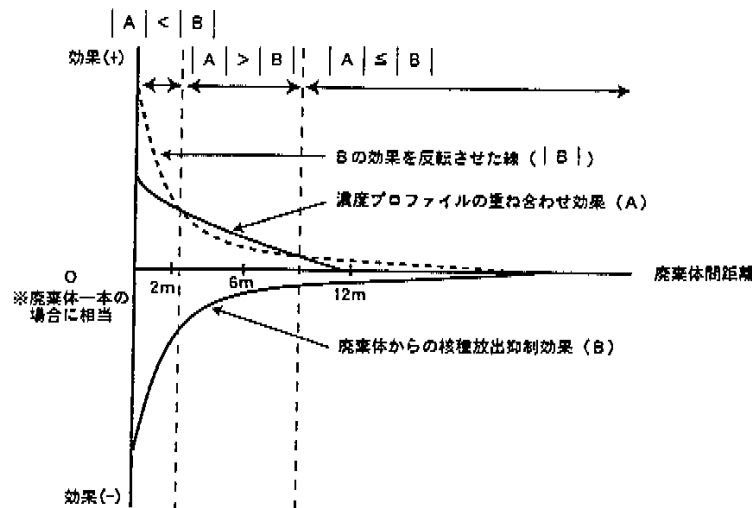


図15 下流側10m地点の核種移行率への影響度の説明
(上流側廃棄体の存在の効果)

廃棄体の位置が下流側廃棄体よりある程度離れると、そのような核種放出抑制効果よりも、各廃棄体から放出された核種の重ね合わせによる効果の方が大きくなり、下流側10m地点の核種移行率が一つの廃棄体の場合よりも大きくなると考えられる（たとえば、6mの場合）。さらに廃棄体間距離が大きくなると（ここでは、12mの場合）、上流側廃棄体から放出された核種の重ね合わせ効果が廃棄体間に存在する岩体の分散・遅延効果によってほとんどなくなり、上流側廃棄体からの核種流入による下流側廃棄体の核種放出抑制効果だけが働き、評価地点の核種移行率が一つの廃棄体の場合よりも小さくなったものと考えられる。挙動は複雑であるが、評価地点への上流側廃棄体の存在の影響はあまり大きくなく、複数の廃棄体を考えることによる核種移行率の抑制効果は期待されることが示された。

4. おわりに

地下水流速や岩体の性状、および空間的に配置された周囲の廃棄体を考慮しながら、これら二つの領域を連続的に扱うことのできる現実的なニアフィールド核種移行解析コード（多重ソースコード）を開発し、それらを考慮することによるニアフィールド核種移行挙動への影響を概略的に検討した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- ① 人工バリアと周辺岩体間の濃度の連続性を考慮することは、人工バリアからの核種放出率および下流側10m地点の核種移行率に対し、考慮

しない場合よりも小さくする方向に働くことが判った。

- ② 地下水流速の変化について、人工バリアからの核種放出率と下流側10m地点の核種移行率とを比較した場合、影響の受け方としては下流側10m地点の核種移行率の方が大きいことが確認された。
- ③ 岩体中の遅延係数が大きくなると、人工バリアー岩体間の境界濃度をゼロとみなせる期間が長くなり、非定常状態での人工バリアからの核種放出率が大きくなることがわかった。また、遅延係数が大きい場合、境界濃度をゼロに仮定した場合とほとんど同じ評価結果を与えることが確認された。
- ④ 二つの廃棄体を地下水流れ方向に配置し、廃棄体間距離を近づけていった場合、それぞれ的人工バリアからの核種放出率は、廃棄体が一つしかない場合と比べて数10%減少する傾向を示した。また、下流側10m地点の核種移行率については、廃棄体が1つの場合とほとんど同じ挙動を示した。すなわち、同一流線上に二つの廃棄体が存在する場合、上流側廃棄体からの核種の流入による下流側廃棄体からの核種放出率への抑制効果は小さいこと、および岩体中の評価地点に対する上流側廃棄体の存在の影響は小さいことが確認された。

今後は、様々な核種移行解析に多重ソースコードを適用した場合に、より信頼性の高い計算結果

が与えられるための数値解パラメータ（たとえば、タイムステップ幅、空間メッシュ幅等）の設定方法について検討していく。

また、複数崩壊連鎖を考慮した場合、様々なパターンの廃棄体の空間配置を考慮した場合等についてより詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 石川博久：“高レベル放射性廃棄物処分の概念と研究状況”，材

- 料と環境，45，p487-494（1996）。
- 2) 動燃事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—”，動燃事業団技術資料，PNC TN1410 92-081（1992）。
- 3) 大井貴夫，梅本博之，他：“崩壊連鎖に伴う人工バリア中核種移行への影響要因の検討”，放射性廃棄物研究，1，P243-252（1995）。
- 4) 細中耕一郎，梅本博之，他：“天然バリア中の核種移行遅延効果に関する感度解析”，動燃事業団技術資料，PNC TN1410 92-086（1992）。
- 5) 動燃事業団：“地層処分研究開発の現状（平成5年度）”，動燃事業団技術資料，PNC TN1410 94-094（1994）。
- 6) 動燃事業団：“地層処分研究開発の現状（平成8年度）”，動燃事業団技術資料，PNC TN1410 96-071（1996）。