

## 多重人工バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設の 安全性能評価手法に関する考察

鈴木俊一\*1 青木広臣\*2 川上博人\*2 畑明仁\*1,3 本島貴之\*1

本稿では、多重バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設の安全性能評価手法について提案する。本稿で提案する手法は、我が国において既存の放射性廃棄物処分施設に対しておこなわれた安全評価で用いられている移行率モデルの概念に基づいている。提案する安全評価手法の有利な点は、複雑な数値シミュレーションを多用することなく、廃棄体からの溶出率を考慮した人工バリアシステム(EBS)からの放出フラックスを算定でき、さらに、人工バリアが有する遅延性能、低透水性、及び低拡散性能の3つの性能指標からなる移行率を提案・採用している点である。また、本稿で提案する安全性能評価手法を用いて、人工バリアからの放射性核種の放出フラックスに対して感度解析を行い、廃棄体からの溶出率、移行率、及び人工バリアからの放射性核種の最大放出率による相図を作成し各パラメータの影響度を整理した。

**Keywords :** 放射性廃棄物処分施設, 多重バリアシステム, 安全評価, 安全性能指標, 移流, 拡散, 遅延, 解析解

A safety assessment methodology especially for radioactive waste disposal facility with multiple engineered barrier system is proposed in this paper. This proposed method is based on the concept of migration rate which had been used for the safety assessment for existing radioactive waste disposal facilities in Japan. The advantages of this proposed methodology are to calculate nuclides out fluxes from Engineered Barrier System (EBS) considering the effect of leaching rates of wastes without using complex numerical simulation, and to provide migration rates composed of three barrier performance indicators: retardation, impermeability and diffusivity. Additionally, several sensitivity analyses for radionuclides mass flux from a facility are carried out using this method and the phase diagrams of migration rate, leaching rate and maximum out flux from a facility are shown in this paper.

**Keywords:** radioactive waste disposal facility, multiple barrier system, safety assessment, safety indicator, advection, diffusion, retardation, analytical solution

### 1 はじめに

放射性廃棄物処分施設の設計及びレイアウトは、施設の構造安定性ととも、廃棄物に含まれる核種の閉じ込め性能に最大限の配慮を行いながら実施される。放射性廃棄物処分施設の主要な設計目標は、埋設した放射性廃棄物からの放射線障害に対して人の健康と環境を防護することである。施設閉鎖後の安全評価では、地下水による放射性廃棄物処分施設からの核種漏洩に関する地下水シナリオが主要な核種移行シナリオの一つであるとされている[1]。

国内においては、地下水シナリオは低レベル放射性廃棄物の処分に関する政令濃度上限値の決定に際して用いられたシナリオ[2]であり、さらに、「低レベル放射性廃棄物埋設の安全規制の基本的考え方[3]」では基本シナリオとして位置付けられている。こうした事実より、放射性廃棄物処分システムのバリア性能を評価するうえで、地下水シナリオは最も基本的なシナリオと考えることができる。海外の類似施設についても、処分システムの安全性評価における最も基本的なシナリオは地下水シナリオである。例えば、スウェーデンにおいてスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB 社)により 1988 年から操業が行われているス

ウェーデンの低・中レベル放射性廃棄物処分施設である SFR1 処分場に対する最新の安全評価[4]においても、地下水シナリオが安全評価の基本シナリオとなっている。

地下水シナリオに対する施設の安全性評価は、移流分散方程式を支配方程式とした地下水移行による核種の時間当りの漏洩量(放出率)を算出し、この値を用いて被ばく線量値で評価される。この評価では、廃棄体に含まれる極めて多数の核種の崩壊評価が求められるとともに、数値分散に配慮した解析モデルを用いて超長期間に渡る数値解析が必要となる。このような数値解析は計算機への負担は極めて大きく、従来の安全評価では計算機能力の制約等から、施設のモデル化及び数値解析に用いるパラメータを保守的に設定したうえで、三次元問題を一次元モデルに置き換えて評価されているのが現状である[5-8]。

具体的な例としては、文献[5]における核種移行解析においては、廃棄体埋設設備からの核種の放出率を算出するにあたっては、設備内の媒体への核種の収着を各媒体の収着体積分率に応じて算出した遅延係数を考慮した埋設設備内への地下水浸入水量と分配平衡となる埋設設備の体積の比である移行率を保守的に算出したうえで1次元モデルとして評価されている。文献[2]における核種移行解析においても、同様に移行率の概念を用いて一次元モデルにより施設からの核種放出率が算出されている。

放射性廃棄物処分施設の安全性能評価においては、設計計画段階から処分施設の諸元及びレイアウトが施設全体のバリア性能に及ぼす影響について、経済的要因も加味して検討し、最新の知見が得られた場合には、これを反映して繰り返し見直すことが求められている。

しかしながら、処分施設のバリア性能の頑健性を高めるために、材料特性の異なる複数の材料からなる多重バリア

A study on safety assessment methodology of radioactive waste disposal facility with multiple engineered barrier system by Shunichi Suzuki (shun1@ce.taisei.co.jp), Hiroomi Aoki, Hiroto Kawakami, Akihito Hata, Takayuki Motoshima

\*1 大成建設株式会社 原子力本部  
Taisei Corporation, Nuclear Facilities Division  
〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1

\*2 独立行政法人 原子力安全基盤機構 規格基準部  
Japan Nuclear Energy Safety Organization, Safety Standard Division  
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-17-1TOKYU REIT 虎ノ門ビル

\*3 現所属: 大成建設株式会社 技術センター

(Received 5 September 2008; accepted 10 February 2009)

システムを有する廃棄物処分施設に対する安全性能評価解析では、用いるパラメータの種類が極めて多く、さらに、施設周辺の地下水流動特性、廃棄体特性及び材料特性に応じて3次元問題を1次元問題に保守的に置き換える必要があるため、上述したような施設諸元の最適化を目的とした安全性能評価解析は多大な労力が必要となる。そのため、施設設計を行う技術者により容易に実施することが困難であるのが現状である。

こうした背景に着目して、本論文では、施設の設計及びその安全性能評価の効率化に資するべく、多重バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設の地下水シナリオを対象として、多重バリアシステムを有する処分施設部のバリア性能を、比較的簡易に算定可能な定量的指標を構築し、その妥当性を数値解析により確認することを目的とした。

## 2 放射性廃棄物処分施設に関する既往の安全性能評価について

多重バリアシステムを有する処分施設のバリア性能指標の構築を行うにあたり、代表的な国内外の施設部の評価モデルについて調査結果を紹介する。

### 2.1 国内における放射性廃棄物処分施設の核種移行解析について

国内における放射性廃棄物処分施設を対象とした代表的な核種移行解析の例としては、原子力安全委員会が放射能濃度上限値の算出のために、各処分方式に応じて線量評価を行った例が挙げられる。その他にも、既に国から事業許可がなされ、日本原燃株式会社により青森県六ヶ所村にて操業が開始されている低レベル放射性廃棄物埋設センターを対象とした核種移行解析及び安全評価の事例が文献[5]として公開されている。さらに、高レベル廃棄物を対象とした地層処分施設を対象とした例[6]や、TRU 廃棄物を対象とした例[7]などがある。これらの検討においても、種々の要素技術課題に対する精力的かつ膨大な検討の成果に基づき、核種移行解析時のモデル化や入力パラメータが設定されているが、以下に文献[2]の事例の概要を記述する。

本事例では、核種移行解析に一次元モデルが採用されており、特に処分施設又は廃棄体からの放射性物質の移行に関しては、処分施設内を分配平衡と仮定した上での移行率モデルが採用され、以下の式で示すような処分施設からの放出フラックスで表現されている。

$$J_i(t) = \eta_i C_{W,i} W \cdot e^{-(\lambda_i + \eta_i)t} \quad (1)$$

$$\eta_i = \frac{v_{in}}{h_d} \eta_{0,i} = \frac{v_{in}}{h_d \varepsilon_W R_{W,i}} \quad (2)$$

$$R_{W,i} = 1 + \frac{1 - \varepsilon_W}{\varepsilon_W} \rho_W K_{d,W,i} \quad (3)$$

ここで、

$J_i(t)$  : 時間  $t$  における核種  $i$  の移行フラックス[Bq/y]

$\eta_i$  : 核種  $i$  の移行率[1/y]

$C_{W,i}$  : 廃棄体中の核種  $i$  の濃度[Bq/kg]

$W$  : 廃棄体の総重量[kg]

$\lambda_i$  : 核種  $i$  の崩壊定数[1/y]

$v_{in}$  : 浸透水量[m/y]

$h_d$  : 埋設施設の高さ[m]

$\eta_{0,i}$  : 核種  $i$  の放出係数[-]

$\varepsilon_W$  : 廃棄体の空隙率[-]

$R_{W,i}$  : 廃棄体中における核種  $i$  の遅延係数[-]

$\rho_W$  : 廃棄体の真密度[kg/m<sup>3</sup>]

$K_{d,W,i}$  : 廃棄体中における核種  $i$  の分配係数[m<sup>3</sup>/kg]

次に、文献[5]に示された事例について示す。低レベル放射性廃棄物埋設センターを対象とした核種移行解析においては、一次元モデルが採用されており、施設部から天然バリア部への核種  $i$  の放出率  $S_c(t, i)$  は、(4)式に示したように評価がなされている。

$$S_c(t, i) = A_0(i) \cdot \eta(i) \cdot \frac{Q_{g0}}{Q_{i0}} \cdot \exp[-\lambda(i) \cdot t - \eta(i) \cdot t'] \quad [t' > 0]$$

$$S_c(t, i) = 0 \quad [t' \leq 0] \quad (4)$$

ここに、

$$\eta(i) = \frac{Q_{i0}}{\varepsilon \cdot Rf(i) \cdot V_{meq}} \quad (5)$$

$$\overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} = \sum_j [P(j) \cdot \varepsilon(j) \cdot Rf(i, j)] \quad (6)$$

$$Rf(i, j) = 1 + \frac{1 - \varepsilon(j)}{\varepsilon(j)} \cdot \rho(j) \cdot K_d(i, j) \quad (7)$$

$A_0(i)$  : 核種  $i$  の総放射能[Bq]

$Q_{i0}$  : 埋設設備全体への浸入水量[m<sup>3</sup>/yr]

$Q_{g0}$  : 埋設設備から天然バリアへの流出水量[m<sup>3</sup>/yr]

$P(j)$  : 埋設設備内の媒体  $j$  の体積分率[-]

$\varepsilon(j)$  : 埋設設備内の媒体  $j$  の空隙率[-]

$Rf(i, j)$  : 埋設設備内の媒体  $j$  の核種  $i$  の遅延係数[-]

$\rho(j)$  : 埋設設備内の粒子密度[kg/m<sup>3</sup>]

$K_d(i, j)$ : 埋設設備内の媒体  $j$  の核種  $i$  の分配係数[m<sup>3</sup>/kg]  
 $V_{meq}$ : 分配平衡となる埋設設備の体積[m<sup>3</sup>]  
 $\lambda(i)$ : 核種  $i$  の崩壊定数[1/yr]  
 $t'$ : 漏出開始後の時間[yr]

(4)式, (5)式及び(6)式より, 当該施設から天然バリア部への核種の放出率は, 埋設設備全体を均質材料かつ瞬時分配平衡領域とみなした際の等価な空隙率と遅延係数を算出し, 埋設設備から天然バリアへの流出水量と埋設設備内の空隙体積の比によって評価されていることがわかる。

## 2.2 海外における放射性廃棄物処分施設の核種移行解析について

海外において, 英国, 米国, スウェーデン及びフィンランドなどの各国の関係機関が, 既に当局より操業許可がなされている放射性廃棄物処分施設を対象とした核種移行解析の例(例えば, 文献[4, 9-12])を公開している。

1990年代半ばまでには, 低・中レベル放射性廃棄物処分施設を対象とした複数の長期的な安全性能評価手法が各関係機関等により開発されてきたが, それらの手法間には多数の相違があることも同時に明らかとなった。こうしたことから, 1997年に, 国際原子力機構(IAEA)により, 浅地中処分施設を対象とした安全評価手法の整備を目的としたプロジェクト(Improvement of Safety Assessment Methodologies: ISAM)が立ち上げられた。このプロジェクトの成果は, 2004年に文献[13]として公開されており, 放射性廃棄物処分施設から核種放出率を算出するためのポイントや数学モデルの例が記されている。以降, 海外における放射性廃棄物処分施設に関する核種移行解析の例として, これらに関する概要を記述する。

放射性廃棄物処分施設からの核種放出率の算出方法として, 保守性の観点及び移行パラメータの設定が不要なことから, 文献[13]では, 廃棄物からの核種の放出率を施設からの放出率とみなす手法が最も簡易な手法であると記述されている。以下に, そこで示されている廃棄物からの核種の放出率の算定式を記す。

$$R(t) = \lambda_i \cdot M(0) \cdot \exp\{-(\lambda + \lambda_i) \cdot t\} \quad (8)$$

$$\lambda_i = \frac{q}{z \cdot (\theta_w + \rho_b K_d)} \quad (9)$$

ここに,

$R(t)$ : 廃棄物からの核種放出率[M/T]  
 $M(0)$ : 放射性物質の初期質量[M]  
 $\lambda$ : 放射性物質の崩壊定数[T<sup>-1</sup>]  
 $\lambda_i$ : 放射性物質の浸出率[T<sup>-1</sup>]  
 $q$ : 廃棄物を通過する単位面積当りの地下水流量[MT<sup>-1</sup>]

$\theta_w$ : 廃棄物の空隙率[-]  
 $\rho_b$ : 廃棄物のかさ密度[ML<sup>-3</sup>]  
 $K_d$ : 廃棄物の分配係数[L<sup>3</sup>M<sup>-1</sup>]  
 $z$ : 廃棄物の高さ[L]

(8)式の右辺は, 廃棄物中の放射性物質の質量に浸出率を乗じているため, 廃棄物からの核種放出フラックスを表している。また, (9)式は, 遅延係数  $R$  を用いると(10)式のように表現される。したがって, (9)式は廃棄物空隙中の地下水の実流速と廃棄物空隙地下水中の放射性物質の質量と廃棄体内全放射性物質の質量の比との積であることが判る。

$$\lambda_i = \frac{q}{z \cdot \theta_w} \cdot \frac{1}{R} \quad (10)$$

なお, (8)式は, 廃棄物を通過する流量が比較的大きな場合(移流場)に対するものであり, 拡散が卓越するような場合においては, (11)式及び(12)式に示した支配方程式と初期条件に対する(13)式の準解析解により, 廃棄物からの放出率が算定可能としている。

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \nabla^2 C(x, t) - \lambda C(x, t) \quad (11)$$

$$C(x, 0) = C_0 \quad (12)$$

$$CFR = \frac{2A}{V} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (13)$$

ここに,

$C(x, t)$ : 時間  $t$  における廃棄体内の放射性物質の濃度 [M/L<sup>3</sup>]  
 $D$ : 廃棄物の拡散係数[L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]  
 $\lambda$ : 放射性物質の崩壊定数[T<sup>-1</sup>]  
 $x$ : 空間位置ベクトル[-]  
 $t$ : 廃棄物容器破損後の経過時間[T]  
 $CFR$ : 放射性物質の累積放出比[-]  
 $A$ : 廃棄物表面積[L<sup>2</sup>]  
 $V$ : 廃棄物の体積[L<sup>3</sup>]

上記のような, 廃棄物からの核種の放出率を施設部からの放出率とみなす簡易な手法以外としては, 多数の手法があり, 拡散・分散による放出を無視し, 遅延・崩壊及び移流を考慮して施設からの放出率を評価する手法があると, 文献[13]では記述されている。施設の工学バリア材の亀裂を通過する地下水流動特性などの局所的な効果が重要となる場合には, 2次元モデルや3次元モデルが必要となる可能性があるとして記述されている。また, このような詳細な

多次元モデルは、長期間を対象とした数千ケースもの解析ケースを行うことはできない可能性もあるため、施設内通過流量の代表値の妥当性を供与するために用いられると記述されている。

### 3 多重人工バリアシステムに対するバリア性能指標の導出

前章では、国内外における代表的な放射性廃棄物処分施設の安全性能評価における施設部の核種移行解析手法に関する調査結果の概要を記述した。

いずれの解析手法においても、廃棄体あるいは施設を一次元モデルで近似して評価する手法を採用あるいは推奨していることが特徴である。さらに、文献[13]では、移流場と拡散場のそれぞれに応じた評価式が記述されているのも特徴である。

一般に、放射性廃棄物処分施設の設計では、バリア性能と建設コストとの最適化が求められることから、廃棄物の特性、施設周辺の地下水流動特性及び施設に用いる材料特性に配慮しつつ、施設諸元を決定する必要がある。したがって、複数の施設構成材料に対する核種の収着による遅延効果を考慮した施設部からの拡散及び移流による核種の漏えい率を同時に考慮したバリア性能指標を導出することにより、施設設計作業の効率を高めると筆者らは考えて、多重人工バリアシステムを有するバリア性能指標を提案することとした。以下に、詳細を示す。

バリア性能指標を提案するに当たっては、既往の評価手法との連続性を重視して、複数の材料・部材から構成される多重人工バリアシステムを等価な均質材料による単一のミキシングセルに置き換えて評価することとした。

今、放射性廃棄物処分施設を間隙水と単一の材料から構成されるとし、さらに、放射性物質の溶解度を無視した場合には、放射性廃棄物内の放射性物質の収支は(14)式で、放射性物質の施設内の収支は(15)式で表せる。これら2式より、施設内の放射性核種の収支は(16)式のとおりとなる。

$$\frac{dm_{w,s}}{dt} = -\zeta \cdot m_{w,s} - \lambda_s \cdot m_{w,s} \quad (14)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = \zeta \cdot m_{w,s} - \left( \frac{F_{d,s} + F_a}{F_{r,s}} \right) \cdot m_s - \lambda_s \cdot m_s \quad (15)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = m_{w,s}(0) \cdot \zeta \cdot e^{-(\lambda_s + \zeta)t} - \left( \frac{F_{d,s} + F_a}{F_{r,s}} \right) \cdot m_s - \lambda_s \cdot m_s \quad (16)$$

ここで、

$m_s$  : 施設内の核種  $s$  の質量[M]

$m_{w,s}$  : 放射性廃棄物内の核種  $s$  の質量[M]

$m_{w,s}(0)$  : 放射性廃棄物内の核種  $s$  の初期質量[M]

$\zeta$  : 放射性廃棄物の溶出率[T<sup>-1</sup>]

$\lambda_s$  : 核種  $s$  の崩壊定数[T<sup>-1</sup>]

$t$  : 経過時間[T]

$F_{r,s}$  : 施設の核種  $s$  に対する遅延係数[-]

$F_{d,s}$  : 施設からの濃度拡散による核種  $s$  の移行率[T<sup>-1</sup>]

$F_a$  : 施設からの移流による移行率[T<sup>-1</sup>]

(16)式中の右辺第一項は、廃棄物から施設内への核種  $s$  の溶出を示し、第二項は放射性廃棄物処分施設から周辺岩盤(天然バリア)への核種漏洩を、第三項は放射性崩壊を示している。(16)式では、複数の材料・部材からなる多重人工バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設を単一の材料に置き換えた場合の式であり、この場合には、施設のバリア性能は  $F_r, F_d$  及び  $F_a$  に集約することが可能となる。

以降の項にて、複数の材料・部材で構成される施設に対する  $F_r, F_d$  及び  $F_a$  を各々、施設全体の遅延性能、低拡散性能、低透水性能と称して、それらの算出方法について述べる。

#### 3.1 施設全体の遅延性能 $F_r$ の導出

施設が複数の材料(部材)で構成されている場合、施設全体を単一のミキシングセルでモデル化を行い、また、そのセルが瞬時分配平衡と仮定した場合には、核種  $s$  に対する施設全体のマクロ分配係数  $Kd_{total,s}$  は(17)式で表現される。

$$Kd_{total,s} = \frac{n_{total}}{\rho_{total}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{NM} Kd_{k,s} \cdot \rho_k \cdot V_k}{\sum_{k=1}^N n_k \cdot V_k} \quad (17)$$

ここに、

$n_{total}$  : 施設全体の空隙率[-]

$\rho_{total}$  : 施設全体のみかけ密度[ML<sup>-3</sup>]

$NM$  : 施設を構成する異なる材料の数[-]

$Kd_{k,s}$  : 材料  $k$  の分配係数[L<sup>3</sup>M<sup>-1</sup>]

$\rho_k$  : 材料  $k$  のみかけ密度[ML<sup>-3</sup>]

$V_k$  : 材料  $k$  の体積[L<sup>3</sup>]

$n_k$  : 材料  $k$  の空隙率[-]

$$n_{total} = \frac{\sum_{k=1}^{NM} n_k V_k}{V_{total}} \quad (18)$$

$$\rho_{total} = \frac{\sum_{k=1}^{NM} \rho_k V_k}{V_{total}} \quad (19)$$

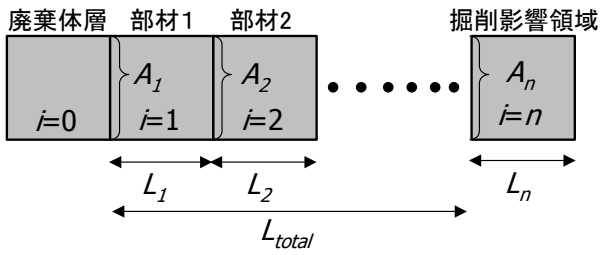


Fig. 1 Concept of Mixing-cell model

また、施設全体を瞬時分配平衡状態と仮定した場合には、核種  $s$  に対する施設全体の遅延係数  $F_{r,s}$  [-] は、(20)式で表現される。

$$F_{r,s} = 1 + \frac{\rho_{total} K d_{total,s}}{n_{total}} \quad (20)$$

### 3.2 施設全体の低拡散性能 $F_d$ の導出

複数の材料・部材から構成される施設全体の低拡散性能は、施設が定常拡散状態にあると仮定して導出した。低拡散性能  $F_d$  を算定するために想定したミキシングセルモデルの概念図を Fig. 1 に示す。隣接するミキシングセル間の拡散による核種  $s$  の単位時間当りの質量移動量は、以下の式で表される。

$$f_{s,i \rightarrow j} = D_s (c_{is} - c_{js}) \quad (21)$$

$$D_s = \frac{A}{\frac{L_i}{n_i d_s t_i} + \frac{L_j}{n_j d_s t_j}} \quad (22)$$

ここに、

$f_{s,i \rightarrow j}$  : セル  $i$  からセル  $j$  の拡散による核種  $s$  の時間当りの質量移動量 [MT<sup>-1</sup>]

$c_{is}$  : セル  $i$  中の核種  $s$  の液層濃度 [ML<sup>-3</sup>]

$c_{js}$  : セル  $j$  中の核種  $s$  の液層濃度 [ML<sup>-3</sup>]

$D_s$  : セル  $i$  とセル  $j$  間の拡散伝導係数 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]

$A$  : セル  $i$  とセル  $j$  間の拡散面積 [L<sup>2</sup>]

$L_i$  : セル  $i$  中の拡散距離 [L]

$L_j$  : セル  $j$  中の拡散距離 [L]

$n_i$  : セル  $i$  の空隙率 [-]

$n_j$  : セル  $j$  の空隙率 [-]

$d_s$  : 地下水中の核種  $s$  の分子拡散係数 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]

$t_i$  : セル  $i$  の屈曲度 [-]

$t_j$  : セル  $j$  の屈曲度 [-]

ここで、施設内側に位置する廃棄体層の濃度を一定とし、施設外側に位置する掘削影響領域の濃度をゼロとした場合の定常拡散状態を仮定した場合には、施設全体の核種  $s$  に対する拡散伝導係数  $D_{total,s}$  [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>] は(23)式で表現することが可能となる。

$$D_{total,s} = \frac{L_{total}}{A_{total}} \frac{1}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{L_i}{n_i t_i d_s} \left( \frac{1}{A_i} + \frac{1}{A_{i+1}} \right)} \quad (23)$$

ここに、

$L_{total}$  : 廃棄体層最外縁から掘削影響領域内縁までの拡散距離 [L]

$A_{total}$  : 代表拡散面積 [L<sup>2</sup>]

$n$  : 廃棄体層外縁から施設周辺母岩の間に位置する部材 (掘削影響領域含む) の数

$L_i$  : セル  $i$  中の拡散距離 [L]

$A_i$  : セル  $i$  の内縁側の拡散面積 [L<sup>2</sup>]

施設からの拡散が定常状態と仮定しているため、施設全体の核種  $s$  に対する低拡散性能  $F_d$  [T<sup>-1</sup>] を施設からの単位面積あたりの拡散フラックスを初期の核種  $s$  の質量で除した値とする。すなわち、 $F_d$  [T<sup>-1</sup>] は以下の式となる。

$$F_{d,s} = \frac{J_s A_{total}}{M_{0,s}} = \frac{A_{total}}{n_{waste} V_{waste} L_{total}} D_{total,s} \quad (24)$$

ここに、

$J_s$  : 施設から放出される単位面積あたりの拡散フラックス [ML<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>]

$M_{0,s}$  : 廃棄体内の核種  $s$  の初期質量 [M]

$n_{waste}$  : 廃棄体層の空隙率 [-]

$V_{waste}$  : 廃棄体層の体積 [L<sup>3</sup>]

ここで、施設全体の核種  $s$  に対する低拡散性能  $F_d$  [T<sup>-1</sup>] を施設全体の核種  $s$  に対する拡散伝導係数を廃棄体層の空隙体積  $n_{waste} \cdot V_{waste}$  [L<sup>3</sup>] で除した値として定義する。

### 3.3 施設全体の低透水性性能 $F_a$ の導出

施設全体の低透水性は施設内への地下水の浸入量、すなわち、施設内の放射性物質により汚染された地下水の浸入量を支配するため、施設全体のバリア性能に直接寄与する。

施設内への精緻な地下水の浸入水量を算出する方法としては、複雑な形状や複数の透水性を有する部材に対応可能な有限要素法や有限差分法が用いられるのが一般的である。

しかしながら、放射性廃棄物処分施設的设计計画段階で

は、施設のバリア性能のみならず、施工性、操業効率性、建設・操業コストなど様々な因子を視野に入れた様々な施設コンセプトに対する検討が必要となるため、ある程度の精緻さを犠牲にしても、種々の施設コンセプトに対する相対的な施設の低透水性能を比較的簡易に導出可能な手法が求められる場合が多い。

こうした理由から、筆者らは、多重同心円環領域に対するポテンシャルの理論式を利用して施設の低透水性能を算出することとした。一様な動水勾配  $h$  を有する地下水流動場の中における多重同心円環領域の処分施設を対象とした場合、定常状態の地下水流動の支配方程式は(25)式で表現され、極座標  $(r, \theta)$  系における境界条件は Fig. 2 に示した廃棄体層の中心位置を原点とした場合には(26)式及び(27)式で表現される。

$$k \nabla^2 P = 0 \tag{25}$$

$$P(r, \theta) = -hr \sin \theta \quad [r \rightarrow \infty \text{ のとき}] \tag{26}$$

$$P(0, \theta) = 0 \tag{27}$$

上記の条件に対する、円環領域内の各領域間点における全水頭に対する解析解は(28)式[14]となる。

$$P(r_n, \theta) = \left( \alpha_n r_n + \frac{\beta_n}{r_n} \right) \sin \theta \tag{28}$$

(26)式及び(27)式の条件より、

$$\beta_1 = 0 \tag{29}$$

$$\alpha_{end} = -h \tag{30}$$

となる。

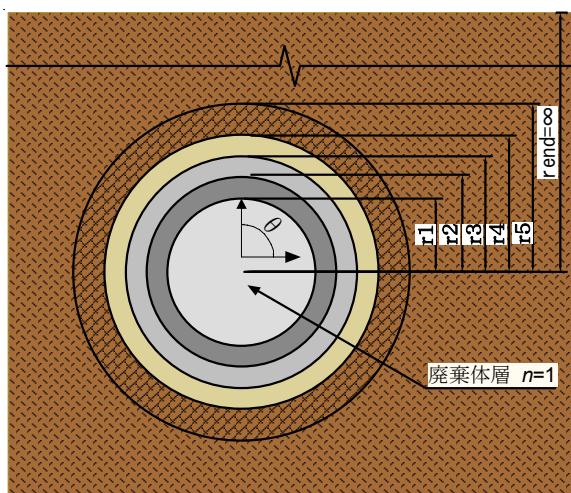


Fig. 2 Angle and radius at multiple annular domains

さらに、(28)式より、任意点における円環領域直行方向のダルシー流速の解析解  $v(r, \theta)$  は(31)式となる。

$$v(r_n, \theta) = k \left( \alpha_n - \frac{\beta_n}{r_n^2} \right) \sin \theta \tag{31}$$

また、全水頭及びダルシー流速が各領域間で連続する条件より、(32)式及び(33)式が成立する。

$$\left( \alpha_n r_n + \frac{\beta_n}{r_n} \right) = \left( \alpha_{n+1} r_n + \frac{\beta_{n+1}}{r_n} \right) \tag{32}$$

$$k_n \left( \alpha_n - \frac{\beta_n}{r_n^2} \right) = k_{n+1} \left( \alpha_{n+1} - \frac{\beta_{n+1}}{r_n^2} \right) \tag{33}$$

$n$  層の多重同心円環領域に対する全水頭及びダルシー流速は(32)式及び(33)式からなる連立  $2(n-1)$  元 1 次方程式となり、(29)式及び(30)式の条件を代入することにより、 $\alpha_1$  を汎用表計算プログラムなどにより、簡易に算出することが可能となり、また、単位奥行きあたりの廃棄体層の浸入水量  $Q_{r1}$  [ $L^2 T^{-1}$ ] は(34)式にて算出可能となる。

$$Q_{r1} = k_1 \int_0^\pi \frac{d(\alpha_1 r_1) \sin \theta}{dr} r d\theta \tag{34}$$

今、施設(処分坑道)の奥行きを  $D$  [L] とした場合、廃棄体層中の間隙水の交換率  $F_a$  [ $T^{-1}$ ] は(34)式で表現される。

$$F_a = \frac{Q_{r1} D}{n_{waste} V_{waste}} \tag{35}$$

筆者らは、上式で表現される廃棄体層の間隙水の交換率  $F_a$  [ $T^{-1}$ ] を施設の低透水性能と定義した。

#### 4 バリア性能指標を用いた施設部からの核種の放出フラックスの解析解の導出

前項までには、施設の遅延性能、低拡散性能及び低透水性能を各々示した。施設全体の核種  $s$  に対するバリア性能については、施設の遅延性能  $F_r$  は施設内の核種の全質量と間隙水中の核種の質量との比であること、拡散及び移流による施設からの核種の漏出は空隙水中の濃度に依存することから、低拡散性能と低透水性能の和を遅延性能で除した値として近似した値となる。つまり、施設全体の核種  $s$  に対するバリア性能  $F_s$  [ $T^{-1}$ ] は以下の式で表現することが可能となる。

$$F_s = \frac{F_{d,s} + F_a}{F_{r,s}} \tag{36}$$

低透水性能  $F_a$  に対して遅延性能  $F_r$  で除すという考え方は、(5)式の移行率の考え方、(9)式及び(10)式の浸出率の考え方と同等である。また拡散についても移流と同様の考えにおいて、遅延性能  $F_r$  の定義が施設内の核種の全質量と間隙水中の核種の質量との比であることを勘案し、低拡散性能  $F_d$  を遅延性能  $F_r$  で除すことで、遅延を考慮した拡散による核種放出量として定義した。

本稿では、施設からの核種の放出を支配する因子として、施設内を通過する地下水の浸入流量によって定義される移流、間隙水中の放射性核種の濃度勾配による拡散の2つの因子で表せると考えている。施設内浸入水量を駆動力とした移流と、濃度勾配を駆動力とした拡散をそれぞれ個別に評価して核種放出量を算定し、この2つの因子の和とすることが施設からの核種移行量を評価する上で保守的な仮定であると考え、(36)式に示すように移流と拡散の和によって施設の核種  $s$  に対するバリア性能  $F_s$  を定義した。

この結果、施設全体の核種  $s$  に対するバリア性能  $F_s$  は、既述した従前の安全評価手法[1, 5]において、単一バリア材料からなる施設からの移流による施設からの核種放出を評価してきたモデルに対し、多重のバリア材料を有した施設からの移流による核種放出に加え、拡散による核種放出も評価可能であり、且つ遅延性能を考慮した指標となっている。

(36)式を(16)式に代入すると、以下の式となる。

$$\frac{dm_s}{dt} = m_{w,s}(0) \cdot \zeta \cdot e^{-(\lambda_s + \zeta)t} - (F_s + \lambda_s) \cdot m_s \quad (37)$$

上式を  $m_s$  について解くと以下の式となる。

$$m_s(t) = \frac{m_{w,s}(0) \cdot \zeta}{\zeta - F_s} \cdot \left\{ e^{-(F_s + \lambda_s)t} - e^{-(\zeta + \lambda_s)t} \right\} \quad (38)$$

(16)式及び(38)式より、施設から周辺岩盤への放出フラックス  $J_{s,f \rightarrow g}(t)$  は、以下の式となる。

$$J_{s,f \rightarrow g}(t) = \frac{m_{w,s}(0) \cdot F_s \cdot \zeta}{\zeta - F_s} \cdot \left\{ e^{-(F_s + \lambda_s)t} - e^{-(\zeta + \lambda_s)t} \right\} \quad [F_s \neq \zeta] \text{ のとき} \quad (39)$$

$$J_{s,f \rightarrow g}(t) = m_{w,s}(0) \cdot F_s^2 \cdot t \cdot e^{-(F_s + \lambda_s)t} \quad [F_s = \zeta] \text{ のとき} \quad (40)$$

最大放出フラックス  $Max(J_{s,f \rightarrow g}(t))$  の発生時間  $T_{max}$  を求めるため(21)式を時間  $t$  で微分すると、以下の式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t} J_{s,f \rightarrow g}(t) = m_{w,s}(0) \cdot \left( \frac{\zeta \cdot F_s}{\zeta - F_s} \right) \cdot \left( - (F_s + \lambda_s) e^{-(F_s + \lambda_s)t} + (\zeta + \lambda_s) e^{-(\zeta + \lambda_s)t} \right) \quad (41)$$

(23)式の右辺第二項をゼロとする時間  $t$  が  $T_{max}$  となり、 $T_{max}$  は以下の式で表すことができる。

$$T_{max} = \frac{1}{\zeta - F_s} \ln \left( \frac{\zeta + \lambda_s}{F_s + \lambda_s} \right) \quad [F_s \neq \zeta] \text{ のとき} \quad (42)$$

導出した  $T_{max}$  を(39)式に代入し、施設からの核種  $s$  の最大放出フラックス  $Max(J_{s,f \rightarrow g}(t))$  を求めると、以下の式となる。

$$Max(J_{s,f \rightarrow g}(t)) = m_{w,s}(0) \cdot \frac{\zeta \cdot F_s}{\zeta - F_s} \cdot \left\{ \left( \frac{\zeta + \lambda_s}{F_s + \lambda_s} \right)^{\frac{F_s + \lambda_s}{\zeta - F_s}} - \left( \frac{\zeta + \lambda_s}{F_s + \lambda_s} \right)^{\frac{\zeta + \lambda_s}{\zeta - F_s}} \right\} \quad [F_s \neq \zeta] \text{ のとき} \quad (43)$$

同様に、 $[F_s = \zeta]$  のときには  $T_{max}$  及び  $Max(J_{s,f \rightarrow g}(t))$  は以下の式で示される。

$$T_{max} = \frac{1}{F_s + \lambda} \quad (44)$$

$$Max(J_{s,f \rightarrow g}(t)) = m_{w,s}(0) \cdot F_s^2 \cdot \frac{1}{e \cdot (F_s + \lambda)} \quad (45)$$

この結果、(43)式及び(45)式によって、施設全体の核種  $s$  に対するバリア性能  $F_s$  に加えて溶出率も考慮した施設全体の核種移行抑制性能を定量的に算定可能となる。

## 5 バリア性能指標を用いた試解析

前章までに導出したバリア性能  $F_s$  及び廃棄体の溶出率を考慮した施設から周辺岩盤への放出フラックス  $J_{s,f \rightarrow g}(t)$  の検証を行うため、公開文献を参考に処分坑道を想定し試解析を行った。処分坑道は、電気事業者らが検討を行っている余裕深度処分施設を念頭に、坑道形式の処分施設を想定した。

### 5.1 試解析条件

多重バリアシステムのバリア性能指標を用いた試解析を実施するにあたり、対象とする施設の諸元及び核種移行に係るパラメータについては文献[15]及び[16]を参考に設定した。Fig. 3 及び Table 1 に試解析の対象として想定した処分施設の概念図及び寸法をそれぞれ示す。文献[15]では、馬蹄形の坑道断面が想定されているが、本検討で用いる手法は有限要素法のように複雑な形状を有する多次元問題を精緻に取り扱うことを目的としたものではなく、施設を

Table 1 Dimension of assumed disposal facility

部材	部材厚さ		体積 [m <sup>3</sup> ]
	値[m]	記号	
廃棄体層	幅：9.2 高さ：7.4	w1 h1	68.1 (廃棄体：51.2) 充填材：16.9
コンクリートピット	0.70	L2	25.2
低拡散層	0.60	L3	24.7
低透水層	1.0	L4	47.6
埋戻し材	*	L5	97.1
吹付及び 覆工コンクリート	0.75	L6	44.9
掘削影響領域	1.0	L7	65.3

\*矩形の低透水層と円形の吹付及び覆工コンクリートの間をすべて埋戻すことを想定しているため、半月形状を有する。

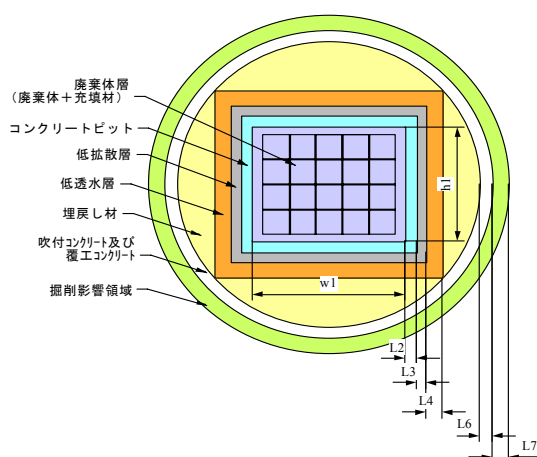


Fig. 3 Concept of disposal facility

構成する各部材・部位の体積と面積により施設のバリア性能を算出するものであることから、単純化のため円形の断面を想定し、低透水層の隅角部に吹付コンクリート及び覆工コンクリートが接するように設定し、その間を埋戻し材で充填することを想定した。また、廃棄体とその周囲の充填材は均一混合層の廃棄体層として想定した。

各部材の物性値及び核種移行に係るパラメータは、基本的に文献[8]に基づいて設定し、当該文献に記載されていない各部材の物性値及び核種移行に係るパラメータについては、同文献に含まれる同種の材料を用いることとした。なお、本試解析での評価対象核種は、既往の余裕深度処分施設を対象とした検討事例[8]において、安全性能評価上の重要核種として示されている <sup>14</sup>C(半減期: 5730 年)及び <sup>36</sup>Cl(半減期: 3 × 10<sup>5</sup> 年)とした。

### 5.2 処分施設のバリア性能 $F_s$ の算出

本節では、前節に示した処分坑道の諸元及び核種移行に係るパラメータを対象として、処分施設のバリア性能指標  $F_s$  を試算した。以降に、低透水性、低拡散性及び遅延性能の算出過程をそれぞれ示す。

### 5.2.1 施設全体の遅延性能 $F_{r,s}$ の算出

施設全体の遅延性能  $F_{r,s}$  を(20)式を用いて算定するため、各部材の遅延に係るパラメータを Table 2 に示す。本稿では、充填材、コンクリートピット、低拡散層、埋戻し材、吹付コンクリート及び覆工コンクリートに対し、セメント系の材料を用いることを想定しているため、これらの分配係数には同値を設定した。また、<sup>36</sup>Cl はヨウ素と同族元素であることから、すべての部材において分配係数を期待しない設定とした。Table 3 に、(17)式から(20)式を用いた施設全体を単一のミキシングセルでモデル化を行った場合の各パラメータの値を示す。本稿で想定した各部材の寸法及び遅延に係るパラメータの設定で算出した遅延性能  $F_r$  は、セメント系材料に分配係数を見込んだ <sup>14</sup>C においては  $F_{r,^{14}C} = 2.5$ 、すべての部材に分配係数を見込んでいない <sup>36</sup>Cl においては  $F_{r,^{36}Cl} = 1.0$  である。

### 5.2.2 施設全体の低拡散性能 $F_{d,s}$ の算出

Table 4 に低拡散性能  $F_{d,s}$  の算出に用いた各部材のパラメータを示す。各部材の拡散距離は各部材の厚さと定義し、拡散面積は単位坑道あたりの各部材の内縁面積と定義している。ベントナイト系材料を用いた低透水層の屈曲度は核種依存のパラメータとして設定した。

Table 5 に施設全体の低拡散性能に係るパラメータ及び  $F_{d,s}$  の算出結果を示す。代表拡散距離  $L_{total}$  については、廃棄体層最外縁から掘削影響領域内縁までの距離であると定義しているため、コンクリートピットから吹付コンク

Table 2 Parameters for  $F_{r,s}$

部材	みかけ密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	空隙率 [-]	分配係数 [m <sup>3</sup> /kg]	
			<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl
充填材	2.0E+3	0.20	2.5E-4	0
コンクリートピット	2.1E+3	0.20	2.5E-4	0
低拡散層	2.0E+3	0.20	2.5E-4	0
低透水層	1.6E+3	0.40	0	0
埋戻し材	1.7E+3	0.20	2.5E-4	0
吹付及び 覆工コンクリート	1.7E+3	0.20	2.5E-4	0

Table 3 Calculated  $F_r$  for <sup>14</sup>C and <sup>36</sup>Cl

パラメータ	<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl
施設全体の空隙率 $n_{total}$ [-]	0.24	
施設全体のみかけ密度 $\rho_{total}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.8E+3	
施設全体のマクロ分配係数 $Kd_{total}$ [m <sup>3</sup> /kg]	2.1E-4	0
施設全体の体積 $V_{total}$ [m <sup>3</sup> ]	256	
施設全体の遅延性能 $F_r$ [-]	2.5	1.0



リート及び覆工コンクリートまでの拡散距離の総和として算出した。ここで、Fig. 3に示すように、埋戻し材は半月形状を有していることから、埋戻し材を代表する拡散距離を定義する必要がある。本稿では、半月形状の埋戻し材の体積を保存した上で、埋戻し材の内縁側拡散面積と外縁側拡散面積を保存するように台形形状を仮定し、その厚さを拡散距離として定義した。代表拡散面積  $A_{total}$  は、施設全体の低拡散性能を規定する重要パラメータであり、(24)式からも明らかであるが、 $F_{d,s}$  は  $A_{total}$  に比例する。本稿では、施設全体からの拡散によるフラックスを過小評価しないことに留意し、 $A_{total}$  は掘削影響領域の最内縁面積として定義した。施設全体の拡散伝導係数  $D_{total,s}$  は、屈曲度、

分子拡散係数、各セルの拡散距離及び内縁面積から算定した。

低拡散性能  $F_{d,s}$  を算定した結果を Table 5 に併記する。

$^{14}\text{C}$  と  $^{36}\text{Cl}$  の  $F_{d,s}$  の値に差が生じない要因は、想定している施設がセメント系材料に低拡散性能を期待しているため、低拡散性能  $F_{d,s}$  の算定において低拡散層をはじめとしたセメント系材料の屈曲度すなわち実効拡散係数の影響が大きく、他方、低透水層の屈曲度の影響が小さく評価されるためである。

5.2.3 施設全体の低透水性性能  $F_a$  の算出

施設全体の低透水性性能  $F_a$  は、施設内を通過する地下水が廃棄体層の間隙水の交換する割合であると前章において定義した。ここでは、(32)式及び(33)式からなる連立  $2(n-1)$ 元1次方程式により各部材の浸入水量を算出し、低透水性性能の定義より  $F_a$  を算出した。

Table 6 に低透水性性能  $F_a$  算出のための各部材のパラメータを示す。想定した処分施設は、低透水層に粘土系材料であるベントナイトを用いることを想定しているため、セメント系材料より一桁小さい  $10^{-12}$  m/s という透水係数を設定した。

施設浸透水量算定には、(34)式で示した多重同心円状領域に対する算定式を適用するため、Fig. 3に示したような矩形部を有する施設に対し、Fig. 4に示すように各部位の体積を保存するような等価な半径を求めた。多重同心円状に施設を置き換える際の部位  $k$  の等価な半径  $r_k$  は以下の式で求めることができる。

$$r_1 = \sqrt{\frac{V_{waste}}{\pi}}, \quad r_k = \sqrt{r_{k-1}^2 + \frac{V_k}{\pi}} \quad (k=2,3,4\dots) \quad (46)$$

上式から各部材の通過流量を算定した結果を Table 7 に、また、施設全体の低透水性性能  $F_a$  を算出した結果を Table 8 に示す。

また、上述した施設全体の遅延性能  $F_{r,s}$ 、低拡散性能

Table 4 Parameters for  $F_{d,s}$

部材	拡散距離 [m]	空隙率 [-]	屈曲度[-]		拡散面積 [m <sup>2</sup> ]
			<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl	
廃棄体層	—	0.43	2.5E-3		—
コンクリートビット	0.7	0.2	2.5E-3		33.2
低拡散層	0.6	0.2	2.5E-3		38.8
低透水層	1.0	0.4	1.8E-1	2.5E-2	43.6
埋戻し材	1.8	0.2	2.5E-3		51.6
吹付及び覆工コンクリート	0.75	0.2	2.5E-3		57.5

Table 5 Calculated  $F_d$  for <sup>14</sup>C and <sup>36</sup>Cl

パラメータ	値	
	<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl
分子拡散係数 $d_s$ [m <sup>2</sup> /s]	2.0E-9	2.0E-9
廃棄体層最外縁から掘削影響領域内縁までの拡散距離 $L_{total}$ [m]	4.8	
代表拡散面積 $A_{total}$ [m <sup>2</sup> ]	62	
施設全体の拡散伝導係数 [m <sup>2</sup> /s]	9.8E-13	9.7E-13
施設全体の低拡散性能 $F_{d,s}$ [y <sup>-1</sup> ]	1.4E-5	1.4E-5

Table 6 Parameters for  $F_a$

部材	透水係数		等価半径	
	値 [m/s]	記号	値 [m]	記号
廃棄体層	1.0E-10	$k_1$	4.7	$r_1$
コンクリートビット	1.0E-11	$k_2$	5.4	$r_2$
低拡散層	1.0E-11	$k_3$	6.1	$r_3$
低透水層	1.0E-12	$k_4$	7.3	$r_4$
埋戻し材	1.0E-11	$k_5$	9.1	$r_5$
吹付及び覆工コンクリート	1.0E-11	$k_6$	9.9	$r_6$
掘削影響領域	1.0E-7	$k_7$	11	$r_7$
周辺岩盤	3.0E-8	$k_8$	—	—

動水勾配: 0.1 [-]

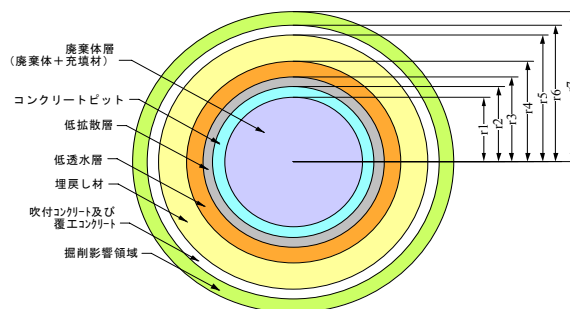


Fig. 4 Concept of disposal facility made replacement multiple annular domains

Table 7 Calculated flow rate  $Q_{rk}$

部材	$\alpha$	$\beta$	通過流量 $Q_{rk}$ [m <sup>3</sup> /y]
廃棄体層	1.3E-2	0.0E+0	3.9E-4
コンクリートピット	7.3E-2	-1.3E+0	4.0E-4
低拡散層	7.3E-2	-1.3E+0	4.2E-4
低透水層	5.6E-1	-2.0E+1	4.3E-4
埋戻し材	1.4E-1	2.5E+0	6.4E-4
吹付及び 覆工コンクリート	1.4E-1	2.5E+0	7.2E-4
掘削影響領域	8.3E-2	8.1E+0	1.0E+00

Table 8 Calculated  $F_a$

パラメータ	値
$Q_{r1}$ [m <sup>3</sup> /y]	3.9E-4
処分坑道の奥行き $D$ [m]	1 (坑道単位奥行きあたり)
施設全体の低拡散性能 $F_a$ [y <sup>-1</sup> ]	1.4E-5

Table 9 Calculated value of safety indicator  $F_s$  for <sup>14</sup>C and <sup>36</sup>Cl

性能指標	値	
	<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl
施設全体の遅延性能 $F_{r,s}$	2.5	1.0
施設全体の低拡散性能 $F_{d,s}$	1.4E-5	1.4E-5
施設全体の低透水性 $F_a$	1.4E-5	
バリア性能指標 $F_s$	1.1E-5	2.7E-5

$F_{d,s}$  及び低透水性  $F_a$  の算出結果と、処分施設のバリア性能  $F_s$  の算出結果を合わせて Table 9 に示す。

5.2.4 感度解析

放射性廃棄物処分の安全性を確保する上では、処分施設のバリア性能の頑健性を確保することが重要であるとの認識がなされている[3]。処分施設のバリア性能の頑健性の確認のひとつの方法として、安全性能評価解析において、各パラメータに対する核種放出率あるいは被ばく線量値への影響度を把握する方法が考えられるが、本稿で提案したバリア性能指標は、個々の部材の各パラメータにより各バリア性能を算出すること、有限要素法や有限差分法といった仔細な数値解析手法を用いていないことから、着目する部材・部位のパラメータが、処分施設のバリア性能に与える影響度を、その着目パラメータの値を変化させて判断する、所謂、パラメータ感度解析を極めて容易に行うことが可能である。

本稿では、バリア性能指標に対する感度解析の例として、設定した処分施設の部材のうちセメント系材料からなる部材(充填材、コンクリートピット、低拡散層、埋戻し材及び覆工及び吹付コンクリート)の実効拡散係数に着目した施設のバリア性能指標に対する感度解析を実施した。

なお、実効拡散係数は、間隙率、核種  $s$  に対する地下水の分子拡散係数及び屈曲度の積で表されるが、本検討ではセメント系材料の屈曲度を変動パラメータとして感度解析を実施した。

感度解析より得られたセメント系材料の実効拡散係数とバリア性能指標の関係を Fig. 5 に示す。

同図において、セメント系材料の実効拡散係数が  $10^{-12}$  [m<sup>2</sup>/s] 以下では、施設のバリア性能  $F_s$  に与える感度が極めて小さくなり、施設のバリア性能  $F_s$  は  $F_a \cdot F_{r,s}^{-1}$  で与えられる値に収束していることが分かり、このような感度解析を行うことにより、施設全体のバリア性能として、セメント系材料の低拡散性能に期待できる上限値を判断可能となる。

同様な感度解析を低透水層の透水係数に対して行うことにより、低透水性材料の低透水性に期待できる上限値を判断することが可能となる。

5.3 最大放出フラックスに対する試解析

(39)式及び(40)式で示した施設から周辺岩盤への放出フラックスについて、<sup>14</sup>C の例を Fig. 6 に示す。放出フラックスの算出にあたっては、各核種の初期質量  $m_{s,0}$  をそれぞれ

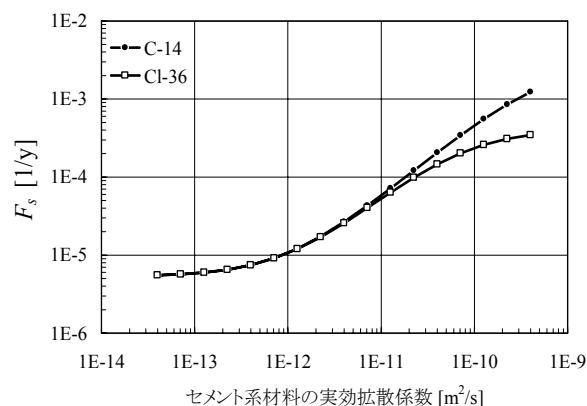


Fig. 5 Relationships between effective diffusion coefficient of cement material and safety indicator  $F_s$

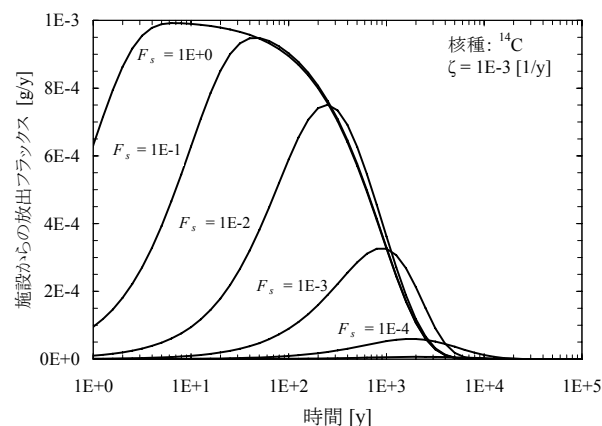


Fig. 6 Out fluxes from engineered barrier system

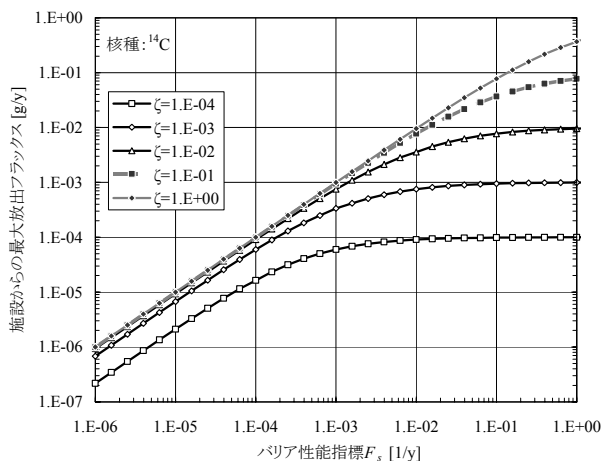


Fig. 7 Relationships between maximum out flux from EBS and safety indicator  $F_s$

れ1 [g]とした。施設からの放出フラックスは(16)式または(37)式で示されるとおり、流入項は溶出率によって支配され、流出項はバリア性能に支配されるため、施設からの放出フラックスの最大値は、初期質量を単位質量とした場合には、溶出率の値(Fig. 6 では  $10^{-3}$  [1/y])を超えることはなく、バリア性能指標の値に応じて最大放出フラックスの値が小さくなっていることが Fig. 6 よりわかる。

(43)式で示した施設からの最大放出フラックスについて、複数の溶出率  $\zeta$  に対する最大放出フラックスとバリア性能指標の関係を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、バリア性能指標が大きくなる場合、すなわち、施設に核種移行抑制が期待できない場合においても、最大放出フラックスの値は溶出率を超えることはなく、一方、溶出率が期待できない場合 ( $\zeta \geq 1$ ) においては、バリア性能指標と最大放出フラックスの値は、概ね線形の関係となることが分かる。

また、バリア性能指標  $F_s$ 、溶出率  $\zeta$  及び最大放出フラックスの関係を整理した相図を Fig. 8 に示す。整理にあたっては、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{36}\text{Cl}$  とともに、短半減期核種の代表として  $^{60}\text{Co}$ (半減期：5.3 年)、 $^{241}\text{Am}$ (半減期 430 年)を加えた。縦軸及び横軸は、それぞれバリア性能指標  $F_s$  及び溶出率  $\zeta$  の対数値である。溶出率及びバリア性能指標の値により、核種が人工バリア内に留まる時間が定まり、半減期に応じて人工バリア内での減衰割合に差が生じるため、核種毎に最大放出フラックスに差が生じていることが容易に確認することができる。

## 6 まとめ

本稿では、放射性廃棄物処分の安全性能評価において施設の安全性能を評価する基本シナリオである地下水シナリオを対象に、処分施設の核種移行抑制性能(バリア性能)を高度な数値解析手法によらずとも、比較的簡易に算出可能なバリア性能の指標を提案するとともに、当該指標を用

いた感度解析の事例提示と廃棄体の溶出率とバリア性能指標の相対関係と処分施設部からの最大放出フラックスの関係を代表的な核種を対象に整理した。

提案したバリア性能指標は、国内における従前の放射性廃棄物処分施設を対象とした安全性能評価手法の考え方を踏襲するものであり、既存施設とのバリア性能の比較など、その汎用性は高いものとする。

一方、近年の海外の検討[17]においては、放射性廃棄物

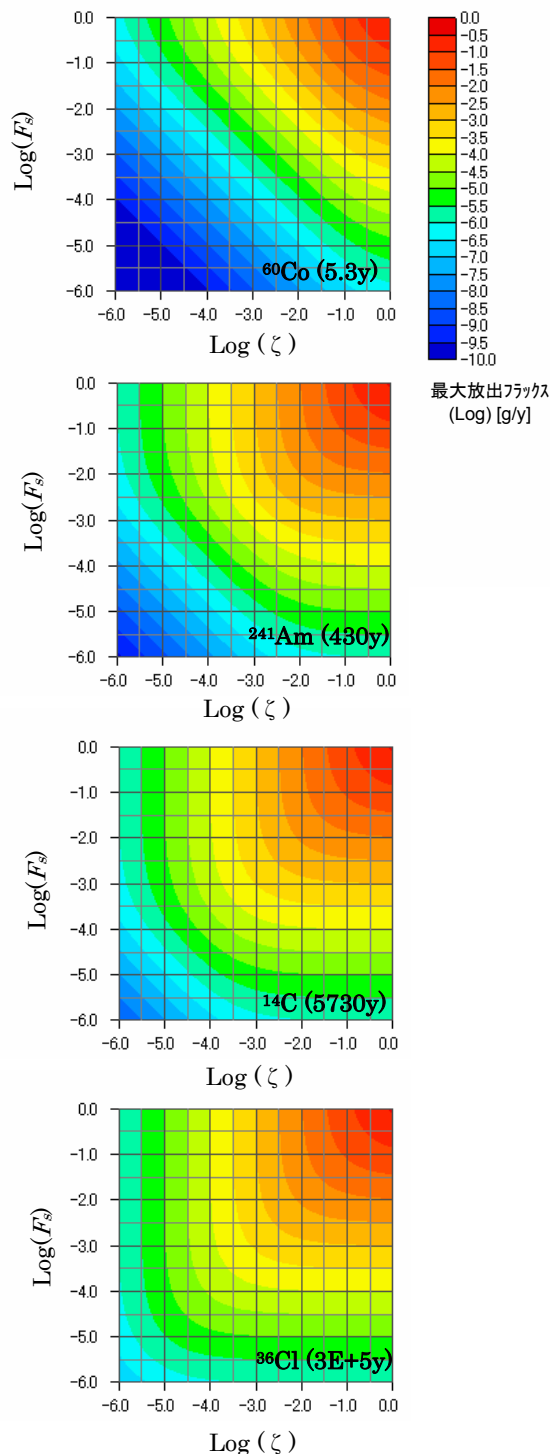


Fig. 8 Phase diagram among  $F_s$ ,  $\zeta$ , and maximum out flux from EBS

処分施設を対象とした 3 次元地下水-核種移行連成解析は研究レベルではあるものの、既に実施されており、数値分散を効率的に抑制する極めて精度の高い解析手法も確立しつつある。このような解析手法は、今後の研究の進展と計算機能力の向上にもなって、実務への適用も遠くない将来には可能になると考えられる。

今後、筆者らは、数値分散等の数値解析的な問題を効率的に制御可能なアルゴリズムを用いた 3 次元地下水流動-核種移行連成解析コードの開発を行うとともに、本稿で提案したような 1 次元モデルによる安全性能評価手法の特性や適用限界を確認し、放射性廃棄物処分施設の安全性能評価手法の整備と高度化を図る予定である。

## 参考文献

- [1] IAEA: Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, IAEA-TECDOC-1380 (2003).
- [2] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全基準専門部会: 低レベル放射性固化体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第 3 次中間報告), 平成 12 年 9 月 14 日 (2000).
- [3] 原子力安全委員会: 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告), 平成 19 年 7 月 12 日 (2007).
- [4] SKB: Repository for Radioactive Operating Waste(SFR1), Final Safety Report(SSR2001) (2001).
- [5] 日本原燃株式会社: 六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター廃棄物埋設事業変更許可申請書, 平成 9 年 1 月 (1997).
- [6] 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, 平成 11 年 11 月 26 日 (1999).
- [7] 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とりまとめ, 2005 年 9 月 (2005).
- [8] 原子力安全基盤機構: 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会(第 6 回)配布資料 低レベル放射性廃棄物処分施設の代表的な安全評価シナリオの解析例 (2006)
- [9] BNFL: Drigg Post-Closure Safety Case (2002).
- [10] Oak Ridge National Laboratory: Composite Analysis for Solid Storage Area 6, ORNL Report ORNL-6929 (1997).
- [11] DOE: 2004 WIPP Compliance Recertification Application, DOE/WIPP 04-3231 (2004).
- [12] Vieno, T. et al.: VLJ Repository Safety Analysis, Report TVO-1/98 (1998).
- [13] IAEA: Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (2004).
- [14] Farlow, S. J.: PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS for Scienetists and Engineers, John Wiley & Sons. Inc. (1982).
- [15] 日本原燃(株): 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会(第 1 回)配布資料 低レベル放射性廃棄物処分の次期埋設施設の検討状況 (2005).
- [16] 電気事業連合会: 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会 (第 17 回)配布資料 余裕深度処分に関する検討状況について(2007).
- [17] Hoteit, H., Ackerer, Ph., Mosé, R.: "Nuclear waste disposal simulations: Couplex test cases", Computational Geosciences, **8**, 99-124 (2004).