

地質環境条件の空間的不均質性に応じた施設レイアウト等の工学的対策によるシステム全体性能の改善の可能性について

高瀬博康^{*1} 稲垣学^{*1} 須山泰宏^{*2}

地層処分における多重バリアシステムの眼目とするところは、人工バリア及び天然バリアの安全機能を組み合わせることによって、長期的安全性を確保することにある。このため、処分事業の各段階における調査で明らかとなる地質環境条件に基づき、これに適した処分場概念を構築することが求められるが、この際、与条件となる天然バリア性能の程度によっては、人工バリアの安全機能を強化あるいは変更することによって、多重バリアシステム全体としての性能を確保することが必要になる場合があるものと予想される。ここで、前提となる地質環境条件が顕著な空間的不均質性を呈する場合が多いにもかかわらず、従来の検討では、ある代表的な地質環境条件を固定して単一の廃棄物と人工バリアの組についての核種移行解析を実施し、その結果を数万体の廃棄物全体に適用することが普通であった。しかしながら、地質環境条件に空間的不均質性が含まれている以上、対象領域の中に、相対的に「好ましい」部位と「好ましくない」部位とが混在することとなる。このため、相対的に「好ましい」領域により多くの廃棄物を定置するという意味での処分場レイアウトの最適化を行う具体的な方策を検討すること、そして、このような最適化を図ることによるシステム全体性能の改良の程度を定量化することが重要な課題となる。本論では、このような観点から、従来の均質近似のアプローチに代わって、地質環境条件の空間的不均質性を前提として、より好ましい部位に処分場のレイアウトを展開して多数の廃棄物を定置することにより処分システム全体としての性能の改善を図るというアプローチの基本的な考え方について考察を加えることを試みた。

Keywords：空間的不均質性，核種移行解析，処分場レイアウト

Multi-barrier concept utilizes both engineered barrier system (EBS) and natural barrier system (NBS) to guarantee long-term safety of geological disposal. For this purpose an appropriate disposal concept has to be adopted based on the information obtained in the site characterization at each stage, which includes enhancement or modification of some components of the EBS. Although properties of geological environment often exhibit significant spatial heterogeneity, in most of the existing studies, nuclide release from a single waste package surrounded by an “average” host rock is calculated and the result is regarded as a representation of the whole heterogeneous repository region. However, spatial heterogeneity in the repository region implies that there exist sub-regions that are more favorable from the safety perspective and the ones that are less favorable. In other words safety performance of an entire repository cannot be determined without knowing how many wastes can be accommodated within the more favorable sub-regions and how thoroughly hydrological connection between favorable and less favorable sub-regions can be mitigated by design and engineering solutions.

In this study, as an alternative to the strategy based on homogeneous approximation, an approach to optimizing repository layout by maximizing number of waste packages to be accommodated in the favorable sub-regions in a heterogeneous geological environment and to evaluate its contribution to improving safety performance of the entire system is proposed.

Keywords: spatial heterogeneity, nuclide transport modelling, repository layout

1 目的及び概要

地層処分における多重バリアシステムの眼目とするところは、人工バリア及び天然バリアの安全機能を組み合わせることによって、長期的安全性を確保することにある。このため、処分事業の各段階における調査で明らかとなる地質環境条件に基づき、これに適した処分場概念を構築することが求められるが、この際、与条件となる天然バリア性能の程度によっては、人工バリアの安全機能を強化あるいは変更することによって、多重バリアシステム全体としての性能を確保することが必要になる場合があるものと予想される。ここで、前提となる地質環境条件が空間的不均質性を呈する場合が多いにもかかわらず、従来の検討では、ある代表的な地質環境条件を固定して単一の廃棄物と人工バリアの組についての核種移行解析を実施し、その結果を数万体の廃棄物全体に適用することが普通であった

(以下、本稿では、このようなアプローチを「均質近似アプローチ」と呼ぶこととする)。しかしながら、地質環境条件に空間的不均質性が含まれている以上、対象領域の中に、相対的に「好ましい」部位と「好ましくない」部位とが混在することとなる。このため、相対的に「好ましい」領域により多くの廃棄物を定置するという意味での処分場レイアウトの最適化を行う具体的な方策を検討すること、そして、このような最適化を図ることによるシステム全体性能の改良の程度を定量化することが重要な課題となる。本稿では、このような観点から、従来の均質近似のアプローチに代わって、地質環境条件の空間的不均質性を前提として、その中に処分場のレイアウトを展開して多数の廃棄物を定置するという現実的な文脈の中での処分場概念構築の基本的な考え方について考察を加えることを試みた。本稿では、まず、次節において、従来の検討で標準的であった均質近似のアプローチに基づく核種移行解析結果を例示し、次に、3において不均質性の存在を前提とした場合の工学的対策の概要とその効果に関する検討結果を示す。そして、4において、これらの成果に基づき、今後の課題を整理する。なお、3における不均質場での核種移行解析においては、天然バリア性能の高い「好ましい」

Implication of spatial heterogeneity in geological environment to development of disposal concept by Hiroyasu Takase (htakase@quintessa.co.jp), Manabu Inagaki, Yasuhiro Suyama

*1 株式会社クインテッサジャパン

Quintessa Japan

〒220-6007 横浜西区みなとみらい2-3-1, クイーンズタワーA7 階 707

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所

Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

Table 1 Input parameters for stochastic nuclide transport calculations
(Natural barrier system)

Parameters		Type of probability density function	Unit	Minimum	Maximum
Migration distance		Log uniform	m	10	1000
Fracture density			m ² /m ³	0.1	7
Aperture ¹			-	0.1	10
Matrix diffusion depth			m	0.01	1
Flow wet surface area			-	0.1	1
Porosity			%	1	3
Effective diffusion coefficient			m ² /s	6x10 ⁻¹⁴	1x10 ⁻¹⁰
Transmissivity			m ² /s	1.35x10 ⁻¹⁰	1.35x10 ⁻⁸
Hydraulic gradient			-	0.001	0.1
Rate of dispersion length			-	0.01	1
Distribution coefficient	Cs		m ³ /kg	0.001	10
	Se		m ³ /kg	0 ²	0.1
	Np	m ³ /kg	0.1	10	
	U	m ³ /kg	0.1	10	
	Th	m ³ /kg	0.1	10	

1. $a = c\sqrt{T}$, a : aperture, T : transmissivity, c : constant, 2. 10^{-5} is used for calculations.

部位と「好ましくない」部位のそれぞれにおかれた廃棄物についての解析を2と同様のモデルを用いて実施し、その結果をそれぞれの部位に収容される廃棄体の総数を考慮して加算することによって不均質性の影響を簡易に検討した。

2 均質近似アプローチにおける核種移行解析結果への地質環境条件の感度

ここでは、核種移行解析の観点から、どのような考え方や指標で「好ましい」地質環境条件と「好ましくない」地質環境条件を区別するかを統計的な核種移行解析を実施することによって調べることにした。

2.1 統計的核種移行解析

地下水を媒介とした核種移行に関係する現在の地質環境条件が継続することを仮定した基本シナリオにおける、長期的安全性を確保する上での要件の抽出を目的として、天然バリア性能に関係する種々のパラメータ入力値を第2次取りまとめ [1] における記載範囲で変動させた統計的核種移行解析を行い、解析結果について感度分析を実施した。

(1) 核種移行解析モデル

天然バリア中核種移行解析には、単一の二重空隙チャンネルモデルを用い、Table 1 に示した特性値の範囲（基本的には [1] におけるデータ不確実性範囲、及び地質環境変動の範囲の和集合に基づき範囲を設定した。ただし、移行距離、マトリクス拡散深さ及び亀裂透水量係数については、感度の調査を目的として同報告書の設定よりも幅広い

範囲を想定した)からランダムに入力値をサンプリングして約 3,000 ケースの核種移行解析を行った。また、人工バリア内の核種移行挙動に関する特性や条件については [1] におけるリファレンスケースでの入力値 (Table 2) を固定して用いた。ただし、人工バリア中の核種移行に対して外側境界条件として働く、掘削影響領域中の地下水流量については、天然バリア側の特性や条件に依存して変化するものであることから、ミキシングセル流量以外のパラメータを全てリファレンスケースで固定した状態で、ミキシングセル流量を変化させて多数の 1 次元人工バリア中核種移行解析を行い、その結果をスプライン補完した関数を天然バリア核種移行のソースタームとして用いることとした。以上の評価モデルの概念を Fig. 1 に示す。評価対象核種としては、第2次取りまとめの各解析ケースにおいて被ばく線量に最も大きな寄与を持つと考えられた、Se-79、Cs-135、Th-229 及びその親核種 (Np-237、U-233) の 5 核種とした。

(2) 核種移行解析結果

(1)のモデルを用いて各核種について約 3,000 ケースの核種移行解析を行った。[1] におけるリファレンスケースである平地；河川水；農業従事者に関する線量への換算係数を用いて、均質近似アプローチに対応して単一の地質環境条件について算出された核種移行率を廃棄物の総数 (4 万本) に適用した場合の被ばく線量の時間変化算出例を Fig. 2 に示す。また、約 3,000 ケースの全てについて、被ばく線量最大値とその出現時刻の分布を Fig. 3 にまとめる。約 7 万年において Cs-135 及び Th-229 の被ばく線量のピークが密集しているのは、ガラス固化体の溶解期間に対

**Table 2 Input parameters for stochastic nuclide transport calculations
(Engineered barrier system)**

Geometry	Vitrified waste(Diameter 440 mm ; Height 1,350 mm; Glass density 2.7 Mg/m ³ ; Initial volume 0.15 m ³) Overpack (Width 190 mm ; Height 1,730 mm) Buffer material (Width 700 mm ; Porosity 0.41 ; Dry density 1.6 Mg/m ³)		
Inventory of radionuclides	Se-79 :	1.64 x 10 ¹⁰	Bq/Waste package
	Cs-135 :	2.97 x 10 ¹⁰	Bq/Waste package
	Np-237 :	2.31 x 10 ¹⁰	Bq/Waste package
	U-233 :	9.75 x 10 ⁷	Bq/Waste package
	Th-229 :	4.52 x 10 ⁶	Bq/Waste package
Glass dissolution time	70,000 years		
Dissolution rate	Se:	3 x 10 ⁻⁹	mol/l
	Cs:	soluble	
	Np:	2 x 10 ⁻⁸	mol/l
	U:	8 x 10 ⁻⁹	mol/l
	Th:	5 x 10 ⁻⁶	mol/l
Distribution coefficient in the buffer material	Se:	0	m ³ /kg
	Cs:	0.01	m ³ /kg
	Np,U,Th :	1	m ³ /kg
Effective diffusion coefficient in the buffer material	Se:	2 x 10 ⁻¹⁰	m ² /s
	Cs:	6 x 10 ⁻¹⁰	m ² /s
	Np,U,Th:	3 x 10 ⁻¹⁰	m ² /s

Following to the H12 report, each parameter is fixed with a value of a reference case.

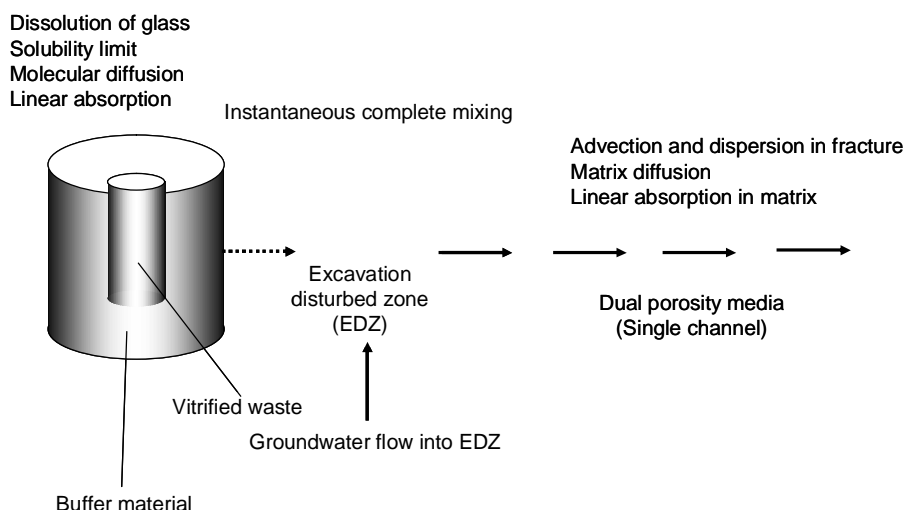


Fig.1 Schematic view of transport model used for stochastic calculations

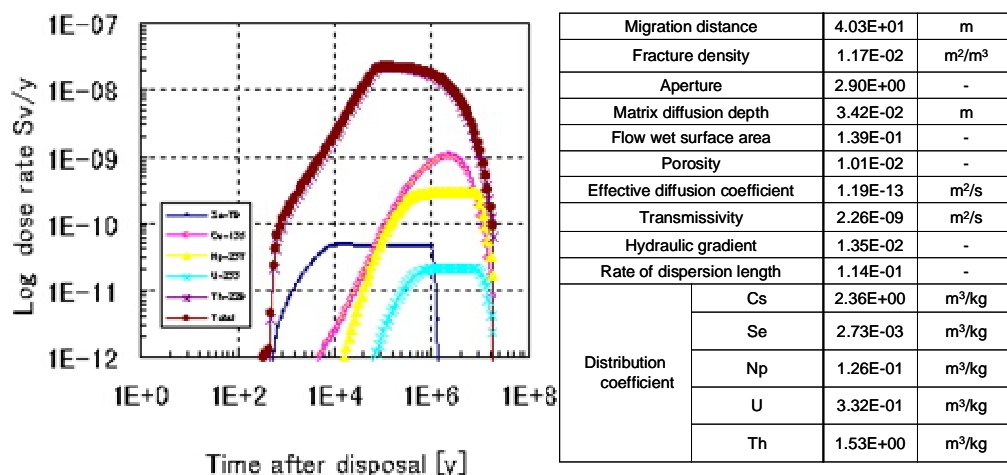


Fig. 2 Example of calculated annual dose rate as a function of time (40,000 waste packages)

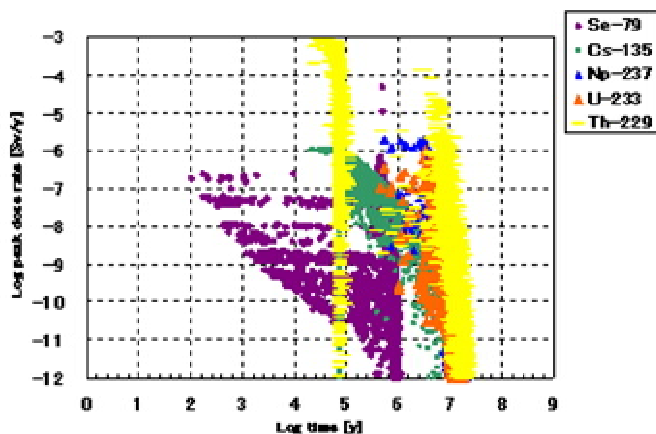


Fig.3 Distribution of peak annual dose rate and its time of occurrence for 3,000 runs (40,000 waste packages)

応するものであり、特に Th-229 についてガラス内での Np-237 系列の壊変によって生じたものが、天然バリア内での移行時間が極端に短いような入力パラメータの組み合わせがサンプリングされた場合に下流端にまで達しているケースに相当する。なお、ここで、Th-229 のピーク値が数桁の範囲で変動しているのは、天然バリア中の核種移行時間に応じて比較的短半減期の Th-229 の崩壊の程度が大きく異なるためである（前述したように、これらのケースでは核種移行時間がガラス溶解時間に比して短いために、図中ではその変動は見られず、結果的に数桁異なるピークが「同じような時刻」に生じているように見える）。また、Np-237 系列の核種の被ばく線量のピークが約 1,000 万年において密集しているのは、Np-237 の枯渇時期に対応するものであると考えられる。各核種による被ばく線量の最大値は押しなべて $1\mu\text{Sv/y}$ 以下の低い値をとるが、Th-229 については、ガラス固化体中で生成された分が天然バリア中を速やかに移行するような地質環境の場合には、 $100\mu\text{Sv/y}$ のオーダーに達するものが含まれている。

2.2 感度解析

各入力パラメータの変動範囲について、ある制約条件を課した場合、このことによって評価結果が安全目標を満足する可能性が変化することとなる。特に、長期的な安全性が向上する方向の条件を設定した場合には、安全目標を満足する可能性が向上することとなる。具体的には、多数の統計的シミュレーションケースのうち条件 1 を満足するものが N_1 個あったとして、このうち、安全目標を満足するものが n_1 個あるとすると、このような「安全目標を満足する可能性」は、 n_1/N_1 として定義される。上記の統計的解析のように各パラメータ値の変動範囲のみを指定して確率分布を定義していない場合には、 n_1/N_1 は厳密な意味で確率と呼べるものではない。そこで、これを、SI (Sufficiency Index: 十分条件としての強さ) と呼ぶ [2]。勿論、各パラメータの入力値に関して確率密度関数が定義できる場合には、SI は確率と一致することとなる。SI を用いた感度解析は、あるパラメータに着目して、そのパラメータの変動範囲を変えた場合に、安全目標を満足する可能性（即ち SI）がどの程度変化するかを計算するものである。Fig. 4 は、SI 法による感度分析の例を示したものである。同図は、解析ケース全体のうち、入力パラメータ（この例では亀裂を含む透水量係数の対数）が p^* 以上であるような部分集合のみに着目した場合に SI（つまり、この部分集合に含まれる解析ケースのうち安全目標を満足するものの割合：縦軸右）がどのように変化するか（青線）、そして同様に、 p^* 以下であるような部分集合のみに着目した場合に SI（縦軸左）がどのように変化するか（赤線）を同時に表示しており、青線及び赤線がいずれも水平である場合には、当該パラメータの感度は無視でき、いずれかあるいは両方の線の傾きが顕著であればそれぞれの方向での感度が大きいということになる。この例では、亀裂を含む透水量係数の対数を好ましいもの（-8.5 程度以下）とす

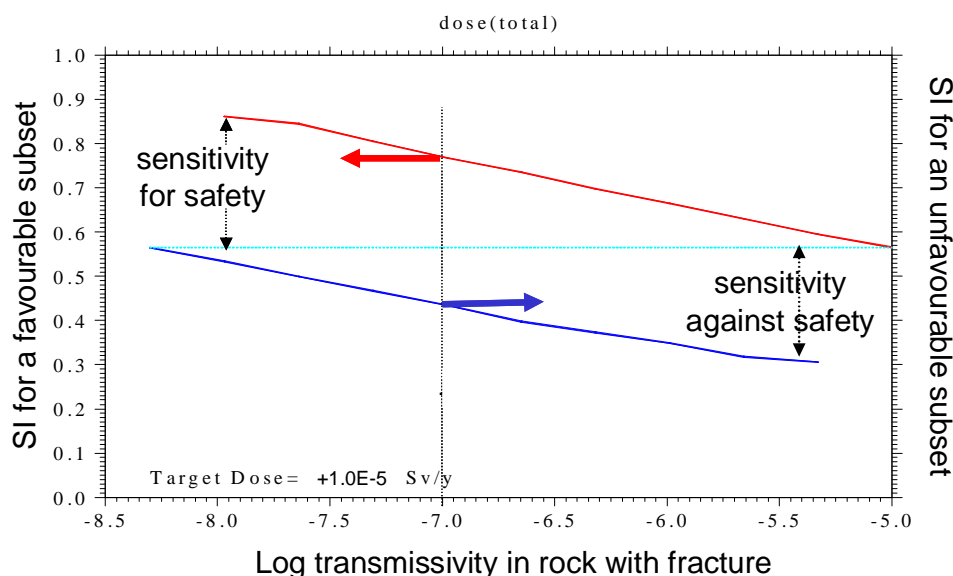


Fig.4 Sensitivity analysis based on Sufficiency Index

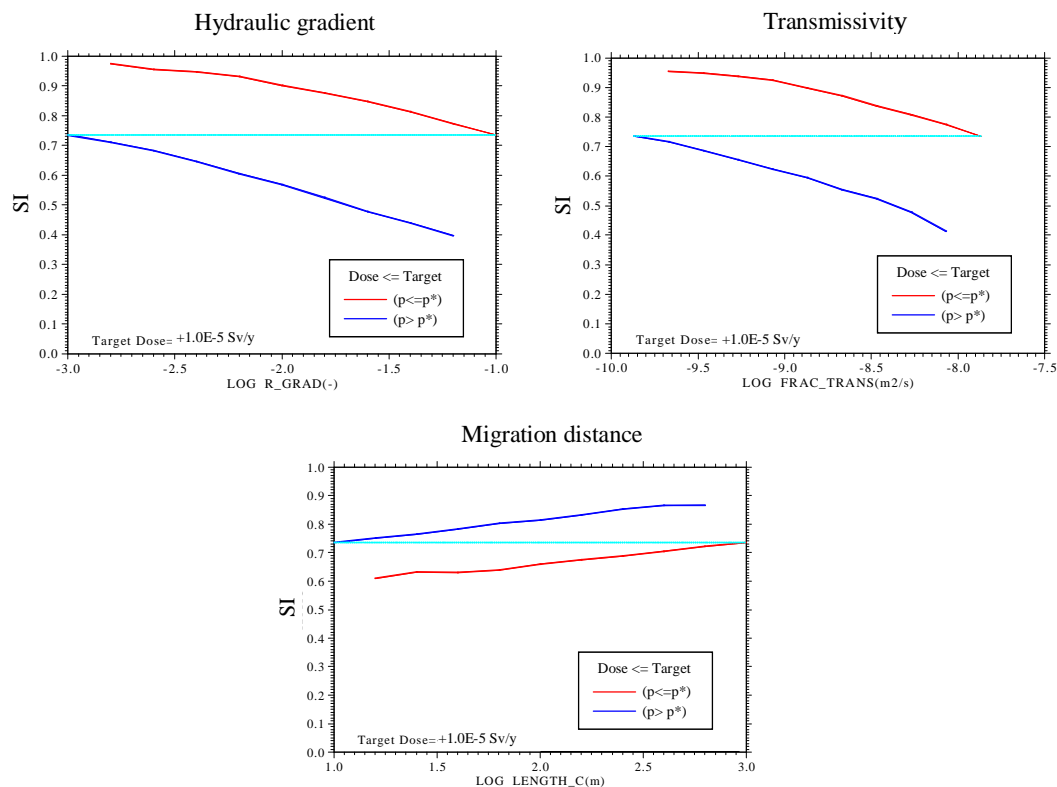


Fig.5 Result of sensitivity analysis for some key natural barrier system parameters

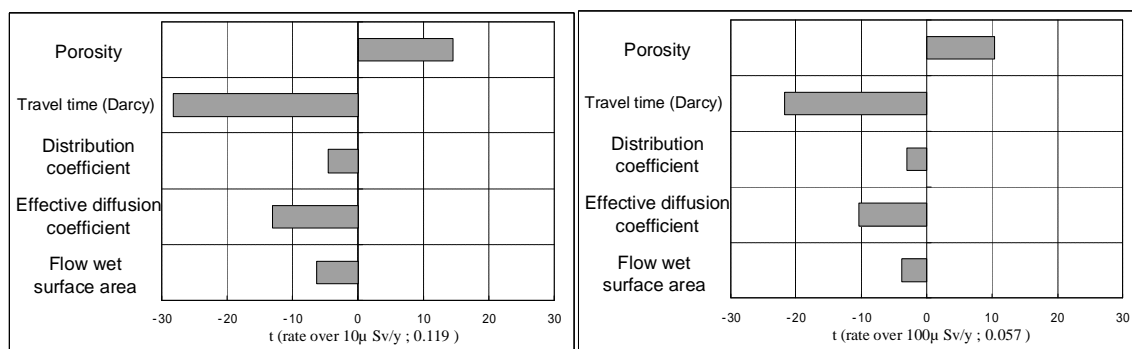


Fig.6 Significance of contribution of key natural barrier system parameters to runs which resulted in peak annual dose rate greater than 10 μSv/y (left) and 100 μSv/y (right)

ることができた場合には SI は 55% 程度から 85% 程度にまで上昇し、逆に好ましくないもの(たとえば -5.0 程度以上)とせざるを得なくなった場合には 30% 程度にまで低下することとなり、大きな感度を有するものと判断される。

Fig.5 は、均質近似のアプローチにおいて最大被ばく線量の目標を暫定的に 10 μSv/y 以下と設定した場合の SI 法の感度解析結果を例示したものである。これらは、当該パラメータの範囲が変動した場合に、目標とする被ばく線量を下回ることのできる確からしさがそれぞれの程度変動するかという観点から、核種移行解析結果の特徴を定量的に要約したものと考えることができる。

統計的核種移行を行った全ケースのうち、安全目標の例として暫定的に想定した 10 μSv/yr 及び 100 μSv/y を上回るものの割合は、それぞれ、およそ 12% 及び 6% であった。

また、これらの比較的高線量のケースの部分集合について各入力パラメータの平均値を計算し、それと全体集合の平均値との差異(t)に関する χ^2 乗検定を行った結果を Fig.6 にまとめる。ここで、絶対値が大きいパラメータについては、全体集合の平均との間の差異が偶然のものではなく、つまり、これらのパラメータがある範囲にあるために高い線量が生じていると判断することができる。いずれの安全目標の例についても、それを上回るようなケースはダルシー流速に基づく地下水移行時間が短く、マトリクス中の実効拡散係数が小さいことが統計的に顕著であることがわかる。そこで、[1] に従い、硬岩系岩盤の種類に応じた実効拡散係数の範囲を、

- 酸性結晶質岩及び先新第三紀砂質岩；実効拡散係数： $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

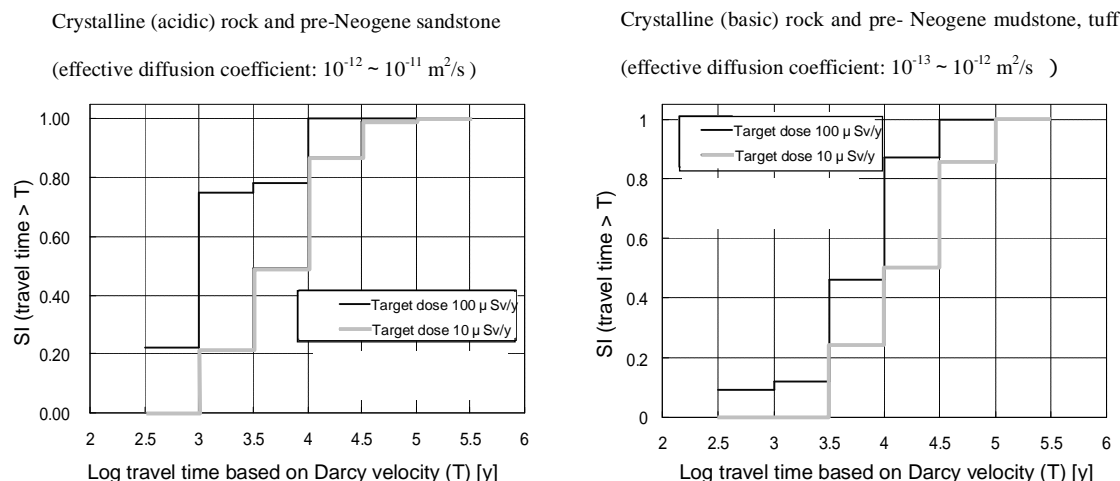


Fig.7 Sufficiency index for hard rocks as a function of groundwater travel time calculated from Darcy velocity

- ・ 塩基性結晶質岩及び先新第三紀泥質岩、凝灰岩；実効拡散係数: $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

として、それぞれについて、ダルシー流速に基づく地下水移行時間が変化した場合に、目標の例として暫定的に想定した $100\mu\text{Sv/y}$ 及び $10\mu\text{Sv/y}$ を下回るケースの割合がどのように変化するかを整理した (Fig. 7)。酸性結晶質岩及び先新第三紀砂質岩の場合は、ダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1 万年～3 万年程度確保できれば、ほぼ確実に $100\mu\text{Sv/y}$ 以下とすることができ、また、このとき暫定的な努力目標である $10\mu\text{Sv/y}$ を下回るケースの割合も 80% を上回っていることがわかる。実効拡散係数が小さくマトリクス拡散による移行遅延が相対的に小さい塩基性結晶質岩及び先新第三紀泥質岩の場合は、ダルシー流速に基づく地下水移行時間が 3 万年～10 万年程度確保できれば、ほぼ確実に $100\mu\text{Sv/y}$ 以下とすることができ、また、このとき暫定的な努力目標である $10\mu\text{Sv/y}$ を下回るケースの割合も 80% を上回っている。このように、天然バリア性能の観点から「好ましい」条件と「好ましくない」条件とを規定する主要な要因としては、ダルシー流速に基づく地下水移行時間とマトリクス拡散係数が挙げられることがわかった。また、硬岩系の種々の岩種において想定されるマトリクス拡散係数の範囲内で、ダルシー流速に基づく地下水移行時間を尺度として「好ましい」条件と「好ましくない」条件とがどのように分岐するかを、暫定的な目安とする線量に対する SI 値を指標として整理し得ることがわかった。

3 地質環境の不均質性の含意

前項で述べた感度解析結果は全て、4 万本の高レベル廃棄物ガラス固化体に対し、同一の地質環境条件を適用した均質近似のアプローチによるものであった。しかしながら、地質環境条件に空間的不均質性が含まれている以上、対象領域の中に、相対的に「好ましい」部位と「好ましくない」

部位とが混在することとなり、相対的に「好ましい」領域により多くの廃棄体を定置するという意味での処分場レイアウトの最適化を行う具体的な方策を検討すること、そして、このような最適化を図ることによるシステム全体性能の改良の程度を定量化することが重要な課題となる。本節では、このような観点から、従来の均質近似のアプローチに代わって、地質環境条件の空間的不均質性を前提として、その中で相対的に好ましい部位に多数の廃棄物を定置するという最適化を図った場合の全体システム性能の向上の程度について考察を行うこととする。

3.1 空間的不均質性のスケールに関する階層構造

地下深部の岩盤における地下水流動経路としては、相互に接続した亀裂や節理等の不連続面が支配的となることが知られており [1]、特に硬岩系岩盤においては、亀裂のないマトリクス部はほとんど不透水性である。また、不連続面の中にも、連続性の乏しい個別の割れ目から多数の割れ目の密集した破碎部等、透水性の程度の異なるものがそれぞれ異なる頻度で分布することとなる。このことは、透水係数の不均質性においてスケールに関する階層構造が存在することを示唆している。つまり、多くの岩盤において、非常に狭い領域（例えば 1 m 立方）を選ぶことが許容されるのであれば、拡散による物質移動に比して移流が無視し得るという意味で不透水性とみなすことのできるような場所を見出すことができる。しかしながら、この領域を徐々に拡大していくと、ある程度以上の大きさの領域では割れ目が含まれざるを得ず、さらに着目する領域の大きさを拡大すれば、一定の亀裂密度を示す破碎部が含まれることとなり、さらに領域を拡大するとより高密度で亀裂を含むような高透水性の破碎部が含まれることとなる。また、各スケールで遭遇する高透水性の亀裂は開口幅や充填状況等の性状についても異なる可能性がある。このような不均質性のスケールに関する階層構造は、具体的な地質環境によって種々に異なるものとなるが、後述するような工学

的対策を考える上で重要である。実際、任意の1 m 立方領域に含まれるような高透水路は、廃棄物ガラス固化体や人工バリアの大きさを極端に小さくしない限りは回避することができず、つまり、これよりも小さいスケールの「好ましい」低透水路は廃棄物の設置環境として活用することが困難である。他方、10 m 程度の間隔をあけて分布するような高透水路については、少なくとも、これを避けて廃棄物を定置することは可能であり、これに加えて後述する止水工等によって坑道掘削影響領域との水理学的な連続性を断ち切ることができればその影響を低減することができる。つまり、10 m 程度以上のスケールで存在する低透水路は、工学的対策によって、廃棄物設置環境として活用できる可能性があることになる。また、さらに大きな間隔において存在するような低頻度の高透水路については、坑道との交差を避けるあるいは処分パネルとの交差を避けるといった方法によって回避することが可能となり、それよりも高頻度で出現する不連続面のみを含む相対的に好ましい領域を活用することが期待できる。以上のような観点から種々の地質環境における透水特性の空間的不均質性を議論する際の指標としては、ある特定のスケールに着目した透水係数の平均値の有用性は限られており、むしろ、種々のスケールを横断的に見て、それぞれのスケールにおいて相対的に「好ましい」部位を選択したとすると、どの程度の低透水性が期待できるかを示すスケール特性が重要である。このような観点から、本論では、[3] に倣い、以下に述べる極値統計学に基づく表現を採用することとする。極値統計学は、与えられたデータの最頻値近傍に着目する通常の統計的手法と異なり、稀頻度で出現する極値の分布形を導出し、その統計的特徴を分析することにより、低確率ながら巨大な影響を及ぼす事象の評価を行う手法であり、これまで、気候（洪水、豪雨、等）、地震、経済（大恐慌、インフレ、等）などの分野において適用されてきている。

確率分布関数 F に従う互いに独立な m 個のデータの最大値の確率分布関数が F^m であることは容易に確認できる。ここで、極値統計学の基本的な定理は、次のことを主張するものである [4]。

定理 (Fisher-Tippett)

$F^m(b_m + a_m x)$ が $m \rightarrow \infty$ の極限において、有意な分布関数に収束するのであれば、その分布関数は、元の分布関数 F によらず、一般極値分布関数

$$G_r\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \exp\left[-\left(1+r\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{r}}\right], \quad 1+r\frac{x-\mu}{\sigma} > 0, r \neq 0 \quad (1)$$

に従う。即ち、

$$\left|F^m(x) - G_r\left(\frac{x-\mu_m}{\sigma_m}\right)\right| \rightarrow 0, \quad m \rightarrow \infty \quad (2)$$

極値分布関数として最も一般的な Gumbel 分布 ((1)式において $r \rightarrow \infty$ に相当する) を選択した場合、以下の式を解くことによって Gumbel 分布の位置のパラメータ μ 及びスケールのパラメータ σ (それぞれ、正規分布の場合は平均値と標準偏差に対応する) を決定することができる [4]。

$$\sigma - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma}\right)} = 0, \quad \mu = -\sigma \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i}{\sigma}\right)}{n} \right] = 0 \quad (3)$$

ただし、 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は各区分での亀裂頻度の最大値

[3] では、(3)式を用いて、東濃地域の花崗岩中の試錐孔データに基づき Fig. 8 左のような極値分布関数を導出している。そして、これを外挿することにより、さらに稀頻度の（大規模な）破砕帯の出現確率（あるいは出現間隔）を予測することができる。結果を Fig. 8 右に示す。同右図から明らかな通り、亀裂頻度 5 本/m 以上の極値の出現間隔は、極値の増大に伴って指数関数的に増大することがわかる。また、別途実施した 3 次元亀裂ネットワークモデルにおける地下水流動解析結果に基づき、亀裂頻度と平均透水係数との間の回帰式 (Fig. 9) を導出し、これを用いて亀裂頻度極大値の出現間隔を透水係数極大値の出現間隔に変換したものが Fig. 10 である。なお、ここで、“critical paths”と記載されているのは、縦軸で指定されるスケールの領域を考えた場合に、このような領域に含まれる最も透水性の高い経路のことを指し、また、その“average hydraulic conductivity”とは、同様のスケールの領域を多数想定した場合の“critical paths”の平均（正確にはアンサンブル平均）を指す。

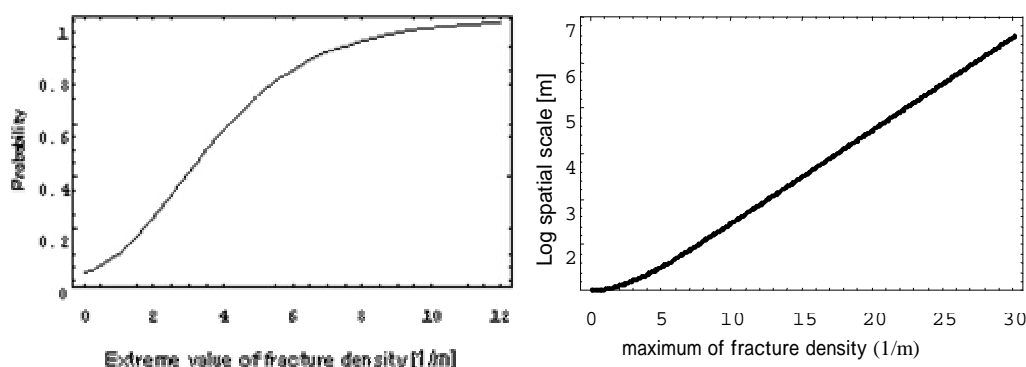


Fig.8 Cumulative distribution function for extreme values in fracture density (left) and expected spatial scale for encountering extreme values (right)

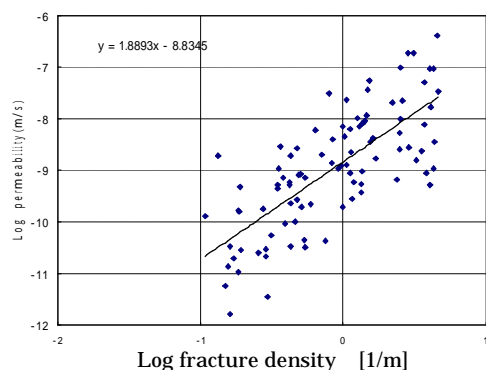


Fig.9 Correlation between average hydraulic conductivity and fracture density estimated from ensemble of fracture network simulations

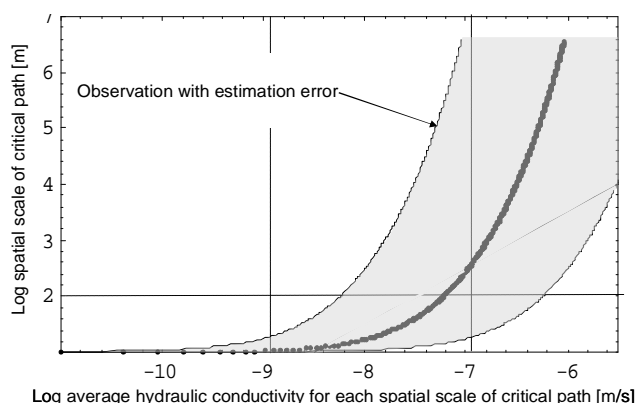


Fig.10 Average hydraulic conductivity of critical paths expected in various spatial scales

3.2 各スケールの不均質性への工学的対処の方法

次に、前項で述べた空間的不均質性のスケールにおける階層構造を前提として、工学的対策について検討を試みた。なお、ここで対象とした処分概念は、[1] で検討された処分パネル（硬岩系岩盤、縦置き方式）の形状とレイアウト（Fig. 11 参照）を基本とした。また、対象とした空間的不均質性については、前節までの検討を参考として、Fig. 12 に示すように仮想スケールでの廃棄物設置環境として活用できる低透水路（以下、好ましい部位）と避けるべき高透水路（破碎帯等）が事前に把握されていることを前提とした。なお、実際の不均質性は、低透水路から高透水路まで透水係数の連続的に異なる領域の分布として表現されるものであるが、ここでは、不均質性と工学的対策の効果との関連性を簡潔に表現するために、高透水路と低透水路とをそれぞれ透水係数の顕著に異なる離散的な領域として表現することとした。なお、ここでの検討の主眼は、このような特性の異なる領域の空間的配置に応じたレイアウトの可能性にあり、このため、それぞれの部位の透水係数の絶対値については特定していない。

まず、Fig. 12 の空間的不均質性のスケールを約 10 km 四方とした場合、Fig. 13 に示すように好ましい部位が広く

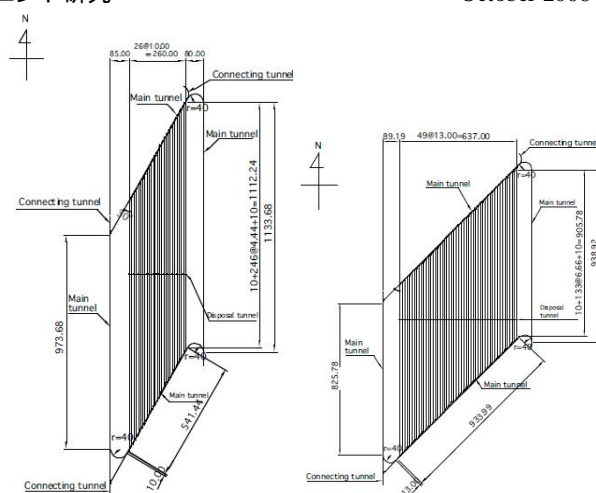


Fig.11 Layout of repository panels to be considered (Case of vertical emplacement of wastes in boreholes drilled in a hard host rock)

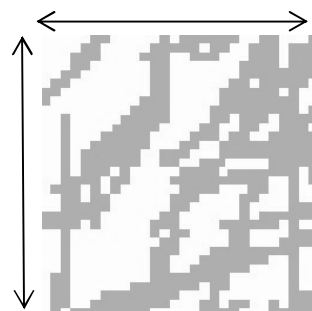


Fig.12 Example of spatial heterogeneity in ×

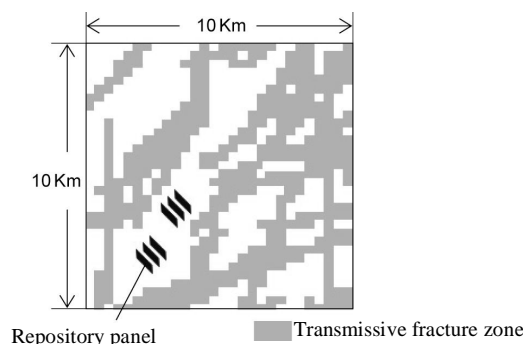


Fig.13 Example of panel layout for a 10 km x 10 km scale spatial heterogeneity

分布することになるため、工学的対処としては第2次取りまとめで検討された処分パネルの形状とレイアウトをそのまま活用することができる。

次に、スケールを 1/10 の約 1 km 四方とした場合、第2次取りまとめで検討された長さ約 1 km である処分パネルの形状では避けるべき高透水路を避けてレイアウトすることができない。そこで考えられる工学的対処としては、高透水路を避けずにレイアウトを行い、高透水路と交差する坑道にてプラグ等の止水対策を行うことと、Fig. 14 に示すように処分パネル形状を変更し、高透水路を避けてレイアウトすることが考えられる。

スケールを更に 1/10 つまり約 100m 四方とし、さらに、高透水性のために避けるべき破砕帯等からの緩衝領域(廃棄体周囲に確保すべき低透水路の領域)を考慮する必要があるとした場合には、Fig. 15 に示すように廃棄物設置環境として活用できる好ましい領域がほとんど確保できなくなり、約 1 km 四方のスケールと同様の処分坑道を規則的に並べるレイアウトを採ることの合理性が顕著に低下することが分かる。

この結果から、約 100m 四方で Fig. 12 に示すような空間的不均質性が存在する場合、[1]における基本レイアウトをそのまま適用することは困難であり、このような不均質地質環境において適切に廃棄物設置を行うためには、処分坑道を規則的に並べるレイアウトよりもむしろ、限られた好ましい部位に集中して廃棄物を設置することが適切と考えられる。そこで、例えば Fig. 15 に示すように好ましい部位を通るように処分坑道を掘削し、緩衝領域内で低透水路としての機能を回復させるためにプラグ等の止水対策を行うことが合理的と考えられる。また、ここで例示した工学的対策では、数少ない処分坑道でできるだけ広い面積の好ましい部位を横切り、かつ、避けるべき高透水路を横断する箇所をできるだけ制限するようなレイアウトを採ることが望まれる。

3.3 工学的対策の効果について

前出の極値統計学的解析の結果 (Fig. 10) における最良推定値 (エラーバーの中央に位置する黒の点線) が約 10m のところ (対数スケールのため、縦軸の 1 に相当) で横軸

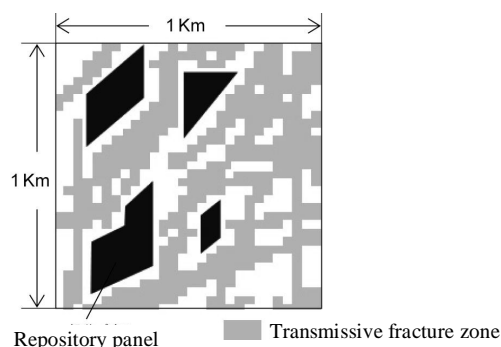


Fig.14 Example of tunnel layout for a 1 km x 1 km scale spatial heterogeneity

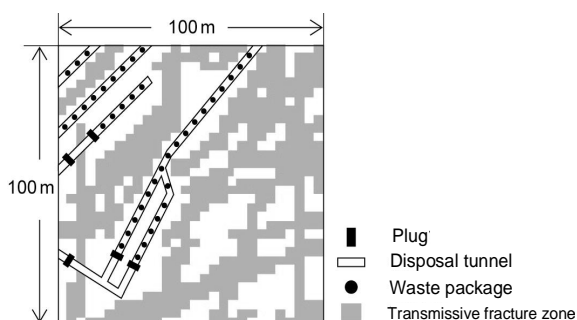


Fig.15 Example of tunnel layout for a 100 m x 100 m scale spatial heterogeneity

の 10^{-9} m/s と交差し、また、約 100m (同じく縦軸の 2 に相当) で横軸の 10^{-7} m/s と交差している。このことは、以下のように解釈することができる。

- ・ 透水係数の極大値が 1×10^{-9} m/s 以下であるような 10 m 立方程度の大きさの「好ましい」領域を選定することができる
- ・ 任意の 100 m 区間において 1×10^{-7} m/s 程度以上の高透水路が出現する

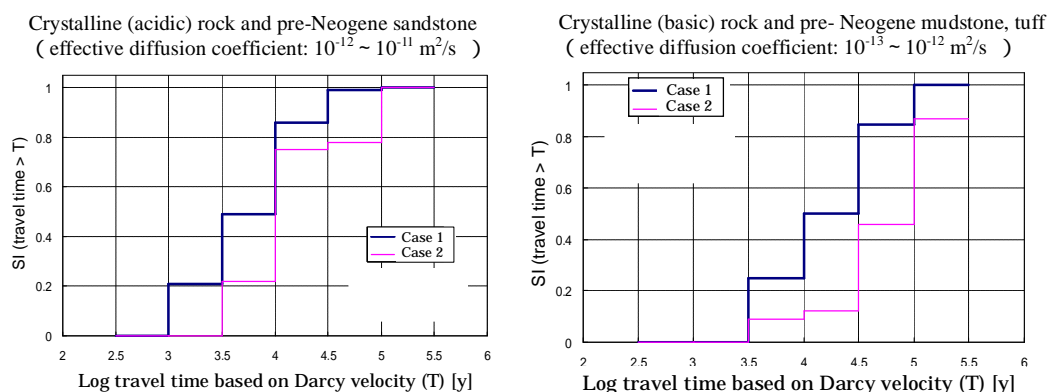
というスケールのな階層構造の存在を意味していることから、ここでは、

- ・ 透水係数の極大値が K m/s 以下であるような L m 立方程度の大きさの「好ましい」領域 D_0 を選定することができる
- ・ 任意の 10L m 区間において $100K$ m/s 程度以上の高透水路が出現する

という仮想的な不均質地質環境を想定し、 K 及び L を種々に変動させて核種移行解析を行った。また、解析においては、前項で述べた工学的対策が有効に機能する場合と効力が限定的な場合を想定して、以下の二つのケースについて計算を行うこととした。

- ・ ケース 1: 4 万本の廃棄体の全てを上記の「好ましい」領域 D_0 に収容し、かつ、適切な止水工によって高透水路と廃棄体定置領域との間の水理学的な連続性を断つことができる。この場合、全ての廃棄体から溶出した放射性核種は、透水係数が K m/s 程度であるような L m の経路を移行するものと仮定した。
- ・ ケース 2: 4 万本の廃棄体のうち 10% 相当 (4,000 本) は高透水路に設置されるかあるいは止水が不完全であるためにこれらの廃棄体に含まれる放射性核種は速やかに高透水路に至りそこを移行する。これらの廃棄体から溶出した放射性核種は、透水係数が $100K$ m/s 程度であるような $10L$ m の経路を移行するものと仮定した。なお、残り 90% についてはケース 1 と同一の条件とする。

それぞれのケースについて、2.の場合と同様のパラメータ変動範囲から統計的にサンプリングを行い、約 3,000 ケースの核種移行解析を行った。目標線量を暫定的に $10\mu\text{Sv/y}$ とした場合にこれを満足する可能性 (SI 値) を、 D_0 でのダルシー流速に基づく地下水移行時間 (K と L の変動によって幅広く変動することとなる) に対して整理した結果が Fig. 16 である。ケース 1 と 2 の間の差異は顕著なものであり、高透水路が移行経路となるような廃棄体数が 10% 程度であっても、処分場全体としての核種移行率が顕著に影響されることがわかる。このことは、前出の工学的対策を適切に講じることの重要性が高いことを示唆するものと考えられる。



*1 Case 1: all waste packages in the favorable site.

Case 2: 10% of dose in all waste migrate through unfavourable site.

*2 Travel time (horizontal axis) calculated from Darcy velocity denotes the value in the 'favorable site'

*3 $10\mu\text{Sv/y}$ is taken for the target dose.

Fig. 16 Dependence of safety performance of entire repository on its layout in heterogeneous geological environment

4 まとめ及び今後の課題

4.1 工学的対策の具体化と自由度の拡大

本論では各スケールの不均質性への工学的対処に関する検討を行い、そのスケールによっては [1] で検討された処分概念がそのまま適用できる場合と適用できない場合があることを示すと共に、不均質性を前提とした場合の工学的対策を例示した。ここで例示したような工学的対策を用いることにより、ある離間距離で高透水部が分布しているようなサイトにおいても、相対的に「好ましい」部分領域を選択的に抽出して処分場を適切に配置することにより安全な地層処分が可能になると考えられる。本論で提示したような工学的対策を具体化していくためには、下記に示す課題の克服が不可欠であり、今後、更なる検討を進めて行く予定である。

「好ましい」部位の分布範囲を的確に把握するための坑道周辺での探査技術

「好ましい」部位の分布範囲に応じた設計を随時行うことのできる情報化施工技術

坑道掘削・操業・閉鎖後も「好ましい」部位であることを保証できる地質環境の復元技術（例えば、坑道埋め戻し技術や止水プラグ技術、止水グラウト技術等）

Fig. 15 に示したような応用例に対応可能な操業・閉鎖技術

4.2 三次元不均質場での地下水流動及び核種移行解析手法

前項で述べたような工学的対策の安全確保上の効用を定量的に評価し、さらに最適化していく上では、地質環境の有する空間的不均質性と坑道及びその周囲の掘削影響領域や人工バリアの形状・配置そして止水工の仕様等、相互の相対的な位置関係を適切に表現しつつ、地下水流動及び核種移行解析を実施することが必要である。このよう

な観点からは、亀裂を含む母岩透水係数の三次元不均質場と、そこに配置された透水性が種々に異なる連続体である人工材料における地下水流動解析を行い、かつ、こうして得られる不均質流速場の中での三次元核種移行解析を実施することが重要となる。ここで、特に計算負荷の高い不均質場における三次元核種移行解析については、[5]において開発されているランダムウォーク法による手法等、従来の三次元移流・分散方程式の有限要素法や差分法による数値的解法に対する代替的な技術の開発が重要な課題になるものと考えられる。

参考文献

- [1] 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 分冊3：地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023 (1999).
- [2] 三木崇史、小山田潔、池田孝夫：包括的感度解析ツールの体系化・高度化、JNC TJ8400 2003-053 (2003).
- [3] 高瀬博康、天野健治：東濃地域における亀裂分布のスケール特性に関する極値統計学的考察（投稿中）(2006).
- [4] Reiss, R.D., Thomas, M.: Statistical Analysis of Extreme Values, With Applications to Insurance, Finance, Hydrology, and Other Fields, Birkhäuser (2001).
- [5] 高瀬博康、稲垣学、梅木博之、小西俊実、羽根幸司、戸井田克：人工バリア・天然バリアインターフェイスにおける核種移行解析手法の開発、日本原子力学会「2003年春の年会」O32 (2003).