

多重人工バリアシステムを対象とした放射性廃棄物処分施設のバリア性能指標に関する検討 —その2 所定の安全性能を保有する余裕深度処分施設の条件整理とセーフティマップ—

独立行政法人原子力安全基盤機構	正会員	鈴木 俊一
独立行政法人原子力安全基盤機構		青木 広臣
独立行政法人原子力安全基盤機構		川上 博人
大成建設株式会社	正会員	○畑 明仁
大成建設株式会社	正会員	本島 貴之

1. 検討の背景と目的

地表面下 50～100m程度への建設が予定される余裕深度処分施設は、セメント系材料とベントナイト系材料を用いた多層の人工バリアと、岩盤を用いた天然バリアからなるシステムとなることが想定されている。余裕深度処分施設の安全評価の観点からはシステム全体の性能を正確に把握することが重要であるが、それぞれのバリア性能が多数の因子の影響を受けることがその理解を困難にしており、余裕深度処分システム全体としての性能を簡易に評価する手法が望まれている。以上の背景から本検討は、複雑なシステムである余裕深度処分システムの性能を簡易に表現する手法を構築するとともに、構築された手法を用いて所定の安全性能を満足するための条件を整理することを目的としている。別報に示された（その1）¹⁾においては人工バリアシステムの性能指標を示したが、本検討では新たに天然バリアシステムの性能指標を導入し、人工バリアの性能指標と合わせて用いることにより余裕深度処分システム全体の性能を簡易かつ包括的に表現するセーフティマップを作成、提案する。また、セーフティマップに示される余裕深度処分システムの性能が持つ特徴を示す。

2. 天然バリアの性能指標

余裕深度処分システムにおいて想定される主要な核種移行経路は、地下水に溶出した放射性核種が天然バリア中を流れる地下水とともに移動する地下水移行経路である。このような地下水中の核種移行は、以下に示す核種の崩壊、核種の吸着を考慮した次元移流分散問題としてとらえることが出来る。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D}{R_{di}} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - u' \frac{\partial C_i}{\partial x} - \lambda_i C_i \quad \text{式 1}$$

ただし、 C_i : 核種*i*の濃度[ML⁻³]、 u' : 地下水実流速[LT⁻¹]、 D : 分散係数[L²T⁻¹]、 R_{di} : 核種*i*の遅延係数[-]、 λ_i : 核種*i*の崩壊定数[T⁻¹]である。

天然バリアの性能を余裕深度処分システムの安全評価の観点から考える場合、核種移行抑制機能に注目することが重要である。すなわち、天然バリア中を流下する流量が小さくなると生物圏に放出される単位時間あたりの放射性核種量が低下するため生物圏での被ばく線量を小さくすることが出来るとともに、生物圏に到達するまでの時間を十分に長くとることが出来れば、放射性核種の放射壊変による減衰を期待することも出来るからである。こうした天然バリアの核種移行抑制機能を評価する指標としては、天然バリアが移流分散経路であるため、天然バリア中の移流速度を代表する量を選択することが適切と考えられる。したがって、天然バリアの性能指標として、天然バリア始点に入力された核種が天然バリアの放出端に達するまでの時間を採用する。具体的には、式1の系に濃度がパルス入力された場合の放出端におけるピーク濃度発生時刻を求め、天然バリアの性能指標とする。

式1を $C_i(x,0)=C_{0,i}\delta(x)$ 、 $C(\pm\infty,t)=0$ の境界条件で解くと厳密解は式2のようになる。ただし、 $\delta(x)$ はデルタ関数である²⁾。

$$C_i(x,t) = \frac{C_{0,i}}{2\sqrt{\pi Dt/R_{di}}} \exp\left\{-\frac{(x-u't/R_{di})^2}{4Dt/R_{di}}\right\} \exp(-\lambda_i t) \quad \text{式 2}$$

濃度が最大となる時間は上式を微分して以下のように求められる。

$$T_{\max} = \frac{\sqrt{\left(\frac{4D}{R_{di}}\right)^2 + 16\left(\frac{u'^2}{R_{di}^2} + \frac{4D\lambda_i}{R_{di}}\right)x^2} - \frac{4D}{R_{di}}}{4\left(\frac{u'^2}{R_{di}^2} + \frac{4D\lambda_i}{R_{di}}\right)} \quad \text{式 3}$$

ここで、核種崩壊の影響が小さく ($\lambda \rightarrow 0$)、分散の小さい ($D \rightarrow 0$) 系を考慮すれば、濃度が最大となる時間は式 4 のように簡略化される。

$$T_{Rd} = \frac{Rd \cdot x}{u'} \quad \text{式 4}$$

式 4 に示される性能指標は、核種崩壊の影響が小さく、また分散が小さい場合には、岩盤への収着を考慮した核種の移行時間を示していると考えられる。

3. 所定の安全要件を満足する余裕深度処分システムの人工バリアと天然バリアの性能（セーフティマップの作成）

（その 1）で示した人工バリアの性能指標および前項で示した天然バリアの性能指標を用いて、所定の安全要件を満足する人工バリアと天然バリアの性能の関係（セーフティマップ）を図 1 に、

図 1 の曲線状の各点に対応する条件で算定された生物圏における線量の時間変化を図 2 に示す。なお、本検討では対象核種は C-14 とし、第 3 次中間報告³⁾ に示された生物圏モデルを用いた際に被ばく線量の最大値が $10 \mu\text{Sv/yr}$ を満足する人工バリアと天然バリアの性能を求めている。またこの図は、汎用解析コード GoldSim を用いて逆解析を実施して求めている。

図 1 の結果は、ある最大線量値を満足する人工バリア性能と天然バリア性能の組み合わせが複数存在することを示している。すなわち、一方の性能を規定する場合には他方の性能とのバランスをとって考慮することが重要であることを示している。

また、図 1 の曲線から、人工バリアおよび天然バリアの双方に極値が存在することがわかる。これは、どちらかのバリアが全く存在しないとした場合、他方のバリアの性能だけで $10 \mu\text{Sv/yr}$ の線量を満足するための条件を示している。すなわち、極値 A は人工バリアから直接生物圏に放射性核種が放出された場合に $10 \mu\text{Sv/yr}$ を満足するための人工バリアの性能要件を示し、また、極値 B は人工バリアがなく、天然バリアに総放射エネルギーがパルス状に入力された場合に $10 \mu\text{Sv/yr}$ を満足するための天然バリアの性能要件を示している。すなわち、これらは、人工バリアあるいは天然バリアに要求される上限の性能に関する情報を与えてくれるものである。

4. まとめ

上記検討では、余裕深度処分システムが所定の安全要件を満足するための人工バリア性能と天然バリア性能の関係を整理するとともに、セーフティマップとして提示した。こうした整理方法は、余裕深度処分システムに要求される安全要件を包括的に考えることを可能にし、技術基準等を策定するうえでも有用であると考えられる。

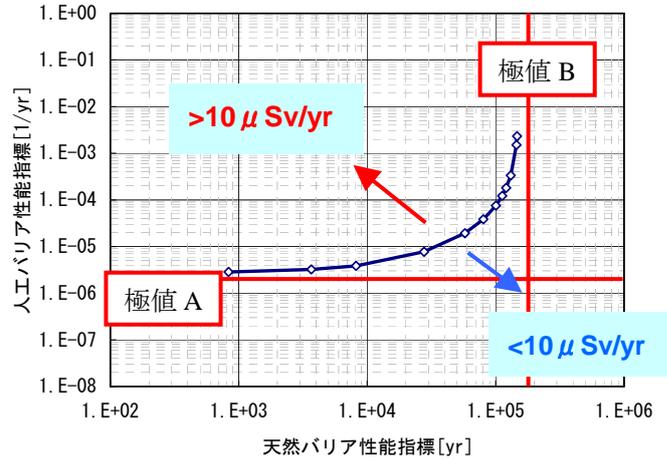


図 1 $10 \mu\text{Sv/yr}$ を境界とするセーフティマップ

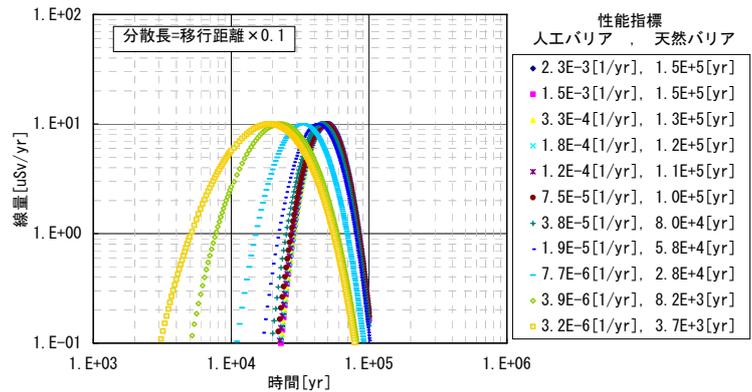


図 2 $10 \mu\text{Sv/yr}$ を満足する各条件で算定された線量

¹⁾ 鈴木ら：多重人工バリアシステムを対象とした放射性廃棄物処分施設のバリア性能指標に関する検討—その 1，第 61 回土木学会年次学術講演会，2005

²⁾ 例えば、佐藤，岩佐：地下水理学，2002 など

³⁾ 原子力安全委員会：低レベル放射性固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