

核種移行解析における掘削影響領域のモデルバリエーションに関する検討

若杉圭一郎* 牧野仁史* 小尾繁**

第2次取りまとめの安全評価では、掘削影響領域(EDZ)内の移行遅延効果を保守的に無視したモデルを用いて評価を行い、システムの性能に重要な影響を及ぼすプロセスの1つとして、EDZ内の地下水流れが挙げられた。このため本研究では、EDZ内の核種移行に着目し、そのモデル化の違いが評価結果に与える影響を定量的に把握することを目的として、EDZの概念モデルおよび数学モデルのバリエーション(0濃度境界モデル、ミキシングモデル、多孔質モデル、亀裂モデル)を設定し、各モデルを用いて核種移行解析を実施した。この結果、0濃度境界モデルは最も保守的な結果を与えること、亀裂モデルは用いる境界条件により評価の保守性に幅を持つことなどがわかった。さらに、「簡単さ/複雑さ」と「現実性/保守性」の程度を勘案して、EDZの各モデルの特徴を定性的に整理し、今後のEDZのモデル開発の方向性について検討した。

Keywords: 核種移行解析, 掘削影響領域, モデルの不確実性, 安全評価

The safety assessment of the H12 report pointed out that groundwater flow in the excavation disturbed zone (EDZ) is one of the important processes affecting system performance. This determination was made by using an EDZ model, which conservatively ignores the retardation effect in the EDZ. This study focuses on nuclide migration in the EDZ. The variation in the conceptual models and the mathematical models for the EDZ (zero concentration boundary model, mixing model, porous medium model and fracture model) were defined. To examine the effect this model variation has on safety assessment, nuclide migration analyses were performed using each model. These simulations confirmed that zero concentration boundary model gives the most conservative results and that the conservatism of the fracture model changes depending on the outer boundary conditions. Furthermore, the EDZ models were qualitatively classified ranging from simple to complex and from realistic to conservative. The direction of model development for the EDZ is also discussed.

Keywords: nuclide migration analysis, excavation disturbed zone, model uncertainty, safety assessment

1 はじめに

1999年11月、核燃料サイクル開発機構は原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書[1]にしたがい、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性に関する研究開発の成果を、地層処分研究開発第2次取りまとめ[2]（以下、「第2次取りまとめ」）としてまとめ、原子力委員会に提出した。この第2次取りまとめにおける安全評価では、幅広い地質環境を対象としたシステムの多様性や、モデル、データおよびシナリオの不確実性による個別の影響を定量的に評価することにより、安全評価上重要な因子を整理した。この結果、掘削影響領域（以下、「EDZ」）内での地下水流れが地層処分システムの性能へ影響を及ぼす重要なプロセスの1つとして挙げられた。ここで、第2次取りまとめの安全評価におけるEDZの取り扱いについては、個別に行う人工バリアと天然バリアの核種移行解析を接続するための領域として取り扱われ、そのモデル化においては、

- EDZをモデル化するために必要な情報が十分に取得されていない
- EDZ内に存在する亀裂や空隙は不均質性を有する
- サイトに依存する因子も多い

などの理由から、保守的な評価となるように、比較的簡単な概念モデルと数学モデルが適用された。しかしながら、

EDZは処分坑道掘削の影響を受けた岩盤として想定された領域であり、緩衝材外側に達した核種は、そこに接するEDZ内の亀裂部のみならず、基質部（以下、「マトリクス」）にも移行し、収着により遅延されることが期待される。

一方、第2次取りまとめ以外の既存の安全評価に関する報告書においても、多くの場合、EDZを人工バリア中核種移行解析の外側境界条件を設定するための領域として取り扱い、さまざまなモデル化が行われている。このEDZのモデル化の違いは、人工バリア中核種移行解析の外側境界条件の違いとして人工バリアからの核種移行率へ影響するだけでなく、天然バリア中の核種移行解析を介して、システムの性能を把握するための解析（以下、「システム性能の総合的解析」）の結果にも影響する可能性があり、モデルの不確実性の検討としても重要である。

以上のことから、本研究では、まず既存の安全評価に関する報告書を参考にしながら、EDZに対する概念モデルや数学モデルのバリエーションを設定し、次に、これらのEDZモデルを考慮した核種移行解析モデルを構築し、EDZのモデル化の違いがEDZからの核種移行率、およびシステム性能の総合的解析結果に与える影響を定量的に把握する。このとき、安全評価で考慮すべき不確実性については、モデルの不確実性のみならず、シナリオやデータの不確実性、あるいはそれらの組み合わせ等も考えられるが、本研究では、まず、個々の不確実性の影響について知見を整備しておくことが重要であると考え、モデルの不確実性の1つとしてEDZのモデルのバリエーションが安全評価結果に与える影響に主眼をおき検討を行う。以上の検討を通じて、複数の視点からEDZに対するモデルのバリエーションの比較と整理を試みる。

Study on model variation of the excavation disturbed zone for the nuclides migration analysis by Keiichiro Wakasugi (wakasugi@tokai.jnc.go.jp), Hitoshi Makino, Shigeru Koo

* 核燃料サイクル開発機構 Japan Nuclear Cycle Development Institute, 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

** 株式会社 NESI Nuclear Energy System Inc. 〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

2 モデル

ここでは、第2次取りまとめや諸外国の安全評価に関する報告書を参考に、EDZのモデルのバリエーションとして以下の4つのモデルを設定した。

- ・ 0濃度境界モデル
- ・ ミキシングモデル
- ・ 多孔質モデル
- ・ 亀裂モデル

以下に、各モデルについての概念モデルおよび数学モデルを述べる。なお、モデル化においては廃棄体1本を対象とする¹⁾とともに、とくに断らない限り、数学モデルには1次元円筒座標系を用いることとする。

2.1 0濃度境界モデル

(1) 概念モデル：Fig.1

0濃度境界モデルとは、緩衝材外側の核種濃度を0と仮定する最も簡単なモデルとして位置づけられる。このとき、緩衝材外側へ達した核種の全量が瞬時に母岩へ移行することを仮定することになる。また、本モデルは、現象論的にはEDZ内に核種濃度が常に0になるような非常に大きな地下水の流れが存在し、緩衝材外側に到達した核種の全量が、その地下水により母岩へ移行することに相当すると考えることができる。しかしながら、人工バリアだけでなく天然バリアを含めて考えると、このような現象を想定することは、EDZと周辺母岩の間での水理学的な整合性がとれなくなるため、注意する必要がある。なお、本モデルでは、緩衝材外側の濃度が0であることに起因して、濃度勾配を駆動力とする緩衝材中の核種の移行が促進され、さらに緩衝材外側での核種の濃度勾配が大きくなるため、保守的な結果を導く評価モデルとして使用されている(たとえば[3,4])。

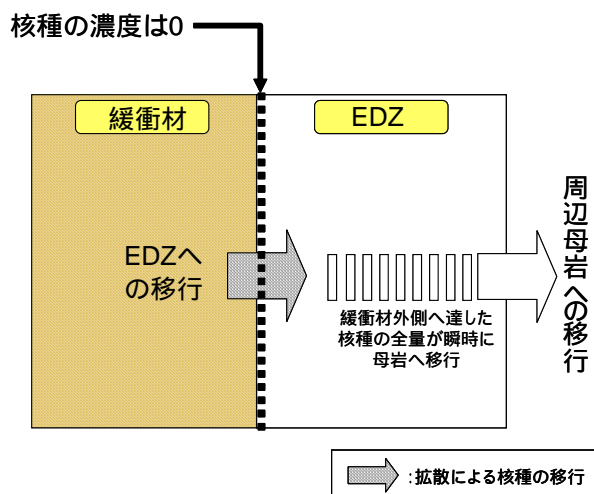


Fig.1 Conceptual illustration of the zero concentration boundary model

¹⁾ システム性能の総合的解析では、第2次取りまとめと同様に、廃棄体1本を対象とした解析結果に、処分場に埋設する廃棄体の総本数を乗ずることで算出する(4章参照)。

(2) 数学モデル

$$C_{ij}^B \Big|_{r=r_{out}} = 0 \quad (1)$$

$$f_{ij}^{B \rightarrow E} = f_{ij}^{E \rightarrow H} = -2\pi r_{out} L \varepsilon^B Dp_i^B \frac{\partial C_{ij}^B}{\partial r} \Big|_{r=r_{out}} \quad (2)$$

C^B : 緩衝材の間隙水中の核種濃度[mol/m³]

Dp^B : 緩衝材間隙水中の拡散係数[m²/y]

L : 緩衝材長さ[m]

ij : 当該核種を表すインデックス(元素*i*の同位体*j*)

ε^B : 緩衝材の間隙率[-]

r : 水平方向(緩衝材半径方向)の距離[m]

r_{out} : 緩衝材外側半径[m]

$f^{B \rightarrow E}$: 緩衝材からの移行率²⁾[mol/y]

$f^{E \rightarrow H}$: EDZからの移行率²⁾[mol/y]

2.2 ミキシングモデル

(1) 概念モデル：Fig.2

ミキシングモデルとは、EDZを、吸着媒体の存在を仮定しない水だけで満たされている領域とし、緩衝材外側に到達した核種が、EDZを通過する地下水と瞬時に混合するモデルである。そのときEDZ内での核種はEDZを通過する地下水流れにより周辺母岩へ移行すると仮定する。EDZを通過する地下水流量は、地下水流動解析などから求められる値が使用される。なお、本モデルは、0濃度モデルに対して、EDZでの放射性崩壊とEDZ内を通過するより現実的な地下水流れとの瞬時混合、および、この地下水流れによるEDZから周辺母岩への移行プロセスを追加したモデルであり、第2次取りまとめで基準としたケース(以下「レファレンスケース」)などで使用されている。

²⁾ 第2次取りまとめでは、 $f^{E \rightarrow H}$ を人工バリアからの移行率と定義した。しかしながら、本研究では、EDZ内の核種移行遅延効果を考慮したモデルも取り扱うことから、緩衝材からEDZへの核種の移行と、EDZから周辺母岩への核種の移行を明確に区別する必要がある。このため、本研究では $f^{B \rightarrow E}$ を緩衝材からEDZへの移行率(以下、「緩衝材からの移行率」)、 $f^{E \rightarrow H}$ をEDZから周辺母岩への移行率(以下、「EDZからの移行率」と定義する。なお、0濃度境界モデルでは、緩衝材外側へ達した核種の全量が瞬時に母岩へ移行することから、緩衝材からの移行率がEDZからの移行率に相当する。

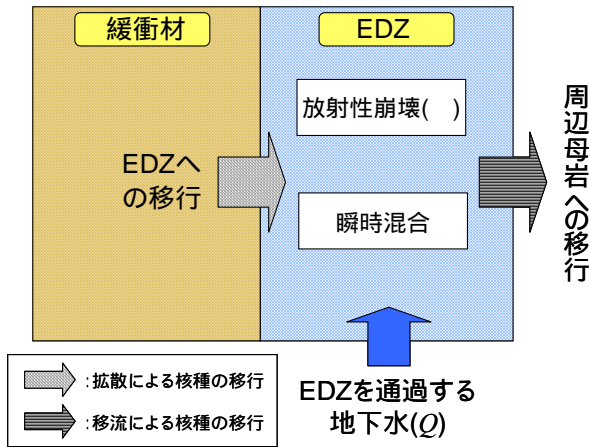


Fig.2 Conceptual illustration of the mixing model

(2) 数学モデル

$$V^E \frac{C_{ij}^{Mix}}{t} = -2\pi r_{out} L \varepsilon^B D p_i^B \frac{C_{ij}^B}{r} \Big|_{r=r_{out}} - V^E \lambda_{ij} C_{ij}^{Mix} + V^E \lambda_{IJ} C_{IJ}^{Mix} - Q C_{ij}^{Mix} \quad (3)$$

$$f_{ij}^{E \rightarrow H} = Q C_{ij}^{Mix} \quad (4)$$

- C^{Mix} : EDZ 中の核種濃度[mol/m³]
- V^E : EDZ の体積[m³]
- Q : EDZ を通過する地下水流量[m³/y]
- : 崩壊定数[1/y]
- IJ : 親核種を表すインデックス(元素 I の同位体 J)
- t : 時間[y]

2.3 多孔質モデル

(1) 概念モデル : Fig.3

多孔質モデルとは、EDZ を多孔質媒体として取り扱い、そこでの移行遅延効果を考慮したモデルである。ここでは、第2次取りまとめでのモデルの不確実性の検討で使用されたモデルに準拠して記述することとする。すなわち、ここでの多孔質モデルとは、ミキシングモデルに対してEDZ内での収着媒体の存在と収着プロセス(瞬時/可逆/線形を仮定)を追加したモデルである。

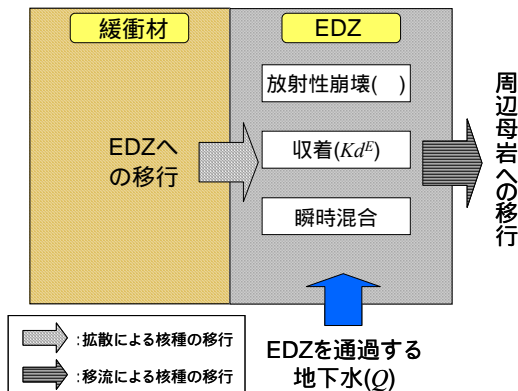


Fig.3 Conceptual illustration of the porous medium model

(2) 数学モデル

$$V^E \frac{\partial A_{ij}^E}{\partial t} = -2\pi r_{out} L \varepsilon^B D p_i^B \frac{\partial C_{ij}^B}{\partial r} \Big|_{r=r_{out}} - V^E \lambda_{ij} A_{ij}^E + V^E \lambda_{IJ} A_{IJ}^E - Q C_{ij}^E \quad (5)$$

$$f_{ij}^{E \rightarrow H} = Q C_{ij}^E \quad (6)$$

なお、EDZ 中の全核種濃度 A^E [mol/m³]は以下のように表される。

$$A_{ij}^E = \varepsilon^E C_{ij}^E + (1 - \varepsilon^E) S_{ij}^E \quad (7)$$

$$S_{ij}^E = \rho^E K d_i^E C_{ij}^E \quad (8)$$

- A^E : EDZ 中の全核種濃度[mol/m³]
- C^E : EDZ 中の間隙水中の溶存種濃度[mol/m³]
- S^E : EDZ 中の収着媒体中の収着種濃度[mol/m³]
- ε^E : EDZ の間隙率[-]
- $K d^E$: EDZ の分配係数[m³/kg]
- ρ^E : EDZ の真密度[kg/m³]

2.4 亀裂モデル

(1) 概念モデル : Fig.4

本モデルでは、EDZ を亀裂媒体とし、以下の仮定に基づき概念モデルを設定する。なお、ここでは、簡単化のため、EDZ 中に単一の平行平板亀裂が EDZ 水平方向(緩衝材半径方向)に存在すると仮定する。

- ・ 亀裂は EDZ の中心に位置すると仮定し、EDZ 垂直方向の中心から上半分の下流側を評価対象領域とする。
- ・ 緩衝材外側に達した核種は、そこに接する亀裂とマトリクスへ移行する。
- ・ EDZ 内に存在する亀裂表面への収着は考慮しない。
- ・ 亀裂内で核種はマトリクスへ拡散しながら、移流により移行する。なお、分散の効果は無視する。
- ・ マトリクス内で核種は拡散により移行し、収着により遅延される。

EDZ 外側境界のマトリクス部(以下「マトリクス外側」)については、SITE-94[5]および若杉ら[6]の報告等を参考に、以下の2つの境界条件を考慮する³⁾。

- ・ マトリクス外側を0濃度とする(以下、「0濃度境界亀裂モデル」)。
- ・ マトリクス外側から周辺母岩へのフラックス(単位時間、単位面積当たり移行する核種量)を0とする。(以下、「0フラックス境界亀裂モデル」)。

³⁾ 現象論的には、マトリクス外側に達した核種はEDZの周辺母岩中のマトリクスへ拡散することが考えられる。しかしながら、本研究では、周辺母岩を含めて核種移行をモデル化していないため、マトリクス外側に境界条件を設定することとした。

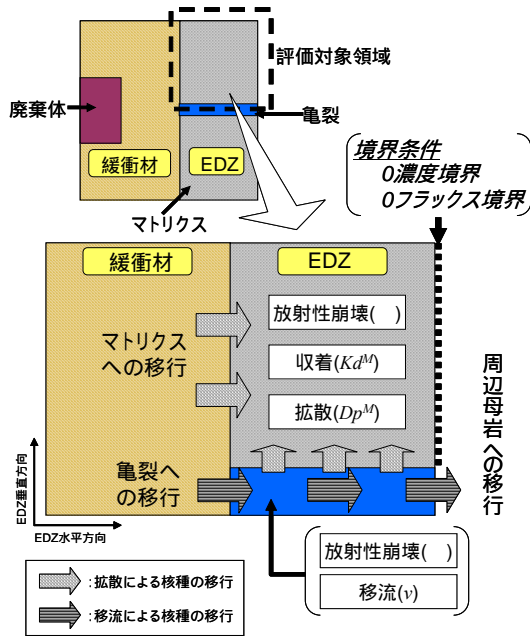


Fig.4 Conceptual illustration of the fracture model
 (: zero concentration boundary fracture model and
 : zero flux boundary fracture model)

なお、0 濃度境界亀裂モデルは、0 濃度境界モデルと同様に、マトリクス外側に非常に大きな地下水流れの存在を想定することになる。このため、天然バリアを含めて考えると、EDZ と周辺母岩の水理学的な整合性がとれなくなるが、マトリクス外側の核種濃度が0 になることに起因して、マトリクス中での核種の移行が促進されるため、0 フラックス境界亀裂モデルより保守的なモデルであると考えられる。

また、Fig.4 から、緩衝材と EDZ の境界面では、緩衝材からマトリクスへの移行と緩衝材から亀裂への移行の2種類の境界が存在すること、さらにマトリクス中での拡散や亀裂からマトリクスへの拡散を考慮することから、数学モデルを2次元以上の座標系で構築する必要がある。

(2) 数学モデル

ここでは、Fig.4 に示した概念モデルに基づき、2次元円筒座標系に基づく数学モデルを記す。

【亀裂】

$$\frac{\partial C_{ij}^F}{\partial t} = -v \frac{\partial C_{ij}^F}{\partial r} - \lambda_{ij} C_{ij}^F + \lambda_{LJ} C_{LJ}^F - \frac{FWS}{b} \cdot \varepsilon^M Dp_i^M \frac{\partial C_{ij}^M}{\partial z} \Bigg|_{z=b} \quad r_{out} \leq r \leq r_{out} + h \quad (9)$$

【マトリクス】

$$R_i \frac{\partial C_{ij}^M}{\partial t} = Dp_i^M \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_{ij}^M}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C_{ij}^M}{\partial z^2} \right] - \lambda_{ij} R_i C_{ij}^M + \lambda_{LJ} R_i C_{LJ}^M \quad r_{out} \leq r \leq r_{out} + h, \quad b \leq z \leq b+d \quad (10)$$

$$R_i = 1 + \frac{\rho^M \cdot Kd_i^M}{\varepsilon^M} \quad (11)$$

【境界条件】

$$-\varepsilon^B Dp_i^B \frac{\partial C_{ij}^B}{\partial r} \Bigg|_{r=r_{out}} = v C_{ij}^F \Bigg|_{r=r_{out}} \quad 0 \leq z \leq b \quad (12)$$

$$-\varepsilon^B Dp_i^B \frac{\partial C_{ij}^B}{\partial r} \Bigg|_{r=r_{out}} = -\varepsilon^M Dp_i^M \frac{\partial C_{ij}^M}{\partial r} \Bigg|_{r=r_{out}} \quad b \leq z \leq b+d \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_{ij}^F}{\partial z} \Bigg|_{z=0} = 0 \quad r_{out} \leq r \leq r_{out} + h \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_{ij}^M}{\partial z} \Bigg|_{z=b+d} = 0 \quad r_{out} \leq r \leq r_{out} + h \quad (15)$$

概念モデルに基づき、マトリクス外側については、以下の2種類の境界条件を設定する。

<0 濃度境界亀裂モデル>

$$C_{ij}^M \Bigg|_{r=r_{out}+h} = 0 \quad b \leq z \leq b+d \quad (16)$$

<0 フラックス境界亀裂モデル>

$$\frac{\partial C_{ij}^M}{\partial r} \Bigg|_{r=r_{out}+h} = 0 \quad b \leq z \leq b+d \quad (17)$$

【EDZ からの移行率】

<0 濃度境界亀裂モデル>

$$f_{ij}^{E \rightarrow H} = 2 \left[2\pi b(r_{out} + h) v C_{ij}^F \Bigg|_{r=r_{out}+h} - 2\pi(r_{out} + h) \varepsilon^M Dp_i^M \int_{z=b}^{z=b+d} \frac{\partial C_{ij}^M}{\partial r} \Bigg|_{r=r_{out}+h} dz \right] \quad (18)$$

<0 フラックス境界亀裂モデル>

$$f_{ij}^{E \rightarrow H} = 2 \left[2\pi b(r_{out} + h) v C_{ij}^F \Bigg|_{r=r_{out}+h} \right] \quad (19)$$

C^F : 亀裂中の核種濃度[mol/m³]

C^M : マトリクス中の核種濃度[mol/m³]

V : 亀裂内流速[m/y]

b : 亀裂開口幅の 1/2[m]

Dp^M : マトリクス間隙水中の拡散係数[m²/y]

FWS : 亀裂からマトリクスへの拡散に寄与する面積率[-]

R : マトリクスの遅延係数[-]

Kd^M : マトリクスの分配係数[m³/kg]

ε^M : マトリクスの間隙率[-]

h : EDZ 水平方向への亀裂の長さ[m]

d : EDZ 垂直方向へのマトリクスの長さ[m]

ρ^M : マトリクス部の乾燥密度[kg/m³]

z : 緩衝材垂直方向の移行距離[m]

Table 1 Geometry and features of the buffer and the EDZ

モデル	0濃度境界モデル	ミキシングモデル	多孔質モデル	0濃度境界亀裂モデル	0フラックス境界亀裂モデル
緩衝材					
廃棄体長さ[m]				1.73	1.73
緩衝材内側半径[m]	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
緩衝材外側半径[m]	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
緩衝材長さ[m]	2.14 ¹⁾	2.14 ¹⁾	2.14 ¹⁾	3.13	3.13
緩衝材体積[m ³]	7.15	7.15	7.15	11.20	11.20
緩衝材乾燥密度[kg/m ³]	1600	1600	1600	1600	1600
緩衝材間隙率[-]	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
EDZ					
EDZ長さ[m]	2.14	2.14	2.14	3.13	3.13
EDZ外側半径[m]	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
EDZ体積[m ³]	9.14	9.14	9.14	13.37	13.37
EDZ乾燥密度[kg/m ³]			2600		
EDZ間隙率[-]			0.2 ²⁾		
マトリクス乾燥密度[kg/m ³]				2600	2600
マトリクス間隙率[-]				0.02	0.02
亀裂開口幅の1/2 ³⁾ [m]				5 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻⁵
マトリクス長さ[m]				1.56	
EDZを通過する地下水流量の取り扱い		地下水流動解析 ⁴⁾ から求められた廃棄体1本あたりのEDZを通過する地下水流量(10 ⁻³ [m ³ /yr])を仮定	地下水流動解析 ⁴⁾ から求められた廃棄体1本あたりのEDZを通過する地下水流量(10 ⁻³ [m ³ /yr])を仮定	亀裂内の地下水流量として、地下水流動解析 ⁴⁾ から求められた廃棄体1本あたりのEDZを通過する地下水流量(10 ⁻³ [m ³ /yr])を仮定 ⁵⁾ 。さらに、マトリクス外側に核種濃度が0となるような大きな地下水流れを仮定	亀裂内の地下水流量として、地下水流動解析 ⁴⁾ から求められた廃棄体1本あたりのEDZを通過する地下水流量(10 ⁻³ [m ³ /yr])を仮定 ⁵⁾

1) 第2次取りまとめのレファレンスケースに準拠し、オーバーバック外側全表面積からの緩衝材の移行を考慮するため、仮想的な緩衝材長さを仮定した。
 2) EDZの緩み等を考慮して、第2次取りまとめレファレンスケースにおける母岩の間隙率(0.02)の10倍を設定した。
 3) 亀裂開口幅(2b)については、第2次取りまとめの亀裂ネットワークモデルでのEDZの透水係数(T=5 × 10⁻¹⁰ [m²/s])から、2b=2 Tに基づき算出される値(2b=4.5 × 10⁻⁹ [m])を参考に、EDZの緩み等を考慮して2倍に設定した。このとき、緩衝材と亀裂の接触面積は、7 × 10⁻⁴ [m²]と非常に小さい値となる。
 4) ここでは、第2次取りまとめの3次元モデルによる地下水流動解析を対象とする。
 5) 廃棄体1本あたりのEDZを通過する地下水流量が単一の亀裂に全て流れる仮定であり、想定しうる最も早い流速を設定している。

3 EDZ からの移行率評価

ここでは、2章で示したEDZのモデルを用いて、ガラス固化体、緩衝材、およびEDZを考慮した核種移行解析を実施し、EDZのモデル化の違いがEDZからの移行率に及ぼす影響を定量的に把握する。

3.1 データ

各モデルの緩衝材およびEDZに設定したデータをTable 1に示す。1次元でモデル化した0濃度境界モデル、ミキシングモデルおよび多孔質モデルでの緩衝材の幾何形状については、第2次取りまとめの安全評価において1次元モデルで解析するために設定した解析上の仮想的な緩衝材長さをそのまま用いる。また、2次元でモデル化した0濃度境界亀裂モデルおよび0フラックス境界亀裂モデルの緩衝材の幾何形状については、第2次取りまとめで設定された緩衝材の仕様と廃棄体ピッチ(処分坑道横置き方式を想定)に準拠し、緩衝材の幾何形状を正確にモデル化する⁴⁾。その他、評価対象核種、核種移行データ等は、レファレンスケースに準拠して設定する。

EDZの幾何形状については、緩衝材周辺の厚さ0.5mの母岩をEDZと仮定する。なお、EDZ中の核種移行データ

は、第2次取りまとめレファレンスケースの母岩のデータを用いることとする。

3.2 解析コード

ミキシングモデル、0濃度境界モデルおよび多孔質モデルについては、第2次取りまとめの人工バリア中核種移行解析で使用した1次元コード「MESHNOTE」[2]を用いた。また、数学モデルを2次元で構築した0濃度境界亀裂モデルおよび0フラックス境界亀裂モデルについては、1次元のMESHNOTEでは対応できないため、GUI(Graphical User Interface)を用いたプラットフォーム上で視覚的に解析モデルを構築することができるGoldSim[7]により解析モデルを構築し、これを用いた。

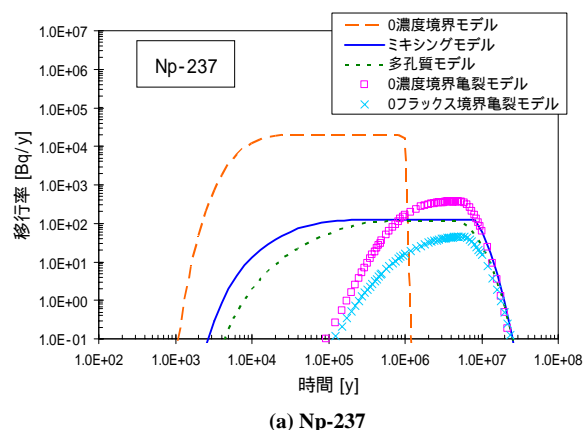
3.3 解析結果

3.1節および3.2節にそれぞれ示したデータおよびコードを用いて、EDZからの移行率を求めた。ここでは、第2次取りまとめの安全評価において重要核種として挙げられた、Np-237およびCs-135を対象とし、結果を整理・考察した。なお、結果の考察については、第2次取りまとめレファレンスケースで用いたミキシングモデルを比較の基準として論ずることとする。

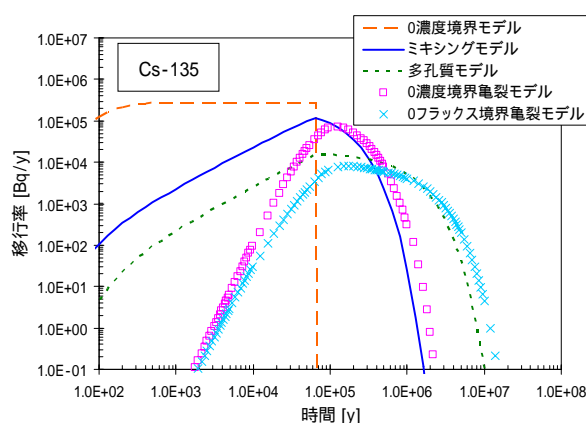
(1) Np-237 : Fig.5(a)

ミキシングモデルにおけるNp-237は、緩衝材内側で濃度が溶解度により抑制され、かつ緩衝材中の移行が定常状態となる。また、緩衝材内側の沈殿がなくなる800万年以降、Np-237の移行率は急激に減少している。以下、このミキシングモデルの結果と他のモデルの結果の比較をまとめる。

4) 1次元モデルおよび2次元モデルにおける緩衝材幾何形状の違いが、EDZからの移行率に与える影響を把握するために、両モデルの緩衝材外側にミキシングモデルのEDZを考慮した解析を実施した。この結果、安全評価上重要なNp-237のEDZからの移行率は、緩衝材の幾何形状の違いによらず、ほぼ等しいことを確認している。なお、Cs-135については、緩衝材の体積の違いに起因して、後述するC_{max}(3.3節参照)の値が変化するため、移行率の最大値に若干の違いが見られるが、その差はわずかである。



(a) Np-237



(b) Cs-135

Fig.5 Release rate from the EDZ

- 0濃度境界モデルから得られた Np-237 の EDZ からの移行率の最大値（以下、「最大移行率」）は、ミキシングモデルより約 2 桁高い。これは、緩衝材外側の濃度が 0 であることに起因して、緩衝材外側での濃度勾配が大きくなることにより、濃度勾配を駆動力とする緩衝材中の Np-237 の移行が促進されるためである。
- 多孔質モデルでは、EDZ に対する分配係数が緩衝材と同じ設定値であったため、実質的には、ミキシングモデルでの緩衝材厚さを EDZ 分増やしたことと同等となる。このとき、緩衝材内側で濃度が溶解度により抑制され、かつ緩衝材中の移行が定常状態となる Np-237 の EDZ からの最大移行率は、ミキシングモデルとほぼ同じであった。なお、最大値への到達時間については、EDZ での移行遅延効果を考慮したことにより、ミキシングモデルより遅れる。
- 2つの亀裂モデルにおける EDZ からの移行率は、100 万年まで、ミキシングモデルよりも低い値を示した。これは、緩衝材外側まで達した核種の多くがマトリクスへ移行し、そこでの遅延効果が働いているためと考えられる。しかしながら、最大移行率に関しては、0濃度境界亀裂モデルがミキシングモデルより、3 倍程度高い結果となった。これは、マトリクス外側に 0濃

度境界を設定していることに起因して、マトリクスから EDZ の周辺母岩への移行が促進されている影響であると考えられる。また、0 フラックス亀裂モデルの最大移行率は、本研究で考慮したモデルの中で最も低い結果となった。

(2) Cs-135 : Fig.5(b)

ミキシングモデルにおける Cs-135 は、可溶性元素であるため、ガラス固化体と調和溶解した後、Np-237 のような緩衝材内側での沈殿を生じることなく、緩衝材へ移行する。このため、ガラス固化体が全量溶解する約 7 万年で Cs-135 の移行率は大きく減少する。以下、このミキシングモデルの結果と他のモデルの結果の比較をまとめる。

- Cs-135 の 0 濃度境界モデルの最大移行率は、ミキシングモデルと比較して、Np-237 のような顕著な増加が見られなかった。これは、EDZ 内の核種濃度が 0 になるに伴う移行率の増加が、ガラス固化体からの核種の溶出率を上限として頭打ちになっていること、さらにミキシングモデルの最大移行率がすでにこの上限値に近かったためであると考えられる。
- 多孔質モデルは、ミキシングモデルに比べて、最大移行率が 1 桁程度低減した。これは、双方のモデルにおける Cs-135 の最大移行率が、Cs-135 の初期インベントリの全量が移行領域中で均質に分布したときの間隙水中の Cs-135 の濃度 (C_{max}) に依存していることに起因する。すなわち、ミキシングモデルの場合、Cs-135 の最大移行率は、緩衝材のみを収着媒体として、Cs-135 が緩衝材と EDZ に分布したときの間隙水中の濃度と EDZ の地下水流量の積により規定される。一方、多孔質モデルの場合には、緩衝材に加え EDZ での収着も考慮するため、収着領域が増加するとともに、EDZ に対する分配係数が緩衝材より大きいこと（緩衝材への分配係数: $0.01[m^3/kg]$, EDZ への分配係数: $0.05[m^3/kg]$ ）、結果的に EDZ での Cs-135 の間隙水中の濃度がミキシングモデルに比べて減少する。このため、最大移行率が約 1 桁低下したと考えられる。
- 0 濃度境界亀裂モデルの最大移行率は、ミキシングモデルとほぼ同じであった。このことから、最大移行率については、マトリクス外側の 0 濃度境界に起因するマトリクス中での早い拡散移行や、亀裂内での移流などの移行促進効果により、マトリクスの遅延効果がほとんど発揮されていないことが考えられる。なお、最大移行率に到達する 10 万年までは、マトリクスによる遅延効果により、0 濃度境界亀裂モデルの移行率がミキシングモデルより低い。
- 0 フラックス境界亀裂モデルの最大移行率は、ミキシングモデルから 1 桁低減した。これは、
 - 緩衝材外側に達した核種の多くがマトリクス内で収着により遅延されること

- 緩衝材と亀裂の接触面が小さいことに起因して、流れの速い亀裂への核種の流入が少ないことなどの影響により、EDZ の遅延効果が顕著化するためと考えられる。

4 システム性能の総合的解析への影響評価

ここでは、EDZ のモデルのバリエーションに起因する EDZ から移行率の違い (3 章参照) が、システム性能の総合的解析結果に与える影響を定量的に把握するために、EDZ 外側に第 2 次取りまとめと同様の母岩と断層を考慮した解析を行う (4.1 節参照)。解析では、第 2 次取りまとめと同様に、廃棄体 1 本に対する解析で求められる断層からの核種移行率をシステム性能の総合的解析で考慮する廃棄体の総本数 4 万本にあわせて 4 万倍し、その核種移行率を線量に換算する (4.2 節参照)。また、結果の考察は、3 章と同様に Np-237、Cs-135 を対象とするとともに、EDZ のモデルのバリエーションがシステム性能の総合的解析結果へ与える影響についても検討するために、全評価対象核種の線量の総和 (以下、「総線量」) も評価する。なお、0 濃度境界モデルおよび 0 濃度境界亀裂モデルでは、EDZ 内およびマトリクス外側をそれぞれ 0 濃度と仮定しているため、現象論的には非常に大きな地下水流れを想定することに相当するが、ここでは、EDZ と天然バリアとの水理学的な整合性を考慮せず、すべてのモデルで、第 2 次取りまとめのレファレンスケースと同じ天然バリア中の地下水流れを用いることとする。

4.1 天然バリアモデル

母岩中の核種移行モデルについては、第 2 次取りまとめと同様に、亀裂の透水性の不均質性を考慮するため、透水性の異なる複数の 1 次元平行平板モデルを重ね合わせたモデルを適用する (Fig.6 参照)。1 次元平行平板モデルの重ね合わせにおいては、亀裂の透水量係数分布 (対数平均値: -9.99, 対数標準偏差: 1.07) を 48 分割し、分割した区間ごとに 1 次元平行平板モデルを適用する。母岩からの

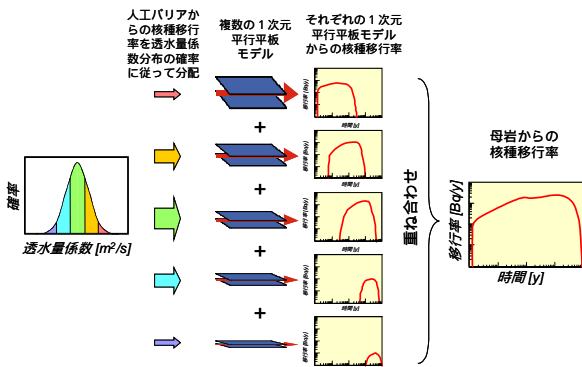


Fig.6 Conceptual illustration of the one-dimensional multi-pathway model

核種移行率は、分割した各透水量係数で求められる核種移行率に各区間の確率を乗じて足し合わせるにより算出する。一方、断層については、亀裂の透水量係数分布の最大値を用いて 1 次元平行平板モデルでの評価を行う。以上の核種移行解析を第 2 次取りまとめで用いた解析コード「MATRICS」[2]を用いて評価する。

4.2 生物圏モデル

第 2 次取りまとめにおける生物圏評価では、天然バリア (断層) からの、核種移行率を線量に換算するための係数 (以下、「線量への換算係数」) を算出した[2]。本研究では、第 2 次取りまとめのレファレンスケースで用いた線量への換算係数をそのまま用いることとする。

4.3 解析結果

ここでは、まず、各モデルにおける断層からの線量を求め、安全評価上重要な Np-237 と Cs-135 を対象として結果を比較・検討した。さらに、総線量についても評価し、EDZ のモデル化の違いがシステム性能の総合的解析結果に与える影響を考察した。

(1) Np-237 : Fig.7(a)

- EDZ からの最大移行率については、0 濃度境界モデルがミキシングモデルより 2 桁以上高いものの、断層からの線量の最大値 (以下、「最大線量」) は約 1.5 桁の増加に収まっている。これは、0 濃度境界モデルにおける EDZ から母岩への移行継続時間が相対的に短いこと、さらに Np の岩盤中の遅延効果が高いことなどに起因して分散の効果が顕在化しているためと考えられる。
- ミキシングモデル、多孔質モデルおよび 2 つの亀裂モデルについては、EDZ からの移行が長期間継続するため、断層からの最大線量の大小関係やその相対比と、EDZ からの最大移行率の関係とに、大きな違いは見られなかった。

(2) Cs-135 : Fig.7(b)

- Cs-135 の断層からの最大線量の変動は、すべてのモデルで約 0.5 桁の幅に収まった。これは、EDZ からの最大移行率のばらつきが小さいこと、さらに、Np-237 と同様に分散の効果が関係していると考えられる。

(3) 総線量 : Fig.8

- 0 濃度境界モデルの総線量の最大値 (以下、「最大総線量」) は、ミキシングモデルより約 1 桁大きく、その値は Th-229 の線量の影響が最も大きい。なお、Th-229 は Np-237 と放射平衡になるため、Np-237 の最大線量の増加 (Fig.7(a)) が比例的に寄与していると考えられる。

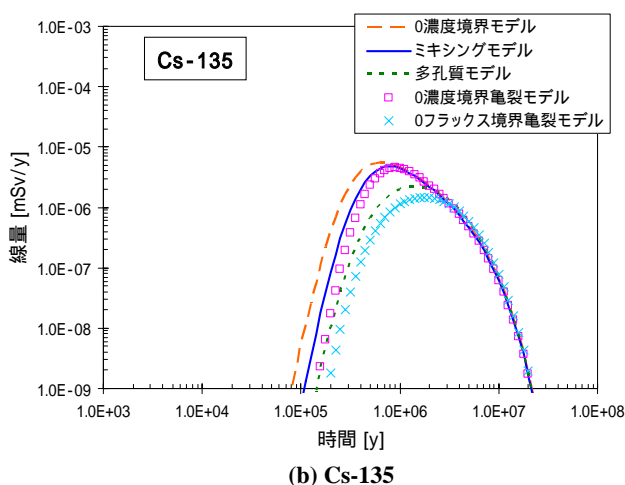
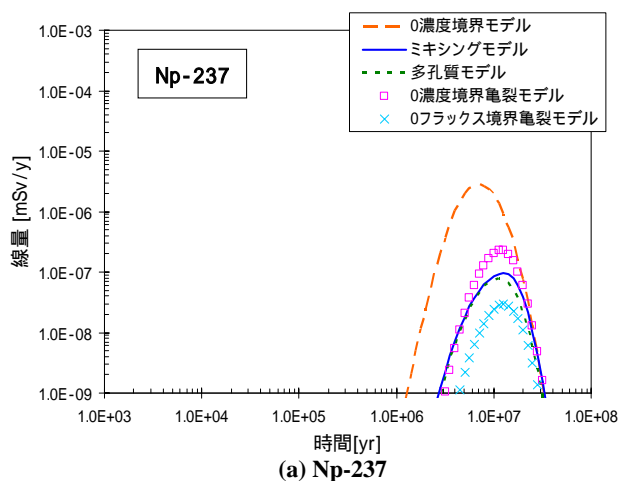


Fig.7 Dose from the fault

- ・ 0濃度境界モデル以外のモデルにおける最大総線量は、Cs-135が支配核種であり、その変動幅は、Cs-135の最大線量の変動幅 (Fig.7(b)) とほぼ等しい。
- ・ ミキシングモデルと2つの亀裂モデルのEDZからの移行率の大小関係は、Np-237とCs-135で異なる結果となったが、最大総線量はいずれのモデルもCs-135に支配されるため、結果は「ミキシングモデル>0濃度境界亀裂モデル>0フラックス境界亀裂モデル」となった。

以上のことから、本研究で対象としたEDZのモデルのバリエーションにより、最大総線量がオーダーで変化すること、また、最大総線量の変動には、各核種の最大線量の変化に加え、支配核種の違いも関係していることがわかった。

5 まとめと考察

第2次取りまとめにおいて、安全評価上重要な因子の1つとしてEDZ内での地下水流れがあげられたことに基づき、本研究ではEDZ内の核種移行に着目し、EDZの概念モデルや数学モデルのバリエーションについて整理した。さらに、このモデル化の違いが評価結果に与える影響を、

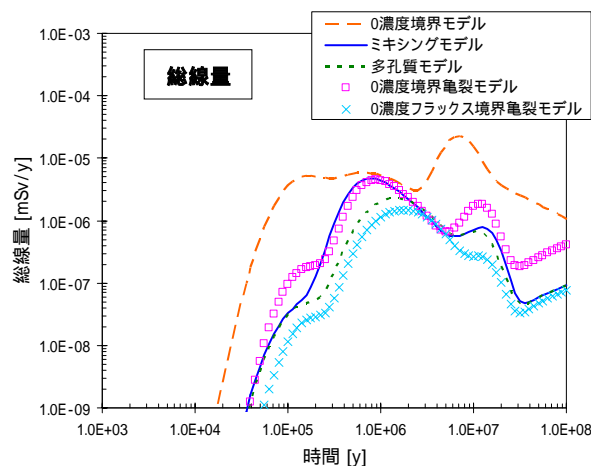


Fig.8 Total dose from the fault

第2次取りまとめと同様の母岩と断層を想定した解析体系を用いて、定量的に検討した。この結果、各モデルについて、以下の特徴を整理できた。

- ・ 0濃度境界モデルは、EDZからの最大移行率、断層からの最大線量とともに、最も高い結果を導くモデルであった。
- ・ 多孔質モデルは、EDZからの最大移行率、断層からの最大線量とともに、「ミキシングモデル>多孔質モデル」という関係が成り立っていた。このときの差異の程度は、Np-237等の緩衝材内側で溶解度により規定される核種よりも、Cs-135のような可溶性核種の方が大きい。
- ・ 2つの亀裂モデルとミキシングモデルとの比較では、核種ごとにその大小関係が異なる結果となった。Np-237については、EDZからの最大移行率、断層からの最大線量とともに、「0濃度境界亀裂モデル>ミキシングモデル>0フラックス境界亀裂モデル」の関係が成り立っていた。これは、0濃度境界亀裂モデルにおけるマトリクス外側からの移行が顕著に増加した結果であった。また、Cs-135については、EDZからの最大移行率、断層からの最大線量とともに、「ミキシングモデル>0濃度境界亀裂モデル>0フラックス境界亀裂モデル」の関係が成り立っていた。これは、EDZからの最大移行率が、 C_{max} により規定されるため、0濃度境界亀裂モデルにおけるマトリクス外側からの移行が顕著化しなかったためであると考えられる。以上のことから、2つの亀裂モデルは、用いる境界条件により評価結果に幅を持つ結果となった。

以上の結果および考察から、EDZのモデル化においては、さまざまなモデルのバリエーションを考慮し、それが結果に与える影響の程度を把握しておくことが必要であると考えられる。このとき、モデルのバリエーションにより安全評価上重要な最大総線量がオーダーで変化すること、さらには、支配核種についてもモデルごとに変化する可能性

があることに注意する必要がある。

とくに、具体的な地質環境に対する評価においては、調査の進展に伴い充実すると考えられる EDZ の岩盤特性、水理特性および物質移行特性についての知見レベルなどに応じて、より現実的な EDZ モデルの構築や評価も可能になると考えられる。この場合には、不確実性の程度などを勘案しつつ、以下の項目等の検討を通じて、どのようなモデルの構築、あるいは利用を目指すのかを明確にしておくことが重要であると考えられる。

・ どのような目的で EDZ のモデルを用いるのか？

たとえば、「規制や事業での安全評価に直接使用するのか?」、あるいは、「簡単なモデルを用いた評価の保守性を確認するために、より詳しいモデルを使用するのか?」などが、目的として考えられる。

・ 現状の知見レベルはどの程度か？

既存の岩盤特性、水理特性、物質移行特性などに關する知見を整理したうえで、「EDZ は多孔質媒体で近似できるか?」、「亀裂媒体として取り扱うべきか?」あるいは「ミキシングモデルのように水だけで満たされた領域と仮定するほうが合理的か?」などを検討していく。

・ どのようなプロセスをモデル化するか？

現状の知見レベルの整理に基づき、「EDZ 内での核種移行遅延を考慮するか?」、「緩衝材からマトリクスへの移行およびマトリクス内での拡散や収着を考慮するか?」、「亀裂による移行を考慮するか?」などを検討していく。

ここで、本研究で考慮した各モデルの特徴を定性的に対比させることを目的として、「簡単さ(Simple) / 複雑さ(Complex)」と「現実性(Realistic) / 保守性(Conservative)」を切り口とし、各モデルの関係を Fig.9 に整理した。なお、簡単さ / 複雑さについては、モデルの次元数や EDZ における核種移行プロセスの取り扱いの詳細度などを勘案して、また、現実性 / 保守性については、EDZ が有すると考えられる安全機能の取り扱いや安全評価結果へのインパクトなどを勘案して、おおよその相対的な配置を当てはめた。たとえば、第 2 次取りまとめのレファレンスケースで用いたミキシングモデルは、緩衝材外側に到達した核種が EDZ を通過する地下水と瞬時に混合する比較的簡単な 1 次元モデルであり、かつ EDZ 内での核種の移行遅延機能を無視した保守側のモデルとして位置づけることができる。なお、本研究では考慮しなかったが、EDZ 内に存在する亀裂の不均質性を考慮したモデルは、0 濃度境界モデルとは対極となる最も複雑で現実的な位置に分類されると考えられる。

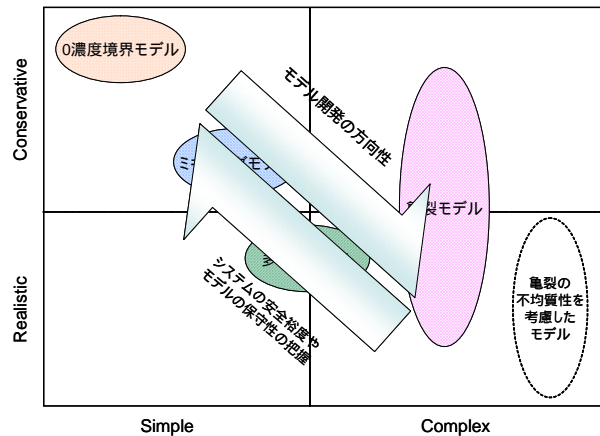


Fig.9 Mapping of the relationship between different EDZ models ranging from simple to complex and from realistic to conservative (Note: The heterogeneous fracture model was not considered in this paper)

EDZ のモデル開発を行ううえでは、既存のモデルに対して、より詳細かつ現実的なモデルの開発や評価を進めることにより、システムの安全裕度を理解すること、また、開発したモデルを用いて既存のモデルの保守性を確認していくことが重要であり、両者のバランスをとりつつ進めていくことが肝要である (Fig.9)。たとえばミキシングモデルを例として考える場合には、より詳細かつ現実的なモデル(たとえば亀裂モデル)の開発および評価が重要になるとともに、双方の評価結果を比較することにより、システムの安全裕度をよりよく理解し、さらにミキシングモデルの保守性の程度を確認していくことが必要となる。このような、システムの安全裕度の理解/モデルの保守性の確認を繰り返し行うことで、用途に応じた 1 つあるいは複数の EDZ モデルを適切に選択することが可能になると考えられる。また、以上のような検討を通じて EDZ のモデルのバリエーションを整理し、モデルを適切に選択するための技術基盤を整備していくことは、安全評価の信頼性を向上させていく意味でも重要であると考えられる。

参考文献

- [1] 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発等の今後の進め方について(1997).
- [2] 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- JNC TN1400 99-020 (1999).
- [3] 動力炉・核燃料開発事業団：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 - . PNC TN1410 92-081(1993).
- [4] Nagra : Kristallin-I Safety Assessment Report. NTB 93-22(1994).
- [5] SKI : SKI SITE94 Deep Repository Performance Assessment Project. SKI Report 96:36(1996).

- [6] 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾繁 : 2次元核種移行解析モデルによる掘削影響領域の遅延効果に関する検討 . 日本原子力学会 2003 年春の年会 , アルカス SASEBO , 3月27日~29日 , O27(2003) .
- [7] Golder Associates : GoldSim Contaminant Transport Module , User's Guide , Golder Associates Inc. (2002).