

## 断層に至るまでの核種移行に着目した処分場の閉鎖性能についての検討

杉田裕\* 川上進\* 油井三和\* 牧野仁史\* 澤田淳\* 三原守弘\* 栗原雄二\*

高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分場の閉鎖技術に関しては、個々の技術のみでなく、処分技術と安全評価の両者の観点から、処分場としての閉鎖性能の検討が必要である。そこで、第2次取りまとめで示した閉鎖概念に基づき、閉鎖後の処分場における閉鎖性能に関する評価の一例として、処分場から大規模な破砕帯を伴う断層に至るまでの核種移行に関する閉鎖性能について検討した。

本検討では、閉鎖要素（埋め戻し材、止水プラグ）の止水性能、掘削影響領域や支保工の水理特性等の閉鎖性能に影響を与える因子について現在の知見を整理し、母岩以外の移行経路を経由する支配的な核種移行の可能性として「連絡坑道から小規模の破砕帯を伴う断層を経由する支配的な核種移行の可能性」に着目して fault ツリーを用いた分析を行い、閉鎖性能を論じるためのシナリオの検討を行った。

検討の結果、閉鎖要素においてその機能が発揮されること、支配的な移行経路となるためにはいくつもの条件を同時に満たすことが必要であることから、「連絡坑道から小規模の破砕帯を伴う断層を経由する支配的な核種移行が存在する」というシナリオの可能性は低く、第2次取りまとめの「母岩を経由して大規模な破砕帯を伴う断層に至る」とするシナリオが妥当であることを示すことができた。

**Keywords：**高レベル放射性廃棄物、地層処分、閉鎖性能、埋め戻し、止水プラグ、fault ツリー

Regarding closure technology of underground facilities on geological disposal of the high-level radioactive waste, closure performance of a disposal facility should be assessed from view points of both engineering technology and performance assessment, not only depending on individual technology. Thus, based on closure concept described in H12 report, closure performance of the backfilled repository focused on radionuclides migration from a repository to a major fracture zone was discussed.

We aimed at the case of via a connecting tunnel and a minor fracture zone as a potential of migration path other than host rock. Current knowledge on performance of the closure elements as backfill and water stopping plug, hydraulic properties of excavation damaged zone and concrete lining was summarized. Then, a fault tree was analyzed and a closure scenario was discussed for its closure performance.

The assessment was concluded that the scenario of existence of the critical path via a connecting tunnel and a minor fracture zone has low potential because the scenario will be prevented by function of closure elements and by low potentiality to meet all necessary conditions simultaneously, and that the scenario of the critical path via host rock in H12 report is relevant.

**Keywords：**high-level radioactive waste, geological disposal, closure performance, backfill, water stopping plug, fault tree

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が第2次取りまとめにおいてその技術的信頼性[1,2]を示し、その後、高レベル放射性廃棄物の処分の実施主体「原子力発電環境整備機構」が設立され、日本における処分事業も新たなフェーズに入ってきた。

第2次取りまとめで示されているように、「処分場の閉鎖」では、坑道そのものの「埋め戻し（埋め戻し材）」や、破砕帯と坑道の交差部での移行経路の「分断（止水（粘土）プラグ）」等が行われる（Fig.1 参照）。人工バリアを構成するオーバーバックや緩衝材に関しては設計要件が設定され、仮想地質環境における人工バリアの設計、長期健全性の評価、核種移行評価等が行われているが、閉鎖要素としての埋め戻し材や止水（粘土）プラグに関しては、人工バリアに有意な影響を与えないように適切に処置する技術として概念検討が行われたにとどまっている[1,2]。そのため、安全評価においても、処分技術での検討を受けて、処分場が適切に閉鎖されるものとして核種移行等の評価を行っている[2]。

現在は、海外での地下研究施設を中心に閉鎖要素（埋め戻し材、プラグ等）に関する実規模での原位置試験が行われ、その性能が徐々に明らかになってきている[3-6]。サイクル機構もカナダのカナダ原子力公社（AECL）における国際共同研究「トンネルシーリング性能試験」[3] やスウェーデンのスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）における国際プロジェクト「プロトタイプ処分場プロジェクト」[4]に参画し、閉鎖性能に関するデータの取得およびこれらの性能の評価手法の確立を目指した研究を行っている。一方、ここ数年の間に、閉鎖に関する複数の国際会議[7,8]が開催され、その中で工学技術と安全評価の両

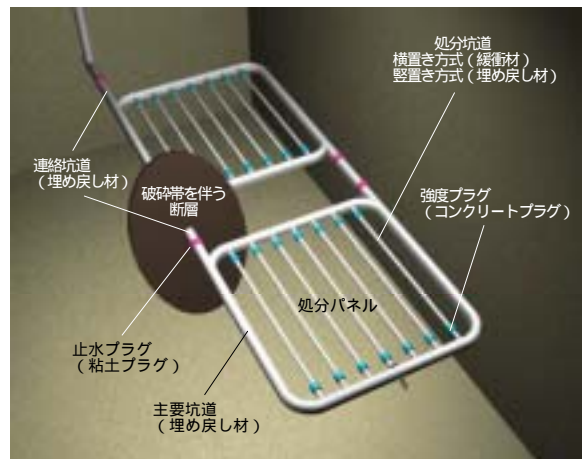


Fig. 1 Closure concept of a repository in the H12 report (after [1])

A Study on closure performance of the repository focused on radionuclide path to a major fracture zone by Yutaka Sugita (sugita@tokai.jnc.go.jp), Susumu Kawakami, Mikazu Yui, Hitoshi Makino, Atsushi Sawada, Morihiro Mihara, Yuji Kurihara

\* 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

者の観点から処分場としての閉鎖性能を検討すべきであるとの結論が導き出されている[7]。

このような背景のもと、著者らは、これまでに行われてきた処分技術の観点からの閉鎖性能の考え方に関する検討[9]を踏まえ、さらに安全評価の観点を加えることにより、処分場の閉鎖性能と核種移行経路およびそこの核種移行との関係について検討を行った[10]。ここでは、Fig.1の閉鎖概念に基づき、閉鎖要素（埋め戻し材、止水プラグ）の止水性能、掘削影響領域や支保工の水理特性等をまとめるとともに、第2次取りまとめで想定した母岩を經由して処分場から大規模な破砕帯を伴う断層に至る核種の支配的な移行経路に対して、それ以外の可能性のある移行経路と核種移行に関する検討を行い、今後の課題を整理した。

## 2 検討の進め方

検討の進め方として、はじめに本検討の対象とする閉鎖性能との関係で放射性核種の支配的な移行経路となりえる母岩以外の経路の抽出を行い、そのための条件を fault ツリーとして整理した。次に、その条件と関係する閉鎖性能に影響を与える因子について現状理解されている知見を整理した。この知見を fault ツリーのダイアグラムに当てはめ、母岩以外の経路での核種の支配的な移行経路の存在の可能性についてのシナリオを評価した。

## 3 移行経路の抽出

人工バリアから地表への放射性核種の移行経路は、人工バリアが所期の設計要件で設置され、処分場も人工バリアに有意な影響を与えないように適切に閉鎖されているとすれば、人工バリアから母岩を通り地表に至るものとなる。このとき、処分場の設置される岩盤には大規模な破砕帯を伴う断層が存在することも考えられ、第2次取りまとめの地下水シナリオ[2]では、Fig.2のような大規模な破砕帯を伴う断層の存在を仮定し、処分場と断層間の距離を100mとした。このシナリオでは、放射性核種は処分場から母岩を通り大規模な破砕帯を伴う断層に至り、その断層に到達した後は断層沿いに移行し、帯水層を經由して地表に至る、という核種移行経路を考える。

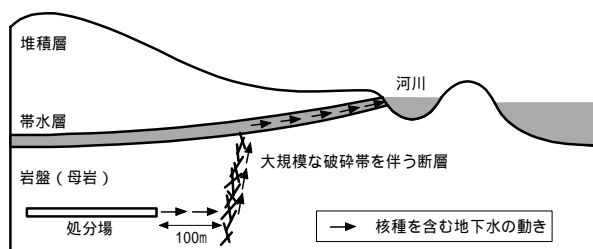


Fig. 2 Radionuclide transport pathway considered in the Reference Case in the H12 report

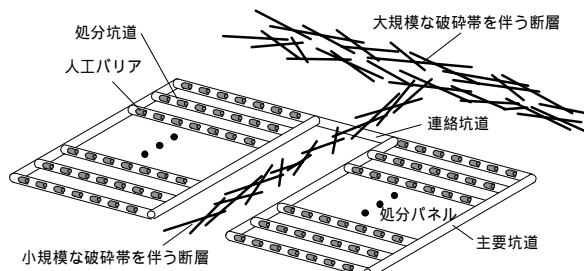


Fig. 3 Schematic representation of a repository layout with faults

処分場と断層の規模の関係については、NAGRA における断層規模の分類例[11]として「処分場として避けるもの」、「処分パネルとして避けるもの」という考え方がある。Fig.3はこのような断層の分類例に倣い、破砕帯を伴う断層を考慮したレイアウトの例であり、「大規模な破砕帯を伴う断層」を処分場として避け、「小規模な破砕帯を伴う断層」を処分パネルとして避けている。図には示していないが、さらに規模の小さい断層の中には、処分パネル内の主要坑道や処分坑道と交差するものが存在することも考えられる。なお、以降では「大規模な破砕帯を伴う断層」を「断層 A」、「小規模な破砕帯を伴う断層」を「断層 B」と呼ぶ。

Fig.3では、「断層 B」が連絡坑道と交差しており、この断層はさらに「断層 A」に接続している。このような場合には、Fig.3の処分場から断層 Bに向かって、岩盤（母岩）以外の支配的な移行経路が存在する可能性も考えられる。そして、この可能性が閉鎖性能と関係を持つと考えられる。

そこで、ここでは処分パネルから「断層 B」を經由し、「断層 A」に向かう核種の支配的な移行経路の存在の可能性について検討することとする。

処分パネル - 断層 A 間での核種移行が生ずる移行経路の候補としては、主として Fig.4 の、の3つが考えられる。第2次取りまとめの基本ケースは、母岩を通り断層 A に至る図中の移行経路に相当する経路での核種移行を考えている。また、閉鎖性能との関係で考えると、連絡坑道を通り断層 B を經由して断層 A に至る図中の移

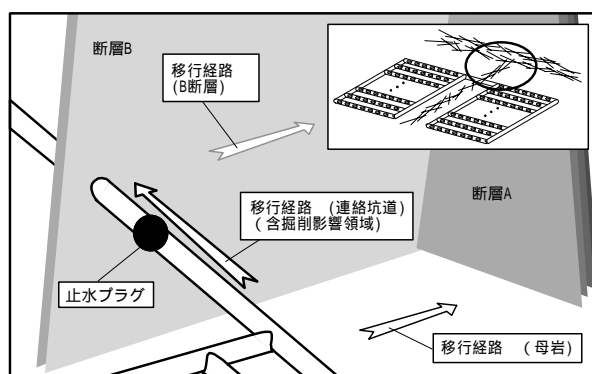


Fig. 4 Radionuclide transport pathway between a disposal panel and faults

行経路の移行が候補として加わる。このうち、移行経路は連絡坑道の止水性能に依存するところであり、閉鎖要素としては埋め戻し材および止水プラグが関係する。また、これら閉鎖要素の止水性能に加え、移行経路に関係する坑道周囲に発生する掘削影響領域あるいは支保工等の水理特性が関係する。

さらに、処分場の坑道は連絡坑道以外にも多数地下で展開していることから、主要坑道や処分坑道が断層 B 以外の断層と交差する可能性を考えると、それも核種の支配的な移行経路の候補となる。ただし、前述したように断層（主要坑道と交差する断層を断層 C、処分坑道と交差する断層を断層 D と呼ぶ）の規模としては断層 B よりもさらに小さくなると考えられる。また、立坑はそのものが地表と地下施設を接続していることから、立坑そのものも候補となる。同様に、地表から地下深部に向けて掘削されたボーリング孔も候補となる。

これらを分類すると、処分場から断層 A までの核種の支配的な移行経路の候補として、

- 0) 母岩を経由するケース（第 2 次取りまとめで検討）
  - 1) 連絡坑道から断層 B を経由するケース（断層 B 断層 A）
  - 2) 主要坑道から断層 C を経由するケース（断層 C 断層 B 断層 A）
  - 3) 処分坑道から断層 D を経由するケース（断層 D 断層 C 断層 B 断層 A）
- 直接地表に至る核種の支配的な移行経路の候補として、
- 4) 立坑を経由するケース
  - 5) ボーリング孔を経由するケース

と分類できる。

本研究では、断層 A までの核種移行が生ずる移行経路の候補を代表して、「連絡坑道から断層 B を経由するケース」を検討することとした。また、直接地表に至る核種移行が生ずる移行経路の候補である「立坑を経由するケース」、「ボーリング孔を経由するケース」については、今回の検討からは除外した。これは、立坑やボーリング孔へ至るまでの移行経路およびその経路での核種移行の存在に関して、1)～5) の検討が必要であるが、まずは 1) から取り掛かることとしたためである。

以上のことから、本検討では断層 A までの移行、つまり処分パネル - 断層 A 間の移行に関して、「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行 (Fig. 4 の移行経路) が存在する可能性」について検討することとした。

#### 4 閉鎖性能に関する核種移行の存在に関する fault ツリー

3 で選定した経路について、移行の存在に関係すると考えられる影響因子を設定し、fault ツリーを作成する。fault ツリーは、原子力発電所の事故時のリスク評価などによく

用いられる手法であり、放射性廃棄物処分のシナリオ解析においてもいくつかの適用例がある[12]。

#### 4.1 影響因子の設定および fault ツリーの作成

「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行が存在する可能性」において、移行の存在に関係すると考えられる影響因子は、

- 1) 断層 B と連絡坑道が交差する可能性およびその断層 B における連続的な移行が存在する可能性
  - 2) 坑道周辺岩盤（掘削影響領域を含む）における連続的な移行が存在する可能性
  - 3) コンクリート支保工の設置された坑道における支保工の劣質による連続的な移行が存在する可能性
  - 4) 坑道の埋め戻し材が止水性能を喪失する可能性（支保工（高 pH の場合）の影響を含む）
  - 5) 止水プラグが止水性能を喪失する可能性
- の 5 つである。

Fig.5 は、上記因子について「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行が存在する」ことを命題にして、それが成立するための条件を整理した fault ツリーである。fault ツリーを構成する各箱をダイアグラムと呼ぶこととする。

fault ツリーでは、成立するための条件を右方向に展開して作成した。例えば、「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行」が成立するための条件として、「連絡坑道から断層 B に至る移行」と「断層 A までの支配的な移行経路となる断層 B を通過する移行」のダイアグラムが並列で並ぶ。この場合、「連絡坑道から断層 B まで移行」し、かつ「断層 B 内を移行」した場合に「断層 A に至る移行」が存在するため、「AND 条件（破線）」でつなく。一方、並列に複数のダイアグラムがあっても、どれかひとつのダイアグラムが成立するだけで上位のダイアグラムが成立する場合は「OR 条件（実線）」としてつなく。このようなルールで右方向に条件を展開し、fault ツリーを作成した。

#### 5 影響因子に関する知見の整理

ここでは、6.1 での fault ツリーの分析に反映するため、影響因子について現在の知見を整理した。次に、その影響因子を fault ツリーの条件を満たすとすべきものか、あるいは条件を満たさないとして除外することが妥当かを判断した。

##### 5.1 断層と連絡坑道の交差

断層と連絡坑道との交差の可能性は、考慮する地質環境条件と処分場の規模の関係による。地表まで到達するような断層の存在に関しては、Fig.6 に示すように亀裂（ここでは、断層と同義とする）のトレース長と累積亀裂個数と

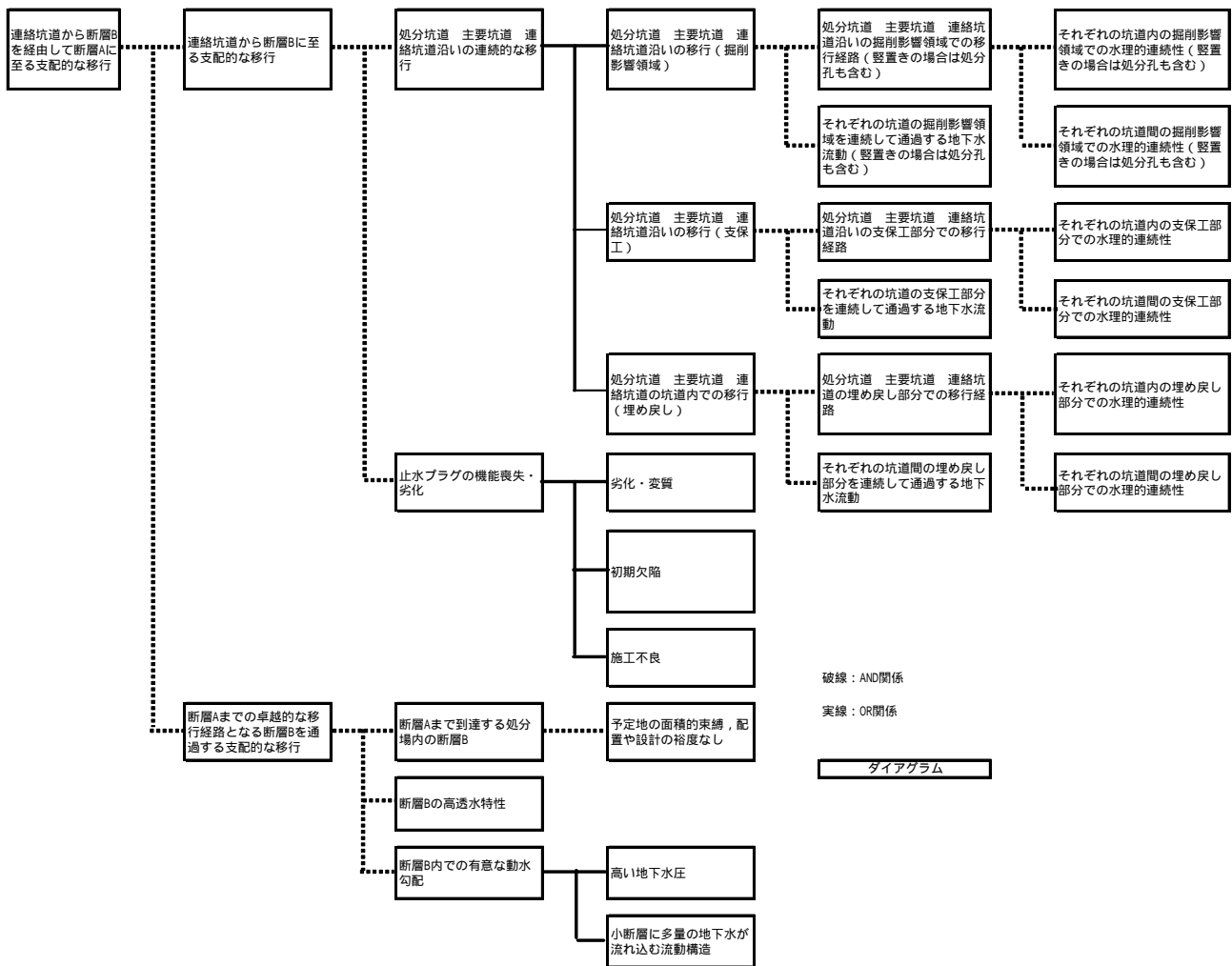


Fig. 5 Fault tree on potential radionuclide transport between a disposal panel and faults

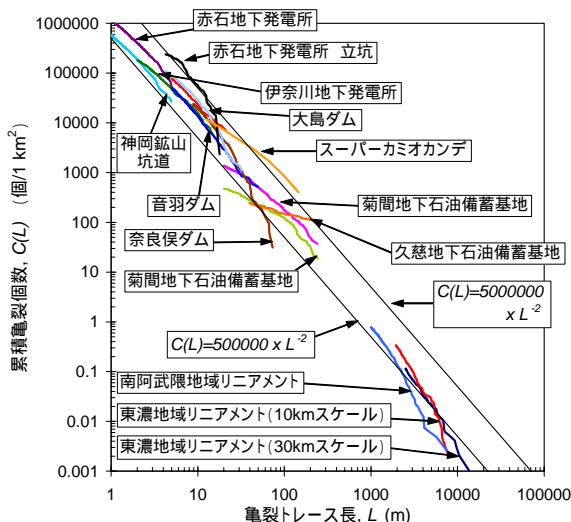


Fig. 6 Fractal distribution of fracture trace length normalized by 1km x 1km scale (after [13, 14])

の関係がまとめられている[13,14]。これは、大野・小島[15]に基づいた研究事例をベースに取りまとめたもので、亀裂の大きさと密度はスケールに対して連続して分布し、スケールに依存していることがわかる。

棚井らは、断層の分類[15-18]に基づき仮想地質モデルを

設定し、処分パネルの配置を検討した[19]。この検討では、断層はその延長線上にも連続するものと仮定し、縦置き方式で 1.2km<sup>2</sup>、横置き方式で 0.47km<sup>2</sup> 以上の断層のない区画が存在するという条件で、断層のない区画に処分パネルを設置できるとしているものの、処分パネル間の連絡坑道は断層と交差するとしている。また、処分パネル建設時に予測できなかった断層と遭遇した場合、当該区域における処分パネルの設置を放棄して遭遇した坑道を連絡坑道として扱い、減少した処分パネルの面積を確保するため、他の区画でパネルを拡張することで対処が可能としている[19]。

一方、断層の水利特性に関しては、第2次取りまとめで国内での研究事例について調査が行われている[20]。これによると、結晶質岩と堆積岩で多少の差はあるものの、透水係数は 10<sup>-9</sup> ~ 10<sup>-4</sup> m/s に分布している[21]。また、断層内でも粘土部と角礫部では、粘土部で 10<sup>-8</sup> ~ 10<sup>-5</sup> m/s、角礫部で 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>-3</sup> m/s という結果もある[22]。これらから、第2次取りまとめでは破碎帯の透水係数を 10<sup>-9</sup> ~ 10<sup>-3</sup> m/s としている[20]。また、巨視的な岩盤の透水係数は、岩種にかかわらず 10<sup>-10</sup> ~ 10<sup>-8</sup> m/s を中心に分布しているとしている[23]。

以上のことから、処分パネル間には連絡坑道と交差する

断層が存在し、その透水係数は岩盤部より大きく、その水理特性は断層内において連続するものとして取り扱う。

## 5.2 坑道周辺岩盤(含掘削影響領域)

岩盤に坑道を掘削すると、周辺岩盤には掘削影響領域が発生する。ここでは、母岩と比して力学的水理学的特性が変化することとなり、移行の評価のためにはその水理特性の把握が必要である。

第2次取りまとめでは、発破掘削によるものと機械掘削によるものという工法の違いによる掘削影響領域の発生およびそれによる透水係数の変化について取りまとめている[2,20]。それによると、坑道径5m程度の坑道において、発破掘削の場合、坑道壁面より1m程度まで掘削の影響を受けており、そこでは2桁程度まで透水性が増加すると評価されている。一方、機械掘削の場合は、発破掘削に比して影響は小さく、坑道壁面より0.5m程度、透水性の増加は1桁程度と評価されている。しかしながら、これらは局部的なある点での調査結果に基づく評価であり、掘削前後で透水性は低下するという結果も報告されている。閉鎖性能の評価に資する坑道沿いの掘削影響領域の連続性に関する研究例はない。

以上のことから、掘削影響領域の水理特性に関して「連続性がない」といえない現状では、坑道沿いの掘削影響領域は水理的連続性を有し、さらに処分坑道から主要坑道、連絡坑道へとそれは連続し、さらに、そこには地下水の支配的な移行経路が存在するとの想定も可能性として残すこととして取り扱う。

## 5.3 支保工の変質とその影響

岩盤が堆積岩等の軟岩の場合、坑道壁面はコンクリート支保工が施工されるものと考えられる。また、結晶質岩においても岩片の剥離による落下防止等の観点から吹付け工等の施工がなされるものと考えられる。支保工の材料としてはコンクリートが有力であるが、超長期においては変質することが考えられる。このため、コンクリートの変質による透水性の変化についても評価が必要であると考え

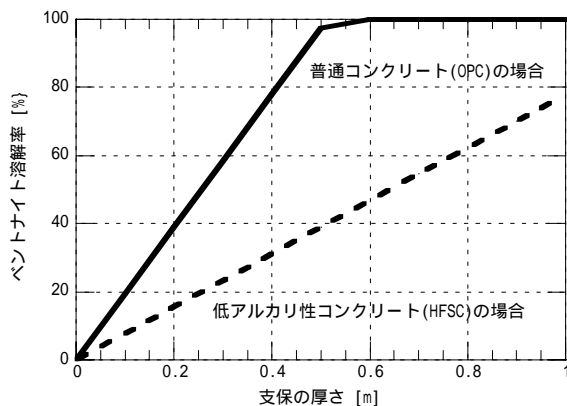


Fig. 7 Correlation between the thickness of a concrete lining and the ratio of dissolved bentonite [10]

られる。本検討では、支保工は第2次取りまとめで示されたように連絡坑道の壁面に50cm厚さでコンクリートが施工されるものとする[1]。

コンクリートの透水係数は、水セメント比ならびに骨材の最大寸法に依存し、健全なコンクリートの透水係数は $10^{-12}$  m/s オーダーである[24]。しかしながら、これまでの知見では、コンクリートの長期的な透水係数を評価することは非常に困難であり、変質後の支保の透水係数を砂の透水係数と同等の値( $10^{-5}$  m/s オーダー)と仮定する保守的な評価しかできない。よって、坑道の変質した支保工部分には、透水層が連続して存在するとの考えや地下水流動が存在するとの考えも否定できない。

また、コンクリートに関しては、支保工そのものの変質のみならず、ベントナイトや岩盤への化学的影響に関しても考慮しておく必要がある。この理由の一つとして高アルカリ環境下に長期間さらされると、周辺岩盤やベントナイトは変質する可能性があり、評価における不確実性が増すことがあげられる。コンクリート材料としては普通コンクリートと低アルカリ性コンクリート[25,26]が検討されており、それぞれについてベントナイトの溶解に着目した検討を行った。ケイ砂の存在を無視した過度に保守的な評価例ではあるが、コンクリート中のすべての水酸化物が溶出し、そのすべてがベントナイト(乾燥密度 $1,800$  kg/m<sup>3</sup>, ケイ砂混合率85wt%のクニゲルV1)のモンモリロナイトと玉髓の溶解に消費されると仮定すると、コンクリートとベントナイトのマスバランスによるベントナイト溶解はFig.7のように試算できる[10]。図から、普通コンクリートで支保工の厚さが50cmの場合、100%近くのベントナイトが溶解することとなる。このとき、低アルカリ性コンクリートを用いると、溶解率は40%程度に抑制することができる。

以上のことから、支保工に関しては、変質により透水層が連続して存在し、この透水層は地下水の支配的な移行経路になるという想定は除外できない。そのため、この想定を可能性として残すこととして取り扱う。

また、支保工の化学的影響によりベントナイトを用いる埋め戻し材や止水プラグの性能(ここでは止水性)が低下すると考えられるが、この影響は定量的に評価されるものと仮定し、その評価結果を考慮した適切なセメント材料の選定やベントナイト量の混合率とすることで低透水性は確保されるものとして取り扱う。

## 5.4 埋め戻し材の止水性能

埋め戻し材は、人工バリア定置後に空間として残っている坑道を埋め戻す時に用いる材料である。竖置き方式の場合は緩衝材との接触、坑道に支保がある場合は支保との接触、支保がない場合は岩盤との接触があり、横置き方式では緩衝材との接触がない以外は竖置き方式の場合と同じ設置条件であり、緩衝材や支保材であるコンクリートおよ

び岩盤との化学的・力学的相互作用があると考えられる。

第2次取りまとめでは、Pusch が示した埋め戻し材の要件[27]等を参考にその機能を検討した[1]。これらは、「坑道そのものが「卓越した水みち」とならないように低透水性の材料であること」、「坑道の変形をある程度抑制する剛性を持った材料であること」、「新たな空隙の発生を充てんする膨潤性を備えていること」である。坑道そのものが卓越した水みちとならないということは、「連続した水みち」にもならないということである。このような機能を備えたものとして、第2次取りまとめではベントナイトとケイ砂の混合体を埋め戻し材とした。

実際の地下深部の坑道を対象とした水平坑道の埋め戻し材の性能の検証として、スウェーデン SKB において Backfill and Plug 試験[6]およびプロトタイプ処分場プロジェクト[4]が行われている。

Backfill and Plug 試験は水平坑道の埋め戻しのみに着目し、プロトタイプ処分場プロジェクトは、さらに縦置き方式の処分概念における処分孔上部の処分坑道の埋め戻しの性能(とくに緩衝材との相互作用)にも着目したものである。

埋め戻しの施工方法は両試験とも Fig.8 に示す斜め締固め工法が採用されている。これは、巻きだした材料に対して振動コンパクターで締固めエネルギーを与えるものである。坑道の上部では締固めエネルギーの供給が十分でないため、締固め密度が小さくなると予想される。そこで、坑道上部にはあらかじめ高密度に圧縮整形した粘土ブロックを施工し、密度の部分的な低下を抑制するような工夫が施されている。

プロトタイプ処分場プロジェクトの場合、埋め戻し材は掘削ずり 70wt%、ベントナイト(ギリシャ産 Milos ベントナイト)30wt%の混合物で、平均乾燥密度は  $1,700\text{kg/m}^3$ (有効粘土密度で  $929\text{kg/m}^3$ )であった。

クニゲル V1[1]をベースとした埋め戻し材(ベントナイト混合率 15wt%)で同様の埋め戻しが可能とすると、乾燥密度  $1,700\text{kg/m}^3$ の場合、有効粘土密度は  $563\text{kg/m}^3$ となる。クニゲル V1 の透水性に関しては、室内試験結果の  $10^{-12}\text{m/s}$  オーダーの低透水性となるのは有効粘土密度  $500\text{kg/m}^3$ 以上である[28]。クニゲル V1 で坑道規模の埋め戻し施工の実績は無いが、プロトタイプ処分場プロジェクトの場合と同程度の埋め戻しが可能とすると、埋め戻し材は低透水性となる。

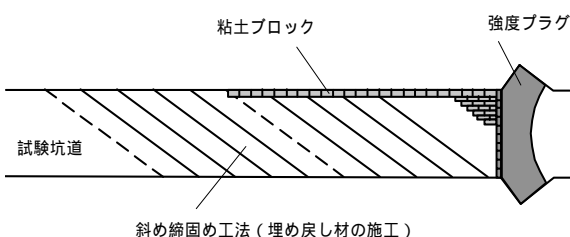


Fig.8 Schematic view of Backfill and Plug Test (after [6])

一方、人工海水を試験水とした透水係数は蒸留水の場合と比較して1桁ほど大きくなる傾向があり[29]、 $10^{-12}\text{m/s}$  オーダーの低透水性となるのは有効粘土密度  $1400\text{kg/m}^3$ 以上である。

以上のことから、地下水組成を考慮した適切なベントナイト量の混合率とすることで、埋め戻し材で埋め戻された坑道そのものは坑道全域に渡り低透水性を維持するものとして取り扱う。

また、岩盤が堆積岩等の場合は坑道壁面には支保工が施工されていると考えられ、埋め戻し材はこの支保工の化学的影響を受けるものと考えられる。これは埋め戻し材の性能(ここでは止水性)に影響すると考えられるが、その影響は定量的に評価されるものと仮定し、その評価結果を考慮した適切なベントナイト量の混合率とすることで低透水性は確保されるものとして取り扱う。

## 5.5 止水プラグの止水性能

止水プラグは、核種移行に有意な影響を与える(パネルとして避けなければならない)可能性のある連絡坑道と断層との交差点において、断層の両側に設置して連絡坑道と断層間の水理的経路を分断するものである。

このため、止水プラグそのものは低透水性の材料である必要がある。また、長期にわたりこの分断機能は求められることからプラグ材料そのものも化学的に安定な材料とする。連絡坑道の周辺岩盤には掘削影響領域が分布し、「5.2 坑道周辺岩盤」で示したように坑道沿いに連続する水理的経路が存在すると考えられることから、止水プラグは掘削影響領域を分断するように設置する必要がある。

カナダ AECL の URL で実施しているトンネルシーリング性能試験は Fig.9 に示すように実規模のプラグ(プラグは粘土プラグとコンクリートプラグ)を中心とした止水性能に関するデータを取得するプロジェクトである[3]。トンネルシーリング性能試験では、現場での各計測により長軸 4.4m、短軸 3.5m の楕円状の坑道壁面からの径方向の掘削

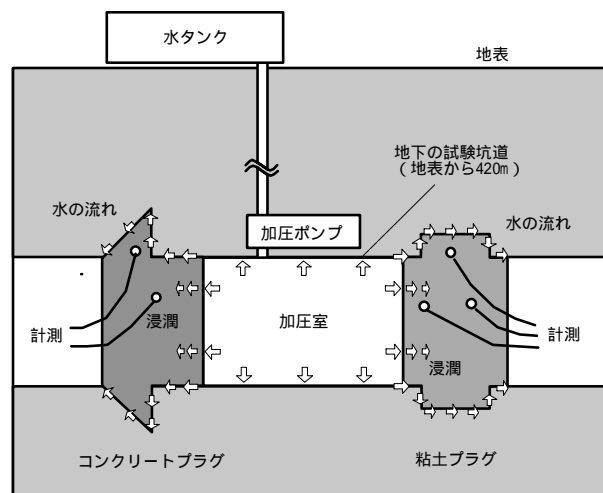


Fig.9 Schematic representation of the Tunnel Sealing Experiment

影響領域の広がりを最大 0.7m と評価し、それを分断するように 1.0m の切欠きを備えたプラグの構造とした [3,30,31]。粘土プラグは、粘土ブロックと吹付け層で構成される。材料はケイ砂混合率 30% のクニゲル V1 で、ブロックの乾燥密度は 1,900 kg/m<sup>3</sup>、吹付け層は 1,300 kg/m<sup>3</sup> である。膨潤後の平均乾燥密度は 1,800 kg/m<sup>3</sup> と推定される [32]。加圧室の水圧が 4.0MPa での湧水量 (1.0 ml/min 以下, Fig.10 参照) から周辺岩盤を含めた粘土プラグ全体の透水係数は 10<sup>-11</sup> m/s と評価されている [32]。湧水の分布から、湧水はプラグ周辺の岩盤を経由し、粘土プラグそのものは低透水性を發揮していると考えられる。

以上のことから、坑道周辺に発生する掘削影響領域を把握することができれば、それを分断する切欠きを備えた止水プラグを設置することで、坑道沿いの水理的な連続性を分断することができるものとして取り扱う。

また、岩盤が堆積岩等の場合は坑道壁面には支保工が施工されていると考えられ、止水プラグの端部は止水性能において支保工の化学的影響を受けるものと考えられるが、その影響は定量的に評価されるものと仮定し、その評価結果を考慮した適切なベントナイト量の混合率とすること

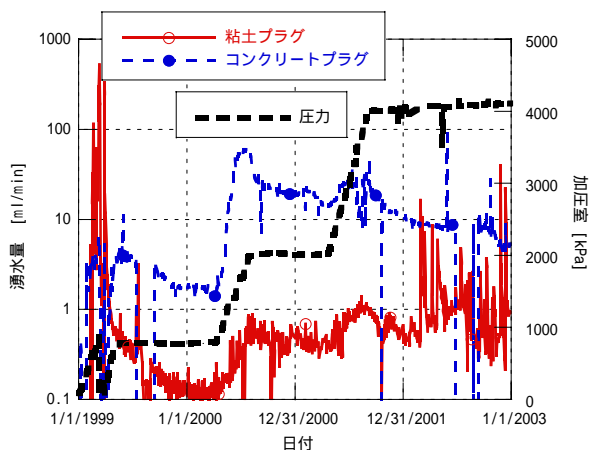


Fig. 10 Change in seepage rate through plugs with time

で低透水性は確保されるものとして取り扱う。

5.6 影響因子に関する知見の整理結果

以上の影響因子に関連する知見に基づき、fault ツリーの条件を満たす可能性があるとして検討対象とすべきものか、あるいは検討から除外することが妥当かの判断結果を Table 1 のように整理できる。判断基準は、1) データに基づき除外できない、2) データが十分でないため除外できない、3) 品質管理・施工で回避できるため除外できる、である。

6 シナリオの評価

ここでは、「5.影響因子に関する知見の整理」を踏まえて「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行が存在する」ことについて Fig.5 の fault ツリーを分析し、シナリオの可能性について評価を行った。

6.1 Fault ツリーの分析

Fig.11 では、Fig.5 の fault ツリーのダイアグラムに Table 1 の影響因子の判断結果を当てはめ、支配的な移行経路の存在の可能性についての検討対象から除外できるものを着色した。

「埋め戻し材」に起因する坑道内での核種の支配的な移行経路の存在に関しては、埋め戻し材が低透水性を維持することにより水理的連続性を検討対象から除外することができ、この結果、「埋め戻し材」に起因する坑道内での核種の支配的な移行経路の存在は検討対象から除外できた。一方、ほかの「掘削影響領域」および「支保工」に起因する核種の支配的な移行経路の存在は、現段階ではデータが十分でないため検討対象として除外できなかった。この系列は OR での関係のため、上位の「処分坑道→主要坑道→連絡坑道沿いの連続的な移行」は除外することはできない。

Table 1 Influence factors on closure performance

影響因子	本検討での取り扱い
断層Bと連絡坑道の交差	本検討では、処分パネル間には連絡坑道と交差する断層Bが存在するものとし、その断層は水理的連続性を有し、そこでの地下水流動が存在するものとして取り扱う。
坑道周辺岩盤 (含掘削影響領域)	本検討では、坑道沿いの掘削影響領域が水理的連続性を有すること、および坑道間でも掘削影響領域の水理的連続性を有することについては、それらの可能性を現段階で否定できないことから、そこでの地下水流動が存在するものとして取り扱う。
支保工の変質	本検討では、支保工が変質により透水層となり、これが水理的な連続性を有する可能性が現段階では否定できないことから、そこでの地下水流動が存在するものとして取り扱う。
埋め戻し材の止水性能の劣化	本検討では、埋め戻し材で埋め戻された坑道そのものは坑道全域に渡り低透水性と取り扱う。また、支保工の化学的影響は定量的に評価されるものと仮定し、その評価結果を考慮した適切なベントナイト量の混合率とすることで低透水性は確保されるものとして取り扱う。
止水プラグの止水性能の劣化	本検討では、坑道周辺に発生する掘削影響領域を把握することができれば、それを分断する切欠きを備えた止水プラグを設置し、坑道沿いの水理的な連続性を分断することができるものとして取り扱う。また、支保工の化学的影響は定量的に評価されるものと仮定し、その評価結果を考慮した適切なベントナイト量の混合率とすることで低透水性は確保されるものとして取り扱う。

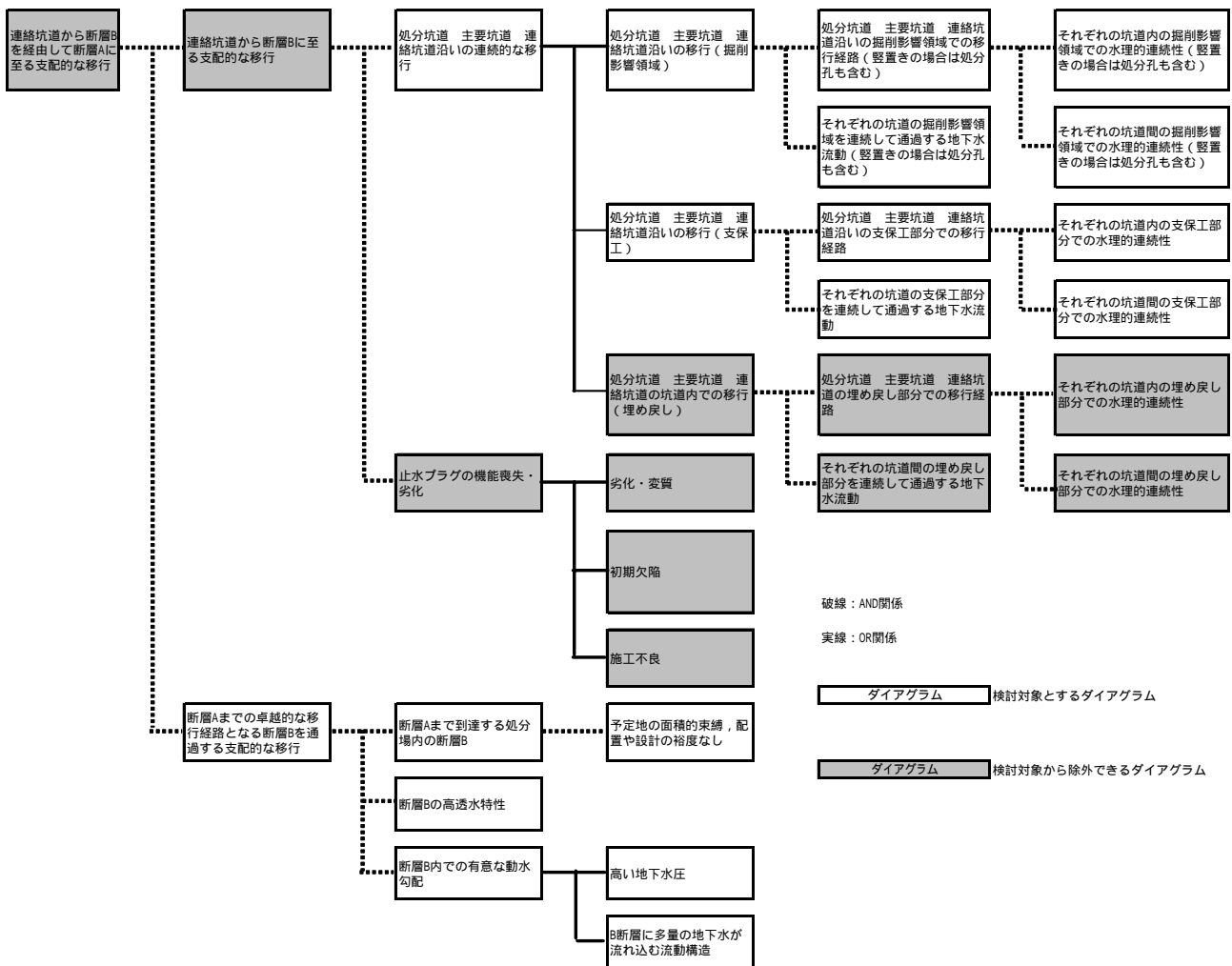


Fig. 11 Result of the fault tree analysis on radionuclide transport between a disposal panel and faults

しかし、「処分坑道→主要坑道→連絡坑道沿いの連続的な移行」と「AND 条件」にある「止水プラグの機能喪失・劣化」に関しては、止水プラグがその機能を発揮することにより連絡坑道から断層 B への移行経路を遮断することが可能となる。このため、上位の「連絡坑道から断層 B に至る移行」は除外できることとなる。これにより、「断層 A までの支配的な移行となる断層 B を通過する移行」は、データが十分でないことから、検討対象から除外することができないものの、最終的には「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行」は、検討対象から除外できることとなる。

今回の分析結果では、止水プラグの機能に依存するところが大きい結果となったが、「掘削影響領域」および「支保工」に起因する移行の存在についても、水理的に連続しないというデータが现阶段では十分でないことから、保守側に連続するとしたものであり、実際に全てが水理的に連続しているためにはいくつもの条件を同時に満たすことが必要であり、移行が成立する可能性は現実的には低いと考えられる。同様に、「断層 A までの支配的な移行となる断層 B を通過する移行」についても全て連続しているためにはいくつもの条件を満たすことが必要であり、移行が成

立する可能性も低いと考えられる。

以上のことから、閉鎖要素（埋め戻し材および止水プラグ）以外の影響因子に起因する移行もその存在の可能性は低く、今後のデータの蓄積により検討対象から除外することも可能となると考えられる。

### 6.2 シナリオの評価

Fault ツリーの分析結果から、閉鎖要素（ここでは、埋め戻し材および止水プラグ）がその期待される機能を発揮することにより、「連絡坑道から B 断層を経由し、A 断層に至る支配的な移行」はないとする結果となった。一方、今回検討対象から除外できなかったダイアグラムに関して、除外する十分なデータがないことに起因するものが多いこと、また、移行が存在するためには坑道沿いの連続的な移行の存在等、いくつもの条件を同時に満足することが必要であることを考慮すると、「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行が存在する」という結果に至るシナリオの可能性は低く、第 2 次取りまとめでの仮定、つまり「母岩を経由して A 断層に至る」とするシナリオが妥当であると結論付けることができる。



## 7 閉鎖性能の評価に関する課題

今回の検討では、「連絡坑道から断層 B を経由して断層 A に至る支配的な移行が存在する」というシナリオの可能性は低く、第 2 次取りまとめでの仮定、つまり「母岩を経由して断層に至る」とするシナリオが妥当であることを示すことができた。しかしながら、表 1 に示したように、データが十分でないために水理学的な連続性等の可能性が否定できなかったことや、閉鎖要素（埋め戻し材および止水プラグ）の長期の健全性の成立等、検討において仮定を置かざるを得ないところがあった。

閉鎖要素の止水性能に関するデータの取得に関しては、たとえば、緩衝材に比較して有効粘土密度が低い埋め戻し材仕様で塩強度依存性に関するデータを蓄積するとともに、同じベントナイト混合材料である緩衝材の長期挙動に関するデータおよび評価手法を、止水プラグおよび埋め戻し材の評価にも取り込んでいく必要がある。

支保工の影響に関しては、コンクリート材料の変質評価とともに、高 pH 環境がベントナイトや岩盤の性能に与える影響を定量的に評価するためにもベントナイトや岩盤の変質・劣化挙動の研究成果を取り入れていくことが必要である。

また、掘削影響領域の水理挙動等、坑道規模の挙動に関しては、原位置での試験により定量的な評価を行う必要がある。原位置での試験が必要なものに関しては、幌延等の地下研究施設を利用したデータの取得が有効であると考えられる。

これら要素の特性や原位置試験の結果から処分場環境で期待される性能を考慮した場をモデル化した水理解析を実施することにより、様々な場における核種移行の評価を行う必要がある。

一方、断層 A までの核種の支配的な移行経路の検討に関しても、今回の検討では除外した直接地表に至る核種の支配的な移行経路の候補（立坑を経由するケース、ボーリング孔を経由するケース）などについて、今回実施した fault ツリー分析等を行い、安全評価への影響について検討していくことが必要である。

## 8 おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分場の閉鎖技術に関しては、個々の技術のみでなく、処分技術と安全評価の両者の観点から、処分場としての閉鎖性能の評価が必要であることから、第 2 次取りまとめで示した閉鎖概念に基づき、閉鎖後の地層処分場における閉鎖性能に関する評価の一例として、処分場から大規模な破砕帯を伴う断層に至るまでの核種移行との関係に着目した閉鎖性能について検討した。

本検討では、閉鎖要素（埋め戻し材、止水プラグ）の止

水性能、掘削影響領域や支保工の水理特性等の閉鎖性能に影響を与える因子について現在の知見を整理し、母岩以外の核種の支配的な移行の可能性として「連絡坑道から小規模な破砕帯を伴う断層を経由する支配的な核種移行の可能性」に着目して fault ツリーを用いた分析を行い、閉鎖性能を論じるためのシナリオの検討を行った。

検討の結果、閉鎖要素においてその機能が発揮されること、その核種移行の存在のためにはいくつもの条件を同時に満たすことが必要であることから、「連絡坑道から小規模な破砕帯を伴う断層を経由して大規模な破砕帯を伴う断層に至る支配的な核種移行が存在する」というシナリオの可能性は低く、第 2 次取りまとめの「母岩を経由して大規模な破砕帯を伴う断層に至る」とするシナリオが妥当であることを示すことができた。

一方で、安全評価の視点も取り入れた閉鎖性能についての検討により、閉鎖要素の長期挙動、支保工の化学的影響および掘削影響領域の原位置での定量的な評価等、閉鎖性能についての研究課題を抽出することができた。これらの課題に関しては、今後の閉鎖性能の研究開発計画に取り込み、着実に解決していく必要がある。

## 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 分冊 2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022 (1999).
- [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 分冊 3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023 (1999).
- [3] Chandler, N. Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J., Vignal, B.: The five years report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727 (2002).
- [4] Dahlström, L.-O.: Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for the Prototype Repository, SKB Progress Report HRL-98-24 (1998).
- [5] Dereeper, D., Volckaert, G.: The RESEAL Project: A Large Scale In-situ Demonstration Test for Repository Sealing in an Argillaceous Host Rock, Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- [6] Börgesson, L.: Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for Backfill and Plug Test, SKB Progress Report HRL-98-08 (1997).
- [7] SKB : Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop, SKB IPR-02-05 (2002).

- [8] ONDRAF/NIRAS : Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- [9] 古市光昭, 奥津一夫, 平和男, 原啓二: 高レベル放射性廃棄物処分場の埋め戻しの検討, 原子力バックエンド研究 5, No.1, pp.51-58(1998).
- [10] 杉田裕, 川上進, 油井三和, 牧野仁史, 澤田淳, 栗原雄二, 三原守弘: 高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討(平成14年度), JNC TN8400 2003-010 (2003).
- [11] Thury, M. Gautshi, A., Mazurek, M., Muller, W., Naef, H., Person, F., Vomvoris, S. and Wilson, W.: "Geology and Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme", NAGRA TR 93-01 (1994)
- [12] OECD/NEA: Systematic Approaches to Scenario Development, A report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal, Paris (1992).
- [13] 澤田淳, 井尻裕二, 大西有三, 大津宏康, 西山哲: 亀裂トレス長のスケール依存性を考慮した検討, 第11回岩の力学国内シンポジウム, A04 (2002).
- [14] Sawada, A., Ohnishi, Y., Ohtsu, H. and Nishiyama, S.: Applicability of the concept of fractal to fracture network model in rock mass, Rock Engineering problems and approaches in underground construction, Choi, Ryu, Jeon & Moon (eds), 1, pp.203-210 (2002).
- [15] 大野博之, 小島圭二: 岩盤割れ目のフラクタル(その1), 応用地質 33, 3号, pp.133-146 (1992).
- [16] 大野博之, 小島圭二: 岩盤割れ目のフラクタル(その2), 応用地質 34, 2号, pp.58-72 (1993).
- [17] 緒方正虔, 本荘静光: 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質 22, 1号, pp.67-87 (1981).
- [18] 井上大栄, 水落幸広, 桜田裕之: リニアメントの断裂系としての特性とその評価, 応用地質 33, 3号, pp.147-156 (1992).
- [19] 棚井憲治, 岩佐健吾, 長谷川宏, 郷家光男, 堀田政國, 納多勝: 地層処分場のレイアウトに関する検討, JNC TN8400 99-044 (1999).
- [20] 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国の岩盤の水理特性について, JNC TN8400 99-090 (1999).
- [21] 米田茂夫, 小屋開地稔: 地盤の透水性に関する文献調査(その2), PNC TJ7308 93-005, vol.1 (1993).
- [22] 田中和広, 井上大栄: 断層の定義, 考え方, 土と基礎 43, 3号, pp.11-14 (1995).
- [23] 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 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021 (1999).
- [24] たとえば日本コンクリート工学協会編: コンクリート便覧(第二版), 技報堂出版株式会社, pp.265 (1996).
- [25] 大和田仁, 三原守弘, 入矢桂史郎, 松井淳: 放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント系材料の検討 - 浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性 -, JNC TN8400 99-057 (2000).
- [26] Gray, M., Shenton, B.: For better concrete, take out some of the cement, 6<sup>th</sup> ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand (1998).
- [27] Pusch, R.: Backfilling with Mixtures of Bentonite/Ballast Materials or Natural Smectitic Clay?, SKB TR-98-16 (1998).
- [28] 杉田裕, 藤田朝雄, 棚井憲治, 古市光昭, 奥津一夫, 三浦一彦: 地層処分における地下施設の埋め戻し, JNC TN8400 99-040 (1999).
- [29] 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志: 緩衝材の飽和透水特性 II, JNC TN8430 2003-002 (2003).
- [30] 杉田裕, 升元一彦: トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術, JNC TN8400 2002-005 (2002).
- [31] Martino, J., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F.: The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, 2003, pp.602-609 (2003).
- [32] Dixon, D., Martino, J., Chandler, N., Sugita, Y. and Vignal, B.: Water Uptake By A Clay Bulkhead Installed In The Tunnel Sealing Experiment At Atomic Energy of Canada's Underground Research Laboratory, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Abstracts, p.111, International Meeting (2002).