

# 処分システムに求められる 閉鎖性能の考え方

—坑道交差部における水理解析—

（ 研 究 報 告 ）

2005年9月

核燃料サイクル開発機構  
原子力発電環境整備機構

本資料は、原子力発電環境整備機構と核燃料サイクル開発機構が発行する報告書です。本資料の入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、核燃料サイクル開発機構技術展開部技術協力課<sup>1)</sup>、もしくは原子力発電環境整備機構技術部<sup>2)</sup>あてお申し越し下さい。

1) 〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

2) 〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階

This report is issued by Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Technical Cooperation Section, Technical Management Division, JNC<sup>1)</sup>, or Science and Technology Department, NUMO<sup>2)</sup>.

1) 4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1184, Japan

2) (Mita NN Bldg.) 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

© Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2005

© Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2005

2005 年 9 月

処分システムに求められる閉鎖性能の考え方  
－坑道交差部における水理解析－  
(研 究 報 告)

杉田 裕<sup>1)</sup>、高橋美昭<sup>1)</sup>、浦上 学<sup>1)</sup>、北山一美<sup>1)</sup>

藤田朝雄<sup>2)</sup>、川上 進<sup>2)</sup>、梅木博之<sup>3)</sup>、油井三和<sup>2)</sup>、宮本陽一<sup>2)</sup>

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価においては、処分場の閉鎖性能を考慮する必要がある。原子力発電環境整備機構と核燃料サイクル開発機構は、地層処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し、そこで示される坑道の埋め戻し材や粘土プラグ等の閉鎖要素の設計要件に対する今後の技術開発等の方向性を導出することを目的として、協力協定に基づき、双方のこれまで蓄積している知見を活用し、共同で閉鎖要素の性能を検討していくための場として「処分場閉鎖技術に関する検討会」を設置した。

検討の第一段階として、国内外の閉鎖技術に関する現状、関連する処分場の構成要素及び処分場環境を整理し、これらの整理結果を受けて処分パネルにおける処分坑道と主要坑道の交差部及び人工バリア周辺に存在する処分場構成要素を考慮し坑道交差部に焦点を当てた水理解析を行った。地下施設では全ての坑道が連結しており、この交差部における地下施設閉鎖後の水理挙動の把握は、人工バリアからの放射性核種の移行挙動を解釈し、地層処分システムに求められる閉鎖性能を理解する上で重要なポイントとなる。

解析の結果、人工バリア周囲の地下水流動には、圧力勾配、コンクリートや埋め戻し材の透水性及び粘土プラグの設置数が影響することが分かった。

- 
- 1) 原子力発電環境整備機構 技術部  
2) 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部  
3) 核燃料サイクル開発機構 経営企画本部 バックエンド推進部

September, 2005

Discussion on Sealing Performance Required in Disposal System  
—Hydraulic Analysis of Tunnel Intersections—

(Research Document)

Yutaka SUGITA<sup>1)</sup>, Yoshiaki TAKAHASHI<sup>1)</sup>, Manabu URAGAMI<sup>1)</sup>, Kazumi KITAYAMA<sup>1)</sup>

Tomoo FUJITA<sup>2)</sup>, Susumu KAWAKAMI<sup>2)</sup>, Hiroyuki UMEKI<sup>3)</sup>,  
Mikazu YUI<sup>2)</sup>, Yoichi MIYAMOTO<sup>3)</sup>

Abstract

The sealing performance of a repository must be considered in the safety assessment of the geological disposal system of the high-level radioactive waste. NUMO and JNC established “Technical Commission on Sealing Technology of Repository” based on the cooperation agreement. The objectives of this commission are to present the concept on the sealing performance required in the disposal system and to develop the direction for future R&D programme for design requirements of closure components (backfilling material, clay plug, etc.) in the presented concept.

In the first phase of this commission, the current status of domestic and international sealing technologies were reviewed; and repository components and repository environments were summarized subsequently, the hydraulic analysis of tunnel intersections, where a main tunnel and a disposal tunnel in a disposal panel meet, were performed, considering components in and around the engineered barrier system (EBS). Since all tunnels are connected in the underground facility, understanding the hydraulic behaviour of tunnel intersections is an important issue to estimate migration of radionuclides from the EBS and to evaluate the required sealing performance in the disposal system.

In the analytical results, it was found that the direction of hydraulic gradient, hydraulic conductivities of concrete and backfilling materials and the position of clay plug had impact on flow condition around the EBS.

- 
- 1) Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan
  - 2) Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute
  - 3) Nuclear Cycle Backend Division, Headquarter, Japan Nuclear Cycle Development Institute

## 目 次

|                                                                                                                |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. はじめに                                                                                                        | 1      |
| 1.1 背景                                                                                                         | 1      |
| 1.2 検討会設置の主旨及び活動の目的                                                                                            | 1      |
| 1.3 報告書の内容                                                                                                     | 2      |
| 2. 閉鎖技術に関する国内外の動向                                                                                              | 3      |
| 2.1 閉鎖技術に関する海外の動向                                                                                              | 3      |
| 2.2 閉鎖技術に関する国内の動向                                                                                              | 4      |
| 2.3 国内外の動向と検討会の実施内容との関係                                                                                        | 5      |
| 3. 処分場の構成要素と処分場環境                                                                                              | 6      |
| 3.1 処分場の構成要素                                                                                                   | 6      |
| 3.2 処分場環境                                                                                                      | 7      |
| 4. 坑道交差部における水理解析                                                                                               | 9      |
| 4.1 解析対象の設定                                                                                                    | 9      |
| 4.2 解析方法                                                                                                       | 9      |
| 4.3 解析モデル                                                                                                      | 12     |
| 4.4 解析条件                                                                                                       | 13     |
| 4.5 解析結果                                                                                                       | 16     |
| 4.6 考察                                                                                                         | 27     |
| 5. おわりに                                                                                                        | 31     |
| 謝 辞                                                                                                            | 31     |
| 参考文献                                                                                                           | 32     |
| 付 録                                                                                                            |        |
| 付録-1 国際ワークショップの概要（1）International workshop on the uses of<br>backfill in nuclear waste repositories            | 付-1(1) |
| 付録-2 国際ワークショップの概要（2）Backfill Requirements in KBS-type<br>repository -A POSIVA/SKB Workshop                     | 付-2(1) |
| 付録-3 国際ワークショップの概要（3）6 <sup>th</sup> International Workshop on Design and<br>Construction of Final Repositories | 付-3(1) |

## 目 次

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 表-4.1 | 解析における坑道断面等の設定値       | 11 |
| 表-4.2 | 解析におけるプラグ形状の設定値及び設置位置 | 11 |
| 表-4.3 | 構成要素の透水係数一覧           | 13 |
| 表-4.4 | その他の解析入力値一覧           | 14 |
| 表-4.5 | 解析ケース一覧               | 15 |

## 図 目 次

|        |                                           |    |
|--------|-------------------------------------------|----|
| 図-3.1  | 処分場の構成要素と期待される安全機能                        | 6  |
| 図-3.2  | 地下施設での作業イメージ                              | 7  |
| 図-4.1  | 処分坑道と主要坑道の交差部の構成要素                        | 10 |
| 図-4.2  | 主要坑道の形状                                   | 10 |
| 図-4.3  | 粘土プラグの配置位置                                | 12 |
| 図-4.4  | 解析モデル                                     | 12 |
| 図-4.5  | 境界条件                                      | 13 |
| 図-4.6  | 解析メッシュ                                    | 13 |
| 図-4.7  | 各要素内の水の流れ方向とコンクリートプラグと各要素との接触面での<br>水の出入り | 15 |
| 図-4.8  | 流量・流速の評価節点                                | 16 |
| 図-4.9  | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-13-O)             | 17 |
| 図-4.10 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-9-O)              | 17 |
| 図-4.11 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-5-O)              | 17 |
| 図-4.12 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-5-O)              | 18 |
| 図-4.13 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-8-O)              | 18 |
| 図-4.14 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-11-O)             | 18 |
| 図-4.15 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース P-0-O)              | 19 |
| 図-4.16 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース P-1-O)              | 19 |
| 図-4.17 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース P-2-O)              | 19 |
| 図-4.18 | ケース C シリーズの通過流量及び最大流速の比較                  | 20 |
| 図-4.19 | ケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較                  | 21 |
| 図-4.20 | ケース P シリーズの通過流量及び最大流速の比較                  | 21 |
| 図-4.21 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-13-P)             | 22 |
| 図-4.22 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-9-P)              | 22 |
| 図-4.23 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース C-5-P)              | 22 |
| 図-4.24 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-5-P)              | 23 |
| 図-4.25 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-8-P)              | 23 |
| 図-4.26 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図 (ケース B-11-P)             | 23 |

|        |                                      |    |
|--------|--------------------------------------|----|
| 図-4.27 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図（ケース P-0-P）          | 24 |
| 図-4.28 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図（ケース P-1-P）          | 24 |
| 図-4.29 | 流速ベクトル図と全水頭コンター図（ケース P-2-P）          | 24 |
| 図-4.30 | ケース C シリーズの通過流量及び最大流速の比較             | 25 |
| 図-4.31 | ケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較             | 26 |
| 図-4.32 | ケース P シリーズの通過流量及び最大流速の比較             | 26 |
| 図-4.33 | 各ケースにおける地下水流動の模式図（直交圧力勾配下）           | 27 |
| 図-4.34 | 各ケースにおける地下水流動の模式図（平行圧力勾配下）           | 28 |
| 図-4.35 | 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（コンクリートの影響）     | 28 |
| 図-4.36 | 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（埋め戻し材の透水係数の影響） | 29 |
| 図-4.37 | 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（粘土プラグの設置数の影響）  | 29 |

## 1. はじめに

### 1.1 背景

高レベル放射性廃棄物（以下、「高レベル廃棄物」）の地層処分システムの安全評価を行うためには、処分場の閉鎖性能を理解することが重要である。処分場の閉鎖に関わる技術（以下、「閉鎖技術」）には、処分場のレイアウト設計や坑道掘削前後の止水対策（止水グラウト等）、掘削影響領域の影響低減対策等も関係するが、本検討では、処分場の長期挙動を考慮し、人工バリア定置後の坑道の処置技術を検討の対象とする。処分場の閉鎖性能を評価するためには、処分技術で対応可能である坑道周辺の処置技術（物質移行経路を分断する等）と、その処置部分の安全評価におけるモデル化や解釈の間で整合性を確保しておく必要がある。

### 1.2 検討会設置の主旨及び活動の目的

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」）は、第2次取りまとめ以降、埋め戻し材や粘土プラグ等の地下環境での機能に関するデータが取得されてきたことを受け（たとえば、Chandler et al., 2002 ; 核燃料サイクル開発機構, 2002, 2003, 2004）、これらの具体的な機能を考慮した処分技術と安全評価の両者の観点からの閉鎖性能の評価が必要であると考え、研究に取り組んできている（杉田ほか, 2004）。処分事業への研究成果の反映のためには、実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」）のニーズを考慮する必要がある。原環機構は、最終処分事業を的確かつ効率的に推進するため、実施主体としての技術基盤を確保する上で必要な技術開発に取り組んできており、処分場閉鎖技術の評価手法の開発は、その一つである。これを的確かつ効率的に実施するためには、サイクル機構のこれまでの成果を活用しつつ、自らの評価手法の整備を図ることが適切である。

以上のような双方のニーズから、サイクル機構と原環機構は、処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を整理するため、両者で締結されている「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」に基づき、「処分場閉鎖技術に関する検討会」を設置した。

本検討会は、高レベル廃棄物地層処分システムの安全評価上重要と考えられる、処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し、そこで示される閉鎖要素の設計要件の考え方に対する今後の技術開発等の方向性を導出することを目的とする。

本検討を実施することにより、サイクル機構は、処分場の閉鎖性能に関する考え方の整理、及びそれらを検証する幌延深地層研究センターにおける閉鎖技術の試験研究計画の策定が可能となる。また、国が実施する地層処分に関する安全規制等の策定に資する技術基盤情報の蓄積が可能となる。原環機構は、埋め戻し材・プラグ等に対する具体的な機能を考慮することにより、概要調査地区等選定段階における応募区域の具体的な地質環境条件に合わせた閉鎖設計が可能となる。また、本検討での知見を基に閉鎖技術や閉鎖要素の機能を考慮した解析・評価を実施することで、詳細な安全評価手法の整備が可能となる。

本検討は、2004年度から2006年度の3年間を検討期間とし、その進め方は以下のように考えた。まず、構成要素間の相互影響や埋め戻し材、粘土プラグ等の効果等を概略把握するため、処分場に存在すると考えられる構成要素を考慮した水理解析を実施する。この結果を受けて、構成要素を考慮した閉鎖シナリオを構築し、閉鎖性能の考え方のベースとする。また、具体的な試験で得られた閉鎖要素の性能に関する検証データを用いて、それらの解析評価手法を確立する。両者の検討結果から、処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し、閉鎖要素の



設計要件の考え方を明らかにする。

2004年度は、構成要素間の相互影響や埋め戻し材、粘土プラグ等の効果等を概略把握するため、人工バリア周囲の地下水流動に対する影響に着目した。この影響を評価するためには、構成要素の各物性値（特に透水性）で想定される範囲において人工バリア周辺の地下水流動がどのように変化し、どこが、どの程度核種移行にとって支配的であるか、またはどの閉鎖要素がどの程度、核種移行抑制・遅延に寄与できるかの感度を把握することが必要であると考え、人工バリア周囲における地下水の流速や通過流量を感度の指標とし、処分場に存在すると考えられる構成要素を考慮した水理解析を行うこととした。解析の対象範囲は、これらの構成要素が含まれていて、かつ処分場の一般的な部位であることが基本となると考え、処分坑道と主要坑道の交差部及びその周辺に着目することとした。

なお、地層処分事業は段階ごとに進められることとなるが、検討会では処分場の閉鎖段階に移るための判断基準等は扱わないものとし、技術的問題の検討に焦点を絞る。

### 1.3 報告書の内容

本報告書は、本検討会において閉鎖性能の考え方を提示するため、検討の第一段階として実施した、国内外の閉鎖技術に関する現状の整理、関連する処分場の構成要素の状況についての整理、これらの整理結果を考慮した人工バリア周囲の構成要素の相互影響を概略評価する水理解析の結果について示すものである。

2 章で閉鎖技術に関する国内外の動向及び本検討会の実施内容、3 章で処分場の構成要素と処分場環境、そして4 章で坑道交差部における水理解析の結果及び考察について示す。報告書で使用する用語類は、第2次取りまとめを参考として使用する。

## 2. 閉鎖技術に関する国内外の動向

### 2.1 閉鎖技術に関する海外の動向

処分場の閉鎖性能に関する海外の動向として、ここ数年では国際ワークショップが3回（カールスバッド（1998年）、エスポ（2001年）、ブリュッセル（2002年））開催されている（Bennett et al., 1998; SKB, 2002; ONDRAF/NIRAS, 2002）。これらのワークショップを通じた議論は、以下のようにまとめられる。なお、各ワークショップの概要については付録に示す。

日本の処分概念では、Buffer は「緩衝材」、Backfill は「埋め戻し材」として分類されている（核燃料サイクル開発機構, 1999a）が、この用語の用い方は各国（各処分概念）で異なる。日本と同じく Buffer と Backfill の両者が用いられるのは、スウェーデンやフィンランドに代表されるように廃棄体堅置き方式（以下、「堅置き方式」）の処分概念の場合である（たとえば Svemar, 1995）。堅置き方式では人工バリアを設置する処分孔とその上部に位置する処分坑道が明確に区分されるため、材料や設計要件の考え方が異なる Buffer と Backfill の両者が用語として用いられる。これに対し、処分坑道に直接廃棄体が処分される処分方式（以下、「横置き方式」）では、廃棄体の周囲を充填するものという意味合いから Backfill のみが用いられる場合がある。これは、坑道そのものの閉塞性が期待される岩塩や泥岩層を地層処分の対象岩盤としている場合に多い（たとえば Köster et al., 2002; Johnson and Blümling, 2002）。このため、ブリュッセルの国際ワークショップ（ONDRAF/NIRAS, 2002）では Backfilling が題材であったが、スイスからの報告は堅置き方式でいうところの緩衝材に関するものであった（Johnson and Blümling, 2002）。これに対し、エスポのワークショップでは、SKB が検討している堅置き方式の処分概念に基づき、埋め戻し材が検討対象であった（SKB, 2002）。このような用語の定義は検討の対象を明確にする上で重要であり、本検討での取り扱いは3章で示す。

上記の用語に関する問題にも見られるように、閉鎖に関わる問題は処分概念に大きく依存している。カールスバッドのワークショップにおいては、処分概念が異なれば閉鎖の考え方も異なるとの結論が出されている（Bennett et al., 1998）。つまり、処分概念（廃棄体）に応じて理想的な物理化学特性の材料が選択され、処分される地層が一般的な岩石、粘土材料に富んだ泥岩、岩塩といったように異なれば、それに応じて閉鎖の考え方は根本的に異なることとなる。

堅置き方式の処分概念での閉鎖の考え方の例として、処分場を乱されていない状態（好ましい環境を作る）に戻すこと（Autio et al., 2002）、処分場において有意な水理場を発生させないこと（Pusch, 1998）等がある。また、坑道と EDZ における核種の移行経路を分断できればよいという考え方も示されている（Autio et al., 2002）。これは区分化概念という考え方で、坑道周囲の EDZ における透水性の増大が避けられない場合、坑道そのものは掘削ずりのようなもので充填し、核種移行の要所となる部分には止水性能を十分に発揮できる粘土プラグを設置するというものである。その際、粘土プラグは EDZ を分断できるように岩盤側に切込んだ形状となる。埋め戻し材を用いる閉鎖において共通する考え方には、他のバリア材への影響が小さいということが挙げられる（Autio et al., 2002; Pusch, 1998）。

また、さまざまな処分概念を踏まえた最適な埋め戻し材の選定の試みとして、カールスバッドのワークショップでは選定フローが示されている（付録参照, Bennett et al., 1998）。

これらワークショップの主な結論は以下にまとめられる（Bennett et al., 1998; SKB, 2002）。

- ・全ての処分概念に適用できる埋め戻し概念というものはないが、共通の廃棄体や処分概念で

比較すると、埋め戻し材の材料等、その考え方には共通な部分が多い。

- ・安全評価において、埋め戻し材の物性値の評価、シナリオ、施工等に対して十分な検討がなされていない。
- ・処分場環境に適合した埋め戻しを確実に行う技術が必要であり、さまざまな施工方法から適切な工法を組合せることにより、要求される性能（低透水性等）を確保する必要がある。さらに、埋め戻し材の施工技術は、安全評価での取り扱いとの整合性にも考慮する必要がある。

## 2.2 閉鎖技術に関する国内の動向

国内においても、処分場の閉鎖を目的としたさまざまな検討がなされている。サイクル機構は、高レベル廃棄物の地層処分における地下施設の閉鎖技術に関して、第2次取りまとめでは人工バリアの設置環境に有意な影響を与えないように、また、坑道そのものが有意な水みちにならないように処置する技術として概念検討を行った。安全評価においては、そのバリア性能を無視して（機能を期待しないこととして）処分システムを評価した（核燃料サイクル開発機構、1999a, 1999b, 1999c）。第2次取りまとめ以降、埋め戻し材や粘土プラグ等の地下環境での機能に関するデータが取得されてきたことを受け（たとえば、Chandler et al., 2002；核燃料サイクル開発機構、2002, 2003, 2004）、これらの具体的な機能を考慮した処分技術と安全評価の両者の観点からの閉鎖性能の評価が必要であると考え、研究に取り組んできている（杉田ほか、2003, 2004）。具体的には、閉鎖技術に関する要素技術の一つであるプラグに着目した実規模の原位置試験（トンネルシーリング性能試験；以下、「TSX 試験」）をカナダ原子力公社（AECL）との共同研究として AECL の地下研究施設において実施している（たとえば、Chandler et al., 2002）。TSX 試験では、粘土プラグ及びコンクリートプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得するとともに、その性能の評価手法の開発を行ってきている。

設計要件に関しては、埋め戻し材とプラグの役割として、埋め戻し材は核種移行のクリティカルパスにならないこと、人工バリアの性能発揮に悪影響を与えないことを示し、粘土プラグは坑道に沿った地下水の移動を遮断すること、強度プラグは埋め戻し材、緩衝材の膨出を押さえること（埋め戻し中）、人工バリアの性能発揮に悪影響を与えないこと（埋め戻し後）を示している（杉田ほか、2003）。

一方、土木学会の原子力土木委員会の地下環境部会（以下、「地下環境部会」という）は、地下施設の埋め戻しに関して、処分場が所要のバリア機能を保持するために、適切な時期に坑道を埋め戻すことが必要であるとしている。プラグの役割として、地下環境部会は、坑道及びその周辺の緩み域<sup>1</sup>、断層破碎帯、各種調査・試験用ボアホール等が将来主要な地下水移行経路とならないようにその連続性を絶つこと、坑道内の緩衝材や埋め戻し材の移動・流出を防止することとしている（土木学会、2004）。

設計要件に関しては、埋め戻し材とプラグ（粘土、コンクリート）の設計要件の整理、仕様例の検討がなされており（電力中央研究所・電気事業連合会、1999）、地下環境部会は、埋め戻し材の設計要件として水理特性（低透水性）が最も重要であるとしている（土木学会、2004）。原環機構は、第2次取りまとめ以降明らかにされた科学的知見や国際的な議論を反映した技術報告書を取りまとめる中で、閉鎖技術については、第2次取りまとめを基本としている（原子

1 坑道掘削時に力学的、水理学的に影響を受けた坑道周囲の岩盤領域をいう。土木学会の報告書においては、プラグの役割の記載に「緩み域」を用いており、本報告書での「掘削影響領域（EDZ）」と同意である。

力発電環境整備機構，2004）。

### 2.3 国内外の動向と検討会の実施内容との関係

本検討会での具体的な実施内容は，1章で示した本検討会設置の主旨に則り，上述した国内外の動向を考慮して決定した。それによると，閉鎖技術に対する重要課題としては，①人工バリアの健全性を確保するための設計要件の設定，②性能評価（解析モデル）と処分技術（実際の処分場環境）との整合性を高めることである。

そこで，検討会においては，処分場に存在すると考えられる構成要素と，その挙動（たとえば，セメント材料の時間的変化）を考慮することとする。2004年度は，人工バリアを含む坑道交差部周囲の構成要素を考慮した水理解析を実施し，構成要素間の相互影響や埋め戻し材，粘土プラグ等の効果等を概略評価する（本報告書の内容）。

2005年度以降，この評価結果を受けて構成要素を考慮した閉鎖シナリオを構築し，閉鎖性能の考え方のベースとする。また，TSX試験で得られた粘土プラグ及びコンクリートプラグを対象とした閉鎖性能に関する検証データを用いて，それらの解析評価手法を確立する。両者の検討結果から処分システムに求められる閉鎖性能の考え方を示し，閉鎖要素の設計要件を明らかにする。

最終的には，明らかにされた閉鎖要素の設計要件に対する今後の技術開発等の方向性を導出する。

### 3. 処分場の構成要素と処分場環境

#### 3.1 処分場の構成要素

処分場は、人工バリア、地上施設、地下施設からなる「処分施設」と天然の岩盤（天然バリア）で構成され、第2次取りまとめの処分概念に基づく処分場の構成要素は図-3.1 に示すとおりである。さらに、地下施設は、地上施設から廃棄体（ガラス固化体をオーバーパックに封入したもの）や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道、主要坑道<sup>2</sup>、廃棄体を定置するための処分坑道あるいは処分孔等から構成される。廃棄体の定置方式には、処分坑道から処分孔を一定間隔で掘削しそこに定置する方法（縦置き方式）と処分坑道に廃棄体を直接定置する方法（横置き方式）がある。



図-3.1 処分場の構成要素と期待される安全機能  
(核燃料サイクル開発機構, 1999a を参考に作成 ;  
原子力発電環境整備機構, 2004a)

処分場の閉鎖性能を評価するためには、処分場の閉鎖性能に影響を及ぼす構成要素の状態の理解が必要である。つまり、処分場の閉鎖性能に影響を及ぼす構成要素が何時から何処に存在し、それによる影響とそれらの相互作用についても理解する必要がある。

本検討において閉鎖性能を評価する上で対象とする処分場構成要素は、図-3.1 に示した人工バリアの構成要素（ガラス固化体、オーバーパック及び緩衝材）のほか、アクセス坑道や連絡坑道、主要坑道、それら坑道の支保工、坑道周辺のEDZ、コンクリートプラグ、坑道の埋め戻し材、粘土プラグそして地質環境となる母岩とする。

<sup>2</sup> 処分パネルの外郭をなし、パネル内の処分坑道をつなぐ坑道をいう。原環機構の坑道の分類は、「処分坑道」「連絡坑道」「アクセス坑道」の3種類であり、サイクル機構が用いている「主要坑道」は「連絡坑道」に含めている。本検討では、サイクル機構の分類を参考とし、処分パネルの周囲の坑道に対して「主要坑道」を用いた。



上記構成要素のうち、人工バリアの設置後の処置に係わる構成要素を閉鎖要素という。本検討において、閉鎖要素は埋め戻し材及び粘土プラグとし、以下のように定義する。

埋め戻し材：人工バリア定置後に残された坑道群（主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道等）を埋め戻す材料である。

粘土プラグ：坑道が断層破砕帯と交差するような場合に断層破砕帯と坑道との連続性を分断するように断層破砕帯をはさむようにその両側に設置される、あるいは坑道周辺の EDZ に沿った地下水の移動経路を分断するために設置される粘土材料である。

コンクリートプラグは、人工バリアの設置後の処置として用いられるが、坑道埋め戻しまでの短期の処分坑道における緩衝材（堅置き方式の場合は埋め戻し材）の膨出防止の役割を期待するものであり、本検討においては閉鎖要素としては取り扱わない。

### 3.2 処分場環境

図-3.2 は建設・操業時における地下施設での作業イメージ図である。本図を用いて、堆積岩における横置き方式（一部、堅置き方式のみの作業を含む）を例にして、閉鎖性能へ影響が考えられる構成要素の内容及び状態を整理する。図に示すように、地下施設での作業は区画化された処分パネル毎に行われることが考えられている。

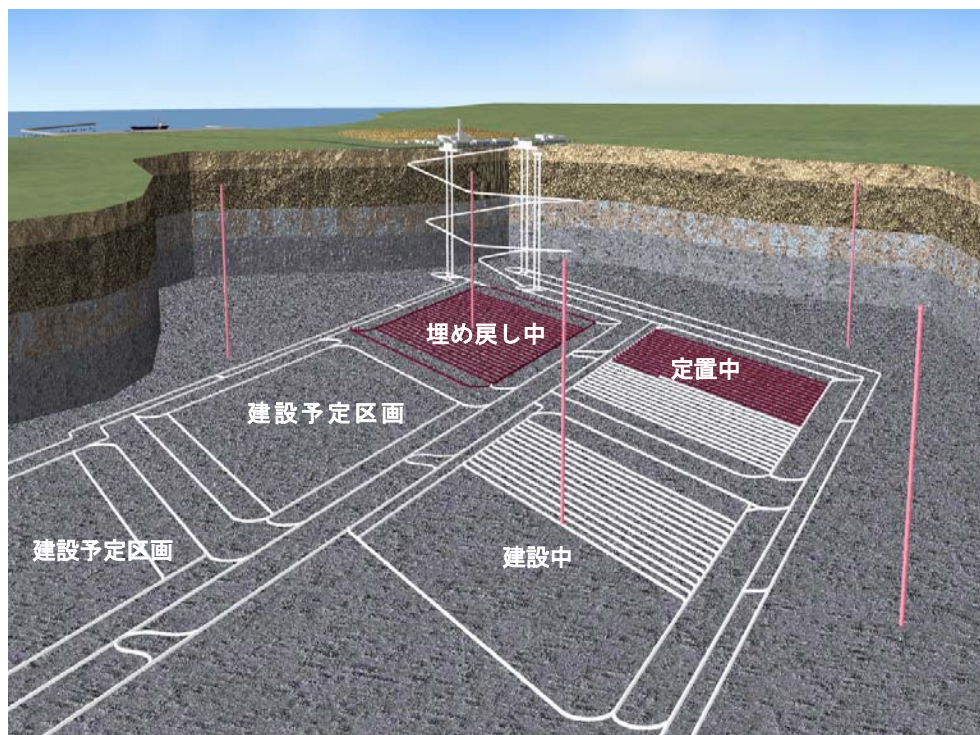


図-3.2 地下施設での作業イメージ  
(原子力発電環境整備機構，2004a に加筆して作成)

図中「建設予定区画」パネルは、連絡坑道及び処分パネルの外郭となる主要坑道の施工まで

が終了した状態である。この時点では、坑道としては連絡坑道及び主要坑道が存在する。坑道は、作業安全、坑道形状の維持等の目的により主にセメント材料を用いた支保工が設置される。一旦施工された支保工は、一部を除いて撤去されることはない。その特性は経年変化し、さらに溶出したセメント成分は周辺の構成要素に化学的影響を与える。支保工の周囲の母岩には坑道掘削による応力再配分及び坑道掘削そのものの影響により EDZ が分布している。EDZ は、一旦発生した後は、岩盤クリープや周囲の構成要素の影響によりその特性は変化するものの永続する。

また、地下施設建設に先立ち、アクセス坑道が掘削されるが、アクセス坑道及びその周囲で閉鎖性能への影響が考えられる構成要素の状況は上記と同様である。

「建設中」パネルでは、「建設予定区画」の次の段階として処分パネル内に処分坑道が掘削される。図はパネルの半分まで処分坑道の掘削が終了した時点を示している。閉鎖性能への影響が考えられる構成要素としては、「建設予定区画」パネルの処分坑道がある。処分坑道の周囲には上記と同様に支保工、EDZ が存在する。

縦置き方式の場合、処分坑道の掘削が終了すると、処分孔が掘削される。処分孔には支保工は設置されない。

「定置中」パネルでは、人工バリアが処分坑道に設置される。また、人工バリアの定置が終了した処分坑道の両端には緩衝材の膨出を抑制するコンクリートプラグが設置される。設置したコンクリートプラグは撤去しない。その特性は経年変化し、さらに周辺の構成要素に化学的影響を与える。縦置き方式の場合、処分孔に人工バリアが設置され、処分坑道は空洞のままである。

縦置き方式の場合、上述したように処分坑道が空洞のままであることから、処分坑道の埋め戻しが必要となる。「埋め戻し中」パネルでは、処分孔に人工バリアが設置された後、処分坑道が埋め戻し材で埋め戻される。閉鎖性能への影響が考えられる構成要素として埋め戻し材がある。処分坑道の両端部には、上記同様、コンクリートプラグが設置される。

全ての処分パネルに人工バリアが定置され、最終確認の後、地下施設の閉鎖段階となると、主要坑道、連絡坑道及びアクセス坑道が埋め戻される。図には示されていないが、必要に応じて粘土プラグが設置され、構成要素として考慮される。

#### 4 坑道交差部における水理解析

図-3.2から分かるように、処分パネルを構成する全ての処分坑道は主要坑道や連絡坑道に繋がっており、アクセス坑道を介して地上とも繋がっている。これは、埋め戻された坑道そのものが人工バリアからの放射性核種の移行経路となる可能性があることを示している。人工バリアの健全性を確保し、地層処分システムが適切に機能することを保証するためには、従来の廃棄体を中心とした長期安全性に特化した評価だけではなく、人工バリアや人工バリア周辺に存在する閉鎖要素といった構成要素をも考慮した評価が必要になってきている（杉田ほか, 2004）。

これまでの長期安全性の評価は、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い（核燃料サイクル開発機構, 1999a, 1999c）、そこには将来の技術開発まで視野に入れて閉鎖が着実に行われることを見込んでいた。一方、閉鎖要素に関しては、埋め戻し材や粘土プラグといった個別の性能の検討までにとどまっており（核燃料サイクル開発機構, 1999a, 1999b）、ようやく実規模での実際の坑道環境における性能に関する知見が得られてきたところである（たとえば、核燃料サイクル開発機構, 2002, 2003, 2004）。このように、処分場を設計、建設する処分技術と長期安全性を評価する安全評価との両者の検討の前提条件には隔たりがあったが、ようやく両者が同じテーブルで検討できるよう諸条件が揃ってきた。

##### 4.1 解析対象の設定

閉鎖要素の検討では、処分場に存在すると考えられる構成要素を設定し、実際のデータに基づく物性値を考慮した解析を実施することにより、地層処分システムが適切に機能することを示し、閉鎖要素に対する要件等を具体的に示すことが重要である。

処分場環境は、3章で示したように処分坑道内に人工バリア、支保工及びコンクリートプラグが、また、主要坑道内に、埋め戻し材が存在する。粘土プラグは、必要に応じて処分坑道、主要坑道に設置される。また、第2次取りまとめにおける安全評価では、EDZにおける地下水流れとの相互作用をモデルに取り込んだ核種移行の感度解析の結果、安全の裕度を高めるために重要な現象の一つにEDZでの核種移行遅延が挙げられている（核燃料サイクル開発機構, 1999c）。したがって、閉鎖性能を評価する上で対象とする処分場構成要素として、坑道周辺のEDZも取扱う。

検討における対象範囲は、これらの構成要素が含まれていて、かつ処分場の一般的な部位とする。この部位として、処分場と主要坑道の交差部及びその周辺を選定した。

##### 4.2 解析方法

本検討では、地層処分システムに求められる閉鎖性能を検討する第一段階として、上記で設定した処分坑道と主要坑道の交差部における構成要素を考慮した水理解析を行う。処分場に存在すると考えられる構成要素を想定し、人工バリアの設置される処分パネル内で人工バリアと他の構成要素（ここでは主に閉鎖要素である埋め戻し材と粘土プラグ）との接触点に着目した評価を行う。

第2次取りまとめの処分場概念では、処分パネルは処分坑道と主要坑道で構成される。処分坑道と主要坑道の交差部は、操業機械が通過することを考慮して交差角135度で交差している。図-4.1は処分パネルにおける1本の処分坑道と主要坑道の交差部を抽出したものである。解析では、母岩は堆積岩、人工バリアの定置方式は横置き方式を想定する。考慮する構成要素は、



処分坑道、主要坑道、坑道周囲の EDZ、支保工、人工バリア（廃棄体及び緩衝材）、コンクリートプラグ、埋め戻し材、粘土プラグ、そして母岩である。

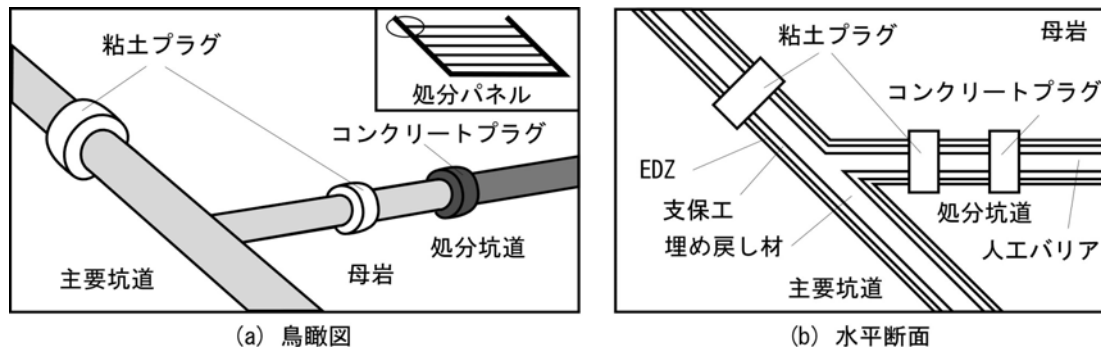


図-4.1 処分坑道と主要坑道の交差部の構成要素

水理解析では、上述した構成要素の物性の組合せと物性（水理特性）を変化させた場合について、人工バリア周辺における EDZ 及び支保工における地下水流れの変化を指標とし、比較検討する。本解析では、埋め戻し材、粘土プラグの水理特性が閉鎖性能に大きく影響すると考えられ、解析結果は、これら閉鎖要素の材料あるいは適切な設置位置の選定要件の考察に反映できると考えられる。

水理解析は、岡山大学、株式会社ダイヤコンサルタント、三菱マテリアル株式会社共同開発の有限要素法の移流分散解析ソフト Dtransu-3D・EL (Nishigaki et al., 2001) を用いた飽和浸透流解析である。

図-4.2 は、第 2 次取りまとめの処分場概念で示されている主要坑道の形状を示したものである（核燃料サイクル開発機構，1999a）。解析では母岩は堆積岩とするため、主要坑道の形状は軟岩系岩盤用の三芯円坑道となるが、解析の安定性の観点から、解析でモデル化する坑道の断面形状は断面積がほぼ等しい矩形断面を仮定した。処分坑道は横置き方式の場合、岩種によらず直径 2.22m で一定となる坑道の断面は主要坑道と同様にほぼ同断面積の矩形断面を仮定した。本解析における主要坑道、処分坑道の断面形状の設定値を表-4.1 に示す。

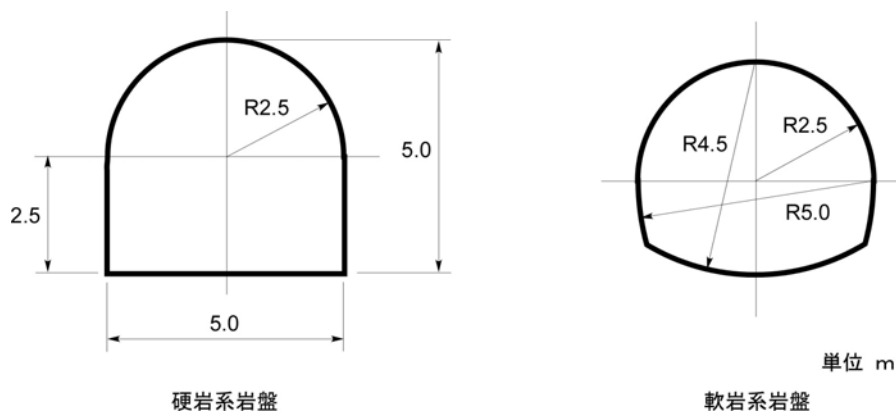


図-4.2 主要坑道の断面形状  
(核燃料サイクル開発機構，1999a を一部修正して作成)

表-4.1 解析における坑道断面等の設定値

| 種類   | 第2次取りまとめの仕様                                                           | 本解析での設定                                                                                                                                              |
|------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主要坑道 | 軟岩系岩盤：<br>幅 5.0m, 高さ 4.5m<br>三芯円<br>支保工厚 0.5m<br>EDZ：<br>設定なし         | 第2次取りまとめ仕様の坑道の断面積は約 18 m <sup>2</sup> であり、一辺 4.0m の矩形断面(断面積 16.0 m <sup>2</sup> )とする。<br>坑道の掘削は発破掘削を想定する。<br>支保工, EDZ の厚さはそれぞれ 0.5m とする。             |
| 処分坑道 | 横置き方式：<br>直径 2.22m<br>支保工厚 0.1m<br>EDZ：<br>1.0m (発破掘削)<br>0.5m (機械掘削) | 第2次取りまとめ仕様の坑道の断面積は約 3.8 m <sup>2</sup> であり、一辺 2.0m の矩形断面(断面積 4.0 m <sup>2</sup> )とする。<br>坑道の掘削は機械掘削を想定する。<br>支保工の厚さは 0.1m とする。<br>EDZ の厚さは 0.5m とする。 |

表-4.2 に解析におけるプラグ形状の設定値, 設置位置を示す。第2次取りまとめでは, コンクリートプラグ及び粘土プラグの設置目的は示されているものの, 設計まではされていない。そこで, TSX 試験の実績(たとえば, Chandler et al., 2002)を考慮して本解析の仕様を設定した。プラグの形状は, 坑道から母岩に対して均等に切り欠く矩形とする。切り欠きの深さは EDZ の端部から母岩側へ 0.5m とする。プラグの長さはいずれのプラグも 2m とする。コンクリートプラグは処分坑道の端部に設置する。第2次取りまとめでは粘土プラグの設置位置は卓越した割れ目の両側であるが, 本解析では, 埋め戻し材の材料として粘土を混合しない条件, EDZ 及び支保工の劣化を考慮した条件における坑道交差部付近での水の流れに対する粘土プラグの効果を把握するため, 処分坑道及び主要坑道を設置位置とする。

表-4.2 解析におけるプラグ形状の設定値及び設置位置

| 種類  | 第2次取りまとめの仕様                                                                   | 本解析での設定                                                                                                 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| プラグ | 切り欠き：<br>未定<br>長さ：<br>未定<br>設置位置：<br>粘土プラグは卓越した割れ目の両側。<br>コンクリートプラグは処分坑道の両端部。 | 切り欠きは, EDZ 外側から 0.5m 岩盤に切り込む。<br>両プラグの長さは 2.0m とする。<br>粘土プラグの設置位置は, 3 通りとする。<br>コンクリートプラグは処分坑道の端部に配置する。 |

粘土プラグの配置位置を図-4.3 に示す。(a)は粘土プラグを配置せず, 坑道沿いの流れを妨げるものがない場合である。(b)は主要坑道に粘土プラグを配置するもので, 坑道沿いの流れを主要坑道で妨げる場合である。(c)は処分坑道と主要坑道に粘土プラグを配置する場合で, 処分坑道の粘土プラグは, 人工バリアから見てコンクリートプラグの外側に配置する。これは, 双方の坑道に対して坑道沿いの妨げを設置する場合である。これらの比較検討により, 粘土プラグの効果的な設置について考察が可能となる。

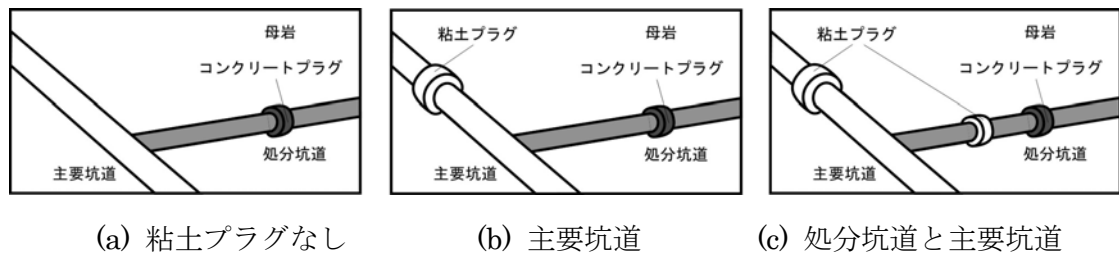


図-4.3 粘土プラグの配置位置

### 4.3 解析モデル

図-4.4 に解析モデル，図-4.5 に境界条件を示す。図-4.1 を参考に，坑道の中心で対称と考え（重力が作用するため全くの対象ではないが，解析対象領域ではその影響は小さいと考えられる。），坑道上部半分をモデル化した。処分坑道に垂直及び平行に圧力勾配を作用できるように解析領域を設定した。表-4.1 及び 4.2 で示した坑道形状及びプラグ形状，設置位置をモデルで表現した。坑道断面の比較を図-4.4 に示す。処分坑道の粘土プラグとコンクリートプラグの間隔は中心で 4m とした。坑道交差部から各プラグまでの距離は，主要坑道の粘土プラグは 6.02m，処分坑道の粘土プラグは 8.98m とした。

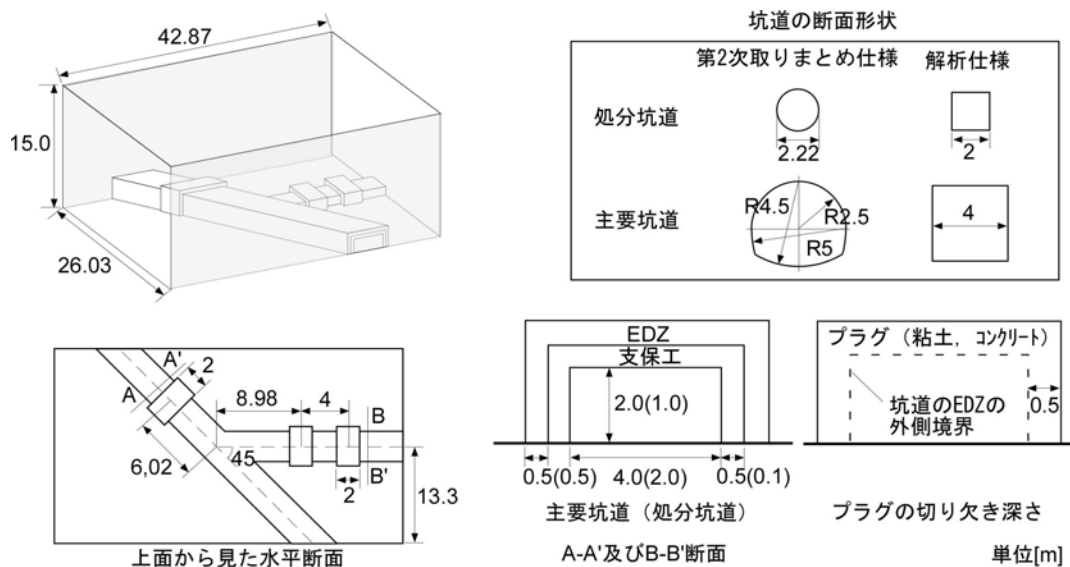


図-4.4 解析モデル

境界条件であるが，図-4.5 に示すように圧力勾配を作用させる面は圧力固定とし，その他の面は不透水境界とした。圧力勾配は 0.01 とした。圧力勾配は処分坑道に直交の場合と平行の場合の 2 通りとした。

図-4.6 に解析メッシュを示す。節点数は 211,653，要素数は 204,594 である。粘土プラグは，解析ケースによって設置する個数が変わることから，プラグ部分のない状態も表現出来るように要素のグルーピングを工夫した。プラグのない部分を含む解析ケースの場合，坑道，支保工，EDZ はプラグ部分において，図-4.3 に示すようにその形状で連続する。

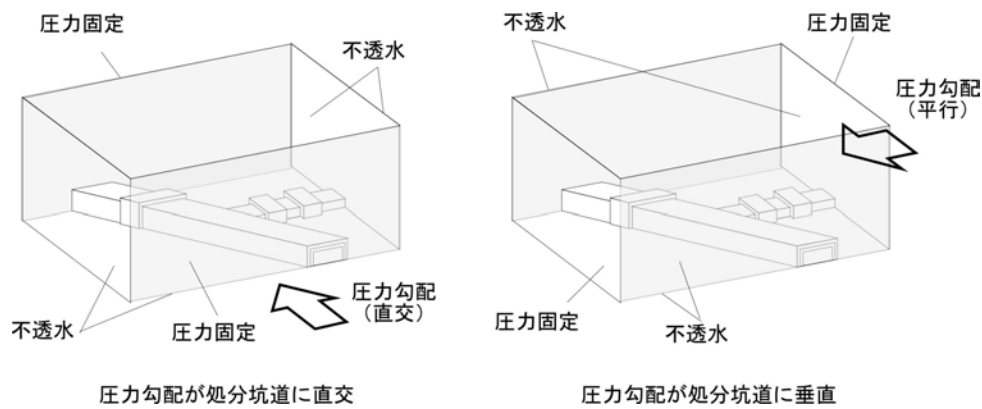


図-4.5 境界条件

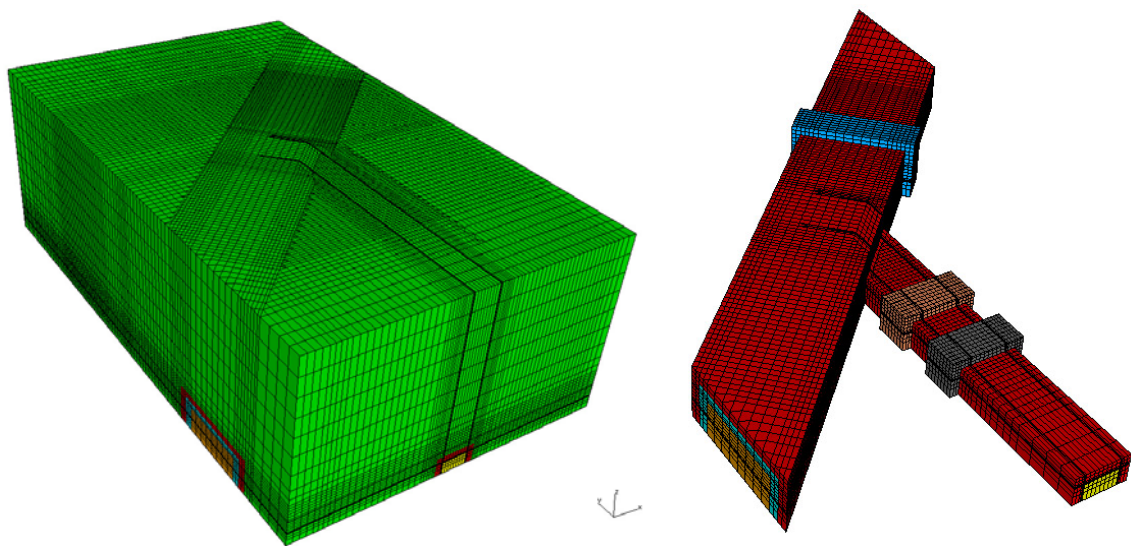


図-4.6 解析メッシュ

(左：全体像，右：母岩を取り除き，坑道等を露出させたもの)

4.4 解析条件

解析で使用する各構成要素の透水係数の一覧を表-4.3 に示す。それぞれの設定理由をあわせて示す。

表-4.3 構成要素の透水係数一覧

| 構成要素      | 透水係数[m/s]                          | 備考      |
|-----------|------------------------------------|---------|
| 母岩        | $10^{-8}$                          | 設定理由 1) |
| 緩衝材       | $10^{-12}$                         | 設定理由 2) |
| 埋戻し材      | $10^{-5}$ , $10^{-8}$ , $10^{-11}$ | 設定理由 2) |
| 支保工       | $10^{-5}$ , $10^{-9}$ , $10^{-13}$ | 設定理由 3) |
| 粘土プラグ     | $5.0 \times 10^{-13}$              | 設定理由 4) |
| コンクリートプラグ | $10^{-5}$ , $10^{-9}$ , $10^{-13}$ | 設定理由 5) |
| EDZ       | $10^{-6}$                          | 設定理由 6) |

#### 設定理由

- 1) 第2次取りまとめでは、岩盤の透水係数は岩種によらず  $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{m/s}$  で設定している。堆積岩の地下研究施設であるサイクル機構の幌延深地層研究センターで取得されている値は、 $10^{-4} \sim 10^{-10} \text{m/s}$  である（核燃料サイクル開発機構，2004）。これらの値を考慮して、母岩の透水係数は  $10^{-8} \text{m/s}$  とする。
- 2) 緩衝材の透水係数は、第2次取りまとめ仕様（乾燥密度  $1,600 \text{ kg/m}^3$ ，ケイ砂混合率 30wt%）の物性を想定する。  
埋め戻し材はベントナイトの混合率が決定していないことから、数種類を想定する。 $10^{-11} \text{m/s}$  は、第2次取りまとめの設計で示した乾燥密度  $1,800 \text{ kg/m}^3$ ，ケイ砂混合率 85wt%の物性を想定している（核燃料サイクル開発機構，1999b）。 $10^{-5} \text{m/s}$  は、支保工のセメント分の影響により含有するベントナイトの性能が劣化し、砂相当になった場合、あるいは埋め戻し材としてケイ砂のみを使用した場合を想定している。 $10^{-8} \text{m/s}$  は、その中間値である。
- 3) 支保工の  $10^{-5} \text{m/s}$  は、劣化により砂相当になった場合を想定する（杉田ほか，2003）。 $10^{-13} \text{m/s}$  は、施行時の健全な支保工を想定する。 $10^{-9} \text{m/s}$  は、その中間値である。
- 4) 粘土プラグの透水係数は、ブロック相当とし、乾燥密度  $1,800 \text{ kg/m}^3$ ，ケイ砂混合率 30wt%を想定して  $5.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$  とする（核燃料サイクル開発機構，1999b）。粘土プラグの設置数は 0，1，2 の3 ケースとする。
- 5) コンクリートプラグの  $10^{-5} \text{m/s}$  は、劣化により砂相当になった場合を想定する（杉田ほか，2003）。 $10^{-13} \text{m/s}$  は、施行時の健全な値を想定する（Chandler et al., 2002）。 $10^{-9} \text{m/s}$  は、その中間値である。コンクリートプラグの設置数は処分坑道に1つとする。
- 6) EDZ の透水係数は岩盤の設定値に対して、1桁大きくする。

その他、解析に使用した物性の一覧を表-4.4に示す。

表-4.4 その他の解析入力値一覧

| 構成要素      | 比貯留係数<br>[1/m]       | 間隙率    | 備考 |
|-----------|----------------------|--------|----|
| 岩盤        | $5.0 \times 10^{-8}$ | 0.347  |    |
| EDZ       | $3.2 \times 10^{-7}$ | 0.366  |    |
| 緩衝材       | $5.8 \times 10^{-4}$ | 0.3333 |    |
| 埋戻し材      | $5.8 \times 10^{-4}$ | 0.3333 |    |
| 粘土プラグ     | $5.8 \times 10^{-4}$ | 0.3072 |    |
| コンクリートプラグ | $4.1 \times 10^{-7}$ | 0.3072 |    |
| 支保工       | $4.1 \times 10^{-7}$ | 0.3333 |    |

次に、解析ケースを表-4.5 に示す。粘土プラグの設置位置、埋め戻し材の透水係数、コンクリート材料（支保工及びコンクリートプラグ）の透水係数が変数となる。それぞれの解析ケースでパラメータとなる Concrete, Backfill, Plug のイニシャルを解析ケース名称の冒頭に冠した。また、各解析ケースの末尾の O 及び P は与えた動水勾配の方向であり、O (Orthogonal)

は処分坑道に直交する方向，P（Parallel）は処分坑道に平行の方向を示す。

解析ケースCシリーズは，粘土プラグの設置無し，埋め戻し材の透水係数を砂相当と固定し，コンクリート材料の変質・劣化による透水係数の増大の影響を把握する。解析ケースBシリーズは，粘土プラグの設置無し，コンクリート材料の透水係数を砂相当と固定し，埋め戻し材の材料選定による透水係数の増大の影響を把握する。解析ケースPシリーズは，埋め戻し材及びコンクリート材料の透水係数を砂相当と固定し，粘土プラグの設置位置による効果を把握する。なお，物性値の組合せの関係から，C-5，B-5，P-0は同じ解析結果となる。

表-4.5 解析ケース一覧

| ケース                            | 粘土プラグ<br>の設置位置    | 透水係数[m/s]                            |                                      |                                                                                     |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                |                   | 埋め戻し材                                | コンクリート材料                             | その他                                                                                 |
| C-13-O,P<br>C-9-O,P<br>C-5-O,P | なし                | $10^{-5}$                            | $10^{-13}$<br>$10^{-9}$<br>$10^{-5}$ | 緩衝材：<br>$10^{-12}$<br>粘土プラグ：<br>$10^{-13}$<br>EDZ：<br>$10^{-6}$<br>母岩：<br>$10^{-8}$ |
| B-11-O,P<br>B-8-O,P<br>B-5-O,P | なし                | $10^{-11}$<br>$10^{-8}$<br>$10^{-5}$ | $10^{-5}$                            |                                                                                     |
| P-2-O,P<br>P-1-O,P<br>P-0-O,P  | 主要・処分<br>主要<br>なし | $10^{-5}$                            | $10^{-5}$                            |                                                                                     |

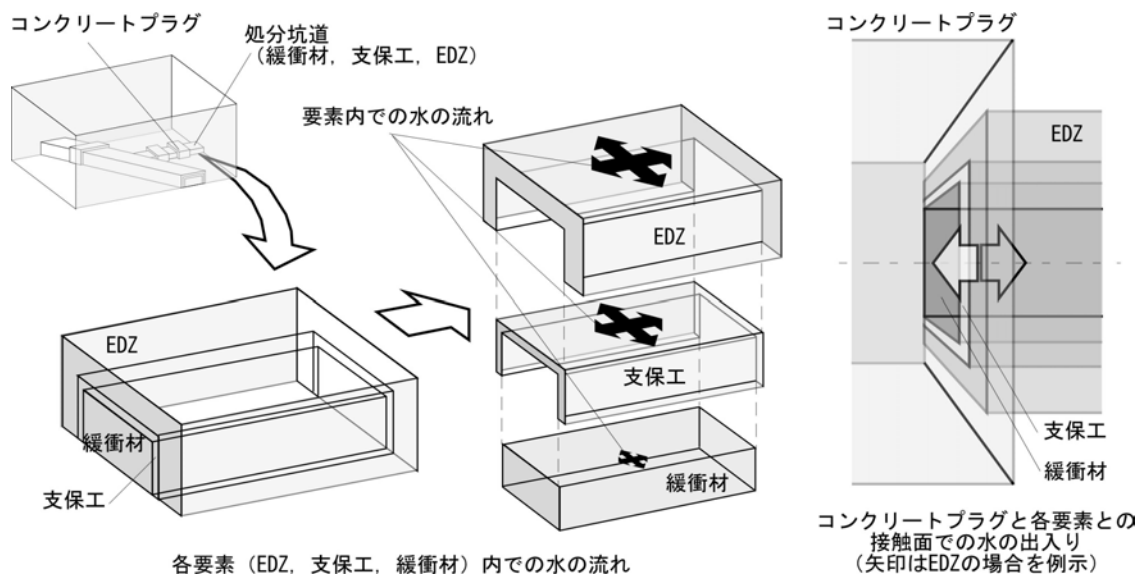


図-4.7 各要素内の水の流れ方向とコンクリートプラグと各要素との接触面での水の出入り

解析結果は，埋め戻し材の物性値の設定や粘土プラグの設置箇所起因する流れ場の変化により評価を行う。図-4.7は各要素（ここでは，EDZ，支保工，緩衝材）内の水の流れ方向とコンクリートプラグと各要素との接触面での水の出入りを模式的に示したものである。表-4.3，4.4の物性値から，支配的な地下水流動の経路となるのは，埋め戻し材で埋め戻される連絡坑道，支保工（コンクリートプラグを含む），EDZが考えられる。これらの要素内においては流

速も大きくなると考えられるが、坑道沿いの流れが大きい場合は、その先への流れを制御する性能として埋め戻し材や粘土プラグの効果に期待することとなる。緩衝材とコンクリートプラグの接触面での地下水流動が小さくても、その周囲の支保工部分や EDZ 部分での接触面において顕著な地下水流動が発生するような場合は、人工バリアの健全性に影響を及ぼすことも考えられる。そこで、ここではコンクリートプラグと各要素との接触面での水の出入りに着目して考察を行う。

#### 4.5 解析結果

前節で示したように、埋め戻し材や粘土プラグの効果について、コンクリートプラグと各要素との接触面での水の出入りで評価する。各要素の流量・流速を評価した断面を図-4.8に示す。Dtransu-3D・ELでは、各要素の流速が求められる。そこで、要素内の流速から各要素における最大流速を求め、これを各要素の最大流速値とした。また、要素内の各流速に断面積をかけたものの要素内での合計から各要素の通過流量を求めた。図から分かるように、評価断面における最大流速及び流量に関しては、EDZ-コンクリートプラグ、支保工-コンクリートプラグ、緩衝材-コンクリートプラグのそれぞれの要素の組合せから3つの値が得られることとなる。

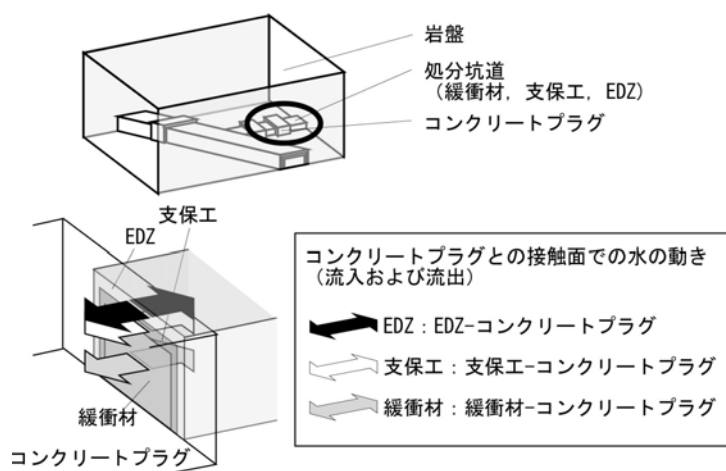


図-4.8 流量・流速の評価断面

##### (1)直交圧力勾配（ケースx-x-O）の場合

圧力勾配が処分坑道に直交する場合について結果を示す。コンクリート材料の健全性の影響を比較するため、図-4.9～4.11にCシリーズの解析モデル下端面での流速ベクトル図と全水頭コンター図を示す。図-4.9がケースC-13-O、図-4.10がケースC-9-O、図-4.11がケースC-5-Oである。図-4.9～4.11に関しては、ベクトル長さは同じ縮尺であり、図からケース間で直接流速を比較することができる。表-4.5で示したように粘土プラグは設置されておらず、埋め戻し材は砂相当の透水係数（ $10^{-5}\text{m/s}$ ）である。

コンクリート材料が健全であるC-13-O、C-9-Oではコンクリート材料である支保工やコンクリートプラグには流れは認められないが、主要坑道の埋め戻し材が砂相当の透水係数であることから、主要坑道に大規模な流れが生じている。処分坑道との接続部では、処分坑道への流れ込みも確認されたが、その影響もコンクリートプラグで遮断されている。これに対して、コン

クリート材料が劣化した場合を想定したケースC-5-Oでは、主要坑道全体の大規模な流れは支保工部分にも及んだ。また、コンクリートプラグの止水効果も低下することから処分坑道内にも流れが生じているが、評価断面であるコンクリートプラグと緩衝材の設置される処分坑道近傍では流れ場は認められない。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

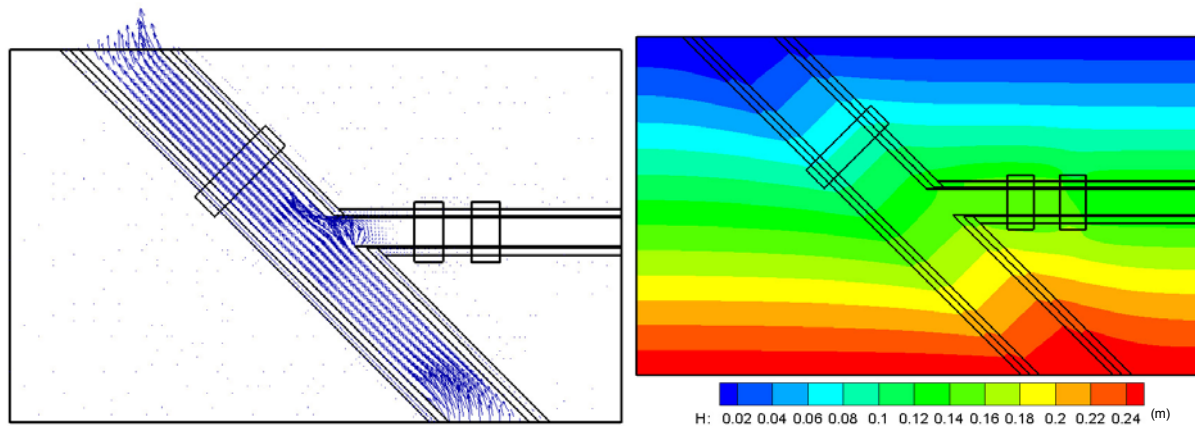


図-4.9 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-13-O)

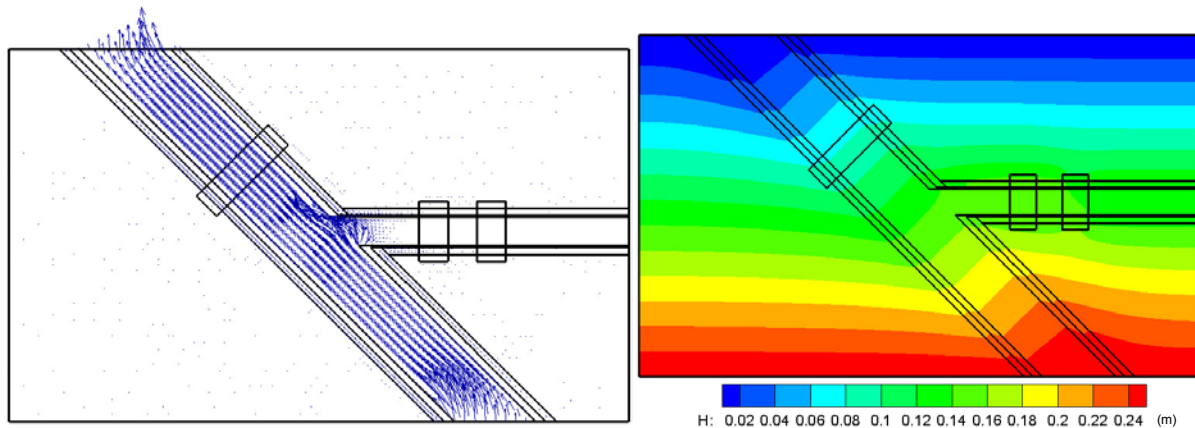


図-4.10 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-9-O)

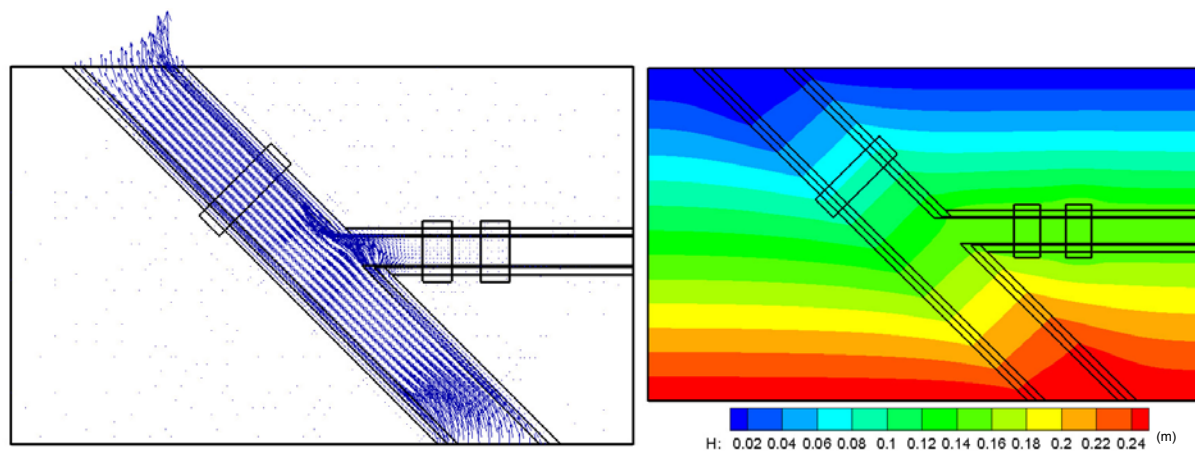


図-4.11 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-5-O)

次に、埋め戻し材の透水係数の影響について示す。図-4.12 がケース B-5-O，図-4.13 がケー



ス B-8-O、図-4.14 がケース B-11-O である。このケースもベクトル長さは同じ縮尺であり、図からケース間で直接流速を比較することができる。ケース B-5-O では、主要坑道に大規模な流れが発生し、処分坑道との接続部で処分坑道にも流れ込みが発生している。ケース B-8-O、B-11-O では、埋め戻し材で埋め戻された主要坑道の坑道内は水の流れが抑制され、坑道周囲の支保工部分や EDZ に流れが集中している。この場合、処分坑道との接続部においても処分坑道への流れ込みは坑道周囲の支保工部分や EDZ に限られている。処分坑道への流れ込みは、いずれのケースにおいても評価断面であるコンクリートプラグと緩衝材の設置される処分坑道近傍では流れ場は認められない。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

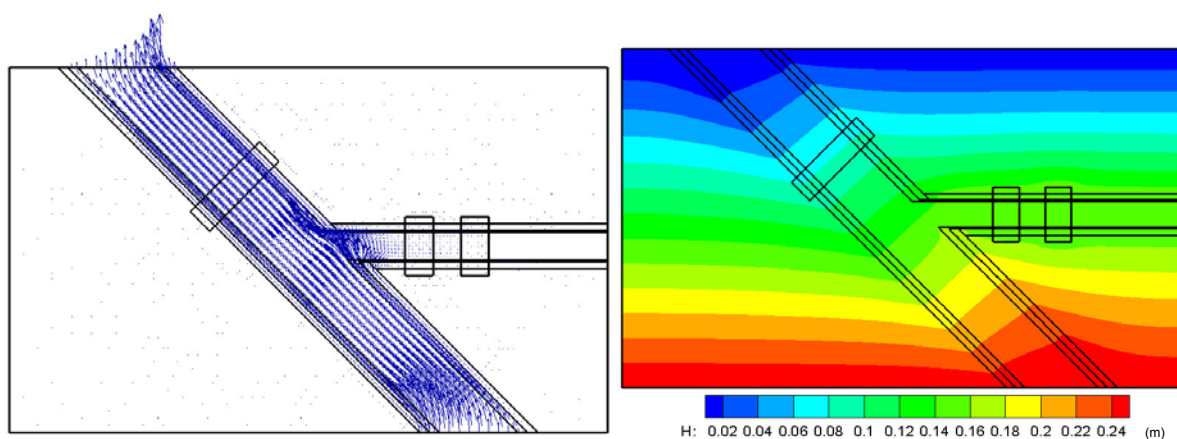


図-4.12 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-5-O)

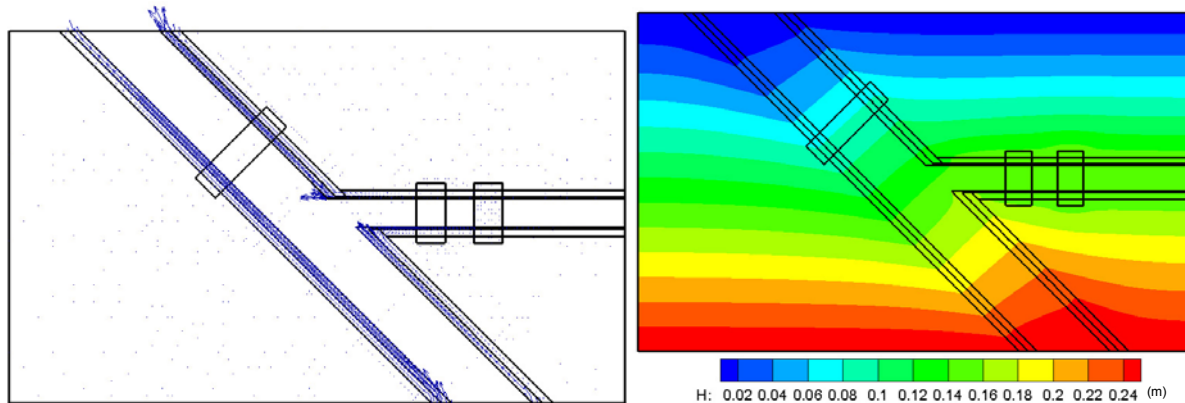


図-4.13 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-8-O)

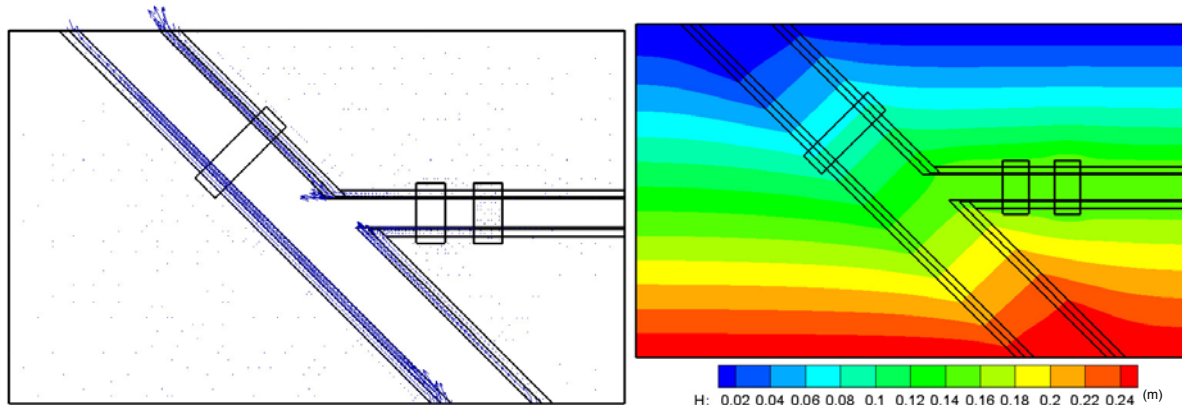


図-4.14 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-11-O)

次に、粘土プラグ設置の効果について示す。図-4.15 がケース P-0-O, 図-4.16 がケース P-1-O, 図-4.17 がケース P-2-O である。ベクトル長さの縮尺は、図-4.15 に対して図-4.16 が 10 倍、図-4.17 が 100 倍で描かれている。

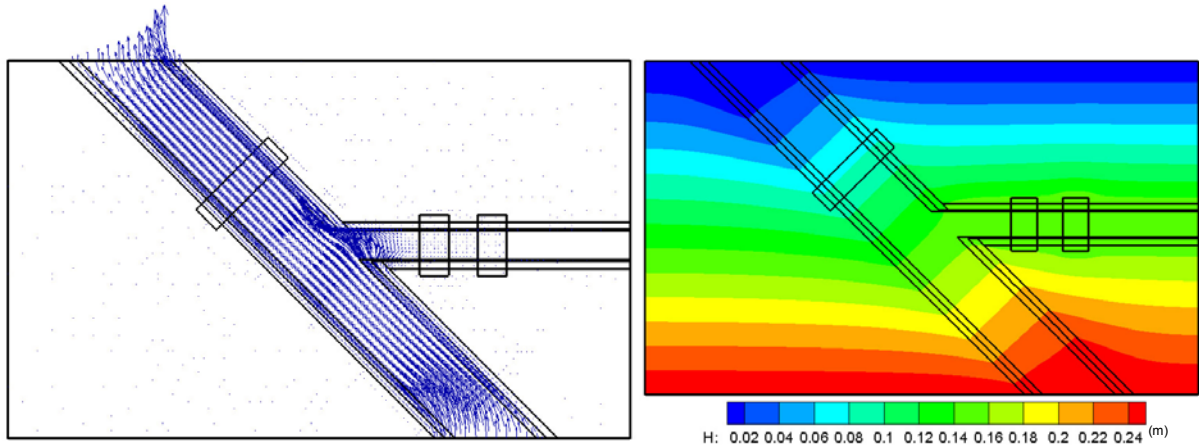


図-4.15 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-0-O)

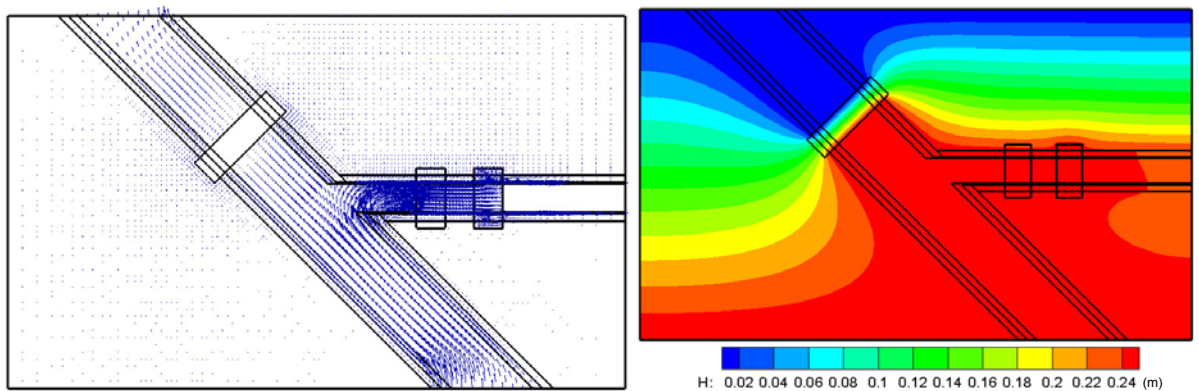


図-4.16 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-1-O)

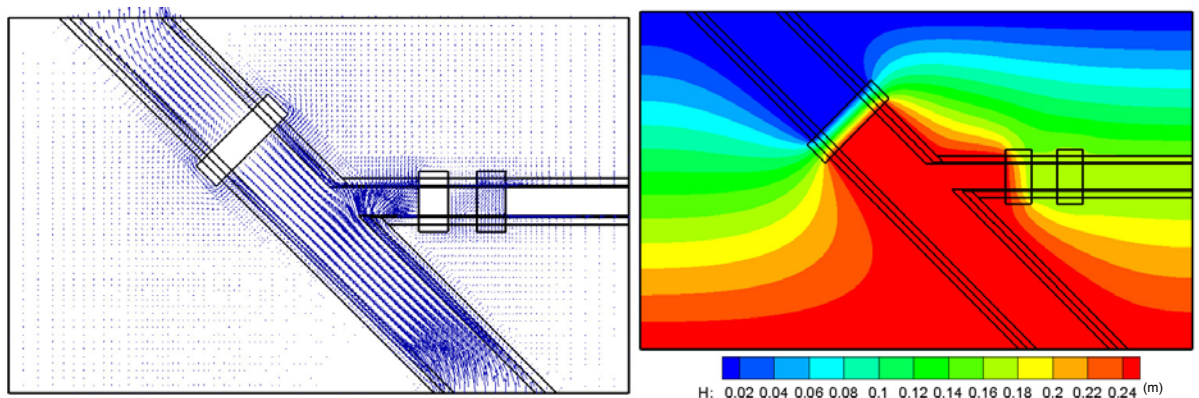


図-4.17 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-2-O)

主要坑道に粘土プラグが設置されるケース P-1-O になると、主要坑道沿いの流れが劇的に抑制される。主要坑道が遮断された流れは、逃げ場を手前に接続している処分坑道に向けることとなる。処分坑道に大きく流れ込み、緩衝材周囲の支保工や EDZ に大きな流れが発生している。流れの方向は主要坑道から流れ込む方向である。処分坑道端部にも粘土プラグを設置する

ケース P-2-O では、処分坑道内の流れも抑制される。主要坑道沿いの流れは主要坑道と処分坑道の両者を塞がれた形となるため、坑道沿いから岩盤へ向かう流れとなっている。流速も全体的に小さくなっており、粘土プラグ設置の効果がベクトル図からもわかる。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

次に、各構成要素における通過流量及び最大流速の比較について示す。評価断面における流量ベクトルのスカラー量の合計を通過流量とし、最大値を最大流速として比較した。ただし、緩衝材における通過流量及び最大流速は、EDZ 及び支保工と比較して無視できるほど小さいため、比較の対象より外した。

図-4.18 はケース C シリーズの結果を示したものである。コンクリート材料が健全な場合、評価断面における通過流量は EDZ が支配的である。これは、透水係数が  $10^{-9}\text{m/s}$  の場合（ケース C-9-O）も同様である。最大流速も両ケースではほとんど変化はない。これに対して、コンクリート材料の劣化を考慮したケース C-5-O では、支保工において流量が発生している。支保工と EDZ を合わせた流量は他のケースと比較して C-5-O のケースが大きくなった。最大流速をみても、C-5-O のケースでは最大流速を示した構成要素が EDZ から支保工に代わり、ケース C-13-O、C-9-O と比較して約 4 倍となっている。このとき、EDZ における最大流速は減少した。通過流量及び最大流速の結果から、コンクリート材料が劣化し、透水係数が増加すると、支保工が選択的な流れ場になる可能性を示す結果となった。

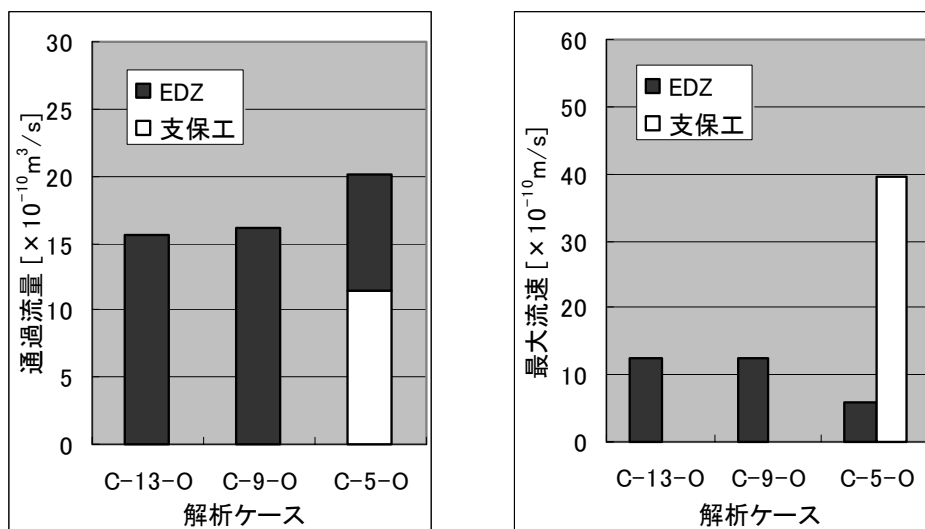


図-4.18 ケース C シリーズの通過流量及び最大流速の比較

図-4.19 はケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較を示したものである。埋め戻し材で埋め戻される主要坑道の周囲の支保工が劣化している条件であるため、坑道内部材料の透水性に係わらず、評価断面周辺の流れ場に変化は生じていない。また、通過流量、最大流速の両者に関しても 3 つのケースでほとんど差は認められない。通過流量は支保工との出入りが EDZ に比較して多くなっており、最大流速に関しても支保工内が EDZ よりも速くなっている。通過流量及び最大流速の結果から、支保工を選択的に流れる場では、埋め戻し材の効果は小さい結果となった。

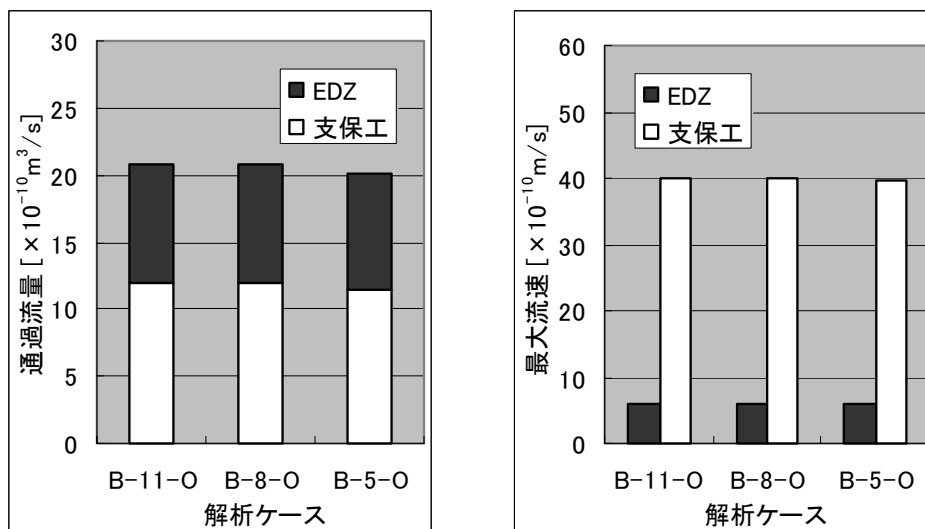


図-4.19 ケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較

図-4.20はケースPシリーズの通過流量及び最大流速の比較を示したものである。ケースP-0は主要坑道が主要な流れ場になっていることから、評価断面近傍に流れ場が発生していないことと同様に、粘土プラグを処分坑道側にも設置する粘土プラグ2個設置の場合（ケースP-2-O）も評価断面近傍に流れ場は発生していない（図-4.15, 4.17参照）。これを反映して、通過流量、最大流速とも両者は同じ傾向となっている。これに対し、粘土プラグを主要坑道のみを設置するケースP-1-Oでは、図-4.16のベクトル図から分かるように処分坑道に大きな流れ場が生じている。支保工、EDZとも他のケースと比較すると大きな流量となっており、最大流速についても最大流速の大きい支保工で比較して約4倍となっている。通過流量及び最大流速の結果から、主要坑道の流れのみを止める粘土プラグの設置は処分坑道沿いに流れ場を発生させる結果となったが、処分坑道から主要坑道へ向かう流れ（核種移行上の性能に影響する流れとなる）とは逆方向である。

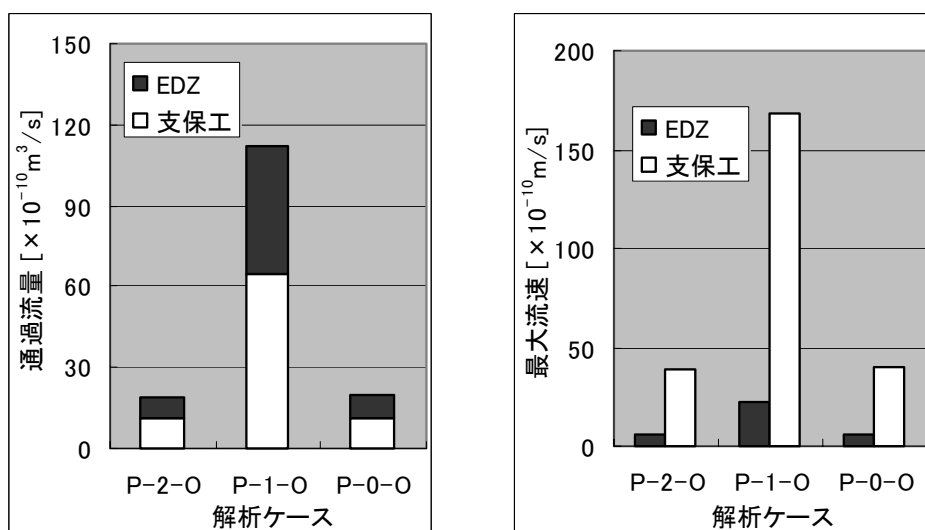


図-4.20 ケース P シリーズの通過流量及び最大流速の比較



(2) 平行圧力勾配（ケースx-x-P）の場合

圧力勾配が処分坑道に平行な場合について結果を示す。コンクリート材料の健全性の影響を比較するため、図-4.21～4.23にCシリーズの解析モデル下端面での流速ベクトル図と全水頭コンター図を示す。図-4.21がケースC-13-P、図-4.22がケースC-9-P、図-4.23がケースC-5-Pである。平行圧力勾配のケースのベクトル長さは全て同じ縮尺であり、図からケース間で直接流速を比較することができる。ベクトル長さの縮尺は、図-4.16の直交圧力勾配下の粘土プラグを主要坑道の上に設置したケースP-1-Oと同じである。表-4.5で示したように粘土プラグは設置されておらず、埋め戻し材は砂相当の透水係数（ $10^{-5}\text{m/s}$ ）である。

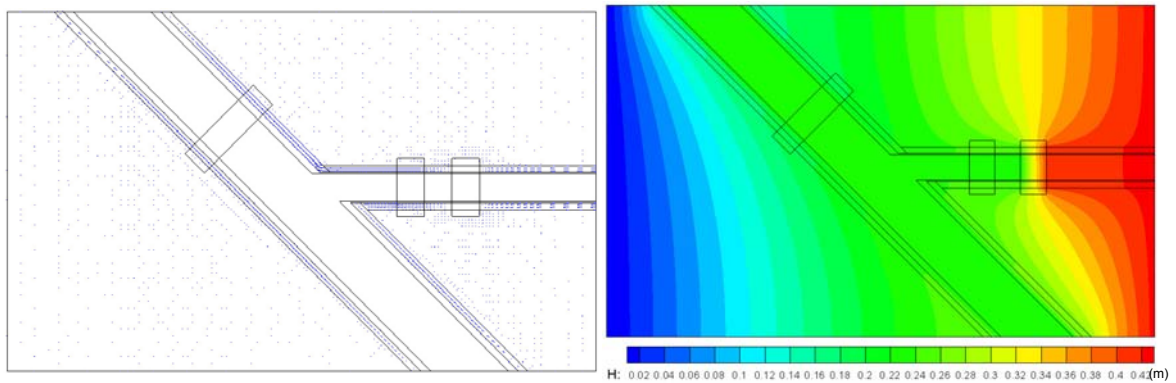


図-4.21 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-13-P)

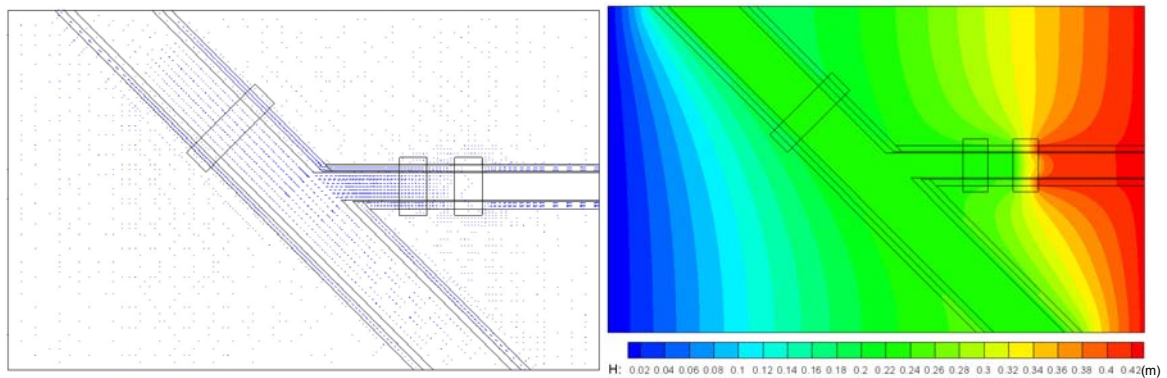


図-4.22 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-9-P)

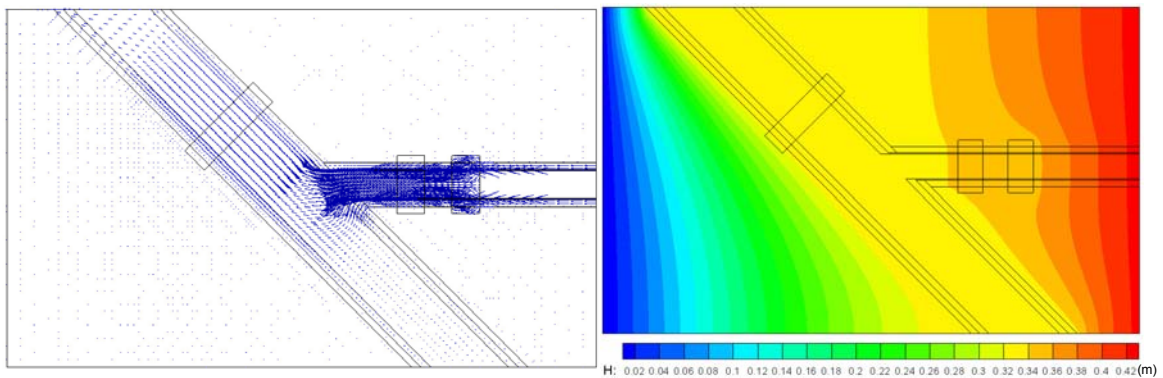


図-4.23 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース C-5-P)

コンクリート材料が健全であるC-13-Pでは、処分坑道に平行な圧力勾配の場合でもコンクリート材料である支保工やコンクリートプラグが止水材として働いているため、処分坑道や主要坑道には流れは認められない。主要坑道も坑道を覆う支保工が止水材として作用していることから坑道内部は岩盤から遮断されており、流れは全く発生していない。坑道周囲のEDZには、坑道沿いのわずかな流れが発生している。C-9-Pでは、支保工の透水性が大きくなるため、支保工を浸透した水の流れが砂相当の透水係数である埋め戻し材に発生している。流れの方向は、処分坑道から主要坑道へと向かうものである。これに対して、コンクリート材料が劣化した場合を想定したケースC-5-Pでは、コンクリートプラグの止水材としての効果がなくなるため、

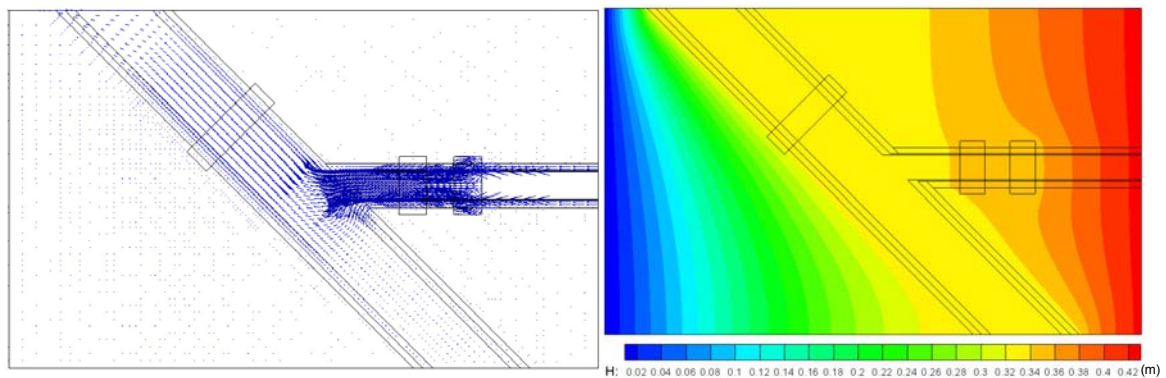


図-4.24 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-5-P)

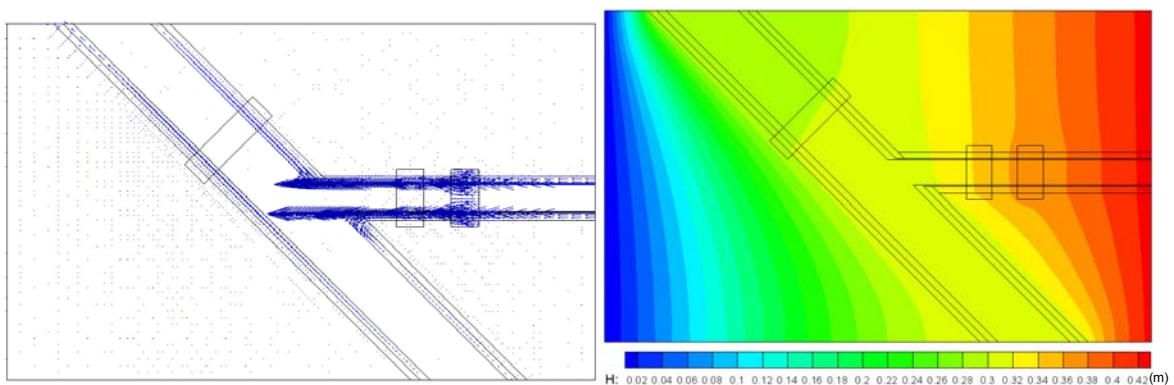


図-4.25 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-8-P)

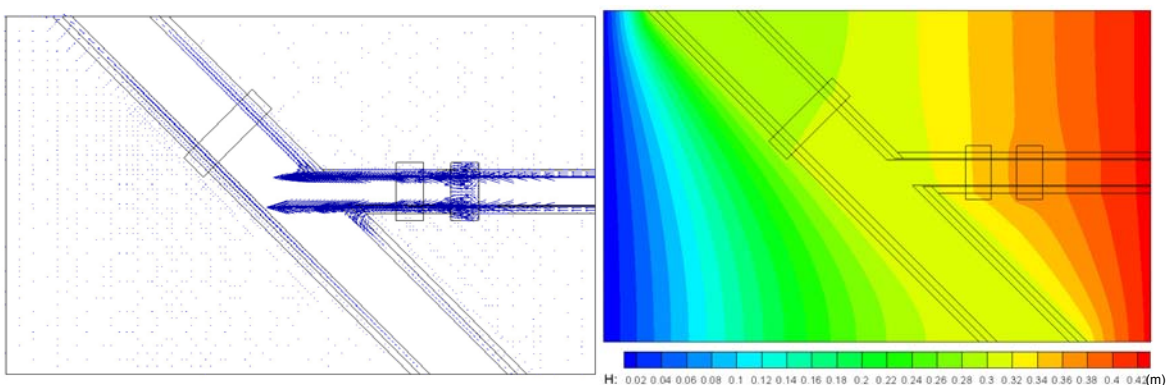


図-4.26 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース B-11-P)



処分坑道内に大きな流れが生じている。埋め戻し材の透水係数が砂相当であることから埋め戻し材の中を流れている。しかしながら、断面の大きい主要坑道に達すると、その勢いは緩慢になる。評価断面であるコンクリートプラグと緩衝材の設置される処分坑道近傍では、大きな流れが発生している。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

次に、埋め戻し材の透水係数の影響について示す。図-4.24 がケース B-5-P、図-4.25 がケース B-8-P、図-4.26 がケース B-11-P である。前述したように、このケースもベクトル長さは同じ縮尺であり、図からケース間で直接流速を比較することができる。この場合、支保工の透水係数が砂相当であることから、コンクリートプラグも止水材としては機能しない条件となっており、処分坑道に大規模な流れが発生している。流れは、いずれも処分坑道から主要坑道へ向

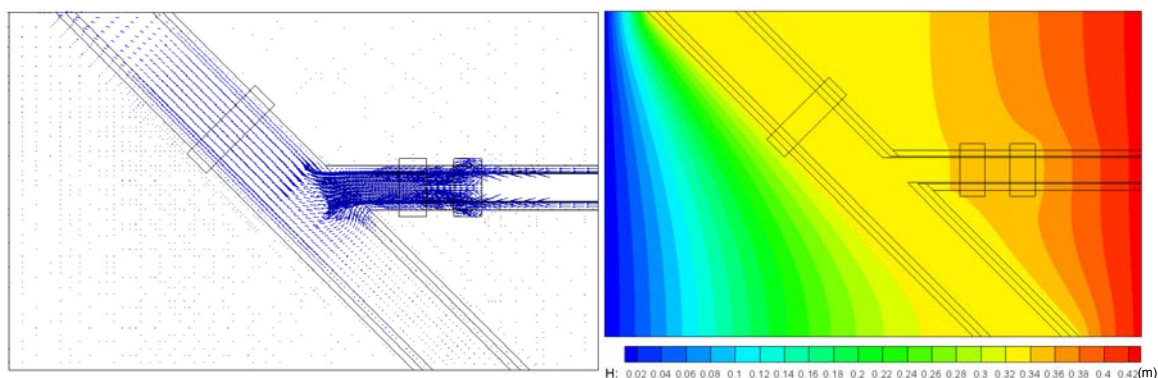


図-4.27 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-0-P)

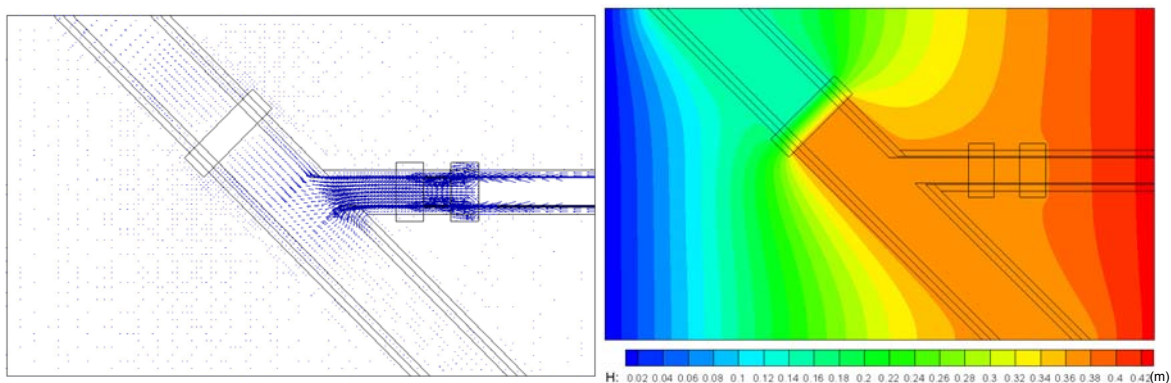


図-4.28 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-1-P)

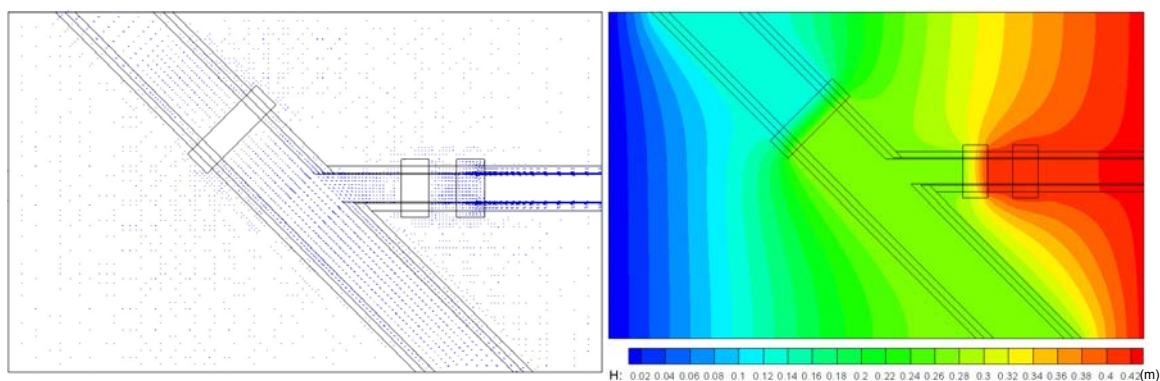


図-4.29 流速ベクトル図と全水頭コンター図(ケース P-2-P)

かう方向である。埋め戻し材の透水係数が小さくなると、処分坑道の埋め戻し材内の流れは抑制される。その代わり、支保工に流れが集中している。いずれの場合も、断面の大きい主要坑道に達すると、その勢いは緩慢になる。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

次に、粘土プラグ設置の効果について示す。図-4.27 がケース P-0-P, 図-4.28 がケース P-1-P, 図-4.29 がケース P-2-P である。ベクトル長さの縮尺は、いずれも同じである。主要坑道に粘土プラグが設置されるケース P-1-P では、粘土プラグがないケース P-0-P に比較して主要坑道の流れを抑制することができる。しかしながら、処分坑道から主要坑道に至る流れは速度が小さくなるものの、まだその流れは顕著である。処分坑道端部にも粘土プラグを設置するケース P-2-P では、処分坑道内の流れも抑制される。主要坑道沿いの流れは、主要坑道と処分坑道の両者を塞がれた形となるため、坑道沿いから岩盤へ向かう流れとなっている。流速も全体的に小さくなっており、粘土プラグ設置の効果がベクトル図からもわかる。全水頭コンター図からも同様の傾向が認められる。

次に、各構成要素における通過流量及び最大流速の比較について示す。評価断面における通過流量と最大流速は直交圧力勾配下の場合と同様に求めた。ただし、緩衝材における通過流量及び最大流速は、EDZ 及び支保工と比較して無視できるほど小さいため、比較の対象より外した。

図-4.30 はケース C シリーズの結果を示したものである。コンクリート材料が健全な場合、評価断面における通過流量は EDZ が支配的である。これは、透水係数が  $10^{-9}\text{m/s}$  の場合（ケース C-9-P）も同様である。最大流速も両者ではほとんど変化はない。これに対して、コンクリート材料の劣化を考慮したケース C-5-P では、支保工において流量が発生している。支保工と EDZ を合わせた流量は他のケースと比較して C-5-P のケースが著しく大きくなった。最大流速をみても、C-5-P のケースでは最大流速を示した構成要素が EDZ から支保工に代わり、ケース C-13-P, C-9-P と比較して約 40 倍となっている。このとき、EDZ における最大流速も増加している。通過流量及び最大流速の結果から、コンクリート材料が劣化し、透水係数が増加

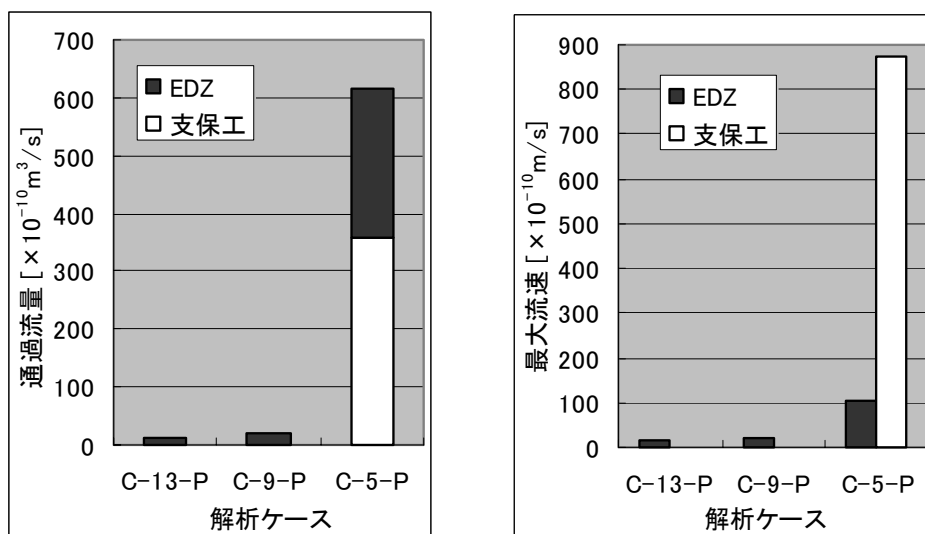


図-4.30 ケース C シリーズの通過流量及び最大流速の比較



すると、支保工が選択的な流れ場になる可能性を示す結果となった。

図-4.31 はケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較を示したものである。埋め戻し材で埋め戻される主要坑道の周囲の支保工が劣化している条件であるため、坑道内部材料の透水性に係わらず、評価断面周辺の流れ場に変化は生じていない。また、通過流量、最大流速の両者に関しても 3 つのケースでほとんど差は認められない。この傾向は直交圧力勾配の場合と同様である。通過流量は支保工との出入りが EDZ に比較して多くなっており、最大流速に関しても支保工内が EDZ よりも速くなっている。通過流量及び最大流速の結果から、支保工を選択的に流れる場では、埋め戻し材の効果は小さい結果となった。

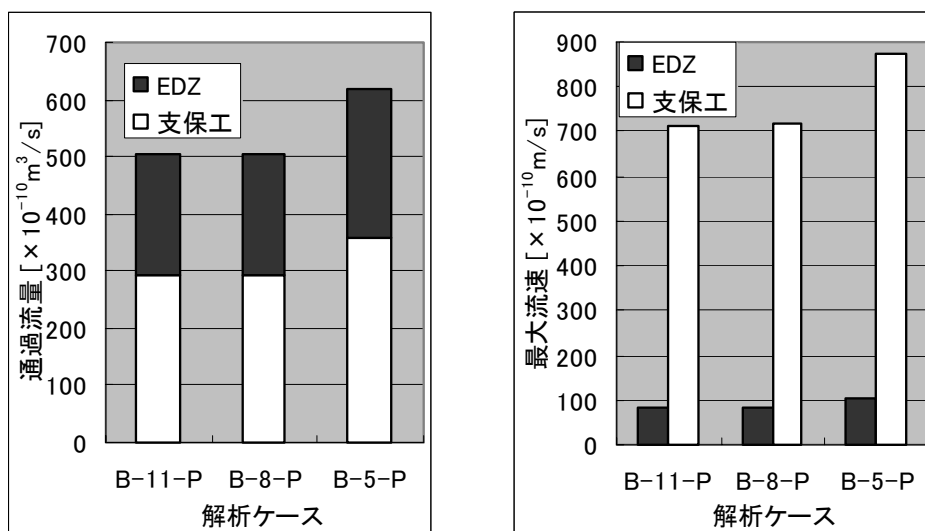


図-4.31 ケース B シリーズの通過流量及び最大流速の比較

図-4.32 はケース P シリーズの通過流量及び最大流速の比較を示したものである。ケース P-0-P は評価断面における通過流量がもっとも大きくなっている。主要坑道に粘土プラグを設

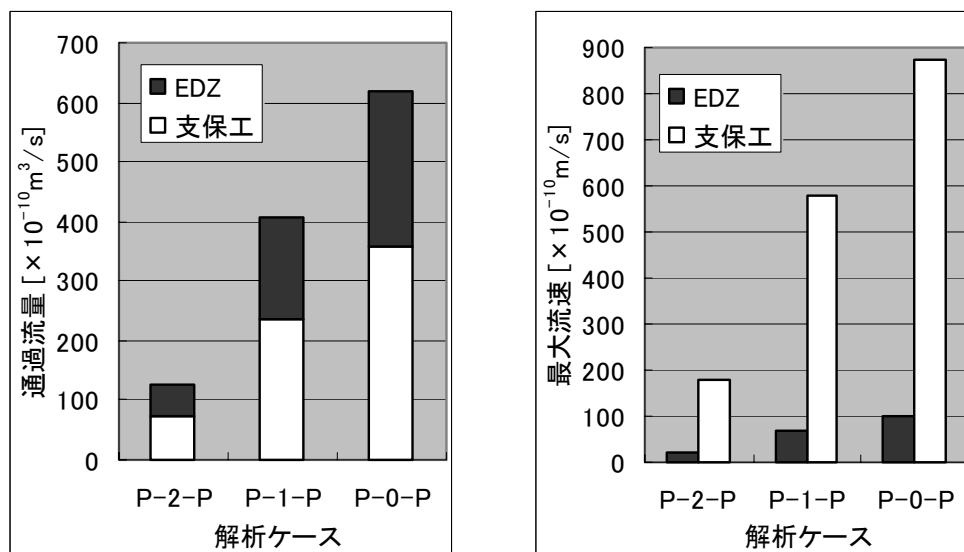


図-4.32 ケース P シリーズの通過流量及び最大流速の比較

置することにより（ケース P-1-P），通過流量は減少する。さらに処分坑道にも粘土プラグを設置すると（ケース P-2-P），通過流量はさらに減少する。流量は EDZ，支保工両者で発生しており，それぞれが粘土プラグの設置数に応じて減少している。最大流速についても粘土プラグの設置による効果は明らかである。各ケースでは支保工の最大流速が EDZ のそれのほぼ 9 倍である。通過流量及び最大流速の結果から，粘土プラグの設置数に応じて通過流量及び最大流速共に抑制することが可能であることが分かった。

#### 4.6 考察

直交圧力勾配下での地下水流動の模式図を図-4.33 に，平行圧力勾配下での地下水流動の模式図を図-4.34 に示す。流速ベクトルの結果から顕著な流れとなる構成要素，そこにおける流速分布を示したものである。

圧力勾配下において発生する流れ場に関しては，直交圧力勾配下の結果(図-4.33 参照)は，水の出入りの評価断面（図-4.7 参照）で流れが発生する場合においても，その方向は主要坑道から処分坑道に向かう流れであった。これに対して，平行圧力勾配下の結果（図-4.34 参照）は，コンクリートが健全な場合を除き，全てのケースにおいて水の出入りの評価断面で流れが発生し，その方向は処分坑道から主要坑道に向かうものであった。圧力勾配の方向は，処分場周辺の地下水流動場を大きく変え，水の出入りの評価断面に発生する水の流れの方向に大きく影響する。

解析モデル内の顕著な水の流れは，4.5 解析結果で示したように圧力勾配の方向によらず，支保工，EDZ，埋め戻し材内において発生している。人工バリア周囲の水の流れに直接関連するのは，水の出入りの評価断面における支保工、EDZ の通過流量や最大流速である。そこで，両構成要素のうち，値が大きい構成要素を代表値とし，圧力勾配の方向の影響について考察す

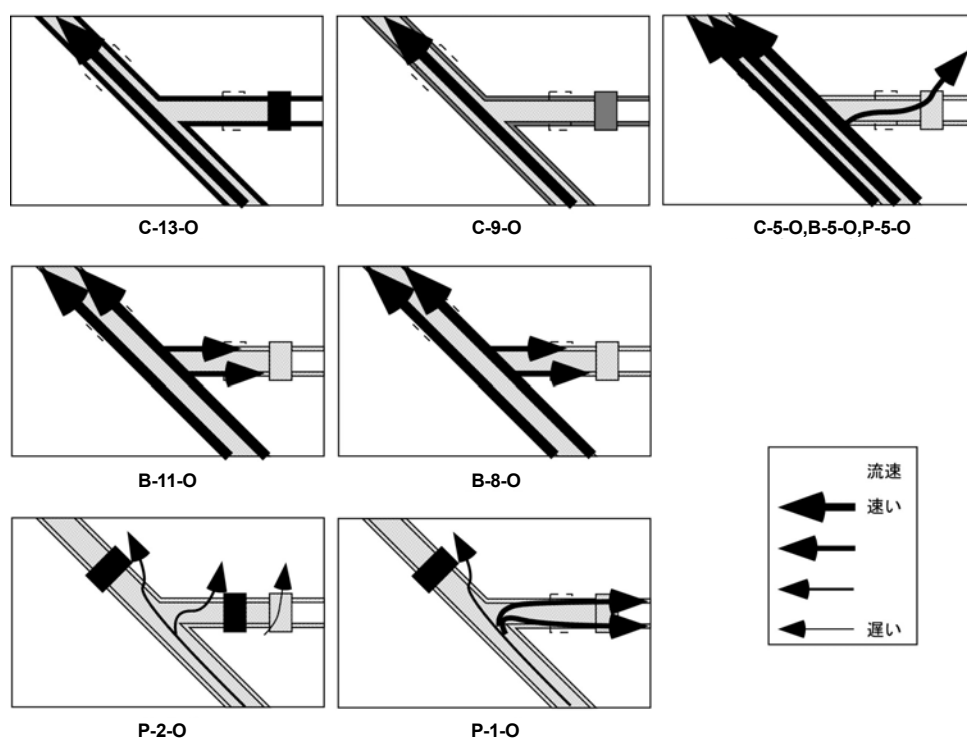


図-4.33 各ケースにおける地下水流動の模式図(直交圧力勾配下)

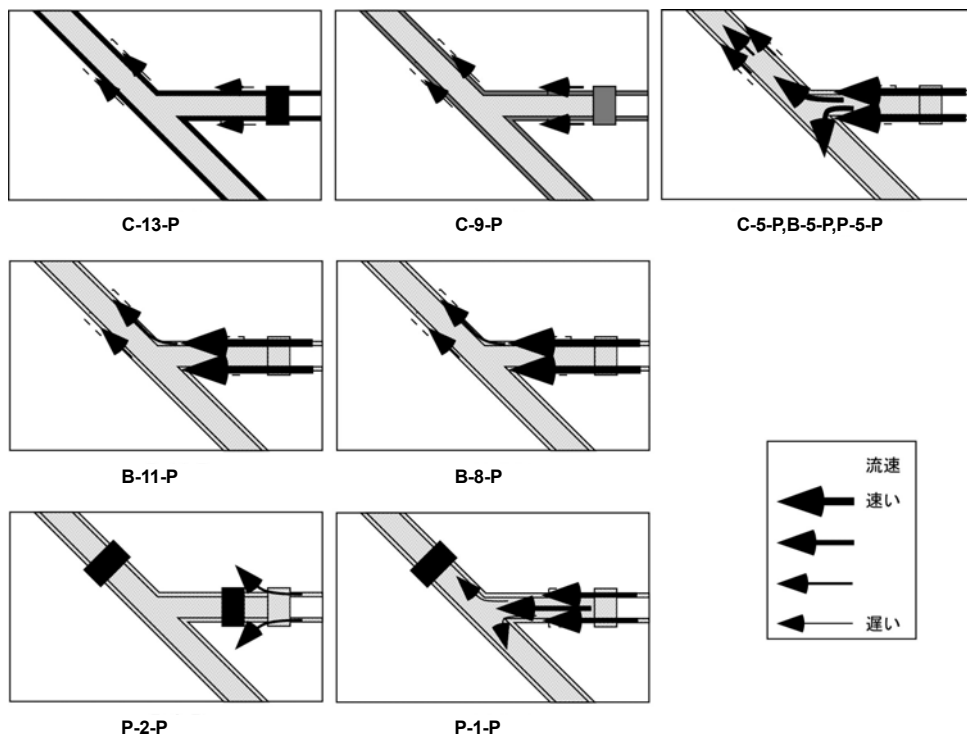


図-4.34 各ケースにおける地下水流動の模式図(平行圧力勾配下)

る。

圧力勾配の方向による最大流速と通過流量の比較を図-4.35～4.37に示す。図-4.35がコンクリートの影響を比較するCシリーズ、図-4.36が埋め戻し材の透水係数の影響を比較するBシリーズ、図-4.37が粘土プラグの設置数の影響を比較するPシリーズである。

図-4.35から、コンクリートが健全なC-13やC-9の条件では、圧力勾配の方向によらず、水の出入りの評価断面での通過流量や最大流速はほぼ同じ値である。これに対し、コンクリートの変質・劣化を想定したC-5になると、平行圧力勾配の条件下では、水の出入りの評価断面で

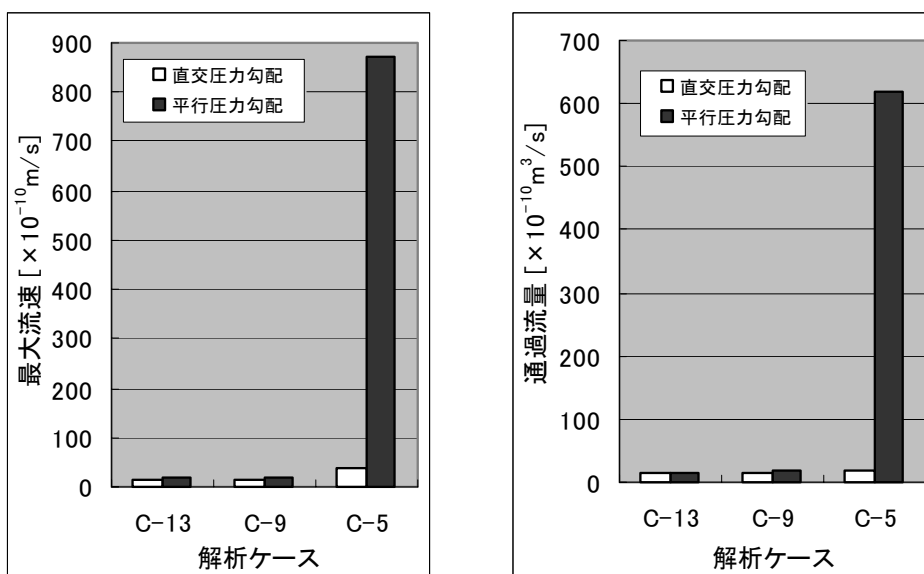


図-4.35 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（コンクリートの影響）

の通過流量，最大流速が突出して大きくなった。

図-4.36 から，コンクリートプラグや支保工の透水性が大きい場合には，埋め戻し材の透水係数によらず，水の出入りの評価断面での通過流量及び最大流速は，平行圧力勾配下の場合が顕著である。

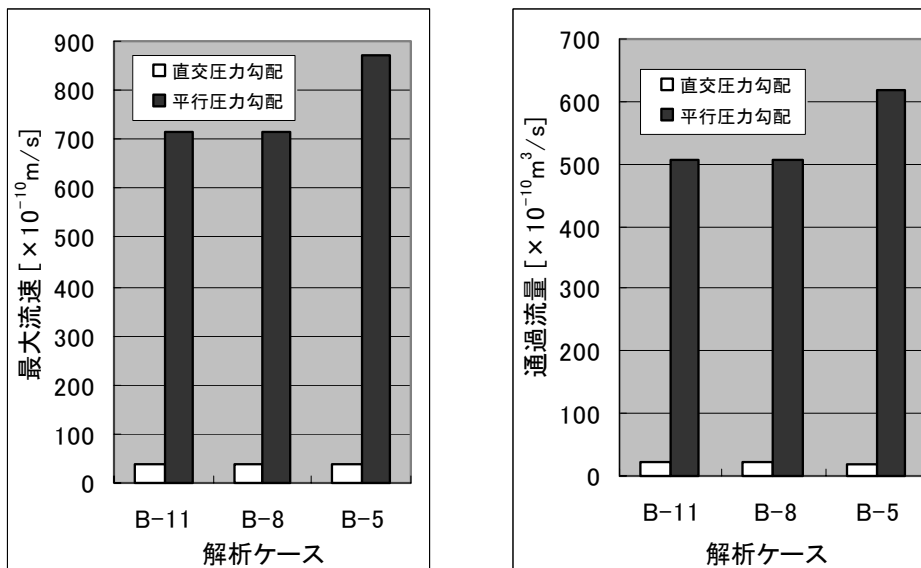


図-4.36 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（埋め戻し材の透水係数の影響）

図-4.37 から，圧力勾配が平行の場合は，水の出入りの評価断面はプラグの設置数に対応して増減する。粘土プラグを処分坑道にも設置する P-2 のケースでは直交圧力勾配下と平行圧力勾配下との差は小さくなる。

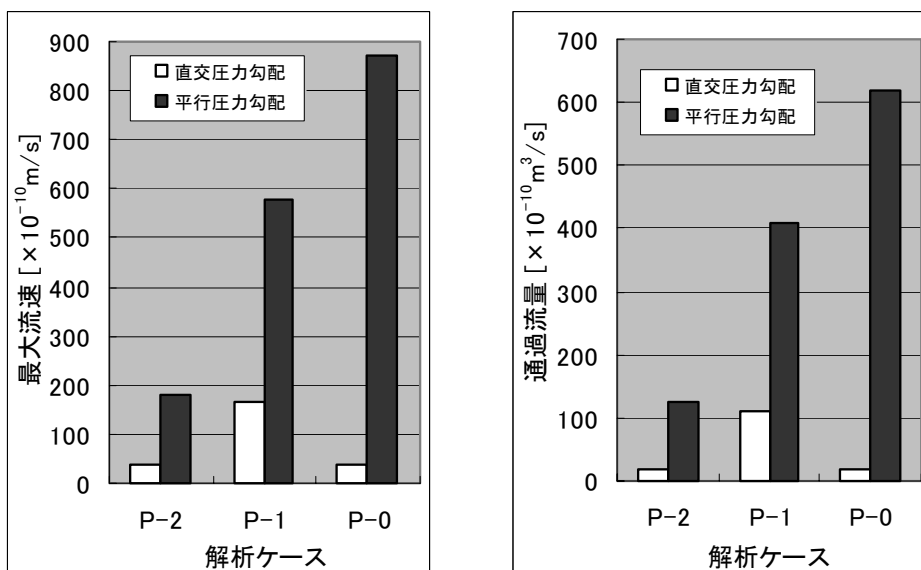


図-4.37 圧力勾配の違いによる最大流速，通過流量の差（粘土プラグの設置数の影響）

図-4.35～4.37 から，いずれのケースも平行圧力勾配の方が直交圧力勾配の時よりも，水の

出入りの評価断面での最大流速及び通過流量は大きいことが分かる。両者の値が接近しているのは、コンクリートプラグや支保工が健全な場合、あるいは粘土プラグを処分坑道にも設置する場合であり、人工バリアの比較的近くに流れを止める閉鎖機能がある場合である。

以上の結果から、処分坑道の端部に設置し、緩衝材の膨出を抑制するコンクリートプラグに関しては、その透水性についても全体の地下水流動に大きく影響を与えることが示されている。しかしながら、セメント材料は長期においては変質・劣化する恐れがあり、性能に不確実性を持つ。したがって、処分システム全体の安全性を確保するためにはコンクリートの影響に左右されにくいシステムの構築が求められる。

一方、粘土プラグ、埋め戻し材、緩衝材は、粘土材料を用いることが考えられている。流れ場がある場合、ベントナイトは長期にわたり侵食され、流出することが懸念される。これまでのベントナイトを用いた流出に関する試験により、流速が  $10^{-6}\text{m/s}$  の条件において侵食現象が確認されている（松本・棚井，2004）。本検討では、いずれのケースも緩衝材周囲の支保工で確認された最大流速がこれよりも小さい流速であったことから、人工バリアに関しても物理的に安定であることが期待できる。

圧力勾配の方向は、最大流速及び通過流量に対して大きな影響を与える結果であった。これは、処分場の設計においてレイアウトを選定する際、圧力勾配の方向を十分に考慮する必要があることを示している。

閉鎖システムを考える場合、支保工やコンクリートプラグであるセメント材料の変質・劣化に伴う透水性の評価や、埋め戻し材と粘土プラグの適切な組合せの検討が必要といえる。また、直交圧力勾配条件の C シリーズ、B シリーズの結果は、粘土プラグを設置しないことにより、処分パネル周囲に流れ場を誘発させ、人工バリアの設置される処分パネル内を水理的に安定させる可能性を示すものであり、このような処分場概念への影響についても検討していく必要がある。

本検討では、坑道交差部における水理解析により検討を行ったが、上記を踏まえ、定置方式や各構成要素の物性値の影響を把握するとともに、スケールについては、坑道交差部のみならず、坑道全体、パネル規模、さらにはアクセス坑道を考慮した処分場規模での解析等を実施する必要がある。これらの検討によって、構成要素に要求する要件を定量的に評価し、設計に反映させていく必要がある。

## 5. おわりに

原環機構とサイクル機構が設置した「処分場閉鎖技術に関する検討会」において、処分システムに求められる閉鎖性能の概略評価を行うための水理解析を行った。堆積岩を対象とし、処分坑道と主要坑道との坑道交差部で存在すると考えられる構成要素を考慮した飽和浸透流解析により、人工バリアに隣接する EDZ 及び支保工における地下水流量を指標とし、閉鎖要素の性能を比較検討した。

今回の設定における解析の結果、全体の地下水流動に対して圧力勾配の方向が大きな影響を与えることがわかった。また、同じ圧力勾配の条件下では、コンクリートの透水性及び粘土プラグの設置の有無は影響が大きいですが、埋め戻し材の透水性はその影響が小さいことが明らかとなった。

閉鎖システムを考える場合、支保工やコンクリートプラグであるセメント材料の変質・劣化に伴う透水性の評価や、埋め戻し材と粘土プラグの適切な組合せの検討の必要性が示された。

## 謝 辞

本検討における水理解析の実施では、検査開発株式会社の酒井裕一氏に多大なご協力をいただいた。また、D-transu3D-EL のソースコードに関して、開発者の一人である株式会社ダイヤコンサルタントの菱谷智幸氏には貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- Autio, J., Hautajärvi, A., Salo, J.-P. and Vieno, T.: “Backfilling concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto” , 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- Bennett, D.G., Papenguth, H.W., Chu, M.S.Y., Galson, D.A., Duerden, S.L. and Matthews, M.: “International workshop on the uses of backfill in nuclear waste repositories” , Carsbad, New Mexico, USA, May 1998, US Department of Energy / Environment Agency R&D Technical Report P178, Environment Agency, Bristol (1998).
- 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).
- 電力中央研究所・電気事業連合会：“高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術”（1999）。
- 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：“高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上に向けて－土木工学に係わる技術を中心として－”（2004）。
- 原子力発電環境整備機構：“高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料”， NUMO-TR-04-01 (2004)。
- Johnson, L.H. and Blümling, P.: “Requirements for backfill in radioactive waste repositories in clay” , 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- 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総論レポート， JNC TN1400 99-020 (1999a)。
- 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 (1999b)。
- 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 (1999c)。
- 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－”， JNC TN1400 2002-003 (2002)。
- 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 14 年度報告－”， JNC TN1400 2003-004 (2003)。
- 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 15 年度報告－”， JNC TN1400 2004-007 (2004)。
- Köster, R., Maiwald-Rietmann, H.-U. and Laske, D.: “Development of Backfill Materials in an Underground Salt Repository” , 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- ONDRAF/NIRAS : “Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories” , Brussels, March 2002 (2002).
- Nishigaki, M, Hishiya, T. and Hashimoto, N.: “Density Dependent Groundwater Flow with Mass Transport in Saturated-Unsaturated Porous Media” , Proceedings of the First



- Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, pp.1375-1380 (2001).
- 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵食特性”，JNC TN8400 2003-035 (2004).
- Pusch, R.：“Backfilling with Mixtures of Bentonite/Ballast Materials or Natural Smectitic Clay?”，SKB TR-98-16 (1998).
- SKB：“Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop”，SKB IPR-02-05 (2002).
- Svemar, C.：“Major Layout-and Design-Determining Factors for Swedish KBS-3 Type Repository for Final Disposal of Spent Nuclear Fuel”，Radioactive Waste Management and Environmental Remediation-ASME 1995
- 杉田裕，栗原雄二，川上進，神徳敬，油井三和：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア性能等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先（その2）”，JNC TN8400 2003-015 (2003).
- 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：“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”，原子力バックエンド研究 **10**, No.1-2, pp.103-112 (2004).

## 付録-1 国際ワークショップの概要（1）

### International workshop on the uses of backfill in nuclear waste repositories

1998年5月に米国の連邦エネルギー省（DOE）と英国の Environment Agency が共催し、カールスバッドで開催された埋め戻しの仕様に関する国際ワークショップである（Bennett et al., 1998）。廃棄物の対象は、低中レベル廃棄物、TRU 廃棄物、高レベル廃棄物、使用済み燃料である。本ワークショップの総括は、第6回の International Workshop on Design and Construction of Final Repositories でこれまでの議論の紹介として報告された（Bennett et al., 2002）。ここでは、ワークショップの結論について概要を示す。

ワークショップでは、backfill 材料としてセメント、混合セメント、酸化マグネシウム、岩塩、ベントナイトが挙げられた。本論でも述べたように処分概念によっては、緩衝材と埋め戻し材を同義で用いており、また、上述したように本ワークショップは対象とする廃棄物を高レベル廃棄物に限定していないことから、低中レベル廃棄物、TRU 廃棄物に関する材料も含めた議論がされている。

高レベル廃棄物に対して、人工バリアを定置した後に残される坑道等の空間を閉鎖するために粘土材料を用いるのは、カナダ、スウェーデン、フランス、スペイン、スイス、ベルギー等の処分概念である。粘土質岩盤を母岩とする場合は母岩がそのまま材料となり、硬岩の場合は粘土（ベントナイト）と母岩との混合材が材料となる。

#### (1)材料に関わる主要プロセス

ワークショップでは、各廃棄物の処分概念に応じた backfill 材料及びそれに関わる特性との関係をとりとまとめた。付表-1.1 はその材料を選択する際に、主な要因となる特性を示したものである。機能は、化学、水理、構造、熱に分類でき、さらに特性を細分化できる。それぞれの材料の選択時に考慮する必要がある特性を示している。

付表-1.1 backfill 材料に関わる主要プロセス

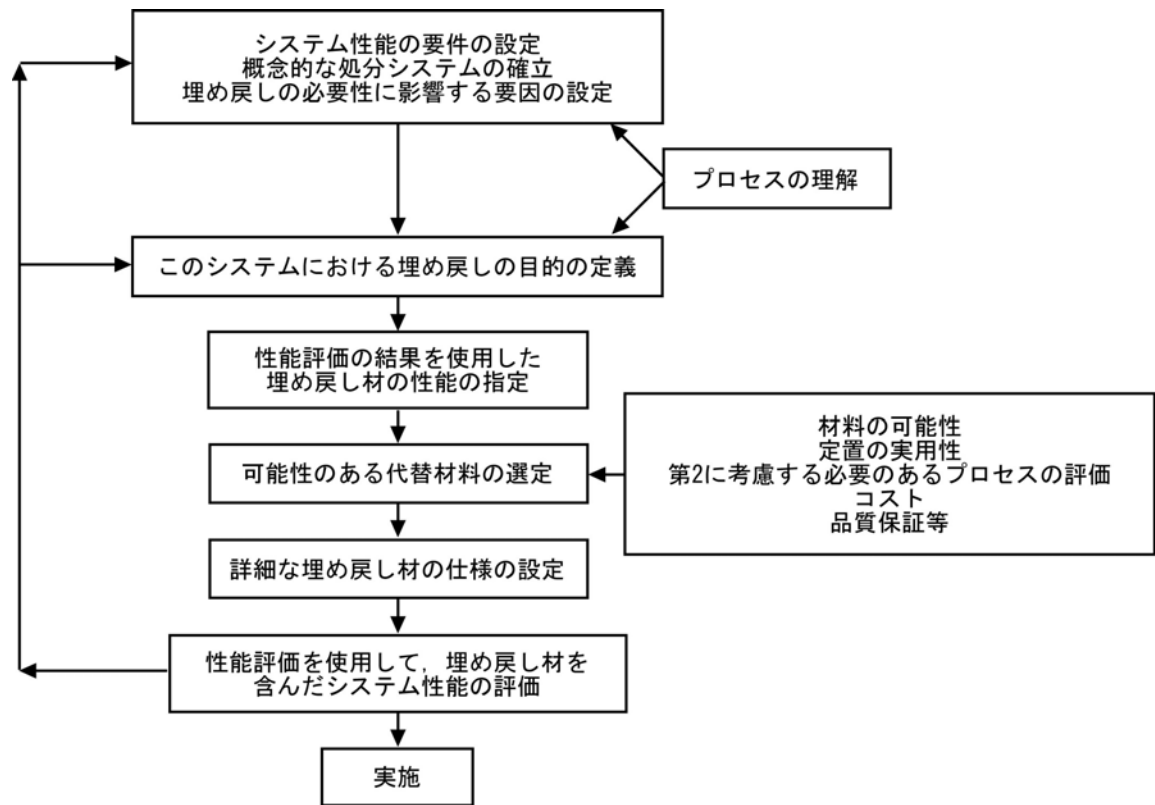
| 材料の機能 | 特性            | 材料   |    |   |          |      |
|-------|---------------|------|----|---|----------|------|
|       |               | セメント | 粘土 | 塩 | 酸化マグネシウム | リン酸塩 |
| 化学    | 緩衝性／平衡力       | ✓    |    |   | ✓        |      |
|       | 溶解性コントロール     | ✓    |    |   | ✓        | ✓    |
|       | 収着性コントロール     | ✓    | ✓  |   |          | ✓    |
| 水理    | 透水性 or 透気性    | ✓    | ✓  | ✓ | ✓        |      |
|       | 拡散性           | ～    | ✓  | ✓ |          |      |
|       | コロイドフィルトレーション | ～    | ✓  |   |          |      |
| 構造    | 膨潤圧           |      | ✓  |   | ✓        |      |
|       | クリープ          | ✓    |    | ✓ |          |      |
|       | 強度            | ✓    |    |   | ✓        |      |
|       | シール性          |      |    | ✓ | ✓        |      |
| 熱     | 熱伝導性          |      | ✓  | ～ |          |      |

✓：埋め戻し材の選択時に第1に考慮する必要がある特性

～：埋め戻し材の選択時に第2に考慮する必要がある特性

(2)材料選定の方法論（最適化）

ワークショップ開催の目的の一つが、材料選定の基本的な方法論を導き出すことであった。付図-1.1 は、ワークショップで導き出した材料の選定フローである。理想的な特性から開始し、段階を進めるに従い現実的な特性を評価する方法である。図中に示すように、安全評価を取り込んだ繰り返し評価を経て、最終的な材料を選定する。このような構造的かつ綿密な評価手法を示すことで、評価結果に対する規制局や利害関係者の信頼を築くとともに材料の最適化が可能となると考えられる。



付図-1.1 材料の選定フロー

付表-1.2 今後解釈が必要と考えられる課題（水理特性）

| 影響 | 材料                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                         |                                                                                                  |                                                                              |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|    | セメント                                                                                                                                                          | 粘土                                                                                                                                                      | 塩                                                                                                | 酸化マグネシウム                                                                     |
| 水理 | <ul style="list-style-type: none"><li>・水理特性。</li><li>・ニアフィールドの空間的な不均一性、亀裂進展、亀裂閉塞の過程</li><li>・他材料（粘土、岩等）との相互作用</li><li>・セメント状態の処分場から母岩周辺へアルカリブルームの移行</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・経年劣化（熱水変質、イライト化、シリカ化）による膨潤特性の低下、透水性の増加</li><li>・経年劣化材料の特性</li><li>・ガス移行メカニズム</li><li>・他材料（スチール等）との相互作用</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・安全評価では塩水注入を過敏評価しているかもしれない</li><li>・塩埋め戻し材の物性評価。</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>・微生物反応</li><li>・水理特性及びその他の特性</li></ul> |

(3)主要プロセスの現状の理解度

各材料において、今後解釈が必要と考えられる課題が付表-1.2 にまとめられた。表は水理特性についてまとめたものである。

粘土材料に関わる課題は、劣化や相互作用等の長期挙動の解明が主なものとして示された。

(4)結論

ワークショップの議論を受けた、閉鎖に関わる結論として、長期挙動の評価に関する問題のクローズアップ等、以下のようにまとめられた。

- ・埋め戻し材の評価に関して、安全評価の一つのシナリオとして埋め戻し材の不良が考えられているが、水理特性の長期における変化、ガス移行特性が不十分であり、他の材料（鉄等）との両立性が明らかになっていない。
- ・安全評価での埋め戻し材の入力においては、設置初期に期待できる物性値を初期値として用い、その値をそのまま長期の解析にも外挿している。これらの評価（解析）では、化学反応による影響等は無視されている。
- ・技術的不確実性への取組み、埋め戻し材の安全評価への取込みが、今後の課題である。
- ・廃棄物が多様であり、それに対応してさまざまな処分概念があるように、共通する埋め戻し概念というものがない。
- ・廃棄体や処分概念が共通していれば、埋め戻しの材料等、共通な部分が多々ある。それぞれの材料の選択は参加機関においてコンセンサスを得られた。

**参考文献**

- Bennett, D.G., Papenguth, H.W., Chu, M.S.Y., Galson, D.A., Duerden, S.L. and Matthews, M.L.: “International workshop on the uses of backfill in nuclear waste repositories, R&D Technical Report P178, Environment Agency (1998).
- Bennett, D.G., Duerden, S.L., Galson, D.A., Yearsley, R.A. and Papenguth, H.W.: “Use of backfill in radioactive waste repositories: Reference methodology for backfill selection and optimization, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).

## 付録-2 国際ワークショップの概要（2）

### Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop

2001年にスウェーデンのSKB及びフィンランドのPosiva社が共催し、SKBのエスボ試験場で開催された国際ワークショップである。題材は、SKB及びPosiva社が検討している堅置き方式の処分概念（KBS-3）における埋め戻しの要件であった。セッションは、

- セッション1：安全評価における埋め戻しの役割、
- セッション2：埋め戻しの実施工程及び適用する技術、
- セッション3：岩盤と埋め戻しの相互作用

の3つであった。

KBS-3の処分概念は、処分坑道に掘削された処分孔に使用済み燃料を封入した廃棄体が定置され、処分孔の廃棄体の周囲には緩衝材が充填されるが、処分坑道は埋め戻し材で埋め戻される。

ここでは、ワークショップで示されたSKBとPOSIVAの閉鎖の考え方、ワークショップの結論を紹介する。

#### (1)SKBの考え方 (Sellin, 2002)

SKBの処分概念は、KBS-1, KBS-2, KBS-3, SKB91, SR97と検討されてきている。KBS-1では、廃棄体はガラス固化体であった。緩衝材はバリアではなくガラス固化体を処分孔の中心に保持するために使用するものと考えられていた。KBS-2では、廃棄物がガラス固化体から使用済み燃料に代わった。使用済み燃料は核種インベントリーが高いため、緩衝材に対してバリア機能を求めるようになった。KBS-1及びKBS-2では、埋め戻し材という概念はなかった。KBS-3の処分概念において、初めて埋め戻し材という概念が登場し、岩盤同等の透水係数を持つという考えが示された。ここまでは、材料はベントナイトと砂の混合材料で混合比はB（ベントナイト）/S（ケイ砂）=20/80であった。SKB91の処分概念では、埋め戻し材に対して圧縮性、長期安定性を加えた。SR97の処分概念で埋め戻し材の材料の混合比がB/S=15/85に代わり、透水係数 $10E-10m/s$ 、膨潤圧0.1MPaという基準値が示された。

SR97の処分概念における埋め戻しの考え方はこうである。

- ①埋め戻し材はそれ自体バリアではない。
- ②その目的は緩衝材及び岩盤が好ましい特性を保持する事を保証することである。

放射性核種の移行への影響を示すためには、埋め戻し材中における流量の影響（流速が早くなることの影響）を評価する必要があるが、このような研究はなされていない。

SR97の処分概念では、埋め戻し材が処分概念の弱点の一つになることを指摘しており、特に長期の問題が今後の課題としている。たとえば、イオン交換の影響はベントナイト量が少ない埋め戻し材では無視できない問題であり、高塩濃度は埋め戻し材の膨潤機能を奪う可能性がある。流出に関しては大きな問題にはならないと考えられるが、水みちが形成される可能性がある。これらを考慮しても、透水係数 $10E-10m/s$ 、膨潤圧0.1MPaという基準値は、長期にわたり保証されるものではない。

その対策として、たとえば、内陸の処分地とすればイオン強度の低い地下水となり、その影響を抑えられる。また、ベントナイト量を多くすることで膨潤、水理特性を上げられる。しか

し、これは同時に埋め戻し材の材料のコスト高や剛性の低下の原因となる。コストや性能の面では天然粘土材を使用することも考えられるが、これまでのところ材料の特性は十分に調査されているとはいえない。

人工バリアとの関係ということでは、埋め戻しという概念そのものを制限できる横置き方式を採用するという考え方もある。

これらの諸問題に関して、SKBは2007年までに解決策を考慮した評価が求められている。

## (2)POSIVAの考え方 (Autio et al., 2002)

フィンランドで進められているオルキルオトの処分場の処分概念に関しては、KBS-3タイプの処分概念に加え、異なる深度での2段方式、200m程度の水平坑道を使うMLH等の複数の概念が考えられている。ワークショップでは、KBS-3タイプの処分概念について紹介された。

オルキルオトでは、処分深度は400-700mで計画されているが、地下水の塩濃度や岩盤の強度の面から浅いほうが望ましいとされている。塩濃度に関しては、処分場の設計では35g/lを要求しており、これは海洋水と同じである。深部500mでは地下水の塩濃度は10-25g/lで設計の要求を満たすが、800m以深では地下水は塩濃度30-75g/lの環境となり、設計の要件を超える。岩盤強度の観点からは、深度が700m程度になると、岩盤強度に比して作用する応力が大きくなるため、掘削時に対策が必要になる。

埋め戻し材に考えられる機能は、以下が挙げられる。

- ①緩衝材の膨潤に対抗すること
- ②坑道を力学的に安定に保つこと
- ③他のバリア材への影響が小さいこと
- ④長期における力学的化学的安定性があること
- ⑤低透水性であること
- ⑥材料は、人工物より天然のものが望ましい

しかしながら、上記の全てを求めるわけではなく、低透水性について言えば坑道沿いのEDZのみを分断出来ればよいと考えている。そういう意味では、埋め戻し材よりは粘土プラグの機能に期待するところが多い。

これは、EDZは掘削初期の段階から長期に渡って高透水性になっており、坑道内をきちんと処置してもその周りを放置しては意味がないということである。また、埋め戻し材そのものも地下水の塩濃度が35g/lであると、B/S=30/70の混合材料でも十分な機能は発揮できないと考えられる。天然粘土であるFriedland粘土は塩水の影響を受けにくく、塩濃度20%でも透水係数 $10E-10$  m/s、膨潤圧600kPaを確保すると考えられるが、長期の機能としては課題がある。

そこで、考えられているのが要所を重点的に処置する「区分け」処分という埋め戻し概念である。これは、坑道やEDZにおける水みちを高圧縮粘土のプラグで分断するものである。この場合、坑道そのものは止水性を期待せずに砕石等で埋め戻す。SKBの考え方にもあるように、廃棄体の定置方式を横置き方式とすれば、処分坑道における埋め戻し概念の問題を排除できるが、他の坑道における問題を解決したことにはならない。これに対して、「区分け」処分の埋め戻し概念は、全ての坑道に当てはめることが出来る。

粘土プラグを処分坑道の両端部に置くことで、坑道内の圧力勾配を低下させる。坑道を砕石で埋め戻すと、その隙間にはベントナイトが侵入していくと考えられるが、砕石よりも細かい

フィルターとして機能する層をプラグとの接触面に設置しておく。処分孔の上にも同じようなフィルター層を施工する。低透水性の確保と塩水へ対抗するため、2,000 kg/m<sup>3</sup> 程度の高密度が要求される。他の坑道では、破砕帯との関係を考慮して適切な位置に設置する。

### (3) ワークショップでの結論

ワークショップでまとめられた主な結論は以下のようである。

- ・ 埋め戻しを確実にを行う技術が必要であり、さまざまな施工方法から適切な工法を組合せることにより要求される性能（低透水性等）を確保する必要がある。さらに、埋め戻し材の施工技術は、その解析での取り扱いとの整合性にも考慮する必要がある。
- ・ 処分場の評価の観点では、埋め戻し技術を無視することは出来ない。解析での取り扱いと実際の処分場環境を作り出す工学技術との整合が求められる。3次元での解析評価は、坑道周囲における移行経路の評価に効果的である。
- ・ 海水条件はベントナイトの諸特性に影響するため、これらを考慮した設計要件の設定が重要となる。
- ・ 長期の挙動を考えた場合想定される問題を考慮する必要がある。たとえば、岩盤と埋め戻し材の密着が維持されているのか、EDZにおける割れ目の開口が発生するのか、等がこれにあたる。

### 参考文献

Autio, J., Riekkora, R. and Salo, J-P. : “Alternative backfilling concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto, Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop, SKB IPR-02-05, pp.39-48 (2002).

Sellin, P.: What are the requirements of the backfill from the point of long-term safety?, Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop, SKB IPR-02-05, pp.31-37 (2002).



### 付録-3 国際ワークショップの概要（3）

#### 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories

処分場の設計・建設に関連するテーマを設定して定期的に行われている国際ワークショップの第6回目である。2002年にベルギーの ONDRAF/NIRAS が主催し、ブリュッセルで開催された。本ワークショップでは、1995年にフランスで開催された第3回において「Plugging and Sealing」を題材とした経緯がある。今回の題材は、「Backfilling in Radioactive Waste Disposal」であった。セッションは

セッション1：概括、

セッション2：安全の観点からの要求、機能の観点からの要求、

セッション3, 4：実験、実現可能性

の4つであった。

廃棄物の対象は高レベル廃棄物に限定していないことから、低中レベル廃棄物や TRU 廃棄物のについても報告があった。

ここでは、粘土材料を題材とした処分概念のものを示す。

##### (1)粘土質岩盤における要求（Johnson and Blümling, 2002）

スイスは処分場の候補岩盤として、結晶質岩盤と粘土質岩盤の両者を検討している。ここでは、粘土質岩盤における埋め戻し材（スイスでは廃棄体の周囲を充填するものを埋め戻し材と呼んでおり、緩衝材の機能を要求している。）の設計要件について報告している。スイスで検討を進めている粘土質岩盤はベルギーの泥岩である Boom clay とスイスの泥質岩である Opalinus Clay である。

Boom clay のように変形性に富む岩盤では、坑道掘削後、直ちに分厚いコンクリート製の支保工が設置される。この支保工により坑道を維持し、内部に廃棄体、ベントナイトブロックが充填される。一方、Opalinus Clay の場合、強度がより強いことから坑道は支保工が無く、下支えとなるベントナイトブロックの上に廃棄体が設置され、廃棄体周囲の隙間は粒状ベントナイトで充填される。いずれの場合も岩盤の透水係数が低いことが特徴であり、Boom clay では  $1.0E-12$  m/s, Opalinus Clay では  $<1.0E-13$  m/s である。廃棄体が設置される部分では、周囲に 40-50m 厚の粘土質岩盤が取り囲むようにする。

このような粘土質岩盤における埋め戻し材に関する設計が付表-3.1, 3.2 にまとめられている。

付表-3.1 安全機能に関する各々のバリアの相対的重み付け

| 安全機能          | 廃棄体／コンテナ                                   | 埋め戻し材                                                 | 岩盤                       |
|---------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| 制限／崩壊         | 多くの RN s : D or S<br>幾つかの RN s (I-129) : m | S: 多くの要素に対しては強い収着、多くの RN s に対して溶解度制限                  | D-長い輸送パス内の収着             |
| 希釈            | S-数 RN s はコンテナ破壊前崩壊                        | m-母岩内と同じだが薄いバリアのみ                                     | D-遅い拡散、マトリックス拡散、時間と共に広がる |
| 損害的現象、不確実性の排除 | S-キャニスターの寿命は高温、放射線期間をカバー                   | D-温度の影響から岩盤を守る、力学的影響から岩とキャニスターを守る、腐食からキャニスターを守るかもしれない |                          |
| 不確実性の緩和       | S-キャニスターの寿命は THM の不確実性挙動をカバー               | S-例えば膨潤と低透水係数、想定外シナリオの相殺                              | D-自己シール特性                |

(D:最重要、S:重要、m:少し重要) (RN s : 放射性核種)

付表-3.2 粘土質岩盤における処分場での埋め戻し材の役割及び機能要件

| 埋め戻し材の役割                                                                 | 機能要件                                             | コメント                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 安定なキャニスター定置位置を与える                                                        | 現実的で、安全で、経済的な埋め戻し材定置作業                           |                                                                                                |
| 長期間のキャニスター支持、キャニスター位置の維持、一応応力環境を与える                                      | 十分な強度、クリープ特性、緩衝材応力に対する可塑性                        |                                                                                                |
| 掘削による閉鎖後の力学的ダメージから岩盤を守る                                                  | トンネルの内空変位を抑え、EDZ 内の閉じた引っ張り亀裂を助長する十分な膨潤性能         | 周辺岩盤のクリープ特性は EDZ の幅及び透水係数の増加を促すかもしれない。OPALINUSCLAY では重要である。                                    |
| 地下水流れを制限することによる長期の好ましい水理状況、コンテナの健全性を促す化学環境を与えることにより、廃棄体からの放出を遅延させ、保持させる。 | 低透水係数、自己シール性、埋め戻し材の有害成分を取り除くかまたは、キャニスターに輸送を減らす能力 | 拡散支配環境を与え、処分システム内のバスの発生を防ぐ。好ましい地球化学環境による多くの要素を減じる                                              |
| 放射性核種の収着                                                                 | 高収着性能                                            | 安全評価では岩盤と埋め戻し材の収着係数を同等にすることにより、safetyCase の頑健性を推奨している。<br>埋め戻し材内の遅延は線量の低減に貢献するがその貢献は岩盤に比べて小さい。 |
| 廃棄体及びキャニスターを許容できる低温度に維持する                                                | 許容できる熱伝導性                                        | 最大温度は廃棄体及びキャニスターによりきまる                                                                         |
| 岩盤を温度から守る                                                                | 許容できる埋め戻し材の厚さと熱伝導性                               | OPALINUSCLAY の最高温度を 90 度に設定。過去 200 百万年間にこの最大温度に達した経験がある。<br>この要件は重要ではないかもしれないが安全性の議論を簡単にする。    |

埋め戻しの主目的は、以下のようにまとめられる（Resele et al., 2002）。

- ・ 空洞の力学的な支え（内空変位、それらに起因する破壊を避ける）
- ・ 処分場内への流れ、処分場内での水・塩水流れ、処分場からの放射性核種流れを減らし立坑と坑道に沿った流れに対する抵抗力
- ・ 溶解限界に対する放射性核種の流れを小さくし、内空変位による水・塩水の排水を最小限にするために空隙体積等を小さく維持
- ・ 低溶解性限界と核種の高吸着性のための好ましい化学的環境の維持
- ・ 高溶解度能力
- ・ 長期安定性

### (3)フィンランドの埋め戻し概念（Autio et al.,2002）

フィンランドは使用済み燃料を廃棄体とする。廃棄体の定置方式は縦置き方式と横置き方式の両方式が検討されている。廃棄体の周囲に設置されるのが緩衝材で、それ以外の坑道や空間の充填に用いられるのが埋め戻し材である。

閉鎖に要求する機能として以下が挙げられている。

- ・ 乱されてない地球水理・化学の状態の再確立を促進する
- ・ 緩衝材と廃棄体に対して熱的、微生物的環境のみならず、好ましく予測可能な水理、化学、力学環境を与える

- ・ 表層水や他国の水（例えば氷河解け水等）の処分場への流入を制限する
- ・ 空洞及びEDZが処分場から出た放射性核種主要なルートなることを避ける

埋め戻し材の選択肢は以下の3つが考えられている。

- ①掘削ズリとベントナイト（30%くらいまで）の混合材
- ②自然混合層粘土
- ③区分化概念（坑道内は掘削ズリでEDZ沿いの移行経路はベントナイトブロックによるプラグで挟み込む）

今後ONKALOで各概念の性能を確認していく。

### 参考文献

- Autio, J., Hautajärvi, A., Salo, J.-P. and Vieno, T.: “Backfilling concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- Johnson, L.H. and Blümling, P.: “Requirements for backfill in radioactive waste repositories in clay, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- Resele, G., Niemeyer, M., Schwarz, R. and Klubertanz, G.: “Requirements on the Backfilling Concept for Waste Repositories as Deduced from Safety Analyses”, 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002)