



JAEA-Research

2007-021



JP0750144

JAEA-Research

## 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件

Requirements for Expected Performance of Closure Components  
in Crystalline Rock

藤田 朝雄 須山 泰宏\* 戸井田 克\*

Tomoo FUJITA, Yasuhiro SUYAMA\* and Masaru TOIDA\*

地層処分研究開発部門  
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

## 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

藤田 朝雄、須山 泰宏<sup>\*1</sup>、戸井田 克<sup>\*1</sup>

(2007年1月19日受理)

本報告書では、第2次取りまとめ以降の地層処分場の閉鎖技術に関する課題に基づいて、地下実験施設における止水プラグの原位置適用性試験結果などを踏まえ、結晶質岩における閉鎖要素に対して期待すべき性能要件及び閉鎖システムの考え方を取りまとめた。

止水プラグの原位置適用性試験に関しては、主に日本側が主体的に取り組んできた粘土プラグ施工、グラウト施工、蒸発散測定、トレーサー試験およびその評価について、全体を通じて既存の知見を取りまとめており、本試験結果に基づき、原位置における止水プラグ中心とした閉鎖要素の実現可能性について示した。

また、結晶質岩を対象に処分場で考えられる閉鎖に関わる事象を抽出し、その事象が発生する部位、事象の発生を抑制するための要件およびその具体的な対策方法について整理するとともに、これらに対して上記止水プラグの原位置適用性試験結果から得られた知見を整理した。さらに、そのように性能が期待できる個々の閉鎖要素を処分場レイアウト規模に適用していく閉鎖システムとしての考え方を整理し、課題を抽出した。

Requirements for Expected Performance of Closure Components in Crystalline Rock

Tomoo FUJITA, Yasuhiro SUYAMA<sup>\*1</sup> and Masaru TOIDA<sup>\*1</sup>

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 19, 2007)

Based on the results and experiences obtained from the tunnel sealing experiments in the Canadian underground research laboratory in crystalline rock under the collaboration with JNC (now JAEA), this report summarizes the requirements for closure components such as backfilling material and hydraulic plug from the viewpoint of expected barrier performance, taking account of key issues on sealing technologies which have been left open after H12 project.

The results of the tunnel sealing experiments indicate that the constructability of closure components and low permeability of the hydraulic plug is well performed. Requirements for the closure components and key issues for further study are identified from the viewpoint of barrier performance considering a range of events related to the sealing and taking account of where these are occurred as well as appropriate countermeasure for them. It is also discussed how to apply these preferable closure components to the scale of repository layout, and further technical issues are then identified.

Keywords: Sealing Technology, Performance Requirement, Crystalline Rock, TSX, Closure Components

---

<sup>\*1</sup> : KAJIMA CORPORATION

## 目 次

1.はじめに	1
1.1 背景及び目的	1
1.2 処分場の構成要素と処分場環境	2
1.2.1 処分場の構成要素	2
1.2.2 処分場環境	3
1.3 閉鎖技術に関する国内外の動向	4
1.3.1 閉鎖技術に関する海外の動向	4
1.3.2 閉鎖技術に関する国内の動向	8
1.4 結晶質岩における閉鎖要素に関する課題	10
2.地下実験施設におけるプラグ及びグラウトの原位置適用性試験	11
2.1 試験サイトの概要	11
2.2 原位置適用試験 (TSX) の概要	12
2.3 プラグ施工	13
2.4 プラグ周辺への粘土グラウト	15
2.4.1 注入孔のレイアウト	15
2.4.2 配合切り替えによる注入方法	16
2.4.3 粘土グラウトの注入施工	17
2.4.4 粘土グラウトの注入効果確認	18
2.5 蒸発散量計測による湧水評価	20
2.5.1 試験方法	20
2.5.2 試験結果	22
2.5.3 考察	23
2.6 圧入試験およびトレーサー試験	24
2.6.1 圧入試験	24
2.6.2 トレーサー試験	27
2.7 まとめおよび課題	32
3. 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件と閉鎖システムの考え方	33
3.1 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件	33
3.2 処分場レイアウト規模を対象とした閉鎖システムの考え方	35
3.2.1 既往の検討例	35
3.2.2 処分場レイアウト規模を対象とした閉鎖システムの考え方	36
3.3 残された課題	37
4.まとめ	38
参考文献	39

## Contents

<b>1. Introduction -----</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Background and objectives -----</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Repository components and repository environments-----</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1 Repository components -----</b>	<b>2</b>
<b>1.2.2 Repository environments -----</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Current status of domestic and international sealing technology-----</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1 Current status of international sealing technology-----</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2 Current status of domestic sealing technology-----</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Issues on sealing components in crystalline rock-----</b>	<b>10</b>
 <b>2. In-situ experiment of plug and grouting technology in underground rock laboratory</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Test site -----</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Tunnel sealing experiment (TSX)-----</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Plug construction -----</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Clay grouting around plug-----</b>	<b>15</b>
<b>2.4.1 Test layout-----</b>	<b>15</b>
<b>2.4.2 Injection method-----</b>	<b>16</b>
<b>2.4.3 Injection-----</b>	<b>17</b>
<b>2.4.4 Confirmation of effectiveness-----</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Evaporation measurement-----</b>	<b>20</b>
<b>2.5.1 Measurement method-----</b>	<b>20</b>
<b>2.5.2 Results-----</b>	<b>22</b>
<b>2.5.3 Prospect -----</b>	<b>23</b>
<b>2.6 Pressure test and tracer test -----</b>	<b>24</b>
<b>2.6.1 Pressure test-----</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2 Tracer test -----</b>	<b>27</b>
<b>2.7 Summary-----</b>	<b>32</b>
 <b>3. Performance requirement expected for closure components in crystalline</b>	
<b>rock and concept of sealing system-----</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Performance requirement expected for closure components in</b>	
<b>crystalline rock -----</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Concept of sealing system for repository layout dimension -----</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1 Current status of study on sealing system-----</b>	<b>35</b>
<b>3.2.2 Concept of sealing system for repository layout dimension-----</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Summary-----</b>	<b>37</b>
 <b>4. Conclusion-----</b>	<b>38</b>
 <b>Reference-----</b>	<b>39</b>

## 表 目 次

表 1.3-1	海外における閉鎖概念の考え方のまとめ-----	5
表 1.3-2	第2次取りまとめで示された閉鎖技術-----	9
表 1.3-3	「高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術」で示された閉鎖技術-----	9
表 2.3-1	試験工程表-----	15
表 2.4-1	粘土グラウトの注入実績-----	16
表 2.4-2	グラウト前後の透水係数の比較 -----	19
表 2.6-1	各フェーズにおける湧水量の整理結果 -----	24
表 2.6-2	トレーサー試験結果-----	28
表 3.1-1	結晶質岩における処分場で考えられる閉鎖に関わる事象およびその対策と TSXで得られた知見-----	34

## 図 目 次

図 1.2-1	地下施設での作業イメージ-----	3
図 2.1-1	試験位置周辺の地質状況-----	11
図 2.2-1	URLと試験位置-----	12
図 2.2-2	トンネルシーリング試験の概要 -----	13
図 2.3-1	トンネルシーリング試験のレイアウト -----	13
図 2.3-2	止水プラグ完成状況-----	14
図 2.4-1	グラウト注入のレイアウト-----	16
図 2.4-2	粘土グラウトの注入結果-----	18
図 2.4-3	注入濃度と注入量の関係-----	18
図 2.4-4	予備注入後の注入孔内の保持圧力（初期圧力 200kPa）-----	20
図 2.5-1	ベンチレーション試験レイアウト -----	20
図 2.5-2	局所蒸発散量計測位置-----	21
図 2.5-3	ベンチレーション試験結果-----	21
図 2.5-4	局所蒸発散量頻度分布-----	22
図 2.5-5	蒸発散量の岩盤壁面分布図-----	23
図 2.6-1	圧入試験結果（全フェーズ）-----	25
図 2.6-2	止水プラグ断面と湧水量計測位置-----	25
図 2.6-3	止水プラグからの湧水量（フェーズIII初期段階まで）-----	25
図 2.6-4	サイクロメータによる飽和度計測結果-----	26
図 2.6-5	止水プラグ内の圧力計測結果-----	27
図 2.6-6	トレーサーの投入方法-----	28
図 2.6-7	トレーサー試験結果-----	28
図 2.6-8	トレーサー解析モデル、トレーサー測定位置および入力データ-----	29
図 2.6-9	ステップ1解析結果（プラグ下流側における濃度比（C/C <sub>0</sub> ）解析結果と 実測値）-----	30
図 2.6-10	温度によるEDZの透水性に与える影響の評価結果-----	30
図 2.6-11	3次元トレーサー解析結果-----	31
図 2.6-12	各フェーズにおける透水性の比較-----	31
図 3.2-1	閉鎖要素を考慮した水理解析の例-----	35
図 3.2-2	可変型処分坑道レイアウトの概念-----	36
図 3.2-3	高透水部の分布形状を踏まえた可変方処分坑道レイアウトイメージ-----	36
図 3.2-4	パネルレイアウトのバリエーション-----	37

This is a blank page.

## 1. はじめに

### 1.1 背景および目的

高レベル放射性廃棄物\*の地層処分において、処分場建設のために掘削された坑道を人工バリア設置後も埋め戻さずに長期にわたり放置しておくと、地圧の作用などにより坑道の力学的安定性が損なわれたり、坑道が地下水の卓越した水みちとなったりするなど、人工バリアおよび天然バリアといった処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。また、地下施設と地上とを直結する坑道が残置されると、処分場と生活圏を結ぶ経路となることや処分場に人間が不用意に接近することも考えられる。このような、処分場の全体性能に有意な影響を与える要因を排除する方策として、掘削された坑道への埋め戻し材の施工やプラグの設置、坑道周辺へのグラウト注入といった閉鎖技術の適用が考えられている。

本研究は、このような処分場の閉鎖に関して、設計、施工や閉鎖性能について最新の知見を提供するとともに、処分場全体の安全性向上に寄与するものである。

地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>1)</sup>（以下、「第2次取りまとめ」という）で示した閉鎖要素は、埋め戻し材、プラグ、グラウトである。埋め戻し材は坑道そのものを埋め戻すものであり、プラグは処分坑道の両端部に設置するコンクリートからなる強度プラグと連絡坑道が破碎帶と交差するなどの場合に設置する粘土系の止水プラグである。また、閉鎖要素として取り扱うグラウトは粘土グラウトである。第2次取りまとめでは、人工バリアの定置後に実施する主要坑道（処分孔堅置方式の場合には処分坑道も含む）の埋め戻しの施工技術および品質管理については、類似の建設工事で適用されている現状技術により十分に行うことができる事が示されている。第2次取りまとめ段階での課題としては、閉鎖技術を深地層の研究施設での研究開発計画や諸外国の地下研究施設計画により確認することや閉鎖技術を実際の地質環境に対する適用性を概略的に検討し、その中で地質環境の調査における留意点などを整理することなどが示されている。

原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」という）は、第2次取りまとめで示された閉鎖概念に基づき地下施設の閉鎖に関して示しており、今後、プラグなどのシーリング位置や構造要素の検討のための情報や埋め戻しやシーリングによる閉鎖後安全性への影響を評価するための方法論、モデルおよびデーターデットの開発のための情報等を必要としている<sup>2)</sup>。また、規制側は、処分場の閉鎖段階で閉鎖に係る技術基準、地上施設の解体撤去の技術基準の検討・整備、閉鎖に係る計画を予め確認する許認可（例：閉鎖措置計画認可）を実施している<sup>3)</sup>。

諸外国における閉鎖技術に関する知見に関しては、閉鎖技術は処分概念に大きく依存し、処分概念が異なれば閉鎖の考え方も異なるという議論が多くなされている<sup>4)</sup>。つまり、処分概念に応じて理想的な物理化学特性をもつ材料が選択され、処分サイトの地層が火成岩等の結晶質岩盤、また、粘土成分に富んだ泥岩、さらに岩塙といったように異なるれば、それに応じて閉鎖の考え方は根本的に異なるためである。また、このような閉鎖技術の検討に関しては、埋め戻し材の物性値の評価、シナリオ、施工などに対して十分な検討がなされた性能評価は行われていない。一方で、処分環境に適合した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、要求される性能が確保できるという議論も行われている<sup>4)5)</sup>。

\*使用済燃料の再処理後に残存する物を固型化したものという（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律）

以上を踏まえ、第2次取りまとめ以降の課題としては、結晶質岩に対するプラグ材料（ベントナイト、低アルカリ性セメント）の閉鎖性能の確認、低アルカリ性セメントの性能に関わる室内試験、埋め戻し材性能室内試験、結晶質岩地下研究施設における重要データ（たとえば、掘削影響領域[Excavation Damage Zone, 以下、「EDZ」という]特性、セメント影響、埋め戻し材性能）に基づく閉鎖性能の確認、人工海水を用いた試験、塩濃度をパラメータとした試験による埋め戻し材の基本特性データの取得、堆積岩地下研究施設での操業・閉鎖の原位置試験計画の立案、結晶質岩におけるプラグ設置技術、埋め戻し材施工技術の例示が挙げられる。このうち本検討では、カナダの地下実験施設における止水プラグの原位置適用性試験が終了したことを受け、その結果を踏まえ、結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能を確保するための要件（性能要件）および閉鎖システムの考え方を取りまとめた。

なお、本研究の成果は地層処分を行う長半減期低発熱放射性廃棄物との併置処分を検討する際にも反映可能と考える。

## 1.2 処分場の構成要素と処分場環境

### 1.2.1 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、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、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鉛直下向きに掘削しそこに定置する方法（豎置き方式）と水平方向に掘削した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。

廃棄体定置後、閉鎖要素設置以降の処分場および閉鎖要素自身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、人工バリアの構成要素（ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材）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、強度プラグ、坑道の埋め戻し材、止水プラグ、強度プラグそして地質環境となる母岩とする。

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、止水プラグおよび強度プラグとし、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。

**止水プラグ**：坑道が断層破碎帯と交差するような場合に断層破碎帯と坑道との連続性を分断するように断層破碎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。ここでいう“止水”とは、坑道を通過する地下水流动を抑制することである。また、

材料を意味する“粘土プラグ”という場合もある。

強度プラグ：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る。また、材料を意味する“コンクリートプラグ”という場合もある。

### 1.2.2 処分場環境

図 1.2-1 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および状態を整理する。地下施設での作業は、建設予定区画での作業から順に、建設、定置、埋め戻しへと進められ、図 1.2-1 に示すように、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。

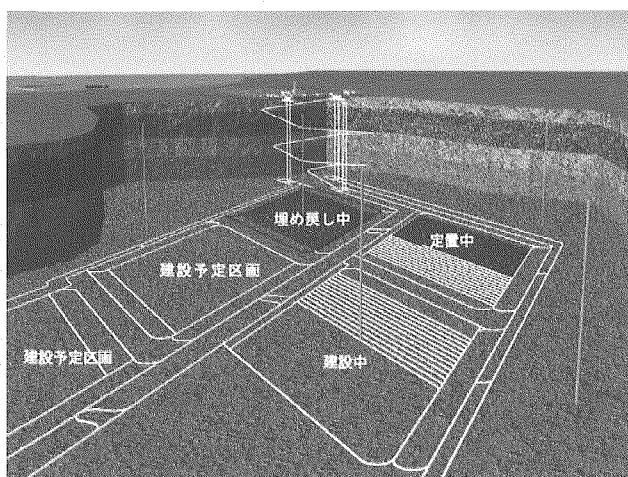


図 1.2-1 地下施設での作業イメージ

（参考文献<sup>2)</sup>に加筆して作成）

図中「建設予定区画」パネルは、連絡坑道およ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および主要坑道が存在する。坑道は、作業安全、坑道形状の維持等を目的に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およ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、アクセス坑道およ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」での上記作業を踏まえ、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、「建設中」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。

堅置き方式の場合、処分坑道の掘削が終了すると、処分孔が鉛直下向きに掘削される。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強度プラグが設置される。設置した強度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。豊置き方式の場合、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。

豊置き方式の場合、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。処分坑道の両端部には、上記同様、強度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、連絡坑道およ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、必要に応じて止水プラグが設置される。

### 1.3 閉鎖技術に関する国内外の動向

#### 1.3.1 閉鎖技術に関する海外の動向

カナダ<sup>6)~10)</sup>、アメリカ<sup>11)12)</sup>、フランス<sup>13)</sup>、スイス<sup>14)</sup>、スウェーデン<sup>15)~18)</sup>、フィンランド<sup>19)~22)</sup>、各国についての閉鎖概念についての考え方をまとめたものを表 1.3-1 に示す。国ごとに「埋め戻し」、「プラグ」および処分坑道内へ廃棄体以外の材料を充填する場合の充填物（以下「処分坑道充填物」という）について整理を行っている。埋め戻しには処分坑道と周辺トンネル（主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道）の区別はないが、横置きの概念の場合、処分坑道自体に廃棄体を設置するため、処分坑道の埋め戻しの一部または全部が緩衝材となる場合がある。この時、埋め戻しは人工バリアの一部となり、周辺トンネルの埋め戻し以上に性能評価上重要な位置付けとなる。そのため「埋め戻し」には処分坑道以外の周辺トンネルにおける処理の仕方を示す。表では、1) 要素技術、2) 設置位置、3) 材料、4) 役割 4) 材料自身に求められる期待性能について示している。これらをまとめると以下のようになる。

- (1) 処分坑道の処理に関しては、アメリカにおいて処分坑道の埋め戻しが現在考えられていない他は、廃棄体豊置き方式の場合、処分坑道は膨潤性を持つ埋め戻し材で埋め戻すこと、横置き方式の場合、緩衝材を主体に埋め戻すこと、というレイアウトが基本であった。また、処分坑道の坑口にはプラグを設置する場合が多い。
- (2) 周辺坑道へは、粘土を含む材料で埋め戻しを行い、プラグを性能評価上重要な部位に設置し、グラウトを併用するという考え方が多い。
- (3) 各閉鎖要素の材料自身に求められる期待性能については、周辺岩盤程度という表現が多かった。現状では、性能評価に基づいて具体的な仕様が決定されていない。

表 1.3-1 海外における閉鎖概念の考え方のまとめ(「-」は情報が得られなかつたことを示す。)

## カナダ

		要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
廻 分 坑 道 充 填 材	堅 置 き	緩衝材(締め固めブロック)	廃棄体周り	Na ベントナイト (50%)+珪砂(50%)	核種の遅延効果	$10^{-11}\text{m/s}$ 以下の透水係数
		高密度埋め戻し材(現地締め固め)	処分坑道下部	粘土(25%)+ずり花崗岩(75%)	緩衝材に対する反力	$10^{-10}\text{m/s}$ 以下の透水係数
	横 置 き	低密度埋め戻し材(吹き付け)	処分坑道上部	Na ベントナイト (50%)+珪砂(50%)	隙間の充填, 核種の遅延効果	$10^{-10}\text{m/s}$ 以下の透水係数
		緩衝材(締め固めブロック)	廃棄体周り	Na ベントナイト+珪砂	核種の遅延効果	$10^{-11}\text{m/s}$ 以下の透水係数
		高密度埋め戻し材(締め固めブロック)	緩衝材周り	粘土+ずり花崗岩	緩衝材に対する反力	$10^{-10}\text{m/s}$ 以下の透水係数
		低密度埋め戻し材(吹き付け)	処分坑道上部	Na ベントナイト+珪砂	隙間の充填, 核種の遅延効果	$10^{-10}\text{m/s}$ 以下の透水係数
埋 め 戻 し	高 度 化 工 事 業 開 発 委 員 会	底盤コンクリート	処分坑道下部	低発熱高流動コンクリート	定置のし易さ	-
		粘土プラグ(締め固めブロック)	廃棄体間	Na ベントナイト+珪砂	核種の遅延効果	-
		高密度埋め戻し材(現地締め固め)	主要, 連絡坑道	粘土(25%)+ずり花崗岩(75%)	核種の遅延効果	-
		低密度埋め戻し材(吹き付け)	主要, 連絡坑道	Na ベントナイト (50%)+珪砂(50%)	隙間の充填, 核種の遅延効果	-
	コンクリート, 粘土材料埋め戻し, 調査ボーリング	立坑	粘土(25%)+ずり花崗岩(75%)	粘土(25%)+ずり花崗岩(75%)	核種の遅延効果	-
プラ グ	コンクリートプラグ	処分坑道坑口	低発熱高流動コンクリート	埋め戻し材の流出防止, 核種遅延	-	
	コンクリート, 粘土プラグ	立坑	低発熱高流動コンクリート, Na ベントナイト(50%)+珪砂(50%)	核種の遅延効果	-	
	コンクリート, 粘土プラグ	破碎帶	低発熱高流動コンクリート, Na ベントナイト(50%)+珪砂(50%)	核種の遅延効果	-	
	鉄筋コンクリートプラグ	立坑坑口	低発熱高流動コンクリートコンクリート	人間侵入を防ぐ	-	

アメリカ

	要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
充填材 処分坑道	埋め戻しをしない(検討はしている)				
埋め戻し	埋め戻し材(吹き付け)	アクセス斜坑	破碎凝灰岩/ベントナイト/ペントナイト(5-10%)砂混合土	湧水を含む湿度の処分坑道内への侵入を防ぐ, 人間侵入を防ぐ	周囲の岩盤と同程度の透水性( $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{m/s}$ )
	埋め戻し材	立坑			
プラグ	コンクリート, 粘土プラグ	アクセス斜坑 立坑	・コンクリート ・ペントナイト	湧水を含む湿度の処分坑道内への侵入を防ぐ, 人間侵入を防ぐ	高強度, 低透水, 長期耐久性
	コンクリートプラグ	立坑坑口	(5-10%)砂混合土		

フランス

	要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
処分坑道充填材 カテゴリC	緩衝材(締め固めブロック)	廃棄体周り	ペントナイト	長期にわたる物理的, 化学的安全, 核種の遅延効果	—
	コンクリート/粘土埋め戻し	廃棄体周り	コンクリート, ベントナイト		
戻し埋め	—	—	—	—	—
プラグ	操業時プラグ	処分坑道坑口	コンクリート	操業中の再取出しを可能にする	—
	長期プラグ	処分坑道坑口	ペントナイト, コンクリート	長期隔離	—

イスス

	要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
充填材 処分坑道	埋め戻し材(=緩衝材)	廃棄体下部	締め固めペントナイトブロック	廃棄物下部の支持, 定位置までの搬入, 核種の遅延効果	低透水性, 安定した化学特性, 物理的自己修復性
戻し埋め	—	—	—	—	—
プラグ	コンクリートプラグ	処分坑道坑口	コンクリート	埋め戻し材流出防止	—

## スウェーデン

	要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
処分坑道充填材	緩衝材(締め固めブロック)	廃棄体周り	100%MX-80	キャニスターの防護, 核種への遅延効果, 核種の吸着, コロイドのろ過, キャニスター内部のガスの放出, 熱の効率的発散	長期化学的安定性 低透水性( $10^{-11}$ m/s 以下) 1MPa の膨潤圧
埋め戻し	埋め戻し材(現地締め固め)	その他の坑道 立坑	100%MX-80 (30%)+岩づくり(70%)	トンネルの力学的安定, 緩衝材に対する反力, 坑道周辺の地下水水流動の制限	長期化学的安定性 低透水性( $10^{-10}$ m/s 以下) 0.1MPa 以上の膨潤圧
プラグ	短期プラグ(短期性能を期待)	処分坑道坑口	コンクリート, 岩盤とのインター フェースにベント ナイトシール	処分坑道と操業区画との隔離, 緩衝材と埋め戻し材の流出防止	短期的止水性 短期的耐圧性
	長期プラグ(長期性能を期待)	坑道 立坑 破碎帯	検討中(ベントナイト, コンクリート)	操業時の坑道が卓越した, 透水経路になることを防ぐ 破碎帯の隔離	低透水性
	ベントナイトプラグ	調査ボーリング孔	ベントナイト	ボーリング孔沿いの水の移行を防ぐ	

## フィンランド

	要素技術	設置位置	材料	役割	要求性能
処分坑道充填材	緩衝材(締め固めブロック)	廃棄体周り	100%MX-80 Na-ベントナイト/ Na モンモリロナイト +CaCO <sub>3</sub> /CaSO <sub>4</sub> (検討中)	核種の遅延効果	低透水性 化学的安定性
	埋め戻し材(現地締め固め/締め固めブロック)	処分坑道	岩づくり+ベントナイト(10~30%)/ 粘土(粘土含有率 90%, 内 50%が膨潤性に富む粘土)/ 岩づくり+締め固めベントナイトブロック	核種の遅延効果	低透水性 膨潤性(特に高塩分濃度下)
埋め戻し	埋め戻し材(現地締め固め/締め固めブロック)	その他の坑道 立坑	岩づくり+ベントナイト(10~30%)/ Friendland 粘土(粘土含有率 90%, 内 50%が膨潤性に富む粘土)/ 岩づくり+締め固めベントナイトブロック	核種の遅延効果	低透水性 膨潤性(特に高塩分濃度下)
	短期プラグ(短期性能を期待)	処分坑道坑口	コンクリート	坑道内の地下水の移動を防ぐ	低透水性
プラグ	長期プラグ(长期性能を期待)	坑道 立坑	締め固めベントナイトブロック	人間侵入を防ぐ	

また、処分場の閉鎖をテーマとした国際ワークショップも開催されており（カールスバッド（1998年）<sup>23)</sup>、エスピ（2001年）<sup>24)</sup>、ブリュッセル（2002年）<sup>25)</sup>）、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。

- (1) 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。
- (2) 性能評価において、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。
- (3) 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、性能評価での取り扱いとの整合性にも考慮する必要がある。

### 1.3.2 閉鎖技術に関する国内の動向

核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構）は、高レベル放射性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、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（表 1.3-2）を行った<sup>1)</sup>。第2次取りまとめ以降、埋め戻し材や止水プラグ等の具体的な性能を考慮した工学技術と性能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捉え研究に取り組んできている<sup>26)27)</sup>。このような観点から、第2次取りまとめで示した閉鎖概念に対して、水理解析を参考にした閉鎖に係るシナリオの検討を実施してきている。その結果、閉鎖要素を設計する際に考えなければならない設計要件として、埋め戻し材は核種移行の主要な経路にならないこと、人工バリアの性能発揮に悪影響を与えないことを、止水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）が求められることを示している<sup>26)</sup>。

また、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）も、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、坑道内およびその周辺の水理特性（低透水性）が最も重要であると示している。プラグの役割としては、坑道およびその周辺の緩み域、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示している<sup>28)</sup>（表 1.3-3）。

原環機構は、技術報告書の中で、第2次取りまとめで示された閉鎖概念に基づき地下施設の閉鎖に関して示している<sup>29)</sup>。

表 1.3-2 第 2 次取りまとめ<sup>1)</sup>で示された閉鎖技術

要素技術	設置位置	目的
埋め戻し材	全坑道	埋め戻し部が卓越した透水経路になることを防ぐ
		坑道周辺岩盤の長期間における変形, EDZ の拡大を防ぐ
		処分場内への人間の侵入を防ぐ
コンクリートブラグ	地表坑口	処分場内への人間の侵入を防ぐ
	処分坑道の両端部	処分坑道からの緩衝材・埋め戻し材の膨出を防ぐ
		処分坑道内への人間の侵入を防ぐ
粘土プラグ	適宜(アクセス坑道基部)	坑道, EDZ の寸断
	断層を挟み込む位置	断層の隔離(坑道の寸断, EDZ の寸断)
		断層からの埋め戻し材の流出時における影響範囲の限定
グラウト	断層部	断層からの埋め戻し材の流出防止
	粘土プラグの周囲	EDZ の寸断
	粘土プラグに挟まれた影響領域	EDZ の止水

表 1.3-3 「高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術<sup>28)</sup>」で示された閉鎖技術

要素技術	位置	目的
埋め戻し材	全坑道	埋め戻し部が卓越した透水経路になることを防ぐ
		坑道周辺岩盤の長期間における変形, EDZ の拡大を防ぐ
		処分場内への人間の侵入を防ぐ
コンクリートブラグ	地表坑口	処分場内への人間の侵入を防ぐ
	処分坑道の両端部	処分坑道からの緩衝材・埋め戻し材の膨出を防ぐ
		処分坑道内への人間の侵入を防ぐ
粘土プラグ	坑道交差部	各パネル毎の水理的分断
	断層を挟み込む位置	断層の隔離(坑道の寸断, EDZ の寸断)
		断層からの埋め戻し材の流出時における影響範囲の限定
複合プラグ	アクセス坑道基部	坑道, EDZ の寸断
		アクセス坑道内の埋め戻し材の自重による主要坑道への押し出しの制御
複合プラグ	アクセス坑道中間部	坑道, EDZ の寸断
		アクセス坑道内の埋め戻し材の膨潤移動, 自重沈下の制御
	地層境界部を挟み込む位置	高透水部になる地層境界部の隔離(坑道の寸断, EDZ の寸断)
グラウト	断層部	断層からの埋め戻し材の流出防止
	粘土プラグの周囲	EDZ の寸断
	粘土プラグに挟まれた影響領域	EDZ の止水

#### 1.4 結晶質岩における閉鎖要素に関する課題

「1.3 閉鎖技術に関する国内外の動向」で示されているように、閉鎖要素に期待すべき性能要件に関しては、人工バリアのように性能評価に基づく積極的なバリア機能の期待が明示されているものではなく、人工バリア性能発揮を補助する役割であり、閉鎖要素自身は周辺岩盤程度の性能を持つものとまとめることができる。また、上記も含め、これまでに閉鎖要素に関する性能要件や設計の検討に関しては、安全評価・基準策定等の様々な観点で、各閉鎖要素に着目した要件の整理が実施されてきている<sup>29)</sup>。実際に処分場での対処を考えると、坑道内の各部に対して、各閉鎖要素を合理的に組み合わせて施工・設置するものであり、それら組み合わせがシステムとして機能を評価するべきと考える。

以上を踏まえ、地質環境を結晶質岩とした場合に閉鎖要素に関する課題を整理すると下記のようになる。

- ① 閉鎖要素自身の施工が可能であることと、期待される性能が発揮できることを確認する必要がある（閉鎖要素の実現可能性の確認）。
- ② 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件を提示するとともに、そのように性能が期待できる個々の閉鎖要素を処分場レイアウト規模に適用していくために必要となる閉鎖システムとしての考え方を整理する必要がある（結晶質岩における閉鎖システムの考え方の整理）。

そこで、本検討では閉鎖技術の成立性の確保に向け、①の閉鎖要素の実現可能性の確認に対しては、地下実験施設におけるプラグおよびグラウトに関わる施工、性能試験の結果を用いて、2章で取りまとめた。①では先ず止水プラグを中心とした閉鎖要素の実現可能性を確認することが目的であるため、均質で低透水な母岩を有するカナダの地下実験施設での原位置適用性試験結果を用いている。

また、②の結晶質岩における閉鎖システムの考え方の整理については、これまでの研究成果などを踏まえ3章で取りまとめた。

## 2. 地下実験施設におけるプラグおよびグラウトの原位置適用性試験

高レベル放射性廃棄物処分場の操業後の閉鎖段階においては、地下深部に掘削した坑道や立坑などが人間の生活圏への放射性廃棄物の移行経路とならないよう埋戻しておく必要がある。現在の計画では適切な材料を用いて坑道や立坑を埋め戻すと共に、ゆるみ域などの連続性の遮断にプラグなどを用いることが考えられているが、これらの実現可能性については十分に検討されていないのが現状である。

そこで核燃料サイクル開発機構（JNC）は、止水プラグ中心とした閉鎖要素に着目し、実際の地下深部の地質環境における施工性とその性能の確認を目的に、カナダの地下実験施設（Underground Research Laboratory, URL）において原位置適用性試験（トンネルシーリング試験<sup>30)</sup>、Tunnel Sealing eXperiment, TSX）を実施した。TSXは、カナダ原子力公社（AECL）とJNCの共同研究であり、他にフランスから放射性廃棄物管理機関（ANDRA）、アメリカからウィップ・プロジェクト（WIPP）も参加している。

2章では、主に日本側が主体的に取り組んできた粘土プラグ施工、グラウト施工、蒸発散測定、トレーサー試験およびその評価について、全体を通じて既存の知見を取りまとめており、本試験結果に基づき、原位置における止水プラグ中心とした閉鎖要素の実現可能性について示す。

### 2.1 試験サイトの概要

TSXの試験位置はURLの地下420mレベルの坑道であり、地質的にはカナダ盾状地のLac du Bonnetバソリス（花崗岩質大規模深成岩体）に含まれる。試験位置周辺の地質状況を図2.1-1に示す。試験坑道周辺では顕著な破碎帯は観察されていない。しかし、最大主応力である水平応力が最小主応力の鉛直応力の約6倍という地圧条件下にあることから、坑道掘削に伴う応力再配分により亀裂群が坑道壁面近傍の岩盤内に発達する。EDZは、10cmから30cmの幅で観測されている<sup>31)</sup>。

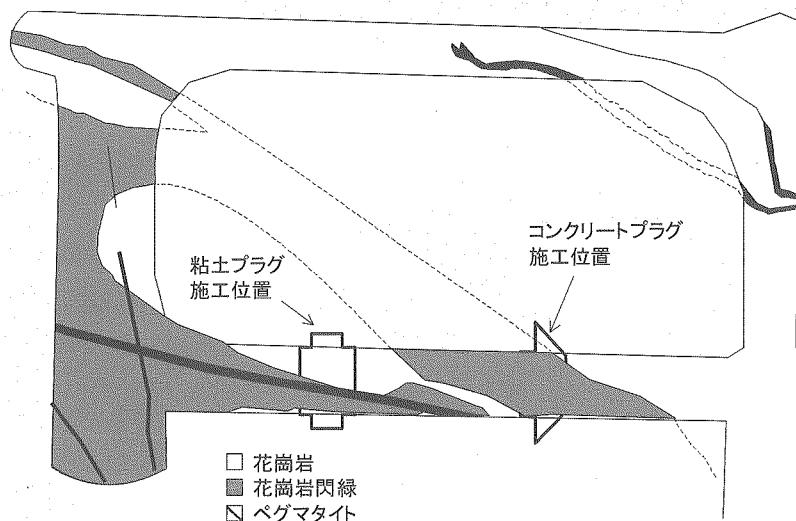


図 2.1-1 試験位置周辺の地質状況(点線は推定)

岩盤の強度は圧縮強度が120MPa以上、引張強度が6MPaであり、坑道周辺にはほぼ静水圧相当の水圧が分布している。TSX試験坑道の温度は一年を通じてほぼ15度程度で一定である。TSXの概要は次節において示すが、TSXで構築した強度プラグ部近くには花崗岩と花崗閃緑岩の境界部があり、止水プラグ部には花崗閃緑岩中に捕獲された花崗岩やペグマタイトの貫入が確認されている。これらの岩相の違いによる力学的、水理学的な特性の違いは小さい。

## 2.2 原位置適用試験（TSX）の概要

TSXは、カナダ、マニトバ州ウィニペグの北東約100kmに位置するURLの420mレベル(GL-420m)で実施されている。URLはカナダにおける放射性廃棄物地層処分の安全評価研究を目的として、処分候補岩体の一つであるカナダ盾状地中に建設された地下実験施設である(図2.2-1)。TSXでは、プラグの適用性試験として、ベントナイトブロックを材料とする止水プラグ(止水プラグ)と低発熱高流動コンクリートを材料とする強度プラグ(コンクリートプラグ)の2種類のプラグを高さ3.5m、幅4.375mの橿円形の水平トンネルに実スケールで施工し、その後、2つのプラグに挟まれた11mの区間に水、トレーサー、温水を最大4MPaで圧入し、各プラグや周辺岩盤への水、トレーサーの浸透状況によりその性能を検証することとした(図2.2-2)。

プラグの施工概要については「2.3 プラグ施工」に、プラグ周辺での粘土グラウトの施工とその性能確認については「2.4 プラグ周辺への粘土グラウト」に示している。そして、止水性能の確認のために実施した試験については「2.6 圧入試験およびトレーサー試験」に示す。また、圧入試験などの品質管理の一環で、圧入した水の到達範囲確認のために実施した試験については「2.5 蒸発散量計測による湧水評価」に示す。

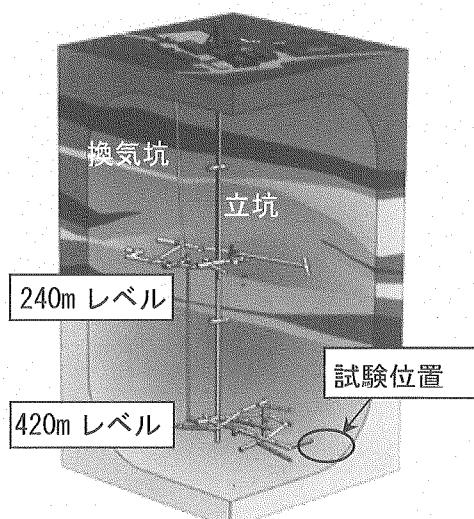


図 2.2-1 URLと試験位置

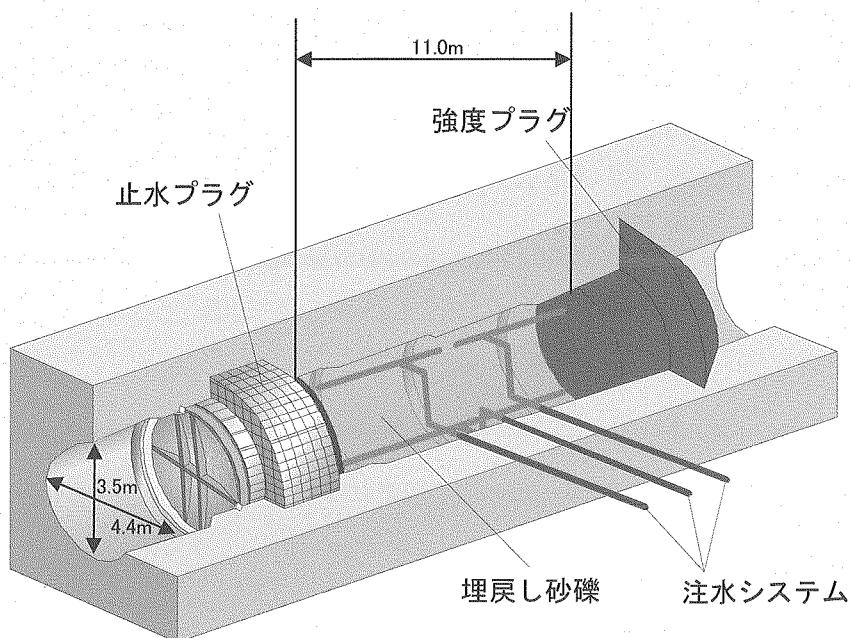


図 2.2-2 トンネルシーリング試験の概要

### 2.3 プラグ施工

TSX サイトにおける地圧は、最大主応力が水平に掘削した試験トンネルに平行な方向で、最小主応力である鉛直方向の約 6 倍と計測されている<sup>32)</sup>。このような偏圧下でトンネルを掘削すると、トンネル周辺岩盤内の応力再配分により主応力方向で岩盤のゆるみが発生しやすい<sup>33)</sup>。このような部分は EDZ と呼ばれ、健岩部に比べ透水性が増大し、地下水に溶出した放射性核種の移行経路になる可能性がある。そこで各プラグの施工においては、プラグ部の周辺で図 2.3-1 に示すような拡幅を実施することにより、プラグの力学的安定性を確保すると共に、EDZ に沿った放射性核種の移行を部分的に遮断する役割を持たせた。

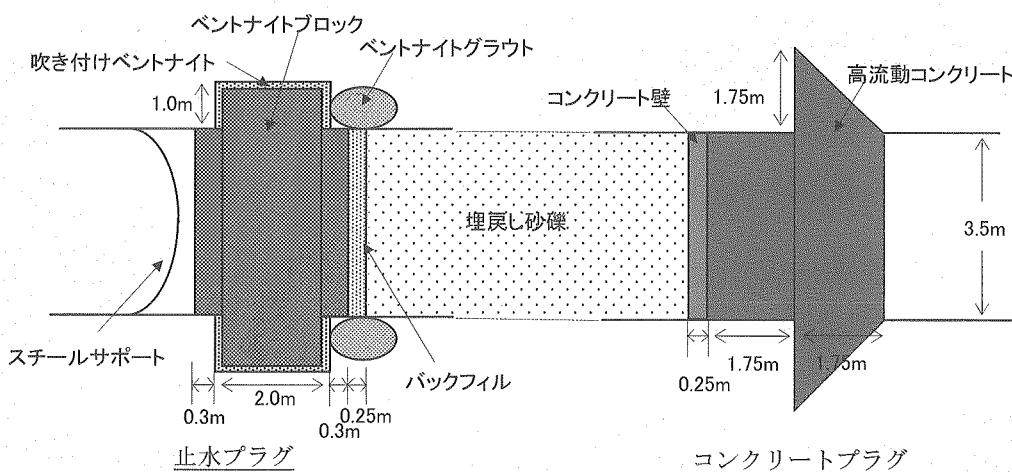


図 2.3-1 トンネルシーリング試験のレイアウト

止水プラグの形状はほぼ円柱状とし、一方の面にスチールサポートを配した。これは加圧時の力学的支保であると共に、ベントナイトブロック間やプラグと岩盤の隙間を埋めるための膨潤圧をプラグ内に発生させることを目的としている。止水プラグは約 9,000 個の締固めベントナイトブロック（配合比：ベントナイト 70%，珪砂 30%，乾燥密度 1.9，重量約 13kg）を積み上げることにより施工した。岩盤との接触面にはベントナイト吹き付けを行い、岩盤との境界面に生じる隙間を埋めた。その他に粘土（ベントナイト）グラウト、埋戻し材（バックフィル）をプラグ周辺に施工した。粘土グラウトは、プラグ周辺岩盤内で EDZ の特に発達した部分の改良のため実施し、バックフィルには、現在検討されているベントナイトと砂礫の混合材を使用した。図 2.3-2 に示すように、計画どおり原位置での止水プラグの施工を実施することができた。

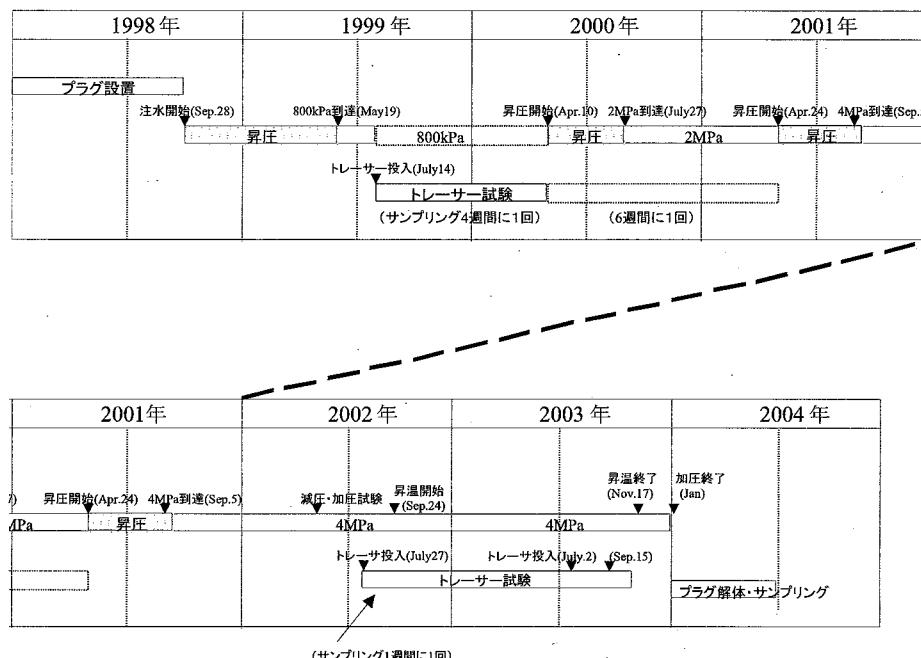


図 2.3-2 止水プラグ完成状況

プラグの施工は 1998 年 9 月に終了し、引き続き水の圧入試験を実施した。閉鎖性能の評価のため、各プラグの両側でプラグや周辺岩盤を通過してきた湧水量の計測と共に、プラグ内や周辺岩盤内に設置した 500 個を越えるセンサーにより水分量、間隙水圧、膨潤圧、温度、変位、ひずみがモニタリングされている。全体の試験工程を表 2.3-1 に示す。

TSX において施工された強度プラグの形状は、固化時に収縮したプラグが加圧時に斜めの面を岩盤に密着できるようキノコ型とした。強度プラグには、AECL が開発した低発熱高流動コンクリート (Low-Heat High-Performance Concrete) を 76m<sup>3</sup> 打設した。このコンクリートは、カナダにおける実際の処分場において使われることを考慮して、高強度（一軸圧縮強度 70MPa 以上）、低透水性 ( $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  以下) 低水和熱（最大温度上昇 21 度）低 pH（約 10）といった特徴を持っている。

表 2.3-1 試験工程表



## 2.4 プラグ周辺への粘土グラウト

本グラウトでは、坑道周辺に生じる EDZ の遮断を目的に、粘土グラウトの施工性とその性能確認を実施した。粘土グラウトのターゲットとしては特に EDZ が発達している部位とした。TSX サイトにおいて EDZ が発達している部位は、試験坑道が地圧の最大主応力方向に掘削されているため、最小主応力方向である坑道の天盤、底盤部と中間主応力方向である左右両側面に沿った部分である。

### 2.4.1 注入孔のレイアウト

注入孔のレイアウトは、上記した考え方に基づき、止水プラグ周辺で EDZ が発達している 4 力所を対象領域として、図 2.4-1 に示すような G1～G4 の 4 本の配置とした。各ボーリング孔は孔径 76mm、削孔長 1m で、削孔位置はプラグの拡幅部鉛直面においてトンネル壁面から 15cm 内側とした。各注入孔はトンネル軸から 10° 外側に向けて削孔し、G2, G4 孔は注入中の空気を逃がすためにそれぞれ 5° 上方、5° 下方にに向けて削孔した。トンネル軸に対し低角度の注入孔を削孔したのは、EDZ との交差区間をできるだけ長くするためである。グラウト注入時には、パッカーチューブ長 7.5cm のメカニカルパッカーを孔口に用いたため、岩盤壁面から 7.5cm 以深で注入を行った。また、グラウトの浸透を確認するための観測孔 OB を G3 孔から 30cm 離れた位置に 0.5m の長さで削孔した。粘土グラウトは、止水プラグ設置位置の拡幅掘削終了後、止水プラグ設置前に実施している。

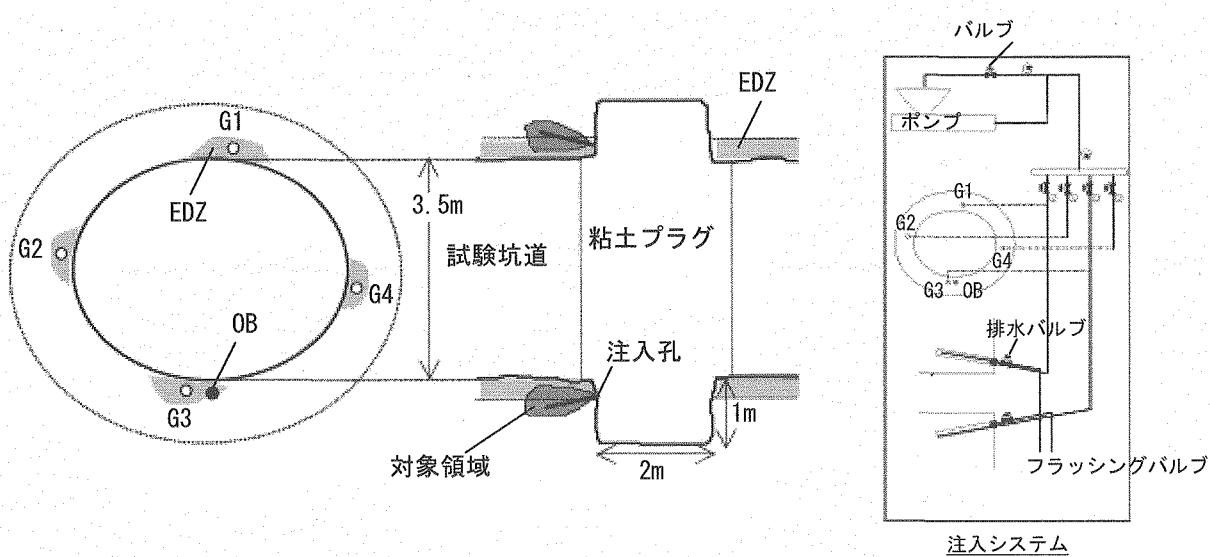


図 2.4-1 グラウト注入のレイアウト

## 2.4.2 配合切り替えによる注入方法

粘土グラウトの材料には、止水プラグに使ったものと同じベントナイト（クニゲル V1）を使用した。グラウト注入は、図 2.4-1 に示すよう 4 孔同時注入とし、事前に実施された予備試験の結果<sup>34)</sup>を基に低濃度から高濃度へ配合を切り替える方法を用いた（表 2.4-1）。グラウトスラリーの重量%が 0.2%, 0.5% の時最大圧 200kPa で、1.0%, 2.0% の時最大圧 300kPa で、4.0%, 6.0%, 8.0% の時最大圧 500kPa で注入を行った。配合の切り替え時には、注入孔内のスラリーが完全に次の濃度のスラリーに置換したことを孔内からの循環水の電気伝導度で確認した。また、限られた日数内に少しでも長時間注入をするため、0.2%, 0.5%, 2.0%, 6.0% の各濃度での本注入前に、200kPa の注入圧でグラウトスラリーを供給した後、供給弁を閉じ一晩放置した（予備注入保持）。

表 2.4-1 粘土グラウトの注入実績

ベントナイト 濃度	設定最大圧 (kPa)	予備注入 保持時間	設定圧での 注入時間	注入量 (mL)
0.2%	200	17h-5min	4h	3,377
0.5%	200	18h-27min	1h-50min	2,599
1.0%	300	—	2h	2,480
2.0%	300	18h-12min	1h-55min	1,763
4.0%	500	—	2h	2,941
6.0%	500	17h-27min	1h-50min	7,392
8.0%	500	—	2h-10min	2,724

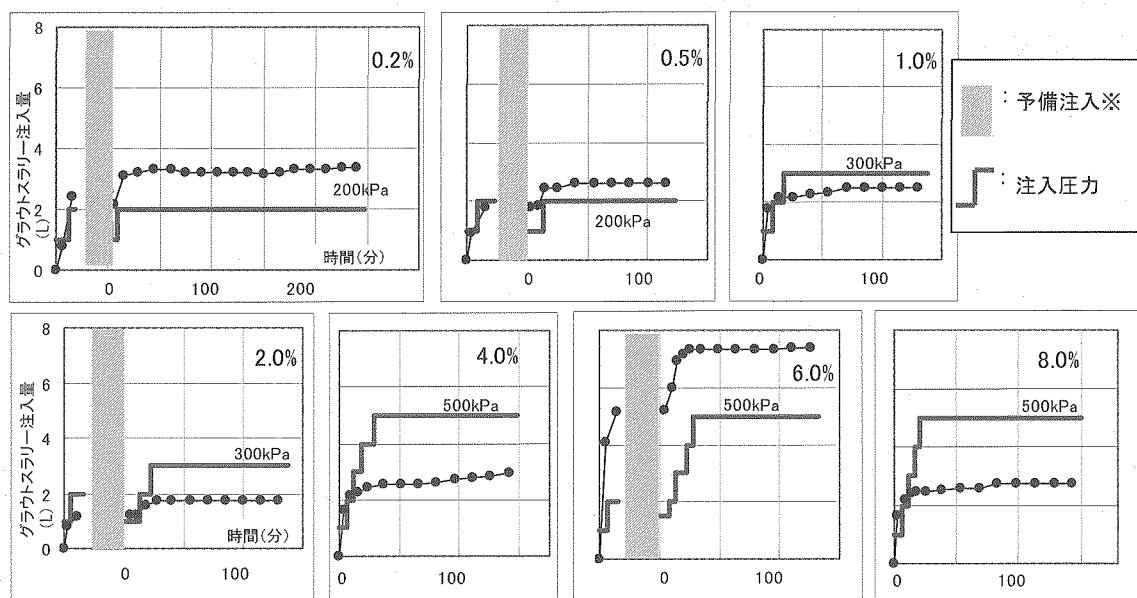
### 2.4.3 粘土グラウトの注入施工

注入実績として、図 2.4-2 に各濃度における注入経過時間と注入量との関係を示す。注入量は、注入ポンプに取り付けられたホッパー内のグラウトスラリーの減少量により計測した。図 2.4-3 には注入濃度と注入量およびベントナイト注入量の関係を示す。ベントナイト注入量はグラウトスラリーの注入量にベントナイト濃度を掛け合わせたもので、岩盤内に注入したベントナイトそのものの量を表すものである。

図 2.4-2 よりすべての濃度で注入開始直後から 200kPa 程度に昇圧するまで注入量が増加するが、設定圧に到達した後はほとんど注入量が増加しないことが分かる。注入開始直後に注入速度が最大値を示す理由として、注入孔の G1 と G2 が上向きであることが考えられる。つまり、配合の切り替えごとに圧力を低下させたために、一度岩盤内に押し込まれたスラリーの一部が流出してしまったものと考えられる。このようなスラリーの流出を考慮しても、図 2.4-3 に示すように 0.2%から 2.0%まで注入量は減少しており、亀裂の目詰まりが進行していることが分かる。この時、同じ注入圧である 0.2%, 0.5%（注入圧 200kPa）および 1.0%, 2.0%（注入圧 300kPa）における注入では注入量がほぼ同じように減少しているが、圧力の変化する 0.5%から 1.0%の間では注入量の減少は余り見られず、圧力の上昇による注入量の増大効果が現れていると考えられる。

一方、注入圧力が 500kPa に上昇すると、4.0%のスラリーの注入量は増加に転じ、ベントナイト注入量も上昇する。これは、圧力が増加したことにより亀裂の新たな開口を発生させ、また、これまでに注入した低濃度のスラリーの一部を押し流したことによると考えられる。図 2.4-2 の 4.0%の注入結果から分かるように、この濃度では注入量がまだ上昇傾向にあったが、注入を中断してしまったため、4.0%のスラリーが十分に入りきっておらず、6.0%のスラリーの注入量が増加したものと考えられる。しかし、6.0%の 500kPa においてスラリーの注入量は増加しておらず、8.0%においてはスラリーの注入流量が大きく減少していることから、6.0%による注入により目詰まりが進行したことが分かる。

グラウト注入時に岩盤からの大量の漏水は見られなかったが、注入孔周辺の半径 10-20cm の領域で岩盤表面が濡れているのが観察できた。この濡れは G1 孔において顕著であり、トンネル天盤に沿っても観察された。また、グラウト注入中、G3 孔の孔口近くで小さな水泡が観察された。この水泡は、4.0%, 6.0%スラリーを 500kPa で注入している時に観察されたものであるが、6.0%の注入中に無くなっている。このことは、6.0%での注入時において目詰まりが進行したことを示す。一方、G3 孔から 30cm 離れた観測孔 OB へのグラウトの浸透は確認されなかった。これより坑道下端部ではグラウトの浸透範囲は 30cm 以内であると考えられる。



※浸透性確認のため、200kPaの注入圧でグラウトスラリーを供給後、供給弁を閉じ、一晩放置した期間

図 2.4-2 粘土グラウトの注入結果

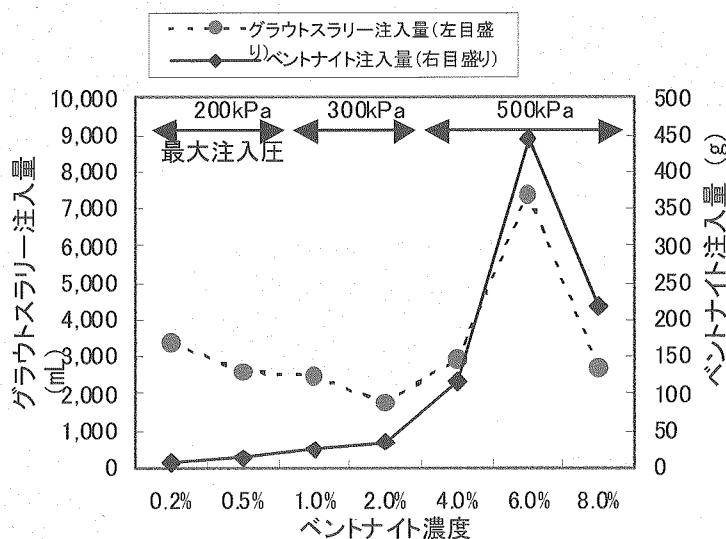


図 2.4-3 注入濃度と注入量の関係

#### 2.4.4 粘土グラウトの注入効果確認

粘土グラウトによる透水性の改良効果確認のため、各注入孔を用いてグラウトの前後で透水試験を実施した。試験はパルス試験で、パッカにはグラウト注入に用いたものと同じメカニカルパッカを使用した。透水試験による注入したグラウトの流出を防ぐため、パルス圧は最大で100kPaとした。試験結果を表 2.4-2 に示す。 $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  オーダーであった G4 孔では透水計数が 1 オーダー小さくなった。しかしながら、G3 孔ではほぼ同じ透水係数であり、注入前後で顕著な改良効果は見られなかった。一方、 $10^{-13}$  オーダーと非常に小さい透水係数であった G1, G2 孔の

結果は、G1 孔では透水係数がわずかではあるが小さくなつたが、G2 孔では反対に透水係数は大きくなつた。しかし、いずれも  $10^{-13}$  オーダーと非常に小さい値のままであつた。

表 2.4-2 グラウト前後の透水係数の比較

Borehole	透水係数 (m s <sup>-1</sup> )	
	before Grouting	after Grouting
G1	7.36E-13	3.34E-13
G2	1.75E-13	3.50E-13
G3	1.54E-11	1.31E-11
G4	3.22E-11	7.53E-12

透水係数の改良の観点からは、グラウト前後による差は見られなかつた。これは、母岩の透水性が極端に低い岩盤であり EDZ の幅も小さかつたことから、ボーリング孔内に占める健岩部の部分が大きかつたためと考えられる。

また、注入濃度 0.2%, 0.5%, 2.0%, 6.0% の予備注入時における 200kPa からの圧力保持の程度を、注入孔周辺の透水性を反映する指標として整理した。つまり、予備注入中の供給弁を閉じている時間はいずれも 17 時間以上であることから、圧入再開直前の圧力は各注入孔内の透水性に依存すると考えられる。各予備注入後の注入孔内の圧力を図 2.4-4 に示す。0.2% の予備注入時には、G1, G2 孔では初期値の 200kPa から約 17 時間後でも 150kPa 程度の圧力を保持しているのに対して、G3, G4 孔では 50kPa 以下に圧力が低下している。これは G1, G2 孔が G3, G4 孔と比べて透水係数が小さいことに対応している。透水係数の大小と保持圧力の大小を比較すると、グラウト注入前の透水係数  $G4 \geq G3 > G1 > G2$  に対して、0.2% の予備注入の保持圧力  $G3 < G4 < G1 < G2$ 、また、グラウト注入後の透水係数  $G3 > G4 > G2 \geq G1$  に対して、6.0% の予備注入の保持圧力  $G3 < G4 < G1 < G2$ 、であり、ほぼ相関がある結果となつてゐる。

また、この図から、G1, G2, G4 孔では 2.0% の予備注入時まで圧力の保持能力が徐々に減少しているのに対し、6.0% 注入時には 0.2% 注入時程度に圧力の保持能力が回復していることが分かる。一方、G3 孔では 0.5% で圧力の保持能力が大きくなつてゐるが、他の濃度では圧力の保持能力が小さく、30kPa 以下に下がつてゐる。このことから、今回のグラウト注入においては、6.0% の G1, G2, G4 孔への注入で目詰まりがかなり進行したことが確認できた。

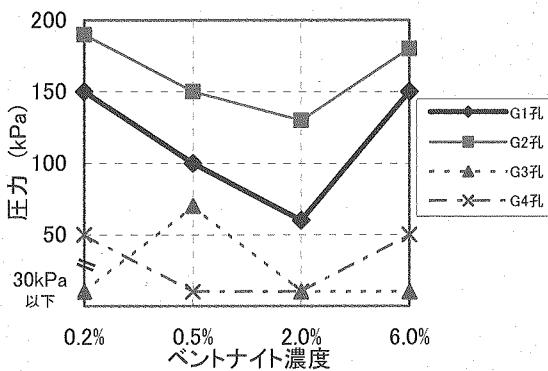


図 2.4-4 予備注入後の注入孔内の保持圧力(初期圧力 200kPa)

## 2.5 蒸発散量計測による湧水評価

### 2.5.1 試験方法

TSX プロジェクトでは、止水プラグの閉鎖性能の確認のため、水の圧入試験を行っている。止水プラグ内、止水プラグと岩盤の境界部、および坑道近傍の EDZ の各々を通過した湧水の量については、図 2.3-1 に示すスチールサポート部にて計測しているが、実際の圧入された水にはスチールサポート部を超えて坑道に湧水するものも存在すると想定された。そこで、スチールサポート部よりも更に外側の坑道を対象に蒸発散量計測（ベンチレーション試験）を実施した。ベンチレーション試験は、加圧前から断続的に合計約 310 日間実施した。また、局所蒸発散量計測は、加圧前<sup>35)</sup>と 775kPa 加圧時において実施した。今回の試験で構築したベンチレーション室のレイアウトを図 2.5-1 に示す。加圧前計測時との相違点は、ベンチレーション室内で岩盤が露出している 4m 区間からの湧水量だけを計測するため、基準日より 260 日後にビニールシートをスチールサポートの外側に設置した点である。

一方、局所蒸発散量計測については、初期計測では 56 点の計測点数（図 2.5-2 参照）であったが、ゆるみ域の進展に伴い天盤付近の計測ピンが抜け落ちたため 53 点になった。また、計測時の風による影響を除去するため、775kPa 加圧時の計測では計器の周りに高さ約 5cm の風よけをつけ計測を実施した。

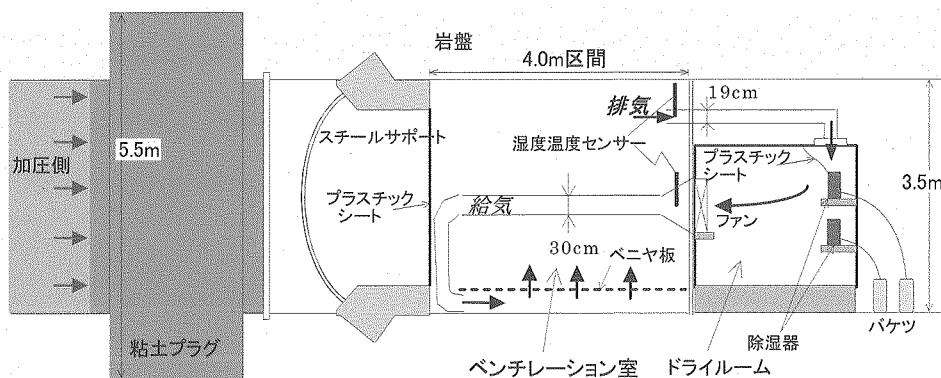


図 2.5-1 ベンチレーション試験レイアウト

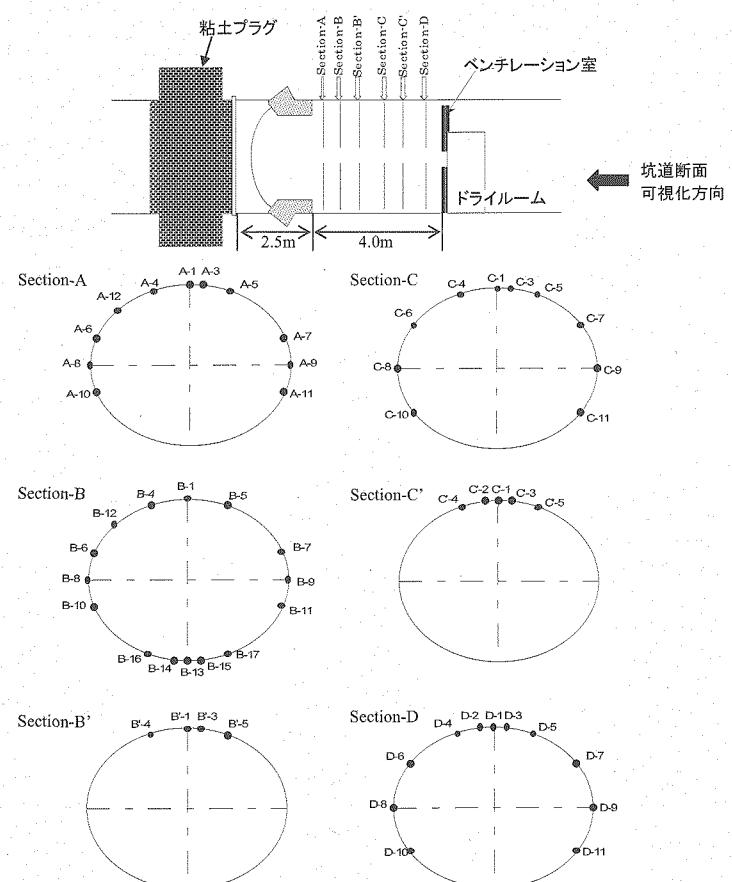


図 2.5-2 局所蒸発散量計測位置

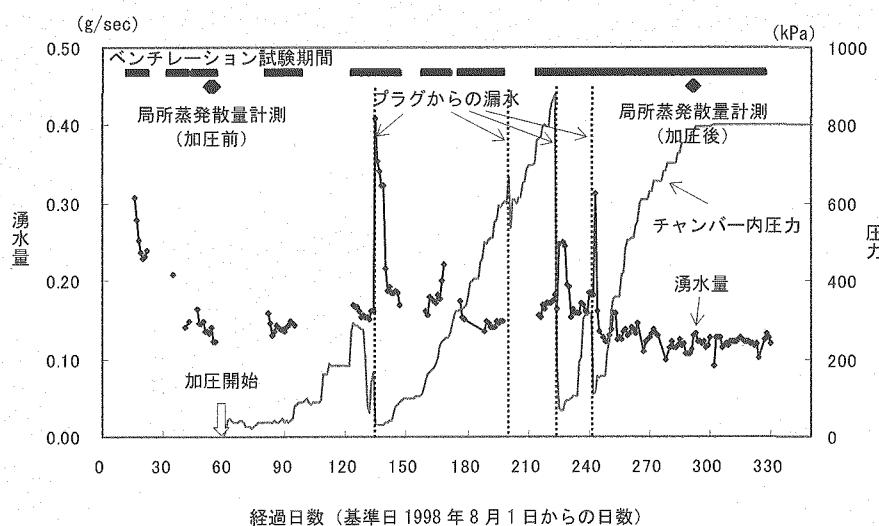


図 2.5-3 ベンチレーション試験結果

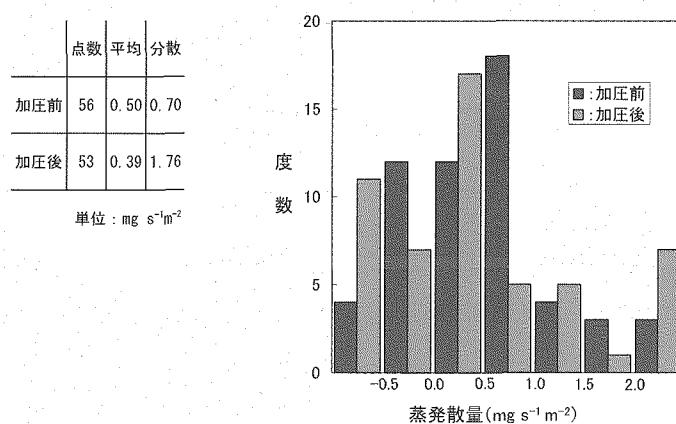


図 2.5-4 局所蒸発散量頻度分布

## 2.5.2 試験結果

図 2.5-3 にベンチレーション試験結果を示す。データは 15 分毎に得られているが、1 日の内で最もベンチレーション室内の空気の状態が安定すると考えられる午前 0 時の値を選択し、さらにベンチレーションを実施している期間のみのデータをプロットした。このベンチレーション試験で計測される湧水量と除湿器によりドライルームの外側のバケツに貯められる水の量を比較したところほぼ同じ量になったため、ベンチレーション試験による計測値はベンチレーション室内の湧水量を見積もっていると考えられた。図 2.5-3 に示すように、ベンチレーション試験中、ベンチレーション室内の底盤に水が溜まるほどの止水プラグからの漏水が 4 回認められた。この毎に蒸発散量が一時的に大きな値を示すが、急激に減少していることが分かる。また、湧水量が安定した期間では  $0.12\text{g sec}^{-1}$  の値を示し、これは加圧状態とは関連がないことが分かる。

図 2.5-4 には局所蒸発散量計測結果の頻度分布を、図 2.5-5 には蒸発散量の壁面内での分布を示す。局所蒸発散量の平均値は加圧前と加圧時においてほとんど変化はなく、この結果はベンチレーション試験の傾向と一致している。しかし、分散は加圧時の方が大きいことが分かる。一方、蒸発散量の分布を比較すると、加圧前において蒸発散領域（プラスの領域）が広範囲にわたっているのに対し、加圧時は蒸発散の大きい領域が天盤に沿ってやや右壁よりの部分に集中していることがわかる。この部分はトンネル断面上では最小主応力軸  $\sigma_3$  方向に対応しており、掘削に伴うゆるみが発達しやすい領域であることから、ゆるみ域に沿って蒸発散量が大きくなつたことを示している。

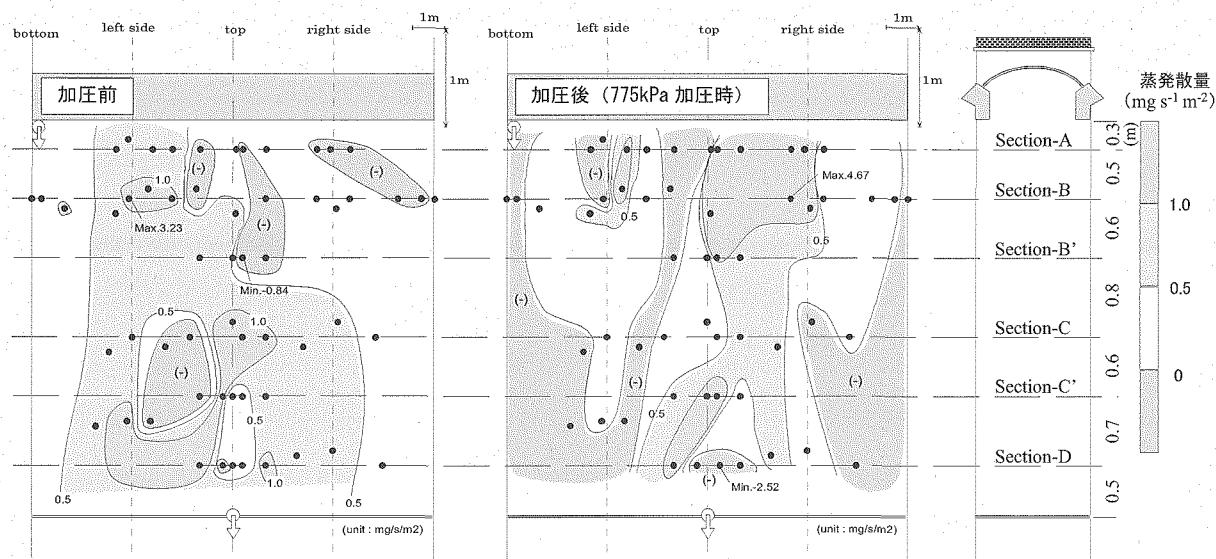


図 2.5-5 蒸発散量の岩盤壁面分布図

### 2.5.3 考察

加圧前と加圧後の蒸発散量を比較した結果、両者にはほとんど変化がないことが分かった。この理由としては、周辺岩盤内の間隙水圧が壁面から 2m 程度で 2MPa 以上を示す水理環境であるため、775kPa の昇圧ではプラグから 2m 以上離れたベンチレーション室への湧水変化はごく微量であったためと考えられる。この結果、圧入された水はほとんどがプラグとスチールサポートの間で湧出し、ベンチレーション室までは到達していないことが分かった。

ベンチレーション試験で求められた湧水量  $0.12 \text{ g s}^{-1}$  が岩盤壁面約  $50\text{m}^2$  から蒸発していると仮定すると、平均的な蒸発散量は約  $2.4 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  になる。この値と比べて、局所蒸発散量計測の平均値 0.50 (加圧前), 0.39 (加圧後)  $\text{mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  は小さい。この理由として、局所蒸発散量計測ではより蒸発散量の大きい部分を測定していなかったと考えられる。また、局所蒸発散量の計測中は、ベンチレーション室の人間からの水分の蒸発によりベンチレーション室内の湿度が上昇し、そのために岩盤壁面からの蒸発散速度が減少し、結果的に局所蒸発散量計測では小さい値が計測された可能性がある。

## 2.6 圧入試験およびトレーサー試験

止水プラグの閉鎖性能の確認として、水の圧入試験とその評価のためのトレーサー試験を実施した。以下、その概要および評価結果を示す。

### 2.6.1 圧入試験

圧入試験は、実スケールで施工した止水プラグと強度プラグに挟まれたチャンバー内に注水システムを使って水を圧入し、各プラグや周辺岩盤への水の浸透状況から閉鎖技術の性能評価を行うものである。本試験は、表 2.6-1 に示すように 5 つのフェーズに分けることができる。フェーズ I は 800kPa での注入圧段階、フェーズ II は 2.0MPa での注入圧段階、フェーズ III は 4.0MPa での初期の注入圧段階、フェーズ IV と フェーズ V は 4.0MPa で温水の注入圧段階である(図 2.6-1 参照)。各フェーズにおけるチャンバー内の圧力、温度、止水プラグからの総湧水量を図 2.6-1 に示す。止水プラグからの湧水量は、図 2.6-2 に示すようにプラグ最下流面において区間ごとに計測した。

止水プラグは締固めたベントナイトブロックを積み重ねて構築されているため、ベントナイトブロックの膨潤によりブロック間の間隙をなくし一体化させることを目的に、フェーズ I までの昇圧時には低い圧力からステップ状に圧力を作用させた。それでも、急速なチャンバー内の昇圧のため 1998 年 9 月から試験を開始し、1999 年 5 月に 800kPa に到達するまで止水プラグ側から 4 回  $10\text{mL min}^{-1}$  を超える大きな湧水量が認められたが、その後はブロックが十分に膨潤し、フェーズ III の 4MPa まで昇圧する過程において大きな湧水量は計測されなかった(図 2.6-3 参照)。チャンバー内圧が 800kPa と 2MPa の場合、安定した時点での湧水量を測定するため昇圧後最低 9 カ月間湧水量のモニタリングを継続した。800kPa 加圧時に約  $0.1\text{mL min}^{-1}$  の、2MPa 加圧時に約  $0.5\text{mL min}^{-1}$  のほぼ一定の湧水が計測された。4MPa への昇圧直後は約  $1.0\text{mL min}^{-1}$  の湧水量が計測されたが、その後、数ヶ月で約  $0.4\sim0.5\text{mL min}^{-1}$  まで湧水量は減少しており、2MPa 加圧時とほぼ同じ量になった。4MPa 加圧時における湧水量から止水プラグの概算の透水係数を算定すると、 $3.6\times10^{-12}\text{m s}^{-1}$  に相当することが分かった。また、全ての止水プラグ内部の土圧計で圧力が増加していることからも、ベントナイトブロックの膨潤により止水プラグの閉鎖性能が発揮されていると判断される。

表 2.6-1 各フェーズにおける湧水量の整理結果

フェーズ	I	II	III	IV	V
注水圧(kPa)	800	2,000	4,000	4,000	4,000
流量安定時期	1999年5月 ～2000年4月	2000年7月 ～2001年4月	2001年9月 ～2002年5月	2002年11月 ～2003年3月	2003年7月 ～2003年12月
ベントナイトプラグ	ベントナイトブロック直近の温度(°C)	15	15	15	35~40
	平均湧水量 (mL/min)	0.18	0.46	0.55	0.88
トレーサー試験	トレーサー試験1		トレーサー試験2		トレーサー試験3, トレーサー試験4

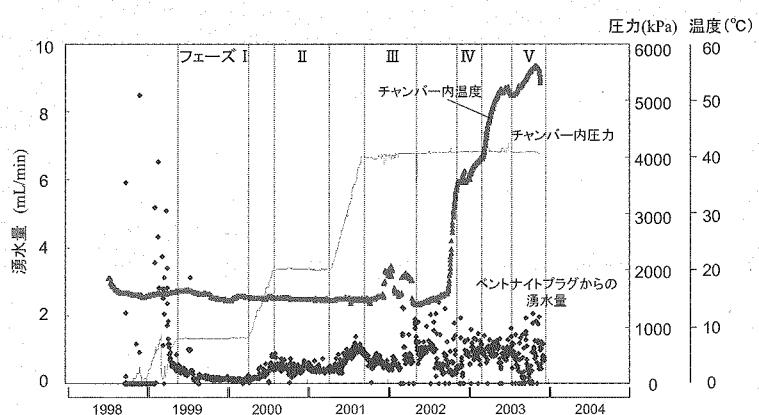


図 2.6-1 圧入試験結果(全フェーズ)

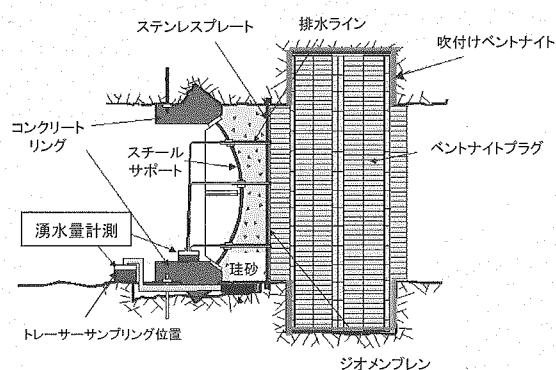


図 2.6-2 止水プラグ断面と湧水量計測位置

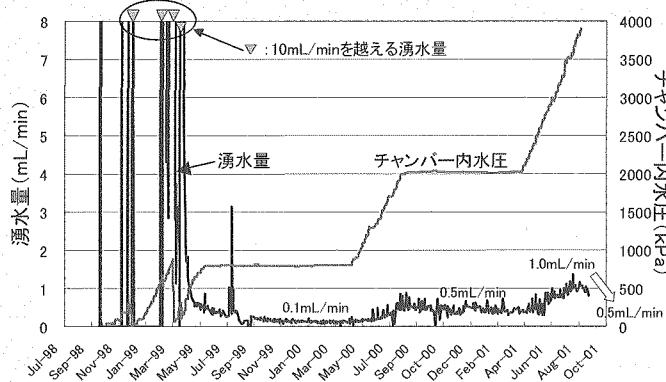


図 2.6-3 止水プラグからの湧水量(フェーズIII初期段階まで)

今回の試験では水分量、変位、圧力、温度等を計測するために約500個のセンサーを設置している。計測開始後3年以上経過した時点で、約90%のセンサーが正常に稼動していることが確認された。止水プラグ内の含水状態は、サイクロメータ、TDR、湿度計で計測した。図2.6-4にサイクロメータで計測されたサクション圧変化を示す。サクション圧が1MPa以下でほぼ飽和度100%であることから、加圧に伴いプラグの周辺部から中心部に向かって水の浸潤が進行していることがわかる。これはプラグに接している岩盤のゆるみ域やプラグと岩盤の境界部に設置した吹付けベントナイト部の透水性が相対的に大きいためである。4MPa昇圧時においては、プラグの中心部のわずかな部分を除き、ほぼ飽和状態に達したこと分かる。また、2MPa加圧時の止水プラグの変位量の計測結果から、プラグのチャンバー側の面が45mm、プラグ最下流面のスチールプレートが6mmそれぞれ下流側へ変位し、プラグ自体がトンネル軸方向に38mm圧縮されていることが計測された。図2.6-5に止水プラグ天盤付近のトンネル周囲方向の圧力変化(①～③)とスチールプレートにおけるトンネル軸方向の圧力変化(④)を示す。スチールプレートにおいてチャンバー内の加圧より大きな値が計測されているのは、止水プラグの膨潤圧が付加されたためである。トンネル周囲方向の計測では膨潤圧を計測しているものと考えられるが、加圧に従い増加しており、これは飽和度の増加に加えプラグ変形の影響を受けているためである。

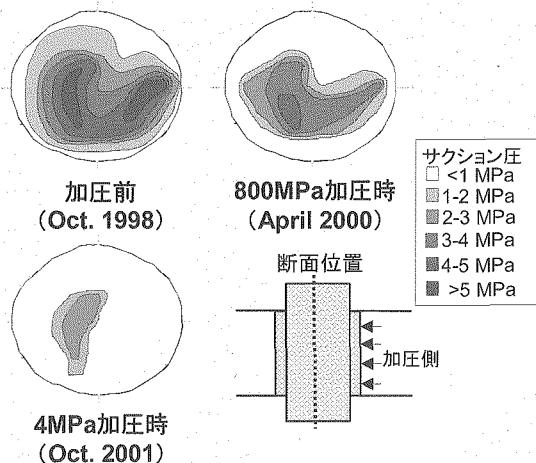


図2.6-4 サイクロメータによる飽和度計測結果

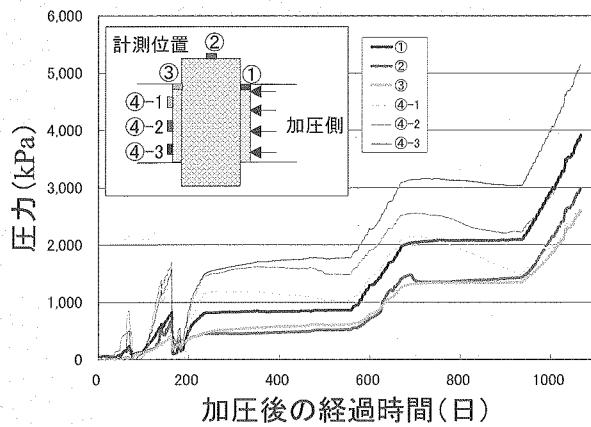


図 2.6-5 止水プラグ内の圧力計測結果

## 2.6.2 トレーサー試験

### (1) トレーサー試験の概要

トレーサー試験は、トレーサーの種類（表 2.6-2 参照）と時期（表 2.6-1 参照）を変えて合計 4 回試験を行った。トレーサーは緊急時に用いる予備タンクに溶かし込み、この予備タンクから注入を行った。トレーサーの投入方法として、一度チャンバー内の水を抜いた後でトレーサー水を注入する方法と、チャンバー内の水圧を低下させずに短時間でチャンバー内の水をトレーサー水に置換させる方法の 2 つが考えられる。前者では、プラグ周辺に不飽和部が生じる、止水プラグが除荷により変形を生じる、といった不具合が発生する可能性があることから後者を採用した。具体的なトレーサー投入方法としては、立坑のスタンドパイプを利用して排出パイプから常に注水圧力が作用するようにして、高圧ポンプを用いて 1 日で注入を行った（図 2.6-6 参照）。トレーサーの投入直後に、トレーサーがチャンバーの底盤付近に溜まっている現象が観測されたが、注入に使ったパイプとポンプを用いてチャンバー内の水を攪拌させることによりチャンバー内でのトレーサー濃度をほぼ均一にした。トレーサーのサンプリングは、止水プラグ、強度プラグの外側に設置したサンプラーと間隙水圧計測用の水平ボーリング孔を用いて行った。水平ボーリングからのサンプリングは、止水プラグ側の HGT-8 孔と HGT-10 孔を用い、計測区間の最もプラグよりの区間から、サンプリング毎に低下した間隙水圧が回復するのを待って、ポンプによるサンプリングを行った（図 2.6-6 参照）。

各トレーサー試験での最下流面における実測トレーサー濃度のブレークスルーカーブを図 2.6-7 に示す。

表 2.6-2 トレーサー試験結果

	トレーサー試験 1 (TT1)	トレーサー試験 2 (TT2)	トレーサー試験 3 (TT3)	トレーサー試験 4 (TT4)
トレーサー	ヨウ化ナトリウム	臭化ナトリウム	ローダミン	ヨウ化ナトリウム
温度 [°C]	15	15~35	55	55
圧力 [MPa]	0.8~2	4	4	4
初期濃度 [g L <sup>-1</sup> ]	1.0	1.0	3.7	0.8
粘土プラグにおける破過時間 [h]	500	816	810~870	1,000

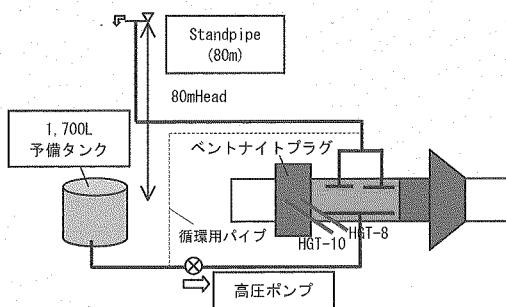


図 2.6-6 トレーサーの投入方法

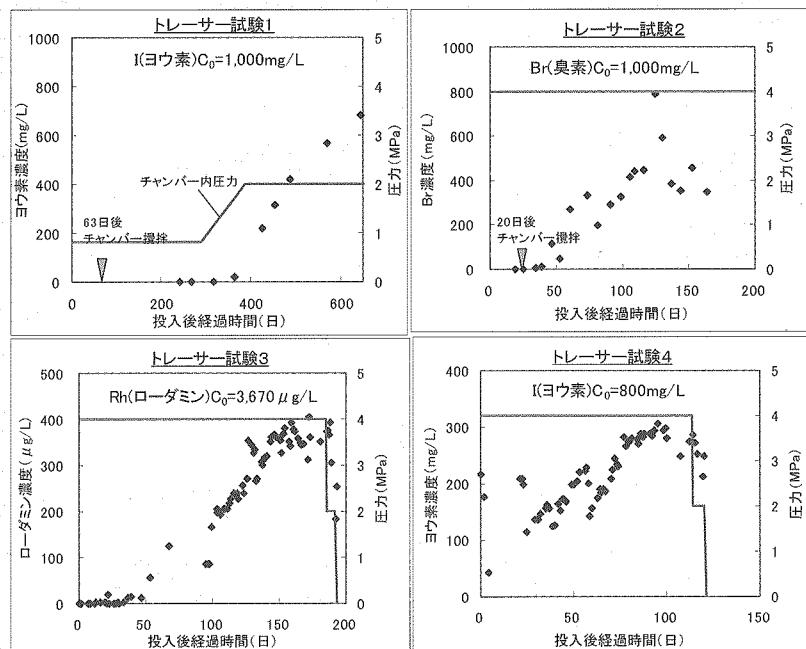


図 2.6-7 トレーサー試験結果

## (2) トレーサー試験解析結果

前述のトレーサー試験結果について解析評価を実施した。まず、温度上昇前の試験であるトレーサー試験 2 に対し、プラグ周辺の EDZ の透水係数をパラメータとして適切な値に設定し（ステップ 1），設定された透水係数の温度影響をモデル化し、トレーサー試験 3, 4 の実測結果と比較することにより温度のトレーサー試験に与える影響を評価した（ステップ 2）。解析は、軸対称 2 次元モデルで実施し、流出側に EDZ1 相当の物性をもつ要素を設けた。トレーサー解析モデル、トレーサー測定位置および入力データを図 2.6-8 に示す。

ステップ 1 の解析結果評価をトレーサー試験 2 の実測破過曲線と比較した。その結果、トレーサー濃度をパルスとして与え、プラグ周辺の EDZ の透水係数を  $5.0 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  としたときに、実測値と解析値が比較的良く一致することが分かった（図 2.6-9 参照）。これをステップ 2 に用いることとした。

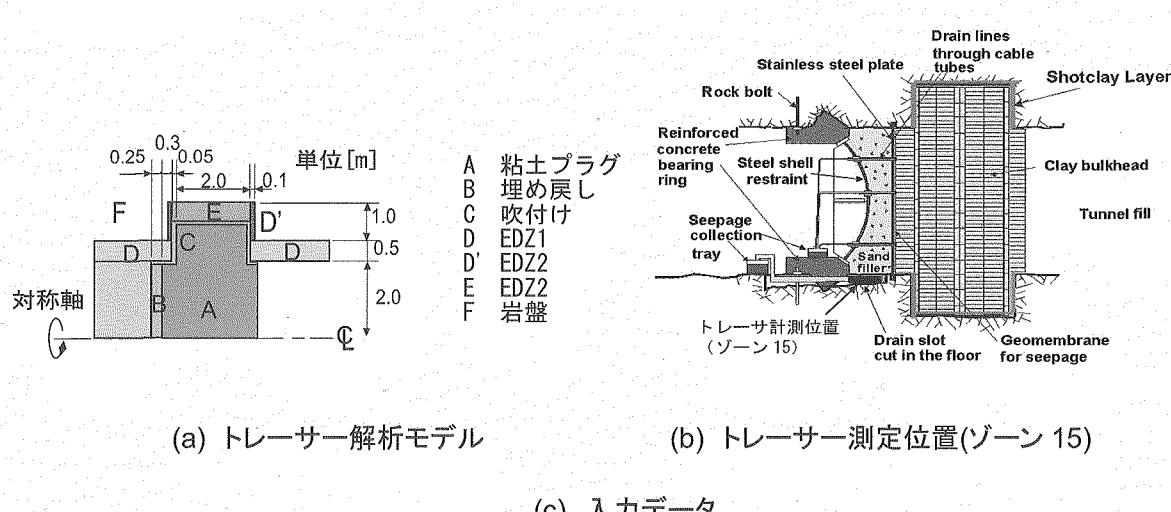


図 2.6-8 トレーサー解析モデル、トレーサー測定位置および入力データ

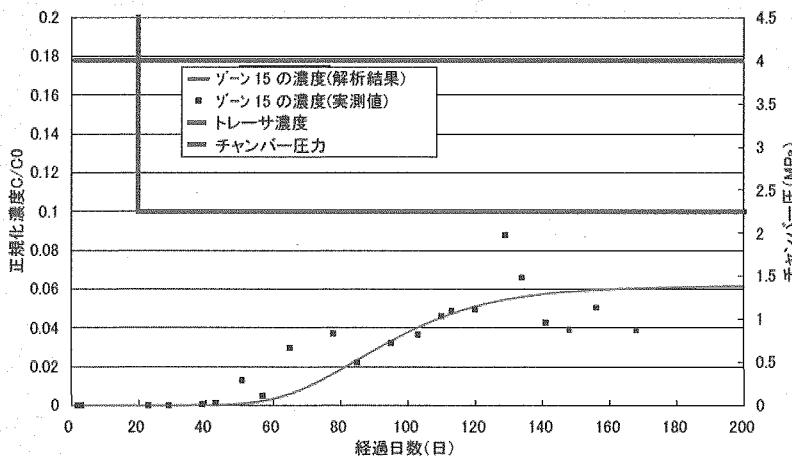
図 2.6-9 ステップ1解析結果(プラグ下流側における濃度比( $C/C_0$ )解析結果と実測値)

図 2.6-10 に温度が EDZ の透水性に与える影響の評価結果を示す。トレーサー試験 3 ではローダミンが 40 日経過後から破過していることから、トレーサー試験 4 開始直後から 30 日までの値をバックグラウンド値として考慮し、その平均値からの増加分を用いて比濃度  $C/C_0$  を設定し、トレーサー試験 4 の実測値の破過との比較を行った。この結果から、実測値は温度上昇による透水係数の低減率 0~20%を考慮した解析値の範囲にあり、温度による透水性への影響は小さいことがわかる。さらに 3 次元解析を行った結果を図 2.6-11 に示す。本モデルにおいては、トレーサーは境界部および EDZ を選択的に移行していることが示されている。

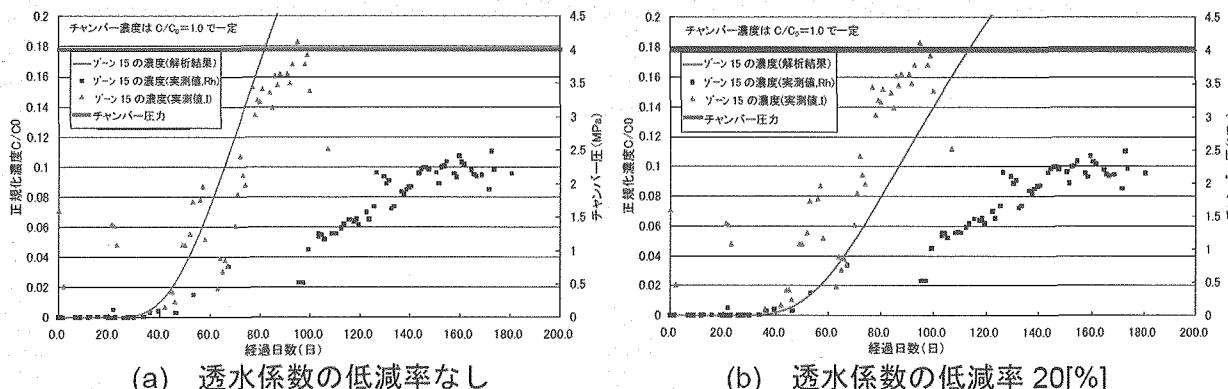


図 2.6-10 温度による EDZ の透水性に与える影響の評価結果

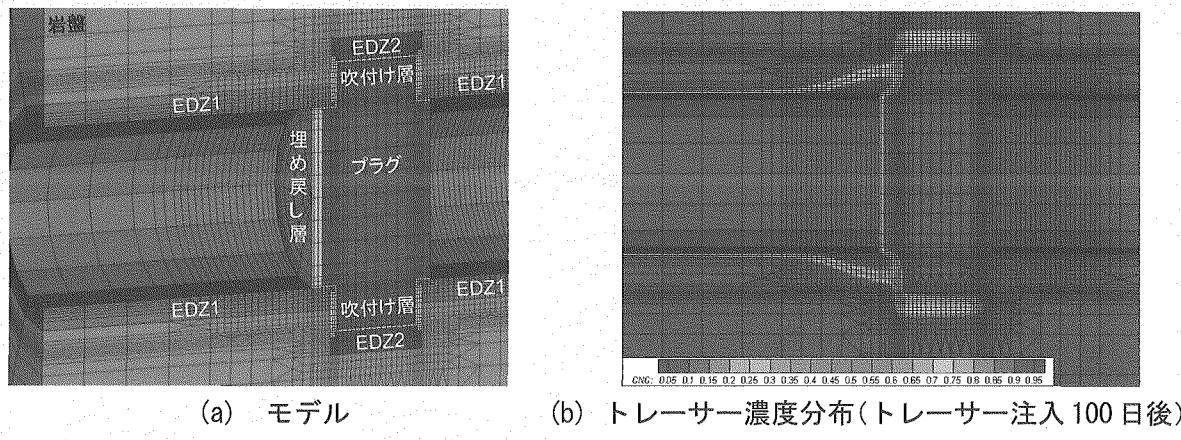


図 2.6-11 3 次元トレーサー解析結果

また、各々のフェーズにおける止水プラグからの平均湧水量から、プラグ全体の透水性を計算した結果が図 2.6-12 である。フェーズIV, V は圧入した水の温度が異なることから、温度上昇による水の粘性の増加を考慮に入れ 15°C 相当になるように補正を行っている。フェーズ I と II は透水性がほぼ同じであるが、フェーズ I はベントナイトブロックが飽和されていない期間であることから、湧水量が実際の浸透量より少なく計測されている可能性がある。フェーズ II から III にかけて透水性が減少している理由としては、ベントナイトの膨潤により、プラグと岩盤との境界部の閉塞が進行したことが考えられる。また、フェーズ IV, Vにおいて湧水量がやや減少する傾向が見られる理由としては、昇温による岩盤の膨張によりゆるみ域の亀裂が閉塞したことや、ゆるみ域とプラグとの境界部がさらに閉塞したことが考えられる。しかし、これらの透水性の違いは 1 オーダー以内であり、いずれのフェーズにおいても安定した止水性能を発揮していることが分かる。

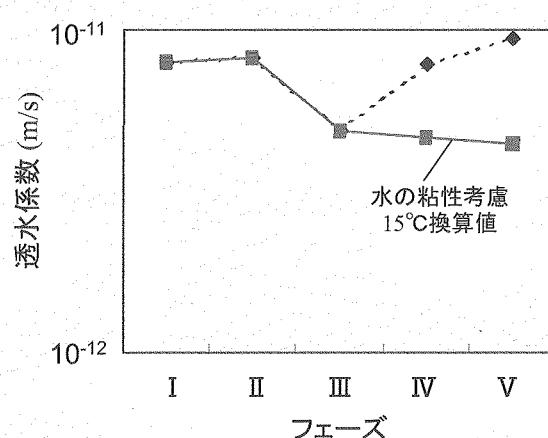


図 2.6-12 各フェーズにおける透水性の比較

## 2.7まとめおよび課題

本章では、主に日本側が主体的に取り組んできた粘土プラグ施工、グラウト施工、蒸発散測定、トレーサー試験およびその評価について、これまでに、全体を通じて知見を取りまとめたものがなかったため、本資料の目的である閉鎖要素自身の施工が可能であり、施工が可能な閉鎖要素に期待される性能が発揮できることの確認する観点で、改めてとりまとめを行った。その結果、得られた知見は以下のようになる。

- 止水プラグの施工
  - 止水プラグは約9,000個の締固めたベントナイトブロック（配合比：ベントナイト70%，珪砂30%，乾燥密度 $1.9\text{ t m}^{-3}$ ，重量約13kg）を積み上げることにより施工することができた。
  - 止水プラグとの接触面になる岩盤部にはベントナイトを吹き付けることにより、止水プラグと岩盤との境界面に生じる隙間を埋めることができた。
- 強度プラグの施工
  - 低発熱高流動コンクリートを材料とする強度プラグを施工することができた。
- 止水プラグの遮水性能
  - 止水プラグの片側から圧入試験を行い、初期の段階はベントナイトの膨潤不足などにより湧水が確認されたが、その後は湧水量が減少し、最終的に止水プラグは概算の透水係数 $3.6 \times 10^{-12}\text{ m s}^{-1}$ に相当する遮水性を有していることを確認できた。
- 粘土グラウトの適用性
  - 坑道周辺に生じるEDZを対象に粘土グラウトの施工を行うことができた。
  - 蒸発散量計測による湧水評価
    - 実際に圧入された水が湧水量計測部（スチールサポート）を超えて、更に外側の坑道に到達する可能性があるため、蒸発散量計測を行い、圧入した水の到達範囲の確認を行った。その結果、圧入した水が止水プラグから2m以上離れた坑道への到達量は僅かであり、ほとんどがスチールサポートの部分で湧出していることを確認した。
  - トレーサー解析による止水プラグの物質移行特性把握
    - 物質移行解析によりトレーサー試験結果のトレースを行い、止水プラグ周辺の物質移行特性を概略把握することができた。

原位置適用性試験結果に基づき、止水プラグ、強度プラグおよび粘土グラウトに関して、現状技術を組み合わせることにより施工が可能であり、止水プラグ周辺部での低透水性能を把握することができた。今後は、上記施工技術、評価技術の高度化を図るとともに、埋め戻し材の施工および性能を把握する必要がある。

### 3. 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件と閉鎖システムの考え方

2章では、カナダの地下実験施設における止水プラグの原位置適用性試験が終了したことを受け、全体を通じて既存の知見を取りまとめて、原位置における止水プラグ中心とした閉鎖要素の実現可能性について取りまとめた。本章では、もう一つの成立性の課題である“結晶質岩における閉鎖システムの考え方の整理”に関する検討を実施した。

#### 3.1 結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件

1章でも述べたように、処分場地下施設のパネルを構成する全ての処分坑道は、主要坑道、連絡坑道およびアクセス坑道を介して地上に繋がっており、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評価するためには、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、人工バリアおよび人工バリア周辺に存在する閉鎖要素といった構成要素も考慮した要件の整理や性能評価が必要である。これまでに閉鎖要素に関する設計要件の検討に関しては、主に性能保証という観点で、時期、性能保証項目が抽出され、各部位に着目した設計要件が抽出し、整理されてきている<sup>29)</sup>。実際に処分場での対処を考えると、坑道内の各部に対して、各閉鎖要素を合理的に組み合わせて施工・設置するものであり、それら組み合わせがシステムとして機能を評価するべきであり、このような観点からの事象の抽出、要件の整理、その対策、これまで得られている知見を整理することにより、より現実的な性能要件の抽出が可能となる。

したがって、ここでは、改めて結晶質岩を対象に処分場で考えられる閉鎖に関わる事象を抽出し、その事象が発生する部位、事象の発生を抑制するための要件およびその具体的な対策方法について整理するとともに、これらに対して2章で示したTSXの試験結果から得られた知見を整理した（表3.1-1）。ここで想定している結晶質岩とは、2章で示したTSXの試験場のように花崗岩質大規模深成岩体であり、強度的には硬岩で脆性的な挙動示すとともに、水理的には亀裂媒体で亀裂ネットワーク中を地下水が移動する特性を持つ。

表3.1-1のように、事象が発生する部位毎に整理することにより、閉鎖要素を単体で用いるのではなく、他と組み合わせることが重要であることが分かる。また、TSXの試験結果から得られた知見より、止水プラグ、粘土グラウト、切欠きに関しては施工及び性能が確認されているが、埋め戻し材、支保工の撤去、強度プラグの施工及び性能に関わる検討が今後必要である。

表 3.1-1 結晶質岩における処分場で考えられる閉鎖に關わる事象およびその対策と TSX で得られた知見

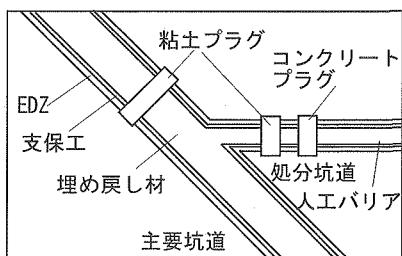
閉鎖に關わる事象 (課題)	部位	要件	対策	具体的な内容	TSX で得られた知見
坑道内 (アクセス坑道含む)が核種移行の主要な経路となる	坑道 埋め戻し材 と岩盤との境界部	坑道(アクセス坑道含む)を核種移行の主要な経路としないこと	坑道内の透水性を要求するように坑道を充填する 境界部の透水性を要求するように坑道を充填する	埋め戻し材と止水プラグを組み合 わせて施工 ショットクレイ、ペントナイトブロックと止水プラグを組み合わせて施工	止水プラグを実際に施工することができ、境界部分も含めたプラグ全体で低透水性( $10^{-11} \text{ m/s}$ )を確保することが可能
支保	EDZ	支保を核種移行の主要な経路としないこと	支保部分の透水性を要求すべ ル以下に抑えるように支保に接觸する部材が隙間を埋める 支保工の劣化を考慮して、そ の連続性を遮断する	埋め戻し材、ショットクレイ、ペントナイトブロックと止水プラグを組み合 わせて施工 応力状態、岩盤の力学特性等を考 慮した支保工の部分的な撤去(撤 去部分に止水プラグを施工)	高密度ブロックおよび岩盤との境界部へのショットクレイにより、設計仕 様どおりの高密度の止水プラグの施工することができ、プラグ全体で低 透水性( $10^{-11} \text{ m/s}$ )を確保することが可能
坑道周辺 岩盤が核種移行の主要な経路となる	EDZ	EDZ を核種移行の主要な 経路としないこと	EDZ の連続性を遮断する EDZ の力学特性等を考 慮した切欠きの施工設計支保工の 撤去	EDZ の範囲を適切に把握し、応力状態、岩盤の力学特性等から適切 な切欠き深さを設計施工が可能(三角錐、矩形)	
断層	調査孔	断層を核種移行の主要な 経路としないこと	断層を隔離する 断層の透水性を改良する 試験孔を開塞する 緩衝材の膨出を押さえる	止水プラグを施工 粘土グラウトを施工 グラウトおよび止水プラグ(試験孔 用)を施工 強度プラグを施工	高密度ブロックおよび岩盤との境界部へのショットクレイにより、設計仕 様どおりの高密度の止水プラグの施工することができ、プラグ全体で低 透水性( $10^{-11} \text{ m/s}$ )を確保することが可能
人工バリ アの機能 が発揮され ない					切欠き部分を利用した、プラグ周囲の EDZ への粘土グラウトが可能 2m 程度であれば、ボーリング孔に円柱状の高密度のベントナイトプロ ックを充填することにより閉塞が可能 低発熱高流動のコンクリートおよびセメントグラウトの併用により、設計 仕様どおりの強度プラグの施工が可能

### 3.2 処分場レイアウト規模を対象とした閉鎖システムの考え方

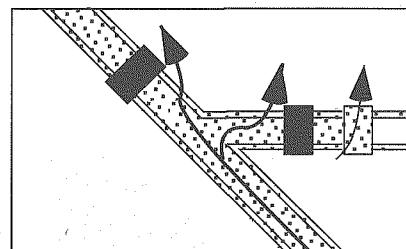
#### 3.2.1 既往の検討例

前節においては、結晶質岩における個々の閉鎖要素に対して期待すべき性能要件を抽出するとともに、TSX の試験結果からの知見と今後個々の閉鎖要素の設計で検討すべき課題を抽出した。ここでは、そのように性能が期待できる個々の閉鎖要素を処分場レイアウト規模に適用していく閉鎖システムとしての考え方を整理する。

これまでの性能評価は、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、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。しかしながら、前項のような閉鎖要素の組み合わせによる性能を評価し具体的な設計を行っていくためには、処分場に存在すると考えられる構成要素を考慮した評価が必要である。母岩が均質であることを前提として、藤田他<sup>37)</sup>や杉田他<sup>38)</sup>は処分パネル規模や坑道交差部周辺を対象とした水理解析による検討を実施し、処分場レイアウトを設計する際には地下水の動水勾配の方向に留意が必要なことや粘土プラグが人工バリアからの主要坑道への流量の抑制に効果があること（図 3.2-1）を示している。これらの成果を踏まえ、さらに核種移行解析を行い、主要な核種の移行経路の把握、閉鎖要素の物性値の設定方法を評価することにより、ゆるみ域における移行経路の遮断の程度や、性能評価上考慮すべき指標の一つである通過流量の低減の程度に関して、処分パネル全体での設計仕様の策定に役立つものと考えられる。

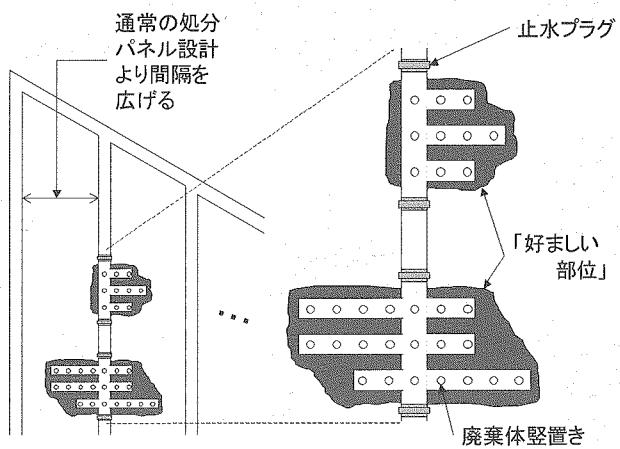
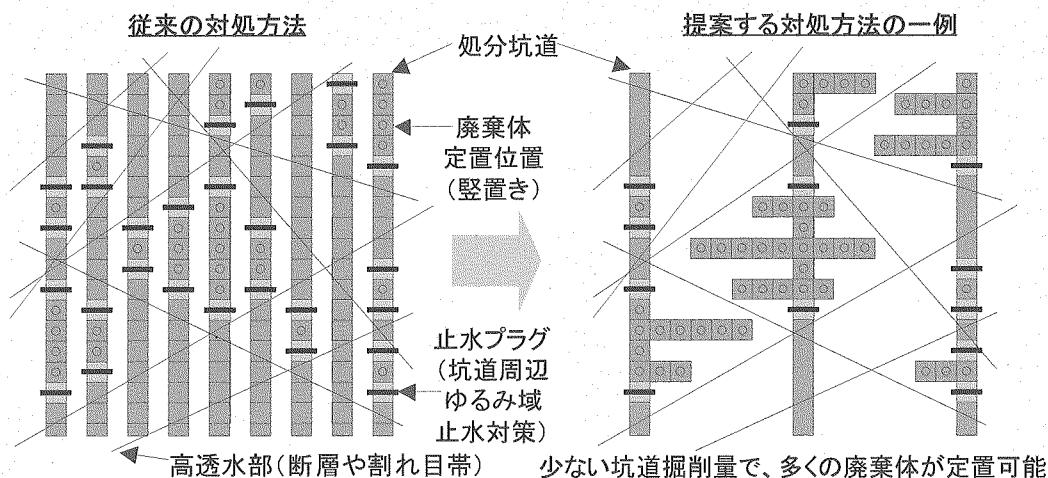


(1) 水理解析評価モデル

(2) 解析結果例(矢印は粘土プラグを設置した場合の流線,  
動水勾配は図下から上部)図 3.2-1 閉鎖要素を考慮した水理解析の例 (出典 : 参考文献<sup>37)</sup>)

亀裂が発達した不均質な母岩を対象に、須山他<sup>39)</sup>は母岩が本来有する天然バリア機能を有効に活用できるように、不均質な地質環境に応じて処分坑道レイアウトを変更する概念を提案している。この概念は、高透水の断層や割れ目帯などを避け、不均質な地質環境内に分散して存在する好ましい部位に集中して廃棄体を定位するものであり、不均質性に応じて処分坑道間隔を広げ、例えば処分坑道から直交する方向にも廃棄体を定位するものである（図 3.2-2 参照）。この概念では、図 3.2-3 に示すように止水プラグ設置数を減らすことが可能となる<sup>40)</sup>。

限られた調査のみでは岩盤内の特性を十分に評価することは困難ため、例えば、山岳トンネルの設計は一般的な土木構造物の設計と比べて、仮の設計や目安としての設計の性格が強いということが言われている<sup>41)</sup>。そのため、当初設計とは異なる地質環境条件が確認された場合には、過度に保守的な設計を防ぐという意味で、図 3.2-3 右図に示す可変型処分坑道レイアウトを適用するということが有効であると考えられている。

図 3.2-2 可変型処分坑道レイアウトの概念（出典：参考文献<sup>39)</sup>）図 3.2-3 高透水部の分布形状を踏まえた可変方処分坑道レイアウトイメージ  
(参考文献<sup>40)</sup>に加筆)

### 3.2.2 処分場レイアウト規模を対象とした閉鎖システムの考え方

前節を踏まえ、結晶質岩における閉鎖要素の設計においては、地質環境の不均質性の程度によって止水プラグへの要求機能を整理する必要がある。結晶質岩での不均質性の代表である高透水の割れ目帯などが数 100m～数 km 間隔で出現する場合は、第 2 次取りまとめ<sup>1)</sup>で示しているパネルレイアウトのバリエーション（図 3.2-4 参照）のように、割れ目帯を避けたレイアウトを行い、割れ目帯に囲まれた領域においては、上述に示すように均質と見なした上で、埋め戻し材等の閉鎖要素を考慮した閉鎖解析評価を行い処分パネル全体での仕様を設定していくことが有効である。

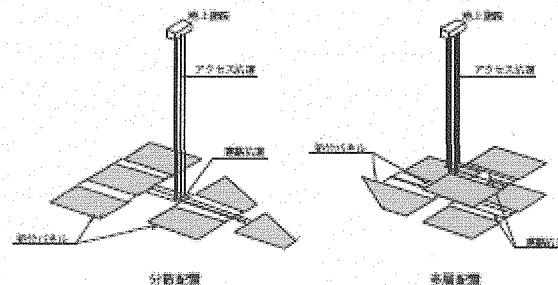


図 4.2-4 パネルレイアウトのバリエーション

図 3.2-4 パネルレイアウトのバリエーション（出典：参考文献<sup>1)</sup>）

また、割れ目帯などが数 10m～数 100m 間隔で出現する場合には、上述に示すように、母岩が本来有する天然バリア機能を有効に活用した上で、処分場全体として止水プラグの設置数を減らすように、坑道掘削時の情報を用いて処分坑道のレイアウトを見直す必要がある。この場合、日々得られる施工情報を基に処分坑道レイアウトを最適化するために、情報化施工技術としての処分坑道レイアウト最適化システムの開発などが必要となる。

### 3.3 残された課題

今後、上記のような閉鎖技術をより確かなものにしていくためには、次のような設計、施工、評価の課題に対して、対応していく必要がある。

設計に関しては、上記したように全体としての解決すべき方向性が提示されている。埋め戻し材に関しては、実規模での施工性および性能の確認を、また、強度プラグ材料のベントナイト材料への影響等の観点からのさらなる施工性および性能の確認を行う必要がある。また、均質な岩盤を対象とした水理解析や核種移行解析により、処分パネル全体での設計仕様の検討が必要である。さらに、不均質性が顕著な岩盤に対しては、処分坑道レイアウト最適化システムの開発が必要なため、システムの構築に加え、操業や閉鎖の観点から様々な制約条件の抽出や、これらの結果を踏まえた閉鎖要素の設計マニュアルの構築が必要である。

施工に関しては、特に廃棄体横置きの処分場概念では、操業・閉鎖に対し止水プラグの施工が核種移行の主要な経路となるため、施工性を向上させる合理的な施工方法の検討などが不可欠である。また、実施工を考えた場合、止水プラグ拡幅部では掘削後のずり排出が困難であることや湧水が溜まりやすいなどの課題もあり、より現実に即した技術開発が望まれる。更に、施工後の止水プラグの品質管理方法の整備が不可欠である。

評価に関しては、その信頼性を高めるためにも設計とのリンクが重要である。

#### 4. まとめ

本報告書では、第2次取りまとめ以降の地層処分場の閉鎖技術に関する課題を考慮に入れて、カナダの地下実験施設における止水プラグの原位置適用性試験結果などを踏まえ、結晶質岩における閉鎖要素に期待すべき性能要件と閉鎖システムの考え方を取りまとめた。

止水プラグ、強度プラグ及び粘土グラウトについては、現状技術を組み合わせることにより施工が可能であり、止水プラグ周辺部での低透水性能が発揮されることを確認した。また、結晶質岩を対象に閉鎖に関わる事象を抽出し、その事象が発生する部位、事象の発生を抑制するための要件及びその具体的な対策方法を整理するとともに、これらについて原位置試験結果で得られた知見をとりまとめ、今後個々の閉鎖要素の設計で検討すべき課題を抽出した。さらに、そのような性能が期待できる個々の閉鎖要素を処分場レイアウト規模に適用していくために必要な閉鎖システムとしての考え方を整理し、あわせて課題を抽出した。

今後、閉鎖技術の信頼性を高めていくためには、原環機構が現在進めている処分場概念の構築フレームとの整合性を確保しつつ、処分場システム全体としての性能向上を図る必要がある。

## 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－地層処分研究開発第2次取りまとめ－ 総論レポート”, JNC TN1400 99-020(1999).
- 2) 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).
- 3) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：“放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について”, 平成18年9月11日(2006)
- 4) 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”, 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- 5) 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, Swedish Nuclear Fuel and Wastes Management, Co. (SKB), IPR-02-05, pp.31-37(2002).
- 6) Simmons, G.R. and P. Baumgartner: “The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineering for a disposal facility”, AECL Report No. AECL-10715, COG-93-5 (1994)
- 7) Baumgartner, P., D.M. Bilinsky, Y. Ates, R.S. Read, J.L. Crosthwaite and D.A. Dixon: “Engineering for a disposal facility using the in-room emplacement method”, AECL Report No. AECL-11595, COG-96-223 (1996)
- 8) Dixon, D.A., M.N. Gray, S.C.H. Cheung and B.C. Davidson: “The hydraulic conductivity of dense clay soils”, In Geotechnique in Resource Development, Proc. 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, 389-396 (1987)
- 9) AECL: “Environmental impact statement of the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste”, AECL Report No. AECL-10711, COG-93-1 (1994)
- 10) Johnson, L.H., J.C. Tait, D.W., Shoesmith, J.L. Crosthwaite and M.N. Gray: “The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineered barriers alternatives”, AECL Report No. AECL-10718, COG-93-8 (1994)
- 11) USDOE/OCRWM: “Yucca Mountain Science and Engineering Report”, Technical information supporting site recommendation consideration, Report No. DOE/RW-0539 (2001)
- 12) CRWMS M&O, Closure Seal Materials and Configuration : TDR-SCS-MG-000001 REV 00. Las Vegas, Nevada: CRWMS M&O. ACC: MOL.20000124.0136 (2000)
- 13) ANDRA: “Geological Disposal of High Level Waste”, Final Report (2001)
- 14) McKinley, I.G. and C. McCombie: “High-level radioactive waste management in Switzerland, Background and status 1995, Geological Problems in Radioactive Waste Isolation, Second Worldwide Review”, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-38915, UC-814, pp. 223-231 (1996)

- 15) SKB: "RD&D-programme 98. Treatment and final disposal of nuclear waste", Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. (1998)
- 16) SKB: "Deep repository for spent nuclear fuel : SR-97 – Post-closure safety. Main Report - Volume I.", Technical report TR-99-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (1999)
- 17) Hökmark, H. : "Plug design – Numerical study of rock mechanical conditions", PR 44-94-024, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (1994)
- 18) Hökmark, H. : "Numerical tunnel plug study", PR D-96-007, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (1996)
- 19) Johansson, E., R. Riekola, Salo, J.-P., Anttila, P. : "State-of-the-art – Nuclear waste repository projects and rock mechanics in Finnish program", In Proc. Int. Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, Vail, Colorado, June 5 – 6, American Rock Mechanics Association (1999)
- 20) Vieno, T. and H. Nordman: "Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara", Tila 99. Helsinki. Posiva 99-07 (1999)
- 21) Vieno, T. : "Groundwater salinity at Olkiluoto and its effects on a spent fuel repository", Posiva report 2000-11 (2000)
- 22) Riekola, R. : "Technical design of the HLW-Repository and applications of civil engineering and mining technology in Finland", In Proc. 2nd Int. Workshop on Geomechanics of Nuclear Waste Repositories, Seattle, Washington, July 29, American Rock Mechanics Association (2000)
- 23) 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).
- 24) SKB : "Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop", SKBIPR-02-05 (2002).
- 25) ONDRAF/NIRAS : "Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories", Brussels, March 2002 (2002).
- 26) 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する研究の進め方と反映先(その2)", JNC TN84002003-015 (2003).
- 27) 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).

- 28) 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).
- 29) 川上進, 藤田朝雄, 油井三和：“埋め戻し材, プラグ, 坑道および処分孔等の性能保証項目に関わる評価ツールの現状”, JAEA-Research 2006-015 (2006).
- 30) 藤田朝雄, 杉田裕：“JNC/AECL 共同研究－トンネルシーリング性能試験の現況について－”, サイクル機構技報, No.1, pp.79-84 (1998)
- 31) Read, R. S. : "Characterization Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory", EDZ Workshop, Int. Conf. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Canadian Nuclear Society, pp.35-46 (1996)
- 32) Chandler, N., Read, R. and Martin, C. : "In situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design", in Aubertin, M., Hassani, F. and Mitri, H. (eds.), Rock Mechanics Tools and Techniques, pp.929-936, Balkema (1996)
- 33) Read, R. : "Characterization Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory", Proc. EDZ Workshop, Int. Conf. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Canadian Nuclear Society, pp.35-46 (1996)
- 34) Masumoto, K., Sugita, Y., Fujita, T. and Chandler, N. : "Trial of Bentonite Grouting into the EDZ at AECL's Underground Research Laboratory", 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.36-42 (1999)
- 35) 升元一彦, 藤田朝雄, 杉田裕, 渡辺邦夫：“岩盤壁面からの初期湧水量の推定”, 岩盤地下水理に関するワークショップ, pp.7-12 (1999)
- 36) 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知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 分冊 2 工学技術の開発安全評価”, JNC TN1400 99-023 (1999)
- 37) 藤田朝雄, 川上進, 杉田裕, 高橋美昭, 酒井裕一：“地層処分システムにおける閉鎖要素の相互影響を考慮した坑道交差部における水理解析”, 土木学会 第 61 回年次学術講演会, CS05-017, pp.239-240 (2006)
- 38) 杉田裕, 高橋美昭, 藤田朝雄, 川上進, 酒井裕一：“地層処分システムにおける閉鎖要素の相互影響を考慮したパネル規模での水理解析”, 土木学会 第 61 回年次学術講演会, CS05-018, pp.241-242 (2006)
- 39) 須山泰宏, 戸井田克：“地質環境の不均質性を踏まえた処分坑道レイアウトの最適化に関する検討”, 日本原子力学会「2006 年秋の大会」, B62, p129 (2006)
- 40) 柳澤孝一, 須山泰宏, 高瀬博康：“地層処分における地質環境特性調査の進め方－不確実性評価－”, Isotope News, Dec.06.No.632, pp.2-8 (2006)
- 41) 中川浩二：“山岳トンネルの事前調査・設計における問題点と今後の展望”, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp.1-13 (2004)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	$m^2$
立体積	立方メートル	$m^3$
速度	メートル毎秒	$m/s$
加速度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波数	メートル	$m^{-1}$
密度(質量密度)	キログラム毎立メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立メートル毎キログラム	$m^3/kg$
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	$A/m$
(物質量)濃度	モル毎立メートル	$mol/m^3$
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ベタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	a
$10^2$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	$J/s$
電荷, 電気量	クーロン	C	$W/A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	フアラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S	$V/A$
磁束密度	テスラ	T	$A/V$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種)放射能吸収線量, 質量エネルギー	ベクレル	Bq	$Wb/A$
線量当量, 周辺線量当量	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量, 方向性線量当量, 人線量当量, 純線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量), 質量エンタルピー	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビーグル	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーベル	Np	1Np=1
ペル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アードル	a	1a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オンストローム	A	1A=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バーン	b	1b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイニン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa·s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>-4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホルト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-29</sup> W·m <sup>-2</sup> ·Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリヨン	cal	1 cal=1J
ミクロ	μ	1 μ=1pm=10 <sup>-6</sup> m