

結晶質岩における粘土プラグの閉鎖性能に関わる原位置試験および解析評価

藤田朝雄^{*1} 杉田裕^{*1} 升元一彦^{*2} 風間秀彦^{*3}

高レベル放射性廃棄物の地層処分場における閉鎖技術に関して、国内外における閉鎖概念の考え方を整理した上で、その考え方に基づいた閉鎖性能の発揮において確認しなければならない課題として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と設定した。本研究では、この課題を解決すべく AECL との共同研究としてカナダの地下研究施設において実施した TSX の施工概要および連続計測で取得されたデータを示すとともに、施工した粘土プラグの止水性能を確認するために実施した加圧注水試験結果とトレーサー試験およびその試験結果に基づく解析結果を示した。今回の試験により、現状技術を組み合わせることによって施工した粘土プラグは、周辺部を含めて低透水性を発揮できることを確認した。また、トレーサー試験の解析評価を行うことにより、粘土プラグ周辺の物質移行特性を把握することができた。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 閉鎖技術, トンネルシーリング性能試験, 地下研究施設, 粘土プラグ, 結晶質岩, 掘削影響領域, トレーサー試験, 物質移行

To establish sealing performance suitable for geological environmental conditions of Japan, it is necessary to obtain basic data related to the sealing functions through laboratory and in-situ experiments. These data are to be used for practical design of the sealing materials and to establish the method for analysis of the sealing performance.

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) had joined the international project, the Tunnel Sealing Experiment (TSX), to demonstrate the sealing performance of full scale plugs in-situ, and to develop analytical method of the sealing performance of the plugs at Underground Research Laboratory of the Atomic Energy of Canada Limited in Canada.

This paper presents the experimental data on the sealing performance, as well as the analytical studies for clay plug performance based on the tracer test results. The results of the experiments and the analytical studies indicate that the low permeability of the clay plug was well performed. It was also shown that the boundary between the clay plug and rock could be a dominant mass transport pathway.

Keywords: HLW, geological disposal, sealing technology, TSX, URL, clay plug, crystalline rock, EDZ, tracer test, mass transport

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分場建設のために掘削された坑道を放置しておく、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システム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ていると、廃棄物と人間の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、処分場全体の長期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、坑道周辺の掘削影響領域(Excavation Damage Zone :以下「EDZ」という)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[1]。

一般に、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[2]。つまり、処分概念に応じて適切な物理化学特性をもつ材料が選択され、処分サイトの地質環境が火成岩等の結晶質岩盤、また、粘土成

分に富んだ泥岩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ためである。

核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)は、「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—」(以下、「第2次取りまとめ」という)において、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を行った[1]。第2次取りまとめ以降、埋め戻し材やプラグ等の具体的な機能を考慮した工学技術と性能評価の両者の観点からの評価が必要であると捉え研究に取り組んできている[3,4]。具体的には、第2次取りまとめで示した閉鎖概念を対象とした地下水流動解析を実施し、これらに基づいた閉鎖に係るシナリオを検討するとともに埋め戻し材やプラグ等の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の検討を実施している。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、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、コンクリート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[3]。

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性能を保持するために、適

In-situ experiment and analytical studies on sealing performance of clay plug in crystalline rock by Tomoo Fujita (fujita.tomoo@jaea.go.jp), Yutaka Sugita, Kazuhiko Masumoto, Hidehiko Kazama

*1 (独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*2 鹿島建設株式会社 技術研究所

Kajima Technical Research Institute
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

*3 埼玉大学 地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute, Saitama University
〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

切な時期に坑道を埋め戻すことが必要であるとし、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 EDZ、断層破砕帯、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[5]。

原子力発電環境整備機構は、閉鎖技術については、以上のような検討も踏まえ、第2次取りまとめの概念を基本とし、その後明らかにされた科学的知見や国際的な議論を反映した検討結果を示している[6]。

さらに、カナダ[7-9]、アメリカ[10,11]、フランス[12]、スイス[13]、スウェーデン[14,15]、フィンランド[16,17]、における閉鎖概念についての考え方をまとめると次のようになる。

- ① 廃棄体縦置き方式の場合、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、という概念が基本である。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、プラグを安全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 各閉鎖要素の要求機能については、周辺岩盤程度という表現が多い。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。

以上より、閉鎖要素に関しては、地層処分システムに期待する主な安全機能としてバリア性能を発揮する役割というよりは、人工バリア性能発揮を補助する役割を果たすことと閉鎖要素自身は周辺岩盤程度の性能を持つことが期待されているとまとめることができる。このような性能が発揮されるためには、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。

以上の観点から閉鎖要素の施工性および性能を確認するためには、要素試験のような実験室レベルでは施工性も含めた十分な性能を把握することはできないため、実際の坑道規模で性能が確保できるかどうか確認する必要がある。

坑道規模での埋め戻し材の施工性の確認および施工初期からの性能を原位置で確認する試験として、スウェーデン・エスボ岩盤試験場での Backfill and Plug 試験[18]や Prototype Repository プロジェクト[19]、ベルギー・モル地下研究所における立坑の埋め戻し部の止水性能の把握に関しては RESEAL プロジェクト[20]がある。

Backfill and Plug 試験および Prototype Repository プロジェクトは、縦置き方式の処分概念における処分坑道上部の処分坑道の埋め戻し材の性能の検証を想定している。Backfill and Plug 試験では坑道の埋め戻し性能の検証が可能であり、Prototype Repository プロジェクトでは試験孔の

人工バリアとの相互作用(とくに緩衝材との相互作用)に関する検証が可能である。埋め戻し材の施工は斜め締固め工法が採用され、透水試験が行われている。

一方、立坑の埋め戻しに関する RESEAL は、内径 1.4m(掘削径は 2.2 m)、深さは 24 m の立坑を用いた試験である。立坑は深さ 16m までがコンクリートプラグ、その上部に厚さ 2.24m のベントナイトシール(パウダー／ペレットの混合)がある。ここでは、シールの透水性やガス透気性に関する試験、トレーサー注入試験を行ない、EDZ における拡散パラメーターが測定される。

上記、3つのプロジェクトは現在進行しているものであり、坑道における施工性および閉鎖性能に関するデータが今後引き続き取得される。

筆者らは、とくに、閉鎖要素の一つであるプラグに着目した実規模の原位置試験(Tunnel Sealing Experiment[トンネルシーリング性能試験]；以下、「TSX」という)を、第2次取りまとめ以前から、カナダ原子力公社(AECL: Atomic Energy of Canada Ltd.)との共同研究として AECL の地下研究施設(Underground Research Laboratory: 以下「URL」という)において実施しており[21,22]、原位置で施工した粘土材料およびコンクリート材料のプラグに対して、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た。

本報告では、上記に閉鎖要素の課題として示した閉鎖要素自身の施工性の確認および期待される性能が発揮できることを確認することを目的に、TSX で実施した試験および解析結果を示すものである。

まず、2章において TSX の概要を示すとともに3章で粘土プラグの止水性能を確認するために実施した加圧注水試験結果とトレーサー試験およびその試験結果に基づく解析結果を示し、4章で考察を加える。

2 TSX の概要

2.1 TSX の目的

TSX は、閉鎖要素の一つであるプラグに着目した実規模の原位置試験であり、URL の深度 420m の試験坑道に、粘土プラグおよびコンクリートプラグを施工し、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うものである。コンクリートプラグは AECL が開発した低発熱高流動コンクリート(低アルカリ性コンクリート)[23]を、また、粘土プラグはケイ砂と国産 Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を重量比 3:7 の割合で混合したものを材料としている(Fig.1)。本試験の実施にあたっては、動力炉・核燃料開発機構(現日本原子力研究開発機構)および AECL のほか、フランスから放射性廃棄物管理機関(ANDRA)、アメリカからサンディア国立研究所(Sandia National Laboratory、以下、SNL という)が技術協力機関として参加した。

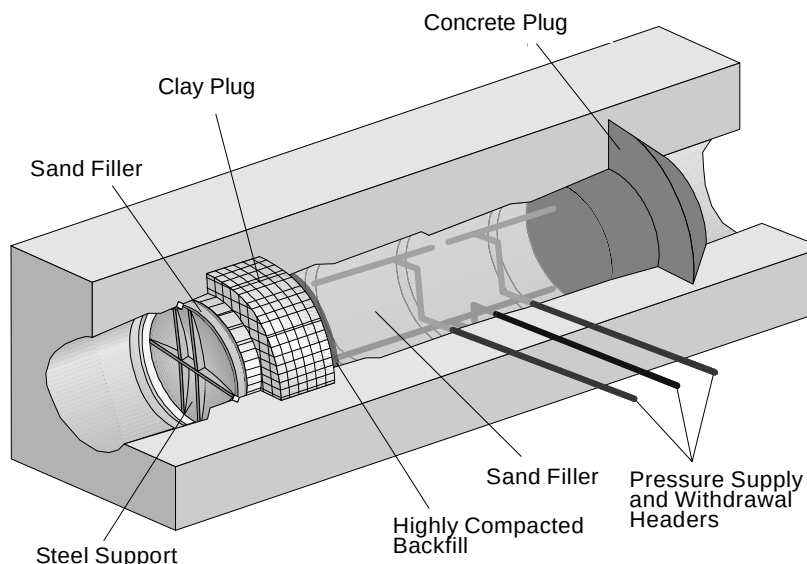


Fig. 1 Configuration of the TSX, Clay Plug is a total of 2.6 m thick; Concrete Plug is 3.5 m thick

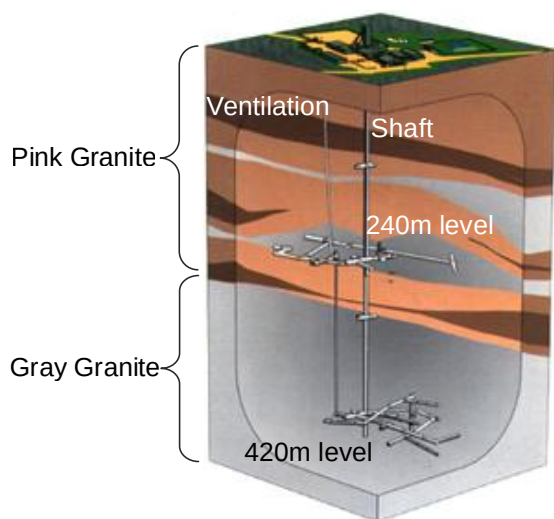


Fig. 2 Schematic View of Underground Research Laboratory

本試験の目的は、以下の通りである。

- ① 原位置において粘土プラグおよびコンクリートプラグに対して既存の施工技術の適用性を確認すること、
- ② 施工したプラグの性能を評価すること、
- ③ 性能に影響する要因を明らかにすること。

以上のように、現状技術でのプラグの施工性とプラグ坑道軸方向の水の流れの抑制性能に着目して、試験レイアウト(Fig. 1)、坑道レイアウト(Fig. 2)、プラグ材料、試験条件、計測項目等が設定された。しかしながら、実際の地層処分における閉鎖性能には、周辺岩盤程度の放射性核種の移行を抑制することも求められるため、上記目的にさらに以下のような詳細な項目も設定された。

- ① コンクリートプラグの設計・施工
- ② 高圧縮ベントナイトブロックの設計・施工
- ③ 坑道掘削する際に EDZ を最小化する掘削技術
- ④ EDZ への充填手法や EDZ の連続性を分断する施工方法の評価

⑤ 動水勾配下でのプラグおよびその周辺での水理・物質移行挙動の把握

⑥ 水理・物質移行挙動に影響ある因子の把握

以上のような閉鎖性能を把握するため、TSX は、地質構造による顕著な破碎帯のない場所を選定した。

この試験から得られる情報は、処分場の閉鎖要素の設計・施工に必要な不可欠なものとなるばかりでなく、処分場の長期安全性確保の観点からの要件の設定にも使用されるものである。また、これらは、坑道掘削技術や閉鎖性能を確認する際の計測技術に関しても重要な知見を与えるものでもある[22]。

2.2 試験位置

URL は、カナダのほぼ中心に位置するマニトバ州の州都ウィニペグの北東約 100km に位置し、地質的にはカナダ盾状地(Canadian Shield)の Lac du Bonnet バソリス(花崗岩質深成岩体)内に建設されている[24]。また、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、建設され、240 m レベルと 420 m レベル(それぞれ、地表から深度 240 m および 420 m の地点)に試験坑道が展開されている。TSX は、この URL の 420 m レベルの試験坑道を用いて実施された(Fig. 2)。URL そのものには破碎帯も存在するが、TSX の実施されている 420 m レベルでは破碎帯は観察されず、温度環境は一年を通じてほぼ 15°C 程度で一定である。また、岩盤の強度は圧縮強度が 120 MPa 以上、引張強度が 6 MPa である。

URL の主応力分布には特徴があり、試験坑道が位置する地下 420m レベルの最大主応力 σ_1 、中間主応力 σ_2 、最小主応力 σ_3 はそれぞれ 60 ± 3 MPa, 45 ± 4 MPa, 11 ± 2 MPa であり、最大主応力 σ_1 は最小主応力 σ_3 の 6 倍相当になる。また、最大主応力 σ_1 と σ_2 がほぼ水平方向にあり、最小主応力 σ_3 は 74.2° の傾きでほぼ鉛直である[25]。TSX では、

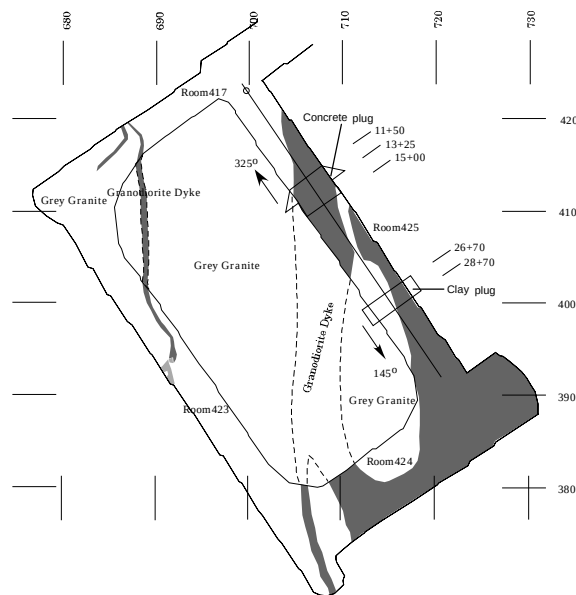


Fig. 3 Geology of the TSX area at 420m Level in Underground Research Laboratory

上記主応力と他の試験結果等を考慮して、応力比が小さくなる最大主応力方向に試験坑道を配置した。420 m レベルでは EDZ の特性調査が行われており、坑壁から掘削したボーリング孔内のボアホールカメラ観察結果により、坑壁から数 10 cm の範囲で壁面に平行な亀裂が観察されている[26]。また、ボーリング孔を利用した坑壁周辺の弾性波速度調査結果から、速度の低下域は 50 cm まで及んでおり、水理調査結果からは、坑壁近傍の数 10 cm で透水係数が健岩部と比べて 4 オーダー以上増加する領域が発達し、その周辺の 80 cm 程度の幅まで透水係数が増加する領域が存在するという計測結果が得られている[22]。

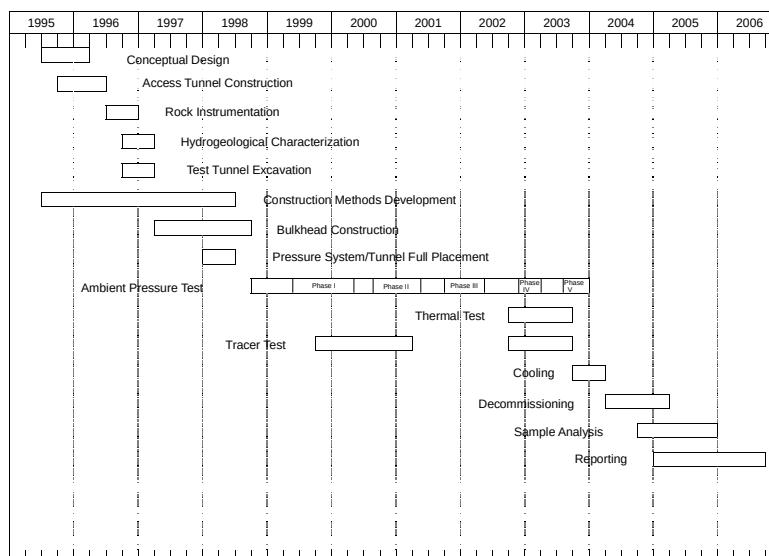
TSX のプラグ設置試験坑道周囲のレイアウトを Fig. 3 に示す。試験坑道は Room 425 で、既存の URL の試験坑道からのアクセス坑道として Room 417 が配置されている。Room 417 からコンクリートプラグ側の試験坑道 Room 425

がアクセス可能である。また、プラグ設置後に粘土プラグへのアクセスを可能とするために、Room 423, Room 424 が設置されている。Room 417, Room 423, Room 424 は、試験坑道周辺の岩盤挙動を計測するためのボーリング孔の設置および計測のために利用されている。

2.3 スケジュール

Table 1 に試験工程を示す。試験坑道の掘削、プラグ施工も含めた設備の設置は 1995 年 12 月から約 2 年 9 ヶ月間実施された。1998 年 9 月から試験坑道への注水・加圧を開始し、1999 年 5 月に水圧は 0.8 MPa に到達し、1999 年 7 月に水圧を 0.8 MPa に保ったままトレーサーを投入し、モニタリングを開始した。2000 年 4 月から水圧を昇圧させ、2000 年 7 月には 2MPa に到達した。2001 年 4 月からさらに水圧を昇圧させ始め、2001 年 9 月に 4 MPa に到達した。

Table 1 Simplified Schedules for the TSX



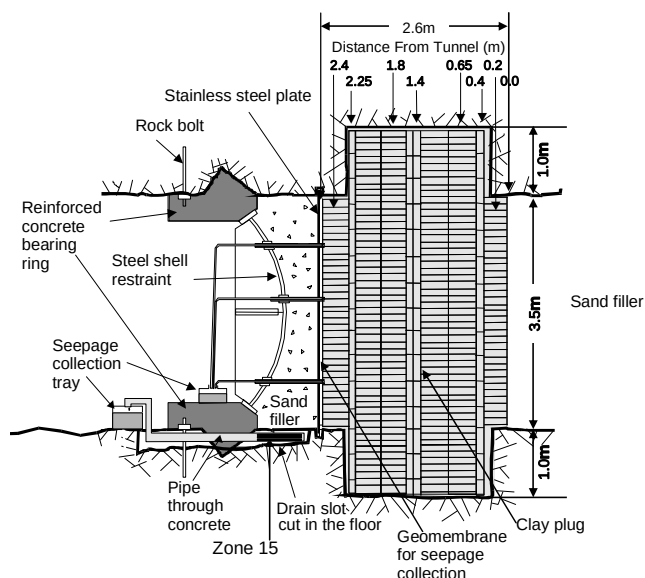


Fig. 4 Clay Plug and Restraint

その後、2002 年 7 月に加圧・減圧試験や臭化ナトリウムを使ったトレーサー試験を行い、さらに、2002 年 9 月からヒーター試験を開始し、ヒーター試験終了の 2003 年 11 月までの間にロードミンやヨウ化ナトリウムを用いたトレーサー試験を実施した。2004 年 1 月には加圧終了後に減圧を行い、2004 年 2 月以降に設備の解体・サンプリングを実施した。

2.4 プラグ施工

TSX サイトにおける地圧は、上述のように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 倍と偏圧状態であることから、坑壁から数 10cm の範囲で EDZ が確認されている[22,25]。このような EDZ は、健岩部に比べ透水性が大きく、物質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 Fig. 4 に示すような拡張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ともに、



Fig. 5 Photograph Showing the Completed Construction of the Clay Plug

EDZ に沿った移行経路を部分的に遮断する役割を持たせた。

粘土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。粘土プラグは約 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 g cm^{-3} , 重量：約 13 kg)を積み上げることで施工した。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 のとくに発達した部分の改良のため実施し、バックフィル(Fig.1)には、ベントナイトと砂礫の混合材を使用した。計画どおり原位置で施工された粘土プラグを Fig.5 に示す。

2.5 粘土プラグ周辺の計測データ

プラグ内の水分量、変位、圧力、温度等を計測するために 475 個のセンサーを設置している(Table 2 参照)。Fig. 6

Table 2 TSX Instrumentation in the Clay Plug

Instrument	Description	Quantity	Thermistors
Earth pressure cells (EPC)	Swelling pressure	35	35
Total pressure cells (TPC)	Swelling pressure	27	16
Thermocouple psychrometers (PSY)	Clay moisture content	132	132*
Hygrometers (HYG)	Clay moisture content	14	14
Time domain reflectometry (TDR)	Clay moisture content	12	0
Vibrating wire piezometers (PZ)	Clay water pressure	8	8
EDZ piezometers (PZ)	EDZ pore pressure	5	5
Linear potentiometer (LP)	Displacement	4	0
Rotary potentiometer (RP)	Displacement	1	0
Sonic probe measurement points (SONP)	Displacement	6	0
Stainless steel plate LVDTs (CLDT)	Displacement	6	0
Steelshell LVDT** (CLDT)	Displacement	1	0
Ring beam LVDTs (CLDT)	Displacement	4	0
Evaporation room hygrometers (VHS)	Relative humidity	2	2
Evaporation room thermistors (CL-T)	Air temperature	0	6
Total		257	218

* Psychrometers use thermocouples to measure temperature

** LVDT - Linear Variable Differential Transformer

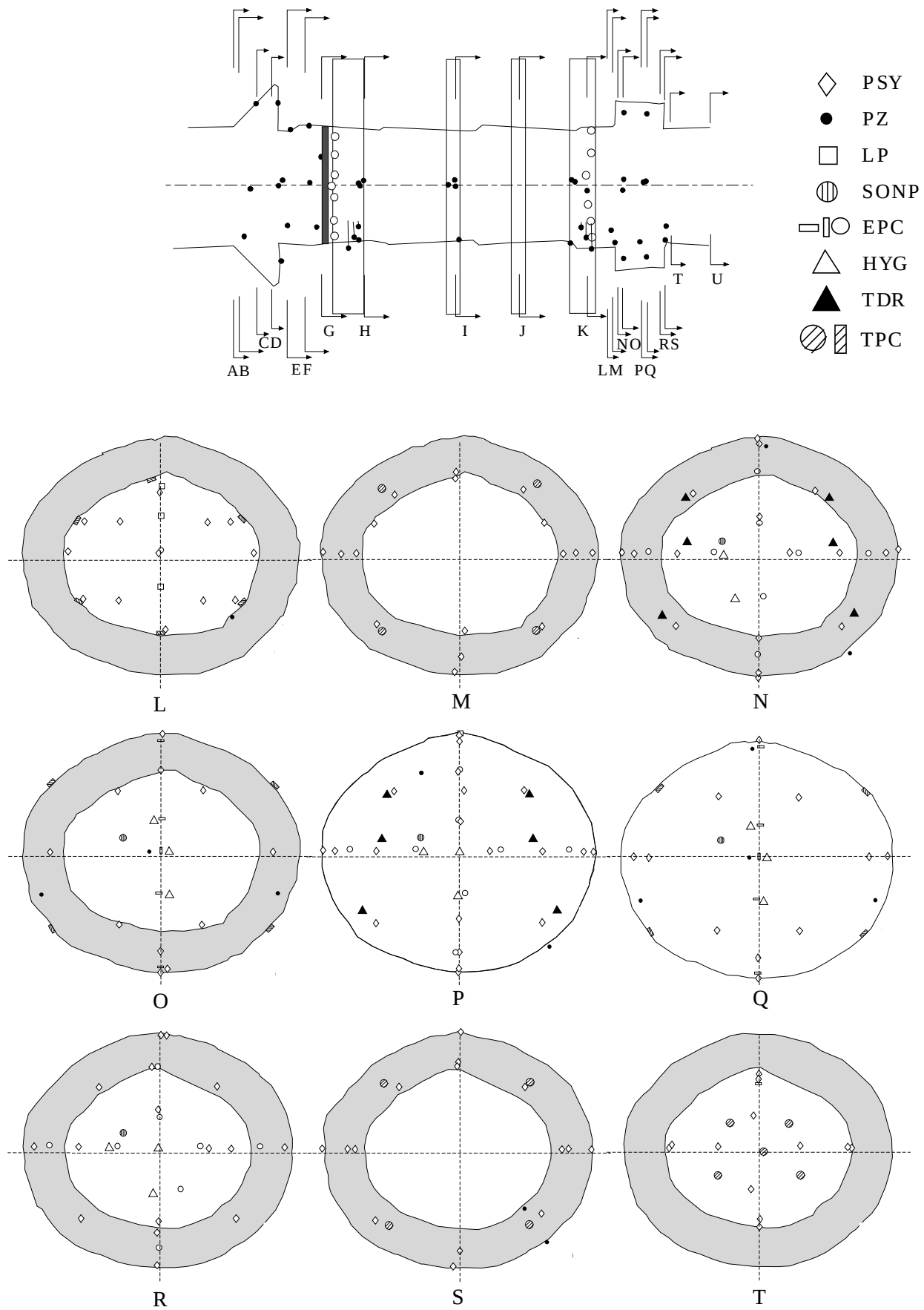


Fig. 6 Cross-Section of the Instrumentation in the Clay Plug

に粘土プラグの計測断面の一覧を示す。粘土プラグは、9つの計測断面が設定されている。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。

粘土プラグ内の含水状態を計測するためのセンサーとしては、132個のサイクロメータ、14個の湿度計、12個のTDRを用いた。Fig. 7にサイクロメータおよび湿度計で計測されたサクション圧変化を示す。サクション圧が1 MPa以下ではほぼ飽和度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EDZ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。1998年9月から加圧注水試験が始まったことから、プラグの浸潤速度が

速くなった。粘土プラグとコンクリートプラグに挟まれた加圧室内圧力が2001年9月時点にほぼ4 MPa昇圧時以降においては、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。飽和に至る過程で多くのセンサーにエラー等の不具合が発生した。これは、水分量の増加により、測定範囲を超えた場合が生じたためだと考えられる。計測システム全体としては、4年間連続的に計測することが可能であった。なお、TDRによる計測では、計測初期において測定範囲を超える水分量の流入となり、他のセンサーとは異なる挙動を示した。解体後にTDRを観察したところ、TDR内に錆が確認され、これが計測値に影響したと考えられる。

2 MPa加圧時の粘土プラグの変位量の計測結果から、プラグの加圧室側の面が45 mm、ステンレススチールプレー

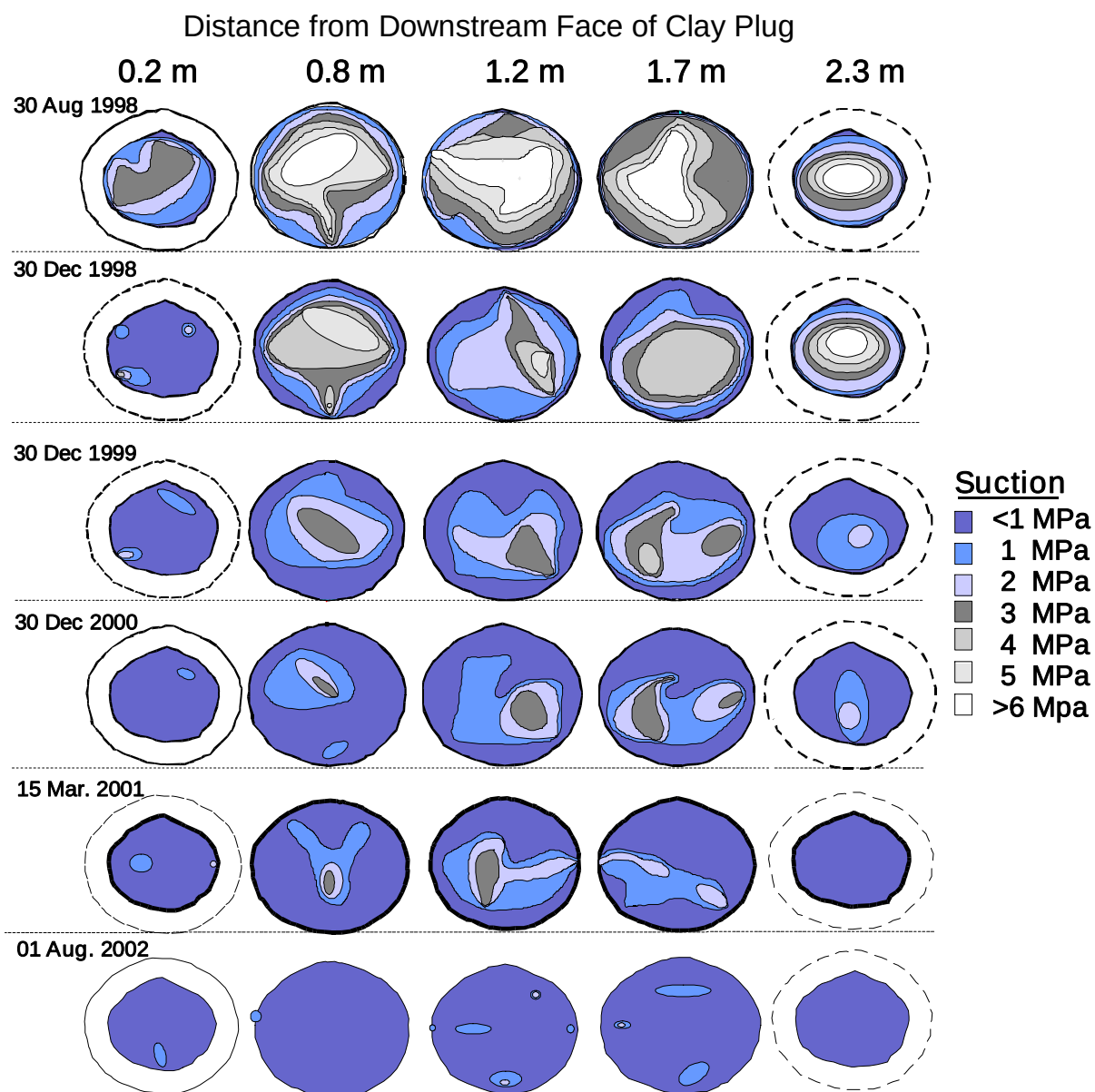


Fig. 7 Water Uptake by the Clay Plug as Measured Using Psychrometers and Hygrometers (RH values converted to suction equivalents)

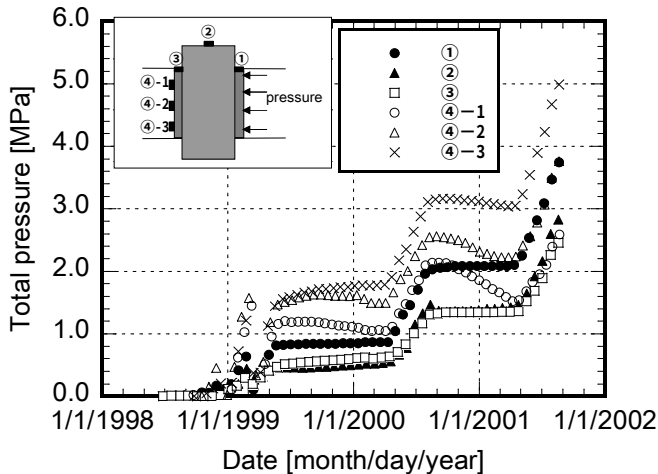


Fig. 8 Distribution of Total Pressures of the Clay Plug

トが 6 mm 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 38 mm 圧縮されていることが計測された。

Fig. 8 に粘土プラグ天盤付近のトンネル周囲方向の圧力変化(①～③)とステンレス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。ステンレススチールプレートにおいて加圧室内の加圧より大きな値が計測されているのは、粘土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。

3 性能確認試験

3.1 はじめに

前章においては、TSX の目的、スケジュール、プラグ施工および試験期間を通じた連続計測データについて示した。本章では、上記のようにして施工した粘土プラグに対し、処分場の閉鎖後に期待される性能のうち、とくに重要と考えられる透水性および物質移行特性に着目した試験結果とその試験結果に基づく解析結果について示す。

粘土プラグの透水性を確認するために、注水圧力および温度の影響を考慮した加圧注水試験を実施した。これは、粘土プラグとコンクリートプラグに挟まれた加圧室内に注水システムを使って水を圧入し、プラグや周辺岩盤への水の浸透状況から閉鎖要素の性能を評価するものである。

次に粘土プラグおよびその周辺の物質移行特性を把握することを目的に、トレーサの種類、時期を変えて 4 回のトレーサ試験を実施した。また、処分場における廃棄体設置初期の状況を把握するため、温度の影響についても考慮した。

さらに、上記試験結果から、高動水勾配下および温度上昇による EDZ の透水特性を把握することによりプラグの閉鎖性能を把握することを目的にトレーサ試験について移流分散解析を実施した。

3.2 加圧注水試験

加圧注水試験は、実スケールで施工した粘土プラグとコンクリートプラグに挟まれた加圧室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要素の性能評価を行うものである。本試験は、Table 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 15 °C で 0.8 MPa での注入圧段階(1999 年 5 月～2000 年 4 月)、フェーズ II は 15 °C で 2 MPa での注入圧段階(2000 年 7 月～2001 年 4 月)、フェーズ III は 15 °C で 4 MPa での初期の注入圧段階(2001 年 9 月～2002 年 5 月)、フェーズ IV は 35～40 °C で 4 MPa での注入圧段階(2002 年 11 月～2003 年 3 月)、フェーズ V は 50～55 °C で 4 MPa での注入圧段階(2003 年 7 月～2003 年 12 月)である。各フェーズにおける加圧室内の圧力、温度、粘土プラグからの総湧水量を Fig. 9 に示す。粘土プラグからの湧水量は、Fig. 4 に示すようにステンレススチールプレート表面における湧水を区間毎に採水できるように排水ラインと湧水量計測トレイを設置している。

粘土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、急速な加圧室内の昇圧のため 1998 年 9 月から試験を開始し、1999 年 5 月に 0.8 MPa に到達するまで粘土プラグ側から 4 回 $100 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ 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 4 MPa 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。加圧室内圧が 0.8 MPa と 2 MPa 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 ヶ月間湧水量のモニタリングを継続した。0.8 MPa 加圧時に約 $3 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ の、2 MPa 加圧時に約 $8 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ のほぼ一定の湧水が計測された。4 MPa への昇圧直後は約 $10 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ の湧水量が計測されたが、その後、数ヶ月で

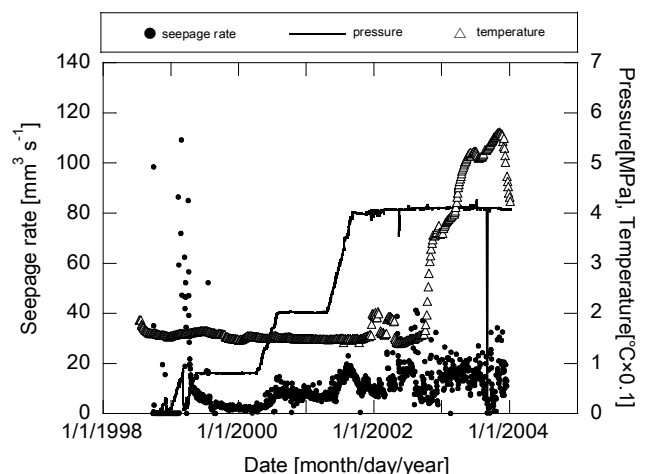


Fig. 9 Tunnel Pressure, Temperature and Seepage Rate for the Clay Plug

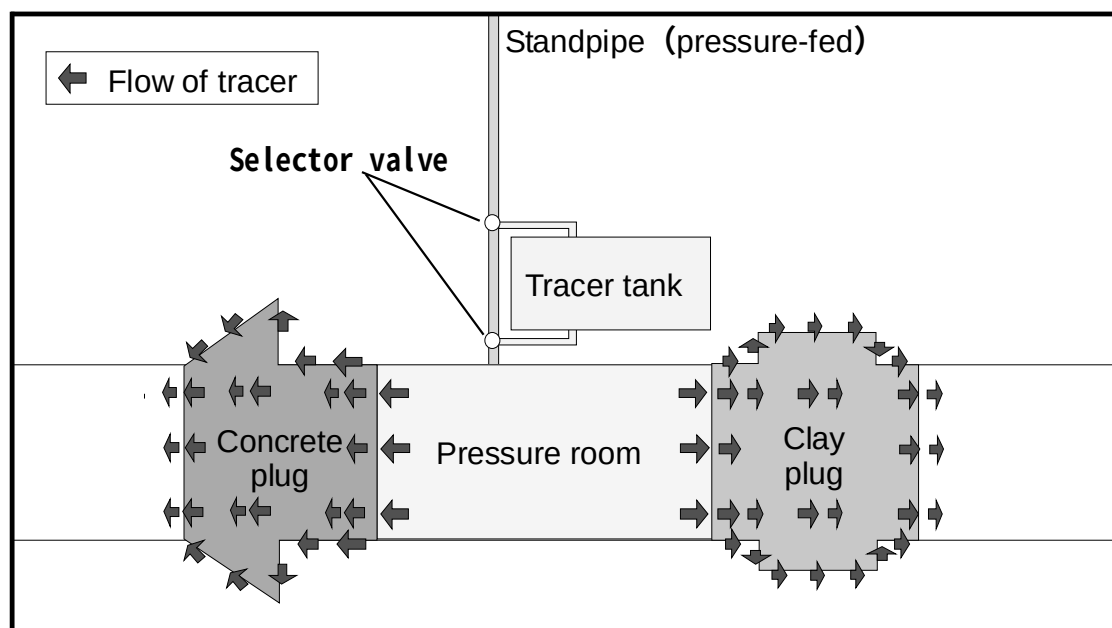


Fig. 10 Conceptual Diagram of the Tracer Injection Method

約 $6 \sim 8 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ まで湧水量は減少しており、2 MPa 加圧時とほぼ同じ量になった。4 MPa 加圧時における湧水量からプラグ境界部を含めた粘土プラグ全体の透水係数を概算すると、 $3.6 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ に相当することが分かった。これは、第2次取りまとめで示した緩衝材の透水性と同等であるということがいえる。また、別途計測したすべての粘土プラグ内部の土圧計で圧力が増加していることから、ペントナイトブロックの膨潤により粘土プラグの閉鎖性能が発揮されていると推察される。

3.3 トレーサー試験

前節においては、試験坑道内の水圧を上昇させ高動水勾配下でのプラグもしくはプラグ周辺の岩盤を通過してきた湧水状況の把握を行った。さらに、坑道内にプラグを施工することによる、プラグ自身、その周辺の岩盤との境界部および岩盤内の物質移行特性を把握することを目的に、トレーサー試験を実施した。

トレーサー試験は、トレーサーの種類、時期を変えて4回を行った。トレーサー試験1では、非吸着性のヨウ化ナトリウムと染料であるウラニンを使用した。トレーサー試験2においては吸着性の臭化ナトリウムを、トレーサー試験3においては臭化ナトリウムと区別するために別の吸着性のローダミンを、トレーサー試験4においては非吸着性のヨウ化ナトリウムをトレーサーとして用いた。ヨウ化ナトリウムについては、プラグからの湧水中のヨウ素の濃度が 0.01 mg l^{-1} 以下で、周辺岩盤中の地下水に含まれるヨウ素の濃度も 2.7 mg l^{-1} とバックグラウンド値が低いことから選定した。また、臭化ナトリウムは、トレーサー試験1において残存するヨウ化ナトリウムと区別するために用いた。ウラニン、ローダミンについては、可視化できるトレーサーであることから選定した。各試験においては、加

圧室内を満たしている水の量が 51,000ℓであることから、タンクに設定濃度に対応するトレーサー量を溶解させ、タンクの水をすべて加圧室内に注入することにより所定の濃度を確保した[22]。

トレーサーの投入方法として、一度加圧室内の水を抜いた後でトレーサーを注入する方法では、粘土プラグの浸潤挙動に影響を与え、圧力の除荷／再負荷によりブロックを積み上げて作成されている粘土プラグの安定性を乱すといった不具合が発生する可能性があることから、Fig. 10に示すように、立坑のスタンドパイプを利用して排出パイプから常にバックプレッシャーがかかるようにして注入し、加圧室内の水圧を低下させずに、短時間で加圧室内の水をトレーサー水に置換させた。また、1日以内にタンクの水を加圧室内に注入するため高圧ポンプを用いて圧入を行った。

加圧室内の温度は、トレーサー試験1実施時は 15°C 、トレーサー試験2では 15°C から 35°C 、トレーサー試験3, 4では 55°C とした。

トレーサーは、Fig. 4に示すように粘土プラグ本体から流出したものを計測する収水トレイと岩盤との境界の吹きつけ部からゾーン15を経由して流出したものを計測する収水トレイに分けて連続的に計測したが、粘土プラグ本体からはほとんど計測されなかった。これは、粘土プラグが止水性能を有することを示すものである。

したがって、試験結果はゾーン15での計測結果を示している。Table 3に試験結果のまとめを、また、Fig.11に各試験におけるトレーサー破過曲線を示す。

トレーサー試験1は231日(5544時間)後に破過し、また水圧の上昇とともに濃度が上昇している。トレーサー試験2は34日(816時間)後に破過し、約125日(3000時間)後に最大濃度 0.8 g l^{-1} が計測されている。トレーサー試験3は

Table 3 Results of Tracer Tests

Tracer test 1	Tracer	Sodium iodide
	Temperature [°C]	15
	Pressure [MPa]	0.8-2
	Initial concentration [g l ⁻¹]	1
	Breakthrough time at clay plug [day(hour)]	231(5544)
Tracer test 2	Tracer	Sodium bromide
	Temperature [°C]	15-35
	Pressure [MPa]	4
	Initial concentration [g l ⁻¹]	1
	Breakthrough time at clay plug [day(hour)]	34(816)
Tracer test 3	Tracer	Rhodamine
	Temperature [°C]	55
	Pressure [MPa]	4
	Initial concentration [g l ⁻¹]	3.7
	Breakthrough time at clay plug [day(hour)]	33(810)-37(870)
Tracer test 4	Tracer	Sodium iodide
	Temperature [°C]	55
	Pressure [MPa]	4
	Initial concentration [g l ⁻¹]	0.8
	Breakthrough time at clay plug [day(hour)]	-

33～37 日(810～870 時間)後に破過し、約 166 日(4000 時間)後に最大濃度 0.4 g l⁻¹ が計測されている。この濃度が加圧室内の初期濃度 3.7 g l⁻¹ に比べて小さいのは、ロードミンが吸着性をもつためである。トレーサー試験 4 ではトレーサーの破過があまりはっきりしていない。これは、トレーサー試験 4 においてはトレーサー試験 1 のときと同様にトレーサーとしてヨウ化ナトリウムを使用していたため、それが残存していたためにトレーサー試験 4 開始直後のサンプリングにおいてもヨウ素が検出されているものと思われる。約 100 日(2400 時間)後に最大濃度 0.3 g l⁻¹ が計測され、その後減少を示している。

3.4 トレーサー試験解析評価

3.4.1 解析評価方法

(1) 解析の進め方

高動水勾配下および温度上昇の粘土プラグの止水性能に与える影響を評価するため、注水圧が 4MPa、加圧室内の温度を上昇させた場合で非吸着性のヨウ化ナトリウムを用いたトレーサー試験 4 について移流分散解析を実施した。これは、高動水勾配下および温度上昇に着目するため問題を単純化することから、解析モデルには吸着の効果を考慮しないためである。

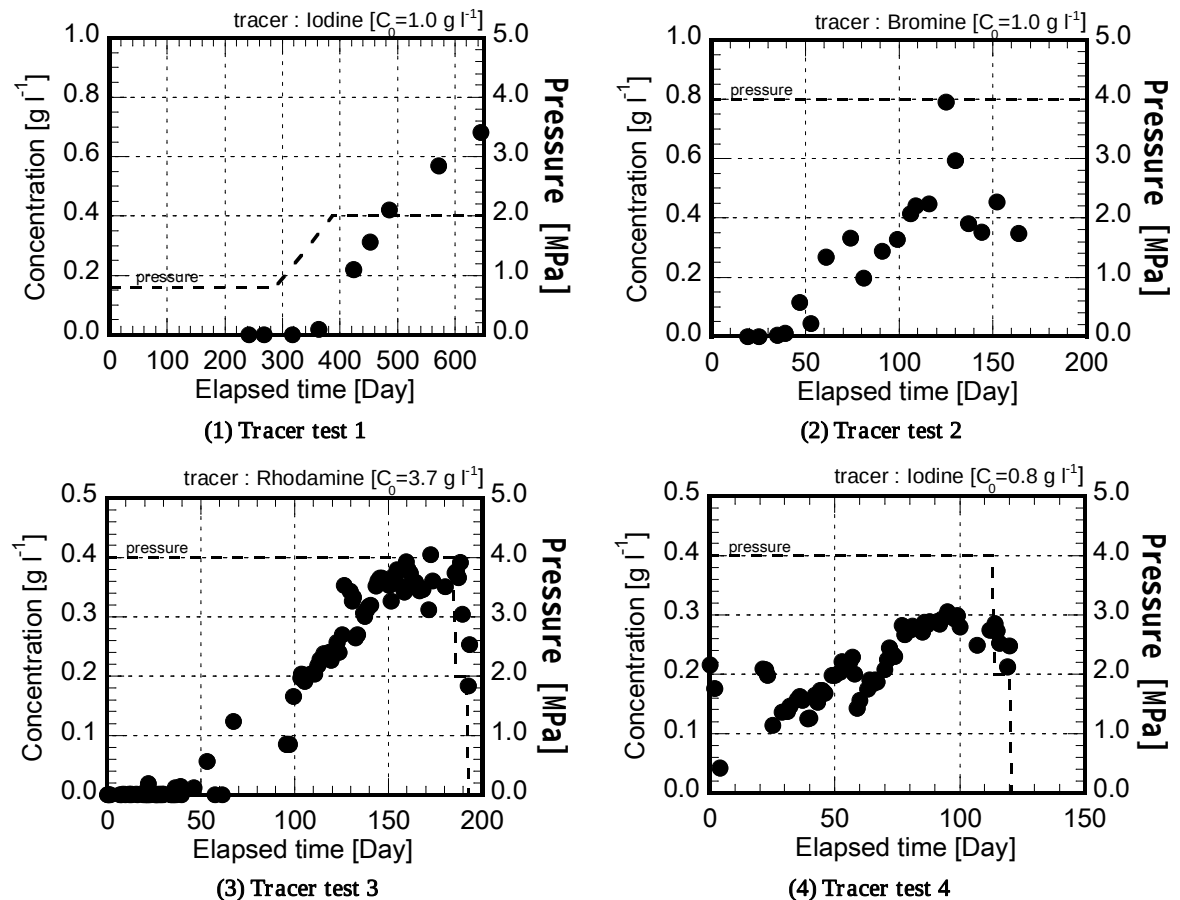


Fig. 11 Results of Tracer Tests

Table 4 Summary of Evaluations for Tracer Tests

STEP1	
Objectives:	Estimation of hydraulic conductivity before temperature increasing
Method:	Simulation of Tracer test 2
Initial pressure:	Stationary solution
Concentration:	Parameter
Temperature:	25 °C constant
Hydraulic conductivities of EDZ, boundary	Parameter
STEP2	
Objectives:	Estimation of hydraulic conductivity with temperature increasing
Method:	Simulation of Tracer test 4
Initial pressure:	Stationary solution
Concentration:	Results of STEP1
Temperature:	55 °C constant
Hydraulic conductivities of EDZ, boundary	Parameter with temperature dependency

まず、トレーサー試験 4 での注水压と同じである 4 MPa で、温度上昇前の条件であるトレーサー試験 2 に対し、パラメーター解析を実施してプラグ周辺の EDZ の透水係数を求めることとした(STEP1)。

次に STEP1 解析で求められた EDZ の透水係数に対し、温度上昇の影響をモデル化しトレーサー試験 4 の実測結果と比較することにより、温度の EDZ の透水性に与える影響を評価し、粘土プラグの止水性能を評価することとした(STEP2)。トレーサー試験解析の進め方を Table 4 に示す。

解析モデルは軸対称 2 次元モデルとし、流出側に EDZ

領域を設けることとした。解析モデル、領域および境界条件を Fig.12 に示す。ここで、試験トンネルの掘削には発破を用いたが、拡幅部にはラインドリリング(Line-Drilling)手法とロックスプリッティング(Rock-Splitting)手法で慎重に掘削したため、同じ EDZ でもトンネルに接した領域 D(EDZ1)と拡幅部に接した領域 D'および E(EDZ2)に分けて取り扱った。

(2) STEP1 の入力条件の設定

トレーサー試験 2 実施時にはプラグからの湧水量が $10^{-3} \text{ l min}^{-1}$ で安定していたこと、加圧室周辺の間隙水圧分布も安定していたことから、4 MPa で行った定常解析結果を初期状態と設定するのが妥当と考えた。

トレーサー試験 2 ではトレーサーの注入直後においてトレーサーの密度が大きいため加圧室下側にトレーサーが沈殿する現象が見られた。その後、加圧室内のトレーサー攪拌を数回行うことにより、20 日後にほぼ所定の設定濃度である 1.0 g l^{-1} に加圧室内の濃度が落ち着くことが加圧室内の電気伝導度計測結果から判断できた。また、粘土プラグからの計測と同時に、反対側のコンクリートプラグの下流部にも湧水量計測用のダムを設け、コンクリートプラグの下流端面および岩盤部からの湧水も含めてトレーサーを計測した。このときの臭素濃度の計測結果からは、破過後、一時的に 9.0 g l^{-1} にまで上昇し、その後、攪拌により設定値である 1.0 g l^{-1} に低下することが計測された。このことから、攪拌前に高濃度のプリュームが部分的に破過した可能性が考えられる。したがって、正規化のための初期濃度を設定値である $C_0 = 1.0 \text{ g l}^{-1}$ として一定とする場合と、初期濃度を $C_0 = 9.0 \text{ g l}^{-1}$ として最初の 20 日間は C/C_0

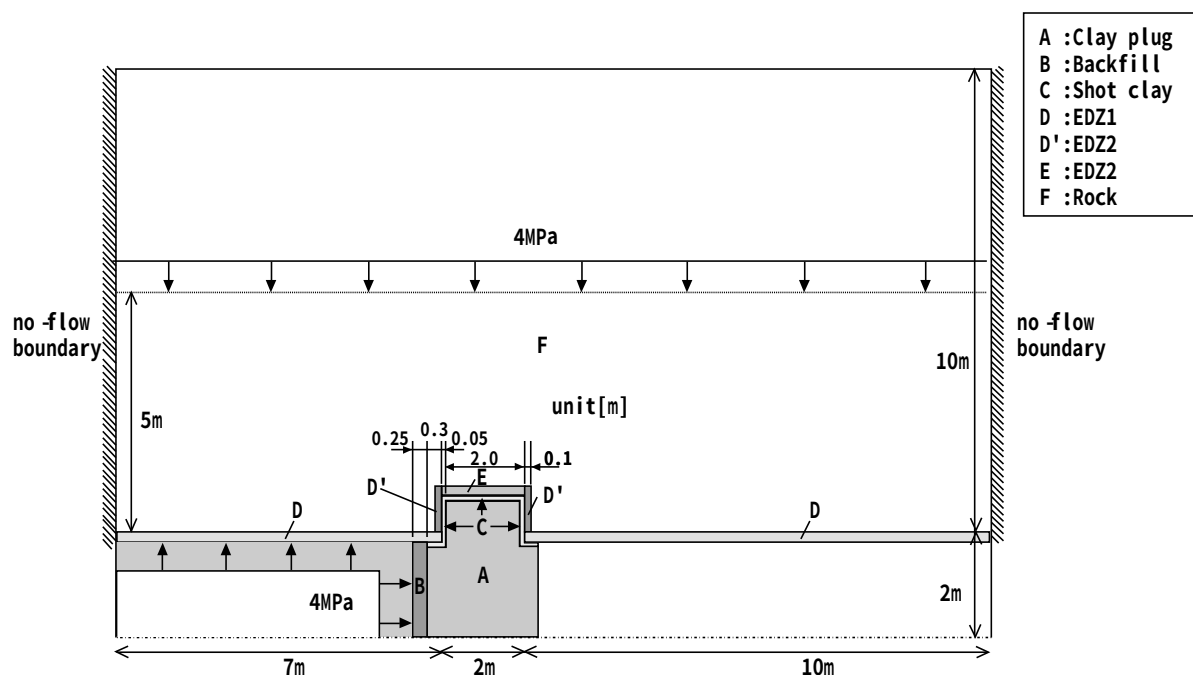


Fig. 12 Modeling of Tracer Test

= 1.0 とし、その後 0.1 へ変化する場合の 2 通りを仮定した。

トレーサー投入開始後、約 55 日後から昇温試験を開始したため、トレーサー試験によるサンプリング実施期間のベントナイトプラグ近傍の温度は 15 °C から 35 °C まで変化した。このため解析においてはベントナイトプラグ周辺の温度を 25 °C と設定した。この場の温度変化は、水の動粘性、ブラウン運動に影響を与えと考え、解析の物性値としては、透水係数、拡散係数に影響を与えるものとした。

透水係数 K [m s^{-1}] は、地盤工学ハンドブック[27]によると固有透水係数 k [m^2]、水の粘性係数 μ [Pa s]、重力加速度 g [m s^{-2}]、および水の密度 [g cm^{-3}] により、

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (1)$$

と表される。ここで、温度 15 °C のときの透水係数を K_{15} 、粘性係数を μ_{15} とし、25 °C のときには K_{25} 、 μ_{25} とすると、それぞれに対して(1)式が次のようになる。なお、本温度の範囲では、水の密度の温度依存性は小さいことから無視した。

$$K_{15} = k \frac{\rho g}{\mu_{15}} \quad (2)$$

$$K_{25} = k \frac{\rho g}{\mu_{25}} \quad (3)$$

ここで、25°C の透水係数 K_{15} を求めるにあたり、水の粘性係数は μ_{15} は 1.138、 μ_{25} は 0.89 であるから、(2)および(3)から

$$K_{25} = K_{15} \frac{\mu_{15}}{\mu_{25}} = K_{15} \frac{1.138}{0.89} = 1.2786 K_{15} \quad (4)$$

と定めることができる。これに従い 25 °C におけるベントナイトおよび岩盤の透水係数を定めることとする。

拡散係数については、Arrhenius の式によると、ある絶対温度 T_1 [K] における有効拡散係数 D_1 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] と、 T_2 [K] における D_2 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] との間には

$$D_2 = D_1 \cdot \exp \left\{ -E \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right\} \quad (5)$$

の関係が成り立つ[28]。ここに E は固有活性化エネルギー [K] である。

(5)式から固有活性化エネルギーを求めると、

$$E = - \frac{\log \frac{D_2}{D_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (6)$$

となる。ベントナイト中でのニッケルのみかけの拡散係数は文献[29]によると、

$$D_{25} = 1.15 \times 10^{-11} \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-1}) \quad (7)$$

$$D_{60} = 2.40 \times 10^{-11} \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-1}) \quad (8)$$

であるから、(6)式からベントナイトの固有活性化エネルギー $E = 905.9 \text{ K}$ と求められる。各温度における拡散係数は、この E の値と(5)式から設定することとした。

3.4.2 STEP1

(1) 物性値および解析ケース

Table 5 に解析用物性値を示す。Fig. 12 において領域 D' および E(EDZ2)以外の透水係数は、これまでに実施された試験結果[22]および解析評価[30]で示された値を用いた。領域 D' および E(EDZ2)の透水係数は、これまでにトレーサー試験 1 に対する解析評価[30]において試験結果から設定された値 $7.0 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ (15°C) を基準として、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ と $5.0 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ を設定した。

Table 6 に STEP1 の解析ケースと EDZ2 の透水係数を示す。トレーサー試験 2 ではトレーサーの注入直後において加圧室下側にトレーサーが沈殿する現象が見られたため、加圧室内のトレーサーの攪拌を実施した。このことから、攪拌によりトレーサーが一時的に流入したことが考えられるため、解析におけるトレーサー注入濃度を初期の段階では一定とした場合とパルス的に与えた場合を設定した。

Table 5 List of Material Properties in STEP 1

	Material	Permeability [m s ⁻¹]	Specific storage[m ⁻¹]	Coefficient of diffusion [m ² s ⁻¹]	Porosity	Longitudinal dispersivity[m]
A	Clay Plug	3.8×10 ⁻¹³	5.8×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻¹⁰	0.3000	0.1
B	Backfill	1.3×10 ⁻¹¹	5.8×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻¹⁰	0.2100	
C	Shot-clay	1.3×10 ⁻¹²	5.8×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻¹⁰	0.5300	
D	EDZ1	1.3×10 ⁻⁹	3.2×10 ⁻⁷	1.1×10 ⁻¹²	0.0100	
D'	EDZ2	Table 6	1.7×10 ⁻⁷	5.6×10 ⁻¹³	0.0050	
E	EDZ2					
F	Rock	1.3×10 ⁻¹³	5.0×10 ⁻⁸	1.1×10 ⁻¹³	0.0025	

Table 6 Analytical Case of STEP 1

case	Input concentration (C/C ₀)	Permeability at 25 °C of EDZ2 [m s ⁻¹]
1-1	constant	8.951×10 ⁻¹¹ *1
1-2	pulse(1.0->0.1)	8.951×10 ⁻¹¹ *1
1-3	constant	1.279×10 ⁻¹⁰ *2
1-4	pulse(1.0->0.1)	1.279×10 ⁻¹⁰ *2
1-5	constant	6.393×10 ⁻¹¹ *3
1-6	pulse(1.0->0.1)	6.393×10 ⁻¹¹ *3
*1 : Estimation by substitution of the K ₁₅ of 7.0×10 ⁻¹¹ into equation (4)		
*2 : Estimation by substitution of the K ₁₅ of 1.0×10 ⁻¹⁰ into equation (4)		
*3 : Estimation by substitution of the K ₁₅ of 5.0×10 ⁻¹¹ into equation (4)		

その他の各領域の透水係数、間隙率については、URLでこれまで実施された試験結果[22]を元に設定した。

比貯留係数の設定において、ベントナイト部(A:粘土プラグ, B:埋め戻し材, C:吹き付けベントナイト)については、Jacobの多孔質媒体についての比貯留係数Sと体積弾性係数Kの関係式[31]を用いて計算した。

$$S = \frac{\rho_w}{K} \quad (9)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (10)$$

ここで、Kは体積弾性率(GPa)、 ρ_w は水の密度(g cm⁻³)、Eはヤング率(MPa)、 ν はポワソン比を表す。

比貯留係数Sを計算するときに必要な体積弾性率Kは、別途実施された試験時に用いた値[32] E = 10 MPa、 ν = 0.4を(10)式に代入することにより求めた。

岩盤部(EDZ1, EDZ2, 岩盤)の比貯留係数は、以下を用いて計算した[33]。

$$S = \frac{\alpha\phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} + \frac{3\alpha^2}{3K + 4G} \quad (11)$$

ここで、 ϕ は間隙率、 α はPoroelastic Biot Modulus、 K_s は構成粒子の体積弾性率(GPa)、 K_f は流体の体積弾性率(GPa)、Kは岩の体積弾性率(GPa)、Gは岩のせん断弾性係数を表す。

分散係数 $D_{L,T}$ (m² s⁻¹)は下式のように定義できる。

$$D_{L,T} = \alpha_{L,T} V_d + D_{X,Z} \quad (12)$$

ここで、 $\alpha_{L,T}$ は分散長(m)、 V_d はダルシー流速(m s⁻¹)、 $D_{X,Z}$ は拡散係数(m² s⁻¹)を表す。このうち、拡散係数については、ヨウ素イオンについて求められた有効拡散係数 D_e (m² s⁻¹)と間隙率との関係[34]を用いて設定した。

分散長については、縦分散長 α_L を設定し、横分散長 α_T は縦分散長 α_L の10%という経験則[35]を適用した。縦分散長については、現状では経験的に設定されるパラメーターであるが、多孔質媒体、亀裂性媒体とともにあまり大きくない区間では地質媒体中の評価地点までの距離Lとともにほぼ単調増加することが知られている[36]。本解析では、Lの値として、埋め戻し材(0.25 m)、粘土プラグ(2.6 m)、

湧水量・蒸発散量測定部分(7.5 m)を加えた長さから10 mと設定できるので、 α_L を0.1 mとした。

(2) 解析結果

解析結果はトレーサー試験2の実測の破過曲線との比較により評価を行った。各ケースのゾーン15における破過曲線をFig. 13に示す。

トレーサー注入濃度を一定に与えた場合、解析結果は連続的に増加する結果を示すのに対し、パルス的に与えた場合、解析結果はピークをもち、その後減少または一定になるような挙動を示している。EDZ2の透水係数が大きいほど破過時間が早くなっている。

これらの解析結果のうち、ケース1-6における実測値と解析値が比較的良く一致することがわかる。このときのプラグ周辺のEDZ2の透水係数は 5.0×10^{-11} m s⁻¹であり、EDZ1の透水係数(1.3×10^{-9} m s⁻¹)よりも小さくなることを仮定して設定したものである。このことから、ラインドリリング手法とロックスプリッティング手法はプラグ設置部の施工方法として有効な手法の一つといえる。

以上の結果から、プラグ周辺のEDZ2の透水係数を 5.0×10^{-11} m s⁻¹としてSTEP2の検討を行うこととした。

3.4.3 STEP2

(1) 解析ケースおよび物性値

STEP2における入力条件は、初期圧力、EDZ2の透水係数についてはSTEP1のケース1-6における条件を踏襲し、濃度については昇温時には温度を一定に保つため加圧室内の温水は常に循環しているため、トレーサー試験4ではトレーサー試験2で考慮したような濃度溜まりが加圧室内に存在しないと考え、一定の濃度における注入を想定した。

温度上昇による影響として、以下の3つの事象が考えられる。

- ① 水の粘性度の低下により見掛け透水係数が増加ブラウン運動により拡散係数が増加。
- ② 岩盤の膨張による既存亀裂の閉塞により透水係数が減少。

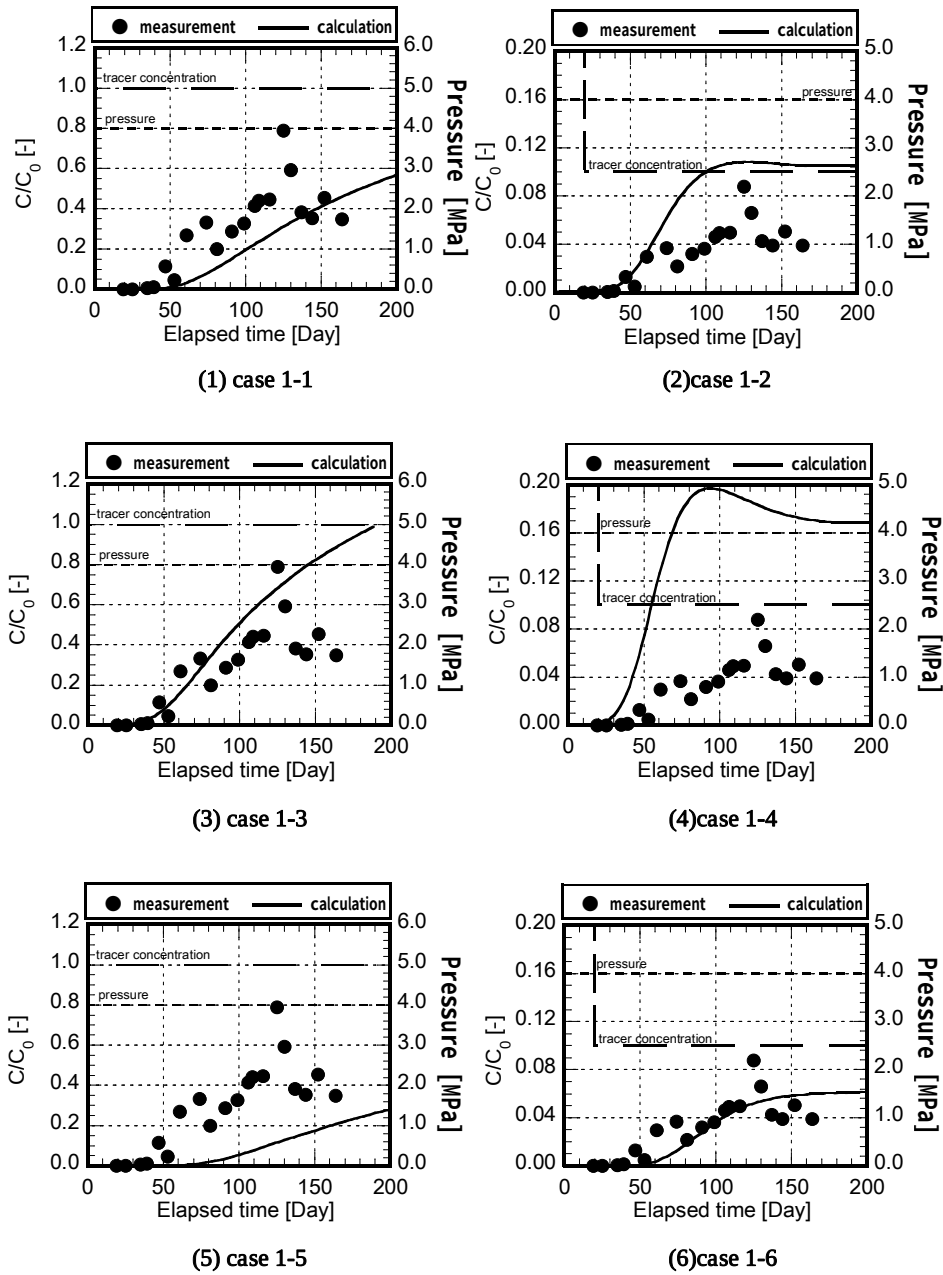


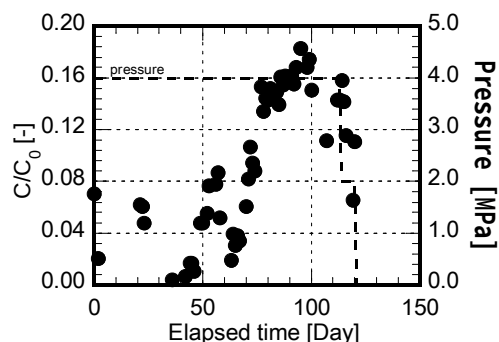
Fig. 13 Comparison of Breakthrough Curve between Measurement and Calculation of Tracer Test 2 in STEP1 (C/C_0 is normalized solute concentration)

Table 7 List of Material Properties in STEP 2

	Material	Permeability [m s ⁻¹]	Specific storage[m ⁻¹]	Coefficient of diffusion [m ² s ⁻¹]	Porosity	Longitudinal dispersivity[m]
A	Clay Plug	6.7×10 ⁻¹³	5.8×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹⁰	0.3000	0.1
B	Backfill	2.2×10 ⁻¹¹	5.8×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹⁰	0.2100	
C	Shot-clay	2.2×10 ⁻¹²	5.8×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻¹⁰	0.5300	
D	EDZ1	2.2×10 ⁻⁹	3.2×10 ⁻⁷	1.5×10 ⁻¹²	0.0100	
D'	EDZ2	Table 8	1.7×10 ⁻⁷	7.3×10 ⁻¹³	0.0050	
E	EDZ2					
F	Rock	2.2×10 ⁻¹³	5.0×10 ⁻⁸	1.5×10 ⁻¹³	0.0025	

Table 8 Analytical case of STEP 2

case	Input concentration (C/C_0)	Permeability at 55 °C of EDZ2 [m s^{-1}]
2-1	constant	1.127×10^{-10} *1
2-2	constant	9.014×10^{-11} *2
2-3	constant	5.634×10^{-11} *3
*1: Estimation by substitution of the K_{15} of 5.0×10^{-11} into equation (4) in which “ $\mu_{55}=0.505$ ” is used in place of “ μ_{25} ”		
*2: 0.8 times the permeability in case 2-1		
*3: 0.5 times the permeability in case 2-1		

Fig. 14 Breakthrough Curve of Tracer Test 4 (C/C_0 is normalized solute concentration)

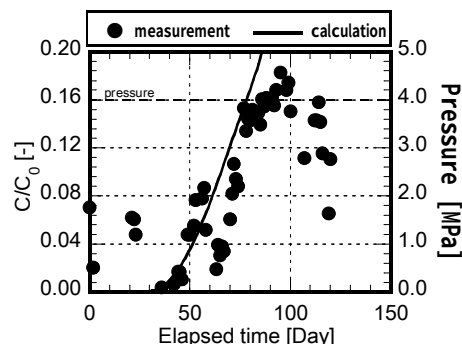
③ 岩盤の膨張により岩盤とベントナイトプラグ境界部が閉塞し境界部の透水性が減少。

上記の①に関しては、STEP1 で検討したように透水係数、拡散係数を温度に応じて変化させることとする。②、③に関しては、プラグ周りの EDZ および岩盤と粘土プラグ境界部の透水性に影響を与えるものと考えられ、高温トレーサーが通過した粘土プラグにより近い部分である EDZ2 の透水係数を変化させることとした。トレーサー試験 4 においては、加圧室内の温度が 55 °Cであったため、15 °C のときの透水係数が 55 °Cのときに 1.0 倍、0.8 倍、0.5 倍変化するものとして解析を行うこととした。

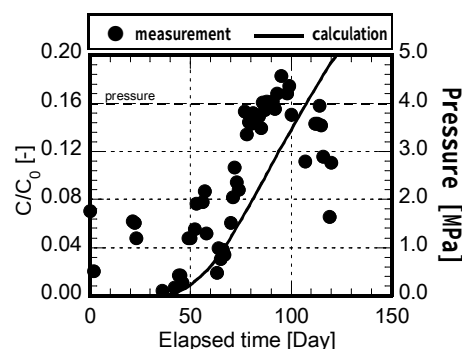
各ケースの解析用物性値を Table 7 に示す。また、Table 8 に解析ケースを示す。

(2) 解析結果

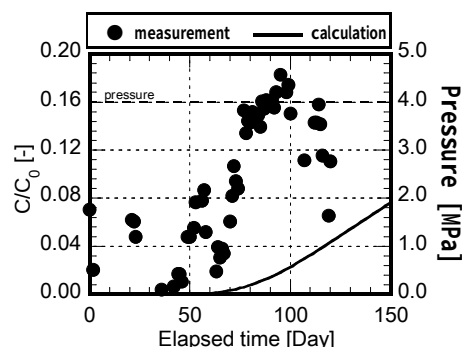
解析結果の評価のためのトレーサー試験 4 の実測破過曲線を Fig. 14 に示す。トレーサー試験 4 においてはトレーサー試験 1 のときと同様にトレーサーとしてヨウ化ナトリウムを使用していたため、Fig. 11(4)に示すようにトレーサー試験 4 開始直後のサンプリングにおいてもヨウ素が検出され、その後約 30 日後から連続的に増加している。これはトレーサー試験 1 で使用したヨウ素がトレーサー試験 4 の初期段階でも場に残存し、その後トレーサー試験 4 として投入したヨウ素が検出されたことを示している。また、トレーサー試験 3 においてローダミンが約 40 日経過後から破過していることから、上記のような挙動が推察できる。したがって、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



(1) case 2-1



(2) case 2-2



(3) case 2-3

Fig. 15 Comparison of Breakthrough Curve between Measurement and Calculation of Tracer Test 4 in STEP2 (C/C_0 is normalized solute concentration)

平均値からの増加分を比濃度 C/C_0 と設定した。

この実測値と各ケースの解析結果の破過曲線を Fig. 15 に示す。ケース 2-1 は、STEP1 で求められた EDZ2 の透水

係数をそのまま用いており、解析値は破過直後の実測値を良く表していることがわかる。ケース 2-2 は、STEP1 で求められた EDZ2 の透水係数の 0.8 倍を設定しており、解析結果はケース 2-1 に比べ濃度の広がり若干遅くなっているものの、全体的な傾向はケース 2-1 と同様となっている。ケース 2-3 は、同様に STEP1 で求められた EDZ2 の 0.5 倍の透水係数を用いており、解析結果は計測結果と大きく異なる挙動を示している。以上の結果から、温度上昇による EDZ2 の透水係数の低減は 1.0~0.8 倍の間であり、今回のような 50 °C 程度の温度上昇ではプラグの止水性能に与える影響は小さいことが分かった。また、温度上昇により EDZ2 の透水係数が低減すると、破過時間を遅らせ閉鎖性能を向上させる方向になることが分かった。

4 考察

前章までに、TSX における粘土プラグの止水性能に関わる性能確認試験として実施した加圧注水試験結果、トレーサー試験およびその試験結果に基づく解析結果を示した。

加圧注水試験は、粘土プラグとコンクリートプラグに挟まれた加圧室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要素の性能評価を行った。試験は、注水圧力、温度条件を変え 5 回に分けて実施した。

トレーサー試験では、トレーサーの種類、時期を変えて 4 回を行った。トレーサー試験 1 ではヨウ化ナトリウムとウランを、トレーサー試験 2 においては臭化ナトリウムを、トレーサー試験 3 においてはローダミンを、トレーサー試験 4 においてはヨウ化ナトリウムをトレーサーとして用いた。加圧室内の温度は、トレーサー試験 1 実施時は 15 °C、トレーサー試験 2 では 15 °C から 35 °C、トレーサー試験 3、4 では 55 °C であった。

トレーサー試験解析評価では、温度上昇前のトレーサー試験 2 に対し、パラメーター解析を実施し、より正確なプラグ周辺の EDZ の透水係数を求めた。求められた透水係数に対し温度上昇の影響を考慮した上で、トレーサー試験 4 の実測結果を解析し、温度の EDZ の透水性に与える影響を把握することによりプラグの閉鎖性能を把握した。これらの結果から以下の知見が得られた。

- ① 土プラグからの湧水量は計測期間中、 $10 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$ 未満と安定しており、4 MPa 加圧時における湧水量から粘土プラグの概算の透水係数を算定すると、 $3.6 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ に相当することが分かった。また、別途計測したすべての粘土プラグ内部の土圧計で圧力が増加していることから、ベントナイトブロックの膨潤により粘土プラグの止水性能が発揮されていると推察された。
- ② トレーサー試験 1 から 4 において破過時間、濃度の経時変化等のデータが取得され、粘土プラグにおける物質移行に関わる挙動を把握することができた。また、

トレーサーは粘土プラグ本体から流出したものを計測する部分と境界の吹きつけ部からの流出したものを計測する部分に分けて連続的に計測したが、粘土プラグ本体からはほとんど計測されなかった。これは、加圧注水試験からも示しているように、締固めたベントナイトブロックを積み重ねて構築された粘土プラグは、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し、止水機能を発揮できたものと推定された。また、トレーサー破過後に濃度の減少が見られるが、これは、ベントナイトブロックの膨潤にともない吹きつけ部が岩盤との境界で密度上昇したためと考えられる。

- ③ トレーサー試験 2 に対する解析において、ケース 1-6 (プラグ周辺の EDZ2 の透水係数が $5.0 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$) の解析結果が実測値と比較的に良く一致することが分かった。このときのプラグ周辺の EDZ2 の透水係数は、EDZ1 よりも小さくなることを仮定して設定したものであり、このことから、ラインドリリング手法とロックスプリッティング手法はプラグ設置部の施工方法として有効な手法の一つといえる。
- ④ トレーサー試験 4 に対する解析において、温度上昇による EDZ2 の透水係数の低減は 1.0~0.8 倍の間であり、今回のような 50 °C 程度の温度上昇ではプラグの止水性能に与える影響は小さいことがいえる。また、温度上昇により EDZ2 の透水係数が低減すると、破過時間を遅らせ閉鎖性能を向上させる方向になるといえる。

5 結論

本報告では、高レベル放射性廃棄物の処分場における閉鎖技術に関して、国内外における閉鎖概念の考え方を整理した上で、その考え方に基づいた閉鎖性能の発揮において確認しなければならない課題として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掲げた。

この課題を解決すべく AECL との共同研究としてカナダの地下研究施設において実施した TSX の施工概要および連続計測で取得されたデータを示すとともに施工した粘土プラグの止水性能を確認するために実施した加圧注水試験結果とトレーサー試験およびその試験結果に基づく解析結果を示した。

本検討により、現状技術を組み合わせることによって施工した粘土プラグは、周辺部を含めて低透水性能を発揮できることが確認できた。また、トレーサー試験の解析評価を行うことにより、粘土プラグ周辺の物質移行特性を把握することができた。

これらのことにより、粘土プラグは人工バリア性能発揮を補助する役割を果たし、周辺岩盤程度の性能の発揮が期待できることが分かった。

今後、堆積岩における閉鎖性能の検討が重要である。

謝辞

本研究の原位置試験に関する部分は、カナダ AECL のトンネルシーリング試験プロジェクトの一部として実施したものです。本試験に協力いただいた AECL の Jason Martino 氏と URL の関係者各位に深く感謝の意を表します。

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] Bennett,D.G., Duerden,S.L., Galson,D.A., Yearsley,R.A., 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] AECL: Environmental impact statement of the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste. AECL Report No. AECL-10711, COG-93-1 (1994).
- [8] Simmons,G.R., Baumgartner,P.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineering for a disposal facility. AECL Report No. AECL-10715, COG-93-5 (1994).
- [9] Baumgartner,P., Bilinsky,D.M., Ates,Y., Read,R.S., Crosthwaite,J.L., Dixon,D.A.: Engineering for a disposal facility using the in-room emplacement method. AECL Report No. AECL-11595, COG-96-223 (1996).
- [10] 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).
- [11] USDOE/OCRWM: Yucca Mountain Science and Engineering Report. Technical information supporting site recommendation consideration, Report No. DOE/RW-0539 (2001).
- [12] ANDRA: Geological Disposal of High Level Waste. Final Report (2001).
- [13] McKinley,I.G., McCombie,C.: 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).
- [14] SKB: RD&D-programme 98. Treatment and final disposal of nuclear waste. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (1998).
- [15] 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).
- [16] Vieno,T., Nordman,H.: Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA 99, Helsinki, Posiva 99-07 (1999).
- [17] Vieno,T.: Groundwater salinity at Olkiluoto and its effects on a spent fuel repository. Posiva report 2000-11 (2000).
- [18] Börgesson,L.: Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for Backfill and Plug Test. SKB Progress Report HRL-98-08 (1997).
- [19] Dahlström,L.-O.: Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for the Prototype Repository. SKB Progress Report HRL-98-24 (1998).
- [20] Dereeper,D., Volckaert,G.: The RESEAL Project: A Large Scale In-situ Demonstration Test for Repository Sealing in an Argillaceous Host Rock. Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002).
- [21] 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, JNC TN1340 98-001, No.1, pp.79-84 (1998).
- [22] Chandler,N., Cournot,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 year report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. AECL Report No. AECL-12727 (2002).
- [23] Gray,M., Shenton,B.: For better concrete, take out some of the cement. 6th ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand (1998).
- [24] Everitt,R.A., Brown,A., Davison,C.C., Gascoyne,M., Martin,C.D.: Regional and local setting of the Underground Research Laboratory. Proc. Int. Symp. on Unique Underground Structures, 2, Denver, Colorado, pp.1-23 (1990).
- [25] Chandler,N., Read,R., 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).
- [26] Martino, J.: A Review of Excavation Damage Studies at the Underground Research Laboratory and the Results of the Excavation Damage Zone Study in the Tunnel Sealing Experiment. Atomic Energy of Canada Limited, Ontario Power Generation Report, 06819-REP-01200-10018-R00 (2000).
- [27] 地盤工学会: 地盤工学ハンドブック (1999).
- [28] 三田名津季, 伊藤一秀, 加藤信介, 朱清宇, 安宅勇二: カップ法による各種建材中の有効拡散係数の測定(その2)有効拡散係数の温度依存性と Arrhenius 式の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.949-950 (2003).
- [29] 動力炉・核燃料開発事業団: ベントナイト中での Ni のみかけの拡散係数の測定. 地層処分研究開発の現状(平成8年度). pp.159-161 (1996).
- [30] Masumoto,K., Kawabata,J., Toida,M., Sugita,Y., Kozak,E., Chandler,N.,: Modelling of transport properties of excavation damage zone and plug based on tracer experiment of Tunnel sealing Experiment. Excavation Damaged Zone Workshop in NAMS-TAC (2002).
- [31] Jacob,C.E.: Flow of Groundwater. Engineering Hydraulics, Chap. 5, John Wiley & Sons. (1950).
- [32] Fujita,T., Kobayashi,A., Börgesson,L.: Experimental investigation and mathematical simulation of coupled T-H-M processes of the engineered buffer materials the TC3 problem. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media, Mathematical modelling and experimental studies, pp.369-392 (1996).
- [33] Hudson,J.A.: Comprehensive Rock Mechanics - Vol.2 Analysis and Design Method -. Section 5, Pergam Press Ltd. (1993).
- [34] 喜多治之, 岩井孝幸, 中嶋悟: 花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定. 応用地質, 30, No.2, pp.84-90 (1989).
- [35] Dominico,P.A., Schwartz,F.W.: Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons Inc., Toronto (1990).
- [36] Gelhar,L.W., Mantoglou,A., Welty,C., R.Rehfeldt,K.: A Review of Field-scale Physical Solute Transport Processes in Saturated and Unsaturated Porous Medium. Electric Power Research Institute EPRI EA-4190 Project 2485-5, p.116 (1985).