



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

藤田 朝雄 杉田 裕

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

資料番号：1-8

Current Status of Tunnel Sealing Experiment in Joint Project between JNC and AECL

Tomoo FUJITA Yutaka SUGITA

Waste Isolation Research Division Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）とカナダ原子力公社（AECL）との間の「放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力協定」（平成6年6月3日締結）に基づき、AECLの地下研究施設（URL）においてサイクル機構とAECLが共同でトンネルシーリング性能試験を実施している。トンネルシーリングとは、高レベル廃棄物の地層処分の際に坑道を埋め戻すとともに、設置した人工バリアを安定に静置させるために実施する行為であり、トンネルシーリング性能試験は1996年（平成7）12月22日に共同研究に関する付属契約書を取り交わして以来、2年を経過している。また、本試験では2国間の他に、フランス放射性廃棄物管理機関（ANDRA）、米国廃棄物隔離パイロプラン（WIPP）も技術的な協力を実施している。1998年（平成10）には、シーリングシステムのうち、サイクル機構側の概念である粘土系（ベントナイト）プラグとAECL側の概念である高性能コンクリートによるプラグの構築が終了し、10月中旬から注水加圧試験を実施している。本報告では、トンネルシーリング性能試験のこれまでの経緯と現状について述べる。

Under the agreement on joint research and development of radioactive waste management between the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) and Atomic Energy of Canada Limited (AECL), tunnel sealing test have been carried out at an underground research laboratory (URL) since December 22, 1995. The bentonite bulkhead proposed by JNC was completed in June 1998. The low-heat bulkhead made of high performance concrete proposed by AECL was constructed in September 1998 and injection test have been carried out since October 1998.

This report describes the details and current status of the tunnel sealing experiment.

キーワード

グラウト、AECL、地下研究施設、地層処分、シーリング、プラグ、地下水、埋め戻し
AECL, URL, Geological Isolation, Sealing, Plug, Bulkhead, Grouting, Groundwater

1. はじめに

サイクル機構とカナダ原子力公社（AECL）との間の「放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力協定」（平成6年6月3日締結）に基づき、AECLの地下研究施設（URL）においてサイクル機構とAECLが共同でトンネルシーリング性能試験（図1）を実施している。トンネルシーリングとは、高レベル廃棄物の地層処分の際に坑道を埋め戻すとともに、設置した人工バリアを安定に静

置させるために実施する行為であり、トンネルシーリング性能試験は、1996年（平成7）12月22日に共同研究に関する付属契約書を取り交わして以来、2年を経過している。また、本試験では2国間の他に、フランス放射性廃棄物管理機関（ANDRA）、米国廃棄物隔離パイロプラン（WIPP）も技術的な協力を実施している。1998年（平成10）には、シーリングシステムのうち、サイクル機構側の概念である粘土系（ベントナイト）

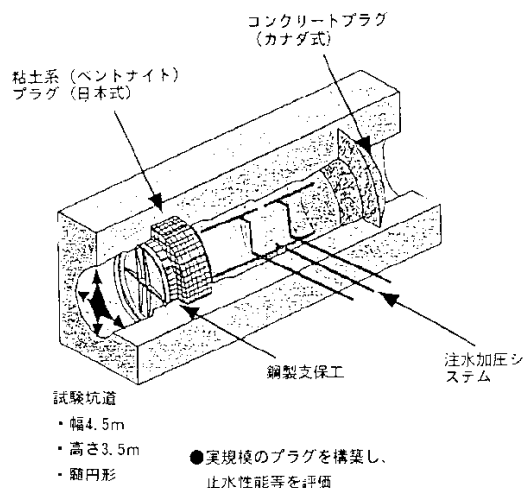


図1 トンネルシーリング性能試験の概略図

プラグとAECL側の概念である高性能コンクリートによるプラグの構築が終了し、10月中旬から注水加圧試験を実施している。

2. これまでの経緯

過去、AECLとはURLにおいて水理物質移行等に関する共同研究を進めてきた。より一層の協力を推進するため、処分研究全般にわたる情報交換、研究者の相互派遣等を含む包括的な協力協定「放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力協

定」を1994年（平成6）6月3日に締結した。協定の中では、処分研究全般の情報交換に関して年1回の「協力会議」の開催や、特定のテーマに関する「共同研究会議」、「URLでの試験調整会議」を適宜開催することが確認されている。一方、サイクル機構においては、実験室や釜石原位置試験場において、個々のシーリング材であるプラグ、グラウト等に関する試験研究が実施されており、プラグ、グラウト、埋め戻しを一同に施したシーリングシステムに関する試験研究の必要性があったことから、トンネルシーリング性能試験を実施することとなった。トンネルシーリング性能試験に関する議事経緯を表1に示す。

3. 試験の進捗状況

図2に試験坑道図を示す。平成7年12月に掘削を開始したアクセス坑道（Room 423、424）は、試験坑道の詳細仕様（最大主応力方向とトンネルの掘削方向の関係）検討のため、1996年（平成8）5月以降一時掘削を中断していた。その後、11月にRoom 423の残り部分から掘削を再開し、1997年（平成9）1月末にRoom 424の掘削を完了している。

上部計測坑道Room 419は、平成8年9月下旬に掘削を開始し、10月中旬に掘削を完了した。また、試験坑道Room 425は、平成8年9月の第3回試験調整会議で、幅4.375 m×高さ3.5 mの楕円形の断面形状に決定され、平成9年2月に掘削を開始し、3月に掘削を完了している。

サイクル機構側のコンセプトである粘土系（ベントナイト）プラグの断面形状は、平成9年6月

表1 トンネルシーリング性能試験に関する議事経緯

1.	第1回協力会議（平成6年10月18日～20日、事業団本社）	トンネルシーリング性能試験を共同研究として実施することに合意。
2.	専門家会議（平成7年2月23日～24日、事業団本社）	トンネルシーリング性能試験の5カ年のワークスコープに基本合意。費用分担について協議。
3.	第1回試験調整会議（平成7年7月25日、AECLホワイトシエル研究所/URL）	トンネルシーリング性能試験の実施計画、アクセス坑道のレイアウトを決定。
4.	第2回協力会議（平成7年10月10日～13日、AECLホワイトシエル研究所）	トンネルシーリング性能試験に関する共同研究の付属契約書の取り交わしについて協議。
5.	「トンネルシーリング性能試験に関する共同研究の付属契約書」締結（平成7年12月22日）	
6.	第2回試験調整会議（平成8年4月9日～12日、AECLホワイトシエル研究所/URL）	アクセス坑道の掘削状況を確認し、試験坑道のレイアウトを決定。
7.	第3回試験調整会議（平成8年9月12日、13日、AECLホワイトシエル研究所/URL）	試験坑道、周辺岩盤内における計測の詳細仕様を決定。
8.	第3回協力会議（平成8年10月23日～29日、事業団本社）	研究者の派遣について協議。ベントナイト（クニゲルV1）の発送を決定。
9.	専門家会議（平成9年4月24日、事業団本社）	試験の進捗状況、AECLの民営化の影響について協議。
10.	第4回試験調整会議（平成9年6月25日～27日、AECLホワイトシエル研究所/URL）	ベントナイトプラグの詳細仕様を決定。
11.	第5回試験調整会議（平成9年12月2日～4日、AECLホワイトシエル研究所/URL）	ベントナイトプラグの施工状況確認及び加圧注水試験の概念検討。

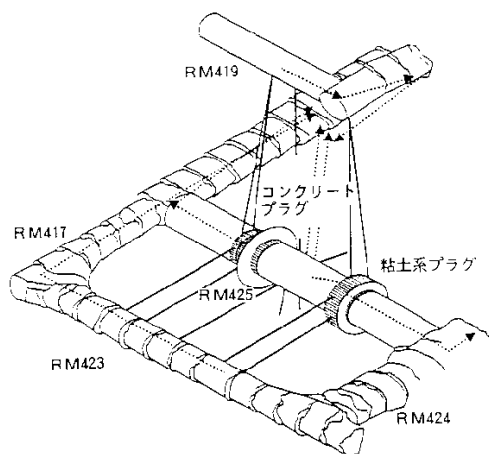


図2 試験坑道図

表2 トンネルシーリング性能試験の詳細工程

		'95	'96 年	'97 年	'98 年	備 考
1. 掘削作業	アクセストンネルの掘削					
	アクセストンネルの掘削(継続)					
	試験トンネルの掘削					
	ベントナイトKeyの拡幅					
	コンクリートKeyの拡幅					
2. Hydrogeology (水理特性調査)	削 孔					
	パッカー設置					その後計測中
3. Characterization (周辺岩盤特性 調査)	削 孔					
	パッカー設置					
	計 測					計器設置後、注水時にも実施
4. ベントナイト グラウト	注入孔削孔					
	グラウト注入					
5. ベントナイト プラグの設置	ベントナイト・ブロックの作成					
	試験トンネル底盤部まで設置					
	設置再開					
	計器の埋設					周辺岩盤部へは10月中
	計器の埋設(継続)					
6. 注水システムの 設置	流出防止層(Backfill)の施工					
	注水用ボーリング孔の削孔					
	注水システムの設置					
7. スチールサポートの設置						
8. 注水チャンバーの埋戻し						
9. コンクリートプラグの設置						
10. 注水試験						
11. テストKey (Room419)で のActivity	Room419の掘削					'98年7月開始
	MVP計測孔の削孔、計測					
	試験keyの掘削					
	拡幅後のMVP計測					
	試験ベントナイトグラウト					
12. その他	試験ベントナイトブロック設置					
	ベントナイトブロック作成試験					
	Clay Sealing Simulation					
	Connected K Test					

の第4回試験調整会議で、拡幅量1m、幅6.375m×高さ5.5m×奥行き2mの円柱状というサイクル機構側の基本的な考え方にに基づき決定された。また、プラグの両サイド前面には、AECL側の提案による1ブロック分(30cm)の試験坑道側拡幅部と、サイクル機構側の提案に基づく25cmの流出防止層(礫十砂十ベントナイト)を設置することに決定した。

粘土系(ベントナイト)プラグの断面形状の決定を受けて、プラグ拡幅部は、平成9年6月より掘削を開始し、8月に完了、コンクリートプラグ部の拡幅は、9月～11月に実施されている。

周辺岩盤内の計測用ボーリング孔の掘削は、平成8年10月から開始され、現在までに56孔すべてが完了している。

周辺岩盤内計測機器のうち、音響放出(AE/MS:Acoustic Emission/Micro Seismic)センサーは平成9年6月に設置された。その後計測を開始し、掘削影響評価(EDA:Excavation Damage Assessment)パッカーを用いて多段設置する間隙水圧計のうち、2測線分の設置は、平成9年2月上旬に完了し、2月中旬から計測を開始している。その他、変位を計測するエクステンソメータや水圧を計測するピエゾメータは各々、平成9年4月、平成10年2月から削孔及び計器埋設

が行われている。

粘土系(ベントナイト)プラグ周辺岩盤の透水性性能向上のため、平成9年9月～10月に粘土系(ベントナイト)グラウト注入を実施している。

試験に関連するサイクル機構側の技術検討としては、平成8年当初以降、試験坑道の向き、断面諸元に関する検討、粘土系(ベントナイト)プラグ材料の室内透水試験、粘土系(ベントナイト)プラグの断面諸元の検討、スチールサポートの概略構造解析検討、粘土系(ベントナイト)プラグの施工計画の検討、粘土グラウトの検討等を実施した。表2に試験の工程を示す。

4. 試験の内容

4.1 試験全体の概要

試験サイトは、カナダURLの420mレベルに新たに掘削した試験坑道である。試験坑道内において、サイクル機構側の粘土系材料によるシーリング概念とカナダ側のコンクリートによるシーリング概念を並行して評価する計画になっている。具体的には、水平に掘削された坑道にベントナイトブロックを積み上げたプラグと低発熱高流動コンクリートによるプラグの2つを設置し、これらのプラグ区間に注水を行う。フェーズ1(注水試験)では地下420mでの間隙水圧を想定して最大4MPa

まで水压を上昇させ、その間の掘削影響領域（EDZ：Excavation Damage Zone）や周辺岩盤とプラグの境界部やプラグ内部の水の流れを観測する。フェーズ2（温水試験）では温度の伝わり方を観察するために、約85℃の温水を注水する予定になっている。

4.2 試験坑道のレイアウト

試験坑道（Room 425）のレイアウトについては、URLの420mレベルにおける地圧を考慮する必要がある。試験位置での地圧の特徴は、最大主応力がほぼ水平方向を向いていることである。当初、AECL側から中間主応力 σ_2 に平行な方向で楕円形断面の試験坑道のレイアウトが提案された。しかし、サイクル機構側の地層処分概念として楕円形状の処分坑道の可能性が小さいため、最大主応力 σ_1 に平行な方向で極力円形の断面形状に近づける試験坑道のレイアウトがサイクル機構側から提案された。協議の結果、試験坑道のレイアウトは、坑道長が40m、最大主応力 σ_1 に平行な方向でアスペクト比1.25の断面形状の試験坑道案が採用された。周辺のアクセストンネルは、メインレベルでRoom417、423、424が掘削され、上部レベルでRoom418、419が、下部レベルでRoom421が掘削された。

4.3 計測項目、計測機器の配置

粘土系（ベントナイト）プラグへの浸潤には、かなりの時間を要するために追加注水の可能性も考えられたため、共同研究に参加している4機関での協議の結果、温度計、水压計、圧力計を粘土系（ベントナイト）プラグ中に均等に配置することが決定された（図3）。

4.4 ベントナイトブロックの施工

(1) ベントナイトブロックの施工（表3）

1) プラグ形状について

キー（拡幅部）の幅は2mであり、トンネル壁面沿いの漏水を防ぐために、その上流側（チャンバー側）に0.3m、下流側に0.3mの拡幅部を持たせる形状とした。

2) プラグ幅

プラグ幅は、ベントナイトブロックの施工期間に時間がかかり原位置試験での注水期間を極端に短くしないこと、及びプラグ長が短いという難しい条件下での施工を勘案して2mとした。

3) 施工順序

施工順序は、ベントナイトブロック間の隙間を極力少なくし、水压（4MPa）作用時の力学的安定性を保つために、まず、プラグサポート（スティールサポート）を施工する。次にセンサーの埋設と併行してベントナイトブロック積み上げを実

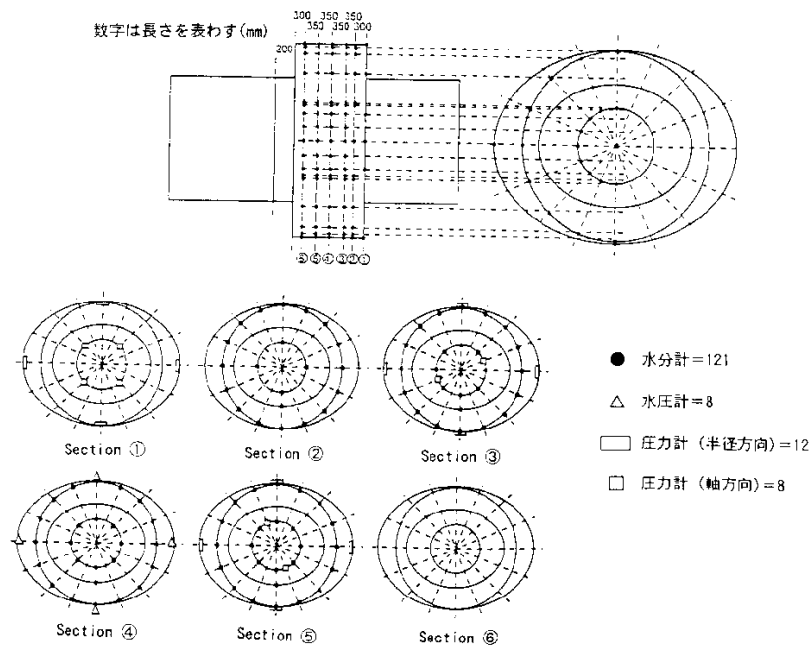


図3 プラグ断面ごとの埋設計器配置（最終レイアウト）

表3 ベントナイトブロック等の物性値

名	材料	特性	膨潤圧 (kPa)	透水係数 (m/s)
ベントナイト ブロック	70%クニゲル 30%砂	1.9Mg/m ³ 1.7Mg/m ³ 14.5% >90%	乾燥密度 湿潤密度 含水比 飽和度	<100 <10 ⁻¹²
ショットクレイ	70%クニゲル 30%砂	1.2~1.4Mg/m ³ 1.0~1.17Mg/m ³ 22%~25% 60%	乾燥密度 湿潤密度 含水比 飽和度	150~200 <5×10 ⁻¹¹
ジョイント及び ギャップフィルター	70%クニゲル 30%砂	1Mg/m ³ 0.8Mg/m ³	乾燥密度 湿潤密度	<100 <10 ⁻¹⁰
埋め戻し	10%クニゲル 90%スリ	2.1Mg/m ³ 0.7Mg/m ³ 8%	乾燥密度 湿潤密度 含水比	<10 ⁻¹⁰
注水層	100%スリ	2.1Mg/m ³ 8%	乾燥密度 含水比	<10 ⁻⁸

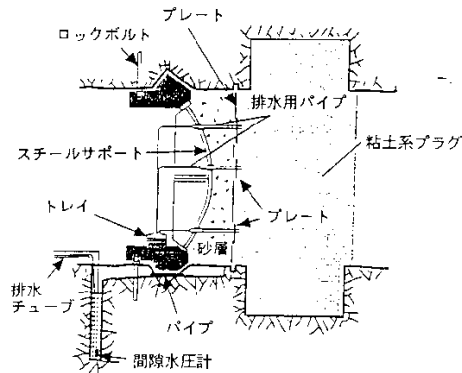


図4 粘土系プラグ/スティールサポート構造概要

施する。また、ベントナイトブロック積み上げ中に適宜、流出防止層の埋め戻しを実施する。

ベントナイトブロック中に埋設するセンサーのケーブルを引き出すための穴をセンサー位置に合わせて開けておく。別の場所でのテスト・バルクヘッドの建設時に施工方法を確認（テスト）しておく。また、スティールサポート側にはプラグ中の湿潤水を集水するための処置（ジオテキスタイルの設置）を施す。

4) ベントナイトブロックの密度

これまでのサイクル機構側の研究方針に沿って試験トンネル内に設置した状態での密度を $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$ とした。ただし、形成時の条件は自然含水状態であり、出来型の精度は±1.0%程度である。

5) プラグ拡幅部の施工方法

プラグ拡幅部は、岩盤を傷めないためにラインドリリングとロックスプリッターの併用により実施したが、この時に生じた凹凸を平滑にするためベントナイト吹付けを施した。

6) ブロック間の隙間及び岩盤境界部の処理

ブロック間の隙間及び岩盤境界部にはベントナイト粉末を充填し、木植等で締め固める。岩盤との境界部には必要に応じてベントナイトペーストを塗布した。

(2) 流出防止層

下半部はタンパーによる転圧施工を行い、上半部は吹付け及び側方転圧施工を行う。また、施工中に品質確認のためのサンプリングや密度、含水比測定を行う。埋め戻し材の施工方法（締め固め、吹付け）については事前に別の場所で確認（テスト）した。

(3) スティールサポートについて（図4）

粘土系（ベントナイト）プラグについては、加

圧注水（4MPa）時に、力学的安定性を確保する必要があるため、AECL側から提案されたシェルの形状のスティールサポートを背面に設置した。スティールサポートの力学的検討に際しては、サイクル機構とAECLの設計思想の差異についても充分勘案し、下記事項について事前検討を行うと共に、加圧注水時に注意深くモニタリングを行う予定である。

1) 局部座屈について

局部座屈を防ぐために、スティールサポートの縦方向に2つの補剛材を配置した。

2) 支保コンクリートについて

設計時にクリティカルとなる、コンクリートのせん断強度の設定値が、地震の多い我が国と地震の少ないカナダとの間で異なった。具体的には、日本では1923年（大正12）の関東大震災をきっかけに、せん断破壊によると考えられる被害が多いとの観点から、諸外国に比べてせん断強度の安全率が除々に大きくなり、現在に至っていることが確認できた。最終的には、加圧注水時に注意深くモニタリングを行うことを前提に、AECL側の設計思想に基づいた設計を採用することとした。

3) 岩盤のすべりについて

本件については、すべり防止のため、プラグ拡幅部の岩盤にロックボルトを28本、深さ60cmで打設した。この仕様もAECL側の設計思想に基づいた。

4.5 粘土系（ベントナイト）グラウト

粘土系（ベントナイト）グラウトについては、掘削影響領域に対する注入方法の開発とグラウト効果確認を目的とした検討がRoom 419のテスト中でのグラウト予備試験時に行われた。大まかな手順としては、削孔→グラウト注入→注入孔のブ

ラキングとなる。また、注入前に注入孔を利用した透水試験を行うとともに、水頭 1 m のダムを注入孔直上に設置し、ダム注入孔周辺からの湧水量の測定を注入前後で行い、注入効果の評価についての検討資料として用いた。

(1) グラウト注入効果による評価

単位時間あたりのグラウト注入量は、グラウト濃度が 0.2% と 0.5% がいちばん多いが、1%、2%、4% になるにつれ少なくなり、6%、8% ではより少なくなる傾向がみられ、岩盤の透水性の低下を示しているものと判断できた。

グラウトの注入量やグラウト流出量についても、グラウト濃度が 0.2% から 0.5% や 1% までは増加傾向にあったものが、1% 以上では低下傾向になり、この観点からも岩盤の透水性が小さくなったと判断された。

さらに、グラウト濃度が 0.2% と 0.5% では経時的な注入量の減少はみられないが、1% 以上では経時的に注入量の減少がみられ、0.5% を境に岩盤の亀裂での目詰まりが生じたものと考えられた。

ボーリング孔掘削前の湧水量は、ダム洪水後 10 日で約 6.7 ml/min、11 日経過後に約 6.55 ml/min、グラウト注入後 6 日で、湧水量が 5.3 ml/min となり、グラウト注入により湧水量が低下した。

以上のように、予備試験において、グラウト注

入によりダム間に貯留された水の岩盤表面への漏水が低減されることを確認した。そして、この地下水の経路となっていると判断される掘削影響領域での透水係数 k はグラウト注入前で $k=10^{-11} \sim 10^{-14}$ m/sec と極めて小さい値であるが、このような低透水性岩盤に対しても、本グラウトの適用可能性が示されたものと考えられる。

4.6 Room 419 での予備試験

本プロジェクトでは、サイクル機構のみならず AECL でも初めての経験となる試験項目も多かったため、別途掘削した Room 419 で下記の予備試験施工を行った。

- ① Room 419 の掘削 平成 8 年 9 月～10 月
- ② MVP 計測孔の削孔、計測 平成 9 年 3 月
- ③ プラグ設置部の拡張 平成 9 年 4 月～5 月
- ④ 拡張後の MVP 計測 平成 9 年 5 月
- ⑤ 試験粘土系（ベントナイト）グラウト
平成 9 年 6 月～8 月
- ⑥ 試験ベントナイトブロック設置 平成 9 年 10 月

5. おわりに

以上カナダ AECL の地下研究施設（URL）において実施中のトンネルシーリング性能試験の現状について報告した。今後、加圧注水試験を継続して実施していく予定である。