実規模シーリングシステムに関する研究()

概 要

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年1月

鹿島建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。 〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49 核燃料サイクル開発機構 技術展開部 技術協力課 電話:029-282-1122(代表) ファックス:029-282-7980 電子メール:jserv@jnc.go.jp Inquiries about copyright and protection should be addressed to: Technical Cooperation Section, Technology Management Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute 4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184 Japan

② 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)2003

JNC TJ8400 2003-023 2003 年 1 月

実規模シーリングシステムに関する研究()概要

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

 戸井田
 克*
 塩釜
 幸弘*
 渥美
 博行*
 須山
 泰宏*

 川端
 淳一*
 伊藤
 圭二郎*
 奥津
 一夫*
 高村
 尚*

要 旨

わが国の地質環境条件に適応し得るこれら閉鎖システムの確立に資するため,室内試験 及び原位置試験を通じてこれらの性能に関連するデータの取得,および,これらのデータ を活用し評価手法を確立することが必要である。

本年度は,カナダAECLにおけるトンネルシーリング性能試験で昨年度までに実施した 4MPaまでの注水圧の試験に引続き,加熱の影響下における性能に関する試験を行うこと から,取得されるデータおよびトレーサー試験結果のデータの整理,解釈,トレーサー結 果の数値解析に関わる技術的検討,評価を行った。また,シーリングシステム性能評価手 段構築のための情報整理を行った。

本報告書は, 鹿島建設株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関 するものである。

機構担当部課室:東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

* 鹿島建設(株)

Full-scale demonstration of Sealing Technique in Geological Disposal () (Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

M.Toida*, Y.Shiogama*, H.Atsumi*, Y.Suyama* J.Kawabata*, K.Itou* K.Okutsu*, H.Takamura*

Abstract

To establish sealing technique suitable for geological environmental conditions of Japan, it is necessary to obtain data related with this sealing function through laboratory tests and in-situ tests. It also is necessary to put these data to practical use and to establish the estimating method of the sealing technique.

This report deals with the sealing function tests under heating condition of supplying water, following the pressurized tests of supplying water at the AECL in Canada until last year. These test results are reported here together with the data, interpretation and analysis of tracer test results. Information arrangement for the establishment of estimation method of sealing function is also performed.

This work was performed by KAJIMA Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

JNC Liaison : Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

^{* :} Kajima Corporation

目次	
1.はじめに	1
1.1 目的	1
1.2 研究の範囲	1
1.3 研究の内容	1
1.4 本報告書の構成	2
2.トンネルシーリング性能試験データ解釈,評価	3
2.1 トンネルシーリング性能試験の概要	3
2.2 トンネルシーリング性能試験結果	3
2.3 施工グラウト試験に関する検討	5
3 . トレーサー試験解析評価	10
3.1 トレーサ試験の概要	10
3.2 トレーサ試験の詳細結果	10
3.3 解析条件	11
3.4 解析結果	11
4.シーリングシステム評価手法構築のための情報整理	18
4.1 岩盤緩み域の地下水挙動評価に関する情報整備	18
4.1.1 岩盤緩み域の地下水挙動評価に関する情報整備	18
4.2 埋戻し技術に関する情報整備	28
4.2.1 グラウト性能に関する調査	28
4.2.2 類似プロジェクトに関する調査	29
4.3 性能評価に関する情報整備	34
4.3.1 安全評価における岩盤緩み域の位置付け	34
4.3.2 安全評価における埋戻し部の位置付け	40
4.4 支保工の取扱いについて	43
4.4.1 支保工の現実的な仕様の整理	43
4.4.2 支保工撤去の現実的な可能性について	47
4.5 性能評価を総合的に検証するための原位置試験計画	48
4.5.1 概要	48
4.5.2 技術開発項目	49
4.5.3 幌延深地層研究所における原位置試験計画	50
5.おわりに	54

図 目 次

図 2-1	トンネルシーリング性能試験の概要	.6
図 2-2	トンネルシーリング性能試験工程表	.6
図 2-3	粘土プラグからの湧水量(2001 年 3 月 ~ 2002 年 7 月)	.7
図 2-4	コンクリートプラグからの湧水量(2001 年 3 月 ~ 2002 年 10 月)	.7
図 2-5	ヒーターの外観	.7
図 2-6	ヒーター試験の加熱手順	.8
図 2-7	両プラグ背面の断熱方法	.8
図 2-8	トンネルシーリング性能試験における加熱の影響(2002 年 9 月 ~ 2002 年 1	0
月)	.9
図 2-9	詳細粘土グラウト方法(案)	.9
🛛 3-1	2回のトレーサ試験の計測データを経過時間を同じスケールにして対比した	2
もの	\mathcal{D}_{\dots	13
🖄 3-2	解析モデル	13
図 3-3	解析メッシュ及び原位置計測状況	15
図 3-4	移流分散解析における入力条件	16
3-5	解析結果	16
図 3-6	実測値と解析値の対比	17
図 3-7	解析結果	17
図 4.1-1	1 岩盤緩み域の定義	26
図 4.1-2	2 機械掘削した坑道周辺の岩盤緩み域	26
図 4.1-3	3 トンネルシーリング性能試験穿孔発破坑道の周りの岩盤緩み域	26
义 4.1-4	4 様々な手法で掘削された坑道周辺の岩盤緩みに関する知見	27
図 4.1-5	5 結晶質岩,堆積岩での地下空洞掘削時の岩盤緩み域の範囲と特性の概念図	1
		27
図 4.2-1	1 RESEAL プロジェクト	31
図 4.2-2	2 立坑埋戻し試験状況	32
図 4.2-3	3 エスポにおける埋戻しプラグ試験位置(ZEDEX)	32
図 4.2-4	1 試験概要	33
図 4.2-5	5 計測配置(奥)	33
図 4.2-6	3 プラグ部の詳細	33
図 4.4-1	1 鋼製支保工の各種形状	45
図 4.4-2	2 防・排水工の呼称	45

図 4.4-3	補助工法の種類	46
図 4.4-4	現実的な支保構造の例(結晶質岩 , 竪置き方式)	46
図 4.4-5	現実的な支保構造の例(堆積岩,竪置き方式)	47
図 4.5-1	注入パターン案(1)	54

図 4.5-2	注入パターン案	(2)	54
A 1.0 %		(ω)	

表 目 次

表 3-1 🕯	解析ケース一覧	14
表 4.3-1	堆積岩サイトにおける埋戻し材に求められる役割と機能	43
表 4.4-1	吹付けコンクリートの作用効果	44
表 4.4-2	ロックボルトの作用効果	44
表 4.4-3	支保工の撤去事例	48

1.はじめに

1.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては,廃棄体の定置後,処分のために建設した地 下施設を埋戻す。埋戻しに当たっては,構造物を埋戻し,プラグ,グラウトといった要素技 術により人工バリアの健全性を保つとともに,廃棄体の定置間隔性能を長期にわたり確保す る必要がある。さらに埋戻し部自身が地層処分システムの安全性に悪影響を及ぼさないこと が重要である。

そこで,わが国の地質環境条件に適応し得るこれら閉鎖システムの確立に資するため,室 内試験及び原位置試験を通じてこれらの性能に関連するデータの取得,および,これらのデ ータを活用し評価手法を確立することが必要である。

本年度は,カナダAECLにおけるトンネルシーリング性能試験で昨年度までに実施した 4MPaまでの注水圧の試験に引続き,加熱の影響下における性能に関する試験を行うことから,取得されるデータおよびトレーサー試験結果のデータの整理,解釈,トレーサー結果の 数値解析に関わる技術的検討,評価を行った。また,シーリングシステム性能評価手段構築 のための情報整理を行った。

1.2 研究の範囲

- (1)トンネルシーリング性能試験データ解釈,評価
- (2)トレーサー試験解析評価
- (3)シーリングシステム性能評価手法構築のための情報整備
- 1.3 研究の内容
 - (1) トンネルシーリング性能試験データ解釈,評価

カナダの AECL とサイクル機構との共同研究として AECL の地下研究施設において実施している性能試験では,昨年度注入圧 4MPa による注入試験,定常注入圧状態でのトレーサー試験が行われ,シーリング性能に関する基礎データが取得された。

本年度は試験領域がほぼ飽和状態となっており,定常状態でのトレーサー試験,蒸発量 測定が実施された。また,処分場環境を模擬した熱負荷影響に関する試験も開始される。 これらの試験から取得されるデータの整理,検討および評価を実施した。

また,プラグ周囲における施工グラウト試験の実施に関する検討も併せて実施し,これ らの評価結果に基づく,技術検討会議用資料作成を行った。

(2) トレーサー試験解析評価

トンネルシーリング性能試験では,プラグ周辺における浸透経路を把握するため,トレ ーサー試験を実施している。

本年度はトレーサー試験結果に基づき,浸透流解析・移流分散解析を行い,トレーサー 試験時のシーリングシステムの性能を評価した。また,評価結果に基づき,技術検討会議

に関わる資料作成を行った。

(3) シーリングシステム性能評価手法構築のための情報整備

日本におけるシーリングシステムの構築のためには,諸外国におけるシーリングシステムの考え方,日本の地質環境条件および安全評価手法を考慮し,シーリングシステムの性能を評価することが必要となる。

本年度は,掘削影響領域を中心とした岩盤の水理特性の評価に関する国内外の情報を収 集し,安全評価の観点からシーリングシステム性能評価手法構築に係わる情報整備を行う (*)。さらに,性能評価手法を総合的に検証するための原位置試験計画に必要な情報も取り まとめる。

* シーリングシステムの性能評価手法構築に係わる情報整備の内容 岩盤緩み域の地下水挙動評価に関する情報整備 安全評価における岩盤緩み域の位置付けは以下の2項目である。

a.人工バリア中の核種移行解析の外側境界条件になる。

b.核種の卓越移行経路になる。

本情報整備は b.に着目する。岩盤緩み域に存在する核種の動きは,周辺岩盤の特性に よって異なったものになる可能性があることから,周辺岩盤の水理学的特徴を考慮して, 緩み域の核種の動きの特徴を地下水挙動に代表させて評価し,処分場の安全性への影響を 定性的に把握する。

・緩み域の連続性(連続している場合,分断されている場合)

・周辺岩盤の水理的特性(亀裂性,ポーラス)

・周辺岩盤の水理的特性(亀裂の透水性,ポーラスな岩盤の透水性)
 埋戻し部の性能評価に関わる情報整備
 性能評価に関わる情報整備
 支保工の取扱いに関する検討
 性能評価手法を総合的に検証するための原位置試験計画検討

1.4 本報告書の構成

本報告書の構成として,第2章に前項(1)に相当する「トンネルシーリング性能試験評価」を,第3章に前項(2)に相当する「トレーサー試験解析的評価」を,第4章に前項(3)に相当する「シーリングシステム性能評価手法構築のため情報整備」を,配した。

2.トンネルシーリング性能試験データ解釈,評価

2.1 トンネルシーリング性能試験の概要

トンネルシーリング性能試験(Tunnel Sealing Experiment, TSX)はカナダ AECL の地 下研究施設(Underground Research Laboratory,以下 URL)で実施されている高レベル 放射性廃棄物地層処分の閉鎖技術に関する原位置試験である。図 2-1にトンネルシーリング 性能試験全体の概要図を示す。

これまでにプラグを実スケールでトンネル内に建設することにより施工性が確認されてお り,1998年9月から実スケールでの閉鎖性能の評価試験を実施中である。性能評価試験と して,2つのプラグに挟まれた区間に水圧を作用させる試験(圧入試験)とトレーサーを圧 入する試験(トレーサー試験)が実施されている。圧入試験では,プラグ周辺に生じる高動 水勾配により,プラグ内の湿潤過程やプラグもしくはプラグ周辺の岩盤を通過してきた湧水 状況をモニタリングし,トレーサー試験ではトレーサーの移行状況をモニタリングし,解析 する。両試験結果からプラグおよびその周辺岩盤における止水性能を評価することになって いる。

図 2-2に 1998 年から 2002 年までの工程を示す。1998 年 9 月から注水を開始し,1999 年 5 月に 800kPa に到達。その後,1999 年 7 月に 800kPa を保ったままトレーサーを投入し, トレーサーのモニタリングを開始。2000 年 4 月から 2MPa へ昇圧を始め,2000 年 7 月には 2MPa に到達。2001 年 4 月に 4MPa へ昇圧を開始するまでトレーサーのモニタリングは継 続して行われた。2001 年 4 月に 4MPa へ昇圧を始め,2001 年 9 月に 4MPa に到達後,モ ニタリングを開始している。

その後,2002年7月に加圧・減圧試験や臭素を使ったトレーサ試験を行い,さらに, 2002年9月からヒーター試験を開始した。

2.2 トンネルシーリング性能試験結果

以下に,主要項目ごとの概要を示す。

(1) 粘土プラグの状況

2002 年 4~8 月に湧水量が $1.2 m \ell$ / 分に増加したが,これはスティールサポート内の フィルタを洗浄したためである(図 2-3参照)。

(2) コンクリートプラグの状況

湧水量は9mℓ/分で安定している(図2-4参照)。

(3) ケーブル / 注水用ボーリング孔からの漏水対策の効果

第 11 回コーディネーションミーティング後に漏水対策として Mandrel を設置し, その後,660 $m\ell$ / 分の漏水が 15 $m\ell$ / 分 10 $m\ell$ / 分と1 / 10 以下に減少した。

(4) 減圧・加圧試験結果

4MPa から 3.5MPa に減圧し,その後 125KPa / 回ずつ 4MPa まで昇圧させ,両 プラグの挙動を観察した 粘土プラグ :土圧計,圧力計がすぐ反応したが,音波センサと湿度センサは応答 なしであった

コンクリートプラグ: すべての機器が減圧・加圧に対して弾性的に応答した

(5) トレーサ試験(2)

臭素をトレーサとして使用した 7/4 から 7/5 14:30 までに注入を終了した(4.9ℓ/分の割合) コンクリートプラグでのサンプリング結果からブレークスルーが観測された 粘土プラグでもサンプリング結果からブレークスルーが観測された

(6) トレーサ試験(2)

加熱試験(図 2-5参照)は図 2-6に示す手順で昇温を行い,この加熱をより効率的なものとするためにチャンバー外側の両プラグ(粘土,コンクリート)背面に断熱処置を行った(図 2-7参照)。図 2-8は各プラグへの過熱の影響を示したものである。

その他,プラグ内に設置された計器での計測結果は以下のとおりである。

圧力計

粘土プラグ内に設置した圧力計の計測結果から,加圧チャンバーに近い断面では,断 面内の圧力分布がほぼ同様であるのに対し,チャンバーから離れるに従って断面内の応 力分布が不均一になることがわかる。最もチャンバーから遠い断面では,天端部の圧力 が最も小さいが,この断面のみの特徴のようであり,プラグの特定の位置が圧力が小さ くなっている傾向は認められない。

ソニックプローブ

粘土プラグ中のソニックプローブ5点の計測結果から,プラグの中心よりも外線側の 方が変位が大きくなっていることがわかる。

粘土プラグの変位

粘土プラグ下流面・加圧面の変位データから,加圧面側は均一な変位分布であるが, 下流面はプラグの上部程大きな変位が認められる。

ピエゾメーター

粘土・コンクリートプラグ,チャンバー岩盤部,チャンバー内による計測結果から, チャンバー内関連のデータよりもプラグ部の圧力分布が不均一になっていることがわか り,の圧力計データの分布状況と整合的である。

電気伝導度計

両プラグ近傍のチャンバー内で計測した電気伝導度データから,トレーサ注入に従っ て,データの低下が認められる。

プラグでの断熱処理

両プラグでの断熱処理を施した。

2.3 施工グラウト試験に関する検討

前回の粘土グラウトでは,その適用性についての確認はできたが,注入効果に関して必ず しも充分な成果が得られなかった。今後,粘土グラウトの効果確認を目的として,図2-9に 示すようなグラウト試験を検討した。

試験提案内容における目的は以下のとおりである。

- ・プラグ周辺岩盤中のゆるみ域に直接ボーリング・注入を行い,透水性の改良を行う
- ・チャンバーに近い位置までボーリングする可能性があるため,削孔・注入中はチャンバ ー内圧力を低下させることが望ましい(新たに湧水を増大させる恐れがある)
- ・粘土グラウトの効果確認は、ボーリング孔内での透水試験の実施(グラウト注入前後)
 が望ましいが、ボーリング孔 ~ チャンバー内に連絡があった場合等も想定し、チャンバー内でのモニタリングが可能か否かについても事前検討が必要である。

具体的なグラウト試験手順は以下のとおりである。

粘土プラグ下流側のコンクリートリングから最も掘削影響の大きい領域に対して,1本 のボーリング孔を掘削影響領域付近まで削孔する

削孔したボーリング孔内で口元にパッカーをかけ,透水試験を実施する

削孔したボーリング孔内で口元にパッカーをかけ,粘土グラウトを実施する(注入深度 はの透水試験結果を勘案して決定する)

粘土グラウト注入後,再度口元にパッカーをかけ,透水試験を行う

注入前後の透水試験結果(,)を対比し,粘土グラウトによる掘削影響領域への止 水効果を評価する



図 2-1 トンネルシーリング性能試験の概要



、 (サンプリング1週間に1回)

図 2-2 トンネルシーリング性能試験工程表 (2002 年 10 月まで)



図 2-3 粘土プラグからの湧水量(2001 年 3 月~2002 年 7 月)



図 2-4 コンクリートプラグからの湧水量(2001年3月~2002年10月)



図 2-5 ヒーターの外観



図 2-6 ヒーター試験の加熱手順





図 2-8 トンネルシーリング性能試験における加熱の影響(2002 年 9 月~2002 年 10 月)



図 2-9 詳細粘土グラウト方法(案)

- 3.トレーサー試験解析評価
- 3.1 トレーサ試験の概要

以下,トレーサ試験についての概要を記す。

- (1) トレーサ試験の準備
 - ・NaBr 保存性トレーサを使用した
 - ・設定濃度は 35400mg/ℓ(最終的な平均濃度は, 30700 mg/ℓ)の NaBr トレーサ
- (2) トレーサ注入
 - ・まず 1000 mg/ℓの濃度のトレーサを 52000ℓのチャンバ内地下水に投入,既存のパイ プを利用し,チャンバ内圧力をキープしながら随時注入した
 - ・注入時に流量 Q をモニタリング(ポンプとマスフローメーターを使用)し,既存の トンネルシーリング性能試験設備を使ってチャンバ内圧力をモニタリングした
 - ・2002 年 7 月 4 日に地下タンクに 1815^ℓの地下水を地上タンクから流入させ、 NaBr71.5kgを投入し、7 月 5 日 8:50 から初期投入を開始した
 - ・注入速度は約 5^{ℓ} /min であった
 - ・注入中は注入タンクから4サンプルを採取した
 - ・本注入は7月5日14:30からで,合計1710ℓを注入した
 - ・ポンプでチャンバ内地下水を撹拌し,均一なトレーサ濃度とした
- (3) 湧水のサンプリング
 - ・コンクリートプラグからの湧水をサンプリング・分析した。なお,トレーサ注入中は, 手動で10分間隔採水し,トレーサ注入後の採水は連続的に100分間隔で実施した。
 - ・採水は前出の図 2-13~2-14 に示す CLSP15 から手動で毎週実施した
 - ・電気伝導度センサーの内,前出の図 2-14 中の 2 つのセンサー(CS10, CS3)で Br の反応があった
 - ・採水したものの電気伝導度を計測すると共に,化学分析を行い,Br 濃度を測定した
 (初期 Br 濃度は < 1 mg/^ℓであった)

3.2 トレーサ試験の詳細結果

35400 mg/ℓの濃度 NaBr 溶液 1710ℓをチャンバ内へ 2002 年 7 月 5 日の 8:50 から 14:30 までの間に注入した。

- ・トレーサ撹拌中のチャンバ内圧力は 0.35MPa であった
- ・チャンバ内地下水の循環は、7月23日に開始(~5^ℓ/min)し、7月24日までに 7^ℓ/minとなった、また、ミキシングは7月27日に終了し、これがベントナイトプ ラグのトレーサ試験開始となる
- ・コンクリートプラグでの Br のブレークスルー(到達)は7月6日4:20で注入開始後, 19.35 時間であった。また, Br のピークは約 9000 mg/^ℓの濃度で7月11日10:40頃

であった(注入開始後145.68時間)

・ベントナイトプラグでの1回/週の頻度で手動により CLSP15 から採水分析を行った,また,Brのブレークスルー(到達)は8月8日で注入後816時間,濃度は5.6ppmであり,Brのピークは10月6日,2184 で濃度は700ppm であった

3.3 解析条件

今回の解析メッシュ・解析モデルはこれまでと同じ,図 3-2~図 3-3に示すトンネル軸に 対する軸対象モデルとした。

以下に示すように,前回のトレーサ試験結果と今回のトレーサ試験結果を対比すると,現 時点では粘土プラグ裏側での濃度変化でしか相対的な評価が難しいが,以下のことが考えら れる。

- ・前回よりも今回の方が注入圧力は大きい,4.08/0.8=5.1倍
- ・プラグ部のベントナイトは,ほぼ完全に飽和しているものとおもわれる
- ・粘土プラグ裏側での濃度変化から推定されるブレークスルー時間は,前回よりも短い (約 1/6.8 となっている)
- 注入圧力の違いとブレークスルー時間の違いを対比するとオーダー的に整合しており、
 ほぼ注入圧力の違いだけで説明可能とも思われる
- ・ただし、ブレークスルー時の濃度や間隙水圧計測地点での濃度変化に着目すると、今回は前回に比べて到達したトレーサの濃度が約 1/10 である

以上より,下記条件で解析を実施した。

- ・吹き付けベントナイトの物性は膨潤後の値を用いる;10E-13(m/sec)
- ・各部の構造(寸法)は H13 年度のモデルを用いる
- 解析上のパラメータとしては,まず,比濃度/圧力を考え,以下の2通りとする。
- ・当初の不飽和に近い岩盤状態でのトレーサ試験を想定して,比濃度 0.8 1.0, 圧力 0.8 2.0 (MPa)の比濃度/圧力で,非定常解析を実施する
- ・今回の飽和に近い岩盤状態でのトレーサ試験を想定して,比濃度=1,圧力=4MPa で定常浸透流解析を実施した後,移流分散解析を実施する

次のパラメータとしてプラグ部岩盤のゆるみ域(D',E)の透水係数を考え,これまでの解析結果から実状に近いと判断される,

1E-11(m/s)

7E-11(m/s)

の2通りを考える。

表 3-1に解析用物性値の一覧を示す。

3.4 解析結果

解析結果のブレークスルーカーブを図 3-6に示す。また,図 3-7は,4つの計算ケースで, ほぼプラグ中央部までトレーサが浸透した状態での比濃度分布状況を対比したものである。

これらより以下のことが考えられる。

- ・ブレークスルーが早いのは、プラグの下流側で評価した場合、飽和高圧・ゆるみ域透水係数大(約40日) 飽和高圧・ゆるみ域透水係数小(約275日) 不飽和低圧・ゆるみ域透水係数大(約325日) 不飽和低圧・ゆるみ域透水係数小(500日以上)、という順番であり、飽和状態の方が不飽和状態よりも早く、透水係数が大きい方が早いことがわかる
- ・ブレークスルー後の比濃度は,透水係数の大小の影響が大きく,透水係数が大きいほど,比濃度は大きくなる
- また,実測値と数値解析結果を対比すると,
 - ·実測結果: 飽和高圧(約34日), 不飽和低圧(231日)
 - ・数値解析結果: 飽和高圧・ゆるみ域透水係数大(約40日), 不飽和低圧・ゆるみ域 透水係数大(約325日)
- と、いずれもゆるみ域の透水係数が大きい場合が実測値と整合的である。

また, 湧水量に関する実測値と数値解析結果の整合性については, コンクリートプラ グ側からのリーク量やベントナイトプラグ部での吸水の影響が考えられるため, 定量的 な評価は難しいと考えられるが, 今回の解析結果では, 飽和高圧/不飽和低圧 = 約5倍 の量となっている。

以上の結果を整理すると以下のとおりである。

ブレークスルー(到達)が早いのは,プラグの下流側で評価した場合,以下のようになっている。

比濃度 = 1	,	・ゆるみ域透水係数大	約 40 日
比濃度 = 1	,	・ゆるみ域透水係数小	約 275 日
比濃度 0.8	1.0,圧力 0.8	2.0MPa・ゆるみ域透水係数大	約 325 日
比濃度 0.8	1.0,圧力 0.8	2.0MPa・ゆるみ域透水係数小	500 日以上

- 実測結果 : 比濃度 = 1 ・ 圧力 = 4 MPa (約 34 日), 比濃度 0.8 1.0・圧力 0.8 2.0MPa (231 日)
- 数値解析結果:比濃度 = 1 ・ 圧力 = 4 MPa・ゆるみ域透水係数大(約 40 日), 比濃度 0.8 1.0・圧力 0.8 2.0MPa・ゆるみ域透水係数大(約 325 日)

また,今回の解析では不飽和特性を考慮していないが,比濃度 0.8 1.0, 圧力 0.8 2.0MPaの場合には粘土プラグ部分が飽和状態になっていないことが予想され,この条件を勘案して解析結果を評価する必要があると判断される。





図 3-1 2回のトレーサ試験の計測データを経過時間を同じスケールにして対比したもの (プラグ最下流点で対比すると前回の方が到達時刻は遅いが,比濃度は大きい)



表 3-1 解析ケース一覧

<model7a></model7a>	<u> </u>	「飽 和、	、ゆるみ透水係数小			
	岩種	記号	kx[m/day]]ky[m/day] kx[m/s] ky[m/s] n Ss			
1	rock	F	8.64E-09 8.64E-09 1.00E-13 1.00E-13 0.0025 5.00E-08			
2	clay	А	2.59E-08 2.59E-08 3.00E-13 3.00E-13 0.3 5.80E-04			
3	back_fill	В	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.21 5.80E-04			
4	shot_cray	С	8.64E-08 8.64E-08 1.00E-12 1.00E-12 0.53 5.80E-04			
5	EDZ-1	D	8.64E-05 8.64E-05 1.00E-09 1.00E-09 0.01 3.20E-07			
6	EDZ-2	D'	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.005 1.70E-07			
7	EDZ-2	Е	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.005 1.70E-07			
<model7b></model7b>	可変型:7	節和 、	、ゆるみ透水係数大			
	岩種	記号	kx[m/day] ky[m/day] kx[m/s] ky[m/s] n Ss			
1	rock	F	8.640E-09 8.640E-09 1.00E-13 1.00E-13 0.0025 5.00E-08			
2	clay	А	2.592E-08 2.592E-08 3.00E-13 3.00E-13 0.3 5.80E-04			
3	back_fill	В	8.640E-07 8.640E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.21 5.80E-04			
4	shot_cray	С	8.640E-08 8.640E-08 1.00E-12 1.00E-12 0.53 5.80E-04			
5	EDZ-1	D	8.640E-05 8.640E-05 1.00E-09 1.00E-09 0.01 3.20E-07			
6	EDZ-2	D'	6.048E-06 6.048E-06 7.00E-11 7.00E-11 0.005 1.70E-07			
7	EDZ-2	E	6.048E-06 6.048E-06 7.00E-11 7.00E-11 0.005 1.70E-07			
<model8a></model8a>			飽和、ゆるみ透水係数小	kx:樟		
	岩種	記号	kx[m/day]ky[m/day] kx[m/s] ky[m/s] n Ss	k・縦		
1	rock	F	8.64E-09 8.64E-09 1.00E-13 1.00E-13 0.0025 5.00E-08	1 x y . MA		
2	clay	A	2.59E-08 2.59E-08 3.00E-13 3.00E-13 0.3 5.80E-04	n:有		
3	back_fill	В	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.21 5.80E-04			
4	shot_cray	С	8.64E-08 8.64E-08 1.00E-12 1.00E-12 0.53 5.80E-04	S_s : tt		
5	EDZ-1	D	8.64E-05 8.64E-05 1.00E-09 1.00E-09 0.01 3.20E-07			
6	EDZ-2	D'	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.005 1.70E-07			
7	EDZ-2	E	8.64E-07 8.64E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.005 1.70E-07			
<model8b> 施和、ゆるみ透水係数大</model8b>						
	岩種	記号	kx[m/day] ky[m/day] kx[m/s] ky[m/s] n Ss			
1	rock	F	8.640E-09 8.640E-09 1.00E-13 1.00E-13 0.0025 5.00E-08			
2	clay	А	2.592E-08 2.592E-08 3.00E-13 3.00E-13 0.3 5.80E-04			
3	back_fill	В	8.640E-07 8.640E-07 1.00E-11 1.00E-11 0.21 5.80E-04			
4	shot_cray	С	8.640E-08 8.640E-08 1.00E-12 1.00E-12 0.53 5.80E-04			
5	EDZ-1	D	8.640E-05 8.640E-05 1.00E-09 1.00E-09 0.01 3.20E-07			
6		IID'				

k_x:横方向透水係数

ky:縱方向透水係数

n:有効間隙率

Ss:比貯留係数



図 3-3 解析メッシュ及び原位置計測状況



移流分散解析における入力条件(不飽和)

移流分散解析における入力条件(飽和)



















図 3-7 解析結果

4.シーリングシステム評価手法構築のための情報整理

4.1 岩盤緩み域の地下水挙動評価に関する情報整備

4.1.1 岩盤緩み域の地下水挙動評価に関する情報整備

岩盤緩み域の地下水挙動評価に必要なパラメータを決定するための要素を抽出し,これ らの要素を把握するための水理特性や物質移行特性などを調査・計測する技術について検 討した。

(1)既往研究資料の整理・分析

岩盤緩み域の調査・測定手法に関する主な研究内容の整理分析結果を以下に示す。

() 岩盤緩み域の定義

空洞掘削影響領域に関する文献では,掘削擾乱領域,擾乱領域,そして,掘削影響領域 といった用語が,使用されている。ここでは,図4.1-1に示されているような定義に従っ た。擾乱領域とは,空洞掘削のために大きな応力変化が生じ,岩盤の特性に可逆的変化が 生じている空洞部周囲の領域であり,この領域内には,掘削により誘起された亀裂のため に,物質特性にミクロ規模で恒久的変化が生じている,狭い意味の掘削影響領域も存在し ている。

亀裂性岩盤の場合,坑道の閉鎖性能としての観点から最も関心が高い領域は,掘削影響 領域であり,亀裂が存在する岩盤では,空洞部近くに新規の亀裂が生じたか否かに係わら ず,応力変化のために,もともと存在している亀裂に変形が生じる可能性がある。このよ うな場合,影響及び擾乱領域は,お互いに区別できなくなる可能性があり,これらの領域 が空洞からかなりの距離まで拡がる可能性もある。

()各国の地下研究施設と岩盤緩み域に関する試験

岩盤緩み域は,岩盤にもともと存在している固体及び流体の力が,掘削の過程で変化す るために生じるものと考えられ,掘削により生じる亀裂の発生や発達に関する研究が国内 外の諸機関により実施されてきている。

カナダ

岩盤緩み域の特性評価に関係した多くの試験や研究が, AECL の URL では実施されて おり, これらのうちのいくつかは, 深さ 240m レベルと矩形立坑上部の, 応力がさほど 大きくない条件下で実施されている。その他は, 円形立坑内と深さ 420m レベルで実施 されている。

深さ 240m レベルでの試験から,底盤部の発破孔に爆薬をより高い密度で装填するために,発破によって誘起される影響範囲が,坑道の側壁からは約0.2m以内に限定されるが,底盤部では約0.5mまでに広がることが示された。

- 209 室での試験からは,底盤部での岩盤緩み域が,約0.3mの深さで,比較的大きな 透水係数を持った亀裂が相互に連結していることがわかった。
- 、深さ 240m レベルで最近実施された発破影響評価(BDA)プロジェクトからは,異なる
 応力環境(深さ 240m レベルと,深さ 420m レベル)において,発破工法で同じように
 掘削された坑道の周りに形成される岩盤緩み域の差異が示された。
- URLの深さ420mレベルでの試験から得られた知見は、少ない亀裂が存在する花崗 岩内での掘削影響と坑道の安定性が、ニアフィールドの応力履歴や分布、熱負荷、地 質学的変動性、掘削方法、坑道の幾何学形状と方向性、内部封圧など多くの要因によ り影響を受けることを示している。
- ・影響領域(図 4.1-2参照)は、この深さレベルでの応力比が大きな異方性を持つために、 開削部の周りに不均質に分布し、異なる特性を示している。すなわち、掘削影響は、 側壁の引っ張り応力又は不負荷領域ばかりでなく、天盤部の圧縮応力集中領域でも顕 著であった。また、この坑道での損傷領域では、水理学的に連続した透水性パスを形 成していることも明らかになり、その透水係数は非擾乱岩盤に比べて8オーダーも大 きくなっていた。
- 過熱損傷試験からは,岩盤緩み域の発達に対し熱負荷の影響や応力パス影響の重要性が実証され,掘削安定性研究から原位置特性評価を充分に実施し,その結果を掘削設計に組み込むことにより,深さ420mレベルでの空洞部周辺の岩盤緩み域の範囲を最小限にとどめることができることが実証された。
- トンネルシーリング性能試験の結果からは,発破による掘削の周りでの岩盤緩み域の 性質とその時間の経過に伴う発達が明らかになった。これら試験から,岩盤緩み域の 範囲は,掘削坑道周縁の半径より浅い範囲に限定されることがわかった。

スウェーデン

ストリパ

ストリパ鉱山は,ストックホルムの西,約250kmに位置し,1448年から1976年まで 操業された。このストリパ・プロジェクトは,高レベル核燃料廃棄物の処分に適すると考 えられる花崗岩の地質サイトを特性評価する技術の開発,そして,そのようなサイトでの 処分場システムの長期的安全性を向上させるべき人工バリアの材料およびその設計の検討 を目的として行われた研究である。

- 水平坑道妥当性試験(SCVの一環としての)では,岩盤緩み域が地下空洞部へ流れ込む 湧水について大きな影響を及ぼすことが実証された。岩盤緩み域において4倍の透水 係数が計測されたが,モデルによる湧水量予測値と計測値を合致させるために,岩盤 緩み域を低透水係数の薄い層として取り扱う必要があった。このような観測結果は, カナダの URL での209 室試験の結果でもみられ,小規模の水理学的計測と平行して マクロ的な透水性試験を実施する重要性を示している。
- ・ 岩盤緩み域は, Butter-Mass 試験と岩盤シーリング・プロジェクトの一環としても研究され,発破掘削に伴う岩盤緩み域が空洞壁面においては0.3mの深さまで,底盤部

では 1.2m の深さまで拡がっていることが示された。また岩盤緩み域により,坑道の 周囲から 1m の深さまでの間隙水圧に影響が及び,さらに,異方性を示し,坑道の軸 に平行により高い透水係数が存在することがわかった。

エスポ(Äspö)

エスポ研究施設(HRL)は、スウェーデン南東海岸のエスポ島に立地しており、深さ 450m まで発破掘削により掘削されたスパイラル状の斜坑で主に構成されている。なお、 409m 以深は TBM により掘削された。このサイトでは、掘削時の地質学的特性評価に関 して複数のプロジェクトが実施されているが、岩盤緩み域関連の主たる試験は、 ZEDEX(Zone of Excavation Disturbance EXperiment:掘削攪乱領域試験)プロジェクト であり、SKB(スウェーデン)、ANDRA(フランス)および UK Nirex 社(英国)による共同プ ロジェクトである。このプロジェクトへの参加により、岩盤緩み域特性の計測、異なる掘

1919年である。このフロシェクドへの参加により, 石盛緩み域将住の計測, 異なる掘 削手法がニアフィールド岩盤に及ぼす影響の比較, 岩盤緩み域の水理特性を定量化するた めの装置や手法の確認といった面での知見が得られた。

- ZEDEX プロジェクトでは,発破と削岩による掘削での坑道周囲に生じる岩盤緩み域の 比較が行われ,様々な装置や試錐孔を使用した手法が,岩盤緩み域の進展状況およびその特性評価のために適用された。その結果から,TBM 掘削坑道の周りの影響は,坑道の 周囲から数 cm に限定されることが示された。発破による坑道掘削の場合,影響を受けた 範囲は,底盤部では80cm まで,坑道側壁では約30cm まで認められた。水理特性は,岩 盤緩み域において大きく変化し,透水係数は1ないし2オーダー増加したが,ニアフィー ルド攪乱領域内の掘削誘起影響領域の外側では,特性に大きな変化は認められなかった。 トレーサ注入によって目視観察されたマクロ的な亀裂は,坑道周縁から約50cmの深さまで確認されたが,発破による坑道でしか大きな掘削影響はみられなかった。TBM 掘削坑 道の壁での染料浸透試験では,自然に生じている亀裂だけしか特定されなかった。
 - ZEDEX プロジェクトにより,掘削影響領域が,掘削手法を選択することによって, そして,発破を慎重に行うことによって制御可能であることが実証された。TBM 掘 削による坑道の周りの岩盤緩み域は,発破による坑道の周りの緩み域に比べて,その 範囲と水理特性の面で明らかに影響が小さかった。

スイス

グリムゼル(Grimsel)

グリムゼル試験サイト(GTS)は,スイスアルプスの中央部にあるグリムゼル峠直下,海 抜1730mの場所にあり,この施設には,水力発電会社である Kraftwerke Oberhasli(KWO)社が所有する延長1kmの主アクセストンネルを通って出入りできる。 この試験サイトは,深度約450mの場所にあり,主アクセストンネルから延長されてい る水平の枝分かれした坑道は,総延長約1.1kmになる。ほとんどの坑道部分は,TBMを 使用して掘削されたものだが,一部の試験用の坑道は,発破掘削により掘削されている。 このサイトの岩盤は,節理の発達した花崗閃緑岩/花崗岩からなる。

- 二次元及び三次元の数値解析により,岩盤緩み域が,坑道すぐそばに存在する節理と, 局所的な応力場の方向に大きな影響を受けることが示された。数値解析で予測される 坑道壁の変位は,3mmから10mmのオーダーであった。これらの予測に基づいて, 岩盤緩み域は,半径2mの坑道の周囲から約2mの深さにまで広がっているものと算 定された。
- グリムゼル試験サイトで実施された原位置特性評価試験から,亀裂の比較的少ない領域において,発破掘削を行うと坑道周縁から深さ約0.2mから0.5mの範囲に岩盤緩み域が発生することがわかった。しかし,他の研究施設での岩盤で得られた結果と異なり,坑道の側壁と上部の四半分円の方が,底盤部よりさらに影響を受けていることがわかった。また,大規模坑道換気試験により,岩盤の相当深い場所まで不飽和となっている可能性があり,この不飽和化は,一部の特性評価手法の結果に影響を及ぼし,坑道の周りに存在する岩盤緩み域の範囲を過大評価する可能性がある。

モンテリ (Mont Terri)

モンテリ地下研究施設は,スイス北西部のモンテリ背斜褶曲の南端に位置し,この研究施設は,厚さ140mのオパリナス(Opalinus)泥岩層にある。このサイトの被覆層の230mから320mの範囲で変動が見られ,この層状の堆積岩体は,南東方向に約45度傾斜している。最大主応力は7MPaのオーダーであり,構造がほぼ鉛直方向になっている。オパリナス泥岩は,非常に透水係数が小さく(~2×10⁻¹³ m/s),膨張性粘土物質を含む比較的安定した泥岩層である。

モンテリ調査坑道は,地質及び岩石力学条件を調査する目的で1989年に掘削された。 地下研究施設のための掘削は,調査坑道に沿った側壁に8つのニッチの掘削(1996年に掘 削)と新規坑道の掘削(1997年と1998年に掘削)が行われた。掘削工法としては,(1)電気 及び電子起爆装置を使用した従来の発破,(2)ロード・ヘッダー掘削,(3)圧縮空気削岩機 が使用された。

モンテリでの試験プログラムは,1996年に開始され2002年に終了し,7つの段階に 分かれており,岩盤緩み域の特性評価に直接関係するものは4件ある。これら試験では, 亀裂の特性を評価するための掘削-樹脂注入,水理学的条件を評価するための水理学的及 び空気力学的試験,岩盤緩み域プロセスを評価するための掘削モニタリング,新規坑道で の地球物理学的特性評価が行われている。岩盤緩み域の自己回復試験は,岩盤緩み域内の 特性の時間変化を評価することを目指した次段階での研究項目になっている。

・新規坑道の周りの岩盤緩み域では、二つの領域、すなわち、内側領域と外側領域とが特定された(図4.1-4参照)。この領域は、不飽和な亀裂がお互い網目のようにつながっている。この領域での透水性は、ファーフィールドの値に比べて数桁大きくなっており、特に、坑道周縁から最初の0.4m以内の場所では、この傾向が顕著となっている。坑道のいろいろな部分で、異なる変形メカニズムが特定され、側壁部では伸張性亀裂が、天盤と底盤部では層理に沿ったずれが認められた。岩盤緩み域の内側領域の範囲は、側壁に比べて天盤と底盤部で奥にさらに拡がっており、ロード・ヘッダー(機械)掘削の部分に比べて、発破又は削岩の部分の方がより顕著であった。岩盤緩み域の範囲を物理探

査手法で計測することによって,コア観察や検層からの知見が確認された。

 岩盤緩み域の外側領域は、坑道周縁から 2m 以内であった。この領域での亀裂ネット ワークは、相互に連結していないが、応力の作用していない亀裂パターンに局部的な 異質性が存在している。この領域は、通常は坑道まで連続しておらず、亀裂は部分的 に間隙水により飽和している。この領域内の水理学的透水性は、内側領域に比べて小 さくなっているが、ファーフィールドにおける透水性よりは大きくなっている。

米国

クライマックス使用済燃料試験

クライマックス使用済燃料試験は,ネバダ州のクライマックス花崗深成岩の深さ420m で実施された掘削影響試験であり,本試験の主な目的は,使用済燃料用の再取り出し可能 な貯蔵施設としての花崗岩の適性を評価すること,そして,岩盤の熱負荷応答を評価する ことであった。

この試験は,2本の平行な坑道で実施され,伸縮計と振動ワイヤ応力計を2列に設置し, 計測装置を設置した後,二本の坑道間の中央に,これらと平行に,発破によるベンチ掘削 によって,馬蹄形の坑道が掘削された。この中央の坑道の中で,内空変位計測が実施され 岩盤緩み域について検討した(試験は,地下水面よりも上の不飽和域で実施された)。

・岩盤の応答は、中央の坑道の掘削中、加熱及び冷却期間を通じてモニタリングされ、その結果を、数値解析モデルによる予測結果と対比検討し、温度分布の予測結果と計測結果とは良好な一致をみたが、計測された変位応答は、数値解析による予測結果とは大きく異なっていた。これは、岩盤内に初めから存在していた不連続面が、空洞のニアフィールド領域での力学的挙動を支配したものと判断された。

コロラド鉱工業大学の試験

コロラド鉱工業大学の試験は,コロラド州アイダホ・スプリングス近郊のエドガー鉱山 の地上から約100mの亀裂性花崗片麻岩層で実施された。この試験の目的は,地下開削 部の周りの岩石への影響を最小限にする発破方法の開発・評価,そして,掘削影響領域の 性質と範囲の特性評価手法の開発である。計測装置の一つとして,垂直伸縮計を用いて坑 道の掘削進捗に伴う変位をモニタリングするため,切羽近くの天盤部に設置された。掘削 に続いて,深さ5mの試錐孔7本×6組が,発破による影響の特性評価のために,掘削部 から外向きに放射状に掘削された。制御発破の実施により,発破による損傷領域の範囲は 坑道の壁から0.5mから1mの範囲内におさまった。これより,ひずみ計測,超音波速度 計測及び透水率計測が,岩盤緩み域内での擾乱の範囲と程度を見極める上で概ね有効であ り,ひずみデータや変位の逆解析結果からは,計測された変位が非弾性的であることが示 唆された。

ユッカマウンテン・プロジェクト (YMP)

米国エネルギー省(DOE)は,ネバダ州ユッカマウンテンの溶結凝灰岩を,高レベル放射

性廃棄物を貯蔵するのに有効な母岩であるとして検討している。ユッカマウンテンは,西 側でソリタリオ(Solitario)渓谷の断層,東側でゴースト・ダンス(Ghost Dance)断層を境 界とし,一連の構造ブロックから構成されている。この断層ブロックの主要構成は,層状 の降下火山凝灰岩の薄い層理を伴った溶結及び非溶結火山灰凝灰岩である。同サイトで実 施された水圧破壊応力計測から,最大と最小の水平応力がそれぞれ 2.9 MPa と 1.7MPa で あること,鉛直応力が 47 MPa であることが示され,垂直な断層応力系である。

機械掘削で建設された調査研究施設(ESF)は,1997年に完成し,延長8km,直径8m の坑道で,密に溶結した亀裂の多い凝灰岩内に主坑道が掘削されている。浸出プロセスを 定量化するため,主坑道に沿って選定された4箇所にニッチが掘削された。これらの場 所での調査から,坑道掘削に伴う応力解放の結果として,坑道の壁から少なくとも1mま での範囲で,透水係数が1ないし2桁増加していることが示された。

- ・ YMP での亀裂特性に関する情報は,ESF における試錐コア調査,地表の測量,完全 な周縁地質図作成,詳細な踏査などのサイト特性評価調査によって,DOE が収集し ている。ESF 内でマッピングされた主要亀裂群とQ値に基づいたモデリング研究か ら,長期的な坑道の安定性に懸念のあることが示唆されている。例えば,主要な亀裂 群に動的な地震力の負荷が加わった際に,不均一なブロックが生じて,落盤を引き起 こす可能性のあることを示している。極端な場合,この落盤は,岩盤中の坑道の直径 に相当する深さにまで拡がり,結果的に坑道の崩壊を引き起こすことになる。
- 試験サイトを掘削する過程で生じる応力と間隙水圧の変化により、同サイトの節理開 口幅と流体圧力の分布に大きな変化が生じうることがわかった。これは、節理の発達 した岩盤内での原位置試験の設計と解釈を複雑なものにする可能性があり、同サイト の空洞周辺岩盤の水理学的構造に影響をもたらすことを示唆している。

WIPP

廃棄物隔離パイロット・プラント(WIPP)のサイトは,ニューメキシコ州カールスバッド(Carsbad)の約40km 東に位置している。このWIPPは,地上から655mの深さのサラド(Salado)層にある地下に,超ウラン廃棄物を永久的に処分するように設計されたものである。この厚さ610mの地層は水平方向に層理が発達した岩塩層で,硬石膏(anhydrite),ポリハライト及び粘土の層が見られる。地下掘削部のレイアウトは,幅10mの部屋を使った7つの通路を持つ廃棄区画の30m×90mのピラーが含まれている。

 WIPP サイトの換気立坑(AIS)試験で行われた超音波速度計測は、クリープと損傷の 進展に時間依存性があり、8年間にわたってクリープが進んでいることを示している。 立坑壁での第三紀地層の0.6m程度のクリープとそれによる粒状スケールでの微小割 れ目により、結果としてP波速度が20%減少した。また、継続することにより、立 坑の壁付近にスラブ状の損傷が生じる可能性が考えられる。

WIPP サイトでの熱力学試験から,熱負荷環境下で岩塩層に大きなクリープが発生し, 坑道周縁(主に天盤部)から1m深さの範囲にスラブ化が生じる可能性のあることが実証され た。WIPP での掘削部周囲の岩盤緩み域では間隙率と透水係数の増加が認められたが,こ の領域は,時間の経過とともに岩盤のクリープによって回復することが見込まれている。

アルコーブ(alcove)を掘削した際,掘削影響を受けない圧縮負荷領域が存在する可能
 性が弾性波速度計測から示された。このような知見は,岩塩層内での坑道閉鎖の設計
 に示唆を与えるものであった。

ベルギー

ベルギーのモルにある高放射能処分試験サイト(HADES)の地下研究施設は,1980年 から1987年にかけ建設され,ブーム(Boom)粘土層の地下233mに掘削されている。 また,厚さ80mの粘土層が滞水性の砂質層で覆われており,立坑と最初の試験施設で ある延長39m,直径3.5mの水平な坑道は,1982年から1983年に掘削された。クリ ープで坑道が閉塞するのを防止するために地盤凍結法を使用し,その後,セグメント製 のスチール内張を施工した。

ANDRA(フランス)は,地下掘削部周りの二アフィールドの原位置挙動を評価するため,同サイトでの研究に参加した。2回の試験掘削の結果,地盤凍結をしなくても連続した掘削を行うことが可能であること,そして,空洞内を補強すれば力学的には十分であることを明らかにした。これらの初期掘削で観測された結果に基づき,その後の深さ23mの立坑と延長67mの水平試験坑道は,凍結処理なしに掘削され,コンクリートブロックによる支保が施された。ニアフィールド粘土層の換気と熱負荷の影響に関する原位置試験は,他機関の協力のもとにANDRAが実施した。さらに掘削応答試験(CLIPEX および PRACLAY)が,実施中,あるいは,計画立案段階にあり,第二アクセス立坑は1999年に完成し,延長80mの接続坑道が,2002年3月に完成している。この施設をさらに拡張することが,PRACLAY試験の準備のために計画されている。

・ブーム粘土は、粘土そのものの透水係数が小さく、高いイオン交換能力を有しており、 中程度の負荷で大きなクリープを生じ、水分が存在すると膨張する性質を持っている。 クリープと膨張との組み合わせにより、ブーム粘土で埋め戻しした坑道の周りの岩盤 緩み域が回復する可能性がある。また、溶解空気およびガスのために間隙水の圧縮性 が、水だけの場合よりも1桁程度大きくなることが明らかになった。この低い圧縮 性のために、半径2.35mの坑道周囲で予想される岩盤緩み域の範囲が、8.6mから 10.0mに増加することになる。さらに、熱負荷により、間隙水圧、全応力及び変位 がわずかに増加するものと考えられる。

日本

日本の場合,放射性廃棄物処分に関連した試験が実施されているサイトは,硬結晶質 岩(花崗閃緑岩)の釜石鉱山と軟堆積岩(凝灰質泥岩と砂岩)の東濃鉱山の2ヶ所のサイトで ある。

・直径約 3m の坑道が,釜石と東濃の両鉱山で掘削された。さらに,東濃鉱山では,直径 6m の立坑が掘削された。掘削の結果として生じる岩盤の力学的,水理学的及び化学的特性の変化が,掘削中および掘削後もモニタリングされた。これらの原位置研究の結果から,発破に伴う力学的影響が,堆積岩と結晶質岩の両方で,開削部周縁から約 1m の範囲に拡がることが明らかになった。また透水係数の変化が,両者で同様の

空間範囲において観測された。例えば,東濃鉱山での立坑周囲の岩体の透水係数は, 空洞部周縁から約 1m の範囲内で 2 ないし 3 桁程度まで増加した。これらの変化は, 新たな亀裂の形成,そして/あるいは,既存の亀裂が発破によって進展したためであ る。同様に,岩盤緩み域の不飽和状況に関連した地球化学的特性の変化は,空洞部に 非常に近接した領域に限定されていた。

これら2ヶ所のサイトでの掘削影響領域に関する試験から得られた知見(図 4.1-5参照)は,日本での高レベル放射性廃棄物処分のための第2次取りまとめに反映された。

() 岩盤緩み域調査ツール

これまで示した調査内容に基づき,地下開削部周りの岩盤緩み域の分布と,岩盤緩み 域の水理特性を調査するために利用可能なツールおよび手法について以下にとりまとめた。

岩盤緩み域調査用ツールは,6つの主要分野,すなわち,地質学的,地球物理学的, 水理学的,力学的,熱的及び化学的分野に分類した。これらの中で,地球物理学的及び 水理学的分野には,多くのツールや手法が存在するが,力学的分野におけるものは少な く,その他の分野ではさらに少ない。一部のツールや手法は,多目的に使用でき,例え ば,AECLが開発したPAC-EXは間隙圧力と変位を同時に計測できる。一方,間隙水 の化学特性に関連した手法については,一つしか示していない。このことは,岩盤緩み 域内の化学的条件の変化が,移行特性の面で大きな影響を及ぼす可能性のあることは理 解されているものの,岩盤緩み域調査における化学分野は,これまでは大きな関心の的 ではなかったことを反映している。

ただし全ての手法が,あらゆる環境で利用できるわけではないことに注意が必要であ る。例えば,レーダーは岩盤の成分の影響を大きく受けるため,粘土層でのレーダーの 有効深さは,結晶質岩に比べて大幅に低減する。さらに,岩盤緩み域特性評価には直接 関連しないが,多くの国際的な試験が既に終了,実施中,あるいは計画されており,こ れについても本調査の対象とはしなかった。これらの多くは,人工バリア及び天然バリ アの相互作用問題を取り扱った複数の構成材料を使った試験である。

()結論

各国の岩盤緩み域関連試験,および岩盤緩み域をモニタリング及び特性評価するための関連ツールや手法の調査結果から,以下のような知見が得られた。

- ・岩盤緩み域を研究するために実施された試験により,異なる境界条件を持つ様々な
 岩盤での岩盤緩み域の特性と範囲に関して多くの情報が得られてきている。
- ・これら様々な試験で得られた結果の比較から,岩種,亀裂の状態,原位置応力状態, 地下水条件,掘削手法,坑道の設計及び坑道内の環境条件により,岩盤緩み域の特 性と範囲が大きく変化する可能性のあることが示唆されている。
- ・岩盤緩み域の水理特性は、ファーフィールド岩盤の特性とは大きく異なる可能性がある。掘削部近傍において、透水係数は数桁大きくなる可能性があり、それは主として掘削手法やニアフィールドの応力条件に左右される。
- ・坑道掘削前における岩盤内の亀裂や節理の発達の程度は,岩盤緩み域の性質に影響

を及ぼす可能性がある。モンテリの場合,岩盤内の不連続パターンが要因の一つと なって,底盤と側壁とで異なる亀裂発生メカニズムが特定された。

- ・粘土質の岩盤では,不飽和化により大きな亀裂や物質特性に不可逆的変化が生じる 可能性があるが,このようなことは結晶質岩ではまれである。一方,いずれの岩体 でも,加熱負荷により岩盤に不可逆的な影響を引き起こす可能性がある。
- ・岩盤緩み域およびその発達をモニタリング及び特性評価するために開発されたツー ルや手法がかなり進歩している。数値解析モデルや予測ツールについては,岩盤が 複雑である場合や物質の挙動が十分解明されていないような場合には,適用に限界 がある。



図 4.1-3 トンネルシーリング性能試験穿孔発破坑道の周りの岩盤緩み域



(locations indicated in Figure 3)	[m] (see drawing)	Frequency of EDZ fractures range [m ⁻¹]	Subvertical dip, parallel to bedding	
Pneumatic hammering data from only 2 boreholes	$a_h \approx 0.70$	≈ 19		
in new gallery	a _v > 1.2	not known	Inclined, subparallel to bedding	
Blasting data from 10 boreholes in	$0.60 \leq a_h \leq 1.10$	1 – 7 (along a _h)	Subvertical dip, parallel to tunnel wall, oblique to bedding	
security and new gallery	$0.30 \leq a_v \leq 1.25$	4 – 15 (along a _v)	Inclined, subparallel to bedding	
data from 8 side niches in security tunnel	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	4 - 32 (along a _h) 0 - 12 (along b _h)	Subvertical dip, parallel to tunnel wall, oblique to bedding	
Road header data from 8 boreholes in new gallery	$0.10 \leq a_h \leq 0.60$	1 - 9 (along a _h)	Subvertical dip, parallel to tunnel wall, oblique to bedding	
	$0.30 \leq a_v \leq 0.90$	2 - 8 (along a _v)	Inclined, subparallel to bedding	





図 4.1-5 結晶質岩, 堆積岩での地下空洞掘削時の岩盤緩み域の範囲と特性の概念図

4.2 埋戻し技術に関する情報整備

4.2.1 グラウト性能に関する調査

昨年度は,日本の地質環境に応じたシーリングシステムの考え方,システム自体の構築 を行う前段階として,これまでに示されている日本や海外における関連機関でのシーリン グシステムの考え方に関する情報整理を行った。本年度はグラウト性能に関する部分を中 心に追加調査を行ったので,グラウトの位置付けも含め,一部昨年度調査結果のレビュー も併せて,以下に検討結果を示す。

海外におけるシーリングシステム考え方の整理の確認

カナダ,アメリカ,スウェーデン,フィンランド,スイス,フランス,各国についてのシ ーリングについての考え方を,国ごとに「埋め戻し」,「プラグ」,「グラウト」の要素技 術と共に,「処分坑道の処置」についてまとめた。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。

(1) カナダでのグラウトに関する知見

- ・ストリパ及び URL で 10-8 m/sec 以上の岩盤を対象としたクレイグラウト/セメントグ ラウトの実験を実施
- ・URL での破砕帯の透水係数は 10-7~10-1 m/sec
- ・セメントグラウトは幅 20mm 以上の亀裂には注入可能だった
- ・グラウト後に熱応力により岩盤中に新たな亀裂が発生する可能性がある
- ・EDZ や破砕帯の透水係数は, グラウトによって 10-8 m/sec 程度まで改良できると判断された
- ・ベントナイトを材料として用いれば, 10-9 m/sec 程度までの改良が望める(他の粘土 系材料では,ここまでの改良は難しい)但し,水流が有る場合には不利である
- ・カーテングラウトは,プラグとの組み合わせで,EDZ を対象に適用されることが予想されまた,坑道立坑を横切る破砕帯等の止水にもグラウトは効果的と思われる

(2)アメリカ (YMP) でのグラウトに関する知見

- ・グラウトは坑道を閉鎖するためのプラグ周辺に適用することが考えられている
- ・施工方法としては,プラグ施工前に周辺岩盤に削孔・注入しての透水性の改良,プラ グ施工後にプラグ部を通して周辺岩盤まで削孔・注入を行う方法が考えられている。
- ・火山灰を用いた耐熱性にすぐれたグラウトの研究が進められている

<u>(3)スウェーデン(SKB)でのグラウトに関する知見</u>

- ・SKB では, グラウト注入過程のモデル化研究を行っている
- ・エスポにおける HRL でフィールドテストを行う予定

- (4) フィンランドでのグラウトに関する知見
 - ・グラウトについては現在検討中である。

(5)スイスにおけるグラウトに関する知見

・グラウトは,施設建設中やトンネル閉鎖時の湧水低減に用いられるものと予想される

(6) フランスにおけるグラウトに関する知見

昨年度に引き続き,日本や海外における関連機関のシーリングシステムの考え方,特に グラウト部分を中心に情報整理を行った。その結果を以下にまとめる。

- ・閉鎖システムと一環としてのグラウトと施設建設中の湧水低減のためのグラウトが ある
- ・前者としては、処分坑道の処置方法として、廃棄体縦置きの場合には膨潤性の埋め戻し材で埋め戻す、横置きの場合には緩衝材を主体に埋め戻す、というレイアウトが基本であり、処分坑道の坑口にはプラグを設置する場合が多い。そして、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、プラグ周辺岩盤にグラウトを併用するという考え方が多い。
- ・グラウトに関しては,材料としてベントナイトとセメントが考えられているが, YMPのように火山灰を使う新しい材料の発想もある。

4.2.2 類似プロジェクトに関する調査

(1) ベルギー, モルにおけるリシール試験(図4.2-1~図4.2-2参照)

RESEAL プロジェクトは,可塑性の粘土中における代表的規模のボーリング孔および 立坑のシーリングを実証することを目指したものである。プロジェクトの主な目的は,ベ ントナイトで作られた透水性のシールが水,ガスおよび放射性核種のシール/母岩境界に 沿った,または掘削影響領域を通った選択的な移行を防止することを実証することである。 予め圧縮成形した高密度ベントナイトブロックを水平なボーリング孔のシールに使用し, 一方,ベントナイトの粉末/ペレット混合物を立坑のシールに使用した。

立坑は深さ 24 m,内径 1.4 m,掘削直径約 2.2 m である。その底には,ギャラリーが あり,その長さは約 8 m,直径は立坑と同じ大きさである。立坑は約 16 m の深さまでコ ンクリートで埋め戻した。この埋め戻し領域の上には,立坑のライナーを撤去した後,ベ ントナイト製のシールを設置した。このシールは高さ 224 cm,直径約 220 cm である。 最初の 60 cm は,このプロジェクトのために特別に設計され工業用締固め機を用いて, 粉末/ペレットの混合物を締固めた。シール内には,間隙水圧,全応力,変位,および相 対湿度を測定するための計器を設置した。シールの人工的な水の浸潤を 2000 年 5 月始め に開始し,現在進行中である。

母岩に生じる可能性のある変位を出来るだけ少なくするためにシールを速やかに設置したにもかかわらず, ライナーを除去したことによって,予想以上に大きな周辺母岩の水力学的 機械的擾乱が生じ,特に立坑壁面から半径方向に少なくとも1mの距離まで亀裂

が生じた。

ボーリング孔シーリング試験は,プレ圧縮した FEDEX 粘土および FoCa 粘土のブロ ックで直径 270 mm のボーリング孔をシールするもので,このシールは 1997 年 12 月に 設置した。飽和状態のシールの透水性が母岩層の透水性の 10 分の 1 であること,および ガス注入状態でのシールの挙動によりボーリング孔のシーリングの実現可能性が立証され た。

(2) スウェーデン,エスポにおける埋戻し,プラグ試験(図4.2-3~図4.2-6参照)

埋め戻し・プラグ試験では,埋め戻しの材料と定置方法の試験,および実規模プラグの 試験が行われている。この試験は,発破により掘削した処分坑道での埋め戻し材料とニア フィールド岩盤との総合的な機能試験である。また,プラグの水力学的および力学的な機 能試験でもある。

試験設備の設置は,埋め戻しおよびプラグの最終部分の打設を含めて,1999年秋にすべて完了し,1999年末には透水マットに水を満たして水の飽和を開始した。

試験の主要な目的は以下の通りである。

- ・発破により掘削した坑道の埋め戻しに用いる様々な材料および締固め方法を開発し, 試験すること。
- ・埋め戻し材の機能および埋め戻し材と周辺岩盤との相互作用を,発破により掘削した 坑道内で実規模で試験すること。
- ・坑道プラグを建設する技術を開発し,その機能を試験すること。

試験領域は,長さ約28mで古いZEDEX坑道の部分に位置し,以下の三つの試験区域に分けることができる。

- 1. 内側区域。ここは,30%のベントナイトを含む埋め戻し材を充填。
- 2. 外側区域。ここは,ベントナイトを含まない埋め戻し材を,また,天盤部はベント ナイト・ブロックを充填。
- 3. プラグ

埋め戻し材区域は,層状に埋め戻し材を置き,この目的のために開発し,製作した振動 板を用いて締固めを行った。予備試験によって,底盤から天盤までの全断面において,傾 斜を付けた締固めを行なうべきこと,また傾斜は約35°にすべきという結論が得られて いる。

内側試験区域は,ベントナイト含有量 30%のベントナイトと破砕岩の混合物で充填さ れている。組成は実験室での試験および現場での締固め試験の結果に基づいたものである。 外側試験区域は,ベントナイトを加えていない破砕岩で充填されている。破砕岩には膨潤 性がなく,むしろ沈下する可能性があるため,埋め戻し材と岩盤の間の接触がよくなるよ うに,埋め戻し材と天盤の間に数 10 cm の隙間を残し,ベントナイト 100%の高圧縮ブ ロックをいくつも充填した。これらのブロックと岩盤との間に残された不規則な部分には ベントナイトペレットを充填した。

2つの試験設備区域は長さ14mであり,透水性のマットでできた排水層で各々の試験 設備区域を分割して,層の間に水圧勾配を与え,埋め戻し材およびニアフィールド岩盤中

での水の流動を調べた。マットは,また,埋め戻し材を人工的に水で飽和させるのにも使用している。マットは,2.2m間隔で設置した。天盤近くの流れを底盤近くの流れから分離することができるようにするため,また,岩盤近くの流れを埋め戻し材中央部の流れから分離するために,各マット区域は3つのユニットに分割した。

プラグを打設するまで一時的に埋め戻し材を支えるために,外側部分の端部には前もって組み立てたビームでできた壁を設けた。埋め戻し材の現場締固めは上部の隅では行なえないため,この三角形部分はベントナイト含有量20%のベントナイト/砂混合物のブロックで充填した。

埋め戻し材および岩盤には,ピエゾメータ,全圧計,熱電対,水分計,および局所的な 透水係数を測定するための計器を設置した。埋め戻し材およびニアフィールド岩盤の軸方 向の透水性は,水が飽和した後,坑道に沿ってマット間に水圧勾配を与え,水の流れを測 定することにより試験することになっている。計器からの全てのケーブルは,ケーブルを 通した漏洩を防ぐために,Tecalan チューブに収めた。ケーブルは,岩盤を通る鋼製配管 を通り,試験坑道とそれに隣接した Demo 坑道との間に掘削されたボーリング孔にある データ収集室まで引かれた。

プラグは,発生する可能性のある水圧と膨潤圧に耐えられるように設計されている。



図 4.2-1 RESEAL プロジェクト



図 4.2-2 立坑埋戻し試験状況



図 4.2-3 エスポにおける埋戻しプラグ試験位置(ZEDEX)



- 33 -

4.3 性能評価に関する情報整備

4.3.1 安全評価における岩盤緩み域の位置付け

ここでは,各国のプロジェクトにおける,安全評価上の岩盤緩み域の位置付けを整理する。 (1)結晶質岩サイト

()カナダ

カナダにおける使用済み燃料の処分コンセプトによると,耐食性容器に封入された廃棄 体容器が,カナディアンシールドと呼ばれる深成岩中の深度 500~1000mの工学的に設計 された処分施設に埋設される。処分概念を提示するにあたり,AECLでは2つの安全評価, すなわち環境影響評価(EIS:Environmental Impact Statement)及びセカンドケーススタ ディ(Second Case Study)を実施した。EISにおいては,掘削損傷領域は核種移行にとっ て無視し得る影響しか持たないという仮定を立てており,これにより岩盤緩み域はAECL94 の評価モデルには含まれていない。これは,ドーム型空洞(vault)が建設される低い位置の 岩盤領域("waste exclusion zone"と呼ばれる)においては,非常に小さい透水係数及び 均質な水理特性を持つことによる結果である。AECLによると,応力解放によって透水係数 が増加する可能性のある領域の幅は非常に狭いものであり,たとえ高透水性のエリアが形成 されたとしても,それは岩盤中の大規模な破砕帯には連結しない,とされた。しかし,こ の仮定は,すなわち,核種が緩衝材から直接岩盤緩み域に,埋戻し材を迂回する経路を通 じて岩盤中の高透水性の破砕帯に導かれ,さらにそこから地表の環境まで移行する可能性 があるという指摘を受けた。

AECL は,上記の指摘に対し,「空洞の定置エリア周辺の岩盤緩み域と高透水性の破砕帯が交差する点は,核種の移行を大きく促進する可能性があるものの,掘削段階に取られる予防措置により,そのような破砕帯を避けることを確認できると考えられる」と回答している。AECL は,技術的判断から,そのようなゾーンは後で形成されるものである,とも主張している。AECL によれば,岩盤緩み域とその流れにつながる水みちは以下の観点から制限できる,としている。

- ・立坑,トンネル,ドーム型の処分空洞は,慎重な制御発破により掘削に伴う損傷を最 小限に抑えることが可能なこと。
- ・坑道の形状や縦横比を最適化するとともに,坑道の方向を最大主応力方向との関係か ら最適化することにより,応力再分配に起因する損傷を最小限にすること。
- ・立坑やトンネルにおいて,評価上重要な部分,つまり処分空洞(disposal room)の 両端部や,ドーム型処分空洞(disposal vault)へ通じる空洞に交差する亀裂の端部 の一方にシール(岩盤緩み域へのグラウトを含む)を施すこと。

AECL におけるセカンドケーススタディ(SCS: Second Case Study)では EIS と同様の幾何形状で,架空の水理地質条件を考慮し, 'waste exclusion zone 'に 100 倍の透水性が与えられた。SCS では, 'waste exclusion zone 'バリアが損なわれた点を補うために, ' 4ν - μ - Δ '定置(in-room emplacement)の設計概念と,より耐久性の高い耐食性のある容器が用いられた。長期環境評価の結果,効果の小さな地質中の'waste exclusion zone'をより効果の大きな人工バリアが補う,という理由にもより,SCS の方に安全なケースが示された。数値解析モデル研究では, 'waste exclusion zone'と高透

水性の水みちを連結する個々の亀裂や岩盤緩み域(またはそれらの組合せ)の影響につい て検討した。安全性へのかかわりは,EIS,SCSの両方でその線量結果に対する感度が高 い核種:I-129(ヨウ素)の移行を予測することによって判断された。3次元のEISサイ トスケール地下水モデルと,それに対応する2次元の溶質移行モデルが考慮された。評価 モデルは,ドーム型空洞の周囲を覆う厚さ1mの岩盤緩み域と,空洞と大規模破砕帯(厚 さ20m,浸透率10⁻¹⁵m²,間隙率0.1)を結ぶ個々の細い亀裂(または亀裂群)を含んで いる。岩盤緩み域の浸透率は空洞上部で10⁻¹⁸m²,底部で10⁻¹⁷m²であった。個々の亀裂 は,有効水理開口幅10mm(狭い破砕帯のケースの場合,開口幅80mm)をもち,長さ 約158m,幅100m,傾斜角45°と設定された。

I-129の大規模亀裂への移行率,及び井戸水摂取を仮定した線量結果は,10万年以上の期間を考慮して評価した。主な知見は以下の通りである。

- ・ 'waste exclusion zone 'と交差する単一亀裂の存在,及びその開口幅は, I-129の
 移行率と移行時間に対して重大な影響を及ぼす。
- ・空洞周りの岩盤緩み域の存在は, I-129の移行率に対して軽微な影響しか及ぼさない ように思われる。
- ・主要断層への空洞周り岩盤緩み域の広がり(extension)は, I-129の移行率と移行時 間に対して軽微な影響しか及ぼさない。
- () フランス (SPA)

フランスでは,花崗岩地質における一般的な処分場に対する長期安全評価研究が実施された。フランスにおいては花崗岩サイトが放射性廃棄物処分に対して可能性のあるものと 考えられており,SPA プロジェクト上,IRSN は EVEREST の枠組み内で定義される一 般的な仮想サイトに関して評価を行っている。

()ドイツ(SPA)

ドイツでは,国際 SPA プロジェクトの支援のもと,花崗岩地質における一般的な処分 場に対する長期安全評価研究が実施された。レファレンスケース,パラメータ変動,3つ の異なるシナリオが検討された。

処分場概念は,単一のステンレス鋼容器を鉛直のボアホールに定置するものとされている。また,締め固めベントナイトが緩衝材として用いられる。その理由は,ドイツにおける花崗岩地質の最初の調査結果において,水理地質的,水理地化学的特性がスイス(地質構造は Krystallin- に記載されているものを考慮した)と類似しているためである。

レファレンスシナリオは次のように定義された。処分場の操業段階の直後,ベントナイトは即座に飽和する。全ての容器は1000年後に破壊し,SPAプロジェクトで特定されたソースタームによる核種の移動,ベントナイト中の拡散,花崗岩の低透水性の領域における亀裂性岩脈を通じた核種移行とマトリックスによる吸着。廃棄体容器の25%は,ファーフィールド中でそれと見なされる移行経路に接続されている。核種は,地表近くの層まで輸送される。汚染された地下水は,地表近くの井戸で汲み上げられ,飲料,灌漑,畜牛の餌,人工池に用いられる。また,代案シナリオは以下の通りである。

- ・深井戸:生物圏における水の希釈度はレファレンスケースにおけるよりも小さく,暴 露経路としては飲料水のみ考慮する。
- ・坑道及び立坑の岩盤緩み域を通じた移行:ファーフィールドにおける移行経路として,
 長さ 500m,透水係数 1.75 × 10⁻³ m/s の多孔質媒体に代表されるものとする。
- ・堆積層の覆い:花崗岩サイトが,堆積層に覆われているとする。低透水性の花崗岩中で亀 裂性の岩脈を通じて移行した後,核種は長さ200mの多孔質媒体を通じて移行する。

「岩盤緩み域を通じた核種移行」シナリオでは,岩石圏は,長寿命核種や,C-14,I-129,Cs-135といった吸着性の弱い核種にとって,バリアとして機能しない。岩盤緩み 域内の移行中はC-14の移行が遅延されず,濃度が低減されないため,最大の年間線量率 は,レファレンスケースより早く現れ,レファレンスケースの2.7倍となる。アクチノイ ドの線量率は,核種移行経路に沿った輸送中に減少するが,レファレンスケースと比較す ると,その最大値より1オーダー以上大きい線量率が,もっと早くに現れる。

()スペイン

1997年,花崗岩地質における一般的な処分場に対する予備的評価が実施された。 (a) レファレンスシナリオ

ENRESA97によると,線量に重要な影響を及ぼす岩盤領域のパラメータは,

- ・損傷領域 (DRZ: disturbed rock zone) を通じた地下水流
- ·地下水移行時間
- ・岩石基質中の拡散による遅延

である。レファレンスシナリオにおいて, DRZ を通過する地下水総量は, 0.37~ 0.77m³ /vear の範囲となり,以下のことが分かった。

- ・溶解度の低い核種による線量は, DRZ からの流量に比例的である。
- ・溶解度制限のない核種(Cl-36, I-129, Cs-135)では,最大線量はDRZからの流量が1オーダー増加すると, 2~3倍に増加する。
- (b) 変動シナリオ

レファレンスシナリオをもとに6つの異なる変動シナリオが実施された,現在の研究で 閉鎖するときに関わりの大きいシナリオを以下に示す。

1) 岩盤緩み域中及び岩盤領域中の地下水流れの変動シナリオ

DRZ を通じた流れ,及び GBI (生物圏と岩石圏のインターフェース)と処分場を結ぶ 経路からの放出について,10 倍への増加と 1/10 への減少の 2 ケースについて解析された。 ・流量が大きい場合

- 得られた結果は,溶解度の高い核種(Cl-36,I-129,Cs-135)による年平均線量の最大値は,1.5~3.5倍に増加する。溶解度に低い核種による年平均線量は,DRZから流出する流量が10倍に増加すれば,そのまま10倍となる。線量の総量はI-129に支配されるため,DRZを通じた流れが10倍に増加することは,線量の総量が2倍に増加することにつながる。

・流量が小さい場合

- 得られた結果は,溶解度の高い核種(Cl-36, I-129, Cs-135)による年平均線量

の最大値は,1/4~1/8 に減少する。その他の核種(溶解度に低い核種)による年平均 線量は,DRZ から流出する流量が1/10 に減少すれば,そのまま1/10 に減少する。線 量の総量はI-129 に支配されるため,DRZ を通じた流れが1/10 に減少することは,線 量の総量が1/4 に減少することにつながる。

2) 低品質シーリングシナリオ (poor-sealing scenario)

シール材の劣化を含むシナリオの計算は,レファレンスケースと同様のモデル及びパラ メータを用いて実行された。ただし,DRZ 及び岩盤を通じた地下水データは,MAFIC による計算(坑道のシールが機能しないと仮定,すなわちその領域ではDRZ の通水性が 減少しない)で得られたデータを用いた。その結果,平均線量はレファレンスシナリオの 1.5 倍であると示された。

()スイス(Krystallin-)

アクセス坑道や立坑は,処分場施設の様々な構成要素と連絡し,結晶質岩では高透水性 の領域と交差する可能性がある。アクセス坑道の方向は,坑道に沿った有意な地下水経路 が生じる可能性を最小限に抑えるよう,一方向のみからのアクセスとなるよう取り決めら れる。閉鎖時にはアクセス坑道及び立坑は埋め戻され,ある部位においては高性能のシー ルが施される。レファレンスシナリオにおいては,シーリング性能により,立坑からの核 種の放出は無視できるものと仮定する。

仮にシールが長期的に機能しなくなると,埋戻し後のトンネル及び立坑は,地下水流れ や核種の移行にとって,健全母岩よりも高透水性の経路を提供する可能性がある。さらに, 立坑や坑道(処分坑道を含む)周りの母岩における岩盤緩み域中で亀裂が進展する可能性 があり,この領域における連続的,または半連続的な開口亀裂のネットワークも移行経路 を提供する可能性が見込まれる。

岩盤緩み域は,流速の大きい移行経路(fast transport pathway)であり,境界条件(岩盤緩み域中の移流フラックス)になるものと考慮されている。

高透水性の水みちの潜在的重要性は,代案のシナリオで検討されており,次の2つのケ ースに区分されている。

・埋め戻されたトンネル及び立坑に沿った移行

・連続性を仮定した岩盤緩み域に沿った移行

埋戻し材,岩盤緩み域中における地下水のダルシー流速は,それぞれ 8.7 m/y 及び 2.9 my⁻¹であった。

処分場エリアは,処分坑道及びその周囲の岩盤緩み域が,仮想水平面と交差する面積 (投影面積)の合計とみなされている。各坑道は直径3.7mであり,岩盤緩み域は坑道壁 面からちょうど坑道直径分の距離だけ広がるものと見込んでおり,したがって,各坑道に 相当する仮想平面の幅は10mとなる。廃棄体容器は2693 個であり,トンネル軸方向に 5mの離間距離で設置されることから,処分場エリアの面積は,10m×5m×2693=1.35 ×10⁵ m² となる。

立坑における岩盤緩み域は,立坑の周りにリング状に形成され,立坑半径と同じ幅 (6.6m)を持つものと設定された。

移行経路は,等価な多孔質媒体としてモデル化された(この取扱いは保守的ではなく, もし岩盤緩み域が亀裂性媒体として取り扱われればもっと急速な核種移行が生じる。しか しながら,それに必要とされるデータが現状では得られていない)。

シーリングは,高レベル廃棄物(HLW)の個々のパネルと,中レベル廃棄物(ILW) のサイロを水理的に互いに離し,岩盤中の高透水ゾーンから隔離するよう設計される。母 岩中の調査孔もまた埋め戻される。シールは,アクセス坑道及び立坑の短い区域を低透水 性材料(締め固めベントナイトブロック)で埋め戻した部分で構成され,その端部に厚い プラグ(コンクリート)を含む。ベントナイトはアルカリ溶解(セメント間隙水)により 変質する可能性があるが,そのような溶液のベントナイト中への拡散は限られた広がりし か持たないため,コンクリートプラグと隣接するベントナイトの限られた範囲にのみその 影響を受けると見込まれている。

調査孔,立坑,坑道のシーリングの実現性及び有効性がこれまでに検討されている。シ ールは,核種移行の唯一の経路が低透水性の健全母岩中に限られるよう,処分場パネルの 完全な水理的隔離をもたらすものと見込まれている。

() スウェーデン

スウェーデンでは,埋戻し及びシーリングシステムの性能に関する新しい評価,関連す る懸念事項については報告されていない。しかし,さらなる研究が必要とされる安全性に 関わる幾つかの課題が認識されたことは,注目に値すると思われる。

- ・最終的に用いられる掘削技術の違いにより,処分場内の異なる領域で生じる岩盤緩み 域の広がりと水理特性
- ・処分坑道内, またはその近傍でセメント系材料が使用された場合の, その局所的影響
- ・破砕岩を混入したベントナイト埋戻し材の長期的な地化学的,水理的な変遷
- ・主要なシナリオに関連づけた,高応力,大きい動水勾配の条件下におけるシールとプ ラグの挙動

()フィンランド

POSIVA は,実証的処分孔3本の特性に基づき,全断面ボーリング(full-face boring)技術による処分孔周りの損傷領域は,核種移行の観点からはあまり重要ではない と結論付けた。したがって,処分孔周りの損傷領域は,ニアフィールドの移行モデルには 含まれていない。実際,かなり小さな間隙率をもつ損傷岩盤の狭い領域は,ベントナイト 緩衝材から拡散により到達した核種と結合した沈下物を遅延するよう機能する。

レファレンスシナリオにおいて,ニアフィールドから岩石圏への核種の移行は,4つの 移動係数に支配される(流速と等価)。

- ・キャニスター周りにシェル状に設置されたベントナイトの最も外側から,処分孔に交 差する岩盤中の割れ目へ
- ・処分孔頂部の破砕岩/ベントナイト埋戻し材から,坑道底盤下の岩盤損傷領域へ
- ・坑道内の埋戻し材から、坑道周辺岩盤、または損傷領域へ
- ・坑道に沿って,そして岩石圏中

坑道沿いの経路では,レファレンスケースにおいて,核種は最初のトンネル区画から 直接に岩盤圏に放出される保守的な仮定がなされている。

ニアフィールドモデルから岩石圏への4つの核種移行ルートが仮定されている。

- ・キャニスター周りのベントナイトから,処分孔に交差する岩盤中の割れ目へ
- ・処分孔頂部の埋戻し材から,坑道底盤下の岩盤損傷領域へ
- ・坑道内から,坑道周辺岩盤,または損傷領域へ
- ・坑道に沿って,そして岩盤中

坑道沿いの移流,分散による核種移行のモデル化も可能であるが,レファレンスケー スにおいては,核種は最初のトンネル区画から直接岩石圏に放出されると保守的に設定 されている。その他3つのルートによる移行は,ニアフィールドから岩盤中への総放出 量として合計され,岩盤中における核種移行解析のインプットとされる。

坑道および処分孔の上部は,破砕した岩とベントナイトの混合材料で埋め戻される。 混合材は,ベントナイトの配合率がサイト条件に合わせて調整され,例えば,塩水環境 下では30%であるのに対し,塩分を含まない地下水環境下では10~15%の配合率が計 画されている。サイトの局所的なスケールにおける地下水流動シミュレーションでは, 2次元断面で処分場が等方的な透水量係数5×10⁻⁸ m²/s をもつものとしてモデル化さ れた。この仮定は,埋戻し後の坑道と,その周辺の岩盤損傷領域の水理特性を考慮した ものである。一般に,坑道内部やその周囲,また処分孔上部を通じた地下水流れのモデ ル化は,概念上の不確実性およびパラメータの不確実性を有する。その不確実性は,以 下の項目に関連する。

- ・母岩,損傷領域,埋戻し材の絶対的および相対的透水係数
- ・動水勾配と坑道方向の関係
- ・坑道に交差する破砕帯の影響
- ・埋戻し材、シール材の長期特性

() イギリス

英国においては,閉鎖後の性能評価に関する重要パラメータ取得に向けた地下水流動 モデリングへのアプローチとして,2次元多孔質連続体モデルが用いられた。この2次 元多孔質連続体モデルでは,岩盤緩み域が明白にモデル化された。この扱いにおける重 要な要素は,岩盤緩み域の広がりと水理特性の設定である。岩盤緩み域は空洞(vault) から約8mの広がり(おおよそ空洞直径の半分,または,空洞直径が用いられた)を持 つものとされた。この岩盤緩み域領域における有効透過率(局所スケール)の空洞軸方 向の成分は健全母岩におけるそれより2オーダー大きいものと設定され,鉛直成分は変 化しないものとされた。

当初,この方法は一般の岩盤としては過大評価につながるとの観点で保守的な扱いと見られた。その後,これはAspo地下研究所のZEDEX プロジェクトで得られた結果から検証された。

重要な性能評価パラメータ(空洞を通過する地下水フラックスと地表への移行時間)の 有効透過率への感度を判断するため,地下水モデリングについて「偏った調査(bias audit)」が公式に実施された。パラメータは岩盤緩み域の透過率に対する感度が高いとの結果は得られなかったが,もし岩盤緩み域が岩盤中にかなりの広がりをもつモデル化であれば,明らかに処分空洞を通過する地下水フラックスは違うものであったろう。興味深いことに,数値計算によると,岩盤緩み域は,処分空洞内の廃棄体から地下水を遠くそらす働きをするように見える。したがって,核種移行の危険性が過小評価されていないことを裏付けるにあたっては,空洞周りの岩盤緩み域を広がりと水理特性で定義することは保守的でない可能性がある。

(2) 堆積岩サイト

() ベルギー

低品質シーリングシナリオ (poor-sealing scenario)は,主要坑道とアクセス立坑が十分 にシールされず,核種の選択的移行経路を提供し,主要坑道及びアクセス立坑の透水係数 が Boom 粘土より数オーダー大きくなるとの仮定を立てている。このとき,坑道は地下水 を泥質体に排水する巨大な濾過材のように振る舞い,坑道及び立坑を通じた移流を促す。 濾過の効果を一層強めるため,このシナリオはさらに Boom 粘土中の動水勾配を逆転させ るとの仮定をたてた。これまで実施された低質シーリングシナリオによる影響評価による と,このシナリオは重要な影響を持つべきものでない,と示された。Boom 粘土の低透水性 により処分場に流入する地下水が限られているため,シールが不十分な主要坑道中の移流 による核種移行は極端に制限されたままである。このシナリオの起こり得る可能性は,処 分場閉鎖段階におけるセーフティカルチャーと厳格な品質保証方針を確実にすることにより, 大きく低減される。

() フランス - IPSN

粘土系岩盤は,フランスにおける放射性廃棄物処分の一つの有力な候補である。SPA プロジェクトでは,処分場サイトはパリ盆地の主な特徴を反映しているが,特定のサイト に対応しているわけではない。仮想的な処分場エリアは,パリ盆地の南端,167mの Toarcian/ Domerian 粘土層に位置する。パリ盆地は沈降作用による海底堆積層から成る が,これらの層はほぼ水平と考えられ,幾分か露頭に連続しており,中心部は新しく形成 され,外周部は最も古い典型的な同心リング状を示している。これは,水理地質的には, 浸透性の高い層,帯水層,不浸透性の層,非透水半帯水層(aquitard)が交互に並ぶ複雑 な系となる。Toarcian と Callovo-Oxfordian 粘土層が,処分の有力候補層である。しか し外観の特徴は空間的(水平,鉛直的とも)に変化する。その上にある帯水層(流速約 0.03 m/y)の勾配が非常に小さく,鉛直方向の地下水の流れは約2×10⁵ m/y と考えられ ている。Toarcian/Domerian 粘土層を通じた移行は,基本的に,その下のTrias 層から その上の Bajocian 層に向けた上向き流れである。

4.3.2 安全評価における埋戻し部の位置付け

ここでは,近年の性能評価において,どのように埋戻し材が取り扱われているか述べる。 ほとんどの評価において,処分場の立坑,坑道,調査孔では低透水性のシーリング材料を 用いるものとされている。シーリングは,処分場の様々な部位や,坑道に交差する高透水 性の構造(すなわち,高透水性の断層や亀裂)を水理的に隔離することを目的として,立 坑やアクセス坑の計画上重要な位置に施される。これらシールには,その効果や,特に長 期健全性に対する不確実性が存在すると考えられる。仮に,立坑や坑道のシールが劣化し, 効果がなくなった場合には,立坑,坑道とそれらに沿った岩盤緩み域は,地下水や汚染物 質の移行に対して,乱されていない健全母岩よりも高透水性の移行経路を与える可能性が 懸念される。

埋戻し材(または緩衝材)と母岩の透水係数の対比により,どちらの経路が性能評価上 重要視されるべき因子であるかが位置付けられる。粘土を埋戻し材として用いる結晶質岩 系岩盤における処分システムでは,移行経路は,概ねキャニスターから母岩までの粘土を 通じた最も短い経路となる。粘土系の埋戻し材が設置される粘土系岩盤の処分システムで は,埋戻し材は,母岩よりも大きな透水性をもつ可能性が見込まれる。このことは,処分 場の坑道を選択的経路とすることにより,移行時間の短縮をもたらす可能性がある。

SKBの安全評価上の埋戻し材の取扱いに関するワークショップでは以下のような結論が 得られている。

- ・性能評価における埋め戻し後の坑道の取扱いは,埋戻し材による連続的な埋戻しによる 場合と,プラグやシール材を用いた埋戻しによる場合について相対的な利点を再調査す ることが必要である。後者は,単調な埋戻しよりも,核種移行をより効果的に抑制する 可能性がある。
- ・結晶質岩における節理の長期的な変質,粘土系岩盤における自己修復性は,埋戻し材や プラグなどのシール材と母岩との密着性を維持するのに貢献する可能性がある。
- ・膨潤性の粘土や粘土 / 破砕岩の混合材といったトンネルシーリング材の性能に対する地 下水の塩分濃度の影響については, さらに詳しく調査する必要がある。
- ・性能評価モデルにおける埋戻し材をより正当に評価するため,いくつか残されている技術的な不確実性を究明すること,および埋戻し材料に関する研究と性能評価のインターフェースを向上させることを目的とした継続的な尽力が必要である。
- ・坑道周辺領域の3次元ディスクリートフラクチャーモデルは,岩盤緩み域の異方的特徴 や水みちとしての横方向の連絡性に関する知見を提供しうる可能性がある。
- ・微小振動データによると,熱的影響後の期間(2000年程度以降),岩盤緩み域中の亀裂の進展を抑制するためには,比較的小さな埋戻し材の圧力(100kPa以下)があれば 十分であることを示唆している。この,もしかすると重要な観察結果について,一般的な妥当性を確認するためにさらなる研究が求められる。
- ()結晶質岩におけるシーリング,埋戻し

性能評価研究は,結晶質岩サイトの処分場における安全性に貢献する点において,ベン トナイトによる埋戻しが重要な役割をもつことを明快に実証した。

(a) カナダ

立坑及びトンネルのシーリングの破壊は,地下水モデルにより検討されている。立坑の

シーリング(横坑, 立坑の埋戻し材も)の破壊が, 地下水モデルと(埋戻し材の浸透率を 7オーダー上げての)粒子追跡調査により, シミュレートされている。地下坑道から地表 までの地下水移行時間への影響は, 比較的重要にならないことが明らかになった。粒子が 立坑を地表まで上昇するケースは, 非常に極端なケース, すなわち廃棄体を定置しない領 域(waste exclusion zone)を設けず, 地下空洞は全て破砕岩だけで埋め戻すと仮定した 場合にしか起きないことが計算で示された。したがって, 立坑や坑道のシーリングの破壊 により見込まれる影響は, 地下水流速に変化をもたせた設定により, ある程度起こりそう なシミュレーションに取り込むことができると考えられる。

(b) スウェーデンおよびフィンランド

埋戻し材の性能評価における POSIVA の取扱いは, 埋戻し後の坑道が水みちとなる可能性を考慮に入れているものの,本質的に SKB と同様である。

例えば,トンネル断面中に高透水性材料と低透水性材料を組み合わせることにより,断 面全てを単一に埋め戻す方法より,低コストで全体的な透水性を低減することができる可 能性がある。透水性の破砕帯は建設中に確認されるものであるから,例えば,全ての坑道 断面を画一的に埋め戻す方法よりも,これらの破砕帯のシーリングに対して特別注意を払 うことにより,局所的な水みちへの経路を最小限に抑える方が効果的であると考えられる。 POSIVA が重要視している課題は,塩分濃度の高い地下水における埋戻し材の性能である。

() 堆積岩におけるシーリング, 埋戻し

堆積岩サイトの埋戻しに必要とされる重要な機能を,実現性,建設安全性,頑健性と いった課題も考慮して表4.3-1にまとめる。この表では,廃棄体定置坑道(岩盤緩み域含 む)が,低透水性で比較的単一な水理特性をもつ健全母岩領域の中に"孤立した"状態 となるよう,その端部で効果的にシーリングされるものと仮定されている。粘土の自己 修復特性および可塑性の粘土母岩は,岩盤緩み域を通じた移行経路を排除した立坑や坑 道のシーリングシステム設計に資する。例えば,坑道の短い区間で支保材料を全て撤去 し,母岩よりも透水性の低いベントナイトを設置することが可能である。粘土を母岩と するケースでは,岩盤緩み域を1m程度掘削して劣化した岩盤を取り除き,適度の膨潤 圧(5MPa程度)を発揮するベントナイトを充填すれば,岩盤緩み域の水理的連続性を 低減するのに十分であると考えられる。

埋戻しの役割の一つは,閉鎖後において,空洞が存在することにより生じる深刻な岩 盤の力学的損傷が生じないように防護することである。それに必要な機能は,坑道内側 への変形に抵抗し,岩盤緩み域中の亀裂の進展を抑えるために十分な膨潤性能である。 周辺岩盤の過渡なクリープ変形は,岩盤緩み域の幅を増加させるとともに,その透水係 数を増加させる可能性がある。Opalinus 粘土は自己修復性の確認が重要であり,安全性 を立証する上で必要である。

埋戻しの役割	必要な機能	備考
キャニスターを定位置に設置するた	実際的で安全かつ低コストの	
めの安定性を提供する	埋戻し材設置作業	
長期間にわたってキャニスターを支	十分な強度とクリープへの抵	
持し , その位置を保持させるととも	抗力 , 緩衝材の応力に対する十	
に,キャニスターにかかる応力を一様	分な緩衝性を備えること	
にすること		
空洞の存在による閉鎖後の有意な力	坑道の内側への変形や岩盤緩み	周辺岩盤の過渡の変形(クリープ)は,
学的損傷から岩盤を保護すること	域中の亀裂の進展を抑えるために	岩盤緩み域の幅と透水性を増加させる可能
	十分な膨潤性能	性がある。.
廃棄体容器の健全性と核種の放出率	低透水性 , 自己シール性 , 埋	拡散支配の環境を与えること,
低減,保有に好ましい化学環境及び地	戻し材中に有害な成分がないこ	処分場システムを通じた水みちの発達を
下水流れの制限により , 長期にわたっ	と,またはそれのキャニスター	抑えること,好ましい地化学環境による核
て水理的に好ましい状況を作ること	への移動を抑制する能力	種の不動 / 遅延
核種の吸着を促進すること	高い吸着性能	埋戻し中の遅延は , 線量の減少に大いに
		貢献する。ただし,その貢献度は母岩中の
		遅延効果よりも小さい
廃棄体及びキャニスターを許容温度	必要とされる熱伝導率	許容最大温度はサイト固有である(キャ
以下に維持すること		ニスターの材質等)
周辺岩盤を熱的悪影響から保護する	必要とされる埋戻し材厚さと	Opalinus 粘土を用いた設計研究では , 母岩
こと	熱伝導率	内の温度は(過去に受けた最大温度である)
		90 を超えなかった。これは,本質的ではな
		いにせよ , 安全性の議論を簡単化するもので
		ある

表 4.3-1 堆積岩サイトにおける埋戻し材に求められる役割と機能

4.4 支保工の取扱いについて

これまで既往の安全評価関連研究では, 吹付け・覆工コンクリートを始めとする支保 構造等が考慮されていない。支保が設置されれば閉鎖時に撤去するのが前提とされてい る。しかし,現実的にどのような支保構造や補助工法,防排水工が適用され得るかは詳 細に明示されておらず,処分場における支保工の撤去方法,実現可能性については未検 討と判断される。

4.4.1 支保工の現実的な仕様の整理

現実的に支保工や防排水工等が実際の処分場建設時に適用され得るか検討するため,一般 に適用されている道路トンネルや鉄道トンネルの事例や設計基準を参考に,支保構造,防排 水工,補助工法について整理し,処分坑道周辺の支保構造の仕様を例示する。

(1) 支保構造

支保構造は,掘削したトンネルを安定に保つために設けられる構造物の一部であり,施 工を安全に能率よく行えるものであるとともに,トンネルの長期にわたる共用に対して, 十分な信頼性を有するものでなければならない。支保構造を構成する部材としては吹付け コンクリート,ロックボルト,鋼アーチ支保鋼及び覆工などがあり,各々の特徴をいかし て,地山条件に最も適合するように単独または組み合わせて用いる(表 4.4-2~表 4.4-3, 図 4.4-1参照)。

トンネルの内空の保持は,支保構造と地山とが一体になって達成されるので常に地山と支 保構造との相互作用を考える必要がある。また,トンネルの掘削に伴う地山の挙動は地山の 強度,節理などの不連続面の状態,地山の物性とトンネルを掘削する場所の応力状態によっ

て異なり,トンネルの施工順序や形状によっても複雑に変化する。トンネルの支保構造は各 支保工部材を地山の挙動を勘案し,最も効果的な安定効果が得られるよう組み合わせ,施工 順序や施工時期も含めて総合的に地山条件に適合したものとすることが一般的である。

表 4.4-1 吹付けコンクリートの作用効果					
吹付けコンクリートの作用効果	概念図				
岩盤との付着力, せん断抵抗のよる支保効果 吹付けコンクリートと岩盤の付着力により, 吹付けコンクリートに作用する外力 を地山に分散させ,またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え,キープ ロックを保持し抜け落ちを防止し, グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成さ せる。割れ目の多い硬岩等に作用効果が大きい。	T T				
内圧効果,リング閉合効果 比較的厚い吹付けコンクリートが連続した1個の部材として地山を支持すること により,地山の変形を拘束して地山に支保力(内圧)を与え,地山を三軸応力状態 に近い状態に保持して地山の応力解放を抑制する。また,早期にインバートを敷設 して断面を仮閉合することにより,支保効果がさらに発揮される。	NT. TN				
外力の配分効果 鋼アーチ支保工,あるいはロックボルトに土圧を伝達する部分として挙動する。	and the second s				
弱層の補強効果 地山の凹みを埋め,弱層をまたいで接着することにより,応力集中を防ぎ,弱層 を補強する効果					
被覆効果 掘削後,早期に壁面を被覆するため,周辺地山の風化防止,止水,微粒子の流出 防止等の効果がある。					
表 4.4-2 ロックボルトの作用効果					

ロックボルトの作用効果	概念図
縫付け効果(吊下げ効果) 発破などで緩んだ岩塊を緩んでいない地山に固定し,落下を防止しようとす るもので,最も単純な効果である。割れ目の発達した地山において,吹付けコ ンクリートと併用すると効果がある。	
はり形成効果 トンネル周辺の層をなしている地山は,層理面で分離して重ねばりとして挙 動するが,ロックボルトによって層間を締め付けると,層理間でのせん断応力 の伝達が可能となり,合成ばりとして挙動させる効果が生じる。	
内圧効果 ロックボルトの引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用する。 これにより,トンネル近傍の地山を三軸応力状態に保つことが可能となる。こ れは,圧縮試験時における拘束圧の増大と同じような意味を持ち,地山の強度 あるいは耐荷強度の低下を防ぐ作用となる。	
アーチ形成効果 ロックボルトによる内圧効果のため,耐荷能力の高まったトンネル周辺の地 山は,一様に変形することによって地山アーチを形成する。	



図 4.4-1 鋼製支保工の各種形状

(2) 防水工・排水工

覆工に水密なコンクリートを用いても,打ち継ぎ目や亀裂からの漏水を完全に止めることは不可能である。覆工に漏れが生じると,凍害による覆工の劣化,冬季のつららの発生,架線・通信・電気などの内部設備の機能と耐久性の低下など多くの問題が発生する。これらの障害を防止するためには適切な防水工を行わなければならない。NATMでは吹付けコンクリートを下地として連続した全面防水工が施工でき,覆工も全面で打設することから,優れた漏水防止効果が得られる。さらに防水工は前述した覆工のひび割れ防止効果も期待することができる。



図 4.4-2 防・排水工の呼称

(3) 補助工法

亀裂の多い地山,破砕された地山,膨張性軟岩地山や土砂地山では,天端部の肌落ち・ 崩落,鏡部の崩壊が発生し,掘削後切羽の安定が充分確保できない場合がある。このよう な状況では施工の安全性が損なわれ,滞水土砂地山や被圧水を有する地山では,流砂現象 や突発的な出水により地山の崩壊や土砂流出が起こる可能性が高い。地山からの湧水は, 少量であっても吹付けコンクリートの付着性を低下させるため,吹付けコンクリートを洗 い流したり,剥離させたり,リバウンド量・急結材混入率が多くなる等施工を困難にする 原因となる。さらに,ロックボルトの定着力も湧水により低下するため,支保効果が低減 することになる。このように,NATMでは湧水が施工に及ぼす影響が大きい。したがっ て,地山の状況や湧水によって施工が困難になる場合や支保効果が低減する場合には,施 工を安全かつスムーズにそして効率的に進めるために適切な補助工法を併用することが必 要となる(図 4.4-3参照)。





(4) 処分坑道の支保工の現実的な仕様の例示

前項(1)~(3)で支保構造,防排水工,補助工法の特徴を整理したが,ここでは, 処分坑道の支保工の現実的な仕様を例示するにあたり,日本道路公団による地山等級に対応した支保構造の範囲,2車線道路トンネルの標準支保パターン,などを参考にした (「日本道路公団設計指針」より)。

なお,処分坑道の仕様は「地層処分研究開発第2次とりまとめ」に順じた。

()結晶質岩,竪置き方式の例

支保構造として吹付けコンクリートとロックボルトを考慮する。



図 4.4-4 現実的な支保構造の例 (結晶質岩, 竪置き方式)

() 堆積岩,竪置き方式の例

支保工として, 吹付けコンクリート, 金網, ロックボルト, 鋼アーチ支保, 覆工コンク リート, インバートコンクリートを考慮する。



図4.4-5 現実的な支保構造の例(堆積岩,竪置き方式)

4.4.2 支保工撤去の現実的な可能性について

(1) 支保工撤去に関わる検討課題

支保構造として用いた覆エコンクリートや鋼材は,長期的にはセメント成分の溶出や鋼 製材料の腐食により,処分場の安全性能に対して悪影響を及ぼす可能性が考えられるため, 埋戻し時には撤去するのが望ましいと考えられている。しかし,支保構造は,坑道掘削後 の周辺岩盤の変形や応力の流れの変化に伴い,岩盤からの荷重を周辺岩盤と分担して受け 持つこと,数十年後の処分場閉鎖段階では,緩み域に相当する岩荷重が全て支保構造に作 用している可能性があることから,撤去しようとすれば崩落や肌落ちの発生などのきわめ て厳しい状況が予想される。

そのため,処分場における支保工撤去の検討にあたっては,まず,処分場の総合的な安 全性を担保する上で,支保工撤去が本当に必要であるかどうかについて性能評価の観点か ら検討することが重要である。その検討の中で,撤去する場合にはすべてを撤去すべきな のか,あるいは部分的(例えばプラグ部のみ)に撤去すればよいのか,コンクリートは撤

去し鋼材は残した場合はどうか,処分坑道はすべて撤去するが他の坑道は撤去しなくても よいか,撤去する必要のある範囲は限定できないかなど,十分な検討がなされなければな らない。その上で支保工撤去が必要であると判断された場合には,撤去工法の検討に加え て,撤去にかかる工程・費用の課題に対して,撤去を考えなくてもよい処分場の考え方・ 設計(新しい覆工材料の開発・採用)が可能かどうかの検討も重要となる。

ここではまず,少なくともプラグ設置箇所については,その止水性能確保の観点から支 保工の撤去が必要と判断されることを考慮し,支保工撤去の事例収集を中心に検討するこ ととした。

(2) 支保工撤去工事の事例

JICST のキーワード検索により,類似工事の事例を収集した。その結果を表 4.4-3に 示す。支保工を撤去した事例は少なく,さらに周辺岩盤に損傷を与えないように考慮した 工法となると,非常に限定される。プラグ設置部の覆工撤去技術としては,その工法とし て,ウォータージェット,もしくはウォータージェットに研磨剤を混入した工法(アブレ イシブジェット)などが考えられる。

No.	工事名	トンネ ル名	場所	工期	発注者	施 工	工事概要(撤去 の目的)	撤去した支保部 材	撤去工法
1	青函トンネ ル(竜飛) 定点 1	青函ト ンネル	青森県東津 軽郡	1984. 5 ~ 1985. 8	日本鉄道建設公団	鹿島	定点(トンネル 内で列車火災が 生じた場合の避 難気停車よしての 緊急停車あたり, 本坑の既設コン クリートを取り 壊して分岐坑を 設ける。	覆エコンクリー ト	アブレイシブ マット(ウォー タジェットの噴 流に合いり利を 混らりコンクリ ートの縁切り 分割発破 or ラバ ースプリッター による取り壊し
2	安房トンネ ル 中ノ湯 工区工事	安房ト ンネル	長野県南安 曇郡安曇村 中ノ湯	1996. 9 ~ 1997.12	建設省	鹿島	坑口の迂回 (本設 トンネル切換えの ための) 分岐工事		
3	九州自動車 道 肥後トンネ ル南工事	肥後ト ンネル	熊本県球磨 郡山江村大 字万江		日本道路 公団	熊 谷 ,間 JV	既設作業坑(1 期線の避難坑) を本坑(2期 線)に拡幅する ための工事で支 保を撤去	鋼アーチ支保, ロ ックボルト, 金 網, 鉄矢板, 木矢 板, 底盤コンクリ ート, 2次覆エコ ンクリート, 吹付 けコンクリート, U 字溝など	発破 , ブレーカ ー
4	口径 50 粍中原送水 管布設替工 事その1	中原送 水管	仙台市青葉 区八幡七丁 目地内	1993. 7 ~ 1995. 6	仙台市 水道局	鹿島	老朽化の激しい 既設トンネル (500の送水 管)を撤去し, 新送水管を布設	巻き立てコンク リート	機械による取り 壊し,補助工法 として薬液注入 (ウレタン)を 採用

表 4.4-3 支保工の撤去事例

4.5 性能評価を総合的に検証するための原位置試験計画

4.5.1 概要

(1)本検討の位置付け

高レベル廃棄物の地層処分は時系列的に次の順に進められる。

処分予定地の選定

処分場サイトの特性調査・処分技術の実証 処分場の設計・安全審査 処分場の建設・操業・埋戻し 処分場の閉鎖

これらの内で が地下の作業になり,実際にこれらを実施するまえにその方法の妥当性 を確認しておく必要がある。 のうち建設(掘削)については,これまでに多数の類似工事 が経験されているが,操業・埋戻しについては,実績が見当たらない。さらに埋戻しにつ いては,技術の適用性が処分サイトの地質条件に支配されるため,処分サイトとして可能 性のある地質環境に対し,埋戻し技術の適用性を示す必要がある。

(2) 処分場の安全確保における埋戻しの位置付け

掘削された立坑・坑道をそのまま放置しておく場合,以下の懸念がある。

バリア機能に有意な影響を及ぼす可能性がある。

地圧により,立坑・坑道の力学的安全性が減少する。

立坑・坑道が核種の卓越移行経路になる。

地下施設と生物圏を直結する通路になり,不用意に人間が接近する可能性がある。 このため,処分場の安全性を確保するうえで,埋戻し部を適切に処置しておくことは重 要である。処分場の安全性に影響する可能性のある重要事象としては次の2ケースが想 定される。

アクセス立坑を通じて地上へ核種が移行するケース

坑道から断層破砕帯を通して地上へ核種が移行するケース

これらに対する対応の基本的な考え方を整理すると以下のようになる。

坑道またはアクセス立坑において,核種移行遅延性能が周辺岩盤と同等以上であれば, 問題はない。

核種移行遅延性能が周辺岩盤より劣る場合,核種がアクセス立坑または断層破砕帯を通じて地上へ移行するケースに対し,処分場の安全性を確認する必要がある。

4.5.2 技術開発項目

シーリングシステムは,地層処分システムの性能を支配する重要な構成要素であるが,ま だ具体的な仕様が確定されていない。仕様・施工法を確定するためには,以下の開発が必要 である。

掘削影響領域の調査・評価技術の開発

要素技術の開発

設計手法の開発

性能評価手法の開発

さらに,開発された技術は原位置で実証する必要がある。

わが国の高レベル廃棄物処分のサイトはまだ決まっておらず,候補地の地質として結晶質 岩と堆積岩が挙げられている。そのため,これらの地質に対してシーリングシステムを確立 しておく必要がある。現在,結晶質岩に対してはカナダ,マニトバ州の州都ウィニペグの北

東約 100km に位置する AECL・URL の地下 420m の坑道を利用して原位置試験(トンネル シーリング性能試験)を実施中である。一方,堆積岩に対しては,まだ世界的にも原位置試 験は実施されておらず,わが国では現在計画中の幌延深地層研究所にて実施される予定であ る。

トンネルシーリング性能試験は,結晶質岩におけるシーリングシステムを検証する目的で 開始された実規模工学試験であり,カナダのAECL,日本のサイクル機構(当時動力炉・核 燃料開発事業団)のお互いのニーズに基づき 1996 年から開始したプロジェクトである。そ の後,サイクル機構,AECL に加えてフランスから放射性廃棄物管理機関(Agence nationale pour la gestin des déchets radioacts,以下,ANDRA),アメリカから WIPP (Sandia national Laboratory がサポート)が参加している。

トンネルシーリング性能試験のうち,日本側のニーズに対応する部分として,サイクル機構がこれまで検討してきたコンセプトであるベントナイトプラグが設置されており,試験の目的を具体的に述べると以下のようになる。

結晶質岩に設置されたシーリングシステムの性能を検証する。

ベントナイトプラグを製作する技術の適用性を評価する。

施工されたベントナイトプラグおよび掘削影響領域を通過する地下水流動を評価する。 シーリングシステムの性能に影響する要因を抽出する。

4.5.3 幌延深地層研究所における原位置試験計画

幌延深地層研究所における「シーリングシステム」に関わる原位置試験は、より質の高い 成果が期待できるように、トンネルシーリング性能試験の経験とからめて計画する必要があ り、特に以下の点に注目する必要がある。

地質の相違, すなわち結晶質岩と堆積岩の相違によって異なる技術要素

上述の AECL・URL のトンネルシーリング性能試験で開発し切れなかった技術項目

具体的には,第1候補と考えられているシーリングシステム(トンネルシーリング性能試 験で設置したシステムと基本的な点は同じ)を設置し,堆積岩におけるシーリングシステム の有効性を確認すること,さらにシーリングシステムを地質条件に対応させて設計,性能評 価する手法を確立することが基本となる。シーリングシステムの設計とは,プラグの形状, 岩盤への掘り込み深さ,ベントナイトの設置方法(特に頂部),グラウト方法等を決めること であり,性能評価とは,プラグおよび掘削影響領域を通過する地下水流動を解析的に評価す ることである。これらの手法が確立されることによって,高レベル処分場サイトの地質条件 に対し,シーリングシステムの設計が可能になり,またその性能も概略評価することができ る。その結果,埋戻し部の性能も考慮した,処分場の安全性を評価できることになる。

(1) 掘削影響領域の調査・評価

埋戻し部の核種移行遅延性能は周辺の掘削影響領域の水理特性に支配されるため,掘削 影響領域の把握はシーリングの設計をする上においても,また,埋戻し部のシーリング性 能を予測する上においても重要である。トンネルシーリング性能試験では掘削影響領域の 幅,分布,水理特性を把握するため,以下の6つの計測が実施された。このうち,特に

が水理特性の把握を目的にしたものである。計測の結果,各項目で評価されると包

含した緩み領域はおおよそトンネル形状を一様に 0.5m大きくした形になっている。これ に対し,原位置試験で設置したベントナイトプラグは空洞壁面から 1m 周辺岩盤に掘り込 んだ形とした。

すでにシーリングシステム全体の性能は通過する地下水量から概略評価されているが, 厳密な地下水流動の評価はしきれておらず,現在,プラグおよび掘削影響領域を通過す る地下水流動の解析的評価がトレース試験と合わせて実施されている。地下水流動が精 度よく評価されたならば,その結果から,ここで実施した下記6つの計測のそれぞれの URLの地質に対する有効性の議論が可能になる。

幌延においては,地質および岩盤特性が異なることから,トンネルシーリング性能試 験での検討結果をそのまま適用することはできず,あらためてトンネルシーリング性能 試験で実施した下記計測と同じ計測を実施し幌延の地質への適用性を評価することが望 ましい。これによって,幌延の坑道掘削における緩み領域の概要が把握でき,また個々 の計測に対してもトンネルシーリング性能試験での評価と比較することが可能になる。 これらから,結晶質岩と堆積岩に対する一般的な掘削影響領域の調査・評価方法がまと まるものと考える。

トンネル掘削に伴うマイクロサイスミックの計測

ポアホール MS17 から MS26 での掘削により生じたマイクロサイスミック(0.1-10kHz の幅)をとらえる。計測範囲は 100,000m³の範囲内。(結果は資料 - 2 参照)

ベントナイトプラグ周辺の AEl から AE4 において Acoustic Emission を計測。計測範囲 はマイクロサイスミックより小さく 1,000m³ であるが, 50-250kHZ のより周波数の高い波 をとらえることができる。

トンネル周辺岩盤内の弾性波検層

ベントナイトプラグ,コンクリートプラグ付近に放射状に各々6本ずつ5mの検層用の ボアホール(MVP Array)を掘削。それぞれにおいて Micro-Velocity Probe(Keele 大学 が開発)を用い弾性波検層を測定。

トンネル壁面からの屈折波探査

トンネル壁面から,ベントナイトプラグ予定位置を横切る7測線において弾性波屈折 波探査を実施。トンネル周辺の弾性波速度の低下傍域の把握。

トンネル周辺の弾性波トモグラフィー探査

ベントナイトプラグ周辺の2断面においてP波S波の弾性波トモグラフィーを実施。 トンネル周辺岩盤内の間隙水圧の測定

ポアホール HGTI から HGT9 でのパッカーシステムによる測定。空洞近傍の 1m区間 では EDA パッカー (AECL が開発)を用い,最小で 10cm の区間の間隙水圧を測定。

トンネル壁面近傍の岩盤内の透水係数の計測

トンネル壁面近傍(最短で壁面から 10cm)の岩盤内の透水係数を, Micro-Velocity - Probe で計測したものと同じボアホールを使って計測。ANDRA が開発した SEPPI Probe が用いられた。

(2) 試験トンネルの形状

日本においてトンネルシーリング性能試験のような極端な偏圧のある地圧下での処分 場建設は考えにくいが,地下大深部ではこのような地圧が生じる可能性も否定はできな い。その時,掘削による周りの岩盤の損傷を少なくする方法の一つとして,トンネルシ ーリング性能試験で検討されているようなトンネル断面形状を楕円にすることも考えら れる。

(3) ベントナイトプラグの形状

トンネル形状に対し,どれだけ岩盤中にプラグの切り込みを作るかがポイントであり, 上述の掘削影響領域の評価によって決定することになるが,幌延の岩盤の場合,掘削影 響領域はトンネルシーリング性能試験の場合より大きくなる可能性が高く,2~3m 程度 の岩盤への掘り込みが必要と予想される。その場合,プラグの設置にあたり,コンクリ ート支保工の撤去,岩盤中にプラグを切り込ませるための岩盤掘削方法等の検討が必要 である。

(4) ベントナイトプラグの製作・施工

トンネルシーリング性能試験ではベントナイトプラグを施工するために,300~400個/ 日の能率で合計 9000 個のベントナイトブロックを製造した。ベントナイトブロックは 80×50×200mm の直方体状で,その仕様は,ベントナイト配合率 Bm=70%,乾燥密度

d =1.9t/m³であり,重量は約13kgである。

この方法で作られたベントナイトプラグは満足できる低透水性を有していたが,頂部に おいて締め固めが不十分な部分があり,ベントナイトが膨潤するまでは,この部分が地下 水の卓越移行経路になってしまった。実際の処分においては,想定される導水勾配は小さ く,また膨潤に必要な時間も十分あることから上記問題点は生じないと予想されるが,頂 部のベントナイトの施工方法を改良することが望ましい。

(5) ベントナイトグラウト

シーリングシステムの性能において掘削影響領域の透水性が重要であり,トンネルシ ーリング性能試験においても,このことが明らかになった。

ベントナイトの開発については, グラウト自体の性能向上とシ-リングシステムへの 適用方法の検討が必要である。前者については, グラウト材料の開発と注入方法の開発 がポイントとなる。後者については, 改良を必要とする掘削影響領域の所定の場所に適 切に注入できる技術の開発が重要である。ここでは後者について述べることとする。

トンネルシーリング性能試験で適用した方法, すなわち注入孔がトンネルから離れる 方向にレイアウトした方法では, トンネル壁面のごく近傍部の透水性は改良できないと いう点で不十分である。この問題点を改良し, プラグ周辺領域を効率的にかつ確実に改 良する方法として,図4.5-2に示す注入パターン1と注入パターン2の組み合わせを構 築する。

注入パターン1はプラグに対し坑道軸から離れる方向へ削孔した注入孔に対して注入 を行うのに対し,注入パターン2はプラグに対し坑道軸に近づく方向へ削孔した注入孔

に対して注入を行う。注入パターン1は拡幅部の鉛直面から注入を行うもので,前章の 適用試験で実施した注入レイアウトと同じである。注入パターン2は坑道埋め戻しの順 序により2通りの方法が想定される。注入パターン2-1はプラグ設置後,両側からの アクセスが可能な場合での注入方法で,注入パターン2-2は片側から埋め戻しが進ん できて,片側の坑道への埋め戻しが完了している場合の注入方法である。注入パターン 2-1は坑道からプラグ拡幅部へ注入孔を削孔し坑道から注入を行うもので,注入孔を プラグまで貫通させることにより水みちになる可能性が高いプラグと岩盤の境界部分へ の注入も可能になる。注入パターン2-2はアクセス可能な側への注入は注入パターン 2-1と同じであるが,既に埋め戻しが完了している側へは,拡幅部鉛直面から埋め戻 し材により充填されている坑道へ向けて注入を行う。注入孔を坑道まで貫通させること により埋め戻し部と岩盤との境界部分への注入も可能になる。これらのグラウトの注入 時には,適用試験で実施したグラウトスラリーを低濃度から高濃度へ配合切り替える注 入方法を用い,注入後は注入孔を締め固めベントナイトにより埋め戻すこととする。

プラグ周辺部へのグラウトは,上記の注入パターン1と注入パターン2を交互に組み 合わせることにより隙間無く改良できるものと考える。注入孔の本数については実際の 岩盤の状況により決定されるが,一例としてプラグ片側から注入する場合の注入パター ン1と注入パターン2の場合を示す。

(6) ベントナイトプラグ部の拡幅方法

トンネルシーリング性能試験では拡幅部の岩盤の凹凸に対し,ベントナイトの吹き付けを用いて平滑にした上で,ベントナイトブロックを設置した。その結果,吹き付け部分が弱点になったことはすでに述べた。この問題に対し,岩盤が理想的に平らに掘削できたならば,ベントナイト吹き付けをしなくてもベントナイトブロックをうまく整形することにより岩盤とベントナイトブロックの隙間をなくすことができる。日本の岩盤を想定した場合,亀裂も多く,きれいな掘削面を望むことは現状では困難かも知れない。しかし,岩盤緩み域を作らずに岩盤面を平らに掘削する手法としてはウォータージェット等の適用が考えられ,日本で同様のKeyの拡幅を行うときは新たな掘削技術の開発が望まれる。

(7) 一般部埋戻し

一般部の埋戻しは,これまでに試験の実績も蓄積されていることから,それらの中か ら最も高品質を確保できそうでかつ合理的な方法を選択するのが望ましい。その上で, 選ばれた方法をプラグの性能試験とは別の場所で検証するのがよいと考えられる。この 視点で現在最も合理的と考えているのは,SKBが実施した「Vibratory Plate Compactor による締め固め」である。試験において留意する項目は,以下のとおりで ある。

想定している密度が一様に得られること 隙間部も所定の密度に締め固められること



<u>注入パターン2-1</u>



<u>注入パターン1+注入パターン2</u>



<u>注入パターン2-2</u>





入孔

図 4.5-2 注入パターン案 (2)

図 4.5-1 注入パターン案 (1)

5.おわりに

本年度の研究では,カナダAECLにおけるトンネルシーリング性能試験で昨年度までに 実施した 4MPa までの注水圧の試験に引続き,加熱の影響下における性能に関する試験を 行ったことから,取得されるデータおよびトレーサー試験結果のデータの整理・解釈, トレーサー結果の数値解析に関わる技術的検討,評価,シーリングシステム性能評価手段 構築のための情報整理,を行った。