

高レベル放射性廃棄物の地層処分における  
人工バリア性能等の性能保証に関する研究の  
進め方と反映先（その2）

（研究報告）

2003年5月

核燃料サイクル開発機構  
東 海 事 業 所

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 reproduction 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

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

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア性能等の  
性能保証に関する研究の進め方と反映先（その2）  
(研究報告)

杉田 裕\*, 栗原雄二\*\*, 川上 進\*, 神徳 敬\*, 油井三和\*

要　旨

国が策定する安全基準・指針等に資するため、今後の研究開発等により得られる成果がどのように反映されるかを明確にするための検討を行った。ここでは、処分場における長期的安全性の観点から人工バリア等の処分施設を構成する各要素のうち、埋め戻し、プラグ、坑道、処分孔等、において性能を保証すべき項目(案)を抽出し、これらの項目について具体的にどのように性能保証するかの(案)を示した。さらに、これらの性能保証方法(案)について現状の取り組み状況（第2次取りまとめ）を踏まえて、今後の取り組みが必要と考えられる課題を抽出した。

---

\* 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

\*\* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

Studies on the performance guarantee for the Engineered Barrier System  
On geological disposal of High-level radioactive waste (Vol. 2)  
( Research Document )

Yutaka SUGITA\*, Yuji KURIHARA\*\*, Susumu KAWAKAMI\*,  
Takashi JINTOKU\* and Mikazu YUI\*

Abstract

In order to contribute to the safety standards and guidelines upon which a governmental administration decide, examination for clarifying how to reflect the result obtained by future R&D was performed. From a view point of long-term safety on geological disposal, the items which should guarantee the performance of each element which constitutes disposal institutions (by this report, they are the backfill, the plug, the tunnel, and the pit) were extracted, and it was shown what a performance guarantee is concretely offered about these items. Furthermore, based on H12 report as a situation of present R&D for a method of a performance guarantee, the subjects considered that a future R&D is required were extracted.

- 
- \* Barrier performance group, Waste isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works
  - \*\* Repository system analysis group, Waste isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

## 目 次

1 はじめに	1
1.1 目的	1
1.2 人工バリア等の性能保証項目（案）の抽出および整理	1
2 埋め戻し材・プラグ	3
2.1 埋め戻し材	3
2.2 プラグ	8
3 アクセス・連絡・主要・処分の各坑道	11
4 処分孔等	15
5 おわりに	20
参考文献	21

## 付録

付-1 割れ目帯の区分	付-1(1)
付-2 時間依存性変形を考慮した応力変形解析理論解	付-2(1)
付-3 低アルカリ性コンクリートの特性	付-3(1)
付-4 低アルカリ性コンクリートの施工実績	付-4(1)
付-5 参考文献	付-5(1)

## 表 目 次

表・2.1 埋め戻し材の性能保証項目(案) ······	4
表・2.2 埋め戻し材の設計要件と課題の整理表 ······	5
表・2.3 プラグの性能保証項目(案) ······	9
表・2.4 プラグの設計要件と課題の整理表 ······	10
表・3.1 坑道の性能保証項目(案) ······	12
表・3.2 坑道の設計要件と課題の整理表 ······	13
表・4.1 処分孔等の性能保証項目(案) ······	16
表・4.2 処分孔等の設計要件と課題の整理表 ······	17
表・付 1 割れ目帯の連続性の分類 ······	付・1(1)
表・付 2 低アルカリ性コンクリートの特性比較 ······	付・3(1)

## 図 目 次

図・1.1 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全基準・指針等に関するスケジュール ······	2
図・2.1 閉鎖の概念 ······	3
図・3.1 処分場における坑道 ······	11
図・4.1 処分孔および処分坑道 ······	15
図・付1 時間依存性変形模式図 ······	付・2(1)
図・付2 コンクリートの搬送ルート ······	付・4(1)
図・付3 コンクリートの打設 ······	付・4(2)
図・付4 コンクリートプラグー岩盤間の処置状況 ······	付・4(2)
図・付5 実規模吹付け実験 ······	付・4(2)
図・付6 実規模セグメントの製作 ······	付・4(2)

## 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分については、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（官報, 2000a）」が成立し、これに基づき実施機関として「原子力発電環境整備機構」が設立された。

処分に係る安全規制に関しては、その基本的考え方が「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）（原子力安全委員会, 2000）」として公表され、ここでは、実施主体が行う処分事業の進展に合わせて安全の確認が適切に行われるよう、安全審査、安全確認等に係る指針・技術基準を策定していくこととし、安全基準・指針等の策定に関するスケジュールが示されている（図-1.1）。

これらの安全規制に係わる指針・基準を策定に反映するための技術情報は、安全規制・基準の策定スケジュールに合わせて整備しておく必要があり、既存のものおよび今後の研究開発により取得する必要があるものもある。「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（官報, 2000b）」では、国および関係機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発を積極的に進めていくことを求めている。

このような背景を受けて、川上ら（2003）は安全基準・指針(案)の想定と性能保証項目(案)との関連性の検討を行い、さらに、処分場を構成する要素の中からオーバーパックおよび緩衝材を抽出し、具体的な性能保証項目(案)の抽出および整理を行った。

### 1.1 目的

処分場を構成する要素は、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔等がある。川上ら（2003）はオーバーパックおよび緩衝材に関する具体的な性能保証項目(案)の抽出および整理を行っているが、これらの項目の抽出および整理は、それぞれの要素において、

- 1) 何を保証すべきか
- 2) それをどう保証（評価）するか
- 3) 評価に当たり今後の課題は何か

を想定し検討することにより、これまで個々に行われていた研究開発が安全基準・指針等に対してどのような位置づけにあるかをより明確にすることを目的とした。そこで、本検討においては、オーバーパックおよび緩衝材以外の埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔等に対して同様の性能保証項目の抽出および整理を行うことを目的とする。

### 1.2 人工バリア等の性能保証項目(案)の抽出および整理

埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔等を対象とした性能保証項目(案)の抽出および整理を行う。さらに、この項目をどのように保証するのか、そのために必要な具体的な評価方法・評価に必要なデータベース等を抽出・整理する。この具体的な内容に対して現状での取り組み状況を整理することにより、性能保証項目(案)に対して今後取り組むべき課題が整理されるものと考える。

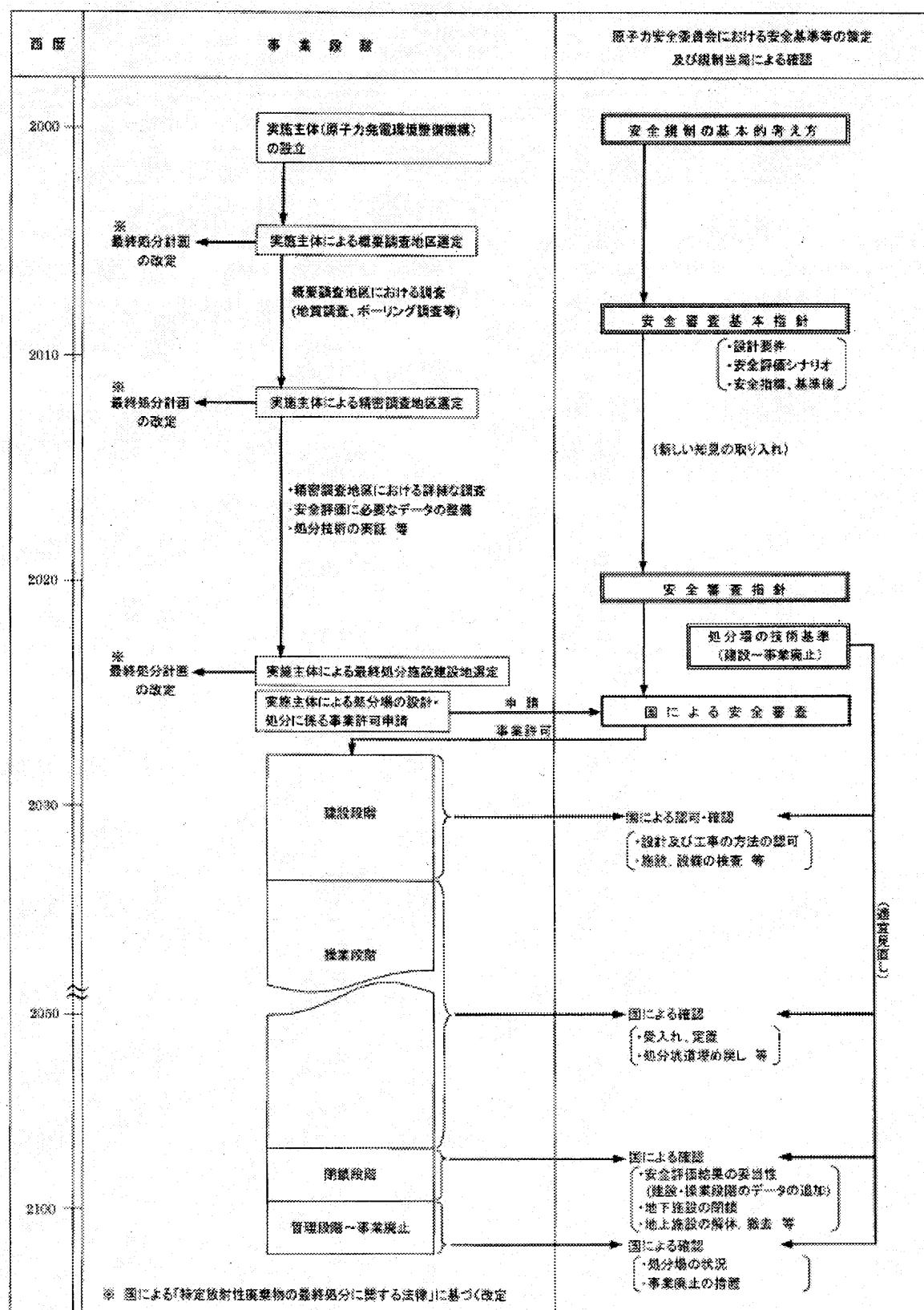


図-1.1 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全基準・指針等に関するスケジュール  
(原子力安全委員会, 2000)

## 2 埋め戻し材・プラグ

図-2.1 に示すように、埋め戻し材は、坑道そのものを埋め戻すものであり、プラグは、処分坑道の両端部に設置する強度プラグ（コンクリートプラグ）、断層破碎帯と交差する坑道の前後等に設置する止水プラグ（粘土プラグ）がある（サイクル機構、1999）。埋め戻し材およびプラグは、処分場閉鎖に関わる重要な構成要素である。

なお、グラウトについては、建設に伴う湧水対策としてのグラウトと、閉鎖技術としてのグラウトがあるが、後者については長期耐久性が求められることから粘土グラウトが対象となる。しかし、粘土グラウトは材料自体が非固結性であることから効果の持続性が保証されておらず、現段階でグラウトに積極的な機能、すなわち性能保証項目(案)を設定することは適切ではないと判断し、本資料の検討対象から除外した。

以下に、埋め戻し材、プラグの性能保証に関する検討結果を示す。

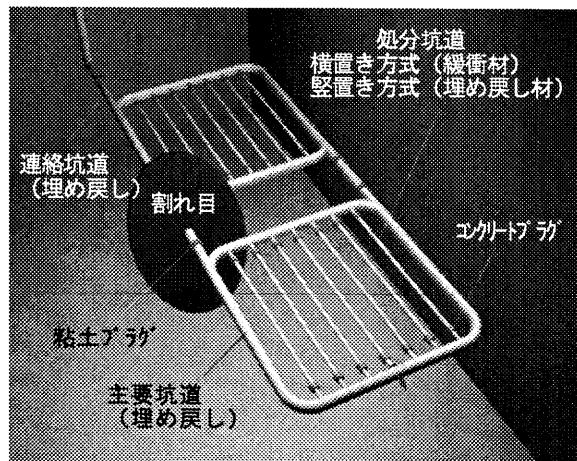


図-2.1 閉鎖の概念（サイクル機構、1999）

### 2.1 埋め戻し材

埋め戻し材は、地下施設に人工バリアを定置した後に残置された坑道（アクセス坑道、主要坑道、連絡坑道、処分坑道）を埋め戻すものであり、骨材（掘削ずり等）と粘土材料を混合したものである。埋め戻し材の性能保証に関わる検討において考慮する期間は、埋め戻し材の飽和後の挙動である。埋め戻し材に関わる性能保証項目(案)を表-2.1に示す。また、今回検討した埋め戻し材に関する整理表を表-2.2に示す。

表-2.1 に示すように、埋め戻し材の性能保証に関わる項目(案)は、処分場における時間軸としては飽和後に関わるものである。役割は大きく、「核種移行のクリティカルパスにならない」こと、「人工バリアの性能発揮に悪影響を与えない」ことである。基準のポイントは、これらが細分化され、「処分坑道の変形による緩み域の増加を抑えるため、必要な剛性を持つこと」、「坑道内の透水性を要求レベル以下に抑えること」、「緩衝材の膨潤圧に対して著しく変形せず、膨出を抑えること、または変形評価が可能のこと（縦置き）」、「緩衝材を劣化させる要因とならないこと」となる。処分坑道の剛性に関しては、「劣化支保工の影響」や「地下水流れによる流出」についてもポイントとなる。

以上のような基準のポイントに対し、設計の要件が表-2.2 に示すように設定できる。設計

の要件は、「隙間をふさぐ機能を有するように十分な量のベントナイトを混合した埋め戻し材を用いること」、「十分な密度が得られる充填手法・技術を適用すること」、「埋め戻し部分の透水性を評価すること」、「低透水性を確保するため、ベントナイトを混合すること」、「十分な充填密度、圧縮剛性を有するように設定すること」および「人工バリアの性能評価に悪影響を与えるような埋め戻し材自身、あるいは骨材を使用・混合しないこと」となる。

設計要件の保証の方法としてその内容を表-2.2 に示す。ここで、設計要件の「人工バリアの性能発揮に悪影響を与えるような埋め戻し材自身、あるいは骨材を使用・混合しないこと」に関しては、ここでの検討では、ベントナイトおよび掘削ずりを基本材料としており、設計要件にあるような材料を埋め戻し材として用いないこととしているため、具体的な評価内容は空欄（評価の必要は無い）となっている。

埋め戻し材の透水性の評価に関しては、表-2.2 の評価内容に示した評価方法のほかに、理論解による時間依存性変形の評価による方法も可能であると考えられる（付-2 参照）。

埋め戻しに関しては、処分場の調査段階から掘削される地表からの「試錐孔」の埋め戻しについても検討が必要である。「試錐孔」は処分場の概要調査地区の選定段階から行われる地質調査のために複数のものが配置されることとなり、調査内容に応じてその内部状況も変わってくる。試錐孔の埋め戻しは坑道の埋め戻しと異なり、空間的な余裕が少ないとから材料の選択、試錐孔内への投入、効果の確認といった手法の確立が必要である。現在、数十 m の試錐孔の埋め戻しは原位置での試験において低透水性材料の投入が可能であることが確認されているが（Blümling, 1997），今後、1000m 程度までの試錐孔に適用する埋め戻し技術の確立が必要である。「試錐孔」に関してここでは性能保証項目の選定、設計要件と課題の整理の検討対象としているが、今後、「試錐孔」の埋め戻し技術情報の整備を踏まえ、検討を行う必要があると考えられる。

表-2.1 埋め戻し材の性能保証項目(案)

処分場における時間軸	何を性能保証するか（性能保証項目）	
	役割	基準のポイント
飽和後	核種移行のクリティカルパスにならない	<p>処分坑道の変形による緩み域の増加を抑えるため、必要な剛性を持つこと。</p> <p>支保工の設置が想定される場合も考慮して、埋め戻し材に十分な膨潤性能を持たせること。</p> <p>充填された密度を長期にわたり維持し、地下水の流れで流出しないこと。</p>
	人工バリアの性能発揮に悪影響を与えない	<p>坑道内の透水性を要求レベル以下に抑えること。</p> <p>緩衝材の膨潤圧に対して著しく変形せず、膨出を抑えること、または変形評価が可能なこと（堅置き）。</p> <p>緩衝材を劣化させる要因とならないこと。</p>

表-2.2 埋め戻し材の設計要件と課題の整理表 (1/3)

時期	役割	基準のポイント	何を性能保証するか(基準の内容)	どう保証するのか(方法、評価)		現状(B) 評価内容 (評価方法、データベース) (A)	第2次取りまとめの 取り扱い	今後の課題 (C-A-B)
				設計の要件	評価方法			
飽和後	核種移行 のクリーパスによる 緩み域の増加を抑える ため、必要な剛性を持つこと。	支保工の設置が想定される場合も考慮して、埋め戻し材に十分な膨潤性を有するようトナイトナイロン混合した埋め戻し材を用いること。 <sup>*1</sup>	隙間をふさぐ機能を有するようトナイトナイロン混合した埋め戻し材を用いること。 <sup>*1</sup>	・施工方法(現場締固め方式、プロック方式等)による隙間の発生を定量的に評価し、隙間により確認する。 ・また、その挙動を解析モデル(大変形モデル等)により補完する。	-	-	・すき間が充填されることを示すため、すき間、密度、試験水(蒸留水、人工海水 <sup>*2</sup> )をバラメータとしたすき間膨脹試験(室内原位置)を実施する。 ・すき間を埋める大変形モデルを開発する。	-
飽和後	テイカル ペスになら ない	処分坑道による 緩み域の増加を抑える ため、必要な剛性を持つこと。	充填された密度を維持するため、必要十分な密度が得られる充填手法・技術を適用すること。 地下水流れで流出しないこと。	長期間、地下水の流れで流出しないこと。	流出挙動の解析ツールを適用した長期にわたる埋め戻し材流出の定量的な評価を行い、流出量を考慮した充填密度の設定を行う。	-	-	-

\*1：ベントナイトに代わる膨潤性の材料は検討対象になります  
 \*2：特に、塩強度依存性は重要である

表-2.2 埋め戻し材の設計要件と課題の整理表 (2/3)

時期	何を性能保証するか (基準の内容)	どう保証するのか (方法、解説)	設計の要件	現状 (B) (評価方法、データベース) (A)	第2次取りまとめでの 取り扱い	今後の課題 (C-A-B)
飽和後 核種移行 のクリ ティカル パスにな らない	坑道内の透水性を要求レベル 以下に抑えること。 <sup>*1</sup>	・埋め戻し施工における隙間を考慮した膨潤挙動を評価する。*2 ・支保工 (コンクリート) の化学的劣化挙動を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化を評価する。 <sup>*2</sup> ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化学的劣化挙動を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化を評価する。 <sup>*2</sup> ・上記を入力条件として、支保工部分と埋め戻し部分の力学変形挙動評価を行う。 <sup>*2</sup> ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。 <sup>*2</sup> ・岩盤の変形を条件として支保工／埋め戻し部分の力学挙動の再評価を行う。(必要に応じて繰り返す。) ・岩盤／支保工／埋め戻し部分の力学変形挙動からそれの間隙率を評価し、間隙率と透水性の関係を求め、各部位の透水性を評価する。 <sup>*2</sup>	・埋め戻し材の膨潤挙動を評価し、膨潤心力と力学特性を把握する。 ・支保工 (コンクリート) の化学的劣化挙動を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化を評価する。 <sup>*2</sup> ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化学的劣化挙動を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化を評価する。 <sup>*2</sup> ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。(必要に応じて繰り返す。) ・岩盤／支保工／埋め戻し部分の力学変形挙動からそれの間隙率を評価し、間隙率と透水性の関係を求め、各部位の透水性を評価する。 <sup>*2</sup>	低透水性を確保するためペントナイトを15wt%程度混合 ペントナイトを15wt%程度混合 ペントナイト含有率、供試体規模、試験水*4を ペントナイトとした透水試験を実施する。 <sup>*3</sup>		

<sup>\*1</sup>：母岩の透水性及び掘削影響領域の透水性を考慮する。<sup>\*2</sup>：低レベル放射性廃棄物 (TRU廃棄物) 处分技術開発 (以下、TRU研究) にて実施中 (核燃料サイクル開発機構, 2003)<sup>\*3</sup>：ペントナイトに代わる低透水性の材料は検討対象になりえる。<sup>\*4</sup>：塩強度依存性は重要である。

表-2.2 埋め戻し材の設計要件と課題の整理表（3/3）

時期	何を性能保証するか（基準の内容）	どう保証するのか（方法、解説）	設計の要件	評価内容 (評価方法、データベース) (A)	現状(B) 第2次取りまとめでの 取り扱い	今後の課題 (C-A-B)
初期 人工ペリ アの性能 影響を与 えない	緩衝材の膨潤圧に対して著しく変形せず、膨出を抑えること、または変形評価が可能なこと（堅置き）。	十分な充填密度、圧縮剛性を有することに設定すること。	緩衝材の膨潤拳動、周辺岩盤の変形拳動を考慮した緩衝材の膨出挙動解析を行う評価する。（緩衝材の評価手法に準ずる）	—	緩衝材の膨潤応力と乾燥密度の関係、埋め戻し材の弾性係数から複形解析の繰り返しで緩衝材のはらみ出しきを見積もり、その時の透水係数に影響が無いことを確認した。	・境界条件を規定する緩衝材の「膨潤特性」、「岩盤の変形特性」を評価する詳細モデルを開発し、緩衝材の特性を埋め戻し材に適用して総合的な解析評価を行う。 ・緩衝材、岩盤のクリープ特性試験を実施する。
飽和後	緩衝材に悪影響を与えない	緩衝材を劣化させる要因となるらないこと。	人工ペリアの性能発揮に悪影響を与えるようなるいは骨材*1を身使用・混合しないこと。	—	人工ペリアに有意な影響を与えないという記載のみ。	—

\*1：セメント、モルタル等を使用する場合は、十分な検討・評価が必要である

## 2.2 プラグ

プラグは、強度プラグと止水プラグに大別できる。強度プラグは、処分坑道内に定置される人工バリア（豎置き方式の場合は、処分坑道内には埋め戻し材がある（図・2.1 参照））を処分坑道内に封じ込め、人工バリアに使用される緩衝材、あるいは埋め戻し材（豎置き方式）の密度低下が発生しないようにするものである。また、強度プラグは、操業期間中は処分坑道に連結する主要坑道が物流確保のために開放されており、プラグ自体が自立し、緩衝材（豎置き方式では埋め戻し材）の膨潤圧に耐えるだけの強度を求められる。材料は強度の期待できるコンクリート材料が考えられているが、高アルカリ性環境による緩衝材や埋め戻し材への影響を定量的に評価する必要がある。また、このような化学的影響を軽減する材料として低アルカリ性コンクリート（付-3 参照）が考えられている。コンクリート材料は操業中の強度は期待できるものの、超長期においてはその機能の維持は期待できない。しかしながら、地下施設全体が埋め戻された状態では強度プラグの両側はほぼ同様の圧力状態となることが想定される事から、強度の維持は必要としない。主要坑道等の坑道も埋め戻されていることから、封じ込めは維持されると考えられる。これらは埋め戻し材の設計要件に反映されている（表・2.2 「人工バリアの性能評価に悪影響を与えない」参照）。

表・2.3 はプラグに関する性能保証項目(案)であるが、強度プラグの性能保証に関する検討において考慮する期間は、埋め戻し中、埋め戻し後である。また、強度プラグの役割は、「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）」である。

一方、止水プラグは、地下施設の坑道（たとえば処分パネルを連結する連絡坑道）が核種の移行経路になるとされる避けるべき割れ目帯（付-1 参照）と交差する場合に、その割れ目帯との交差が核種の移行経路として有意な影響を与えないように隔離するために割れ目帯の前後の坑道に設置される。また、立坑の手前やパネル間など坑道に沿った地下水の移動を遮断したい場合にも設置される。このため、止水プラグは低透水性の材料で製作され、長期において化学的にも安定な材料で、かつその性能を維持することが要求される。

以上のように、止水プラグの性能保証に関する検討において考慮する期間は、表・2.3 に示すように埋め戻し後である。その役割は、「避けるべき割れ目帯に遭遇したときに坑道に沿った地下水の移動を遮断する」ことである。

また、両プラグの基準のポイントは、表・2.3 に示すように強度プラグに関しては、埋め戻し中は「埋め戻し材、緩衝材の膨潤圧により機能を喪失しないこと」、埋め戻し後は「プラグ材料が悪い影響を与えないこと、もしくはその影響が評価されていること」である。一方、止水プラグの基準のポイントは、「プラグ部分の透水性を低くすること」、「支保工、掘削影響領域を含めたプラグ周囲の低透水性を確保すること。連續性を遮断すること」である。

以上のような基準のポイントに対し、設計の要件が表・2.4 に示すように設定できる。設計の要件は、強度プラグに関して「プラグにかかる圧力を設定し、強度評価を実施するとともに、所定の期間以上、強度を維持すること」、「コンクリートを用いた場合は、プラグ材が緩衝材や埋め戻し材に与える影響を評価すること」となる。止水プラグに関しては、「当該部分に低透水性の材料で障壁を設けること。十分な量のベントナイトを混合すること」、「切欠き部を設け岩盤と密着させること。十分な量のベントナイトを混合し、適切な密度で施工すること」となる。

表・2.3 プラグの性能保証項目(案)

処分場における時間軸	何を性能保証するか (性能保証項目)	
	役割	基準のポイント
埋め戻し中	埋め戻し材、緩衝材の膨出を押さえる (強度プラグ)	埋め戻し材、緩衝材の膨潤圧により機能を喪失しないこと。
埋め戻し後	人工バリアの性能発揮に悪影響を与えない (強度プラグ)	プラグ材料が悪い影響を与えないこと、もしくはその影響が評価されていること。
	坑道に沿った地下水の移動を遮断する (止水プラグ)	プラグ部分の透水性を低くすること。 支保工、掘削影響領域を含めたプラグ周囲の低透水性を確保すること。 連続性を遮断すること。

表-2.4 プラグの設計要件と課題の整理表

時期	役割	基準のポイント	設計の要件	どう実証するのか（方法、解説）		現状③ 第2次取りまとめでの 取り扱い	今後の課題（C-A-B）
				評価内容 (評価方法、データベース) (A)	評価内容 (評価方法、データベース) (B)		
埋め戻し材中	埋め戻し材、緩衝材の膨出を押さえる（强度プラグ）	埋め戻し材、緩衝材を喪失しないこと。	プラグにかかる圧力を設定し、強度評価を実施するごとに、所定の期間以上、強度を維持すること。	・プラグ本体そのものの強度の評価とともに、設置する岩盤条件（強度、亀裂頻度、掘削影響領域の広がり等）に基づくプラグ形状の設計・施工を包括した解析コードにより評価する。	・硬岩に關しては、AECLとの共研TSXでの試験結果により検証データを取得するとともに、評価を行いう。軟岩に關しては、幌延での試験によつて検証データを取得するとともに、評価を行う。	・コンクリートに対する剪断強度で安全率を評価。	・硬岩に關しては、AECLとの共研TSXでの試験結果により検証データを取得するとともに、評価を行いう。軟岩に關しては、幌延での試験によつて検証データを取得するとともに、評価を行う。
人工バリアの性能影響を与えない（强度プラグ）	人工バリアに悪影響を与えないこと。もしもくはその影響が評価されれていること。	コンクリートを用いた場合は、プラグ材 <sup>*1</sup> （普通コンクリート、低アルカリ性コンクリートか）と緩衝材や埋め戻し材に与える影響を評価すること。	・コンクリートを用いた場合、プラグ材料の緩衝材や埋め戻し材、処分場環境への影響評価（透水係数、地化学特性等）を、実験に基づく評価モデルにより評価する。	・コンクリートの影響が不明なため、普通ポルトランドセメントは材料として使用しないと仮定。 ・低アルカリ性コンクリートから想定される地下水のpHに対し、緩衝材の変質、オーバーパックの腐食挙動への影響を定性的に評価。 ・TSXで低アルカリ性コンクリートの施工実績。 <sup>*2</sup>	・コンクリート部分の性能評価への長期的影響の評価を行う。 ・低アルカリ性コンクリートから想定される地下水のpHに対し、緩衝材の変質、オーバーパックの腐食挙動への影響を定性的に評価。	・地下研開連、及びTRU関連で、施工性などの研究を実施する。	・地下研開連、及びTRU関連で、施工性などの研究を実施する。
埋め戻し後	坑道に沿った地下水流動を遮断する（止水プラグ）	プラグ部分の透水性を低くすること。	当該部分に低透水性の材料で隔壁を設けること。 十分な量のペントナイトを混合すること。	・透水係数の評価。 (緩衝材の透水性評価に準ずる)	TSXを例に、ペントナイトプラグのコンセプトを紹介。	・硬岩に關しては、AECLとの共研TSXでの試験結果により検証データを取得するとともに、評価を行いう。軟岩に關しては、幌延での試験によつて検証データを取得するとともに、評価を行う。	・硬岩に關しては、AECLとの共研TSXでの試験結果により検証データを取得するとともに、評価を行いう。軟岩に關しては、幌延での試験によつて検証データを取得するとともに、評価を行う。

<sup>\*1</sup>:鋼製、セラミック、岩石プラグ等もプラグの検討対象になりえる<sup>\*2</sup>:付-4参照<sup>\*3</sup>:ペントナイトに代わる低透水性の材料は検討対象になりえる

### 3 アクセス・連絡・主要・処分の各坑道

坑道には、図-3.1に示すようにアクセス坑道（立坑や斜坑）、連絡坑道、主要坑道および処分坑道がある。アクセス坑道は地上施設と処分場を結ぶものであり、連絡坑道はアクセス坑道と処分パネルや処分パネル間を連結する坑道、主要坑道は処分坑道を結ぶために処分パネルの周囲に配置される坑道、処分坑道は人工バリアを定置する坑道である。堅置き方式の場合は、処分坑道の床盤に処分孔がさらに掘削されることとなる。以下に、これら坑道の性能保証に関する検討結果を示す。ここで、対象とするのはアクセス坑道、連絡坑道、主要坑道および堅置き方式の処分坑道である。

坑道の役割、すなわち性能保証項目としては、まずは建設・操業に必要な空間の確保であり、坑道閉鎖後では、坑道および坑道周辺部分が卓越した水みちとならないこと、主としてコンクリート材料に起因する高アルカリ性環境が人工バリア、埋め戻し材および岩盤に有意な影響を与えないことがあげられる。また、地盤状態により建設時に地盤改良として使用される可能性のあるセメントグラウトに関しては、その影響を適切に判断することが困難なため、検討対象より除外した。しかし、コンクリート材料と同様にセメントグラウトの影響も懸念されることから、今後その影響について評価が必要と思われる。

なお、処分孔等の検討に関しては、4章で記述する。

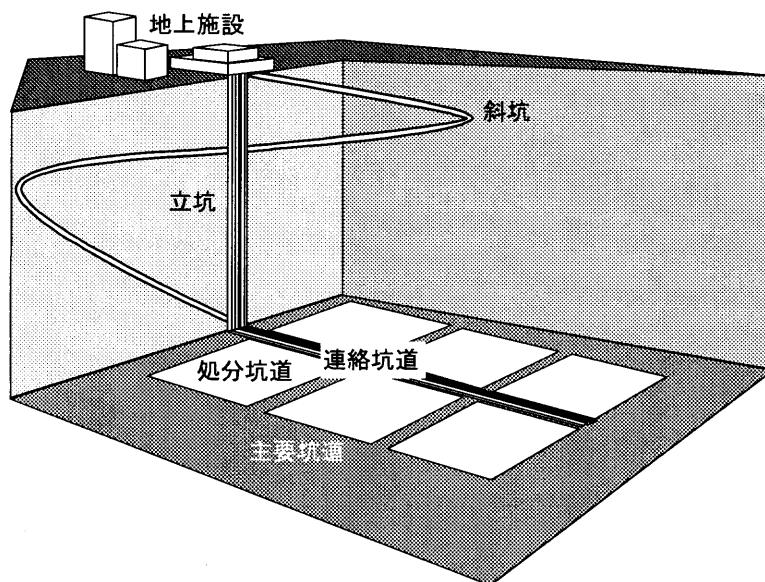


図-3.1 処分場における坑道

表-3.1に、坑道に関する性能保証項目(案)を、また、坑道に関する整理表を表-3.2に示す。表-3.1に示すように、坑道の性能保証に関わる項目は、処分場における時間軸として「建設・操業・埋め戻し」と「飽和後」である。役割は、「建設、操業、埋め戻し作業のための空間を確保する」、「坑道に沿ったルートが核種移行のクリティカルパスにならない」、「人工バリア、埋め戻し材および岩盤の性能発揮に悪影響を与えない」である。基準のポイントは、「空洞安定性が確保されること」、「緩み域の物質移行評価が可能なこと」、「支保工部分の物質移行評価が可能なこと」、「坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと」、「支保工材料が緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材および岩盤の性能に悪影響を与えないこと」、

「緩衝材の温度を制限温度以下に抑えること」である。

以上のような基準のポイントに対し、設計の要件が表-3.2 に示すように設定できる。設計の要件は、「建設・操業・埋め戻し」においては「掘削時、供用期間経過時、地震時の空洞安定性を評価すること」があげられる。「飽和後」に関しては、「岩盤損傷の少ない施工方法を採用すること」、「緩み領域の範囲と透水性を評価すること」、「支保工材料の透水性を評価すること」、「埋め戻し部分の透水性を評価すること」、「低透水性を確保するためベントナイトを混合すること」、「支保工材料が緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材および岩盤に与える影響を評価すること」、「処分坑道間隔を適切に設定すること」である。

設計要件の「処分坑道間隔を適切に設定すること」では、緩衝材の温度を制限温度以下となるように、熱解析による評価を実施して坑道間隔の設定を行うこととしている。ここで、緩衝材に対してケイ砂などの熱伝導性のよい材料を加えることにより、緩衝材としての熱伝導性を向上させ、緩衝材の温度上昇を抑制する方法も考えられる。ただし、緩衝材の整理（川上ほか、2003）では、性能保証項目に対して温度環境に対する性能劣化等の評価は必要としているが、制限温度に係わる性能保証項目は無い。制限温度に関しては、少なくとも人工バリアを含めたニアフィールドにおける評価が必要なことから、坑道での記載とした。

表-3.1 坑道の性能保証項目(案)

処分場における時間軸	何を性能保証するか（性能保証項目）	
	役割	基準のポイント
建設、操業、埋め戻し	建設、操業、埋め戻し作業のための空間を確保する	空洞安定性が確保されること。
飽和後	坑道に沿ったルートが核種移行のクリティカルパスにならない	緩み域の物質移行評価が可能なこと。 支保工部分の物質移行評価が可能なこと。 坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと
	人工バリア、埋め戻し材および岩盤の性能発揮に悪影響を与えない	支保工材料が緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材および岩盤の性能に悪影響を与えないこと。 緩衝材の温度を制限温度以下に抑えること。

表-3.2 坑道の設計要件と課題の整理表 (1/2)

時期	何を性能保証するか(基準の内容)	どう保証するのか(方法、解説)		現状(B) 第2次取りまとめの 取り扱い	今後の課題(C=A-B)
		評価の要件	評価方法、データベース(A)		
建設、操業、埋め戻し作業、坑道内の空間を確保する	建設、操業、埋め戻し作業、坑道内の空間を確保すること。	掘削時、供用期間経過時、地震時の空洞安定性を評価すること。	・弾性、弾塑性、粘弹性、弾粘塑性等、地質特性とフェーズを考慮したモデルにより評価する。 ・地震時は静的手法または動的手法により評価する。	・掘削時は弾塑性モデルにて評価を行い、応答震度法にて評価している。 ・供用期間経過時の空洞安定性は評価していない。	・供用期間中の岩盤の時間依存性挙動評価を行う。 ・供用期間中の岩盤の時間依存性挙動評価を行う。
坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	岩盤損傷の少ない施工方法を採用する。	・岩盤損傷に關する施工方法を比較評価する。	・制御発破工法や機械掘削工法を探用していい。 ・岩盤損傷に關する施工方法の定量的比較は行っていない。	施工方法の違いによる岩盤損傷の定量的評価を行う。
坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	緩み領域の範囲と透水性を評価すること。	・埋め戻し施工における隙間を考慮した膨脹実験および大変形モードル等による解析により埋め戻し材の膨脹挙動を把握する。 ・支保工(コンクリート)の化学的劣化挙動を評価する。 ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化學特性変化を評価する。 ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化学的劣化挙動を評価する。 ・上記を入力条件として支保工部分と埋め戻し部分の力学変形挙動を評価する。 ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。	・既往の知見により緩み領域の範囲と透水性を設定し、通過水量換算で評価。経路としてモデル化はしていない。 ・時間的変化の影響は未実施	・埋め戻し施工における隙間を考慮した膨脹実験による解析により、膨潤率を把握する。 ・支保工(コンクリート)の化学的劣化挙動を評価する。 ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化學特性変化を評価する。 ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の化学的劣化挙動を評価する。 ・上記を入力条件として支保工部分と埋め戻し部分の力学変形挙動を評価する。 ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析をして支保工／埋め戻し部分の力学変形挙動の再評価を行う。 ・岩盤の変形を条件として支保工／埋め戻し部分の力学挙動の再評価を行う。(必要に応じて繰り返す。) ・岩盤／支保工／埋め戻し部分の力学変形挙動からそれぞれの関係を求める。各部位の透水性を評価する。 ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。
坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	坑道内埋め戻し部分の物質移行評価が可能なこと。	低透水性を確保すること。	支保工材料の透水性を評価すること。	・通過水量への影響は評価していない。 ・通過水量への影響は評価していない。	・通過水量への影響は評価していない。 ・通過水量への影響は評価していない。 ・低透水性を確保すること。 ・ペントナイトを15wt%程度混合 ・透水係数を小さくする。

\*1 : TRU研究にて実施中 (核燃料サイクル開発機構, 2003)

\*2 : ペントナイトに代わる低透水性の材料は検討対象になりえる

表-3.2 坑道の設計要件と課題の整理表 (2/2)

時期	何を性能保証するか (基準の内容)	基準のポイント	どう保証するのか (方法、解説)	現状 (B)		今後の課題 (C=A-B)
				設計の要件	評価方法、データベース) (A)	
飽和後 人工パリ ア, 埋め戻 し材, およ び岩盤の性 能発揮を与 えない、	支保工材料が緩衝材、オーバーパック材、埋め戻し材および岩盤の性能に悪影響を与えないこと。	支保工材料が緩衝材、オーバーパック材、埋め戻し材および岩盤に及ぼす影響を評価する。 (処分坑道のみ)	支保工に起因するアルカリ性が緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材および岩盤に及ぼす影響 (変質→力学/水理特性) を評価する。 ・低アルカリ性コンクリートの施工性開発を行い、幌延の地下研究施設で施工性の確認を行う。	・PH11以下で顕著な変質は避けられる見通しとしている。 ・支保工に低アルカリ性コンクリートを用いるとしているが、その施工性は確認されていない。	・PH11以下で顕著な変質は避けられる見通しとしている。 ・支保工に低アルカリ性コンクリートを用いるとしているが、その施工性は確認されていない。	・PH11以下で顕著な変質は避けられる見通しとしている。 ・支保工に低アルカリ性コンクリートを用いるとしているが、その施工性は確認されていない。
	緩衝材の温度を制限温度以下に抑えること。 *3	処分坑道間隔を適切に設定すること。	熱解析により緩衝材の最高温度を評価すると共に、空洞安定性解析で処分坑道間隔の確認を行う。	熱解析により緩衝材の最高温度を確認すると共に、空洞安定性解析で処分坑道間隔の確認を行っている。	熱解析により緩衝材の最高温度を評価すると共に、空洞安定性解析で処分坑道間隔の確認を行っている。	処分場設計までに廃棄体定置状態での緩衝材の温度履歴を評価する。

\*1 : 鋼製支保工等も支保工の対象となりえる

\*2 : TRU研究にて実施中 (核燃料サイクル開発機構, 2003)

\*3 : 第2次取りまとめでは、制限温度を100°Cと設定。今後詳細な検討が必要。

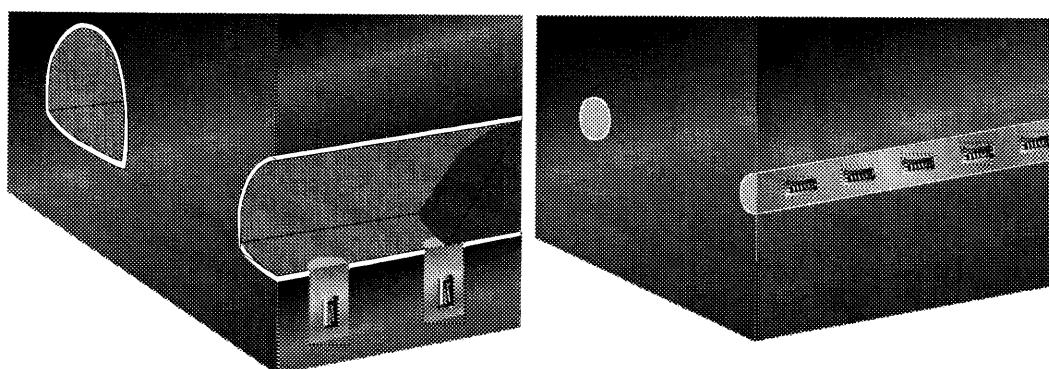
#### 4 処分孔等

ここで対象とするのは、横置き方式の処分坑道および堅置き方式の処分孔である。処分孔は、人工バリアの定置方式に関して図・4.1 に示すように処分孔堅置き方式を採用した場合に処分坑道の床盤に一定間隔で設置されるものである。横置き方式の処分坑道は直径 2.2m であり、軟岩の場合は支保工が設置される。処分孔は岩種によらず裸孔で、直径 2.2m、深さ 5.0m である（サイクル機構、1999）。

処分坑道の掘削工法としては、対象となる坑道が「3 アクセス・連絡・主要・処分の各坑道」で対象とする坑道より小規模であり、形状・寸法への精度もより高度なものが求められると考えられる。処分孔は処分坑道と比較して一本一本の長さは短くなるものの形状・寸法に求められる精度は処分坑道と同等であると考えられる。岩盤にこれらの坑道や処分孔を掘削する場合、掘削行為そのものにより岩盤が損傷することに加え、坑道周囲には応力開放による応力再配分がおこり、応力集中等による岩盤の損傷、緩み領域の発生、さらには処分場操業時における換気等の影響による岩盤内の不飽和領域の発生が考えられる。

また、これらの処分坑道、処分孔は緩衝材を設置するところであり、緩衝材の定置に影響を及ぼすと考えられる湧水量も重要な検討項目となる。この湧水は坑（孔）壁に現れる亀裂状態とも密接に関係があると考えられる。

これらすべての項目を処分坑道および処分孔に求める性能保証項目として考慮する。



図・4.1 処分孔および処分坑道

処分孔等に関する性能保証項目(案)を表・4.1 に示す。また、今回検討した処分孔等に関する整理表を表・4.2 に示す。表・4.1 に示すように、処分孔等の性能保証に関する項目は、処分場における時間軸として「建設・操業・埋め戻し」と「緩衝材膨潤中～膨潤後」である。役割は、「人工バリアを内部に設置する」、「人工バリアが所定の性能を発揮すること」、「坑道に沿ったルートが核種移行のクリティカルパスにならない」、「人工バリアおよび岩盤の性能発揮に悪影響を与えない」である。基準のポイントは、これらの役割が細分化されて、「空洞安定性が確保されること」、「緩衝材定置に支障しない湧水状態であること」、「緩衝材の定置作業に支障しない寸法的余裕を持つこと」、「緩衝材の性能に悪影響を与えない湧水状態であること」、「緩衝材の性能に悪影響を与えない形状寸法であること」、「緩衝材の性能に悪影響を与えない亀裂状態であること」、「緩み域の物質移行評価が可能なこと」、「支保工部分の物質移行評価が可能なこと」、「支保工材料が緩衝材、オーバーパックおよび岩盤の性能に悪影響を与えないこと」、「緩衝材の温度を制限温度以下に抑えること」で

ある。

以上のような基準のポイントに対し、設計の要件が表-4.2 に示すように設定できる。設計の要件は「建設・操業・埋め戻し」においては、「掘削時、空洞維持期間の空洞安定性を評価する」、「湧水状態と緩衝材の定置状態の関連を評価する」、「処分孔の形状寸法と緩衝材の定置状態の関連を評価する」である。「緩衝材膨潤中～膨潤後」に関しては「湧水状態と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する」、「処分孔の形状寸法と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する」、「亀裂の位置や頻度、特性と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する」、「岩盤損傷の少ない施工方法を採用する」、「緩み領域の範囲と透水性を評価する」、「支保工材料の透水性を評価する」、「支保工材料が緩衝材に与える影響を評価する」、「処分孔間隔を適切に設定する」である。

表-4.1 処分孔等の性能保証項目(案)

処分場における時間軸	何を性能保証するか（基準の内容）	
	役割	基準のポイント
建設、操業、埋め戻し	人工バリアを内部に設置する	空洞安定性が確保されること 緩衝材定置に支障のない湧水状態であること 緩衝材の定置作業に支障のない寸法的余裕を持つこと
緩衝材膨潤中～膨潤後	人工バリアが所定の性能を発揮すること	緩衝材の性能に悪影響を与えない湧水状態であること 緩衝材の性能に悪影響を与えない形状寸法であること 緩衝材の性能に悪影響を与えない亀裂状態であること
	坑道に沿ったルートが核種移行のクリティカルパスにならない	緩み域の物質移行評価が可能なこと 支保工部分の物質移行評価が可能なこと
	人工バリアおよび岩盤の性能発揮に悪影響を与えない	支保工材料が緩衝材、オーバーパックおよび岩盤の性能に悪影響を与えないこと 緩衝材の温度を制限温度以下に抑えること

表-4.2 処分孔等の設計要件と課題の整理表（1/3）

何を性能保証するか、(基準の内容)	どう保証するのか、(方法、解説)	設計の要件	現状(B)	今後の課題(C=A-B)
時期	役割	評価方法、データベース	評価内容	
建設、操業、局部埋め戻し	基準のポイント 空洞安定性が確保されること。 緩衝材定置に支障のない湧水状態であること。	掘削時、空洞維持期間の空洞安定性を評価する。	・弾性、強塑性、粘弹性、彈粘塑性等、地質特性とフェーズを考慮したモデルにより評価する。	・掘削時は弾塑性モデルにて評価している。 ・空洞維持期間の空洞安定性は評価しない。
人工パリア内に設置する	湧水状態と緩衝材の定置状態の関連を評価する。	湧水状態や局部湧水が緩衝材の定置状態に及ぼす影響を評価する。	・湧水量や局部湧水が緩衝材の定置直後の状態に及ぼす影響を評価する。	・湧水量や局部湧水が緩衝材の定置作業や定置直後における評価を行なう。
緩衝材の定置作業に支障のない寸法的余裕を持つこと。	処分孔の形状寸法と緩衝材の定置状態の関連を評価する。	・処分孔の径、傾き、底面状態、肌落ちなどが定置状態に及ぼす影響を評価する。	・処分孔との隙間40mmは充填し、総体的な密度を確保する。 ・定置状態について実規模試験を通じた確認が必要としている。	・処分孔の径、傾き、底面状態、肌落ちなどが定置作業や定置直後の状態に及ぼす影響を評価する。
緩衝材の性能に悪影響を与えない湧水状態であること。	湧水状態と緩衝材の定置状態の関連を評価する。*1	・湧水量や局部湧水及び湧水下での定置状態が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響を評価する。	・湧水量に及ぼす影響を評価する。 ・定置状態について実規模試験を通じた確認が必要としている。	・湧水量や局部湧水及び湧水下での定置状態が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響を評価する。
緩衝材が所定の性能を発揮するところ	処分孔の形状寸法と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する。*1	・処分孔の径、傾き、底面状態、肌落ちなどが膨潤挙動に及ぼす影響を評価する。	・処分孔との隙間40mmは充填し、総体的な密度を確保する。 ・定置状態について実規模試験を通じた確認が必要としている。	・処分孔の径、傾き、底面状態、肌落ちなどが膨潤挙動に及ぼす影響を評価する。
緩衝材膨潤中～膨潤後	緩衝材の性能に悪影響を与えない亀裂状態であること。	亀裂の位置や頻度、特性と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する。*1	・亀裂の位置や頻度、特性と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する。	・亀裂の位置や頻度、特性と緩衝材の膨潤挙動の関連を評価する。

\*1：評価の結果、不具合が生じる場合は必要な処置を講じる

表-4.2 処分孔等の設計要件と課題の整理表 (2/3)

時期	役割	基準のポイント	何を性能保証するか (基準の内容)		設計の要件	現状 (B)	今後の課題 (C = A-B)
			評価内容 (評価方法、データベース)	評価内容 (評価方法、データベース)			
		岩盤損傷の少ない施工方法を採用すること。	・埋め戻し施工による岩盤損傷の評価はしていない。	・機械掘削工法を採用している。			
		機みぬくの物質移行評価が可能なこと。	・既往の知見により緩み領域の範囲と透水性を評価する。 ・支保工 (コンクリート) の化学的劣化特性を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化による評価は未実施。	・既往の解説による評価を考慮した膨脹実験および大変形モデル等による解析により埋め戻し材の膨脹挙動を評価し、通過水量換算で評価。経路としてモルタル化はしていない。 ・時間的変化の評価は未実施。	・埋め戻し施工における隙間を考慮した膨脹実験および大変形モデル等による解析により埋め戻し材の膨脹挙動を評価し、膨脹応力と力学特性を把握する。 ・支保工 (コンクリート) の化学的劣化特性を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化による岩盤と埋め戻し材の力学特性変化を評価する。*1 ・支保工の影響による岩盤と埋め戻し材の力学特性変化を評価すると共に、劣化に伴う力学特性変化を評価する。*1	・機械掘削工法による岩盤損傷の評価を行なう。	機械掘削工法における岩盤損傷の定量的評価を行う。
		坑道に沿つたルートが核種移行のクリティカルパスにならない	支保工部分の物質移行評価が可能なこと。	支保工部分の物質移行評価を行なう。	・上記を入力条件として、支保工部分と埋め戻し部分の力学変形挙動評価を行う。*1 ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。	・岩盤の変形を条件として支保工／埋め戻し部分の力学挙動の再評価を行う。(必要に応じて繰り返す。) ・岩盤／支保工／埋め戻し部分の力学変形挙動からそれぞれの間隙率を評価し、各部位の透水性を評価する。*1	・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。 ・支保工部分と埋め戻し材の力学特性変化を評価する。 ・支保工と埋め戻し材の力学特性変化を評価する。 ・上記結果を内圧条件として周辺岩盤のクリープ解析を行い、岩盤の変形挙動を評価する。 ・岩盤からそれぞれの間隙率を評価し、各部位の透水性を評価する。*1

\*1 : TRU研究にて実施中 (核燃料サイクル開発機構, 2003)

表-4.2 処分孔等の設計要件と課題の整理表 (3/3)

時期	役割	何を性能保証するか (基準の内容) 基準のポイント	どう保証するのか (方法、解説)		現状 (B) 第2次取りまとめの 取り扱い、	今後の課題 (C = A-B)
			設計の要件 (評価方法、データベース)	計画内容 (評価方法、データベース) (A)		
緩衝材 膨潤中 ～膨潤 後	人工バリア および岩盤 に悪影響 を与えない 能発揮を 与えない	支保工材料が緩衝材 における影響、および岩 盤の性能に悪影響を与える (処分坑道のみ) こと。	支保工材料が緩衝材 に与える影響を評価 (処分坑道のみ) こと。	支保工に起因するアルカリ性が岩盤と緩衝材に及ぼす影響。 ・支保工に低アルカリ性コンクリートを用いるが、その施工性は確認していない。	・pH 1.1 以下で顕著な変質は避けられる 見通しとしている。 ・支保工に低アルカリ性コンクリートを用いるが、その施工性は確認を行っている。	・支保工に起因するアルカリ性が岩盤と緩衝材に及ぼす影響。 ・低アルカリ性コンクリートの施工性開発を行いう。 ・実工事において施工性の確認を行う。

\*1 : TRI研究にて実施中 (核燃料サイクル開発機構, 2003)

\*2 : 第2次取りまとめでは、制限温度を100°Cと設定。今後詳細な検討が必要。

## 5 おわりに

本報告では、今後国が策定することとなっている安全基準・指針等に資するため、今後研究開発等により得られる成果がどのように反映されるかを明確にするための検討として、埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔を対象とした検討を行った。これらの要素に対して性能を保証すべき項目(案)を抽出し、さらに、具体的にどのように性能を保証するのかを示した。また、これらの保証の方法について現状の取り組み状況（第2次取りまとめ）を踏まえて、今後の取り組みが必要と考えられる課題を抽出した。これらにより、各課題が処分場の長期安全性を確保するための研究としての位置付けが明確となったと考えられる。

今後は、本報告で示した課題について、サイクル機構における取り組み状況を整理し、安全基準・指針の策定への反映を念頭において整理を行う。

## 参考文献

Blümling, P.: "Borehole Sealing Project at the Grimsel Test Site", 3<sup>rd</sup> European Engineering Geology Conference 33<sup>rd</sup> Annual Conference of the Engineered Group of the Geological Society, pp.19-35 (1997)

核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊2 地層処分の工学技術”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-022 (1999)

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成13年度報告一”，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003 (2002)

核燃料サイクル開発機構：“概況報告（環境保全対策），1.3 低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）の処分技術開発”，サイクル機構技報，No.19, 2003.6, pp.98 (2003)

官報：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律，平成12年6月7日 (2000a) .

官報：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本計画，通商産業省告示第591号，平成12年10月2日 (2000b) .

川上進，杉田裕，栗原雄二，神徳敬，谷口直樹，油井三和，棚井憲治，柴田雅博，本間信之：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-026 (2003)

原子力安全委員会：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第一次報告），原子力安全委員会，平成12年11月6日 (2000) .

## 付-1 割れ目帯の区分

プラグの整理表（表-2.4 参照）では「避けるべき割れ目帯」の記述がある。ここで、NAGRA（スイス）およびSKB（スウェーデン）における割れ目帯の考え方を例に区分について示す。

## (1) 割れ目帯の分類例

NAGRAはKristalline Iプロジェクトでのスイス北部における地質調査結果に基づいて割れ目帯を評価している。NAGRAにおける割れ目帯の分類は大きく4種類に分けている。表-付1に示す4つの分類で、それぞれ連続性が異なる。NAGRAの概念では、処分場の規模は少なくとも $100,000\text{m}^2$ （200m×500mに相当）が必要としており、上記割れ目帯の地質調査結果から1stオーダーの割れ目帯は処分場として避けるべき割れ目帯、2ndオーダーの割れ目帯は処分区画として避けるべき割れ目帯とした。

一方、SKBは7つに分類しており、そのうち上位3分類は表-付1に示すように分類している。全体としての透水係数は1stオーダーで $10^{-6}\text{[m/s]}$ 、2ndオーダーで $10^{-7}\text{[m/s]}$ 、2ndオーダーで $10^{-8}\text{[m/s]}$ と評価している。

表-付1 割れ目帯の連続性の分類

機関	分類	割れ目帯の連続性
NAGRA (Thuryほか, 1994)	1 <sup>st</sup> オーダー	10km以上
	2 <sup>nd</sup> オーダー	数km～約10km
	3 <sup>rd</sup> オーダー	数十m～2,3km
	小断層	10mオーダー
SKB (Puschほか, 1991)	1 <sup>st</sup> オーダー	数km間隔で数十km
	2 <sup>nd</sup> オーダー	数100m間隔で数km
	3 <sup>rd</sup> オーダー	50～100m間隔で数十m

## 付-2 時間依存性変形を考慮した応力変形解析理論解

コンクリート支保を有する処分坑道の埋め戻し後の安定性評価においては、コンクリートのアルカリ溶脱による材料劣化、またその影響による埋め戻し材や岩盤の劣化の程度、さらに材料劣化によって生じると考えられる岩盤・コンクリート支保・埋め戻し材の水理特性変化を適切に評価する必要がある。

ここでは、これらの課題を解決するための一手段として、レオロジーモデルで記述される応力・変位の理論解を用いた研究の方向性を示すことにする。まず理論解（今後開発が必要）を略述し、モデルのパラメータを決定するために、各材料特性の把握試験の必要性を述べる。また、解析結果から材料の水理特性の推定方法も示唆する。そして、今後の研究の展開可能性についても言及する。

### (1) 理論解の展開

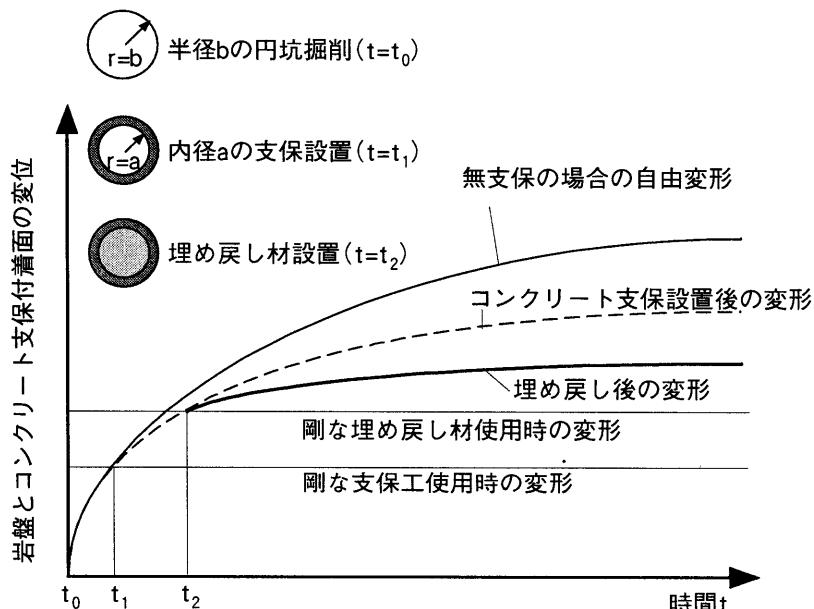


図-付 1 時間依存性変形模式図

図-付 1 は、粘弾性体である岩盤内に半径  $b$  の円形トンネルを掘削した場合、岩盤掘削面における半径方向変位の経時変化を模式的に表している。支保を施さない場合には、細い実線で示すような自由変形をすると考えられる。しかし、 $t = t_1$ において粘弾性体のコンクリート支保を打設した場合は、コンクリートと岩盤に相互作用が生じ、岩盤掘削面は破線で表す変形をするものと考えられる。この相互作用を考慮した時間依存性応力および変位については、既にレオロジーモデル（ばね・ダッシュポット系）で応力・変位を記述する 2 次元平面ひずみ理論解が存在する(Lo and Yuen, 1980)。この理論では、岩盤・コンクリートを粘弾性体と考え、掘削から支保建て込みまでの時間遅れを考慮している。また、 $r = a$  におけるトンネル内部の圧力はゼロと考え、 $r = b$  における支保と岩盤の接触面は完全に付着している (No Slip) 場合と完全に切り離されている (Full slip) 場合の両極端を考えている。

いま、埋め戻し材設置後 ( $t > t_2$ ) の安定性を評価する場合、埋め戻し材を粘弾性体と仮定すれば、同様のロジックで理論を展開することが可能である（変形は、例えば図・付 1 の太い実線で示した曲線となると予想される）。但し、 $r = a$ においては 1) 埋め戻し材とコンクリート支保間の相互作用が生じること、2) アルカリによる埋め戻し材の劣化を考慮するためにせん断抵抗がないと仮定する（Full slip 条件のみ）こと、3) 半径方向の応力と半径方向の変位は埋め戻し材とコンクリート支保で連続であること、4) 埋め戻し材の半径方向変位は、支保との相互作用がない場合の自由な（膨潤）変位と相互作用で生じる力に起因する変位の和で表現する…などの調整が必要である。

#### (2) 各材料の時間依存性特性の把握

各材料について、レオロジーモデルのばね定数と粘性を決定する必要がある。そのための室内・原位置試験は欠かせない（各種膨潤試験・クリープ試験など）。また、時間と材料の劣化程度の関係を知ることで、材料定数の経時変化も捉える必要があると考える。例えば、ある物性が時間の対数（最初は限られた範囲の時間でもよいとする）に対して線形的に減少することを実測値でデモンストレートできれば、それを理論解に直接取り込むことも出来る。

#### (3) 体積変化からの間隙率変化予測と透水係数の推定

解析では各点での変位を計算するので、材料の体積変化（多孔質体と考えると間隙率）を理論的に時間を追って計算できる。一方岩石の間隙率と透水係数の対数には一般に相関があることが観察されており、体積変化を透水係数の変化として捉えることも可能であると思われる。

また、劣化の深度に関する観察例として、現在トンネル補修などで行われる支保背面の岩盤の含水比調査が考えられる。支保背面の含水比を測定すると、「ある限られた深さまでの大きな変化とそれ以深の小さな変化」というコントラストが見られる場合があり、「ゆるみ域」の判定指標となり得る。解析により、体積変化の著しい範囲が同定できれば、水理特性の変化の推定にも有用であると考えられる。

#### (4) 今後の研究の展開

今回提案の解析では、各材料を粘弾性体と仮定している。しかし、トンネル掘削解析では一般に岩盤を弾塑性体と捉えることが多い。側圧係数が 1 の場合（鉛直と水平初期地圧が等方）の場合は、弾塑性理論解が存在し、2.項で示した理論解誘導方法と同様に相互作用を理論的に論じることが出来る。側圧係数が 1 以外の場合は数値計算で対応できる。その場合の定式化はさほど難しくないものと思われる。

また、熱弾塑性解析例（Ogawa and Lo, 1990）のように、時間とともに塑性域が進展する解析結果も報告されており、将来の研究課題としての可能性がある。

## 付-3 低アルカリ性コンクリートの特性

低アルカリ性コンクリートは、普通コンクリート浸出液のpHが12以上の高アルカリ性であるのに対してpHが11以下となるようにアルカリ度を低下させた材料である。低アルカリ性コンクリートに関しては、これまでにも種々のコンクリートが開発されている。カナダAECLの低発熱高流動コンクリート(Low Heat High Performance Concrete (LHHPC)) (Gray and Shenton, 1998) , サイクル機構のフライアッシュ高含有シリカヒュームセメント(High Fly ash contained Silica fume Cement (HFSC)) (大和田他, 2000), 電力中央研究所・太平洋コンサルタントのLAC-S(藤田他, 1998; 田中他, 2000)がその一例である。

低アルカリ性コンクリートの特長は、その低アルカリ性にあり、普通コンクリートの使用に対して処分場環境において緩衝材であるベントナイトや岩盤の変質を低減する効果があり、放射性核種の収着等のバリア性能への影響を抑えることができると考えられている。

なお、HFSCやLHHPCでは施工性確保のため高性能減水材の使用が必要であり、これには有機物が用いられるため、今後、性能評価への影響を検討する必要がある。

表・付2は、これまでに開発されている低アルカリ性コンクリートの特性の比較表である。

表・付2 低アルカリ性コンクリートの特性比較

呼称	LAC-S*	HFSC**	LHHPC***
種別	クリンカー設計	ポゾラン質混合	ポゾラン質混合
基本セメント	80wt%(LAC-S)	40wt%(OPC)	50wt%(OPC)
Silica Fume	20wt%	20wt%	50wt%
Fly Ash	—	40wt%	—
基本配合(kg/m <sup>3</sup> )			
セメント	300	500	194
細骨材	853	906	895
粗骨材	930	750	1040
Silica Flour	—	—	194
水	165	150	97
水セメント比	55%	30%	50%
高性能減水剤	7.5	15.0	10.3
その他添加剤	1.5(クエン酸)	—	—

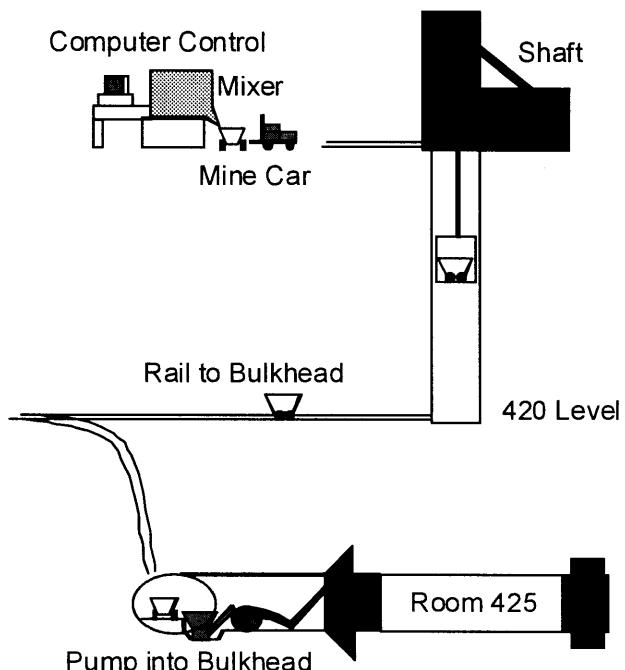
\* 電力中央研究所・㈱太平洋コンサルタントが開発

\*\* 核燃料サイクル開発機構が開発

\*\*\*カナダ原子力公社(AECL)が開発

## 付-4 低アルカリ性コンクリートの施工実績

カナダ AECL の地下研究施設で実施しているトンネルシーリング性能試験 (TSX) (Chandler et al., 1998) では、低アルカリ性コンクリートである LHHPC (Gray and Shenton, 1998) が強度プラグとして施工されている。トンネルシーリング性能試験では、コンクリートプラグに関しても止水プラグと位置づけている。設計されたコンクリートプラグは容積が約 72 m<sup>3</sup>である (杉田・升元, 2002)。



図・付 2 コンクリートの搬送ルート

図・付 2 に試験坑道へのコンクリートプラグの打設手順を示す。コンクリートは地上において 2 m<sup>3</sup> ミキサーで調合した材料を練り混ぜ、所定の練り混ぜ後、トロッコに積み込んだ。トロッコごと立坑のエレベータにより試験深度まで運んだ。試験深度では軌道で所定の位置まで進み、図・付 3 に示すように材料をホッパに投入し、打設用のポンプで枠内に打設した (杉田・升元, 2002)。

材料特性試験の結果から、LHHPC は打設後に収縮することが予想されたため、図・付 4 に示すようにプラグ拡幅部の頂上部およびプラグ胴体部の上部にグラウトを注入するパイプをあらかじめ設置した。また、プラグの周囲には水を含んで膨張し、すき間をシールするベントナイトストリップス (ベントナイトを練りこんだシール材) を設置した (杉田・升元, 2002)。この処置により、プラグ打設後の収縮に対して頂上部のすき間は収縮後にグラウトを注入して充填し、微細なすき間はベントナイトストリップスの膨潤により充填する。

コンクリートの打設がプラグ全体によよんでいることを確認するため、プラグの最上部となる切り欠き部の頂上部に内部撮影用のカメラをセットした。カメラによって内部の打設状況を確認し、最終的にはカメラがコンクリートに埋もれることを確認してプラグ全体がコンクリートで充填されたことを確認した。打設時間は 76 m<sup>3</sup> で 8 時間 28 分であった。



図-付3 コンクリートの打設  
(左: ホッパへの投入, 右: プラグ内部状況)

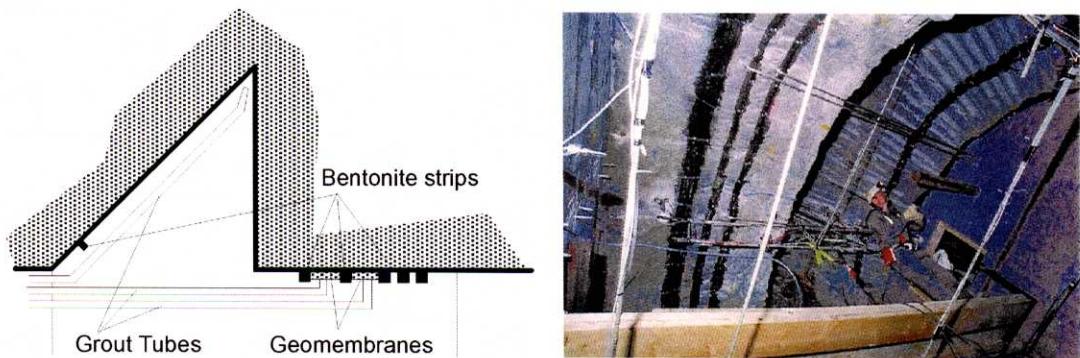


図-付4 コンクリートプラグー岩盤間の処置状況  
(写真の黒い筋がベントナイトストリップス。ベントナイトストリップス間に  
設置されたパイプがグラウト注入用パイプ)

また、わが国においても幌延の深地層の研究施設建設に使用するためにHFSCの施工性の開発を行っている。コンクリートプラグはもとより、トンネル支保工としての吹付け施工、セグメントを対象に実規模実験を実施しており、基本的に適用可能であることを確認している（図-付5、6参照）。



図-付5 実規模吹付け試験

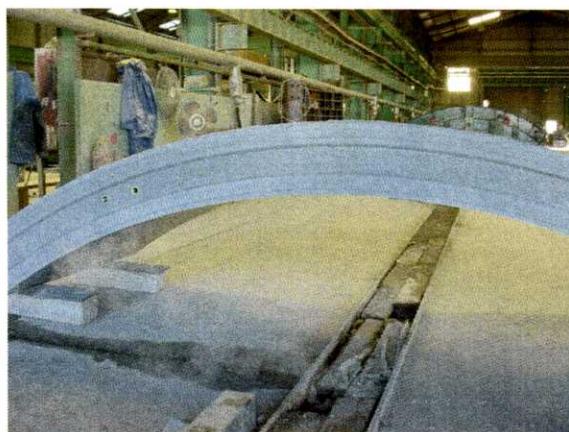


図-付6 実規模セグメントの製作

## 付-5 参考文献

Chandler, N., Dixon, D., Gray, M., Hara, K., Cournut, A. and Tillerson, J.: "An in situ Demonstration of Technologies for Vault Sealing", Proc. 19<sup>th</sup> Annual Conference of Canadian Nuclear Society (1998)

藤田英樹, 野口聰, 廣永道彦：“アーウィン系アルカリ性セメントの開発—pH 挙動に及ぼすシリカフューム添加の影響—”, 日本原子力学会「1998年秋の大会」予稿集(第Ⅲ分冊), M6 (1998)

Gray, M. and Shenton, B.: "For better concrete, take out some of the cement", 6<sup>th</sup> ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand (1998)

Lo, K.Y. and Yuen, C.M.K. : "Design of tunnel lining in rock for long term time effects", Can. Geotech. J., vol. 18, pp.24-39 (1980)

Ogawa, T. and Lo. K.Y. : "Stresses, displacements and temperature around a circular opening in a thermal elasto-plastic rock at great depth", Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds), pp.1379-1391 (1990)

大和田仁, 三原守弘, 入矢桂史郎, 松井淳：“放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント系材料の検討—浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性—”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-057 (2000)

Pusch, R., Börgesson, L., Karnland, O. and Hökmark, H.: "Final Report on Test 4 – Sealing of Natural Fine Fracture Zone", SKB TR 91-26 (1991)

杉田裕, 升元一彦：“トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-005 (2002)

田中良仁, 廣永道彦, 藤田英樹, 田辺進：“クリンカー設計による低アルカリ性セメントの特性について”, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS-148 (2002)

Thury, M., Gautshi, A., Mazurek, M., Muller, W., Naef, H., Person, F., Vomvoris, S. and Wilson, W: "Geology and Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme", NAGRA TR 93-01 (1994)