

付録 1 （3.2.1 坑道シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

目 次

スウェーデン	付 1-1
フィンランド	付 1-6
フランス	付 1-10
スイス	付 1-14
カナダ	付 1-18

スウェーデン（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

※本資料は年度成果報告書に整理する主要国の詳細情報を要約的に取りまとめたものである。

スウェーデンについては公開情報に基づく情報整理であり、特段の出典情報が記されていない限り出典資料は 2011 年 SR-Site 報告書¹⁾である。シーリングシステムの設計に係るこれらの情報は、既に 1980 年代からの最適化を含む反復的な開発プロセスの 1 断面のものであり、特定された候補サイトの特性も考慮されていることに留意願いたい。

1. シーリングシステムの設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①サイトの地質環境特性

- 基本特性：処分場建設予定地はフォルスマルク地域（処分深度 500 m）
- 結晶質基盤岩(坑道等の開口部は自立可能)、地下水流動は低水準
- 長期安全性の観点で留意すべき基本特性：
- 処分場深度において、透水性亀裂の存在頻度が低い
 - スウェーデンの深部花崗岩の一般的な特性と同様に処分場深度は還元性環境
 - 地下水の塩分濃度（5,000～6,000 mg/L）はベントナイト粘土緩衝材の安定性に有利
 - 数十万年周期の氷河サイクル（隆起・沈降に伴う岩盤応力、地下水流動、水理化学面での変化）
 - 金属や産業用鉱物の採掘可能性がない

②処分場構成

事業進捗状況	●2001 年;政府が SKB 社のサイト調査候補地の選定結果を承認 ●2009 年;フォルスマルクを処分場建設予定地を選定 ●2011 年;立地・建設許可申請書を提出 ●2030 年;処分開始予定
処分対象廃棄物	使用済燃料（12,000tU）
処分概念 （KBS-3V）	●使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した岩盤内に設置 ●複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※横置き方式（KBS-3H 概念）の実現可能性も検討中
処分場構成要素	①キャニスタ ②緩衝材 ③埋め戻し材 ④閉鎖材（※③④には各種プラグが含まれる） ※人工バリアではないが、「母岩」も安全機能が割り当てられた構成要素。 支保、ロックボルト、グラウトの使用を想定。

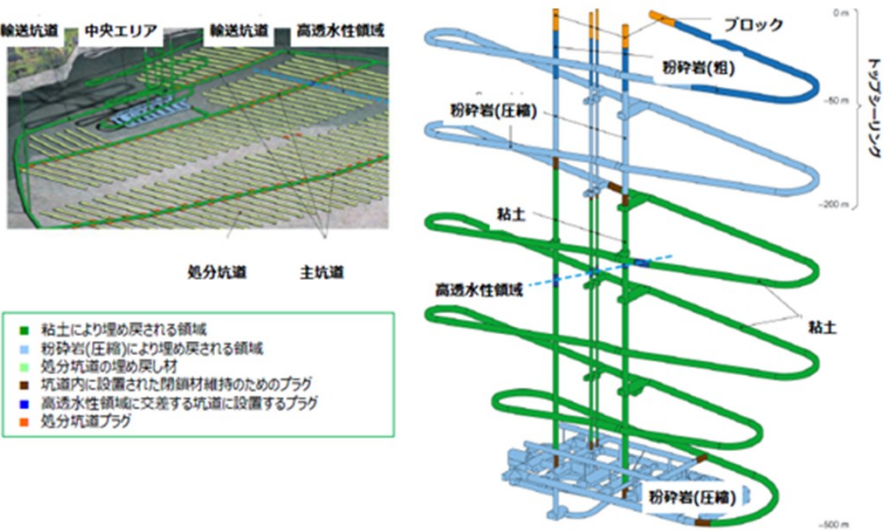
③安全規制要件とシーリングシステム構成

- 安全規制要件：SSMFS 2008:21²⁾の規則において、バリア及びその機能について以下のように記載されている（埋め戻し材に関連する事項を抜粋）。
- 処分場の閉鎖後安全性は、受動バリアのシステムにより維持されなければならない（§2）
 - それぞれのバリアは、直接的または間接的にバリアシステムの他のバリアを保護することにより、放射性物質の拡散を閉じ込め、妨げ、あるいは遅らせるために寄与する一つ又は複数の機能を有するものでなければならない（§3）
- この中で、人工バリア及びそのバリア機能の一例として、以下が示されている。
- 人工バリアの例）粘土、砂またはコンクリートの埋め戻し材
- バリア機能の例）低透水性、溶存物質の低透過性、放射性物質の散逸を防止するのに寄与する化学的性質、他のバリア機能を保護・維持する能力
- 設計及び建設については、以下のように記載されている。
- バリアシステムは、それらのバリアの閉鎖後の性能に影響を与える可能性がある特性、事象、プロセスに対して、耐久

- 性がなければならない（§5）
 - バリアシステムは、利用可能な最善技術（BAT）を考慮して設計、建設されなければならない（§6）
 - バリアシステムは、一つのバリアに個々の不具合が生じた場合に、可能な限りにおいて、必要な安全性が維持されるように複数のバリアを含むものでなければならない（§7）
- シーリングシステム構成^{3),4)}
- SKB では「シーリングシステム」の定義はないが、「埋め戻し材(backfill)、閉鎖材(closure)、プラグ」を「シーリングシステム」の構成要素とした。

エリア	構成要素の名称		定義	目的及びその機能
処分場まで 地表から	閉鎖材(closure)	トップシーリング	立坑及び斜坑の上部を充填し、閉鎖するために設置される物質	意図しない処分場への侵入を防ぎ、地下開口部を通じた地下水移行を制限すること。
		トップシーリング下の斜坑及び立坑の閉鎖材	トップシーリング下部（深度200m まで）を充填し、閉鎖するために設置される物質	
中央エリアの閉鎖材		中央エリアを充填し、閉鎖するために設置される物質		
処分エリア深度		主坑道及び輸送坑道の閉鎖材	主坑道及び輸送坑道など処分坑道以外の坑道を充填し、閉鎖するために設置される物質	・ 力学的な強度及び／又は水理面での制御機能を有すること。 ・ 安全かつ確実な閉鎖材の設置に寄与すること。
		閉鎖材としてのプラグ(plug) (注：バリア機能は有していない)	力学又は水理学的、あるいは閉鎖材の設置に対する安全性のために設置される構造物	
	埋め戻し材(backfill)	処分坑道を充填するために設置される物質	・ 緩衝材を定置位置に保持し多重バリア原則を維持すること。 ・ 定置坑道を通じた地下水の流動を限定すること。	
		処分坑道プラグ(plug) (注：バリア機能は有していない)	処分坑道の末端に設置され、操業期間にわたり、処分坑道を閉鎖する構造物	主坑道の充填が終了し、飽和状態となるまで処分坑道を閉鎖し、その内部の埋め戻し材を所定の位置に保つと共に、水の流動を阻止すること。

シーリングシステム構成要素の設置イメージ
SKB TR 10-17 (Fig. 3-1, 3-4)



スウェーデン（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

○埋め戻し材（処分坑道）の安全機能³⁾

上位の安全機能	下位の安全機能	安全機能指標	安全機能指標基準 ^{*1}
閉じ込め	緩衝材の膨潤に対する反作用	密度	高い
遅延	移流移行の制限	a) 透水係数	$<10^{-10}$ m/s
		b) 膨潤圧	>0.1 MPa
		c) 温度	$>-2^{\circ}\text{C}$
	放射性核種の収着	分配係数(K_d)	高い

注 安全機能指標が定量的な基準で示せない場合、「高い」、「低い」、「制限される」といった単語を用いて示されている。

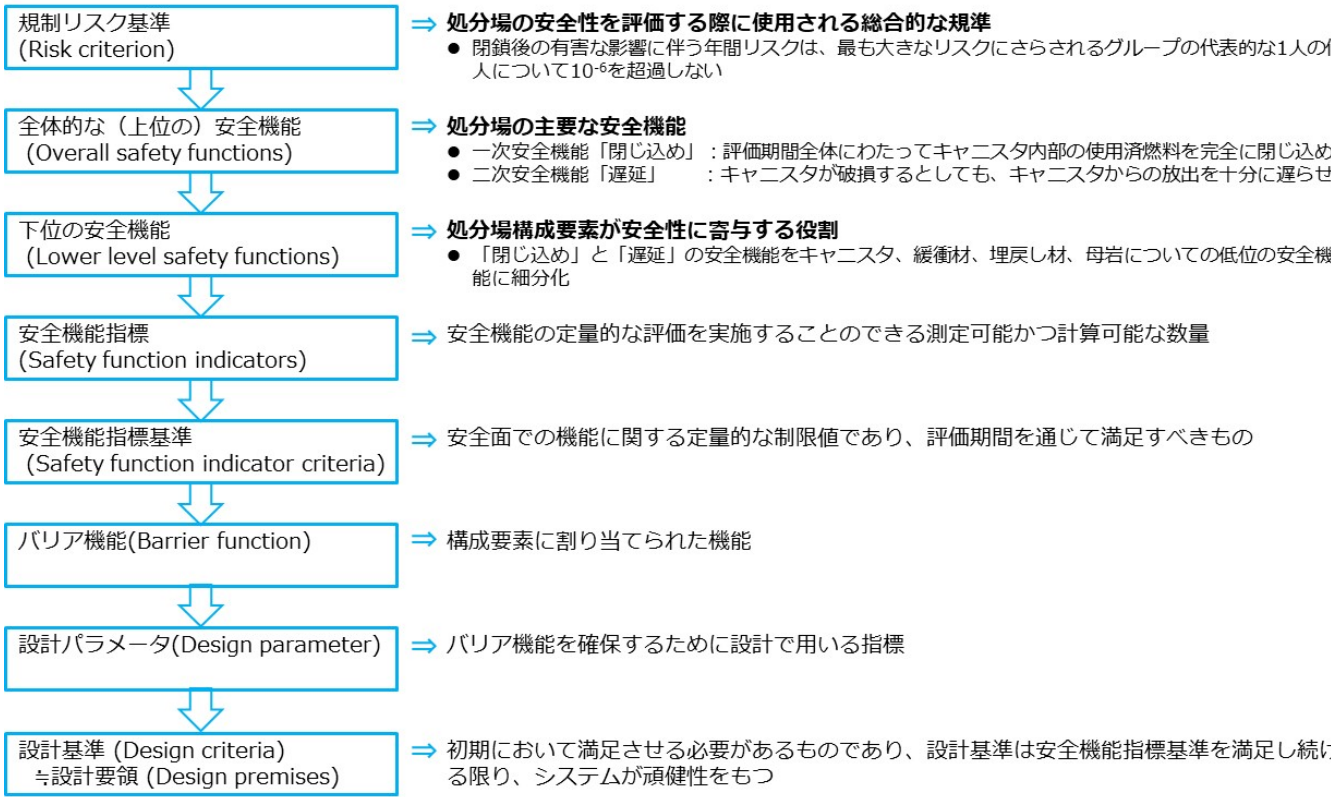
○シーリングシステム構成要素に求められるバリア機能^{3),4)}

構成要素	性能要件	設計要件	設計仕様
埋め戻し材 （処分坑道）	・ 処分坑道内の水の流動（移流移行）の制限	透水係数： $<10^{-10}$ m/s 膨潤圧： >0.1 MPa	ベントナイト粘土の 使用
	・ 処分孔から上向き緩衝材の膨潤／膨張の制限	密度： $>1,950$ kg/m ³	
	・ その他バリアのバリア機能を著しく損なわないこと	記載無し	
	・ 想定される処分環境下での長期間耐久性の保持及びその他のバリア機能の維持	記載無し	
処分坑道プラグ	・ 処分深度における静水圧と埋め戻し材の膨潤圧に耐えること（主坑道の充填完了まで）	埋め戻し材からの膨潤圧：5MPa	詳細は今後検討
	・ プラグを介した水の流動の制限（隣接する主坑道が充填され、飽和状態となるまで）	今後検討	
	・ 処分施設及び処分場環境下での耐久性の保持及び機能維持（主坑道の閉鎖材が飽和状態となるまで）	・ 埋め戻し材からの膨潤圧：5MPa ・ 燃料からの発熱によるコンクリートの熱膨張	
	・ 他の人工バリア又は岩盤のバリア機能を著しく損なわないこと	・ pH ≤ 11 ・ 高流動化剤以外の有機物使用の禁止	
閉鎖材	・ 処分場と地上との間の岩盤のバリア機能低減に影響する高透水性流路の形成防止	透水係数： $<10^{-8}$ m/s（立坑、斜坑及びボーリング孔のみ。その他は制限なし）	詳細は今後検討
	・ 他のバリアのバリア機能を著しく損なわないこと	pH < 11	
	・ 埋め戻し材の膨潤/膨張、及び処分坑道からの膨出制限（主坑道の閉鎖材）	記載無し	
	・ 隣接する地下開口部の閉鎖材を設置位置に留める機能維持	記載無し	
	・ 処分場への意図的しない侵入の効果的な抑止（立坑、斜坑及びボーリング孔上部の閉鎖材）	記載無し	
	・ 想定される処分環境下での長期間耐久性の保持及びバリア機能の維持	記載無し	
閉鎖材としてのプラグ	・ 設置場所での静水圧に耐えること ・ プラグを介した水の流動の制限（隣接する坑道、立孔、斜坑等が充填され、飽和状態となるまで） ・ 耐久性の保持及び機能維持（地下開口部の閉鎖材が飽和状態となるまで） ・ 他の人工バリア又は岩盤のバリア機能を著しく損なわないこと	記載無し	詳細は今後検討

2. 要件管理に基づく処分場設計の方法論

①全体概要

SKB の報告書では、処分場設計に関する方法論がフローなどで明示的に示されていない。ここでは、SR-Site 報告書¹⁾と埋め戻し材の Production Report³⁾に記載されている内容に基づいて、処分場設計の全体像を以下のフローとして整理した。



② 構成要素への要件の展開例

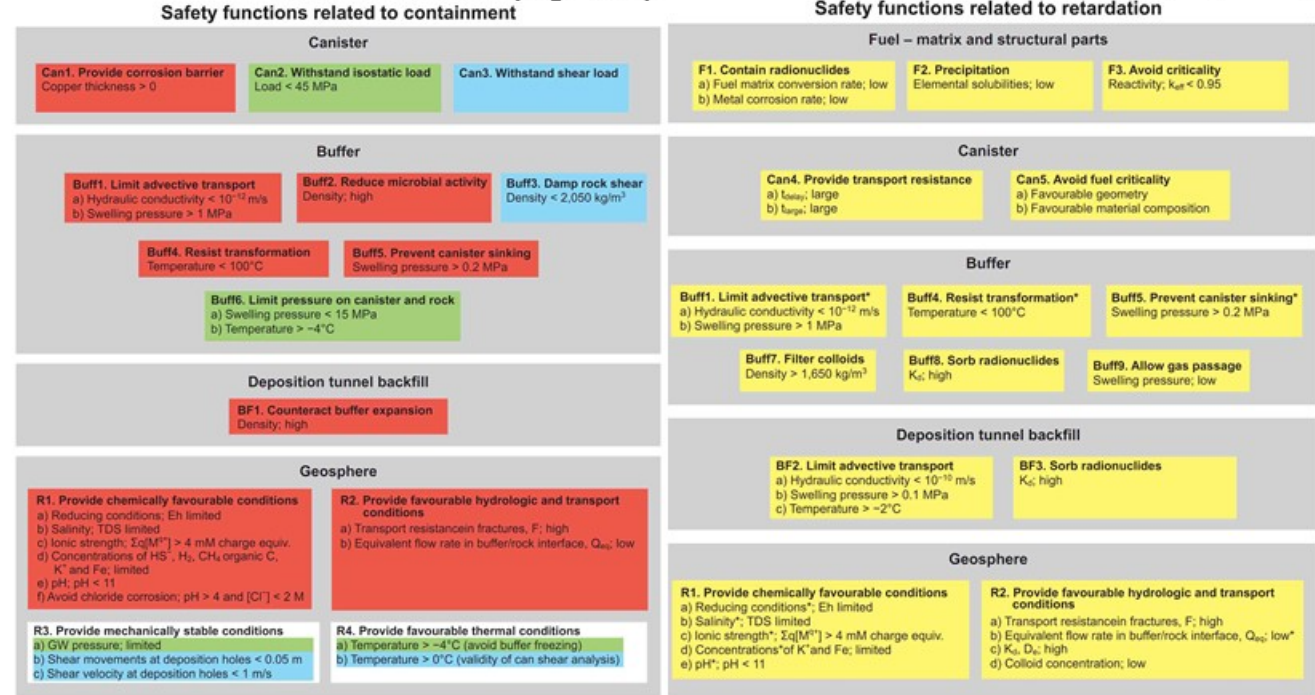
KBS-3 概念の第一の安全機能は、評価期間全体にわたり使用済燃料を銅製キャニスタ内に完全に閉じ込めることであり、SR-Site の場合、この期間は 100 万年に設定されている。たとえキャニスタに損傷が生じ、キャニスタから何らかの放出が生じた場合であっても、第二の安全機能によってこれが遅延されることになる。

○構成要素への要件は、以下の観点から設定

- 各構成要素の閉じ込めに関する安全機能は、キャニスタの安全機能（閉じ込め）を直接的または間接的に支援するように設定されている。
- 遅延に関する安全機能は、キャニスタに破損が生じた場合に核種の放出制限及び遅延を確保されるように設定されている。

スウェーデン（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

構成要素への安全機能、安全機能指標、安全機能指標基準の展開
SKB TR 11-01 (Fig. 8-2) SKB TR 11-01 (Fig. 8-3)



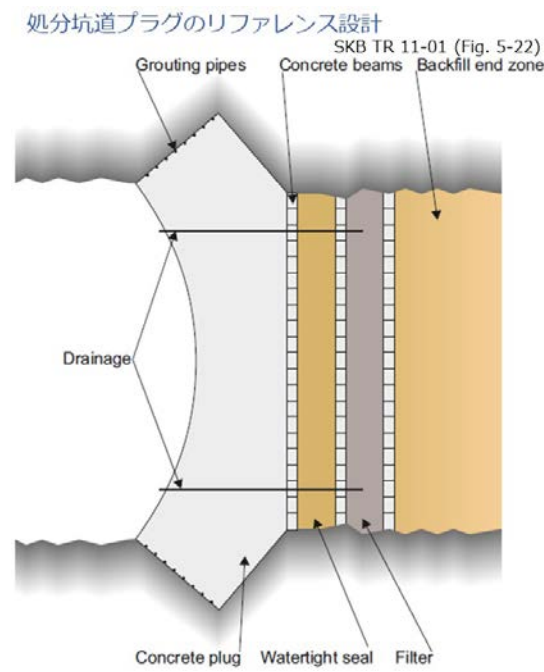
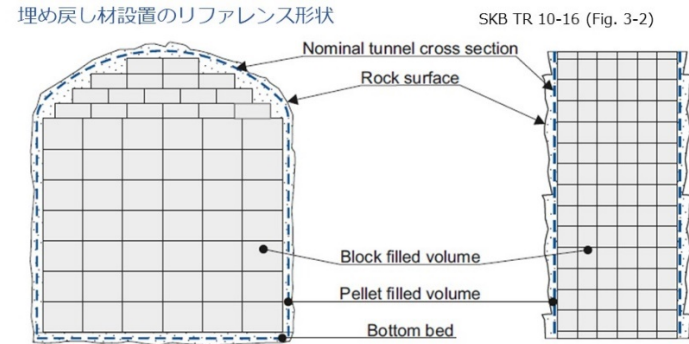
※閉じ込め/遅延に関連した安全機能（太字）、安全機能指標及び安全機能指標基準。
※定量的な基準を示せない場合、安全機能指標の好ましい値を示すために「高い」、「低い」及び「限定的」などの用語が使用されている。
※色彩の違いは、その機能がキャニスタの安全機能にどのように寄与しているかを表している
：Can1（赤色）、Can2（緑色）、Can3（青色）。

③シーリングシステムに関するリファレンス設計

埋め戻し材のリファレンス設計仕様		
SKB TR 10-16 (Table 3-5)		
Design parameter	Nominal design	Accepted variation
Blocks		
Block part of blast round volume ¹	According to Figure 3-2	V _{blocks} ≥ 60%
Free space between blocks and tunnel walls	–	Free space ≥ 10 cm
Pellet filling in gap between blocks and tunnel walls		
Pellet part of blast round volume	The volume between the installed blocks and deposition tunnel walls	–
Bottom bed		
Thickness	10 cm from nominal tunnel floor	–
Inclination perpendicular to the tunnel axis	–	< 3 mm/tunnel width
Inclination along the tunnel axis	Inclination of nominal tunnel floor	–
Dry density compacted bed	> 1,200 kg/m ³	–

¹ Including blocks in the upper part of the deposition hole and excluding slots between blocks.

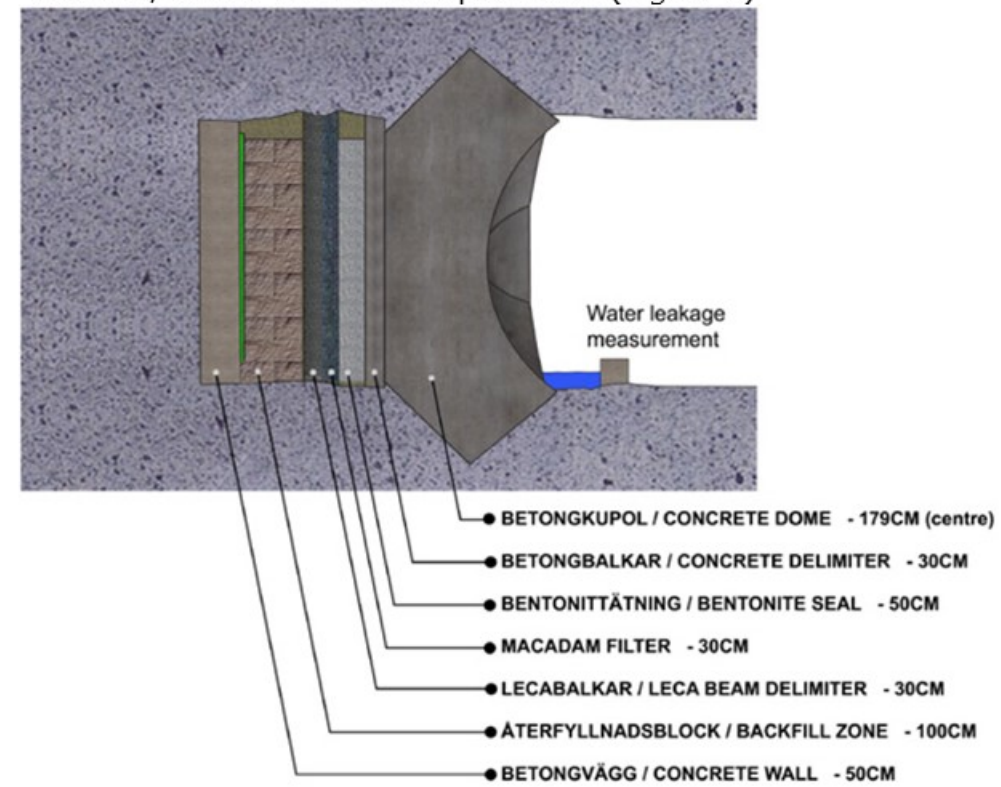
注) 埋め戻し材に使用されるベントナイト粘土は、IBECCO-RWC-BF（ミロス島産）、アシャ（カッチ産）及びMX-80（ワイオミング産）が検討されており、設計仕様はIBECCO-RWC-BF（ミロス島産）を想定した設計となっている。



処分坑道プラグ 構成部位	役割	材質
コンクリートプラグ (Concrete plug)	・ 耐力学的変形 ・ 他のプラグ構成部位の位置の維持	鉄筋コンクリート*2
コンクリートビーム (Concrete beams)	①コンクリートプラグ打設時のコンクリートとベントナイトの混合防止、及び水密性シールの位置の維持 ②フィルタの位置の維持 ③埋戻し材の位置の維持	鉄筋コンクリート
水密性シール (Watertight seal)	・ コンクリートプラグ内又はコンクリートと岩盤表面との間の微小割れ目を介した漏出経路のシール ・ プラグへの圧力勾配の吸収	ベントナイトブロック／ペレット
フィルタ(Filter)	・ 養生完了前のコンクリートプラグへの水圧影響を防止・低減するため、埋め戻し材からの漏出水を集水し、排水管を通じて排出	砂又は砂利
排水管(Drainage)	・ 養生完了前のコンクリートプラグへの水圧影響を防止のため、フィルタに集水された水を処分坑道外部に排水	鋼鉄（又は必要に応じてチタン製）
グラウチング管 (Grouting pipes)	・ コンクリートプラグと岩盤との岩着及びブレストレス状態の維持	鋼鉄

DOMPLU (Dome Plug) experiment

DOPAS, D3.22 DOPMLU experiment (Fig. 2-1)



スウェーデン（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

閉鎖材のリファレンス設計（SKB TR10-17）		
施工場所	想定されている構成材料	備考（今後の課題等）
トップシーリング	最大粒径 200mm の碎石	施工深度は想定される永久凍土深度で決定
立坑／斜坑	・ 粘土系物質 ・ 高透水性領域は、砂又は粉碎岩	－
中央エリア	原位置で碎石を圧縮	必要な密度や透水性、圧縮率等の特定
主坑道及び輸送坑道	処分坑道埋め戻し材と同様に粘土系物質	－
試錐孔	・ 頑健な密閉効果を要求される箇所：圧密ベントナイト ・ 破砕体通過区間：コンクリートプラグ	－
閉鎖材としてのプラグ	現場の条件に依存するため、今後検討されるが、下記種類を想定 ・ 異なる材質で充填された領域（例：碎石と粘土）の連結開口部を隔てるプラグ ・ 立坑、斜坑及び坑道が高透水性領域を通過する場合に使用されるプラグ ・ 中央エリアのような大規模な地下開口部に閉鎖材の設置する際のプラグ	－

3. 性能評価におけるシーリングシステムのハンドリング

- SKB では、「performance assessment」という用語は使われておらず、性能評価を表す用語として「reference evolution」が使用されている。
- reference evolution では、2 つのケースが扱われている。
- 基本ケース：最初の 12 万年の氷期サイクルの間の外部条件は、前サイクルのウルム氷期と同様であると仮定する。その後、100 万年の評価期間全体の終わりまで、さらに 7 回のサイクルの反復を想定する。
 期間 1：掘削・操業期
 期間 2：処分場閉鎖後の最初の 1,000 年間、及びレファレンス氷期サイクル当初の温暖期
 期間 3：氷期サイクル当初の残りの期間
 期間 4：氷期サイクルの 2 回目から、処分場閉鎖後 100 万年までの期間
 - 地球温暖化バリエーション：最初の 12 万年の氷期サイクルについて、将来の気候と外部条件は、人為起源の温室効果ガス排出によって大きな影響を受けると想定する。
- reference evolution をととして、①気候関連の事項、②生物圏関連の事項、③地圏に関連する熱的、力学的、水理学的、化学的な事項、④人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋戻し材）に関連する熱的、力学的、水理学的、化学的な事項を特定し、安全評価シナリオの選定に資する情報を提供する。

○シーリングに関する reference evolution の評価項目

評価期間	評価項目		
期間 1	● プラグの水飽和とそのシーリング能力 ● パイピングによる浸食	● 定置孔における浸食量の推定 ● 定置坑道において浸食された物質	● ベントナイト物質喪失後の均質化
期間 2	● 埋め戻し材の飽和 ● 乾燥岩石ケースにおける水分再分配 ● フォルスマルク・サイトにおける水理条件への適用 ● 埋め戻し材の均質化 ● 緩衝材の上方に向けた膨張 ● ベントナイト物質の喪失が起きた後の均質化 ● 緩衝材の喪失	● 埋め戻し材物質の喪失後の均質化 ● 移流条件が成立する可能性 ● 不飽和段階と高温期間 ● 塩分濃度の効果 ● コロイド化放出が起こり得る条件 ● 定置坑道埋め戻し材の浸食率 ● 埋め戻し材、さらには透水性亀裂と連絡されていない緩衝材における地球化学的な変遷	● 飽和期間 ● フォルスマルク・サイトにおける地球化学的な条件の適用 ● 定置坑道プラグのコンクリートの劣化 ● 坑道プラグ崩壊後の埋め戻し材の膨潤 ● 緩衝材及び埋め戻し材に対する浸透圧効果
期間 3	● 凍結 ● 地下水組成が変質した場合の緩衝材及び埋め戻し材の化学的変遷	● 緩衝材と埋め戻し材のコロイド化放出 ● 液状化	● 塩水が緩衝材及び埋め戻し材に及ぼす効果 ● 流動の増大による力学的な効果
期間 4	● 緩衝材の膨張の相殺		

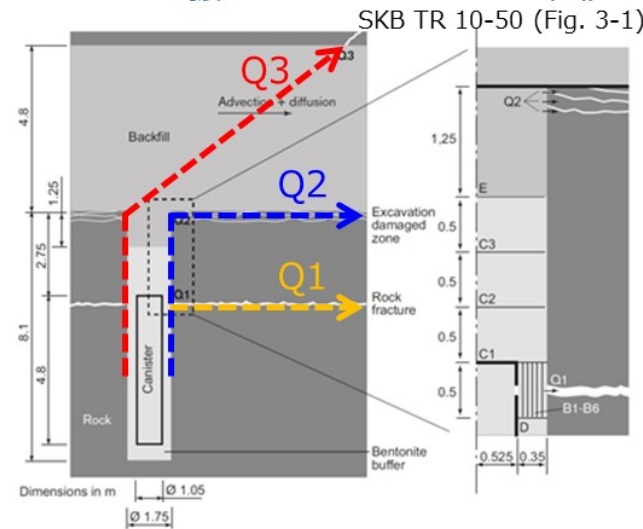
- 評価期間 4 の埋め戻し材に関する評価結果
- 10⁶ 年間の評価対象期間において、比較的透水係数が高く、定置坑道と交差する亀裂のいくつかで埋め戻し材の密度低下が生じたとしても、処分孔上の膨潤圧が大幅に低下し、処分孔内で移流条件が成立するほどの規模の浸食を引き起こすことはない。亀裂が破砕帯と接しているいくつかの位置については、220 トンを上回る埋め戻し材が失われることも考えられるが、これはキャニスタの密封性の観点からは、重要ではない。

4. 安全評価におけるシーリングシステムのハンドリング

- 処分坑道埋め戻し材を介した核種移行⁵⁾
- SR-Site の安全評価における核種移行シナリオとしては、下記が選定されている。
- ①キャニスタ破損シナリオ
- 腐食によるキャニスタ破損
 - 地震によるせん断によって引き起こされるキャニスタ破損
- ②仮想的残余シナリオ（バリア機能の例証）
- 地殻均衡荷重シナリオ（地殻均衡荷重によるキャニスタ破損）
 - ピンホール拡大シナリオ（キャニスタの貫通ピンホールの拡大による欠陥モード）
 - バリア損失シナリオ（さまざまなバリアが完全に失われると仮定した仮想ケース）
- ただし、ニアフィールドにおける核種移行については、上記シナリオのうち、ピンホール拡大シナリオを除き、以下のように評価されており、これ以外は、移行経路の対象とされていない。
- あらゆるニアフィールド構成要素は、核種の保持能を有していないと仮定（腐食によるキャニスタ破損シナリオ）。
 - 核種は、緩衝材（保持能を考慮）を移行後、処分孔内の岩盤亀裂へ移行（下図の放出経路 Q1 に該当する）するため、埋め戻し材は考慮されない（腐食によるキャニスタ破損シナリオ以外）

スウェーデン（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

ピンホール拡大シナリオにおける核種移行経路



※図中の矢印は、シーリングシステムを介した核種移行（Q2 及び Q3）

一方、ピンホール拡大シナリオについては、放出経路 Q1 に加え、緩衝材及び埋め戻し材を介した拡散・移流を考慮した下記の移行経路が含まれる。ここで核種は、緩衝材及び埋戻し材での収着が考慮される。

- 処分坑道床面の EDZ
（放出経路 Q2）
- 処分坑道に交差する亀裂への放出
（放出経路 Q3）

○閉鎖材内の核種移行⁵⁾

閉鎖材に関しては、対象となる立坑や斜坑、ボアホールの地下開口部が特別な経路となることは想定されていない。これは、元来、閉鎖材により地下開口部が有効な水みちにならないように設計されていること、加えて、安全評価において、核種移行は岩盤又は岩盤亀裂中の移流移行が卓越していることによる。

○EDZ における核種移行

- 処分坑道周囲に生じる掘削影響領域について、その核種移行経路としての重要度は限定的である。
処分坑道周囲に生じる掘削影響領域（EDZ）の重要度は、他の核種移行経路と比べて限定的である。EDZ に関して、基本掘削工法と非常に悲観的な仮定をしない限り、移流条件下でのキャニスタ腐食の程度に影響が生じない。

【引用文献】

- 1) SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, (2011).
- 2) SSM: The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS 2008:21, (2008).
- 3) SKB: Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB TR-10-16, (2010).
- 4) SKB: Design, production and initial state of the closure, SKB TR-10-17, (2010).
- 5) SKB: Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-50, (2010).

フィンランド（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

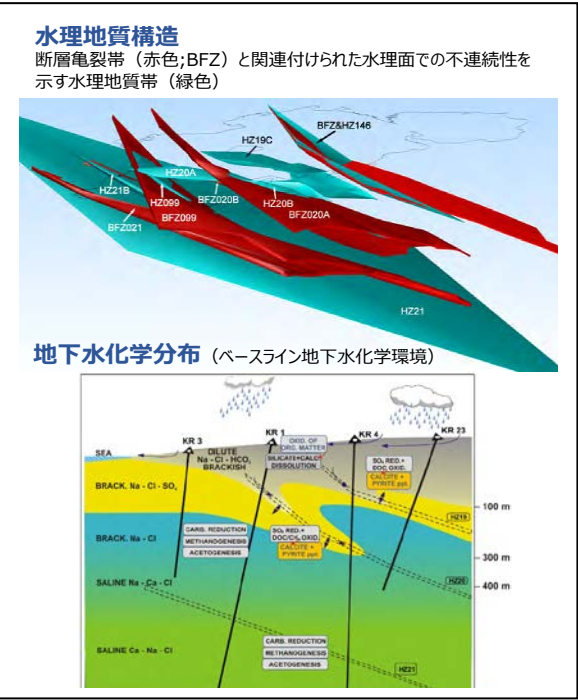
※本資料は年度成果報告書に整理する主要国の詳細情報を要約的に取りまとめたものである。

フィンランドについては公開情報に基づく情報整理であり、特段の出典情報が記されていない限り出典資料は 2012 年セーフティケース統合報告書¹⁾である。シーリングシステムの設計に係るこれらの情報は、既に 1980 年代からの最適化を含む反復的な開発プロセスの 1 断面のものであり、特定された候補サイトの特性も考慮されていることに留意願いたい。

1. 処分場設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①サイトの地質環境特性

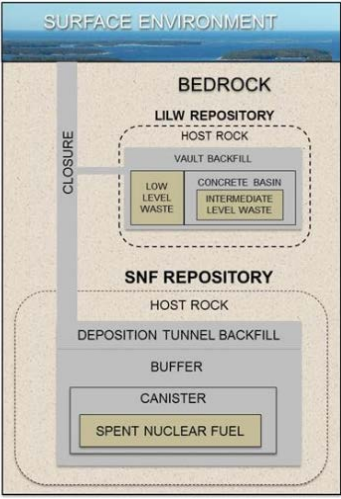
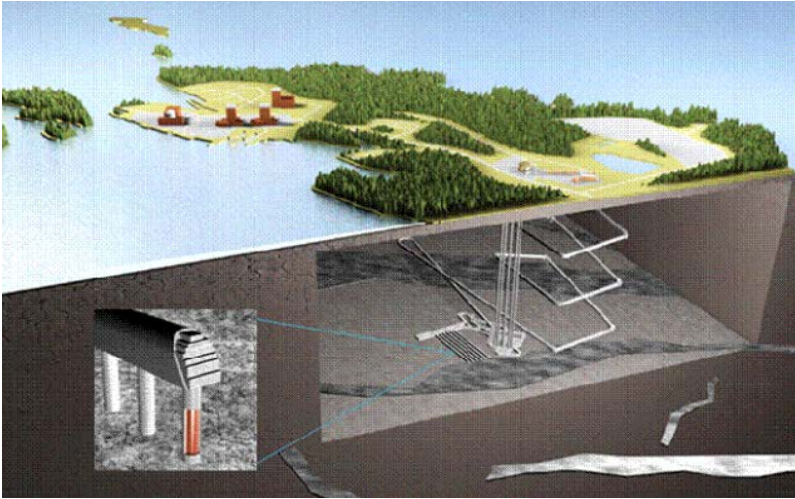
- 基本特性；結晶質基盤岩(坑道等の開口部は自立可能)、地下水流動は低水準(処分深度の平均透水係数は 10⁻¹⁰m/s)
- 長期安全性の観点で留意すべき特性；
 - 変形帯や破砕帯が存在（水理学的な活動水準が高い）
 - 比較的高い地下深部の岩石応力（坑道安定性への影響）
 - 深部地下水の塩分濃度が高い
 - 約 12 万年周期の氷河サイクル（隆起・沈降に伴う岩盤応力、地下水流動、水理化学面での変化）



②処分場構成

事業進捗状況	●2001 年;候補サイトを原則決定（2004 年;精密調査施設建設開始） ●2013 年;建設許可申請 ●2015 年;建設許可発給（2016 年;処分場建設開始） ●2020 年代初め;処分開始（操業期間は約 90 年）
処分対象廃棄物	使用済燃料（6,500tU）
処分概念（KBS-3V）	●使用済燃料をキャニスタ（外側：銅製／内側：鋳鉄製）に封入し、その周囲を緩衝材（ベントナイト粘土）で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した岩盤内に設置 ●複数の人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより、放射性廃棄物を長期に隔離し、隔離ができなくなった場合でも処分場からの放射性核種の放出を遅延 ※スウェーデンと共同で横置き方式（KBS-3H 概念）の実現可能性も検討中
処分場構成要素	①キャニスタ ②緩衝材 ③埋め戻し材 ④閉鎖材（※③④には各種プラグが含まれる） ※人工バリアではないが、「母岩」も安全機能が割り当てられた構成要素。 支保工の施工は想定されていないが、ロックボルトやグラウトの使用を想定。

処分概念（KBS-3V、深度約400～450m） Posiva 2017-2 (Fig 3-2、Fig 1-1、1-2)



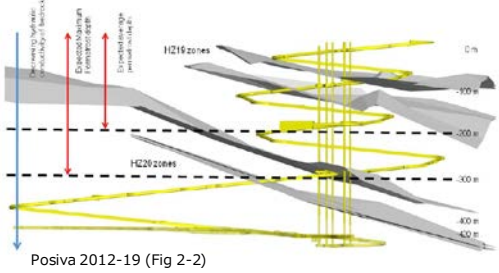
③シーリングシステム構成と安全規制要件

- 安全規制制度において、「埋め戻し材」および「閉鎖材」は人工バリアと定義。STUK 規制指針(YVL D.5)³⁾において、以下のような定性的な要件を設定（「埋め戻し材」に関する事項を抜粋・要約）。
 - YVL D.5 （406 考慮すべき安全機能）
 - ・他の人工バリアの機能維持
 - ・掘削坑道を通じた放射性物質の移行制限
 - YVL D.5 （507 母岩の望ましい長期特性維持のための坑道の建設・操業・閉鎖に係る要件）
 - ・定置坑道は、処分活動やモニタリング等に不都合にならない限り迅速に埋め戻し閉鎖する

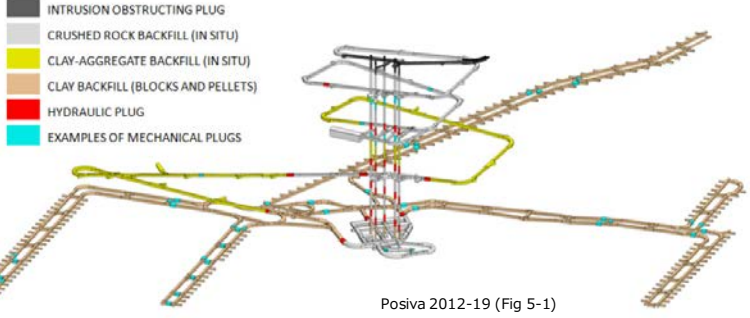
○シーリングシステムのサブシステム構成要素^{4),5)}

区画分類	構造物名称	定義
地表から処分深度までの区画	閉鎖材 (Closure)	閉鎖埋め戻し材
	プラグ	●アクセス坑道及び立坑の埋め戻し・閉鎖のために設置される構造物（巨れき、破砕岩、粘土及びそれらの混合物を深度によって使い分け） ●隔離のための構造物 ●力学プラグ、水理プラグ、人間侵入防止プラグ
処分深度の区画【主に処分坑道】	閉鎖材 (Closure)	閉鎖埋め戻し材
	プラグ	●処分坑道以外の空洞の埋め戻しのための構造物（破砕岩や粘土） ●隔離のための構造物 ●力学プラグ、水理プラグ
	埋め戻し材 (Backfill)	処分坑道埋め戻し材 ●処分坑道の埋め戻しのための構造物（底盤(Foundation layer)および粘土系材料のブロックとペレットより構成） ●処分坑道を力学的、水理的な隔離のために処分坑道端部に設置される構造物（鉄筋・低 pH コンクリート製のコンクリートドーム及びコンクリートビーム、砂又は砂利より成るフィルタ、粘土製の水密性シールより構成）

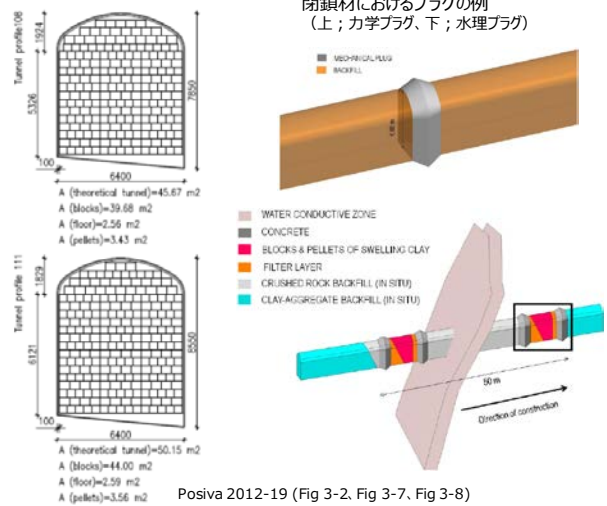
連絡坑道等(地表～処分深度)と水理地質帯(破砕ゾーン)との関係



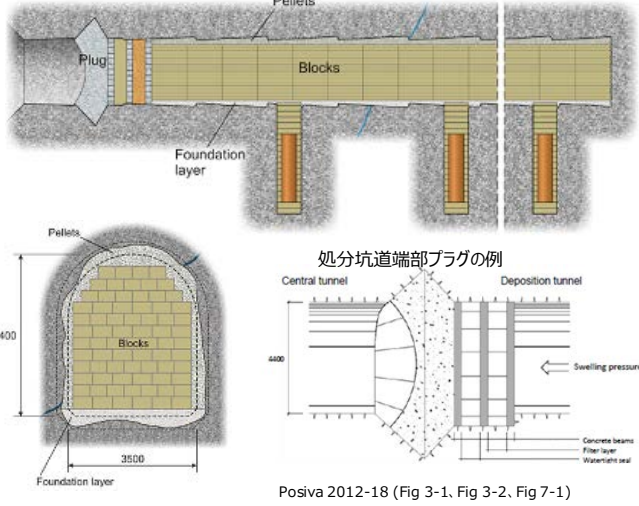
連絡坑道等における閉鎖材（及びプラグ）の設置概念



閉鎖材の設計例(連絡坑道等)



処分坑道の埋め戻し材の設計例



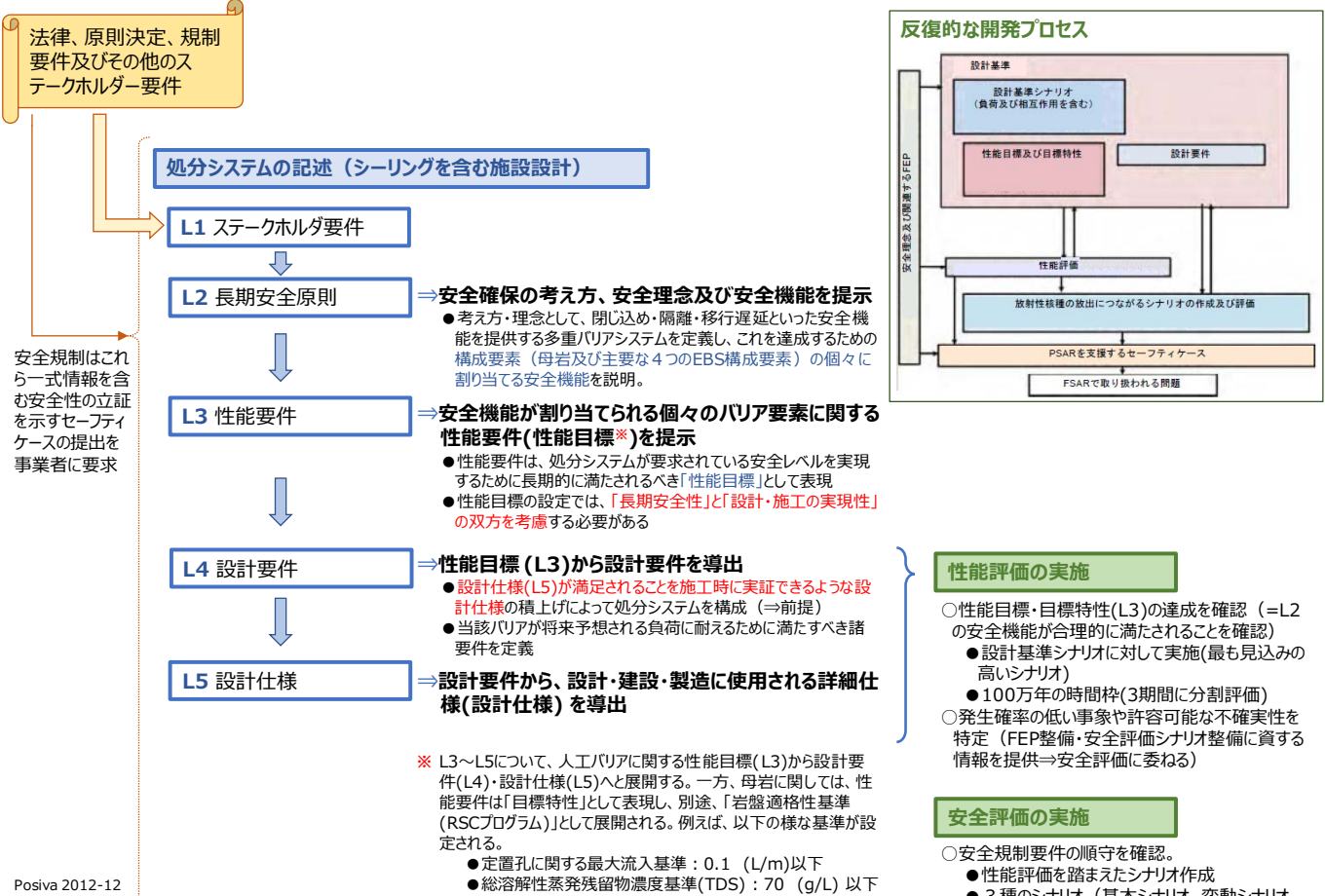
フィンランド（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

2. 要件管理に基づく処分場の設計方法

①全体概要（方法論）

- 最上位の法規制要件(ステークホルダ要件；L1)を含め、5段階に要件を階層化して展開(下図)。
- 設計要件(L4)までは定性的な要件、設計仕様(L5)ではL4を満たすための定量的な値や情報を提示。
- 要件設定をととした設計基準(レファレンス設計)の開発、処分場システムの性能評価、放射性核種放出につながるシナリオの作成及び安全評価が、相互に連携した反復的開発プロセスの中で実施。

セーフティケースで表現されるシーリングを含む処分場設計の全体像



②シーリングシステムに関する要件の展開例（処分坑道埋め戻し材の例：次図）^{4),5)}

- 埋め戻し材に関するL3性能要件（性能目標）は、2つの観点から設定。
 - 埋め戻し材自身の性能に関する性能目標
 - 他の構成要素の機能発揮を支援（サポート）するための性能目標
- L4設計要件の設定では、要件設定の「根拠」ならびに「機能発揮において予想される負荷」についても整理。
- L5設計仕様の設定では、埋め戻しのサブシステム要素毎（底盤、ブロック、ペレット）に、材料特性や具体的な材料製造～原位置施工の手順を整理し、その実現性が見通しが得られている（Posiva 2012-18）。その上で、製作・施工が実現できる範囲の中で、施工仕様を「初期状態」として定めている。

階層化された要件への展開例（処分坑道埋め戻し材の例）

L2 長期安全原則（安全機能）

埋め戻し(処分坑道)

- 緩衝材及びキャニスタにとって良好かつ予測の比較的容易な力学的、地球化学及び水理地質学的な条件に寄与する。
- 起こり得るキャニスタ破損事象の発生後に、放射性核種放出を制限し、遅延させる。
- 設置坑道に隣接する岩石の力学的な安定性に寄与する。

L3 性能要件（性能目標）

埋め戻し(処分坑道)

- L3-BAC-5 別途指定されていない限り、埋め戻し材及びプラグは、偶発的な逸脱を除き、処分場に予想される条件において、**数十万年間の期間にわたり**、以下に列記する性能目標を満たすものとする。
- L3-BAC-8 埋め戻し材は、設置坑道沿いの移流による流動を制限するものとする。
- L3-BAC-9 プラグは、処分場の操業段階にわたり、設置坑道を水理学的に隔離するものとする。
- L3-BAC-13 埋め戻し材及びプラグの化学的組成は、緩衝材、キャニスタまたは基盤岩の性能を危険にさらすものではないものとする。
- L3-BAC-16 埋め戻し材は、緩衝材を所定の位置に保つものとする。
- L3-BAC-17 埋め戻し材は、設置坑道の力学的安定性に寄与するものとする。
- L3-BAC-18 プラグは、操業フェーズにわたり、埋め戻し材を所定の位置に保つものとする。
- L3-BAC-19 埋め戻し材は、設置坑内でのキャニスタの持ち上げ（リフティング）現象の防止に寄与するものとする。

L4 設計要件

埋め戻し(処分坑道)

(定義)

- 埋め戻し材の主成分は、天然膨潤性粘土で構成しなければならない。プラグは、良好な水理的隔離能力を備え、長期的に大規模な体積変化を起こさない物質で構成しなければならない。

(性能)

- L4-BAC-28 自己シーリングと自己修復 埋め戻し材は、設置後の自己シーリングや、何らかの水理学的及び力学的擾乱の発生後の自己修復が可能となるよう設計しなければならない。

(水理・移行特性)

- L4-BAC-5 透水係数 埋め戻し材は、飽和後に埋め戻された坑道の全断面における透水係数が 1×10^{-10} m/s以下となるよう設計しなければならない。
- L4-BAC-6 プラグの供用寿命 プラグは、少なくとも中央坑道が閉鎖されるまで、水理的隔離能力を維持するように設計しなければならない。

(力学特性)

- L4-BAC-13 プラグの膨潤圧及び水圧に対する耐性 [～割愛～]
- L4-BAC-14 プラグが埋め戻し機能を維持する能力 [～割愛～]
- L4-BAC-29 母岩との接触 初期状態において、埋め戻し材は母岩と良好に接触していなくてはならない。

(化学特性)

- L4-BAC-18 有害物質含有量の制限 [～割愛～]
- L4-BAC-30 緩衝材を所定の位置に保つための・・・ [～割愛～]

L5 設計仕様

性能特性（埋め戻し材）

(モンモリロナイト含有量)

- 30-38% (Friedland clay blocks)
- 75-90% (Foundation layer and Pellets)

(乾燥密度 [dry density])

- 1990-2070 kg/m³ (Friedland clay blocks)
- 1150-1350 kg/m³ (Foundation layer)
- 900-1100 kg/m³ (Pellet)

(ジオメトリ)

- The backfill blocks shall have following dimensions: 550 x 470 x 330 mm. The manufacturing tolerance shall be -1 mm / +2 mm.
- The block filling degree (from the theoretical/nominal cross-section) shall be >80%.
- The gap width between the blocks and the theoretical tunnel wall/roof shall be 100 mm. The pellet fill shall fill the remaining open gap between the blocks and rock.
- The thickness of the foundation bed shall be maximum +150 mm above the theoretical floor layer. Considering excavation tolerance of +400 mm, the maximum thickness of the foundation layer is 550 mm.

化学特性（埋め戻し）

- The organics content in the backfill shall be lower than 1 wt-%.
- The total sulphur content in the backfill shall be less than 1 wt-%, with sulphides making, at most, half of this.

設計仕様(L5)として展開される処分坑道埋め戻し材の初期状態

構成要素	材料	備考
埋め戻しブロック	Friedland粘土、ドイツ	セクション3.2.2を参照
基層	ベントナイト顆粒、ギリシャのMilos	セクション3.2.1を参照
ペレット	ベントナイトペレット、ギリシャのMilos	セクション3.2.3を参照
構成要素の乾燥密度	最小 平均 最大	備考
埋め戻しブロック	kg/m ³ 1990 2030 2070	(±40 kg/m ³)
基層	kg/m ³ 1150 1250 1350	(±100 kg/m ³)
ペレット	kg/m ³ 900 1000 1100	(±100 kg/m ³)
含水率	最小 平均 最大	備考
埋め戻しブロック	% 8.5 9.0 9.5	(±0.5%)
基層	% 18.0 19.5 21.0	(±1.5%)
ペレット	% 17.5 27.5 37.5	(±10%)
モンモリロナイト含有率	最小 平均 最大	備考
埋め戻しブロック	% 30 34 38	調整 ±2% 可能性のある変動 28-40%
基層	% 75 80 90	調整を含む
ペレット	% 75 80 90	調整を含む
EMDD		
埋め戻しブロック	kg/m ³ 1150 1332 1497	
基層	kg/m ³ 962 1099 1227	
ペレット	kg/m ³ 734 862 1031	

実現の見通しが得られている埋め戻し材の製造・施工ライン

3. INSTALLATION OF BACKFILL COMPONENTS

フィンランド（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

3. 性能評価におけるシーリングシステムのハンドリング⁶⁾

- 性能評価は、設計基準シナリオに対して(将来の状況が合理的に見込まれる変遷の道筋)、3つの期間に分けて実施。
 - 評価期間 1：掘削及び操業から処分施設の閉鎖まで（数十年から最大で約 100 年まで）
 - 評価期間 2：閉鎖後から 1 万年まで
 - 評価期間 3：1 万年後以降の長期（8 回の氷期サイクルが想定される 100 万年まで）
- 性能評価をととして、性能目標(L3)の達成を確認するとともに、発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定し、FEP や安全評価シナリオの整備に資する情報を提供する。
- シーリングシステム（特に埋め戻し材）は、自身の機能に関連する直接的な評価項目に加えて、他の機能に関連する評価でも間接的に扱われる（坑内湧水環境の評価など）。
- 評価項目は、その評価対象期間の違いによって異なる（下表）。
- 評価期間 3 のシーリングに関する評価結果（要約）
 - 次の氷期サイクル（10 万年を超える期間に）に予想される様々な条件の変遷のもとでも、EBS 及び母岩の特性は、性能目標及び目標特性を順守する。
 - 100 万年というタイムフレームにおいてさえ、構成要素のほとんどはその性能目標を満たす状態を維持する。

最初の評価期間 1（掘削及び操業から処分施設の閉鎖まで）を対象とした性能評価における評価項目	
大分類	評価期間 1 を対象とした性能評価における評価項目
地圏の水理学及び地球化学面での変遷	● 地下水流動環境（坑内湧水） ※EDZの特性・生成挙動含む ● 地下水化学環境（ニアフィールド領域の地下水組成、塩分濃度、pH、酸化還元状態、溶存する鉄・硫化物、微生物影響、セメント系材料からのコロイド放出）
熱環境の変遷	●ニアフィールド領域の熱環境の変遷（緩衝材の熱制約）
岩盤の力学的な変遷	※ 岩盤の損傷は目標特性(L3)の直接の評価・検討項目になっていないが、上記の水理・化学面の変遷の評価に資するものとして、以下が評価項目として挙げられている。 ● 熱負荷に伴うニアフィールド岩盤内部の局所的損傷（スポーリング、亀裂の再活性化等に伴うEDZなど） ● クリープ
緩衝材と埋め戻し材の力学及び水理学面での変遷	● 緩衝材及び埋め戻し材のバイピング・侵食（緩衝材及び埋め戻し材の喪失量、バイピングの影響を受ける処分孔の数、侵食水量、侵食水中の固形分）
緩衝材と埋め戻し材の地球化学的変遷	● 酸素の消費とpHの変遷 ● コロイドの生成 ● ニアフィールドにおけるセメント系浸出液の影響（セメント系材料の浸出、岩盤中での浸出液の移行、セメント系浸出液と粘土(モンモリロナイト)の相互作用、他のシーリング材の浸出(シカソル)閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷
閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷	● 操業期間中の閉鎖埋め戻し材の変遷 ● 操業期間中のプラグのコンクリート構成要素の変遷（一般的なコンクリート構造物の耐久性、設置後100～200年間におけるHZ20水理地質帯より上部の標準コンクリートの変遷、設置後100～200年間におけるHZ20水理地質帯より下部の低pHコンクリートの変遷）
キャニスタの腐食	（割愛）
臨界	（割愛）

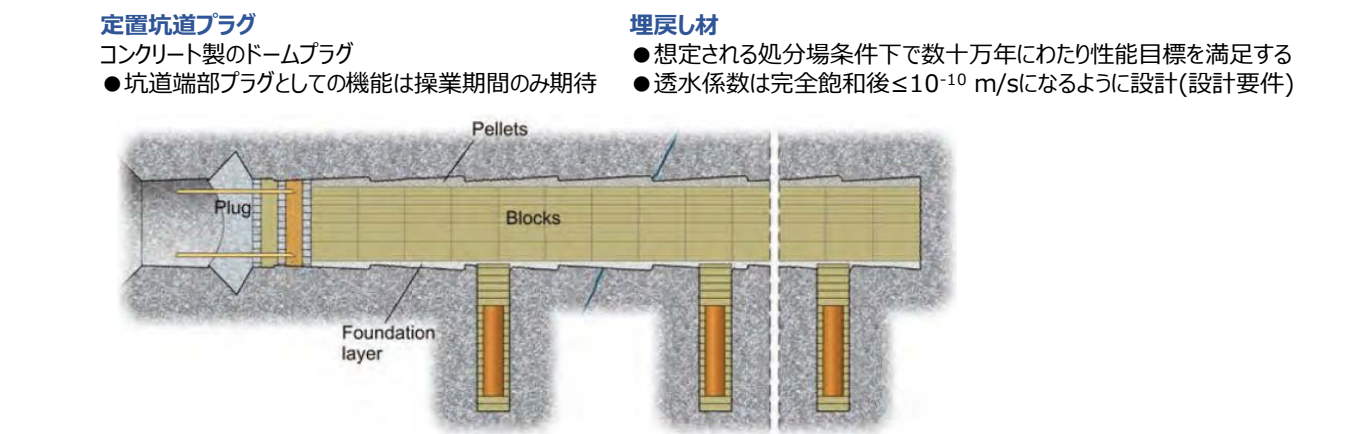
性能評価の各対象期間における評価項目の違い（大分類「緩衝材と埋め戻し材の力学及び水理学面での変遷」の例）			
大分類	評価期間 1（～閉鎖まで）	評価期間 2（～10,000年）	評価期間3(～100万年)
緩衝材と埋め戻し材の力学及び水理学面での変遷	● 緩衝材及び埋め戻し材のバイピング・侵食（緩衝材及び埋め戻し材の喪失量、バイピングの影響を受ける処分孔の数、侵食水量、侵食水中の固形分、	● 飽和プロセス（再冠水プロセス） ● 膨潤および均質化プロセス ● 埋め戻し材への緩衝材の膨出（浸潤プロセス中及び浸潤後）	● 緩衝材及び埋め戻し材の間隙水化学と塩分(塩度)の変遷 ● アルカリ性の浸出液が緩衝液と埋め戻し材に及ぼす影響 ● モンモリロナイトの長期安定性 ● 緩衝材へのキャニスタ腐食生成物の影響 ● 微生物プロセスと有機物の影響

- 性能評価結果を踏まえ、安全評価のための核種放出シナリオ（基本シナリオ）では、シーリングシステムを以下のように扱っている。
 - 埋め戻し材：処分坑道埋め戻し材とプラグは要件に従って設計及び定置される。埋め戻し材の性能目標(L3)は変遷にわたって満たされる。

- 閉鎖材：閉鎖埋め戻し材やボーリング孔シール材は、要件に従って設計及び定置され、性能目標(L3)は変遷期間にわたって満たされる（水理プラグの劣化を仮定しても、材料は重力沈降するため優先的流路は形成されない）。

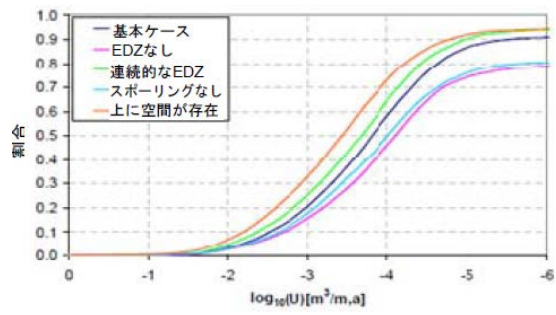
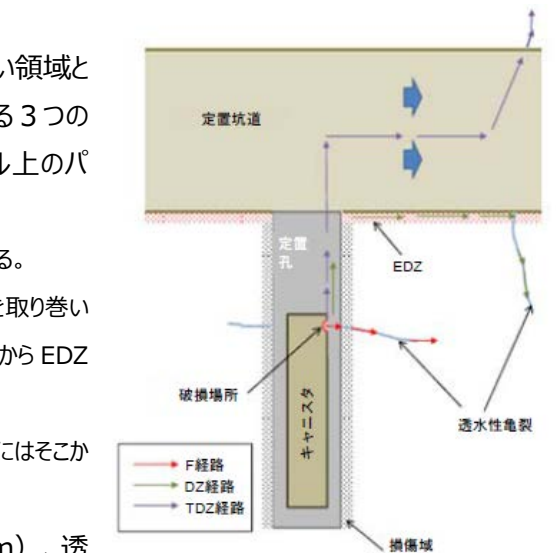
4. 安全評価におけるシーリングシステムのハンドリング

- シーリングシステムの扱い；
 - 処分システムの機能変遷に係る性能評価において、「埋め戻し材」や「閉鎖システム」の機能は損なわれないと評価。
 - シーリングシステムを介した坑道を直結する短絡経路シナリオは、安全評価における「変動シナリオ」や「稀頻度事象(What if)」でも扱われていない。



○掘削損傷領域（EDZ）の扱い

- EDZ は、評価上その存在を容認しており、母岩よりも透水性の高い領域として、基本シナリオの水理モデルにおいて、廃棄体から生活圏に至る3つの核種移行経路のフラックスの合算として考慮している（水理モデル上のパス；亀裂ネットワークのモデル）。
 - ・ **F 経路**：キャニスタから緩衝材を通して、定置孔と交差する母岩の亀裂に至る。
 - ・ **DZ 経路**：キャニスタから緩衝材を通して直接に、または**損傷域**（定置孔を取り巻いてると仮定される領域）を経由する形で、**定置坑道の EDZ** に、そしてそこから EDZ と交差する母岩の亀裂に至る。
 - ・ **TDZ 経路**：キャニスタから、緩衝材を通して定置坑道の**埋め戻し材**に、さらにはそこから定置坑道と交差する母岩の亀裂へと至る。
- オルキオトの EDZ 特性は、深さ範囲 15～70cm（平均 30cm）、透過率 10⁻¹²～10⁻⁸m²/s 等と評価されている。
- 安全評価における核種のフラックス計算の結果、支配的な役割を果たす地上までの移動経路は F 経路であり、それに比べると、定置坑道の DZ 経路や TDZ 経路の重要性が低いとしている。
- ※EDZ による連結性が増大するのは、亀裂が全く横断していない区画や初期流量が少なく輸送抵抗が大きい区画。



フィンランド（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

出典資料

- 1) POSIVA 2012-12, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto- Synthesis 2012”, 2012
- 2) POSIVA 2017-2, “Safety Case Plan for the Operating Licence Application”, 2017
- 3) STUK, “GUIDE YVL D.5 DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE”, 2015
- 4) POSIVA 2012-18, “Backfill Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug”, 2013
- 5) POSIVA 2012-19, “Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure”, 2012
- 6) POSIVA 2012-04, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Performance Assessment 2012”, 2012

フランス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

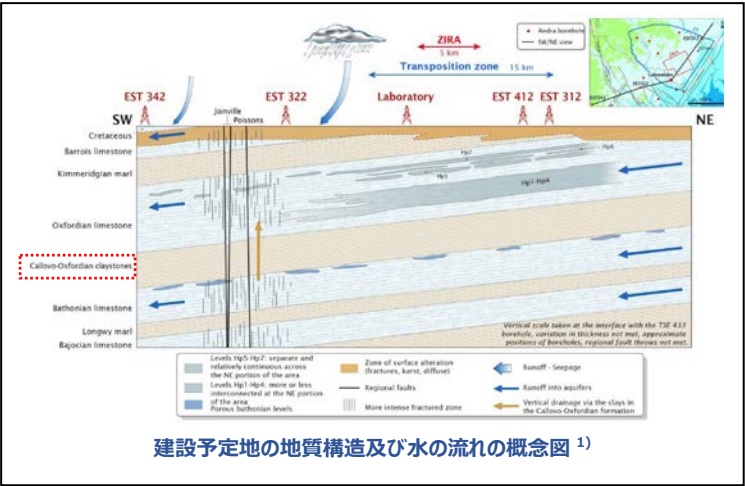
※本資料は年度成果報告書に整理する主要国の詳細情報を要約的に取りまとめたものである。

フランスについては公開情報に基づく情報整理であり、特段の出典情報が記されていない限り出典資料は Cigeo プロジェクトに関する 2016 年安全オプション書類¹⁾²⁾である。シーリングシステムの設計に係るこれらの情報は、既に 1991 年代からの規制とのやり取りを踏まえた反復的な開発プロセスの 1 断面のものであり、特定された候補サイトの特性も考慮されていることに留意願いたい。

1. 処分場設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①サイトの地質環境特性

- 基本特性；上下を石灰岩層に挟まれた均質なカロボ・オックスフォーディアン粘土層(層厚:130～160m)は、大規模な不連続層が存在せず、鉛直方向の動水勾配が低い。また、粘土層内の地下水流動は低水準であり、還元性の化学的特性を有する。さらに、地震活動も極めて少なく、稀少資源が存在しない。
- 長期安全性の観点で留意すべき特性；
 - 地下水を層内に制限する建築構造（dead-end architecture）
 - 粘土層のサイズを利用した平面型処分エリア
 - 環境温度の制限：最大 100℃（裕度は 90℃で設定）
 - 掘削損傷領域の低減（特に処分セルの周囲）



建設予定地の地質構造及び水の流れの概念図¹⁾

②処分場構成

事業進捗状況	●1991 年;放射性廃棄物管理研究法（可逆性のある地層処分方法）の制定 ●2000 年;ピュール地下研究所建設開始 ●2010 年;地下施設展開区域（ZIRA、約 30km ² ）の決定 ●2019 年;処分場の設置許可申請予定（2030 年頃処分開始予定）
処分対象廃棄物（併置処分想定）	●ガラス固化体：10,000m ³ ●TRU 廃棄物等：72,000m ³ ※全量再処理を前提とした 2015 年の見積（処分容器を含まない量）
処分概念	●地下約 500m の粘土層内に処分坑道を建設し、次の 3 つのバリアからなる多重バリアシステムにより隔離 ○ 廃棄物パッケージ（放射性廃棄物自身とそれを収容するキャニスタ、オーバーバックにより構成） ○ 人工構成要素（廃棄体パッケージ、処分孔内の鋼鉄製スリーブ等） ○ 天然バリア（サイトの地質学的環境特性） ●処分孔内のスリーブは、処分孔の力学的な支持に加え容易に廃棄物パッケージの定置と回収が可能な機能 ●ガラス固化体用廃棄物パッケージは、処分孔内に横置き定置
処分場構成要素	○廃棄物パッケージ ○セル（粘土層内に水平上又はわずかな傾斜で掘削された球形型若しくは卵型の地下掘削部分） ○スリーブ（セルの内側に設置される、廃棄体容器・セパレーター、プラグを収納する鋼鉄製の管） ○充填材（スリーブの外側と掘削された粘土岩の間を充填するために用いられる材料） ○ZFC（掘削影響領域） ○ZFD（ZFC 外側の掘削による未損傷領域） ○プラグ ○埋め戻し材 ○シール材（立坑シール材、斜坑シール材、横坑シール材）

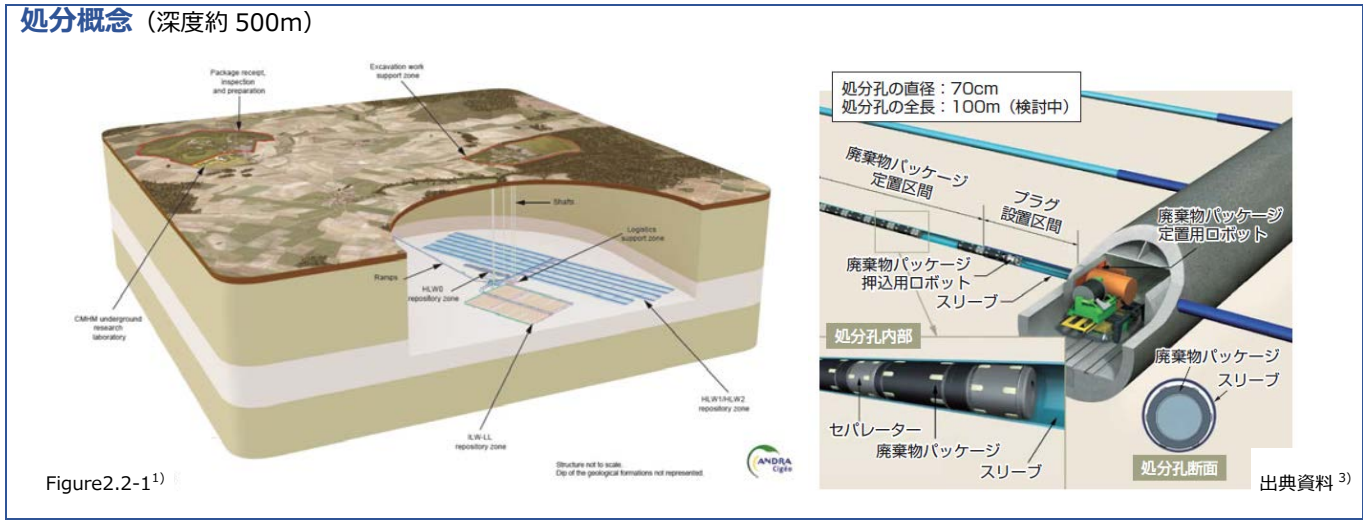


Figure2.2-1¹⁾

出典資料³⁾

③安全規制要件とシーリングシステム構成

- ASN 安全指針⁴⁾では、処分システム構成要素（廃棄物パッケージ、人工構成要素、母岩）は、処分施設の閉鎖後に安全に関する役割を担うものであり、「埋め戻し材」及び「閉鎖材」を含む「人工構成要素」には以下のような定性的な要件及び安全機能を要求（§5.4/5.5）

人工構成要素の目的	●坑道及び定置されたパッケージ周辺の空隙の可能な限りの減少 ●閉鎖前の母岩の損傷を抑制
人工構成要素の機能	●放射性核種の閉じ込めに寄与する機能 ○処分施設内への水の流入を制限 ○核種移行の抑制及び遅延 ●廃棄物の隔離に寄与する機能 ○母岩の間隙水以外の水の浸入を抑制 ※但し、機能、性能及び特性は、パッケージ及び母岩との関係において定められ、正当化されなければならない。
人工構成要素の材料選定	母岩及び廃棄物パッケージの安全機能に悪影響をもたらすことがないこと
人工構成要素の設計時の考慮事項	●廃棄物パッケージ等から放出される熱及びガスの発生 ●機械的強度の減少 ●腐食や核種移行抑制の観点で有利な物理化学的条件の維持
設計に関する考慮事項（シーリング）	●設計時からのシール性能の保証の実施 ●効果的なシーリングを実施するための可能な限り水の流入を抑制する坑道設計やレイアウト

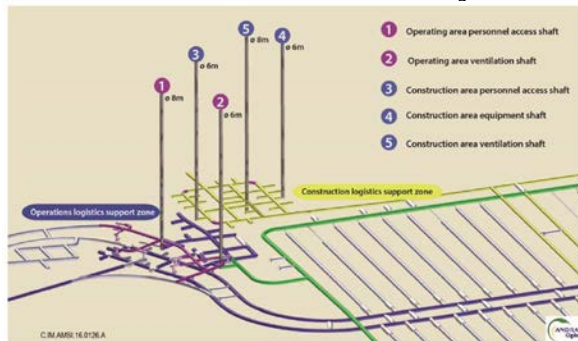
フランス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

○シーリングシステムのサブシステム構成要素^{1),2)}

区画分類	構造物名称		目的および使用材料など
地表から処分深度までの区画	・立坑シール	埋め戻し材	透水性の高い領域に設置。処分エリア深度と同様に掘削土と添加材の混合物が検討されている
	・斜坑シール	帯水層分離シール	処分エリア深度上部にある透水性の高い石灰岩層の分離のために設置（詳細は今後検討される）
		膨潤性粘土コア	閉鎖後安全機能に対して最も重要な役割であり、アクセス坑道への水の浸入を制限するために膨潤性粘土ベースの粘土コア（目標とされる透水係数：飽和状態において 10^{-11} m/s 程度）で製作・施工
		閉じ込め壁	膨潤性粘土コアへの影響（力学／化学）を制限するために設置される低 pH コンクリート製のプラグ
		ライナ（斜坑のみ）	粘土コアへの水の浸入を制限することを目的に設置。基本的には最終的に除去されるが、残される場合には、低 pH コンクリートを使用
処分深度の区画【主に処分坑道】	・横坑シール	埋め戻し材	掘削土と添加材の混合物が検討されている
		膨潤性粘土コア	閉鎖後安全機能に対して最も重要な役割であり、アクセス坑道への水の浸入を制限するために膨潤性粘土ベースの粘土コア（目標とされる透水係数： 10^{-9} m/s 未満）で製作・施工
		閉じ込め壁	膨潤性粘土コアへの影響（力学／化学）を制限するために設置される低 pH コンクリート製のプラグ
		ライナ	粘土コアへの水の浸入を制限することを目的に設置。基本的には最終的に除去されるが、残される場合には、低 pH コンクリートを使用
	・埋め戻し材		掘削土と添加材の混合物が検討されている
	・充填材		スリーブ外側と掘削された粘土岩の間を充填するために設置
	・閉鎖プラグ		核種の移行低減、遅延及び減衰並びに周辺岩盤の特性維持（水循環抑制機能は求めている）のために設置される粘土プラグ

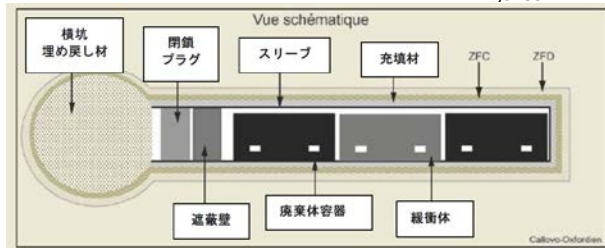
立孔／斜坑／坑道の位置

Figure 3.5-15²⁾

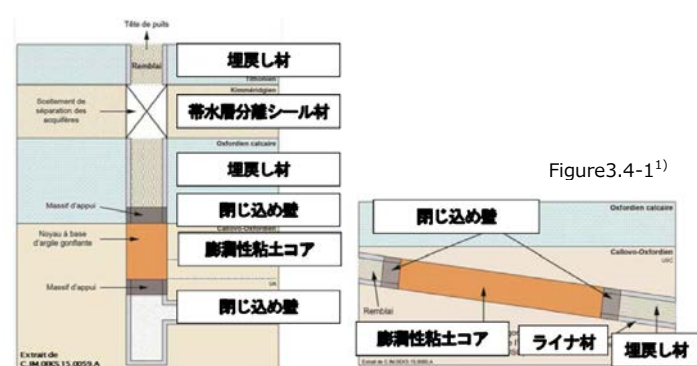


ガラス固化体用セル内の構成

Figure 3.2-1¹⁾



立孔／斜坑シーリングの構成



横坑シーリングの概略図

Figure 3.4-1¹⁾



2. 要件管理に基づく処分場の設計方法

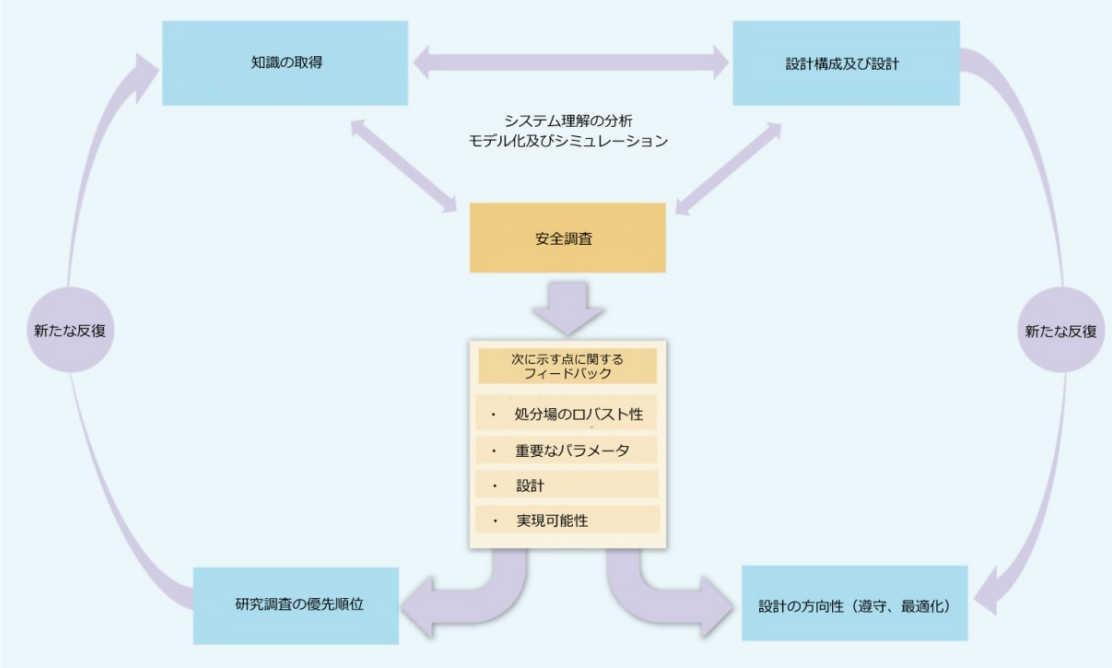
①全体概要（方法論）

○ANDRA は、ASN 安全指針⁴⁾に従い、閉鎖後安全機能を特定し、各機能についてサイト及び設計の選択に関する一般原則を採用。

閉鎖後安全機能	サイト及び設計の選択に関する一般原則
地上でのさまざまな現象や、人間の行為から廃棄物を隔離	・ 処分場を地下の深い場所に、また地球力学的な作用が低く、均一な区域に配置すること（これにより、処分システムは浸食現象から保護され、またその結果として、人間侵入（長期的な観点からは重要度は大きくない）からも保護される。 ・ 調査活動の対象となる可能性がある地下資源または地熱資源が存在しないこと。 ・ 処分施設に関する記憶を、その閉鎖後において可能な限り長期間にわたり保存すること。
水の循環を防止	・ カロボ・オックスフォーディアン層内の透水性が低く、また ZIRA(地層処分場の地下施設の展開が予定される区域)において適用された導水勾配も低いことから、低水準のものであること。 ・ 水理面において活性な地質構造から離れた区域に処分場を設置すること。 ・ 地上－底部連絡構造の圧密及びシーリングを行い、坑道等を通じて潜在的に起こりうる水循環を最小限にする。 ・ 処分区画を、地下施設の他の部分から切り離すことにより、処分場内での水の流動を制限する（カロボ・オックスフォーディアン層における小規模な水の流動のみが生じることとなる）。
放射性核種及び有毒物質の放出の制限と、それらの処分場内での固定化	・ 廃棄物及びパッケージが物理化学的の観点から保護されるようにセル（特にセルに使用される物質）を設計することにより、廃棄物及びパッケージの変質を可能な限り制限する。 ・ 放射性核種及び有毒物質の放出並びに移行量を制限するセルの物理化学的な諸条件を確保すること（例えば、使用される物質がこの目的に合わせて選択されること、一定の廃棄物パッケージについては、当該パッケージが引き起こすと見込まれる擾乱やこれらのパッケージに収納されている物質の感度に基づき、パッケージ間の最低限の距離が設定されること、カロボ・オックスフォーディアンの有利に働く諸特性、低い水の流量、還元性水の化学的性質、支配的な移送プロセスが拡散であることなどが挙げられる）。
放射性核種の移行の遅延及び低減	・ カロボ・オックスフォーディアン層はきわめて厚く（ZIRA の部分で少なくとも 130 m）、高い保持性能と間隙水（中性～還元性）を伴っており、廃棄物中の放射性物質及び有毒物質の溶液中濃度が制限され、溶液中でのさまざまな物質の移行はゆっくりとしたものとなる。よって、大部分の放射性物質及び有毒物質に関して時の経過と共に、また空間的に希釈効果が生じる。 ・ カロボ・オックスフォーディアン層の中間部における地下施設の配置及び操業面での技術的制約を考慮した場合、当該施設の建築構造は平面的なものとなる。そのため、地下施設の上下両側に位置するカロボ・オックスフォーディアンの未擾乱層はきわめて厚いものである。 ・ 地下施設におけるセル及び横坑の幾何学形状（特に長さの面での）の最適化をはかる。これにより、地下構造物に沿った放射性物質及び有毒物質の移動が制限されるだけでなく、優先的な移行経路がカロボ・オックスフォーディアン層を通じたものとなる。

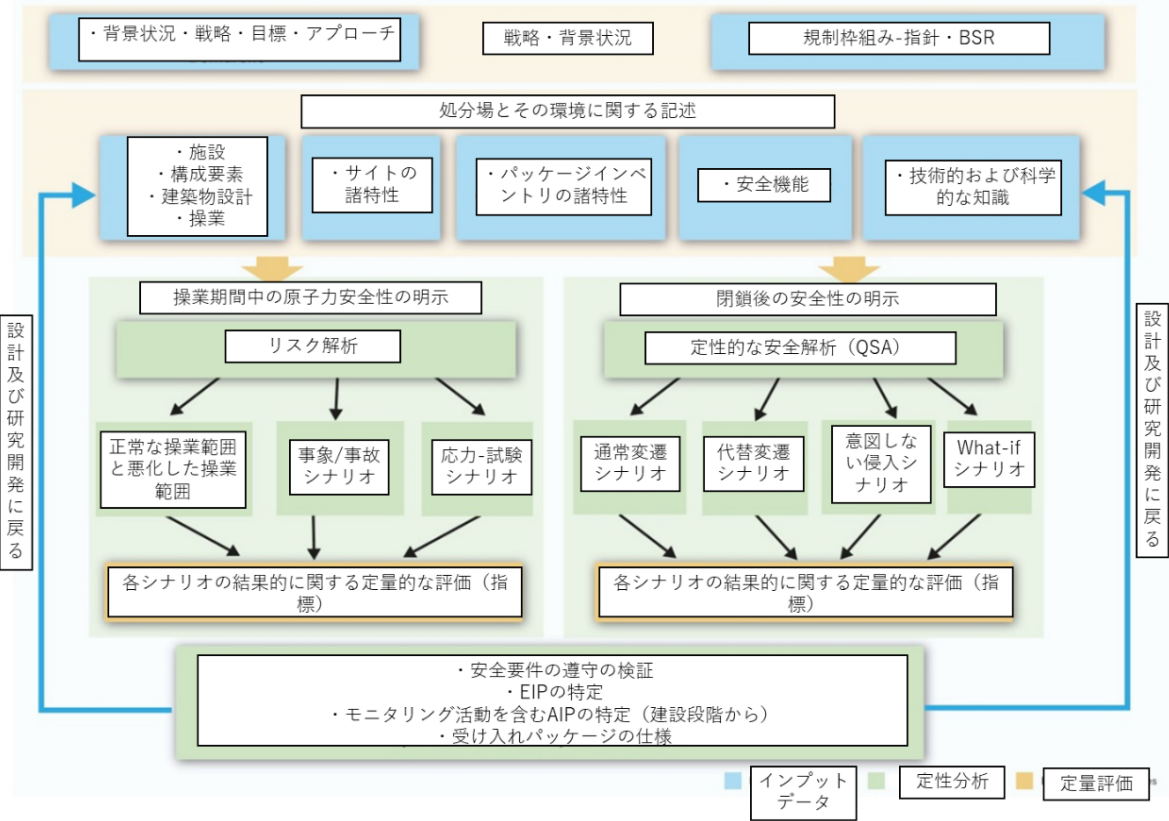
○ASN による 1991 年の基本安全規則（RFS III.2.f）では、処分場の長期安全性能に何を期待するのか、また設計原則、適格な地質媒体の選定に使用する規準や調査期間を示すとともに、処分に関する研究の指針としなければならない複数の基本目標が示された。これにより、現象論的な知識の取得、地層処分にとって適切な方法の開発、さらには技術的解決策に関する研究・開発に基づいて安全面での反復作業が実施されることになった。下図に示されているように、この反復的アプローチは、設計と取得された知識と安全評価の間の密接なつながりに基づいている¹⁾。

フランス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）



セーフティケースで表現されるシーリングを含む処分場設計の全体像

○処分場の設計については、操業中及び閉鎖後の安全性の協調的アプローチ（閉鎖後の安全性を確保した上で、設計の変遷を、Cigeo 全体を通して統合するアプローチ）を用いることとしている¹⁾。



②シーリングシステムに関する要件（横坑シールの例）

○横坑シールは、閉鎖後安全機能のうち「水の循環を防止すること」に対して寄与し、現段階で設定されている要件及び性能、設計面での措置、関連する下位構成要素（横坑シールの構成要素）が整理されている。

要件・性能	設計面での措置	関連する下位構成要素
可能な限り均一な粘土コアの特性を確保するために、残存する空隙は合理的に可能な限り低くする。	粘土コアは、粘土のペレットまたは粉末（膨潤性のもの又は混合物）を用いる。	粘土コア
粘土コアの膨潤圧により、粘土コアと接触する粘土岩の変形が制限され、また損傷を受けた粘土岩の亀裂の修復が促進される	設置密度については、膨潤性粘土の鉱物学的性質にとって適切な密度が選択される。 ーコアの最小限の長さは、掘削された直径の 2 倍、すなわち 20 m に等しいものとされる。	
ライナが粘土コアを迂回する優先的な水循環経路を形成する事態を防止するために、その連続性が遮断されなければならない。	●レファレンスオプション： 粘土コアの設置予定箇所のライナの部分的な除去（少なくとも 4 m の述べ長さにわたる）。除去区域は、粘土コアに使用される物質に類似した物質で満たされる。 ●バリエーションオプション： 連続亀裂帯（ZFC）の連続性とその場所に残されるライナの連続性の半径方向に遮断する措置が 3～5 か所で実施される。	コアと切羽部分の粘土岩との間に位置する構成要素
粘土コアと接触するかそれに近い場所に位置するライナ部分または遮水帯によって生じる化学的擾乱は、可能な限り小さくする。	その場に残されるライナ部分は、低 pH コンクリート製のものを使用する（少なくともコアいずれかの末端から直径 1 つ分に相当する距離まで）。	
粘土コアの膨潤圧が再飽和期間にわたり発生し、その変遷期間を通じて維持するように力学的に閉じ込められなければならない。	粘土コアの両端にコンクリート製の閉じ込め壁を設置する。その寸法（長さ、幾何学的形状、何らかの固定方法）は次に挙げる条件に従ったものとされる。 ●コア膨潤圧といずれかの末端部における水頭を左右される。 ●コンクリートの化学分解が考慮に入れられる。 ●可能な限り高い安定度と耐久性をもたらす。	コンクリート製閉じ込め壁
粘土コアの化学的擾乱は、最小限にされなければならない。	低 pH コンクリート配合の使用。	

3. 性能評価におけるシーリングシステムのハンドリング

○Andra は、シール材に関する多数の試験及びシミュレーションをすでに実行している。しかし試験された配置構成は最終的に使用されるシール材の設計を決定付けるものではない（この種のシール材が実際に使用されるのは、最初の横坑シール材の場合には 2070 年以降、立坑シール材及び斜坑シール材の場合には 2150 年以降と考えられている）。これにより、採用可能な実現手法に関して、また潜在的性能に関して、それぞれの構成要素ごとのフィードバックが得られることになる。

フランス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

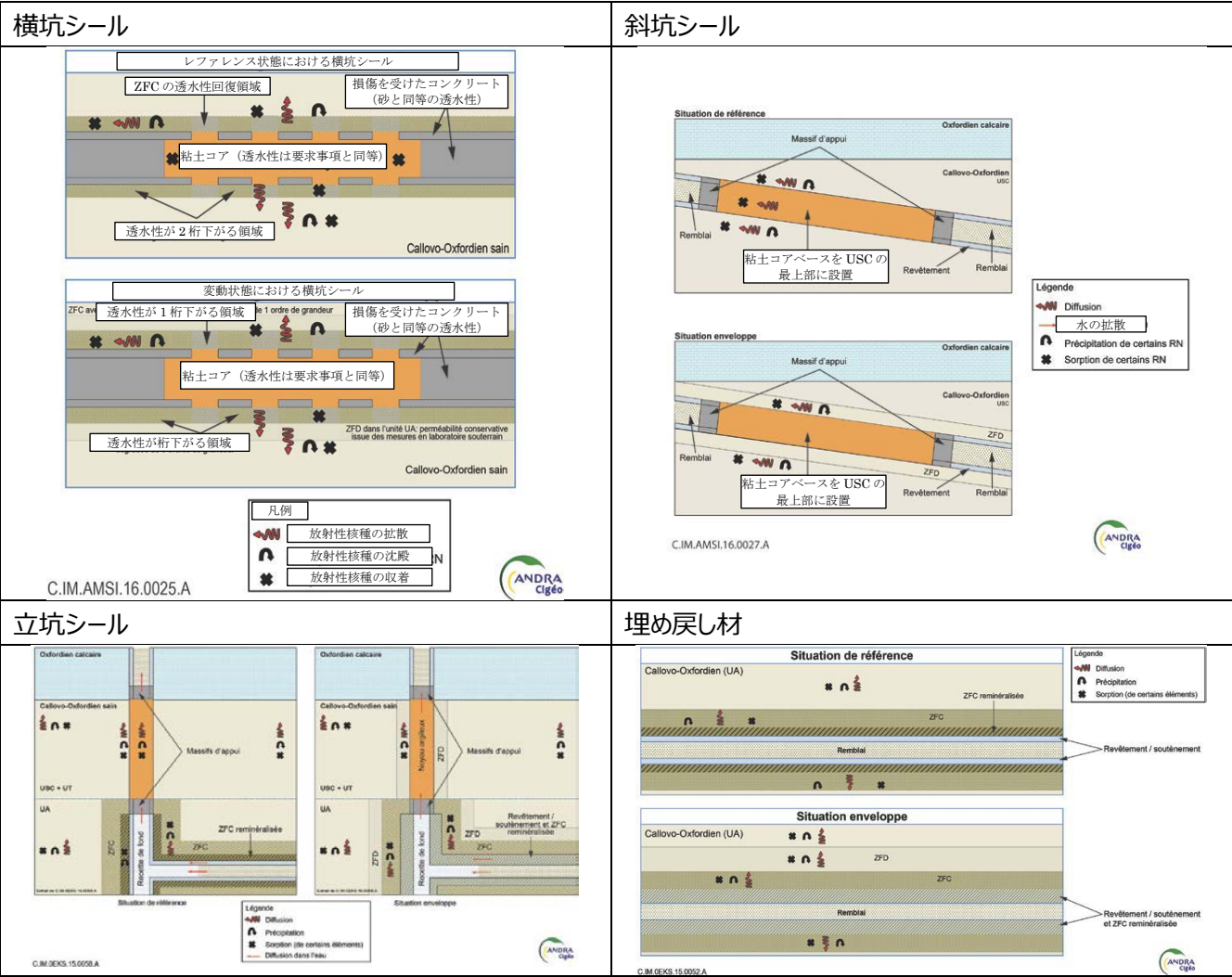
4. 安全評価におけるシーリングシステムのハンドリング

○シーリングシステムの扱い¹⁾；

- 処分場の核種移行を評価するにあたり、Andra は「レファレンス状態」と「変動状態」という2つの状態について、検討を実施している。

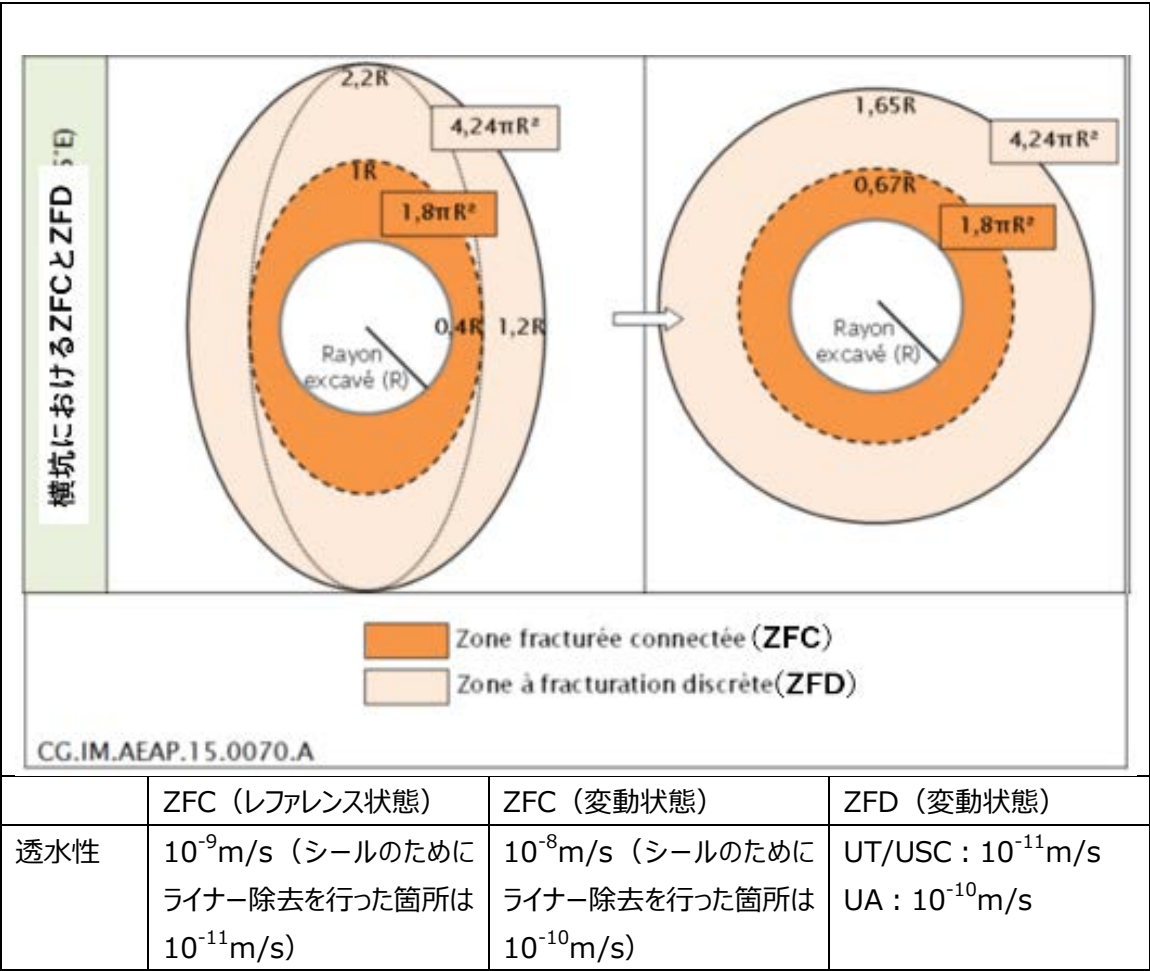
ケース	蓋然性喪失までの期間	備考
レファレンス状態	4300 年	✓ パッケージ及び人工構成要素の劣化プロセス（パッケージ及び封入マトリックスの腐食、人工構成要素の老朽化等）を考慮 ✓ 核種移行媒体としての考慮
変動状態	500 年	✓ 人間活動に関連する事象として、シール材の欠陥（製造または設計欠陥）を含む

- 横坑シールにおいて、膨潤性粘土コアへの核種の収着は、レファレンス状態でのみ考慮している。
- 横坑シールのライナ除去部における ZFC の透水性は、レファレンス状態と変動状態で想定を変更（後述参照）。
- 粘土コア（立坑、斜坑、横坑）および埋め戻し材の透水性は、レファレンス状態と変動状態のいずれにおいても、各々「 10^{-11}m/s 」、「 10^{-8}m/s 」と設定している。



○掘削損傷領域（ZFC）の扱い¹⁾

- 粘土岩の掘削により影響を受けた領域について、ZFC（掘削損傷領域）および ZFD（ZFC の外側の掘削による未損傷領域）を考慮し、評価を実施している（数値概念の簡略化のために、楕円モデルを同一の面積を有する円として評価。なお、ZFD においては変動状態のみ考慮）。
- ZFC 及び ZFD の透水性については以下の通り設定している。



出典資料

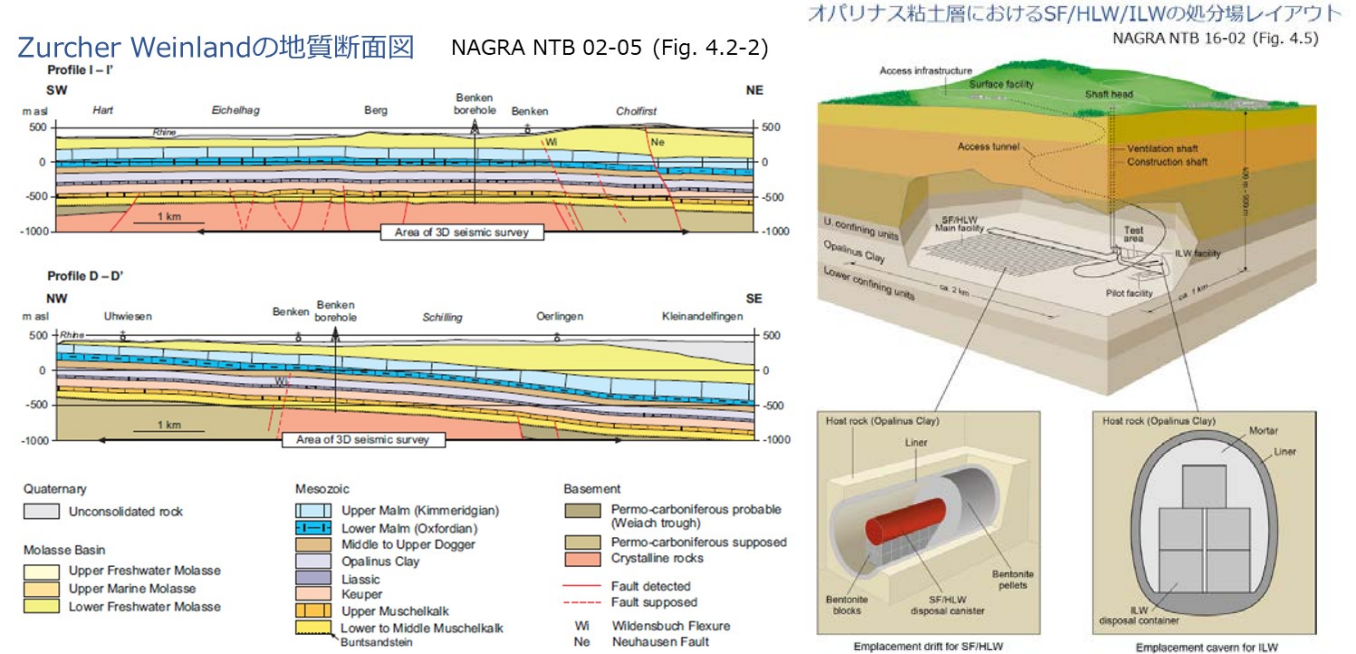
- 1) ANDRA, “Dossier d’options de sûreté partie après fermeture (DOS-AF)”, 2016.
- 2) ANDRA, “Dossier d’options de sûreté partie exploitation (DOS-EXPL)”, 2016.
- 3) RWMC, “諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について”, 2018.
- 4) ASN, “Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde”, 2008.

スイス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

1. シーリングシステムの設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①サイトの地質環境特性¹⁾

- 基本特性：硬性粘土岩（粘土質頁岩）（オパリナス・クレイ）、予測可能な構造であり水理及び地球化学特性を有している（透水係数 10^{-13} m/s）、構造的に安定で隆起及び侵食速度は小さい
- 長期安全性の観点で留意すべき特性：
 - 低透水係数（拡散場）
 - 地球化学条件は還元性、弱アルカリ性及び中程度の塩性
 - 自己シール能力を有する



②処分場構成

事業進捗状況	●2000 年;EKRA（放射性廃棄物の処分概念に関する専門家グループ）が「監視付き長期地層処分」概念を提案 ●2005 年;「監視付き長期地層処分」の方針が法律で明確化 ●2011 年; 3 つの地質学的候補エリアを連邦政府が承認し、サイト選定の第 1 段階終了 ●2018 年;連邦評議会は、ジュラ東部、チューリッヒ北東部、北部レゲレンをサイト選定第 3 段階に進む候補とした ●2060 年頃;処分開始予定
処分対象廃棄物	使用済燃料（8,995 m ³ ）、ガラス固化体（398 m ³ ）
処分概念	●監視付き長期地層処分概念（monitored geological disposal） ●SF、HLW、L/ILW を併置 ●主施設、試験区域、パイロット施設、ニアフィールド・環境モニタリングプログラムのための坑道も含めた各システムコンポーネントを連絡するための坑道システムで構成される。 ●使用済燃料またはガラス固化体をキャニスタ（炭素鋼）に封入し、坑道内のベントナイトブロック製の台座の上に横置きで定置して、周りの空間は粒状化したベントナイトで埋め戻す
処分場構成要素	①キャニスタ ②埋め戻し材 ③中間シール材 ※坑道には鋼製支保の使用を想定。

③安全規制要件とシーリングシステム構成

○安全規制²⁾において、シーリングシステムに関する以下の要件を設定。また、関連する用語の定義も行われている。

- 規制要件
 - ・地層処分場の閉鎖後には、長期の安全性を確保するための更なる措置が要求されないように設計されなければならない
 - ・埋め戻し、シールのいずれも長期安全要件の遵守を要求
 - ・廃棄物の定置に続いて埋め戻しを実施
 - ・試験区域における埋め戻し材の充填（回収が必要な場合はその除去）や空洞及び坑道のシール方法の実証を要求
 - ・廃棄体定置前にパイロット施設において廃棄体の定置と埋め戻しを実施することを要求
 - ・安全評価上、埋め戻し及びシールは考慮

●用語の定義

関連用語	解説（抄訳）
多重バリアシステム (Multiple barrier system)	廃棄物に含まれる放射性核種を閉じ込め、維持するために利用される、複数の受動的に機能する多様な人工及び天然バリアのシステム。多重バリアシステムの機能は、主として単一のバリア機能に依存することがあってはならない。
人工バリア (Engineered barrier)	閉鎖後も存在し、安全概念に基づいて受動的に機能し、放射性核種の閉じ込めに寄与する地層処分場の人工的な構成部分。
埋め戻し(Backfilling)	固体の物質を充填することにより空洞を塞ぐこと。埋め戻しによって、天然バリア及び人工バリアの力学的安定化、空間的な分離、あるいは機能・能力の保証が可能となる。
シール構造 (Sealing structure)	岩盤支持機能を持つ水理・力学的人工バリア。埋め戻し材の保護にも寄与する。

○シーリングシステム構成¹⁾

エリア	構造物名称	定義
地表から処分深度まで	立坑、アクセス坑道	埋め戻し材 立坑、アクセス坑道に設置される物質
		シール材 立坑及びアクセス坑道が Wedelsandstein 層と交差する地点に設置される物質
処分エリア深度	建設坑道、操業坑道等	埋め戻し材 建設坑道、操業坑道等に設置される物質
		シール材 立坑及びアクセス坑道との接続部に設置される物質
	処分坑道	埋め戻し材 処分坑道のキャニスタ（横置き）の周囲に設置される物質
		中間シール材 処分坑道の各セクションの高度なコンパートメント化のためにキャニスタ 10 体毎に設置される物質
		最終シール材 処分坑道の末端に設置される物質

スイス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

2. 要件管理に基づく処分場設計の方法論

①全体概要

セーフティケースで表現されるシーリングを含む処分場設計の全体像

設計時の要件	・発熱性廃棄物から生じる熱による影響に加えて、人工バリアと天然バリアの間の相互作用に留意 ・人工バリアを含む処分場施設の設計に当たっては、廃棄物や天然バリアとの物理的及び化学的な相互作用に留意
--------	---

○ロバストな処分システムの選定原則

処分場の建設、操業そして特に閉鎖は比較的遠い将来に行われることになると考えられ、現時点ではすべての問題や不確実性が十分に解決されているわけではなく、将来的にも幾つかの不確実性は未解決のまま残る。そのため、以下の処分システムの選定原則を提示している。

※処分システムの選定原則²⁾

- 未解決問題によって安全性が損なわれたり安全性の実証能力が損なわれたりすることがないこと
- サイト特性調査や研究開発プログラムに対して過度の要求を課すような安全性実証に係わる不確実性が存在しないこと

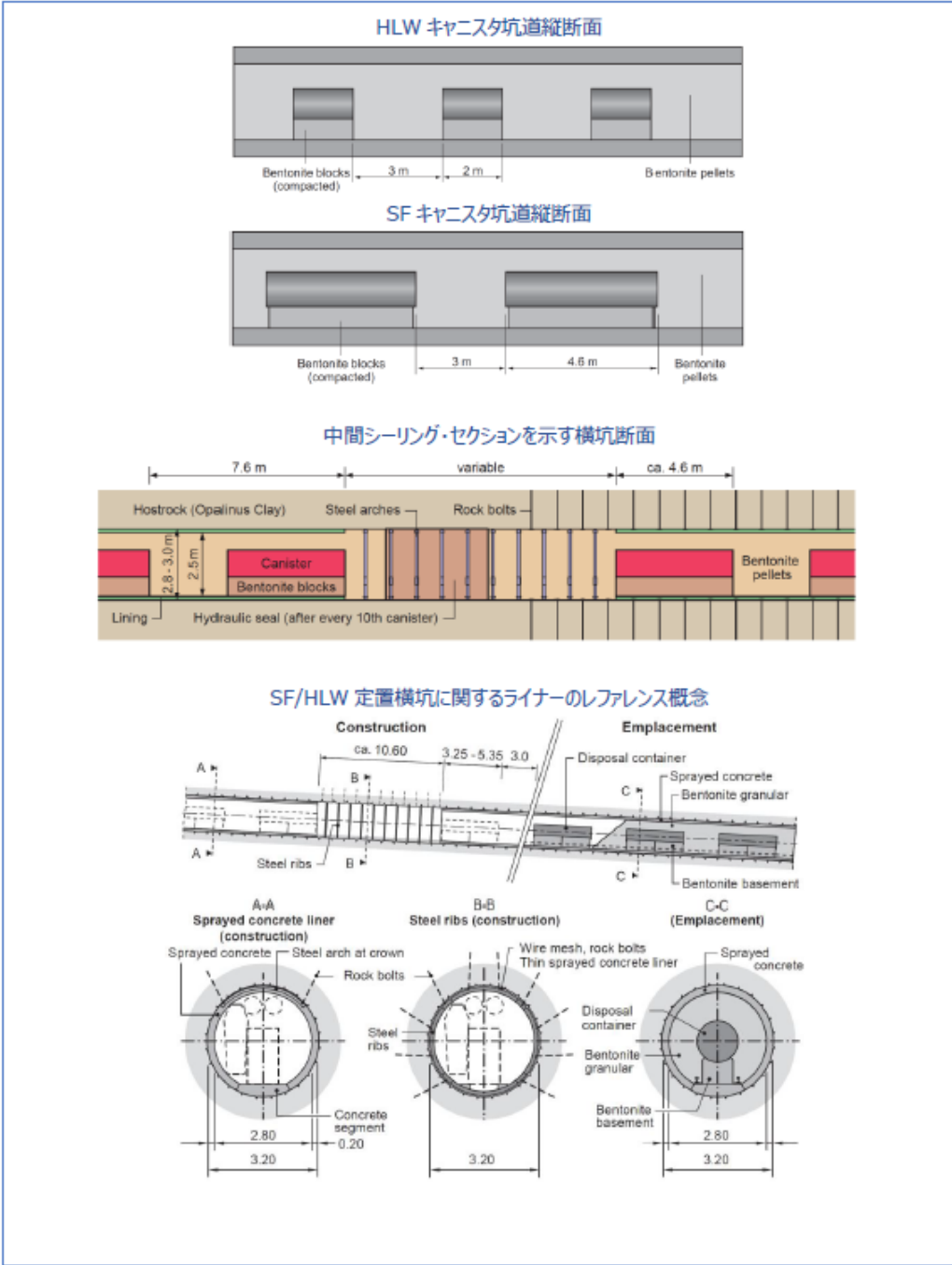
○処分場の設計及び実施に関する原則

- 封じ込め及び緩和
- SF 及び HLW に対する初期の完全閉じ込め
- 不確実性に対する感度のなさを確保するための冗長性
- 有害現象の回避及び有害現象に対する感度のなさ
- 実施の信頼性
- 処分場閉鎖の信頼性
- 予測可能性

②シーリングシステムに関する要件の展開例（処分坑道埋め戻し材の例）

- 中間シール材
 - ・SF/HLW 処分坑道の各セクションの高度なコンパートメント化のために、キャニスタおよそ 10 体ごとに、中間ベントナイト・シール材を設置
 - ・低透水性：K < 10⁻¹² m/s
 - ・力学特性：処分キャニスタへの力学的な支持性、坑道支持性
- ライナー
 - ・中間シーリング・セクションでないSF/HLW 処分坑道沿いに設置
 - ・坑道支持性
- 最終シール材
 - ・処分坑道の末端に設置
 - ・最終シール材に関する要件は開発中
- 建設坑道、操業坑道等の埋め戻し材
 - ・建設坑道、操業坑道等を充填するために建設坑道、操業坑道等に設置
 - ・水理特性：埋め戻し後に擾乱を受けていない母岩と同様とすること

- 建設坑道、操業坑道等のシール材
 - ・立坑及びアクセス坑道との接続部に設置
 - ・水理特性：埋め戻し後に擾乱を受けていない母岩と同様とすること
- 立坑、アクセス坑道の埋め戻し材
 - ・立坑、アクセス坑道を充填するために立坑、アクセス坑道に設置
 - ・水理特性：埋め戻し後に擾乱を受けていない母岩と同様とすること
- 立坑、アクセス坑道のシール材
 - ・立坑及びアクセス坑道が Wedelsandstein 層と交差する地点に設置
 - ・水理特性：埋め戻し後に擾乱を受けていない母岩と同様とすること



スイス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

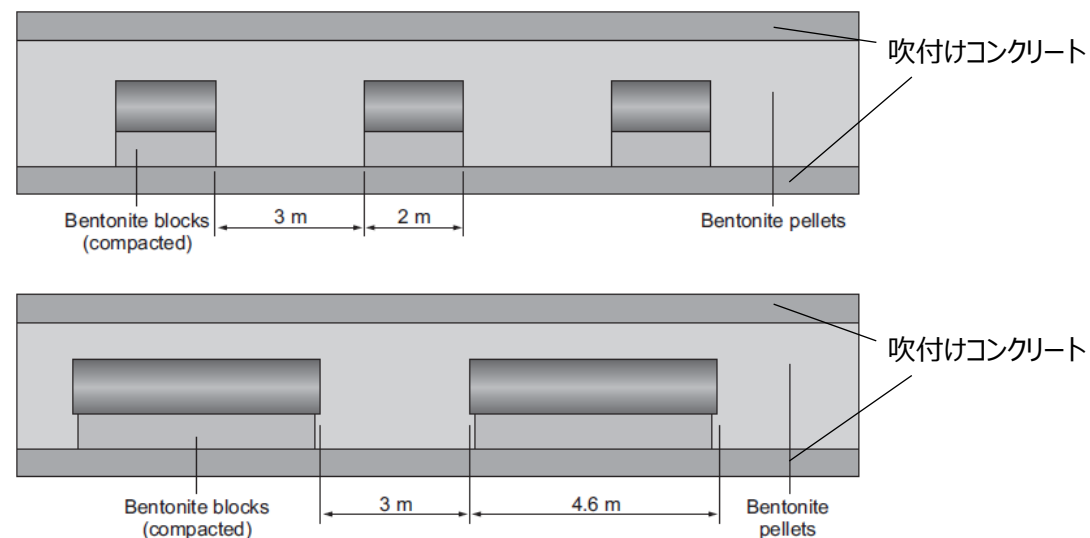
設計仕様として展開される処分坑道埋め戻し材の初期状態

- 中間シール材
 - ・ 緩衝材に使用されているものとほぼ同じ。例外として、透水係数に関する要件はより厳格になっている（中間シール材 $< 10^{-12} \text{ m/s}$ 、緩衝材は $< 10^{-11} \text{ m/s}$ ）。
- ライナー
 - ・ 吹付けコンクリートライナーを適用
 - ・ 中間シール材設置場所の間には、ライナーを伴わない鋼鉄製支保工を設置
- 最終シール材
 - ・ 高圧縮粒状ベントナイトで構成される
- 建設坑道、操業坑道等の埋め戻し材
 - ・ 30%ベントナイト／70%砂の混合物（ $K=5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ）
- 建設坑道、操業坑道等のシール材
 - ・ 高圧縮ベントナイト（ $K=10^{-13} \text{ m/s}$ ）
- 立坑、アクセス坑道の埋め戻し材
 - ・ 30%ベントナイト／70%砂の混合物（ $K=5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ）
- 立坑、アクセス坑道のシール材
 - ・ 約 40m の高圧縮ベントナイト（ $K=10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ ）で密封

3. 性能評価におけるシーリングシステムのハンドリング（NAGRA, TECHNICAL REPORT 16-02）

（現状性能評価に関する記載は少ない。）

- 支保の成立性のために、支保材（例えば、コンクリートあるいは合成ポリマー）とベントナイト及びオパリナス・クレイとの相互作用の評価が必要とされる。



HLW/SF キャニスタ坑道断面における吹付けコンクリート（支保）

4. 安全評価におけるシーリングシステムのハンドリング（NTB-02-05）

（現状、安全評価に関する記載は少ない。）

○ シーリングシステムの扱い；

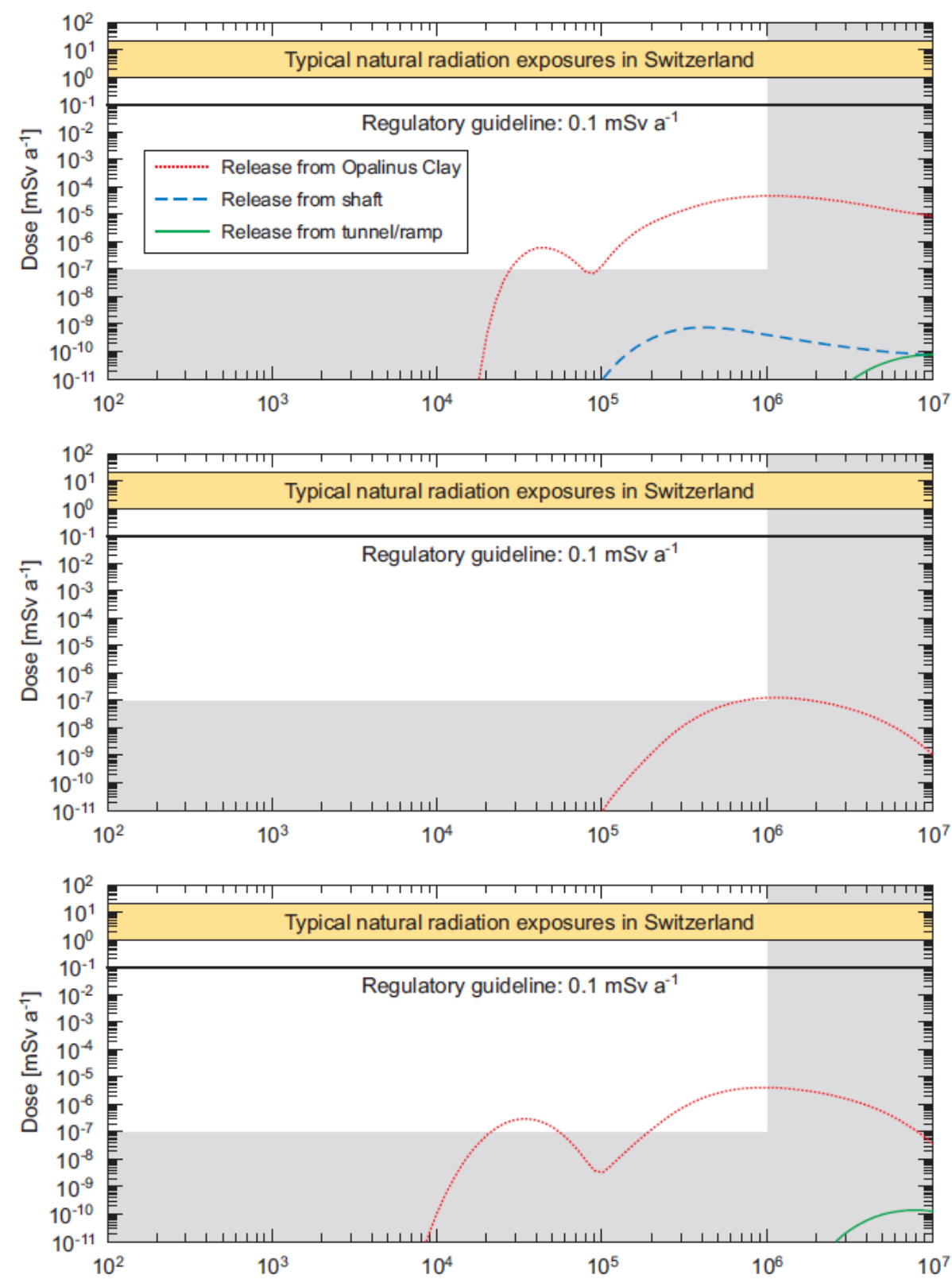
- レファレンスケースでは、放射性核種の坑道、斜坑及び立坑に沿った移行はないと仮定。
- 上記仮定の妥当性を示すため、アクセス坑道に沿った核種移行は母岩を通じた移行と比べて無視できるほど小さいことを例示。（NTB 02-05, Fig. 7.4-6）

レファレンスケースにおいては、シーリングシステムに関して以下の仮定を設けて、安全評価を行っている。

（但し、安全評価項目についての記載はみられない）

- ベントナイト(SF/HLW)
 - － 放射性核種はキャニスタ内部の間隙空間に相当する、十分に混合された水の中に放出され、ベントナイトの内側境界面と接触すると仮定される。
 - － ベントナイトの移行特性は均質と仮定される。特に、廃棄物パッケージ周辺のベントナイト中の熱変質領域は無視し得る程度であり、廃棄物の近傍で放射線分解によって生成する酸化剤のベントナイト緩衝材中への著しい移行は起こらないと仮定される。
 - － 処分場の内部及び周辺は還元性条件となると仮定される(SF 表面を除く)。同一元素の同位体間による溶解限度の分配と還元条件下での溶解限度によって、水中の放射性核種濃度は制限される。特定元素のすべての同位体の濃度の合計値が溶解限度を超えると放射性核種の沈殿が起こり、濃度が低下すると再溶解が起こる。
 - － 溶解限度を超えたかどうかを評価するために用いられる元素濃度は、廃棄物から放出されるすべての同位体の濃度を合計することによって求められる。廃棄物以外から生ずる同位体のバックグラウンド濃度は保守的に無視される。
 - － ラジウムについては、必要なデータが得られていること、また親核種である U-238 の半減期が非常に長く Ra-226 が安全性にとって潜在的な重要性を有していることから、類似の化学特性を有する元素の非放射性同位体とラジウムとの共沈が考慮される。ただし、その他すべての元素については、キャニスタ及び廃棄体の腐食生成物への放射性核種の収着と同様、共沈による不動態は無視される。
 - － ベントナイト緩衝材中での溶質の移行メカニズムは、Fick の法則によって記述される水の拡散と、元素依存の収着係数(分配係数：Kd)で記述される線形平衡収着による遅延である。水に溶解した放射性核種のガス及び／あるいは坑道収斂による移行は無視できると考えられる。
 - － 放射性核種を含むコロイドはベントナイト中では不動態であると仮定され、考慮外とされる。
- 坑道／斜坑／立坑
 - － 坑道、斜坑及び立坑に沿った放射性核種の移行はないと仮定される。

スイス（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）



評価ケースの線量の時間変化(基本ケース；斜坑／立坑の影響を受ける核種放出を考慮)

出典資料

- 1) NAGRA, “The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland”, TECHNICAL REPORT 16-02, 2016
- 2) NAGRA, “Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)”, TECHNICAL REPORT 02-05, 2002
- 3) Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, “Guideline for Swiss Nuclear Installations, Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case” ENSI-G03/e, 2009

カナダ（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

※本資料は年度成果報告書に整理する主要国の詳細情報を要約的に取りまとめたものである。

カナダについては公開情報に基づく情報整理である。処分場の設計は主に候補地の地質的特徴ならびに処分場に置かれる廃棄物の特性によって大きく変わるが、現時点で、候補岩種による差異は、岩盤の熱伝導度の相違による処分エリアの広さ（掘削／埋戻量の違いに影響）のみであるとされていることから、本資料では最新の結晶質岩のレポート情報²⁾を参考とした。

1. 処分場設計を含むセーフティケース開発の全体概要

①サイトの地質環境特性

○処分場の候補岩種（結晶質岩か堆積岩）を含む、具体的な処分場設計は決定していない

②処分場構成

事業進捗状況	●サイト選定中（2023 年までに最も好ましい 1 地点を選定する予定） ●2043 年操業開始を目指す
処分対象廃棄物	使用済燃料（CANDU 炉から、約 500 万体的以上）
処分概念	●使用済燃料を再処理せずに処分する。 ●適応性のある段階的管理(APM プロジェクト)
処分場構成要素	① UFC（使用済燃料コンテナ） ②緩衝材（バッファボックス） ③埋め戻し材（ベントナイト） ④遮断壁（低熱高性能コンクリート(LHHP プラグ） ⑤閉鎖材（グラウト、アスファルト、ギャップフィル）



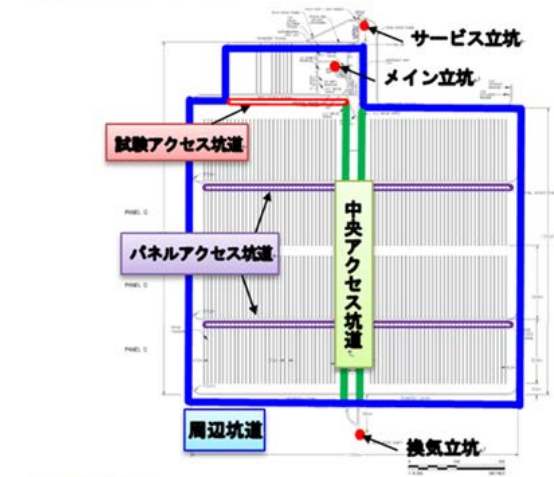
③シーリングシステム構成と安全規制要件

- シーリングシステムについての明確な規制要件はみられないが、長期評価については下記のように記載されている。
 - 廃棄物管理システム及びその構成要素が機能する様式は、安全性と環境の防護がどのように達成されることとなるかの明瞭な理解を提供するのに十分な詳細度で記述されるべき。
 - 人工バリアが性能を発揮すると考えている時間枠，ならびにその安全機能の変遷は，適切な現行の国内または国際標準を参照して文書化し，正当化すべき。
- 埋め戻し材／シーリング材等の性能要件
 - 工学的シールは、アクセス坑道から定置室を隔離すること。
 - 坑道の埋め戻し材とシールは、地表面から処分場を隔離すること。

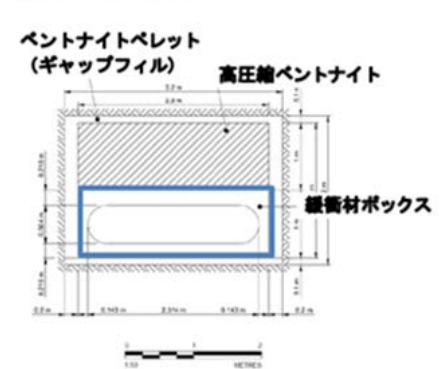
○シーリングシステムのサブシステム構成要素

区画分類	構造物名称	定義
地表から処分深度までの区画	立坑	●コンクリートキャップ：人間侵入の低減 ●コンクリート遮蔽壁(Bulkhead)：シーリング材の構造支持，母岩の収縮による潜在的な影響を最小限に抑えるため、遮断壁の周りにシールグラウト等を使用 ●アスファルト／高密度ベントナイト密封材：地下水の影響を抑制 ●立坑埋戻材：設置後の膨潤圧による岩盤シール性，立坑設置後に必要密度まで圧縮。 ●コンクリートモノリス(concrete monolith)：各立坑の下に敷設することで、上部のシール材に安定な基盤の提供
処分深度の区画	アクセス坑道	●高密度埋戻材：主要な機能は、岩盤開口部の力学的サポートの提供／地下水移行の遅延であり、坑道の大部分で利用 ●低密度埋戻材：高密度埋戻材と同様の機能を有するが、高密度埋戻ブロックを定置できない坑道側部や上部領域に利用
	定置室	●高圧密ベントナイト(HCB)：緩衝材ボックスの固定 ●ベントナイトベレット（ギャップフィル）：定置室の空間充填 ●遮断壁：ベントナイトの膨潤圧に対する坑道の埋戻材位置の保持／定置室の物理的分離

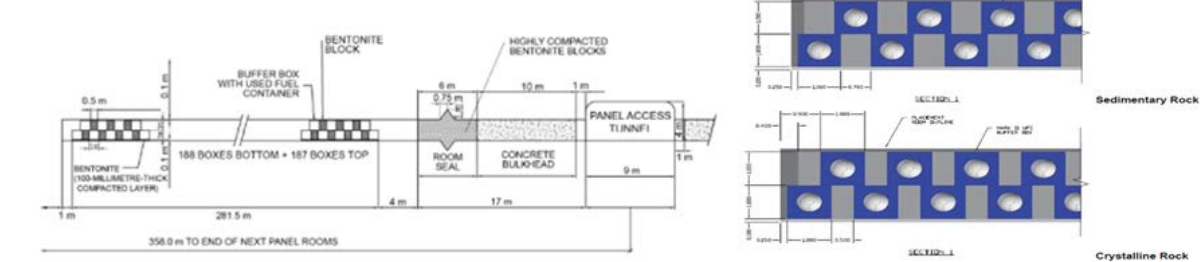
処分場レイアウト



定置室断面



定置室区画



2. 要件管理に基づく処分場の設計方法

①シーリングシステムの設計要件・仕様

- 結晶質岩環境の地層処分施設における定置室と坑道の密閉要件
 - 各使用済燃料コンテナは、緩衝材で完全に囲まれていなければならない。緩衝材は、コンテナ周囲の地下水の流れを制限し、容器の腐食を最小限にする安定した化学環境を作り出し、（例えば、岩盤の動きによる）外部負荷を減衰させる機械的な緩衝材として作用する。
 - 地層処分場の各定置空洞は、使用済燃料コンテナを定置し、定置場所が満たされた後に遮蔽壁で閉じられなければならない。

カナダ（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

- 定置空洞のシーリングシステムは、定置空洞内の地下水の動きを最小限に抑えるように機能しなければならない。
- 遮断シーリングシステムは、隣接する非密封エリアにおける放射線を軽減するような遮蔽を提供する。そのため、定置室から地下水の移動を妨げるように掘削影響領域に止水溝(cut-off trench)を建設することで、密封された使用済燃料コンテナ定置室へのアクセス制御を提供することができる。
- 結晶質岩環境の地層処分施設における立坑の密閉要件
 - 立坑のシール材および設計は、立坑を取り囲む母岩の化学的および力学的条件と、母岩と処分場シーリングシステム構成要素の間隙流体の化学条件と適合しなければならない。
 - 立坑に適用されたシーリングシステムは、保守または交換なしに、閉鎖後期間中にその機能を維持しなければならない。
 - 立坑に定置されたシーリング材の沈下を最小限に抑え、将来の偶発的侵入の可能性を低減するために、立坑はシーリングシステムによって完全に充填されなければならない。
 - 立坑に適用されるシーリングシステムは、垂直立坑を介して接続された透過性岩盤の間の地下水の流れおよび混合を防止するように設計されなければならない。

②定置室、坑道及び立坑のシール材の設計要件

- 掘削されたすべての区域を密封する。
- その場の環境による物理的および化学的劣化を防ぐ。閉鎖前および閉鎖後の地球化学的条件も含む。
- 密閉された定置室での地下水の流量を制限する。
- 密閉された定置室から放射性核種移行の可能性を制限する。万が一、定置室から漏出がある場合には、地下坑道および立坑内での放射性核種の移行を制限する。
- 粘土ベース材料は、ほとんどの地下空間で埋め戻し材として使用される。各定置空間の入り口と坑道内の戦略的場所で、高圧縮ベントナイトブロックなどの材料は掘削損傷領域(EDZ: excavation damaged zones)のために重要である。これらのシール材は、コンクリート遮断壁によって場所を維持する。
- 各立坑は、ベントナイト／砂混合物で埋め戻される。各立坑の戦略的な場所では、コンクリート遮断壁が建設される。また、アスファルトは立坑シール材として使用される。

③シーリングシステムの設計・施工要件、施工仕様

- 設計段階で検討された材料の一般的な組成と特性

	Dry density [kg/m ³]	Saturation [%]	Porosity [%]	Bulk density [kg/m ³]	Water content [kg/kg]	Effective montmorillonite dry density [kg/m ³]
HCB (100% bentonite)	1,610	65	41.3	1,880	0.167	1,470
Gap Fill (100% bentonite)	1,410	6	48.6	1,439	0.021	1,260
Light backfill (50:50 bentonite/ sand)	1,240	33	53.7	1,418	0.143	692
70% bentonite (70:30 bentonite/ sand)	1,600	80	41.1	1,930	0.205	1,220
Dense backfill (5:25:70 bentonite/clay/crushed rock aggregate)	2,120	80	19.4	2,276	0.074	376

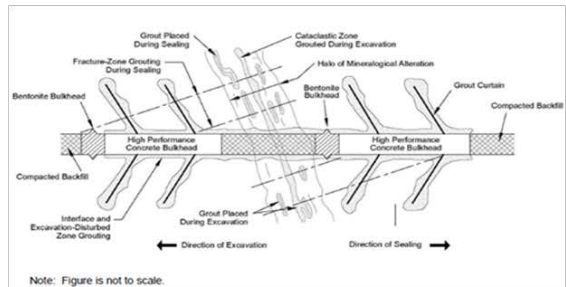
Note: Dry densities and saturations of the clay-based sealing materials are taken from SNC Lavalin (2011); other properties are determined using calculations illustrated in Baumgartner (2006).

- 定置室の埋め戻し材
 - 高密度ベントナイト(HCB)：100%ベントナイト
 - ベントナイトペレット（ギャップフィル）：100%ベントナイト
 - 遮断壁（プラグ）：低熱高性能コンクリート（LHHPCL: Low-Heat High-Performance Concrete）, アクセス坑道との連結部に設置
- アクセス坑道の埋め戻し材
 - 高密度埋め戻し材（ブロック成型）：ベントナイト／粘土／砕石（配合比：5:25:70）
 - 低密度埋め戻し材（ブロック成型）：ベントナイト／砂（配合比：50:50）
- 立坑のシール材
 - 立坑シーリングシステム（shaft seal system）は、処分エリアまでの深度毎に材質を変化
 - 基本的には耐久性のある天然材質であるベントナイト／砂で構成
 - 処分エリア近傍のベントナイト（MX-80 又は相当）／砂のシール材の上部は、地下水の影響を抑制するため、透水性の低いアスファルト又は高圧密ベントナイト（HBC）材を利用
 - コンクリート（無筋）は、低 pH／低発熱高性能コンクリート（LHHPCL）を使用した力学的な構成要素であると共に、追加的なシール能力（但し、初期）にも期待
- 高透水性エリアの密封材
 - 高透水性エリアで掘削や建設をする際、又は人工構造物周辺の地下水流入を制限する際に使用
 - 粘土ベースグラウト材料、セメント或いはシリカベースのグラウトの使用が計画

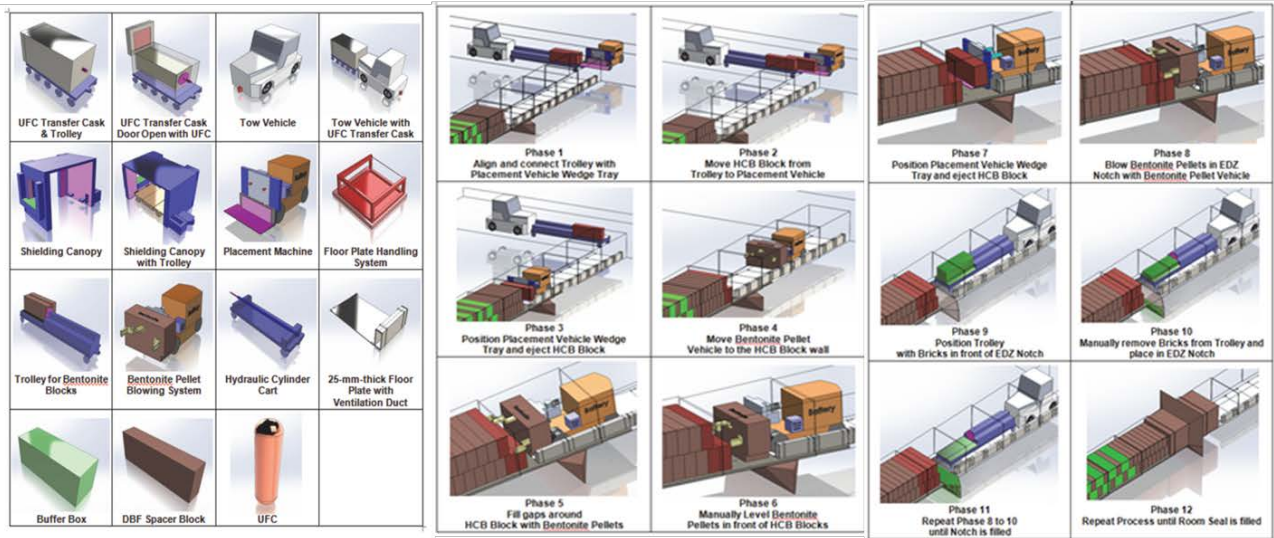
立坑シーリングシステムの設計案

Depth from Surface	Material
0 – 20 m	Low-heat high-performance concrete— concrete cap at surface
20 – 150 m	70/30 bentonite / sand shaft seal compacted in-situ
150 – 170 m	Low-heat high-performance concrete for concrete bulkhead keyed into rock / overburden to a distance of 0.5 times the original radius of the shaft
170 – 330 m	70/30 bentonite / sand shaft seal compacted in-situ
330 – 380 m	Asphalt or highly-compacted bentonite seal
380 – 480 m	70/30 bentonite / sand shaft seal compacted in-situ
480 – 500 m	Concrete monolith – Low-heat high-performance concrete

高透水性エリアの密封材



施工＜定置室の密封＞



カナダ（シーリングシステムに関する諸外国の先行事例調査）

3. 性能評価におけるシーリングシステムのハンドリング

- 使用済燃料定置室の密封・閉鎖活動停止後に、拡張モニタリング（Extended Monitoring）期間がある。最大 70 年間、引き続き処分場の機能を確認する。その後、規制当局の承認を受けてから、地下処分場は全体的に廃止・密封される。処分場の密封または閉鎖が完了すれば、地表の使用が可能になる。
 - 拡張モニタリング期間：最大 70 年
 - 廃止措置：10 年間
 - 閉鎖期間：15 年間
- 拡張モニタリング期間中、地下にあるシステムからのデータ収集は、処分場の変遷を評価するための有益な情報を提供し、システムの安全性を確認することになる。モニタリングデータは、人工バリアが計画通りに機能していることを確認するために使用可能であり、処分場を閉鎖する決定を下すために重要となる。

4. 安全評価におけるシーリングシステムのハンドリング

- シーリングシステムを介した核種移行シナリオの設定の考え方・評価事例
 - 通常変遷シナリオでは、立坑シール材や立坑・処分場の EDZ を考慮。
 - 破壊的シナリオでは、下記のシーリングシステムの欠陥ケースを仮定して評価を実施。破壊的シナリオはバリアの浸透及び閉じ込め機能を喪失するような可能性が低い事象の発生を意味する。
 - 立坑の密封失敗シナリオ
 - ・立坑の密封失敗シナリオは急速かつ広範囲の劣化を除き、通常変遷シナリオと同じように処分場システムの変遷と放出経路を考慮している。
 - ・保守的な観点から、この劣化は処分場閉鎖時に発生した物と想定されている。
 - ・安全評価の前提条件は下記の通り。

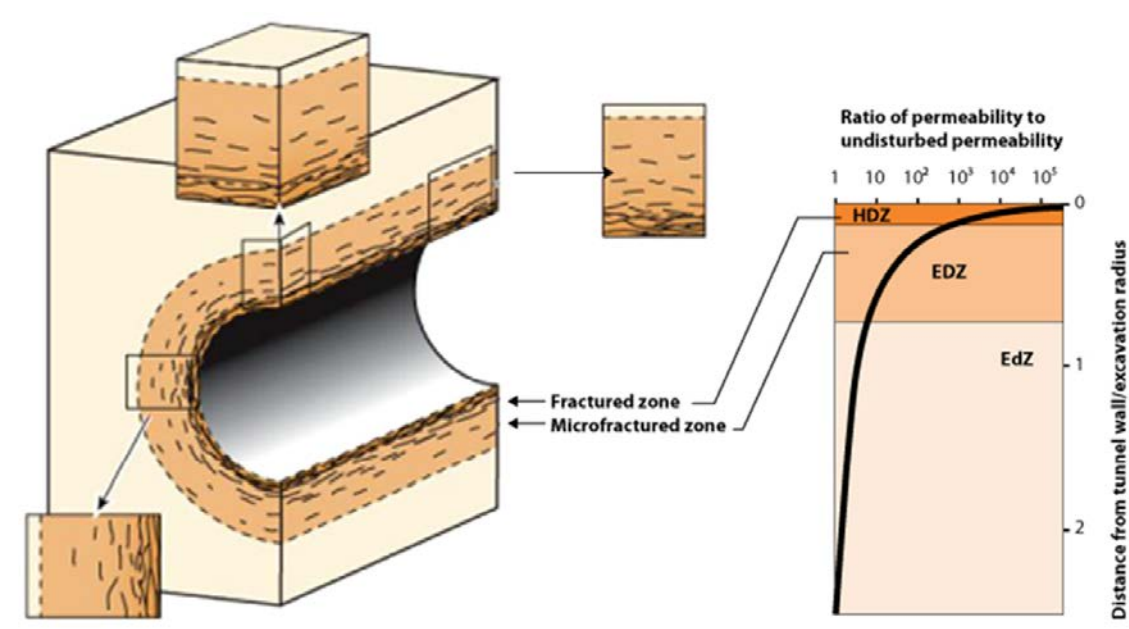
	レファレンスケース	破壊的ケース
透水係数 (m/s)	ベントナイト：1.6×10 ⁻¹¹ コンクリート：1.0×10 ⁻¹⁰ アスファルト：1.0×10 ⁻¹²	全てのシール材 ベースケース：1.0×10 ⁻⁹ 極端ケース：1.0×10 ⁻⁷

- 非密封試験孔シナリオ
 - ・試験孔は処分場から十分離れている。
 - ・試験孔のサイズも十分小さくて移動の限界もあるため、重要な問題だと考えにくい。

○掘削損傷領域（EDZ）の扱い

- 掘削損傷領域（定置室、坑道、立坑および他の地下開口部周辺の掘削中に損傷した岩盤領域）は、下記に示す 3 つに区分される：
 - ・高損傷領域（HDZ：Highly Damaged Zone）：マクロスケールの亀裂や剥離が発生する可能性がある領域として定義されている。この領域の透水係数は、接続破壊システム（interconnected fracture system）によって支配され、非攪乱の岩盤より桁違いに大きくなる可能性がある。
 - ・掘削損傷領域（EDZ：Excavation Damaged Zone）：水理及び地球化学的な変化に伴う、流動および輸送特性に大きな変化を有する領域

- ・掘削擾乱領域（EdZ：Excavation Disturbed Zone）：水理及び地球化学的な変化はあるが、流動及び輸送特性に大きな変化がなかった領域。



Note: Figure is from Fracture Systems (2011).

出典資料

1) NWMO: Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Sedimentary Rock, Pre-Project Report, NWMO TR-2013-07, (2013).
2) NWMO: Postclosure Safety Assessment of a Used Fuel Repository in Crystalline Rock, NWMO TR-2017-02, (2017).
3) NWMO: Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment, APM-REP-00440-0015 R001, (2016).
4) NWMO: Long-Term Stability Analysis of APM Conceptual Repository Design in Sedimentary and Crystalline Rock Settings, NWMO-TR-2015-27, (2015).