

付録 1 2.1 品質保証及び性能確認の手法や知見の体系化に資する基盤情報の整備

補足資料

目次

1.	品質保証プログラムに関連する参考資料.....	付 1-1
1.1.	フィンランドにおける製造施工プロセス管理手法の具体例	付 1-1
1.1.1.	キャニスタの製造施工プロセス管理手法	付 1-1
1.1.2.	緩衝材の製造施工プロセス管理手法.....	付 1-6
1.1.3.	処分坑道埋め戻し材の製造施工プロセス管理手法.....	付 1-10
1.1.4.	処分坑道プラグの製造施工プロセス管理手法	付 1-18
1.1.5.	閉鎖材	付 1-21
1.2.	スウェーデンにおける品質管理の考え方.....	付 1-24
1.2.1.	処分坑道埋め戻し材の品質管理.....	付 1-24
1.2.2.	設計、施工及び長期性能の関係.....	付 1-25
2.	性能確認プログラムに関連する参考資料.....	付 1-26
2.1.	米国における性能確認プログラムと品質保証	付 1-26
2.1.1.	性能確認プログラム	付 1-26
2.1.2.	品質保証	付 1-26
2.2.	フランスにおけるモニタリング戦略.....	付 1-33
2.3.	スイスにおけるパイロット施設でのモニタリング	付 1-34
2.4.	Modern2020 のパラメータスクリーニングに関するテストケース	付 1-35
3.	参考文献.....	付 1-38

1. 品質保証プログラムに関連する参考資料

1.1. フィンランドにおける製造施工プロセス管理手法の具体例

品質保証プログラムの一部となる製造施工プロセス管理手法の一例として、フィンランドの製造・施工プロセス管理手法について記す。製造・施工プロセス管理手法とは、フィンランドの生産ライン報告書に記されている、定置された人工バリアの品質を確保する取組のことであり、材料の調達から施工に至るまでに実施される品質管理に関する記述を一貫して示している。生産ライン報告書は、フィンランドのセーフティケース「TURVA-2012」を構成する主要な付属文書の位置付けで、人工バリアの種類ごとに、人工バリア及びその構成要素の参照設計、原材料の調達、製造及び施工に関する概要を示している。

生産ライン報告書の目的は、人工バリアに関する設計基準、設計基準から導き出される設計要件、参照設計について記述した上で、設計要件が満たされるかどうかを確認することである。人工バリアの生産ライン（生産ライン）では、あらゆる段階で試験及び検査が実施される。その目的は、人工バリアの材料及びその構成要素の特性が、その人工バリアに設定されている要件を充たすようにすることである。

付表 1.1-1 にそれぞれの人工バリアの製造施工プロセスが記載されている生産ライン報告書を示した。以下にそれぞれの人工バリアの製造施工プロセス管理手法の概要を示す。

付表 1.1-1 人工バリアごとに示されている生産ライン報告書群

人工バリア	製造施工プロセス管理手法が記載されている文献
キャニスタ	Canister Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Canister, Posiva 2012-16. (Posiva, 2012a)
緩衝材	Buffer Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Buffer, Posiva 2012-17. (Posiva, 2012b)
処分坑道埋め戻し材	Backfill Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug. Posiva Report POSIVA 2012-18. (Posiva, 2012c)
処分坑道プラグ	
閉鎖材	Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure, Posiva 2012-19. (Posiva, 2012d)

1.1.1. キャニスタの製造施工プロセス管理手法

フィンランドにおける地層処分の対象廃棄物は使用済燃料であり、使用済燃料は銅製のキャニスタに収納される。キャニスタは、銅製部材（チューブ、蓋、底部）、鋳鉄製インサート（鋳鉄部、チューブカセット、蓋）、より構成される。

キャニスタの生産ラインは、製造（キャニスタの製造、組立、輸送）及び施工の管理プロセスが検討されている。

キャニスタの製造の主な工程を付表 1.1-2 に示す。また、それぞれの工程に対して示されている検査フェーズと各検査フェーズにおける設計パラメータの検査方法を付表 1.1-3 に示す。

Posiva では、銅製チューブの製造の手法としてピアスアンドドロー（Pierce and Draw）及び

押し出し加工（Extrusion）の検討を行っている。ピアスアンドドローは底部と統合して製造することが可能であり、溶接が必要なのは蓋のみとなる。一方で、押し出し加工の場合には底部と蓋の両方を溶接しなければならないことから、Posiva はピアスアンドドローによる底部統合型銅製チューブをレファレンスとし、押し出し加工は代替法として位置づけている。したがってキャニスタの製造工程として底部の製造を行うのは押し出し加工の場合のみである。溶接方法は摩擦攪拌溶接（FSW）および電子ビーム溶接（EBW）が検討されている。溶接プロセスの管理はコンピュータ数値制御（CNC）マシンにより行われる。

検査については銅製チューブの製造において、延性についてチューブの過熱形成後、破壊試験用のサンプルを採取する場合もあるが、基本的には非破壊試験（NDT）が用いられる。欠陥の判定には以下の手法が用いられる。

- ・ 表面欠陥：目視試験、浸透探傷試験、渦電流探傷試験
- ・ 表面近傍の欠陥：渦電流探傷試験
- ・ 内部欠陥：超音波試験

付表 1.1-2 キャニスタの製造プロセス

キャニスタの製造工程（大工程）	主な工程（小工程）
インサートの製造	・ 鋼製蓋の製造 ・ 鋼製チューブカセットの製造及び鋳型への設置 ・ 鋳造 ・ 機械加工
銅製チューブの製造	・ チューブ用の銅ビレット（Billet）の鋳造 ・ 銅製チューブの加熱成形（ピアスアンドドローもしくは押し出し加工） ・ 機械加工
銅製の蓋及び底部の製造	・ 蓋及び底部用の銅ビレットの鋳造 ・ 鍛造 ・ 機械加工
底部の溶接（押し出し加工の場合）	・ 摩擦攪拌溶接 ・ 機械加工
キャニスタ構成要素の組立	・ 各構成要素の洗浄 ・ 組立
封入プラントへのキャニスタの輸送	・ 組立てられたキャニスタ及び蓋の工場から封入プラントへの輸送

付表 1.1-3 キャニスタの製造の工程における各検査フェーズでの検査内容とその方法（（Posiva, 2012a）を基に作表）

特性	設計パラメータ	インサートの製造					銅製チューブの製造 -ピアスアンドドロウ（Pierce and Draw） -押し出し加工（Extrusion）			銅製の蓋及び底部の製造			底部の溶接 押し出し加工（Extrusion）のみ		組立・輸送 ⁹⁾ 14 組立・輸送
		鋼製蓋の製造	鋼製チューブカセットの製造	インサートの 鋳造	下加工	最終加工	銅ビレットの 鋳造	加熱成形	機械加工	銅ビレットの 鋳造	鍛造	機械加工	底部溶接	機械加工	
材料組成	構造用鋼製蓋	材料の認証													
	インサート			材料分析 (溶融金属) ¹⁾											
	標準銅（EU 基準）+限 定的 P, S, H 及び O						従来技術 ⁵⁾			従来技術			開発段階にお ける破壊試験		
材料特性	降伏強度、引張強度	材料の認証		引張試験 ²⁾											
	破壊靱性、伸長			引張試験 ²⁾											
	延性、クリープ延性						目視 浸透探傷試験	引張試験 ⁶⁾			引張試験 ⁶⁾		開発段階にお ける破壊試験		
	平均粒径							マイクロ構造試験 ⁶⁾	超音波試験		マイクロ構造試験 ⁶⁾	超音波試験	開発段階にお ける破壊試験		
	硬度												開発段階にお ける破壊試験		
寸法（蓋）	直径、厚さ、ベベル角度	材料の認証													
寸法（インサ ート）	全長、外径、底部厚さ			従来技術 ³⁾	従来技術 ³⁾ 超音波試験 ³⁾	従来技術 ³⁾ 超音波試験 ³⁾									
	外側コーナー半径、肉厚		供給者からの 材料認証 ³⁾												
	内幅、内側長さ、真直度		計測 ³⁾	計測 ³⁾	超音波試験 ³⁾										
	チューブ間距離		従来技術 ³⁾	従来技術 ³⁾											
	エッジ距離			従来技術 ³⁾	超音波試験 ³⁾										
寸法（銅製チ ューブ） ⁷⁾	厚さ						重量	目視検査	超音波試験						
	長さ及び内径						重量	目視検査	手法未定義						
寸法（銅製蓋 及び底部並び に底部溶接）	厚さ。径方向寸法、軸方 向寸法									従来手法	従来手法	従来手法 ⁸⁾ 超音波試験 ⁸⁾	従来手法		
欠陥	表面及び内部の欠陥	材料の認証 超音波試験		非破壊試験 ⁴⁾		非破壊試験 ⁴⁾ 超音波試験 ⁴⁾	表面欠陥 渦電流探傷試験	表面欠陥 渦電流探傷試験	表面欠陥 ⁴⁾ 渦電流探傷試験 ⁴⁾ 目視試験 ⁴⁾	表面欠陥 渦電流探傷試験 目視試験 浸透探傷試験	表面欠陥 渦電流探傷試験	表面欠陥 渦電流探傷試験 目視試験		表面：渦電流探 傷及び目視試験 内部：超音波及 び放射線透過試 験	
	溶接部の欠陥		超音波試験 ⁴⁾												

1) 鋳造工場にて分析 2) インサート頂部からのサンプル及び鋳造時に抽出したサンプルを用いた破壊試験 3) 製作メーカーにて実施 4) 試験結果を用いた受入／棄却の判断が行われる 5) 両端から試験用サンプルを採取してチェック
6) 加熱成形後に破壊試験用のサンプルを採取 7) 寸法検査は幾つかの段階で実施 8) 下加工後と最終加工後に検査 9) キャニスタ構成要素の組立及び封入プラントへのキャニスタの輸送

キャニスタの施工の主な工程を付表 1.1-4 に示す。また、それぞれの工程に対して示されている検査フェーズと各検査フェーズにおける各設計パラメータの検査方法を付表 1.1-5 に示す。

キャニスタの施工は封入プラントに輸送された段階から検討され、キャニスタの検査も施工工程に含まれている。

キャニスタへの銅製蓋の溶接については、プロダクション報告書 (Posiva, 2012a) 時点では、電子ビーム溶接 (EBW) と摩擦攪拌溶接 (FSW) が検討されていたが、2014 年に摩擦攪拌溶接 (FSW) を選定した (Posiva, 2014)。溶接後の検査は、以下に示す 4 種類の非破壊試験 (NDT 法: Non-Destructive Testing) を用いて実施される。検査に際しては、4 種類の NDT 法から得られるデータを複合的に利用する。各 NDT 法では、まず、生データを用いた分析が行われる。そこで、容認基準を超える兆候が検出された場合には、さらなる欠陥可能性の特定や分析が行われる。

- ・ 目視試験 (VT)
- ・ 渦電流探傷試験 (ET)
- ・ 超音波試験 (UT)
- ・ 放射線透過試験 (RT)

付表 1.1-4 キャニスタの施工工程 ((Posiva, 2012a) を基に作表)

キャニスタの施工工程 (大項目)	主な工程 (小項目)
封入プラントにおけるキャニスタ検査	・ 受入検査 (文書、データ及び識別事項の品質管理) ➢ インサート及びその構成要素 (鋼製カセット) ➢ 鋼製蓋 ➢ インサートの小型部品 (ねじ) ➢ 溶接用の銅製蓋 ➢ 銅製チューブ ・ 溶接前の蓋の検査 (蓋及びチューブの寸法測定による図面との対応チェック)
使用済燃料の装荷	
キャニスタへの銅製蓋の溶接 ※溶接方法は摩擦攪拌溶接 (FST) を選定	・ 銅製蓋の据え付け ・ 銅製蓋の溶接 ・ 機械加工 ・ 溶接後の検査 (非破壊試験: NDT) ➢ 目視試験 (VT) ➢ 渦電流探傷試験 (ET) ➢ 超音波試験 (UT) ➢ 放射線透過試験 (RT)
定置前の保管	・ 封入プラント内での保管 ・ 処分場内の保管場所への輸送 ・ 処分場内での保管
処分孔までの輸送	・ 所定の処分孔に輸送
定置	・ キャニスタ輸送・定置車両を用いて処分孔に定置 ・ 定置直前に、あるいは輸送・定置車両内において、NDT 法を用いた表面の最終チェック

付表 1.1-5 キャニスタの施工の工程における各検査フェーズでの検査内容とその方法
 ((Posiva, 2012a) を基に作表)

フェーズ	検査内容	検査方法
封入プラントにおけるキャニスタ検査	受入検査	文書、データ及び識別事項の品質管理
	溶接前の蓋の検査	蓋及びチューブの寸法測定による図面との対応チェック
キャニスタへの銅製蓋の溶接	溶接後検査	目視試験 (VT) 渦電流探傷試験 (ET) 超音波試験 (UT) 放射線透過試験 (RT)
定置前の保管	—	—
処分孔までの輸送	—	—
定置	最終チェック (定置直前又は輸送・定置車両内)	非破壊試験

1.1.2. 緩衝材の製造施工プロセス管理手法

緩衝材は、①ディスクブロック (Disk block)、②リングブロック (Ring block)、③ペレットより構成される。各人工バリアに求められる要件は性能目標、設計要件、設計仕様と展開されている。緩衝材に設定されている要件を付表 1.1-6 に、それを踏まえたレファレンス設計の概要を付表 1.1-7 に示す。

付表 1.1-6 緩衝材に求められる要件

要件レベル	要件項目	要件		
		ディスクブロック	リングブロック	ペレット
性能目標	—	岩盤せん断影響軽減、微生物活動制限、低透水性、コロイド移行制限、処分孔壁支持、キャニスタ保持、熱伝達、透気性、他の人工バリアに悪影響を及ぼさない、数十万年の性能目標維持		
設計要件	—	天然膨潤性粘土、キャニスタ腐食制限、岩盤せん断影響軽減、拡散場、収着性、母岩との良好な接触、自己シーリング及び自己修復、コロイド移行制限、有害物質及び微生物活動制限、狭い隙間		
設計仕様	材料	MX-80 (主成分：モンモリロナイト)		
	モンモリロナイト含有率	75～90%		
	乾燥密度	2000 kg/m ³ (飽和状態)		
	含水率	> 15%		
	寸法等	底部厚さ > 500mm 上部厚さ > 2500mm	処分孔壁との隙間 350±25mm	
	処分孔壁との隙間	—	—	ベントナイト充填
	総硫黄含有率	1%未満 (硫化物は半分以下)		
	有機物含有率	1%未満		

付表 1.1-7 緩衝材のレファレンス設計

	ディスクブロック	リングブロック	ペレット
材料	MX-80	MX-80	MX-80
モンモリロナイト含有率	80～85%	80～85%	80～85%
寸法	外径 1650mm 高さ 400, 500, 800mm	外径 1650mm 内径 1070mm 高さ(OL3 ^{※1}) 875mm 高さ(LO1,2 ^{※2}) 900mm 高さ(OL1,2 ^{※3}) 960mm	11×11×5 mm
乾燥密度	1990 kg/m ³	2050 kg/m ³	1075 kg/m ³
含水率	17%	17%	17%

※1 OL3：オルキルト 3 号機 (EPR)

※2 LO1,2：ロビーサ 1,2 号機 (VVER)

※3 OL1,2：オルキルト 1,2 号機 (BWR)

緩衝材の製造・施工の工程一覧を付表 1.1-8 に示す。緩衝材の製造・施工は、材料の掘削・調達、ブロックやペレットの製造、運搬・輸送、キャニスタ周囲への設置といった工程で実施されるが、その全てにおいて、品質管理が含まれている。品質管理の目的は、緩衝材に設定されている品質要件を満たすことである。緩衝材の設計パラメータは、製造・施工された緩衝材が参照設計（Reference Design）に適合していることを確認するため、直接又は間接的に、緩衝材の製造・施工時に検査しなければならない。製造工程における各設計パラメータの検査方法の一覧を付表 1.1-9 に示す。また、施工工程における検査方法の一覧を付表 1.1-10 に示す。用いられる試験や検査の方法は、他の産業分野などですでに信頼を得ている手法に基づいて適用することとしている。例えば、測定精度は、検査対象となる特性に関して許容可能なばらつきの範囲内でなければならないが、十分な精度を備えた従来型の手法及び装置がすでに利用可能になっている。なお、試験や検査の種類や回数などの詳細は、今後の品質計画で定義される予定であるとしており、それらの試験や検査によって、品質要件を満たす材料及び構成要素が実際の施工に用いられる。

付表 1.1-8 緩衝材の製造及び施工の工程

緩衝材の製造工程（大工程）	主な工程（小工程）
材料の掘削・調達	- 掘削及び前処理 - 材料の納入と港湾における中間貯蔵 - 運搬及び生産施設での貯蔵
緩衝材構成要素の製造	- ベントナイトの調整 - ブロックの圧縮成形 - ブロックの機械加工 - ペレットの製造 - ブロック及びペレットの保護
緩衝材構成要素の貯蔵及び運搬	- 地上レベルでの貯蔵 - 処分場レベルでの貯蔵
処分孔の準備	- 清掃 - 湿気保護/排水システムの設置及び検査 - キャップの設置
緩衝材の設置	- ブロックの設置 - 湿気保護/排水システムの撤去 - 隙間充填
処分孔上部の充填	処分孔上部のブロック設置と隙間充填

付表 1.1-9 緩衝材の製造工程における検査内容とその方法

特性	設計パラメータ	採掘 及び前処理 4)	材料調達及び一 時貯蔵	製造プラントで の貯蔵のための 輸送	ベントナイトの 調整	ブロックの圧縮 成型/ペレットの 圧縮成型	ブロックの機 械加工
材料組成	モンモリロナイト含有率	MQC	X線回折等	X線回折等			
	有機炭素含有率	MQC	加熱	加熱			
	硫化物含有率	MQC	加熱	加熱			
	全硫黄含有率	MQC	加熱	加熱			
	膨潤指標	MQC	メスシリンダ内 での膨潤	メスシリンダ内 での膨潤			
	陽イオン交換容量	MQC	交換可能な 陽イオンの置換	交換可能な 陽イオンの置換			
圧密特性	粒径分布	MQC ⁵⁾	ふるい分け	ふるい分け	ふるい分け ⁶⁾		
	含水率	MQC ⁶⁾	オープンでの 乾燥 ⁷⁾	オープンでの 乾燥 ⁷⁾	オープンでの 乾燥 ¹⁾	オープンでの 乾燥	
ブロックの密度 及び寸法	かさ密度					重量測定及び 寸法	重量測定及び 寸法
	寸法					カリパス ²⁾	機械情報 ⁸⁾
ペレットの密度 及び寸法	個々のペレットのかさ密度					重量測定及び 寸法 ⁹⁾	
	寸法					カリパス	
	隙間充填材のかさ密度					特定体積での 重量測定	

1) 加水混合後かつ圧縮前 2) 機械加工前 3) コンテナの目視検査後に必要に応じて

4) 業者品質管理 (MQC) システムに従ってベントナイト供給業者が実施 5) 粉砕後 6) 乾燥後 7) 輸送後

8) CNC-機械加工 (コンピュータ数値制御機械加工) 9) パラフィンオイル内での重量測定により定義された個々のペレットのかさ密度

付表 1.1-10 緩衝材の施工工程における検査内容とその方法

特性	設計パラメータ	一時貯蔵	処分場深度への 運搬及び貯蔵	処分孔の準備 ²⁾	ブロックの設置	ペレットの設置	処分孔上部の充 填
設置された 密度	寸法	寸法測定	必要に応じた 寸法測定 ¹⁾				
	ブロックのかさ密度	コンテナ収納前 のブロックの重 量測定及び目視 検査	コンテナの目視 検査 及び 必要 に応じたブロック の重量測定 ¹⁾	湿気防止システ ムの目視検査及 び機能試験	重量測定及び 寸法		重量測定及び 寸法
	充填ペレットのかさ 密度	コンテナ収納前 のペレットの重 量測定及び目視 検査 及び/又は 大型バグの重 量測定	大型バグの目 視検査 及び 必 要に応じた重量 測定 ³⁾			隙間の全長が同 時に充填される 場合における設 置前の重量測定 及び体積の測定	設置前の重量測 定及び体積測定
	ペレットが充填され た隙間の幅				ブロック設置装 置に関する情報		ブロック設置装 置に関する情報
設置形状	設置されたブロック の位置				ブロック設置装 置に関する情報		ブロック設置装 置に関する情報
	ペレットが充填され た隙間の幅 ³⁾				ブロック設置装 置に関する情報		ブロック設置装 置に関する情報
	設置されたブロック 内側の孔の直径				ブロック設置装 置に関する情報		
	処分孔上部チャンバ ーの寸法						ブロック設置装 置に関する情報

1) コンテナの目視検査後に必要に応じて 2) ベントナイト緩衝材の直接的な検査ではない

3) 設置されたブロックの位置とスキャンされた処分孔の寸法に基づく

1.1.3. 処分坑道埋め戻し材の製造施工プロセス管理手法

処分坑道埋め戻し材は、底盤（Foundation layer）、ブロック、ペレットより構成される。処分坑道埋め戻し材に設定されている要件を付表 1.1-11 に、それを踏まえたレファレンス設計の概要を付表 1.1-12 に示す。

付表 1.1-11 処分坑道埋め戻し材の要件

要件レベル	要件項目	要件		
		底盤	ブロック	ペレット
性能目標	—	緩衝材の維持、HMC 条件の維持、移行遅延、処分坑道に沿った移流の制限、他の人工バリアに悪影響を及ぼさない、キャニスタ上昇防止		
設計要件	—	天然膨潤性粘土、自己シーリング&自己修復、透水係数 1×10^{-10} m/s 以下、母岩との良好な接触、有害物質や微生物活動の制限、他の人工バリアとの相互作用の考慮		
設計仕様	モンリロイト含有率	75～90%	30～38%	75～90%
	乾燥密度	1150～1350 kg/m ³	1990～2070 kg/m ³	900～1100 kg/m ³
	寸法等	最小厚さ 150mm	550×470×330mm (-1mm～+2mm)	ブロック/岩盤壁面間を埋められること
	坑道壁との隙間	—	100mm 以上	—
	設置率	—	80%以上	—
	総硫黄含有率	1%未満（硫化物は半分以下）		
	有機物含有率	1%未満		

付表 1.1-12 処分坑道埋め戻し材のレファレンス設計

	底盤	ブロック	ペレット
材料	Minelco グラニュール	Friedland 粘土	Cebogel QSE
粘土鉱物含有率	73～94%	66～78%	73～94%
スメクタイト含有率	67～94%	30～38%	69～94%
寸法	最小厚さ 150mm	550×470×330mm	長さ 4～16mm 厚さ 6～6.5mm
乾燥密度	1150～1350 kg/m ³	1990～2070 kg/m ³	900～1100 kg/m ³
含水率	18～21%	8.5～9.5%	17.5～37.5%

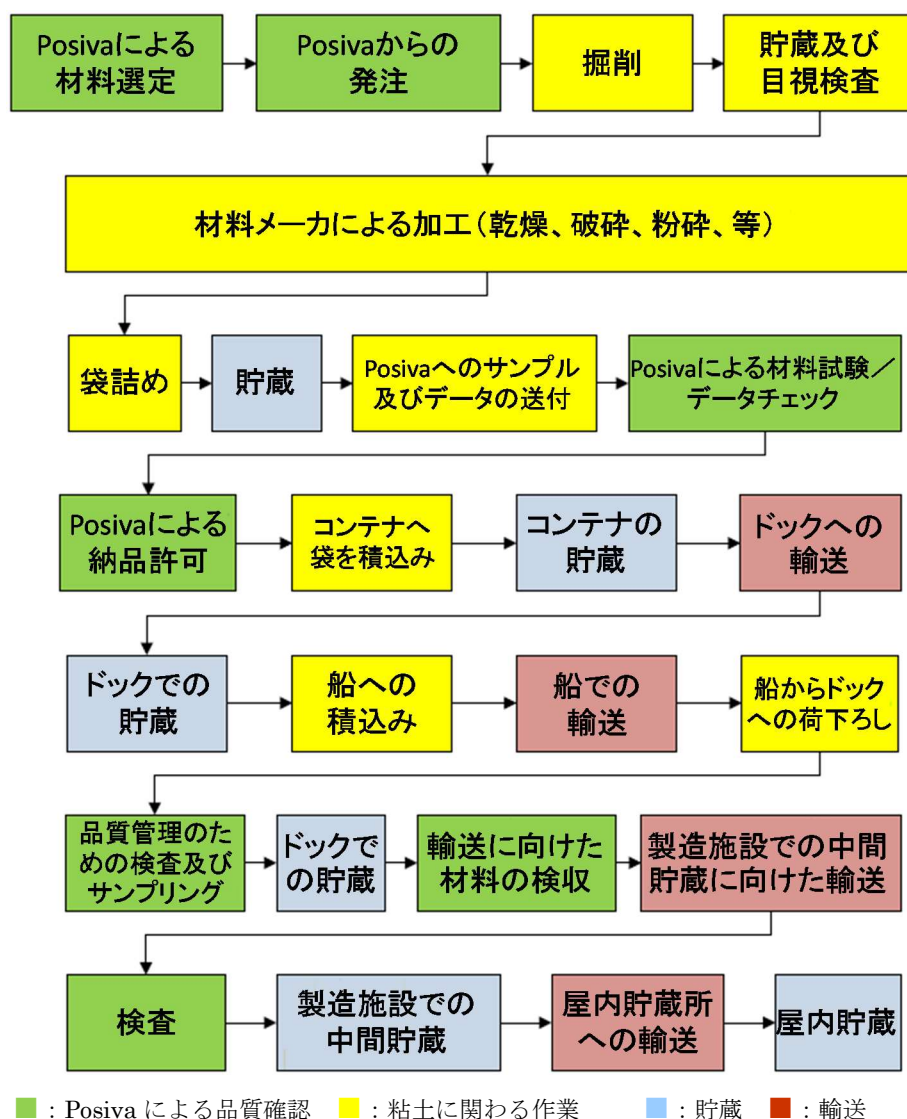
処分坑道埋め戻し材の製造・施工の工程は、大きく分けて、以下の 3 工程である。

- ① 処分坑道埋め戻し材の材料の採掘及び輸送
- ② 処分坑道埋め戻し材の各構成要素（基盤層、ブロック、ペレット）の製造
- ③ 処分坑道埋め戻し材の各構成要素の施工

上記の工程に対し、より詳細な工程とその意味合いを色分けして示したスキームがそれぞれに示されている。スキームにおける色分けの意味は以下の通りである。

- ・ 緑色：Posiva による品質確認
- ・ 黄色：粘土に関わる作業
- ・ 青色：貯蔵
- ・ 赤色：輸送

「①処分坑道埋め戻し材の材料の採掘及び輸送」に関するスキームを付図 1.1-1 に示す。付図 1.1-1 からわかるように、工程の要所要所で、Posiva による品質確認が実施されるスキームとなっている。品質確認の際の管理パラメータの設定について、付表 1.1-13 に示す。



付図 1.1-1 処分坑道埋め戻し材の材料の採掘及び輸送スキーム

付表 1.1-13 TRUVA2012 で想定される処分坑道埋め戻し材の材料の採掘及び輸送における管理パラメータ

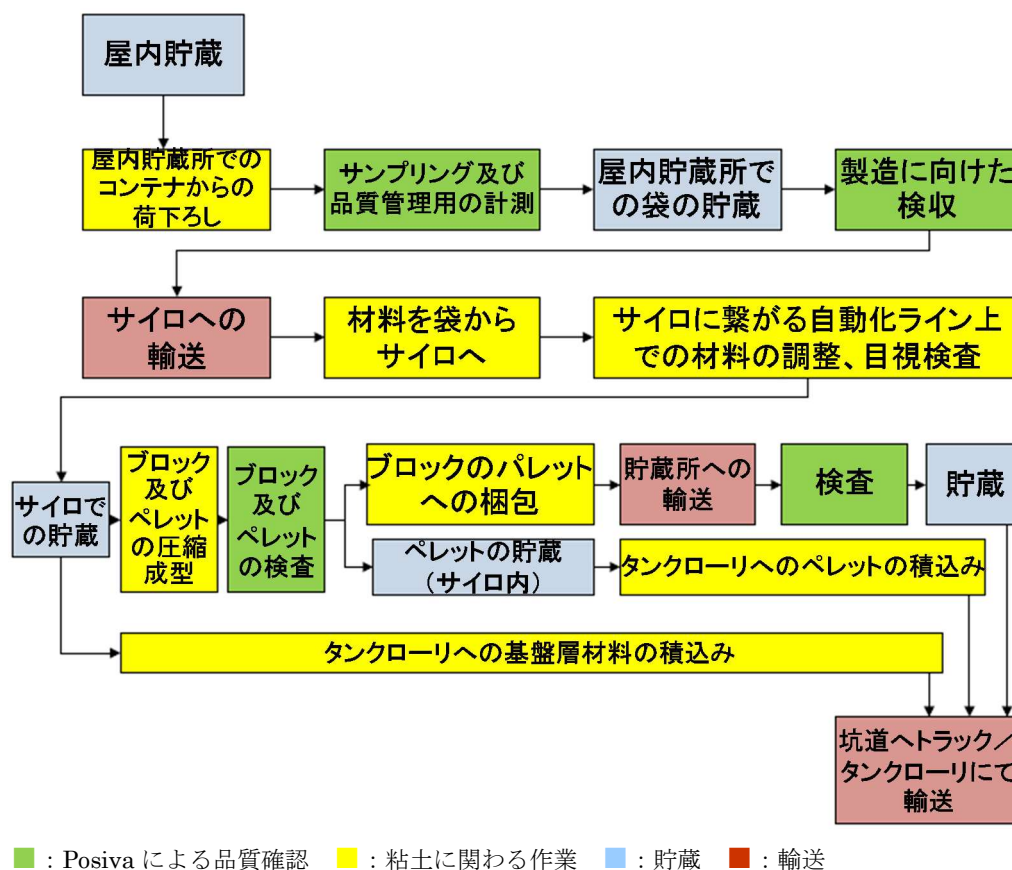
掘削及びサイトへの輸送 ^{※1} の各プロセス	責任者 ^{※2}	管理ポイント	管理されるパラメータ
Posiva による材料選定（材料の入手可能性と品質の検討を含む）	Posiva	技術的	粒度分布、含水率、膨潤指標、CEC、鉱物学的組成、化学的組成、交換性陽イオン、膨潤圧、透水係数、圧密特性
Posiva からの発注	Posiva		
粘土の掘削	材料供給業者		
貯蔵及び目視検査（輸送、備蓄、積重ね貯蔵を含む）	材料供給業者	技術的	貯蔵条件の適切性（清浄度）
粘土の加工（乾燥、破碎、粉碎、場合により活性化等）	材料供給業者	技術的	機器類の適切性（清浄度、信頼性）
粘土の袋詰め（1000 kg 袋）	材料供給業者	技術的	袋の適切性（防水性）、袋詰め前に含水率を確認
粘土袋の貯蔵	材料供給業者	輸送及び技術的	貯蔵スペースの適切性（温度、相対湿度（RH%）、清浄度）
サンプリング	材料供給業者	技術的	
供給業者から Posiva へのサンプル及びデータの送付	材料供給業者		
Posiva による納品許可に向けたサンプルの品質及びデータの確認	Posiva	技術的	粒度分布、含水率、膨潤指標、CEC、鉱物学的組成、化学的組成、交換性陽イオン、膨潤圧、透水係数、圧密特性
Posiva が供給業者に納品を許可	Posiva		
コンテナ ^{※3} への粘土袋の積み込み：	材料供給業者	輸送及び技術的	コンテナの適切性（防水性、通気性、断熱性）、材料の重量
加工施設でのコンテナの貯蔵	材料供給業者	技術的	粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
コンテナのドックへの輸送（トラック又は列車）	供給業者の輸送会社	技術的	粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
ドックでのコンテナの貯蔵	供給業者の輸送会社	輸送	粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
船へのコンテナの積み込み（一隻あたり最大 1500 コンテナ）	供給業者の輸送会社	技術的	コンテナの個数、粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
コンテナの船での輸送	供給業者の輸送会社	輸送	粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
船からドックへのコンテナの荷下ろし	Posiva	技術的	コンテナの状態の目視検査、コンテナの個数、供給業者から要求された情報の検査
サンプリング及び品質管理用の計測（各コンテナから 1 袋ずつ）	Posiva	技術的	サンプリング器具の清浄度、袋が無損傷であること、総重量、含水率
品質管理用の計測が実施され、製造施設での中間貯蔵に向けた輸送が許可されるまでの、ドックでのコンテナの貯蔵	Posiva		粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない
製造施設での中間貯蔵に向けた、トラックでの輸送	Posiva	技術的	温度が 0℃を下回することは許容されない、輸送後のコンテナの状態（目視検査）、温度、相対湿度（RH%）
製作施設の中間貯蔵所でのコンテナの貯蔵（最大、坑道 2 本分の材料を貯蔵）	Posiva	輸送及び技術的	温度が 0℃を下回することは許容されない
コンテナの屋内貯蔵所へのトラックでの輸送	Posiva	技術的	粘土の温度が 0℃を下回することは許容されない、温度、相対湿度（RH%）、及び清浄度
コンテナの屋内貯蔵所での貯蔵（コンテナを開ける前にしばらく周辺環境条件と平衡化）、及びコンテナからの粘土袋の荷下ろし	Posiva	技術的	貯蔵スペースの適切性（温度、相対湿度（RH%）、清浄度）、袋が無損傷であること

※1：ブロックの材料（Friedland 粘土）の場合（最終的に選定されるとは限らない）。その他の材料については、プロセスが異なる可能性がある。

※2：TURVA-2012 時点での想定

※3：コンテナのサイズは 6.05m×2.5m×2.6m、容積 32.5m³、積載容量 20t（コンテナ 1 台あたり 20 袋）

「②処分坑道埋め戻し材の各構成要素の製造」に関するスキームを付図 1.1-2 に示す。上記に示した採掘及び輸送の場合と同様、工程の要所要所で、Posiva による品質確認が随所で行われるスキームとなっている。ブロックの製造プロセスの概要を付表 1.1-14 に、ペレットの製造プロセスの概要を付表 1.1-15 に、それぞれ示す。品質確認の際の管理パラメータに関しては、現段階で、付表 1.1-16 に示すパラメータが設定されている。



付図 1.1-2 処分坑道埋め戻し材のブロック、ペレット及び基盤層の製造スキーム

付表 1.1-14 処分坑道埋め戻し材ブロックの製造プロセスの概要

プロセスの段階	目的	内容	期間
埋め戻し材製造のための最終検収	品質管理	袋の目視検査、サンプリング、含水率、粒度分布、膨潤指標、鉱物学的組成化学的組成、CEC、交換性陽イオン、膨潤圧、透水係数、圧縮特性の計測	屋内貯蔵所でのコンテナからの荷下ろし後
ブロックの圧縮成型に向けた原材料の加工	材料がブロック圧縮成型に必要な状態になるよう準備する	必要に応じて乾燥（乾燥機）	乾燥時間は、乾燥機、及び原材料の水分量により異なる
		必要な含水率にするための混合（ミキサ）	混合時間は、バッチ当たり 10～15 分
		主に廃棄されたブロックの再利用のための粉砕	粉砕時間は、粉砕機により異なる
材料の養生	水をより均一に分布させる	混合した材料を拡散密封したサイロに保管	最低 1 日、最適化のため、そのままにする
圧縮成型	埋め戻し材ブロックの圧縮成型	一軸圧縮	ブロック 1 個あたり 1 分未満
ブロックの品質管理	ブロックの一定した品質の保証	寸法、密度、重量の決定	
		目視検査	
ブロックの梱包及び貯蔵	圧縮成型及び検査済のブロックの梱包	ブロックをパッケージに梱包	直ちに梱包
	圧縮成型したブロックの貯蔵所への輸送	トラックでの貯蔵所への輸送	

付表 1.1-15 処分坑道埋め戻し材ペレットの製造プロセスの概要

プロセスの段階	目的	内容	期間
埋め戻し材製造のための最終検収	品質管理	袋の目視検査、サンプリング、含水率、粒度分布、膨潤指標、鉱物学的組成化学的組成、CEC、交換性陽イオン、膨潤圧、透水係数、圧縮特性の計測	屋内貯蔵所でのコンテナからの荷下ろし後
ペレットの押出し成型に向けた原材料の加工	原材料がペレットの押出し成型に必要な状態になるよう準備する	混合による含水率の調整	バッチ当たり 10～15 分
		必要に応じて乾燥	乾燥時間は、乾燥機、及び原材料の水分量により異なる
		必要に応じて粉砕	粉砕時間は、粉砕機により異なる
原材料の養生	水をより均一に分布させる	混合した材料を拡散密封したサイロに保管	最低 1 日、最適化のため、そのままにする
ペレットの押出し成型	ペレットの押出し成型	押出し成型	15～20t で 8 時間
ペレットの品質管理	ペレットの一定した品質の保証	密度	
		寸法	
		重量	
		含水率	
ペレットの梱包及び貯蔵	押出し成型及び検査済のペレットの梱包	ペレットを大型袋に梱包し、サイロにて貯蔵	
	ペレットを梱包した大型袋の貯蔵所への輸送	輸送及び貯蔵	

付表 1.1-16 TURV2012 で想定される処分坑道埋め戻し材の製造に関する管理パラメータ

ブロックの製造	ペレットの製造	基盤層の製造	責任者※ ¹	管理ポイント	管理されるパラメータ
屋内貯蔵場所でのコンテナからの荷下ろし			Posiva	技術的	荷下ろし用機器の清浄度
サンプリング（全ての袋から）			Posiva	技術的	サンプリング器具の清浄度、袋が無損傷であること
品質管理用の計測※ ²			Posiva	技術的	目視検査、粒度分布、含水率、膨潤指標、CEC、鉱物学的組成、化学的組成、交換性陽イオン、膨潤圧、透水係数、圧密特性
屋内貯蔵所での袋の貯蔵と製造に向けた検収			Posiva	技術的	貯蔵条件（温度、相対湿度（RH%）、清浄度）
袋をフォークリフトでサイロに輸送※ ³			Posiva	技術的	輸送機器の清浄度
コンベア（空気コンベア又はスクリーコンベア）で袋中の材料をサイロへ※ ⁴			Posiva	技術的	コンベアの清浄度、袋が無損傷であること
自動調整ライン上での材料の調整：混合、含水率の調整（乾燥又は加水）、必要に応じた粉砕※ ⁵			Posiva	技術的	添加設備の状態と清浄度、粒度（ふるいで管理）、材料及び添加水の重量、（調整ラインの始点と終点に自動含水率計を設置）
調整ラインはサイロまで続く			Posiva		
サイロでの貯蔵（1日から数日）			Posiva	輸送及び技術的	サイロの状態（温度、相対湿度（RH%））と清浄度
製作に向けたブロックとペレットの材料の輸送※ ⁶		サイロから（密封された）タンクローリへの基盤層材料の積み込み	Posiva	技術的	- 添加設備の状態と清浄度 - タンクローリの清浄度
ブロックの圧縮成型	ペレットの圧縮成型※ ⁷		Posiva	技術的	- 圧縮装置/ブロックの型/ペレット成型装置の清浄度と状態 - 製作されたブロックの目視検査（ひび、層状化）、重量、密度（パルク及び乾燥）、含水率 - 製作された個々のペレット、及び充填材としてのペレット（loose pellet filling）の寸法、重量、密度（パルク及び乾燥）
ブロックの梱包と識別	貯蔵サイロからタンクローリへのペレットの積み込み		Posiva	技術的	- パッケージの清浄度、状態、及び無損傷であること - タンクローリの清浄度
貯蔵所への輸送			Posiva	技術的	温度、相対湿度（RH%）
貯蔵			Posiva	輸送及び技術的	輸送後の目視検査（識別、状態）、貯蔵条件（温度、相対湿度（RH%）、清浄度）

※1：TURVA-2012 時点での想定

※2：コンテナ1個あたり3袋ないし5袋、又は試験によっては材料300tあたり1袋。

※3：品質管理の計測が終了し、製作のための検収済みのもの

※4：サイロは材料調整ラインとつながっている

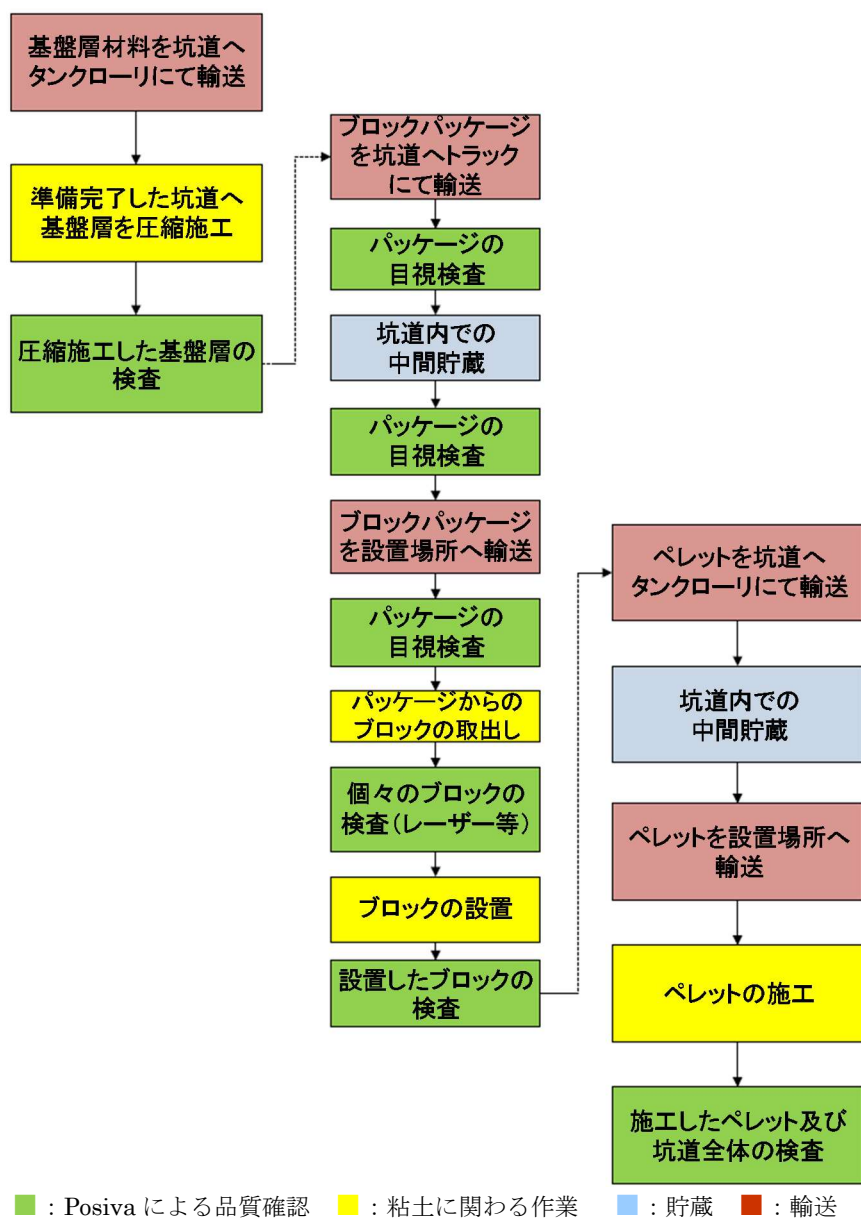
※5：必要に応じて、緩衝材製作ラインのものと同一破碎/粉砕ユニットをラインに追加できる

※6：サイロとブロックの型/ペレット圧縮成型装置の間は直接チューブで接続されている

※7：ペレットの製作ラインは貯蔵サイロにつながっている

「③処分坑道埋め戻し材の各構成要素の施工」に関するスキームを付図 1.1-3 に示す。処分坑道埋め戻し材の設置では、基盤層の施工後、ブロックを積み上げた後、ペレットを Wet Spraying Method（ペレットをノズルにより水と共に吹付ける工法）により施工する。

上記に示した採掘及び輸送や製造の場合と同様、工程の要所所で、Posiva による品質確認が実施されるスキームとなっている。品質確認の際の管理パラメータに関しては、現段階で、付表 1.1-17 に示すパラメータが設定されている。



付図 1.1-3 処分坑道埋め戻し材の基盤層の圧縮及びペレットとブロックの施工のスキーム

付表 1.1-17 TURUVA2012 で想定されている処分坑道埋め戻し材の施工における管理パラメータ

ブロックの施工	ペレットの施工	基盤層の施工	責任者※ 1	管理ポイント	管理されるパラメータ
坑道ヘトラック／タンクローリにて輸送			Posiva	輸送及び技術的	温度、湿度、清浄度
坑道でのブロック及びペレットの短時間貯蔵（ペレットはサイロの可能性）		準備完了した坑道へ基盤層材料をタンクローリから直接排出した後、ローラー圧縮機にて水平に圧縮施工	Posiva	輸送及び技術的	・ 輸送後のパッケージの目視検査（識別、状態） ・ 貯蔵所の状態（貯蔵所における水の漏えいは許容されない） ・ 基盤層の施工前に、坑道の容積を（表面スキャンにより）計算し、施工中に、施工した基盤層材料の重量を（既知の含水率と共に）記録する。これにより、施工された基盤層のバルク密度と乾燥密度が計算できる。施工後、表面スキャンにより、基盤層の傾斜と均一性が検査され、また、スポットチェックで含水率と密度を確認する。ローラー圧縮機には、圧縮結果を制御するためのオンラインシステムが搭載されている。
施工に向けたブロックの輸送			Posiva	輸送及び技術的	輸送の前後に目視検査を行う
パッケージからのブロックの取出し			Posiva	技術的	・ 設置前の個々のブロックの目視検査（スキャン、重量計、等） ・ 含水率（非破壊検査が可能な場合）
ブロックの施工（2 台の施工装置を利用可能）			Posiva	技術的	・ 設置後の個々のブロックの検査（カメラ、配置確認） ・ 設置されたブロックの各先端部/各層の検査（均一性、目視及びスキャンにて確認） ・ ブロックと岩盤壁面との距離の検査。 ・ 坑道断面あたりのブロック数の確認（総容積を坑道容積と比較） ・ 設置されたブロックの最終検査（目視、カメラ及びスキャン）（必要に応じて再施工）
	施工に向けたペレットの輸送		Posiva	輸送及び技術的	
	吹付けによるペレットの施工		Posiva	技術的	・ 施工したペレットの重量、及び施工中に（ダスト防止用に）添加した水分量、施工後の含水率と密度のスポットチェック ・ 施工装置前部に搭載したカメラでの充填度の目視検査 ・ 最終的な坑道内の施工密度の計算（含水率、重量、坑道のスキャン結果等、製作及び施工中に記録された値から）

※1：TURVA-2012 時点での想定

1.1.4. 処分坑道プラグの製造施工プロセス管理手法

処分坑道プラグは、主に、コンクリートドーム（Concrete dome）、コンクリートビーム（Concrete beams）、フィルタ層、水密性シール（Watertight seal）より構成される。処分坑道プラグに設定されている要件を付表 1.1-18 に、それを踏まえたレファレンス設計の概要を付表 1.1-19 に示す。

付表 1.1-18 処分坑道プラグの要件

要件項目	要件			
	コンクリートドーム	コンクリートビーム	フィルタ層	水密性シール
—	処分坑道の水理的隔離（操業期間）、他の人工バリアに悪影響を及ぼさない、埋め戻し材の維持			
—	良好な水理的隔離能力、長期的に大規模な体積変化を起こさない物質、水理的隔離能力の維持（中央坑道閉鎖まで）、埋め戻し材膨潤圧や地下水静水圧への耐性、埋め戻し材機能維持（水理的隔離機能喪失後）、有害物質や微生物活動の制限			
主要材料	コンクリート： Ca-Si 比 1：6 以下	コンクリート： Ca-Si 比 1：6 以下	ケイ砂／粉碎岩： 最適化した粒子サイズ	ベントナイト： モンモリロナイト含有率 75-90%、 乾燥密度 1400 kg/m ³ 以上、 あらかじめ飽和
厚さ	1500mm	—	750mm	750mm
透水係数	1×10 ⁻¹¹ m/s 以下	1×10 ⁻¹¹ m/s 以下	—	—
維持期間	100 年間			
耐圧性	7.5MPa 以上			
総硫黄含有率	1%未満（硫化物は半分以下）			
有機物含有量	1%未満			

付表 1.1-19 処分坑道プラグの主要構成要素の材質

	コンクリートドーム	コンクリートビーム	フィルタ層	水密性シール
材料	鉄筋低 pH コンクリート	鉄筋低 pH コンクリート	砂又は砂利	ベントナイトブロック 及びペレット（MX-80）
その他	・厚さ約 1500mm	・厚さ約 300mm	・厚さ 750mm ・密度 1900 kg/m ³ 以上	・厚さ 750mm ・乾燥密度 1400 kg/m ³ 以下

処分坑道プラグの製造・施工の工程は、大きく分けて以下の 3 工程である。処分坑道プラグの各構成要素の材料と製造の概要を付表 1.1-20 に示す。なお、TURVA-2012 時点では、各工程の品質管理方策の詳細は今後決定されるとしており、品質管理の原則のみが、概略的に示されている。

- ① 処分坑道プラグの材料の調達・貯蔵
- ② 処分坑道プラグの各構成要素の製造
- ③ 処分坑道プラグの各構成要素の施工

付表 1.1-20 処分坑道プラグの各構成要素の材料と製造

プラグの構成要素	原材料／成分	サイトにて製造	既製品の購入
プラグ中のコンクリート	セメント シリカフェーム 水 石灰石フィルタ 砂及び砂利 混和剤	○	
コンクリートビーム、エレメント及び原位置打設基礎	セメント シリカフェーム 水 石灰石フィルタ 砂及び砂利 混和剤	○	
水密性シール	MX-80 製ベントナイト ブロック及びペレット	○	
フィルタ層	砂／砂利もしくは骨材	○	
鋼製構成要素 (鉄筋や排水管)	鋼(鉄筋) 鋼／チタン(排水管)		○

「①処分坑道プラグの材料の調達・貯蔵」について、サイトにて製造するプラグ構成要素の材料は、大型袋にて納入し、処分場サイトの乾燥した温かい貯蔵施設にて貯蔵する。プラグ構成要素が望ましい特性を保持するため、材料の納入と貯蔵に関する指示に従わなければならない。シリカフェームとセメントに関しては、水和や早期の凝結を防止するため乾燥貯蔵する必要がある。本工程における品質管理の原則は以下の通り。

- ・ 全ての材料供給業者はその品質保証システムについて Posiva の承認を受けなければならない。
- ・ 材料はサイトに輸送された時点で検査し、規定の基準に合格した材料だけを受け入れる。
- ・ コンクリート構成要素に使用される原料の検査は標準や規格に従う。
- ・ 検査には、乾燥材料の抜き打ち品質検査（例、化学的、鉱物学的調査、粒径分布）等が含まれる。
- ・ 原料の保管条件（例、相対湿度(RH%)や温度）に従う。
- ・ 粘土構成要素の品質は処分坑道の埋め戻しと同じ方法で検査する。
- ・ フィルタ層の材料はその含水量、粒径分布及び清浄度を検査する。

「②処分坑道プラグの各構成要素の製造」について、付表 1.1-21 にまとめる。本工程における品質管理の原則は以下の通り。

- ・ コンクリート構成要素の検査には、製造された構成要素の寸法、重量、密度及び強度の抜き打ち検査等を含めなければならない。
- ・ 製造業者や Posiva が保管のために規定した条件（例、相対湿度(RH%)や温度）に従う。
- ・ 全ての材料は、処分坑道のプラグの建設に必要な時点で坑道内に搬入される。
- ・ 材料の輸送は、所定の条件（例、相対湿度(RH%)や温度）が保たれるように設計しなければならない。また、所定の条件での一時的な保管が可能でなければならない。

付表 1.1-21 処分坑道プラグの各構成要素の製造方法

プラグの構成要素	製造方法
コンクリートドーム中のコンクリート	・ サイトにて混合（詳細な設計文書に示される順序と時間に基づき正確に実施） ・ セメントとシリカヒュームは混合まで乾燥状態で保管 ・ コンクリートミキサープラント（材料の計量、取扱い等各種システム及び回転ミキサで構成される自動システム）にて混合 ・ 混合後、油圧システムでコンクリートトラックに移送
水密性シール	・ サイトにて圧縮 ・ 材料の準備方法は処分坑道埋め戻し材と同様（貯蔵に際しては、温度、相対湿度(RH%)を管理する）
フィルタ層	・ 骨材の原料は、坑道から掘削された岩石（処分場サイトで保管後、破碎、洗浄し、所定の粒径分布となるようふるいにかける） ・ 砂／砂利は、別の場所から収集し、所定の粒径分布となるよう準備する可能性あり
その他	・ 強化用の鋼／チタンの構成要素と配管は、市販のもの ・ コンクリートビームはサイトにて製造

「③処分坑道プラグの各構成要素の施工」について、コンクリートドーム用の溝（slot）は、ワイヤソーイング工法で製造する。ドームの位置は、処分坑道の入り口の詳細な地質学的マッピングに基づいて選定する。

最初のコンクリートビームは、最後の埋め戻し材ブロックとペレットの設置時に、同時に設置する。コンクリートビームの最上層を設置する前に、処分坑道を埋め戻し、コンクリートビームと岩盤の隙間をベントナイトペレットで充填すべきである。ペレットも、コンクリートビームを通じた配管から設置可能である。

第2のコンクリートビームは、フィルタ層と同時に設置する。フィルタ層の砂／砂利又は骨材は設置時に圧縮する。排水管は、第2のコンクリートビームが設置される際に設置される。層の最上部のフィルタ材は、コンクリートビームを通じた配管から設置する。

第3のコンクリートビームは、水密性シールの粘土ブロックとペレットが設置される際に同時に設置される。層の最上部へのペレットの設置は、コンクリートビーム層を通じて配管から実施する。第3のコンクリートビームはコンクリートドームの打設の背面型枠である。

補強材、チューブ、配管及び他の計装機器を設置し、次に、前面の型枠を建設し、低 pH コンクリートを型枠に打設する。所定の強度が得られたら、前面の型枠を解体し、排水管をグラウチングで施栓する。

本工程における品質管理の原則は以下の通り。

- ・ 設置後、フィルタ層の密度を、基盤層の密度と同じ方法で検査する。
- ・ 打設中のコンクリート材料とコンクリート構成要素の品質を検査するため、以下の対策を講じる予定である。
 - ・ 施工に使用される材料の量を測定、記録する。
 - ・ 建設現場に搬入される材料を体系的にチェックする。原料の品質試験、梱包材とその表示に関する試験が含まれる。
 - ・ 標準や規格に従ってコンクリートの打設状態を試験し、その特性を測定する。
 - ・ コンクリートの打設中の温度等をモニターする。
 - ・ 鑄造した構造物と自由表面の均質性に関する検査を、標準や規格で指定されている方法で実施する。
- ・ フィルタと水密性シールの設置中、フィルタ層と水密性シールに設置される質量と、定置され

た材料の密度を、非破壊検査法とサンプリングによる検査で記録する。

- ・ 操業中に、プラグからの漏水量の測定やコンクリート表面の外観検査を行う。コンクリートドームは、有害な亀裂が発生した場合、その都度規定する材料と工法で修復する。

1.1.5. 閉鎖材

フィンランドでは、処分坑道を埋め戻す材料と、処分坑道以外の地下開口部を埋め戻す材料とで、異なった名称を用いており、前者を埋め戻し材（Backfill）、後者を閉鎖材（Closure）としている。閉鎖材は、閉鎖用埋め戻し材及び閉鎖用プラグにより構成される。閉鎖材の材質及び要件等を以下に示す。

閉鎖材は、深度や場所に応じて、異なった材料を用いることが検討されており、その透水性に関する要件も、深度や場所に応じて異なっている。閉鎖用プラグには、①力学プラグ、②水理プラグ、③人間侵入防止プラグの3種類があり、必要な場所に対して設置される。

付表 1.1-22 閉鎖材の材質と透水性の要件

深度・場所		材質	透水係数の要件
地表から深度 50 m		巨礫（Boulders）	なし
深度 50 m～200 m		破碎岩	10^{-7} m/s 以下
深度 200 m～HZ20 層		粘土－骨材混合物	10^{-8} m/s 以下
HZ20 層		粘土ブロック及びペレット並びに破碎岩	10^{-6} m/s 以下
HZ20 層～処分深度		粘土－骨材混合物	10^{-8} m/s 以下
処分深度	技術室及び低層部立坑	破碎岩	10^{-7} m/s 以下
	中央坑道及び車両坑道	粘土ブロック及びペレット	10^{-9} m/s 以下

閉鎖材の製造・施工プロセスは、一般に、以下のような段階からなる。各段階において、品質保証（QA）及び品質管理（QC）は重要な役割を果たす。

- ・ 閉鎖材の材料供給者の選定
- ・ 閉鎖材の原材料及び構成要素の発注
- ・ 閉鎖材の原材料及び構成要素の納入・保管
- ・ 閉鎖材構成要素の製造
- ・ 閉鎖材設置前の準備作業
- ・ 閉鎖材構成要素の設置

閉鎖材の製造・施工プロセスやその管理手法は、処分坑道の埋め戻し材と類似したものとなる。閉鎖用埋め戻し材及び閉鎖用プラグのそれぞれについて、その原材料、製造プロセス、設置プロセスと、それらの品質管理項目について、付表 1.1-23 及び付表 1.1-24 にまとめる。

付表 1.1-23 閉鎖用埋め戻し材の構成要素の原材料、製造プロセス、設置プロセス及び品質管理項目

構成要素	原材料	製造				設置	
		サイト内	外部調達	製造方法	品質管理項目の例	設置方法	品質管理項目の例
基盤層	膨潤性粘土	○	—	—	—	中央坑道及び立坑下部の埋め戻しに使用（原位置圧縮法）	乾燥重量、圧縮度、含水率、厚さなど
ブロック	膨潤性粘土	○	—	単軸圧縮法	寸法・重量の抽出検査、目視検査（クラックなど）	中央坑道及び立坑下部の埋め戻しに使用（積み上げ）	均一性、ブロックと岩盤の隙間の距離や体積など
ペレット	膨潤性粘土	○	—	押し出し加工法	寸法・重量・含水量・密度など	中央坑道及び立坑下部の埋め戻しに使用（吹き付け）	乾燥密度、含水率など
粘土－骨材混合物	膨潤性粘土骨材、砂利、等	○	—	従来技術（回転ドラムミキサなど）	粒子サイズ分布、乾燥質量割合、含水量、密度など	立坑及びアクセス坑道の埋め戻しに使用（原位置圧縮法）	埋め戻し体積、密度など
碎石	掘削母岩 地元産碎石	○	—	処分施設掘削岩石を洗浄・粉砕	粒子サイズ分布、乾燥質量割合、含水量、密度など	立坑及びアクセス坑道の埋め戻しに使用（原位置圧縮法）	埋め戻し体積、密度など

付表 1.1-24 閉鎖用プラグの構成要素の原材料、製造プロセス、設置プロセス及び品質管理項目

構成要素	原材料	製造			設置方法	品質管理項目の例
		サイト内	外部調達	製造方法		
コンクリートプラグ (標準及び低 pH コンクリート)	セメント シリカヒューム 石灰石粉 砂礫 その他の添加物 混和剤	○	—	型枠組立、材料混合、打設	岩石表面洗浄、ノッチ形成、型枠建設、鉄筋設置、温度・応力センサ設置、乾燥材料配送、材料混合、コンクリート打設・養生、水和作用モニター、コンクリート冷却、グラウチング、型枠撤去、空隙充填、グラウトチューブ密封	プラグ構成要素の品質保証方策:材料物量の計測・記録、配送材料のチェック(原材料の品質検査など)、コンクリートの試験的打設・特性測定、打設時の特性監視、打設構造物の均質性検査(地中レーダ、超音波検査)、表面検査(目視、シュミットハンマー)
水理プラグの水密性シール	膨潤性粘土 ブロック・ペレット	○	—	坑道埋め戻し材の場合と同じ(単軸圧縮法及び押し出し加工法)	コンクリート構造物の間に水密性シールを設置	
フィルタ層	所定の粒子サイズ分布の骨材	○	—	処分施設掘削岩石を洗浄・粉砕	水理プラグ及び人間侵入防止プラグに使用	
鋼製構成要素 (鉄筋、チューブ、配管)	鋼	—	○	商用品を利用して事前製作	各種プラグに使用	
付属品(モールド、支持構造物)	未定	○	—	型枠はプラグ位置で建設	各種プラグに使用	
巨礫及び天然石	巨礫及び天然石	○	(○)	人間侵入防止プラグ用の天然石、サイトの掘削岩石から選定、巨礫は周辺地域から調達	アクセス坑道及び立坑の人間侵入防止プラグに使用。設置は次の4段階:フィルタ層設置、巨礫運搬、コンクリート基部打設、天然石運搬	

1.2. スウェーデンにおける品質管理の考え方

1.2.1. 処分坑道埋め戻し材の品質管理

坑道埋め戻し材の安全機能 (Posiva SKB, 2017) は次の通りである。

- 緩衝材の固定
- 移流による大量移動の制限

これらの安全機能から、坑道埋め戻し材の性能目標が導き出された。今回のケースでは、坑道埋め戻し材が満たすべき条件は、透水係数 10^{-10}m/s および膨潤圧 1MPa である。しかし、これらの特性を施工中に測定することは不可能であり、したがってこれらの数値を乾燥密度に換算し、これを施工中に確認することとなる。これを技術設計要件という。

SKBにおける埋め戻し材のプロダクション報告書 (SKB, 2010) では、一般的な材料仕様のアプローチを採用し、モンモリロナイトの最低量を決め、坑道埋め戻し材ブロックの乾燥密度を固定した。その後、ベントナイトが、特定の乾燥密度とモンモリロナイト量において、必ずしも膨潤圧と透水係数が一定でないことから、適応型設計のアプローチに変更した。この適応型設計では、性能目標と乾燥密度の関係を、実験室において確立する。この関係を設計に役立て、そこで必要となるブロックの乾燥密度が算出される。生産プロセスは、正しい特性を持つ構成要素を生産するように調整される (Kronberg et al., 2020)。

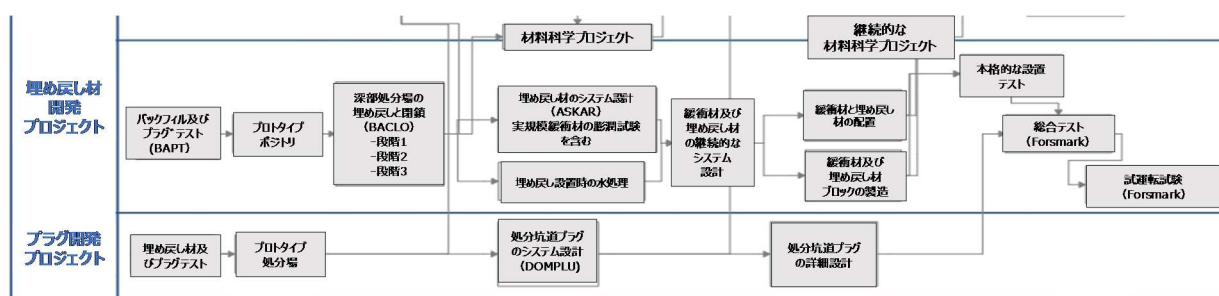
品質管理は、ふたつの部分に分割することができる。ひとつは納品に関する管理で、材料を正確に届けることであり、もうひとつは生産管理で、坑道内の乾燥密度が正しく施工されるようにすることを目的とする。

材料は、購入の前にサンプルを実験室で評価し、関連するすべてのパラメータを明確にする。この測定結果の詳細については、(Svensson et al., 2017) 及び (Svensson et al., 2019) に記載されている。最も重要なパラメータは膨潤圧および透水係数であるが、鉱物内容についても特定している。このデータをもとに設計を行い、メーカーに対し材料を発注する。材料が納品されれば、その材料が設計のベースとなったものと同一であることを確認するための検査を実施する。納品確認が済み、承認されれば、その材料を生産に回すことになる。この時点で重要となるパラメータは、生産プロセスを左右する材料の顆粒のサイズ分布、水分含有量および締固め圧である。ブロックを締固めた際にその寸法を測定し、同時に重量から密度を算出する。水分含有量がわかっているので、ブロックひとつひとつの乾燥密度も算出できる。つまり、すべてのブロックの寸法と重量が測定され、製造公差が満たされていることが確認される。ただし、現在の計画では、埋め戻しブロックは個別にではなく、パレットレベルで識別される。各パレットには 9 個の埋め戻しブロックがあるが、パレットの総質量はわかる。

ブロックはその後処分坑道に設置されるが、坑道の容積を割り出しておかなければならない。この測定には、レーザースキャンを使用し、ブロック施工を開始するまでに測定を行う。施工期間に、ブロック塊とパレットの測定を継続的に行う。ブロックとパレットの質量と水分含有量がわかっているので、処分坑道内の乾燥密度も算出できる。乾燥密度の要件は 6 m セクションの平均として表されるため、ブロックの前面とパレットの前面は、一定の間隔でレーザースキャンによって測定される。この計算による乾燥密度は、技術設計要件と突合せ、必要条件が満たされていることを確認する。

1.2.2. 設計、施工及び長期性能の関係

設計開発を確認するため、大規模試験および実規模試験に加え、実験室レベルでの試験を実施する必要がある。付図 1.2-1 は「SKB の坑道埋め戻し材およびプラグ開発のロードマップ概要」の一部分であり、SKB による坑道埋め戻し材及びプラグの開発に関する様々なプロジェクトやステップが記載されている。これらプロジェクトのひとつひとつに共通する目的は、例えば、要件の達成、操業の迅速さなどといった開発・更新された設計の一部を確認、もしくは検証することである。坑道埋め戻し材およびプラグの確認・更新された設計は、SKB 内の様々な専門分野（長期安全性、処分場設計、等）を含むマネジメントグループにより承認され、更新された参照設計が提示された。

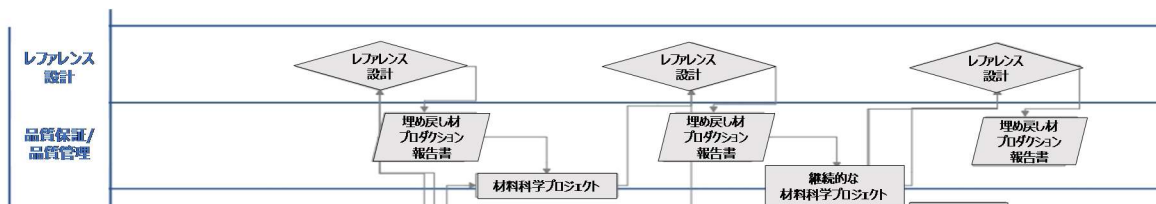


付図 1.2-1 坑道埋め戻し材及びプラグの開発ロードマップ

プロダクション報告書には、KBS-3処分場の設計、生産、施工、及び図7-2に示すような検査 (QC/QA) のあり方が示されている。KBS-3処分場および処分場施設の安全性に関しても、一連のプロダクション報告書に含まれている。

設計のイタレーションごとに作成される坑道埋め戻し材のプロダクション報告書 (例えば、SKB, 2010) には、処分坑道内の坑道埋め戻し材およびプラグの初期の状態についての情報を含んでおり、長期的安全性に対する評価に寄与するものである。この初期状態は、KBS-3処分場に最終的に設置された完成品としてのバリアの特性に関するもので、その後は処分場施設内でそれ以上の対応を必要としない。加えて、これらのレポートの情報は、坑道埋め戻し材およびプラグの取扱いや施工のあり方に関して、運用上の安全性レポートに有益な情報も提供している。

このレポートには、処分坑道内の坑道埋め戻し材およびプラグに関する設計の前提条件や参照設計が紹介されており、これらの設計が、前提条件に準拠していることを確認するものである。また、坑道埋め戻し材の生産についても、原料となる材料の掘削、納品から処分坑道への施工まで、詳細に報告し、またプラグの施工の概要も述べている。最後に、この坑道埋め戻し材およびプラグの初期状態、参照設計および設計前提条件への準拠について述べている。



付図 1.2-2 プロダクション報告書に示されている処分坑道埋め戻し材の品質保証及び品質管理

2. 性能確認プログラムに関連する参考資料

2.1. 米国における性能確認プログラムと品質保証

2.1.1. 性能確認プログラム

(1) 規制要求

米国においては地層処分にあたり規制要求の 10 CFR Part 63（ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分、及び修正規則）(Nuclear Regulation Committee, 2001) がある。10 CFR Part 63 では性能確認プログラムの実施を規定する条項が示されている。また実施主体である DOE が許認可申請時に提出した安全解析報告書（以後、SAR とする。）(DOE, 2008) において、性能確認とは「10 CFR Part 63 の技術基準（Technical Criteria）に係るサブパート E（§ 63.102 Concepts）で特定された性能目標（人間の合理的最大限の放射線被曝の限度に対する必要事項、放出された放射性核種が到達しうる環境から地下水を保全するための限度に対する必要事項、など）への準拠を実証するために使用される情報の妥当性を評価するために実施されるテスト、実験、及び分析のプログラム」、と定義される。

10 CFR Part 63「Performance confirmation（性能確認）」においては、目的、方法、期間が次のように規定されている。

- 目的：
 - 処分場の建設及びその後に行われる廃棄物の定置を可能にした調査結果につながる仮定、データ及び分析の適切性を評価するため
 - 永久閉鎖後の地層処分場の性能目標について許認可申請において仮定された条件に重要な変化が起こった場合に、それらを特定するため
- 方法：
 - 主要な地質工学及び設計パラメータ（天然及び人工システム及び構成要素の間の何らかの相互作用を含む）のモニタリング
- 期間：
 - サイト特性調査、建設、定置及び操業段階（§ 63.131 General requirements (b)では、「サイト特性調査中に開始し、永久閉鎖まで継続」と規定）

また、サブパート F（§ 63.131～§ 63.134）では、性能確認プログラム（Performance Confirmation Program）自体について規定されており、人工バリアの性能確認はもとより、処分環境についても許認可申請時の想定範囲内であるかの確認も要求されている。また、性能確認プログラムに含めるべき内容として、下記があげられている。

- ① 地質工学及び設計パラメータの確認（§ 63.132 ）
- ② 設計に関する試験（§ 63.133）
- ③ 廃棄物パッケージのモニタリング及び試験（§ 63.134 ）

10 CFR Part 63 のうち、性能確認に係る箇所を抜粋し、付表 2.1-1 に示す。また、性能確認プログラムの実施内容に関する規定を付表 2.1-2 に示す。

付表 2.1-1 米国ユッカマウンテン地層処分場に係る性能確認プログラムの要件の抜粋

10CFR Part63 (Nuclear Regulation Committee, 2001) より抜粋
サブパート E：技術基準、 §63.102 概念 (m) 性能確認 性能確認プログラムは、処分場の建設及びその後に行われる廃棄物の定置を可能にした調査結果につながる仮定、データ及び分析の適切性を評価するために実施される。 主要な地質工学及び設計面でのパラメータ（天然及び人工システム及び構成要素の間の何らかの相互作用を含む）のモニタリングが、サイト特性調査、建設、定置及び操業段階の全体を通じ、§63.113(b)及び(c)で指定された性能目標の順守に影響を及ぼす可能性のある許認可申請において仮定された条件に重要な変化が起こった場合に、それらを特定するために実施される。
サブパート F：性能確認プログラム、 §63.131 一般的な要件 (a) 性能確認プログラムは、実行可能な限りにおいて、次の点に関するデータをもたらすものでなければならない。 (1) 建設及び廃棄物定置作業中に実際に遭遇した地表面下の条件やこれらの条件の変化が、許認可審査で想定された限度内に収まっているかどうか。及び、 (2) 処分場の操業にとって必要であり、永久閉鎖後にもバリアとして機能することが設計に組み込まれているか、想定されている自然体系及び人工システムが、意図及び予測された機能を果たしているかどうか。 (b) 性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始され、永久閉鎖まで継続されなければならない。 (c) 性能確認プログラムには、本セクションのパラグラフ(a)で要求されているデータを入手する上で適切と考えられる原位置モニタリング、室内試験及び現場試験、原位置実験が含まなければならない。 (d) 性能確認プログラムは、次のような形で実施されなければならない。 (1) このプログラムによって、地層処分場の地質及び人工の要素がそれぞれの性能目標を満たす能力に悪影響が生じることはない。 (2) このプログラムによって、サイト特性調査、建設及び操業活動によって変化した可能性のある地質環境に関するパラメータ及び自然プロセスに関する基礎情報と、それらの基礎情報に関する分析がもたらされる。 (3) このプログラムによって、地層処分場の性能に影響を与え得るパラメータの基礎条件の変化を対象としたモニタリング及び分析が行われる。
§63.132 地質工学的なパラメータと設計パラメータの確認 (a) 処分場の建設及び操業期間中、サーベイランス、測定、試験及び地質図作成のための継続的な計画が実施されなければならない。この計画の目的は、地質工学的パラメータと設計パラメータの確認を保証すると共に、現場で実際に遭遇した条件に対応する上で必要な設計上の変更に関する情報を NRC に提供するために適切な措置がとられることを保証することにある。 (b) 地表面下の条件は、設計で用いられた前提に照らしてサーベイランス及び評価されなければならない。 (c) 測定及び観察を行うべき具体的な地質工学及び設計面でのパラメータが、自然体系及び人工システム及び構成要素の間の何らかの相互作用を含めて、性能確認プログラムにおいて特定されなければならない。 (d) これらの測定及び観察は、当初の設計の基盤及び前提と比較されなければならない。測定及び観察された結果と、当初の設計の基盤及び前提の間に重要な相違が存在する場合、設計及び建設方法の修正の必要性が明らかにされなければならない。これらの相違点、それらの地層処分場にとっての重要性、さらには勧告される変更が、NRC に報告されるものとする。 (e) 地下施設の熱力学的な応答に関する原位置モニタリングは、地質学的な特徴及び人工特徴の性能が設計限度内であることを保証するために、永久閉鎖まで実行されなければならない。

§63.133 設計試験

- (a) 建設の初期及び開発段階では、設計において使用される人工システム及び構成要素（例として、ボーリング孔及び立坑の密閉材、埋め戻し材、ドリップシールドなどが挙げられる）に加えて、廃棄物パッケージ、埋め戻し材、ドリップシールド、岩石及び不飽和帯及び飽和帯の水の間の熱相互作用に関する試験を行う計画が実施されなければならない。
- (b) この試験は、実行可能な限り早期に開始されなければならない。
- (c) 処分場設計に埋め戻しが組み込まれている場合、永久的な埋め戻し材の設置が開始される以前に、埋め戻し材の設置及び圧密手段の効果を設計要件に照らして評価するための試験が実施されなければならない。
- (d) ボーリング孔、立坑及び斜坑を密閉するための本格的な作業が開始される以前に、ボーリング孔、立坑及び斜坑の密閉材の効果を評価するための試験が実施されなければならない。

§63.134 廃棄物パッケージのモニタリング及び試験

- (a) 地層処分場操業エリアにおいて、廃棄物パッケージの条件をモニタリングするための計画が設定されなければならない。この計画のために選択される廃棄物パッケージは、地下施設に定置されるパッケージを代表するものでなければならない。
- (b) 廃棄物パッケージモニタリング計画のために選択された廃棄物パッケージの環境は、地層処分場操業エリアにおける安全な操業と両立する範囲内で、本格操業において廃棄物が定置される環境を代表するものでなければならない。
- (c) 廃棄物パッケージモニタリング計画には、廃棄物パッケージの内部状況に焦点を絞った室内実験が含まれなければならない。またこの室内実験では、実行可能な限り、廃棄物パッケージモニタリング計画に地下施設に定置された廃棄物パッケージが実際に経験する環境が作り出されなければならない。
- (d) この廃棄物パッケージモニタリング計画は、永久閉鎖が行われる時点まで、実行可能な限りの長期にわたって継続されなければならない。

付表 2.1-2 米国ユッカマウンテン地層処分場に係る性能確認プログラム内容の規定

サブパート F 性能確認プログラム		規定の内容	
		大分類	小分類
§ 63.131 一般要件	(a)項	確認事項 (可能な限り)	① 建設及び操業中の地下環境及び環境の変化が、許認可申請時の想定範囲内であるか ② 操業中及び閉鎖後のバリア機能として設計された天然及び人工バリアシステム及びその構成要素が、意図・予測したとおりに機能しているか
	(b)項	期間	サイト特性調査中に開始され、永久閉鎖まで継続
	(c)項	方法	(a)項に規定されるデータ取得に適切と考えられる方法で次のもの ・ 原位置モニタリング (in situ monitoring) ・ 室内及びフィールド試験 (laboratory and field testing) ・ 原位置実験 (in situ experiments)
	(d)項	実施	① 処分場構成要素の性能低下への悪影響を及ぼしてはならない ② サイト調査から閉鎖までの活動による変化可能性を有するサイト環境パラメータの取得、バックグラウンド情報の取得及び分析の実施 ③ 地層処分場の性能に影響を及ぼすパラメータのモニタリング及び分析
§ 63.132 地質工学及び設計パラメータの確認	(a)項	目的	・ 地質工学及び設計パラメータの確認 ・ 設計上の変更の際に適切な措置が採用されたことを NRC に提供するため
		期間	・ 処分場の建設及び操業期間中
		活動	次のものを連続的に含むプログラムを要求 ・ サーベイランス ・ 測定 ・ 試験 ・ 地質図作成
	(b)項	地下環境条件	・ 設計時の前提条件を踏まえて実施
	(c)項	パラメータの特定	・ 測定及び観察を行うべきパラメータの特定は、他の構成要素の間との相互作用を含めて行う
	(d)項	結果の取扱い	・ 測定及び観察結果は、当初の設計基礎及び前提と比較されなければならない。 ・ この結果、重要な相違が存在する場合には下記の活動を要求 ・ 設計及び建設方法の修正の必要性 ・ 修正内容（現時点との相違） ・ 修正による地層処分場にとっての重要性

サブパート F 性能確認プログラム		規定の内容	
		大分類	小分類
			・ NRC への報告
	(e)項	特定のモニタリング要求	●地下施設の熱力学的な応答に関する原位置モニタリング ・ 目的：地質学的及び工学的な性能が設計限度内であることを保証するため ・ 終了時期：永久閉鎖まで実施
§ 63.133 設計試験	(a)項	活動	・ 時期：建設初期～建設段階 ・ 試験内容：次の内容を要求 ・ 工学システム及び構成要素（例えば、ボーリング孔や立坑のシール材、埋め戻し材（backfill）、ドリップシールドなど）に関する試験プログラム ・ 工学システム間や周辺岩盤との熱的相互作用に関する試験プログラム
	(b)項	開始時期	・ 設計試験は、可能な限り早期に開始
	(c)項	埋め戻し材に関する試験要求	・ 目的：埋め戻し材の設置及び圧密手段の効果に関する設計要件の確認（但し、処分場設計に埋め戻し材が含まれる場合に限定） ・ 時期：埋め戻し材の設置が開始される以前
	(d)項	シール材に関する試験要求	・ 目的：ボーリング孔、立坑及び斜坑のシール材効果の評価 ・ 時期：ボーリング孔、立坑及び斜坑のシール作業が開始以前
§ 63.134 廃棄物パッケージのモニタリング及び試験 ¹	(a)項	モニタリング要件	廃棄物パッケージモニタリングは、次の内容を含むプログラムを要求 ・ モニタリング場所：地層処分場操業エリア ・ モニタリング対象：廃棄物パッケージの諸条件 ・ 計測の代表性：地下施設に定置されるパッケージを代表するものでなければならない。
	(b)項	モニタリング環境に関する要件	・ 地層処分場操業エリアでの安全操業と両立する範囲での実施 ・ 通常操業において廃棄物が定置される環境を代表するものでなければならない
	(c)項	室内試験の要件	・ 廃棄物パッケージの内部状況に焦点を絞った室内実験を含めること ・ 可能な限り、廃棄物パッケージの定置環境を模擬すること。
	(d)項	モニタリング期間	・ 永久閉鎖が行われる時点までの可能な限り長期に亘る継続性を要求

注¹ 我が国の処分概念と異なり、廃棄物パッケージ周りの緩衝材の施工がないため、計測器の設置などを含む原位置試験が可能な環境であることに留意が必要である。

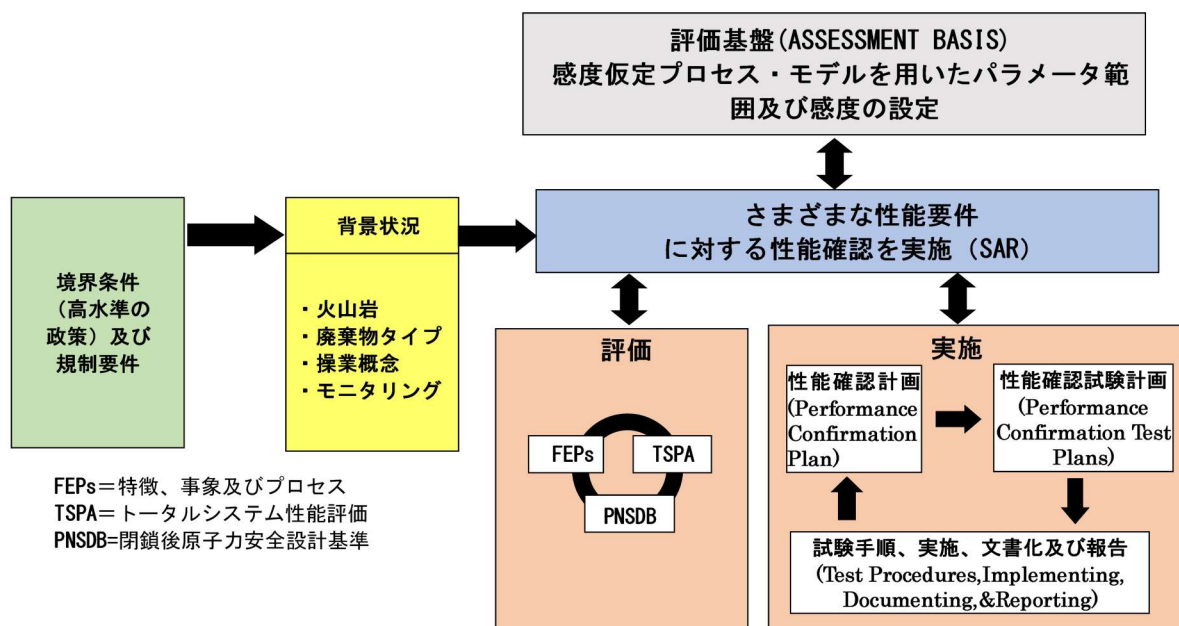
(2) 性能確認プログラムの流れ

米国における性能確認プログラムは、「処分場性能確認報告書（サンディア国立研究所）」（Sandia National Laboratory, 2011）によれば、下記の付図 2.1-1 の手順を示すことができる。まず、前提条件として高水準の政策や規制要件、及び背景状況等が設定される。それら前提条件を考慮しつつ、設定した「評価基盤」の下で、DOE の許認可申請書の一部である SAR (DOE, 2008) において、性能確認が実施される。

「評価」では閉鎖後原子力安全設計基準（以下、PNSDB とする。）（Argonne National Laboratory, 2008）、FEPs、およびトータルシステム性能評価（以下、TSPA とする。）（Sandia National Laboratory, 2008）が連関している。PNSDB では処分場を構成する廃棄物管理において重要なバリア要素（ITWI）が抽出され、FEPs では SAR にて評価すべき項目のスクリーニングを行い、それらを受けて TSPA が実施される。

「実施」では、性能確認計画・性能確認試験計画の検討（Bechtel SAIC Company, 2008）、および性能確認の実施や報告等が行われる。性能確認計画では、SAR で参照する TSPA の閉鎖前・閉鎖後評価のうち、最も関連性がある 20 項目の試験項目が抽出されている。さらに性能確認試験計画により 20 項目の試験項目が 17 項目まで選定される。この 17 項目が、TSPA に対する中程度から高い重要性、又は不確実性に及ぶ天然及び EBS の閉鎖後性能確認の技術的基礎に最も直接関連する設定となる。試験項目の選定について付表 2.1-3 に示す。

上記のプロセスにより性能確認が実施され、結果は、「評価基盤」、「評価」及び「実施」へと適宜フィードバックされ、性能確認プログラムの詳細さの向上が計られる。



付図 2.1-1 米国ユッカマウンテン地層処分場における性能確認の開発及び評価における階層構造（(Sandia National Laboratory, 2011) より作成）

付表 2.1-3 性能確認計画及び性能確認試験計画の取組リスト

取組名称	ID #	取組の説明	バリア又はプロセス	性能確認計画 (20項目)	性能確認試験計画 (17項目)
1. Yucca Mountain Review Planにおける一般的な要件の試験と監視（天然及び人工バリア）					
降水モニタリング	84	降水のモニタリングと組成分析	上部天然バリア	○	—
浸透モニタリング	133	水サンプルの浸透モニタリングと実験室分析	上部天然バリア	○	○
地下水と岩石の試験	119	地下施設で採取されたサンプルに基づいた、塩化物の物質収支と同位体化学の実験室分析	上部天然バリア、下部天然バリア	○	○
不飽和層の試験	137	周囲の坑道での、トポバスプリング凝灰岩の結晶の乏しいサンプルによる輸送特性及び収着特性の試験	上部天然バリア、下部天然バリア	○	○
飽和層のモニタリング	150	ユッカマウンテンの下方及び下り勾配の飽和帯での水位と水理学サンプリングのモニタリング。	下部天然バリア	○	○
飽和帯断層水理試験	159	飽和帯における異方性を含む断層帯の水理特性の水理及びトレーサ試験	下部天然バリア	○	○
飽和層沖積試験	225	沖積層の複数のボーリング孔測定パラメータを使用した沖積試験施設でのトレーサ試験。	下部天然バリア	○	○
坑道検査	59	必要に応じて、非定置坑道の定期検査、及び定置坑道、熱加速坑道、及びその他の地下施設の定期検査を、リモート測定技術を使用して行う	EBS、回収可能性	○	○
熱加速坑道近接場モニタリング	125	熱的に加速された坑道に関連する近接場結合プロセス（熱水力学・機械・化学）特性及びパラメータの監視。	上部天然バリア、下部天然バリア	○	○
粉塵の蓄積モニタリング	52	EBS表面の粉塵の量と組成のモニタリングと、室内試験	EBS	○	○
熱加速坑道環境モニタリング	54	ガス組成のモニタリングと室内試験 ・水量、組成、及びイオン特性（薄膜を含む） ・微生物の種類と量 ・熱的に加速された坑道内での放射線と放射線分解	EBS	○	○
2. 地質工学と監視の設計と試験					
地下マッピング	105	亀裂、断層、層序の接触、及び岩相特性のマッピング	上部天然バリア、下部天然バリア	○	○
地震モニタリング	167	地域の地震活動の監視。重要な局所的又は地域的な地震後の地下及び表面断層位置のモニタリング	破壊的な事象、回収可能性	○	—
建設影響モニタリング	224	機械的特性を確認するための建設による変形の監視	上部天然バリア、回収可能性	○	—

取組名称	ID #	取組の説明	バリア又はプロセス	性能確認計画 (20項目)	性能確認試験計画 (17項目)
熱加速坑道熱応力モニタリング	60	熱加速坑道での坑道及びインパートの形状と整合性のモニタリング	EBS、回収可能性	○	○
3. 設計試験（廃棄体パッケージ以外）					
シール試験	200	ボーリング孔シール有効性の室内試験と、それに続く立坑及び斜坑シール有効性の実地試験。必要に応じて、充填する埋め戻し材の有効性を評価するための試験を行う	EBS、 上部天然バリア	○	○
4. 廃棄体パッケージのモニタリングと試験					
廃棄体パッケージのモニタリング	83	廃棄体パッケージの外部腐食を証明するための遠隔モニタリング。	EBS	○	○
腐食試験	222	処分場の熱及び化学環境の代表的な範囲における廃棄体パッケージ及びドリップシールドサンプルの実験室での腐食試験。 室内試験には、一般的な腐食、合金22の相変態、局所腐食が含まれる。	EBS	○	○
熱加速坑道サンプルでの腐食試験	223	熱加速坑道の条件による廃棄体パッケージ及びドリップシールドサンプルの実験室での腐食試験。室内試験には、一般的な腐食、合金22の相変態、局所腐食が含まれる。	EBS	○	○
廃棄物試験	226	廃棄物パッケージ条件下による実験室内での廃棄物試験（廃棄体パッケージ内で一対になった場合を含む）	EBS	○	○

(3) 性能確認プログラムにおける各構成要素における ITWI と性能要件

10CFR63 の方針によって処分場は 3 つのバリア構成（上部天然バリア、EBS、下部天然バリア）が設定される。それぞれのバリアは FEPs データベースやその他の補足データも参考にしつつ、バリア機能にとって重要な要素（ITWI）が導出され、性能確認へ進む。付表 1.1-16 に各バリアの構成要素とバリア機能について示す。

付表 2.1-4 米国ユッカマウンテン地層処分場における各バリアの構成要素 / 機能

バリア	Feature	バリア機能 a)	安全分類 b)	性能要件 (参考: SAR §1 及び§2)
上部天然バリア	地形と表土	水の移動速度を防止又は大幅に低減	ITWI	SAR2.1.2.1 上部天然バリア性能の要約—上述のバリア性能解析の結果、地形と表土は処分場の上にある地下の不飽和帯の岩石層への正味の浸透を大幅に低減することが立証された。閉鎖後 1 万年間において予測される気候状態に関し、地形及び表土は降水が地下の不飽和帯の岩石層に浸入するのを (平均) 約 90%以上防ぐ。さらに具体的に言えば、各気候状態に関する平均降水量の割合としての正味の浸透率の平均値は、(1) 現在の気候に関しては約 8% ; (2) モンスーン気候に関しては約 9% ; (3) 間氷期の気候に関しては約 10%と推定される。
上部天然バリア	処分場の上の不飽和層	水の移動速度を防止又は大幅に低減	ITWI	SAR2.1.2.1 毛細バリア効果により環境中の水の流れを定置坑道周辺に分岐させる。この効果を考慮すると、坑道への平均漏出率は、健全な坑道では年間平均浸透率の 11%以下、劣化した坑道では、坑道の劣化状態次第で、12%以下～48%の範囲で変化する。
EBS	処分坑道	水の移動速度を防止又は大幅に低減 放射性核種の移動速度を防止又は大幅に削減	ITWI	SAR2.1.2.2 EBS 内の不飽和流— 破損した廃棄物パッケージ内、及びインパート内での放射性核種の有効な拡散と可動性を低減する 坑道内の水の化学的特性—坑道内の水の化学的特性は、(漏出、凝結、毛細流などにより) 侵入する水の化学的特性、蒸発、及び熱—水理学的環境に関係する坑道内の他の熱—化学的プロセスにより影響を受ける (セクション 2.3.5.1 とセクション 2.3.5.5)。これらの化学的特性は、廃棄物パッケージ外側バリアの局所腐食の可能性に影響するだけでなく (セクション 2.3.6.4)、廃棄物パッケージからインパートへ放出される放射性核種の移行特性にも影響する。 地震が励起する坑道崩壊による EBS 構成要素の損傷— 地震活動に伴う地震動は、定置坑道周辺の母岩を破損させ、ドリップシールドを損傷させる可能性がある。この結果ドリップシールドを損傷させ、応力腐食割れを発生させる場合がある。しかし、割れの開口部は非常に小さく、緊密なため、有効な水の流れは、廃棄物パッケージと水の直接的な接触を防ぐ、又は接触する水の量を大幅に減少させるドリップシールドの性能には影響しないほど少ない。したがって、この種のメカニズムは TSPA から除外されている。
EBS	ドリップシールド	水の移動を防止又は大幅に低減 放射性核種の移行を防止又は大幅に削減	ITWI	—処分坑道は、廃棄体パッケージを閉鎖後の落石から保護するドリップシールド構造に対応している。 —インターロックドリップシールドは、岩が廃棄体パッケージの腐食バリアに影響するのを防ぐために、分離しないように設計されている。 —ドリップシールドは、耐腐食性材料で構成されており、予想される閉鎖後の性能期間の寿命のために、すべての表面の腐食許容量が含まれている。 —インターロックドリップシールドは、岩からの水滴が廃棄体パッケージに接触するのを防ぐ。
EBS	廃棄体パッケージ	水の移動を防止又は大幅に低減 廃棄物からの放射性核種の放出速度を防止又は大幅に低減 放射性核種の移行を防止又は大幅に削減	ITWI	厚さ 25 mm の外側シェルは、耐腐食性の Alloy 22 で構成される。厚さ 50 mm のステンレス鋼の内側シェルは、3 つの機能を果たす。 (1) 落石に耐える構造強度を提供し、内部廃棄物を据え付けパレット上での取り扱いを容易にする。 (2) 外部表面の接触線量率を減らすために放射線を遮蔽する。 (3) 廃棄体内の放射性廃棄物を限定的に封じ込めるが、TSPA-LA モデル分析ではこの封じ込めを考慮していない。
EBS	廃棄体据え付けパレット	無し	Non-ITWI	—廃棄体パッケージ据え付けパレットは、名処分場の性能確認シナリオで定義された負荷にさらされている間及びその後に、Alloy 22 廃棄体パッケージ据え付けパレット表面以外のものと廃棄物パッケージが連続して接触するのを防ぐ。 —劣化した廃棄物パッケージ設置パレットの静的負荷計算は、パレットの構成に永久的な変形が生じていないことを示す。したがって、このパレットは、廃棄体パッケージが Alloy 22 以外のものと接触するのを防ぎ、性能要件に対処する。
EBS	インパート	無し	Non-ITWI	長期的な沈下を防ぐ
下部天然バリア	処分場下の不飽和層	放射性核種の移動速度を防止又は大幅に削減	ITWI	SAR2.1.2.3 処分場から接近環境への放射性核種の移行を防ぐ
下部天然バリア	飽和層	放射性核種の移動速度を防止又は大幅に削減	ITWI	SAR2.1.2.3 処分場から接近環境への放射性核種の移行を防ぐ

注記

- a) バリア機能は、処分システムに求められる性能を定義する。
b) ITWI 分類は、バリア機能に適用される。ITWI : 廃棄物管理において重要、Non-ITWI : 廃棄物管理において重要ではない。

(4) 性能確認プログラムの例示

前項では、米国にて設定されている性能確認プログラムの手順についての記載をしたが、本項では、それら手順の適用性を例示する。

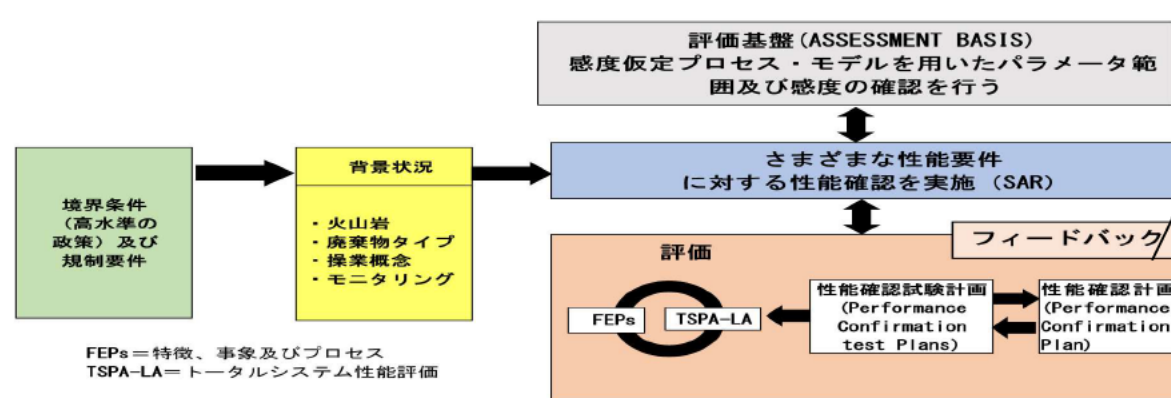
例示に際しては、付図 2.1-1 に記載したセーフティケースの流れに、ドリップシールドを当てはめ性能確認の手順を例示した。評価に用いるドリップシールドの情報を付表 2.1-5 に示し、結果を付図 2.1-2 に示す。

付図 2.1-2 は各要素に情報を当てはめた結果であるが、SAR は評価の詳細さの向上を図るため TSPA-LA へのフィードバックを行い、また“評価基盤（感度仮定プロセス・モデルを用いたパラメータ範囲及び感度の確認）”も考慮され、これらの作業は反復的に行われる。

付表 2.1-5 性能確認手順成立性の検証に必要な情報まとめ（ドリップシールド）

性能確認手順 必要項目	必要情報	
さまざまな要件	性能要件 -処分坑道は、廃棄体パッケージを閉鎖後の落石から保護するドリップシールド構造に対応している。 -インターロックドリップシールドは、岩が廃棄体パッケージの腐食バリアに影響するのを防ぐために、分離しないように設計されている。 -ドリップシールドは、耐腐食性材料で構成されており、予想される閉鎖後の性能期間の寿命のために、すべての表面の腐食許容量が含まれている。 -インターロックドリップシールドは、岩からの水滴が廃棄体パッケージに接触するのを防ぐ。	
	粉塵の蓄積のモニタリング -粉塵の蓄積と潜在的な化学的影響の仮定を評価する 腐食試験 -腐食モデルの結果を評価する 熱的に加速された坑道サンプルの腐食試験 -腐食モデルの結果を評価する	
FEPs	1.2.03.02.0C 地震による横坑の崩壊による EBS の損傷	地震活動は、岩盤の動作や岩盤の応力に変化を引き起こし、ドリップシールド、廃棄体パッケージ、又は他の EBS 構成要素に影響をあたえる可能性のある横坑の崩壊をもたらす可能性がある。影響として、静的及び動的負荷を考慮する。
	2.1.03.02.0B ドリップシールドの応力腐食割れ	ドリップシールドは、応力腐食割れが発生し得る環境において水が付着している可能性がある。乾燥条件下又は熱応力による応力腐食割れの可能性も、この FEP の一部として取り扱われる。
	2.1.03.03.0B ドリップシールドの局所腐食	局所腐食（空孔又は隙間腐食）は、ドリップシールドの劣化を促進する可能性がある。
	2.1.03.08.0B ドリップシールドの早期損傷	製造上の欠陥、不適切な密閉又は製造及び据付中の品質管理に関連するその他の要因により、ドリップシールドは早期に損傷する可能性がある。
	2.1.03.10.0B ドリップシールドのき裂を通過する液体と固体の移流	ドリップシールドに十分なサイズのき裂又は開口部が存在すると、ドリップシールドへ水や固体材料の移流経路が形成される可能性がある。生じるき裂は、ドリップシールドの性能及び/又はその後の廃棄体パッケージへの滴下に影響を与える可能性がある。化学的又は物理的反応によるドリップシールドのき裂の部分的又は完全な詰まりも、ドリップシールドを通過する流路に影響を与える可能性がある。
	2.1.03.11.0A 廃棄体パッケージとドリップシールドの物理的形状	処分場におけるドリップシールド、廃棄体パッケージ、及び内部の廃棄体容器の形状は、処分場の長期性能に影響を与える可能性がある。廃棄体パッケージの形状は、容器の強度や熱拡散に影響を与える可能性がある。廃棄体パッケージとドリップシールドの材料は、処分場環境への物理的及び化学的挙動に影響を与える可能性がある。廃棄体パ

性能確認手順 必要項目	必要情報	
		パッケージとドリップシールドの完全性は、放射性核種の放出に影響する。廃棄体パッケージには、局所的な寄与と、処分場全体に対する寄与の両方がある。商業用の SNF、DOE SNF、及び DOE HLW を含むすべての種類の廃棄体パッケージ及び容器を検討する必要がある。
	2.1.06.06.0A ドリップシールドが 流れに与える影響	ドリップシールドは、廃棄体パッケージに到達する水分量に影響する。ドリップシールドが廃棄体の環境に与える影響は、廃棄体が「完全な」状態と「劣化した」状態の両方について考慮する必要がある。
	2.1.07.05.0B ドリップシールド内 での金属材料のク リープ	ドリップシールドに使用される金属は、偏差応力に応じたクリーププロセスによって変形する可能性がある。
	1.2.03.02.0A 地震活動による EBS の損傷	地震活動による EBS 構成要素（ドリップシールド、廃棄体パッケージ、パレット、インパート）の繰り返し振動は、ドリップシールド及び廃棄体パッケージへ深刻な損傷を与える可能性がある。このような損傷メカニズムは、性能の低下につながる可能性がある。
	2.1.03.11.0A 廃棄体パッケージと ドリップシールドの 物理的形狀	処分場におけるドリップシールド、廃棄体パッケージ、及び内部の廃棄体容器の形状は、処分場の長期性能に影響を与える可能性がある。廃棄体パッケージの形状は、容器の強度や熱拡散に影響を与える可能性がある。廃棄体パッケージとドリップシールドの材料は、処分場環境への物理的及び化学的挙動に影響を与える可能性がある。廃棄体パッケージとドリップシールドの完全性は、放射性核種の放出に影響する。廃棄体パッケージには、局所的な寄与と、処分場全体に対する寄与の両方がある。商業用の SNF、DOE SNF、及び DOE HLW を含むすべての種類の廃棄体パッケージ及び容器を検討する必要がある。
TSPA-LA	7.6.4.3.1 Drip Shield, Waste Package, and Waste Form Degradation - Drip Shield Corrosion - Drip Shield and Waste Package Early Failure 7.6.4.3.1 ドリップシールド、廃棄体パッケージ、廃棄物の劣化 - ドリップシールド腐食 - ドリップシールドと廃棄体パッケージの早期損傷	
性能確認計画 ⁰	性能確認計画は、性能確認のための 20 の取組を特定する。いくつかの取組は、最新の技術情報と TSPA-LA の閉鎖前・閉鎖後の性能確認に最も関連性があるものとして選択された。4 つの受け入れ基準カテゴリ（Yucca Mountain Review Plan (YMRP, NUREG-1804)のセクション 2.4.3(NRC 2003 [DIRS 163274])) ごとにグループ化し、各取組の簡単な説明と、対応するバリアを記載した。	
性能確認試験計画 ⁰	(SNL 2008a) 1.3.1 より 性能確認計画で特定された 20 項目の取組を、試験計画として性能確認と性能確認の両方の組織によって承認されたレポート（Watson 2004 [DIRS 172213]）が作成され、20 のうち 17 項目が、TSPA-LA に対する中程度から高い重要性又は不確実性に及ぶ天然及び EBS の閉鎖後性能確認の技術的基礎に最も直接関連することが確認された。 （除外された 3 項目は、地震モニタリング、降水量モニタリング、建設影響モニタリング）	



性能要件

ードリップシールドは、耐腐食性材料で構成されており、予想される閉鎖後の性能期間の寿命のために、すべての表面の腐食許容量が含まれている。

—腐食試験 (腐食モデルの結果を評価)

代表的な処分場の熱的及び化学的環境の範囲でのドリップシールドサンプルの実験室での腐食試験:一般的な腐食、合金 22 の相変態、局所腐食の室内試験

20 の取組のリスト

- ・腐食試験 (処分場の代表的な熱及び化学環境)
- ・熱加速坑道サンプルでの腐食試験

20 の性能確認計画取組リストのうち 17 が、TSPA-LA に対する中程度から高い重要性又は不確実性に及ぶ天然及び EBS の閉鎖後の性能評価の技術的基礎に最も直接関連することが確認された。“腐食試験”及び“熱加速坑道サンプルの腐食試験”は実施される。

2.1.03.03.0B

ドリップシールドの局所腐食

局所腐食 (空孔又は隙間腐食) は、ドリップシールドの劣化を促進する可能性がある。

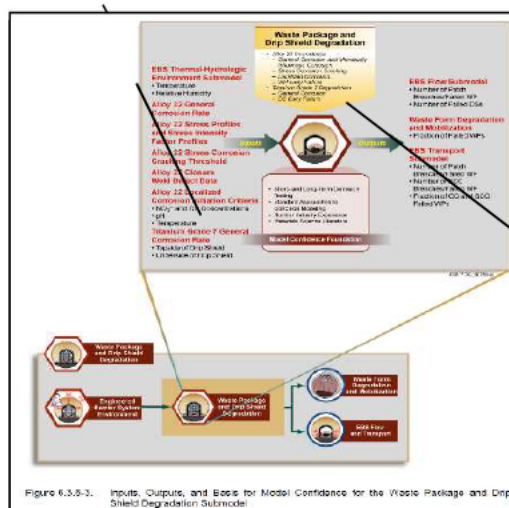


Figure 6.3.3-3. Inputs, Outputs, and Basis for Model Confidence for the Waste Package and Drip Shield Degradation Submodel

腐食試験に関するインプットとアウトプット

付図 2.1-2 性能確認手順の例示 (ドリップシールドの腐食)

2.1.2. 品質保証

本項では、ユッカマウンテン地層処分場における品質保証に関する規制当局による規定と実施主体であるエネルギー省（DOE）による取組について調査した。

(1) 規制要求

10 CFR Part 63（ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分、及び修正規則）（Nuclear Regulation Committee, 2001）のサブパート G（品質保証：§ 63.141～144）の内容を要約すると主に以下の通りであり、品質保証には、サイト特性調査より地上施設の解体の期間、安全性に関する処分場に係わる構成要素やシステムについての品質管理や性能確認（モニタリング）などを含むものである。

- ・ 品質保証の定義：品質保証（Quality assurance）には、地層処分場に関する構造物、システム及び／又は構成要素が、所定の通りの性能を発揮するための計画的及び系統だった措置が含まれる（§ 63.141）。
- ・ 品質管理の定義：品質管理（Quality control）は、品質保証（Quality assurance）に含まれ、材料、構造物、構成要素又はシステムの物理的な特徴に関連する品質保証措置であり、それらの品質があらかじめ規定された要件に適合したものとなるように管理する手段を実現する措置により構成される（§ 63.141）。
- ・ 品質保証計画に含めるべき範囲：事業者は、安全解析書の中に、安全性にとって重要なすべての構造物、システム及び構成要素、さらに廃棄物の隔離に重要なバリア設計及び特性についての品質保証計画を含める必要がある。品質保証計画に含めるべき主な範囲は、以下の通りであり、さらに適用される品質保証要件への遵守方法も示す必要がある（§ 63.142 (a)）。
 - サイト特性調査
 - サンプル及びデータの取得、管理及び分析
 - 試験及び実験
 - 科学的な調査
 - 施設及び設備の設計及び建設
 - 施設の操業
 - 性能確認
 - 永久閉鎖
 - 地表施設の除染及び解体
- ・ 品質保証の要件が適用される範囲：品質保証の要件は、廃棄物の確認にとって重要な構造物、システム及び構成要素の安全機能に関するあらゆる活動（設計作業、購買、製造、取り扱い、輸送、貯蔵、洗浄、組み立て整備、設置、点検、試験、操作、保守、修理、改造、サイト特性調査、性能確認、永久閉鎖、除染、地表施設の解体などが含まれる）に適用される（§ 63.142 (a)）。
- ・ 設計管理措置：事業者は、構造物、システム及び構成要素に関して適用される規制要件及び設計基準が、仕様、図面、手続き及び指示通りとする措置を講じなければならない、これらの措置により、適切な品質基準が設定され、設計文書に組み込まれると共に、これらの基準からの逸脱の管理が行わなければならない。さらには、廃棄物隔離及び、構造物、システム及び構成要素の安全機能にとって重要な資材、部品、設備及びプロセスを選定し、その適格性を審査する措置も策定しなければならない（§ 63.142 (d)）。
- ・ 設計の適格性検証又は検査措置の策定設定：設計の適格性検証又は検査措置の策定の方法としては、設計審査の実施、代替計算あるいは単純化された計算方法の使用、適切な試験計画

- の実施などが挙げられる（§ 63.142 (d)）。
- ・ 具体的な設計特性の適格性検証：その他の検証又は検査プロセスではなく試験計画が使用される場合、最も不利な設計条件の下でのユニットの適切な品質確認試験が含まれていなければならない。このような設計管理措置には、下記の項目に適用されなければならない（§ 63.142 (d)）：
 - 様々な分析（臨界物理学、応力、熱、水理学、閉鎖前／後）
 - 物質間の相容性（compatibility）
 - 点検、保守及び修繕のためのアクセス可能性
 - 検査及び試験の基準に関する概略的な記述
 - ・ 購入資材の管理：事業者は、購入された物質、設備及び役務に関して、調達仕様文書に適合したものとなるための措置を講じる必要がある（§ 63.142 (h)）
 - ・ 点検：事業者は、品質に影響を与える活動の点検に関する計画を策定し、計画通りに実施する必要がある（§ 63.142 (k)）。
 - ・ 材料又は品目の検査、測定又は試験が、品質確認のために必要な場合、工程ごとに実施されなければならない。これらの点検が不可能又は不都合（disadvantageous）を生じさせる場合には、プロセスの方法や設備、モニタリングなどの間接的な管理が実施されなければならない。なお、点検とプロセスモニタリングの両方が実施されなければ管理が不十分な場合、両方とも実施されなければならない（§ 63.142 (k)）。
 - ・ （性能確認）試験の管理：事業者は、安全性にとって重要な構造物、システム及び構成要素がその使用に際して満足のゆく性能を示すことを立証するために必要なあらゆる試験が、書面に示された試験手順（適用される設計文書に含まれる要件及び受け入れ限度が組み込まれたもの）に従って確実に特定及び実施されるようにする試験計画を設定する（§ 63.142 (l)）。
 - 試験計画に含めるべき内容
 - ✓ 設置前の保証試験（proof tests）
 - ✓ 操業前試験（preoperational tests）
 - ✓ 操業期間中の操業試験（operational tests）
 - 試験手順の要件：
 - ✓ 試験の前提条件が満足できること
 - ✓ 適切な試験器具類が利用可能でかつ実際に使用されること
 - ✓ 適切な環境条件の下での試験実施を確保するための諸規定を含めること
 - 試験計画の文書化
 - ・ 試験の設備の管理：事業者は、品質に影響を与える活動において使用される工具、ゲージ類、装置類、その他の測定及び試験装置が、必要とされる限度内の精度を維持できるように、指定された間隔において適切に管理、校正及び調整されるようにするための措置を策定する（§ 63.142 (m)）。
 - ・ 是正措置：事業者は、品質に悪影響を及ぼすような条件（故障、機能不全、欠陥、逸脱、欠陥を伴う材料や設備、不適合など）を速やかに特定及び是正されるようにする措置を策定する。重要な条件が品質に悪影響を及ぼすものである場合、これらの措置によって原因が特定され、その再発を防止するための是正措置が講じられるようにしなければならない。品質に悪影響を及ぼす重要な条件、これらの条件の発生原因、それに対応して講じられた措置の特定は、文書化された上で、組織幹部の適切なレベルに報告されなければならない（§ 63.142 (q)）。

(2) 事業者による取組み

事業者である米国 DOE が許認可申請にて提出した SAR (DOE, 2008) の Chapter 5 (管理プログラム) の § 5.1 (品質保証) では、ユッカマウンテン処分場における品質関連活動に適用する品質保証プログラムの要件に関して、The Office of Civilian Radioactive Waste Management (民間放射性廃棄物管理局: OCRWM) の Quality Assurance Requirements and Description (品質保証の要件と解説: QARD) が述べられている。

QARD (version20) のうち関連する項目を

付表 2.1-6 にまとめた。

付表 2.1-6 品質関連活動に適用する品質保証プログラムの要件(QARD:version20) のうちモニタリングに関連する項目

QARD セクション		内容
10.0 検査		
10.1 概要		このセクションでは、検査プログラムを開発するための要件を確立する。特定の要件への品目及び活動の適合性を検証するために必要な検査を計画し、実行する。
10.2 要件	10.2.1 検査計画	A. 検査計画を策定し、文書化する。検査計画は、手順管理によって管理される別個の文書、又は承認された文書の不可欠である。 B 関連する組織の代表者及び QA の資格を有する者は、計画活動に参加できる。 C. 検査計画の作成には、適用可能なコード、標準、仕様、及び設計文書を使用する。 D. 検査計画は以下の要素を含む。 1. 検査する特性。 2. 使用される検査又はプロセスモニタリングの説明。 3. 検査を実施する組織の名称。 4. 必須なホールドポイントの特定。 5. 受け入れ基準。 6. 使用された更生機器。及びその検査。 7. 検査結果の記録方法。
	10.2.2 検査員の選定	(略)
	10.2.3 検査のポイント	ホールドポイントを使用する場合、実装文書に示す必要がある。
	10.2.4 統計的サンプリング	統計的サンプリングにより品目を検証する場合、サンプリング計画の要件に準拠するものとする。
	10.2.5 工程内検査とモニタリング	A. 品質を検証するために製造中の品目を検査するものとする。処理された品目の検査が不合格な場合は、製造方法、設備、及び人員の監視により間接的な管理が行わなければならない。 B. 検査とプロセスモニタリング方法を組み合わせて使用する場合、プロセスの制御と品目の品質に関する要件が、プロセスの全期間を通じて満たされるように、体系的な方法で実行するものとする。 C. プロセス又は製造の段階で、確立された検査ポイントで作業の調整と順序付けのための管理が確立され、文書化されるものとする。

QARD セクション		内容
	10.2.6 最終検査	A. 最終検査は、指定された要件への品目の適合に関する結論に達するように計画される。 B. 完成品は、指定された要件への品質と適合性を検証するために、較正、調整、損傷からの保護、又はその他の特性について検査するものとする。 C. 過去に検査されていない品質記録は、妥当性について検査されなければならない。 D. 最終検査には、結果のレビューと、過去の検査で発生した不適合の解決が含まれる。 E. 最終検査の後に行われた品目の変更、修理、又は交換には、受け入れ可能性を検証するために、必要に応じて再検査又は再試験が必要となる。
	10.2.7 品目の受入	A. 検査結果の受理は、有資格者によって文書化され承認されるものとする。 B. 品目の検査状態は、セクション 14.0 に従って識別されるものとする。
	10.2.8 検査文書	(略)
	10.2.9 検査員の資格と認定	(略)
	10.2.10 委託文書の位置づけ	(略)
11.0 試験管理		
11.1 概要		A. このセクションでは、品目が製造中に十分機能することを実証するために必要な試験を計画及び実行するための要件を確立する。 1. 試験は、該当する設計文書に含まれる要件と受け入れ基準を組み込んだ実装文書に従って実施するものとする。 2. 試験には、プロトタイプ認定試験、構成又は機能の認定試験、生産試験、建設試験、及び操業前試験（つまり、閉鎖前操作の開始前の試験プログラム）が含まれる。
11.2 要件	11.2.1 試験計画	試験計画では、試験実装文書が以下を提供することを要求するものとする。 A. 試験を制御及び実行し、(i) 試験機器の精度要件を決定し、(ii) 試験がいつ必要であり、試験の実行方法と時期を定義するための基準を示す文書 B. プロトタイプ、構成、又は機能の検証試験（設計検証試験を含む）を、設置が不可逆的となる前に実行するための規定。 C. 適用される設計及び調達文書に含まれる、試験対象の品目及び試験要件と受け入れ制限の識別。 D. 採用する試験方法と試験実施の指示の特定。 E. 以下の試験の前提条件。正確性の要件、専門作業員、試験機器の状態、及び適切な試験機器及び計装。適切に管理された環境条件；データの取得と保存に関する規定。 F. ホールドポイントを設定する組織による証言のための必須検査ホールドポイント。 G. データと結果を記録する方法。 H. 試験の前提条件が満たされていることを確認するための規定。 I. M&TE が目的の機能を達成するために適切な範囲、精度、及び許容範囲であることを確認するための試験の実行に

QARD セクション		内容
		使用する測定及び試験機器（M&TE）の選択と識別。
	11.2.2 性能試験	性能試験は、必要に応じて、次の要件に対処する実装文書に従って実行されるものとする。 A. 試験がいつ必要かを決定し、試験の実施方法を説明し、専門の作業員が試験を確実に実施するための規定。 B. 特定の試験の前提条件が満たされ、較正済みの計装が適切に利用可能であり、必要なモニタリングが実行され、適切な環境条件が維持されることを保証するための試験目標及び規定。 C. 試験する品目の設計を担当する組織によって提供又は承認された試験要件と受け入れ基準。 D. 適用される設計又はその他の関連する技術文書に含まれる特定の要件に基づいた試験要件と受け入れ基準。
	11.2.3 その他の試験文書	(略)
	11.2.4 試験結果	A. 試験結果が文書化され、受入基準への適合性は、試験要件が満たされていることを確認するために、責任組織内の有資格者によって評価されるものとする。 B. 品目の試験状態は、セクション 14.0 に従って識別されるものとする。
12.0 測定及び試験装置		
12.1 概要		このセクションでは、品質に影響を与える工程で使用されるツール、測定機器、が、必要な制限内の精度を維持するために指定された期間で適切に制御、較正、及び調整されることを保証する手段の確立に適用される要件を規定する。
12.2 要件	12.2.1 機器更生	A. M&TE（ソフトウェア又はハードウェア機器を含む）は、所定の期間、又は使用前に、ユニットとして較正、調整、及び保守されるものとする。国家的に認められた標準又は物理定数が存在しない場合、校正の根拠を文書化しなければならない。使用者が開発又は変更したソフトウェアは、補足 I に従って制御するものとする。科学調査試験装置の操作、メンテナンス、又は構成に不可欠なデータ取得及び制御アプリケーションは、制御試験計画を検証し、文書化する。 B. 校正標準は、設定された精度よりも高い精度を持たなければならない。 1. 設定された精度よりも高い精度の校正標準が存在しないか利用できない場合、要件に適切であることが示される場合は、必要な校正精度に等しい精度の校正標準を使用できる。 2. 校正受理は、責任ある管理者によって文書化され、承認されるものとする。この機能を実行する権限を与えられた管理のレベルは示されていないなければならない。 C. M&TE の構成に使用される更生標準は、更生される機器の必要な精度の少なくとも 4 倍の精度を持つか、これが不可能な場合は更生される機器が必要な許容範囲内になることを保証する精度を持たなければならない。受け入れの基準は、責任ある経営陣によって承認されるものとする。この機能を実行する権限を与えられた管理のレベルは示されていないなければならない。 D. 各デバイスの更生方法と期間は、機器の種類、安定特性、

QARD セクション		内容
		必要な精度、精度、使用目的、使用度、及び測定制御に影響するその他の条件に基づいて定義するものとします。1 回限りのアプリケーションで使用される M&TE の場合、使用前と使用後の両方で更生を行う必要がある。 E. 以下の場合、更生又は更生チェックを実行する必要がある。 1. M&TE の精度が疑われる場合。 2. M&TE が更生の期日を過ぎた場合。 F. 較正済みの M&TE は、次の較正の期日を示すために、ラベル付け、タグ付け、又は適切にマーク付け又は文書化するものとする。 G. 較正済み M&TE は、その較正データにトレーサビリティを示すために一意に識別されるものとする。 H. 更生に影響する M&TE に含まれるソフトウェアの更新には、使用前に機器の再更生が必要となる。
	12.2.2 測定及び試験機器の文書化	(略)
	12.2.3 構成から外れた測定、試験機器	(略)
	12.2.4 紛失又は奉仕された測定、試験機器	(略)
	12.2.5 取り扱い、保管、使用	A. M&TE は、適切な精度を維持するために、適切に取り扱われ、保管される。 B. M&TE の選択は、意図された使用に適切なタイプであることを保証するために管理されるものとする。
	12.2.6 商業装置	(略)
	12.2.7 測定及び試験の文書	(略)
	12.2.8 委託文書の位置づけ	(略)
13.0 取り扱い、保管、発送		
13.1 概要		このセクションでは、損傷や紛失を防ぎ、劣化を最小限に抑えるために、設計と調達の要件に従って、品目と消耗品の取り扱い、保管、クリーニング、包装、出荷、保存の要件を確立する。
13.2 要件	13.2.1 コントロール (Controls)	A. 品目の取り扱い、保管、クリーニング、梱包、出荷、及び保存は、確立された作業及び検査の実施文書、出荷指示、又はその他の指定文書に従って実施するものとする。 B. 重要、繊細、傷みやすさ、又は価値の高い品目には、取り扱い、保管、清掃、梱包、出荷、及び保存に関する特定の実施文書を作成して使用するものとする。
	13.2.2 特殊な機器、ツール、環境	A. 必要に応じて、特別な機器（例：コンテナ、ショックアブソーバー、加速度計）及び特別な保護環境（例：不活性ガス雰囲気、特定の含水量レベル及び温度）を指定できる。 B. 特別な機器と環境が指定される場合、それらの検証のための準備がなされなければならない。 C. 安全で適切な取り扱いを確保するために、必要に応じて特別な取り扱いツールと機器を使用及び管理するものとする。 D. 特別な取り扱いツール及び機器は、指定された期間で、実装文書に従って検査及び試験され、ツール及び機器が適切

QARD セクション		内容
		に維持されていることを確認する。 E. 特別な取り扱い及び搬送装置のオペレーターは、それら装置を使用するための訓練を受けていなければならない。
	13.2.3 マーキングとラベリング	A. 品目を適切に識別、維持、及び保存するために、必要に応じて、品目の包装、出荷、取り扱い、及び保管のマーキング及びラベル付けのための対策を確立するものとする。 B. マーキングとラベリングは、特別な環境の存在、又は必要に応じて特別な管理の必要性を示すものとする。
	13.2.4 委託文書の位置づけ	(略)
14.0 検査、試験及び運転状態		
14.1 概要		このセクションでは、製造、設置、及び試験を通して、品目の検査、試験、及び動作状態を識別するための要件を確立する。
14.2 要件	14.2.1 品目	A. 品目は必要な検査と試験に合格しなけれなまらまい。 B. 品目の識別に際して、合格していない品目の不注意による設置、使用、を排除するものとする。
	14.2.2 状態の提示	A. 品目の検査と試験は、不適切に省略されることを防ぐために必要に応じて示されるものとする。 B. 品質の状態は、判読可能で容易に認識できる状態（タグ、マーキング、ラベル、スタンプなど）又はその他の手段（検査、試験記録など）を使用して維持するものとする。 C. 上記の認識できる状態は、適用及び削除する権限を指定されているものとする。 E. 不適合、作動不能、又は機能不全の機器類の不注意な使用又は操作を防ぐため、品目の操作が可能なすべての場所にタグ又はマーキングなどの表示を配置するものとする。
	14.2.3 委託文書の位置づけ	(略)

2.2. フランスにおけるモニタリング戦略

フランスでは規制要件にて「処分施設及び地質環境の構成要素の状態を特徴付ける幾つかのパラメータの変遷、及びこの変遷の原因となる主要現象を追跡調査する」モニタリングが要求され（ASN,2008）、モニタリングが容易な処分概念を採用していることが背景として挙げられる。2016年に Andra は、さまざまな安全オプションに関する説明を行う文書として Cigéo プロジェクトの『安全オプション文書』をフランスの規制当局である ASN に提出した（Andra, 2016）。同文書では、施設の安全性を確保するために選択された目標、概念及び原則が提示されている。2019 年現在、Andra と規制組織の間で、モニタリングに関する規制枠組みに関する議論が進められているところである。

Andra は、「高レベル廃棄物」（HLW）をパリ盆地のカロボ・オックスフォーディアン粘土層内に立地される Cigéo 地層処分施設に処分する計画を立てている。同施設の設計では、HLW が処分セルと呼ばれる小口径坑道内に定置される。処分セルには、将来の決定次第で、廃棄物の定置プロセスを容易にし、回収可能性を強化するために低炭素鋼のスリーブを用いたライニングが施される。

Andra のモニタリングプログラムに設定された閉鎖後安全性と回収可能性に関する目標として、次のものが挙げられる。

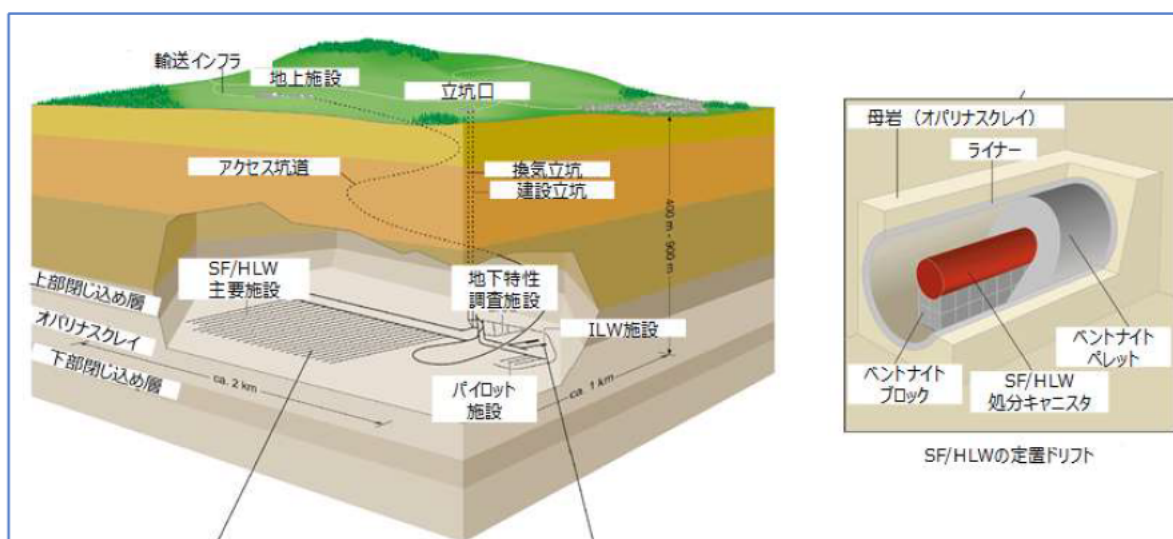
- 廃棄物パッケージを回収する可能性のチェックを行うこと。
- 次に示すものによって閉鎖後安全性が予想通り確保されることのチェックを行うこと。
 - 操業期間にわたる処分場システムの変遷に関する追跡調査。その目的は、このシステムの変遷が予想通りのものであると確認することにある。
 - 長期安全性に影響を及ぼすさまざまなプロセスの理解に対する信頼性の向上。

現在のところ、処分場のモニタリングプログラムは、限られた数の処分セルに計器を施す方法が考えられている。モニタリング作業は、処分場操業期間に最初に設定された「パイロット操業フェーズ」と呼ばれる期間に開始されることになっており、このフェーズ中に、選択されたパラメータの全てのモニタリングを可能にする計器が一部のセルに施される。

2.3. スイスにおけるパイロット施設でのモニタリング

スイスでは、回収可能性の考えを取り入れた処分概念「監視付き長期地層処分」が法令で定められている。この処分概念は、地層処分の受動的安全性に加え、社会的要請や技術的不確実性に対処するための慎重かつ段階的なアプローチを組み合わせたものである。Nagra は、この法令に沿う形で、高レベル放射性廃棄物の処分エリア（主要施設）の他にパイロット施設及び地下特性調査施設を建設する計画をしている。（Nagra, 2002）。

- 廃棄物の回収が容易となるような長期モニタリングの実施
- 予測モデルの試験
- 想定外の好ましくない挙動に対する早期検出



付図 2.3-1 Nagra が検討している処分場の構成要素（（Nagra, 2016）より作成）

パイロット施設では少数の廃棄体を処分することにより、廃棄体、埋め戻し材及び母岩に生じる変化や挙動をモニタリングし、予測モデルの妥当性の確認等を実施することになっている。このパイロット施設は、主要施設との間に THMC の相互作用を生じさせず、また、主要施設と同じ挙動を示すものである必要がある（Nagra, 2002 ; Nagra, 2016）。パイロット施設に処分された廃棄体の回収自体は可能だが、基本的に回収は予定されていないため、パイロット施設でも主要施設と同じ安全要件が履行されなければならない。このため、大量のケーブルや計器の設置は予定されていない。ただし、人工バリアへの効果が無視できるレベルだと証明できる場合には、ケーブルを接続したセンサを用いて特定のパラメータのモニタリングを行うことができる。全てのモニタリング活動は、アクセス坑道と立坑が閉鎖された時点で終了する。

また Nagra は、処分場サイトに地下特性調査施設を建設することを計画している。この地下特性調査施設では放射性廃棄物は取り扱われないものの、他のいくつかの要素のモニタリングを実施する場所が提供される。たとえば、地質学的プロセスや水理学的プロセスのモニタリングを行うことで、処分場内に生じることが見込まれる諸条件に関する情報を入手することができると考えられる（Modern2020, 2017a）。

2.4. Modern2020 のパラメータスクリーニングに関するテストケース

地層処分におけるモニタリングに関する国際共同研究 Modern2020 では、閉鎖後の安全性を示すモニタリングに資するパラメータのスクリーニング方法を開発し、複数国でその適用性を確認するテストケースが実施された。本章ではフィンランドが実施したテストケースの概要について示す (Modern2020, 2019a)。

このテストケースは Modern2020 で開発されたスクリーニングの方法論の適用性を検討するために処分場でのモニタリングの対象となりうるパラメータの特定が実施された。なお、フィンランドのテストケースの中で、モニタリングとは作業中の原位置モニタリングを意味しており、このモニタリングの対象とならないパラメータは品質保証 (QA) /品質管理 (QC)、実規模試験、原位置単一構成要素試験などの対象として扱われた。どれにも対象とすることのできこれらに当てはまらないパラメータは一時保留として、今後の検討課題とされている。埋め戻し材に関するモニタリングパラメータのスクリーニング結果を付表 2.4-1 に示す。

付表 2.4-1 埋め戻し材に関するモニタリングパラメータのスクリーニング結果 (一部抜粋)
(Modern2020, 2019a) より作成)

プロセス (埋め戻し材)	パラメータ(埋め戻し材)	スクリーニングの結果:どのように対処するか				
		保留	QA/QC	実規模試験	単一 構成要素 原位置試験	作業 モニタリング
水の取り込み及び膨潤 (飽和)	含水率及び分布			✓	✓	
	相対湿度			✓	✓	
	圧力(埋め戻し材のさまざまな部分)			✓	✓	
	鉱物学的状況		✓			
	乾燥密度		✓			
	含水率		✓			
水の取り込み及び膨潤 (膨潤圧の発生)	相対密度			✓	✓	
	圧力(膨潤圧)			✓	✓	
	圧力(プラグを通じて)	✓				
エロージョン	密度(開始当初及び解体時)			✓	✓	
	漏出水の量及び組成(プラグを通じて/通過)					✓
	地下水組成			(✓)	(✓)	✓
	膨潤性粘土の含有率		✓			
	幾何学的形状		✓			
浸出	化学的状況		✓	✓	✓	✓
水溶解度及び種分化	地下水の化学的性質			(✓)	(✓)	✓
	化学的性質		✓			
	鉱物学的性質		✓			

このテストケースにおいて、モニタリングパラメータのスクリーニング作業の出発点には、POSIVA の要件管理システムで EBS の各構成要素に設定されている性能目標が設定された。それぞれの性能目標に対して、モニタリング対象とすべきプロセス及びパラメータを決定するため、スクリーニング方法論ダイアグラム及び POSIVA の Modern2020 タスクグループがこの目的のために作成した 11 の項目から成るテンプレート (付表 2.4-2) が用いられた。

このテストケースでは、スクリーニングの結果、キャニスタ、緩衝材及び埋め戻し材それぞれの全てのパラメータを対象として作業期間中の直接的なモニタリングは行われず、QA/QC、実規模実証設備及び原位置試験を用いた調査が行われる結果となった。間接的なモニタリングとして、地下水流動とその化学的な性質に関するモニタリング及び坑道における地震活動度及び温度のモニタリングが建設及び作業期間を通じて行われることになっている。

付表 2.4-2 緩衝材に関するモニタリングパラメータのスクリーニングの例
((Modern2020, 2019a) より作成)

モニタリング対象とすべきプロセス及びパラメータ決定のためのテンプレート		スクリーニングの例
1) EBS	モニタリングの必要性を検討する EBS を決定する。	緩衝材
2) 性能目標	目標又は限度、またモニタリングを行う必要性を示す。	緩衝材内の溶質にとって、拡散が支配的な移行メカニズムとなるべきである。このことは、透水係数が $<10^{-12}$ m/s であることに対応する。(VAHA のレベル 3、2017 年 2 月付のドラフトより)
3) プロセス	性能目標に影響を及ぼすプロセスを定義する。	1. 水の取り込み及び膨潤(均一化)。 2. エロージョン。
4) 閉鎖後安全性との関連性及びモニタリングの有効性	当該プロセスは閉鎖後安全性と関連性が高いか、モニタリング付加価値を与えられるか記述する。	関連性は高いが、当該プロセスは時間を要するものであるため、モニタリングは価値をもたらさない。
5) パラメータ	特定されたプロセスのモニタリングに使用できるパラメータを決定する。	1 と 2 の両方に関して、 実規模/原位置試験において： － 開始時及び解体時の幾何学的形状 － 開始時及び解体時の密度(均一性) 操業フェーズにおいて： － 開始時のさまざまな特徴 － QA/QC (モニタリングは行われない) － 処分孔 RSC からの入力情報
6) 予想される変遷(パラメータ、プロセス)	プロセス及びパラメータに対し、どのフェーズでどんな変遷が起こると想定されるか記述する。	システムは、長期的に見た場合には要求されている性能を発揮すると想定されており、拡散が支配的な移行メカニズムである。
7) モニタリング戦略と技術オプション	モニタリングが実施可能な場合、それをどのように実施できるのかについて記述する。	－ 設置フェーズと解体フェーズにおいて、モニタリングは実規模又は原位置試験の前後に実行可能である。 － 操業フェーズ中にモニタリングは行われない。 － QA/QC － 建設後、処分孔の特性調査が行われる。 すでに特性調査済の孔を対象としたモニタリングを行うかどうかは、当該孔が使用に先立ってどの程度の期間にわたって開かれた状態に維持されていたかに左右される。
8) オプションは技術的に実行可能か?	この設問に対する「yes」又は「no」の回答は、モニタリング戦略と技術オプションにかかわるものである。	実規模又は原位置試験では実行可能である。操業フェーズでは QA/QC のみ。
9) パラメータ/プロセスはモニタリング計画に含まれているか?	yes/no の回答を示し、可能な場合には詳細な説明を付け加える。	モニタリングプログラムには含まれないが、QA/QC によって取り扱われる。
10) 不確実性及びこれらの不確実性にどのような対処がなされるのか	プロセスの展開、パラメータ測定、パラメータのプロセスへのつながりの提示、その他の同様の検討項目に関してどのような不確実性が存在するのかを列記	サンプルの代表性。 実規模/原位置試験からは、きわめて初期のフェーズ変遷に関する情報しか得られない。
11) 測定されたパラメータから挙動まで		実規模/原位置試験時のモニタリングにより、緩衝材挙動の予測に対する信頼を醸成することができる。

テストケースに基づき、付表 2.4-3 に示すモニタリングに関するジェネリックな高水準の戦略要素が特定されたている。Modern2020 では、付表 2.4-3 に示した戦略要素をさまざまな方法で組み合わせることにより、各国の処分場が立地される地質環境、処分場概念や設計及び関連する法律などに対応した具体的なモニタリング戦略を作成することができるとしている。

付表 2.4-3 モニタリング戦略の高水準の戦略要素 (Modern2020, 2019b)

側面	高水準の戦略要素
場所	☐ 処分場本体における原位置モニタリング。モニタリング期間が終了した後も、モニタリング対象となった構成要素の回収は行われない。 ☐ 原位置モニタリング。モニタリング期間が終了した後に、モニタリング対象となった構成要素は回収されるか、解体される（またそれが廃棄物の場合には再処分される）。 ☐ パイロット施設におけるモニタリング。 ☐ サイト内試験施設におけるモニタリング。
対象	☐ 廃棄物パッケージ（及びその周囲の EBS とニアフィールド岩盤） ☐ 模擬廃棄体（dummy package）（及びその周囲の EBS とニアフィールド岩盤） ☐ EBS の特定の要素（たとえば、小スケールのパッチ試験） ☐ 天然バリア（ニアフィールド岩盤及びファーフールド岩盤） ☐ 生物圏
期間	☐ 処分場の操業開始前又は試験操業期間中 ☐ 廃棄物の定置作業期間中 ☐ 処分場閉鎖後

なお、テストケースに示された各国のモニタリング戦略等に関しては、今回の作業のみにとって有効なものであり、将来 WMO（放射性廃棄物管理機関）が実行するモニタリングプログラムを示すものではないことに注意する必要がある。

3. 参考文献

- Andra (2016a) : Dossier d'option de sûreté – Partie après fermeture (DOS-AF)
- Argonne National Laboratory (2008) : Postclosure Nuclear Safety Design Bases, ANL-WIS-MD-000024 REV 01.
- ASN (2008) : Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde
- Bechtel SAIC Company (2008) : Performance Confirmation Plan, TDRPCS-SE-000001 REV 05. Las Vegas, Nevada
- DOE (2008) : Yucca Mountain Repository License Application SAFTY ANALYSIS REPORT Rev.1, DOE RW-053.
- Kronberg M, Johannesson L-E, Eriksson P (2020) : Strategy, Adaptive Design and Quality Control of Bentonite Materials for a KBS-3 repository SKB TR-20-03, Svensk Kärnbränslehantering AB (in print)
- Modern2020 (2019a) : Deliverable D2.2, Monitoring Parameter Screening: Test Cases
- Modern2020 (2019b) : Deliverable D6.5, Modern2020 Project Synthesis, Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation
- Nagra (2002) : 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
- Nagra (2016) : The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report 16-02
- Nuclear Regulation Committee (2001) : 10 CFR Part 63: Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada.
- Posiva (2012a) : Canister Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Canister, Posiva 2012-16.
- Posiva (2012b) : Buffer Production Line 2012, Design, Production and Initial State of the Buffer, Posiva 2012-17.
- Posiva (2012c) : Backfill Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug. Posiva Report POSIVA 2012-18 (2012).
- Posiva (2012d) : Design, Production and Initial State of the Underground Disposal Facility Closure, Posiva 2012-19.
- Posiva (2014) : 2014 年 3 月 21 日付けプレスリリース, Posiva chose friction stir welding for the encapsulation of spent nuclear fuel,
http://www.posiva.fi/en/media/press_releases/posiva_chose_friction_stir_welding_for_the_encapsulation_of_spent_nuclear_fuel.2277.news#.XRQRoI_grcs
- Posiva SKB (2017) : Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sandia National Laboratory (2008) : National Laboratories: Total System Performance Assessment Model/Analysis for the License Application, MDL-WIS-PA-000005 REV00.
- Sandia National Laboratory (2011) : Repository Performance Confirmation, SAND2011-6277.
- SKB (2010) : Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. Updated 2013-10. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Svensson D, Lundgren C, Johannesson L-E, Norrfors K, (2017) : Developing strategies for acquisition and control of bentonite for a high level radioactive waste repository. SKB TR-16-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Eriksson P, Johannesson L-E, Lundgren C, Bladström T, (2019) : Developing strategies for acquisition and control of bentonite for a high level radioactive waste repository. SKB TR-19-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.