

NUMO技術開発成果報告会2015

～包括的技術報告書「わが国における安全な地層処分の実現性」(仮称)～
中間報告

(3) 処分場の設計と建設・操業・閉鎖技術

- 1) わが国の地質環境の特徴を考慮した処分場の設計
- 2) 建設・操業・閉鎖技術の進展

(4) 処分場の安全性の評価

- 1) 処分場の閉鎖前における安全性

2015年6月29日

原子力発電環境整備機構(NUMO)

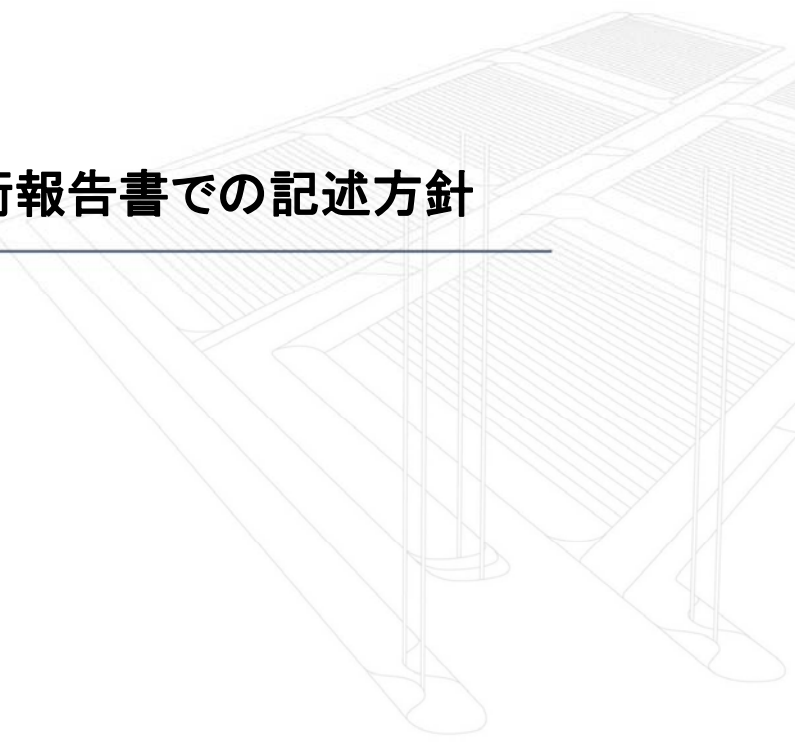
技術部 窪田 茂

報告内容

1. 包括的技術報告書での記述方針
2. 設計方法の体系的整備
3. 処分場レイアウトの設計(深成岩類モデルの例)
4. 建設・操業技術の進展および回収可能性への取り組み
5. 事業期間中の安全確保の考え方と検討状況
6. まとめと今後の進め方



1. 包括的技術報告書での記述方針

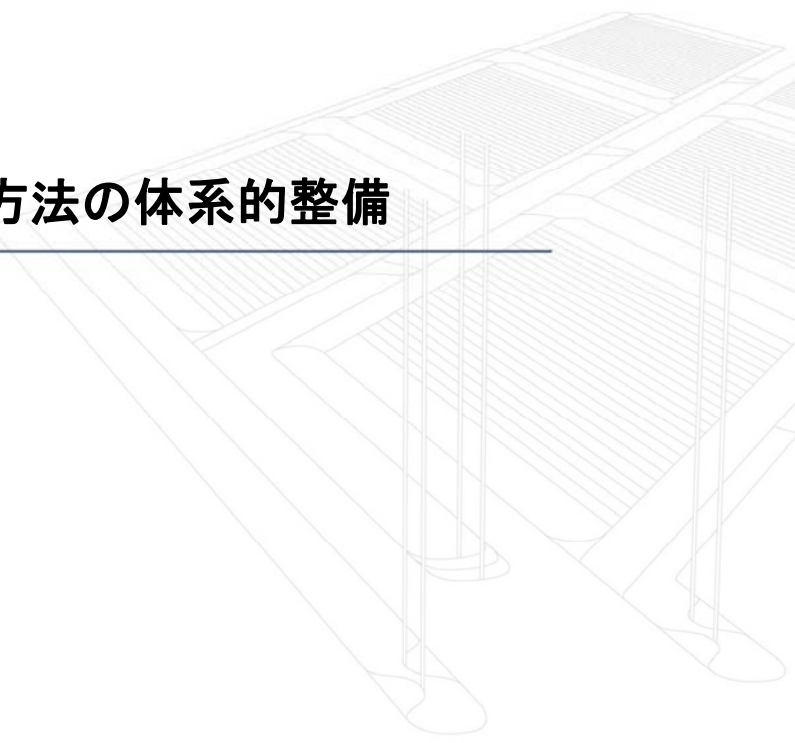


包括的技術報告書での記述方針

- 多様なサイト条件や社会的な環境変化などに対して、**柔軟に処分場の設計を行うための設計の方法論が体系的に整備**されていることを示す。
- これらの方法論を用いて、数種類の候補母岩のモデルを対象として、断層等の地質環境の特徴を踏まえて、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、および建設・操業・閉鎖の工学的実現性を充足する**高レベル及びTRU廃棄物処分場の設計**の仕様を具体的に示す。これにより、**多様な地質環境に対して処分場の設計が可能**であることを示す。
- 建設・操業・閉鎖に関する類似施設の実績や最新の技術開発成果に基づいて、**処分場の設計で示された仕様が工学的に実現可能**であることの見通しを示す。また、可逆性および回収可能性の確保について、国内外の最新の技術開発成果に基づいて、**回収可能性を支える技術の検討状況、ならびに坑道を閉鎖せずに回収を維持した場合の影響**について示す。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故以降に見直しされた原子力施設の安全設計の規則などを参考に、**処分施設に対して多重防護の考え方に基づく閉鎖前の安全性の評価を実施し、安全性の見通し**を示す。



2. 設計方法の体系的整備



処分場の設計の進め方

多様なサイト条件や社会的な環境条件に適するように、柔軟に処分場の設計を進める

①体系的な設計の方法論に基づく設計

わが国の多様な地質環境に対して柔軟に対応するためには、普遍的に適用可能な方法論の整備が必須。

- 対象とする処分場概念の選定
- 要求機能の網羅的な抽出（設計因子と事業段階を考慮）
- 要求機能を処分場の構成要素に割り付け
- 要求機能充足のための設計要件の設定
- 設計手順と設計要件の関連付け、および要件充足の方策の設定

設計の方法論



設計要件を満たすように設計を実施

②設計オプションの準備

複数の設計オプションを整備することにより、限られた工学的対策に依存しない処分場の設計による柔軟性の確保。

要求機能の設定について

処分場に持たせる性質や能力を表わす設計因子に基づいて、事業段階に応じて必要となる要求機能を網羅的に設定。

設計因子及び事業段階と要求機能の関係

事業段階 設計因子	閉鎖前				閉鎖後長期
	サイト調査	建設	操業	閉鎖	
閉鎖後安全性	(対象としない)	(対象としない)	(対象としない)	(対象としない)	・ 隔離 ・ 閉じ込め
操業安全性	○一般労働安全 ・ 労働災害対策 ・ 作業環境対策	○一般労働安全 ・ 労働災害対策 ・ 作業環境対策	○放射線安全 ・ 遮蔽 ・ 閉じ込め ○一般労働安全 ・ 労働災害対策 ・ 作業環境対策	○一般労働安全 ・ 労働災害対策 ・ 作業環境対策	(対象としない)
工学的成立性／ 品質保証	(対象としない)	建設関連設備ごとに 要求機能を設定	操業関連設備ごとに 要求機能を設定	閉鎖関連設備ごとに 要求機能を設定	(対象としない)
工学的信頼性					
サイト特性調査 とモニタリング	調査・評価への フィードバック	モニタリング項目	モニタリング項目	モニタリング項目	(対象としない※)
回収可能性	(対象としない)	(対象としない)	回収可能性の確保	(対象としない)	(対象としない)
環境影響	環境保全対策	環境保全対策	環境保全対策	環境保全対策	(対象としない)
社会経済的側面	要求機能として設定するのではなく、相互比較などの視点として利用				

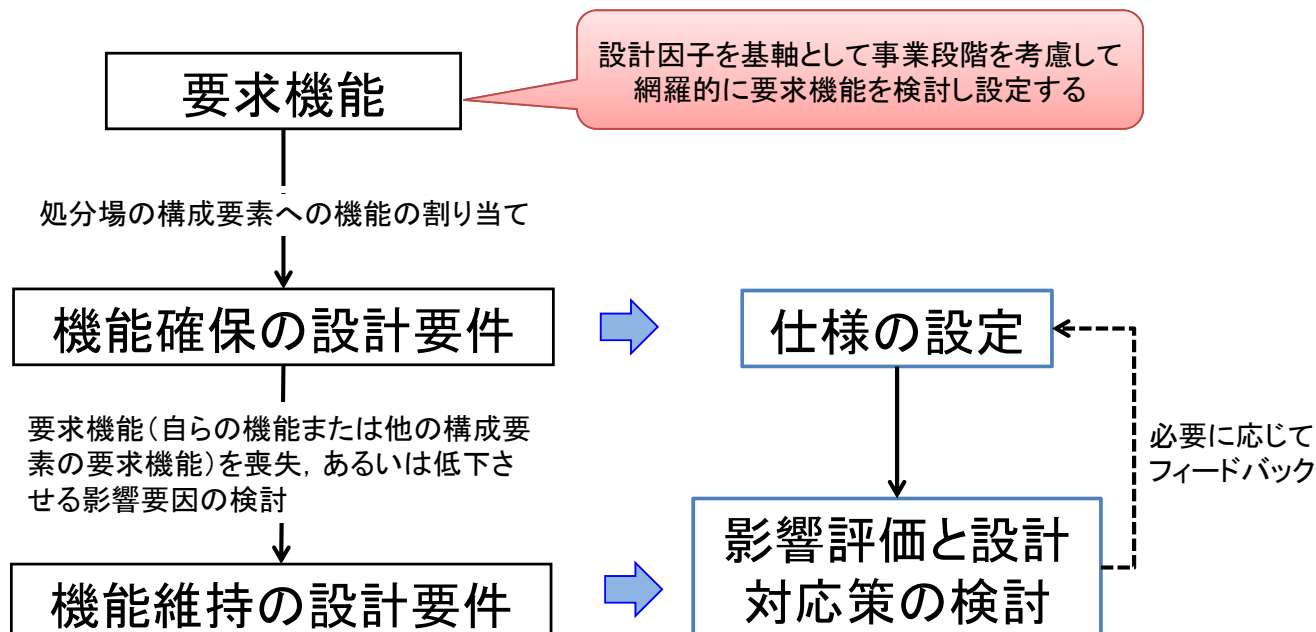
※地層処分の安全確保上は、処分場閉鎖後のモニタリングは不要。ただし、社会的な要請等がある場合は対応を別途検討する。

要求機能に基づいた設計要件の設定と設計の流れ

設計因子と事業段階に留意して設定した要求機能を確保・維持するための設計要件に基づいて設計を実施することで、着実に設計を実施。

(設計要件の設定の流れ)

(構成要素の設計の流れ)



人工バリアの要求機能と設計要件(オーバーパック)

○オーバーパックに設定した要求機能

構成要素	設計因子	要求機能(安全機能)	
オーバーパック	閉鎖後長期安全性	閉じ込め	発熱の著しい期間の地下水との接触の防止
	工学的実現性	遠隔操作による封入・定置性	

○オーバーパックの設計要件

設計要件		設計要件の説明		設計要件		設計要件の説明	
機能確保の設計要件	母材の耐食性	所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと		機能維持の設計要件	耐熱性	廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと	
	母材の構造健全性	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること			耐放射線性	放射線脆化が著しくないこと	
	溶接部耐食性	溶接部の耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと			不動態化の抑制	低酸素環境下における不動態化の影響が著しくないこと	
	溶接部構造健全性	溶接部の構造健全性が母材と比較して著しく劣らないこと			残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	
	製작성	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること			バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	
	遠隔封入性	地上施設においてガラス固化体をオーバーバックに遠隔操作により封入できること			ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	
	遠隔定置性	地下施設においてオーバーバックを遠隔操作により定置可能であること			耐食性に対する放射性分解の影響の防止	地下水の放射性分解の影響により耐食性が著しく低下しないこと	
	品質確認性	遠隔封入時および遠隔定置時に、所定の品質の確認技術を有すること			耐食性に対する微生物活動の影響の防止	微生物の活動により耐食性が著しく低下しないこと	
				構造健全性に対する地震動の影響の防止	地震動により構造健全性が損なわれないこと		

P.8

設計オプションの準備

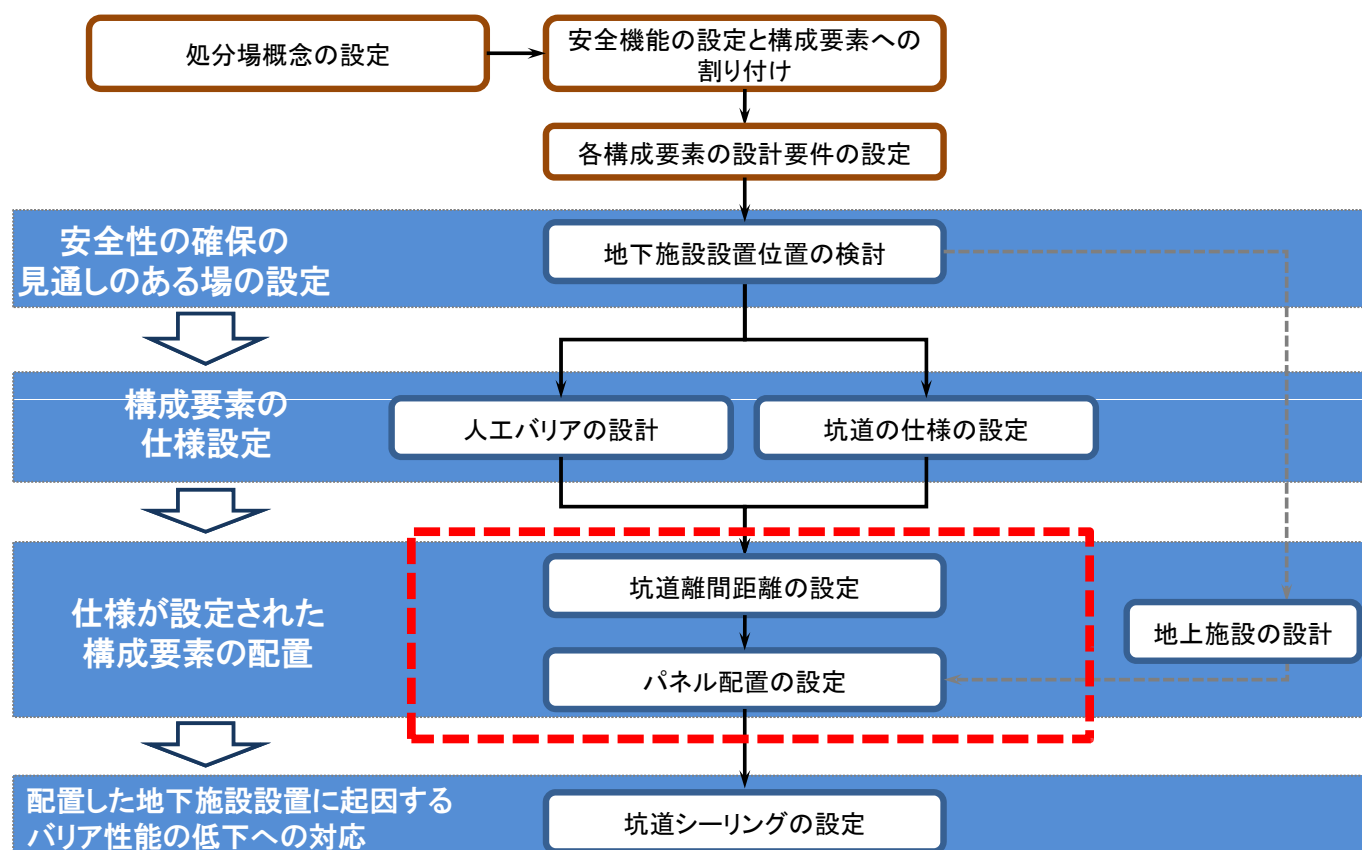
処分場の構成要素の設計オプションを複数準備することにより、サイトの地質環境や社会的な要請にも柔軟に対応して処分場を設計できるようにする。

設計オプションの例

構成要素	設計オプションの例
オーバーパック	○材料選定；炭素鋼（鍛造品，鋳鋼品），チタン-炭素鋼複合，銅-炭素鋼複合 ○ふた接合技術；電子ビーム溶接，TIG法など
緩衝材	○材料選定；ベントナイトのイオン型，ケイ砂混合率 ○施工技術；ブロック定置方式，PEM方式，原位置締固方式，ペレット充填方式など
アクセス坑道	立坑，斜坑
坑道配置	処分パネル型，フィッシュボーン型
回収技術	オーバーコアリング技術，塩水除去技術など

3. 処分場レイアウトの設計 (深成岩類モデルの例)

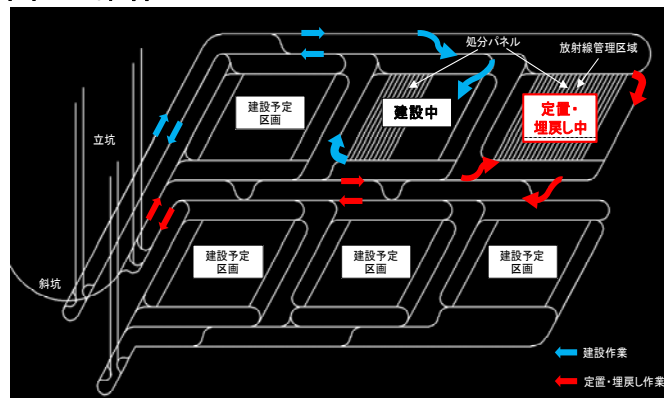
地層処分場の設計の流れ



地下施設レイアウト設計の基本的考え方

設計要件(機能確保)

- 4万本以上の廃棄体の収容性の確保
- 建設・操業の並行作業性の確保



作業領域の区分の概念

地下施設レイアウト設計の基本的考え方

処分パネルをレイアウトすることによる処分システムの各構成要素の要求機能への影響を考慮したうえで、各構成要素が所要の機能を維持出来るように対応を取る

この基本的考え方に基づき**設計要件(機能維持)**を設定

NUMO

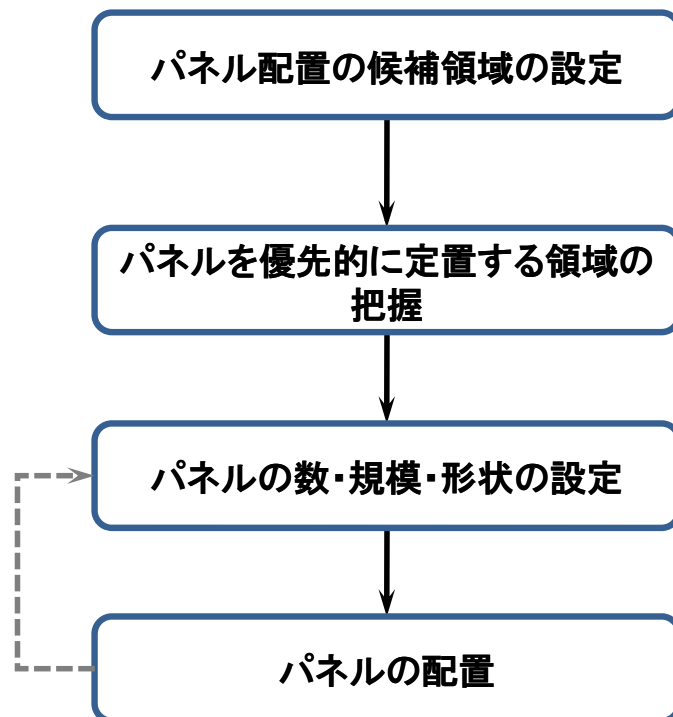
P.12

レイアウトにおける設計要件(機能維持)

処分パネルの仕様により影響を受ける構成要素とその影響事象			設計要件(機能維持)
影響を与える処分パネルの設計項目	影響を受ける構成要素	影響事象	
坑道離間距離 廃棄体ピッチ	緩衝材	廃棄体からの発熱に伴う緩衝材の温度上昇に起因する変質	緩衝材の温度上昇を制限温度以下に抑えること
	処分坑道	隣接する坑道の掘削の影響による空洞安定性の低下	隣接する坑道の空洞安定性を確保すること
坑道の線形	搬送・定置システム	搬送・定置装置の通過が困難となる	想定する搬送システムが走行可能であること
パネルの数・規模・形状	換気システム	坑内の風速が大きくなる	1パネルあたりの発熱量(廃棄体発熱・地熱等)を考慮すること
	坑道交差部	坑道交差部の空洞安定性の低下	坑道交差部の空洞安定性への影響を考慮すること
	端部プラグ	端部プラグの設置および施工スペースの確保が困難となる	端部プラグの施工スペースを考慮すること
パネルの配置 (方向, 位置)	バリアシステム	TRU廃棄物処分場からの硝酸イオンがHLW処分場のオーバーバックの局部腐食の駆動力となる	TRU廃棄物の地下施設を配置することによるHLW地下施設への影響を考慮すること
		坑道に沿った水みちの生起による核種移行抑制性能の低下	処分坑道軸の設定において地下水の流向を考慮すること
		地圧の異方性に起因する掘削影響領域(EDZ)の増大に伴う坑道軸方向の透水性の増大	地圧の異方性に起因する掘削影響領域(EDZ)の増大に伴う坑道軸方向の透水性の増大を考慮すること
		局所的に早い地下水流速によるバリア性能評価の不確実性の増大	パネルの配置位置の設定時に地下水流動場を考慮すること
	アクセス坑道, 連絡坑道, 主要坑道, 処分坑道	破砕帯などの高透水性の構造からの湧水により掘削が不能となる 破砕帯などの力学的な弱部の横断時の空洞安定性の低下	坑道が破砕帯等を横断する箇所が少なくなるよう配慮すること

NUMO

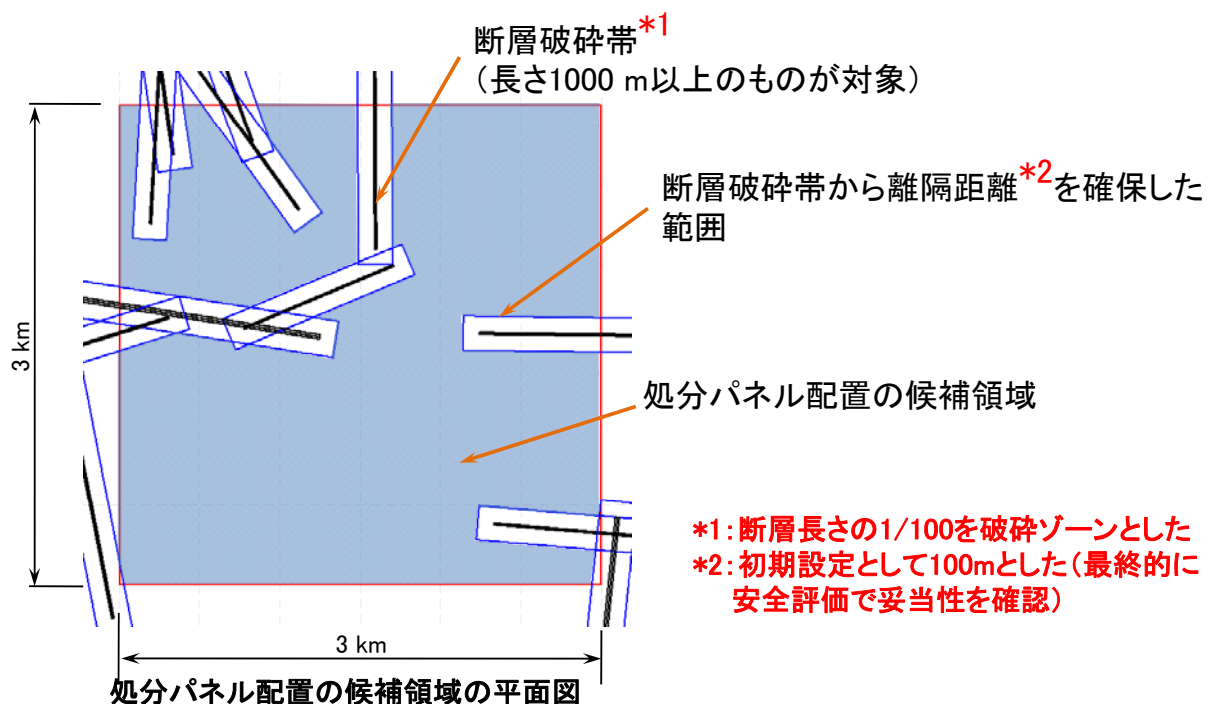
P.13



パネル配置の候補領域の設定

【設計要件】; 坑道が断層破碎帯等を横断する箇所が少なくなるよう配慮すること

設計要件への対応; 処分パネル(複数の坑道が接続)は断層破碎帯を避けて配置

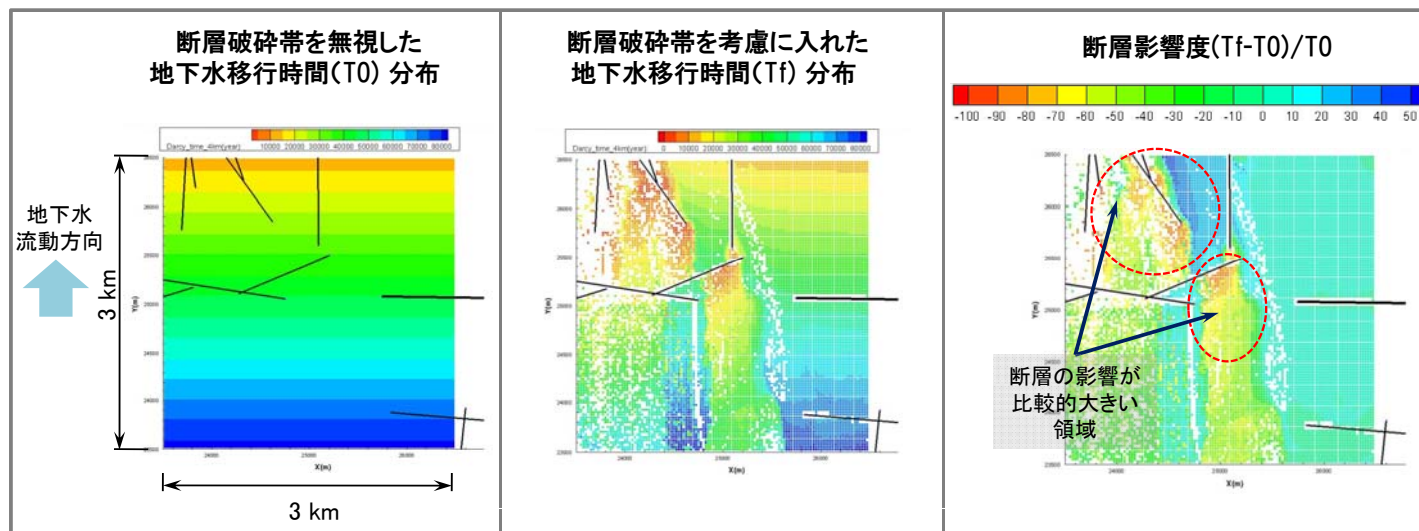


パネルを優先的に配置する領域の把握

【設計要件】： パネルの配置位置の設定時に地下水流動場を考慮すること

設計要件への対応： 移行抑制性能の向上や性能評価の不確実性を低減するため、地下水流動場への断層破碎帯の影響が小さい領域に優先的に処分パネルを配置する

Tf : 断層破碎帯ありモデルによる下流側までの地下水移行時間
T0 : 断層破碎帯なしモデルによる下流側までの地下水移行時間



処分場スケールにおける地下水移行時間分布と断層による影響(平面図)

パネルの数・規模・形状の設定

【設計要件】

- ① 1パネルあたりの発熱量を考慮すること
- ② 坑道交差部の空洞安定性への影響を考慮すること
- ③ 端部プラグの施工スペースを考慮すること

処分パネルの概要

廃棄体定置仕様(1パネルあたり)

- ・ 処分坑道数・・・50本
- ・ 処分坑道あたりの廃棄体定置本数・・・140本

坑道仕様

- ・ 曲率(R)・・・30m
- ・ 交角(θ)・・・135°

廃棄体専有面積・・・310,800m²(=44.4x7,000)

パネル面積・・・394,400m²(=0.39km²)

① 設計要件への対応

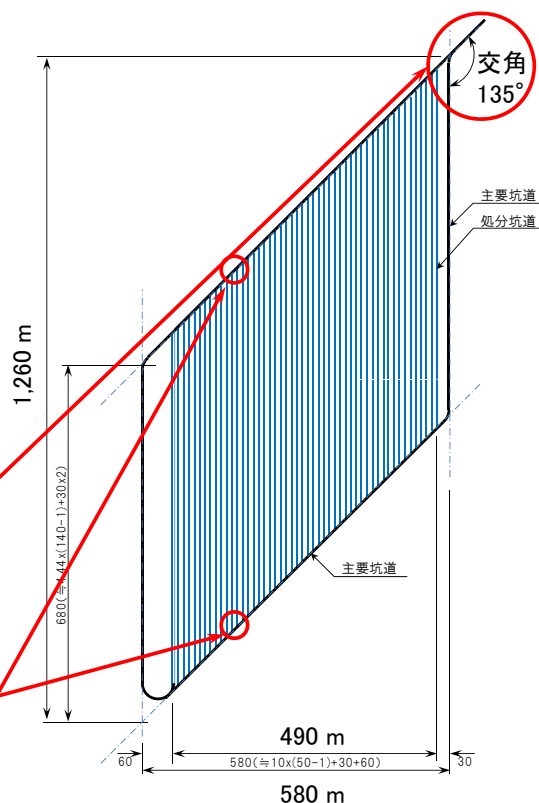
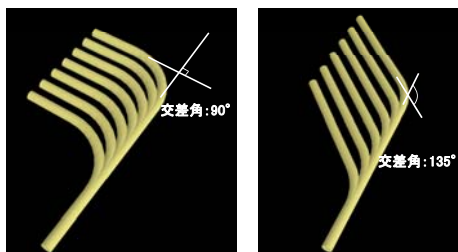
連絡坑道の風速等を考慮してパネル数を6に設定

② 設計要件への対応

交差角を135°に設定

③ 設計要件への対応

廃棄体の定置に必要な延長にプラグ施工に必要な空間として坑道両端に30mを確保

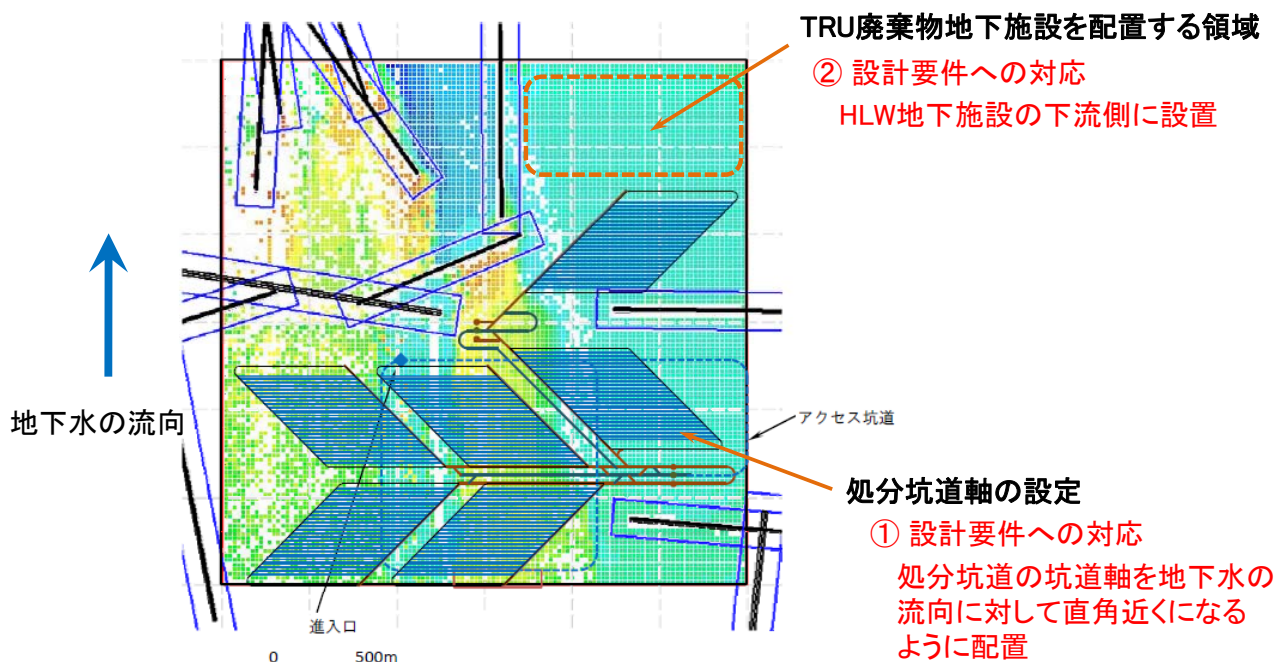


1つのパネルの形状・寸法

深成岩類モデルにおけるパネル配置の検討結果

【設計要件】

- ① 処分坑道軸の設定において地下水の流向を考慮すること
- ② TRU廃棄物の地下施設を配置することによるHLW地下施設への影響を考慮すること



4. 建設・操業技術の進展および 回収可能性への取り組み

建設技術

- これまでの**土木工事や鉱山開発，深地層研究施設の建設などの実績から，様々な地質条件に対して掘削できる技術が確立**している。
- 立坑の掘削は，鉱山，土木工事や深地層研究施設で実績のあるショートステップ工法が基本になる。深地層研究施設にてサイクルタイム等のデータが蓄積されている。

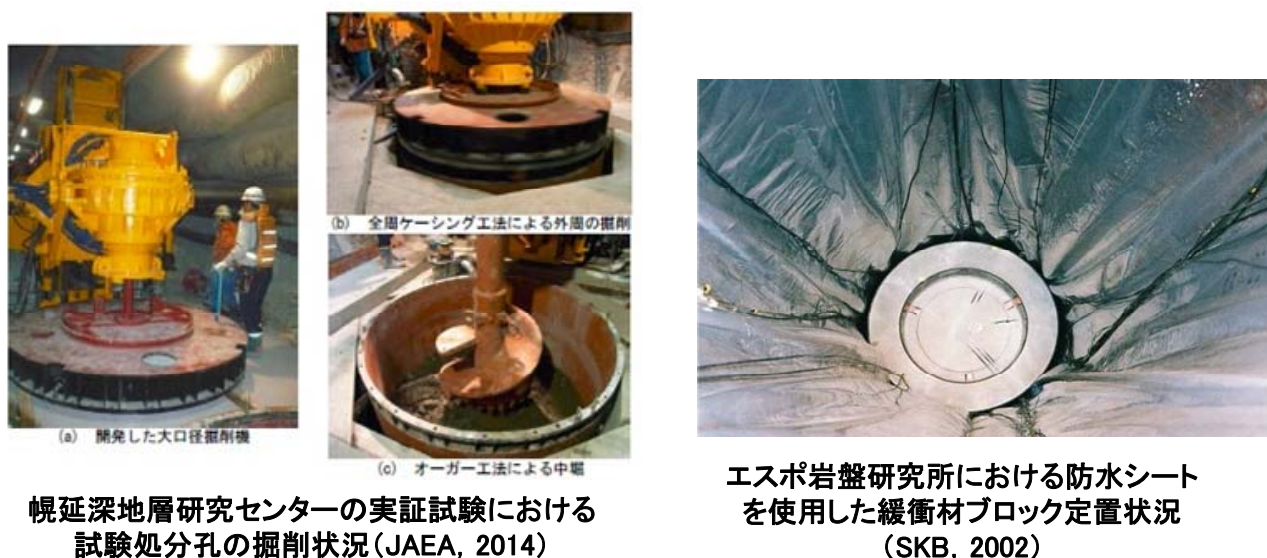


NUMO

P.20

建設・操業技術

- 国内外の地下研究施設における実証試験等を通じて地層処分固有の建設・操業技術の工学的実現性の見通しを得つつ進めている。
- 一方で，操業工程に対応した効率性向上，遠隔作業性の見通しに関して，これまでの**実証事例をレビューし，必要な改善を着実に進めていく。**



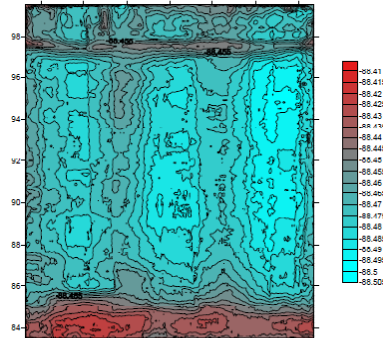
NUMO

P.21

人工バリアの搬送・定置の実証とプロセス管理手法の確立



大型振動ローラーによる底部緩衝材の
締固め施工試験



転圧完了後の仕上がり面高さのスキニング
⇒ 投入材料の重量管理とあわせて非破壊で転圧面
の平均密度の把握が可能

緩衝材の施工と品質管理の事例(RWMC, 2008年)

- 閉鎖後長期の安全確保の観点から、建設・操業段階における**性能を保証するための品質のプロセス管理が重要。**
- 検査すべき特性**(必要に応じて代替指標を用いる)、**検査方法**(出来るだけ非破壊、ただし実証段階では破壊試験との対比で非破壊試験の正当性を確認)、**検査のタイミング**、**検査場所・頻度**、**管理基準の範囲とその妥当性の根拠**、**管理基準を外れた場合の対処方法**などを予め設定する必要がある
- 事業の実施段階では、**プロセス管理における合格の積み重ねで安全性を確保しつつ、モニタリングと併せて総合的に安全性を判断。**
- プロセス管理の方法と妥当性については、精密調査段階の地下調査施設における実証試験までに準備を進め、当該試験において確立させる。

NUMO

P.22

回収技術(動向)

改定された基本方針(2015年5月22日閣議決定)

第4 特定放射性廃棄物の最終処分の実施に関する事項

最終処分事業は極めて長期にわたる事業であることを踏まえ、今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、**機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとする。**

第5 特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項

国及び関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。合わせて、**最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。**当該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である。

NUMO

P.23

高レベル放射性廃棄物処分における回収技術の検討状況

(縦置き, 横置き)



①処分坑道端部プラグの除去

(縦置き・ブロック方式の場合)

(横置き・PEM方式の場合)

②処分坑道埋め戻し材の除去(自由断面掘削機)

②坑道埋め戻し材の除去(自由断面掘削機)



③緩衝材の除去(右図の塩水噴射除去装置)

②' 坑道埋め戻し材の除去(塩水噴射除去)



④オーバーパックの回収(右図の装置に機能を備える)

③PEMの回収(専用装置の開発による)



塩水を用いた緩衝材除去技術の実証
(原環センター, 2014)

(NUMO検討中)

基盤研究として進めている縦置き方式に対する塩水噴射による回収技術は、地上の模擬坑道で実証試験済み。横置き・PEM方式の場合の回収も、概念検討により既存技術の応用で対応可能との見通しを得た。

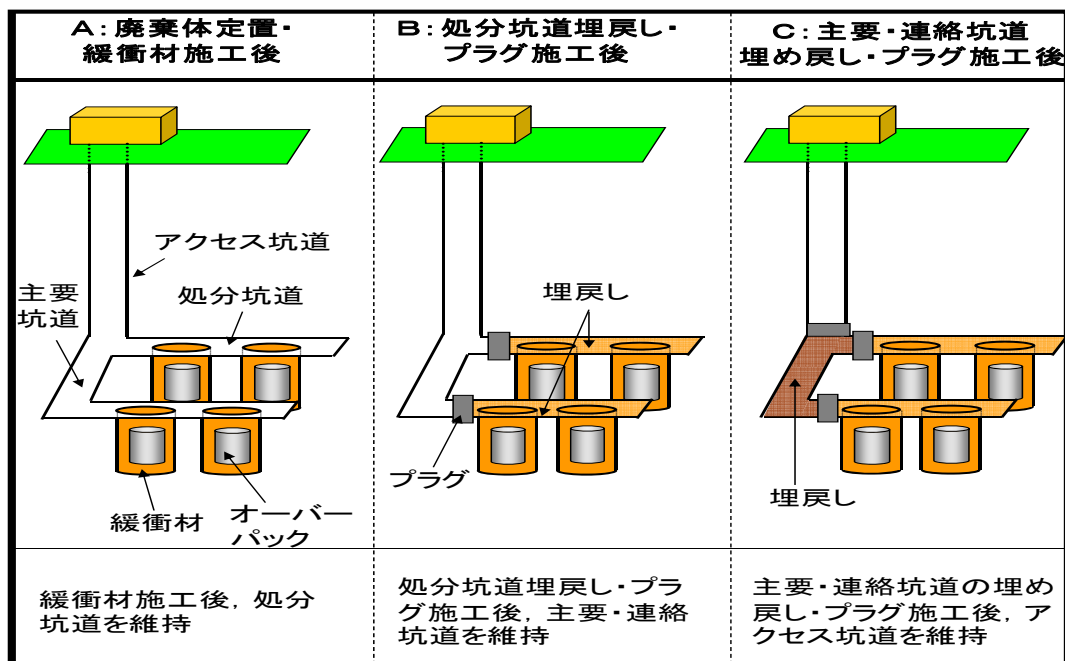
NUMO

P.24

回収可能性を維持した場合の影響評価

—状態設定—

回収可能性を維持する状態として3つの状態を想定し、回収可能性を維持することに伴う地層処分に対する影響を検討し、その低減対策を整備する。



NUMO

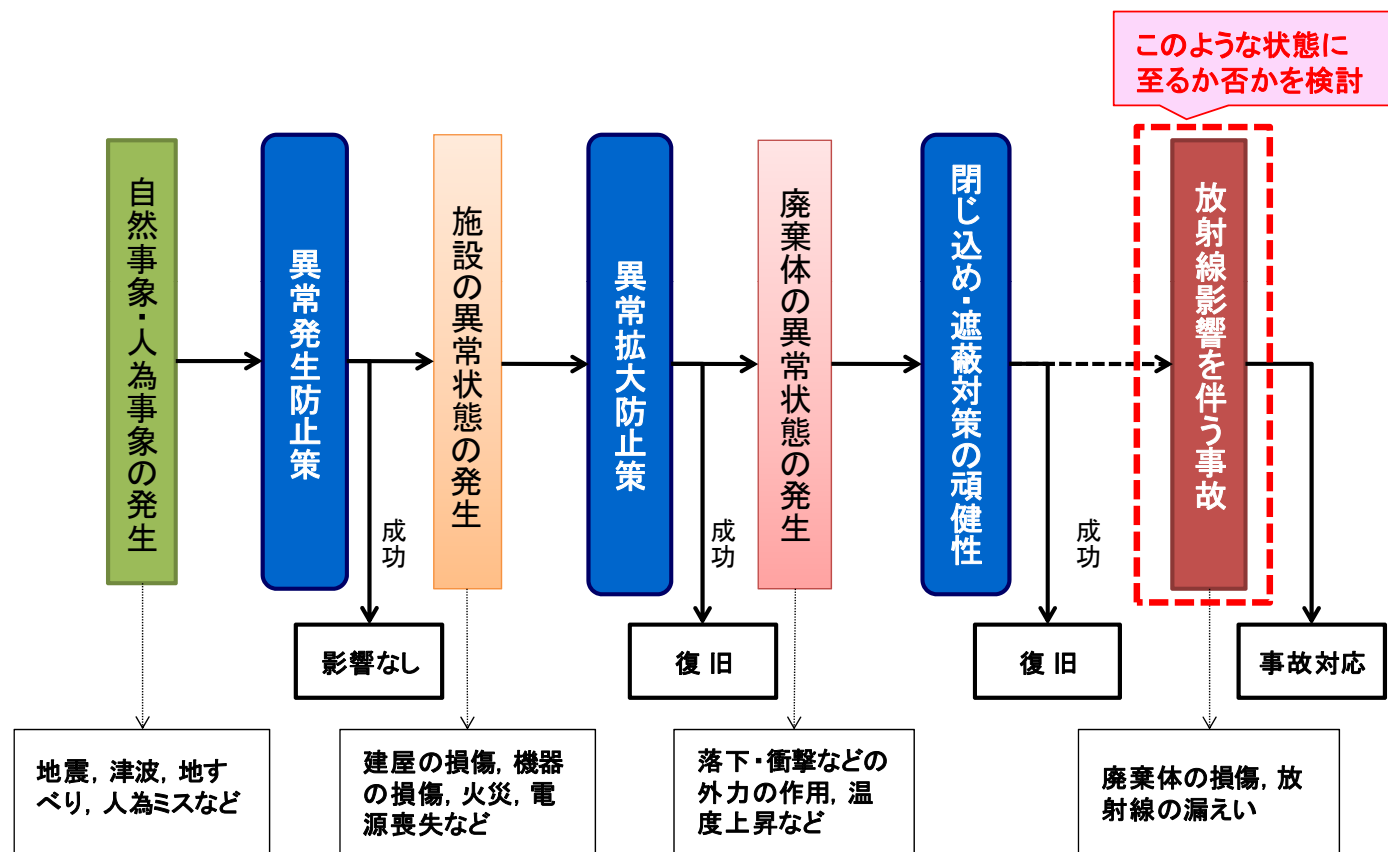
P.25

- 坑道の維持管理, 人工バリアの温度, 緩衝材の流出, オーバーパックの腐食等の観点から, 各状態の比較を実施。
- 今後, 回収可能性を維持できる状態の定量的な把握に向けた検討を進める。

回収可能性の維持による影響		状態A	状態B	状態C
回収手順の複雑さ		- 緩衝材の除去 - 廃棄体の回収	- 処分坑道の埋め戻し除去 - 緩衝材の除去 - 廃棄体の回収	- 主要坑道の埋め戻し除去 - 処分坑道の埋め戻し除去 - 緩衝材の除去 - 廃棄体の回収
地質環境に対する影響	処分場周辺の地下水の流速	速い		遅い
	処分場周辺の地下水位	低下範囲が大きい		低下範囲が小さい
	処分場周辺の地下水の酸化還元電位	酸化性		還元性
人工バリアに対する影響	人工バリアの温度	高い		低い
	緩衝材の流出	影響大		影響小
	オーバーパックの腐食	影響大		影響小
坑道の維持管理に対する影響	坑道類の維持管理の範囲	処分坑道, 主要坑道 連絡坑道, アクセス坑道	主要坑道, 連絡坑道 アクセス坑道	連絡坑道, アクセス坑道
	排水量	多い		少ない

5. 事業期間中の安全確保の考え方と検討状況

多重防護による閉鎖前の安全対策の基本的考え方



イベントツリーによる影響伝播の分析のまとめ

	起因事象	施設の異常状態	廃棄体などの異常状態	影響を受ける安全機能
地上施設	地震, 津波, 人為ミスなど	・遮へい壁への地震力の作用		遮へい
		・装置故障→取り扱い中の把持具からの落下	ガラス固化体に対する外力の作用	閉じ込め
		・電源喪失→換気停止 ・装置故障→取り扱い装置からの出火	ガラス固化体の温度上昇	閉じ込め
地下施設	オーバーパック, 岩盤により遮へい機能は十分な裕度を有する。			遮へい
	地震, 有害ガス, 異常出水, 津波など	・車両故障→車両逸走 ・坑道の落盤 ・メタンガスの爆発 ・積替え, 定置作業中の落下 ・地下施設の水没	オーバーパックへの外力の作用	閉じ込め
	人為ミスなど	・車両故障→逸走→搬送車両の火災	オーバーパックの温度上昇	閉じ込め

廃棄体に関する異常状態は、**温度上昇と外力の作用に大別**できる。
表中の朱書きの状態について、廃棄体の閉じ込め機能の裕度の検討を実施。

オーバーパックの衝撃に対する頑健性の検討

操業中の異常状態を設定し、衝突速度を算出し、限界速度と比較することで貫通亀裂の発生可能性を判断

事象	衝突時速度 (km/h)		
	50	100	150
地下施設、斜坑逸走（一辺250m） （勾配10%, 1周で100m降下）	80 km/h		
地下施設、メタン爆発による （爆発力が最大となるメタン濃度）	72 km/h		
地下施設、定置中の落下 （吊り上げ高さ 4-5mに設定）	32-36 km/h		
地下施設、積替え時の落下 （吊り上げ高さ 2-3mに設定）	23-28 km/h		
			破損限界速度 113 km/h

処分場の地下施設における廃棄体の落下、メタンガスの爆発によるオーバーパックへの衝撃について検討した結果、オーバーパックは衝撃に対して頑健性を有している

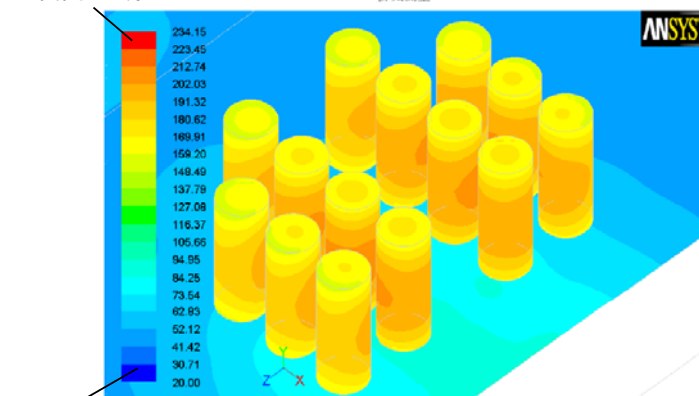
ガラス固化体の温度上昇に対する頑健性の検討

一地上施設での換気停止一

ガラス固化体28本を受け入れ検査のため仮置き中に電源が喪失し、換気機能が停止した状態を想定

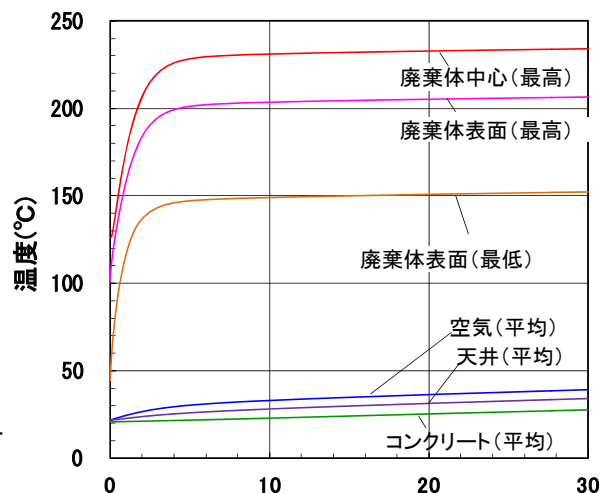
（30年冷却（約600W）、空気対流を考慮しない保守的な評価）

温度高い(赤:230℃)



温度低い(青:20℃)

解析結果:ガラス固化体の温度分布



換気停止後の経過時間(日)

ガラス固化体温度の経時変化

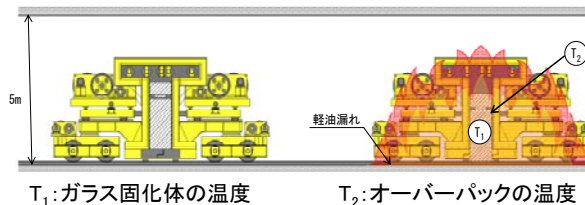
換気機能停止後、5日程度で急激に温度が上昇するが、その後、温度上昇は著しく鈍化する。ガラスの失透化する目安温度である500～600℃を十分に下回っており、温度上昇に対する頑健性を有している

ガラス固化体・オーバーパックスの温度上昇に対する裕度の検討

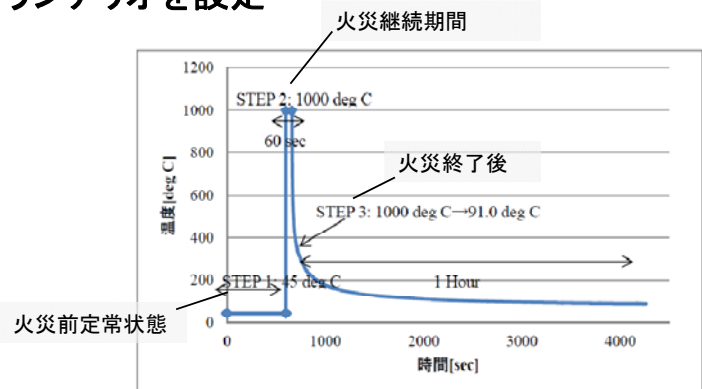
評価対象とする火災発生シナリオの選定

ー地下施設での火災ー

『主要坑道における廃棄体の搬送工程において輸送車両から漏えいした軽油に着火し廃棄体が火炎に包まれる』というシナリオを設定



火災発生シナリオのイメージ



設定した廃棄体周囲の温度

廃棄体温度の評価結果

- ・ オーバーパックスの温度は火災終了直後に約250°Cにまで上昇
⇒ 融点に対して十分に低い
- ・ ガラス固化体の温度は火災終了40分後に約100°Cにまで上昇
⇒ 失透化の目安温度(500~600°C)に対して十分に低い

6. まとめと今後の進め方

まとめ

- 設計因子と事業段階を考慮して要求機能を設定し、要求機能を処分システムの構成要素に割り付けるとともに、設計項目ごとに設計要件の設定と要件充足の方策を整理することで、**体系的な設計方法を整備した。**
- 地下施設の設計では、**深成岩類モデルにおける水理地質構造と規模の大きな断層破碎帯の分布を考慮して、地下施設のレイアウトを検討して示した。**
- 設定した設計仕様に対して、処分場を建設・操業・閉鎖する際に適用可能な技術を提示し、**地層処分が工学的に実現可能であることの見通し**を示した。また、**廃棄体の回収可能性を確保する技術の検討状況を示すとともに、今後の技術課題を把握した。**
- 安全対策が万が一機能しなかった場合を想定した**廃棄体の事故評価を行った結果、放射性物質を周辺に放出するような事故の発生には至らないことを確認した。**

今後の進め方

- 深成岩類モデルを対象としたTRU廃棄物処分場と、残りの地質環境モデルを対象とした高レベル放射性廃棄物とTRU廃棄物処分場の設計を実施する。
- 設計オプションについて、人工バリアの代替技術や、地下施設レイアウトの設計オプション等について検討を進め、技術開発が必要と考えられるものはその方向性を示す。
- 高レベル放射性廃棄物の廃棄体は、異常時においても閉じ込め機能を十分に発揮できる見通しを得たので、TRU廃棄物を収納する廃棄体パッケージについても同様の確認を行う。