

3. 高レベル放射性廃棄物に関する研究開発 ～各研究開発分野の成果と今後の計画～

(2) 処分場の工学技術

(2) 処分場の工学技術

1) これまでの成果の概要と今後の計画

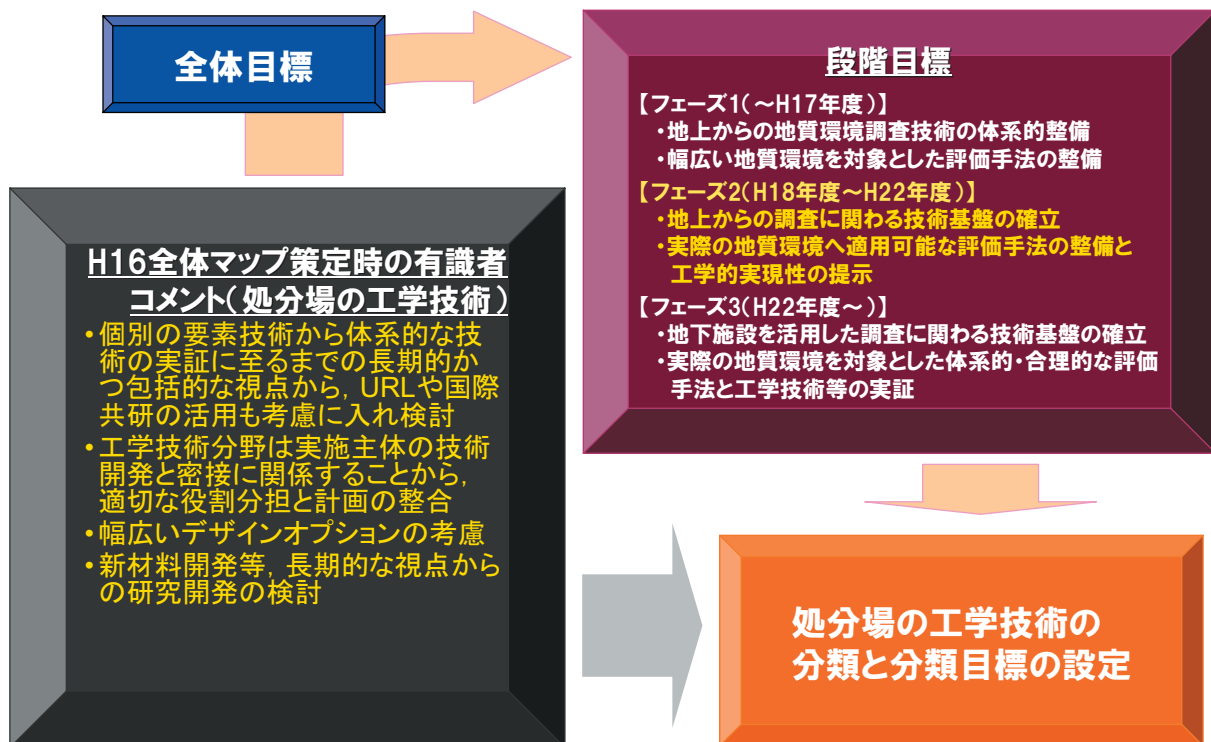
平成19年3月5日

地層処分基盤研究開発調整会議
工学技術ワーキンググループ
コーディネータ 油井 三和

発表内容

- 処分場の工学技術分野の研究計画の全体像
- これまでの成果の概要と今後の計画

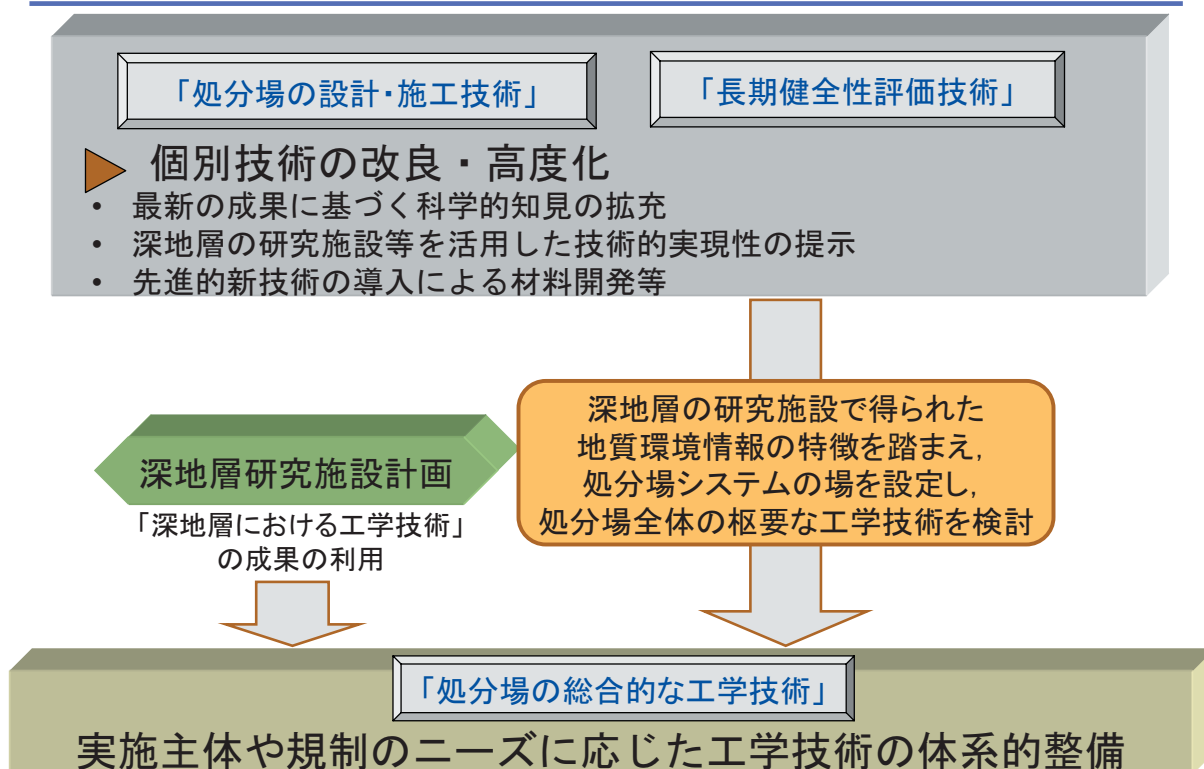
研究開発の段階目標



処分場の工学技術分野の分類、達成レベル、分類目標

分類	達成レベル		分類目標	
	第2次取りまとめ	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3
(1) 処分場の総合的な工学技術	幅広い地質環境に柔軟に対応できる設計評価の基本的な流れを提示	人工バリア等の設計評価手法の体系的整理	実際の地質環境への適用を考慮した柔軟性のある工学技術の体系化	実際の地質環境への適用性が確認された工学技術全体の体系化
(2) 処分場の設計・施工技術	幅広い地質環境を対象に、現状技術で実現可能と考えられる建設・操業・閉鎖技術を概念的に提示	閉鎖等の個別要素技術の強化	設計・建設技術の実際の地質環境への適用性確認と操業・閉鎖技術の整備	処分場の設計・施工技術の実際の地質環境への適用性確認
(3) 長期健全性評価技術	降水系地下水を中心とした実測データや基本モデルを整備し、保守的な考え方に基づく設計技術を提示	海水系を中心とした現象理解の向上と評価モデルの拡充・高度化	実際の地質環境へ適用可能な長期健全性評価モデルの整備	実際の地質環境に対する長期健全性評価モデルの総合的な適用性確認

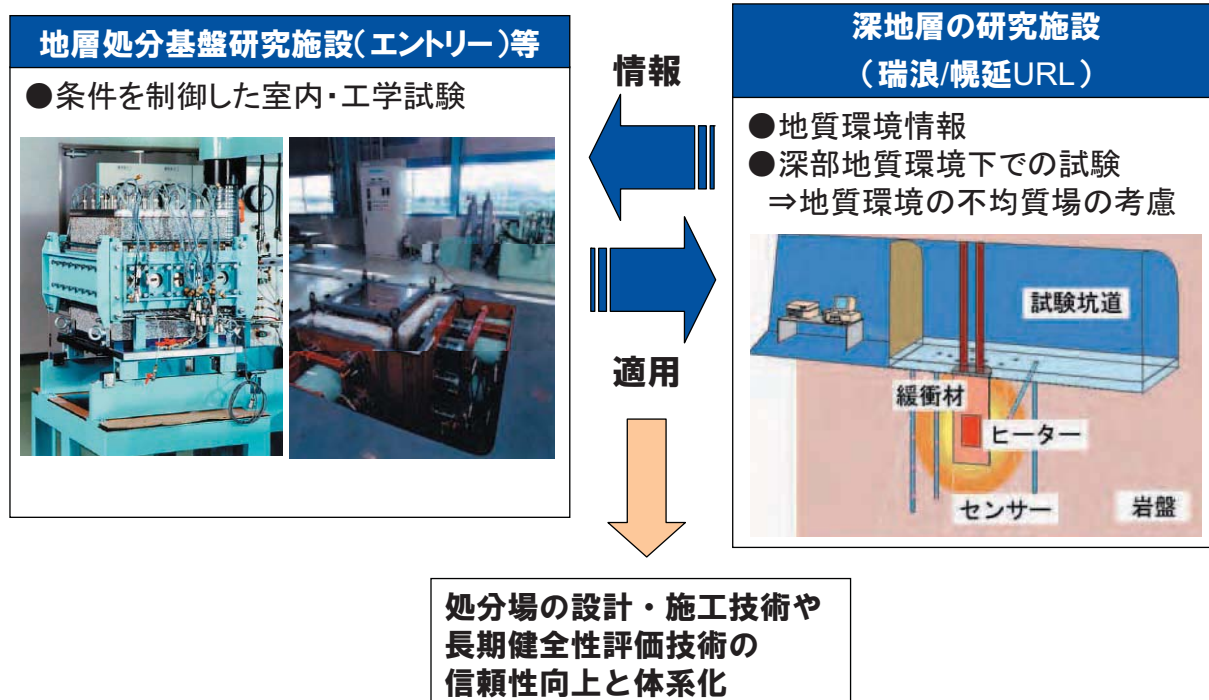
フェーズ2での研究開発計画の基本構造



フェーズ2の研究開発要素

分類	細目	
(1) 処分場の総合的な工学技術	①URLにおける適用性検討	
	②工学技術オプション	
(2) 処分場の設計・施工技術	①人工バリア(オーバーバック/緩衝材)	a) オーバーバック
		b) 緩衝材
	②支保・グラウト・シーリング	a) シーリング
		b) 支保(低アルカリ性セメント)
		c) グラウト
	③建設・操業・閉鎖等の工学技術	a) 建設技術
		b) 操業技術
		c) 閉鎖技術
		d) 品質管理
e) 回収技術		
(3) 長期健全性評価技術	①ガラス固化体	
	②緩衝材	a) 緩衝材の長期力学的変形挙動
		b) 緩衝材の長期変質挙動
		c) 緩衝材流出・侵入挙動
	③セメント・コンクリート	
	④岩盤	
	⑤熱-水-応力-化学連成評価技術	
⑥ガス移行挙動		
⑦人工バリアせん断応答挙動		

深地層の研究施設を活用した 工学技術の適用性確認と体系化



フェーズ2での重点課題

設計・建設技術の体系的整備

- 処分場の長期性能に有意な影響を与えない設計・建設技術(掘削技術、グラウト/支保技術、情報化施工、空洞安定性評価技術など)について、深地層の研究施設での実績や取得データを活用し体系的に整備

工学技術オプションの成立性や実現性に関わる 技術基盤の整備

- サイト条件の様々な特徴に適した処分概念の構築に資するよう、代替の処分概念を含む工学技術オプションの成立性*に関わる共通的な技術基盤の整備

*セメント影響、緩衝材制限温度、操業性、回収可能性、品質管理……

(1) 処分場の総合的な工学技術

① URLにおける適用性検討

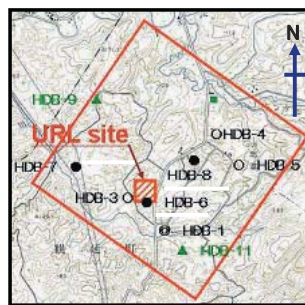
② 工学技術オプション

フェーズ1の主な成果【URLにおける適用性検討】

幌延URLを対象とした検討

処分孔竖置き方式を例として、

- 第2次取りまとめの考え方と最新の知見を踏まえ処分場全体設計フローを更新
- オーバーパック及び緩衝材の設計に関する手順の明確化
- 地上からの調査に基づく設計データの設定
- 人工バリアおよび処分場の設計を試行し、設計手法の適用性を確認
- 地上からの調査段階における設計上の留意点を整理



試錐調査配置図

幌延における地上からの調査によって得られたデータをもとに力学、水理、熱及び地下水化学特性をそれぞれ設定

地下水化学特性の設定例

幌延を一例とした検討

Na, K, Ca, Mg, Cl については、水質分析結果より、pH, Eh, C, Fe, S については、一般的な深部地下水に関する地球化学的知見とその不確実性をもとに地球化学モデルにより推定

空洞安定性評価指標に関する第2次取りまとめとの比較

指標	第2次取りまとめ	幌延の地質環境
支保工の応力	許容応力度以内	許容応力度以内
応力状態	局所安全率1.5を下回る領域が対策工により改良可能な範囲であること	塑性領域が対策工により改良可能な範囲であること
変形(岩盤の直ひずみ及び最大せん断ひずみ)	桜井・足立(1988)による限界ひずみと弾性係数の関係における中央値を上回る領域が対策工により改良可能な範囲であること	情報化施工のための指標

フェーズ2の計画

①URLにおける適用性検討

坑道掘削段階において得られる情報をもとに、
地上からの調査段階における手法の適用性を検証

- ・フェーズ1での設計手法や設計上の留意事項の妥当性確認
- ・処分坑道横置き方式の検討

②工学技術オプション

概念オプションの成立性や実現性に必要な技術基
盤の提示

- ・温度・セメント・放射線などの影響評価
- ・設計・建設・操業・閉鎖技術の留意点の整理



(2) 処分場の設計・施工技術

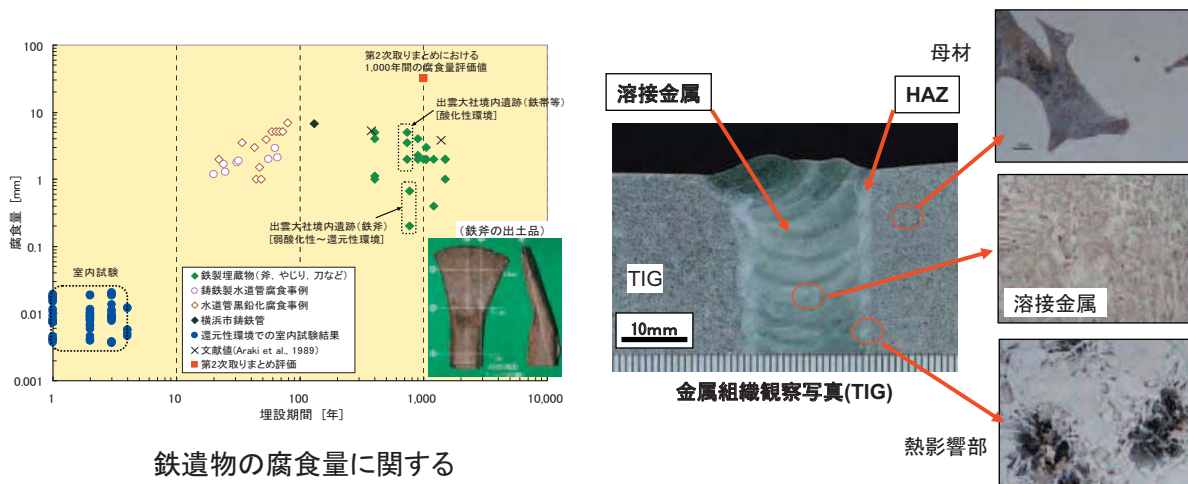
①人工バリア(オーバーパック／緩衝材)

②支保・グラウト・シーリング

③建設・操業・閉鎖等の工学技術

フェーズ1の主な成果(1) 人工バリア【オーバーパック(炭素鋼)】

- ・長期試験(最大4年)やナチュラルアナログデータ(1,000年規模の弱酸化性から還元性環境での事例)の蓄積によるオーバーパックの長期信頼性の向上
- ・高pH化, マグネタイトによる腐食などに対する生起可能性, 生起条件およびその影響について定量的な評価手法の提示
- ・オーバーパック溶接部の耐食性に関する実験的検討を開始【RWMC共同研究】

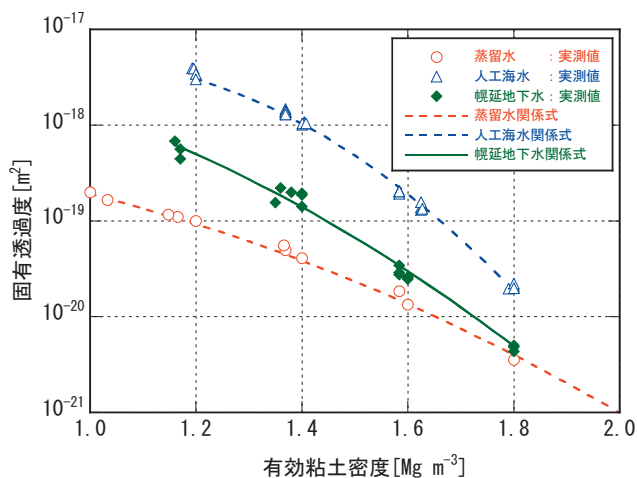
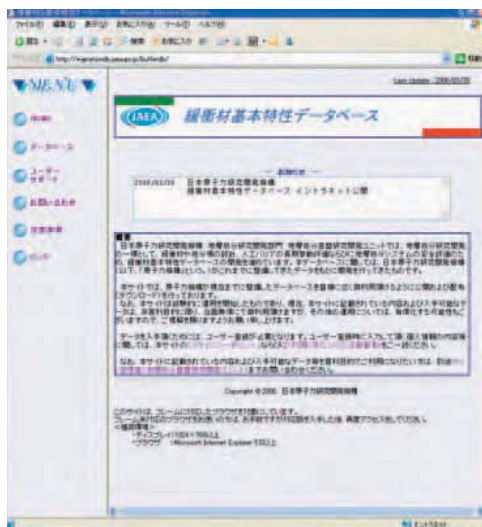


鉄遺物の腐食量に関する
ナチュラルアナログ・データ

炭素鋼溶接継手部の組織観察例

フェーズ1の主な成果(2) 人工バリア【緩衝材の基本特性】

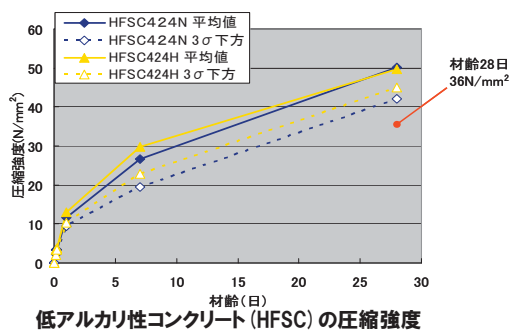
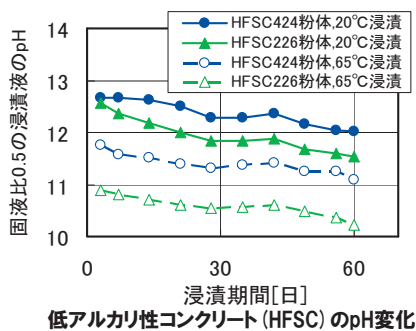
- ・海水系地下水条件下におけるデータの拡充と関係式の提案
- ・設計等に必要となる緩衝材の基本特性データをデータベースとしてWeb公開
- ・膨潤応力や熱物性の測定に関する標準的手法を検討
- ・塩水系地下水条件下における緩衝材ブロック隙間の充填および透水性能を把握【IRI】



海水系地下水条件下における有効粘土密度と固有透過度の関係

フェーズ1の主な成果(3) : 支保【低アルカリ性セメント】

- ・コンクリート打設性能や吹き付け性能等の施工性について問題ないことを確認
- ・pHの低下挙動のデータ取得・モデル開発による目標pH達成についての見通し



低アルカリ性コンクリートの吹付試験

フェーズ2の計画(1)

①人工バリア

a) オーバーパック

- ・材料選定指針の基盤、溶接影響や放射線影響の評価手法提示、腐食データベースの開発、URLにおける適用性確認

b) 緩衝材

- ・緩衝材基本特性データベースの公開・更新、測定手法の標準化
- ・緩衝材施工オプションと関連付けた基本特性把握

②支保・グラウト・シーリング

a) シーリング

- ・堆積岩/結晶質岩に対する閉鎖要件の明確化、埋戻し材及び止水プラグに関する設計基盤情報の提示

b) 支保

- ・URL掘削段階における低アルカリ性コンクリートの施工例の提示

フェーズ2の計画(2)

③建設・操業・閉鎖等の工学技術

a) 建設技術

- ・URL掘削段階における技術の例示
- ・操業技術の成立性を考慮したオプションの提示

b) 操業技術

- ・遠隔溶接、定置技術などのオプションの提示

c) 閉鎖技術

- ・操業技術の成立性を考慮したオプションの提示

d) 品質管理

- ・URL掘削段階の情報や最新の知見に基づく人工バリアや処分施設の品質管理計画の提示

e) 回収技術

- ・操業技術の成立性を考慮した閉鎖前の回収技術オプションの提示
-

(3)長期健全性評価技術

①ガラス固化体

②緩衝材

③セメント・コンクリート

④岩盤

⑤熱－水－応力－化学連成挙動

⑥ガス移行挙動

⑦人工バリアせん断応答挙動

フェーズ1の成果例【熱-水-応力-化学連成評価技術】

◆解析モデル

- 熱-水-応力連成コードに物質移行及び地球化学コードを付加したプロトタイプ・コードの構築

◆検証

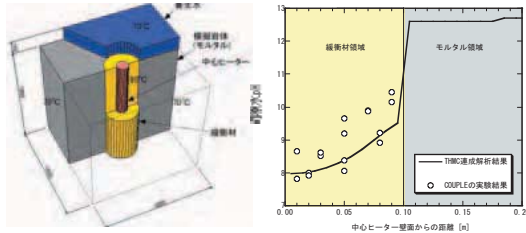
- 室内連成試験, 塩の蓄積挙動, ユッカマウンテン坑道加熱試験(国際共研)に対する検証解析

◆解析評価

- 第2次取りまとめにおける結果の妥当性を確認



現象理解, 理論/経験則に基づくプロトタイプ・コードの構築

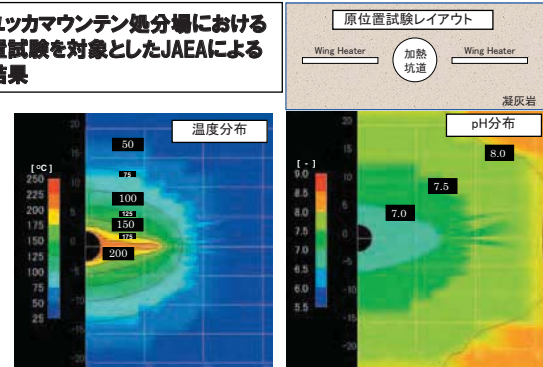


室内連成試験装置 (COUPLE)

180日後のpH分布と解析結果

室内連成試験に対する検証解析

米国ユッカマウンテン処分場における原位置試験を対象としたJAEAによる解析結果



試験開始から4年後の解析結果

フェーズ2の計画(1)

①ガラス固化体 第1フェーズで終了

②緩衝材

a) 長期力学的変形挙動

- 緩衝材-岩盤の連成モデルの構築、二次圧密の加速挙動の解明

b) 長期変質挙動

- 近年注目されている鉄-緩衝材相互作用評価の実施
- 100°Cを上回る場合の評価方法の提示

c) 流出・侵入挙動

- 降水系条件における実岩盤を想定した侵入モデルの改良、ベントナイトコロイド生成条件の明確化

③セメント・コンクリート(TRU処分研究と連携)

- 多様な環境を考慮した化学-物質移行モデル構築とデータベース開発

フェーズ2の計画(2)

④岩盤

a) 長期力学的変形挙動

- ・URL掘削段階における評価手法の検証、EDZの性状・自己回復特性の把握

b) 長期変質挙動(TRU処分研究と連携)

- ・アルカリ変質シナリオ構築と影響評価手法の提示

⑤熱－水－応力－化学連成評価技術

- ・URLを対象とした数値実験システムの提示、THMC原位置試験計画とセンサー計測技術の提示

⑥ガス移行挙動

- ・応力を考慮したガス移行評価手法とパラメータ設定手法の提示

⑦人工バリアせん断応答挙動

- ・断層ずれのせん断速度の効果を考慮した評価手法の提示

フェーズ2での主要な連携内容(1)

・地質環境－工学技術間の連携：

- 「深地層における工学技術」の実績に基づく
 - 地下施設的设计・建設技術の提示
 - グラウト(低アルカリ性セメント)の適用性検討
 - 低アルカリ性セメントを用いた吹付け施工試験

・工学技術－性能評価間の連携：

- 掘削影響領域における物質移行経路の評価

フェーズ2での主要な連携内容(2)

- **工学技術－TRU廃棄物処分研究間の連携：**
 - セメント影響を考慮した緩衝材の基本特性把握と変質劣化の評価
 - コンクリート支保の人工バリアへの化学的影響を熱-水-応力-化学連成解析コードに取り込み
 - 低アルカリ性セメントの開発
- **JAEA-ANRE事業間の連携：**
 - 炭素鋼、チタンの溶接・検査技術

まとめ：フェーズ2における研究開発の重点

地質環境、性能評価、TRU廃棄物処分研究の分野間の連携およびJAEA-ANRE事業間の連携を踏まえた

- 設計・施工技術や長期健全性評価技術の信頼性向上と体系化
特に、URL掘削段階の情報を活用した設計・建設技術の体系的整備
- 工学技術概念オプションの成立性や実現性に必要な技術基盤の整備



工学技術の基盤強化に向けて

平成19年3月5日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

ニアフィールド研究グループ

内藤 守正

発表内容



- フェーズ1での取組みと成果
 - 基盤強化に向けた研究開発の取組み
 - 研究開発成果

- 今後に向けて

フェーズ1における分類と目標



分類	細目	フェーズ1の分類目標	
(1)工学技術	①人工バリア (オーバーパック/ 緩衝材)	a) 全体(適用性検討)	
		b)オーバーパック	
		c)緩衝材	
	②支保・グラウト・シーリング		
	③建設・操業・閉鎖 等の工学技術	a)建設技術	
b)操業・閉鎖技術			
c) 品質管理			
(2)長期健全性	①ガラス固化体	海水系等を中心とした現象理解の向上と評価モデルの拡充・高度化	
	②緩衝材		a)緩衝材の長期力学的変形挙動
			b)緩衝材の長期変質挙動
			c)緩衝材流出・侵入挙動
	③セメント・コンクリート		
	④岩盤		
	⑤熱-水-応力-化学連成評価技術		
⑥ガス移行挙動			

基盤強化に向けた研究開発の取り組み



(1) 工学技術

- ◆ データの質と量の強化
 - ・ 取得条件の多様化, 取得手法の標準化
- ◆ 工学技術の実証
 - ・ 室内や原位置の試験利用
- ◆ 技術の適用性確認と経験／ノウハウの蓄積
 - ・ URL(地上からの調査段階)を通じて得られた知見の整理
- ◆ 代替材料開発

(2) 長期健全性

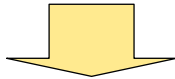
- ◆ モデルの高度化
 - ・ 個別現象や複合挙動の特徴をより表現
- ◆ 現象の理解促進
 - ・ 可視化技術の導入

(1) 工学技術 データの質と量の強化： 炭素鋼オーバーパックの腐食



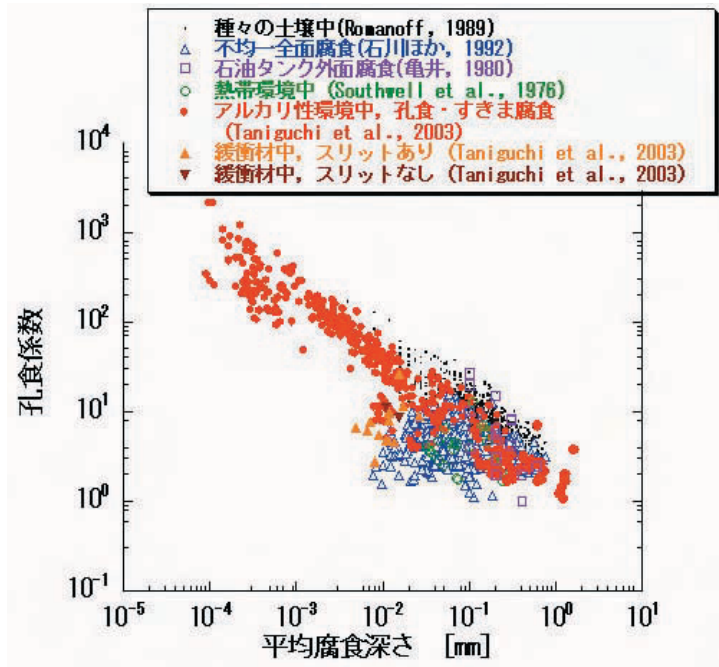
➤H12(第2次取りまとめ)

日本における地下水条件の範囲での腐食挙動評価を実施。セメントによる影響、マグネタイトによる腐食加速などは限られたデータに基づく評価



➤H12以降

セメント、マグネタイト影響、数年間の長期データを含めた実験データの拡充により(右図に一例)、1,000年間の腐食寿命評価の信頼性が向上



炭素鋼の孔食係数の平均腐食深さ依存性

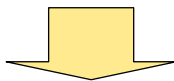
高pH環境において炭素鋼が不動態化して局部腐食を生じたとしても顕著な腐食の局在化は生じない。

(1) 工学技術 データの質と量の強化： 緩衝材特性データベースの公開



➤H12

降水系地下水条件下における各基本特性データを整備し、関係式を提案し、設計の考え方を例示。



➤H12以降

海水系地下水条件下におけるデータの拡充と関係式の提示及び緩衝材基本特性データベースのWeb公開(2006)。具体的な地質環境での試設計の例示と課題の抽出

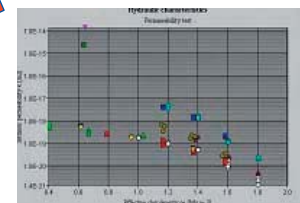


緩衝材の基本特性データ

透水特性	透水試験	力学特性	一軸圧縮試験	
膨潤特性	飽和膨潤応力試験	圧裂試験	二次元圧密試験	
	不飽和膨潤応力試験			
	飽和膨潤ひずみ試験			非圧密非排水三軸試験
	不飽和膨潤ひずみ試験			圧密非排水三軸試験
	動的締固め試験			圧密非排水三軸クリニブ試験
締固め特性	静的締固め試験	動的三軸試験	弾性波速度測定	
熱特性	熱物性測定(熱伝導率・熱拡散率)	液状化試験		
乾燥収縮特性	乾燥収縮試験			



データ検索機能



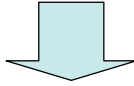
グラフ作成機能

(1) 工学技術 工学技術の実証 閉鎖技術



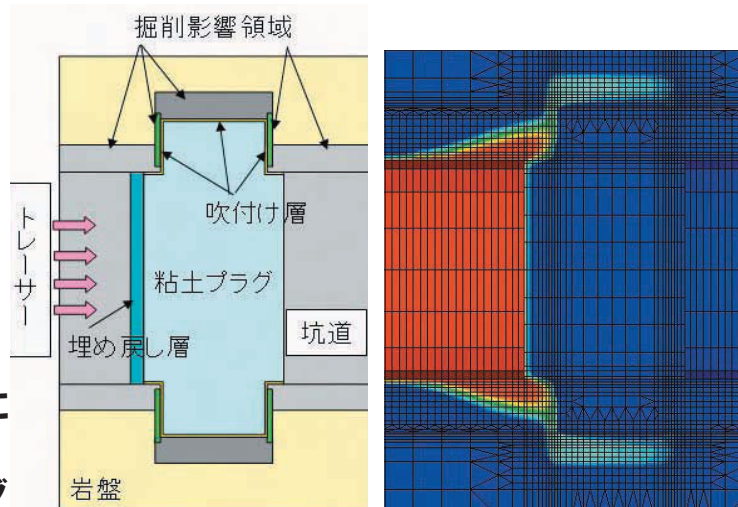
➤H12

- 結晶質岩系岩盤での粘土プラグの施工の実証および降水系地下水条件下での埋め戻し材仕様の提示



➤H12以降

- データの拡充によるシーリングに関する評価手法の体系化
- 結晶質岩系岩盤におけるプラグ性能の提示
- 海水系地下水条件下における埋め戻し材の適用性に関わる基本データの拡充
- シナリオ分析による閉鎖性能評価のための手法開発



原位置試験閉鎖要素 3次元トレーサ解析結果
(トレーサ濃度分布100日後)

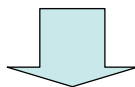
トレーサは掘削影響領域を選択的に移行

(1) 工学技術 技術の適用性確認： 処分場全体設計フロー



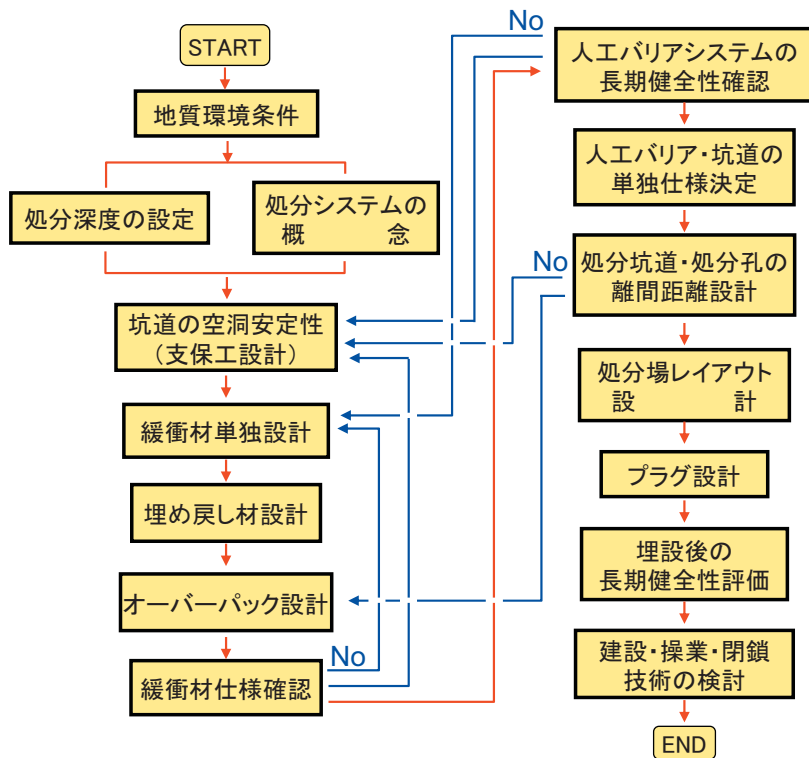
➤H12

- 幅広い地質環境を一般化して扱う処分場設計フローを提示



➤H12以降

- 処分孔竖置き方式を対象として人工バリア設計や施設設計等の個々の構成要素間の相互関係を明確化し、一般性・客観性をより向上させた設計フローへと見直し、幌延URLで得られた地質環境情報を用いて設計検討を実施



(1) 工学技術 技術の適用性確認： 緩衝材の設計



➤H12

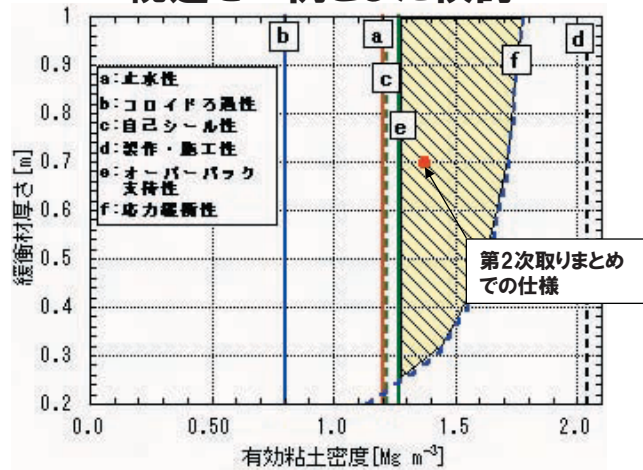
幅広い地質環境を一般化して
扱う人工バリアの設計の考え方を
例示



➤H12以降

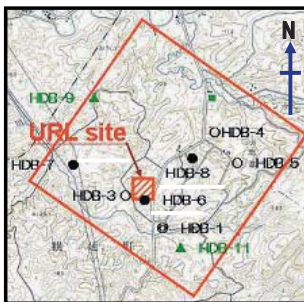
設計手法の適用性確認を通じて、
地上からの調査段階における
留意点を整理

幌延を一例とした検討



緩衝材設計例(ブロック方式)

(1) 工学技術 経験／ノウハウの蓄積： URLでの適用性検討



試錐調査配置図

幌延における地上からの調査によって得られたデータをもとに
力学、水理、熱及び地下水化学特性をそれぞれ設定

幌延を一例とした検討

Na, K, Ca, Mg, Cl については、水質分析結果より、pH, Eh, C, Fe, S については、一般的な深部地下水に関する地球化学的知見とその不確実性をもとに地球化学モデルにより推定

地上からの調査段階における留意点の整理

- ① 処分孔の安定性の適切な評価
 - ・建設・操業中の岩盤クリープ挙動の考慮
- ② 地下水化学データの取得
 - ・大気との接触が避けられない場合、地下水水質の深度依存性に関する知見、熱力学的解析結果及び地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮
- ③ 埋め戻し材設計
 - ・ベントナイト配合率が低い埋め戻し材の海水条件での自己シール性に係るデータの拡充
- ④ 緩衝材設計
 - ・設計要件の一つである自己シール性の範囲を設定するための判断基準の整備

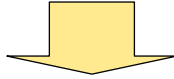
(1) 工学技術

代替材料(低アルカリ性コンクリート)開発



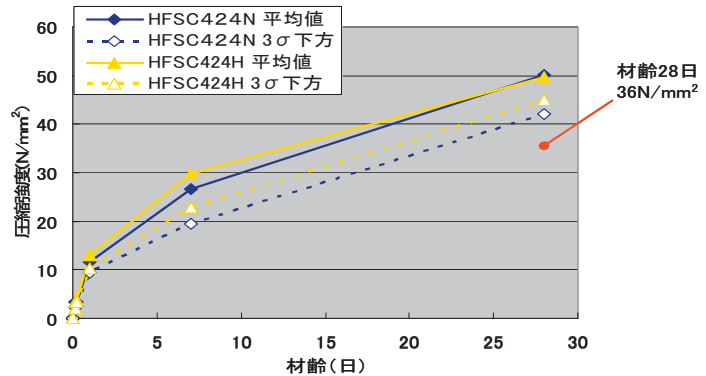
➤H12

- 普通セメントによる地下水のpH上昇を抑制するため低アルカリ性セメント(HFSC, pH11以下を目標)の使用を推奨



➤H12以降

- コンクリート打設性能や吹き付け性能等の施工性について問題ないことを確認
- pHの低下挙動のデータ取得・モデル開発とpH目標達成についての見通し
- 幌延における支保工の設計基準強度(材齢28日で36N/mm²)を満足するコンクリート配合の選定, 模擬トンネルに対する吹き付け施工試験を実施



セメント種類	スラブ (cm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)										急結剤
				W	OPC	HPC	SF	FA	S	G	減水剤			
HFSC 424N	18±2	40	60	200	200	-	100	200	950	645	C×1.1%	HFSC×10%		
HFSC 424H		45	60	203	-	180	90	180	975	663	C×1.2%	HFSC×10%		

(2) 長期健全性 モデルの高度化: 熱-水-応力-化学連成挙動モデル



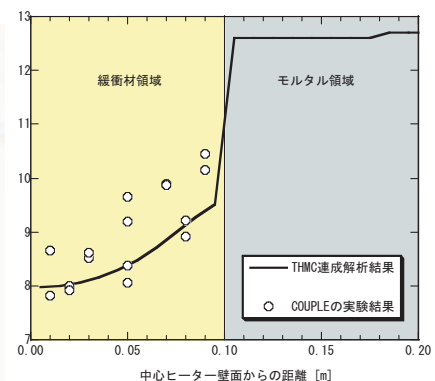
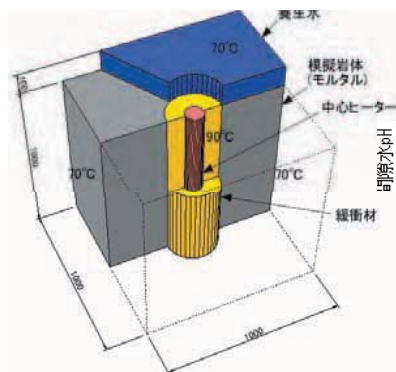
➤H12

熱-水-応力連成モデルの開発及び検証を行い, 廃棄体定置後のニアフィールド挙動を評価



➤H12以降

熱-水-応力-化学連成モデルを開発し, 室内連成試験等を通じた検証を実施し, 廃棄体定置後のニアフィールド挙動を評価



室内連成試験装置(COUPLE) 180日後のpH分布と解析結果

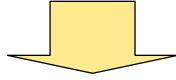
室内連成試験による連成モデルの検証

(2) 長期健全性 現象の理解促進: 緩衝材の流出・侵入挙動



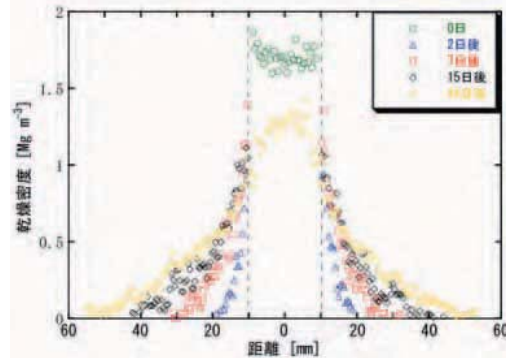
➤ H12

- ・実験データに基づく経験則による評価

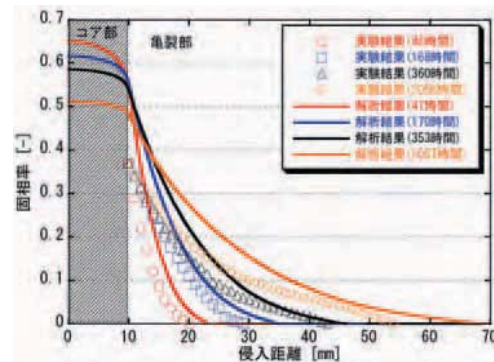


➤ H12以降

- ・第2次取りまとめでは得られていなかった緩衝材の亀裂侵入密度のデータをX線CTを用いて取得
- ・CTデータ等を用いた拡散モデルの適用性確認
- ・緩衝材の侵入現象は、海水系の場合ほとんど効かないが、降水系地下水環境では顕著



(X線CTを用いた侵入密度分布測定結果)



(実験結果のシミュレーション解析結果)

今後に向けて: 細目の設定



フェーズ1

分類	細目	
(1) 工学技術	①人工バリア (オーバーバック/緩衝材)	a) 全体 (適用性検討) b) オーバーバック c) 緩衝材
	②支保・グラウト・シーリング	
	③建設・操業・閉鎖等の工学技術	a) 建設技術 b) 操業・閉鎖技術 c) 品質管理
(2) 長期健全性	①ガラス固化体	
	②緩衝材	a) 緩衝材の長期力学的変形挙動 b) 緩衝材の長期変質挙動 c) 緩衝材流出・侵入挙動
	③セメント・コンクリート	
	④岩盤	
	⑤熱・水・応力・化学連成評価技術	
	⑥ガス移行挙動	

フェーズ2以降

分類	細目	
(1) 処分場の総合的な工学技術	①URLにおける適用性検討 ②工学技術オプション	
(2) 処分場の設計・施工技術	①人工バリア (オーバーバック/緩衝材)	a) オーバーバック b) 緩衝材
	②支保・グラウト・シーリング	a) シーリング b) 支保 (低7M加圧セメント) c) グラウト
	③建設・操業・閉鎖等の工学技術	a) 建設技術 b) 操業技術 c) 閉鎖技術 d) 品質管理 e) 回収技術
(3) 長期健全性評価技術	①ガラス固化体	
	②緩衝材	a) 緩衝材の長期力学的変形挙動 b) 緩衝材の長期変質挙動 c) 緩衝材流出・侵入挙動
	③セメント・コンクリート	
	④岩盤	
	⑤熱・水・応力・化学連成評価技術	
	⑥ガス移行挙動	
	⑦人工バリアせん断応答挙動	

(1) 処分場の総合的な工学技術

- ① URLにおける適用性検討: 工学技術の実証(URLを利用した工学技術の体系化)
- ② 工学技術オプション: 概念成立性に関わる新技術の開発

(2) 処分場の設計・施工技術

- ① 人工バリア(オーバーパック/緩衝材): オーバーパック材料選定指針の基盤整備, 腐食データベースの開発, 緩衝材基本特性データベースの更新, 測定手法の標準化等
- ② 支保・グラウト・シーリング: 閉鎖要件の明確化, 低アルカリ性コンクリートの施工例の提示等
- ③ 建設・操業・閉鎖等の工学技術: URL掘削段階における建設技術の例示, 操業・閉鎖技術のオプションの提示等

(3) 長期健全性評価技術

- ① ガラス固化体: フェーズ1にて終了
- ② 緩衝材: 緩衝材-岩盤力学連成モデルの構築, 鉄-緩衝材相互作用評価等
- ③ セメント・コンクリート(TRU処分研究と連携): 化学-物質移行モデル構築等
- ④ 岩盤: EDZの性状・自己回復特性の把握, アルカリ変質シナリオ構築等
- ⑤ 熱-水-応力-化学連成評価技術: URLを対象とした数値実験システムの提示等
- ⑥ ガス移行挙動: 応力を考慮したガス移行評価手法とパラメータ設定手法の提示
- ⑦ 人工バリアせん断応答挙動: せん断速度の効果を考慮した評価手法の提示