

【個別技術報告】 処分技術の信頼性向上と 安全評価手法の高度化に向けた 取組みの現状

地層処分技術に関する研究開発報告会
－処分技術の信頼性向上のための基盤整備に向けて－

平成16年2月26日 津田ホール

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
石川 博久

東海事業所における研究開発課題

研究開発目標

実際の地質環境への
地層処分技術の
適用性確認

地層処分システムの
長期挙動の理解

研究開発課題

処分技術の信頼性向上

①人工バリアの基本特性
データベースの整備

②人工バリア等の
長期複合挙動に関する研究

③人工バリア等の
工学技術の検証

④設計手法の適用性確認

・オーバーパックの腐食挙動に及ぼす
セメントの影響評価

・緩衝材流出／侵入挙動に関する研究
・熱-水-応力-化学(THMC)連成挙動に
関する研究

・金属のナチュララアナログ研究

・低アルカリ性セメントの開発

・処分技術の信頼性向上に係わる
幌延深地層研究計画との連携

安全評価手法の高度化

①核種移行
データベースの整備

②安全評価モデルの高度化

③安全評価手法の
整備・高度化

④安全評価手法の
適用性確認

・JNC熱力学・収着データベースの開発
・放射性核種の移行挙動に関する
モデル及びデータベースの信頼性確認

・コロイド等の影響評価モデルの開発
・亀裂を有する軟岩中の流れと
移行現象に関する研究

・不確実性評価技術
・技術情報統合システム(JGIS)開発

処分技術の信頼性向上の目的/ねらい

●信頼性向上の目的

人工バリアや周辺岩盤における長期的な現象について
メカニズムの理解に基づくモデルやデータベースの構築
および実際の地質環境に対する設計手法等の適用性確認

信頼性向上の視点	ねらい
長期挙動・現象理解、 予測モデルの構築	経験則からメカニズムに基づくモデル開発、 数値実験手法の開発
実際の地質環境条件や 設計・施工条件との整合性	深地層の研究施設等と整合した工学技術や 設計手法の整備
ナチュラルアナログによる妥当性確認	処分環境に類似しかつ環境条件が把握された より長期のナチュラルアナログデータの拡充
透明性、追跡性、分かり易さ	人工バリア等の基本特性データベースの整備、 実験や解析結果の可視化

安全評価手法の高度化の目的/ねらい

●高度化の目的

実際の地質環境に適用可能かつ信頼性の高い安全評価に
向けた基盤技術の開発

高度化の視点	ねらい
現象理解、定量的モデルの構築	科学的信頼性の向上、 保守性の確認
実際の地質環境条件や 設計条件等との整合性	深地層の研究施設等の情報と整合した 評価手法の整備
不確実性の取扱い	不確実性の取扱手法の整備
透明性、追跡性、分かりやすさ	効果的かつ効率的な分野間の連携、 整合性や追跡性の向上、 情報の普及（インターネットの活用）

オーバーパックの腐食挙動 に及ぼすセメントの影響評価

●目的:

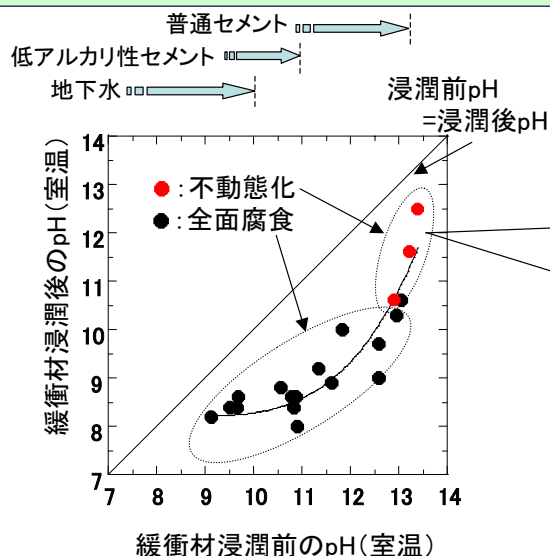
地下水の高pH化による炭素鋼オーバーパックの腐食への影響の把握
→特に、普通セメントの使用を想定し、酸化性雰囲気での
アルカリ性環境における局部腐食進展挙動を検討

●実施内容:

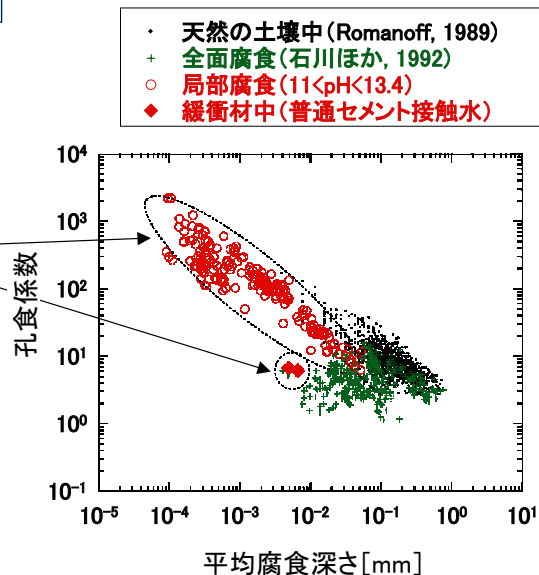
セメントと接触した地下水のpH条件を想定して炭素鋼の不動態化挙動、
局部腐食挙動を調査
→今回はアルカリ性環境(pH約11~13)において浸漬試験を実施し、
局部腐食における孔食係数(最大腐食深さと平均腐食深さの比)を求め、
全面腐食での値、天然の土壌中での値等との比較検討を行った。

オーバーパックの腐食挙動 に及ぼすセメントの影響評価

緩衝材によるpH緩衝作用と 緩衝材中における炭素鋼の腐食形態



平均腐食深さと孔食係数の関係



○高pH環境における孔食係数は平均腐食深さの増加とともに低下した。
平均腐食深さ約0.1mm以上では全面腐食での孔食係数と同程度になると推定される。

●目的:

岩盤亀裂中への緩衝材の膨潤による侵入および地下水による浸食の現象解明ならびに長期予測モデルの構築

●実施内容:

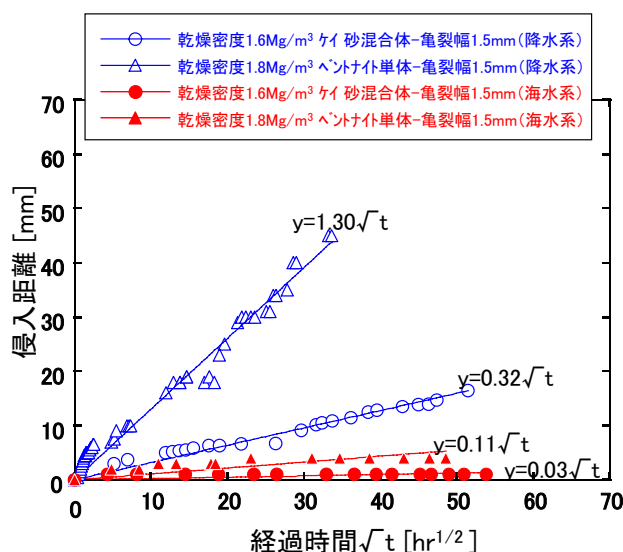
侵入現象

- ・海水系地下水における基礎データの拡充
- ・モデル構築へ資するための物性データ(侵入密度分布等)の整備および上記データを用いたモデルの妥当性評価

浸食現象

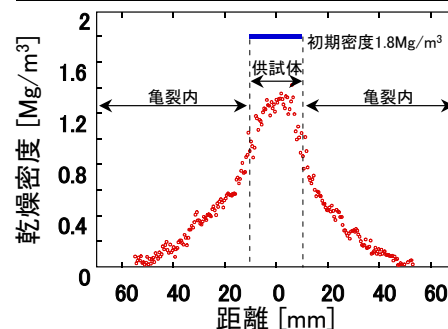
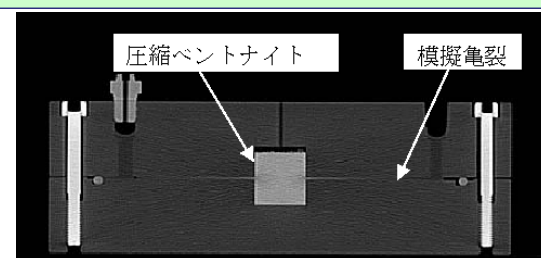
- ・安全評価におけるベントナイト浸食の影響評価に反映するため、降水系地下水における流速と浸食コロイド濃度に係るデータを拡充

海水系地下水の侵入挙動への影響



○海水系地下水を用いたデータの拡充により、海水系地下水は降水系に比べ亀裂中への侵入が小さく、比例係数は降水系地下水の1/10程度となった。

X線 CTによる侵入密度分布の測定



《0～44日後の密度分布》

○モデルの妥当性を評価するために必要となる、亀裂中に侵入したベントナイト密度分布の把握を行った。

熱-水-応力-化学 (THMC) 連成挙動 に関する研究

●目的:

熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響を及ぼし合うニアフィールド連成挙動の時間的／空間的変遷を数値実験に基づき現実的に理解、把握

●実施内容:

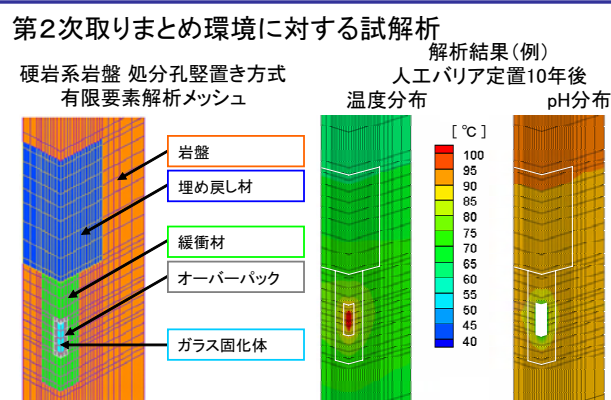
THMC連成モデル／解析コードの
プロトタイプを開発し試解析を実施
室内試験(改良型COUPLE)を実施中



THMC連成挙動の室内試験
(改良型COUPLE)

熱-水-応力-化学 (THMC) 連成挙動に関する研究

連成モデルによる解析結果



- THMC連成モデル／解析コードの
プロトタイプを開発し、
ニアフィールド数値実験の基盤を
整備した。
- 開発コードによる試解析結果と
第2次取りまとめの整合を確認した。

	第2次取りまとめ	プロトタイプコードによる試解析 (THC連成解析)
緩衝材中の最高温度	82℃(THM連成解析)／ 98℃(熱解析)	90℃
緩衝材の再冠水時間	50年以下(THM連成解析)	20年
人工バリア定置1,000年後の 緩衝材間隙水のpH	8.4 (地球化学解析)	8.9

金属のナチュラルアナログ研究 —鉄製遺跡出土物を用いた長期腐食例調査—

●目的:

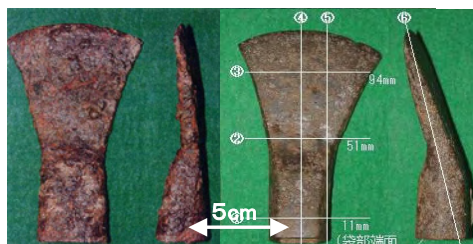
オーバーパック腐食寿命評価方法の信頼性の確認
→特に、数百年から千年程度の長期の金属腐食挙動について、
試料の環境を考慮し実例を評価

●実施内容:

地中に埋没していた考古学的試料等を用いた金属腐食の評価



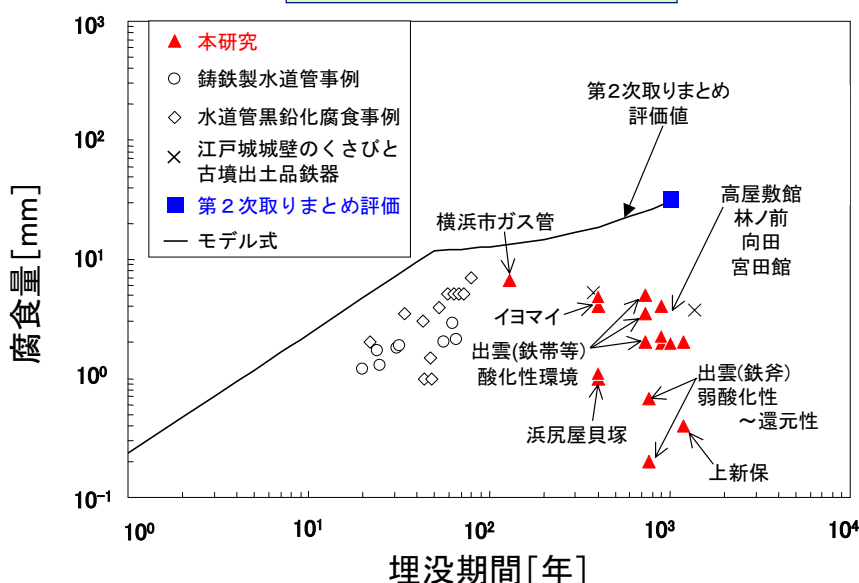
酸化性環境からの出土例
鉄帯(約750年間埋没)



弱酸化性から還元性環境からの
出土例、鉄斧(約750年間埋没)

金属のナチュラルアナログ研究 —鉄製遺跡出土物を用いた長期腐食例調査—

埋没期間と腐食量の関係



○これまでの試料は酸化雰囲気や百年以下の埋没事例が多かったが、
弱酸化性から還元性で、千年程度の試料を入手し、より、現実的な
長期腐食データが得られた。

●目的:

緩衝材(ベントナイト)の変質およびオーバーパック(炭素鋼)の腐食に
顕著な影響を与えないセメント材料の開発

●セメントの概要:

高pHの原因となる水酸化カルシウムの生成を抑制するため、
pHが11以下になるように、普通セメントに多量のシリカフュームと
フライアッシュを混入したセメント

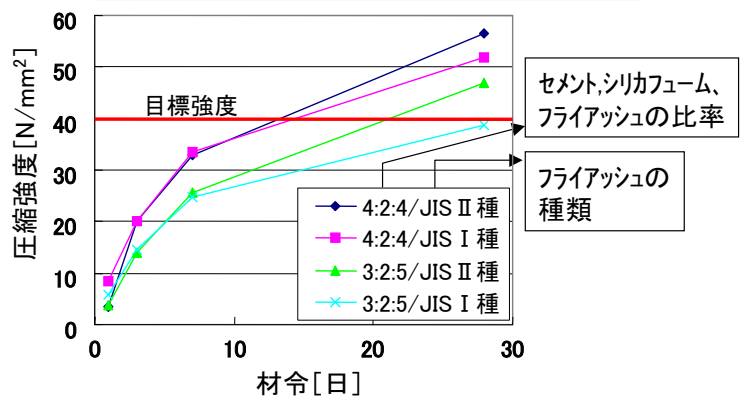
●実施内容:

- ①強度の得られる配合設計
- ②pH低下挙動の把握
- ③鉄筋の腐食耐久性評価
- ④施工性の確認

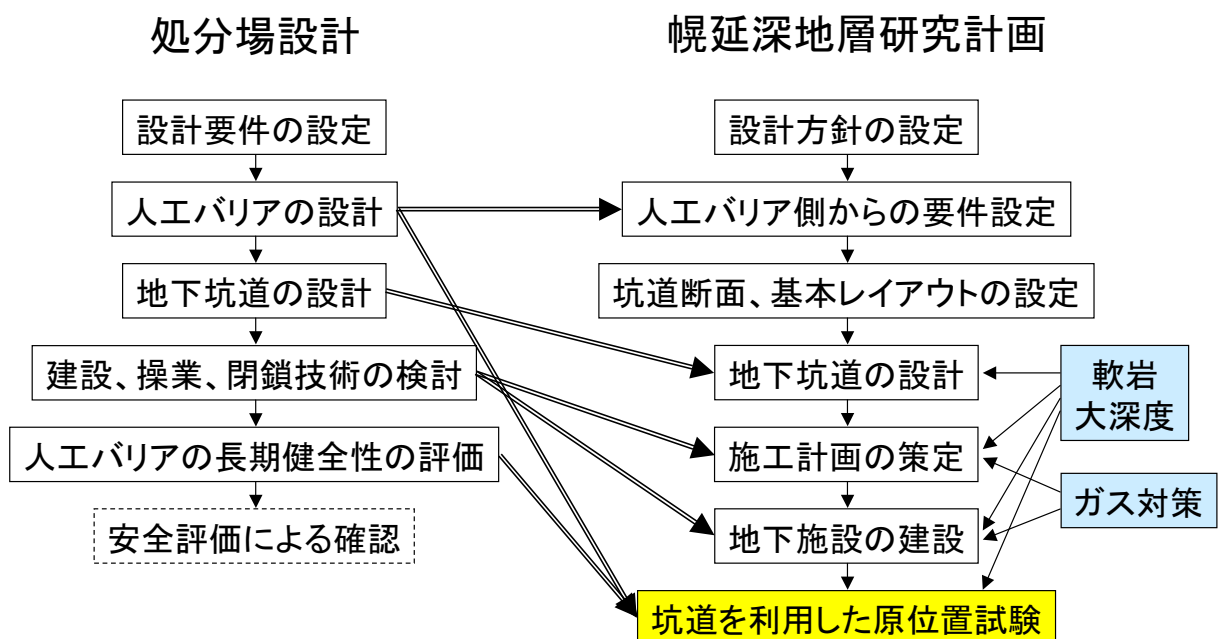
●今後の予定:

幌延の深地層研究施設で
施工性を確認する。

低アルカリ性コンクリートの圧縮強度



処分技術の信頼性向上に係わる 幌延深地層研究計画との連携



処分技術の信頼性向上に係わる 幌延深地層研究計画との連携

連成挙動に関する研究の例

室内試験
(エントリー、クオリティー)

基礎データ
取得

熱物性試験



工学試験
(COUPLE)



モデル構築／数値実験

国際共同研究(DECOVALEX 等)

予測解析

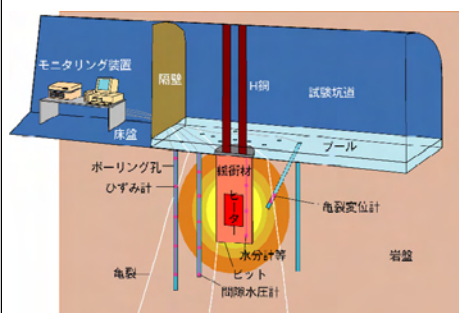


検証データ



深地層の研究施設での試験

原位置人工バリア試験

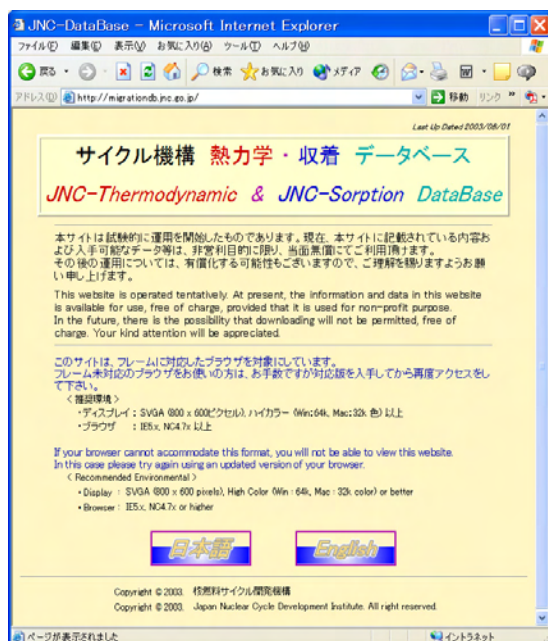


原位置におけるデータ取得
計測技術の適用性確認

JNC 熱力学・収着データベースの開発

● 目的:

JNCが開発した熱力学・収着データベースを国内外に幅広く周知し、
データベースの活用を図ること



平成15年8月1日より、ホームページを
外部公開。アドレスは、
<http://migrationdb.jnc.go.jp/>

熱力学データベースは、地球化学コード
PHREEQE、PHREEQC、EQ3/6および
Geochemists Work Benchで
利用可能なフォーマットで整備。

収着データベースは、
Microsoft Accessで利用可能。

データベースのダウンロードにあたっては、
e-mail address、user ID、氏名および住所を
入力し、ユーザー登録して頂きます。
現在の登録者数は、110名程度。

放射性核種の移行挙動に関する モデル及びデータベースの信頼性確認

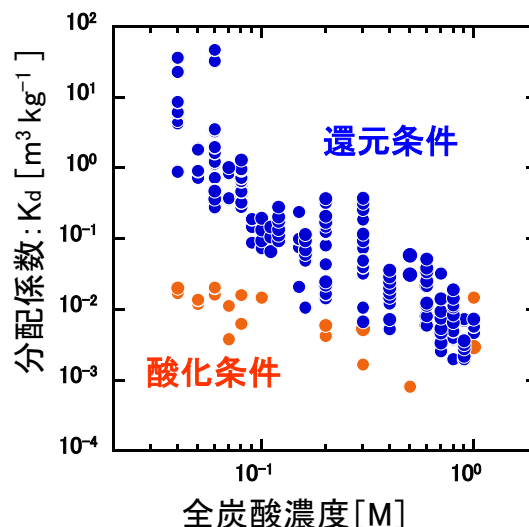
- **目的:** 地層処分放射化学研究施設(QUALITY)等における実験結果に基づき、放射性核種の移行挙動に関するモデル及びデータベースの信頼性を確認するとともに、不足している領域のデータを取得する。

	平成15年度	平成16年度	平成17年度	期待される成果
ガラス固化体の溶解挙動	廃棄物ガラスの鉍化物試験 還元下・海水系でのガラス浸出試験			変質・浸出メカニズム検討 ガラス溶解モデルの信頼性確認
放射性核種の溶解度	還元下での溶解度試験(Np, Se, Pu)			還元下での熱力学データの信頼性確認
ベントナイト・岩石への収着	海水系でのベントナイト収着試験(Cs, Se, Np, Pu) 海水系での堆積岩収着試験(Cs, Se, Np, Pu)			海水系での収着データの拡充 堆積岩への収着データの拡充
ベントナイト・岩石中の拡散	還元下でのベントナイト中拡散試験(Np, Se, Pu) 海水系での堆積岩中拡散試験(Cs)			還元下での拡散データの拡充 海水系での拡散データの拡充
コロイド・有機物の影響評価	フミン酸との錯生成試験(Np) コロイド収着試験(Cs, Np) コロイド・フミン酸共存下でのカラム移行試験			核種との収着・錯生成モデル検討 移行試験でのモデルの信頼性確認

- **反映先:** 成果は、性能評価に用いる計算コード(モデルに基づく)及びデータベース(熱力学・収着・拡散)の作成に反映される。

放射性核種の移行挙動に関する モデル及びデータベースの信頼性確認

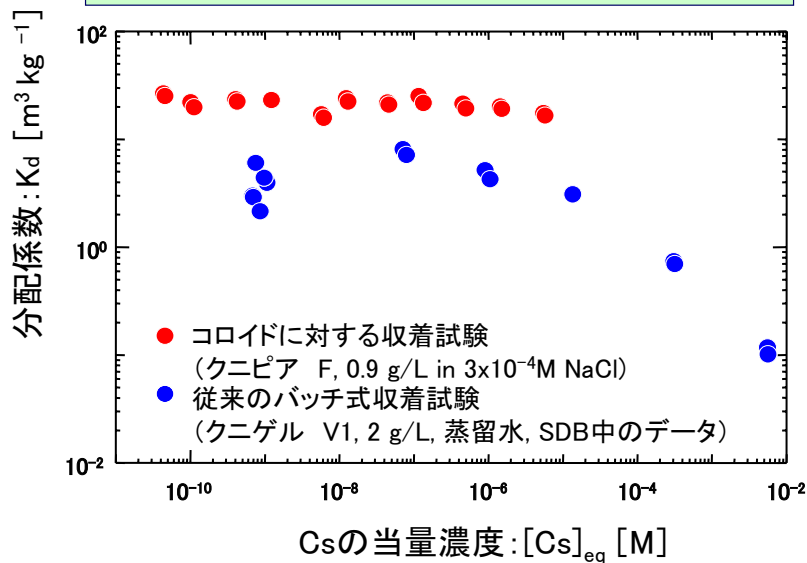
スメクタイトに対するNpの収着挙動
—酸化還元条件、炭酸濃度依存性—



- 還元条件: Npのスメクタイトへの収着は全炭酸濃度と負の相関がある。
Npの収着は溶存化学種に依存する。
- 酸化条件: Npはあまり収着しない。

放射性核種の移行挙動に関する モデル及びデータベースの信頼性確認

ベントナイトに対するCsの収着挙動
－バッチ式収着試験とコロイド収着試験の比較－



○コロイドに対する分配係数は、
バッチ式収着試験による分配係数より大きい。

コロイド等の影響評価モデルの開発

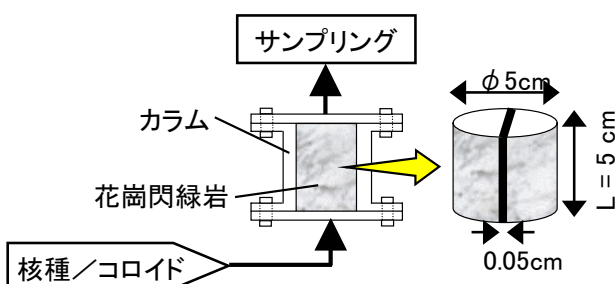
●目的:

コロイド等の影響評価モデルの開発と、安全評価手法としての適用性の検討

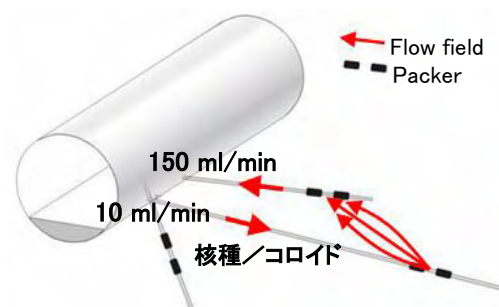
●実施内容:

- ・平行平板状亀裂を加工した岩石カラムを用いた核種とコロイドの移行試験
実施による実験とモデル解析の結果の比較 (左図)
- ・グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種とコロイドの移行試験に関する
モデル解析を通じた実用性の検討 (右図)

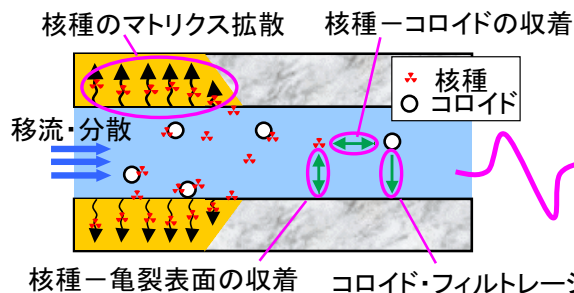
核種とコロイドの
カラム移行試験 (ENTRY内)の概略図



グリムゼル岩盤試験場での亀裂中の
核種とコロイドの移行試験の概略図



コロイドの影響を考慮した核種移行モデルの概念

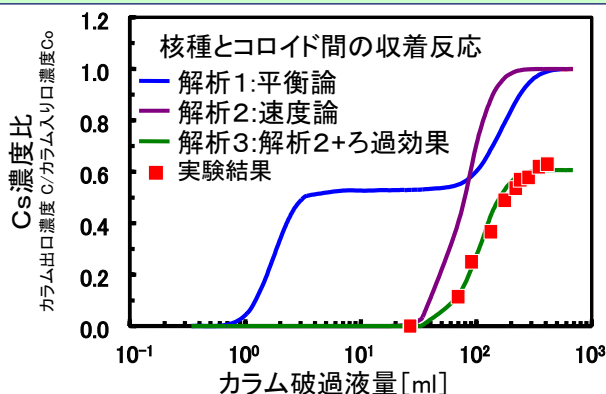


第2次取りまとめ以降のモデル開発点

核種-コロイド間の収着反応 平衡論 / 速度論

核種-亀裂表面間の収着反応 平衡論 / 速度論

カラム試験におけるコロイド共存下でのCs+の移行



○核種移行試験の解析では、核種-コロイドの収脱着の反応速度を考慮することの重要性が認められた。

○亀裂中でコロイドがろ過されることに伴って、コロイドに収着した核種も亀裂内に留まることが示唆される。

亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究

●目的:

堆積性軟岩における透水係数は、原位置試験から得られた値が室内試験から得られた値よりも高く、亀裂が透水性を高めている可能性がある。

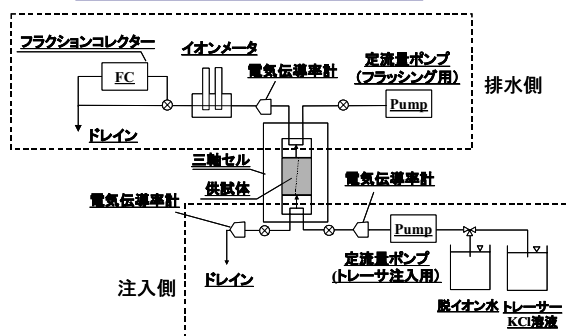
亀裂が透水性に寄与する場合、流速が早くなり、性能評価に影響を与える可能性があることから、室内試験を通してその支配プロセスを同定・評価する。

●実施内容:

- ・基本物性測定
- ・透水試験
(亀裂無し試料、亀裂有り試料)
- ・トレーサ試験(亀裂有り試料)
- ・拡散試験(亀裂無し試料)

室内試験に使用した岩石コア試料は、幌延で掘削した試錐孔から採取した。

トレーサ試験の流れ図



亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究

透水試験結果

試料名	採取深度 (HDB-4)	透水係数 [m/s]	
		亀裂有り	亀裂無し
2-1i	200m付近	5.56E-09	5.49E-12
3-2i	300m付近	1.51E-09	4.88E-12
4-1i	450m付近	1.02E-08	1.63E-12

亀裂有り試料: 定流量透水試験

亀裂無し試料: トランジェントパルス法

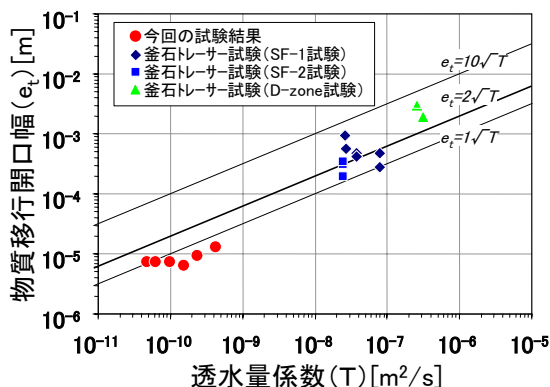
○地下水流れに関しては、堆積岩基質部よりも亀裂が卓越した「水みち」を形成する可能性がある。

●今後の課題

今後、さらに原位置において亀裂の頻度や透水性、連結性を評価し、岩盤全体として見た場合にも亀裂の影響が大きいかを評価する必要がある。

トレーサ試験結果

—透水量係数と物質移行開口幅の関係—



○第2次取りまとめで設定した結晶質岩における物質移行開口幅と透水量係数の関係が、堆積軟岩でも適用可能である。

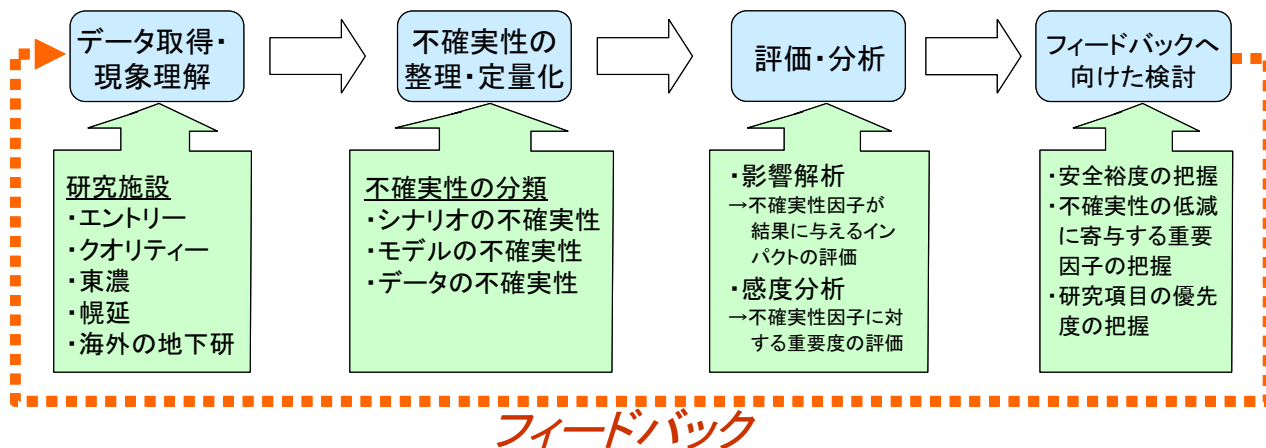
不確実性評価技術

●目的:

データ、モデル、シナリオの不確実性の定量化技術および評価・分析技術を整備すること。

また、データ取得、現象理解へのフィードバックを指向した検討を行うこと。

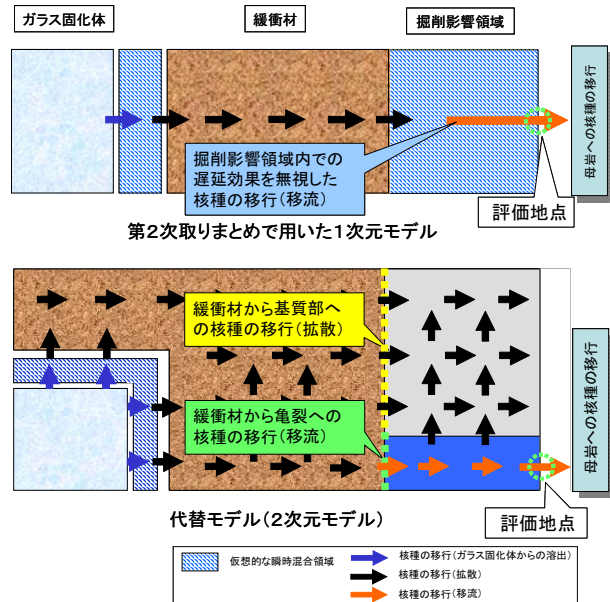
不確実性評価の流れ



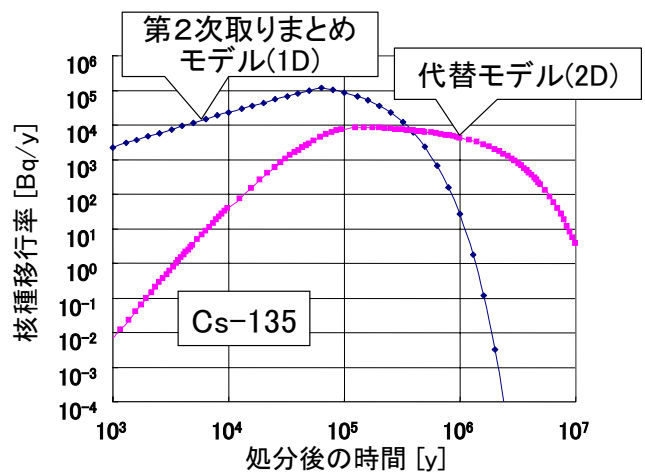
モデル不確実性の検討例：代替モデルの開発

着眼点：保守的かつ簡略的にモデル化した掘削影響領域(EDZ)中の核種移行を、より詳細にモデル化することにより、EDZの遅延効果を推定

概念モデル



EDZからの核種移行率の比較



○EDZ内の基質部の遅延効果により
 ・長半減期：数分の1から1桁程度低減
 ・短半減期：数桁の低減

技術情報統合システム(JGIS)開発

JNC Geological Disposal Technical Information Integration System

●目的:

多様な研究の連携と繰り返しによる信頼性の段階的な向上

技術情報の増大・複雑化

情報マネジメントの必要性

「技術情報統合システム」の開発

① 技術情報の統合

研究の体系的な流れに即した情報の管理

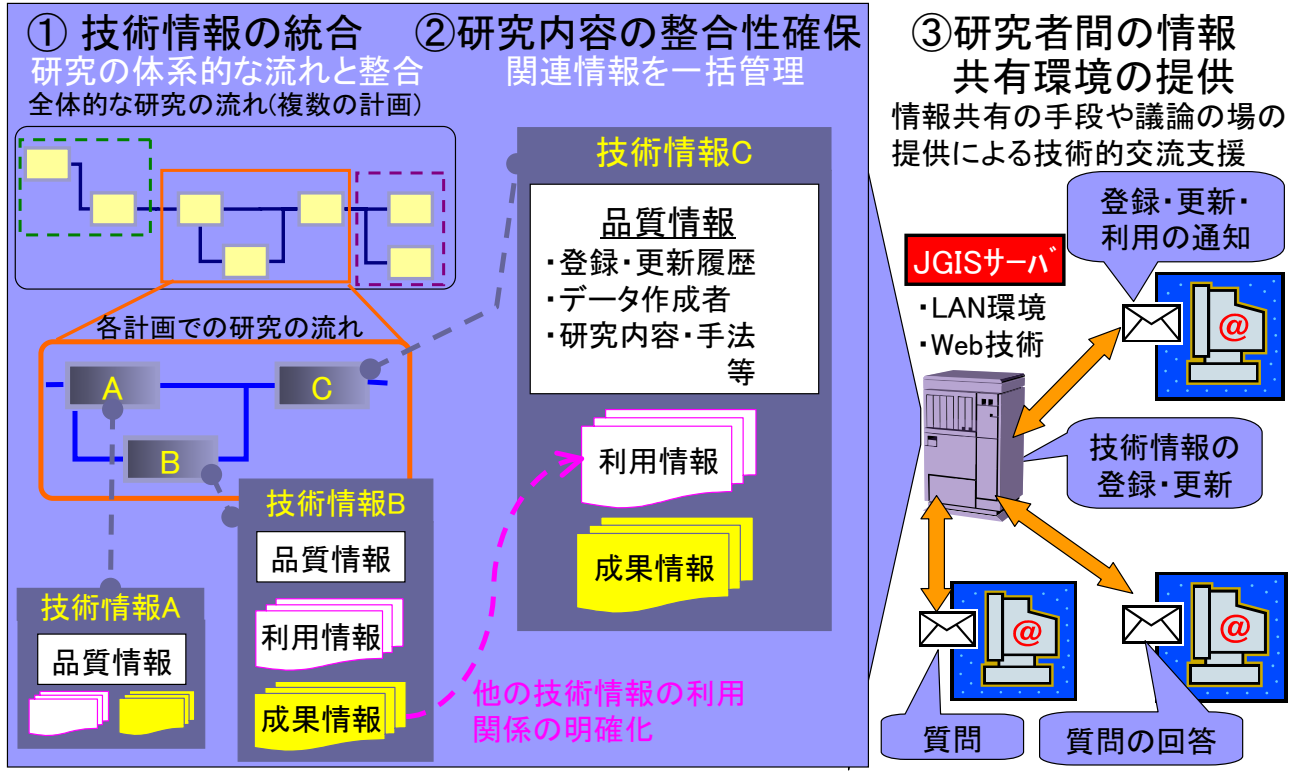
② 研究内容の整合性確保

品質情報の管理、情報登録・更新の管理、情報利用の管理

③ 研究者間の情報共有環境の提供

IT技術(LAN、Web技術)の利用、情報登録・更新・利用の通知、技術的交流支援

システムの主要な機能と使用イメージ



まとめ

1. 処分技術の信頼性向上に関する研究成果

- ・ 実際の地質環境を考慮し、
地下水条件(イオン濃度、pH)を変えたデータの充実
- ・ 経験則からメカニズムに基づくモデル開発
- ・ ナチュラルアナログによる妥当性の確認
- ・ 深地層研究施設計画等と整合した工学技術、設計手法

2. 安全評価手法の高度化に関する研究成果

- ・ 信頼性の高いデータ取得とデータベースの整備
- ・ 実際の地質環境に適用可能／現実に即したモデル開発
- ・ 不確実性の定量化技術の開発
- ・ 分野間の連携を効率的に行う技術情報統合システムの整備