

平成25年度における個別研究開発の現状および今後の予定について

④ 地層処分研究開発

- －処分システムに関する工学技術の信頼性向上－
- －安全評価手法の高度化－

平成25年12月11日
日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門



処分システムに関する工学技術の信頼性向上

- 1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発
- 2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究
- 3)工学技術の信頼性向上



H25年度の研究開発目標

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発

人工バリア等の長期挙動に関する基礎データの拡充、データベースの改良
緩衝材の膨潤特性試験法の標準化に向けたデータの取得

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

人工バリア等の長期挙動評価に関する解析手法の改良(構成則の見直し等)

3)工学技術の信頼性向上

原位置(幌延)における検証データ取得のための計測センサーの開発(pH、腐食速度)
原位置(幌延)での人工バリア等の工学技術の実証(低アルカリ性セメントの施工, 人工バリアの定置技術;RWMCと共研)

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発; 人工バリア等の変質等の長期挙動

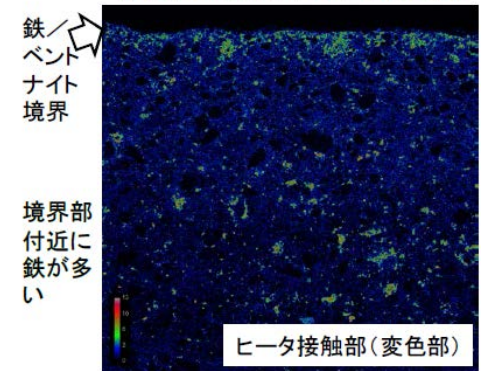
□ 成果(H22~H25)

【鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材の変質等の長期挙動評価】

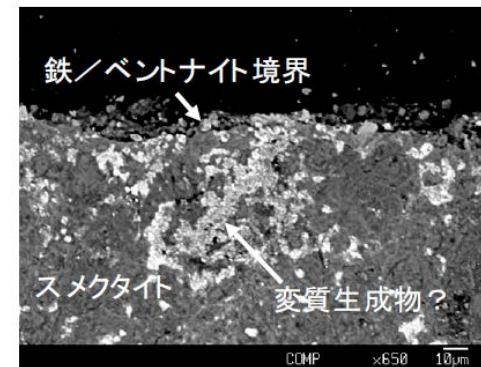
- 鉄-ベントナイト相互作用に伴い、緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトが非膨潤性の鉱物に変化する場合のメカニズムや条件について、既往の知見や室内試験により把握した。【1】
- 鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材の変質影響を評価するため、変質に影響を与えると考えられる主要な要因として、①オーバーパックの腐食反応に伴う Fe^{2+} の供給、②圧縮ベントナイト中での Fe^{2+} の拡散、③スメクタイト結晶端への Fe^{2+} の収着や層間でのイオン交換、④スメクタイトの鉱物学的変化に伴う二次鉱物の生成(非膨潤性鉱物の生成)を考慮した評価モデルを構築した。【3】
- 上記の評価モデルに基づき、変質への影響が大きいと考えられる要因を解析的に検討した結果、④の要因が最も影響が大きいと示唆された。また、④による影響により、鉄-ベントナイトの境界部に二次鉱物が生成し、間隙の閉塞が生じると推察された。【1】
- 上述したような鉄-ベントナイトの境界部における間隙の閉塞に係る現象はSKBとの国際共同研究(ABM: Alternative Buffer Material)を通じて得られたÄspö HRLの原位置(GL-450m)における粘土充填熱負荷試験(130℃, 約1年)の試験後試料に対する分析結果からも示唆され、解析により推定されるような現象が実際に生じている可能性が示唆された。【1】
- なお、評価モデルによる解析結果に基づけば、非膨潤性鉱物の生成は、オーバーパックの近傍に限定され、長期的な影響の範囲は限定的であることが示唆された。【3】



EPMAによる元素マッピング(Fe-Kα)



EPMAによる反射電子像(BEI)観察の結果

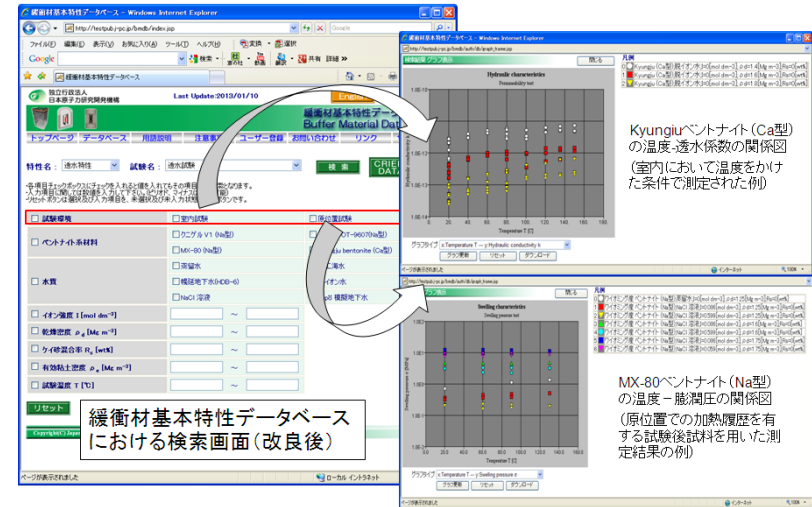


1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発; 人工バリア等の変質等の長期挙動

□ 成果(H22~H25)

【熱影響に伴う緩衝材の基本特性への影響に関するデータの拡充】

- 高温での熱履歴を受けた緩衝材の特性(膨潤性, 透水性)の変化に関わる既往知見・データを拡充するため, 文献調査を行い, 319件のデータを収集した。これらのデータは, 原子力機構が開発した緩衝材基本特性データベースに取り込まれ, データベースが拡充された。【2】



□ 意義/反映先

- 緩衝材の長期安定性評価において, オーバーパックの候補材の1つである炭素鋼(鉄)との相互作用について, 長期的な変質影響を評価するための手法開発に反映。
- 保守的な温度制限($<100^{\circ}\text{C}$)に対し, サイト裕度の拡大等の観点で, 緩衝材の温度制限を検討する場合の基礎的な情報として反映。

□ 課題

- 鉄-ベントナイト相互作用による長期的な変質評価のためのモデルの信頼性向上。
- 鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材の変質が核種移行へ及ぼす影響の検討。

□ 今後の予定

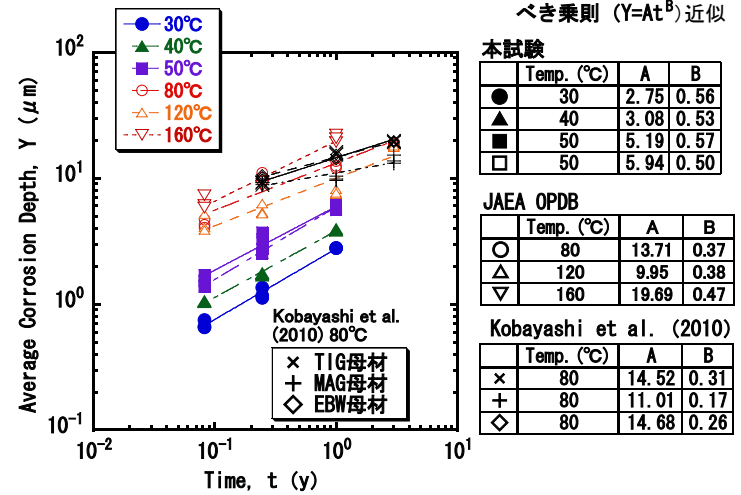
- 評価モデルに必要な現象理解・パラメータ取得に向けた試験、モデルにおいて考慮すべき現象のさらなる検討を行い、モデルの信頼性を向上させる。
- 原位置試験(SKBとの国際共同研究ABM試験)分析結果に基づく現象理解と、モデル解析結果と原位置試験結果との比較によるモデル信頼性の検証。
- 緩衝材の変質を考慮した系で核種移行パラメータ取得試験を実施し、変質影響を定量的に把握する。

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発: オーバーパックおよび緩衝材

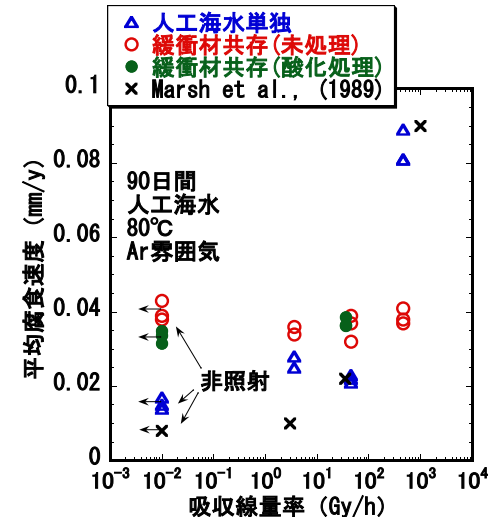
□ 成果(H22~H25) オーバーパック

炭素鋼オーバーパックの長期信頼性向上や具体的な設計のためには炭素鋼の腐食挙動およびそれに及ぼす種々の因子の影響に関する知見の整備が不可欠である。そこで、処分環境における実験データの拡充を進め、以下の知見を得た。

- 炭素鋼の腐食に及ぼす温度の影響に関するデータを拡充し、温度と腐食速度や皮膜の保護性の関係に関する知見を得た。また、既往の寿命評価における腐食速度設定の保守性を確認した。【1】、【3】
- 炭素鋼の腐食に及ぼすγ線照射の影響を実験的に検討し、緩衝材共存下ではγ線による影響が著しく緩和され、数100Gy/h以下では照射による腐食速度への影響はほとんど認められないことを明らかにした。これにより、従来の遮へい厚さ設定を合理化できる可能性が示された。【1】、【3】
- これまで得られたオーバーパックの腐食データをデータベースとして体系的に整備し、公開した。【2】



低酸素濃度下における炭素鋼の腐食速度に及ぼす温度の影響



炭素鋼の腐食速度に及ぼすγ線照射の影響

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発; オーバーパックおよび緩衝材

□ 成果(H22~H25)

緩衝材

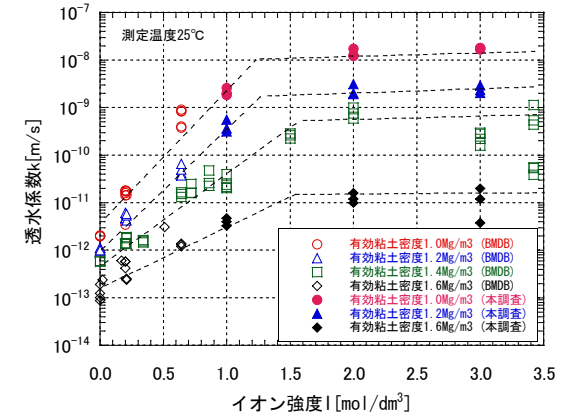
- 地層処分で想定される環境下での緩衝材の候補材料であるベントナイトの基本特性を把握するために、支保工等に使用されるセメントの影響を考慮したCa型化ベントナイトの塩水系地下水環境下での膨潤及び透水特性データを取得・拡充した。

【2】

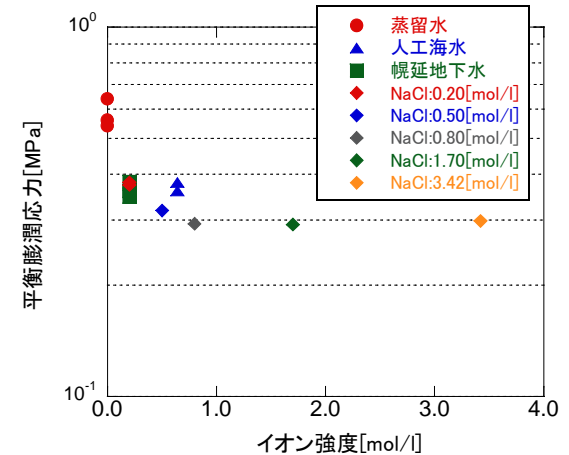
- Na型ベントナイトの膨潤及び透水特性に関しては、浸潤する間隙水のイオン強度が高くなることにより膨潤性は低く透水性は高くなるものの、海水以上のイオン強度の高塩水環境下では一定値に収束することを明らかにした。【1】

- 標準的な方法が定められていないベントナイト系材料の膨潤特性に対する試験方法について、その標準化のための基盤的な情報整備として、寸法効果や摩擦影響に関する物性値を取得し、供試体の寸法や縦横比の違いや、試験セルと供試体の摩擦が膨潤圧に影響することを明らかにした。【3】

- 膨潤圧の寸法効果は、第2次取りまとめのリファレンスとして示された仕様(乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$, ケイ砂混合率30wt%)ではその影響は顕著ではないが、供試体の密度が高い場合に顕著となることを明らかにした。【3】



人工バリア材料の基本特性例
(イオン強度と透水係数)



人工バリア材料の基本特性例
(イオン強度と平衡膨潤圧)

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発: オーバーパックおよび緩衝材

□ 意義/反映先:

- 設計・評価における入力データ・パラメータを整備する(データ取得方法の妥当性、緩衝材の挙動評価OP腐食寿命評価)。【2】、【3】
- 基本特性データの品質を確保する(データ取得方法の透明性・追跡性の確保)。【2】、【3】

□ 課題

- ベントナイトの膨潤圧に及ぼす試験セルと供試体の摩擦を完全に排除することはできないことから、それを考慮した膨潤圧評価のための測定手法の標準化が必要である。【1】、【2】
- 幅広い試験条件で得られた試験データを評価するために現象のメカニズムの解明が必要である。【1】、【3】
- オーバーパックに生じうる個別の腐食現象に関するメカニズムを解明するとともに、複合的な因子が作用する条件や環境条件が過渡状態での腐食挙動を明らかにする必要がある。【1】、【3】

□ 今後の予定

- 膨潤挙動を評価する手法の取り組みとして、摩擦の影響を考慮できる解析による評価を行う。【1】
- 信頼性向上のために試験方法を標準化する(緩衝材の膨潤挙動etc.)。【1】、【2】
- 幅広い環境条件を考慮したデータを拡充する(環境因子・材料因子の影響、種々の因子の複合作用)。【2】、【3】
- 現象のメカニズム解明に資する試験を実施する。【1】、【2】
- 実際の人工バリアにおいて膨潤性能として膨潤圧が発揮されることを幌延URLで実施する人工バリア性能試験で計測される膨潤圧により検証する。【1】
- オーバーパックにおける個別の腐食現象の生起・進展に関するデータ拡充を進めるとともにデータベースを拡充、更新する。また、実験的な現象理解に基づき、腐食メカニズムを明らかにし、モデル化を行う。更に、処分後初期の環境条件が過渡的な状態や影響因子が複雑に作用する状態での腐食挙動を室内試験、幌延URLでの原位置試験により評価する。【1】、【2】、【3】

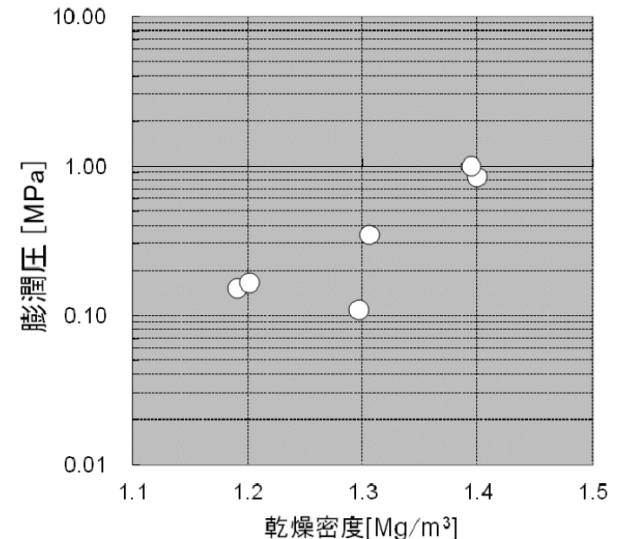
1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発: 埋め戻し材

□ 成果(H22~H25)

- 第2次取りまとめで示した岩盤の掘削ずりを主材とするベントナイトとの混合土を埋め戻し材として使用する基本的考え方に基づき、幌延URLの掘削ずりとベントナイトの混合土を対象とした基本特性(透水性及び膨潤特性データ)を取得した。【2】，【3】
- 幌延URLの掘削ずりである珪質泥岩の間隙率が高く見かけ密度が低いという特性を考慮した上で、処分坑道を対象とした埋め戻し材としての設計の考え方を例示し、転圧締固め及びブロックによる現場での施工性を地上施設において確認した。【3】，【4】
- 幌延の人工バリア性能試験で使用する埋め戻し材を対象とした室内試験を継続し、透水及び膨潤特性データを取得(人工バリア性能確認試験の予測解析のための入力データの整備)【2】

□ 意義/反映先

- 人工バリアに必要な性能を担保する埋め戻し材を設計するための具体的な手法を提示する。【3】
- 処分場の閉鎖に関わる工学技術を整備する。【3】，【4】



乾燥密度と膨潤圧の関係
取得した埋め戻し材の基本特性の例 8

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発; 埋め戻し材

□ 課題

- 幌延での人工バリア性能試験における掘削ずりの特性を考慮した埋め戻し材の基本特性データを整備する。【2】, 【3】
- 地下環境条件(温度, 湿度, 空間的制限)において, 坑道の埋め戻し材の施工方法としての転圧締固め及びブロックによる現場での施工性を実証する。【3】, 【4】

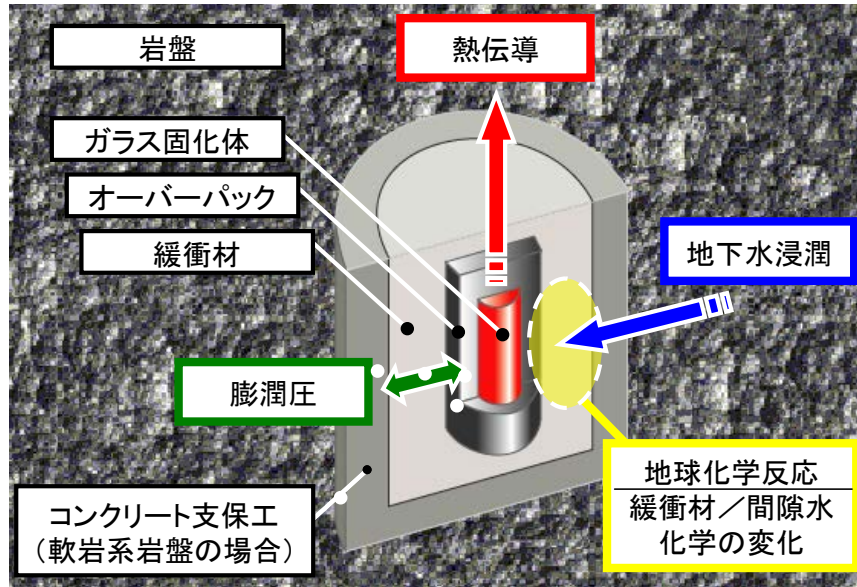
□ 今後の予定

- 幌延の掘削ずりを用いた埋め戻し材の基本特性データを整備する。【2】, 【3】
- 幌延URLで実施する人工バリア性能確認試験では, 第2次取りまとめで示された竖置き方式の人工バリアのレイアウトを考慮した試験を行う。そこでは, 竖置き方式の人工バリアの定置で必要となる坑道部分の埋め戻しを行う。実規模の人工バリアを定置した後, 地上施設で確認した埋め戻し材の転圧締固め及びブロックによる現場での施工性を実証するとともに, 埋め戻し材の透水及び膨潤特性が設計値を満足するかどうかを確認する。【3】, 【4】

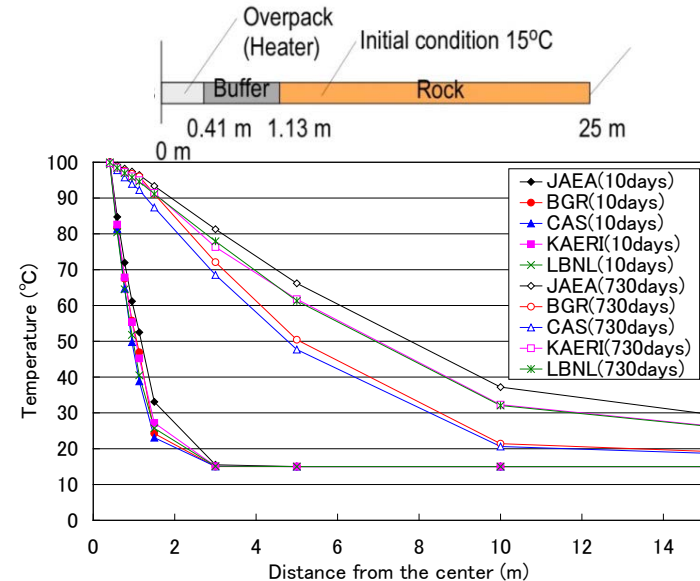
2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力-化学連成(4連成)挙動の解析評価

□ 成果(H22~H25)

- 4連成解析コードの高度化として, 地球化学反応に関して, オーバーパックの腐食等に影響を及ぼす緩衝材中のpHの定量化に必要なベントナイト中の鉱物反応や, 第2次取りまとめで除外されていた間隙水中の塩濃縮を考慮出来るように, 4連成解析コードの改良を行った。【3】
- 解析コードの検証及び適用性の確認については, 連成解析コードの検証・開発を目的とした国際共同研究(DECOVALEX-2015)を活用し, 幌延で計画している人工バリア性能確認試験の長期挙動予測解析を題材とした研究計画を策定するとともに4連成解析コードを用いて同試験の予測解析結果を示した。【3】



人工バリア模式図



人工バリア性能試験の解析結果例
(ヒーターからの距離と温度の関係)
DECOVALEXでの各国の計算結果の比較例

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 熱-水-応力-化学連成(4連成)挙動の解析評価

□ 意義/反映先

- 処分坑道・人工バリアの過渡期(坑道の掘削・閉鎖・地下水の飽和)における4連成挙動評価手法を整備する。【3】
- 核種移行解析のための初期条件を提示する。【3】

□ 課題

- 工学規模の室内試験及び原位置試験との比較による検証を通じた評価手法の妥当性を確認する必要がある。【3】
- 廃棄体の発熱等により想定される高温環境下における間隙水等の相変化(気液二相流)を考慮可能な評価手法への改良を行う。【3】
- 4連成解析手法を適用すべき問題を明確化し, 解析コードの高度化に向けた開発計画(取り込むべきモデルの抽出)を明確にする。【3】

□ 今後の予定

- 工学規模の室内試験及び原位置試験を実施し, 解析結果との比較により評価手法の妥当性を評価する。【3】
- 何を評価すべきかを明確にした上で, モデルの改良を実施する。【3】

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 4連成挙動把握のための計測技術

□ 成果(H22~H25)

- 人工バリア設置初期の緩衝材中で発現する熱-水-応力-化学の連成現象を理解する上で、とくに化学特性の経時変化は、人工バリア設置直後の過渡期におけるオーバーパックの腐食速度や緩衝材の膨潤特性に影響を及ぼすため、人工バリア設計における基礎データとして重要である。緩衝材中のpHの計測に関しては、従来埋め込み式のセンサーを試験後に取り出し、ある時間の計測値として求めていたが、緩衝材中のpHを連続的に計測する手法として、比色法による測定原理に基づきpHに対する感受性を有する指示薬を含浸させた発色剤と光ファイバーを利用したpHセンサーシステムを考案した。【1】
- 幌延の人工バリア性能確認試験での緩衝材中のpHの連続計測に向け、計測の際に必要な検量線を室内試験において取得するとともに広範な地質環境条件に適用できるようpHセンサーシステムの改良を行い、pHの測定が可能となった。【1】
- 人工バリア設置初期など環境条件の変化を伴う場におけるオーバーパックの腐食挙動を評価するためには、上記のような緩衝材中の化学特性とともに、オーバーパック材料の腐食特性を連続的にモニタリングする必要がある。これまで室内試験で行われてきた炭素鋼の腐食電位測定や交流インピーダンス測定などの電気化学的測定を、幌延の人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験に適用するためには、測定系をコンパクト化するとともに耐久性を考慮する必要があった。そこで電気化学計測に必要な電極類を耐熱性の樹脂に埋め込んで一体化したセンサーを考案・試作し、室内試験により計測を実施して適用性の確認を行った。これにより原位置で計測が可能となる見通しが得られた。【1】

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究: 4連成挙動把握のための計測技術

□ 意義/反映先

- 原位置において緩衝材中におけるpHや電位の連続計測が実現可能であることを提示する。
【1】
- 原位置において計測されるデータを用いて, 4連成解析コードの検証が可能になるとともに, 現象理解のためのメカニズムの解釈や, 現象理解を踏まえた解析コードの改良に反映可能となる。【1】, 【3】
- 処分場の操業～閉鎖時における地球化学特性の連続モニタリングへの要求に応えることが可能となる。【3】

□ 課題

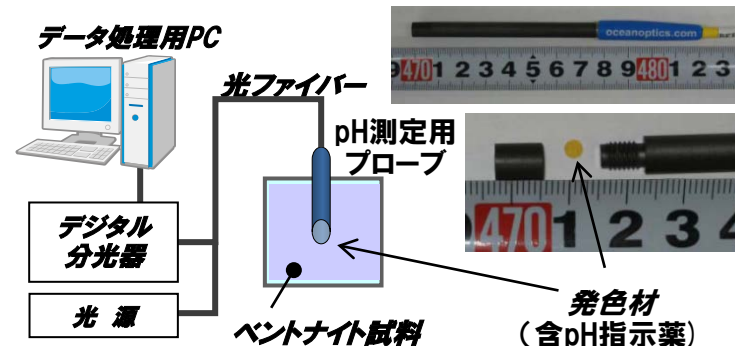
- 原位置試験条件下での適用性(耐久性及び応答性)を確認する必要がある。【1】, 【3】

□ 今後の予定

- 工学規模の室内試験及び原位置試験を通じた計測センサーシステムの適用性の確認。
【1】, 【3】
- 代替計測手法の準備 代替計測手法との比較による精度の確認。



低pH 高pH
pHの差異による発色材の色の違い

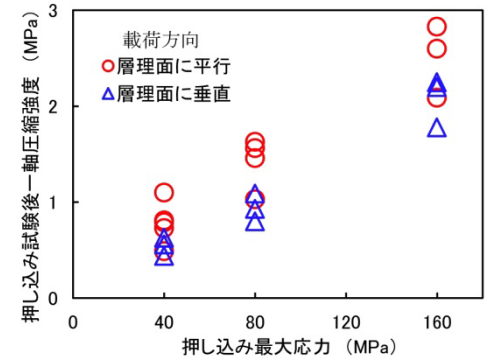
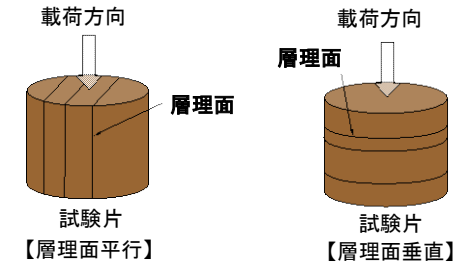


pHセンサーシステム概念図

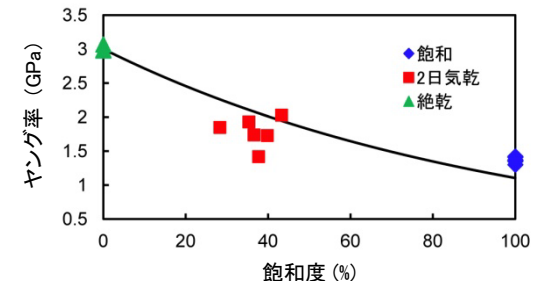
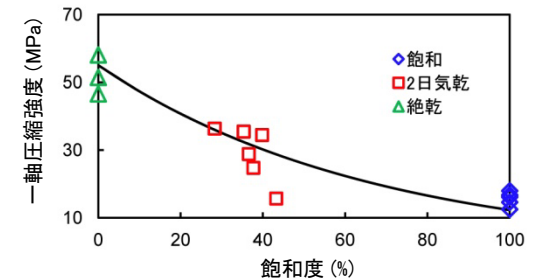
3) 工学技術の信頼性向上: 岩盤長期挙動予測評価技術の精緻化

□ 成果(H22~H25)

- 幌延URLの母岩である珪質泥岩や珪藻質泥岩は、岩盤の力学特性に与える飽和度依存性及び層理面方向依存性の影響が顕著であることが岩石コアを使用した室内試験の結果から明らかになった。このような地質環境条件(飽和度および層理面方向)が岩石の力学特性に与える影響の理解(岩盤長期力学挙動メカニズムの解明)が、幌延の原位置で観測される坑道の挙動評価(支保工応力、変形挙動の解析による再現)において重要であることを指摘した。【1】
- 処分場で考慮すべき岩盤の長期力学的特性に関する現象理解として岩盤長期力学挙動メカニズムの解明を進め、岩盤長期力学挙動評価手法の信頼性向上を図るため、幌延URLで採取した稚内層珪質泥岩を用いて、変形・強度特性、時間依存性、強度回復特性、飽和度依存性、層理依存性に関する室内試験を実施し、各々の特性を定性/定量的に把握するための試験データを蓄積・拡充させた。【1】、【2】
- 原位置においては、幌延URLで施工された実規模の坑道を対象として力学的安定性に関するデータを計測し、岩盤長期力学挙動評価手法の検証データの蓄積を図った。【2】、【3】、【4】



強度回復/層理面依存性に関する試験結果の例



飽和度依存性に関する試験結果の例

3)工学技術の信頼性向上: 岩盤長期挙動予測評価技術の精緻化

□ 意義/反映先

- 岩盤長期力学挙動メカニズムの解明及び岩盤長期力学挙動モデルへの反映を行い、地層処分における岩盤の長期挙動予測評価技術の高度化を図る。【1】, 【3】

□ 課題

- 幌延URLでの原位置試験(テストピット挙動評価試験)及び実規模の坑道での計測(A,B計測)を継続し、評価手法の検証データとする、より長期にわたる原位置での計測データを取得する。【2】, 【4】
- 珪質泥岩に関するこれまでに蓄積された試験結果について強度特性、水理特性など(→各々の特性)の相関を整理・精査し、岩盤の長期力学挙動のメカニズム解明に関わる課題を抽出するとともに、その解決策(研究計画)を立案し着実に遂行する。【1】, 【3】
- 強度回復特性、飽和度依存性、層理面依存性などの影響を反映した岩盤長期力学挙動モデルの開発する。【1】, 【3】

□ 今後の予定

- 強度回復特性、飽和度依存性、層理面依存性などを考慮した長期力学挙動を表現できるように構成方程式を改良し、数値解析コードへ反映させる。【1】, 【3】
- さらに、構成方程式の改良とその信頼性の向上を目的として、変形・強度特性、時間依存性、強度回復特性、飽和度依存性、層理依存性に関する室内試験を実施し、試験データを拡充する。【1】, 【2】
- 幌延URLにおいて評価手法の検証データとする、より長期にわたる原位置計測データ(テストピット挙動評価試験及びA,B計測)を取得する。【2】, 【4】

3) 工学技術の信頼性向上: 坑道を利用した調査評価 低アルカリ性コンクリート材料の実証/低アルカリ性コンクリート材料の開発

□ 成果(H22~ H25)

(1) 坑道支保工への適用性の確認

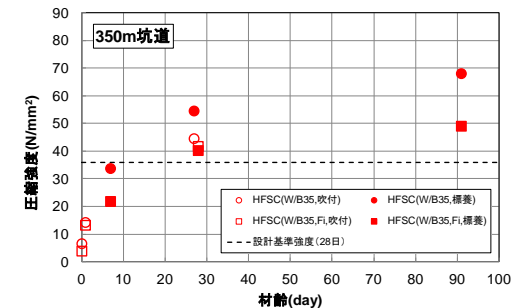
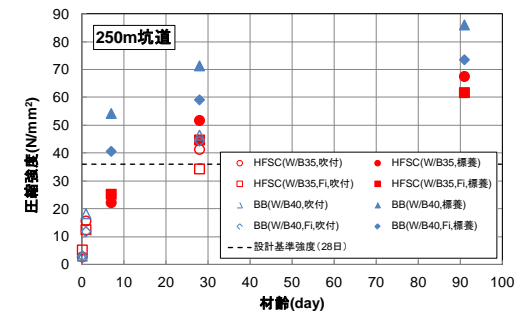
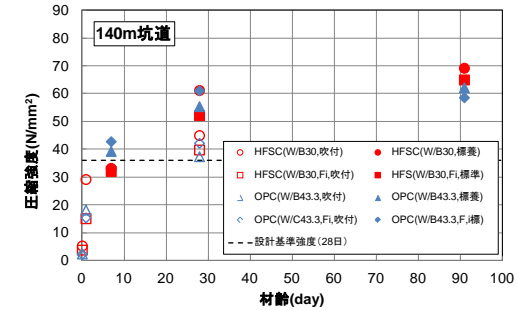
- HFSCの吹付けコンクリート(設計基準強度 $36\text{N}/\text{mm}^2$)としての施工性を確認するための原位置施工試験を実施し、深度250m及び350mの調査坑道において施工実績を示した(施工性の深度影響評価を合わせて提示した)。【4】
- 緩衝材に対する地球化学的な影響を低減するために処分坑道において施工される力学プラグの設計のための配合選定法を提示した。【3】
- HFSCは十分な設計強度を発現できるものの、その強度発現速度はOPCと比較して緩慢であることから、この特性を考慮した処分場の建設工程の考え方を提示した。【2】, 【3】

(2) 低アルカリ性セメント系材料の周辺岩盤への影響評価確認

- 原位置においてHFSC吹付けコンクリートを施工した坑道から岩石コア及び地下水を採取し、周辺岩盤や地下水への影響に関するデータを蓄積した。【1】, 【2】, 【3】

吹付けコンクリート/岩石コアおよび地下水の採取計画

深度	H21	H22	H23	H24	H25	H26	採取予定
140m	施工	○	○		○		H27,H30
250m			施工		○		合計5回
350m					施工		合計5回



強度発現の関係



3)工学技術の信頼性向上: 坑道を利用した調査評価

低アルカリ性コンクリート材料の実証/低アルカリ性コンクリート材料の開発

□ 意義/反映先

- HFSCを使用した処分場の建設における意思決定への反映が可能である。【2】, 【3】, 【4】
 - HFSC吹付けコンクリートの設計、現場施工の実現性を提示する。
 - 低アルカリ性セメントの施工上の制約を考慮した施工方法(吹付け, 場所打ち)を例示する。
 - 周辺岩盤への影響評価が可能な低アルカリ性セメントの化学モデルを構築する。

□ 課題

- 低アルカリ性セメント系材料の周辺岩盤への影響評価の確認【1】, 【2】, 【3】
 - 低アルカリ性セメントは周辺環境への影響が抑制されていることを前提に開発されていることからその地球化学的影響に関する検証データを原位置において取得するためには、より長期間にわたる原位置データ(地下水の水質, コンクリートコアや岩石コアの成分)の取得が不可欠である。
 - 低アルカリ性セメントの化学モデルの原位置打設事例への適用性を検証する。

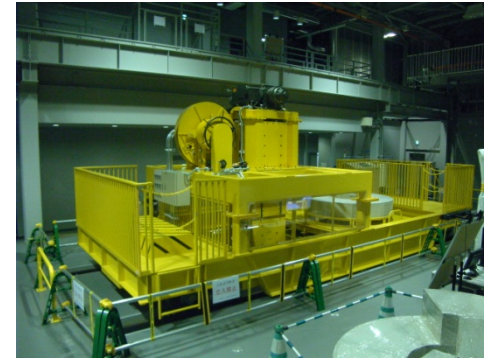
□ 今後の予定

- (1) 低アルカリ性セメントの坑道支保工等への適用性確認【3】, 【4】
 - 東立坑深度374~380mにおいてHFSC場所打ち覆工コンクリートの原位置施工試験を実施する。
 - 試験坑道2,3,4(試験坑道4は, 第2次取りまとめの堆積岩の処分坑道の寸法を再現)においてHFSC吹付けコンクリートを施工する。
 - 人工バリア性能確認試験において力学プラグ(HFSC場所打ちコンクリート)を設計、施工する。
 - 施工性の観点からの制約条件(設計強度に対する強度発現速度)を提示する。
- (2) 低アルカリ性セメントの化学モデルの原位置打設事例への適用性評価【1】, 【2】, 【3】
 - コンクリート支保工周辺環境への影響に関する原位置データを取得・拡充する。
 - 原位置データの低アルカリ性セメント化学モデルによる解析を実施する。

3) 工学技術の信頼性向上: 室内試験/調査結果に基づく評価・解析 地層処分実規模設備整備事業への協力

□ 成果(H22~H25)

- 第2次取りまとめで示された人工バリア(形状及び仕様は実物)を対象として, 緩衝材定置試験設備を設計・製作し, 地上施設において模擬オーバーパックの定置及び真空把持装置を利用した緩衝材ブロックの定置が所定の模擬処分孔に精度良くて位置できることを実証した。【3】, 【4】
- 緩衝材をブロックで施工する際には, ブロック間の隙間が水みちとなることが懸念されるが, アクリル板でブロック間の隙間の挙動を直接目視にて確認できる緩衝材可視化試験装置を用いた室内試験を実施し, 緩衝材の持つ自己修復性, 自己シール性の確認という所期の目的を達成するとともに, 地層処分システムの成立性に対する公衆の理解の一助となった。【1】



緩衝材定置試験設備



緩衝材定置試験状況

□ 意義/反映先

- 現実的な工学技術により実規模の人工バリアの施工が成立することを提示する。【4】
- 可視化試験や実規模での施工性の実証を通じた地層処分事業の着実な遂行が可能な段階にあることへの公衆の理解を推進する。【1】

3)工学技術の信頼性向上: 室内試験/調査結果に基づく評価・解析 地層処分実規模設備整備事業への協力

□ 課題

- 地下環境条件(温度, 湿度, 空間的制限)において, 現実的な施工技術での人工バリアシステムの構築が可能なことを示す。【4】

□ 今後の予定

- 幌延URLで実施する人工バリア性能確認試験では, 第2次取りまとめで示された縦置き方式の人工バリアを対象とした試験を行う。そこで実規模の人工バリアを定置する技術としてこの事業で開発した装置を適用し, 地下環境条件における人工バリアシステムの構築技術を実証する。【4】

H26年度における研究開発成果

1)人工バリア等の基本特性データの拡充及びデータベースの開発

- ナチュラルアナログによる人工バリアの変質に係る長期挙動予測の不確実性低減に資するデータの拡充
- 緩衝材及びオーバーバックの基本特性データに関して、試験環境条件を従来より幅広に設定したデータの取得。これらをデータベースとして整理

2)人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 処分坑道・人工バリアの過渡期(掘削～閉鎖～飽和)におけるTHMC連成挙動評価技術等を開発し、幌延における原位置試験データを活用してその妥当性を評価

3)工学技術の信頼性向上

- 幌延でのテストピット挙動評価試験を実施し、その結果を用いて大久保モデルを確証。
- 稚内層珪質泥岩に関するこれまでに蓄積された試験について飽和度依存性、層理面依存性などの観点から、その内容を精査し、岩盤の長期力学挙動のメカニズム解明に関わる課題を抽出
- 低アルカリ性セメントの原位置での吹付け及び場所打ち施工の実証。低アルカリ性セメントの施工性の観点からの制約条件(設計強度に対する強度発現速度)を提示。低アルカリ性セメントの化学モデルの原位置打設事例への適用性評価



安全評価手法の高度化

- 1) 評価手法の開発
- 2) モデル化技術の開発
- 3) データベース開発

使用済燃料の直接処分を可能とするための研究開発



H25年度の研究開発の実施状況

年度目標

- **深地層の研究施設計画との連携を強化し、地質環境の特徴やその長期的な変動を考慮にした諸現象の最新の知見・理解に基づき、現実的な設計・性能評価手法を整備する。**

1) 評価手法の開発: 天然事象影響評価

□ 成果

- 地質の長期的変動として**隆起・侵食**に着目し、処分場が地表へ接近することを想定した隆起・侵食シナリオについて検討するとともに、わが国の侵食形態(侵食モード)を踏まえた概念モデルを構築
- 上記概念モデルに基づき**安全評価**を実施し、隆起・侵食に関するプロセスと安全機能の関係を定量的に把握

□ 意義／反映先

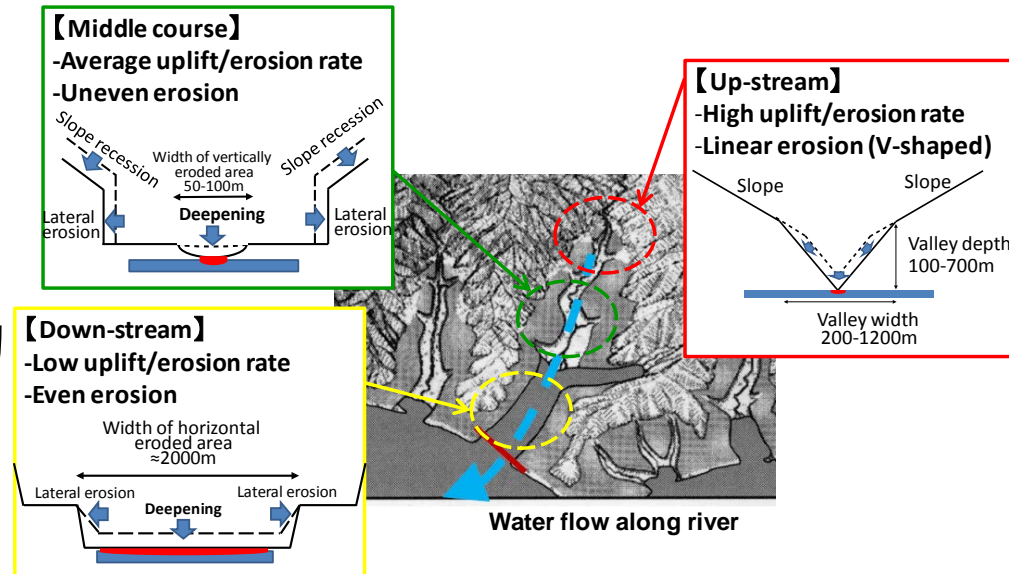
- 実施主体が行う安全評価に利用可能な、隆起・侵食影響評価のモデリング技術に反映

□ 課題

- 地質の長期的変動に関する研究成果の反映と多様な条件に対する適用性確認

□ 今後の予定

- 隆起・侵食の動的平衡状態に加えて、隆起・侵食速度の時間変化や地形の段階的発達モデルを考慮した地表環境の時間変化の検討
- 使用済燃料直接処分を対象として隆起・侵食を考慮した影響評価の検討



各河川領域での侵食モードに関する概念モデル

1) 評価手法の開発: 堆積岩を対象とした原位置トレーサー試験方法の検討

□ 成果

- 原位置トレーサー試験結果の解析より、収着・非収着トレーサーのピーク到達時間が同時で、回収率が大きく異なることを確認 ⇒ サンプル処理方法や試験条件の設定について再検討する必要性あり
- 割れ目内の透水不均質性が原位置トレーサー試験結果の解析に与える影響をシミュレーションより把握し、その影響を考慮した試験孔のレイアウトを提示

□ 意義／反映先

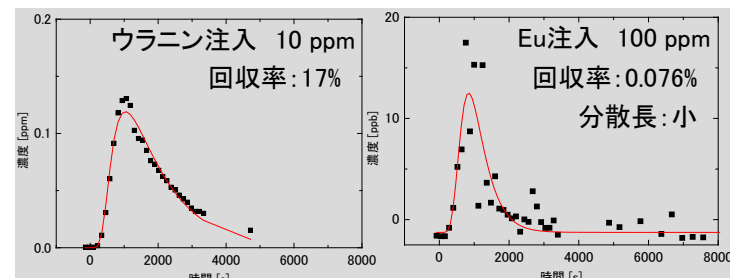
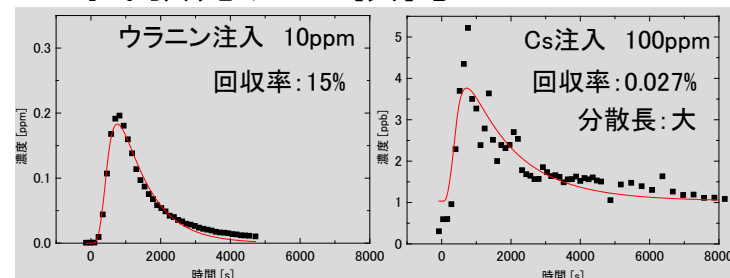
- 堆積岩を対象とした原位置トレーサー試験におけるサンプル処理方法・試験条件に関する問題点の抽出

□ 課題

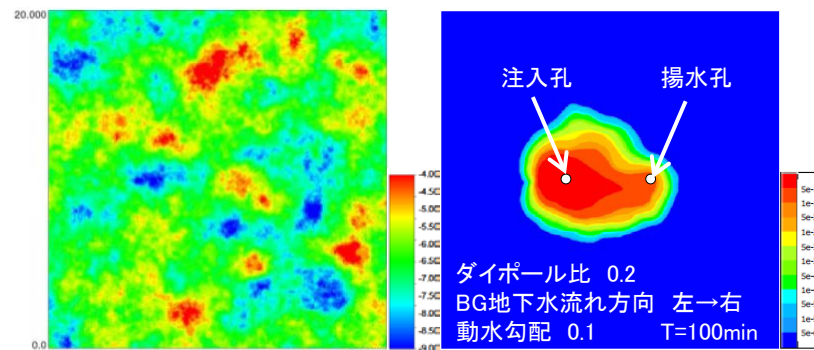
- 幌延の堆積岩を対象とした原位置トレーサー試験におけるサンプル処理方法・試験条件の最適化の例示

□ 今後の予定

- トレーサー試験サンプルの再分析と人工亀裂試料を用いた複数の流速条件下での室内トレーサー試験(公募事業と連携)
- 上記の結果を踏まえた350m 坑道での原位置トレーサー試験の詳細計画策定



逆解析による原位置収着性トレーサー試験結果の解析の1例
ウランと比較して・・・ピーク到達時間: 同じ, 回収率: 1/100 ~ 1/1000程度, 分散長: 元素により異なる



平行平板割れ目モデルに発生させた透水量係数分布(左図)とトレーサー試験シミュレーション結果濃度分布(右図)の1例
(両図とも1辺20mの正方形)

2)モデル化技術の開発： 表層環境を考慮した生物圏モデル構築フローとわが国の特徴を考慮した移行パラメータの整備

□ 成果

- 実際の地表・地質環境の条件及びそれらの長期的変遷と統合的な生物圏評価における地表環境の状態設定に関する既往の検討例に基づく経験・知見の表出化；一部，資源エネルギー庁公募（地質環境長期安定性評価確証技術開発）

□ 意義／反映先

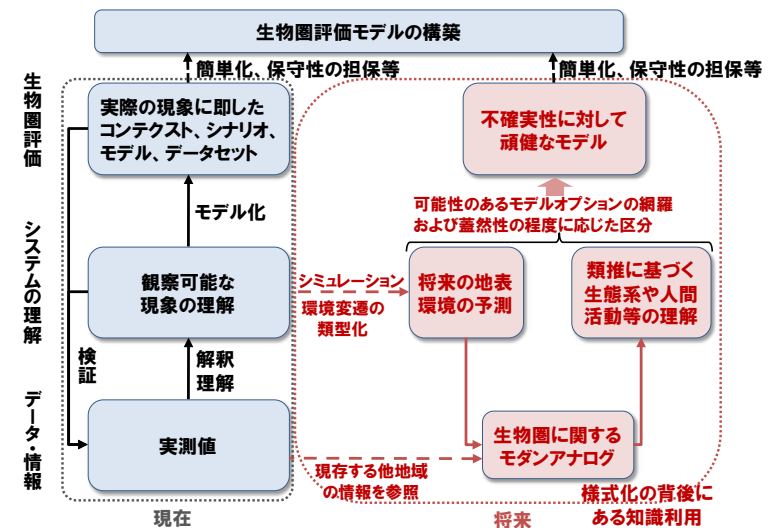
- 実際の地表環境及びそれらの変遷を考慮した生物圏評価モデル構築に必要な経験・知見の表出化・蓄積と生物圏評価モデル構築への活用による評価手法の信頼性向上

□ 課題

- 幌延深地層研究センター近傍の表層環境条件を参考とした生物圏評価モデル構築試行に基づく、モデル構築手順の適用性確認
- 長期変遷を考慮した生物圏評価における様式化の考え方の具体化

□ 今後の予定

- 地下研近傍等の具体的な表層環境を対象とした生物圏評価モデル構築の試行を通じた手順の具体化・手順書の作成・公開
- 地質環境変遷数値モデルの検討成果に基づく生物圏評価モデル構築のための地表環境の状態設定の試行と、それを通じた様式化の考え方の提示



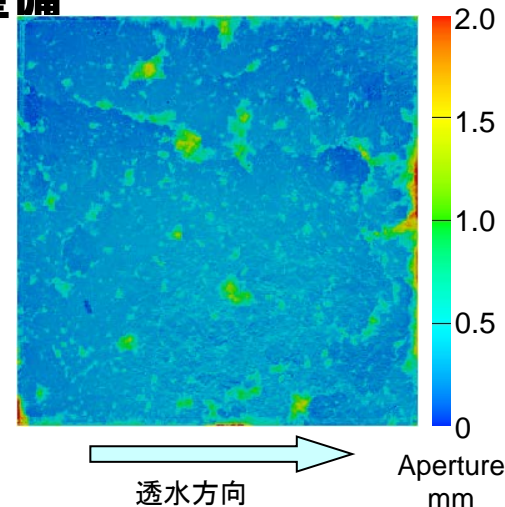
長期の生物圏評価における知識利用の概念

平成24年度までの資源エネルギー庁公募事業の成果（上図）を活用し、生物圏評価モデル構築の際に利用する既往の知識を整理し、様式化の考え方を具体化する

2) モデル化技術の開発：岩盤中の水理・物質移行評価手法の整備

□ 成果

- 開口幅などの亀裂パラメータ値設定の信頼性向上を見据え、亀裂の表面形状や開口幅分布と、地下水流動や物質移行との関係を明らかにするためのデータを蓄積
- 岩石亀裂の透明樹脂によるレプリカ試験体の光学的測定による亀裂表面形状、開口幅分布の定量化手法の高度化
- 上記試験で取得した定量的データに基づく地下水流動数値解析モデルによる検討から、亀裂表面形状が接触面積率や流動経路の形成に大きく寄与し、その結果、亀裂内の地下水流動に大きな影響を及ぼすことを確認



レプリカ試験体の光学的測定による開口幅分布の定量化結果の例

□ 意義／反映先

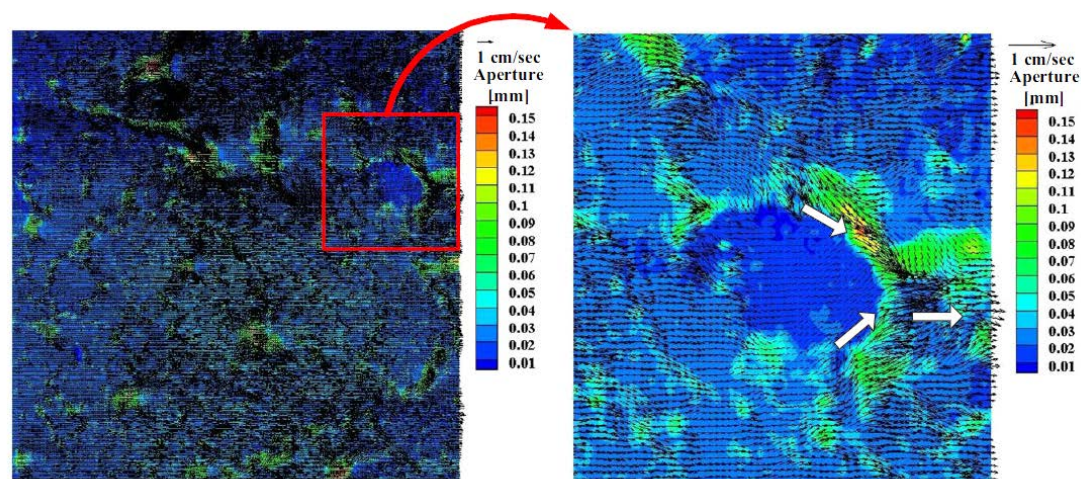
- 物質移行を評価する性能評価モデル（平行平板モデル）に対する開口幅設定の信頼性向上

□ 課題

- わが国の地下環境の亀裂データの取得

□ 今後の予定

- 地下研を活用し、透水に寄与する亀裂表面形状データの取得・評価に基づいて、具体的な地質環境(岩盤)の性状に応じた亀裂パラメータ設定手法を検討



レプリカ試験体で計測した亀裂表面形状と開口幅の不均質な分布を考慮した流体流動モデルを用いた検討例

H25年度の研究開発の成果とその重要性

2) モデル化技術の開発；コロイド、有機物、微生物の影響評価モデルの開発

● 成果

- 電中研との共研によるアクチナイドに対する三元系(核種-ベントナイトコロイド-花崗岩)収着試験の実施。電中研におけるAm (III) 試験の着手、JAEAにおけるNp (IV)・Np (V) 試験の先行着手。試験期間中のコロイド粒径とKdの変化を把握
- 開発した微生物影響評価手法を性能評価の観点から整理し、幌延原位置トレーサ試験を対象とした微生物影響の研究方針を作成中

● 意義／反映先

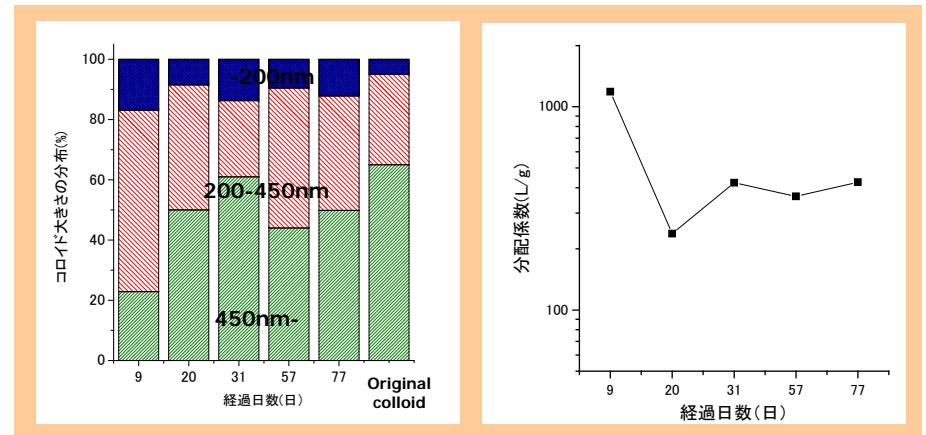
- 概要調査段階におけるコロイド、有機物、微生物に対する評価手法の提示

● 課題

- コロイド三元系収着モデルの確立、天然無機コロイド評価手法の開発
- 地下水有機物の錯形成データの拡充
- 微生物影響評価手法の高度化、バイオフィルムの収着・拡散係数データの拡充

● 今後の予定

- 幌延における原位置トレーサ試験と連携したコロイド、有機物、微生物の調査およびそれらを対象とした室内試験の実施



各粒径のコロイドに対するAm収着割合の経時変化(左)
Amのベントナイトコロイドに対する分配係数(右)

3) データベース開発：収着・拡散データベースの開発

● 成果

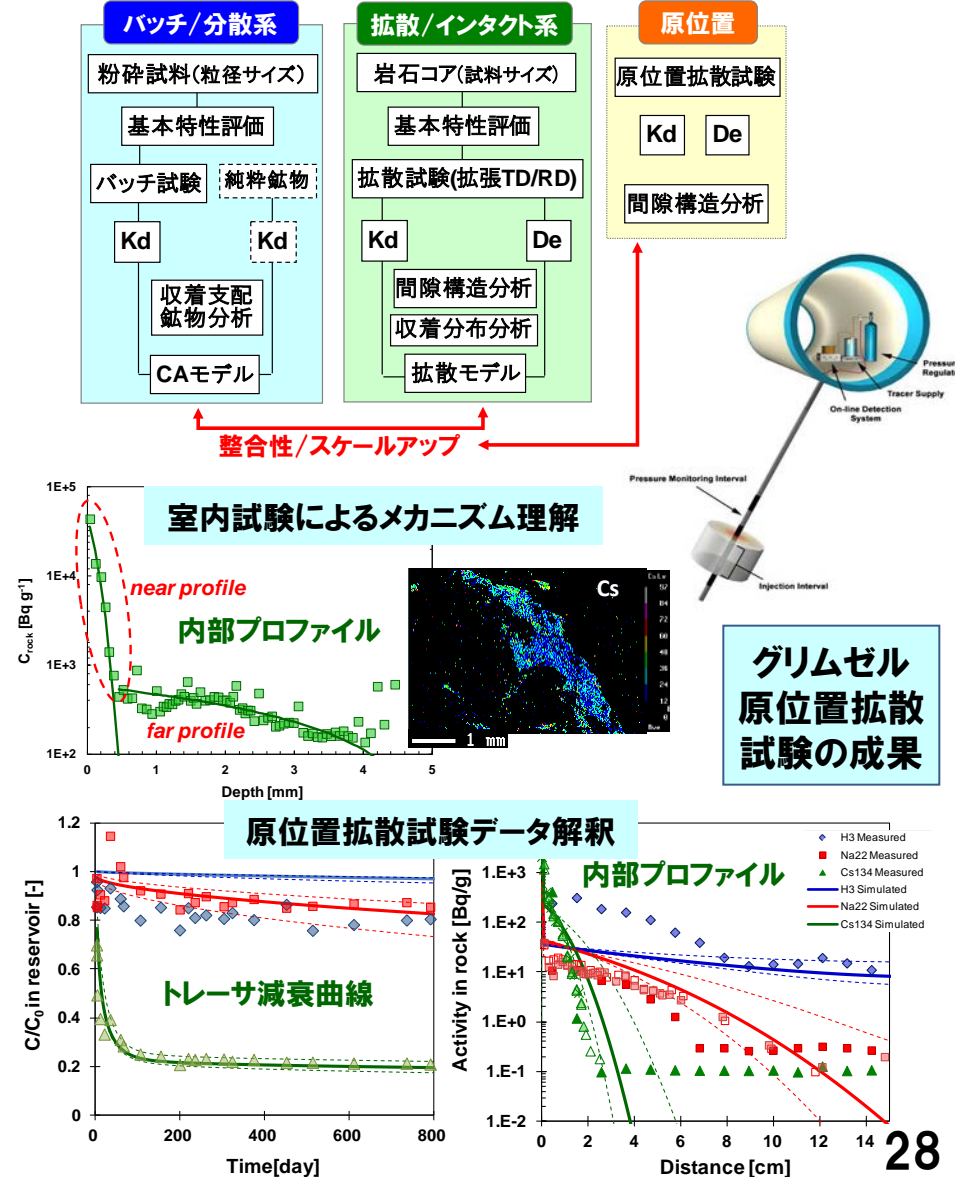
- グリムゼル花崗岩の原位置拡散試験の継続，室内データに基づく原位置パラメータ評価手法の提示
- 幌延の原位置トレーサー試験と連携した，割れ目系を含む室内データ取得手法，パラメータ評価を含む原位置試験評価手法の開発に本格的に着手
- 緩衝材収着・拡散モデルの高度化，幌延を対象としたパラメータ設定手法の改良と適用事例の提示
- これまでに構築してきた最新の方法論に基づく核種移行パラメータ設定手法の提示，土壌中Cs収脱着評価と福島環境動態解析への反映

● 意義／反映先

- 原位置確認やモデル高度化等を反映した核種移行モデル/パラメータ評価の方法論を構築：直接処分評価，処分事業(NUMO共同研究)，福島関連評価(オフ/オンサイト)等へ反映

● 課題／今後の予定

- 地下研での原位置トレーサー試験との連携した原位置確認，多様な環境条件やシナリオへの対応，先端的な分析・計算科学アプローチとの連携



グリムゼル
原位置拡散
試験の成果



H25年度の研究開発の成果とその重要性

使用済燃料の直接処分を可能とするための研究開発

使用済燃料（スウェーデンの例）

□ 成果

- 原子力委員会の見解(H24年12月)等を踏まえ、原子力政策等の見直しに柔軟に対応できるように、使用済燃料の直接処分を可能とするための技術開発についての全体計画の策定と着手

□ 意義／反映先

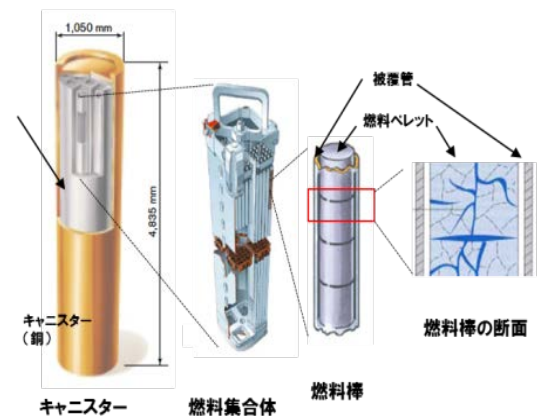
- 制度整備を見据え、国のリーダーシップによる基盤研究開発での実施
- 研究開発成果は、新たな原子力政策の策定や核燃料サイクルのシナリオの選択への柔軟な対応に反映

□ 課題

- 安全評価研究(文部科学省の運営費交付金)
- 処分施設の設計技術等の開発(エネ庁公募事業)

□ 今後の予定

- 実現可能性と課題を第1次取りまとめとして提示(H25年度末目処)
- 技術的信頼性について、第2次取りまとめのレビュー版(H27年度末目処)と最終版(H29年度末目処)を提示



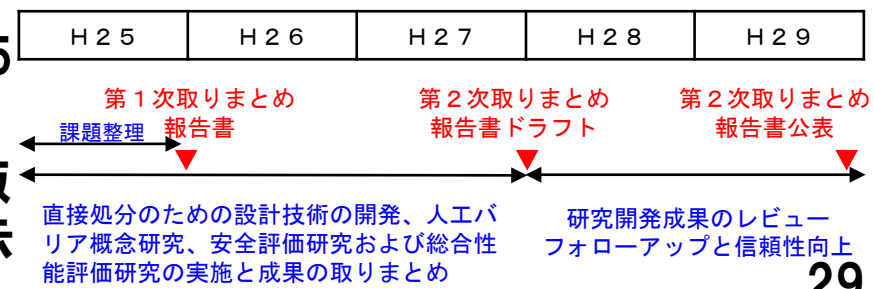
使用済燃料の特徴(ガラス固化体に対して)

- ・ウラン/プルトニウムが多量に存在
- ・燃料棒内の固相、ガス相に核種が存在
- ・発熱量が大きい
- ・放射線量が大きい
- ・臨界可能性がある 等



日本の地下水を対象とした溶解現象や放射線影響等、ガラス固化体と異なる使用済燃料特有の研究開発が必要

【H25年度-H29年度：5年間の全体計画】





H26年度における研究開発成果

安全評価手法の高度化

- 1) **評価手法の開発**；様々な天然事象に対する評価のための概念モデルの構築および影響評価手法の例示
 - 様々な天然事象について、影響を把握するためのシナリオと適用すべき概念モデルの整備、発生の可能性や時間区分の考え方について検討を進めることによる影響評価手法の例示
- 1) **評価手法の開発**；堆積岩を対象とした物質移動特性の評価手法の構築
 - 原位置トレーサー試験におけるサンプル処理方法・試験条件の最適化の例示
- 2) **モデル化技術の開発**；表層環境を考慮した生物圏モデル構築フローとわが国の特徴を考慮した移行パラメータの整備
 - 実施主体が行う概要調査や精密調査などのそれぞれの段階で得られるデータに基づく、処分場閉鎖後の安全性を評価指標(人間が受ける放射線影響)によって示すための評価手法の提示
- 2) **モデル化技術の開発**；岩盤中の水理・物質移行評価手法の整備
 - 亀裂を対象とした水理・物質移行モデルに用いる亀裂開口幅等のパラメータ値を各調査段階の取得データに応じて設定する方法の整理と数値解析コードの評価・検証に必要な室内試験データの整備
- 2) **モデル化技術の開発**；コロイド、有機物、微生物の影響評価モデルの開発
 - 有機物、微生物の影響評価モデル開発としては、幌延原位置の地下水有機物を対象とした影響評価手法と核種移行へのバイオフィルム影響評価手法のプロトタイプの提示
- 3) **データベース開発**；収着・拡散データベースの開発
 - 緩衝材及び岩石を対象に、モデル高度化や原位置確認等の最新成果の統合による、多様な核種と環境条件に適用可能な収着・拡散パラメータ/不確実性の設定評価手法の提示

使用済燃料の直接処分を可能とするための研究開発

- 使用済燃料の直接処分に関する安全評価研究と処分施設の設計技術等の開発の成果に基づき策定した実現可能性と課題を示す第1次取りまとめを踏まえ、技術的信頼性を提示するための技術の開発・整備