



# **地層処分技術に関する研究開発報告会 -第2次取りまとめ以降の研究開発の進展と今後の展開-**

## **処分システムに関する工学・安全評価技術開発**

**平成27年7月14日**

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所  
環境技術開発センター 基盤技術研究開発部 部長  
亀井 玄人**

- **地層処分研究開発(工学・安全評価技術)の役割**
- **第2次取りまとめ以降の成果**
  - 工学技術**
    - 成果事例**
  - 安全評価技術**
    - 成果事例**
  - TRU廃棄物処分に固有の課題**
    - 成果事例**
- **まとめ**
  - 地層処分の技術基盤の整備状況**
  - 今後の課題**

# 地層処分研究開発の役割

## 処分事業

事業者の技術開発  
(経済性、効率性向上等)

## 安全規制

規制支援研究  
(安全基盤の確保)

技術継承・移転

## 地層処分の技術基盤

地層処分研究開発

深地層の科学的研究

### 処分システムに関する

**工学技術**：人工バリアや処分施設を合理的に設計、施工するための基盤技術  
**安全評価技術**：地層処分システムの安全性を評価するための基盤技術

### 知識ベースの構築(KMS)

- 次世代型サイト特性調査情報統合システム
- 処分概念データベース
- 性能評価統合レポート(e-PAR)など

国民・関係者のみなさまの  
信頼感の醸成  
(人材育成にも活用)



データベースは以下から直接アクセスできます

<p><b>熱力学・収着・拡散データベース</b></p> <p>地層処分の安全評価のためのデータベースです。</p>	<p><b>緩衝材基本特性データベース</b></p> <p>緩衝材や処分場の設計と人工バリアの長期挙動評価のためのデータベースです。</p>
<p><b>グラウトデータベース</b></p> <p>地下坑道掘削時における湧水抑制のためのグラウト技術のデータベースです。</p>	<p><b>ガラスの溶解に関するデータベース</b></p> <p>ガラスの溶解挙動に関する公開情報を集約したデータベースです。</p>
<p><b>オーバーバックデータベース</b></p> <p>オーバーバックの腐食試験や溶接試験に関するデータベースです。</p>	

## 人工バリアや処分施設を合理的に設計、施工するための基盤技術

### 人工バリアの基本特性データベース開発/長期挙動評価

- オーバーパック、緩衝材の基本特性データベースを拡充
- オーバーパック材長期腐食評価の妥当性確認：  
炭素鋼の10年にわたる腐食試験・考古学的鉄製品(ナチュラルアナログ)の活用

### ニアフィールドの長期複合挙動に関する研究

- 処分坑道埋め戻し後の過渡的現象を評価する熱-水-応力-化学連成解析コードを開発
- 地下環境でのオーバーパック腐食試験および人工バリア性能確認試験着手
- 連続計測センサーを開発
- 鉄-ベントナイト相互作用による緩衝材機能への影響評価
- 断層の人工バリア直撃影響評価技術の開発

### 工学技術の信頼性向上/新材料開発

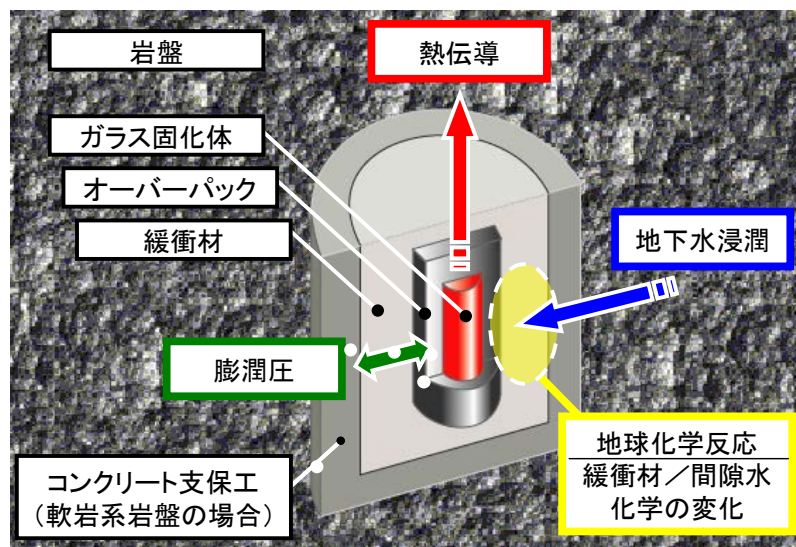
- 坑道の設計技術：地質環境評価データと坑道の力学的安定性データより、坑道の長期挙動予測手法の適用性を確認
- 新材料開発/適用性確認：低アルカリ性セメントの施工性確認、変質モデル開発、低アルカリグラウト材の開発

## ニアフィールドの長期複合挙動に関する研究： 熱-水-応力-化学連成挙動解析評価

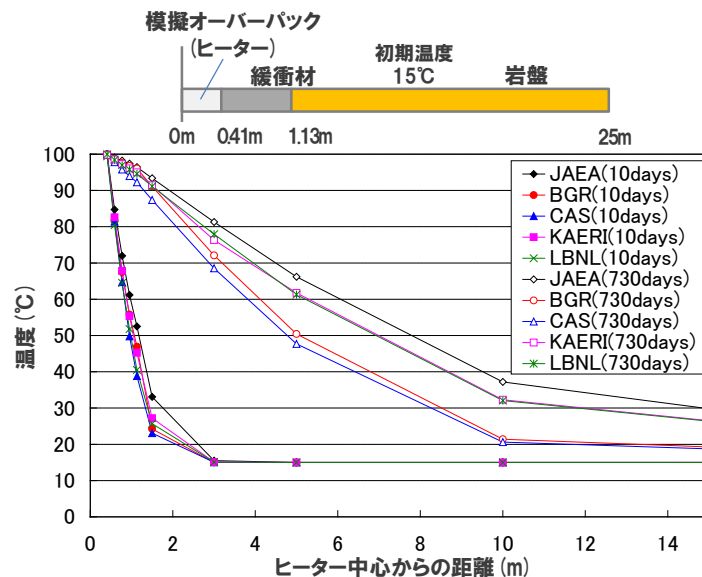
➤ ベントナイト中の鉱物反応や間隙水中の塩濃縮も考慮できる4連成解析コードの開発



➤ オーバーパックの腐食条件や核種移行解析のための初期条件の設定に活用



人工バリア模式図



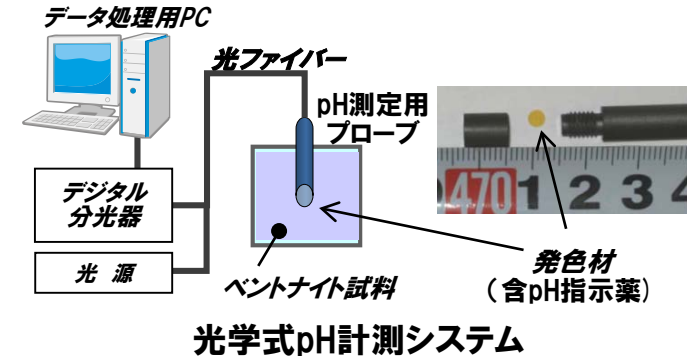
人工バリア性能試験の解析結果例  
(ヒーターからの距離と温度の関係)

DECOVALEX-2015での各国の計算結果の比較例

## 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

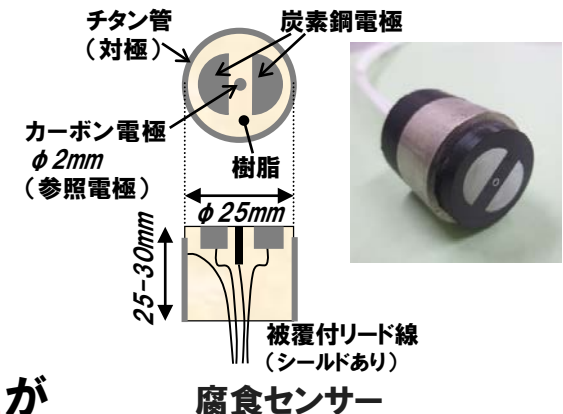
- 緩衝材中のpH計測技術: 発色剤と光ファイバーを利用した光学式pH計測システムを開発し、地下環境での人工バリア試験に適用



- 人工バリア設置初期など、過渡的環境条件でのオーバーパックの腐食挙動を評価するセンサーを開発



- 地下環境での計測データにより、4連成解析コードの検証が可能。メカニズムの解釈、現象理解を解析コードの改良に反映
- 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



炭素鋼の腐食電位や交流インピーダンスなどの電気化学測定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

## 地層処分システムの安全性を評価するための基盤技術

### システム性能評価手法の開発

- 隆起・侵食による処分場の地表接近: 河川侵食影響評価概念モデル構築
- 多様な前提条件が地層処分システムに与える影響についての評価技術の整備  
✓ 異なる条件下でのインベントリ解析や核種移行解析を実施する支援ツールの整備 等
- 表層環境や日本の特徴を考慮した生活圏モデル構築・移行パラメータの整備

### 放射性核種移行の現象理解とデータベース開発

- 核種移行データベース(熱力学、収着・拡散、ガラス溶解)の拡充
- 最新知見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
- 核種移行に対する有機物・微生物・コロイド等の影響評価モデルの改良

## システム性能評価に係る手法の開発:

多様な前提条件が地層処分システムに与える影響についての評価技術の整備

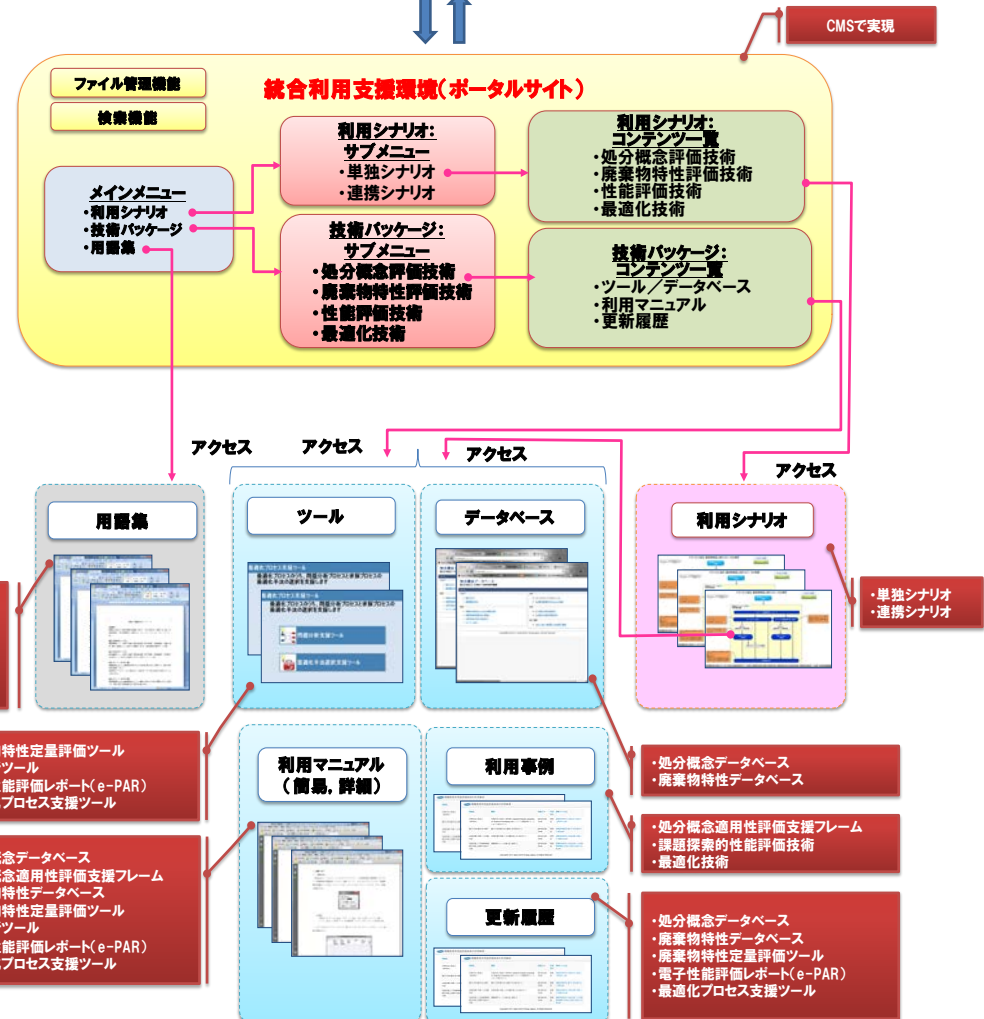
●条件(廃棄体インベントリや処分概念オプション等)の多様性に関するデータベースの構築

●電子性能評価レポート(e-PAR); 多様な条件下でのインベントリ解析や核種移行解析を実施可能とする支援ツールの整備

●これらを有効利用する環境、利用マニュアル及び利用シナリオ等の整備



経済産業省資源エネルギー庁 研究開発事業 地層処分技術  
受託「先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発」成果

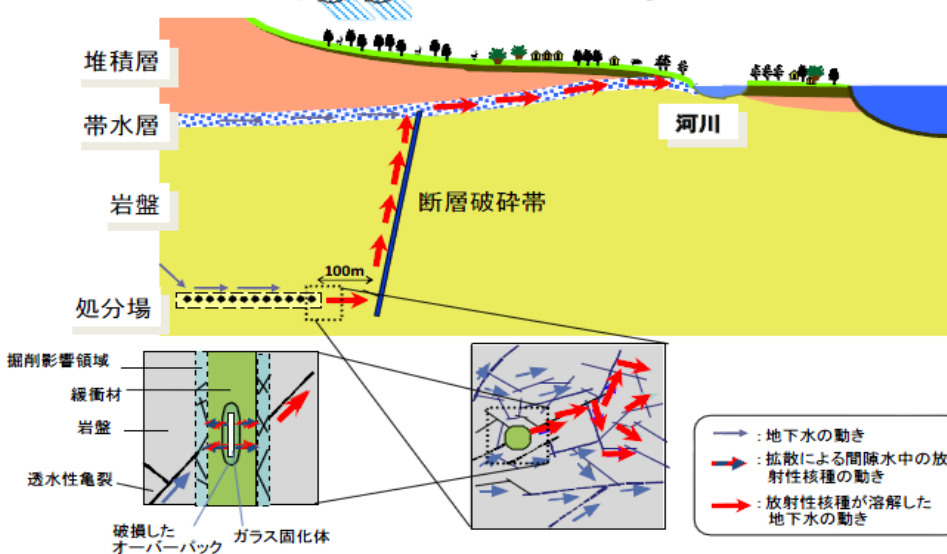




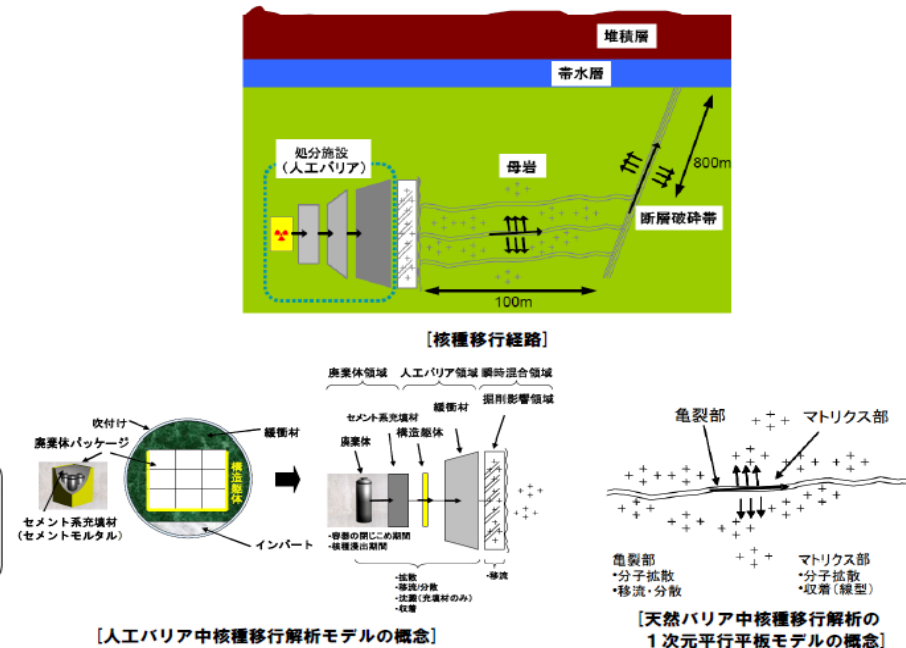
## 「電子性能評価レポート（e-PAR）」の整備 e-PAR : Electronic Performance Analysis Report

- さまざまな条件を変化させて実施する核種移行解析作業を支援
- 解析コードの専門家でなくても利用可能
- 人材育成の教材、技術継承ツールとしての利用可能性 等

### 高レベル放射性廃棄物地層処分 第2次取りまとめの基本ケース

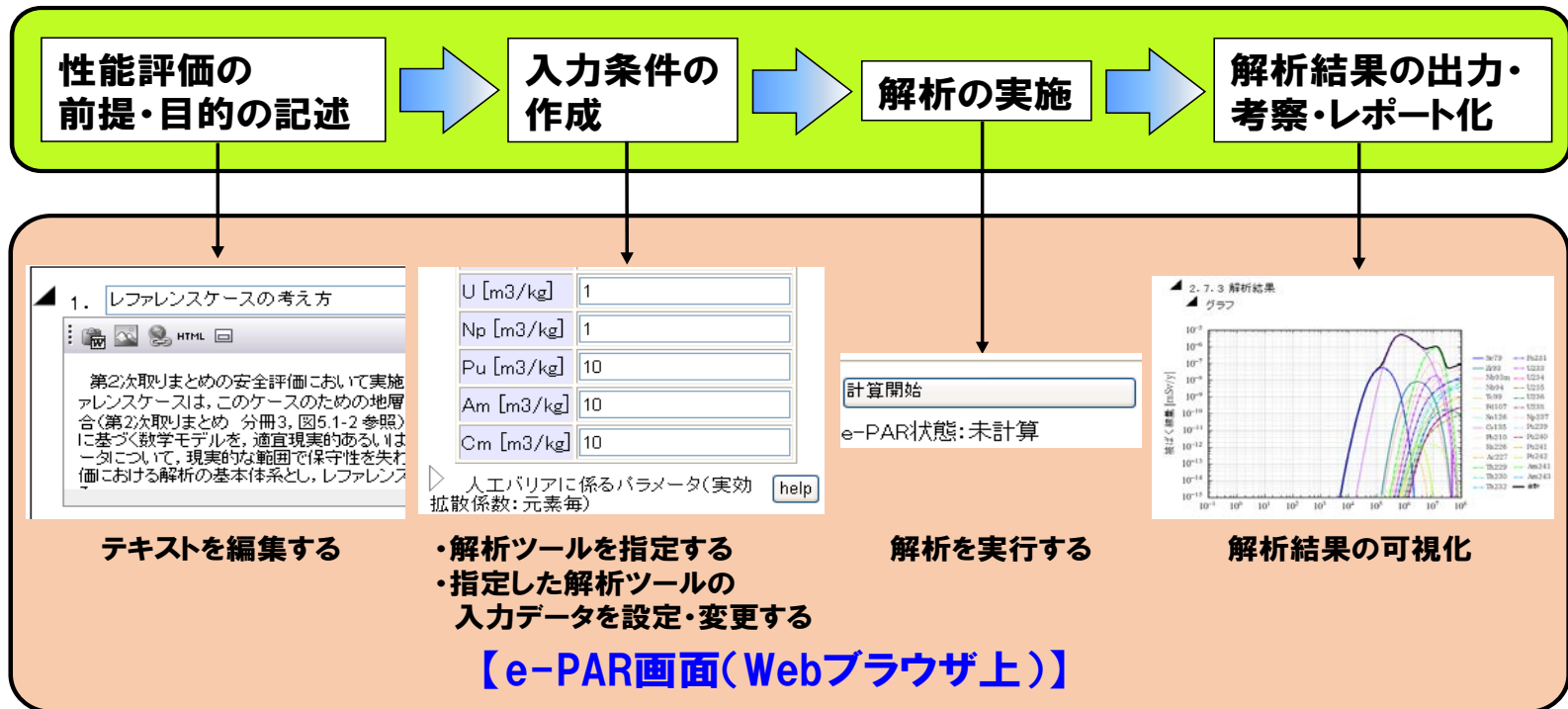


### 第2次TRUレポートの基本ケース



# e-PARの特徴と基本構成

- 既存解析の内容や結果の閲覧に加えて、新規の解析作業やレポート作成が可能
- Webブラウザ上でのわかりやすい操作環境の提供
- 解析ツールやインターフェイスのモジュール追加により解析対象を拡張可能



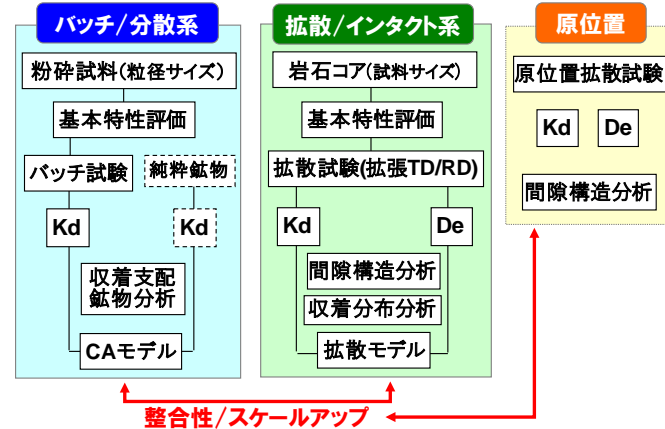
## 放射性核種移行の現象理解とデータベース開発

### ●最新知見を反映した核種移行モデル/パラメータ評価の方法論の構築

- 深地層の研究施設(幌延)でのトレーサー試験と連携: 割れ目を含む岩石試料のデータ取得・評価と、原位置試験条件設定へ反映
- 花崗岩試料のマトリクス部の室内データ取得と原位置条件へのアップスケリング法の適用性評価
- 圧縮ベントナイト中の不均質間隙構造の分析評価と拡散モデルの高度化、モデルに基づく核種移行パラメータ/不確実性の評価手法開発



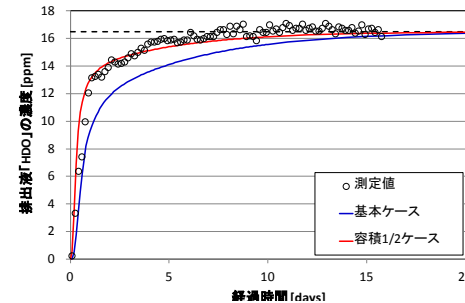
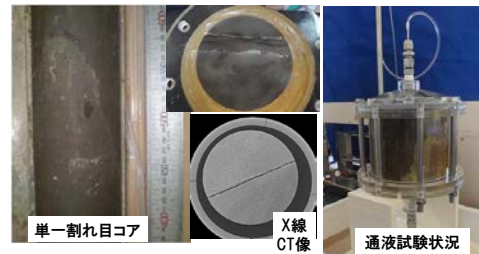
収着・拡散データベースの開発・  
拡充/信頼性の向上



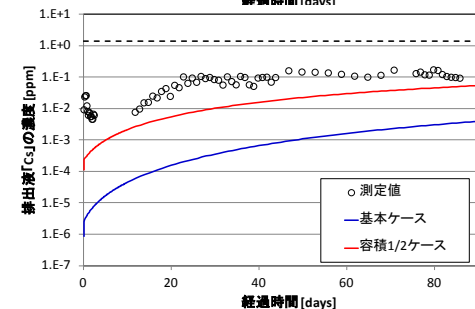
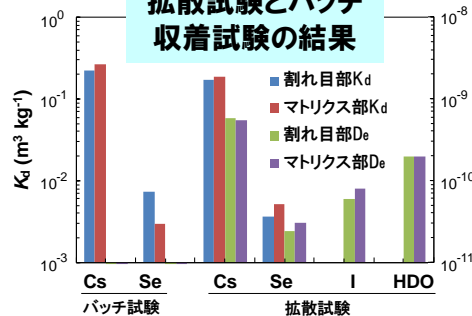
幌延地下坑道でのトレーサー試験準備状況



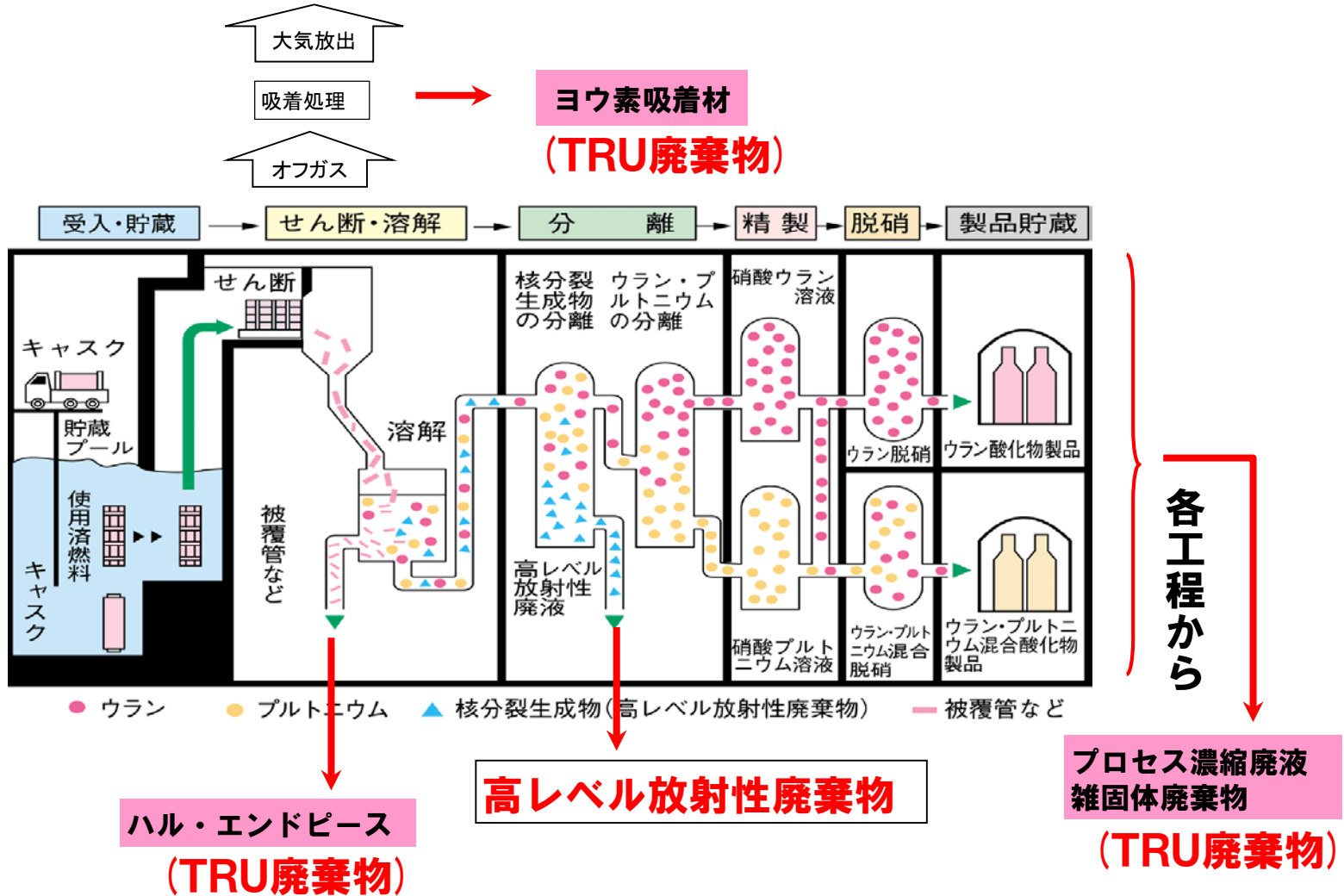
単一割れ目試料の低流量通液試験の破過データと解析結果



拡散試験とバッチ収着試験の結果



# 地層処分対象となる廃棄物



## セメント系材料の処分システムへの影響評価技術を構築

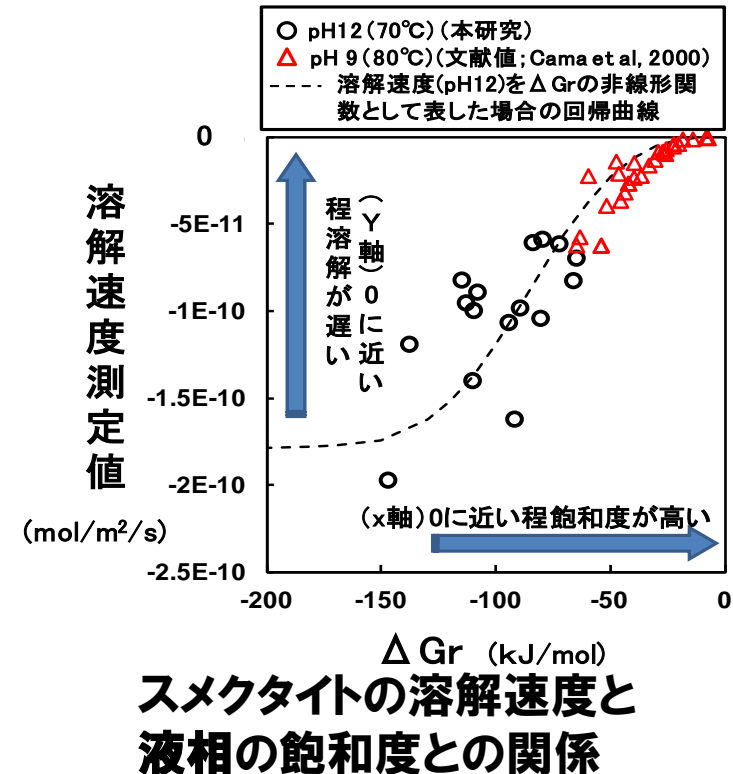
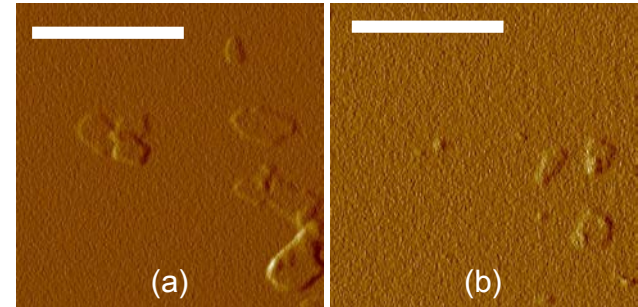
- 低アルカリ性セメント(フライアッシュ高含有シリカフェームセメント)の低アルカリ性発現機構のモデルを構築
- ベントナイトの主要鉱物であるスメクタイトのアルカリ領域における溶解速度式を導出。これを適用した化学-物質輸送連成解析により、緩衝材の止水性が10万年後も失われず、拡散場が維持されることを提示
- セメント系材料に起因する複合現象影響評価システムを構築

## 廃棄物に含まれる硝酸塩の処分システムへの影響評価技術を構築

- 硝酸イオンと炭素鋼との反応、黄鉄鉱との反応、および微生物との反応を考慮し、硝酸イオンの化学的変遷モデルを構築
- 硝酸イオンやその変遷物質であるアンモニアの放射性核種の溶解度や収着分配係数に及ぼす影響についてデータを取得
- これらの知見に基づく硝酸塩影響評価システムを構築。高レベル放射性廃棄物との併置処分の評価への適用性を確認

## セメント由来のアルカリ性溶液による緩衝材の変質挙動を評価:スメクタイトの溶解速度モデルを開発

- 高アルカリ性条件(pH12)での溶解実験
  - 原子間力顕微鏡を用いてスメクタイト粒子サイズの変化を測定し、溶解速度を求める統計解析的手法を適用
  - 既往の研究(pH9条件)と同様、pH12においてもスメクタイトの飽和度( $\Delta Gr$ )が高くなると溶解速度が低下することを見出し、新たな溶解速度式を導出
- 化学-物質輸送連成解析に適用し、緩衝材の止水性が10万年後も失われず、拡散場が維持される見通しを得る結果となった。

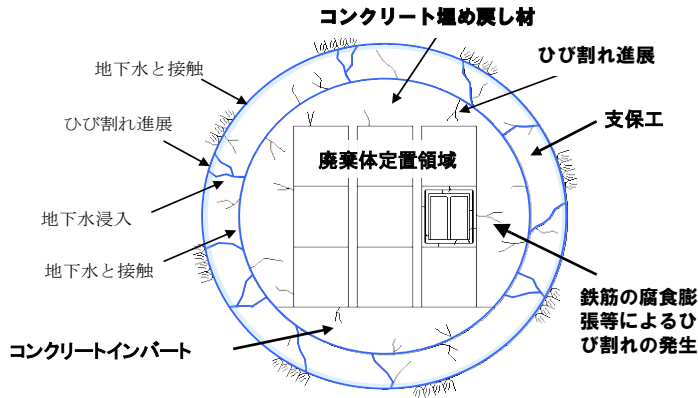


## セメント系材料に起因する複合現象影響評価システムの構築

経済産業省資源エネルギー庁 研究開発事業 地層処分技術受託「セメント材料影響評価技術高度化開発」成果

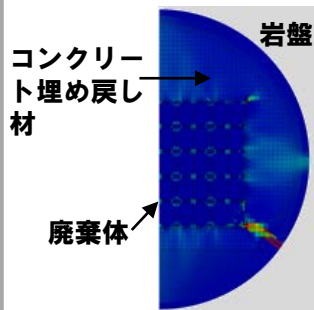
## セメント系材料中のひび割れ発生を考慮できる力学影響評価技術の開発

### TRU廃棄物処分施設のセメント系材料におけるひび割れの発生



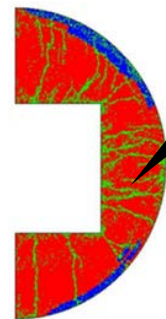
- より現実的な核種移行評価技術の必要性 → 様式化・単純化された評価の保守性の確認、サイト条件に応じた設計の選好関係の提示等
- 第2次TRUレポートの核種移行評価では、セメント系材料で発生したひび割れの内部を選択的流路として地下水が流れる現象についてはモデル化せず、セメント系材料全体が均質な砂並みの透水係数になるものとして多孔質媒体モデルによる評価を実施
- ひび割れ内部を地下水を含む核種が移行する現象を表現したモデルによる核種移行解析に必要な、場のひび割れに関する情報を提供するための力学影響評価技術を開発

### セメント系材料でのひび割れの発生を考慮した、粒状体個別要素法 (DEM) による解析の概念

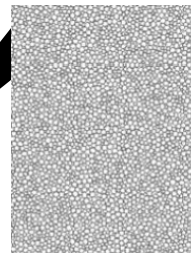


MACBECEによる解析 (有限要素法)

解析により求められる変位情報をDEMの境界条件に変換



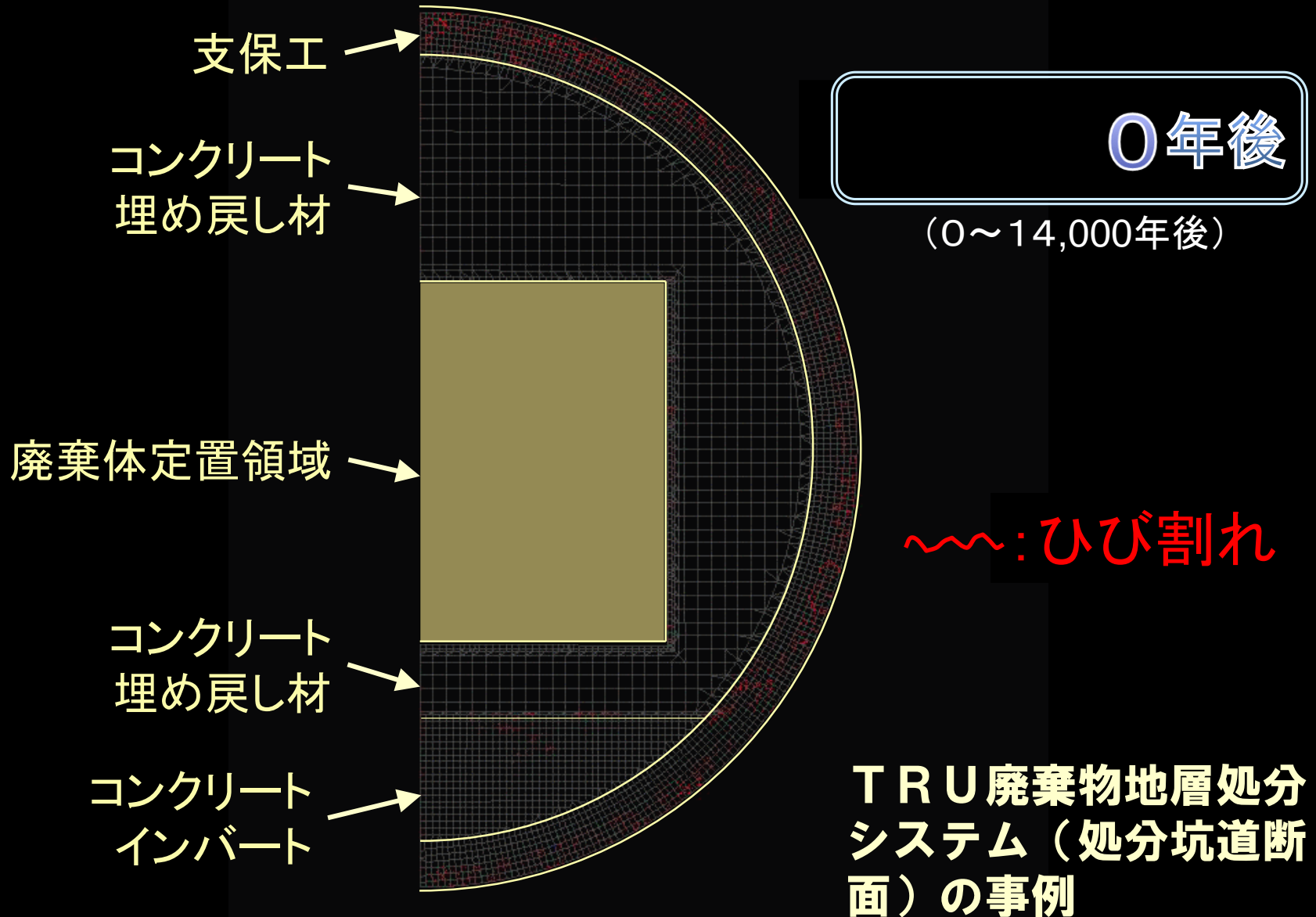
DEMによる解析



セメント系材料をDEM粒子によりモデル化

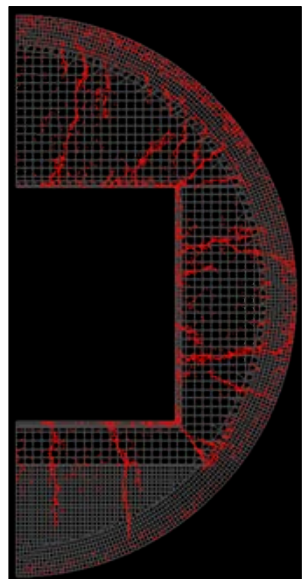
- コンクリート埋め戻し材の部分のみをDEM粒子によりモデル化
- 機構が開発した長期力学評価コード: MACBECEによる、処分施設断面全体を対象とする力学解析結果で得られる変位情報を境界条件に反映して、DEMによる解析を実施

# DEMによる解析結果の例

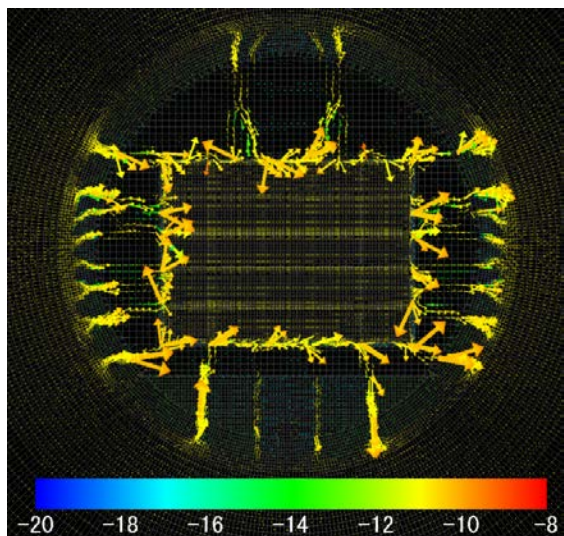




## セメント系材料でのひび割れの発生を考慮した核種移行評価技術の開発



施設外まで貫通するひび割れのみを抽出して定常水理解析を実施



定常水理解析により求められたダルシー流速分布の例（矢印の色は流速(単位:m/s)の対数を示す）

DEMによる解析結果をひび割れチャンネルモデルに反映

### ひび割れチャンネルモデルの概念

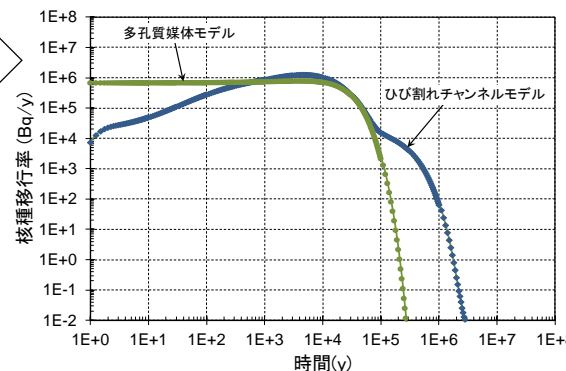
セメントひび割れセル



廃棄体セル



マトリクスセル



セメント系材料でのひび割れを想定した核種移行解析の結果の例(人工バリア出口, 対象核種:I-129)

- 定常水理解析により、ひび割れた処分坑道内部の地下水流動を評価
- 主要なひび割れを平行平板チャンネルとしてモデル化し、各チャンネルの地下水流量をその定常水理解析結果から決定して、核種移行解析を実施
- 従来の多孔質媒体モデルによる解析結果と比較して、核種移行率が時間的に分散される傾向

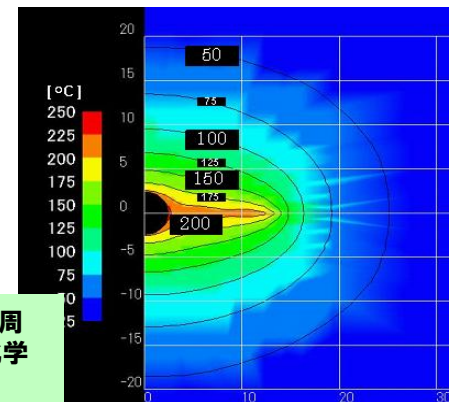
# まとめ：地層処分の技術基盤の整備

## 1. 工学技術関連

- 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・拡充
  - ・オーバーパックデータベース； 約1,700件
  - ・緩衝材基本特性データベース； 約2,200件
  - ・グラウトデータベース； 材料203件 施工215件
- 人工バリア等の長期挙動及び複合挙動評価モデル構築
- 工学技術の信頼性向上・新材料（セメント系材料）の開発



人工バリアを設置後の坑道周辺における熱-水-応力-化学状態変化に関する解析



## 2. 安全評価技術関連

- 核種移行データの拡充、現象論に基づくメカニスティックモデルの開発・改良

### 及びデータベースの開発・拡充

- ・熱力学データベース（平衡定数）； 約1,800件
- ・収着分配係数データベース； 約 46,000件
- ・拡散係数データベース； 約 2,000件
- ・ガラス溶解データベース； 数値データ 約23,300件

- 処分システム性能評価モデルの開発・改良

- ・天然事象、地質環境、表層環境の特徴を考慮した評価モデルの改良
- ・核種移行に対するコロイド、有機物、微生物の影響評価モデルの改良
- ・地層処分システムに与える条件の影響評価技術の体系化 等



処分場の安全評価・設計の基礎となるデータベースの開発

## 3. TRU廃棄物処分に固有の課題

- セメント系材料の影響評価技術構築
- 硝酸塩影響評価技術構築
- （これらの取得データは上記データベースに集約）

## 1. 工学技術関連

- ・深地層の研究施設でのデータを活用した個別の設計・施工技術等の検証、妥当性・適用性評価
- ・これらの設計・施工技術等を処分システムの工学技術として体系化

## 2. 安全評価技術関連

- ・安全評価技術の体系化
- ・深地層の研究施設から得られる坑道周辺の知見を活用した安全評価手法の適用性確認
- ・システム変遷についての核種移行評価モデルとデータベースの先端化
- ・深地層の研究施設での試験や天然事例評価による時空間スケールを含めたモデル確認

## 3. TRU廃棄物処分に固有の課題

- ・セメント、緩衝材及び岩石変質評価モデル等の確認
- ・セメント及び硝酸塩の重畳現象を考慮したモデルの開発

**ご清聴ありがとうございました。**