



# 地層処分研究開発の現状と今後の予定

平成25年3月19日  
日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門



# 計 画

---

第二期中期計画（平成 22 年4 月1 日～平成 27 年3 月31 日）

## 1) 地層処分研究開発

- ① 人工バリアや放射性核種の長期挙動に関するデータの拡充とモデルの高度化を図り、処分場の設計や安全評価に活用できる実用的なデータベース・解析ツールを整備する。
- ② 深地層の研究施設等を活用して、実際の地質環境条件を考慮した現実的な処分場概念の構築手法や総合的な安全評価手法を整備する。



# 目次

---

## 地層処分研究開発

シナリオシミュレーション技術の開発

性能評価統合技術(e-PAR)の開発

岩盤規模把握技術の実証

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

核種移行の場としての酸化還元状態に及ぼす微生物影響評価手法の開発

核種移行に及ぼすコロイド影響評価手法の開発

核種移行に及ぼす有機物影響評価手法の開発

収着・拡散データベースの開発

オーバーパックの基本特性

熱-水-応力-化学連成挙動

グラウト技術の開発(低アルカリ性材料)

## 福島環境修復に係る対応:

地層処分技術を活用した福島事故に関する取り組み

放射性物質の分布予測モデルに適用可能な技術情報調査

放射性物質の土壌中深度方向の分布状況調査に関する取組(2次調査)

まとめ:平成24年度成果と今後の予定

## 専門家の知見に基づくシナリオ解析を補完するシナリオシミュレーション技術

### 従来のシナリオ解析

多くの現象間の関係をヒューリスティック\*な判断で処理してニアフィールド環境変遷の多面的な特徴をシナリオとして記述

ニアフィールド現象の特徴(複雑性, ダメミス)  
⇒ ヒューリスティックの限界

補完

### 複雑系工学の計算手法を用いたシナリオシミュレーション

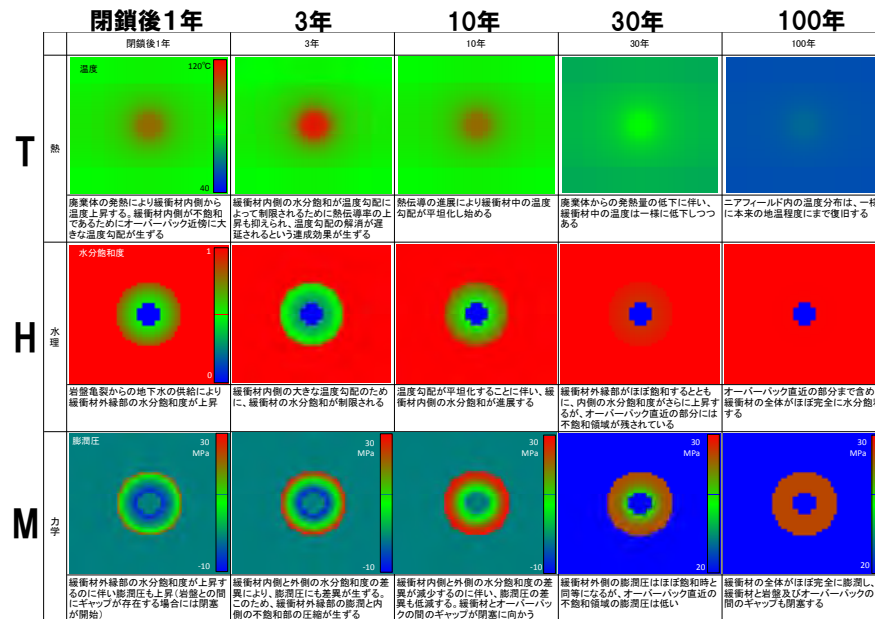
多数・多様な要素間の相互作用を単純なルールとして定義し, システム全体挙動を表現する  
マルチエージェントシミュレーション

系の構成要素をエージェントとして定義。系のダイナミックに変化を取り扱う問題に有効。  
(e.g. 建設・操業期間)

### 多変量セルラーオートマタ

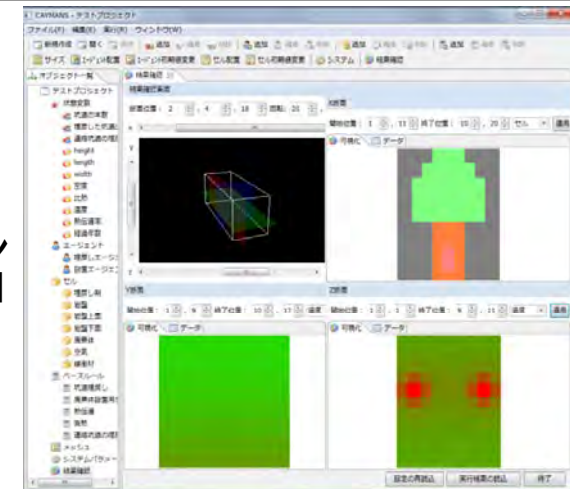
解析体系及び形状は固定。各セルにおける多数の状態変数間の因果関係や相関を定義したシミュレーションが可能。(e.g. 処分場閉鎖後の種々の物理化学現象による環境条件の変遷)

\*ヒューリスティック: 問題解決, 判断, 意思決定を行う際に, 規範的でシステマティックな手順(アルゴリズム)によらず, 暗黙のうちに簡便な解法や法則を用いて近似的な答えを得るための解決法

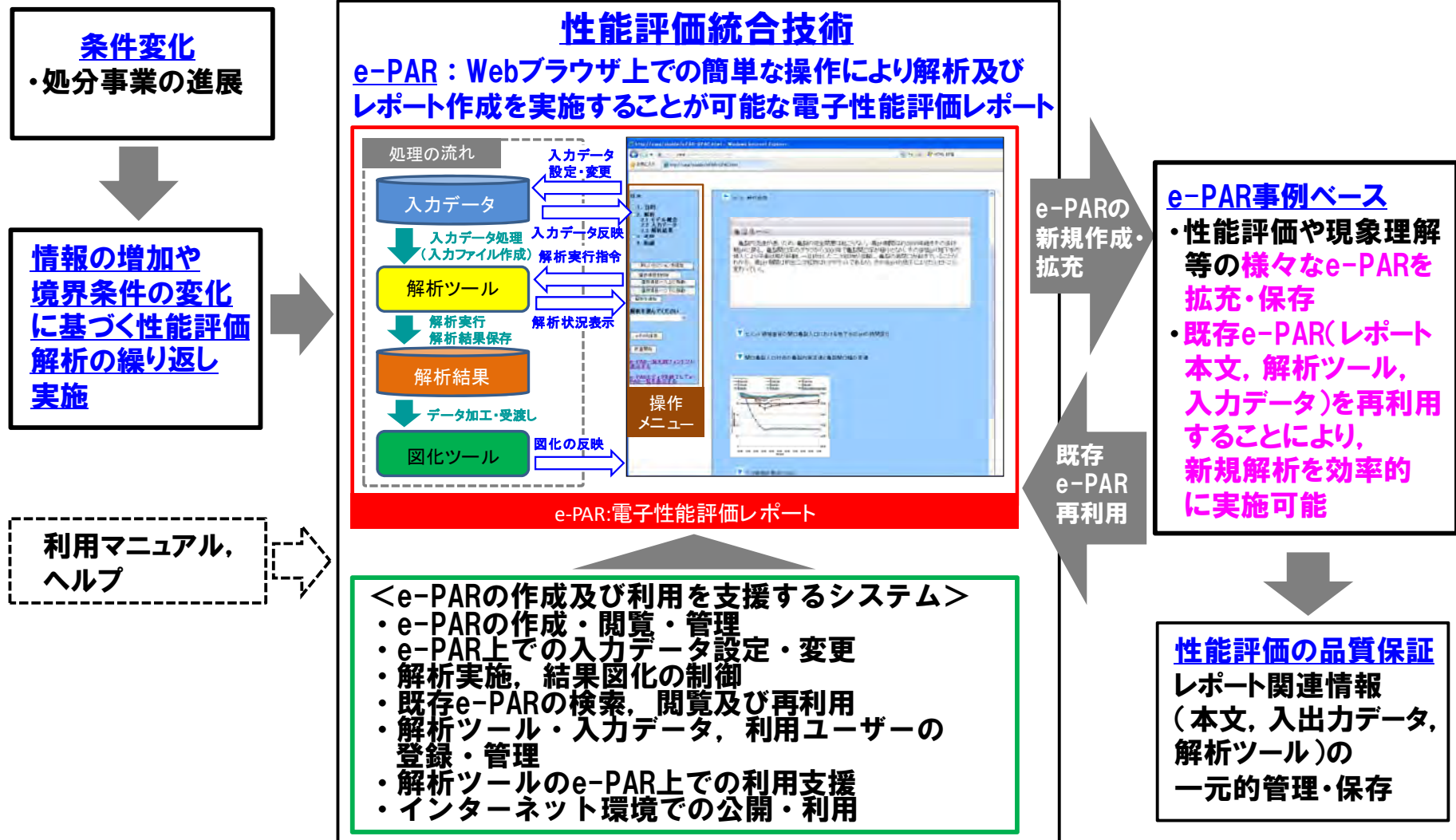


シナリオシミュレーション結果に基づくニアフィールドのTHMCの時間変化の例

開発したシミュレーションツール CAYMANSのGUI



- 地層処分システムの性能評価に関する一連の解析作業(入力条件の設定、解析の実施、解析結果の表示)およびそのレポート化を**Web上で実施可能とするシステムを開発**

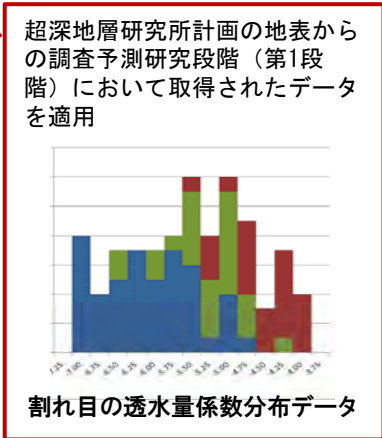
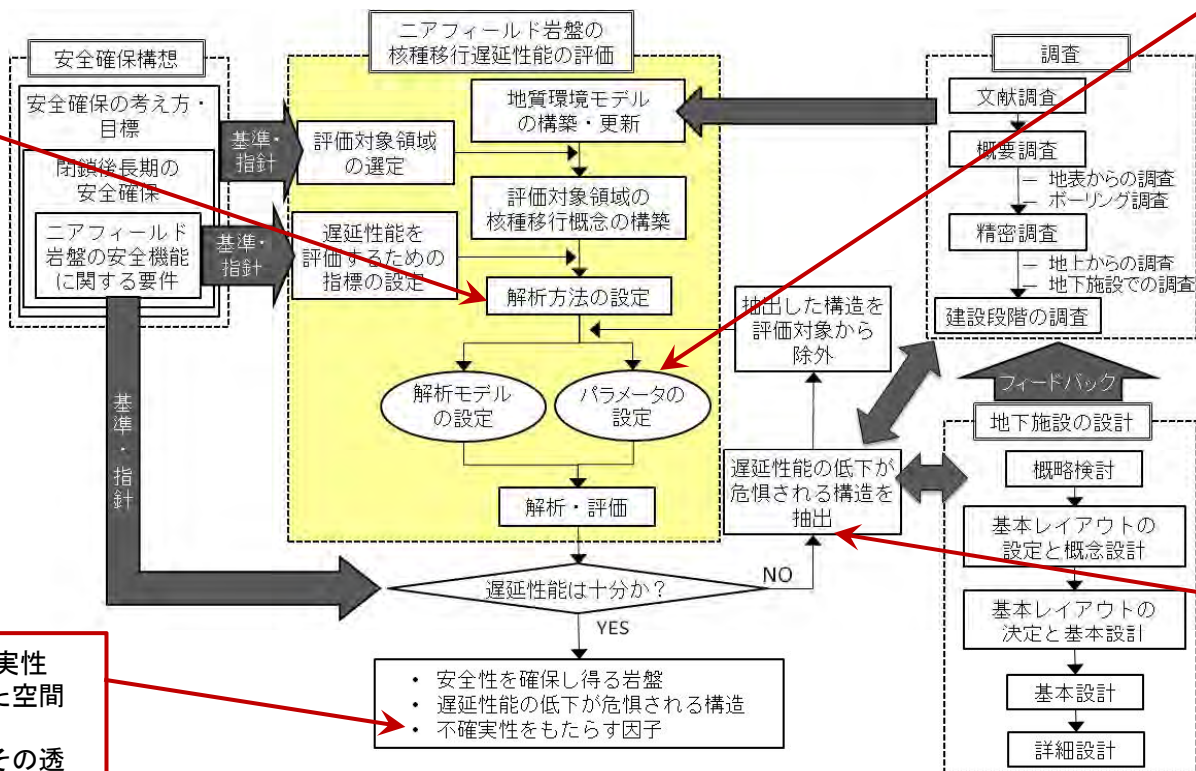
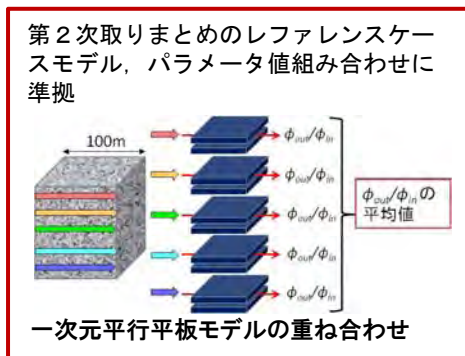


ユーザーのニーズに応じて、性能評価解析等を簡単かつ効率的に実施することが可能



# 岩盤規模把握技術の実証

- ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能を簡略的に評価する手法を具体化
- 調査で取得可能なデータ、安全確保の考え方、地下施設の設計等との関係に留意して、安全性を確保し得る岩盤を評価する方法について検討
- 瑞浪などの地下研究施設計画で取得されたデータを活用した事例的な検討



- ①高透水性の構造
- ②調査により検出可能な構造など

透水量係数分布の設定の不確実性

- 透水性割れ目の頻度に応じた空間解像度での調査
- 高透水性の割れ目の検出とその透水量係数の定量的化が可能な調査
- より低透水性の割れ目の定量的化が可能な調査

- ・ 安全性を確保し得る岩盤
- ・ 遅延性能の低下が危惧される構造
- ・ 不確実性をもたらす因子

ニアフィールド岩盤の核種移行遅延性能を評価するフローと調査、安全確保の考え方、地下施設の設計との関係イメージ図 (JAEA-Research 2012-038)

# 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

- 概要調査や精密調査などの各調査段階で得られるデータに基づき、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検討

### ■ 実際の表層環境の情報を用いた生物圏モデル構築の考え方の整理

実際の表層環境における地下水流動解析を行い、それぞれの環境構成要素にどれくらいの放射性核種が流出するかを推定

- モデル構築のための作業フローを用いた、生物圏評価モデル構築及びパラメータ設定の試行とこれに基づく留意点の抽出
- 表層環境における地下水流動解析の結果から、それぞれの環境構成要素にどれくらいの放射性核種が流出するための手法を検討

### ■ 長期の生物圏評価における知識利用の考え方の整理

METI 受託

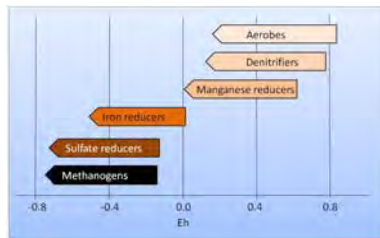
- 実際の地表・地質環境の条件及びそれらの長期的変遷と統合的な生物圏評価における様式化の考え方や、モデル化手法の調査を通じた課題及び対処方策の整理
- 既往検討を参照した課題解決のための具体的アプローチの抽出・整理

➡ 具体的なサイト及びその時間的変遷を考慮した生物圏評価モデル構築における既往の検討での経験や知識を整理することにより、モデル構築において生じると想定される種々の問題点や課題を解決するための具体的な方策を提示

## 【実施内容】

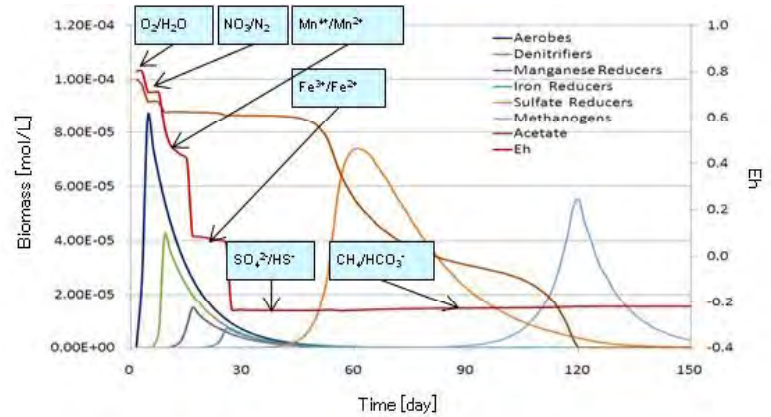
幌延試料による室内試験や原位置試験を実施した。深部地質環境の地下水・岩石表面における微生物量定量手法を新たに開発して提示した。また、地球化学計算コードを用いた微生物影響評価コードを開発し、モデル解析として酸化から還元環境への微生物影響による復帰変遷に対する解析が可能となった。

## 地球化学計算コードPHREEQCによる解析平衡反応計算

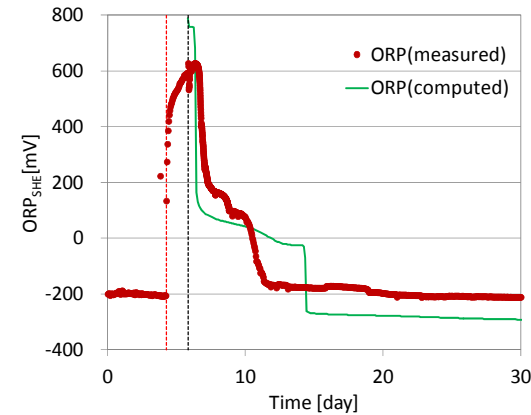
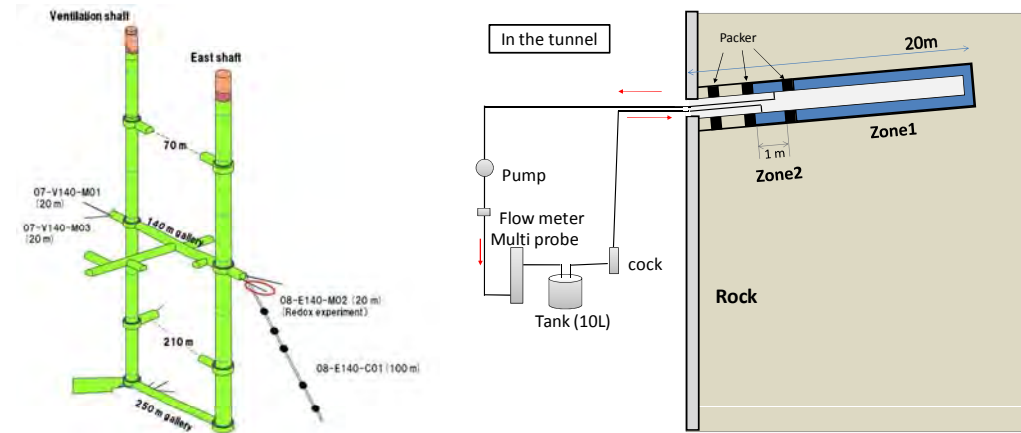


微生物増殖速度式  
Monod式  
$$r_x = K_{max} \cdot Y \cdot S / (K_s + S) \cdot X$$

必要なパラメータ  
 $K_{max}$ : 有機物最大消費速度  
 $Y$ : 細胞収率  
 $S$ : 電子供与体濃度  
 $K_s$ : 半飽和定数  
 $X$ : 微生物量



## 微生物による地下水化学変化のPHREEQC解析例



・原位置試験における酸化還元電位、溶存酸素、pHの変化傾向を解析により再現できた。



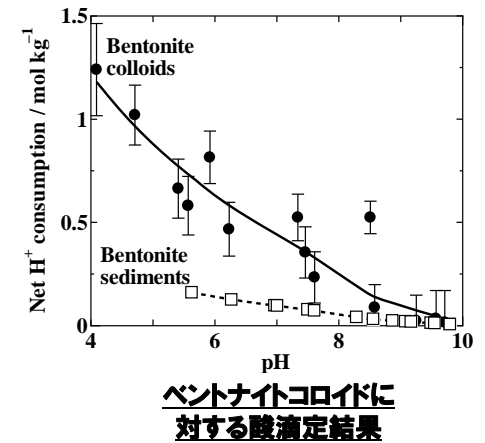
# 核種移行に及ぼすコロイド影響評価手法の開発

## 核種-ベントナイトコロイド-岩石 三元系における核種収着モデルの開発

◆ベントナイトコロイドの特性評価(エッジサイト密度の定量)を実施し、その結果に基づいて核種-ベントナイトコロイド二元系での収着モデルの構築した。この収着モデルが、核種-ベントナイトコロイド-岩石三元系においても適用できることを確認した。

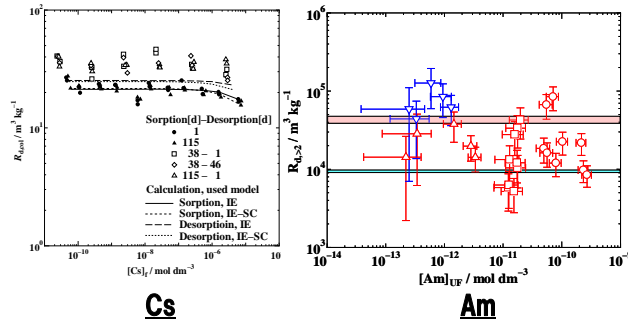
ベントナイトコロイドの  
エッジサイト密度の定量

コロイドのエッジサイト密度は通常のベントナイトの約8倍

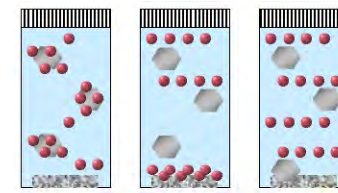


## ◆エッジサイト密度の定量

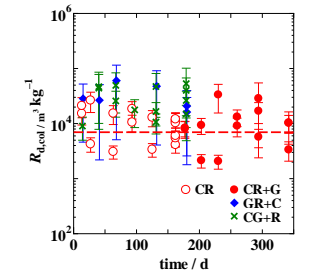
エッジサイト密度を考慮した収着モデルによりベントナイトコロイド-核種相互作用を説明可能 (Cs, Am)



ベントナイトコロイドへの分配係数とモデル計算値



核種-ベントナイトコロイド-岩石  
三元系試験模式図



三元系での分配係数と  
モデル計算値

核種-コロイド-岩石三元系においても二元系でのCs, Amの収着モデルが適用できることを実験的に確認

◆核種-ベントナイトコロイド 二元系収着モデル構築

◆核種-コロイド-岩石 三元系収着モデル適用性確認

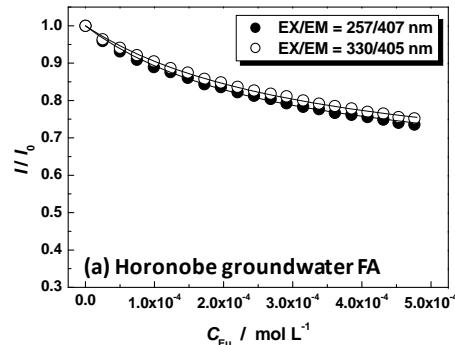
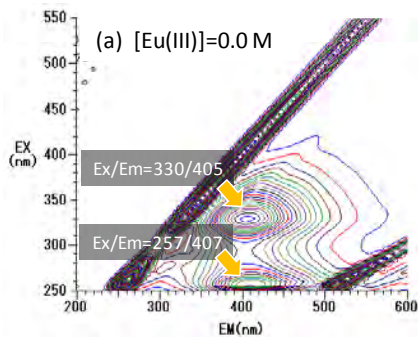
・Cs、Amに対して、核種-ベントナイトコロイド-岩石 三元系における核種の分配を予測するモデルが適用できることを実験的に確認した

**地下環境条件が与えられた際の有機物影響評価手法のプロトタイプを提示**  
 □分光学的手法に基づく微量有機物試料の錯形成能評価手法を提示した。地下水有機物の特異的な結合サイトの存在が分かった。  
 □限られた錯形成パラメータを用いた原位置有機物錯形成パラメータ設定手法を提示した。  
 □錯形成モデルと核種収着・拡散モデルとの統合手法を提示した。

## 天然有機物の特性評価

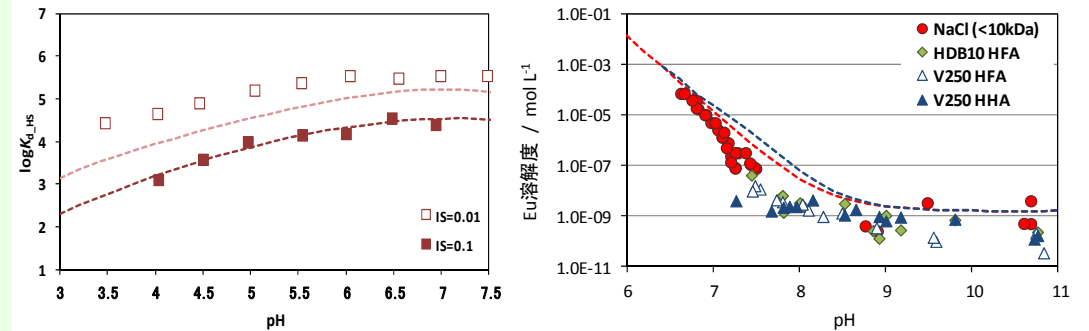
地下水有機物の特異的な結合サイトの存在を確認した。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{RES} / I_0 - 1}{2K\alpha C_{PEC} / Z} \times \left[ \frac{(K\alpha C_{PEC} / Z + KC_{Eu} + K_{NO_3} C_{NO_3} + 1)}{-\sqrt{(K\alpha C_{PEC} / Z + KC_{Eu} + K_{NO_3} C_{NO_3} + 1)^2 - 4K^2 C_{Eu} \alpha C_{PEC} / Z}} \right] + 1$$



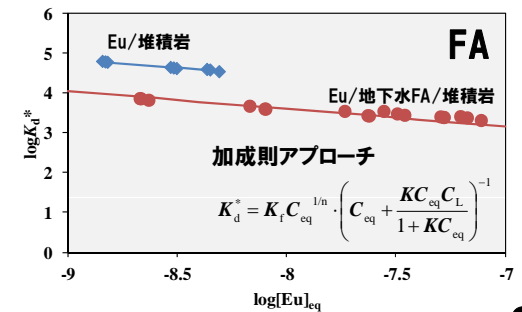
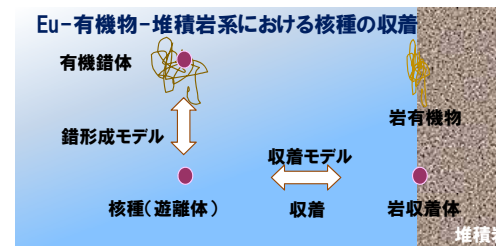
## 核種-有機物錯形成評価手法の開発

地下水有機物と三価核種との錯形成は、NICA-Donnanモデルと一部パラメータの最適化により評価可能であることが分かった。



## 核種-有機物-岩石三元系収着拡散モデルの開発

核種-有機物-岩三元系における核種収着挙動は、(i)核種-腐植物質錯平衡モデルと(ii)核種-岩収着モデルのみを統合した加成則アプローチにより記述可能であることを示した。





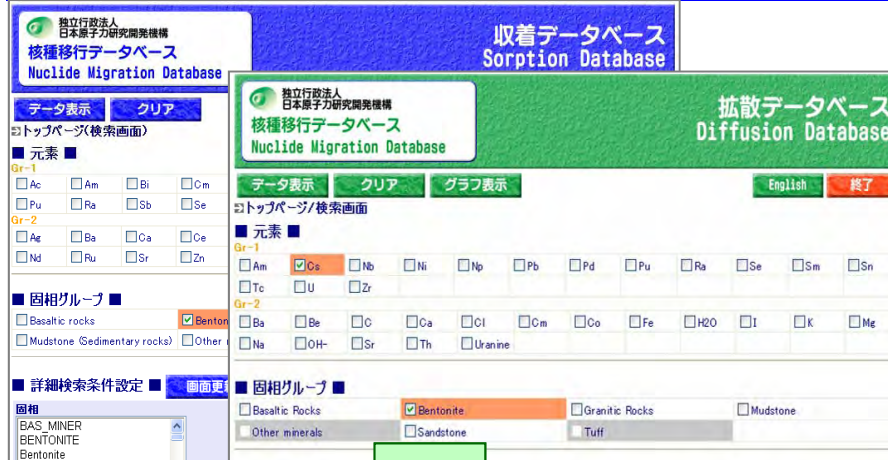
# 収着・拡散データベースの開発

<http://migrationdb.jaea.go.jp/>

## JAEA-SDB/DDB (実測値データベース)

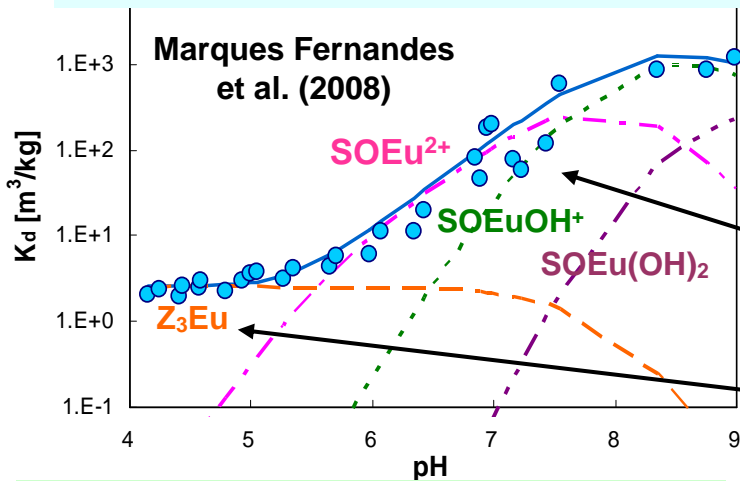
性能評価における信頼性の高い核種移行パラメータ設定を支援する収着拡散モデル/データベースを開発

- NEA収着プロジェクト等の最新国際動向, 収着・拡散メカニズム分析等のモデル化への反映した。
- 従来の実測データに基づく設定(実測値データベース(JAEA-SDB/DDB)の利用)と連携し、モデルの活用による多様な核種/環境条件を対照とした収着・拡散パラメータ設定手法を提示した。

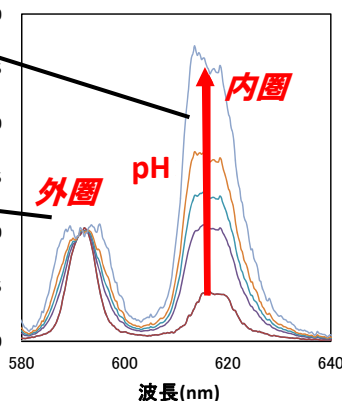


## 高収着性核種を例にした現象論的収着モデル・データベースの開発

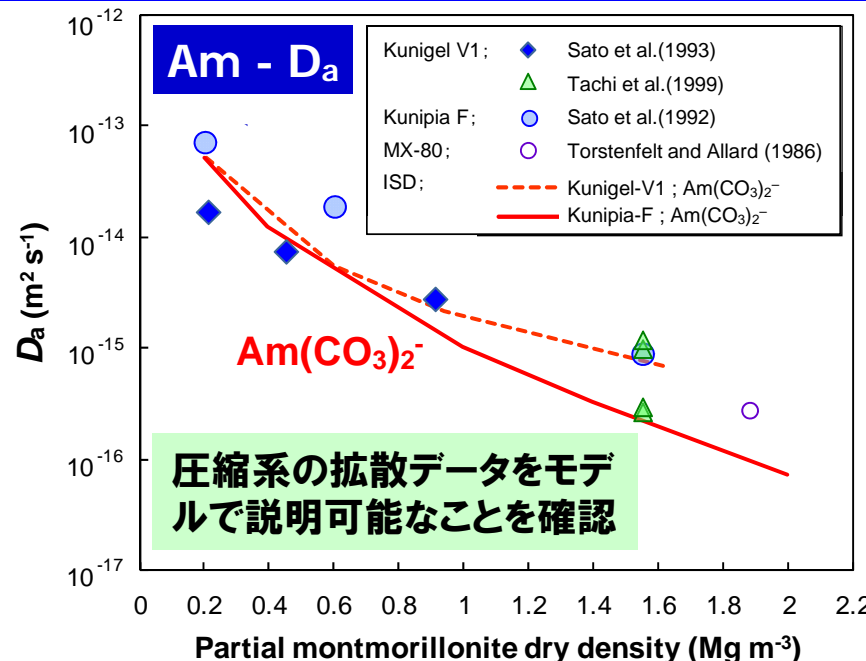
### Am/Euのベントナイトへの収着モデル



### TRLFS-PARAFAC解析によるEuの収着形態分析



## 統合収着・拡散モデルの圧縮系への適用評価



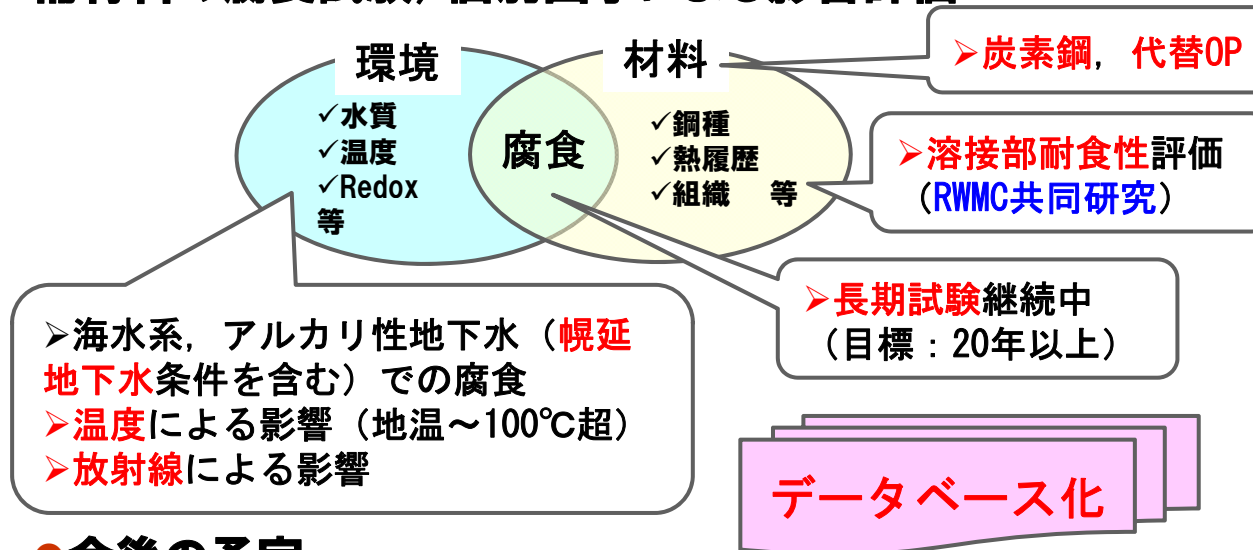
最新の化学種分析結果を反映した収着モデルを構築

## ●目的

オーバパックの長期健全性に関わる腐食データを拡充し、信頼性の向上、オーバパック設計に資する

## ●実施内容

➢環境因子、材料因子をパラメータとしたオーバパック候補材料の腐食試験、個別因子による影響評価



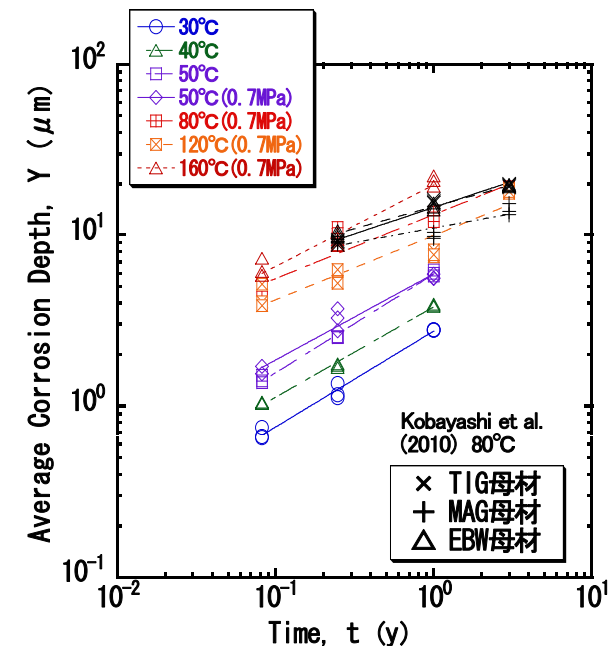
高温・高圧下での腐食試験状況の例

## ●今後の予定

➢オーバパック設計や長期健全性評価に資する知見の拡充と体系的整備(試験データ、評価の考え方、手法)

➢個別現象のメカニズム解明とモデル化

➢複合的要因の関わる系での腐食挙動(幌延原位置試験を含む)



低酸素濃度下の炭素鋼の腐食に及ぼす温度の影響



## 【研究開発の目的】

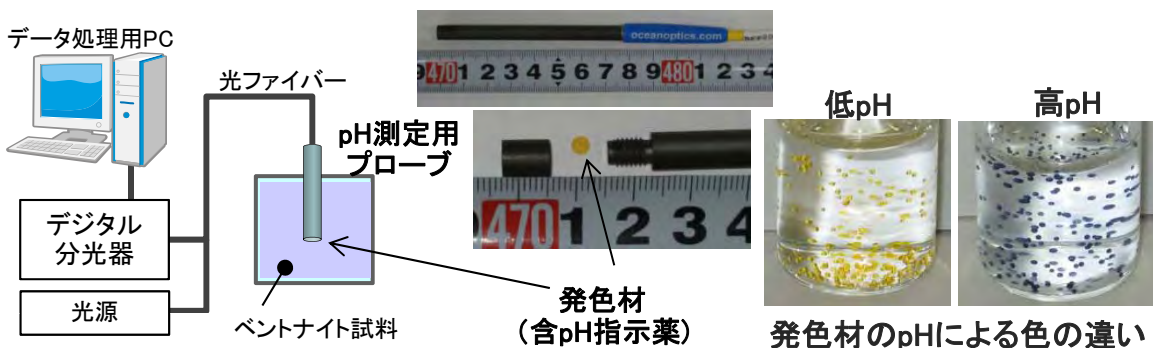
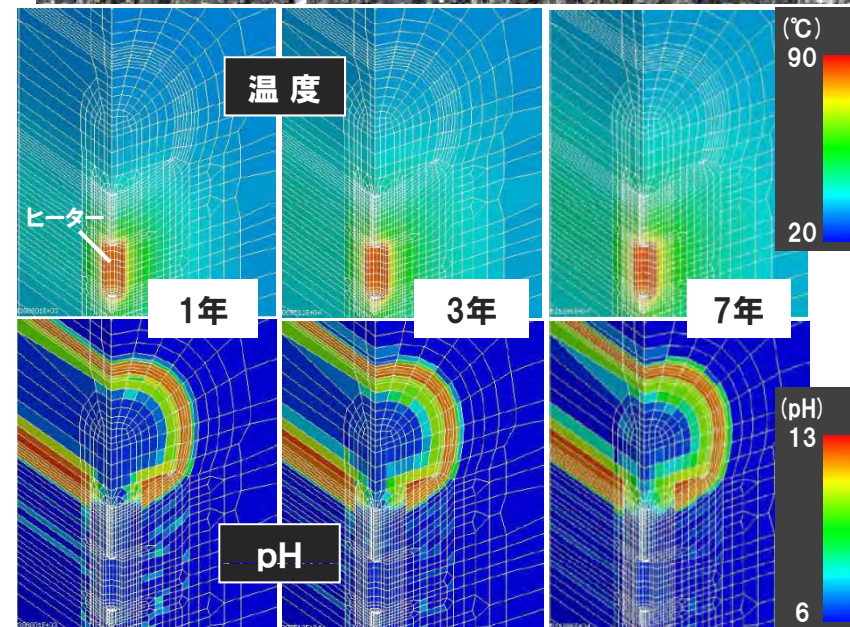
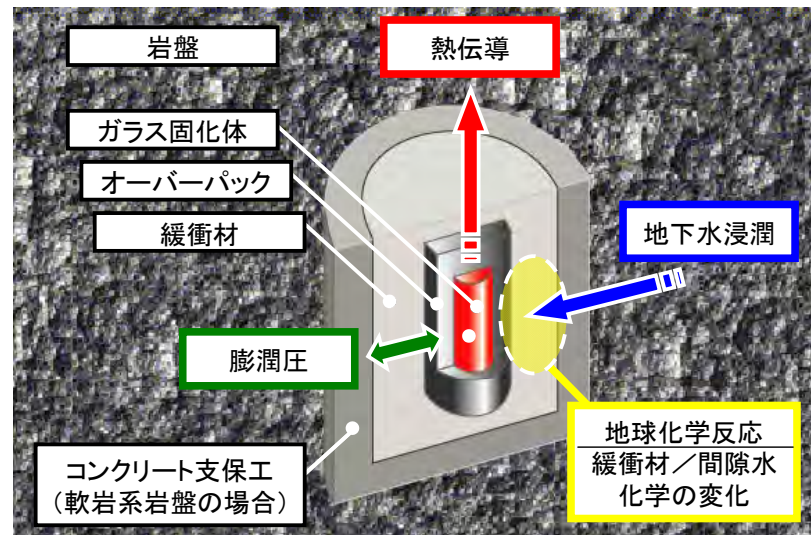
処分場を設計する際の保守性や信頼性, 処分場閉鎖時の判断, 閉鎖後の性能評価への反映を目的とした坑道掘削, 廃棄体定置, 閉鎖後におけるニアフィールドの熱的, 水理的, 力学的, 化学的なプロセスの時間的・空間的な変化を**評価するモデルと計測手法**の開発

## 【実施内容】

- ✓ 評価モデル及び計測手法の開発のためのENTRYにおける**熱-水-応力-化学連成試験(装置:COUPLE)**
- ✓ 開発したモデルの検証や適用性確認のための**共同研究(国際共同研究DECOVALEX-2015等)**
- ✓ 開発したモデルを用いた**長期挙動解析**

## 【今後の予定】

- ✓ 幌延URLにおける人工バリア性能試験計画への反映
- ✓ 評価モデル, 計測手法の適用性確認, 評価・計測手法の確立



緩衝材中の間隙水のpHをモニタリングするための技術例  
(光ファイバー技術を利用した測定手法)

開発した解析技術によるニアフィールドの長期挙動解析例  
幌延URLの岩盤等の物性値, ヒーターの埋設を仮定した試解析例 **12**

## 【研究開発の目的】

わが国の深部地質環境(割れ目が多く地下水が流出しやすい)への適用や処分場の安全評価の不確実性低減(処分場の長期性能への影響を考慮)を目標とした、

- ✓ 新たなグラウト材料/注入技術の開発
- ✓ グラウト等のセメント系材料による岩盤への影響評価技術の高度化

## 低アルカリ性グラウト材料の適用範囲

材料	配合 (W/B)	開口幅(μm)			
		50	100	150	200 250
低アルカリ性セメント	400/600%			125-188 (123-184)	188以上 (184以上)
超微粒子球状シリカ	400/600%	38-50 (33-44)	50-188 (44-184)		188以上 (184以上)
溶液型 (ゲルタイム120分)		38-50 (33-44)	50-100 (44-95)	100以上 (95以上)	

幾何学的開口幅  
(水理学的開口幅)

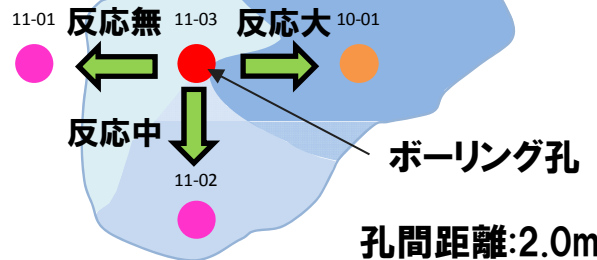


暴噴対策装置  
(プリベンダ)



高圧対応パッカー

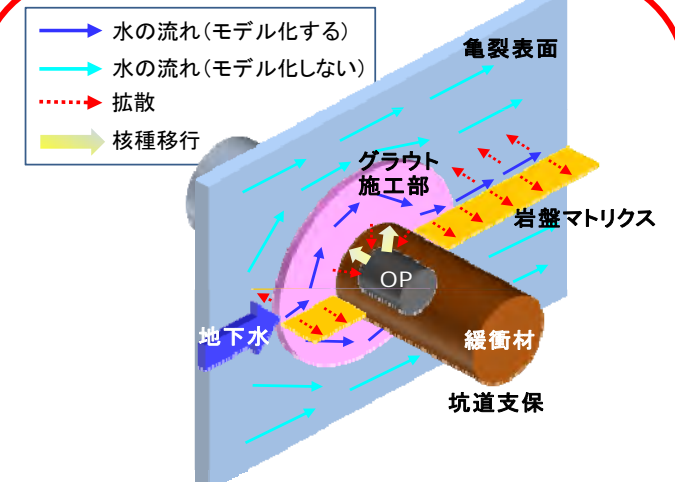
原位置での高圧対応装置の  
適用性確認(幌延URL:250m)



原位置におけるグラウト注入状況  
グリムゼルテストサイト(スイス)

## 【今後の予定】

- 成果物である深部地質環境に適用可能な**グラウト技術のガイドライン(考え方, 手法, DB, 事例)**を実施主体の概念設計(湧水抑制対策)に反映。
- **幌延URL**におけるグラウト技術の適用性の確認。



グラウト等のセメント系材料による  
岩盤変質等への影響を考慮した  
核種移行評価のための概念図

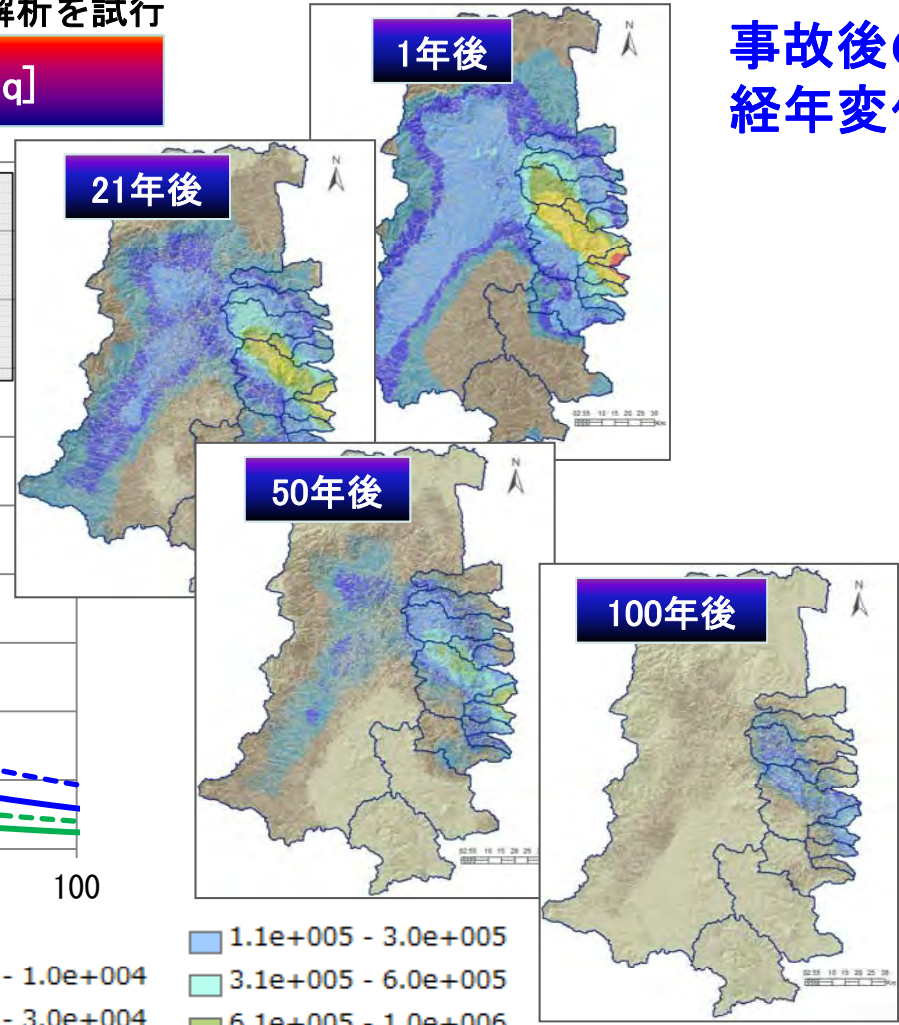
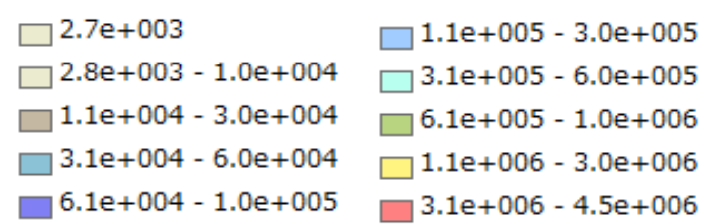
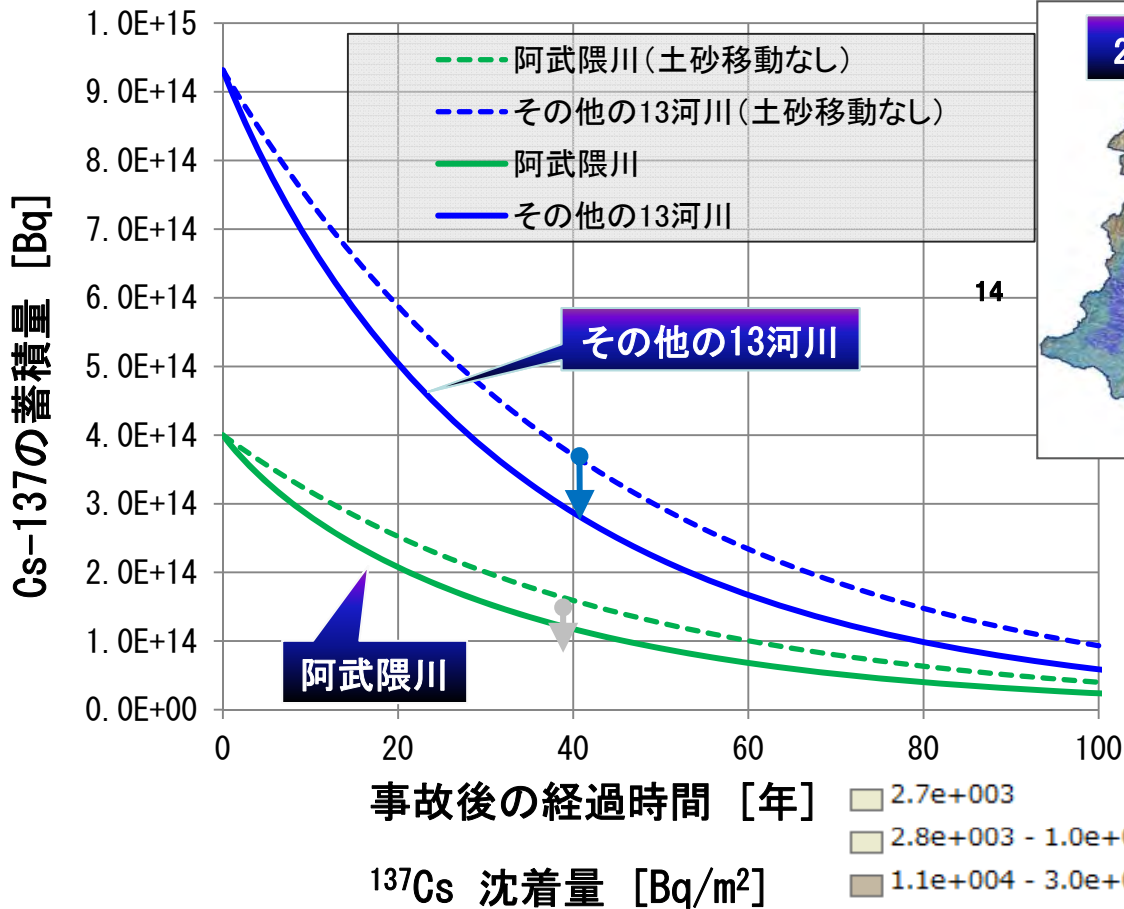


# 福島対応:地層処分技術を活用した福島事故に関する取り組み

## 計算結果の例:<sup>137</sup>Cs総沈着量の経年変化

- 環境中に放出された放射性物質のうち、土壌に沈着した放射性物質の将来にわたる分布を推定するために、地理情報システム等を用いた土壌流亡移動解析を試行

各河川流域における<sup>137</sup>Cs総沈着量の経年変化 [Bq]



事故後の  
経年変化

# 福島対応：放射性物質の分布予測モデルに適用可能な技術情報調査

MEXT受託

## ● 調査対象：

### 評価対象媒体：

- 土壌
- 地表水
- 地下水

### モデル特徴：

- 経験論ベース
- 概念ベース
- 物理ベース
- プロセス特化型
- 地表プロセス集中型
- 河川プロセス集中型
- 総合型

### 情報整理項目：

- モデル名
- モデル特徴, 種類
- 対象スケール, 特徴
- 考慮するプロセス
- 入力/出力
- 長所・短所, 効率性
- 参考文献等

### 調査対象：

- チェルノブイリ事故
- 防災関係等

## ● 技術情報の整理のイメージ：(主要なモデルについては、より詳しい情報や適用事例等を整理)

Table 1: 浸食と土砂移動モデル

モデル	分類	スケール	インプット/アウトプット	参考文献
Water quality				
AGNPS	概念	小集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 流出体積、ピーク速度、浮遊物質、窒素、リン、化学的酸素要求量濃度	Young et al. (1987)
ANSWERS	物理ベース	小集水域	インプット要件: 高 アウトプット: 土砂、栄養素	Beasley et al. (1980)
CREAMS	物理ベース	田畑 40-400 ha	インプット要件: 高 アウトプット: 浸食、堆積	Knisel (1980)

Table 2: モデルで表されているプロセス

モデル	降雨-流出			地表での土砂			ガリ(小峡谷)			河川の中での土砂		水質に関わる土砂	
	生成	移動	堆積	生成	移動	堆積	生成	移動	堆積	地表	河川の中	地表	河川の中
AGNPS	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ANSWERS	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
CREAMS	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	○	×

→どのような評価目的や対象領域の特徴に対して、どのモデルがどの範囲で利用可能か等を概観可能とする



# 福島対応:放射性物質の土壌中深度方向の分布状況調査に関する取組(2次調査)(1/2)

## <目的>

- 事故から3ヶ月後のH23年6月に実施した1次調査の結果と課題を踏まえ、**1次調査の変化や放射性物質の移行状況等を把握**すること

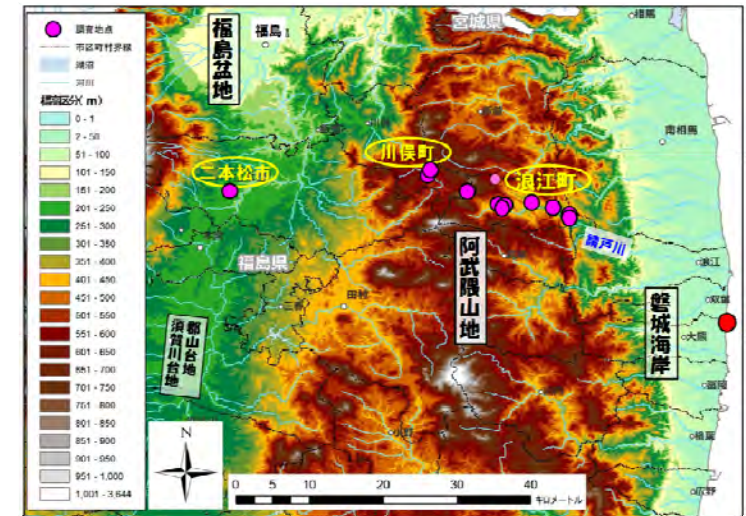
## <調査期間>

- H24年2/23~3/19日(現地調整、現地調査:2/27~3/8日、撤収)

## <実施内容>

- 打ち込み式のポータブルドリル及びサンプラーによる調査:11地点19本
- 水簸分級:3種類の土壌(砂質土壌、粘土質土壌、有機質土壌)  
⇒ 粘土(<2 $\mu$ m)、シルト(2-20 $\mu$ m)、砂・礫(>20 $\mu$ m)
- 鉱物組成分析(XRD):3種類の土壌、水簸分級試料
- 収・脱着試験:3種類の土壌、水簸分級試料、バッチ法、核種:Cs-137, I-131
- 濃度分布測定:Ge半導体検出器にて $\gamma$ 線放出核種分析

## <調査地点>



● 東京電力福島第1原子力発電所



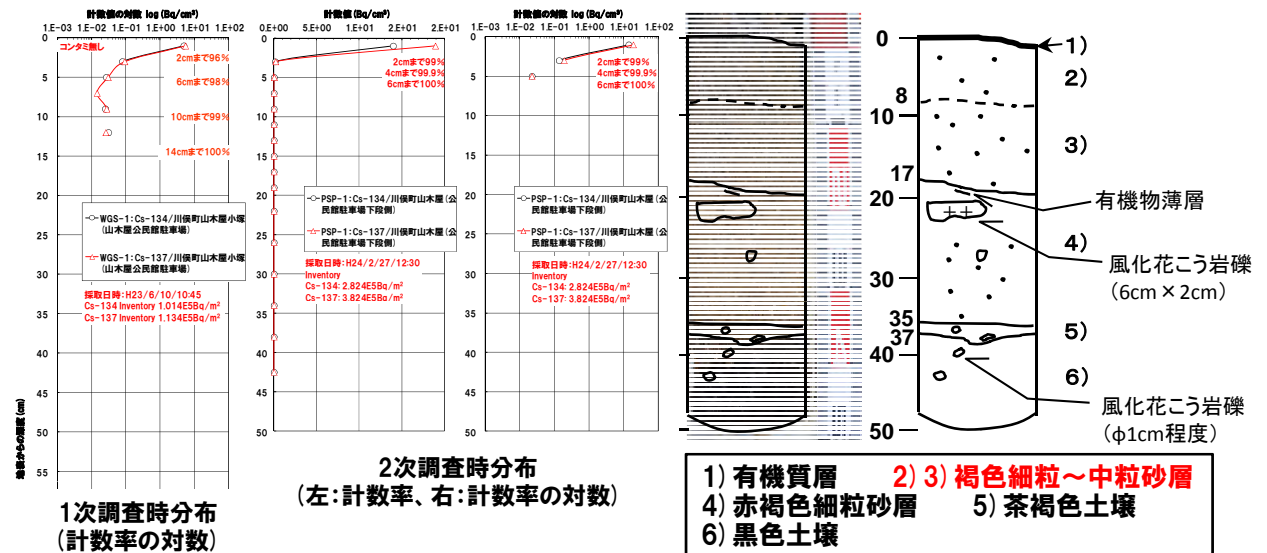
打ち込み式ポータブルドリルと土壌サンプラー(内径15cm)による掘削調査状況



採取された土壌コアの例 U-8容器



ロードからの土壌試料のサンプリング



○ 表層5cm以内にインベントリーの95%以上、10cm以内に99%以上が存在し、殆ど変化していない

深度方向の濃度分布の例(川俣町山木屋:Cs-134, 137)

## 福島対応:放射性物質の土壌中深度方向の分布状況調査に関する取組(2次調査)(2/2)

## 土壌構成成分の含有率、CEC及びAEC

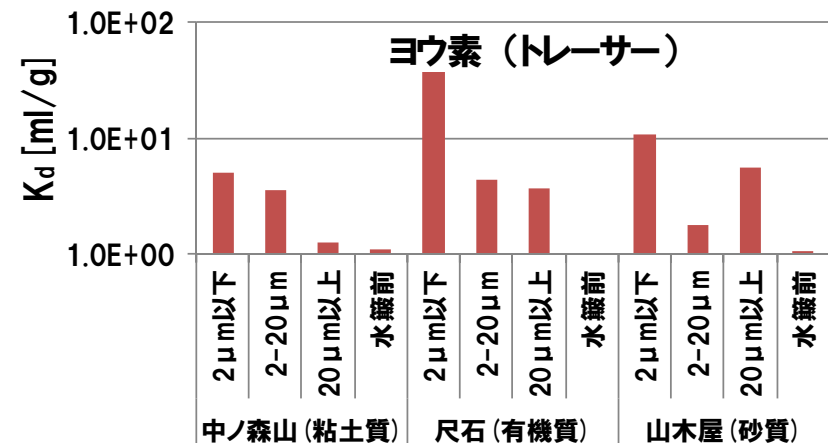
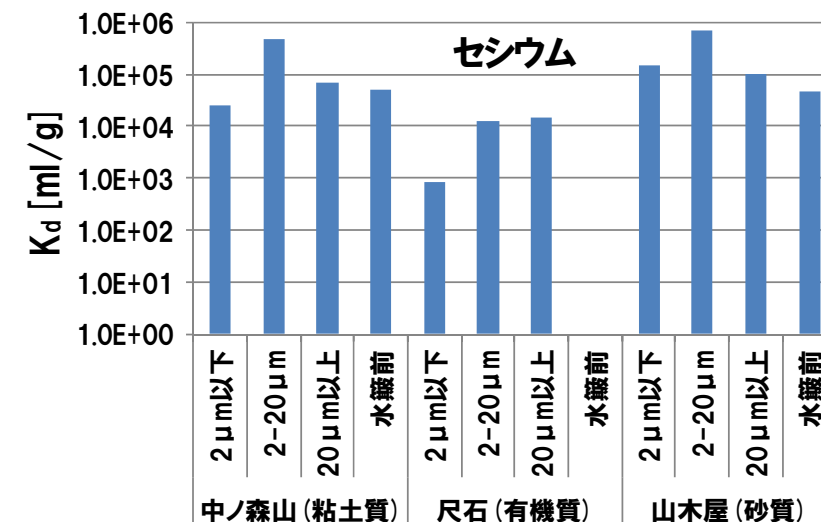
採取箇所	性状	成分	粒径	水簸分級		CEC (meq/100g)	AEC (meq/100g)
				乾燥重量(g)	含有率(%)		
川俣町山木屋 (公民館駐車場下段側)	砂質	無処理				5.5	11.3
		粘土	<2 $\mu$ m	10.8	1.2	21.4	12.1
		シルト	2~20 $\mu$ m	33.6	3.9	21.7	10.7
		砂、礫	>20 $\mu$ m	820.3	94.9	2.4	9.0
浪江町下津島 (中ノ森山登山道入口-3)	粘土質	無処理				10.4	14.3
		粘土	<2 $\mu$ m	3.5	0.8	12.6	16.6
		シルト	2~20 $\mu$ m	190.4	43.9	17.6	14.1
		砂、礫	>20 $\mu$ m	239.8	55.3	8.8	10.3
浪江町屋曽根尺石-1	有機質	無処理				23.6	6.6
		粘土	<2 $\mu$ m	5.2	2.0	83.4	0.5
		シルト	2~20 $\mu$ m	38.8	14.7	58.2	4.6
		砂、礫	>20 $\mu$ m	220.1	83.3	7.3	5.2

## &lt;土壌構成成分と鉱物組成&gt;

- 粘土質土壌は、シルト以下の粒子が半分近く含有
- 粘土鉱物としてバーミキュライト、マイカ、カオリナイトが同定
- 粘土質土壌は、バーミキュライト(砂・礫成分にも含有)、砂質土壌は、マイカとカオリナイトが主体、有機質土壌は、各粘土鉱物が同程度含有

 <収着分配係数 $K_d$ >

- 1次調査における $K_d$ と同程度の範囲( $C_s:K_d=10^3\sim 10^5$ ml/g,  $l:K_d=10^{-1}\sim 10^2$ ml/g)
- シルト成分への $C_s$ の $K_d$ は高い  $\Rightarrow$  シルト成分に粘土鉱物(バーミキュライト、マイカ、カオリナイト)が多いため
- 有機質土壌への $C_s$ の $K_d$ は低い  $\Rightarrow$  有機物との錯形成よりも土壌構成成分への収着の方が高いため


 土壌及び土壌構成成分に対する $K_d$

### 地層処分研究開発

- ① 処分場の設計や安全評価の信頼性を向上させるため、人工バリアの長期挙動と核種の収着・拡散等に関するモデルの高度化・データ拡充を図るとともに、緩衝材中における核種の現象論的収着・拡散モデル及び基本定数データベースを構築した。
- ② 深地層の研究施設等の成果も活用して、現実的な性能評価手法の整備を継続するとともに、熱-水-応力-化学連成モデルを用いた人工バリア試験の事前解析を実施した。幌延深地層研究所では、低アルカリ性コンクリートの吹き付け施工による周辺岩盤への影響を観測するとともに、低アルカリ性材料を用いた湧水抑制対策の適用試験を実施した。
- ③ 今後、深地層の研究施設を活用しつつ、処分システムの長期変遷と核種移行の現実的・複合的な現象理解を進め、更なる信頼性向上に資する。また、これまでの地層処分研究成果等を活用しつつ、直接処分の技術的実現性検討に着手する。

### 福島原子力事故に対する取り組み

- ① 環境修復等に向けた技術的貢献を継続した。
- ② 今後、サイト内廃棄物対策も含め、福島技術本部の事業に対し、地層処分研究開発成果等を活用して可能な限り技術的貢献を進めるとともに、福島対応によって得られた知見の処分研究開発へのフィードバックを試みる。