



# 地層処分研究開発の現状と今後の予定

平成24年12月6日  
日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門

## 第二期中期計画（平成 22 年4 月1 日～平成 27 年3 月31 日）

### (2) 高レベル放射性廃棄物の処分技術に関する研究開発

実施主体である原子力発電環境整備機構による処分事業と国による安全規制の両面を支える技術基盤を整備していくため、「地層処分研究開発」と「深地層の科学的研究」の2つの領域において、他の研究開発機関と連携して研究開発を進め、地層処分の安全確保の考え方や評価に係る様々な論拠を支える「知識ベース」を充実させる。

実施主体や安全規制機関との技術交流や人材交流等を進め、円滑な技術移転を図る。また、研究施設の公開や研究開発成果の発信等を通じて、国や実施主体等が行う地層処分に関する国民との相互理解促進に貢献する。

### 1) 地層処分研究開発

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。

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。

## 平成24年度計画

### 1) 地層処分研究開発

処分場の設計や安全評価の信頼性を向上させるため、地層処分基盤研究施設や地層処分放射化学研究施設等を活用して、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やデータベースの拡充を継続し、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する。

深地層の研究施設等の成果を活用して、天然現象による長期変動を考慮した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する。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する。また、人工バリアの工学技術に関する研究を通して、国が進める地層処分実規模設備整備事業に協力する。

地層処分システムの安全機能に基づくシナリオ構築手法の開発

地層処分システムにおける総合的性能評価手法の開発

岩盤規模把握技術の実証

岩盤中の水理・物質移動評価手法の整備:

沿岸域塩淡境界解析手法の高度化

亀裂開口幅設定手法の検討

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

核種移行パラメータ設定手法の高度化

幌延岩石の収着拡散モデル

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)

福島为学校施設、モデル地区における線量低減への取り組み

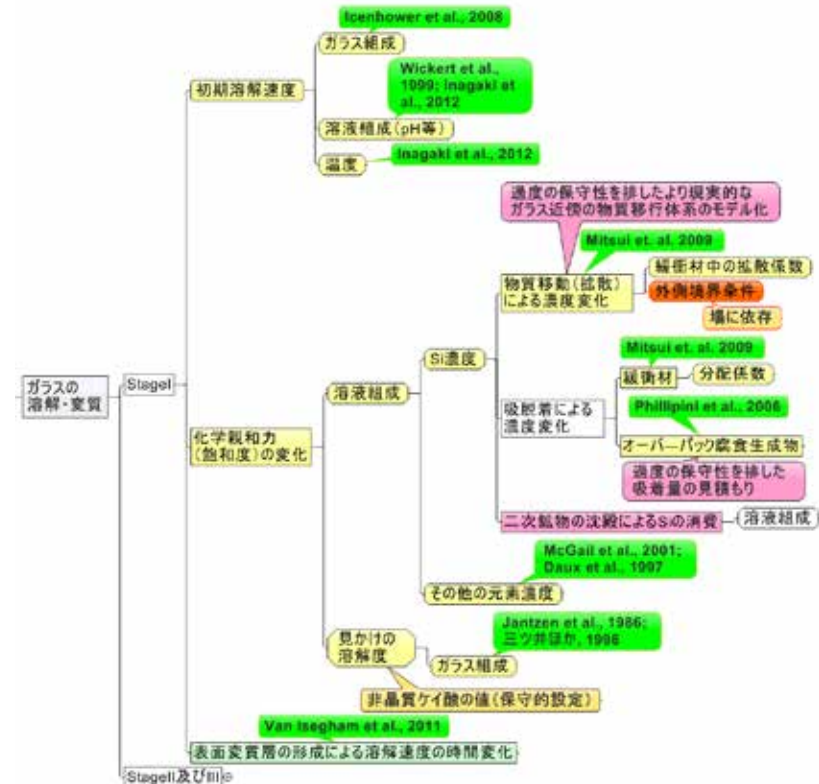
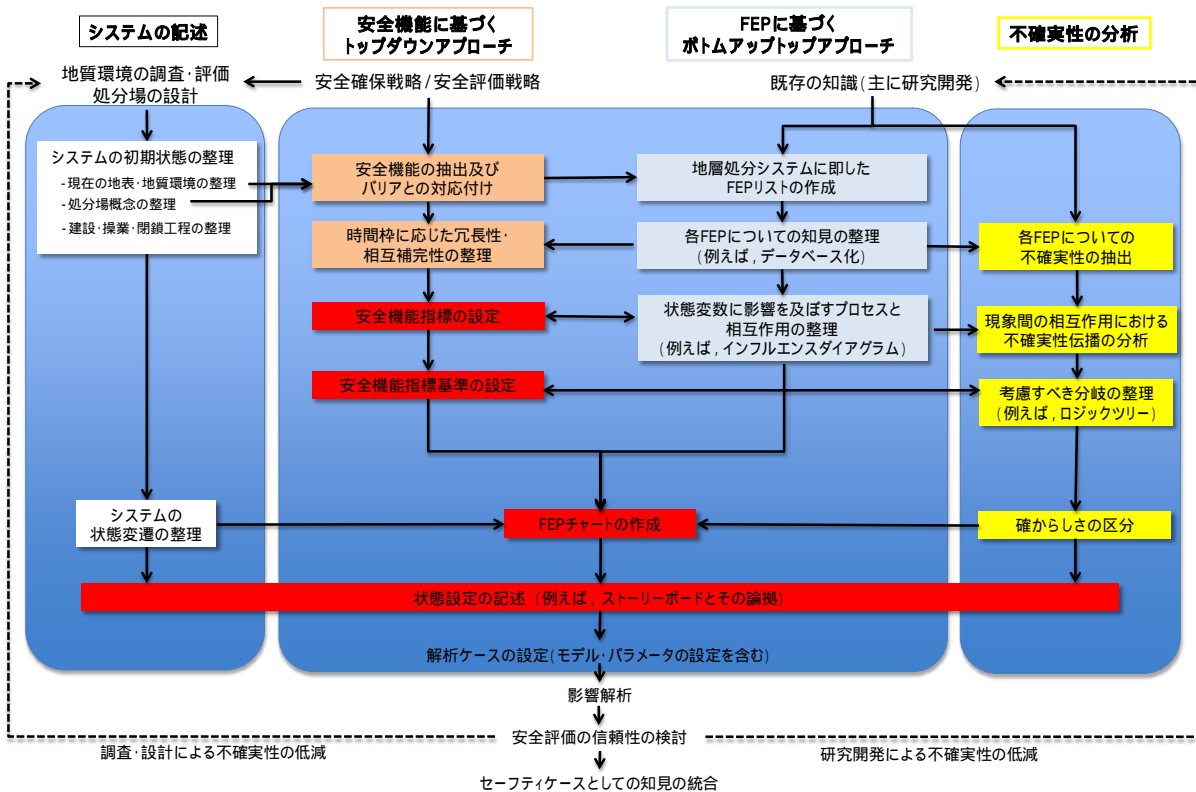
地層処分技術を活用した福島事故に関する取り組み

地表におけるCs動態解析

土壌のCs動態調査

シナリオ構築において検討すべきことの再整理を行うとともに、シナリオ構築の前提となる状態設定に係る作業フローの具体化を試行

シナリオ構築の前提となるシステム理解の一環として、個別現象に関する最新の知見の調査と情報の構造的な整理を実施



「ガラス固化体からの核種の浸出」に係る因子の構造的な整理例（部分）

- 重要な環境条件依存性、不確実性のハイライト
- 文献情報の記載
- 解析ケース、パラメータ設定にも有効な情報整理情報の追跡性等の担保

安全機能に基づくトップダウンアプローチとFEPを用いたボトムアップアプローチを統合化した状態設定の基本的流れの例

1 廃棄体の配置などの処分場の設計オプションや、坑道周辺岩盤の透水性などの特性を反映可能な**現実的な性能評価手法の体系的な整備に向けた情報の整理を実施**

## 処分場レイアウトの最適化に関する検討例

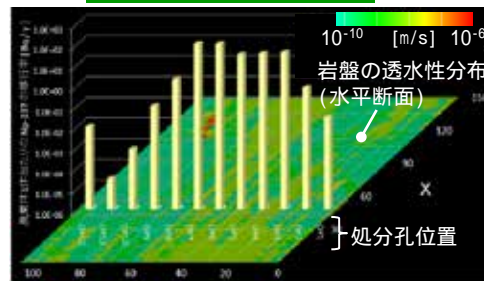
問題設定

問題分析

対処方針

事例 :

人工バリアの位置とともに、その**周辺岩盤の特性**を考慮した処分場レイアウトの最適化



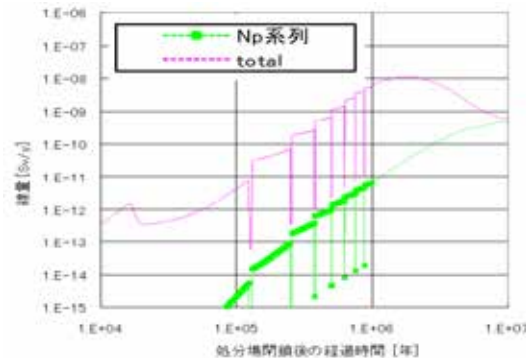
岩盤の透水性の不均質性、処分孔の配置等を考慮した解析例

- ・地質環境の不均質性把握技術 (トモグラフィ等の物理探査技術)
- ・低拡散バリアの開発技術
- ・不均質性推定技術(地球統計学的手法の応用等)

地質環境調査，処分技術，性能評価それぞれの分野について，必要と考えられる**要素技術を試解析等を通じて整理**

事例 :

海水準変動，隆起・侵食による**地下水流動の変化**を考慮した処分場レイアウトの最適化



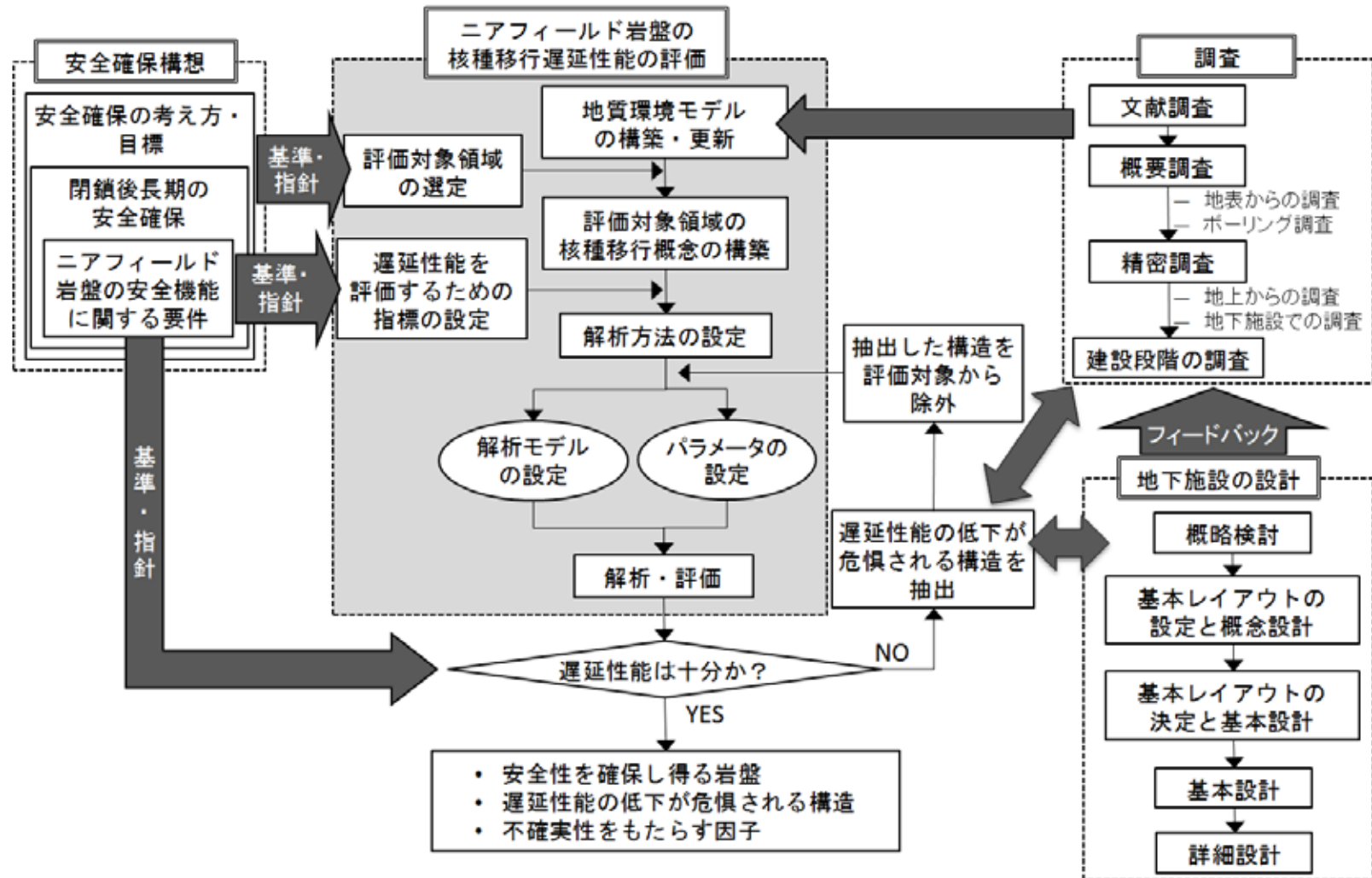
環境変遷(海水準と塩水・淡水の変化)を考慮した解析例(NUMO, 2011)

- ・地下水流動推定技術(地形・地質構造の変化を考慮した解析等)
- ・周囲からの地下水流動の影響を受け難い構造の構築技術(Hydraulic Cage)
- ・地質環境中での放射性物質の動態推定技術(物性等の経時変化を考慮した解析等)

処分場レイアウトの最適化に関して設定した事例に対し，地層処分技術に関する各分野の要素技術を精査し，対処可能あるいは開発が必要な技術を整理

# 岩盤規模把握技術の実証

- 1 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
- 1 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
- 1 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

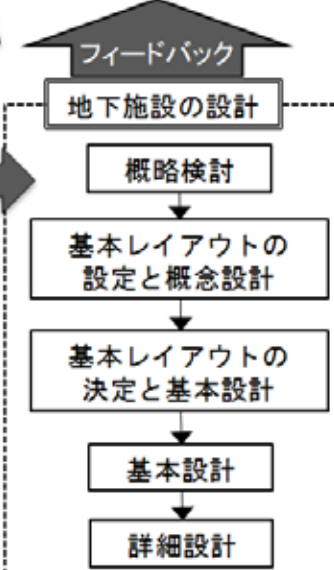


遅延性能は十分か?

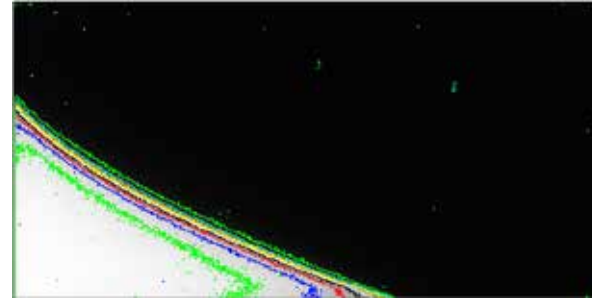
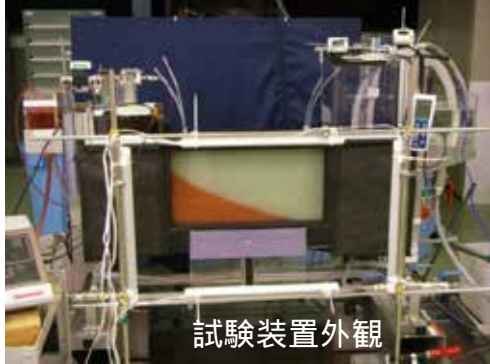
YES

- 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

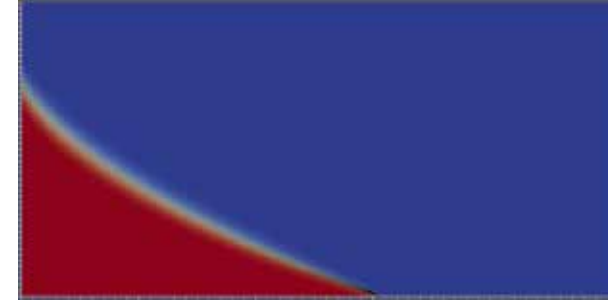
NO



- 沿岸域等，塩水・淡水が共存する場での移流・拡散に密度流が連成した地下水流動解析コードの検証と，検証のための室内試験データ取得



塩水楔試験結果

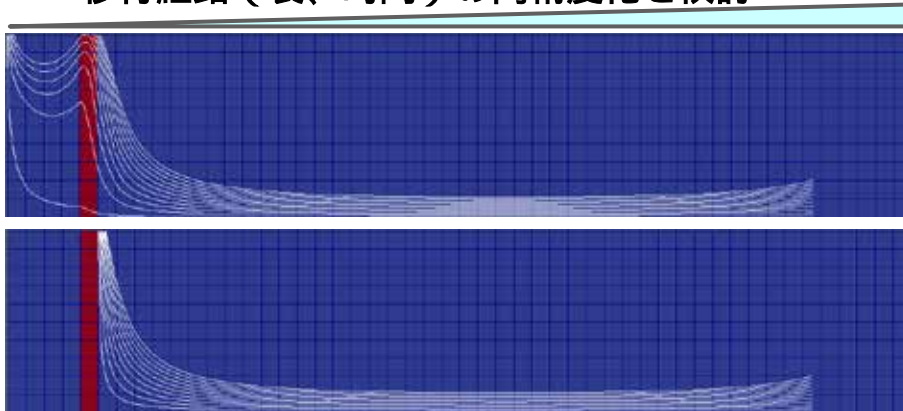


解析結果

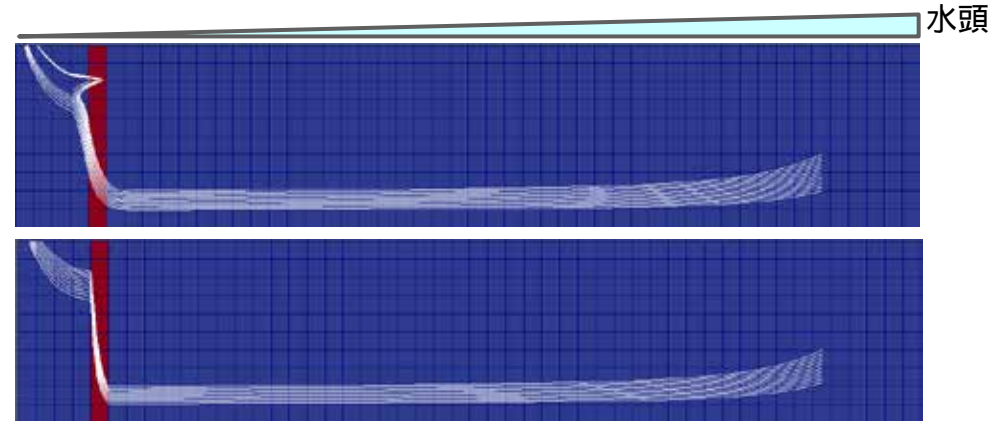
密度流を連成した地下水流動解析コードの検証例

- 安全評価に資するために地下水解析手法の高度化

- 要素境界（面や辺）に、質量保存則と流速が連続する条件を課すことで、流量、流出点、移行経路（長、時間）の高精度化を検討



上：一般的有限要素法、下：高度化有限要素法




上：一般的有限要素法、下：高度化有限要素法

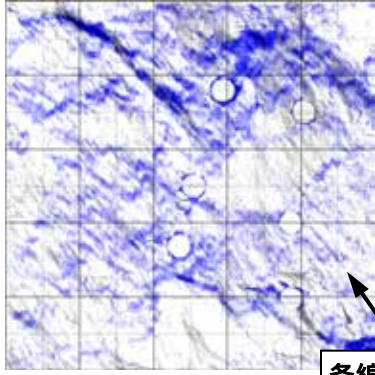
地下水解析手法の高度化の検討例



## I 50cmスケールの亀裂形状の精密計測から、実際の亀裂の地質学的特徴を考慮した調査の必要性を提案



研削初期の様子



0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 mm

亀裂開口幅分布

亀裂内の不均質な開口部の分布は（チャンネル構造）亀裂のせん断などに起因した地質学的な構造に強く依存

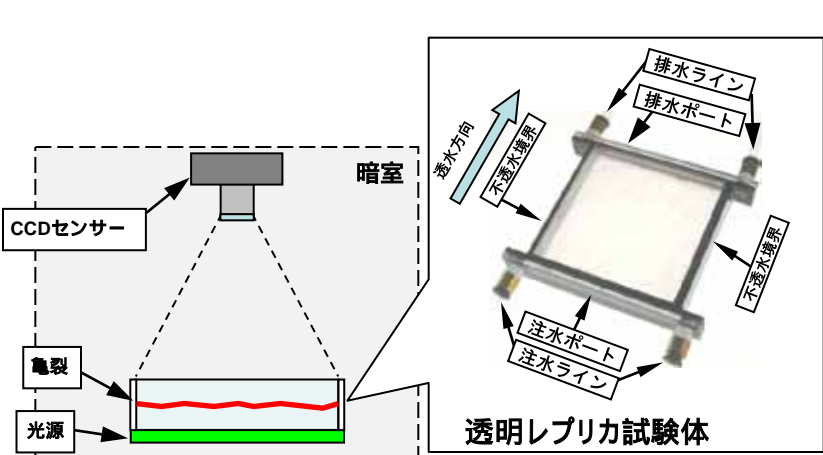
↓

- 実際の亀裂の特徴を理解するデータ取得の重要性
- 地質学的構造の特徴的なスケール（条線、スリッペンステップ、亀裂分岐、交差など）に応じた調査

研削による亀裂形状計測

条線に起因したと考えられる線状構造の方向

## I 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とデータの拡充



暗室

CCDセンサー

光源

亀裂

透明レプリカ試験体

透水方向

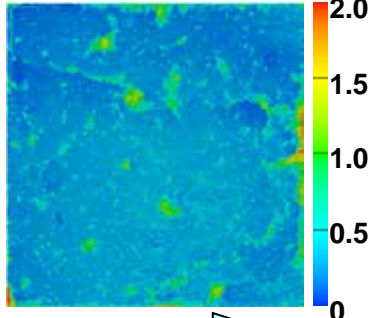
不透水壁

排水ライン

排水ポート

注水ポート

注水ライン



0 0.5 1.0 1.5 2.0 mm

透水方向

亀裂開口幅分布の測定結果

亀裂表面形状、開口幅分布の定量データと透水トレーサー試験データの取得手法の高度化

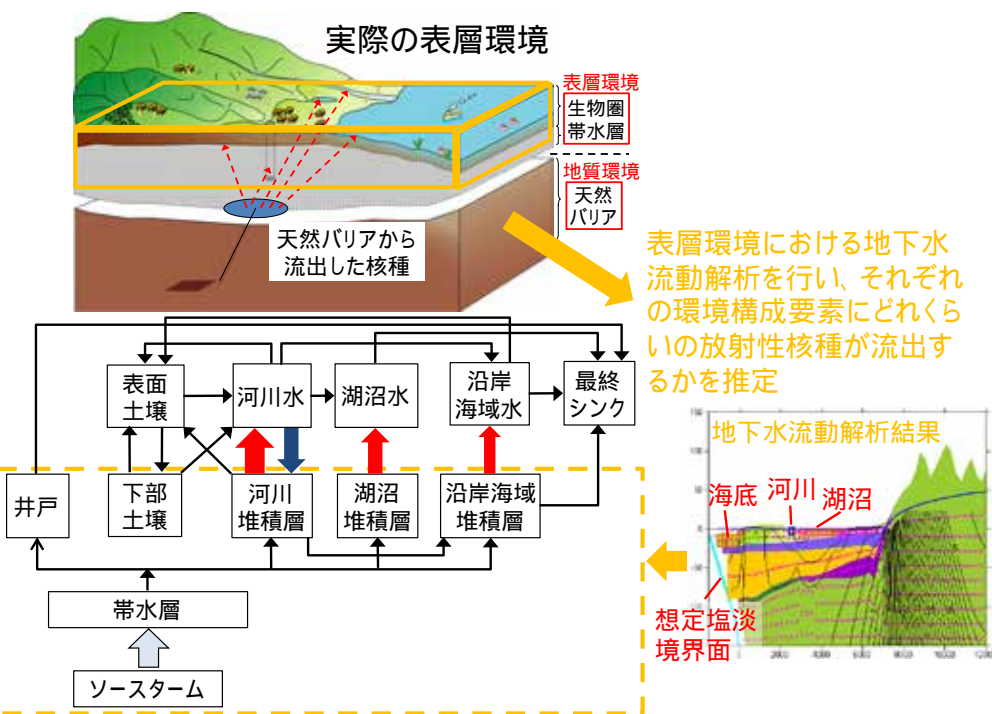
↓

- 不均質に開口幅が分布する亀裂内の移流・分散プロセスの検証データとして活用
- 亀裂内の不均質構造が亀裂の水理や物質移行に与える影響の把握

亀裂形状と開口幅の光学的測定概念図

- 1 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

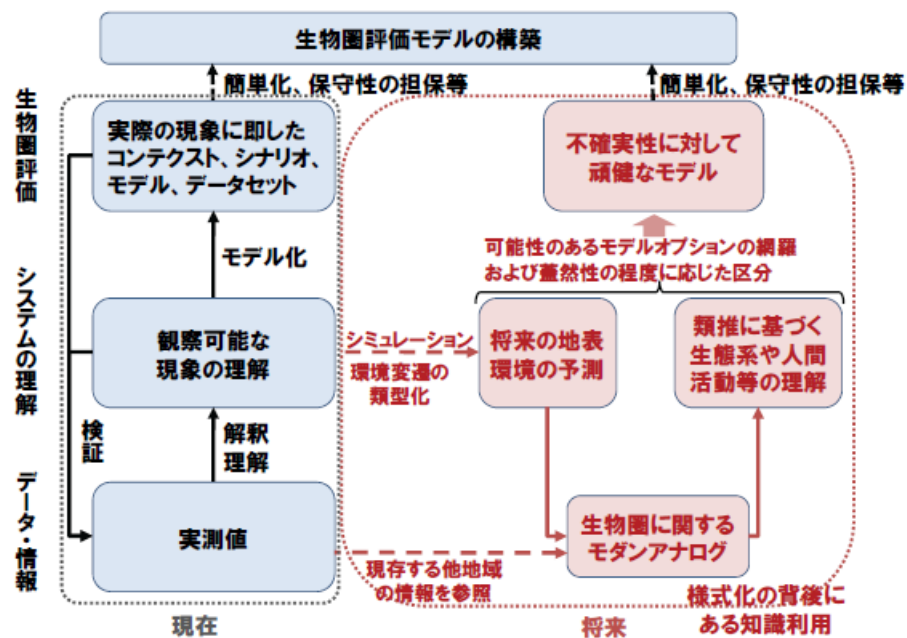
## n 実際の表層環境の情報を用いた生物圏モデル構築のイメージ



- 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かを推定し，流出域を設定
- この結果に基づき，生物圏モデルのパーツ（環境構成要素）を設定

## n 長期の生物圏評価における知識利用の概念

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
- 赤字部分は，生物圏評価モデル構築における様式化の背後にある知識利用に係わるプロセス

【実施内容】

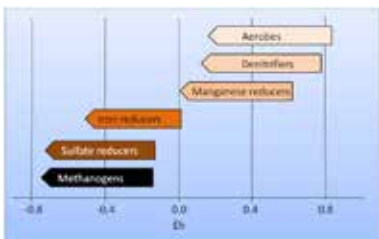
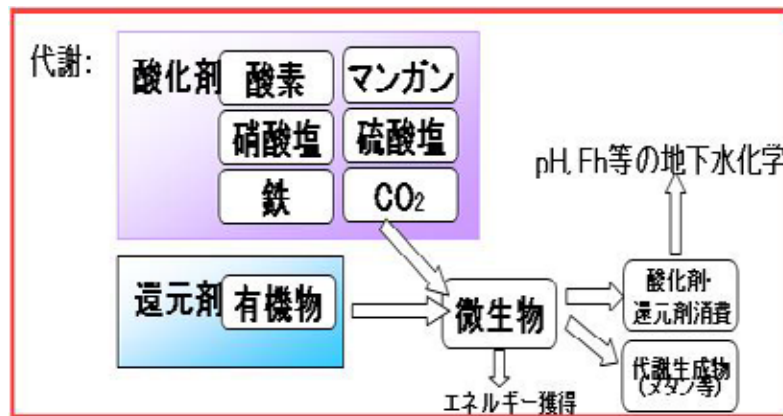
(1) 酸化還元状態に与える微生物影響評価手法の構築

・室内試験および原位置試験により取得したデータを用い、微生物反応のモデル化により微生物影響評価手法を構築した。

(2) 酸化還元状態の変化を考慮した試験によるデータ拡充

・室内試験および幌延での原位置試験を実施した。

地球化学計算コード PHREEQC による解析平衡反応計算

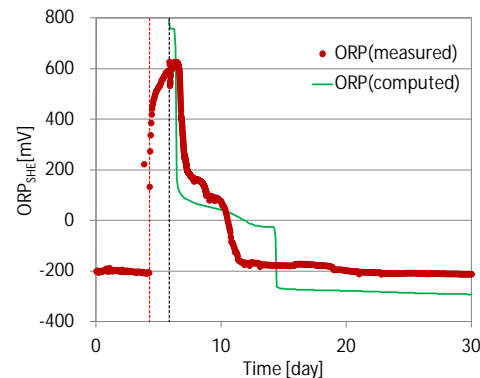
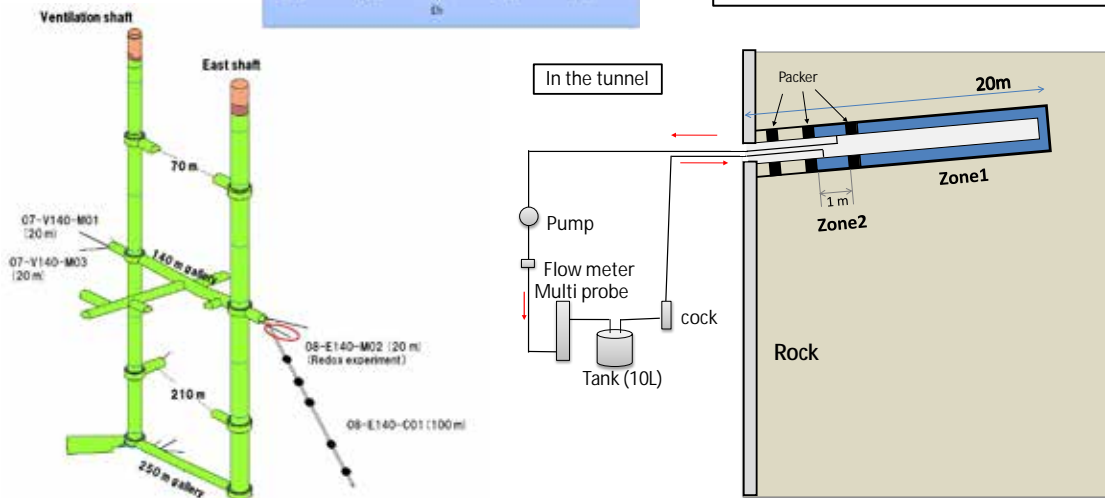


微生物増殖速度式  
Monod式

$$r_x = K_{max} \cdot Y \cdot S / (K_s + S) \cdot X$$

必要なパラメータ

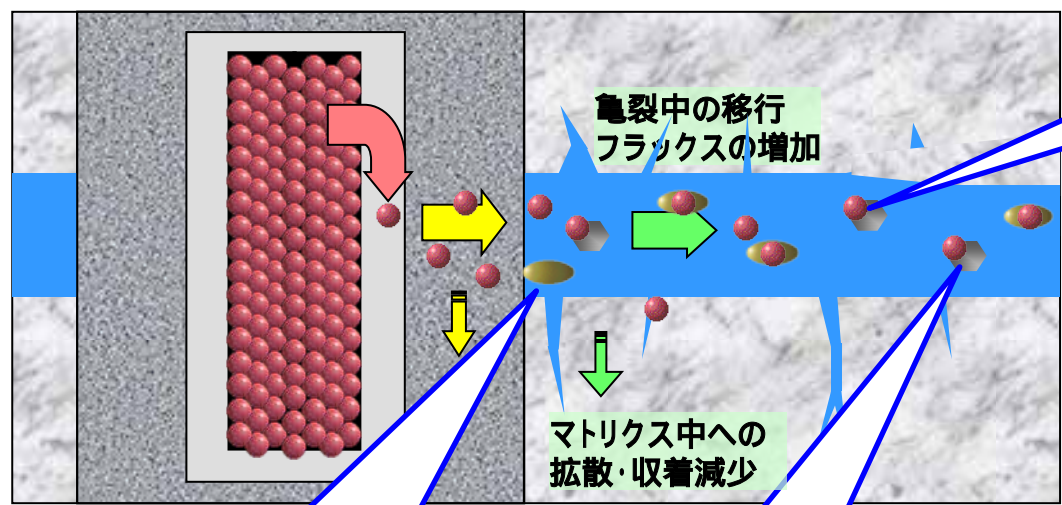
- $K_{max}$ : 有機物最大消費速度
- $Y$ : 細胞収率
- $S$ : 電子供与体濃度
- $K_s$ : 半飽和定数
- $X$ : 微生物量



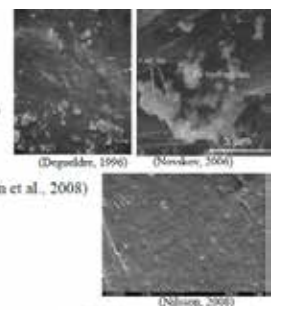
・原位置試験における酸化還元電位、溶存酸素、pHの変化傾向を解析により再現できた。

# 核種移行に及ぼすコロイド影響評価手法の開発

## 重要コロイド種の抽出



- ・天然コロイドの報告例
- ケイ酸・アルミノケイ酸コロイド
    - ・Whiteshell (0-1200 m) (Vilks et al., 1991)
    - ・Grimsel, Leuggern (-1680 m) (Degueldre et al., 1996)
    - ・Daejeon (-30-457.5 m) (Baik et al., 2007)
  - 粘土コロイド
    - ・Forsmark (-452.7 m), Oskarshamn (-437.5 m) (Nilsson et al., 2008)
  - 水酸化鉄 (HFO) コロイド
    - ・Whiteshell (0-1200 m) (Vilks et al., 1991)
    - ・Mayak PA (-20-100 m) (Novikov et al., 2006)
    - ・Daejeon (-30-457.5 m) (Baik et al., 2007)
    - ・Gorleben 2227 (-128 m) (Plaschke et al., 2002)
  - フミンコロイド
    - ・Gorleben (-10-234 m) (Buckau et al., 2000)

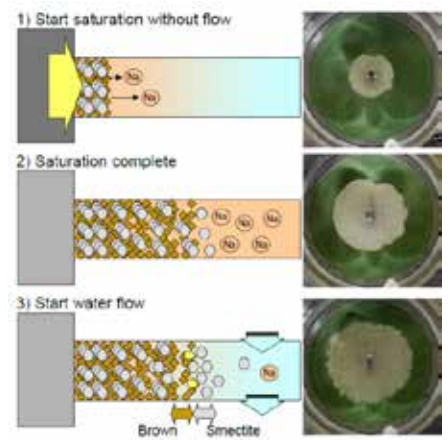


## ベントナイトコロイド生成速度

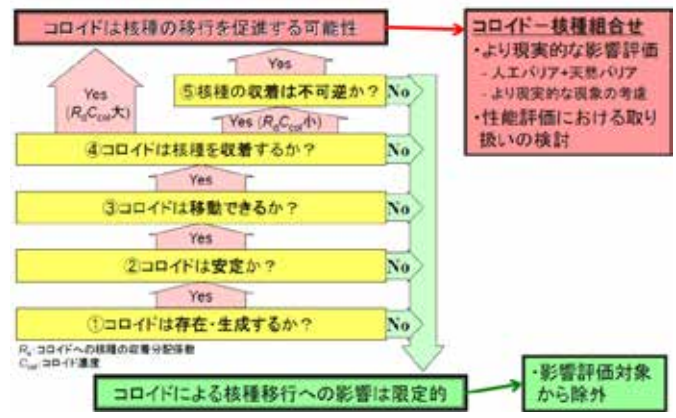
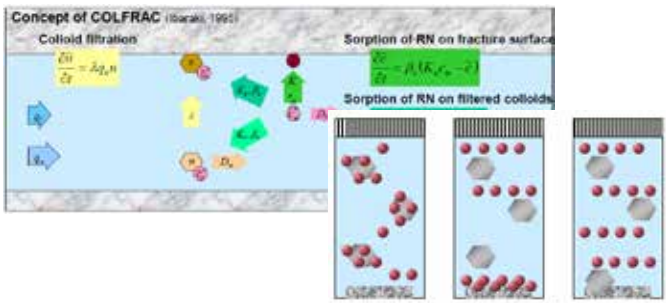
## 核種 - コロイド 収着挙動

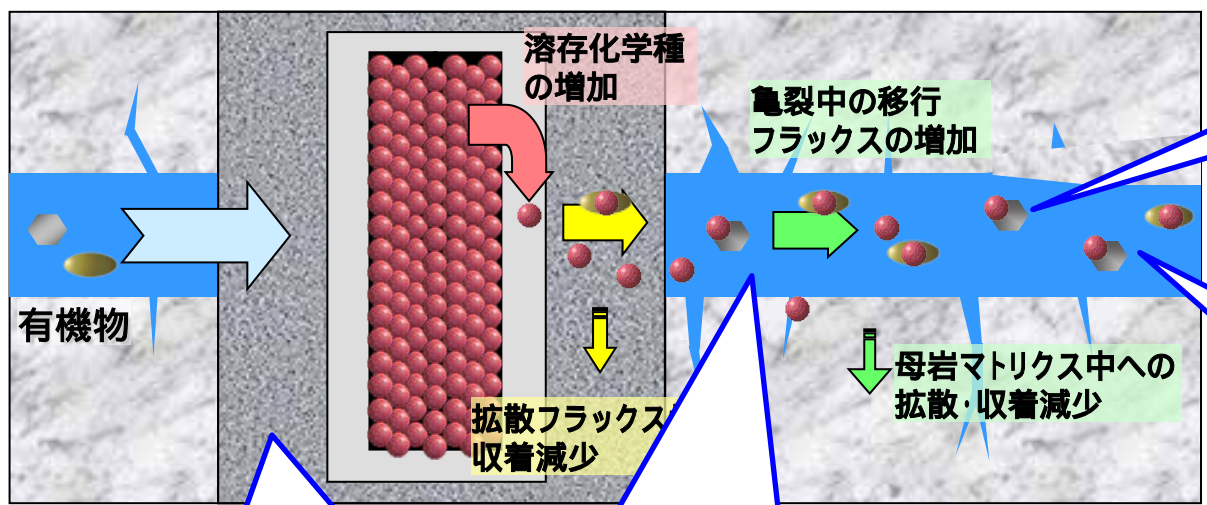
## コロイド影響評価ガイドラインの提示

## 核種 - コロイド - 岩石三元系における評価

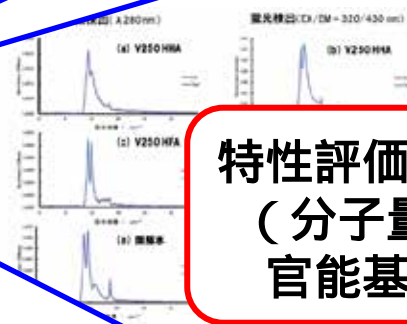


コロイド生成試験 (BENTFLOW)





天然有機物の特性評価

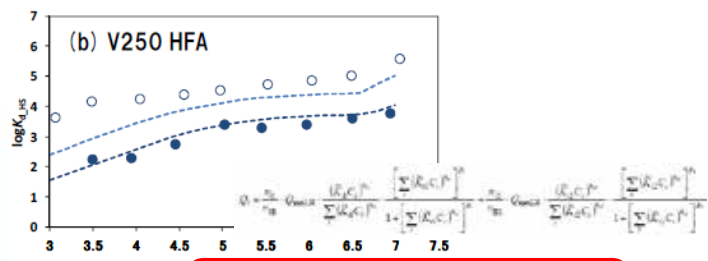


特性評価手法開発  
(分子量分布、官能基分析)

緩衝材による有機物のフィルター効果

核種 - 有機物 - 緩衝材・岩石三元系における移行評価

有機物-核種の錯形成モデルの構築



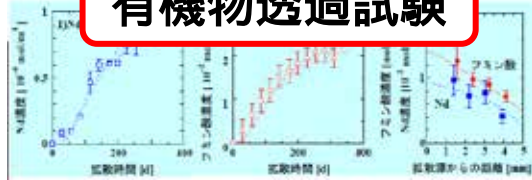
錯形成モデル開発



有機物透過試験



有機物収着試験



## 核種移行への有機物影響顕在化条件の把握

# 収着・拡散データベースの開発

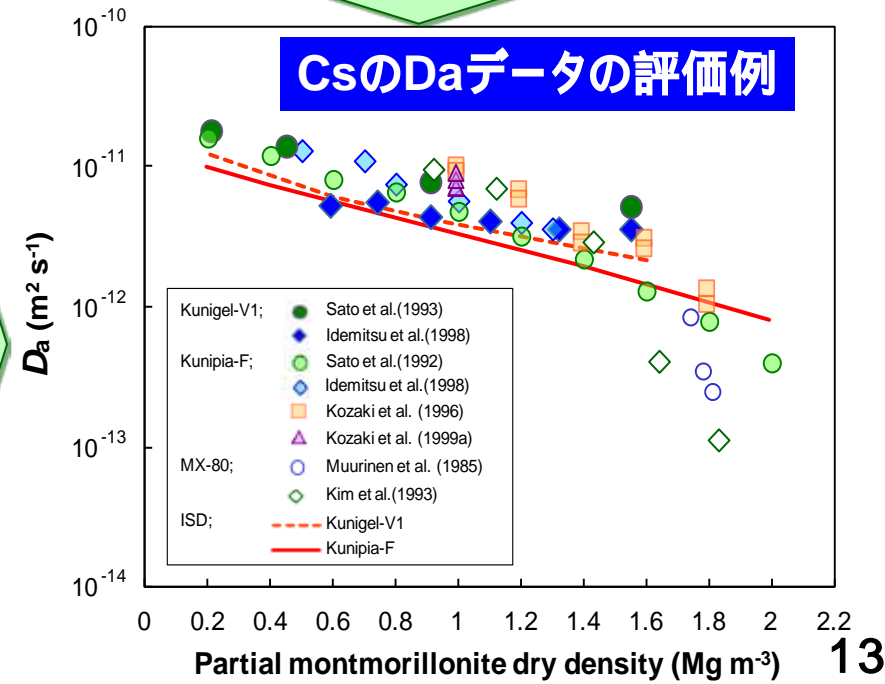
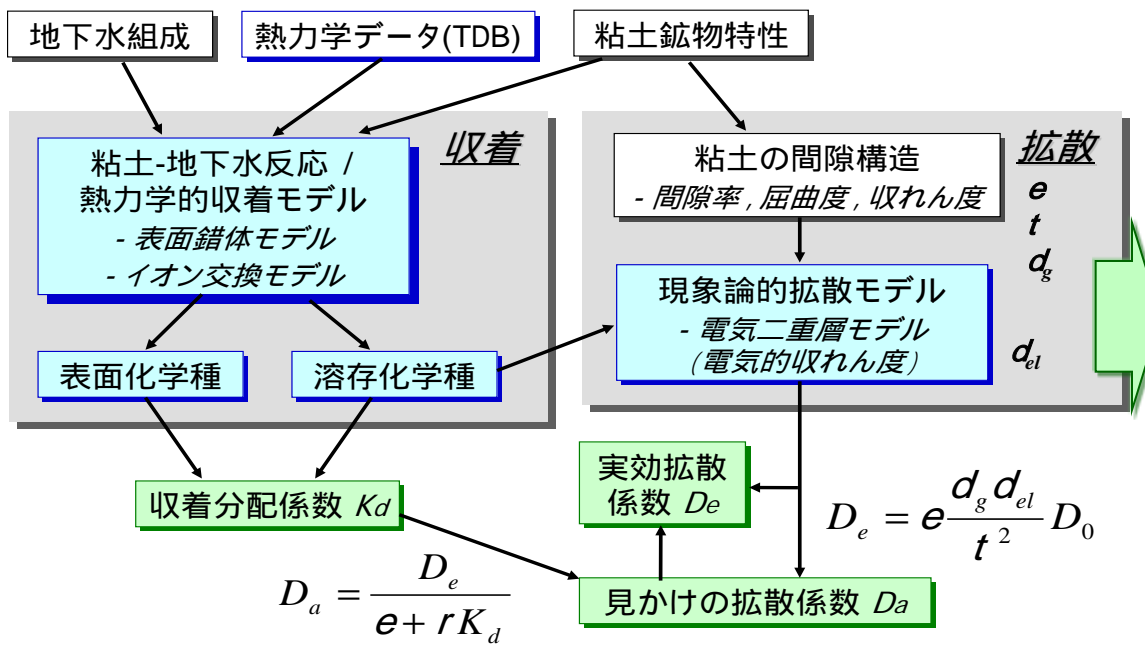


性能評価における信頼性の高い核種移行パラメータ設定を支援するため、

- q NEA収着プロジェクト等の最新動向を反映しつつ、
- q ベントナイト中の現象論的収着・拡散モデル/データベース体系 (ISD) を構築
- q 実測値データベース (JAEA - SDB / DDB) と連携し、多様な核種 / 環境条件への適用性を提示

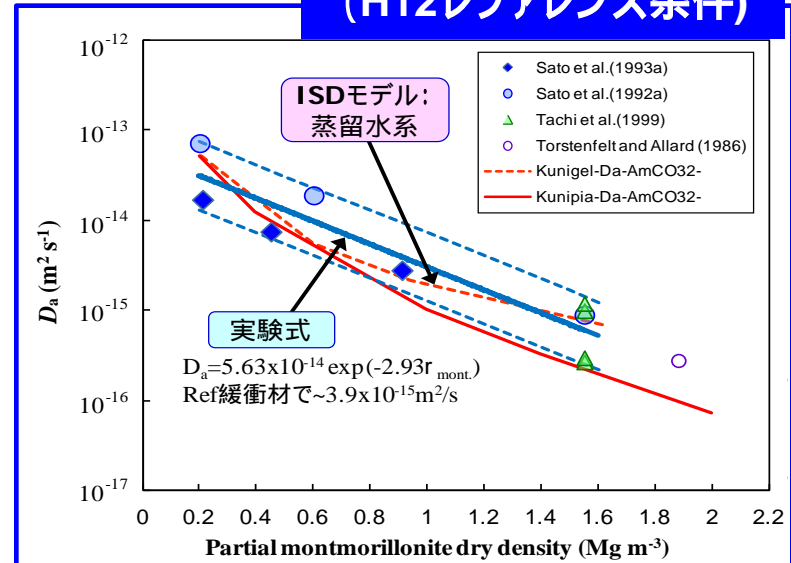
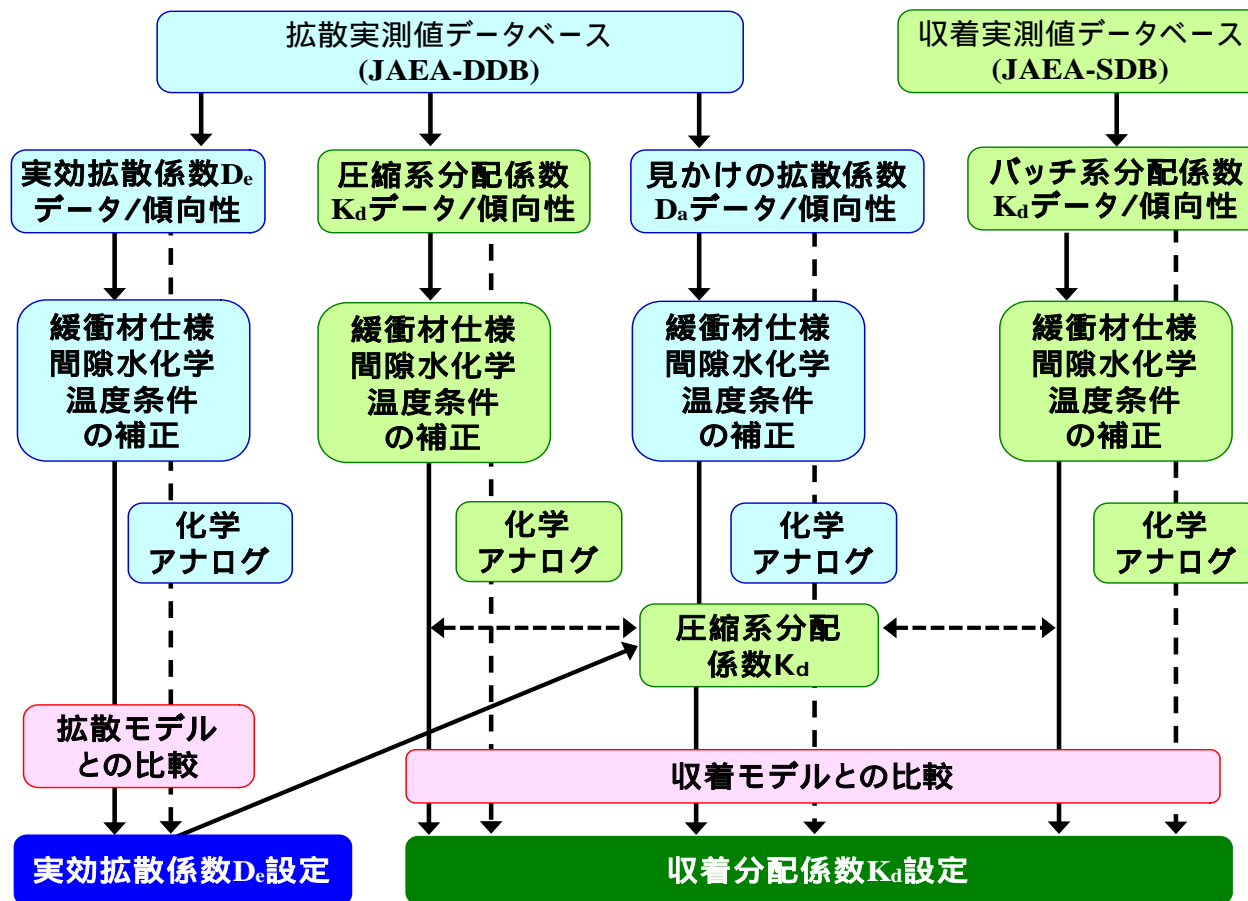


## 現象論的収着・拡散モデル (ISD) の概念



# 核種移行パラメータ設定手法の高度化

Amの $K_d$ 設定例  
(H12レファレンス条件)



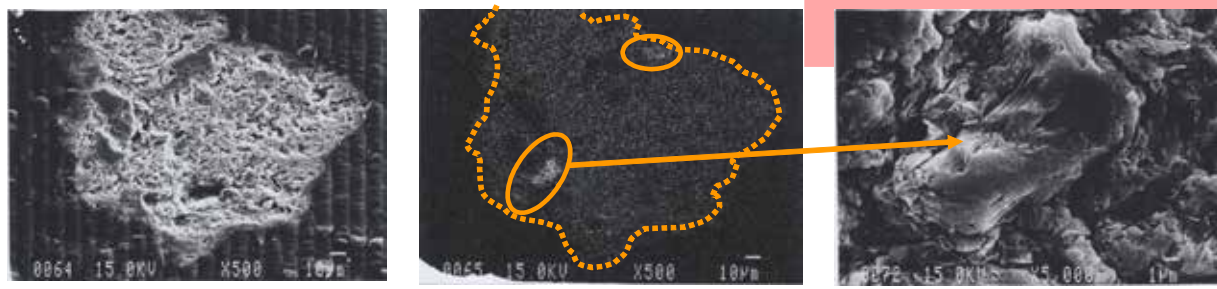
		FRHP/FOHP 間隙水	
実測ベース設定 (圧縮系 $K_d$ より)	設定値	$2.5 \times 10^1$	
	不確実性	$1.5 \times 10^1$	$3.5 \times 10^1$
実測ベース設定 ( $D_a$ より)	設定値	$1.4 \times 10^0$	
	不確実性	$7.0 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^0$
モデルベース設定	設定値	$1.2 \times 10^1$	
	不確実性	$5.4 \times 10^0$	$2.5 \times 10^1$
第2次取りまとめ	設定値	$(1 \times 10^1)$	
	不確実性	$(1 \times 10^1)$	$(5 \times 10^1)$

- 「拡散及び収着データベース(JAEA-DDB/SDB)」による参照データの効率的な抽出・選定
- 多様な核種と条件下での実効拡散係数データに基づく、「実効拡散係数評価」(HTOから化学アナログへ)
- 圧縮系で実測された「圧縮系の分配係数」, 圧縮系とバッチ系の整合確認に基づく「バッチ系データ」の活用
- 多様な核種・条件への適用性が確認された「収着・拡散モデルの活用」
- 多様な緩衝材条件のデータの「部分モンモリロナイト密度」による補正 などのH12からの変更

# 泥岩試料を用いた収着拡散モデルの検討

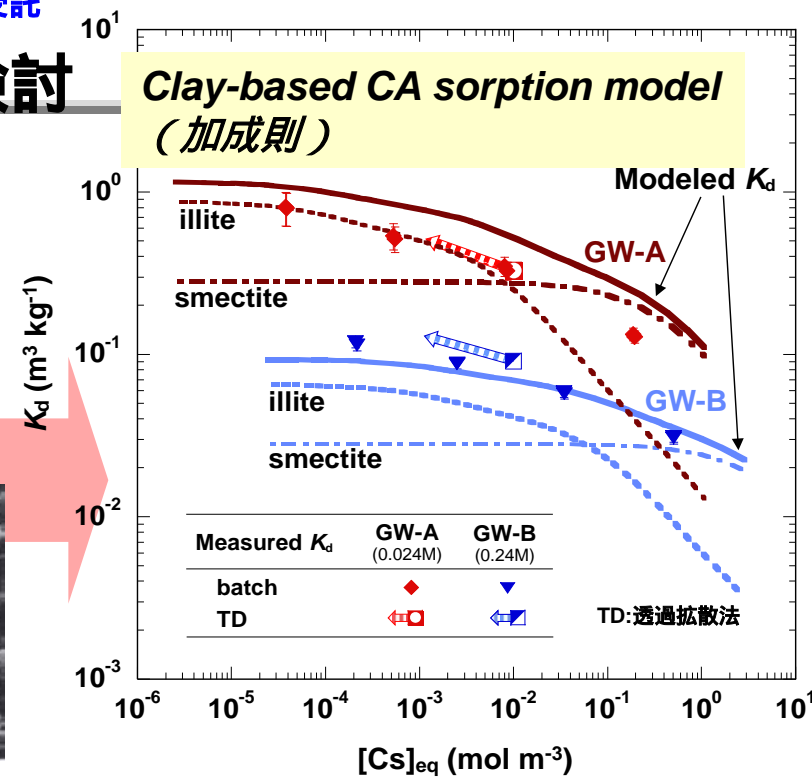
- 幌延の泥岩を試料として拡張型TD/RD法の適用性を確認
- Cs/HTO/I の拡散・収着の塩濃度依存データを対象に粘土ベースモデルを適用評価

## 収着へ寄与する岩石構成鉱物の特定

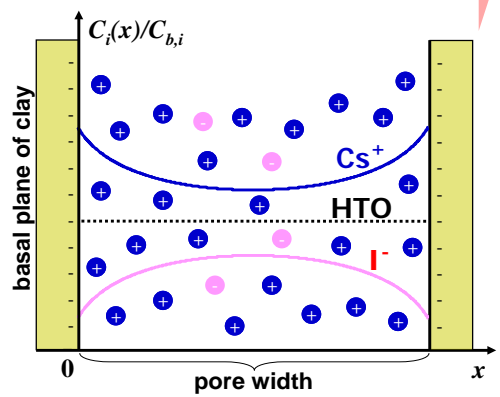
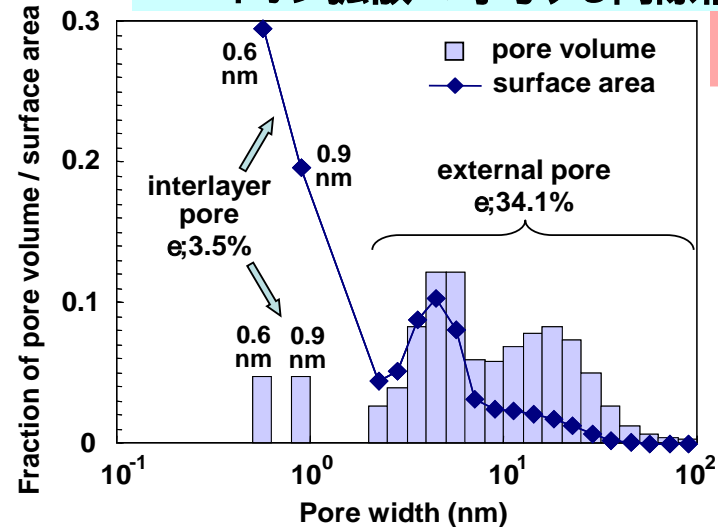


rock fragment      Elemental map for Cs      Illite particle

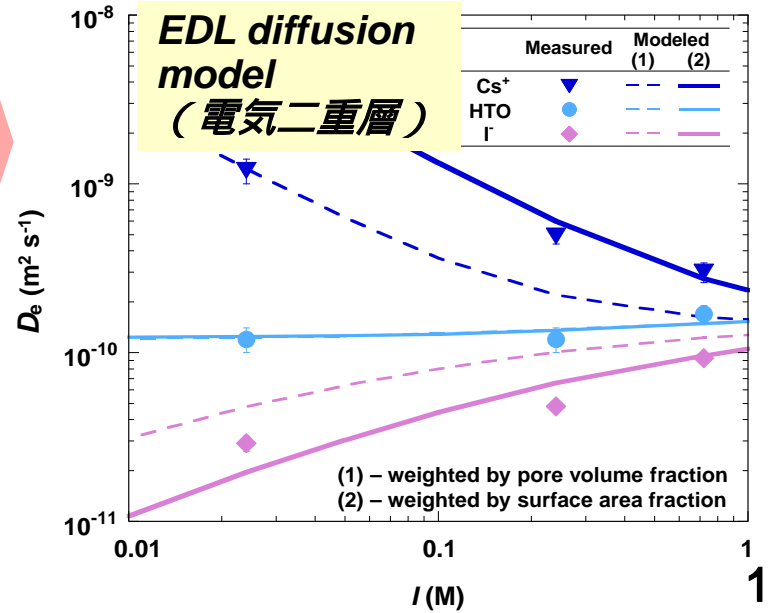
## Clay-based CA sorption model (加減則)



## イオン拡散へ寄与する間隙構造の評価



## EDL diffusion model (電気二重層)



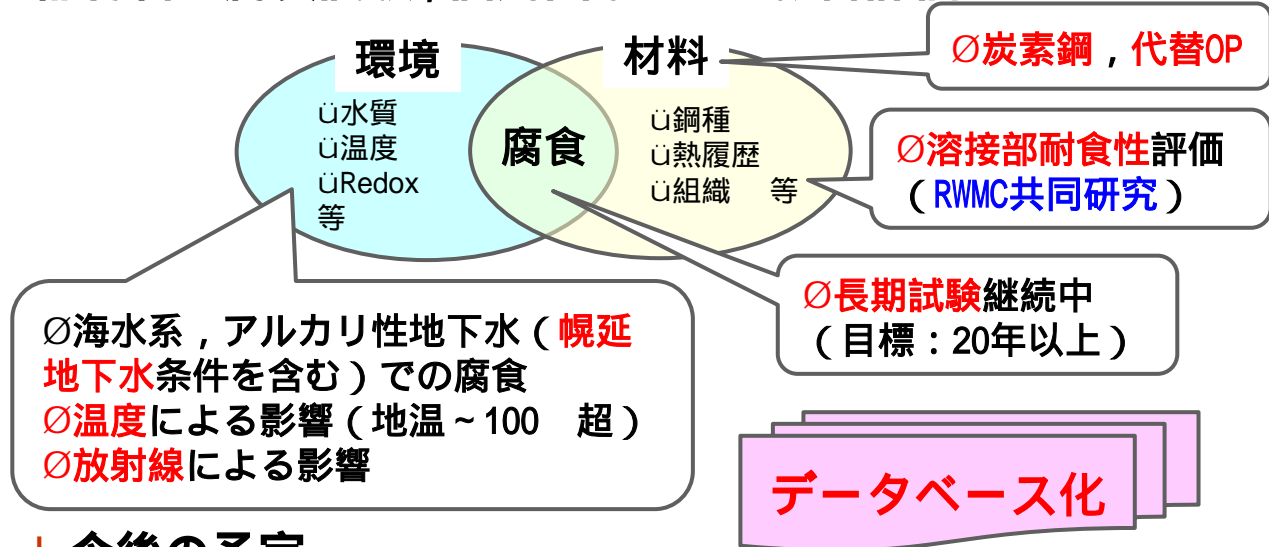


## 目的

オーバー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、オーバー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ーパック候補材料の腐食試験、個別因子による影響評価



海水系，アルカリ性地下水（幌延地下水条件を含む）での腐食  
 温度による影響（地温～100 超）  
 放射線による影響

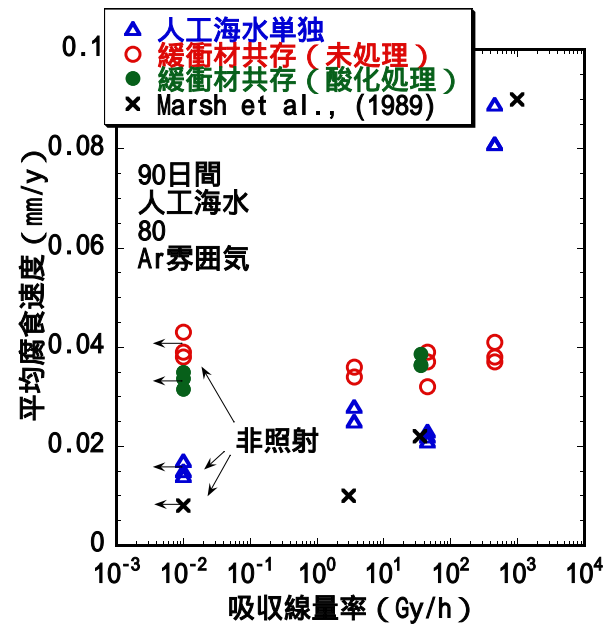
## 今後の予定

- オーバー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）



照射室 照射室内の試験容器

線照射下での試験状況（高崎量子応用研究所Co-60 線照射施設にて実施）



低酸素濃度下の炭素鋼の腐食に及ぼす線量率の影響  
 緩衝材による線影響緩和効果を確認

## 【研究開発の目的】

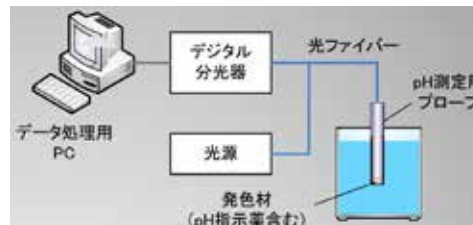
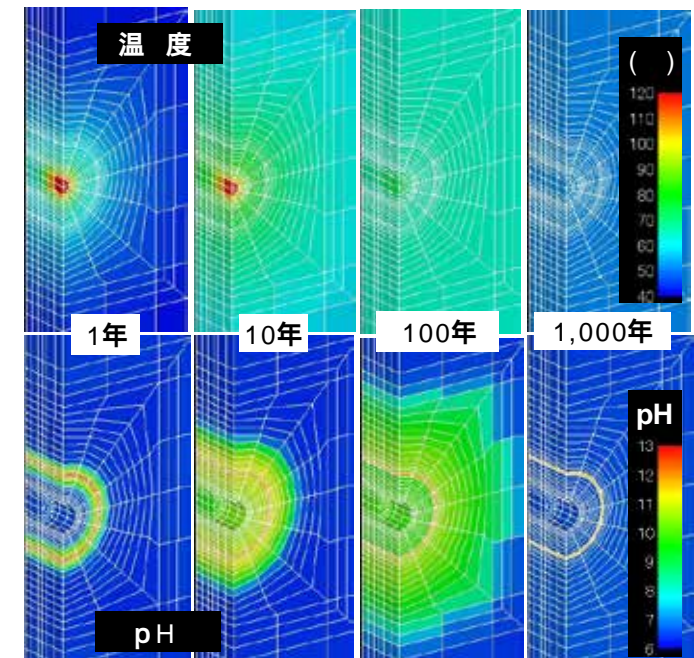
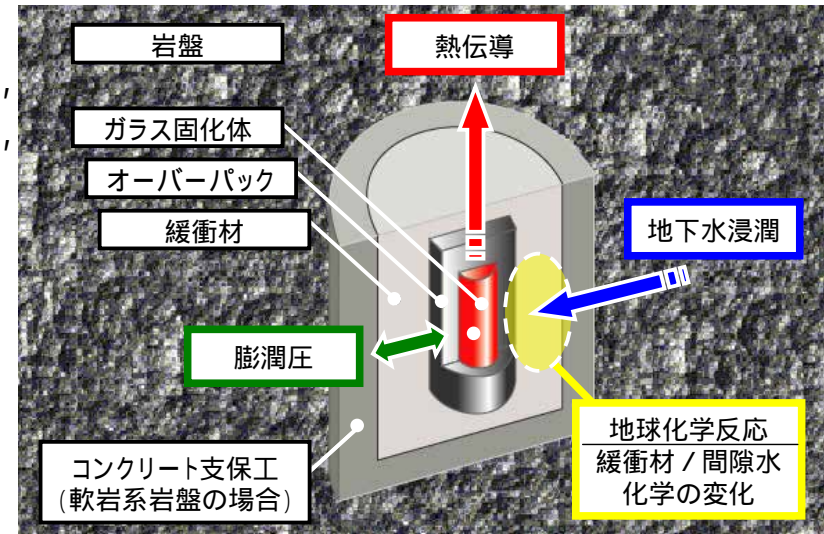
処分場を設計する際の保守性や信頼性, 処分場閉鎖時の判断, 閉鎖後の性能評価への反映を目的とした坑道掘削, 廃棄体定置, 閉鎖後におけるニアフィールドの熱的, 水理的, 力学的, 化学的なプロセスの時間的・空間的な変化を **評価するモデルと計測手法** の開発

## 【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

## 【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)

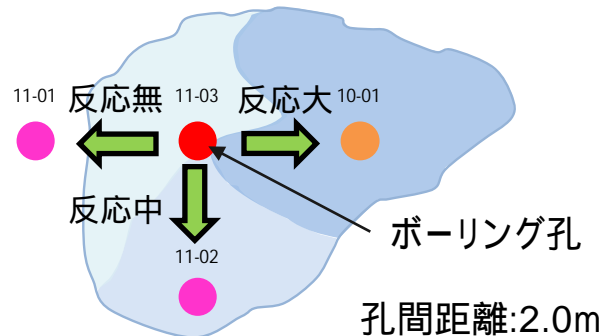


暴噴対策装置 (プリベンダ)

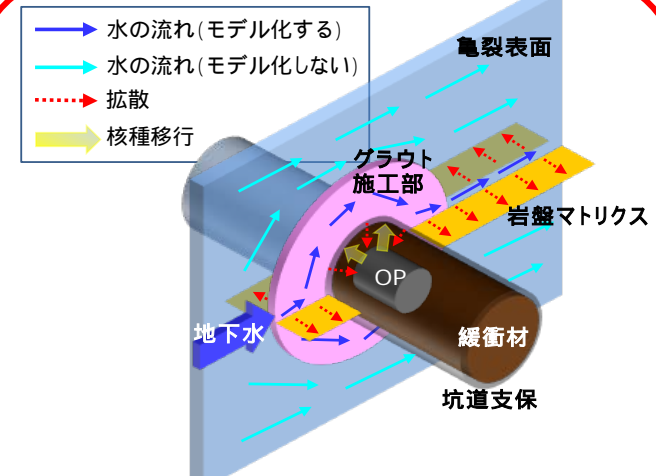
原位置での高圧対応装置の適用性確認 (幌延URL: 250m)



高圧対応パッカー



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)



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

## 【今後の予定】

- 深部地質環境に適用可能なグラウト技術 (考え方, 手法, DB, 事例) の提示。
- 幌延URLにおけるグラウト技術の適用性の確認。

## 福島市の中学校・幼稚園の校庭・園庭の測定及び除染調査を実施

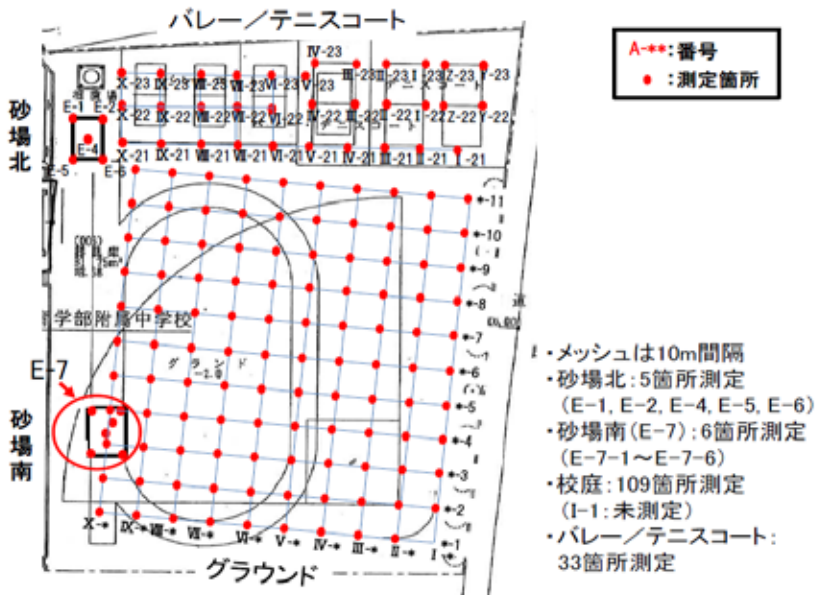
- 福島大学附属幼稚園、中学校（5/22～6/7）
- モデル地区の測定及び除染調査を実施
- 伊達市の民家、集会場等の除染調査（7/8～12/31）
- 南相馬市のリクレーション施設の除染調査、森林の影響調査（7/8～1/31）



空間線量率は約 1/10～1/20 と大幅に減少。

（中学校グラウンド（1m）の平均 2.5 → 0.15  $\mu$ Sv/h  
幼稚園の園庭（50cm）の平均 2.8 → 0.22  $\mu$ Sv/h）

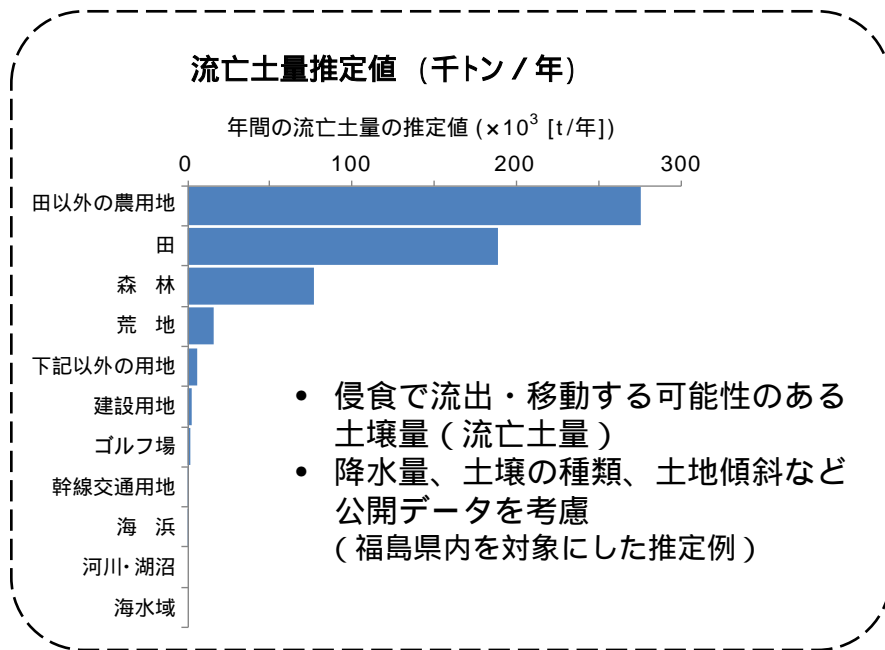
## 【福島大学附属中学校における除染調査】



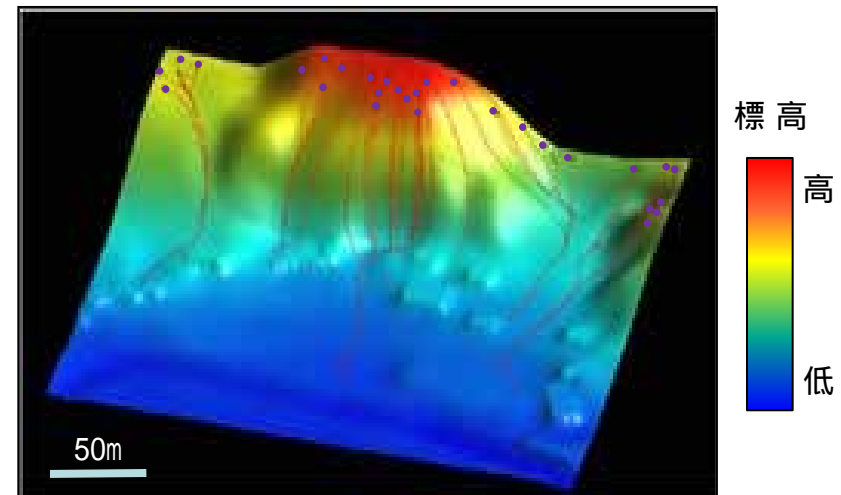
	線量率( $\mu$ Sv/h)		減少割合 (%)
	対策後	対策前	
中学校グラウンド			
100 cm	0.15 ± 0.07	2.5 ± 0.3	94
50 cm	0.16 ± 0.06	2.9 ± 0.3	94
1 cm	0.16 ± 0.06	3.1 ± 0.5	95
コート			
100 cm	0.11 ± 0.05	2.4 ± 0.2	95
50 cm	0.11 ± 0.06	2.7 ± 0.2	96
1 cm	0.12 ± 0.07	3.0 ± 0.3	96
中学校全体	0.15 ± 0.07		
幼稚園グラウンド			
100 cm	0.21 ± 0.06	1.9 ± 0.2	89
50 cm	0.22 ± 0.08	2.8 ± 0.2	92
1 cm	0.19 ± 0.09	3.1 ± 0.4	94
幼稚園全体	0.20 ± 0.08		

## 地表におけるCs動態解析

- 環境中に放出された放射性物質のうち，土壤中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壤流亡移動解析を試行
- 除染効果や自然環境の変遷を考慮した放射性物質の移動解析を実施し，生活圏での放射性物質濃度や空間線量率の時間変化を推定



土地利用区分ごとの土壤移動量の推定例



：粒子の始点 - ：粒子の移行経路

放射性物質の移動に関する推定例 (地形モデルと粒子追跡解析結果の例)



合理的な除染計画，移動抑制対策への反映を期待



## < 目的 >

- 福島第一原発所の事故に伴い放出され、土壌に沈着した放射性物質の深度方向の分布状況のデータを提供すること
- 事故発生直後の地表面への放射性物質の沈着状況を推定すること

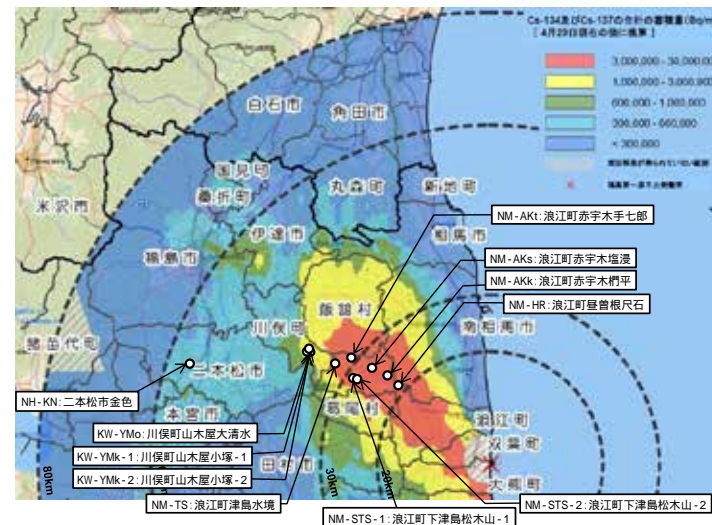
## < 調査期間 >

- H23年6/7 ~ 19 (現地調整、現地調査: 6/10 ~ 16、撤収)

## < 実施内容 >

- ジオスライサー調査: 11地点29本
- 収着試験: 11点24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 線放出核種分析

## < 調査地点 >



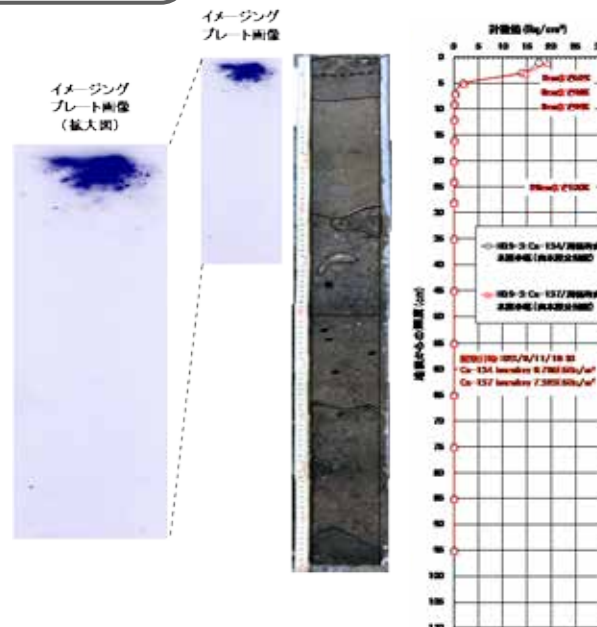
ジオスライサーによる掘削  
(ハンディタイプ)



土質・収着試験試料採取



核種分析用試料採取



- 地表面土壌に対しては、**表層5cm**以内に殆どの放射性物質が存在
- 元農地(花壇を含む)と推定される土壌に対しては、**表層14cm**以内に殆どの放射性物質が存在