

平成17年度地球シミュレータ利用報告会（平成17年1月6日）

地下空間における放射性核種移行と 地下水挙動の大規模シミュレーション 技術に関する研究

プロジェクト責任者 奥田洋司（東京大学人工物工学研究センター）

Ahn Joonhong・川崎大介 (Univ. of California, Berkeley), 大橋弘忠・陳ユ (東大工), 植田浩義 (原子力発電環境整備機構), 畑中耕一郎 (核燃料サイクル), 渡辺正 (原研), 中島研吾 (東大理), 陳莉 (東大生研), 上田真三・辻本恵一・大橋東洋・川上潤 (三菱マテリアル), 吉野尚人・久慈雅栄 (前田建設工業), 青山裕司 (クインテッサジャパン), 山崎輝幸 (ベストシステムズ)



高レベル放射性廃棄物地層処分

■ 対象となる物理現象

- 地下水, ガラス固化体収納物, キャニスタ, オーバーパックの熱, 化学反応によるソースタームの放出
- 地下水による移動
- 核種崩壊, 沈殿, 溶解, 沈着

■ 特徴

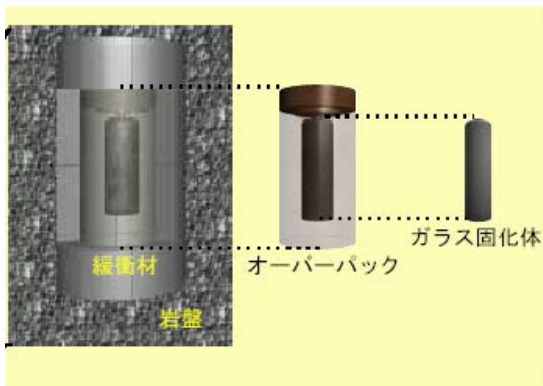
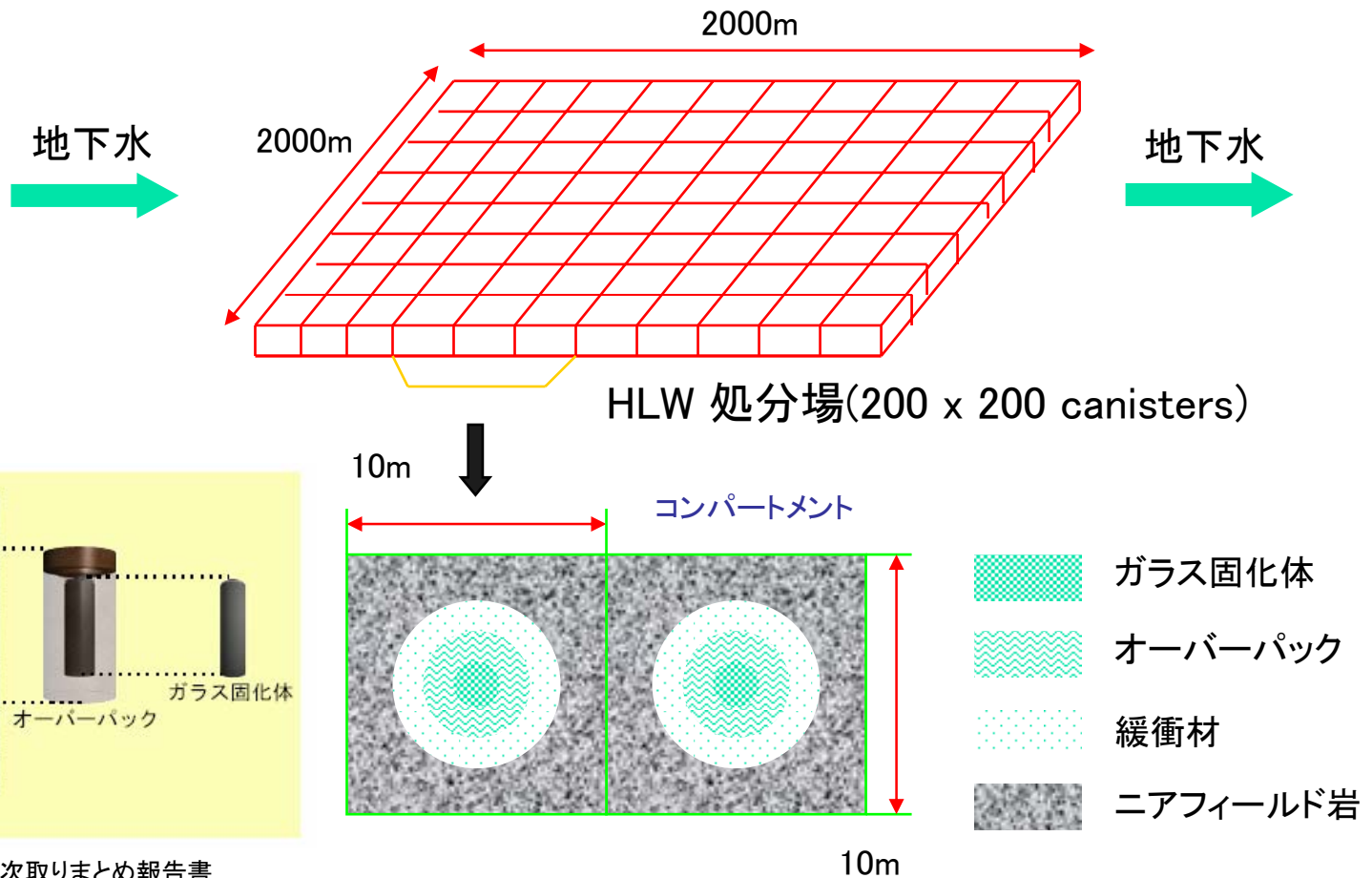
- 非線形性, 様々な物理・化学プロセス, 様々な時空間スケール
- 短期的・・・埋戻し直後のサイトの挙動(地下水流れ, 熱, 地盤応力挙動の連成)
- 長期的・・・地殻変動による断層発生などの構造変化, 海面変動による塩淡境界変化(地下水流れ, 熱, 物質移動の連成)




本プロジェクトの目的

- 地層処分シミュレーションに必要な、放射性核種移行と地下水挙動に関する計算コードを地球シミュレータ上で最適化し、廃棄体4万體から構成される実サイトを模擬したフルスケールの詳細シミュレーションを、処分場設計パラメータの不確実性を考慮しつつ、100万年スケールの長期間に関して実施し、処分場建設地選定に向けた安全評価に資する。
- 当該分野における様々なシミュレーションを効率的に実施するための、大規模並列データ処理、大規模並列可視化、大規模並列線形ソルバー解法に関する共通の基盤を整備し、現在開発、整備中、あるいは今後開発されるシミュレーションコードを効率的に利用する環境を整える。

処分場モデルの例



出典: JNC第2次取りまとめ報告書



地球シミュレータの必要性

- 平成40年度後半における最終処分開始を目指し、概要調査地区の公募開始 → 保守性を排除した現実的な性能評価が必要
- 100万年スケールの超長期にわたった安全性を示す必要があるが、実験、観測は事実上不可能
- 数十km、深度～5000mの領域において、4万本の廃棄体、地層、亀裂、断層などをモデル化する必要
 - 10 km × 10 km × 1 kmのニアフィールド(NF)領域において、地盤の不均質性を考慮するために一辺5mのメッシュを利用すると8億メッシュが必要
 - 塩淡境界問題など連成問題の場合、自由度数は数十億オーダー
 - 亀裂を含むなど複雑形状に関しては、メッシュ数が更に増加

従来研究： 極端に保守的な境界条件，小規模(数百メートル)，簡略化モデル

例) 処分場サイトには約40,000本のガラス固化体が収納されるが，これまでの計算は100本程度について考慮するのみ



今年度当初の計画

- ① 大規模地下水流動および物質移動解析(FF解析: GeoFEM-HLW)
 - 廃棄体数千体から構成される処分場FFモデルの地下水流動および物質移行計算

- ② 亀裂の確率的取り扱いを考慮した地下水および物質移行解析(NF解析: FFDF)
 - 廃棄体数百体から構成される亀裂を考慮した処分場NFモデル

- ③ ^{237}Np のFFへの放出率評価(NF解析: VR)
 - 昨年度フルノード拡張したVirtual Repositoryコードを利用し, ②の不確実性を考慮した廃棄体数百体から構成される処分場NFモデル

各コードの関係

処分場外領域(FF)

①高レベル放射性廃棄物
処分場の大規模地下水流
動及び物質移動解析

解析コード:GeoFEM-HLW

処分場内領域(NF)

亀裂性媒体モデルの解析

②亀裂の確率的取り扱いを
考慮した高レベル放射性廃
棄物処分場モデルの地下水
及び物質移行解析

解析コード:FFDF

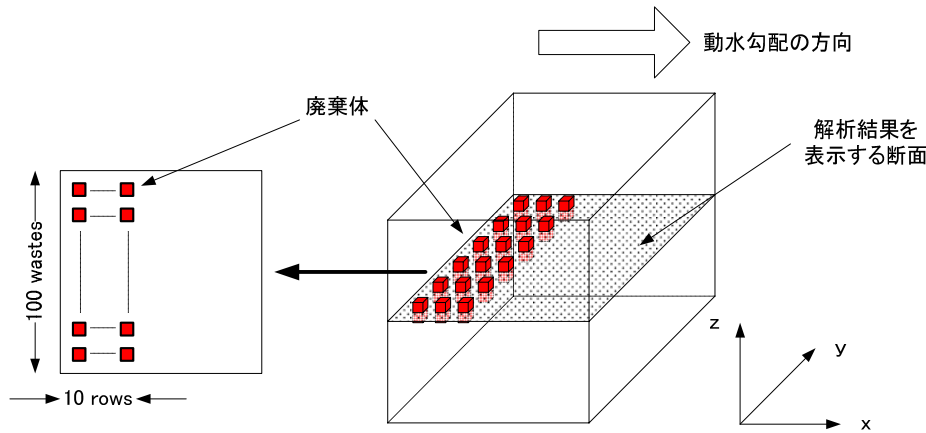
多孔質媒体モデルの解析

③高レベル放射性廃棄物
処分場の不確実性解析

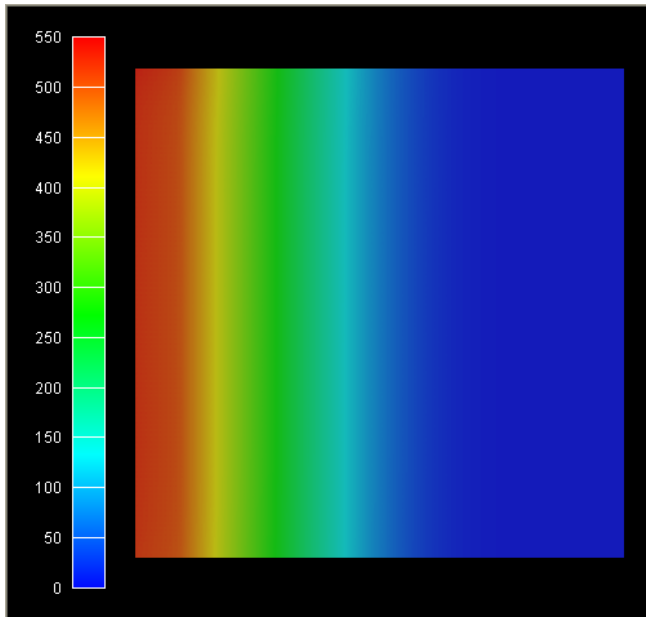
解析コード:Virtual Repository

①高レベル放射性廃棄物処分場の大規模地下水流動及び物質移動解析

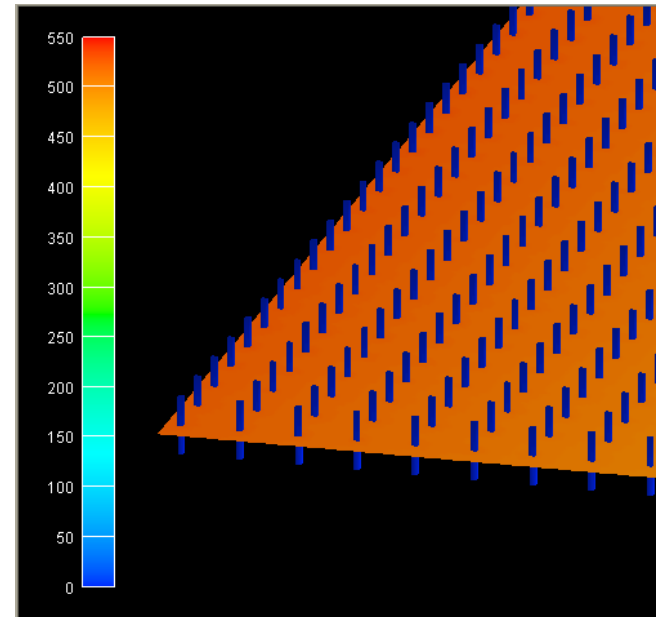
廃棄体1000体から構成される処分場NFモデルの非定常核種濃度分布の高性能計算が可能となった



節点数	ESノード数	実行時間 (sec)	ベクトル化率 (%)	並列化率 (%)
1600万	4	813.1	99.15	99.904
	8	394.4	99.12	
5億	250	399.3	99.10	99.993
	500	223.6	98.91	

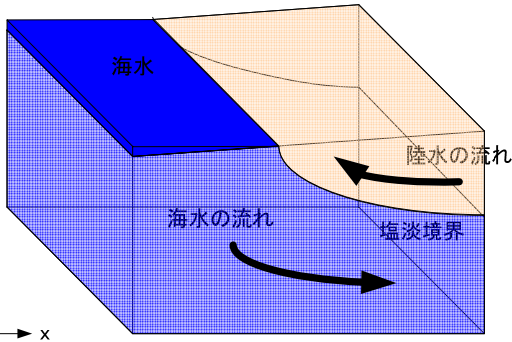


濃度分布

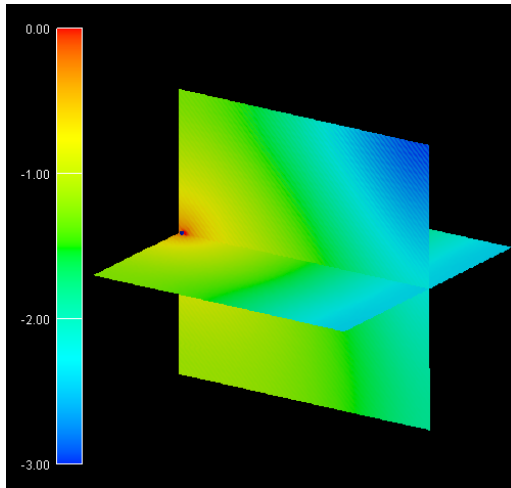
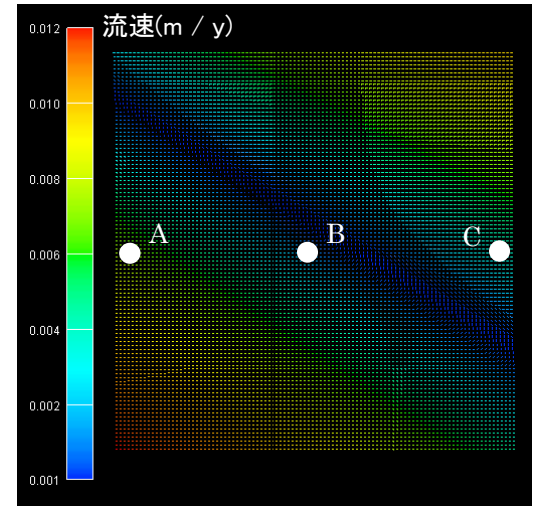


廃棄体周辺拡大図

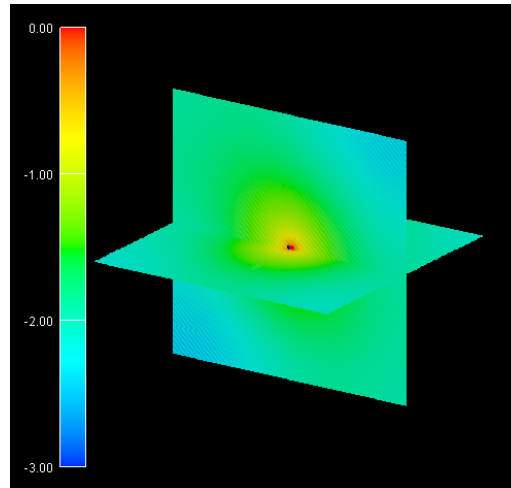
①高レベル放射性廃棄物処分場の大規模地下水流動及び物質移動解析



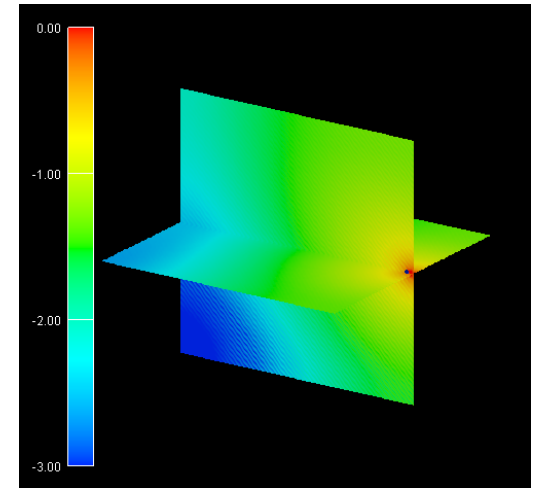
- 地形勾配による陸水の陸域から海域方向への流れ
- 陸水より密度の高い海水が密度流により陸水の下部に侵入する流れ
- これにより、塩淡水境界が形成される



A:塩水環境内



B:塩淡水境界上



C:陸水環境内

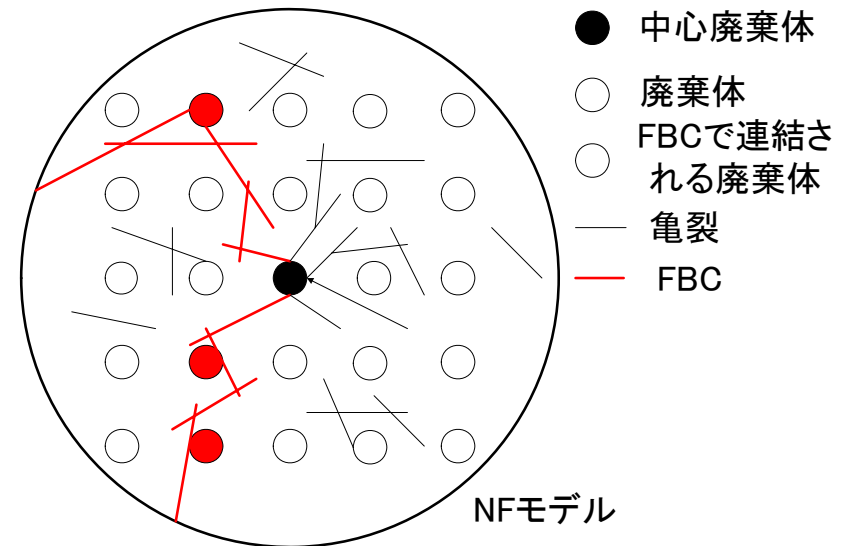
1万年後の濃度分布

処分場FFの塩淡水境界を含んだ地下水中の核種の非定常濃度分布を数万年スケールで解析

NFモデルとFBC

■ 計算モデル

- 半径60mの円
- 廃棄体109体より構成
- 複数回の試行を実施
 - 亀裂形状を乱数により決定
- FBCの大きさを評価
 - FBCで連結される廃棄体数を指標

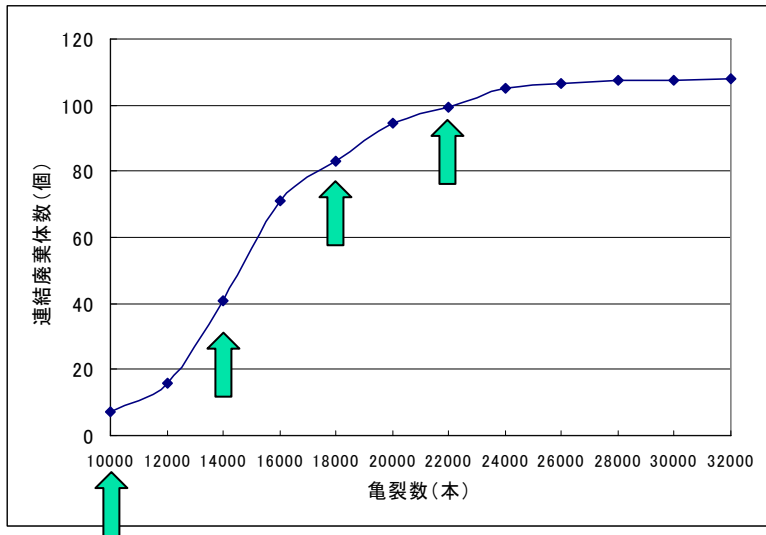


FBC (Fracture Bearing Cluster)

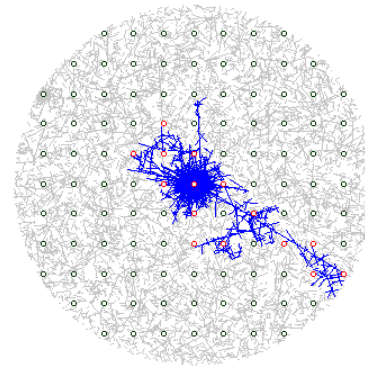
中心廃棄体と処分場モデル外周を繋ぐ亀裂クラスタ、水が流れる経路

②亀裂の確率的取り扱いを考慮した地下水および物質移行解析(NF解析:FFDF)

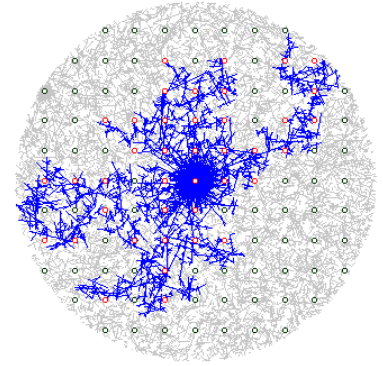
亀裂数 vs FBCで連結される廃棄体数



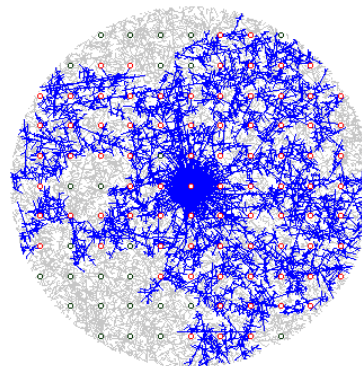
FBCで連結される廃棄体数(平均値)
(亀裂数ごとに10試行)



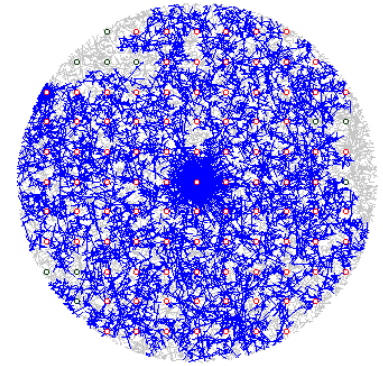
亀裂10000本



亀裂14000本

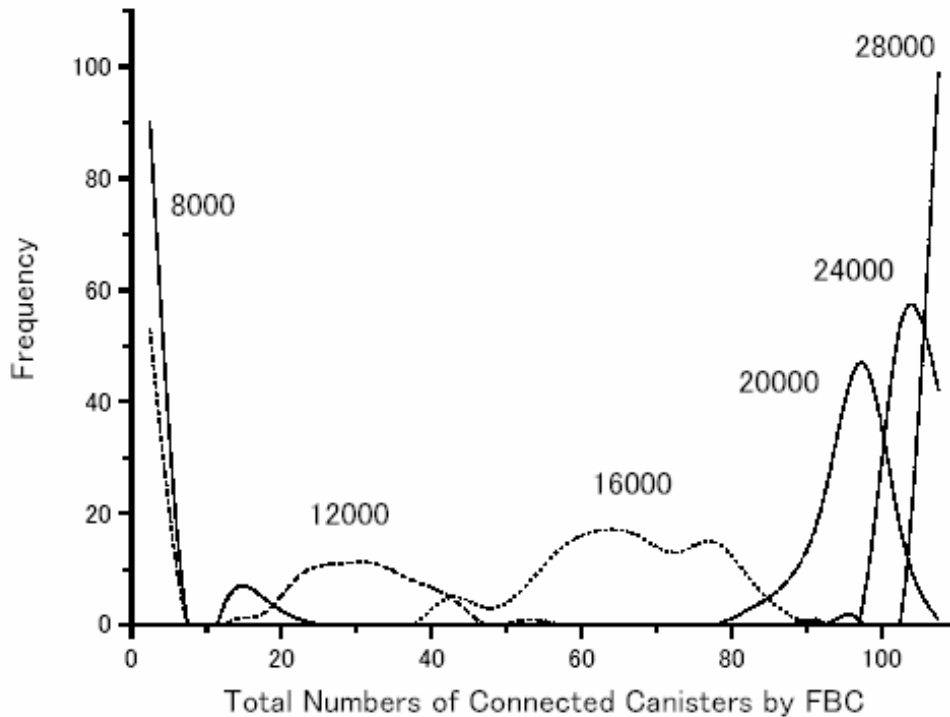


亀裂18000本



亀裂22000本

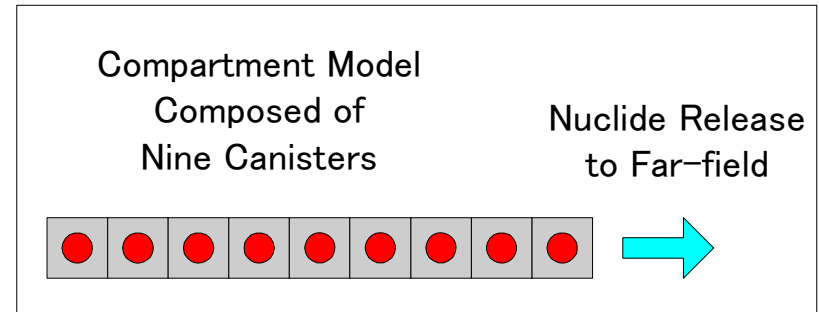
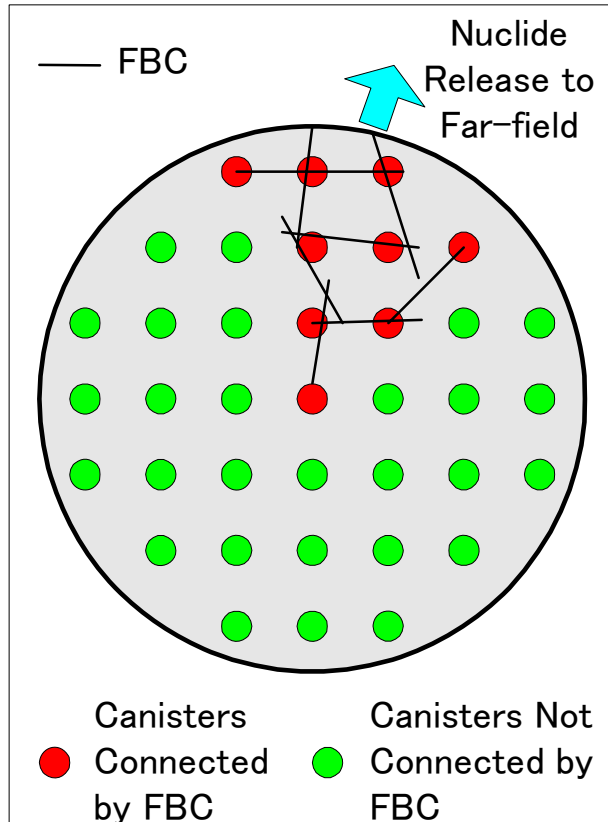
FBCにより連結される廃棄体数の確率密度関数



複雑な亀裂ネットワークをモデル化した廃棄体100体から構成される処分場NFモデルにおいて、亀裂による連結廃棄体数の確率密度関数を求めた

FBCにより連結される廃棄体数の確率密度関数

2次元処分場モデルと 1次元コンパートメントモデルの関係



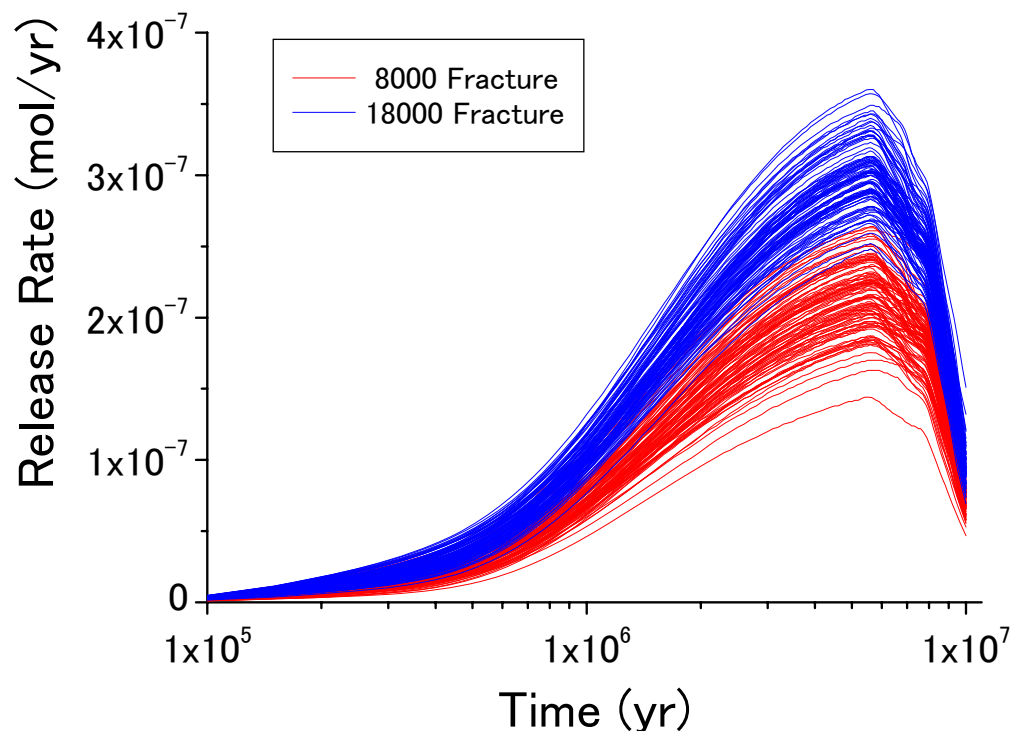
Equivalent Compartment Model
(Compartment Model: One Canister and its
Neighbouring Area are Modeled)

Two-Dimension Repository Model
(Nine Compartments are Connected by FBC)

不確実性解析

- 入力パラメータは各試行毎にPDFに従いサンプリング
 - 核種の溶解度
 - バッファの核種の収着係数
 - 亀裂による連結廃棄体数
- Np-237 のみ考慮
- 500廃棄体から構成される処分場モデルで、100試行を解析
- VR コードを試行毎に実行して、²³⁷Np 放出率の最大値 (R_j(t))を算出
- ²³⁷Np のファーフールドへの放出率の計算
 - $F(t) = \sum P_j R_j(t)$
 - F(t) : 時間tにおける放出率
 - P_j : 亀裂クラスタにより、j 個の廃棄体が 連結される確率
 - R_j(t) : コンパートメントモデルから求められた時間tにおけるj番目の廃棄体からの核種放出率

²³⁷Np 放出率



²³⁷Np 放出率の分布

(亀裂数8000個および18000個に対応する連結廃棄体数PDFを考慮)

最大500 廃棄体から構成されるコンパートメントモデルの解析 (Virtual Repository コード) を100試行実施して、²³⁷Np 放出率分布を求めた。

2次元処分場NFモデルの解析 (FFDF コード) から求めた連結廃棄体数のPDFをサンプリングして、コンパートメントモデルの構成廃棄体数を決定。



亀裂の不確実性が処分場性能に与える影響を定量的に評価した。

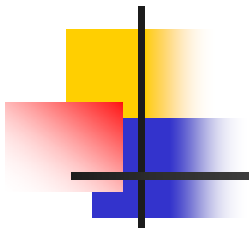
莫大な計算負荷のため従来不可能であった計算を地球シミュレータで実現した。



まとめ

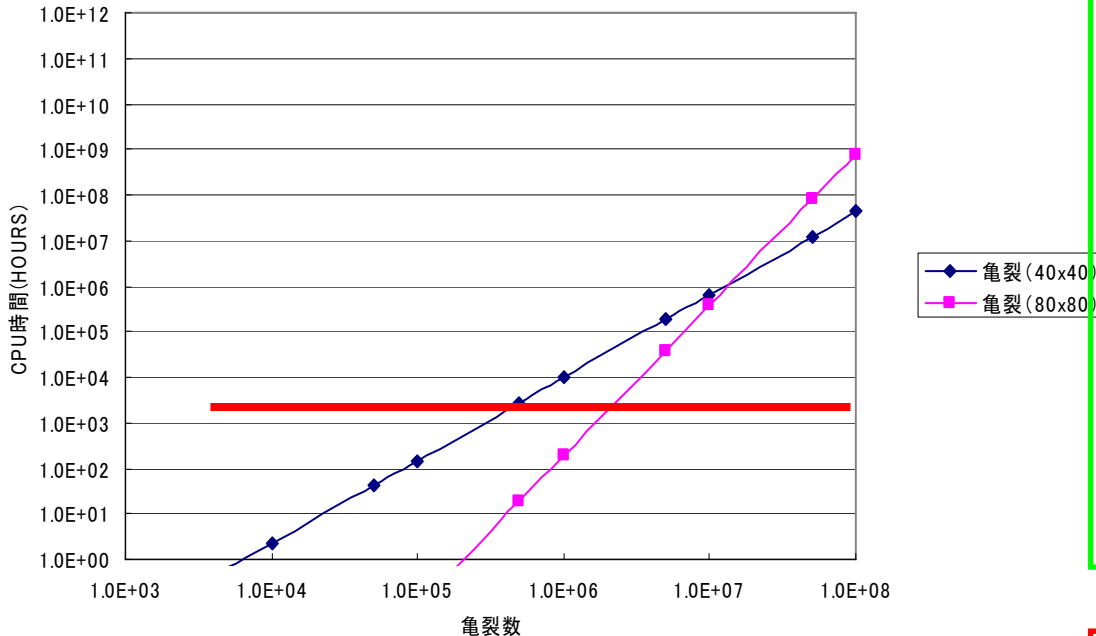
- ① GeoFEM-HLW
 - ベクトル化率98.91%、並列化率99.993%、500ノード拡張
 - 5億節点モデルの解析を実現
 - 塩淡境界を含む処分場FFの核種移行を数万年スケールで評価
- ②FFDF
 - 従来は計算不可能であった亀裂により連結される廃棄体数の確率密度関数を求めた。
 - 上記の確率密度関数を③に反映
- ③VR
 - 亀裂を考慮した ^{237}Np のFFへの放出率評価を行う新解析手法を開発
 - 昨年度フルノード拡張したVRコード(処分場の複数廃棄体モデルの物質移行解析コード)に新手法を適用し、従来は計算不可能であった亀裂を考慮した処分場の不確実性解析を実現
 - 亀裂の不確実性が処分場性能に与える影響を定量的に評価





ここからうしろは予備

全処分場モデルの計算時間予測



亀裂数と計算時間の予測

モデルを構成する要素数を2ケース検討
ベクトル化率は現在と同じと仮定

- 実際の処分場には**1E7~1E8個**の亀裂が存在すると予想される（地質調査結果に基づく）
- 亀裂数が**1E6個**程度で、計算時間が1万時間となる（1年間の利用時間に相当）
- メモリの観点から廃棄体**50体程度**で地球シミュレータの限界に到達（1廃棄体を160×160要素に分割）

現状のコードでは地球シミュレータを使っても全処分場モデルの解析は不可能であることが判明

実施概要

- 高レベル放射性廃棄物処分場の性能評価
 - 亀裂性岩盤の地下水及び物質移行解析・・・高い計算負荷
 - モンテカルロ法・・・複雑な輸送経路の形状を評価可能
- 目的
 - 亀裂クラスタに含まれる廃棄体数の確率密度関数を求める
 - 現実的な処分場規模のシミュレーションをFFDFコードで実行する場合の実現性を検討
- 実施内容
 - FFDFコード: モンテカルロ法による亀裂性岩盤の地下水及び物質移行解析コード
 - FFDFコードを地球シミュレータに移植し、処分場規模の解析を実現(処分場モデル: 半径60m、廃棄体109体を含む亀裂性媒体モデル)



まとめと今後の課題

- FFDFコードを地球シミュレータに移植して、**亀裂性媒体の地下水及び物質移行の大規模計算**を実施した。（廃棄体109体から構成される処分場モデル上に最大10万個の亀裂を発生）
- **亀裂による連結廃棄体数の確率密度関数**が亀裂数に支配されていることが判明した。
- プログラムの性能評価の結果、現状のコードでは**全処分場モデルの解析は地球シミュレータのフルノード**を利用しても不可能であることが判明した。
- 今後はコード性能の向上のために、計算アルゴリズムの改良が必要。

実施概要

- 高レベル放射性廃棄物処分場の不確実性
 - 長時間の挙動、及び地質環境に不確実性が内在する
 - 亀裂ネットワークは本質的に不確実性を持つが、従来不確実性解析が不可能
- 目的
 - 亀裂を考慮した処分場モデルの不確実性解析を実施する。
- 実施内容
 - 亀裂により連結される廃棄体数の確率密度関数：FFDFコードより得られた
 - 複数廃棄体の物質移行解析：Virtual Repositoryコードで実現（コンパートメントモデルによる解析コード、フルノード拡張済）
 - 両者を活用して、亀裂を考慮した処分場モデルの不確実性解析を実施する



まとめと今後の課題

- 処分場の性能評価に必要な大規模地下水流動及び物質移動解析システムを地球シミュレータ上に構築した。
- 地下水流動解析
 - ソルバーの効率は高い
 - 密度、熱などの影響を考慮する機能が必要
- 物質移動解析
 - 完全陽解法なので(タイムステップが短い)効率が低い
 - 移流が拡散に対して卓越する移流支配問題での誤差が大きい
 - 特性曲線法など新たな手法を検討する必要がある