

NUMOにおける地質環境のモデル化技術の 高度化に向けた取り組み状況

Current status of NUMO's studies to improve
geological environment modeling technology

2022年5月17日（火）

原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan

技術部 調査技術グループ

尾上 博則

Hironori ONOE



■ 技術開発の課題

Technical issues

■ トピックス 1: 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

Topics 1: Improvement of modeling technology for long-term evolution of geological environment

■ トピックス2 : 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備

Topics 2: Development of methodologies for validation of groundwater flow and mass transport model

■ まとめ

Summary

地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～平成34年度)(地層処分研究開発調整会議, 2018)における研究課題

- 
- 包括的技術報告書*¹ (NUMO-TR-20-01) を作成する過程で明らかとなった課題
 - これまでの研究開発過程で抽出された課題
 - 国の審議会等*²で抽出された課題
 - 科学的特性マップ[○]の作成及び提示に際して寄せられた技術的信頼性に関する国民からの声等も含めて網羅的に課題を抽出

全体計画のうち、事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点から、NUMOが実施する技術開発の項目や技術開発工程等を整理*³

- 地質環境特性の**長期変遷のモデル化技術**の高度化
Improvement of **modeling technology for long-term evolution** of geological environment
- 地下水流動・物質移行**モデルの妥当性確認**手法の整備
Development of **methodologies for validation** of groundwater flow and mass transport model

*¹最新の科学的知見やこれまでの技術開発成果に基づき、サイトを特定せず、わが国における安全な地層処分の実現性について総合的に検討した報告書

*²「地層処分技術 WG」、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」、「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」等

*³地層処分事業の技術開発計画(2018年度～2022年度)改訂版 (NUMO-TR-20-05)



トピックス 1:

地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

Topics 1:

Improvement of modeling technology for long-term evolution of geological environment

- 包括的技術報告書では、日本の代表的な岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）を対象に三次元の地質環境モデルを構築し、それに基づき処分場の設計や安全評価を実施
- 将来の水理場及び化学場といった地質環境特性の変化の幅等を推定し、その結果を処分場の設計や安全評価に反映するために、これらと連携しつつ、地質環境特性の長期変遷のモデル化技術を整備することが課題

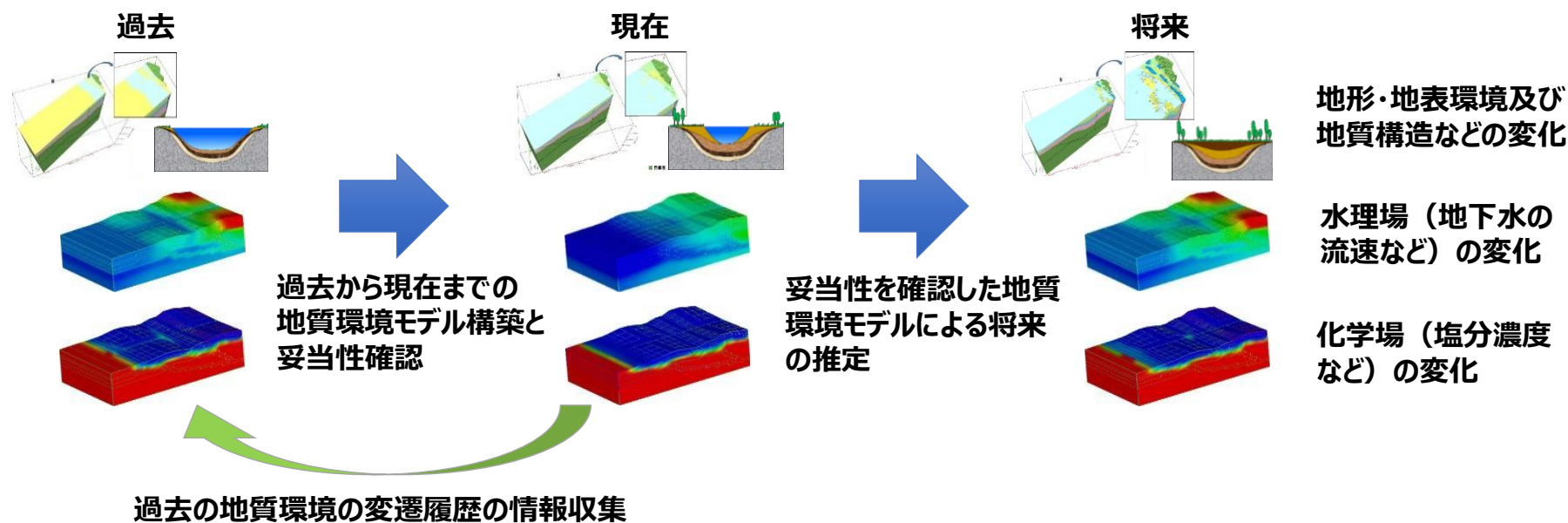


Image of modeling approach for long-term evolution of geological environment

- より信頼性の高い、現実に即した処分場の設計や安全評価に資するために、長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの水理場や化学場といった地質環境特性の変化を考慮した、四次元地質環境モデル（三次元空間に時間軸を考慮したモデル）の構築技術を整備する。
- To develop a technology for the 4D site descriptive modeling (the model has 3D space and time scale) that takes into account changes in characteristics of geological environment such as hydraulic and hydrochemical conditions from the surface to deep underground due to long-term topography and climate changes, in order to reflect for more reliable and realistic underground repository design and safety assessment.

- 包括的技術報告書で示した三岩種（新第三紀堆積岩類、深成岩類及び先新第三紀堆積岩類）を対象として、四次元地質環境モデルを構築し、モデル構築に係る作業手順や考え方、処分場の設計や安全評価に提供する情報の整理を実施
 - ✓ 全国規模の文献情報に基づき、仮想地域における現在から将来100万年間を対象とした地形及び地質構造の長期変遷モデルを構築
 - ✓ 気候・海水準変動による解析条件の連続的な変化を考慮した非定常状態における地下水流動・物質移行解析を実施
 - ✓ 処分場地下施設の設置可能領域を選定する際の留意点や考え方を整理するなど、解析結果を処分場の設計及び安全評価に反映する方法について検討

深成岩類を対象としたモデル化・解析の事例を紹介

- 河川争奪などによる河川水系の時間的変遷に関する情報や知見を収集するとともに、河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化や三岩種が混在する地形・地質構造条件を考慮した、より複雑な地質環境を対象としたモデル化・解析を実施中

現在の地形モデル及び三次元地質構造モデルの構築

Construction of topographic and 3D geological models at present

● 地形・地質構造の概念モデルの構築

- ✓ 包括的技術報告書で整理された深成岩類の概念モデルを適用

● 既存情報の収集・整理とモデル化

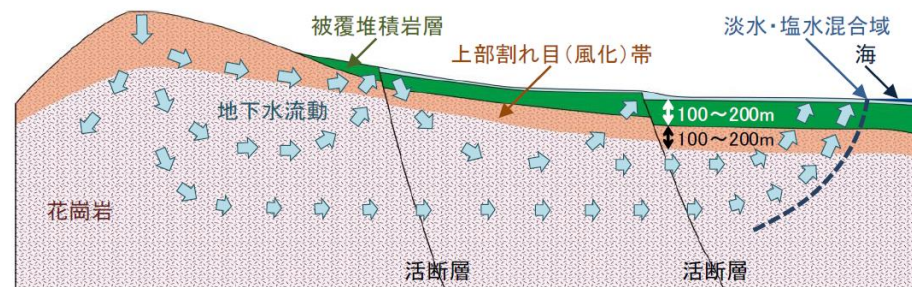
- ✓ 花崗岩が分布する地域の既存情報に基づき、代表岩種の面積比及び個別岩体の形状、伸長方向等の地形・地質構造のモデル化に必要なパラメータを整理し、数値化
- ✓ 数値化した情報を統合し、モデル化

Area ratio of representative rock types

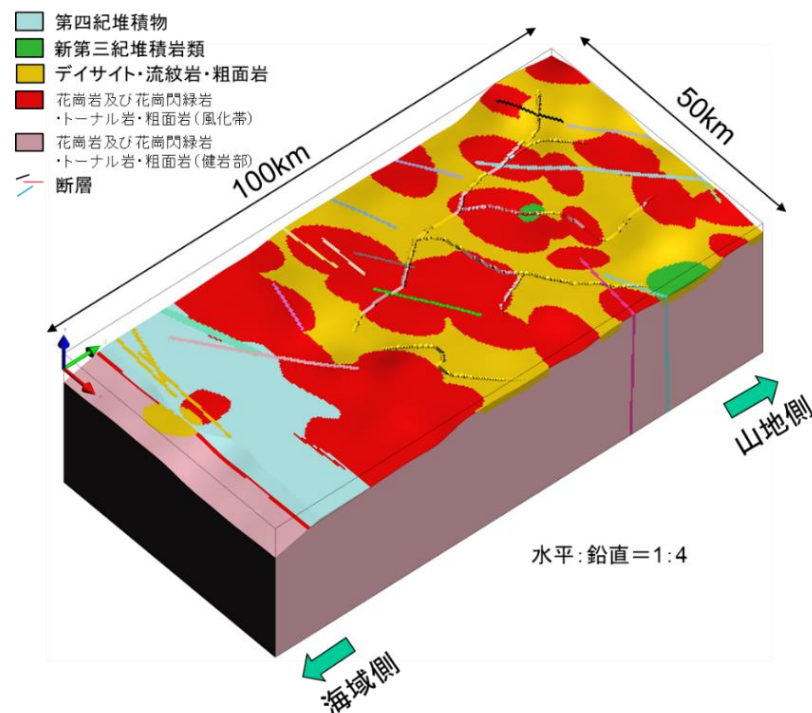
地帯	花崗岩	花崗閃緑岩・トータル岩・粗面岩	デイサイト・流紋岩・粗面岩
地帯A	46	14	40
地帯B	41	5	54
地帯C	54	42	4

シームレス地質図（構造区分⑤）

現在モデルの構築に考慮すべき地形・地質構造要素の抽出方法や、モデル化に必要なデータ及びデータの解釈や統合化に係る考え方・手順を整理



Conceptual model of groundwater flow



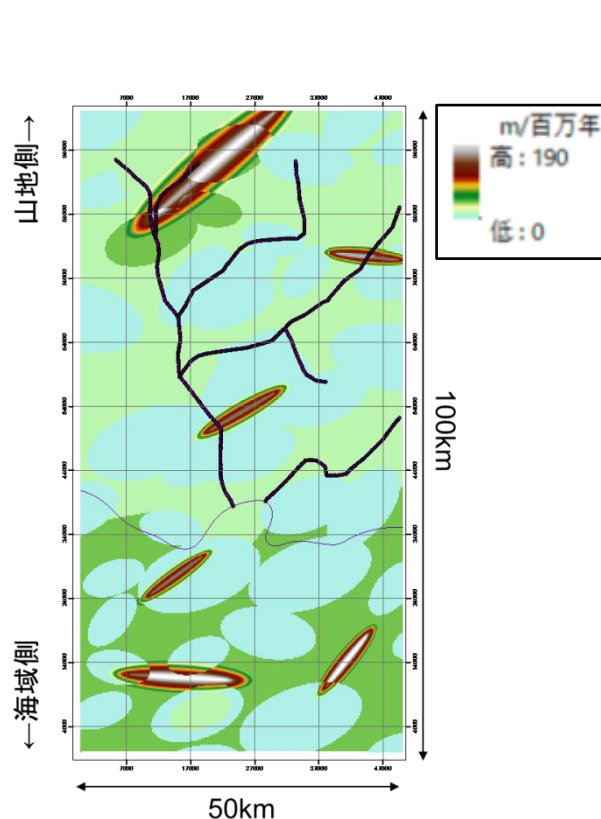
Topographic and geological model

将来100万年間を対象とした地形モデル及び三次元地質構造モデルの構築

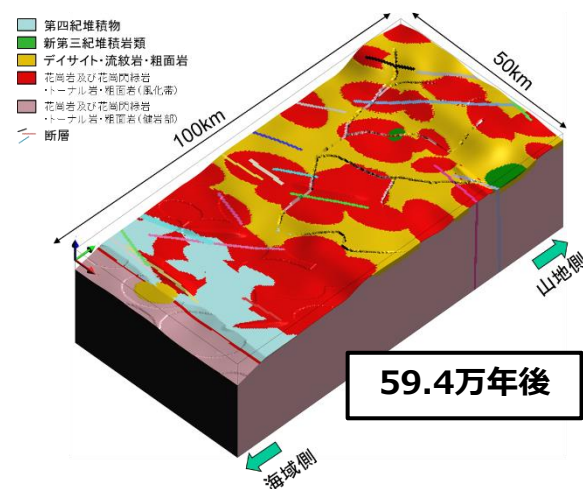
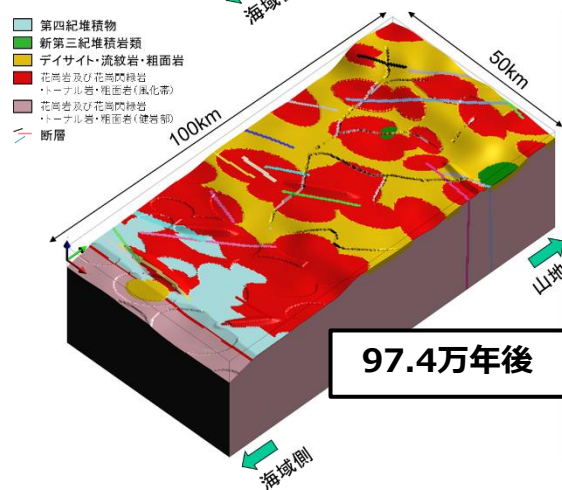
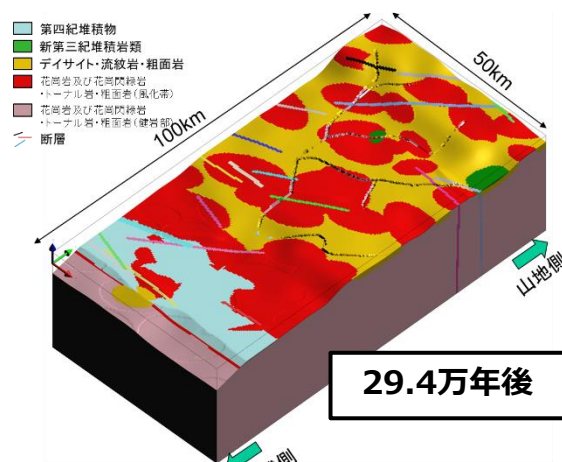
Construction of topographic and 3D geological models for 1 My in the future

● 既存情報の収集・整理とモデル化

- ✓ 隆起（沈降）、侵食（堆積）などの地形変化パラメータを整理し、数値化
- ✓ 数値化した情報を統合し、モデル化



Parameter setting of Uplift velocity



Topographic and geological model in the future

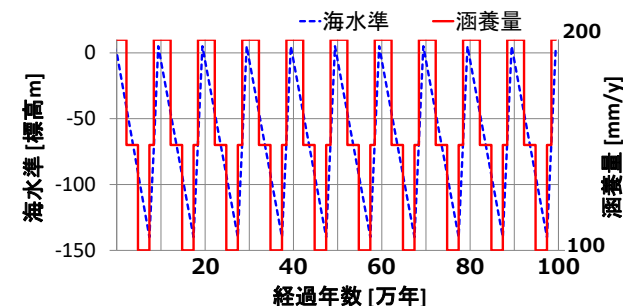
将来モデルの構築に考慮すべき
時間断面の設定方法や、モデル
化に必要なデータ及びデータ
の解釈や統合化に係る考え方・
手順を整理

非定常状態における地下水流動・物質移行解析の実施

Transient simulation of groundwater flow and mass transport

● 既存情報の収集・整理と解析

- ✓ 地下水流動・物質移行解析の解析条件（境界条件やその時間変化）を設定
- ✓ 長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地下水の流速分布や塩分濃度分布などの変化を連続的に推定



Boundary conditions of sea level and recharge rate

地質環境特性の時間変遷を考慮した解析手法

・水理地質構造モデル①
・境界条件の時間変化

解析結果

・水理地質構造モデル②
・境界条件の時間変化

初期条件

解析結果

・水理地質構造モデル③
・境界条件の時間変化

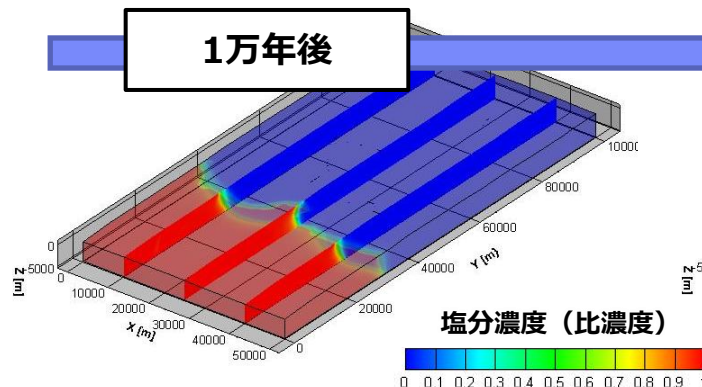
初期条件

解析結果

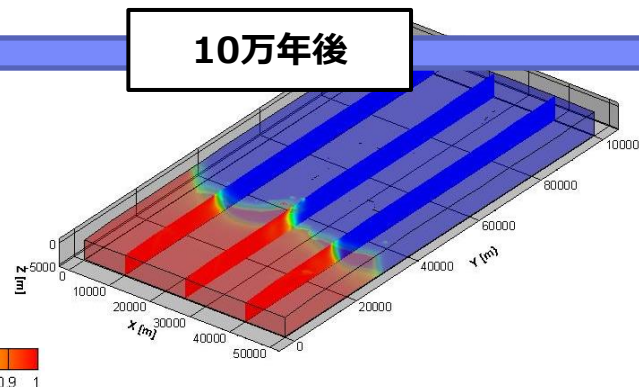
・水理地質構造モデル④
・境界条件の時間変化

初期条件

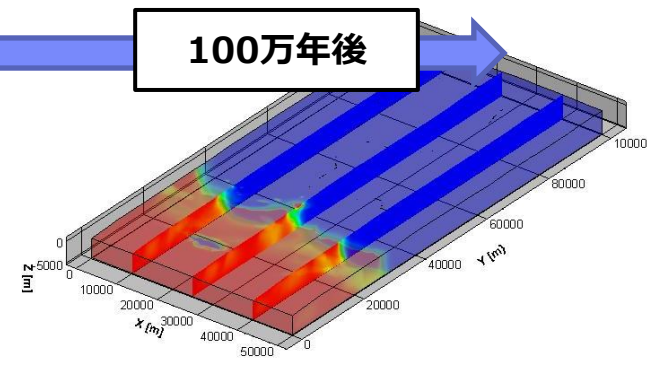
1万年後



10万年後



100万年後



Estimation results of groundwater salinity distribution change

地質環境特性の時間変遷を考慮した解析を実施するための領域設定、境界条件などの設定や、解析パラメータの設定に係る考え方を整理

処分場地下施設設置可能領域の選定

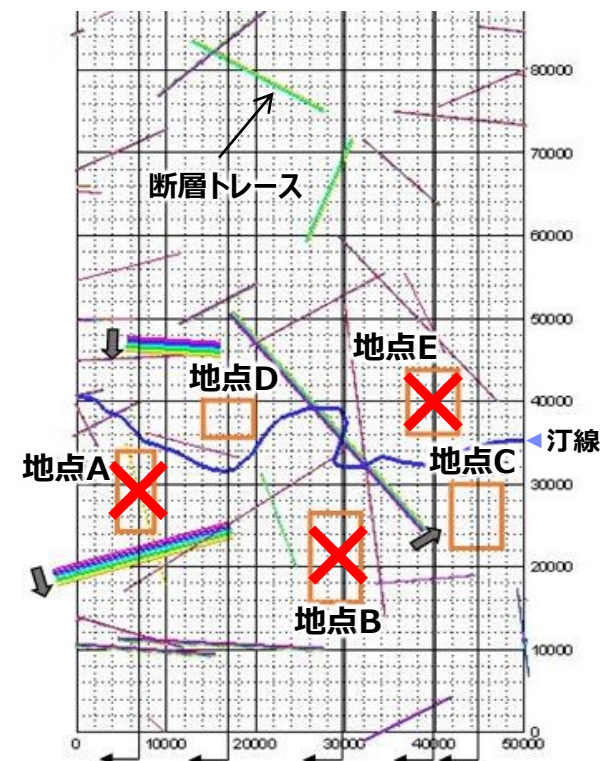
Site selection of potential areas for underground repository facilities

- 候補母岩の広がりや断層などの地質構造の分布、地点ごとの地下水・物質移行特性に基づき選定

岩種	深成岩類	
処分場の候補母岩	花崗岩・花崗閃緑岩	
処分場地下施設設置可能領域候補地点の選定条件	● 現海岸線から海域20km、陸域20km程度の範囲 ● 長さ10km以上の断層（活断層相当）が分布しない場所 ● 複数の断層の連結可能性を考慮して、離間距離5km以内に同一走向・傾斜方向の断層が一直線に分布しない場所 ● 地形変化量が小さい場所	
候補地点	【沿岸海域】 ● 地点A、B、C	【内陸部】 ● 地点D、E

候補地点の地下水・物質移行特性の評価

処分場地下施設設置可能領域	沿岸海域	内陸部
	● 地点Bは、断層が交差するように分布するため、地上設備やアクセス坑道の配置の観点から除外 ● 地点Aと地点Cの地下水移行時間に大きな差がないこと、地点Aの深部に断層が伏在することから、地点Cを選定 ● 施設の設置深度：深度毎に有意な差がみられないことから、経済合理性や保守的な評価の観点から最も浅い標高-500mと設定	● 地点Dと地点Eの地下水の移行時間に大きな差がないこと、地点Dの地表地形の方が地上施設の配置が容易なことから、地点Dを選定



断層トレース：深度方向に100m間隔で表示

Location of fault distribution and potential areas

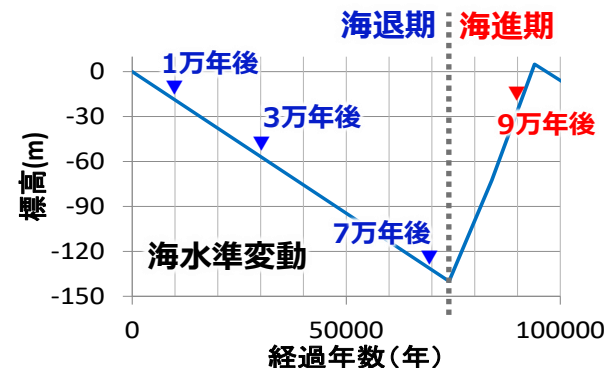
モデルや解析結果に基づき、処分場地下施設設置可能領域を選定する際の留意点や考え方を整理

処分場地下施設設置可能領域の選定のための地下水・物質移行特性評価

Characterization of groundwater flow and mass transport for site selection of potential areas

● 処分場地下施設設置可能領域の候補地点を対象として粒子追跡線解析を実施

岩種		深成岩類
地下水・物質移行特性の検討条件	粒子の出発点の配置	● 水平方向：200m間隔 ● 深度方向：5深度（標高-500m～-1,000m；100m間隔）
	地下水流動場	● 1万年毎の定常地下水流速場
	評価期間	● 現在から約10万年後まで（海水準変動の1サイクル(海退期，海進期)を考慮）



地下水移行時間の比較・評価

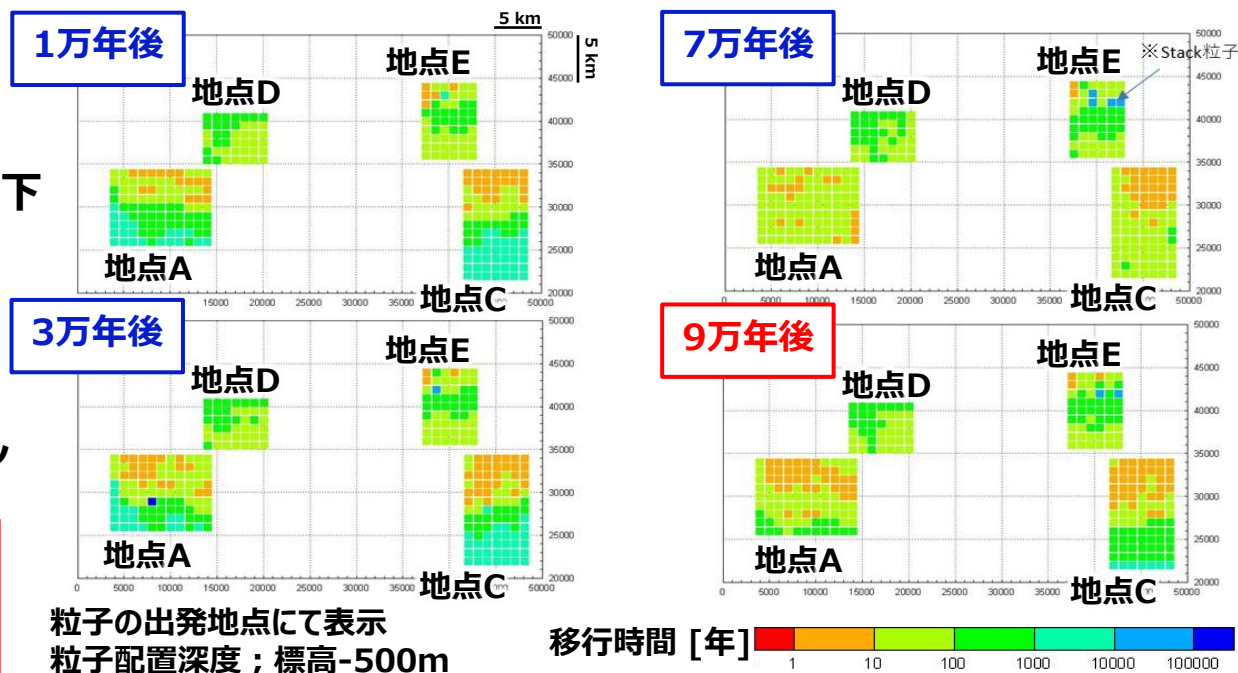
● 沿岸海域（地点A、C）

- ✓ 海退期：移行時間は短くなる（海底下の拡散場から陸域の移流場に変化）
- ✓ 海進期：移行時間は長くなる

● 内陸部（地点D、E）

- ✓ 海退期、海進期ともに大きな変化なし

処分場地下施設設置可能領域を選定する際に実施する地下水・物質移行解析の仕様や結果の分析方法を整理



粒子の出発地点にて表示
粒子配置深度；標高-500m

移行時間 [年] 1 10 100 1000 10000 100000

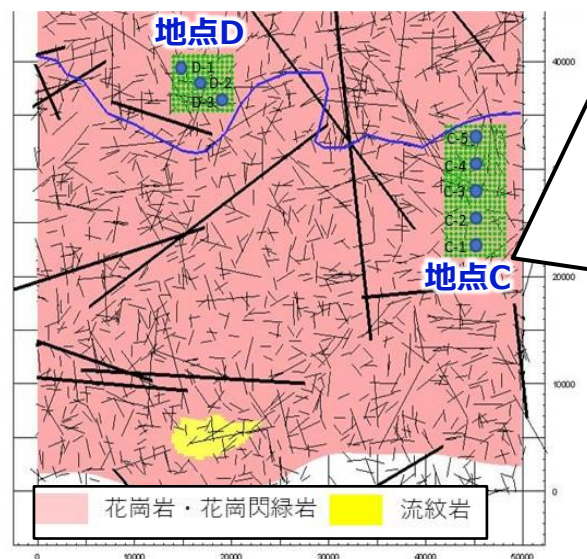
Distribution of groundwater travel time

処分場地下施設設置可能領域における地下水・物質移行特性評価

Characterization of groundwater flow and mass transport in the potential areas

● 処分場地下施設設置可能領域を対象としてより詳細な粒子追跡線解析を実施

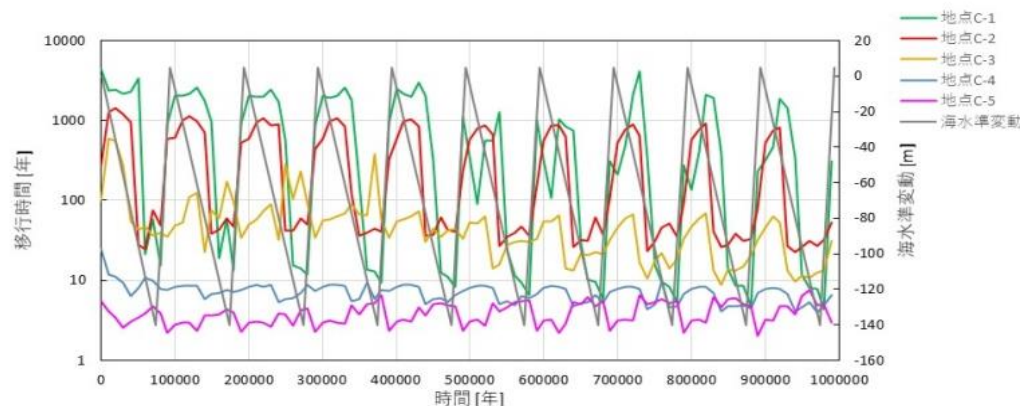
岩種		深成岩類
地下水・物質移行 特性の検討条件	粒子の設定	● 地点Cと地点Dの領域内に、粒子の出発点を水平方向に500m間隔に配置（配置深度：標高-500m） ● 上記の配置条件で、1万年毎に粒子を投入
	地下水流動場	● 地形変化や気候変動を考慮した非定常地下水流速場
	評価期間	● 現在から約100万年後まで



Location of starting points for particle tracking analysis

● 地点C（沿岸海域）

- ✓ 汀線付近（C-5）では、数年オーダーと移行時間が短く、海水準変動の影響も小さい
- ✓ 汀線から離れると（C-1、C-2）、海水準変動の影響を受けて数十年～数千年オーダーの範囲で変動



Long-term changes of groundwater travel time

安全評価に提供する情報を得るための地下水・物質移行解析の仕様や結果の分析方法の考え方を整理



安全評価に資するための地質環境特性に係る情報整理

Compilation of information on geological environmental characteristics for safety assessment

● 処分場地下施設設置可能領域のうち、地点Cの情報整理の一例

時間枠	(万年)	0～7.4	7.4～9.4	9.4～100	
解析モデルの参照時間断面	(万年)	1, 3, 5, 7	9, 10	17 (最大海退), 20 (最大海進), 57 (最大海退), 60 (最大海進), 87 (最大海退), 90 (最大海進)	
相対海水準変動		海退期	海進期	海退期	海進期
沿岸海域 (地点C)	地質環境変動イベント	隆起 (常時海) ※処分場の上昇は解析モデル上考慮しない			
	水理場 (移行時間)	【沿岸付近】 ・大きな変化なし (数年オーダー)			
		【沿岸遠方】 ・短くなる傾向 (数千→十数年)	【沿岸遠方】 ・長くなる傾向 (十数年→数千年)	【沿岸遠方】 ・短くなる傾向 (数年～数十年に変化)	【沿岸遠方】 ・長くなる傾向 (数百～数千年に変化)
		【沿岸付近】 淡水環境が維持			
	化学場 (塩分濃度)	【沿岸遠方】 ・塩水環境→淡水環境	【沿岸遠方】 ・淡水環境→塩水環境	【沿岸遠方】 ・塩水環境→淡水環境	【沿岸遠方】 ・淡水環境→塩水環境
地質環境の不確実性		・長期的な相対海水準変動量の不確実性：水理場，化学場（塩分濃度）に影響を及ぼす ・1サイクル目の海進/海退期における相対海水準の変動量の不確実性：化学場（塩分濃度）に影響を及ぼす			

時間枠ごとの処分場地下施設設置可能領域から生活圏インターフェイス（GBI）までの範囲における水理場及び化学場（移行経路沿いの局所的な流速分布や塩分濃度分布）の状態及びその不確実性の整理を試行

- **引き続き、四次元地質環境モデルに表現する地質環境情報の内容を検討するとともに、地質環境の時間変遷を考慮した地下水流動・物質移行解析結果を、処分場の設計及び安全評価に反映する方法の検討を実施する。**
- **事例検討地域を対象とした過去から現在にかけての地質環境の変遷を考慮したモデル化及び解析作業を通じて、四次元地質環境モデルの構築技術の妥当性確認を実施する。**
- **特定のサイトを対象とした、より現実的な処分場の設計や安全評価に反映するための四次元地質環境モデルの構築に必要なデータや調査項目、モデル構築の際に着目すべき点や留意事項を含む作業手順等を体系的に取りまとめる。**
- The data and investigation items required for the construction of the 4D site descriptive model, important matters and work procedures for the model construction will be organized, and the modeling technology will be systematized.



トピックス 2:

地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備

Topics 2:

Development of methodologies for validation of groundwater flow and mass transport model

- 概要調査段階以降における処分場の設計及び閉鎖後長期の安全評価では、地下水流動・物質移行モデルを用いた数値シミュレーションが実施されるが、地下水流動や物質移行の場となる地質環境は、岩盤中に分布する断層や割れ目等によって不均質であるため、数値シミュレーションに必要なとなる水理・物質移行パラメータや境界条件を完全に把握することは難しい。
- 不均質な岩盤における割れ目のモデル化には割れ目ネットワークモデル（以下、DFNモデル）といった確率論的な手法が適用されるが、上記に示した地質環境の理解の不完全性は、原位置で取得したデータとの単純な比較によるモデルの妥当性の確認を困難にさせる要因にもなっている。
- そのため、数値シミュレーションに用いるモデルの構築だけでなく、構築したモデルの妥当性確認の考え方や手順といった方法論の整備が必要である。

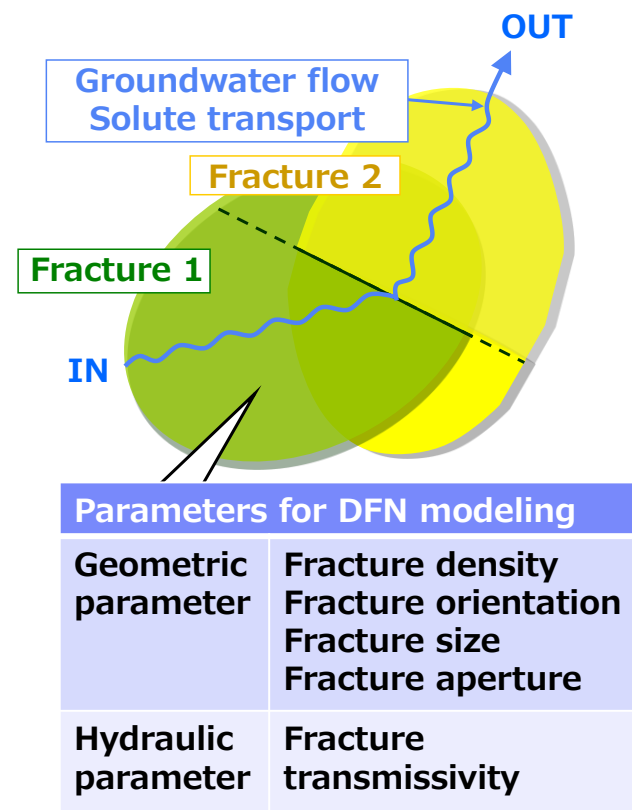


Image of DFN modeling

目的 Aim

- 不均質性を有する岩盤を対象とした地下水流動・物質移行評価結果の信頼性を示すための、調査、地下水流動・物質移行のモデル化・解析及びモデル化・解析結果の妥当性評価の具体的な考え方を構築する。
- To develop specific methodology for investigation, modeling and analysis of groundwater flow and mass transport, and validation of modeling and analysis results to demonstrate the reliability of groundwater flow and mass transport assessment results for rock mass with heterogeneous.

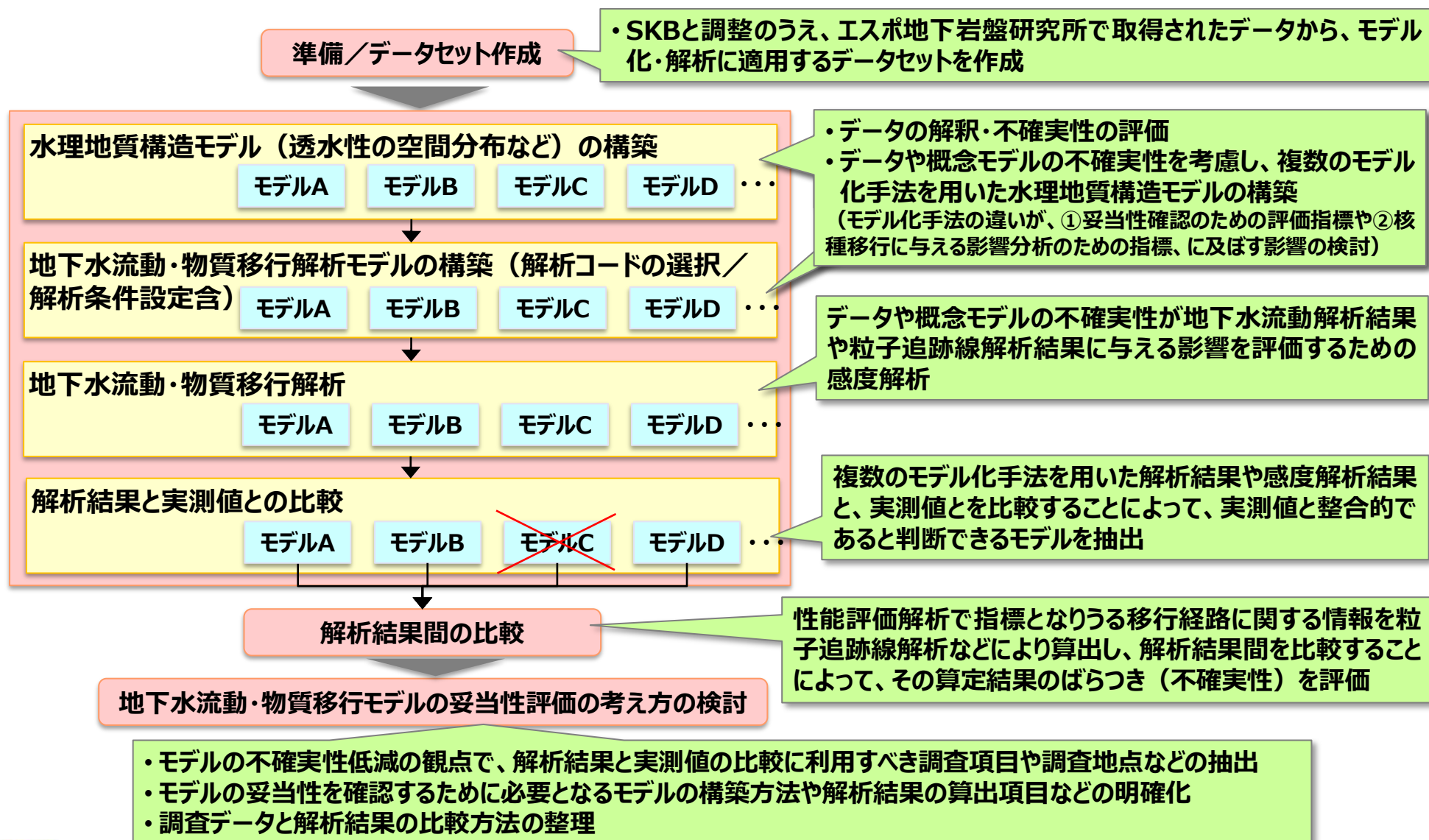
これまでの主な検討内容 Previous studies

- 地質環境がよく理解され、体系的な調査によって十分なデータが揃っていると期待された、エスポ地下岩盤研究所を事例として複数の手法を用いた岩盤の不均質性のモデル化・解析を行い、それぞれの手法の特徴や適用性・課題を抽出

 エスポ地下岩盤研究所を対象としたモデル化・解析の事例を紹介

検討アプローチ Approach of this study

● SKB Internationalとの協力協定に基づき入手したデータを用いた検討を実施



適用したモデル化手法 Modeling methods

● 水理地質構造の概念が異なる3種類のモデル化手法を適用

・ DFN : 高透水性割れ目を対象にモデル化
・ ECPM : 残りの割れ目は等価連続体近似(クラックテンソル法)でモデル化

DFNモデルを等価連続体近似(6方向の流量計算による最小二乗近似)でモデル化

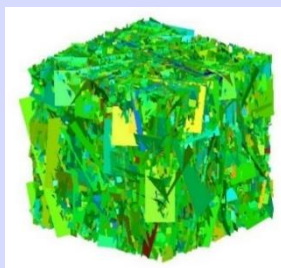
概念モデル①

概念モデル②

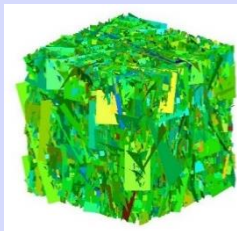
概念モデル③

水理地質構造
概念モデル

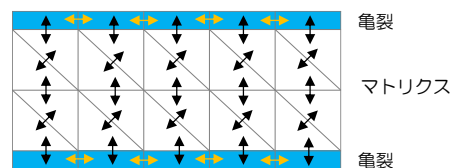
割れ目ネットワークモデル
(DFN)



二重透水・間隙モデル
(DFN + ECPM)

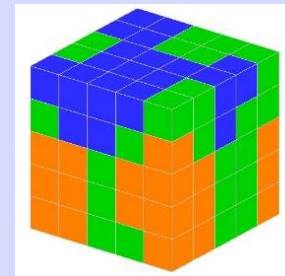


マトリクス拡散の数学モデル



←→ 平行平板モデルにより表現した亀裂中の移流分散
(移流分散方程式)
↔ 連続体モデルにより表現したマトリクス拡散
(数値解析: 拡散方程式)

等価不均質連続体モデル
(ECPM)



地下水流動・
物質移行の
表現方法

・ 地下水は、割れ目を水みち
(平行平板モデル)として移動
・ 地下水に溶出した物質は、
割れ目内を移流・分散により
移動

・ 割れ目ネットワークにマトリクスを多孔質媒体として考慮
することで、地下水は割れ目とマトリクス(移流・拡散)
を移動
・ 地下水に溶出した物質は割れ目内とマトリクスを移流・
分散・拡散により移動

・ 地下水は不均質で透水異方性を有する多孔質媒体中をダルシ
ー則で移動
・ 地下水に溶出した物質は、上
記の多孔質媒体中を移流・分
散により移動

モデル化・解析
手法(コード)

コード : ConnectFlow
開発元 : 英国・Wood.

コード : COMSOL
開発元 : スペイン・AMPHOS21

コード : HydroGeoSphere
開発元 : カナダ・AQUANTY

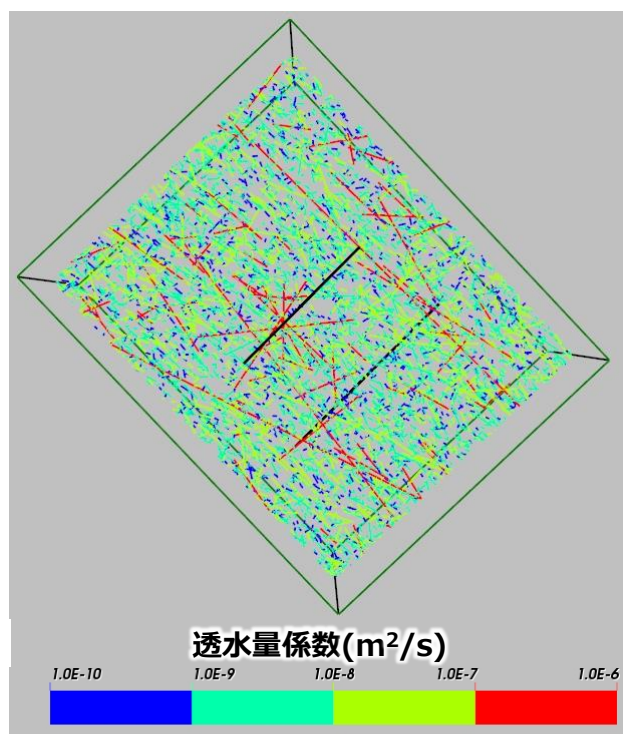
水理地質構造モデルの構築結果の一例

Results of hydrogeological modeling

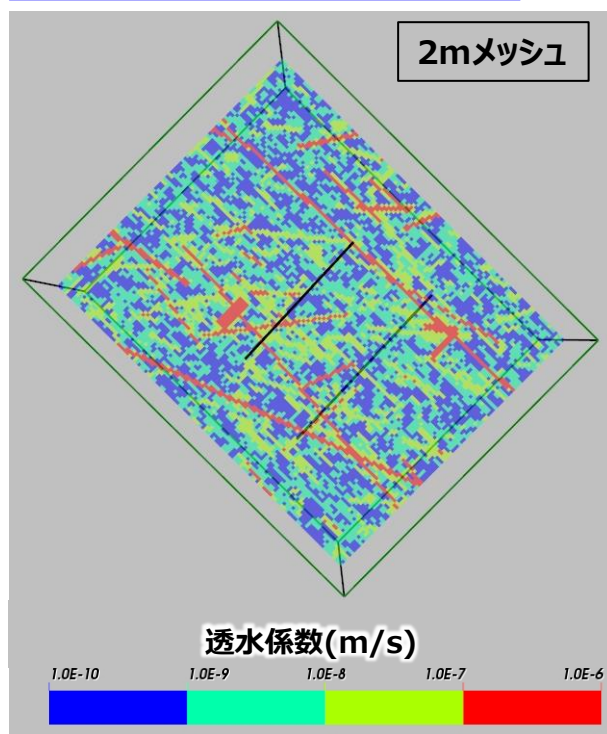
● モデル化手法の違いによる透水性の比較

- ✓ DFNの多孔質媒体近似においては、割れ目が交差していない場合でも、多孔質媒体に近似することで連続性が確保されるため、全体的な透水性は高くなる
- ✓ DFNからECPMへの変換の要素サイズが大きい場合は、より高透水性の割れ目が要素内に存在する確率が高くなり、相対的に透水係数の小さい要素が少なくなる

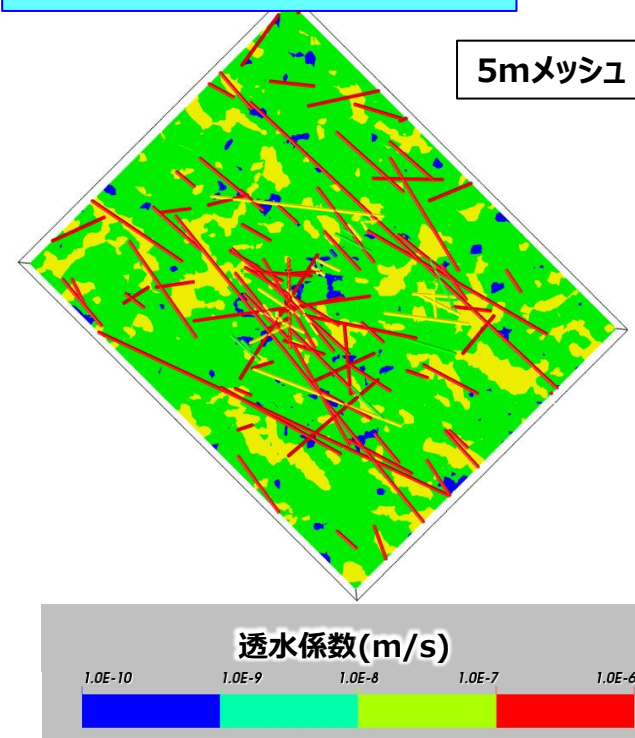
DFN/ConnectFlow



ECPM/HydroGeoSphere



DFN+ECPM/COMSOL

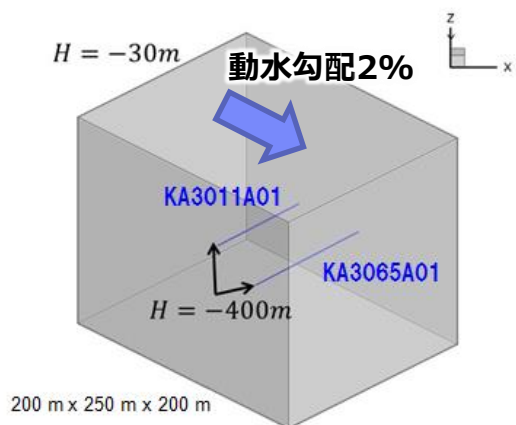


概念モデルの違いが粒子追跡線解析結果に及ぼす影響の一例

Effects of different conceptual models on the results of particle tracking analysis

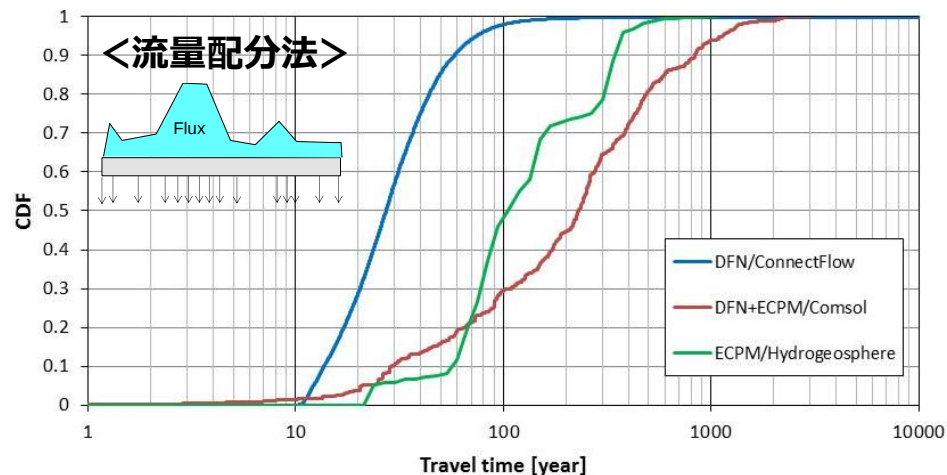
● 粒子追跡線解析の実施

- ✓ パイロットボーリング直交方向に動水勾配2%を設定
- ✓ KA3011A01孔内に配置した10,000個の粒子を流量配分法で投入し、モデル下流端までの移行時間を算出



概念モデル（モデル化手法）の違いが、解析結果に及ぼす影響の特徴や程度を確認

● 解析結果



概念モデル	結果
DFN	全ての粒子は高透水性の割れ目から出発するので、初期到達、50%確率の移行時間が短い
DFN+ECPM	マトリクスから粒子が出発しているため、初期到達時刻、50%確率の移行時間が長い
ECPM	割れ目ネットワークに伴う分散効果を同等に表す空間分解能でモデル化されていないため、移行時間のばらつきが相対的に小さい

DFNモデルを用いた感度解析によるモデルパラメータの不確実性評価(1)

Uncertainty evaluation of model parameters by sensitivity analysis using DFN model

● 感度解析のケース設定

- ✓ データの不確実性やモデル化・解析入力パラメータ値の不確実性の分析結果に基づき、着目すべき不確実性因子を抽出し、それらを組み合わせて感度解析のケースを設定

【抽出した不確実性因子】

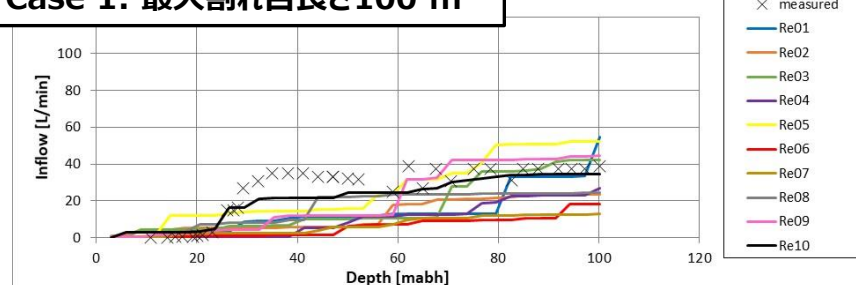
① 割れ目の卓越方位の区分方法、② 割れ目長さに関するべき乗数の設定方法、③ 最大割れ目長さ、④ 割れ目の透水量係数と長さとの関係（準相関もしくは無相関）

● 感度解析結果の一例（③最大割れ目長さに着目）

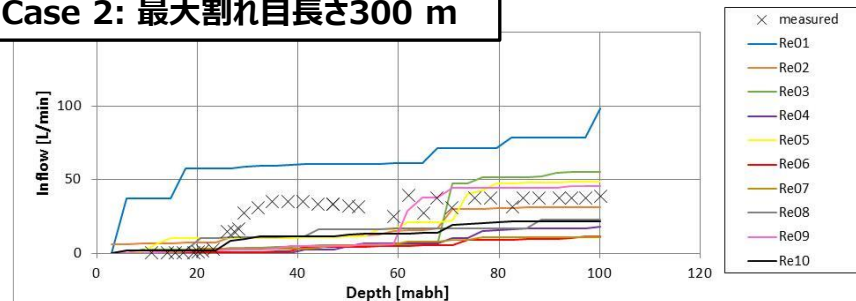
- ✓ 最大割れ目長さの設定値が、湧水量の推定結果に与える影響が大きい
- ✓ 最大割れ目長さを大きく設定することで、規模が大きく透水性の高い割れ目の遭遇確率が高くなり、実測値の再現性が向上
- ✓ ボーリング孔に遭遇する割れ目をコンディショニングすることで、湧水量の再現性が向上

モデル化・解析作業に内在する不確実性を抽出し、それらの不確実性の関連性や解析結果に及ぼす影響を整理

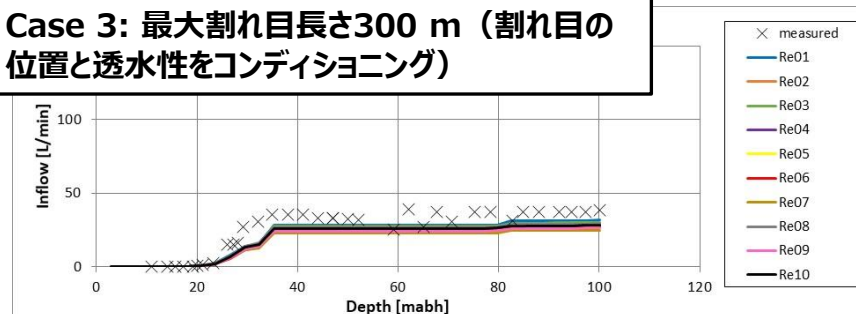
Case 1: 最大割れ目長さ100 m



Case 2: 最大割れ目長さ300 m



Case 3: 最大割れ目長さ300 m (割れ目の位置と透水性をコンディショニング)



Distribution of water inflow in the pilot borehole

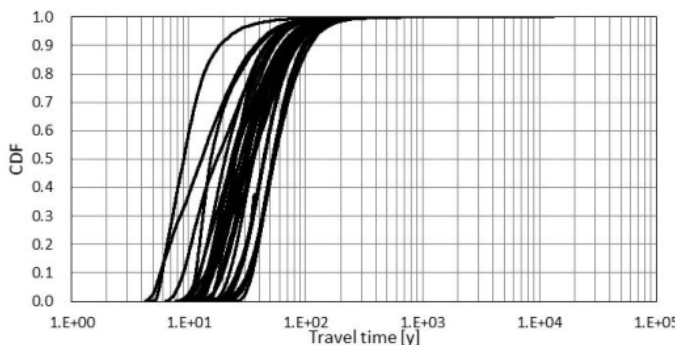
DFNモデルを用いた感度解析によるモデルパラメータの不確実性評価(2)

Uncertainty evaluation of model parameters by sensitivity analysis using DFN model

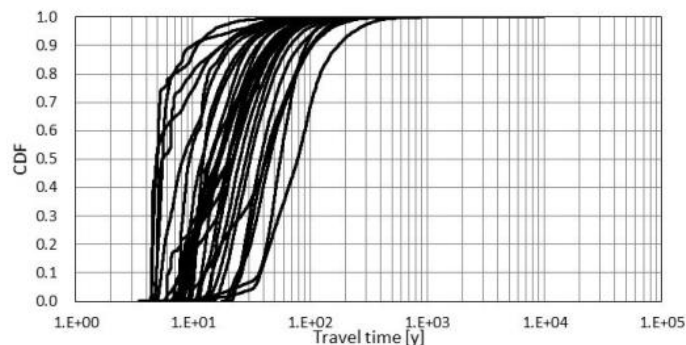
● 粒子追跡線解析の結果

- ✓ 最大割れ目長さの設定によって、地下水の移行時間分布が大きく異なる
- ✓ 最大割れ目長さを大きく設定することで、地下水の主要な移行経路となりうる規模が大きくかつ透水性の高い割れ目が発生する確率が高くなり、地下水の移行時間分布のばらつきが増加
- ✓ 割れ目をコンディショニングすることで、地下水の移行経路の選択肢が限定されるため、移行時間分布のばらつきが収斂する傾向

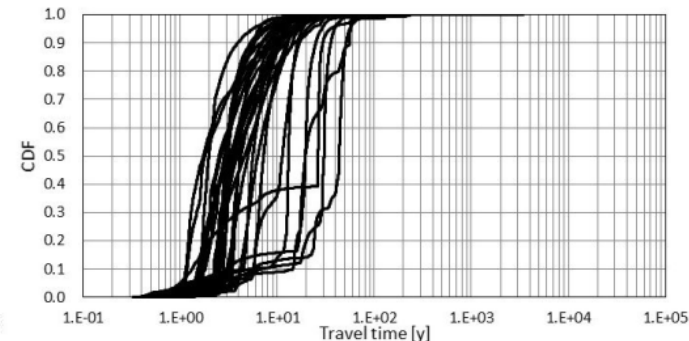
Case 1: 最大割れ目長さ100m



Case 2: 最大割れ目長さ300m



Case 3: 最大割れ目長さ300m (割れ目の位置と透水性をコンディショニング)



※30リアライゼーションの結果を表示

Distribution of groundwater travel time

地下水流動解析結果と粒子追跡線解析結果とを組み合わせた分析結果から、湧水量の再現性の程度が地下水の移行時間のばらつきに影響を及ぼしている可能性が示唆

- 日本特有の特徴である割れ目の密度が高い岩盤を対象に以下について検討し、モデルの妥当性確認の方法論を構築するための技術的な知見を蓄積する。
 - ✓ 瑞浪超深地層研究所で取得された公開データを用いて、百m規模の空間スケールの水理地質構造モデルの構築及び地下水流動・物質移行解析を実施
 - ✓ 上記のモデル構築及び解析に用いたデータの不確実性や作業仮説に内在する不確実性を洗い出し、それらの不確実性が妥当性確認に用いる解析結果に及ぼす影響を整理
- エスポ地下岩盤研究施設の事例検討結果と瑞浪超深地層研究所を事例とした成果とを比較・統合し、割れ目密度の高い日本の岩盤に対する手法として、モデルの構築及び妥当性確認に有効なデータ・調査項目・数量等に関する技術的知見や提言をまとめる。
- Through a case study of the Mizunami underground research laboratory, the effects of uncertainties in modeling and simulation of fractured rock on the model validation will be analyzed. Furthermore, technical knowledge and recommendations regarding data, investigation items and quantities to modeling and model validation for rock mass with high fracture density in Japan will be presented.

- NUMOにおける地質環境のモデル化技術の高度化として、以下2つの技術開発課題に対する取り組みの現状を紹介
 - ✓ 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化
 - ✓ 地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認手法の整備
- 今年度は、地層処分事業の技術開発計画(2018年度～2022年度)の最終年度であり、これまでに得られた技術的な知見や成果などを実用的な技術として取りまとめる。
- 今後は、概要調査以降の地質環境特性評価に適用する調査・評価技術の信頼性向上に向けた技術の整備を着実に進める。
- In the future, we will synthesize the results of studies related to the Advancement of geological environment modeling technology, and steadily develop technologies for improving the reliability of investigation and evaluation technologies applied to geological environment characteristics for the preliminary investigations in geological disposal project.



ご清聴ありがとうございました。

Thank you for your attention.