

# 貯留槽造成型地熱発電に資するマルチスケールマルチフィジックスシミュレータ開発

研究代表者 大阪大学大学院工学研究科 助教 緒方 奨

## 1. 緒言

脱炭素・低炭素社会を実現する上で再生可能エネルギーの普及促進は極めて重要である。再生可能エネルギーの中でも、CO<sub>2</sub>排出量がほぼゼロであり、他の再生可能エネルギーより発電コストが低く、天候の影響も受けない地熱発電が世界的に注目を集めている。しかし、日本の電力供給全体に占める地熱発電量の割合は 1%を大きく下回っており、世界第三位の地熱資源量をほぼ活用できていない。そんな中近年、地熱発電を促進する非従来型技術である地熱増産システム (EGS) の研究開発が国内外で活発化しつつある。EGS の主要技術である貯留槽造成型 EGS では、深度約 2~5km の高温岩盤に高压の水を注入する水圧破砕法によって人工の地熱貯留槽となる亀裂群を造成し、そこへ注入した流体を生産井まで流動させ蒸気を生産・抽出し発電を行う (図 1(a))。ただし、本手法では貯留槽を一から構築するため、初期開発には多くの時間・費用がかかるという点は避けがたい。ゆえに、この問題を補って余りある持続可能な高性能貯留槽の設計が本手法の実用化において必要不可欠であり、設計支援技術として貯留槽の挙動と生産持続性を高確度で予測する数値シミュレーションの確立が渴望されている。そのためには、貯留槽造成型 EGS 実施時に想定される亀裂群造成過程から、その後の亀裂内も含むマルチスケール空間での熱・流体・力学・化学に関する種々の現象 (図 1(b)) とその相互作用 (連成現象) を実際に対し忠実に計算機上で記述する必要がある。特に、造成された個々の亀裂において局所的に生じる岩石鉱物の溶解や沈殿等の地化学反応は蒸気生産・回収を左右する貯留槽内の流体流動性 (亀裂の透水性) を時間変化させることから精緻な考慮が必要である (図 1(b))。

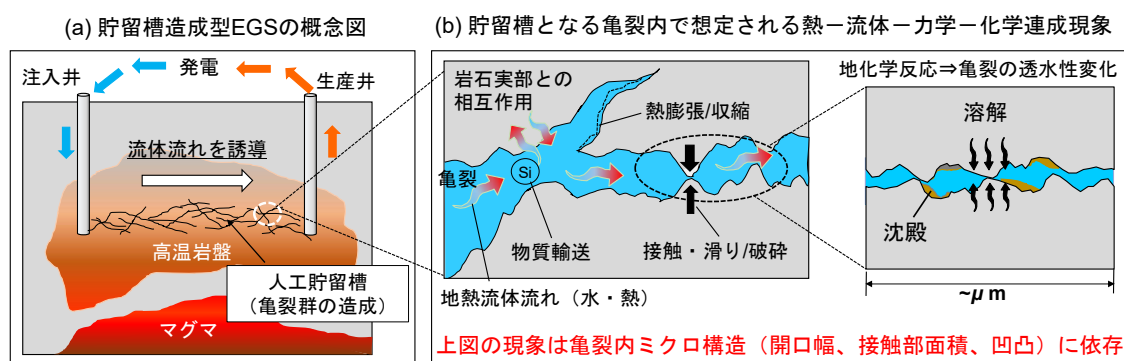


図 1 貯留槽造成型 EGS の概念図と貯留槽を構成する各亀裂内で発生が想定される連成現象

これまでに研究代表者は、前述した様な亀裂群造成からその後の熱－流体－力学－化学連成現象まで一貫して計算可能な多連成解析手法<sup>[1]</sup>の構築に世界でも唯一成功している（図 2）。この解析手法<sup>[1]</sup>は研究代表者独自のモデリング<sup>[1]</sup>により鉱物溶解・沈殿まで包括的に考慮可能であり、超長期間（数万年規模）の亀裂含有岩盤の透水性時間変化の予測評価等にも適用されている。しかし、同解析手法<sup>[1]</sup>は岩石・岩盤工学分野で主流である、亀裂を含んだ周辺岩石の挙動を一定体積で平均化した等価連続体モデルを基盤にしており、個々の亀裂そのものを定義できるモデリングは導入していない。また、亀裂内での種々の現象は凹凸、開口幅、接触部面積といった各亀裂が持つマイクロな構造特性に強く影響を受けるため、解析の中でこれらのマイクロ構造特性を各亀裂領域に設定しその影響を適切に反映させる必要があるものの、同解析手法<sup>[1]</sup>では各亀裂領域を明確に定義することができないため、亀裂のマイクロ構造特性の影響を適切に反映させることが困難である。上述したこれらの要因により、地熱発電において特に重要となる亀裂に関わる局所的現象（図 1(b)）については実際との乖離が避けられず、予測精度に限界がある。

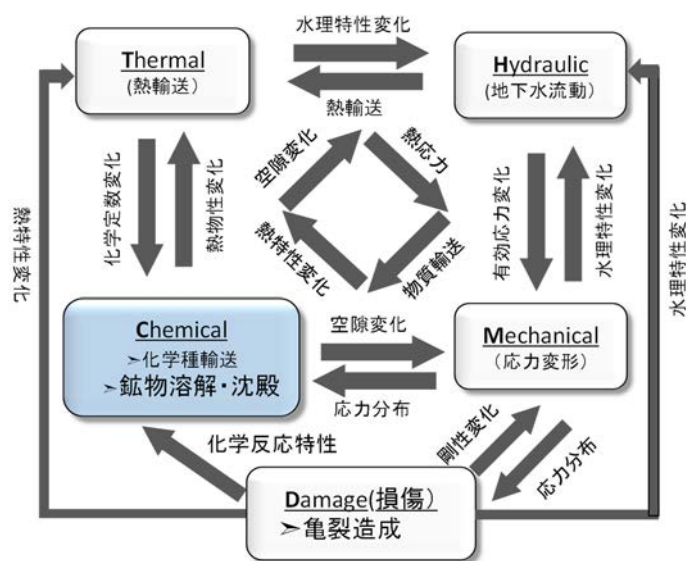


図 2 研究代表者が開発してきた連成解析手法で考慮している相互作用関係

本研究では、実際との乖離を生じさせる上述した様な要因を克服した新たな数値シミュレータを開発する。具体的には、地下で造成される個々の岩石亀裂を内部空間構造のマイクロな特性も含め計算機上で考慮可能とする解析手法を構築するとともに、それを開発済みの多連成解析手法<sup>[1]</sup>と融合したマルチスケールマルチフィジックスシミュレータ *GEF-REMMS* (*Generated Fracture-Resolving Multiscale Multiphysics Simulator*) を開発する。これにより、貯留槽造成型 EGS における、亀裂内の局所的現象を含めた人工地熱貯

留槽の挙動と蒸気生産・回収の持続性を従来よりも格段に実際に近い形で予測し得るツールを確立することを本研究の目的とする。

この目的を実現すべく、(1) 亀裂の造成とミクロな内部空間構造を予測する解析手法の構築、(2) マルチスケールマルチフィジックスシミュレータ *GEF-REMMS* の構築、(3) シミュレータの性能検証と実問題への適用、という三つの研究項目に取り組んだ。

## 2. 亀裂の造成とミクロな内部空間構造を予測する解析手法の構築

### 2.1 構築アプローチの概要

貯留槽造成型 EGS の蒸気生産・回収を左右するのは地熱貯留槽となる亀裂群の造成形態と、造成後の亀裂での物理・化学現象である。また、造成後の亀裂での現象の多くは、凹凸、開口幅、接触部面積等の亀裂のミクロな内部空間構造の影響を受ける。ゆえに、地熱貯留槽の挙動を正確に予測するためには、亀裂内のミクロ空間構造の把握が不可欠となる。しかし、亀裂をある程度マクロに見た場合の造成形態（発生開始位置や進展方向等）については高精度に予測可能な解析手法が構築されているが、内部空間構造等のミクロな造成形態については予測手法が確立されていない。そこで本研究ではまず、岩石の微視的な特徴（岩石構成鉱物の分布）を考慮し、ミクロ構造レベルで亀裂の造成形態を予測可能なミクロスケール亀裂造成解析手法を構築した。これにより、亀裂の内部空間構造を詳細に計算可能とした。このミクロスケール亀裂造成解析手法は、亀裂の造成形態を計算機上で实际的に表現可能な不連続体解析手法を組み込んだ連続体－不連続体統合型の解析手法（FDEM<sup>[2]</sup>：有限要素法 FEM と個別要素法 DEM の混合手法、図 3(a)）と鉱物分布モデリング（GBM：Grain Based Model、図 3(b)）を融合させることで構築した。なお、ここでは、高精度かつ高効率なミクロスケール亀裂造成解析を実現するために、岩石・岩盤工学分野で多く用いられている従来型の FDEM<sup>[2]</sup>を、より正確な応力変形計算が可能かつ亀裂造成・進展に伴う煩雑なリメッシュ処理を一切必要としない形へと独自改良した上で GBM と融合させるアプローチを採用した。上述したアプローチの詳細は次頁以降の 2.2～2.3 節にて記す。

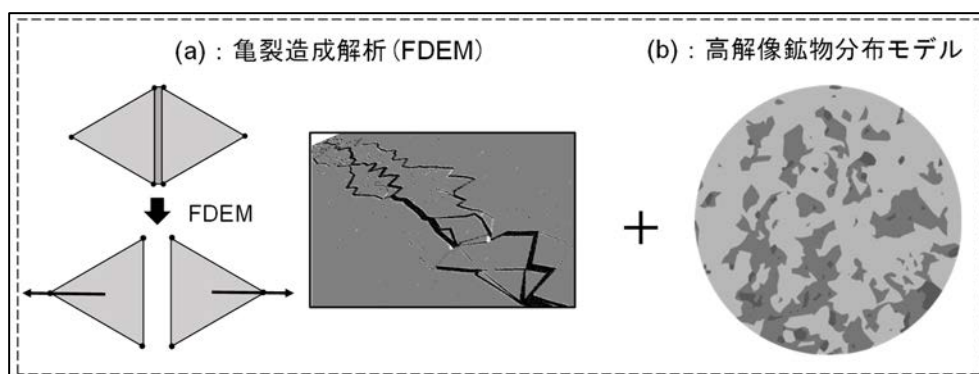


図3 ミクロスケール亀裂造成解析手法の概要

## 2.2 FDEM の高度化（高精度化と高速化）

高精度かつ高効率なミクロスケール亀裂造成解析手法を確立すべく、本解析のベースであり、亀裂造成過程を高度に表現可能な手法である FDEM の更なる高精度化と高速化を行った。FDEM では、亀裂造成過程を Cohesive Zone Model (CZM) <sup>図</sup>をベースに記述している。この CZM は岩石に限らず多種多様な材料の破壊挙動のモデル化に用いられており、各有限要素（計算に用いるメッシュ）の間に Cohesive 要素と呼ばれる特殊な境界要素を挿入し、その開口と滑りに応じた結合力を作用させ亀裂先端の破壊進行域をモデル化する。CZM には、Cohesive 要素を計算開始段階から全有限要素間に挿入する Intrinsic CZM(ICZM) <sup>図</sup>と、破壊条件を満たした要素間にのみ挿入する Extrinsic CZM (ECZM) <sup>図</sup>があり、従来の FDEM<sup>図</sup>は ICZM に基づき構築されている。しかし ICZM 型の FDEM では、計算対象が破壊する前から Cohesive 要素を挿入していることによる応力計算精度の大きな劣化が生じることが報告されている<sup>図</sup>。ゆえに、岩石の固体的な変形～不連続体的な亀裂造成・進展過程までを一貫して正確に追跡するためには、上記の様な精度劣化が一切生じない ECZM に基づく FDEM (ECZM 型 FDEM) の適用が必須である。しかし、従来の ECZM<sup>図</sup>では、計算領域内に Cohesive 要素を挿入する過程において極めて煩雑なリメッシュ処理が必要であるため、計算が非効率かつ逐次性が高く、並列計算による高速化が不可能であった。これに対し本研究では、上述した煩雑なリメッシュ処理を完全に回避するアルゴリズム (Master-Slave アルゴリズム) を実装した高効率かつ逐次性の低い革新的な ECZM に基づく FDEM を開発した。

この様なリメッシュ処理は ECZM が提案されてから現在までの 20 年以上もの間、解決されなかった重要な課題である。さらに、これまで並列化不可能であった ECZM 型 FDEM の並列化 (GPGPU 並列) まで実現し、従来の ECZM 型 FDEM の計算に対し 200 倍以上の高速化も優に達成でき、計算負荷（要素数）が増大するほど速度向上率が上昇するため大規模な数値解析に対する高い適用性を有していることが確認された(図 4)。以上の成果について、海外学術雑誌 1 編（地盤工学に関する計算力学分野において最高峰の学術雑誌 *Computer and Geotechnics*) で公表済みである。また、本成果を国内の岩盤力学に関する学術シンポジウムで発表したところ、その独創性・有用性が高く評価され 1 件の学術賞が授与された（岩盤力学に関するシンポジウム優秀ポスター賞）。

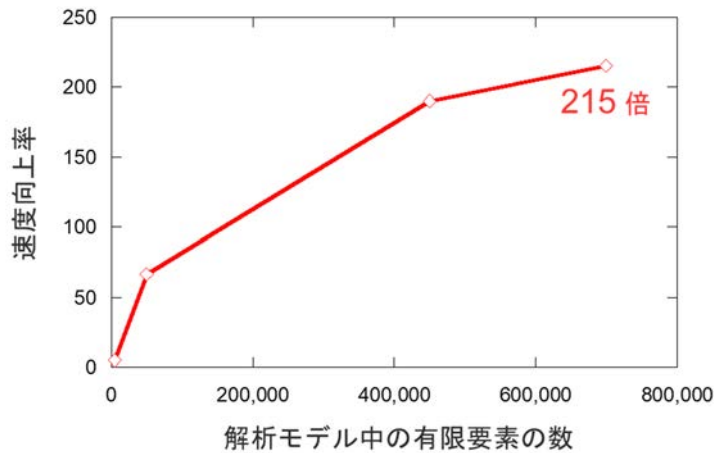


図4 並列化 EGZM-FDEM の速度向上率（横軸：有限要素数、縦軸：GPGPU 並列型 ECZM と並列化無し ECZM-FDEM の計算時間の比）

### 2.3 岩石構成鉱物分布を考慮したミクروسケール亀裂造成解析手法の構築と花崗岩を用いた岩石破壊実験を通じた性能検証

花崗岩（稲田花崗岩）に対する  $\mu$  フォーカス X 線 CT 撮影と画像解析より、対象岩石（稲田花崗岩）のミクロな構成鉱物分布を抽出し、それを忠実に反映した解析モデル GBM を構築し、それを先に構築した ECZM 型 FDEM の並列解析コード（2.1 節で紹介）に実装することで、ミクروسケールの岩石亀裂造成解析手法を構築した。この解析手法を用いて、岩石破壊実験（2 本の稲田花崗岩円柱供試体に対する圧裂試験）の再現計算を行った結果、構築手法は微視的な鉱物分布に依存した亀裂造成形態の特徴を的確に表現可能であることが確認された（図 5）。

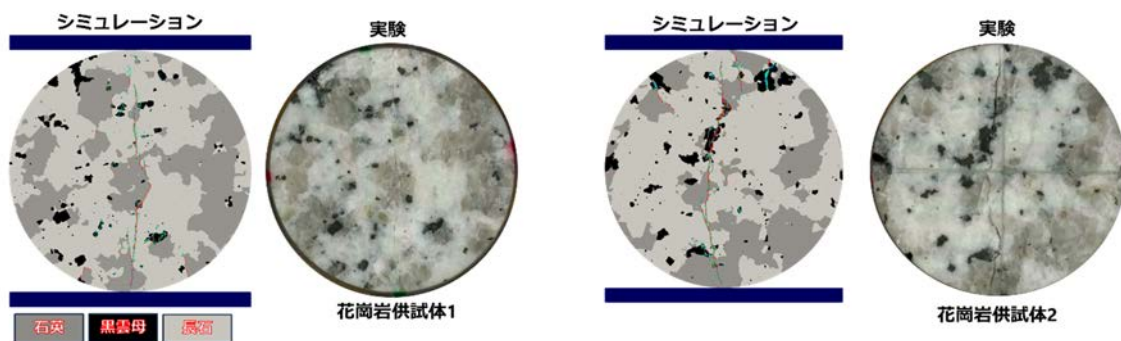


図5 鉱物鉱物を考慮したミクروسケール亀裂造成解析手法による花崗岩圧裂試験の再現解析の結果  
(鉱物分布の異なる供試体中の亀裂造成形態についての解析と実験の比較)

さらに、図 5 に示した花崗岩供試体 1 中の亀裂について、亀裂内部のマイクロ空間構造と関連する代表的なパラメータである Joint Roughness Coefficient（亀裂内の凹凸の粗さレベルを定量的に表すためのパラメータ：0～20 の数値で表す）を数値解析と実験それぞれから算出し比較した結果、両者の値の差はわずか 0.25 程度であり、構築した解析手法は岩石亀裂の造成とマイクロな内部空間構造を予測可能であることが確認された。

### 3. マルチスケールマルチフィジックスシミュレータ *GEF-REMMS* の構築

#### 3.1 構築アプローチの概要

続いて、先に構築した連続体解析－不連続体解析の統合手法 FDEM ベースのミクロスケール解析手法（2.2 節と 2.3 節で紹介）を研究代表者が開発してきた連続体解析ベースの熱－流体－力学－化学多連成解析手法<sup>[4]</sup>に実装することで、連続体解析－不連続体解析－マルチスケール解析－マルチフィジックス解析が融合した革新的数値シミュレータ *GEF-REMMS* を構築した。なお、研究代表者が開発してきた多連成解析手法<sup>[4]</sup>は、等価連続体モデルを用いた亀裂そのものを計算機上で直接的に表現できない連続体解析をベースにしており、亀裂で生じる局所現象に対する再現精度に限界があった。そこで、FDEM などの亀裂形態を計算機上で直接的に表現可能な不連続体解析を含んだ解析手法を導入した新たな連成解析の枠組みへと再構築し、更にその枠組みを亀裂のマイクロ構造特性を考慮した形まで拡張することにより、*GEF-REMS* を構築することとした。上述したアプローチの詳細を以下の 3.2 節で記す。

#### 3.2 マルチスケールマルチフィジックス解析フレームの構築

まず、不連続体解析手法を導入した新たな連成解析のフレームワークとして、連続体－不連続体統合解析手法である FDEM を用いた陽解法型の亀裂造成解析と、不連続亀裂ネットワークモデル（DFNM：Discrete Fracture Network Model）を用いた陰解法型の流体・熱流動・化学反応解析を研究代表者がこれまで開発してきた熱－流体－力学－化学連成解析手法<sup>[4]</sup>に導入した新たな多連成解析手法を構築した。なお、この様な不連続体解析を導入した複雑マルチフィジックス解析は計算工学分野を見渡しても極めて高度かつ先駆的な試みであり、解くべき各現象に対しそれぞれ最適な計算手法の適用が求められる。今回、構築したフレームワークにおいては、陽解法と陰解法という、二つの計算手法を連結させるアプローチを採用した。即ち、瞬間的に進行する岩石亀裂造成過程の計算には、許容される計算の時間刻みは非常に小さいが収束計算を伴わないため極短時間で生じる非線形破壊現象なども計算破綻することなく求解できる陽解法を適用し、岩石内の時々刻々の流体・熱流動・化学反応過程の計算には、収束計算を伴うが許容時間刻みを比較的長く設定できる陰解法を適用した上で、それぞれの過程を連結させることにより、陽解法と陰解法の両者の強みを上手く活かしながら、亀裂含有岩盤でのマルチフィジックス現象を解くアプローチである。続いて、上述した連

成解析フレームに、亀裂造成解析より算出された亀裂のミクロ構造特性を亀裂内での流体・熱・物質の流動や岩石鉱物の溶解・沈殿反応を記述するメゾスケールモデルに反映し亀裂含有岩盤のマクロな挙動とリンクさせるというマルチスケールフレームを導入することで *GEF-REMMS* の構築を完了した。また、上述した成果を国内学会（岩盤力学に関するシンポジウム）で発表したところ、その独創性・先進性が高く評価され、1 件の学術賞が授与された（岩盤力学に関するシンポジウム若手奨励賞）。

#### 4. シミュレータの性能検証と実問題への適用

##### 4.1 地熱貯留槽を模擬した室内試験（水圧破碎試験、透水試験）の再現計算を通じたシミュレータの妥当性検証

まず、構築したシミュレータを用いて、地熱貯留槽環境を模擬した岩石水圧破碎実験の再現計算を実施し水圧破碎による亀裂造成に対するシミュレータの妥当性を検証した。再現対象となる水圧破碎実験は、玄武岩を用いて温度 250℃、拘束圧 30MPa の高温高压条件で実施された。図 6 に、水圧破碎による亀裂造成形態に関する実験と計算結果の比較を示す。図 6 より、構築したシミュレータは実際の亀裂造成形態の特徴を的確に再現できており、地熱貯留槽環境での水圧破碎による亀裂造成についてシミュレータの妥当性が確認された。上述した成果を国内学会（日本地熱学会学術講演会）で発表したところ、その独創性・先進性が高く評価され、2 件の学術賞（日本地熱学会学生ベストプレゼンテーション賞、ポスター発表優秀発表者賞（銅賞））が授与された。

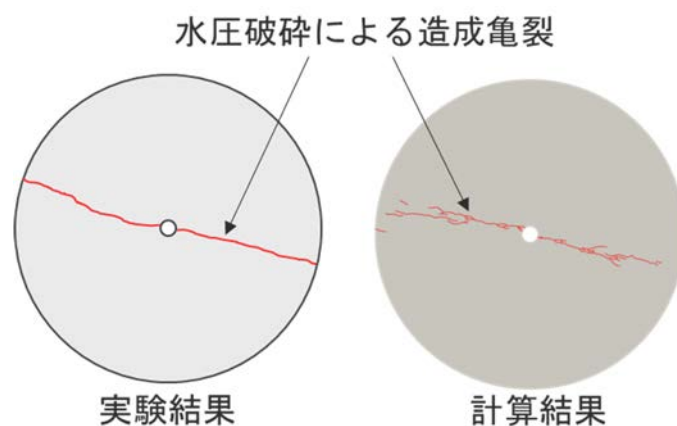


図 6 水圧破碎時の亀裂造成形態に関する実験と再現計算の結果の比較  
(赤い領域が巨視亀裂領域)

続いて、地熱貯留槽環境を模擬した岩石亀裂への透水試験の再現計算を通じて亀裂造成後の透水性経時変化に対するシミュレータの妥当性を検証した。再現対象となる透水実験は、花崗岩亀裂を用いて、最大温度 350℃（室温～350℃）・有効拘束圧 20MPa という亜臨界を含む高温高压条件下で実施された<sup>6)</sup>。再現計算の結果、世界的に見てもはじめて、特に大きな深度での貯留槽造成 EGS 実施時に想定され得る亜臨界条件下での亀裂の透水性経時変化を的確にシミュレートすることに成功した（図 7）。

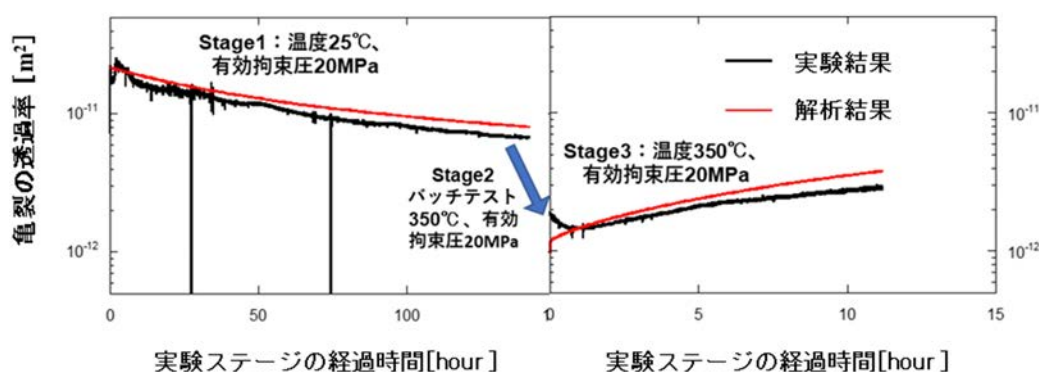


図 7 温度 350℃・有効拘束圧 20MPa 下での花崗岩亀裂透水試験<sup>6)</sup>で計測された亀裂の透過率変化と再現解析結果との比較

これらの結果より、貯留槽造成 EGS 実施時に想定され得る重要現象である亀裂群造成や亀裂の透水性経時変化に対する開発したシミュレータの妥当性が確認された。

#### 4.2 高温岩盤での貯留槽造成型 EGS を想定した長期予測解析

構築したシミュレータを用いて、高温岩盤での貯留槽造成 EGS による地熱発電の実施過程を想定した長期スパンの予測解析を行った。具体的には、①200℃の岩盤に対し注入井を通じた水圧破碎による亀裂群造成（人工的な地熱貯留層の造成）過程の解析を行い、②造成亀裂群の最大到達地点近傍に抽出井を設置した上で 40℃の水を注入井から抽出井に向かって流動させ回収する地熱流体流動過程の解析を行った。

その結果、水圧破碎による亀裂群造成過程の解析より、水圧破碎の古典理論<sup>7)</sup>とも整合した妥当な方向に亀裂が進展していく挙動が確認された（図 8）。また、亀裂造成後の地熱流体流動過程の解析より、水圧破碎によって造成された亀裂群（図 8）の内、岩石鉱物－流体間の溶解または沈殿反応が卓越した亀裂においてのみ、蒸気生産・回収量を大きく左右する数オーダー以上もの顕著な透水性経時変化が生じ得ることが示された（図 9）。



図 8 高温岩盤での水圧破砕時の造成亀裂の進展挙動

**化学反応が卓越した亀裂でのみ透水性が顕著に変化**  
 →この様な反応による亀裂の不均質な透水性変化は不連続体解析ベースの熱一流体一応力一破砕一化学連成計算ではじめて解像可能

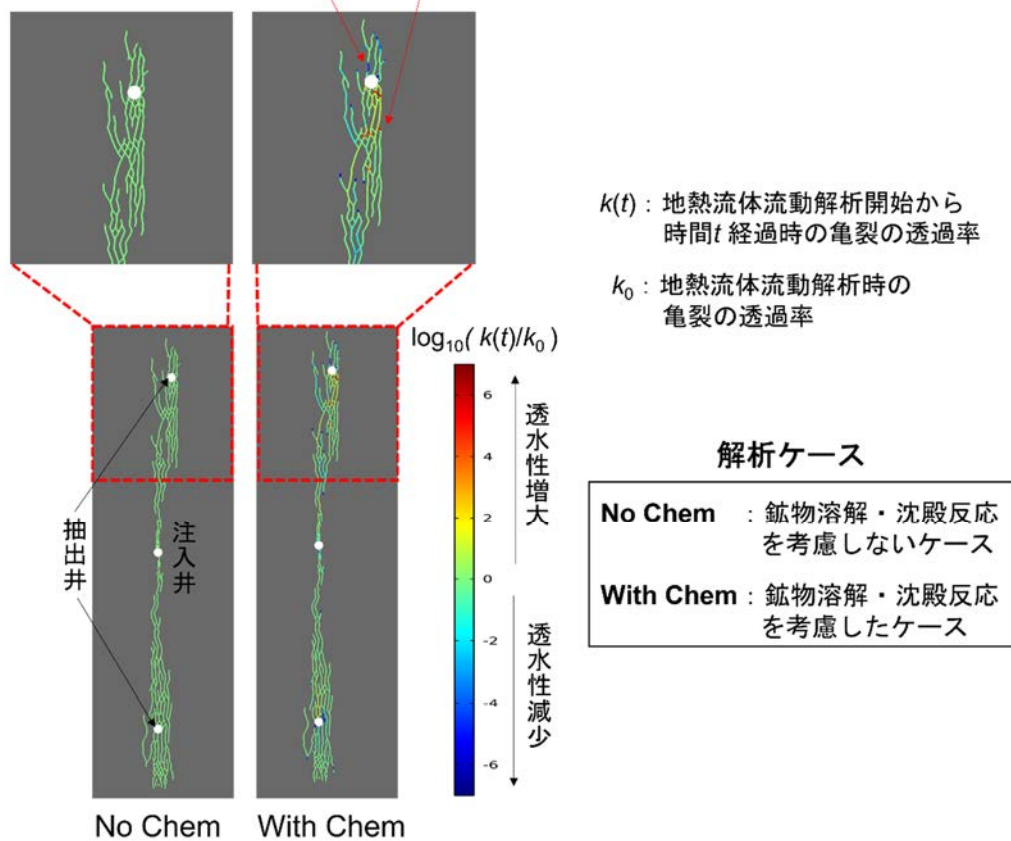


図 9 地熱流体流動解析開始後 20 年時点での亀裂の透水性変化割合の分布  
 (地化学反応を考慮した場合と考慮しない場合の比較)

### 4.3 地熱流体流動過程の解析に関する考察

地熱流体流動過程の予測解析の結果から、造成亀裂の中でも流路が行き止まり状態になっている箇所において透水性の低下が生じている一方で、行き止まりになっていない流路では透水性の増加が生じていることが確認できる（図 9）。これについては、流路が行き止まりの箇所では、流れてきた溶解物が蓄積され流体中の物質濃度が過飽和となり鉱物沈殿反応が活発化したことで、亀裂内空隙が沈殿物により閉塞し透水性が低下している。流路が行き止まりでない箇所では、溶解物は蓄積せず流体中の物質濃度が未飽和となるため鉱物溶解反応が活発化し、亀裂内空隙が拡大し透水性が増加している。蒸気生産・回収量に大きな影響を及ぼし得るこのような亀裂の透水性変化の詳細なメカニズムは、各亀裂の造形成態やマイクロ構造特性に依存した岩石鉱物の溶解・沈殿反応等の発生挙動を詳細に考慮可能な *GEF-REMMS* によってはじめて解像・評価できるものであり、本研究で開発したシミュレータの有用性が確認された。

## 5. 結言

本研究では、地下深部で造成される未知なる岩石亀裂の長期挙動を、亀裂内のマイクロな空間構造特性も考慮して精緻に計算可能な革新的マルチスケール・マルチフィジックスシミュレータ *GEF-REMMS* を開発した。また、そのシミュレータを用いて、貯留槽造成 EGS における各種プロセスに対応した実験群（水圧破碎による亀裂造成実験、岩石亀裂内透水実験）の再現計算を行った結果、実験結果（亀裂造形成態や亀裂の透水性変化）を正確に再現することに成功し、開発したシミュレータが貯留槽造成 EGS 実施時に岩石内で想定され得る現象に対し高い予測性能を有していることが確認できた。さらに、大規模高温岩体での貯留槽 EGS の実施過程を想定した長期スパンの予測解析を実施した結果、高温岩体中に造成された亀裂群の内、岩石鉱物の溶解または沈殿反応が卓越した亀裂でのみ、蒸気生産・回収量を左右する顕著な透水性経時変化が生じるという傾向が示された。また、その様な地化学反応駆動の局在的な亀裂の透水性経時変化が生じるメカニズムも解析結果より明らかにすることができた。

## 謝辞

本研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて実施したものです。JFE21 世紀財団には研究期間の延長も許可いただきまして、目標としていた成果を概ね得ることができました。財団および関係者の皆様のご支援に心より感謝いたします。

## 成果発表業績

### ・学術雑誌論文

- [1] Yutaro Maeda, Sho Ogata(責任著者), Daisuke Fukuda(責任著者), Hongyuan Liu, Toru Inui: Development of a GPGPU-parallelized FDEM based on extrinsic

cohesive zone model with master-slave algorithm, *Computers and Geotechnics*, Vol. 166, 105942, 2024

- [2] Sho Ogata(責任著者), Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Toru Inui, Eita Nishira, Kiyoshi Kishida: Numerical analyses of coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical processes for estimating permeability change in fractured rock induced by alkaline solution, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol. 31, No. 100372, 2022

・国際会議論文

- [1] Yutaro Maeda, Sho Ogata, Daisuke Fukuda, Hideaki Yasuhara, Toru Inui, Kiyoshi Kishida:  
A Framework of Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical Analysis for Simulating Hydraulic Fracturing Based on Explicit and Implicit Methods, Proceedings of 57TH US ROCK MECHANICS / GEOMECHANICS SYMPOSIUM, Paper No. ARMA-2023-0759 (2023).
- [2] Sho Ogata, Yutaro Maeda, Daisuke Fukuda, Hideaki Yasuhara, Toru Inui, Kiyoshi Kishida: Coupled THMC Simulation Based on Explicit Fracture Representation Using Extrinsic Cohesive Zone Model, Proceedings of 56TH US ROCK MECHANICS / GEOMECHANICS SYMPOSIUM, Paper No. ARMA-2022-0642 (2022).

・学会発表

- [1] 前田 悠太朗、緒方 奨、詫間 康平、渡邊 則昭、大里 和己、寺井 周：岩石の CO<sub>2</sub> 水  
押破碎シミュレータの開発、第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム、2024 年 1 月  
12 日
- [2] 永瀬 みちる、緒方 奨、岡本 敦、乾 徹：亜臨界領域での地化学反応に伴う岩石亀裂  
の透水性変化を考慮した透水ー反応輸送連成 シミュレータの開発と検証、第 50 回  
岩盤力学に関するシンポジウム、2024 年 1 月 12 日
- [3] 詫間 康平、渡辺 優斗、坂口 清敏、渡邊 則昭、前田 悠太朗、緒方 奨、大里和己、  
寺井 周：地熱貯留層条件下での CO<sub>2</sub> 圧入による火山岩の破碎メカニズム、日本地熱  
学会令和五年学術講演会、2023 年 11 月 16 日（本発表が日本地熱学会学生ベストブ  
レゼンテーション賞を受賞）
- [4] 詫間 康平、渡辺 優斗、坂口 清敏、渡邊 則昭、緒方 奨、前田 悠太朗、大里和己、  
寺井 周：火山岩地熱貯留層の CO<sub>2</sub> フラクチャリングシミュレーション、資源・素材  
学会東北支部令和五年春季大会、2023 年 6 月 8 日（本発表がポスター発表優秀発表  
者賞（銅賞）を受賞）
- [5] 家永凌苒、緒方奨、前田悠太朗、福田大祐、乾徹：陽解法と陰解法を導入した亀裂性  
岩石の熱ー水ー力学連成解析法の開発と岩石水圧破碎への適用、第 49 回岩盤力学に関

するシンポジウム、2023 年 1 月 12 日（本発表が第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム若手奨励賞を受賞）

- [6] 前田悠太郎、緒方奨、福田大祐、乾徹：Extrinsic Cohesive Zone Model をベースとしたハイブリッド FEM-DEM 解析の並列化、第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム、2023 年 1 月 12 日（本発表が第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム優秀ポスター賞を受賞）
- [7] Yutaro Maeda, Sho Ogata, Daisuke Fukuda, Hideaki Yasuhara, Toru Inui, Kiyoshi Kishida: Development of hydraulic fracturing simulator based on explicit and implicit methods, CouFrac 2022 - International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media, 2022 年 11 月 15 日
- [8] 緒方奨、前田悠太郎、福田大祐、陳友晴：陽解法－陰解法連成解析法を用いた水圧破碎解析、日本地熱学会令和 4 年学術講演会、2022 年 11 月 8 日

#### 引用文献

- [1] S, Ogata., H, Yasuhara., N, Kinoshita., K, Kishida: Coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical modeling for permeability evolution of rocks through fracture generation and subsequent sealing, *Computational Geosciences*, Vol. 24, 1845-1864, 2020
- [2] A, Munjiza: The Combined Finite-Discrete Element Method, *John Wiley & Sons*, 2004
- [3] GI, Barenblatt: The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 7, 55-129, 1962
- [4] D, Fukuda., E, Nihei., SH, Cho., S, Oh., Y, Nara., J, Kodama., Y, Fujii: Development of a Numerical Simulator for 3-D Dynamic Fracture Process Analysis of Rocks Based on Hybrid FEM-DEM Using Extrinsic Cohesive Zone Model, *Journal of the Materials Sciences, Japan*, Vol. 69, No. 3, 228-235, 2020
- [5] Z, Zhang., G, Paulino., W, Celes: Extrinsic Cohesive Zone Modelling of dynamic fracture and microbranching instability in brittle materials”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 72, 316-335, 2007
- [6] A, Okamoto., H, Tanaka., N, Watanabe, H, Saishu., N, Tsuchiya., Fluid pocket of generation in response to heterogeneous reactivity of a rock fracture under hydrothermal conditions, *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, 10306-10315, 2017
- [7] B, Haimson., C, Fairhurst: Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks, *Society of Petroleum Engineering Journal*, Vol. 7, 310-318, 1967