

jh250075

CO₂ と水の注入による地下岩体フラクチャリングプロセスを予測する大規模数値シミュレーションと CO₂ 活用型地熱発電への展開

緒方 奨 (大阪大学)

概要 近年、CO₂ を活用した地熱発電プロジェクトが国内で推進されており、その中で課題代表者らは、岩体中に高性能な地熱貯留層を人工的に造成するための新技術として、CO₂ と水を併せて用いる革新的岩石破碎法を開発し、室内実験規模において手法の有効性を検証している。本研究では、その開発した破碎手法を実岩体規模に適用した際に想定される未知の岩石破碎プロセスを精密に予測し得る大規模数値シミュレーションを実現した。また、シミュレーションの結果から、CO₂ 注入により破碎が生じ始めた時点で水の注入を開始する方が亀裂の開口幅がより大きな浸透性の高い地熱貯留層を造成できる可能性が高いことをはじめて明らかにした。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター
大阪大学 D3 センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

※代表者・緒方奨&前田悠太郎&辻埜大輔&田中祐成 (大阪大学工学研究科)

役割分担

- ・スパコン利用を想定したコードの改良
- ・室内実験規模のシミュレーション
- ・実岩盤規模でのシミュレーション

副代表者・福田大祐&Gyeongjo Min (北海道大学工学研究院)

役割分担

- ・スパコン利用を想定したコードの改良
- ・室内実験規模のシミュレーション

安福健祐 (大阪大学 D3 センター)

役割分担

- ・スパコン利用全般の補助：コードチューニングや計算実行の補助
- ・大規模可視化システムの利用補助

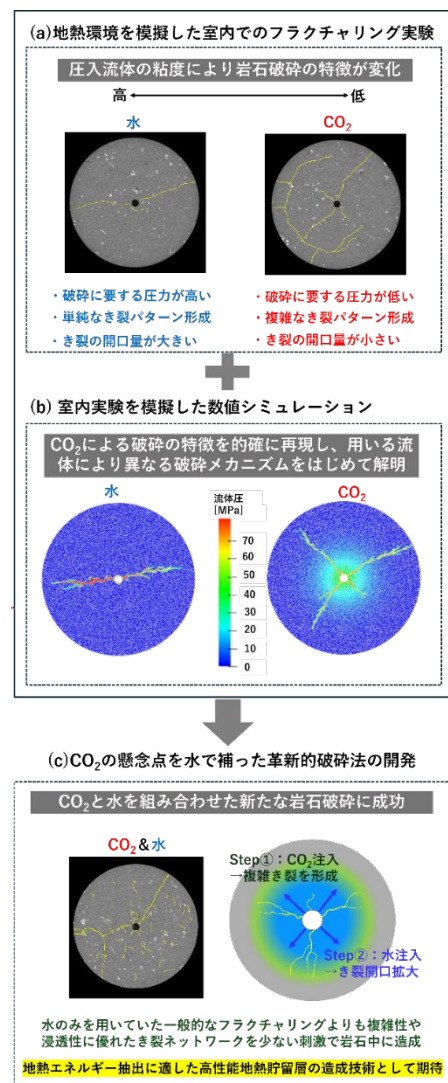


図1 研究代表者らが実施したCO₂や水を用いたフラクチャリングに関する研究の概要

2. 研究の目的と意義

世界第三位の地熱資源量を活かしきれていない我が国の地熱発電の現況を変えていくために、2021年より日本国内では、従来の地熱発電で用いられてきた天然の地熱貯留層（地熱流体が浸透し溜まることのできる浸透性の亀裂ネットワーク）に頼らない新たな非従来型地熱発電の一つとして、CO₂を活用し地熱資源（高温岩体）の開発と発電を行う、CO₂活用型の地熱発電プロジェクトがJOGMECにより開始されている。本プロジェクトでは、高温高压の火山岩帯にある地熱資源を主な開発対象としており、CO₂を活用した岩石のフラクチャリング（円孔井からの流体圧入による岩石破碎）により地熱貯留層を人工的に火山岩帯に造成することで地熱資源を開発していく計画が予定されている。しかし、従来の高温高压環境（地熱環境）でのフラクチャリング事例の多くが水を用いたものであり、CO₂を用いた火山岩でのフラクチャリングの先行事例は室内規模でさえ皆無であるため、CO₂を活用し火山岩帯に地熱貯留層を造成する上での有効かつ最適な実施手法などが一切明らかになっていなかった。

他方、近年の精力的な研究により、上記の様な未開拓領域を先駆的に切り拓きつつあるのが研究代表者らである。具体的には、CO₂を用いた火山岩内のフラクチャリングプロセスを表現可能な独自開発の数値シミュレータと室内破碎実験を統合した多角的な現象分析によって、CO₂を火山岩内に先行注入した後に続けて水を注入することでCO₂のみを用いた場合に生じる問題点（亀裂の開口量が小さくなる）を水の機能で補うことのできる世界初のユニークなフラクチャリング手法の開発に成功している（図1, Takuma et al. (2024)¹⁾）。なお、このCO₂と水という粘度の異なる流体を組み合わせた開発手法により、水のみを用いていた旧来の一般的なフラクチャリング手法よりも、複雑性や浸透性に優れた亀裂ネットワークをより少ない刺激で火山岩中に造成できることが実証されている（図1, Takuma et al. (2024)¹⁾）。これらは、地熱開発時の地震発生リスクの低減や地熱エネルギー

の抽出において非常に優位な特性であるため、高性能な人工地熱貯留層の造成、ひいてはCO₂地熱発電の更なる推進に大きく貢献することが期待されている（大阪大学よりプレスリリースされ当該分野で注目を集めている）。そして、このような室内実験規模での検討に続く研究ステージは地下深部の実岩体における貯留層人工造成への応用展開である。しかし、地下でのフラクチャリングの一回当たりの実施コストは非常に高価（数億～数十億円程度）となるため、スーパーコンピュータを利用した大規模数値シミュレーションによって、実岩体でのフラクチャリングによる貯留層人工造成過程に対する事前予察を行うことが必須である。以上の背景を踏まえ本研究では、研究代表者らが世界に先駆けて開発した最新のフラクチャリング手法（CO₂×水ハイブリッドフラクチャリング）を地下深部地熱環境の実岩体（火山岩帯）に適用した際の貯留層人工造成過程に対する大規模シミュレーションを実現する。これにより、貯留層人工造成過程を仮想の計算機空間上で精密に表現（バーチャライゼーション）可能となり、想定され得る現象を実寸大で高精細に具現化できる。その結果、CO₂×水ハイブリッドフラクチャリング手法を用いた実施工において、どのようにCO₂及び水が大規模な岩体中に圧入・浸透していくのか？それに伴いどの程度の注入圧段階で亀裂ネットワークがどのくらいの範囲まで発達・連結するのか？といった、高性能なCO₂活用型地熱発電を安全に実現する上で極めて重要となる学術的問いの予察・解明が期待できる。また、CO₂活用型地熱発電を行う際には、多くの場合、まず人工貯留層を造成し、その後貯留層を利用した長期熱抽出を実施するという工程が想定される。本研究により人工貯留層造成過程が正確に予測可能になることで、それに続く長期熱抽出過程の予測計算の精度向上等にも繋がるため、一連の実工程を再現したより統合的なCO₂活用型地熱発電の性能評価への発展も期待できる。なお、CO₂活用型地熱発電は、日本政府が掲げたカーボンニュートラル実現に向けた重点政策の一つである地熱開発加速化パッケージにおけ

る有力な次世代地熱開発技術の一つになっていることから、上述した様な本研究で得られる成果は我が国のカーボンニュートラルの達成において極めて大きな意義を持つ。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究課題は、CO₂ と水という二つの流体が数十～数百メートル規模の実岩体に圧入・浸透していき、それに伴い微細（単一だとミリ～センチの長さ）かつ複雑な亀裂網が発生・連結していく連成プロセスを高解像度に再現・予測可能とする、前例の無い極めてチャレンジングな大規模マルチスケール・マルチフィジックス（非定常の二相流体流動—変形・破碎連成）シミュレーションに挑戦するものであり、大規模計算資源の利用は必須である。また、このような実岩体に対する高度な大規模マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションの実現には、岩石・岩盤工学や環境資源工学・地球化学等の幅広い分野に対する計算機科学の応用展開において高い実績を有する研究者と情報科学分野に精通する研究者との学際的な共同研究体制が不可欠である。よって、本課題は、上述した様な様々な分野の研究者が連携したチーム体制の中で大規模計算資源を円滑に利用することのできる JHPCN 公募型共同研究の下で実施する必要があると考える。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究は、JHPCN においては今年度からの新規課題であるため、該当する記載事項はありません。

5. 今年度の研究成果の詳細

2.で上述した研究目的を研究期間（2025 年 4 月～2026 年 3 月）である本年度中に遂行するため、(1)[フラクチャリング解析コードをスパコン上で実行するためのコード改良]、(2)[室内実験スケールのフラクチャリング解析を通じた計算性能の検証]、(3)-1[人工貯留層造成過程のシミュレーション]、(3)-2[人工貯留層造成後の長期熱抽出過程のシミュレーション]を実施する計画を掲げていた。

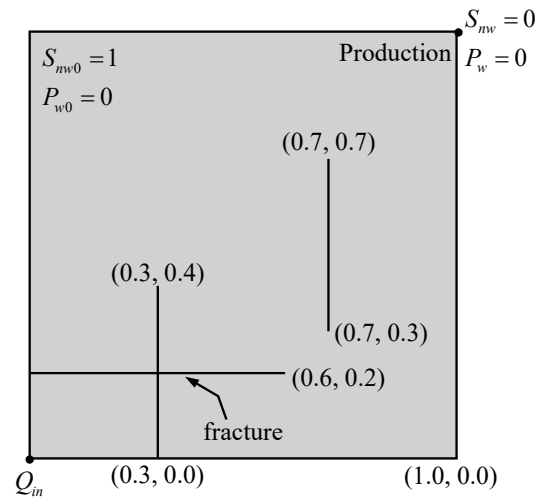


図2 二相流ベンチマーク解析に使用したモデルジオメトリおよび初期/境界条件.

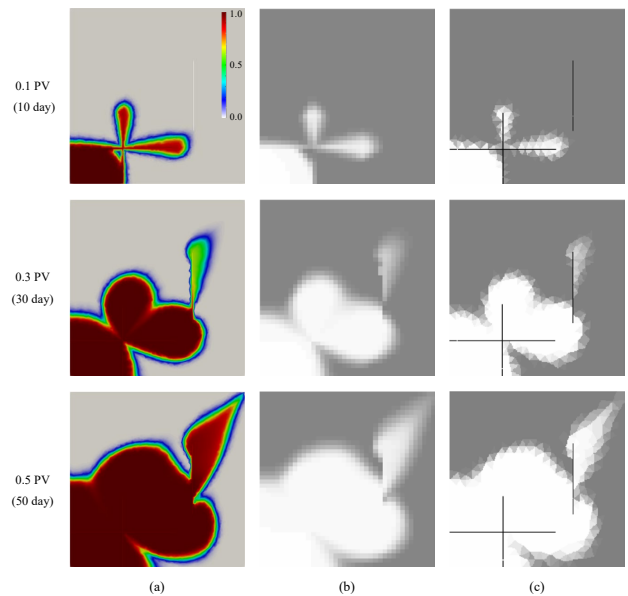


図3 改良コードによる水相の飽和度の解析結果(a)及び Karimi-Fard の参照結果²⁾ (FEM(b), DEM(c)).

これまでの段階では、課題(1)・(2)・(3)-1については既に遂行済みで、課題(3)-2の実施の準備中の状況である。これまでに実施した各課題より得られた成果の詳細を以下に記す。

(1)[フラクチャリング解析コードをスパコン上で実行するためのコード改良]

本課題で目標としていた、既開発のフラクチャリング解析コードをスパコン上での実岩体規模の

CO₂×水フラクチャリング解析に対応可能な形に改良することに成功した。既開発コードは、離散亀裂ネットワークモデル (Discrete Fracture Network Model : DFNM) を用いた流体流動計算と Extrinsic 結合力モデル (Extrinsic Cohesive Zone Model : ECZM) を用いた変形・破砕計算の連成により構成されている。また、MPI (Message Passing Interface) に基づく 3D のマルチ GPU 並列計算を実装済みであり、GPU 枚数に概ね比例した速度向上率を達成していたが、このコードは単相の流体流動を仮定しており、二相流問題となる CO₂×水フラクチャリングには適用できない状態であった。

そこで本課題では、DFNM に基づく岩石内の亀裂領域とそれ以外の健岩領域における単相流体流動計算の支配方程式とプログラムを二相流系に拡張し、CO₂、水をはじめとした種々の流体の二相流計算に対応可能とした。更に、改良したコードの二相流計算のベンチマークを行った。具体的には、亀裂を含む多孔質媒体の二相流れに対する参照解として利用されることが多い、Karimi-Fard et al.²⁾ の解析結果との比較を行った。解析に用いたジオメトリおよび境界条件/初期条件を図 2 に示す。解析ドメインは 1 m×1 m の正方形 2 次元領域であり、初期状態としては非湿潤相であるオイルが全領域に渡って飽和状態で存在し ($S_{mv}=1$)、3 本の初期亀裂が存在する。初期亀裂の開口幅は一様に 0.1 mm である。岩石実部の透過率 K_m および空隙率 ϕ_m はそれぞれ、 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、0.2 とする。また亀裂の空隙率については 1.0 とする。このとき、左下の注入井から常温状態の水が $Q_{in} = 0.01 \text{ PV/Day}$ ($2.32 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) の割合で注入され、モデル内右上の生産井からオイルが抽出される。注入井では完全な水が注入されるためディリクレ境界として $S_w=1$ を付加する。また、Capillary 圧に関しては本解析では無視し、水およびオイルの相対浸透率については線形関係を仮定した。

解析結果として、水相の 0.1, 0.3, 0.5 PV (それぞれ $t = 10, 30, 50 \text{ day}$) における飽和度プロファイルを図 3 に示す。同図(a) は今回の解析結果を示し、(b), (c) はそれぞれ Karimi-Fard et al.²⁾ の FEM,

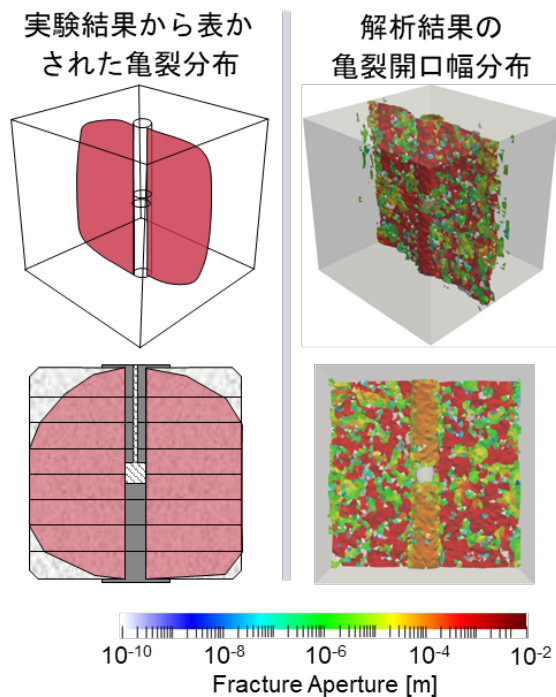


図 4 CO₂×水フラクチャリングにより生じた岩石サンプル内の三次元亀裂造成形態に関する実験と解析結果の比較。

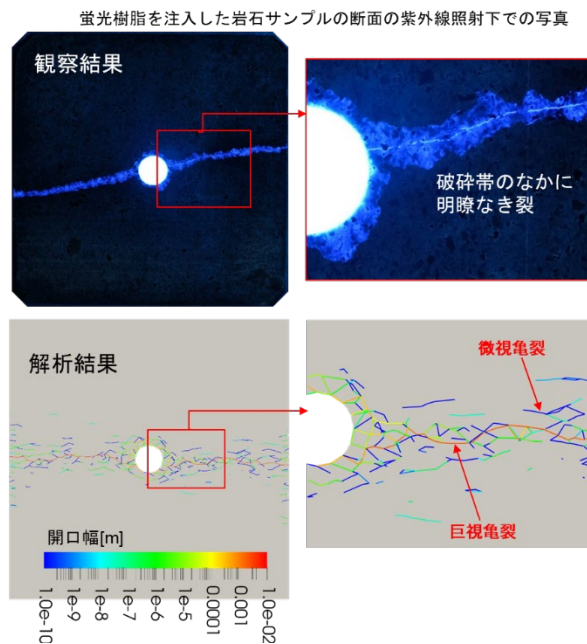


図 5 CO₂×水フラクチャリングにより生じた岩石サンプル断面の亀裂造成形態/性状に関する実験と解析結果の比較。

DEM を用いた解析結果である。図 3 から、注入された水は最初に交差する亀裂へと徐々に浸透し、亀裂内を優先的に流れ、生産井へと移流することが確認された。また、Karimi-Fard の水飽和度の時間プロファイルと比較しても、本解析結果は非常

によく一致しており、二相流の定式化およびその実装の妥当性が確認できた。

(2)[室内実験スケールのフラクチャリング解析を通じた計算性能の検証]

当初の計画通り、(1)の課題で改良したマルチGPU 並列型の CO₂×水フラクチャリング解析コードの実現象との整合性に関する検証題材として、東北大・渡邊則昭教授らによる地熱環境を模擬した高温高压真三軸応力下での CO₂×水フラクチャリング実験 (10cm×10cm×10cm の大型岩石ブロックを使用) を再現した 3D 解析を行った。その結果、解析は実験で観察された亀裂造成のマクロな形態やミクロな性状 (CO₂ により形成された微視亀裂と水により形成された巨視亀裂) を概ねよく再現できており、開発したシミュレータの CO₂×水フラクチャリングに関する妥当性が確認された (図 4, 図 5)。

(3)-1[人工貯留層造成過程のシミュレーション]

Initial geo-stress: $\sigma_z = 40 \text{ MPa}$ $\sigma_y = 30 \text{ MPa}$ $\sigma_x = 20 \text{ MPa}$

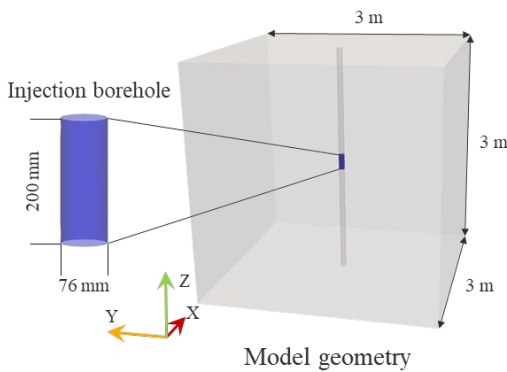


図 6 数値解析で設定した解析領域及び初期応力条件。

本課題で目標としていた、地熱資源が賦存する地層環境での人工貯留層造成試験を想定した予察シミュレーションを改良・検証済みの解析コードを用いて実施した。具体的には、我が国の地熱資源分布地帯で想定され得る、本小松安山岩 (溶岩) 及び玄武洞玄武岩 (溶岩) に近い物性を有する岩石から成る地層環境での水によるフラクチャリング (以下、水フラクチャリングとする)、CO₂ によるフラクチャリング (以下、CO₂ フラクチャリン

グとする)、CO₂×水フラクチャリングを想定した 3D の人工貯留層造成シミュレーションを実施した。図 6 に示す通り、解析領域は 1 辺 3.0 m の立方体領域とし、中央に直径 76mm、高さ 200mm の注入区間を設けている。初期間隙水圧は 10 MPa とした。また、拘束圧については、 $\sigma_x = 20 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_y = 30 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_z = 40 \text{ MPa}$ をモデルの外端境界にそれぞれ与えた (図 6)。流体圧入条件については、水フラクチャリングと CO₂ フラクチャリングともに 50 mL/min の流量でボアホールに注入する設定とした。解析領域は初期状態で完全に水飽和している条件とした。解析に用いた岩石物性値は、東北大で実施された本小松安山岩 (溶岩) 及び玄武洞玄武岩 (溶岩) に対する各種力学試験結果に基づき設定した。まず、解析より得られた水フラクチャリングに関する結果について示す。図 7 には、水フラクチャリングにおけるボアホール圧の時間変化 (図 7(a)) と、破壊判定を満たした亀裂要素 (Cohesive 要素) の数の時間変化 (図 7(b)) をそ

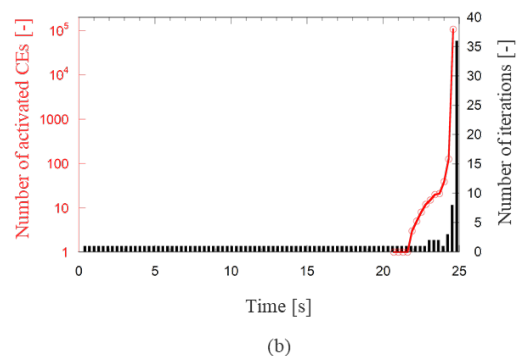
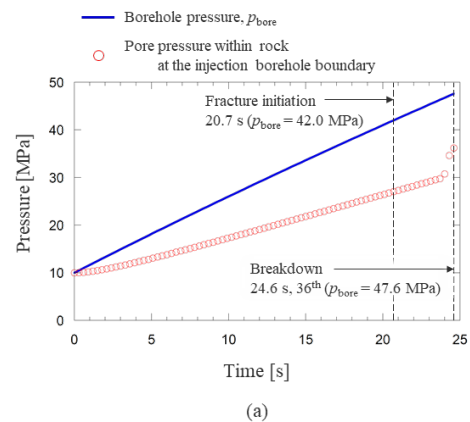


図 7 (a)水フラクチャリングの数値解析におけるボアホール圧及び円孔境界部の間隙流体圧の時間変化 (図中の p_{bore} はボアホール圧を表す) と(b)発生した亀裂要素の時間変化

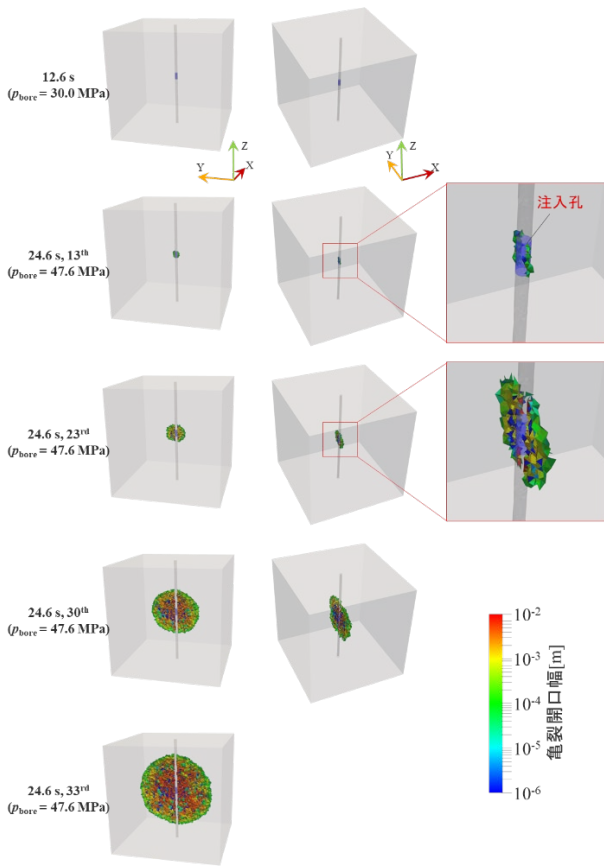


図 8 水フラクチャリングの数値解析における造成亀裂の開口幅分布の進展(図中の P_{bore} はボアホール圧を表している)

それぞれ示しており、水フラクチャリングでは、ボアホール圧が 42MPa の段階で破碎が開始し、47.6MPa でブレイクダウンしている。

また、図 7 (a)より、ボアホール圧 (青色実線) と円孔境界部 (内部壁面) 間隙流体圧の値には乖離が生じていることがわかる。これは、水は粘性が高いため、ボアホールからの円孔壁面への流体浸透が限定的であることに起因している。図 8 には、水フラクチャリングにおける造成亀裂の開口幅分布の進展を示している。図より、注入に伴い円孔壁面から亀裂が円盤状に進展していることがわかる。なお、本解析では、鉛直拘束圧 σ_z が最も大きく、水平拘束圧 σ_x が最も小さい地圧条件を設定しているため、図 8 から分かる通り σ_x の方向に開口する形の亀裂が造成されている。次に、水フラクチャリングにおける間隙流体圧分布と亀裂面の損傷変数の進展を図 9 に示す。図 9 では、各

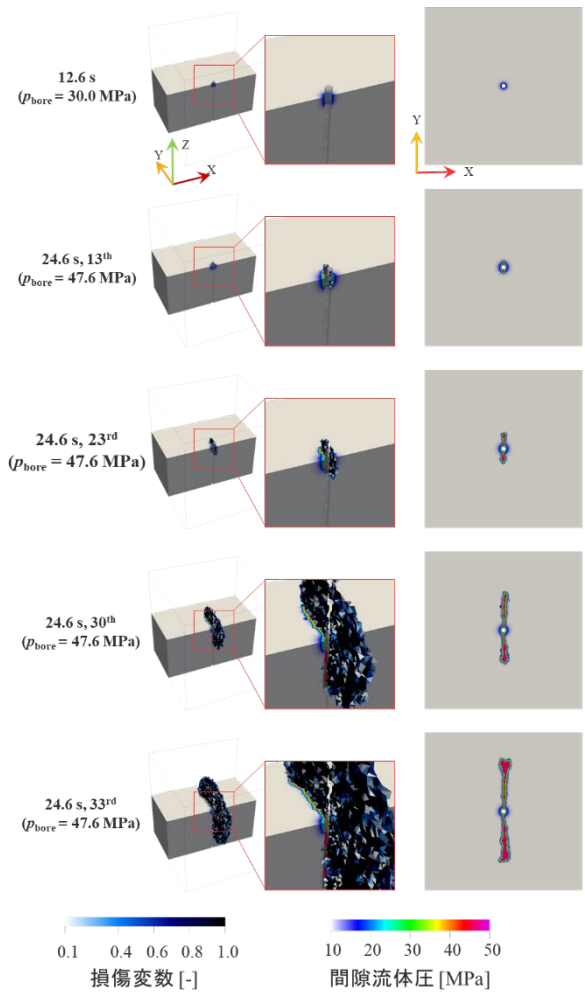


図 9 水フラクチャリングの数値解析における間隙流体圧分布と亀裂面の損傷変数の進展(図中の P_{bore} はボアホール圧を表している)

時間ステップにおける間隙水圧の空間分布を示しており、岩盤の損傷度合いを示す損傷変数の値は亀裂面に沿って等高線で表示されている。図 9 より、破碎開始前は流体の浸透と圧力上昇は円孔近傍領域に限定されており、破碎開始後は破碎面に沿って高い流体圧が発生していることが分かる。また、亀裂から離れたインタクト領域では、破碎開始後においてもほとんど流体圧の上昇は発生していないことがわかる。

続いて、CO₂ フラクチャリングの結果を示していく。図 10 には、CO₂ フラクチャリングにおけるボアホール圧の時間変化 (図 10 (a)) と、破壊判定を満たした亀裂要素 (Cohesive 要素) の数の時間変化 (図 10 (b)) をそれぞれ示している。図より、CO₂ フラクチャリングでは、ボアホール圧が

39MPa の段階で破砕が開始していることが確認できる。これは、水フラクチャリングの破砕開始圧より 3MPa 程度小さい値である。また、図 10 (a) より、ボアホール圧（青色実線）と円孔境界部（内部壁面）間隙流体圧の値がほぼ一致していることがわかる。これは、超臨界状態の CO₂ は粘性が低いため、ボアホールからの円孔壁面への流体浸透が容易であることに起因している。図 11 には、CO₂ フラクチャリングにおける造成亀裂の開口幅分布の進展を示している。図より、大局的には水フラクチャリングと同様に円孔壁面から亀裂が円盤状に進展していることがわかる。次に、CO₂ フラクチャリングにおける間隙流体圧分布、亀裂面の損傷変数、CO₂ 飽和度分布の進展を図 12 に示す。図 12 より、水飽和岩盤への CO₂ 注入によりマトリックス内の CO₂ 飽和度が増加し、破砕開始後は破砕領域周辺でも高い CO₂ 飽和度が分布している。

間隙流体圧の空間分布について、水フラクチャリングにおける結果（図 9）と比較すると、ボアホール圧が約 30 MPa（水フラクチャリングでは 12.6 秒。CO₂ フラクチャリングでは 2925 秒の時点）において、CO₂ フラクチャリングではより高い流体圧の領域がより広範囲に広がっている。このような広範囲での流体圧の上昇に伴う有効応力の減少によって、CO₂ フラクチャリングでは水フラクチャリングよりも破砕開始圧が低くなっていると考えられる。

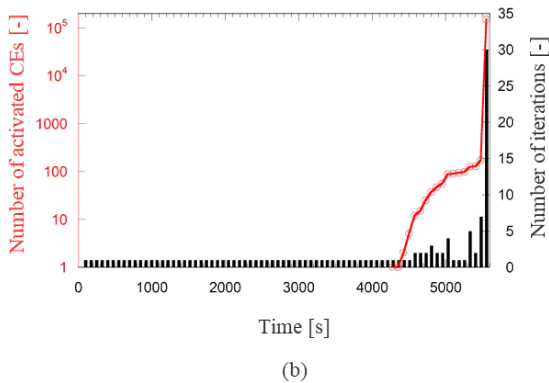
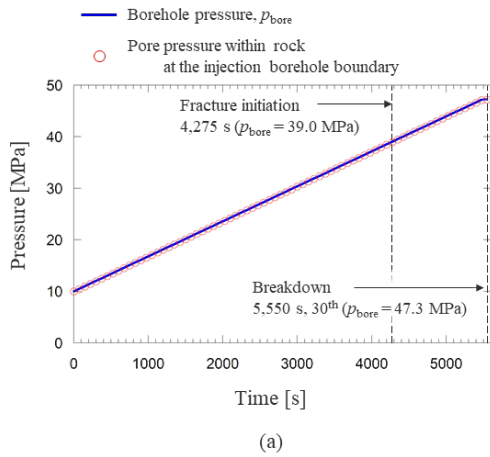


図 10 (a) CO₂ フラクチャリングの数値解析におけるボアホール圧及び円孔境界部の間隙流体圧の時間変化（図中の P_{bore} はボアホール圧を表す）と (b) 発生した亀裂要素の時間変化

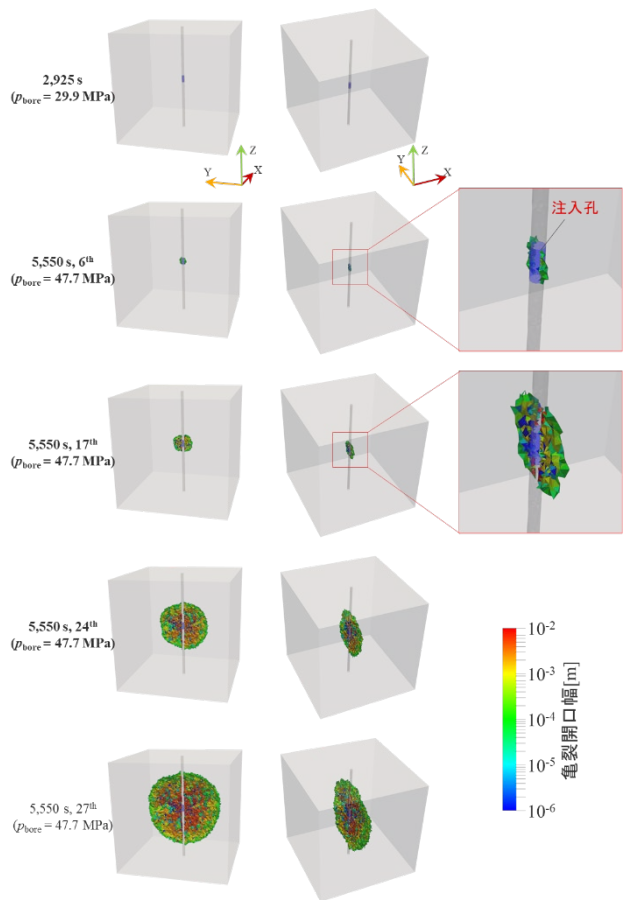


図 11 CO₂ フラクチャリングの数値解析における造成亀裂の開口幅分布の進展（図中の P_{bore} はボアホール圧を表している）

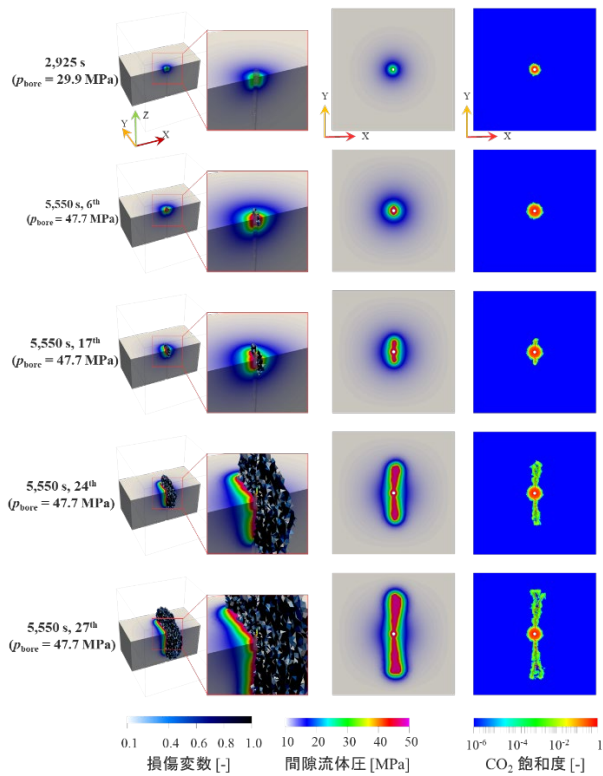


図 12 CO₂ フラクチャリングの数値解析における間隙流体圧分布、亀裂表面の損傷変数、CO₂ 飽和度分布の進展 (図中の P_{bore} はボアホール圧を表している)

上述した結果より、粘性の違いに起因した間隙流体圧分布の差によって、CO₂ フラクチャリングの方が水破碎よりも破碎開始圧が低くなるという、既往の室内フラクチャリング実験 (Takuma et al. (2024)¹⁾, Pramudyo et al. (2024)³⁾) で観察されたものと同様な傾向が仮想の実フィールドを想定したシミュレーションでも確認された。

最後に、CO₂×水フラクチャリングも含めた各破碎において造成された亀裂の開口幅の傾向についてみていく。なお、今回実施した CO₂×水フラクチャリングの解析では、CO₂ の先行注入の後に水の注入を開始するタイミングによる破碎への影響を検討するため、水注入のタイミングを変えた 2 つのケースで CO₂×水フラクチャリングシミュレーションを行った。1 つ目のケース (Case1) が、加圧区間の壁面近傍から破碎が開始した直後の時点で水注入を開始するケースである (図 13 の左図)。2 つ目のケース (Case2) が、xy 断面におい

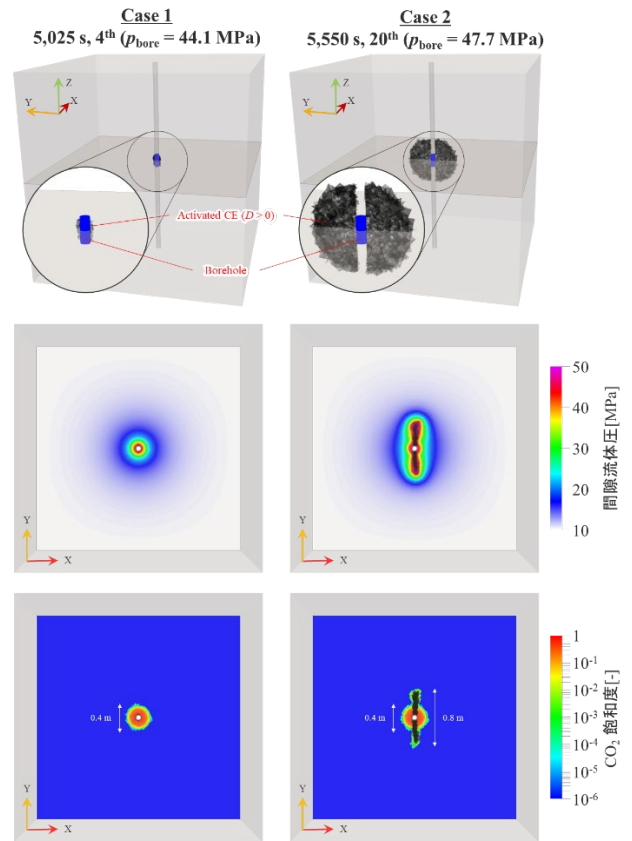


図 13 CO₂ 水押し破碎解析における、水押のタイミング (注入流体を CO₂ から水へ切り替えるタイミング) の概要: Case1 円孔近傍で破碎が発生開始した時点. Case2 XY 断面において円孔中心から破碎域先端までの距離が約 0.4m の距離 (Y 軸の上下方向併せて約 0.8m 程度) まで亀裂が進展した時点.

て円孔中心から破碎域の先端約 0.4m の距離 (Y 軸の上下方向併せて約 0.8m 程度) まで亀裂が進展した時点で水注入を開始するケースである (図 13 の右図)。

図 14 に、各フラクチャリング解析 (水フラクチャリング解析, CO₂ フラクチャリング解析, CO₂×水フラクチャリングの Case1 と Case2 の解析) において亀裂が同様の範囲まで進展した時点での、亀裂開口幅分布、間隙流体圧分布、CO₂ 飽和度分布の比較結果を示す。図より、注入孔中央深度の xy 断面中の円孔から 0.4m (坑井近傍領域) の距離の範囲内に存在しておりかつ開口幅が 1 μ m を超える亀裂について、水フラクチャリングでは坑井近傍平均開口幅が 2076 μ m, CO₂ フラクチャリングでは 1502 μ m となっており、水フラクチャリングの

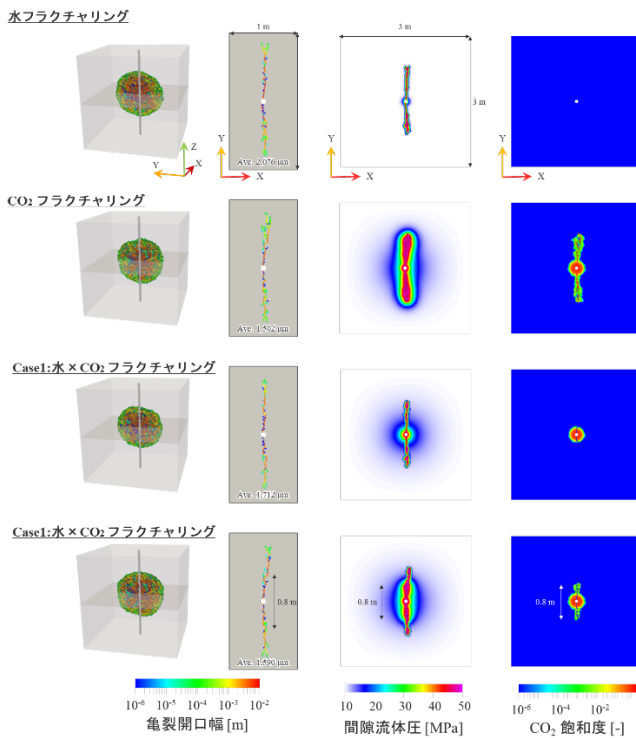


図 14 各フラクチャリング解析(水フラクチャリング解析, CO₂ フラクチャリング解析, CO₂×水フラクチャリングの Case1 と Case2)において亀裂が同様の範囲まで進展した時点での亀裂開口幅分布, 間隙流体圧分布, CO₂ 飽和度分布の比較結果

方がより大きな開口幅を形成していることがわかる。間隙流体圧分布をみると, CO₂ フラクチャリングの方が水フラクチャリングよりも亀裂内外の圧力差が小さくなっており, 超臨界 CO₂ の粘性の低さに起因した亀裂からマトリクス部への流体浸透による亀裂内外の圧力差の低下によって亀裂の開口が抑制されていると考えられる。

また, 水注入のタイミングの違う Case1 と Case2 の CO₂×水フラクチャリング解析の坑井近傍域の平均開口幅の値をみると, Case1 が 1712 μm で Case2 が 1590 μm であり, Case1 については CO₂ のみを用いた破碎と比べ坑井近傍の平均開口幅について約 210 μm 程度の有意な増大が確認できる。一方 Case2 については CO₂ のみを用いた破碎の場合よりも坑井近傍の平均開口幅の値は大きいものの, その差は約 90 μm 程度と小さいことが確認できる。なお, 図 14 中には記載はないが, CO₂×水フラクチャリング解析の両ケースとも, 破碎開始圧は

CO₂ フラクチャリングの結果と同程度であり, 水フラクチャリング時の破碎開始圧よりも小さい。これらより, フィールドスケールにおいても, 水フラクチャリングよりも破碎開始圧を低減でき, CO₂ フラクチャリングよりも開口幅を増大できる CO₂×水フラクチャリングは貯留層造成法として有効である可能性が示唆された。またさらに, CO₂×水フラクチャリング解析の Case1 と Case2 の坑井近傍の平均開口幅を比べると, Case1 の方がより開口幅が大きいことがわかる。図 14 の両ケースの間隙流体圧と CO₂ 飽和度の分布をみると, Case1 では注入水の高い粘性が亀裂面からの流体の漏出を抑制し, 周辺マトリクスにおける流体圧上昇を効果的に制限していることが確認できる。一方, Case2 では, 破碎域の先端が円孔中心から 0.4m の距離まで進展した時点で水注入を開始しており, その時点で亀裂進展域(円孔中心から 0.4m までの範囲)周辺には既に高い間隙流体圧が発生している。その結果, 円孔中心から 0.4 m 以内の範囲については, 水注入による亀裂の開口が抑制されたと考えられる。これらの結果より, CO₂ 水フラクチャリングにおいて, CO₂ 注入によって破碎がある程度進行してしまっている場合は, 既に CO₂ 浸透により広範囲に高い間隙流体圧が生じている可能性が高く, 亀裂の開口幅増大という観点では注入流体を CO₂ から水に切り替えるメリットは減少すると考えられる。すなわち, CO₂×水フラクチャリングにおいて亀裂の開口幅増大という観点では, CO₂ 注入により破碎が生じ始めた時点で水の注入を開始するのがよいと考えられる。

上記の結果等をふまえると, 今回実施した仮想条件での人工地熱貯留層造成解析を通じて, 以下の事項が想定される。

- ・地熱フィールドにおいても, CO₂ フラクチャリングの方が水フラクチャリングよりも小さな注入圧で亀裂を造成できるが開口幅が小さいという, 既往の室内破碎実験 (Takuma et al. (2024) ¹⁾, Pramudyo et al. (2024) ³⁾) で確認されてきたものと同様な傾向が共通して生じる可能性が高い。

- ・フィールドスケールの CO₂×水フラクチャリン

グにおいても、既往の室内破碎実験 (Takuma et al. (2024)¹⁾, Pramudyo et al. (2024)³⁾) の傾向と同様で、水のみによるフラクチャリングよりもより低い注入圧で亀裂を造成でき、CO₂ のみによるフラクチャリングよりも開口幅を増大でき、貯留層造成法としての高い有効性を持つ。

・CO₂×水フラクチャリングでは、CO₂ 注入により破碎が生じ始めた時点で水の注入を開始する方が亀裂の開口幅がより大きな貯留層を造成できる可能性が高い。

(3)-2[人工貯留層造成後の長期熱抽出過程のシミュレーション]

本項目については、計算に用いるマルチコア CPU 並列計算を搭載した、陰解法ベースの 3D-FEM 地熱流体流動解析コードを整備し、解析期間を 20 年に設定した長期地熱流体流動解析を行う準備が完了した状況である。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

上述した通り、本研究で計画していた、(1)-(3)の 3 つの主要課題の内、課題(1)[フラクチャリング解析コードをスパコン上で実行するためのコード改良]、課題(2)[室内実験スケールのフラクチャリング解析を通じた計算性能の検証]については当初の計画通りに遂行することができた。また、課題(3)[実施工を想定した実岩体規模での人工貯留層造成シミュレーション]を構成する 2 つのサブ課題の内 1 つである、課題(3)-1[人工貯留層造成過程のシミュレーション]も当初の計画通りに遂行し、地熱環境下での CO₂×水フラクチャリングにより亀裂開口幅の大きな浸透性の高い貯留層を人工造成する上で最適な施工条件を世界に先駆けて明らかにすることができた。これらを鑑みると、当初予定していた研究内容の内、約 83%程度 ($1/3 \times 2 + 1/3 \times 2/1 = \text{約 } 0.83$) 達成できたものと考えられる。今後は、今回の研究期間内で実施できなかった、サブ課題(3)-2 に該当する「人工貯留層造成後の長期熱抽出過程のシミュレーション」を実施したいと考えている。具体的には、本研究のサブ課

題(3)-1 の解析より得られた人工貯留層における長期間の熱抽出過程に対するシミュレーションを実施する予定である。一般的に実際の地熱発電では最低でも 20 年間程度に渡り継続的に熱抽出できることが求められるため、本シミュレーションの解析期間は最低でも 20 年以上を想定するとともに、施工条件を様々に変化させたパラメトリックスタディを行い、持続的に CO₂ 活用型地熱発電を行う上で最適なフィールドデザインを解明したい。

参考文献

- (1) Takuma, K., Maeda, Y., Watanabe, Y. et al. (2024). CO₂ fracturing of volcanic rocks under geothermal conditions: Characteristics and process, *Geothermics*, 120, article number; 103007.
- (2) Karimi-Fard, M., Durlafsky, L., Aziz, K. (2004): An Efficient Discrete-Fracture Model Applicable for General-Purpose Reservoir Simulators. *SPE Journal*. 9(2),227-236.
- (3) Pramudyo, E., Takuma, K., Watanabe, Y. et al. (2024). Characteristics and effectiveness of water-assisted CO₂ fracturing for creating geothermal reservoirs in volcanic rocks, *Geoenergy Science and Engineering*, 243, article number; 213280.