

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420138

研究課題名(和文) ナノスケールCO₂による次世代安定地中隔離技術の開発研究課題名(英文) Development of new stable geological sequestration technique by nanoscale CO₂

研究代表者

植村 豪 (Uemura, Suguru)

東京工業大学・工学院・特任准教授

研究者番号：70515163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、CO₂の貯留安定性を大幅に向上させる新しい地中隔離技術として、高圧水中でCO₂をナノスケールに微粒化して帯水層中に隔離する手法を提案し、その基礎メカニズムを明らかにした。X線可視化解析の結果、ナノスケールCO₂は帯水層を模擬した多孔質モデル内で等方的に広がり、空隙中に均質に浸透することが分かった。さらにナノスケールCO₂を注入した直後は、多孔質モデル内を4 mm/min程度の速度で上昇する様子も観察された。格子ボルツマン法(LBM)を用いた数値解析の結果、CO₂液滴の粒径がマイクロスケールまで増大すると、界面張力によって空隙部分で安定してトラップされることが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new CO₂ geological sequestration technology that employs nanosized CO₂ injection was proposed in order to improve the storage stability, and the fundamental mechanism was clarified.

As a result of the X-ray visualization analysis, it was found that nanoscale CO₂ spread homogeneously in the porous media, and permeated in the pore uniformly. After injection of nanoscale CO₂, it was also observed that the CO₂ moved up in the porous media approximately 4 mm/min. However, numerical analysis using Lattice Boltzmann method (LBM) showed that when the CO₂ droplet diameter increases to micro scale, it is stably trapped in the pore by interfacial tension.

研究分野：熱流体工学

キーワード：CO₂地中隔離 多孔質内二相流

1. 研究開始当初の背景

化石燃料に由来するCO₂の排出量削減は近年の重要な国際的課題であり、これまでに原子力、再生可能エネルギーへの転換が積極的に進められてきた。しかしながら東日本大震災以降、原子力の利用拡大は難しく、再生可能エネルギーについても低コスト、高効率化の実現には長期的な研究開発を必要としている。さらに現在では火力発電への依存度が40年前のオイルショック時よりも高い状況にあり、今後も中期的には依然として化石燃料を基盤としたエネルギー供給体制が続く。多量のCO₂が排出され続けると予想されている。したがって低コストで量的寄与のあるCO₂削減技術が必要不可欠であり、火力発電所などの大規模排出源からCO₂を回収して地下や海底下に隔離する二酸化炭素回収隔離(Carbon Capture and Sequestration, CCS)が注目されている。特に従来の天然ガス掘削や原油増進回収技術が応用できるCO₂地中隔離技術は、実用化に最も近い技術として期待され、既に海外では約100万トン/年のCO₂貯留も実施されている。

CO₂地中隔離は地下700-3000 mの飲用に適さない地下水層(帯水層)を対象とし、水で満たされた多孔質構造中(空隙率10-20%、空隙径1-100 μm程度)にCO₂を圧入する。地下の温度、圧力条件ではCO₂が液体または超臨界状態となり、密度が水よりも小さいために浮力を受けて帯水層中を2-3 cm/year程度の速度で上昇する。従ってCO₂の漏洩を防ぐため、帯水層上に不透層(キャップロック)が存在する地質構造を利用する貯留手法が主流と考えられているが、キャップロックに亀裂が存在した場合にCO₂漏洩リスクを低減させる抜本的な解決策はなく、社会的受容性を高めた新しいCO₂隔離技術の確立が重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、CO₂の貯留安定性を大幅に向上させる新しい地中隔離技術として、高压水中でCO₂をナノスケールに微粒化して帯水層中に隔離する手法を提案し、その基礎メカニズムを明らかにする。CO₂が受ける浮力はその大きさに比例するため、CO₂をナノスケール(直径10-100 nm程度)まで微粒化すれば、多孔質構造中で浮力が分散され、CO₂の上昇が抑制できる。さらに、従来のようにCO₂をそのまま圧入する場合、多孔質構造の空隙の30%程度しかCO₂が浸透できないが、ナノスケールCO₂は隅々の空隙まで浸透し、貯留効率が向上することも期待される。また、圧入した後のナノスケールCO₂は時間が経つと相互に合一が進行するが、空隙と同程度のマイクロスケールの粒径まで成長すると多孔質中で界面張力によって保持され、最終的にCO₂は安定した状態でトラップされると考えられる。このため、本研究では高压環境下で任意の粒径に制御したナノスケールCO₂を生

成すると共に、多孔質構造中に注入した際のナノスケールCO₂の浸透、合一、トラップメカニズムを明らかにし、安定性の高い新しいCO₂地中隔離技術を確立することを研究の最終目的とする。

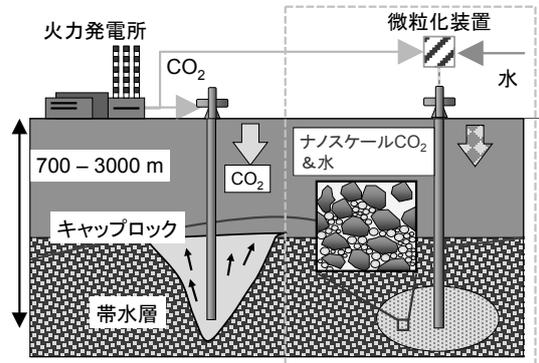


図1 従来のCO₂地中隔離(左側)とナノスケールCO₂地中隔離(右側)

3. 研究の方法

帯水層と同じ温度圧力条件においてナノスケールCO₂を生成し、粒径分布や粒径の経時変化を制御する因子を明らかにする。粒径制御したナノスケールCO₂は帯水層を模擬した多孔質モデル、さらに実際の帯水層と同じ砂岩サンプルへ圧入し、多孔質構造中を浸透するナノスケールCO₂とその経時変化に伴うトラップ過程をX線CTにより非侵襲・非破壊で可視化計測する。

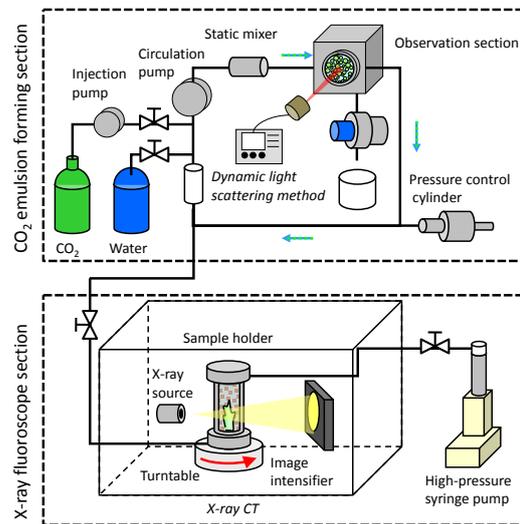


図2 ナノスケールCO₂の生成装置および圧入・可視化実験装置

実験装置図を図1に示す。実験条件は圧力8.0 MPa、温度22°Cで水と液体CO₂を体積比1:1として、界面活性剤水溶液を2%添加し、スタティックミキサーを用いて液体CO₂をナノスケール化した。多孔質モデルは粒径100

～250 μm の珪砂を内径 54 mm の高压容器に充填して水飽和させた．注入流量は 5.0 ml/min とし，多孔質モデル内の浸透挙動を X 線透過画像から連続的に観察した．

また， CO_2 浸透時の動的挙動を観察するために，多孔質内二相流の解析に適した格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) を用いた数値計算も行い，多孔質中における CO_2 の挙動を詳細に明らかにする．

4. 研究成果

図 3 は多孔質モデル内にナノスケール CO_2 を注入した場合と，比較のために液体 CO_2 のみを注入した場合の X 線透過画像である．ナノスケール CO_2 の場合は注入口から等方的に広がり，浸透領域のコントラストがほぼ一様であることから，ナノスケール CO_2 が均一に分布していると考えられる．一方，液体 CO_2 の場合は浸透領域の形状が異なり，斑点状に分布していることが分かる．さらに同時刻で同量を注入したナノスケール CO_2 の分布と比較すると，液体 CO_2 はより上方まで浸透していることから，多孔質モデル内で一部の領域のみを不均一に浸透していると考えられる．

さらにナノスケール CO_2 を 20 ml だけ浸透させ，注入を停止して静置した実験では，図 4 に示すようにナノスケール CO_2 が約 4 mm/min の非常に遅い速度で多孔質モデル内を上昇する様子が観察された．従来の実験では空隙内の浸透挙動に着目していたため，微小な多孔質モデルを用いており，このような浮上挙動は観察されていなかった．しかし大きな多孔質モデルを用いて可視化計測を行った結果，従来の微小な多孔質モデルでは観察できなかったナノスケール CO_2 のマクロな挙動が捉えられたと考えられる．なお，ナノスケール CO_2 は上昇しながらもその粒径は増加し続けていると考えられ，ある一定の高さまで浮上した後空隙中でトラップされることが予想される．

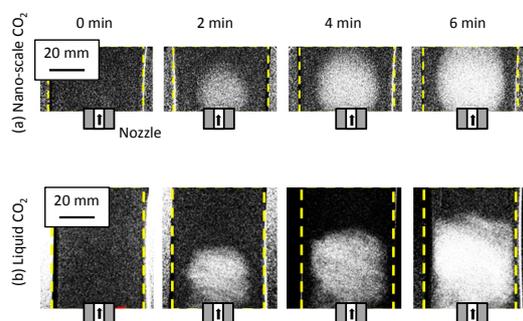


図 3 X 線透過像による多孔質内の可視化結果．(a)ナノスケール CO_2 注入時，(b)液体 CO_2 注入時．

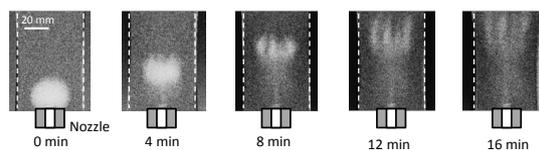


図 4 多孔質内を浮上するナノスケール CO_2 の可視化結果．

そこで空隙中を浮上するミクロスケールの CO_2 液滴の動的挙動を捉えるため，LBM を用いた数値シミュレーションを行った．LBM は複雑な流路構造における二相流の解析に適した手法であるため，空隙中を浮上またはトラップされる CO_2 液滴の動的挙動を解析することが可能である．計算の制約上，ナノスケールの CO_2 液滴を模擬することはできないため，ミクロスケールまで CO_2 液滴が成長した状態を想定し，実験系と対応させた数値シミュレーションを実施した．初期配置した CO_2 液滴径は 20 μm とし，界面張力は界面活性剤によって 1 mN/m まで低下した状態を想定した．解析の結果，多孔質モデル内に配置したミクロスケールの CO_2 は空隙部分でトラップされることが分かった．これまでの実験結果と併せ，ナノスケール CO_2 地中隔離の安定性および有効性を示唆する基礎的知見が得られた．

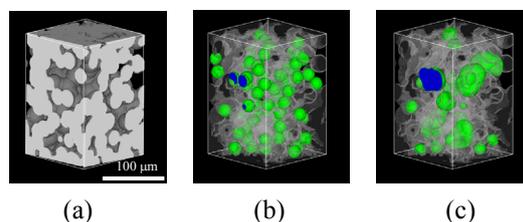


図 5 LBM による多孔質内のミクロスケール CO_2 の動的挙動解析結果．(a)帯水層を模擬した多孔質モデル，(b)空隙内に配置したミクロスケール CO_2 液滴，(c)ミクロスケール CO_2 液滴が合一して粒径が増大するが，空隙内で保持されている．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

- (1) 植村豪，間瀬大幾，平井秀一郎，“ナノスケール CO_2 多孔質内移動現象の X 線可視化”，平成 27 年度石油技術協会春季講演会 特別講演・シンポジウム．個人講演要旨集 (平成 27 年度石油技術協会春季講演会)，秋田，Jun 10, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植村 豪 (UEMURA SUGURU)

東京工業大学・工学院・特任准教授

研究者番号：70515163