

難透過性岩石に対する CO₂ 透過・貯留特性評価のための実験システムの設計

九州大学工学部 学生会員 ○久世佳多留 九州大学大学院 正会員 江崎 哲郎
九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩 九州大学大学院 学生会員 一枝 俊豪

1. はじめに

近年世界的に温暖化が認められ、CO₂ を初めとする温室効果ガスの排出量を削減する必要性が叫ばれるようになり、その対策の1つとしてCO₂を地下深部の地層へ注入し、層内に貯留するCO₂回収・貯留技術（以下 CCS）が注目されている。この技術は石油産業の分野で発達した EOR（Enhanced Oil Recovery）技術を元にしたもので、世界的に見ると既に枯渇油田やガス田へのCO₂注入、貯留が行われている。一方、日本ではこうしたガス田、油田が少なく、その代替地として主に地下深部の難透過性岩盤（以下 貯留層）への注入が有力視されている。

ここで貯留層として想定されるのは、地下 800 m 以深の堆積岩層である。しかし、これまで堆積岩に注入されたCO₂の透過特性、および貯留性を研究した例は少なく、CO₂貯留の安全性および周辺環境の保全などの観点からこれらを把握する必要があるが、現時点ではモニタリングやシミュレータなど長期安定性の評価手法は未だ確立されていない。

そのため、本研究では透水係数の小さい難透過性堆積岩を対象として、貯留層原位置におけるCO₂の透過特性や貯留性といった基礎的な特性が再現、把握できる室内実験システムの設計を行う。

2. 実験システムが満たすべき要件

CO₂ 地中貯留を検討する際、効率良くCO₂を貯留するにはCO₂を超臨界流体とすることが望ましいと考えられている。これは超臨界流体が液体の溶解性と気体の拡散性を併せ持っているためで、これらの特徴により超臨界CO₂が貯留層内の岩石と炭酸塩鉱物を構成したり、岩石孔隙内に浸透することで長期にわたり貯留されると考えられている。この点を踏まえ、実験システムが満たすべき要件を以下にまとめる。

(1) CCS で対象となるのは地下深部の堆積岩層である。そのため、本研究では難透過性堆積岩を対象として透水試験を実施し、流体移動特性の評価を行う。難透過性堆積岩に対する流体移動特性の評価手法としてはフローポンプ法もしくはトランジェントパルス法透水試験が適しており、これらの試験が実施可能である必要がある。

(2) CO₂ を超臨界状態とするには圧力 7.38 MPa 以上、温度 31.1 °C 以上である必要があり、実際の地中貯留で

は地下深度 800～1200 m の堆積岩層への注入が検討されている。そのため実験システムを設計する際、この深度における温度（30 °C 以上）、および圧力（間隙水圧：8～12 MPa、地圧：20 MPa 以上）の条件が再現可能である必要がある。

(3) 本研究では、堆積岩に注入された超臨界 CO₂ の透過特性、およびその貯留性の把握を目的としており、注入時の岩石孔隙内部の状況を様々に変化させる必要がある。そのため、試験体に対して超臨界 CO₂ を注入するだけでなく、CO₂ 以外の水や空気の注入も可能な実験システムである必要がある。このような観点から、透水試験および CO₂ 透過・貯留実験を連続して行うことができる配管システムが必要である。

(4) 室内実験において超臨界 CO₂ が試験体内で相変化を起こした場合、試験体内における CO₂ の透過特性、貯留性を評価することが困難となる。そのため、試験体内に注入されたCO₂が超臨界状態となっていることが確認できる仕組みが必要である。

3. 実験システム

本研究で設計した実験システムの概略図を Fig. 1 に示す。本実験システムは、張ら¹⁾が開発した難透過性材料に対する室内透水・透気試験システムに変更を加え、貯留層における温度、圧力を再現し、装置内においてCO₂を超臨界状態で維持できることを条件に設計する。以下にその概要をまとめる。

(1) シリンジポンプシステム (Fig. 1, *1 部分)

シリンジポンプは試験体上流側に水、CO₂ 注入用として二台を設置し、また下流側の水（透水試験）・CO₂

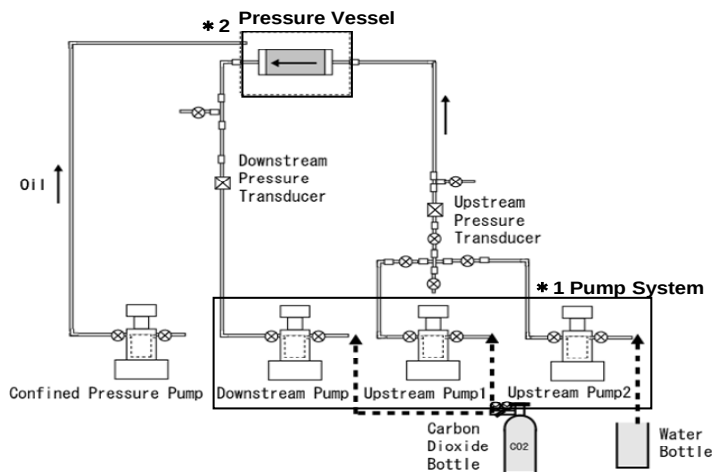


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

(CO₂透過・貯留実験) 注入用として一台を設置する。これらシリジポンプは温度を制御し、ポンプ内に充填した CO₂ を超臨界状態にできるよう、循環槽に連結した恒温用ジャケットを装着し、循環槽 (NCB-1200, EYELA 社製) から任意の温度に加熱した水を流すことで、ポンプ内に充填した流体の温度を -30~95 °C の範囲で 0.1 °C 単位で制御できる。またシリジポンプを一台用い、シリコンオイルを三軸容器内に充填することで試験体に対して拘束圧を载荷する。これらシリジポンプは全て定圧、定流量モードでの運転が可能である。定圧モードでは 69 kPa~69 MPa までの圧力を 1psi (=6.9 kPa) の分解能で载荷でき、定流量モードでは 0.01 µl/min~50 ml/min の流量を ±3 % の精度で運転可能である。

(2) 三軸容器 (Fig. 1, *2 部分)

三軸容器は今後の研究の展開を考慮して設計耐用圧は 100 MPa とする。また、三軸容器内において CO₂ を超臨界状態とするため、棒ヒータおよび温度センサ (TJA-550, AS ONE 社製) を追加し、三軸容器内の温度を制御する (Fig. 2)。これにより 0~200°C の範囲で、0.1 °C 単位で温度制御でき、三軸容器内において貯留層原位置の温度、圧力条件を再現する。

(3) 圧力計

難透過性材料の流体移動特性を評価するため、CO₂ 注入・排出側それぞれに圧力計 (PW-20MPa, 東京測器研究所 (株) 製) を設置し、最大 20 MPa までの圧力を 5 kPa の分解能で計測できる。実験では配管に設置した圧力計の値から試験体に生じる差圧を計測する。これらは設置位置による水頭の影響を避けるため、同じ高さの水平な台の上に設置する。

(4) 配管系統

実験時、加熱した水、CO₂ が配管内部を移動するが、配管が外気と接触し、配管内部の温度が低下するのを防ぐため、配管周囲に遮熱材を装着して配管の放熱を軽減するとともに、断熱材を装着して外気との接触を遮断する。

以上の実験システムを恒温室内に設置し、温度：20 ~ 95 °C、間隙圧：最大 20 MPa、拘束圧：最大 69 MPa の範囲において、様々な温度、圧力条件下での実験が可能である。

4. 確認試験

開発した実験装置を用いてフローポンプ法による透水試験を行う。透水試験では CO₂ 透過・貯留実験と同じ温度・圧力条件下で試験を行い、本実験装置が CO₂ 透過・貯留実験を実施するうえで妥当であることを確認する。その結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は温度：40 °C、拘束圧：10 MPa、間隙圧：7.5 MPa、注入量：5 µL/min

時の透水試験の結果である。この結果より、本実験システムが高温、高压条件下での実験条件を満足することを確認した。

5. まとめ

本研究では CO₂ 排出量削減対策の一環として注目される CCS 技術に関連して、難透過性堆積岩に CO₂ を注入し、貯留層内における CO₂ の透過特性や貯留性を再現、把握するための室内実験システムの設計を行った。また、本実験システムの適用性を評価するため、高温・高压条件下で透水試験を実施し、設計した実験システムを用いて超臨界 CO₂ 透過・貯留実験が実施可能であることを確認した。今後、実際に試験体内に超臨界 CO₂ を注入して試験体内に貯留される CO₂ 量を定量的に把握し、また超臨界 CO₂ の水への溶解も含めた厳密解を確立することを目的に研究を進めていく。

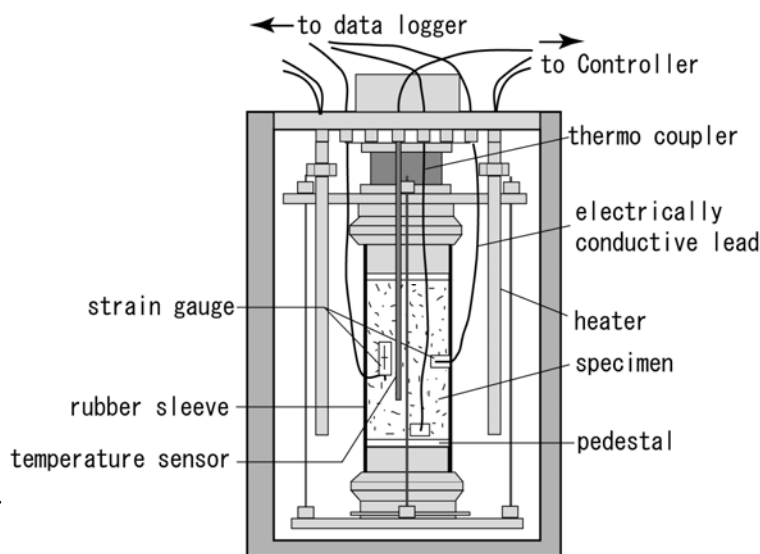


Fig. 2 Specimen with heater and temperature sensor.

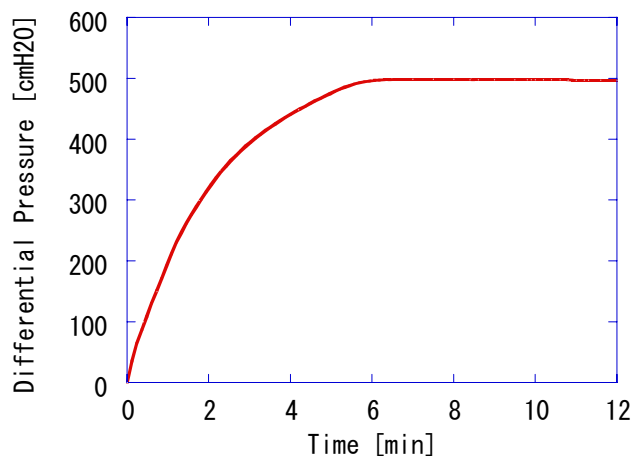


Fig. 3 Result of permeability test (Flow pump method).

参考文献

- 1) 張銘, 高橋学, 江崎哲郎, 遠藤秀典: 難透水性岩盤材料を対象とした高精度汎用室内透水試験システムの開発, 応用地質, 第43巻, 第2号, pp. 83-91, 2002.