

難透過性岩石を対象とした CO₂ 透過・貯留特性評価のための実験システムの開発

九州大学工学部 学生会員○大浦 志郎 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
九州大学大学院 学生会員 久世 佳多留

1. はじめに

近年, CO₂ の増加による地球温暖化が世界的に指摘されており, CO₂ 排出量を削減する対策として CO₂ 地中貯留が注目されている. これは地下深部の地層に CO₂ を注入・貯留する技術であり, 主な貯留方法は, ドーム構造をした難透過性のキャップロックを上部にもつ帯水層に CO₂ を注入し, キャップロックによりこれを遮蔽・固定する方法である. しかし, このような地層構造は, 石油や天然ガスの貯留層などの地層構造であるため, 世界的に見て極めて偏在性が高い. そこで, 日本では代替案として地下深部の難透過性堆積岩への貯留が検討されている. しかし, 難透過性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, 岩石内の CO₂ 挙動の把握, 評価手法の確立に至っていないのが現状である.

そこで本研究では, 貯留層原位置における地下深部の圧力, 温度の状況を再現し, 難透過性堆積岩に対する CO₂ 透過・貯留特性評価を行うことができる室内実験システムを開発する.

2. 実験システムの開発

CO₂ 地中貯留の対象となる貯留層は深度 800~1200 m である. ここでの地下の地圧と温度は, CO₂ の臨界点 (圧力: 7.38 MPa, 温度: 31.1 °C) を超えており, 圧入された CO₂ は超臨界状態となる. そのため, 本研究で開発する実験システムは, 試験体内に注入される CO₂ が超臨界状態を維持することが不可欠となる.

そこで, 本研究では張ら¹⁾が開発した難透過性材料に対する室内透水・透気システムに改良を加え, 装置内において CO₂ を超臨界状態で制御できる実験システムを開発する. 開発した実験システムの概略図を Fig. 1 に示し, その特徴を以下に整理する. なお文中の (a) ~ (l) は Fig. 1 中の各装置を示す.

(1) シリンジポンプは試験体上流側に流体注入用として一台, 試験体下流側に圧力貯留槽として一台設置する (c, d). シリンジポンプは温調ジャケットを装着しており, 循環水槽 (a) で温度制御した水をジャケット内で循環させることで, ポンプ内の流体の温度を一定に保つ. これにより, ポンプ内の CO₂ を超臨界状態で高精度に制御することができる. シリンジポンプ (k) をさらに 1 台用い, 三軸容器 (j) にシリコンオイルを充

填することで試験体に対して拘束圧を載荷する.

(2) 今回の超臨界 CO₂ 透過・貯留実験ではフローポンプ法を適用するが, 超臨界 CO₂ 透過・貯留実験に伴う CO₂ の差圧の挙動範囲が予測できないため, 試験体注入側および流出側の両方に 50 cmH₂O の分解能で計測できる圧力計 (g) を 2 台設置し, 上流側圧力および下流側圧力をそれぞれ計測することで試験体両端間に発生する差圧を求める.

(3) 恒温水槽 (e) を作製し, 温度制御した水を配管周囲に循環させることで, 配管内流体の温度変化を最小限にとどめる. また, 透過流体の相状態を把握するため圧力計の位置 (g) に熱電対を設置し, 配管内流体の温度を計測する.

(4) 三軸容器内に設置したセンサーおよびヒーター (h) で試験体の温度監視・制御が可能である. センサーがシリコンオイルの温度を感知することでヒーターの発熱量を調節し, 試験体の温度を制御する. また, 試験体を覆うゴムスリーブ側面の上端, 中央, 下端の 3 点に設置した熱電対により, 三軸容器内温度を計測する.

3. 超臨界 CO₂ 透過・貯留実験

開発した実験システムにより超臨界 CO₂ 透過・貯留実験を行う. 実験は, 水飽和状態の難透過性堆積岩 (相浦砂岩, 単位体積重量; 2.77 g/cm³, 間隙率; 12 %) に対しフローポンプ法による透水試験を行い, これと同一試験体に対し同一試験条件で超臨界 CO₂ 透過・貯留実験を行う. 試験条件は拘束圧; 20 MPa, 間隙圧; 10 MPa, 注入流量; 3 μL/min であり, 設定温度はシリンジポンプ; 35 °C, 恒温水槽; 36 °C, 三軸容器; 38 °C である. 透水試験の結果, 試験体の透水係数は 3.33 E-08 cm/s であった. 透水試験終了後, 試験体および試験体

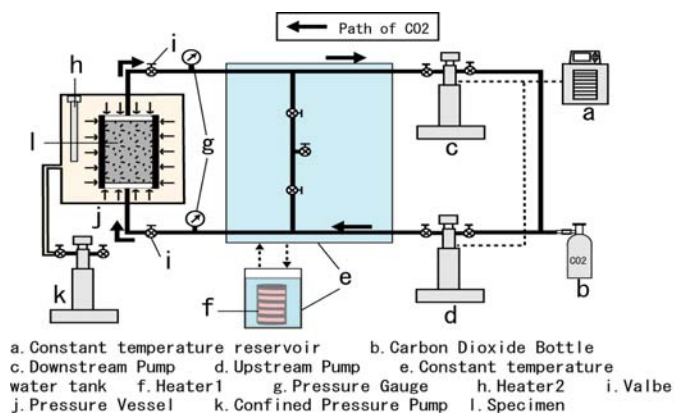


Fig. 1 Schematic view of test system.

の両端のバルブ (Fig. 1 中の i) までの配管を水飽和状態で残し, 残りの配管およびポンプを CO₂ に置き換え, 超臨界 CO₂ 透過・貯留実験を行う。

超臨界 CO₂ 透過・貯留実験における配管内 CO₂ の温度変化を Fig. 2 に示す。図に示すように, 配管内の CO₂ は臨界温度 (31.1 °C) を常時上回っており, ほぼ一定温度で制御できている。また, 三軸容器内も臨界温度以上ではほぼ一定に制御できていた。実験における差圧変化を Fig. 3 (a) に示す。これより, 初めに差圧が上昇し一定となる①段階目, さらに差圧が急上昇し一定の傾きで増加する②段階目, その後, 差圧が一旦上昇し減少を続ける③段階目といった 3 段階の差圧変化が見られる。①段階目の差圧が一定となった部分から, ダルシー則により透水係数を算出すると 2.29 E-08 cm/s であった。これは透水試験の結果と比べ約 0.7 倍と小さい。その理由として, CO₂ が試験体内に流入することで水の流動が妨げられ, 水の浸透率が水単相での浸透率より小さくなったためと考えられる。そのため, ①段階目は CO₂ が配管および試験体内の水を押し出す過程と考えられる。②段階目の差圧の急激な上昇は Fig. 3 (b) より, 流出側圧力の減少によるものである。圧力 10.5 MPa, 温度 35 °C における水と CO₂ の等温圧縮率は水の方が約 100 倍大きく, 流出側に CO₂ が流出したことで圧縮率の違いによる圧力変化が生じたと考えられる。その後の差圧上昇は, CO₂ が流れ方向に貫通しておらず独立した CO₂ が流出し, 流出圧力増加率が減少したためと考えられる。③段階目は間隙圧の上昇により, 試験体内の CO₂ 飽和度が増し, CO₂ が流れ方向に貫通することで試験体内が CO₂ 単相流れに近づいていると考えられる。また, 差圧減少の理由として圧力 12~15 MPa, 温度 35 °C における超臨界 CO₂ と水の粘性は水の方が約 10 倍大きいいため, 試験体内の CO₂ 飽和度の増加により差圧は減少すると考えられる。超臨界 CO₂ は臨界点以上のわずかな圧力変化により, 粘性や密度などが変化するため, 差圧が一定値をとることは難しいと考えられる。

以上の挙動イメージを Fig. 4 に示すが, この挙動については他にも様々な検討が行われており²⁾, 今後新たな評価手法も含め, 定量的に検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では, CO₂ 透過特性や貯留特性を再現・把握するための CO₂ 透過・貯留実験システムの開発を行った。さらに, 超臨界 CO₂ 透過・貯留実験では CO₂ の温度, 圧力が共に臨界点を常時超えており, CO₂ が超臨界状態で注入できていることが確認できた。今後, 圧力変化については実験の再現性も含め, さらなるデータの収集および検討を行う。

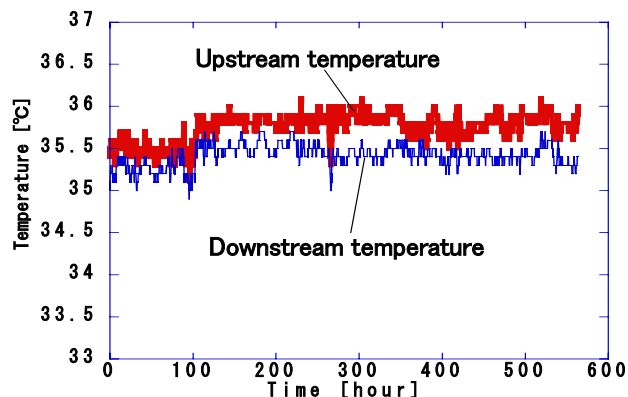
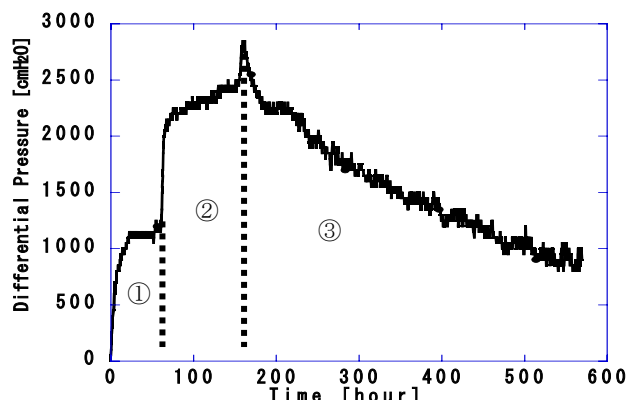
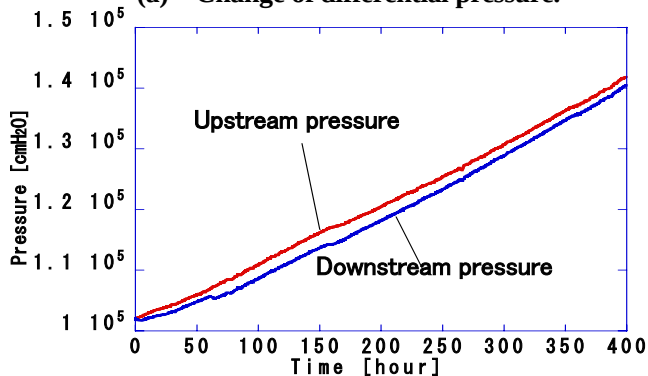


Fig. 2 Change of temperature in pipe during the test.



(a) Change of differential pressure.



(b) Change of the pressure.

Fig. 3 Result of permeability test (supercritical CO₂).

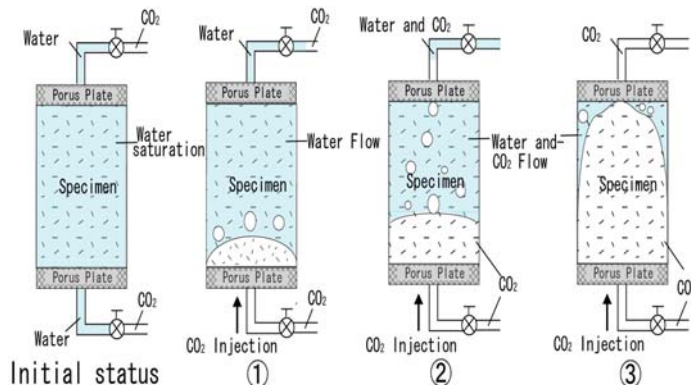


Fig. 4 Model for behavior of supercritical CO₂ injected into specimen.

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.
- 2) Tetsuya Suekane, Shingo Soukawa, Satoshi Iwatani, shoji Tsushima, Shuichiro Hirai: Behavior of supercritical CO₂ injected into porous media containing water, Energy 30 (2005), pp.2370-2382.