難透過性岩石の CO₂透過・貯留特性の実験的評価

九州大学工学部 学生会員 〇本田 博之 九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩 九州大学大学院 正会員 池見 洋明 九州大学大学院 学生会員 野口 拓也

1. はじめに

近年、大気中の温室効果ガスのうち CO₂の増加が 要因の一つとされる地球温暖化が世界的に指摘され ている。この CO₂の排出を早期かつ大規模に削減す る方法として、CO₂地中貯留が注目されている。こ れは地下深部に CO₂を注入・貯留する技術であり、 ドーム構造の不透水層を上部に持つ帯水層に CO₂を 注入し、地中へ遮蔽・固定する方法であるが、この ような地質構造は油田や天然ガスなどのごく限られ た地域にしか存在していない。また、日本のような 地震多発地域では CO₂の漏洩リスクが考えられる。 そこで、その代替案として、地下深部の難透過性堆 積岩への貯留が一つの案として検討されている。し かし、難透過性堆積岩に対し CO₂の透過・貯留特性 を研究した例は少なく、岩石内における CO₂の透 過・貯留特性の把握に至っていないのが現状である。

本研究では、貯留層原位置における地下深部の圧 カ・温度の状況を再現し、CO₂透過・貯留実験を行 い、CO₂透過・貯留の特性について実験的検討を行 う。

2. 実験条件・方法

実験では,試験体として直径 5 cm,高さ 10 cm に 整形した相浦砂岩を用いる。相浦砂岩は,長崎県佐 世保市相浦産の砂岩であり,間隙率 15.5 %,単位体 積質量 2.37 g/cm³ である。

CO₂地中貯留の対象となる貯留層は,深度 800~ 1,200 m である。ここでの地圧および温度は,CO₂の 臨界点(圧力:7.38 MPa,温度:31.1 ℃)を超え,圧 入された CO₂は超臨界状態となる。そのため、本実 験でも注入する CO₂の相状態は超臨界状態とする。 シリンジポンプを拘束圧用に1台,CO₂圧入用に3 台 の計4 台用いる。また,三軸容器セル,配管を含む 実験装置それぞれに温度制御を施し,CO₂を超臨界 状態に維持した状態で実験を行う¹⁾。実験では,ま ず三軸容器内に設置した水飽和状態の試験体に対し, 岩石の透水性を把握するために透水試験を行い,同 一試験体を用いて超臨界 CO₂透過・貯留実験を行う。 さらに,同一の岩石を用い,超臨界 CO₂で飽和した 試験体に対して超臨界 CO₂単相での透気試験を実施 する。実験条件について Table 1 に示す。

実験では、試験体の下部(上流側)から一定流量 の流体を注入したときの試験体上下端の差圧を測定 するフローポンプ法を用いる。その際、試験体の上 部(下流側)は10 MPaの定圧で制御した。これは上 流から一定流量の流体を注入したときに生じる間隙 圧の上昇を抑え、長時間の実験を可能にするためで ある。また、透水試験と CO₂透過・貯留実験におけ る注入流量は3 μL/min とし、透気試験では明確な差 圧変化を計測するため、50 μL/min で行う。

3.実験結果および考察

透水試験によって得られた差圧の時間変化を Fig. 1に示す。この結果よりダルシー則を用いて算出した 透水係数は 1.58×10⁻⁸ cm/sec であった。また, 超臨 界 CO2 透過・貯留実験の差圧の時間変化は Fig. 2 に 示すように4段階の挙動変化を確認できる。①段階 目は実験開始から約35時間まで、②段階目は、経過 時間が約35時間から約60時間である。これらの段 階ではともに差圧が急激に上昇し, その後, 緩やか に一定値を示す。①段階目の透水係数は透水試験と 同じ1.58×10⁻⁸ cm/sec を示すことから, CO₂が配管内 を満たしていた水を押し出し、その水が試験体内を 透過している状態であると考えられる。②段階目は, CO2 が試験体まで達するが、試験体内の水を排出さ せるほどの圧力がなく、上流側の配管もしくは試験 体内に CO₂が溜まり,試験体からは水が排出されな いため急激な差圧の上昇が生じると考えられる。そ の後、徐々に水が押し出されることで差圧の上昇が 緩やかになったと考えられる。③段階目(経過時間 が約120時間まで)は、差圧が減少に転じている。 これは、流れ方向に CO₂ が貫通することで CO₂ が 徐々に透過している過程と考えられる。④段階目は

Table 1Experimental condition.

Confining pressure	Initial pore pressure	Temperature
(MPa)	(MPa)	(° °)
20	10	35

実験開始から約120時間後の差圧が一定となっている区間であり、この状態では、流れ方向に CO₂の流路が形成されたと考えられる。

ここで、超臨界 CO2 単体で行った透気試験におけ る時間と差圧の関係を Fig. 3 に示す。その結果、ダ ルシー則より求めた, 透気係数は 2.13×10⁻⁶ cm/s とな った。この結果と CO2 透過・貯留実験の④段階目の 結果を比較するためにフローポンプ法の厳密解²⁾を 用いて、フィッティングによる解析を行った。その 際に、水が完全に排出され、超臨界 CO2 単相流れが 形成されていると仮定して, 透気係数を求めると 2.23×10⁻⁷ cm/s となった。この値は超臨界 CO₂単体 で行った透気試験より求めた透気係数より1オーダ ー小さいことから、試験体内では超臨界 CO2の単相 流れではなく,超臨界 CO2の選択的な流れが形成さ れることにより超臨界 CO2 が流れる実際の透過断面 積が小さくなることに加え,試験体内の水の残存部 分との境界に流動抵抗が生じ,透過性が小さくなっ たと考えられる。さらに、水の残留を確認するため に実験前後の試験体の重量を比較すると,試験体の 絶乾重量は445.71g,水飽和後の重量は464.78gであ り,実験後の試験体の重量は460.25gであった。実 験後に重量を計測した際は,室温かつ,大気圧下で あり超臨界 CO2 は状態変化により気化すると考えら れるため,実験前後の重量の差は,試験体内に水が 残存しているために生じたと考えられる。

4. 結論

本研究で行った CO₂ 地中貯留の対象となる貯留 層の状態を再現し、下流側を定圧にするフローポン プ法を用いた超臨界 CO₂ 透過・貯留実験により以 下のことが明らかになった。

- ・超臨界 CO₂の透過は4段階の挙動変化を示す。
- ・水飽和状態の岩石に超臨界 CO₂を注入すると、
 超臨界 CO₂ を単体で岩石に注入するより透過性が小さくなることを、定量的に確認できた。

以上より,超臨界 CO₂ が地下水で飽和された地 下深部の難透過性岩石を透過する際は,水の残留に より超臨界 CO₂ 単体の場合に比べてゆっくりとし た流れとなるため,岩石の空隙への物理的なトラッ プだけでなく,移流地下水への溶解にも期待でき, 長期的な貯留が可能になると考えられる。



Fig. 1 Change of differential pressure during the water permeability test.



Fig. 2 Change of differential pressure during the injection of supercritical CO₂.



参考文献

- Arsyad, A., Mitani, Y. and Ikemi, H.: Determination of Permeability and Specific Storage of Reservoir Rocks Injected by Supercritical Carbon Dioxide Using Constant Pressure Permeability Method, Proceeding of 7th Asian Rock Mechanics Symposium, pp.1011-1012, 2012.
- 2)Esaki, T., Zhang, M., Takeshita, A. and Mitani, Y.: Rigorous Theoretical Analysis of A Flow Pump permeability Test, Geotechnical Testing Journal, Vol.19, No.3, pp.241-246, 1996.