九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

低浸透率砂岩中の超臨界CO2透過・貯留メカニズムに関する研究

本田，博之

https://doi.org/10.15017/1931888

出版情報：九州大学，2017，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式２）

氏　　名　：本田　博之

論 文 名　：低浸透率砂岩中の超臨界 CO_2 透過・貯留メカニズムに関する研究

区　　分　：甲

論 文 内 容 の 要 旨

温室効果ガス排出量増加による地球温暖化問題の解決を早期・大規模に行える方策として CCS（CO_2 回収・地中貯留技術）が世界的に実施されている．現行の CO_2 貯留対象は，油田の増進回収や廃油田等の浸透率が高い貯留層が主流であるが，このような地質構造は，偏在性が高く，日本においては適地が限られていることに加え，地震活動等による CO_2 シール層の破壊等が懸念される．そこで，地下 1,000m 以深の塩分濃度が高く，工業・農業に利用価値が低い深部帯水層が CO_2 貯留層の一つとして着目されている．この貯留層は，深度が大きくなるにつれ地圧の影響を受けて，岩盤の浸透率は著しく低くなるが，堆積岩の空隙への物理トラッピングに加え，貯留層内での移流速度が遅いことから地下水への溶解や鉱物化反応による CO_2 の固定が想定され，その貯留ポテンシャルが地球上の CO_2 排出量の数百年分にも相当することもあり，新たな貯留対象として期待されている．

これまでに，貯留層上部に健全なシール層が存在することを前提に，浸透率の高い堆積岩（10^{-13} ~ 10^{-15} m^2 オーダー）を対象とした CO_2 の流動や浸透に関する研究が数多く実施されている．その結果，浸透率の低い堆積岩中は，CO_2 は選択的な流路を形成しながら透過し，岩石中に不均一な CO_2 の分布が生じるとされているが，そのメカニズムは十分に明らかにされていない．

そこで，本研究では，低浸透率砂岩（10^{-17} m^2 オーダー）における CO_2 透過・貯留メカニズムの解明を目的とし，地下深部の温度・圧力条件下でコアスケールの低浸透率砂岩への超臨界 CO_2 注入実験を実施し，数値シミュレーションを併用しながら，その透過・貯留特性を把握するとともに，そのメカニズムを明らかにする．

本論文は，以下の各章から構成される．

第１章では，本研究の背景として，地球温暖化や CO_2 の性状と CO_2 地中貯留のメカニズムについてまとめるとともに，国内外の CCS プロジェクトの最新動向を調査し，低浸透率砂岩への貯留の可能性について言及した．また，多孔質砂岩中の CO_2 流動に関する先行研究のレビューから，解決すべき問題を精査し，CO_2 透過・貯留メカニズムを低浸透率砂岩における流量上昇による影響や，キャピラリー圧支配領域から粘性抵抗卓越領域への変遷，高浸透率砂岩との CO_2 透過・貯留挙動の違いから明らかにすることが大きな課題であることを指摘し，本研究の目的とした．

第２章では，開発した CO_2 透過・貯留実験システムについて，その設計を行い，システムを構築した．実験は，コアスケールでの要素試験と位置付け，CO_2 地中貯留が想定される地下の温度・圧力条件を長期間厳密に再現しながら CO_2 透過・貯留特性を定量的に把握するとともに，弾性波探査並びに電気比抵抗測定のシステムを導入することで CO_2 注入実験中の試験体内部での CO_2 挙動を明らかにすることができる実験システムとした．また，それらの同時計測を可能とする岩石コア表面のセンサーや電極の配置や実験の手順についてもその手法を確立した．

第3章では．低浸透率砂岩中の CO_2 透過・貯留特性の把握のために，CO_2 注入実験中の岩石コア全体の CO_2 飽和度の把握と水・CO_2 の2相流状態における浸透の評価に用いられる相対浸透率の同定を行った．まず，水飽和岩石への CO_2 注入実験から岩石コア全体の CO_2 飽和度を算出した結果，CO_2 注入に伴い CO_2 飽和度は上昇し，試験体をブレイクスルーした後，上昇が止まることを明らかにした．また，実験で得られた試験体上下端に発生する差圧の定常時の値と CO_2 飽和度の変化から，相対浸透率曲線を構成する残留水・ガス飽和度を決定することで相対浸透率を同定した．その結果，得られた相対浸透率は，高浸透率砂岩に比べ，残留ガス飽和度が大きな値を示すことから，低浸透率砂岩においては CO_2 飽和度が上昇しないと CO_2 が流動できないこと，つまり，CO_2 を十分に保持する特性を有することを明らかにした．

第4章では，低浸透率砂岩の CO_2 透過・貯留メカニズムの解明のために，2種類の CO_2 注入実験を実施する．注入流量を段階的に上げることで，CO_2 の流動に与える影響を把握する実験と，同一の流量で注入を繰り返すことで，キャピラリー圧卓越領域から粘性抵抗卓越領域へと変遷する中で，流路形成と流動メカニズムの変化を把握する2つの実験を実施した．両実験とも，各弾性波測定断面の速度減衰のタイミングと減衰率から，塩水飽和された試験体に低流量で CO_2 を注入すると，浸透のスピードは注入側が遅く，多くの CO_2 が分布していることを明らかにした．また，注入流量を上げることで，CO_2 流動はキャピラリー圧が卓越し，確実に CO_2 飽和度が上昇する一方で，試験体内の不均一な CO_2 分布に起因し，注入流量と差圧に明確な関係が存在しないことを明らかにした．また，同一の流量で注入を繰り返すことで，CO_2 飽和度は上昇し，差圧（注入圧）が小さくなり，最終的に CO_2 飽和度に変化は生じなくなることから，キャピラリー圧支配領域から粘性抵抗卓越領域へ移行したと考えられ，この CO_2 注入と停止の一連の工程のなかで，CO_2 流路が固定されることがわかった．最後に，高浸透率砂岩であるベレア砂岩に対して実施した CO_2 注入実験の結果から，低浸透率砂岩は高浸透率砂岩に比べ，キャピラリー圧卓越領域から粘性抵抗卓越領域への移行のしにくさから，注入のしにくさはあるものの，CO_2 を貯留するという観点からは，低い流量でも CO_2 飽和度が上昇するため，低浸透率砂岩石の貯留層は CO_2 貯留に有効であることを示した．さらに，注入を繰り返すことで CO_2 は既成の流路を流動することから，注入圧を抑えることができるため注入のしにくさは改善されるとともに，CO_2 流路が固定されることを明らかにした．

第5章では，X線CTスキャナーで岩石コアを撮影し，2次元の空隙分布を把握した．また，多孔質砂岩中の CO_2 の選択的な流動に関して，CO_2 の注入からブレークスルーまでをインベージョンパーコレーションを用いて再現した．その結果，CO_2 注入実験中にモニタリングされた浸透スピードと注入側の CO_2 の分布が多い傾向を再現でき，CO_2 注入過程のメカニズムをモデル化することができた．さらに，把握した流路と，流路以外で相対浸透率曲線を構成する残留水・ガス飽和度を与えることで，ブレイクスルー後の定常状態に至るまでの CO_2 挙動を再現できた．

第6章では，上記の内容を統括し，結論とした．