HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	超臨界 CO2の圧入に伴う石炭の力学的挙動に関する基礎的研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	木山, 保
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第7084号
Issue Date	2019-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75859
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tamotsu_Kiyama_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　木山 保

学　位　論　文　題　名

超臨界 CO_2 の圧入に伴う石炭の力学的挙動に関する基礎的研究
(A Basic Study on Mechanical Behavior of Coal during Supercritical CO_2 Injection)

CCS (Carbon Capture and Storage) の有力な手法の一つである CO_2-ECBM (Enhanced Coal Bed Methane) においては、火力発電所などの大規模発生源で生成された CO_2 の分離・回収、ならびに、地下深部の石炭層への圧入が計画され、予備的な原位置試験が試みられている。たとえば、夕張で実施された予備実験において、CO_2 の圧入量は事前の予想を大きく下回った。その後 N_2 を圧入すると圧入性が改善されたことから、CO_2 の低い圧入量は炭層と CO_2 の反応によるものと考えられた。このように、CO_2 の炭層固定では、CO_2 を吸着した石炭は膨潤し、浸透率が低下する。また、注入された流体の流路となる連続性が高い主炭理 (face cleat) およびこれに直交する従炭理 (but cleat) と呼ばれる石炭内部の割れ目系は、吸着・膨潤および脱着・収縮を生じる石炭マトリクスによって開口および閉塞する。したがって、石炭の浸透率の挙動は、CO_2 の相変化と粘性や圧縮率などの物理特性、CO_2 を圧入する地下の炭層の拘束条件および CO_2 吸着特性と温度の関係などに依存する。本研究では、これらの挙動を室内試験により明らかにすることを目的とした。

まず、変形が許される応力拘束条件におかれた石炭供試体に液体または超臨界 CO_2 を注入し、膨潤特性および浸透率の変化を観察した。炭理の性状はさまざまで、局所的にきわめて浸透率の高い領域があり、主炭理は連続性が高いので、液体 CO_2 の一部は比較的短時間で排出側に到達するが、残りは石炭内部を徐々に進行する。マイクロポアを有するブロック状のマトリクスが平板き裂状の炭理に囲まれた構造の石炭のモデルにおいて、き裂開口幅がマイクロポアの直径と同程度でも、炭理の浸透率はマトリクスより大きく、炭理を流れる液体 CO_2 の速度はマトリクスを流れる液体 CO_2 の速度より大きい。マトリクスの圧入側と排出側の差圧が水と液体/超臨界 CO_2 のキャピラリー圧より低ければ、液体/超臨界 CO_2 はマトリクス内部を流れないので、低い差圧では CO_2 は炭理のみを流動し、全体の浸透率は低い。N_2 飽和状態の石炭に超臨界 CO_2 を圧入すると、きわめて短い反応時間で N_2 と超臨界 CO_2 の置換が進行して膨張するのに対し、その後に N_2 を圧入した場合、収縮するのに長い時間を要する。これは、マトリクスと CO_2 との反応が強く、N_2 と CO_2 では吸着・脱着速度が違うことと、また、N_2 の圧入では、CO_2 がすでに侵入しているマトリクス内部の孔隙に浸透しづらく、主たる流路が炭理となることによる。

次に、夕張予備実験などで観察された CO_2 炭層固定における圧入量の大きな変化が拘束条件の違いに起因する可能性を考慮し、インタクトな石炭供試体を用いて N_2 および CO_2 を応力拘束およびひずみ拘束条件下で注入した。石炭の Vp は炭理の開閉に依存するので、間隙流体の種類に変化がなければ、有効封圧と正、つまり、周変位と負の相関を示す。石炭に超臨界 CO_2 または N_2 が注入された場合は、それぞれ、マトリクスの膨潤または収縮が発生するが、応力拘束条件ではマトリクスの膨張または収縮に関わらず炭理の開閉は少なく、Vp の変化も顕著ではない。一方、ひずみ拘束条件ではマトリクスの膨潤または収縮を相殺するような炭理の開閉により Vp の変化は顕著となり、拘束条件の影響はきわめて大きい。石炭はマトリクスと平板き裂の炭理で構成されるが、有

効封圧が比較的低い領域と高い領域で区別すると、前者では有効封圧の増加に伴いマトリクスの体積圧縮と炭理の閉塞が同時に進行する。後者ではすでに多くの炭理が閉塞しているので有効封圧の増加に伴いマトリクスの体積圧縮のみが進行し、流路となる炭理がほとんど閉塞しているため浸透率は著しく低い。このように、有効封圧そのものよりも有効封圧の変化に伴う炭理の開閉が浸透率を支配する。ひずみ拘束条件で石炭に超臨界 CO_2 を注入すると、まず CO_2 は炭理に浸入し、つぎにマイクロポアに吸着されてマトリクスは膨潤する。ひずみ拘束条件では、マトリクスの膨潤により炭理が閉鎖され、流動は間欠的となりその後停止する。流動が間欠的になってから以降は Vp の増加はわずかで、ほぼ完全に炭理は閉塞したものと考えられる。この状態から N_2 を注入すると、炭理が閉塞しているのですぐに流動は発生しないが、徐々に N_2 が浸透して CO_2 と N_2 が置換し、マトリクスが収縮すると炭理が開口して、浸透率は加速的に増加する。しかし CO_2 の石炭への吸着は N_2 より強いので完全に CO_2 は脱着せず、マイクロポアには CO_2 が残存すると考えられる。一方、応力拘束条件で石炭に超臨界 CO_2 を注入すると、流動は継続し、流量の減少や流動の停止は起こらなかった。夕張における予備実験で CO_2 圧入量が徐々に低下したことは、原位置の拘束条件が応力拘束だけではなく、ひずみ拘束の要素が含まれることを示唆する。

最後に、温度の影響について検討した。まず、石炭の CO_2 吸着量と温度は負の相関を示し、石炭の温度を上げると吸着可能な CO_2 の量が減少する。また、ひずみ拘束条件において CO_2 および N_2 で飽和された石炭が温度上昇に伴い熱膨張するとき、膨張を抑制するために封圧が増加するが、CO_2 では N_2 より浸透率が低く、間隙圧が下がりにくいので封圧の増加が顕著となる。間隙流体が N_2 における温度と Vp とは、熱膨張を相殺する炭理の開閉により明瞭な正の相関を示すが、CO_2 では炭理がほぼ閉塞しているので Vp の変化は小さい。このように、間隙流体そのものの物性の変化と間隙流体と石炭の吸・脱着などの応答が Vp に影響を及ぼすため、間隙流体により温度変化に対する挙動は異なる。なお、間隙流体が CO_2 で温度 40 ℃、間隙圧 10 MPa における石炭の体積弾性率は 990～1400 MPa となった。

以上の実験結果を踏まえ、超臨界 CO_2 および N_2 圧入に伴う膨潤と浸透率変化に関して考察し、浸透率低下改善のため、圧入孔の配置や圧入温度に関する提案を行った。