

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249131

研究課題名(和文) 超臨界及び液体二酸化炭素の岩盤圧入小規模現場実験

研究課題名(英文) Small scale in situ experiments to inject supercritical and liquid carbon dioxide into rock mass

研究代表者

石田 毅 (Ishida, Tsuyoshi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10232307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化の速効的対策であるCO<sub>2</sub>(二酸化炭素)地中貯留では、大量のCO<sub>2</sub>を地下深部に圧入するが、CO<sub>2</sub>は地下深部ではさらさらとして粘度が小さい超臨界状態となるため周辺地層に与える影響を検討して必要がある。本研究では、現場の岩盤に超臨界CO<sub>2</sub>の圧入しその際の微小な破壊音であるAEを測定した。その結果、超臨界CO<sub>2</sub>は水の圧入に比べてAEの震源が広く分布するが、圧入位置での亀裂造成後時間が経過すると亀裂閉合によると思われるAEが観測された。このようなAEは岩盤の破壊ではなくガス抜けによるものと思われる、例えばAEの震源分布が広がっても周辺地層に安定性に与える影響は小さいと思われた。

研究成果の概要(英文)： In the underground sequestration of CO<sub>2</sub> (carbon dioxide), large amount of CO<sub>2</sub> is injected into rock mass. Since CO<sub>2</sub> becomes supercritical state in the deep underground and it is very slick, it is necessary to access effect of the injection on stability of surrounding rock mass. In our study, we injected CO<sub>2</sub> into a hole drilled around 10 m long from the floor of a tunnel in a mountain with monitoring of AE (Acoustic Emission: elastic wave radiated with rock fracturing). The results indicated that the AE sources with the CO<sub>2</sub> injection distributed larger than those with the water injection. However, with time elapsing after the CO<sub>2</sub> injection, AE events that seemed to be caused by crack closing started to be observed. Since these AE events are most likely associated with degassing in the cracks without rock fracturing, it seems that they never bring instability to the surrounding rock mass even if they distribute large.

研究分野：岩盤力学

キーワード：二酸化炭素排出削減 資源開発工学 水圧破碎 岩盤 破壊 Acoustic Emission 微小地震 地殻・マントル物質

1. 研究開始当初の背景

わが国の CO<sub>2</sub> の 30% は火力発電所から発生しているが、東日本大震災による原子力発電の見直しに伴い火力発電量が増え、CO<sub>2</sub> の発生はさらに増大傾向にある。しかし、火力発電所や製鉄所などの大量発生源で CO<sub>2</sub> を回収して地中に貯留し大気中への放出を防止すれば、地球温暖化の速効的な対策となり得る。現在検討されている最も有力な CO<sub>2</sub> の地中貯留は、陸域や海域の帯水層に貯留する方法である。

わが国では新潟県岩野原で年間 1 万 t の規模で実験が行われ、その後北海道苫小牧で数 10 万 t の実証試験が行われているが、諸外国では次の 3 地点で年 100 万トンを超える実用的規模での地中貯留がすでに実施されている。

- (1) Sleipner (Norway, 1996 ~ , 年 100 万 t)
- (2) Weyburn (Canada, 2000 ~ , 年 100 万 t)
- (3) In-Salah (Algeria, 2004 ~ , 年 100 万 t)

このような大量の CO<sub>2</sub> を地中に圧入するためには、岩盤の安定性を損なうことなく流体を効率よく圧入する必要がある。

CO<sub>2</sub> は地下 1000m を越える地下深部に圧入することが想定されているが、そのような地下深部では多くの場合圧力 7.39MPa、温度 31.0 の臨界条件を上回り、CO<sub>2</sub> は超臨界状態となる。超臨界状態は気体と液体の中間的な状態であり、CO<sub>2</sub> の場合、液体の水に対する比重は 0.5、粘度は 1/100 ~ 1/20 の軽いさらさらとした状態である。また地中温度が低い特殊な地質条件下では液体状態で圧入されることが予想されるが、液体状態でも粘性は液体の水の 1/20 ~ 1/10 程度である。研究代表者は科研基盤研究(B)の補助を得て、平成 21 年度から 4 年間にわたり、室内で岩石供試体に超臨界状態の CO<sub>2</sub>、液体状態の CO<sub>2</sub>、水、水の約 100 倍の粘性を有する自動車用トランスミッション・オイルを圧入する実験を行い、破碎流体の粘度の違いが造成された亀裂や破碎圧(岩盤に亀裂が生じて圧力が急低下する限界圧力)にどのような影響を与えるかを検討してきた。具体的には、1 辺 17cm の立方体の花崗岩供試体に地圧を模擬した拘束圧を载荷し、これらの载荷方向と直交する方向に直径 2cm のボーリング孔を掘削し破碎圧や AE(Acoustic Emission: 岩盤の微小破壊に伴う弾性波動)の測定を行い、また実験後の供試体の亀裂を顕微鏡で観察した。これらの実験の結果、表 1 のように、流体の粘性が小さくなるにつれて破碎圧が小さくなり、破碎に伴って造成される亀裂は幅の大きな 1 枚ものの平面的な亀裂から幅の小さい分岐の多い 3 次元的な亀裂になる傾向がみられた。また AE の波形解析から、粘度が小さくなるにつれて拘束圧(地圧)の影響を強く受け、破壊機構が引張卓越型からせん断卓越型に変化する傾向が見られた。この結果は粘度の小さい超臨界 CO<sub>2</sub> を地中に圧入し

表 1. 流体の粘度と造成亀裂の特徴の関係

	超臨界CO2	液体CO2	水	油
粘度(cP)	0.01~0.05	0.05~0.1	1	80
破碎圧	小 ←————→ 大			
亀裂幅	小 ←————→ 大			
亀裂分岐	多い ←————→ 少ない			
破壊機構	せん断破壊 ←————→ 引張破壊			

た場合、水の場合よりも容易に広く浸透するという大量貯留に対して好ましい面と、CO<sub>2</sub> が遠くまで浸透し貯留層や貯留層上方のキャップロックの安定性を損なう可能性があるという負の面の両面があることを示唆している。

2. 研究の目的

これまでの室内実験では、亀裂が供試体端部にまで瞬時に進展するため、破碎流体の粘性の違いによる亀裂の進展範囲の大きさの違い、岩盤中に存在する自然の節理や断層面、層理面の影響など、現実のプロジェクトにおける重要な課題を解明することが困難であった。そこで現場の高温の岩盤を利用して超臨界状態の、また通常の温度の岩盤を利用して液体状態の CO<sub>2</sub> で破碎実験を行い、これらの課題を解決することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

高温の岩盤としては中部山岳地帯のトンネルを、また通常の温度の岩盤としては JAEA(日本原子力研究開発機構)の瑞浪超深地層研究所の横坑を選定した。いずれの実験サイトでも、図 1 に示すように、1 辺約 1.4m の正方形の 4 つの頂点に直径 66mm の AE 観測孔を、中央に直径 86mm の CO<sub>2</sub> 圧入孔を、それぞれ深さ 10m 程度掘削し、CO<sub>2</sub> 圧入孔の孔底の中心に直径 36mm のパイロット孔を 150mm 程度掘削して密閉し CO<sub>2</sub> の加圧圧入区間とした。この圧入区間を 3 次的に取り囲むように、各 AE 観測孔に 4 個ずつ合計 16 個の AE センサーを設置した。圧入が終了すれば、圧入区間をさらに

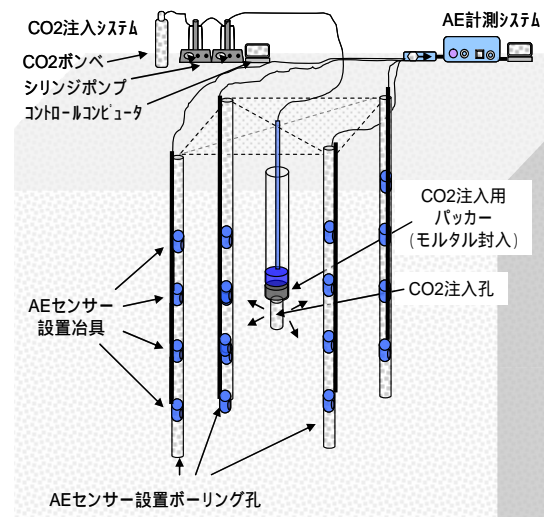


図 1. CO<sub>2</sub> 圧入現場実験の概念図

深い深度に移動して同様の圧入実験を繰り返した。CO<sub>2</sub>と比較のため水による破碎も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験結果

図2に一例として中部山岳地帯の高温の花崗岩にCO<sub>2</sub>を圧入した際の、圧力、温度、AEの発生率及び注入流量を示す。ポンプの制御トラブルによる中断を除き1分間当たり50ccの一定流量でCO<sub>2</sub>の圧入を続けたところ、圧力が臨界点を越える7.38MPaで急激に圧力が上昇をはじめた。この変化はCO<sub>2</sub>が気体状態から超臨界状態に変化し圧縮率が小さくなったためと思われる。圧力は15.62MPaの最大圧を示したのち急激に低下し、AEの発生率もこれとともに急増しているの、この圧で岩盤に亀裂が生じたものと思われる。亀裂発生時には臨界温度の31℃を下回らないもの温度が32.6℃まで低下している。この温度低下は亀裂の発生によりCO<sub>2</sub>が漏洩して断熱膨張したためと思われる。亀裂発生に伴うAEの発生が極めて多かったためデータ収録能力が追いつかず、図2(b)の黒四角で示した時間にAEデータの欠測が生じた。AE発生率の最初の低下は、この欠測によるものである。

この実験で震源決定できた1463個のAEの震源分布の水平面XY及び2つの鉛直断面YZ及びXZへの投影図を図3に示す。水平面図のAE1~AE4はAE観測孔の位置を、鉛直断面図の2本の点線は加圧区間を、またAE観測孔内の印は、AEセンサーの位置を示す。

震源決定精度は50mm程度であるが、AE震源は破碎孔からAE1孔とAE3孔の方向に広がり、鉛直方向には加圧区間を中心にやや下方に大きく広がっていることがわかる。AE1孔とAE3孔では破碎に伴いCO<sub>2</sub>が孔内にたまった水の中からぼこぼこと湧出するのが観察されており、震源分布はこの観察結果とよい一致を示している。

##### (3) 考察

図4は、亀裂発生(BD:Breakdown)から75秒まで(図2で18分55秒から20分10秒)と、亀裂発生から1500秒の間(18分55秒から43分55秒)のAE震源分布の水平面XYへの投影図を比較したものである。図3(a)をみると、亀裂発生から75秒までは破碎孔からAE1とAE3の方向(A方向と呼ぶ)にAEの震源分布が分布するが、図3(b)に見られるように、75秒以降破碎孔から0.7m程度離れた位置でA方向にほぼ直交するB方向に震源が分布していることがわかる。図3で圧力を見ると、亀裂発生から1500秒後に対応する43分55秒まで注入圧はほとんど0であることから、B方向に広がったAE震源は新たな亀裂の発生ではなく既存亀裂にCO<sub>2</sub>が侵入して発生したものと思われる。以上のことから、超臨界状態のCO<sub>2</sub>で岩盤が破碎され、亀裂が破

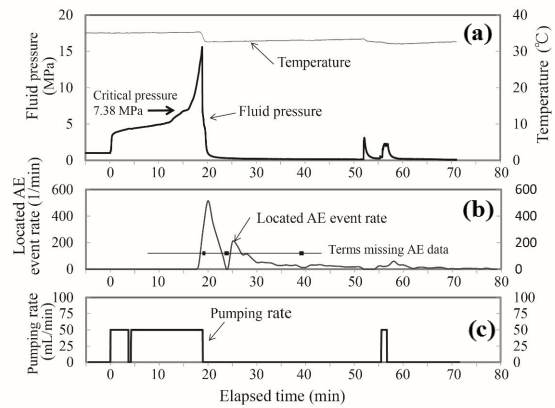


図2 CO<sub>2</sub>の注入圧力、温度、AE発生率及び注入流量。

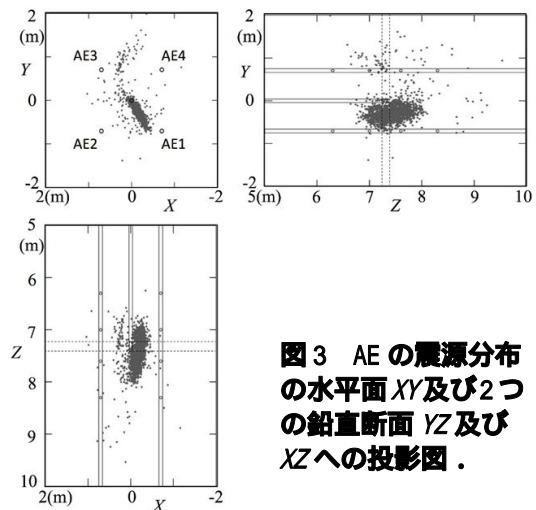


図3 AEの震源分布の水平面XY及び2つの鉛直断面YZ及びXZへの投影図。

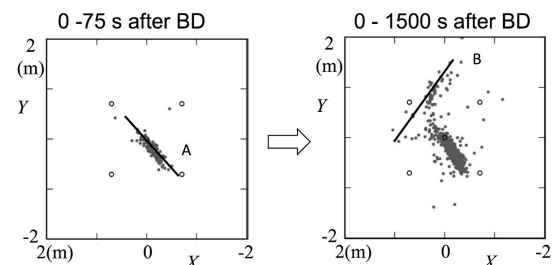


図4 亀裂発生(BD:Breakdown)から75秒までと500秒までのAE震源の水平分布の比較。

碎孔からAE1及びAE3の方向(A方向)に進展するとともに、破碎後75秒経過してから圧力が低下して気体状態となったCO<sub>2</sub>がA方向とほぼ直交するB方向の既存亀裂に侵入してAEを発生させたものと思われる。

既存亀裂への侵入がほぼ圧力0の状態で行われていることは、気体状態のCO<sub>2</sub>は既存亀裂に侵入しやすいことを示していると思われる。

##### (4) まとめ

ここでは実験結果について既存亀裂の影響に関する結果を示したが、この実験の後機会を改めて、同じ流量でCO<sub>2</sub>と水とを圧入した実験では、CO<sub>2</sub>の方が水よりも広い範囲にAEの震

源が分布する傾向がみられており、また破碎のメカニズムもCO<sub>2</sub>と水で異なる傾向伺える。今後室内実験の結果とも比較しながら、さらにデータの解析を注意深く行っていきたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計4件)

Ishida, T., Chen, Y., Bennour, Z., Yamashita, H., Inui, S., Nagaya, Y., Naoi, M., Chen, Q., Nakayama, Y. and Nagano, Y.: Features of CO<sub>2</sub> fracturing deduced from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments, J. Geophys. Res. Solid Earth, 査読有, Vol. 121, No. 11, pp. 8080-8098, 2016. doi:[10.1002/2016JB013365](https://doi.org/10.1002/2016JB013365).

Bennour, Z., Ishida, T., Nagaya, Y., Chen, Y., Nara, Y., Chen, Q., Sekine, K. and Nagano, Y.: Crack extension in hydraulic fracturing of shale cores using viscous oil, water, and liquid carbon dioxide, accepted to the special issue dedicated to Professor Ove Stephansson of Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, Vol. 48, No. 4, pp. 1463-1473, 2015.

doi:10.1007/s00603-015-0774-2 67.

石田毅・永谷侑也・乾周平・Ziad Bennour・陳友晴・陳渠・中山芳樹: 超臨界二酸化炭素と水及び粘度の大きな油による水圧破碎実験, Journal of MMIJ(資源・素材学会誌), 査読有, Vol.131, No.4, pp.115-121, 2015.

Chen, Y., Nagaya, Y. and Ishida, T.: Observation of fractures induced by hydraulic fracturing in anisotropic granite, accepted to the special issue dedicated to Professor Ove Stephansson of Rock Mechanics and Rock Engineering, 査読有, Vol. 48, No. 4, pp. 1455-1461, 2015. doi:10.1007/s00603-015-0727-9

##### [学会発表](計24件)

Ishida, T., Nagaya, Y., Inui, S., Aoyagi, K., Nara, Y., Chen, Y., Chen, Q. and Nakayama, Y.: AE monitoring of hydraulic fracturing experiments with CO<sub>2</sub> and water, Eurock2013, Wroclaw (Poland), September 24-26, 2013.

Inui, S., Ishida, T., Nagaya, Y., Nara, Y., Chen, Y. and Chen, Q.: AE monitoring of hydraulic fracturing experiments in granite blocks using supercritical CO<sub>2</sub>,

water and viscous oil, US Rock Mechanics, Minneapolis (USA), June 1-4, 2014.

Bennour, Z., Ishida, T., Nagaya, Y., Nara, Y., Chen, Y., Chen, Q., Nakayama, Y., Sekine, K. and Nagano, Y.: Fracture development and mechanism in shale cores by viscous oil, water and L-CO<sub>2</sub>

injection, US Rock Mechanics, Minneapolis(USA), June 1-4, 2014.

Chen, Y., Suzuki, T., Bennour, Z. Nagaya, Y., Ishida, T., Chen, Q. and Akai, T.: Visualization of fractures induced by hydraulic fracturing, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, October 14-16, 2014, Sapporo(Japan),

Chen, Y., Bennour, Z., Nagaya, Y., Yano, S., Suzuki, T., Ishida, T. Akai, T. and Takagi, S.: An approach to observe fractures induced by hydraulic fracturing, 13th International Congress of Rock Mechanics, May 10-13, 2015, Montréal(Canada),

Bennour, Z., Watanabe, S., Chen, Y., Ishida, T. and Akai, T.: Evaluation of Stimulated Reservoir Volume Using the Fluorescence Method in Hydraulic Fracturing of Shale Cores, International Conference on Geomechanics, Geo-energy and Geo-resources (IC3G 2016), Melbourne (Australia), September 28-29, 2016.

Ishida, T., Desaki, S., Yamashita, H., Inui, S., Naoi, M., Fujii, H. and Katayama, T.: Injection of supercritical carbon dioxide into granitic rock and its acoustic emission monitoring, Proc. of Eurock 2017. Ostrava (Czech Republic), June 19-22, 2017.

森重有矢・渡邊翔太・友永悠斗・陳友晴・石田毅: 頁岩中に造成される水圧破碎フラクチャーの特徴, 第14回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 神戸, 2017年1月10-11日

##### [図書](計0件)

##### [産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:

国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 毅 (ISHIDA, Tsuyoshi)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10232307

### (2) 研究分担者

直井 誠 (NAOI, Makoto)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10734618

### (3) 研究分担者

陳 友晴 (CHEN, Youqing)

京都大学・大学院エネルギー科学研究

科・助教

研究者番号：80293926

### (4) 研究分担者

奈良 禎太 (NARA, Yoshitaka)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00466442