

超臨界地熱条件下における減圧破碎された花崗岩の透水性

修了年月 2021年3月 環境システム学専攻 47-196653 角野愛美

指導教員 愛知正温 講師

キーワード：超臨界地熱発電、花崗岩、減圧破碎、浸透率、間隙率

1. 研究の背景

1.1 超臨界地熱発電

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次報告書において、温暖化には疑う余地がなく、20世紀半ば以降の温暖化の主な要因は、人間の影響の可能性が極めて高いと評価されている中^[1]、2016年4月に日本では、内閣府によって「エネルギー・環境イノベーション戦略」が策定された^[2]。ここで温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きく有望な革新的技術として次世代地熱発電技術が位置づけられた。その具体例の一つとして超臨界地熱発電の技術開発が挙げられ、2050年頃の普及を目指し開発が進んでいる^[3]。

地下の表層に浸み込んだ雨水・地下水等から供給された水分が、高温の地層内のキャロック (難透水性の地層) 下等に蓄積した場所を地熱貯留層といい、従来型の地熱発電は、これらの天然の蒸気・熱水資源を活用したものである。これに対し、既存の地熱貯留層に水を注入し熱水資源の生産量を回復させたり、岩盤内への水圧破碎等により貯留層の透水性を高めたり、新たに貯留層を造成させたり等、地熱発電を行うために必要な流体、熱、亀裂のいずれかの要素が欠けている場合に、欠けている要素を人為的に補うことで発電量を増加させるシステムを地熱増産システム(EGS: Engineered / Enhanced Geothermal System)と呼ぶ^[4]。従来のEGS開発では、人工的に透水性を向上させた亀裂システムが、ある一定の透水性を有する天然亀裂システムと接続しているために注入水を損失してしまい、地表から注入した水の30-40%以下しか回収できなかったというデータがある^[4]。これは、従来のEGSを行った場合、地表から常に大量の水を注入し続ける必要があることを示唆しているが、これはコストの観点から非現実的である。

近年、日本におけるEGSの問題点を解決することが可能であるとして、脆性-延性以深でEGSを造成する概念が提案された^[4]。脆性

延性以深では天然の亀裂のほとんどが閉塞しており、また応力状態も脆性領域に比べて均質であることを示すデータが得られている^[4]。このような領域でEGSを造成した場合、水の回収率が100%近くになることに加え、温泉への影響も小さいことが想定される^[4]。また、均質な応力状態や貯留層周辺に大きな構造が存在しないことを考えると、大きなマグニチュードを有する誘発地震の発生も起こりにくいと想定されている^[4]。超臨界地熱発電 (図1) は、脆性-延性境界以深における地熱利用であることから、熱水が貯留層から散逸することなく、水の回収率を改善できる可能性がある。また超臨界地熱発電は、火山地帯の3-5kmの深部に存在すると推定され、温度374°C、圧力22.1MPa以上の超臨界水を地熱資源として活用する発電方式であるため、1発電所あたりの大出力化が期待されている^[3]。

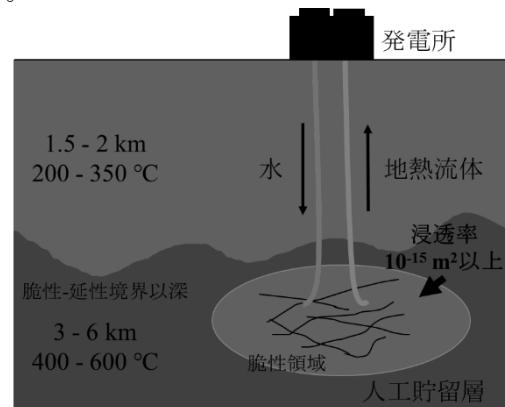


図1 超臨界地熱発電のイメージ。
『TSC Foresight 地熱発電』概要(2015)を参考に作成

1.2 開発目標および先行研究

「エネルギー・環境イノベーション戦略」の策定を受け、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下、NEDO) では、日本で超臨界地熱資源の存在可能性が高いと想定される地域での資源量評価や調査井掘削に必要な技術課題の整理と、具体的な調査井に必要な仕様の提案を行っている^[3]。

また、調査井に必要とされる技術の研究開発を実施している^[3]。このプロジェクト内の開発目標の一つに、水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方において、生産可能な浸透率 (10^{-15} m^2 オーダー) 以上の破碎が可能なことを室内試験かつ数値シミュレーションにより立証することが挙げられている^[6]。

Watanabe et al. (2017) は、温度 350、380、400、450、500 °C 下、有効封圧 ~100 MPa 下で亀裂を持つ花崗岩の透水性を測定し、花崗岩質の岩石中における超臨界地熱資源の存在可能性を調べた。その結果、高深度の地下でも、浸透率 10^{-15} m^2 を担保できる可能性があることを示唆した^[7]。先行研究における課題点は二つあると考える。一つは、使用された試料に含まれる亀裂が単一亀裂や複数亀裂であり、実際に地熱開発を行う場合の温度圧力条件下における水圧破碎や減圧破碎で生成されたものではないことである。もう一つは、透水性が測定された際の間隙流体が水蒸気であり、超臨界流体ではないことである。

また花崗岩の透水性測定は、一般的に三軸圧縮装置を用いて行われる。この時シーリング材は、試料側面を間隙水が流れるのを防ぐために用いられるが、本研究の高温高压条件下で使用するのは困難である。

2. 研究の目的

先行研究における課題点から、岩盤内に実際に存在するとされる超臨界水を使用して減圧破碎あるいは水圧破碎を行う必要がある、既存研究が少なく、未だ実験におけるデータが少ないことから、試料の破碎方法は減圧破碎に絞って行う必要があると考えた。また、透水性の測定に関しても、超臨界水を用いて行う必要があると考えた。よって本研究の目的は、(1) 超臨界水を用いた減圧破碎実験および透水実験の方法を検討する、(2) 開発ターゲットである岩盤が実際に存在する条件下で、減圧破碎を行い、破碎された岩石の透水性 (具体的には浸透率が 10^{-15} m^2 オーダーは可能か) を調べる、(3) モデリング技術手法開発に向けた、室内実験による間隙率および透水性データを得る、の三つとした。

3. 研究の方法

3.1 実験試料

本研究では、実験試料として直径約 20 mm、長さ約 25 mm の円柱形の稲田花崗岩 (試料番号: IN1、IN2、IN3) を用いた。花崗岩を選択したのは、花崗岩が日本の大陸地殻の大部分を構成し、実際に地熱開発を行う場合、対象のフィールドになる可能性が高いと考えたためである。また、稲田花崗岩を選択したのは、先行研究との比較が可能であるためである。

3.2 実験方法

間隙率と浸透率の測定は減圧破碎の前後に行った。間隙率は、試料中の間隙に入った水分の体積を試料全体の体積で割ることにより算出した。

減圧破碎・透水実験に用いた実験装置のシステムを図 2 に、実験操作による温度圧力の挙動を図 3 に示す。

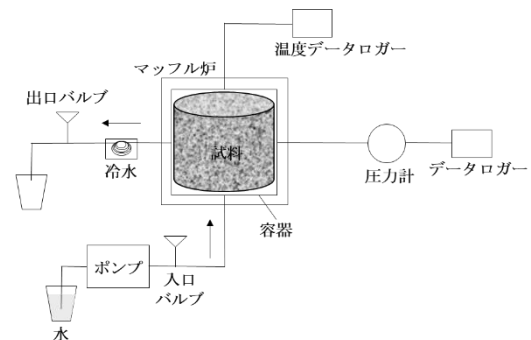


図2 減圧破碎および透水測定を行う実験装置のシステム。

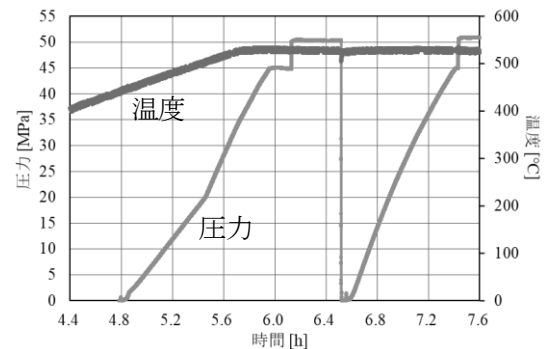


図3 一連の実験 (IN1 試料) における、圧力挙動および温度挙動。

手順はまず、容器に試料を入れ、容器ごとマッフル炉で 530 °C まで加熱した。加熱による亀裂生成を避けるため、加熱速度は約 1.5 °C/分とした。温度が 400 °C を超えたら、容器内に蒸留水を送り、45 MPa まで昇圧させた。次に、温度は 530 °C で一定とし、超臨界

水の圧力を瞬間的に 50 MPa まで上げた（昇圧速度：約 0.7 MPa/s）。この時、試料内部と容器内の圧力に差が生じ、時間の経過とともに容器内の圧力が減少すると考えられるため、圧力が一定になるまで待った。この圧力減衰の時間変化から浸透率 k [m²] を求めた。容器内の圧力が一定になったら、再度、圧力を 50 MPa まで上げた。次に、出口バルブを開放することにより超臨界水を抜き、容器内の圧力を 50 MPa から大気圧下まで下げた（減圧破碎、減圧速度：約 10-13 MPa/s）。減圧後、再度 45 MPa まで昇圧させ、圧力を瞬間的に 50 MPa まで上げる操作を行った。

4. 造成された亀裂

IN1 から IN3 試料の間隙率は、実験の前後でそれぞれ 0.60%、0.61%、0.59% から 1.29%、1.68%、1.88% まで増加した。また破碎実験の前後で、試料の体積が 7.89 cm³ から 7.96-8.07 cm³ へと増加したが、試料の重さは 20.793 - 20.865 g から 20.788 - 20.845 g へと減少した。このことから試料内に造成された亀裂は、減圧破碎だけでなく、鉱物の溶解によるものも含まれると考えられる。ここで急減圧した時の温度挙動の結果（図 4）を見てみると、急減圧時の温度差は IN1 で 22.8℃、IN2 で 11.9℃、IN3 で 39.8℃ であった。また、急減圧時の温度の低下速度は IN1 で 16℃/s、IN2 で 29.8℃/s、IN3 で 7.5℃/s であった。亀裂増加量は、最も温度差のある IN3 が大きかったが、IN1 と IN2 の結果からは温度差による影響は見られなかった。急減圧した時の温度差や温度低下速度差が大きいほど、亀裂の増加量に影響を与えると推測していたが、今回の実験においては、温度差あるいは温度低下速度差による亀裂の

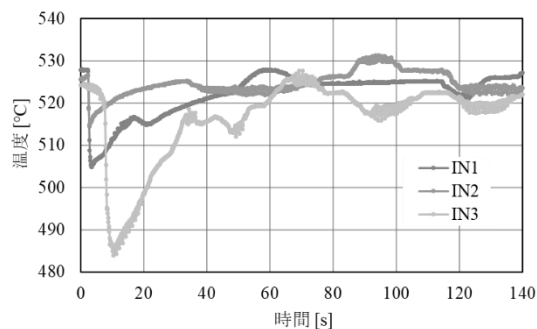


図 4 IN1 から IN3 試料が急減圧した時の温度挙動。

増加量への大きな影響は見られなかった。これは先に述べた鉱物の溶解が起因しているのではないかと推察する。

5. 透水性

IN1 および IN2 試料を用いて行った実験では、急減圧前後のどちらの場合も 45 MPa から 50 MPa への昇圧後に圧力減衰は見られなかった（図 5）。

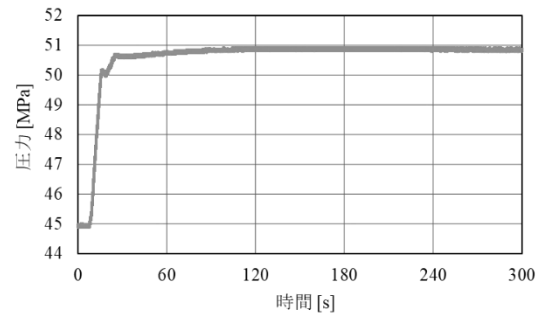


図 5 45 MPa から 50 MPa に昇圧した時の圧力挙動（IN1 試料、急減圧後）。

室温（25℃）下で同様の実験を行ったところ圧力減衰が見られたことから、室温下と 530℃下における流体の固さの違いが原因ではないかと考えた。より流体を固くすれば圧力減衰が見られると推測し、容器体積を小さくした。容器につなげているチューブを短くし、また直径 20.05 mm、長さ 4.63 mm のセラミックフィルターを使用することで、容器体積を約 1.55×10^{-5} m³ から約 8.53×10^{-6} m³ にした。IN3 試料を用いて再度行った実験では、圧力減衰が見られた（図 6）。

実験後の試料において、圧力は 45 MPa を

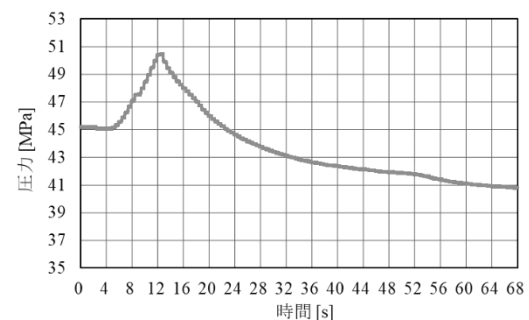


図 6 45 MPa から 50 MPa に昇圧した時の圧力挙動（IN3 試料、急減圧後）。

下回り減衰した。昇圧前の試料容器内は 45 MPa で一定を保っていたため、この減衰挙動には何らかの原因があると考えられる。原因として、試料容器とチューブのつなぎ目やバルブ

とチューブのつなぎ目からの漏れが考えられるが、実験前に漏れ検査を行った際は流体の漏れは確認されず、実験中においてもつなぎ目やバルブからの漏れは無かった。また事前の漏れ検査より、少しでも漏れが発生していれば瞬時に大気圧下まで下がるのがわかっているため、この点からも図6の減衰挙動は漏れが原因である可能性は低いと考える。その他の原因として、試料容器と出口バルブの間に設置している冷水(0-5℃、図2)が挙げられる。これは、出口バルブの耐熱温度が232℃であるため、試料容器から出てきた高温流体の温度を下げる役割がある。図6の18s付近や53s付近で圧力が相対的に急に下がる挙動をしたことから、チューブ内の流体の温度が冷水により下げられ、圧力が下がったのではないかと推測する。また、試料容器の体積を小さくするため、試料容器から出口バルブのチューブの長さを約269cmから約115cm削った。このため、IN1およびIN2試料を用いた実験よりもIN3試料を用いた実験の方が、試料容器から冷水までのチューブの長さが短いため、IN3試料を用いた実験の方が冷水の影響を受けやすいと考える。図4を見ると、IN3試料を用いて50MPaから大気圧下までの急減圧を行った際の減圧に伴う温度挙動は、IN1やIN2試料に比べIN3試料の方が大きく下がっていた。この点からも、IN3試料を用いた実験の方が冷水の影響を受けやすいと考える。

試料容器内の流体が冷水の影響を受けていると仮定し、影響を受ける前(18s付近よりも手前まで)の減衰挙動から浸透率 k [m²]を求めた。図6の13sから18s付近の減衰した部分を抜粋した結果と45.1369MPaから50.4015MPaまで瞬間的に昇圧し、50.4015MPaから47.2588MPaまで4.8sで減衰したときの圧力減衰のフィッティングを行い、浸透率 k を求めた(図7)。この結果、減圧後の浸透率は約 1.66×10^{-18} m²となった。減圧前の試料の 3.73×10^{-20} m²と比較すると、二桁程大きくなったと言える。

今回の実験で得られた浸透率 k は約 1.66×10^{-18} m²であり、NEDO目標である 10^{-15} m²を下回る結果となった。先行研究における50MPa付近の浸透率と比較しても、一桁から

二桁程小さい値となった。減圧破碎のみでは浸透率は 10^{-15} m²を担保できないと考える。しかし、本研究では浸透率 k の結果は1点しか得ることができなかったため、複数回実験を行い、さらに調べる必要がある。

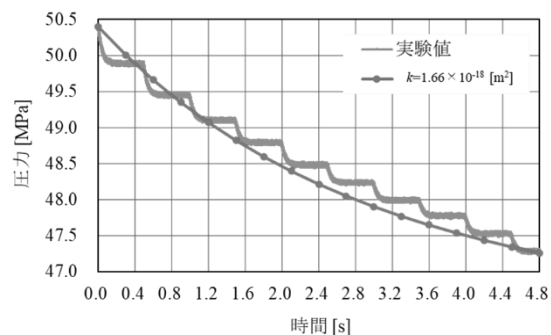


図7 図6の13sから18s付近を拡大した実験結果と計算値のフィッティング。

6. 課題

本研究では透水性を調べるために、実験手法として密閉容器内の圧力減衰を測定する手法を用いた。超臨界水は常温の水と比べ体積弾性率が小さく、IN1およびIN2試料においては、減圧破碎前後のどちらの場合でも圧力減衰は見られなかった。容器体積を小さくすることでIN3試料では圧力減衰が見られたが、バルブの耐熱温度を考慮した冷水の影響を受けたのではないかと考えられる。容器体積を小さくするにあたり、チューブの長さを短くするよりもセラミックフィルターの効果が大きかったため、容器から出口側バルブ間のチューブは削らずに、容器のより細かい部分にもセラミックフィルターを埋め込めば、冷水の温度影響を避けつつ容器体積を小さくできると考える。

<参考文献>

- [1] 環境省 (2014): IPCC 第5次評価報告書の概要 - 第1作業部会(自然科学的根拠).
- [2] 内閣府 (2016): エネルギー・環境イノベーション戦略.
- [3] NEDO (2020): ニュースリリース 『超臨界地熱発電の実現に向け、新たに3件の研究開発を採択—超臨界地熱資源に対する調査井掘削の詳細検討に着手—』.
- [4] 浅沼宏 (2014): Engineered Geothermal Systems (EGS)型地熱開発の概要.
- [5] 米倉秀徳 (2016): 『TSC Foresight 地熱発電』概要.
- [6] NEDO (2020): 2020年度実施方針 超臨界地熱発電技術研究開発.
- [7] Watanabe et al. (2017): Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust.