

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年5月31日現在

研究課題名（和文） **地殻エネルギー・フロンティアの科学と技術**  
研究課題名（英文） **Science and Technology for Geothermal  
Energy Frontier**

課題番号：25000009

研究代表者

**土屋 範芳 (NORIYOSHI TSUCHIYA)**

東北大学・大学院環境科学研究科・教授



研究の概要：本研究は、従来型地熱の開発対象領域である脆性環境を通り越した、その向こう側にあるより熱エネルギー環境が高い（400～500℃以上の）延性領域の開発（超臨界地熱資源の開発のための基礎研究）を目的とした研究を学術の観点から行う。

研究分野：工学，総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：地熱エネルギー，脆性-延性遷移，超臨界地殻流体

#### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災や福島第一原発事故以降、本邦においては再生可能エネルギーに大きな関心が寄せられ、とくに地熱エネルギーに対しては、安定的な再生可能エネルギーとして期待が寄せられている。しかしながら、従来型の地熱エネルギー開発では、地熱開発と誘発地震との因果関係が充分につかめないなどの科学的な課題が残されている。

本研究では、地殻エネルギーのフロンティアを開拓すべく、未来技術として、流体との相互作用が極端に弱くなる400℃以上の温度環境、および岩石の流動性が増して誘発地震が発生しづらくなる延性領域を利用する必要がある。

本研究は、従来型地熱の開発対象領域である脆性環境を通り越した、その向こう側にあるより熱エネルギー環境が高い（400～500℃以上の）延性領域の開発を目的とした研究を学術の観点から行う。

#### 2. 研究の目的

本研究は、従来型地熱の開発対象領域である脆性環境を通り越した、その向こう側にあるより熱エネルギー環境が高い（400～500℃以上の）延性領域の開発を目的とした研究を学術の観点から行う。

#### 3. 研究の方法

新たに設計製作する地球環境も模擬する実験装置により、延性領域よりもさらに高温側も岩石の破壊挙動、流体と岩石の相互作用、き裂の発生と進展のモニタリング手法、ならびにこれらの研究を統合化させたシミュレーターを新たに開発し、地殻エネルギー・フ

ロンティアの理解と利用に関する知識と技術を開発する。

本研究では以下の5つの観点での研究を推進する。

- ・高温島弧の地熱熱構造と地熱流体解析
- ・延性領域掘削の基礎技術の開発
- ・き裂型貯留層の多相流動シミュレータの開発
- ・ICDP-JBBP サポート
- ・既存地熱のEGSの新展開

#### 4. これまでの成果

##### 高温島弧の地熱熱構造と地熱流体解析

**地熱熱構造**：高温島弧の地熱熱構造と地熱流体解析を目的として、地殻深部から現在の地表面まで、深度に応じた地球科学的現象を配列し、地熱資源の類型化を行った。その結果、高温島弧の地熱資源および地熱有望地域を、即効性(promising)、蓋然性(probability)、可能性(possibility)、発展性(potentiality)という4つの概念を用いて整理、評価した。この結果、高温島弧の地熱熱構造と地熱流体解析のデータの解析技術を開発し、地熱資源と開発可能性の定量的評価方法を提案することができた。また、有望地域周辺域での超臨界地熱資源のチャールアノグ研究を実施し、超臨界地熱貯留層の実態を明らかにした。

**地熱流体解析**：高温高圧の地熱流体には多量の岩石成分（特にシリカ）が溶け込んでおり、流体からのシリカの析出は、スケール問題を引き起こすとともに、地下の亀裂や断層を閉塞させ、抽熱の効率にも大きな影響を与える。地熱地帯深部のシリカの析出が水理学的特性に与える影響を評価するために、独自装置により超臨界条件（410℃、30 MPa）における流通式水熱実験を行い、析出に伴う流体

圧（浸透率）の時間変化と、マイクロ X 線 CT によって間隙構造の発達を調べた。地熱地帯のような岩石—水相互作用が激しく起こるところでは、地震によって流体流動が引き起こされ、高過飽和な流体からシリカの微粒子が形成することにより、流体圧にダイナミックな変動を与えることが示唆された。従来、力学的な現象としてアプローチされてきた地震発生過程に対して、地下の熱水—岩石の化学的な相互作用が大きな影響を与えることを示しており、地震学への波及効果は高いものがある。

### 延性領域掘削の基礎技術の開発

「フラクチャークラウド創成実験装置」を用いて、超臨界水環境下におかれた岩石試料の急減圧にともなう岩石内き裂の発生について実験を行った。500°Cから 610°C・28 から 43MPa の実験条件下において、実験温度が上昇するに伴って空隙率が初期状態の 0.5%程度から約 3.2%まで増加し、これは既往の研究と比較して、500°C以上では急減圧破壊により、より空隙率が大きくなることが明らかとなった。さらに P 波伝播速度 (Wave Velocity: Vp) も顕著な低下が観察された。特に、600°Cから急減圧を行うと、Vp が水中の伝播速度(1.5km/s)よりも低下した。変形が生じて破壊しづらいつと考えられてい

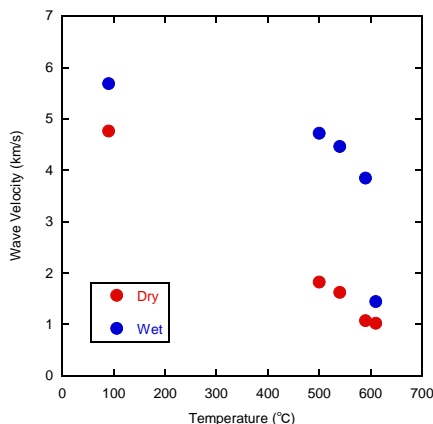


図1 500°Cからの急減圧の結果、岩石の弾性波伝播速度はきわめて小さくなり水以下となる

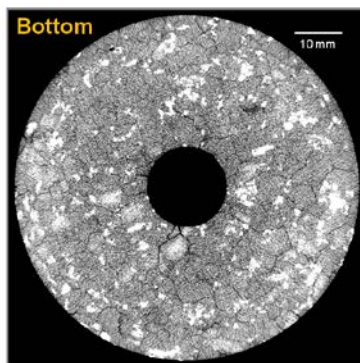


図2 急減圧により岩石が破壊し、き裂が進展する (X線 CT 画像)

た延性領域でも、流体との相互作用により岩石がもろく破壊する実験的事実をつかむことができた。

### き裂型貯留層の多相流動シミュレタの開発

延性岩体に形成されたき裂型貯留層内の流体流動を予測するためには、熱水および水蒸気の二相流動の取り扱いが可能なシミュレタの開発が必要であり、二相流動の取り扱いを可能とするためにはき裂ネットワークの相対浸透率曲線を明らかにし、定式化することが求められる。

単一き裂の相対浸透率曲線は、岩種および流体系にかかわらず、き裂面にせん断変位を生じ開口幅が増大したき裂（絶対浸透率： $10^{-10} \text{ m}^2$ 以上）で毛管現象の影響が無視できる場合には既存の X 型相対浸透率曲線モデルが適用可能である。一方、毛管現象が無視できない場合には既存のどのモデルとも異なる。このことを実験に基づいて解析し、ギリシャ文字の  $\nu$  (ニュー) に似た形状の  $\nu$  型相対浸透率曲線（二次元多孔質体における極めて大きな流体間の相互干渉）となることを明らかにし、この相対浸透率曲線を定式化した  $\nu$  モデルを提案した。

これらの研究成果は、地熱貯留層の開発・生産のみならず石油・天然ガスのき裂型貯留層の開発・生産あるいは CO<sub>2</sub> 地中貯留におけるリスク評価などに他分野にも直接応用展開可能な貯留層工学の発展に大きく貢献する重要な成果である。

### 5. 今後の計画

2030 年にパイロットプラントの実用化を目指し、そのための基礎研究の充実を進める。

### 6. これまでの発表論文

- (1) Tsuchiya, N., Yamada, R., Uno, M. Supercritical geothermal reservoir revealed by granite-porphphy system., Geothermics, in press, 2016
- (2) Saisyu, H., Okamoto, A., and Tsuchiya, N. The significance of silica precipitation on the formation of the permeable-impermeable boundary within Earth's crust, Terra Nova 26(4), 253 – 259, 2014.
- (3) Watanabe, N., Sakurai, K., Ishibashi, T., Ohsaki, Y., Tamagawa, T., Yagi, M., and Tsuchiya, N. New  $\nu$ -type relative permeability curves for two-phase flows through subsurface fractures. Water Resource Research, 51,1-18, 2015.

ホームページ等

<http://geo.kankyo.tohoku.ac.jp/gmel/tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp>