

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年5月1日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2013～2017

課題番号：25000009

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 of Geothermal Energy Frontier

研究代表者 土屋 範芳 (TSUCHIYA, Noriyoshi)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授

研究者番号：40207410

交付決定額(研究期間全体)(直接経費)：440,000,000円

研究成果の概要(和文)：

超臨界地熱貯留層に関する、地球化学的、岩石力学的、掘削工学的、ならびに地質学的制約条件についての基礎研究を行った。その結果、超臨界状態での地化学変化により不透水層が形成され、岩石の力学特性変化から、き裂の透水率を維持しながら開発できる可能性を示した。また、東北地方の沈み込み帯には、超臨界地熱貯留層が賦存している可能性が高いことを明らかにし、その開発の技術的方向性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：

Geological models and the properties of supercritical geothermal reservoirs are described with respect to supercritical geofluids, mechanical behaviors of reservoir rocks, crustal permeability and tectonic settings. Mechanical conditions at the elastic-plastic boundaries of granitic rocks indicate potentially exploitable supercritical geothermal resources. Tensile fracturing is possible even in ductile rocks, and some permeability-depth relations proposed for the continental crust show no drastic permeability reduction at the BDT (Brittle-Ductile Transition). The reservoir permeability ($>10^{-16} \text{ m}^2$) could be maintained even under supercritical conditions. The permeable-impermeable boundary of the crust and geothermal reservoirs were affected by water-rock interaction such as dissolution and precipitation of silica minerals. NE Japan is representative of an Island-Arc setting in a subduction system, and it is highly possible that exploitable supercritical geothermal resources may be located on and around the present volcanic front.

研究分野：

地熱エネルギー工学ならびに地殻流体科学

キーワード：地殻エネルギー、再生可能エネルギー、超臨界流体、脆性破壊、脆性延性遷移領域、地熱貯留層、岩石-水相互作用、貯留層シミュレーター

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おり、さらに実作業上の問題としては、地熱貯留層内の流体流動特性の把握が充分にできていないため、持続的な蒸気生産量が設計できない、流体と岩石の相互作用が未解明のため、貯留層内の鉱物の析出や流路閉塞が生じ、所定の流体の生産や還元ができないなどの問題が生じている。これらの問題を解決するための未来技術として、流体との相互作用が極端に弱くなる 400°C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。

2. 研究の目的

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°C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。岩石の力学挙動は複雑なため、脆性領域から遷移領域を経て延性領域にいたる領域を一意的に示すことはできないが、花崗岩質岩の場合にはおおざっぱには 400°C以上で脆性的環境から離脱し始めると考えられる。

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°C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った。

3. 研究の方法

本研究は、フィールドサイエンス、水熱実験、ならびに数値流体科学の各種法を最大限活用し、またそれらの研究方法の有機的な連携を加速して研究を進めた。特に、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で岩石の破壊挙動、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した。

4. 研究成果

(1) 地球化学的制約条件

地熱地帯におけるシリカの溶解度について、実験的検討ならびに熱力学的検討を行い、

亜臨界条件と超臨界条件ではシリカの溶解度の劇的な転換点があり、それにより地熱地帯の透水構造が大きく制約を受けていることを明らかにした。図1には、岩手県葛根田地熱地帯の温度勾配とその温度圧力条件でのシリカの溶解度を示している(Saishu *et al.*, 2014)。これによれば、シリカの溶解度は、深度 2.2km ((350°C付近)で最大値を示すが、3.1km (400°C) のところで急減する。この溶

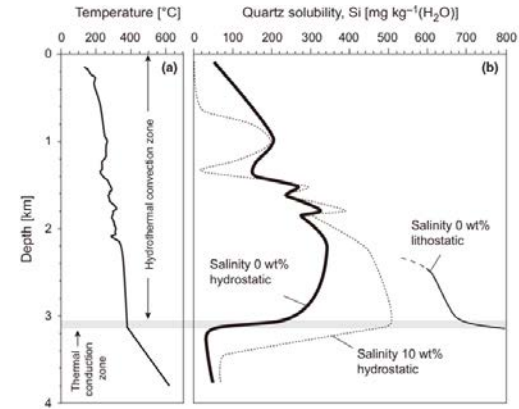


図1 葛根田地熱地帯での温度勾配とシリカ溶解度

解度曲線から、地下深所から上昇してきた流体は、温度 400°Cあたりでシリカを沈殿させ、そこにシリカによる不透水層を作る可能性がある。これにより、超臨界流体は、浅部への上昇が妨げられ超臨界地熱貯留層を形成する可能性があることを明らかにした。

(2) 岩石力学的制約条件

超臨界真三軸水圧破碎装置により、亜臨界から超臨界に至る岩石の力学特性、水理学的特性を明らかにした。その結果、超臨界環境で水圧破碎した場合、透水率が上昇し、それは不可逆的変化(透水率が低くなることはない)であることを実験的に初めて明らかにした。これらの実験基礎に、Elastic (弾性的)-Plastic (塑性的)変形の境界を温度-圧力線図上に表すことに成功した(図2, Watanabe *et al.*, 2017)。この線図上に世界で行われた深部掘削の熱伝導帯と対流帯の境界をプロットし、超臨界地熱貯留層として開発可能な温度圧力範囲を明らかにすることができた。

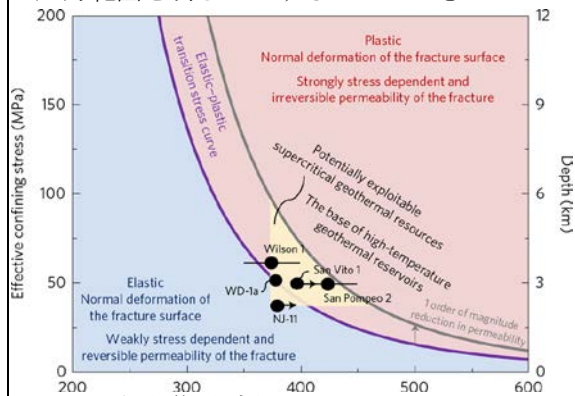


図2 弾性-塑性境界

(3) 掘削工学的制約条件

超臨界状態で水圧破碎を実施した場合、岩石は、亜臨界条件でのせん断破壊とは全く異なり、鉱物粒界が開いて、無数の雲状のき裂が形成されることがわかった。この結果、透

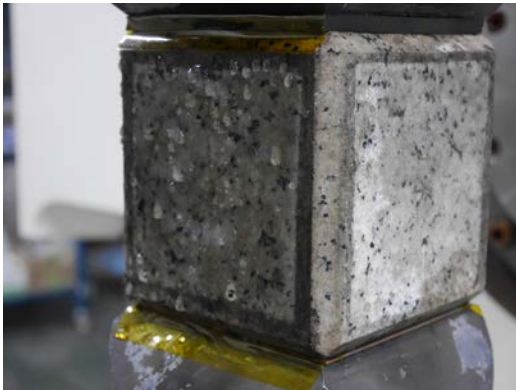


図3 超臨界状態で水圧破碎の結果生じた Fracture Cloud

水率は大きく向上し、またせん断き裂でないことから誘発地震リスクも大きく軽減すると推定される。

図3には、水圧破碎後の花崗岩試験片の様子を示す、試験片端面からまるで汗のように水がしみ出てくるのがわかる。このような雲状き裂 (Fracture Cloud) を形成することにより流体の可採ならびに効果的な熱交換が可能となると考えられる。

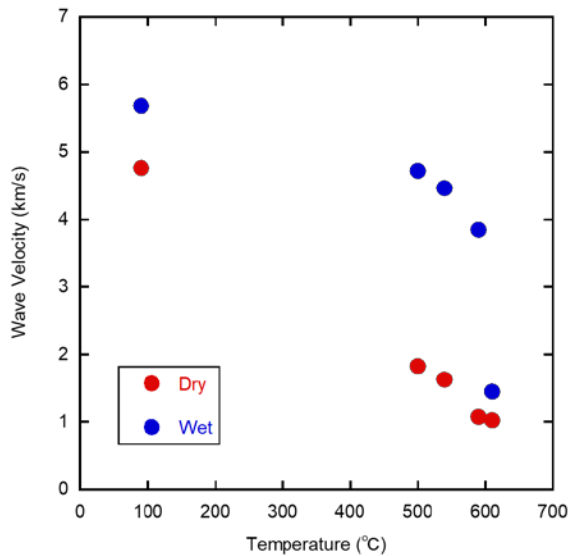


図4 弾性波伝播速度 (超臨界状態から急減圧した岩石の弾性波伝播速度は、1.5km/sで、ほぼ水中の伝播速度くらいまで低下する)

また、超臨界状態から急減圧させた場合、岩石内には上記と似たような Fracture Cloud が形成され、弾性波伝播速度 (P波速度) は著しく低下することを見いだした。これは、急減圧に伴う流体に沸騰現象により、岩石が急冷され、熱応力割れが生じて鉱物粒界が剥離して、弾性波の伝播が著しく阻害されたと

考えることができる。このような現象を利用すれば、超臨界状態での岩石の脆弱化を誘起して、効率的な掘削技術に結びつけることが可能となる。産業財産権 「② 名称：坑井掘削用ビット」はこのような基礎実験結果から出願に至ったものである。

(4) 地質学的制約条件

超臨界地熱貯留層のナチュラル・アナログとして花崗岩-斑岩系を選定し、ここに発達するき裂系の形成条件などを明らかにして、超臨界地熱貯留層の発達シナリオを明らかにした (Tsuchiya *et al.*, 2016)。これによれば、花崗岩-斑岩系の頂部付近には、シリカセルフシーリング帯に遮られた超臨界流体が滞留し、最終的に水和鉱物から成る鉱物脈を形成していることを明らかにした。すなわち、超臨界地熱貯留層は、超臨界条件で形成されたシリカ沈殿層 (セルフシーリング不

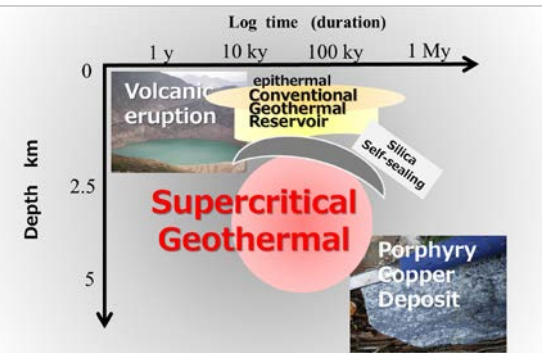


図5 超臨界地熱貯留層の深度-時間発展

花崗岩-斑岩システムの頂部と、火山の下部の領域にシリカのセルフシーリング帯を不透水層として、その下位に超臨界地熱貯留層が形成される。

透水層)の下位に賦存していると推定される。この超臨界地熱貯留の持続時間は、1万年から10万年程度と考えられる。(図5)

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 6 件)

- ① Noriaki Watanabe, Motoki Egawa, Kiyotoshi Sakaguchi, Takuya Ishibashi, Noriyoshi Tsuchiya, Hydraulic fracturing and permeability enhancement in granite from subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions, Geophysical Research Letters, 査読有, 44 巻, 2017, 5468-5475
DOI:10.1002/2017GL073898
- ② Masaoki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi

Tsuchiya, Excess water generation during reaction-inducing intrusion of granitic melts into ultramafic rocks at crustal P-T conditions in the Sør Rondane Mountains of East Antarctica, *Lithos*, 査読有, 284-28, 2017, 625-641
DOI: 10.1016/j.lithos.2017.04.016

- ③ Noriaki Watanabe, Tatsuya Numakura, Kiyotoshi Sakaguchi, Hanae Saishu, Atsushi Okamoto, Steven E. Ingebritsen and Noriyoshi Tsuchiya, Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, *Nature Geoscience*10, 査読有, 2017, 140-144,
DOI:10.1038/NGEO2879
- ④ A Okamoto, H Tanaka, N Watanabe, H Saishu, N Tsuchiya, Fluid Pocket Generation in Response to Heterogeneous Reactivity of a Rock Fracture Under Hydrothermal Conditions, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 44 巻, 2017, 10306-10315
DOI: 10.1002/2017GL075476
- ⑤ Tsuchiya, N., Yamada, R., Uno, M., Supercritical geothermal reservoir revealed by granite-porphyry system., *Geothermics*, 査読有, 63 巻, 2016, 182-194
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.12.011>
- ⑥ Takuya Ishibashi, Noriaki Watanabe, Hiroshi Asanuma, and Noriyoshi Tsuchiya, Linking microearthquakes to fracture permeability evolution, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 2016
DOI:10.1002,2016,GL069478

[学会発表] (計 5 件)

- ① Noriyoshi Tsuchiya, Supercritical Geothermal Reservoir -Scientific and Engineered Perspective, 15th International Workshop on WATER DYNAMICS Deeper and Hotter in Frontier Earth, 東北大学青葉山キャンパス (仙台市), 2018.3.13
- ② Atsushi Okamoto, Some unsolved problems on supercritical water-rock interaction, 15th International Workshop on WATER DYNAMICS Deeper and Hotter in Frontier Earth, 東北大学青葉山キャンパス (仙台市), 2018.3.14,
- ③ Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya, Budget of slab-derived water in arc

crust: Constraints from meltcrust reaction zones and fossil caldera differentiation processes, 15th International Workshop on WATER DYNAMICS Deeper and Hotter in Frontier Earth, 東北大学青葉山キャンパス (仙台市), 2018.3.14

- ④ Noriyoshi Tsuchiya, Geological Model of Supercritical Geothermal Reservoir on the Top of the Magma Chamber, American Geophysical Union FALL MEETING, New Orleans(USA), 2017.12.11
- ⑤ Noriyoshi Tsuchiya, Geological model of supercritical geothermal reservoir related to subduction system, EGU 2017 (Austria), 2017.4.27

[図書] (計 1 件)

- ① Takuya Ishibashi, Noriaki Watanabe, Hiroshi Asanuma and Noriyoshi Tsuchiya, *Wiley, Crustal Permeability*, P49-64, 2017,

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

- ① 名称: 酸性温泉水又は酸性鉱山排水の処理方法並びにその方法により製造された殿物
発明者: 土屋範芳、大庭雅寛
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2017-15431 号
出願年月日: 平成 29 年 1 月 31 日
国内外の別: 国内
- ② 名称: 坑井掘削用ビット
発明者: 長縄成実、島田邦明、土屋範芳
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2017-12284 号
出願年月日: 平成 29 年 1 月 26 日
国内外の別: 国内
- ③ 名称: 廃棄物を利用した水素製造法
発明者: 土屋範芳
権利者: 同上
種類: 特許
出願年月日: 出願準備中
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

- ① 名称: 熱発光測定装置と熱発光測定方法
発明者: 梶原 竜哉, 赤塚 貴史

権利者：地熱エンジニアリング株式会社、
国立大学法人東北大学
種類：特許
番号：特許第 5995021 号
出願年月日：平成 27 年 4 月 10 日
取得年月日：平成 28 年 9 月 2 日
国内外の別：国内

[その他]
ホームページ等
<http://geo.kankyo.tohoku.ac.jp/gmel/>
<http://geoserv.kankyo.tohoku.ac.jp/wd/wd15/>

鉱業権（計 4 件）

- ① 種類：試掘権
出願人：国立大学法人東北大学 学長
里見進
出願代理人：土屋範芳
番号：29 東北経出試般第 4 号
出願年月日：平成 29 年 6 月 26 日
出願地：秋田県仙北市
面積：34,985 アール
- ② 種類：試掘権
出願人：国立大学法人東北大学 学長
里見進
出願代理人：土屋範芳
番号：29 東北経出試般第 5 号
出願年月日：平成 29 年 6 月 26 日
出願地：秋田県仙北市
面積：34,748 アール
- ③ 種類：試掘権
出願人：国立大学法人東北大学 学長
里見進
出願代理人：土屋範芳
番号：29 東北経出試般第 6 号
出願年月日：平成 29 年 6 月 26 日
出願地：秋田県湯沢市
面積：34,981 アール
- ④ 種類：試掘権
出願人：国立大学法人東北大学 学長
里見進
出願代理人：土屋範芳
番号：29 東北経出試般第 7 号
出願年月日：平成 29 年 6 月 26 日
出願地：秋田県湯沢市
面積：34,514 アール

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 範芳(TSUCHIYA,Noriyoshi)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号：40207410

(2) 研究分担者

浅沼 宏 (ASANUMA,Hiroshi)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・
再生可能エネルギー研究センター・地熱チ
ーム長
研究者番号：50250717

岡本 敦(OKMOTO, Atsushi)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：40422092

坂口 清敏(SAKAGUCHI, Kiyotoshi)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：50261590

渡邊 則昭(WATANABE, Noriaki)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：60466539

平野 伸夫(HIRANO, Nobuo)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号：80344688

木崎 彰久(KIZAKI, Akihisa)
秋田大学・国際資源学研究科・准教授
研究者番号：60344686

森谷 祐一(MORIYA, Hirokazu)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60261591