

令和 3 年 4 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19039

研究課題名（和文）高温延性地殻の超臨界水による水圧破碎現象を利用した高透水性網状き裂システム形成法

研究課題名（英文）A method to create a dense fracture network utilizing hydrofracturing phenomenon by supercritical water in the high-temperature ductile crust

研究代表者

渡邊 則昭（Watanabe, Noriaki）

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：60466539

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：超臨界地熱資源の形成環境を考慮して、最高温度500℃、最大応力100 MPa程度までの条件下の花崗岩に対して、世界初となる最大・中間・最小主応力を独立に制御（地下の応力場をより忠実に再現）した真三軸応力下での超臨界水圧破碎実験を実施し、水圧破碎に関する新しい学術体系の創出に向けた第一歩を踏み出すことを目的とした。地層条件（温度や地殻応力場）と破碎条件（井戸に対する主応力の方向や加圧速度）が、き裂発生に要する水圧レベルや、き裂進展パターン、さらには透水性増加に及ぼす影響を系統的かつ定量的に検討し、超臨界水圧破碎の基礎理論構築と、高透水性・網状き裂システム形成法を創出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超臨界地熱資源が形成される地殻環境で生じる超臨界水圧破碎現象は、従来の水圧破碎とは全く異なる新しいタイプの水圧破碎現象である。したがって、この新発見の現象を地熱発電等において工学的に利用するためには、既存の水圧破碎に関する学術体系を大きく変革させる必要があった。そこで本研究では、超臨界地熱資源の形成条件を考慮した温度や真三軸応力条件で花崗岩の水圧破碎実験を実施し、超臨界水圧破碎の基礎理論を構築した。本研究の成果は、超臨界地熱資源の開発・生産において常に懸念事項となる不十分な透水性への遭遇による経済的リスクの大幅な低減を通じて、超臨界地熱発電の実現、低炭素化社会の構築に貢献すると期待できる。

研究成果の概要（英文）：We aimed to create a new scientific field for hydraulic fracturing of subsurface rocks based on results from a set of the first-ever hydraulic fracturing experiments on granite under true triaxial stress state at supercritical temperatures of water, with consideration for the formation environments of supercritical geothermal resources. We systematically and quantitatively investigated influences of various factors (temperature, stress state, fluid injection rate and so on) on fracture pattern and permeability enhancement for granite, and developed a fundamental theory of supercritical hydraulic fracturing which can be applied to a new method to create high-permeability cloud-fracture networks.

研究分野：地球・資源システム工学

キーワード：超臨界地熱資源 水圧破碎 延性地殻 透水性 貯留層

1. 研究開始当初の背景

超臨界水を包有するき裂性岩体からなる新しい地熱資源“超臨界地熱資源”を利用した発電が世界的に注目されている。研究代表者らの研究結果によると、超臨界地熱資源は、従来想定されていた高温の玄武岩質・脆性地殻内だけでなく、大陸地殻の大部分を占める高温の花崗岩質・延性地殻内でも形成されることがわかってきたが(図1中段)[引用文献①]、経済的に開発可能な透水性(生産性)に達していない可能性もある。したがって、高温延性岩体内での人工き裂システム形成法、特に熱交換面積が大きく抽熱に有利な、き裂が三次元的に分布した網状き裂システム形成法の確立が重要である。

そこで研究代表者らは近年、天然では超臨界水が関与して高透水性・網状き裂が形成されていることに着目し、延性条件下の高温花崗岩に設けた孔(井戸を模擬)の内部を超臨界水で加圧したところ、網状き裂が形成され、透水性が1000倍程度増加することを発見した(図1下段)[引用文献②]。この超臨界水圧破碎は、井戸の壁面から直線的に進展する通常の水圧破碎(図1上段)とは全く異なる新しいタイプの水圧破碎である。このような高温延性地殻内の水圧破碎現象を工学的に利用するためには、既存の水圧破碎に関する学術体系を大きく変革させる必要がある。

2. 研究の目的

そこで本研究では、超臨界地熱資源の形成環境(図1中段)を考慮して、最高温度500°C、最大応力100MPa程度までの条件下の花崗岩に対して、世界初となる最大・中間・最小主応力を独立に制御(地下の応力場をより忠実に再現)した真三軸応力下での超臨界水圧破碎実験を実施し、水圧破碎に関する新しい学術体系の創出に向けた第一歩を踏み出すことを目的とする。地層条件(温度や地殻応力場)と破碎条件(井戸に対する主応力の方向や加圧速度)が、き裂発生に要する水圧レベルや、き裂進展パターン、さらには透水性増加に及ぼす影響を系統的かつ定量的に検討し、超臨界水圧破碎の基礎理論構築と、高透水性・網状き裂システム形成法を創出する。

3. 研究の方法

まず(当初予定では初年度の平成30年度)に、超臨界水圧破碎の実験手法を新たに確立する。独自に開発した最高温度500°C、最大応力150MPaまでの条件下において岩石の透水性、変形およびP波速度およびアコースティック・エミッションの測定が可能なる新実験システムを使用し、水注入・加圧用の孔を設けた立方体状花崗岩の孔内水圧変化および各主応力方向の変形挙動、水圧伝搬挙動、そしてP波速度変化やアコースティック・エミッションの発生挙動を捉えることに挑戦する。

従来の実験システムでは、二つの主応力しか独立に制御できず、実験中に測定可能なものは孔内水圧だけであった。新実験手法では、三つの主応力を全て独立に制御し、各主応力方向のき裂形成および透水性変化の挙動を三次元的に捉えることができる。本研究の実験システムは、所定の温度において、注水・加圧孔を有する10cm角の花崗岩サンプルにピストンを介して直交三方向より所定の圧力を加えた状態で、サンプルの注水・加圧用孔へ所定の流量あるいは圧力で水を注入、サンプル各端面から流出させるとともに、各主応力方向のサンプルの変形および透過P波速度やサンプル内部から発せられるアコースティック・エミッションをそれぞれピストンの変位およびピストンに設置した弾性波プローブにより測定できるように設計されている。

従来、より小型の円柱状サンプルを使用していたが、大型の立方体状サンプルを使用することにより、室温・大気圧下の透水性測定を実施した際、サンプルの各端面でき裂からの水の流出が目視できるようになり、網状き裂の形成パターンが非常にわかりやすくなった。また大型サンプルを使用することにより、室温・大気圧下ではあるが、サンプルに蛍光樹脂を含浸させた後、切断して大型薄片を作製し、その薄片の紫外線照射下の発光パターンの観察を通じて、き裂形成が

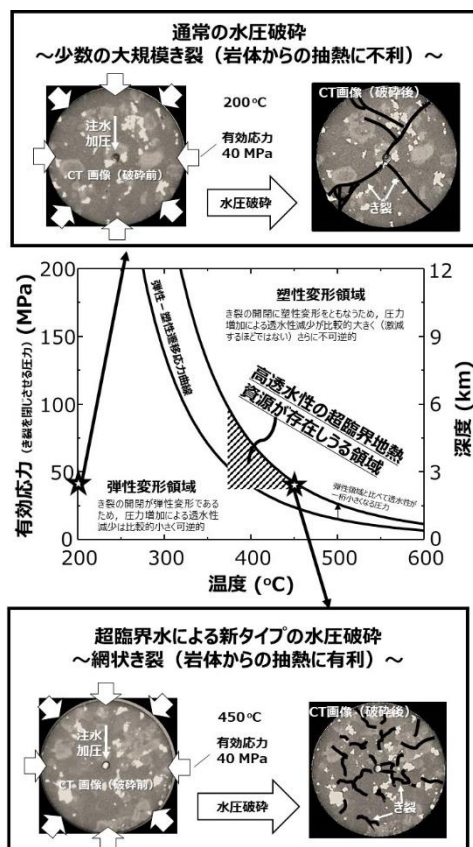


図1: 超臨界地熱資源が存在する温度・応力条件(中段)で生じる超臨界水圧破碎現象(下段)と在来型地熱条件で生じる水圧破碎現象(上段)。

どのように生じているかを特定できる可能性が高まった。

次に（当初予定では平成31/令和元年および最終年度の令和2年度）、確立した実験手法を用いて、様々な温度、応力場、孔の向きおよび坑内加圧速度の組み合わせ条件下で、き裂発生に要する水圧レベルや、き裂進展パターン、さらには透水性増加を定量的に明らかにする。このことにより最終的に、超臨界水圧破碎と従来の水圧破碎の違いを明確にした上で、水圧破碎の学術的新展開をもたらし、高温延性岩体中での高透水性・網状き裂システム形成法を見出す。

4. 研究成果

まず当初計画通り初年度に、超臨界水圧破碎の実験手法を新たに確立した。独自に開発した最高温度 500°C、最大応力 150 MPa までの条件下において岩石の透水性、変形および P 波等の弾性波計測が可能な新実験システムを使用し、水注入・加圧用の孔を設けた立方体状花崗岩の孔内水圧変化および各主応力方向の変形挙動、水圧伝搬挙動、そして P 波速度変化およびアコースティック・エミッション発生挙動を捉えることを可能にした（図 2）。また二年度目に実施予定の実験の一部を先行して実施した。その結果、超臨界地熱環境における花崗岩の水圧破碎では、井戸に対する主応力の方向の違いにかかわらず、最小主応力と中間主応力の間の水圧レベルにおいて、等方的に密に分布する微小き裂からなる高透水性き裂ネットワークが形成されることを見出した（図 3）。さらに本成果を国際学術雑誌 Scientific Reports 上で公表した [引用文献③]。このように初年度に、2 年度目に実施予定の研究計画を一部前倒して実施することができており、研究は当初の計画以上に進展した。

二年度目は当初計画通り、様々な温度、応力場、孔の向きおよび坑内加圧速度の組み合わせ条件下において水圧破碎実験を実施した。その結果、超臨界地熱条件では温度等の条件によらず、き裂発生に要する水圧レベルは既存き裂を起点とした破壊を仮定する Griffith の破壊基準に概ね一致すること、つまり岩石内部の既存微視き裂の高温・低粘性水による刺激にともない等方的に密に分布するき裂群からなるき裂ネットワークが形成されること、そして形成される透水性は最大で 10^{-12} m^2 程度に達しうることを見出した。このように、最終目標となる超臨界水圧破碎の基礎理論の構築および高透水性・網状き裂システム形成法が概ね明らかになり、二年度目の研究も当初計画以上に進展した。そして三年度目（最終年度）に、いくつかの補足実験・解析を実施することで、超臨界水圧破碎の基礎理論および高透水性・網状き裂システム形成法をより明確なものとし、国際学術雑誌 Rock Mechanics and Rock Engineering 上で公表し、本研究を完成させた [引用文献④]。

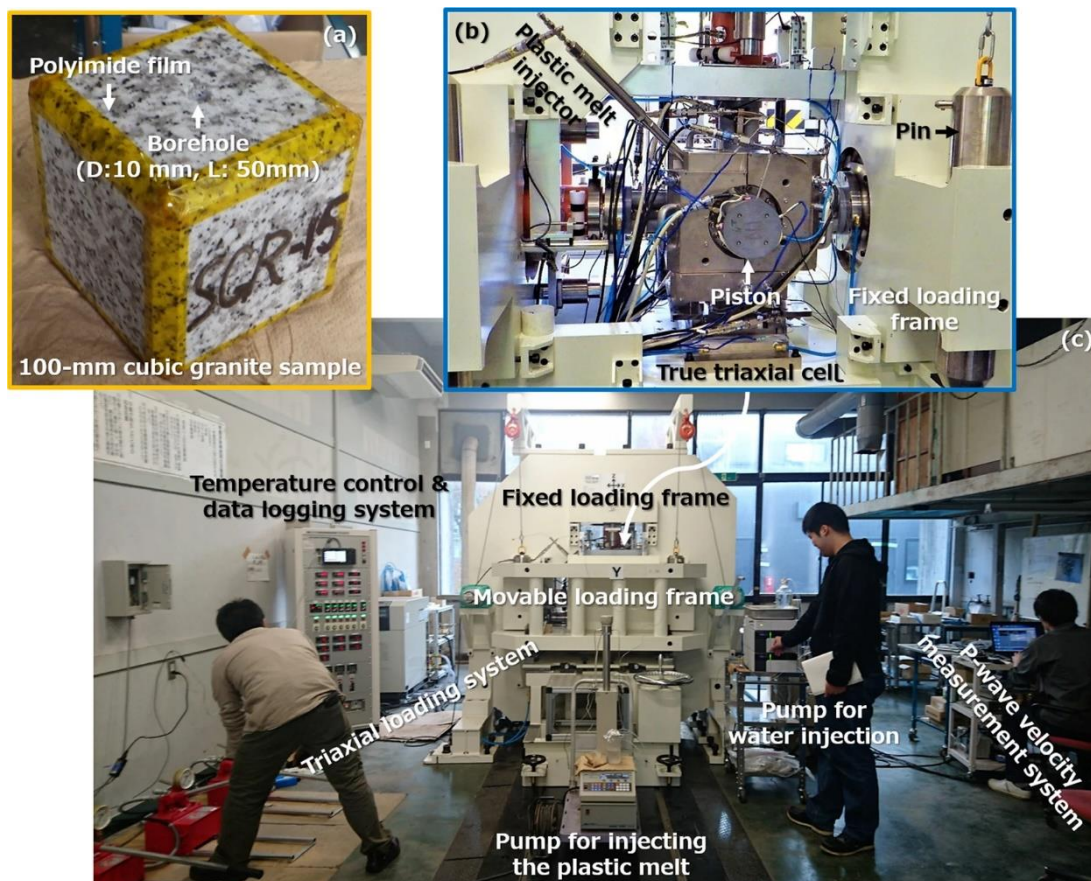


図 2: 真三軸応力下超臨界水圧破碎実験システム [引用文献③].

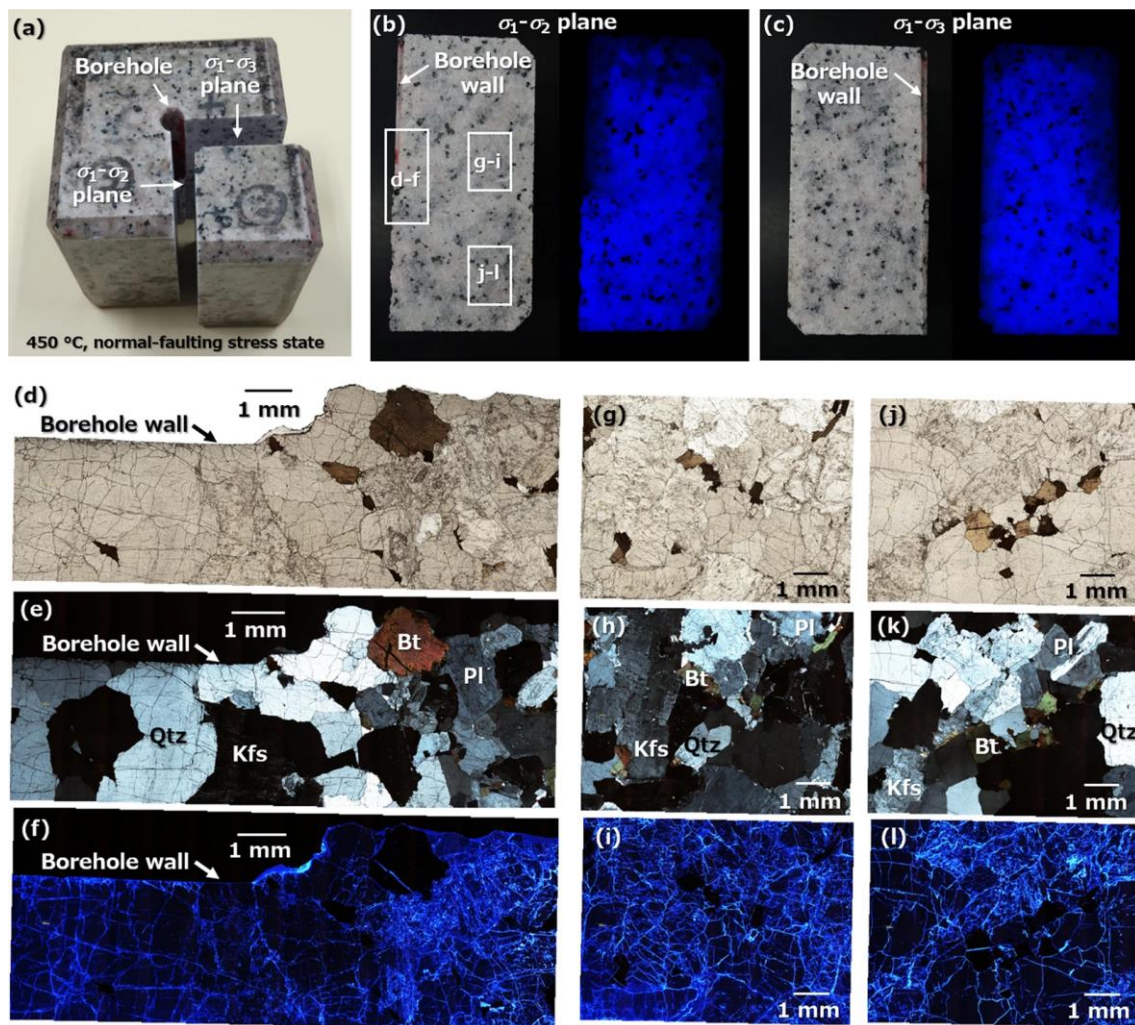


図 3: 450°C・正断層型応力条件での超臨界水圧破碎で生じた岩石サンプル内に等方的に密に分布する微小き裂からなる高透水性き裂ネットワーク(a: 蛍光樹脂を含侵させたサンプル, b と c: 紫外線照射下のサンプル切断面で観察された蛍光樹脂による均一な蛍光, d~l: 切断面から作製した薄片の単ニコルおよびクロス・ニコル顕微鏡観察ならびに紫外線照射下顕微鏡観察により得られた写真)。

<引用文献>

- ① Watanabe, N., Numakura, T., Sakaguchi, K. et al. Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust. *Nature Geosci* 10, 140–144 (2017).
- ② Watanabe, N., Egawa, M., Sakaguchi, K., Ishibashi, T., Tsuchiya, N. Hydraulic fracturing and permeability enhancement in granite from subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions, *Geophys Res Lett*, 44, 5468–5475 (2017).
- ③ Watanabe, N., Sakaguchi, K., Goto, R. et al. Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy. *Sci Rep* 9, 939 (2019), licensed under CC BY 4.0.
- ④ Goto, R., Watanabe, N., Sakaguchi, K. et al. Creating Cloud-Fracture Network by Flow-induced Microfracturing in Superhot Geothermal Environments. *Rock Mech Rock Eng* (2021), <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02416-z>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 武山 詳, 後藤 遼太, 渡邊 則昭, 坂口 清敏, 土屋 範芳	4. 巻 43
2. 論文標題 高温環境における岩石き裂のすべり特性と透水性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本地熱学会誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Noriaki, Abe Hikaru, Okamoto Atsushi, Nakamura Kengo, Komai Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Formation of amorphous silica nanoparticles and its impact on permeability of fractured granite in superhot geothermal environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-84744-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Goto Ryota, Watanabe Noriaki, Sakaguchi Kiyotoshi, Miura Takahiro, Chen Youqing, Ishibashi Takuya, Pramudyo Eko, Parisio Francesco, Yoshioka Keita, Nakamura Kengo, Komai Takeshi, Tsuchiya Noriyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Creating Cloud-Fracture Network by Flow-induced Microfracturing in Superhot Geothermal Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Rock Mechanics and Rock Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00603-021-02416-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Watanabe, K. Saito, A. Okamoto, K. Nakamura, T. Ishibashi, H. Saishu, T. Komai, N. Tsuchiya	4. 巻 260
2. 論文標題 Stabilizing and enhancing permeability for sustainable and profitable energy extraction from superhot geothermal environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 114306 ~ 114306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apenergy.2019.114306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Watanabe, K. Sakaguchi, H. Saishu, R. Goto, T. Ishibashi, A. Okamoto, Y. Chen, S.E. Ingebritsen, T. Komai, N. Tsuchiya	4. 巻 -
2. 論文標題 Fracture and permeability of granite in superhot geothermal environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the YSRM2019 & REIF2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 E. Pramudyo, N. Watanabe, S. Takeyama, R. Goto, T. Miura, K. Hattori, K. Sakaguchi, T. Komai	4. 巻 -
2. 論文標題 Supercritical carbon dioxide fracturing of granite from conventional to superhot geothermal conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Watanabe, K. Sakaguchi, R. Goto, T. Miura, K. Yamane, T. Ishibashi, Y. Chen, T. Komai, N. Tsuchiya	4. 巻 9
2. 論文標題 Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-37634-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏, PRAMUDYO Eko, 駒井武, 土屋範芳, 陳友晴, 石橋琢也, PARISIO Francesco, 吉岡慶太
2. 発表標題 超高温水圧破碎における高密度き裂ネットワークの形成プロセス
3. 学会等名 日本地熱学会 令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部光, 渡邊則昭, 中村謙吾, 岡本敦, 駒井武
2. 発表標題 超臨界地熱環境下におけるアモルファスシリカ粒子の形成と花崗岩き裂の透水性への影響
3. 学会等名 日本地熱学会 令和2年学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏
2. 発表標題 超臨界水圧破砕に及ぼす岩石の異方性の影響
3. 学会等名 令和元年度 資源・素材学会東北支部春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏, 三浦崇宏, 五十嵐大樹, 吉岡慶太, Francesco Parisio, 渡邊教弘, 石橋琢也
2. 発表標題 真三軸応力下におけるPMMAの水圧破砕に対する脆性 延性条件の効果
3. 学会等名 資源・素材2019(京都)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤遼太, 三浦崇宏, 渡邊則昭, 坂口清敏, 五十嵐大樹, 吉岡慶太, Francesco Parisio
2. 発表標題 延性地殻内における水圧破砕メカニズム解明のための真三軸応力下でのアクリル樹脂の水圧破砕実験
3. 学会等名 日本地熱学会 令和元年熊本大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦崇宏, 渡邊則昭, 坂口清敏, 後藤遼太, 山根宏太, 駒井武, 陳友晴, 石橋琢也, 土屋範芳
2. 発表標題 弾性波計測に基づく超臨界地熱環境における水圧破碎現象の特性評価
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Pramudyo, N. Watanabe, S. Takeyama, R. Goto, K. Hattori, K. Nakamura, K. Sakaguchi, T. Komai
2. 発表標題 Supercritical carbon dioxide fracturing of granite at geothermal conditions
3. 学会等名 令和元年度 資源・素材学会東北支部春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Pramudyo, N. Watanabe, S. Takeyama, R. Goto, T. Miura, K. Hattori, K. Sakaguchi, T. Komai
2. 発表標題 Supercritical carbon dioxide fracturing of granite from conventional to superhot geothermal conditions
3. 学会等名 The 25th Formation Evaluation Symposium of Japan
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Abe, N. Watanabe, K. Nakamura, A. Okamoto, T. Komai
2. 発表標題 Characteristics of precipitation of amorphous silica and its influences on permeability of fractured granite in superhot geothermal environments
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊則昭, 坂口清敏, 平野伸夫, 鈴木杏奈, 後藤遼太, 三浦崇宏, L. Bai long, 伊藤高敏, 駒井武, 土屋範芳, 渡邊教弘, 石橋琢也, 浅沼宏
2. 発表標題 水圧・減圧破碎による 人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究
3. 学会等名 日本地熱学会 令和元年熊本大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Watanabe, K. Sakaguchi, H. Saishu, R. Goto, T. Ishibashi, A. Okamoto, Y. Chen, S.E. Ingebritsen, T. Komai, N. Tsuchiya
2. 発表標題 Fracture and permeability of granite in superhot geothermal environments
3. 学会等名 YSRM2019 & REIF2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Watanabe, K. Sakaguchi, R. Goto, T. Miura, T. Ishibashi, Y. Chen, T. Komai, N. Tsuchiya
2. 発表標題 Hydraulic fracturing of granite in superhot geothermal environments
3. 学会等名 16th International Workshop on WATER DYNAMICS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏, 三浦崇宏, 山根宏太, 石橋琢也, 陳友晴, 駒井武, 土屋範芳
2. 発表標題 超臨界地熱環境における花崗岩の水圧破碎および透水性増加
3. 学会等名 資源・素材2018 (福岡)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏, 三浦崇宏, 山根宏太, 駒井武, 土屋範芳, 陳友晴, 石橋琢也
2. 発表標題 超臨界岩体内での人工貯留層造成に関する室内実験
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会(東京大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斎藤 耕平・渡邊 則昭・岡本 敦・土屋 範芳・駒井 武・石橋 琢也・最首 花恵・渡邊 教弘
2. 発表標題 高温延性花崗岩き裂における圧力溶解・自由表面溶解による透水性変化
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会(東京大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦 崇宏・渡邊 則昭・坂口 清敏・後藤 遼太・山根 宏太・駒井 武・土屋 範芳・陳 友晴・石橋 琢也
2. 発表標題 弾性波計測に基づく超臨界地熱環境における水圧破碎現象の特性評価
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会(東京大会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プレスリリース：超高温地熱環境でのハイドロフラクチャリング
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/01/press-20190131-01-watanabe-web.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	坂口 清敏 (Sakaguchi Kiyotoshi) (50261590)	東北大学・環境科学研究科・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	UFZ	TU Bergakademie Freiberg	