

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03504

研究課題名(和文) 高温延性地殻の浸透率挙動と超臨界地熱資源の時空間発展予測法

研究課題名(英文) Permeability behavior in high-temperature ductile crust and prediction of spatiotemporal evolution in supercritical geothermal resource

研究代表者

渡邊 則昭 (Watanabe, Noriaki)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：60466539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：母岩に貫入したマグマが地下水と接触し冷却・固結する過程で形成される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”および浅部の従来型地熱資源の規模や特性は、母岩および貫入岩の浸透率に大きく依存する。一方、浸透率は、脆性-延性遷移等の力学特性の変化や、流体の相変化にともなう高速・核形成型析出により激変する可能性が示唆されているが、詳細は不明である。そこで本研究では、室内実験を通じて岩石の力学特性の変化および流体の相変化が関与する浸透率挙動の支配方程式を導出し、超臨界地熱資源の時空間発展予測シミュレーションの実施を通じて、超臨界地熱資源の時空間発展予測法の可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの“延性岩体は不透水”という仮説が正しくないことを独自に見出し、水理地質学分野と地熱貯留層工学分野の新たな研究を展開した。本研究の成果は、地震学や鉱床学の分野でも議論が絶えない高温延性地殻の浸透性に関する知見を新たに提供し、世界的にも我が国にとってもエネルギー・環境問題の解決に重要な役割を果たすと考えられる超臨界地熱資源のより良い理解および開発・生産の実現に貢献する。

研究成果の概要(英文)：The scale and characteristics of new geothermal resources, "supercritical geothermal resources", which consist of fractured rocks containing supercritical water, are highly dependent on the permeability of the intrusive rocks and its host rocks. On the other hand, it has been suggested that the permeability may change drastically due to changes in mechanical properties of rocks such as the brittle-ductile transition, and fast, nucleation-type precipitation associated with fluid phase changes, but the details are unknown. In this study, we derived model equations of permeability behaviors involving changes in the mechanical properties of rocks and phase changes of fluids through laboratory experiments, and clarified the possibility of a prediction method of spatio-temporal evolution of supercritical geothermal resources by conducting spatio-temporal evolution simulations.

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 再生可能資源・エネルギー 延性地殻 浸透率

1. 研究開始当初の背景

世界的な低炭素社会への移行の流れから地熱発電の重要性は近年飛躍的に増大している。現在、我が国やアイスランドなどの地熱資源が豊富な国においては、高い比エンタルピーをもつ超臨界水(374 以上, 22.1 MPa 以上)が存在するき裂性岩体からなる新しい地熱資源、いわゆる超臨界地熱資源の存在が注目されている。実際、アイスランドにおいては近年、掘削により 450 の超臨界地熱資源の存在が確認されており、この新しい地熱資源を用いた場合の生産井一本あたりの発電量は、従来型地熱資源を用いた場合(3~5 MW)よりも一桁大きい(35 MW)と見積もられている。また我が国においては、COP21 パリ協定を受けて策定された内閣府のエネルギー・環境イノベーション戦略においても超臨界地熱資源による発電が取り上げられており、超臨界地熱資源を用いた発電の実現可能性および重要性が示されている。

最新の数値シミュレーションに基づく研究結果によると、超臨界地熱資源は、母岩に貫入したマグマが冷却・固結する過程で周囲の地下水を熱することで形成され、また同時に超臨界地熱資源から上昇した高温水と周囲の低温水が混合することで、浅部に従来型地熱資源が形成される。しかし、浸透性が高く(流体の生産性が良く)経済的に開発可能な超臨界地熱資源の形成は、450 以上の脆性-延性遷移温度をもつ岩体(例えば、玄武岩質岩石)に限定されるとも言われている。

この根拠は、脆性-延性遷移により延性的な力学挙動となった岩体は、流体の流路となるき裂が形成されにくく、また形成されたとしても閉塞しやすく、浸透性が極めて悪いという仮説が存在するためである。この仮説が真実の場合、脆性-延性遷移温度が 350~400 程度の花崗岩質岩が主体の大陸地殻では高浸透性・超臨界地熱資源はほとんど形成されないという結論に至ってしまう。しかし研究代表者らは、延性岩体内ではせん断破壊は生じにくいものの、引張破壊は生じうることや、大陸地殻が延性的になる深度でも浸透性が維持されているという推定結果から、この仮説が正しくない可能性を見出した。

そこで研究代表者らは近年、引張破壊で形成したき裂を有する花崗岩の浸透率を、最高温度 500、最大有効応力 100 MPa(最大深度 6km 相当)までの条件下で実測し、この仮説を検証した。その結果、高温条件下では、ある有効応力レベルを超えると、き裂面の垂直応力に対する変形挙動、つまり“き裂の開閉挙動”が塑性変形を含むものに変化(弾性-塑性遷移)し、浸透率が不可逆・高応力依存型となることを見出した(右図上段)。さらに弾性-塑性遷移が生じる応力“弾性-塑性遷移応力”の温度依存性と、弾性および塑性領域での浸透率の応力依存性を定式化し、温度・応力依存型の浸透率モデルを構築した。この浸透率モデルに基づけば、大陸地殻の浸透率構造の推定結果が説明可能であり、高温延性岩体中でも引張き裂形成が生じれば、高浸透性・超臨界地熱資源の形成はありうることを見出した(Watanabe et al., 2017)。

このように研究代表者らの研究によって、高浸透性・超臨界地熱資源の形成しうる環境が延性地殻まで拡大したが、資源量評価や最適発電方式の検討のためには、超臨界地熱資源の形成および開発・生産過程における資源の規模および特性の時空間発展を予測する必要がある。

2. 研究の目的

母岩に貫入したマグマが地下水と接触し冷却・固結する過程で形成される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”および浅部の従来型地熱資源の規模や特性は、母岩および貫入岩の浸透率に大きく依存する。一方、浸透率は、脆性-延性遷移等の力学特性の変化や、流体の相変化にともなう高速・核形成型析出により激変する可能性が示唆されているが、詳細は不明である。そこで本研究では、室内実験を通じて岩石の力学特性の変化および流体の相変化が関与する浸透率挙動の支配方程式を導出し、超臨界地熱資源の時空間発展予測シミュレーションの実施を通じて、時空間発展予測法の可能性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

まず、塑性条件下のき裂面溶解、流体の相変化による高速・核形成型析出およびき裂の非地震性せん断すべりに関して、既知の弾性条件下のき裂面溶解、結晶成長型析出および地震性せん断すべりと比較した場合、浸透率への影響に顕著な違いがあるかを明らかにする。具体的には、き裂を有する花崗岩に対して最高温度 500、最大三軸応力 150 MPa、最大間隙圧 50 MPa までの条件下においてシリカ濃度を調整した水での流動実験および水圧刺激せん断すべり実験を実施する。その後、上記の現象のうち、既知の現象とは明らかに異なる浸透率への影響をもつものに関して、より広範な条件での実験を通じて、その影響を定式化する。さらに最終的に、超臨界地熱環境で生じうる熱水力学・地化学連成現象を考慮可能なシミュレータを開発し、基礎的なシミュレーションを通じて超臨界地熱資源の時空間発展予測法の実現可能性を検討する。

4. 研究成果

まず初年度に、き裂を有する花崗岩を用い、塑性条件下のき裂面溶解、流体の相変化による高速・核形成型析出およびき裂の非地震性せん断すべりに関して、既知の弾性条件下のき裂面溶解、結晶成長型析出および地震性せん断すべりと比較した場合、浸透率への影響に顕著な違いがあるかどうかを室内実験により検討した。その結果、同一の温度および流体圧条件下であっても、き裂面が塑性変形する有効応力条件では、弾性変形する有効応力条件と比較して、圧力溶解を含む溶解反応による浸透率減少速度が大きくなることが示唆された。また花崗岩を溶解した水がき裂を流動する際、液相から超臨界相へ相変化して多数の球状アモルファスシリカの形成が生じると、数時間程度の短時間でも浸透率が激減することが示唆された。加えて、花崗岩の脆性-延性遷移温度付近（ ~ 350 ）を境に、き裂のせん断すべり速度の低下（非地震性すべり）が生じ、地震性すべりの場合に生じるような浸透率増加は生じにくくなることが示唆された。

二年度目には、塑性条件下のき裂面溶解に関する浸透率への影響に関する室内実験を通じた検討を終了し、 $350 \sim 500$ の地熱環境に適用可能な、き裂面の自由表面溶解および圧力溶解にともなう浸透率変化挙動の予測式を導出した。一方で、流体の相変化による高速・核形成型析出に関しては、析出するアモルファスシリカの特徴に及ぼす温度、間隙圧およびシリカ飽和度依存性を室内実験により検討した。その結果、析出条件により異なる特徴を有するアモルファスシリカが得られた。また、き裂の非地震性すべりに関しては、温度の影響に加えて、応力レベルの影響に関する室内実験を開始し、応力レベルの影響は顕著ではない可能性を見出した。

三年度目には、二年度目までに実施した塑性条件下のき裂面溶解に関する浸透率への影響に関する室内実験を通じた検討で得られた成果の妥当性を再検証し、国際学術雑誌上で公表した（Watanabe et al., 2020; 図1は成果の一例）。一方で、流体の相変化による高速・核形成型析出に関しては、二年度目の成果を踏まえ、析出するアモルファスシリカの特徴と浸透率変化挙動との関係を解明することを目標として室内実験を実施した。また、き裂の非地震性すべりに関しては、二年度目に引き続き、応力レベルの影響に関する室内実験を実施し、応力レベルの依存性を概ね明らかにすることができた。

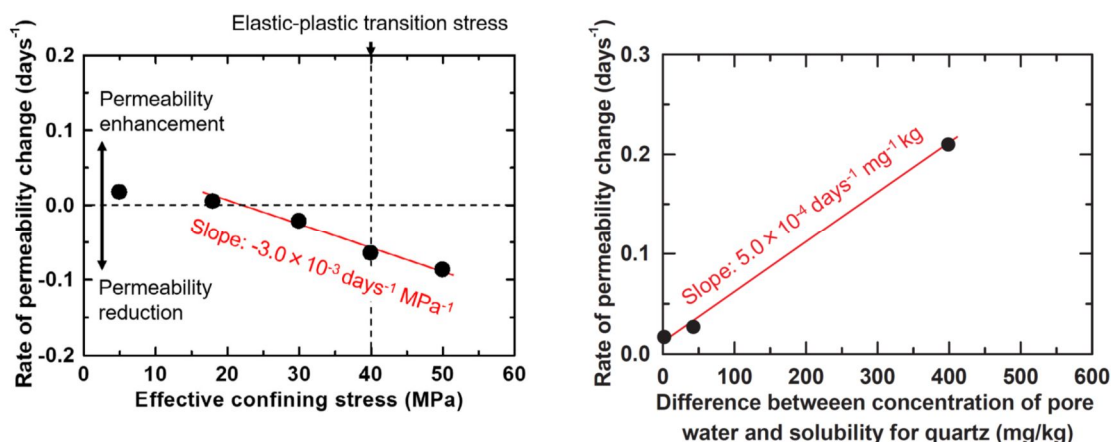


図1 き裂面の圧力溶解による浸透率変化速度と有効応力の関係（左）および自由表面溶解による浸透率変化速度とき裂内の水の石英の既溶解量と石英の溶解度との差の関係（右）。

4年度目には、流体の相変化による高速・核形成型析出に関する実験を終了し、アモルファスシリカ・ナノ粒子の形成にともなう浸透率変化挙動の予測式を導出した。また本研究成果の国際学術雑誌上での公表も行った（Watanabe et al., 2021; 図2は成果の一例）。き裂の非地震性すべりに関しては、実験を概ね終了し、き裂の非地震性すべりの浸透率への影響を定式化した。そして最終年度には、き裂の非地震性せん断すべりの浸透率への影響に関する室内実験を通じた検討で得られた成果に関して、補足実験により妥当性を検証し、学術雑誌上で発表を行った（武山ら, 2021; 図3は成果の一例）。加えて、超臨界地熱環境で生じる熱水力学地化学連成現象を考慮可能なシミュレータの開発に着手し、基礎的なシミュレーションを通じて超臨界地熱資源の時空間発展予測法の実現可能性を示し、本研究を完成させた。

(e) 450 °C, 30 MPa

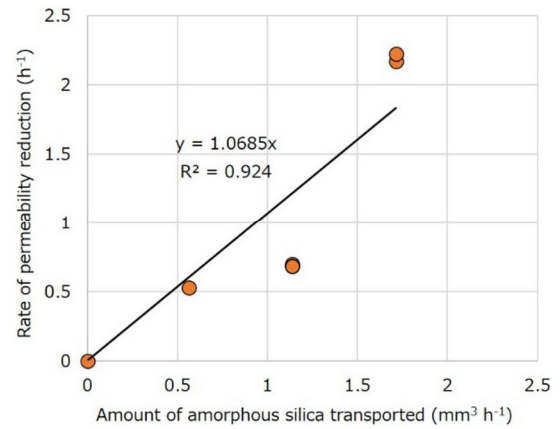
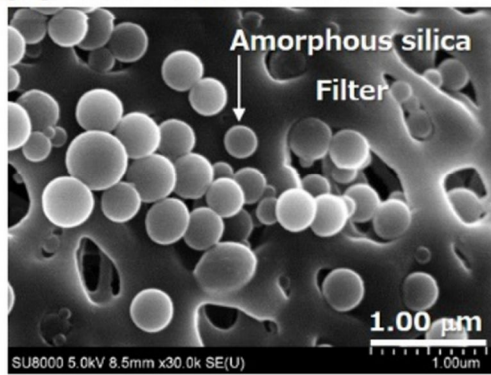


図2 水の相変化にともない形成されたアモルファスシリカ・ナノ粒子(左)および浸透率減少速度とアモルファスシリカの形成量との関係(右)。

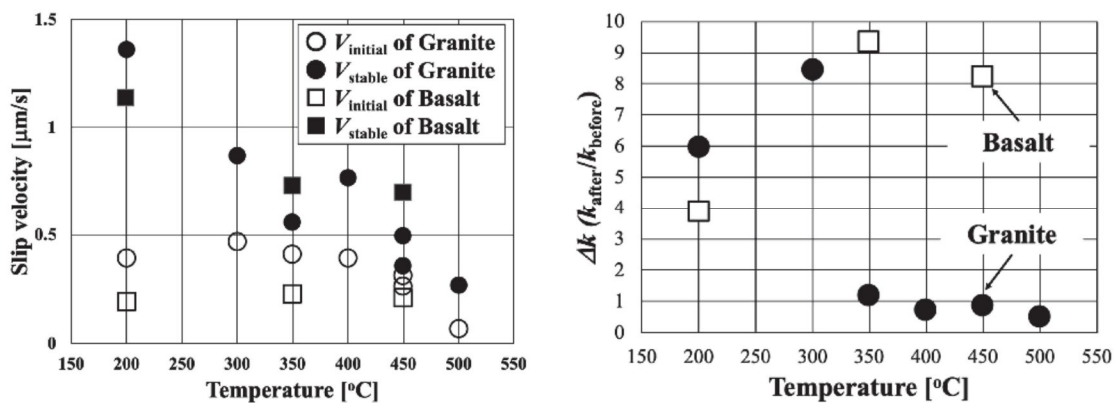


図3 花崗岩および玄武岩のき裂のせん断すべり速度と温度との関係(左)およびせん断すべりによる浸透率変化と温度との関係(右)。

< 引用文献 >

Watanabe, N., Numakura, T., Sakaguchi, K., Saishu, H., Okamoto, K., Ingebritsen, S. E., Tsuchiya, N. Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust. *Nature Geoscience* 10, 140-144 (2017). <https://doi.org/10.1038/ngeo2879>

Watanabe, N., Saito, K., Okamoto, A., Nakamura, K., Ishibashi, T., Saishu, H., Komai, T., Tsuchiya, N. Stabilizing and enhancing permeability for sustainable and profitable energy extraction from superhot geothermal environments. *Applied Energy* 260, 114306 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114306>

Watanabe, N., Abe, H., Okamoto, A., Nakamura, K., Komai, T. Formation of amorphous silica nanoparticles and its impact on permeability of fractured granite in superhot geothermal environments. *Sci Rep* 11, 5340 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84744-2>

武山 詳, 後藤 遼太, 渡邊 則昭, 坂口 清敏, 土屋 範芳. 高温環境における岩石き裂のすべり特性と透水性. *日本地熱学会誌* 43 (2), 53 ~ 64 (2021). <https://doi.org/10.11367/grsj.43.53>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Luis Salala, Ryota Takahashi, Noriaki Watanabe, Kengo Nakamura, Noriyoshi Tsuchiya, Takeshi Komai	4. 巻 -
2. 論文標題 Permeability Enhancement by Selective Mineral Dissolution of Rocks in Geothermal Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPWLA 26th Formation Evaluation Symposium of Japan	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 Ryota Goto, Eko Pramudyo, Noriaki Watanabe, Kiyotoshi Sakaguchi, Yuqing Chen, Takeshi Komai	4. 巻 -
2. 論文標題 Flow-Induced Microfracturing of Granite in Conventional and Superhot Geothermal Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPWLA 26th Formation Evaluation Symposium of Japan	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 Watanabe Noriaki, Takahashi Kaori, Takahashi Ryota, Nakamura Kengo, Kumano Yusuke, Akaku Kohei, Tamagawa Tetsuya, Komai Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Novel chemical stimulation for geothermal reservoirs by chelating agent driven selective mineral dissolution in fractured rocks	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/s41598-021-99511-6	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 Pramudyo Eko, Goto Ryota, Watanabe Noriaki, Sakaguchi Kiyotoshi, Nakamura Kengo, Komai Takeshi	4. 巻 97
2. 論文標題 CO2 injection-induced complex cloud-fracture networks in granite at conventional and superhot geothermal conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102265 ~ 102265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geothermics.2021.102265	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 Liu Bailong, Suzuki Anna, Watanabe Noriaki, Ishibashi Takuya, Sakaguchi Kiyotoshi, Ito Takatoshi	4. 巻 184
2. 論文標題 Fracturing of granite rock with supercritical water for superhot geothermal resources	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Renewable Energy	6. 最初と最後の頁 56 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.renene.2021.11.062	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 Parisio Francesco, Yoshioka Keita, Sakaguchi Kiyotoshi, Goto Ryota, Miura Takahiro, Pramudyo Eko, Ishibashi Takuya, Watanabe Noriaki	4. 巻 11
2. 論文標題 A laboratory study of hydraulic fracturing at the brittle-ductile transition	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/s41598-021-01388-y	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 該当する

1. 著者名 Goto Ryota, Sakaguchi Kiyotoshi, Parisio Francesco, Yoshioka Keita, Pramudyo Eko, Watanabe Noriaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Wellbore stability in high-temperature granite under true triaxial stress	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102334 ~ 102334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2021.102334	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 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 53 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11367/grsj.43.53	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 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 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 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 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 -

1. 著者名 S. Takeyama, H. Yamane, N. Watanabe, K. Sakachuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Injection-induced slip characteristics of a rock fracture under high temperatures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 10th Asiam Rock Mechanics Symposium	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 R. Goto, T. Ishibashi, K. Yamane, T. Miura, N. Watanabe, K. Sakaguchi, N. Tsuchiya	4. 巻 -
2. 論文標題 AE measurement during hydraulic fracturing of Inada granite at 400 via the novel true triaxial system at Tohoku University	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 GRAND RENEWABLE ENERGY 2018 Proceedings	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 Noriaki Watanabe, Motoki Egawa, Kiyotoshi Sakaguchi, Takuya Ishibashi, Noriyoshi Tsuchiya	4. 巻 44
2. 論文標題 Hydraulic fracturing and permeability enhancement in granite from subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 5468-5475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL073898	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 A. Okamoto, H. Tanaka, N. Watanabe, H. Saishu, N. Tsuchiya	4. 巻 44
2. 論文標題 Fluid pocket generation in response to heterogeneous reactivity of a rock fracture under hydrothermal conditions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 10306-10315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL075476	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 Kohei Saito, Noriaki Watanabe, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, Takuya Ishibashi, Hanae Saishu	4. 巻 41
2. 論文標題 Pressure solution and permeability evolution in fractured granite at elastic and plastic deformation regimes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geothermal Resources Council (GRC) Transactions	6. 最初と最後の頁 945-955
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 -

[学会発表] 計40件(うち招待講演 1件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Ryota Goto, Noriaki Watanabe, Kiyotoshi Sakaguchi, Youqing Chen, Takuya Ishibashi, Eko Pramudyo, Francesco Parisio, Keita Yoshioka, Kengo Nakamura, Takeshi Komai, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Flow-induced microfracturing of granite in superhot geothermal environments
3. 学会等名 The 23rd EGU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Eko Pramudyo, Noriaki Watanabe, Ryota Goto, Kiyotoshi Sakaguchi, Kengo Nakamura, Takeshi Komai
2. 発表標題 Characteristics and mechanism of CO ₂ -based fracturing of granite in conventional and superhot geothermal environments
3. 学会等名 The 23rd EGU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Luis Salala, Noriaki Watanabe, Kaori Takahashi, Jose Erazo, and Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Selective mineral dissolution and permeability enhancement of fractured volcanic rocks by chelating agent flooding in geothermal environments
3. 学会等名 The 23rd EGU General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Luis Salala, Ryota Takahashi, Noriaki Watanabe, Kengo Nakamura, Noriyoshi Tsuchiya, Takeshi Komai
2. 発表標題 Permeability Enhancement by Selective Mineral Dissolution of Rocks in Geothermal Environments
3. 学会等名 The SPWLA 26th Formation Evaluation Symposium of Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Goto, Eko Pramudyo, Noriaki Watanabe, Kiyotoshi Sakaguchi, Yuqing Chen, Takeshi Komai
2. 発表標題 Flow-Induced Microfracturing of Granite in Conventional and Superhot Geothermal Environments
3. 学会等名 The SPWLA 26th Formation Evaluation Symposium of Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 遼太, Pramudyo, Eko, 坂口 清敏, 渡邊 則昭, 吉岡 慶太, Parisio, Francesco
2. 発表標題 超臨界地熱環境における花崗岩の孔壁破壊実験
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋 亮太, 渡邊 則昭, 中村 謙吾, 駒井 武
2. 発表標題 キレート剤による選択的鉱物溶解にともなう花崗岩の透水性増加のプロセスと最適pH
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 教弘, 渡邊 則昭
2. 発表標題 超臨界地熱貯留層THMC連成シミュレータのコア機能開発
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 サララ ルイス, 渡邊 則昭, 土屋 範芳
2. 発表標題 弱酸性キレート剤溶液による高温火山岩の選択的鉱物溶解
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ジョナサン アルゲタ, ルイス サララ, 渡邊 則昭, 土屋 範芳
2. 発表標題 地熱条件下の安山岩におけるキレート剤による選択的鉱物溶解に対する pHの影響
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021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・PRAMUDYO Eko, 駒井 武, 土屋 範芳, 陳 友晴, 石橋 琢也, FRANCESCO Parisio, 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 後藤遼太, 渡邊則昭, 坂口清敏
2. 発表標題 超臨界水圧破碎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の水圧破碎に対する脆性 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碎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碎実験
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. Bailong, 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・減圧破砕による 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 武山 詳, 渡邊則昭, 坂口清敏
2. 発表標題 高温環境下における岩石き裂の間隙水圧誘起すべり特性
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 齋藤 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

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 R. Goto, T. Ishibashi, K. Yamane, T. Miura, N. Watanabe, K. Sakaguchi, N. Tsuchiya
2. 発表標題 AE measurement during hydraulic fracturing of Inada granite at 400 MPa via the novel true triaxial system at Tohoku University
3. 学会等名 GRAND RENEWABLE ENERGY 2018
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, 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 Kohei Saito, Noriaki Watanabe, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, Takuya Ishibashi, Hanae Saishu
2. 発表標題 Pressure solution and permeability evolution in fractured granite at elastic and plastic deformation regimes
3. 学会等名 Geothermal Resources Council 2017 Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuya Ishibashi, Noriaki Watanabe, Kiyotoshi Sakaguchi, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Hydraulic fracturing in granite at subcritical/brittle to supercritical/ductile conditions
3. 学会等名 Geothermal Resources Council 2017 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 齋藤 耕平, 渡邊 則昭, 岡本 敦
2. 発表標題 高温き裂性花崗岩の弾性および塑性条件下における水 - 岩石反応にともなう透水性変化
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂口 清敏, 渡邊 則昭
2. 発表標題 高温延性花崗岩の水圧破碎特性と透水性向上に対する水圧刺激の効果
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本 敦, 田中 寛人, 渡邊 則昭
2. 発表標題 花崗岩亀裂におけるシリカの溶解・析出と深部地熱貯留層の間隙変化
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武山 詳, 渡邊 則昭, 坂口 清敏, 土屋 範芳
2. 発表標題 脆性-延性領域における岩石き裂のすべり特性
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊 則昭, 沼倉 達矢, 坂口 清敏, 最首 花恵, 岡本 敦, Steven E. Ingebritsen, 土屋 範芳
2. 発表標題 延性地殻における透水性と超臨界地熱資源の形成可能性
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊教弘, 最首花恵, 浅沼 宏, 渡邊則昭
2. 発表標題 天然超臨界地熱資源の形成シミュレーション
3. 学会等名 日本地熱学会 平成29年函館大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊則昭, 坂口清敏, 土屋範芳, 石橋琢也
2. 発表標題 高温延性花崗岩の超臨界水による水圧破碎および透水性増加に関する室内実験
3. 学会等名 日本地熱学会 平成29年函館大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本 敦, 田中 寛人, 渡邊 則昭, 最首 花恵, 土屋 範芳
2. 発表標題 水熱条件下の花崗岩亀裂の不均質な反応性に起因した流体だまりの形成
3. 学会等名 日本地熱学会 平成29年函館大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takuya Ishibashi, Satoru Ishikawa, Noriaki Watanabe, Hiroshi Asanuma
2. 発表標題 Permeability change and shear slip on rough-walled fracture caused by pressurized water injection
3. 学会等名 15th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norihito Watanabe, Hanae Saishu, Noriaki Watanabe
2. 発表標題 Numerical simulation of supercritical geothermal reservoir formations
3. 学会等名 15th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Noriaki Watanabe, Kiyotoshi Sakaguchi, Takuya Ishibashi, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Hydraulic fracturing and permeability enhancement under supercritical geothermal conditions
3. 学会等名 15th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	岡本 敦 (Okamoto Atsushi) (40422092)	東北大学・環境科学研究科・教授 (11301)	
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	