

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02237

研究課題名（和文）岩盤の熱・水・応力・化学連成数値シミュレータの開発と地層処分技術への実装

研究課題名（英文）Development of coupled THMC numerical simulator and its application to geological disposal

研究代表者

安原 英明（YASUHARA, HIDEAKI）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：70432797

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では単一不連続面を有する花崗岩を対象とし、地下環境を想定した高温・高圧・塩水条件下でラフネス剛性試験および連続透水試験を実施した。ラフネス剛性試験で供試体のかみ合わせを向上させ、連続透水試験で、高温条件下での模擬海水が花崗岩不連続面の透水特性に与える影響を評価した。また透過率の経時変化の要因を検討するため、ICP発光分光分析、不連続面形状計測、走査型電子顕微鏡観察を行った。さらに、熱・水・応力・化学連成場におけるき裂の透水性変化を記述可能な連成シミュレータを開発し、室内試験の再現解析を実施することで開発したシミュレータの妥当性・有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地層処分に想定される温度、応力、地下水環境を模擬した条件で室内試験を実施し、亀裂性岩盤の透水特性の長期変性メカニズムを明らかにした。また、変性メカニズムを記述する現象論モデルを実装した熱・水・応力・化学・連成解析シミュレータを開発した。本研究成果は、地層処分技術の信頼性向上のために必須事項と設定されている課題に真正面から取り組んでおり学術的意義は高い。

研究成果の概要（英文）：Roughness stiffness tests and flow-through experiments were conducted under high temperature, high pressure, and saline water conditions to simulate an underground environment in granite with a single fracture. Roughness stiffness tests were conducted to improve the interlocking of the rock samples, and flow-through experiments were conducted to evaluate the effect of simulated seawater under high temperature conditions on the permeability properties of the granite fracture. ICP emission spectroscopic analysis, fracture surface profiling, and scanning electron microscopy were also conducted to investigate the factors that cause changes in permeability over time. In addition, a coupled simulator was developed to describe the permeability change of cracks in a coupled thermal, hydraulic, stress, and chemical field, and the validity and usefulness of the simulator were verified by reproducing and analyzing laboratory tests.

研究分野：岩盤工学

キーワード：熱・水・応力・化学連成 連成数値シミュレータ き裂性岩盤 透水・物質移行挙動 地層処分事業

1. 研究開始当初の背景

我が国では、これまでの原子力発電により放射性廃棄物が発生しており、その処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物を深地層下の岩盤内に隔離し、長期にわたりその性能を保証するためには、天然バリアとなる亀裂性岩盤の透水・物質移行特性を詳細に把握する必要がある。また、処分施設の建設においては、廃棄物輸送時の安全性確保の観点から、沿岸部が「より適性の高い地域」として提案されている（資源エネルギー庁：『科学的特性マップ』、2017）。そのため、処分施設が建設される岩盤の長期性能評価を行う場合、(1)深地層下における高圧力環境、(2)廃棄体からの放熱に起因する高温環境、(3)セメント材料溶出に起因する高 pH 環境、(4)海陸接合部の塩水環境という連成環境が亀裂性岩盤の透水・物質移行特性の長期変性に及ぼす影響を予め把握しておくことが必要不可欠となる。しかしながら、それらの連成環境を模擬した室内試験・現場試験が圧倒的に不足しているため、不十分な情報（不確実性の高い現象論モデル・解析パラメータ）を用いて予察解析を実施しているのが現状である。例えば、地層処分時の応力・温度環境を模擬して実施した花崗岩単一亀裂の長期透水試験（Yasuhara et al., Earth Planet. Sci. Lett., 2006）に対して、世界の 7 研究機関が再現を試みた解析的研究（Bond et al., Environ. Earth Sci., 2017）があるが、どの研究機関も十分な精度で再現できておらず、現状の岩盤内の浸透流・物質移行解析が如何に不正確であるのかがわかる。

また、日本原子力研究開発機構第 3 期中長期計画（2015～2021 年度）の必須課題として、現場透水試験および現場物質移行試験を実施し、熱・水・応力・化学連成環境における岩盤中の透水・物質移行現象を計測・評価する技術の確立を目指すと明示している。つまり、地層処分に対する国民の安全・安心を獲得するためには、熱・水・応力・化学連成環境における亀裂性岩盤の透水・物質移行特性の「長期変動幅」、ひいては、岩盤内の核種の長期移行挙動をこれまでよりも高い精度で提示しなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、高レベル放射性廃棄物地層処分時に天然バリアとなる岩盤中に想定される応力、温度、空隙水 pH、塩分濃度を実験パラメータとし、室内試験を行うことで、岩石亀裂の透水・物質移行特性の変性メカニズムを記述する現象論モデルを構築する。さらに、現象論モデルを実装した熱・水・応力・化学連成数値シミュレータを開発し、日本原子力研究開発機構が行っている現場実験の再現解析を実施し、連成シミュレータの妥当性・有用性を検証することで、当機構の第 3 期中長期計画必須課題の解決に貢献する。最終的に、連成環境下における亀裂性岩盤の透水・物質移行特性の数万年オーダーの長期変性およびそれに伴う核種移行を予察解析し、地層処分技術の信頼性・安全性の更なる向上に資する成果を明示する。

3. 研究の方法

本研究では、地層処分時に想定される深地層下における高圧力環境、廃棄体からの放熱に起因する高温環境、セメント材料溶出に起因する高 pH 環境、海陸接合部の塩水環境という連成環境における岩石亀裂の長期透水・物質移行試験を実施し、透水・物質移行特性の長期変性メカニズムを明らかにする。さらに、『熱・水・応力・化学・連成解析シミュレータ』を開発し、連成環境下における岩盤の透水・物質移行特性の長期変性を予測する。具体的な研究内容を以下に示す。

① 拘束圧・温度・化学条件を制御した岩石亀裂の長期透水・物質移行試験

- 岩石用高温高圧透水・物質移行試験装置の開発：高温・高圧環境下で実施できる透水・物質移行試験装置を開発する。
- 岩石試料採取・作製：研究に使用する岩石（花崗岩、珪質泥岩）を日本原子力研究開発機構東濃地科学センター・幌延深地層研究センターで採取する。その後、亀裂を有する実験用供試体を作製する。
- 透水試験・トレーサー試験：拘束圧（5～25MPa）、温度（20～150℃）、化学条件（pH7～11、塩分濃度）を制御した岩石亀裂の透水・物質移行試験（試験期間：連続数ヶ月以上）を実施し、透水・物質移行挙動の経時変化を明らかにする。透水試験は、所定の試験期間中連続で実施し、透水特性変化を時系列で計測する。物質移行試験は、実験開始時に行い、その後は一定期間ごとに実施し、実験終了時にも行い変化を評価する。

② 岩石分析・化学分析・微視構造観察

- 鉱物組成分析：実験前後の供試体に対して、蛍光 X 線分析（XRF）、X 線回折分析（XRD）により鉱物分析することで、透水・物質移行特性変化に影響を及ぼす因子を調査する。

- 化学分析・微視構造観察：透水試験・物質移行試験中に流出する溶液を採取し、ICP 発光分析を行い溶出鉱物の定量評価を行う。また、実験前後の岩石供試体を用いて、マイクロフォーカス X 線 CT 分析を実施する。さらに、走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析 (SEM-EDX) を実施し、微視的構造・鉱物組成の変化を観察することで、透水・物質移行特性の変化要因を精査する。

③ 熱・水・応力・化学・連成解析シミュレータの開発・適用

- シミュレータの開発：熱輸送、地下水流動、応力変形、亀裂発生・進展、物質移行、地化学反応を一括処理する熱・水・応力・化学連成数値シミュレータを開発する。
- 妥当性・有用性検証：開発するシミュレータを用いて室内試験結果を再現し、妥当性を検証する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

① 拘束圧・温度・化学条件を制御した岩石亀裂の長期透水・物質移行試験

本研究では、単一不連続面を持つ花崗岩を対象に連続透水試験を実施した (図 1)。そして、塩水が処分施設周辺岩盤の透水特性に与える影響を評価した。また、正規化透過率を用い既往研究と比較することで、温度、拘束圧、透過水の違いが与える影響についても評価した。温度条件は室温状態である 20 °C または廃棄体からの発熱を想定した 90 °C、拘束圧条件は地層処分地の応力状態を想定し 5.0 MPa または 10.0 MPa に設定した。そして、透過水には海水由来の塩類を含んだ模擬海水を使用した。さらに、連続透水試験前後において、ラフネス剛性試験を実施し、花崗岩不連続面の不可透水特性についても評価した。ここで、各塩水条件の連続透水試験結果を図 2 に示す。20 °C 条件である E-22、24 の透過率が約 2 オーダー減少しており、他の塩水条件に比べ最も減少量が大きいことを示した。これは、模擬海水を由来とした二次鉱物が不連続面表面に沈殿したことが一因として考えられる。また、90 °C 条件である E-23、27 では、20 °C 条件よりも減少量は小さく、約 1 オーダーの減少量であった。これは、温度作用により溶解物質の溶解度が上昇し、沈殿現象が抑制されたことが予想される。次に、E-24 におけるラフネス剛性試験の結果を図 3 に示す。透水試験前後を比較すると、約 1 オーダーの透過率減少が確認でき、連続透水試験後に拘束圧を除荷しても、透過率は試験前の初期値に回復することはなかった。つまり、透過率の減少傾向は不連続面の圧縮挙動による粘弾性的な可逆現象ではなく、圧力溶解や沈殿現象等の不可逆現象に起因することが分かった。

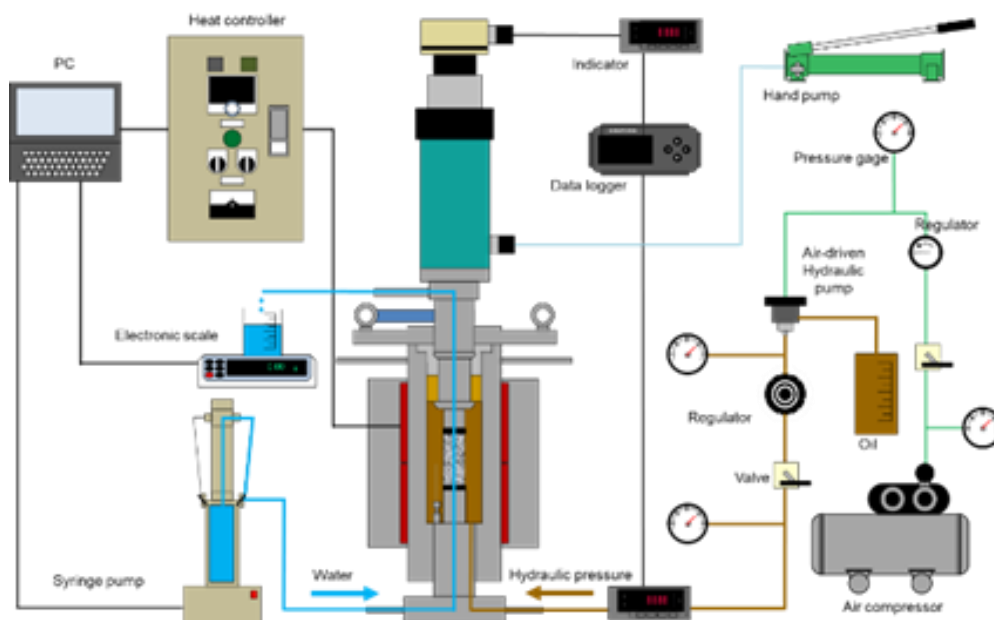


図 1 連続透水試験装置概念図

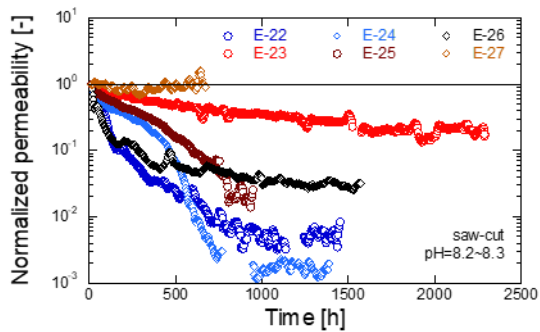


図2 正規化透過率の経時変化

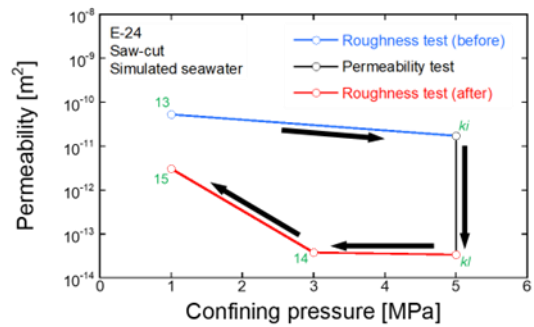


図3 ラフネス剛性試験結果 (E-24)

② 岩石分析・化学分析・微視構造観察

本研究では、透過水として模擬海水を用いた透水試験後の供試体を対象に SEM-EDX を用いた微視構造観察を実施した。そして、透水試験による不連続面表面における鉱物の組成変化を観察した。図4より、立方体型の二次鉱物が不連続面表面に点在していることが確認できた。そして、EDX分析から鉱物同定を行ったところ、これらは塩結晶 NaCl であることが分かった。 NaCl が沈殿した要因として、 Na を組成元素の一つに含む曹長石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 等の沈殿に伴い、共同沈殿したことが予想される。

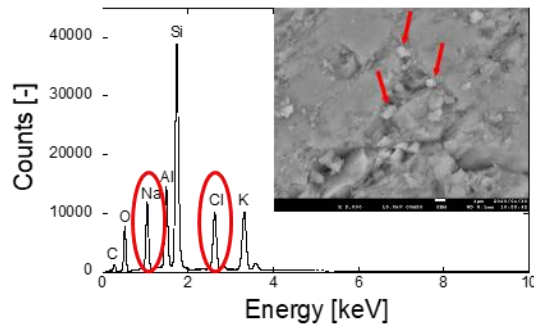


図4 EDX分析結果 (E-22)

連続透水試験で採取した供試体通水後の透過水を対象に、ICP発光分光分析とイオンクロマトグラフィー分析を実施し、花崗岩および模擬海水に含まれる主要元素の濃度変化を計測した。そして、得られた濃度データに対し、滞留時間を考慮することで、どの塩水条件も元素濃度が経時的に減少することを確認した(図5)。また、 20°C 条件の濃度減少が最も大きく、低温であるほど沈殿現象が促進されやすい環境にあることが分かった。

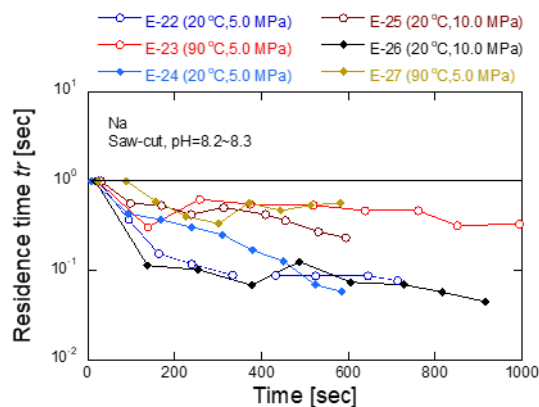


図5 正規化濃度比較 (Na)

③ 熱・水・応力・化学・連成解析シミュレータの開発・適用

本研究では、熱・水・応力・化学連成場における岩盤き裂の透水性変化を予測する解析シミュレータを開発した。特に、シミュレーション時間の高速化と、地球化学反応の一部として二次鉱物の沈殿を取り入れるという、2つの主要な改良を行った。また、透水係数や排水中の元素濃度

の結果を実験結果と比較することで、提案したモデルの妥当性を確認した。提案したモデルは、E-22、E-23 の透水係数を非常によく再現し、計算時間も短縮することに成功した (図 6)。また、20°C と 90°C の両方で行われた模擬海水通水実験において、本モデルが実際に起こる現象をうまく予測することができた。さらに、20°C 条件では亀裂表面に方解石やドーナイトの鉱物が析出することが判明した。この二次鉱物の析出により、シミュレーションの初期には透水係数が急激に低下する。しかし、接触するアスペリティの応力低下と鉱物の反応表面積の減少により、透水係数の低下速度は時間とともに遅くなることが確認された。また、90°C では二次鉱物の析出が起これず、透水性の低下速度が遅くなった。このことから、二次鉱物の析出による透水性の低下は、圧力溶解によるものよりも大きいことが示唆された。シミュレーションで得られた K、Na、Mg の排水濃度は、これらの元素が高濃度であることから、実験による濃度とよく一致する。しかし、他の元素については、Ca と Fe を除いて、予測結果と実測結果の差は 1 桁以上である。これらの排水濃度の差は、ICP 分析時の希釈工程による測定誤差が原因と考えられますが、今後さらに分析を進め、ミスマッチのメカニズムを解明する予定である。

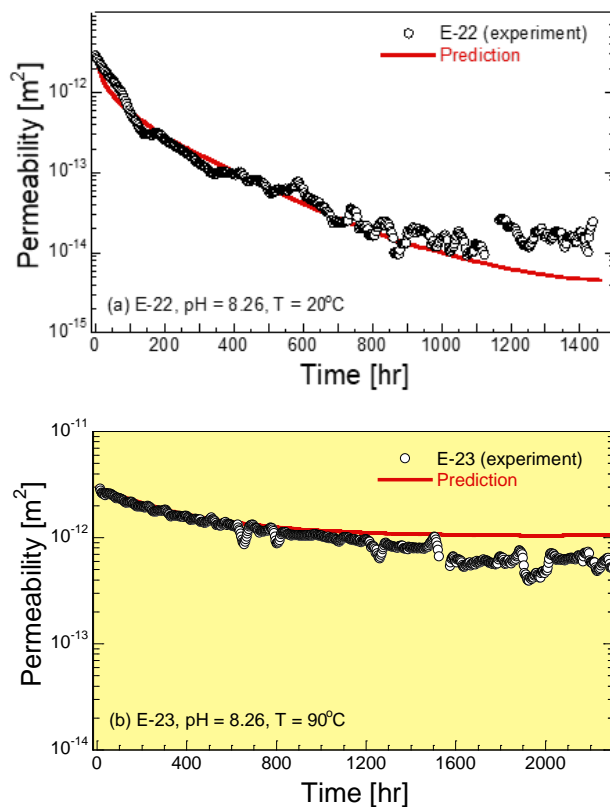


図 6 透水試験結果の再現解析 (E-22、E-23)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Qarinur Muhammad, Ogata Sho, Kinoshita Naoki, Yasuhara Hideaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Predictions of Rock Temperature Evolution at the Lahendong Geothermal Field by Coupled Numerical Model with Discrete Fracture Model Scheme	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 3282 ~ 3282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en13123282	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 Ogata Sho, Yasuhara Hideaki, Kinoshita Naoki, Kishida Kiyoshi	4. 巻 24
2. 論文標題 Coupled thermal?hydraulic?mechanical?chemical modeling for permeability evolution of rocks through fracture generation and subsequent sealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Geosciences	6. 最初と最後の頁 1845 ~ 1864
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10596-020-09948-3	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 Achmad Hafidz, Naoki Kinoshita, Hideaki Yasuhara	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of permeants on fracture permeability in granite under hydrothermal conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rock Mechanics Bulletin	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rockmb.2022.100007	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15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 佐古大地, 安原英明, 木下尚樹
2. 発表標題 塩水を用いた高温・高圧環境における花崗岩不連続面の透水実験
3. 学会等名 令和3年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西史記, 安原英明, 木下尚樹
2. 発表標題 温度・拘束圧制御下の泥岩不連続面剛性及び摩擦強度の経時変化に関する研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐古大地, 安原英明, 木下尚樹
2. 発表標題 塩水・高温・高圧環境における花崗岩不連続面の透水特性
3. 学会等名 令和3年度地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西史記, 安原英明, 木下尚樹
2. 発表標題 温度・拘束圧制御下における泥岩不連続面の剛性および摩擦強度の実験的検討
3. 学会等名 令和3年度地盤工学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐古大地, 緒方奨, 大西史記, 木下尚樹, 安原 英明
2. 発表標題 高温・高圧環境における 塩水を用いた花崗岩不連続面の透水実験
3. 学会等名 第48回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideaki Yasuhara, Kiyoshi Kishida and Naoki Kinoshita
2. 発表標題 Evolution of permeability in a single granite fracture under various temperature, confining pressure, and pH conditions
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muhammad Qarinur, Sho Ogata, Tri Rahayu, Naoki Kinoshita and Hideaki Yasuhara
2. 発表標題 Performance evaluation of the Lahendong geothermal field by coupled numerical model
3. 学会等名 2nd International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observations, Modeling (CouFrac2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ogata, H. Yasuhara, N. Kinoshita, T. Inui, S. Mishima and K. Kishida
2. 発表標題 Prediction of permeability evolution in granite under the coupled THMC interactions with pH alteration
3. 学会等名 2nd International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observations, Modeling (CouFrac2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ogata, S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Kishida, K.
2. 発表標題 Coupled THMC coupling simulation for estimating the long-term evolution of rock permeability depending on groundwater chemistry
3. 学会等名 54th US Symp. on Rock Mechs./Geomechs (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ogata, S., Yasuhara, H., Aoyagi, K., Kishida, K.
2. 発表標題 Coupled THMC analysis for predicting hydro-mechanical evolution in siliceous mudstone
3. 学会等名 53rd US Symp. on Rock Mechs./Geomechs, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Muhammad Qarinur, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita
2. 発表標題 Thermo-hydro-mechanical modeling to simulate Lahendong geothermal field
3. 学会等名 The 7th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Muhammad Qarinur, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita
2. 発表標題 Numerical Investigation for Modeling Lahendong Geothermal Field, North Sulawesi
3. 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars ' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Ogata, Hideaki Yasuhara and Kiyoshi Kishida
2. 発表標題 Development of multi-physics simulator by considering damage evolution due to mineral reactions in fractured rocks
3. 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars ' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohya Sumimoto, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita
2. 発表標題 Development of test apparatus using transient pulse method for rock permeability measurement
3. 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeru Kumagai, Hideaki Yasuhara, Naoki Kinoshita, Sho Ogata
2. 発表標題 Simulations of flow-through experiments using the granite fractures by THMC coupled model considering pH dependence
3. 学会等名 The 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (国際学会)
4. 発表年 2019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	岸田 潔 (KISHIDA KIYOSHI) (20243066)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	木下 尚樹 (KINOSHITA NAOKI) (30263958)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授 (16301)	
研究分担者	青柳 和平 (AOYAGI KAZUHEI) (40636841)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター・研究職 (82110)	

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
---------	---------