

高温・高圧条件における鉱物飽和水を用いた花崗岩不連続面の透水実験

愛媛大学大学院 学生会員 ○ 柁原こころ

正会員 安原英明

正会員 木下尚樹

1. はじめに

原子力発電の運転に伴い発生する使用済み核燃料を再処理する際に、高レベル放射性廃棄物が生成される。この処分方法として、地下 300 m 以深に地層処分する計画が進められている。地層処分では廃棄体の放射能レベルが低くなるまで数万年かかると想定され、長期的な地下岩盤の水理学特性変化の把握が必要である。処分施設周辺では、廃棄体の発熱により高温・高圧状態になること、地下岩盤内にて溶解物質が飽和状態の地下水が流入していることが想定される。そこで、それらを再現した循環透水試験を行い、既往研究との比較により水理学特性変化に与える影響を評価した。また、ICP 発光分光分析により、物質濃度評価を行い不連続面内における溶解・沈殿現象を考慮した開口幅変化を予測した。

2. 透水試験

本研究では、瑞浪産土岐花崗岩を用いて循環透水試験を行った。各実験の境界条件を表 1 に示し、循環透水試験の模式図を図 1 に示す。また、地下水環境を再現するために透過水として鉱物飽和水を用いる。鉱物飽和水は、花崗岩の主要構成鉱物が石英 (SiO_2) であることから、ビーカーに、粉碎した花崗岩と脱イオン水を入れ、90 °C 条件で攪拌した。その後、 SiO_2 の濃度が過飽和状態になったことを確認し、十分にろ過してから使用した。

透水試験によって得られた結果から、式(1)を用いて水理学的開口幅 b を算出し、式(2)を用いて透過率 k を算出した。

$$b = \left\{ \frac{12\mu Ql}{w(P_0 - \rho_w gl)} \right\}^{1/3} \quad (1)$$

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (2)$$

ここで、 b : 水理学的開口幅 [m], μ : 粘性係数 [Pa s], Q : 流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], l : 供試体高さ [m], w : 供試体直径 [m], P_0 : 透水差圧 [Pa], ρ_w : 流体密度 [kg m^{-3}], g : 重力加速度 [m s^{-2}], k : 透過率 [m^2] である。初期透過率が各透水試験で異なるため、時系列で変化する透過率を初期透過率で除した正規化透過率を算出し、境界条件が透水特性変化に及ぼす影響を評価した。

温度条件の違いによる正規化透過率の比較を図 2 に示す。20 °C 条件の方が 90 °C 条件より透過率が減少していることが確認できた。

表 1. 境界条件

供試体	不連続面 形状	温度 [°C]	拘束圧 [MPa]	透過水
E-16 ¹⁾	平滑	20	5.0	鉱物飽和水
E-18	平滑	90	5.0	鉱物飽和水

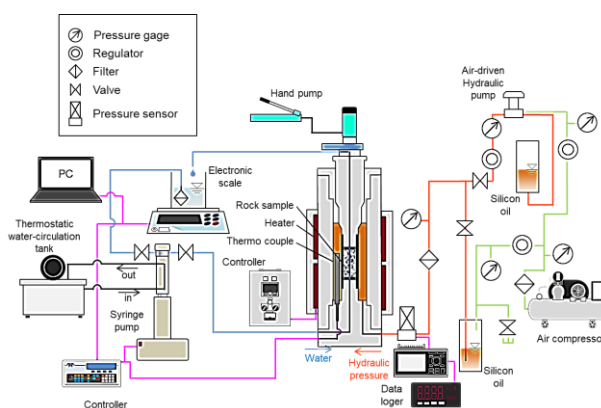


図 1. 循環透水試験模式図

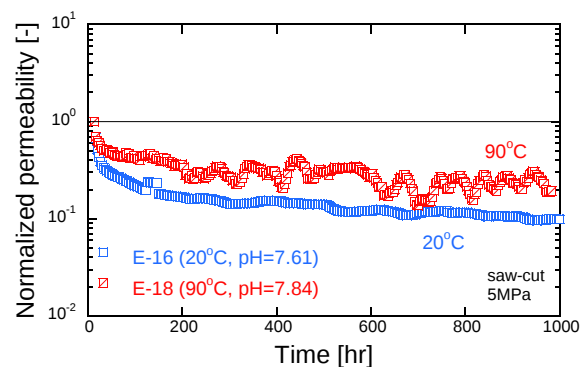


図 2. 正規化透過率の経時変化の比較
(温度条件の違い)

3. 物質濃度評価

花崗岩に含まれる主要元素は Si, Al, K, Fe, Ca, Na, Mg の 7 元素²⁾である。透水試験中に透過水を採取し、その透過水の主要元素の濃度を測定した。なお、それぞれの測定結果は透過する前の鉱物飽和水の元素濃度を差し引いたものである。また、鉱物溶解反応は岩石不連続面内を流れる透過水の滞留時間に依存するため、滞留時間を考慮した正規化溶出濃度を算出した。E-16 の滞留時間を考慮した測定結果を図 3 に示す。一部の元素の溶出濃度が負の値を示している。これは採取した透過水のほうが透水前の透過水より溶出濃度が低いことを示し、不連続面内にて沈殿現象が起きていることが想定される。

4. 開口幅予測

計測された元素濃度から、水理学的開口幅の経時変化の予測を行う。実験に使用した試料が石英、正長石、曹長石、灰長石、黒雲母の 5 つの鉱物のみで構成されていると想定し、時系列で計測された元素濃度を用いて酸化物に換算し、式(3)のように近似できる。

$$\dot{M} \cong \bar{Q} \sum_j (C_{j,ICP} - C_{j,in}) \quad (3)$$

ここで、 $\dot{M}$: 溶解質量変化率 [kg s^{-1}], $\bar{Q}$: 平均流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], $C_{j,ICP}$: 計測された元素濃度を酸化物に換算した濃度 [kg m^{-3}], $C_{j,in}$: 透過前の溶液中の平均濃度 [kg m^{-3}]である。ただし、 $j = \text{SiO}_2, 1/2(\text{Al}_2\text{O}_3), \text{FeO}, \text{MgO}, \text{CaO}, 1/2(\text{Na}_2\text{O}), 1/2(\text{K}_2\text{O})$ である。この溶解質量変化率から開口幅を算出し、時系列で変化する開口幅の予測値と実験値の比較を図 4 に示す。実験値は、透水開始から減少傾向にあるが予測値は増加傾向にある。次に、予測値と実験値の比較 (図 5) を行い、1 オーダー以内に収まっていることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、処分施設周辺岩盤の再現のため、高温・高圧環境また、地下水を再現した循環透水試験を行い、既往研究との比較により水理学特性変化に与える影響を評価、物質濃度評価を行った。今後、二次鉱物の沈殿の特定や新たなメカニズムの検討を行っていく必要がある。

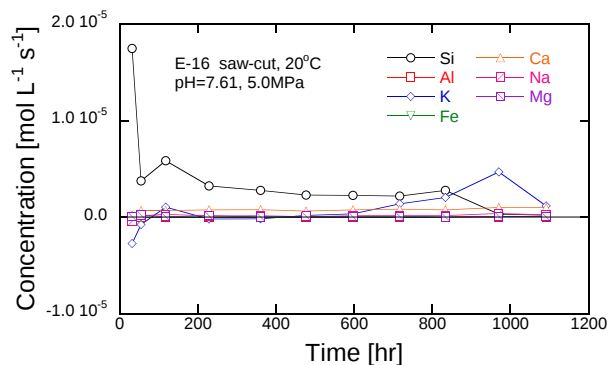


図 3. ICP 発光分光分析の結果(E-16)

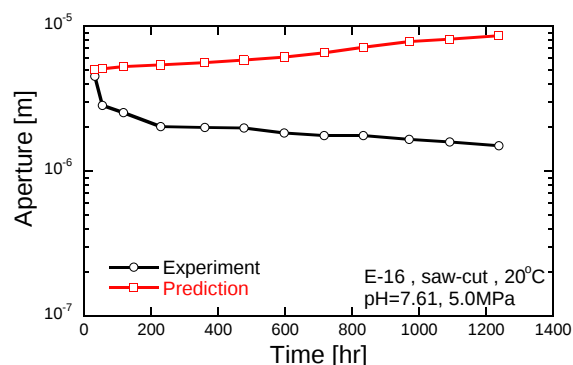


図 4. 開口幅変化 (E-16)

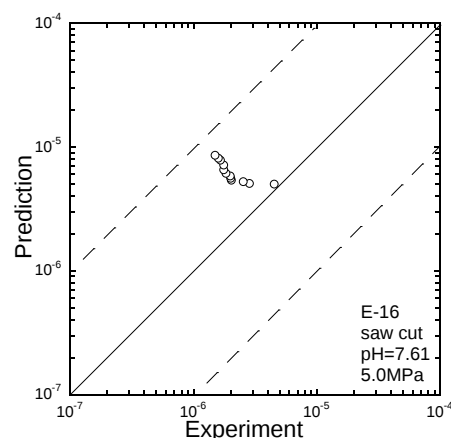


図 5. 予測値と実験値 (E-16)

参考文献

- 1) 廣恵なつ美：花崗岩不連続面の透水特性と溶解機構の検討，土木学会四国支部第 23 回技術研究会，2017
- 2) 安原英明，橋本克樹，木下尚樹：温度・pH を制御したフロースルー溶解試験による花崗岩溶解速度式の提案とその妥当性の検討，Journal of MMIJ, Vol.128, pp.79-85, 2012