

## スイス南部 Bedretto 地下研究所における EGS 基礎研究のための DFN を用いた水理モデルと熱抽出評価

阿戸豪\*・小池克明\*・久保大樹\*

Claudio Madonna\*\*・Alba S. Zappone\*\*・Alexis Shakas\*\*

## DFN-based Hydraulic Modeling and Heat Extraction Assessment for Fundamental EGS Research at the Bedretto Underground Laboratory, Southern Switzerland

Go Ado\*, Katsuaki Koike\*, Taiki Kubo\*

Claudio Madonna\*\*, Alba S. Zappone\*\* and Alexis Shakas\*\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,  
Graduate School of Engineering, Kyoto University  
E-mail: ado.go.84z@st.kyoto-u.ac.jp

\*\* Department of Earth and Planetary Sciences, ETH Zurich

### 和文要旨

本研究では、スイス南部の花崗岩帯に位置する Bedretto 地下研究所を対象として、サイト固有の水理特性を反映した DFN (Discrete Fracture Network: 離散亀裂ネットワーク) モデルを構築した。まず、地球統計学的手法の GEOFRAC を用いて、観測された亀裂データに基づき、確率論に基づく DFN を生成した。これにより、NE-SW 走向の急傾斜亀裂セットを忠実に再現する DFN が得られた。次に、地中レーダーによって特定された主要亀裂の位置に整合するよう DFN を条件付けし、それらに不均質な開口幅分布を割り当てた。連成解析の結果、亀裂面の不均質性に起因する透水特性の変化や流体注入に伴う圧力上昇、および岩盤変形との相互作用などの複雑な連成挙動が適切に再現された。特に、亀裂が重複する領域では岩盤変形が拘束され、その結果として流体の移動が局所的に制限されることを明らかにできた。本研究の成果は、EGS (Enhanced Geothermal Systems: 強化地熱システム) に伴う地熱貯留層の挙動を予測する上で、DFN に基づく連成解析アプローチが有効であることを示している。

### English Abstract

This study develops a DFN (Discrete Fracture Network) model incorporating site-specific hydraulic properties for the Bedretto Underground Laboratory in the southern Swiss granitic basement. Initially, a stochastic DFN was generated using GEOFRAC, a geostatistical method that reproduce the dominant NE-SW striking, steeply dipping fracture set. The model was subsequently conditioned to align with observed fractures identified by a Ground Penetrating Radar survey, and incorporating heterogeneous aperture distributions. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical simulations (using PorePy) successfully captured complex behaviors, including permeability evolution due to aperture heterogeneity and injection-induced pressure buildup, and rock mass deformation. Notably, the analysis revealed that in zones of overlapping fractures, rock deformation is constrained, thereby locally restricting fluid flow. These findings demonstrate the efficacy of geophysically-conditioned DFN-based coupled analysis in characterizing the behavior of geothermal reservoirs under operation of EGS (Enhanced Geothermal Systems).