

# 地殻流体が駆動する地圏環境の資源形成・脱炭素化プロセスの理解とその有効利用

Geo-environmental systems driven by fluid-rock reactions



教授 岡本 敦  
Professor  
Atsushi Okamoto

地圏環境において流体は化学反応や物質・エネルギー移動を促進し、岩石-流体反応はグローバルな物質循環、表層環境、資源形成など、人間社会にも大きな影響を与える。本年は、岩石へ二酸化炭素が継続的に固定されるメカニズムを室内実験から解明し、フィールド調査からその実証を進めている。次世代エネルギーである超臨界地熱資源について、貯留層温度評価手法を開発するとともに、室内実験により超臨界条件下での空隙生成を試みている。また、金属資源や海底生物圏のエネルギー源として重要な海底熱水鉱床について、研究航海による実地調査、熱起電力測定実験、流通式反応実験、機械学習を通して、元素輸送・鉱物析出過程やエネルギー生成機構の解明を進めている。

In geo-environments, fluids facilitate chemical reactions and mass and energy transfer, and fluid-rock reactions have a significant effect on human society, including global geochemical cycles, surface environments, and resource formation. In this year, we have clarified the mechanisms of continuous fixation of carbon dioxide in rocks by laboratory experiments and have validated the mechanisms through field investigations. For supercritical geothermal resources, one of the next-generation energy resources, we have developed a method to evaluate reservoir temperature from drill samples, and we are trying to understand pore-generation mechanisms under supercritical reservoirs by laboratory experiments. We are also investigating the mechanisms of elemental transport, mineral precipitation, and energy generation in submarine hydrothermal deposits through cruise field surveys, thermal electromotive force measurements, hydrothermal flow-through experiments, and machine learning.

## マントル岩石への CO<sub>2</sub> 固定化の自己促進機構の解明

自然界では CO<sub>2</sub> は岩石中に固定され地球内部を循環している。この地圏環境の CO<sub>2</sub> 固定化メカニズムを理解し、大気中の CO<sub>2</sub> 削減技術につなげるために、室内実験及び野外調査に基づく研究を進めている。マントル岩石のアナログ物質である MgO を用いた室内実験により、水や二酸化炭素を吸収する反応の体積変化により亀裂が生じ、浸透性を増大させることで、CO<sub>2</sub> 固定化が加速されることを明らかにした (Fig.1; プレスリリース 2022 年 1 月 18 日)。オマーンオフィオライトなどフィールド調査を行い、破壊を伴う CO<sub>2</sub> 固定化プロセスが地表に露出したマントル岩石でも大規模に起こっていることを示した (Fig.2)。

沈み込む炭素は地球内部にも影響を与える。沈み込み帯深部を再現する反応実験を行い、地殻-マントル境界において、大きな元素移動を伴いながら水や二酸化炭素が固定されることを示し、表層と地球内部をつなぐグローバルな元素循環、及び CO<sub>2</sub> 流体と地震発生との関係を検討している (科研費基盤研究 (S))。

## 超臨界地熱資源と岩石-流体反応による空隙形成

超臨界地熱システムの発達過程と資源量を評価するために、最新の岩石学的温度計を葛根田地熱地帯の掘削時のコアカッティング

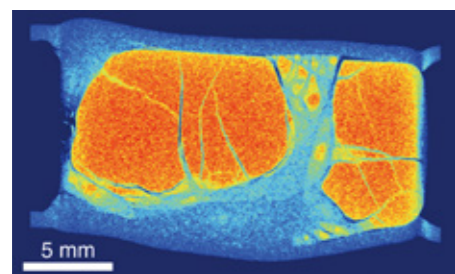


Fig.1 X-ray CT Image of the experimental products showing reaction-induced fracturing during volatile-consuming reaction.

## Self-accelerated CO<sub>2</sub> fixation in mantle rocks

In nature, CO<sub>2</sub> is fixed in rocks and circulates in the Earth's interior. To understand the mechanism of CO<sub>2</sub> fixation in the geosphere and to develop technologies to reduce atmospheric CO<sub>2</sub>, we are conducting research based on laboratory experiments and field studies. Laboratory experiments using MgO, an analogue of mantle rocks, have revealed that CO<sub>2</sub> fixation is accelerated by the volume increase of reactions that absorb water and carbon dioxide, causing cracks and increased permeability (Fig.1; press release January 18, 2022). Field studies, including the Oman Ophiolite, have shown that fracture-associated CO<sub>2</sub> fixation processes occur even on large-scale mantle rocks exposed at the Earth's surface (Fig.2).

Subducting carbon also affects the Earth's interior. Reaction experiments simulating the deep subduction zone have shown that water and CO<sub>2</sub> are fixed at the crust-mantle boundary with large elemental transfers. In addition, the global elemental cycle linking the surface and the Earth's interior and the relationship between CO<sub>2</sub> fluid and earthquake occurrence are being investigated (Grant-in-Aid for Scientific Research (S)).



Fig.2 Field work on carbonate veins in serpentinites within the Oman ophiolite (Jan 2023).



助教 宇野 正起  
Assistant Professor  
Masaaki Uno



助教 ダンダル オトゴンバイヤル  
Assistant Professor  
Dandar Otgonbayar

ス試料に適用した。その結果、熱伝導と対流の効果を示唆する精度の高い連続的な温度プロファイルを得ることに成功した (Fig.3)。この方法は、地熱資源を評価するための精度の高い新たな手法として期待される。さらに、超臨界地熱貯留層の条件下での流体と地殻岩石の反応実験を行い、同位体ラベリングや反応前後の X 線 CT 撮像による空隙形状の解析により、空隙形成を支配する反応条件とそのメカニズムを検討している。このような、地殻の流体反応に伴うナノスケールからフィールドスケールの構造形成と元素移動について、ユトレヒト大学 (オランダ) やメリーランド大学 (アメリカ) との国際的な共同研究を進めている (Fig.4)。

## 海底熱水系の岩石-流体反応と資源形成

日本近海にも数多く存在する海底熱水系は、レアメタルなどの重要な金属鉱床を作るとともに、特異な生態系を支えるエネルギー源としても注目されている。新青丸による小笠原での研究航海によりチムニーと熱水の採取を行った (Fig.5)。チムニー及び黒鉱試料の解析により、硫化物のチムニーは構成鉱物や化学組成によって変化する半導体特性を明らかにした。さらに、黒鉱中の石英粒子について、水熱実験により、水の状態変化に伴って、準安定鉱物から形成したことを明らかにした。

また、海洋底の熱水循環について、鉄の酸化に伴う水素エネルギー発生が温度と岩相により系統的に変化することを実験的に見出すとともに、機械学習を用いて海底熱水変質に伴って元素選択的溶脱・固定が起こっていることを明らかにした。

【受賞】 杉岡純平 (修士課程 2 年) 地球惑星科学連合大会学生優秀発表賞 2022 年 5 月 25 日、高橋美咲 (修士課程 2 年)・松野哲士 (博士課程 1 年) 環境科学研究科優秀発表賞 2022 年 10 月 28 日

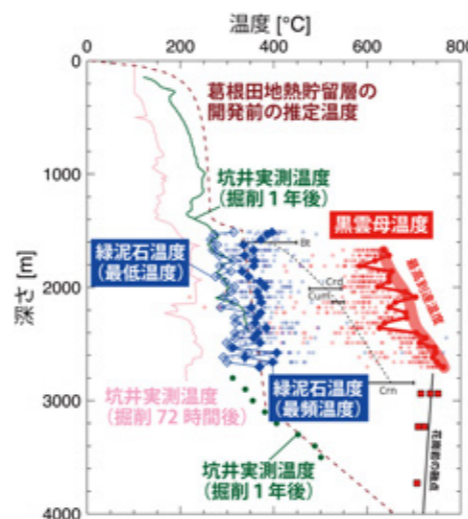


Fig.3 Temperature profile estimated by petrological thermometry along the well of the Kakkonda geothermal field.



Group Photo

## Supercritical geothermal resource and porosity formation induced by fluid-rock reaction

Petrographic thermometry was applied to core cuttings samples from drilling in the Kakkonda geothermal field. As a result, we succeeded in obtaining highly accurate and continuous temperature profiles suggesting the effects of heat conduction and convection (Fig.3). This method is expected to be applicable as a highly accurate and simple method. Furthermore, we are conducting high temperature hydrothermal experiments, and we have revealed the reaction conditions and mechanisms to produce porosity in the supercritical geothermal reservoirs. International collaborations with Utrecht University (the Netherlands) and the University of Maryland (United States) are underway to investigate the linkage between nanoscale to field-scale structures in rocks and element transport associated with fluid reactions in the crust (Fig.4).

## Fluid-rock interaction at seafloor hydrothermal systems and resource formation

Submarine hydrothermal systems, of which there are many in the seas around Japan, are attracting attention as a source of energy that supports unique ecosystems as well as creating important metal deposits such as rare metals. Chimney and hydrothermal samples were collected during a research cruise around the Ogasawara Islands by the Shinsei Maru (Fig.5). Analysis of chimney and black ore samples revealed that sulfide chimneys have semiconducting properties that vary with the constituent minerals and chemical composition. Furthermore, hydrothermal experiments on quartz grains in black ores revealed that they formed via the formation of metastable minerals as a result of changes in water density.

In addition, we experimentally found that the generation of hydrogen energy associated with iron oxidation varies systematically with temperature and lithology in the hydrothermal circulation of the ocean floor, and we clarified that element-selective dissolution and fixation occur with seafloor hydrothermal alteration by using machine learning. [Awards: J. Sugioka (M2): Best Student Presentation Award, JpGU, June 6 2022, M. Takahashi (M1), S. Matsuno (D1): Presentation Award, GSES, October 28 2022]



Fig.4 Workshop on water-rock interaction at Utrecht University, Netherlands (Nov 2022).

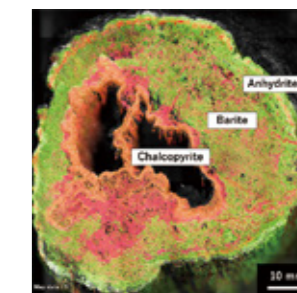


Fig.5 Elemental map of the cross section of Chimney from the Myojin Caldea taken from the scientific cruise to the Ogasawara (Aug 2022).