エネルギー資源学講座　Energy Resources

エネルギー資源リスク評価学分野　Resources and Energy Security

# 地圏環境科学の深化と持続可能なエネルギー資源開発

**Deepening of Geo-Environmental Science and Sustainable Energy Resource Development**

教授 渡邉 則昭
Professor
Noriaki Watanabe

エネルギー資源リスク評価学分野は、環境とエネルギー資源の相互作用に関する様々な研究成果をもとに、地球環境における物質循環に根ざした地圏システムの理解、エネルギー資源の開発にともなう安全保障および環境リスク管理、人の健康と自然環境との関係、地圏環境における土壌や地下水等の汚染問題、さらには有害化学物質のリスク評価に関する総合的な教育・研究を実施する。

本研究室の特色は、地球科学とエネルギー資源工学の学術を基礎として、地球環境および地域環境の保全に資する技術やシステムの研究開発を実施し、教育および研究を通じて学術や社会に貢献することである。学術集会や開発手法の技術公開、プレス発表等を通じて、研究成果を広く学術界および社会に発信している。

We conducted various research in sciences and engineering related to energy resources and environments, such as environmental risk assessments and reduction, and geosciences and geoengineering, in light of energy resource developments and environmental protections for a sustainable future. We have investigated hydraulic, mechanical, and chemical properties of geomaterial such as rocks at a wide range of temperature and pressure conditions, as well as ways to control and utilize them. Our work focuses on the sustainable and profitable production of petroleum and geothermal resources, atmospheric $CO_2$ removal, and $CO_2$ geological storage and mineralization. Recently, we initiated research on a new method for $CO_2$ mineralization, in which an environmentally friendly chelating agent is applied and recycled to efficiently extract calcium from industrial waste for high-purity calcium carbonate production in an alkaline aqueous solution. Furthermore, we initiated new research on enhanced $CO_2$ geological storage and mineralization in basalt using biobased biodegradable chelating agents and atmospheric $CO_2$ removal via enhanced mineral dissolution with natural chelating agents.

## $CO_2$ 利用／誘発地震抑制型エネルギー資源開発技術

$CO_2$ を用いた岩石破砕により地熱貯留層を造成し、造成した貯留層から $CO_2$ で熱抽出を行い発電するカーボンリサイクル $CO_2$ 地熱発電技術の研究開発が JOGMEC により実施されている。当研究室では、この岩石破砕の特徴およびプロセスを室内実験および数値シミュレーションにより解明した（Takuma et al., *Geothermics*）。また、この岩石破砕における欠点を克服するため、新たに $CO_2$ と水を併用した岩石破砕法を発明し（特願 2024-094841）、その特徴および有効性を明らかにした（Pramudyo et al., *Geoenergy Science and Engineering*）。さらに、高圧流体の圧入を最低限にとどめ、誘発地震のリスクへの懸念を低下させるために発明した、環境調和型キレート剤による選択的鉱物溶解を用いた岩石き裂浸透性改善技術（特許 7115692）に関連して、新たに、$CO_2$ 破砕との併用方法を提案するとともに（Pramudyo et al., *Geoenergy Science and Engineering*）、火山岩き裂への適用における pH の影響を明らかにした（Luis et al., *Geothermics*）。

## Creating geothermal reservoirs by injecting $CO_2$ and/or environmentally friendly chelating agents

Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) has conducted research and development of carbon-recycling $CO_2$ geothermal power-generation technology, in which a geothermal reservoir is created by rock fracturing using $CO_2$, and $CO_2$ heat extraction from the created reservoir generates electricity. In our laboratory, the characteristics and processes of $CO_2$ fracturing were elucidated by laboratory experiments and numerical simulations (Takuma et al., *Geothermics*). To overcome the disadvantage of rock fracturing using $CO_2$, a new rock-fracturing method that combines the use of $CO_2$ and water was invented, and characteristics and effectiveness of the method were clarified (Pramudyo et al., *Geoenergy Science and Engineering*). We previously invented a rock-fracture permeability improvement technique using selective mineral dissolution via environmentally friendly chelating agents to minimize the use of high-pressure fluid injection and concern of induced seismicity (patent 7115692). In this year, we newly proposed a way to use this technique in combination with $CO_2$ fracturing (Pramudyo et al., *Geoenergy Science and Engineering*). Moreover, we clarified the importance of pH in the use of this technique for fracture permeability improvement in volcanic rocks (Luis et al., *Geothermics).*

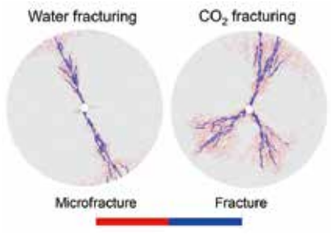


Fig. 1 Water and $CO_2$ fracturing simulations of a volcanic rock under geothermal conditions

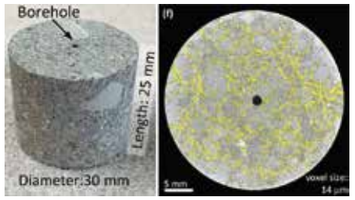


Fig. 2 Water-assisted $CO_2$ fracturing of a volcanic rock under geothermal conditions


Fig. 3 Temperature-swing process for $CO_2$ capture and mineralization using a recyclable chelating agent solution



助教 王 佳婕
Assistant Professor
Jiajie Wang

助教 エコ プラムディヨ
Assistant Professor
Eko Pramudyo

助教 ルイス ホセ サララ サントス
Assistant Professor
Luis José Salalá Santos

Group Photo

## 植物由来・生分解性キレート剤を利用した $CO_2$ 地中貯留・鉱物固定促進法

$CO_2$ の地中貯留・鉱物固条件下における鉱物の溶解挙動に関する基礎的データを所得した（Wang et al., *ACS Omega*; Wang et al., *American mineralogist*）。また、鉱物の溶解を促進するとともに金属イオンを捕捉する植物由来・生分解性キレート剤を利用した革新的 $CO_2$ 地中貯留・鉱物固定促進法（特願 2023-51335）を *Science Advances* 誌上で発表した。

## 再生可能キレート剤を用いた $CO_2$ 回収・鉱物固定技術

再生可能キレート剤の革新的利用により 100℃以下の温度スイング式 $CO_2$ 回収・鉱物固定技術を開発した（特許 7345791）。本技術は、室温での $CO_2$ を吸収させたキレート剤水溶液（抽出液）による産業廃棄物からのカルシウム（Ca）の抽出の促進、抽出液の加熱（100℃未満）による炭酸塩鉱物の製造および $CO_2$ ガス吸収による抽出液の再生からなる（Wang et al., *Journal of Environmental Chemical Engineering*）。本技術は、従来の $CO_2$ 鉱物固定技術のもつ問題を解決するとともに、金属資源の回収も期待され、複数の企業と実用化に向けた共同研究を実施している。

## アミノ酸と水環境を利用した大気中 $CO_2$ 除去システム

ケイ酸塩鉱物の水中での溶解による pH 上昇を利用して、大気中 $CO_2$ の水への溶解を促進できる。一方、アミノ酸（天然キレート剤）は鉱物の溶解を促進可能性がある。そこで、アミノ酸による鉱物溶解促進効果と大気中 $CO_2$ 除去効果を室内実験により検証し、NaCl とアミノ酸が鉱物溶解を促進するのに相乗効果を発見した。また、アミノ酸が豊富に存在する水環境を利用した革新的な大気中 $CO_2$ 除去システムを提案した（Wang et al., *Environmental Science & Technology*）。

## Enhanced $CO_2$ geological storage and mineralization using biobased biodegradable chelating agents

We acquired fundamental data on dissolution behaviors of minerals under the conditions of $CO_2$ geological storage and mineralization (Wang et al., *ACS Omega*; Wang et al., *American mineralogist*). Additionally, we published an innovative method for enhanced $CO_2$ geological storage and mineralization using biobased biodegradable chelating agents that enhance mineral dissolution and trap metal ions in *Science Advances*.

## Enhanced $CO_2$ capture and mineralization process using recyclable chelating agents

An advanced $CO_2$ capture and mineralization process using a recyclable chelating agent solution has been developed (patent 7345791). This innovative approach tackles common challenges in $CO_2$ mineralization, notably the excessive use of chemicals and substantial wastewater generation. The process involves the enhanced extraction of calcium from industrial waste using a $CO_2$-charged chelating agent solution at room temperature, carbonate mineral production by heating the extraction solution (< 100°C), and $CO_2$ capture by the extraction solution for solution regeneration (Wang et al., *Journal of Environmental Chemical Engineering*). This process is currently undergoing practical implementation through joint research with multiple companies.

## Atmospheric $CO_2$ removal system using amino acids and aqueous environments

The dissolution of silicate minerals in water, which increases pH, can be applied for atmospheric $CO_2$ removal, and amino acids, the natural chelating agents, have the potential to boost this process. We experimentally demonstrated the effectiveness of amino acids in enhancing mineral dissolution, revealing a synergistic effect between NaCl and amino acids in enhancing mineral dissolution. Based on the findings, innovative atmospheric $CO_2$ removal systems using amino acids and aqueous environments was proposed (Wang et al., *Environmental Science & Technology*).

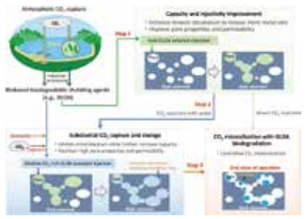

Fig. 4 $CO_2$ geological storage and mineralization using biobased biodegradable chelating agents

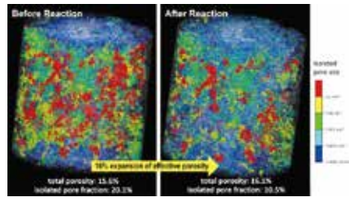


Fig. 5 Improvement of pore properties of basalt using biobased biodegradable chelating agents

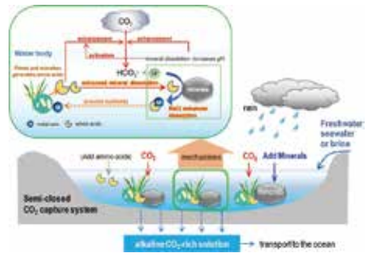


Fig. 6 Atmospheric $CO_2$ removal using amino acids and aqueous environments