

マイクロ波で CO₂吸着材を高速再生 —省エネルギーな二酸化炭素回収技術へ—

ポイント

- ① アミン吸着材(※1)の再生時の加熱に多くのエネルギーを要することが課題です。
- ② アミンが CO₂との反応で生成したイオン種が、マイクロ波(※2)加熱特性を向上させる機構を明らかにしました。
- ③ 従来の伝熱加熱と比較して、マイクロ波加熱では最大 16.5 倍の CO₂脱離速度を達成しました。

概要

カーボンニュートラルの実現に向け、排ガスや大気中から CO₂を選択的に分離回収する技術の高度化が求められています。アミン吸着材は CO₂に対する高い反応性と選択性を有する代表的な回収材料ですが、回収した CO₂を脱離させて再生する工程では、従来の伝熱加熱に伴うエネルギー損失や昇温・冷却時間が課題となります。また、長時間の加熱はアミンの劣化や揮発を招く可能性もあります。このため、CO₂を保持する活性部位へ選択的にエネルギーを与え、短時間で再生できる加熱法と吸着材設計が必要とされています。

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所附属三井化学カーボンニュートラル研究センター兼九州大学大学院工学研究院の椿俊太郎教授、Mahesh Nair 学術研究員（当時）、Obey Gotore 学術研究員、大学院生物資源環境科学府の原理佳子大学院生（当時）、大学院農学研究院の井倉則之教授、および金沢大学の山田秀尚教授らのグループは、CO₂吸着部位をマイクロ波で選択的に加熱し、アミン吸着材を迅速に再生するための材料設計を明らかにしました。構造の異なるアミンについて、誘電特性、電気伝導性および CO₂取込量を評価した結果、CO₂との反応で生じるカルバメートや重炭酸イオンなどのイオン性化学種が、CO₂回収だけでなくマイクロ波エネルギーを熱へ変換する過程にも重要であることを明らかにしました。特にモノエタノールアミン（MEA）は高い CO₂取込量とイオン伝導性を示し、これをシリカ(※3)やゼオライト(※4)に固定化した吸着材では、従来加熱と同一温度で最大 16.5 倍の CO₂脱離速度を達成しました。さらに、担体の細孔構造や誘電特性も発熱と脱離挙動に影響することを示しました。本成果は、アミンと担体の分子設計により、迅速かつオンデマンドな CO₂回収プロセスの構築に貢献するものです。

本研究成果は雑誌「Journal of Physical Chemistry C」に 2026 年 8 月 7 日（金）にオンライン掲載されました。

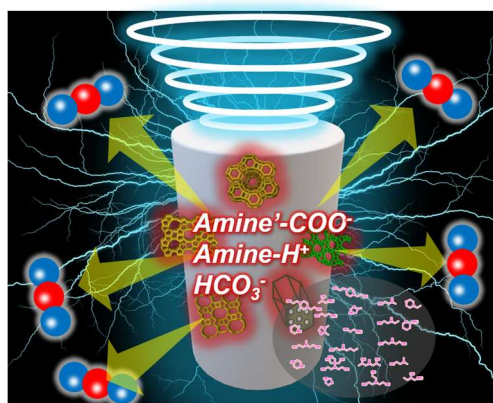


図1. マイクロ波による CO₂脱離加速のイメージ

研究者からひとこと：

本研究では、アミンの分子構造によるマイクロ波吸収性の変化に着目し、CO₂を効率的に脱離できる吸収剤の設計を示しました。今後は、この知見を基盤として、マイクロ波により必要な反応場だけへ選択的にエネルギーを与える技術をさらに発展させたいと考えています。省エネルギーな CO₂回収に加え、マイクロ波による自在な化学反応制御法の確立にも結び付けていきます。

（椿俊太郎）

【研究の背景と経緯】

カーボンニュートラルの実現には、発電所や化学工場などの排ガス、さらには大気中から CO₂ を分離回収する技術の高度化が不可欠です。なかでもアミン系吸収材は、CO₂ に対する高い反応性と選択性を有し、既存設備にも適用しやすいことから有力な材料として研究されています。しかし、CO₂ を吸収したアミンを再利用するためには、一般に約 100 °C まで加熱して CO₂ を脱離させる必要があります。従来の熱再生では、容器、配管、担体および周囲の雰囲気も含めて外部から加熱するため、熱損失が生じやすく、昇温および冷却にも時間を要します。加えて、長時間の加熱はアミンの熱劣化や揮発を促進し、吸着材寿命を低下させる要因となり得ます。すなわち、CO₂ の吸着サイトへ効率的にエネルギーを供給し、迅速に再生する手法の確立が重要な課題です。マイクロ波加熱は、電磁場と相互作用する物質の内部で直接発熱を生じさせるため、外部からの熱伝導に依存しない高速加熱が可能です。特に、CO₂ を吸収したアミン部位のみを選択的に加熱できれば、吸着材全体への過剰な熱負荷を抑えつつ CO₂ を脱離できると期待されます。一方、マイクロ波吸収はアミンの分子構造、生成するイオン種、照射周波数および担体の誘電特性に依存します。そのため、マイクロ波再生に適したアミンと多孔質担体の組合せを決定する一般的な設計原理は、これまで十分に確立されていませんでした。

【研究の内容と成果】

本研究では、第一級、第二級、第三級、環状および芳香族アミンを含む多様なアミン水溶液を対象とし、100～6500 MHz の周波数範囲における複素誘電率を同軸プローブ法（※5）により測定しました。併せて、CO₂ 吸収前後の電気伝導性と CO₂ 吸収量を比較し、分子構造やイオン形成能およびマイクロ波吸収挙動の相関を解析しました。その結果、アミンが CO₂ を取り込むとカルバメートおよび重炭酸イオンなどのイオン種が生成し、溶液の電気伝導性と誘電損失が増大することが確認されました（図 2）。すなわち、CO₂ 吸収に伴うイオン形成によって、アミンがマイクロ波エネルギーを吸収しやすくなります。検討したアミンのなかでも、MEA は高い CO₂ 吸収量とイオン伝導性を示し、マイクロ波選択加熱に最も適した活性成分として選定しました。

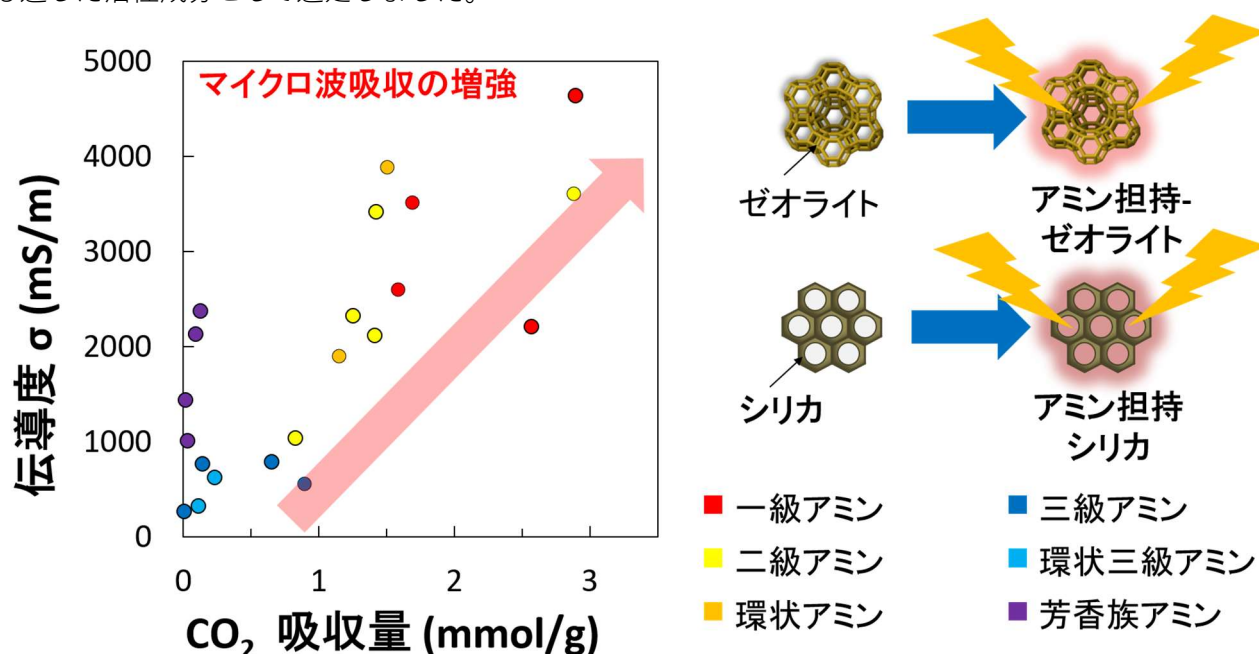


図 2. アミン吸着材のマイクロ波再生における誘電特性

CO₂ 吸収に伴いアミン部位でカルバメートや重炭酸イオンなどのイオン性化学種が形成され、マイクロ波吸収性が向上する。

次に、MEA をメソポーラスシリカおよびゼオライトへ固定化し、アミン吸着材を調製しました。吸着材に対し、マイクロ波を照射し、CO₂脱離挙動を測定しました。比較のため、同じ吸着材を用いた従来の伝熱加熱条件でも脱離挙動を評価しました。その結果、MEA 担持ゼオライトの CO₂脱離速度は、従来の加熱に対してそれぞれ 16.5 倍、14.3 倍および 8.2 倍に増大しました（図 3）。

さらに、マイクロ波照射下では、アミンと CO₂から形成されるイオン性化学種に加え、担体の細孔径、細孔構造、SiO₂/Al₂O₃比および酸性質が発熱と脱離を支配することを見出しました。特に、ゼオライトの酸点とアミンとの酸塩基相互作用、細孔内外における MEA の分布、ならびに担体自体の誘電特性が複合的に作用すると考えられます。したがって、マイクロ波再生用の吸着材では、CO₂吸着容量のみを指標とするのではなく、アミンや担体の分子設計によって、CO₂吸収後に形成されるイオン種のマイクロ波吸収特性を制御する必要があることを示しています。

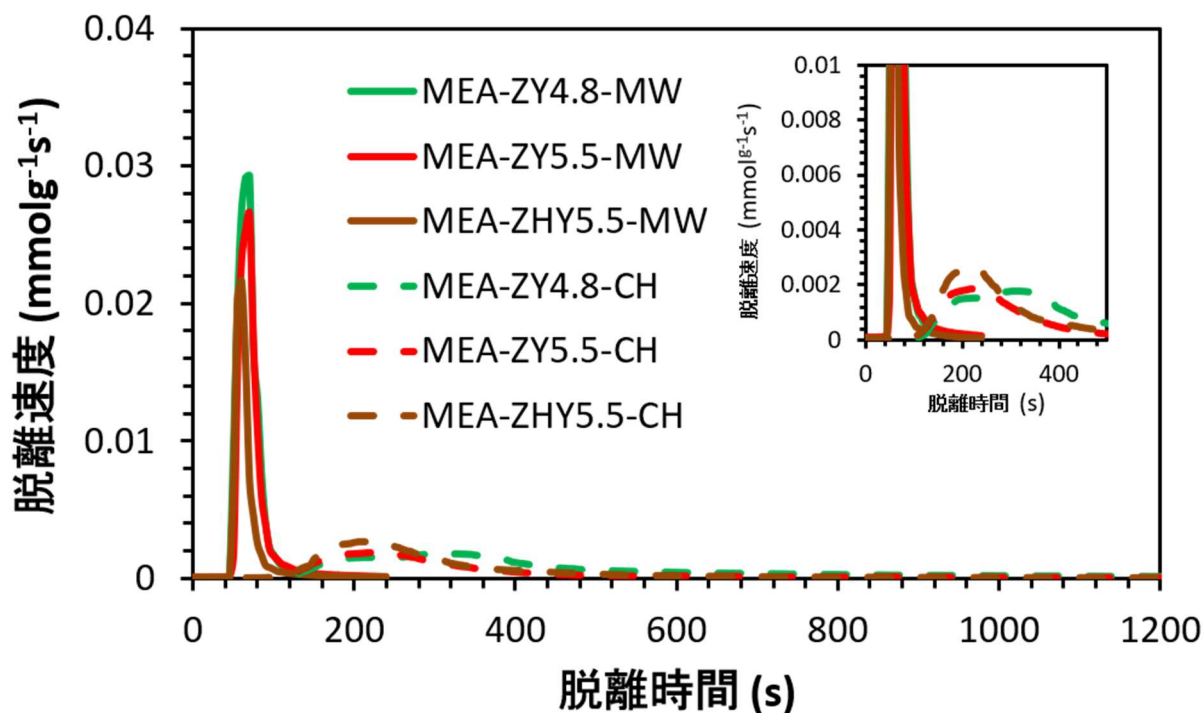


図 3. MEA 固定化固体吸着材のマイクロ波加熱による CO₂脱離挙動

ゼオライトに MEA を固定化したアミン吸着材における CO₂脱離挙動の比較。マイクロ波加熱では、CO₂吸収後に形成されるイオン性化学種や担体の誘電特性により吸着部位が効率的に加熱され、従来の伝熱加熱と同一温度条件で最大 16.5 倍の脱離速度を示した。

【今後の展開】

本研究により、CO₂との反応で生成するイオン種の導電特性、アミンの分子構造、および多孔質担体の誘電特性を組み合わせることで、マイクロ波により迅速に再生可能な固体吸着材を設計する基本指針が得られました。今後は、より多くのアミンと担体の組合せへ本指針を適用し、構造と誘電応答、温度分布および CO₂脱離速度の定量的関係を明らかにする必要があります。また、長期間の吸脱着サイクルにおける耐久性、実排ガス中の水蒸気・酸素・酸性ガス等の影響、アミンの揮発・劣化挙動を検証することが重要です。さらに、マイクロ波発生器から吸着材への電力伝達効率、昇温・冷却時間、一回の温度スイングに要するエネルギーを含むプロセス全体の評価を進めます。これにより、大規模排出源における温度スイング吸着プロセスだけでなく、低濃度・小規模排出源に対応する分散型 CO₂回収装置の高速化および省エネルギー化への展開が期待されます。

【用語解説】

(※1) アミン吸着剤：アミノ基を持つ化合物により、CO₂を化学的に捕集する材料。CO₂吸着後に加熱などでCO₂を放出させ、繰り返し利用できる吸着材。

(※2) マイクロ波：電波の一種で、物質中の分子やイオンを振動・移動させて内部から発熱を生じさせる電磁波。家庭用電子レンジの加熱にも用いられ、材料や反応場の選択加熱にも応用される加熱方式。

(※3) シリカ：二酸化ケイ素（SiO₂）を主成分とし、多孔質化により大きな表面積を持たせられる材料。本研究では、アミンを固定化するための担体。

(※4) ゼオライト：規則的な細孔構造を持つアルミノケイ酸塩の多孔質材料。細孔径や酸性質を調整でき、吸着材や触媒の担体として広く利用される材料。

(※5) 同軸プローブ法：同軸ケーブル状のプローブを試料に接触させ、マイクロ波帯における誘電率などを測定する手法。液体や粉体などのマイクロ波吸収特性の評価に用いられる測定法。

【謝辞】

本研究は、三井化学株式会社、JSPS 科研費 基盤研究 (A) (JP25H01202)、基盤研究 (B) (JP22H03779)、挑戦的研究 (萌芽) (JP23K18546、JP21K19859)、日本鉄鋼協会カーボンニュートラル研究助成の支援を受けて実施しました。

【論文情報】

掲載誌：The Journal of Physical Chemistry C

タイトル：Rational Design of CO₂ Sorbents Based on Microwave-Matter Interaction for Rapid Dielectric Heating Regeneration

著者名：Mahesh Muraleedharan Nair、Rikako Hara、Obey Gotore、Hidetaka Yamada、Noriyuki Igura、Shuntaro Tsubaki

D O I : 10.1021/acs.jpcc.6c02465

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所附属三井化学カーボンニュートラル研究センター、九州大学大学院工学研究院

教授 椿 俊太郎（ツバキ シュンタロウ）

TEL：092-802-2746

Mail：tsubaki.shuntaro.318@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp