東北大学 TOHOKU UNIVERSITY　慶應義塾大学　茨城大学 Ibaraki University

Press Release

2025 年 12 月 3 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学
慶應義塾大学
国立大学法人茨城大学

水に強くリサイクルできる RAMOF 電極を実証
—水系デバイスの材料としての幅広い展開に期待—

【発表のポイント】

- 酸性水溶液中でも高い耐久性をもち、材料全体で蓄電できる金属有機構造体（RAMOF: Redox-Active Metal-Organic Framework）を電極材料として初めて実証しました。
- RAMOF は、電極材料として使用後に、炭酸塩水溶液に入れることで原料へと分解され、再合成することで温和にリサイクルできることを実証しました。
- 水系デバイス（注１）の材料としての RAMOF の幅広い機能開拓が期待されます。

【概要】

RAMOF は、金属と有機分子が配位結合（注２）によって連続的につながった無数の空孔をもち、材料内に酸化還元して蓄電できる部位をもつ多孔質材料であり、電池の電極材料への応用が期待されています。しかし、RAMOF を構成する配位結合は、水、特に酸で分解されやすいことが多いため、酸性水溶液を用いた水系デバイスの材料への応用は難しいとされていました。

東北大学 多元物質科学研究所の岡 弘樹 准教授（茨城大学 カーボンリサイクルエネルギー研究センター 特命研究員 兼任）、笠井 均 教授、大窪 航平 助教、材料科学高等研究所（WPI-AIMR）の西原 洋知 教授（多元物質科学研究所 兼任）、同大学院工学研究科 バイオ工学専攻の 赤井 亮太 大学院生と北嶋 奨羽 大学院生、慶應義塾大学 理工学部 応用化学科の芹澤 信幸 准教授らの共同研究チームは、酸性水溶液中でも構造が安定な UiO-66 に、酸化還元活性な *p*-ヒドロキノンを導入した RAMOF（UiO-66-$(OH)_2$（注３））を合成しました。本研究では、酸性水溶液を電解液とした水系二次電池（注４）の中で、RAMOF が高い耐久性をもち、材料全体で蓄電でき、電池として使った後に UiO-66-$(OH)_2$ を温和に分解し、再使用できること（リサイクル性）を初めて実証しました。本研究は、RAMOF の、水系デバイスの材料への幅広い応用を拓くことが期待されます。

本研究成果は、2025 年 12 月 1 日付けで、科学誌 Nature Communications に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

RAMOF は、金属と有機リンカーから成る多孔質材料であり、大きな空孔内に電解液が染み込むことでイオンを効率的に輸送でき、大面積で電気化学反応できることが見込まれるため、電極材料としての応用が期待されています。しかし、RAMOF は、水、特に酸で分解されやすいことが多い配位結合で構築されるため、酸性水溶液を用いた水系デバイスの材料への応用は難しいとされていました。

今回の取り組み

酸性水溶液中で分解せずに安定な RAMOF を実証すべく、図 1 左上に示すように、配位結合の中でも強い結合である Zr-O 結合から成る UiO-66-$(OH)_2$ を作製しました。電解液として使用する 0.05 M 硫酸水溶液中に 24 時間静置した後でも、高い結晶性（注５）を保っており、酸性水溶液中で構造が安定であることが示されました。

負極材料に UiO-66-$(OH)_2$、正極に白金/炭素触媒、電解液に酸性水溶液を用いた水系空気二次電池を作製し、その性能を評価しました。その結果、図 2 左に示すように、同電池の放電容量は理論容量（注６）の 99%以上に達し、図 2 右に示すように、100 回の充放電サイクル測定後も初期の放電容量の 99%の放電容量を維持しました。このことから、UiO-66-$(OH)_2$ は酸性水溶液中での電極材料として高い性能をもつことが示されました。

さらに、図 3 に示すように、UiO-66-$(OH)_2$ は、電池の電極材料として使用後に、炭酸塩水溶液に入れることで原料へと分解され、再合成できました。再合成した UiO-66-$(OH)_2$ は、理論容量通りに蓄電できており、UiO-66-$(OH)_2$ の温和なリサイクルを実証しました。

今後の展開

本研究では、RAMOF が酸性水溶液中でも高い耐久性をもち、材料全体で蓄電できることを初めて実証しました。さらに、電池の電極材料として使った後の RAMOF の温和な条件でのリサイクルも達成しました。本研究の成果は、RAMOF の水系デバイスの材料としての幅広い応用を拓くものと期待されます。

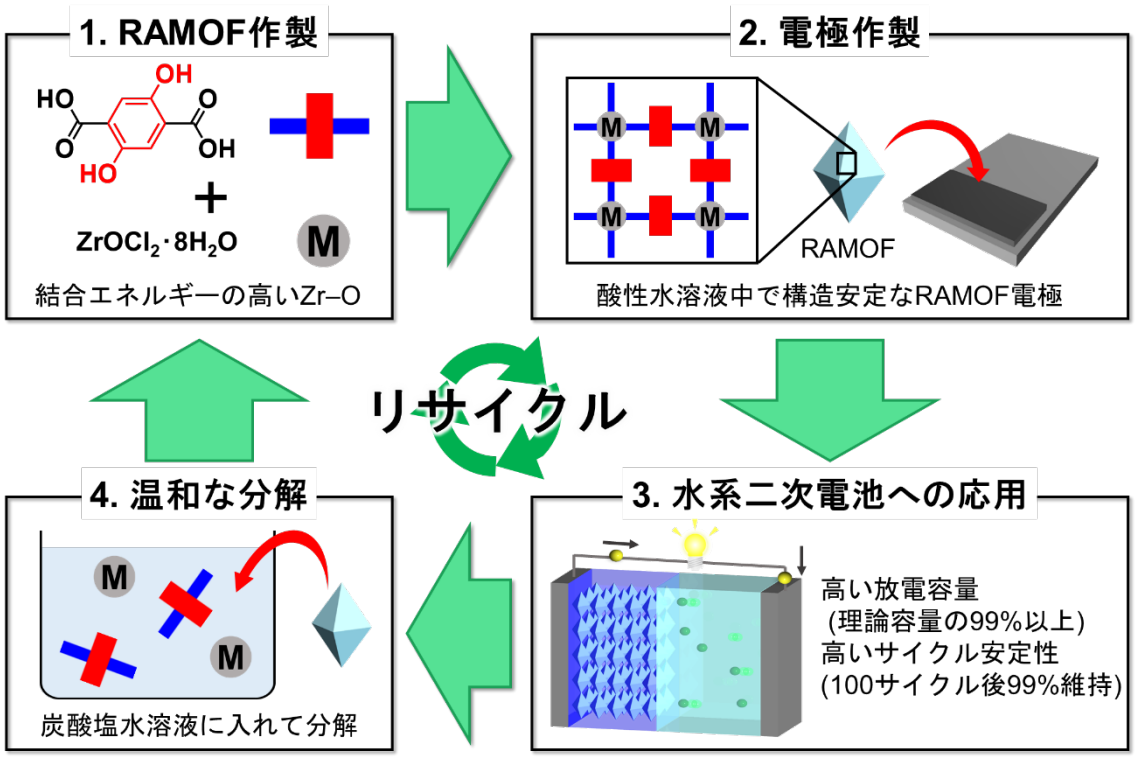

図 1. RAMOF の合成から電池利用、分解、再使用までの一連の概要

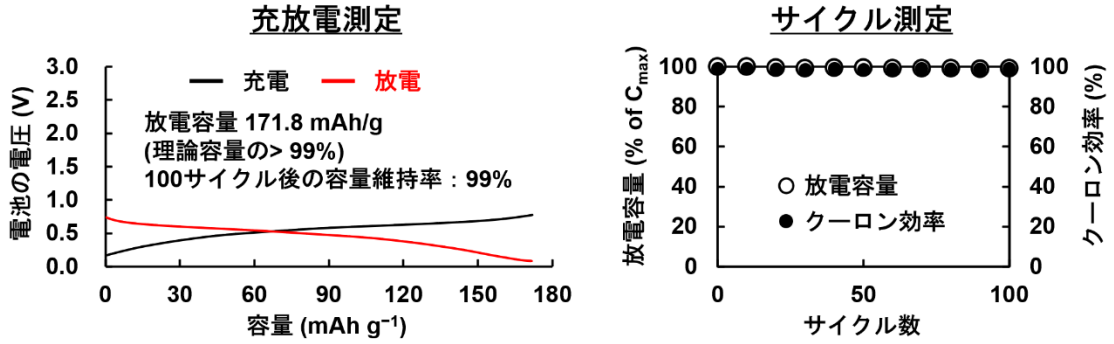

図 2. RAMOF を用いた水系空気二次電池の充放電曲線

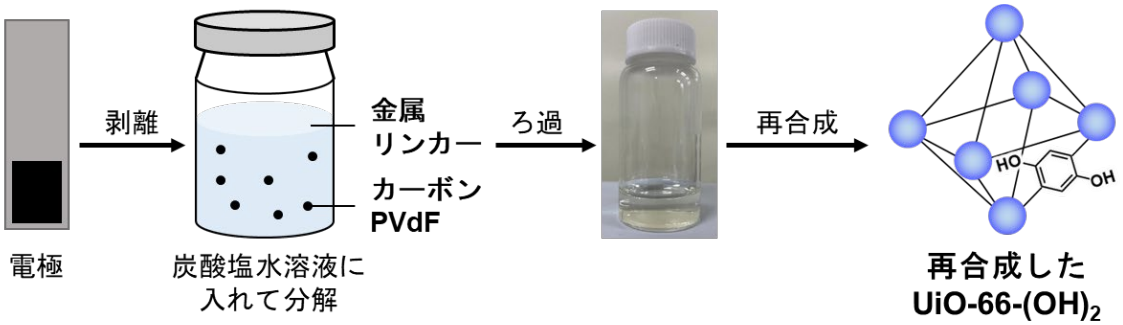

図 3. RAMOF の温和な条件での分解と再合成の概要図

【謝辞】
本研究は、科研費・学術変革領域研究（B）「新奇活イオン液体の設計・合成と「応用電気化学」への展開」（注７）（JP23H03827）、科研費・基盤研究（B）「持続可能なクリーンエネルギー製造に向けた革新的な有機固体触媒の創製」（JP24K01552）、科研費・特別研究員奨励費「イオン性の高い水素結合に基づく有機レドックス分子の自在な配列制御と機能開拓」（JP24KJ1576）の支援を受けて実施されました。また、掲載論文は「東北大学 2025 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業」により Open Access となっています。

【用語説明】
注1. 水系デバイス：水環境で活用できるデバイス。
注2. 配位結合：一方の原子が 2 個の電子（電子対）を供出して形成される結合。水によって金属-有機リンカーの配位結合が、金属-水に置き換わることで結合が切断されやすい。
注3. UiO-66-$(OH)_2$：金属イオンとして Zr をもつ RAMOF の一種。
注4. 水系二次電池：電解液に水溶液を用いた、充電して繰り返し使える電池。
注5. 結晶性：分子が規則的なパターンで配置されている状態。
注6. 理論容量：電極材料が化学反応によって理論上、最大で蓄えることができる電気の容量。
注7. 科研費・学術変革領域研究（B）「新奇活イオン液体の設計・合成と「応用電気化学」への展開」：反応活性を有するイオン（活イオン）を含む液体材料を対象とした研究領域。

学術変革領域研究B
活イオン液体の科学

【論文情報】
タイトル：Water-resistant redox-active metal–organic framework
著者：赤井 亮太、北嶋 奨羽、大窪 航平、芹澤 信幸、西原 洋知、笠井均、岡弘樹*
*責任著者：東北大学 多元物質科学研究所　准教授　岡弘樹
掲載誌：Nature Communications
DOI: 10.1038/s41467-025-65849-y
URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-65849-y

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学 多元物質科学研究所
准教授　岡 弘樹（おか こうき）
TEL: 022-217-5585
Email: oka@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）
東北大学 多元物質科学研究所 広報情報室
TEL: 022-217-5198
Email: press.tagen@grp.tohoku.ac.jp

慶應義塾広報室
TEL: 03-5427-1541
Email: m-pr@adst.keio.ac.jp

茨城大学 広報・アウトリーチ支援室
TEL：029-228-8008
Email：koho-prg@ml.ibaraki.ac.jp