



2025 年 9 月 19 日

NIMS（国立研究開発法人物質・材料研究機構）／ 東洋炭素株式会社

1 Wh 級の積層型リチウム空気電池を開発

～「高出力」「長寿命」「大型化」を同時に実現するカーボン電極を開発～

NIMS は、東洋炭素との共同研究により、高出力・長寿命・大型化対応を同時に実現するカーボン電極を開発することで、1 Wh 級の積層型リチウム空気電池の安定作動に成功しました。本研究においては、東洋炭素が多孔質カーボン材料「クノーベル®」で培った製造技術を駆使し開発した材料に対して、NIMS が開発してきた自立膜化技術を適用することで、電池セルサイズの大型化が可能となりました。これにより産業レベルでの応用が現実的になったことは、リチウム空気電池の実用化を大きく進展させる成果といえます。この研究成果は、9 月 18 日に Cell Reports Physical Science 誌のオンライン版に掲載されました。

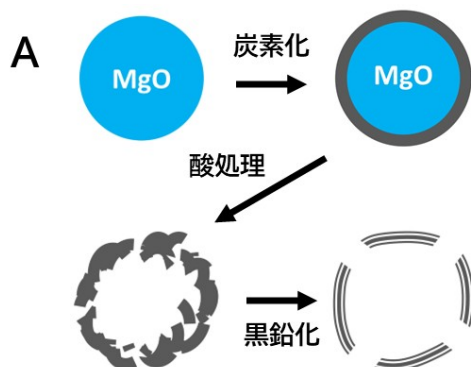
研究成果の概要

■ 従来の課題

リチウム空気電池は、理論上の重量エネルギー密度が現在主流のリチウムイオン電池の数倍に達する、「究極の二次電池」として注目されています。NIMS の研究グループは、2021 年に 500 Wh/kg 級という、現行のリチウムイオン電池のエネルギー密度の 2 倍以上の重量エネルギー密度を持つリチウム空気電池を開発しました。しかし、実用化に向けては、高出力性能の確保やサイクル寿命の向上など、複数の技術的課題を克服する必要があります。加えて、これまでに報告されているリチウム空気電池の電力量の多くは 0.01 Wh 以下にとどまっており、実用的な電池としての研究開発を進めるためには、電池セルの大型化に関する検討が不可欠となっています。

■ 成果のポイント

NIMS と東洋炭素による共同研究グループは、リチウム空気電池の実用化に向けて、「高出力」「長寿命」「大型化」を同時に実現するカーボン電極の開発に成功しました。本研究では、メソスケール構造が制御された多孔質カーボン材料「クノーベル®」に対し、NIMS がこれまでに確立してきた自立膜化技術を適用。これにより、細孔構造が階層的に制御されたカーボン電極の作製が可能となり、リチウム空気電池の高出力運転を実現しました。さらに、カーボン電極の結晶性を高めることで耐久性が向上し、電池の長寿命化にも成功しました。また、10 cm 角以上の大面積電極の作製にも対応可能な製造プロセスを確立し、大型セルへの応用も視野に入れた技術基盤を確立しました。これらの成果を統合し、4 cm 角サイズの電極を用いた 1 Wh 級の積層型リチウム空気電池を試作し、安定した動作を確認しました。



B

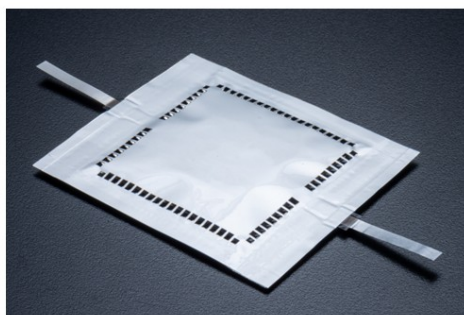


図 1 : (A) メソスケール細孔が制御されたカーボン材料合成スキームの概念図。(B) 本研究で作製した 1 Wh 級の積層型リチウム空気電池の外観

■将来展望

本研究で開発された高性能カーボン電極は、リチウム空気電池の実用化に向けた鍵となる「高出力・長寿命・大型化」という三つの課題を同時に克服する成果です。リチウム空気電池は、軽量かつ大容量であることから、電動航空機や電気自動車など、社会の電動化を進めていくうえで、不可欠な分野での活用が期待されています。しかし、これまでその実用化は技術的課題により限定されていました。本研究により、電池セルの大面积化が可能となり、産業レベルでの応用が現実的になったことは、リチウム空気電池の実用化を大きく進展させる成果といえます。

■その他

- ・本研究は、NIMS エネルギー・環境材料研究センター電気化学スマートラボチームの松田翔一チームリーダー、DUTTA Arghya NIMS 特別研究員、亀田隆 NIMS エンジニア、東洋炭素近藤照久記念東洋炭素総合開発センター森下隆広 エグゼクティブフェローらを中心とした共同研究チームによって行われました。
- ・本研究成果は、2025 年 9 月 18 日に Cell Reports Physical Science のオンライン版に掲載されました。

研究の背景

リチウム空気電池^{※1}は、非常に高い重量エネルギー密度^{※2}を有しており、軽量性が求められるドローンや IoT 機器に加え、電気自動車や家庭用蓄電システムなど、幅広い分野への応用が期待されています。リチウム空気電池は、正極活物質として空気中の酸素を、負極には金属リチウムを用いることで、理論上の重量エネルギー密度が現在のリチウムイオン電池の数倍に達する「究極の二次電池」とされています。NIMS は 2021 年、重量エネルギー密度が 500 Wh/kg 級という、リチウムイオン電池を大きく上回るリチウム空気電池の開発に成功しました（「500Wh/kg 級リチウム空気電池を開発」2021 年 12 月 15 日プレスリリース）<https://www.nims.go.jp/press/2021/12/202112150.html>）。しかし、実用化に向けては、サイクル寿命の向上、電池セルの大型化、高出力性能の確保といった複数の技術的課題を克服する必要があります。

リチウム空気電池は、多孔性カーボン膜（正極）、セパレータ、金属リチウム箔（負極）を積層した構造を持ちます。放電時には、負極の金属リチウムが電解液中に溶出し、正極で酸素と反応して過酸化リチウム（ Li_2O_2 ）が生成・析出します。充電時には、この反応が逆方向に進み、正極の過酸化リチウムが分解されて酸素が放出され、負極には再び金属リチウムが析出します。過酸化リチウムは電子伝導性が低いため、反応場となる正極には、比表面積および細孔容積の大きい多孔性カーボン電極が必要とされます。リチウム空気電池の持つポテンシャルを最大限に引き出すためには、適切に設計された細孔構造を有するカーボン電極の開発が不可欠です。特に、高出力を実現するには、酸素やリチウムイオンの輸送経路として機能するマクロスケールの細孔を電極内に適切に形成する必要があります。一方で、長寿命化の観点からは、カーボン電極自体の高い耐久性が重要となります。NIMS の研究グループはこれまでの研究で、カーボン電極の分解が電池寿命のボトルネックであることを明らかにしており（<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202300896>）、高耐久性を備えた電極材料の開発が不可欠であると認識してきました。これまでも、高出力特化型、耐久性重視型、大面积化対応型など、さまざまな目的に応じたカーボン材料の開発が進められてきましたが、これらの要求をすべて満たす電極材料は実現していませんでした。特に、大面积電極の作製に適したプロセスの確立は、リチウム空気電池の実用化に向けた研究開発を進めるうえで、極めて重要な課題となっています。

研究内容と成果

本研究では、東洋炭素が有するメソスケール細孔制御技術と、NIMS が確立してきた多孔性カーボン自立膜作製技術を統合することで、「高出力・長寿命・大型化」という三つの課題を同時に解決可能なカーボン電極の開発に取り組みました。まず、カーボン粉末の作製において、 MgO 粒子を鋳型として使用した「テンプレート法」^{※3}により、メソスケール細孔構造を制御したカーボン材料を作製しました。さらに、リチウム空気電池に最適な細孔サイズとなるよう、メソ細孔径のチューニングを実施しました。このカー

ボン粉末に対して、適切な温度条件下で熱処理を施すことで黒鉛化を促進し（図 A）、材料の結晶性と耐久性を向上させることに成功しました。これにより、長寿命化に貢献するカーボン電極材料の基盤を確立しました。

次に、開発したカーボン粉末に対して、NIMS が確立してきた自立膜形成プロセスを適用しました。具体的には、カーボン粉末を主成分としたスラリーを調製し、ドクターブレード法^{※4}で塗工。その後、非溶媒誘起相分離法^{※5}を用いることで、膜内部にマクロスケールの細孔構造を導入しました。このように形成されたマクロスケールの細孔は、電極内の酸素やリチウムイオンの輸送パスとして機能し、電池の高出力運転を可能とします。このような一連のプロセスにより得られた多孔性カーボン自立膜は、94%という高い空隙率を持ちながらも、機械的強度に優れ、電極としての成形性とスケラビリティを兼ね備えた特徴を有しています。

こうして作製したカーボン電極を正極に用いたリチウム空気電池を作製し、その充放電特性を評価しました。その結果、1.5 mA/cm²という高い電流密度下においても、150 サイクル以上の安定な充放電動作を実現しました（図 B）。また、過去に報告された他のリチウム空気電池と比較しても、1 mA/cm²以上の高電流密度領域において最も長いサイクル寿命を達成しており、性能面で大きなブレイクスルーを示しています（図 C）。

さらに、本研究で確立したカーボン電極の作製プロセスは、10 cm 角以上の大面積カーボン電極にも対応可能であり、リチウム空気電池の大型化に適したスケラブルな技術です。実際に、4 cm 角サイズの電極面積を有する積層型リチウム空気電池セルを試作しました。本電池は、電力量^{※6}として 1 Wh 以上を実現しました。特筆すべきは、このような大型セルにおいても、従来の小型電池と同等の電池性能が確認された点です。これら一連の成果は、リチウム空気電池の実用化に向けた研究開発において、重要なステップを達成したものと位置づけられます。

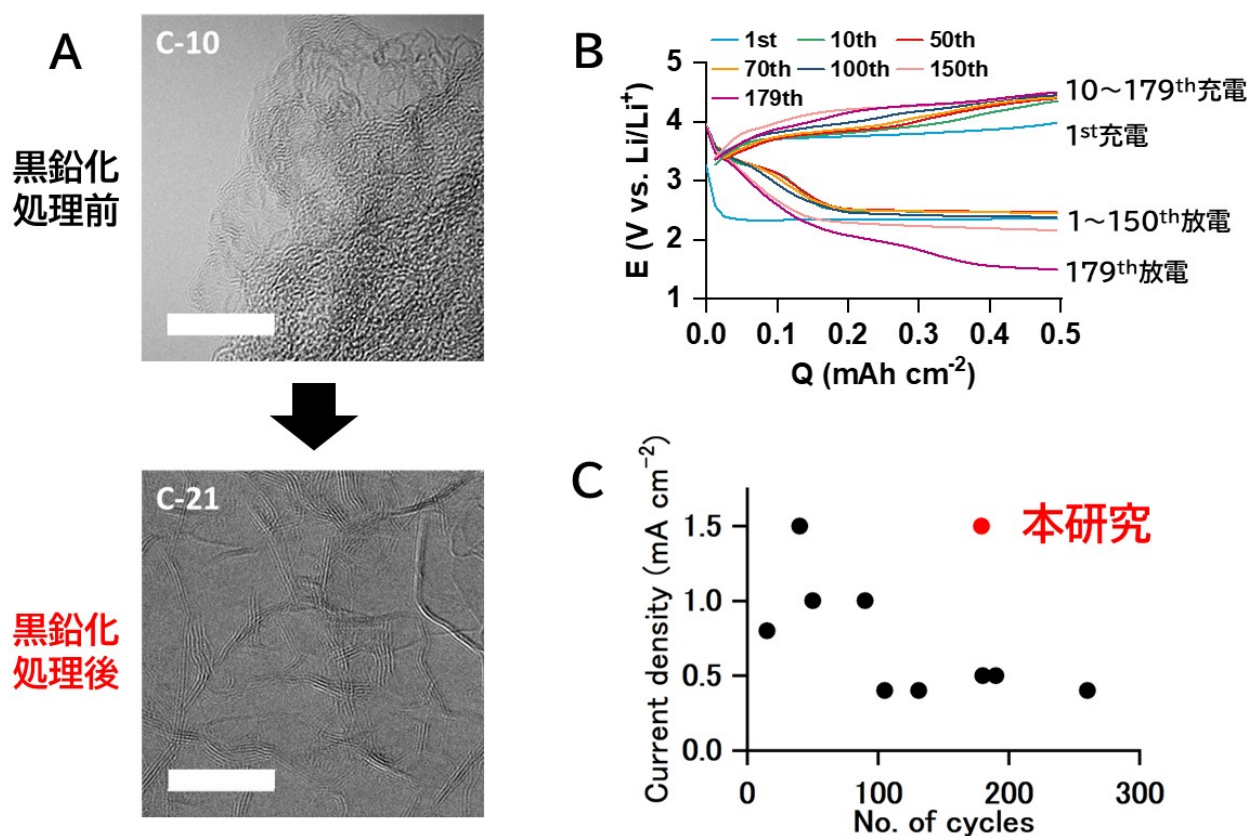


図 2 : (A)カーボン粉末の TEM 像、スケールバー : 10 nm、黒鉛化処理後においては、写真中の平行線として層状構造が認識できる。(B)1.5 mA/cm²条件におけるリチウム空気電池の性能評価結果。(C)これまで報告されているリチウム空気電池との性能比較

今後の展開

本研究で開発された高性能カーボン電極は、リチウム空気電池の実用化に向けた鍵となる「高出力・長寿命・大型化」という三つの課題を同時に克服する成果です。リチウム空気電池は、軽量かつ大容量であることから、電動航空機や電気自動車な

ど、社会の電動化を進めていくうえで、不可欠な分野での活用が期待されています。しかし、これまでその実用化は技術的課題により限定されていました。本研究により、電池セルの大面积化が可能となり、産業レベルでの応用が現実的になったことは、リチウム空気電池の実用化を大きく進展させる成果といえます。

■掲載論文

題目	Hierarchically Porous Graphitized Carbon Membrane for 1 Watt-Hour Class Rechargeable Lithium-Oxygen Pouch Cells
著者	Arghya Dutta, Takashi Kameda, Emiko Mizuki, Taiga Ozawa, Shoji Yamaguchi, Junji Takada, Yuuka Nakajima, Takahiro Morishita, and Shoichi Matsuda
雑誌	Cell Reports Physical Science
DOI	doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102841
掲載日	2025 年 9 月 18 日

■用語解説

※1 リチウム空気電池

空気中の酸素を正極活物質とし、金属リチウム負極と非水系電解液からなる二次電池。理論エネルギー密度が現行のリチウムイオン電池の数倍に達する「究極の二次電池」として知られています。重量エネルギー密度が圧倒的に大きいことから、軽量性が重視されるドローンや IoT 機器、さらには電気自動車や家庭用蓄電システムなど、幅広い分野への応用が期待されます。

※2 重量エネルギー密度

単位重量当たりの電池の容量。Wh/kg の単位で表されます。この値が大きいほど、より多くのエネルギーを電池に蓄えることができます。

※3 MgO 粒子を鋳型とした「テンプレート法」

特定の構造を持つ物質（鋳型）を使って、その形状を転写するように目的の材料を合成する手法。MgO は高温安定性や除去の容易さから鋳型として用いられる。東洋炭素は、「クノーベル®」に代表される多孔質カーボン製品群開発に関して高い技術力を有する (<https://www.toyotanso.co.jp/Products/cnovel/>)。

※4 ドクターブレード法

液体状のスラリーを基板上に均一な厚さで塗布するためのコーティング技術。特に、リチウムイオン電池の電極材料の製造に広く用いられており、膜厚の制御が容易であることや、スケールアップしやすいことが大きな特徴。

※5 非溶媒誘起相分離法

高分子を含む溶液を、非溶媒と接触させることで相分離を起こさせ、固体膜などを形成する方法。膜形成技術の一つ。NIMS では、本手法を多孔性カーボン自立膜の作製に応用する技術をこれまでに確立し、リチウム空気電池用電極として利用する研究を進めてきた (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386421002101>)。

※6 電力量

電池がどれだけのエネルギーを出せるか（蓄えているか）を表す。Wh の単位で表され、この値が大きいほど、より多くのエネルギーを電池に蓄えることができます。

研究内容について	NIMS エネルギー・環境材料研究センター 電気化学スマートラボチーム 松田翔一 チームリーダー E-mail: MATSUDA.Shoichi@nims.go.jp TEL: 029-860-4637
	東洋炭素 近藤照久記念東洋炭素総合開発センター 森下隆広 エグゼクティブフェロー E-mail: tmorishita@toyotanso.co.jp
報道・広報について	NIMS 国際・広報部門 広報室 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017
	東洋炭素 経営企画部 IR広報グループ https://www.toyotanso.co.jp/Contact/

NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、国内で唯一、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。世界を構成する様々な「物質」。その中で私たちの生活を支えているのが「材料」です。その材料も、大きくは有機・高分子材料、無機材料に分類でき、無機材料はさらに金属材料とセラミックス材料とに分けられます。石器時代から産業革命を経て現代まで、人類の発展はこの材料の進歩とともにありましたが、近年では、地球規模の環境や資源問題の解決手段のひとつとしても注目が高まっています。NIMS はその物質・材料に関する研究に特化した国立研究開発法人として、「材料で、世界を変える」をテーマに、未来を拓く物質・材料の研究に日々取り組んでいます。

【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>