

酸素と水から環境にやさしい酸化剤を創出！ 安全な水と衛生のための持続可能なソリューション

1. 概要

東京都立大学大学院都市環境科学研究科の天野史章教授と榎本和真（大学院生）らの研究グループは、酸素と水を使って環境にやさしい酸化剤〔1〕である「過酸化水素（ H_2O_2 ）」を効率的に合成する新しい技術を開発しました。この技術は、再生可能エネルギーを活用して二酸化炭素を一切排出せずに H_2O_2 水溶液を製造するものです。 H_2O_2 は消毒や水処理など幅広い用途に利用され、その分解後には水と酸素しか残らないため環境負荷が極めて低い化合物です。持続可能かつ経済的な方法で H_2O_2 を製造できれば、地球規模の水や衛生の課題解決への可能性が広がります。

H_2O_2 は、消毒、漂白、廃水処理など多方面で利用される重要な物質ですが、従来の製造工程では大量の温室効果ガスが排出されるという課題がありました。また、電解反応による製造方法では電解質（イオンや酸・塩基）などの不純物が混入し、使用用途が制限されることも問題でした。

今回、東京都立大学の研究グループは、多孔質な構造をもつ電解質膜〔2〕を活用して、原料となる酸素と水がそれぞれ高濃度で電極触媒に近接できる新しい電解反応装置を設計しました。この反応装置を用いることによって、空気中の酸素と水だけを原料として、不純物を含まない H_2O_2 水溶液を高効率で合成することに成功しました。さらに、50 時間以上にわたり濃度 5,000 mg/L の H_2O_2 水溶液を連続的に製造できることを実証しました。

この技術は、分散型の再生可能エネルギーを活用でき、どこでも容易に入手可能なありふれた原料のみを使うため、必要な場所で必要な濃度や量だけを製造できる地産地消型の取り組みを推進するものです。 H_2O_2 の製造時だけでなく、在庫管理や配送の際の CO_2 排出も削減します。安価な H_2O_2 水溶液は、SDGs の目標 6「すべての人々に水と衛生の利用可能性を確保する」に対する解決策（ソリューション）として期待されます。

本研究成果は、2025 年 1 月 23 日付けで Elsevier 社が発行するオープンアクセス誌「Materials Today Catalysis」でオンライン無料公開されました。

2. ポイント

- 多孔質電解質膜を用いた独自の装置設計により、酸素を効率よく反応させ不純物ゼロの H_2O_2 を合成
- 水処理に十分な濃度である 5,000 mg/L の H_2O_2 水溶液を長時間にわたって連続で生成することを実証
- 太陽光や風力などを利用して、地球に優しい酸化剤である H_2O_2 の地産地消型製造を可能に

3. 研究の背景

過酸化水素 (H_2O_2) は、私たちの生活に欠かせない重要な化学物質です。紙の漂白、消毒、化学製品の製造、そして廃水处理など、多くの分野で使用されています。また、 H_2O_2 は分解後に水と酸素だけを残す「クリーンな酸化剤」としても注目されており、将来的には燃料電池の酸化剤としての利用も期待されています。 H_2O_2 の需要は世界的に増加の一途をたどっていますが、現在の製造方法にはいくつかの課題が存在します。

現在、市場に出回る H_2O_2 の95%以上は、「アントラキノン法」で製造されています。この方法では、大量の温室効果ガスが排出されるだけでなく、製造された H_2O_2 を高濃度 (70%) まで濃縮する必要があり、輸送時に爆発のリスクが伴います。しかし、実際の用途では10%以下の低濃度 H_2O_2 が求められることがほとんどです。例えば、水処理では0.5% (5,000 mg/L) 程度の濃度で十分対応できます。このような現状を踏まえ、必要な場所で必要な量を作るオンサイト型の H_2O_2 製造技術が求められています。この技術が実現すれば、輸送や貯蔵時のリスクを軽減し、 CO_2 排出量の削減にもつながります。

H_2O_2 を生成する方法の一つとして、酸素を還元する電気化学的手法が注目されています。この方法では、酸素 (O_2) を水素イオン (H^+) や電子 (e^-) と反応させて H_2O_2 を合成します ($\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$)。電力として再生可能エネルギーを用いれば、カーボンニュートラルな合成法が実現可能となります。現在、アルカリ性条件での H_2O_2 の電解合成は商業化されていますが、不純物を含まない中性条件での H_2O_2 合成技術はまだ課題が残っています。高純度な H_2O_2 水溶液を生成するためには、電解質膜 (特定のイオンを通す膜) が重要な役割を果たします。しかし、従来の市販電解質膜では高効率化が難しいという問題がありました。東京都立大学の研究グループは、この課題を解決するために、従来にはないアイデアを取り入れた「多孔質電解質膜」を活用した電解反応装置を開発しました。この革新的な技術により、 H_2O_2 の合成効率を向上させることに成功しました。

4. 研究の詳細

東京都立大学の研究グループでは、細かい穴がたくさん空いた膜状の素材を用い、これを水素イオン伝導性のフッ素系樹脂で機能化した「多孔質電解質膜」を開発しました (図1)。この膜は、水素イオンを効率よく運ぶだけでなく、酸素のような気体を通す一方で液体の水はほとんど通さないというユニークな特性を実現しています。この「多孔質電解質膜」が重要な構成要素となる電解反応装置の設計により、 H_2O_2 合成の電解反応において高い効率と安定性を両立することが可能となりました。

従来の燃料電池や水電解装置では、電解質膜を通じた他の物質の移動 (クロスオーバー) がエネルギー効率を低下させる課題として知られていました。しかし、今回の研究では、このクロスオーバー現象を逆手に取り、新しい電解反応装置の設計に活用しました (図2)。酸化反応を行う陽極 (アノード) と還元反応を行う陰極 (カソード) の二つの領域を仕切るための電解質膜の代わりとして、新たに開発した多孔質電解質膜を導入しています。陽極には水蒸気を含む湿らせた酸素ガスを供給し、水蒸気を分解して酸素を発生させます。この反応を促進する触媒としては、酸化イリジウムを使用しました。このとき陽極に供給した酸素は、多孔質電解質膜を透過して陰極に拡散します。陰極には純水を供給し、酸素分子の還元で生成した H_2O_2 を回収します。この酸素分子の還元反応にはコバルト触媒を採用しました。また、生成された H_2O_2 が効率よく回収できるよう陰極側の親水性を高める工夫を施しました。なお、多孔質電解質膜の撥水性が、純水が陽極に移動することを防いでいます。これらの設計により、安定した反応環境が維持され、酸素の還元反応による H_2O_2 合成の生成工程が効率化されました。

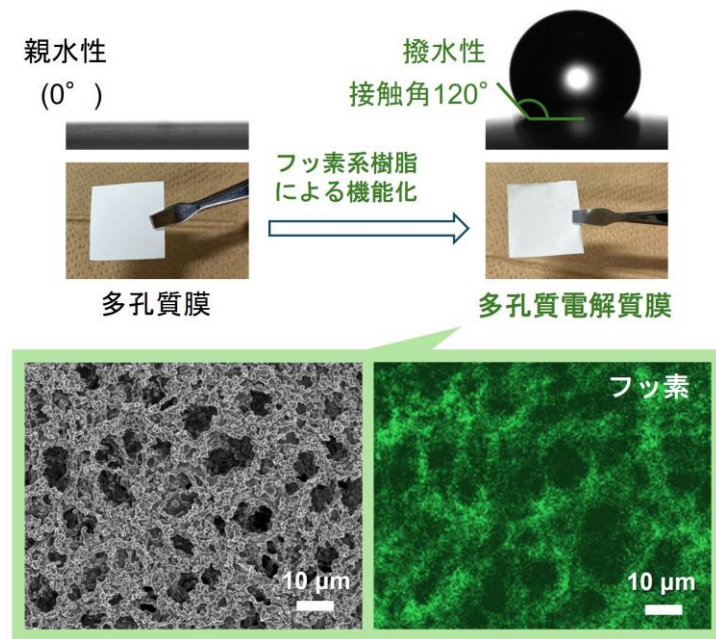


図1 気体や水素イオンは通すが液体の水はほとんど通さない多孔質電解質膜

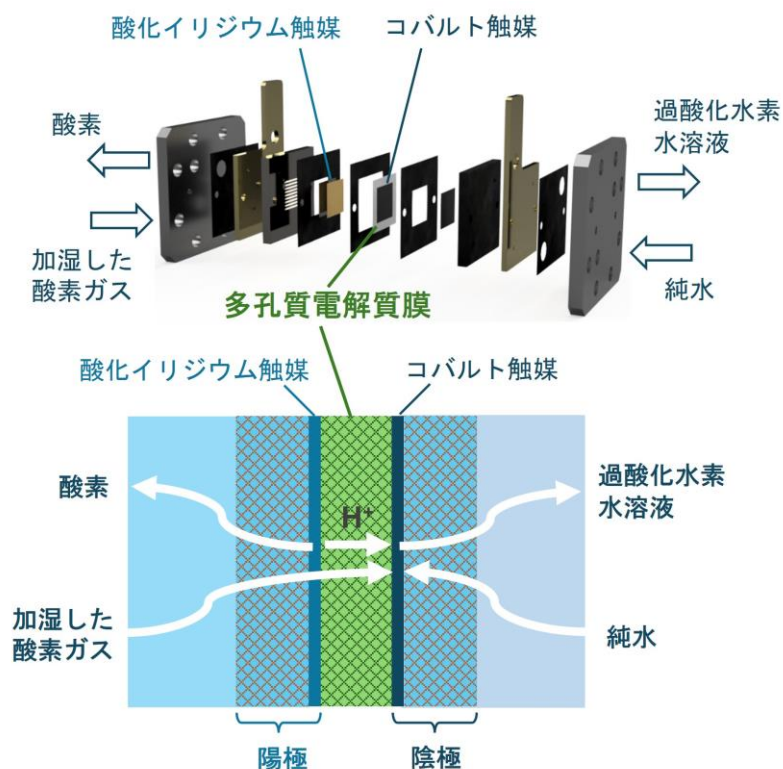


図2 不純物を含まない H_2O_2 水溶液を効率よく合成するために独自設計された電解反応装置

この新しい電解反応装置により、電流密度 5.0 mA/cm^2 において79%という高いファラデー効率[3]で H_2O_2 を合成することに成功しました。さらに、電流密度 40 mA/cm^2 の条件下で、 $5,000 \text{ mg/L}$ 以上の濃度の H_2O_2 水溶液を50時間以上連続して合成することができました(図3)。これは、多孔質電解質膜を通じて供給される酸素ガス、および陰極に供給される純水が、コバルト触媒の近傍で安定な三相界面[4]を形成し、その反応環境を維持できることを示しています。

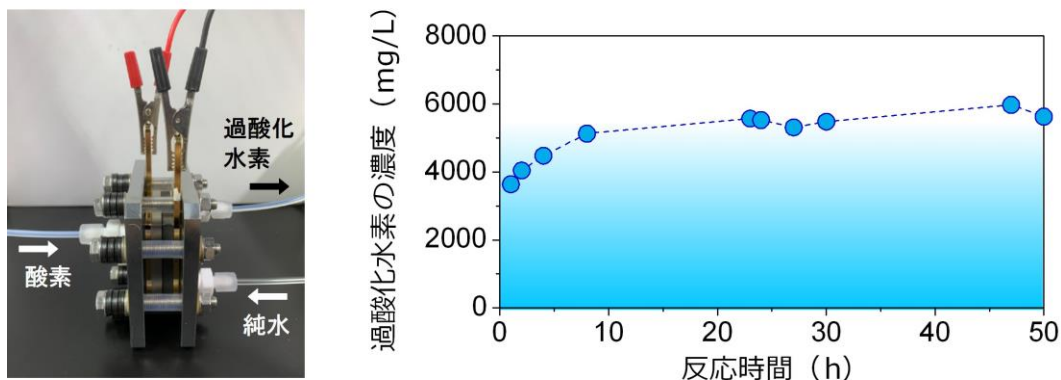


図3 水処理に十分な濃度（5,000 mg/L以上）の H_2O_2 水溶液の連続合成

今後、 H_2O_2 の生産効率をさらに向上させるためには、触媒性能の改良や電解反応装置の最適化が鍵となります。今回開発された多孔質電解質膜は、水素イオン伝導性に優れており、高い電流密度でもエネルギー損失（オーミック損失 [5]）を最小限に抑えられる可能性を秘めています。これにより、将来的にはより効率的で持続可能な H_2O_2 生成の実現が期待されます。

5. 研究の意義と波及効果

本研究の成果として、再生可能エネルギーを活用して、 H_2O_2 を必要な場所で必要な量だけ製造する新しい技術の提供が可能となりました。この技術により、 H_2O_2 製造時の CO_2 排出量を削減できるだけでなく、高濃度 H_2O_2 の保管・輸送時に発生する環境負荷も大きく軽減できます。化学品のサプライチェーン全体における CO_2 排出削減は、持続可能な脱炭素社会の実現に寄与します。さらに、今回合成された H_2O_2 水溶液は従来の技術とは異なり、電解質やその他の不純物を一切含みません。そのため、水処理や飲料水の消毒を含む幅広い用途に直接利用できる点が大きな特長です。特に、安全で清潔な飲料水の確保や、全ての人々が衛生的な環境にアクセスできる社会を実現するため、不純物を含まない H_2O_2 水溶液は極めて重要な役割を果たします。経済的な合理性が確保されれば、この環境にやさしい酸化剤・消毒剤への需要はさらに拡大すると予測されます。こうした電解合成技術は、地域ごとでの地産地消型の生産を可能にし、持続可能な社会への道を切り開くと期待されます。

6. 特記事項

本研究の成果は、2025年1月23日付けでElsevier社発行の学術雑誌「Materials Today Catalysis」にオンライン公開されました。この雑誌は、材料科学分野で影響力のある「Materials Today」誌の姉妹紙であり、特に触媒反応に関する先進的な研究を取り上げるものです。

<タイトル> “Electrocatalytic H_2O_2 Synthesis from Crossover Oxygen through a Porous Proton Exchange Membrane”

<著者名> Kazuma Enomoto, Takuya Okazaki, Kosuke Beppu, Fumiaki Amano*

<雑誌名> Materials Today Catalysis

<DOI> 10.1016/j.mtcata.2025.100088

本研究は、東京都立大学及び東京都による「カーボンニュートラルの実現に向けた取組」の支援により行われました。また、本発明は2024年2月19日に特許出願しています。

<タイトル> 反応装置及びそれを用いた化合物の製造方法

<特許出願番号> 特願 2024-022913

7. 補足説明

- [1] 酸化剤：化学反応において他の物質から電子を奪い、酸化反応を引き起こす物質。酸化剤は自身が還元されることで反応を進める役割を果たす。過酸化水素 (H_2O_2) は代表的な酸化剤として知られており、漂白、消毒、水処理など多くの産業で利用されている。
- [2] 電解質膜：電気化学反応においてイオンを運ぶ役割を担う薄膜。例えば、燃料電池や水の電気分解装置で使われる膜は、陽極と陰極を分けるとともに、水素イオンや水酸化物イオンなど特定のイオンを選択的に移動させることができる。今回の研究で使用された「多孔質電解質膜」は、水素イオン伝導性とガス透過性を兼ね備えた新しい機能性材料である。
- [3] ファラデー効率：全電流のうち、目的の生成物を生成する反応に利用された電流の割合を示す指標。電気化学反応の効率を評価するための重要な尺度で「電流効率」とも呼ばれる。今回の研究では、 H_2O_2 の生成に寄与した電子の割合がファラデー効率として計測されている。高いファラデー効率は、反応が高い選択性を持つことを意味する。
- [4] 三相界面：気体、液体、固体の三つの相が接する境界領域を指す。触媒（固体）の表面でガス（酸素など）と液体（水や電解質）が効率的に接触することが求められる。この三相界面が安定して存在することで、電気化学反応が継続的に進行する環境が整う。本研究では、三相界面の形成が反応効率の向上に寄与した。
- [5] オーミック損失：電解反応装置や燃料電池において、電流が流れる際に電解質膜や電極材料で発生する電気抵抗によるエネルギー損失。この損失は主にジュール熱として現れ、電力効率を低下させる要因となる。本研究では、開発した多孔質電解質膜が薄いことから、高い電流密度でもオーミック損失を最小限に抑えることができる。

8. 問合せ先

（研究に関すること）

東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 教授 天野史章

TEL：042-677-2852 E-mail：f.amano@tmu.ac.jp

（大学に関すること）

東京都立大学法人

東京都立大学管理部 企画広報課 広報係

TEL：042-677-1806 E-mail：info@jmj.tmu.ac.jp