

微生物と電気のでアンモニウムの再生に成功

～サステイナブルな窒素循環社会の実現に期待～

ポイント

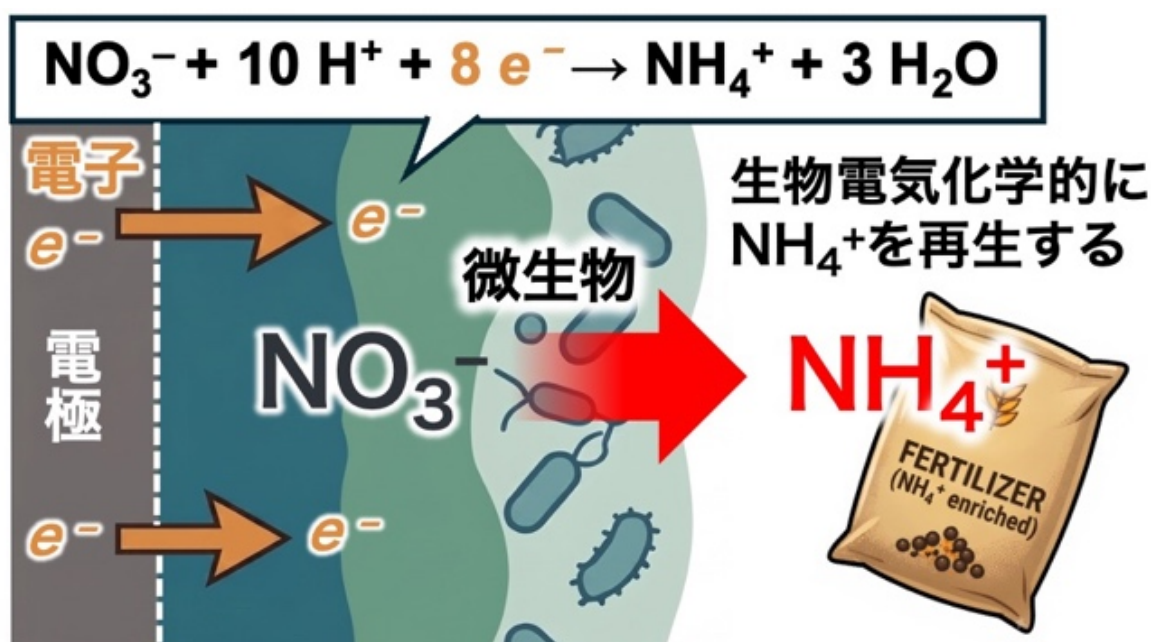
- ・微生物と電気の力を組み合わせ、低濃度の硝酸からアンモニウムを再生することに成功。
- ・従来のバイオフィルムを用いた方法と比べ、最大 8 倍以上の高い再生速度を達成。
- ・硝酸汚染対策と窒素資源回収を同時に実現でき、持続可能な窒素循環の達成に期待。

概要

北海道大学大学院工学研究院の崔 閏晶博士研究員、押木 守准教授らの研究グループは、溶液中を自由に拡散する電子伝達体*¹を利用した新しい生物電気化学プロセス*²を開発し、地下水・河川水中に含まれる希薄な硝酸 (NO_3^- ; 約 1 mM) をアンモニウムイオン (NH_4^+) へ高効率に変換することに成功しました。本プロセスは、窒素の循環型利用（窒素回収）に向けた新技術として注目されます。

今回開発したプロセスでは、電子伝達体が溶液中を漂うことで溶液中の微生物全体に電子を供給することが可能となり、従来の最大 8 倍以上の速さで硝酸をアンモニウムイオンへ変換することに成功しました。また、実際の地下水・河川水でも同様の性能が確認され、金属触媒を用いる方法と比べて少ないエネルギーで変換できることを実証しました。

なお、本研究成果は、2026 年 9 月 7 日（月）公開の Chemical Engineering Journal 誌にオンライン掲載されました。



環境中へ大量に散逸する硝酸 (NO_3^-) を生物電気化学的に NH_4^+ へ戻し、再生肥料化する。

【背景】

アンモニア (NH_3) は肥料や工業原料として不可欠な窒素源ですが、その主な製造法であるハーバー・ボッシュ法は高温・高圧を必要とし、世界のエネルギーの 1~2% を消費しています。一方、農地に投入された肥料の約半分は作物に利用されず、硝酸 (NO_3^-) などとして環境中に流出し、地下水や河川水の汚染を引き起こします。さらに、こうして環境中に流出した窒素を除去するため、下水処理をはじめとする排水処理にも多大なエネルギーが投入されています。つまり、現在の窒素利用は、多くのエネルギーを使って窒素を「固定」し、利用されなかった窒素が環境中へ「散逸」し、さらにエネルギーを使って「除去」するという非効率な構造になっています。この構造から脱却し、窒素を廃棄物として除去するのではなく、資源として回収・再利用する技術の開発が現在求められています。

生物電気化学プロセスを用いた硝酸の還元は、硝酸をアンモニウムイオン (NH_4^+) として回収できる有望な技術ですが、従来のシステムは電極に付着したバイオフィーム^{*3}を介した電子伝達に依存しており、利用できる微生物が一部の微生物種（ジオバクター属・シュワネラ属等）に限られ、反応速度も低いという課題がありました。

【研究手法】

押木准教授らは、溶液中を自由に拡散する水溶性電子伝達体を介して、溶液中に浮遊する微生物全体に電極から電子を供給する生物電気化学プロセスを新たに開発しました（図 1）。3 種類の微生物（*Escherichia coli*・*Shewanella oneidensis*・*Candidatus Brocadia sinica*）と様々な電子伝達体をスクリーニングし、 $^{15}\text{NO}_3^-$ トレーサー実験^{*4}により硝酸から NH_4^+ への変換を直接確認しました。

【研究成果】

大腸菌 (*E. coli*) と電子伝達体メチルビオローゲン (MV) の組み合わせが最高性能を示し、最大硝酸還元速度は $10.9 \text{ mmol-N L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 、硝酸に対する見かけの親和定数 (K_s) は 0.19 mM という高い親和性を示しました。これは既報のバイオフィーム型システムの最大 8 倍の速度に相当します。実際の地下水・河川水を用いた試験では、ファラデー効率 50~59%、エネルギー消費量 $188\sim 192 \text{ kWh kg-NO}_3^-\text{-N}^{-1}$ を達成し、同濃度域の金属触媒システムと比較して低いエネルギー消費量を実現しました（図 2）。また、電子伝達体の種類と印加電位を調整することで、最終生成物を亜硝酸 (NO_2^-) またはアンモニウムイオン (NH_4^+) に選択的に制御できることも示しました。

【今後への期待】

本研究が開発した生物電気化学プロセスは、地下水・河川水という実環境水でも機能することを実証しました。将来的には、下流の窒素濃縮・回収プロセスと組み合わせることで、環境水中の硝酸汚染対策と肥料原料の回収を同時に実現する、窒素の循環型利用技術として発展が期待されます。

【謝辞】

本研究は JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR216Z)、JSPS 科研費 (JP23H02114 及び JP25K01581)、JST NEXUS プログラム (JPMJNX25F3) の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Soluble-electron mediator assisted bioelectrochemical reduction of nitrate to ammonium for nitrogen recovery (水溶性電子伝達体を用いた生物電気化学プロセスによる硝酸のアンモニウム再生)

著者名 崔 閔晶¹、高橋二千翔² (研究当時)、岡部 聡¹、押木 守¹ (¹北海道大学大学院工学研究院、²北海道大学大学院工学院)

雑誌名 Chemical Engineering Journal (化学工学の専門誌)

D O I 10.1016/j.cej.2026.181710

公表日 2026 年 9 月 7 日 (月) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 准教授 押木 守 (おしきまもる)

T E L 011-706-7597 F A X 011-706-7162 メール oshiki@eng.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

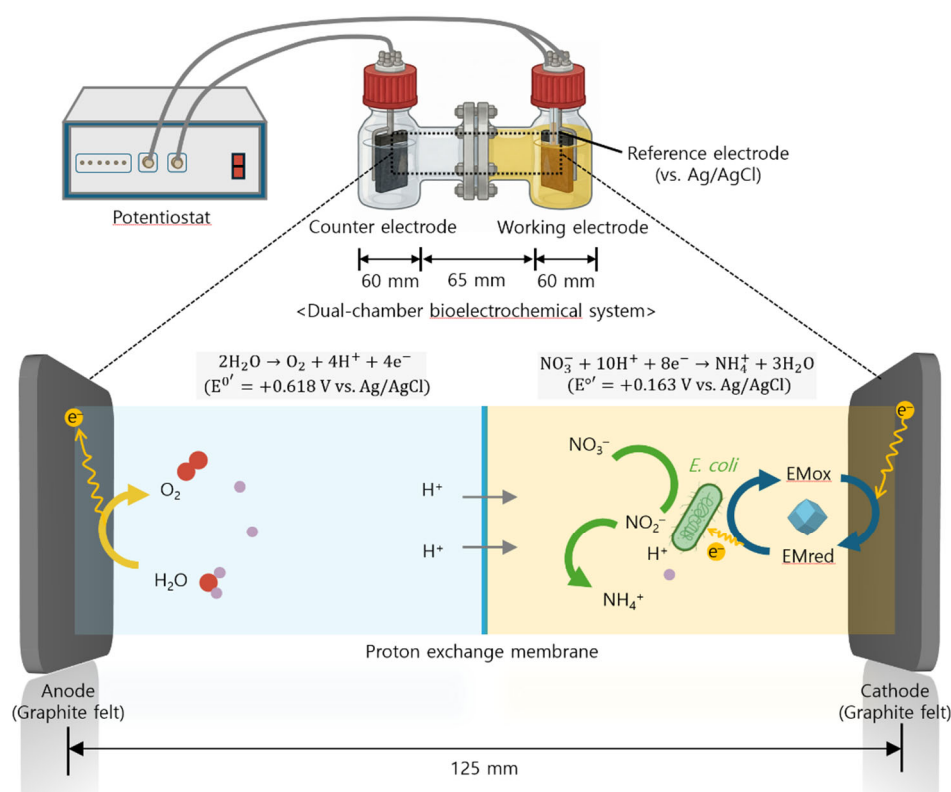


図 1. 開発した生物電気化学プロセスの模式図：右側反応槽にて硝酸が亜硝酸（NO₂⁻）を経て、アンモニウムイオン（NH₄⁺）まで還元される。この還元反応を微生物（*E. coli*）が触媒し、還元反応に必要な還元力（e⁻）は電極から水溶性電子伝達体（EMox/red）によって供給される。

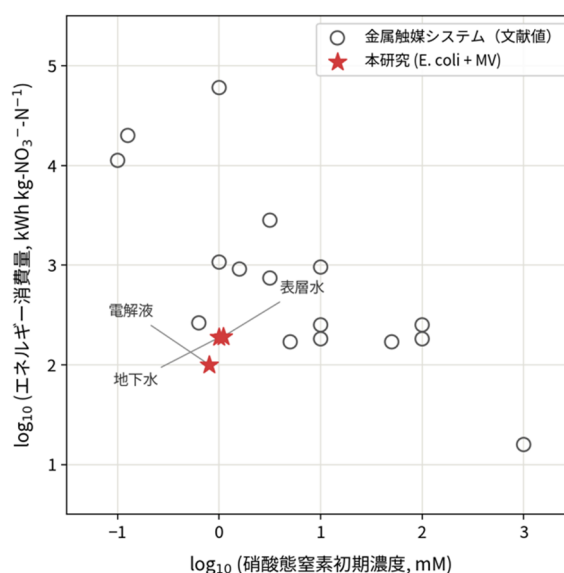


図 2. 金属触媒（先行研究）及び生物触媒（本研究）を用いたシステムのエネルギー消費量と初期硝酸濃度の関係。金属触媒は希薄濃度域でエネルギー消費量が増大する傾向にあるなか、生物触媒を用いた本研究では極めて小さい電力消費量を達成した。

【用語解説】

- *1 電子伝達体 … 電極と微生物細胞の間で電子を仲介する小分子化合物。酸化型と還元型を繰り返し行き来しながら電子を運ぶ。本研究ではメチルビオローゲン等を使用した。
- *2 生物電気化学プロセス … 微生物の代謝活性を電気化学反応と組み合わせることで駆動・制御するプロセス。電極から供給される電子を利用して微生物が目的の化学反応（ここでは硝酸の還元反応）を行う。
- *3 バイオフィーム … 微生物が表面（ここでは電極面）に付着して形成する膜状の集合体。従来の生物電気化学プロセスでは電極に付着した菌のみが反応に関与するため、反応速度に限界があった。
- *4 ¹⁵NO₃⁻トレーサー実験 … 通常の窒素（¹⁴N）の代わりに重い同位体（¹⁵N）で標識した硝酸を使用する実験。生成されたアンモニウムイオン中の ¹⁵N を追跡することで、硝酸がアンモニウムイオンに変換されたことを直接確認できる。