

包括固定化技術を用いたアナモックス反応による窒素除去システム

The Full-Scale Anammox Plant for Nitrogen Removal Using Gel Entrapment Technology

木村 裕哉
YUYA KIMURA

(株)日立製作所インフラシステム社 〒271-0064 千葉県松戸市上本郷 537

TEL: 047-361-6103 FAX: 047-361-5296

E-mail: yuuya.kimura.kv@hitachi.com

Infrastructure Systems Company, Hitachi, Ltd., 537, Kami-Hongo, Matsudo, Chiba 271-0064, Japan

キーワード: 包括固定化, 窒素, 脱窒, アナモックス

Key words: Immobilization, nitrogen, denitrification, anammox

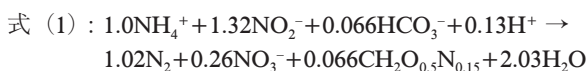
(原稿受付 2016 年 2 月 5 日 / 原稿受理 2016 年 2 月 12 日)

1. はじめに

嫌気性アンモニア酸化 (アナモックス) 反応が 1990 年代に発見され, アナモックス細菌の生理学的な特性や窒素除去システムなどに関する多くの研究開発がなされている。アナモックス反応を排水中の窒素除去に適用し, 実用化するためには, アナモックス細菌を反応槽内にかに維持し, 安定的な処理性能を得るかが必要であった。著者らはこの有用なアナモックス細菌を, 包括固定化技術を用いて高分子ゲル内に固定化し, この担体を用いた窒素除去システムの開発を行ってきた。本報では, 包括固定化技術の特徴を述べるとともに, 2013 年末に化学工場排水向けに実用化した窒素除去システムについて紹介する。

2. アナモックス反応と開発課題

高濃度の窒素排水は無機薬品製造業, 半導体製造業, 畜産業など様々な業種で排出される。排水中の窒素除去技術は, 活性汚泥を用いて生物学的な硝化反応と脱窒反応を組合せた硝化・脱窒法が有効とされている。一方でこれらの反応とは異なる新しい窒素の反応経路を持つアナモックス細菌が 1990 年代に発見され, 注目されている。アナモックス細菌は *Planctomycetales* 門に属する独立栄養性細菌であり, 実験的に得られたこのアナモックス反応の化学量論式を式 (1) に示す¹⁾。これによると有機物の添加や酸素の供給を必要とせず, アンモニアとその約 1.3 倍量の亜硝酸が脱窒される。



このアナモックス反応は有機物を必要とせず, 排水中

のアンモニアの約半量を直接窒素ガスへ変換できるため, 従来の硝化・脱窒法に比べ, 硝化反応に必要な酸素供給量や脱窒反応に必要な有機物添加量を大幅に削減でき, 省エネルギー型の窒素除去技術となり得る。これらの効果から, 多くの機関でアナモックス反応を排水処理に適用するための研究開発が行われている。このアナモックス反応を排水中のアンモニアの処理に適用するためには, 基本的にアナモックス反応の前に, 硝化細菌により排水中のアンモニアの半量を亜硝酸に酸化させる亜硝酸型の硝化反応を行い, 二つの反応を組合せることが必要となる。

生物学的処理方法を用いて, 汚濁物質を分解・除去する場合の処理性能は, 一般的に分解除去を担う細菌などの数に依存する。特に活性汚泥などを浮遊状態で使用する場合, 活性汚泥中には多種多様な微生物が存在するため, 対象となる汚濁物質を分解除去できる有用菌の割合は高くなく, その処理性能は低い。また流出などその細菌数の変動により処理が不安定になることがある。そのため安定して高い処理性能を得るためには特定の有用菌を反応槽に高濃度に維持する必要がある。アナモックス細菌を用いた場合も同様である。さらにアナモックス細菌は通常の細菌に比べて増殖するのに特に時間がかかり, 反応槽内に維持させることが難しいと考えられている。そのためアナモックス反応を排水処理に適用するための課題の一つとしては, アナモックス細菌を反応槽内に維持し, 安定的な処理を行うことが挙げられた。

3. 包括固定化技術の特長

上記課題に対して反応槽内に各種細菌を維持させる手段には, 固定床や流動床などに固定する方法がある。筆者らは細菌の維持方法として, 高分子ゲルの中に固定化し, 高濃度で細菌などを保持する包括固定化技術につい

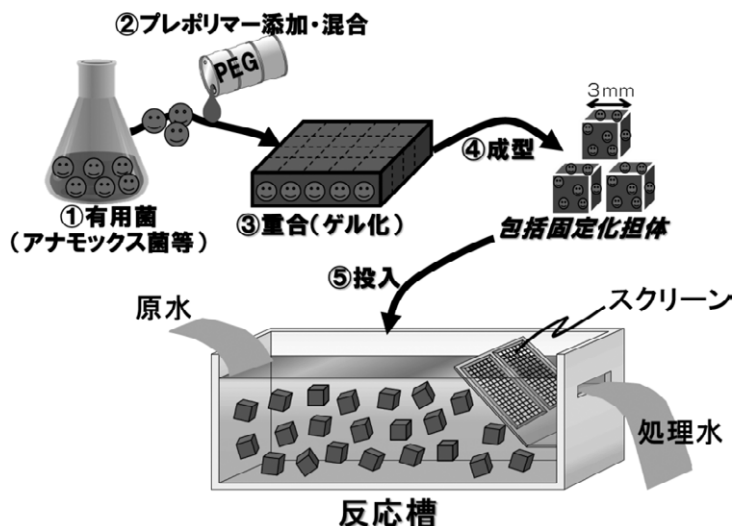


図1. 包括固定化技術を用いた排水処理の概要

て検討を行ってきた²⁾。その技術の概要を図1に示す。
①アナモックス細菌など有用菌を含む汚泥を、②ポリエチレングリコール (PEG) 系のプレポリマーと混合した後、③重合反応により寒天状にゲル化させ、細菌を高分子ゲル内に固定化する。④そしてこのゲルを適当な形に成型し、⑤反応槽へ投入し利用する²⁾。なお、処理水口にはスクリーンが設置されており、担体と処理水はここで分離される。そのため、担体(有用菌)の流出を防止することができ、反応槽内に有用菌を高濃度に維持でき、安定的な性能を得ることが可能となる。

4. 包括固定化技術のアナモックス細菌への適用検討

このPEG系のゲルを利用した包括固定化技術は、硝化細菌を固定化する技術として開発された成果³⁾であり、処理性能の向上や安定化を特長に、現在、国内の下水処理施設や産業排水処理施設の窒素処理技術として実機導入されており、他の有用菌への適用も期待されている。今回、本技術をアナモックス細菌へ適用することを検討した。

筆者らはアナモックス細菌の集積培養に成功し、これをPEG系のゲルの内部に固定化、維持する方法を開発した。そして、このアナモックス担体を用いて排水の窒素除去性能を検証すると同時に、ラボスケールからパイロットスケールの実証試験を実施し、安定した処理性能を取得してきた⁴⁾⁹⁾。パイロットスケールの実証試験では、消化汚泥を脱水処理した後の分離液(以下、消化汚泥脱水ろ液)を対象に窒素除去性能を評価した⁷⁾⁸⁾。消化汚泥脱水ろ液は、アンモニア濃度が1000 mg-N/L程度と高濃度のアンモニア排水である。また固液分離後のろ液であるため、SS成分が多く含まれることや、流入負荷の変動が起こることが想定される。これに対し、流入SS濃度の変動や1割程度の流入負荷変動を行った条件でも安定した窒素除去性能を確認し、包括固定化技術の特長を示した。

5. 実用化事例

アナモックス反応を用いた窒素除去システムの適用排水は下水の消化汚泥脱水ろ液など、おもに発酵排水系であり、化学工場や半導体工場などの産業排水への適用例は少ない。ここでは、アナモックス細菌を包括固定した担体を、アンモニアを合成する化学工場の実排水の処理に適用した排水処理装置の事例について紹介する¹⁰⁾。

本事例での排水の計画水量は580 m³/dであり、窒素としてアンモニアが約700 mg-N/L含まれるほか、有機物としてメタノールを100~400 mg/L程度含有する。排水処理フローと各反応槽の容積を図2に示す。前述したとおり、アナモックス反応はアンモニアと亜硝酸を用いるため、アナモックス槽の前段に亜硝酸型硝化槽を設置している。またこれら窒素処理工程を担う硝化反応およびアナモックス反応に強く障害をするメタノールが排水に含まれていることから、これらの前段にメタノールを除去する前脱窒槽とBOD酸化槽を付加している。さらに処理水水質を確保するため、必要に応じてアナモックス槽の処理水に残留する亜硝酸、硝酸を除去する後脱窒槽を設けた構成である。

後脱窒槽以外の各槽にはそれぞれの機能を有する細菌を含む汚泥をPEG系のゲルを用いて包括固定化し、3 mm角の立方体に成型した担体を充填している。

排水中のメタノールの一部と亜硝酸型硝化槽から循環された亜硝酸は前脱窒槽で同時に処理され、その後、BOD酸化槽にて残留する有機物成分が除去される。この処理水を亜硝酸型硝化槽に流入させてアンモニアの半量を亜硝酸とした後、アナモックス槽に供して窒素除去を行う。

各処理工程における各態窒素の濃度を図3に示す。亜硝酸型硝化槽では、曝気量をコントロールすることでアンモニアの亜硝酸への硝化は約半量にコントロールできた。この硝化処理水をアナモックス槽に流入させることで、アンモニアと亜硝酸が同時除去されていることを確認した。流入排水の平均全窒素濃度が676 mg/Lに対し、処理水は110 mg/Lであり、また窒素除去量は

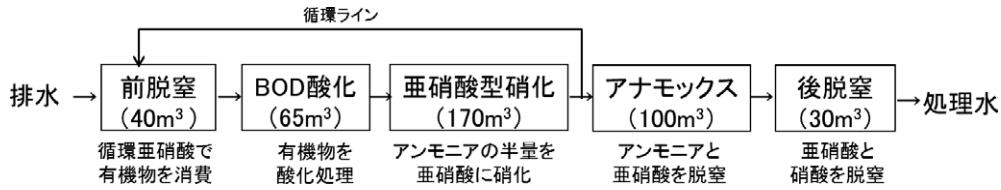


図2. 包括固定化技術を用いた排水処理装置の処理フロー

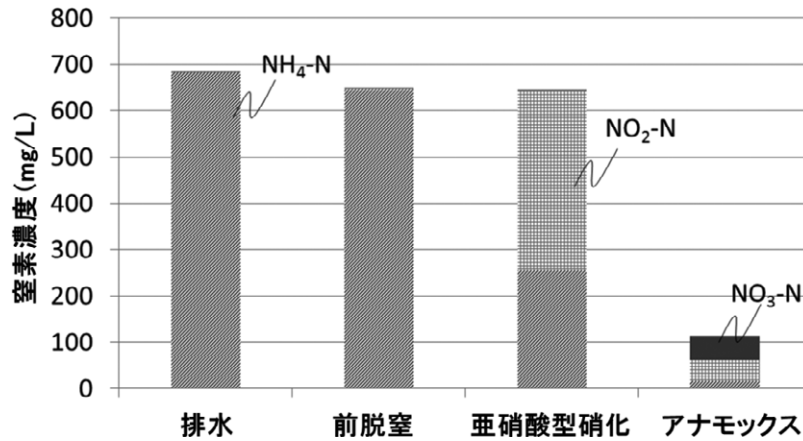


図3. 各処理工程の平均窒素濃度

3.0 kg-N/ (m³ · d) 以上で、長期間にわたり、安定した窒素除去性能を確認している。

現在、運転開始約2年が経過しているが、安定して同様の窒素除去性能を得ている。

6. まとめ

アナモックス反応を排水中の窒素除去システムとして、実用化するにあたって、包括固定化技術をアナモックス細菌に適用した。これにより反応槽内にアナモックス細菌を安定的に維持することができ、実装置レベルで安定的な処理性能が得られることを示した。今後も包括固定化技術と有用な細菌の反応を利用し、さらに幅広い業種に対して排水処理に適用されることを期待する。

文献

- 1) Strous, M., J.J. Heijnen, J.G. Kuenen, and M.S.M. Jetten. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidation microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 50: 589–596.
- 2) Sumino, T., K. Noto, T. Ogasawara, N. Hashimoto, and Y.

- Suwa. 1997. *Proceeding of WEFTEC 70th Annual Conference and Exposition, USA*, 165–172.
- 3) 江森弘祥, 中村裕紀, 竹島 正, 田中和博, 中西 弘. 1995. 包括固定化微生物を用いた窒素除去リアクターの開発. *土木学会論文集*. 515: 115–126.
- 4) Isaka, K., Y. Date, T. Sumino, and S. Tsuneda. 2007. Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 76: 1457–1495.
- 5) 井坂和一, 能登一彦, 木村裕哉, 糸川浩紀, 村上孝雄, 角野立夫. 2009. 包括固定化アナモックス担体による汚泥脱水ろ液の処理特性. *水環境学会誌*. 32: 427–433.
- 6) 木村裕哉, 井坂和一, 能登一彦, 生田 創, 糸川浩紀, 村上孝雄. 2010. 包括固定化担体を用いた亜硝酸型硝化・アナモックスプロセスによる汚泥脱水ろ液中の窒素処理. *下水道協会誌*. 47: 156–165.
- 7) Isaka, K., H. Itokawa, Y. Kimura, K. Noto, and T. Murakami. 2011. Novel autotrophic nitrogen removal system using gel entrapping technology. *Biores. Technol.* 102: 7720–7726.
- 8) Kimura, Y., H. Itokawa, K. Noto, T. Murakami, and K. Isaka. 2013. Stability of Autotrophic Nitrogen Removal System under Four Non-Steady Operations. *Biores. Technol.* 137: 196–201.
- 9) 木村裕哉, 井坂和一. アナモックス反応による化学工場排水中の窒素処理実証. 2015. *水環境学会誌*. 38: 117–125.
- 10) 井坂和一. 2014. 包括固定化技術を用いた窒素除去システムの実用化. *水環境学会誌*. 37: 341–344.