

〈特集〉

固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術

高木 啓太¹⁾, 土井 知之¹⁾, 渡邊 陽一²⁾福田 政昭²⁾, 糸川 浩紀³⁾, 橋本 敏一³⁾¹⁾(株)タクマ 水処理技術部

(〒 660-0806 兵庫県尼崎市金楽寺町 2-2-33 E-mail: k-takaki@takuma.co.jp)

²⁾熊本市上下水道局 計画整備部計画調整課

(〒 862-8620 熊本県熊本市中央区水前寺 6-2-45 E-mail: watanabe.yoichi@city.kumamoto.lg.jp)

³⁾日本下水道事業団 技術戦略部技術開発企画課

(〒 113-0034 東京都文京区湯島 2-31-27 E-mail: itokawah@jswa.go.jp)

概要

固定床型アナモックスプロセスは、平成 24 年度 B-DASH 採択の栄養塩（窒素）除去技術で、従来の窒素除去法に比べ、低コストで省エネルギーな窒素除去が可能となる。下水処理場における嫌気性消化汚泥の脱水ろ液（返流水）を適用対象とし、返流水由来の窒素負荷量を低減し、これにより水処理施設の流入窒素負荷量を低減することで、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図ることができる。B-DASH では、本技術の普及に向けて有用なデータを取得することができた。今後は B-DASH の成果を広く発信し、本技術の普及展開を図っていききたいと考えている。

キーワード：窒素除去，低コスト，省エネルギー，アナモックスプロセス，嫌気性消化汚泥脱水ろ液

原稿受付 2017.5.10

EICA: 22(1) 12-16

1. はじめに

下水処理場では、地球温暖化対策としての省エネルギー対策やエネルギー回収が求められており、汚泥の減量とエネルギー回収を図れる嫌気性消化が改めて注目されている。しかし、嫌気性消化では有機物の分解にともない窒素・りんが液中に溶出し、これが脱水ろ液などの返流水として水処理施設へ返送されるため、水処理施設へ流入する窒素・りん負荷量を増大させる点が問題となる。

このような窒素・りんの返流水による負荷量を低減する方法として、返流水の個別処理がある（Fig. 1）。個別処理における窒素除去法としては、従来は硝化・脱窒反応による生物学的窒素除去法が使用されてきたが、返流水は窒素濃度に対して有機物濃度が著しく小さいのが通常で、脱窒のためにメタノールなどの有機物（薬品）の添加が必要となり運転コストなどが増大

する点が課題とされている。

固定床型アナモックスプロセス（以下、本技術）は、新しい窒素変換反応であるアナモックス反応を利用した生物学的窒素除去法で、従来の窒素除去法に比べ、コスト縮減、温室効果ガス排出量・エネルギー使用量削減などが可能となる。本技術は、平成 24~25 年度の B-DASH において実証研究を実施し、国土交通省国土技術政策総合研究所により「固定床型アナモックスプロセスによる高効率窒素除去技術導入ガイドライン（案）（以下、GL）¹⁾」が策定されたものである（平成 26 年 8 月公表）。

本稿では、本技術の概要や導入効果について紹介するとともに、B-DASH 終了後の自主研究の成果や普及展開に向けた取り組みについても紹介する。

2. 技術の概要

2.1 技術の特長

アナモックス反応は、硝化・脱窒反応による従来の窒素変換とは異なり、式 (1) に示すように、アンモニア性窒素（以下、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）と亜硝酸性窒素（以下、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ）を基質とした無酸素条件下での反応により窒素ガスを生成する。

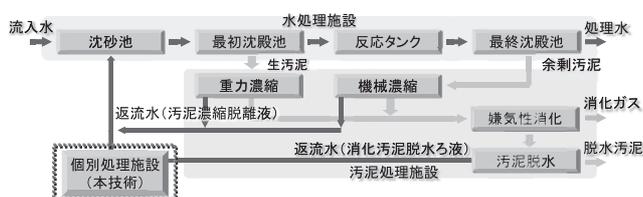
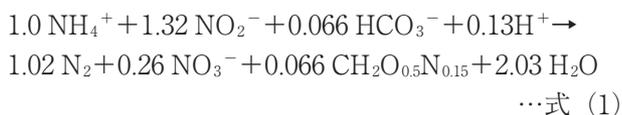


Fig. 1 Example of introduction of fixed-bed type anammox process in wastewater treatment plant



アナモックス反応を利用して排水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ を除去する場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の約半量をアナモックス反応に必要な $\text{NO}_2\text{-N}$ へ変換する部分亜硝酸化工程が必要である。アナモックスプロセスは、部分亜硝酸化工程とアナモックス工程とを組み合わせた窒素除去プロセスで、本技術はこのプロセスの一種である。

B-DASH における実証施設のフローを Fig. 2 に示す。本技術は、前処理工程、部分亜硝酸化工程、アナモックス工程で構成される。前処理工程は、原水の水量・水質変動の平滑化、および BOD・SS 濃度が上昇した際の濃度低減を目的として設置している。部分亜硝酸化工程は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を $\text{NO}_2\text{-N}$ へ変換する固定床型の亜硝酸化槽、およびアナモックス工程への流入水を調整する設備などで構成される。具体的には、式 (1) に基づく $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比の制御として、脱気・調整槽に設置した $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_2\text{-N}$ の水質センサの計測値に基づき $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比が所定の範囲に維持されるようバイパスの水量が自動で制御される設備を備えている。アナモックス工程は、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比を調整した排水から窒素を除去する固定床型のアナモックス槽を備えている。

アナモックスプロセスは、従来の窒素除去法に比べ、低コストで省エネルギーな窒素除去が可能で、①～④の特徴を有する。さらに、本技術はこれらに加え⑤の特徴を有する。詳細は GL を参照されたい。

- ① 曝気動力を削減できる。
- ② 脱窒のための有機物添加が不要である。
- ③ 施設の設置スペースを縮小できる。
- ④ 汚泥発生量を削減できる。
- ⑤ 処理の安定性が高い。

2.2 適用の対象および条件

本技術は、窒素濃度が高く、かつ窒素濃度に対して有機物濃度が低い排水の処理に有効で、GL では下水処理場における嫌気性消化汚泥の脱水ろ液に含まれる

窒素の除去に適用することとしている。本技術の適用に際しては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が低い排水では亜硝酸化反応が安定しない可能性があるため、対象排水の $\text{NH}_4\text{-N}$ が 300 mg-N/L 以上であることを基本とする。

本技術を導入する直接的な効果は、返流水由来の窒素負荷量が低減される点にあり、これにより水処理施設の流入窒素負荷量を低減することで、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図る方法として有効である。本技術の導入が有効と考えられる典型的なシナリオ例を以下に示す。

- A 嫌気性消化が導入されているが、返流水個別処理施設を有しない場合、本技術の導入により既存の消化槽由来の窒素負荷量を低減し、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図る。
- B 汚泥処理に嫌気性消化を導入する場合、あわせて本技術を導入することで上昇が見込まれる消化槽由来の窒素負荷量を低減し、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図る。
- C 外部からバイオマスなどを受入れる場合、本技術の導入により上昇が見込まれる消化槽由来の窒素負荷量を低減し、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図る。
- D 既存の返流水個別処理施設（従来技術）を再構築する場合、本技術の導入によりコスト削減、温室効果ガス排出量・エネルギー使用量削減などを旨とする。

具体例として、A では既存の水処理施設の窒素除去能力が十分ではなく放流水の窒素規制への対応性に難がある場合などに、本技術を導入して返流水由来の窒素負荷量を低減することで、放流水の窒素濃度の低減・安定化を図ることができると期待できる。この場合、水処理施設に係るコストの低減を図ることができる。さらに、硝化に要する曝気量を低減することも可能となる。

2.3 評価結果

(1) 窒素除去機能

B-DASH における実証試験は、熊本市東部浄化センター（現有施設能力 $138,300 \text{ m}^3/\text{日}$ ）内に設置した

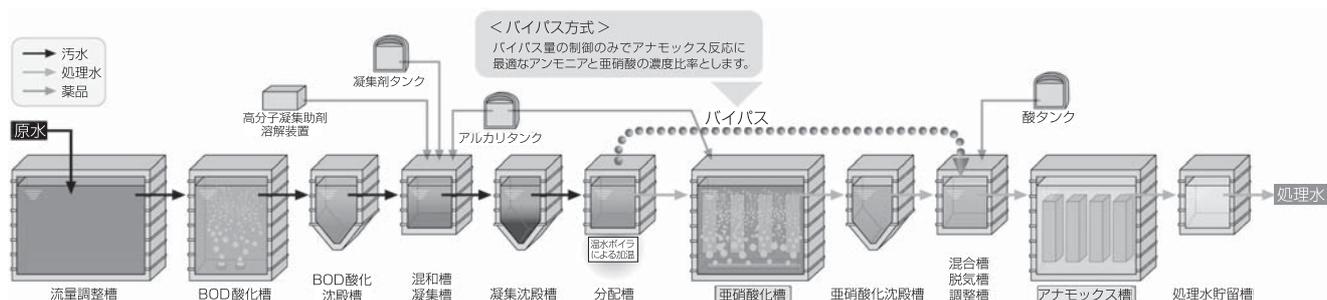


Fig. 2 Schematic flow of demonstration plant

固定床型アナモックスプロセスの実規模実証施設を用いて行なった (Fig. 2)。処理対象は当浄化センターで発生する嫌気性消化汚泥の脱水ろ液で、定格処理水量は 50 m³/日と、平成 24 年度時点で下水処理場へ適用したアナモックス施設としては国内最大規模での実証を行なった。

平成 24~25 年度の各季節の詳細調査期間において、プロセス全体の総窒素 (T-N) 除去率は、いずれの季節においても平均 80% 以上で、高い窒素除去機能が示された。一例として、平成 25 年度冬季における各プロセスの窒素濃度の推移を Fig. 3 に示す。プロセス全体の平均窒素除去率は 81% であった。

なお、B-DASH の実証試験では、短期的なデータ採取であったことから、B-DASH 終了後の自主研究にてデータ蓄積を実施し、本技術の更なる低コスト化について検討している。

(2) コストおよび温室効果ガス排出量など

B-DASH では、本技術の評価を実施するにあたり、前項適用条件の A のケースについて、3 つの下水処理場規模 (流入下水量として、10,000, 50,000, 100,000 m³/日) での本技術導入時のコスト、温室効果ガス排出量などについて試算を行なった。算定に当っては、処理対象とする水量よりも窒素除去量に上記の算定値は依存するため、それぞれ窒素除去量当りの値としている。

上記 3 条件について試算した結果、Fig. 4 に示す結果が得られた。これに基づいて Table 1 に示す算定式 (費用関数) を導き、事項に示す本技術の導入効果の検討の際には、この費用関数を用いて簡易的にコスト、温室効果ガス排出量などを試算でき、導入の是非を判断することができる。

なお、本評価結果は B-DASH にて得られた実際の運転データを基に試算したものであるが、B-DASH 終了後の自主研究にて、施設設計や運転に関わるコスト低減のためのデータが得られており、更なる低コスト化が可能となる。

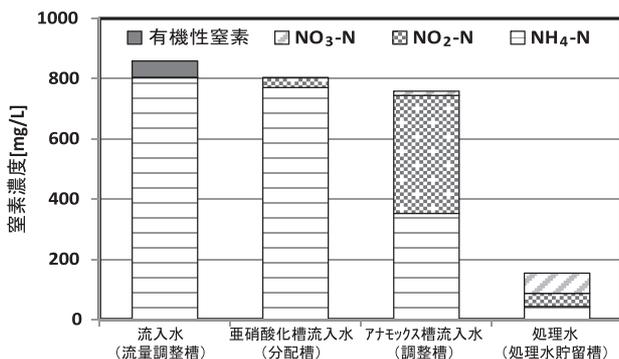


Fig. 3 Changes in nitrogen concentrations in 2013 winter period

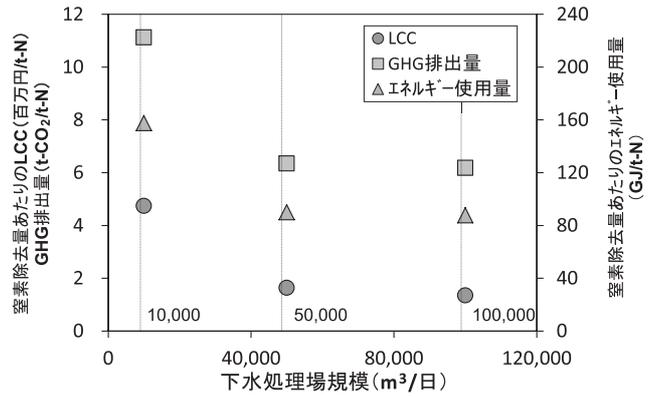


Fig. 4 Example of feasibility study of LCC, GHG emission, and energy consumption

Table 1 Calculation functions for costs, GHG emission, and energy consumption in this process

項目	単位	算出式	備考
建設費	百万円	$Y = 2.70 \times N + 378.88$	N: 窒素除去量 (kg-N/日)
維持管理費	百万円/年	$Y = 0.19 \times N + 18.20$	〃
LCC	百万円/年	$Y = 0.36 \times N + 52.33$	〃
GHG 排出量	t-CO ₂ /年	$Y = 2.06 \times N + 69.42$	〃
エネルギー使用量	GJ/年	$Y = 29.26 \times N + 980.60$	〃

3. 導入検討方法

本技術の導入の検討にあたっては、導入の目的を明確にした後、必要な情報を収集・整理し、導入効果を概略試算してその評価を行なった上で、導入の是非を判断する。

3.1 導入効果の検討方法

下水処理場に本技術の導入を検討する上で、まず下水処理場全体として返流水個別処理が有効であるか、その要否についての評価を行ない、その有効性が見込まれる場合には本技術による返流水個別処理の導入効果を検討し、他の技術 (従来技術) とその効果を比較することで評価を行なう。本技術を下水処理場に導入する有効性について、(a) 返流水個別処理を導入する効果の検討【導入検討 I】、(b) (従来の返流水個別処理技術との比較による) 本革新的技術の導入効果の検討【導入検討 II】の 2 段階で定量的に確認する。

【導入検討 I】では、下水処理場全体における窒素量の物質収支を試算することで、返流水個別処理を導入する有効性を検討する。ここでの有効性とは、返流水個別処理を導入することで、どれだけ返流水の窒素負荷量を低減できるか、また放流水 T-N 濃度を低減できるかなどの水質改善効果を表す。返流水個別処理の導入が有効であると判断された場合には、【導入検討 II】として、本技術の導入効果について従来技術との比較により検討する。ここでの導入効果とは、従来

技術の導入に対するコスト削減、温室効果ガス排出量・エネルギー使用量削減効果を表す。具体的な手順についてはGLを参照されたい。

3.2 導入効果の検討例

(1) 導入検討Ⅰ

返流水個別処理の導入による放流水の水質改善効果が特に大きいと考えられる前項適用条件のB、Cを合わせたケースを具体例として、流入下水量50,000 m³/日の仮想の下水処理場に外部バイオマス（濃縮汚泥）15,000 kg-DS/日を受け入れる場合を想定し、返流水個別処理の導入の有効性を検討した。

下水処理場全体の物質収支の試算によると、導入前の放流水 T-N 濃度は 8.7 mg-N/L である。これに対して、消化槽を導入し、さらに外部からバイオマスを受入れた場合、放流水 T-N 濃度は 12.2 mg-N/L に上昇すると予想される。ここで、返流水個別処理施設を導入する場合、放流水 T-N 濃度は 9.2 mg-N/L と予想され、導入前と比較して放流水の T-N 濃度が 3.0 mg-N/L 低減できるとの試算結果となった。これより、返流水個別処理を導入することで、放流水 T-N 濃度を大きく上昇させることなく嫌気性消化の導入および外部バイオマスの受け入れが可能となり、返流水個別処理導入の有効性が高いと評価できる。

(2) 導入検討Ⅱ

返流水個別処理の典型的な導入シナリオである前項適用条件のAのケースを具体例として、嫌気性消化を行なう流入下水量50,000 m³/日の仮想の下水処理場に返流水個別処理の導入を想定した検討を行なった。比較対象とする従来技術は、担体添加ステップ流入式2段硝化脱窒法とした。本技術の試算は、評価結果より導いた **Table 1** の算定式を用いる簡易な方法とし、建設費、維持管理費、LCC、温室効果ガス排出量、エネルギー使用量を試算した。

従来技術と比較した場合、建設費、維持管理費、LCCはそれぞれ22%、33%、25%の削減効果が得られる試算となった。また温室効果ガス排出量、エネルギー使用量はそれぞれ64%、42%の削減効果が得られる試算となった。以上のことから、本技術による返流水個別処理を導入することは、従来技術を用いる場合よりもコスト低減などの効果が大きいことが確認された。なお、本試算条件では、有機物やSSが高く前処理設備を要するプロセス構成となるが、原水水質の条件によっては前処理設備が要らないプロセス構成とすることができ、またB-DASH終了後の自主研究の成果を反映することで、建設コストの削減や電力・薬品の使用量（維持管理コスト）の低減、またそれともなう温室効果ガス排出量やエネルギー使用量を削減することが可能となる。

4. 更なる低コスト化に向けた検討

B-DASH 終了後の平成 26 年以降も自主研究として実証試験を継続してデータ蓄積を実施し、今後の普及展開に向けた低コスト化のための検討を実施している。以下、自主研究成果の一部を紹介する。

4.1 水温条件の検討²⁾

B-DASH の実証試験では、亜硝酸化槽において硝酸の生成を抑制するため亜硝酸化槽の水温の制御値を 35℃ として運転を行なったが、自主研究では 30℃ での安定運転の可能性を検討し、水温を低下させても安定運転を維持できることが確認できた。これにより、加温にLPGを使用する場合には使用量を約30%削減できる。なお、加温には嫌気性消化槽の余剰ガスを熱源として有効利用することもでき、平成29年度現在の実証試験では、場内の余剰消化ガスを熱源とした加温方法に切替えて運転を行なっている。

4.2 間欠運転と処理安定性の検討^{2,3)}

本プロセスの運転は原水の排出元である脱水機の稼働状況に影響される。週末に脱水機の稼働を停止する下水処理場も多く、またメンテナンス時や年末年始の休暇時にも長期で停止することがあり、脱水機の稼働状況に応じて本プロセスを間欠運転（運転・停止）できれば、流量調整槽の容量を大幅に削減できコスト削減が可能となる。B-DASH の実証試験では、平成 25 年 9 月に週末の脱水機停止を想定した 3 日間の間欠運転を実施し、復帰時には停止前と同等の処理能力（窒素変換量）を有していることを確認したが、自主研究では平成 27 年 8 月から 12 月にかけて週末停止を繰返し実施し、特に影響なく安定して運転を維持できることを確認した。当該期間では原水（脱水ろ液）の NH₄-N 濃度は 362~514 mg-N/L であり、プロセス全体を通して窒素（T-IN：総無機性窒素）除去率は概ね 80% 以上と安定した運転が維持でき、本プロセスの安定した処理性能が示された。

5. 普及展開に向けて

固定床型アナモックスプロセスは、今後下水処理場が目指す省エネルギー・創エネルギー化に資する技術である。しかしながら、海外では 100 基を超える実施が建設されている一方で、国内での本技術の普及はほとんど進んでいない状況である。そのような中、B-DASH では実施規模での実証を実施することができ、本技術の普及に向けて革新的な窒素除去技術としての有用なデータを取得することができた。また、その後の自主研究では本技術の更なる低コスト化に繋

がる様々なデータを取得することができ、よりユーザーのニーズに応えられる技術として提供できると考えている。現時点では、下水処理場における返流水対策として本技術を導入検討する段階には至っていないが、返流水対策に問題を抱える自治体に対して本技術の有用性、有効性を積極的にアピールしていくことで、普及展開を図っていきたいと考えている。

今後はB-DASH およびその後の自主研究の成果を広く発信し、国内でもこの革新的技術を広く普及させて社会に貢献できるよう、日々尽力していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, B-DASH プロジェクト No.3 固定床型アナモックソプロセスによる高効率窒素除去技術導入ガイドライン (案), (2014)
- 2) 高木啓太, 水澤幸太, 福田政昭, 糸川浩紀: 固定床型アナモックソプロセスにおける間欠運転の最適条件に関する検討, 環境システム計測制御学会誌, 第20巻, 第2・3号, pp.50-54 (2015)
- 3) 高木啓太, 土井知之, 渡邊陽一, 福田政昭, 糸川浩紀, 橋本敏一: 固定床型アナモックソプロセスの低コスト化運転における処理性能, 第53回下水道研究発表会講演集, pp.968-970 (2016)