

〈研究発表〉

固定床型アナモックスプロセスにおける間欠運転の最適条件に関する検討

高木 啓太¹⁾, 水澤 幸太¹⁾, 福田 政昭²⁾, 糸川 浩紀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, m-kouta@takuma.co.jp)

²⁾ 熊本市上下水道局 計画調整課

(〒862-8620 熊本県熊本市中央区水前寺6-2-45 E-mail: fukuda.masaaki@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

筆者らは、平成24～25年度の国土交通省下水道革新的技術実証事業（B-DASH）において、熊本市東部浄化センター内に設置した実規模実証施設を用いて「固定床型アナモックスプロセス」による汚泥処理返流水（嫌気性消化汚泥脱水ろ液）からの窒素除去実証試験を実施した。B-DASH終了後の平成26年度も実証試験を継続し、本プロセスのさらなる低コスト化を目的とした検討を行なった。本研究では、本プロセスの流量調整槽の容量縮減を目的とした間欠運転（停止・再稼働）の最適条件に関する検討を行ない、最大11日間原水供給がない場合も速やかな再稼働が可能であることが確認できた。また、加温用燃料の低減を目的とした水温低下試験において、亜硝酸化槽では水温30℃でも亜硝酸化反応は安定し、同条件での運転において約3.5ヶ月間にわたり高い処理性能が安定して維持できた。さらに本プロセスの各種制御に係る操作について自動で適正に制御できた。

キーワード：固定床型アナモックスプロセス、運転条件最適化、窒素除去、返流水処理

原稿受付 2015.6.30

EICA: 20(2・3) 50-54

1. はじめに

アナモックスは近年新しく見出された生物学的窒素変換反応であり、これを利用した窒素除去プロセス（アナモックスプロセス）は新たな窒素除去技術として期待されている。本反応が初めて見出されたのは1990年代初頭であるが、海外ではすでに実用段階に入っており、国内でも本格導入に向けての検討が進められつつある¹⁾。

筆者らは、平成24～25年度の国土交通省下水道革新的技術実証事業（以下、B-DASH）において「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に関する技術実証研究」（以下、B-DASH実証研究）を実施し、熊本市東部浄化センター内に設置した処理能力50 m³/日の実規模実証施設を用いて「固定床型アナモックスプロセス」による汚泥処理返流水（嫌気性消化汚泥脱水ろ液）からの窒素除去実証試験を実施した²⁾。なお、本B-DASH実証研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託研究として実施したものである。B-DASH終了後の平成26年度も熊本市・日本下水道事業団・(株)タクマによる共同研究において実証試験を継続し、本プロセスのさらなる低コスト化を目的とした検討を行なった。本研究では、本プロセスの運転および設備に係るコスト低減を図る

ため、①間欠運転（停止・再稼働）の最適条件に関する検討、②水温低下の影響と処理安定性の評価を行なった。①に関しては、中小規模の下水処理場では週末に脱水機の運転を停止することが多く、またメンテナンス時や年末年始の休暇時にも1～2週間程度停止することがある点を考慮して実施したものである。本プロセスとしては原水が連続的に供給されることが理想的であるが、脱水機の運転にあわせた間欠運転が可能であれば流量調整槽容量を大幅に縮減できる。②に関しては、亜硝酸化処理では水温が高いほど硝酸化反応は抑制されやすく処理が安定しやすいとされるが、ここでは加温用燃料の低減を目的として亜硝酸化槽の水温をこれまでの35℃から30℃に低下させた場合の亜硝酸化処理への影響について評価を行なった。あわせて、本プロセスの制御性について評価を行なった。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実証施設

本研究は、熊本市東部浄化センター（現有施設能力138,300 m³/日；以下、当浄化センター）内に設置した固定床型アナモックスプロセスのB-DASH実証施設を用いて行なった（Fig. 1）。処理対象は当浄化センターで発生する嫌気性消化汚泥脱水ろ液（以下、脱

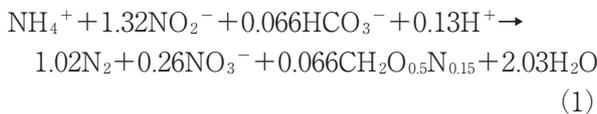


Fig. 1 Photo of demonstration plant

水ろ液)であり、処理水量は 50 m³/日とした。

実証施設の概略フローを Fig. 2 に示す。本プロセスは、前処理工程 (Pretreatment stage), 部分亜硝酸化工程 (Partial nitritation stage), アナモックス工程 (Anammox stage) 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た。部分亜硝酸化工程は、アンモニア性窒素 (NH₄⁺-N) を亜硝酸性窒素 (NO₂⁻-N) へ変換する固定床型の亜硝酸化槽 (Nitritation tank) と同槽の pH 調整のためのアルカリ供給設備、およびアナモックス工程への流入水を調整する設備で構成される。具体的には、下記(1)式のアナモックス反応式³⁾に基づく NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比の制御として、脱気・調整槽 (Adjusting tank) に設置した NH₄⁺-N および NO₂⁻-N の水質センサの計測値に基づき NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比が所定の範囲に維持されるようバイパスラインの水量が自動で制御される設備を備えている。また脱気・調整槽には pH 調整のための酸供給設備を備えている。さらに水温維持のため、分配槽 (Distribution tank) の排水を所定の設定値に加温するための加温設備を設置した。アナモックス工程は、NO₂⁻-N/NH₄⁺-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 (Anammox tank) を備えている。

【アナモックス反応式】



2.2 実験原水

本研究では、当浄化センターの汚泥処理施設から送水された脱水ろ液を原水とした連続運転を行なった。平成 26 年度の運転において、原水の NH₄⁺-N 濃度は 373~753 mg-N/L であった。

2.3 運転方法

これまでの研究にて、原水 (脱水ろ液) に残留する高分子凝集剤が処理機能に悪影響を及ぼすことがあったため、対策として流量調整槽 (Equalization tank) にて投入原水量に対して 5~10% (v/v) の汚泥を投入し高分子凝集剤を吸着除去する運転を行なった²⁾。また、実験期間を通して、凝集沈殿槽 (SS removal unit) に流入する時点で SS 濃度が前処理工程の目標値 (BOD, SS とともに 100 mg/L) 未満にまで低減されていたため、凝集沈殿槽では凝集剤の添加は行なわなかった。

亜硝酸化槽では、槽内の水温、pH および曝気量を自動で制御した。曝気量の制御は、同槽内の NH₄⁺-N 残留率を指標とした。また固定床担体に汚泥が過剰に付着することを防ぐため定期的に粗大気泡による曝気洗浄を実施した。アナモックス槽では、流入水について前述の NO₂⁻-N/NH₄⁺-N 比と pH を自動で制御した。

間欠運転は実証施設の稼働を約 10 日間停止させた後再稼働させる試験と、金曜 17 時に停止し月曜 9 時に再稼働させる週末停止を繰り返した試験を行なった。

2.4 評価指標

処理性能を評価する上で使用する主な指標を以下に定義する。ここでは、有機性窒素の関与は無視して総無機性窒素 (T-IN) 除去率を窒素除去率と見なす。

(1) 亜硝酸化槽

$$\text{アンモニア残留率}(\%) = \frac{C_{\text{NH}_4\text{.NOUT}}}{C_{\text{NH}_4\text{.NIN}}} \times 100$$

C_{NH4.NIN} : 亜硝酸化槽流入水 NH₄⁺-N 濃度

C_{NH4.NOUT} : 亜硝酸化槽流出水 NH₄⁺-N 濃度

$$\text{亜硝酸生成率}(\%) = \frac{C_{\text{NH}_4\text{.NOUT}} - C_{\text{NO}_2\text{.NIN}}}{C_{\text{NH}_4\text{.NIN}}} \times 100$$

C_{NO2.NIN} : 亜硝酸化槽流入水 NO₂⁻-N 濃度

C_{NO2.NOUT} : 亜硝酸化槽流出水 NO₂⁻-N 濃度

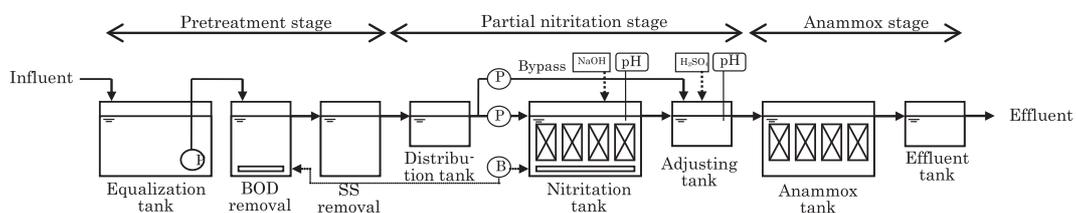


Fig. 2 Schematic flow of demonstration plant

$$\text{硝酸生成率(\%)} = \frac{C_{\text{NO}_3.\text{NOUT}} - C_{\text{NO}_3.\text{NIN}}}{C_{\text{NH}_4.\text{NIN}}} \times 100$$

$C_{\text{NO}_3.\text{NIN}}$: 亜硝酸化槽流入水硝酸性窒素 (NO_3^- -N) 濃度

$C_{\text{NO}_3.\text{NOUT}}$: 亜硝酸化槽流出水 NO_3^- -N 濃度

(2) アナモックス槽

$$\text{窒素転換率(\%)} = \left(1 - \frac{C_{\text{NH}_4.\text{AOUT}} + C_{\text{NO}_2.\text{AOUT}}}{C_{\text{NH}_4.\text{AIN}} + C_{\text{NO}_2.\text{AIN}}}\right) \times 100$$

$C_{\text{NH}_4.\text{AIN}}$: アナモックス槽流入水 NH_4^+ -N 濃度

$C_{\text{NH}_4.\text{AOUT}}$: アナモックス槽流出水 NH_4^+ -N 濃度

$C_{\text{NO}_2.\text{AIN}}$: アナモックス槽流入水 NO_2^- -N 濃度

$C_{\text{NO}_2.\text{AOUT}}$: アナモックス槽流出水 NO_2^- -N 濃度

(3) プロセス全体

$$\text{窒素除去率(\%)} = \left(1 - \frac{C_{\text{TIN.POUT}}}{C_{\text{TIN.PIN}}}\right) \times 100$$

$C_{\text{TIN.PIN}}$: プロセス原水 T-IN 濃度

$C_{\text{TIN.POUT}}$: プロセス処理水 T-IN 濃度

3. 実験結果および考察

3.1 間欠運転の最適条件の検討

平成 26 年 1 月(A), 5 月(B), 8 月(C), 平成 27 年 1 月(D)に実施した間欠運転の停止時の条件を **Table 1** に示す。停止期間はそれぞれ約 10 日間とした。停止中は 4 ケース全てで亜硝酸化槽の間欠曝気を行ない、かつ期間 A のみ 35℃ に加温した。期間 A では停止中に亜硝酸化槽で硝酸化が進行し、再稼働後の硝酸化の抑制と亜硝酸化の促進に約 20 日を要した (**Fig. 3**)。この原因として停止中の過剰な曝気が考えられたことから、期間 B 以降では間欠曝気の送風量をさらに低減させたところ、停止中に NO_3^- -N の生成はほとんど見られなかった。期間 B, D では停止時に水温が低下し、再稼働時に加温を行なった後に原水供給を再開したが、期間 B~D のいずれにおいても原水供給を再開して通常運転に戻した直後の時点で亜硝酸化槽の亜硝酸生成量、アナモックス槽の窒素転換量が停止前の処理性能に達し (**Fig. 4, 5**), プロセス全体としても 80% の T-IN 除去率が得られた。

平成 26 年 11 月に週末停止を繰り返した試験を実施した。停止時の操作は上記の期間 B~D と同様とした。このような週末停止を 3 回繰り返し実施しても亜硝酸

化槽、アナモックス槽の処理性能は維持され、本プロセスの運転に影響がないことを確認した。ただし、今後長期的な確認は必要である。

以上より、長期間および短期間停止時の操作条件は

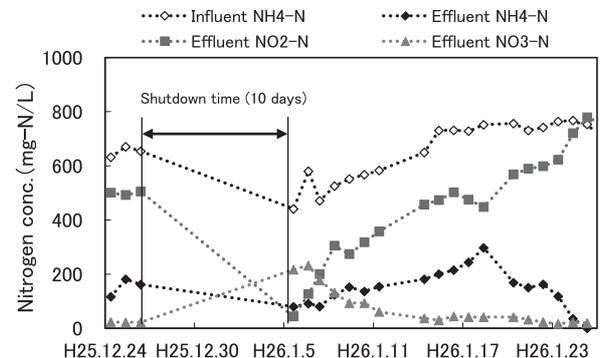


Fig. 3 Changes in nitrogen concentration in nitrification tank during case A

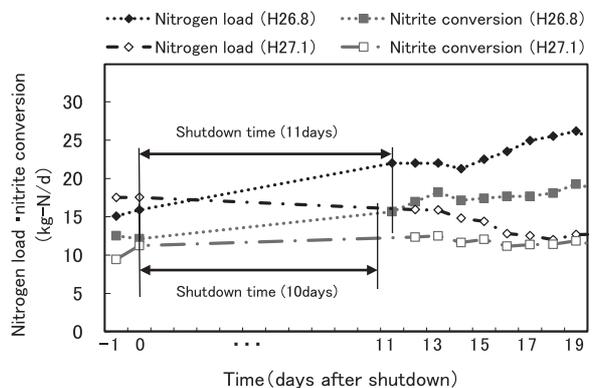


Fig. 4 Changes in nitrogen load and nitrite conversion in nitrification tank during case C and D

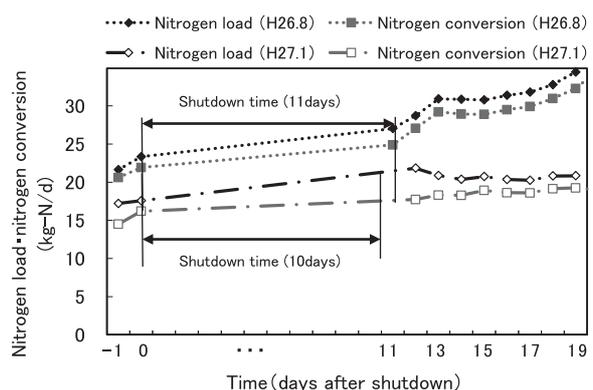


Fig. 5 Changes in nitrogen load and nitrogen conversion in anammox tank during case C and D

Table 1 Operating Condition of Shutdown State

| Case | A | | B | C | D |
|-----------|---------------|--------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|
| Phase | January H26 | | May H26 | August H26 | January H27 |
| Condition | Shutdown Time | 10 days | 9 days | 11 days | 10 days |
| | Operation | Aeration at Nitrification Tank | About 10% of steady operation | About 3% | About 3% |
| | | Heating | ○ | × | × |

確立され、最大11日間原水供給がない場合も速やかな再稼働が可能であることが確認でき、流量調整槽の大幅縮減が可能であると考えられた。

3.2 水温低下の影響と処理安定性の評価

平成26年6月の約2週間、亜硝酸化槽の水温をこれまでの35℃から30℃に低下させて運転を行なった。水温を30℃に低下させた後も亜硝酸化槽ではNO₃⁻-Nの生成はほとんど見られず、NO₂⁻-N生成率は水温35℃時と同様に80%以上を安定して維持できた。これより、以降の運転では水温の制御値を30℃とした。

平成26年8～11月の期間（前述の間欠運転期間を含む）、運転条件を一定とした定常条件での連続運転によるデータ採取を行なった。当該期間の亜硝酸化槽における窒素転換率の経日変化をFig. 6に示す。原水のNH₄⁺-N濃度255～753 mg-N/Lに対して、亜硝酸化槽ではNH₄⁺-N残留率、NO₂⁻-N生成率、NO₃⁻-N生成率はそれぞれ2～26%（平均：13%）、71～98%（平均：84%）、2～9%（平均：3%）が得られ、水温30℃の条件でも35℃と同様に安定した亜硝酸化反応を確認した。この時、アナモックス槽では窒素転換率は90%以上と安定した運転が維持できた。

当該期間を含む連続運転に際しては、前述のとおり、NO₂⁻-N/NH₄⁺-N比や水量、および水温、pH、曝気量の制御に係る操作は全て自動で運転を行なった。脱気・調整槽におけるNO₂⁻-N/NH₄⁺-N比と水量の関係をFig. 7に、プロセス全体における窒素除去率の経日変化をFig. 8に示す。亜硝酸化槽では、NH₄⁺-N残留率の設定値を10～20%の範囲で意図的に変更して運転を行なったところ、設定値に対して概ね追従して制御できた（Fig. 6）。またFig. 7に示すとおり、脱気・調整槽におけるNO₂⁻-N/NH₄⁺-N比の実測値はNH₄⁺-NおよびNO₂⁻-Nの水質センサの計測値に基づき、バイパス水量を自動制御することでほぼ設定値に制御された。

以上より、当該期間の約3.5ヶ月間にわたり、亜硝酸化槽が水温30℃の条件でも35℃と同様に処理性能

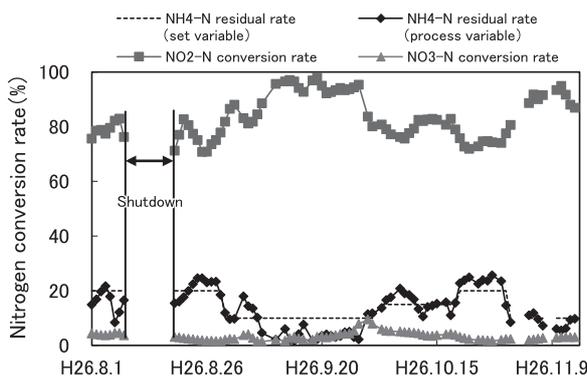


Fig. 6 Changes in nitrogen conversion rate in nitrification tank

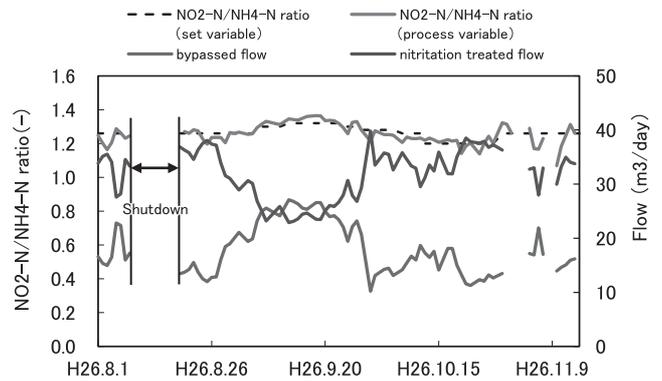


Fig. 7 Changes in NO₂-N/NH₄-N ratio and flow

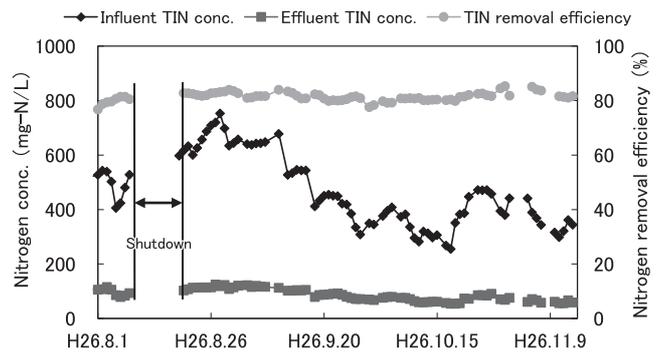


Fig. 8 Changes in nitrogen concentration and nitrogen removal efficiency in overall process

が安定して維持でき、かつ各種制御については自動で適正に制御でき、プロセス全体として窒素除去率80%程度を安定して維持できた（Fig. 8）。

4. ま と め

下水処理場における嫌気性消化汚泥脱水ろ液を処理対象として、実規模実証施設を用いて実証試験を行ない以下の成果を得た。

① 間欠運転の最適条件の検討

- ・本プロセスを長期間および短期間停止する際の操作条件は確立され、最大11日間原水供給がない場合も速やかな再稼働が可能であることが確認できた。

② 水温低下の影響と処理安定性の評価

- ・亜硝酸化槽では水温30℃でも亜硝酸化反応は安定し、同条件での運転において約3.5ヶ月間にわたり高い処理性能が安定して維持できた。
- ・当該期間を含む連続運転に際しては、NO₂⁻-N/NH₄⁺-N比や水量、および水温、pH、曝気量の制御に係る操作について自動で適正に制御できた。

謝 辞

本研究で使用した実証施設は、平成24年度に上記3者が国土交通省国土技術政策総合研究所から受託し

た B-DASH 実証研究において設置されたものである。
同研究所の関係者各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本下水道事業団技術開発部, アナモックス反応を利用した窒素除去技術の評価に関する報告書, 技術開発部技術資料 10-003, 2010.
- 2) 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), 国土技術政策総合研究所資料 No.802, 2014.
- 3) Strous M., Heijnen J. J., Kuenen J. G., Jetten M. S. M., The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 50, 589-596, 1998.