

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

平成22年3月

日本下水道事業団 技術評価委員会

審議の経過

平成21年	3月10日	第58回技術評価委員会
平成21年	6月24日	第1回アナモックス反応を利用した 窒素除去技術専門委員会
平成21年	9月18日	第2回アナモックス反応を利用した 窒素除去技術専門委員会
平成21年	12月24日	第3回アナモックス反応を利用した 窒素除去技術専門委員会
平成22年	2月17日	第4回アナモックス反応を利用した 窒素除去技術専門委員会
平成22年	3月5日	第60回技術評価委員会

委員の構成

(平成 22 年 3 月 5 日現在)

技術評価委員会

会 長	東洋大学常勤理事	松尾 友矩
委 員	京都大学大学院教授	津野 洋
〃	東京大学大学院教授	味埜 俊
〃	北海道大学大学院教授	高橋 正宏
〃	国土交通省都市・地域整備局下水道部長	松井 正樹
〃	国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部長	清水 俊昭
〃	東京都下水道局技監	小川 健一
〃	大阪市建設局理事	前田 邦典
〃	埼玉県都市整備部下水道課長	酒巻 和彦
〃	社団法人日本下水道協会理事	佐伯 謹吾
旧委員	日本大学教授	田中 和博
〃	国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部長	藤木 修
〃	東京都下水道局技監	中村 益美
〃	大阪市建設局理事	永澤 章行
〃	埼玉県都市整備部下水道課長	山口 文平

(旧委員の所属職名は委員委嘱当時のもの)

アナモックス反応を利用した窒素除去技術専門委員会

委員長	熊本大学副学長	古川 憲治
委員	広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻教授	大橋 晶良
〃	大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻教授	池 道彦
〃	国土交通省都市・地方整備局下水道部下水道企画課 下水道技術開発官	石井 宏幸
〃	国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部 下水処理研究室長	小越 眞佐司
〃	横浜市環境創造局施設管理部設備課長	高橋 慎治
〃	大阪市建設局下水道河川部水質調査担当課長代理 兼水質試験所長	中平 亨

目 次

(技術評価の経緯)	1
(技術評価の目的)	2
(評価対象技術)	2
(評価の範囲)	4
(アナモックスプロセスの特徴)	4
(設計上の留意事項)	8
(運転管理上の留意事項)	10
(適用上の留意事項)	12
(その他の留意事項)	13

(技術評価の経緯)

下水処理場の機能に求められる要求は多様化・高度化しており、処理の高度化・低コスト化に加えて、近年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るようになってきている。このような状況で、汚泥の減量とエネルギー回収を図れる嫌気性消化プロセスが再度脚光をあびている。しかし、同プロセスでは有機物の分解に伴い窒素・りんが溶液中に溶出し、これが消化汚泥の脱水ろ液を始めとした汚泥処理返流水として水処理施設へ返流されるため、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。このような栄養塩負荷の返流を低減する方法として、汚泥処理返流水の個別処理がある。汚泥処理返流水からのりん除去方法としては、りんの回収が可能なMAP（りん酸マグネシウムアンモニウム）法などが実用化されている。一方、汚泥処理返流水からの窒素除去方法としては、硝化・脱窒反応を利用した生物学的窒素除去法が利用できるが、嫌気性消化工程を含む汚泥処理返流水では、窒素負荷に対して有機物負荷が著しく低いのが通常であり、脱窒のための有機物源として多量の外部基質投入が必要となる点が課題であった。

近年になって新規に見出された窒素変換反応であるアナモックス反応は、有機物を必要としない独立栄養型の細菌により行なわれるため、有機物負荷の低い高濃度窒素排水からの窒素除去技術への応用が図られつつある。国外では、既に下水処理場の汚泥処理返流水処理や工場排水処理にアナモックス反応を利用した窒素除去プロセスが導入されており、我が国においても、工場排水を対象とした導入事例がある。一方、我が国の下水道事業においても、日本下水道事業団（JS）や大阪市において嫌気性消化汚泥の脱水ろ液を対象とした実証試験が行なわれるなど、知見が集積されてきている。アナモックス反応を利用することで、嫌気性消化工程を含む汚泥処理返流水からの高効率かつ安価な窒素

除去技術が確立されれば、嫌気性消化プロセスの導入促進や、嫌気性消化導入施設における処理水質の高度化などを図ることが可能となる。

以上のような背景から、平成21年3月、JS理事長より技術評価委員会へ諮問があり、アナモックス反応を利用した窒素除去技術について技術評価を行なうこととなった。

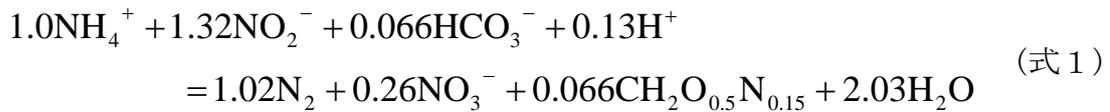
(技術評価の目的)

前述の経緯から、JSなどが実施した実験プラントによる実証実験結果を体系的に整理することにより、アナモックス反応を利用した窒素除去技術（アナモックスプロセス）の処理機能や特徴を明確にすると同時に、下水道事業へ適用する場合の設計や運転管理上の留意事項を提示することを、本技術評価の目的とする。

(評価対象技術)

1. アナモックス反応

アナモックス反応は、1990年代に見出された生物学的窒素変換反応である。本反応では、嫌気性の独立栄養細菌（アナモックス細菌）により、アンモニア性窒素および亜硝酸性窒素が窒素ガスへ変換される。その過程で水素イオンが消費されると同時に、少量の硝酸性窒素が生成する。現在提案されているアナモックス反応の実験式（式1）によれば、消費されるアンモニア性窒素と亜硝酸性窒素のモル比は1：1.32で、消費される窒素量のうち88%が窒素ガスに、11%が硝酸性窒素に変換される。



アナモックス細菌は、実験的に見出された平均倍化時間が約 11 日と、増殖速度が極めて小さいという特徴を持つ。排水処理を行なうアナモックス汚泥（アナモックス細菌が高濃度に集積された汚泥）を用いた実験的検討により、アナモックス細菌の増殖の至適温度は 37～40℃程度であることが明らかにされている。

2. アナモックスプロセス

アンモニア性窒素を主たる窒素成分とする排水へアナモックス反応を適用する場合、アナモックス反応を行なうアナモックス工程に先立ち、排水中のアンモニア性窒素の約半量を亜硝酸性窒素へ変換する部分亜硝酸化工程が必須であり、そこでは硝化反応の第 1 段階であるアンモニア酸化反応が利用される。この部分亜硝酸化工程とアナモックス工程を組合わせた処理プロセスをアナモックスプロセスと呼ぶ。アナモックスプロセスは、部分亜硝酸化工程およびアナモックス工程を別箇の反応タンクで行なう 2 槽式プロセスと、両工程を 1 つの反応タンクで行なう 1 槽式プロセスに大別される。また、これら 2 工程に加えて、排水の負荷量変動や性状に応じて、流量調整、SS 除去、BOD 除去などの前処理工程が必要となることがある。

アナモックスプロセスでは、関与する生物学的反応の特性より、以下の特長が期待できる。

- ① 有機物を必要としない独立栄養型の窒素除去プロセスである。したがって、排水中の窒素濃度に対して有機物濃度が低い場合に従来の硝化・脱窒法で必要となる外部基質の添加が不要である。

- ② 部分亜硝酸化工程ではアンモニア性窒素の約半量を亜硝酸性窒素まで変換すればよいため、従来の硝化・脱窒法に比べて必要酸素量が小さい。最適な亜硝酸化率を想定した場合の理論的な必要酸素量は、完全硝化を行なう場合の43%である。
- ③ 処理機能に関与する細菌の増殖収率が小さいため、従来の硝化・脱窒法に比べて汚泥発生量が小さい。

3. 評価対象技術

これまでに国内外で多様なアナモックスプロセスが提唱・開発されてきているが、本評価では2槽式のアナモックスプロセスを対象とする。適用場所として下水処理場（汚泥集約処理施設を含む）の嫌気性消化汚泥脱水ろ液を個別処理して同一処理場の流入系統などへ返送するシステムを対象とし、アナモックスプロセスの処理水を直接放流するケースや他の排水へ適用するケースは対象外とする。評価に当っては、我が国で嫌気性消化汚泥脱水ろ液を用いたパイロット規模での実証実験実績を有する3種類のプロセスの実験結果を主として使用する。

(評価の範囲)

本評価では、前処理、部分亜硝酸化、アナモックスの各工程を含むアナモックスプロセスを対象とする。

(アナモックスプロセスの特徴)

1. プロセス構成

本評価で対象とするアナモックスプロセスの構成上の特徴は以下のとおりで

ある。

(1) プロセス全体

- ① アナモックスプロセスは、前処理工程、部分亜硝酸化工程、アナモックス工程から構成される。
- ② 原水の水温および個別のプロセスの要件に応じて、処理工程に加温設備を設ける。

(2) 前処理工程

- ① 前処理工程は、部分亜硝酸化工程以降の処理機能を適切に維持する目的で必要に応じて設置する。
- ② 原水および個別のプロセスの特性に応じて、流量調整、有機物除去、SS 除去、りん除去などの機能を持つユニットプロセスを組み合わせる。

(3) 部分亜硝酸化工程

- ① 部分亜硝酸化工程では、流入水中のアンモニア性窒素の約半量を亜硝酸性窒素へ変換する。また、後段のアナモックス工程では流入するアンモニア性窒素と亜硝酸性窒素の比率 ($\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{+N}$ 比) が窒素除去機能に大きく影響するため、部分亜硝酸化工程において $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{+N}$ 比を調整する。
- ② 亜硝酸化には硝化反応を利用するが、亜硝酸酸化反応を抑制する必要がある。そのための方法として、水温、pH、DO 濃度などの運転条件を調整することでアンモニア酸化細菌が優占する条件を形成するものと、加熱処理などにより亜硝酸酸化細菌のみを失活させるものがある。
- ③ アナモックス工程へ供給する $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{+N}$ 比を調整する方法として、流入水の全量を亜硝酸化槽へ投入しそこでの処理条件の制御により亜硝酸化率を調整するワンパス方式と、亜硝酸化槽をバイパスさせた流入水と亜硝酸化槽流出水とを混合することで同比を調整するバイパス方式がある。ワンパ

ス方式では、亜硝酸化槽での亜硝酸化率を調整するために、同槽流入・流出水のアンモニア性窒素濃度などの計測値に基づく送風量のオンライン制御が使用される。一方、バイパス方式では、同様の計測値に基づきバイパス水量を制御する。

- ④ 亜硝酸化槽は曝気を行なう好気槽とする。様々な反応槽形式が検討されているが、本評価で検討対象とした3プロセスでは、運転管理の簡便性と反応槽容積の縮小を図るため、汚泥返送系を持たない固定床や流動担体といった生物膜型反応槽が使用されている。
- ⑤ 亜硝酸化槽ではアンモニア酸化反応によりアルカリ度が消費されるため、流入水の窒素濃度およびアルカリ度に応じて、アルカリ剤の添加が必要となることがある。アルカリ剤としては安定した亜硝酸型硝化を維持する見地から重炭酸ナトリウムや炭酸ナトリウムが広く使用されるが、より安価な水酸化ナトリウムを併用または単独で用いるプロセスもある。
- ⑥ 亜硝酸化槽の後段に、亜硝酸化槽流出水と同槽バイパス水の混合、制御用水質測定、残存 DO の消費、アナモックス槽流入水の pH 調整などの機能を想定した小容量の調整槽を設ける。

(4) アナモックス工程

- ① アナモックス工程では、アナモックス反応により、流入したアンモニア性窒素および亜硝酸性窒素を窒素ガスへと変換する。
- ② アナモックス槽は無酸素槽とする。様々な反応槽形式が検討されているが、本評価で検討対象とした3プロセスでは、増殖速度の小さいアナモックス細菌を高濃度に保持する目的で、汚泥返送系を持たない固定床、流動担体、グラニュール（自己造粒汚泥）といった生物膜型反応槽が使用されている。
- ③ アナモックス工程ではアナモックス反応により水素イオンが消費されるた

め、硫酸など酸の添加が必要となることがある。ここでは、アナモックス槽に直接添加する方法に加えて、前段の調整槽で添加する方法がある。

2. 処理機能上の特徴

本評価で検討対象とした3種のアナモックスプロセスの実証実験結果などに基づく処理機能上の特徴は以下のとおりである。

- ① 主たる窒素成分としてアンモニア性窒素を高濃度に含む嫌気性消化汚泥脱水ろ液に対して、部分亜硝酸化工程とアナモックス工程の組合せにより、70～80%の窒素除去率が期待できる。適用可能な窒素濃度および窒素容積負荷はプロセスにより異なるが、本評価で使用した実証実験実績ではそれぞれ700～1,000 mgN/L、0.7～2.0 kgN/(m³・日)程度である。
- ② 部分亜硝酸化工程では、前処理およびプロセス固有の条件設定を適切に行なうことで、硝酸性窒素の生成を概ね完全に抑制しながら安定的に亜硝酸化を行なうことが可能である。ただし、流入水性状や条件設定によっては硝酸性窒素の生成が見られる場合もある。その場合、後段のアナモックス工程では硝酸性窒素が大きくは除去されないため、処理水窒素濃度を上げる要因となる。亜硝酸化槽で期待できる亜硝酸化速度はプロセスにより異なるが、本評価で使用した実証実験実績では0.8～1.7 kgN/(m³・日)程度である。
- ③ アナモックス槽では、流入するNO₂⁻-N/NH₄⁺-N比が窒素除去率に大きく影響する。流入NO₂⁻-N/NH₄⁺-N比が適切に保たれていれば、80%以上の窒素変換率（アンモニア性窒素と亜硝酸性窒素の総量の減少率）が期待できる。ただし、反応した亜硝酸性窒素の一部は硝酸性窒素に酸化されるため、これを加味した窒素除去率は、窒素変換率に対して最大で10%程度低くなる。アナモックス槽で適用可能な窒素負荷はプロセスにより異なるが、本評価で使用した実証実験実績では2.8～5.4 kgN/(m³・日)程度である。アナモックス槽

で未反応の亜硝酸性窒素が高濃度に残留すると、同槽の処理機能が著しく低下することがある。

- ④ 条件により、亜硝酸化槽やアナモックス槽で従属栄養型の脱窒による窒素除去が付加的に生じる可能性がある。
- ⑤ プロセスの立上げ期間は初期に投入する種汚泥の濃度およびプロセスにより異なるが、本評価で使用した実証実験実績では亜硝酸化槽について0.5～1ヶ月程度、アナモックス槽について2～3ヶ月程度である。

(設計上の留意事項)

1. アナモックスプロセスの導入検討

- ① アナモックスプロセスを含む複数の返流水個別処理技術について、導入の効果、所要の施設容量、建設/改造コスト、維持管理コストなどを総合的に比較評価し、最適な返流水個別処理技術を選定する。ここでは、アナモックスプロセス以外の処理技術（硝化・脱窒法、アンモニアストリッピング法など）では、脱水ろ液以外の汚泥処理返流水も処理対象となる可能性がある点に留意する。
- ② 個別のアナモックスプロセスの設計検討結果などに基づき、施設容量、建設/改造コスト、維持管理コストなどを総合的に比較評価し、最適なプロセスを選定する。

2. アナモックスプロセスの設計検討

(1) 流入条件およびプロセス構成

- ① 対象下水処理場の実績などに基づき、アナモックスプロセスの処理対象とする脱水ろ液の水量（変動パターンを含む）、水質、水温などの流入条件を設定する。

- ② 流入条件およびプロセス固有の要件に基づき、前処理工程および加温設備を含めたプロセスフローを検討する。
- ③ ユニットプロセスごとに水量、固形物、有機物、窒素、りん、アルカリ度などの収支を検討し、各ユニットプロセスの流入負荷量、所要の変換量・除去量を算出する。

(2) 前処理工程

- ① 対象下水処理場の脱水機の運転状況を考慮して、脱水機停止時にもアナモックプロセスへ最低限の原水供給が可能となるような流量調整槽を検討する。
- ② 原水に高濃度の SS が含まれる場合には、凝集沈殿などの SS 除去工程の導入を検討する。ただし、プロセスによっては高濃度の SS 流入が大きく処理性能に影響を与えないものもある。また、原水性状などにより MAP の生成が予想される場合にも、凝集沈殿処理によるりん濃度低減策を検討する。
- ③ 原水に高濃度の溶解性 BOD が含まれる場合には、有機物除去工程の導入を検討する。

(3) 部分亜硝酸化工程

- ① 所要の亜硝酸化量および個別プロセスの特性として期待できる亜硝酸化速度に基づき、亜硝酸化槽の容量を決定する。
- ② アルカリ度収支計算などに基づき、アルカリ剤添加量を検討する。アルカリ剤としては、個別のプロセスの実験実績などに基づき、重炭酸ナトリウム、炭酸ナトリウム、水酸化ナトリウムなど（複数のアルカリ剤の併用を含む）を使用する。
- ③ 流入条件やプロセス固有の特性などに基づき、流入水バイパス設備、調整槽関連設備、散気装置、ポンプ類、薬品添加設備、汚泥排出設備、計装・制御

設備などの付帯設備・機器類を検討する。

(4) アナモックス工程

- ① アナモックス槽では、条件によっては従属栄養型の脱窒の同時進行も期待できるが、現状ではこれを予測・制御することが困難なので、基本的にはアナモックス反応単独での窒素変換量および窒素変換速度（アンモニア性窒素と亜硝酸性窒素の総量の減少量および減少速度）に基づく設計を行なう。
- ② 所要の窒素変換量およびプロセス固有の特性として期待できる窒素変換速度に基づき、アナモックス槽の容量を決定する。
- ③ 反応槽内で局所的に亜硝酸性窒素が高濃度とならないよう、槽形状や混合特性を検討する。特に、押出し流れ型の混合特性を持つ反応槽を使用する場合には、内部循環経路の設置など亜硝酸性窒素の局所的な高濃度化を避けるための措置を検討する。
- ④ 水素イオン濃度の収支計算などに基づき、酸の添加量を決定する。酸としては、硫酸や塩酸などを使用する。
- ⑤ 流入条件やプロセス固有の特性などに基づき、内部循環設備、攪拌装置、ポンプ類、薬品添加設備、汚泥排出設備、計装・制御設備などの付帯設備・機器類を検討する。

(運転管理上の留意事項)

1. プロセスの立上げ

- ① 前処理および亜硝酸化工程を立ち上げた後にアナモックス工程の立ち上げを行なう。
- ② 亜硝酸化槽およびアナモックス槽の立ち上げに当っては、処理状況を監視し

ながら段階的に流入負荷量を引上げる。流入負荷量の調整は流入水量によることを基本とするが、立ち上げ初期においては、二次処理水などによる流入水の希釈運転も検討する。

- ③ アナモックス槽では、高濃度の亜硝酸性窒素による阻害を避けるため、亜硝酸性窒素の残留が生じないような流入負荷量設定を行なう。

2. 運転管理

- ① プロセス固有の最低処理水量が常時確保できるよう、脱水機の運転方法および流量調整タンクの運転条件を調整する。
- ② 各処理工程において、主たる処理対象となる水質項目について流入水および処理水質を定期的に測定し、処理状況を把握する。加えて、各処理工程の流入負荷量がプロセス固有の適正範囲であるかどうかについても確認を行なう。
- ③ 亜硝酸化槽およびアナモックス槽については、流入水および処理水の無機性窒素成分組成（アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素）を測定し、各工程における窒素成分の変換状況を把握しながら運転管理を行なう。
- ④ 処理機能に対する影響度合いの大きい重要なモニタリング項目として、(a) 亜硝酸化槽流入水の SS 濃度、(b) 亜硝酸化槽流入水の C-BOD 濃度、(c) 亜硝酸化槽流入水のアンモニア性窒素濃度、(d) 亜硝酸化槽の pH および DO 濃度、(e) アナモックス槽流入水の亜硝酸性窒素濃度、(f) アナモックス槽流入水の $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、(g) アナモックス槽の pH がある。
- ⑤ 亜硝酸化槽およびアナモックス槽では、生物膜型反応槽を利用するプロセスであっても、槽内の汚泥蓄積状況を定期的に確認し、適宜汚泥を排出する。また、担体などに過剰な汚泥が付着すると処理機能が低下することがあるため、処理水質の悪化が見られるような場合には、担体などへの汚泥付着量を

確認し、必要に応じて逆洗などの改善操作を行なう。

(適用上の留意事項)

1. 処理対象

本技術は、アンモニア性窒素濃度が高く有機物濃度が低い排水に有効である。したがって、下水道事業における主たる処理対象は嫌気性消化汚泥の脱水ろ液とする。他の排水への適用を検討する場合には、当該排水を用いた処理実験などにより、阻害の有無、必要な前処理、期待できる処理速度などについて事前に十分に検討を行なう。

2. 導入コスト

本技術を嫌気性消化汚泥脱水ろ液に適用する場合、従来の硝化・脱窒法と比較して、(a)反応タンク容量の縮小に伴う土木工事費、(b)送风量削減に伴う機器費および電力費、(c)メタノール添加に係る設備費および薬品費、(d)当該プロセスで発生する汚泥の処理・処分費などが主たるコスト削減要因である。一方、原水の水質や水温に応じて、(a)亜硝酸化槽のアルカリ添加に係る薬品費、(b)アナモックス槽の酸添加に係る設備費および薬品費、(c)反応タンク加温に係る設備費および動力費（原水水温が低い場合）、(d)前処理に係る設備費・動力費・薬品費などの追加のコストが発生する。また、プロセスによっては、部分亜硝酸化工程での窒素成分比率（ $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{+N}$ 比）を制御するための水質センサーに係る設備費も必要となる。

嫌気性消化を行なう処理能力 6 万 $\text{m}^3/\text{日}$ の下水処理場への返流水個別処理の導入を想定したケーススタディでは、本技術の建設費は 1 日の除去窒素量当り 1.5～2.7 百万円/kgN、ユーティリティ費は除去窒素量当り 240～370 円/kgN と試算される。

3. 温室効果ガス発生量

上記のケーススタディにおいて試算された本技術のユーティリティ使用量を二酸化炭素排出量に換算すると、除去窒素量当り 5.7~8.6 kgCO₂/kgN となる。一方、本技術では、亜硝酸化槽などにおいて、従来の硝化・脱窒法と同様に亜酸化窒素が発生する可能性がある。

4. 種汚泥

アナモックス槽の立上げ期間は、初期に投入できる種汚泥（アナモックス汚泥）の濃度に依存する。従って、個別のアナモックスプロセスの比較評価に当たっては、種汚泥の供給方法についても考慮する必要がある。

(その他の留意事項)

アナモックスプロセスは、下水処理場の汚泥処理返流水だけでなく、食品、半導体、革なめしなどの事業場排水の処理へと既に導入されている。加えて、ごみ処分場浸出水、畜産排水、メタン発酵プラント脱離液、天然ガス製造所かん水など、多様な排水を対象とした窒素除去プロセスへの展開が実験的に検討されている。一方、本技術評価で対象とした2槽式のアナモックスプロセスに加えて、部分亜硝酸化とアナモックスの両工程を同一の反応槽で行なう1槽式のプロセスも開発されており、既に実機が導入されているものもある。これらの技術動向には、今後も着目していく必要がある。