

1. 装置の詳細説明

本装置は、下水処理水の放流先が閉鎖性水域など水質基準の厳しい場合に、富栄養化の原因となる窒素、リンを除去する高度処理を目的とした装置である。

下水処理分野では、放流先である閉鎖性水域の環境改善を目的として、汚水中の BOD 除去に加えて、富栄養化の原因となる窒素、リンを除去する下水放流水の高度処理化が求められており、国が主導する流域別下水道整備総合計画に基づき、多くの下水処理場では嫌気無酸素好気法（以下、A2O 法と記載）の整備計画が策定されている。しかし、高度処理化には膨大な建設コストが掛かり、さらには処理のための電気使用量が増加するといった課題もあることから、2013（平成 25）年時点での高度処理実施率は 41%¹⁾ に留まっている。このような背景から、従来型の高度処理技術に代わる、新たな省エネルギー型高度処理技術の必要性が高まっている。

以下に紹介する新たな高度処理技術＜嫌気・同時硝化脱窒処理＞（以下、本装置と呼ぶ）は、従来の高度処理法である A2O 法と比較して電力使用量が少なく処理能力が高いため、水質改善と省エネルギーの両立を図ることができるとともに、既存施設の軽微な改造により低コストで早期に導入することが可能な深槽反応タンク用の革新的な下水高度処理装置である。

(1) 本装置の構成

本装置の構成を図 1 に示す。本装置は、主に以下の 4 つで構成される。

- 1) 深槽反応タンク設備
- 2) 水質センサー（硝酸等を測定する NOx 計、アンモニアを測定する NH₄ 計）
- 3) 風量演算装置
- 4) 送風設備（ブロワ、送風管、風量調節弁）

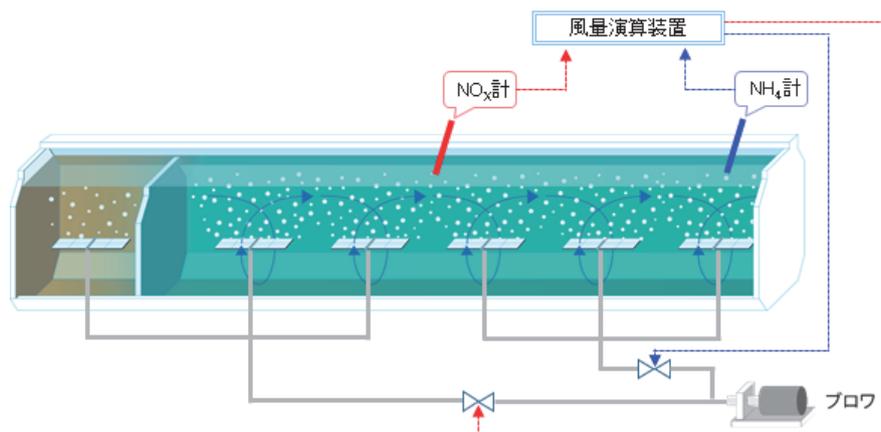


図1 本装置の構成

(2) 処理の原理

汚水処理では水中の汚濁物質を様々な手法により除去するが、下水処理においては活性汚泥と呼ばれる微生物の集合体を利用する方法（以下、活性汚泥法）が一般的であり、高度処理ではBODのほかに、閉鎖性水域の富栄養化原因となる窒素、リンが除去対象となる。

図2に従来の高度処理方式であるA2O法の反応タンクとイメージを示す。リンについては、反応タンク前段に嫌気槽を設け、嫌気好気活性汚泥法と同様の原理で生物学的リン除去を行う。

窒素については、概ね以下の二種類の生物反応によって除去されるが、通常はタンク内に設置される隔壁などによって空間を分割し、それぞれの反応を個別に進行させる。

- 1) 反応タンクと呼ばれる容器内に保持された活性汚泥に対して空気（酸素）を供給し、溶存酸素（以下、DO）の多い環境下でアンモニアを酸化（硝化）する。
- 2) アンモニアの酸化によって生じる硝酸などの窒素化合物は、空気の供給が無く、DOの少ない環境下において還元（脱窒）され、窒素ガスとなり大気中に放出される。

一方、本装置の適用対象である水深10m程度の深槽反応タンクでは、エアレーション装置から出た気泡によって旋回流を作り出し活性汚泥と下水に空気（酸素）を供給することで混合して汚水を処理する。我々は、その旋回流内で硝化反応や有機物の分解などによって酸素が消費されることで、旋回方向にDOの濃度差が生じることを突き止め、深槽反応タンク内に設置される隔壁などで空間を分割することなく、適切な空気量の調整のみにより硝化と脱窒を効率よく進行させる手法を検討した。図3に旋回流中でのDO濃度差発生イメージを示す。

具体的には、2つの水質センサーを活用し、以下の4つの観点から、好氣的処理に必要な最低量の空気を供給する風量制御を行う。

- ① 低DO濃度領域で脱窒可能な量の硝酸を、好気領域（硝化ゾーン）において生成させる
- ② エアレーション装置の下部や反応タンク下部に脱窒可能な低DO濃度領域（脱窒ゾーン）を形成する
- ③ 硝化を常に完了させ硝化細菌の活性と菌数を維持できるようにする
- ④ 脱窒に必要な水素供与体である有機基質を反応タンクの流下方向に可能な限り残存させ、

好気タンク（以下、同時硝化脱窒タンクという）内でより多くの脱窒が起きるようにする

このように硝化と脱窒にそれぞれ適した DO 濃度領域をバランス良く形成することは、従来のような反応タンク全体の送風量を一括制御する方法では困難である。

そこで本装置では、硝化反応と脱窒反応を同時に発生させるため、同時硝化脱窒タンクを前半と後半に分けて、2つの水質センサーにより個別に送風量を制御している。図4に本装置の反応タンクの構成と制御のイメージを示す。

具体的には、有機物濃度が高く脱窒が起りやすい同時硝化脱窒タンク前半をNO_x計により脱窒可能なNO_x量を確保するように送風量を制御（①、②）し、後半はアンモニア計により硝化を確実に完了させつつ硝化に必要な最低の風量に制御（③、④）をしている。このようにして深槽反応タンクにおける同時硝化脱窒タンク内で硝化反応と脱窒反応を行うことで、A20法では脱窒のために必要であった無酸素タンクを設置することなく、窒素除去を行うことを可能とした。

また、本装置はA20法で用いる硝化液循環ポンプや、無酸素タンク用攪拌機の設置も不要であるため、A20法に比べて大幅に消費電力を低減することが可能である。

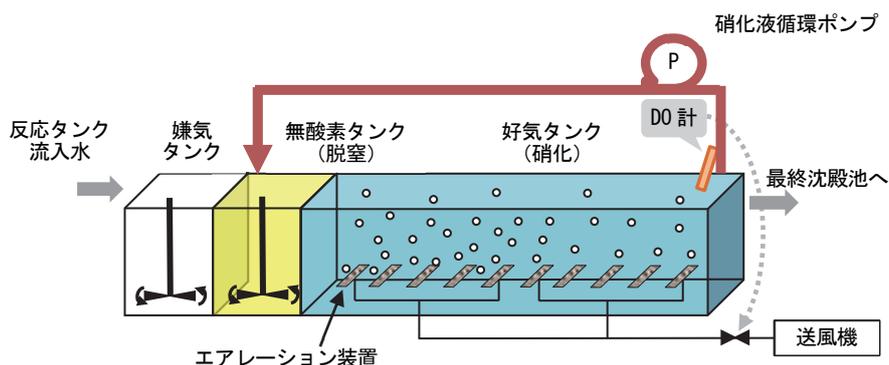


図2 従来技術_嫌気無酸素好気法（A20法）の反応タンク構成と制御のイメージ

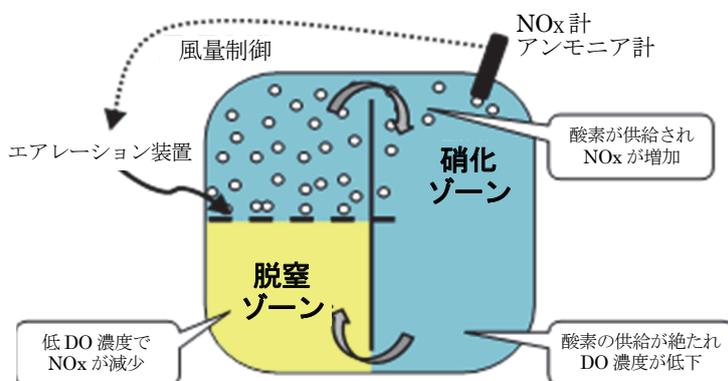


図3 旋回流中でのDO濃度差発生イメージ

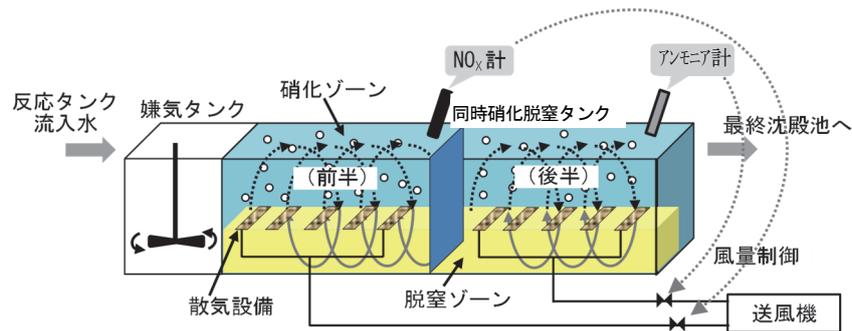


図4 新たな高度処理装置の反応タンクの構成と制御のイメージ

(3) 反応タンクの構造

本装置は、深槽式の同時硝化脱窒タンクを前半と後半に分けて送風量を制御することから、既存の標準活性汚泥法施設を改造して導入する場合は、以下の軽微な改造で済む。

- ・ 反応タンク内にリン除去に必要な嫌気タンクを確保するための仕切り壁を設置
- ・ 同時硝化脱窒タンクを前半と後半に分ける仕切り壁を設置

(4) 水質センサー

本装置では二種類の水質センサーを以下の用途で用いる。

① NO_x 計

同時硝化脱窒タンク前半の出口付近に設置し、硝化と脱窒のバランスを維持するように送風量を制御するために用いる。

② アンモニア計

同時硝化脱窒タンク後半の出口よりも少し上流に設置し、硝化を確実に完了させるとともに硝化に必要な最低の送風量に維持することで脱窒を促すために用いる。

(5) 风量演算装置 (新たな送风量制御手法)

本装置は、送风量の制御に従来の DO 計ではなく NO_x 計とアンモニア計を用いている。これら制御指標は単位送风量あたりの応答性が全く異なるため、制御手法は従来の PID (Proportional - Integral - Derivative) 制御ではなく、将来の状態予測が可能なモデル予測制御を用いる。

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

1) 開発の趣旨

我が国では、下水道施設において使用される電力が国内全体の使用量の約 1%と莫大な量となっている。地球温暖化防止の観点からも下水処理場での省エネルギー対策は重要である。このため、従来型高度処理技術である A2O 法に比べてイニシャル、ランニング双方のコストを低減可能な高度処理技術を開発する。

2) 背景

図5に全体計画で高度処理を位置付けている処理場の現状を示す。国土交通省が、2013（平成25）年1月から11月にかけて3回にわたって実施した高度処理に係る全国アンケート調査によると、全体計画で高度処理を位置付けている処理場は、全国の処理場数2,208箇所（4,192系列）のうち、約27%にあたる593箇所（1,645系列）であった。全体計画で高度処理を位置付けている処理場のうち、約44%の施設では高度処理が導入されていたが、事業計画で位置付けているものの高度処理を導入していない施設が約11%、事業計画に位置付けていない施設が約22%と、必要性が高いにもかかわらず取り組みに至っていない施設が多い。その理由として、耐用年数や費用等の問題から全面的な増改築が当面見込めない処理場が多数あることが挙げられる。

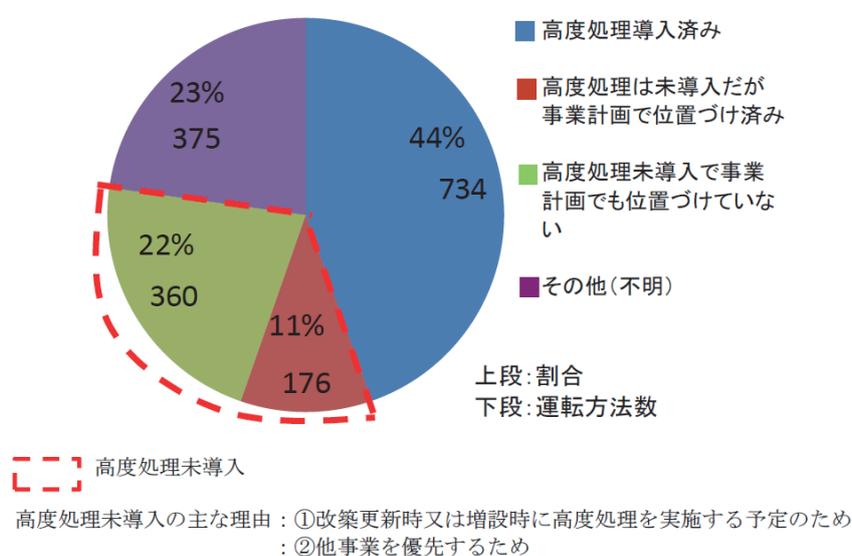


図5 全体計画で高度処理を位置付けている処理場の現状¹⁾

3) 開発の目標

A20法と比較して電力使用量が少なく、かつ処理能力も高く、水質改善と省エネルギーを両立させるとともに、既存施設の軽微な改造により低コストで早期に導入することが可能な装置を開発する。

4) 開発の経緯

2011年11月～2013年9月	簡易提供型共同研究を実施 件名：アンモニア計と硝酸計を組み合わせた曝気空気量の制御技術の開発 開発場所：芝浦水再生センター 本系深槽西系 共同研究先：東京都下水道局、東京都下水道サービス株式会社、メタウォーター株式会社
2013年11月	東京都下水道局技術管理委員会で新たな高度処理法としての要件を満たしていることから、実用化すべき技術として承認

2014年3月	プレス発表 『水質改善と省エネルギーの両立を図る「新たな高度処理技術」を開発しました～東京下水道の新技术～』
2015年4月	第1号機納入
2016年2月	「東京都下水道局経営計画2016」に本技術による高度処理の拡大を提示

(2) 共同開発

本装置は、東京都下水道局、東京都下水道サービス株式会社、メタウォーター株式会社が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は、次のとおりである。

- ・東京都下水道局：
実施の運転手法の研究と改善、効率的な実運転の確立と実施、基礎原理の確立、設計手法開発と標準化
- ・東京都下水道サービス株式会社：
研究計画の立案、調査研究の主導、システム評価
- ・メタウォーター株式会社：
研究計画の立案、研究調査の実施、設備の建設、設計手法開発と標準化

3. 独創性

(1) 旋回流を活用した処理機構の発見

活性汚泥の混合と効率的な酸素供給の手段として、深槽反応タンクで用いられる旋回流に着目し、生物反応による旋回方向のDO挙動を詳細に調査した結果、反応タンク断面方向に生じるDO勾配を利用することで、旋回流に沿って硝化反応と脱窒反応を連続的に生じさせることができることを初めて発見した。

(2) 新たな制御指標の採用

人々の活動によって生じた汚水は下水管によって集められ下水処理場に流入する。このため、下水の量と質は時間とともに大きく変化し、処理に必要な空気の量も変動する。従来は下水処理では、反応タンク内における窒素の処理状況の変化をDO計などによって間接的に把握し、送風量を調整する手法が一般的である。送風量を徐々に増加させるような状況を想定したとき、送風を開始してしばらくは硝化反応に必要な酸素が速やかに消費されるため、酸素は残留せずDOは検出されない。一方で、硝化が進行しない、つまり汚水中のアンモニアが全て酸化された状態では余剰な酸素が生じ、DOとして検出されることになる。処理の安定性の観点から、DOの設定値を1～2mg/L程度に設定し、硝化が確実に進行するように維持する運転が一般的であるが、これは、硝化反応に必要な酸素よりも常に多くの酸素を供給することを意味し、エネルギーの無駄につながる。

一方、本装置では、処理対象となるアンモニアや硝酸といった物質を直接的かつリアルタイムに測定するため、処理状況に応じて常に必要最低限の空気供給を行うことができ、従来に比べて大幅なエネルギーの削減を実現した。

さらには、過剰な空気供給を防止することが、反応タンク内において脱窒反応に適した低DO

領域をより多く確保することにつながるため、結果として窒素除去効率の向上にも寄与する。

(3) 独自の風量制御手法

従来の送風量制御では、管理指標に DO 計を用いており、フィードバック制御の 1 つである PID 制御が用いられることが多く、本装置の制御も当初 PID 制御を検討し NO_x やアンモニア (図中では NH₄-N) の制御を試みたが、図 6 に示すように風量が大きく上下し、また、風量と NH₄-N 濃度の変化に時間のズレが生じた。この現象は、P、I、D それぞれの係数を調整しても解消できなかった。

その理由は、NO_x 計やアンモニア計で硝酸濃度やアンモニア濃度を計測し窒素処理の状況を直接把握して送風量を制御しようとするとき、これらの濃度変化は、微生物による硝化や脱窒といった代謝過程を経て現れるため、送風量を変化させてからその結果が現れるまでの時間(無駄時間や一次遅れ時間)が、DO 濃度に変化が現れるまでの時間よりも長くなるためである。

そこで本装置では、プロセスの動的モデルに基づいて未来の挙動を予測し制御するモデル予測制御 (Model Predictive Control) を送風量制御に用いて NO_x 設定値や NH₄-N 設定値に対する送風量の追従性と安定性を実現することに成功した。^{2) 3)} 図 7 はモデル予測制御時の NH₄-N と送風量の時間変動であり、アンモニア設定値に対する実測値と送風量の変化は、図 6 の PID 制御の結果に比べて極めて安定していることが分かる。

モデル予測制御は未来挙動を予測するフィードフォワード機能をベースに、予測と実測の差異を補正するフィードバック機能を兼ね備えた制御技術である。なお、予測と実測の差異の補正は、12 時間前までに蓄積したデータを参照しながら、類似する状況を再現するように行うが、類似する状況がない場合は、フィードバック機能にて補正を行う。

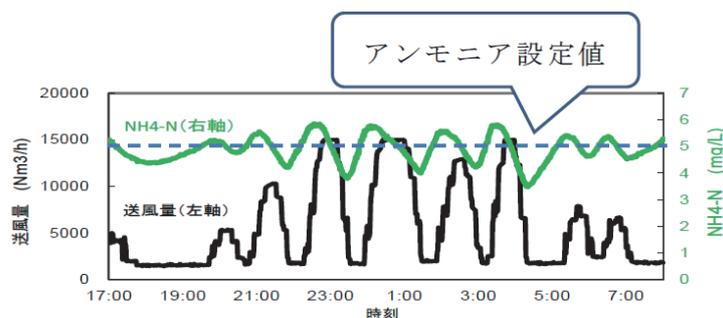


図 6 PID 制御時の NH₄-N 濃度と送風量の時間変動 (2012. 11. 7~8)

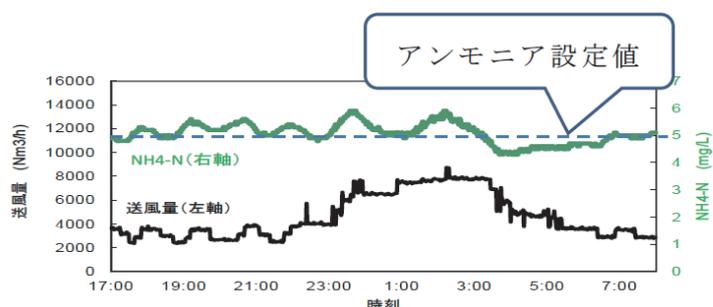


図 7 モデル予測制御時の NH₄-N と送風量の時間変動 (2012. 11. 4~5)

(4) 固定概念を覆す新たな高度処理技術

窒素除去を行う上では硝化反応と脱窒反応を効率よく進めることが重要である。しかしながら、二つの反応は異なる DO 環境を必要とするため、壁を設置して物理的に仕切るか、または時間的に DO の多少を切り替えることにより、双方の反応効率を最大化させることが重要と考えられてきた。また、壁によって反応タンクを仕切る場合、脱窒に必要な有機物が多く存在する流入部付近で脱窒することが効率的なため、下流側で硝化した硝酸などをポンプによって移送（硝化液の循環）する必要がある。さらには、脱窒環境の維持と活性汚泥の混合のために、専用の攪拌機を設置するため、付帯機器が多数必要となり、建設コストや消費電力の増加、維持管理負担の増大につながる。

一方、本装置の開発過程においては、壁による仕切りが無い状態であっても硝化と脱窒を両立できる可能性を見出し、それを具現化する様々な手法を取り入れることで、従来の常識にとられない全く新しい処理技術を確立し、これまで高度処理の普及を妨げていた全ての課題を解決することが可能となった。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み。

特許番号：第 6022536 号

/ 名称：排水の処理装置、排水の処理方法、および排水の処理システム、並びに制御装置、制御方法、およびプログラム

特許番号：第 5878231 号

/ 名称：排水の処理装置、排水の処理方法、および排水の処理システム、並びに制御装置、制御方法、およびプログラム

特許番号：第 6022537 号

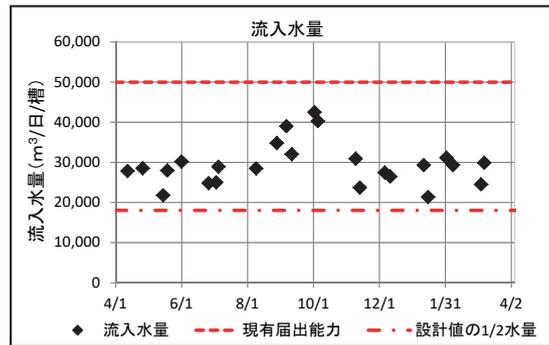
/ 名称：排水の処理装置、排水の処理方法、および排水の処理システム、並びに制御装置、制御方法、およびプログラム

5. 性能

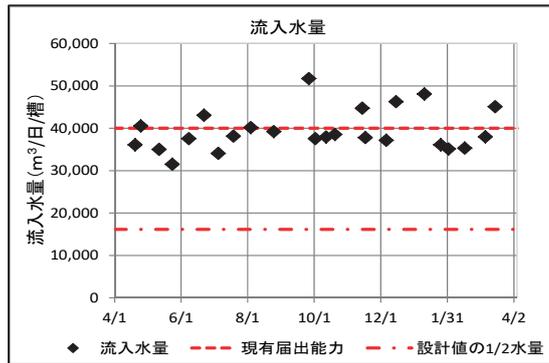
(1) 実施設における処理水質

高度処理に求められる主な水質基準として、水域の富栄養化の原因となる窒素とリンに加え、有機汚濁指標である BOD の 3 つが挙げられ、基準値は窒素（図中では T-N）が 20mg/L 以下、リン（図中では T-P）が 3mg/L 以下、BOD が 15mg/L 以下と定められている。そこで、稼働中の実施設（3センター）における流入水量の変動と処理水中の各指標について調査した結果を図 8～11 に示す。

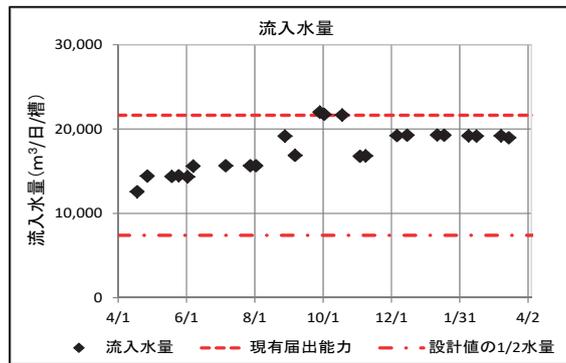
放流水の窒素、リン、BOD のいずれにおいても、年間を通じて常に基準値を満足しており、流入水量の変動に対しても安定的な高度処理が行われていることが分かる。



(ア) A 水再生センター

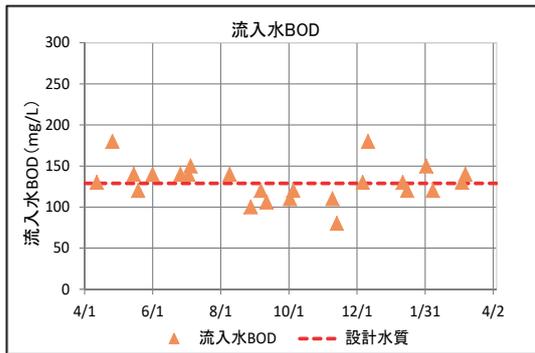


(イ) B 水再生センター

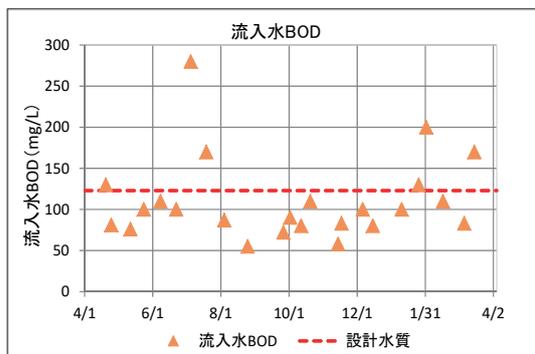


(ウ) C 水再生センター

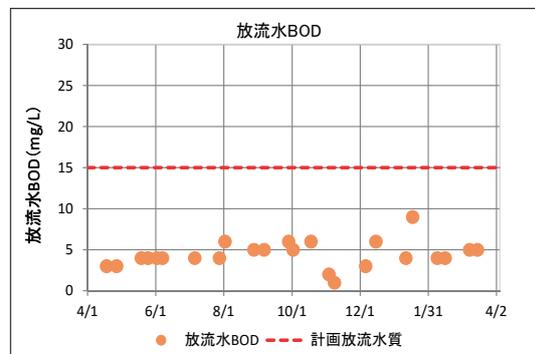
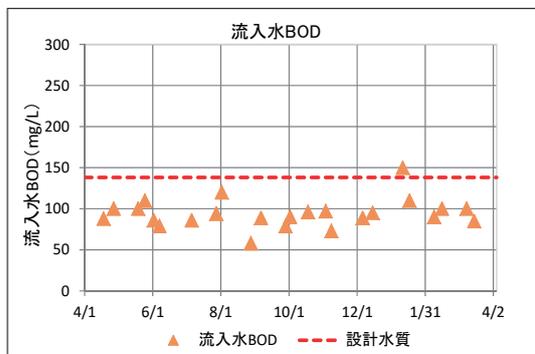
図8 流入水量推移



(ア) A 水再生センター

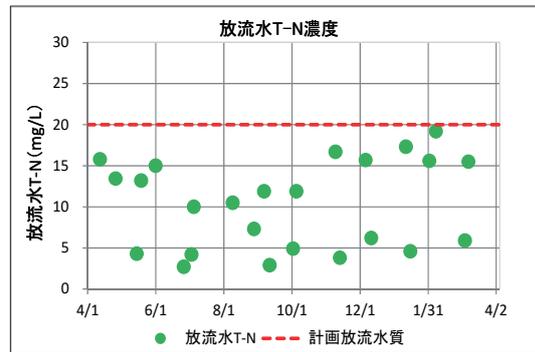
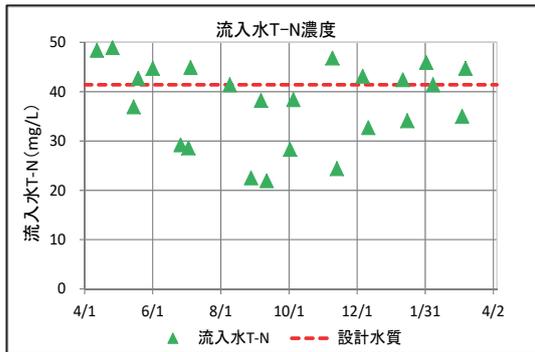


(イ) B 水再生センター

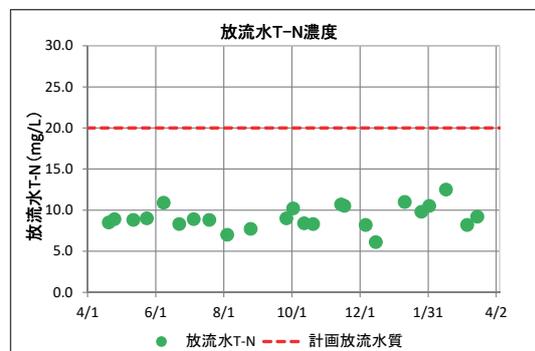
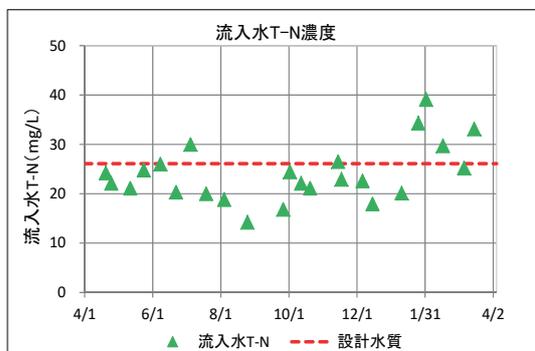


(ウ) C 水再生センター

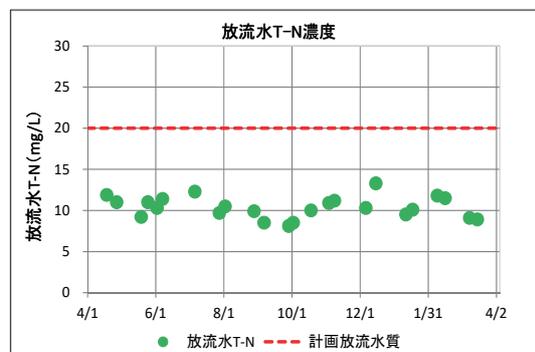
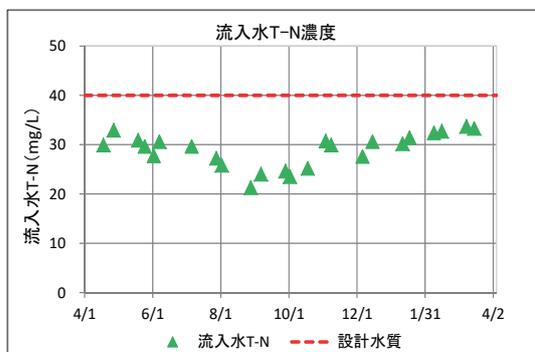
図9 反応タンク流入水と放流水のBOD



(ア) A 水再生センター

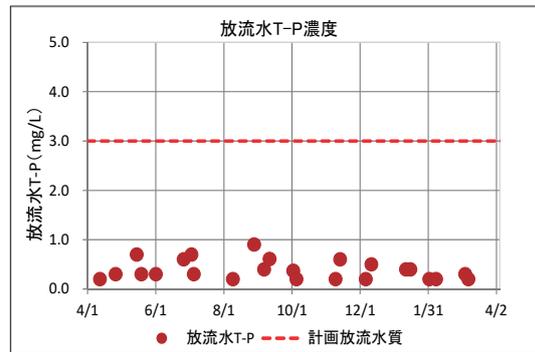
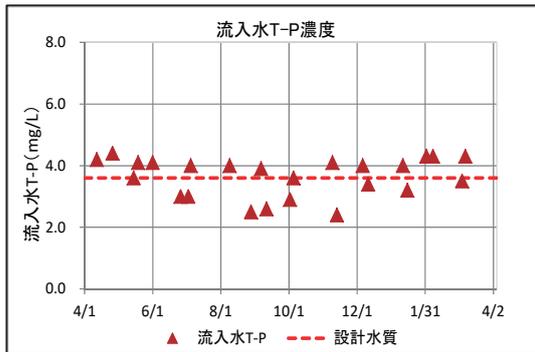


(イ) B 水再生センター

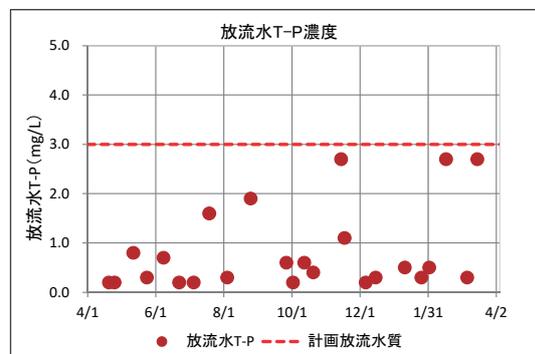
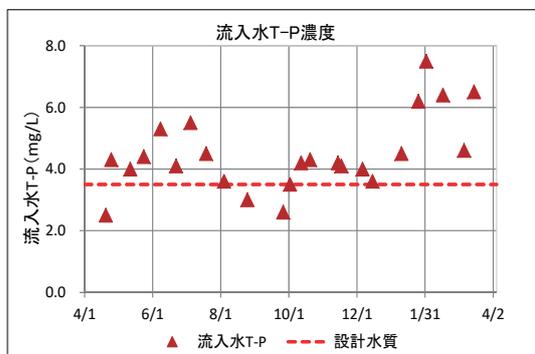


(ウ) C 水再生センター

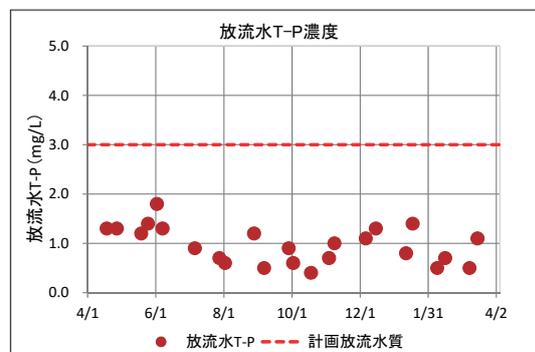
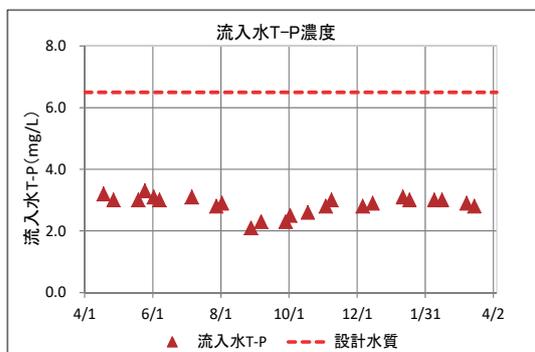
図10 反応タンク流入水と放流水のT-N濃度



(ア) A 水再生センター



(イ) B 水再生センター



(ウ) C 水再生センター

図 11 反応タンク流入水と放流の水 T-P

(2) 流下方向における窒素処理状況と DO 分布⁴⁾

A 水再生センターにおいて休日に行った調査で得られた DO 濃度分布を図 12 に、無機態窒素の挙動を図 13 に示す。図 12 からエアレーション装置下部や反応タンク下部に低 DO 領域が形成されていること、図 13 から好気タンク前半では硝酸濃度が増加せずにアンモニア、亜硝酸、硝酸の無機態窒素の合計濃度が減少していること、また、後半でも無機態窒素の合計濃度が減少し脱窒が生じていることが確認できる。ただし、反応タンク出口に近付くにつれて硝酸濃度が増加するとともに無機態窒素の濃度減少幅は小さくなり脱窒が弱まっている。これは、脱窒に必要な水素供与体となる有機基質の濃度の減少や酸素消費速度の低下により脱窒に必要な低 DO 領域が減少したことによると考えている。

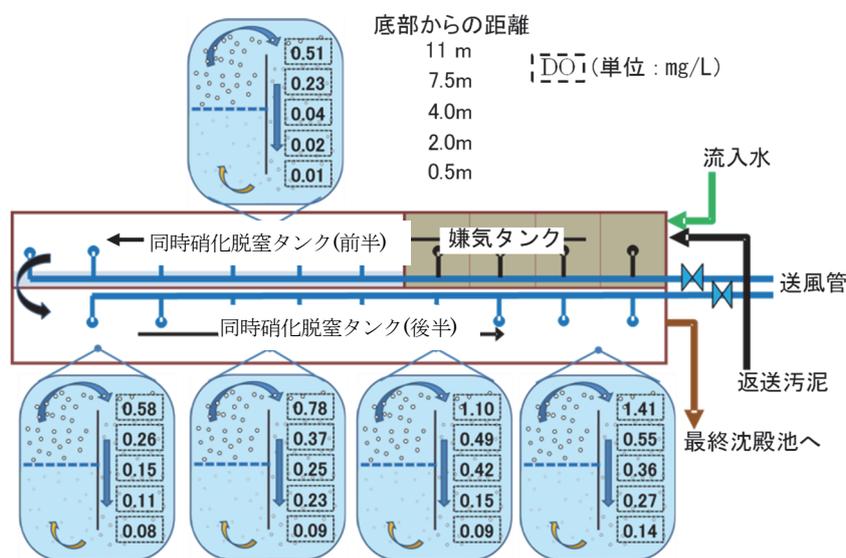
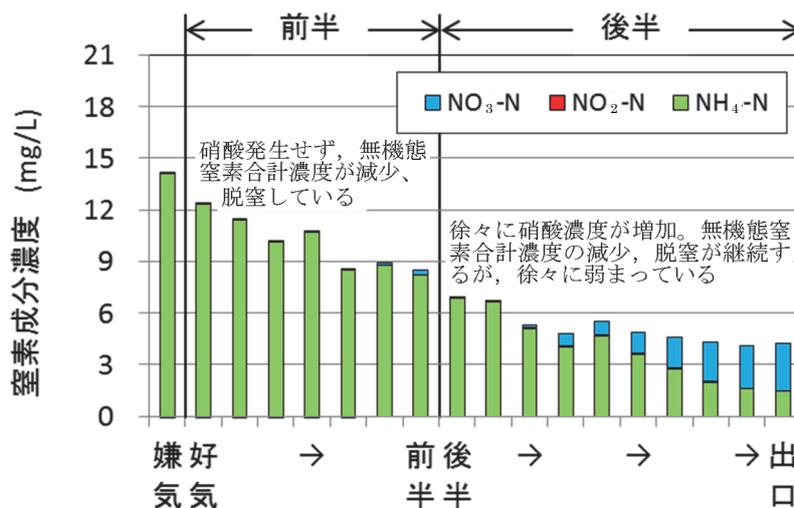


図 12 DO 濃度差の具体例



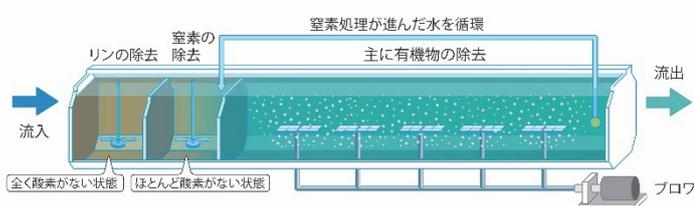
※無機態窒素とは、アンモニア、亜硝酸、硝酸を指す
図 13 反応タンク内の無機態窒素^{*}の挙動例

6. 経済性

本装置と従来の高度処理法（A2O法）を、経済性の観点から比較した結果を図14に示す。本装置は従来高度処理法に比べて、電力使用量を2割程度削減可能であり、さらに処理能力が高いことから、例えば高度処理化に伴って土木躯体の増設（新しい反応タンクの設置）などを検討している下水処理場において、躯体の増設を不要とし、建設コストを大幅に削減できる可能性もある。

また、既存施設の軽微な改造により早期に導入することが可能であるため、工事期間の短縮による改造コストの低減や、A2O法で必要となる攪拌機や硝化液循環ポンプといった機器が不要であることから、点検・整備といった維持管理面での負担軽減にもつながり、人的負担の軽減が図れる。

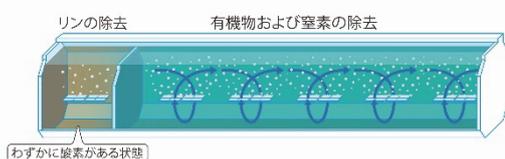
■ 高度処理 (A2O法)



処理水質	電力
窒素:65 リン:40	130

電気代が
約2割削減

新たな高度処理 (嫌気・同時硝化脱窒処理法)



処理水質	電力
窒素:65 リン:40	100以下

※出典:東京都下水道局「アースプラン2017」

本法の特徴と従来技術との比較

項目	新たな高度処理装置	嫌気無酸素好気法
処理対象	BOD、窒素、リン	BOD、窒素、リン
反応タンク滞留時間	10.2~15.2時間 ^{※2}	16~20時間 ^{※1}
窒素除去率	60~70%程度	60~70%程度
リン除去率	70~80%程度	70~80%程度
制御に用いる水質計	NOx計、アンモニア計	DO計
無酸素タンク攪拌機	不要	必要

滞留時間（処理に掛かる時間）が短くなることで反応タンクを小さくでき、土木工費が削減できる

攪拌機や循環ポンプが不要になることで、機器設備費、メンテナンス費、動力費（電気代）が削減できる

※1:設計指針に記載の値

※2:本法、嫌気無酸素好気法において容量計算条件にて窒素除去率60~70%を得る値である。

図14 新たな高度処理技術と従来処理技術との比較⁶⁾

7. 将来性

国内の下水道を取り巻く社会情勢や環境は、「経営の合理化」「老朽化」「水質改善」「省エネ化」等の様々な課題を抱えており、各自治体は、これらの課題を同時に複数解決可能な新しい技術を求めている。

特に、高度処理化が義務付けられている下水処理場では、本装置を導入することによって早期に実現可能となり、加えて温暖化防止の観点から省エネルギー化が求められている多くの下水処理場に対しても非常に有効な技術である。

海外においても、北米・欧州地域では、国内の下水道環境と同様に、施設の老朽化や財源不足の問題を抱えており、本技術の需要は高いと想定している。特に、五大湖地域などの閉鎖性水域や、各国で上乘せ基準を設けている欧州では高度処理化ニーズが高い。

また、今後水質改善が求められる後進国など、下水処理場の整備を進めている各国に対しても需要が見込まれる。

これらのことから本装置の適用範囲は多岐にわたり、地球全体の水インフラ環境の保全への貢献に加えて地球温暖化対策に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 既存施設を活用した段階的高度処理の普及ガイドライン（案）
- 2) 高橋宏幸、草野吏、古屋勇治、2012、曝気空気量制御における高度制御技術の適用とその効果の検証、第49回下水道研究発表会講演集、pp. 1108-1110
- 3) 中村高士、葛西孝司、曾根啓一、鈴木重浩、高橋宏幸、2016、アンモニア計と硝酸計を用いた同時硝化脱窒処理技術の開発、環境システム計測制御学会誌、21（2，3）、p21-25
- 4) 葛西孝司、曾根啓一、鈴木重浩、高橋宏幸、黒住光浩、坂根良平、2015、好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理）の開発、日本下水道協会誌、Vol. 52、NO. 635、p114-122
- 5) 葛西孝司、池田広数、渡瀬誠司、松下勝一：「制限曝気A20法による水質改善効果および処理コストの比較」 東京都下水道局技術調査年報2010 p. 139-150
- 6) 東京都ホームページ