

水環境改善と省エネルギーに貢献する 下水道高度処理・制御技術

Advanced Wastewater Treatment Process and Control Technology for Improving Water Environment and Saving Energy

山野井 一郎 後藤 正広 井坂 和一
Yamanoi Ichiro Goto Masahiro Isaka Kazuichi

大塚 真之 西田 佳記
Otsuka Masayuki Nishida Yoshinori

世界的な人口増加や都市化に伴い、水環境の悪化やエネルギー不足が深刻な社会問題となっている。人間活動や事業活動で排出される下水の浄化の役割を担う下水処理システムには、健全な水循環系の構築のため、これまで以上の技術開発が求められている。日立グループは、持続可能な社会構築をめざし、水環境改善と省エネルギーに貢献する下水道高度処理・制御技術の開発を進めている。効率よく下水を浄化・運用し、環境負荷を低減できるこれらの技術を連携することにより、施設単位だけでなく、都市単位、地域単位での水循環インフラの運用改善が可能となる。

1. はじめに

近年、人口増加やそれに伴う都市化が爆発的な勢いで進行する中、水環境の深刻な汚染が大きな問題となっている。下水処理は、人間の生活や事業活動によって生じた下廃水を浄化することであり、水環境を保全するその役割はますます高まっている。一方で、下水処理に必要な電力は国内の消費量の0.7%を、排出される温室効果ガスは0.5%を占める¹⁾とされており、限りある燃料資源の節約や世界的な温室効果ガス削減の動きの下、これまで以上の水環境改善、省エネルギー、温室効果ガス削減が求められている。

日立グループは「環境ビジョン2025」を掲げ、持続可能な社会をめざして、「地球温暖化の防止」、「資源の循環的な利用」、「生態系の保全」に取り組んでいる。

ここでは、下水処理における下水制御技術、高度処理プロセス、水循環利用に関する技術を中心とした取り組みについて述べる。

2. 環境負荷低減制御技術

2.1 下水処理における温室効果ガス

下水処理の水処理工程で放出される N_2O （亜酸化窒素）は、 CO_2 の310倍の温室効果を持つ温室効果ガスであり、

硝化・脱窒工程の副生成物として生成する。下水処理場全体の温室効果ガスの8.7%を占める¹⁾と言われており、水処理工程では、放流水水質の向上と消費電力低減に加えて、 N_2O ガスの放出を低減する運転が求められている。

2.2 環境負荷低減型下水処理制御システム

日立グループは、これまで、水処理による環境負荷を低減するため、放流水水質の維持に加えて、温室効果ガスである N_2O ガスの放出機構の解明に取り組み、従来の活性汚泥モデルに N_2O ガス生成モデルを組み込んだ下水水質シミュレータ²⁾や、最適制御モジュールを実装した環境負荷低減型下水処理制御システムを開発してきた（図1参照）。これまでの研究で、 N_2O ガス放出量は、硝化工程の中間生成物である NO_2-N （亜硝酸態窒素）濃度や硝化量と相関があることを明らかにした。このシステムは、硝化制御をベースとしているため、最適制御モジュールでアンモ

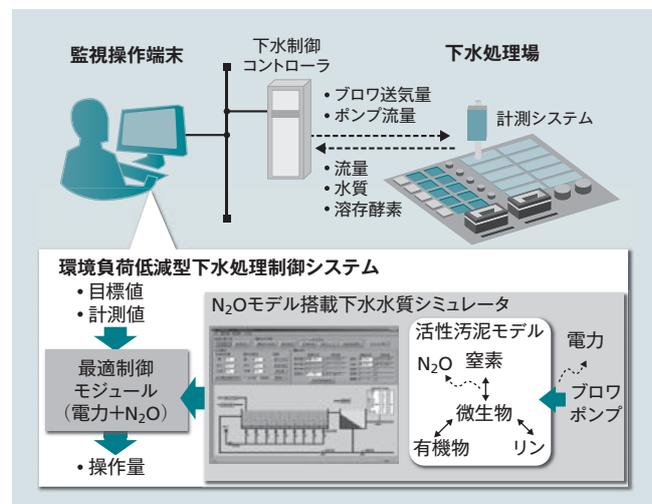


図1 | 環境負荷低減型下水処理制御システムの概要
新規開発の N_2O モデルを搭載した下水水質シミュレータにより、電力と CO_2 を考慮した水質維持運転が可能となる。

ニアセンサーなどの硝化量を推定するセンサーからのフィードバック情報と、下水水質シミュレータに基づくフィードフォワード演算情報により、ブロウ送風量などの操作量を最適に制御する。制御モードには、省電力モードに加えて、温室効果ガス低減モードが実装されている。あらかじめ実測した $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度値と、モデル演算に基づいて推定した N_2O ガス量に応じて目標硝化量を修正する。これにより、水処理工程全体の環境負荷低減を図る。

硝化制御による環境負荷低減については、下水処理場に設置した実験装置での制御実験によって検証している³⁾。実験装置の有効容積は90 Lで、対照系の従来制御は風量一定制御とした。このシステムによって適正に硝化を制御することで、ブロウ電力および N_2O ガス由来の温室効果ガスを18%低減する結果となった。

今後、このシステムを実機に適用し、省電力、温室効果ガス削減を実証する計画である。

3. 高度処理システム: 省エネルギー型「ペガサス」^{*1)}

「ペガサス」は、地方共同法人日本下水道事業団と日立グループが共同開発した高度処理システム(包括固定化窒素除去プロセス)である。硝化菌を高分子ゲルに包括固定化した「バイオエヌキューブ」を反応タンクに投入することで、従来の高度処理技術に比べて短時間での処理を可能とする。「ペガサス」の開発に着手してから約20年が経過し、この間にさまざまな高度処理システムへの適用を図ってきた。これまでに国内15か所の下水処理場で採用され、延べ約400,000 m^3 /日の処理を行っている。

これらの豊富な運転実績データを解析するとともに、このシステムを構成する担体分離スクリーン、散気装置、攪拌(かくはん)機、および循環装置の各機器を改良開発し、消費エネルギーが抑えられ、運転管理が容易な省エネルギー型「ペガサス」(以下、省エネルギー型と記す。)を開発し、標準化した⁴⁾(図2参照)。

3.1 システムの概要

省エネルギー型のシステムには3つの特長がある。

(1) 国内の曝気(ばっき)槽(生物反応槽)が主として旋回流曝気に適した構造である点を考慮して、両面配置型担体分離スクリーンと筒型メンブレン式散気装置を組み合わせ、槽底部に担体が堆積しにくい両側旋回流の曝気方式を採用した。これにより、担体分離スクリーンは既設軀(く)体との取り合いがなくなり、散気装置は池底コンクリートのかさ上げが不要となった。また、スクリーン面の閉塞防

^{*1)} ペガサスは、日立製作所と地方共同法人日本下水道事業団の日本における登録商標である。

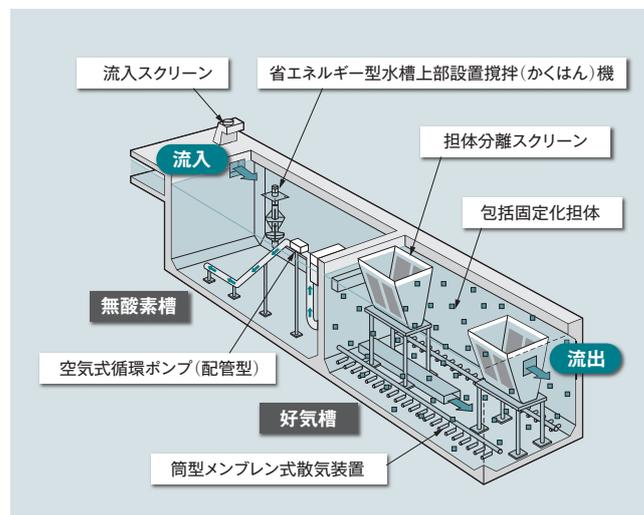


図2 | 省エネルギー型「ペガサス」のシステム構成図(循環式硝化脱窒法の場合)

既設軀(く)体との取り合いをなくし、設計の標準化や施工に要する労力の低減をめざすとともに、省エネルギー化を図った。

止に効果のある水の流速が向上(当社比約1.4倍)し、さらに折り返し板付きのスクリーン構造にすることでスクリーンの洗浄空気量を削減(当社比 $\frac{1}{2}$)した。

(2) 納入実績における運転データを解析して設計空気量を適正化することで、従来型に比べて必要空気量を約20%削減(当社比)した。さらに、筒型メンブレン式散気装置は風量制御範囲が広く運転制限が少ないため、低負荷時にはさらなる省エネルギー効果が見込める。

(3) 日立グループが独自開発した2面ろ過式流入スクリーン、省エネルギー型攪拌機「デュアルミキサー」や配管移送型空気式循環ポンプを標準化した。反応槽全体で従来型に比べて約35%(当社比)の省エネルギー効果が見込める。

3.2 納入事例

堺市三宝下水処理場では、大阪湾流域別下水道整備総合計画に基づき、限られた敷地で効率的に下水高度処理を行うため、担体投入型ステップ流入式3段硝化脱窒法+急速ろ過が採用されている。このうち、処理水量約80,000 m^3 /日の新2系には省エネルギー型を適用し、2013年3月に納入した(図3、図4参照)。この設備の完成により、

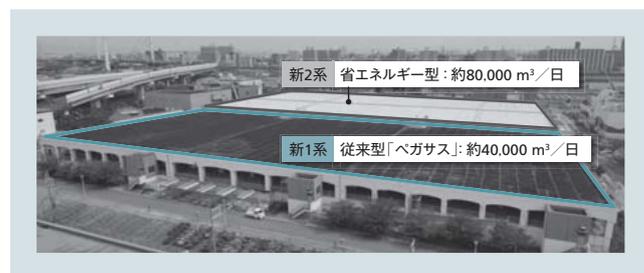


図3 | 三宝下水処理場

新1系には従来型を、新2系には省エネルギー型の「ペガサス」を納入した。



図4 | 好気槽内部の施工（新2系）
両面配置型担体分離スクリーンと筒型メンブレン式散気装置を組み合わせ、旋回流曝気（ばっき）を行う。

既設の新1系（約40,000 m³/日）と合わせて延べ処理水量約120,000 m³/日の国内最大^{※2)}の「ベガサス」が完成した。

4. 下水返流水中の窒素除去技術

4.1 下水返流水による窒素負荷

下水処理工程から発生する汚泥の適切な処理が求められており、消化処理はエネルギー回収および汚泥減容に有効なものとして活用されている。この消化処理後の汚泥脱水時に排出される脱水ろ液は、下水返流水として下水処理施設へと戻され、処理される。しかし、下水返流水は、窒素濃度が極めて高く、BOD (Biochemical Oxygen Demand) 成分が低いという特性を有する。また、下水処理施設に与える窒素負荷は、下水処理施設の約10～20%となることが報告されている⁵⁾。

これらのことから、下水処理施設においてより高い窒素処理性能を得るには、この下水返流水を下水処理工程にそのまま戻さず、個別に処理することが有効であると考えられる。そこで、嫌気性アンモニア酸化（以下、アナモックスと記す。）反応を活用した廃水処理システムを開発し、下水返流水の処理について検討した。

4.2 アナモックス反応による窒素処理

排水中の窒素処理方法としては、主に生物学的硝化・脱窒法が用いられている。これは、排水中のアンモニアの全量を硝化菌によって硝酸へ酸化する硝化工程と、その硝酸を有機物とともに脱窒菌によって窒素ガスに変換する脱窒

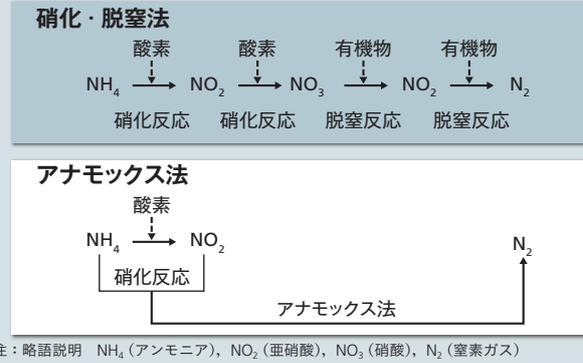


図5 | 各窒素処理技術の反応経路

硝化・脱窒法ではアンモニアを全量硝酸に酸化し、有機物とともに脱窒する。アナモックス（嫌気性アンモニア酸化）法は有機物を使わず、アンモニアと亜硝酸を直接脱窒する。

工程から成る。硝化工程では多大な曝気動力が、脱窒工程では有機物源が必要であり、省エネルギーで有機物添加量の少ない窒素排水の処理システムが求められている。一方、1990年代に発見されたアナモックス反応は、アンモニアと亜硝酸から有機物を使わず直接窒素ガスに変換できる⁶⁾（図5参照）。したがって、アナモックス反応を利用した窒素排水の処理システム（以下、アナモックス処理システムと記す。）は、曝気エネルギーを半減することができ、従来技術に比べて省エネルギー型で有機物添加を不要とする有効な処理システムとなる。

4.3 アナモックス処理システム

日立グループのアナモックス処理システムは、アナモックス槽の前段に、約半量のアンモニアを亜硝酸に酸化する亜硝酸型硝化槽を付加した2槽型のシステムである。このシステムでは、硝化菌およびアナモックス菌をおおの包括固定化した3 mm角の担体を各槽に使用していることが特徴である⁷⁾（図6参照）。この包括固定化技術を用いることで、担体内で硝化菌やアナモックス菌をそれぞれ高濃度に保持できる。このため担体表面に微生物を付着させる生物膜法に比べ、高い処理速度が得られる。

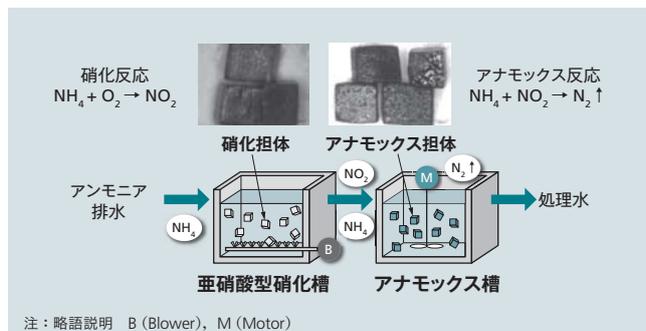


図6 | 包括固定化担体を利用したアナモックス処理システム

亜硝酸型硝化槽でアンモニアから亜硝酸を生成し、アナモックス槽でアンモニアと亜硝酸を窒素ガスに変換して窒素を処理する。

※2) 2013年7月現在、日立製作所調べ。

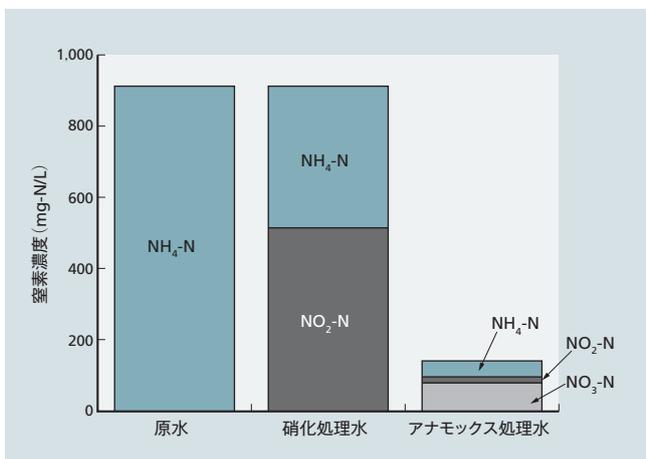


図7 | 下水返流水中の窒素処理特性
原水中のアンモニアは、亜硝酸型硝化行程において約半量亜硝酸に酸化する。その後、アナモックス槽で脱窒処理される。

4.4 下水返流水の処理特性

実際の下水返流水を用いて、アナモックス処理システムの実証試験を実施した。なお、この試験は日本下水道事業団との共同研究で行ったものである。

約7か月間の安定運転を行い、各工程における窒素濃度の変化をまとめたものを図7に示す⁸⁾。亜硝酸型硝化槽において、約半量のアンモニアを安定して亜硝酸に硝化できることを確認した。また、その硝化処理水をアナモックス槽で処理すると、約85%の窒素を処理することができた。さらに、アナモックス槽では平均窒素除去速度5.1 kg-N/(m³/日)という高い処理速度を維持できた⁹⁾。

これらの試験結果を基に、従来法[硝化・脱窒法(ペガサス法)]を用いた場合と、アナモックス法を用いた場合について、それぞれ容量計算およびランニングコストを試

算した。流入水温条件30℃で試算した結果、アナモックス槽は高い処理速度が得られることから、反応槽容積は従来法の約1/3(当社比)となり、設置スペースを大幅に削減できることが明らかとなった。また、ランニングコストについては、曝気動力やメタノールなどの薬品費を大幅に削減できることから、従来法の半分以下で処理できる見通しを得た。この技術については2010年に日本下水道事業団による技術評価を終えており、今後普及が期待される。

5. 地域水資源利用システムを構築するためのIISSの適用

5.1 IISSの研究目的および概要

世界中で顕在化する水問題を解決するためには、地域規模で生活排水を適切に処理し、かつ処理水を生活用水、河川流量維持水などに有効活用することが大きな効力を発揮する。そこで、新規開発の低ファウリング膜を活用する膜技術を統合した革新的な水処理システムを開発して分散配置し、処理水を有効活用しやすい環境を作るだけでなく、これに成熟度の高い自然エネルギー活用技術や、個々の施設を有機的につなぐ情報管理技術を融合し、新しい独創的な地域水資源利用システム「Integrated Intelligent Satellite System (IISS) = 水・エネルギー・情報を融合したサテライトシステム」¹⁰⁾を構築する(図8参照)。このシステムは、独立行政法人科学技術振興機構(JST)のプロジェクトとして、工学院大学、東京大学などと研究にあっている。IISSの中核を成す膜による水処理技術では、膜のファウリングが最大の障害となっている。この研究では、従来とは全く異なる水の分子レベルの構造に着目した新規な低ファウリングNF/RO(Nanofiltration/Reverse Osmosis)膜の開

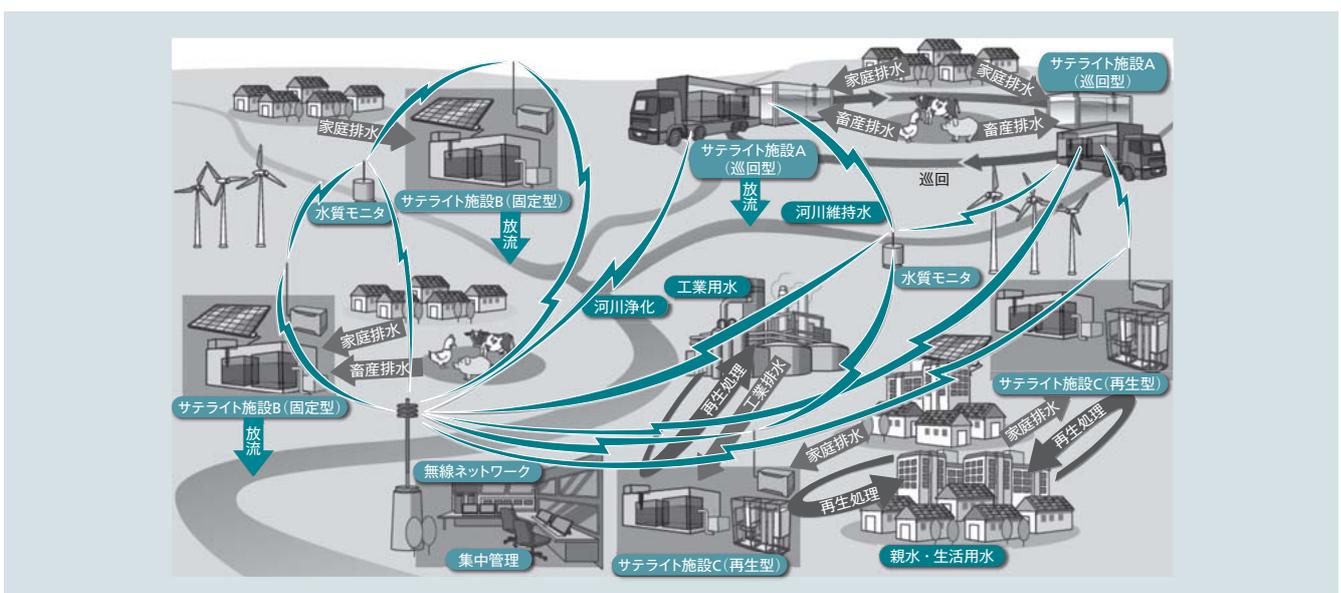


図8 | 地域水資源利用システムを構築するためのIISSの適用
IISS (Integrated Intelligent Satellite System) は、生活排水を適切に処理し、親水、生活用水、工業用水、および地球温暖化対策用河川維持水として活用する水資源不足地域向けの革新的水循環システムを構築する。

発や、不安定電源として敬遠されがちな自然エネルギーを有効に利用できる電場を利用した新規ファウリング制御技術を開発し、革新的な水処理システムの構築を目的としている。これにより、地域規模で生活排水の処理レベルを向上して環境汚染を抑制するだけでなく、目的に合った安全・安心な再利用水を供給することをめざす。

5.2 IISSにおける日立グループの活動および成果

(1) 膜分離活性汚泥法+NF/ROシステムの要素検討

このシステムのパイロット装置(膜分離活性汚泥法装置: 10 m³/日×2系列, RO透過水量: 1.35 m³/日×2系列, 設置場所: 日立市)の連続試験運転において、活性汚泥浮遊物質(MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids)濃度が15,000 mg/L程度の高濃度条件における運転が可能であり、余剰汚泥発生率を従来比で30%削減できることを確認した。また、高濃度MLSS条件で得られる膜分離活性汚泥法処理水からRO膜装置で50%の回収率を得ようとする場合、ろ過抵抗が約1.4倍に上昇する傾向を確認した。これにより、濃縮度とファウリングの程度についての相関を得て、運転条件の設計指針を構築中である。

(2) 高機能化検討

このシステムのパイロット装置用のオゾンマイクロバブル利用パイロット装置(処理流量: 10 m³/日)を用いて、RO濃縮水と余剰汚泥の処理性能を実験的に評価した。その結果、実用化を想定する中国での放流水一級B水質基準(生物化学的酸素要求量, 化学的酸素要求量, 固形浮遊物, 色度)を満足させる処理条件において、最大75%の汚泥可溶化率(余剰汚泥削減率)を達成できる見通しを得た。

(3) 処理水の安全性評価

簡易DNA(Deoxyribonucleic Acid)チップを用いた細菌およびウイルスの評価における反応プロトコル構築において、増幅と固相化を同時に行い、反応時間を短縮して2時間以内で陽性または陰性の検査が完了する結果を得た。また、培養細胞を用いた処理水の安全性評価において、長期継代培養試験法を用いて、パイロット装置における膜分離活性汚泥法およびRO処理水を評価した結果、明らかな有害性は認められなかった。さらに、長期継代培養試験手順を改変し、継続的な処理水質モニタリングを可能とした。

5.3 IISSの将来展望および応用

このシステムは、実社会への適用性を強く意識して「迅速性」、「安全・安心」を十分考慮しているだけでなく、日本や世界が抱えるさまざまな水問題に対応できる「柔軟性」を兼ね備えている。今後、日本の戦略的創造研究推進事業の成果として、新規水ビジネス開拓の礎を築き、この水処

理技術に、成熟度の高い自然エネルギー活用技術や、個々の施設を有機的につなぐICT(Information and Communication Technology)などを活用し、この事業から生まれた新しい独創的な地域水資源利用システムIISSを広く世界に浸透させていく。

6. 高機能微生物活用プロセスによる省エネルギー化

6.1 高機能微生物活用プロセス

下水の高度処理では、硝化菌、脱窒菌、リン蓄積菌(PAO: Phosphorus Accumulating Organisms)によって有機物、窒素、リンが除去される。高度処理にはA₂O法(嫌気-無酸素-好気法)などがあり、水域への環境負荷低減のために普及が進んでいる。

日立グループは、高度処理における省エネルギー化と処理水質の向上を実現するため、脱窒性リン蓄積細菌(DPAO: Denitrifying PAO)を活用した処理プロセスの構築、運転制御方法の確立に取り組んでいる。DPAOはNO₃を用いてリンを摂取でき、窒素・リンの同時除去が可能である。そのため、DPAOを用いた窒素・リン除去では酸素および有機物の消費量が減少し、曝気風量の低減や低有機物負荷時の窒素・リン除去性能の確保が期待される。

DPAOを活用する処理プロセスとして、A₂N法(非循環式硝化-内生脱窒脱リン法)(図9参照)が提案されている¹¹⁾。DPAOの集積には好気状態(溶存酸素との接触)の短縮が有効であるとされているため、A₂N法では、汚泥分離槽においてDPAOを含む活性汚泥を沈降分離し、無酸素槽へ移送させる。DPAOは硝化工程での長時間の好気状態を通過しないため、活性汚泥中で集積する。また、活性汚泥に吸着した有機物も硝化工程をバイパスするため、好気状態での有機物酸化を抑制できる。A₂N法では移送ポンプは必要であるが、硝化-無酸素の順に槽を配置しているため、上流への循環が必要なA₂O法と比べてポンプ流量を減少できる。これらのDPAOの特徴から、A₂N法では省エネルギーと処理水質の向上が期待できる。

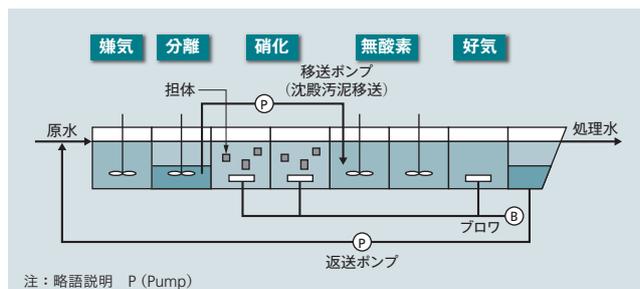
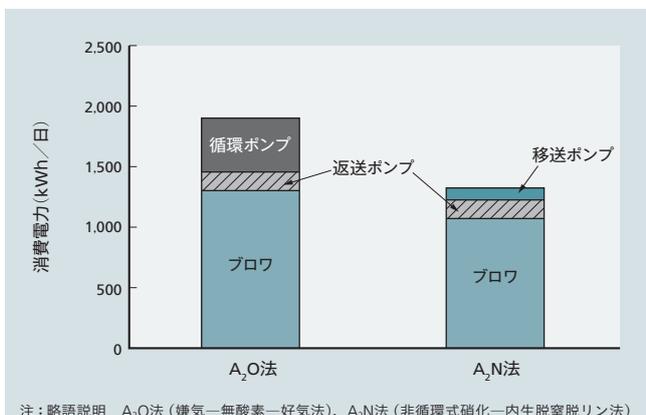


図9 | A₂N法の処理フロー

A₂N法では、DPAO(Denitrifying Phosphorus Accumulating Organisms)は嫌気→無酸素→好気の順に反応槽を通過し、窒素・リンを除去する。



注：略語説明 A₂O法（嫌気—無酸素—好気法）、A₂N法（非循環式硝化—内生脱窒脱リン法）
図10 | A₂O法とA₂N法の消費電力の試算結果の比較
 窒素・リン除去でのDPAOの活用により、ポンプ・ブロウの消費電力の削減が期待できる。

6.2 DPAO活用プロセスの処理性能

DPAO集積と処理性能の向上が可能なA₂N法の運転条件を回分実験によって探索した結果、無酸素工程の後段に好気工程を1時間程度実施する条件で、窒素とリンを安定的に除去できた。この運転条件において、実下水の連続処理実験を実施した結果、処理水窒素10 mg/L以下、リン0.5 mg/L以下を達成した。また、DPAO集積度も活性汚泥を採取したAO法（嫌気—好気活性汚泥法）の20%から50%まで上昇した。

6.3 省エネルギー効果試算

A₂N法の省エネルギー効果を評価するため、A₂N法と従来高度処理法であるA₂O法のそれぞれの消費電力を試算し、その結果を比較した¹²⁾（図10参照）。ブロウ電力は、A₂N法では好気状態での有機物除去の抑制とDPAOによるリン除去の効果により、A₂O法と比べて18%低下した。また、ポンプ電力は、A₂N法では活性汚泥の循環がないため、A₂O法に比べて60%の電力削減となった。これらの結果により、A₂N法ではA₂O法と比べて水処理に要する電力は理論的には最大約30%低下すると期待される。

7. おわりに

ここでは、下水処理における下水制御技術、高度処理プロセス、水循環利用に関する技術を中心とした取り組みについて述べた。

日立グループは、国内外の健全な水環境の維持と水インフラの持続的な発展のため、今後も新たな提案で貢献していく考えである。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、国土交通省（2009）
- 2) 山野井，外：活性汚泥モデルに準拠したN₂Oガス生成モデルの開発，下水道協会誌，Vol. 48，No. 589，65～75（2011）
- 3) 山野井，外：酸化還元電位（ORP）によるN₂O抑制制御方式の開発，環境システム計測制御学会誌「EICA」，Vo.16，No. 2/3，p. 28～37（2011）
- 4) 大塚，外：低CO₂排出水処理への取り組み～高度処理プロセスの機器改良による省エネ化～，第49回下水道研究発表会講演集，646～648（2012）
- 5) 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，日本下水道事業団 技術評価委員会（2010）
- 6) M. Strous, et al. : The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms, Applied Microbiology and Biotechnology, 50, 589-596（1998）
- 7) K. Isaka, et al. : Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier, Applied Microbiology and Biotechnology, 76, 1457-1465（2007）
- 8) K. Isaka, et al. : Novel autotrophic nitrogen removal system using gel entrapment technology, Bioresource Technology, 102, 7720-7726（2011）
- 9) Y. Kimura, et al. : Stability of Autotrophic Nitrogen Removal System under Four Non-Steady Operations, Bioresource Technology, 137, 196-201（2013）
- 10) 中尾：膜技術を活用した革新的な水システムの開発動向，水環境学会誌，Vol. 36，No.1（2013）
- 11) T. Kuba, et al. : Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system, Water Research, Vol. 30, No. 7, pp. 1702-1710（1996）
- 12) Y. Nishida, et al. : Investigation of Operational Conditions and Evaluation of Energy Saving Effects of Two-Sludge System to Utilize Denitrifying Phosphate Accumulating Organisms, Journal of Water and Environment Technology, in press.

執筆者紹介

- | | |
|---|---|
|  | <p>山野井 一郎
 2006年日立製作所入社，日立研究所 材料研究センタ エネルギー材料研究部 所属
 現在，下水道向け監視制御・情報システムの研究開発に従事
 博士（エネルギー科学），技術士（上下水道）
 環境システム計測制御学会会員</p> |
|  | <p>後藤 正広
 1992年日立機電工業株式会社入社，日立製作所 インフラシステム社 技術開発本部 松戸開発センタ 水環境システム部 所属
 現在，国内外向け水処理システムの研究開発に従事</p> |
|  | <p>井坂 和一
 1998年日立プラント建設株式会社入社，日立製作所 インフラシステム社 技術開発本部 松戸開発センタ 水環境システム部 所属
 現在，特殊微生物を用いた水処理システムの研究開発に従事
 工学博士
 日本水環境学会会員（運営幹事），日本水処理生物学会会員</p> |
|  | <p>大塚 真之
 1997年日立プラント建設株式会社入社，日立製作所 インフラシステム社 インフラ建設・エンジニアリング事業本部 環境事業統括本部 水処理事業部 開発部 所属
 現在，上下水道をはじめとした水処理システムの開発に従事</p> |
|  | <p>西田 佳記
 2011年日立製作所入社，日立研究所 材料研究センタ エネルギー材料研究部 所属
 現在，下水道向け監視制御・情報システムの研究開発に従事
 環境システム計測制御学会会員</p> |