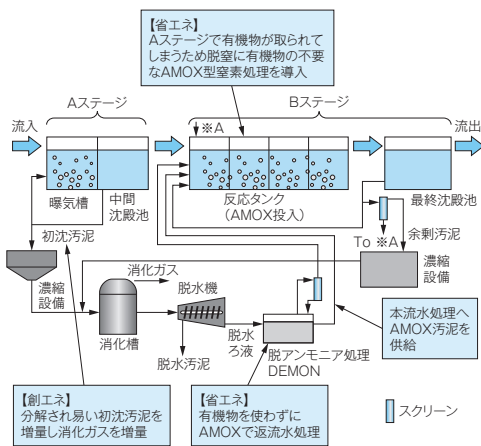


アナモックス細菌を用いた 省エネルギー型下水高度処理技術に 関する研究

酒井孝輔 Kosuke Sakai
福崎康博 Yasuhiro Fukuzaki
Lai Minh Quan

キーワード 省エネルギー、創エネルギー、アナモックス、高度処理、ABプロセス

概要



ABプロセスとDEMONの組み合わせ概念図

低炭素社会の実現に向けた温室効果ガス排出量の削減は、下水道分野でも喫緊の課題である。近年、省エネ・創エネの取り組みで、下水処理場がエネルギー供給者と成り得る次世代型下水処理技術の可能性が示唆されている。

海外ではABプロセスと呼ばれる下水処理技術に、近年発見された嫌気性アンモニア酸化（AMOX、通称アナモックス：anaerobic ammonium oxidation）細菌を利用することで、下水処理場のエネルギー自給自足が達成された事例が報告されている。

当社では、これらの技術を応用して国内下水処理に適用することを視野に、パイロットスケールでの試験を実施し、省エネ・創エネ効果を確認した。

1 まえがき

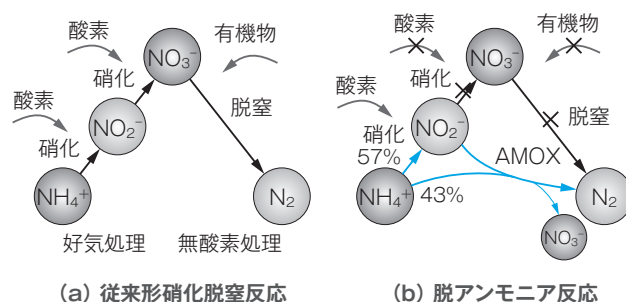
日本における下水処理施設は、その消費電力量が国内の総消費電力量の約0.7%を占め、温室効果ガスの排出量が多いインフラである。地球温暖化の抑制が求められ、世界的なエネルギー資源のひっ迫が懸念される現在、下水処理施設における消費電力量、温室効果ガス排出量の低減は喫緊の課題である。

一方、海外では下水処理場での省エネ・創エネが先進的に進められ、オーストリアのStrass処理場など下水処理場でのエネルギー自給率が100%を超えている事例もある⁽¹⁾。Strass処理場で用いられている処理方式はABプロセスと呼ばれる処理方式に、1995年に発見された嫌気性アンモニア酸化⁽²⁾を応用することで実現した次世代型の下水処理法である。

ABプロセスは下水に含まれる有機物を高効率にAステージで初沈汚泥として除去し、続いてBステージで栄養塩除去をする処理法である。除去された初沈汚泥を消化槽に投入し、消化槽内での嫌気性消化でメタンを発生させ、メタンを含む消化ガス発電によってエネルギーに変換し創エネを達成する。消化槽で有機物を分解する際に残留する高濃度の窒素は、嫌気性アンモニア酸化（AMOX、通称アナモックス：anaerobic ammonium oxidation）を用いて高効率に処理する。さらにBステージでAMOXを使った窒素処理を併用することで、処理場全体で窒素処理における酸素供給量の低減による省エネ化・低コスト化を図る。このようなコンセプトを持つ本処理法は、下水汚泥の持つバイオマスエネルギーとしてのポテンシャルを最大限に引き出すことができる。

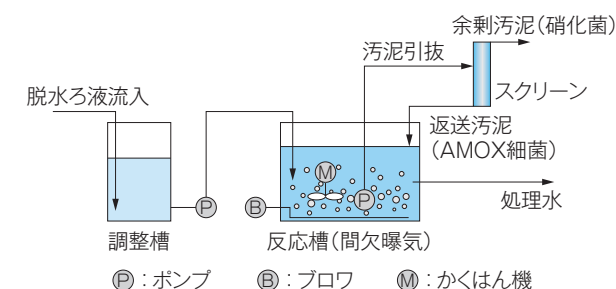
当社では、1980年代からのメタン発酵、水処理の研究開発経験を基に、重電メーカーとして下水処理で更なる省エネ技術を模索してきた。その一環として、AMOXを用いた窒素処理技術を開発し、下水処理場で高濃度の窒素を含む返流水を処理対象としたパイロット試験を行ってきた。その中でもAMOXを用いたDEMONと呼ばれる処理方式は国内外でパイロット試験を実施し⁽³⁾、海外では実機納入の実績がある。

このような経験を生かし、国内で初めてABプロセスとAMOXを組み合わせた下水処理場のエネルギー自立化を目指した省エネルギー型下水高度処理技術のパイロット試験を行った。本取り組みは、神戸市の下水処理場で共同研究として実施した。また、同研究期間内で国土交通省の下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）に採択され、同省国土技術政策総合研究所の委託研究としてFS（Feasibility Study）調査を行った。本稿では、パイロット試験の試験結果を紹介する。



第1図 硝化脱窒反応と脱アンモニア反応の比較

(a) 従来形硝化脱窒反応と (b) 脱アンモニア反応の代謝経路を示す。脱アンモニア反応では硝酸までの硝化が不要となり、有機物の添加も不要となる。



第2図 DEMON処理フロー

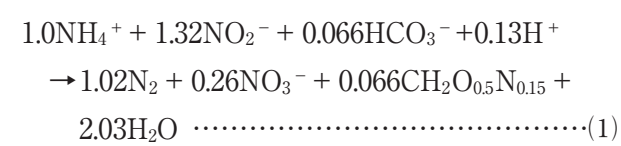
DEMONの処理フローを示す。DEMONは1槽の中で亜硝酸化反応とAMOX反応を行い、曝気は間欠運転となる。

2 省エネルギー型下水高度処理技術の特長

2.1 脱アンモニア処理

2.1.1 嫌気性アンモニア酸化の概要

AMOX反応は、(1)式に示すようなアンモニア性窒素と亜硝酸性窒素を基質として窒素ガスを生成する反応である⁽²⁾。この反応は高温・高濃度窒素環境を好む、嫌気性独立栄養細菌であるAMOX細菌によって行われる。



AMOX反応と亜硝酸化反応を組み合わせたものを脱アンモニア反応と呼び、従来の硝化脱窒反応と比較すると第1図のようになる。脱アンモニア反応は従来形の硝化脱窒反応と比べ、(1)空気量を削減できる、(2)脱窒時に有機物を必要としない、(3)汚泥発生量が少ない、といった特長があり、低コスト

での窒素処理が期待されている。本技術に適した廃水として、消化汚泥脱水ろ液・畜産廃液・ごみ埋め立て浸出水などの高濃度窒素含有排水が挙げられ、国内では公共下水の返流水処理でも導入が始まっている。

2.1.2 DEMON⁽⁴⁾

脱アンモニア処理のうち世界で最も普及している方式は、1槽型の脱アンモニア処理のDEMONである。第2図にDEMONの処理フローを示す。DEMONはNEWPort社（オーストリア）によって開発され、一つの槽の中で完全混合状態の浮遊汚泥を利用して実現される方式である。

DEMONは当初回分式で提案されたが、連続式としてより効率的な処理方式としても開発が進んでいる。回分式は原水を間欠的に反応槽に流入させる間欠曝気工程、汚泥を沈めて分離する沈殿工程、上澄みを排出する排水工程から成る。反応槽ではpH制御による間欠曝気が行われ、亜硝酸化反応とAMOX反応が1槽の中で同時に進行する。汚泥は、フロック

状の硝化菌と微細な赤いグラニュール状の AMOX 細菌で構成される。粒径による汚泥分別をスクリーンで行い、増殖速度の遅い AMOX 細菌を槽内に留められるようにする。

以上のことから、DEMON の特長として、2槽型の脱アンモニア処理より機器点数を抑えられる点、汚泥管理が容易な点などが挙げられる。一方、連続式では、固液分離ゾーンによって連続的に汚泥と上澄みを分離して排水する。沈殿工程がないため、その分の処理水量が増大する利点がある。

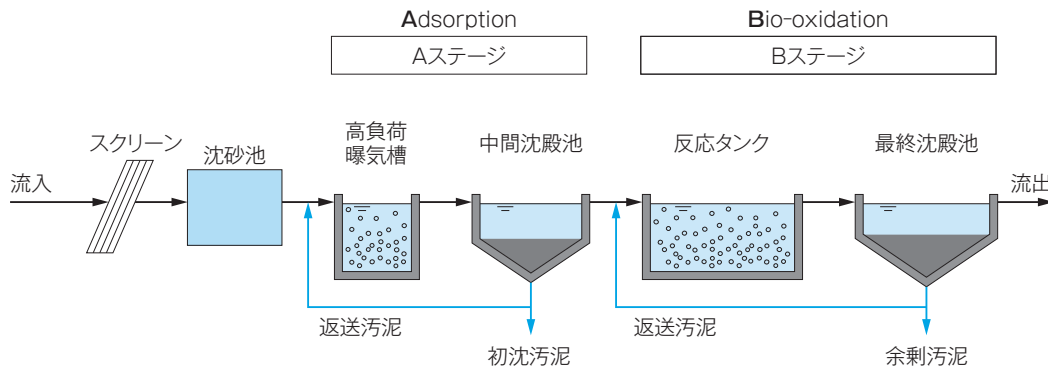
2.2 ABプロセス

ABプロセスは1970年代に提案され⁽⁵⁾、1980年代

にヨーロッパの下水処理場を中心に適用された下水処理方式である。この処理方式は、有機物を高い負荷量で除去する A ステージと、残留有機物及び窒素やリンなどの栄養塩を除去する B ステージから成る。さらに高負荷な処理が実現でき、水槽をコンパクトにできることから、敷地面積に制限のある場合に有利な方法であった。第 3 図に処理フローを示す。

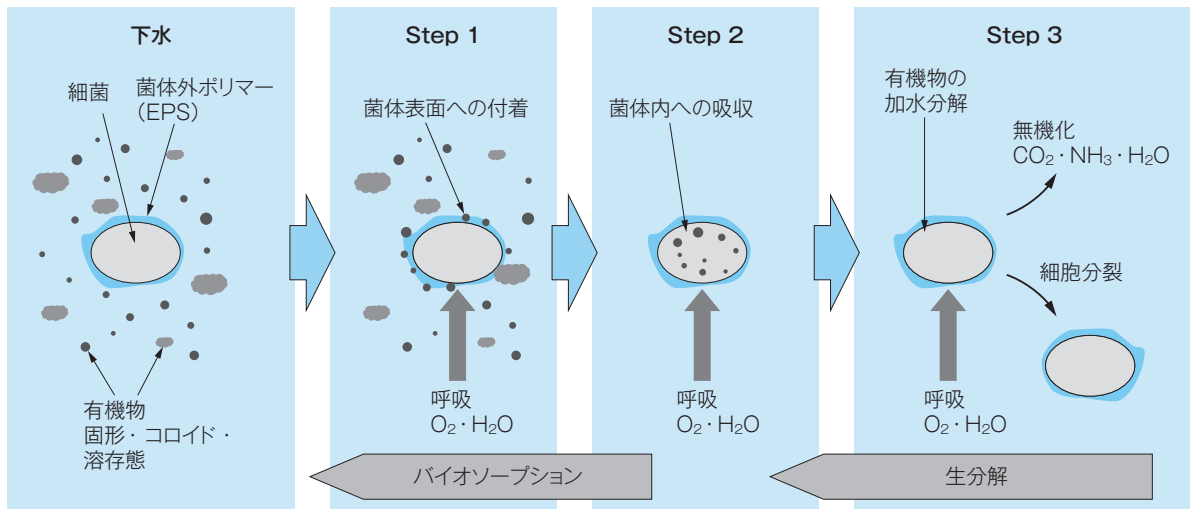
2.2.1 Aステージ

A ステージは沈砂池の直後に配置され、高負荷曝気槽と中間沈殿池で構成される。沈降性の汚泥を沈降分離せずに、始めから曝気することが最初沈殿池と大きく異なる。第 4 図に細菌による有機物の付着



第 3 図 ABプロセス処理フロー

ABプロセスの処理フローを示す。2ステップあり、前段をAステージ、後段をBステージと呼ぶ。



第 4 図 細菌による有機物代謝

細菌による有機物（固形・コロイド・溶存態）の吸着と代謝の模式図を示す。EPSが重要な役割を果たしている。Aステージでは、バイオソープションまでを行う。

及び吸収，そしてその後続く加水分解や細胞分裂について一連のプロセスを示す。Aステージではこの付着及び吸収までのプロセス，つまりバイオソープションの段階で反応を止め，その先の有機物分解を抑制しながら初沈汚泥を引き抜く。バイオソープションの制御には，接触・吸着反応を行うため高負荷曝気槽の水理学的滞留時間（HRT）を30分程度に，有機物の分解を抑えるため汚泥滞留時間（SRT）を0.5日程度に設定する。第4図に示すように，バイオソープションでは固形物だけではなく，コロイドや溶存態の有機物の一部も吸着する。下水の有機物組成は，固形:コロイド:溶存態 = 45% : 31% : 24%という報告があり⁽⁶⁾，固形物以外の有機物成分が占める割合は少なくない。この固形物以外の有機物も吸着させ，初沈汚泥として取り出せることがAステージの特長である。

2.2.2 Bステージ

Aステージ後段に，低負荷な有機物除去及び窒素・リン除去の目的で配置される活性汚泥処理がBステージで，曝気槽及び最終沈殿池から構成される。Aステージで有機物が多く除去されるため，Bステージでは有機物が不足し，窒素除去に制限を受ける。また，生成する余剰汚泥は活性汚泥微生物で構成され，初沈汚泥よりも分解されにくい。

このような問題・特長があるため，Strass処理場では窒素除去に有機物を必要としないAMOXを組み合わせたBステージが考案された。AMOXを導入することで，有機物に頼らない窒素除去も一部できるようになり，かつAMOX細菌は増殖速度が遅いため，余剰汚泥発生量を抑えることができる。ただし，Bステージでは水温が低く，窒素濃度も低いいため，AMOXが高い活性を維持することは難しい。したがって，AMOX細菌はBステージではほぼ増殖できないため，継続的なAMOX細菌の供給が必要となるが，返流水処理で脱アンモニア処理が導入されていればそれが可能となる。

2.3 組み合わせ効果

エネルギー自立化に向けた下水処理システムとは，前項のシステムを利用し，Bステージでは

第1表 バイロットの各要素技術の目標値

Aステージ・Bステージ・DEMON・組み合わせ技術の目標値を示す。

技術	評価項目	目標値
Aステージ	有機物除去率	汚泥COD _{Cr} 転換率 50%以上 (T-COD _{Cr} 除去率 60%以上 S-COD _{Cr} 除去率 25%以上)
Bステージ	処理水質	下記高度処理水質を満たす BOD 10mg/L以下 全窒素 10mg/L以下 全リン 0.5~1.0mg/L以下
DEMON	窒素除去率	窒素除去率 80%以上
組み合わせ技術	創エネ	消化ガス発生量 15%増大

注: COD_{Cr}: ニクロム酸カリウムによる化学的酸素要求量, T-COD_{Cr}: 全COD_{Cr}, S-COD_{Cr}: 溶解性COD_{Cr}, BOD: 生物化学的酸素要求量

AMOXなどで処理に必要な電力を低減し，かつAステージでできるだけ多くの有機物を初沈汚泥として取り出して消化槽へ送り消化ガスの発生量を増やし，増えた消化ガスによって発電量を増やすことで処理場の全電力を賄おうというものである。また，消化脱離液に含まれる窒素濃度が増大してもDEMONによって問題なく処理できる。

このように発生ガス量が増大することから，発電電力量が増大し処理場の電力自給率が上昇する。また，余剰電力が発生した場合は電力会社に売電し，地域に配電するエネルギー拠点となることもできる。

3 国内下水処理での適用

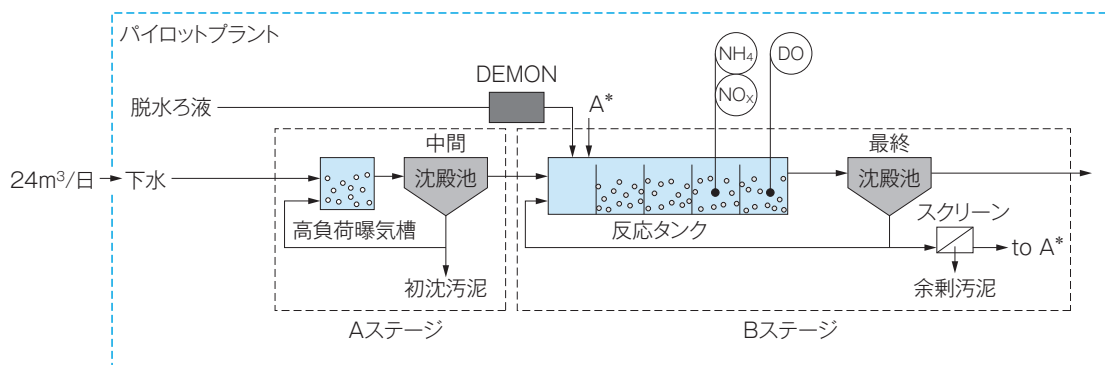
3.1 目的・目標

当社は，ABプロセスとDEMONを組み合わせた下水処理場でのエネルギー自立化の可能性を調査するため，神戸市西水環境センター垂水処理場でパイロットスケールの処理実験を実施した。第1表にパイロットの各要素技術の目標値を示す。

3.2 方法

第5図にパイロットプラントの処理フローを示す。下水原水は24m³/日で実施設の日間変動を模擬し通水した。第2表に試験期間中の下水原水とBステージ処理水の水質結果を示す。

Aステージは有効容積0.5m³の高負荷曝気槽と有効容積1.5m³の中間沈殿池で構成した。高負荷曝気



第5図 パイロットプラント処理フロー

パイロットプラントの処理フローを示す。パイロットプラントは、Aステージ・Bステージ・DEMONで構成した。BステージのNH₄計・NO_x計は、後段に設置した。

第2表 下水原水とBステージ処理水の水质分析結果

下水原水・Bステージ処理水の平均水質と、目標となる高度処理水質、垂水処理場本場の塩素混和後の放流水質を示す。高度処理水質を維持することができ、垂水処理場本場と同等の成績が確認できた。

水質項目	下水原水	Bステージ処理水	高度処理水質目標	垂水処理場本場放流水
T-COD _{Cr} (mg/L)	329	14	—	—
BOD (mg/L)	145	7	≤ 10	7.5
C-BOD (mg/L)	125	2	—	2.2
COD _{Mn} (mg/L)	67	7	—	8.4
SS (mg/L)	179	3	—	2
全窒素 (mg/L)	31	9.2	≤ 10	14
全リン (mg/L)	3.4	0.7	≤ 0.5~1.0	1.6

注. C-BOD：硝化反応を抑制したBOD, COD_{Mn}：過マンガン酸カリウムによる化学的酸素要求量, SS：浮遊物質

槽のHRTを30分、SRTを0.5日と調整することで、生分解が始まる前のバイオソープションの段階で初沈汚泥を引き抜いた。高負荷曝気槽の酸素供給は、溶存酸素一定又は風量一定制御を用いた。また、更なるバイオソープション能力の向上のため、Bステージの余剰汚泥をAステージに投入する試験も実施した。

Bステージは、有効容積1.25m³×5槽から成る反応タンクと、有効容積1.5m³×2槽から成る最終沈殿池で構成した。反応タンクの前段1槽は無酸素槽とし、後段4槽は間欠曝気槽とした。間欠曝気槽の

無酸素・好気時間の割合は、AvN制御⁷⁾と呼ばれる方法で制御した。AMOX細菌が十分な活性を保つためには、アンモニア性窒素の残留、無酸素環境の確保などが挙げられる。AvN制御ではアンモニア(NH₄)計とNO_x計を用いNH₄/NO_xの比率を一定に保つように曝気時間を調整する。そのため反応タンク末端でもアンモニア性窒素が残存しやすく、無酸素環境も確保されやすいと考えられる。DEMONからの汚泥供給量は、国内下水処理場の平均的な返流水窒素負荷から発生するDEMON汚泥量比率に合わせ、10g-SS/日に設定した。汚泥分離は、AMOX細菌とそのほかの細菌の増殖速度の差異を調節するためにスクリーンを用いた。スクリーンの目幅は0.2mmとし、粒径が約0.3～0.8mm程度となるAMOXグラニューールの流出を留め、反応タンクに返送した。反応タンク末端ではリン除去のために凝集剤のポリ塩化アルミニウムを添加した。

DEMONは、これまで実証してきた回分式に加えて連続式でも試験を行った。回分式では有効容積0.5m³の反応槽を使用した。連続式のうち固液分離を反応槽外の分離槽で行う方式(槽外セパレータ型)では、反応槽0.5m³・分離槽0.014m³の構成とした。連続式のうち固液分離を反応槽内の分離ゾーンで行う方式(槽内バツフル型)では、反応槽0.75m³・分離ゾーン0.022m³の構成とした。汚泥分離はBステージと同様に目幅0.2mmのスクリーンを用いた。

消化ガス発生量の評価は、消化槽を模擬したバイアル瓶による消化試験で行った。消化汚泥は、垂水

処理場で運転されている消化槽の消化汚泥を使用した。試験に供する初沈汚泥・余剰汚泥は、ABプロセスから採取したものと、対照系として垂水処理場から採取したものを使用した。

3.3 結果・考察

AステージではT-COD_{Cr}除去率で60%程度、S-COD_{Cr}除去率で25%程度、汚泥COD_{Cr}転換率で55%の有機物除去性が示された。同設備による最初沈殿池型の運転では、T-COD_{Cr}除去率が54%程度、S-COD_{Cr}除去率は10%以下であったことから、溶解性有機物を多く除去するAステージの効果が確認された。なお、垂水処理場の流入下水の水質のうちSSや全窒素濃度は、日本の下水処理場の平均値に近い性状であった。T-COD_{Cr}の分画は、固形：コロイド：溶存態 = 61%：19%：20%で、欧米より固形性が高くコロイドが低い下水であった。本処理場の流入下水では固形成分が多かったため、最初沈殿池で元々高い除去率が得られやすかった。そのため、Aステージを導入することで得られるコロイドや溶存態成分の除去による除去率向上効果が見えづらくなっていた。コロイド成分が多い下水ではより高い吸着効果が得られるものと考えられる。

Bステージの処理水質は、高度処理で求められる計画放流水質を達成し、垂水処理場の放流水質と同等の成績となっていることが確認できた。

次世代シーケンサによる遺伝子解析結果や活性などの確認から、継続的なDEMON汚泥の供給によってある程度のAMOX細菌がBステージ中に存在することを確認した。安定同位体で標識した窒素(¹⁵N)を用いた試験結果から、AMOX反応は主にBステージの無酸素槽での窒素除去に寄与していることが分かった。

AvN制御ではNH₄計・NO_x計を間欠曝気槽の三段目に設置したが、反応槽末端でもアンモニア性窒素が枯渇することなく維持され、NH₄/NO_xの比率によって、負荷に応じて好気時間・無酸素時間を自動で適切に調整できた。

これらのAMOX反応の寄与とAvN制御による曝気制御で、AステージやDEMONを含めてパイ

ロット全体での空気量は、垂水処理場の実機と比較して約12.5%削減される結果となった。したがって、BステージではAMOXの活用によって、水質悪化を防止しつつ省エネが達成できることを確認した。

DEMONでは、目標窒素除去率80%以上を達成できた。窒素容積負荷は回分式で0.8kg-N/m³/日、連続式槽外セパレータ型では1.4kg-N/m³/日、連続式槽内バツフル型では1.8kg-N/m³/日を安定的に達成した。DEMONを回分式から連続式に改良することで、沈殿・排出時間の有効活用ができ負荷が向上したものと考えられる。連続式とすることで、原水を貯留する調整槽の容量を小さくでき、回分式の際に短時間で処理水を排出できるよう設けられた処理水槽も不要となる。したがって、連続式とすることで機器点数・敷地面積を更に削減できる。

細菌の遺伝子解析結果や汚泥活性の調査から、スクリーンでAMOXと硝化菌を効率的に分離できることを確認した。スクリーンの目詰まりは、処理水を用いたスプレー噴射で容易に防止できる。

汚泥収支の確認によって、汚泥発生量がABプロセス化したことで、初沈汚泥で10%増加、余剰汚泥で15%減少した。また、消化試験で汚泥当たりの消化ガス発生量は、初沈汚泥で18%増加、余剰汚泥ではほぼ変化しないという結果となった。これらの結果から、分解されやすい初沈汚泥を増加させ、分解されにくい余剰汚泥を減らすことができ、さらに初沈汚泥はガスを発生しやすい性質となったと言える。プロセス全体で考えると、ABプロセス化することで消化ガス発生量は24%増加した。またAステージへの余剰汚泥供給の結果、更にAステージでの吸着能が向上し、垂水処理場の実施設と比較して消化ガス発生量が31%増加する結果となった。

以上の省エネ・創エネ効果を用い、垂水処理場にABプロセスとDEMONを導入したケースでのエネルギー回収率を試算した。エネルギー回収率は、対象系列からの寄与で得られる発電電力量の同系列での消費電力量（水処理と送風機）に対する比率と定義した。その結果、導入前ではエネルギー回収率が75%であったのに対し、導入後は111%まで向上する試算となった。

4 むすび

下水に潜在するエネルギーをAステージで引き出し、AMOX細菌を活用したBステージとDEMONによってエネルギー消費を抑制し、下水処理場のエネルギー自立化の達成を目指してパイロット試験を実施した。各要素技術の性能と組み合わせ効果をパイロット試験で確認し、本処理方式は省エネと創エネを同時に実現できる処理方式であることが示された。

最後にこのような先進的な技術開発を実施する場のご提供と、全面的なご協力・ご指導をいただいた神戸市に深く感謝する次第である。

- ・DEMONは、NEWport GmbHの商標である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) B. Wett, K. Buchauer, C. Fimml : "Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems", Proc. IWA Leading Edge Technology Conference, Singapore, Asian Water, pp.21-24, 2007.9
- (2) M. Strous, J. J. Heijnen, J. G. Kuenen and M. S. M. Jetten : "The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms", Appl Microbiol. Biotechnol., Vol.50 pp.589-596, 1998

(3) Bernhard Wett, 福崎康博, 中村安宏, 川久保祐貴, 渡辺哲文 : 「嫌気性アンモニア酸化によるエネルギー自給自足型下水処理技術」, 明電時報343号, 2014/No.2, pp.32-40

(4) B. Wett : "Solved upscaling problems for implementing deammonification of rejection water", Water Sci. Technol., Vol 53, No.12 pp.121-128, 2006

(5) B. Böhnke : "Installation for the treatment of waste water by the activated sludge process." Patent DE 28 037 59, 1978

(6) A. Guellil, F. Thomas, J. C. Block, J. L. Bersillon and P. Ginestet : "Transfer of organic matter between wastewater and activated sludge flocs", Water Res., Vol.35, No.1, pp.143-150, 2001

(7) P. Regmi, M. W. Miller, B. Holgate, R. Bunce, H. Park, K. Chandran, B. Wett, S. Murthy and C. B. Bott : "Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitrification/denitrification", Water Res, Vol.57, No.15, pp.162-171, 2014

《執筆者紹介》



酒井孝輔
Kosuke Sakai

ソリューション企画部
水処理技術の研究開発に従事



福崎康博
Yasuhiro Fukuzaki

水インフラ営業・技術本部技術部
水処理技術の研究開発に従事



Lai Minh Quan

水インフラ営業・技術本部技術部
水処理技術の研究開発に従事