

下水・排水の制御技術・高度処理プロセス・次世代型システム

後藤 正広
Goto Masahiro

山野井 一郎
Yamanoi Ichiro

大塚 真之
Otsuka Masayuki

花本 陽介
Hanamoto Yousuke

木村 裕哉
Kimura Yuya

井坂 和一
Isaka Kazuichi

世界的な人口増加や都市化の急伸に相反して、都市インフラの改善・発展が停滞していることから、水環境の悪化、水および電力供給の不安定さ、大気汚染、騒音や大量の廃棄物の発生・投棄、交通渋滞など、さまざまな環境問題が深刻な社会問題を引き起こしている。

日立グループは、これまでの技術開発において積み上げ

てきた下水・排水の運転制御、既存処理技術の簡素化および省エネルギー化、高度処理システム、次世代型技術などを連携することにより、都市・地域単位での水循環インフラの運用改善を可能とする水環境ソリューションを提供し、社会インフラの持続的発展に貢献していく。

1. はじめに

人々の日常の営みから発生する汚水は、自治体・流域あるいは事業所単位にて設置される汚水処理システムにより浄化される。

日立グループは、「環境ビジョン2025」に対応した汚水処理システムに関連する技術開発への取り組みを進めている。これら最新の下水・排水処理関連技術は、より豊かな生活の実現に向けた水環境の維持・改善のみならず、被災地域における応急復旧処理支援、および温室効果ガス排出抑制や固形廃棄物の発生抑制への貢献にも有用と考えている。

ここでは、下水・排水処理における制御技術、高度処理プロセス、次世代型システムに関する技術を中心とした取り組みについて述べる。

2. ICTを活用した効率的な硝化運転制御の 実用化に関する技術実証研究

2.1 実証研究概要

人間の生活や事業活動により生じた下水を浄化する下水道事業は、老朽化、財政難、省エネルギー、水質管理、職員不足、人口減少、広域化対策など、多岐にわたる課題に直面している。これらのうち、特に省エネルギー、水質管理に関する課題を解決するため、茨城県と日立製作所は、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）」において、硝化制御の効率化を図る「ICTを活用した効率的な硝化運転制御の実用化に関する技術実証研究」を、国土技術政策総合研究所の委託研究として2014年度より開始した。本研究では、茨城県霞ヶ浦浄化センターの一部の水処理系列（処理流量 約6,500 m³/日）で、運転データの収集・検証を実施している。

2.2 開発制御システム概要

図1上に開発制御システム（以下、「開発制御」と記す。）の概要を示す。開発制御は硝化（窒素処理工程の一つ）を効率化する制御システムで、省エネルギーと水質管理の両立を図る。ブロウ風量削減による省エネルギーを実現するために、下流側のDO（Dissolved Oxygen：溶存酸素濃度）計に加えて、上流側と中間点にアンモニア計を設置している。従来の予測と結果のずれを訂正するフィードバック（FB：Feedback）制御に加えて、処理特性モデルを利用したフィードフォワード（FF：Feedforward）制御を備えたことが特徴である。FB制御とFF制御を組み合わせ、下水の流入流量・濃度の変動に適切にいち早く対応し、処理の安定化を図る。また、FF制御には、硝化処理に必要なブロウ風量を見える化した処理特性モデルを用いる。この処理特性グラフはアンモニア計の実測値から自動更新が可能で、これにより、予測モデルの精度を自動的に保つことができる。さらに、処理特性グラフは活性汚泥（微生物）が

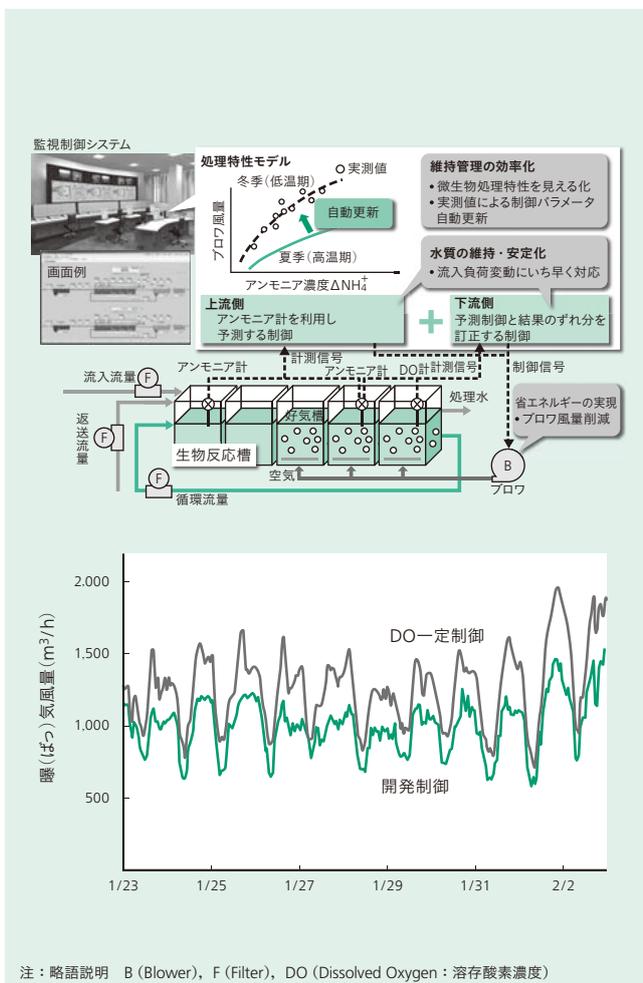


図1 開発制御システム概要(上)と曝気風量の時間履歴(下)
 2014年度の結果として処理水水質を維持しつつ曝気風量を14.1%低減できた。2015年度も実験を継続し、長期安定性を実証する。

もつ処理特性の表示機能でもある。微生物の特性変化、処理異常の傾向を早期に把握可能となり、維持管理業務を効率化できる。

2.3 実証研究状況

2015年1月より実験を開始した。図1下は開発制御およびDO一定制御における曝(ばっ)気風量の時間履歴である。すべての時間帯で開発制御による曝気風量は、DO一定制御の結果を下回った。曝気風量比の評価量は85.9%となり、2014年度の結果として、曝気風量をDO一定制御比で14.1%低減しつつ、処理水アンモニア濃度を0.3 mg-N/Lに保つことを示した。2015年度も実験を継続し、長期安定性を実証する。

この開発制御は、高度な制御を有する監視制御システムであり、制御性の高いブロウの下で特に有効である。したがって、監視制御システムやブロウの更新に際し、この技術を導入することでより一層の省エネルギー・水質維持管理効果が期待できる。

3. 膜分離活性汚泥法の簡素化および省エネルギー化技術の開発

3.1 高速凝集沈殿法および膜分離活性汚泥法を用いた災害時応急復旧処理技術の開発

2011年3月に発生した東日本大震災では、生活環境の改善や公衆衛生の向上など市民生活にとって重要な役割を担っている下水道施設が甚大な被害を受けた。今後も首都圏を含む広域なエリアで巨大地震の発生が懸念されている。そのため、下水道施設においても、災害対策の強化が求められている¹⁾。また、大規模災害時(地震、集中豪雨など)においては、下水道施設の本復旧の完了までに長期間を要することが予想されることから、段階的な復旧(緊急措置、応急復旧、本復旧)の考え方が提言されている²⁾。

そこで、災害時の段階的な応急復旧処理に対応可能な災害時応急復旧下水処理技術として、合流改善におけるBOD (Biochemical Oxygen Demand) 処理技術の一つである高速凝集沈殿法と小規模向け高度処理技術の一つである膜分離活性汚泥法(MBR: Membrane Bioreactor)に注目した。現在、各システムの簡素化や処理時間の短縮化を行うとともに、これらを組み合わせた処理について、地方共同法人日本下水道事業団と日立グループで共同開発を進めている³⁾。

開発技術の技術概要は次のとおりであり、応急復旧などの目標放流水質や処理水量などの条件に応じて、処理フロー(単独、組み合わせ)などを選定し対応する(図2, 表1参照)。

(1) 高速凝集沈殿法

2種類の凝集剤(無機系、高分子系)を原水に添加し、凝集フロックを粗大化して浮遊物質(SS: Suspended Solids)を沈降しやすくする。また、沈殿池は傾斜板沈降装置などを用い、設備能力に余裕を持たせて、維持管理や

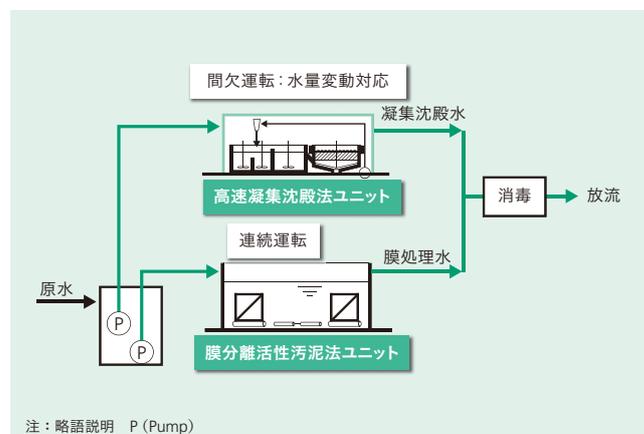


図2 開発技術の組み合わせ処理フロー例

流入水量の変動に対して、膜分離活性汚泥法で連続的に一定水量の処理を行い、残りの変動する流入水量を高速凝集沈殿法で処理を行うことにより、日平均で処理水質を達成する。

表1 | 段階的な応急復旧への開発技術の対応の考え

目標放流水BOD濃度に応じて、高速凝集沈殿法の単独や、膜分離活性汚泥法との組み合わせ処理システムを適用する。

復旧分類 ²⁾	応急復旧(2) (中級処理)	応急復旧(3) (中級処理より高水準)
処理水目標BOD ²⁾	60 mg/L程度	60→15 mg/L程度
本復旧までの期間 ²⁾	1か年	3か年
開発技術の対応性	高速凝集沈殿法 + 消毒	高速凝集沈殿法 + 膜分離活性汚泥法 + 消毒

注：略語説明 BOD (Biochemical Oxygen Demand)

運用の簡素化を図っている。目標処理水質は、SSが40 mg/L程度、BODが50 mg/L程度である。

(2) 膜分離活性汚泥法

反応槽は単槽式とし、好気工程と無酸素工程を繰り返す連続処理により、必要なアルカリ度の回収[処理水水素イオン濃度(pH)確保]とSS、BODの短時間処理を図っている。また、膜ろ過の運転はいずれの工程でも行うものとして、無酸素工程時には反応槽内の気体を循環させて膜面を曝気洗浄する方式を採用した。目標処理水質は、SSが1 mg/L程度、BODが3 mg/L程度である。

現在、日本下水道事業団技術開発実験センターに実機相当のユニット化した実験プラント(処理能力：高速凝集沈殿法500 m³/日、膜分離活性汚泥法300 m³/日)を設置して、実下水を用いた連続運転を行い、各技術の運転条件や処理性能などに関して検証、実証試験を継続中である(図3参照)。

この共同開発の成果を通して、災害時の応急復旧用仮設処理装置としての適用をめざしていく。

3.2 膜分離活性汚泥法の省エネルギー化技術の開発

MBRは、反応槽に含まれる活性汚泥による生物処理、ならびに膜による固液分離により清澄な処理水を得ることが可能である。また装置が従来法に比べコンパクトであることは、MBRの最大の特長である。日立は、小規模MBRの販売事業を中東地域で展開している。2009年度以降、



図3 | 実証試験装置の外観写真図

実機相当の実験プラントを設置し、実下水を用いた連続運転を行い、処理性能などを検証している。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)と国立研究開発法人科学技術振興機構(JST: Japan Science and Technology Agency)の国のプロジェクトにおいて、競争力のある省エネルギー化技術開発を目的に、システム動力の60%を占める散気動力の削減を主な検討対象として開発を進めてきた。散気動力には膜面洗浄散気動力と生物処理散気動力があるが、今回膜面洗浄散気量を65%削減できる技術を開発し、処理水量1 m³当たりのシステム動力を0.4 kWhに低減した。

平膜が並んで配置構成される膜ユニットの下部には膜面洗浄用の散気装置が配置され、膜エレメント間を上昇する気泡を含んだ気液二相流のせん断応力により膜面を洗浄する。この開発では、膜エレメント間流路への気泡の均等分配による洗浄効率化を目的とした直交散気管(図4参照)の開発により、膜面洗浄散気量を30%削減した。さらに、間欠的に膜面洗浄散気を行う(図5参照)と連続的に散気する場合に比べて気泡と液相間のスリップ速度(速度差)が大きくなる(図6参照)ことを見いだした。このスリップ速度の上昇により、気泡周囲の流体の乱れが強くなり洗浄効果が高まるため、従来の連続的な散気運転と比較して洗浄効率が向上し、膜間差圧(TMP: Trans Membrane Pressure)の上昇速度を低減できた(図7参照)。この直交散気管と間欠散気の組み合わせにおいて、適切な間欠散気条件(5秒散気、5秒停止)では、膜面洗浄散気量をさらに50%削減できる。これらの直交散気管と間欠散気の組み

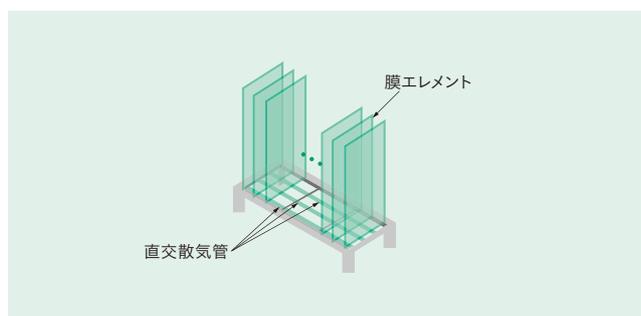


図4 | 膜エレメントと直交散気管

直交散気管により、膜エレメント間流路へ気泡を均等分配する。

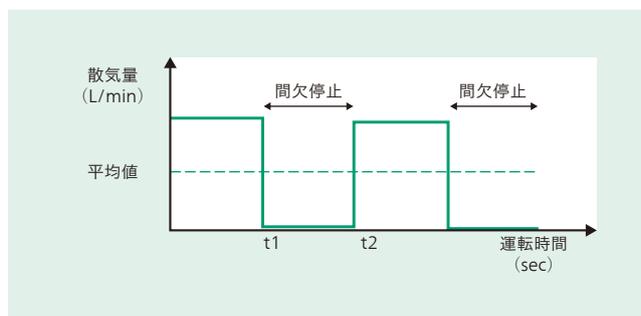


図5 | 間欠散気の運転概念図

散気と停止を交互に行い、停止時間分の散気量を削減する。

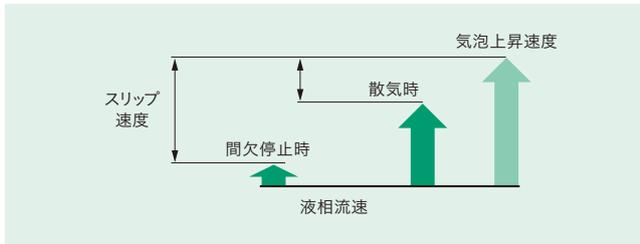


図6 | 液相間のスリップ速度

液相流速にメリハリをつけ、気泡周囲の流体乱れを強化し、洗浄効率を向上させた。

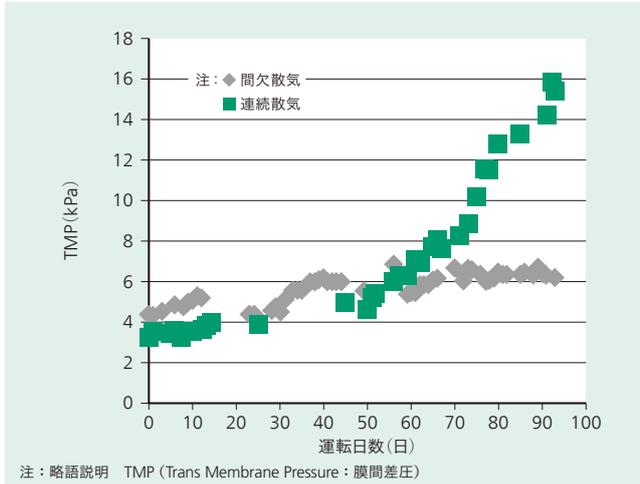


図7 | 間欠散気と連続散気のTMP経日変化

洗浄効率が高い間欠散気により、TMP上昇速度を低減できる。

合わせにより、膜面洗浄散気量を65%削減し、システム動力を実機ベースで処理水量1 m³当たり0.4 kWhに低減した。

今後、他の機器動力(生物処理散気用ブロウ、循環ポンプなど)の動力低減効果を評価し、処理水量1 m³当たりのシステム動力を0.3 kWh以下に低減し、省エネルギー化に貢献していく。

4. アナモックス反応を用いた窒素処理システム

高濃度の窒素排水は無機薬品製造業、半導体製造業、畜産業などさまざまな業種で排出される。内湾、湖沼など閉鎖系水域における富栄養化などの汚染を防ぐため、2014年には第7次総量規制基準が適用されるなど窒素を排出する事業場に対する規制は年々強化されている。従来の窒素処理技術は、活性汚泥を用いた生物学的な硝化・脱窒法が広く用いられている。これは排水中のアンモニア(NH₄)を硝化細菌によって全量硝酸(NO₃)へ酸化する硝化工程と、その硝酸を有機物源とともに脱窒細菌により窒素ガス(N₂)に変換する脱窒工程からなる。

一方でこれらの反応とは異なり、省エネルギー型の排水処理ができる嫌気性アンモニア酸化(以下、「アナモックス」と記す。)反応が1990年代に発見された。アナモックス反応は独立栄養性のアナモックス細菌が担っており、アンモ

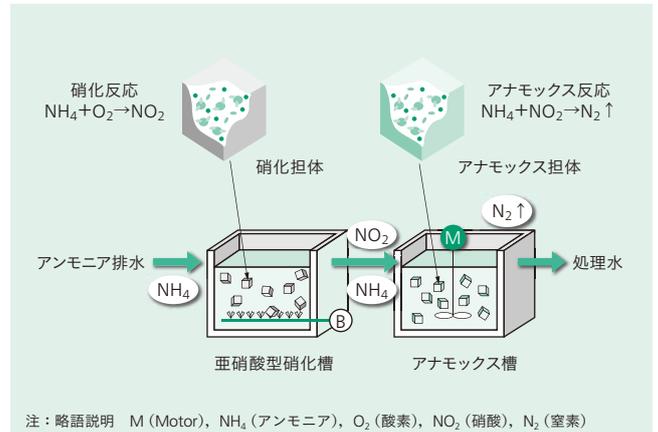


図8 | 包括固定化技術を用いたアナモックス処理システムの概要

亜硝酸型硝化槽には硝化細菌を包括固定化した担体を投入し、半量のアンモニアを亜硝酸に酸化する。アナモックス槽にはアナモックス細菌を包括固定化した担体を投入し、アンモニアと亜硝酸を脱窒する。

ニアとその約1.3倍量の亜硝酸(NO₂)を窒素ガスに変換する。有機物を必要とせず、さらに排水中のアンモニアの約半量は酸化させずに、直接窒素ガスに変換できるため、窒素処理に関わる使用エネルギーを削減できるなどのメリットがある。この反応を用いた窒素処理システム(以下、「アナモックス処理システム」と記す。)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二槽型のシステムとなる。日立のアナモックス処理システムの特長は、包括固定化技術を用いている点である。包括固定化技術はアナモックス細菌などの有用細菌を高分子ゲルの中に固定し、担体化するものである(図8参照)。この担体内で有用細菌は高濃度に保持され、安定した処理性能や速い処理速度が見込める。これまで実排水を用いた実証試験を実施し、従来法に比べてエネルギー使用量を50%程度削減できることや、長期安定性能が得られることなど、このシステムの有効性を見いだしてきた⁴⁾。

そしてアンモニアを合成する化学合成工場の実排水に対して、2013年に実設備を納入した(図9参照)。アナモックス槽の反応容積は100 m³規模であり、国内最大級とな



図9 | 納入設備外観

アンモニアを合成する工場の実排水にアナモックス反応を用いた窒素排水処理システムを適用した。

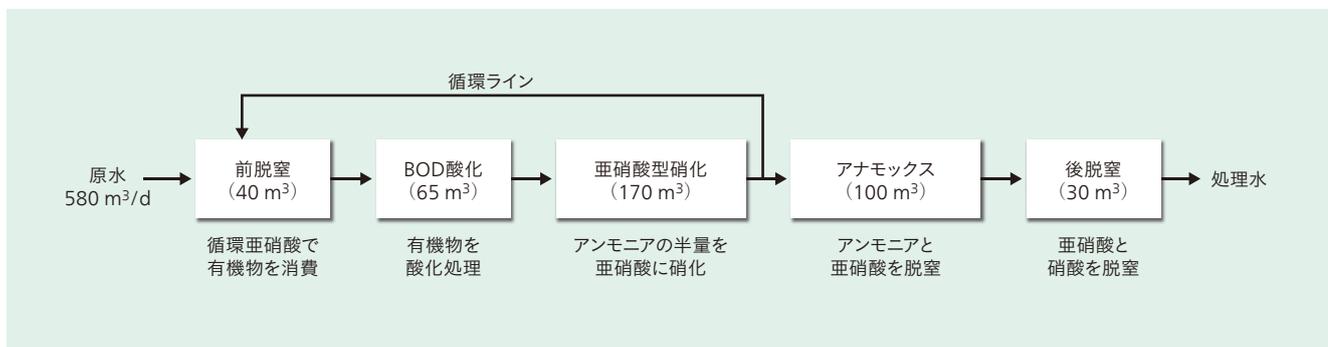


図10 | 包括固定化技術を用いた実設備の排水処理フロー

計画水量580 m³/dの排水処理システムの排水処理フローを示す。前脱窒槽、BOD酸化槽で排水中のメタノールを除去し、亜硝酸型硝化槽で排水中のアンモニアの半量を亜硝酸に硝化し、アナモックス槽にて、アンモニアと亜硝酸を脱窒し、窒素を除去する。後脱窒槽では、残留する亜硝酸、硝酸成分の一部を添加する有機物とともに除去する。

る。さらに包括固定化技術を用いたアナモックス処理システムの実設備は、世界でも類例の少ない先進設備である。ここでは、その事例を紹介する⁵⁾。

実排水のアンモニア濃度は約700 mg-N/Lあり、また有機物源としてメタノールが100～400 mg/L程度含まれる。メタノールはアナモックス処理システムの窒素処理を担う硝化細菌、アナモックス細菌に強く阻害影響を与えることが報告されている。そのため、アナモックス処理システムの前段に、メタノールを除去する前脱窒槽とBOD酸化槽を設けた(図10参照)。なお後脱窒槽以外の各槽にはそれぞれの機能を有する細菌を包括固定化技術により固定化した担体を充填(じゅうてん)した。

前脱窒槽およびBOD酸化槽にてメタノールを完全に除去した。その処理水を亜硝酸型硝化槽に通水し、約半量のアンモニアは亜硝酸に硝化処理できた。この硝化処理水に含まれるアンモニアと亜硝酸をアナモックス槽で窒素ガスに変換させた。このときアナモックス槽の流入水および処理水の平均全窒素濃度はそれぞれ676 mg/Lおよび110 mg/Lとなり、80%以上の窒素が除去された。そして現在1年以上の長期間にわたり、安定した窒素処理性能を確認している。これらの安定した窒素処理性能の経過はこれまでの開発成果を実証しているものとする。

5. 微生物燃料電池を用いた下水処理技術

下水処理は、活性汚泥を用いた生物学的処理法で処理されており、下水中の有機物質は微生物により分解される。一方で微生物が多量に増殖するため、余剰汚泥が発生し、その処分が大きな課題となっている。この汚泥は産業廃棄物として処分されるが、その費用は運転コストの約20%を占める。そのため、下水処理工程での汚泥発生量を削減する新しい処理技術が求められている。

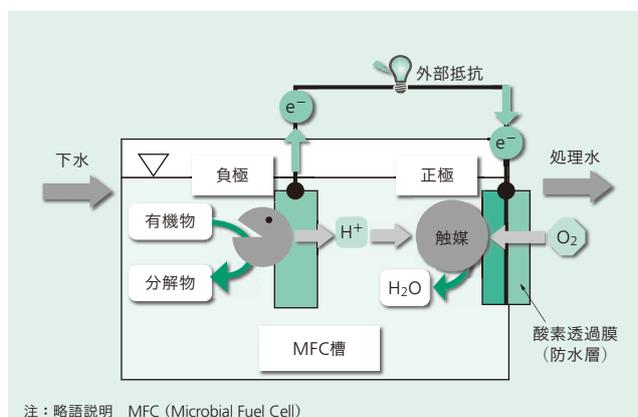
筆者らは、微生物燃料電池(MFC: Microbial Fuel Cell)を下水処理システムに組み込むことで、汚泥発生量を従来

法より30%以上削減^{※)}すると同時に、エコ発電により場内照明などの電力を一部自給する新しい下水処理システムを開発中である。

MFCは微生物が有機物を分解する過程で生成する電子と水素を電気エネルギーとして回収することで、微生物の増殖を抑制し、汚泥発生量を削減する画期的な技術である。排水中に負極電極を浸漬し、処理槽壁面に酸素透過性の防水層を有する正極を設置する。微生物が有機物を分解する際に発生する電子を負極で回収する。一方、正極には触媒を塗布した酸素透過膜が設置されており、透過した酸素と水素イオンが触媒上で水に変換される⁶⁾。すなわち、水の電気分解の逆反応が生じることになり、水が生成されるのと同時に電力が発生することがMFCの原理である(図11参照)。

微生物は通常、有機物を分解して生成した電子を利用して増殖するが、その一部が負極で回収されるため、増殖することができない。そのため、汚泥発生量を削減することができる。

※) オキシデーションディッチ法を従来法とした場合の日立試算値。



注：略語説明 MFC (Microbial Fuel Cell)

図11 | MFCにおける有機物分解と電気回収

有機物分解で発生した電子は負極で回収し、正極では透過した酸素が触媒上で水素と反応し水を生成する。

MFCを用いた下水処理システムの開発では、実下水を用いたシステム評価、電極コストの大幅な削減、数センチメートル規模から1 m規模への電極の大型化が課題となっている。

日立ではA市下水処理場から実下水を採取し、連続試験を長期間にわたり実施しており、実用化に向けた課題の抽出および対策を行っている。また、電極コストの要因としては、正極に触媒が必要であり、高価な白金 (Pt) 触媒が用いられることが多い⁷⁾。そこで、日立ではPtを使わない炭素電極を利用することで、電極コストを約 $\frac{1}{4}$ に削減した。この電極を用いて連続試験を行った結果、下水中の有機物を長期間安定して処理できると同時に、微量ではあるが電極面積当たり平均 8.8 mW/m^2 の発電性能を確認することができた。下水中の有機物処理指標であるCOD (Chemical Oxygen Demand) の処理性能は、平均 9.7 mg/L と実処理場の水質と同等の値を得ている (図12参照)。

さらに、実機を想定した大型電極の開発を行い、1 m規模へ大型化した電極の試作に成功した。この大型電極を組み込んだ実証試験装置を製作し、A市下水処理場に設置を完了した (図13参照)。現在、実下水を用いて連続処理試験に着手しており、有機物処理性能、汚泥削減効果および

発電性能を評価し、本法の有効性を実証する。

6. おわりに

日立グループは、健全な水環境の維持・改善と環境負荷低減型水インフラの持続的な発展に向け、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) 国土交通省, 日本下水道協会: 新下水道ビジョン〜「循環のみち」の持続と進化〜 (2014)
- 2) 国土交通省: 災害時における下水の排除・処理に関する考え方 (案) (2012)
- 3) 佐々木, 外: 高速凝集沈殿法及び膜分離活性汚泥法を用いた災害時応急復旧処理技術の開発, 第51回下水道研究発表会講演集, 190〜192 (2014)
- 4) 陰山, 外: 下水・排水処理技術の高度化による地球環境保全への取り組み, 日立評論, 93, 9, 619〜623 (2011.9)
- 5) 井坂: 包括固定化技術を用いた窒素処理システムの実用化, 水環境学会誌, 37, 9, 341〜344 (2014.9)
- 6) Bruce E. Logan, et al.: Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology, Environmental Science & Technology, Vol. 40, No 17, 5181〜5192 (2006)
- 7) M. Miyahara et al.: Use of cassette-electrode microbial fuel cell for wastewater treatment, Journal of Bioscience and Bioengineering, Vol.115, No.2, 176〜181 (2013)

執筆者紹介



後藤 正広

日立製作所 電力・インフラシステムグループ 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



山野井 一郎

日立製作所 研究開発グループ 材料イノベーションセンタ プロセスエンジニアリング部 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



大塚 真之

日立製作所 電力・インフラシステムグループ インフラシステム社 水・環境ソリューション事業部 社会システム本部 事業企画部 所属
現在, 国内上下水処理システムの開発に従事
技術士 (上下水道)



花本 陽介

日立製作所 電力・インフラシステムグループ 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, 膜分離活性汚泥法をはじめとした水処理システムの開発に従事



木村 裕哉

日立製作所 電力・インフラシステムグループ 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, 特殊微生物を利用した窒素排水処理システムの研究開発に従事
博士 (工学)



井坂 和一

日立製作所 電力・インフラシステムグループ 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

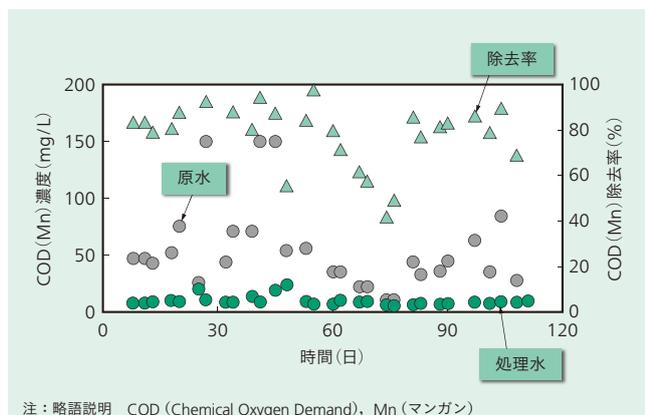


図12 | ベンチプラント試験装置による下水処理性能の評価

長期間安定したCOD処理性能を確認した。処理水質は実処理場と同等の水質を維持できる。

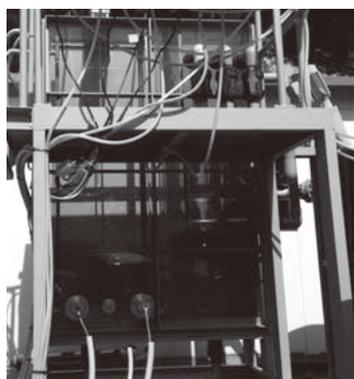


図13 | 大型電極を用いた実証試験装置

大型電極 (1,000×250 mm) 4枚を組み込んだ実証試験装置を下水処理場に設置し、実証運転を開始した。