

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

Hitachi's Approach for Global Environmental Conservation by Improvements in Wastewater Treatment Technologies

陰山 晃治
Kageyama Koji

木村 裕哉
Kimura Yuya

宇田川 万規子
Udagawa Makiko

日立グループは、持続可能な社会の実現に向けて策定した「環境ビジョン2025」の中で、地球環境保全に努めて社会に貢献していくことを宣言している。地球環境のうち、水環境は最も身近で重要な要素の一つである。下水処理や排水処理はこの水環境の保全に無視できない影響を及ぼすことから、特に生態系の保全と資源の循環的な利用に重点を置いたうえで、地球温暖化防止についても考慮した技術開発を進めている。

今後も、水処理技術およびその監視制御技術の切り口から環境ビジョン2025に対応した技術開発を継続して進め、より豊かな暮らしの実現に寄与し、社会へ貢献していく。

1. はじめに

より豊かな生活を実現するため、さまざまな分野において、地球環境保全への取り組みが進められている。人々の暮らしに潤いを与える水環境も、保全されるべき地球環境の一つであり、汚れのない清澄な水辺の実現および維持が求められている。

しかし、人々の活動の結果として発生する生活排水や産業排水には有機物や無機物が多く含まれており、これを直

接河川に放流すると水環境や生態系の悪化をもたらす。そこで、生活排水や産業排水を浄化してから放流するため、下水処理装置や排水処理装置が自治体・流域あるいは事業所単位で設置されており、より豊かな生活の実現のためには、これまで以上にその処理性能の向上が重要となっている。こうした中、日立グループは、「環境ビジョン2025」に対応した下水・排水処理の技術開発を進めている（図1参照）。

これら最新の下水・排水処理技術は、単に水環境の改善のみならず、他の環境負荷、例えば温室効果ガス排出量や固形廃棄物の発生量などの増大抑制も考慮していることから、中国など海外で開発計画が進んでいるエコシティやスマートシティの構成要素としても有効であり、また、2011年3月に発生した東日本大震災の被災地域の復興にも有用と考えられる。

ここでは、活性汚泥モデルを用いた下水処理制御技術、オゾンマイクロバブルを用いた水再生処理装置、および機能性微生物を用いた高効率な産業排水の処理装置の開発例について述べる。

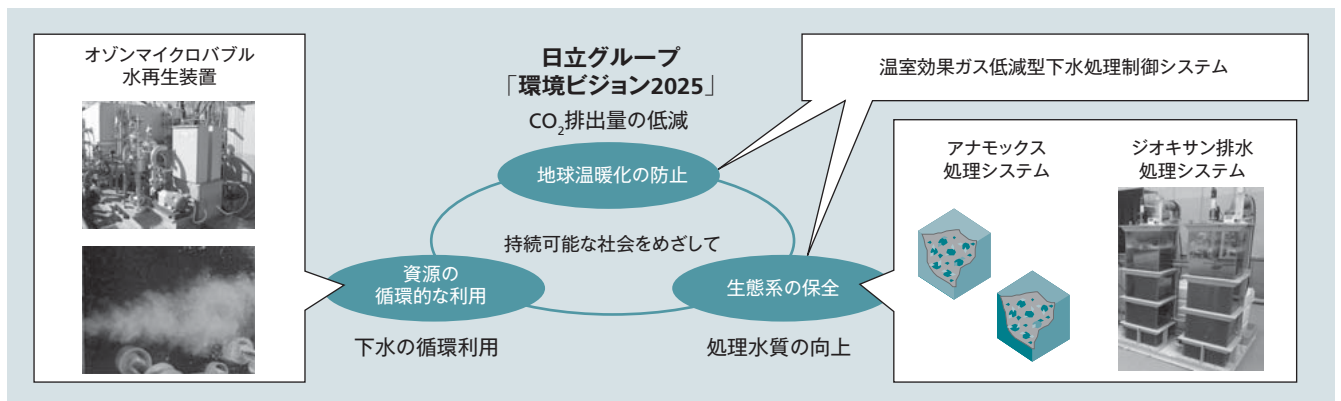


図1 「環境ビジョン2025」と水環境における地球環境保全への取り組み
環境ビジョンの方針に対応した研究開発を通じて、水環境の保全に貢献する。

2. 温室効果ガス低減型下水処理制御システム

下水道の処理人口普及率は2009年度末で73.7%に達した¹⁾。しかし、閉鎖性水域では水質改善が十分に進んでいない。そのため、有機物のみならず栄養塩である窒素やリンの除去も目的とした高度処理の導入が徐々に進みつつある。これら高度処理を実施した場合、処理水質の改善を図ることは可能となるが、近年ニーズが高まっている温室効果ガスの排出量の削減は保証されず、処理水質は改善しても温室効果ガスが増大してしまうケースが想定される。このことから、処理水質向上と温室効果ガス排出量低減の両立が今後は重要になると考えられる。

下水処理プロセスで排出される温室効果ガスには、電力消費由来で間接的に発生するCO₂のほかに、水処理に寄与する活性汚泥（微生物群）がその代謝の副産物として生成するN₂O（一酸化二窒素）ガスがある。N₂Oガス単位質量当たりの温室効果は、CO₂の約310倍と大きく、生成量の低減が重要な課題として認識されつつある。

日立グループは、下水処理プロセスから排出される温室効果ガスを低減するため、電力消費由来のCO₂に加え、N₂Oガスも考慮した新しい制御技術を開発した。N₂Oガスは、活性汚泥の代謝における生物学的窒素除去過程で生成されることを明らかにし²⁾、その生成メカニズムを数式モデルとして構築した。この数式モデルを、これまでに開発した下水水質シミュレータの活性汚泥モデルに組み込んだ。下水水質シミュレータに入力因子として原水水質と運転条件を与えて計算することで、処理水の有機物や栄養塩の濃度に加えてCO₂排出量とN₂Oガス生成量を求めることができる。この技術をベースとした温室効果ガス低減型下水処理制御システムを開発した（図2参照）。

このシステムは、水質項（処理水水質の悪化時に重みが

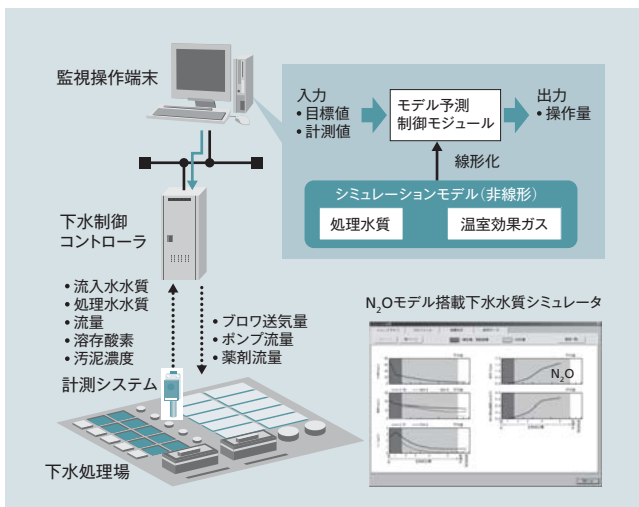


図2 | 温室効果ガス低減型下水処理制御システム

温室効果ガス排出量低減と処理水水質の向上・維持を両立する制御が実現できる。

増加）と環境負荷項（温室効果ガス排出量に比例）で構成された評価関数と、非線形のシミュレーションモデルを線形化した線形モデルを組み込んだモデル予測制御を適用したことが特徴である。さらに、処理水水質や流入水水質の計測システムを組み込み、計測値を制御に反映させたオンライン制御システムとしている。現在、このシステムの制御効果や信頼性を確立するための実証実験を実下水処理場で実施中であり、処理水質向上と温室効果ガス排出量低減の両立が可能な制御システムとして製品化を進めていく。

3. オゾンマイクロバブル水再生装置

人々が直接触れ合う典型的な水環境の例として、せせらぎや親水公園がある。このために用いる水として、下水処理水の再生水を利用する場合がある。下水処理水には、一般的にわずかではあるがさまざまな物質が含まれており、親水の水質基準を満足するために脱色、脱臭、除濁、殺菌処理が求められる。これらの処理に適した水処理技術として、オゾンを用いた酸化処理がある。

オゾンによる酸化処理は、放電により酸素分子(O₂)から生成したオゾンガス(O₃)を被処理水に溶解させ、その強い酸化力で被処理水中の有機物や微生物を低分子化、不活化するものである。これまでのオゾン処理装置では、オゾンガスを溶解するために多数の細孔を持つ散気管を用いており、オゾンガスは直径数ミリメートルの気泡として被処理水中に注入されていた。この場合、水深が低いとオゾンの溶解効率が低くオゾン生成コストや排オゾンガス処理コストの増大につながるため、3～5 mの水深が必要であった。このため水処理装置が大規模となり、設計の自由度も低かった。

これに対し、日立グループは、直径が50 μm前後の微細な気泡であるオゾンマイクロバブルを利用した水再生装置を開発した。気泡径がきわめて小さいため、数ミリメートルの径の気泡に比べて比表面積が格段に大きく、上昇速度も低いため、高い溶解性と反応性を実現できる。また、濁質の浮上分離効果が高く、砂ろ過などの前処理を省くことも可能である。この装置は、独自構造のノズルと気泡生成ループに特徴があり、マイクロバブルの生成に必要な圧力を低減するとともに生成量を増加でき、オゾン使用量およびマイクロバブル生成電力の大幅な低減と、装置の小型化を達成した。これまでに、下水処理場において処理性能の実証を完了しており、色度10度以下、濁度2度以下、大腸菌不検出の再生水を従来のオゾン処理方式と比べて約80%の運転コストで得られることを地方共同法日本下水道事業団との共同研究で確認した。また、水深が0.6 m以上であれば、99.8%以上のオゾン利用効率を得られるこ

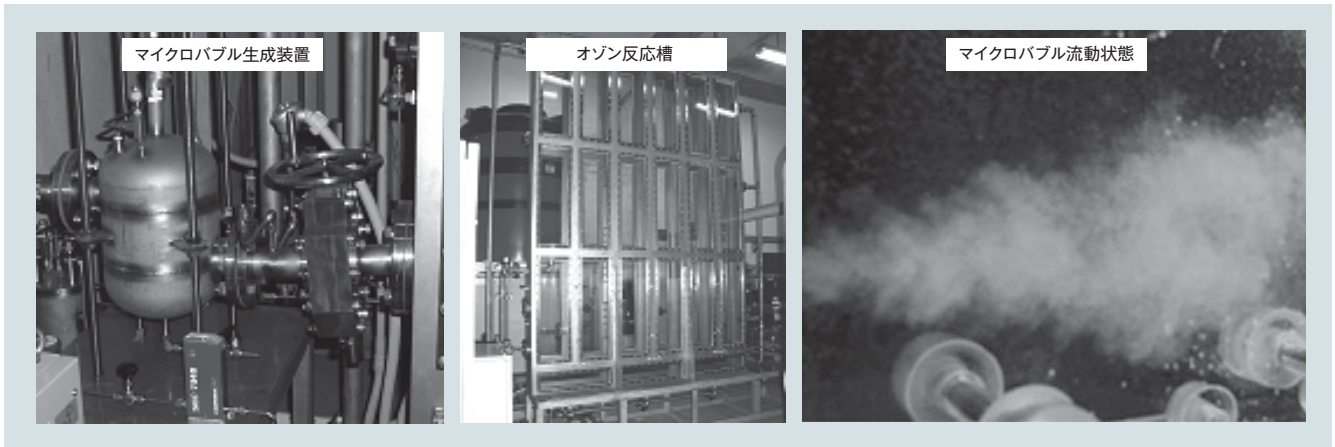


図3 | 実証設備とマイクロバブルの流動状態
下水処理場での実証実験によってマイクロバブルの処理性能を確認し、製品化した。



図4 | オゾンマイクロバブル水再生装置 (600 m³/日) 外観
オゾン反応槽はマイクロバブルの流動特性をモデル化した流体解析を行い、設計を最適化した。

とも明らかとなり、設計の自由度の向上に加えて設備コストを低減できる結果を得た³⁾ (図3, 図4参照)。

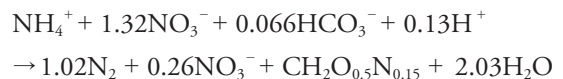
この技術は再生水のみならず、下水処理水の放流水、産業排水、さらには水圏の浄化にも応用することが可能である。より清澄な水環境の実現に向け、適用先を順次拡大していく予定である。

4. アナモックス反応を用いた窒素処理システム

窒素排水は畜産業をはじめ、電気めっき業、無機薬品製造業、貴金属製造業などさまざまな業種で排出され、その処理が求められている。従来の窒素処理技術は、主に生物学的な硝化・脱窒法が用いられており、排水中のアンモニアを硝化菌によって全量硝酸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菌によって窒素ガスに変換する脱窒工程を経る。しかし、特に高濃度の窒素排水は、硝化工程での多大なばっ気動力や脱窒工程での多量の有機物(メタノールなど)添加を必要とし、処理コストの増加が課題となっている。

4.1 アナモックス処理システムの特徴

アナモックス反応は、独立栄養性のアナモックス菌によって、嫌気性条件下で次式⁴⁾のとおりアンモニアと亜硝酸を直接窒素ガスに変換する。



このアナモックス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2槽型のシステムとなる(図5参照)。

株式会社日立プラントテクノロジーで開発中のアナモックス処理システムの特長は、アナモックス菌および硝化菌をおのおの包括固定化した担体を各槽に使用していることである^{5), 6)}。包括固定化技術を用いることで、担体内でアナモックス菌や硝化菌をそれぞれ高濃度に保持でき、担体表面に微生物を付着させる結合固定化技術に比べ、高い処理速度や安定性能が得られる。

このアナモックス処理システムでは、アンモニアを約半

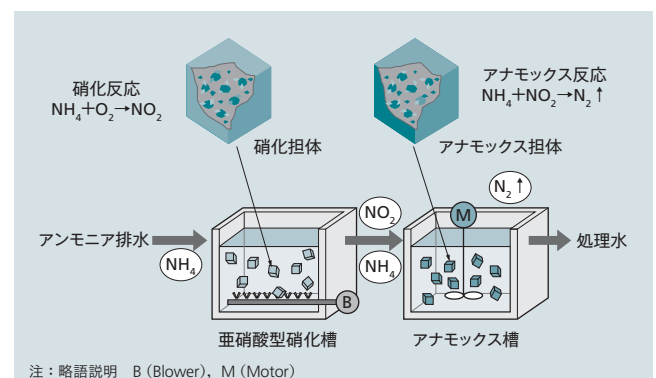


図5 | 包括固定化担体利用型アナモックス処理システム
亜硝酸型硝化槽でアンモニアから亜硝酸を生成し、アナモックス槽でアンモニアと亜硝酸から窒素ガスへ変換し、窒素を処理する。

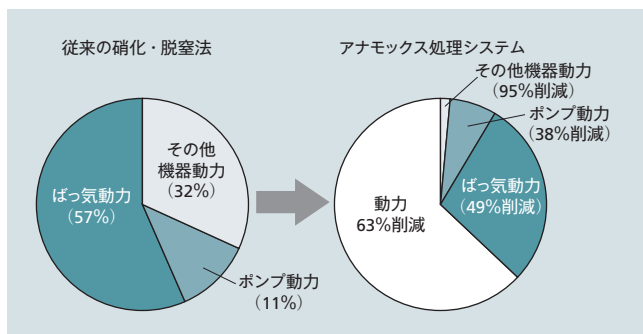


図6 | 処理コスト削減効果試算例
 アナモックス処理システムは、従来の硝化・脱窒法に比べてエネルギー使用量を削減でき、省エネルギー・低コスト型のシステムとなる。

量だけ亜硝酸に酸化することで、ばっ気動力の削減ができ、かつ有機物を添加することなく窒素ガスに変換できるため、省エネルギー・低コスト型の窒素処理システムとなる。下水処理施設内で生じる消化汚泥の脱水ろ液（以下、汚泥脱水ろ液と記す。）を対象に、処理規模104 m³/日、流入アンモニア性窒素濃度1,060 mg-N/Lの排水を254 mg-N/Lにアナモックス処理システムで処理する場合、従来の硝化・脱窒法に比べて動力使用量を約63%、処理コストを約48%、反応槽容量を85%程度削減できる見込みである（図6参照）。

4.2 アナモックス処理システム実証試験

ここでは、汚泥脱水ろ液をアナモックス処理システムで処理した実証試験結果について述べる。なお、この実証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⁷⁾。

汚泥脱水ろ液は、アンモニア濃度が高く、有機物量が少ないため、従来の硝化・脱窒法で処理した場合、多量のばっ気動力や有機物源の添加が必要となる。この試験は、亜硝酸型硝化槽250 L、アナモックス槽100 Lの反応槽を用いて行った。その結果、流入水の全窒素濃度は925 mg-N/Lであったのに対し、処理水は126 mg-N/Lとなり、窒素除去率86%を得た。また、このときの亜硝酸型硝化槽での亜硝酸の生成速度は平均1.7 kg-N/(m³・d)、アナモックス槽での平均窒素除去速度は4.6 kg-N/(m³・d)と高い処理性能を安定的に得られ、汚泥脱水ろ液に対してアナモックス処理システムが適用できることを実証した。

アナモックス処理システムは汚泥脱水ろ液のみならず、アンモニア濃度が高く、有機物量が少ない各種産業排水に適用可能であり、今後実排水での適用をめざしていく。

5. ジオキサン排水処理システム

1,4-ジオキサンは、塗料やセルロースなどの溶剤、有機溶剤の安定化剤などの工業用薬剤から、洗剤、化粧品などの家庭用品に至るまで幅広い製品に用いられており、各種

工場排水や廃棄物処理場の埋め立て地浸出水などからの検出事例が多く報告されている。1,4-ジオキサンは、WHO（World Health Organization：世界保健機関）の外部組織であるIARC（International Agency for Research on Cancer：国際がん研究機関）により、クラス2B（発がん性分類の一つで、「動物に対する発がん性が明らかで、ヒトに対する発がん性の可能性がある物質」と限定）に指定されており、発がん性などの健康被害への影響が懸念されている。また、難分解性で水への溶解度が高いという特性を有することから、現在、環境省に設置された諮問機関である中央環境審議会において、水質汚濁防止法の新たな有害物質として排水規制への検討が進められており、2012年度には施行される見通しである。

5.1 ジオキサン除去の従来方法

1,4-ジオキサンは、一般的な排水処理方法である凝集沈殿、活性炭吸着や活性汚泥による生物処理ではほとんど除去できず、促進酸化法が唯一有効と考えられている。促進酸化法は、オゾンと過酸化水素や紫外線を組み合わせて発生する強力な酸化力をもつOHラジカルにより有機物を酸化分解するもので、難分解性化学物質の分解に有効な手段である。しかし、この方法はオゾン発生器や紫外線照射装置などが高価なうえ、運転に膨大な電力が必要となり、低コスト・省エネルギーなどの観点から、より効率的なジオキサン処理システムが求められている。

5.2 ジオキサン分解菌

化学物質審査規制法に基づく1,4-ジオキサン分解率は、2週間で0%であり、通常の微生物で分解することはできない。1,4-ジオキサンを唯一のエネルギー源として利用・増殖できる既知の微生物は世界でも4株しか発見されておらず、また、これらの微生物は1,4-ジオキサンの分解速度が低く、実用的な分解能力を有していない。

一方、大阪大学が、独自のプロトコルにより多数のサンプリングの中から集積培養・単離したジオキサン分解菌は新種の微生物であり、これまで知られていたものに比べて10倍以上の1,4-ジオキサン分解速度を有している⁸⁾。

5.3 ジオキサン排水処理システムの概要

このジオキサン分解菌の高い分解速度を活用する技術は、日立プラントテクノロジーが包括固定化窒素除去プロセス「ペガサス」で長年培ってきた技術を応用展開したもので、包括固定化担体内部にジオキサン分解菌を高濃度に保持し、短時間で効率的に1,4-ジオキサンを分解することができる。ジオキサン排水処理システムは、従来方法であ

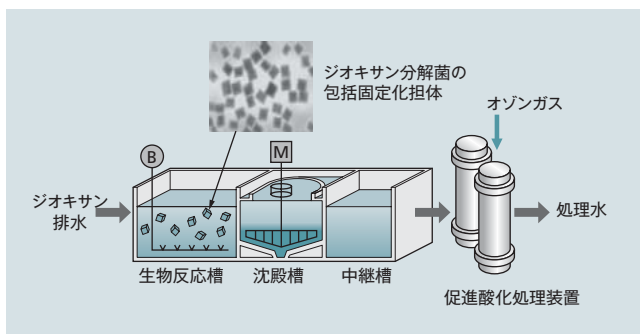


図7 | ジオキサン排水処理システム

促進酸化処理装置の前段の生物反応槽内に、ジオキサン分解菌の包括固定化担体を投入し、生物処理によって1,4-ジオキサンを分解する。



図8 | ジオキサン排水処理実証試験装置

約3か月にわたって実排水処理の実証運転を行い、処理性能を検証した。

る促進酸化処理装置の前段に設置した生物反応槽内に、ジオキサン分解菌の包括固定化担体を投入し、生物処理によって1,4-ジオキサンを分解するものである。これにより促進酸化処理設備の小型化を図ることができる(図7参照)。

なお、開発にあたっては、図8に示す実証試験装置(生物反応槽容量120 L×2槽)を用い、約3か月にわたって実排水処理の実証運転を行い、その性能を検証した。

処理規模210 m³/日、1,4-ジオキサン濃度400 mg/Lの排水を、このシステムで0.5 mg/L以下に処理する場合、従来方法に比べてイニシャルコストを約41%、ランニングコストを約72%低減できる見込みであり、大幅な低コスト化が可能である。

6. おわりに

ここでは、活性汚泥モデルを用いた下水処理制御技術、オゾンマイクロバブルを用いた水再生処理装置、および機

能性微生物を用いた高効率な産業排水の処理装置の開発例について述べた。

監視制御、情報システム、水処理装置など、水環境の保全に有効な技術は数多くあるが、それらの技術を組み合わせたシステムとして、総合的に良好な水環境を実現することが重要と考えている。今後も継続して日立グループの力を結集してさらなる技術開発に注力し、社会貢献を進めていく。

参考文献など

- 1) 国土交通省、平成21年度末の下水道整備状況について、
http://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000111.html
- 2) 上門、外：下水処理硝化工程における一酸化二窒素の生成量評価と抑制方法の検討、環境システム計測制御学会誌、Vol.15, No.2/3, 99-107 (2010)
- 3) 隅倉、外：オゾンマイクロバブルを用いた下水再生装置の開発、環境システム計測制御学会誌、Vol.13, No.2/3, 105-108 (2008)
- 4) M. Strous, et al.: The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms, Applied Microbiology and Biotechnology, 50 (5), 589-596 (1998)
- 5) T. Sumino, et al.: Immobilization of nitrifying bacteria by Polyethylene glycol prepolymer, J Ferment Bioeng 72 : 141-143 (1991)
- 6) 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)
- 7) 井坂、外：アナモックス反応を用いた汚泥消化脱水ろ液中窒素除去システムの実証、第45回下水道研究発表会講演集、821~823 (2008)
- 8) 清：1,4-ジオキサン分解菌の特徴とその活用、水中1,4-ジオキサンの新基準の動向と低コスト除去・処理技術、170 (2010)

執筆者紹介



陰山 晃治

1993年日立製作所入社、日立研究所 エネルギー・環境研究センター 公共・産業研究部 所属
現在、上下水道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



木村 裕哉

2006年株式会社日立プラントテクノロジー入社、研究開発本部 松戸研究所 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



宇田川 万規子

1993年日立プラント建設株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社、研究開発本部 松戸研究所 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