

カーボンニュートラルに貢献する 下水処理の省エネ・創エネソリューション

Sewage Treatment Energy Conservation and Energy Creation Solutions Contributing to Carbon Neutrality

柿沼 建至 KAKINUMA Kenji 平岩 良太 HIRAIWA Ryota 木内 智明 KIUCHI Tomoaki

政府が宣言した2050年までのカーボンニュートラルの実現に貢献するため、上下水道事業でも新しい技術開発の推進が求められている。

東芝グループは、上下水道施設の省エネルギー（以下、省エネと略記）・創エネルギー（以下、創エネと略記）を実現するソリューションを開発している。省エネの観点では、下水処理施設での消費電力の大半を占める曝気（ばっき）動力の削減のため、水処理を低動力・短時間で行う回転繊維ユニットRBC（以下、RBC装置と略記）や、（株）クボタと共同開発した最適な曝気風量制御を行うスマートMBR（SCRUM™）の性能検証を実規模で行っている。創エネの観点では、発電に使用可能な消化ガス^(注1)の発生量が増やせる消化污泥可溶化装置を開発・製品化した。

To contribute to achieving the government's goal of carbon neutrality by 2050, development of new technologies is needed in water supply and sewerage system businesses.

The Toshiba Group is now developing solutions to achieve energy conservation and energy creation at water supply and sewerage system facilities. To reduce aeration power, which accounts for the vast majority of energy consumption at sewage treatment facilities, we have demonstrated that a sewage treatment device using the rotating biological contactor (RBC) method with a three-dimensional mesh-like fibrous body (hereafter referred to as "RBC device") is capable of low-power water treatment in a short period of time, and that the smart MBR (SCRUM™) developed jointly with Kubota Corporation is capable of optimal aeration air volume control on a real scale. In terms of energy creation, we have developed and commercialized a digested sludge solubilizing system that increases the amount of digestion gas which can be used for power generation.

1. まえがき

政府が令和3年10月に改定した「地球温暖化対策計画」では、2030年度に温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減し、2050年までに排出量を実質ゼロにするという目標が掲げられた。

下水道分野でも、カーボンニュートラルへの貢献が期待され、2030年度における温室効果ガス排出量を、2013年度比で208万t（二酸化炭素（CO₂）換算）削減するという具体的な目標が掲げられている⁽¹⁾。下水道からの温室効果ガス排出量は半数以上が下水処理場で使用される電力由来していることから、水処理や污泥処理技術の省エネを推進することは重要な施策となっている。

また、下水道は、地域の水・資源・エネルギーが集約されるため、脱炭素に貢献する高い創エネポテンシャルを持っている。特に、下水污泥に含まれる有機物のエネルギーポテンシャルを試算すると年間約120億kWhに上り、下水道分野での全消費電力量の約1.56倍に相当する⁽¹⁾。

(注1) 污泥中の有機物が微生物により分解されて発生したガス。メタンが主成分。

下水污泥のエネルギー利用技術のうち、下水污泥から発生する消化ガスを使った発電は、既に全国100か所以上の下水処理施設で行われている。これを更に普及させるためには、下水污泥の有機物をより多く消化ガスに転換する技術が求められており、その一つに污泥可溶化がある。

このような背景の下、東芝グループは、下水道分野のカーボンニュートラルに貢献するソリューション開発を推進している。ここでは、水処理の省エネと、下水污泥由来の創エネを実現する新たなソリューションについて述べる。

2. RBC装置-OD法

RBC装置は、立体網目状構造の繊維体を用いる回転生物接触法（RBC：Rotating Biological Contactor）の水処理装置である（図1）。RBC装置は繊維体に大量の微生物を保持し、短時間かつ繊維体の回転に必要な少ない動力だけで、曝気をせずに下水中の有機物を低減できる⁽²⁾。

2.1 性能検証のための実証試験

RBC装置をOD（オキシデーションディッチ）槽の前処理に用いることでOD法の省エネや負荷増強を図る新たな水処理技術（RBC装置-OD法）について、実規模の実証試験

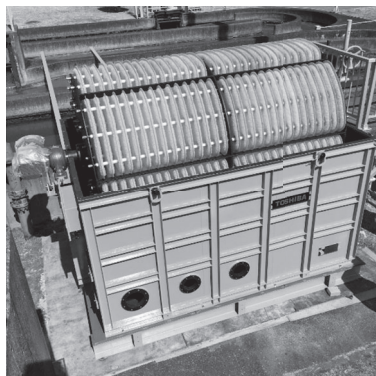


図1. RBC装置の外観

立体網目状構造の繊維体を、装置内に30枚設置している。

Appearance of RBC device

を実施した。処理能力1,160 m³/日の1系(580 m³/日×2池)のOD槽前段にRBC装置を設置して実証系列とし、隣接する2系(処理能力1,230 m³/日×1池)を対照系列とした(図2)。運転条件などの調整を経て、2022年7月4日～2023年1月9日に省エネ試験を行った。2023年1月10日からは負荷増強試験として、実証系列において流入下水水量を変更せず、1-2系だけにこれまでの倍の水量を流入させた。

2.2 RBC装置の水処理性能

有機物汚濁の程度を表す指標 BOD(生物化学的酸素要求量)や、S-BOD(溶解性BOD)は、RBC装置の入口水(注2)では省エネ試験期間の平均でそれぞれ213 mg/L、76 mg/Lであったのに対し、RBC装置の出口水では平均

77 mg/L、52 mg/Lであり、返送汚泥の影響が小さいS-BODで見ても低減率は平均31%であった。加えて、浮遊性BOD(非溶解性BOD)の低減率がRBC装置前後で80%を上回る値となった。その結果、実証系列では曝気時間を短縮した運転で、処理水の平均BODは対照系列と同程度にできた。

RBC装置前後のNH₄-N(アンモニア性窒素)は、HRT(水理学的滞留時間)が約15分と短い今回の条件ではほとんど低減されなかった。一方、有機態窒素の低減率は大きく、平均57%となった。各系列の処理水のT-N(有機態窒素と無機態窒素を合わせた全窒素)は同程度であり、RBC装置での有機物負荷低減による脱窒への悪影響は認められなかった。

2.3 RBC装置-OD法での省エネ効果

省エネ試験では、実証系列においてRBC装置によって有機物負荷が低減された結果、曝気装置の稼働時間削減が可能となり、処理水量当たりの消費電力量原単位は0.24～0.29 kWh/m³と、並行して運転された対照系列より平均15.3%減少した。

一方、負荷増強試験では、実証系列における曝気装置の稼働時間が長くなったものの、OD槽の稼働数が半分になったことで消費電力量原単位は0.19～0.22 kWh/m³まで低下し、対照系列より平均37.3%減少した(図3)。なお、実証系列の消費電力量のうち、RBC装置が占める割合は10%程度であった。

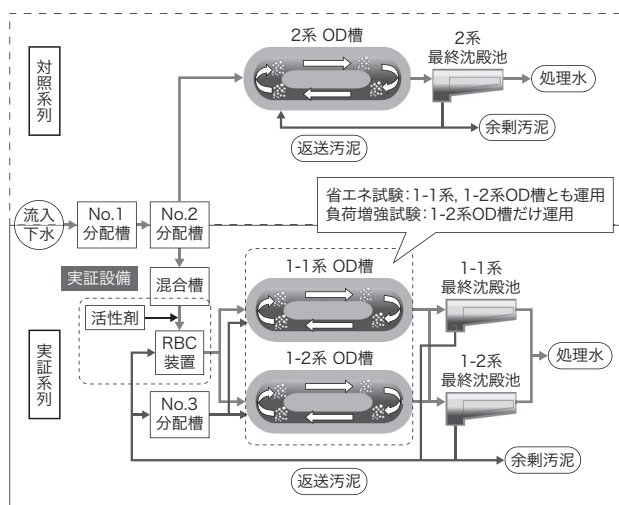


図2. 実証試験における水処理フロー

RBC装置で下水中の有機物を処理した後、RBC装置の出口水をOD槽に流入させる。

Sewage treatment process in demonstration test

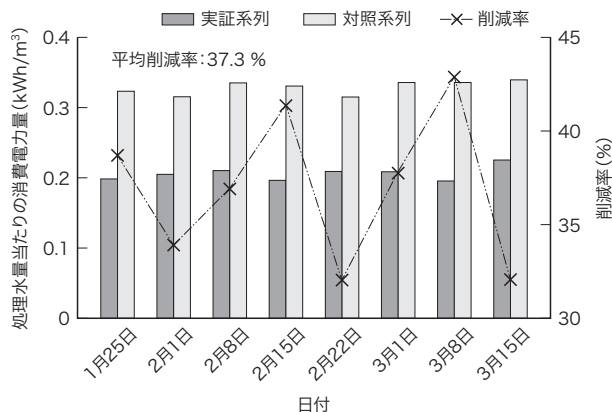


図3. RBC装置の負荷増強試験における処理水量当たりの消費電力量の比較

RBC装置で有機物を低減したことから、OD槽の数が削減でき、曝気に必要な消費電力量が減少することを確認できた。

Comparison of energy consumption for treated water volume in load increase test of RBC device

(注2) RBC装置の入口水の水質は、流入下水・返送汚泥の水質測定結果と流量から計算した。

3. SCRUM™

3.1 MBRの特長

膜分離活性汚泥法 (MBR: Membrane Bio Reactor) は、下水処理の過程で発生する汚泥を、精密ろ過膜 (MF膜) で固液分離する。従来、一般的な下水処理場では、フロック (集塊) 化した汚泥を最終沈殿池で沈めることで固液分離してきた。

MBRは従来方式に比べ、高い活性汚泥濃度で運転が可能なことや、反応タンク内に膜ユニットを設置すれば最終沈殿池を省略できて施設が省スペースなこと、精密ろ過膜で懸濁物質や大腸菌などの微生物を除去した高度な処理水が得られることが利点である。これらの利点を活用することで、既存の土木躯体 (くたい) を流用した下水処理場の高度処理化が可能になり、また、処理水を再生水として農業用水や修景用水、トイレ用水などで利用することが可能となる。

3.2 MBRの課題

利点の多いMBRだが、標準活性汚泥法などに代表される従来の方式に比べて消費電力量が大きく、導入台数が多くてランニングコストの差が大きくなる中大規模施設への導入が進んでいない。MBRでは生物処理に必要な酸素を供給するための曝気だけでなく、膜表面に付着する堆積物を洗浄するための曝気が必要になる。従来の施設では、余裕を持った一定の曝気風量で運用することが多く、消費電力量が大きくなる傾向があることから、曝気に要する消費電力量を削減することが課題となっている。

そのため東芝インフラシステムズ (株) は、省エネ制御技術と膜メーカーである (株) クボタのMBRとを組み合わせたスマートMBR (SCRUM™) を共同開発した。

3.3 省エネ制御技術

SCRUM™の省エネ制御は、①膜洗浄の風量制御、②補助散気の風量制御の二つを組み合わせている。

膜洗浄の風量制御技術は、膜の目詰まりの指標である換算膜差圧を、各種プロセスデータを用いたモデル式を基に予測し、換算膜差圧の予測値が目標曲線上を推移するよう膜洗浄の風量を制御する (図4)。定期的 to 実施する薬液洗浄の周期を守り、余剰な風量を削減する。また、膜差圧予測モデルに用いるパラメーターを、運転状況に応じて自動でチューニングするパラメーター自動調整機能を開発し、維持管理の負担軽減を図っている。

補助散気の風量制御技術は、高度処理でNH₄-NをNO₃-N (硝酸性窒素) に変化させるために必要な酸素供給量を制御する。生物反応槽末端で計測したNH₄-N濃度から適正な溶存酸素量を算出し、補助散気の風量制御の目標値と

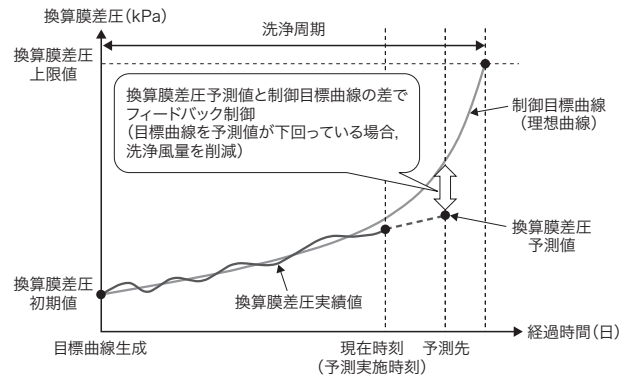


図4. SCRUM™での膜洗浄の風量制御

換算膜差圧の予測値と、制御目標曲線の差を用いて風量のフィードバック制御を行う。余剰風量を削減できて、省エネにつながる。

Air volume control for SCRUM™ scouring membrane

して、処理水質は維持しながら余剰な風量を削減する。

SCRUM™では、処理水量当たりの消費電力量 0.22 kWh/m³以下の達成を目標としている。これは一般的な高度処理の消費電力量と同等であり、達成によりSCRUM™の普及を促進し、カーボンニュートラルに貢献することが期待される。

3.4 普及展開の促進

SCRUM™は、大阪市中浜下水処理場 (処理能力 40,000 m³/日) に納入し、性能検証を開始した。また、大阪市海老江下水処理場、ほか1施設に導入が決定しており、普及展開していく。

4. 消化污泥可溶化装置

4.1 消化污泥可溶化装置の概要

污泥可溶化とは、污泥中の微生物の細胞膜・細胞壁を破壊することで溶解性有機物を増やす技術で、消化ガスの増量や污泥の減量ができる。装置の構成と処理フローを図5に示す。オゾンに過酸化水素を併用した新しい促進酸化処理、及び独自の構造で高効率な攪拌を行う溶解反応タンクを適用し、従来に比べて少ないオゾン注入量で高い可溶化効果を実現した。

4.2 実規模での実証試験による評価

下水処理施設に導入した場合の効果を検証する目的で、北海道江別市の江別浄化センターで実証試験を実施した。

4.2.1 消化ガスの増量効果

実証系列と対照系列の消化ガス発生倍率は、式(1)により求めた。実証系列の消化ガス発生倍率が対照系列より大きければ、污泥可溶化で消化ガスが増加したことになる。

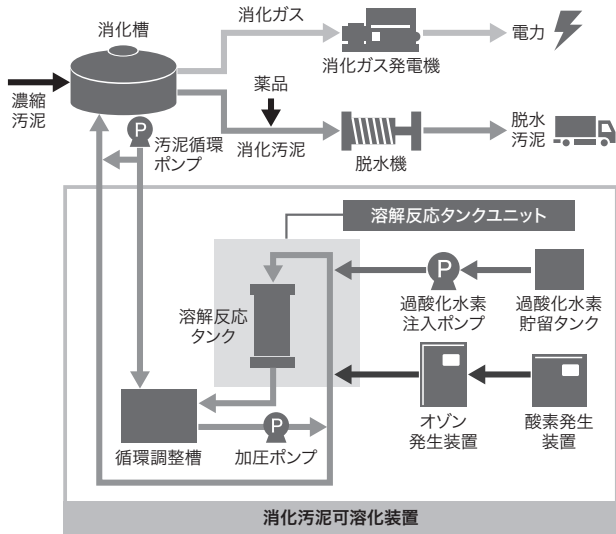


図5. 消化汚泥可溶化装置の構成と処理フロー

消化汚泥を消化槽から引き抜き、オゾン及び過酸化水素を注入し、溶解反応タンクで混合攪拌した後、消化槽へ返送する。

Digested sludge solubilizing system composition and treatment process

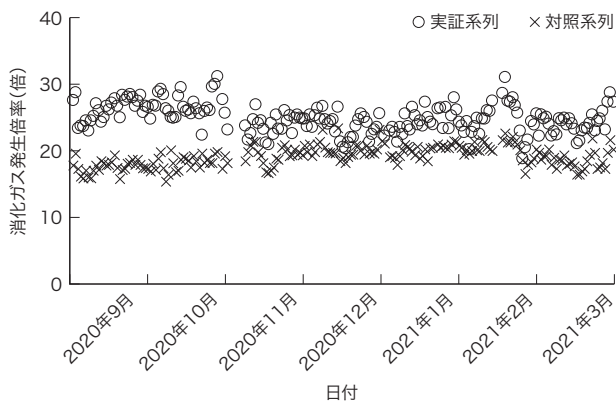


図6. 汚泥可溶化の有無による消化ガス発生倍率の違い

汚泥可溶化によって消化ガスが増加することを確認できた。

Differences of digestion gas occurrence rate with and without sludge solubilization

$$\text{消化ガス発生倍率 (倍)} = \frac{\text{消化ガス発生量 (m}^3 \text{ (Normal)/日)}}{\text{濃縮汚泥量 (m}^3 \text{/日)}} \quad (1)$$

消化ガス発生倍率の評価結果を図6に示す。評価期間中の平均で、実証系列は対照系列の1.28倍であり、汚泥可溶化によって消化ガスが増加することを確認できた。

4.2.2 汚泥の減量効果

実証系列と対照系列の消化汚泥中の浮遊物質 (SS) の割

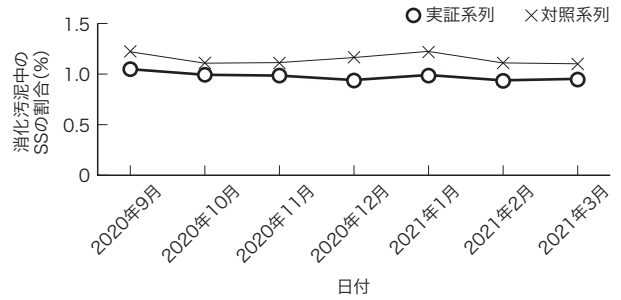


図7. 汚泥可溶化の有無による消化汚泥中のSSの違い

汚泥可溶化によって消化汚泥中のSSの割合が減少することを確認できた。

Differences of SS in digested sludge with and without sludge solubilization

表1. CO₂排出量増減の試算

Calculation of CO₂ emission increase and decrease

| 項目 | 値 | CO ₂ 排出係数 | CO ₂ 排出量 (t/年) | |
|----|-------------|----------------------|-------------------------------|--------|
| 増加 | 装置の電力消費 | +100 (MWh/年) | 0.533 (kg/kWh) ⁽³⁾ | +53.3 |
| | 過酸化水素の製造 | +0.42 (t/年) | 3.9 ⁽⁴⁾ | +1.6 |
| 削減 | 消化ガス発電 | -237 (MWh/年) | 0.533 (kg/kWh) ⁽³⁾ | -126.3 |
| | 脱水設備の電力消費減少 | -8.8 (MWh/年) | 0.533 (kg/kWh) ⁽³⁾ | -4.7 |
| | 塩化第二鉄使用量の減少 | -8.2 (t/年) | 0.32 ⁽⁴⁾ | -2.6 |
| | 消石灰使用量の減少 | -11.6 (t/年) | 0.45 ⁽⁴⁾ | -5.2 |
| 合計 | | | -83.9 | |

合を評価した結果を図7に示す。評価期間中は常に実証系列が対照系列に比べ少なくなっており、汚泥可溶化によって平均16%のSS減量効果を確認できた。

4.2.3 温室効果ガス排出量の削減効果

運用時のCO₂排出量の増減を評価するため、表1のとおり、各項目に由来するCO₂排出量を試算した。消化汚泥可溶化装置と外から供給する過酸化水素の製造に伴う電力消費のために、CO₂排出量は約55 t/年増えるが、増加した消化ガスを用いた発電などにより約139 t/年のCO₂排出量が削減され、合計では約84 t/年のCO₂排出量の削減効果が見込める。

5. あとがき

国際エネルギー機関 (IEA : International Energy Agency) の報告によると、2050年カーボンニュートラルを実現するシナリオに到達できた場合でも、化石燃料の消費割合は20%程度を占め、最終的にゼロにはならない。したがって、消費するエネルギーを削減しながら再生可能エネルギーに

転換していかなければカーボンニュートラルは達成できない。

東芝グループでは、この論文で述べた省エネ・創エネソリューションの開発を今後も推進するとともに、ICT（情報通信技術）や、AI、センシング技術などを組み合わせて、省エネ運転管理や効率化につながる技術の開発を行うことで、上下水道分野におけるカーボンニュートラルの実現に貢献していく。

文 献

- (1) 国土交通省, “脱炭素に関する動向について(令和3年12月)”. <<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001444668.pdf>>, (参照 2023-07-14).
- (2) Ito, T. et al. Microbial Communities and Nitrogen-Utilizing Bacteria of Rotating Biological Contactors and Activated Sludge Treating Public Sewage and Night Soil/Johkasou Sludge. *Journal of Water and Environment Technology*. 2021, **19**, 3, p.109-119.
- (3) 北海道電力, “2021年度のCO₂排出実績について(暫定値)”. ぼくでん. <https://www.hepco.co.jp/corporate/environment/global_warming/results_co2.html>, (参照 2023-07-13).
- (4) 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実行計画策定の手引き(平成21年3月)”, 国土交通省, 2009, 92p. <<https://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>>, (参照 2023-07-13).

・SCRUMは(株)クボタの商標。



柿沼 建至 KAKINUMA Kenji

東芝インフラシステムズ(株)
社会システム事業部 水・環境システム PPP事業開発部
日本水環境学会会員 技術士(上下水道部門)
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



平岩 良太 HIRAIWA Ryota

東芝インフラシステムズ(株)
社会システム事業部 水・環境システム PPP事業開発部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



木内 智明 KIUCHI Tomoaki

東芝インフラシステムズ(株)
社会システム事業部 水・環境プロセス技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.