

# 特集論文

## 関連するSDGs



## 下水処理施設におけるカーボンニュートラルに向けたエネルギーソリューション

Energy Solutions for Carbon Neutrality at Municipal Wastewater Treatment Facilities

柏谷 幸太郎  
Kasuya Kotaro  
大久保 章  
Okubo Akira  
吉田 宏司  
Yoshida Hiroshi

今岡 博義  
Imaoka Hiroyoshi  
漆垣 謙次  
Urushigaki Kenji

### 概要

政府のカーボンニュートラルに向けた政策に従い、水処理施設における二酸化炭素の排出量削減の要求が高まっている。当社では、下水処理施設のカーボンニュートラル達成のためのエネルギーソリューションとして、省エネルギー対策や再生可能エネルギー導入、ならびにそれらを効果的に使用するためのエネルギー・マネジメントシステムなどを提供している。本稿では、近年の下水処理施設向けエネルギーソリューションを紹介する。

### Synopsis

At water treatment facilities such as water supply and sewerage facilities, there is increasing demand to reduce CO<sub>2</sub> emissions in line with the government's policy toward carbon neutrality. We provide energy solutions for carbon neutrality at municipal wastewater treatment facilities, such as energy saving measures and the introduction of renewable energy, as well as energy management systems for the effective use of these solutions. This paper introduces recent energy solutions for sewerage facilities.

キーワード：下水道施設、カーボンニュートラル、エネルギーソリューション、省エネルギー、再生可能エネルギー

### 1. はじめに

わが国は、2030年までに温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減し、2050年までにカーボンニュートラルを達成するという目標を掲げている。2021年度の下水道施設からの温室効果ガスの発生量は約520万トンであり（図1）<sup>(1)</sup>、これはわが国の温室効果ガス排出・吸収量（11億2,200万トン）<sup>(2)</sup>の約0.5%に相当する。また、自治体の事務事業における温室効果ガス排出量のうち、下水処理が占める割合は大きい。そのため、自治体が排出量削減の目標を達成するためには、下水処理施設のカーボンニュートラル化が不可欠である。

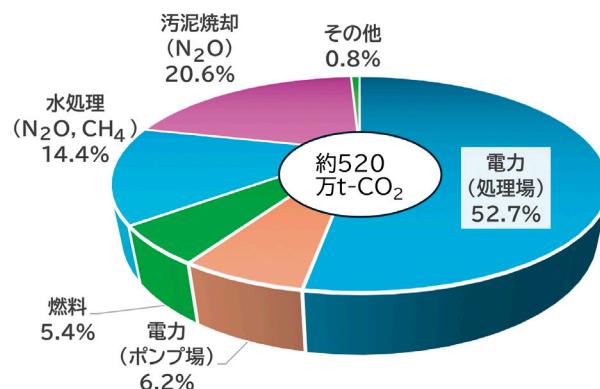


図1 下水道施設からの温室効果ガス発生量（2021年度）

## ■ 2. 下水処理施設におけるカーボンニュートラルへの取組み

下水処理施設におけるカーボンニュートラルの実現に向けた取組みは多岐にわたる。そのうちの主な取組みの状況、および課題とその対策を以下に述べる。

### 2. 1 エネルギー消費量の削減

下水処理施設の多くは老朽化が進行し、エネルギー効率の低下や事故リスクの高まりが懸念されている。老朽化設備の計画的な更新が喫緊の課題となっているが、設備更新の際にはカーボンニュートラルの達成も念頭に置く必要がある。エネルギー消費量を削減するために、最新の省エネルギー（以下、省エネ）機器の導入やエネルギー効率の高い機器への交換はもとより、設備制御（ポンプ運転など）の最適化、操作方式の見直しによる省エネ制御システムの開発および新規導入、運転条件や負荷の最適化、最新の省エネ技術の導入などが進んでいる。

### 2. 2 再生可能エネルギーの導入

敷地内の遊休地を利用した太陽光発電や汚泥処理過程で発生する消化ガスを活用した発電など、下水処理施設へ再生可能エネルギー（以下、再エネ）を導入することによりエネルギー自給率を高め、電力負荷の軽減と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の削減が進められている。

### 2. 3 運用のスマート化とエネルギー管理

少子高齢化により熟練技術者の減少と次世代の担い手不足が深刻化している。これは、下水処理施設の運用の継承や効率化、および技術革新の妨げとなり、保有技術の継承が重要課題となっている。

そこで、情報通信技術（ICT）や人工知能（AI）を活用した監視制御・維持管理システムにより、最適なエネルギー利用を追求し、エネルギー管理の効率を向上させる技術の開発および市場投入が徐々に進んでいる。例として、効果的な運用を促進する運転支援装置、AIを活用したエネルギー管理、設備稼働データに基づいたアセットマネジメントなどがある。

## ■ 3. 水処理設備における消費電力量の削減

下水道施設における消費電力量の設備別の内訳を図2に示す<sup>(1)</sup>。水処理設備（図3）の消費電力量の全体に占める割合は45%と高いことから、ここでの消費電力量を削減することが下水道施設全体の消費電力量の削減に有効であり、その方策として水処理設備の省エネ運転や送気量制御の適正化が挙げられる。

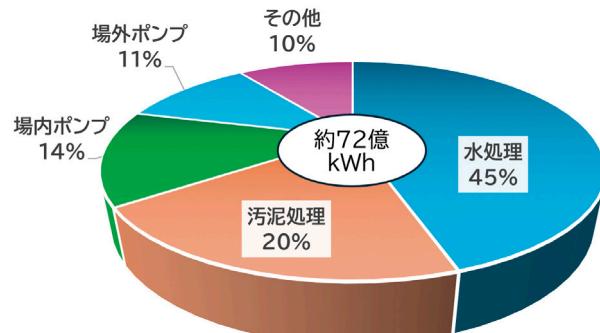


図2 下水道施設における消費電力量の設備別内訳(2021年度)

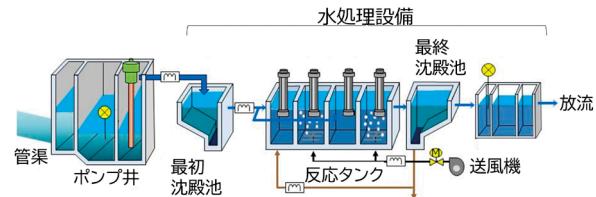


図3 下水処理施設の水処理設備

### 3. 1 水処理設備の省エネ運転

国土交通省の「新下水道ビジョン加速戦略」<sup>(3)</sup>では、健全な下水道経営の確保に向けた取組みとして省エネ技術の採用等によるコスト縮減の徹底が掲げられており、適切な処理水質を維持しながら省エネ化が進められている。

ここでは当社が提案する省エネ運転技術を紹介する。

#### 3. 1. 1 水中攪拌機の間欠運転

反応タンク内の水中攪拌機は、活性汚泥<sup>\*1</sup>の沈降を防ぎ、汚水と活性汚泥との良好な接触を促す。一般に、水中攪拌機の消費電力は大きいことから、汚水の流入量が多い時間帯など、反応タンク内で一定の攪拌効果が期待できる場合は、水中攪拌機の間欠運転を行うことで水質の維持と消費電力量の削減を図れる。

水中攪拌機の連続運転と間欠運転の概念を図4に示す。実際の運転計画は、流入水量や送気量などの運転条件から想定される攪拌効果の時間特性に応じて設定する。

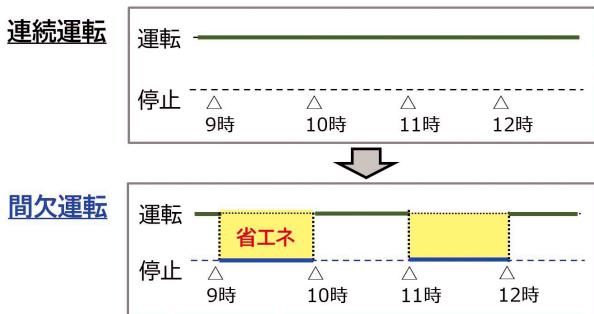


図4 水中攪拌機の連続運転と間欠運転

### 3. 1. 2 水中攪拌機の回転数調整

水中攪拌機が間欠運転に対応していない場合は、反応タンク内の攪拌状態に応じて攪拌機の回転数を調整することによって省エネ化が図れる。

例えば汚水の流入量が多く、反応タンク内で一定の攪拌効果が期待できる時間帯は、通常よりも低い回転数での運転が可能であり、これによって消費電力の削減が期待できる（図5）。

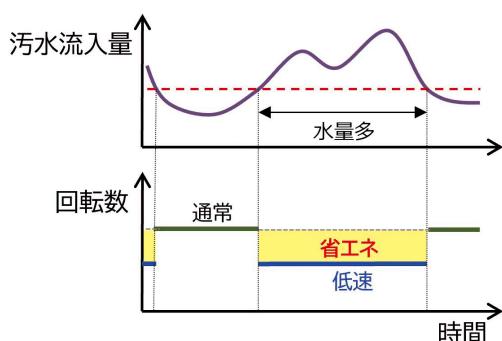


図5 汚水流入量に基づいた水中攪拌機の回転数調整

### 3. 1. 3 循環ポンプの流量調整

汚水中の窒素成分を生物学的に除去するための下水処理方法として「循環式硝化脱窒法」や「嫌気無酸素好気法」が知られており、これらの方法では、反応タンクの下流側から上流側へ活性汚泥の混合水を返流する循環水ポンプが運転される。循環水流量の増加に伴い理論的な窒素除去率は向上するため、循環水の流量は、反応タンクへの汚水流入量とほぼ等しくなるよう、あるいはそれ以上になるように運転される。したがって、汚水中的窒素濃度に応じて循環水流量を調整することにより、処理水質の安定化とポンプ消費電力の削減が期待できる。

汚水中的窒素濃度に基づいて循環水流量を調整すると（図6）、汚水中的窒素濃度が低い時間帯、すなわち、窒素の除去率を高く設定しても目標の処理水質が得られる時間帯に循環水の流量を少なくできるため、処理水質の維持と省エネ化が図れる。

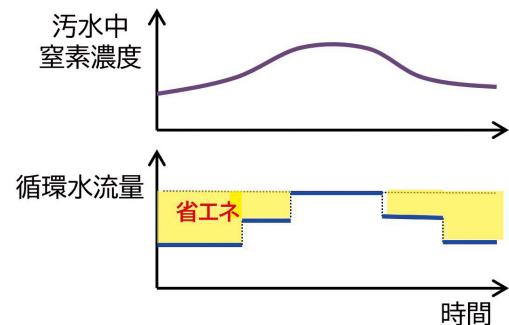


図6 汚水中的窒素濃度に基づいた循環水流量の調整

### 3. 1. 4 消泡水ポンプの間欠運転

反応タンクなどで泡が発生すると処理水質の悪化や悪臭の発生を招くため、連続的に消泡水ポンプを運転して泡の発生・拡大を抑制している。泡が発生する要因や程度は、季節、時間帯、運転条件などによってさまざまである。したがって、各下水処理施設での泡発生の傾向や特性に応じて、間欠運転を取り入れるなど、消泡水ポンプの運転を調整することでポンプ消費電力量の削減が図れる。消泡水ポンプの連続運転と間欠運転の概念を図7に示す。

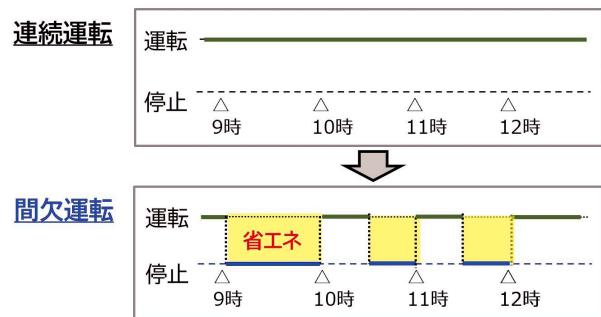


図7 消泡水ポンプの連続運転と間欠運転

### 3. 2 アンモニア計を活用した送気量制御

下水処理施設では、反応タンクのエアレーションに用いる送風機に多くの電力が使用されている。特に、アンモニア性窒素（以下、NH<sub>4</sub>-N）の硝化<sup>※2</sup>には多くの送気量を必要とするため、処理水質を維持しつつ、送気量を適正化して省エネを達成することが重要な課題となっている。

当社は、地方共同法人日本下水道事業団（以下、JS）と株式会社日新システムズと共に、水中のNH<sub>4</sub>-N濃度を連続的に計測するアンモニア計（以下、NH<sub>4</sub>-N計）を活用して送気量を適正に制御する技術を既に開発している。ここでは本技術の概要を紹介する。

### 3. 2. 1 制御方法

本技術は、反応タンク内の上流側に設置したNH<sub>4</sub>-N計の計測値（以下、前段NH<sub>4</sub>-N濃度）によるフィードフォワード制御と、下流側に設置したNH<sub>4</sub>-N計の計測値（以下、後段NH<sub>4</sub>-N濃度）によるフィードバック補正を組み合わせて反応タンク送気量の自動制御を行う技術であり、活性汚泥法<sup>※3</sup>（OD法<sup>※4</sup>を除く）を用いる処理施設を対象とする。

本制御技術の概要を図8に示す。本技術は、「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」として、JSの新技術導入制度における新技術I類に選定されている<sup>(4)(5)</sup>。

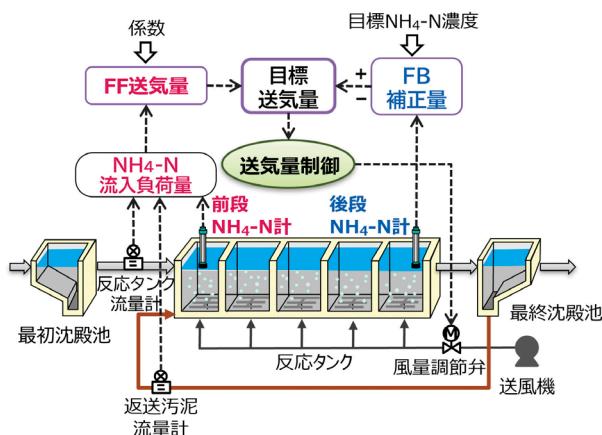


図8 アンモニア計を活用した送気量制御技術の概要

### 3. 2. 2 技術の特長

NH<sub>4</sub>-N流入負荷量<sup>※5</sup>の変動に対する後段NH<sub>4</sub>-N濃度と送気量について、従来技術であるDO一定制御<sup>※6</sup>と本技術を比較したイメージ図を図9に示す。従来技術では、流入負荷量が低い時間帯もDO（溶存酸素）濃度が目標値となるよう送気量を制御するため、必要酸素量に対して送気量が過剰になりやすい傾向がある。一方で、流入負荷量が急激に増加した場合は、制御動作の遅れにより送気量が不足し、硝化の進行が不完全になることが懸念される。

これに対して本技術は、NH<sub>4</sub>-N流入負荷量を指標とする反応タンクへの流入負荷量の変動に対してリアルタイムに追従するフィードフォワード制御を採用しているため、必要酸素量の変動に対して送気量を適正に追従させることができるとなる。さらに、後段NH<sub>4</sub>-N濃度の計測値と目標値との偏差に応じて送気量をフィードバック補正することにより、後段NH<sub>4</sub>-N濃度を目標値に維持することが可能となる。

### 3. 2. 3 導入効果

本技術により、従来技術に対して概ね10%以上の送気量の削減、およびそれに伴う送風機消費電力の

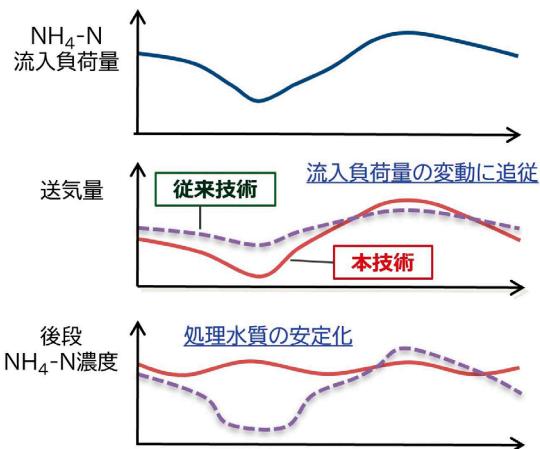


図9 アンモニア計を活用した送気量制御技術と従来施術との比較(イメージ)

低減が図れる。ただし、消費電力の詳細な低減効果については、送風機の仕様、動力特性、運転条件などに依存する。また、後段NH<sub>4</sub>-N濃度に応じて送気量を補正することで、処理水NH<sub>4</sub>-N濃度の安定化が図れる。

## 4. 再エネの導入と資源の有効活用

### 4. 1 太陽光発電

人口減少による流入水量の減少に伴い、処理場内の整備が見直され、遊休地や未利用地が増加することが想定される。このような増加スペースに加え、処理棟の屋上、水処理施設上部などに太陽光パネルを設置し、そこで発電した電気を施設内で利用することでCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。また、水処理施設上部への設置は、藻類発生の抑制や異物飛来防止にも貢献する。

ただし、処理場が電気を必要とするタイミングと太陽光パネルが発電するタイミングには差異があるため、状況によっては無駄が発生する可能性がある。これに対しては、蓄電池を設置して蓄放電することにより、電力の無駄を抑制し、より効果的に電気を使用することが可能となる(図10)。

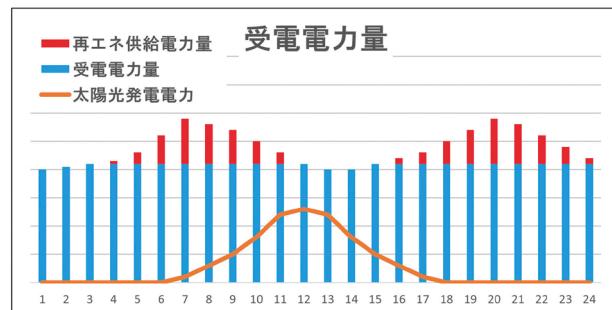


図10 太陽光発電と蓄電池を活用したピークカット

#### 4. 2 消化ガス発電

下水処理施設で回収された下水汚泥は濃縮消化タンクに投入されるが、タンク中では微生物の働きにより消化ガスが発生する。消化ガスは、メタン( $\text{CH}_4$ )と二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )を含んだ可燃性ガスであり、大気放出できない(メタンは $\text{CO}_2$ の25倍の温室効果がある)。そのため、従来、消化ガスは、消化タンクを加熱するためのボイラー燃料として使用するか、焼却処分していた。

消化ガスは、専用のガス発電機を用いることで、発電機燃料として使用可能である。また、消化ガス発電の際に発生する排熱を回収し、消化タンクの加温に使用したり(図11)、冷房・暖房用、および給湯用の熱源として利用したりすることができる。

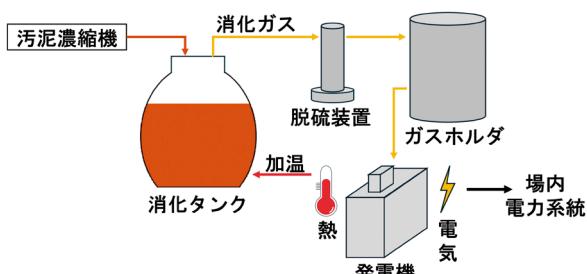


図11 消化ガス発電システム構成図

また、消化ガスはガスホルダ内に貯留することができるため、処理場が電気や熱を必要とするタイミングで利用することにより、より効果的な発電が可能である(図12)。さらに、下水汚泥は「バイオマス」に該当することから、消化ガスを使用する際に放出される $\text{CO}_2$ は温室効果ガスとはみなされない。したがって、この発電を下水処理施設に利用することで、カーボンニュートラルにも貢献できる。

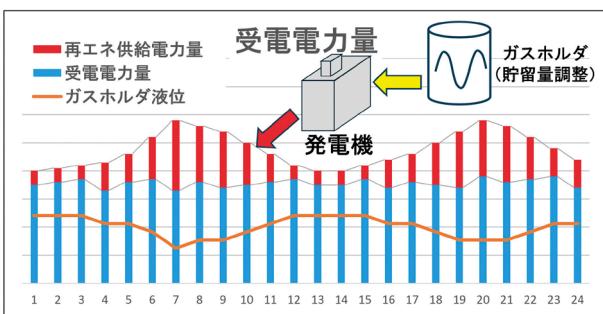


図12 ガスホルダ貯留による消化ガス発電

以下に、京都府木津川上流流域下水道の木津川上流浄化センター(以降、浄化センター)に消化ガス発電を導入した事例を紹介する<sup>(6)</sup>。

浄化センターは、木津川上流域(木津川市、精華町)を対象として平成11年(1999年)に供用を開始した。同浄化センターのある精華町は民間企業の研究拠点等が集積する関西学術研究都市に位置してお

り、同都市における企業や住宅の立地の増加に伴い、浄化センターへの汚水流入量も増加傾向にある。令和元年度末(2019年度末)時点の処理人口は90,958人、処理能力水量は32,280m<sup>3</sup>/日であった。

浄化センターでは、下水処理の過程で発生するメタンガス(消化ガス)を利用する消化ガス発電設備(図13)を平成27年(2015年)に4台、令和3年(2021年)に3台導入した。合計7台の消化ガス発電設備を利用することで、次のような効果が期待できる。

(1) 年間の消化ガス発電電力量は一般家庭約500世帯分の年間消費電力量に相当する約150万kWhを予定している。これを全て浄化センター内で使用することで、浄化センターにおける年間消費電力の約25%がまかなえると共に、約510トンの温室効果ガスの削減につながる。

(2) 従来は温水ボイラーを使用していた消化タンクの加温に、消化ガス発電機の排熱が利用できる。消化タンク内の温度および加温用温水の温度を計測して熱量が十分であるかを評価し、不足時には温水ボイラーで追い炊きを行うことで、安定的な消化工程を維持することができる。



図13 木津川上流浄化センター消化ガス発電設備

#### 5. デジタル技術の活用によるスマート化

下水処理施設のエネルギー消費量は大きいため、エネルギー管理が非常に重要となる。効率的なエネルギー管理は、エネルギーコストの大幅な削減だけでなく、温室効果ガス排出量の削減も期待できるため、地球温暖化対策に貢献する。また、汚泥処理の過程で発生する消化ガスを再エネとして利用するなど、資源の有効利用を促進することにもつながる。

さらに、日本国内では人口減少に伴って設備の維持管理の効率化と省人化も課題となっている。このため、デジタル化を通じて、AIを活用した自動制御や、設備の稼働データの分析による劣化診断等を行い、計画的

な設備保全や更新計画の立案を進めることが求められている。

ここでは当社が取組んでいる、中央監視制御装置との連携によるエネルギー管理とアセットマネジメントのスマート化の例を紹介する。

### 5. 1 効率的な運用を促進する運転支援装置

前出のNH<sub>4</sub>-N計を活用した硝化制御システムは、流入負荷分析支援機能、曝気風量設定支援機能、目標値出力機能を備えた運転支援装置と監視制御装置を連携することにより、省エネ運転を実現している(図14)。

運転支援装置は、各種流量、NH<sub>4</sub>-N濃度、送気量などの実績データを取り込み、反応タンクへのNH<sub>4</sub>-N流入負荷量と送気量の関係を自動表示する。ここで表示されるグラフに基づき、制御係数の設定、および運転状況や処理状況の確認を行なうことができる。

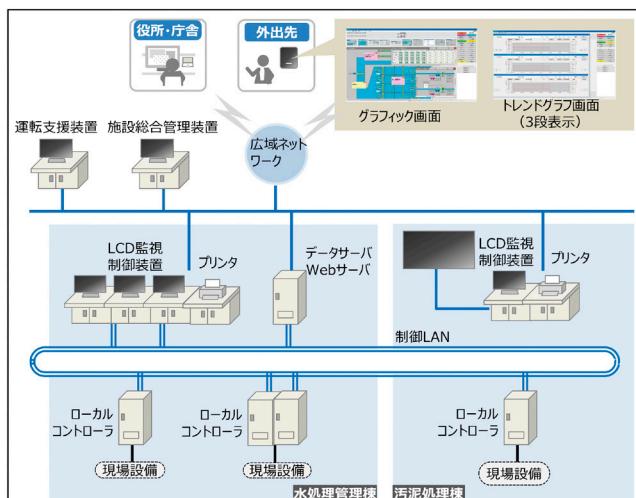


図14 監視制御システム構成例

### 5. 2 AIを活用したエネルギー管理

水質汚濁防止法では下水処理施設からの放流水の排水基準が定められており、化学的酸素要求量(COD)が管理対象となっている。瀬戸内海などの特定地域内の下水処理施設では、全窒素含有量(TN)、全りん含有量(TP)が追加規制の対象となっている。処理場では、これらを自動測定装置を使って監視しているが、流入する汚水の水質や下水処理工程の状況によっては処理水質が悪化することがある。悪化した水質を正常状態に戻すためには、維持管理者の経験やノウハウが求められ、また、一定の時間を見る。

そこで、AIが過去の実績データを基にして将来の水質変動を予測し、それに基づいて維持管理者が水

質悪化を未然に防ぐことができれば、維持管理者の負担を軽減できる。当社は、このような技術を開発し、運転管理の効率化に向けた取組みを実施している(図15)<sup>(7)</sup>。

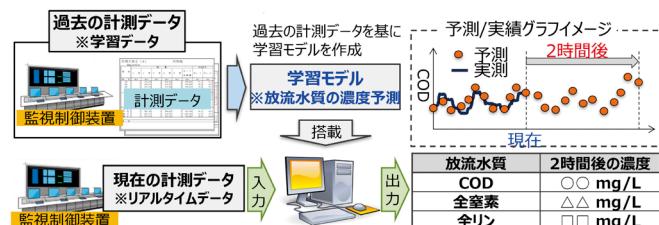


図15 AIを活用した放流水質予測技術の開発

### 5. 3 設備稼働データに基づいたアセットマネジメント

電気設備は設置環境により劣化の度合いが異なるため、環境状況を常に監視して把握することが重要である。当社では、現場設備の設置環境をデータ化して収集する複合環境センサ(図16)を製品化し、データ分析による劣化診断技術の開発に取組んでいる<sup>(8)</sup>。



図16 製品化された複合環境センサ

当社の監視制御装置は各種データリンク機能を備えており、複合環境センサの稼働データとリンクする。また、下水処理施設の設備情報を登録する設備管理台帳機能を有し、日々の現場設備点検業務の内容および点検結果をデータベース化して報告書作成支援を行う施設総合管理装置と、この監視制御装置を連携することにより、各種データの統合化、リンク付け、紐付け検索、および分析を支援する(図17)。

分析結果から、計画的な点検と修繕計画作成の支援を行い、アセットマネジメント計画を立案し、老朽化設備の更新を促すことで、カーボンニュートラルの達成を推進する。



図17 監視制御装置と施設総合管理装置の連携

## ■ 6. おわりに

本稿では、下水道施設のカーボンニュートラルに向けたエネルギーソリューションの中から、水処理設備の省エネ制御技術や再生可能エネルギーの導入、下水由来の資源有効活用、およびデジタル技術を活用したスマート化について紹介した。

脱炭素社会の実現には、設備更新による省エネ機器の採用や省エネ制御の導入に加えて、再エネの導入拡大が不可欠であり、再エネを有効に活用して社会的コストを最適化することが求められる。環境性だけでなく、安全性や経済性も考慮した全体最適視点からのアプローチが重要となり、その取組みは多岐にわたる。当社は、本稿では紹介できなかった環境配慮製品の開発や、再エネ電源や蓄電池の利活用に適したシステムの開発も進めている。今後もたゆまぬ研究開発を行い、社会ニーズに対応した最適なソリューションの提供を進めていく所存である。

## 用語集

- ※1 活性汚泥  
汚水中の汚濁物質(有機物や窒素、リン)を摂取・分解する微生物を含む汚泥。
- ※2 硝化  
微生物の働きにより、水中のアンモニア性窒素( $\text{NH}_4\text{-N}$ )が、亜硝酸性窒素( $\text{NO}_2\text{-N}$ )を経て硝酸性窒素( $\text{NO}_3\text{-N}$ )へ酸化される現象。
- ※3 活性汚泥法  
活性汚泥を利用して汚水の水質浄化を行う水処理方法。
- ※4 OD法  
オキシデーションディッチ法。最初沈殿池を設けず、水深の浅い循環水路を反応タンクとする活性汚泥法。
- ※5 流入負荷量  
下水処理施設や反応タンクへ流入する汚濁物質の量。
- ※6 DO一定制御  
反応タンク内のDO(溶存酸素)濃度が一定となるよう、送気量を自動制御する技術。

## 参考文献

- (1) 国土交通省:「上下水道:脱炭素化／資源・エネルギー利用」[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd\\_sewerage\\_tk\\_000124.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html) (参照: 2025/7/7)
- (2) 環境省:「2021年度(令和3年度)の温室効果ガス排出・吸収量(確報値)について」(2023)  
<https://www.env.go.jp/content/000128750.pdf> (参照: 2025/8/1)
- (3) 国土交通省:「新下水道ビジョン加速戦略(令和4年度改訂版)」(2023)
- (4) 漆垣 他:「アンモニア計による送気量フィードフォワード制御技術」、日新電機技報、Vol.65, No.2, pp.72-75(2020)
- (5) 漆垣 他:「下水処理場向けアンモニア計によるフィードフォワード制御技術」、住友電工テクニカルレビュー、第198号、pp.101-103(2021)
- (6) 日新電機:「2021年の技術成果[4] 水処理用設備」、日新電機技報、Vol.67, No.1, pp.15-16(2022)
- (7) 大久保 他:「AIを活用した放流水質予測技術の開発」、日新電機技報、Vol.66, No.1, pp.28-32(2021)
- (8) 長塩 他:「水処理用監視制御装置の技術と展望」、日新電機技報、Vol.67, No.2, pp.29-35(2022)

執筆者紹介

粕谷 幸太郎 Kasuya Kotaro  
電力・環境システム事業本部  
システムエンジニアリング事業部  
環境技術部長



今岡 博義 Imaoka Hiroyoshi  
電力・環境システム事業本部  
システムエンジニアリング事業部  
環境技術部 主幹



大久保 章 Okubo Akira  
電力・環境システム事業本部  
システムエンジニアリング事業部  
ソリューション技術部 主幹



漆垣 謙次 Urushigaki Kenji  
電力・環境システム事業本部  
システムエンジニアリング事業部  
ソリューション技術部 主査



吉田 宏司 Yoshida Hiroshi  
電力・環境システム事業本部  
システムエンジニアリング事業部  
環境技術部 グループ長