

健全な水循環の実現に貢献する 上下水道ソリューション

Solutions for Water Supply and Sewerage Systems
Supporting Realization of Healthy Water Cycle

小峰 英明 福田 美意 金平 真梨子

■ KOMINE Hideaki ■ FUKUDA Mii ■ KANEHIRA Mariko

水循環基本法で定められた“健全な水循環”を維持するうえで、上下水道が果たすべき役割は大きい。そのために解決すべき課題も多岐にわたっており、様々な自然環境と社会環境の変化に適応し、水質リスク低減や、水環境保全、下水汚泥のバイオマス利用などを実現するソリューションが求められている。

東芝は、リスク低減、再生、及び再利用をキーワードにこれらの課題を効率的に解決するために、当社がこれまで培ってきた上下水道プラント制御技術を活用したソリューションを提供し、健全な水循環の維持に貢献している。

Water supply and sewerage systems play a major part in maintaining the soundness of the water cycle as defined by the Basic Act on the Water Cycle. In order to ensure the soundness of the water cycle, demand has been rising for solutions not only to adapt to various changes in the natural and social environments, but also to solve the following issues: reduction of water quality risk using an energy-saving membrane bioreactor (MBR), conservation of the water environment using a coagulant injection control system, and effective use of sewer resources to generate electric power.

To efficiently solve these issues, Toshiba has supplied solutions making full use of control technologies acquired through the development of water supply and sewerage systems from the viewpoints of risk reduction, recovery, and reuse, and is contributing to the maintenance of a healthy water cycle.

1 まえがき

上下水道施設は供用開始後、長期間にわたって使用される施設であり、その間の様々な自然環境と社会環境の変化に適応できることが、健全な水循環の維持に重要である。上下水道施設にまつわる自然環境の変化としては水質・水量変化が挙げられ、柔軟に対応して水質リスクを低減していく必要がある。また社会環境の変化としては、下水高度処理化による閉鎖性水域の水環境保全や、再生水利用及び下水汚泥のエネルギー源としての利用に代表される下水道資源の活用など、新たな価値の提供が求められるようになってきている。

東芝はこれらの課題に対し、リスク低減、再生、及び再利用をキーワードに、長年にわたり培った上下水道プラント制御技術を適用し、健全な水循環の維持に貢献している。

ここでは、様々な環境変化に適応し価値を提供する、三つの上下水道プラント制御技術について述べる。

2 優れた処理水質と省エネ性の下水高度処理技術で 再生水利用に貢献するスマートMBR

膜分離活性汚泥法 (MBR: Membrane Bioreactor) は、汚水処理に伴い発生する余剰汚泥を、従来用いられている沈殿に替えて精密ろ過膜 (MF 膜) を用いて処理水から分離する、下水処理方式の一つである。最終沈殿池の省略や高い活性

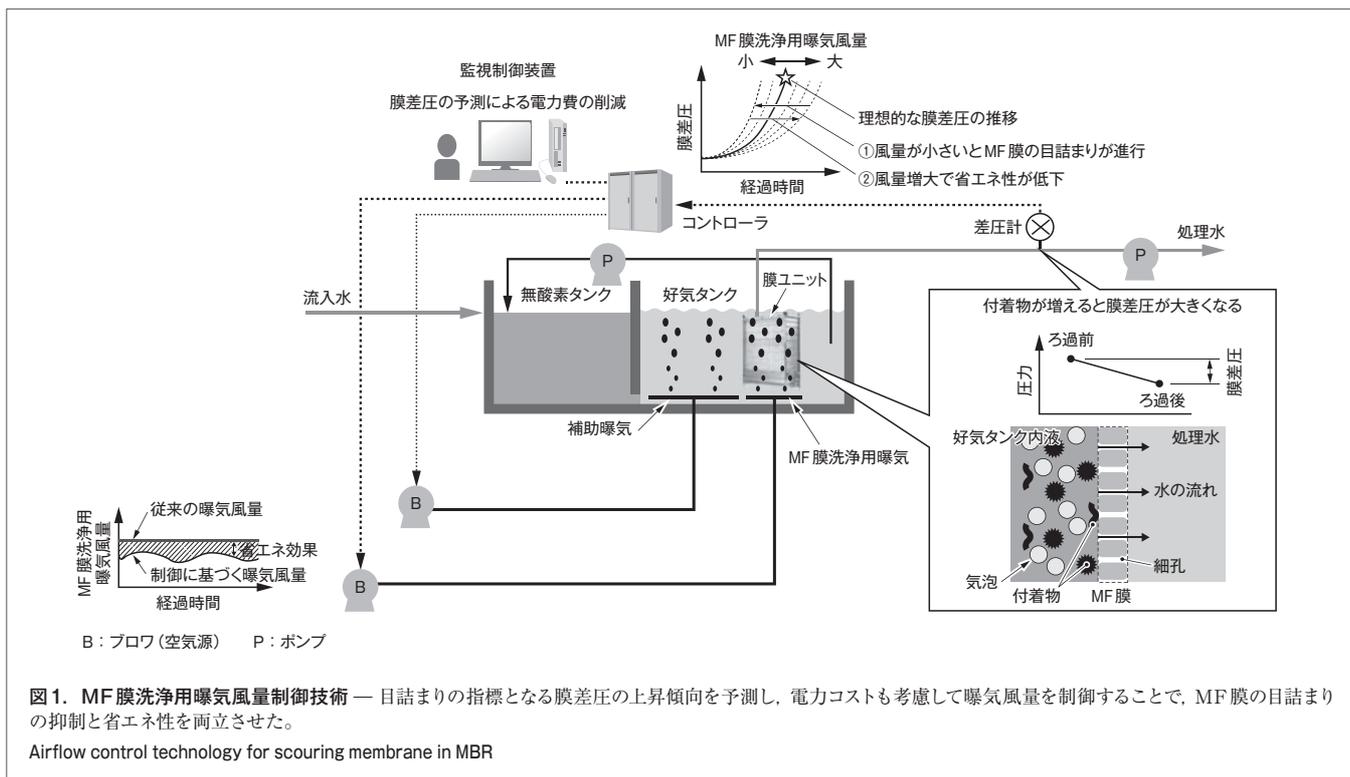
汚泥浮遊物 (MLSS) 濃度での運転により、従来の処理方式よりスペースを削減でき、孔径 0.4 μm 以下の MF 膜は大腸菌などの微生物や懸濁物質を通さないことから消毒処理せずに清澄な処理水が得られるという特長がある。

これらの特長は、既存施設を改築して大容量の反応タンクが必要な、窒素・リン除去を目的とした高度処理を導入する際、最大限に発揮される。MBR を用いることで既存の土木躯体 (くたい) を拡張せずに高度処理を導入でき、処理水も再生水として農業用水や散水用水などに利用できるようになる。

MBR は水循環の中で、生活・事業排水を公共用水域に還流させる排水処理機能だけではなく、処理水再循環のための再生水製造拠点としての機能も期待される優れた技術である。

2.1 従来の MBR の課題

MBR は優れた特長を持つ処理方式であるが、国内下水処理施設では小規模施設を除いて導入が進んでいない。その背景には、消毒不要で薬品費を低減できる一方、従来方式より電力コストが高価と考えられている点がある。MBR では生物処理用の曝気 (ばっき) だけでなく、MF 膜の目詰まりを抑制するための MF 膜洗浄用の曝気も必要となるうえ、余裕を持った風量で曝気することが多かったため、ブロワ (送風機) の消費電力が大きくなる傾向があった。省エネは MBR における主要な技術課題であり、メーカー各社はその性能向上に取り組んでいる。



2.2 MBRの省エネ制御

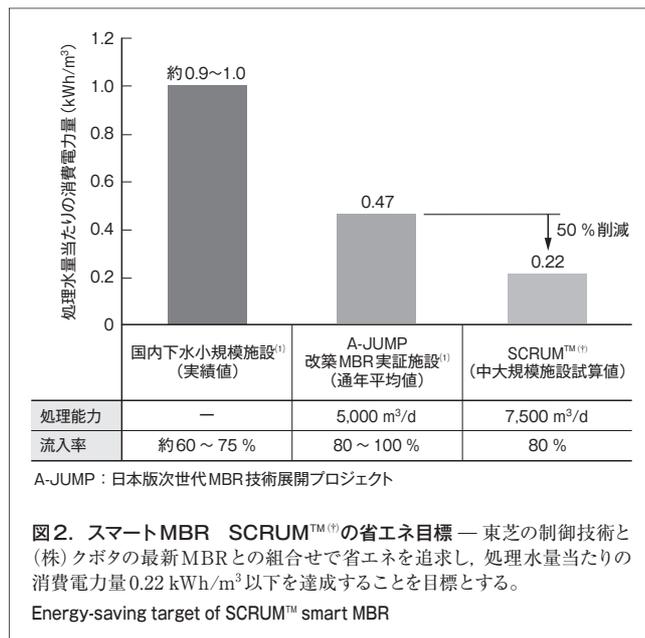
当社は(株)クボタと共同で、MBRの曝気風量を必要最小限にするMBRの省エネ制御技術を開発している。2015年12月には名古屋市上下水道局、(株)クボタ、及び当社の3組織で実証試験の実施を含む共同研究を開始した。

MBRの省エネ制御は、①MF膜洗浄用曝気風量制御技術、及び②NH₄-N(アンモニア性窒素)濃度計測による曝気風量制御技術、の二つの要素技術を組み合わせる。

MF膜洗浄用曝気風量制御技術は、MF膜の目詰まり抑制のための曝気風量を適正に制御する技術である(図1)。目詰まりの指標となる膜差圧(ろ過時に水が膜面を通過するのに必要な、ろ過前後の圧力差)を測定して上昇傾向を予測し、電力コストも考慮して曝気風量を適正に制御する。これにより、ブロワでの消費電力を削減するとともに、膜差圧上昇後の薬液を用いたMF膜洗浄の計画実施によって維持管理性の向上を実現する。

NH₄-N濃度計測による曝気風量制御技術は、生物的高度処理でNH₄-NをNO₃-N(硝酸性窒素)に変化(硝化)させるための酸素供給量を適正值に制御する技術である。硝化の進んだ位置でのNH₄-N濃度を計測し、効率的に硝化させるための適正溶存酸素量を逆算してこれを好気タンクでの目標値とすることで、硝化に寄与しない過剰な曝気を避け、処理水質を維持しながら省エネを実現する。

この制御技術を(株)クボタのMBRに適用した省エネ型スマートMBR(SCRUM™^(注))では、(株)クボタの最新MBRと組



み合わせた場合で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。この値は従来のMBRでの消費電力を半減させるもので、一般的な高度処理方式の消費電力と同等の水準である(図2)。

再生水利用や省スペースでの改築更新などの必要性をきっかけにSCRUM™^(注)が中大規模施設に導入され、その実績によってMBRに対する評価が改まり、SCRUM™^(注)の普及が加速することが期待される。

3 水質変動に対応して浄水処理のリスク低減に貢献する凝集剤注入制御

水循環で水道水の供給を担う浄水場では、取水源の水質が変動しても良質な浄水処理を維持するために、厳しい水質管理を行っている。現在の浄水場での水質管理は、運転管理業務従事者の経験やノウハウに頼って行われることが多く、水質悪化のリスク低減と従事者の負担軽減を両立させる自動制御技術の導入が期待されている。

浄水場では、原水中の濁質を除去するために凝集剤を使用する。従来、凝集剤の注入には、取水量に比例した量を注入する注入率一定制御が広く採用されてきた。しかし、注入量の不足による水質悪化の懸念や適正量を超えて凝集剤を過剰注入するケースもあり、注入量を適正に保つ制御技術は、水循環でのリスク低減に貢献する。

当社は、凝集剤注入量を適正化するため、水中粒子の荷電状態を反映する流動電流値を指標とした凝集剤注入制御技術を開発し実用化した。凝集剤を添加した直後の混和池から検水して測定するため、応答特性が良いという特長を持つ。

3.1 凝集性と流動電流値

水中に含まれる濁質は一般に負電荷を持ち、凝集剤は正電荷を持つ。濁質と凝集剤の正負の電荷を打ち消し合う荷電中和点では、良好な凝集性を示す。流動電流値はこのような水中粒子の荷電状態を連続計測できる指標であり、濁質に対して凝集剤が過剰であれば正の値を、不足であれば負の値を示す。流動電流値を指標とすることで、原水濁度が変動しても凝集剤注入量を適切に制御できる。

3.2 様々な水質の原水に対応できる凝集剤注入制御

流動電流値は、原水の水質に影響を受ける。このため、流動電流値を指標とした凝集剤注入制御は原水の水質に合わせて制御アルゴリズムを構築する必要があり、構築に係るコストがこの技術の適用拡大の妨げとなっていた。そこで今回、様々な水質の原水に適用できる共通の補正式を確立した。

3.3 改良した凝集剤注入制御システムと試験結果

凝集剤注入制御システムの構成を図3に示す。着水井の出口の導電率と混和池のpH（水素イオン指数）を測定するセンサをそれぞれ設置し、測定した流動電流値を導電率とpHの測定値に基づいて補正することで、原水の水質に応じた補正済み流動電流値を得るようにした。この補正済み流動電流値を、統合コントローラに設定した流動電流値の目標値と等しくなるように凝集剤注入率を演算し、流量計で測定した原水の流量に応じた量の凝集剤を混和池に注入する。

このように流動電流値を補正することで、原水の水質に応じたリアルタイムな凝集剤注入制御が可能になり、従来システムの導入時に必要だった現地調整などに要する時間と作業を大幅に削減した。

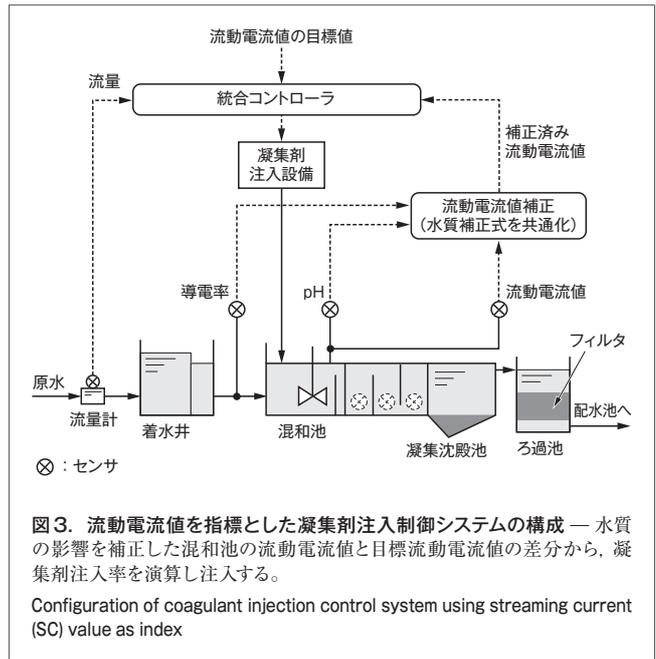


図3. 流動電流値を指標とした凝集剤注入制御システムの構成 — 水質の影響を補正した混和池の流動電流値と目標流動電流値の差分から、凝集剤注入率を演算し注入する。

Configuration of coagulant injection control system using streaming current (SC) value as index

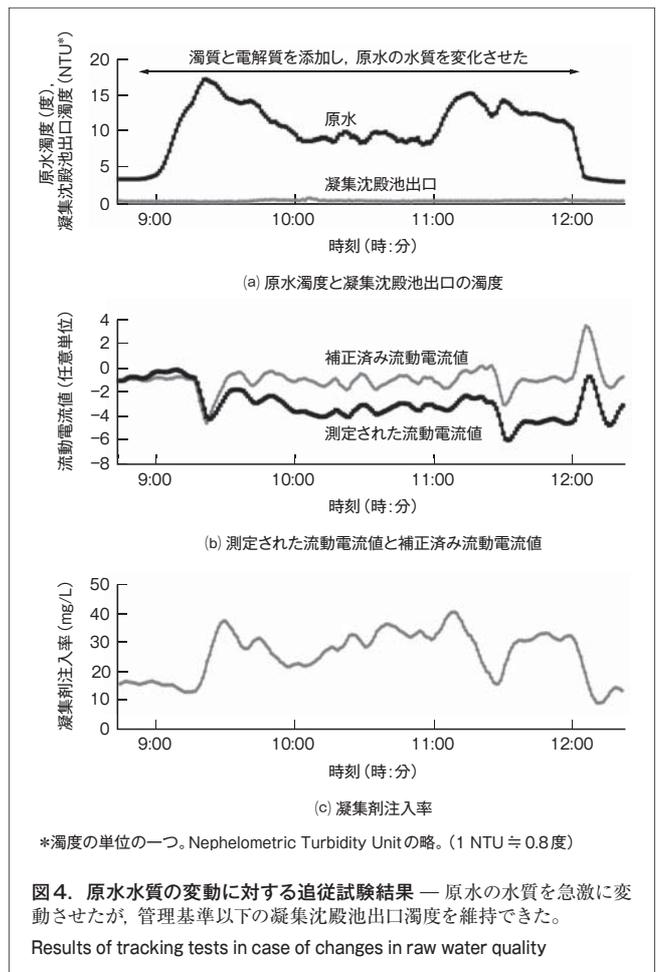
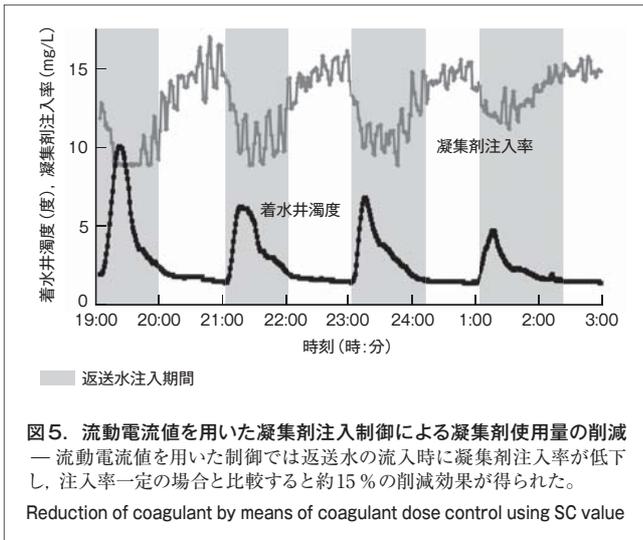


図4. 原水水質の変動に対する追従試験結果 — 原水の水質を急激に変動させたが、管理基準以下の凝集沈殿池出口濁度を維持できた。
Results of tracking tests in case of changes in raw water quality

この制御システムを実証試験装置に搭載し、実際の浄水場の現場を借りて検証した。原水の水質を人為的に変化させて、



実証試験装置を運転した結果、凝集沈殿池出口での濁度が管理基準の1度を下回る良好な処理を維持できた(図4(a))。このとき、測定された流動電流値を導電率やpHなどの測定値で補正して補正済み流動電流値を得て(図4(b))制御に使用したため、原水水質の変動に対して凝集剤注入率が適切に追従したことが観測された(図4(c))。

浄水処理では、ろ過池の洗浄水上澄みなどを、返送水として着水井に戻している。着水井に返送水が流入したときの、着水井の濁度と凝集剤注入率の推移を図5に示す。返送水が着水井に流入すると(図5の網掛け部)、返送水に含まれている汚泥などの影響で着水井の濁度が上昇する。通常は、濁度の上昇に追従して凝集剤注入率も上げる必要がある。これに対し図5では、返送水が流入している間は流動電流値が正側へ推移したため、濁度が上昇したにもかかわらず、通常とは逆に凝集剤注入率が減少する方向へと制御されたが、凝集沈殿池出口の処理水濁度は管理基準の1度を下回り良好に処理された。これは、返送水に含まれる未反応の凝集剤が作用したためと推測される。未反応の凝集剤が循環するこのケースでは、流動電流値を用いることで凝集剤注入率は平均12.7 mg/Lに減少し、凝集剤注入率一定制御(15 mg/L)の場合に比べて約15%削減できた。一般に原水濁度の増加に応じて凝集剤注入量を増やす運用が行われているが、実際には濁質の荷電状態を考慮する必要があり、流動電流値を用いることで適切な注入量制御が実現できる。

4 再生可能エネルギー源としての下水汚泥再利用に貢献する消化ガス発電システム

2015年9月に閣議決定された「第4次社会資本整備重点計画」では、下水汚泥エネルギー化率を2013年度実績の約15%に対し、2020年度までに約30%にするという目標が掲げられた。

下水処理の過程で発生する下水汚泥は多くの有機物を含んでいることから、質及び量ともに安定・継続的に発生する再生可能エネルギー源(バイオマス)として再利用が求められている。再利用法の一つに、下水汚泥の消化処理で発生する消化ガスを燃焼させ発電する消化ガス発電システムがある。このシステムは発電と同時に発電装置の排熱を蒸気や温水に変換し消化槽の加温に利用することで、電気と熱を合わせて約80%という高いエネルギー変換効率を実現できる。

健全な水循環の確立にあたっては、副生成する下水汚泥も適切に再利用し良好な循環を形成する必要がある。当社は消化ガス発電システムの普及を通じて再生可能エネルギー源としての下水汚泥再利用を推進し、健全な水循環の維持に貢献していく。

4.1 消化ガス発電システムによるリスク低減、再生、及び再利用への貢献

近年、消化ガスの再生や再利用についての新たな取組みとして、固定価格買取制度(FIT)を利用して自治体や民間事業者が消化ガス発電設備を建設し、発電した電力を一般電気事業者に売る事業が国内下水処理施設で行われている。

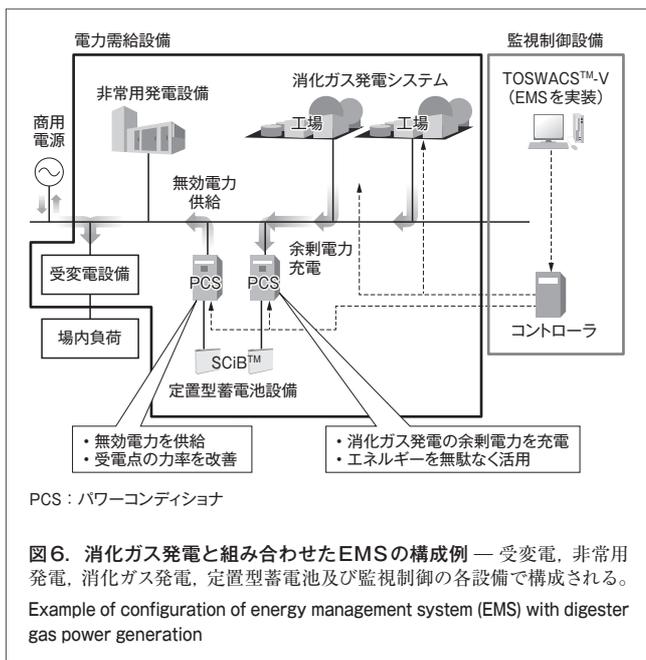
当社は、このFITを活用した発電事業である沖縄県宜野湾浄化センターにおける民設民営事業を、代表企業として受注した。この事業では、20年間の事業期間中の安定した再生可能エネルギーの再生及び再利用だけでなく、災害時の施設運用停止リスクの回避も重視され、そのための設備構築を行う。一般電気事業者からの電源供給が停止した場合には、水処理プロセスを縮退運転することで所要電力を最小化するとともに、消化ガス発電電力の供給先を一般電気事業者から場内負荷に切り替え、発電設備の自立運転で賄うことができる設備容量及び構成とする。現在、2016年10月1日の事業運営開始に向けて設備の建設中であり、運営開始後は事業運営ノウハウを集積し、消化ガス発電システムの普及を図っていく。

また、下水汚泥エネルギー化率30%以上を実現する消化ガス発電システムを適用して、再生可能エネルギー源としての下水汚泥の再利用を推進するとともに、災害時などの施設運用停止リスクを低減できるソリューションを提供する。

4.2 消化ガス発電へのEMSの適用

前節の事例にもあるように、下水処理施設では震災などの災害発生時でも持続的な運用が求められることから、消化ガス発電システムを場内負荷への電力供給(自家発電自家消費)に活用する必要がある。そこで当社は、消化ガス発電システムを自家発電自家消費で有効活用するために、上下水道監視制御システムTOSWACS™-Vに実装するEMS(Energy Management System)を開発した。

(1) システム構成 消化ガス発電と組み合わせたEMSのシステム構成例を図6に示す。このシステムは、電力需給設備である受変電、非常用発電、消化ガス発電、及び



当社製リチウムイオン二次電池 SCiB™を用いた定置型蓄電池の各設備と、監視制御設備で構成される。

- (2) システムが実現する機能 このシステムは、①買電電力ピークカット・ピークシフト機能、②力率改善機能、③出力変動抑制機能、④逆流防止機能、⑤電力配分機能（台数制御）、及び③④⑤の組合せで実現する⑥自立運転機能を持つ。

以下に、⑥の自立運転機能について述べる。

自立運転機能は、一般電気事業者からの電力供給が停止しても下水処理施設内に設置された電源設備だけで負荷に給電するものである。具体的には、施設内の電力需要と複数の電源設備から供給される電力を一致させ、電源の電圧と周波数を一定に保つ機能である。定置型蓄電池設備の充放電電力量を状況に合わせて瞬時に変化させて、③④⑤の機能を同時に満足する。

一般電気事業者の配電系統が停電した際、下水処理施設では場内の非常用発電設備から電力を供給するが、自立運転機能により、非常用発電設備と消化ガス発電システムの組合せだけでなく、他の複数の分散電源と組み合わせで運転した状態でも電力を安定供給できる。

これにより、非常用発電設備だけで給電する場合に比べて下水処理施設を長時間運用できることに加え、非常用発電設備が燃料切れや故障で停止した場合に、緊急電源として消化ガス発電システムを活用できるようになる。

また消化ガス発電をEMSに組み込むことにより、非常用発電機燃料、消化ガス、及び蓄電といった、エネルギー密度や、エネルギー貯蔵コスト、入出力特性などが異なるエネルギー源を適切に組み合わせ、長周期から短周期までの負荷変動に対応可能なシステムを、コストを抑えながら実現できる。

5 あとがき

当社は、上下水道プラントの構築でこれまでに培った制御技術を礎として、変化し続ける環境やニーズに応えるとともに、従来にない新たな価値を創出するソリューション技術の開発と提供を進め、今後も健全な水循環の維持に貢献していく。

文献

- (1) 日本下水道事業団 技術戦略部編. 膜分離活性汚泥法の技術評価に関する第2次報告書-MBRの適用拡大に向けて-. 日本下水道事業団, 2013, 239p.

・ SCRUMは、(株)クボタの商標。



小峰 英明 KOMINE Hideaki

インフラシステムソリューション社 水・環境システム事業部 水ソリューション事業開発部主務。下水処理プラント制御技術の開発に従事。技術士（上下水道部門、機械部門、電気電子部門）。Water & Environmental Systems Div.



福田 美意 FUKUDA Mii

エネルギーシステムソリューション社 電力・社会システム技術開発センタープラントシステム・ソリューション開発部主務。上水水質制御及び水処理（システム）技術の研究・開発に従事。界面動電現象研究会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



金平 真梨子 KANEHIRA Mariko

インフラシステムソリューション社 水・環境システム事業部 水・環境プロセス技術部。下水道をはじめとする環境システムのエンジニアリング業務に従事。Water & Environmental Systems Div.