

下水処理施設における資源の有効活用と省エネ・省コスト運用に貢献する技術

Solutions Contributing to Effective Utilization of Resources and Energy- and Cost-Saving Operation of Sewerage Facilities

榎木 辰彦 平岡 由紀夫 安部 裕宣

■ ENOKI Tatsuhiko ■ HIRAOKA Yukio ■ ABE Hironobu

改正省エネ法の施行に伴い、政令指定都市など大規模自治体の下水処理施設は、エネルギー消費原単位を年1%以上削減するための中長期計画の提出が義務付けられる、第一種エネルギー管理指定工場の対象となるものが多い。また、東日本大震災を契機とした電気料金の値上げにより、いっそうの運用コスト削減が求められている。

東芝は、このような課題の解決に貢献するため、下水道が持つ未利用エネルギーを最大限に活用して資源循環を実現する技術や、省エネソリューション及び異常の早期発見によるリスク低減技術などの開発により、下水処理施設の運用におけるスマート化を目指している。

Following the revision of the Act on the Rational Use of Energy, sewerage facilities operated by large municipalities such as ordinance-designated cities may be categorized as type 1 designated energy management factories, etc., which are required to submit medium- and long-term plans to achieve a reduction of more than 1% per year in energy consumption in terms of basic units of energy. Demand has also been growing for technologies that can further reduce the operating cost of sewerage facilities due to the increase in electricity costs since the Great East Japan Earthquake.

To resolve these issues, Toshiba is actively promoting the development of plants that optimally use unharnessed energy sources in sewerage systems to achieve high-efficiency resource circulation, as well as the development of energy-saving solutions and of technologies for risk reduction to detect abnormal conditions in plant facilities at an early stage, with the aim of realizing optimal plant operation.

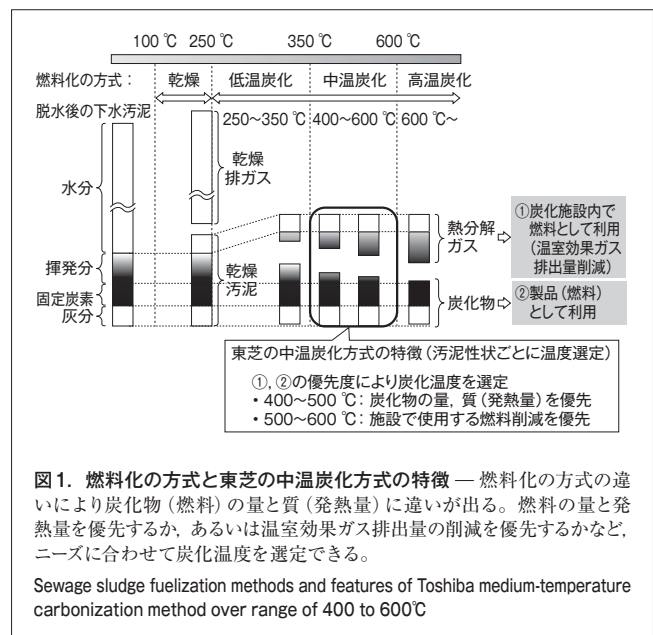
1 まえがき

下水処理施設においては、プロワヤポンプなどを動かすための電力や、汚泥を焼却するための燃料など多くのエネルギーが消費されている。このため、世界的なエネルギー需要の増加や地球温暖化の抑制に貢献する、下水処理施設の省エネ・省コスト運用を実現する技術の開発が急務となっている。

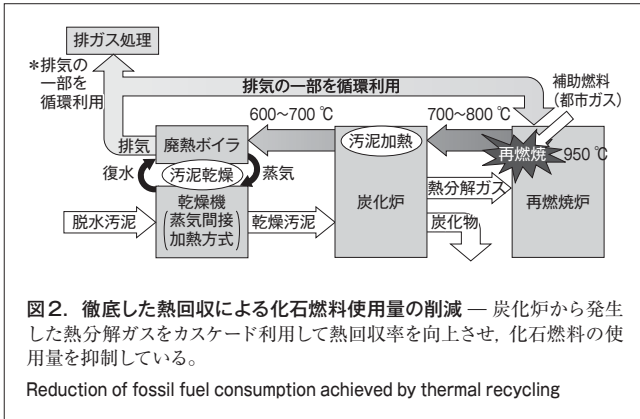
ここでは、東芝が開発し、運用を実現した事例として、下水汚泥が持つ未利用エネルギーを最大限に活用する汚泥燃料化システム、水質を維持しながら消費電力を削減する窒素除去型曝気(ばっき)風量制御システム、及び多くのプロセス監視データの中から運用の改善点を発見し、省エネや水質改善などを支援するオンラインプロセス性能診断システムについて述べる。

2 汚泥燃料化システム

下水汚泥は質、量ともに継続的に排出され、しかも特別な収集の必要がないバイオマスとして、その有効活用、特にエネルギー利用に大きな期待が寄せられている。2012年8月に閣議決定された「第3次社会資本整備重点計画」では、下水汚泥のエネルギー化率を2010年度末実績の約13%から、2016年度末には約29%に引き上げることを目標として定めている。



当社は、この下水汚泥のエネルギーを利用するため、炭化による燃料化システムを開発し、事業展開している。図1に示すように、燃料化には乾燥や炭化(低温、中温、高温)など、いくつかの方式がある。当社は発熱量が確保でき、臭気の少ない中温炭化方式を採用している。この方式では、汚泥性状ごとに炭化温度を選定して炭化物(燃料)の量と質(発熱量)を



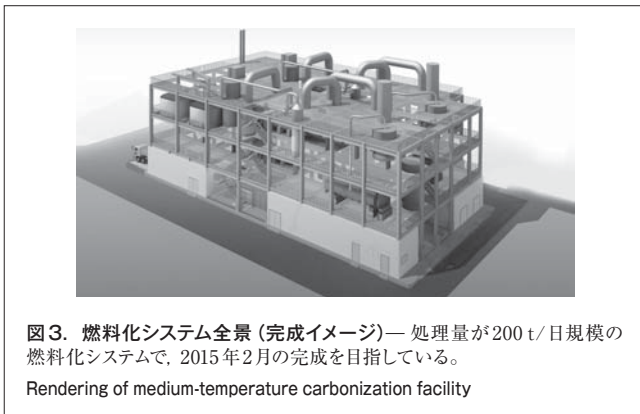
優先させるなど、顧客のニーズに合わせて運転の最適化を図っている。

また、図2及び以下に示すように、炭化炉から発生した熱分解ガスをカスケード利用^(注1)して熱回収率を向上させるなど、熱回収を追求した装置構成にして、化石燃料由来の補助燃料の使用量を抑制している。

- (1) 炭化炉の高温排気(熱風)を廃熱ボイラに送り、汚泥の乾燥に再利用
- (2) 蒸気間接加熱方式の乾燥機による低温熱源(蒸気)の高効率利用
- (3) 排気の循環利用による廃熱(捨てる熱)の削減

現在、図3に示すように、JFEエンジニアリング(株)との共同企業体(JV)で、埼玉県下水道局から、和光市新河岸川水循環センター内の処理規模が200t/日の燃料化システムを受注し、2015年2月の完成に向けて建設中である。

この燃料化システムは、既存の汚泥焼却炉と併用する計画であり、汚泥の有効活用に加えて汚泥処理方法の選択肢の多様化を図り、リスク分散している。また、処理対象が未消化汚泥で発熱量が比較的高いため、汚泥の持つエネルギーを燃料化システム内で有効に活用しながら、炭化物の発熱量も確



(注1) 資源やエネルギーを1回だけの使い切りではなく、高レベルの利用から低レベルの利用へと多段階に活用すること。

保できるという特長がある。

今後は、現在建設中の前記燃料化システムの完成に注力するとともに、事業拡大に向けた中小規模の下水処理施設に適用可能な燃料化システムの検討や、ほかのバイオマスの活用などにより、多様な顧客ニーズに対応しながら汚泥が持っているエネルギーの活用貢献していく。

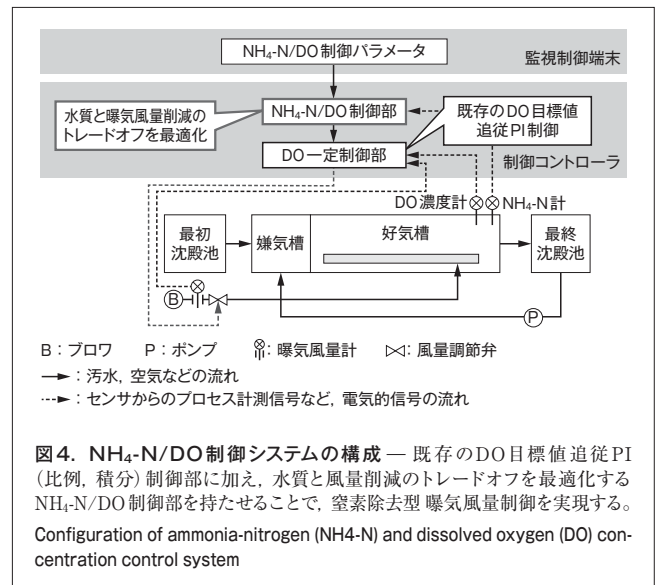
3 窒素除去型 曝気風量制御システム^{(1), (2)}

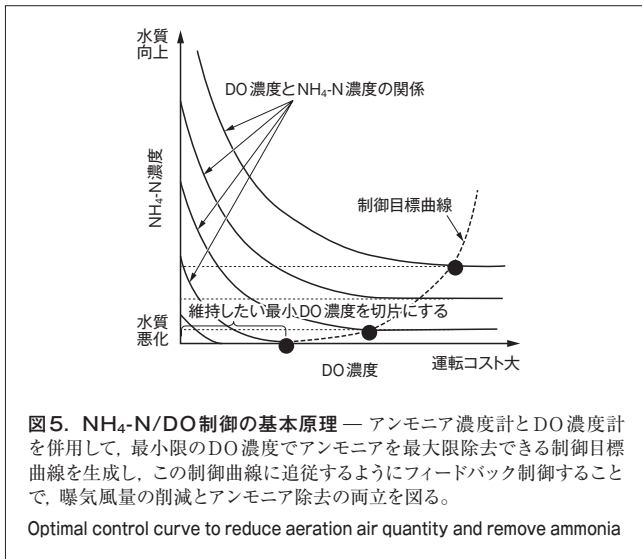
下水処理施設では多くの電気エネルギーが消費されている。中でもブロウ、主ポンプ、及び反応槽の機器(かくはん機、循環ポンプなど)で大部分が占められており、これら機器を効率的に運用し、電力費を抑制したいというニーズが高い。

一方、放流水質では従来の有機物除去に加えて窒素やリンの除去を求められる場合も多く、これを実現するためには、水質を維持しながら曝気動力の削減を行う技術の確立が重要となる。

従来のDO(溶存酸素)一定制御では、目標値が高すぎると曝気風量が過剰となり、低すぎると良好な水質を維持することができないため、これを適切な値に設定することは容易ではない。当社は、曝気風量の増減に対するNH₄-N(アンモニア性窒素)濃度とDO濃度の増減がトレードオフの関係にあることに着目し、この関係を自動的に最適化する曝気風量制御(以下、NH₄-N/DO制御と呼ぶ)システムを開発した。システム構成を図4に示す。

NH₄-N/DO制御は、アンモニア濃度計とDO濃度計を併用して、最小限のDO濃度でアンモニアを最大限除去できる制御目標曲線を生成し、この制御曲線に追従するようにフィードバック制御することで、曝気風量の削減とアンモニア除去の両立を図るものである。図5に示す制御目標曲線は、様々な流



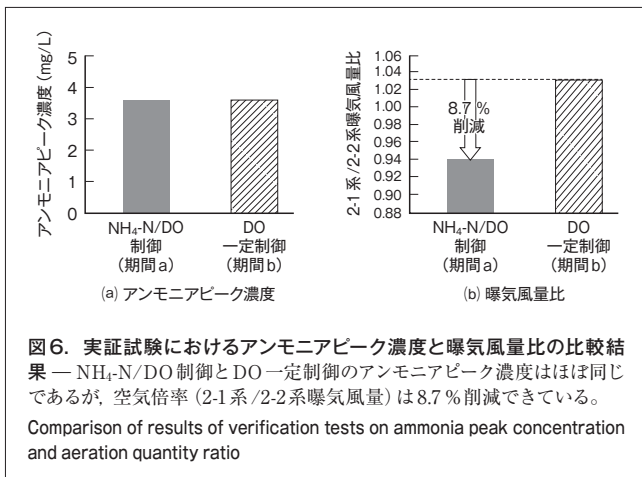


入負荷に対するDO濃度とアンモニア濃度の関係を把握し、維持したい最小DO濃度を切片とし、典型的な負荷時の最適点ともう一つの負荷時（通常、想定最大負荷時）の2点についてDO濃度とアンモニア濃度の関係をあらかじめ決定し、3点を通る曲線を制御目標曲線とする。

実証試験は神奈川県内のA下水処理場で実施した。A下水処理場は処理能力が68,700 m³/日であり、1-1系～2-4系の8系列で下水処理を行っている。このうち、標準活性汚泥法を採用している2-1系を使用して実証試験を行った。

この2-1系での3か月の試験期間中に、DO一定制御とNH₄-N/DO制御を1週間ごとに切り替えて評価を行った。NH₄-N/DO制御による曝気風量の削減効果については、アンモニアピーク濃度が同程度であったNH₄-N/DO制御期間（期間aとする）と、DO一定制御期間（DO濃度目標値=1.5 mg/L、期間bとする）で比較して評価した。

期間a、bにおけるアンモニアピーク濃度と曝気風量の比較を図6に示す。曝気風量は、両期間の流入負荷の影響を除くため、DO一定制御を行っている2-2系の曝気風量に対する比



で評価した。図6を見ると、期間aと期間bのアンモニアピーク濃度はほぼ同じであるが、曝気風量は8.7%削減できている。つまり、水質を維持したまま曝気風量を削減できていることがわかる。

このように、アンモニア濃度に応じた適切な曝気風量を供給することで、水質を維持しながら曝気風量を削減できることがわかり、この制御システムが下水処理制御に有用であることを確認した。

4 プロセス性能診断システムのオンライン化と流入水質監視システムへの適用

わが国を含め下水道インフラが整備された国々では、既存の下水処理施設の効率的な運用や維持管理が重要な課題であるが、近年では更に、消費電力の削減、放流水質の維持や向上、運用コスト削減やリスク低減など、様々な観点からより高度な維持管理が求められている。

このような状況のなかで、当社は、監視制御システムに蓄積される多くのプロセス監視データの中から、運用における改善点の発掘などを支援するシステムとして、多変量統計のプロセス管理(MSPC: Multivariate Statistical Process Control)技術^(注2)を応用した、オンラインのプロセス性能診断技術^(注3)を適用したシステム開発を進めてきた。このシステムは、多変数の診断を1分周期で行うという性能面での課題が解決され、また、効果的なヒューマンインタフェースとして過去のオフライン解析のなかで得られた知見などを反映させることで、実用化された。

その後、当社は、地方共同法人日本下水道事業団からの委託を受け、実際の汚水中継ポンプ場に、この技術を適用したオンライン流入水質監視システムの試作機を設置して、その運用と評価を行った⁽³⁾。

このシステムでは、従来から行われている個別項目の異常値監視という視点に加えて、常態監視という新たな概念が導入されている(図7)。連続的に測定され蓄積されたデータは、日常的に繰り返される水質の変動パターンを表しており、そのデータを利用して構築された診断モデルが、いわゆる常態を表したものと言える。そして、診断モデルから外れた状態、すなわち常態から外れた状態が発生したかどうかを監視する。

常態から外れた動きが見られた場合には、なんらかの通常とは異なる水質の流入が想定されることから、この動きを早期

(注2) 多数のプロセス監視データを統計的に処理することで、プロセス監視データの相関軸からの距離を示す統計量Qと、分布の中心からの距離を示す統計量T²を生成し、これらの統計量とそのしきい値からプロセスの異常を検出するとともに、その異常要因と考えられるプロセス監視データを推定する技術。

(注3) ある特定の性能指標に注目して、その指標に関する異常の検出と要因の推定を行う技術であり、地方共同法人日本下水道事業団との共同研究「アセットマネジメントに関する技術の開発」において開発。

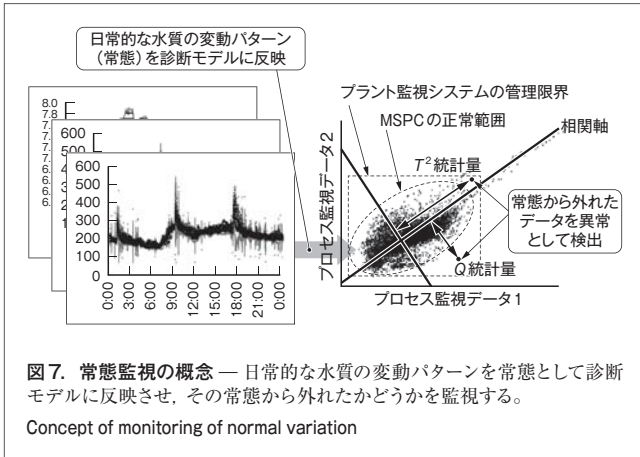


図7. 常態監視の概念 — 日常的水質の変動パターンを常態として診断モデルに反映させ、その常態から外れたかどうかを監視する。
Concept of monitoring of normal variation

に異常として捉えることで、下水処理施設のリスク低減につなげることができる。

オンライン流入水質監視システムでは、水質センサやスペクトルセンサで計測されるデータを用いて常態を表す診断モデルを構築し、また、この診断モデルを用いて、ある定められた周期で異常診断処理と要因候補抽出処理を行う。そして、異常診断処理により異常を検出し、ある定められた採水条件に適合した場合には、遠隔監視装置経由で自動採水装置への採水指示を出力し、その異常時点の流入水の採水を行う。2012年度の約3か月にわたる運用期間中は、主に2011年度の計測データを利用して作成した診断モデルを適用し、1分周期で異常診断処理を継続して実施した。診断モデル及び異常診断処理に使用した変数は、pH（水素イオン指数）、電気伝導度、アンモニア濃度、水温、及び53波長での吸光度の合わせて57変数である。

この試作機の運用では、本格的な実用化に向けて次のような成果が得られた。

- (1) 上下限管理値の監視だけで判断がつかないようなデータの変化を捉え、異常を検出
- (2) 2011年度のオフライン評価の際には見られなかった、特定の曜日や時間帯に発生する吸光度上昇に伴う異常を検出
- (3) 異常の検出状況から、センサ値のドリフト状況を間接的に捕捉

このように、プロセス性能診断システムのオンライン化の実用性を検証することができたが、このような診断技術については、表1に示すように様々な応用例が考えられる。診断に必要な期間のプロセス監視データが得られれば、このような診断を行うことが十分可能であることから、新設のプラントにおける運用の早期安定化や、運用が難しいプラントなどの維持管理にも有効に活用できると考えられる。

今後はオンラインでの診断技術として、監視制御システムへの実装やクラウドサービスとして実用化することで、わが国及び東南アジアや中国など新興国の下水処理施設における、省

表1. プロセス性能診断システムの応用例

Examples of application of process performance diagnosis systems

区分	診断項目
汎用異常兆候診断	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ異常診断 ・機器故障診断（ポンプ、ブロウ、ほか） ・プロセス異常診断（硝化阻害、バルキング、ほか） ・制御異常診断
水質異常兆候診断	<ul style="list-style-type: none"> ・放流水質悪化兆候診断⁽⁴⁾ ・流域水質異常兆候診断⁽³⁾
省エネ診断	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー消費原単位異常診断⁽⁵⁾

エネや、コスト削減、リスク低減などを実現する高度な維持管理体制の構築に貢献できると考えている。

5 あとがき

下水処理分野において資源の有効活用、省エネ・省コスト運用、及びリスク低減に貢献する技術について述べた。

当社は、今後、これら技術の更なる改善を進めながら、実績を積み重ねていく。更に、個別の制御技術の開発や改善にとどまらず、それらを連携させて下水処理施設全体の効率のかつ最適な運用を目指した技術開発により、循環型・低炭素型社会の実現に貢献していく。

文献

- (1) 山中 理 他. 窒素除去型曝気風量制御システムの実プロセスへの適用～実証実験による評価～. 環境システム計測制御学会誌. **18**, 2/3, 2013, p.14-22.
- (2) 川本直樹 他. 風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用. 第50回下水道研究発表会講演集. 東京, 2013-07～08, 日本下水道協会. 2013, p.805-807.
- (3) 平岡由紀夫 他. プロセス性能診断技術のオンライン流入水質監視システムへの適用とその評価. 第50回下水道研究発表会講演集. 東京, 2013-07～08, 日本下水道協会. 2013, p.1033-1035.
- (4) 山中 理 他. プロセス監視情報を利用した放流リン水質悪化診断. 第47回下水道研究発表会講演集. 名古屋, 2010-07, 日本下水道協会. 2010, p.645-647.
- (5) 山中 理 他. プロセス監視データを活用したエネルギー原単位上昇の要因発見支援. 第48回下水道研究発表会講演集. 東京, 2011-07, 日本下水道協会. 2011, p.184-186.



榎木 辰彦 ENOKI Tatsuhiko

コミュニティ・ソリューション社 水・環境システム事業部 水・環境システム技術部主務。上下水道をはじめとする公共システムのエンジニアリング業務に従事。
Water & Environmental Systems Div.



平岡 由紀夫 HIRAOKA Yukio

コミュニティ・ソリューション社 水・環境システム事業部 水・環境システム技術部主務。下水道システムに関する開発業務に従事。電気学会会員。技術士（総合技術監理部門、上下水道部門）。
Water & Environmental Systems Div.



安部 裕宣 ABE Hironobu

コミュニティ・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主務。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.