

# 上水道における省エネ・省資源技術

## Effective Energy and Resource Utilization Technologies for Water Supply Systems

牧瀬 竜太郎      阿部 法光      横川 勝也

■ MAKISE Ryutaro      ■ ABE Norimitsu      ■ YOKOKAWA Katsuya

近年の水道事業に対しては、水の安定供給だけでなく、より安全でおいしい水が求められ、高度浄水処理プロセスの導入、耐塩素性病原生物への対策、及び膜ろ過プロセスの導入などが進められている。一方、地球温暖化防止が全世界的に叫ばれるなか、上水道分野では、省エネや省資源が重要な課題として位置づけられている。

東芝は、省エネ・省資源技術を上水道分野におけるスマート技術ととらえ、開発を進めている。更に、蛍光分析計を用いたオゾン注入制御システム、紫外線 (UV) 照射装置のランプ調光制御技術、及び膜ろ過のシミュレーション技術では、消費電力や薬品使用量、及びシステムを構成する機器数の削減を実現し、上水道プラントの総合的な省コスト化を図っている。

To meet the growing demand for safer and more palatable water as well as stable water supplies, various technologies such as an advanced water treatment process, countermeasures against chlorine-tolerant pathogenic organisms, a membrane filtration process, and so on have been introduced into water utilities in recent years. Effective energy and resource utilization in the water supply technology field has also become a critical issue worldwide as a measure against global warming.

With this as a background, Toshiba has been engaged in research and development aimed at realizing effective energy and resource utilization technologies as smart technologies for water supply systems, including an ozone injection control system using a fluorescence analyzer, a lamp power control system for ultraviolet (UV) irradiation equipment, and membrane filtration simulation technologies. These technologies are contributing to lower electricity and chemical consumption and a decrease in the number of devices used in water supply systems, thereby achieving comprehensive cost reductions for water supply plants compared with conventional technologies.

## 1 まえがき

わが国の上水道（以下、水道と言う）の普及率は2009年時点で97.5%に達し、国民の大部分が水道による飲料水の供給を受けられるようになってきている。一方、海外ではまだ、安全な水が安定的に供給されていない国や地域も多く、水道事業を取り巻く環境は地域、環境、文化によって多様化している。このように多様化する環境にあつて、地球温暖化防止は世界的レベルの共通課題となっている。国内では電力の0.9%を消費する水道事業に対しては、東日本大震災に端を発した原子力発電所事故を背景に、よりいっそうの節電・省エネ努力が求められており、この動きは海外においても広がりつつある。

東芝は、このような課題を解決するソリューションの開発を進めている。ここでは、それらの中から、高度浄水処理プロセスのキー技術であるオゾン発生装置、耐塩素性病原生物への対策技術である紫外線 (UV) 照射装置、及び維持管理が容易で耐塩素性病原生物にも対応できる膜ろ過装置を取り上げ、省エネと省資源に向けた取組みについて述べる。

## 2 蛍光分析計を用いたオゾン注入制御システム

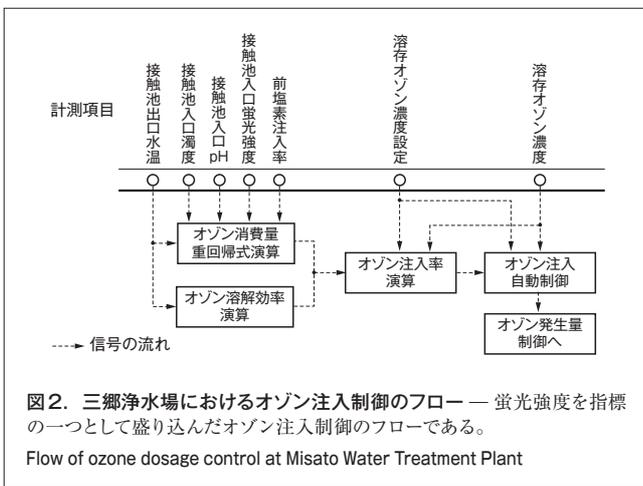
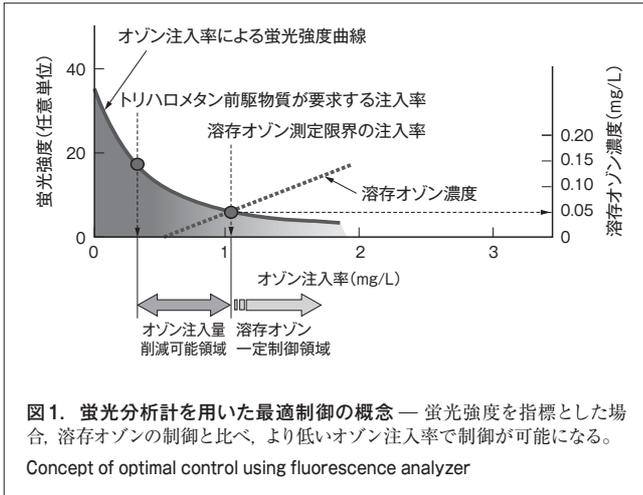
水道水における異臭味の発生やトリハロメタン生成の問題

が顕在化し、これらの対策として1990年代以降、オゾンと活性炭を用いた高度浄水処理プロセスの導入が進められてきた。しかし、オゾンを通剰に注入すると原水の水質によっては臭素酸が生成し、その量が水質基準値0.01 mg/Lを超えるおそれがある。また、火花のでない無声放電によって効率よくオゾン生成する場合でも、オゾン生成に関わる電力量のうち、放電電力の占める割合は大きいことから、被処理水質に応じた必要最低限のオゾン注入制御をきめ細かく行うことは、システムの省エネ運用にとり重要な手法の一つとなる。

従来のオゾン注入制御方式は、溶存オゾン濃度を指標とした制御が用いられてきた。しかし、浄水オゾン処理の主目的であるトリハロメタン前駆物質の酸化反応は、溶存オゾン濃度が数値として現れるより前にその反応がほぼ終了しているため、当社は、オゾンによるトリハロメタン前駆物質の酸化度合いを感度よく検出できる蛍光分析計を用いたオゾン注入制御システムを開発し、提案してきた。

トリハロメタン前駆物質が要求する酸化剤量と等量のオゾン注入することで、溶存オゾンに起因する臭素酸の生成抑制と15%程度の電力費削減効果が期待できる(図1)。

一方で、東京都水道局の独自技術である蛍光分析計を用いたオゾン注入制御が、現在建設中の東京都水道局「三郷浄水場 高度浄水施設(二期) オゾン設備等設置工事」で採用され



た。この技術は、従来の溶存オゾン濃度に加え、被処理水の濁度、温度、pH（水素イオン指数）、前塩素注入率、及び蛍光強度を組み合わせたオゾン注入自動制御として、国内初<sup>(注1)</sup>となる（図2）。

今後、オゾンを含む高度浄水処理プロセスの省エネ運用として、当社は、蛍光分析計を応用したオゾン注入制御システムの導入拡大を目指す。

### 3 UV照射装置の省エネを実現するランプ調光制御技術

当社は、浄水用紫外線消毒装置のTOSALEAR<sup>TM</sup>シリーズ4機種について、(財)水道技術研究センター（JWRC）の技術審査基準<sup>(1)</sup>への適合が認定され、製品化している。

TOSALEAR<sup>TM</sup>は、1本でも非常に高いUV出力が得られる中圧UVランプを採用しているため、使用ランプ数が少なく、装置を小型化できるので、省資源と省スペースを同時に実

(注1) 2011年7月時点、当社調べ。

現できるという特長がある。また、ランプ1本当たりの消費電力が大きいため、被処理水の流量や水質の変動に対応してランプ出力を調整する調光制御システムが有効になる。

しかし、従来の調光制御システムでは、被処理水の水質としてUV透過率（UVT）の変動を監視するためのオンライン型UVT計が必要であり、設置に伴うイニシャルコストや日常メンテナンス項目の追加に伴うランニングコストの増加をもたらすなどの課題があった。そこで当社は、オンライン型UVT計が不要なランプ調光制御システムを新たに開発した。

#### 3.1 UVモニタ位置の適正化によるUVT計の省略

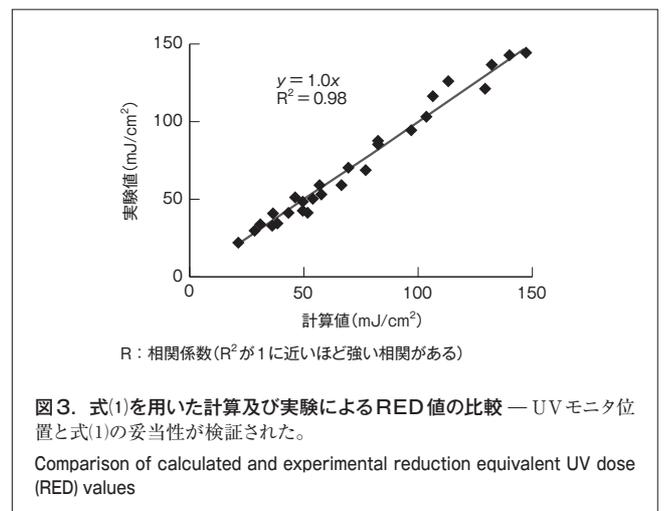
UVT計を省略するためには、装置に取り付けるUVモニタで、ランプのUV出力の変化と被処理水のUVTの変化を同時に検出し、検出されたUV強度とUV照射量（以下、照射量と略記）の間に一次線形相関が成立する位置にUVモニタを設置する必要がある。そこで、まずUVモニタの適正な位置を解析により探り、次に解析の結果を反映した実規模装置を用いて、生物線量試験<sup>(注2)</sup>を行い検証した。

生物線量試験で評価される照射量は、指標菌の生残率から求められる換算照射量（RED）である。そこで、UVモニタ位置が適正であることを確認するため、REDをUVT項のない式(1)で定義し、実験値と比較した。

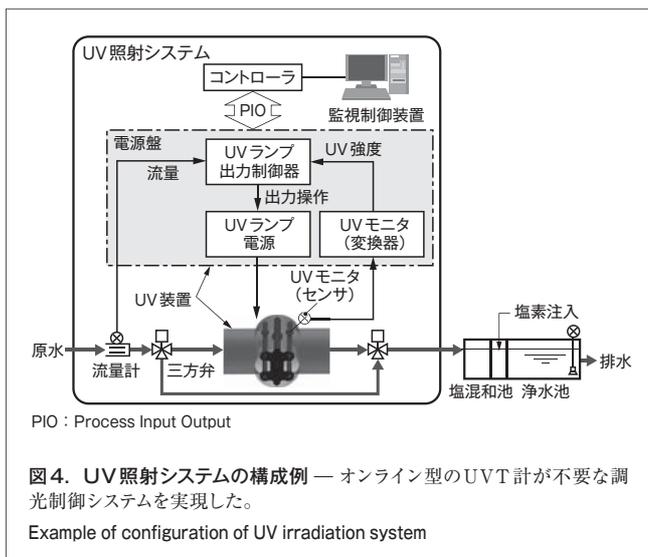
$$RED = a \times \left[ \frac{S/S_0}{Q} \right]^b \quad (1)$$

ここで、Qは被処理水の流量、SはUVモニタで検出されるUV強度、S<sub>0</sub>はUVT及びUVランプの出力が100%のときのUV強度、aとbは係数である。

比較の結果、式(1)による計算値と実験値は非常によく一致し、UVモニタ位置が適正であることが実証されるとともに（図3）、この式で照射量を推定できることも確認できた。



(注2) UVに対して安定した感受性を持ち、かつ人体に無害な細菌を指標菌として実機に流し、UV照射前後の生残率から照射量を評価する試験方法。



### 3.2 ランプ調光制御手順の概要

ランプの調光制御に必要な要件は、対象となる病原性微生物の消毒に必要な照射量を常に維持し、かつランプの出力(消費電力)を必要最小限に抑えることである。そのため、調光システムでは、被処理水の流量とUVモニタで検出されるUV強度を監視し(図4)、ランプの出力を次の手順で調整する。

- (1) 病原性微生物の消毒に必要な照射量をあらかじめ設定
- (2) (1)で設定した目標照射量とQを式(1)に代入し、目標UV強度( $S_{SV}$ )を計算

(3) Sが(2)の $S_{SV}$ と一致するように、ランプの出力を調整

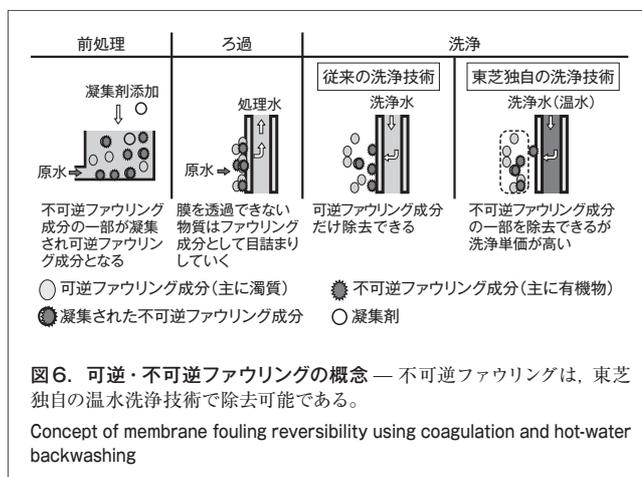
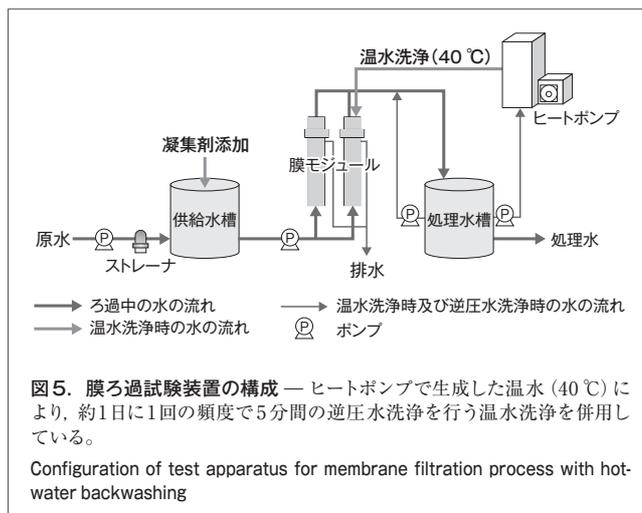
これにより、例えばUVTを95%として設計した装置をUVTが98%、Qが設計値の75%で運転した場合には、30%以上の省エネ効果が期待できる。

## 4 膜ろ過シミュレーションによる省エネ運転

膜ろ過装置は、効率よく浄水処理を行えることから、浄水場への導入が進んでいる。一方で、膜ろ過を行う過程において、原水中の濁質や有機物が膜の細孔を閉そくする目詰まり(ファウリング)を引き起こす場合がある。一般に、ファウリングを抑制するために薬剤の添加や膜の洗浄を行うが、過剰な薬剤添加や頻繁な洗浄は薬品費や動力費の増大を招くことから、ファウリングの抑制と処理コストの低減はトレードオフの関係にある。この課題に対して、ファウリングを抑制するための代表的な施策である凝集剤添加と、当社独自の洗浄技術である温水洗浄を用いて、処理コストが最小となるような運転条件のシミュレーションを行い検討した<sup>(2)</sup>。

### 4.1 膜ろ過装置の概要

実証試験を行った当社の膜ろ過試験装置の構成を図5に示す。粒子が比較的大きな雑ごみを除去するストレーナを通した原水に対し、前処理で凝集剤を添加して膜モジュールにより



ろ過する。膜モジュールに対して、約45分に1回の頻度で、モジュールの二次側から逆圧水による3分間の洗浄を行う。

### 4.2 ファウリングを抑制する凝集剤添加と温水洗浄技術

ファウリングは可逆ファウリングと不可逆ファウリングに分類できる。図6に示すように、可逆ファウリングの主成分は原水中の濁質であり、膜に付着しても、膜モジュールの二次側からの逆圧水による従来の洗浄技術で比較的除去しやすい。一方、不可逆ファウリングの主成分は原水中の有機物であり、従来の洗浄技術では十分な除去ができない。凝集剤の添加は、原水中の不可逆ファウリング成分の一部を可逆ファウリング成分に変化させる効果があるが、過剰な添加は可逆ファウリングの増加を招き、逆圧水洗浄を実施するまでに必要な電力量が増加するといった弊害が生じる。また、温水洗浄は不可逆ファウリングの一部を除去する効果があるが、洗浄単価が高く、処理コストの増加を招く。

### 4.3 シミュレーションによる運転条件の決定

2007年9月から2008年2月まで実施した実証試験データを基に、シミュレーション技術を用いて処理コストを定量的に評価した。表1は、凝集剤の添加率15mg/L及び温水洗浄の

表1. 凝集剤添加率と温水洗浄の有無による処理コストのシミュレーション結果

Results of simulation of operating costs with and without flocculant addition and hot-water backwashing

項目	条件					
	①	②	③	④		
凝集剤添加率 (mg/L)	0	15	0	15		
温水洗浄頻度 (回/日)	0	0	1	1		
膜差圧上昇率 (kPa/日)	8.0	1.0	2.3	0.3		
* 処理コストの構成	薬品洗浄費	—	100	12.5	28.8	3.8
	薬品費	凝集剤	—	2.4	—	2.4
	動力費	ポンプ動力	3.5	3.7	5.1	5.6
		温水洗浄	—	—	5.0	5.0
	合計		103.5	18.6	38.8	16.8

\* 処理コストは、膜差圧の上昇率が8.0 kPa/日ときの薬品洗浄費を100とした

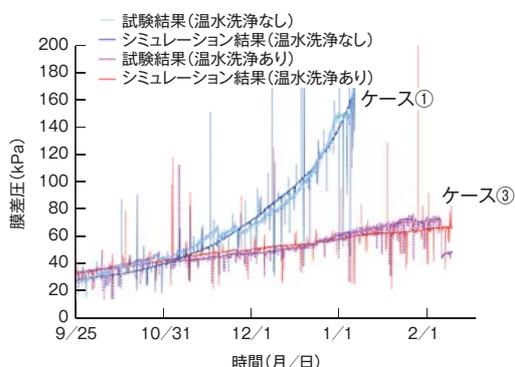


図7. 温水洗浄の効果 — 温水洗浄を併用することで膜差圧の上昇を抑制できる。

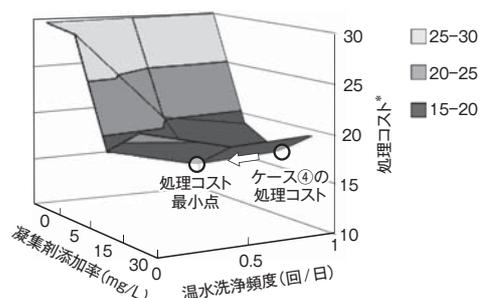
Results of simulation and tests of transmembrane pressure (TMP) with and without hot-water backwashing

頻度1回/日を基本とし、それぞれの条件に実施の有無を組み合わせて比較した結果である。原水の水質は濁度3 mg/L、有機物濃度1 mg/L、及び水温25℃で一定と仮定し、膜差圧が300 kPaに到達した時点で薬品洗浄を行うという前提で処理コストを算出した。凝集剤添加ありと温水洗浄ありのケース④がもっとも安価で、凝集剤添加なしで温水洗浄なしのケース①と比較して約84%削減された。

また、温水洗浄の効果を比較するため、表1のケース①と③の膜差圧の変化を図7に示す。温水洗浄技術は従来の洗浄技術より膜差圧の上昇を抑制できること、及び膜ろ過シミュレーション技術は膜差圧を精度よく予測できることが確認できた。

次に、凝集剤の添加率と温水洗浄の頻度をパラメータとして、シミュレーションにより処理コストを評価した結果を図8に示す。この図から、凝集剤の添加率15 mg/L及び温水洗浄の頻度0.5回/日の運転条件で処理コストが最小になり、表1のケース④と比べ2.4%削減されることがわかった。

これらの結果は、開発したシミュレーション技術によって最適な運転条件を決定できるだけでなく、いくつかの試験条件



\* 処理コストは、膜差圧の上昇率が8.0 kPa/日ときの薬品洗浄費を100とした

図8. 凝集剤添加率と温水洗浄頻度をパラメータとする処理コストのシミュレーション結果 — 凝集剤の添加率15 mg/L、温水洗浄の頻度0.5回/日の運転条件で処理コストが最小になる。

Result of simulation of operating cost with flocculant addition and hot-water backwashing rate as parameters

を省略できるなど、実証試験の試行回数を削減できる可能性も示唆している。今後、このシミュレーション技術を早期に実用化して、膜ろ過設備の省エネ運転に貢献していきたい。

## 5 あとがき

水道事業を取り巻く環境は、今後更に多様化することが予想される。その一方で、地球温暖化対策、省エネ、及び省資源の推進はますます重要な課題になっていくことが容易に想像できる。当社は、これらの課題を解決するソリューションの開発を推進し、国内外の水道事業に貢献していく。

## 文献

- 水道技術研究センター. 紫外線照射装置JWRC技術審査基準(中圧紫外線ランプ編). 東京, 水道技術研究センター, 2008, 88p.
- 横川勝也 他. "膜ろ過シミュレーションによる凝集剤添加と温水洗浄の効果評価". 第62回全国水道研究発表会講演集. 大阪, 2011-05, 日本水道協会. 2011, p.346-347.



牧瀬 竜太郎 MAKISE Ryutaro

社会インフラシステム社 水・環境エンジニアリングセンター  
水・環境プロセス技術部 参事。水処理システムのエンジニアリング業務に従事。

Water & Environmental Engineering Center



阿部 法光 ABE Norimitsu

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 環境・水システム開発部 主務。水処理システムの研究・開発に従事。環境システム計測制御学会 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



横川 勝也 YOKOKAWA Katsuya

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 制御システム開発部 主務。上下水道システムの研究・開発に従事。日本機械学会 会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center