

上水道施設を支える水処理装置と計測制御技術

Process Equipment and Instrument and Control Technologies Supporting Effective Operation of Water Treatment Plants

松代 武士

■ MATSUSHIRO Takeshi

横川 勝也

■ YOKOKAWA Katsuya

阿部 法光

■ ABE Norimitsu

“安全でおいしい水”を求めるニーズが高まるなか、東芝はこれまで、オゾン発生装置などの水処理装置と計測制御技術を基盤として、上水道施設の高度化や運転効率化を支えるシステムを提供してきた。

新たな取組みとして、膜ろ過処理、紫外線消毒、オゾン注入制御に関する研究開発など幅広く水処理装置の開発を進めるとともに、施設管理の広域化に対応する水運用システムの開発を行い、上水道施設のシステム全体の最適化を図り、その低コスト化と効率運用の実現を目指していく。

In response to the growing social awareness of the need for safe and palatable water, Toshiba has been offering highly advanced and effective systems for the operation of municipal water treatment plants utilizing water treatment devices such as ozonizers as well as instrument and control technologies. We intend to continue our efforts to develop advanced water treatment facilities as well as facilities management systems covering a wider area, with the aim of optimizing the total system and realizing more effective and economical operation of municipal water services. For this purpose, we are conducting R&D work on membrane filtration, ultraviolet disinfection, ozone injection control, and water operation scheduling system technologies.

1 まえがき

2004年、水質基準が全面的に見直しされ、水道水質管理の充実強化が求められている。一方、2004年に厚生労働省で策定された“水道ビジョン”では、水道施設の将来像への具体的な施策や工程が提示されている⁽¹⁾。今後は、新たな上水道施設の建設が減少していく傾向にあるため、既にある施設を有効に利用しつつ、設備投資コストや維持管理コストを抑制することが課題である。

これらの要求や課題に応じていくため、東芝はこれまで、オゾン発生装置など、水処理にかかわる装置を提供するとともに、計測制御技術を上水道施設へ適用することで、上水道施設の高度化や運転効率化に寄与してきた。今後は、施設管理の広域化に対応するシステム開発に加え、更に幅広く水処理装置の開発にも取り組むことによって、全体を最適化し、上水道施設の低コスト化と効率運用の実現を目指していく。

ここでは、水処理装置と計測制御技術の例として膜ろ過システム、紫外線消毒システム、及びオゾン注入制御システムを、また水運用に関する新しい取組みとして広域水道用システムを研究開発の視点から述べる。

2 上水道施設の高度化に寄与する水処理装置技術

2.1 膜ろ過システム

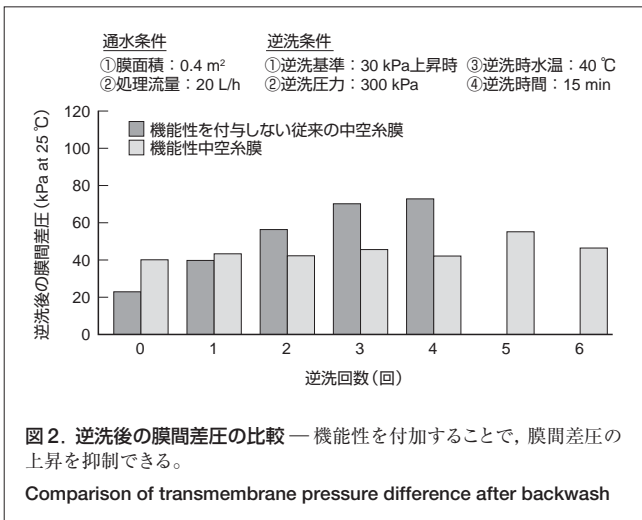
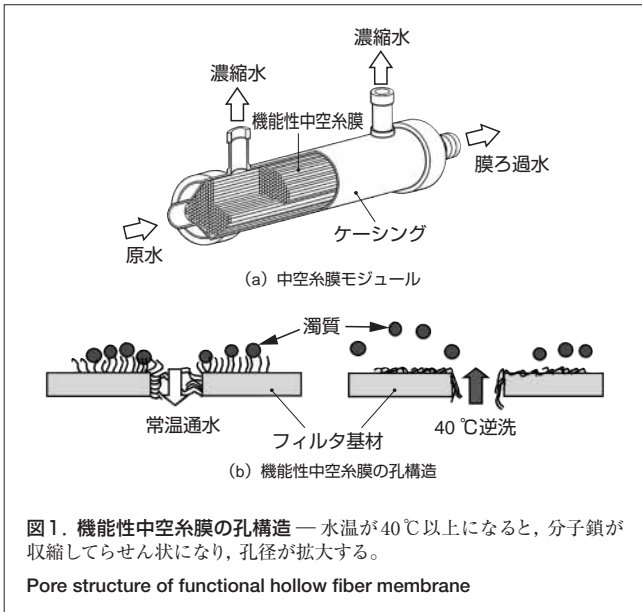
近年、除濁及び除菌を効率よく行えること、運転管理が容易

なことから、膜ろ過システムの浄水場への導入が進んでいる。一方、水道原水中の微小で粘着性の高い物質が物理洗浄では除去し難い不可逆的なファウリングを引き起こすため、膜の薬品洗浄の頻度が高くなり、結果として膜寿命が短くなるなどの課題がある。

2.1.1 東芝の新しい機能性中空糸膜 当社はこうした課題を解決するため、膜表面にN-イソプロピルアクリルアミドモノマー(NIPAAm)を重合し、膜表面の付着物を効率よく除去できる機能性中空糸膜の開発を進めている。機能性中空糸膜は、水温により伸縮するNIPAAmの分子鎖が表面に重合しており、温水で洗浄することにより、膜表面の汚れを効率よく除去できるという特長がある(図1)。

室温ではNIPAAmの分子鎖は伸びた状態にあるため、水が通過する流路は狭まり濁質を捕獲しやすい状態にある。膜表面の汚れを除去する場合は、膜が接する水を約40℃に加温してNIPAAm分子鎖を収縮させ、孔径を拡大させる。

2.1.2 模擬水による加速試験 機能性中空糸膜と機能性を付与していない中空糸膜の双方に模擬水を通水し、膜間差圧の上昇特性を比較した(図2)。模擬水は長期間の放置により藻類を発生させた難ろ過性の懸濁水である。機能性中空糸膜の初期の膜間差圧は約40kPaで、機能性を付与していない中空糸膜の膜間差圧25kPaより高い。しかし、通水及び洗浄を繰り返すと、機能性中空糸膜の洗浄後の膜間差圧はほぼ一定の値を保持するのに対して、機能性を付加していない中空糸膜では直線的に増加する。



これは膜表面を機能化することにより、懸濁物が逆洗で効率よく除去できることを示している。このように、機能性中空糸膜は逆洗による差圧回復性に優れるため、膜の洗浄にかかわる運転コストの低減につながると思われる。

2.2 東芝の紫外線消毒システム

わが国の水道は、塩素殺菌による衛生学的安全性を基盤として運用されてきたが、近年、塩素では殺菌できないクリプトスポリジウムなどの病原性微生物による水道汚染事故が報告されており、従来の塩素消毒システムでは対応しきれなくなりつつある。このため、欧米では塩素代替、補完技術として紫外線消毒システムの導入が進んでいる。また、わが国でも(財)水道技術研究センター(JWRC)から紫外線消毒ガイドラインが発行され、塩素消毒の補完技術、特にクリプトスポリジウムなどの病原性原虫の不活化技術として位置づけが明確に示された⁽²⁾。一方、紫外線消毒装置(以下、UVリアクタと記す)を浄水

処理工程へ適用する場合、ランプ破損によるガラス片や水銀漏出の危険が懸念されている。

当社は、こうした課題に対し、ランプ配置を最適化するための紫外線照度分布解析技術と、流動解析技術を活用することにより、万が一紫外線ランプが破損した場合でも、ガラス片や水銀片が処理水へ混入する事態を防止できるサイクロン型UVリアクタを考案した。

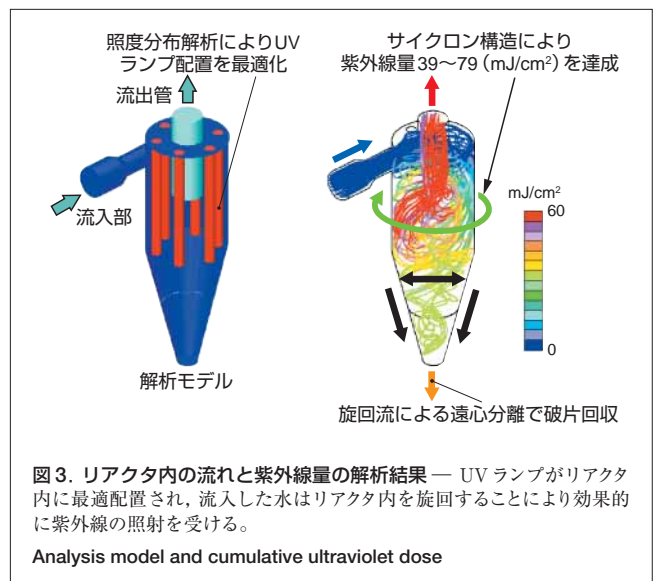
2.2.1 流動解析による紫外線量の評価 UVリアクタの病原菌不活化性能は、水がリアクタ内を通過する間に受ける紫外線量(=照度(mW/cm^2) \times 照射時間(s))で評価する。紫外線照度はランプ表面からの距離に依存し、水の流れが一様ではないため線量の評価は難しい。そこで、3次元の流動解析に照度分布解析を組み合わせたシミュレーション技術を開発し、紫外線量を求めた。

2.2.2 解析結果と考察 解析モデルと紫外線量に対応した色で表示した流れを図3に示す。流入した大部分の水がリアクタの外周側に沿って旋回流を形成している。

これにより、流れに沿って紫外線量が徐々に増加し、流出部ではクリプトスポリジウムを不活化し、また、大腸菌などの病原性微生物の不活化する紫外線量としてガイドラインで要求されている $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ をほぼ達成している。

更に、万が一ランプが破損した場合に汚染物質として発生するガラス片などの回収限界径を回転流速分布(周方向分布)に基づいて試算した結果、サイクロンの遠心分離作用により回収可能な粒子径は、水銀片で $0.14 \sim 0.4 \text{ mm}$ 、石英ガラス片で $0.4 \sim 1.3 \text{ mm}$ と試算された。

これらの結果により紫外線照射効率向上、破損時の破片回収が可能であることが確認でき、水道ビジョンが目指す“安全・快適な給水の確保”に貢献する消毒技術としてサイクロン型UVリアクタが有効であることを確認した。



2.3 オゾン注入制御システム

従来オゾン処理で用いられている溶存オゾン濃度によるフィードバック制御は、オゾン処理水に残留する溶存オゾンにより発がん性物質である臭素酸が生成し、水質基準値(0.01 mg/L以下)を超えるおそれがある(図4の従来方式)。

当社ではこれまで、ラボスケールのオゾン処理実験により、有機物濃度が高い原水に溶存オゾンが検出されるまでオゾンを入力すると、臭素酸が多く生成する結果が得られている(図5)。そのため、オゾン処理においては、有機物の分解と臭素酸の生成抑制を同時に達成することが求められる。

そこで当社は、オゾンによる有機物の分解をオンラインでとらえられ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た(図4の開発方式)。図6は、溶存オゾン濃度でオゾン注入制御を行っている実プラントにおいて、溶存オゾン濃度、オゾン処理前後の蛍光強度、及び蛍光強度残存率を示した結果である。

蛍光強度残存率は原水中の有機物の分解レベルを示す指標で、次式で定義される。

$$\text{蛍光強度残存率} = (\text{処理後蛍光強度}) / (\text{処理前蛍光強度})$$

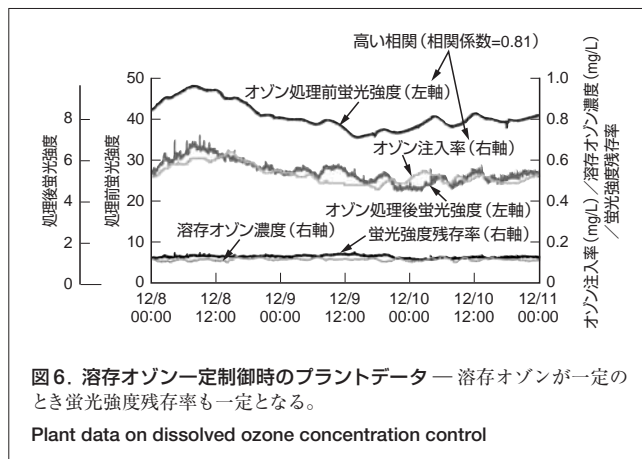
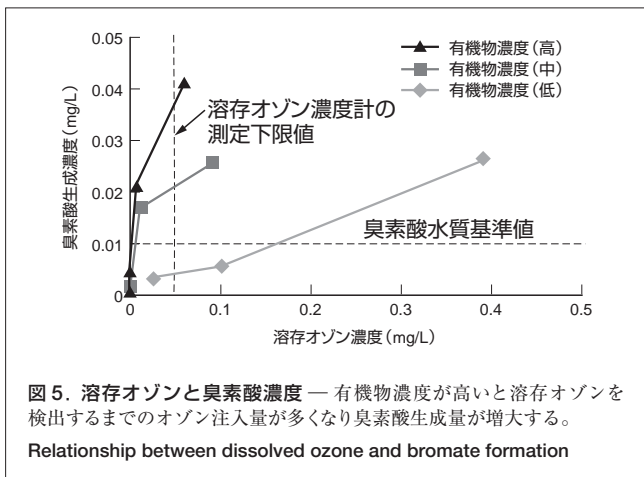
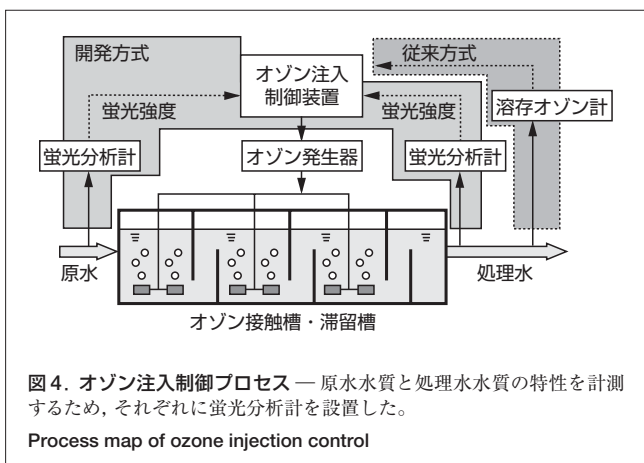


図6に示すように、原水水質の変化に応じてオゾン処理前の蛍光強度も変化しており、オゾン注入率の間に高い相関が見られる。したがって、オゾン処理前の蛍光強度とオゾン注入率の相関を用いることで、即応性が高いフィードフォワード制御を行うことが可能である。

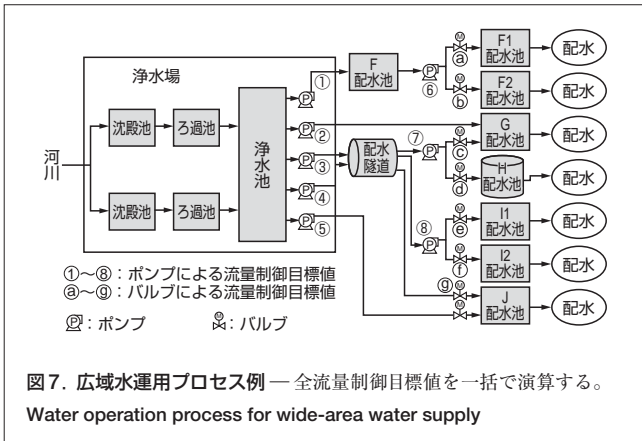
また、オゾン処理前の蛍光強度が変化しても蛍光強度残存率はほぼ一定であることから、蛍光強度残存率を目標値としてオゾン注入制御を行うことで、従来の溶存オゾン濃度一定制御と同等の効果を得ることができる。更に、蛍光強度は低いオゾン注入率でも有機物の分解に応答することから、蛍光強度残存率を指標とすることで、より広い範囲でオゾン注入制御が可能となるため、適量のオゾン注入による臭素酸の生成抑制と電力費削減効果が期待できる(この特集の論文“安心・安定・持続を実現する上水道ソリューション”の図3 (p.14) 参照)。

3 施設管理の効率化を実現する広域水運用システム

近年、限られた水資源の有効利用や、運転管理の省力化が求められている。このような要求に応えるため、当社は水運用を最適化する技術や、配水管路網の状態変化をとらえる配水管理技術の開発に取り組んでいる。

広域水供給の水運用は、生活パターンに応じて変動する水需要に対して、浄水場から各配水池への送水流量変動を極力抑えることが重要であるが、複数施設を管理するためその運転が複雑で、安定した水運用を運転員が手動で行うことが難しい。当社の広域水運用システムではこうした課題を解決するため、水運用を以下の最適化問題としてとらえる。

- (1) 目的関数
(浄水場からの送水流量変化) + (目標水位との誤差) + (各配水池の受水流量変化) + (ポンプ電力量) → 最小化
- (2) 制約条件
(a) 各配水池需要量に対し安定的に浄水を供給



(b) 各配水池容量による運用水位上下限値を満足
この最適化問題を解くため、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用している。しかし、図7で示す広域水運用の場合、計画すべき流量制御目標値が多数存在するため、演算時間が増大してしまう問題があった。

高速演算を実現するために、今回新たに開発した広域水運用システムでは、従来のGAを更に改良して実データや運用ノウハウをシステムに取り込んでいる。その結果、すべての流量制御目標値を短時間で一括演算可能となる。各手法による演算時間の比較を図8に示す。

例えば、計画すべき流量制御目標値数が15の場合、従来のGAでは約1時間であるのに対し、今回改良したGAでは、256秒で演算可能であり5分以内を達成することができた(従来比1/15)。ただし、計画する流量制御目標値数が1又は2であれば従来のGAが有効であり、対象プロセスに応じてアルゴリズムを使い分けることが重要である。

広域水運用システムの計算例を図9に示す。この計算例から、次のことが確認できる。

- (1) 夜間電力を最大限に利用して省コスト運転を実施
- (2) 送水流量の変更が少ない(図では2回/日)

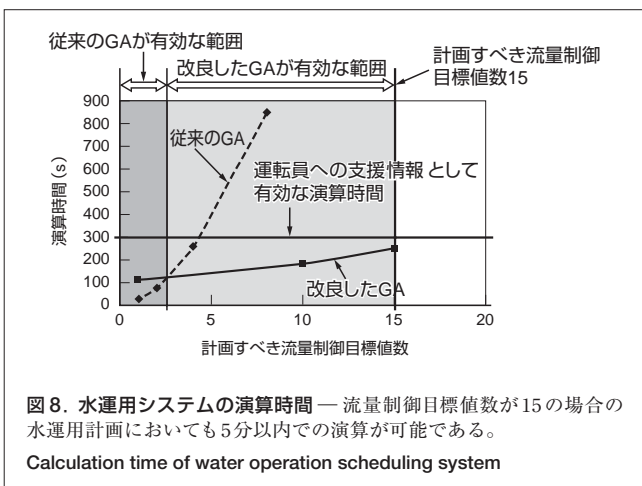
(3) 配水池の上下限水位を維持

4 あとがき

当社はこれまで、水処理にかかわる水処理装置と計測制御技術を基盤として、上水道施設の高度化や運転効率化を支えるシステムを提供してきた。今後は、施設管理の広域化に対応するシステム開発に加えて新しい水処理装置を提供し、更に、フィールド試験を通じてその有効性を確認して、上水道施設の低コスト化と効率運用を実現していく。

文献

- (1) 厚生労働省健康局水道課. “水道ビジョンについて”.
< <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/vision2/index.html> >,
(参照 2006-02-01).
- (2) 財団法人水道技術研究センター. 環境影響低減化浄水技術開発研究(e-Water)ガイドライン集. 2005, 410p.



松代 武士 MATSUSHIRO Takeshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 社会システム開発部主務。上水道処理システムの研究・開発に従事。Power and Industrial Systems R&D 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 社会システム開発部。上水道監視制御システムの研究・開発に従事。日本機械学会会員。Power and Industrial Systems R&D 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 社会システム開発部主務。上水道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 R&D Center