

再生水プラントの高効率化を実現するソリューション

Solutions for Realization of Wastewater Recycling Plants with Higher Efficiency

中村 健介 NAKAMURA Kensuke 柿沼 建至 KAKINUMA Kenji 猪谷 達也 IDANI Tatsuya

経済発展が進むアジア、アフリカ地域では、生活用水や工業用水といった水使用量の増加に伴い、水不足が深刻な問題となっている。

東芝グループは、再生水プラントを導入することで、これらの問題の解決に取り組んでいる。再生水プラントの導入にあたっては、水の有効利用の観点から、再生水量の確保が課題となるが、RO（Reverse Osmosis：逆浸透）膜の目詰まりを抑制するような処理プロセスを構築することで、高い水回収率を可能にするソリューションを提供している。一方、運用時には、時々刻々と変動する排水条件に対応し、プラントの処理性能を維持することが課題となっている。この課題に対しては、各処理設備について、様々な運用データを確認しながら、排水条件に合わせた維持管理を行うことで、プラントの安定稼働を可能にしている。今後は、新たな高濃縮技術の実用化やクラウドシステムの活用により、再生水プラントの更なる高効率化を図っていく。

As a consequence of the increase in both household and industrial water consumption in the Asian and African regions accompanying their economic development, water shortages have become a matter of serious concern in recent years.

To address this issue, the Toshiba Group has been engaged in the introduction of wastewater recycling plants to countries in these regions. From the viewpoint of efficient use of water, we have developed a solution that makes it possible to achieve high water recovery rates by means of a treatment process that suppresses the clogging of reverse osmosis (RO) membranes so as to secure sufficient supplies of recycled water. From the viewpoint of maintaining the treatment performance of plants, on the other hand, we have developed a solution to ensure stable plant operation by offering operation and maintenance (O&M) services that can remotely control individual facilities in accordance with constantly changing wastewater conditions based on various collected data. In addition to these solutions, we are aiming to further improve the efficiency of wastewater recycling plants through the practical application of high-concentration technologies and the use of cloud systems.

1. まえがき

国際連合が掲げるSDGs（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）の一つとして、「すべての人々に水と衛生へのアクセスと持続可能な管理を確保する」ことが挙げられている⁽¹⁾。しかし、水資源量は、地域によって偏りがあることが問題で、2010年時点での一人当たりの水資源賦存量は、全世界平均の6,148 m³/年に対し、南及び東アジアでは2,952 m³/年、西アジアでは1,588 m³/年と少ない⁽²⁾。更に、アジア諸国では、人口増加や経済発展に伴う生活用水や工業用水の使用量の増加で、今後、水の需給は更に逼迫（ひっばく）することが予想されている。

この水需要に応えるため、排水を捨てることから再生利用することへの転換が進み、再生水の利用は新たな持続可能な代替水資源として期待されている。従来、河川や地下水

などの水源からの取水が浄化された後、使う場所へと供給されるが、そのエネルギーの90%程度は、水を運ぶことに使われている⁽³⁾。再生利用は、新たな水資源を提供するだけでなく、使う場所で水を生産することで輸送のエネルギーが削減され、経済的な効果も期待できる。再生水の供給には、用途に応じた設備投資が必要となるが、灌漑（かんがい）から、工業用水、飲料水と処理レベルが上がるに従って、再生水の利用価値も高まり、経済性がより向上する可能性がある⁽⁴⁾。これまでは、修景用や灌漑利用が多かったが、工業用水としての利用も増加している。

また、再生利用することで、排水による自然環境への影響が減り、排出先の環境汚染が緩和される効果もある。更に進んで、排水を最大限に再利用し、外部に排出される水をゼロにまで低減して水環境保全を図ることは無排水（ZLD：Zero Liquid Discharge）と呼ばれ、米国や新興国を中心

に適用が進んでいる⁽⁵⁾。

排水の再生利用やZLDは、水資源を確保し、水環境を保護するために有効な手段であるが、技術課題も存在している。ここでは、近年急速に普及する工業用水用途の再生水プラントに焦点を当て、主要課題とその対策として採用するソリューションについて述べる。

2. 再生水プラントの課題とソリューション

2.1 再生水プラントに求められる要素技術と課題

排水原水に含まれる汚濁物質や、栄養塩類、硬度成分などを除去するため、不純物の種類や濃度に適した処理プロセスを採用する必要がある。工業用水用途では、凝集沈殿や生物処理などで排水原水からSS（浮遊性懸濁物）やBOD（生物化学的酸素要求量）を除去した後、溶解性の塩類や金属イオンなどの除去が求められるが、その手段としては、RO膜を用いた膜ろ過処理が効果的である。このとき、RO膜から排出される濃縮水の水分を除去して排水をゼロ化することがZLDであり、排水の再生利用とZLDでは適用される要素技術や課題が共通する。その技術と課題を図1に示す。

ほかの水源からの給水量削減や、汚染物質の排出負荷量低減の観点から、再生水プラントでは水回収率を向上させることが求められる。しかし、RO膜処理では、被処理水中の生物起因のコロイド状物質により、RO膜にファウリング

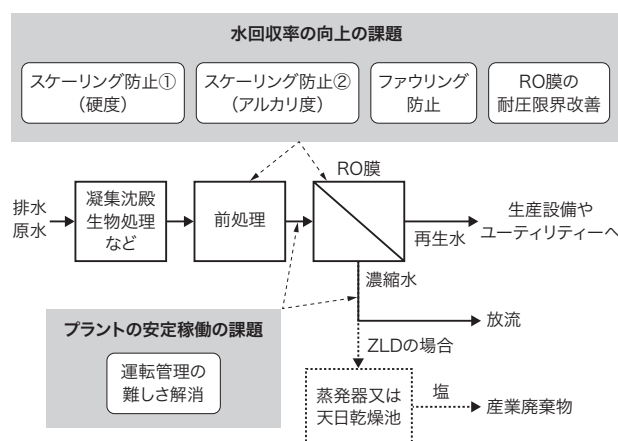


図1. 再生水プラントの要素技術と主要課題

ほかの水源からの給水量削減や、汚染物質の排出負荷量低減の観点から、前処理とRO膜の運転で水回収率を向上させ、時々刻々と変動する原水の水量や水質に合わせてプラントを安定稼働することが課題となる。

Element technologies for and major issues encountered by wastewater recycling plants

が生じて薬品洗浄を行っても性能が回復しないことや、硬度成分と炭酸塩が飽和溶解度を超過して析出し、膜表面にスケールが生じることで透過水量が急激に低下することが問題となる。

また、運用面では、時々刻々と変動する原水の水量や水質に合わせて適切に運転管理することが難しいという問題がある。

2.2 東芝グループのソリューション

2.1節で述べた水回収率の向上と安定運用の課題に対し、東芝グループが提供するソリューションを表1に示す。

2.2.1 水回収率の向上

処理プロセスの面では、以下のソリューションでRO膜の水回収率を向上させている。

- (1) スケーリング防止①（硬度除去） RO膜の前段に陽イオン交換樹脂を設け、カルシウムやマグネシウムなどの多価陽イオンを除去し、硫酸塩などの硬度成分によるスケールを防止する。
- (2) スケーリング防止②（アルカリ度除去） 脱炭酸塔、脱気膜でアルカリ度を除去し、炭酸カルシウムによるスケール発生のリスクを低減する。
- (3) ファウリング防止 限外ろ過（UF：Ultra Filtration）膜で、高分子物質やコロイド状物質などのファウリング成分を除去する。また、高pH（水素イオン指数）下でのRO膜運転で、ファウリング成分の膜への付着を抑制する方法もあり、主に高い水回収率が必要なZLDで用いる。
- (4) RO膜の耐圧限界の改善 高塩濃度原水であるほど、イオンが水に溶解する浸透圧が高く、より高圧でRO膜処理を行う必要があるが、通常のRO膜の耐圧は8.3 MPa程度であり、高塩濃度原水には適用できない。

表1. 再生水プラントの技術課題と東芝グループのソリューション

Technical issues confronted by wastewater recycling plants and solutions provided by Toshiba Group

目 的	技術課題	東芝グループのソリューション
水回収率の向上	スケール防止①（硬度）	・陽イオン交換樹脂による硬度除去
	スケール防止②（アルカリ度）	・脱炭酸塔、脱気膜によるアルカリ度除去
	ファウリング防止	・UF膜によるコロイド状物質除去 ・高pH下でのRO膜運転による付着防止
	RO膜の耐圧限界改善	・超高圧RO膜の使用
プラントの安定稼働	運転管理の難しさ解消	・ノウハウに基づく運転管理手法 ・処理水返送による負荷平準化

かった。この対策としては、運転圧力を12 MPaまで高めた超高压RO膜を採用することで、水回収率を向上させることができる。

これらのソリューションにより、RO膜に流入する膜の目詰まり成分を、従来に比べ1/100以下の濃度領域まで除去することが可能になるとともに、RO膜の水回収率を最大限に高めることができる。

2.2.2 プラントの安定稼働

運用面では、以下のソリューションで水量・水質ともに安定した再生水を供給できる。

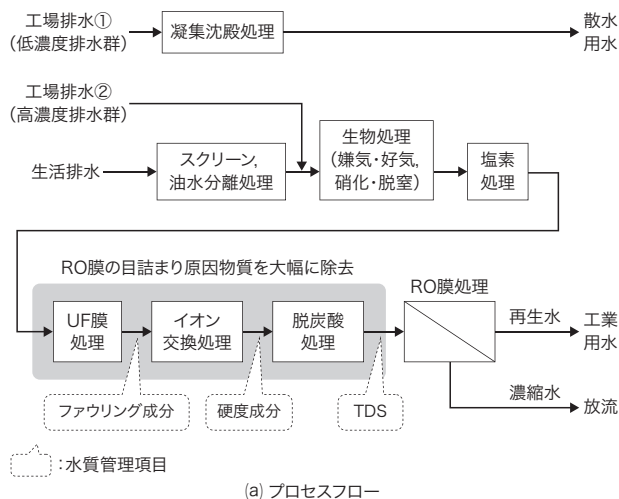
(1) ノウハウに基づく運転管理手法 RO膜の透過水量低下の兆候を早期に発見するため、処理プロセスごとの水質を管理する。具体的には、UF膜出口側ではファウリング成分を、陽イオン交換出口側では硬度成分を、RO膜入り口側ではTDS (Total Dissolved Solid：総溶解固形分)濃度を、それぞれ管理する。これらの水質管理項目やその管理ポイントは、東芝グループがこれまでに納入したプラントの運用実績から得られたデータに基づくもので、あらかじめ極低濃度のしきい値を定めている。通常は運転差圧や処理水の水量・水質を基に各装置の運転条件やRO膜の洗浄頻度を自動制御するが、オンラインでは測定できない項目もあり、現場の技術者が運転差圧、水量変化、及び極低濃度領域での水質から運用判断することは難しい。東芝グループは、これまでに複数の再生水プラントで得た運転ノウハウを基に、測定時期や頻度の異なる複数の水質管理項目の変動トレンドを見ながら調整することで、再生水プラントの安定した運転を実現している。

(2) 処理水返送による負荷の平準化 排水の水量や水質が大きく変動し、前述のしきい値を超える場合には、高負荷となっている箇所へ再生水の一部を返送することで、一時的に負荷を平準化する。

2.3 再生水プラント適用事例

東芝グループは、中東に位置するオマーン国の、ソハール港に隣接した工業団地向けに再生水プラントを納入した。従来、この工業団地には既設の排水処理施設があり、処理水は海域に放流されていたが、放流水の水質基準値に関する法令の見直しや当該地域における水需要の上昇により、既設排水処理施設の敷地を転用する形でこのプラントが建設された。このプラントのプロセスフローを図2に示す。

建設された再生水プラントでは、工業団地に入居する石油化学や、電力、鉄鋼業などの各工場からの排水と家庭か



(b) 再生水プラント

図2. オマーン国の工業団地に納入した再生水プラント

UF膜によるファウリング防止、イオン交換・脱炭酸による硬度・アルカリ度除去、RO膜による脱塩処理を適用した。工業団地の排水10,000 m³/日を受け入れて、安定処理できる。

Wastewater recycling plant installed at industrial estate in Oman

らの生活排水を受け入れて処理し、再生水として工業団地に供給している。

工場からの排水は、不純物の濃度により低濃度排水群と高濃度排水群の2種類に分別し、低濃度排水群は凝集沈殿処理を行った後、散水用水として用いられている。

一方、高濃度排水群は、生活排水と混合される。そして、2.2節で述べたソリューションのうち、UF膜によるファウリング成分の除去、イオン交換・脱炭酸による硬度・アルカリ度除去、RO膜による脱塩処理を経て、工業用水として再利用されている。

工業排水及び生活排水の処理能力は10,000 m³/日であり、TDSが25 ppm未満という高品質の再生水を供給できる。納入後、2年以上が経過しているが、水量・水質ともに基準値を逸脱することなく、安定稼働を継続している。

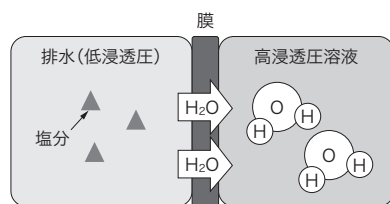
3. 再生水プラントの展望

東芝グループは、再生水プラントのシステム全体を通じて、より効率的な運用を実現するための取り組みを行っている。2章で述べたとおり、再生水プラントでは、特に水回収率の向上とプラントの安定稼働が重要となることから、排水の高濃縮技術とクラウドシステムに注目し、その改善を図っている。以下に、その展望を述べる。

3.1 水回収率の向上

RO膜や超高压RO膜を用いて再生水を回収する場合は、2.2節で述べたとおり、RO膜の耐圧性能が制約となって水回収率の向上に限界があった。

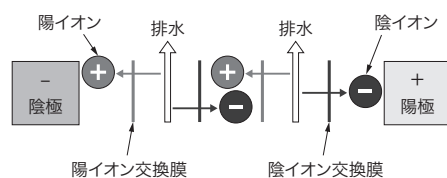
東芝グループは、超高压RO膜より更に水回収率を向上できる技術として、FO (Forward Osmosis：正浸透) 膜法、膜蒸留法、電気透析法に着目している(図3)。



(a) FO膜法



(b) 膜蒸留法



(c) 電気透析法

H₂O: 水 H: 水素 O: 酸素

図3. 再生水プラント向けの新たな高濃縮技術

新たな技術を導入して展開し、再生水プラントの水回収率を更に高めることで、貴重な水資源の有効活用に貢献できる。

Newly developed high-concentration technologies for wastewater recycling plants

FO膜法は、高塩濃度原水よりも更に高い浸透圧を有する駆動溶液を用いることで、高塩濃度原水中の水分を高浸透圧溶液に吸引させることができる。吸引した水分は、再び高浸透圧溶液から分離し、再生水として回収する。東芝グループでは、正浸透膜法を実用化し再生水プラントに導入していくためには、高浸透圧溶液の開発が重要であると考えている。

膜蒸留法は、温度差のある排水と処理水を疎水性の多孔質膜を介して接触させ、蒸気圧差を利用して水を回収する方法であり、従来の蒸発法よりも低温で高塩濃縮と再生水の回収が可能である。

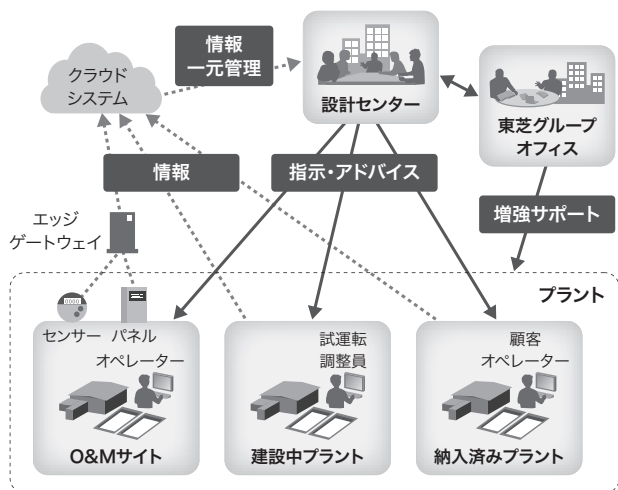
電気透析法は、陽イオン交換膜と陰イオン交換膜を介して電気で原水中の塩分を取り除く技術であり、ほかの方法と同様に、高塩濃度原水中から再生水を回収できる。

今後、このような新たな技術を導入し、展開していくことで、再生水プラントの水回収率を更に高め、貴重な水資源の有効活用に貢献していく。

3.2 クラウドシステムの活用による安定稼働

変動する排水の水量や水質に対して、再生水プラントを安定稼働させるためには、各設備の水質や運用データを細かく管理する必要がある。現状、設備の運用管理は現場のオペレーターに委ねられているが、今後は、クラウドシステムを逐次導入して各設備の運用データを蓄積し、設計センターに在席する経験豊富な技術者が各プラントの運用データを確認し管理できるようにしていく。ノウハウを保有する技術者が運用データを確認することで、前処理設備やRO膜設備の運用の適正化や、トラブルの兆候を早期に発見することによるトラブル回避策の検討、トラブル発生時の多角的な原因追究と対処方針の指示、薬品等消耗品使用量の効率化などの運用改善が可能となる。

また、東芝グループは、全世界で多くの水処理プラントの維持管理業務を請け負っているが、これまで各プラントにおける維持管理業務のレベルは、現場オペレーターの経験や実力に依存する傾向が強かった。クラウドシステムにより、各プラントの情報を設計センターで一元管理することで、維持管理レベルを一様に高いレベルに保つことが可能となる(図4)。また、トラブル発生時に、軽微な事象に関しては、現場のオペレーターが対応し、重大な事象に関しては、クラウドシステムに蓄積された情報を参照して通知をグループオフィスに展開することで、トラブル対応にあたる人員の増強や機器手配を含めた迅速なトラブル復旧に取り組むことが可能となる。



O&M : Operation and Maintenance

図4. クラウドシステム活用の展望

クラウドシステム上に蓄積された各プラントの運用データを基に、各プラントの維持管理レベルを一様に高いレベルに保ったり、通知範囲を広くすることでトラブルシューティングを迅速にしたりするなど、プラントの最適運用を図る。

Operation of wastewater recycling plants using cloud system

4. あとがき

東芝グループは、再生水プラントにおいて、高い水回収率を達成できる処理プロセスを構築し、納入している。水回収率を維持するように運転管理を行うにはノウハウが必要であるが、各処理装置の運用データを分析し、変動する水量や水質に合わせて運転条件を緻密に調整して維持管理を行うことで、プラントの安定稼働を実現している。

また、新たな水回収率向上技術の実用化やクラウドシステムの導入を通じて、再生水プラントの更なる高効率化に向けた取り組みを進めている。

今後も、東芝グループは、高い水回収率を有する再生水プラントを導入することで、持続可能な水資源の確保と環境負荷低減に貢献していく。

文 献

- (1) 国際連合広報センター, “持続可能な開発目標 (SDGs) 報告2016”, SDGs進捗報告, <http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/sdgs_report/>, (参照 2018-10-01).
- (2) 国土交通省 水管理・国土保全局水資源部, “第7章 水資源に関する国際的な取り組み”, 平成30年版 日本の水資源の現況, 国土交通省, 2018, p.103-121, <<http://www.mlit.go.jp/common/001257609.pdf>>, (参照 2018-10-01).
- (3) 田中 宏明, 水利用は「使い捨て」から「繰り返し型」へ, JST news, 2016-10, p.12-13, <https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2016_10/2016_10_p12-13.pdf>, (参照 2018-10-01).
- (4) UN-Water, World Water Development Report 2017, UNESCO ed. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018, 196p, <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002471/247153e.pdf>>, (参照 2018-10-01).
- (5) Tiezheng Tong, T.; Elimelech, M. The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. Environmental Science & Technology, 2016, 50, 13, p.6846-6855.



中村 健介 NAKAMURA Kensuke
東芝インフラシステムズ(株)
水・環境システム事業部
水・環境プロセス技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



柿沼 建至 KAKINUMA Kenji
東芝インフラシステムズ(株)
水・環境システム事業部
水・環境プロセス技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



猪谷 達也 IDANI Tatsuya
東芝インフラシステムズ(株)
水・環境システム事業部
水・環境システム技術第一部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.