

排水を最大限再利用し液体廃棄物を排出しない ZLD システム

Zero Liquid Discharge (ZLD) System to Maximize Wastewater Reuse and Eliminate Liquid Waste

古藤 慶彦

■KOTO Yoshihiko

ハーシュ クシェトリ

■Hersh KSHETRY

シバラム レディ

■T. Sivaram REDDY

産業の発展に伴い水質汚染が進む新興国では、健全な水循環を実現するための法規制が強化されている。水質汚染リスクの低減と、排水の再生及び再利用の視点から液体廃棄物をゼロにする排水処理の無排水 (ZLD: Zero Liquid Discharge) 化が促進されているが、その幅広い導入には工場全体の水バランスを考慮した水環境ソリューションが求められる。ZLDは、排水中の不純物を濃縮分離し再生水を生成する機能と、不純物が濃縮された水を蒸発させて乾燥した塩などを得る機能から成るが、主要設備の逆浸透 (RO) 膜では目詰まりや耐圧限界が、蒸発器では高溶解度成分の濃縮が問題になっている。

これらを解決するためには、前処理として硬度・アルカリ度除去及び脱窒処理を行うことと、超高圧RO膜を採用することが有効である。今回東芝グループは、これらの一部を採用したZLDシステムをインドの自動車工場に納入した。

Accompanying the increase in water pollution in developing countries due to their rapid industrial development, actions have been taken to strengthen laws and restrictions so as to ensure soundness of the water supply. The introduction of wastewater treatment systems aimed at zero liquid discharge (ZLD) has been promoted from the viewpoint of the reduction of water pollution risks and the reuse and recycling of wastewater. In order to achieve the widespread introduction of such ZLD systems, water and environmental solutions are required that take the water balance of a whole factory into consideration. The two major functions of a ZLD system are (1) a water purifying function to extract impurities from wastewater and produce recycled water, and (2) a water evaporation function to obtain dry salts from the highly concentrated brine produced as a byproduct of the water purifying function. However, scaling and fouling on the reverse osmosis (RO) membranes, the existence of a maximum feed pressure limit for RO membranes, and the concentration of high-solubility compounds in evaporators are critical issues in the operation of ZLD systems.

Effective measures to address these issues include pretreatment processes, such as processes to remove hardness and alkaline components and a denitrification process, and RO membranes with an ultrahigh feed pressure limit. The Toshiba Group has now supplied a ZLD system incorporating some of these measures to an automobile factory in India.

1 まえがき

都市への急激な人口と産業の集中が進む新興国では、産業排水による水質汚染が年々深刻化し、排水の水質改善や排出先の水環境保全のニーズが高まっている。東芝は、国内で培った上下水道インフラ整備の経験とノウハウを基に、インド、インドネシア、及び中国に現地法人を展開し、“低減”、“再生”、“再利用”、及び“強化”の視点から自然・社会環境に適応した水環境ソリューションの提供に取り組んでいる。

水質汚染に対するソリューションとして、排水による河川の水質汚染リスクの低減と再生水利用による水資源の有効活用 (再生及び再利用) の視点から二つの方法がある。一つは使用した水をきれいにして自然界に戻すことで排出先の水質改善を図る方法であり、もう一つは水をきれいにして再利用することで水資源の有効活用を図る方法である。この二つの方法を基に、工場内で水を再生し利用するとともに、更に工場から外部に出される排水をゼロにまで低減することで水環境保全を図るコンセプトをZLDと呼ぶ。

最初のZLDシステムは1970年代に米国のコロラド川などで表

層水への塩分濃度の排水規制に対応するために設置された⁽¹⁾。それ以来、ZLD市場は毎年2億ドル以上のペースで成長してきた⁽²⁾。ZLD市場の成長は、水不足、水単価の高騰、及びCSR (企業の社会的責任) 意識の高まりによって促されてきたが、法規制の強化によるところが大きい。

新興国の一つであるインドでは、急速な工業発展に伴う水の枯渇や水源汚染への対策として、中央政府及び州政府の汚染管理局 (PCB: Pollution Control Board) による管理の強化から、ZLDシステムの導入が進んでいる。工場を新設する際、ZLD工場であればPCBからの認可を容易に取得できる。また排水基準を遵守させるために、PCBが既存工場に対して排水処理設備のZLD化の命令を出す場合がある。特に皮革業や蒸留所では排水の不純物濃度が高く、ZLD以外の方法では排水基準を満たすことはできない⁽³⁾。

また、未処理の下水や工業排水が大量にガンジス川へ流れ込んでいる現状を受け、ガンジス川流域管理局 (NGRBA: National Ganga River Basin Authority) により、ガンジス川浄化委員会 (NMCG: National Mission for Clean Ganga) が設置された。これは下水処理場や工場などに排水基準遵守を徹

底させるための組織である。更にいくつかの州政府のPCBでは、特定の産業や地域に対してZLDを義務化している。

このような状況を背景にZLD市場は成長を続けているものの、いくつかの技術課題も存在している。ここではZLDシステム構築にあたって工場全体の水使用設備を調査することの重要性、及びZLDシステムの主要技術課題とその対策として採用したソリューションについて述べる。

2 ZLDシステムの課題とソリューション

2.1 工場全体の水バランス

工場全体の水の流れを図1に示す。河川や地下水などの給水が給水・純水処理設備で処理された後、生産設備、ユーティリティ、及び建屋に送水されて使用される。更に使用後の水は下水・排水処理設備及びZLD設備に送水され処理される。ZLD設備からの再生水は給水・純水処理設備に原水として供給されるか、生産設備やユーティリティなどに直接配水され再利用される。ZLDは、一般的に排水から不純物を分離して再生水を生成する設備と、不純物の濃縮水を蒸発乾燥し固形廃棄物を排出する設備の導入により、液体廃棄物を工場外に出さない状態を指し、工場単位で実施されることが多い。

このように工場内の各水関連設備で水が循環利用され相互に影響するため、ZLD設備だけに着目するのではなく、全ての水使用設備を調査し、各水量を適切に配分するとともに、再生水の有効利用で工場全体の水使用量の低減を図ったうえで、ZLDを実現することが重要である。

しかし通常、新興国での工場建設では、設備はパッケージごとに分けられ、それぞれの担当者が設備計画を作成することが多い。つまり給水・純水処理設備、生産設備、ユーティリティ、建屋、下水・排水処理設備、及びZLD設備に分けられ、担当者は互いに関知しない。例えば、給水・純水処理設備担当者がZLD設備への影響を考慮することなく逆浸透（RO）膜の

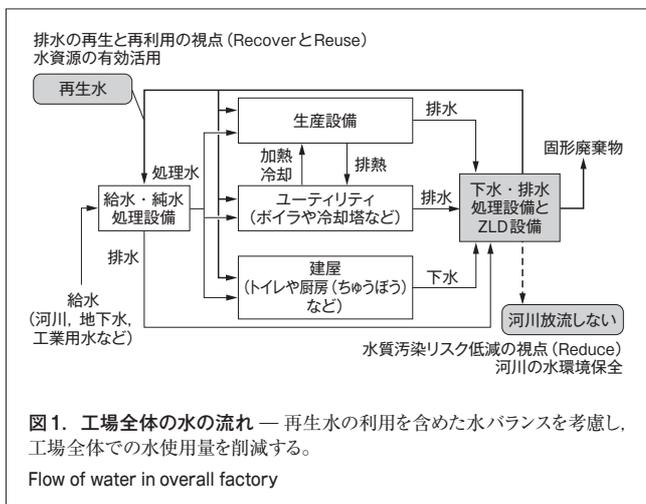


図1. 工場全体の水の流れ — 再生水の利用を含めた水バランスを考慮し、工場全体での水使用量を削減する。
Flow of water in overall factory

代わりにイオン交換による純水処理設備を設置した場合、イオン交換設備からは再生排水が発生し、これが最終的にZLD設備に対して不必要な負荷増大を招くことになる。また、生産設備やユーティリティの検討段階においても、より省水性能の高い機器を選ぶことや、後段での処理が容易な生分解性の高い薬剤を選ぶことなどにより、最終的にZLD設備への負荷を低減するというメリットが得られる。このように水関連設備の全てを一貫して考慮することで、工場全体で見た際に大きくコスト削減できる可能性がある。

2.2 従来のZLDシステムの技術課題

工場全体の水バランスに配慮し、ZLDを実現する水環境ソリューションを構築するうえで、ZLDシステムにはいくつかの技術的な課題がある。

従来のZLDシステムは図2(a)のように、前処理、RO膜処理、及びRO濃縮水の蒸発・乾燥処理から構成される。まず硬度・アルカリ度除去や生物処理などの前処理の後、RO膜を透過させ溶解性の塩を除去する。この溶解性塩濃度はTDS (Total Dissolved Solids) という指標で表示される。RO膜では純度の高い再生水が得られる代わりに高TDSの濃縮水が同時に排出される。濃縮水を再度RO膜に透過させると更に高TDSの濃縮水が排出され、これを繰り返すことで最終的にRO膜では処理できないほど高濃度にまで濃縮される。この最終濃縮水を蒸発器にかけると蒸発した水分を凝縮した再生水が得られ、溶解していた塩は析出して固形廃棄物として排出されるという仕組みである。

システム構築の際に重要なのはZLDの処理工程で初期コスト、運用コストともっとも大きい割合を占める蒸発処理である。従来の複数蒸発室を用いて段階的に水分を除去する蒸発器の一つである四段効用蒸発器の場合、水1m³の蒸発に掛かる単価は約3ドルにもなり、これはRO膜での処理単価に比べて1桁大きい。システム全体として再生水の量を増やし、蒸発させる水の量を削減することが求められる。

蒸発量削減のためには、RO膜での濃縮率を向上させて、蒸発器を効率良く運用する必要があるが、①RO膜におけるスケーリング（不純物堆積）とファウリング（目詰まり）の防止、②RO膜の耐圧限界の改善、及び③蒸発器中での高溶解度成分の濃縮が主な課題である。

2.3 東芝グループのZLDシステム

2.2節で述べた三つの課題を解決することで、ZLD設備の性能を向上させ、全体としてより効率の良い水バランスを実現できる。これらの課題に対して東芝グループが提供するソリューションを表1に、またそのZLDシステムの処理フローの一例を図2(b)に示す。

2.3.1 RO膜におけるスケーリングとファウリングの防止

従来のRO膜では投入処理水に対する再生水の回収率は一般的に75～80%程度である。これ以上回収率を上げて

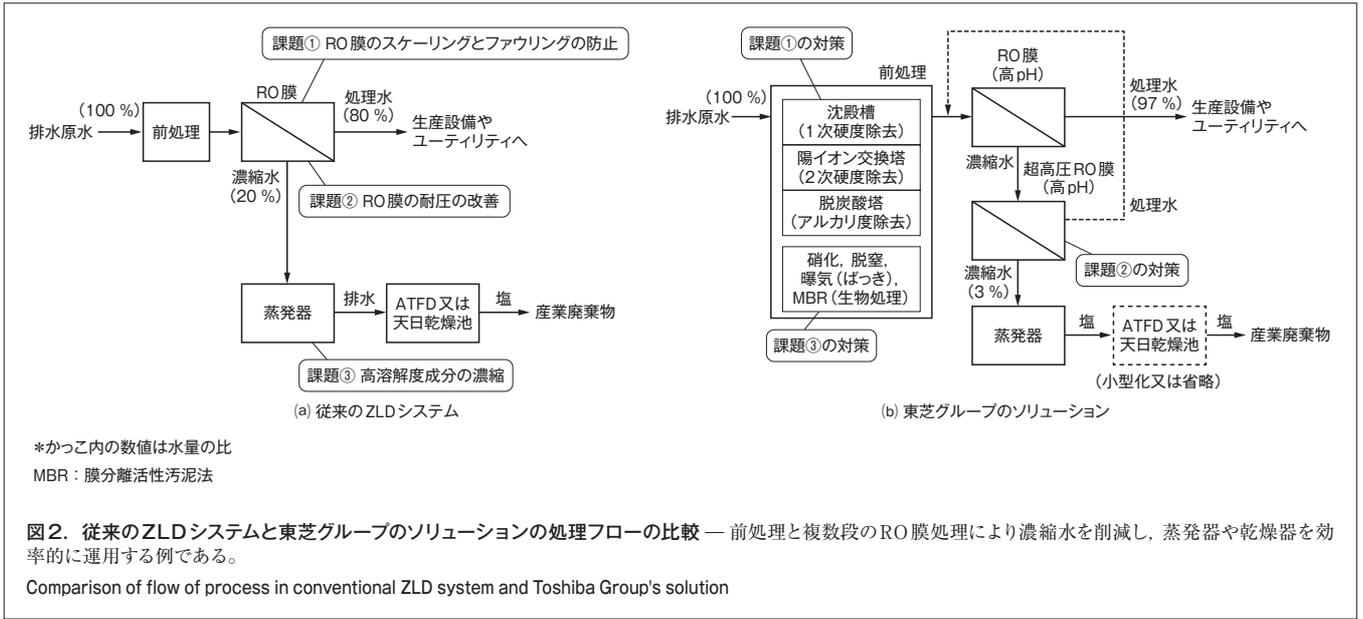


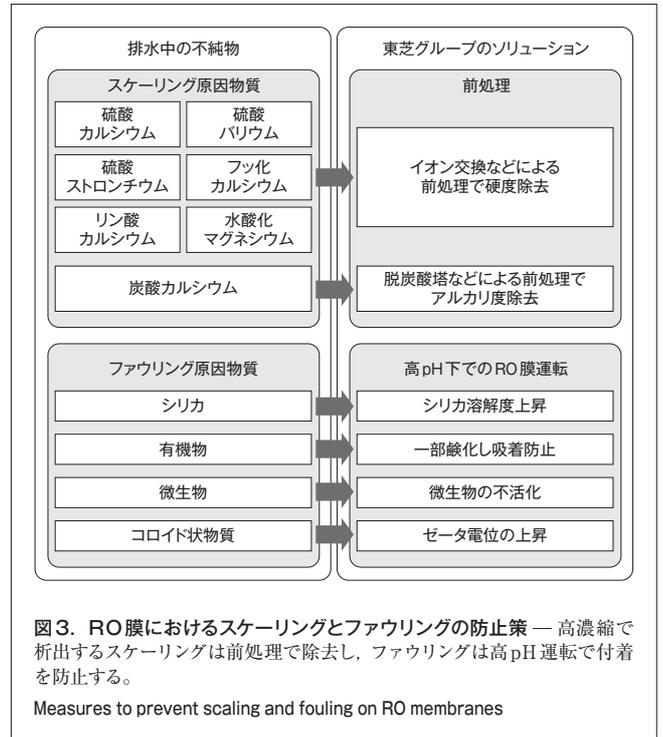
表1. ZLDシステムの技術課題とソリューション
Toshiba Group's solution to technical problems of ZLD systems

技術課題	東芝グループのソリューション
RO膜のスケールリングとファウリングの防止	硬度・アルカリ度除去と高pHでのRO膜運転
RO膜の耐圧限界の改善	超高压RO膜の使用
蒸発器中での高溶解度成分の濃縮	脱窒工程を含む生物処理による前処理で硝酸と有機物を除去

濃縮率を高めていくと水中に溶解している物質の濃度が飽和溶解度をを超えて析出し、スケール物質になってRO膜の透過性を阻害する。更に有機物、微生物、及びコロイド状物質によるファウリングが発生し、薬品洗浄を行っても性能を回復できないことがある。このため供給圧を高めて回収率を上げるのではなく、原因物質を効率的に除去する必要がある。

そこで各原因物質に対して、一連の前処理と特定条件でのRO膜の運転を行うことにより、RO膜のスケールリングとファウリングの要因を排除し、回収率を高めることにした(図3)⁽⁴⁾。

- (1) 硬度除去 消石灰あるいは苛性ソーダを用いた凝集沈殿による1次硬度除去処理を行い、更に陽イオン交換樹脂設備で2次硬度除去を行うことで、後段のRO膜における炭酸カルシウム塩などのスケール発生リスクを下げられる。また陽イオン交換樹脂設備から発生した高硬度の再生廃液は凝集沈殿槽に戻して処理できる。
- (2) アルカリ度除去 炭酸塩スケール発生を防止するために脱炭酸塔や脱炭酸膜によるアルカリ度除去を行う。
- (3) 高pH運転 RO膜を10～11程度の高pH(水素イオン指数)で運転することで、シリカスケール、有機物、微生物、及びコロイド状物質によるファウリングを防止できる。通常のRO膜は中性か弱酸性条件で運転されるが、



高pH下でシリカの溶解度は高くなるため、スケール発生を防止できる。また、高pHでは弱陰イオン性有機酸などの有機物の一部が鹸化(けんか)^(注1)されるので、RO膜表面への吸着を防止できる。バイオフィウリングに関しては、高pH下では微生物細胞は溶解又は不活化するため、膜表面でのバイオフィルムの生成を防止できる。コロイド状物質によるファウリングについては、高pHの環境

(注1) 油脂にアルカリ性物質を加えて、塩とアルコールに加水分解すること。

では一般的にRO膜表面とコロイド状物質との間のゼータ電位^(注2)が高まるので、RO膜表面へ付着しにくくできる。

2.3.2 RO膜の耐圧限界の改善 RO膜にスペーサを挟み筒状に巻いたスパイラル型モジュールを用いた海水淡水化用RO膜の最大運転圧力は8.3 MPaなので、濃縮水の浸透圧は8.0 MPa程度以下に保つ必要があった。圧力を上げて濃縮水の濃度を上げるほど最終的に蒸発させる水分は少なくできるが、仮にスケーリングやファウリングがなかったとしても、最大運転圧力の制限で濃縮水の最大TDSは90,000 mg/L程度である。更に濃縮するためには、耐圧限界の改善が必要だった。

東芝グループのソリューションでは、前処理と高pHでの運転を行うので、RO膜での水回収率を妨げる因子は運転圧力だけになる。この運転圧力制限を超えるために、更に高圧まで耐えられる超高压RO膜を採用した。これにより運転圧力を12 MPa程度まで上げ、蒸発器に送るRO濃縮水の水量を更に下げることができる。このとき、濃縮水中のTDSは110,000 mg/L程度になる。超高压RO膜は一般的なRO膜よりも処理単価は高いが、蒸発器に比べると1桁程度安くできる。

2.3.3 高溶解度成分の濃縮 蒸発器を運用していると溶解度の高い硝酸塩や有機物などの成分が濃縮されるため、一定の周期で濃縮水を排出（ブロー）する必要がある。ZLDを達成するにはこのブロー水も蒸発させる必要があるので、薄膜乾燥器（ATFD：Agitated Thin Film Dryer）を使用するか天日乾燥を行う必要があった。ATFDは蒸発器よりも更に多くのエネルギーを消費する機器であり、天日乾燥は広い土地を必要とする他、天候に左右されるという問題があるため、高濃度成分の効率的な除去が求められていた。

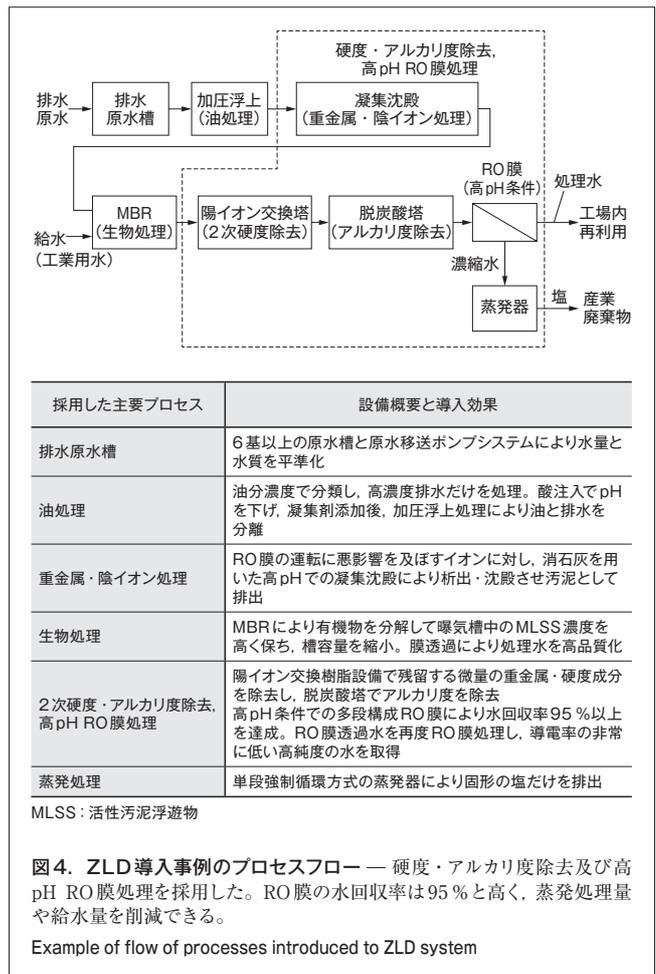
東芝グループのソリューションでは、前処理に脱窒工程を含む生物処理を設けることにより、有機物と窒素濃度をできる限り低減させ、ブロー頻度を減らしてATFDや天日乾燥池を小型化又は省略可能にした。

3 ZLDの自動車工場への導入事例

3.1 背景

インドの自動車工場に当社製のZLDシステムを導入した。この工場の生産設備からの排水は20種類以上に及ぶ。排水中に含まれる主な処理対象物質は、油、高COD（化学的酸素要求量）物質、重金属類（マンガン、亜鉛、ニッケル、及び鉛）、及び陰イオン類（フッ化物とリン酸）である。それぞれの排水で水量、水質とも変動幅が大きく、最大時と最小時では1日当

(注2) 液体中に分散している粒子の多くは帯電しているためにイオンが集まり、粒子周囲に電位分布が形成される。粒子が液体中を移動すると、粒子表面からある厚さの層にある液体は粒子に引き付けられて共に移動する。この層の表面電位がゼータ電位と定義され、粒子の分散安定性を表す指標として用いられる。



りの水量は60倍程度、水質はCODが100倍程度異なるという条件で、給水量と、排水処理及び再生する水量のバランスに配慮したシステム設計が求められた。

3.2 導入システムのポイントと導入結果

3.2.1 全体の水バランス

当初、給水処理と排水処理は個別の二つのシステムで計画されていた。給水処理も排水処理と同様のRO膜を採用する計画だったが、工場全体の水バランスを検討するなかで、排水処理RO膜の設備容量を必要給水量に合わせれば再生水供給用のRO膜だけで対応できることがわかり、台数を削減することを提案した。具体的には、再生水量の不足分は工場外からの給水を処理工程の中段で受け入れて処理し、排水処理RO膜が給水設備としても機能するシステムとした（図4）。

排水の種類が多く水量や水質の変動が大きいので、排水原水槽を設置して水量や水質の平滑化を図り、水のバランスを考慮して給水処理と排水処理の二つの機能を兼ねたZLDシステムを実現した。設備が集約されることで全体の維持管理の負担も軽減できる。

3.2.2 ZLDシステム

ZLDのために、処理対象物質に合わせて、表1で述べたソリューションのうち硬度・アルカリ

度除去及び高pHでのRO膜処理を採用した。

RO膜での水の回収率は従来のZLDの80%程度に比べて95%と非常に高く、給水使用量削減に貢献できる見込みである。また、RO膜から排出される濃縮水の削減により、蒸発処理容量も従来の約1/4に縮小できた。

4 あとがき

インドでは排水先の水質改善と水資源の有効活用のため、排水に対する厳格な法規制が施行され、ZLDシステムの導入が進みつつあるが、その普及にはRO濃縮水の蒸発に掛かるコストを低減する水環境ソリューションが求められている。

東芝グループは、導入先の顧客と共同で工場全体の水使用プロセスや機器の調査を行い、全体での水使用量を削減している。また、ZLDシステムでは個別の水質などの条件に応じた適切な前処理と膜選定を行い、RO膜の水回収率向上及び蒸発器容量の削減をしている。

今後も、健全な水循環の実現に更に貢献する水環境ソリューションの提供を進めていく。

文献

- (1) Global Water Intelligence. "From zero to hero - the rise of ZLD". Global Water Intelligence Homepage. <<http://www.globalwaterintel.com/archive/10/12/market-insight/from-zero-to-hero-the-rise-of-zld.html>>, (accessed 2016-03-14).
- (2) Weimer, L. "THE GLOBAL PUSH FOR ZERO". Water & Wastewater International Homepage. <<http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-30/issue-1/technology-case-studies/the-global-push-for-zero.html>>, (accessed 2016-03-14).
- (3) Bhawan, P. GUIDELINES ON TECHNO - ECONOMIC FEASIBILITY OF IMPLEMENTATION OF ZERO LIQUID DISCHARGE (ZLD) FOR WATER POLLUTING INDUSTRIES. Central Pollution Control Board (India). 2015.
- (4) Debashish, M. Method and Apparatus for High Efficiency Reverse Osmosis Operation. U.S. Patent 5, 925, 255. 1999-07-20.



古藤 慶彦 KOTO Yoshihiko

UEM社 ビジネスディベロップメント部 アソシエイトバイスプレジデント。水処理プラントのプロセスエンジニアリング業務に従事。
UEM India Pvt. Ltd.



ハーシュ クシェトリ Hersh KSHETRY

UEM米国社 デビュティゼネラルマネージャー。水処理プラントのプロセスエンジニアリング業務に従事。
UEM Inc.



シバラム レディ T. Sivaram REDDY

UEM社 ビジネスディベロップメント部 デビュティマネージャー。水処理プラントのプロセスエンジニアリング業務に従事。
UEM India Pvt. Ltd.