

## 学位（博士）審査結果報告書

学位申請者：大学院理工学研究科 博士後期課程 環境ソリューション工学専攻  
T13D721 A. K. M. Ashadullah

学位の種類：博士（工学）

論文題目：Development of a Reverse Osmosis (RO)-Based Water Treatment System for Potable Water Production from Contaminated Source Water

### 1. 論文内容の要旨

本論文は、汚染された原水から安全で衛生的な飲料水を得ることを目的として、逆浸透法（RO）を基盤とした水処理システムを開発・提案するものであり、次の全5章より構成されている。

第1章は序論として、本研究の背景を述べるとともに研究目的を示している。発展途上国では、水道水源である表層水や地下水が汚染されている状況が散見され、水道の普及率も低い。加えて、水道が普及している地域においても、水道管網の不適切な管理などにより配水過程における水道水の汚染が認められる。このような状況を踏まえ、汚染された原水や水道水を水利用直前に処理し、安全で衛生的な飲料水を製造・供給する小規模な水処理システムを構築する必要性を述べている。

第2章は Applicability of reverse osmosis (RO) membrane to potable water production と題し、RO 膜の飲料水製造への適用可能性を検討している。この章の主な目的は、商業的に利用可能な小型 RO 膜エレメントを汚染原水の処理に適用し、各種汚染物質の阻止率を評価するとともに、RO 膜エレメントの機能維持のための膜洗浄方法を確立することである。実排水をベースとして一部汚染物質を添加した汚染原水の処理実験を行った結果、浮遊物質および生物化学的酸素要求量、化学的酸素要求量、大腸菌群数は完全に分離除去することが可能であった。無機イオン類についても概ね 90%以上の阻止率が達成されたが、亜硝酸イオン、硝酸イオン、アンモニアについてはそれぞれ 80%、77%、45%と低い阻止率にとどまった。したがって、これらの無機態窒素については原水の汚染レベルによっては何らかの前処理もしくは後処理が必要であると考えられた。膜の閉塞（ファウリング）によるろ過流速低下は、原水中の有機性凝集粒子や鉄コロイドのような無機粒子が主に引き起こしていた。RO 膜エレメントの濃縮液排出口から洗浄液を流入させる表面洗浄方法を検討した結果、有機性凝集粒子および鉄コロイド、いずれの粒子によるファウリングに対しても、洗浄液に 1000 mg/L の水酸化ナトリウム溶液を用いることが効果的であり、初期流速に対して 79~100%までろ過流速の回復が可能であることを明らかにした。

第3章は Organic aggregates and iron colloids removal through active surface-charge control depth filtration と題し、RO 膜処理におけるファウリング原因物質である有機性凝集粒子や鉄コロイドの除去を目的として、導電性炭素繊維不織布をろ材に用い、ろ材表面電位を能動制御することを特徴とする深層ろ過法を開発した。水中浮遊物質が一般に負に帯電していることから、処理操作時にろ材表面電位を正に制御して静電吸着効果により除去能力を高め、ろ層洗浄時にはろ材表面電位を負に制御して静電反発効果により捕捉粒子のろ材からの脱着を促進することを意図したものである。水の電位窓以下である  $\pm 1.0$  V の電位印加を行った結果、0.1~4.0  $\mu\text{m}$  のカオリン粒子を対象とした実験において正電位制御ろ過において粒子除去率の向上が確認され、除去率 100%を達成することが可能であった。ろ層洗浄においても負電位制御による脱着促進効果が認められたが、負電位制御効果は陰イオン界面活性剤の共存により阻害された。これは陰イオン界面活性剤のろ材表面への吸着に起因していると考えられた。

第4章は Inorganic nitrogen and microorganisms removal through electrolysis と題し、RO 膜による阻止率が低いアンモニアを中心とした無機態窒素および RO 膜のバイオフィウリングの要因となる微生物の前処理技術として、電解技術を導入し、その効果を評価・検討した。本技術では塩化物イオンのアノード酸化による次亜塩素酸の生成と硝酸イオン・亜硝酸イオンのカソード還元によるアンモニアの生成を行わせ、生じたアンモニアと次亜塩素酸を反応させて不連続点塩素処理機構により窒素ガスとして除去するものである。アノードに Ti/Pt 電極、カソードに Cu 電極を用い、隔膜に陽イオン交換膜（Nafion NE-1110, DuPont）を用いた二室型電解フローセルを製作し、処理実験を行った結果、塩化物イオン濃度を 800 mg/L まで高め、5.1 kC/L の通電を行うことにより、アンモニアや亜硝酸イオンの蓄積を抑制しつつ無機態窒素の除去が可能であることが示され、大腸菌群数や一般細菌も 99.5%以上の除去率が達成可能であることを明らかにした。

第5章では Final conclusion として、本研究で得られた成果を総括するとともに、研究結果に基づき、汚染原水から飲料水を製造するための統合水処理システムを提示している。提示システムでは、ろ材表面電位制御深層ろ過で浮遊物質を取り除き、その処理水を貯留タンクに貯留する。貯留タンクには

電解フローセルと RO 膜エレメントへの水循環系が構築されており、電解フローセルにて無機態窒素や微生物の除去が、RO 膜エレメントにて飲料水の製造が行われる。システム全体の水の回収率は 67.7%、造水エネルギーコストは 2.94 USD/m<sup>3</sup>と評価している。

## 2. 論文審査結果の要旨

以上の論文内容に関して審査した結果は以下の通りである。

安全で衛生的な飲料水の確保は、特に発展途上国においては深刻かつ喫緊の課題である。本論文は、衛生的な飲料水確保という課題に対して、水利用の直前に造水する小規模水処理システムを提案し、その実現可能性を明らかにしたものである。提案しているシステムは、RO 膜処理を基盤とし、補助プロセスとして、ろ材表面電位制御深層ろ過や電解プロセスを導入している。RO 技術自体は広く実用に供されており、新しいものではないが、本論文では、実排水をベースにした汚染原水を用いて、RO 膜処理の能力を評価するとともに、ファウリング対策を検討しており、実際的な条件下での運転条件や洗浄条件を提示している点は評価することができる。また、RO 膜処理による分離が不十分な汚染物質や RO 膜のファウリング原因物質を特定した上で、相補的な技術を補助プロセスに選定しており、全体システム構築の手順も合理的なものである。浮遊物質除去を目的とした深層ろ過は近代浄水プロセスにおいて広く用いられている技術であるが、凝集剤等の薬剤の添加をしない場合、微細粒子の除去能力が小さいという特徴がある。本研究では、浮遊粒子とろ材表面の間の相互作用に着目し、ろ材表面電位を能動制御することにより、薬剤添加を行うことなく微細粒子の除去能力向上を図っている。従来、水中ではイオンの吸着による遮蔽効果があることから、静電吸着は吸着の主要メカニズムとして働きにくいと考えられていたが、本研究では、ろ材表面電位を正に制御することにより粒子除去能が向上することを明らかにしており、吸着技術における静電相互作用の積極的な利用への道を拓く、独創的なものであると評価できる。電解プロセスを含めた統合水処理システムについては、個々の実験結果から、水の回収率や造水エネルギーコストを試算している。水道未整備地域において、飲用を目的とした場合は、実現可能なレベルにあり、需要サイドで造水するという新しいコンセプトの実現可能性を提示した有用性の高い研究として評価できる。

以上の審査の結果、本論文は、衛生的な飲料水を確保する上での諸課題に対して、需要サイドで造水するというコンセプトを提示し、その実現可能性の検証に成功していることから、新規性と独自性が認められ、かつ、課題解決型研究として、学術的、社会的にも評価できることから、博士（工学）の学位を授与されるに相応しいものと認められる。なお、本論文に記載された研究成果の一部は、2 編の査読付き学術論文、3 編の国際会議報告として公表されている。

## 3. 口述試験結果の要旨

2016 年 7 月 20 日、審査員および口述試験委員出席のもと、学位申請者に対して論文の内容およびこれに関連する事項について試問を行い、合格と判定した。

## 4. 学位授与の可否

以上の結果、学位申請者 A.K.M. Ashadullah は、博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。

2016 年 7 月 20 日

審査員（主査）	理工学部教授	岸本直之
審査員（副査）	理工学部教授	市川陽一
審査員（副査）	理工学部教授	Lei, Thomas Ting
口述試験委員	理工学部准教授	越川博元
口述試験委員	理工学部准教授	奥田哲士