

審査の結果の要旨

氏名 薛文超 (Xue Wencho)

本論文は「Characteristics of seawater driven forward osmosis process for concentrating nutrients in MBR-treated municipal wastewater (MBR 下水処理水中栄養塩の濃縮における海水駆動正浸透プロセスの特性)」と題し、メンブレンバイオリアクター (MBR) からの都市下水処理水を対象として、海水を駆動力とした正浸透 (FO) によるエネルギー消費の低い新しい栄養塩濃縮法を提案し、その有用性と濃縮特性を明らかにした独創的研究である。

第1章は「序論」である。研究の背景、目的と位置づけ、及び論文構成等を述べている。

第2章は「文献レビュー」である。下水処理水中の栄養塩除去技術等についてまとめた後、FOの原理、膜素材、既往のFOモデル等、FOに関する既往の知見をまとめている。

第3章は「方法」である。以下の各章に詳細な実験方法の記述があるが、ここでは本研究全体を通して共通する実験材料や分析方法についてまとめている。

第4章は「栄養塩濃縮用海水駆動FO膜の選定」である。本章で用いた実験装置や材料、方法を記述したのち、現在入手可能なFO膜として酢酸セルローズ系で2種類、複合膜系で1種類を用いて、人工栄養塩溶液を作成しバッチ実験で濃縮試験を行った結果をまとめている。ポリアミド系の複合膜は負荷電が大きすぎ、かつ海水というイオン強度の高い環境を水の引き抜きに利用しているため、引き抜き側の陽イオンの影響が顕著に生じアンモニアの濃縮には向かないことなどを明らかにした。結論として、供試した膜の中では、支持層がスクリーンメッシュタイプの酢酸セルローズ膜の活性層を供給側に配置することにより、必要な水フラックスを維持しつつリン酸の保持率平均90%、アンモニア保持率平均92%を達成できることを示した。

第5章は「正浸透の性能を支配する諸因子」である。4章で選定したFO膜を用い、水フラックス及びに栄養塩保持に対するクロスフロー流速やpH、模擬海水濃度(単一組成、複合組成)の影響等を調べ、栄養塩保持性能の観点からは、クロスフロー流速は $6.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上が望ましく、水フラックスは $7 \text{ L} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ が必要であることなどを明らかにした。またアンモニアの保持に関しては、pH中性付近が推奨される。

第6章は「バッチ実験によるMBR下水処理中の栄養塩濃縮に関するFO性能」である。本章で用いた実験装置や材料、方法を記述したのち、MBRを用いた実下水処理水中の栄養塩濃縮をバッチ試験で調べたものである。実用FO膜モジュールではモジュール内で、水回収率が変化するため、バッチ試験では水回収率を変化させて膜モジュール内での挙動を解析するための基礎データを取得した。取得した基礎データと数理モデルを用い本プロセスの実用のための開発数値目標である全体の水回収率80%における状況での栄養塩濃縮率として、アンモニア4.2倍、リン酸4.9倍等が得られることを示した。FOプロセスの技術的適用可能性を明らかにした重要な成果である。

第7章は「MBR下水処理中の栄養塩濃縮におけるFO膜ファウリング及び長期的安定性」である。前章までに得られた基礎的知見を基に、実際のMBR下水処理水を用い、長期運転を行った結果をまとめている。55日の連続濃縮試験でも水フラックスは5%程度しか低下せず、MBR下水処理水のFO膜に対するファウリングの影響は顕著でないことを実証した。またファウリング物質は精密分析の結果、生物構成体となる有機物質であることがわかった。さらに、長期的にはFO膜面上には硝化菌主体の生物膜が形成されるため、その抑制策としては残留塩素が検出されないレベルでの塩素消毒前処理が有効であることを明らかにした。これらの結果は、実用化へ向けての大きな一歩を与える重要な成果である。

第8章は「FOの実用設計のための最適化モデリングとプロセスシミュレーション」である。平膜型と中空糸型、それぞれで浸漬型膜モジュールを試設計し数理モデルを用いたシミュレーションを行った。平膜、中空糸膜（海水側の良好な流動状態を保つ工夫を前提としている）、ともに、水回収率80%という設計条件を満足しつつ、モジュールとしてのアンモニア保持率85%以上を達成できることを示し、実用モジュール開発への道を拓いた。

第9章は「結論と今後の展望」である。

以上要するに、本論文は、都市下水を対象としたMBRの後段処理として、低濃度栄養塩の省エネルギー濃縮法を開発し、その運転条件や設計条件を得るための基礎的かつ学術的情報を与える独創性の高い研究であると評価できる。また、本研究で得られた知見は、都市環境工学の学術の発展に大きく貢献するものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。