

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 Thanuttamavong Monthon (タヌッタマヴォン モントン)

本論文は、「Ultra Low Pressure Nanofiltration of River Water for Drinking Water Treatment (超低圧ナノ濾過を用いた河川水の浄水処理)」と題し、既存の浄水ナノ濾過技術における運転圧力よりさらに圧力を低くした運転条件下での、実際の河川水のナノ濾過特性を解明し、自然地形を利用した位置エネルギー差による運転を可能とする全く新しいナノ濾過浄水システム構築の可能性を示した研究である。

第1章は「緒論」である。研究の背景と目的を述べた後、本論文の構成を示している。

第2章は「既往の研究」である。ナノ濾過における物質移動現象や既往の理論・モデル等についてまとめている。

第3章は「理論的展開」で、既往の理論やモデルを出発点として、対象溶質の有効サイズに着目し溶質の有効半径 r_s^* 及びスリット状の膜孔形態という新たな概念を用いた超低圧ナノ濾過の数理モデル化を行っている。

第4章は「実験方法」である。本研究では、多摩川下流において、ベンチスケールのナノ濾過装置を4ヶ月間、0.1 MPaの超低圧下で連続運転した。従ってここでは多摩川流域の概要から、実験装置の仕様、実験条件及び分析項目・方法等がまとめられている。

第5章「膜の特性と多摩川原水水質」では、濾過水のフラックスや、多摩川河川水中の有機及び無機汚染物質の阻止率などといった運転特性の実験結果を整理し、長期運転期間における多摩川原水中の溶存有機物質及び無機塩類の平均濃度、有機物の分子量分画、励起蛍光マトリクス等の分析結果をまとめ考察している。また、多摩川原水に関して、THMFP（トリハロメタン生成能）とUVA254（254 nmにおける紫外線吸光度）との間の線形関係を明らかにしている。さらに使用前後の膜表面ゼータポテンシャル値の変化や原子間力顕微鏡を用いて表面の特徴の変化等をとらえ、ファウリングの影響を評価している。これより以下の結論を得ている。超低圧、長期間運転のナノ濾過システムにおける膜ファウリングは、フラックス、膜表面の粗度、ゼータポテンシャルのような膜特性には影響を及ぼしたが、汚染物質の阻止特性には影響がなかった。使用後の膜表面の観測により、膜表面が吸着溶存物質と付着粒子により覆われていることが観測された。一方、使用後の各膜表面のゼータポテンシャルは、ファウリング物質に起因するほぼ同一の値を示した。しかし、ナノ濾過による荷電性溶質の阻止メカニズムは、このルースなファウリング層の電荷に関わらず、溶質と膜との境界面において機能すると推論された。

第6章「ナノ濾過ベンチスケール実験装置による長期運転性能」では、超低圧（0.15 MPa）ナノ濾過の長期運転（4ヶ月間）において、濾過水フラックスは、どの膜を用いた場合について

も、初期段階で急速に減少したのち安定化することが実証された。また精密濾過膜による前処理を行わない場合は、前処理を行う場合に比して急速にフラックスの減少が起ることを確認した。しかし、多摩川原水中の有機及び無機汚染物質の阻止特性は、膜洗浄なしの4ヶ月間の長期運転を通じてほとんど変化が見られなかった。

第7章「超低压ナノ濾過による希薄系混合溶質における阻止モデル」では、第3章で提示した新しいモデル(SHEモデル)と既存モデルによる算出値との比較を行った。その結果、SHEモデルにより、さまざまなナノ濾過膜、特にタイトな膜を用いた多摩川原水の処理における汚染物質の阻止特性のより精度の高い予測が可能であった。溶質の有効半径 r_p^* 及びスリット状の膜孔形態という新たな概念を用いた SHE モデルの利用により、膜孔内を移動する溶質の Steric hindrance 効果を用いた計算を改良することができた。さらに、各ナノ濾過膜のスリット状ポアの幅を、修正 steric hindrance-pore モデルを用いて推算した。最終的に、ほとんどのナノ濾過膜、中でも特にタイトなナノ濾過膜について、SHEモデル中の steric hindrance factor K_{sh} と、ポア幅と有効溶質半径との比 (r_p^*/r_s^*) との間に良好な線形関係が得られた。しかし、一部の陽イオンについては、その阻止特性を SHE モデルによっても適切に予測することができなかった。浄水処理に関わる河川水中の汚染物質の多くは負に帯電している。従って、SHEモデルは、超低压ナノ濾過における河川水中の汚染物質の処理特性の予測を行うツールとして有効であることが示された。

第8章「重力ろ過型ナノ濾過による小規模浄水プラントの提案」では、透過水量や汚染物質阻止率といった観点から優れた長期運転実績を示したナノ濾過膜を用いて、多摩川河川水の超低压ナノ濾過処理プラントとして、重力による位置エネルギー差を利用したナノ濾過という新しいコンセプトのプラントを提示し、このような全く新しいナノ濾過浄水システム構築の可能性を示した。

以上要するに、既存の浄水ナノ濾過技術における運転圧力よりさらに圧力を低くした運転条件下での、実際の河川水のナノ濾過特性を解明し、自然地形を利用した位置エネルギー差による運転を可能とする全く新しいナノ濾過浄水システム構築の可能性を示した独創的研究であると高く評価でき、本論文により得られた知見は、都市環境工学の学術の進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。