

京都大学	博士（工学）	氏名	NGUYEN ANH VU
論文題目	TEMPERATURE EFFECT ON FILTRATION PERFORMANCE, MEMBRANE FOULING, AND OSMOTIC BACKWASHING IN A FORWARD OSMOSIS MEMBRANE SYSTEM FOR SEWAGE CONCENTRATION (下水濃縮を目的とした正浸透膜システムにおけるろ過性能、膜ファウリングおよび浸透逆洗に及ぼす温度の影響)		
（論文内容の要旨） 下水には再利用可能な水、有機物、栄養塩が含まれており、エネルギー消費が大きい従来の活性汚泥法に代わる省エネルギー・資源回収型の下水処理システムが希求されている。圧力駆動型のプロセスとは異なり、浸透圧を駆動力とする正浸透（FO）法は、より少ないエネルギー投入で下水を濃縮でき、後段の嫌気性消化（AD）で濃縮下水からのエネルギー回収が期待できる。しかし、FO の性能は本質的に温度に依存し、水の移動、溶質の拡散、ファウリングの進行、そして微生物活性のすべてに水温が影響するにもかかわらず、これらの統合的な影響は十分に解明されていない現状にある。本論文は、下水濃縮を目的とした FO 法におけるろ過性能、膜ファウリングおよび浸透逆洗に及ぼす温度の影響に関する新規かつ体系的な学術的成果を提示したものであり、5 章から構成される。 第 1 章では研究背景と目的を述べている。FO 法における温度影響に関する包括的文獻レビューに基づき、温度上昇が水透過流束、水回収率、塩の逆拡散流束（RSF）、膜阻止率、ファウリング挙動などに及ぼす影響を整理した上で、既往研究において報告されている知見には一貫性がなく、特に温度、溶質の挙動、およびファウリングメカニズムの相互作用については不明な点が残っていることを指摘している。また、多くの研究はモデル溶液や単一の性能指標に依拠しており、実際の都市下水を用いた検討や、後段の資源回収までを見据えた研究は限られる現状にある。これらの課題を踏まえ、本論文では、運転温度および洗浄温度が、FO 法による下水濃縮に及ぼす影響の体系的評価を行うとともに、水透過流束、RSF、溶質阻止率、および濃縮効率に対する温度影響の定量化、ならびに安定的かつ持続可能な性能を得るための適切な運転温度範囲の特定を目的としている。 第 2 章では、駆動溶液（DS）として 1.2 M の NaCl を使用し、FO 法による短期間（24 時間）の下水濃縮に対する温度影響（10～30℃）を調査した。温度を 10℃ から 30℃ に上昇させることで、主に物質移動の改善と実効的な浸透圧駆動力の強化により、平均水透過流束が 60%以上向上した。RSF は温度とともに増加したが、その相対的な増加は水透過流束の増加よりも小さく、供給液として用いた下水中の塩類濃度の上昇を緩和した。すべての温度でファウリングによる水透過流束の低下が生じたが、高温ではその低下速度が抑制された。有機物とリンの阻止率は高かった一方で、窒素の阻止率は、温度の上昇に伴い著しく低下した。この短期間の実験において、溶質の濃縮効率は、温度誘発的な水回収率の増加に強く影響された。温度が高くなるほど、供給液の体積減少が大きくなり、溶質の濃縮効率の見かけ上の上昇につながった。しかし、観察された濃縮効率は、体積減少のみに基づいた理論的予測よりも低いままであり、これは膜への蓄積、溶質の透過、および生物分解によるものであった。非嫌気条件下における酸素の存在は有機物の保持にさらなる影響を与え、高温条件では有機物の濃縮がより抑制された。			

第3章では、ファウリングしたF0膜の浸透逆洗に対する温度影響を10、25、40℃の条件で調査した。水流洗浄では初期水透過流束の約80%まで流束が回復し、温度依存性は限定的であったのに対して、浸透逆洗では強い温度依存性を示し、浸透逆洗流束の増大とファウラントの剥離改善により、40℃で最大90%の水透過流束の回復を達成した。有機物と窒素は、主に浸透逆洗によって、特に高温条件で除去された。一方、リンは逆洗流束とクロスフロー剪断力の両方によって部分的に除去された。しかし、ファウリングと洗浄のサイクルを繰り返した結果、逆洗時の温度上昇は初期の回復率を向上させる一方で、その後のサイクルにおいてより強固なファウリングを促進することも示され、短期的な水透過流束回復と長期的なファウリングの持続性との間に、温度に依存するトレードオフの関係があることが明らかになった。

第4章では、第1章で特定されたF0-AD統合の課題、および第2章で述べた短期実験の限界に対処するため、嫌気性条件下での長期F0運転を行った。このシステムでは、下水量を20分の1にまで濃縮するとともに、得られた濃縮下水のADへの適合性を評価した。温度を10℃から30℃に上昇させると、水透過流束が約60%向上し、目標とする濃縮倍率に達するまでの時間が110時間から69時間に短縮された。長期運転において、RSFは高温条件で減少し、その結果、30℃では10℃と比較して濃縮下水における塩分蓄積が約40%低く抑制された。ファウリング物質を分析した結果、すべての温度で有機物と無機物の混合層が確認されたが、高温になるほど無機リン酸塩の沈着が促進され、有機物および窒素含有量はわずかに減少した。最終的な濃縮倍率はすべての温度で同一であったため、第2章とは異なり、溶質の濃縮効率は体積減少のメカニズムよりも、主に溶質の挙動に支配された。20倍の体積減少にもかかわらず、溶質濃度は最大でも12倍の上昇にとどまり、温度の影響を受けた顕著な溶質損失が確認された。高温条件下では、DSへの窒素の損失が促進される一方で、ファウリング層内へのリンの蓄積も促進された。バッチ式メタン発酵試験では、30℃で生成された濃縮液の方が高いメタン収率を示した。これは主にRSFの低下に伴う濃縮下水中の塩分抑制によるものであるが、メタン生成は依然として塩分と基質の利用可能性によって制限される結果となった。

第5章は、結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

2050 年までに下水道分野におけるカーボンニュートラルを実現するためには、従来の活性汚泥法に代わる、エネルギー効率が高く、かつエネルギー回収が可能な新規の下水処理プロセスの確立が強く求められている。圧力駆動型のプロセスとは異なり、正浸透 (FO) 法は浸透圧を利用した省エネルギーな分離プロセスであり、濃縮された下水を嫌気性消化に付すことでエネルギー回収が期待される。その一方で、FO 法は温度の影響を非常に受けやすいため、実際の排水処理においては、季節的な温度変動が性能に大きな影響を及ぼすことが予想される。本論文では、下水濃縮を目的とした FO 法における温度影響を体系的な実験により明らかにした学術的成果を提示している。得られた主要な成果は以下の通りである。

1) FO 法による 24 時間の短期下水濃縮実験を行った結果、温度を 10℃ から 30℃ に上昇させることにより、平均水透過流束が 60% 以上向上した。有機物とリンの阻止率は高かった一方で、窒素の阻止率は、温度の上昇に伴い著しく低下した。観察された溶質の濃縮効率は、下水の体積減少のみに基づく予測よりも低く、これは膜への蓄積、溶質の透過、および生物分解によるものであった。

2) ファウリングした FO 膜の浸透逆洗に対する温度影響を 10、25、40℃ の条件で調査した。浸透逆洗では強い温度依存性を示し、浸透逆洗流束の増大とファウラントの剥離改善により、40℃ で最大 90% の水透過流束の回復を達成した。有機物と窒素は、主に浸透逆洗によって、特に高温条件で除去された。一方、リンは逆洗流束とクロスフロー剪断力の両方によって部分的に除去された。ファウリングと洗浄のサイクルを繰り返した結果、逆洗時の温度上昇は初期の水透過流束回復率を向上させる一方で、その後のサイクルにおいてより強固なファウリングを促進することも示された。

3) 嫌気性条件下での長期 FO 実験を行い、得られた濃縮下水のメタン発酵への適合性を評価した。塩の逆拡散流束 (RSF) は高温条件で減少し、その結果、30℃ では 10℃ と比較して濃縮下水における塩分蓄積が約 40% 低く抑制された。ファウリング物質に関しては、高温になるほど無機リン酸塩の沈着が促進され、有機物と窒素の含有量はわずかに減少した。下水量を 20 分の 1 まで濃縮したにもかかわらず、溶質濃度の上昇は最大でも 12 倍にとどまった。高温条件下では、駆動溶液 (DS) への窒素の損失が促進される一方で、ファウリング層内へのリンの蓄積も促進された。バッチ式のメタン発酵試験では、30℃ での濃縮液の方が高いメタン収率を示した。これは主に RSF の低下に伴う濃縮下水中の塩分抑制によるものであるが、メタン生成は依然として塩分と基質の利用可能性によって制限される結果となった。

以上、本論文は、正浸透法による下水濃縮技術における温度影響を体系的に評価しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 8 年 2 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。