

学 位 論 文 題 名

逆浸透膜による海水淡水化の
ホウ素除去率向上に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、逆浸透膜による海水淡水化において、その透過水は高性能の分離膜を用いるために非常に純度が高いと考えられていた。しかし、水道水質基準値 85 項目の全てを測定した結果、監視項目としてのホウ素のみが特異的に除去率が低いことがわかった。逆浸透膜の透過水はホウ素の水質基準値より数倍高くて基準値を満足することができなかった。

この現象に関する既往の研究は全くなく、新しい知見であった。著者は逆浸透膜によるホウ素の除去に関しての研究を行い、ホウ素除去の運転条件について実験を行った。これらをもとに逆浸透膜透過理論に基づいたシュミレーションを行って実証実験との整合性の検討も行った。

本論文の主な成果を要約すると次の通りである。

（１）「逆浸透膜による海水淡水化装置の実証プラント」

逆浸透膜海水淡水化実証装置により得られた透過水を飲料水として利用する場合には、水道水質基準値の観点からトリハロメタン類、ホウ素、臭素と陸水とのブレンドによる消毒副生成物が問題となる。本論文では実用規模の実証プラント（造水量 80 トン／日）を用いた実験を行った。その結果、本研究で用いた芳香族架橋ポリアミド膜ではトリハロメタン類、臭素の除去率に関しては全く問題ないことが分った。しかし、ホウ素に関しては他の無機イオンなどと比べて特異的に除去率が低いことが明らかとなった。

一方、透過水中に残存する臭素と陸水を処理して供給される水道水とのブレンドにより生成する消毒副生成物の増加量は微量で問題ないことが明らかになった。

（２）「ホウ素物性値と水質管理基準値及びホウ素の除去方法について」

ホウ素の物性値と健康障害について調べた。ホウ素の物理的な特徴としては、イオン化エネルギーが高くて水中では錯体を形成しにくくその分離は非常に難しいことが予想された。また水道水源及び水道中のホウ素について、一般的な処理技術である凝集沈殿、オゾン、イオン交換樹脂、市販の浄水器などでは全く除去できないかまたは非常に除去困難で実用的なレベルではなかった。

（３）「逆浸透膜による海水淡水化におけるホウ素低減化システムの研究」

逆浸透膜装置を用いたホウ素の分離実験を、操作圧力、膜の種類やpHなどを変化させて基礎実験を行った。その結果、ホウ素含有水のpHを変化させた場合にホウ素の除去性は、pHの上昇とともに比例的に向上することが明らかになった。この原因としてはpHを高くすることにより分子状態のホウ素からイオン状態のホウ素の存在比が増加する。また架橋芳香族ポリアミド膜は表面荷電は負であり、pHを高くすることによりさらに膜表面の負荷電が高くなるという相乗効果によりホウ素の除去性が向上することが明らかとなった。

これらの結果を踏まえて実証プラントにて海水淡水化の透過水のpHを上げて実験を行った。実験としては高圧逆浸透膜による１段目の透過水をさらに超低圧逆浸透膜にて処理する方法と、またこの透過水をさらに超低圧逆浸透膜にかける２段処理についてそれぞれ実験を行った。なおこの２段処理する目的は１段目の膜処理において淡水の回収率を非常に高くすると硫酸カルシウムなどのスケール成分が発生し処理が不可能となるためである。

これらの処理システムにおいてホウ素濃度をWHO基準値の0.5mg/lを満足する運転操作条件を見出すことができた。

（４）「ホウ素除去システムのシュミレーション解析研究」

逆浸透膜理論による解析手法により１段目、２段目の膜における物質移動係数、膜輸送係数を実用上の８インチ膜モジュールにより実験的に求めた。この結果を基に１段処理システムや２段処理システムにおけるホウ素除去についてのシュミレーションモデルを確立した。このモデルを用いた解析結果と実験結果とは非常に良く整合していた。この結果は、このシュミレーションモデルはプラント設計に非常に有効であることを示している。

（５）「ホウ素低減化逆浸透膜システムにおけるコストの試算」

ホウ素低減化システムを既設の海水淡水化プラントに設置する場合と新設する場合について、処理水のホウ素濃度を目標水質として与えた条件下でのイニシャルコストとランニングコストを求めた。これらの結果は、特に既存の海水淡水化施設により水道水を供給している水道システムの施設改良計画を合理的に設定することに資するものである。

以上の事項により逆浸透膜による海水淡水化のホウ素の除去特性とその除去を可能とする設計手法を明らかにしたものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	眞柄泰基
副査	教授	高桑哲男
副査	教授	渡辺義公
副査	教授	清水達雄
副査	助教授	亀井翼

学位論文題名

逆浸透膜による海水淡水化の ホウ素除去率向上に関する研究

淡水資源の制約条件が厳しい島嶼地域の水道施設では逆浸透膜による海水淡水化が行われている。また、中東各国でも海水淡水化が行われており、逆浸透膜による施設の占める割合が高くなってきている。逆浸透膜による海水淡水化によって得られる透過水は、高性能の分離膜を用いるために非常に純度が高いと考えられていた。しかし、その評価は塩分濃度等総括的な指標により行われており、健康影響リスクが明らかになっている有害物質についての評価は行われていない。

本論文はこのようなことから、健康影響リスクを基に定められている水道水質基準値 85 項目全てについて測定した結果、ホウ素のみが特異的に除去率が低く、基準値を超過していることが明らかとなった。この現象に関する既往の研究は全くなく新しい知見であった。そこで、逆浸透膜によるホウ素の除去特性、ホウ素除去効率向上を明らかにするため、実験プラントによる実験をおよび逆浸透膜透過理論に基づくシュミレーションを行った。その結果を基に WHO 飲料水ガイドラインを達成することができる逆浸透膜による海水淡水化施設を提案している。

本論文は 7 章から構成されており、その内容は以下のように要約される。

第 1 章では、本論文の背景、目的および構成について記している。

第 2 章では海水淡水化技術及びホウ素に関する文献学的考察を行い、海水淡水化の現状と水道施設として利用する際の問題点およびホウ素の健康影響リスクを論じている。すなわち逆浸透による海水淡水化施設が今後とも整備される傾向があること。ホウ素の慢性毒性を基に WHO 飲料水ガイドラインや水道法に定める水質基準等が定められている。ホウ素は温泉水の影響を受けている水道原水を利用している所等では高く、また、海水中でも高いこと等をまとめている。

第 3 章では海水淡水化施設の水質特性を明らかにしている。すなわち実用規模の実証プラント（造水量 80m³/日）を用いた実験を行い、本研究で用いた芳香族架橋ポリアミド膜では塩分濃度、トリハロメタン類、臭素の除去率に関しては水質基準等を満たす透過水を得られることを確認

したが、ホウ素に関しては他の無機イオンなどと比べて特異的に除去率が低い。そのため水質基準等を満たすことが出来ないことを明らかにした。この知見は世界で初めてのものである。さらに、わが国の淡水化施設の実態調査をおこない、実験プラントと同様な状態であることを確認した。

第4章では逆浸透膜海水淡水化装置におけるホウ素低減化システムについて実験を行った結果を論じている。すなわち、逆浸透膜装置の操作圧力、pHなどを変化させて基礎実験を行った。その結果、操作圧力とpHによりホウ素の除去が影響を受けることを明らかにした。特に、pHの影響が顕著であった。この原因としてはpHを高くすることにより分子状態のホウ素からイオン状態のホウ素の存在比が増加する。また膜表面荷電が負である架橋芳香族ポリアミド膜は、pHを高くすることによりさらに膜表面の負荷電が高くなる相乗効果によりホウ素の除去性が向上することを明らかにした。

これらの結果を踏まえて高圧逆浸透膜による1段目の透過水をさらに超低压逆浸透膜にて処理する方法と、また、硫酸カルシウムのスケール発生を抑制できる2段処理についてそれぞれ実験を行った。その結果、何れの方式でもホウ素濃度をWHO基準値の0.5ppmを満足する運転操作条件を見出すことができる実用可能な方式であることを明らかにした。

第5章ではホウ素低減化システムのシュミレーション解析について論じている。すなわち、膜透過理論により逆浸透膜施設の操作条件を任意に設定したときの溶質の透過流束および阻止率を求めることが出来る。そこで、そのシュミレーション解析に必要な1段目、2段目の膜における物質移動係数、膜輸送係数を実用8インチ膜モジュールで実験的に求めた。この結果を基に1段処理システムや2段処理システムにおけるホウ素除去についてのシュミレーションモデルを確立した。このモデルを用いた解析結果と第4章での実験結果と良く整合していたことから、このシュミレーションモデルはプラント設計に有効であるとしている。

第6章では、ホウ素低減化逆浸透膜システムにおけるコストの試算を行っている。すなわち、ホウ素低減化システムを既設の海水淡水化プラントに設置する場合と新設する場合について、処理水のホウ素濃度を目標水質として与えた条件下でのイニシャルコストとランニングコストを求めた。その結果、水質基準であるホウ素濃度1ppmあるいはWHO飲料水ガイドライン0.5ppmを満たすためのシステムを付加することによるコストの上昇は、既設コストの20%程度であり、工学的に可能であることを明らかにした。

第7章は本研究の結論である。本論文は逆浸透膜により海水淡水化水はホウ素濃度が特異的に高いという世界で最初の発見をもとに、その原因を究明し、その除去に関係する因子を考慮したホウ素も低減できる逆浸透膜システムを提言している。さらに、透過水のホウ素濃度をも考慮したプラント設計に資するシュミレーションモデルを確立している。これらの成果を基にホウ素低減化システムのコストを試算し、工学的に適応可能であると結論づけている。

これを要するに、著者は逆浸透膜による海水淡水化におけるホウ素の除去特性とその除去を可能とするシステムを開発し、その設計手法を提言することにより、海水淡水化技術上新しい知見を得たものであり、また、今後の海水淡水化技術の進歩に資するものであり、都市環境工学とくに環境衛生工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。