

中空糸型正浸透膜モジュールにおける 内部流れと浸透性能に関する研究

長崎大学大学院工学研究科
寺嶋 真伍

現在、世界的な地球温暖化が深刻化するなか、再生可能エネルギーを利用した発電が大きく期待されている。その中でも、1975年にLoeb氏らにより提案された、浸透圧を利用する「浸透圧発電」が天候に影響を受けることもなく、設置面積も狭小で、騒音も無いといった多くの特長を有しているため注目を集めている。浸透圧発電とは、浸透膜と海水流路、淡水流路を一体とした膜モジュールへ、海水と淡水を供給し、浸透膜を介して浸透を生じさせることで、海水側を増水させ、タービンを回すことで電気エネルギーを得る手法である。ただし発電コストがやや高く、海水や淡水を送水する電力の割に、浸透流量が少ないといった問題がある。このため、膜モジュールの浸透性能向上が求められる。

これまでの研究では、浸透流量を向上させるため、二分割型浸透装置による発電模擬実験、更には濃度分極と浸透圧発電量に関する研究が行われている。一方で浸透流量の予測モデル構築がなされ、運転条件と実現可能な発電量の想定が可能となっている。

ここで、膜モジュールにおける「内部流れ」が浸透性能に及ぼす影響については、これまでの研究で考慮されていないことに着目した。浸透性能とは、供給した海水流量と淡水流量に対して、どれ程多くの流量を得ることができるかという効率を指す。そこで本研究では、正浸透にとって最適な流動状況をつくりだす正浸透膜モジュールを、流動特性と浸透性能の面から提案することを最も大きな研究目的として設定した。

正浸透において、塩水への淡水の浸透は、膜モジュール各所における塩水の塩分濃度と密接に関係し、塩水の流動状況で大きく左右される。したがって、膜モジュール内部では、均一な流れで全体が一様な浸透性能を発揮しているとは限らず、場所によって流れやすい所や、浸透が大きい所など、ばらつきが存在する。本研究では、このような流れのばらつき、すなわち偏流を把握する手段として、数値シミュレーションを用いた膜モジュール内部の可視化を採用した。数値シミュレーションを用いる際、中空糸エレメントを適切にモデル化することが重要となる。すなわち、中空糸エレメントの抵抗特性を把握するという事に相当する。以降、各章の内容を要約する。

第5章では、実際の膜モジュールにおける抵抗特性を把握するため、小型の中空糸集束帯を用いた抵抗計測実験、及び理論計算を行い、中空糸膜エレメントにおける半径方向抵抗と軸方向抵抗を把握した。その結果、以下の点が明らかとなった。

1. 中空糸膜に対して垂直方向、および平行方向の両方向において粘性損失が支配的である。
2. 中空糸膜に沿って塩水が流れる場合に比べて、中空糸膜に垂直方向の運動量損失は大きくなるため、中空糸膜エレメントの領域は指向性の抵抗である。

第6章では、濃度分極や偏流の影響を受けない状態を再現するミニモジュールを作製し、理想状態における浸透流束を計測する実験について記した。その結果、現在得られている膜モジュールの性能試験データを基に算出した浸透流束に対して、最大で約3.5倍の浸透流束向上が期待できることが明らかとなった。

第7章では、中空糸エレメントの半径方向と軸方向の各方向について抵抗を変化させた場合における、数値シミュレーションを用いた流れ解析を行い、浸透性能を把握した。その結果、以下の点が明らかとなった。

1. 半径方向抵抗を大きくすることで浸透流量の向上に繋がり得る。
2. モジュール入口から出口にかけて、比較的均一な浸透流束を実現できているため、浸透流量を多くすることが可能となった。
3. 軸方向抵抗を小さくすることで浸透流量の向上に繋がり得る。
4. 半径方向の抵抗を変化させた場合と同様に、均一な浸透流束が高浸透流量を可能とする。

第8章では、塩水流量に変化を与えた場合、淡水側の濃度上昇、濃度分極、淡水の消失、及び偏流の4つの要因が浸透性能へ及ぼす影響について調査した。ここでの淡水の消失とは、中空糸内腔を流れる淡水が浸透により無くなることで、浸透流量の低下へ繋がる影響を意味している。その結果、以下の点が明らかとなった。

1. 塩水流量が少ない場合、濃度分極と塩水の偏流による影響が大きくなる。
2. 濃度分極による影響は、淡水側ではなく、塩水側が支配的である。
3. モジュール出口側の外径領域で、浸透流束の無い領域が広がるため浸透流量が少ない。

第9章では、淡水流量に変化を与えた場合、淡水側の濃度上昇、濃度分極、及び淡水の消失の3つの要因が浸透性能へ及ぼす影響について調査した。その結果、以下の点が明らかとなった。本章では特に、淡水流量による偏流への影響が見られなかったため、偏流については省略している。

1. 淡水流量が少ない場合、濃度分極と淡水の消失による影響が大きくなる。
2. 濃度分極による影響は、淡水側ではなく、塩水側が支配的である。
3. 淡水流量が少なくなると、特に中空糸長さが長いモジュール外径領域において、淡水の無い領域が長くなる。

第10章では、塩分濃度に変化を与えた場合における、淡水側の濃度上昇、濃度分極、淡水の消失、及び偏流の4つの要因が浸透性能へ及ぼす影響について調査し、結果として以下の点が明らかとなった。

1. 塩分濃度が高い場合、濃度分極と塩水の偏流による影響が大きくなる。
2. 塩分濃度が高くなるにつれ、浸透流束が大きくなるため、濃度分極による影響は、塩水側が支配的となる。
3. 塩分濃度が高い場合、浸透が早期に完了するため、モジュール外径領域において、浸透流束の無い領域が広がる。

以上の内容から、数値シミュレーションによる膜モジュール内部の流れ状態を把握することが可能となり、運転条件による流れ状態への影響を見積もる手法を確立できた。また今後の展望として、膜モジュールにおける内部流れを考慮した場合の、モジュール最適化設計手法を提案することが可能となる。

Research about flow state and permeation performance of Hollow Fiber Type Forward Osmosis Membrane Module

Graduate school of engineering, Nagasaki university
Shingo Terashima

Renewable energy is expected because global warming has been proceeding in the world. Especially, osmotic power generation which Loeb et al. had suggested in 1975 has attracted attention. Osmotic power generation is not depended on weather, and installation area for generation plant is narrow, and it doesn't cause noise. In the osmotic power generation, seawater and fresh water are supplied to membrane module which consisted of semi-permeable membrane, seawater flow path, and fresh water flow path. In the membrane module, permeation is caused through the semi-permeable membrane, and seawater is increased. This increased seawater rotate water turbine. However, cost for power generation is relatively high, and permeation flow rate is low against supplied seawater and fresh water. Thus, high permeation performance of membrane module is required.

For high permeation performance, many researches have worked on it. Simulation with bisected type permeation system had been researched. Additionally, relationship between concentration polarization and the amount of generated power had been researched. On the other hand, prediction model had been suggested, feasible generated power for variable control conditions can be predicted.

In this research, relationship between the flow state in membrane module and permeation performance is focused because effect of flow in the membrane module has not been researched. Here, permeation performance means permeation flow rate against the supplied seawater flow rate and fresh water flow rate. Thus, the object of this research is to suggest the optimized membrane module with the relationship between the flow state and permeation performance.

In the Forward Osmosis membrane module, permeation depends on the salt concentration at each area, and salt concentration distribution depends on the flow state at each area of membrane module. Additionally, flow state in membrane module cannot be uniform flow state. In the membrane module, area of large flow velocity or area of large permeation flux can be exists. This flow state is visualized with numerical simulation. The importance to use the numerical simulation for membrane module is "How is membrane area created?". In this paper, membrane area in membrane module is expressed as 1 resistance body. Therefore, it's important to clarify the characteristics of resistance. The works of each section are summarized in below.

In section 5th, experiments to measure the resistance of membrane area with mini-hollow fiber membrane element and theoretical calculation are described. Here, the resistance of membrane area means the difference between the resistance for vertical direction against the hollow fiber and resistance for axial direction of hollow fiber. As a result, the following points were clarified.

1. In the vertical direction and axial direction against hollow fiber, viscous loss is dominant.
2. Resistance of vertical direction is larger than that of axial direction. Thus, resistance of hollow fiber area has the characteristics of directional loss.

In section 6th, the details about the mini-module to measure the permeation flux in ideal state and results of experiments are described. As a result, permeation flux in ideal state is about 3.5 times larger than that of the conventional permeation flux.

In section 7th, flow state in the case of various radial direction loss and axial direction loss with numerical simulation is clarified. As a result, the following points were clarified.

1. In the large resistance of radial direction, permeation flow rate is relatively high.
2. In the large resistance of radial direction, permeation flow rate is high because uniform permeation flux is caused from the inlet to outlet of membrane module.
3. In the low resistance of axial direction, permeation flow rate is relatively high.
4. In the low resistance of axial direction, as the same to radial direction, uniform permeation flux is caused from the inlet to outlet of membrane module.

In section 8th, effects of 4 factors : increase of solute concentration, concentration polarization, dissipation of fresh water, and salt water flow on permeation performance in the case of various salt water flow rate are researched. Here, dissipation of fresh water means permeation isn't caused in the area fresh water doesn't exist by permeation. As a result, the following points were clarified.

1. At the case of low salt water flow rate, effects of concentration polarization and salt flow state are large.
2. For concentration polarization of salt water side is dominant than fresh water side.
3. No permeation flux area spreads at the area of outer diameter area near the outlet.

In section 9th, effects of 3 factors : increase of solute concentration, concentration polarization, and dissipation of fresh water on permeation performance in the case of various fresh water flow rate are researched. As a result, the following points were clarified. Especially, salt water flow isn't evaluated because salt water flow state didn't change in various fresh water flow rate.

1. At the case of low fresh water flow rate, effects of concentration polarization and dissipation of fresh water are large.
2. For concentration polarization of salt water side is dominant than fresh water side.
3. At the case of low fresh water flow rate, no permeation flux area exists at the outer diameter area where the hollow fiber length is long.

In section 10th, effects of 4 factors : increase of solute concentration, concentration polarization, dissipation of fresh water, and salt water flow on permeation performance in the case of various salt concentration are researched. As a result, the following points were clarified.

1. At the case of high concentration, effects of concentration polarization and salt water flow state are large.
2. Concentration polarization of salt water side is dominant because permeation flux can be changed largely against the salt concentration.
3. At the case of high concentration, permeation can be finished rapidly. Therefore, no permeation flux area spreads at the outer diameter area.

From the above contents, flow state in membrane module can be simulated with high precision, and permeation performance for various control condition can be predicted. Additionally, optimization system considered flow state in membrane module can be suggested.