

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420886

研究課題名(和文) 海水と淡水による塩分濃度差発電モジュールの開発

研究課題名(英文) Investigation of PRO module for power Generation with Sea water

研究代表者

林 秀千人 (HAYASHI, Hidechito)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：10173022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：海水と淡水による浸透圧発電を目指して、中空糸膜モジュールの性能向上解析を進めた。膜モジュールでは、中空糸群の浸透能力に比べおよそ10分の1になる。その原因は、濃度分極と有効膜面積の低下であることが明らかとなった。また、淡水側では濃度分極と流量不足が問題となる。これらのことを踏まえてモジュール形状を設定することが重要であることを指摘した。最適形状にすることにより、従来より約3倍の浸透性能が可能であることを指摘した。

研究成果の概要(英文)：It is researched the permeation performance of the hollow fibers module with PRO (Pressure Retarded Osmosis). It is cleared that the module permeability is very low and about a tenth of a hollow fiber permeability. The main causes are the concentration polarization and the reduction of the effective film area. The reduction of performance in fresh water flow caused with the concentration polarization and the least flow rate. It is pointed out by the high accuracy simulation that the optimization of the module geometry is very important and it can be obtain the three times higher performance than the conventional module.

研究分野：工学 流体力学

キーワード：浸透圧発電 中空糸 膜モジュール 浸透性能 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

浸透圧を利用した海水浸透圧発電は 1973 年に Loeb により提案された。海水のおよそ 3MPa (30 気圧) にもなる浸透圧を利用するもので、海水と河川あるいは都市排水を有する都市部でコンパクトに構成をすることができる非常に有望な次世代の発電システムである。しかし、これまでは十分な浸透量が得られず、実現の可能性が低かった。これまで、2009 年に Statkraft 社が世界で初めて、浸透圧発電実験で正味出力を出し、さらに共同研究を進めている協和機電工業は 2011 年に海水淡水化施設からの高濃縮海水を用いて、実用化へ可能な出力を得た。

しかしながら、海水による濃度差発電では、実用化のための十分な浸透量が得られず、実現への技術的課題が克服されていない。これまでに 2008-2009 年度の協和機電工業との共同研究で淡水側の流動解析を行い、最適な膜形状の提案を行い国内・国際特許を申請した。さらに 2010-2013 年度の最先端研究開発支援プログラム Mega-ton Water System では塩水側の基本的な流動特性の解析を行い、浸透性能と流動、性能との関係を明らかにした。これらのモジュール性能の解析をもとに、研究開発を進めるものである。

2. 研究の目的

膜モジュールには 2 種類のものがある。1 つは平膜 (フィルム) モジュールで、もう一つは中空系モジュールである。そのうち本研究は、中空系モジュールを対象とする。中空系膜は平膜に比べ、膜表面積を格段に大きくすることができ、コンパクトで多量の浸透流量を得ることが可能である。しかしながら、現行の中空系膜モジュールを浸透圧発電に使用した場合、出力が非常に小さく、実用化には現在の約 3 倍の浸透性能が必要である。一方で、中空系自身の浸透性能は、モジュールの浸透性能の 10 倍以上あるといわれており、低下の原因はモジュール形状の問題である。そこで、高性能中空系膜モジュールの開発を行なうために、以下を明らかにする。

(1) 塩水側濃度分極特性の解明とその低減
塩水側の濃度分極は、流れの状況と密接に関係しており、中空系間の流れを的確に把握することが必要である。そのために、流動抵抗の方向特性の解析、局所的な浸透流れと中空系まわりの濃度分極特性の解明を行う。

(2) 淡水側流れと塩水側流れのシミュレーションマッチング

塩水側の流動・浸透状況は濃度境界層の発達過程と関係し、中空系まわりの流れと関係する。そのために、明らかにする局所の流れと濃度分極との関係を踏まえてモデル化を行い、モジュールにおける濃度

分極の評価を行う。局所浸透を浸透流量が大きな全体浸透量との関係から算定するモデルを構築し、高性能シミュレーションによるマッチングをおこなう。

(3) 高性能モジュール形状、運転条件の開発

以上の結果を踏まえて、中空系直径、巻き具合、モジュールサイズ、運転の塩水・淡水圧力、流量の最適条件をもとめ最適化を図り、現行より約 3 倍の浸透性能を目指す。

3. 研究の方法

(1) 中空系群における浸透・流動特性を解明する基礎実験。

PRO においては、中空系 1 本の基本性能がモジュールにおいては十分発揮されないが、その原因の 1 つである濃度分極の形成機構を明らかにする。そのために、中空系を束にした中空系群の流動抵抗ならびに浸透性能を計測する装置を製作する。この装置により、以下により基礎解析を行い、モジュール浸透・流動特性へ展開を図る。

(2) 局所特性のモジュールへのモデル拡張検証試験。

Mega-ton Water System において使用したモジュール流動試験装置を改良して、流れと濃度の分布が計測できるようにする。これまでのシミュレーション研究からモジュール内で流れの偏り (偏流) が発生し、性能低下へ大きく影響する可能性を指摘した。さらに、実験により検証するため分布を知ることが必要で、流動特性の計測点を設定する。

(3) モジュール全体としての流動・浸透性能のシミュレーションの開発。

以上により得られた偏流、濃度分極の特性をもとに、淡水側、塩水側の流れのマッチングが図られる流れを考慮したシミュレーションを行う。ここでは、中空系内の淡水の流れと浸透の性能が密接に関係している点を考慮して、多くの中空系本数からなる流れでモデル化を提案する。それを受けて現行の解析モデルを淡水と低濃度塩水のモジュール浸透の最適化を提案し、塩分濃度差発電の実現を目指す。

4. 研究成果

(1) 塩水側濃度分極特性の解明とその低減
濃度分極の解明およびその影響を明らかにするために、中空系群による基礎実験を行なった。実験では、流水中に数本の中空系を設置して、わずかな浸透量を高精度で計測し、流れがない状態との比較で濃度分極の影響を調べた。

図 1 は浸透性能を示す淡水の透過係数である。さまざまな塩分濃度に対して行なった結果の平均を示すとおり、流水により塩水を混合して、濃度分極を抑えた場合に、膜の浸透性能が 4 割程度増加している。このように、濃度分極による影響がかなり

大きく、塩水側の流れの制御が重要であることがわかる。

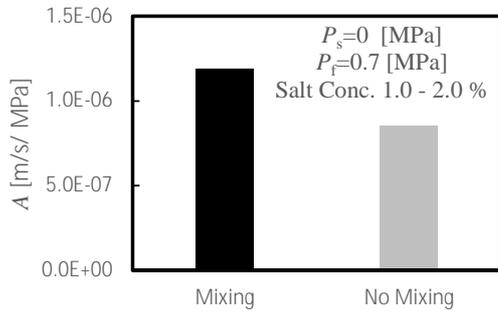


図1 透過係数の濃度分極による影響

図2に中空糸本数と透過係数の関係を示す。中空糸本数が増加するにつれて、対数的に透過係数が減少している。中空糸本数に比べ、モジュールでは性能がおよそ1/4程度にまで低下している。このように、現モジュールでは、中空糸性能が十分に発揮されていないことがわかる。

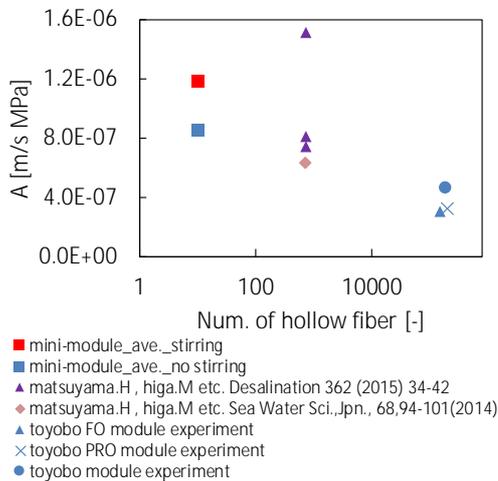


図2 透過係数の中空糸本数による影響

この主たる原因は、中空糸を過密に編みこんでいるために、重なりが大きく中空糸膜表面積を有効に利用できていないことによる。この点を踏まえて、中空糸の編み方を変更し、重なりが減少するように半径位置により編む方向を変えるような工夫が必要である。

(2)局所特性のモジュールへのモデル拡張検証試験。

中空糸内部の淡水流れと外部の塩水流れのバランスを図るために、モジュールの淡水側の流量を変化させて、局所浸透および流れの性能が全体性能へ及ぼす影響を検証した。図3は浸透流量の減少に及ぼす局所特性の影響を示している。淡水流量が極端に少なくなると、中空糸内部の淡水が出口の前でほとんど浸透するために、途中で浸透減少がなくなる。淡水流量が極端に少ない場合にはその影響が著しく、これはモジュール全体ではなく、中空糸の巻き方等

で、中空糸ごとに長さが異なること、塩水側の濃度が異なるため、局所により浸透流量が異なること等により、全体流量としては確保されていても、中空糸の一部でこのような現象が発生することを示している。また、濃度分極の影響が次に大きく、これは、中空糸群について行った図1の結果から影響の大きさがモジュールにおいても確認された。このように、淡水側の流れの条件が、モジュールの浸透性能に大きな影響を与えるが、淡水側については淡水流量の増加により、この影響は顕著に減少させることができ、これを考慮して淡水流量を検討することが必要である。また、塩分濃度等を考慮して、中空糸の長さの場所による配置および編み方を考慮すべきである。

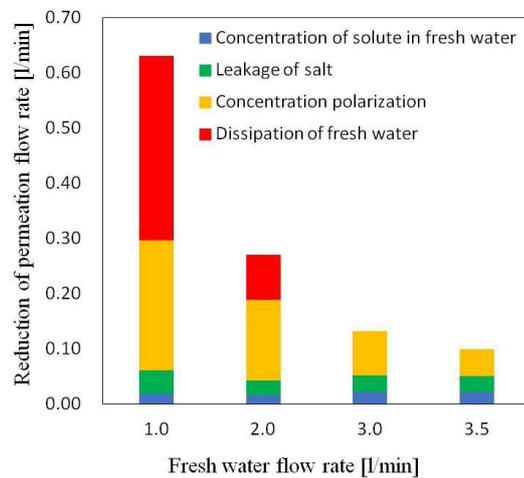


図3 浸透流量に及ぼす局所特性の影響

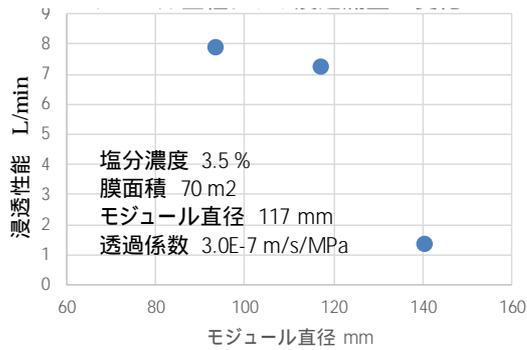
(3)モジュール全体としての流動・浸透性能のシミュレーションの開発。

浸透膜モジュールの流動解析シミュレーションについて、以上の結果を踏まえて塩分濃度が低く、高精度なシミュレーションを必要とするプログラムを開発し、これまでは塩分濃度が低く良好な評価が難しかった海水と淡水によるシミュレーションを行なうことができるようになった。

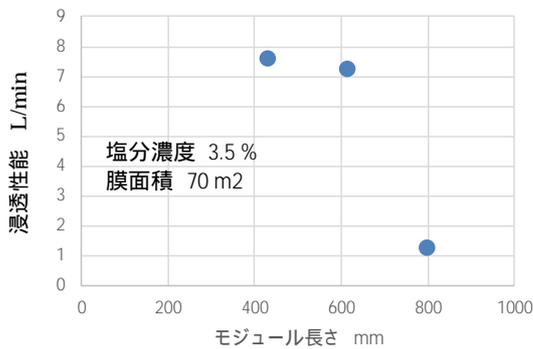
図4はモジュール形状による浸透流量の影響を示している。図4(a)は直径による影響を示している。海水においては、塩分濃度が低いために、モジュール直径を大きくするにつれて浸透流量の減少が見られる。モジュール中心の入口側から塩水流れが次第に広がる中で、浸透が進んで低濃度の状態で直径が大きい領域および出口領域に進むこととなり、十分な形状の特性を発揮していないことがわかる。特に、一般のRO等で用いられる直系5インチ程度から、性能低下が著しくなる。

図4(b)のモジュール長さの影響においても、長さが長くなるにつれて、浸透性能が次第に低下する様子が見られる。長さが

600mm 程度まではわずかな低下であるが、それから急激な変化が発生している。モジュール長さの増加は、内部での浸透性能の著しい分布を生じさせており、それが浸透性能の顕著な低下へと進んでいる。従来のモジュールは5インチ直径で700mm程度の長さがあり、モジュールの形状としては、性能低下が起る形状部分にあたる。これを踏まえて、浸透性能を向上するためには、モジュール形状を変更することが必要となる。



(a) モジュール直径の影響



(b) モジュール長さの影響

図4 浸透流量に及ぼすモジュール形状

図5は直径の変化に対する浸透性能の分布を示している。直径が小さい場合に比べて、直径が大きくなると、半径方向への非対称性画像化するとともに、軸方向へも浸透性能の変化が大きい。浸透性能が良好なところが、入り口のごく限られた部分に限定されており、最適モジュール形状から著しく離れていることがわかる。

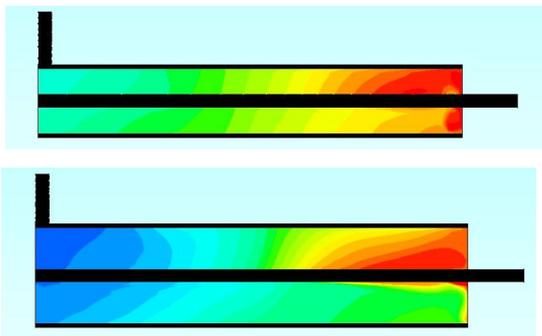


図5 直径の違いによる浸透性能分布

以上のように、塩分濃度が低い海水では、モジュール性能の低下や偏流が顕著に表れるために、モジュールの最適化を図ることが重要である。

以上の結果から、本研究においては、塩水流量に対する浸透流量がこれまでは、30%程度であったものが、シミュレーションにおいては、90%程度まで増加することが予測できた。このように形状の最適化を進めると大きな浸透性能を向上させることが可能である。現状のモジュールにおいては、直径、長さともに性能が著しく低下するものとなっている。したがって、形状の最適化はモジュール性能を著しく増加させる可能性を示すことができた。ただ、一般にはモジュールが高価であるため、全体コストとの兼ね合いから、検討される。すなわち小型の最適化を進めると、浸透量確保のためにモジュール本数が増加することになり、全体のコストの増加をきたす。これらを踏まえた検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

野上峻希, 寺嶋真悟, 奥村哲也, 林秀千人, 松山慧, 入江守裕, 坂井秀之, 海水による浸透圧発電用に向けての膜モジュールの特性解析, 日本機械学会九州支部第70期講演会論文集, 査読(なし), 2017, pp113-114

Shingo TERASHIMA, Hidechito HAYASHI, Tetsuya OKUMURA, Tetsuro UEYAMA, Kei MATSUYAMA, Hideyuki SAKAI, Permeation characteristics of fresh water in hollow fiber membrane module for pressure retarded osmosis, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, 査読(有), Vol.3, No.6, 2016, 1-10

Hidechito Hayashi, Tetsuya Okumura, Macro and nano behavior of salt water in pressure retarded osmosis, membrane module, Desalination, Vol.389, No.1, 査読(有), 2016, 155-161

Shingo Terashima, Hidechito Hayashi, Tetsuya Okumura, Kei Matsuyama, Tetsuro Ueyama, Hideyuki Sakai, CHARACTERISTICS OF FRESH WATER PERMEATION IN HOLLOW FIBER MEMBRANE MODULE FOR PRESSURE RETARDED OSMOSIS, Proceeding of AJK2015_FED, AJK Fluids 2015-22704, 査読(有), 2015, pp 1-5

Akihiko Tanioka, Keiichiro Saito, Atsuo Kumano, Mitsuru Higa,

Hidechito Hayashi, Morihiro Irie, Kei Matsuyama, Hideyuki Sakai, POWER GENERATION BY PRESSURE RETARDED OSMOSIS USING CONCENTRATED BRINE FROM SEAWATER DESALINATION, Proceeding IDAWC15, 査読(有),2015, pp1-11

Hidechito Hayashi, Shingo Terashima, Tetsuya Okumura, Tetsuro Ueyama, Kei Matsuyama, Hideyuki Sakai, Akihiko Tanioka, FLOW CHARACTERISTICS OF SALT WATER IN PRO HOLLOW FIBER MODULE, Proceeding IDAWC15, 査読(有), 2015, pp1-10

林 秀千人, 奥村 哲也, 寺嶋 真伍, 中空系型正浸透膜モジュールにおける塩水流れの解析, 日本機械学会九州支部講演会論文集, C11, 査読(なし), 2015, pp1-2

[学会発表](計5件)

野上峻希, 寺嶋真悟, 奥村哲也, 林秀千人, 松山慧, 入江守裕, 坂井秀之, 海水による浸透圧発電用に向けての膜モジュールの特性解析, 日本機械学会九州支部第70期講演会, 佐賀, 2017-3-14, pp113-114

Shingo Terashima, Hidechito Hayashi, Tetsuya Okumura, Kei Matsuyama, Tetsuro Ueyama, Hideyuki Sakai, CHARACTERISTICS OF FRESH WATER PERMEATION IN HOLLOW FIBER MEMBRANE MODULE FOR PRESSURE RETARDED OSMOSIS, AJK2015_FED, AJKFluids2015-22704, 2015-7-29, 蘇州, pp. 1-5

Akihiko Tanioka, Keiichiro Saito, Atsuo Kumano, Mitsuru Higa, Hidechito Hayashi, Morihiro Irie, Kei Matsuyama, Hideyuki Sakai, POWER GENERATION BY PRESSURE RETARDED OSMOSIS USING CONCENTRATED BRINE FROM SEAWATER DESALINATION, IDAWC15, 2015-9-2, サンディエゴ, pp1-11

Hidechito Hayashi, Shingo Terashima, Tetsuya Okumura, Tetsuro Ueyama, Kei Matsuyama, Hideyuki Sakai, Akihiko Tanioka, FLOW CHARACTERISTICS OF SALT WATER IN PRO HOLLOW FIBER MODULE, IDAWC15, 2015-9-2, サンディエゴ, pp1-10

林 秀千人, 奥村 哲也, 寺嶋 真伍, 中空系型正浸透膜モジュールにおける塩水流れの解析, 日本機械学会九州支部長崎講演会, C11, 2015-9-19, 長崎, pp1-2

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 秀千人 (HAYASHI, Hidechito)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号: 10173022