浸透圧を利用した塩分濃度差発電の性能に及ぼす塩分濃度の影響*

荒井 義樹^{*1}, 安ヶ平 和一^{*2}, 庵原 昭夫^{*3}

Effect of Salt Concentration on Performance of Hydroelectric Power Station due to Osmotic Pressure

Yoshinori ARAI, Waichi YASUGAHIRA^{*4} and Akio IHARA^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, Utsunomiya University,
7-1-2 Youtou, Utsunomiya-shi, Tochigi, 321-8585 Japan

This paper presents an experimental study about a possibility of a hydroelectric power station due to osmotic pressure generated between sea water and river water. The experiment is conducted by a newly constructed equipment using a spiral reverse osmotic module with membrane surface area 4.318 m². The equipment can be pressured up to 0.5 MPa to avoid a generation of bubble in pure and salt water channels. Tap water and salt water are used for experiment instead of river water and sea water. On the way of tap water passage, a valve is inserted to generate a loss corresponding to a hydraulic turbine load. Using a pump, salt water is forced to circulate and its flow rate is variable. The flow rate of tap water and the pressure difference between the valve inlet and outlet are measured with varying salt concentration from 0.1 wt% to 0.6 wt% and salt water flow rate from 3.5 l/min to 5.0 l/min. In these experiments we can obtain a maximum output about 0.86 W at salt concentration 0.6 wt%. From these results, we had a confidence to construct the hydraulic power station utilizing osmotic pressure.

Key Words: Osmotic Pressure, Hydraulic Power Station, Sea Water, River Water

1. 緒 言

ここで述べる塩分濃度差発電とは、河川の真水を河口の上流部において取水し、浸透膜を介して海水中へと放出することで得られる浸透圧により、水力発電に必要なとされる流量と落差を確保しようというものである。これまでの研究^{(1)~(3)}によると、本方式の発電によって、日本の主要河川を利用するだけでも1000 MW級の原子力発電所数台分に相当する発電が見込まれている。

本研究では、実験に好適な浸透膜モジュールが市販されていないことから、市販の逆浸透膜モジュールを用いて超小型の浸透圧塩分濃度差発電システムを構築し、加圧下でのシステムの発電性能を実験的に求めようとするものである。加圧する理由は、大気圧下でシステムを作動させると、浸透圧により浸透膜モジュール内真水流路が負圧となり、内部に気泡が発生して浸透流量が著しく低下することが予想されることから、

それを防ぐためである。実験には河川水の代わりに水道水を、海水の代わりに塩水を使用した。また、真水の流入により塩水側膜表面の塩分濃度が低下するのを低減させるために、塩水をポンプにより強制的に流動させた。

2. 発 電 原 理

水力発電における水車の出力 W は次の式で表される。

$$W = \eta Q \Delta p = \eta \rho g H Q \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで η は水車効率、 Q は流量、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 H は落差である。本発電方式においても式(1)がそのまま適用できる。 Δp は水車負荷に相当する。また、浸透膜を透過する真水の流量 Q は、浸透流速 u_w と膜面積 F の積によって求められる。ここで浸透流速 u_w は以下の式で求めることができる⁽⁴⁾。

$$u_w = A(\Delta\pi - \Delta p) \\ = A[b(\rho_s - \rho_w) - \Delta p] \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、 A は真水の透過係数、 Δp は水車負荷および管路損失の和、 $\Delta\pi$ は浸透圧である。また、 b は浸透圧を塩分濃度から簡易的に求めるための係数、 ρ_s は塩水側膜近傍における塩分濃度、 ρ_w は真水側膜近傍の塩分濃度である。本研究における実験では、 Δp は

* 原稿受付 2008年3月5日。

^{*1} 元：宇都宮大学大学院工学研究科[現：三菱重工業(株) (〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)]。^{*2} 正員，宇都宮大学工学部 (〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)。^{*3} 正員，フェロー，元：宇都宮大学工学部。

E-mail: waichiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

真水流路内に設けたバルブによって与えることとし、 Q は真水流路の流量によって与えるものとする。

3. 実験装置および実験方法

図1に本研究で製作、使用した実験装置の概略を示す。

装置は真水流路と塩水流路からなり、真水流路と塩水流路との接点に浸透膜が設置してある。浸透膜には海水から真水を逆浸透により抽出するために使用されている膜面積 4.318 m^2 、耐圧 6.9 MPa のスパイラル型逆浸透膜モジュール(日東電工製 NTR-70 SWC-S4)を使用した。真水流路および塩水流路の両系は、浸透によって真水流路が負圧となり気泡が発生することを抑えるために、コンプレッサにより等しく加圧できるようにした。加圧可能な最大圧力はおよそ 0.7 MPa である。これは真水と海水(塩分濃度 $3.5 \text{ wt}\%$)との間に発生する浸透圧 2.8 MPa に対して低い値であるが、実験には塩分濃度 $0.6 \text{ wt}\%$ (浸透圧 0.48 MPa)以下の塩水を用いることにより、 0.5 MPa の加圧でも真水流路内が負圧になることを防ぎ、気泡の発生を抑えるのに十分な圧力となるようにした。真水流路には水車負荷に相当する損失を与えるためのバルブを挿入し、その開度を調節することにより損失量を変化させた。そのバルブ前後の圧力を圧力計により計測し、バルブ前後差圧を算出した。さらに真水流路には微小流量計を挿入し、浸透流量を計測した。

また、真水の浸透による塩水側膜面近傍の濃度低下を防ぐために、塩水はポンプにより強制的に循環させ、循環させる塩水の流量および圧力を計測した。製作した装置では塩水と浸透した真水が混合して塩水タンクに戻り、それが再度塩水流路に流し込まれる仕組みとなっている。そのため長時間の運転では塩分濃度の低下が心配されることから、真水の浸透流量に比べて塩水タンクの容積を十分に大きくした。試作した装置の30分の作動時間での塩分濃度の変化は、例として 0.4

$\text{wt}\%$ から $0.375 \text{ wt}\%$ へと減少する程度である。

4. 実験結果と考察

4.1 予備実験 図2に大気圧下で浸透実験を行った際の真水流路に設けたバルブ後方(モジュール側)の様子を示す。図2の写真は実験開始から10分後のものである。実験条件は塩分濃度 $4.0 \text{ wt}\%$ 、真水および塩水水温は 283 K 、塩水流量はモジュール内塩水流路平均流速が 5 cm/s (塩水流路圧力 0.003 MPa)である。また、バルブは全閉状態である。

実験開始前(ポンプ始動前)には見られなかった気泡が、図2より、実験開始から10分経過後には、バルブ下流側に発生していることが認められる。これは浸透圧によって真水が塩水側に浸透したことにより、浸透膜モジュールの真水流路を含むバルブ下流側の圧力が水の飽和蒸気圧以下となったためであると考えられる。この大気圧下での予備実験の塩分濃度を $4.0 \text{ wt}\%$ とした理由は、塩分の濃度を実際の海水として模擬し、浸透圧の影響を明確にするためである。この予備実験以降の実験においては、塩分濃度 $4.0 \text{ wt}\%$ の浸透圧 2.8 MPa に抗う圧力を加えることは装置が複雑になることから、塩分濃度を $0.6 \text{ wt}\%$ を上限として、大気圧下および加圧下での実験を行なった。

また、塩分濃度を $0.4 \text{ wt}\%$ (浸透圧 0.32 MPa)とし、大気圧下および系を 0.5 MPa 加圧した状態で同様の実験を行ったところ、大気圧下の実験ではこの気泡の発生を目視により確認したが、加圧下の実験では気泡の発生は確認されなかった。このことは、系を加圧することによりモジュール内および真水流路内が負圧になることを抑えられたことを示すものである。よって、製作した装置の“負圧による気泡の発生を抑える”という目的は達成したといえる。

4.2 大気圧下および加圧下での浸透流量の測定

図3に、系の圧力が大気圧および 0.5 MPa における浸透流量の時間経過に対する変化を示す。実験条件と

Fig. 1 Outline drawing of experimental equipment

Fig. 2 Photo of pure water channel in the neighborhood of ball valve

Fig. 3 Permeate flux vs. time at atmospheric pressure and at 0.5 MPa (Salt concentration: 0.4 wt%)

して、塩分濃度は0.4 wt%，真水および塩水の水温は288 K、塩水流量はモジュール内塩水流路平均流速が5 cm/sとなるように調節した。真水流路に設けたバルブの開度は全開とした。また、ポンプによって塩水の循環を開始した瞬間を0秒としている。

大気圧下および加圧下のいずれにおいても塩水循環開始直後に浸透流量は極大値に達するが、その後0 L/minまで減少した後、急激に増大して極大値に到達し、その後徐々に減少していく様子を確認した。前者の極大値は、塩水を循環させるためにポンプを始動させたことにより塩水側の圧力が上昇し、浸透膜のわずかな変形などにより生じた真水流路の逆流を微量流量計が感知したものと考えられる。つまり後者の極大値以降の流量が、本研究で目的とする浸透による流量である。

また、前述したように大気圧下の実験において、モジュール内真水流路に気泡の発生を目視により確認したが、図3を見る限り、大気圧下の浸透流量は加圧下のそれとほとんど同じであり、明確な違いは確認できない。さらに、大気圧下および加圧下での浸透流量を比較する実験は0.1, 0.2, 0.6 wt%においても同様に行った。しかしながら、0.4 wt%での実験と同様に、両者の明確な差は見られなかった。つまり、予想した気泡の発生による浸透流量の減少は認められなかった。したがって、塩分濃度0.6 wt%程度までの浸透実験(水車負荷なし)では、膜面の気泡の発生による浸透流量の低下はないと結論付けてよさそうである。

以上より、後者の極大値を示した後、時間経過とともに浸透流量が減少していくのは、真水の浸透によって塩水側膜面近傍の塩分濃度の低下が生じ、浸透圧が減少したことが主な原因であると考えられる。

4.3 浸透流量に及ぼす塩分濃度の影響 図4には0.5 MPa加圧下における塩水の塩分濃度0.1 wt%

Fig. 4 Effect of salt concentration on permeate flux

Fig. 5 Relation between maximum permeate flux and salt concentration

から0.6 wt%の各濃度における浸透流量の時間経過に対する変化を示す。ここで、塩水流量は5 L/min (モジュール内塩水流路平均流速およそ5 cm/s)となるように塩水流量調節バルブによって調節し、バルブ開度は全開とした。浸透流量の時間経過に対する変化は、どの濃度においても図3と同様に二度目の極大値を示した後、減少していくという傾向を示した。また、時間経過に対する減少の割合は、塩分濃度が濃いほど大きくなっていることがわかる。

また、図5には各濃度において得られた最大浸透流量を示した。図5において、当然のこととはいえ、塩分濃度が濃いほど浸透圧が増大するため、浸透流量は増大している。また、図5より、塩分濃度と最大浸透流量は完全な比例ではなく、濃度が濃くなるほど、最大浸透流量の増加が鈍くなる傾向にあることがわかる。この傾向は、濃度が濃いほど、前述した真水の浸透による塩水側膜面近傍の塩分濃度低下の影響が大きく現れるためであると考えられる。

4.4 バルブ前後差圧に及ぼす塩分濃度の影響

4.3節と同様に塩分濃度を0.1 wt%から0.6 wt%の間で変え、バルブ開度の実験条件のみを全閉と変更して同様の実験を行った。図6に、各濃度のバルブ前後

Fig. 6 Effect of salt concentration on differential pressure between valve inlet and outlet

差圧の時間経過に対する変化を示す。ここで興味深いのは、どの塩分濃度においてもバルブ全閉における差圧が極大値に到達した後、徐々に減少していることである。

本来ならば、真水の供給が止められているために、モジュール内真水圧力は浸透平衡に到達したときの圧力を保つはずである。この現象は次のように考えることができる。実験開始後、浸透膜を介して真水と塩水が接した後、まず、浸透により、モジュール内真水流路中に保持されていた真水が塩水流路へと流出する。すると真水の供給は止められているために、真水流路内は塩水流路内の圧力に比べ急激に圧力降下が生じる。その圧力差に加え、浸透の場合においても、逆浸透の場合と同様に浸透膜の塩分阻止率が100%でない（ここで、本研究に用いた逆浸透膜の逆浸透に対する阻止率は99.6%）と考えると、浸透膜を介して、微量ながら塩分が真水側へと流れ込む。すると真水側の塩分濃度が増加し、膜を介した真水側と塩分濃度差が減少する。これにより、その分だけ浸透圧が減少する。そしてそれと平衡状態を保つために塩水側から真水側へと真水の逆浸透が生じ、その分、モジュール内真水流路圧力が増加する。このために、得られるバルブ前後差圧は極大値を示した後、時間とともに減少したものと考えられる。したがってこの結果から、実験に使用した逆浸透膜モジュールを浸透に用いた場合にも、逆浸透と同様に僅かながら真水側への塩分の漏洩があると言える。この塩分の漏洩もまた、図4に示す時間とともに浸透流量が減少する原因の1つと考えられる。

図7には各塩分濃度において得られた最大バルブ前後差圧を示した。また、図7には文献(5)から得た各濃度における浸透圧も示した。図7から、各塩分濃度に対応する浸透圧に対して、得られた最大差圧は小さ

Fig. 7 Relation between maximum differential pressure and salt concentration

Fig. 8 Diagrammatic illustration of spiral wound module

な値を示していることがわかる。さらに、濃度を高くするほどその差は大きくなっている。しかしながら、各濃度における最大差圧は、それぞれの浸透圧のおよそ87%と一定の割合で小さいことがわかる。これについても前述したように、浸透した真水によって、膜を介した塩分濃度差が低くなったことが影響しているものと考えられる。

4.5 浸透膜モジュール形状に関する考察 本節では、スパイラル型浸透膜モジュールを塩分濃度差発電に用いることに関する問題点について考察する。

4.4節で述べた真水流路側への塩分の浸透は、市販のスパイラル型浸透膜モジュール(図8)を塩分濃度差発電に対して使用することの限界を示唆するものである。このモジュールは、真水収集管に封筒型をした浸透膜を取り付け、真水収集管を中心に巻きつけた構造をしている。ここで、真水流路はその封筒型をした膜の内側であるが、塩水流路からの塩分の浸透がある場合、膜の構造上、その浸透してきた塩分を排出することができない。これは時間とともに浸透流量が減少する一つの要因であると考えられる。このことから、スパイラル型浸透膜モジュールは、塩分濃度差発電を持続的に行うことを考えた場合、不向きであるといえる。

また、友田ら⁽⁶⁾によれば、浸透圧発電を連続発電す

Fig. 9 Effect of valve opening on differential pressure between valve inlet and outlet (Salt concentration: 0.4 wt%)

るためには、4 開口(塩水入口・出口、真水入口・出口)の浸透膜モジュールが必要であるとしている。これは本研究において塩水側膜面に新鮮な塩水を供給するために流れを与えたのと同様に、真水側膜面にも新鮮な真水を供給することを目的として、真水流路にも流れを与えるためである。これにより、前述した真水流路内への塩分の浸透の影響を抑制できる。友田らは中空糸膜を用いて 4 開口耐圧モジュールを試作し、実験を行っている。その結果は 50 時間の連続運転においても、浸透流量の劣化は見られないというものであった。

本研究においても友田らが試作した 4 開口耐圧モジュールを用いるべきとも思われるが、それに比較して構造が単純で、内部流れのモデル化もより容易であり、性能予測がし易いこと、また、安価であることを考慮し、本研究には市販のスパイラル型浸透膜モジュールを採用した。スパイラル型のそれらの性質は、実用化に際しては、まだ改良の余地があるとはいえ、重要なことと思われるので基礎データを得ることとした。

4・6 浸透流量およびバルブ前後差圧に及ぼすバルブ負荷の影響 図 9 にバルブの開度を変えて実験を行った場合の、バルブ前後差圧の時間変化を示す。

実験条件は 4・2 節の加圧下の場合と同じである。図 9 中の表示 No.1 から No.4 は、バルブの開度を表している。No.1 がバルブ全開、No.4 が全閉であり、No.2, 3 はそれらの途中のものである。また、バルブ全開においては、その差圧は読み取れないほど小さなものであったため、0 MPa としてプロットしている。当然のことながら、バルブの開度を小さくするほど差圧は増加している。また図 10 には図 9 の差圧に対応した浸透流量を示す。図 9, 10 を併せてみると、各バルブ開度における最大差圧と最大浸透流量の得られる

Fig. 10 Effect of valve opening on permeate flux (Salt concentration: 0.4 wt%)

Fig. 11 Output performance curve (Salt concentration: 0.4 wt%)

時間が一致していることがわかる。また、前述したように、各最大値を示した後、時間の経過とともにその値は減少していく様子がわかる。

4・7 発電性能 図 11 に、本研究で作製した実験装置を、塩分濃度 0.4 wt% の塩分を用いて作動させたときの性能曲線を示す。横軸には水車負荷を模したバルブ前後の差圧をとっている。また、図 11 にはバルブ前後差圧に対する浸透流量もあわせてプロットしている。前述したように、本研究における浸透流量および差圧は、様々な要因により安定した値を示さず、減少し続けた。そこで、各バルブ開度における最大浸透流量および最大差圧の得られる時間が一致することから、発電性能の算出にはそれらの値を用いた。また効率 η は単に 100% として出力を算出した。

図 11 より、水車出力の実験点は一本の曲線上に乗り、バルブ前後差圧が本実験条件で得られた最大差圧の 0.24 MPa のおよそ半分である 0.12 MPa あたりで最大出力 0.35 W を示している。また、浸透流量はバルブ前後差圧の増大とともに減少して、一本の直線上に乗っている。また、図 12 には塩分濃度 0.4 wt% の性能曲線も含め、塩分濃度 0.1, 0.2, 0.6 wt% の性

Fig. 12 Comparison of output performance curves

Fig. 13 Relation between maximum output and salt concentration

能曲線を示した。図 12 から、どの塩分濃度においても、0.4 wt%の結果と同様の傾向を示すことがわかる。さらに、各塩分濃度における最大出力を図 13 に示す。図 13 は両対数グラフで示している。図 13 より、塩分濃度 0.1 wt% から 0.6 wt% の範囲において、最大出力は塩分濃度のおよそ 1.77 乗に比例して増大していくことがわかる。このことは、式 (1) における Q が式 (2) 中の ρ_s (膜近傍の塩分濃度) に、さらに式 (1) における Δp が塩分濃度に比例することから、およそ塩分濃度の 2 乗に比例するという関係を示したものであるといえる。また、2 乗にならない要因として、図 7 に示したように、バルブ前後差圧が、浸透圧の 87% 程度になっていることが挙げられる。これは塩分濃度が濃くなるほど、真水の浸透の影響により、膜を介した塩分濃度差が低くなるためだといえる。

5. 結 論

本研究では、実用化を考慮に入れて系全体を加圧出来るように超小型浸透圧塩分濃度差発電試験システムを構築し、塩分濃度 0.1 wt% から 0.6 wt% の塩水お

よび真水を用いて、その発電性能を実験的に検証した。得られた結果の主なものは以下のとおり。

(1) 膜面積 4.318 m² の浸透膜を用いて製作した塩分濃度差発電システムの超小型装置の出力は、水車効率 100%、塩分濃度 0.6 wt% として、最大でおよそ 0.86 W であった。

(2) 塩分濃度 0.1 wt% から 0.6 wt% において、製作した装置の最大出力は、塩分濃度のおよそ 1.77 乗に比例した。

(3) 濃度差発電システムを加圧下で作動させた場合、真水流路が負圧になることを防ぎ、真水流路における気泡の発生を抑えられた。

(4) 浸透流量は、最大浸透流量が得られた後、時間経過とともに減少した。これは主に浸透した真水および塩水により、膜を介した濃度差が小さくなったためである。

(5) 塩分濃度 0.1 wt% から 0.6 wt% までの塩分濃度の増加に対する最大浸透流量の増加は、塩分濃度にほぼ比例した。

(6) 塩分濃度差発電システムを大気圧下で作動させた場合、僅かながら真水流路が負圧になるため、真水に溶存している気泡の発生を確認したが、浸透流量に影響はなかった。

文 献

- (1) Ihara, A., Watanabe, H., Hashimoto, H., Kawano, S. and Katagiri, K., Flow Test through Semipermeable Membranes with Salinity Difference between Pure Water and Sea Water for Foundation of Hydraulic Power Plant, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 62, No. 596 (1996), pp. 1454-1458.
- (2) Yasugahira, W., Tsukada, Y. and Ihara, A., Performance Prediction of Hydroelectric Power Station Utilizing Osmotic Pressure as Driving Force, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 69, No. 677 (2003), pp. 75-81.
- (3) Shiono, A., Yasugahira, W. and Ihara, A., Basic Research of Hydroelectric Power Station Utilizing Osmotic Pressure between Sea Water and River Water, *Proceedings of the 20th Annual Meeting of Japan Society of Energy and Resources*, No. 28-1 (2004-1), pp. 501-504.
- (4) Rautenbach, R. and Albrecht, R., *Membrane Processes*, (1994), pp. 48-171, John Wiley & Sons.
- (5) Oya, H., *Design Method of Processes of Membrane Separation* (in Japanese), (1985), pp. 61-88, Kitamishobo Ltd.
- (6) Tomoda, T., Asami, T., Mano, H. and Matsumoto, T., Experimental Study of Power Generation by "Pressure Retarded Osmosis" under Flow Conditions, *Proceedings of the 20th Annual Meeting of Japan Society of Energy and Resources*, No. 28-2 (2004-1), pp. 505-508.