

海水浸透圧を利用した浸透圧発電システム

松 山 慧・坂 井 秀 之

浸透圧発電（Pressure Retarded Osmosis：PRO）は海水等の塩水と河川水や下水等の淡水との間の浸透圧差を利用した発電方式である。海水淡水化施設から排出される濃縮海水と下水処理施設から放流される下水処理水を用いた PRO 実証プラントを建設し、試験を実施した結果、10 インチ中空糸型 PRO 膜モジュールを使用した試験では、 10 W/m^2 の膜出力が得られ、大型の海水淡水化施設の造水エネルギーを約 10%削減可能であることが示された。また、現在は濃縮海水での浸透圧発電開発の経験を生かし、通常の海水を用いた浸透圧発電の開発に着手しており、本技術の実用化、普及促進を目指している。

キーワード：再生可能エネルギー、塩分濃度差、浸透圧、浸透圧発電、下水処理水、海水淡水化

1. はじめに

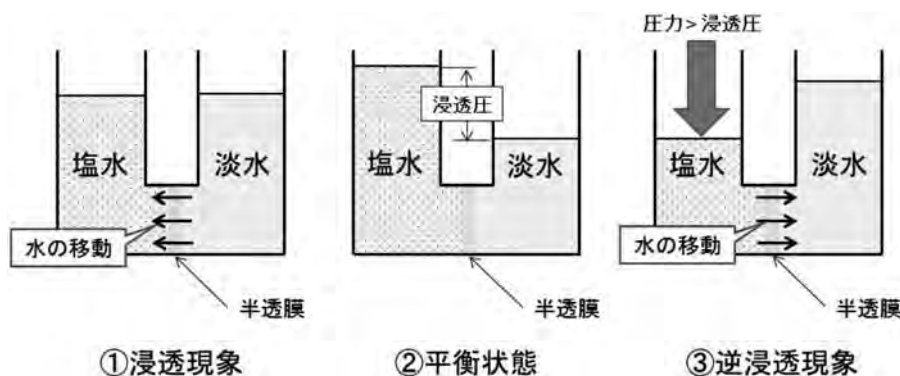
近年太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが注目されており、特に周囲を海に囲まれた日本では海洋エネルギーを利用した技術開発が盛んに行われている。しかしこれらの再生可能エネルギーには効率が低い、設備稼働率が低い、設置場所が限られるといった問題点がある。この問題点を解決するために様々な方式の再生可能エネルギー利用技術が提案され、実用化へ向けた開発が進められている。その一つとして注目されているのが塩分濃度差エネルギーによる発電技術である。

塩分濃度差を利用した発電は浸透圧発電（Pressure Retarded Osmosis：PRO）と逆電気透析発電（Reverse Electrodialysis：RED）に分類される。PRO は海水と淡水の間の浸透圧差に起因する圧力差からエネルギーを取り出す方式であり、RED は海水と淡水の間の電

位差によるイオンの流れをエネルギーとして取り出す方式である。どちらの発電方式も環境に負荷を与えず、従来の太陽光や風力発電のように天候、時間に左右されず安定した発電が可能のため、これまでにない新たな再生可能エネルギーとして期待されている。本稿では海水等の塩水と下水処理水との間の浸透圧差を利用した浸透圧発電システムの開発状況について紹介する。

2. 浸透圧発電の原理

浸透圧発電（以下 PRO）は 1976 年に Loeb により提唱された発電方式である。塩水と淡水の間に水分子のみを選択的に透過する半透膜を設置すると、淡水側から塩水側へ水が移動する浸透現象が発生する（図—1 参照）。浸透によって生じた水頭差が浸透圧と等しい状態で平衡となり、塩水側へ浸透圧よりも大きな圧



図—1 浸透現象の模式図

力をかけた場合、逆に塩水側から淡水側へ水が移動する逆浸透（RO）現象が発生する。この逆浸透現象を利用したものが逆浸透法による海水淡水化である。PRO では浸透現象によって塩水中に移動する淡水の増分を利用して発電を行う。このとき浸透現象により淡水側から塩水側へ水が浸透する際の透過流束は次式で表わされる。

$$J_w = A(\Delta \Pi - \Delta P) \quad (1)$$

ここで、 A は半透膜の透過係数、 $\Delta \Pi$ は塩水と淡水の間の浸透圧差、 ΔP は塩水と淡水の間の流体力学的圧力差である。このとき、PRO で得られる膜出力 PD は式 (2) で算出される。

$$PD = J_w \Delta P = A(\Delta \Pi - \Delta P) \Delta P \quad (2)$$

式 (2) は ΔP の 2 次関数となるため、 $\Delta P = \Pi/2$ のときに PRO における出力が最大となる。そのため PRO システムでは塩水の供給圧を浸透圧の 1/2 に加圧して供給される。海水の場合、浸透圧が約 3 MPa であるため供給圧力は約 1.5 MPa となる。

3. 海水淡水化施設濃縮海水を利用した PRO システムの開発

PRO では使用される塩水の塩分濃度が高いほどより大きなエネルギーが得られる。海水淡水化施設から排出される濃縮海水は通常の海水の約 2 倍（7%）の塩分濃度であり、この濃縮海水を利用することで大きな発電が期待されるため、2002 年より海水淡水化施設から排出される濃縮海水を用いた PRO システムの開発を開始した。

福岡市に建設された PRO 実証プラント（2010 ～ 2013）の概要を写真—1 に示す。実証プラントでは塩水として近隣の海水淡水化施設から放流される濃縮海水（460 m³/日）を、淡水として地域の下水処理施設から放流される下水二次放流水（420 m³/日）を、PRO 膜として 10 インチ中空糸型 PRO 膜モジュール 8 本を使用し、設備発電出力は 8 kW となっている。



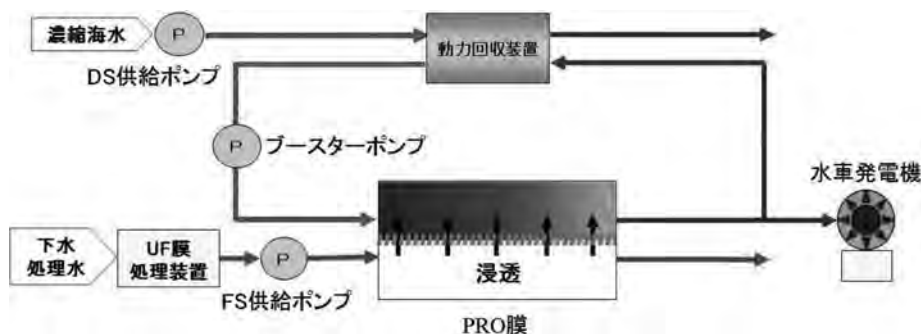
写真—1 PRO 実証プラント



写真—2 PRO 試験プラント

2013 年からは長崎市内の下水処理施設に PRO 試験プラント（濃縮海水：90 m³/日）を設置し試験を行っている（写真—2 参照）。

開発された PRO システムのフローを図—2 に示す。システムは PRO 膜、各送水ポンプ、動力回収装置、下水処理水前処理装置、水車発電機にて構成されており、PRO 膜としては中空糸型の浸透膜を、動力回収装置としては海水淡水化で用いられる容積式動力回収装置を、下水処理水の前処理としては UF 膜による前処理が採用された（写真—3 参照）。このとき PRO システム全体における正味出力（ E_{net} ）は、水車発電機で発電された発電出力（ E_o ）からシステムで使用される各ポンプの消費エネルギーの合計（ E_i ）を差し引いたものとなる。



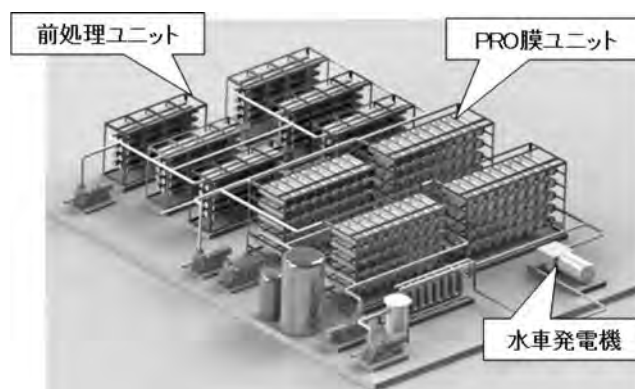
図—2 PRO システムのフロー図



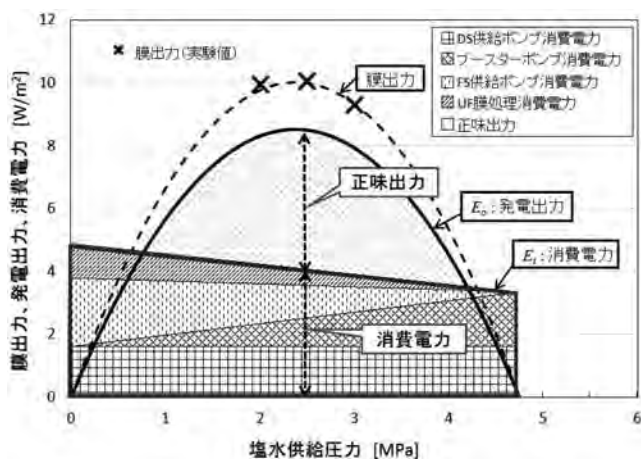
写真—3 PRO システムの構成

濃縮海水を用いたPRO試験にて得られたPRO膜出力の試験結果と、試験結果をもとに試算した発電出力、消費電力、正味出力の値を図—3に示す。なお発電出力、消費電力の算出にあたってはPRO発電プラント規模を数万 $\text{m}^3/\text{日}$ の濃縮海水利用と大型化させた場合を仮定し水車発電機、各ポンプの効率を85%と設定している。PRO膜出力は塩水供給圧力が2.5 MPaの所で約 10 W/m^2 と最大を示した。このように濃縮塩水の浸透圧の1/2付近で最大出力を示すことは理論的予測とも一致する結果となった。

これらの結果から海水淡水化施設の濃縮海水と下水処理水施設の放流水を原水とするPROシステムの実用化について検討を行った結果、海水淡水化の生産水



図—4 100 kW 規模のPROプラントのイメージ



図—3 濃縮海水でのPRO膜出力の試験結果

量が十万～百万 $\text{m}^3/\text{日}$ 規模の施設にPROを導入した場合、RO法による海水淡水化の消費電力を約10%削減可能となることが試算された。さらにPROでは、濃縮海水と下水処理水を混合して放流するため、海水淡水化施設の濃縮海水放流による環境負荷の影響を低減させることも可能となる。この結果をもとに現在、海水淡水化施設におけるPROシステムの商業化に向け図—4に示す100 kW規模（濃縮海水：1万 $\text{m}^3/\text{日}$ ）の発電設備導入を目指している。

4. 海水を利用したPRO発電システムの開発

通常の海水と淡水によるPROの実現は世界中で膨大な発電量が期待でき、本発電技術の普及拡大にもつ

ながると考えられる。しかし、通常の海水の塩分濃度は濃縮海水の約半分であり、PROによって回収できるエネルギーが少ないという技術的課題がある。現在PRO試験プラント（長崎市）にて通常の海水を用いたPROシステムの試験開発を実施している。

図-5は通常の海水でのPRO膜出力の試験結果と開発目標を示したものである。試験プラントにて得られた膜出力の試験結果は 3.2 W/m^2 となっている。発電出力と消費電力を見てみるとそれぞれの値は同等であり、正味出力はほとんど得られていないことがわかる。海水利用によるPROシステムの実現のためにはPROシステムにおける膜出力が 6 W/m^2 以上を達成することが必要と試算しており、更なるシステムの効率化とPRO膜の性能向上を目指して開発を行っている。

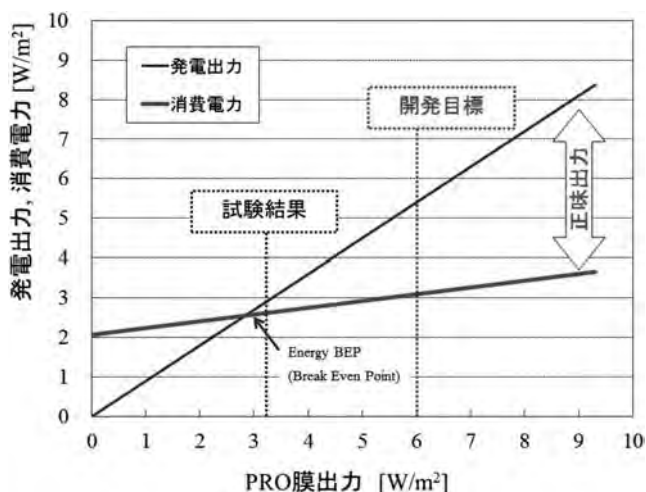


図-5 海水でのPRO膜出力と開発目標

5. おわりに

浸透圧発電は海水と河川水や下水処理水などの淡水との浸透圧差を利用した発電方式であり、発電による環境負荷がなく、また発電の時間的変動が少なく安定してエネルギー取得が可能であるため、これまでにない再生可能エネルギーと考えられる。

海水淡水化施設から排出される濃縮海水と、下水処理施設から放流される下水処理水を用いた浸透圧発電システムについて実証試験プラントでの試験を行い、その結果、大型海水淡水化施設の造水に必要な電力消費量を約10%削減可能であることが示された。また、海水による発電実現に向け試験開発を行っており、 3.2 W/m^2 のPRO膜出力を得ている。

浸透圧発電は現在未利用の塩分濃度差を利用した再生可能エネルギーであり、本技術の実用化、普及促進を目指していきたい。

J C M A

【筆者紹介】

松山 慧（まつやま けい）
協和機電工業㈱
事業開発部



坂井 秀之（さかい ひでゆき）
協和機電工業㈱
代表取締役社長

