

〈研究発表〉

海水淡水化プラントの取水条件に基づいた電力削減制御

難波 諒¹⁾, 横川 勝也²⁾, 松代 武士³⁾, 山形 英顕⁴⁾, 松井 公一⁵⁾, 黒川 太⁶⁾

- 1) 株式会社 東芝 (〒183-0043 東京都府中市東芝町1, E-mail: ryo.namba@toshiba.co.jp)
- 2) 株式会社 東芝 (〒183-0043 東京都府中市東芝町1, E-mail: katsuya.yokokawa@toshiba.co.jp)
- 3) 株式会社 東芝 (〒183-0043 東京都府中市東芝町1, E-mail: takeshi.matsushiro@toshiba.co.jp)
- 4) 株式会社 東芝 (〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1, E-mail: hideaki1.yamagata@toshiba.co.jp)
- 5) 株式会社 東芝 (〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1, E-mail: koichi4.matsui@toshiba.co.jp)
- 6) 株式会社 東芝 (〒183-0043 東京都府中市東芝町1, E-mail: futoshi.kurokawa@toshiba.co.jp)

概要

逆浸透膜法による海水淡水化プラントでは、ランニングコストの半分以上をポンプの電力消費量が占めるため、消費電力削減が技術課題の一つである。本稿では、海水の塩分濃度や水温の季節変動や日変動による膜透過特性の変化に着目し、一定量の淡水を得るために必要な電力量を削減するためのポンプやバルブの自動制御方法を提案する。具体的にはまず、海水の塩分濃度や水温の変動によって変化する電力量を評価可能なシミュレーションモデルについて述べる。さらに、海水取水量に対して得られる淡水量の比率である回収率を操作量とした自動制御の電力削減効果についてシミュレーション評価した結果を示す。

キーワード： 脱塩(Desalination), 逆浸透(Reverse Osmosis), 電力削減(Energy Reduction)

1. はじめに

世界的な水不足が懸念されている中、中東・アフリカなどの地域では、2025年には水不足が深刻化すると予想されている。その解決策の一つとして、海水から淡水を得る海水淡水化システムの導入が盛んになってきており、市場成長率は年10%以上と言われている¹⁾。特に、逆浸透(Reverse Osmosis: RO)膜による海水淡水化(Seawater Reverse Osmosis: SWRO)方式は、近年の膜の性能向上により蒸発法に比べて造水コストの面で有利となり、2002年以降導入が進んでいる。

SWRO方式では、ポンプにより浸透圧以上の高い圧力を海水に与えることでRO膜を透過させて淡水を得る。その際、ポンプ動力として消費する電力量はラン

ニングコストの半分以上を占める²⁾。また、海水の塩分濃度や濁度、水温、pHなどの種々の水質項目は季節変動や日変動を有しているため、RO膜の透過特性は変化し、それに応じて消費する電力量も変化する。また近年では、前処理の処理方法の差による水質の変化と電力量の関係についても研究されている³⁾⁴⁾。

本稿では、RO膜の透過特性へ影響が大きいと思われる塩分濃度と水温に着目し、それらの変動による電力量の変化を模擬可能なシミュレーションモデル例を示す。また、回収率(海水取水量に対して得られる淡水量の比率)の操作による電力原単位(kWh/m³; 生産する淡水あたりの電力消費量)の変化をシミュレーション評価し、電力原単位が最小となる回収率について考察する。さらに、最小電力原単位を実現するポンプ・バルブの自動制御方法を提案する。

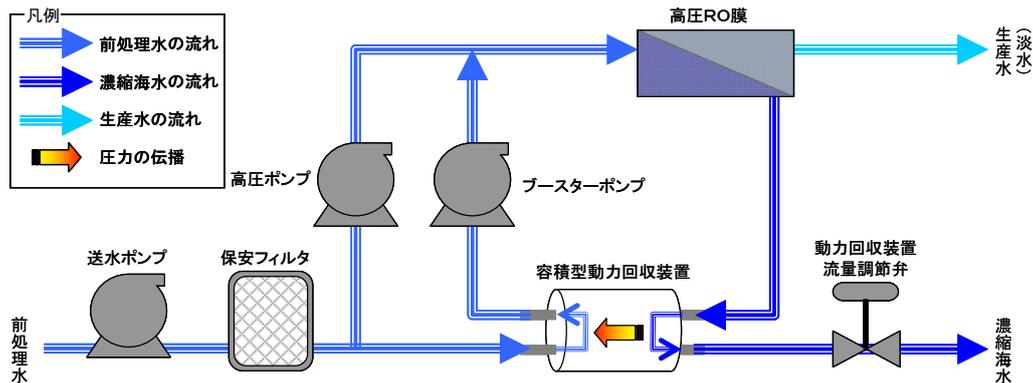


Fig. 1: Principal Layout of Bench-Scale SWRO Process

2. 対象プロセス

2.1 プロセス概要

一般にSWROプラントでは海水を取水後、滅菌や濁質除去を目的とした前処理を行った海水（前処理水）に対して脱塩を行う。本稿では、Fig. 1のように前処理後の脱塩プロセスを対象とした。

送水ポンプにより送水された海水は機器保護を目的とする保安フィルタを通過した後、高圧ポンプにより圧力（6.5MPa程度）を加えられる。高圧RO膜の逆浸透現象により濾過された淡水が生産水となるが、濾過されない濃縮海水は高い圧力を保持して動力回収装置へ入る。動力回収装置は保安フィルタを通過した海水に濃縮海水が持つ圧力を伝える。動力回収装置により昇圧された海水はブースターポンプにて高圧RO膜流入圧力不足分を昇圧され、高圧RO膜へ流入する。

2.2 プロセスシミュレータ

本稿では、Fig. 1に示したプロセスを模擬するシミュレータを使用して、電力量を評価する。以下、各装置のモデルとそれらの演算方法について述べる。

(1) ポンプ・バルブ・配管

Table 1はプロセス中の3ポンプ（送水ポンプ、高圧ポンプ、ブースターポンプ）の性能概要を示している。シミュレータには、ポンプの性能曲線を基に二次曲線近似したモデルを組み込んでいる。また、配管・バルブによる損失は、ヘーゼン・ウィリアムズ式やバルブ特性曲線に基づいた損失水頭式を適用した。

(2) 高圧RO膜

RO膜のモデルについては様々なモデルが提案されているが、シミュレータには溶解・拡散モデルを使用した⁵⁾。溶解・拡散モデルは以下の2式で表現される。

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

$$J_s = B(C_F - C_P) \quad (2)$$

J_w : 溶媒の透過流束、 J_s : 溶質の透過流束、

ΔP : 膜間の差圧、 $\Delta \pi$: 溶質による浸透圧、

C_F : 透過前の溶質濃度、 C_P : 透過後の溶質濃度、

A : 溶媒透過係数、 B : 溶質透過係数

Table 1: Performance of Three Pumps

	送水ポンプ	高圧ポンプ	ブースターポンプ
流量 (m ³ /min)	1.7	0.83	1
揚程 (m)	30	600	150
効率 (%)	50	75	50

水質条件に対する透過流速の高低

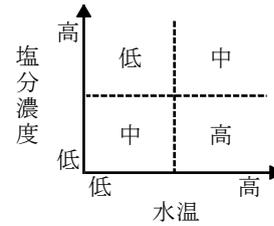


Fig. 2: Correlation between Permeate Flow and Water Condition

なお、溶媒・溶質の透過係数である A 、 B は塩分濃度や水温などの水質による影響を受ける。

塩分濃度、水温によるRO膜の透過特性を Fig. 2に示す。塩分濃度が低く、水温が高ければ、透過流速が高く、高圧RO膜による淡水生産能力は高くなる。逆に、塩分濃度が高く、水温が低い場合、淡水生産能力は低くなる。

なお、プロセスシミュレータでは、試験データにより同定した塩分濃度、水温によるRO膜の透過特性を透過係数 A 、 B に適用した。

(3) 動力回収装置

海水淡水化プラントの動力回収装置には、ペルトン水車・ターボチャージャ・容積型などがあるが、容積型は90%以上の動力回収効率を達成でき、近年シェアを伸ばしているため、本シミュレータには容積型のモデルを組み込んだ。

容積型動力回収装置のモデルは、Fig.3の性能曲線に基づき、高圧側、低圧側それぞれについて、流量に基づき水頭損失を与えるものとした。

動力回収装置は流入量が増える場合、Fig.3の様に流量に応じて高圧側・低圧側の損失水頭が相互に影響を及ぼすため、動力回収性能のポテンシャルを引き出すには、流量調節弁を適切に制御する必要がある。

容積型動力回収装置性能曲線

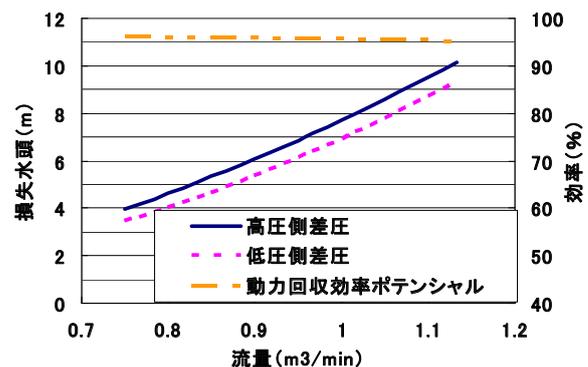


Fig.3: Performance of Isobaric Energy Recovery Device

Table 2: Evaluation of Simulation Accuracy

(A) 生産水量

水温 (°C)	塩分濃度 (mg/L)	回収率 (%)	生産水量 (m ³ /h)		誤差 (%)
			実測値	シミュレーション値	
15.5	29610	46.9	5.51	5.55	0.7 %
16.3	29890	52.2	5.51	5.59	1.4 %
16.3	29960	54.4	5.51	5.6	1.6 %

(B) 濃縮海水塩分濃度

水温 (°C)	塩分濃度 (mg/L)	回収率 (%)	濃縮海水塩分濃度 (mg/L)		誤差 (%)
			実測値	シミュレーション値	
15.5	29610	46.9	55640	55757	0.2 %
16.3	29890	52.2	60030	58852	-2.0 %
16.3	29960	54.4	61360	62504	1.8 %

2.4 プロセス値演算法と精度

本プロセスシミュレータは、各装置のモデルからなる連立方程式に対して、ニュートン法により解を求める。塩分濃度による浸透圧の変化を模擬するため、塩分の物質収支も考慮している。ニュートン法により、各機器の入口・出口部の静的なプロセス値（流量、圧力、塩分濃度）を算出することができ、それら結果に基づいて対象プロセスの電力原単位を演算することができる。本プロセスシミュレータの精度評価結果を Table 2 に示す。実プラントより入手した実測値とシミュレーション値の誤差は概ね2.0~1.8%である。流量計の精度は1%程度であるため、十分な精度であると判断した。

3. シミュレーションによる電力原単位評価

3.1 シミュレーション条件

対象プロセスの規模は1,000m³/日を想定した。具体的には Table 1 で示したポンプと動力回収装置が各1台稼動しており、高圧RO膜は1ベッセルあたり7エレメントとし、8ベッセルが1つのユニットを構成するものとした。

3.2 評価対象取水条件

Fig.4、Fig.5 は関東沿岸の海域の塩分濃度と水温の季節変動を示している。塩分濃度の季節変動である毎月の平均塩分濃度は概ね33000~34000mg/Lであり、各月の最大・最小塩分濃度は1000~3000mg/L程度の偏差を有している。

また、Fig.5に示すように水温は季節変動が大きく、2月と8月の平均水温を比較しても10°C以上差がある。また、年間の最小水温と最大水温の差は約20°Cである。

Table 3: Simulation Conditions

	時期	塩分濃度 (mg/L)	水温 (°C)	透過流束
条件1	2月	34910	6.8	低
条件2	8月	30010	27.72	高

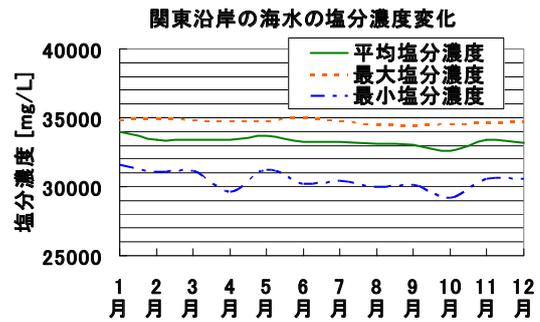


Fig.4: Salinity Concentration at The Coast of Kanto Area Adapted from Japan Oceanographic Data Center⁶⁾

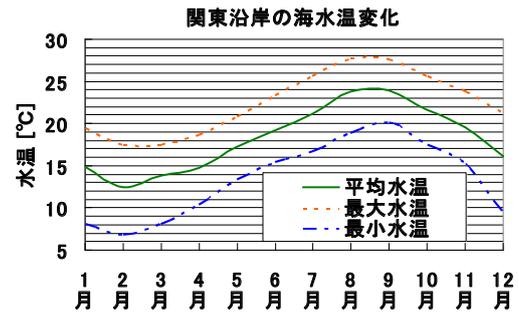


Fig.5: Seawater Temperature at The Coast of Kanto Area Adapted from Japan Oceanographic Data Center⁶⁾

本稿では、淡水生産能力の差が最も大きい Table 3 の2月と8月の条件について、電力原単位をシミュレーション比較し、塩分濃度・水温に応じて回収率を変化させることによる電力原単位削減効果について評価する。

3.3 電力原単位評価

Table 3 の2条件に対し、回収率の変化による電力原単位の変化を Fig.6、Fig.7 に示す。生産する淡水量は一定とし、濃縮海水流量を変化させることで回収率を制御した。淡水量は高圧ポンプ、濃縮海水量はブースターポンプにて流量制御している。また、動力回収装置流量調節弁は適切に制御され、動力回収装置の性能を引き出している場合の結果である。

電力原単位の値に着目すると、8月は2.37~2.40kWh/m³、2月は3.48~3.54kWh/m³であり、8月と2月の電力原単位は1.1kWh/m³差があることから、塩分濃度と水温が電力原単位に与える影響は大きいことが分かる。

また、8月の条件で最も電力原単位が低い回収率は約40%である。実際、多くのSWROプラントでは、試験プラントによる実験データにより、40%付近の一定回収率で運転を行っている。

一方、淡水生産能力が低い2月の条件となると、電力原単位が最も低い回収率（最適回収率）は約37%となり、最適回収率に約3%の差が生じる。つまり、年間を通して、8月の条件に基づき40%付近で固定運転

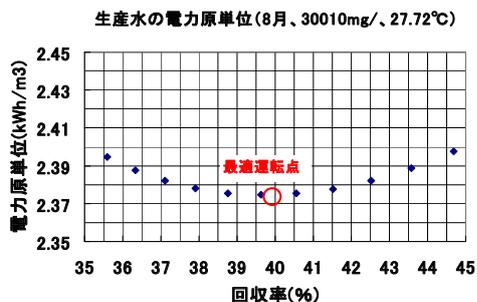


Fig.6: Specific Energy Consumption (August, 30010mg/L, 27.72°C)

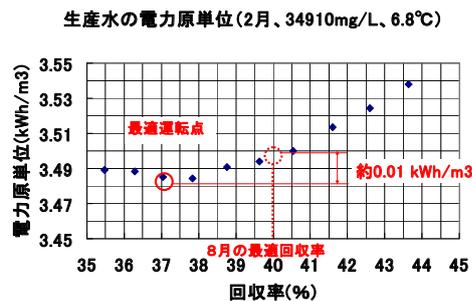


Fig.7: Specific Energy Consumption (February, 34910mg/L, 6.8°C)

している場合、最適回収率にて運転をしていないため、電力を無駄に消費することになる。

生産する淡水量が一定の条件のもとで、Fig.6、Fig.7 以外の塩分濃度や水温のケースについて同様の評価を行った場合、電力原単位を最小とする回収率は塩分濃度や水温に応じて変化した。最適回収率と塩分濃度、水温との関係を図示すると Fig.8 となる。

4. 考察

Fig.6、Fig.7 の結果から分かるとおり、海水の塩分濃度や水温により、電力原単位を最小とする回収率は変化するため、Fig.9 のように塩分濃度と水温をセンサにて監視し、その値に応じた最適回収率で運転することを考える。

しかしながら、Fig.7 のように、最適回収率は約 3% の変化があるのに対し、電力原単位の変化は約 0.01kWh/m³ (0.3%)であるため、より大きな電力原単

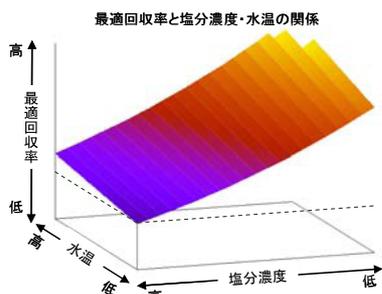


Fig.8: Correlation of Optimum Recovery Rate with Salinity Concentration and Seawater Temperature

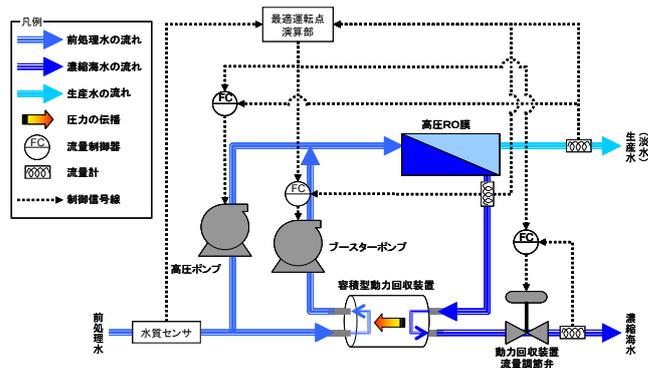


Fig.9: An Example of Composition to Control for Specific Energy Consumption

位削減効果を得るためには、海水の塩分濃度・水温以外の水質項目が高圧RO膜へ与える影響を加味し、対象プロセスの範囲も前処理プロセスを加えるなど、プラント全体の最適化を図る制御を行う必要がある。

5. まとめ

本稿では、海水の塩分濃度や水温によって電力原単位が変化すること、電力原単位を最小とする最適運転点(最適回収率)は塩分濃度と水温により変化することをシミュレーションにて示した。

今回の対象プロセスでは、前処理による水質変化を考慮していないため、今後は前処理プロセスも含めて、塩分濃度・水温以外の水質項目の高圧 RO 膜への影響を明らかにし、プラント全体のランニングコストを最小とする制御アルゴリズムを開発し、実プラントにて検証を行う。

参考文献

- 1) 日本原子力産業協会: 海水淡水化の現状と原子力利用の課題ー世界的な水不足の解消をめざしてー, 調査研究報告書, (2006)
- 2) 下水道技術推進機構: 特集 日量5万トンの水を造れ,新機構情報, Vol. 13, No.51 (2005)
- 3) Richard L. Stover: Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices, Elsevier, Desalination, No. 203, pp. 168 - 175 (2007)
- 4) Heinz Ludwig: Possibilities for energy optimization in design and operation of SWRO Plants, Desalination & Water Reuse, Vol. 19, No.2, pp. 14 - 26 (2009)
- 5) Soltanieh M., and Gill W.: Review of Reverse Osmosis Membranes and Transport Models, Chemical Engineering Communications, Vol. 12, No. 4, pp. 279 - 363 (1981)
- 6) 日本海洋データセンター(JODC): 水温統計・塩分統計, <http://www.jodc.go.jp>