

# 海水淡水化プラントの造水コスト低減技術

Technologies to Reduce Water Production Costs at Seawater Desalination Plants

松井 公一      黒川 太      松代 武士

■ MATSUI Koichi      ■ KUROKAWA Futoshi      ■ MATSUSHIRO Takeshi

近年、世界的に水不足の問題が深刻化しているに伴って、海水淡水化プラントの普及が進んでおり、なかでもRO (Reverse Osmosis) 膜法が主流となってきている。海水淡水化は水不足解消の有効な手段であるが、電力や薬品を多く使用し、運用コストが高価であるという課題がある。

東芝は、省コストで海水淡水化プラントの運用を実現する制御技術と運用技術を開発した。一つは、回収率最適制御技術であり、RO膜は原水水質により必要な動力費が変化するため、動力費がもっとも低くなる回収率での運転制御は非常に有効である。もう一つは、膜前処理の最適運用技術であり、膜洗浄に温水を利用して汚れを効率よく除去することで膜本数を削減し、イニシャルコスト低減と省資源を実現する。これらの技術の適用により、スマートな造水ソリューションを提供することができる。

Due to the increasingly serious water shortage on a global scale in recent years, seawater desalination plants, particularly those utilizing the reverse osmosis (RO) membrane process, are becoming a widespread solution for the production of water. However, with the usage of large amounts of both electricity and chemicals in desalination plants, their high operating cost is an important issue affecting their dissemination.

Toshiba has developed the following technologies to reduce water production costs at seawater desalination plants: (1) an optimal recovery control technology that achieves the lowest energy cost in the operation of energy recovery equipment at any desalination recovery rate, and (2) an optimal operation technology applying the backwashing of membrane filters with hot water, which reduces the initial cost and energy cost by allowing the number of membrane modules required to be selected. We will offer smart desalination solutions applying these technologies.

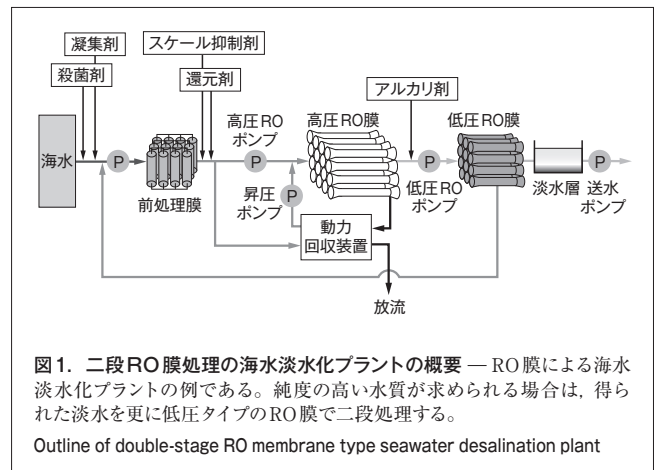
## 1 まえがき

近年、世界的な人口増加や経済発展に伴って、水の需要が増加している。また、地球温暖化などによる水循環への影響もあり、世界各地で水不足が深刻な問題になっている。これを解消する有効な手段の一つとして海水淡水化技術がある。海水淡水化の方式には蒸発法と膜法があり、造水コストが比較的安い膜法が主流となってきており、なかでもRO (Reverse Osmosis) 膜法の普及が進んでいる。

しかし、省エネの観点からはまだまだ多くの課題があり、淡水化のコストを低減するための技術開発が注目されている<sup>(1), (2)</sup>。その中には低圧型RO膜や高効率動力回収装置など数多くの開発アイテムが存在するが、プラントを適切に運用することも重要であり、それらを総合的にエンジニアリングすることが必要である。

プラントの適切な運用には制御技術と運用技術が不可欠であり、東芝は、省コストや省資源を実現するための回収率最適制御技術と膜前処理の最適運用技術を開発した。

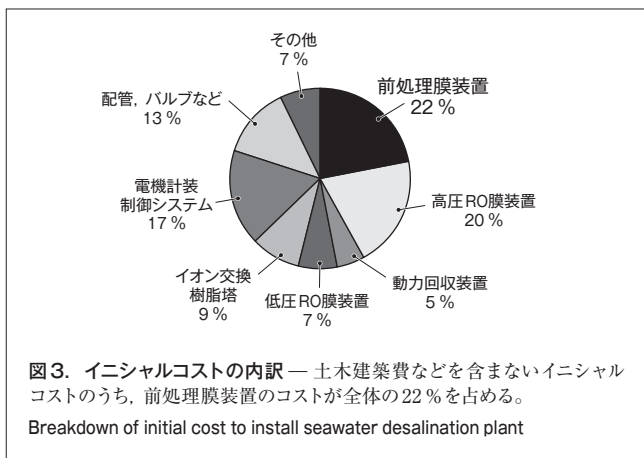
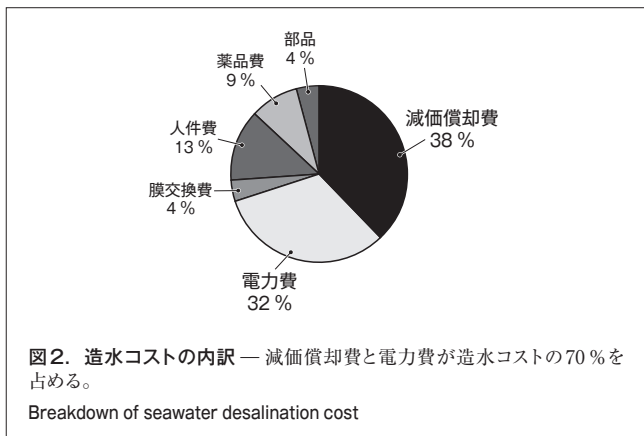
また、エンジニアリングには、水質プロセスシミュレーションや自動制御、最適運用を考慮した機器選定及び制御設計が不可欠である。当社は、水質予測や制御手法の開発を行い、省コストで運用できるようなエンジニアリングを行っている。



ここでは、RO膜法海水淡水化プラントの課題と、回収率最適制御技術及び膜前処理の最適運用技術について述べる。

## 2 RO膜法海水淡水化プラントの課題

一般的な二段RO膜処理の海水淡水化プラントの概要を図1に示す。RO膜法による海水淡水化プラントでは、高圧RO膜に5～7 MPa程度の高い圧力をかけて脱塩し、淡水を得る。ボイラへの純水供給用などでは、得られた淡水を更に低圧



タイプのRO膜で処理してより純度の高い水質にする。  
一般的な海水淡水化プラントの造水コストの内訳を図2に示す。減価償却費が38%でもっとも比率が高く、電力費が32%で次に高いことがわかる。省コストで造水を実現するためには、これらのコストを改善することが有効である。

電力費の改善では、高圧RO膜へ海水を供給する高圧ポンプの動力費削減が有効であるため、これが課題となる。また、減価償却費は、インシャルコストの削減が必要となる。インシャルコストの内訳の一例を図3に示す。これは、膜による前処理を採用したケースの内訳であり、前処理膜装置のコストが22%と大きく、このコスト削減が課題となる。

当社は、これらの課題に対し、動力費を削減する制御技術と、インシャルコスト低減や省資源を実現する膜の最適運用技術に注目して、造水コストの改善に向けた技術開発を行っている。次章以降で、これらの技術の詳細について述べる。

### 3 回収率最適制御技術

#### 3.1 制御システムの概要

当社は、二段RO膜処理の海水淡水化プラントにおいて、低圧RO膜での回収率をプラント全体のエネルギー最小化の

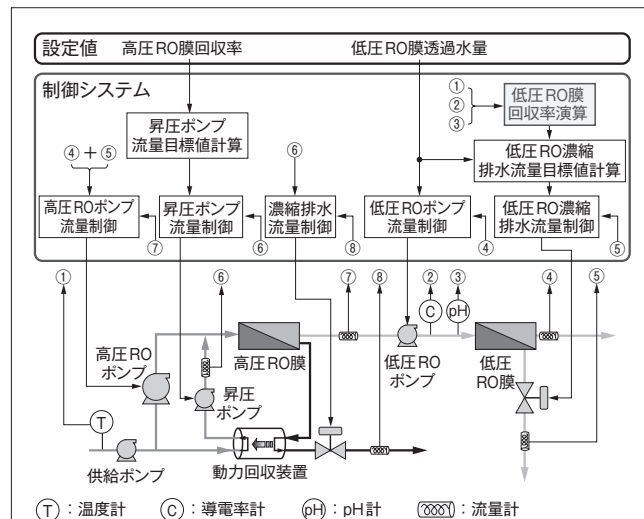


図4. 回収率最適制御システムの概要 — 二段RO膜処理のシステムでは、低圧RO膜での回収率を制御することで、従来と比較してエネルギー原単位を年間で0.17 kWh/m<sup>3</sup>削減できる。  
Outline of optimal recovery control system for double-stage RO membrane type seawater desalination plant

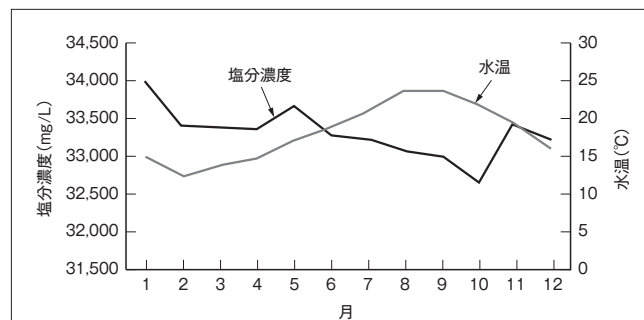


図5. 海水の塩分濃度と水温の年間変動 — 東京湾近海の海水の塩分濃度と水温の年間変動である。  
Example of seasonal variations in seawater salinity and temperature

観点から最適に制御することで、高圧ROポンプの動力を削減する制御システムを開発した<sup>(3)</sup>。

開発した回収率最適制御システムの概要を図4に示す。プラント全体の生産水量は一定であることが求められるため、低圧RO膜の透過水量が一定となるように流量制御する。このとき、低圧RO膜での回収率を最大化するように制御することで、低圧ROポンプへの供給流量を最小化する。この結果、高圧ROポンプの流量目標値が低下し、結果として高圧ROポンプの動力費が削減される。

海水は比較的安定した水質であるが、図5に示すように、海水の塩分濃度や水温は年間で変動する。このような多様性を考慮しながら、図4に示す低圧RO膜回収率演算部で、低圧RO膜での回収率を最大化するように演算を行う。ただし、低圧RO膜での回収率を上げると、濃縮水の無機物が析出し

てRO膜が早期に目詰まりするため、無機物が析出しない範囲で回収率を最大化する必要がある。

回収率最適制御システムでは、次のようにして低圧RO膜での回収率を演算する。

$$LSI = pH - pH_s \quad (1)$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2)$$

$$A = (\log(TDS) - 1) / 10 \quad (3)$$

$$B = -13.12 \times \log(t + 273) + 34.55 \quad (4)$$

$$C = \log(Ca) - 0.4 \quad (5)$$

$$D = \log(Alk) \quad (6)$$

$LSI$  : ランゲリア指数

$pH$  : 低圧RO膜濃縮水のpH(水素イオン指数)

$TDS$  : 溶解性蒸発残留物。導電率と温度から換算(mg/L)

$t$  : 海水温度(°C)

$Ca$  : カルシウム濃度(mg/L,  $CaCO_3$ (炭酸カルシウム)換算)

$Alk$  : アルカリ度(mg/L,  $CaCO_3$ 換算)

低圧RO膜の濃縮水の $pH$ ,  $TDS$ ,  $Ca$ ,  $Alk$ は、低圧RO膜での回収率で変化する。したがって、次の式(7)を満足する範囲で低圧RO膜での回収率を最大化して、回収率を決定する。

$$LSI(r) < LSI_{max} (= 0) \quad (7)$$

$r$  : 低圧RO膜回収率( $0 < r \leq 1$ )

$LSI_{max}$  : 無機物が析出しない $LSI$ の最大値

この制御システムの妥当性を検証するため、海水の年間水質データを用いてシミュレーションを行った。

### 3.2 シミュレーション結果

開発した回収率最適制御システムと、一般的に適用されている回収率一定制御システムに対し、図5に示す月単位の海水温度と塩分濃度の平均値を用いて、次に示す条件でエネルギー原単位をシミュレーションした。

- (1) 生産水量 4 m<sup>3</sup>/h
- (2) 高圧RO膜での回収率 50%
- (3) 高圧RO膜透過水のpH 5.5
- (4) 高圧RO膜透過水のアルカリ度 4 mg/L
- (5) 高圧RO膜透過水のカルシウム濃度 0.1 mg/L
- (6) 低圧RO膜供給水のpH 9.5

このとき、回収率一定制御は、海水温度がもっとも高く、無機物の析出がない範囲で回収率が最大となる70%とした。

シミュレーション結果を図6に示す。回収率一定制御と回収率最適制御を比較すると、後者のほうが常にエネルギー原単位が小さいことがわかる。回収率最適制御システムを適用すれば、年間平均で0.17 kWh/m<sup>3</sup>のエネルギー原単位の削減が可能である。また、海水温がもっとも低くなる2月では、最大0.29 kWh/m<sup>3</sup>のエネルギー原単位の削減が可能である。

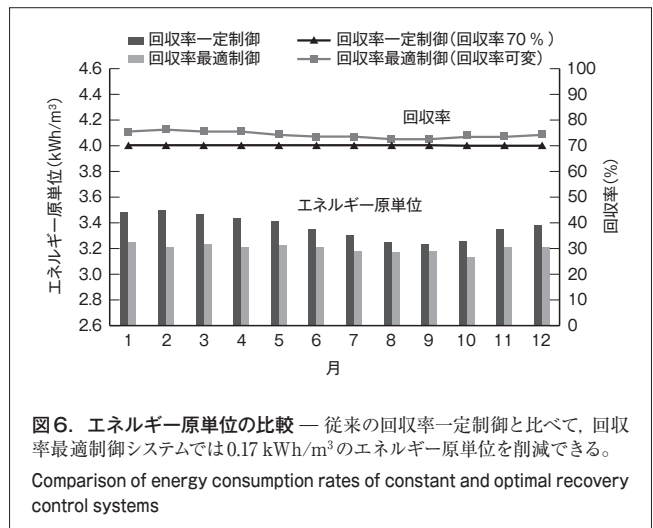


図6. エネルギー原単位の比較 — 従来の回収率一定制御と比べて、回収率最適制御システムでは0.17 kWh/m<sup>3</sup>のエネルギー原単位を削減できる。

Comparison of energy consumption rates of constant and optimal recovery control systems

エネルギー原単位が削減されることで、造水コストの削減が可能である。

## 4 膜前処理の最適運用技術

海水淡水化システムでは、前処理に膜を適用することにより処理が安定し、プラントをより安全に継続して運転できる。しかし、汚染が進んだ海域では膜の必要本数が増大し、インシヤルコストを押し上げる要因の一つとなる。したがって、膜本数を削減するためには、膜前処理の単位面積当たりの処理量(以下、fluxと言う)を向上させる必要がある。

処理量向上のためろ過の流れとは逆方向に水を流す従来の逆洗(以下、水洗浄と言う)では、膜に付着した汚れをとっても除去しきれない汚れが膜表面に蓄積する。このため膜の目詰まりが生じ、膜前処理でろ過する際の圧力が増加する。その結果、薬品洗浄の頻度を高くするなどの対策が必要になり、環境負荷やコストの増大を招くといった課題があった。

そこで当社は、膜性能の回復のため、従来の水洗浄に加え、温水での逆洗(以下、温水洗浄と言う)を併用することで、膜に付着した汚れを効率よく除去する膜前処理システムを開発した。温水洗浄の条件を最適化し、温度を40°C、流量をろ過流量の2倍、時間を30sに設定して膜性能の回復試験を実施した結果、図7に示すように従来の水洗浄のflux 1.5 m/日に対し、1.7倍のflux 2.5 m/日を達成した<sup>(5)</sup>。

更に、パイロットプラントで、flux 1.0 m/日で連続試験を行った。その結果、図8に示すように、従来の水洗浄だけの場合に比べ40°Cの温水洗浄を併用することで膜間差圧の上昇を抑制できることが確認できた<sup>(5)</sup>。

この結果を踏まえ、従来の水洗浄だけの場合(flux 1.5 m/日)と40°Cの温水洗浄を併用した場合(flux 2.5 m/日)とのコスト比較を行った(図9)。インシヤルコストとして温水器や配管

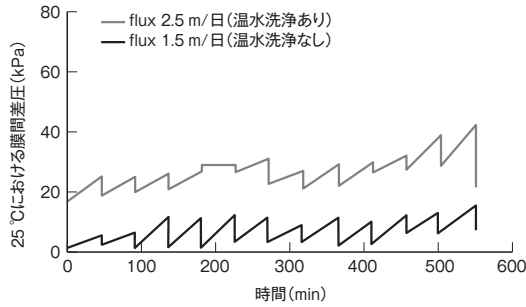


図7. 温水洗浄の追加によるflux向上 — 従来の水洗浄と温水洗浄の併用により、従来比で1.7倍のfluxを達成した。

Comparison of fluxes applying backwashing of membrane filter with and without hot water

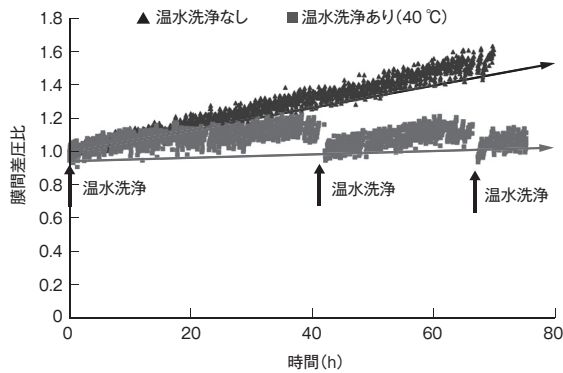


図8. パイロットプラントでの連続試験における膜間差圧の経時変化 — 40℃の温水洗浄を併用することで、膜間差圧の上昇を抑制できることが確認できた。

Changes in transmembrane pressure during continuous tests at pilot plant

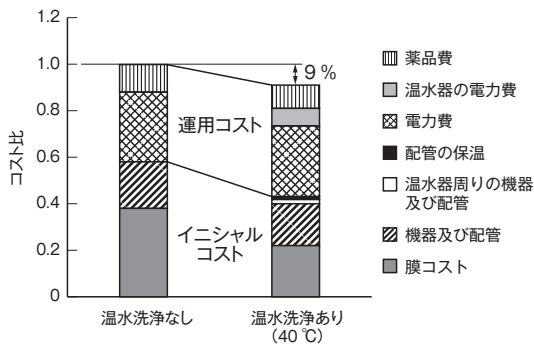


図9. 水洗浄コストの評価結果 — 温水洗浄の併用により、トータルコストを9%削減できる。

Evaluation of capital expenditures and operating costs of seawater desalination plants applying backwashing of membrane filter with and without hot water

のコストが、また運用コストとして温水器の電力費が追加となるが、膜本数の削減効果により、トータルで9%のコスト削減効果の見通しを得た<sup>(5)</sup>。

現在、パイロットプラントで連続試験を継続中で、海水の季節変動に対する膜前処理の長期安定性を確認するとともに、海域の多様性への対応を視野に入れ、膜の目詰まりの要因となる物質の特定及び対策技術の評価を進めている。

## 5 あとがき

回収率最適制御技術及び膜前処理の最適運用技術は、2011年9月にパースで開催された国際脱塩協会 (IDA) の研究発表会で海外からも注目された。更なる改善と実プラントへの導入を実現していきたい。

BOT (Build Operate Transfer) やBOO (Build Own Operate) などの民間資金による社会インフラ整備プロジェクトが世界的に加速するなか、造水コストの低減は常に求め続けられるテーマである。開発される多くの省エネ製品をどのように採用し、運用するかがプラント運営上非常に重要であり、今後も当社は、制御技術と運用技術の総合的なエンジニアリングで省コストと省資源を実現するソリューションを提供し続けていく。

## 文 献

- (1) Heinz, L. Possibilities for energy optimization in design and operation of SWRO Plants. Desalination & Water Reuse. 19, 2, 2009, p.14 - 26.
- (2) Richard, L. S. "Permeate Recovery Rate Optimization at the Alicante Spain SWRO Plant". IDA World Congress 2009. Dubai, UAE, 2009-09, IDA. 2009, p.131.
- (3) Yokokawa, K. et al. "MODEL-BASED OPTIMAL CONTROL FOR SWRO PROCESS BASED ON A PILOT PLANT DATA", IDA World Congress 2011. Perth, Australia, 2011-09, IDA. 2011, p.59.
- (4) 日本海洋データセンターホームページ. 処理データ. <<http://jdoss.jodc.go.jp/>>. (参照 2012-04-02).
- (5) Matsushiro, T. et al. "OPTIMIZING THE BACKWASHING CONDITION IN MEMBRANE PRETREATMENT FOR SWRO PLANT", IDA World Congress 2011. Perth, Australia, 2011-09, IDA. 2011, p.391.



松井 公一 MATSUI Koichi

社会インフラシステム社 水・環境エンジニアリングセンター 水・環境プロセス技術部グループ長。海水淡水化プラントなどのプロセスエンジニアリング業務に従事。IDA 会員。  
Water & Environmental Engineering Center



黒川 太 KUROKAWA Futoshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 環境・水システム開発部主幹。上下水道制御システムの研究・開発に従事。IDA 会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



松代 武士 MATSUSHIRO Takeshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 環境・水システム開発部主務。上水処理及び海水淡水化システムの研究・開発に従事。IDA 会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center