蒸発法海水淡水化技術の開発*

Research and Development of Thermal Seawater Desalination Technology

大塚 裕之**
OHTSUKA Hiroyuki大島 翼**
OHSHIMA Tsubasa

Abstract There are growing needs for seawater desalination plants all over the world in order to secure stable water resources. Hitachizosen has seawater desalination technologies for three processes (MSF, MED and RO). A significant amount of research and development (R&D) has been carried out in order to constantly improve the technologies and reduce the cost of desalination. This paper describes the features of the processes, overviews of our recent R&D activities and future trends in thermal seawater desalination technologies.

Keywords: Thermal Seawater Desalination, Multi Stage Flash, Multi Effect Distillation, Vapor Compression

1. はじめに

「水の惑星」と呼ばれる地球であるが、地球上に存在する水は 97.5%が海水であり、淡水はわずか 2.5%である。しかも、淡水のうち氷河などの水が約 1.7%であるので、人類が容易に利用できる地下水、河川、湖沼として存在する淡水は、地球上の水の 0.8%に過ぎない。

また、水は地域偏在性が極めて高い資源であり、特に中近東やアフリカなどの国では、慢性的に水不足にさらされている。加えて、近年の人口の急激な増加、経済・生活レベルの向上に伴い、世界各地で水需要が拡大する一方で、水資源が確保できない地域が多く存在するようになってきている。

このように水不足問題が深刻化するなか、海水から淡水を生産する海水淡水化技術は、水資源の安定供給源として世界的にその重要性を高めている。海水はおおよそ 3.5%の塩分を含んでいるので、通常の水として利用するためには、0.05%以

下まで低減しなければならない。脱塩処理して飲料水や工業用水を生産するプロセスは海水淡水化と呼ばれており、その方法には、蒸発法、逆浸透膜法、電気透析法、イオン交換樹脂法などがある。これらの中で現在実用化されているのは、蒸発法と逆浸透膜法である。世界の海水淡水化プラント設備の累積容量は 2010 年で 6000 万 $\text{m}^3/\text{日}$ を超えており、毎年設備容量で 2010 年には 470 万 $\text{m}^3/\text{日}$ 、2016 年には 1330 万 $\text{m}^3/\text{日}$ の需要が見込まれている [1]。このように今後更なる淡水化の需要拡大が予測されている。

当社は、蒸発法および逆浸透膜法を採用した海水淡水化技術を所有し、現在までに 39 プロジェクト、総造水量で 117 万 m^3 の建設実績を有している [2]。中でも蒸発法に関しては 1971 年に 1 号機を建設して以来、今日まで運転実績を積み重ねて技術知見を蓄積してきた。また、継続的に研究開発を推進して、海水淡水化技術発展の一翼を担ってきた。本稿では、主に当社の蒸発法海水淡水

* 2011.1.31 受付

** 日立造船(株)技術研究所 〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11

TEL : (06)6551-9173 FAX : (06)6551-9841 E-mail : ohtsuka_h@hitachizosen.co.jp

化技術の研究開発について紹介する。

2. 蒸発法による海水淡水化の方式

現在普及している蒸発法の海水淡水化技術には、多段フラッシュ法 (Multi Stage Flash : MSF) と多重効用法 (Multi Effect Distillation : MED) の二つの方法がある。この他、蒸気圧縮法 (Vapor Compression : VC) があるが、これは蒸発器内で発生した蒸気を再利用する方法であり、蒸発器の形式ではない。VC は、多重効用法の消費電力を低減するために組み合わせて用いられることが多い。これらの蒸発法淡水化装置の形式と特徴について以下に説明する。

2.1 多段フラッシュ法

Fig. 1 に多段フラッシュ造水装置のフローを示す。取水された海水 (ブライン) は、各段の凝縮器管内を順次通過して凝縮潜熱を回収しながら昇温されていく。更に海水加熱器では外部からの加熱蒸気により所定温度まで昇温された後、蒸発器下部のフラッシュ室に供給される。フラッシュ室内は減圧されているので、供給された海水は、断熱自己蒸発 (フラッシュ蒸発) し、温度を下げながら次のフラッシュ室に流入する。各フラッシュ室内は、順次減圧されるよう設計されているため、ブラインは次々にフラッシュ蒸発を繰り返しながら温度が低下していく。各段で発生した蒸気は、凝縮器管内の海水にその保有熱を放出して凝縮し生産水を得る。

Fig. 1 MSF flow sheet.

多段フラッシュ法は、主に中東地区で発電・淡水化の二重目的プラントとして、大規模で信頼性の高い方式として建設され、経済性、エネルギー効率改善の技術開発が進められてきた。特に装置の大型化による経済性の追求が顕著であり、最近

では単機容量が 79,550 m³/日 (17.5 MIGD (MIGD : Million Imperial Gallon per Day)) の大型プラントが建設されている。このように多段フラッシュ法は、単機で最も高い生産能力が得られることが特徴である。また、ブライン最高温度を 110 °C 前後まで上げて運転することで造水効率を高めている。

2.2 多重効用法

多重効用法は蒸発室 (効用缶) を多数並べて、最初の効用缶で海水を加熱し、発生した蒸気を次の効用缶の加熱蒸気として使用し、これを順次繰り返して蒸発させる方法である。効用缶には伝熱面の配置と形状などの違いによって水平伝熱管式、垂直伝熱管式、プレート式などがある。以前は、垂直伝熱管式が用いられていたが、現在では大型化に有利な水平伝熱管式が主に採用されている。

Fig. 2 に水平伝熱管式多重効用造水装置のフローを示す。取水された海水は、水平に配置された伝熱管群の上部から供給され、伝熱管の外面に液膜を形成しながら流下していく。そして、系外より第 1 効用缶の伝熱管内に導かれた加熱蒸気によって加熱され、一部が蒸発して蒸気となる。発生した蒸気は第 2 効用缶の伝熱管内に送られ、管外を流下する海水により冷却され凝縮し淡水となる。このサイクルが最終効用缶まで繰り返し行なわれる。各効用缶は加熱された海水が蒸発するよう減圧されており、後段ほど蒸発温度が低くなるよう設計されている。

Fig. 2 MED flow sheet.

多重効用法は、多段フラッシュ法に比べて有利な面を多く持つため、近い将来の蒸発法の主流となるといわれている。多重効用法の主な特徴を以下に示す。

- ・ 伝熱管の内外面で凝縮、蒸発の相変化を伴う

ため伝熱係数が高い。

- ・ 蒸気圧縮法を併用することで、熱効率を高めることができる
- ・ 蒸気側と液側の熱交換推進力である温度差として MSF は対数平均温度差であるのに対して、MED は正味の温度差が利用できる。
- ・ MSF のようなブラインの非平衡温度差がほとんどなく、温度ロスがない。
- ・ 運転操作温度が 70 °C 以下と低いため、安価な材料が適用できる (MSF は 110 °C 前後)。
- ・ MSF のような大型ブライン循環ポンプがなく、消費電力が少ない。

2.3 蒸気圧縮法

蒸気圧縮法は最終段階で発生した低圧蒸気を断熱圧縮して高温、高圧の蒸気に転換し再度加熱蒸気として利用する方法である。発生蒸気の圧縮に蒸気エゼクタを用いる方法を Thermal Vapor Compression といい、機械式圧縮機で蒸気を圧縮する方法を Mechanical Vapor Compression という。最近のほとんどの MED は、蒸気消費量を低減するために蒸気圧縮法を併用している。

3. 多段フラッシュ法蒸発器の開発

MSF 法は 2.1 で記述した通り、大型の海水淡水化装置に適した技術である。

MSF の大型化には、単位幅あたりに流れるブライン流を高速化して、蒸発室単位面積あたりの蒸発量を増加させる必要があるが、大型化に伴って様々な技術的課題を克服しなければならない。主な技術的課題を以下に示す。

3.1 技術的課題

3.1.1 非平衡温度差

ブライン流が高速化するとフラッシュ蒸発が完了しないまま次段にブラインが流出する非平衡現象が発生し、蒸発性能が悪化する。フラッシュ蒸発における蒸発完了の程度を示す指標として非平衡温度差 (NETD : Non-Equilibrium Temperature Difference) が用いられ、次式の通り定義される。

$$NETD = T_b - T_s$$

ここで、 T_b は出口ブライン温度、 T_s は発生蒸気温度である。NETD が増大すると、凝縮器における有効温度差を低下させるので、所定の造水量を

得るには伝熱面積を増大させる必要がある。

3.1.2 段間オリフィスの吹き抜け

フラッシュ室の圧力は順次低下するように設計されており、各段で適正なブライン液位を保つように段間絞りオリフィスの開口面積が調整されている。ブライン液位が適切に維持されていないと、Fig. 3 に示すように前段で蒸発した蒸気が次段に吹き抜けてしまい、装置全体の効率が低下する。ブライン流の高速化に伴って、オリフィス開度を大きくする必要があるが、吹き抜けを防止するためにオリフィス開口よりもブライン液位を高く保持する必要がある。しかし、ブライン液位が上昇すると、底部を流動するブラインは液位による静圧の影響を受けるため、蒸発が妨げられて、蒸発効率の悪化を招く。

ブラインオリフィスの単位幅あたりに流れるブライン流量をウエアロード (Weir Road) と呼び、大型 MSF 造水装置では、1000 t/m-h 以上のウエアロードが必要となる。

Fig. 3 Steam leakage from the orifice.

3.1.3 管群振動

大型化による発生蒸気量の増加に伴って、凝縮器管束 (バンドル) の伝熱面積を増大しなければならない。伝熱面積を増大するには、伝熱管を長くする、もしくは伝熱管本数を増加すれば良いが、伝熱管長さには限界があるため (製造および輸送限界から考慮して、25 m が実質的な伝熱管長さ限界とされている)、伝熱管本数の多い大型の管束を開発する必要がある。

発生蒸気量が増加すると、バンドルに流入する蒸気速度も上昇するため、伝熱管の振動による破損、損傷などの振動事故が発生することがある。流体によって引き起こされる管群の振動は、カルマン渦による振動や流力弾性振動が挙げられる。管群振動を防止するには、振動の発生しない蒸気

流量まで減少させる必要があるが、所定の造水量を満足できなくなる。従って、大型 MSF になると (35,000 m³/日以上以上の造水能力)、片側から蒸気が流入するタイプのバンドル (シングルエントリー) では対応できず、両側から流入するタイプのバンドル (ダブルエントリー) が採用される (Fig. 4)。また、管群圧力損失の観点からもダブルエントリーは有効である。

Fig. 4 Steam inflow method to the bundle.

3.1.4 MSF バンドルにおける凝縮性能

フラッシュ室で発生した蒸気には、海水に含まれる炭酸イオンの分解によって発生した CO₂ や外部から漏れ込んだ空気等の非凝縮性ガスが含まれる。非凝縮性ガスが凝縮器内に混在すると、凝縮過程において伝熱面近傍では非凝縮性ガスの濃度が高くなるので、蒸気の凝縮が阻害され、凝縮熱伝達は低下する。また、CO₂ が存在すると、凝縮液膜の pH が低下して伝熱管腐食することも指摘されている[3]。

従って、MSF バンドルでは、Fig. 4 に示すようににバッフルプレートにてバンドルの一部を囲い、ガス冷却部を形成し、内部流れを高速化して非凝縮ガスを効率的に排出できるよう設計している。しかし、バンドル内の蒸気流れがスムーズでないと非凝縮性ガスがバンドル内に滞留し、著しい凝縮器能力の低下を招く。凝縮性能を低下させないためには、凝縮器内の非凝縮性ガスの挙動を把握して、効率良く非凝縮性ガスを排出することのできるバンドル形状を設計しなければならない。

3.2 フラッシュ蒸発実験

MSF 蒸発装置のフラッシュ蒸発に関する研究は、これまでに実験的、解析的に様々な検討がされているが[4, 5]、ここでは、実験的な取り組みを

紹介する。Fig. 5 にフラッシュ蒸発装置の概観を示す。実験装置は前室 Inlet Box と後室に挟まれた 1 段分の蒸発室を計測対象としている。蒸発室の断面形状は実機相当の寸法であるが、幅方向は 200 mm の 2 次元モデルとしている。蒸発室内には約 100 点の熱電対を設置してフラッシュ現象の解明を行っている。

Fig. 5 Photo of appearance of MSF flash test equipment.

Fig. 6 にブラインのウエアロードが 1000 t/m-h の条件で得られたブライン温度分布を示す。70 °C の温度条件では、せき越え直後にほぼ蒸発が完了しているのに対し、50 °C の低温では下流域付近まで蒸発が続いている。

Fig. 6 Temperature profile of flashing flow.
(Wire road : 1000 t/m-h)

次にウエアロードを 1400 t/m-h に上げた条件のブライン温度分布を Fig. 7 に示す。70 °C の温度条件では、1000 t/m-h と同様せき越え時にほぼ蒸発は完了しているが、50 °C の低温では、ステー

ジ出口まで蒸発が続き、蒸発が完了しないまま次段に流出している。このようにブライン流が高速化されると、特に低温条件において蒸発性能の悪化が著しい。これは、フラッシュ室底部を流動するブラインは液位による静圧の影響を受けるが、低温では蒸気圧が小さく蒸発が著しく抑制されるためである。

Fig. 7 Temperature profile of flashing flow.
(Wire road : 1400 t/m-h)

フラッシュ蒸発を促進させるためにオリフィスやせき形状を改良するなど内部構造の検討が行われている。その対策の一例として、Fig. 8 の下げ底構造を示す。段間オリフィス部分をフラッシュ室室底板よりも下部に設置することで、シール性を高めると共に、ブライン液位を低く設定できるので、ブライン流の高速化に対しても、効率の良いフラッシュ蒸発が可能となる。当社では、これまでに様々なオリフィス開発を行い、ウェアロード 1500 t/m-h まで向上させ、最大単機造水能力 90,000 m³/日まで対応することができる。

Fig. 8 Structure of lower bottom orifice.

3.3 凝縮器バンドルの数値解析

造水装置が大型化されると、プラント建設費の中で伝熱管の占める割合が大きくなる。そのため、

全ての伝熱管が十分に熱交換を果たすよう凝縮器を設計することが望まれる。当社では主に数値シミュレーションにより凝縮器バンドル内流れを検討して最適設計をしている[6]。開発したシミュレーションプログラムでは、蒸気と非凝縮性ガスの気-気2相流計算手法によって、非凝縮性ガス濃度による局所的な熱伝達低下の影響を考慮して、凝縮伝熱量や管束内の流れの状態を適切に評価することができる。また、複雑な固体境界に対しては、効率的に固体境界条件を表現できる仮想流束法[7]を用いている。

解析の一例として、Fig. 9 に非凝縮性ガスの体積率分布を示す。Fig. 9(a)では非凝縮性ガスがバンドル下部に滞留している様子が再現されている。Fig. 9(b)のようにプレートの形状を変更することで非凝縮性ガスの滞留する量が減少することがわかる。このようにシミュレーションにより非凝縮性ガスが排出されやすいバンドル形状を評価し、最適なバンドル形状を設計することが可能となった。

Fig. 9 Profile of non-condensable gas void fraction.

4. 多重効用法蒸発器の開発

MED は MSF よりも古くから確立された技術であるが、最大の需要地域である中近東では先に MSF が早くから普及し運転実績も蓄積されていたために採用されることはなかった。

しかし、1980 年代になると蒸気圧縮法を併用した MED 造水装置が市場に登場するようになり、1990 年代になると中東市場でもこの蒸気圧縮 MED 造水装置が採用されるようになった。そして、1990 年代後半以降、急速に大型化が進行し、これまでにない大型プラントが建設され、現在で

は、 $38,670 \text{ m}^3/\text{日}$ (8.5 MIGD) の大型 MED が建設されている。MSF と同様、大型化、省エネルギー化の開発が進められている。

MED 大型化への課題は、伝熱管が乾くことなく、常に安定した液膜を形成することである。多段に配置されている伝熱管列を流下する液膜蒸発では、バンドル下部に向かうほど蒸発により液膜流量は少なくなる。また、バンドル内で発生した蒸気は、バンドル外側に向かうほどその流出速度を増大させていく。そのため、バンドル上部から海水を均一に散布しても、バンドル内の液膜流は、発生蒸気の影響を受けて、バンドル下部では均一な液膜分布を得ることができない。元々、バンドル下部では液膜蒸発のため液膜流量は少なく、液膜の偏流が生じると、伝熱管表面に局所的な乾き（ドライアウト）が発生してしまう。このドライアウトが発生するとスケールが析出し、熱伝達が著しく低下するため、ドライアウトが発生しないように安定した液膜を形成することが必要である。そこで、当社では、実機と同じサイズのバンドルを備えた実験装置を建設して、ドライアウトの発生する限界熱流束、伝熱特性、ブライン液膜の偏流傾向などの設計する上で必要なデータを計測している[8]。Fig. 10 に MED 実験装置の概観を示す。バンドルは実機の片側半分を模擬した形状であり、 $45,000 \text{ m}^3/\text{日}$ (10 MIGD) 以上に対応できる。

Fig.10 Photo of appearance of test equipment.

4.1 流下液膜の流動状況

伝熱管を流下する液膜の流動状況を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a)では、伝熱管の直上から落下したブラインが管外表面を流下して、伝熱管表面全体が液膜で覆われている様子が観察される。しかし、ある限界の液膜流量以下になると Fig. 11(b) のように液膜が破断してドライアウトが発生する。

(a) Stable wet surface (b) Dryout surface

Fig. 11 Condition of falling films.

4.2 ブラインの偏流

バンドル上部からブラインを均一に供給しても、前述したようにバンドル下部の伝熱管ほどドライアウトが懸念される。そこで、ブラインの偏流を定量的に把握するために、実験バンドルの下部に収集升を設けて、バンドル下部から流出するブライン流量分布を計測した (Fig. 12)。バンドル上部から均一にブラインを供給したにもかかわらず、バンドル中心から端に向かうに従い、ブライン流量は減少する。また、熱流束 q の増加 (発生蒸気量の増加) に伴い、飛散するブラインが増加するため、更にバンドル端でのブライン流量が減少していくことが確認できる。このときの液膜の状況を観察すると、 $q = 5,000 \text{ W/m}^2$ の条件ではドライアウト発生は認められないが、 $q = 7,000 \text{ W/m}^2$ に上昇すると、バンドル端にて一部ドライアウトが発生している。そして、 $q = 9,000 \text{ W/m}^2$ の条件になると、バンドル端に供給される液膜が極端に減少し、広範囲にわたりドライアウトを確認された。このように大型バンドルでは、バンドル下部においてドライアウトが発生しやすい。そのため、その限界の熱流束を把握することが、バンドルを設計する上で重要となっている。

Fig. 12 Brine distribution at the bottom of bundle.

4.3 ドライアウト熱流束

実験バンドルにおいて蒸発温度 T_v およびバンドル形状 (バンドル幅) の変化がドライアウト発生限界熱流束 q_{dry} に与える影響を調べた。 $T_v = 40^\circ\text{C}$ 、管束幅 100% (Full バンドル) の場合のドライアウト発生限界熱流束に対する割合で示すと Fig. 13 のようになる。低温域ほど q_{dry} は低く、ドライアウトが発生しやすい。これは、低温域では発生蒸気流速が増大し、流下液膜が吹き飛ばされやすいためである。従って、 q_{dry} を上昇させるには、バンドル内で発生する蒸気流速を減少させることが必要となる。その対策の一つとして、バンドル幅を 100%→85%→60%と短縮することで、 q_{dry} が上昇する結果を得ている。

Fig. 13 Critical heat flux leading to dryout of falling films.

5. 蒸発法海水淡水化技術の動向

世界的にはエネルギー消費量が極めて少ない

RO 膜法がシェアを拡大し、現在では海水淡水化プラントの主流となっている。ただし、中近東地区では、海水塩分濃度が高く、また微生物が繁殖しやすいなどの水質条件が悪いため RO 膜法には厳しい条件であり、安定的な運転ができないプラントも多い。

一方で、蒸発法は原海水の水質悪化の影響をほとんど受けず、メンテナンス無しで長期の安定した性能運転が行える。そのため、特に中近東地区での蒸発法海水淡水化プラントの需要が見込まれている。海水淡水化技術の開発は、主にプラントの大型化、省エネルギー化など経済性を追及する開発が進められており、今後もその傾向は変わらないと推察される。

5.1 MSF 技術

MSF の技術は、既に飽和して成熟の域に達し、新たな技術革新はないといわれている。しかし、最近でもチューブバンドル構造の工夫によって、伝熱面積、消費電力の削減が可能であると報告されており、MSF の技術にはまだ改善の余地が多々ある[9]。また、MSF の特徴である単機容量大型化の傾向は今後も続き、90,000 $\text{m}^3/\text{日}$ 程度までの大型化は進むものと予想されている。また、伝熱管の長さ制限を 30 m にして、ブライン流を更に高速化することができれば、MSF の単機容量は 136,260 $\text{m}^3/\text{日}$ まで可能との試算結果もある[10]。

5.2 MED 技術

蒸発法では、これまで大規模設備で主流を占めていた MSF 法に変わり、電力消費量が少なく、建設コストが安いなど経済的に有利な蒸気圧縮式を併用した多重効用造水装置がそのシェアを拡大していくことが予想される。既に単機容量 45,000 $\text{m}^3/\text{日}$ で入札されている案件もあり、将来的には 67,500 $\text{m}^3/\text{日}$ までは大型化は進むものと見られている。

MED 法のブライン最高温度は、スケールの出にくい 70°C 以下で運転しているが、ナノフィルター膜 (NF 膜) を適用することでスケール成分を除去し、蒸発法の運転温度を上げて、造水効率を上げる取り組みもなされている。また、最近では NF 膜、RO 膜に MED を組み合わせることで、従来の最高運転温度 65°C から 125°C まで上昇させて効率を上げるシステムも提案されている[11]。

5.3 ハイブリッド化

高効率化を目指した淡水化システムとして、蒸発法と膜法を組み合わせたハイブリッドシステムが採用されている。両者を併設するハイブリッドシステムは、互いの長所を生かした設備とすることが可能となる。ハイブリッドシステムのメリットを以下に示す。

- ・ 蒸気を駆動源としない RO 法を組み合わせることで、夏季と冬季の電力需要に応じた効率の良い運転が可能となる。
- ・ 蒸発法で利用した温排水の一部を再利用するため、海水を取水する量が減り、設備のコンパクト化につながる。
- ・ RO の供給海水温度を上げることができ、RO での消費電力を低減できる（冬期の原海水温度低下に伴う RO 性能低下を防止）。
- ・ 蒸発法による生産水と RO 法の透過水を混合できるため、RO 単独の設備に比べ良好な水質の生産水を得ることができる。

6. 結び

世界的に水不足が深刻化するなか、水資源の確保が急務となっている。海水の淡水化は、水不足問題の有力な解決方法の 1 つであり、これまでに数多くの海水淡水化プラントが建設されているが、水不足を解消するまでには至っていない。

本稿では、当社における海水淡水化技術の研究開発について紹介した。海水淡水化技術を普及させていくためには、蒸発法、膜法ともに継続的に技術力の向上に取り組むことが必要であり、将来

の水資源の供給設備としての重要な役割を果たすことが期待される。

Nomenclature

T_b	: brine temperature	[°C]
T_s	: vapor temperature	[°C]
q	: heat flux	[W/m ²]
T_v	: saturation temperature for the vapor phase	[°C]
q_{dry}	: dryout heat flux	[W/m ²]

参考文献

- [1] Desalination Market 2010, GWI Publication (2009).
- [2] Inoue, T., Hitachi Zosen Technical Review, Vol. 70(1), 52-57(2009).
- [3] McGregor, I. D. et al., IDA World Congress Proceedings, Vol. 5, 301-307 (1995).
- [4] Miyatake, O. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35(12), 3245-3257 (1992).
- [5] Yanagi, H. et al., Hitachi Zosen Technical Review, Vol. 67(1), 20-23 (2007).
- [6] Ohshima, T. et al., Transacation of Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 76 (771), 1779-1784 (2010).
- [7] Tanno, I. et al., JSME International Journal Series B, Vol. 49(4), 1141-1148 (2006).
- [8] Ohtsuka, H. et al., Hitachi Zosen Technical Review, Vol. 67(1), 24-27 (2007).
- [9] Fritz Alt, International Desalination Association World Congress, Dubai, UAE, IDAWC/DB09 -044 (2009).
- [10] Hanbury W. T., desalination, Vol. 93, 127-145 (1993).
- [11] Hiri, M. et al., Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan, Vol. 62, 265-270 (2008).