617 簡易構造の平行平板型多重効用海水蒸発濃縮器の実用化研究 (5 段効用濃縮器の性能試験) Development of Simple-Designed Multiple-Effect Diffusion Still (Performance Test of Five-effect Still)

○ 学 高橋 宏司 (琉球大学)
正 野底 武浩 (琉球大学) 正 儀間 悟 (琉球大学) 正 水口 尚 (琉球大学)

Koji Takahashi,
Takehiro Nosoko, Satoru Gima, and Hisashi Minakuchi, University of the Ryukyus

Key Words : Seawater, Distillation, Multiple-effect, still, Diffusion

1 はじめに

近年、日本のいくつかの地方では、海水からミネラルを多く含む塩を作る企業が多い。そのような塩は「自然海塩」と呼ばれ、健康志向の消費者から需要が増えている。しかし、製造の際の人件費が高く、水分の蒸発に多量の熱量を要することから価格が極めて高い。

本研究室では、自動制御が可能で、かつ熱消費の大変少ない簡易構造の多重効用海水蒸発濃縮器を提案し[1,2]、実機レベルの多重効用海水濃縮器を製作して試験運転を行っている。

2 多重効用濃縮器の概要

図 1 に、多重効用濃縮器の構造を示す。簡便のため、図では効用数 3 段のものを示したが、効用段数の設定は自由である。海水濃縮器は、多数枚の仕切り板から成る。第一仕切り板には、下面に蒸気加熱用のボックスが取り付けられており加熱される。各々の仕切り板の間には、ウィック (布)、プラスチック網 2 枚、ウィック (布) を順に重ねて挟んでいる。各板の上面のウィックは、海水を浸透・蒸発させるものであり、板の下面のウィックは、凝縮水を吸収・浸透し回収するものである。濃縮海水と凝縮水の混入を防ぐため、両ウィック間に網を 2 重にして挟む。

各々の海水ウィックの上端に海水を供給して全面に海水を浸透させ、蒸気加熱により浸透した海水を蒸発させる。発生した水蒸気は網目の空間を拡散し上方のウィックに凝縮する。その凝縮潜熱が第 2 の仕切り板を通過し、2 段目でも同様な蒸発—拡散—凝縮が生じる。この過程が第 3、4・・・と繰り返され、1 回の加熱によって全ての蒸発ウィック中の海水を蒸発濃縮し、何倍もの濃縮海水を得ることができる。

最上面にもウィックを設置して海水を浸透させ、周囲空気に蒸散させることにより冷却する。これにより全温度差を大きくし、全ての段での蒸発速度を高くする。濃縮海水と凝縮水は、各々のウィックの下端において回収される。

図 1. 多重効用濃縮器の概略

図 2 に一つの効用中の熱移動を示す。なお、図 1 の横のものを縦にして示してある。次段への熱移動は蒸気拡散 (エンタルピー輸送) に加え伝導と放射でも起きるが、蒸気拡散より約 90% あるいはそれ以上の割合で熱が伝わる。最上面のウィックは周囲空気に接しており、自然対流により蒸発と放熱

が促進される。供給された海水は加熱され高温の濃縮海水と凝縮水となって流出し、エンタルピー流出が生じる。この分だけ次段へ伝わる熱量が減少するため、後段ほど通過熱流束が減少する。

図 2. 各効用中の熱移動

各段について熱収支を立てて、それらを連立させてパソコンを用いて繰り返し計算により解き、図 3 の結果を得た。なお、図中の蒸発倍率は次式で定義した。

$$\text{蒸発倍率} = \frac{\text{総蒸発量}}{\text{加熱用蒸気消費量}} \quad (1)$$

図 3. 効用数の増加に伴う蒸発倍率と総蒸発量の変化

計算条件は、蒸発・凝縮面間距離 3~10mm、周囲空気温度 30℃、蒸気加熱温度 100℃、供給海水濃度 3.5%、回収濃縮海水濃度 16%、上面からの熱伝達率 35W/(m²・K)である。なお、熱収支式および解法の詳細については文献[2]を参照されたい。

この結果から、効用数を増加すると蒸発倍率が増加し、効用段 19 段では 12 倍の高い蒸発倍率が得られることになる。一方、総蒸発量は減少する。蒸発倍率は、蒸発・凝縮面間隔

δ_h にほとんど依存しないが、総蒸発量は δ_h の減少によって著しく大きくなる。その増加は、効用数が多いところで大変大きい。濃縮海水の生産速度は総蒸発量に比例するので、蒸発器の高性能化においては供給海水と凝縮水の混入を防ぎつつ、 δ_h をできるだけ小さくする工夫が重要である。

4 製作した蒸発器と実験方法

製作した蒸発器の構成要素は表 1 の通りである (図 4)。今回は、効用数 5 段で水平から 9° 傾斜させて、水道水を原水として用いて実験を行った。気温 24℃、湿度 94% の室内で、ほぼ無風であった。

表 1. 蒸発器の構成要素

ウィック幅	蒸発ウィック 1000mm 幅の綿布
	凝縮ウィック 1000mm 幅のアクリル布
蒸気加熱面積	縦 1010mm×横 2010mm
ブリキ板	1040mm×2400mm, 厚さ 1mm

図 4. 製作した蒸発器

海水供給部や濃縮水と凝縮水の分離回収部、アクリル網の使用等の工夫により $\delta_h \approx 5\text{mm}$ を達成した。これまで他の研究者の多くの実験において、 $\delta \approx 10\text{mm}$ 程度であったことから、5mm 達成は評価できる。

組み立ては、固定された第一平板の上に蒸発ウィック、分離用の網 2 枚、凝縮ウィック、ステンレス板を順に繰り返して重ねていくという大変簡易なものである。5 段効用の組み立てに 2 人で約 40 分、分解は約 10 分を要した。

5 実験結果および考察

蒸発器の最上の蒸発面の温度分布を、中央と両端から 10cm 内側で測定した (図 5)。蒸発面の温度は板の上端から流下方向距離約 100cm (蒸気加熱の上端から約 80cm) にかけて上昇し、その後は約 55℃ でほぼ一定となった。第一板は 100℃ で蒸気加熱されているので、蒸発器の 5 段を通しての温度差は約 45K である。

図 5. 最終段蒸発面の温度分布

各段での蒸発量を図 6 に示す。初段から第 4 段にかけて蒸発量は低下する。最終の第 5 段では、自然対流により促進されて蒸発量が増大する。初段から第 4 段までの蒸発量の減少は、温度減少に伴い単段蒸発効率 (全通過熱量に対する蒸気エンタルピー輸送量の割合) が低下すること、また後段ほど通過熱量が低下することの二つの理由による。

図 6. 各段の蒸発量

試験運転により得られた蒸発器の性能のまとめを表 2 に示す。蒸発器の側面が断熱されていないことなどによる熱損失が蒸気消費量の約 30% があることが見積もられた。蒸発倍率の算出には、この熱損失を差し引いた初段入力熱量を用いた。蒸発倍率は 3.6 倍、総蒸発量 (生産速度) は蒸気加熱面積 1m² 当たり 8.2kg/(m²・hr) という高い値を示した。蒸発倍率と生産速度は理論予測値の 88% と 74% であった。

表 2. 運転の結果

熱損失 =消費蒸気量－初段内への入力熱量 =6.28-4.44=1.84kg/hr(30%)
蒸発倍率= $\frac{\text{全蒸発量}}{\text{初段入力熱量}}$ =16.15/4.44 = 3.6倍 (理論予測の 88%)
生産速度= $\frac{\text{全蒸発量}}{\text{蒸気ジャケットの加熱 面積}}$ =16.59/2.03=8.17kg/(m ² ・hr)(理論予測の 74%)

6 まとめ

- (1) 蒸発器は平板とウィック、プラスチック網の積層という簡単な構造であり、低コストである。組み立てと分解は短時間で済む。
- (2) 蒸発面と凝縮面間の蒸発拡散距離 5mm の設定で、混合させることなく原水を供給し、濃縮水と凝縮水を分離回収できた。
- (3) 本蒸発器は、蒸発倍率が約 3.6 倍、蒸気生産速度が約 16.4kg/hr という性能を示した。これらは、理想条件下で理論予測された蒸発倍率の約 88%、蒸気生産速度の約 74% に達する。

以上の結果から今回の試験運転で示された本蒸発器の性能は、実用化に向けて高く評価できる。

文献

[1]野底, 金城, 儀間, 「高性能多重効用海水濃縮器の提案とその性能予測」日本海水学会誌 58, 102-109(2004)
[2]Nosoko, T. Kinjyo, T. Park, C.D. Theoretical analysis of a multiple-effect diffusion still producing highly concentrated seawater, *Desalination* 180, 33-45(2005)