多段フラッシュ蒸発装置の基礎的実験

藤井 哲・宮 武 修
田 中 俊 昭・中 岡 勉
松 永 広 助*・坂 口 登**

九州大学 生産科学研究所

緒 言

水不足の問題は年々深刻になりつつあり、昭和60年に至ると全国の主要都市圏において総量1,500万 m^3 /日の水不足が生ずることが予測されており、この水不足に対処して蒸発法、逆浸透圧法、結晶化法、電気透析法などの海水淡水化方式が開発されつつあるが、現時点において大容量に比較的安価に淡水を得るのに最も適しているのは多段フラッシュ蒸発法である。

海水淡水化用の大規模な多段フラッシュ蒸発装置は昭和32年にクウェートに建設された4段の装置¹⁾が最初のもので、その後、装置の早急な開発研究に主力が注がれ、試作装置の性能試験的研究が多かったことは当然の成り行きであった。しかしながら、装置をより高性能にするためには、フラッシュ室内で生ずる現象を定量的に把握する必要がある。

Coogan ら²⁾はフラッシュ室内の温度および速度の分布を測定して多くの有益な知見を得たが、空段 (Empty stage) について、一運転条件下の実験に限定されている。Richardsons Westgarth 社³⁾はバッフル板を設置した場合について、フラッシュ室入口から1.3m程度で蒸発が完了することを見だしており、その結果が室長を決定する目安とされているが、実用装置では通常2~5m程度に室長がとられている。

本研究では前述の研究に準拠して室長を短くして1mとした場合の速度および温度の分布と非平衡温度差を測定した結果を示し、問題点を指摘することにする。

1. 実験装置および実験方法

実用装置を模擬して製作した実験装置のフロー・シートを Fig. 1 に示す。実験においては海水のかわりに河過した水道水を用いた。水は貯水槽からポンプにより冷却器に送られ、いったん冷却されたのち蒸発器本体内に組み込まれている凝縮器の管内を流れ、管外の蒸気を凝縮させながら自らは温度上昇しつつ凝縮器を出て加熱器 (50kW) に至り、そこで過熱状態となって蒸発器に入る。蒸発器は3段から構成されており、必然的に順次低圧に保たれた各段に水が流入するたびにフラッシュ蒸発

を起こし、再び水は貯水槽に戻る。また場合によってはバルブの切り替えにより、凝縮器は独立した系統で冷却される。スタートアップ時の装置の減圧と微量の不凝縮気体の抽気は真空ポンプまたは水エ젝ターにより行われる。

Fig. 2 に蒸発器本体正面図を示す。各段は室長1mで垂直平板により仕切られており、平板下部には液体の流入・流出口である高さ15cmの長方形オリフィスが設けられている。実験はそのままの状態すなわち空段の場合と Fig. 3 に示すようにオリフィス下流5cmの位置に高さ20cmの垂直バッフル板を設置した場合について行った。温度計測のため装置全体では193本の外径1.0mm ϕ の銅・コンスタンタン・シース型熱電対が挿入されているが、そのうち74本はテスト段である中央段に挿入されている。これらの熱電対の起電力は10点/秒の速さで集録装置に記録される。液体の速度分布はテスト段入口オリフィス下流方向距離 $X=0.16, 0.28, 0.65$ および0.75mの位置に陰・陽極2本の1mm ϕ ステンレス線を垂直に張り、液体の電解により発生する水素気泡をトレーサーとして、あるいはステンレス線の陰極側にテルル塊を取り付け、テルルの電解により発生するコロイド状黒雲をトレーサーとして測定した。水素気泡をトレーサーとした場合には、水素気泡を核とした蒸気泡成長が液表面近傍で起こってくるので、水素気泡発生開始直後の水素気泡の運動を追跡した。

Fig. 4 に蒸発器本体横断面図を示した。液体は紙面に垂直に流れ、流路幅は10cmである。発生蒸気はミスト・セパレーターを通り凝縮器管群上で凝縮し、蒸留水はトレイに落下したのちガラス製の計量槽に導かれ、計量され貯水槽に戻される。その他、実験装置の詳細は別報⁴⁾に記述した。

2. 実験結果

空段とバッフル板設置のそれぞれの場合について、実験範囲を Table 1 に示した。 L は室長、 H は液深、 W は単位流路幅あたりの液流量、 T_i は室入口における平均液温度、 V_g は蒸気比容積、 ΔT は段間温度降下すなわち室入口および出口における平均液温度の差 ($T_i - T_o$)、 ΔT_s は過熱度すなわち室入口における平均液温度と平均蒸気温度の差 ($T_i - T_v$) である。

* 日本揮発油 (株)
** 住友金属工業 (株)

Fig. 1 Flow sheet of three stage test apparatus

Fig. 2 Front view of flash evaporator

Fig. 3 Construction of baffle plate

Fig. 5 には水平方向の液体速度 U の測定結果を示した。Y は室底からの距離であり、蒸発がない場合が cold flow で蒸発が起きている場合が flashing flow である。(a) は空段の場合で、入口オリフィスから流入した液体は室底部を流下し、一部はそのまま次段へ流出するが、一部は出口仕切板に沿って上昇流となり、反転して液表面近傍で逆流を形成する。(b) はバッフル板設置の場合で、流れは空段の場合とまったく異なり流入後バッフル板によりすぐ上昇流となり、液表面近傍を流下し出口仕切り板近くで下降し一部は流出するが、一部は反転して室底部で逆流を形成する。

Fig. 6 には温度分布の代表例を示した。(a) は空段、(b) はバッフル板設置の場合で、上方の図が温度レベルが高い。(a) の場合、流れの状態と関連させて考えると、入口オリフィスを通じた熱い液体噴流は、その上にある冷たい液体を巻き込みながらわずかに温度降下するが熱いまま流出し、出口仕切板に沿って上昇した液体が蒸発しつつ液表面近傍を逆流するので、液表面近傍では下流側ほど温度が高いという特異な現象を示す。低温度になるほど液体温度と蒸気温度の差が大きくなる。(b) の場合、 $X=0.53\text{ m}$ までで蒸発はほとんど完了し、それより下流では流れ方向、高さ方向ともに温度は一樣となる。また液体温度と蒸気温度の差については空段の場合と同様の傾向にあるが、空段のように大きな値とはならない。

さて温度分布図からわかるように、室出口における平均液体温度 T_0 と平均蒸気温度 T_v には温度差を生ずる。この温度差 ($T_v - T_0$) は非平衡温度差と呼ばれ、フラッシュ室長、液深、液流量、液体温度、過熱度の条件が同一の場合、非平衡温度差の低下は蒸発性能の向上を意味する。非平衡温度差が生ずる理由として、液体の室内滞留時間が有限であること、気泡の成長には気泡表面張力に打ち

勝つポテンシャルが必要であること、液深による静圧上昇のため液面下の液体に沸点上昇があり、フラッシュ蒸発が底部まで浸透しないことなどが挙げられる。Table 1 に示した実験範囲において測定値を整理した結果、非平衡温度差 $NETD$ について次式で示される実験式を得た。

$$NETD = 1.13 \Delta T_s \exp \left\{ -\frac{2.00}{V_g} + (0.65 H \cdot W \times 10^{-5} - 0.50) \Delta T \right\}$$

(without baffle plate (empty stage)) (1)

$$NETD = 1.31 \Delta T_s \exp \left\{ -\frac{5.07}{V_g} + (0.74 H - 0.96) \Delta T \right\}$$

(with baffle plate) (2)

Fig. 7 には非平衡温度差の実測値 $NETD_m$ と Eqs. (1) および (2) から算出した値 $NETD_c$ の相関を示した。(a) は空段の場合で平均偏差は 0.15°C 、(b) はバッフル板設置の場合で平均偏差は 0.13°C である。(b) の図には空段の場合の実測値も比較のために書き入れたが、バッフル板設置により非平衡温度差が大きく低下することがわかる。

3. 従来の結果との比較および検討

以上室長が 1 m の場合の結果は、従来の室長がより大きい場合の結果と著しい相違を示す。たとえば室長 3.45 m の場合について速度および温度の分布を測定した既述の報告³⁾によれば、 $W=1.6 \times 10^6 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}$ 、 $H=0.49 \text{ m}$ 、 $T_0=46^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T=1.4^\circ\text{C}$ の条件のもとで、入口オリフィスを通じた熱い液体噴流は $X=0.76 \text{ m}$ 近くで液表面に達し、流下しながらフラッシュ蒸発するので、それ以降 2.7 m の部分では逆流域がなく温度分布も下流方向に一様に低下している。室長が 2.06 m でバッフル板設置の場合について、所要フラッシュ室長測定を試みた既述の報告⁸⁾では、 $W=3.0 \times 10^5 \sim 7.4 \times 10^5 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}$ 、 $H=0.30 \text{ m}$ 、 $T_0=52 \sim 93^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T=1.0 \sim 4.4^\circ\text{C}$ の範囲において、室中に垂直可動壁を移動させ、可動壁より上流の区間の蒸発量が全蒸発量の 99% を占める位置を所要室長と定義して、それが 1.3 m 以下という有用な結果を得ている。しかし非平衡温度差は測定されていないので蒸発性能は不明であり、可動壁を液面下にわずかに入れた状態では室長が 2.06 m の流れに近く、実際にその位置に仕切板を設けた場合とは流れの状態が異なることも著者らの実験から予想される。また Williamson ら⁹⁾は $W=1.2 \times 10^6 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}$ 、 $H=0.48 \text{ m}$ 、 $T_0=41^\circ\text{C}$ に近い条件の一連の実験において、室長 3.45 m の $X=0.91 \text{ m}$ の位置に高さ 20 cm のバッフル板を設けた場合、空段の場合よりかえって非平衡温度差が大きくなったと報告しているが、室長の短い場合には熱い液体の底部通り抜けを防止するため、バッフル板の設置は不可欠である。

Fig. 4 Cross sectional view of flash evaporator

Table 1 Ranges of experiments

		Without baffle plate (empty stage)	With baffle plate
L	[m]	1.00	1.00
H	[m]	0.376–0.725	0.376–0.718
W	[kg/hr·m]	3.4×10^4 – 8.3×10^4	3.4×10^4 – 8.1×10^4
T_0	[°C]	30.8–72.3	30.0–70.9
V_g	[m³/kg]	5.33–41.3	5.22–40.8
ΔT	[°C]	0.77–2.86	0.96–4.12
ΔT_s	[°C]	2.54–5.61	1.48–4.79

非平衡温度差は凝縮器における伝熱推進温度差をその分だけ低下させる。フラッシュ蒸発装置の製作費のうち、凝縮器のそれが占める割合は、4 万 m³/日の容量までは 25~30%、それ以上では 35~55% と推定されている⁵⁾ので、通常 5°C 程度の凝縮器伝熱推進温度差を非平衡温度差で少し下げられても、所要凝縮器伝熱面積はかなり増大し、装置製作費に及ぼす影響も大きくなる。

非平衡温度差に関する空段の代表的な実験式として、以下の諸式が従来提出されている。

$$NETD = 2.19 \exp(2.76 H + 0.0320 W \times 10^{-5} - 0.0641 T_0) \quad (3)$$

適用範囲は、 $L=4.27 \text{ m}$ 、 $H=0.30 \sim 0.56 \text{ m}$ 、 $W=7.4 \times 10^5 \sim 14.9 \times 10^5 \text{ kg/hr} \cdot \text{m}$ 、 $T_0=38 \sim 63^\circ\text{C}$ 。

$$NETD = \frac{0.156 H^{0.86} V_g^{0.71} (W \times 10^{-5})^{0.455}}{\Delta T^{0.5}} \quad (4)$$

(a) Without baffle plate (empty stage)

(b) With baffle plate

Fig. 5 Velocity profiles

(a)

(b)

(a) Without baffle plate (empty stage)
(b) With baffle plate
Fig. 6 Temperature profiles

Fig. 7 Correlation of non-equilibrium temperature difference between experimental data and empirical equations

適用範囲は、 $L=3.45$ m, $H=0.25\sim0.61$ m, $W=3.7\times10^5\sim14.9\times10^5$ kg/hr·m, $T_v=24\sim60^\circ\text{C}$, $\Delta T=1.1\sim3.9^\circ\text{C}$.

$$NETD = \frac{0.857 H^{0.344} V_g^{0.284} (W \times 10^{-5})^{0.182}}{\Delta P^{0.348}} \quad (5)$$

適用範囲は $L=4.80$ m, その他は不詳。

$$NETD = \Delta T \left(\frac{2.88}{\Delta P^{0.22} V_g^{0.05}} - 1 \right) \quad (6)$$

ΔP は段間圧力差である。適用範囲は $L=4.80$ m, その他は不詳。

$$NETD = (5.878)^{-0.0123T_v} (1.522)^{6.56H} (1.176)^{0.198(W \times 10^{-5})} \quad (7)$$

適用範囲は、 $L=3.05$ m, その他は不詳。

AMF (American Machine & Foundry) 社が2段の装置で行った結果^{7,9)} が Eq. (3) であり、3段の装置で行った結果⁹⁾ が Eq. (4) である。2段の Eq. (3) は最初の段がテスト段であり、前段でフラッシュ蒸発が起っていないので実際のでないとして Eq. (4) が提出されている。Eqs. (5) および (6) は BLH (Baldwin-Lima-Hamilton) 社の結果²⁾ であり、Eq. (7) は ORNL (Oak Ridge National Laboratory) が Eq. (8) を修正して導いた式⁷⁾ である。

Fig. 8 の上図には $H=0.5$ m, $\Delta T=2^\circ\text{C}$ の条件下で Eqs. (2)~(7) の各式を $NETD$ と T_v の関係で比較した。流量が関係する実験式においては $W=10^6$ kg/hr·m としたが、Eq. (2) はより低流量域で得られたもので直接の比較とはならない。そこで、各実験式は異なった室長で得られたものでもあるので、 $T_v=50^\circ\text{C}$, $H=0.5$ m, $\Delta T=2^\circ\text{C}$ の条件下で Eqs. (1)~(7) を $NETD$ と液体の室内平均滞留時間 t の関係で比較したものが Fig. 8 の下図である。下図からわかるように $NETD$ は t の増加とともに減少して一定値に近づいている。このことは流量を増し t を小さくすると、液乱れの増大による $NETD$

Fig. 8 Comparison of empirical equations

の低下よりも蒸発が十分終了しないことによる $NETD$ の上昇が大であることを意味している。

本実験は加熱器の容量 (50 kW) で十分大きな流量範囲で行われていない。しかし室長 1 m の空段において流量を増加させた場合やはり出口仕切り板の影響を受け、液表面近傍で逆流を起こす流れの様相を維持し、熱い液体の室底部通り抜けとオリフィス通過後の噴流上層部の冷たい液体の巻き込みを防止することができず、下図の Eq. (1) の曲線は t の減少につれて上方に延びる傾向となろう。バッフル板設置の場合は本実験範囲では上流で蒸発が終了しているので、もっと流量を増加させて t を減少させても蒸発域はあまり下流に延びないことが既述の Richardsons Westgarth 社の結果⁸⁾ からも推測でき、Fig. 8 の下図の Eq. (2) の線で示される $NETD$ の一定値は維持され、室長の長い空段の場合と同程度の $NETD$ を示すことになろう。したがってバッフル板の設置された室長の短いフラッシュ室で高流量の運転実験が行われることが期待される。

また Fig. 8 の上図には液深 0.2 m の静止水のフラッシュ蒸発における非平衡温度差の実験式⁶⁾

$$NETD = \frac{33 \Delta T_s^{0.55}}{T_v} \quad (H=0.2 \text{ m}) \quad (8)$$

も参考のために示した。

結 言

フラッシュ蒸発装置の操作範囲において、フラッシュ蒸発領域は室入口から 1.3 m 以内であるという従来の研究⁸⁾ に準拠して、室長 1.0 m の3段フラッシュ蒸発装置において基礎的実験を空段とバッフル板設置の場合について行い、次の結論を得た。

(1) フラッシュ室内での速度および温度の分布を測

定した結果、空段の場合では液表面近傍で液体の逆流域が生じ、室後方にフラッシュ蒸発域がある。また液表面近傍では室後方ほど液体温度が高いという逆転現象が起こり、室底部では熱いままの液体が残り次段へと流出する。バッフル板設置の場合は空段の場合と大きく異なり、室底部で逆流域が生じ、室前方でフラッシュ蒸発域があり、蒸発域を過ぎると液体温度はほぼ均一になる。

(2) 非平衡温度差を測定して実験式を提出した。バッフル板設置により非平衡温度差は大幅に低下する。短いフラッシュ室長の場合は室底部の熱い液体の通り抜けを防止するため、バッフル板設置は不可欠である。

【謝 辞】 実験装置の設計においてご助言いただいた元本研究講師上原春男氏（現佐賀大助教授）ならびに実験にご協力いただいた元本研究技官村上憲太郎氏（現博多工業高校教諭）に謝意を表します。また本研究に対して松永記念科学振興財団より研究助成金をいただきました。記して謝意を表します。

Nomenclature

H	= static liquid level	[m]
L	= flash chamber length	[m]
$NETD$	= non-equilibrium temperature difference defined by $(T_o - T_v)$	[°C]
T	= temperature	[°C]
T_i	= mean inlet liquid temperature	[°C]
T_o	= mean outlet liquid temperature	[°C]
T_v	= mean vapor temperature	[°C]
t	= mean residence time of liquid in stage	[sec]
U	= horizontal velocity component	[m/sec]
V_g	= saturated specific vapor volume	[m ³ /kg]

W	= flow rate	[kg/hr·m·width]
X	= distance from chamber inlet	[m]
Y	= height above chamber floor	[m]
ΔP	= interstage vapor pressure difference	[mmHg]
ΔT	= stage flash down defined by $(T_i - T_o)$	[°C]
ΔT_s	= superheat defined by $(T_i - T_v)$	[°C]

<Subscripts>

c	= calculated
m	= measured

Literature cited

- 1) Baker, R.A., Jr., *Bull. Soc. Sea Water Sci., Japan*, **23**, 191 (1970)
- 2) Catalytic, Inc.: *OSW Res. Devel. Prog. Rep.*, No. 668, (1971)
- 3) Coogan, C.H., Jr., D.A. Fisher, F.W. Gilbert and H.L. Ornstein: *ibid.*, No. 364, (1968)
- 4) Fujii, T., O. Miyatake, N. Sakaguchi, T. Tanaka, T. Nakaoka, K. Murakami, H. Uehara and H. Matsunaga: *The Reports of Institute of Industrial Science, Kyushu Univ.*, **No. 54**, 89 (1972)
- 5) Hittman Associates, Inc.: *OSW Res. Devel. Prog. Rep.*, No. 490, (1969)
- 6) Miyatake, O., K. Murakami, Y. Kawata and T. Fujii: *Bull. Soc. Sea Water Sci., Japan*, **28**, 189 (1972); idem: *HEAT TRANSFER-Japanese Research*, **2**, No. 4, 89 (1974)
- 7) Oak Ridge National Lab.: *OSW Res. Devel. Prog. Rep.*, No. 389, (1969)
- 8) Richardson Westgarth & Co.: *ibid.*, No. 108, (1964)
- 9) Williamson, W.R. and F.W. Gilbert: *ibid.*, No. 525, (1970)

(1973年12月4日受理; 化学工学協会第7回秋季大会(名古屋, 1973年10月), 日本機械学会第823回講演会(東京, 1972年11月), 日本海学会第24年会(岡山, 1973年5月)にて一部発表)

Fundamental Experiments on Flashing Phenomena in a Multi-Stage Flash Evaporator

Tetsu Fujii, Osamu Miyatake, Toshiaki Tanaka, Tsutomu Nakaoka, Hirotsuke Matsunaga* and Noboru Sakaguchi**

Research Inst. of Ind. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka

Since there is little information so far on the phenomena of flash evaporation in a flash chamber of comparatively short length, the authors measured temperature and velocity profiles in a 1.0 meter long flash chamber with and without interstage baffle plates.

The results obtained above are quite different from those obtained from a chamber of comparatively long length.

Without baffle plate, flashing occurs at the rear of the chamber, where the submerged hot jet of liquid reaches the liquid-vapor interface, and the reverse flow of liquid exists near the liquid-vapor interface.

When a baffle plate is installed in the flash chamber, flashing occurs at the front part of the chamber and the reverse flow of liquid exists near the bottom of the chamber.

In the case of a short flash chamber, evaporation is considerably enhanced by the installation of a baffle plate.

Also, the authors obtained empirical equations for non-equilibrium temperature difference from the experimental results.

* Japan Gasoline Co., Ltd.

** Sumitomo Metal Ind., Ltd.