高流速フラッシュ蒸発現象に関する実験的研究

菅 田 孟・外 山 茂 樹

東京工業試験所 プロセス開発部*

1 段のフラッシュ蒸発装置において高流速でのフラッシュ流を前面のガラス越しに観察し、温度分布と非平衡温度差の測定を行ったところ、以下の知見を得た。

単純なフラッシュ室におけるフラッシュ流は泡立ち沸騰とスプラッシュ沸騰の二つの様式に分類された。本研究では 40°C で両方の様式が観察され、液位が高いと、また液流量を減らすと泡立ち沸騰になった。50°C 以上の温度ではスプラッシュ沸騰のみが観察された。

沸騰の様式の遷移にともなって非平衡温度差は不連続的に変化した。泡立ち沸騰における測定値はスプラッシュ沸騰の 1.5~2.0 倍であった。

フラッシュ室に台形の上げ底を設置すると、非平衡温度差は大幅に低下した。

緒 言

わが国の水需給は昭和 60 年頃には重大な事態を迎えるということが予測され、その対策の一つとして海水の淡水化が注目された。そこで通商産業省では昭和 44 年度から 51 年度まで、大型プロジェクトに「海水淡水化と副産物利用」を取り上げ、大容量で比較的安価に淡水を得るのに最も適していると考えられる高流速長管式多段フラッシュ蒸発装置の研究開発を進めてきた。本研究はその一環として、フラッシュ室単位幅あたりのブライン流量を高流速化して装置を小型化し、かつ性能を向上させるための基礎研究として行われたものである。

フラッシュ室単位幅あたりのブライン流量を高流速化する際に問題となるのは、フラッシュ蒸発の平衡到達度が低下し、非平衡温度差が増大することである。非平衡温度差が増大すると、発生した蒸気が伝熱管表面で凝縮するときの伝熱推進温度差がその分だけ低下するため、造水量が低下し造水コストを上昇させる。

このように非平衡温度差は装置性能に重要な影響をもたらすので、その値を実験的に求めたり²⁾、蒸発促進器をフラッシュ室内に設置して非平衡温度差を低減させるための研究^{1,6)}などが行われており、実験式もいくつか報告^{2,4,10)}されている。しかしながら高性能の装置をより合理的に設計するためには、フラッシュ室内の現象を定量的に把握し、非平衡温度差をできるだけ低減させることが必要である。小流量の小型の実験装置に関してはこのための実験報告^{7,9)}も見られるが、高流速装置に関しては、一運転条件下での報告⁵⁾が見られるだけで、詳細な報告は見られない。

本研究ではフラッシュ室内の現象と非平衡温度差の関連に着目して、1 段のフラッシュ蒸発装置により、高流

速におけるフラッシュ流の観察と、温度分布および非平衡温度差の測定を行った。その結果、フラッシュ沸騰には、泡立ち沸騰とスプラッシュ沸騰の二つの型があり、泡立ち沸騰では非平衡温度差が極端に大きくなること、室中央部に台形の上げ底を設置すると非平衡温度差が大幅に低減できることなど、多くの知見を得たのでここに報告する。

1. 実験装置および実験方法

実験装置のフローシートを Fig. 1 に示す。装置は 1 段のフラッシュ蒸発室、凝縮器、加熱器、循環ポンプ、排気装置および冷却水系統より成っている。実験には水道水を使用した。加熱器①により加熱された水は減圧したフラッシュ室②に導かれ、フラッシュ蒸発する。発生した蒸気は凝縮器③で凝縮し、サージタンク④で循環水と混合して、循環ポンプ⑤により再び加熱器を経てフラッシュ室に循環される。フラッシュ水が循環使用されているので、ほぼ完全に脱気されている。起動時の系の排気

Fig. 1 A flow sheet of the experimental apparatus

Fig. 2 Dimension of the trapezoidal shaped bottom

* 〒151 渋谷区本町 1-1-5

Fig. 3 Aspect of flashing flow (bubbly boiling)

Fig. 4 Aspect of flashing flow (splash boiling)

および少量の空気漏れ込みに対して減圧を保つために、水エジェクター⑥を使用した。フラッシュ室圧力の調節は凝縮器冷却水の温度を、冷水塔⑦と温度調節用の混合槽により調節して行った。これによりフラッシュ温度降下が調節できる。フラッシュ室の大きさは、幅 10 cm、高さ 2 m、長さ 3 m で、前面はフラッシュ状態を観察するためにガラス張りになっており、必要に応じて写真撮影あるいは 16 mm シネカメラによる撮影を行った。フラッシュ流の温度分布を測定するために、フラッシュ室内にシース外径 3.2 mm の銅-コンスタンタン熱電対 40 本を挿入した。これらの熱起電力は分解能 $0.1 \mu\text{V}$ (温度換算約 0.0025°C) のデジタル電圧計と、低熱起電力の入力スキャナーを有する集録装置により自動的に切り換えて測定した。スキャナーの熱起電力、熱電対の検定精度などを含めた温度の測定精度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度である。

フラッシュ室段間絞り機構にはいろいろの形式があり、最も単純なものは段間隔壁の下部を開口しただけの潜りオリフィス型のものであるが、フラッシュ蒸発を促進するために、これにバッフル板やスプラッシュ板を設置して、その配置や形を工夫したものや、気泡核発生を促進するためにスクリーンを設置したものなど、各種の形式のものが考えられている⁹⁾。本研究では高流速ということを第 1 の目標として、絞り機構は最も単純なオリフィス型とし室内に何も設置しない空段と、蒸発を促進するために室中央部に Fig. 2 に示す台形状の上げ底を

設置した場合の、2 種類のフラッシュ室について実験を行った。

実験条件はフラッシュ室入口温度 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ 、液流量 $900 \sim 1,500 \text{ ton/m} \cdot \text{hr}$ 、フラッシュ温度降下 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ の範囲である。また液位は空段では $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、上げ底では $60 \sim 70 \text{ cm}$ で実験を行った。

2. 実験結果

2・1 フラッシュ蒸発の様相

空段におけるフラッシュ蒸発の様相には、定性的に Figs. 3, 4 に示すような二つの型がある。Fig. 3 では、オリフィスで発生した噴流は下流にいくにしたがい幅を拡大するが、ほとんど液表面には達せず、室底部を次の段に流出する。一部は出口隔壁により反転して、上層に段全体にわたって下流から上流に流れる巻き返し流れを生ずる。沸騰はこの巻き返し流れの表面で泡立ちようように起きる。このような沸騰の様相を泡立ち沸騰と呼ぶことにする。Fig. 4 ではオリフィスからの流入直後で気泡が発生、成長するため、液が押しのけられ、激しい 2 相流の噴流となり上方に吹き上げる。このような沸騰をスプラッシュ沸騰と呼ぶことにする。

このような泡立ち沸騰からスプラッシュ沸騰への遷移は、温度、流量、フラッシュ温度降下、液位、段長さなどによる。入口温度 40°C では液深 $50 \sim 60 \text{ cm}$ で泡立ち沸騰、 $40 \sim 50 \text{ cm}$ でスプラッシュ沸騰となり、入口温度

Fig. 5 Aspect of flashing flow (trapezoidal bottom)

Fig. 6 Temperature profile of flashing flow (bubbly boiling)

50°C 以上になると、本実験範囲内ではすべてスプラッシュ沸騰となった。宮武ら⁹⁾は 40°C では泡立ち沸騰、80°C ではスプラッシュ沸騰となり、50~60°C では両方が生ずることを報告している。この違いは本実験に比べて流量が1/10、段長さが1/3と大幅に異なるためと考えられる。

ところで以上のような単純な絞りによると、泡立ち沸騰では噴流が底部に潜り込み、スプラッシュ沸騰では絞り直後のスプラッシュ域と表層の一部を除いて沸騰が発生しない。このようにいずれにしても蒸発室底部はフラッシュ蒸発に有効ではなく、底部の流れは液深によって沸騰が抑えられたまま通り抜けてしまうので、非平衡温度差を増大させる要因ともなる。そこで、この部分を取り去れば性能は向上するという考えから、蒸発室底部を台形の上げ底とした。このときのフラッシュの様相の代表例を Fig. 5 に示す。このようにするとオリフィス直後は液深が深いので、気泡の発生・成長はほとんどないが、上げ底により上方に速度を転じた液が、液面に噴出するところで急速に気泡の発生・成長が始まり、激しいフラッシュ蒸発となり、スプラッシュ沸騰と同様の様相を示す。

以下それぞれの性能に関する測定結果について述べる。

2・2 温度分布

温度は5回の測定の平均より求めた。5回の測定にお

ける標準偏差は泡立ち沸騰の上層部で特に大きく、0.5~1.0°Cであるが、下層部では0.1~0.3°Cであった。その他の場合も表層付近で比較的大きいが、ほぼ0.5°C以下で平均では0.2~0.3°Cであった。

Fig. 6 に泡立ち沸騰しているときの温度分布を等温線で示す。オリフィスから流入した熱い噴流は上層の温度の低下した巻き返し流れを巻き込みながら流出していく。下流隔壁で反転して生じる巻き返し流れは、下流から上流に流れながら沸騰蒸発して温度を下げていくことがわかる。またオリフィス直後で等温線が密であることから、噴流はこの付近で低温の巻き返し流れを多く巻き込んでいることが推察される。

Fig. 7 はスプラッシュ沸騰の温度分布の一例である。噴流が2相流となって吹き上げるところで蒸発が急速に進行して上層の温度が低下する。下層では液深により蒸発が抑制されたまま噴流が拡大していき、室中央付近から上層の液と混合しながら液温を低下して流出する。温度分布と目視観察から、蒸発が有効に行われているのは上流の1/3~1/2で、残りの領域は蒸発に関してはデッドスペースのようになっていることがわかる。

Fig. 8 に上げ底を設置した場合の温度分布を示す。上げ底の上で急速に沸騰蒸発して温度の降下が見られる。上げ底手前で巻き返し流れが発生しているが、規模が小さいため影響は少なく、上げ底が始まる位置をずらせばこれは防ぐことができる。

Fig. 7 Temperature profile of flashing flow (splash boiling)

Fig. 8 Temperature profile of flashing flow (trapezoidal bottom)

2・3 非平衡温度差

本実験では沸点上昇のない水道水を使用したので、非平衡温度差はフラッシュ室出口温度と蒸気温度の差とした。

Fig. 9 に入口温度 40°C のときの非平衡温度差とフラッシュ温度降下の関係を示す。スプラッシュ沸騰と泡立ち沸騰とは、液深の差は 10 cm 程度しかないのに非平衡温度差は大幅に異なる。これは沸騰の様相がまったく異なるためで、従来の実験式で示される液深の影響に比べて非常に大きく、かつ不連続である。泡立ち沸騰では沸騰は温度の低下した巻き返し流れの表面で生じるため、非平衡温度差は非常に大きい。たとえば $W=1,200$ ton/m·hr では、スプラッシュ沸騰に比べ 50~100% も大きい。上げ底にすると非平衡温度差は大幅に低下する。入口温度 60°C では Fig. 10 のように上げ底と空段との差は小さくなる。これは流入直後の 2 相流噴流部で液深の影響が小さくなるため、下層においても蒸発がよく進行するためである。

また、一般にフラッシュ温度降下 ΔT が大きくなると非平衡温度差は小さくなるが、40°C では ΔT の増加とともに非平衡温度差も増大し、その増加率は泡立ち沸騰、スプラッシュ沸騰、上げ底と沸騰の状態が激しくなるにつれ小さくなる。60°C では非平衡温度差は ΔT の増加とともに低下する。宮武ら⁹⁾ も泡立ち沸騰の場合には ΔT の増加とともに非平衡温度差が増大することを示している。

次にフラッシュ室入口液温度と非平衡温度差の関係を

Fig. 9 Effect of flash down on non-equilibrium temperature difference

Fig. 10 Effect of flash down on non-equilibrium temperature difference

$\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ について示したのが Fig. 11 である。空段と上げ底の差は明らかで、上げ底は低温部において特に有効であることを示している。図中の鎖線は BLH 社の経験式¹¹⁾

$$NETD = \frac{0.857H^{0.344} \cdot V_g^{0.234} \cdot (W \times 10^{-2})^{0.152}}{\Delta P^{0.345}}$$

により流量 1,200 ton/m·hr、液深 50 cm として計算し

Fig. 11 Relation between non-equilibrium temperature difference and chamber inlet temperature

Fig. 12 Models of the flashing flow

た値である。この式は室長 4.8 m の空段の装置で得られたものである。経験式との比較より、空段では室長 3 m は十分な長さでないことが示唆される。上げ底を設置した場合には、この計算結果とほぼ一致しており、上げ底の設置により室長の長い空段と同程度までは非平衡温度差を低減できることが示唆される。

3. 考察

フラッシュ室の性能は非平衡温度差、あるいは平衡到達度により評価できる。ここでは測定結果を使ってフラッシュ室流れ方向に対して、どのように平衡に到達したかその変化を検討する。すなわち、ここで局所平衡到達度 β を次式で定義する。

$$\beta = \frac{T_i - T_x}{T_i - T_s} = \frac{Q_x}{Q}$$

ここで T_i はフラッシュ室入口液温度、 T_s は蒸気温度、 T_x は入口から距離 x における平均液温度である。 Q は出口液温度が蒸気温度と等しくなるまで蒸発したときに液の失うべき熱量で、 Q_x は入口から x まです蒸発により液の失った熱量である。平均温度 T_x は温度分布と同時に流速分布も決定しなければ求まらない。本実験ではシネカメラによる撮影も行ったが、流速分布を決定できなかった。フラッシュ室内の流れには深さ方向にかなりの流速分布があることが知られている^{3,7)}が、ここでは流

Fig. 13 Variation of local equilibrating ratio with the distance from the chamber inlet

速分布を無視して平均温度を算出した。しかし泡立ち沸騰では上層と下層で流れの方向が逆であるので、流速分布を完全に無視すること是不都合である。そこで観察結果を基に流れ方向の異なる上層と下層を区分し、おののについては流速分布を無視して平均温度を求め、温度測定箇所に対応して流れ方向に五つのセクションに分割して、以下に示す二つの簡単なモデルにより、各セクション内で蒸発により失われる熱量を計算した。各セクション内は完全混合と仮定した。また蒸発による流量減少は無視した。

Model-1 では Fig. 12 (a) のように、下層の噴流は上層の温度の低い巻き返し流れを、各セクションで巻き込みながら温度低下し、流量を増していく。下流の隔壁で一部が反転して巻き返し流れとなって、上層部を蒸発により温度低下しながら、流量を減じながら流れる。

Model-2 では Fig. 12 (b) のように、噴流による巻き返し流れの巻き込みは、オリフィス直後のセクションのみで行われ、それ以降では上層と下層の間では相対的には物質の移動はなく、乱れにより熱だけが移動し噴流は温度低下する。このように模型化されたフローダイアグラムについて収支式を求め、測定結果を与えて局所平衡到達度を計算したのが Fig. 13 である。そのときの各セクションごとの流量を Fig. 12 の矢印の幅で示す。泡立ち沸騰の場合 Model-1 では下流ほど蒸発量が多く、Model-2 では全体にわたってほぼ均一に蒸発していることになる。観察結果では下流ほど沸騰が激しく、定性的には Model-1 の傾向に似ている。しかし噴流による低温液の巻き込みはオリフィス直後で多いという推察結果を考慮すると、実際の流れは両者を折衷した流動状態と考えられる。

スプラッシュ沸騰では前半の 1/3 で急速に蒸発が進み、その後の流れでは蒸発はわずしか行われていないことが、この計算結果からさらに明確となった。この傾向は流量 $W = 900 \sim 1,500 \text{ ton/m} \cdot \text{hr}$ の間ではほぼ同様である。最終的な平衡到達度は流量の小さいほど大きくなるのは当然である。しかしこれらのことは室長を 1/3 程度まで短縮できるということを示しているわけではない。なぜならば、流れはピストン流れではなく、室長を

短くすると巻き返し流れが発達し、蒸発が抑制されるからである。上げ底でも前半の蒸発が支配的であるが、後半でもかなり蒸発しており、室全体が蒸発に有効に使われていることがより明確となった。

結 言

室長 3 m, 幅 10 cm の 1 段のフラッシュ蒸発装置により、ブライン流量の高流速化の基礎的知見を得るための実験を行い次の知見を得た。

(1) フラッシュ蒸発室内の沸騰様式には、泡立ち沸騰とスプラッシュ沸騰の二つの型があり、蒸発室入口温度 40°C では両方の沸騰様式が観察された。その温度では液位が高いと、また流量を減ずると泡立ち沸騰になる傾向があった。50°C 以上では本実験範囲ではすべてスプラッシュ沸騰となった。

(2) 泡立ち沸騰では非平衡温度差が非常に大きく、実用上避けねばならない。スプラッシュ沸騰では非平衡温度差は大幅に低下する。

(3) 台形状の上げ底を設置すると非平衡温度差を大幅に低減でき、特に低温部において有効である。

(4) 空段の非平衡温度差の測定結果を既報の経験式と比べると、計算値を大幅に上回っており、高流速においては 3 m 以下の室長ではここで示した上げ底などの設置により、フラッシュ蒸発を促進する工夫が必要である。

Nomenclature

H	= static liquid level	[m]
$NETD$	= non-equilibrium temperature difference	[°C]
Q	= evaporative heat transfer rate at	

	equilibrium	[kcal/hr]
Q_x	= evaporative heat transfer rate at distance x	[kcal/hr]
T	= temperature	[°C]
T_i	= inlet liquid temperature	[°C]
T_o	= outlet liquid temperature	[°C]
T_v	= vapor temperature	[°C]
T_x	= bulk liquid temperature at the distance x from chamber inlet	[°C]
V_g	= specific volume of vapor	[m ³ /kg]
W	= liquid flow rate per unit chamber width	[ton/m·hr]
x	= distance from chamber inlet	[m]
y	= distance above chamber floor	[m]
β	= local equilibrating ratio	[—]
ΔP	= interstage vapor pressure difference	[mmHg]

Literature cited

- 1) Acqua Chem Inc.: *OSW Res. Devel. Prog. Rep.*, No. 749 (1971)
 - 2) American Machine and Foundry: *ibid.*, No. 525 (1970)
 - 3) Catalytic Construction Co.: *ibid.*, No. 645 (1971)
 - 4) Catalytic Inc.: *ibid.*, No. 668 (1971)
 - 5) Coogan, C. H., Jr., D. A. Fisher, F. W. Gilbert and H. L. Ornstein: *ibid.*, No. 364 (1968)
 - 6) Desalting Systems and Services Inc.: *ibid.*, No. 656 (1971)
 - 7) Fujii, T., O. Miyatake, T. Tanaka, T. Nakaoka, H. Matsunaga and N. Sakaguchi: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 1, 207 (1975)
 - 8) Miyatake, O.: "Technology of Chemical Machinery", 26 (1974)
 - 9) Miyatake, O., T. Fujii and T. Hashimoto: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 1, 454 (1975)
 - 10) Ork Ridge National Lab.: *OSW Res. Devel. Prog. Rep.*, No. 389 (1969)
 - 11) Williamson, W. R. and J. R. Helfer: *ibid.*, No. 575 (1970)
- (1977 年 8 月 2 日受理; 日本海学会第 25 年会 (松山, 1974 年 6 月) にて一部発表)

An Experimental Study of Flash Evaporation Phenomena at a High Liquid Flow Rate

Tsutomu Sugeta and Shigeki Toyama

National Chem. Laboratory for Industry, Tokyo 151

Flashing flows at high flow rates in a single-stage flash evaporator were observed through a front glass. Their temperature distributions and non-equilibrium temperature differences were simultaneously measured. The results clarified the following.

Flashing flows in a simple chamber were classified into two patterns, i. e. bubbly boiling and splash boiling. In this study, both patterns were observed at 40°C. At that temperature, bubbly boiling was apt to take place when the liquid level was increased and the liquid flow rate was decreased. When the temperature was higher than 50°C, splash boiling was always observed.

Non-equilibrium temperature difference was discontinuously changed by the transition of the flashing pattern. The measured data in bubbly boiling were 1.5~2.0 times that in splash boiling.

A chamber having a trapezoidal bottom was effective in reducing the temperature difference.