液-液直接接触式熱交換器に関する 実験研究—第1報 ペンタンの蒸発率—*

辰巳雅信**・石田憲治***
坂出弘二***・太田文夫*****

Experimental study of Liquid-Liquid direct contact heat exchanger
—Part 1 Evaporation Rate of n-Pentane—

By Masanobu Tatsumi, Kenji Ishida, Koji Sakaide, Fumio Ōta

Liquid-liquid direct contact heat exchangers have many advantages over conventional multi-tubular type exchangers from the point of view of area of heat exchange and scaling. However, the mechanism of liquid-liquid direct contact heat exchange is so complicated that many experimental researches are going on.

Hot water and n-Pentane are mixed and exchanged each other in a acrylic cylinder, 40 mm dia. and 220 mm height, of our experimental apparatus.

It is the main object of our research to observe flooding phenomenon of n-Pentane from the cylinder since research reports about the flooding phenomenon are very rare and a portion of liquid n-Pentane still exists in hot water at higher temperature than its boiling point. The evaporation rate of n-Pentane is an important scale of exchanged heat flux between hot water and n-Pentane.

We have found evaporation rate of n-Pentane (evaporated n-Pentane/injected n-Pentane) from the measurement of flooding n-Pentane. From the measurement results, the evaporation rate (λ) is expressed by superheated temperature (ΔT_w) of hot water and the mass flow rate (ϕ =n-Pentane/hot water). Equation of the rate is obtained as follow;

$$\lambda = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\Delta T_w - (10\phi + 2.0)}{16\phi^{0.6}} \right] \right\} \quad \text{where} \quad \Delta T_w = T_1 - T_b$$

T_1 : Inlet hot water temperature (K). T_b : Boiling temperature of water and n-Pentane mixture (K). ϕ : Mass flow rate (n-Pentane/hot water).

The equation is in accord with the experimental results in all superheated temperature region at hot water flow of 8.33×10^{-6} (m³/s). And it differs about 5~10% at hot water flow of 16.7×10^{-6} (m³/s). The experimental equation can be adopted to estimate evaporation rate, and the experimental process is acceptable to observe the flooding phenomenon in Liquid-Liquid Direct Contact Heat Exchange.

1. ま え が き

海洋の暖流，ソーラpondそして工場の温排熱等から熱エネルギーを回収・利用することは資源の有効利用・省エネルギーの観点からも重要である。熱エネルギー回収方法のひとつとして液-液，気-液，固-液，固-気間の直接接触式熱交換がある。これは従来の隔壁式や多管式熱交換方式に比べて伝熱面積が大きくとれ，伝熱壁による熱損失スケール生成等による伝熱性能の低下がない等の利点がある。しかしながら，直接接触式熱交換のメカニ

ズムが，複雑であることから明らかにされていない点が多く，現状としては実用化への基礎研究が進められている段階である。

筆者らは，n-ペンタンと温水間の直接接触式熱交換の全体的伝熱特性の評価を試みてきたが¹⁾，今まで取り上げなかったn-ペンタンの未蒸発量が伝熱特性に影響を及ぼすことに着目した。熱交換過程では，ペンタン蒸発分が支配的となるため，ペンタン蒸発率 λ を知ることが，重要であると考え，蒸発率 λ と2流体間過熱度 ΔT_w ，液供給比 ϕ （n-ペンタン流量 V_p /温水流量 V_w ）等の関係について実験を行ったので，その結果について報告する。

2. 実験装置及び手法

実験装置を図1に示す。温源となる温水はヒータ付き温水タンク(3)から温水循環ポンプ(P1)によって流

* 原稿受付 昭和63年8月4日

昭和63年春期学術講演(昭和63年5月18日)

** 学生会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

*** 正会員 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**** 神戸商船大学(神戸市東灘区深江南町5-1-1)

***** ㈱ダイキン工業(草津市岡本町字大谷1000-2)

量調節弁 (V 1) , 流量計 (F 1) を通り, 接触塔内 (1) に上昇流として流入し, 塔内でペンタンと熱交換した後, 分離器を経て温水タンクへ戻る. また, 冷媒体ペンタンは, ペンタンタンク (5) からペンタンポンプ (P 2) によって流量計 (F 2) , 流量調節弁 (V 3) , プレヒーター (H 1) を通り, 内径 1.99 mm のノズル (n) より接触塔内温水中に上昇流として流入されて温水と熱交換しながら蒸発する. 蒸発したペンタンは, 凝縮器 (4) に導かれて冷却・凝縮された後, 回収される. 未沸騰のペンタンは, 温水と混合されたまま分離器 (2) に流出する. この分離器内で蒸発させたペンタンは, 凝縮器 (7) で凝縮させて計量器 (8) によって接触塔内での未蒸発ペンタン量として測定される. 接触塔の形状・概要を, 図 2 に示す. 接触塔本体は内部が可視できる無色透明アクリル製の内径 40 mm の円形のもので高さが 420 mm で, 接触長さは 220 mm である. 2 媒体の流入流量は, 流量計で測定される. また, 温水入口温度, ペンタン入口温度は, 0.1 mm 径の T 熱電対温度計 (T 1) , (T 3) で蒸気温度は棒状温度計 (T 2) で測定される. 実験は表 1 に示す条件範囲で行われ, 未蒸発ペンタン量の測定に当たっては温水入口温度・流量及びペンタン入口温度・

流量が変化しないように実験装置全体の系を安定した状態に保って測定される。さらに、ペンタン入口温度を決定する際、接触塔内の沸騰様相が、ペンタン入口温度の影響を大きく受けることから接触塔内の温水中（温水流量 $V_w = 15.87 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ）にペンタンを注入したときの状態を図3に示す。図中A, B, C, Dは、ペンタンが液滴のまま流動するものと、沸騰して気泡となるものの割合で区別し、図中A領域は、ノズル出口直後において、全液滴が気泡核を有して気泡に成長する沸騰形態、B領域は、液滴と気泡が混在し気泡の割合が多い状態、C・D領域は、ノズル出口から気泡が少なく、液滴のまま上昇する形態である。また、この沸騰様相を過熱度 ΔT_w とサブクール度 ΔT_{sub} を用いて整理したものが図4, 5である。この流動様式を各実験温水流量について確認した。以上のことより、実験条件を定める上でペンタン入口温度の変化は無視できないため蒸発率の測定には、ペンタン入口温度におけるサブクール度を1K以内に抑えた沸騰形態A, B領域で行った。

3. 実験結果

単一液滴の沸騰蒸発は混合流体中で比較的短時間に完

図1 実験装置

図2 接 触 塔

了する研究報告がある^{2), 3), 4)}。今回の接触塔高さ(220 mm)は、計算上2媒体の接触時間は注入ペンタンの蒸発が完了するのに十分である。にもかかわらず、注入ペンタンの一部分は、未沸騰の状態で接触塔より温水とともに流出している。この未沸騰ペンタンを凝縮器(7)で

図3 沸騰形態による分類

回収し、計量器(8)で測定して得られるペンタンの蒸発率 λ と温水過熱度 ΔT_w 及び液供給比 ϕ (ペンタン流量/温水流量)との関係を調べた。

その結果が図6、図7である。これらより、ペンタンの蒸発率 λ に対する温水流量の影響は、液供給比 ϕ によって整理される。 λ は ϕ の増加とともに減少し、過熱度 ΔT_w に関しては、 ΔT_w の増大とともに $\lambda=1.0$ に漸近するのが確認できた。ペンタン蒸発率 λ の特性曲線は、過熱度 ΔT_w 、液供給比 ϕ をもって次式のように近似できる。

$$\lambda = 1 - \exp \left[- \left\{ \frac{\Delta T_w - (10\phi + 2.0)}{16\phi^{0.5}} \right\} \right]$$

但し、温水流量と液供給比 ϕ は次の範囲である。

表1 実 験 条 件

温 水 流 量 V_w	$8.33 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$		$16.7 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$	
液 供 給 比 ϕ (ペンタン流量 / 温水流量)	0.0617	0.0833	0.0617	0.1000
	0.1000	0.1430	0.1430	0.2000
温 水 過 熱 度 ΔT_w	6 ~ 20 (K)			
ペンタンが沸騰する温度 ΔT_{sub}	1.0 (K) 以 内			
塔 内 流 れ	上 昇 並 流			
塔 内 圧 力	大 気 圧			
接 触 長 さ	2 2 0 m m			
塔 内 径	4 0 m m

図4 サブクール度による沸騰形態の分類

図5 サブクール度による沸騰形態の分類

図6 過熱度の変化によるペンタン蒸発率特性曲線

図7 過熱度の変化によるペンタン蒸発率特性曲線

$$8.33 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)} \leq V_w \leq 16.7 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$0.0617 \leq \Phi \leq 0.20$$

以上より、液-液直接接触式熱交換器において、これまで未沸騰現象について種々報告^{5), 6)}されてきたが、今回の実験結果から、温水入口温度と両者の流量が定まれば、ペンタン蒸発率 λ を数式で容易に決定することが可能である。この式は $V_w = 8.33 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$ では

よく近似できるが、 $V_w = 16.7 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{s)}$ では、過熱度が10Kより大きい領域で5~10%の誤差がある。過熱度 ΔT_w の実験領域を拡大すると同時に ΔT_w の大きい領域での実験データを増やしていくことで精度を高めることが可能と考える。今回は、温水とペンタンの組合せ、又、同一接触塔高さで行ったため他冷媒との組合せ、そして接触塔の形状を変えた場合については、この近似

式がそのまま適用可能とはいいい難い。しかし、蒸発率 λ を求める手法が確立できたものと考え、今後種々の組合せにて研究を続ける予定である。

文 献

- 1) 太田ほか, 舶機講39回前刷 (昭61-10).
- 2) Sideman, S. AICHE Journal, 11-6 (1965).
- 3) 藤田ほか, 機論B編, 51-468 (1985-8).
- 4) 甲藤, 伝熱概論, 231~241, 養賢堂.
- 5) 辻, 今井ほか, 石川島播磨技報, 19-3 (昭54-5), 128.
- 6) R.F. Boehm Laboratory Measurements of Direct-Contact Heat Exchanger Prepartment for the U.S. Department of Energy, Contract No. DE-AC 02-83CH10093, June, 1985.

記 号 表

ΔT_w (K) : 過熱度 ($T_1 - T_b$)
 T_b (K) : ペンタン-温水間の混合物沸点

T_1 (K) : 温水入口温度
 V_p (m³/s) : ペンタン流量
 V_w (m³/s) : 温水流量
 ϕ : 液供給比 (V_p / V_w)
 ΔT_{sub} (K) : サブクール度 ($T_b - T_{p1}$)
 T_{p1} (K) : ペンタン入口温度
 λ : ペンタン蒸発率

〔質 疑 応 答〕

質問者 神戸商船大学 橋本 武

〔質問〕 ノズルの位置は、最下部でよいでしょうが、その穴径を小さくして、もっと個数を増やしても良いのではないか。

〔回答〕 ノズル径、個数を変えた実験はこれまで行っていない。しかし、今回の実験から推測して、蒸発率 λ は、ノズル径、数に関係なく、液供給比 ϕ と過熱度 ΔT_w にて整理できると考える。