細管内における強制流動サブクール沸騰限界熱流束の研究* (限界熱流束実験データの検討)

稲坂 富士夫**, 成合 英樹***, 志村 敏也****

Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in a Narrow Tube (Examination of Experimental Data on Critical Heat Flux)

by Fujio INASAKA, Hideki NARIAI, and Toshiya SHIMURA

The critical heat flux (CHF) of subcooled flow boiling in a narrow tube was investigated experimentally using water as a coolant. Experiments were conducted at nearly ambient pressure under the following conditions: tube inside diameter: 1~3 mm, tube length: 10~100 mm, and water mass velocity: 7 000~20 000 kg/(m²·s). The critical heat flux increases the shorter the tube length and the smaller the tube inside diameter, at the same water mass velocity and exit quality. Experimental data were compared with empirical correlations, such as the Griffel and Knoebel correlations for subcooled boiling at low pressure, the Tong correlation for subcooled boiling at high pressure, and the Katto correlation. The existence of two parameter regions was confirmed. The first is the low CHF region in which experimental data can be predicted well by Griffel and Knoebel correlations, and the second is the high CHF region in which experimental data are higher than the predictions by the above two correlations.

Key Words: Phase Change, Critical Heat Flux, Subcooled Flow Boiling, Narrow Tube, Uniform Heating

1. ま え が き

核融合炉機器における高熱負荷除熱のための冷却として、水による強制流動サブクール沸騰が一つの有力な方法と考えられている。除熱の限界を定めるサブクール沸騰限界熱流束については、従来数多くの研究がなされてきたが、核融合炉機器においては、10~100 MW/m²あるいはそれ以上という高熱負荷となる部分も想定されており、従来あまり研究されていないこれらの領域のサブクール沸騰限界熱流束の精度よい予測が必要とされている。

強制流動サブクール沸騰限界熱流束については、加圧水型原子炉や材料試験炉などの開発のため20y以上前より研究が行われ、各種実験式が提案されてきた。Gambill⁽¹⁾はこれらの多くの実験データと実験式を整理し、相互にかなりのばらつきがあるが、一般に以下の傾向があることを示した。

(1) 水のサブクーリングが大で、流速が大ほど限

界熱流束は増大する。

(2) 大気圧から圧力を上昇させていくと限界熱流束は増大する。

(3) 管内流路の場合、流路径と管長の減少とともに限界熱流束は増大する。

そして、管内径が数 mm 以上と大きい場合にいくつかの実験式がかなり近い値を与えることを示した。それらのうち低圧領域の代表的なものとして Knoebel⁽²⁾や Griffel⁽³⁾、加圧水型原子炉の条件に近い圧力7~14 MPaで Tong⁽⁴⁾の実験式がある。管内径が小さくなると限界熱流束の上昇がみられるが、現在まで最も高い限界熱流束を得たのは Ornatskii ら⁽⁵⁾によるもので、管内径0.4~2.0 mm、管長14 mm、圧力0.9~7.2 MPaの条件で300 MW/m²に近い値を得ているが100 MW/m²以上の限界熱流束データはほかにはほとんど見当たらない。

以上のように、水の強制流動サブクール沸騰で特に狭あい流路を利用した構造を用いれば、高熱負荷除熱の可能性は極めて高いが、最近の Boyd⁽⁶⁾⁽⁷⁾のレビューによってもサブクール沸騰限界熱流束の系統的研究とメカニズムの解明が今後の課題となっている。

本研究は、以上の観点から狭あい流路の限界熱流束を調べる目的で、特に単純化した細管による実験を行

* 昭和60年11月15日 第934回講演会において講演、原稿受付 昭和60年4月26日。

** 正員、船舶技術研究所(〒181 三鷹市新川6-38-1)。

*** 正員、筑波大学構造工学系(〒305 茨城県新治郡桜村)。

**** 筑波大学大学院。

い、従来の実験式との比較などにより限界熱流速の特徴を系統的に検討することによって今後のメカニズム解明への第一歩とするものである。

記 号

- D : 管内径 m
 G : 質量速度 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 H_{fg} : 蒸発潜熱 J/kg
 L : 加熱管長 m
 q_c : 限界熱流速 W/m^2
 ΔT_{sub} : 入口サブクール度 K
 X_{ex} : 出口平衡クオリティ
 μ_l : 粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$

2. 実 験

2.1 実験装置 実験装置は、図1に示すように水槽、渦流ポンプ（吐出し量 26 L/min で全揚程 180 m）、浮子式流量計（0.6~3, 3~16, 16~30 L/min）、予熱器（3 kW）、試験部で構成され、イオン交換処理された水がこれらを経て再び水槽へと循環する。試験部の SUS 管は、絶縁用テフロン継手にコンプレッションフィッティングで垂直に固定され、水は管内を上昇する。加熱は、SUS 管の上下加熱端外周を銅製の電極で固定し、直流電源（45 kW, 1500 A）より直接ジュール加熱し、一様熱流速を模擬している。

計測は、流量、試験部出入口温度・圧力、印加電流・電圧である。0.6 L/min 以下の微小流量は、試験部より下流でじゃ管式冷却器を通して完全に凝縮させた水をオリフィスに取付けた差圧発振器とメスシリンダで計測した。

2.2 実験条件 実験パラメータは管内径 D 、加熱管長 L 、入口サブクール度 ΔT_{sub} 、質量速度 G の四つとし、出口圧力は大気圧とした。実験は、 $D=1, 2, 3$ mm, $L=1, 3, 5, 10$ cm, $\Delta T_{\text{sub}}=80, 60, 40$ K, $G=7\,000, 13\,000, 20\,000$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ について行った。

図1 実験装置系統図

2.3 実験方法とデータ整理 実験方法は、ポンプと試験部間の空気抜きを充分に行ってから予熱器により入口水温を設定した後、加電圧を少しずつ上げていき（バーンアウト近くでは熱流速で3%以内）、赤熱溶融（バーンアウト）させた時の計測データを限界熱流速とした。

限界熱流速値の決定は、特に管長が短い時の電極部への熱損失が無視できないことに注意を払い、熱バランスを考慮しつつ印加電力を補正して求めた。出口平衡クオリティは、本実験範囲であるサブクール沸騰状態では負の値になる。SUS 管出口の状態はループ配管の影響で大気圧よりごくわずかに高く、飽和温度が最大で 100°C より数度高くなったが、誤差として全体に与える影響が小さいため、これをすべて 100°C とみなして算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 各パラメータの影響 一例として、図2に質量速度 $G=7\,000$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、図3に $G=20\,000$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の場合の限界熱流速実験結果を出口平衡クオリティ X_{ex} に対して示した。図3では、内径 D をパラメータとしてみるなら、 D が小さいほど限界熱流速 q_c は高くなっているのがわかる。また、管長 L が小さいほど q_c は高くなっている。図2と図3を比較すると、内径、管長の q_c への影響度は、質量速度が大きいほど大きくなっているのがわかる。一方、図2からわかるように、質量速度が小さくなり、管長、内径がある程度以上大きくなると、内径、管長の q_c への影響は現れなくなっている。

3.2 高熱流速域と低熱流速域 内径、管長の流路形状が寸法効果として限界熱流速に影響を及ぼす領域は、一般に熱流速が高いので、ここでは高熱流速域と呼び、及ぼさない領域では一般に熱流速が低いので低熱流速域と呼ぶことにする。その境界は、限界熱流速実験データをパラメータ間の影響に着目して整理することにより、図4のように示せる。図4中、HIGH が高熱流速域、LOW が低熱流速域を示しているが遷移が徐々に行われ明確な1本の線として表せないため幅をもたせてある。境界は、管長が小さくなると内径が大きくなっており、また質量速度が大きいほど高熱流速域は広くなる。

3.3 従来の実験式との比較 以上の実験データを、各種実験式と比較した。Griffel は、内径 5.6 mm 以上、管長 61 cm 以上のデータに対し、次の式を与えている。

$$q_c = (128.7G + 1.21 \times 10^6)$$

$$\times (8 + 1.8 \Delta T_{\text{sub}})^{0.27} \dots\dots\dots (1)$$

図5は、内径1mmの本実験データを上式(1)と比較したもので、縦軸に式(1)の計算値、横軸に実験値を示す。管長が1cmの実験値は計算値の約4倍ぐらいであるのに対し、管長が5cmでは平均2倍以下となっている。図6は、内径3mmの場合で、管長1cmで2倍強であるが、10cmではほぼ実験値と一致している。

また Knoebel は、内径9.5mm、管長61cm、圧力0.2MPa以上のサブクール限界熱流束として、次式を与えている。

$$q_c = 4.85 \times 10^5 (1 + 1.71 \times 10^{-4} G)$$

$$\times (1 + 0.124 \Delta T_{\text{sub}}) \dots\dots\dots (2)$$

図4 高熱流束域と低熱流束域の境界

図2 限界熱流束と出口クオリティの関係
[$G = 7000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図5 Griffel 式と実験値との比較 ($D = 1 \text{ mm}$)

図3 限界熱流束と出口クオリティの関係
[$G = 20000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

図6 Griffel 式と実験値との比較 ($D = 3 \text{ mm}$)

図7は内径1mmのKnoebel式との比較例で、管長が1cmの実験値は計算値の約3倍強であるが、5cmの熱流束の低い実験値 [$G=7000, 13000 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$] は、計算値とほぼ一致している。図8は内径3mmの場合で、管長1cmの実験値は計算値の約2倍であるが、管長が3cm以上になると20%以内で実験値と計算値は一致している。このように、低熱流束域ではサブクール限界熱流束に対するGriffelやKnoebelの式とかなり良く一致するのに対し、高熱流束域では数倍の違いがあることがわかる。

また、甲藤⁽⁸⁾は一様加熱管の強制流動限界熱流束について広範囲に成り立つ整理式を出している。内径3mmの場合の甲藤式と実験との比較を図9に示した。この場合は低熱流束域データが多いのであるが実験との一致はそれほどよくない。1mmの場合には相関はさらに悪くなる。これは、甲藤式が $X_{ex}>0$ の範囲で

主に検討されたもので、本研究のようなサブクール沸騰データの検討が少ないためと考えられる。

Ornatskiiらは、極細管に対する実験式を出しているが、高熱流束域でも本実験値のほうがかなり小さくなり、本実験条件での相関はあまりよくなかった。

Tongは、圧力7~14MPa、質量速度1400~4000 $\text{kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ の軽水炉条件に近い条件下で次の式を出している。

$$\frac{q_c}{H_{fg}} = C \frac{G^{0.4} \mu_l^{0.6}}{D^{0.6}} \dots\dots\dots (3)$$

$$C = 1.76 - 7.43 X_{ex} + 12.22 X_{ex}^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 H_{fg} は蒸発潜熱、 μ_l は粘度である。図10に、式(3)より実験値から求めたCの値を示した。図10中、Tongと記した実線は式(4)を表し、■印は低熱

図7 Knoebel式と実験値との比較 ($D=1 \text{ mm}$)

図8 Knoebel式と実験値との比較 ($D=3 \text{ mm}$)

図9 甲藤式と実験値との比較 ($D=3 \text{ mm}$)

図10 Tong式と実験値との比較

流束域の実験値を、△印は高熱流束域の実験値を○印は高熱流束域の度合いの特に強い実験値 [$L=1\text{ cm}$, $D=1\text{ mm}$ で $G=13\,000, 20\,000\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$] を示す。図 10 からわかるように、高低熱流束域の違いにもかかわらずかなりよくまとまっており、限界熱流束のメカニズムがこのモデルに近いことを予測させる。なお本実験データは Tong 式よりかなり小さいが、これは実験条件、特に圧力の違いと考えられる。実験データをみると、高熱流束域の度合いが強くなるほど C の値は大きくなるが、限界熱流速の誤差範囲 $\pm 15\%$ 以内で本実験データに対する各領域の C を次のように表せる。

$$\text{低熱流束域: } C=0.24-1.91X_{\text{ex}}+22.9X_{\text{ex}}^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{高熱流束域: } C=0.52-2.61X_{\text{ex}}+26.2X_{\text{ex}}^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{高熱流束域* : } C=0.84-3.42X_{\text{ex}}+30.4X_{\text{ex}}^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

[* $L=1\text{ cm}$, $D=1\text{ mm}$, $G=13\,000, 20\,000\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$]

3・4 細管内限界熱流束についての考察 以上、管内径、管長が小さくなるほど従来の実験式と異なる限界熱流束となることを定量的に示した。Tong の式がかなり近いことから、気泡境界層のはく離モデルに近い現象であること、管内径が減少するほど発生気泡径が小さくなること、管長が減少するほど境界層に対する上流効果が大きくなること、などの重ね合せた効果として、限界熱流束の増大が生ずると考えられるが詳細は今後の課題である。

4. む す び

細管における大気圧条件下でのサブクール沸騰限界熱流束実験と、従来のサブクール沸騰限界熱流束式との比較を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 管内径、加熱管長が小さくなると、流路形状の寸法効果のため管内径と加熱管長が限界熱流束に影響を与える高熱流束域が存在する。

(2) 実験結果より各パラメータ間の相関を整理して高熱流束域と低熱流束域の境界を示した。

(3) 低熱流束域の限界熱流束に対しては、従来のサブクール沸騰限界熱流束の実験式が適用できる。

(4) Tong の実験式を大気圧条件下のサブクール沸騰限界熱流束に適用するなら、実験式中の係数と出口クオリティとの関係式を式(5)～(7)のようにすればよい。

終わりに本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 エネルギー特別研究(核融合)の補助を受けて行われた。ここに付記して謝意を表す次第である。

文 献

- (1) Gambill, W. R., *Nucl. Safety*, 9-6 (1968), 467-480.
- (2) Knoebel, H., *USAEC Rep.*, DP-1306, E. I. Dupont de Nemours and Company, (1973).
- (3) Griffel, J., *Report NYO-187-7*, Columbia University, (1965).
- (4) Tong, L. S., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 11-7 (1968), 1208-1211.
- (5) Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., *High Temperature*, 3-3 (1965), 400-406.
- (6) Boyd, R. D., *Fusion Technol.*, 7-1 (1985), 7-30.
- (7) Boyd, R. D., *Fusion Technol.*, 7-1 (1985), 31-52.
- (8) 甲藤・大野, 機論, 50-459, B (昭59), 2621.

討 論

〔質問〕 伊 藤 猛 宏〔九州大学工学部〕

もっと細い管については、必ずしも著者のいう「高速流束域」にならなかったり、影響のし方が単調でなくなるのではないか。

〔回答〕 内径 1 mm 以下の細い管については、0.5 mm というソ連の実験データがあり、かなり高い限界熱流束値を得ている。それ以外は、一般に管径が数 mm より小さくなると限界熱流束値が高くなるという傾向が報告されているのみで、本研究のように系統的に各パラメータ効果を調べた研究はほとんどな

い。

本研究で内径 1～3 mm を研究対象としたのは、

(1) 過去のデータを調べるとこの範囲で限界熱流束値が上昇する傾向にある。

(2) 1 mm より細い管では圧力損失が極端に増大し実用上あまり意味がない。と考えたことによる

1 mm 以下、0.5 mm 程度までソ連の研究者のいうように本当に限界熱流束が高くなるかどうかなど今後の問題と考える。