ねじりテープ挿入管における R-113 沸騰二相流の限界熱流束特性*

李 相 烈*¹, 井 上 晃*², 高 橋 実*²Critical Heat Flux Characteristics of R-113 Boiling Two-Phase Flow
in Twisted-Tape-Inserted Tubes

Sangryoul LEE, Akira INOUE and Minoru TAKAHASHI

This paper presents experimental data on the critical heat flux (CHF) in twisted-tape-inserted tubes over a wide quality range of -0.25 to 0.8 . The influences of quality, twist ratio, mass velocity, and clearance between the twisted tape and tube inner wall on CHF were investigated. In the subcooled region, it was observed, using an infrared thermoviewer, that CHF was initiated locally at the wall near the twisted tape. Consequently, twisted tape insertion with small tape-wall clearance decreased CHF to below the value in the empty tubes at a low flow rate. This decrease was found to be avoidable by adjusting the clearance. In the net quality region, CHF in the twisted-tape-inserted tubes increased with increasing flow rate contrary to the case of the empty tubes. However, CHF in the net quality region was also decreased by insertion of twisted tapes with high twist ratio (loosely twisted tapes) at a very low flow rate.

Key Words: Critical Heat Flux, Twisted-Tape-Inserted Tube, Subcooled Region, Net Quality Region, Wall Temperature Distribution Visualization

1. ま え が き

種々の熱機器の小形化, 高性能化, および高熱負荷装置の開発に応じて, より高性能の熱交換器が要求されている。高性能化の方法として, 伝熱管の中にねじりテープを挿入して旋回流を起こすことにより, 熱伝達率と限界熱流束を向上させる方法が注目されている。ねじりテープ挿入管の応用としては, 天然ガス設備の常用気化器, 宇宙発電システムのボイラや凝縮器, 核融合炉ダイバータ板の高熱負荷部冷却などが考えられている。

ねじりテープ挿入管の限界熱流束に関する従来の研究は, おもに水を作動流体として, サブクール領域と正のクオリティ領域ごとに別々に行われた。サブクール領域では, ねじりテープ挿入管の限界熱流束が通常の円管の限界熱流束の2.5倍までに達することがわかって⁽¹⁾。このような限界熱流束の増加が, 遠心力による気泡崩壊と気泡境界面の攪拌によるものと考え, 遠心力を考慮した限界熱流束の実験式が提示され

ている⁽²⁾。また, 圧力の増加とともにねじりテープによる限界熱流束の向上効果が低下することも知られており⁽³⁾。稲坂ら⁽⁴⁾は, この原因を圧力の増加とともに気液密度差が減少し遠心力の影響が低下するためと考え, 圧力依存性を含む限界熱流束の実験式を導いた。

一方, 正のクオリティ領域での従来の研究^{(5)~(10)}でも, ねじりテープの挿入により限界熱流束が増加した。Jensen⁽⁵⁾は圧力と遠心力の影響を考慮した限界熱流束の実験式を提示した。しかし, 質量流速が小さくクオリティが大きい場合には限界熱流束が低下することもあり, その原因はねじりテープの表面への液体の付着により伝熱管壁に沿う液膜流量が減少することにあると考えられた⁽⁶⁾。さらに, サブクール入口条件の高質量流速の場合には, ねじりテープで仕切られた並行チャンネル特有の流動不安定に起因する流れの激しい振動が生ずることも知られている⁽⁶⁾。

以上の研究結果によれば, ねじりテープの限界熱流束に及ぼす影響はクオリティによって大きく異なると推定されるが, サブクール領域から高クオリティまでの広いクオリティ領域にわたっての一貫性のある限界熱流束の特性は把握されていない。また, ねじりテープと伝熱管のすきまによっては, ねじりテープと伝熱管の接触部付近に早期に乾きが起こり, 限界熱流束が

* 原稿受付 平成6年8月8日。

*¹ 正員, 東京工業大学大学院 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。*² 正員, 東京工業大学。

低下することも予想されるが、従来の研究ではこれらについての検討がなされていない。

そこで本研究では、サブクール領域から高クオリティ領域までの広範囲にわたり限界熱流束実験を行い、出口クオリティ、ねじり比、流量およびテープと伝熱管のすきまの影響を明らかにすることにより、ねじりテープ挿入管の限界熱流束特性を把握する。また、赤外線熱画像装置により伝熱管外壁の温度分布を観察し、ねじりテープの限界熱流束に及ぼす影響を可視化により考察することも試みる。

2. 実験装置と実験方法

2・1 実験装置 実験装置の概略系統図を図1に示す。作動流体にはR-113を用いた。作動流体はポンプにより循環され、オリフィス流量計、第1予熱器、流量調節弁、第2予熱器を経て、テスト部に下から流入する。テスト部で加熱されて垂直上昇沸騰二相流となり、気液分離器で蒸気と液体が分離される。蒸気は凝縮器で凝縮され、気液分離器から出た液体とともに、冷却器を経てポンプに戻る。系圧力は、テスト部出口に圧力タップを設け、圧力変換器で測定した。この系圧力のフィードバック信号で凝縮器の冷却水流量を制御し、系圧力を一定に保った。

図2に示すように、テスト部と第2予熱器は1本の円管からなる。この円管は内径9.6 mm、厚さ0.2 mm、加熱長さ850 mmのSUS 304製引抜管である。

図1 実験装置の概略系統図

その両端と下流端から20 mmの位置に電極を設けて、上流側の長さ830 mmのテスト部入口クオリティ調節用の第2予熱器と、下流側の長さ20 mmの高熱流束のテスト部の2領域に分けてある。テスト部と第2予熱器の管壁は、二つの直流制御電源を用いて独立に直接通電加熱される。円管のまわりには断熱材が巻かれ保温されており、周囲への漏れ熱は加熱量の3%以下であった。

ねじりテープと平テープは長さ1000 mm、厚さ0.2 mmのSUS 304製板でできており、テスト部と第2予熱器の全長にかけて挿入される。ねじりテープのねじり比(180°ねじりピッチ/管内径)は4, 6.7, 20, ∞(平テープ)の4種類にした。テープの表面にはテープとテスト管との電気絶縁のために、ふっ素系ゴムをベースにした絶縁材を塗布し、熱処理してある。この絶縁材は十分良好に密着しはがれがないことを実験後に確認した。絶縁層を含むねじりテープの厚さは0.4 mm、幅は管壁とねじりテープのすきまが0, 0.3, 0.7, 1.0, 1.3 mmとなるように5種類に選んだ。すきまを一定に保つため、長さ方向96 mm間隔(管内径の10倍)でねじりテープの側面にすきまと同じ高さの突起状スペーサを設けた。このスペーサが位置する第2予熱器伝熱管の周囲を銅ワイヤで巻き、局部的温度上昇を防いだ。

2・2 実験方法 実験前に、作動流体を循環沸騰させることにより非凝縮性ガスを除去した。実験においては、はじめに作動流体の流量を設定し、沸騰させてその蒸気圧で系圧力を設定した。次に第1予熱器の下流側流量調節弁の絞りで第1予熱器内の圧力を系圧力より約0.5 MPa高くし、ここで作動流体が沸騰しないようにしながら液温を設定した。作動流体は流量

図2 テスト部の詳細図

表 1 実験条件

Working fluid	R113
Test section length	20mm
Twist ratio, Y	4, 6, 7, 20, ∞ , Empty
Clearance, δ	0, 0.3, 0.7, 1.0, 1.3mm
System pressure	0.3MPa
Mass velocity, G	Subcooled region 650, 3300, 5940 kg/m ² s Net quality region 450, 650, 900 kg/m ² s
Exit quality, X_{EXIT}	-0.25~0.8

調節弁を通過する際に減圧されるが、この流体のエンタルピーにより第2予熱器入口でのクオリティが決まる。テスト部入口でのクオリティは、サブクール状態からクオリティが約0.2までの範囲については、第1予熱器での液温制御により設定し、0.2以上については第2予熱器も通電加熱し設定した。テスト部の長さが短いために、テスト部入口-出口間のクオリティ変化は最高0.05である。本実験の実験条件を表1に示す。

以上の設定後、テスト部加熱熱流束を限界熱流束まで徐々に上げて、テスト部壁面の平均温度変化を電気抵抗式ダブルブリッジ回路により測定した。テスト部平均温度が急上昇して飽和温度より約50 K高くなった時点で、限界熱流束に達したとみなした。その探知信号を直流制御電源へフィードバックして投入電力を下げることでテスト部の溶断を防いだ。限界熱流束はテスト部への投入電力から求めた。

テスト部外壁の温度分布を赤外線熱画像装置により可視化し、その映像を録画して限界熱流束に至る機構の考察に用いた。テスト部の管の肉厚が薄いために、管壁の内外温度差は十分小さい。テスト部外面に無光沢ラッカーペイントを塗り表面放射率を均一にした。テスト部の管内に一定温度の流体を流し、温度の読みが液温と一致するように放射率を定めることにより、装置の温度校正を行った。テスト部の表面放射率はおよそ0.85程度であった。

3. 実験結果

3.1 限界熱流束に及ぼす出口クオリティの影響

図3に、系圧力 $P_{SYS}=0.3$ MPa、質量流速 $G=650$ kg/(m²·s)、出口クオリティ $X_{EXIT}=-0.25$ (サブクール度約40 K)~0.8における限界熱流束 q'_{CHF} の実験結果を示す。ねじりテープのねじり比 $Y=4$ 、ねじりテープとテスト部伝熱管内壁のすきま $\delta=0.3$ mmである。図3には、テープが挿入されていない円管(Empty)と平テープ挿入管($Y=\infty$)の限界熱流束の実験結果も示し比

図 3 出口クオリティの影響

較した。横軸の出口クオリティ X_{EXIT} は、限界熱流束に到達したときのテスト部の出口クオリティである。

限界熱流束の出口クオリティ依存性は、円管、平テープ挿入管、ねじりテープ挿入管ともに定性的に同じであり、その特性から四つのクオリティ領域に分けられる。次に各クオリティ領域ごとに、限界熱流束の特性を述べる。

3.1.1 サブクール領域 ($X_{EXIT}=-0.25\sim0$) 図3①~②

図3①~②に示すように、 $X_{EXIT}=-0.25\sim0$ のサブクール領域では、 X_{EXIT} の増加に伴い q'_{CHF} はほぼ直線的に減少した。円管の限界熱流束の実験結果は、図3に示すように、Kattoら⁽¹¹⁾の実験式より若干小さいがほぼ一致しており、これによりテスト部入口が単相流の状態にあるサブクール領域における本実験方法が妥当であるとみなすことができる。円管に比べてねじりテープ挿入管の限界熱流束のほうが高いことが注目される。その差は出口クオリティが小さいほど大きく、出口クオリティが約-0.2のときはねじりテープ挿入管の限界熱流束のほうが円管より10%程度小さい。

3.1.2 低クオリティ領域 ($X_{EXIT}=0\sim0.1$) 図3②

図3②に示すように、 $X_{EXIT}=0\sim0.1$ の低クオリティ領域では q'_{CHF} が極小値を示した。円管、平テープ挿入管、およびねじりテープ挿入管の限界熱流束値に差異が見られない。

3.1.3 中間クオリティ領域 ($X_{EXIT}=0.1\sim0.5$) 図3②~③

図3②~③に示すように、 $X_{EXIT}=0.1\sim0.5$ の中間クオリティ領域では、 X_{EXIT} の増加とともに q'_{CHF} が増加した。円管と平テープ挿入管に比べて、ねじりテープ挿入管の限界熱流束の増加率のほうが大きく、 $X_{EXIT}=0.5$ においてねじりテープ挿入管の限界熱流束は円管の約125%に達する。

3.1.4 高クオリティ領域 ($X_{EXIT}>0.5$) 図3③

～④に示すように、 $X_{\text{EXIT}} > 0.5$ の高クオリティ領域では、 X_{EXIT} の増加とともに q'_{CHF} が急激に減少した。しかし、ねじりテープ挿入管の場合は、円管と平テープ挿入管より高いクオリティまで限界熱流束が高く保たれた後減少し、その減少率もより緩やかである。

一方、平テープ挿入管のほうは、円管とねじりテープ挿入管に比べて全クオリティ領域にわたり限界熱流束が低い。

3・2 限界熱流束における管壁温度分布 図4～7は、限界熱流束に至った状態の壁温分布であり、図3の①～④の条件にそれぞれ対応している。図(a)～(c)の各対の写真の左は熱流束が限界熱流束の約95%に達したときの壁温分布、右は限界熱流束に達したときの壁温分布である。写真の白色の部分限界熱流束に達した高温部である。ねじりテープ両端の位置を白線で示してある。その観察結果について次に述べ

る。

3・2・1 サブクール領域 図4(a)～(c)に、図3①のサブクール領域の壁温分布を示す。図4(a)の円管の場合、熱流束が限界熱流束に近づくと小さい高温のはん点が振動しながら上昇し、出口で急拡大して限界熱流束に達する。円管の場合はこの高温はん点の分布が円周方向に均一であるが、図4(b)、(c)に示す平テープ挿入管とねじりテープ挿入管の場合は、限界熱流束に近づくと管壁のテープ付近のみに小さい高温のはん点が振動しながら上昇し、出口のテープ付近で急拡大して限界熱流束に至る。このとき、テープから離れた位置の壁温は安定している。壁温分布の録画映像によれば、図3の①から②までクオリティが増加すると、テープから離れた位置の壁温も徐々に不安定になるが、テープ付近の壁温は最も不安定であり、つねに出口のテープ付近で限界熱流束に至ることがわかった。

3・2・2 低クオリティ領域 図5(a)～(c)に図3②に対応する低クオリティ領域の壁温分布を示す。3種類の伝熱管のいずれにおいても、熱流束の増加とともに管壁全体に不規則形状の高温部が出没し、壁温分布が不安定になる。限界熱流束に至る位置は、テープ付近や出口に限定されず、不規則に管壁全体にわたっている。

3・2・3 中間クオリティ領域 図3の②から③までの中間クオリティ領域では、壁温分布の録画映像によると、クオリティの増加とともに限界熱流束に至る直前のテスト部の壁温分布がだんだん安定になる。図6(a)～(c)に図3③の壁温分布を示す。円管の場合には、壁温は安定しており、熱流束が限界熱流束に達するとテスト部の出口付近で高温部が現れ、これが急拡大する。平テープ挿入管の場合には、テープ付近の管壁に高温部が現れ、その位置で限界熱流束に至る。ねじりテープ挿入管では、テープ付近の壁温は安定しているが、限界熱流束に達する位置は平テープ挿入管と同じく出口のテープ付近である。

3・2・4 高クオリティ領域 図7(a)～(c)に図3④に対応する高クオリティ領域の壁温分布を示す。限界熱流束に至る前には、ねじりテープから離れた位置で流れ方向に縦長の高温部が現れる。録画映像によると、この縦長の高温部は低熱流束から周期的に現れ、熱流束が限界熱流束に近づくと縦長の高温部の出没が頻繁になり、やがて円周方向に急速に拡大して限界熱流束に至る。

3・3 限界熱流束に及ぼすねじり比と流量の影響

3・2節までの結果で、サブクール領域はねじりテープの挿入により限界熱流束が低下し、中間クオリティ領域と高クオリティ領域では逆に限界熱流束が増加することを明らかにした。ここでは、サブクール領域と中間クオリティ領域の両領域についてねじり比と流量の影響を調べた。すきま δ は3・2節と同じく0.3 mmに一定に保った。

3・3・1 サブクール領域 サブクール領域でねじり比 Y と質量流速 G の限界熱流束に及ぼす影響を図8に示す。質量流速の増加とともにいずれの管の限界熱流束も増加する。質量流速が $650 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ のときは、 $Y=4 \sim \infty$ のテープ挿入管の限界熱流束が円管より小さいが、質量流速が高まるにつれてテープ挿入管と円管の限界熱流束の差が小さくなり、 $5940 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ のときはほぼ等しくなる。しかし、実験範囲の質量流速では円管の値を超えるまでには至らない。

一方、各質量流速において、 $Y=4 \sim \infty$ の範囲でテープ挿入管の限界熱流束はほぼ一定であり、実験範囲のねじり比と質量流速ではねじり比の限界熱流束に及ぼす影響は小さい。

3・3・2 中間クオリティ領域 $X_{\text{EXIT}}=0.25 \sim 0.45$ の中間クオリティ領域における限界熱流束のねじり比依存性を、三つの質量流速に対して図9に示す。図9の(a)～(c)を比較すると、同一クオリティにおいて、円管の限界熱流束は質量流速の増加とともにやや低下しているが、ねじりテープ挿入管の限界熱流束は質量流速の増加とともに増加している。

図8 流量およびねじり比の影響(サブクール領域)

図 9 流量およびねじり比の影響(中間クオリティ領域)

図 10 すきまの影響(サブクール領域)

図 11 すきまの影響(中間クオリティ領域)

図 9 (a) の $G = 450 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ の場合、 $Y = 20$ と $Y = \infty$ のテープ挿入管の限界熱流束は円管よりかなり小さい。ねじり比が 6.7 になると、限界熱流束は円管の値にほぼ等しくなる。さらにねじり比が 4 になると、旋回効果が強まり、限界熱流束は円管の値よりかなり大きくなる。図 9 (c) に示すように、質量流速が $900 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ においては、 $Y = 20$, ∞ の限界熱流束が円管とほぼ等しくなり、 $Y = 4$, 6.7 のねじりテープ挿入管の限界熱流束は円管の値より大きくなった。

以上より、この中間クオリティ領域ではねじりテープ挿入の効果が顕著であり、ねじり比が小さく、流速が大きいほど、限界熱流束の向上は著しくなっている。

3.4 限界熱流束に及ぼすすきまの影響 3.3 節までの実験ではねじりテープと伝熱管内壁とのすきまが 0.3 mm に一定であった。このとき、サブクール領域と中間クオリティ領域では限界熱流束に至る位置がねじりテープ付近の伝熱管壁に集中することが観察さ

れた。ここでは、この両領域に対してすきまの影響を調べ、次の結果が得られた。

3.4.1 サブクール領域 図 10 に、サブクール領域における限界熱流束のすきま依存性を示す。ここで、縦軸は円管の限界熱流束と $Y = 4$ のねじりテープ挿入管の限界熱流束の比である。

白抜き印は出口クオリティ 0.1、黒印は出口クオリティ 0.2 の結果であるが、限界熱流束比のすきま依存性はクオリティによって顕著な差異がない。全体的にはすきま δ の増加とともに限界熱流束比が増加し、すきまが 1.0 mm のとき極大となり、 1.3 mm になると減少する。さらにすきまが増加すると、最終的にはねじりテープが挿入されていない円管と同様になるので、限界熱流束比が 1 に漸近するだろう。

一方、同一流量における限界熱流束のすきま依存性はかなり大きく、 $G = 450 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ の場合はすきまが 0 と 1.0 mm のときの限界熱流束比は最低値 0.8 と最高値 1.2 となり、その差は円管の限界熱流束を基

準にして約40%に達する。

3・4・2 中間クオリティ領域 図11に、出口クオリティが0.3と0.4の中間クオリティ領域における限界熱流束比のすきま依存性を示す。限界熱流束比はすべて1より大きいが、平均的にはすきまが0.3mmのときに限界熱流束比が極大値となる。同一流量において $\delta=0\sim1.3$ mmに対する限界熱流束の変位量は円管の限界熱流束を基準にして10%程度であり、サブクール領域の図10と比べると、限界熱流束のすきま依存性はやや弱い。

4. 考察

4・1 サブクール領域 サブクール領域では、ねじりテープ付近の管壁で局所的に限界熱流束に至った。これは、この部分で低流速のため局部的に液温が高まり、気泡の発生量が増加したためと考えられる。そのために、ねじりテープと伝熱管のすきまが狭いときはねじりテープ挿入管の限界熱流束が円管より低くなった。この傾向は低流速において著しい(図8)。ねじりテープ挿入管内の単相流の研究⁽¹²⁾によれば、低流速の場合にねじりテープと管壁との角付近の流速が局所的に低下し、上記の推測を裏付けている。

しかし、すきまが広がるにつれて局所的に限界熱流束に至りにくくなって、ねじりテープ挿入管の限界熱流束が円管の値を上まわるようになる(図10)。さらにすきまが広がると限界熱流束比は低下するが、これは、すきまを流れる流量が増えるために、旋回流による限界熱流束の向上効果は小さくなったと考えられる。限界熱流束が最大になる最適のすきまが存在し、本実験条件範囲では、サブクール領域で1.0mmであった。

4・2 低クオリティ領域 図3②に対応する $X_{\text{EXIT}}=0\sim0.1$ の低クオリティ領域の流動様式は、Baker線図⁽¹³⁾によるとスラグ流であり、図5(a)～(c)に不安定な壁温分布が観察された。このことから、この領域で限界熱流束が極小値を示した理由は、スラグ流の不安定によるものと考えられる。限界熱流束に至る位置が、テープ付近や出口だけでなかったことは、これを立証している。

4・3 中間クオリティ領域 ドライアウトにより液膜の消失が起こる時点には、限界熱流束に至る直前に管壁の渇きと濡れの繰返しのため激しい壁温変動が起こる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。この中間クオリティ領域では、そのような変動が起こらなかったことから、限界熱流束に至る機構は液膜のドライアウトではなく、液膜内での気泡成長による液膜破断など、他の機構と推定される。出口クオリティの増加に伴い限界熱流束が増加したこと

は、流動様式がスラグ流から環状噴霧流に遷移しその液膜流が安定化したために、液膜の破断が起こりにくくなったことを示唆している。

ねじりテープ挿入管では、液膜が壁面に押し付けられるため界面波動が沈静化され、液膜からの液滴の発生が抑制されること、気流中液滴の壁面への伝達促進により液膜流量が増大すること、液膜内部で発生した沸騰気泡の離脱が促進されることなどの遠心力効果による限界熱流束の増大が考えられる。質量流速が大きくねじり比が小さいほどねじりテープ挿入管の限界熱流束が増加したのは[図9(a)～(c)]、このような遠心力効果が強まるためであろう。円管では、質量流速の増加とともに、液滴流量も増加するために、限界熱流束がやや低下していて、従来の研究⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾と同様な結果である。

ねじり比が大きく流量が小さい場合は、ねじりテープ挿入管の限界熱流束が円管の値より低下したが[図9(a)]、この原因としてテープ付近の壁面での流速の低下と、ねじりテープへの液体の付着による液膜流量の減少が考えられる。

4・4 高クオリティ領域 0.5以上の高クオリティ領域で、 X_{EXIT} の増加とともに限界熱流束が急減したが、従来の研究^{(18)～(22)}でも同様の報告がある。Doroshukら⁽¹⁸⁾は、これは限界熱流束への到達機構がDNBからドライアウトに遷移するためと解釈した。また、Katto⁽²³⁾によれば、環状噴霧流に関連したH領域の限界熱流束-クオリティ曲線から、限界熱流束が急減する出口クオリティ X_{EXIT} が予測できる。

高クオリティ領域(図3の③～④)で管壁に流れ方向の縦長の高温部(図7)が出没したことから、液膜流量が不足して管壁に渇きと濡れが繰返すことで壁温変動が起こったと考えられ、この領域ではドライアウトによる液膜の消失により限界熱流束に至ると推定される。

ねじりテープ挿入管のほうが、円管に比べて、限界熱流束が大きく、 X_{EXIT} の増加に伴う減少率が小さくなる理由は、遠心力により液膜への液滴伝達が促進され、液膜流量が増大したためであろう。

5. 結論

本研究では、R-113の沸騰上昇二相流のサブクール領域から高クオリティ領域までの広いクオリティ領域にわたり限界熱流束実験を行い、出口クオリティ、ねじり比と流量、すきまの影響などを明らかにし、ねじりテープ挿入管の限界熱流束を把握した。また、赤外線熱画像装置により伝熱管外壁の温度分布を可視化

し、限界熱流束に至る状況がよく観察できた。

限界熱流束の出口クオリティ依存性は、円管、平テープ挿入管、ねじりテープ挿入管ともに定性的には同様であり、低圧(0.3 MPa)の本実験条件では以下のようになった。

(1) サブクール領域($X_{\text{EXIT}} = -0.25 \sim 0$)では、 X_{EXIT} の増加に伴い q'_{CHF} はほぼ直線的に減少した。

(2) 低クオリティ領域($X_{\text{EXIT}} = 0 \sim 0.1$)では限界熱流束が極小値を示した。

(3) 中間クオリティ領域($X_{\text{EXIT}} = 0.1 \sim 0.5$)では、 X_{EXIT} の増加とともに限界熱流束が増加した。

(4) 高クオリティ領域($X_{\text{EXIT}} > 0.5$)では、 X_{EXIT} の増加とともに限界熱流束が急減した。

ねじりテープ挿入管の限界熱流束特性は各クオリティ領域ごとに異なり、各領域で以下の結論を得た。

(1) サブクール領域

サブクール領域では、円管、平テープ挿入管、およびねじりテープ挿入管の限界熱流束は同様に流量の増加とともに増加する。

一方、ねじりテープと伝熱管のすきまが狭い場合、ねじりテープ付近の管壁で局所的に限界熱流束に至り、ねじりテープ挿入管のほうが円管より限界熱流束が低くなる。この傾向は低流速において著しい。すきまが広がるにつれてねじりテープ挿入管の限界熱流束が円管の値を上回るようになって、さらにすきまが広がると減少し円管の値に漸近する。サブクール領域では他の領域よりすきまの影響が最も大きく、限界熱流束が最大になる最適のすきまが存在し、本実験条件範囲では1.0 mmであった。

(2) 低クオリティ領域

スラグ流の不安定により限界熱流束が極小値を示し、円管、平テープ挿入管、およびねじりテープ挿入管の限界熱流束値に差異は見られなかった。

(3) 中間クオリティ領域

中間クオリティ領域では、円管のほうは流量の増加に伴い限界熱流束がやや低下するが、ねじりテープ挿入管のほうは逆に増加する特性をもつ。

また、すきまの限界熱流束に及ぼす影響はサブクール領域に比べて弱く、ねじりテープが管壁に接した場合を除くとすきまが狭いほど限界熱流束が大きくな

り、平均的にはすきまが0.3 mmのとき最大値を示す。

一方、ねじりテープ挿入管の限界熱流束が円管の値を上回るが、流量が小さくねじり比が大きいときは円管より低くなる。

(4) 高クオリティ領域

高クオリティ領域では、ドライアウトによる液膜の消失の機構で限界熱流束に至る領域であり、出口クオリティの増加とともに限界熱流束が急減した。ねじりテープ挿入管ではその減少率が円管より緩やかであり、テープ付近の管壁で局所的に限界熱流束に至ることもなく、同一流量におけるねじりテープの限界熱流束向上効果が最も顕著である。

文 献

- (1) Gambill, W. R., ほか2名, ORNL-2911(1960).
- (2) 稲坂・ほか3名, 第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集, B 225(1990), 499.
- (3) Gambill, W. R., ほか2名, *Chem. Eng. Symp. Ser.*, 57-32(1961), 127.
- (4) 稲坂・ほか3名, 第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集, B 145(1991), 130.
- (5) Jensen, M. K., *Int. J. Heat Mass Trans.*, 27-11(1984), 2171.
- (6) Moeck, E. O., ほか3名, AECL-2109(1964).
- (7) Matzer, B., ほか3名, *ASME Paper*, 65-WA/HT-30(1965).
- (8) Rosuel, A. and Sourieux, G., EURAEC-146(1963).
- (9) Volterras, J. and Tournier, G., EURAEC-639(1963).
- (10) Rosuel, A., ほか2名, EURAEC-900(1963).
- (11) Katto, Y. and Ohno, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 27-9(1984), 1641.
- (12) Manglik, R. M. and Bergles, A. E., *J. Heat Transf.*, 115(1993), 881.
- (13) Baker, O., *Oil Gas J.*, 53(1954), 185.
- (14) Hewitt, G. F., ほか3名, AERE-R 4374(1963).
- (15) Tippetts, F. E., *Trans. ASME, Ser. C*, 86(1964), 12.
- (16) Weatherhead, R. J., ANL-6675(1962).
- (17) Stevens, G. F., ほか2名, AEEW-R 321(1964).
- (18) Doroschuk, V. K., ほか2名, *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, 6, (1970), B 6.1.1.
- (19) Doroschuk, V. K., ほか2名, *ASME Paper*, 75-WA/HT-22(1975).
- (20) Smolin, V. N., *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, 6, (1970), B 6.8.1.
- (21) Sterman, L. S. and Nekrasov, A. V., *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, 6, (1970), B 6.9.1.
- (22) Morzov, V. G., *Heat Transf. Sov Res.*, 10-2(1977), 58.
- (23) Katto, Y., *J. Heat Transf.*, 104(1982), 40.