非均一加熱条件下のサブクール沸騰限界熱流束に対する ねじりテープの影響*

成 合 英 樹^{*1}, 稲 坂 富士夫^{*2}
石 川 厚 史^{*3}, 木 下 秀 孝^{*4}

Effect of Internal Twisted Tape on Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling under Nonuniform Heating Condition

Hideki NARIAI, Fujio INASAKA,
Atushi ISHIKAWA and Hidetaka KINOSHITA

Critical heat flux (CHF) under circumferentially nonuniform heating conditions was experimentally investigated using direct current heating of a stainless steel tube. CHF in a smooth tube without internal twisted tape under nonuniform heating conditions was slightly higher than that under uniform heating conditions because of the lower average qualities at the tube outlet under nonuniform heating conditions than those under uniform heating conditions. CHF in tubes with internal twisted tape under nonuniform heating conditions was much higher than that under uniform heating conditions, though the average qualities at the tube outlet were the same for both cases. The higher CHF under the nonuniform heating condition was explained by the alternating development and disruption of the bubble boundary layer. The circumferential location of burnout initiation was observed by video camera, and it was confirmed that CHF started at the point where the bubble boundary layer developed the most.

Key Words: Critical Heat Flux, Swirl, Subcooled Boiling, Nonuniform Heating, Twisted Tape

1. 緒 言

核融合炉の高熱流束機器は、10～100 MW/m²の定常的熱負荷にさらされることが想定されており、強制冷却が不可欠となる。しかもこれらの機器は、一般に片側から熱を受けるので、その冷却材は非均一加熱されることになり、除熱限界を与える限界熱流束は、設計上最も重要な因子となる。現在設計が進められている国際熱核融合炉のダイバータ板では、冷却構造としてねじりテープを挿入した冷却管(旋回流管)にアーマタイルを接合したものが検討されている。また、冷却技術の一つとして水冷却方式が考えられているが、この場合には非均一加熱条件下の旋回流管に対するサブクール沸騰限界熱流束の解明が大きな課題となっている。

従来の直接通電加熱による円周方向の非均一加熱条件の限界熱流束の研究は、Ornatskiiら⁽¹⁾、およびLeontievら⁽²⁾の研究に見るように、ねじりテープを挿入していない管(ストレート管)に限られている。著者

ら⁽³⁾⁽⁴⁾は、これまでにストレート管、および旋回流管に対する非均一加熱実験を行ってきた。その結果、管出口平均クオリティが等しいにもかかわらず、旋回流管に対する非均一加熱条件の限界熱流束が、均一加熱条件のものよりかなり高くなることを示し、非均一加熱条件の限界熱流束の増大を説明するには、増倍率を考慮する必要があることを指摘した。しかしながら、旋回流管に対する限界熱流束の増大と非均一加熱特性との関連について、系統的に調べた研究はほとんどない。

本報告では、非均一加熱の度合いをさらに強くした場合の実験を実施し、非均一加熱の度合いが限界熱流束に及ぼす影響、およびそのメカニズムについて検討を行った。そして、ストレート管に対する非均一加熱条件の限界熱流束が、均一加熱条件のものより少し大きくなる理由を定量的に示した。また、旋回流管に対する非均一加熱条件の限界熱流束は、非均一加熱の度合いが大きくなるほど均一加熱のものより大きくなることを明らかにした。その限界熱流束の増大は、気泡境界層の断続的な発達と消滅によるものであることを、バーンアウトの発生開始位置を観察することにより確かめた。

* 原稿受付 平成6年2月28日。

^{*1} 正員、筑波大学構造工学系 (〒305 つくば市天王台1-1)。

^{*2} 正員、船舶技研原子力技術部 (〒181 三鷹市新川6-38-1)。

^{*3} 筑波大学大学院。

^{*4} 学生員、筑波大学大学院。

記 号

- d_i : 管内径 m
 m : 質量速度 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 L_h : 加熱管長 m
 p_a : 管出口圧力 MPa
 q : 熱流束 W/m^2
 q_c : 限界熱流束 W/m^2
 T : 水温 $^{\circ}\text{C}$
 x : 熱平衡クオリティ
 y : テープねじり比 (180° ねじりピッチ/管内径)
 β : テスト管薄肉部の円周角度 (削り角) rad

添 字

- av : 非均一加熱条件での平均熱流束
 H : 非均一加熱条件での高いほうの熱流束
 in : 入口条件
 out : 出口条件
 $unif$: 均一加熱条件

2. 非均一加熱に関する従来の研究

Ornatskii ら⁽¹⁾ は、内径 0.5 mm、加熱管長 14 mm という黄銅製の小口径ストレート管の円周角度 $\pi/3$ rad の部分に厚さ 0.1 mm の白金めっきを施した管を用い、その限界熱流束が均一加熱条件のものより 50~80% 高くなることを示した。しかしこの結果は、極めて内径が小さい特殊条件であり、比較的内径の大きい管には定量的に適用できないものと考えられる。

また、Leontiev ら⁽²⁾ は、内径が 6 mm、加熱管長が 415 mm ではあるが、内径と外径の中心が偏心しているストレート管を用いた圧力 6.86~13.7 MPa の実験を行い、その限界熱流束が均一加熱条件のものより少し高くなること、およびそれに対する平均クオリティが均一加熱条件のものより低くなることを示している。

著者ら⁽³⁾⁽⁴⁾ は、直接通電加熱による非均一加熱条件を模擬するため、内径 6 mm、加熱管長 100 mm のステンレス管の肉厚を円周角度で $\pi/2$ 、および π [rad] 削った管を用い、ストレート管、および旋回流管に対する非均一加熱実験をこれまでに行ってきた。その結果、ストレート管に対する非均一加熱条件の限界熱流束は、均一加熱条件のものより 10~20% 大きくなること、および旋回流管に対する非均一加熱条件の限界熱流束は、管出口平均クオリティが等しいにもかかわらず、均一加熱条件のものより 20~60% 大きくなることを示した。

3. 実験装置と実験条件

図 1 に、テスト管の概略図を示す。ステンレス製の本テスト管は垂直に固定され、直流電源によって直接通電加熱される。円周方向の非均一加熱を模擬するため、管肉厚の一部を電解加工によって薄く削った。図 1 中の断面図は、円周方向の削り角 β が π [rad] の場合を示している。図 2 に、三つの非均一加熱条件を模擬する各テスト管 ($\beta = \pi/2, \pi, 3\pi/2$ rad) の断面図を示した。テスト管の内径は 6 mm、加熱管長は 100 mm で、厚い方、および薄い方の肉厚はそれぞれ約 0.35, 0.15 mm である。旋回流管に対する実験では、テスト管内にジルコニア製のねじりテープが挿入されている。

本研究では、以下の条件に対して実験を実施した。

- 水の質量速度 : 4 000, 7 000 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 水の入口温度 : 約 40°C
 管出口圧力 : 0.1, 0.6, 1.1, 1.5 MPa
 削り角度 (β) : $3\pi/2, \pi, \pi/2, 0$ rad
 テープねじり比 (y) : 2.64, 3.47, ∞

ここで、 $\beta = 0$ rad は均一加熱条件を、 $y = \infty$ はストレート管を意味する。

図 1 テスト管概略図

図 2 実験に用いた三つのテスト管断面図

実験は、上記パラメータを設定した後電力を加え、定常状態になるまで待ってからさらに電力を上げていく方法により、バーンアウトが発生するまで行った。限界熱流束は、バーンアウトが発生する1ステップ前の熱流束値とした。平均熱流束は印加電力を管の加熱表面積で除することにより、また厚肉部と薄肉部の熱流束は各部の電気抵抗比を用い、計算により求めた。厚肉部の熱流束のほうが薄肉部のものより高いので、バーンアウトは厚肉部の方でまず生じる。

4. 実験結果

4.1 ストレート管 図3に、質量速度 $m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の場合のストレート管の実験結果を一例として示した。非均一加熱条件 ($\beta=\pi/2, \pi, 3\pi/2\text{ rad}$) において、 $q_{c,H}$ はバーンアウト時の厚肉部の熱流束(高いほうの熱流束)を、 $q_{c,av}$ はバーンアウト時の平均熱流束を表す。また、 $q_{c,unif}$ は均一加熱条件 ($\beta=0\text{ rad}$) の

図3 ストレート管の実験結果 [$m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]

図4 ストレート管の $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の比

限界熱流束を表す。図3に見るように、 $q_{c,H}$ は β が大きくなるほど、すなわち非均一加熱度が大きくなるほど $q_{c,unif}$ よりも少しずつ大きくなるが、非均一加熱条件の各 $q_{c,av}$ は $q_{c,unif}$ よりもかなり小さくなっており、非均一加熱条件におけるバーンアウト時の管出口の平均クオリティが均一加熱条件のものより低くなっていることがわかる。

図4には、 $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の比を圧力に対して示した。図4に見るように、非均一加熱条件の限界熱流束は、均一加熱条件のものと比べて10~30%大きくなることがわかる。

図5, 6には、それぞれ $m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $P_a=1.1\text{ MPa}$, および $m=7\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $P_a=0.6\text{ MPa}$ の場合の限界熱流束を管出口の平均クオリティ x_{out} に対して示した。図5, 6中、+の記号は均一加熱条件

図5 平均クオリティに対するストレート管限界熱流束 [$m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $P_a=1.1\text{ MPa}$]

図6 平均クオリティに対するストレート管限界熱流束 [$m=7\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $P_a=0.6\text{ MPa}$]

のデータを、+以外の記号は非均一加熱条件のデータであり、その中で白抜きのは $q_{c,H}$ 、黒塗りのは $q_{c,L}$ (薄肉部の限界熱流束)、 $\times$ は $q_{c,av}$ のデータを示している。図5、6の一点鎖線 HB は、熱バランス曲線を表しており、熱流束が零のときは、そのクオリティは入口水温のそれに対応し、熱流束が増大するとともにクオリティは増大していくので右上がりの直線となる。図5、6において、 $q_{c,av}$ と $q_{c,unif}$ は、質量速度と入口水温がほぼ等しい条件なので、HB 曲線上にほぼ位置する。図5、6に見るように、 β が大きくなるにつれ、すわち非均一加熱度が大きくなるにつれ $q_{c,H}$ も大きくなるが、バーンアウト時の平均クオリティも低くなっており、 $q_{c,H}$ の増大が平均クオリティの低下によるものであることを示している。図5、6中の右下がりの各直線は、著者らが先に均一加熱条件のストレート管に対する限界熱流束相関式の評価を行った結果⁽⁵⁾、低・中位の圧力、質量速度に対してよい予測を与えた

修正 Tong 式⁽⁶⁾、Gunther 式⁽⁷⁾、および最近 Celata ら⁽⁸⁾が提案した比較的高質量速度条件に対する理論モデルのクオリティと限界熱流束の関係を示している。図5、6に見るように、各相関式はそれぞれの条件に対し若干異なる予測値を与えるが、 $q_{c,H}$ および $q_{c,unif}$ とよい相関をもつことがわかる。これは、本実験範囲における非均一加熱条件のストレート管に対する $q_{c,H}$ が、同じ実験条件において出口クオリティが等しい場合の均一加熱条件の限界熱流束と同じになることを意味するものである。

4・2 旋回流管 図7と図8は、それぞれ質量速度 $m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ のときのテープねじり比 $y=2.64$ と 3.47 に対する限界熱流束を圧力に対して示したものである。非均一加熱条件の $q_{c,H}$ は、 $q_{c,unif}$ よりも大きくなり、かつ非均一加熱条件の各 $q_{c,H}$ に対応する $q_{c,av}$ は、ほとんど $q_{c,unif}$ に等しいことがわかる。 $\beta=\pi/2\text{ rad}$ に対する $q_{c,H}$ は $q_{c,unif}$ より少し大きいぐら

図7 旋回流管実験結果 ($y=2.64$)

図9 旋回流管の $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の比 [$m=4\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]

図8 旋回流管実験結果 ($y=3.47$)

図10 旋回流管の $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の比 [$m=7\,000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]

いたが、 $\beta=3\pi/2$ rad の $q_{c,H}$ は $q_{c,unif}$ よりもかなり大きくなり、 $\beta=\pi$ rad の $q_{c,H}$ は $\beta=3\pi/2$ と $\pi/2$ rad の間に位置する。

図9と図10には、それぞれ質量速度 $4000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と $7000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ に対する $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の比を圧力に対して示した。図9, 10に見るように、 β , すなわち非均一加熱度が大きくなるほど、 $q_{c,H}$ は $q_{c,unif}$ よりも大きくなることがわかる。図11には、図7中の圧力 1.5 MPa のデータを平均クオリティに対して示した。図11中の記号等のもつ意味は図5, 6と同様であるが、実線は著者ら⁽⁹⁾が提案した均一加熱条件の旋回流管に対する予測を示している。 $q_{c,unif}$ と $q_{c,av}$ はほぼ等しいが、図5, 6と同様に右上がりのHB曲線上にほぼ位置する。非均一加熱条件の平均クオリティは、均一加熱のものより若干低いか逆に高いにもかかわらず、 $q_{c,H}$ の値は、 β が大きくなるほど $q_{c,unif}$ よりもかなり大きくなり、ストレート管の $q_{c,H}$ 増大と特性が異なる

図11 平均クオリティに対する旋回流管限界熱流束

図12 旋回流管に対する $q_{c,H}$ と $q_{c,unif}$ の関係

ことを示している。旋回流管の $q_{c,H}$ 増大は、後述するように、ねじりテープに沿って発生する加熱面上の気泡境界層の断続的な発達と消滅という非均一加熱と旋回流管との組合せ効果によるものと考えられる。

4.3 非均一加熱条件下の限界熱流束増倍率

図12に、非均一加熱条件における $q_{c,H}$ と均一加熱条件の $q_{c,unif}$ の関係を示した。図12に見るように、管出口の平均クオリティがほとんど等しいにもかかわらず、非均一加熱の度合いが増加すると $q_{c,H}$ も増加する。本実験条件でいちばん非均一加熱度が大きい $\beta=3\pi/2$ rad では、 $q_{c,H}$ は $q_{c,unif}$ の約1.8倍にもなることがわかる。

4.4 パーンアウトが発生し始める円周方向の位置

非均一加熱条件下の限界熱流束が、旋回流管の場合に大きくなる理由として、ねじりテープに沿う流れ方向の断続的な気泡境界層の発達と消滅が考えられる。この仮定を確かめるため、ビデオカメラによるバーンアウト発生開始位置の観察を行い、ねじりテープの位置と発生開始位置との相対関係を調べた。

図13は、 $\beta=\pi$ rad の場合の非均一加熱条件において、バーンアウトが発生し始めた軸方向の位置における流路断面を示しており、黒塗りの部分が円周方向の位置を示している。図13中の矢印は、ねじりテープによって発生する旋回流の回転方向を示している。図13(a)は、管出口付近でバーンアウトが発生したケースであり、図13(b)は、管出口からねじりテープの1ピッチ分上流でバーンアウトが発生したケースである。図13に見るように、すべてのデータにおいて、バーンアウトは必ず管厚肉部(高熱流束部)で発生し始める。また、いくつか例外が見られるが、流路断面におけ

図13 非均一加熱旋回流管でのバーンアウト発生開始位置

図 14 均一加熱旋回流管でのバーンアウト発生開始位置

るねじりテープの位置は、テープの両端が管厚肉部と薄肉部の境界近傍であること、および発生し始める位置は、テープの片端が厚肉部に接する位置近傍であることがわかる。図 14 には、均一加熱条件のバーンアウト発生開始位置とねじりテープとの関係を示した。この場合には、旋回流方向の最も下流でバーンアウトが発生しやすいことを示している。しかし、均一加熱の場合には気泡境界層は連続的に成長するので、この場合には後述するように、旋回流中の気泡の偏流を考慮せねばならない。均一加熱管ではほとんどが旋回流方向の下流部でバーンアウトが発生し始めるのに対し、非均一加熱管では、気泡境界層の断続的な発達および流体の二次流れのため、厚肉部の特定の位置では発生し始めないものと考えられる。

5. 考 察

5.1 気泡境界層の断続的な発達と消滅 非均一加熱条件下の旋回流管に対する限界熱流束の増大は、気泡境界層の断続的な発達と消滅に起因し、またバーンアウト発生開始点は、気泡境界層が最も発達する位置に対応するものと考えられる。図 15 は、図 13 中の代表的なバーンアウト発生開始位置とねじりテープに沿う流れとの関係を描いたものである。流路 A, B の各流れは、断続的に高熱流束部と低熱流束部を流れていき、気泡境界層は発達と消滅を繰り返す。実質的にバーンアウトに寄与する気泡境界層の発達部は、管出口における高熱流束部の 1 ピッチ長さ (π [rad] 進む長さ) になるため、結果として非均一加熱条件の旋回流管に対する限界熱流束を均一加熱条件のものより高めるものと考えられる。また、非均一加熱度が大きくなるほど高熱流束部の長さは短くなるため、その限界熱流束もより大きくなるものと考えられる。バーンアウトの発生開始位置は、図 15(c) に見るように、軸方向的に見て流れ A がすべて高熱流束部の部分近傍であ

図 15 バーンアウト発生開始位置と旋回流との関係

図 16 旋回流管における気泡の流れ

り、この位置で気泡境界層はいちばん発達するものと考えられる。

5.2 旋回流管における気泡の偏流 ねじりテープによって発生する旋回流において、気泡がどのような影響を受けるかを調べるために、透明なビニル管にねじりテープを挿入し、断熱条件下で水中の気泡の流れを観察した。図 16 は、質量速度 $m=0, 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、ならびに $2000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上の場合の気泡の流れを描いたものである。質量速度が小さい場合には、重力が気泡の流れを支配するが、質量速度が $2000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上になると、重力の影響はほとんどなくなり、遠心力による気泡の偏流が起こることがわかる。気泡が偏流する位置は、均一加熱管において気泡境界層が最も発達する位置とほとんど一致している。

6. 結 論

非均一加熱条件下におけるねじりテープ挿入管と挿入していないストレート管に対するサブクール沸騰限界熱流束が、実験的に調べられた。おもな結果は、次のとおりである。

(1) ストレート管に対する非均一加熱条件の限界熱流束が均一加熱条件のものより高くなるのは、非均一加熱条件での管出口平均クオリティが低くなるためである。また、ストレート管に対する非均一加熱条件の限界熱流束は、同じ実験条件において出口クオリティが等しい場合の均一加熱条件の限界熱流束と同じになる。

(2) ねじりテープ挿入管に対する非均一加熱では、管出口平均クオリティがほとんど等しいにもかかわらず、非均一加熱条件の限界熱流束のほうが均一加熱条件のものより大きくなった。非均一加熱の度合いが大きくなるほどその増倍率は大きくなり、削り角 $\beta = 3\pi/2$ rad では、均一加熱条件のものより 1.8 倍も大きくなった。

(3) ねじりテープ挿入管の非均一加熱条件における限界熱流束の増大は、ねじりテープに沿う流れ中の気泡境界層の断続的な発達と消滅に起因する。このことが、バーンアウト発生開始点を観察することにより確かめられた。また、ねじりテープ挿入管では、流路断面内の気泡の偏流が、限界熱流束の発生機構に影響を与えるものと考えられる。

終わりに、ジルコニア製のねじりテープ製作に当たり、ニッコー株式会社 毛利譲氏らに、またステンレス管の部分切削に当たり、機械技術研究所 清宮紘一

氏に大変お世話になった。ここに付記して謝意を表す次第である。

文 献

- (1) Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., Heat Transfer Crisis in a Forced Flow Underheated Water in Small-Bore tubes, *High Temperature*, **3**-3(1965), 400.
- (2) Leontiev, A. I., Mostinsky, I. L., Polonsky, V. S., Styrikovich, M. A. and Chernia, I. M., Experimental Investigation of The Critical Heat Flux in Horizontal Channels with Circumferentially Variable Heating, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **24**-5(1981), 821.
- (3) Nariai, H., Inasaka, F., Ishikawa, A. and Fujisaki, W., Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Tube with Internal Twisted Tape under Non-Uniform Heating Condition, *Proc. 2nd JSME-KSME Thermal Eng. Conf.*, **3**(1992), 285.
- (4) Nariai, H. and Inasaka, F., Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Tubes With and Without Internal Twisted Tape under Non-Uniform Heating Condition, *Proc. NURETH-6*, **1**(1993), 715.
- (5) Inasaka, F. and Nariai, H., Evaluation of Subcooled Critical Heat Flux Correlations for Tubes with and without Internal Twisted Tapes, *Proc. NURETH-5*, **4**(1992), 919.
- (6) Inasaka, F. and Nariai, H., Critical Heat Flux and Flow Characteristics of Subcooled Flow Boiling in Narrow Tubes, *JSME Int. J.*, **30**(1987), 1595.
- (7) Gunther, F. C., Photographic Study of Surface-Boiling Heat Transfer to Water Forced Convection, *Trans. ASME*, **73**-2(1951), 115.
- (8) Celata, G. P., Cumo, M., Mariani, A., Simoncini, M. and Zummo, G., Razionalization of Existing Mechanistic Models for the Prediction of Water Subcooled Flow Boiling Critical Heat Flux, *3rd Specialists' Workshop High Heat Flux Component Cool.*, cadarache, (1993).
- (9) Nariai, H., Inasaka, F., Fujisaki, W. and Ishiguro, H., Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Tubes with Internal Twisted Tapes, *Proc. 7th Nucl. Thermal Hydraulics 1991*, ANS, (1991), 38.