チャンネル中の超臨界圧ヘリウム自然対流熱伝達*

森 英 明^{*1}, 尾 形 久 直^{*1}

Natural Convection Heat Transfer of Supercritical Helium in a Channel

Hideaki MORI and Hisanao OGATA

Natural convection heat transfer of supercritical helium in laminar flow are measured on a vertical surface with and without the channel, which has the sizes of 10 mm width, 0.4 mm gap and 130 mm length. The experimental pressures are from 0.25 to 0.8 MPa and fluid temperatures are about 4.2 K. The results show that the channel effects on heat transfer coefficients are in the range of about $\pm 20\%$. The conventional non-dimensional equation for laminar flows with constant properties is successfully applied to correlate, the results by using film temperature in the case when it is below the pseudocritical temperature, and pseudocritical temperature in the opposite case, as the reference temperature in evaluating the properties of helium. Another convection source in the channel increases the heat transfer further when the temperature difference between wall and fluid is less than 10 K, but not above it.

Key Words: Natural Convection, Supercritical Helium, Heat Transfer

1. はじめに

超臨界圧ヘリウムは、気液二相の共存状態がなく、単相冷媒として取扱えることや電気絶縁性が高いなどの利点から超電導機器の冷媒として有望視され、大形の超電導マグネットや超電導発電機の界磁巻線の冷却などに用いられている。

超臨界圧ヘリウムの自然対流熱伝達については、すでにいくつかの報告がある⁽¹⁾⁽²⁾。これらの報告は、開放空間における自然対流を対象とし、ばらつきはあるもののおおむね従来の自然対流熱伝達と同様の挙動を示すとしている。しかし、超電導コイルの冷却を考える場合、発熱部は冷却チャンネル中に設けるのが一般的で、従来の結果がこのような場合にも十分適用できるかどうか明らかでなかった。また、実用上有用な知見である冷却チャンネル中の複数箇所での発熱がある場合の伝熱挙動も明らかでなかった。本報は、これらの点を解明するために行った実験とその結果に関する。

2. 実験装置

図1に、本研究で用いた実験装置の系統図を示す。伝熱試験部となるテストピースは、冷却チャンネルが垂直になるようにステンレス製の圧力容器（内径80

図1 実験装置系統図

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年3月18日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。

mm, 肉厚 1.5 mm, 耐圧 10 bar) の底部に設置した。超臨界圧ヘリウムは、加圧したヘリウムガスを、4.2 K, 0.1 MPa の液体ヘリウムで圧力容器壁を介して間接的に冷却して生成する。圧力容器内の圧力は、種々の外乱に対しても変化しないよう高精度の圧力制御を行った。

図 2 は、テストピースの上面および断面構造を示したものである。これは、ベークライト製の円筒で、縦割りした片方に、マンガン線を使ったヒータとカーボン抵抗温度計 (Allen-Bradley 社製, 100 Ω , 1/8 W) を組み込んだ銅ブロック (無酸素銅) を埋め込み、もう片方に冷却チャンネルとなる幅 10 mm, 深さ 0.4 mm の溝を設けたものである。このような構造にした理由は、冷却チャンネルを付けたり外したりすることによって、その存在が熱伝達にどのように影響を及ぼすかを調べるためである。伝熱面となる銅ブロックの露出面は、横幅 10 mm, 高さ 5 mm で、チャンネルを付加したとき、その片面が高さ方向 5 mm にわたり全面発熱する形になる。

実験では、ヒータを加熱して、その加熱量と伝熱面の温度を測定した。なお、伝熱面の正確な熱流束を知るために、前もって伝熱面以外からの熱の逃げ (熱損失) を測定しておき、加熱量を補正した。なお、最終的に得られる熱伝達係数の誤差は、種々の測定誤差を考慮した結果、 $\pm 10\%$ 以下となった。

3. 実験結果

実験は、まず、チャンネルを外した状態で行った。図 3 に、その結果を伝熱面と周囲流体の温度差 ΔT_w と熱

図 2 テストピース

伝達係数 α の関係で示す。圧力 P が 0.3 MPa では、 α の変化は特異で、物性値の急激な変化がかなり複雑な伝熱挙動を引き起こしているらしいことが推察される。圧力が 0.5 MPa および 0.8 MPa での特性は、非常に似通った特性を示し、少なくとも 0.5 MPa 以上では、熱伝達はあまり圧力に影響されないことがわかった。なお、 T_∞ は、周囲流体の温度である。

図 4 に、圧力 P が 0.3 MPa について、伝熱面に冷却チャンネルを付加した場合の実験結果を示す。図 4 から明らかなように、チャンネルを付加することによって熱伝達は、 $\Delta T_w < 10$ K で最大 20% 程度向上した。また、 ΔT_w が 10 K よりも大きくなると逆に悪くなる現象を示した。ただしこの傾向は、圧力が大きくなると小さくなった。

図 5 に、圧力が 0.3 MPa について、冷却チャンネル内に発熱部が複数あるときの熱伝達測定結果で、上部伝熱面を測定部、下部伝熱面を付加した発熱部とした。この発熱部を加熱することは、チャンネル断面全体にわ

図 3 実験結果 (開放空間)

図 4 冷却チャンネルが熱伝達に及ぼす影響

たる流れを生じさせる対流源を付加することを意味する。図5が示すように、 $\Delta T_w < 10$ K では下側伝熱面の加熱量 Q_i を大きくすると熱伝達は向上するが $\Delta T_w > 10$ K では、その影響はなくなった。ただし、熱伝達の定量的な比較は、 Q_i に応じて T_w が上昇してくるので、この影響を除去して比較できる熱伝達の無次元整理によらなくてはならない。

4. 無次元整理および考察

周知のように、超臨界圧流体は特性値の変化が極めて大きく、一つの代表点での物性値を用いた無次元数で熱伝達を整理することには少々無理がある。しかしながら、無次元整理は異なった条件の熱伝達を推測するのに非常に有用なために、あえて行った。

一般に、自然対流熱伝達のヌッセルト数 Nu は、レイリー数 Ra の関数で表すことができる。 Ra は、

$$Ra \equiv Gr \cdot Pr \equiv \left(\frac{L^3 \cdot g \cdot \rho_\infty \cdot \rho_w}{\nu^2 \cdot \rho} \right) \cdot Pr \quad \dots (1)$$

の定義式を用いた。ここで、 L は伝熱面の高さ、 g は重力の加速度、 ν は動粘性係数、 ρ は密度、ならびに、 Pr はプラントル数で、添字 ∞ および w は、周囲流体および伝熱面における値であることを示す。この無次元数の算出に必要な物性値⁽⁴⁾ の評価温度 T_r を、どの温度にとるかは変物性流体を扱う際には常に議論となるところであるが、ここでは伝熱面温度と流体温度の平均である膜温度 T_f を用いて実験結果を整理した。図6にその結果を示す。CO₂ に関する実験でも報告⁽⁵⁾ されているように、 ΔT_w が増加すると Ra も増加するデータ群1と、 ΔT_w が増加すると逆に Ra が減少するデータ群2と分かれた。このとき、データ群1では Nu は Ra の増加に伴い大きくなるが、データ群2で

は Nu は Ra によらずあまり変化しなかった。ここで、データ群1は $T_f < T_p$ 、データ群2は $T_f > T_p$ で、両データ群の境となる T_f は擬臨界温度 T_p に等しかった。そこで、 T_f が T_p よりも高いときの Nu は、 T_f が T_p と等しいときの Ra でほぼ決まると考え、物性値評価温度 T_r を、

$$T_r = \begin{cases} T_f & \text{at } T_f < T_p \\ T_p & \text{at } T_f \geq T_p \end{cases} \quad \dots (2)$$

のように再定義し、実験結果を無次元整理した。その結果が図7である。若干の T_f 依存性はみられるものの図6のデータ群2が、 Ra が 10^{10} の付近にすべて集中し、すべての実験値が、従来の層流自然対流熱伝達の無次元整理式⁽⁶⁾ $Nu = 0.56 Ra^{1/4}$ におおよそ一致するようになった。そこで、図8に示すように伝熱面にチャンネルを付加したときの実験結果も同様に無次元整理した。その結果、 Nu は若干上昇するが、たかだか

図6 実験結果の無次元整理 ($T_r = T_f$)

図5 チャンネル中に別対流源があるときの実験結果

図7 実験結果の無次元整理 (T_r : 式(2))

図 8 実験結果の無次元整理 (冷却チャンネルあり)

図 10 別対流源の強さとヘリウムの流速との関係

図 9 チャンネル中に別対流源があるときの熱伝達

20% であり、冷却チャンネルが自然対流熱伝達に及ぼす影響は、それほど大きくないことがわかった。

この結論は、温度境界層の厚さがチャンネルのギャップに対してかなり薄いと考えれば当然のことである。実際に、熱伝達から予想される温度境界層の厚さは数 μm ~ 10 数 μm で、テストピースのチャンネルギャップは 0.4 mm である。もしチャンネルギャップが本実験の場合よりもっと小さくなれば、その影響も顕著になると考えられる。

次に、冷却チャンネル内に複数の発熱部を設けた場合の Ra と Nu の関係を図 9 に示す。参考のために、発熱部が一つのときの熱伝達の分布範囲を斜線で示す。図 9 から、第 2 の対流源となる発熱部の発熱量 Q_t が大きいほうが熱伝達は良く、その程度は ΔT_w が小さいほど大きいことが確認できた。図 10 は、この第 2 の

対流源が測定部にどの程度の流れを生じさせているかを推定したものである。算出方法は、 Q_t と、 T_w の温度上昇の測定値から求まる流体のエンタルピー上昇を基に、測定部では Q_t がチャンネル全体に均一に拡散していると仮定し、エネルギー収支から求めた。流速 V は、0.3 MPa において、 Q_t が 1 W のとき 0.5 m/s にも達し、これはレイノルズ数 Re で 15 000 に相当する。

5. ま と め

超臨界圧ヘリウムを用いて垂直伝熱面の自然対流熱伝達の実験を行った。その結果、今回の実験の範囲 ($Ra: 10^7 \sim 10^{10}$) では、冷却チャンネルの形成が熱伝達に及ぼす影響は小さく、物性値の評価温度を式 (2) のようにとれば、熱伝達は従来の層流自然対流の無次元整理式でおおむね表すことができることがわかった。さらに、冷却チャンネル中に第 2 の対流源を設けるなどしてあらかじめ流れを生じさせると、熱伝達を大きく促進できることもわかった。なお、本研究に対しご指導いただいた九州大学工学部 伊藤猛宏教授にお礼申し上げる。

文 献

- (1) Hilal, M. A. and Boom, R. W., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **23**(1980), 697.
- (2) Irie, F., ほか 5 名, *Adv. Cryogen. Eng.*, **23**(1978), 326.
- (3) 甲藤, 伝熱概論, (1973), 53, 養賢堂.
- (4) McCarty, R. D., *NBS Tech. Note*, 631(1972).
- (5) 西川, ほか 2 名, *機論*, **34**-265 (1968), 1557.
- (6) Jacob, M., *Heat Transf.*, **1**(1949), 429, John Wiley & Sons.