チャンネル中加圧超流動ヘリウムの沸騰熱伝達

岡村 哲至, 石戸 功一*, 慶松 征*
 梶島 成治*, 佐藤 明男**

東京工業大学機械工学科 東京都目黒区大岡山 2-12-1

* 東京工業大学エネルギー科学専攻 横浜市緑区長津田町 4259

** (株)東芝総合研究所エネルギー機器研究所 川崎市川崎区浮島町 4-1

(1989年9月8日受理)

Boiling Heat Transfer in Pressurized Superfluid Helium Channel

Tetsuji OKAMURA, Kouichi ISHITO,* Sei KEIMATSU,*
 Shigeharu KABASHIMA* and Akio SATO**

Department of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152

* Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

** Energy Science & Technology Lab., Toshiba Research and Development Center, 4-1 Ukishima-cho,
 Kawasaki-ku, Kawasaki 210

(Received September 8, 1989)

Synopsis:

Boiling heat transfer characteristics have been experimentally investigated in a channel opened at both ends to a pressurized (1 atm) He II bath. Different trends in temperature fluctuation in the channel were observed between the cases when a heat transfer surface is facing upward and downward. This difference in characteristics is considered to be caused by a flow of helium in the channel which is induced by a flow of bubbles. Values of overall heat transfer coefficient between the heat transfer surface and the He II bath indicate a cooling ability of the He II channel quantitatively.

1. はじめに

サブクール状態の大気圧 He II は, He I や飽和 He II に比べて, 超電導マグネットの冷媒として優れた性質をもっている。この He II を冷媒として用いることにより, He I 冷却では達成できない強磁界, 高電流密度のマグネットが製作可能となる。この場合マグネットの熱的安定性を高めるためには, 冷却チャンネル中における He II の伝熱特性を知ることが重要である。とくにマグネット内で常電導部発生後, クエンチに至らないようにするためには, チャンネル中の He II が He I に転移し, さらに核沸騰から膜沸騰に遷移する過程での伝熱特性を解明する必要がある。この沸騰現象に関する研究¹⁻³⁾は過去にいくつかなされているが, ほとんどは形状がシンプルで一端が閉じたチャンネルに関するものである。これは解析は容易であるが, これらのデータだけで冷却チャンネルが上下左右に通じている実際のマグネットの冷却性能

を定量的に評価することは難しい。

そこで本研究では, まず両端が加圧 He II 槽に通じているチャンネルの中央部を加熱して沸騰を生じさせ, 加熱面やチャンネル内のヘリウムの温度変化が, 加熱面の姿勢, チャンネル径, He II 槽温度の違いにどのように影響されるかを明らかにする。また核沸騰から膜沸騰に遷移する直前の加熱面と He II 槽の間の熱通過率の値に着目し, He II チャンネルの冷却性能を評価する。

2. 実験装置

本実験で用いた熱伝達測定用素子の断面図を Fig. 1 に示す。He II チャンネルおよびヒーター部は円筒形のステンレス製真空容器の中に収められ, 真空容器は He II 槽中に浸漬されている。Fig. 1 (a) は真空容器の中心軸を含む鉛直断面図であり, Fig. 1 (b) は銅棒から He II への伝熱面付近の断面の拡大図である。Fig. 1 (c) は Fig. 1 (a) 中の AA' 水平断面を下から

Fig. 1 Cross-sectional view of the sample; ●: thermocouples ($T_1 \sim T_4$), (a) side view of the sample, (b) side view of near the heat transfer surface, (c) bottom view of AA' plane shown in (a).

見た図である。直径 12 mm、長さ 75 mm の無酸素銅の棒の一端から、He II チャンネルとなる長さ 65 cm のステンレス管 2 本をそれぞれ反対方向に接続し、この管をらせん状に上下に導いて真空容器に接合している。ステンレス管の中には He II が満たされ、その両端 (Fig. 1 (a) に示される真空容器の右上と左下の部分) は He II 槽に通じている。ステンレス管は内径が 1 mm と 3 mm のものを二種類用意した。双方

とも肉厚は 0.5 mm である。

銅棒から He II への伝熱面積は 1.13 cm^2 であり、銅棒とステンレス管の接続部は、Fig. 1 (b) に示すようにステンレスでできた He II 溜めになっている。この溜めの容積は 1.8 cm^3 である。銅棒からステンレス管への熱漏れを低減するために、Fig. 1 (b) 中の拡大図に示すように銅棒周囲のステンレスの肉厚を半径方向約 3 mm にわたって 0.38 mm と薄くしてある。伝熱面以外からの熱漏れ量を見積ると、伝熱面から He II に伝熱される量の 1% 以下になる。伝熱面は、表面の凹凸を $0.8 \mu\text{m}$ 以下に機械加工した後、約 1 か月間空气中に放置した状態のものである。

銅棒の伝熱面の反対側の面には、ステンレス製のフィルムヒーターを張り付け、さらにステンレス製のヒーターホルダーで銅棒に押さえつけ熱接触を確保した。ヒーター面からそれぞれ 20 mm と 70 mm 離れた銅棒内にカーボングラス抵抗測温体 (CGR) を差し込み、この 2 つの CGR の示す温度を外挿することにより伝熱面表面の温度 (T_s) を求めた。伝熱面から 2.5 mm 離れた He II の温度 (T_a) とチャンネル出口付近の He II 槽温度 (T_b) も CGR により測定した。この他に、伝熱面からそれぞれ 5 cm と 35 cm 離れた位置のチャンネル外壁に金鉄クロメル熱電対がハンダ付けしてある。これらの熱電対の指示温度は、Fig. 1 (a) に示すように伝熱面が下向きになっている状態で、下にのびているチャンネルの伝熱面に近いほうから T_1, T_2 、上にのびているその伝熱面に近いほうから T_3, T_4 とする。

ヒーターの熱量測定には四端子法を用い、ヒーター、CGR、熱電対の出力は、ともにデジタルボルトメーター、GP-IB を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。

3. 実験結果

チャンネル内の He II が He I に転移しない範囲の熱量を定常的に加えたときの、 T_a と T_b の温度差とチャンネル内の熱流束 q の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 (a) は、チャンネル径 (d) が 1 mm、 T_b が約 1.9 K のときの、伝熱面が上向き、下向き、横向きの場合の結果である。内部対流領域でのチャンネル内 He II の伝熱特性は、伝熱面の姿勢に依存しないことがわかる。これは他の研究結果とも一致する^{4,5)}。Fig. 2 (b) は、 T_b が約 1.9 K、伝熱面が上向きで、 d が 1 mm と 3 mm の場合の結果を示している。この

Fig. 2 Steady state heat transfer characteristics; ▲: heat transfer surface is facing upward, He II bath temperature $T_b=1.88$ K, He II channel diameter $d=1$ mm, ▼: downward, $T_b=1.86$ K, $d=1$ mm, ●: sideward, $T_b=1.87$ K, $d=1$ mm, △: upward, $T_b=1.89$ K, $d=3$ mm, (a) dependence on heat transfer surface orientation, (b) dependence on channel diameter.

伝熱領域では、伝熱特性にチャンネル径による違いが見られない。

内部対流領域からさらに熱量を時間に対して階段状に増加した場合の、伝熱面およびチャンネル内の温度などの経時変化の代表的な結果を Fig. 3～Fig. 5 に示す。

Fig. 3 (a)～(c) は、伝熱面が上向き、 $T_b=1.87$ K, $d=1$ mm の場合の、加熱量、 T_s , T_a , 伝熱面と He II 槽の間の熱通過率 K の経時変化である。ここで熱通過率 K は、

$$K = q_s / (T_s - T_b) \quad q_s: \text{伝熱面での熱流束}$$

で表される値である。また Fig. 3 (a) 中の Q はヒーター加熱量、 q はチャンネル内での熱流束である。チャンネル内のヘリウムの状態によって、Fig. 3 (b) を A から D の 4 領域に分けることができる。すなわち、A はチャンネル内がすべて He II で満たされている内部対流状態、B は伝熱面が He I で覆われているが発泡はしていない自然対流状態、C は伝熱面付近で発

Fig. 3 Behaviors of heat transfer surface temperature T_s , helium channel temperature T_a and overall heat transfer coefficient K when the heat transfer surface is facing upward, $T_b=1.87$ K, $d=1$ mm; A: internal convection region, B: natural convection region, C: nucleate boiling region, D: film boiling region.

泡が生じている核沸騰状態、D は伝熱面が He ガスで覆われた膜沸騰状態である。この場合の沸騰現象の特徴は、Fig. 3 (b) 中の D に示されるように、加熱量が一定にもかかわらず膜沸騰状態から核沸騰状態に戻る現象が現れることである。 K は Fig. 3 (c) に示されるように、A から D の状態でそれぞれ異なる値をもち、おのおのの状態におけるヘリウムチャンネルによる冷却効果を、比較的容易にしかも定量的に把握することができる。たとえば、核沸騰状態 (C) の K のほうが自然対流状態 (B) の値より若干大きくなっているが、これは他の流体でも見られる現象で、発泡によって伝熱面近傍の伝熱が促進されたためであると思われる。

Fig. 4 (a)～(c) は、伝熱面が下向き、 $T_b=1.92$ K, $d=1$ mm の場合の、加熱量、 T_s , T_a , $T_1 \sim T_4$, 熱通過率 K のそれぞれの経時変化である。これらのデータも Fig. 3 の場合と同様な 4 領域に分けることができ

Fig. 4 Behaviors of T_s , T_a , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 and K when the heat transfer surface is facing downward, $T_b=1.92$ K, $d=1$ mm; A: internal convection region, B: natural convection region, C: nucleate boiling region, D: film boiling region.

る。しかし伝熱面が上向きの場合に比べて、自然対流状態 (B) の期間が短いことが特徴である。これは温度が高く密度の小さい He I が伝熱面表面を覆い、冷却が悪くなるためである。膜沸騰状態 (D) では、加熱量の増加に伴い T_s は上昇するが、 T_a は 4.2 K 付近にとどまり、両者の間に大きな差がついている。また T_a が 4.2 K に達するのとほぼ同時に、 T_1 と T_2 は He II 槽温度のままであるのに対し、 T_3 と T_4 はすばやく上昇している。これは、伝熱面で発生した気泡が、まず浮力のために伝熱面付近に溜り、さらにチャンネル内に流れ込んで、チャンネル内で下から上へのヘリウムの流れを生じさせたためであると考えられる。 K は D 領域において加熱量が増加しても、大きく減少することではなく、むしろ加熱量がある値以上では、わずかではあるが増加する傾向を示している。これは、上述の流れのため下方のチャンネルから He II が伝熱面付近に補給されることが主な理由であると思われる。

Fig. 5 Behaviors of T_s , T_a and K when the heat transfer surface is facing upward, $T_b=1.89$ K, $d=3$ mm; A: internal convection region, C: nucleate boiling region, D: film boiling region.

伝熱面が上向き、 $T_b=1.89$ K, $d=3$ mm の場合の各値の経時変化を Fig. 5 (a)~(c) に示す。チャンネル径が 1 mm の場合とは様子が異なり、Fig. 3 と同様に、伝熱形態により領域を分けると、この図には B の自然対流状態は現れない。ある加熱量で T_s は約 4.6 K に、 T_a は 4.2 K にすばやく上昇している。すなわち伝熱面上の He II が He I に変化すると直ちに核沸騰が始まっていると考えられる。これは、 $d=3$ mm のときのチャンネル中の熱流束は Fig. 5 (a) に示すように $d=1$ mm の場合とほぼ等しいが、伝熱面の面積は $d=1$ mm と 3 mm の場合で同一であるから、伝熱面近傍での熱流束は $d=3$ mm のほうが $d=1$ mm の場合より約 10 倍大きいためである。C と D の状態では、 T_s の挙動は $d=1$ mm のときの伝熱面が下向きの場合に似ている。しかし、C では T_a が 4.2 K を上限として数 K の振幅で振動をし、D ではときに 4.2 K 以上になるものの依然として数 K の温度範囲で揺れているところが異なる。これは、チャンネル断面積が広

Fig. 6 Variation of the overall heat transfer coefficient just before a transition from nucleate boiling to film boiling occurs K_c with T_b ; ▲: upward, $d=1$ mm, △: upward, $d=3$ mm, ▼: downward, $d=1$ mm, ▽: downward, $d=3$ mm, ●: sideward (channel remains horizontal near the junction of the copper rod), $d=1$ mm, ○: sideward (channel remains horizontal), $d=3$ mm, ◇: sideward (channel remains vertical), $d=3$ mm.

いため、伝熱面近傍からチャンネル内への気泡の流れ込みが活発で、その結果 $d=1$ mm の場合に比べて、下方のチャンネルから伝熱面付近への He II の補給が促進されているためであると思われる。このことは、Fig. 5 (c) に示すように、C 領域で K の値が熱量を増すにしたがい大きくなっていること、あるいは D 領域では熱量が大きく増加しても K の値はほとんど減少しないことにも現れている。

Fig. 3~Fig. 5 で述べたように、 K は気泡の発生による伝熱促進などのチャンネル内の伝熱のメカニズムに対して敏感に依存している。そこで核沸騰状態から膜沸騰状態に移移する直前の熱通過率を K_c とし、これに着目して整理を行った。

Fig. 6 に $d=1$ mm と 3 mm のそれぞれについて伝熱面が上、下、横向きのとときの K_c の値を示す。横向きの場合は、Fig. 1 に示す素子を真空容器ごと横向きにした状態であるため、伝熱面近傍での局所的なヘリウムの対流は生じるが、上向きと下向きの場合のようにチャンネル内全体でのヘリウムの流れは生じていない。伝熱面が横向きの場合については、Fig. 7 に示すようにチャンネルが伝熱面から水平方向に伸びている場合と鉛直方向に伸びている場合についてそれぞれ測定を行った。

K_c は、伝熱面が上向きの場合のほうが下向きの場合に比べて大きく、発泡による伝熱面付近の伝熱促進

Fig. 7 Schematic view of the configuration of the channel and the copper rod. (a) and (b) represent the cases when channel remains horizontal and vertical, respectively, near the junction of the rod.

が行われていることを表している。 $d=3$ mm の場合のほうがその傾向が顕著に現れている。 $d=3$ mm、伝熱面が横向きの場合は、チャンネルが鉛直の状態のほうが水平の状態より K_c の値が大きく、気泡がチャンネル内に流れ込みやすいかどうかによって冷却効果が変化することを示している。 d の違いについてみると、 K_c は $d=3$ mm の場合のほうが $d=1$ mm の場合に比べ、上向きの場合は約 10 倍、下向きと横向きの場合は約 5 倍になっている。このように K_c に着目することにより、ヘリウムチャンネルによる冷却効果が、伝熱面の姿勢、 d 、 T_b に対してどの程度影響されるかを定量的に知ることができる。

4. ま と め

両端が加圧 He II 槽に通じているヘリウムチャンネル内での沸騰熱伝達特性について以下のことがわかった。

伝熱面が上向きの場合と下向きの場合とで、伝熱面およびチャンネル内の温度の経時変化は異なる。この原因は、気泡が伝熱面から離脱しやすいか否かによると思われる。また沸騰が生じると、気泡がチャンネル内に流れ込み、チャンネル内で下から上へのヘリウム

の流れが生じる。この流れによって下方のチャンネルから伝熱面付近に He II の補給が行われ、伝熱面の温度上昇を抑える。この効果はチャンネル径が大きいほうが大きい。

伝熱面と He II 槽の間の熱通過率の値は、このような冷却効果に対して敏感に反応し、ヘリウムチャンネルの冷却効率を知る上での定量的な指標になる。

本実験を行うにあたり、東工大の本多聡志氏には多大の助力をしていただき感謝します。この研究は一部、文部省科学研究費補助金により行われた。

参 考 文 献

- 1) M. Fouaidy and M. X. François: Adv. Cryog. Engin. **33** (1988) 407
- 2) Z. Chen and S. W. Van Sciver: Cryogenics **27** (1987) 635
- 3) S. R. Breon and S. W. Van Sciver: Cryogenics **26** (1986) 682
- 4) 上岡泰晴: 低温工学 **18** (1983) 119
- 5) G. Bon Mardion, G. Cloude and P. Seyfert: Cryogenics **19** (1979) 45