加圧 He II 鉛直チャンネルにおける沸騰熱輸送

——チャンネル中央部に発熱がある場合——

岡村 哲至, 山下 理道*, 吉澤 善男*

東京工業大学大学院エネルギー科学専攻 横浜市緑区長津田町 4259

* 東京工業大学原子炉工学研究所 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(1992 年 5 月 18 日受理)

Boiling Heat Transport in a Vertical Pressurized He II Channel—Heating at the Midpoint of the Channel

Tetsuji OKAMURA, Norimichi YAMASHITA* and Yoshio YOSHIZAWA*

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

* Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Oh-Okayama, Meguro-ku, Tokyo 152

(Received May 18, 1992)

Synopsis:

Boiling heat transport characteristics of pressurized (1 atm) He II in a vertically placed rectangular cross-sectional channel have been experimentally and analytically investigated. A wire heater is attached at the midpoint of the channel. The temperature distribution of helium in the bottom closed channel is almost the same as that in the bottom opened channel when the boiling occurs. It is considered from the present results that almost all of the input heat is removed by a natural convection when the boiling occurs and low temperature helium is supplied mainly from the top of the channel. When the heat generation ceases, the temperature of the heater in the bottom opened channel recovers to the He II bath temperature faster than that in the bottom closed channel. The time for the recovery does not depend on He II bath temperature for the case of the bottom opened channel.

1. はじめに

超流動ヘリウム (He II) を冷媒として用いると, 常流動ヘリウム (He I) 冷却では達成できない, 高磁界, 高電流密度の超電導磁石が製作可能となる¹⁾。He II 冷却超電導磁石の安定化で一般的に考えられているのは, 冷却チャンネル内のヘリウムが常に He II に保たれるような冷却基準である。

この基準によって製作される磁石よりも, さらに電流密度の高い磁石をめざすための方法として考えられるのは, 冷却チャンネルの断面積を小さくし, 熱的擾乱の発生後, チャンネル内の He II が He I やガスに変化しても擾乱終息後には常電導遷移部が消滅するような冷却安定基準が採用できるかということである。

この可能性を追求するためには, 発泡が生じるような発熱があった場合の, 冷却チャンネル内におけるヘ

リウムの熱輸送特性を明らかにすることが必要である。またこのような熱輸送特性を明らかにすることは, He II 冷却超電導磁石がクエンチを起こしたときのコイル保護を考えるうえでも重要である。

本研究では, 上下端が加圧 (大気圧) He II 槽に通じている鉛直チャンネルの中央部を, ヘリウムガスが生じるまで加熱したときの熱輸送特性および加熱終了後の排熱の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置

本実験で用いたチャンネル素子の概略を Fig. 1 に示す。素子の材質は FRP (エポキシ樹脂強化プラスチック) で, 断面積 0.035 cm^2 , 長さ 20 cm のチャンネルが大気圧の He II 槽中に鉛直に固定されている。本実験ではチャンネル断面のアスペクト比が約 7 ($0.7 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$) と約 1 ($2.0 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$) のものを用い

Fig. 1 Cross-sectional view of the samples. Two samples were used which have different aspect ratios of the channel cross section, that is, 7 (0.7 mm×5 mm) and 1 (2 mm×1.75 mm); ●: Au+0.07% Fe-Cr thermo-couples, (a) bottom view, (b) side view, (c) detailed view near the heater, (d) further magnification of the heater section.

た。チャンネルの中央には、Fig. 1 中の拡大図に示すように、壁面に沿って周方向に巻いた直径 $30\mu\text{m}$ のステンレス線ヒーターが、ワニスにより電気絶縁されて取り付けられている。この部分には、ヒーターがチャンネル内に突出しないように表面にヒーターを埋めるための溝が彫ってある。

チャンネル内のヘリウム温度は、チャンネル軸方向に沿って取り付けけた金鉄クロメル熱電対によって、He II 槽温度 (T_b) は、チャンネル上端近傍の He II 槽内に取り付けけたゲルマニウム抵抗測温体によって測定した。ヒーター発熱量 (Q) の測定には四端子法を用い、ヒーターの表面温度はヒーターの電気抵抗値から換算して求めた。

ヒーターの加熱には定電圧電源を用い、階段状に電

力を増加して、それぞれの電力値において各部の温度が定常になったことを確認しながら温度分布を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 温度分布

He II 槽温度を 1.9 K に保ち、ヒーターの発熱量を 3.6 W としたときの、定常状態でのチャンネル内のヘリウム温度分布を Fig. 2 に示す。この図において横軸の 0 がヒーター位置を、+側がヒーターより上側のチャンネルを、-側が下側のそれを表す。この場合、ヘリウムの温度分布には、チャンネル下端の開閉による差がほとんどみられない。下端が閉じている場合においても、ヒーターより下側のチャンネル内のほとんどの部分が He II 槽温度に保たれている。またヒーター近傍では大きな温度勾配がつくが、それより上部では熱伝導率の小さな He I 領域でも大きな温度勾配がみられない。これらのことから加えられた熱の大部分は、ヒーターより上側のチャンネルから排除されており、しかも伝導でなく対流がおもな熱輸送機構となり、He II 槽内のヘリウムがチャンネル上端から流入していると考えられる。このような温度分布は、He II 槽温度が異なる他の実験条件の場合にもみられた。

3.2 流量の推定

Fig. 2 に示されるような温度分布が生じているときの熱輸送機構を明らかにするために、本研究では Fig. 3 に示すようにチャンネル上端からヘリウムが流れ込むモデルを考え、チャンネル内の上昇流および下降流の流量を見積った。この図はヒーターより上側のチャンネルを模式的に表し、●がヒーターを表す。このモデルでは、He II が加熱部で気化し、その後凝縮し He I として上昇すると同時に、He II が He II 槽から下降流

Fig. 2 Helium temperature distribution in the channel when $T_b=1.9$ K, $Asp.=7$ and $Q=3.6$ W; $\triangle$: bottom opened channel, $\circ$: bottom closed channel.

Fig. 3 Schematic view of the present heat transport model.

として流入するとした。またチャンネル下端が開いている場合は、そこからも He II が流入するとした。この図では、下降流が壁面に沿って流れているように描かれているが、実際はそうに流れているかは明らかではない。

本計算ではチャンネルを軸方向に100分割した Fig. 4 に示されるメッシュを考え、実験から得られたヘリウムのチャンネル内温度分布を満たすように、繰り返し計算により上昇流の流量を求めた。Fig. 4 において、 v は速さ、 A は断面積、 ρ は密度、添え字の a は上昇流、 d は下降流、 o はヒーターより下部における上昇流、 i は要素番号を表す。上昇流と下降流の間の質量移動については次式を用いた。

$$\rho_{ai}v_{ai}A_{ai} = \rho_{ai-1}v_{ai-1}A_{ai-1} + \rho_{di+1}v_{di+1}(A_{ai} - A_{ai+1}) \quad (1)$$

ヒーター位置 ($i=1$) で下降流はすべて蒸発すると仮

Fig. 4 Mesh used in the present calculation.

定すると、そこでの質量保存は、

$$\rho_{ai}v_{ai}A_{ai} = \rho_o v_o A_o + \rho_{di}v_{di}(A_{ai} - A_{ai+1}) \quad (2)$$

で表される。ここで下降流の速さについては、壁面や上昇流との間の摩擦や He II の film flow などについて本実験において明らかでないため、重力落下のみを考慮した。また下降流の温度はすべての場所で T_b とした。上昇流におけるエネルギー式には、

$$Q_{ai} = -A_{ai+1}\lambda_{ai}\frac{T_{ai+1}-T_{ai}}{\Delta x} + A_{ai}\rho_{ai}v_{ai}(h_{ai}-h_b) + Q_{FRPi} + \frac{1}{2}A_{ai}\rho_{ai}v_{ai}^3 \quad (3)$$

を用いた。ここに、 Q_{ai} は $i-1$ 要素から i 要素に流入するエネルギーで、

$$Q_{ai} = Q_{ai-1} - Q_{FRPi-1} \quad (4)$$

である。また λ は熱伝導率、 h はヘリウムのエンタルピー、添え字の b は He II 槽温度を表す。 Q_{FRPi} は FRP のチャンネル壁を通して He II 槽に逃げる熱量で、

$$Q_{FRPi} = \lambda_{FRPi}\frac{T_{ai}-T_b}{d_{FRPi}} \quad (5)$$

とした。ここに λ_{FRPi} と d_{FRPi} はそれぞれ FRP の熱伝導率と厚さである。ヒーター位置でのエネルギー式は、

$$Q_{a1} = Q_{heat} - Q_{low} = -A_{a2}\lambda_{a1}\frac{T_{a2}-T_{a1}}{\Delta x} + A_{a1}\rho_{a1}v_{a1}(h_{a1}-h_b) + Q_{FRP1} + \frac{1}{2}A_{a1}\rho_{a1}v_{a1}^3 \quad (6)$$

となる。ここに Q_{heat} はヒーターの加熱量、 Q_{low} はチャンネル下端へ排除される熱量である。 Q_{low} は以前に筆者らが行った実験結果 (文献2) の Fig. 4 から、本実験におけるすべてのヒーター加熱量にたいして、0.1 W で一定であると仮定した。チャンネル下端から流入するヘリウムの流量は、次式を用いて、実験から得られたヒーターより下側のチャンネル内の He II 温度領域の温度分布を満たすように求めた。

$$Q_{low} = -A_o \left\{ \frac{1}{f(T)} \frac{dT}{dx} \right\}^{1/3} + A_o\rho_o v_o(h_o-h_b) + Q_{FRP} + \frac{1}{2}A_o\rho_o v_o^3 \quad (7)$$

ここに、 $1/f(T)$ は He II の実効的な熱伝導率である。ヒーターより下部における上昇流の流速 v_o は場所によらず一定とした。

様々な加熱量にたいする上昇流の質量流量分布の計

Fig. 5 Calculated results of mass flow rate distribution of natural convection flow in the bottom opened channel upper than heater position when $T_b = 2.1$ K and $Asp. = 7$; —: mass flow rate of ascending flow for various values of Q , ----: mass flow rate of descending flow when the value of Q is 3.6 W.

算結果を Fig. 5 に示す。この計算には、アスペクト比が 7 の両端が開いたチャンネルにおいて、He II 槽温度を 2.1 K に保ったときの実験から得られた温度分布を用いている。横軸の 0 はヒーターの位置を、10 はチャンネルの上端を表す。この図において、流量が大きく増加するヒーター付近の部分と、あまり増加しない部分が見られる。加熱量が 2.1, 2.6, 3.1 W の場合は流量の増加率が大きく変わる部分で、ヒーターで蒸発したヘリウムが凝縮している。3.6 W の場合は、チャンネル出口付近までヘリウムガスが存在することが実験において確認されている。エンタルピーの大きなヘリウムガスによって熱が排除されるために、本計算結果では質量流量が他の加熱量に比べ小さくなっている。この場合については破線により下降流の質量流量も示した。すなわち、実線と破線の差がチャンネル下端から供給されるヘリウムの質量流量を表す。チャンネル上部における上昇流の流量のうちの 9 割程度は上端から流入するヘリウムによって供給され、下端から流入する量は 1 割程度であることがわかる。この割合は他の加熱量の場合でも同程度であった。

3.3 回復時間

定常的に加熱を行っている状態から、加熱をやめた後の排熱の特性を知るために、Fig. 6 に加熱をやめてからヒーター近傍のヘリウムが He II 槽温度に戻るまでの時間 (t_r) を、加熱量にたいして示す。Fig. 6(a) は下端が閉じている場合、(b) は両端が開いている場合である。両端が開いているほうが早く He II 槽温度に戻

Fig. 6 Variation of the recovery time (the time until the temperature of helium near the heater recovers to T_b after the heat generation ceases) with Q ; (a) bottom closed channel, (b) bottom opened channel.

り、また、下端が閉じている場合は t_r が He II 槽温度に依存しているのに対し、両端が開いている場合は He II 槽温度に依存していない。He II の熱伝導率は温度に強く依存することから、両端が開いているチャンネルのこの過程での排熱は、He II の伝導による熱輸送が支配的であるとは考えにくい。下端から He II が流れ込むことができるため、下端が閉じている場合に比べチャンネル内で自然対流が生じやすくなり、おもにこの対流によって排熱が行われると考えられる。

4. ま と め

鉛直姿勢の加圧 He II チャンネルの中央部で発熱があり、チャンネル内にヘリウムガスと He I が生じた場合の熱輸送特性について、以下のことが明らかになった。

チャンネル中央部において沸騰が開始すると、チャンネル上下両端が He II 槽に通じている場合でも、加えられた熱量のほとんどはチャンネル上部から He II 槽へ対流によって排除される。このときはおもにチャンネル上部から He II 槽内のヘリウムが流入し、ヘリウムの温度分布にたいする下端の開閉の影響は小さい。

発熱がなくなった後の排熱の速さは、チャンネル下端の開閉に依存し、下端が開いている場合のほうが閉

じている場合より速い。またその速さは、下端が閉じている場合は He II 槽温度に依存するが、開いている場合は He II 槽温度によらない。

本実験を行うにあたり、東京工業大学の高橋 浩氏と佐川幸栄氏には多大な助力をしていただき、深く感謝いたします。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) 渡辺和雄, 能登宏七, 武藤芳雄: 低温工学 27 (1992) 2
- 2) 岡村哲至, 佐川幸栄, 吉沢善男: 低温工学 25 (1990) 260