

1 K以下における液体³Heの沸騰熱伝達特性の研究

前田 実・重松 利信*・藤井 佳子*・中村 改樹*
山口 稔*・信貴豊一郎*

岡山理科大学大学院理学研究科博士課程材質理学専攻

*岡山理科大学理学部応用物理学科

(1997年10月6日 受理)

1 はじめに

液体⁴Heを始めとする低温液体の沸騰熱伝達特性についての研究は、その工学的利用の見地によりこれまで盛んに行われてきた。しかし工学的な需要が現在まで殆ど無かった液体³Heについては田中等¹⁾、Kuzmenko²⁾による報告だけであった。しかも、田中等の測定は液体温度が1.5Kと2Kでしか行われず、Kuzmenkoは3.2Kから0.72Kまで広い温度範囲で測定を行っているが、核沸騰領域のみの測定であった。

液体³Heは沸点が最も低い液体なので、不純液体による沸騰開始の恐れが無い。更に表面張力が小さいために固体表面を完全に濡らすので、初期状態においては沸騰核生成点(気泡発生点)となるキャビティ(固体表面上の傷や欠陥などによる局所的な窪み)内に既存気泡核は存在しない。故に液体³Heの液相から気相への相変化に対応した、純粋な沸騰現象を観測する事ができる。更に液体³Heは図1に示したように0.5Kにおいて密度の極大を持つためにこれ以下の温度領域では、通常考えられている自然対流が生じない。このような特性が沸騰熱伝達特性に与える影響は興味深い。そして量子液体である³Heは0.1K以下の温度領域においては量子トンネル効果によって沸騰核が生成されることが、Maris³⁾によって予言されている。今回測定に使用する液体³He減圧クライオスタットでは0.1Kまで冷却することは出来ないので、この現象を直接観測できる見込みは非常に小さいが、その予兆が観測できる可能性は否定できない。そこで我々はこれまでになされた測定に比べて広範囲により詳細に液体³Heの沸騰熱伝達特性を測定した。

2 測定装置と方法

2.1 クライオスタット

以前行った予備実験⁴⁾では液体³Heの冷却には我々の研究室で建設した1K溜めの無い新型希釈冷凍機⁵⁾を用いた。この測定の問題点として密閉式セルを希釈冷凍機混合室に熱接触させて液体³Heを冷却したので飽和蒸気圧下での測定ではなかった事と、測定した温度範

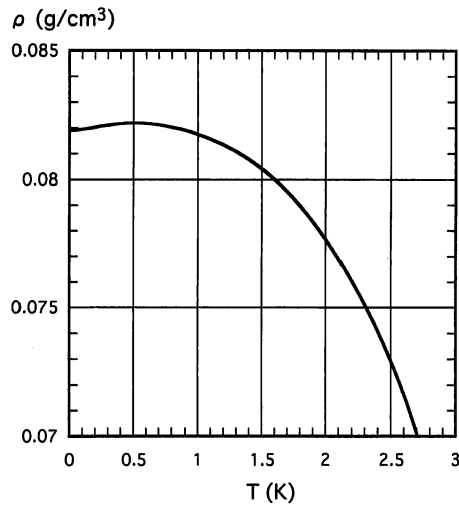


図1 飽和蒸気圧下における液体 ^3He の密度変化

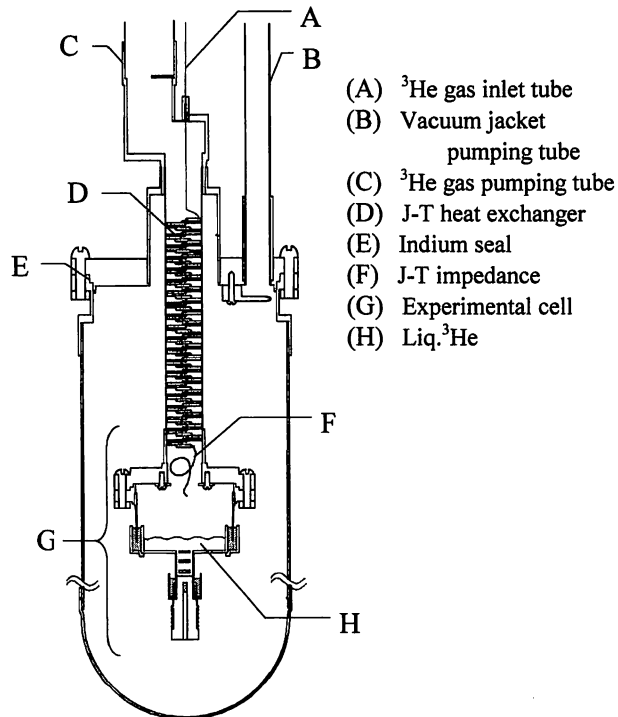


図2 ^3He 減圧クライオスタット本体

囲においては希釈冷凍機の冷凍能力が小さかったために十分な熱量を加えての測定が出来なかった事である。そこで今回は ^3He 減圧クライオスタットを新たに製作し、測定を行った。このタイプのクライオスタットを用いると試料である液体 ^3He を室温においたポンプ

で直接排気し寒冷を得るので、常に飽和蒸気下での測定が可能となり、また0.4K以上の温度では希釈冷凍機より桁違いに大きな冷凍能力が得られるのでより広範囲の熱流における測定が可能になる。

製作した³He減圧クライオスタット(図2)は新型希釈冷凍機同様1K溜めを用いず³Heの液化を行う。測定セル内にある液体³Heはポンプによって排気減圧され、蒸発潜熱を奪われ寒冷が生じる。ここで排気された³Heガスはロータリーポンプにより加圧され、再びクライオスタットに導入される。導入された³Heガスはまず、He槽クーラーで4.2Kに予冷される。予冷されたガスはJ-T(Joule-Thomson)熱交換器においてセルより排気された³Heガスにより逆転温度以下に冷却された後に、J-Tインピーダンス($Z=5.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$)を通過しこの時、J-T膨張により一部のガスが液化され測定セルに戻る。この結果、1K溜めを

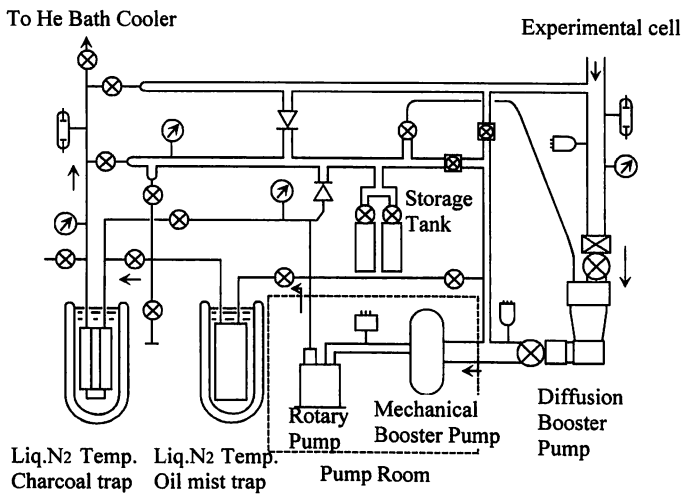


図3 ガスハンドリングシステム

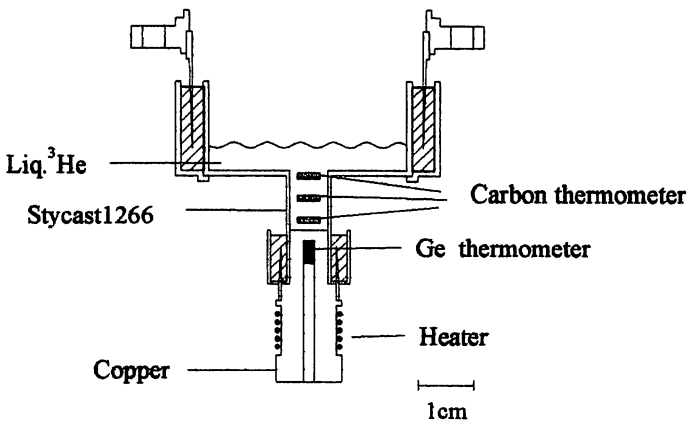


図4 測定セル

必要としないおかげで、通常の液体 ^3He クライオスタットに比べ、構造の簡略化及び操作の簡便化が図られている。ガスハンドリングシステムと循環ポンプは希釈冷凍機のを流用した。(図3)

2.2 測定セル

図4に測定セルを示す。セルの底部には直径7mmの銅製の円柱を取り付けてある。この円柱を伝熱体とするために、ヒーターとしてニューマー線(線径0.05mm, 抵抗率659.3 Ω /m)を約1m巻き付けた。ニューマー線の抵抗率は低温にしてもほとんど変化しない。そして伝熱面であるこの円柱の上部平面は、1500番のサンド・ペーパーで仕上げを行った。1500番のサンド・ペーパーに使われている砥粒の粒径は7 μm ~13 μm であるので伝熱面に残る傷(キャビティ)の深さはこの程度であると考えられる。伝熱体に与えた熱は伝熱面から液体 ^3He に伝わるだけでなく、セルの壁からも逃げてしまう。そこでこの壁を伝わる熱流を極力小さくするために、セルの壁部分を熱伝導度の小さいエポキシ樹脂Sycast 1266製とし、伝熱体につながる部分の肉厚は0.5mmとした。

セルには4つの温度計を取り付けた。伝熱体温度を測定するためにGe抵抗温度計(SI社製4.2K~0.3K較正済み)を伝熱体中(伝熱面との距離は約2mm)にアピエゾングリースと共に挿入した。液体 ^3He 中の温度勾配も測定するためにカーボン抵抗(Matsushita 100 Ω)温度計を、伝熱面から2mm, 6mm, 10mmの位置に3つ置いた。これらのカーボン抵抗体は液体との熱接触を良くし、温度計の容量を小さくする為に1mm程度の厚さまで削り、室温(300K)と液体He温度(4.2K)との間の温度サイクルを数回経験させ、十分な熱トレーニングを行った後にセル内に取り付けた。これらの温度計の抵抗値は全て交流ブリッジを用い4端子法で測定した。

2.3 測定

室温にあるクライオスタットはまず、液体窒素を用いて77Kに予冷され、更に液体Heにより4.2Kに冷やされる。このとき室温、液体窒素温度、液体He温度それぞれの段階において、J-Tインピーダンスの導通テストと、真空リークテストを行わなければならない。作業ガスである ^3He ガス(純度99.5% 11.6 ℓ NTP)をディフュージョン・ブースター・ポンプとメカニカル・ブースター・ポンプの間のニードル・バルブを通して回路に導入し初期液化を行う。この導入は液化されなかった ^3He ガスを、ディフュージョン・ブースター・ポンプで排気しながら行うので、ディフュージョン・ブースター・ポンプが逆流することが無いように導入するガスの量は十分注意する事が必要である。すべての ^3He ガスが回路に導入されるまで約4時間必要であった。初期液化開始から最低温度達成までは約1時間であった。この過程により冷却を行うと室温から約3日で最低温度を得ることが出来る。達成された最低温度はワンショットモードで約0.35K, 循環モードで約0.42Kであった。初期

液化終了後、測定セル内に液体³Heが十分溜まっている状態で、カーボン抵抗温度計をGe抵抗温度計で較正して、沸騰熱伝達特性の測定を行った。

測定は次の手順によって行われた。まず、伝熱体により液体³Heに熱流束 \dot{q} (W/cm²) を印可する。熱流束とは伝熱面により液体³Heに伝わる単位面積当たりの熱量のことである。そして、ディフュージョン・ブースター・ポンプ前にあるバルブを調節して目的の液体温度に保たせる。この液体温度とは液体³Heに浸かっている3つのカーボン抵抗温度計の内、一番伝熱面に近い温度計が示す温度のことである。このバルブの調整だけで液体温度の微妙なコントロール(±0.003K以内)が十分可能であり、液体中に温度微調整用のヒーターを取り付ける必要は全く無かった。つまり、液体中の温度勾配が極めて自然な状態の下で

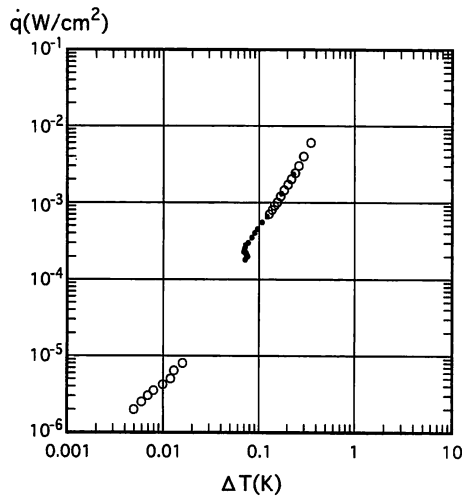


図5 液体温度0.5Kにおける液体³Heの沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

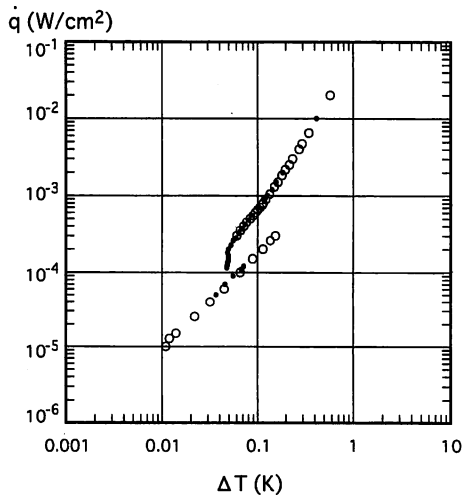


図6 液体温度0.55Kにおける液体³Heの沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

測定が出来たことになる。液体に印可する熱流束は段階的に変化させ、それぞれ十分な熱平衡状態に達した後に加えている熱流束及び各部の温度を測定する。このデータより伝熱体温度と液体温度との差 ΔT を求め、 $\dot{q}-\Delta T$ 曲線を描く。この曲線は沸騰曲線と呼ばれ、その特性より沸騰現象を議論する事ができる。

3 測定結果

図5～10に0.5Kから1Kまでの液体温度の沸騰曲線を示す。熱流束を零から増して行くとまず非沸騰領域が観測された。これはすべての液体温度で観測された。この領域では伝熱面から液体 ^3He への熱伝達は自然対流と熱伝導による。熱流束を増してゆくと突然、 Δ

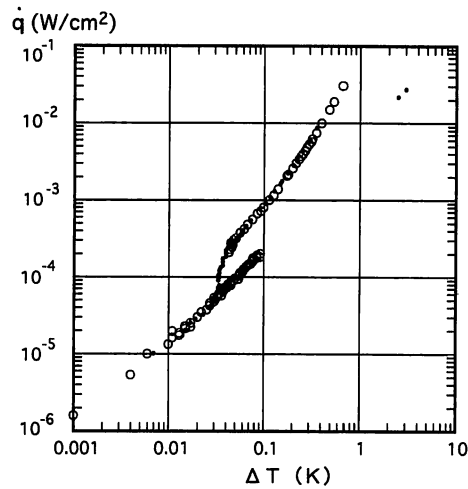


図7 液体温度0.6Kにおける液体 ^3He の沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

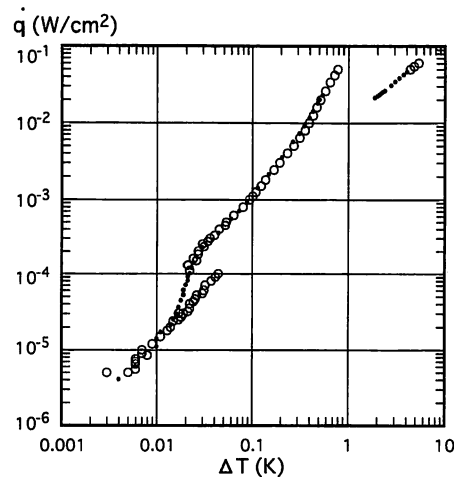


図8 液体温度0.7Kにおける液体 ^3He の沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

Tが不連続な減少を示した。この不連続な減少は核沸騰の開始に対応していると考えられる。つまり、泡が伝熱面近傍の境膜をかき乱し、伝熱面から液体³Heへの伝熱を促進させる為である。液体温度0.5Kの測定では $\dot{q}=8.5 \times 10^{-6}$ (W/cm²)以上の熱流束を加えると、液体温度が0.5K以上になってしまった。これは、³He減圧クライオスタットの冷凍能力の限界によるものである。しかし、沸騰が生じると先に述べた理由により再び0.5Kに保たせることが出来た。

核沸騰領域の曲線の傾きは一般の液体同様ほぼ温度差の2.5乗に比例している。更に熱流束を増してゆくと、核沸騰領域に遷移がおこる。この遷移で ΔT が増加するのは伝熱面が

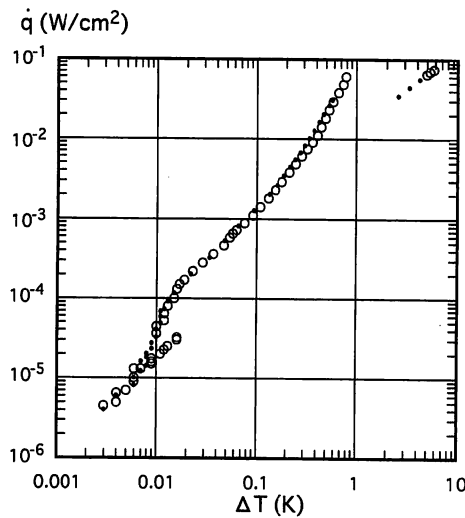


図9 液体温度0.8Kにおける液体³Heの沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

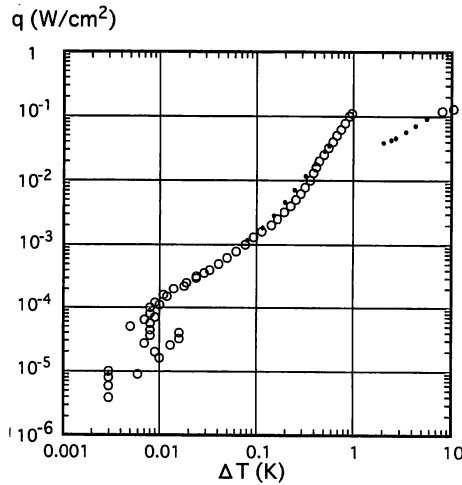


図10 液体温度1 Kにおける液体³Heの沸騰曲線 (○…熱流束増加, ●…熱流束減少)

蒸気膜に覆われてしまう為である。核沸騰領域におけるヒステリシスは通常どの液体でも観測されるものである。今回の測定でも $q=10^{-2}$ (W/cm²) 付近に現れている。しかし、液体温度が 1 K での測定でははっきりわかるがその幅は液体温度の低下と共に狭くなり、0.6 K になるとほとんど無くなっている。この様な現象は今までに見られていない。更にもう一つ今まで観測されていない興味深い現象が見られた。それは熱流束減少時における沸騰の終息つまり、この核沸騰領域から非沸騰領域への遷移に現れた。液体温度が 0.6K~1 K では連続的に沸騰は終息するが、0.55K 及び 0.5K では不連続であった。この不連続な沸騰の終息は今回初めて観測された現象である。不連続な沸騰の開始、終息は沸騰核の生成成長が許されるか否かの境界条件を与えていると考えられる。この条件には様々な因子が絡み合っている。その中でもキャビティのサイズによる効果は無視できない。今回の測定では伝熱面の粗さを変化させてはいないので、定量的な解析は今後の課題である。

4 ま と め

我々は新たに ³He 減圧クライオスタットを製作し、これを用い 1 K 以下の液体 ³He の沸騰熱伝達特性を詳しく測定した。その結果、今まで明らかにされていなかった液体 ³He の沸騰熱伝達特性を実験的により広範囲かつ詳細に求めた。更に今までに観測されていなかった特異な現象を観測した。今回観測された現象を解明し、沸騰現象の理解を深めるためにも伝熱面粗さを変化させての実験を行う必要がある。

参考文献

- 1) M. Tanaka and T. Kodama, *Cryogenics* **29** (1989) 203.
- 2) I. F. Kuzumenko, *Cryogenics* **35** (1995) 219.
- 3) H. J. Maris, *Journal of Low Temperature Physics* **98** (1995).
- 4) M. Maeda, H. Takahashi, Y. Fujii, Z. M. Li, T. Shigematsu, T. Shigi, M. Yamaguchi and M. Nakamura, *Physica B* **219&220** (1996) 672.
- 5) M. Maeda, T. Shigematsu, Z. M. Li, T. Shigi, Y. Fujii, M. Yamaguchi and M. Nakamura, *Proceedings of the ICEC16/ICMC Part 1* (1997) 461.

Heat Transfer Characteristics in Pool Boiling Liquid ^3He below 1K

Minoru MAEDA, Toshinobu SHIGEMATSU*, Yoshiko FUJII*,
Masaki NAKAMURA*, Minoru YAMAGUCHI* and Toyoichiro SHIGI*

*Graduate School of Science,
*Department of Applied Physics,
Faculty of Science,
Okayama University of Science,
Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 6, 1997)

Heat transfer characteristics of liquid ^3He have been measured between 0.5K and 1 K using a ^3He refrigerator. In this refrigerator, the incoming ^3He gas cooled by heat exchanger liquefy by Joule-Thomson expansion through the flow impedance. Heat was transferred to liquid ^3He from the heated Cu surface. The temperature difference between the Cu surface and the liquid ^3He was measured as a function of heat flux under saturated vapor pressure in thermal equilibrium state. With increasing the heat flux, the discontinuous decrease of the temperature difference was observed at the transition from the non-boiling state to the nucleate boiling one. With decreasing the heat flux, the temperature difference changed continuously at the transition from the nucleate boiling state to non-boiling one between 0.6K and 1K. Whereas, the change was discontinuous at 0.5K and 0.55K. This phenomena was observed for the first time.