加圧超流動ヘリウム強制対流熱伝達実験装置

塩 津 正 博

京都大学エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻 宇治市五ヶ庄

Pressurized He II Forced Convection Heat Transfer Experimental Apparatus

Masahiro SHIOTSU

Department of Energy Science and Technology, Kyoto Univ., Uji, Kyoto 611-0011

1. はじめに

超流動ヘリウム (He II) は機能性流体であり、冷凍機迄の熱流路が十分確保されている限り、特に強制対流を行わなくても浸漬冷却で優れた冷却特性を持っていることは良く知られている。

このため、核融合炉や加速器、大型超伝導マグネットの冷却剤として期待されているが、超伝導マグネット内の冷却流路は非常に入り組んだ構造になっているために、冷却流路の断面積が十分とれない場合や流路が長くなってしまいう可能性がある。

このような場合でも、強制対流を用いて細部にいたるまで超流動ヘリウムを送り込みマグネット内を一樣に冷却することでマグネットの安定化につながる可能性がある。

こうした意味で、超流動ヘリウム強制対流熱流動特性の正確な知識が必要であるが、これまでに実験結果は僅かしか報告されておらず、その殆どが飽和超流動のものである。

そこで、我々は定常臨界熱流束や過渡熱伝達に対する流速の影響の解明をめざして加圧超流動ヘリウム強制対流熱伝達実験装置を計画し、種々の困難に遭遇しながら1年以上を経て完成にこぎつけた。ここでは、装置の概要と、どこが難しかったかを説明する。

2. 強制対流熱伝達実験装置

加圧超流動ヘリウム強制対流熱伝達実験装置の構成図を Fig. 1 に示す。クライオスタットは内径 45 cm、高さ 157 cm、液体ヘリウム 150 l で加圧状態の超流動ヘリウムを実現するためにクロード型と呼ばれる複雑

な構造をしている。容器内部はガラスエポキシ製のλプレートによって仕切られており、上部が自由液面を持つ、He I 槽、下部が自由液面を持たない He II 槽になっている。He II 槽内には冷凍用のリング状ボイラーと熱交換器があり、リング状ボイラーへはもうひとつの熱交換器とモーター駆動されたジュール・トムソン弁 (JT 弁) を介して He I 槽から液が供給される。JT 弁で同ボイラー内の液位を一定に制御しながら大容量真空ポンプ (10,000 l/min) でボイラー槽内液体ヘリウム上部空間を排気することにより蒸発潜熱でボイラー槽内の飽和液を He II 温度に冷却しボイラー外壁と熱交換器により He II 槽の液温をλ温度以下の目標液温に設定する。

He I 槽と He II 槽はλプレートと容器内壁間の僅かな隙間からのスーパリークにより連結されているため、加圧状態で He II 槽内の液をλ点以下の目標値に設定できる。

次に試験流路部に強制対流を発生させるメカニズムについて以下に説明する。まず AC サーボモーター[9]を駆動させ、回転導入端子[11]を介して連結された内ねじを切った回転軸と、その中にねじ込まれる構造の外ねじを切った中心軸[12] (回転しない) によって中心軸に比較的低速度の上下運動を誘起させる。この中心軸はλプレート下部のベローズポンプ[3]と SUS 製の円盤[13]に連結されており、中心軸が上下するとベローズポンプが伸縮する。実験開始前にこの円盤を最上端位置まで持ち上げることでベローズポンプ内に最大容量 12.3 l の He II を吸引する。そして実験開始と同時に予め希望する回転数に設定しておいた AC サーボモーターによって、SUS 製円盤[13]を一定速度で降下させ、中の He II を試験流路を通して He II 槽に追い出す。このようにして試験流路部に強制対流をあ

E-mail: shiotsu@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

2001 年 9 月 10 日受理

る一定時間発生させることが出来る。試験流路部内の流速 v は、流量一定の関係より SUS 製円盤[13]の降下速度すなわち AC サーボモーターの回転数から決定することができる。このため、本実験装置では、我が国ではまだ超流動ヘリウムでの動作を保証するものが市販されていない流量計は不要である。

本装置の設計や製作に当たって難しかった点を幾つか紹介する。まず、第1はベローズポンプの駆動軸のシールである。ラムダプレートを通る部分は超流動ヘリウムに接しているため最初は安価なスリップフィット等も考えたが結局 Fig. 1 に示すように溶接ベローズ[2]を入プレートの上に設け、ベローズ内を真空引きする方法とした。完成後この部分でのトラブルは発生していない。次に難しかったのは、クライオスタット外のサーボモーターから内部回転軸への回転導入と回転軸と駆動軸間の摩擦の問題である。ベローズポンプからの流れの脈動を減らす為、溶接ベローズのひだ部分の長さを抑えたためポンプの駆動に比較強い力が必要とする。上部フランジの回転導入機は、当初ベローズ式を用いたが次々壊れたため磁気結合型 (Anelva 954-7605) とした。ねじ部には潤滑剤が一切使えないため、最初焼き付きを恐れて回転軸側を真鍮製のねじにしたところ、最初の試運転中では動いていたのであるが、ベローズポンプを上限迄引き上げた状態で一晩休止中にヘリウム温度での強度不足のためか、ねじ山が全て飛び形でねじが抜け落ちてしまった。クライオスタットの中が見えないので、それに気がつかないまま翌日丸1日臨界熱流束の実験をして全く流速の影響がないことから、もしこれが本当なら高いお金をかけて装置を作ったのに困ったと潰れていることを願いながら実験をうち切った。ねじ強度を上げるため角ねじにし、潤滑を良くする MoS_2 コーティング (川邑研究所デフリック HMB-34) を施してやっと完成をみた。現在実験データを集積中である。

3. 試験流路、発熱体

ベローズポンプの底部フランジは厚さ 10 mm 直径 267 mm の FRP 円盤で、その上に FRP 板や発熱体をスタイキャストで張り付けることによって希望する形状の試験流路を構成する。最近実験に使用した試験流路と発熱体の構成を Fig. 2 に示す。試験流路は、長さが 100 mm、幅 40 mm、高さ 3 mm の両端開放の側面断熱された FRP 製流路となっている。その流路中心部に長

1. Test heater	6.7. Heat exchanger
2. Welded bellows	8. Limiter switch
3. Bellows pump	9. AC servo motor
4. He II boiler	10. Glass epoxy separator
5. JT valve	11. Magnetic coupling

Fig. 1 Experimental apparatus.

(1) Flat plate heater, (2) RuO_2

Fig. 2 Test heater.

さ 40 mm、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm のマンガニン平板発熱体を設置した。なお試験流路内の液温分布が強制対流流速によってどのように変化するかを調べるために図に示すように流路底面より 1.5 mm 上部に 7 箇所 RuO_2 温度センサを設置した。