飽和 He II - 加圧 He II ハイブリッド冷却の熱伝達

小林 久恭, 福田 浩之, 富岡 達郎*

日本大学理工学部原子力研究所 東京都千代田区神田駿河台 1-8

* 現在: 東洋酸素(株)

(1987 年 12 月 18 日受理)

Heat Transfer in Hybrid Cooling with Saturated He II and Pressurized He II

Hisayasu KOBAYASHI, Hiroyuki FUKUDA and Taturou TOMIOKA

College of Science and Technology, Nihon University,
1-8 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101

(Received December 18, 1987)

Synopsis :

We have investigated preliminarily the heat transfer characteristics in hybrid cooling in which one of the heated surfaces of a conductor is cooled by saturated He II (He II_s) and the other side of the surfaces simultaneously cooled by pressurized He II (He II_p). Not that the transition to the film boiling state in the hybrid cooling is dominated by lower peak heat flux in He II_s, but that the observed peak heat flux was close to the average value of those obtained in He II_s and He II_p each. The mechanism of the transition to the film boiling state is explained by the super-heating and the temperature fluctuation between the double transition peculiar to the hybrid cooling.

1. 緒 言

超電導マグネットの安定化を強化する一つの方法として、冷媒に大気圧下の超流動ヘリウム (He II_p) を用いることは有効である^{1,2)}。最も大きな特長は、伝達特性が優れており、膜沸騰領域へ転移する熱束値 (peak-heat flux, Q_p) が He I の場合に比べ数倍大きく³⁾、大きな擾乱のエネルギレベルまでクエンチを抑制しうることである⁴⁾。しかし、排気能力が同じポンプを用いたとき、液温が一定の状態で使いうる冷凍能力が He II_p の場合には飽和超流動ヘリウム (He II_s) に比べて小さく、熱流入後、元の液槽温度へ復帰しにくい。このことは、たとえば超電導マグネットのパルスのまたは交流的使用のような、連続的発熱を伴う運転に対し不利である。

われわれは、He II の冷却上、He I に比べての優位性を確保し、しかも上述の欠点を補償しうる He II_s を He II_p と、同時に用いるハイブリッド冷却 (Fig. 1 参照) を試みた。

ハイブリッド冷却超電導ホローまたは導管 (cable-in-conduit) タイプの導体による安定化の実験に先ん

じ、ハイブリッド冷却時の熱伝達について定常、非定常の特性を測定したので、その一部をここに報告する。

2. 実験装置

ハイブリッド冷却を行うための FRP デュワーについてはすでに報告したが⁵⁾、このクライオスタットのサーマルセパレーター部 (Fig. 2) に熱伝達特性測定用の素子を図のように取りつけた。熱束 Q の印加は厚さ 1.26 mm, 径が 3.5 mm の銅ディスク外周に巻いたマンガニン線 (26Ω) により行い、熱束は長さ $L=7$ cm, 内径 3.4 mm の上部および下部の冷却チャネル中の He II に流れる構造になっている。チャネル上部は、図のように He II_s-He II_p heat exchanger に接続されているので He II_s が満たされ、下部は生成された He II_p で満たされる。したがって中間に位置する銅ディスクがハイブリッド冷却されることになる。なお、比較のため (1) He II_s-He II_s, (2) He II_s-He II_p (ハイブリッド), (3) He II_p-He II_p の三つの組合せて冷却特性を観測した。銅ディスク中央には Au-Fe/クロメル (76μmφ) の熱電対が挿入され、

Fig. 1 Concept of hybrid cooling with He II s and He II p.

Fig. 2 Parts of the thermal separator of the cryostat and the heat transfer element.

銅表面の温度 T が読めるようになっている。またディスクの上部の表面に同種の熱電対が接触するように置かれ、表面近くの液温 (T_1) の変化を読み取れるようにした (この温度計は、Fig. 6 の δ_{1-2} 近辺の平均温度を読むことになる)。

He II s の peak-heat-flux Q_p は静水圧ヘッド (H) に依存するので、He II s - He II p heat exchanger 内部に超電導ポイント液面計を取り付け、 $H=15\text{cm}$ で一定に保った。液槽温度 (T_b) は Ge 温度計を用いて一定温度に制御された。

T_b および H の制御はいずれも exhaust line 内にある JT パルプの操作によって行った。ディスク、ヒーター、温度計および SUS 製冷却チャネルからなる測定系は銅製真空チェンバーで断熱されている。

3. 実験結果と検討

3.1 定常熱伝達特性

マンガニン・ヒーターの電流 (I) とディスク内の熱電対により測定した温度 T のチャートを Fig. 3 に示す。ハイブリッド冷却および He II p - He II p 冷却においては顕著ではないが、He II s - He II s 冷却では、

Fig. 3 Temperature of copper disk vs. heater current characteristics at 1.8K. (a) He II p - He II p, (b) He II s (upper channel) - He II p (lower channel): hybrid cooling, (c) He II s - He II s.

film boiling 状態のガス膜が減圧下において、より厚くなるので加熱両面の冷却がますます悪くなり大きなヒステレシスが現れる。Noisy-film-boiling に伴う加熱表面の付加的温度上昇⁹⁾のためさらにこの効果は増長される。

ヒーター電流を増加していったとき、最初に大きな温度のジャンプが起こる電流値より計算した Q_p について液槽温度 T_b の依存性を Fig. 4 に示す。Fig. 3 に見られるように、ハイブリッド冷却の場合、つねに二段の飛び (Fig. 3 中の ↓ 印) が観測されるので一段目を Q_{p1} 、二段目を Q_{p2} とする。Fig. 4 の棒線は下限が Q_{p1} 、上限が Q_{p2} に相当する double transition の範囲を示し、実線は、He II s と He II p の各単相について、理論にもとづいて計算した Q_p の平均を表す。明らかに He II p 冷却の Q_p が最も大きく冷媒として優れていることがわかり。ハイブリッド冷却では He II s と He II p の場合のほぼ中間の値になる。ハイブリッド冷却の場合、He II s - He II s の Q_p に一致することなく、より大きな Q_{p1} が得られる理由は、次のように Fig. 5 に示したメカニズムによる定性的な説明が可能である。Fig. 1 のように上下両チャネルにはほぼ等方的に流れている熱束 Q_1, Q_2 が増加し、

Fig. 4 Peak heat flux as a function of bath temperature. Solid lines (a), (c): He II p-He II p, He II s-He II s. Solid line (b) represents the average peak heat fluxes of He II p and He II s calculated from theories. Data for hybrid cooling are shown by bars with the width corresponding to the double transition.

He II s 側の表面温度 T が飽和蒸気圧曲線上の T_c に達するとガス He (GHe) が生じ film-boiling がトリガされるはずである。しかし、図中点線で示した準安定な super-heating⁷⁾ が、 Q_p の大きな He II p の冷却により安定的に存在するようになるため実際には T_c より大きな T_s をもたらす Q_{p1} まで GHe の生成を抑止することになる。さらに Q_{p1} より大きな熱束が印加されて Fig. 6 (a) の上側の破線で示した温度分布になると、銅ディスクと He II s との境界面が過渡的に生成した film-boiling による GHe のために断熱的になり、いったんは温度が上昇する。このため銅ディスク内に温度勾配ができ Q_{p1} 以上の熱束の増加分 ΔQ は He II p 側へ分流している Q_2 に加えられることになり、He II s 側の boiling は一時的に停止し Kapitza region へ復帰する。このように Q が Q_{p1} 以上では、 ΔQ が He II s, He II p 側へ交互に分流をくりかえし ΔT_x 間を振動する温度変化を伴う。 Q がさらに増加し、 Q_{p2} に達するとディスク両面が GHe の film に覆われ、 T がさらに大きくジャンプする Fig. 6

Fig. 5 Possible explanation of the transition to the boiling state in hybrid cooling.

Fig. 6 Schematic temperature distributions just before the transition to the higher temperature. The temperature fluctuation of T occurs within ΔT_x .

(b)の状態になる。

上記メカニズムを支持する事実として Fig. 7 のような He II s 側のディスク表面温度 T_1 の時間変化の例を示すことができる。すなわち $Q_{p1} < Q < Q_{p2}$ の発

Fig. 7 Temperature fluctuation of T_1 at the upper surface of the copper disk. (a) $Q < Q_{p1}$, (b) $Q_{p1} < Q < Q_{p2}$ (noisy film boiling).

熱 Q に対して発生する T_1 の振動が Fig. 7(b) に見られる。noisy-film-boiling 状態でも振動現象が現れるが、この温度の振動が noisy-film-boiling によるものではなく上述したメカニズムによると判断したのは、noisy-film-boiling の発生後は Q - ΔT 特性にヒステレシスを伴うことがわかっており Q_{p1} - Q_{p2} 間では reversible な silent-film-boiling 状態⁶⁾ であることからである。

3.2 非定常熱伝達特性

定常加熱の場合の Q_p より大きな熱束をパルス状に印加すると Fig. 8 のように、転移は film-boiling 状態を経て Kapitza 領域へ復帰するという経過を辿る。パルスの加熱の開始時から film-boiling へ take-off するまでの時間 Δt_{tr} は Q_p が大きい冷媒ほど大きく、同一加熱量に対しては、He IIp において最も長い安定な冷却が得られる。一方、パルス加熱により上昇した表面温度が液槽温度 T_b まで復帰する時間変化を示した Fig. 9 からわかるように、ハイブリット法において最も速やかな冷却が得られている。この特性から、超電導マグネットからの A. C. Loss 等低レベルの発熱を He II s が迅速に除去し、He II p の Q_p 大

Fig. 8 Temperature change of the copper disk after the pulsive heating.

Fig. 9 Cooling characteristics of copper disk after the pulsive heat input. The curves are compared for the same starting temperature rises ΔT ($= 0.5$ K) after injecting the pulse heating with the same power level.

という特質が加わってハイブリッド冷却が有効であるといえる。なお、Fig. 9 の結果では He II s-He II s の場合、最も長い復帰時間を要しているが、これは、 Q_p が最も小さく、したがって、 Δt_{tr} が短いため、film 状態での加熱時間が長くなり、ディスクに大きな熱を蓄積したためと考えられる。非定常加熱に関してはより詳細な研究が必要である。

4. 結 言

冷却特性の優れた He II p と、冷凍能力が He II p に比べて大きい He II s とを同時に用いるハイブリッド冷却方法において、熱伝達特性上、

1) super-heating のため He II s より大きな Q_p が得られる。

2) film-boiling への転移は 2 段階を経るので Q_{p1} では catastrophic な温度上昇には至らない。

3) 加熱体の過渡的な冷却は最も速やかに行われる。
などの効果のあることを見いだした。

これらのことから、超電導マグネットの、とくにパルス発熱を伴う場合にハイブリッド冷却は安定化を強化する一方法であるといえる。現在、ハイブリッド冷却マグネットによる小規模な安定化の実験が用意されつつある。

本研究は文部省科研費エネルギー特別研究(核融合)補助により行われたものである。

参 考 文 献

- 1) G. BonMardion, G. Claudet and J.C. Vallier: Proc. of 6th ICEC-6 (1976) 157
- 2) P. Turowski and Th. Schneider: Cryogenics 27 (1987) 403
- 3) 小林久恭, 安河内昂: 低温工学 15 (1980) 226
- 4) H. Kobayashi and K. Yasukōchi: Adv. Cryog. Eng. 27 (1982) 451
- 5) H. Kobayashi, H. Fukuda, T. Tomioka and Y. Kuraoka: Cryogenics 27 (1987) 316
- 6) H. Kobayashi and K. Yasukōchi: Adv. Cryog. Eng. 25 (1980) 372
- 7) G. Krafft: J. Low Temp. Phys. 31 (1978) 441