高遠心力場における液体ヘリウムの沸騰熱伝達

石井 格, 新井 和昭, 海保 勝之, 樋口 登
野村 晴彦, 立石 裕, 大西 利只

電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

(1991年4月9日受理)

Boiling Heat Transfer of Liquid Helium under High Rotational Field

Itaru ISHII, Kazuaki ARAI, Katsuyuki KAIHO, Noboru HIGUCHI,
Harehiko NOMURA, Hiroshi TATEISHI and Toshitada ONISHI

Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305

(Received April 9, 1991)

Synopsis:

Heat flux in liquid helium in a rotating superconducting magnet was measured under the rotational speeds of 500 to 3,600 rpm in order to help analyzing the stability of field winding of superconducting turbine generators. Maximum centrifugal acceleration at the location of heat flux measurement was 2,045 G. Measured maximum heat flux in the nucleate boiling region was increased up to 2 W/cm^2 at the rotational speed of 500 rpm; it changed little with the increase of rotational speed above this level. In the film boiling region, both heat flux and minimum heat flux were increased with the increase of the rotational speed up to 3,600 rpm.

1. はじめに

超電導技術の有力な応用分野の一つとして、発電機、電力貯蔵用マグネット (SMES)、変圧器や送電ケーブルなどの電力機器が考えられる。なかでも超電導発電機は、従来の発電機に比べて小型で高効率になるだけでなく、同期リアクタンスが著しく小さくなるために電力系統の安定度を向上する効果が大きいことが期待されている。この超電導発電機については、日本のほか、ドイツ、ソ連、米国などで研究開発が進められている。なかでも我が国においては、通産省の大型省エネルギー技術開発の一つとして取り上げられて、当面 70 MW 級機による試験を目指して精力的な開発が進められている¹⁾。

この超電導発電機では、超電導マグネットは、3,000 ないし 3,600 rpm で回転する回転子内におかれることになるが、このような高速で回転する超電導マグネットの安定性の条件は、従来の静止状態の超電導マグネットの安定性の条件とは大きく異なることが予想される。そこで著者らは、超電導発電機に近い条件の高速回転場での超電導マグネットの安定性を検討するた

めにモデルローターを試作し、安定性の条件についての検討を開始した²⁻⁴⁾。

超電導マグネットの安定性には、当然、冷媒の液体ヘリウムでとりうる熱流束の値が大きな影響を及ぼす。超電導発電機のような高速回転場では、回転による強大な遠心力が働くために、加熱によって液体ヘリウム内に発生した泡や低密度部分は大きな浮力を受けて高速で移動するので、最大熱流束の値は静止場に比べてかなり大きくなることが知られている^{5,6)}。

しかしこの回転場での超電導マグネット内での伝熱現象は、回転方向と伝熱面との相対関係や伝熱面の近傍でのヘリウム流路の構成などによって大きな影響を受けることが予想される。したがって筆者らは、前記したモデルローター内の超電導マグネットに接した位置で実際の熱流束の値を計測し、このマグネットの安定性の検討に役立てることとした。

2. 実験装置および実験方法

2.1 超電導マグネット安定性試験用モデルロータ

今回試作した、超電導発電機の超電導マグネットの安定性を試験するためのモデルローターの構造を

Fig. 1 Model rotor.

Fig. 1 に示した。発電するための電機子巻線を持たない点を除けば、ほぼ超電導発電機そのものと同様の構造となっている。100kW の駆動用誘導電動機からヘリウムトランスファーカップリングまでの全長は約6m、回転部分の外径は500mmである。この中に、安定性を調べるためのレーストラック形状の試験用コイルが二つ（N極とS極）と、これにかかる磁場を強めるための鞍型のバックアップコイルが納められている。

ローター内部のセンサーからの信号の取り出しは、熱流束計測素子も含めて、ローターと駆動用電動機間に設置した50極のスリップリングを通して行っている。

このローターおよび超電導コイルの詳細については、参考文献²⁻⁴⁾を参照されたい。

2.2 熱流束計測素子

このローターに設置した熱流束計測素子の構造を、Fig. 2 に示す。この素子は、表面を研磨した厚さ3

Fig. 2 Heat flux sensor.

mmの銅板を伝熱板とし、その裏側にヒーターを、銅板のほぼ中心部にカーボン温度計を設置して、これをGFRPのホルダーに納めて伝熱表面以外を熱絶縁したものである。

この熱流束計測素子を、試験用コイルの直線部の、Fig. 3 に示すような位置に設置した。ここで、伝熱板表面の法線方向と泡に働く浮力方向とのなす角 θ は、伝熱板の中心部分で 68° である。またローターの回転方向は、Fig. 3 において図に示したように時計回りの方向になっている。

2.3 実験方法

実験に際しては、ローターを800rpmで回転させつつ、液体窒素で冷却した後液体ヘリウムによる冷却を行い、回転半径で25mmの位置まで液体ヘリウム

Fig. 3 Cross section of the rotor.

を充填した。この時にローター内に充填されている液体ヘリウムの量は、ほぼ 20 l である。冷却の方法の詳細については、参考文献 4) を参照されたい。

液体ヘリウムの充填が終了した後、ローターの回転数を 500 rpm から 3,600 rpm の範囲で変化させ、各回転数における熱流束計測素子のヒーター入力と伝熱板温度との関係を測定した。この際、銅板に埋め込んだ温度計の温度を伝熱板の表面温度と等しいものとみなした。また熱流束の値は、ヒーターで発生した熱のうち GFRP を通して逃げる量は銅板へ伝わる量に対して十分小さいとみなして、4 端子法で測定したヒーターへの入力を伝熱面の表面積で割って求めた。

測定の間は、ローター内の液体ヘリウムのレベルは極力一定に保持した。またローター中心部のヘリウムガスの圧力は、1.00～1.05 atm である。

なおこの熱流束の測定の際は、超電導コイルの励磁は行っていない。

液体ヘリウムにかかる遠心加速度の値は回転数の 2 乗に比例するが、熱流束計測素子の伝熱板中心位置で、500 rpm の時に 39.4 G、3,600 rpm の時は 2,045 G になる。

静止状態と回転状態の熱流束を同一計測素子で比較する目的で、回転数が 0 の場合の熱流束の測定も行った。これについては、液体ヘリウムが入った状態のローターを停止することができないため、ローターに超電導コイルを組み込んだ段階でコイルの健全性を確認する目的で行った静止励磁試験の際に、熱流束の測定を行った。しかしこの場合には、ローターの回転軸を垂直に立てて液体ヘリウムに浸漬したため、伝熱面が垂直（すなわち $\theta = 90^\circ$ ）となり、また泡の流路も回転状態とは異なったものとなっている。

3. 実験結果

測定された熱流束の値を、ローターの回転数をパラメーターとして、Fig. 4 に示した。次章で検討するように、熱流束素子の場所ではヘリウムは過冷却液体となっており、その温度は回転数とともに変化するが、Fig. 4 の横軸は、各回転数においてヒーター入力が 0 の時の伝熱板の温度 T_0 とヒーターを入れた時の伝熱板の温度 T との差 ΔT ($=T-T_0$) をとっている。したがって液体の沸騰熱伝達特性の表示に通常用いられる伝熱面過熱度 ΔT_{sat} ($=T-T_{\text{sat}}$) とは異なっている。また T_0 も厳密には熱流束測定時点のヘリウム温度とはいえないが、ヘリウムの液面とローターの回転

Fig. 4 Heat flux vs. ΔT under rotational field.

数を一定に保っている間の液体ヘリウムの温度変化は小さいので、これをほぼ周囲のヘリウムの温度とみなした。

Fig. 4 から、核沸騰領域の熱伝達特性は、回転数によらずに静止状態からほとんど変化しておらず、ほぼ、 $q=3\Delta T^{2.2}$ (q : W/cm², ΔT : K) で表されることがわかる。ただし核沸騰から膜沸騰に転移する点である最大熱流束の値は、今回測定した最低の回転数である 500 rpm においても静止時の値よりもはるかに大きくなり、約 2 W/cm² に達している。

一方、膜沸騰の熱伝達特性は回転数に大きく依存し、回転数が上昇すると熱流束が増加するとともに、膜沸騰から核沸騰に転移する点である最小熱流束も増加する。

Fig. 5 には最大熱流束および最小熱流束の値を、遠心加速度を横軸にして示した。加速度が 100 G 程度以

Fig. 5 Maximum and minimum heat flux.

下と小さい領域のデータは今回は少ないが、この領域では従来最大熱流束が加速度の1/3乗に比例するといわれている⁹⁾ことから、ここでも両対数表示で直線近似をすると、図に示したように $q \propto a^{0.27}$ となっている。一方最小熱流束のほうは、同じ加速度領域で、 $q \propto a^{0.31}$ となっている。

加速度の大きい領域では、最大熱流束、最小熱流束ともに飽和するが、最大熱流束は1,000 G以上の領域ではかえって回転数の増加とともに僅かに低下する傾向を示す。この低下の理由については、不明である。最小熱流束については、1,000 G以上の領域でもいくらかの上昇がみられる。しかしこの加速度の大きいところでは、Fig. 5 に示されるようにデータにばらつきが見られ、再現性に問題があるかもしれない。

Fig. 4 に見られるように、最大熱流束、最小熱流束の点での ΔT についてはどちらも、静止場での値より大きくなるが、回転数が高くなるほど小さくなる。

4. 検 討

4.1 回転中の圧力

ローター内のヘリウムは回転に伴う遠心力を受けるために、外周部分ほど圧力が高くなる。半径 r の点での圧力 $P(r)$ は次の式で表される。

$$P(r) = P(0) + \frac{\omega^2}{r} \int_0^r x^2 \rho(x) dx \quad (1)$$

ここで、 $P(0)$ は回転中心軸上での圧力、 ω はローターの回転角速度、 $\rho(x)$ は半径 x の点でのヘリウムの密度である。したがって、 $P(r)$ を求めるには各部分でのヘリウムの密度を知らなければならないが、これ

Fig. 6 Phase diagram of cryogenic helium.

については、次のように考えることができる。

Fig. 6 に、ヘリウムの状態図を示すが、ローターの中心から 25 mm のところの気液界面では、ほぼ 4.2 K、1 気圧の点 A (および A') にある。これより外側の液体ヘリウム中では、もしヘリウムが断熱圧縮されるとすると、図中の線①に従って変化する。しかし実際のローター中では、ローター外周面からの熱侵入による加熱とローター内側の気液界面からの熱伝導による冷却との両方の影響により、線①から外れた点にくることになる。ローター内部の半径方向の熱伝導が十分に良い構造であれば、等温線②に近くなる。外周面からの熱侵入が大きいときには、液中でも気液平衡線③に近づこうとするが、一定密度の線④を超えて暖まろうとすると、外側ほど密度が低くなるために強大な遠心力による対流が生じるので、結果として④の線を超えられない。したがって、実際のローター中では、線②と線④のどこかにくることになる。

今回の実験に際して、ヒーター入力がない時の温度が回転数によってどのように変化するかを示したのが、Fig. 7 である。回転数が 3,600 rpm の時に、500 rpm の時に比べて 0.20~0.25 K の温度上昇が観測された。図中の点線は、ローター内の液体ヘリウムが等密度 (Fig. 6 の線④) であると仮定して、式 (1) を用いて圧力を求めてそれから温度を求めた時の値である。この測定値から、本実験においてはローター内のヘリウムは、等密度状態よりもいくらか温度が低く、結果としてほぼ断熱変化をした場合 (Fig. 6 の線①) に近い状態の過冷却液体であると考えられる。しかし Fig. 6 からわかるように、密度は等密度にかなり近

Fig. 7 Temperature rise according to the rotation of the rotor.

く、式(1)の $\rho(x)$ としては4.2 K、大気圧の液体ヘリウムの密度を用いても大きな差は生じないといえる。

これにより、式(1)を用いて伝熱板の中央の点の圧力を求めると、回転数が1,000 rpmの時に1.09 atm、3,600 rpmの時に2.16 atmとなる。

4.2 泡の流れ

熱流束の計測時に伝熱板で生じた泡は、遠心力による加速度場のもとで、Fig. 3 に示す流路を回転中心軸の方へ向かって流れる。伝熱板の法線方向と泡に働く浮力方向との間の角 θ は 68° であるが、この場合の最大熱流束について、静止場では θ が 0° の場合の80%程度になることが知られている⁷⁾。

また回転場においては、泡には遠心力のほかにコリオリの力が働くが、このコリオリの力の大きさはローターの回転角速度と泡の移動速度の両方に比例する。微小な泡の運動を液体中の球体の運動と考えると、運動方程式は

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1\right)\omega^2\vec{r} - \frac{9\eta}{2a^2\rho_g}\frac{d\vec{r}}{dt} + 2\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{\omega}$$

とかけ、右辺の第3項がコリオリの力を表す。ここで、 $\vec{r}$ は泡の位置ベクトル、 $\vec{\omega}$ はローターの回転角速度ベクトル、 ρ_l と ρ_g はそれぞれ液体と気体ヘリウム密度、 a は泡の半径、 η は液体ヘリウムの粘性係数である。ただしここでは、泡の周囲の液体ヘリウムには流れはないとしている。

Fig. 8 Calculated flow path of bubbles made at the heater plate.

この式を用いて、ローターが3,600 rpmで回転している時に伝熱板上で発生した、たとえば直径が $50\mu\text{m}$ の泡の運動を計算すると、Fig. 8のような経路をとる。このようにコリオリの力は遠心力に比べて無視できない程度の大きさになりうるので、上記した θ の影響と合せて、回転方向と伝熱面の相対位置が伝熱特性に影響を及ぼす可能性があることは考えておく必要がある。ちなみに、泡がこの図の経路を移動するのに要する時間はほぼ2 msである。

5. 結 論

超電導発電機の界磁巻線のように高速回転場にさらされる超電導マグネットの安定性を検討する目的でモデルローターを試作し、その巻線に近接した部分での液体ヘリウムの熱伝達特性を、静止状態と500~3,600 rpmの回転状態とにおいて測定した。その結果、以下のような点が明らかとなった。

- (1) 核沸騰域の熱伝達率は回転場中でも静止状態とほとんど変化しないが、最大熱流束の値は大きく増加し、約 2 W/cm^2 に達する。
- (2) 膜沸騰域では回転数が高いほど、熱伝達率が大きくなり、また最小熱流束の値も増加する。
- (3) 遠心加速度が100 G程度以下の領域では、最大熱流束は加速度の0.27乗に、最小熱流束は加速度の0.31乗に比例する。
- (4) 遠心加速度が1,000 G以上の領域では、最大熱流束は加速度の増加とともにいくらか現象する傾向を示す。これに対して、最小熱流束は飽和するもののいくらか増加する。
- (5) モデルローターの供試コイル部分の温度は、3,600 rpmの回転時に500 rpmの場合と比べて0.20~0.25 Kの上昇を示した。これから、ローター内部の液体ヘリウムの状態はほぼ、液体ヘリウムが遠心力で断熱圧縮された場合に近い状態であると推定される。

本研究は通産省のムーンライト計画の中の超電導電力応用技術研究開発の一部として行われたものであり、電子技術総合研究所エネルギー部木村錫一郎長をはじめ、研究の推進に協力いただいた皆様に感謝いたします。また実験装置の製作と運転に関しては、(株)東芝の多大な協力をいただき、関係者に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 上田隆右, 北内義弘: 電気学会雑誌 108(1988) 1117
- 2) 海保勝之ら: 1990 年秋季低温工学・超電導学会 G1-8 (1990)
- 3) T. Onishi, et al.: Cryogenics (to be published)
- 4) 樋口 登ら: 低温工学 (投稿中)
- 5) H. Ogata and W. Nakayama: Cryogenics 17 (1977) 461
- 6) EPRI Report EL-4910 (1986)
- 7) 佐藤新太郎, 尾形久直: 低温工学 12 (1977) 2