「超臨界ヘリウムによる冷却」

佐藤新太郎

(株)日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280

(47年7月10日受理)

“Cooling with Supercritical Helium”

Shintaro SATO

Central Research Laboratory Hitachi, Ltd. Kokubunji, Tokyo

(Received July 10, 1972)

Synopsis :

Recent advances in the field of heat transfer or cooling with supercritical helium are reviewed :

The region boundaries are discussed and the physical properties of supercritical helium are described. A conventional heat transfer correlation may be used to predict the heat flux.

Force-cooled superconducting systems are compared with traditional pool system. Advantages of these systems will be particularly for large coil and long cable. But the design and construction of such systems are associated with some problems to be solved.

1. 緒 言

超電導機器を動作温度以下に冷却するために、従来は液体ヘリウム中に浸漬する方式がとられているが、ヘリウムを強制的に循環させて、効果的に冷却しようという試みもいくつか報告されるようになってきた。たとえば臨界圧力以上のヘリウムで強制冷却する方式があり、すでに海外では超電導マグネットや超電導送電ケーブルに関して実験がすすめられている。このような海外の進展状況についてはすでに低温工学海外調査団によって視察されているところであるが、超臨界ヘリウムの応用についてわが国としても、総合的な研究開発体制が必要であるとの見地から、まずその基盤として超臨界ヘリウム研究会 (SHE 研究会) が発足している。しかし超臨界ヘリウムに関する基礎的、体系的な面でまだ不明確な部分も多く、技術的に確立されているとはいえない。以上のような現状を把握するとともに、問題点をよく見極めることが、この応用分野の正しい発展につながると考える。本文では超臨界ヘリウムによる冷却特性の基礎と応用面での問題点について概説する。

2. 超臨界ヘリウム

1気圧の液体ヘリウムを密閉容器に入れて加熱する場合の相変化を図1の温度—エントロピー線図で説明すると、液相は飽和液体線 AC, 蒸発ヘリウムガス相は飽和蒸気線 BC 上にしたがって、温度と圧力が上昇し液面が下ってくる。ついにはC点にいたり液面を判別することができなくなり、まさに水天彷彿たる状態となり、均一な相と見なされるようになる。このC点を臨界点と呼び、ヘリウムでは臨界温度 $T_c=5.2\text{K}$, 臨界圧 $P_c=2.26\text{ atm}$ という値を示す。この臨界点では蒸発潜熱は零となり、いわゆる沸騰、凝縮の現象は見られなくなる。そのほか、比容積変化 $(\partial V/\partial T)_P$, $(\partial V/\partial P)_T$, エントロピー変化 $(\partial S/\partial T)_P$ および比熱 C_P は無限大となる。臨界点以上の領域ではその物性はどんな挙動を示すだろうか。その大きな特徴は流体の物性値が急激に変化することである。とくに比熱 C_P が極大値を示す温度がある。この温度 T_{ic} は擬臨界温度 (Transposed Critical Temperature) と呼ばれ、図1に臨界点Cから伸びる鎖線で示すような軌跡になる。この線を擬臨界温度線といい、この近傍では

比熱のほか、密度 ρ 、粘度 η 、熱伝導度 K など大きく変化する。これらの物性値は NBS¹⁾²⁾ から発表されており、図2～4に示した。図5のプラントル数の変化は大部分が比熱の寄与である。

ここで超臨界ヘリウムとはどの領域を指すのか、境界を明らかにしておく必要があるように思う。ヘリウムに限らず、一般流体の超臨界領域の定義は不明確であって漠然と臨界点あるいは臨界圧力以上の領域と広く理解されていることが多い。しかし超臨界流体の特徴つまり物性値の特異性や均一相（局所的に不均一性

Fig. 1 S-T Diagram of He

Fig. 2 Density of He^{4) 1)}

Fig. 3 Viscosity of Helium²⁾

Fig. 4 Thermal Conductivity of Helium²⁾

Fig. 5 Prandtl Number of He^{4) 2)}

もある)に着目した基礎的もしくは応用研究をすすめるとすれば、その対象となる領域も自ら限定されてくるであろう。たとえば、学問的興味からすると擬臨界温度近傍が研究の対象となるであろう。しかし超臨界ヘリウムによって冷却するという実用的立場から考えると、Fig. 1 中に斜線で示した領域と考えたい。

3. 熱伝達特性

超臨界流体の一般的な熱伝達現象については、すでに本誌に秋山氏の解説³⁾があるので、ここでは超臨界ヘリウムの熱伝達について述べることにするが、精度が高く系統的な実験は極めて少ししか報告されていない。

自然対流での実験としては、Klipping⁴⁾らの水平円筒についての報告があり、本誌にも紹介⁵⁾されている。筆者はかれらのデータをヌセルト数 Nu とレイリー数 Ra (グラスホフ数 Gr $\times$ プラントル数 Pr) の形で整理した結果、Fig. 6 に示すような関係がえられ、一般流体の自然対流の相関式によく合致することを見出した。これは物性値の特異性あるいは擬沸騰現象などが考えられるにもかかわらず、一般流体と同様の挙動を示すことがうかがわれて興味深いことである。そのほか電総研⁶⁾でも実験されている。

強制対流下における熱伝達については Hay⁷⁾の報告があるが、実験方法と解析には問題がある。Johannes⁸⁾の実験は信頼性はあるが、残念ながら実験範囲が狭く擬臨界温度近傍でのデータがない。これに比較して、最近発表された NBS⁹⁾でのデータは圧力 3~20 気圧、温度 4.3~50 K、熱流束 0~1 W/cm² と実験範囲が広い。これらのデータを従来の熱伝達の相関式に適用した結果、

$$Nu = 0.0259 Re^{0.8} Pr^{0.4} (T_w/T_b)^{0.716} \quad (1)$$

という相関式が約 8% の相対誤差で適合するという。

(1)式を書き直すと

$$(hD^{0.2}/G^{0.8})(T_w/T_b)^{0.716} = 0.0259 K^{0.6} C_P^{0.4}/\mu^{0.4} \quad (2)$$

(T_w : 壁温, T_b : 流体温度, h : 熱伝達率, D : 流路相当直径, G : 単位面積当りの質量速度)

(2)式の右辺は物性値のみに関する項であり、温度と圧力の依存性を Fig. 7 に示す。得られた実験値を(2)式の左辺にしたがつて整理し、流体温度 T_b と擬臨界温度 T_{ic} との比で関連づけたものが Fig. 8 である。これから擬臨界温度において熱伝達率が極大になることが判る。筆者ら¹⁰⁾も同様な実験を行ない、熱伝達率に極大値があらわれることをみているが、高熱流束になると、むしろ熱伝達率が劣化してくる傾向にあり、一般の超臨界流体と同様な挙動を示すことを報告した。Fig. 9 は液体ヘリウムの沸騰曲線と対比して熱流束を計算した結果を示したものであるが、超臨界ヘリウムによる冷却が沸騰冷却に比して必ずしもすぐれているとはいえない。Fig. 9 はプール沸騰の場合との比較であるが、同一形状、流量での強制対流(沸騰流、二相流)と超臨界ヘリウムと比較した場合には、高熱流束では超臨界流が、低熱流速では沸騰流がすぐれている¹⁰⁾。その限界の熱流束の値は流量によって変わるので、今後は二相流熱伝達の解明を必要とする。

超臨界ヘリウムによって強制冷却する場合には振動を伴うことがある。この現象は一般の超臨界流体でもみられることであるが、NBS の実験では振動数 0.05~0.1 Hz、温度振幅 0.01~1 K、圧力振幅 0.3 気圧以下という値を得ている。筆者らはさらに 0.5~1 Hz 程度の比較的高振動のものも観測しているが、その原因や振

Fig. 6 Correlation of Klipping's data

動条件を明らかにするまでにはいたっていない。ともかく擬臨界温度近傍で密度などの物性変化の著しいところでは振動が発生し易いようである。

Fig. 7 Variation of the properties parameter with temperature at constant pressure

4. 浸漬冷却方式との比較および実用上の問題点

超臨界ヘリウムによって強制対流冷却を行なうためには、ほとんどの場合は超電導線材を中空導体にして、そのダクト内に超臨界ヘリウムを流すが、中空導体の構造、安定性およびそれを用いた超電導マグネットに関しては、すでに本誌に詳細に述べられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ここでは重複をさせて、超臨界ヘリウムによる冷却の得失と問題点について略述する。

強制対流による冷却方式の利害得失については、人によって意見が異なるところもあるが、超電導マグネットを強制冷却する方式を最初に提案した Brechna⁽¹³⁾ はコイルを適当な熱絶縁と真空断熱をするだけでよいので、複雑な形状のコイル、たとえば beam transport magnet などを最小のスペースで製作できると考えた。コスト面でも 70 KG の beam bending magnet を例にとると従来方式と大差はないという。しかし彼は最近では液体浸漬方式の方がよいといっている。

Keilin ら⁽¹⁴⁾ は強制対流冷却の長所として、(1) 熱伝達の向上、(2) コイルの電氣的、機械的強度の向上、(3) クライオスタットの簡素化、(4) 予冷張込にお

Fig. 8 Experimental and predicted heat transfer results

るヘリウムの節約を挙げ、欠点としては、(1) 中空導体の製作上の困難さ、(2) 冷媒循環用冷凍機の簡単化と信頼性の必要、(3) 導体の安定性に関する問題などがあるが、大型の超電導装置にとって強制冷却方式は極めて魅力的な方法であるとしている。

Morpurgo¹⁵⁾ は CERN におけるオメガプロジェクトに使用する超電導マグネットに、中空導体を用いて超臨界ヘリウムで冷却するという方式を採用していることは周知のことであるが、彼はその利点として、(1) コイルの形状、位置によらず均一に冷却できる、(2) 電氣的絶縁と機械的強度が増大する、(3) クライオスタットの構造が簡略になる、(4) ヘリウム量を節減することができるなどを挙げ、欠点として、(1) 高電流密度が得にくい (Keilin とは逆の意見)、(2) 付属の冷凍機が必要で操作が複雑になる、(3) 安定性を簡単に論ずる方法がないことを挙げている。

強制循環冷却のシステムについては英国 CERL¹⁶⁾ で超電導送電ケーブルの冷却に関して各種の冷却方式の比較検討をして、超臨界ヘリウムは比熱が大きいので必要な質量流量は少なくてすむ。また圧力損失も小さいので冷凍ステーションの間隔を長くとることがで

きるが、温度、圧力に制限があるといっている。なお日本でも電総研¹⁷⁾では超臨界ヘリウムの冷凍装置を試作して、その動作特性について実験を行なっている。今後このような研究によって、超臨界ヘリウムサイクルの動作条件が確立されることが期待される。

以上のことから超臨界ヘリウムによる強制冷却の長所として現時点で明確にいえることは、

(1) 中空導体を使用するため、従来のようにコイル間に冷却用間隙を設ける必要がなくなり、絶縁耐力を増大することができ、電磁力に対する機械的強度も大きくなる。

(2) 従来のような液体ヘリウムを収容する容器が不要となり、ヘリウムの張込量も少くなる。

最後に、このような利点をもつ強制冷却方式を実用化するにあたって今後ぜひ解明しておかなければならない問題点をまとめてみよう。

(1) 電流密度は高くなるのか。

(2) 中空導体の設計基準が確立されていない。外乱の大きさをどう考えるか。

(3) 中空導体の製作技術は相当進展しているが、コイルに組立てる場合、冷却回路の接続部は極低温下

Fig. 9 Comparison of various modes of heat transfer⁹⁾

で高圧、高真空に耐え、かつ電氣的に絶縁の良いものでなければならない。Morpurgo は Al 陽極酸化材で接続部を製作しているが、実験ではガスのリークがあったということである。接続個所の多い場合にはとくにこの接手の信頼性が問題となるであろう。

(4) 冷凍機と直結した冷却方式であるので信頼性の高い冷凍システムと安全対策が望まれる。

5. 結 言

超臨界ヘリウムによる冷却に関する基礎的な開発状況と問題点について概説したが、この冷却方式の技術的あるいは経済性の評価ということになると一口にその優劣を断ずることは困難で、むしろその得失を考慮して適否を決定すべきであろう。現段階では、送電ケーブルなどの長尺物や巨大な超電導マグネットの冷却には十分期待できると考えられる。しかしこの冷却システムのエンジニアリング・デザインをすすめるためには問題点の解明など、なお一層の研究開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) R. D. McCarty : NBS Report 9762
- 2) NBS Report 10703 (1971) 63-100
- 3) 秋山 : 低温工学 7-1, 1 (1972)
- 4) G. Klipping and K. Kurtzner : Pure and Applied Cryogenics 6, 97 (1966)
- 5) 米満 : 低温工学 4-6, 247 (1969)
- 6) 我妻ら : 第7回低温工学研究発表会, (1971)
- 7) R. D. Hay : Cryogenic Engineering Conference (1969)
- 8) C. Johannes : Proc. ICEC 3, 97 (1970)
- 9) P. J. Giarratano et al : Cryogenics, 11 385 (1971)
- 10) 尾形, 佐藤 : 低温工学 7-1, 20 (1972)
- 11) 塚本, 山村 : 低温工学 6-2, 52 (1971)
- 12) 島本 : 低温工学 5-4, 186 (1970)
- 13) H. Brechna : Proc. ICEC 1, 119 (1968)
- 14) V. E. Keilin et al : Cryogenics 9, 36 (1969)
- 15) M. Morpurgo : CERN Report 68-17 (1968), CERN Report 69-25 (1969), 3rd Int. Conf. on Magnet Technolog, (1970)
- 16) D. N. H. Chairns et al : Proc. of Low Temperature and Electric Power, 155 (1970)
- 17) 等々力ほか : 第9回低温工学研究発表会 (1972)