窒素のサブクール沸騰伝熱

久保田 裕巳[†], 高田 保之, 伊藤 猛宏, 岩熊成卓, 船木和夫九州大学大学院工学研究院 福岡市東区箱崎 6-10-1 ([†]kub@mech.kyushu-u.ac.jp)

(2002 年 5 月 10 日受理)

Boiling Heat Transfer Characteristics of Subcooled Nitrogen

Hiromi KUBOTA, Yasuyuki TAKATA, Takehiro ITO,
Masataka IWAKUMA and Kazuo FUNAKI

Faculty of Engineering, Kyushu Univ., 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku, Fukuoka 812-8581

(Received May 10, 2002)

Synopsis: The boiling heat transfer characteristics of saturated and subcooled nitrogen were investigated to clarify the effect of subcooling. The objective of this study is to supply information on the cooling design of high-Tc superconducting apparatuses such as the high-Tc super-conducting transformer. A thin wire of platinum-30%rhodium with a diameter of 0.05 mm was simultaneously used for the heater and the thermometer. The effect of space restrictions around wire on heat transfer characteristics was also examined by using transparent acrylic tubes covering thin wires, which simulated the complicated structure of a cooling system for high-Tc superconducting apparatuses. The heat transfer characteristics of subcooled nitrogen were compared with those of saturated nitrogen, and it was found that heat transfer was remarkably enhanced with the degree of subcooling.

Key words: Boiling Heat Transfer, Subcooling, Nitrogen, Space Restriction

1. 緒言

近年高温超伝導体の性能向上はめざましく、すでにこの高温酸化物超伝導体を使用し、窒素温度で作動する様々な超伝導機器が開発されている。九州大学を中心とするグループではビスマス系超伝導多芯線を集合化した大容量酸化物超伝導交流導体を使用して、1000kVA クラスの超伝導変圧器の試作開発を行っている。¹⁾ 超伝導変圧器においては、AC ロスなどによる線材の部分的発熱による気泡発生が絶縁性能低下を引き起こすという重大な問題があり、この発泡の抑制が緊急に克服すべき課題となっている。この問題を解決し熱的安定化を達成するには、サブクール領域の液体窒素が非常に有効と期待されている。前述の超伝導変圧器においても窒素はサブクール状態で循環されて

いるが、冷却設計に利用できるよう窒素のサブクール領域における伝熱特性の報告はあまり多くない。加えて、これらの機器においては冷却材が通る流路は、いわゆる制限空間であり、通常のプール沸騰よりも気泡の離脱が阻害されやすい状況にある。したがって、沸騰に及ぼす制限空間の影響も同時に把握する必要がある。

そこで、本研究では、白金-ロジウム(30%)細線を伝熱体と同時に温度計として使用して、窒素のサブクール領域における伝熱特性を測定した。また、制限空間の影響を確かめるため、細線を透明アクリル管で覆い伝熱特性を測定したので報告する。

2. 実験方法

実験装置の概略をFig.1に示す。実験装置は、液体窒素を入れる内径200mmのステンレス製内槽（試験槽）と、断熱のための外槽とから成る。サブクール液の生成は、試験槽内を所定の温度になるまで真空排気し、その後窒素ガスを補給し大気圧に保つことにより行った。なお、実験開始より終了まで（1～2時間）のバルク温度の上昇は1K程度であり、サブクール度は開始時の値とした。

試験体および熱損失校正用試験体は、この試験槽上部のフランジから糸により液体窒素中に伝熱体が水平になるように吊り下げた。Fig.2に試験体の写真を示す。試験体は上枠と下台の2層からなり、伝熱体はその間に挟み込んである。伝熱体は、Pt-30%Rh 細線（ $\phi 0.050\text{mm}$ 、長さ50mm）を3本使用した。これら3本の伝熱体のうち、1本は単独（裸）で用い、他の2本は制限空間の影響を調べるために、それぞれ外径5mm内径3mmおよび外径10mm内径5mmの亚克力管（いずれも長さ50mm）の中心に通して使用した。Pt-30%Rh 細線は、あらかじめ校正して温度-抵抗曲線を求めておいて、温度計として使用すると同時にヒータとしても使用した。なお、校正温度範囲は、68.6K～275Kであり、抵抗-温度曲線は最小2乗法による曲線近似から求めた。また、液体窒素のバルク温度はK型熱電対により測定した。なお実験は、熱流束 $1\sim 580\text{ kW/m}^2$ 、サブクール度 $0\sim 10.4\text{ K}$ の範囲で行った。

3. 実験結果

Fig.3(a)および Fig.3(b)に、それぞれ単独細線および亚克力管（内径3mm、外径5mm、長さ50mm）中の細線の飽和温度における沸騰曲線を示す。実験に

Fig.1 Experimental apparatus

おいては、はじめ熱流束を増加させながら測定を行い、膜沸騰に遷移した後、熱流束を下げながら測定を行った。Fig.3(a)には、西川・藤田²⁾、Breen & Westwater³⁾、西川・伊藤⁴⁾、Lienhald & Wong⁵⁾、Kutateladze⁶⁾の式による計算結果および Shiotsu ら⁷⁾の実験結果も併せて記す。本実験結果は、核沸騰域では西川・藤田の式による計算結果および Shiotsu らの実験結果とほぼ合っていると思われる。膜沸騰域では、Breen & Westwaterの式より西川・伊藤の式による計算結果が近いようである。また、膜沸騰域での Shiotsu らの実験結果は本実験結果と合っていないようであるが、これは線径の違いによると思われる。また、サブクールの影響を示すため、Fig.3(c)に単独細線におけるサブクール度10.4Kの沸騰曲線を、Fig.3(d)に亚克力管（内径3mm、外径5mm、長さ50mm）中の細線におけるサブクール度9.6Kの沸騰曲線を示す。なお、図中*を記した点は、測定点が安定しないうちに変化した点であり、**を記した点は、測定中に測定点が沸騰曲線上で左右に振れる特異な動きを示した点である。この時の気泡の挙動は、亚克力管内から一旦排出されかかった気泡が戻ったり出たりを繰り返しており、このためこのような特異な動きを示したと考えられる。

Fig.2 Heater Assembly

(a) Bare wire (saturation)

(b) Wire in acrylic tube (saturation)

(c) Bare wire (subcooling 10.4K)

(d) Wire in acrylic tube (subcooling 9.6K)

Fig.3 Boiling curves for bare wire and wire in an acrylic tube with an inner diameter of 3 mm

したがって、これらの点は、安定まで至っていないので定常状態とは言えない。また、図中の破線の領域は気泡の発生が観察された領域である。熱流束上昇時のこの領域の始点は発泡開始点であり、発泡開始と同時に

伝熱面温度の低下が観察される。これらの図より、単独細線およびアクリル管中の細線のいずれの場合も、サブクールの影響による極大・極小熱流束および沸騰開始時の熱流束の増加が認められる。

つぎに、飽和温度における沸騰とサブクール沸騰時の沸騰の様相を比較する。

Fig.4 および Fig.5 に、それぞれ単独細線における沸騰の様相および内径 5mm のアクリル管中の細線における沸騰の様相を写真で示す。それぞれの図において(a)および(b)は飽和沸騰における核沸騰領域 ($q_{\max}$ 近傍) および膜沸騰に移行直後の、(c)および(d)はサブクール沸騰時の核沸騰領域 ($q_{\max}$ 近傍) および膜沸騰に移行直後の沸騰の例である。

単独細線の飽和温度における沸騰においては、膜沸騰に移行直前の Fig.4(a)においては沸騰がさかんになり多くの気泡が発生している。ところが、膜沸騰に移行直後の Fig.4(b)においては現象は急変している。

細線は気泡で覆われるようになり、気泡は大きくなりまた形も変わっている様子が見える。一方、サブクール沸騰時の沸騰の様相は、飽和温度における沸騰とは全く異なり、核沸騰 (Fig.4(c))、膜沸騰 (Fig.4(d)) とともに、離脱した気泡は直ちに凝縮するため、細線上の気泡のみが観察される。

内径 5mm のアクリル管中における細線の飽和温度における沸騰 (Fig.5(a), Fig.5(b)) においては、気泡は合体しながら管内を流れ管の一端の開放口よりバルクへ排出される。いずれの端から排出されるかは水平設置時のごくわずかな傾きにより決まる。一方、サブクール沸騰時は、離脱した気泡は管内面上端に達

(a) Nucleate boiling (saturation, $q=14 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(b) Film boiling (saturation, $q=14 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(c) Nucleate boiling
(subcooling 9.5K, $q=46 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(d) Film boiling
(subcooling 9.5K, $q=33 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

Fig. 4 Bubbles in boiling for bare wire

(a) Nucleate boiling (saturation, $q=12 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(b) Film boiling (saturation, $q=15 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(c) Nucleate boiling
(subcooling 8.4K, $q=26 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

(d) Film boiling
(subcooling 8.4K, $q=36 \times 10^4 \text{ W/m}^2$)

Fig.5 Bubbles in boiling for wires covered by acrylic glass tubes (inner diameter of 5 mm)

Fig.6 Effect of Subcooling

する前に直ちに凝縮しており、細線上の気泡のみが観察されるが、気泡の大きさは、核沸騰時 (Fig.5(c)) より膜沸騰時 (Fig.5(d)) の方が大きくなっている。

Fig.6(a), Fig.6(b)および Fig.6(c)は、それぞれ単独細線、内径 5mm のアクリル管 (外径 10mm, 長さ 50mm) および内径 3mm のアクリル管 (外径 5mm, 長さ 50mm) 中の細線に対するサブクール効果を表す。いずれにおいても、核沸騰域ではサブクールがある場合でも沸騰曲線は低熱流束域を除くと、飽和液の沸騰曲線にほぼ一致している。一方膜沸騰域では、単独細線、内径 5mm のアクリル管においてはいずれもサブクールの効果はほとんど現れていないが、内径 3mm のアクリル管においては沸騰曲線に大きな差が見られ、サブクール沸騰時よりも飽和温度における沸騰の場合のほうが伝熱特性は悪くなっている。これは、飽和温度における沸騰においては、前述の沸騰の写真より、離脱気泡直径は、膜沸騰へ移る直前では 0.4mm 程度、膜沸騰では 0.6~0.8mm と見積もれるが、管内径が 5.0mm 程度より大きなアクリル管の場合は、管内半径が離脱気泡直径の 3~6 倍程度以上となるので、端面から気泡が離脱する際体気泡が細線を覆ってしまうような状態には至らないと思われる。一方、膜沸騰の場合でアクリル管の内径が 3mm 程度以下に小さくなると、管内半径が離脱気泡直径の 2 倍程度以下であり、端面から気泡が離脱する際体気泡が管内面に達し、

その結果細線が気泡で覆われる場合が多いと推測される。

制限空間の影響に関しては、Fig.7(a)および Fig.7(b)に、それぞれ飽和沸騰およびサブクール沸騰時における単独細線、内径 5mm のアクリル管 (外径 10mm, 長さ 50mm) および内径 3mm のアクリル管 (外径 5mm, 長さ 50mm) 中の細線に対する沸騰曲線を示す。飽和沸騰およびサブクール沸騰時いずれの場合も、核沸騰時には低熱流束域において多少ばらつきがあるもののさほど差は見られない。一方膜沸騰域では、飽和沸騰の場合は、単独細線、内径 5mm のアクリル管においてはほとんど差はないが、内径 3mm のアクリル管においては、伝熱特性の劣化が見られる。これは、前述のように制限空間が小さくなると端面から気泡が離脱する際体気泡が管内面に達し、その結果細線が気泡で覆われる場合が多くなるためと考えられる。また、サブクール沸騰時の場合は制限空間の影響は大きくないようであるが、これは、離脱した気泡は直ちに凝縮するため気泡の離脱の困難さの影響が出ていないためと思われる。

Fig.8 および Fig.9 は、それぞれ極大熱流束 $q_{\max}$ および極小熱流束 $q_{\min}$ をサブクール度に対して描いたものである。また、Fig.8 には以下に示す Ivey-Morris の式⁸⁾によるサブクール度の効果も併せて記す。

$$q_c / q_{co} = 1 + 0.1(\rho_L / \rho_v)^3 Ja \quad (1)$$

$$(1.22\text{mm} < D < 2.67\text{mm}, \Delta T_{\text{sub}} < 72\text{K})$$

ここに, q_c : サブクールの限界熱流束 [W/m^2], q_{co} : 飽和の限界熱流束 [W/m^2], ρ_L : 液体の密度 [kg/m^3], ρ_v : 気体の密度 [kg/m^3], Ja : ヤコブ数 [-] ($= C_{pl} \Delta T_{\text{sub}} / L$), C_{pl} : 液体の比熱 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], ΔT_{sub} : サブクール度 [K], L : 蒸発潜熱 [J/kg],

D : 伝熱面直径 [mm]である.

なお, この式は本実験結果とあまり一致していないが, これは, 本研究における細線の径が, この式における適用範囲からはずれているためであると思われる. とはいえ, q_{max} および q_{min} いずれもサブクール度の増加とともに大きくなっており, 定性的には同じ傾向を示している. なお, 相関を直線としているのは Ivey-Morris の式における直線性からである.

(a) Saturation

(b) Subcooling

Fig.7 Effect of space restrictions around the wire on heat transfer characteristics

Fig.8 Dependence of q_{max} on subcooling

Fig.9 Dependence of q_{min} on subcooling

単独細線および2種類のアクリル管いずれの場合においても、サブクール度が大きくなるにつれ $q_{\max}$ および $q_{\min}$ はどちらも増加していることがわかる。また、3つの実験条件のうち、 $q_{\max}$ は単独細線がもっとも大きく、空間を限定する管の内径が小さくなるにつれ $q_{\max}$ は小さくなっている。これは、管内の液体の温度上昇および気泡の排除が容易でなくなることに起因すると思われる。ただし、 $q_{\min}$ は3種類の実験条件において、空間限定による違いはほとんどでないようである。

4. 結言

本研究においては、白金-ロジウム(30%)細線を伝熱体と同時に温度計として使用して、窒素のサブクール領域における伝熱特性を測定した。また、制限空間の影響を確かめるため、細線を透明アクリル管で覆い伝熱特性を測定した。

その結果、サブクール度の増大により極大熱流束は2～4倍程度、極小熱流束は2倍程度大きくなること、制限空間が伝熱特性に影響を及ぼすことなどがわかった。したがって、冷媒としてサブクールの液体窒素を

使用することは気泡発生を抑える上で効果的であることが確かめられた。

最後に、富士通株式会社の桑田武則君、大学院生の小清水孝夫君が、実験・整理を手伝ってくれたことを記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. Funaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11-1** (2001) 1578
- 2) 日本機械学会：伝熱工学ハンドブック (1993) 164
- 3) B.P. Breen and J.W. Westwater: Chem. Eng. Prog. **58-7** (1962) 67
- 4) 日本機械学会：伝熱工学ハンドブック (1993) 169
- 5) J.H. Lienhald and P.T.Y. Wong: ASME Paper No.63-HT-3 (1963)
- 6) 日本機械学会：伝熱工学ハンドブック (1993) 171
- 7) M. Shiotsu, et al.: Adv. Cryog. Eng. **35** (1990) 437
- 8) 日本機械学会：伝熱工学ハンドブック (1993) 172