

長い間隙中におけるヘリウム沸騰熱伝達

Boiling Heat Transfer to Liquid Helium in Long Narrow Channels

尾形 久直* 佐藤 新太郎*

Hisanao Ogata

Shintarô Satô

要 旨

大形超電導マグネットの安全運転に大きな意味をもつコイル冷却チャンネルをモデル化し、そのチャンネルの間隙(かんげき)、長さおよび傾斜角を変えて沸騰の臨界熱流束 q_c を測定した。チャンネルは幅 1 cm, 長さ 5~40 cm で間隙 1~5 mm および開放とした。伝熱面の向きは、上向き、下向き、横向きの 3 組で、伝熱面は垂直から水平まで傾斜可能とした。実験の結果、鉛直なチャンネルの q_c は一つの無次元変数で整理されること、傾斜したチャンネルには浮力による二次流れの影響が現われることがわかった。

1. 緒 言

超電導装置は常電導状態から超電導状態への転移温度以下では電気抵抗がゼロとなり、その状態においては全く損失のない電力機器が得られる。しかしながら、その転移温度は 10~20°K ときわめて低く、そのため大気圧における沸点が 4.2°K の液体ヘリウム中で冷却するのが普通である。現在では、安定な冷却を行なうために超電導線に多量の高純度銅を密着させるとともに、それらが液体ヘリウムに接するよう巻線中に多数の冷却チャンネルを設ける方法がとられている。

本研究は、この長くてかつ狭い間隙からなる冷却チャンネルをモデル化して、大気圧下における飽和液体ヘリウムの自然対流下の沸騰熱伝達を調べたものである。ここでは、チャンネル中に設けたヒータの温度が熱負荷の上昇とともに急激に上昇し始めるときの熱流束を「臨界熱流束 (Critical heat flux)」とみなし、この臨界熱流束がチャンネルの間隙や長さ、あるいは傾斜角によってどのように変わるかを測定した。流れの状況にもよるが、一般に臨界熱流束は核沸騰から膜沸騰へ遷移するときの熱流束をさすと考えてよい。

間隙中の沸騰ヘリウムの臨界熱流束については、最初に Wilson 氏⁽¹⁾によって実験が行なわれたが、その範囲は長さ 25 cm 以下、間隙 2.5 mm 以下で実用上不じゅうぶんである。Lehongre 氏ら⁽²⁾は管状、同軸円筒状、平行平板状の 3 種で実験したが、実験の方法や装置はわれわれの場合と類似した点が多く、のちに比較検討する。なお、傾斜したチャンネルについての報告は全くない。われわれはその熱伝達機構を簡単な仮定のもとに解析し、定性的にはかなりよく実験事実を説明することができた⁽³⁾。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた冷却チャンネルのモデルは図 1 に示すように、長方形断面の液体ヘリウム流路を有し、その一側面から加熱される。構造は 2 本の角柱が相対向し、一方の角柱はステンレス鋼製でその表面に電氣的、熱的に絶縁されたハク状ヒータ (幅 10 mm, 厚さ 50 μ のコンスタンタンハク) を接着して伝熱面としている。一方の角柱はベークライト製で、チャンネルの間隙を調節する。ヒータの温度測定には 0.2 mm ϕ の銅コンスタンタン熱電対を採用し、チャンネルの上端部、中央部、下端部のそれぞれをヒータ背面にそう入し、アラライトで固定しており、冷接点を液体ヘリウム温度とした。

実験は鉛直なチャンネルの場合 (実験 I) と傾斜チャンネルの場合 (実験 II) について行なわれた。チャンネルの長さ L は実験 I では 5 cm, 10 cm, 20 cm および 40 cm の 4 種類、実験 II では 22 cm のみとした。チャンネルの間隙 d はいずれの場合も 1 mm, 2 mm,

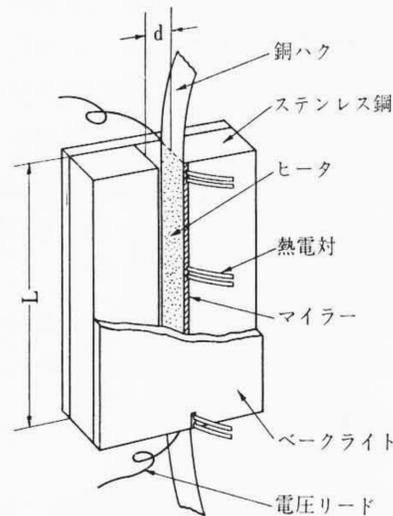
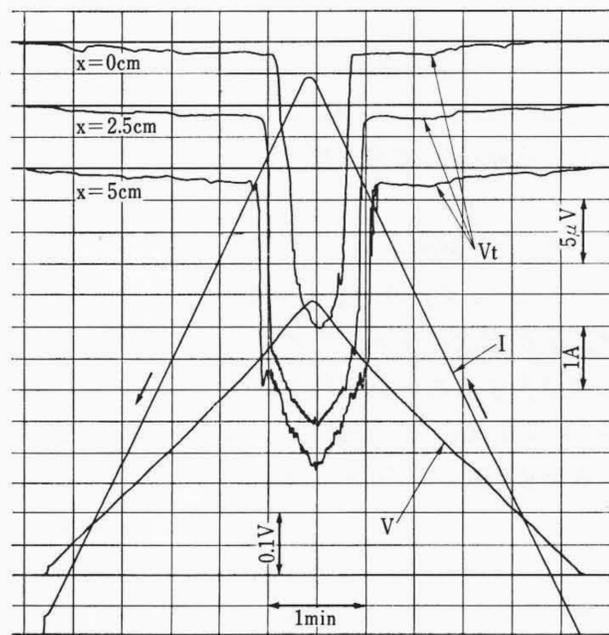


図 1 冷却チャンネルのモデル



$L=5\text{ cm}, d=5\text{ mm}$

I: ヒータ電流, V: ヒータ端子電圧, V_t : 熱電対起電力

図 2 レコーダ・チャートの一例

3 mm, 4 mm, 5 mm および開放状態の 6 種類である。

電流、電圧および各点の温度は多ペンレコーダで同時に記録された。レコーダ・チャートの一例は図 2 に示すとおりである。ヒータを徐々に加熱していくと、その表面で液体ヘリウムの沸騰が始まり、ヒータの温度はゆっくり上昇するが、突然急に上昇しはじめる点があり、この点が q_c を与える。そのときのヒータと液体ヘリウムとの温度差は 0.1~1°K, 熱漏えいは 0.01 W/cm² 以下であった。

* 日立製作所中央研究所

3. 実験の結果と解析

3.1 鉛直なチャンネルの場合 (実験 I)

鉛直なチャンネルの臨界熱流束の測定結果は図3に示すように、一つの無次元数 x/d_e で表わされ、チャンネルの全長 L の違いによる影響はほとんどみられなかった。ここに、 x はチャンネル入口からの距離、 d_e は等価直径で、 S を流路断面積、 P を加熱ペリメータとすれば $d_e = 4S/P$ で表わされる。この結果は Lehongre 氏の実験とよく一致している。

この種の問題は、垂直な一様加熱管中の自然対流による沸騰熱伝達問題に帰着するわけであるが、Wilson 氏の引用した Sydorjak, Roberts 両氏⁽⁴⁾の解析方法は間隙が 0.5~1 mm 以上ではあまり実験と一致しない。また狭い間隙の沸騰を扱った石橋氏ら⁽⁵⁾の研究は対象流体が異なり、バーンアウトまで言及していない。そこで、われわれは簡単な仮定を立てて実験事実の説明を試みた。

いま、気泡の上昇速度 U はチャンネル入口からの距離 x によらず一定と仮定する。この仮定は静止液体中の独立気泡の上昇に関しては厳密に正しく、したがって比較的広い間隙のチャンネルについてはほぼ成立していると考えられる。この点 Sydorjak 氏らは気体と液体が同時に運動するとして解析しており、その結果が広い間隙に適用できない理由の一つであろう。

したがって、主流の蒸気(体積)含有率 f は x の一次関数である。境界条件として入口 ($x=0$) において $f=0$ とすれば、

$$f(x) = \frac{qPx}{U\rho_g\lambda_g S} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_g は蒸発ガスの密度、 λ_g は蒸発潜熱である。

各点の q_c は、 f によって決定され、 $f=0$ における q_c を q_0 、 $f=1$ における q_c を 0 とすれば、

$$\frac{q_c}{q_0} = 1 - f \dots\dots\dots (2)$$

この仮定は、いわゆる充満理論を応用したもので、主流の気泡が、伝熱面に発生した気泡の離脱を阻害していると考えられる。

(1)式における q を q_c に置き換え、(2)式に代入すると、

$$q_c = \frac{1}{C_1 + C_2(x/d_e)} \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここに、 $C_1 = 1/q_0$ 、 $C_2 = 4/(U\rho_g\lambda_g)$ 。

(3)式は、 q_c が形状パラメータ x/d_e のみの関数で表わされ、 x/d_e とともに単調減少することを示している。

実験データより C_1 、 C_2 を求めると、 $C_1 = 1.67 \text{ cm}^2\text{W}^{-1}$ 、 $C_2 = 0.0956 \text{ cm}^2\text{W}^{-1}$ が得られ、図3に示すようによく実験と一致する。

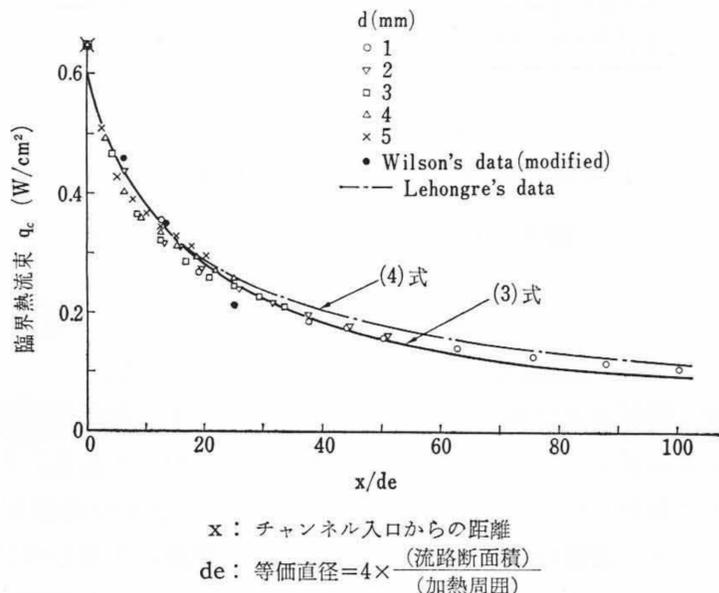


図3 鉛直チャンネルの臨界熱流束

Lehongre 氏の得た経験式は、

$$q_c = \frac{1}{1.7 + 0.125(x/d_e)^{0.88}} \dots\dots\dots (4)$$

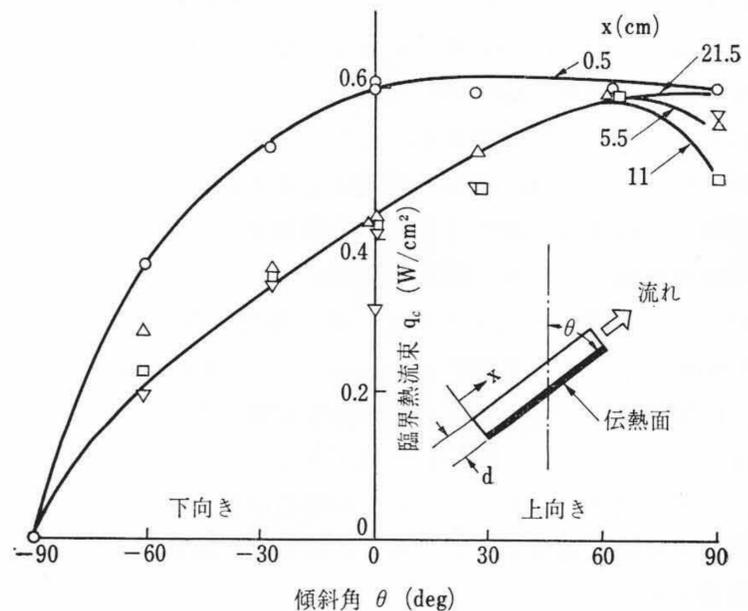
であり、われわれの求めた(3)式とよく似ている。

C_1 および C_2 から逆に q_0 および U を計算すると、 $q_0 = 0.6 \text{ W/cm}^2$ 、 $U = 124 \text{ cm/s}$ となった。

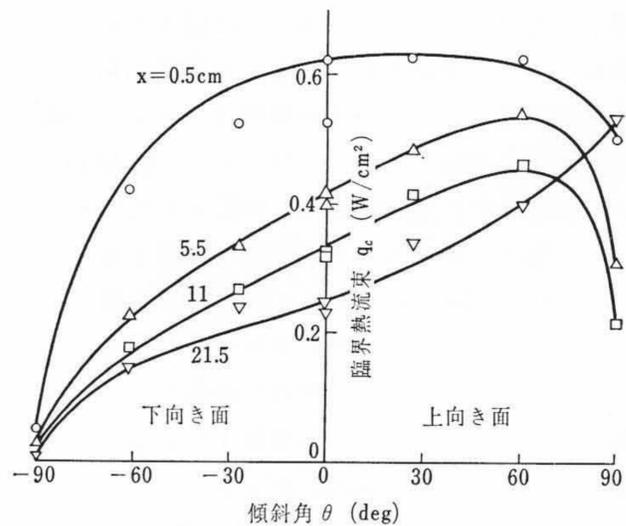
3.2 傾斜したチャンネルの場合 (実験 II)

傾斜したチャンネルの臨界熱流束は図3のように統一して整理することができなかつたので、その典型的なデータを図4および図5に示すことにする。図4はチャンネル中の伝熱面の向き、つまり熱流の方向が上(または下)向きの場合であり、図5は伝熱面が横向きすなわち面自体が鉛直な場合である。上(下)向き面は、一般に予想されるように面の上向き度が大きいほど高い冷却性を示す傾向がある。ただし、水平状態では端部を除いて q_c は低下する。おそらく気泡の流れが悪くなるためであろう。横向き面でも、水平状態ではやはり q_c は小さくなる。注目すべきは、 $\theta = 0$ すなわち鉛直状態よりも $\theta = 30 \sim 60$ 度のときに q_c が極大値をとる傾向が、 d や x の大きいところでみられた。これらは浮力による二次流れの影響であろう。

鉛直方向の気泡の速度を U とすれば、傾斜チャンネルの軸方向の気泡の流れの速度は $U \cos \theta$ となる。二次流れがなければ、(3)式における U を $U \cos \theta$ で置き換えればよいのであるが、実際ほとんどの場合不じゅうぶんである。図6は二次流れのあるときのチャンネル中の気泡流動様式を示したものである。蒸気含有率はいわば「気泡密度」であるから、傾斜した伝熱面近傍の「気泡密度」は伝熱



(a) L=22cm, d>30mm (Open)



(b) L=22cm, d=2mm

図4 傾斜チャンネルの臨界熱流束 (上, 下向き面)

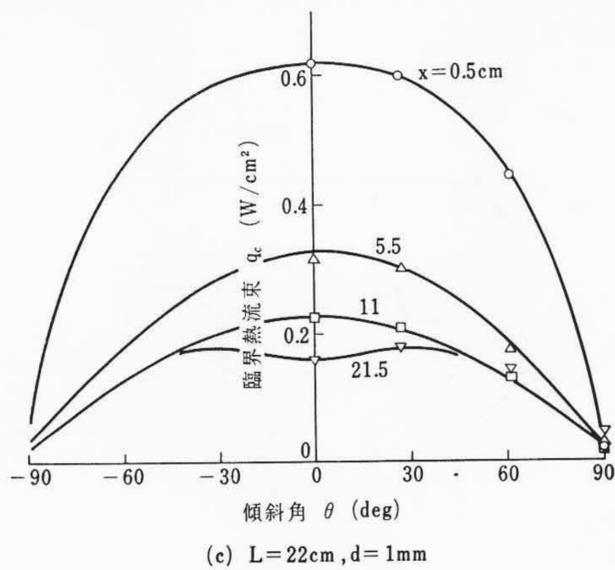
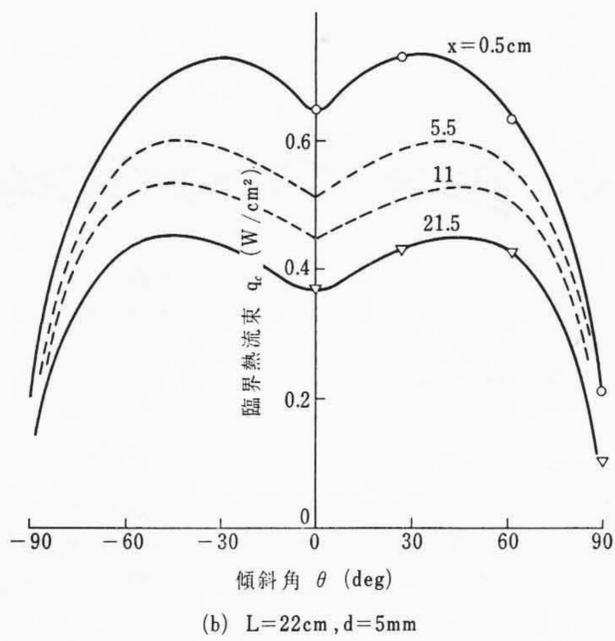
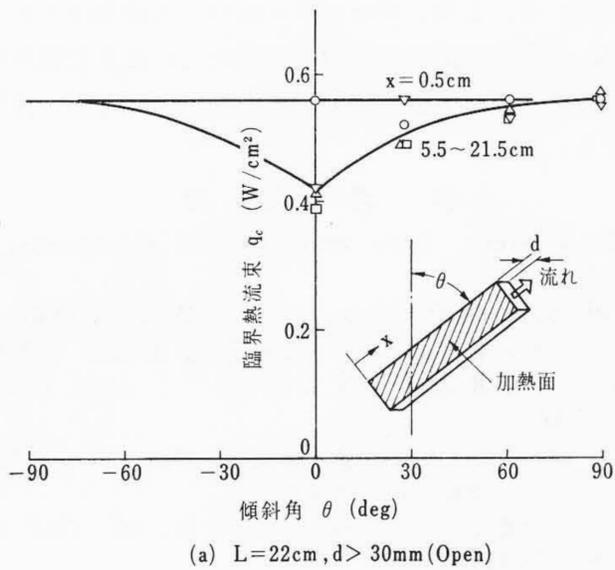


図5 傾斜チャンネルの臨界熱流束 (横向き面)

面法線方向に加わる浮力によって「圧縮」または「膨張」の効果を受けるものと考えられる。鉛直方向の浮力を F とすれば、上向き伝熱面法線方向に加わる力は $-F \sin \theta$ であり、最も簡単な仮定はこれらの「圧縮」「膨張」が力 $-F \sin \theta$ に比例すると考えることである。すると、

$$f(x) = \frac{qPx}{U \cos \theta \cdot \rho_g \lambda_g S} (1 - \beta \sin \theta) \dots (5)$$

したがって、

$$q_c = \frac{1}{C_1 + C_2 \left(\frac{x}{d_e} \right) \frac{1 - \beta \sin \theta}{\cos \theta}} \dots (6)$$

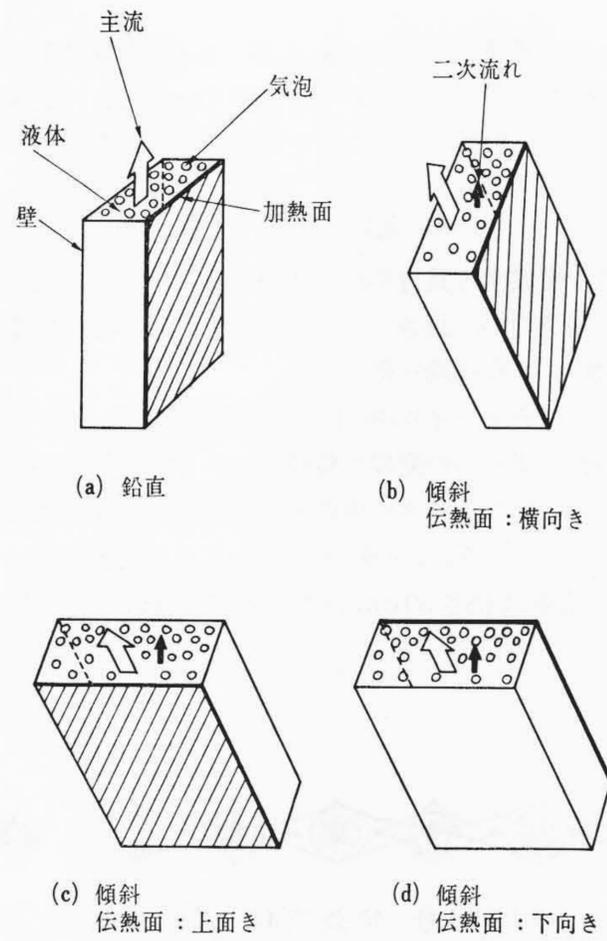


図6 チャンネル中の気泡の流動状態

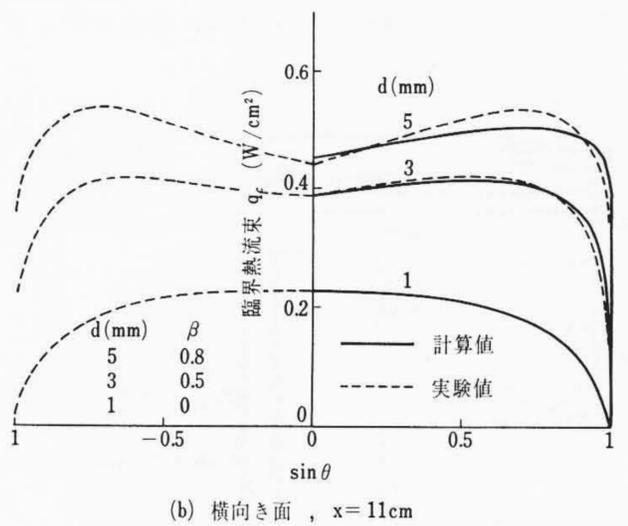
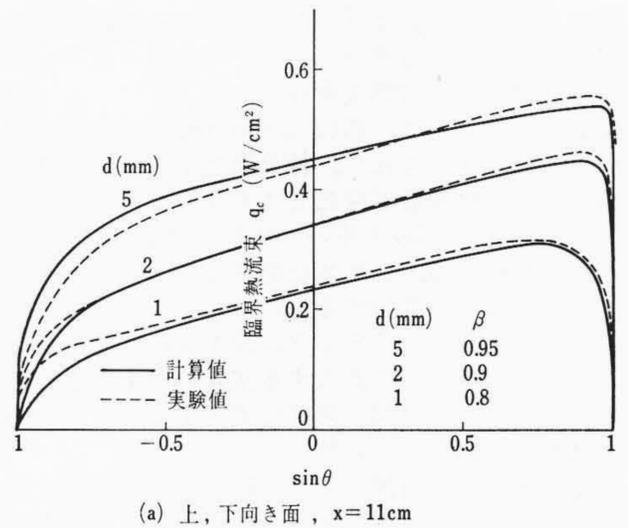


図7 実験値と計算値の比較

ここに、 β は二次流れの効果を表わす比例係数で $0 \sim 1$ の値をとる。

(6)式において、 β を適当に選べば、図7のように比較的实验結果と一致する曲線が得られる。 β の値が大きいほど二次流れの影響

は大きい。

最後に、全く異質なものではあるが、 $q_c-\theta$ 曲線の形が、水平円管内層流の温度分布⁽⁶⁾とときわめてよく似ていること、いずれも浮力による二次流れの影響であることを付け加えておきたい。

4. 結 言

狭い間隙で構成する長方形断面状のチャンネル中における局所臨界熱流束が間隙の幅、長さ、傾斜角とともにどのように変化するかを測定し次のような結論を得た。

- (1) 鉛直なチャンネル中の臨界熱流束はチャンネルの全長にかかわらず一つの変数で整理され、(4)式で表わされる。
- (2) 傾斜したチャンネル中の臨界熱流束は、浮力による二次流れの影響を受け、(6)式でおおよそ説明される。

これらの結果は長さ 50 cm 以下、間隙 1 mm 以上の場合に適用

される。現在、もっと長いチャンネルについて研究中である。

終わりに、本研究の推進に尽力していただいた日立製作所中央研究所木村浩氏ならびに実験に協力していただいた今川一重氏に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) M.N. Wilson: Pure and Applied Cryogenics, 6, 109 (1966)
- (2) S. Lehongre et al: Proc. I.C.E.C. 2, 274 (1968)
- (3) 尾形, 剣持, 佐藤, 木村: 低温工学, 4, 219 (1969)
- (4) S.G. Sydoriak and T.R. Roberts: J. Appl. Phys., 28, 143 (1957)
- (5) 石橋, 西川: 日本機械学会論文集 33, 121 (昭42), 34, 150 (昭43), 34, 743 (昭43)
- (6) 森, 二神ほか: 日本機械学会論文集, 30, 1387 (昭39), 32, 88 (昭41)



特 許 の 紹 介



特許第 594524 号 (特公昭45-17946号)

本 田 寿 一・森 竜 太 郎
松 村 帝 男・吉 田 貞 夫

液 体 燃 料 燃 焼 用 ポ ッ ト 形 バ ー ナ

ポット形バーナは、底面に流入した液体燃料を蒸発させて、これに周囲の穴から供給される空気を混合して、徐々にバーナ高方へ移動させてバーナ直上で定常燃焼を行なう。

この際要望されることは、芯(しん)の燃焼(種火燃焼)で底面の液体燃料が効率よく加熱されて、種火燃焼から定常燃焼への立上りが良好であって、供給油量が変化しても良好な燃焼を行なうことである。しかし、従来のポット形バーナは、供給油量のわずかな変動、通風条件の変動があるとススを発生しやすい欠点があった。

本発明は、上記欠点を解決するもので、バーナ底面中央部から定常燃焼時の二次空気を流入するように筒を設け、定常良好燃焼域を拡大した。かつ、中央部から流入する空気の一部を、底部に設けた補助バーナ内に、バーナ外周に向けて流入するようにして、種火燃焼の良好燃焼域をも拡大せしめた。

図1は、本発明の一実施例であり、図2は、本発明になる補助バーナを拡大して示した斜視図である。図3は、従来のポット形バーナと本発明のポット形バーナの燃焼性能を比較した一例である。図中I'は、従来のバーナ、II'は本発明のバーナの定常燃焼性能である。図3に示すように、本発明のバーナは、従来のバーナに比較し

て良好燃焼領域が著しく広い。

以上説明のように、本発明は供給油量変動に対しても、通風条件の変動に対しても、定常、種火燃焼ともに良好燃焼を行ない、しかも種火燃焼から定常燃焼への移行が早いポット形バーナを提供するものである。

なお、本発明は、イギリス、アメリカ、フランスで登録になっており、登録番号は、イギリス-1118376、アメリカ-3428407、フランス-1494589である。(吉田)

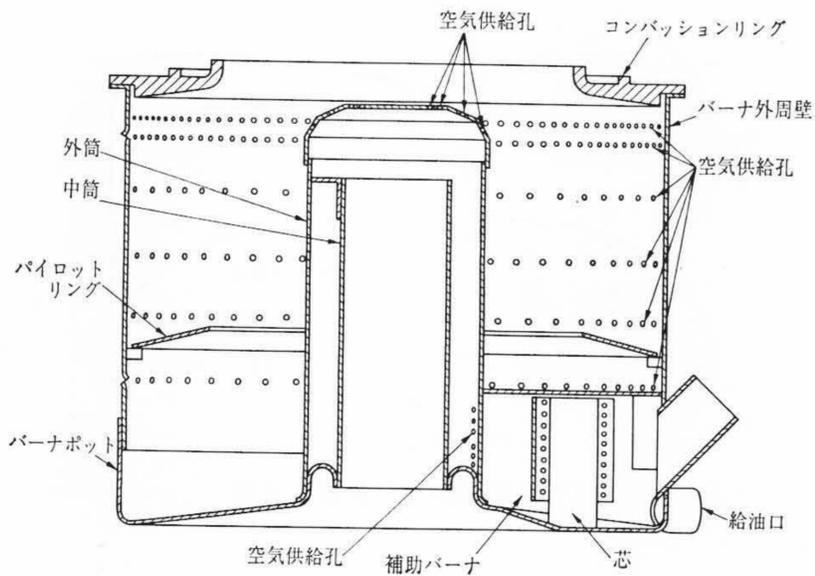


図 1

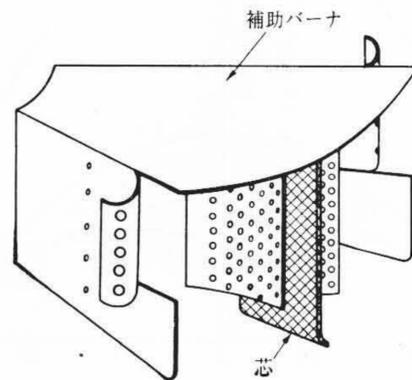


図 2

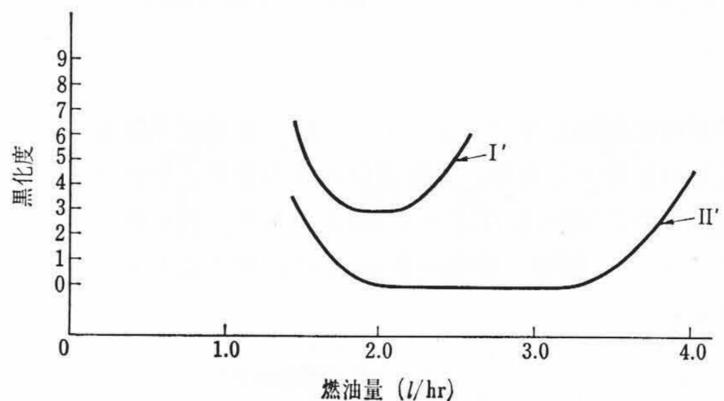


図 3