

論文の内容要旨

論文題目 パワーモジュール用高性能冷媒流自然循環制御式
小型沸騰冷却器の開発に関する研究

氏名 鈴木昌彦

半導体電力制御素子を用いたパワーモジュール (PM) はますます高集積化、高容量化の傾向にあり、PM 用冷却器に対して、1) 体格・重量の低減、2) PM 制御素子間の温度ばらつき低減、3) 電力制御機器としてのメンテナンスの容易化 (PM の縦置き・多段取付け)、4) 低コスト化、に関して強い要望がある。

そこで、本研究では、図 1 に示す開発コンセプトである、自動車用の高性能積層型放熱コアと、PM を多段取付け可能で簡素な平面一体構造の縦置き薄型冷媒槽とを組み合わせた密閉型多管式二相熱サイフォン構造からなる高性能冷媒自然循環制御式小型沸騰冷却器を開発することを目的とした。

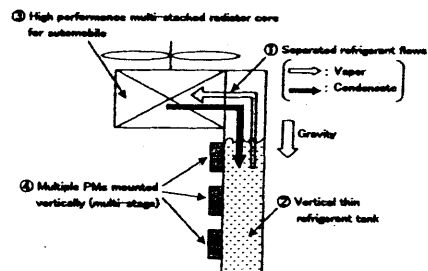
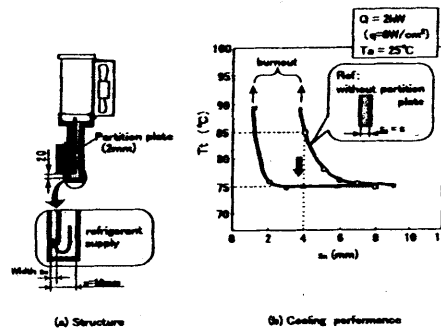


図 1. 開発コンセプト

開発コンセプトを実現するための主要課題は、少ない冷媒量で放熱性能を確保できる薄型冷媒槽の開発である。図2に示すように冷媒槽内で冷媒を自然循環させることにより放熱性能の低下を回避しつつ薄幅化できるが、本研究の対象とする簡素な平面一体構造の薄型冷媒槽で放熱性能を改善し具体的な冷却器として設計した報告例は見当たらない。

図2. 冷媒自然循環による冷媒槽の薄幅化



そこで、開発コンセプトの設計指針を得るために、図3の平面一体構造の冷媒自然循環モデルにより、冷媒自然循環が形成される条件は、熱入力部の内壁が冷媒液と熱的に接触 ($h_3 < h_2$) しており、かつ、冷媒循環流路の総圧損 $\Sigma \Delta P_i$ が冷媒封入量からきまる最大ヘッド差 Δh_0 以下 ($\Sigma \Delta P_i < \rho \cdot g \cdot \Delta h_0$) であることを明確にした。さらに、図4に示す試作品の実験結果から、冷媒循環流路の総圧損を支配する冷媒蒸气流路の最小面積 S_{min} が小さくなると $\Sigma \Delta P_i > \rho \cdot g \cdot \Delta h_0$ となり、冷媒自然循環が阻害されバーンアウトに到ることを検証した。

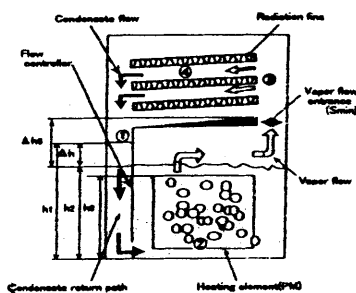


図3. 平面一体構造の冷媒自然循環モデル

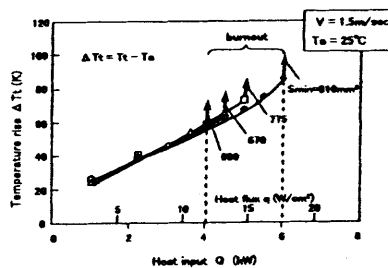


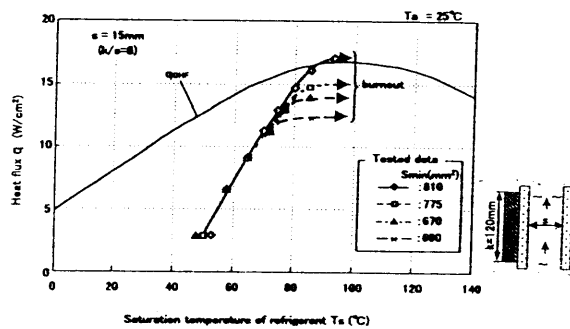
図4. 冷媒自然流路の最小面積がバーンアウト熱流束に及ぼす影響

つぎに、門出ら¹⁾が提案している加熱面長さ k と冷媒槽幅 s との比 k/s を変数とする循環系の限界熱流束整理式の実効性を本研究の実システムにおいて確認

し、この整理式でもとめた限界熱流束 q_{CHF} と図 4 の各 S_{min} に対応するバーンアウト熱流束を図 5 で比較した。この結果、1) 冷媒循環流路の抵抗が小さい場合、バーンアウト熱流束は整理式の q_{CHF} とほぼ一致する、2) 冷媒循環流路の抵抗が大きい場合、バーンアウト熱流束は q_{CHF} よりも小さくなり、 $\sum \Delta P_i$ の影響が支配的になる、ことがわかった。

以上の知見に基づき、バーンアウトを回避する設計限界が、最大ヘッド差 Δh_0 以下、限界熱流束 q_{CHF} 以下の領域であることを明らかにした。

図 5. 最小面積 S_{min} がバーンアウト熱流束に及ぼす影響



つぎに、PM 単段取付けと目的とする PM 多段取付けの挙動の違いを実験的に調べ、PM 多段取付けでは冷媒槽を薄くすると、図 6 に示すように PM 重力方向の過熱度 ΔT_B とばらつきが大きくなるが、冷媒自然循環制御により改善が可能であることと、熱負荷急減時に沸騰部からの伝熱により冷媒戻り通路内で気泡が合体成長・逆流し再負荷時に自然循環流が停止することを明らかにした。改善策として図 7 に示す発泡を利用した熱遮断通路を提案し、冷媒戻り通路への伝熱を抑制することにより自然循環流の停止を回避できることを実証した。

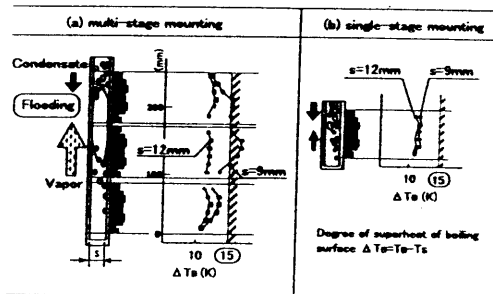


図 6. PM 多段取付けと単段取付けの過熱度と分布の違い

$Q=1.25kW, T_a=25^\circ C$
 $(q = 5W/cm^2)$



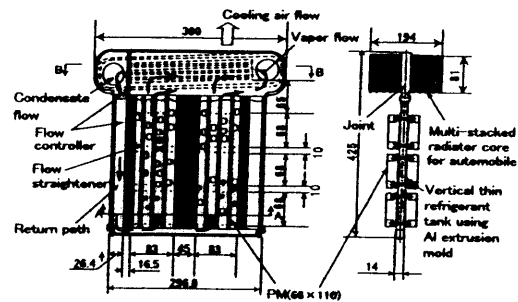
図 7. 発泡を利用した熱遮断通路

さらに、上記の改善策を適用し最適化した PM 多段取付け冷媒槽を用いた実シ

ステムにおいても、門出ら¹⁾の限界熱流束整理式に実効性があることを確認した。

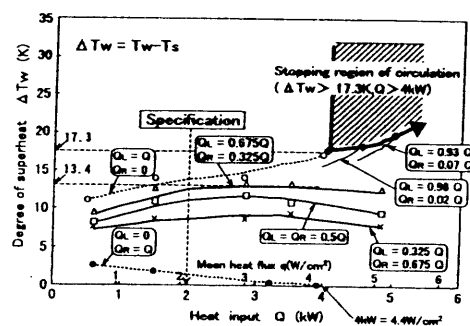
以上で得た設計指針に基づき、PM2列3段(12個)取付け、定格総入力熱量2kW(2.2W/cm²)、PM取付け面の最高温度上昇38K以下を仕様とする図8に示す小型沸騰冷却器を設計・評価した。この結果、開発目標である体格11ℓ(対実用ヒートパイプ1/2)・重量10kg(1/2)・PM取付け面の温度ばらつき5K(1/3)以下に対して、それぞれ5.5ℓ・5.3kg・2.5Kを達成できた。

図8. 開発した小型沸騰冷却器



さらに、開発した小型沸騰冷却器の性能限界を把握するために、PM間の発熱量の比率を変えて冷媒戻り通路壁面の過熱度 ΔT_w の測定と可視化実験をおこない、循環流の安定限界を求めた。図9より、冷媒戻り通路側の発熱量の比率が93%以上と極端に片寄り、かつ、総入力熱量が定格の2倍(4kW、平均熱流束4.4W/cm²)以上の条件で、冷媒戻り通路内の発泡により限界熱流束以下でも冷媒自然循環が停止しバーンアウトに到ることがわかった。今後より厳しくなる熱的要求に対して、本研究で提案した沸騰部から冷媒戻り通路への伝熱を抑制する熱遮断通路の適用や、冷媒槽内の伝熱性能を向上する冷媒整流板の最適化などにより、さらなる改善が期待される。

図9. 冷媒自然循環の安定限界



1) 門出, ほか2名, 日本機械学会論文集 B, 47-423(1981), 2181