研究成果報告書

研 究 題 目		次世代パワー半導体の普及を支える低電費型ヒートシンクの開発	実 施 年 度 H27, 28 年度
代 表 研 究 者	所 属	山陽小野田市立 山口東京理科大学	
	氏 名	結城 和久 印	
<p>1. 研究の目的・背景</p> <p>近年、電気エネルギーの有効かつ効率的な利用を実現するパワーエレクトロニクス技術が注目されている。特に、次世代パワー半導体材料として期待されている SiC が実用化の段階に入り、更なる省エネルギー化や低炭素社会への貢献が期待されている。しかしながら SiC の実用化のためには絶縁、耐久性、信頼性の確保だけでなく、デバイスからの放熱を制御し SiC の動作温度を最適温度領域に確保する必要がある。特に次世代型電気自動車や燃料電池車の車載用インバータでは 300 W/cm^2 を超える発熱が予想されており、従来の液冷技術ではポンプ動力に依存した電力浪費型の冷却システムとなってしまう。</p> <p>一方、申請者は、熱負荷が 100 W/cm^2 を超えるエネルギー機器に対する冷却技術として液体が有する蒸発潜熱ポテンシャルを最大限に活用するポーラス体を用いたヒートシンクの開発に取り組んできた。過去の研究では、過剰に発生した蒸気がポーラス体内で停滞するのを避けるため、ポーラス体内に蒸気排出用のサブチャンネルを試験的にポーラス内に装荷したところ、$\Phi 10\text{mm}$ の狭い面積ではあるが最大 816 W/cm^2 の冷却性能を実証した。この知見は、ポーラス体内での広い伝熱面積を活用して蒸発伝熱を促進するためには、ポーラス体内における蒸気の過剰成長を抑制し、生成蒸気をポーラス体外へ積極的に排出することが重要であることを明らかにしている。</p> <p>そこで本研究では、次世代 SiC 型車載用インバータのヒートシンクとして実装可能なポーラスヒートシンクの開発に取り組む。特に上述の蒸気排出コンセプトを踏襲し、車載スペースを節約するため小型のヒートシンクを設計開発し、その伝熱性能について評価する。具体的には、以下の2つの項目について取り組む。</p> <p>① 開発するヒートシンクでは冷却液は熱流に対向して流入する。液流と蒸気流のポーラス体内での圧力損失を極力低減し、極少量の液供給で高い冷却能力を達成するため、薄肉タイプのポーラス体を使用する。これによりポーラス体内へのサブチャンネルの装荷が難しくなるため、ポーラスの上面にマルチ貫通孔がついた液供給・蒸気排出プレートを設置する。貫通孔から流入した液はポーラス体内で蒸発し、再び隣接する貫通スリットを通過して流出する。</p> <p>② ヒートシンク内の液流・蒸気流の状態を数値解析し、提案するヒートシンクに適したポーラス体を提案する。報告者が有する二相流熱流体コードを改良し、粒子焼結体内の熱流動場を解析し、その問題点について明らかにする。</p>			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

① 小型ポーラスヒートシンクの設計とポーラス体内二相流数値シミュレーション

今回開発するヒートシンクでは、前述の気液セパレータに設置される貫通孔から冷却液がポーラス体内へ噴出し、冷却液はポーラス体内を通りながら熱を受け取って相変化する。更に生成された蒸気は伝熱面グループを介して隣接する蒸気排出スリットからヒートシンク外へ流出する。この冷却構造を達成するため、3層構造（ボトムプレート、スペーサ、カバープレート）のヒートシンクを開発した。ボトムプレートが上述の気液セパレータとして機能し、5つの液供給流路（幅 1.0 mm）には合計 39 個の液供給孔（直径 1.0 mm）が設けられている。更に隣接して幅 1.5 mm の蒸気排出スリットが 4 本設置されている。以上の構造により、ヒートシンクへ流入した冷却液は、5 流路に分配された後、直径 1.0 mm の液供給孔を介してポーラス体内へ噴出する。ポーラス体内で生成された蒸気は蒸気排出スリットから流出した後、カバープレートの内側に設けられた流路を介してヒートシンク外へ流出する。この流路構造により、直径 20mm の伝熱面に対して厚さ 12 mm の小型ヒートシンクを設計できた。一方、この冷却体系において粒子焼結型ポーラス体内の二相流シミュレーションを実施したところ、生成蒸気が液供給を妨げる可能性を確認したため、一方向性の気孔構造を有する Lotus 銅（平均孔径 0.4 mm、気孔率 36 %）を導入することを決定した。

③ 小型ポーラスヒートシンクの伝熱性能と考察

冷却試験に先立ち、ヒートシンクの流量特性を評価した。ポーラス体を装荷することで、圧力損失が流量 0.5 L/min で 1.8 倍に増大したが、ポーラス体装荷による圧力損失増大を最小限に抑えることができた。冷却性能に関しては、ポーラスを装荷した場合、单相伝熱領域（沸騰・蒸発無し：流量 0.5 L/min）におけるポーラス装荷時の冷却性能（熱伝達率）が、装荷しない場合と比べ 2.1 倍にも上昇した。一方向性ポーラス体の利用により、冷却液が直接的に伝熱面近傍に流入することの効果が高いことを実証した。一方、相変化が激しくなる二相領域でも、ポーラス体を装荷しない衝突噴流群よりも沸騰熱伝達性能および限界熱流束が非常に高いことを実証した。具体的には、流量 0.5 L/min では限界熱流束が 260W/cm²、流量 1.0 L/min では最大熱流束 480W/cm²を達成した。特に後者の値は沸騰冷却限界ではないため、更に向上する可能性が高い。特筆すべき事項として、ポーラス体を装荷しない場合、入口圧力が激しく変動するのに対し、ポーラス体を装荷する場合では入口圧力の大きな変動が抑制されていることを確認した。ポーラス体装荷の効果が冷却促進にとどまらず、特に相変化が激しい場合の装置健全化として機能することが期待できることも明らかにした。

④ 達成度について

今回の助成研究では、申請当初の予定通り、小型のヒートシンクを設計製作し、その冷却性能を実証できた。更にポーラス体内部での二相流数値解析から一方向性を有するポーラス体を選定し、結果として目標値となる 300W/cm²を低いポンプ動力で達成することができた。ヒートシンク構造や冷却条件を変化させた実験が時間の都合上実施できず、ヒートシンクの最適化まで至らなかったが、達成度としては 80%ほどである。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

研究経費に関しては、概ね予定通りに執行した。主たる設備品・消耗品として、温度計測ロガー、圧力計測ロガー、高温流体用循環ポンプ、羽根車式流量計、圧力センサー、を購入した。流量計に関しては、研究申請当初は電磁流量計を購入する予定であったが、高温環境での使用に問題があることが判明したため、高温仕様の羽根車式流量計を特注で購入した。また圧力計に関しては圧力変動を正確に計測するため、当初予定のブルトン管式圧力計ではなく歪ゲージ式の圧力センサーを購入した。その他、ヒータ、配管部品、断熱材などを購入した。また、予算計上はしていなかったが、ポーラス体と加熱面との接触熱抵抗の評価と軽減が本ヒートシンクの開発に大きく影響することが判明したため、ガス流れでの伝熱試験を実施するためガス流量計と窒素ガスを購入した。更にヒートシンクからの生成蒸気を可視化するためのカメラを新たに購入した。旅費に関しては、電子機器サーマルマネジメントに関連する研究会および学会にて使用した。研究二年目において成果発表を予定していたが登録に合わなかったため、これ以外の旅費の予算執行はない。但し、本研究の成果については平成 29 年度での国内外での学会に公表予定であり（既に国内学会については発表済、国際会議についてはアブストラクト受理済み）、これについては申請者の研究費を使って参加する予定である。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、次世代の SiC 型車載用インバータのヒートシンクとして、一方向性ポーラス体を用いた小型ヒートシンクを設計・製作し、特にその单相伝熱性能および沸騰/蒸発伝熱性能を評価した。单相伝熱領域においてポーラス体装荷時の熱伝達性能が最大 2.1 倍に増大するとともに、相変化領域についてもポーラス体を装荷しない衝突噴流群よりも沸騰熱伝達性能および限界熱流束が非常に高く、特に流量 1.0 L/min では目標値である 300 W/cm^2 を超える最大熱流束 480 W/cm^2 を達成した。この条件であれば、熱設計として安全率 1.5 を達成できるため、実用化へ向けて大きく進展したと言える。

今後の課題として、ヒートシンク構造や冷却条件を変化させた場合の冷却性能を取得し、ヒートシンクの最適化をはかることが重要である。この際、ヒートシンク部で発生する圧力損失を更に低減する努力が必要である。本研究の最終フェーズでは、実際の冷却液となるエチレングリコール系のロングライフクーラントを用いた冷却試験を実施する。特に、 300 W/cm^2 の熱負荷に対して 1 W 未満のポンプ動力を達成できれば、本冷却技術の優位性がより明確になるため、企業等との共同研究を経て実用化を目指すことが可能である。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

<国内学会発表（発表済み）>

- ・ 結城和久, 辻利佳子, 高井貴生, 木伏理沙子, 海野徳幸, 鈴木康一, 一方向性ポーラス銅を用いた小型冷却デバイスの開発, C115, 第 54 回日本伝熱シンポジウム,(2017).

<国際会議発表（論文アブストラクト受理済み）>

- ・ K. Yuki, R. Tsuji, K. Takai, S. Aramaki, R. Kibushi, N. Unno, K. Suzuki, Heat transfer performance of a small cold plate with uni-directional porous copper for cooling power electronics, ICENFHT 2017 : 19th International Conference on Experimental and Numerical Flow and Heat Transfer, 2017 (Sydney, Australia, December 4 - 5, 2017).

<学術論文投稿>

- ・ Journal of Electronics Packaging もしくは Journal of Enhanced Heat Transfer
へ投稿予定（平成 29 年度中）