

論文の要旨

2024年 11月 28日

氏名 吉村 仁志



論文題名 車載インバータ向け流動制御型シェブロンフィンによる
サブクール沸騰冷却性能向上に関する研究

論文要旨

地球温暖化の防止を背景に、自動車のCO₂排出量低減に貢献できる電気自動車の販売台数増加が見込まれている。電動車両に使用されるインバータは小型化・高出力密度化が求められ、インバータの主コンポーネントであるパワーモジュールの発熱密度（以降、熱流束）は10 MW/m²を超えると予想される。この値は一般的な産業機器では人類が経験したことのない値であり、そのためパワーモジュールの高熱流束化に対応可能な冷却技術の開発が必要不可欠である。

パワーモジュールの冷却技術として、両面冷却構造や直接冷却構造に代表される液体单相の強制対流方式が利用されることが一般的である。しかしながら、既存の液体強制対流方式では10 MW/m²を超える高い熱流束の冷却要求を満足させることは非常に難しい。そこで、従来の液体強制対流方式ではなく、液体の蒸発潜熱を利用することで高い熱流束の除熱が期待できる沸騰冷却技術が必要である。

しかしながら先述のように熱流束10 MW/m²を超える電子デバイスは極めて稀で、インバータ冷却を想定した「狭隘流路における強制対流沸騰」の冷却性能と最適冷却技術については十分に議論されていないのが現状である。さらに、車載インバータで使用される冷却液 LLC (Long Life Coolant) は沸騰環境において伝熱面上にスケールが付着し、冷却性能が低下する問題も指摘されている。そのため、これらの課題を解決し、高い冷却性能を有する沸騰冷却型のインバータを実現することは電動車両の普及のために必須である。

そこで本研究では、車載インバータの高出力密度化の実現と普及に資するため、インバータに搭載されるパワーモジュールの冷却性能向上を目的に「狭隘流路におけるサブクール強制対流沸騰型の冷却技術」を導入、本冷却技術に適した新たな沸騰冷却面構造を提案

し流動沸騰試験と CFD 解析から冷却性能とそのメカニズムについて明らかにする。また車載インバータの冷却液である LLC の冷却性能低下防止を目的に、沸騰時のスケール発生を阻害する化学的手段について提案し、簡易的な基礎試験と実機冷却試験によりその効果を実証する。

以降、本論文の構成についてまとめる。

第 1 章では、CO₂ の低減に有効な電動車両に使われるインバータの高出力密度化に伴う熱流束 10 MW/m² を超える冷却技術の必要性を示し、インバータ用パワーモジュールの冷却方式として従来の液体単相の強制対流方式ではなく冷却液の蒸発潜熱を利用する沸騰冷却方式が有効であることを述べる。その後、沸騰冷却方式の熱伝達性能向上のためには沸騰冷却面の発泡点密度と気泡離脱周波数が大きく影響することを概説し、熱流束 10 MW/m² を超えるこれまでの沸騰冷却技術や検討事例を紹介する。また車載 SiC インバータにおける高密度に半導体素子が実装されたパワーモジュールの冷却を対象に、パワーモジュールの構成要素と動作条件について概説し、LLC の代替流体である水を用いた冷却試験のための方法論と具体的な冷却目標、更に関連する課題について述べる。特に、SiC パワーモジュールを LLC で冷却する場合、壁面過熱度 80 K 未満を維持しながら目標 10 MW/m² の高熱流束を実現する必要があるため、水を用いた冷却試験での目標値を 18 MW/m² と設定する。目標を達成するため、本研究においては「狭隘流路におけるサブクール流動沸騰」と「流動制御型の冷却フィン構造」を導入して沸騰熱伝達の促進と限界熱流束の向上することと、LLC 冷却液に「スケール阻害剤」を導入して沸騰冷却性能低下を抑制することを目指すことを述べる。

第 2 章では、沸騰熱伝達の促進と限界熱流束の向上のため、“渦流および沸騰気泡発生体 (Vortex & Boiling Bubble Generator)”を提案する。提案するフィン構造は狭隘流路の流れ方向に垂直で連続したフィンであり、フィンの高さが狭隘流路高さ 1 mm の 1/5 に相当する 0.2 mm であることが従来技術には無い特徴である。この直交フィンは流体力学的に滑らかでないため、フィンチャンネル内に強い渦流と過熱液を生成することができる。本章で提案する直交フィンにおいて、沸騰熱伝達と限界熱流束の向上に影響するメカニズムについて実験と CFD 解析を用いて検証する。検証結果より、直交フィンの沸騰曲線と沸騰熱伝達率は平滑面と平行フィンよりも高い性能を有し、直交フィンの最大熱流束と最大熱伝達率はそれぞれ 14.4 MW/m² と 88,000 W/m²K である。沸騰気泡の可視化により、直交フィンでは平滑面より低過熱度の条件でも多くの気泡が発生することを明らかにするととも

に、1 kHz～10 kHz の周波数で沸騰気泡が発生、更に高熱流束において 250 Hz～630 Hz の低い周波数の合体気泡が発生するが、ドライアウトには至らないことを示す。加えて二相流の CFD 解析より、沸騰気泡がフィンチャンネル底部の角部で発生し、フィンチャンネル内に強い渦流が形成されることを明らかにする。

第 3 章では、第 2 章で提案した“渦流および沸騰気泡発生体 (Vortex & Boiling Bubble Generator)”を更に改善するために、シェブロンフィンを用いた“熱水リフレッシュ法 (Hot Coolant Refreshing Method)”を提案する。シェブロンフィンは沸騰冷却面全体での沸騰熱伝達を改善することを狙いとし、狭隘流路の流れに対して 45 度の角度で傾けた連続的なフィン構造である。本章では、提案するシェブロンフィンにおいて、沸騰熱伝達の向上効果を実験と CFD 解析の双方から評価する。評価結果より、シェブロンフィンの沸騰曲線と沸騰熱伝達率は、従来の直交フィンと比較して高い冷却性能を有し、最大熱流束と最大沸騰熱伝達率はそれぞれ 15.9 MW/m^2 と $98,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ である。また沸騰気泡の可視化から、微細な沸騰気泡がシェブロンフィンのフィンチャンネル方向に沿って下流方向へ輸送され、気泡の離脱と凝縮が促進されることを明らかにする。さらに単相流の CFD 解析から、シェブロンフィンのフィンチャンネル内の冷却液がフィンに沿って中心からフィン下流方向へ強く旋回しながら流れる。これにより過熱液がフィン下流方向へ輸送され、更に冷却面ホットスポットの緩和、冷却面温度分布の均一化を促し、沸騰冷却面全体で伝熱性能を向上させるとともに、フィン内の気泡合体を抑制し限界熱流束を向上させることを示す。

第 4 章では、第 3 章で提案した“熱水リフレッシュ法 (Hot Coolant Refreshing Method)”を更に活性化するため、新たに「流動制御型気泡微細化沸騰」を提案する。「流動制御型気泡微細化沸騰」を実現するため、フィン上部に圧力勾配場を形成することでフィン上部からフィンチャンネル内部へのサブクール液流入を促すフィン構造について議論する。CFD 解析によりフィン凸高さ、フィン深さ、シェブロンフィン角度をパラメータとした場合の流動を評価、その知見をもとに沸騰熱伝達率と限界熱流束の向上効果を高熱流束型試験装置により評価する。評価結果より、フィン凸高さを高くすることでフィン上部に圧力場の高低差を形成することができ、これにより狭隘流路からフィン内部へ向かう流れが発生するため、沸騰伝熱面へのサブクール液の積極的流入と沸騰気泡の離脱・凝縮を更に促進させる効果が期待できることを述べる。フィン凸高さ、フィン深さ、シェブロンフィン角度の各パラメータの影響を総括してシェブロンフィンの最適化を図り、最大熱流束と最大熱伝達率はそれぞれ 18.9 MW/m^2 と $22.6 \text{ 万 W/m}^2\text{K}$ であることを実証し、沸騰気泡の可視化が

ら、沸騰冷却面から微細化された沸騰気泡を発生させることができることを明らかにする。

第 5 章では、車両用インバータに使われる冷却液 LLC を沸騰環境で使用する際に発生するスケールによる沸騰冷却性能劣化の問題を解決するため、スケールが LLC に含まれる防錆材の成分と水に含まれる金属イオンの化合物であることに着目した化学的スケール抑制技術を導入する。スケール発生を阻害する EDTA (Ethylenediaminetetraacetic Acid、エチレンジアミン四酢酸) を冷却液 LLC に添加することで沸騰冷却面上のスケール付着と冷却性能低下を抑制する技術について提案、簡易沸騰試験と実機実証試験により EDTA の効果を検証する。検証結果から、塩化カルシウムとリン酸カルシウムを用いたポット試験の要素評価において、pH3 および pH5 の酸性ではスケールは発生せず、pH7 以上でスケールが発生する。更に EDTA を添加する場合、pH7 以上でもスケール発生を阻害できることを明らかにする。沸騰伝熱面として平滑面を用いたプール沸騰において、LLC を用いた場合に沸騰冷却面でスケール発生するが、LLC に EDTA を添加する場合ではスケール発生を抑制できることを示す。また平滑面を用いた簡易流動沸騰試験において、LLC によって発生したスケールに伴う沸騰熱伝達の劣化が、EDTA の添加によって回復する。加えて、沸騰伝熱面として直交フィンを有する SiC パワーモジュールのサブクール流動沸騰評価試験において、LLC を用いた場合にパワーモジュールの沸騰冷却面でスケールが発生し、冷却性能が低下する。一方、LLC に EDTA を添加する場合、スケールは発生せず冷却性能も低下しないことを明らかにする。最後に冷却液として EDTA を含む LLC を用いた V 型シェブロンフィンを有する SiC パワーモジュールのサブクール流動沸騰評価試験において、一般車両で使用される LLC30% の濃度条件で最大熱流束は 13.2 MW/m^2 であり目標熱流束 10 MW/m^2 を上回る性能を達成できることを実証する。

以上のように、本研究で提案した流動制御型シェブロンフィン構造が、熱流束 10 MW/m^2 を超える高熱流束環境においてサブクール強制対流沸騰の沸騰熱伝達と最大熱流束を大幅に向上させるとともに、目標値を達成できることを実証する。具体的には疑似流体である水試験において最大熱流束 18.9 MW/m^2 を達成、LLC を用いた SiC パワーモジュール実機試験において最大熱流束 13.2 MW/m^2 を達成できる。更に、スケール発生を阻害する EDTA を LLC 冷却液に添加することで沸騰冷却面上のスケール付着と冷却性能低下を抑制できることを実証する。今回提案したシェブロンフィン構造は、車載インバータだけでなく他の産業機器への展開も大きく期待できるとともに、機器の小型化・軽量化およびカーボンニュートラルの実現に大きく貢献できるものである。