次世代車載用 SiC パワー半導体のクーリング技術

結城 和久*

Cooling Technology for the Next Generation SiC On-Vehicle Inverters

Kazuhisa YUKI*

* 山口東京理科大学工学部機械工学科 (〒 756-0884 山口県山陽小野田市大学通 1-1-1)

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science-Yamaguchi (1-1-1 Daigaku-dori, Sanyo-Onoda, Yamaguchi 756-0884)

1. はじめに

現在、日本ではエネルギー供給と地球温暖化問題において多くの革新的技術の導入が求められている。特に地球温暖化問題では、国内において温室効果に最も寄与している CO₂ の排出が福島原子力発電所の事故以降に急激に増大しており、CO₂ 排出削減や CO₂ 回収技術への期待が非常に大きい。ここで CO₂ 排出の部門別内訳に注目すると、その 2 割ほどを運輸部門が占めており¹⁾、運輸部門の約 9 割を自動車²⁾が占めている。技術立国を維持するうえで産業部門やエネルギー転換部門の CO₂ 排出量を近々に大幅削減することは非常に難しく、自動車や家庭・商用施設などの部門での削減を図る必要がある。

このような背景のもと、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、当然ながら車載用インバータへの適用も強く期待され、自動車業界では各メーカーともに 2020 年を目安に量産体制を構築しようと鎬を削っている。しかしながら、車載用 SiC インバータの実用化のためには絶縁、材料の健全性、耐久性の確保だけでなく、放熱にかかわる幾つかの課題を解決する必要がある。すなわちパワー半導体からの放熱を制御し、SiC の動作温度を最適温度領域である 200 数十℃付近に確保しなければならない³⁾。

一方、現行のハイブリッド車における車載用インバータの殆どは Si-IGBT であり、その最大動作温度は 120℃ほど、かつ半導体チップにおける発熱密度は最新世代のもので最大 150 W/cm² ほどである。このような発熱環境では、基本的に高温のエンジン冷却水をインバータ冷却へ併用することは好まれず、別システムのループで飽和温度以下の冷却液を循環し、半導体チップの両面を単相流直接冷却する設計が多いようである^{4)~8)}。これに対し SiC を導入した場合、ハイブリッド車では半導体の高温動作特性を活かしてエンジン冷却水併用による 1 ループ化が可能となる。さらに次代

の低炭素化社会を担う電気自動車や燃料電池車の SiC パワー半導体システムでも 1 ループによりインバータとモータを冷却することが期待できる。ところが熱密度的な制約で言えば、SiC 導入で期待される低電力損失の反面、大電流密度化、高出力化、さらには車両搭載性を重視した超小型化により、局所的には 300 W/cm² を超えるとも言われる高発熱密度に対応できる冷却技術開発に取り組むことが望ましい。当然ながら、チップと冷却面間にはヒートスプレッド、絶縁基板、サーマルグリースなどさまざまな熱抵抗因子が存在するため、半導体温度を 200℃以上に維持するためには冷却面温度として 150℃以上を確保することが一つの指標として考えられる。ここでチップからの発熱密度 300 W/cm² を単相流状態の LLC (Long Life Coolant) により冷却することを想定する。流体温度を 110℃、冷却面温度を 150℃として設定すると、クーリング則から要求される SiC チップの冷却に必要な熱伝達率は最大出力時で 75,000 W/m²/K 程度 (冷却面熱抵抗 1.3×10^{-5} Km²/W) であると想定することができる。この熱伝達率レベルは非常に高い値ではあるが、狭隘流路を利用した高速流れの液冷であれば達成できない値ではない。しかしながら電気自動車や燃料電池車の開発では、モータ以外での電力消費を極力抑えたいニーズがあるため、より低いポンプ動力での冷却技術開発が求められる。

本稿では、このような高発熱密度・高温環境デバイスに対して有効と考えられる冷却技術のなかで、著者らが取り組む蒸発潜熱を有効的に活用する冷却技術について紹介する。当然、数百ワット/cm² の沸騰冷却技術については従来の沸騰伝熱研究において数多く存在するが、具体的なデバイス開発や (例えば国内では文献 9), 10) など)、明確に車載用 SiC インバータの発熱環境にフォーカスした研究は非常に少ない。本稿では紙面の制約上、蒸発潜熱を利用した冷却方法のうち、①従来型の実装技術を容易に踏襲できる銅ミニチャンネルフィン冷却、さらに、②低流量条件を可能とする金属ポーラス体を用いた冷却技術、③気泡微細化沸騰を利用した浸漬冷却技術、について概説する。

2. 銅ミニチャンネルフィンを用いた沸騰冷却

伝熱促進における第一の鉄則は伝熱面積の増大であり、当然ながら熱伝導性が高い材料でフィンを製作すると放熱面積も広がり効果が高い。さらに近年、流路の狭隘化（マイクロチャンネルやミニチャンネル）により熱伝達を促進する技術が単相流・沸騰流の双方において注目されている。本研究では量産化（加工の容易さ）および沸騰時のベーパーロック（沸騰気泡が流路を閉塞する現象）の発生を防ぐため、フィン厚さ 1.0 mm、流路幅 0.3 mm、流路高さ 10 mm の銅製ミニチャンネルフィンに注目する。すなわち、肉薄フィンでフィンを構成する場合、要求されるフィン表面熱伝達率も高いため必然的にフィン効率（フィン表面積の有効利用度の指標）は低下しフィン高さは短いものになってしまうが、沸騰時にはベーパーロックが起きやすい環境となってしまう。一方、ベーパーロックによる伝熱劣化を防ぐためにはフィン高さをある程度確保すべきであり、この場合、肉厚フィンを採用することでフィン効率を高めることが望ましい。なお、本フィンは単相流冷却において他のミニチャンネルフィンと比べポンプ動力の観点からも冷却性が高いものである。詳細については文献 11) を参照されたい。なお、腐食やスケール堆積の観点から LLC と銅の組み合わせは好まれないのが現実であるが、無電解めっきなどの表面処理技術の併用により十分に解決可能である。

本研究で使用する冷却液は LLC の疑似流体であるエチレングリコール水溶液（以降、EG 水溶液）であり、EG 水溶液の体積濃度は 30, 50, 70 vol%，入口温度 80 度、質量速度は $1,000 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ （流量は濃度順に 1.39, 1.36, 1.33 L/min）である。冷却試験装置の詳細については文献 11), 12) を参照されたい。使用する銅製ミニチャンネルフィンは 1 辺が 10 mm の立方体型であり、ワイヤーカットにより製作されたものである。伝熱試験は流量と入口温度を固定した定常実験であり、フィンヒートシンク底部に設置された複数の熱電対によりヒートシンクの冷却性能となる熱伝達率および冷却面温度、熱流束が評価される。

図 2 は、銅ミニチャンネルフィンのヒートシンク性能（上から熱流束、熱伝達率（二種類）、圧力損失）をそれぞれ表している。二つの熱伝達率 ($\text{W/m}^2/\text{K}$) はそれぞれ流体の飽和温度と入口温度を基準として算出されたものであり、こ

図 1. 銅製ミニチャンネルフィン

の逆数が熱抵抗 (Km^2/W) となる。熱流束の図から全ての濃度において壁面過熱度 ΔT_{sat} （壁面温度と液体飽和温度の差）の増加に伴い熱流束が上昇していることが確認できる。その限界値は沸騰冷却限界を表す限界熱流束ではなく、ヒータ温度が耐熱温度に達したため実験を停止したことによ

図 2. 銅ミニチャンネルフィンの伝熱特性
（上から熱流束、飽和温度ベースの熱伝達率、入口温度ベースの熱伝達率、圧力損失）

る。どの濃度条件においても 600 W/cm^2 を超える冷却性能を確認でき、また壁面温度も 150°C 以上を達成している。しなしながら対象としている 300 W/cm^2 の発熱密度に対しては壁面温度が 115°C 程度と低温となっている。高い冷却性能を裏付ける結果でもあるが、流量をさらに低下させ壁面温度が 150°C 以上になる条件を見つける必要がある。本図においてはそれぞれの冷却性能の差異が明確でないため、まず、壁面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}(\text{K})$ による沸騰熱伝達率に注目する。この図から、壁面過熱度の上昇に伴い低過熱度域では熱伝達率が減少し、その後、高過熱度域で一定値となる傾向を確認することができる。この熱伝達率の減少に意味はなく、この領域において単相熱伝達が支配的であることを示している。このことは次の入口温度ベースの熱伝達率が壁面過熱度、すなわち熱流束によらずほぼ一定であることが裏付けている。以上から壁面過熱度ベースの熱伝達率が一定値となる領域がミニチャンネル内で沸騰が活発になってきていることを示唆している。この領域に注目すると、EG 水溶液の濃度が増加するにしたがって熱伝達率も低下していることが確認できる。これは蒸発潜熱の低下と Pr 数（流体中における運動量拡散と熱拡散の比。一般に高 Pr 数流体になるほど冷却性能は劣化する）の増大効果によるものである。例えば蒸留水の沸騰冷却性能に対し、50 vol% 濃度の沸騰熱伝達率は 80% 台にまで劣化するようである。しかしながら、壁面温度が高い領域においても高い熱伝達性能が維持できるのは肉厚フィン冷却の特徴でもあり、仮にフィン底部においてドライパッチ（気泡底部に形成される乾いた領域）が生成され壁面温度が上昇したとしてもフィン上部において高い熱伝達性能が維持されていることを示している。このことは SiC パワー半導体の冷却設計の観点からも歓迎できる知見である。一方、圧力損失に注目すると、沸騰域にもかかわらず EG 水溶液の圧力損失は熱流束に依存せずほぼ一定であり、このことから単相伝熱の特徴が非常に強い傾向にあることを反映した結果であると言える（もしくはフィン内部で発生する沸騰気泡が水と比べて非常に小さい）。水冷の場合、壁面過熱度 20 K ほどから圧力損失が増大しており、フィン内部で圧力損失に影響するほどの大きな扁平気泡が成長していると考えられる。本流量条件での圧力損失は 5~7 kPa と非常に低いが、さらなる低流量化によって冷却面温度を 150°C 以上に上昇させることを考えると、十分に低いポンプ動力により冷却系を構築できると期待できる。現在、流量をパラメータとしてデータを蓄積しており、濃度に応じた最適な流量条件について評価するとともに、今後、実装デバイス設計についても検討する予定である。

3. 金属ポーラスヒートシンクの開発

冷却促進と圧損増加のトレードオフ問題は、SiC パワー半導体の冷却に限らず多くの高熱流束機器の冷却において

共通の課題である。理想的には蒸発潜熱をより積極的に活用できる冷却デバイスが望ましい。そのような背景のもと、著者らは金属ポーラス体を用いて低ポンプ動力で作動可能な冷却技術を提案し、これまで伝熱試験を実施してきた（例えば文献 13)~16)）。特に、ポーラス体内で生成された蒸気を積極的に多孔質外へ排出するサブチャンネルを装荷することで、高い熱伝達率を維持したまま高熱流束に対応できることを実証している¹⁵⁾。この冷却デバイスでは、発熱チップの背面に接合されたポーラス体内で冷却液を蒸発させ（図 3 参照）、サブチャンネルを介して蒸気がデバイス外に排出される冷却原理となっている。二相領域において全ての冷却液が蒸発できれば蒸発潜熱を熱流束に応じて最大限に活用できる冷却システムを確立することが可能である。排出される蒸気は長距離輸送が可能であり、既存デバイスであるラジエータで液化することで循環システムを構築できる。

以下、結果の概要のみ紹介する。実験の詳細などについては文献 16) を参照されたい。図 4 はポーラス体の伝熱性能（上から流量の影響（液温 30°C ）、熱伝達率、サブクール度（液体の飽和温度と液温の差）の影響、流量減少効果）を表している。最上図より壁面温度が 130°C 以上において相変化が活発となり熱流束が急上昇していることが確認できる。ただし、電子機器の沸騰冷却で懸念されるオーバーシュート（壁面温度が液の飽和温度を大きく超えても沸騰が生じない現象で沸騰が生じると急激に冷却面温度が低下する）は確認できない。高流量条件（約 2 L/min ）では、熱流束 816 W/cm^2 を壁面過熱度 91°C で達成しており、この時の熱伝達率は $9.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ である。実験はヒータ温度が 950°C に達したため終了しているが、図 4 から確認できるように熱伝達率は増加傾向にあるため、さらに高熱流束データを取得できると考える。低流量条件（約 1 L/min ）では限界熱流束への遷移に似た傾向を確認できるが、直後のバーンアウトへの移行は確認できない。熱流束の上昇は緩やかになっているものの、高温壁状態でも安定な冷却が可能である。一方、核沸騰域に対応する領域で熱流束の流量依存性は明確でなく、通常の流動沸騰と同様の傾向が見受けられる。しかしながら壁面温度 $150\sim 160^\circ\text{C}$ の領域で低流量の場合に熱伝達率が高いことが確認できる。なお、高・低流量とも壁面温度 150°C で 400 W/cm^2 の冷却に

図 3. サブチャンネル装荷型多孔質体

成功しており、また目的となる発熱密度 300 W/cm^2 では、壁面温度 130°C で熱伝達率 $80,000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ を達成している（熱伝達率は壁面過熱度ベース）。冷却液として水を用いる場合、さらに低い流量条件で目標値を十分に達成できる。一方、低サブクール度となる入口温度 70°C の場合、図 4 か

図 4. サブチャンネル装荷型ポーラス体の伝熱性能（上から流量の影響（液温 30°C ）、熱伝達率，サブクール度の影響，流量減少効果）

らデータ全体が高過熱度側へシフトしていることが分かる。これは通常の流動沸騰とは異なる傾向である。この理由として、入口温度 30°C では出口温度も低く、サブクール流動沸騰に近い伝熱形態であるのに対し、入口温度 70°C では伝熱面近傍に部分的もしくは非常に薄いドライ域が形成され、多孔質体－伝熱体の接触界面で発生する熱抵抗の影響が顕著に出ているものと考えられる。また、入口温度 70°C の場合でも、壁温約 150°C で 300 W/cm^2 を達成している。最下図は入熱が約 300 W/cm^2 の条件での壁温に対する流量依存性を表している。流量の低下に伴い壁面温度が減少する領域が存在することを確認できる。これは通常の流動沸騰とは異なる傾向であり、流量低下に伴い相変化が促進されていることを示唆している（質量流束 $10 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 、壁面温度 140°C 度で約 $75,000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ を達成）。蒸発潜熱をより積極的に活用するため、流路スケールに対する流量と入口温度の最適値が存在すると考えられる。特筆に値するのは、図 4 に示されるように、ポーラスを用いた冷却技術では壁面温度が 200°C であっても安定した冷却が可能であり、出力変動を伴う車載用インバータでも流量調整により SiC 半導体の温度を最適域に調整することが可能となる。

4. 気泡微細化沸騰を利用した浸漬冷却技術

究極の冷却方法は半導体素子を液に浸してポンプレスで冷却する浸漬冷却である。しかしながら大気圧下の平滑面の水飽和プール沸騰での限界熱流束は 100 W/cm^2 程度であり、外部動力を用いないパッシブ型の伝熱促進では 300 W/cm^2 を超える限界熱流束を達成するのは至難の技である。鈴木・結城らは、パワー半導体素子の浸漬冷却技術を確立するためサブクール環境における沸騰浸漬冷却試験（図 5 参照）を実施し、高サブクール条件で発現する気泡微細化沸騰 (MEB: Microbubble Emission Boiling) を応用した冷却技術について検討している（最近の文献では 17)～19) 参照）。気泡微細化沸騰は、サブクールされた液中で合体泡が凝縮崩壊しミクロンオーダーの微細気泡を周囲に射出しながら気液交換が促進される現象であり、これにより限界熱流

図 5. 浸漬冷却試験装置（詳細については文献 19) 参照）

束以降において熱流束が急激に上昇する（図 6 参照）。ここで気泡微細化沸騰の一例とその冷却性能について紹介する。図 7 は、50 vol% 濃度のエチレングリコール水溶液（EG 水溶液）を用いた際の沸騰曲線（大気圧環境）および加圧環境における水の沸騰曲線を表している。通常、水を冷却液とする場合、サブクール度が 20 K より大きくなると気泡微細化沸騰が発現し、熱流束が急激に上昇することが分かっている。一方、EG 水溶液では図からサブクール度

図 6. 沸騰曲線と気泡微細化沸騰

図 7. MEB による冷却性能

が 40 K でも完全に発達した MEB には遷移しておらずサブクール度 50 K 程度で完全な MEB が発生する。サブクール環境を維持する上でなるべく低サブクール度での MEB の発生が期待されるが、何れのデータにおいても限界熱流束付近で冷却面温度は 140°C 以上、熱流束は 300 W/cm² を達成している。さらに MEB 状態では最大で約 1,000 W/cm² の冷却にも成功している。一方、加圧することによって MEB の発生域が高温側にシフトし、かつ MEB 領域の上昇勾配が緩やかになっていることが確認できる。可視化実験により加圧環境では MEB 状態での微細気泡の射出が緩慢になることを確認しており、このことが影響しているものと考えられる。現在、EG 水溶液の加圧環境における浸漬沸騰冷却試験を実施しており、それらの知見を反映した浸漬冷却デバイス設計を実施する予定である。なお MEB を応用した流動沸騰冷却デバイスについては既に鈴木らにより開発されており、こちらについては文献 20), 21) を参照されたい。

5. おわりに

本稿では、現在開発が進む電気自動車などの電力変換を担う次世代 SiC パワー半導体の冷却を可能とする幾つかの冷却技術について紹介した。いずれの冷却技術も従来型と比べ省スペースかつ極めて低い液流量による高熱流束輸送と高温環境の維持が可能であり、コンパクトかつ低電費型の実装冷却デバイス開発に貢献することが期待できる。

(2015.1.21- 受理)

文 献

- 1) 電気事業連合会：原子力・エネルギー図面集，<http://fepc-dp.jp/>
- 2) 温室効果ガスインベントリオフィス，<http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html>
- 3) 第 58 回エレクトロニクス実装学会セミナー，パワーエレクトロニクスにおける実装の役割，2013
- 4) サーマルマネジメント 余熱・排熱の制御と有効利用，NTS，2013
- 5) マイクロ・ナノファブリケーション研究会 第 24 回公開研究会，エレクトロニクス実装学会 配線板製造技術研究会，2014
- 6) 木村隆志，他：“ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ，” 日立評論，Vol. **95**, No. 11, pp. 42–47, 2013
- 7) 鶴田和弘：“SiC 半導体パワーデバイスの車載実用化の展望，” デンソーテクニカルレビュー，Vol. **16**, pp. 90–95, 2011
- 8) 島 顕洋：“パワーデバイスの変遷と将来展望，” 三菱電機技報，Vol. **88**, No. 9, pp. 98–101, 2014
- 9) 三浦進一，大田治彦，他：“フィン間狭あい流路内強制流動沸騰を利用した高熱流束・大面積冷却システムの研究開発，”

- 日本マイクログラビティ応用学会誌, Vol. **27**, No. 2, pp. 65–76, 2010
- 10) K. Horiuchi, A. Nishihara, and K. Sugimura: “Design of Cost-effective Pinfin Heatsinks,” Proceedings of the International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), IPACK2013-73194, 2013
 - 11) K. Yuki and K. Suzuki: Applicability of Minichannel Cooling Fins to the Next Generation Power Devices as a Single-Phase-Flow Heat Transfer Device, Vol. **4**, No. 1, pp. 52–60, 2011
 - 12) 結城和久, 木内清泰, 鈴木康一: “次世代パワーデバイス用ミニチャンネルフィンヒートシンクの伝熱性能,” 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013
 - 13) K. Yuki, J. Abei, H. Hashizume, and S. Toda: “Numerical Investigation of Thermofluid Flow Characteristics with Phase Change against High Heat Flux in Porous Media,” Journal of Heat Transfer, Vol. **130**, Issue 1, 012602, 2008
 - 14) K. Yuki, K. Suzuki, H. Hashizume, and S. Toda: “Key issues to enable heat flux removal exceeding 10 MW/m² by use of metal porous media as latent-heat transfer device,” Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal, Vol. **1**, No. 1, pp. 1–13, 2010
 - 15) K. Yuki and K. Suzuki: “Development of Functional Porous Heat Sink for Cooling High-Power Electronic Devices,” Transactions of The Japan Institute of Electronics Packing, Vol. **5**, No. 1, pp. 69–74, 2012
 - 16) K. Yuki, M. Uemura, K. Suzuki, and K. Sunamoto: “Boiling/ Evaporation Heat Transfer Augmentation Using Subchannels-Inserted Metal Porous Media,” Proceedings of the 2013 ASME Summer Heat Transfer Conference, 2013
 - 17) Y. Chen, K. Yuk, and K. Suzuki: “Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Effect of Roughness of Heating Surface),” Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014
 - 18) K. Suzuki, K. Yuki, and Y. Chen: “Subcooled Boiling with Microbubble Emission (Applocation to High Heat Flux Cooling Technology in Power Electronics),” Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014
 - 19) K. Suzuki, K. Yuki, and C. Ghang: “High Heat Flux Cooling Technology for Power Electronics: Subcooled boiling of water mixture of antifreeze coolants,” Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-23), 2013
 - 20) PCT: WO2007/102498, 2007
 - 21) PCT: WO2006/075493, 2006

著者紹介

結城和久 (ゆうき かずひさ)
(博士 (工学))

山口東京理科大学工学部機械工学科 准教授 (1998年に九州大学にて博士号を取得, 東北大学の勤務を経て現在に至る)。高発熱密度機器 (車載用インバータ, 核融合炉, 製鉄連続鑄造など) の熱輸送・冷却研究に従事。
(<http://www.yama.tus.ac.jp/departments/teacher/t-yuuki.html>)