

次世代高性能水冷フィン “よりよりフィン”

“Yori – Yori Fins” : Water – Cooled Heat Sink with Three – Dimensionally Interlaced Helical Flow Channels for Enhanced Thermal Performance

*設計技術開発センター

要 旨

車載インバーターやAIデータセンター向け的水冷ヒートシンクには、パワー半導体やGPU(Graphics Processing Unit)の高発熱密度化への対応と低コスト化の両立が不可欠である。従来のヒートシンクに用いられるピンフィンでは発熱体直下に高温の冷却水が偏在する水温むらという課題を抱えており、フィン形状の改善だけでは性能向上には限界があった。三菱電機は螺旋(らせん)流路を三次元的により合わせた独自の構造を持つ“よりよりフィン”を開発し、水温むらの根本的な解消、放熱面積の拡大、界面熱伝達率の向上を同時に実現した。これによって、フィン単体の放熱性能を示すベース面積基準熱伝達率を現行品(当社アルミニウム製ピンフィン)と同一条件の下で51%向上させた。この構造は有孔プレートを積層・接合することで実現し、順送プレス及びろう付による量産化の見通しが立った。これによって、アルミニウム製ながら銅ピンフィンと同等の熱抵抗を達成しつつ、銅ピンフィン比で67%のコスト低減を実現した。

1. ま え が き

近年、車載インバーターやAIデータセンターに用いられるパワー半導体やGPUの小型高出力化・高集積化が急速に進んでいる。これに伴って素子の発熱密度が増大し、冷却性能の確保が更に困難になっている。それに加えて海外サプライヤーとの競争激化によってヒートシンク自体の低コスト化も同時に求められている。

当社は従来、高熱伝導アルミニウム合金製又は銅製のピンフィン型ヒートシンクを採用してきた。しかし、フィン形状の最適化による性能向上には限界があり、新たな流路構造の創出といった根本的なアプローチの刷新が必要であった。

本稿では、その限界を超えた新型水冷フィンよりよりフィンの着想、製造技術、及び性能について述べる。

2. 従来型ピンフィンの課題

従来、水冷機器のヒートシンクには、円柱・角柱・六角柱・変形断面など多様な形状のピンフィンが用いられてきた(図1)。フィン間を流れる冷却水は発熱体から熱を受けて昇温するが、ピンフィンではベース面垂直方向への流れ成分が生まれにくい。このためベース面の遠方を流れる低温の冷却水との混合が起こりにくく、高温の冷却水がベース面近傍に偏在する。この現象を、本稿では“水温むら”と呼ぶ(図2)。水温むらの発生によってベース面-冷却水間の温度差が減少

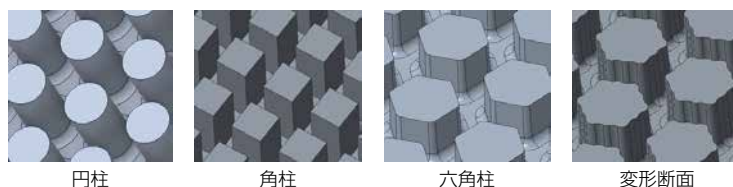


図1-従来型ピンフィンの形状例



図2-ピンフィンでの水温むら発生時の解析温度コンターの例

し、冷却性能が低下する。この現象はピンフィンに共通する根本的な課題であり、フィン形状改善だけでは解決に限界がある。銅のような高熱伝導材料の適用は有効な対策だが、コストが課題になる。

3. よりよりフィンの着想と構造

この章では、よりよりフィンの着想と構造について述べる。

3.1 水温むら解消の着想—螺旋流路のより合わせ—

2章で述べた課題を解決する鍵は、ベース面垂直方向を含む三次元的な攪拌(かくはん)を流路構造に組み込んで、ベース面近傍に常時低温の冷却水を供給し続けることにある。当社は、螺旋流路を複数本、互いに絡み合うように三次元配置した独自の構造よりよりフィンを考案した(図3(a))。よりよりフィンの名称は、隣接する螺旋流路が互いにより合わさるように三次元的に絡み合う構造的特徴に由来する。着想の核心は、螺旋流路を並べるのではなく“より合わせる”点にある。より合わせることで螺旋流路がフィン内部を密に占有し、ベース面積(発熱体搭載面積)当たりの放熱面積(フィン表面積)を最大化している。この構造が生み出す三つの放熱促進メカニズムを3.2節に示す。

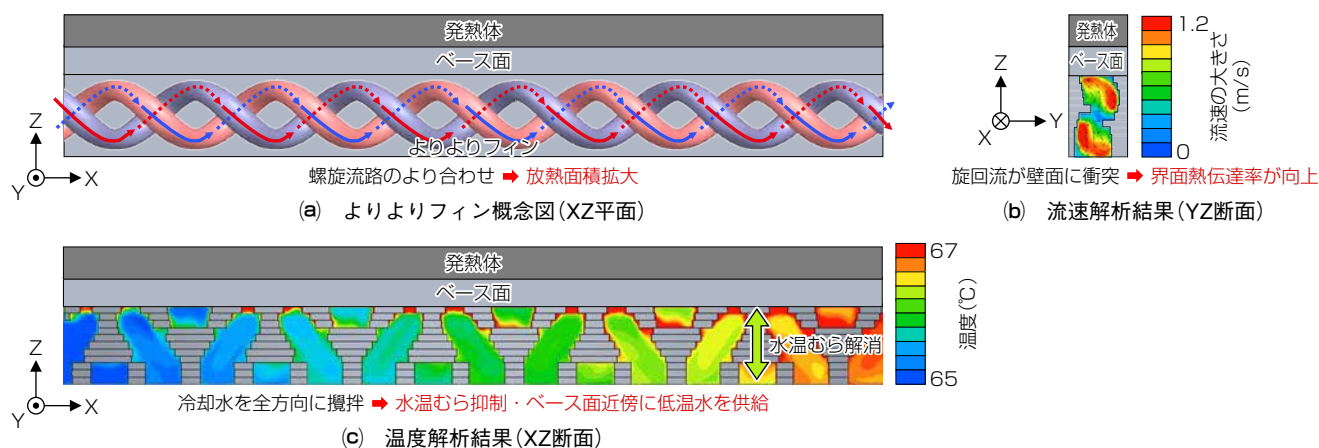


図3-よりよりフィンの構造概念と三つの放熱促進効果

3.2 三つの放熱促進メカニズム

よりよりフィンが従来型ピンフィンを大きく上回る冷却性能を発揮できる理由は、次に述べる三つのメカニズムの相乗効果にある。

(1) 放熱面積の拡大

図3(a)に示すように、高密度により合わされた螺旋流路によって、ベース面積当たりの放熱面積が従来型ピンフィンと比べて大幅に拡大する(現行品比40%拡大)。ただし、放熱面積の拡大が冷却性能向上に結び付くためには、拡大した表面が放熱面として有効に機能する必要がある。一般に、放熱面積の拡大は放熱利用率の低下を招きやすく、さらに水温むらが大きい場合には表面で十分な温度差が生じない。この点で、後述する(3)の水温むら解消が重要になる。

(2) 界面熱伝達率の向上

図3(b)に示すように、螺旋流路内に旋回流が生み出されて、冷却水が流路壁面へ連続的に衝突し続ける。特に、発熱体直下のベース面に対する冷却水の垂直衝突によって、温度境界層の発達を抑制し、界面熱伝達率を向上させる(現行品比6%向上)。

(3) 水温むらの根本的解消

螺旋流路によって冷却水はベース面垂直方向を含む全方向に自律的に攪拌される。この攪拌によって、図3(c)に示すように昇温した高温の冷却水がベース面近傍に偏在することを防ぐとともに、常に低温の冷却水をベース面近傍へ供給する。これによって、ピンフィンでは原理的に不可避であった水温むらを根本的に解消できる。

水温むら解消の効果は有効フィン効率 η_{eff} に波及する。ここで、 η_{eff} はフィン表面の放熱利用率を示す古典的フィン効

率 η_0 に冷却水温度の不均一の影響を加味した指標 ($\eta_{eff} = \eta_0 \cdot \phi$, $\phi \leq 1$ で定義) であり, 冷却水温度が一樣であれば η_0 と等しくなる。従来型ピンフィンでは, 水温むらによって ϕ が低下し η_{eff} が η_0 を下回る。よりよりフィンでは水温むらの解消によって, ϕ が 1 に近づいて η_{eff} が η_0 に回復する。一般に, 放熱面積拡大は η_0 を下げる方向に働くが, よりよりフィンでは, ϕ の向上が η_0 の低下分を上回る効果によって, 結果として η_{eff} を現行品比 2 % 向上させることができた。この 2 % は放熱面積拡大による η_0 低下分を差し引いた正味の改善効果であり, 水温むらの解消が(1)及び(2)の効果を損なわず機能させていることを示している。

3.3 有孔プレートによる積層構造

このような三次元螺旋流路を実製品として成立させるには, 構造を製造可能な形に落とし込む必要がある。 casting, ダイカスト, 金属 3D プリンター等の一般的な製造手法では, 内部形状の高精度な成形が困難, 又はコストが過大になる。当社はこの課題を“有孔プレートの積層構造”によって解決した(図 4)。具体的な量産プロセスへの展開は 4 章で述べる。

よりよりフィンは, アルミニウム製の有孔プレートを複数枚積層することで構成される(図 4(a))。各プレートはそれぞれ異なる穴形状を持ったシンプルな平板であり, 積層方向に適切な順番と向きで重ね合わせることで三次元的により合わせた螺旋流路が形成される仕組みである。これによって, 板金プレス加工とろう付という簡便な製造プロセスで, 複雑な内部流路を形成できる。

本稿で述べるフィンは, 6 種類の穴形状を持つ流路プレートと, 発熱体搭載面になるベースプレートで構成される。なお, 隣接する螺旋流路同士を部分的に連結する設計によって, 万一, 異物詰まりが発生した場合にも冷却水の迂回(うかい)経路が確保され, 冗長性を備えた流路構成を実現している(図 4(b))。

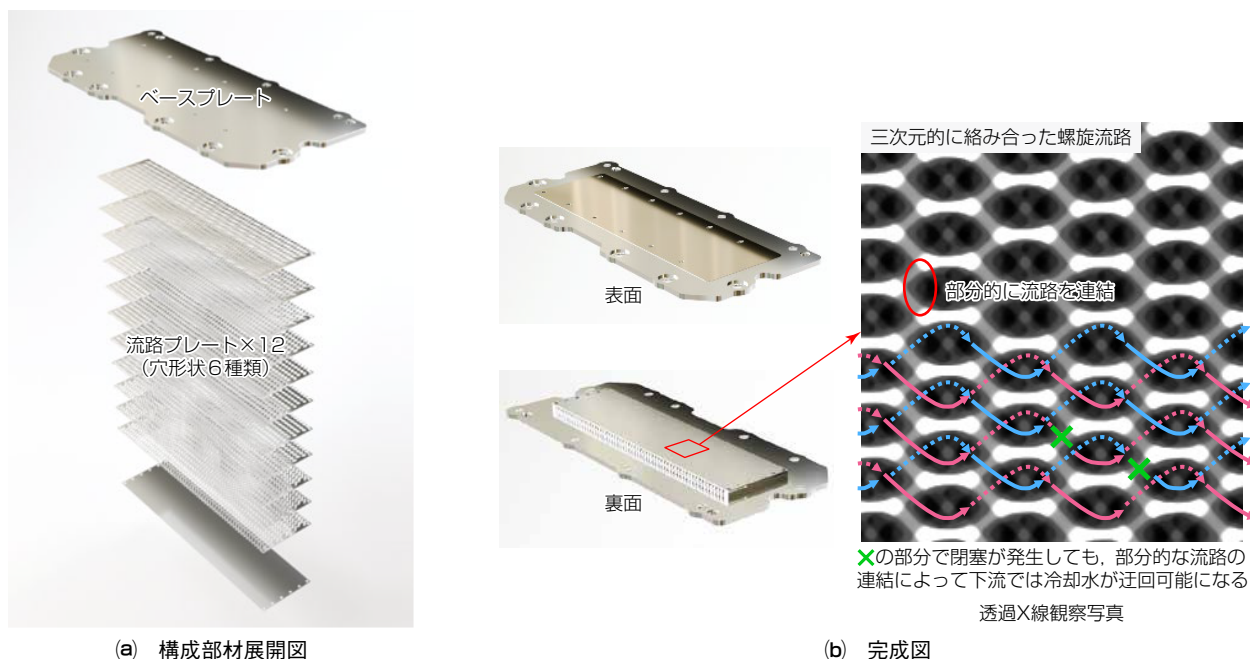


図 4-よりよりフィンの構成部材展開図と内部螺旋流路(透過X線観察)

4. 量産製造技術の確立

複雑な螺旋構造を持つよりよりフィンを実用化するに当たっては, 二つの製造技術の新規開発が不可欠であった。

4.1 精密プレス加工技術

流路プレートには非対称・微細な穴形状が 6 種類存在し, 各穴の寸法精度が冷却性能に直結する(図 5)。このような微細かつ複雑な穴形状の高精度成形は, 一般にプレス加工での難易度の高い課題の一つである。当社は順送プレス金型を用いた連続加工技術を確立し, 6 種類全ての穴形状を一貫した製造工程内でコイル材から連続的に成形することを可能にした。

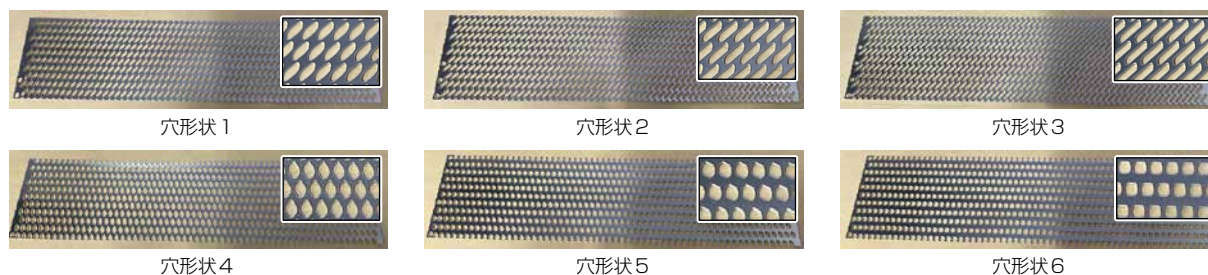


図5-精密プレス加工によって製造した6種の流路プレート

4.2 独自のプレート接合技術

よりよりフィンでは、高い冷却性能を引き出すために熱伝導率の高い6000系アルミニウム合金を使用することとした。一般的なアルミニウム部品のろう付には、表面酸化皮膜を除去するフラックス塗布工程が必要であるが、同合金は代表的な量産ろう付手法であるノコロック^(注1)ろう付で、合金に含まれるマグネシウムがフラックスの酸化膜除去能力を低下させるため、安定接合が困難な材料である。このようなケースでは、真空パッチ炉によるフラックスレスろう付が一般的であるものの、この工法はコストが課題である。

当社はこれらの課題に対して、独自の接合手法を開発し、6000系アルミニウム合金の安定接合を、従来困難とされてきた大気圧連続炉のプロセスで実現することに成功した(図6(a))。これによって、熱伝導率の高い6000系アルミニウム合金の適用による冷却性能向上、フラックス塗布工程の廃止によるプロセス簡略化及びコスト低減、さらに真空パッチ炉に代わる大気圧連続炉の採用による製造コスト抑制の3点を同時に実現した。

また、よりよりフィンの流路は微細な穴の連結によって形成されるため、ろう材量が僅かに過剰になるだけで流路の狭窄(きょうさく)を招いて、冷却性能に悪影響を及ぼす。一方、ろう材量が不足した場合には接合不良を招く。そこでろう材量を適正範囲内に制御するプロセスを確立し、高品質な接合と流路狭窄の抑制を同時に実現した(図6(b))。

(注1) ノコロックは、ソルベイ・ゲゼルシャフト・ミット・ベシュレンクテル・ハフツングの登録商標である。



図6-新規接合手法による接合品質の改善とろう材量の適正化

5. 冷却性能評価

本稿では、冷却性能の評価指標としてベース面積基準熱伝達率 h_b を用いる。放熱設計でチップ-冷却水間の温度上昇を決定する熱抵抗は h_b の逆数に比例し、 h_b は式(1)で定義される。

$$h_b = h_f \cdot (A_f/A_b) \cdot \eta_{eff} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h_f は冷却水-フィン界面の熱伝達率、 A_f/A_b は放熱面積とベース面積の比、 η_{eff} は有効フィン効率である。これらの指標を統合した h_b は、フィン形状によらず冷却性能を公平に比較できる利点がある。

よりよりフィンと当社製ピンフィン、及び他社製フィンの冷却性能の解析比較結果を図7に示す。流量及び冷却水の物性は全ての比較対象で共通とし、他社製品については各社固有の流路構成を変更せずに解析評価した。当社製品については、流路の幅と流れ方向長さを固定した上で、現行品と同等以下の圧力損失条件でベース面積基準熱伝達率が最大になるようフィン寸法を最適化した。

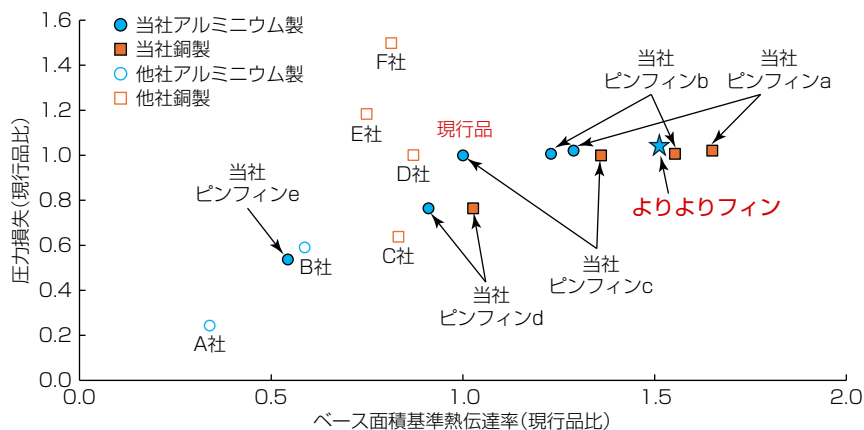
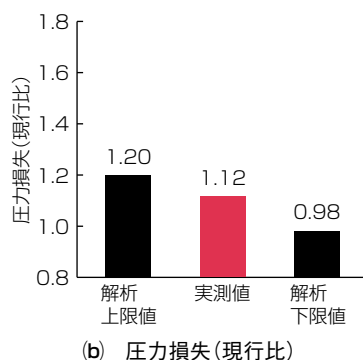
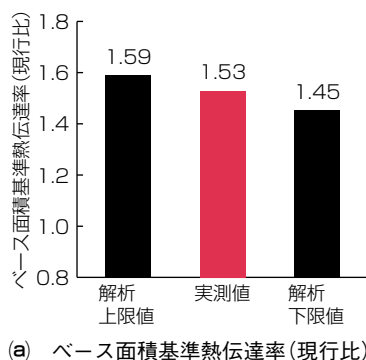


図7-フィンの冷却性能比較結果

解析の結果、よりよりフィンのベース面積基準熱伝達率は現行品と同一圧力損失条件で51%向上することが示された。式(1)に基づいてこの向上要因を分析すると、3章で示した放熱面積の40%拡大、界面熱伝達率の6%向上、及び有効フィン効率の2%向上の相乗効果として述べられる。その寄与は $1.40 \times 1.06 \times 1.02 = 1.51$ と表されて、ベース面積基準熱伝達率の51%向上に対応する。アルミニウム製でこの性能域に到達するフィンは存在せず、よりよりフィンは新たな性能領域を開拓した。また、試作品の冷却性能評価試験で、よりよりフィンのベース面積基準熱伝達率、圧力損失の実測値が製造ばらつきを考慮した解析予測範囲内に収まることを確認し(図8)、解析結果の妥当性を実証した。



(c) よりよりフィン試作品を用いた冷却性能評価装置

図8-よりよりフィン冷却性能の解析値と実測値の比較

6. バリエーション展開

よりよりフィンは“Openタイプ”と“Closeタイプ”の2構成を展開する(図9)。Openタイプは、従来型ピンフィンと同等の形態でウォータージャケット内に組み込んで使用する構成であり、既存機器への適用が容易である。ベースプレートには銅製・アルミニウム製の2仕様を用意し、発熱体の実装条件や熱膨張係数等の要件に応じて選択できる。

一方、Closeタイプは原価低減と性能向上の両面で今回の開発の主力と位置付ける構成である。Openタイプは、ベースプレート、フィン、ウォータージャケットがそれぞれ別部材として機能を分担しているが、Closeタイプは積層されたプレート群に機能を統合する。具体的には、①ベースプレートとしての発熱体搭載機能、②放熱フィンとしての冷却機能、③ウォータージャケットとしての水密機能を統合する。

従来型ピンフィンでは、被冷却機器への組み付けに必要な機械的強度を確保するため、ある程度の厚さを持つベースプレートが必要であった。これに対してCloseタイプは、螺旋流路群を上下から薄板の外殻プレートが取り囲む構造であり、プレート群全体でウォータージャケットの機能と機械的強度を両立する。その結果、発熱体実装面であるベース面を極めて薄く設計できて、ベース面垂直方向の熱抵抗を大幅に低減できる。よりよりフィンCloseタイプは、高いベース面

積基準熱伝達率と低いベース面熱抵抗を両立することで、アルミニウム製ヒートシンクでありながら銅ピンフィンと同等のチップ-冷却水間熱抵抗を実現した(図10)。それに加えて、材料費(銅→アルミニウム)と加工費(鍛造・切削→プレス+ろう付)の両面での低減によって、Closeタイプは銅ピンフィン比で約67%のコスト低減を実現した。

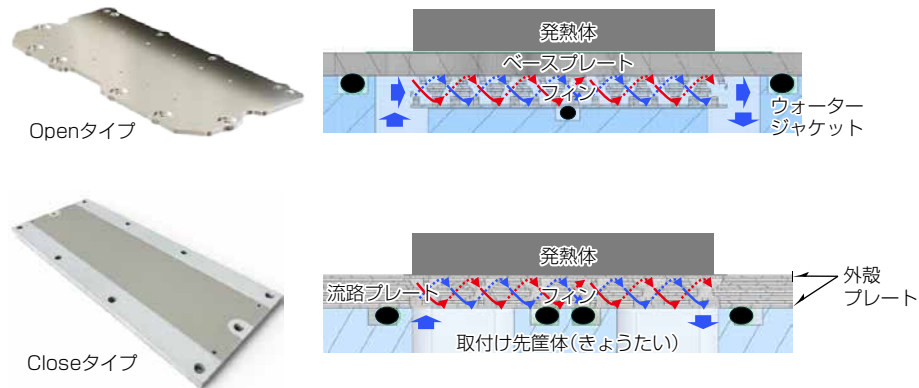


図9-OpenタイプとCloseタイプ

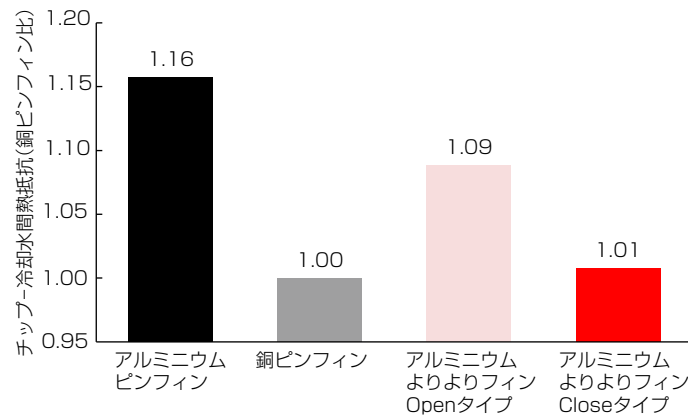


図10-チップ-冷却水間熱抵抗の比較

7. む す び

従来型ピンフィンの流路が原理的に抱える水温むらという課題を、螺旋流路をより合わせるという発想によって根本から解消した次世代水冷フィンよりよりフィンの開発成果を述べた。

主な成果を次に示す。

- (1) 螺旋流路のより合わせによって水温むらを根本解消し、同時に放熱面積拡大と界面熱伝達率向上を両立した。
- (2) 有孔プレートの積層というシンプルな構成によって螺旋流路を実現し、量産プロセス適用の見通しを得た。
- (3) 有孔プレートに要求される非対称・微細な穴形状の高精度成形を、順送プレス加工技術の確立によって実現した。
- (4) 新規接合手法を開発し、有孔プレートへの6000系アルミニウム合金の適用を低コストに実現した。
- (5) 現行品比でベース面積基準熱伝達率51%向上を実現した。
- (6) Closeタイプは銅ピンフィンと同等の熱抵抗と約67%のコスト低減を両立し、性能とコストのトレードオフを克服した。

今後は、車載インバーター及びAIデータセンター向けヒートシンクへの適用を目指して実用化開発を継続する。