



令和3年9月21日  
科学技術振興機構（JST）  
Tel：03-5214-8404（広報課）  
株式会社ロータス・サーマル・ソリューション  
Tel：080-6153-8248  
山陽小野田市立山口東京理科大学  
Tel：0836-88-4505（入試広報課）

## ロータス金属による沸騰促進を利用した沸騰冷却技術を開発 ～パワー半導体における熱集中問題の解消に貢献～

### ポイント

- パワー半導体の性能向上や半導体チップの小型化に伴い、電子回路の発熱密度が高まっているが、現在の冷却方法ではこの熱を十分に放出できなくなっている。
- ロータス金属を沸騰型の冷却器に用いることで、効率良く熱を除去する冷却技術を開発した。
- 沸騰型冷却技術のコアとなる冷却器の設計技術を多種類の冷媒で確立したことにより、パワー半導体や高性能CPUなど幅広い発熱密度範囲の冷却に対応可能である。

JST（理事長 濱口 道成）は、研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）企業主導フェーズ NextEP-Bタイプの開発課題「自発的冷却促進機構を有する高性能車載用冷却器」において、目指していた成果が得られたと評価しました。この開発課題は、山陽小野田市立山口東京理科大学の結城 和久 教授らの研究成果をもとに、平成29年12月から令和3年3月にかけて株式会社ロータス・サーマル・ソリューション（代表取締役社長 井手 拓哉、本社：大阪府大阪市、資本金1億840万円）に委託し、実用化開発を進めていたものです。

大型サーバーに用いられる高性能CPUや、電気式ハイブリッド車（HEV）向けインバーターに利用されるパワー半導体では、集積密度の向上や、大電力化が進むと同時に半導体のパッケージも小型化が進んでいます。そのため、半導体の面積当たりの消費電力が増加し、その結果、発熱密度が高くなり、素子の耐熱限界に近づいているのが現状です。

ロータス・サーマル・ソリューションは、この問題に対する解決策として、ロータス金属<sup>注1</sup>)を用いた高効率な沸騰冷却<sup>注2</sup>)器を開発しました。次世代パワー半導体として期待されているシリコンカーバイド（SiC）の発熱密度は300～500ワット毎平方センチメートル（W/cm<sup>2</sup>）と言われ、SiCをデバイスに用いるためにはこれよりも大きな限界熱流束（Critical Heat Flux：CHF）<sup>注3</sup>)を持った部材による冷却が必要となります。本開発では、ロータス金属を用いた沸騰促進技術を利用することで、従来の冷却器では200W/cm<sup>2</sup>程度であったCHFを、530W/cm<sup>2</sup>以上に向上させ

ることに成功しました。

本開発により、高発熱密度に対応できる沸騰型冷却技術を確立したことから、車載用のS i C半導体によるインバーター回路や大型サーバー用高性能CPUを効率的に冷却するシステムの実現が期待されます。

研究成果最適展開支援プログラム（A－STEP）は大学、公的研究機関などで生まれた研究成果を、国民経済上重要な技術として実用化し、社会に還元することを目指す技術移転支援プログラムです。企業主導フェーズでは、大学などの研究シーズを用いて企業などが行う、開発リスクを伴う規模の大きい開発を支援し、実用化を後押しします。

※A－STEP企業主導フェーズ（N e x T E P－Bタイプ／N e x T E P－Aタイプ）は、令和2年度より「A－STEP企業主体（マッチングファンド型／返済型）」として公募しています。

URL : <https://www.jst.go.jp/a-step/>

## <背景>

現在、HEVでは高効率を目指してモーター制御ユニットにSiCパワー半導体を利用するシステムが検討されています。しかし、パッケージの小型化が進み、半導体の面積当たりの消費電力が増加しているため、Si半導体では $200\text{W}/\text{cm}^2$ 程度だった発熱密度がSiCパワー半導体では約 $500\text{W}/\text{cm}^2$ まで高まり、高発熱密度化に対応できる冷却システムへの関心が高まっています。半導体素子の耐熱温度の限界を超えないためには、集中する熱を素早く取り去る必要がありますが、現在利用されている循環型の水冷方式ではこれが難しくなりつつあります。

これに対し、冷媒の蒸発潜熱を利用する沸騰冷却方式は、水冷方式に比べて高い冷却熱流束を持ち、以前から、高い冷却効率が求められる用途で利用されてきました（図1）。しかし、沸騰冷却方式には、冷媒に熱を伝える面（伝熱面）にCHFを超えた熱が流入すると、冷却能力が急激に失われてしまうという課題があります。

本開発では、沸騰冷却方式の課題を解決し、車載用途を含めて広範囲に適用可能な、より大きな熱流束に対応できる冷却技術として実用化することを目的としました。

## <開発内容>

本開発は、山陽小野田市立山口東京理科大学の結城教授らの沸騰伝熱効果に関する研究成果に基づいて行われました。この研究では、発熱体に接触する銅などの熱伝導体に、幅1ミリメートル（mm）程度の溝を一定間隔で彫り込んだもの（グループ）とロータス金属を組み合わせることで膜沸騰が起こりにくい構造を実現していました（図2）。

そして、本開発では冷却性能を決める重要な要素が、グループとロータス金属の気孔の寸法にあることを見だし、冷媒に応じて適切な溝の断面積と気孔径を求める手法を確立しました。その結果、水を冷媒に利用した場合、従来は $\text{CHF } 200\text{W}/\text{cm}^2$ 程度であったものが、小型サイズ（冷却面： $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ）の冷却器で $\text{CHF } 530\text{W}/\text{cm}^2$ 以上、大型サイズ（冷却面： $65\text{mm} \times 65\text{mm}$ ）の冷却器では $\text{CHF } 270\text{W}/\text{cm}^2$ を達成しました。また、フッ素系不活性液体<sup>注4</sup>冷媒を用いて試作した沸騰冷却器においても、開発した技術を適用することで、発生した蒸気と冷媒の流れを分離し、蒸気の速やかな排出と、冷媒の安定供給が両立できることを示しました（図3）。

さらに、フッ素系不活性液体冷媒を用いてワークステーション（業務用高性能コンピュータ）向けCPUクーラーへの適用を検討し、試作品において、既存製品と同等の冷却性能を半分の冷却器体積で実現できることを示しました。

## <期待される効果>

本開発で試作した沸騰冷却器は、Si半導体およびSiC半導体によるインバーターの冷却が可能な性能を保持しており、高発熱密度化する車載用のパワー半導体の熱集中問題を解消する技術として期待されます。さらに、従来のワークステーション向けCPUや大型サーバーの高効率な冷却技術としても考えられています。これらにより持続可能な開発目標（SDGs）のターゲット7.3「2030年までに、世界全体のエネルギー効率の改善率を倍増させる」の推進にも貢献できます。

<参考図>

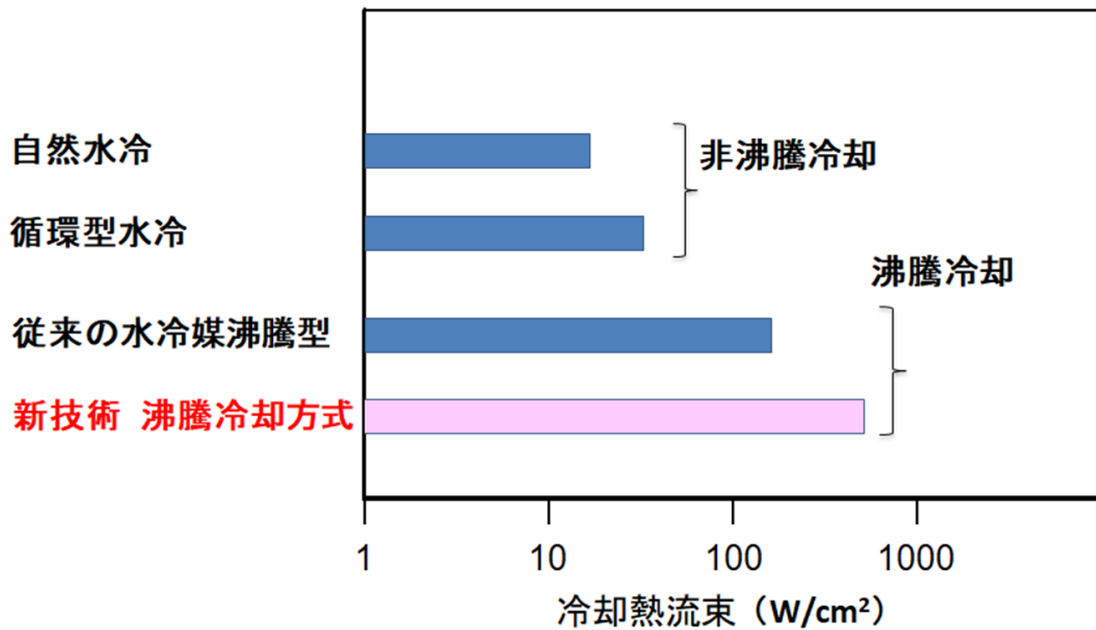


図1 冷却方式と伝熱性能

冷却方式別の水冷媒による伝熱性能を示している。沸騰冷却方式は循環型水冷に比べ50倍以上の熱流束で冷却が可能である。従来の水冷媒沸騰型に比べ本新技術は2倍以上の冷却熱流束が得られる。

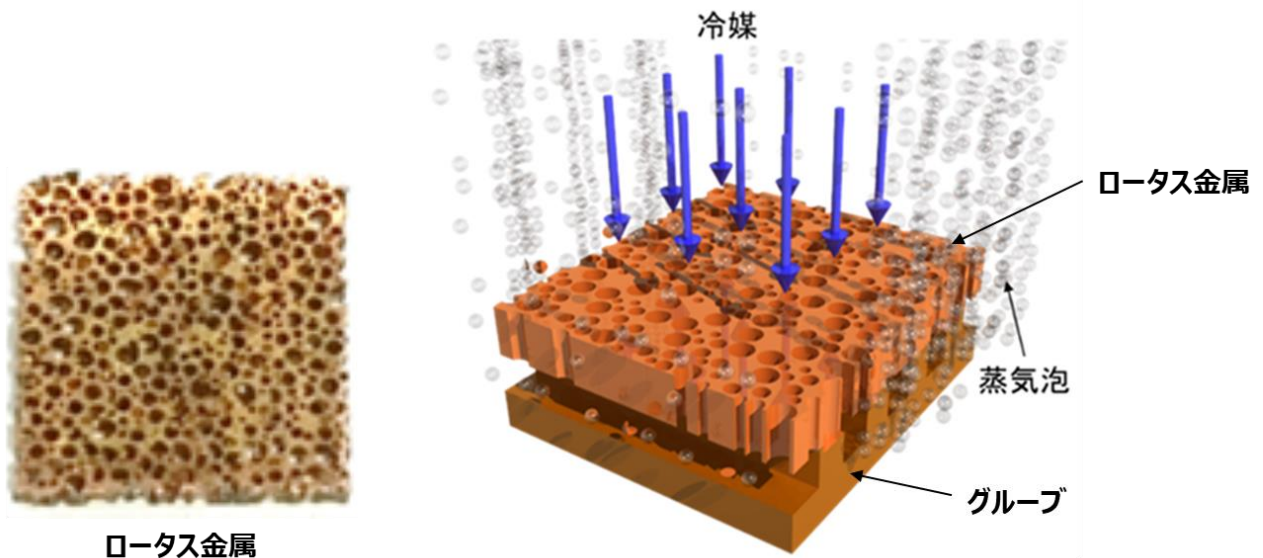


図2 沸騰伝熱効果

ロータス金属とグループ（溝構造を持つ熱伝導率の良い金属板）を組み合わせ、冷媒の沸騰に用いることで膜沸騰が生じにくい効果がある。

左) レンコンのような一方向性の気孔を持つロータス金属。

右) 冷却液がロータス金属上部から吸い込まれ、蒸気がグループの溝から排出される。

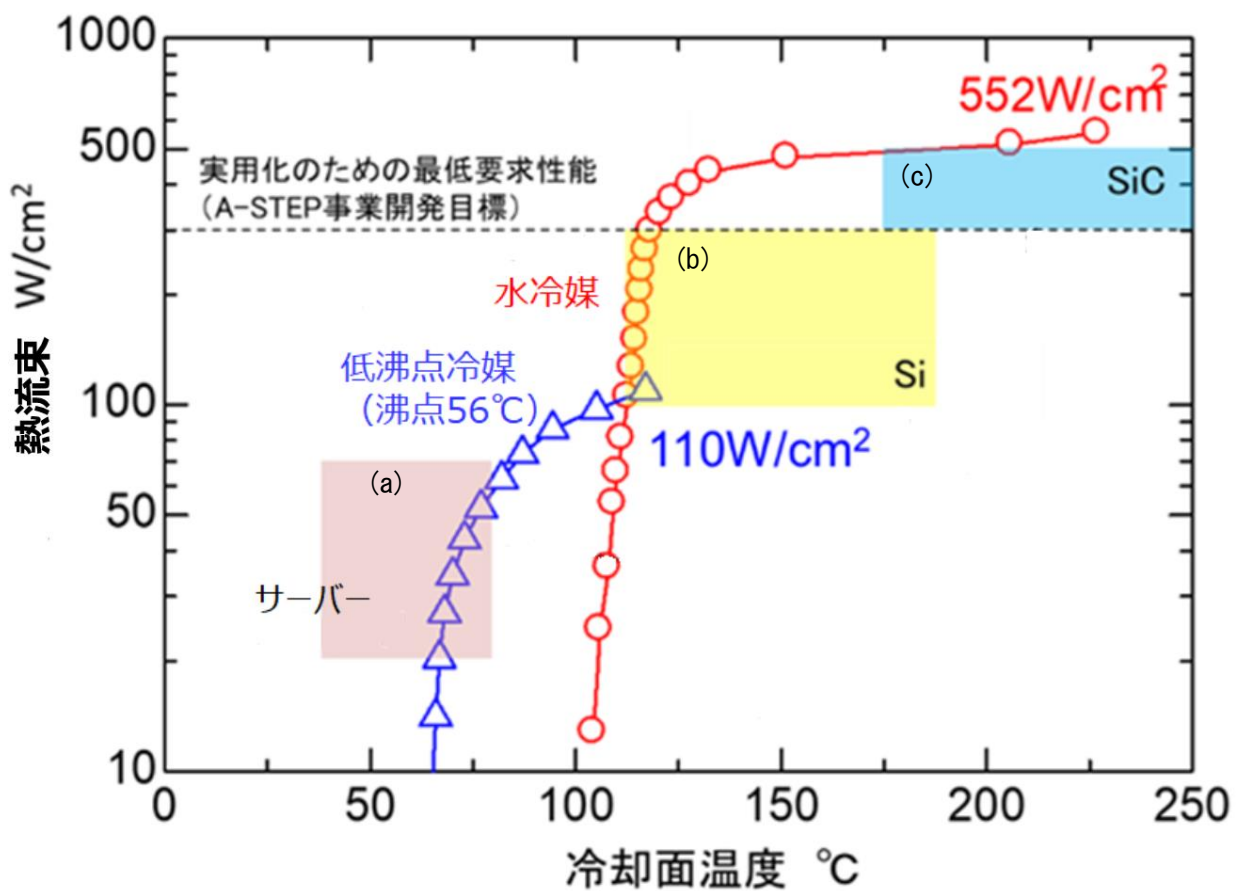


図3 冷却面温度と冷却性能の関係

沸騰促進体を用いた実験により、水冷媒（赤丸）とフッ素系不活性液体冷媒（青三角）を用いた場合の冷却面温度と熱流束を求めた。

- (a) 紫色部分：サーバーの冷却に用いる性能領域
- (b) 黄色部分：Siパワー半導体用途で使う性能領域
- (c) 水色部分：SiCパワー半導体用途で使用が想定される性能領域

## <用語解説>

### 注1) ロータス金属

レンコン状の多孔質金属で、多数の細長い気孔が同一方向に配列している。気孔に冷媒を流すことによる冷却特性を持つ。水素を含んだ熔融金属を凝固させる際に、固溶しきれない水素が気孔を形成することを利用して作製できるため、安価に製造が可能。

### 注2) 沸騰冷却

熱源の熱により液体の冷媒を沸騰させ冷却する手法。従前の冷却手法は、熱源から冷媒である水や空気への熱伝達に温度差を利用し、自然対流もしくは強制対流によって冷却するが、沸騰冷却は気化するときの蒸発潜熱（気化熱）を利用できるため、従来の数倍の冷却能を持つといわれている。

### 注3) 限界熱流束（Critical Heat Flux：CHF）

沸騰冷却において熱負荷が増加すると、ある点で伝熱効率の良い核沸騰が維持できなくなり、加熱面が蒸気膜で覆われた膜沸騰へ突然遷移する。遷移点での熱流束（単位面積あたりの熱流、単位  $[W/cm^2]$ ）を限界熱流束という。

### 注4) フッ素系不活性液体

フッ素を含んだ有機溶液の総称で、パーフルオロポリエーテル（PFPE）、パーフルオロカーボン（PFC）、ハイドロフルオロエーテル（HFE）などの種類がある。電気絶縁性が高く、化学的に不活性で、毒性もなく、さまざまな沸点を持つ液体がある。

## <本成果が貢献しうる持続可能な開発目標（SDGs）>



<お問い合わせ先>

<開発内容に関すること>

井手 拓哉 (イデ タクヤ)

株式会社ロータス・サーマル・ソリューション

〒661-0965 兵庫県尼崎市次屋3-3-16 岩谷産業株式会社 中央研究所内

Tel : 080-6153-8248

E-mail : secre[at]lotus-t-s.co.jp

<JST事業に関すること>

沖代 美保 (オキシロ ミホ)

科学技術振興機構 産学共同開発部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町

Tel : 03-5214-8995 Fax : 03-5214-0017

E-mail : jitsuyoka[at]jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

株式会社ロータス・サーマル・ソリューション

〒530-0001 大阪府大阪市北区梅田一丁目1番3号

Tel : 080-6153-8248

E-mail : info[at]lotus-t-s.co.jp

山陽小野田市立山口東京理科大学 入試広報課

〒756-0884 山口県山陽小野田市大学通一丁目1番1号

Tel : 0836-88-4505

E-mail : kouhou[at]admin.socu.ac.jp