

自己吸引沸騰の作動メカニズムの解明と高性能化研究

福井大学 学術研究院工学系部門 機械工学講座

党 超 鉦

1. 研究背景と目的

1.1 データセンター冷却における熱管理課題

生成 AI、高性能計算およびクラウドサービスの急速な普及に伴い、データセンターに搭載される CPU、GPU、AI アクセラレータおよび電源関連デバイスの発熱密度は継続的に増加している。従来の空冷方式では、熱抵抗および風量の制約が顕在化しており、単相液冷においても、流量増大に伴うポンプ動力、配管系の複雑化、漏えい時の電氣的信頼性リスク、および局所熱負荷変動への応答性が重要な課題となる。データセンター実装では、単に熱伝達率を高めるだけでなく、長時間運転時の安定性、冷媒安全性、圧力損失、保守性、およびモジュール交換性を同時に満たす冷却技術が求められる。

相変化を利用する沸騰冷却は、冷媒の潜熱を利用するため、比較的小さな温度差で高い熱輸送密度を実現できる。一方、従来のプール沸騰では、蒸気排出と液体供給が同一空間を共有するため、高熱流束域において気液対向流の干渉が顕著となる。この干渉により、加熱面近傍への液体再供給が遅れ、局所的な蒸気滞留およびドライアウトが発生し、限界熱流束（critical heat flux: CHF）に到達する。流動沸騰やスプレー冷却は強制流により高性能化できるが、外部ポンプ、配管、流量制御系を必要とし、圧力損失や流動不安定性という別の制約を伴う。

1.2 本研究における実施内容と主な成果

本研究では、気泡成長および気泡離脱に伴う界面運動を液体再供給の駆動源として利用する「自己吸引沸騰」に着目し、その成立条件と高性能化指針を明確にすることを目的とした。具体的には、拡張流路と多孔質補液層の組合せによる気液経路分離、水系における基準性能の再整理、絶縁性フッ素系冷媒 SS-49 への展開、微細流路内スラグ流の液膜厚さ測定、および冷媒物性を考慮した設計計算モデルの構築を実施した。

表 1 本研究における主な実施内容と成果

区分	実施内容	得られた成果・意義
提案概念	拡張流路、多孔質補液層、およびスラグ気泡運動を組み合わせた自己吸引沸騰機構を整理した。	蒸気排出経路と液体供給経路を空間的に分離し、気泡運動を補液駆動力として利用する設計概念を明確化した。
水系評価	純水を用いた自己吸引沸騰データを再解析し、構造パラメータの役割を整理した。	最大熱伝達率 $450 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ を達成し、平滑面と比較して HTC は 8.6 倍、CHF は 3.3 倍に向上した。
冷媒系評価	絶縁性冷媒 SS-49 の飽和圧力-温度関係、平滑面沸騰曲線、拡張流路+金属メッシュ構造を評価した。	絶縁性冷媒相変化冷却へ展開するための冷媒基準データと上部装着型拡張流路構造の設計基盤を得た。
モデル化	スラグ流液膜厚さ測定および設計計算モデルを構築した。	液膜保持、補液抵抗、蒸気排出限界、CHF 判定を同一枠組みで扱う設計手法を整理した。

2. 提案方法の概念

2.1 自己吸引沸騰の基本構造

提案構造は、放射状の拡張流路を有する銅基板と、その上部に配置した多孔質補液層から構成される。多孔質層は液体保持層として機能するとともに、気泡の鉛直方向への自由離脱を抑制する。加熱面で生成した気泡は、拡張流路内でスラグ状に伸長し、流路の拡張方向へ移動する。この過程で、蒸気は流路中心を通過して外周側へ排出され、液体は多孔質層および流路側壁側から供給される。

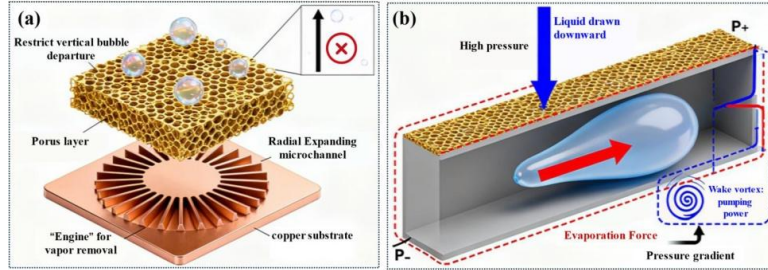


図1 自己吸引沸騰の基本構造とスラグ気泡運動による液体吸引機構

2.2 スラグ気泡運動、圧力勾配および液体再供給

拡張流路内で蒸発による気泡が非対称に成長すると、前後界面の曲率差、蒸発による体積膨張、および流路拡大に伴う運動量変化により、流路出口方向の圧力勾配が形成される。さらに、スラグ気泡が外周へ移動・離脱すると、後流側に一時的な低圧領域が生じる。この低圧領域が多孔質層内の液体を加熱面側へ引き込むため、発生した蒸気そのものが補液駆動源として働く。ここで一旦液体の吸引が始まると、加熱面近傍の再濡れが促進され、薄液膜蒸発および気泡生成が継続しやすくなる。その結果、気泡の成長・移動・離脱による圧力変動がさらに補液を誘起し、補液、蒸発、気泡排出が相互に強化される自己維持的な循環が形成される。この点が、単なる毛細力による受動的な液体供給とは異なる自己吸引沸騰の本質である。

$$\Delta P_{avail} = \Delta P_{cap} + \Delta P_{bubble} \quad (1)$$

ここで、 ΔP_{cap} は多孔質層または微細隙間に由来する毛細圧力であり、 ΔP_{bubble} はスラグ気泡の成長、移動および離脱により発生する圧力寄与である。従来の毛細吸液表面では主として ΔP_{cap} により補液を説明するのに対し、本研究の自己吸引沸騰では、熱負荷の増大に伴って気泡生成頻度が高まると ΔP_{bubble} も増大し得る。このため、外部ポンプを用いない受動構造でありながら、熱負荷に応答して補液を強める能動的冷却に近い挙動が期待できる。

2.3 液膜厚さを中心とする統一的理解

自己吸引沸騰の性能は、核生成サイト数や実効伝熱面積だけで決まるものではない。拡張流路内を移動するスラグ気泡と壁面の間には薄い液膜が形成され、この液膜が蒸発熱伝達とドライアウト発生の双方を支配する。液膜が薄いほど熱抵抗は小さくなるが、過度に薄い液膜は局所的な乾き上がりを誘発する。したがって、液膜厚さを流路形状、冷媒物性、スラグ気泡速度および多孔質層条件と関連づけて定量化することが重要である。

$$Ca = \mu U / \sigma, \quad Re = \rho U D / \mu, \quad Bo = (\rho_l - \rho_v) g D^2 / \sigma \quad (2)$$

本研究では、液膜形成とスラグ気泡運動を、キャピラリー数 Ca 、レイノルズ数 Re 、ボンダ数 Bo 、水力直径 D_h 、断面形状、隙間高さ、および多孔質孔径などの幾何パラメータで整理

した。この枠組みにより，水系で確認された自己吸引機構を冷媒系へ単純に置き換えるのではなく，物性差に基づき再設計することが可能となる。

表 2 自己吸引沸騰構造の主要設計因子

設計要素	物理的役割	設計上の留意点
拡張角	スラグ気泡を外周方向へ誘導し，出口方向の圧力勾配を形成する。	小さすぎると駆動力が不足し，大きすぎると局所滞留または圧力損失が増大する。
流路高さ	スラグ流形成空間と蒸気排出断面を決定する。	低すぎると閉塞し，高すぎると液膜蒸発領域が拡散して吸引効果が弱まる。
多孔質孔径	液体保持，毛細補液，気泡拘束を同時に支配する。	細かすぎると補液抵抗が増加し，粗すぎると蒸気貫通を抑制できない。
層厚さ	液体リザーバ容量と吸引距離を決定する。	厚すぎると補液抵抗が増加し，薄すぎると蒸気貫通を抑制できない。

3. 実験系と測定方法

3.1 可視化沸騰実験装置

自己吸引沸騰の性能評価には，可視化可能な池沸騰実験装置を用いた。装置は，沸騰容器，無酸素銅製試験部，直流電源，K 型熱電対，圧力計，高速カメラ，LED 光源，恒温水槽，真空ポンプ，補助加熱器およびデータ収集装置から構成される。試験部内には複数の熱電対を軸方向に配置し，温度分布を外挿することで受熱面温度を推定した。

$$q'' = Q/A_h = VI/A_h, \quad h = q'' / (T_s - T_{sat}) \quad (3)$$

式(3)により，電圧 V および電流 I から熱流束 q'' を算出し，表面過熱度 $T_s - T_{sat}$ に基づいて熱伝達率 h を評価した。高速度カメラによる可視化観察では，核生成，合体，スラグ化，外周方向への蒸気排出，および液体再濡れ過程を観察した。

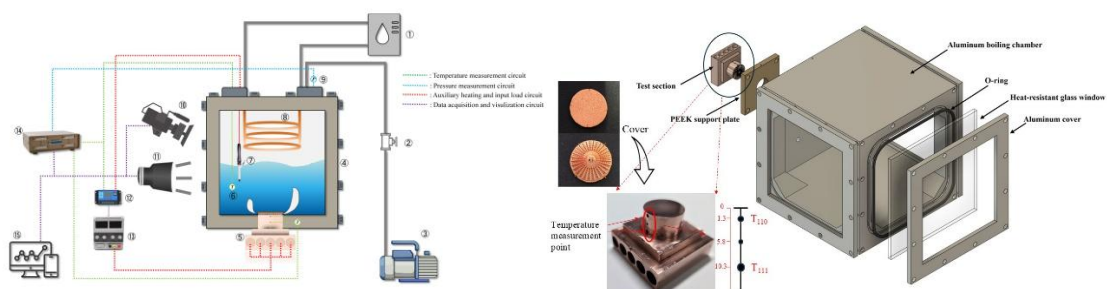


図 2 可視化沸騰実験装置の構成

3.2 凝縮系および平滑面基準試験部の改良

初期装置では，沸騰容器から外部冷却器へ蒸気を輸送する配管径が小さく，配管内で早期凝縮した液体が液柱を形成し，蒸気排出を妨げた。その結果，容器内圧力が上昇・変動し，沸騰曲線の再現性が低下した。そこで，大容積の透明凝縮チャンバーを沸騰容器上部に直接連通させ，内部に銅管コイルを配置して蒸気を直接凝縮する方式へ変更した。これにより，蒸気輸送のボトルネックと凝縮液滞留が低減され，冷媒沸騰実験を安定して実施できる基盤が得られた。

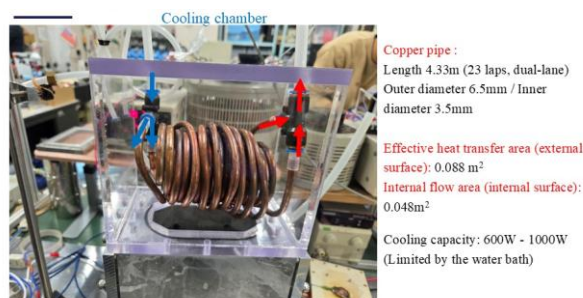


図 3 凝縮系および平滑面基準試験部の改良

また、平滑面基準実験の信頼性を高めるため、PEEK 支持板および銅製試験部を再加工し、K 型熱電対を交換・校正した。銅表面は段階研磨により平滑化し、SS-49 の物性測定および平滑面沸騰曲線の取得に用いた。

4. 純水を用いた自己吸引沸騰性能

4.1 熱伝達率と限界熱流束の向上

純水を用いて、平滑面、拡張流路のみ、および拡張流路+多孔質層構造を比較し、自己吸引沸騰による高性能化機構を整理した。拡張流路+20 PPI 多孔質層では、低熱流束域で最大約 $450 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ の熱伝達率が得られ、平滑面比で 8.6 倍の向上を示した。また、CHF は平滑面比で約 3.3 倍に増加し、高熱流束域でも約 $200 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ の熱伝達率を維持した。

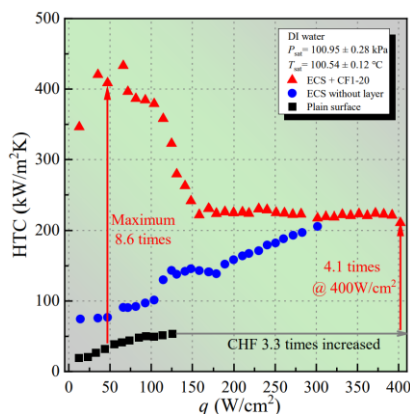


図 4 純水を用いた自己吸引沸騰の熱伝達率および CHF 向上

表 4 純水自己吸引沸騰における構造別性能の解釈

構造	主要結果	物理的意味
平滑面	基準 HTC および基準 CHF を与える。	通常のプール沸騰であり、気液対向流の干渉が支配的である。
拡張流路のみ	HTC は平滑面より向上するが、多孔質層併用ほど高くない。	拡張流路により気泡の横方向移動が促進される。
拡張流路+20 PPI 多孔質層	最大 HTC 約 $450 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ ，平滑面比 8.6 倍，CHF 約 3.3 倍。	スラグ形成，液体保持，気液経路分離が同時に作用する。

4.2 多孔質層の孔径・厚さが与える影響

自己吸引沸騰の高性能化には、多孔質層を単に微細化して毛細力を高めればよいわけではない。1 mm 厚・20 PPI 条件では、気泡が流路中心に沿って軸方向に排出され、側壁および多孔質層からの液体供給経路が保持される。一方、1 mm 厚・80 PPI では孔径が小さすぎるため、気泡成長と伸長が過度に制限され、負圧を生むスラグ気泡が形成されにくい。2 mm 厚・20 PPI では孔径は適切であるが、層が厚すぎるため蒸気侵入域が熱抵抗となり、吸引効果が加熱面近傍まで十分に伝わらない。

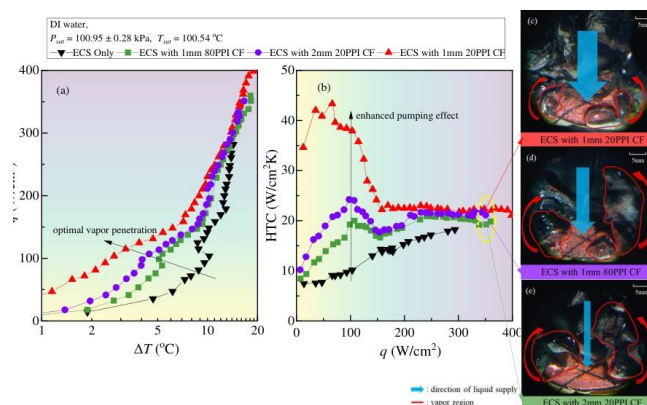


図5 多孔質層の孔径および厚さが自己吸引沸騰に及ぼす影響

表5 多孔質層条件と自己吸引機構の関係

多孔質層条件	観察された特徴	設計上の解釈
1 mm・20 PPI	気泡は流路軸方向に排出され、液体供給経路が比較的明確である。	スラグ形成空間と液体透過性のバランスが良好である。
1 mm・80 PPI	小気泡が分散し、強い軸方向スラグが形成されにくい。	孔径が小さすぎ、気泡成長と蒸気排出を阻害する。
2 mm・20 PPI	蒸気が厚い多孔質層内に深く侵入しやすい。	液体保持量は増えるが、熱抵抗と補液抵抗が増大する。

4.3 既存沸騰促進手法との比較

自己吸引沸騰の位置づけを明確化するため、既存のポンプ駆動型、毛細力駆動型、表面改質型の沸騰促進手法との比較を整理した。自己吸引沸騰は外部ポンプを用いないにもかかわらず、50–200 W/cm²程度の中熱流束域において400–450 kW/(m²K)級の高い熱伝達率を示す。これは、毛細力のみで液体を供給する構造とは異なり、スラグ気泡離脱に伴う負圧生成を補液駆動力として利用するためである。

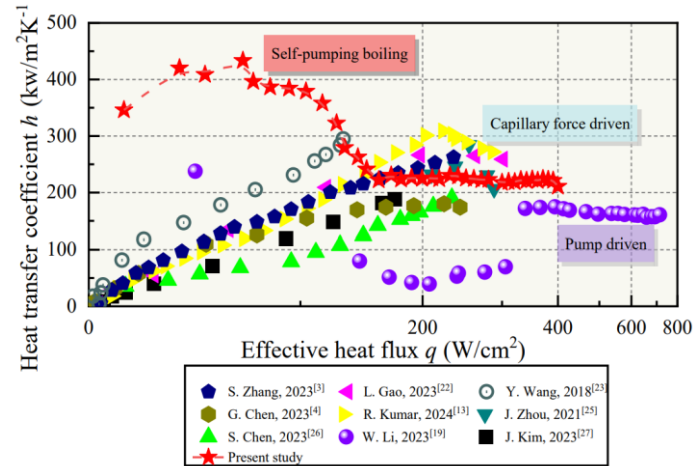


図 6 既存沸騰促進手法に対する自己吸引沸騰の比較

図 6 は、本研究の純水を用いた結果を既存の沸騰促進手法と比較したものである。本図は冷媒二相流チャンネル一般の性能比較を意図したものではなく、自己吸引沸騰が受動構造でありながら、気泡運動を利用して能動的液体供給に近い挙動を示すことを位置づけるための比較である。

5. 絶縁性冷媒への展開

5.1 冷媒 SS-49 の飽和圧力-温度関係

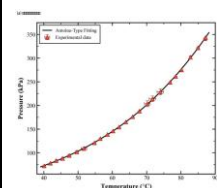
データセンター実装を考えると、水は高い伝熱性能を有する一方、配管から水が漏えいした場合には、電子機器の短絡、絶縁劣化、腐食などの電気的信頼性リスクが生じる。そのため、電気絶縁性を有するフッ素系冷媒を用いた相変化冷却への展開が重要である。本研究では、その候補冷媒として DAISAVE SS-49⁶⁾ を対象とした。SS-49 はフッ素系絶縁性液体であり、常圧沸点が約 49℃であるため、サーバ冷却で想定される温度範囲において沸騰相変化を利用しやすい。また、絶縁破壊電圧が高く、体積抵抗率も大きいため、電子機器近傍で使用する相変化冷媒として有望である。さらに、低粘度であるため微細流路や多孔質層内での流動抵抗を低減できる可能性がある一方、水と比べて表面張力および蒸発潜熱が小さいため、自己吸引沸騰構造をそのまま適用するのではなく、冷媒物性に応じた流路寸法、多孔質孔径、液膜保持条件の再設計が必要となる。

本研究では、SS-49 について 40～90℃の範囲で飽和圧力-温度関係を測定した。測定では、冷媒を封入した密閉容器を恒温水槽中で温度制御し、各温度点で定常状態を確認した後温度と圧力を記録した。得られたデータは Antoine 型の式で良好に近似された。

$$\log_{10}(P) = A - B/(T + C) \quad (4)$$

表 6 DAISAE SS-49 の Antoine 型近似式

過程	近似式	決定係数
昇温過程	$\log_{10}(P) = 9.796992 - 4022.880252/(T + 466.885212)$	0.999870
降温過程	$\log_{10}(P) = 10.144928 - 4010.391719/(T + 492.481883)$	0.999883



5.2 SS-49 平滑面基準沸騰曲線と新規構造の提案

SS-49 の平滑銅面上における池沸騰曲線を取得し、Rohsenow, Forster-Zuber, Cooper などの代表的相関式と比較した。低熱流束域では実験値は代表的相関式と同程度またはやや高い伝熱性能を示した一方、高熱流束域では一部の相関式を下回る傾向が認められた。この差異には、冷媒物性値、表面状態、熱損失補正、温度外挿誤差、および非凝縮性ガスの影響が含まれる可能性がある。SS-49 の結果は、冷媒系自己吸引沸騰を設計する際の基準値となる。

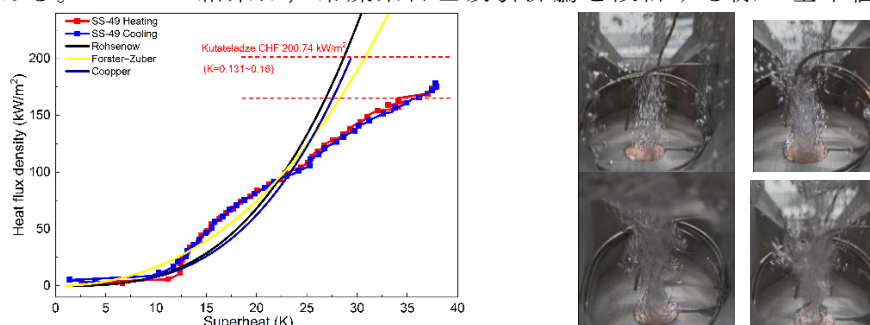


図 7 SS-49 の平滑銅面における沸騰曲線および代表熱流束条件での沸騰様相
(可視化画像の熱流束：3, 6, 15, 18 W/cm²)

さらに、受熱面を直接加工する従来構造から、平滑受熱面の上部に拡張流路と多孔質補液層を配置する上部装着型拡張流路構造へ展開した。この構造では、CPU/GPU パッケージや冷却プレート表面を直接加工することなく、液体補給および蒸気排出の機能を交換可能な上部構造に持たせることができる。そのため、実装性、交換性、および構造パラメータ試験の自由度の観点から有効である。今後は、この上部装着型構造について、隙間高さ、拡張角、リブ厚さ、多孔質層の孔径および濡れ性を変化させ、冷媒条件下における沸騰曲線、熱伝達率、限界熱流束、圧力変動、気泡排出挙動を実測し、自己吸引補液の発現条件を明らかにする予定である。

また、上部構造として拡張流路を配置する方法に加えて、多孔質層そのものの表面に直接拡張流路を形成する手法も試みている。この方法では、多孔質層が液体保持・補液経路として機能すると同時に、その表面に形成された流路がスラグ気泡の成長方向と蒸気排出経路を規定する。これにより、受熱面近傍における液体供給経路と蒸気排出経路をより一体的に制御できる可能性がある。一方で、多孔質材料への微細流路加工では、孔構造の閉塞、表面変形、加工精度の低下が生じやすいため、加工条件と沸騰性能の関係を併せて評価する必要がある。

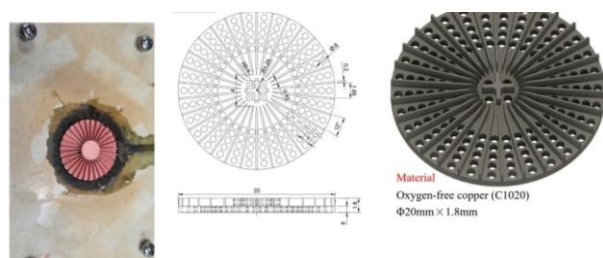


図 8 拡張流路・金属メッシュ構造の評価および上部装着型拡張流路構造の設計

9. まとめ

本研究では、自己吸引沸騰の作動機構を、拡張流路内のスラグ気泡形成、多孔質層からの液体再供給、薄液膜保持、および蒸気排出の連成現象として整理した。特に、気泡の成長・移動・離脱に伴う圧力変動を補液駆動力として利用し、蒸気排出経路と液体補給経路を空間的に分離する点に着目した。

純水を用いた実験では、拡張流路と多孔質層の組合せにより、最大約 $450 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ の熱伝達率が得られ、平滑面比で熱伝達率は 8.6 倍、限界熱流束は 3.3 倍に向上した。また、多孔質層の孔径および厚さが、補液性能、スラグ気泡形成、蒸気排出、熱抵抗を同時に支配することを明らかにした。

絶縁性冷媒への展開に向けては、候補冷媒 SS-49 の飽和圧力－温度関係および平滑面基準沸騰曲線を取得し、冷媒条件下での構造評価に用いる基準データを整備した。さらに、受熱面を直接加工しない上部装着型拡張流路構造と、多孔質層表面に直接拡張流路を形成する構造を検討し、実装性を考慮した構造展開の方向性を示した。

謝辞

本研究は、公益財団法人天野工業技術研究所の研究助成を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) S. Yang, S. Hong and C. Dang, Self-pumping boiling mechanism bridging passive and active cooling performance, manuscript submitted to Int. J. Heat Mass Transfer, 2026.
- 2) D. Fu, Y. Hu, Z. Li, C. Dang and S. Hong, An experimental investigation on characteristics of liquid film thickness of gas-liquid Taylor flow in square/rectangular microchannel applied in microreactor, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 234, 126081, 2024.
- 3) S. H. Hong, C. B. Dang and E. Hihara, Experimental investigation on flow boiling in radial expanding minichannel heat sinks applied for low flow inertia condition, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 143, 118588, 2019.
- 4) S. H. Hong, C. B. Dang and E. Hihara, Experimental investigation on flow boiling characteristics of radial expanding minichannel heat sinks applied for two-phase flow inlet, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 151, 119316, 2020.
- 5) W. M. Rohsenow, A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids, Trans. ASME, Vol. 74, pp. 969-976, 1952.
- 6) <https://www.daikinchemicals.com/jp/solutions/products/fluorinated-liquid/ss-49.html>