

## TED Plaza

## 気泡微細化沸騰を使った沸騰冷却デバイス実現に向けて



海野 徳幸

山陽小野田市立山口東京理科大学 講師  
工学部 機械工学科  
unno@rs.socu.ac.jp

## 1. はじめに～第4次産業革命と熱工学の関係～

1700年代の蒸気機関の発展から始まった第1次産業革命、電気の産業化とモノの大量生産の時代となった1800年代の第2次産業革命、1900年代後半にコンピュータとインターネットが爆発的に普及し様々なオンラインサービスが開始された第3次産業革命。これら以前の狩猟時代や農耕時代を含めて、有史以来産業革命は起こり続けてきた。同時に、それぞれの時代の必要に合わせて技術が進歩し、知識が蓄え続けられてきた。次なる第4次産業革命(ドイツ発祥の Industry4.0, 日本が掲げる Society5.0, 呼び名は違うが目指す先は同じ。)に向けて、ロボット、ビッグデータ、AI (Artificial Intelligence) や IoT (Internet of Things) などのカタカナ言葉が躍る中、人類は産業の究極の効率化に向けて突き進んでいるところである。産業が効率化するということは、今まで必要としていた時間と労力が必要なくなるということでもある。例えば、薪の火を絶妙にコントロールしながら焦がさないように傍に付きっきりでかまどを使って米を炊くことは現在では多くの家庭でなくなった。筆者自身もかまどを使ったことはないの、我が家でも私の代でかまど炊飯技術は途絶えている。しかし、知識は決して色あせることはない。「はじめちよろちよろ中ばっぱ、赤子泣いてもふたとるな」のようなおいしい米の炊き方は古くから先人達が経験的に作り出し、受け継いできた知識である。ここに工学のエッセンスが付与され、米のうまみに関する酵素反応が50℃付近でちょうどよい(はじめちよろちよろの部分)とか、沸騰気泡による激しい熱対流で米を躍らせると一粒一粒が均一温度になり一気に炊ける(中ばっぱの部分)など技術的な裏づけがされた。そして、かまどがおおよそ途絶えた今日でも家電量販店にかまど炊きを売りにした自動化された炊飯器が並んでいるということは、知識の確かさを物語っている例だと強く感じる。

「自動化」の第3次産業革命を超え、上記の例のような知識を集約化した上で「自律化」による産業の効率化を達成し、第4次産業革命を成功に導くためのキーワードの一つは間違いなく本部門の皆様で支えておられる「熱工学」であり、中でも冷却技術であると考え。なぜなら、冷却技術は次世代自律化システム全体を長期連続運用するにあたっての信頼性を確保するためにとっても大切だからである。第3次産業革命から産業のコメとまで呼ばれるようになった半導体デバイスは今や人々の生活には欠かせないものである。第4次産業革命のシステムの根幹をなす全ての機器においても半導体電子デバイスが引き続き使われるため、これらの熱による故障を防ぐには必ず冷やしてやる必要がある。例えば、ロボットや電気自動車を効率良く動かすためのモータ制御用のインバータ回路や制御マイコン、ビッグデータ解析やAIを実現するためのデータセンターやスーパーコンピュータ、末端機器でセンシングしたデータを無線で収集転送する5G基地局、さらには位置情報を取得できるGPS (Global Positioning System) などなど。単にそれぞれの半導体デバイスを冷やせばよいわけでない。次世代自律化システムの冷却にかかるすべてのコスト(=電気料金)はそのまま製造される品やサービスの価格に上乘せされる。つまり高集積化され発熱密度が上がる中、「低コスト」にそれぞれの環境に適した状況下で冷却を行わなければならない。

高速に動作するソフトウェアを開発することでハードウェア構成自体の規模を縮小し、次世代システムの維持にかかるコストを大元から削減できるならば、確かにこれが一番省エネ・低コストになる方法である。実際、各国とも現在はこのようなソフトウェア人材の育成に力を入れているように見える。しかし、ソフトウェアがどんなに進化したとしてもハードウェアをゼロにすることは絶対にできない。データセンターを筆頭としてシステムの電力コストのうち冷却に要する電力が占める割合はまだ多い状態である。地球上の資源エネルギーを無駄遣いすることなく持続可能な発展社会を形成しながら、第4次産業革命時代を生き残るためにはハードウェアの省エネ冷却技術が絶対に欠かせないはずである。今後ますますこの分野の盛り上がりが必要と考え、筆者は次に述べる沸騰冷却に関する研究に現在取り組んでいる。

## 2. 沸騰冷却技術と気泡微細化沸騰研究のこれまで

半導体デバイスを冷却する際の各種冷却方式ごとの性能比較として、伝熱工学の教科書にも記載のある熱伝達率のおおよその大きさを図1に示す(日本機械学会, 2005)。半導体デバイス冷却の歴史はほとんどこの図の性能通りに行われてきた。すなわち、初めの頃は半導体デバイスの集積度が低く扱う電力量も少なかったのでデバイス素子表面の自然対流のみで冷却が間に合っていたものが(気体・自然対流)、集積化が進み空気との伝熱面積拡大のためフィンが必要になり、それでも冷却が追い付かず次にファンが装着された(気体・強制対流)。そしていよいよファンでも冷却が困難になると低沸点冷媒である絶縁性液体中に半導体デバイス自体を沈める浸漬冷却手法が1960年代に提案され、1980年半ばには当時のスーパーコンピュータに一部導入されたりもした(液体・強制対流、沸騰・凝縮)。こう書くと半導体デバイスの沸騰冷却はすでに50年超の歴史があり熟成して一般化された技術なのだろうかと感じるかもしれないが、実際には沸騰冷却が応用された範囲は狭かった。物理的に最も高い熱伝達率を有する冷却技術は沸騰・凝縮であると分かっているながら、何故広く使われることがなかったのか？それは、電気電子工学の発展も同時に進んでおり半導体デバイスからの発熱自体を抑えるたくさんの技術が開発されたため、長い年月をかけ熟成され信頼性が高い空冷・水冷強制対流技術で大抵は事足りていたからであろう。

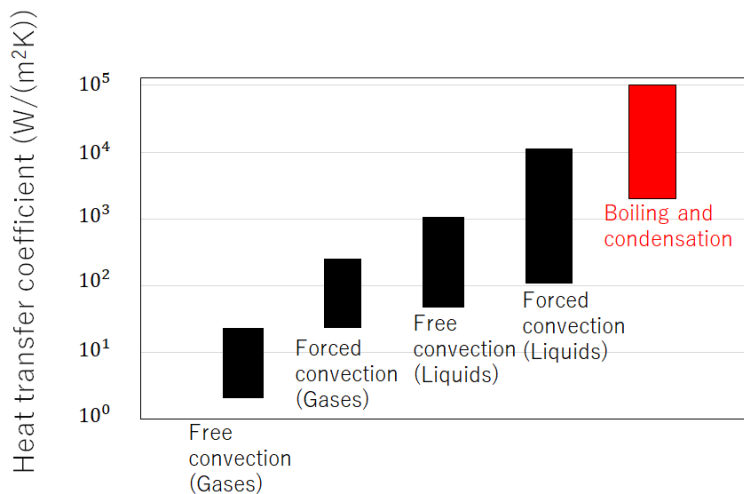


Fig. 1 Comparison of heat transfer coefficients in various cooling methods.

しかし、半導体デバイスの高集積化の流れは加速し続けており、強制対流冷却時の水冷ポンプや空調にかかる冷却電力コストがシステムの利益率にますます影響を与えるようになった。第4次産業革命時代を勝ち抜く省エネ冷却技術として高熱流束除熱が可能な沸騰冷却が再び必要とされる時代がきたのである。幸いなことに電気自動車やロボット、産業用モータ駆動向けの大電力パワー半導体用としては炭化ケイ素(SiC)製のデバイス開発が進み、従来のシリコン(Si)半導体の動作温度約100℃を大きく超える200℃超での動作が可能になった。絶縁に気を付ければ安価で安全性の高い液体である水は、潜熱が他の液体に比べ極めて大きく沸騰冷却に最も向く冷媒である。水の大気圧下における飽和温度(沸点)は100℃であるため、従来のSi製半導体デバイスでは水を用いた沸騰冷却の適用は難しかった。高温動作が可能な半導体の出現により水の沸騰冷却がSiに比べて容易に適用検討できるようになったことは極めて大きな転換点である。

以上のように省エネ冷却技術の切り札として期待できる沸騰冷却であるが、これを普及するために解決しなければならない課題を図 2 に示す沸騰曲線を使って説明する。沸騰曲線は横軸に発熱面表面の温度から使用液体の飽和温度を引いたものである伝熱面過熱度を、縦軸に熱流束（発熱密度）をプロットしたものである。このような整理方法は東北大学の抜山先生が 1934 年に提唱したもので、今や沸騰現象を説明するのに世界中で用いられている（抜山, 1934）。最初、物体が液体中で発熱しだすと、液体との温度差による対流熱伝達がおこる非沸騰領域が現れる。さらに発熱密度が上昇すると、発熱面表面の温度が液体の飽和温度を超え沸騰が始まり気泡が発生する。この時、蒸発潜熱として発熱面から大量の熱を奪うことができるので、熱流束上昇に対する伝熱面過熱度の変化量が非沸騰領域に比べて小さくなる。発熱面上の気泡が発生する個所にはキャビティと呼ばれる小さなくぼみがあり、これを核として気泡の発泡と離脱を繰り返しながら潜熱輸送されるので、核沸騰領域と呼ばれる。非沸騰領域から核沸騰領域に遷移する際の問題が伝熱面過熱度のオーバーシュートである。図 1 にも示した通り、沸騰が開始すると熱伝達率が急激に増大することで壁面温度が急降下することがある。急激な温度変化はナノスケールで作製されている半導体デバイスに高いストレスを与えるため、オーバーシュートは抑える必要がある。また、核沸騰領域においてさらに熱流束が増すと、徐々に伝熱面過熱度の上昇幅が大きくなり、ついには図 2 の赤い点で示した箇所に到達する。この点は限界熱流束（Critical heat flux, CHF）と呼ばれる。一般に、飽和温度にある液体中での沸騰は飽和沸騰と呼ばれ、大気圧下における水の飽和沸騰時の CHF は  $110 \text{ W/cm}^2$  程度である。通常は CHF を超える熱流束が生じると、発熱面全体が気泡の膜に覆われる膜沸騰へと遷移する。この時、発熱面には液体が直接接触れられなくなり蒸発潜熱による熱輸送ができなくなってしまうことで急激に熱伝達率が低下する。結果、膜沸騰への遷移が起こると、半導体デバイスが壊れてしまう温度まで急上昇してしまう。以上のことから、沸騰冷却は核沸騰域内の CHF から安全率を取った熱流束までの範囲内で通常実施される。しかし、次世代電気自動車に用いられる SiC 製インバータの発熱密度は  $500 \text{ W/cm}^2$  にも達すると言われており、CHF 自体の向上技術もしくは CHF を超える沸騰冷却技術がなければ実際の使用は難しい。

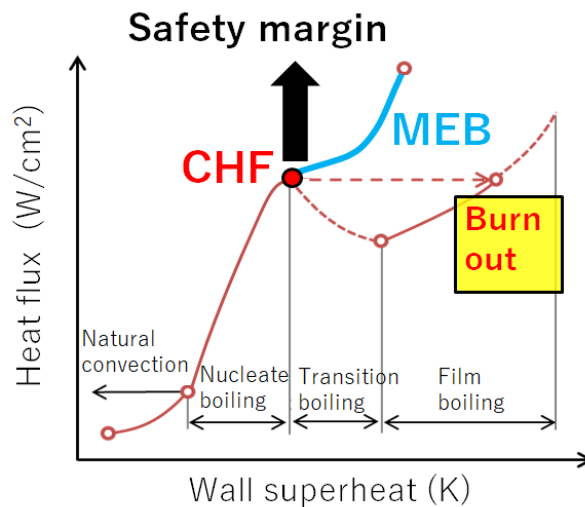


Fig. 2 Boiling curve with or without microbubble emission boiling (MEB) regime.

CHF を超える沸騰冷却技術の一つが気泡微細化沸騰（Microbubble emission boiling, MEB）である（図 2 青線）。MEB は 1980 年代に特殊な沸騰現象として群馬大学の稲田先生らにより発見された（稲田他, 1981a, 1981b, 1981c, 1981d）。本研究室で取得した MEB が発生した場合の実際の沸騰曲線を図 3 に示す。純水プールを用いた大気圧下での実験で無酸素銅製の伝熱面面積  $\phi 10 \text{ mm}$ 、サブクール度  $50 \text{ K}$  での試験結果である。破線はサブクールプール沸騰試験時の CHF 予測によく用いられる Ivey-Morris の式より計算した熱流束値である（Ivey and Morris, 1966）。通常であれば予測された CHF 付近で膜沸騰に遷移してしまい  $100 \text{ K}$  以上の伝熱面過熱度になってしまうはずが、MEB が発生することで  $900 \text{ W/cm}^2$  近くまで熱流束が伸びていることが分かる。もし MEB を積極的に利用できるなら、SiC 製インバータの冷却要求に対しても余裕のある高熱流束冷却が可能になる。



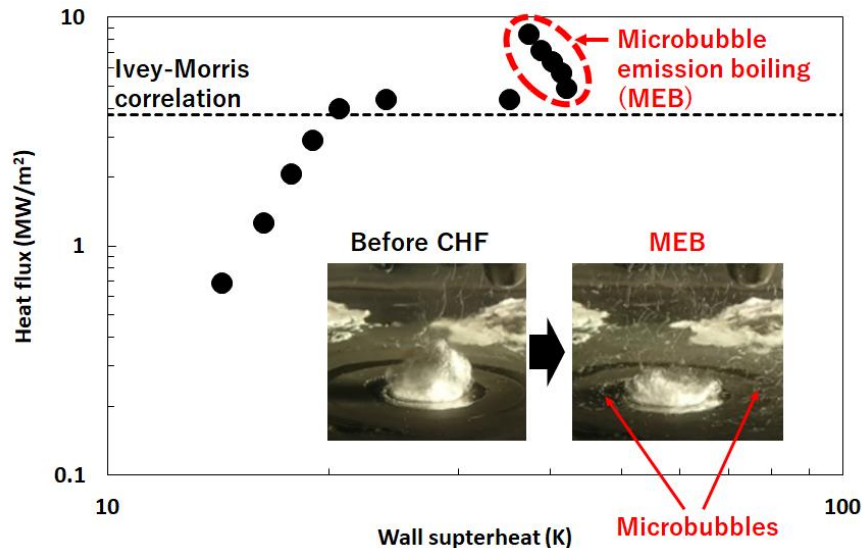


Fig. 3 Boiling curve in subcooled pool boiling at liquid subcooling of 50 K using purewater.  
(1 MW/m<sup>2</sup> = 100 W/cm<sup>2</sup>)

このように驚異的な高熱流束冷却を可能とする MEB であるが、発見から 30 年近くが過ぎても未だ実用が難しいと考えられている。なぜなら、詳しい発生機構が分かっていないからである。しかし、多くの研究者らによって発生条件に関してはおおよそ明らかになりつつある。次の (1) ~ (8) に MEB に関するこれまでの主な知見をまとめた。紙面の関係上その全てを紹介できていないことをお詫びいたします。

(1) プール内圧力の影響 (高圧力下ほど MEB が起きにくい) (Suzuki, et al., 2014)

SUS 製耐圧容器内に純水を入れ、窒素ガスを充てんすることで加圧環境を生み出した実験である。サブクール度 40K, 60K の時の +0, 50, 100 kPa の条件が調べられた結果、100 kPa, 40K 時には MEB への遷移が見られるものの 450 W/cm<sup>2</sup> のときの伝熱面過熱度は 100 K を超えてしまう。

(2) 純水への有機溶媒の添加量が高濃度だと MEB 発生に悪影響となる (Furusho, et al., 2016)  
純水以外の溶媒で MEB が発生するかどうかを確認するため、自動車用不凍液の成分として知られるエチレングリコール (EG) 水溶液の濃度と MEB 遷移の関係についての報告がある。その結果は、EG 濃度が高くなるほど MEB への遷移に高いサブクール度が必要になり、あまりに高い濃度では MEB 自体発生しないことが明らかになっている。他にも、水-エタノール (10%) や水-1-Butanol (3%) の混合液でも MEB の発生は確認されている (Suzuki, et al., 2005)。

(3) サブクール度の影響 (純水の場合大気圧下サブクール度約 20-25K 以下では MEB が起こらない)

MEB 発生要因の一つとして CHF 付近に生じる合体泡の凝縮崩壊が関連していると考えられている。気泡が凝縮崩壊しない飽和沸騰では MEB は観測されていない。実際にサブクールプール沸騰試験時にサブクール度を細かく変化させ純水にて実験された例を見ると、サブクール度 20-25K 以上で MEB が起きるとの報告がある (Suzuki, et al., 2011, Tang, et al., 2013)。また、沸騰現象ではないがサブクールプール中に蒸気を射出した場合に、サブクール度 20K 以上になると蒸気泡界面に擾乱が発生するとの報告もある (Ueno, et al., 2007) (Tang, et al., 2015) (Ueno, et al., 2018)。

(4) プール中に超音波を照射すると、MEB の発生時サブクール条件が緩やかになる  
気泡の凝縮崩壊が MEB 発生の一つの要因であるとの考えから、水中の超音波照射を外乱としたときに MEB 発生条件がどのように変化するかも調べられている。MEB が発生しないサブクール度 20 K で超音波を照射した場合、伝熱面上の合体気泡が微細気泡群に崩壊とともに高熱流束になる MEB が発生している (Suzuki et al., 2009)。すなわち、MEB はサブクール度 20 K 以上の CHF 付近で伝熱面上の合体気泡の気液界面の不安定が増幅して微細気泡に崩壊し、固液接触が起こり、

熱流束が CHF 以上に高くなるものと考えられる。純水の水平矩形管内流動沸騰に発生した MEB において、伝熱面付近の圧力変動と気泡挙動の同期動画解析では、気泡崩壊の周波数にほぼ比例して熱流束が直線的に増加することが報告されている。すなわち MEB における気泡崩壊の周波数が固液接触の周波数と考えている (Suzuki, et al., 2005)。

(5) 水中の非凝縮性ガスの影響 (非凝縮性ガスが MEB 特性に影響する)

純水を用いたサブクールプール沸騰試験において、サブクール度 50 K として事前に脱気をしなかった場合に MEB 領域での熱流束の伸びが抑制されることが報告されている (Tang, et al., 2013)。また高速カメラによる撮影により、溶存ガスがある場合には MEB 時の気泡凝縮崩壊の抵抗になることも示されている (Nakamura, et al., 2018)。一方、窒素ガスをバブリングさせながらサブクール度 50 K にて実験を行った場合でも MEB が発生することも確認されている (海野・結城他, 2018)。

(6) 伝熱面周辺の温度場観察による MEB 時の固液接触箇所の測定 (Furusho, et al., 2017)

高熱流束除去を可能にする MEB であるが、それだけの熱量を冷却するにあたっては伝熱面上にサブクール液が触れて相変化が起きていないことには実現できないはずである。そこで、極細熱電対をアレイ状に配置したものを使って伝熱面周辺の時間平均温度場が測定され、固液接触箇所の解明が試みられている。その結果、MEB 発生初期においては伝熱面周辺部で固液接触が盛んにおきているが、高熱流束域になると面中央側に固液接触が広がる可能性があることが示されている。

(7) 強制流動沸騰においても MEB は発生する (久保・熊谷, 1992)

上辺 427  $\mu\text{m}$ , 下辺 280  $\mu\text{m}$ , 高さ 104  $\mu\text{m}$  の台形マイクロチャンネル内において、サブクール度 80 K 質量流速 883.8  $\text{kg/m}^2\text{s}$  の純水を使った試験にて、MEB の発生が確認されその最大熱流束は 1441  $\text{W/cm}^2$  と報告されている (Wang and Cheng, 2009)。また、流速が速く、流路高さが高いほど MEB へ遷移しやすいとされる (Suzuki, et al., 2005)。しかし、長尺の伝熱面では下流側のサブクール度が劣化し MEB が抑制される (Suzuki, et al., 1999)。これを防ぐには、サブチャンネルからの衝突噴流を吹き付け長尺の伝熱面全領域のサブクール度を調整することが有効である (Torikai, et al., 1994)。

(8) 平面伝熱面だけでなく、細線加熱実験においても MEB は発生する (庄司, 2006)

白金細線などに通電加熱した場合にも、サブクール度の条件が合えば MEB に遷移し平面と同様に CHF を超える高熱流束除去が可能である。一方で、平面伝熱面でも設置の際に周囲から一段下がった状態 (0.5 mm) の場合には MEB への遷移が阻害されることも報告されている (Zhu et al., 2014)。

### 3. 気泡微細化沸騰の実用化にむけた応用研究

前章で紹介した研究のように気泡微細化沸騰のメカニズム解明に対する様々なアプローチがされている。一方で、沸騰という現象自体も最初は工業的応用が先に熟成し、その後に学術上の理解が進み始めたという前例がある。そこで、まずは実用的な気泡微細化沸騰冷却デバイスを何かしらの方法で提示することが急務と考え、これができれば工業的および学術的観点からもありがたいと願っている。そして実用できる気泡微細化沸騰冷却デバイスの熟成を通して様々な問題を解決しながら発生メカニズムに再度アプローチすることにより、解明への道筋が見えてくるのではないかと思ひ、現在筆者の研究グループが進めている応用研究を次に紹介させていただく。

(1) 伝熱面表面ぬれ性が MEB の発生に与える影響 (ぬれ性が悪いと MEB を阻害する)

MEB 実験には平面伝熱面の場合は無酸素銅が用いられてきた。しかし、無酸素銅は酸化・腐食しやすく実用上は何かしらの表面コーティングがなされるはずである。そこで、無酸素銅伝熱面にニッケルやクロムをコーティングした場合 MEB に遷移するのかを確かめた。その結果、コーティングにより MEB への遷移が阻害されることが分かった。水滴を用いて接触角を測定したところ、MEB に遷移後の無酸素銅面に比べて遷移しなかったコーティング面の表面ぬれ性は低いことが分かった。また、無酸素銅伝熱面であっても表面にフッ素系の薄膜コーティングを施した場合にも、MEB への遷移が起きず膜沸騰に遷移することも確認できている。まずは高熱流束環境においても伝熱面がぬれる条件が整っていないと蒸発潜熱による熱輸送が行われないので、気泡の凝縮

崩壊パラメータだけでなく伝熱面表面ぬれ性が MEB 遷移の条件として重要であることを明らかにした (海野・結城他, 2018) (Unno, et al., 2018) .

(2) プール水位が MEB の発生に与える影響 (水位 10mm まで MEB の挙動は変わらない)  
はじめに述べたように、最終目標は省エネ冷却技術としての MEB の利用であるので、外部電力を必要とするポンプを使う強制流動系ではなく、サブクールプール沸騰を現在主に研究している。これまでの MEB 研究で用いられてきたサブクールプール沸騰装置はデバイスに実装するには大きく、プール容量も 1L 以上のものが多かった。そこで、使用液量を 100 mL 以下にしたプール沸騰装置においても MEB への遷移が見られるのかを明らかにするため、実際にコンパクトプール沸騰装置を製作し MEB へ遷移可能な最低水位を調べた。その結果、純水であれば水位 10 mm までは既存の MEB 研究と同等の沸騰曲線が得られるが、水位が 6 mm 以下では膜沸騰に遷移してしまうことを示した。特に、冷却デバイスの大きさは実装にあたり重要であるが、プール部分高さを 10 mm まで低くしても現状の構成で MEB を使えることを示した意義は大きい (Unno, et al., 2018) .

#### 4. おわりに

伝熱面からの超高熱流束除熱に適した省エネ技術である MEB は電子機器 (半導体デバイス) の冷却に応用可能であるとの記述は少なくとも 15 年以上前から見られる (鈴木他, 2004) . 諸先生方の視野と知識の広さは本当にすごいとしか言いようがない。そして今、時代が追い付き始めて沸騰冷却の応用範囲が広がろうとしている。もちろん、従来の単相冷却技術は長年にわたる十分な評価とともに実績の蓄積があり簡単に切り替えられるものではないが、電子機器の冷却に関するトレンドが沸騰冷却に変わる瞬間は将来きっとやってくると確信する。なぜなら、最も高い熱伝達率が得られる物理現象が相変化であり、沸騰であり、気泡微細化沸騰であるという知識が存在するからである。皆がそろって実装し始める日が訪れた時に技術的に遅れないように準備しておくことは大事だと考える。そして、沸騰冷却デバイスを実用化するにあたっては、沸騰だけを考えていけばよいわけではない。どうやって凝縮させて液をプールに戻すか、蒸気に耐性のある安価な部材や容器の気密接合方法はどうか、半導体デバイスの絶縁をどのように担保するかなど、熱工学部門の皆様のみならず様々な業種の産業界から要求を吸い上げて沸騰部分をどう作っていくかがこれからの筆者の仕事だと考えている。そういった意味で普段沸騰がご専門でない方々、特に産業界の皆様が本記事を読んで頂き沸騰冷却にご興味を持って頂けたら幸いである。ご興味をもって頂いた方々と学会などで直接お話できる日を楽しみにしている。

#### 謝 辞

本記事を執筆する機会を頂きました、徳永敦士先生 (宇部工業高等専門学校 准教授) に謝意を表します。沸騰研究の奥深い世界に筆者を導いてくださいました鈴木康一先生 (山陽小野田市立山口東京理科大学 名誉教授) , 結城和久先生 (山陽小野田市立山口東京理科大学 教授) に心より感謝申し上げます。伝熱面表面と沸騰現象について考えるきっかけを下さった佐竹信一先生 (東京理科大学 教授) に厚く御礼申し上げます。

#### 文献

- 日本機械学会, JSME テキストシリーズ 伝熱工学 (2005), p. 9.  
 抜山四郎, 機械學會誌, Vol. 37, No. 206 (1934), pp. 367-374.  
 稲田茂昭, 宮阪芳喜, 泉亮太郎, 小長谷芳彦, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No.417 (1981), pp. 851-861.  
 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 佐久本伸, 泉亮太郎, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No.422 (1981), pp. 2021-2029.  
 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No. 422 (1981), pp. 2030-2041.  
 稲田茂昭, 宮阪芳喜, 泉亮太郎, 小林盛一, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47 No. 423 (1981), pp. 2199-2208.  
 Ivey, H. J. and Morris, D. J., Proceeding of 3rd International Heat Transfer Conference, Vol.3 (1966), pp. 129-142.  
 Suzuki, K., Yuki, K., Chen Y., Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena (2014).

- Furusho, T., Yuki, K. and Suzuki, K., Proc. of 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) (2016), pp. 193-198.
- Suzuki, K., Kokubu, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H., Ogawa, O., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, No.7 (2005), pp.827-832.
- Suzuki, K., Yuki, K., and Mochizuki, M., Application of Boiling Heat Transfer to High-Heat-Flux Cooling Technology in Power Electronics, Transaction of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.4, No.1 (2011), pp.127 -133.
- Tang, J., Zhu, G., Sun, L., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 50 (2013), pp. 97-106.
- Ueno, I., Arima, M., Behavior of vapor bubble in subcooled pool, Microgravity Science and Technology, Vol.19, (2007), pp.128-129.
- Tang, J., Yan, C., Sun, L., International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 88 (2015), pp.597-608.
- Ueno, I., Koiwa, Y., Okada, M., Kaneko, T., Proc. of 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (2018).
- Suzuki, K., Inagaki, F., Ueno, I., Heat transfer enhancement in subcooled boiling with ultrasonic field, Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Science (JSASS) and Space Tech. Japan, Vol. 7 (2009), pp. Ph67-Ph70.
- Suzuki, K. and Inagaki, R., A fundamental study on high heat flux cooling using subcooled boiling with microbubble emission in horizontal rectangular channel., Proc. 5th International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-compact Heat Exchangers, Science, Engineering and Technology, CD-ROM (2005), CHE2005-37.
- Nakamura, J., Tsuruta, T., Tanigawa, H., Proc. of 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (2018).
- 海野徳幸, 結城和久, 木伏理沙子, 鈴木康一, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集 (2018).
- Furusho, T., Yuki, K., Kibushi, R., Unno, N., Suzuki, K., The 28th International Symposium on Transport Phenomena, No.26 (2017).
- 久保良, 熊谷哲, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 58 (1992), pp.497-502.
- Wang, G., Cheng, P., Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No.1-2 (2009), pp. 79-91.
- Suzuki, K., Kokubu, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H., Ogawa, O., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.29 (2005), pp. 827-832.
- 鈴木康一, 鳥飼欣一, 佐藤英明, 石丸淳二, 田中康夫, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 65, No. 637 (1999), pp.3097-3104.
- Torikai, K. and Suzuki, K., et al., Proc. 3rd Int. Symp., Multi-Phase Flow Heat Transf., (1994), pp. 70-77.
- Suzuki, K., Inagaki, F., Hong, C, Heat Transfer Engineering, Vol. 32, No.7-8(2011), pp. 673-682.
- Zhu, G., Sun, L., Tang, J., Mo, Z., Liu, H., International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 59 (2014), pp.148-157.
- 庄司正弘, 神奈川大学工学研究所所報, Vol. 29 (2006), pp. 2-9.
- 海野徳幸, 結城和久, 木伏理沙子, 佐竹信一, 鈴木康一, 熱工学コンファレンス 2018 講演論文集 (2018).
- Unno, N., Yuki, K., Kibushi, R., Satake, S., Suzuki, K., Proc. of the 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29).
- Unno, N., Yuki, K., Kibushi, R., Suzuki, K., Advanced boiling cooling technology using a compact vessel with a low water level. Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 11 (2018), E18-010.
- 鈴木康一, 河村洋, 大田治彦, 阿部宣之, 沸騰冷却方法、沸騰冷却装置および流路構造体並びにその応用製品, 特許第 4464914 号 (2004).