

多孔質体による熱機器の大幅な性能向上

森, 昌司

九州大学大学院工学研究院 機械工学部門 : 教授

<https://hdl.handle.net/2324/7173431>

出版情報 : CERAMICS JAPAN. 57 (5), 2022. 日本セラミックス協会
バージョン :
権利関係 :



多孔質体による熱機器の大幅な性能向上

Cooling performance enhancement using a porous material
Keywords: Honeycomb porous plate, boiling, critical heat flux

森 昌司

Shoji MORI*¹
 (*¹Kyushu University.)

1. はじめに

本稿では、多孔体をうまく活用した熱機器、特に沸騰冷却機器の高度化に関する研究について紹介させて頂きたい。まず沸騰の特性について簡単に説明する。横軸に過熱度(壁温と飽和温度の差)、縦軸に熱流束をとり、これを沸騰曲線と呼ぶ(図1)。B点において沸騰が始まると、沸騰は自然対流に比べて高い熱伝達率を有するため、過熱度はC点まで減少する。AD間は核沸騰領域と呼ばれ、気泡は伝熱面上の小さなキズを核とする気泡核から発生する。高熱流束領域になると、たくさんの発泡点から蒸気が噴出しているような状態の蒸気柱が形成され上向きの蒸気流が伝熱面への液体供給を妨げるようになり、ついにはD点で伝熱面への液体の供給が間に合わなくなり、伝熱面温度が急上昇し、E点へと遷移する。D点を限界熱流束点(Critical Heat Flux point, CHF point)といい、沸騰現象を伴う各種の伝熱機器において伝熱面熱負荷の上限を与えるために実用上非常に重要で、その限界熱流束向上させる技術は興味を持たれている。一方E点の沸騰様式は膜沸騰と呼ばれ、伝熱面と液体の間に蒸気膜が形成される。蒸気の熱伝導率は液体に比べて非常に小さいので、同じ熱流束を維持するためには、非常に大きな温度差を必要とする。そのため、膜沸騰領域での熱伝達率(Heat Transfer Coefficient, 以下 HTC)を向上させるのは勿論のこと、核沸騰領域での熱伝達率の向上も重要である。

一般に、限界熱流束や熱伝達率を向上させるには液体をポンプなどの動力を用いて伝熱面に強制的に供給

すれば可能である。一方で、ハニカム多孔質体を用いることで毛細管現象と気液の流れをうまく制御することができ、外部動力を一切使わずにそのような高性能な冷却ができる。その詳細は後述する。これは、結果として省エネにもつながるだろう。

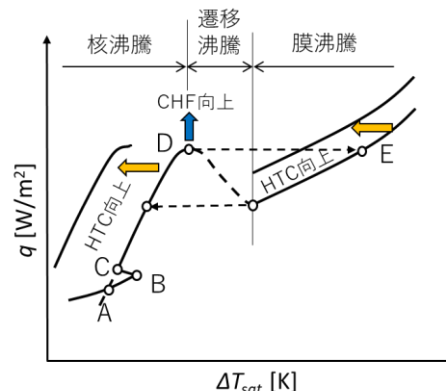


図1 沸騰曲線

2. 多孔質体を用いた限界熱流束の向上

2.1 高熱流束除熱の必要性

2030年の社会動向のシナリオを明らかにするため、日本機械学会において高熱流束除熱の技術ロードマップが2007年に策定された(図2)。これによると、電子機器の高発熱密度化、原子炉事故時の緊急冷却などに対応して、超高熱流束除熱を実現する冷却技術が切望されている。特に最近でも要求される熱流束は約1,000 W/cm²を超えており極めて高い。飽和水のプール沸騰の限界熱流束が100 W/cm²であることを考慮すると、10倍程度まで限界熱流束を向上させる必要がある。

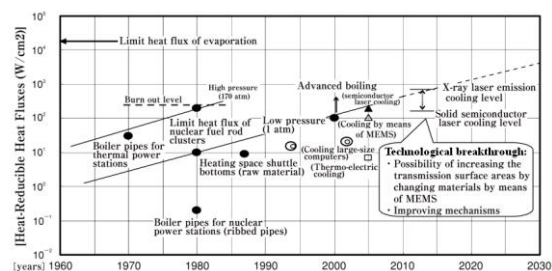


図2 高熱流束除熱技術のロードマップ

2.2 相変化を用いた冷却限界

以上の背景下、高熱流束除熱を目指した研究開発が多く行われている[1]。ところで相変化を用いた冷却は潜熱を利用できるので一般に極めて除熱能力が高いが、その理論限界は、蒸発冷却限界によって決まる[2]。蒸発冷却限界とは、すべての水分子が凝縮せずに蒸発の

みが起こる（すべての分子が界面から飛び出す）場合のことである。例えば大気圧下の水の場合、 $22,320 \text{ W/cm}^2$ と極めて高く、上述した要求されている熱流束（ $1,000 \text{ W/cm}^2$ ）よりも遙かに高い。このことは、相変化を用いた手法にはさらなる高熱流束除去の可能性があることを示している。特にパッシブに稼働するプール沸騰は動力が不要であり工学的に有用である。このような高熱流束除熱を達成するためには、ナノスケールからマクロスケールまでの気液の流れをうまくコントロールすることが重要である。最近のマイクロおよびナノスケールでの伝熱面の改質技術は飛躍的に向上しており、限界熱流束モデルをベースにこれらの技術を用いて蒸発の限界に迫ることができるのか興味あるところである。

2.3 ハニカム多孔質体を用いた限界熱流束の向上^[9-10]

細い管ほど水を高い位置まで吸い上げる（毛細管現象）ことはよく知られている（図3）。ラプラスの式によれば、毛管圧力は、細孔径が $0.1 \mu\text{m}$ の場合、約 1MPa （ $100\text{mH}_2\text{O}$ ）にも達する。すなわち多孔体を用いれば、このくらいの緻密な細孔は簡単に作れるし、この毛管力をうまく活用して、伝熱面に液体を自動的・強制的に供給できれば高熱流束除熱も夢では無い。そこで、伝熱面に緻密な多孔質体をコーティングすることを考えるわけだが、それではあまりうまくいかない。一方、我々は図4に示すハニカム多孔質体をプール水中に浸漬させた発熱面上に装着するだけという簡便な冷却手法を提案している。これにより、飽和プール沸騰水の限界熱流束を飛躍的に向上させることが可能となった。具体的には、図5に示すようにハニカム多孔質体の厚さを薄くすると限界熱流束が向上し、裸面の場合に比して最大2倍以上（約 250 W/cm^2 ）まで除熱することが可能である（最近の研究では、約 500 W/cm^2 以上の除熱に成功しており、これはチャンピオンデータである）。その限界熱流束向上の原理は、以下の通りと考えている。図6に示すように、プール水中の発熱面上にハニカム多孔質体を設置し、加熱するとハニカム多孔質体底部には気液相変化に伴いメニスカスが形成される。加熱によりそのメニスカス部が蒸発すると強烈な毛管力（毛管圧力は、細孔径が $0.1 \mu\text{m}$ の場合、約 1MPa にも達する）で伝熱面に液体が供給される。それと同時に、伝熱面近傍で発生した蒸気を迅速にマクロ孔（蒸気排出孔）から排出させる。その結果、気液の循環が促進させられるため限界熱流束が

向上する。一方、セル内部への液体の直接流入効果、セル上部に形成される二次気泡の影響、さらには伝熱面や多孔質体自体のぬれ性など、限界熱流束に影響を与える因子も、徐々にわかってきている。

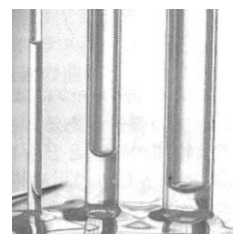


図3 毛細管現象

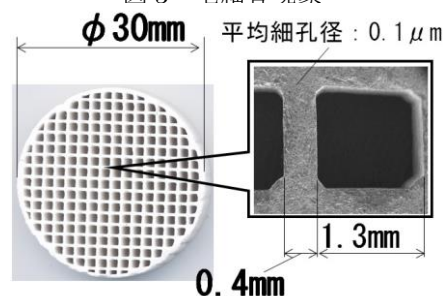


図4 ハニカム多孔質体

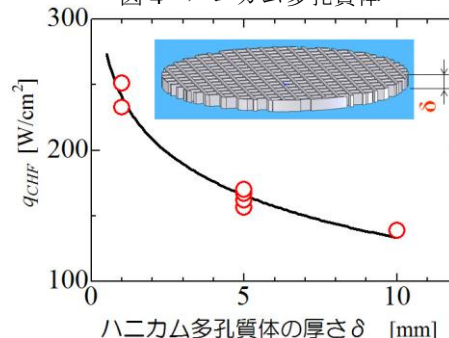


図5 ハニカム多孔質体厚さと限界熱流束の関係（薄くなればなるほど限界熱流束が向上する）

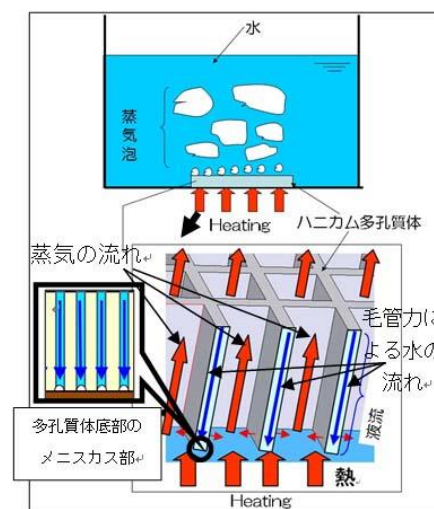


図6 ハニカム多孔質体による限界熱流束向上の原理

さらなる限界熱流束向上には、メカニズムを解明し、そのモデルにしたがって多孔質体内部の構造を緻密に制御することが、今後必要と考えている。本手法の特徴は、大伝熱面かつ高熱流束除去が無動力でできる点である。応用範囲は、大型半導体の冷却や、原子炉事故時における压力容器底部のパッシブ冷却などが考えられる。

3. 多孔質体を用いた熱伝達率向上^[11, 12]

前節では、限界熱流束の向上について述べてきた。本節では、ハニカム多孔質体を用いた熱伝達率向上手法について述べたい。先述したように膜沸騰領域では、伝熱面が蒸気膜で覆われてしまうので、熱伝達率が低く冷却に時間がかかる。特に原子炉において炉心溶融を伴う過酷事故時に压力容器を冠水させ、炉心溶融物を原子炉压力容器内で冷却して閉じ込める新規の冷却システムには、高温になった压力容器を速やかに、膜沸騰から核沸騰状態に移させる技術と限界熱流束向上技術の両方が必須である。ハニカム冷却法は、幸いにも、その両者を満たす数少ない冷却手法である。図7は、高温体の冷却実験に用いる実験装置を示し、最初に600℃になるように金属ブロックを加熱し、先端を水に浸漬させたと同時に加熱を切る。実験は裸面の場合とブロック先端にハニカム多孔質体を設置した状態で行い、その結果を図8に示す。この図よりハニカム多孔質体を設置すると裸面の場合より冷却に必要な時間が約1/7にまで大幅に短縮された。このメカニズムは、裸面の場合には壁温にもよるが、伝熱面はおよそ1mm程度の蒸気膜で覆われているが、ハニカム多孔質体を押しつけることで、ハニカム多孔質体が含水多孔質体となり蒸気膜厚を薄くし(熱伝達率が向上する)、発生した蒸気をスムーズに排出させることに起因しているようである。

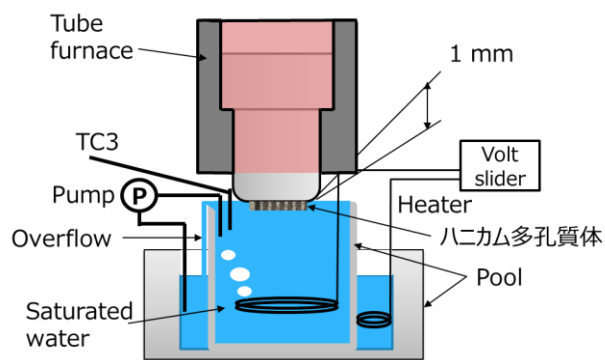


図7 高温体の急速冷却の実験装置

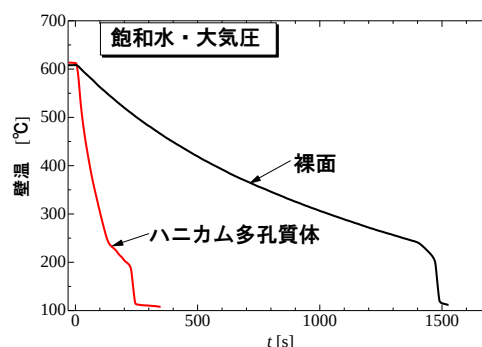


図8 冷却曲線

4. 多孔体を用いたその他の機器の高性能化

4.1 含水多孔質体を用いた過熱水蒸気の急速生成^[13-15]

昨今の健康志向から家庭用過熱水蒸気調理器が流行っているが、300℃の過熱水蒸気を常温の水から生成するには、10分以上もかかるようである。必要なときに必要な量の過熱水蒸気を瞬時に生成できれば、省エネにも大きく貢献できる。蒸気生成の高応答化には、加熱ヒータと水の熱容量を極限まで小さくすること、すなわち、細いヒータ線と含水多孔質体を用いることである。含水多孔質体を用いることの意義は、図9に示すように多孔質体表面に形成される熱容量無限小のメニスカスを活用することである。図10に示す、著者らの考案した瞬間過熱水蒸気生成器は、断熱煉瓦ブロックの中心に孔を開け、その孔内面に細いニクロム線をらせん状に設置し、装置の底面を水に満たすだけである。そのワイヤヒータをステップ状に加熱すると、過熱水蒸気が図11に示すように数秒で生成できる(500Wの場合には約3秒で500℃以上の過熱水蒸気が生成できる)。なお図9で示した蒸気急速生成の原理図では飽和蒸気しか出ないはずであるが、実際には過熱水蒸気が生成された。さらに定常状態におけるエネルギー利用効率(加熱量に対して流体に伝わる熱量)も約90%以上と非常に高い。このメカニズムに関しては、現在、ヒータ直下の乾燥領域の有無も含めて、過熱水蒸気が短時間・高効率で生成できるメカニズムについて検討を行っている。

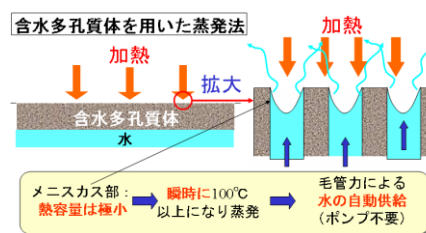


図9 ハニカム多孔質体による限界熱流束向上の原理

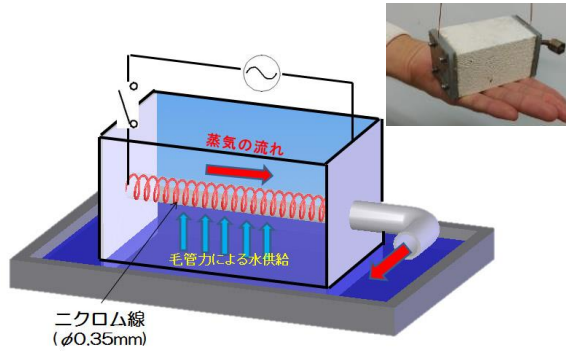


図 10 急速蒸気生成装置

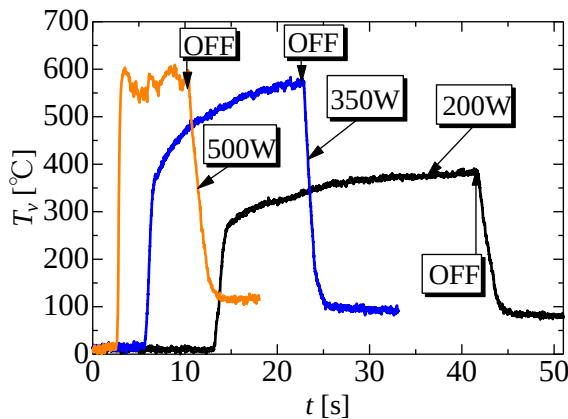


図 11 ステップ加熱時の常温水から過熱蒸気の生成特性

4.2 ハニカム多孔体を用いた水電解技術の高度化

再生可能エネルギーの大量導入が急務だが、風力・太陽光発電は変動が大きく、需要と供給に時空間的なズレがあるため、過剰な発電分を水素として貯蔵する水電解技術の高度化が切望されている。最近では初期導入コスト削減のため高電流密度化し小型化するニーズも高まってきている。このときの限界は、電極が大量の気泡に覆われてしまう水の物質移動律速で発生する。したがって電極上の微細気泡をうまく排除し、水を電極面に如何に供給できるかが鍵となる。熱と物質の拡散・移流現象には類似性があるが、図 12 に示すように沸騰と水電解の特性を示す曲線が両者とも N 字カーブを描くことから、沸騰と水電解に類似性があれば、限界熱流束点を向上できる手法により限界電流密度点の向上も期待できる (図 13)。このような観点のもと実験を行った結果、ハニカム多孔質体により限界電流密度点を 50% まで向上できるという実験結果まで得ている。

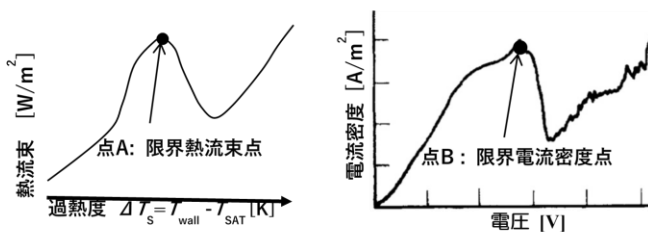


図 12 沸騰と水電解のアナロジー

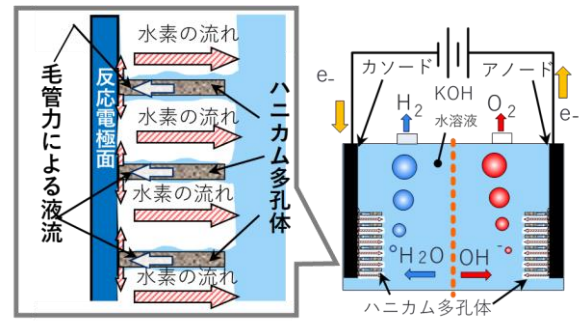


図 13 ハニカム多孔質体による限界電流密度の向上

5. まとめ

本稿では、多孔体をうまく活用した熱機器、特に沸騰冷却機器の高度化に関する研究について紹介させて頂いた。含水多孔質体を用いると気液界面ができ、蒸発による自動的な液の流れなど、極めて興味深い現象が多い。特に、省エネに関わる重要なポイントは、界面制御とも言われており、セラミックの界面制御技術と様々な分野と融合させることで新しい領域が創出されるのではないかと期待している。

文 献

1. Mori, S.; Utaka, Y. Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2017, 108, 2534-2557.
2. Gambill, W.; Lienhard, J. An upper bound for the critical boiling heat flux. *Journal of Heat Transfer* 1989, 111, 815-818.
3. Mori, S.; Okuyama, K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow* 2009, 35, 946-951.
4. Mori, S.; Shen, L.; Okuyama, K. Effect of cell size of a honeycomb porous plate attached to a heated surface on CHF in saturated pool boiling. In *Proceedings of the 2010 14th International Heat Transfer Conference*, 2010; pp. 255-265.
5. Mori, S.; Aznam, S.M.; Okuyama, K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2015, 80, 1-6.
6. Mori, S.; Maruoka, N.; Okuyama, K. CHF enhancement of pool boiling using a honeycomb porous plate with two - layer structure. In *Proceedings of the 9th Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources"*, Minsk, Belarus, 07-10 September, 2015.
7. Mori, S.; Mt Aznam, S.; Okuyama, K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2015, 80, 1-6, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.046.
8. Mori, S.; Mt Aznam, S.; Yanagisawa, R.; Okuyama, K. CHF enhancement by honeycomb porous plate in saturated pool boiling of nanofluid. *Journal of Nuclear Science and Technology* 2015, 1-8.
9. Aznam, S.M.; Mori, S.; Sakakibara, F.; Okuyama, K. Effects of heater orientation on critical heat flux for nanoparticle-deposited surface with honeycomb porous plate attachment in saturated pool boiling of water. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2016, 102, 1345-1355.
10. Aznam, S.M.; Mori, S.; Ogoshi, A.; Okuyama, K. CHF enhancement of a large heated surface by a honeycomb porous plate and a gridded metal structure in a saturated pool boiling of nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2017, 115, 969-980.
11. Mori, S.; Yokomatsu, F.; Tanaka, M.; Okuyama, K. Rapid cooling of a high-temperature block by the attachment of a honeycomb porous plate on a nanoparticle-deposited surface. *Applied Thermal*

- Engineering 2018, 133, 576-579,
doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.088>.
12. Yokomatsu, F.; Fogaça, W.; Mori, S.; Tanaka, M. On the quenching of stainless steel rods with a honeycomb porous plate on a nanoparticle deposited surface in saturated water. International Journal of Heat and Mass Transfer 2018, 127, 507-514,
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.009>.
 13. Mori, S.; Hida, S.; Tanaka, M.; Okuyama, K. On the process of rapid generation of superheated steam using a water containing porous material. In Proceedings of the JSME Symposium on Multiphase Flow 2013, 2013.
 14. Mori, S.; Okuyama, K.; Ryo, K.; Tanaka, M. Examination of rapid generation process of superheated steam using a water containing porous material. Japanese Journal of Multiphase Flow 2013, 26, 531-536.
 15. Mori, S.; Hida, S.; Tanaka, M.; Okuyama, K. Novel process for the rapid and efficient generation of superheated steam using a water-containing porous material. International Journal of Heat and Mass Transfer 2016, 93, 1159-1168,
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.021>.
- .

筆 者 紹 介

森 昌 司 (もり しょうじ)

略歴 九州大学大学院工学研究院 機械工学部門 教授. 2003 年九州大学大学院工学府博士後期課程機械科学専攻修了. 博士(工学). 横浜国立大学助手、准教授を経て 2019 年より現職. 専門は熱流体工学で、気液二相流や多孔質体を用いた熱機器に関する研究に従事.



[連絡先] 〒819-0395
福岡県福岡市西区元岡 744
E-mail: morisho@mech.kyushu-u.ac.jp