

博士論文

二層構造ハニカム多孔質体による  
プール沸騰限界熱流束の向上

(Pool boiling critical heat flux enhancement using a  
honeycomb porous plate with two-layer structure)

横浜国立大学大学院  
工学府

丸岡 成  
(Naru Maruoka)

2018年3月

## 要旨

沸騰冷却は相変化を伴わない冷却方法と比して、その熱伝達率は高く、産業上において幅広く用いられているが、近年の電子素子の高集積化に伴う発熱密度の増大、大電力を消費する電子素子の冷却、原子炉事故時の緊急冷却など、高発熱密度の熱源を冷却可能な除熱技術が将来的に必要となる。特に、福島第一原子力発電所の事故を契機として、大伝熱面、かつ  $4 \text{ MW/m}^2$  級の高熱流束の除熱が可能となる冷却手法の開発することの必要性が高まっている。沸騰冷却の除熱限界値は、一般に、限界熱流束（以下、 $q_{CHF}$ ）と呼ばれ、この限界を超えて熱負荷を増やすと、伝熱面上に蒸気膜が形成され、その蒸気膜が熱抵抗となり、伝熱を阻害する。その結果、壁温は急上昇し、熱機器は破損する。水の  $q_{CHF}$  は、大気圧、飽和状態では、約  $1 \text{ MW/m}^2$  であるため、目標の  $4 \text{ MW/m}^2$  に遠く及ばない。したがって、 $4 \text{ MW/m}^2$  の除熱熱流束を達成させるためには、水の  $q_{CHF}$  を向上する必要がある。このような背景の下、著者らはこれまでに、ミクロンオーダーの細孔をもつ多孔質部とミリメートルオーダーの蒸気排出孔部からなるハニカム多孔質体（以下、HPP）を伝熱面上に装着するという安価かつ簡易な手法を用いて、飽和プール沸騰の  $q_{CHF}$  を  $2 \text{ MW/m}^2$  以上に向上することを実験的に示した。本論文では、HPP 装着時の  $q_{CHF}$  向上メカニズムを把握し、さらなる  $q_{CHF}$  を向上することを目的として、実験的に検討を行った。HPP 装着時の  $q_{CHF}$  向上に寄与する主な液供給効果である（1）毛管力による伝熱面上への液供給と（2）蒸気排出孔に直接流入する液供給に着目し、各液供給機構が  $q_{CHF}$  に与える影響について把握することを目的とし、各素過程を分離した要素実験を行った。その結果、毛管力による液供給効果の抽出実験結果は提案する一次元モデルとよく一致し、高熱流束域（ $3.5 \text{ MW/m}^2$  以上）では、毛管力による液供給効果が支配的であることを明らかにした。一方、約  $2.5 \text{ MW/m}^2$  までの熱負荷では、毛管力による液供給効果に加えて、蒸気排出孔に直接流入する液供給効果が限界熱流束向上に寄与することが実験的に示された。また、電気抵抗法による簡易的な実験から、限界熱流束近傍まで、多孔質体内部は水で満たされ、限界の発生とともに、急激な乾燥が生じ、伝熱面温度が急上昇することを明らかにした。さらに、提案するモデ

ルから、HPP をサブミリメートルオーダーの構造体高さにすることでさらなる限界熱流束が向上することが示唆された。そこで、さらなる限界熱流束の向上が期待されるメンブレンフィルター（膜厚 150  $\mu\text{m}$ ）を用いて実験を行った。その結果、沸騰様相の詳細な観察から、構造体高さが 100  $\mu\text{m}$  程度の薄い多孔質体の場合、多孔質体上部に形成される合体大気泡の影響を受け、大気泡の滞留中に多孔質体内の液枯れが生じ、モデルより低い値で限界熱流束に達することを明らかにした。さらに、構造体高さが 100  $\mu\text{m}$  程度の薄い多孔質体を装着する場合でも、その上に液保持用の多孔質体を設置することで、合体泡滞留中に、多孔質体内の液が消耗し尽くすのを防ぐことができ、結果として、限界熱流束が向上することを明らかにした。これらの結果により、限界熱流束を向上させる上で、毛管力による液供給効果だけでなく、合体大気泡に多孔質体内部の液枯れ現象を想定することが重要であり、また、毛管力による液供給部と液保持部からなる細孔構造の異なる二層構造 HPP が限界熱流束向上に有効であることが示唆された。