

# 飽和およびサブクールプール沸騰における 限界熱流束機構の研究

## 学位論文内容の要旨

沸騰冷却は、非常に高い除熱特性を持つ冷却技術として、原子炉や核融合炉、電子機器の冷却などの高熱流束機器に利用されている。ただし、沸騰冷却には限界熱流束 (Critical Heat Flux : 以下 CHF と略す) と呼ばれる除熱限界が存在し、熱流束が CHF を超えると伝熱面温度は急激に上昇し、伝熱面は溶融・破損に至る。したがって、CHF 発生機構を知ることは、沸騰を利用した機器の安全評価に非常に重要である。しかし、CHF 発生機構については、現在まで複数のモデルが提案されているものの解明には至っていない。また、CHF は周囲流体のサブクール度の増大とともに顕著に増大することが知られており、更なる高集積化が予想される電子機器や小型化・高出力化が進む半導体レーザーなど、今後一層発熱密度が大きくなる次世代高熱流束機器の冷却技術として有望視されている。しかし、サブクール度増大による CHF 増大の要因も明らかにはなっていない。

沸騰は、伝熱面周囲の液の状況によって強制流動沸騰とプール沸騰に大別されるが、両伝熱機構には類似点が多く、より基本的な形態であるプール沸騰の CHF 機構を明らかにすることが他の沸騰形態を含めた CHF を解明する上で重要となる。プール沸騰の CHF 発生機構に関しては、伝熱面ごく近傍に形成される気液構造との関連が多くの研究者によって指摘されてきた。しかし、CHF 近傍では伝熱面上には常に大きな蒸気塊が形成されており光学的方法により伝熱面を観察することは困難であることや、CHF 発生には伝熱面から数十～百  $\mu\text{m}$  程度の領域の気液挙動が関連しており、その測定には非常に高い精度が必要とされることから、伝熱面近傍の気液構造の詳細は十分に明らかにはされていない。また、この気液構造に対する液のサブクール度の影響についての研究は、過去に行われていない。

本研究では、導電プローブと微細熱電対プローブによる高精度測定系を開発し、伝熱面ごく近傍の気液構造の詳細な測定を行い、飽和およびサブクールプール沸騰の CHF 発生機構について実験的な検討を行なった。この結果に基づき、飽和およびサブクール沸騰の CHF 発生を統一的に説明することができる新しい CHF 発生機構のモデルを提案した。また、狭隘流路内のプール沸騰について伝熱面近傍の気液挙動の測定を行い、上向き面を対象とした CHF モデルの、制限空間内での沸騰への適用の可能性を検討した。

本論文は、以下の 6 章より構成されている。

第一章は緒言であり、沸騰伝熱研究における本研究の位置付けを述べ、第二章では、本研究を遂行するにあたり必要となる知見を提供している論文について、その内容を概説した。

第三章では、上向き面における飽和およびサブクールプール沸騰の CHF 機構について実験的な検討を行なった。先端径  $5\mu\text{m}$  以下の高精度導電プローブ測定系を開発し、直径  $8\text{mm}$  の上向き伝熱面

近傍の気液挙動を詳細に測定した。その結果、飽和沸騰とサブクール沸騰で気液構造に大きな差がないこと、サブクール沸騰では飽和沸騰の CHF をはるかに凌ぐ高熱流束域においても蒸気塊底部には液膜が存在することを明らかにした。この液膜厚さを定量的に評価する方法として、導電プローブの信号から蒸気塊に対応する信号を抽出し、伝熱面の高さ方向において蒸気塊信号が消滅する位置を特定することで蒸気塊底部の液膜厚さを求めるという新たな方法を提案した。この方法により、過去に測定例のなかったサブクール沸騰における液膜厚さを測定した結果、サブクール沸騰では飽和沸騰よりも厚い液膜が形成される事実が判明した。また、液膜厚さの熱流束への依存性はサブクール度ごとに異なる傾向を持ち、既存の飽和沸騰における液膜厚さの予測式はサブクール沸騰では適用することができないことが分かった。

さらに、導電プローブを伝熱面から数  $\mu\text{m}$  の高さに設置することで、壁面のドライアウト現象を検知できることを見出した。このドライアウトの信号を解析することで、壁面のドライアウトは蒸気塊滞留期間の後半期に発生すること、核沸騰域での伝熱面はほとんどが液膜で覆われた状態にあり、わずかな熱流束の増大で急激に乾燥領域が拡大して CHF に至ることが分かった。これらの事実から、飽和およびサブクール沸騰の CHF 発生機構として、蒸気塊滞留期間中に液膜が消耗しきることによって CHF が発生するとする「マクロ液膜蒸発モデル」が最も妥当な CHF の物理モデルであることを明らかにした。

以上の事実から、プール沸騰の CHF がサブクール度とともに増大する要因は、サブクール沸騰では飽和沸騰に比べて厚い液膜が形成されること、および液膜を伴う蒸気塊の形成できる下限熱流束がサブクール度とともに増大すること、であることを明らかにした。

第四章では飽和およびサブクール沸騰での CHF 発生を統一的に予測することが可能な液膜形成モデルを提案した。モデルの特徴は、伝熱面上で発生した一次気泡の接合により形成される小合体泡がさらに接合することで蒸気塊を形成し、その下に液膜が残ると考えた点である。モデルでは、一次気泡の発泡点密度が Poisson 分布に従って分布していると仮定して、発泡点間の平均距離の 2 倍で区切った領域中に複数の一次気泡が存在している箇所でも小合体泡が形成されるとした。さらに、小合体泡同士が接合したときに小合体泡の間隙に取り残される液が液膜を形成するとした。気泡は、その底部の気-固-液が接する三相界線からの蒸発と、周囲流体による凝縮の影響を受けながら生長するとした。このモデルは、実験で得られた液膜厚さの特徴を矛盾なく説明できる。また、このモデルから見積もった CHF は飽和からサブクール沸騰にかけて得られた実験データとよく一致する。

第五章は狭隘流路における CHF 機構について検討を行なった。狭隘流路の沸騰は、マイクロデバイスへの応用の観点から近年注目を集めているものの、伝熱面近傍の気液構造が通常のスケールの沸騰とどのような違いがあるかについては十分に明らかになっていない。本研究では、高精度導電プローブを用いて、流路間隙が 4.0-0.2 mm の狭隘流路内の飽和プール沸騰において伝熱面近傍の気液構造を測定した。その結果、狭隘流路内においても上向き面と同様に蒸気塊の下に液膜が形成され、液膜の消耗により CHF に至ることを明らかにした。ただし、液膜厚さは流路幅の影響を強く受け、流路幅の減少とともに顕著に薄くなることが判明した。

第六章では、本研究で得られた知見を総括するとともに、今後検討すべき点や展望を述べた。

以上、本研究で得られた大気圧下の飽和およびサブクールプール沸騰における CHF 発生機構の一連の知見により、現在まで統一的な見解が得られていないプール沸騰全般の CHF 機構解明に向けて貴重な手がかりを提供できたのではないかと考えている。また、本研究で提案した液膜形成モデルは、実験事実に基づいて構築された機構論的なモデルであるため、今後の実験事実の蓄積によって改良を進めることで、高圧力域のプール沸騰や強制流動沸騰にも適用可能となることが期待できる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 准教授 坂 下 弘 人  
副 査 教 授 島 津 洋一郎  
副 査 教 授 近 久 武 美

学 位 論 文 題 名

## 飽和およびサブクールプール沸騰における

### 限界熱流束機構の研究

沸騰冷却は、非常に高い除熱特性を持つ冷却技術として、原子炉や核融合炉、電子機器の冷却などの高熱流束機器に利用されている。ただし、沸騰冷却には限界熱流束 (Critical Heat Flux : 以下 CHF と略す) と呼ばれる除熱限界が存在するため、CHF 発生機構を知ることは、沸騰を利用した機器の安全評価に非常に重要である。しかし、CHF 発生機構については、現在まで明らかになっていない。また、CHF は周囲流体のサブクール度の増大とともに顕著に増大することが知られており、更なる高集積化が予想される電子機器や小型化・高出力化が進む半導体レーザーなど、次世代高熱流束機器の冷却技術として有望視されている。しかし、サブクール度増大による CHF 増大の要因も不明である。

本研究は、飽和およびサブクールプール沸騰の CHF 発生機構の解明を目指して、実験および理論的検討を行なったものである。本論文は、以下の6章より構成されている。

第一章は緒言であり、沸騰伝熱研究における本研究の位置付けを述べ、第二章では、本研究を遂行するにあたり必要となる知見を提供している論文を概説している。

第三章では、先端径  $5\mu\text{m}$  以下の高精度導電プローブ測定系を開発し、直径  $8\text{mm}$  の上向き伝熱面近傍の気液挙動を詳細に測定した。その結果、サブクール沸騰では飽和沸騰の CHF をはるかに凌ぐ高熱流束域においても蒸気塊底部には蒸発し尽くすことのない液膜が存在することを明らかにした。この液膜厚さを定量的に評価する方法として、伝熱面の高さ方向において蒸気塊信号が消滅する位置を特定することで蒸気塊底部の液膜厚さを求めるという新たな方法を提案した。この方法により、過去に測定例のないサブクール沸騰における液膜厚さを測定し、サブクール沸騰では飽和沸騰よりも厚い液膜が形成される事実を明らかにした。また、液膜厚さの熱流束への依存性はサブクール度ごとに異なる傾向を持ち、既存の飽和沸騰における液膜厚さの予測式はサブクール沸騰では適用できないことを明らかにした。

さらに、導電プローブを伝熱面から数  $\mu\text{m}$  の高さに設置することで、壁面のドライアウト現象を検知できることを見出し、ドライアウトは蒸気塊滞留期間の後半期に発生すること、核沸騰域では伝熱面はほとんどが液膜で覆われた状態にあり、わずかな熱流束の増大で急激に乾燥領域が拡大して CHF に至ることを明らかにした。

以上の事実から、「マクロ液膜蒸発モデル」が最も妥当な CHF の物理モデルであり、CHF がサブクー

ル度とともに増大する要因は、サブクール沸騰では飽和沸騰に比べて厚い液膜が形成されること、および液膜を伴う蒸気塊の形成できる下限熱流束がサブクール度とともに増大すること、であることを明らかにした。

第四章では、新しい液膜形成モデルを提案した。モデルの特徴は、伝熱面上で発生した一次気泡の接合により形成される小合体泡がさらに接合することで蒸気塊を形成し、その下に液膜が残ると考えた点である。モデルでは、発泡点が Poisson 分布に従って分布していると仮定して、発泡点間の平均距離の2倍で区切った領域中に複数の一次気泡が存在している箇所で小合体泡が形成されるとした。さらに、小合体泡同士が接合したときに小合体泡の間隙に取り残される液が液膜を形成するとした。気泡は、その底部の気-固-液が接する三相界線からの蒸発と、周囲流体による凝縮の影響を受けながら生長するとした。このモデルは、実験で得られた液膜厚さの特徴を矛盾なく説明できる。また、このモデルから見積もった CHF は飽和からサブクール沸騰にかけて得られた実験データとよく一致する。

第五章は、マイクロデバイスへの応用の観点から近年注目を集めている狭隘流路における CHF 機構について検討を行なった。本研究では、高精度導電プローブを用いて、流路間隙が 4.0-0.2 mm の狭隘流路内の飽和プール沸騰において伝熱面近傍の気液構造を測定した。その結果、狭隘流路内においても上向き面と同様に蒸気塊の下に液膜が形成され、液膜の消耗により CHF に至ることを明らかにした。さらに、液膜厚さは流路幅の影響を強く受け、流路幅の減少とともに顕著に薄くなる事実を明らかにした。

第六章では、本研究で得られた知見を総括するとともに、今後検討すべき点や展望を述べている。

これを要するに、著者は、大気圧下のプール沸騰における CHF 発生機構を明らかにして、サブクール度の増大とともに CHF が増大する要因を解明するとともに、サブクール沸騰での液膜形成を矛盾なく説明できる新しい液膜形成モデルを提案したものであり、現在まで統一的な見解が得られていない沸騰全般の CHF 機構解明に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。