

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	篠崎 健
論文題目	沸騰熱伝達を利用した車載用熱交換器の高度化に関する基礎研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、沸騰冷却を車載用熱交換器に適用することを目的として、フィン群を用いた熱交換器の設計指針となる圧力損失と熱伝達率の予測モデルの構築と、冷却水として用いられる Long-Life Coolant（LLC）を用いた沸騰冷却において課題となる堆積物の付着および特有の沸騰現象を論じた結果を纏めたもので、6 章からなっている。 第 1 章は序論で、本研究の工学的かつ学術的背景と、研究目的および内容について述べている。現在、広く利用されている車載用熱交換器の特徴を整理して纏めるとともに、沸騰冷却に関するレビューを行った。これまで提案されている気液二相流条件下におけるフィン群の圧力損失予測モデルは、実験データをもとに導出した近似式であり、フィンの最適設計に用いることは難しく、物理現象に基づいたモデル構築が必要であることを指摘した。また、LLC を沸騰させた場合に伝熱面に堆積物が付着することを研究した事例は少なく、硫酸カルシウム水溶液やナノ流体を沸騰させた場合に伝熱面に堆積物が付着するメカニズムを纏め、堆積物に関する課題や問題点を明らかにし、本論文の構成を説明している。 第 2 章は、フィン群の強制流動沸騰冷却における圧力損失と熱伝達率の予測モデルについて纏めている。フィン群を用いた強制流動沸騰に対する圧力損失と熱伝達率に関する既存の予測モデルは、様々な形状のフィンを基盤配列や千鳥配列に並べた場合の実験データを整理した結果から導出した近似式であり、物理現象に基づいたモデル化がなされていなかった。本研究では、その課題に対して、フィン群を充填層に見立て、球充填層内における気液二相流の圧力損失モデルである Lipinski モデルをベースとした、フィン群に適用できる修正 Lipinski モデルを開発した。実験結果から、フィン群の圧力損失においては慣性項が支配的であることを示すとともに、Particle Image Velocimetry (PIV) や X 線ラジオグラフィを用いてフィン群内の流れやボイド率を計測した結果に基づいて、慣性項をモデル化した。モデル化した慣性項を、それぞれ Lipinski モデルの液相と気相の運動方程式に適用すれば、二相流圧力損失を誤差 6% 以内で予測できることを示した。また、熱伝達率については、強制対流領域の沸騰曲線は円柱ピンフィンに対する Zukauskas モデルとよく一致し、沸騰が開始すると Kutateladze 相関式と良好に一致することを示した。 第 3 章は、水平アルミニウム伝熱面を用いたサブクールプール沸騰実験を行い、沸騰伝熱特性および堆積物の付着様相について纏めている。イオン交換水、LLC、および LLC とエチレ			

ングリコール濃度が等しいエチレングリコール水溶液を用いて沸騰実験を行った結果、LLC の場合のみ伝熱面に堆積物の付着が観察された。伝熱面への堆積物付着が少ない場合、LLC の沸騰伝熱特性は防錆成分などの添加剤によらず、同一濃度のエチレングリコール水溶液の沸騰伝熱特性とよく一致した。さらに、LLC およびエチレングリコール水溶液の核沸騰領域における沸騰熱流束は、Labuntsov 相関式とよく一致した。同一の伝熱面を用いて、沸騰実験と伝熱面の観察を繰り返した結果、熱流束 740 kW/m^2 以上の条件において伝熱面に堆積物が著しく付着することを明らかにした。堆積物の組成について X 線回折分析を用いて分析した結果、リン酸アルミニウム (AlPO_4) であることがわかった。LLC の添加剤成分として含まれるリンと伝熱面材料との熱化学反応によって堆積物が生成されたことを示した。

第4章は、垂直銅伝熱面を用いた長期サブクールプール沸騰実験を行い、沸騰伝熱特性、伝熱面に堆積物が付着する過程、および伝熱面をコーティングすることによる堆積物付着の抑制効果について纏めた。実験結果から、アルミニウム伝熱面を用いた水平伝熱面と同様、銅伝熱面を用いた垂直伝熱面に対しても、Labuntsov 相関式がよく一致した。長期沸騰実験の結果、伝熱面に堆積物が付着する挙動は大きく分けて 3 つの過程があることを示し、それぞれの過程を次のように定義した。(1)熱流束一定後、伝熱面温度が上昇を続ける温度上昇過程、(2)伝熱面温度が最高温度に達した後、伝熱面温度が低下する温度降下過程、(3)伝熱面温度が安定する温度定常過程、である。X 線回折分析を用いて温度定常過程における堆積物の組成を分析した結果、ストロンチウムヒドロキシアパタイト ($\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) であることがわかった。LLC の添加剤成分としてストロンチウムおよびリンが含まれていることから、 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ は添加剤同士の熱化学反応によって生成され伝熱面上に堆積物として付着した可能性が高いことを示した。さらに実験結果から、長期沸騰実験において一定時間経過後は、堆積物が熱伝達に及ぼす影響がほぼ一定となること、さらに、伝熱面のニッケルや白金箔コーティングによって、初期過程における堆積物の付着を一定時間抑制できることを示した。

第5章は、LLC 液滴を銅製の加熱面に滴下させた液滴蒸発実験により、LLC 特有の蒸発・沸騰現象について纏めた。イオン交換水、エチレングリコール水溶液、および LLC の 3 つの作動流体には共通して 4 つの代表的な液滴蒸発・沸騰領域（膜蒸発、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰）があることを示した。エチレングリコール水溶液と LLC の蒸発寿命曲線を比較すると、膜蒸発、核沸騰および膜沸騰は比較的よく一致するが、LLC の場合、エチレングリコール水溶液と比較して高温で遷移沸騰が起こることを示した。エチレングリコール水溶液および LLC では、加熱面温度が 170°C を超えると、液滴が激しく分裂するフラッシュ沸騰が生じることを示し、その発生メカニズムについて考察を行った。

第6章は総括で、本論文で得られた成果の総括と今後の研究課題・展望について纏めている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、フィン群を用いた熱交換器の設計指針となる圧力損失と熱伝達率の予測モデルの構築と、冷却水として用いられる Long-Life Coolant (LLC) を沸騰冷却に用いる上で課題となる堆積物の付着および特有の沸騰現象を研究した結果を纏めたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. フィン群を充填層に見立て、球充填層内気液二相流の圧力損失モデルである Lipinski モデルをベースとした、フィン群に適用できる Lipinski モデルを開発し、二相流圧力損失の計測結果との比較により、誤差 6%以内で予測できることがわかった。また、強制対流領域の沸騰曲線は Zukauskas モデルとよく一致し、沸騰が開始すると Kutateladze 相関式と良好に一致することを示した。
2. 水平アルミニウム伝熱面を用いたサブクールプール沸騰実験を行い、LLC の核沸騰領域における沸騰熱流束は、Labuntsov 相関式とよく一致することを示した。繰り返し沸騰実験を行い、熱流束 740 kW/m^2 以上の条件において伝熱面に堆積物が著しく付着することを明らかにした。堆積物の組成を分析した結果、リン酸アルミニウム (AlPO_4) であることがわかった。さらに、この堆積物は LLC の添加剤成分として含まれるリンと伝熱面材料との熱化学反応によって生成されたことを示した。
3. 垂直銅伝熱面を用いた長期サブクールプール沸騰実験を行い、Labuntsov 相関式は、垂直銅伝熱面の沸騰熱流束ともよく一致することを示した。さらに、長期沸騰実験の結果、伝熱面に堆積物が付着する挙動は大きく分けて 3 つの過程：(1)温度上昇過程、(2)温度降下過程、(3)温度定常過程、があることを示した。堆積物の組成を分析した結果、ストロンチウムヒドロキシアパタイト ($\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) であることがわかった。銅伝熱面の場合、LLC に含まれる添加剤同士の熱化学反応によって堆積物が生成されることを示した。実験結果から、長期沸騰において一定時間経過後は、堆積物が熱伝達に及ぼす影響がほぼ一定となること、さらに、伝熱面のニッケルや白金箔コーティングによって、初期過程における堆積物の付着を一定時間抑制できることを示した。
4. エチレングリコール水溶液および LLC の液滴は、加熱面温度が 170°C を超えると、液滴が激しく分裂するフラッシュ沸騰が生じることを示し、その発生メカニズムについて考察を行った。

以上のように、本研究で得られた圧力損失モデルおよび熱伝達予測モデル、堆積物の付着メカニズム、および LLC 特有の沸騰現象の観察結果は、沸騰熱伝達の研究に大きく寄与するものである。また、本研究内容は沸騰冷却を製品適用するうえで、工業的な有用性が極めて高く、製品設計への適用や将来のインバータ冷却器の基盤技術として応用が期待される。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 8 月 1 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降