

# 低封入率型自励振動ヒートパイプに対する内部流動の可視化

Internal Flow Visualization for Low Filling Rate-Heat Pipe

麓 耕二<sup>1)</sup> 大久保 健斗<sup>1)</sup> 栗田 圭輔<sup>2)</sup> 原山 勲<sup>2)</sup> 飯倉 寛<sup>2)</sup>

Koji FUMOTO Kento OKUBO Keisuke KURITA Isao HARAYAMA Hiroshi IIKURA

<sup>1)</sup>青山学院大学 <sup>2)</sup>原子力機構

現在、電子デバイスの発熱は深刻な問題となっている。先ごろ、低充填率ヒートパイプ (LFR-PHP) と名付けられた新しい冷却装置が発明された。LFR-PHP は、アルミニウム合金製の蛇行流路と作動流体としての水から構成されています。LFR-PHP の片側を加熱すると、作動流体が流路を流れ始め、作動流体の流れに伴って加熱部から熱が輸送される。これまでの研究によると、LFR-PHP の熱伝達率は従来の冷却装置よりも大きい。しかし、作動流体の流動と熱輸送のメカニズムは不明である。そこで、LFR-PHP の中性子ラジオグラフィ実験を行った。中性子ラジオグラフィとは、中性子ビームを用いた可視化技術である。本論文では、中性子ラジオグラフィ実験の結果を紹介し、LFR-PHP のメカニズムを考察する。

**キーワード：**ヒートパイプ、熱輸送、内部流動、アルミ製扁平多穴管

## 1. 目的

近年、電子部品や精密機器の自己発熱が問題視されており、高効率かつ低コストな冷却デバイスが必要とされている。そこで自励振動型ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe : PHP) が開発された<sup>(1)</sup>。PHP は減圧された蛇行流路の中に作動流体を封入し、一端を加熱部、もう一端を冷却部とした構造を有する。加熱部では作動流体の蒸発が、冷却部では凝縮が発生し、各チャンネル間で圧力の不均衡が連続的に発生する。これにより作動流体が往復振動するように流動し、加熱部から冷却部へと熱輸送が行われる。PHP は電力を必要とせず高効率な熱輸送を行える点などから注目を集め、これまでに様々な研究が行われてきた。既往の研究より PHP への作動流体の封入量には最適な範囲が存在することが確認されている。作動流体の過度の封入は流路内部を閉塞させ熱輸送効果を低減させる。一方で、不十分な封入では作動流体が動きを止め、熱輸送が行われなくなるとされており、最適な封入量は流路体積に対しておよそ 50 vol.%程度であると考えられてきた<sup>(2)</sup>。しかし近

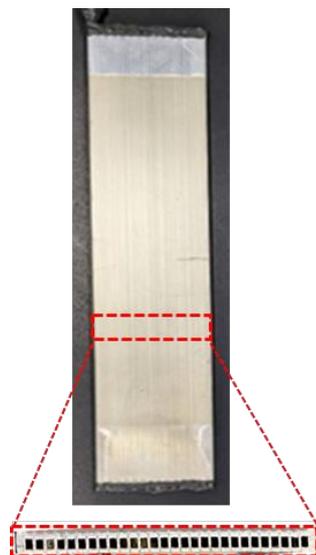


図 1. LFR-PHP の外観と断面

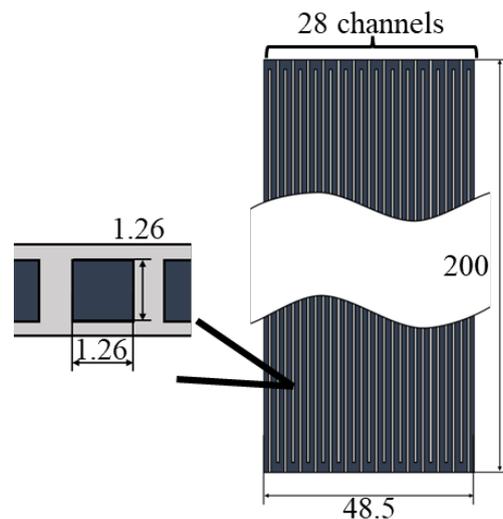


図 2. LFR-PHP の流路形状

年の研究で極端に低い作動流体封入率を有する新型 PHP として、低封入率型自励振動ヒートパイプ (Low Filling Rate-Pulsating Heat Pipe : LFR-PHP) が麓ら<sup>(3)</sup>により開発された。図 1 に LFR-PHP の外観および流路の断面図を、図 2 に LFR-PHP の流路の模式図を示す。LFR-PHP はアルミ製の蛇行した流路と作動流体である水より構成される。流路形状は長さ 200mm、幅 1.26mm、深さ 1.26mm の矩形流路であり、片側 14 ターン(平行 28 チャンネル)の開ループ形状となっている。また流路表面にはアルマイト処理が施してある。その基本的な設計コンセプトは従来式 PHP と同質のものであるのに対し、作動流体封入率は 10 vol.%を採用している。このように極めて低い封入率であるにもかかわらず、その熱輸送効率は従来式 PHP (封入率 50 vol.%) を遥かに上回っていることが報告されており、新たな高効率冷却デバイスとして期待されている。しかし、LFR-PHP 内における流動機構は把握されておらず、その熱輸送原理は一切不明である。

以上より本研究では、LFR-PHP の内部流動を可視化実験により評価を行うことで、その流動機構、熱輸送原理を解明し、より正確かつ高精度な LFR-PHP の設計指針確立へと寄与することを目的としている。

## 2. 方法

図 3 に実験装置の概略図を示す。実験装置は試料部と撮影室に大別される。試料部は LFR-PHP 本体とヒーターブロック、および周囲を囲う断熱材から構成されている。図 4 に試料部の詳細図および外観を示す。LFR-PHP は垂直に配置されており、流路上部を冷却部、流路下部を加熱部としている。加熱部にはヒーターブロックを取り付けることで LFR-PHP に熱負荷を与えている。なお、ヒーターブロックは撮影室外部のボルトスライダーに接続されており、熱負荷を変化させることが出来る。また冷却部は大気開放とし、自然冷却によって放熱を行っている。加熱部および冷却部の面積比率はどちらも 20 area.%となっており、それ以外の箇所はすべて断熱部としている。

撮影室は中性子線を照射するシャッター、透過した中性子線を可視光線化するシンチレーター、および可視化された撮像を記録する高速度カメラから構成される。シャッターの開放により試料部へと中性子線を照射し、LFR-PHP を透過した中性子線をシンチレーターが可視光線化した後、高速度カメラでモニターおよび記録を行う。

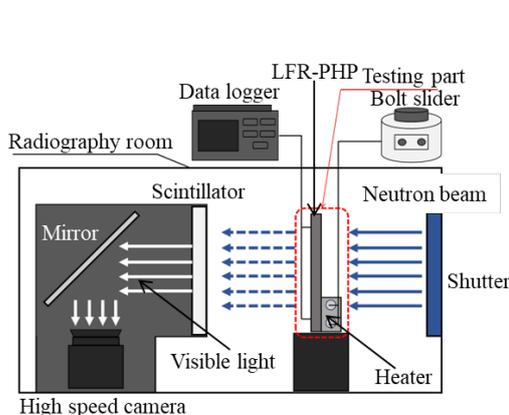


図 3. 実験装置系統図

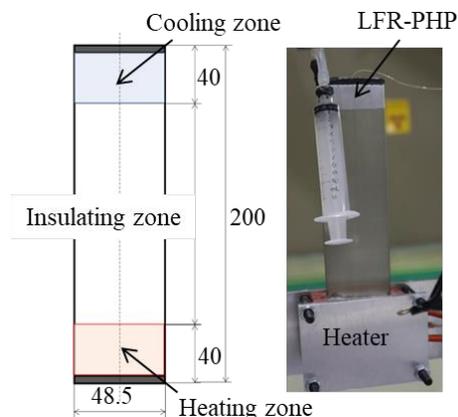


図 4. 実験装置外観

実験方法は、始めに真空ポンプを用いて作動流体の脱気および LFR-PHP の真空引きを行った。LFR-PHP に作動流体を封入した後、ヒーター、熱電対、および断熱材を取り付け撮影室内部に固定した。次にヒーターへ電圧を印加し LFR-PHP を稼働させた。LFR-PHP が温度定常となったら中性子線を照射し、稼働中の LFR-PHP の内部流動を撮影した。

## 3. 結果及び考察

図 5 にヒーター加熱量 14 W における可視化画像を示す。図より、液スラグが流路の上方と下方に分かれて存在していることが分かる。流路下方のスラグは各チャンネルを繋ぐ加熱部側ターン部内にて停滞していた。一方、流路上方のスラグは冷却部近傍で停滞しており、低加熱量時同様、時間経過とともに徐々に長さが減少する様子が見られた。さらに冷却部に液スラグが存在しているチャンネル内において、微小な液

スラグが冷却部へと高速で上昇する様子が見られた。

図 6 に流路右部のチャンネル内における液スラグの挙動を時系列順に並べた画像を示す。図より流路底部から微小な液スラグが飛び出し、冷却部へと移動している様子が分かる。スラグは冷却部へ到達すると停止し、停滞していた別のスラグと合体する様子を見せた。この時のスラグの上昇速度はおよそ 86 mm/s であり、低加熱量時におけるスラグの移動よりも遥かに高速で動いていることが分かる。この様に、中性子ラジオグラフィを通して LFR-PHP 内における液スラグの移動を可視化することが出来た。一方、その移動方向は加熱部から冷却部へ向けた一方向のみであり、どのようにして加熱部内に液が供給されドライアウトを回避しているのかは、現段階では不明である。

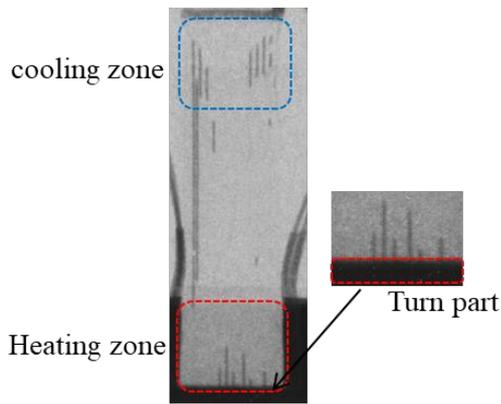


図 5. 可視化結果 (14W)

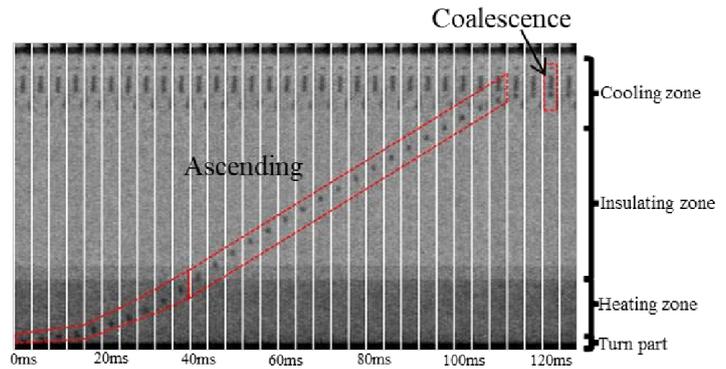


図 6. タイム-ストリップイメージ

#### 4. 引用(参照)文献等

- (1) Akachi, Hisateru, Structure of a heat pipe, US patent #4, 041, 921, (1990)
- (2) Yan, Lipei, Zhang, Ping, Xu, Hui, Ma, Wei, and Sheng, Jiang, Visualization of Thermo-Hydrodynamic Behavior in Flat-Plate Pulsating Heat Pipe with HFE347, Journal of Thermal Science, Vol. 30, No. 3, (2021), pp. 926-938.
- (3) Fumoto, Koji, Ishii, Keiko, Flat plate pulsating heat pipe operating at ultra-low filling ratio, Applied Thermal Engineering, Vol. 228, (2023), 120468