

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Flow Characteristics of Lead-Bismuth Two-phase Flow

(鉛ビスマス二相流の流動特性)

申請者

有吉 玄

最終学歴

平成 31 年 3 月

京都大学大学院 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻
研究指導認定見込

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

(主査)

教授 齊藤 泰司

調査委員

京都大学大学院工学研究科

教授 横峯 健彦

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

准教授 伊藤 啓

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	有吉 玄
論文題目	Flow Characteristics of Lead-Bismuth Two-phase Flow (鉛ビスマス二相流の流動特性)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、加速器駆動システム (ADS) の蒸気発生器配管破断事故時に発生する鉛ビスマス気液二相流の流動特性を実験的・解析的に調べた結果をまとめたもので、6章からなっている。</p> <p>第1章では、本研究の背景および目的について述べており、ADSの動作原理と構造、さらに、核破砕ターゲットおよび冷却材としての利用が期待される鉛ビスマス共晶合金 (以下、鉛ビスマス) に関する研究動向について概説している。ADSのシビアアクシデントの一つとして、蒸気発生器配管破断事故が考えられるが、事故時には、水が鉛ビスマス中へ流入するため鉛ビスマスと蒸気の気液二相流が炉心プール内に形成され、この蒸気泡の炉心への侵入により生じる反応度への影響が懸念されている。しかしながら、鉛ビスマス気液二相流に関しては十分な実験データベースが確立されておらず、ADSの実現には、単相流を含めた鉛ビスマスの流動特性に関する理解が必要となっている。そのため、本研究では、実験的・解析的に鉛ビスマス気液二相流の流動特性を明らかにすることを目的とし、特に、気液密度比、表面張力、壁面濡れ性などの影響について、既存の気液二相流との相違を踏まえた上で検討を行う必要性を示している。</p> <p>第2章では、実験装置および実験方法・実験結果に関して解説している。鉛ビスマスは、可視光に対して不透明で、液相速度などの計測手法が確立されていなかった。本研究では、高温の鉛ビスマスに適用可能な、電気抵抗式ボイドプローブおよび小型電磁流速計を独自に開発し、その計測手法と信号処理方法について検討し、測定精度の評価を行っている。小型電磁流速計を用いて、鉛ビスマス気液二相流のボイド率および液相流速を計測する場合、計測される電圧信号には、気相および液相の信号が混在するため、信号処理で各相に相当する信号部分を分離・抽出する必要がある。本研究では、変動成分の標準偏差に基づく閾値処理と時間微分を用いた相分離・抽出法を提案し、ボイド率と液相流速を測定した。小型電磁流速計によって得られた液相流速分布およびボイド率分布の計測精度を明らかにし、鉛ビスマス気液二相流中の液相流速を精度よく計測できることを示している。また、計測結果から、鉛ビスマス気液二相流の液相流速およびボイド率は、低流速条件において特異な分布形状 (wall-peak 型) となることを明らかにしている。</p>			

第 3 章では、一次元二流体モデルを用いて垂直管内の鉛ビスマス気液二相流の断面平均ボイド率を評価した結果について述べている。空気-水系の気液二相流などと比較して、鉛ビスマス気液二相流は気液密度比が 10 倍程度大きいいため、垂直上昇気液二相流では圧力変化に伴う気泡膨張の影響が無視できない。本研究では、プローブ法により得られたボイド率の計測結果と二流体モデルを用いた数値解析結果を比較し、気液界面抗力の相関式について検討を行っている。既存の相関式を用いると、解析結果のボイド率は実験結果を過大評価し、鉛ビスマス気液二相流中の気液間界面抗力は空気-水系二相流中の抗力と比較して小さくなることを示している。一方、鉛ビスマス気液二相流実験から得られたドリフト速度を気液間界面抗力に適用して解析を行うと、実験結果のボイド率を良好に予測できることを示し、鉛ビスマス気液二相流の数値解析においては、界面抵抗力の適切なモデル化が重要であることを示している。

第 4 章では、気泡塔装置を用いて、壁面濡れ性が鉛ビスマス気液二相流に与える影響を実験および解析によって調べている。実験は、単純円筒体系および環状流路体系において行い、はんだ用のフラックスを用いて、気泡塔内の壁面濡れ性を変化させている。実験結果から、壁面濡れ性が向上すると試験部内の気液二相流中の体積平均ボイド率が増加することが示された。さらに、半径方向の運動量輸送モデルを用いて液相流速分布および分布定数の解析を行ない、実験結果と解析結果を比較している。その結果、環状流路条件における解析で実験値を再現するためには、ボイド率分布のピーク位置を内円筒側にシフトさせる必要があることを示している。このことから、壁面濡れ性が悪い場合には、壁面に付着して上昇する気泡の存在が、ボイド率と液相速度の分布に大きな影響を与えることを示している。

第 5 章では、強制対流条件下における垂直管内鉛ビスマス気液二相流の液相流速分布に関して、実験結果と径方向運動量輸送モデルの解析結果の比較検討について述べている。実験と解析との比較から、運動量輸送において、気泡誘起乱流の効果を考慮する必要があることを示し、実験値の再現には壁面においてスリップ流速を与える必要があることを明らかにしている。これらの結果から、壁面濡れ性が悪い条件下では、壁面上に存在する上昇気泡を考慮すると、結果的に壁面境界条件として、見かけのスリップ流速が生じる可能性があることを示している。

第 6 章では、本論文で得られた成果とその応用について要約している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、加速器駆動システム (ADS) の蒸気発生器配管破断事故時に発生する鉛ビスマス気液二相流の流動特性を、実験的・解析的に研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 電氣的抵抗式プローブと小型電磁流速計を独自に開発し、鉛ビスマス気液二相流におけるボイド率分布の発達過程や液相流速分布を精度よく計測できることを示した。さらに、低流速、低ボイド率条件において、ボイド率分布と液相速度分布が壁面近傍において最大値をとる特異な現象が現れることを示した。
2. 垂直管内の鉛ビスマス気液二相流を対象として、一次元二流体モデルを用いた数値解析を行い、気液界面抗力がボイド率の発達に及ぼす影響について検討した。その結果、既存の界面抗力式を用いると解析結果はボイド率を過大評価するが、鉛ビスマス気液二相流の実験結果に基づいた界面抗力式を用いれば、実験結果のボイド率を精度良く再現できることを示した。
3. 気泡塔試験部を用いた実験と解析を行い、相分布と速度分布から決まる二相流の分布定数を算出し、実験値と比較した。これらの比較から、環状流路条件では、ボイド率の最大値が内壁側に偏った分布を仮定して解析を行う必要があり、壁面濡れ性が悪い場合には、壁面に付着した気泡の存在がボイド率と液相速度の分布に影響を及ぼす可能性があることを明らかにした。
4. 垂直管内鉛ビスマス気液二相流を対象として、実験と解析を行い、気泡誘起乱流を考慮した運動量輸送モデルを用い、さらに、壁面におけるスリップ速度を考慮すれば、数値解析は実験結果を再現できることを明らかにした。これは、濡れ性の悪い壁面上では気泡によって濡れと乾きが繰り返され、壁面上でスリップと同等の効果が生じるためであることを示した。

以上の成果から、本研究では、鉛ビスマス気液二相流の計測手法を確立するとともに、表面張力や、壁面濡れ性などが二相流挙動に与える影響を実験的・解析的に明らかにしており、鉛ビスマス気液二相流の解析モデルの高度化に加え、加速駆動システムのシビアアクシデント解析の高度化に資するところが大きいと考えられる。

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、平成 31 年 2 月 28 日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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

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