

京都大学	博士（工 学）	氏名	植 木 祥 高
論文題目	Development of High-Temperature Ultrasonic Doppler Velocimetry for Lead-Lithium Flow (リチウム鉛流れの高温超音波ドップラー流速計測法の構築)		
（論文内容の要旨） 核融合炉のエネルギー取り出しの最重要課題はブランケット工学設計の確立にある。現在までに様々な核融合炉構造材、トリチウム増殖材、冷却材が研究開発され、それらを組み合わせた種々の核融合炉ブランケット設計が提案されてきている。 本論文は、将来の核融合動力炉ブランケット候補である液体ブランケット概念に着目し、液体冷却材として、化学活性が小さく、トリチウム増殖材の機能を兼ね備え、高い熱変換効率が期待できるとともに、ブランケット構造の簡素化が可能なリチウム鉛 (PbLi) を取り上げ、磁場下の PbLi 熱流動現象の理解とそのモデリングの基礎となる流動データを取得するため、液体 PbLi の物性値や物理特性の把握を行うとともに、PbLi 流れを対象とした高温超音波ドップラー流速計測法 (High Temperature Ultrasonic Doppler Velocimetry: HT-UDV) の構築に関する研究成果を取り纏めたものである。 本論文は 8 章から構成されている。 第 1 章は本研究の背景として核融合エネルギーの重要性、各種核融合炉ブランケット概念の特徴と比較、磁場閉じ込め核融合炉に特徴的な電磁流体力学効果と絶縁技術、および液体ブランケット設計における流速分布計測の重要性について言及し、最後に本研究の目的と概要を述べている。 第 2 章は超音波プローブの端面材と液体 PbLi の境界面における超音波伝達性能を評価するため、HT-UDV 計測に不可欠な液体 PbLi の基礎音響物性値データベースの構築について記述している。まず、超音波プローブ端面材料の超音波透過特性の実験評価を行い、端面材である純 Ti が十分な音響結合性を有することを明らかにした。次いで、音響インピーダンス、および超音波パルスの伝播時間の評価に必要な温度変化を考慮した音速値を実験的に求め、液体 PbLi の音速相関式を世界で初めて取得している。 第 3 章は、物質界面における超音波伝播特性に影響を及ぼす液体 PbLi の濡れ性に関する実験的評価の結果を述べている。具体的には、超音波プローブ端面材である Ti およびブランケット構成材料候補の各種 SiC に対する液体 PbLi の濡れ性について、250℃～400℃の温度範囲における接触角測定を行い、短時間の接液条件においては、いずれの材料も超撥水性を示すことを明らかにしている。さらに、Ti は長時間の接液で腐食が進行することによって音響結合性が向上することも明らかにしている。また、PbLi の化学組成は、固体 PbLi 最表面とバルク領域の X 線回折法により、最表面では Pb と LiOH-H₂O が主成分、バルク領域では酸化鉛 (PbO) が含まれていることを明らかにした。次いで、X 線光電子分光分析を行い、最表面では Li₂O の存在とともに遊離酸素分子の存在を明らかにしている。これは、原子半径が小さい酸素が金属結晶格子間に侵入して固溶体を形成している可能性を示しており、PbLi に関する新たな研究課題を提示している。また、深表面の X 線光電子分光分析の結果、この領域でも Li₂O、PbO、遊離酸素が存在するこ			

京都大学	博士（工 学）	氏名	植 木 祥 高
とを明らかにしている。しかし、固体 PbLi の保存環境である大気の主成分である窒素は検出されず、金属内へのガス移行に選択性を有すること、また PbLi が特定の気体を吸収・放出する性質を有するという新たな課題を提示している。 第 4 章は、X 線分析結果から固体 PbLi 中に PbO が多量に存在していることが明らかとなったので、PbO を超音波反射粒子（トレーサー粒子）とした HT-UDV 計測法を非磁場下の液体 PbLi 流動計測に適用した結果をまとめている。具体的には、酸素濃度と水分を 1 ppm 以下に制御したグローブボックス内に、液体 PbLi を充填した円筒容器内で回転流を形成し、HT-UDV 流速計測を実施し、PbO がトレーサーとして機能することを示すとともに流速分布の計測に成功し、管理された環境下であれば、十分な精度で測定再現性のあることを立証している。 第 5 章は、世界的に例がない液体 PbLi 流動測定用閉ループの建設と構成機器およびループ本体の機能・性能確認試験の結果についてまとめている。具体的には、液体 PbLi 流用の電磁流量計を設計・製作し、液体 PbLi 流動測定用閉ループを建設して高温液体金属用電磁ポンプの性能試験を行っている。その際、ループ内を真空環境に保った場合に電磁ポンプの性能が飽和する現象を見出し、Ar ガスで系統内を加圧することで吐出性能を回復させることに成功している。この原因として、低圧環境では配管壁近傍の液体 PbLi 内部に微小なキャビテーション気泡が発生し、PbLi が流動することによって形成される速度勾配によって気泡が壁面近傍に集中し、液体 PbLi と配管壁との電氣的結合が低下したためであると考えられている。吐出圧と流量の計測結果から、低磁場条件では通常の Newton 流体が管壁によって受ける摩擦抵抗と同様に圧力損失は平均流速の二乗に比例し、磁場強度を増加するに従って平均流速と線形関係を示すことを実証している。また、ループ全体の性能を確認するため、試験ループに円管試験部を接続し、PbLi 用に製作した特殊な差圧計を設置している。MHD 圧損を計測して差圧と流量の関係を調べたところ、得られた試験結果は層流理論解と十分な精度で一致し、試験ループの基本機能・性能を確認している。 第 6 章は、強磁場環境下の液体 PbLi 閉ループへの HT-UDV の適用で得られた技術的知見と HT-UDV 適用時の問題点についてまとめている。具体的には、液体 PbLi ループの矩形管試験部を設計・製作し、強磁場下での HT-UDV 計測を実施した。しかし、超音波信号が得られなかったため、プローブ端面を観察し、非 MHD 流試験でのプローブ端面の状況と比較した結果、超音波信号の強度低下は端面に形成された Ti 酸化膜の存在に伴う PbLi の濡れ性に大きく関係していることを見出している。この酸化膜は非 MHD 流計測時には見出されておらず、液体 PbLi 中の酸素濃度の制御が HT-UDV 計測の最大の要件であることを指摘している。 第 7 章は、本研究の成果に基づいて、液体 PbLi ブランケットに関わる 4 つの技術課題を摘出し、液体 PbLi ブランケット設計に必要な基礎的な熱物質移動過程として、新たに界面を介する酸素移動現象を考慮する必要性を提唱している。 第 8 章は、第 2 章から第 7 章で得られた知見を総括している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、磁場下の PbLi 熱流動現象の理解とそのモデリングの基礎となる流動データである液体 PbLi の物性値や物理特性の把握を行うとともに、PbLi 流れを対象とした高温超音波ドップラー流速計測法 (HT-UDV) の構築に関する研究成果を取り纏めたものである。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 超音波プローブ端面材料である純 Ti が十分な音響結合性を有することを明らかにするとともに、温度変化を考慮した音速値を実験的に求め、液体 PbLi の音速相関式を世界で初めて取得した。

2. プローブ端面材の Ti およびブランケット構成材料候補の各種 SiC に対する液体 PbLi の濡れ性について、短時間接液の場合にはいずれの材料も超撥水性を示すこと、および長時間接液の場合、Ti は腐食が進行して音響結合性が向上することを明らかにした。

3. PbLi の化学組成について、X 線回折法により固体 PbLi 最表面では Pb と LiOH-H₂O が主成分、バルク領域では酸化鉛 (PbO) が含まれていることを明らかにした。また、X 線光電子分光分析から、最表面および深表面領域で遊離酸素分子の存在を見出し、PbLi の化学的性質についての新たな研究課題を提示した。

4. X 線分析から PbLi 内へのガス移行に選択性が有ること、および真空加熱溶融実験から PbLi が特定の気体を吸収・放出する性質を有することを見出し、PbLi の物理的性質に関する新たな研究課題を提示した。

5. HT-UDV を非 MHD 回転流計測に適用し、PbLi に内包される PbO がトレーサーとして機能し、流速分布測定に成功するとともに、酸素濃度と水分が 1 ppm 以下の環境下では、十分な精度で再現性のある流速計測法であることを立証した。

6. 世界的に例がない液体 PbLi 流動測定用閉ループを建設し、構成機器およびループ本体の機能・性能確認試験に成功した。

7. 矩形試験部を製作して HT-UDV 計測を実施したが、超音波信号が得られなかったことから、プローブ端面の比較観察を行い、超音波信号強度の低下原因が端面に形成された Ti 酸化膜の存在に大きく関係していることを見出した。

8. 本研究の成果に基づき、液体 PbLi ブランケットに関わる 4 つの技術課題を摘出し、液体 PbLi ブランケット設計に必要な基礎的な熱物質移動過程として、新たに界面を介する酸素移動現象を流動・熱・物質移動過程で考慮する必要性を提唱した。

以上のように、本論文は、核融合炉液体 PbLi ブランケット概念への適用を念頭に、液体 PbLi 流れを対象とした高温超音波ドップラー流速計測法の構築に関する研究成果を取り纏めたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 8 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。