

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	興野 文人
論文題目	Study on the Instability Analysis of the Liquid Metal and Application for the Fusion Energy Conversion System (液体金属の不安定性解析と核融合エネルギー変換システムへの応用に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は真空中において自由表面を持つ液体金属の自由落下中での挙動を解析するとともに、液滴及び液膜の不安定性を評価し、その知見に基づいて核融合エネルギー変換システムへの応用を目的とした装置を新たに提案して、その成立可能性を論じたものであり、5章よりなる。</p> <p>第1章は序論で、まず核融合エネルギー実用化に向けた世界の研究開発の状況、特に国際熱核融合実験炉 ITER のテストブランケットモジュール TBM 計画において、各極が開発を進めている各種概念をレビューして本研究の目的を明らかにしている。すなわち、液体増殖材ブランケット方式では、燃料トリチウムの製造を流動する増殖材液体 LiPb で行うため多くの技術的に優れた利点を持つにもかかわらず、そのトリチウムの分離回収について実用的な方法が見出されていないという課題がある。ことに液体増殖材からトリチウム気体を放出させる場合、液中でのトリチウムの移動放出過程が明らかでなく、また実験的にも大きな不一致のある結果が報告されており、その原因が明らかになっていないことを指摘している。本研究はこの問題に着目し、現象の本質を分析して、自由表面を持つ液体金属の流動特性の理解の必要性を認識してこれを明らかにすることとした。ついでその結果得られた液体運動に基づく回収プロセスを考案し、さらに液体金属の特徴を活かした核融合エネルギーの有効な変換システムを構築することを意図している。ことに、真空中での自由表面を持つ液体の挙動とその物質移動現象の理解を本研究の中心テーマと定義している。</p> <p>第2章では、真空中を自由落下する液体の挙動の十分な記述が既往研究で得られていないことを指摘し、特にノズルから流下した液滴が周辺媒体と相互作用を行わないことから、表面張力を駆動力とする表面波動の不安定性が液滴の形成に支配的となることを見出し、その過程を記述する方程式を導出した。ノズルから流下する液中は軸対称の波動を持ち、特定の波長の不安定性のみが発達するため、その周期的なくびれが液滴を形成する。さらにその式を用いて、ノズル径と液滴径の関係を導き、4種の異なる形のノズルを用いた液滴生成実験を水と液体金属 LiPb を用いて検証し、理論とよく一致することを確認した。さらに、液滴が固有に持つ振動により変形することを観測し、それが液滴内部での液体の流動に大きな影響を及ぼしている可能性を示した。</p> <p>第3章では、この液滴の生成と運動のメカニズムが、液滴内における物質移動を支配する大きな要因であり、それが静止状態の液体中での拡散より約2桁大きいことを理論的に示した。液滴は、表面張力を駆動力とする軸対象の変形を主モードとする変形を繰り返し、この時液滴内部と表面の間での物質移動を伴う。これはシャーウッド数により無次元的に表現でき、液体の種類によらず普遍的に表現できる。さらに実験により、液体リチウム鉛中に重水素を溶解させ、それを真空中で落下するときの液滴からの放出を観測して実測して理論と実験が一致することを示した。ここで得られた重水素の物質移動係数は理論的に得られた液滴中の移動とよく一致</p>			

し、液体中の水素の拡散として報告されていたこれまでの結果の不一致を統一的に説明した。この結果に基づけば液滴からの溶解水素の放出はノズル径と落下時間のみに依存するので、これらを適切に設定することにより、水素回収プロセスに適用可能であることを明らかにした。

第4章では、この液滴からのトリチウムの回収プロセス、「真空シーブトレイ」を用いて、実際に核融合プラントに適用する場合の概念設計検討を行っている。回収率は、液滴からの放出率であり拡散方程式と同じ表式で表されることから、前章までに求めた液滴中の水素輸送係数により、一意的に液滴径と落下時間により決定できることを示した。次に、要求される回収率を求めるために、核融合炉におけるトリチウム燃料循環系をモデル化し、ブランケットで生成されるトリチウムが閉ループから回収されたのち、燃料としてプラント各所に蓄積され、一旦は減少したのち、最終的には指数関数的な増加を開始し、回収率によってきまるプラント内のトリチウムインベントリーが問題となりうることを見出した。この結果に基づいて、プラント設計上合理的な回収率が約35%であること、これがブランケットトリチウム鉛循環系に著しく大きな負荷を与えずに小さな揚程で設計・建設が可能であることを示した。

第5章は、ここまでの研究で得られた自由表面を持つ液体金属の真空中の波動に関する知見を二次元の液膜に拡張し、核融合エネルギー変換への新たな応用可能性を検討している。液膜の安定性は、液面と接する媒体との作用により発生するケルビンヘルムホルツ不安定性の成長率で決定され、無次元化してウェーバー数で代表的に表せることを示している。この不安定性は真空中では発生しないので、核融合での利用では、高エネルギー束を受ける次期核融合のダイバータやレーザー核融合のチェンバーなどで利用可能であると考えられるものの、高エネルギー束の受容体として使用する場合、熱的蒸発やスパッタリングで発生する自己蒸気との間で同様の不安定性が発生しうることから、扱える熱流束に上限が存在することを指摘している。

第6章はまとめと結論であり、本研究で見出した液体金属の自由表面流の安定性検討を通じて、核融合炉ブランケットにおける燃料トリチウム回収プロセスへの適用性を評価しまとめている。すなわち、従来問題であったトリチウム鉛液体ブランケットからのトリチウム回収は本論文で提案した真空シーブトレイで高い効率で可能であり、技術的な成立性は高いことを明らかにしている。この結果は増殖ブランケットとしての液体金属利用の優位性を指摘するものである。また従来明らかにされていなかった真空中での自由表面をもつ液体金属の挙動と不安定性の基礎的な知見を明らかにし、それが液体中の物質移動に大きな影響を与えていることを指摘し、従来見られていた実験的な水素同位体の挙動について統一的な説明を与えている。

さらに液膜を形成して核融合に特徴的な高エネルギー束の受容体としても有効であることを示し、またその設計可能範囲を規制する本質的な制限についても明らかにしている。

これらの結果を総合して、本論文は今後の核融合炉設計と炉工学研究において、液体金属を利用した新しい技術的な展開の可能性を示している。特に真空中での自由表面を持つ流動媒体として液体金属を利用することで、核融合工学において、燃料トリチウム回収プロセスとエネルギー変換に有用であることを示し、研究の次の段階として、ビームなど高エネルギー流束を用いた実証研究が必要であることを指摘している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉におけるエネルギー変換媒体、特にエネルギーを取り出すとともに燃料トリチウムを生成するブランケットの構成材料として液体金属リチウム鉛合金 (LiPb) を真空中に自由表面を持つ流体として利用することに着目し、不安定性波動の成長を解析する一方、生成トリチウムの回収プロセスへの応用を論じている。次に重水素を溶解させた液体 LiPb を真空中で滴下する実験においてその諸特性を測定して理論との一致を検証し、さらにそれらの結果を高エネルギー粒子束を受容するための液膜にも利用する可能性を示唆し、核融合エネルギー変換のための新しい技術としての成立性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) 真空中にノズルから放出される液体金属について、液滴の形成過程をモデル化して解析し、ノズル径と液滴径の関係が液柱の不安定性理論により記述できることを明らかにするとともに、得られた理論式による解析結果が水および LiPb を用いた実験結果とよく一致することを示した。

(2) この液滴は上記不安定性による固有振動を持つことを同じモデルから導き、さらにそれが液滴中の水素移送を支配していること、および静止状態での拡散に比べて約2桁大きいことを明らかにして、既報の液体金属 LiPb からの水素の拡散放出速度の差異を定量的に説明できることを示した。

(3) 真空中を落下する液滴からの放出に基づいたトリチウム回収装置を設計するとともに、さらに核融合炉システムにおける燃料物質収支をモデル化して最適な回収率を論じ、現実的な設計パラメータの決定法を示した。また、その結果を用いて、核融合炉システムにおける燃料供給挙動とインベントリーの推移を明らかにした。この結果から従来ブランケットへの適用では液体金属材に大きな利点があるにも関わらず、生成する燃料トリチウムの分離法が大きな障害であった問題を解決できることを示唆した。

(4) 表面振動の理論を自由落下する液膜に拡張して、その安定性が液膜からの蒸発蒸気と液の相互作用によるケルビン-ヘルムホルツ不安定性により支配されることを明らかにし、水を用いた実験により確認した。この結果を用いて、慣性核融合炉の液体炉壁や磁場核融合炉のダイバータへの適用性を検討し、高エネルギー受容体としての液体壁の可能性と不安定限界を明らかにした。

以上の成果は、その方法論と知見を通じて核融合工学とエネルギー科学に大きく貢献するものであり、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(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26年8月8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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、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： 平成 年 月 日以降