

氏 名 大胡 武

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2137 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 易融金属ペブルを用いた新たなダイバータ概念の提案及び  
検証研究

論文審査委員 主 査 教授 柳 長門  
教授 宮澤 順一  
教授 増崎 貴  
教授 上田 良夫  
大阪大学大学院工学研究科  
准教授 江原 真司  
東北大学大学院工学研究科

## 博士論文の要旨

氏 名 大胡 武

論文題目 易融金属ペブルを用いた新たなダイバータ概念の提案及び検証研究

核融合発電は燃料の非偏在性、永続性などの利点を持ち、新エネルギーのひとつとしてその実現が期待されている。磁場閉じ込め核融合炉では、反応断面積が大きいことから、重水素 (D) と三重水素 (T) から中性子とヘリウムを生成する DT 核融合反応が用いられる。DT 核融合反応により生成されたヘリウムはその熱エネルギーで炉心プラズマを加熱した後、ダイバータと呼ばれるプラズマ受熱機器に到達し、排気される。この時、プラズマを受け止めるダイバータターゲットの定常熱負荷は数十 MW/m<sup>2</sup> を超える。従来型の固体ターゲットを用いた水冷却方式ダイバータでこの要求を満たすことは困難であり、大きなブレイクスルーが求められている。その一つに熔融金属をダイバータターゲットとして用いる液体金属ダイバータというアイデアがあり、近年世界的にも注目が集まっている。このような背景の下、本研究では「易融金属ペブルダイバータ」を提案するに至った。これは液体金属ダイバータの利点を継承しつつ、その弱点を補う新たなダイバータ概念である。これまでに、易融金属ペブルダイバータの成立性を示すことを目的として、概念設計と課題抽出、及び重要課題に関する基礎実験を行ってきた。本論文はこれらについてまとめたものである。

本研究ではまずダイバータに関するこれまでの研究について概説した。ダイバータとしては高い許容熱負荷と高い遮蔽率、十分な排気性能が実現でき、かつ複雑な機構を使用しないことが求められる。従来型の固体水冷却方式は許容熱負荷に制限があるため、液体ターゲットや、流動する固体ターゲットを用いた様々なアイデアが提案されているが、上述した条件を全て満たすという観点では、重力のみで液体の連続流を流す方式が望ましいと考えられ、液体金属ダイバータ REVOLVER-D が提案されるに至っている。そこで本研究ではまず REVOLVER-D の重要課題に関する研究を行った。

REVOLVER-D は液体スズ噴流のシャワーでプラズマを受けることで、高除熱性能、高メンテナンス性、高粒子排気性能を実現するダイバータ概念である。その重要課題である噴流の安定化及び液体金属噴流に働く MHD 効果の検証を行った。噴流の安定化については、噴流内部に鎖などの内部抵抗を挿入するとコアンダ効果により液体が内部抵抗に沿って流れ、液滴化が抑制された安定な連続流を形成できることに着目し、水や液体金属を用いた実験を行ってこの効果を定量的に検証した。有限要素法計算ソフト ANSYS CFX を使い、実験体系を模擬した数値シミュレーションも行った。その結果、噴流は内部抵抗によって減速し、最終的に流速は内部抵抗周長の約 0.26 乗、体積流量の約 0.36 乗に比例した終端速度となることを明らかにした。MHD 効果の検証については、低融点金属 U-alloy78 を循環させる実験装置を用いて、磁場中で液体金属噴流に電流を印加する実験を行った。その結果、噴流は内部抵抗を伴って曲がるものの、曲がり角が大きい場合には高頻度で内部抵抗が露出することが分かった。またその曲がり具合はローレンツフォースで説明できること

が分かり、実際の核融合炉条件での噴流の曲がり予測したところ、許容できないレベルとなることが判明し、電流経路の遮断が必要になるとの結論を得た。この問題を解決するため、熔融スズ噴流の代わりに固体スズペブル流を用いることで電流経路遮断と高遮蔽率を両立させる易融金属ペブルダイバータ REVOLVER-D2 を新たに考案した。

これを受けて、REVOLVER-D2 の概念設計を行い、その課題を抽出した。REVOLVER-D2 は自由落下するペブル流をダイバータターゲットとして用い、ペブル流を熔融スズプールで受けて落下衝撃を吸収し、熔融スズプールから液滴をシリコンオイル内に滴下してペブルを再生産し、それを移送して再びダイバータターゲットとして用いる、という構想である。ヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 への適用を想定し、必要となるペブルの形状及び流量を見積もった。FFHR-c1 の定常運転モードにおける核融合出力は 0.38 GW であり、ダイバータ熱負荷は 60 MW/m<sup>2</sup> となる。ペブルを 5 m 程度自由落下させる場合、プラズマを通過する際の速度は 10 m/s 程度となる。スズの蒸気圧を 10<sup>-5</sup>Pa 以下に抑えるため、プラズマ通過後の平均温度を 1,000 K 以下にすることも求められる。これらの条件から、ペブル直径 4 mm 以上、総流量 1,200 ton/h が必要になると算出した。また、REVOLVER-D2 の課題として、炉内における大粒径ペブル高速量産手法の確立、ペブル流によるプラズマの遮蔽および熱除去性能の実証、プラズマがペブル落下挙動に及ぼす影響の検証、ペブル流で達成可能な遮蔽率の検証、ペブル移送及び熱交換手法の確立、残留シリコンオイルのプラズマへの影響予測、ペブルの回転誘起による表面温度平均化の可能性検証などを抽出し、本研究ではこれらの中でも特に重要な課題である炉内における大粒径ペブル高速量産手法の確立、ペブル流によるプラズマの遮蔽および熱除去性能の実証、プラズマがペブル落下挙動に及ぼす影響の検証及びペブル流で達成可能な遮蔽率の検証に取り組んだ。

ペブル製造手法としては、液体金属の液滴を冷媒に滴下して固化させ、金属粒を量産する散弾製造法を用いることを提案し、実験による検証を行った。一般に流体中を落下する液滴には表面張力と抵抗力が働き、液滴の大きさが大きい場合には液滴が扁平形状となることが知られている。熱負荷の集中を避けるため、ペブルは球状であることが望ましい。流体中を移動する液滴の形状に関しては表面張力に対する慣性力の割合であるウェーバー数が重要である。液滴に働くウェーバー数は、周囲流体の動粘度の減少関数で液滴径の増加関数であるため、動粘性係数の高い冷媒を用いれば、大粒径液滴も小粒径の場合とウェーバー数が等しくなり球状のペブルを生成できる可能性がある。そこで、動粘性係数 50~1,000 mm<sup>2</sup>/s のシリコンオイルを冷媒に用いて U-alloy78 のペブル製造を行い、生成したペブルのアスペクト比とシリコンオイルの動粘性係数の関係を調べた。その結果、シリコンオイルの動粘性係数が高い場合、直径 4~5 mm かつ球状に近いペブルを製造できることが分かった。また、ペブルの幅を代表長さとし、落下速度、U-alloy78 液滴の密度、表面張力から求めたウェーバー数が 5 未満の場合に球状に近いペブルが形成されることを明らかにした。

ペブルはプラズマに照射されることで帯電する。ペブル同士の距離が近い場合には大きなクーロン力が働くため、その影響を明らかにする必要がある。そこで、東海大学・利根川研究室が有するシートプラズマ実験装置 TPDsheet-U を使用し、ペブル流へのプラズマ照射実験を行った。ラングミュアプローブでプラズマパラメータを計測したところ、イオンフラックス、電子密度のペブル流による減衰が確認された。高速度カメラを用いてペブ

ル流の挙動を計測したところ、ペブルの9割がペブルに働くクーロン力・重力から求めた予測拡散幅の範囲内にあることを確認した。計測されたプラズマパラメータによって求めたペブル帯電時の電荷、デバイ長を考慮すると、今回の実験ではクーロン力の影響は働かなかった可能性が高く、クーロン力の影響についてはより高密度のプラズマを用いた実験などによる検証が必要である。また電子温度についてはペブル流による低減はあまり期待できないことも判明した。しかし、ペブル流より下流における粒子数の減衰が確認されたため、ペブル流による総熱流束の低減が可能であることを実験的に実証できた。

ペブル流の遮蔽率については、シート状レーザーを用いてペブル流による遮蔽率の落下距離依存性を調べる実験を行った。遮蔽率が落下距離、ペブル径の増大に伴い低下するという結果を得た。この結果は先行研究による式によく一致し、既の実証されていたペブル直径1 mmより大きいペブル直径5 mmの場合でも成立することを実証した。これによりFFHR-clの条件におけるペブル流による遮蔽率の予測が可能となり、FFHR-clであれば、幅310mm四方、単位面積あたりの体積流量0.25m/sのペブル流を用いることで、遮蔽率90%を満足できることを明らかにした。

以上の結果をまとめ、本研究で明らかになった設計条件を反映させたヘリカル核融合炉FFHR-clの易融金属ペブルダイバータの設計について述べ、最後に結論を述べた。ペブルに働くクーロン力の検証や電子温度の低減などの課題は残っているものの、本研究を通じて易融金属ペブルを用いたダイバータの要求仕様が明確化し、そのために必要なペブルの量産手法が確立されたこと、また金属ペブル流がダイバータターゲットとして機能することが確認されたことで、易融金属ペブルダイバータ概念の成立性を肯定する結果が得られた。今後未着手の課題に取り組み、装置設計の具体化及び最適化を着実に進めれば、ダイバータ熱負荷問題を解決し、核融合発電に向けた大きな一歩を得ることは十分に可能であるといえる。

## 博士論文審査結果

Name in Full 氏名 大胡 武

論文題目 易融金属ペブルを用いた新たなダイバータ概念の提案及び検証研究

核融合発電炉の実現に向け、高温・高密度のプラズマを受け止めるダイバータ機器の高性能化は最重要課題の一つである。現在までにタングステンをプラズマ対向材料に用いる固体水冷方式ダイバータの開発が進んでおり、その許容熱負荷は最大 20 MW/m<sup>2</sup> 程度に向上してきている。しかしながら核融合炉では 100 MW/m<sup>2</sup> 以上の超高熱負荷も想定されるため、より高い耐熱負荷性能を有するダイバータの開発が求められている。液体金属流をプラズマ対向材料として用いることで耐熱負荷性能が高く、かつ自己修復性も有するダイバータを実現できる可能性があり、近年世界的にも研究が加速している。核融合科学研究所で進められているヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 の設計においても、熔融スズ噴流のシャワーを用いた液体ダイバータの適用が提案された。このような背景のもと、出願者は液体金属シャワーダイバータの基礎実験に取り組み、その中で明らかとなった課題を解決するため、独自のアイデアに基づく新概念の「易融金属ペブルダイバータ」を提案するに至った。本論文は、液体金属シャワーダイバータの基礎実験、易融金属ペブルダイバータの概念設計、及びその重要課題に関して行なった実験の結果についてまとめたものである。

本論文は全4章で構成されている。序章で核融合炉開発の必要性、核融合炉におけるダイバータの役割と課題、液体金属ダイバータの先行研究などについて説明した後、第2章では液体金属シャワーダイバータに関する基礎実験と同実験により明らかとなった課題、その課題を解決し得る易融金属ペブルダイバータの提案、及び FFHR-c1 炉を対象とした易融金属ペブルダイバータの概念設計について述べている。続く第3章で易融金属ペブルダイバータの成立性に関わる3つの重要課題に関して行なった実験について述べ、第4章で本論文をまとめている。

出願者は、液体金属シャワーダイバータの重要課題である液体金属噴流の安定化及び MHD 効果検証に関する基礎的な実験と数値シミュレーションを行うところから研究を開始した。水や液体金属を用いた実験では、噴流内部に鎖などの内部抵抗を入れることで垂流れの安定化と連続流化ができることを見出した。このような内部抵抗を持つ「鞘状噴流」が終端速度を持つことを実験と数値シミュレーションの両面から確認し、この終端速度が噴流流量と内部抵抗周長に強く依存していることを明らかにして、この2つのパラメータ依存性からなるスケールングを提示した。続いて液体金属の鞘状噴流に対する磁場下での電流印加実験を行ない、鞘状噴流における MHD 効果は噴流を1本の導体とみなした場合に働くローレンツ力で説明できることを示した。この結果から、FFHR-c1 炉においては、液体金属噴流が高磁場中でプラズマに接触し、電流が流れ込むことによって、許容できないレベルの変形を受ける可能性があることが明らかとなった。この問題を解決するには、電流経路を遮断することが有効である。そこで出願者は、電流経路を遮断しつつ、噴流と同程度以上のプラズマの高遮蔽率を両立するための手法として、液体金属噴流の代わりに低融点金属のペブル流を用いる易融金属ペブルダイバー

タを新たに考案し、その概念設計を行なった。低融点金属としては、液体金属シャワーダイバータと同様に、蒸気圧の低いスズを第一候補に挙げている。易融金属ペブルダイバータの基本シナリオは次のとおりである。①固体スズのペブル流をヘリカルプラズマ周辺部のエルゴディック層と呼ばれる領域に自由落下させ、プラズマを受けるリミタとする。プラズマはエルゴディック層を長距離周回してからダイバータ領域に流出するため、ペブル流のリミタによってダイバータへと向かうプラズマを遮蔽することで熱流束の大部分を低減できる。ペブル流リミタに衝突したプラズマ粒子は再結合して中性化され、ペブル流の隙間から排気される。②ペブル流はエルゴディック層を通過した後、下部に設置した熔融スズのプールで受け止め、全て融かす。熔融スズを用いることによりペブルの落下衝撃を吸収できるとともに、熱回収も容易となる。これが低融点金属を採用した理由である。③熔融スズプール下部で液滴シャワーを生成してシリコンオイルプールに滴下し、固体スズペブルを大量製造する。④固体スズペブルを機械的に炉上部へと移送し、再び自由落下させる。本論文の概念設計では、これら全てを核融合炉真空容器内で行うとしている。必要なスズの流量およびペブル径が見積もられ、解決すべき重要課題も抽出されている。続く第3章では、これら重要課題の内でも特に設計の成立性に大きく関わる(1)大粒径球状ペブルの高速量産、(2)ペブル流とプラズマの相互作用検証、(3)ペブル流の遮蔽率検証、という3点に関し実施した実験研究について述べている。

出願者はペブルを高速量産するにあたり、冷媒に液体金属液滴を滴下して凝固させるという「散弾製造法」と同様の手法を用いることを考案し、実験を行なった。生成されるペブルの形状は液体金属液滴における慣性力（沈降速度の自乗と液滴径に比例）の表面張力に対する比であるウェーバー数に依存することから、高粘性冷媒を使用して沈降速度を減じ、ウェーバー数を低減することで大粒径球状ペブルを生成できるという仮説を立てた。そこで高粘性シリコンオイルを冷媒とし、これに低融点金属 U アロイ 78 を滴下する実験を行い、実際に目標としていた直径 5 mm 程度の大粒径球状ペブルを 3 Hz で量産することに成功した。球状ペブル生成条件がウェーバー数 5 以下であることも見出した。ペブル流とプラズマの相互作用に関しては、東海大学利根川研究室が有するシートプラズマ実験装置 TPDsheet-U において、世界初となるペブル流へのプラズマ照射実験を実施した。その結果、ペブル流による電子密度及びイオン束の低減を確認し、ペブル流がプラズマを有効に遮蔽し得ることを実証した。ペブル流によって達成可能な遮蔽率の検証に関しては、別途、シートレーザーを用いた計測によって遮蔽率のペブル径やペブル落下距離、ペブル流量に対する依存性を調べた。これと並行して、先行研究で特定のペブル径と落下距離において示されていたランベルト・ベール則に基づくペブル流による遮蔽率の予測モデルを、異なるペブル径や落下距離の場合に拡張した。この拡張モデルは実験で得られた結果を良く説明する。これらの成果により、FFHR-cl 炉における易融金属ペブルダイバータの設計成立性についての見通しを得た。

以上のように本論文では、出願者が液体金属ダイバータの基礎研究を経て独自に着想した易融金属ペブルダイバータについてその概念設計と課題抽出を行い、特に重要な課題に関する実験を行なってこれらに解決の見通しを与えると同時に、核融合炉設計において必要となる数式モデルを提示したことがまとめられている。これらの成果はヘリカル型核融合炉の設計活動に大きく寄与すると同時に、核融合炉のダイバータ熱負荷問題に対する解決策を新たに示し、その基礎を固めたという点で核融合研究の発展にも大きく貢献するものである。これらのことから、本審査委員会は本論文が博士学位論文として十分な価値を有するものと判断した。