

令和元年6月18日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06140

研究課題名（和文）液体金属ダイバータ実現のための液体金属自由表面鉛直流のMHD効果の実験的検証

研究課題名（英文）Experimental study on MHD effect of liquid metal free-surface vertical flow for liquid metal divertor

研究代表者

後藤 拓也 (Takuya, Goto)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30509518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は磁場中を流れる液体金属噴流に電流が流れた際に、MHD（電磁流体力学）効果によって噴流がどのような影響を受けるかについて実験的に検証することを目的として行った。本研究により、水噴流を用いた先行実験で実証した、チェーン等の内挿物による噴流の安定化が液体金属でも起きること、液体金属噴流がMHD効果を受けた際、内挿物を伴って屈曲すること、またその屈曲度合いは液体金属噴流を単一の導体とみなした場合に受けるローレンツ力によって説明できることが判明した。この結果、液体金属噴流を用いた核融合炉のダイバータ（不純物排気のために超高熱負荷を定常で受ける機器）の設計に関する指針を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体金属噴流のMHD効果に関する研究は過去にも多く行われているが、噴流の安定化のために内挿物を挿入した液体金属噴流に対するMHD効果を初めて実験的に検証した点が本研究の学術的な意義である。また、本研究の結果液体金属噴流を核融合炉のダイバータとして直接適用することは難しいことが判明したが、ダイバータ設計に関する定量的な指針が得られ、またMHD効果が大きく働かない環境における超高熱負荷への対処が可能なシステムの一例を構築することができた。これらが本研究の社会的な意義と言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is experimental examination of the behavior of liquid metal jets by MHD(magnetohydrodynamics) effect when the electric current flows along the jet in the presence of an external magnetic field.

The experiment showed the following three facts. Liquid metal jets can be stabilized by inserting an internal flow resistance as shown in the prior experiment using a water jet. Liquid metal jets deformed with the internal flow resistance in the presence of the MHD effect. The deformation of the jet can be calculated by the Lorentz force that works on the jet when it is regarded as a single conductor.

These results give a design guideline for the divertor, the component of a fusion reactor that accommodates ultra high heat load in steady state to remove impurities from the core plasma, using a liquid metal jet.

研究分野：核融合工学

キーワード：液体金属 自由表面鉛直流 MHD効果

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

核融合炉は将来の革新的エネルギー源として期待されており、特に磁場閉じ込め方式の核融合炉はこれまでの数十年にわたる研究を受けて、定常核融合燃焼プラズマの実現が見通せる段階に達している。これにより近い将来に核融合エネルギーの連続的な発生の実証が期待される一方で、商用核融合発電所の実現に向けてはいくつかの未解決な工学的課題が存在する。その最たるものが、炉心プラズマ中の不純物を排気するためのダイバータと呼ばれる機器の設計である。ダイバータには炉心で発生したエネルギーの最大で2割が流入するため、数十万～百万kWの定常発電を想定している核融合発電炉ではこの流入エネルギーは数十～数百MWにもなる。さらにこのエネルギーのほとんどは磁力線に沿ってダイバータに向かうプラズマ粒子が担い、ダイバータ上での熱負荷が限られた領域に集中するため、ダイバータの熱負荷は局所的には100 MW/m<sup>2</sup>を超える、打ち上げ時のロケットノズルに匹敵する超高熱負荷となる。一方で経済的な核融合発電の実現のためには、1年程度の連続定常運転と、高い設備稼働率が求められる。このためダイバータには超高熱負荷の処理と不純物ガスの排気を連続定常で両立する能力と、容易に保守交換が可能となる構造が求められる。

現在ダイバータとしては、高融点金属であるタングステンのターゲットと、優れた熱伝導率を有する銅合金のヒートシンクを接合し、高圧水で冷却する構造が主案として考えられており、国際協力の下フランスで建設が進む国際熱核融合実験炉（ITER）のダイバータにもこの方式が採用されている。しかしこの方式をもっても最大で除去できる熱負荷は20 MW/m<sup>2</sup>程度である。さらに核融合反応で発生する中性子による高い中性子負荷を受ける将来の核融合発電炉では熱・機械特性の劣化のために銅合金の利用が難しく、放射性廃棄物の低減も考慮して銅合金の代わりに低放射化フェライト鋼を用いることが想定されているが、この場合の許容熱負荷は5 MW/m<sup>2</sup>程度に留まる。また、高エネルギー粒子によるターゲットの物理的な損耗も課題となっている。このためダイバータ周辺にアルゴンなどの不純物のガスを導入することで、輻射による熱負荷の分散を行うデタッチメントと呼ばれる手法が提案されているが、未だこの定常的な維持は実現していない。そこで、液体金属をダイバータターゲットとして用いることで、定常超高熱負荷への対処とターゲット表面の修復を実現する液体金属ダイバータが考案され、様々な方式が提案されている。しかしこれまでに提案された液体金属ダイバータは超高熱負荷への対処に重点が置かれ、排気との両立が十分には検討されていない。このように、核融合炉のダイバータとして確実に見通せる解はなく、ダイバータが核融合炉実現に向けたボトルネックとなっている状況であった。

### 2. 研究の目的

上述の背景を受け、研究代表者らは、液体金属の噴流（蛇口から出る水道水のような自由表面の鉛直流）を複数シャワー状に並べ、これを炉心プラズマからダイバータに向かう磁力線に接触させる、という新しいアイデアを提案した（図1）。この方式であれば、ダイバータに向かうプラズマをガス化して消滅させると同時に、発生したガスを噴流間の隙間から排気することができる。また液体金属をノズルから自由落下させる方式とすれば、配管構造も単純で保守交換も容易となる。そして他の液体金属を用いる方式同様、液体金属の高い熱負荷能力とターゲット表面修復の実現、液体金属の流量制御による温度上昇を利用した発電などの熱利用も期待できる。一方で、一般に自由落下する噴流は重力によって加速し、その太さ（半径）は徐々に減少する。また自由表面である噴流には表面張力不安定性が働き、表面形状の乱れと相まって噴流は下流側では細かな液滴に分かれてしまう。そこで研究代表者らはチェーンなどのガイドに流れを沿わせて減速することで、より長い距離でも安定した表面を実現することを提案し、実際に水を用いた実験により5 m程度の距離でも安定した表面を形成できること、また大気中での実験のため短時間かつ短い距離ではあるが、液体金属（スズはんだ）を用いて液体金属でも同様の効果が得られることを確認した。これにより、ガイドに沿って流れる液体金属噴流を用いた全く新しいダイバータ概念の提案に至った。

一方、この新しいダイバータの実現のためにも、プラズマと液体金属の相互作用、液体金属とガイドの材料の相互作用など、様々な課題の解決が必要である。その中でも特に重要なのは、磁場閉じ込め核融合炉内の数テスラに及ぶ高い磁場の下でプラズマと接触して内部に電流が生じた液体金属噴流が磁気流体力学（MHD）効果によりどのような挙動を示すかを検証し、連続かつ安定した液体金属噴流の形成に必要な条件を見出すことであった。過去にこのようなガイドに沿って流れる液体金属噴流のMHD効果についての研究例はなく、また複雑な体系であるため計算機シミュレーションだけではなく実験的な検証が必要と考え、この実験的検証を目的として本研究課題を実施するに至った。

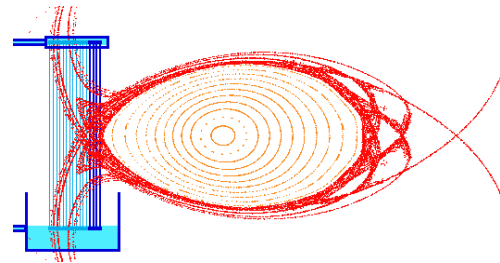


図1 液体金属噴流シャワーを用いたダイバータの概念図

### 3. 研究の方法

当初は核融合炉と同じ高真空中で、核融合炉での使用を想定しているスズを用いて実験を行う方針であったが、詳細検討を行った結果、交付金額と研究期間の範囲でこれを実現することが難しいことが判明した。そこで液体金属としてより低融点で取り扱いが容易な U アロイ 78 (ビスマス-インジウム-スズの三元合金 ( $\text{Bi}_{57}\text{In}_{17}\text{Sn}_{26}$ ) で融点約  $78^\circ\text{C}$ ) を用い、真空中ではなくアルゴン雰囲気中で実験を行う計画に切り替えた。これにより作動流体の温度が下がり高温対応のマグネットポンプによる流動が可能となったこと、腐食性の高いスズではなく U アロイを用いることで通常のステンレス配管 (SUS403) の利用が可能となったこと、また大気圧のアルゴンガス雰囲気中での実験としたことでステンレスではなく透明のポリカーボネート製のグローブボックス内での実験が可能となったことで、実験装置設計の大幅な簡素化が実現した。実験装置の構成図および写真をそれぞれ図 2、3 に示す。本実験装置は上部ノズルと下部液受けの間に長さ約 1 m、最大流量毎分約 9 リットルの U アロイ 78 噴流を連続的に形成することができる。また、グローブボックス内に備え付けられた高さ 20 cm、幅 10 cm の平行平板型の永久磁石 (2 枚の磁石間の距離は 10 cm) により、噴流と直交する方向に最大で約 0.2 T の定常磁場の印加が可能である。2 枚の磁石から等距離の面上における、噴流に沿った方向の磁場強度の分布を図 4 に示す。

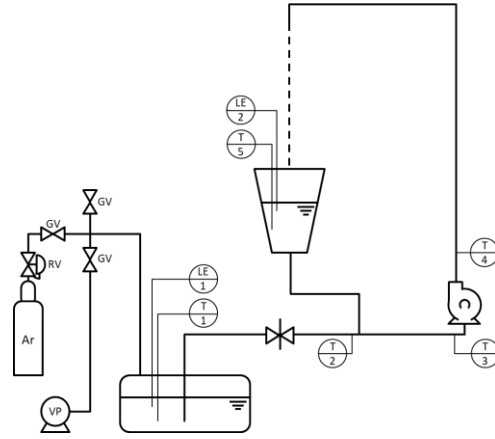


図 2 実験装置構成図



図 3 実験装置写真

### 4. 研究成果

まずは先行の水を用いた実験で実証された、チェーン等のガイドを用いた噴流の安定化効果についての検証実験を行った。図 5 にシャッタースピード 1/2000 秒の高速カメラで撮影した U アロイ 噴流の写真を示す。なおここではガイドとして幅 5 ミリメートルのステンレス製チェーンを用いている。ガイドがない場合、低流量では噴流が下流部で液滴化していることが見て取れる。一方高流量では連続した流れが実現しているが、流れが大きく乱れている。それと比較すると、ガイドがある場合には、流量に関わらず安定した流れが実現されていることが分かる。これにより、ガイドによる噴流表面の安定化が長さ 1 メートル程度の液体金属においても実現することが確かめられた。

続いて MHD 効果についての実験を行った。実験は直径 10 mm のノズルと幅 5 mm のアルミニウム製チェーンを用いて行った (本来はノズル径やチェーンの幅を変えてより体系的なデータ取得を行う予定であったが、ポンプ流量の安定性等の問題で異なるノズル径では安定した噴流が形成できなかったことおよび、ポンプの故障により計測途中で実験が継続不能となったため、予定していた研究期間内にはこの条件のみでのデータ取得に留まった)。噴流への電流の印加は、噴流下流部に設置したアルミニウム製のメッシュと、ノズル先端部との間に定電流電源を用いて電圧を印加することで行った。下部のメッシュの幅を十分大きく取ることで、噴流が MHD 効果により傾いても噴流とメッシュが必ず接触するため、常に一定の電流を流すことができる。なお、メッシュやチェーンに磁性体を用いると磁石に引き寄せられてしまうため、アルミニウム製のものを使用

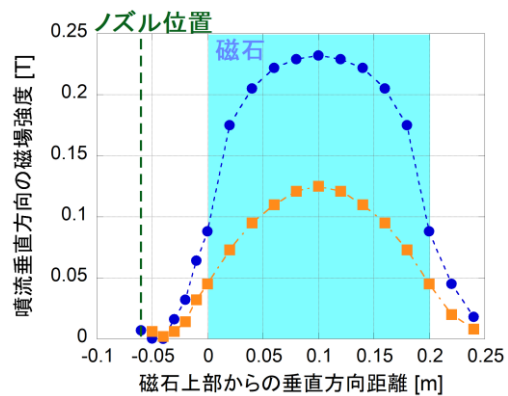


図 4 噴流垂直方向の磁場の分布

(青色：磁石中央部、オレンジ：磁石端部)

した。図5に電流値が0、3、6 Aの状態での噴流の写真を示す。また図6に磁石直下で測定した噴流の水平方向の変位と、噴流を単一の導体とみなし、そこに生じるローレンツ力による変位を電磁力やチェーンによる減速も考慮して計算した結果との比較を示す。ここから、噴流はガイドとなるチェーンを伴って傾き、その傾きは電流が大きくなるにつれ大きくなること、またその傾きは噴流を単一の導体とみなした場合のローレンツ力によって説明できることが判明した。

MHD 効果によって噴流が変形した際、噴流とガイドが切り離されてしまうと、噴流の安定化効果が失われるとともに露出したガイドがプラズマによって損傷する恐れもある、このため、噴流がガイドを伴って変形することは液体金属噴流をダイバーターターゲットとして適用するにおいて肯定的な結果である。しかしその一方で、噴流の変位は今回の実験条件である0.2 T、数 Aでも数 cmに達し、実際の核融合炉で想定される磁場強度(数 T)と電流値(数~数十 kA)においては、ローレンツ力による噴流の変形が許容できないレベルになることが予想される。このため、ガイドに沿う液体金属噴流を直接核融合炉のダイバーターターゲットとして用いることは難しいことが判明したが、他の方式のターゲットの背面に設置して補助的な役割を果たすなど、ローレンツ力の小さな環境下ではその活用が期待される。また、核融合炉に限らず、高い熱負荷や高エネルギーの粒子負荷を定常的に受け続ける箇所を保護するシステムのひとつとしての応用も考えられる。

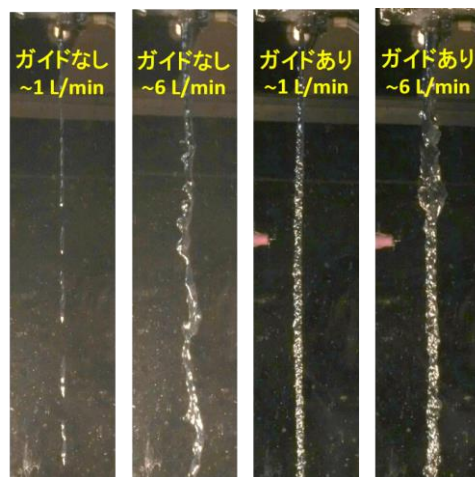


図5 高速カメラで撮影したUアロイ噴流

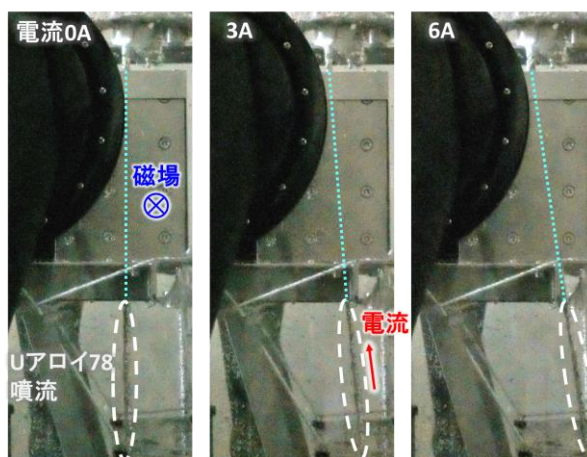


図6 電流の違いによるUアロイ噴流の傾きの変化

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① [Takuya Goto](#), [Takeru Ohgo](#), [Junichi Miyazawa](#), “Experimental Study on MHD Effect of Liquid Metal Sheath Jet for the Liquid Metal Divertor REVOLVER-D”, *Plasma and Fusion Research* **14** (2019) 1405092.
- ② [J. Miyazawa](#), [T. Goto](#), H. Tamura, T. Tanaka, N. Yanagi, T. Murase, R. Sakamoto, S. Masuzaki, [T. Ohgo](#), A. Sagara, “Maintainability of the helical reactor FFHR-c1 equipped with the liquid metal divertor and cartridge type blankets”, *Fusion Engineering and Design* **136** (2018) 1278-1285.
- ③ [Takeru Ohgo](#), [Junichi Miyazawa](#), [Takuya Goto](#), Takanori Murase, “Study on Jets Stabilized by Inserting Internal Flow Resistance for the Liquid Metal Divertor in the Helical Fusion Reactor”, *Plasma and Fusion Research* **13** (2018) 1405003.
- ④ [J. Miyazawa](#), [T. Goto](#), T. Murase, [T. Ohgo](#), N. Yanagi, H. Tanaka, H. Tamura, T. Tanaka, S. Masuzaki, R. Sakamoto, J. Yagi, A. Sagara, “Conceptual design of a liquid metal limiter/divertor system for the FFHR d1”, *Fusion Engineering and Design* **125** (2017) 227-238.
- ⑤ [Takuya Goto](#), [Junichi Miyazawa](#), [Takeru Ohgo](#), “Estimation of the Pumping Power of the Liquid Metal Divertor REVOLVER-D for the LHD-type Helical Fusion Reactor FFHR-d1”, *Plasma and Fusion Research* **12** (2017) 1405016.

[学会発表] (計 6 件)

- ① [Takuya Goto](#), [Takeru Ohgo](#), [Junichi Miyazawa](#), “Experimental Study on MHD Effect of Liquid Metal Sheath Jet for the Liquid Metal Divertor REVOLVER-D”, 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT2018), Sep. 17-21, 2018, Giardini Naxos, Sicily, Italy, O3A.4 (口頭発表)
- ② [Takeru Ohgo](#), [Junichi Miyazawa](#), [Takuya Goto](#), “A Study on the Thermal Property of the Jet with Internal Flow Resistance for Liquid Metal Divertor REVOLVER-D”, 26th International Toki

- Conference (ITC-26) / 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (APFA-11), Dec. 5-8, 2017, Toki, Gifu, Japan, P2-84 (ポスター発表)
- ③ Takuya Goto, Junichi Miyazawa, Takeru Ohgo, “Initial Results of Liquid Metal Circulation Experiment for Realization of the Liquid Metal Divertor REVOLVER-D”, 26th International Toki Conference (ITC-26) / 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference (APFA-11), Dec. 5-8, 2017, Toki, Gifu, Japan, P2-85 (ポスター発表)
- ④ Takeru Ohgo, Junichi Miyazawa, Takuya Goto, Takanori Murase, “Study on Jets Stabilization of Shower Jets by Inserting Internal Flow Resistances for the Liquid Metal Divertor in the Helical Fusion Reactor FFHR-d1”, 13th Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13), Sep. 25-29, 2017, Kyoto, Japan, P1-015 (ポスター発表)
- ⑤ Junichi Miyazawa, Takuya Goto, Hitoshi Tamura, Teruya Tanaka, Nagato Yanagi, Tananori Murase, Ryuichi Sakamoto, Suguru Masuzaki, Takeru Ohgo, Akio Sagara, and the FFHR Design Group, “Maintainability of the Helical Reactor FFHR-c1 Equipped with the Liquid Metal Divertor and Cartridge-type Blankets”, 13th Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-13), Sep. 25-29, 2017, Kyoto, Japan, OA3-1.2 (招待講演)
- ⑥ 大胡武、宮澤順一、後藤拓也、村瀬尊則、「液体金属ダイバータのための内部境界のある自由表面流に関する研究」、プラズマ・核融合学会第33回年会、2016年11月29日～12月2日、東北大学青葉山キャンパス、(ポスター発表)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：宮澤 順一

ローマ字氏名：MIYAZAWA Junichi

研究協力者氏名：大胡 武

ローマ字氏名：OHGO Takeru

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。