

令和元年6月18日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14530

研究課題名(和文) 水道水程度の速度の熔融金属流は核融合プラズマの超高排熱に耐える受熱機器たり得るか

研究課題名(英文) Is it possible to apply a liquid metal jet flowing at a velocity similar to a tap water flow as a heat receiving device that can withstand the ultra-high heat load in the fusion reactor?

研究代表者

宮澤 順一 (Miyazawa, Junichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：50300728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：将来の核融合炉における超高熱負荷に耐えられる受熱機器として、液体金属流のシャワーを用いた新概念ダイバータREVOLVER-Dを提案している。本研究では、これを模擬するために大気中または真空中で低融点金属あるいは溶融スズの噴流を生成し、これらにアルゴンTIGアーク放電を印加する実験を行なった。液体金属噴流に対しアーク放電を行なっても、通常の固体金属で見られるような赤熱や溶接ヒュームの発生は認められず、液体金属噴流が高い耐熱負荷特性を有していることを示す結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高レベル廃棄物や二酸化炭素の発生がない核融合炉は、人類の永続に必須のエネルギー源である。核融合炉を実現するために解決すべき課題の一つに、プラズマからの熱負荷が固体材料では耐えられないほど大きい、という問題がある。液体金属流を受熱機器(ダイバータ)に応用することでこの問題を解決できる可能性があり、本研究はその基礎を与えるものである。真空中で液体金属噴流を連続生成し、これにアーク放電プラズマによる熱負荷を与えるという本研究の実験は世界初の試みであり、重要な学術的意義を有する。液体金属流の受熱機器への応用というアイデアは核融合炉以外にも適用可能であり、本研究のもたらす社会的意義は大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：We are proposing a new concept of liquid metal shower divertor named the REVOLVER-D as a heat receiving device for the future fusion reactor. To demonstrate the basic concept of the REVOLVER-D, experiments applying Ar TIG arc discharges on the liquid metal jets of low melting point metal or tin have been performed. The liquid metal jets showed no change in its color and no weld fume was observed when the arc discharge was applied. These results show that a liquid metal jet has good heat load characteristics applicable to the divertor for the future fusion reactor.

研究分野：核融合学、プラズマ理工学

キーワード：核融合炉 ダイバータ 液体金属 アーク放電 真空中放電

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

将来の核融合炉では、ダイバータと呼ばれる受熱機器の熱負荷が 100 MW/m^2 以上に達する。カーボンやタングステンをプラズマ対向材料として用いる通常の固体ダイバータでは、このような高熱負荷に耐えることは困難である。そのためにブレイクスルーとなる技術が求められているが、特に最近では液体金属を用いる液体ダイバータが注目を集めている。液体金属流をプラズマ対向材料として用いる液体ダイバータは、十分な流速を確保することで高い耐熱負荷性能を期待できる他、除熱機器を真空容器外部に設置できるため、真空容器内での除熱が不可欠な従来型固体ダイバータと比べて放射性廃棄物を大幅に低減可能で、メンテナンスが容易というメリットも有している。我々のグループは、熔融スズのシャワーをプラズマ対向材料とすることで、高耐熱負荷性能に加え高粒子排気性能も実現可能な新概念液体金属ダイバータ REVOLVER-D を提案している。但し、これを実現するためには熔融スズ噴流の脱ガス特性や耐熱負荷特性、MHD 特性、スパッタリング特性、材料腐食特性、及び液体金属ポンプの開発などに関する基礎研究が必要である。中でも、真空中で熔融スズ噴流を用いる実験の早期実施が待たれていた。

2. 研究の目的

本研究では、熔融スズ等の液体金属で乱流が十分に発達した流速数 m/s の自由表面流を高真空中で生成し、これが高熱負荷に耐えることを実験的に検証する。その結果を基に、核融合炉における受熱と排気を両立させるために我々が提案している液体金属ダイバータ REVOLVER-D が実現可能かどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、液体金属噴流への高熱負荷印加実験を大気圧中及び高真空中の2種の環境で実施した。大気圧での実験は図1に示した大型グローブボックスにおいて、高真空中での実験は図2に示した大型真空チャンバにおいて、それぞれ実施した。いずれの実験の場合も、アルゴンガス導入機構付きタングステン電極アークトーチを用いたアルゴン TIG アーク放電により、高熱負荷を印加した。

大気圧での実験に用いた大型グローブボックスは、内部観察を容易にするために透明なポリカーボネート板で構成されており、低融点金属用ポンプ、配管、ノズル、プール（受槽）、及びドレインタンク等からなる低融点金属循環装置を内蔵している。液体金属の酸化を抑えるためにアルゴンガスで満たした大型グローブボックス内で、低融点金属 Uアロイ 78（インジウム-ビスマス-スズの三元合金、融点約 78°C ）を循環させて全長 1 m 程度の液体金属噴流を生成し、

(1) 液体金属噴流安定化実験、及び

(2) 液体金属噴流へのアーク放電、

の2つの実験を行なった。前者では液体金属噴流をチェーンに沿わせて自由落下させることによる安定化効果を検証し、後者では液体金属噴流の温度計測及びアーク光の分光を行なった。

高真空中での実験に用いた大型真空チャンバは、全長約 1.8 m 、内径約 35 cm (ICF406) の真空容器で、その内部に図3(a)に示した小型液体金属噴流生成装置を内蔵している他、四重極質量分析計、ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプ、ガス導入用マスフローコントローラ、圧力計、ピラニゲージ、電離真空計、電流導入端子、冷却水導入端子等を備えている。小型液体金属噴流生成装置は、市販の卓上型噴流式ハンダ槽 NTD-01S（連取電機製作所製、図3(b)）の主要部を取り出してハンダ槽冷却ユニット（カザマエンジニアリング社製、図3(c)）の内部に設置し、インペラ駆動用モータを高温（最大約 300°C ）での動作が可能な真空用超音波モータ VSS52.200.5-UHVG（米国 Phytron 社製）に交換したものである。四重極質量分析計には質量数 $1 - 200$ という広範囲の計測が可能なキャノンアネルバ社製の M-201QA-TDM を用いた。四重極質量分析計は、大型真空チャンバとアングルバルブを介して接続した小型真空チャンバに設置した。この小型真空チャンバは個別に高真空排気が可能である。実験では、大型真空チャンバと

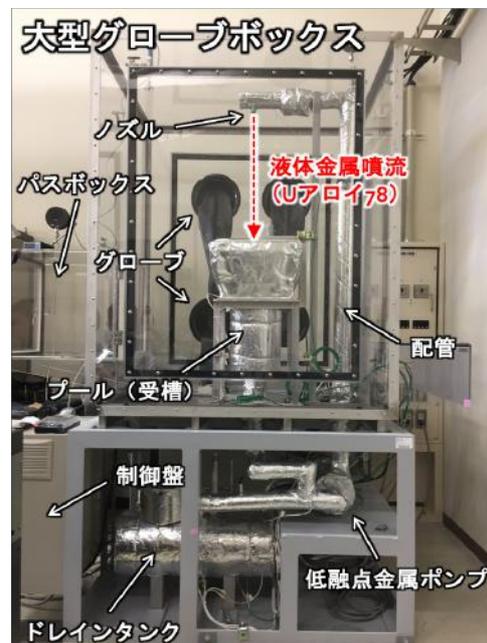


図1 大型グローブボックス。



図2 大型真空チャンバ。

の間のアングルバルブを閉じ、分析ガス抽出用配管(図1参照)及び流量調整弁を介して大型真空チャンバからのガスを導入し、差動排気しながら質量分析を行なった。アルゴン TIG アーク放電を行う際、大型真空チャンバ内圧力は最大 100 Pa 程度まで増加するため、小型真空チャンバ内圧力を四重極質量分析計が動作可能な 1.2×10^{-2} Pa 以下に抑えるには差動排気が必要となる。マスフローコントローラは堀場エステック社製の S48-32-HMT (N_2 換算最大流量 50 SLM (Standard Litter per Minutes))を用いた。TIG アーク放電用の電源として、TEXIO 社製の PSW-720L30 (定格電力 720 W、最大出力電流 72 A、最大出力電圧 30 V)、及び Panasonic 社製の YC-300TR6 (定格出力電流 4 - 300 A、定格出力電圧 20 V、最高無負荷電圧 70 V (いずれも三相 TIG 溶接の場合))の2種を用いた。アルゴンガスは、マスフローコントローラから流量をフィードバック制御しつつ大型真空チャンバ内に導入した後、アークトーチから液体金属噴流に向け、タングステン電極を包み込むように吹き出させた。本装置を用いて、(3)溶融スズ噴流への真空中 TIG アーク放電、に関する実験を行なった。この実験では $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Pa オーダーの高真空まで排気した大型真空チャンバ内で小型液体金属噴流生成装置を運転して溶融スズ (Sn、融点約 232°C) 噴流を生成し、これにアルゴン TIG アーク放電を印加した。放電前後における真空容器内ガス成分の時間変化を四重極質量分析計で計測した。

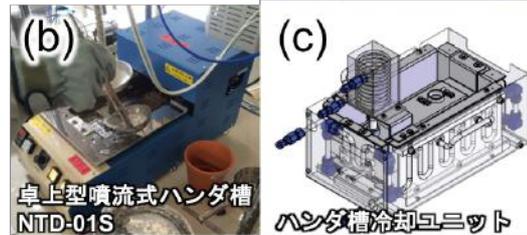


図3 (a)小型液体金属噴流生成装置、(b)卓上型噴流式ハンダ槽 NTD-01S、(c)ハンダ槽冷却ユニット。

4. 研究成果

(1)液体金属噴流安定化実験

大気圧のアルゴン雰囲気中でUアロイ 78 の噴流を生成し、その安定化を試みた。流量が小さい場合、噴流は液滴化する(図4(a))。これは日常において、蛇口から噴出する水道水に見られるのと同様の現象であるが、水滴と異なり、液体金属の液滴は比較的長細いソーセージ状となるのが特徴である。液体金属噴流をプラズマ対向材料として用いるためには、液滴化を阻止する必要がある。物体に沿わせて水を落下させると水流が物体に沿って流れるという現象は、コアンダ効果として知られている。鎖樋などもコアンダ効果を利用したものと言える。液体金属噴流をチェーンやワイヤなどの物体に沿わせて自由落下させると、コアンダ効果によって噴流が物体にまとわりつくため、液滴化を阻止して安定化することができる。図4(b)及び(c)は、図4(a)で液滴化が観測されたのと同じポンプ回転数で生成した小流量の液体金属噴流を、図4(d)に示したステンレスチェーンに沿わせて流した場合の画像である。チェーンの周囲を流体が鞘状に包み込んで流れていることから、このような自由表面噴流を鞘状噴流 (Sheath Jet) と呼び、チェーンなどの挿入物が無い通常の自由噴流 (Free Jet) と区別している。鞘状噴流とすることで、小流量での噴流の液滴化を阻止できた。また、ノズルからプールまで、噴流の太さはほぼ同じであった(図4(b)及び(c))。これは、流速が一定であることを示す。同様の現象は、チェーンでなくワイヤや棒状の物体に沿って噴流を流した場合にも観測される。自由落下によって流速が増えずに一定値を保つということは、重力と釣り合う抵抗力が噴流に働いているということを意味する。この抵抗力は鞘状噴流内にあるチェーンやワイヤなどの挿入物に起因することから、これらを内部抵抗と呼ぶ。

(2)液体金属噴流へのアーク放電

大気圧のアルゴン雰囲気中でUアロイ 78 の鞘状噴流を生成し、これに対しアルゴン TIG アーク放電を行なった。実験の様子を図5に示す。鞘状噴流の内部抵抗としては図4と同じ SUS チェーンを使用した。今回用いた直流電源の最大電圧は 30 V と低かったが、鞘状噴流内の SUS チェーンを手動で揺らし、鞘状噴流をタングステン電極に接触させることでアーク放電を開始することができた。図5に示した例の場合、電源電圧 30 V、電源電流 10 A 程度で、安定なアーク放電を 10 秒程度維持することができた。

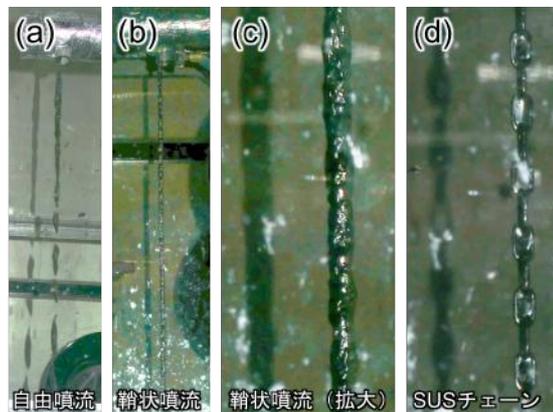


図4 アルゴン雰囲気中におけるUアロイ 78 噴流の安定化実験。(a)自由噴流、(b)鞘状噴流、(c)鞘状噴流の拡大写真、及び(d)内部抵抗として使用した SUS チェーン。

アーク光の分光計測を行なった結果を図6に示す。この実験では、タングステン電極と鞘状噴流の距離に応じて、大きく2種類のアーク放電が観測された。電極・噴流間の距離が広い場合(10 mm程度以上)には、静かでスパークの無い安定な放電が得られ、狭い場合には小さなスパークとともに虫の羽音のようなバズ音を伴う放電となった。前者の場合、全体に発光強度が高く、700 - 900 nmの波長域では強いArIのラインスペクトルが観測された(図6で黄緑、緑、橙、紫、及び赤で示したデータ)。後者の場合にもArIのラインは観測されたが、全体に発光強度が低く、特に500 - 600 nm付近で幾つかのラインスペクトルが観測された(図6で青系色で示したデータ)。これらは、タングステン電極や鞘状噴流に含まれるタングステンやインジウム、ビスマス、あるいはスズに起因するものとも考えられるが、未同定である。

(3) 溶融スズ噴流への真空中TIGアーク放電

真空中でスズの自由噴流を生成し、これに対しアルゴンTIGアーク放電を行なった。実験の様子を図7(a)-(c)に示す。これらは30 fpsで撮影した動画から切り出したものである。噴流の直径は約7 mm、長さは約10 cm、流量は約140 g/s (~20 cc/s)で、流速は0.5 m/s程度と見積もられる。図7(a)及び(b)ではタングステン電極とスズ噴流の位置関係がよく見えるが、動画では図7(c)のように明るいシーンがほとんどを占めていた。アルゴンガスの流量が0.3 SLM以上の場合、TIGアーク放電となり、図7(a)-(c)のようにタングステン電極からスズ噴流に向けて指向性のあるプラズマが観測された。アルゴンガスを水素に変えた場合、ガス流量を1.5 SLMまで増加してもアーク放電を得ることはできなかった。図7(d)は水素ガスを用いた場合の画像であり、グロー放電と考えられる。アルゴンガスでも流量が低い場合には図7(d)のようなグロー放電が観測された。

これらの放電実験を行った際に、四重極質量分析計で計測した各種ガス成分(H, H₂, HO, H₂O, C₂H₆, Ar, Sn, 及びSnH₄)の分圧の時間変化を図8に示す。アルゴンTIGアーク放電は0 - 900秒の間でアルゴン分圧が、水素放電は2,100秒以降で水素分圧が、それぞれパルス状に増加しているタイミングで行われた。特に水素放電を行った場合、水や炭化水素の成分も増加した。一方で質量数116 - 124のスズ、あるいはスタンナン(SnH₄)に相当する成分の分圧には大きな変化は見られなかった。但し、水素で流量が0.4 SLMよりも大きい場合(2,500秒以降)には、質量数116 - 124の分圧に若干の増加が見られた。四重極質量分析計

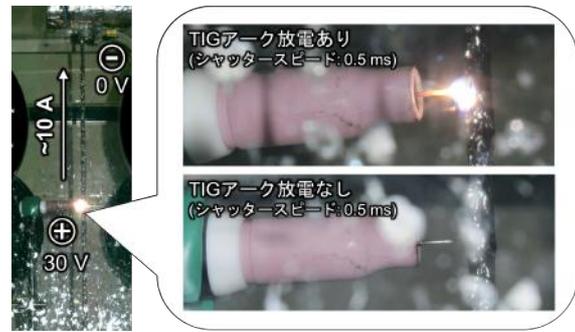


図5 アルゴン雰囲気中におけるUアロイ78噴流へのアルゴンTIGアーク放電実験。

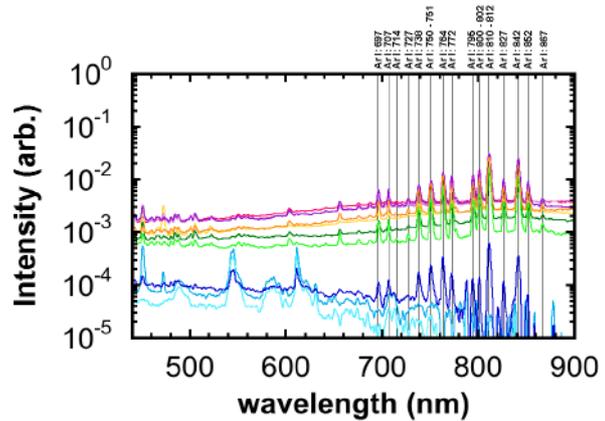


図6 アルゴン雰囲気中におけるUアロイ78噴流へのアルゴンTIGアーク放電時の発光スペクトル。

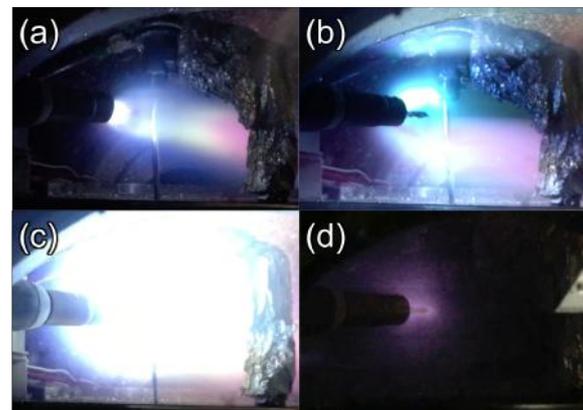


図7 (a)-(c) 真空中におけるスズ噴流へのアルゴンTIGアーク放電、及び(d) 水素ガスを用いた場合に観測されたグロー放電。

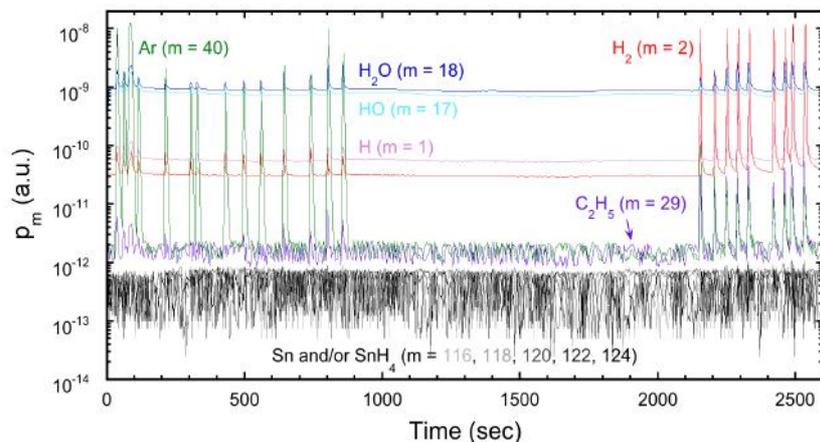


図8 真空中放電実験時の質量分析データ。

では全圧の増加に伴う信号強度の増加が見られる場合があるため、これらがスズに起因するガスの発生によるものかどうか、今後分光計測を併用するなどして詳細に調べる必要がある。

以上のように本研究では、低融点金属Uアロイ 78 あるいはスズの液体金属噴流に対し、アーク放電によって熱負荷を与える実験を行った。実験に用いたアーク放電による熱負荷は、通常の固体金属材料であれば赤熱が観測される程度のものであったが、液体金属噴流にはほとんど影響が見られなかった。但し、真空中で水素ガスを用いた放電を行なった際にはスズ由来のガス成分が微量ながら増加した可能性がある。今回、熱負荷の定量的な評価ができなかったことは反省点の一つである。しかしながら、真空中で熔融スズの噴流を生成し、プラズマによる熱負荷を与えるという本実験は世界でも初の試みであり、これに成功したことは大変有意義であったと言える。今後は、熱負荷を核融合炉クラスまで増大するとともに、これを定量評価し、分光計測などを併用するなどして、さらに実験を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Hitoshi Tamura, Teruya Tanaka, Nagato Yanagi, Tananori Murase, Ryuichi Sakamoto, Suguru Masuzaki, Takeru Ohgo, Akio Sagara, the FFHR Design Group, 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, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.118
- ② Takeru OHGO, [Junichi MIYAZAWA](#), Takuya GOTO and Takanori MURASE, Study on Jets Stabilized by Inserting Internal Flow Resistances for the Liquid Metal Divertor in the Helical Fusion Reactor, Plasma and Fusion Research 13 (2018) 1405003-1 - 1405003-5, DOI: 10.1585/pfr.13.1405003
- ③ [J. Miyazawa](#), T. Goto, T. Murase, T. Ohgo, N. Yanagi, H. Tanaka, H. Tamura, T. Tanaka, S. Masuzaki, R. Sakamoto, J. Yagi, A. Sagara, the FFHR Design Group, Conceptual design of a liquid metal limiter/divertor system for the FFHR-d1, Fusion Engineering and Design 125 (2017) 227-238., DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.07.003
- ④ [Junichi MIYAZAWA](#), Hitoshi TAMURA, Teruya TANAKA, Takanori MURASE, Takuya GOTO, Nagato YANAGI, Ryuichi SAKAMOTO, Akio SAGARA, and the FFHR Design Group, Cartridge-Type Helical Blankets Aiming at Easy Construction and Maintenance for the FFHR-d1, Plasma and Fusion Research 12 (2017) 1405017-1 – 20, DOI: 10.1585/pfr.12.1405017

〔学会発表〕 (計 13 件)

- ① [宮澤順一](#), 田中照也, 後藤拓也, 田村仁, 柳長門, 相良明男, FFHR 設計グループ, ヘリカル体積中性子源 FFHR-b1 の役割と課題, 第 35 回プラズマ核融合学会年会, 2018.
- ② 大胡武, 後藤拓也, [宮澤順一](#), 高粘度液体を用いた散弾製造法による易融金属ペブルダイバータのためのペブル製造方法に関する研究, 第 35 回プラズマ核融合学会年会, 2018.
- ③ Takeru Ohgo, [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Pebble manufacturing experiments by shot tower method with high dynamic viscosity liquid for the fusible metal pebble divertor, The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, 2018.
- ④ [Junichi Miyazawa](#), Hitoshi Tamura, Teruya Tanaka, Takanori Murase, Takuya Goto, Nagato Yanagi, Ryuichi Sakamoto, Akio Sagara and the FFHR Design Group, Strategies toward the Realization of the Helical Fusion Reactor FFHR-c1, 30th Symposium on Fusion Technology, 2018.
- ⑤ Takuya Goto, [Junichi Miyazawa](#), Takeru Ohgo, Experimental study on MHD effect of liquid metal sheath jet for the liquid metal divertor REVOLVER-D, 30th Symposium on Fusion Technology, 2018.
- ⑥ Takeru Ohgo, [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Takanori Murase, A study on the thermal property of jets for liquid metal divertor REVOLVER-D, 30th Symposium on Fusion Technology, 2018.
- ⑦ [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Takeru Ohgo, Tananori Murase, Hitoshi Tamura, Teruya Tanaka, Nagato Yanagi, Ryuichi Sakamoto, Suguru Masuzaki, Akio Sagara, and the FFHR Design Group, Maintainability of the Helical Reactor FFHR Equipped with the Liquid Metal Divertor, 第 13 回 International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2017.
- ⑧ Takeru Ohgo, [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Takanori Murase, Stabilization of Shower Jets by Inserting Internal Flow Resistances for the Liquid Metal Divertor in the Helical Fusion Reactor FFHR-d1, 第 13 回 International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 2017.
- ⑨ [Junichi Miyazawa](#), Takuya Goto, Hitoshi Tamura, Teruya Tanaka, Nagato Yanagi, Yoshiro Terazaki, Takanori Murase, Ryuichi Sakamoto, Akio Sagara and the FFHR Design Group, Conceptual Design of a Compact Helical Fusion Reactor FFHR-c1 Equipped with Challenging Options, Plasma Conference, 2017.
- ⑩ Takuya Goto, [Junichi Miyazawa](#), Takeru Ohgo, Initial Results of Liquid Metal Circulation Experiment for Realization of the Liquid Metal Divertor REVOLVER-D, Joint Meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference, Ceratopia Toki, 5-8 Dec., 2017
- ⑪ 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, Joint Meeting of 26th International Toki Conference and 11th Asia Plasma and Fusion Association Conference, 2017.

- ⑫ J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, T. Murase, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tanaka, R. Sakamoto, S. Masuzaki, H. Tanaka, A. Sagara, and the FFHR Design Group, Basic Concept of the Ergodic Limiter/Divertor Consisting of Showers of Molten Tin Sheath Jets, The 1st International "All-about-Divertor" Symposium, 2016.
- ⑬ J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, N. Yanagi, T. Murase, H. Tamura, T. Tanaka, H. Tanaka, R. Sakamoto, S. Masuzaki, A. Sagara, and the FFHR Design Group, 液体金属ダイバータ REVOLVER-D の概念設計と R&D における最近の成果, 第 11 回 核融合エネルギー連合講演会, 2016.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：クライオポンプ

発明者：宮澤順一

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-112781

出願年：2015 年

国内外の別： 国内

名称：構造体の表面を被覆する自由表面流の生成構造

発明者：宮澤順一

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2015-112782

出願年：2015 年

国内外の別： 国内

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：後藤 拓也

ローマ字氏名：GOTO, Takuya

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：30509518

研究協力者氏名：時谷 政行

ローマ字氏名：TOKITANI, Masayuki

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：30455208

研究協力者氏名：濱地 志憲

ローマ字氏名：HAMAJI, Yukinori

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：60761070

研究協力者氏名：柳 長門

ローマ字氏名：YANAGI, Nagato

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：70230258

※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。