

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04233

研究課題名(和文)核融合炉における真空排気を成立させる超音速ジェットポンプの研究

研究課題名(英文)Development of the Supersonic Jet Pump for Realization of Vacuum Pumping 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) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合炉に必要な強磁場下での水素とヘリウムの同時連続大量排気を可能とするSupersonic Jet Pump (SJP)の原理実証実験を行った。SJPとは、10 K程度に冷却した心棒の表面に、排気ガスの超音速ジェットを吹き付けて凝固させ、これをカッターで削ぎ落として気化し、排気するという装置である。

実験の結果、今回製作したSJPの実効排気速度は空気で0.3 - 0.5 立方メートル毎秒と、大型ターボ分子ポンプと同等であること、この排気速度は5 - 7 sccmで10万秒以上の空気排気後も保持されること、カッターの動作は特に水素成分に大きな影響を及ぼすこと、などが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The Supersonic Jet Pump (SJP) is an innovative vacuum pump that has a possibility of simultaneous and continuous evacuation of hydrogen isotopes and helium gasses at a high exhaust speed. In the SJP, the exhaust gasses are blown as the supersonic jet from the Blowing Units (BUs) to the Cold Core Rod (CCR) cooled down to ~10 K. Gasses become frozen on the surface of the CCR. The Rotating Cutter (RC) shaves off the frozen gasses to the bottom, where the shaved frozen gasses become sublimated and are evacuated by a roughing pump. A part of the sublimated gasses is introduced to the BUs and blown to the CCR again.

The proof-of-principle experiment of the SJP has been performed. The experimental results show that (i) the exhaust speed of the SJP is 0.3 - 0.5 m<sup>3</sup>/s (air), that is comparable to that of a large TMP, (ii) this exhaust speed is sustained after 100,000 seconds of pumping with 5 - 7 sccm of air supply, and (iii) the hydrogen gas component largely increases when the RC is rotated.

研究分野：核融合学

キーワード：真空排気 核融合炉 超音速 クライオポンプ 拡散ポンプ

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合炉 ITER の建設が進展し、核融合原型炉の実現可能性が高まってきている現在になって、核融合炉で使用できる真空ポンプがないのではないか、という基本的な問題が顕在化しつつある。核融合炉における真空ポンプには、(1) 数十台程度の並列使用で十分な排気量が得られること、(2) 三重水素貯留量が小さいこと、(3) ヘリウムの排気も可能なこと、(4) 高速回転部がなく、強磁場中で使用可能なこと、(5) 上流への不純物拡散がないこと、及び (6) 連続運転が可能なこと、の少なくとも 6 点が求められる。従来のクライオポンプやターボ分子ポンプ (Turbo Molecular Pump, TMP)、あるいは油拡散ポンプでは、これらの要求を満たすことは大変困難である。

そこで我々のグループでは、上記 6 項目を満たし得る真空ポンプとして、超音速ジェットポンプ (Supersonic Jet Pump, SJP) を考案した (図 1)。SJP では、10 K 程度に冷却した低温心棒に、排気する水素ガスで生成した超音速ジェットを吹き付け、低温心棒表面に水素を凝固させる。凝固した固体水素は間欠動作するカッターで削り落として昇華させ、排気する。固体水素の一部は超音速ジェット吹出口の一次側に導入し、昇華させて超音速ジェットの生成に用いる。超音速ジェットによる拡散ポンプ効果でヘリウムも排気する。SJP は、連続運転クライオポンプであると同時に、排気する対象のガスを用いる拡散ポンプでもあり、水素とヘリウムの同時大量排気が可能で、全く新しいタイプの真空ポンプである。

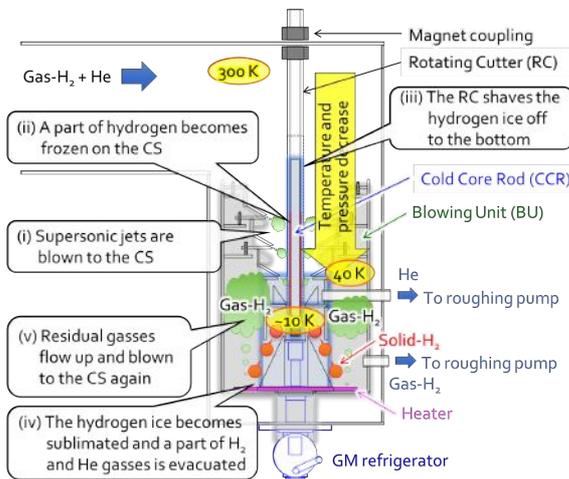


図 1 SJP の動作原理。

2. 研究の目的

本研究の目的は、核融合炉に必須となる強磁場下での水素とヘリウムの同時大量排気を連続かつ少ない三重水素貯留量で可能とする革新的真空排気装置「超音速ジェットポンプ (SJP)」を製作して実験を行い、その排気特性を明らかにすることにある。

3. 研究の方法

本研究では以下を行なって SJP の基本性能

を調べた。

(i) 実験装置の製作

(ii) SJP による真空排気実験

(ii-1) TMP との排気性能比較

(ii-2) SJP による長時間排気実験

(ii-3) カッターを動作させた場合の真空中ガス成分の時間変化計測

尚、本研究では安全の観点から排気対象ガスとして空気を使用した。

4. 研究成果

4-1. 実験装置の製作

本研究では、大型真空容器 (L-VV) に SJP を取り付けて実験を行なった。実験装置の全体写真を図 2 に示す。

SJP を備えた L-VV には、大型ゲートバルブ (L-GV、ICF203) を介して TMP (大阪真空 TG550CW、公称排気速度 0.55 m<sup>3</sup>/sec (N<sub>2</sub>)) が、小型ゲートバルブ (S-GV、ICF70) を介して差動排気用 TMP と四重極質量分析計 (Q mass) とを備えた小型真空容器 (S-VV) が接続されている。実験では SJP のブローユニット内にマスフローコントローラー (MFC) から空気を送り込み、L-VV 内の真空度を電離真空計 (IG) で計測した。これと同時に Q mass を用いて真空中の水素 (H<sub>2</sub>)、水 (H<sub>2</sub>O)、窒素 (N<sub>2</sub>)、酸素 (O<sub>2</sub>)、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) の各成分の時間変化を計測した。S-GV の開度を調整し、S-VV を接続することによる排気速度への影響は無視できる程度まで小さくした。

SJP のブローユニットは図 3 (左~中央) に示すような 4 段構成になっており、各段でスリット幅を調整可能である。SUS303 の軸 (外径 20 mm) にアルミ合金リング (外径 ~70 mm) を複数個通し、SUS316 の円筒カバー (外径



図 2 実験装置全体写真。

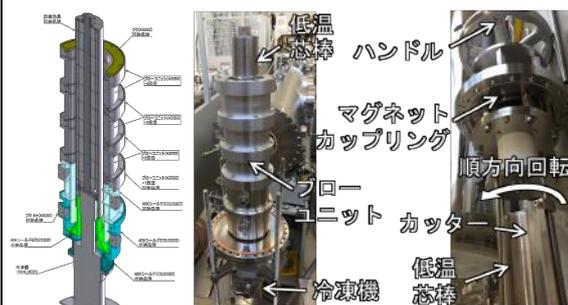


図 3 SJP 内部構造。

76.3 mm、軸方向長さ 545 mm) を被せたものを低温芯棒とした。冷凍機は住友重機械工業 RDK-408S を使用し、コールドヘッドのファーストステージ (~45 K) にブローユニットを、セカンドステージ (~10 K) に低温芯棒を接続した。

低温芯棒の外周に沿って回転するカッターを装着した(図3(右))。このカッターはマグネットカップリングを介して真空容器外に設けたハンドルに接続されており、手動で回転動作させる。マグネットカップリングを採用することで、真空取り合い部にベローズ等を用いる必要を無くし、無限回の回転を可能とした。カッターは回転治具に上部と下部を固定し、回転半径を規定することも可能だが、低温芯棒との位置調整によっては回転しにくくなる場合がある。そこで今回はカッター上部のみ固定し、低温芯棒にカッターが引っかかって動きにくくなった場合でも、カッター全体がしななって回転動作を回復するようにして使用した。

尚、本研究における SJP の設計及び製作はカザマエンジニアリング(株)の多大なる協力の下に行われた。ここに謝意を表す。

#### 4-2. SJP による真空排気実験

35 万秒(約 4 日間)の L-VV 連続排気実験を行い、後半の 2 日間で SJP を運転した。実験中、SJP ブローユニット内部に MFC から空気を導入した。同実験における L-VV 内真空度  $p_{vac}$ 、導入した空気の流量  $Q$ 、及び L-VV 内ガス成分を図 4 に示す。

実験の前半は TMP のみで排気を行い、 $2 \times 10^{-4}$  Pa 程度に到達した段階で一旦排気を停止している ( $t \sim 1.6 \times 10^5$  s)。その後 TMP 排気を再開し、MFC からの空気導入試験を行った。空気の流量  $Q$  を 1–7 sccm まで段階的に増加し、定常となった真空度  $p_{vac}$  から TMP の実効排気速度  $S_{TMP} = Q/p_{vac}$  を実測した結果、 $S_{TMP} \sim 0.3$  m<sup>3</sup>/s という値を得た。その後 MFC を一旦停止してから 5 sccm での空気導入を再開し、 $t \sim 1.95 \times 10^5$  s 付近で冷凍機を起動した。

図 5 に同時間帯付近における真空度等の時間変化を示す。冷凍機起動直後には真空度及び各主要ガス成分に大きな変化は見られないが、冷凍機起動後 500 秒程度で質量数  $m = 18$  の水が減少する。この時点でも真空度に大きな変化は見られないが、これは水よりも導入空気に含まれる窒素及び酸素の分圧が高いためである。水の減少から約 1,000 秒後にまず酸素と二酸化炭素が、次いで窒素が減少し、真空度も減少を開始する。図 5 ではこのタイミングを  $t = 0$  とし、SJP での排気がスタートしたとしている。水素は冷凍機起動前から同じペースで漸減し続け、特に大きな変化はないように見えるが、図 4 では水の減少と同期して僅かに減少していることが認められる。

図 4 に戻るが、SJP 起動後も 5 sccm での空気導入を約  $1 \times 10^5$  s 継続した。その後、L-GV を閉じて TMP 排気を停止し、約  $5 \times 10^4$  s にわ

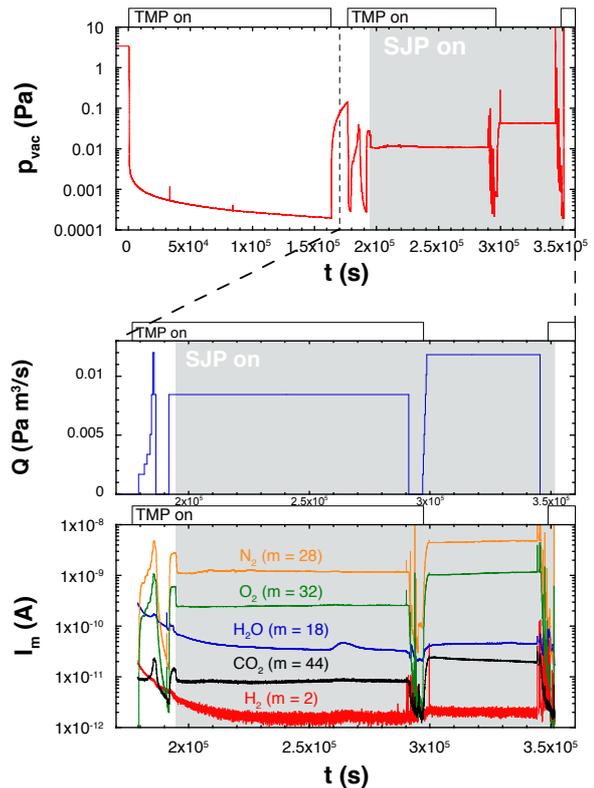


図 4 35 万秒連続排気実験。図は上から、L-VV 内真空度、導入空気の流量、及び L-VV 内主要ガス成分の時間変化をそれぞれ示す。

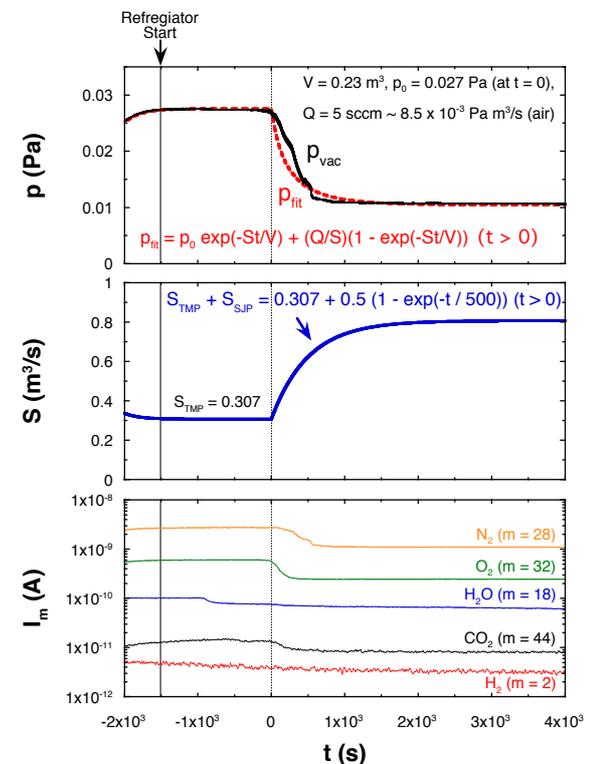


図 5 TMP と SJP の排気速度比較。図は上から、L-VV 内真空度、導入空気の流量、及び L-VV 内主要ガス成分の時間変化をそれぞれ示す。横軸の時間  $t$  は、SJP による排気の効果が見られるタイミングを  $t = 0$  としているが、これは図 4 における  $t \sim 1.95 \times 10^5$  s に相当する。

たり SJP 単独排気を行なった。この間、空気導入量を変化させたり、カッターの動作を行ったりしている。図4で  $t \sim 2.9 \times 10^5$  s 及び  $t \sim 3.5 \times 10^5$  s 付近で真空度とガス成分に見られる細かいスパイク状波形は、カッターの動作に起因するものである (4-2-3 節参照)。

#### 4-2-1. TMP との排気性能比較

図5では、 $t > 0$  における真空度の時間変化を以下の式でフィッティングしてある。

$$p_{\text{fit}} = p_0 \exp(-St/V) + (Q/S)(1 - \exp(-St/V)) \quad (1)$$

ここで、 $p_0$  は  $t=0$  における真空度 (0.027 Pa)、 $S = S_{\text{TMP}} + S_{\text{SJP}}$  であり、 $S_{\text{TMP}}$  ( $= 0.307 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 及び  $S_{\text{SJP}}$  はそれぞれ TMP 及び SJP の実効排気速度である。また、 $V$  は L-VV の容積 ( $= 0.23 \text{ m}^3$ )、 $Q$  は空気の流量であり、図5の範囲では  $Q = 5 \text{ sccm}$  ( $\sim 8.5 \times 10^{-3} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ ) である。 $p_{\text{fit}}$  で  $p_{\text{vac}}$  をフィッティングするため、 $S_{\text{SJP}}$  として以下を用いた。

$$S_{\text{SJP}} = S_{\text{SJP0}} (1 - \exp(-t/t_{\text{TMP}})) \quad (2)$$

但し、 $S_{\text{SJP0}}$  は SJP の最大実効排気速度、 $t_{\text{TMP}}$  は SJP が最大実効排気速度を得るまでの時定数であり、図5では  $S_{\text{SJP0}} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  及び  $t_{\text{TMP}} = 500 \text{ s}$  としている。即ち、SJP の最大実効排気速度は  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  であり、 $S_{\text{TMP}} \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  よりも大きい。また、図5下に示したガス成分の時間変化から、時定数 500 秒というのは窒素が大きく減少するまでの時間に相当することがわかる。

#### 4-2-2 SJP による長時間排気実験

SJP と TMP による同時排気を開始した後、約十萬秒にわたり連続的に  $5 \text{ sccm}$  の空気導入を行なったが、真空度に大きな変化はなく、従ってこの間 SJP の排気速度  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  はほぼ一定だったと考えられる (図4)。導入した空気の総量は約  $845 \text{ Pa m}^3$  であり、この中で SJP に吸着された空気の総量は、 $S_{\text{SJP}} / (S_{\text{TMP}} + S_{\text{SJP}}) = 0.5 / (0.307 + 0.5) \sim 0.62$  より、 $845 \times 0.62 \sim 524 \text{ Pa m}^3$  と見積もられる。

さらにその後、カッターを動作させて若干のアウトガスを確認した後 (次節参照)、今度は SJP 単独排気の状態では  $7 \text{ sccm}$  の空気導入を約 5 万秒行なった。この時、真空度は  $0.04 \text{ Pa}$  でほぼ一定であった。この場合の実効排気速度は約  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  と見積もられる。TMP との同時排気を行なった場合に比べて実効排気速度が低下していることになる。原因として、低温芯棒表面に凝縮したガスの層が厚くなり、吸着効率が低下したことが考えられるが、その直前にカッターを動作させていること、 $7 \text{ sccm}$  の一定空気導入を行なっている間、真空度が変化していないことと無矛盾には説明ができず、その解明は今後の課題となっている。 $7 \text{ sccm}$  での空気導入によって SJP に吸着された空気の総量は  $592 \text{ Pa m}^3$  と見積もられ、上に

述べた  $524 \text{ Pa m}^3$  と合計すれば約  $1,100 \text{ Pa m}^3$  となる。室温で  $1,100 \text{ Pa m}^3$  のガス中には  $2.7 \times 10^{23}$  個の分子が含まれ、分子量を 29 とすればその質量は約  $13 \text{ g}$  と求められる。これが今回用いた低温芯棒の表面積約  $0.14 \text{ m}^2$  に吸着したとすれば面密度は約  $93 \text{ g}/\text{m}^2 = 9.3 \text{ mg}/\text{cm}^2$  であり、更に吸着している固体空気の密度を  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  とすれば、その厚さは  $0.1 \text{ mm}$  程度だったと見積もることができる。但し、今回用いた SJP ではブローユニットも  $45 \text{ K}$  程度に冷却されているため、水素以外の主要ガス成分はブローユニットにも吸着され得ることに注意が必要である。一方、超音速ジェットとして低温芯棒に吹き付けられた排気ガスが、例えば霜や雪のように疎な状態で凝縮していることも考えられる。そのような場合には密度がより低く、従って低温芯棒表面における凝縮ガスの厚さはより厚かったということも考えられる。

いずれにせよ、このような大量の空気を排気した後でも、SJP の実効排気速度は  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  と大きく、大型 TMP と同等の排気速度を保持した。

#### 4-2-3 カッターを動作させた場合の真空中ガス成分の時間変化計測

SJP には、低温芯棒表面に凝縮した固体ガスを削ぎ落とす目的でカッターが設けられている。このカッターを動作させると、真空度はスパイク状に増加する (図6上)。本実験においてカッターの動作は、全て順方向 (図3参照) に 5 回転ということで統一した。L-VV 内主要ガス成分は、カッター動作時に複雑な挙動を示す (図6下)。水素の信号はカッター動作時に

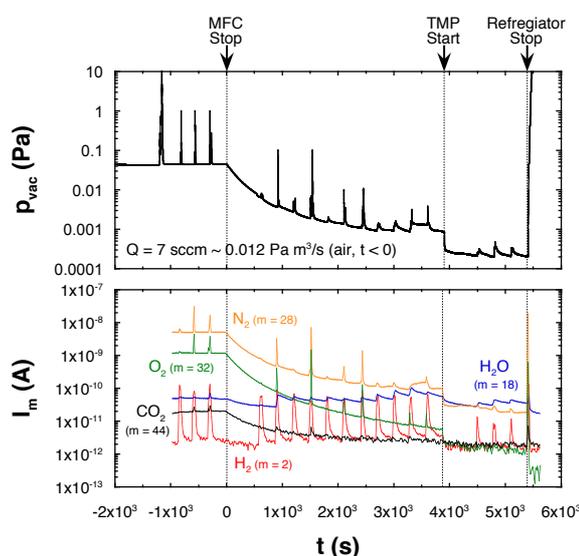


図6 SJP カッター一部動作時の真空度 (上) 及び L-VV 内主要ガス成分 (下) の時間変化。3 本の垂直点線はそれぞれ MFC 停止、TMP 排気停止、冷凍機停止の各タイミングを示す。横軸の時間  $t$  は MFC 停止のタイミングを  $t = 0$  としているが、これは図4における  $t \sim 3.42 \times 10^5$  s に相当する。

は必ず一桁ないしそれ以上の増加を示したが、それ以外のガス種についてはカッター動作に反応しない場合も見られた。特に水については、一旦増加した後で信号強度が元のレベルに戻らない場合も多かった。これらの挙動について、単純に凝固温度の差異等で説明することは困難であり、今後の研究が待たれる。

今回の実験体系では、図1に示したように削ぎ落として昇華させたガス成分を粗引き排気する系統がなく、特に図6の時間帯ではSJP単独排気を行なっていることから、カッター動作によって低温芯棒表面に凝固したガス成分が削ぎ落とされ、昇華したとしても、再び凝固してSJPに吸着(排気)されたと考えられる。

排気時間をさらに延長した場合、いずれは低温芯棒表面に凝固した固体ガス層の厚みが増加し、その断熱効果によって凝固速度が低下する、即ち排気速度が低下することが予想される。その時にカッター部を動作して固体ガス層を削ぎ落とし、昇華させたガスを粗引き排気することでSJPの排気速度を回復するというのがSJPのシナリオである。今回の実験では安全上の理由から水素の大量使用を控えたため、このシナリオを実証するには至らなかったが、少なくとも下記については明らかとなった。

- ① 低温芯棒の表面積が  $0.14 \text{ m}^2$  という SJP で大型 TMP に匹敵する  $0.3\text{--}0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (空気) の排気速度が得られる
- ② この排気速度は、 $5\text{--}7 \text{ sccm}$  で 10 万秒以上の空気排気を行なった後も保持される
- ③ カッターの動作は特に水素成分に大きな影響を及ぼす

本実験により、SJP の基礎原理実証が完了した。今後の課題として、低温芯棒表面に排気ガスが凝固する様子を観察し、その厚みを定量評価すること、大量の水素及びヘリウム排気を実証すること、スリット幅を調整して超音速ジェットの発生条件を最適化すること、カッターによる固体ガスの剥離機構及び発生するガス成分の挙動を明らかにし、SJP による連続排気シナリオを確立すること、等が挙げられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① J. Miyazawa, H. Tamura, T. Tanaka, T. Murase, T. Goto, N. Yanagi, R. Sakamoto, A. Sagara and the FFHR design group, Cartridge-type helical blankets aiming at easy construction and maintenance for the FFHR-d1, Plasma and Fusion Research, 査読有, 12, 2017, pp.1405017-1-1405017-20.  
DOI: 10.1585/pfr.12.1405017
- ② 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, 査読有, 125, 2017, pp.227-238.  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.07.003

[学会発表] (計 9 件)

- ① J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, Initial results of the vacuum pumping experiment using the supersonic jet pump, Joint Meeting of 26<sup>th</sup> International Toki Conference and 11<sup>th</sup> Asia Plasma and Fusion Association Conference, 5 - 8 Dec., 2017, Toki, Gifu, Japan.
- ② J. Miyazawa, T. Goto, H. Tamura, T. Tanaka, N. Yanagi, Y. Terazaki, T. Murase, R. Sakamoto, A. Sagara and the FFHR design group, Conceptual design of a compact helical fusion reactor FFHR-cl equipped with challenging option, Plasma Conference 2017, 20 - 24 Nov., 2017, Himeji, Hyogo, Japan.
- ③ J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, T. Murase, H. Tamura, T. Tanaka, N. Yanagi, R. Sakamoto, S. Masuzaki, A. Sagara, and the FFHR design group, Maintainability of the Helical Reactor FFHR equipped with the liquid metal divertor, International Symposium on Fusion Nuclear Technology, 25 - 29 Sep., 2017, Kyoto, Japan.
- ④ 宮澤順一, 村瀬尊則, 田村仁, 田中照也, 後藤拓也, 柳長門, 坂本隆一, 相良明男, FFHR 設計グループ、ヘリカル核融合炉 FFHR-d1 における製作及び保守を容易にする新方式カートリッジ型ヘリカルブランケット CARDISTRY-B、第 33 回プラズマ・核融合学会年会、2016 年 11 月 29 日 - 12 月 2 日、東北大学
- ⑤ J. Miyazawa, Physics basis and prospect for a heliotron DEMO, 4<sup>th</sup> IAEA DEMO Programme Workshop, 15 - 18 Nov., 2016, Karlsruhe, Germany.
- ⑥ J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, N. Yanagi, T. Murase, H. Tamura, H. Tanaka, T. Tanaka, R. Sakamoto, S. Masuzaki, A. Sagara, and the FFHR design group, REVOLVER-D: A new liquid metal divertor system consisting of molten tin shower jets, 26<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, 17 - 22 Oct., 2016, Kyoto, Japan.
- ⑦ 宮澤順一, 後藤拓也, 大胡武, 柳長門, 村瀬尊則, 田村仁, 相良明男, FFHR 設計グループ、液体金属ダイバータの新概念 REVOLVER-D (炉志向実効的堆積熱吸収型鉛直ダイバータ)、第 32 回プラズマ・核融合学会年会、2015 年 11 月 24 - 27 日、名古屋大学
- ⑧ J. Miyazawa, T. Goto, T. Ohgo, N. Yanagi, T. Murase, H. Tamura, A. Sagara, and the FFHR design group, Conceptual design of a new liquid metal divertor REVOLVER-D, 25<sup>th</sup> International Toki Conference, 3 - 6 Nov.,

2015, Toki, Gifu, Japan.

- ⑨ J. Miyazawa, T. Goto, T. Murase, J. Yagi, H. Tamura, N. Yanagi, T. Tanaka, R. Sakamoto, S. Masuzaki, A. Sagara, and the FFHR design group, Liquid metal divertor concept consisting of vertical free-surface streams and a supersonic jet pump, First IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, 29 Sep. – 2 Oct., 2015, Vienna, Austria.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：クライオポンプ  
発明者：宮澤 順一  
権利者：自然科学研究機構  
種類：特許  
番号：特願 2015-112781  
出願年月日：平成 27 年 6 月 3 日  
国内外の別： 国内

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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：5 0 3 0 0 7 2 8

### (2) 研究分担者

( )

### (3) 連携研究者

後藤 拓也 (GOTO, Takuya)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：3 0 5 0 9 5 1 8

坂本 隆一 (SAKAMOTO, RYuichi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：1 0 2 9 0 9 1 7

三浦 英昭 (MIURA, Hideaki)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：4 0 2 8 0 5 9 9

田中 将裕 (TANAKA, Masahiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：0 0 4 3 5 5 2 0

相良 明男 (SAGARA, Akio)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号：2 0 1 8 7 0 5 8

### (4) 研究協力者

( )