

令和 4 年 8 月 27 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03795

研究課題名(和文) 高密度シートプラズマを用いた非セシウム型大電流負イオン源の開発

研究課題名(英文) Development of cesium-free high current negative ion source using high density sheet plasma

研究代表者

利根川 昭 (TONEGAWA, AKIRA)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：90197905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：シートプラズマ装置(TPDsheet-U)で非Cs型負イオン源の開発研究を推進した。単孔/多孔電極を用いてTPDsheet-UからH-イオンの引き出しに成功した。単孔電極において、負水素イオンビームの電流密度(JC(H-))は、引き出し電圧10kV、放電電流 $I_d=90$ AでJC(H-)は、約7.5mA/cm²得られ、Csを含むITER用H-イオン源の約1/4である。また軟磁性フィルターを開発し電子電流JEG(e)/JC(H-)を0.4以下に低減した。更にシートプラズマを用いた非Cs型負イオン源(TPDsheet-NIS)の設計を行い、大電流負イオン源としてのスケールリングを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来のDEMO級核融合実証炉では、長寿命でメンテナンスの容易な中性粒子ビーム入射装置用負イオン源を開発することが必須となる。特に負イオン源のメンテナンスレス化では、非Cs型大電流負イオン源の基盤技術の確立が急務であるが、Csを添加しない場合、得られる電流密度の値は低く、セシウム代替材料の開発も十分な成果は得られていない。また、負イオン源の長時間運転時では、引き出された負イオンに対する随伴電子の比率を0.5～1.0以下に維持することも不可欠である。これらの課題を解決し、長寿命運転が可能な非Cs型負イオン源を開発することにより、DEMO級核融合発電の実用化に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：We report on the progress of research toward realizing of a high-performance cesium (Cs)-free negative-ion source based on volume production in a magnetized sheet plasma device (TPDsheet-U) is reported. In the experiments, H- ions were successfully extracted from sheet plasma using single-/multi-aperture grids. The experimental results of the single-aperture grid show that the negative hydrogen ion current density (JC(H-)) performance of Cs-free H- ion beams in TPDsheet-U is about one-fourth that of Cs-containing H- ion sources in the ITER negative-ion neutral-beam injector. The JC(H-) was ~7.5 mA/cm² at an extraction voltage of 10 kV, a discharge current I_d of 90 A. The ratio of the electron current JEG(e) and JC(H-), JEG(e)/JC(H-), was successfully reduced below 0.4 for a single-aperture grid with the SMF. Based on these results, we have designed a Cs-free high-current negative ion source (TPDsheet-NIS) using sheet plasma and established scaling as a high-current source.

研究分野：プラズマ物理学、核融合工学

キーワード：核融合発電 加熱用中性粒子加熱装置 負イオン源 非セシウム型 シートプラズマ 体積生成法 高電流密度 磁気フィルター

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

DEMO 級核融合実証炉では核融合反応を長時間継続させるため、長寿命で大電流、かつメンテナンスの容易な中性粒子ビーム入射装置用負イオン源が必須となる。現在、国際熱核融合装置 (ITER) 用の負イオン源として、セシウムを用いた高周波型大電流負イオン源 (水素負イオン電流密度: 29mA/cm^2 、大電流 66A 、引き出し面積 1000cm^2 、寿命 1 時間) の開発が行われている[1]。しかし、この負イオン源では、長パルス時でのビームの安定性、導入するセシウム量の最小化、負イオン源内壁温度の制御等、長時間運転を目指す核融合装置では解決しなければならない課題が存在する。また、負イオンビームと共に引き出される随伴電子による引き出し電極への熱負荷を抑制するため、イオン・電子ビーム比(I_e/I_H)を 0.5 程度(軽水素運転時)に低減させる必要がある。一方、セシウムを用いない負イオン生成法として、プラズマ中の水素の振動励起分子が介在する解離性付着過程を利用した体積生成法がある。この体積生成型負イオンとしての新たな方式が提案されているが十分な負イオン電流値を得るまでには至っていない。

本申請者は、高密度で電子温度の比較的高いシートプラズマを生成することに成功しており、高密度の負イオン電流値を引き出すことが可能な負イオン源を提案している[2]。

2. 研究の目的

独自に開発した高密度シートプラズマを用いると、プラズマ中心部の高エネルギー電子により生成された振動励起分子が、周辺に存在する低エネルギー電子と狭い領域で解離性付着反応を起こすため、セシウムを用いずに体積生成法で効率よく負イオンを生成することができる。本研究では、この成果を進展させ、シートプラズマでの負イオン密度の増大を図り、大電流・長時間運転・メンテナンスの容易な非セシウム型負イオン源を開発し、核融合実証炉の中性粒子ビーム入射装置用の負イオン源としてスケーリングを確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) シートプラズマ生成装置 (TPDsheet-U)

図 1 に本研究で使用したシートプラズマ生成装置 TPDsheet-U(Test Plasma produced by Direct current for sheet plasma- Upgrade)の概略図を示す[3]。全長約 2m の TPDsheet-U は、プラズマ源領域と引き出し領域の 2 つの領域に分割され、真空容器と排気系・ガス導入系・矩形磁場コイルから構成されている。放電装置として放電電源(主放電電源: $100\text{A}\cdot 300\text{V DC}$)、排気系にはロータリーポンプ 3 台、ターボ分子ポンプ 3 台(500L/s x2 台, 1500L/s x1 台)が使用され、各領域間で圧力差をつけることができる。到達真空度は引き出し領域で 10^{-4}Pa 、プラズマソース領域で 10^{-1}Pa である。生成されたシートプラズマは 11 個の矩形磁場コイルの作る磁場によって、Z 方向へ輸送されプラズマターゲットで終端する。

(2) 負イオンビーム引出し装置

負イオンビーム引出し実験は、単孔電極、及び多孔電極を用いて行った。これらの電極は 2 枚の電極とコレクターから構成され、プラズマに対向する電極を Plasma Grid (PG)、電圧を印加する電極を Extraction Grid (EG) とする。引き出し電極の材質は SUS304、コレクターは単孔の場合に Cu、多孔電極の場合に SUS304 を用いた。PG の孔径は単孔、多孔ともに $\phi 4\text{mm}$ 、EG の孔径は単孔電極の場合 $\phi 8\text{mm}$ 、多孔電極の場合 $\phi 6\text{mm}$ である。また、多孔電極には 36 個の孔が備えられている。したがってイオンビームが引き出される総面積は単孔電極の場合 0.125mm^2 、多孔電極の

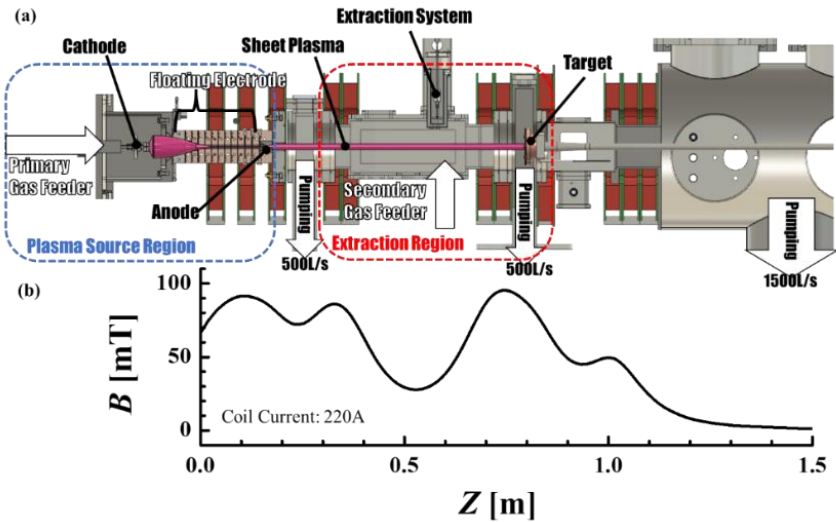


図 1. (a)シートプラズマ生成装置 TPDsheet-U、(b)プラズマ進行方向 (Z 軸方向)の磁場分布。

場合 4.90 mm^2 である。また、PG、EG のサイズは 10kV 印加時の真空絶縁能力を考慮し設計されている。実験では、EG 及びコレクターに $0\sim 10\text{kV}$ の電圧を印加することで負イオンビームをプラズマ中から引き出した。また、この時 PG の電位はアースで固定されており、PG と EG はテフロンにより絶縁されている。引き出された負イオン及び随伴電子は、磁場によって偏向を受け、質量の小さい電子のみが EG で回収され、負イオンはコレクターで計測することが出来る。ここでは、EG 及びコレクターで計測された電流値を PG の総孔面積で規格化して得られた電流密度をそれぞれ J_{EG} 、 J_c とした。本研究では、高密度の随伴電子電流による EG への高熱負荷を防ぐため、電子を選択的にトラップする機構を考案し、PG を改修した。以下にこの機構について示す。

① Electron Fence (EF) の構造と効果[4,5]

図 2(a)は PG に設置した Electron Fence (EF)によって、PG 近傍の電子を選択的にトラップしている様子を示している。磁場中にある荷電粒子は質量に比例する半径で、磁力線を中心としたジャイロ軌道を描きながら運動する(ラーモア運動)。負イオンは電子に対し約 2 万倍の質量であるため、ラーモア半径 ρ が電子と比較して非常に大きい。負イオン温度が電子温度の半分程度であるという過程においては、負イオンのラーモア半径 ρ_{H-} は、電子のラーモア半径 ρ_e に対し約 30 倍である。したがって PG に設置する EF の高さ h を、 $\rho_e < h < \rho_{H-}$ と設定した場合には電子が選択的にトラップされ、負イオンは比較的容易に EF を通過することが出来る。

② Soft Magnetic material plate for Filter (SMF)の構造と効果 [6,7]

図 2(b)では PG に設置した SMF によって、局所的に湾曲した磁力線が電子をトラップしていることを示している。この方式でも EF の場合と同様にラーモア半径の差を利用している。この領域の負イオンは数 mm のラーモア半径を持つため、その軌道は磁力線の変化に対して非常に鈍感である。一方、ラーモア半径の小さい電子は、その軌道がほとんど磁力線に沿って移動する

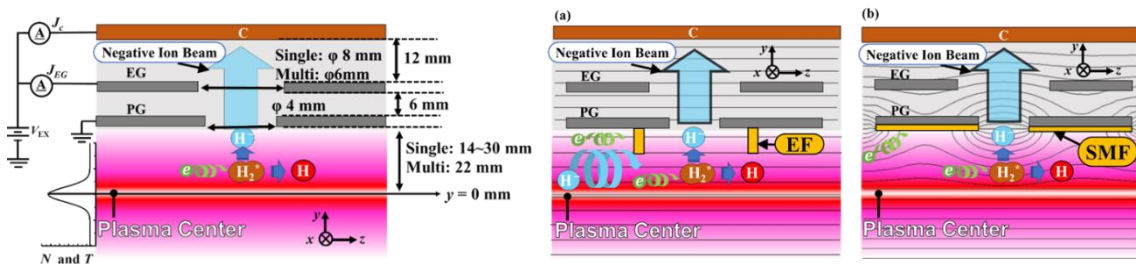


図 2. 負イオン引き出し機構の概念図と随伴電子低減機構の概念図、(a):Electron Fence (EF)、(b): Soft Magnetic material plate for Filter (SMF)。灰色の実線は磁力線を示す。

ため、電極近傍の電子はSMFに終端し、EFの場合と同様に電子が選択的にトラップされる。ただし、EFの場合には電子の磁場を横切る拡散を防ぐことが出来ず、SMFの場合には湾曲した磁場がフィルターの様に作用するためより効率的であると考えられる。また使用したSMFは単孔の時2 or 0.2 x 30 x 10mm、多孔の時に0.5 x 54 x 5.4mm、厚さt=0.2mmを使用した。

4. 研究成果

(1) Electron Fence (EF)を用いた実験

随伴電子電流の低減のため、Electron Fence (EF)を用いて以下の実験を行った。EFの高さ H_{EF} に対する電流密度比 J_{EG}/J_C の特性から、負イオン電流密度に対し電子電流の方が大きく減少し、電流比は $I_d = 80A$ $H_{EF} = 6mm$ では7.5から1.6まで減少した。しかし、ITERで要求される電流比1以下には満たなかった。これは、電子電流と比較して小さい変化ではあるが、負イオン電流密度の減少が大きい要因である。典型的なHの温度を0.5eV程度とした時のラーモア半径が約4mmであることから、電極周辺を移動するHがフェンスに衝突することによってH電流密度が減少したと考えられ、よりHに影響の少ない方式が求められる[5]。

(2) Soft Magnetic material plate for Filter(SMF)を用いた実験 [7, 8]

図2(b)のSMFは、随伴電子電流密度の低減に対し効果的である。ここではSMFを設置した状態で電流比を低減させる条件、次にSMFの設置方法についても最適な条件を示す。放電電流 $I_d=50$ における、印加磁場 B に対する電流比 J_{EG}/J_C と、随伴電子電流密度 J_{EG} 、及び負イオン電流密度 J_C の特性を図3に示す。 J_{EG}/J_C は磁場に対して下に凸の関数となっており $B=41mT$ で最小値0.48を得た。しかしながら磁場を強くしていくことで、 J_C と J_{EG} が緩やかに減少した。さらに37mT~43mTでは J_{EG}/J_C がほとんど変化しないことから、印加する磁場は37mTが最適であることが示された。

図4では、 $t=0.2mm$ と $t=2mm$ の場合での放電電流を40~90Aまで増加させた時の電流密度特性を示す。 $t=0.2mm$ を使用した実験では、電子電流密度が大きく、90Aまで実験を行うことが出来なかった。一方で、 $t=2mm$ の時の実験では予測していたように J_{EG} が減少しており、 J_C はわずかな減少に抑えられている。この時計測し J_C は7.5mA/cm²であり、電流比 J_{EG}/J_C は2.0となった。

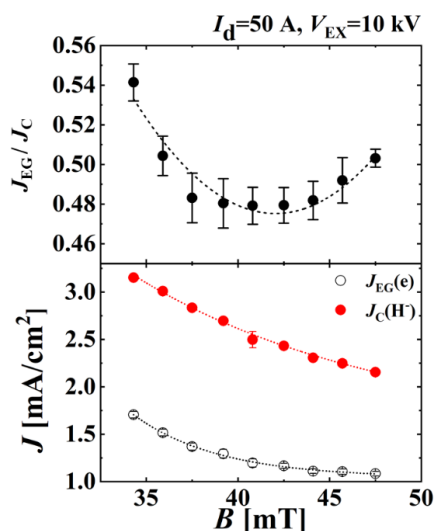


図3. 印加磁場 B に対する電流比 J_{EG}/J_C 、随伴電子電流密度 J_{EG} 、及び負イオン電流密度 J_C の特性。

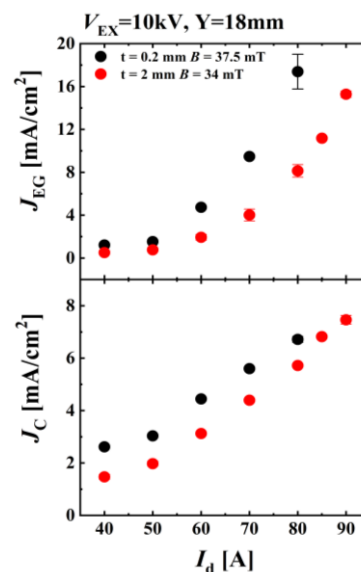


図4. 放電電流に対する随伴電子電流密度 J_{EG} 、及び負イオン電流密度 J_C の特性。

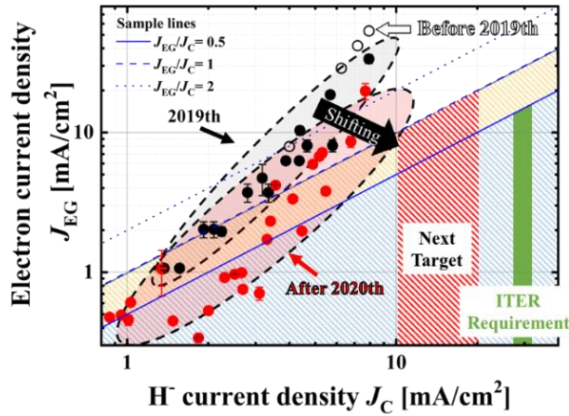


図 5. 東海大学における負イオン源パラメータの推移。

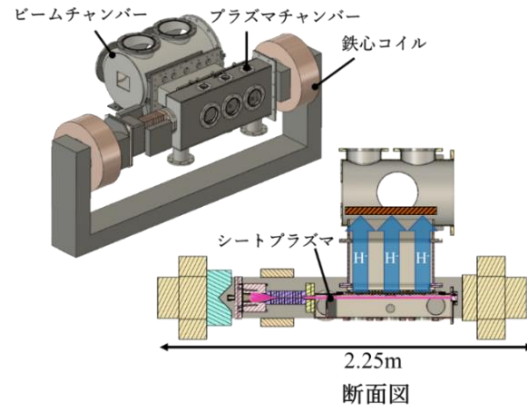


図 6. 大面積実験装置 TPDsheet-NIS の概念図。

(3) まとめと今後の展望

従来のパラメータと本研究で得られた一連の実験結果を図 5 に示す。○は 2019 年度以前のパラメータ、●は 2019 年度以降のパラメータ、そして●は 2020 年度から 2021 年度にかけて得られたパラメータである。本研究でのターゲットパラメータを赤い斜線部、ITER の要求値は緑のラインで示した。2019 年度以前では比較的高い H・電流密度を計測したが、H・と随伴して引き出される電子電流が多くプラズマの高密度化が困難になっている。2019 年度から最終年度（2022 年度）にかけて EF や SMF を用いることで随伴電子電流の低減に成功し、プラズマ源の高出力運転による高密度化が可能となった。

これらの結果を発展させ、シートプラズマを用いた非 Cs 型大電流負イオン源 (TPDsheet-NIS) の設計を行った (図 6)。本装置では負イオンを引き出し可能な領域を従来の約 4 倍の 20cm² まで拡大する。また、約 2.25m の鉄心コイルを用いて真空容器内に磁場を発生させることを予定している。今後はこの装置を用いることで図 5 に示したスケールリングを実施する。

<引用文献>

- [1] D.Wunderlich, C.Wimmer, R.Riedl, F.Bonomo, M.Fröschle, I.Mario, A.Mimo, D.Yordanov, U.Fantz and B.Heinemann, Nuclear Fusion **61**(2017) 096023-096034.
- [2] A.Tonegawa, K.Kumita¹, M.Ono, T.Shibuya and K.Kawamura, Jpn .J. Appl. Phys., **45**, **10B** (2006) 8212-8216.
- [3] A.Tonegawa, H.Yazawa, K.Kumita, M.Ono, and K.Kawamura, J. Nucl. Materials, **313** (2003) 1046-4049.
- [4] K.Hanai, S.Ishihara, R.Endo, T.Takimoto, A.Tonegawa, and K.N.Sato, Fusion Eng. and Des. **146** (2019)2721-2724.
- [5] K.Hanai, T.Takimoto, H.Kaminaga, A.Tonegawa, K.N.Sato, and K.Kawamura, Plasma Fusion Research, **15** (2020)2401029-2401032.
- [6] H.Kaminaga, T.Takimoto, A.Tonegawa, and K.N.Sato, Rev. Sci. Instrum., **91** (2020) 113302-113307.
- [7] H.Kaminaga, T.Takimoto, A.Tonegawa, and K.N.Sato, Fusion Eng. and Des., **168** (2021) 112676-112680.
- [8] A.Tonegawa, H.Kaminaga, K.Hanai, T.Takimoto, K.N.Sato and K.Kawamura, Nuclear Fusion, **61** (2021)106030-106036.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroki Kaminaga, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato	4. 巻 91
2. 論文標題 Characteristics of extracted ion beam froma cesium-free negative ion source usingsheet plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113302-113305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0013364	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HANAI Keito, TAKIMOTO Toshikio, KAMINAGA Hiroki, TONEGAWA Akira, SATO Kohnosuke, KAWAMURA Kazutaka	4. 巻 15
2. 論文標題 Development of Cs-Free Negative-Ion Source by Sheet Plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401029-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.2401029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Keito Hanai, Shogo Ishihara, Ryuta Endo, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato	4. 巻 146B
2. 論文標題 Characteristics of cesium-free negative hydrogen/deuterium ion source by sheet plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 2721 - 2724
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2019.04.096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroki Kaminaga, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato	4. 巻 168
2. 論文標題 Characteristics of co-extracted electron beam current in sheet plasma-type cesium-free negative-ion source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Eng. and Des.	6. 最初と最後の頁 112676-112680
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2021.112676	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A.Tonegawa, H.Kaminaga, K.Hanai, T.Takimoto, K.N.Sato and K.Kawamura	4. 巻 61
2. 論文標題 Characteristics of the extracted negative-ion beam in a cesium-free negative-ion source using TPDsheet-U	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 106030-106036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Hiroki Kaminaga
2. 発表標題 Reduction of co-extracted electron beam by magnetic conguration on negative ion source by using TPDsheet-U
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Kaminaga
2. 発表標題 Characteristic of co-extracted electron beam current in sheet plasma type cesium free negative ion source
3. 学会等名 31th edition of the Symposium on Fusion Technology (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神永啓希
2. 発表標題 シートプラズマを用いた非セシウム型負イオン源での磁性体による引き出し電流比 I_e/I_H への影響
3. 学会等名 負イオン研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 利根川昭
2. 発表標題 高密度シートプラズマを用いた非セシウム型負イオン源TPDsheet-NISの開発
3. 学会等名 負イオン研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神永啓希
2. 発表標題 TPDsheet-Uを用いた非セシウム型負イオン源での磁性体によるビーム引出しへの影響
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keito Hanai, Toshikio Takimoto, Hiroki Kaminaga, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato, Kazutaka Kawamura
2. 発表標題 Design of High Current Cesium-Free Negative Ion Source by Sheet Plasma
3. 学会等名 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-14) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keito Hanai, Toshikio Takimoto, Hiroki Kaminaga, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato, Kazutaka Kawamura
2. 発表標題 Development of Cs-free negative ion source by sheet plasma
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC-28) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 花井啓利, 瀧本壽来生, 神永啓希, 利根川昭, 佐藤浩之助, 河村和孝
2. 発表標題 シートプラズマを用いた非セシウム型負イオン源からの負イオンビーム引き出し特性
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神永啓希, 花井啓利, 瀧本壽来生, 利根川昭, 河村和孝, 佐藤浩之助
2. 発表標題 大電流化に向けたシートプラズマ型負イオン源からのビーム引き出しの評価
3. 学会等名 シンポジウムなどの名称: 2019 SAS Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kaminaga, Ryuichi Onuma, Taiga Goka, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato, Kazutaka Kawamura
2. 発表標題 Effects of Magnetic Filter SMF on the Reduction in Co-Extracted Electrons for Cs-free Negative Ion Source Using TPDsheet-U
3. 学会等名 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kaminaga, Ryuichi Onuma, Taiga Goka, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato, Kazutaka Kawamura
2. 発表標題 Characteristics of plasma parameters with magnetic filter of SMF on negative ion source using TPDsheet-U
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiga Goka, Ryuichi Onuma, Hiroki Kaminaga, Toshikio Takimoto, Akira Tonegawa, Kohnosuke Sato, Kazutaka Kawamura
2. 発表標題 Reduction of co-extracted electron current by SMF using Cs-free negative ion source
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神永啓希, 大沼龍一, 五家大我, 瀧本壽来生, 利根川昭, 佐藤浩之助, 河村和孝
2. 発表標題 シートプラズマを用いた非セシウム型負イオン源における負イオン生成条件の最適化
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五家大我, 大沼龍一, 神永啓希, 瀧本壽来生, 利根川昭, 佐藤浩之助, 河村和孝
2. 発表標題 磁化シートプラズマを用いた非Cs型負イオン源の随伴電子低減特性
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(1)大学院理学研究科物理学専攻2年次生の花井啓利さん(指導教員=理学部物理学科・利根川昭教授)が、11月5日から8日まで岐阜県土岐市で開かれた国際会議「The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research」に参加。ポスターセッションの学生部門で「The ITC Best Presentation Award for Students」を受賞しました。大学院生が国際会議でポスター賞を受賞しました
https://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/science/news/detail/post_68.html
<https://www.nifs.ac.jp/itc/itc28/students.html>

(2)大学院理学研究科物理学専攻2年次生の神永啓希さん(指導教員=理学部物理学科・利根川昭教授)が、11月22日から25日までオンラインで開かれた「第38回プラズマ・核融合学会」で若手学会発表賞を受賞しました。
<https://www.u-tokai.ac.jp/gd-science/news/184/>
http://www.jspf.or.jp/jspf_annual2021/wakate.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------