

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：16102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03783

研究課題名(和文) 重水素負イオン源における同位体効果の物理メカニズムの理論的解明

研究課題名(英文) Theoretical study of the physical mechanism of isotope effects in deuterium negative ion sources

研究代表者

宮本 賢治 (Kenji, Miyamoto)

鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・教授

研究者番号：00532996

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では重水素負イオン源の同位体効果の1つである電子電流の増加の原因について、水素と重水素の原子・分子衝突過程を考慮した0次元モデルによる解析と電子輸送解析用数値シミュレーション(KEIO-MARCコード)の両方で検討した。

まず0次元モデルについて、水素と重水素のイオン化の実効的な反応速度係数や正イオンの輸送損失時定数の違いにより、重水素の方がプラズマ密度が約1.7倍高い結果が得られた。またKEIO-MARCコードでも同様の結果を得ることができた。以上から重水素化することで電子電流が増加するのは、イオン化の実効的な反応速度係数や正イオンの輸送時間の違いが原因であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して得られた知見は、世界の次世代エネルギーとして有望である核融合発電の実現へ貢献できると期待される。さらに、次世代のがん治療法であるBNCT等で用いられる医療用加速器の開発への貢献が期待できる。

また本研究では、負イオン源に形成されるイオン性プラズマの界面構造、荷電粒子の輸送過程、電磁場応答性等の解析を行う。そのため学術的には、非相対論に限られるが、宇宙の電子・陽電子プラズマの静電波動の伝搬や輸送過程の理解に大きな進展をもたらすと期待される。すなわち実験室プラズマ研究から宇宙プラズマ研究への新たな貢献という観点から、プラズマ物理の新領域の開拓が期待される。

研究成果の概要(英文)： In this study, the cause of the increase in electron current, which is one of the isotope effects in a deuterium negative ion source, was investigated using both an analysis with a zero-dimensional model that takes into account the atomic and molecular collision processes between hydrogen and deuterium, and a numerical simulation for electron transport analysis (KEIO-MARC code).

First, for the zero-dimensional model, the results shows that the plasma density is approximately 1.7 times higher for deuterium due to differences in the effective reaction rate coefficients for ionization of hydrogen and deuterium and the transport loss time constant of positive ions. Similar results are also obtained with the KEIO-MARC code. From the above, it is made clear that the increase in electron current due to deuteration is caused by differences in the effective reaction rate coefficients for ionization and the effective confinement time of positive ions.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：プラズマ 核融合 加速器 重水素 負イオン源 数値シミュレーション PIC法 モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

近年、核融合の分野では、NIFS や QST、IPP 等で実機または実機レベルの負イオン源にて、重水素運転での実験が行われている。また、医療用加速器においても重水素負イオンビーム引出の実験が行われている。その結果、水素に比べて、1) 電子電流が多い、2) 負イオンの引出しや電子抑制のための最適なバイアス電圧が高い、3) Cs 効果の持続時間が短い、といった共通の特徴や問題点が報告されている。特に負イオンと同時に引き出された電子は、加速部において、絶縁破壊や電極熱負荷の要因となるため、負イオン源開発においてその抑制は喫緊の課題である。しかし、原因となる物理機構は未解明である。

一方、数値シミュレーションによる研究において PIC 法の負イオン源開発への適用が、我々の研究を契機として、IMIP の F. Taccogna らの研究グループ、トゥールーズ・ジャン・ジョレス大学等で精力的に試みられている。実験では観測しにくい物理過程を捉えられる数値シミュレーションの長所を生かして、負イオン源の物理機構の解明を図る上で非常に有効な手法として貢献している。

2. 研究の目的

本研究の目的は重水素負イオン源について、原子・分子衝突過程を考慮した 0 次元モデルによる解析と運動論的粒子モデルに基づく数値シミュレーションにより、理論・数値シミュレーションの側面から「1. 研究開始当初の背景」において挙げた、同位体効果と呼ばれる水素の場合と異なる物理特性のメカニズムを解明する。そして得られた知見により、核融合や医療用加速器等における重水素負イオン源の実現への貢献を図る。

3. 研究の方法

(1) 原子・分子衝突過程を考慮した 0 次元モデル

核融合科学研究所の負イオン源のプラズマ生成部[1]をモデル化した。水素原子・分子、水素正イオン (H^+ , H_2^+)、電子各々の密度の時間変化に関する、以下のレート方程式を連立させて解く。

水素分子 (振動励起状態):

$$\begin{aligned} dn_{H_2}(v)/dt = & S_{GAS} + S_{eV}(v' \rightarrow v) + S_{EV}(v' \rightarrow v) - S_{eV}(v \rightarrow v') - S_{EV}(v \rightarrow v') \\ & + S_{DR,H3+} - S_{IOZ,H_2} - S_{DISS,H_2} - S_{DI,H_2} - S_{H3+PROD} - n_{H_2}/\tau_{H_2} \\ & + 0.5 \times (1 - R_{N+}) \times (n_{H+}/\tau_+) + 0.5 \times (1 - R_{N0}) \times (n_H/\tau_H) \end{aligned}$$

水素原子:

$$\begin{aligned} dn_H/dt = & S_{DISS,H_2} + S_{DI,H_2+} + S_{DISS,H_2+} + S_{RC,H+} + S_{DR,H_2+} + S_{DR,H_3+} - S_{IOZ,H} - n_H/\tau_H \\ & + R_{N+} \times (n_{H+}/\tau_+) + R_{N0} \times (n_H/\tau_H) \end{aligned}$$

水素正イオン:

$$\begin{aligned} dn_{H+}/dt = & S_{IOZ,H} + S_{DI,H_2} + S_{DISS,H_2+} + S_{DI,H_2+} - S_{RC,H+} - n_{H+}/\tau_+ \\ dn_{H_2+}/dt = & S_{IOZ,H_2} - S_{DISS,H_2+} - S_{DI,H_2+} - S_{DR,H_2+} - S_{H3+PROD} - n_{H_2+}/\tau_+ \\ dn_{H_3+}/dt = & S_{H3+PROD} - S_{DISS,H_3+} - S_{DR,H_3+} - n_{H_3+}/\tau_+ \end{aligned}$$

電子:

$$dn_e/dt = S_{FIL} + S_{IOZ,H_2} + S_{IOZ,H} + S_{DI,H_2} + S_{DI,H_2+} - S_{DR,H_2+} - S_{DR,H_3+} - S_{RC,H+} - n_e/\tau_e$$

ただし n, S, τ は各粒子の数密度、反応速度係数、輸送時間をそれぞれ表す。重水素に対しても同様である。また計算で用いた物理パラメータを表 1 に示す。

表 1 計算で用いた物理パラメータ

物理パラメータ	設定値
アーク電流	600 A
ガス流量	850 sccm
初期プラズマ密度	$1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
初期水素 / 重水素原子密度	$1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
初期水素 / 重水素分子密度	$1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
電子温度	5 eV
水素 / 重水素正イオン温度	1 eV
中性粒子温度	1000 K

(2) 運動論的粒子モデルに基づく数値シミュレーション

本研究で用いた数値シミュレーションコード (KEIO-MARC) は実空間での電子輸送に加えて、電子-電子クーロン衝突、分子解離、分子振動励起、分子イオン化など 500 種類にも及ぶ衝突過

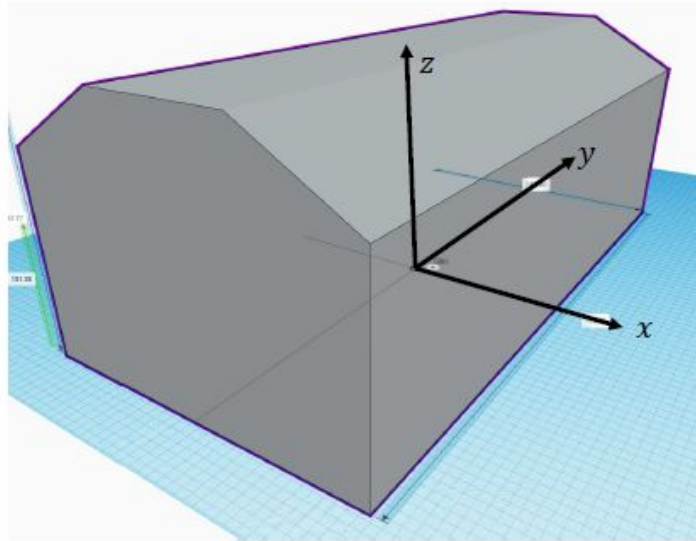


図1 数値シミュレーション領域と座標軸

程を Monte Carlo 法を用いて考慮し、陰極シースで加速された電子のエネルギー緩和過程を模擬できるのが特徴である[2]。次の運動方程式を解くことで荷電粒子(電子、正・負水素イオン)の軌道を求める。

$$m \frac{dv}{dt} = -ev \times \mathbf{B} + m \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_{coll}$$

ただし右辺第2項は粒子同士の衝突による力である。

0次元モデルと同様に、核融合科学研究所の負イオン源のプラズマ生成部をモデル化した。図1に示すように6角柱構造であり、その大きさは長辺700mm、短辺350mm、高さ263mmである。電子温度・密度等の物理パラメータは表1の通りである。また磁場分布については実測に基づいた値を設定した。

4. 研究成果

(1) 原子・分子衝突過程を考慮した0次元モデル

電子、水素/重水素の正イオンと原子の数密度の時間変化を図2に示す。定常状態における電子密度は重水素の方が水素よりも1.7倍程度高い(水素: $1.54 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 重水素: $2.54 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)。これは実験結果の約3倍[2]に比較的近い値が得られた。この理由としてイオン化の実効的な反応速度係数(水素: $4.20 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$, 重水素: $4.20 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$)や正イオンの輸送時間($\tau_{D^+} \sim \sqrt{2}\tau_{H^+}$)の違いであることが分かった。

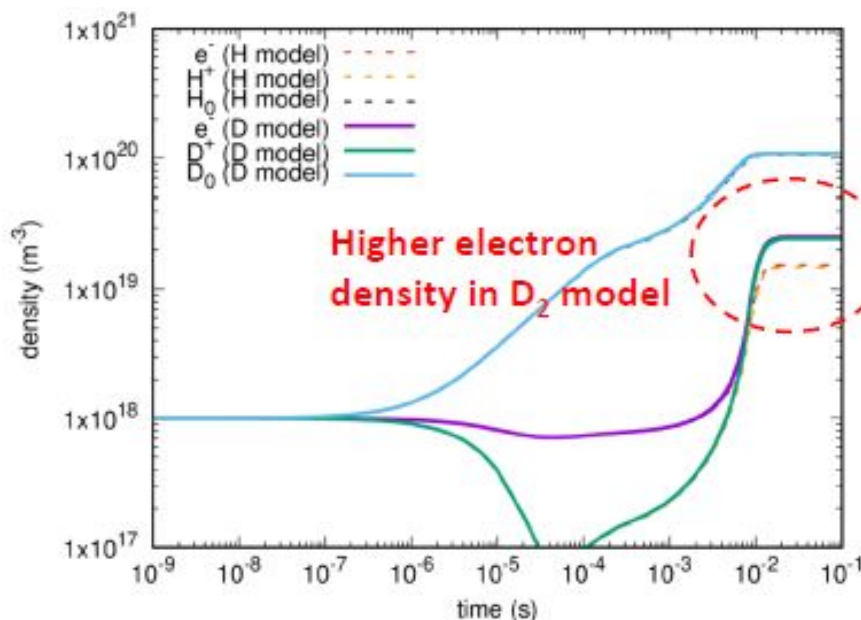


図2 電子、水素/重水素の正イオンと原子の数密度の時間変化

(2) 運動論的粒子モデルに基づく数値シミュレーション

当初の数値シミュレーション結果において、重水素化によってプラズマ密度が増加する事が示された。しかし増加分は約 10 % 程度で、上述の実験結果とは大きく乖離していた。そこで 0 次元モデルで得られたポピュレーションを KEIO-MARC の入力に、逆に、KEIO-MARC で得られた EEDF を 0 次元モデルの入力とする (図 3 参照) ことで、結果にどのような影響が現れるかの検討を行った。現在のところ、KEIO-MARC とゼロ次元モデルは統合されていないが、手動によるデータ交換を 4 回繰り返して解析を進めた。

その結果、KEIO-MARC の入力として 0 次元モデルの結果を用いることで、H と D での電子密度の差は広がった。シミュレーション領域にわたる電子の平均エネルギー、低エネルギー電子の温度、平均電子密度を表 3 に示す。特に電子密度については、0 次元モデル同様に、重水素の方が水素よりも 1.6 倍程度高い結果を得ることができた。

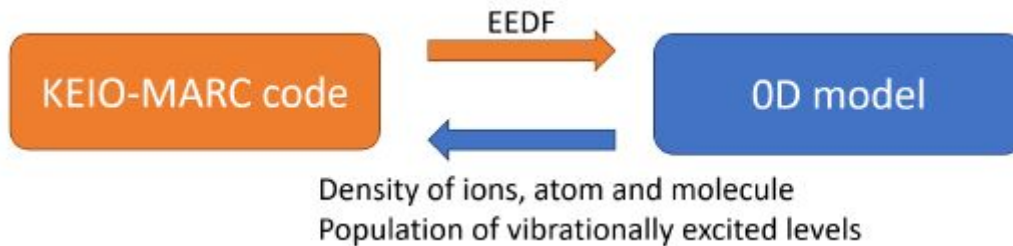


図 3 KEIO-MARC と 0 次元モデルとを連携したモデリング

表 2 水素 / 重水素の電子のエネルギー、低エネルギー電子の温度、電子密度の比較

物理量	水素	重水素
電子のエネルギー	1.32 eV	1.46 eV
低エネルギー電子の温度	2.29 eV	2.12 eV
電子密度	$4.07 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	$6.57 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

以上から重水素化することで電子電流が増加するのは、イオン化の実効的な反応速度係数や正イオンの輸送損失時定数の違いが原因であることを明らかにした。本研究成果から電子電流の低減を図るためには磁場の強度や配位の最適化の必要性が指摘されており、実機の重水素負イオン源の開発における大局的な指針を示すことができた。

参考文献

- [1] H. Nakano et al., Jpn. J. Appl. Phys., **59**, SHHC09 (2020).
- [2] A. Hatayama et al., New J. Phys. **20**, 065001 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kenji Miyamoto, Katuya Hayashi, Kazuo Hoshino, and Akiyoshi Hatayama	4. 巻 31
2. 論文標題 Analysis of the plasma meniscus in a hydrogen electronegative plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 10512-10512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6595/ac9254	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 Katsuya HAYASHI, Kazuo HOSHINO, Akiyoshi HATAYAMA, Kenji MIYAMOTO, Jacques LETTRY	4. 巻 18
2. 論文標題 Effect of Surface Produced H- Ion on the Plasma Meniscus in Negative Hydrogen Ion Sources	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401008-1401008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.18.1401008	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 該当する
1. 著者名 K. Miyamoto, K. Nagaoka, A. Hatayama, K. Hoshino, H. Nakano, T. Shibata, K. Tsumori	4. 巻 2244
2. 論文標題 Study of negative ion beam emittance characteristic using 3D PIC-MCC simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012040- 012040
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2244/1/012040	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 Ryo Kato, Kazuo Hoshino, Haruhisa Nakano, Takanori Shibata, Kenji Miyamoto, Kengo Iwanaka, Katsuya Hayashi, Akiyoshi Hatayama	4. 巻 2244
2. 論文標題 Numerical analysis of isotope effect in NIFS negative ion source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012035-012035
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2244/1/012035	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 T Shibata, R Kato, H Nakano, K Hayashi, J Sato, K Miyamoto, K Hoshino, and A Hatayama	4. 巻 2244
2. 論文標題 Numerical study of different electron density observed in Hydrogen and Deuterium ion source plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012002-012002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2244/1/012002	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 柴田崇統、吉田雅史、澤田圭司、星野一生、和田元、剣持貴弘、宮本賢治、畑山明聖	4. 巻 97
2. 論文標題 イオン源の数値シミュレーション技術の進展と応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 568-596
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lindqvist M., Nishioka S., Miyamoto K., Hoshino K., Lettry J., Hatayama A.	4. 巻 126
2. 論文標題 Effects of the extraction voltage on the beam divergence for a H ⁺ ion source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 123303 ~ 123303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5116413	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 該当する

1. 著者名 池田勝則、宮本賢治、小栗英知、柏木美恵子	4. 巻 95
2. 論文標題 負イオンは一日にして成らず ~ 負イオン研究の進展と広がり ~	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 327 ~ 349
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 K. Miyamoto, K. Hayashi, K. Hoshino, A. Hatayama
2. 発表標題 Study of plasma meniscus including the surface produced negative ions by using PIC-MCC simulation
3. 学会等名 8th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuya Hayash, Kazuo Hoshino, Kenji Miyamoto, Akiyoshi Hatayama, Jacques Lettry
2. 発表標題 Numerical study of the plasma meniscus shape and beam optics in RF negative ion sources
3. 学会等名 8th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩中健悟、塩谷岳大、星野一生、中野治久、柴田崇統、宮本賢治
2. 発表標題 NIFS負イオン源におけるプラズマ輸送過程の評価
3. 学会等名 第39回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Miyamoto, K. Nagaoka, K. Tsumori, A. Hatayama, K. Hoshino, K. Hayashi, M. Kisaki, H. Nakano, K. Ikeda, Y. Fujiwara, and M. Osakabe
2. 発表標題 Study of negative ion beam emittance characteristic using 3D PIC-MCC simulation
3. 学会等名 The 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 R. Kato, K. Hoshino, H. Nakano, T. Shibata, K. Miyamoto, K. Iwanaka, K. Hayashi, A. Hatayama
2 . 発表標題 Numerical analysis of isotope effect in NIFS negative ion source
3 . 学会等名 The 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Shibata, R. Kato, H. Nakano, K. Hayashi, J. Sato, K. Miyamoto, K. Hoshino and A. Hatayama
2 . 発表標題 Numerical study of different electron density observed in Hydrogen and Deuterium ion source plasmas
3 . 学会等名 The 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Hayashi, K. Hoshino, K. Miyamoto, A. Hatayama
2 . 発表標題 Effect of Electro-Negativity on Beam Extraction in Negative Hydrogen Ion Sources
3 . 学会等名 The 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Hamajima, R. Nakamoto, Y.Haba, K. Tsumori, M.Osakabe, H.Nakano, K.Ikeda, S.Yoshimura, K.Miyamoto, K.Takahashi, S.Masaki, E.Rattanawongnara, K.Nagaoka
2 . 発表標題 Effect of RF electric field on beam focusing in negative ion source plasma
3 . 学会等名 The 30th International Toki Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名	Ryoya Nakamoto, Katsuyosi Tsumori, Masaki Osakabe, Haruhisa Nakano, Katsunori Ikeda, Shinji Yoshimura, Masasi Kasaki, Kenji Miyamoto, Kazunori Takahashi, Shingo Masaki, Rattanawongnara Engrhyt, Kenichi Nagaoka
2. 発表標題	Effect of RF electric field on beam focusing in negative ion source plasma
3. 学会等名	The 19th International Conference on Ion Sources (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	濱嶋大河、中本峻也、津守克嘉、長壁正樹、中野治久、藤原大、池田勝則、吉村信次、木崎雅志、宮本賢治、高橋和貴、正木伸吾、Engrhyt Rattanawongnara、永岡賢一
2. 発表標題	負イオン源プラズマ中におけるRF電場のビーム集束性に対する影響
3. 学会等名	一般社団法人 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	K. Nagaoka, Y. Haba, M. Kasaki, K. Takahashi, A. Ando, J. Slief, R. Nakamoto, H. Nakano, K. Tsumori, K. Ikeda, K. Miyamoto, Y. Fujiwara, S. Masaki, E. Rattanawongnara, M. Osakabe
2. 発表標題	Different characteristics of plasma meniscus formation between positive and negative beam extractions
3. 学会等名	The 7th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	宮本賢治、永岡賢一、津守克嘉、畑山明聖、星野一生、林克哉、木崎雅志、中野治久、池田勝則、藤原大、長壁正樹
2. 発表標題	PICシミュレーションによる負イオンビームのエミッタンス特性の研究
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 加藤凌、佐藤捷、中野治久、柴田崇統、宮本賢治、畑山明聖、星野一生
2. 発表標題 NIFS重水素負イオン源における電子輸送の数値解析
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 永岡賢一、波場泰昭、木崎雅志、中本峻也、津守克嘉、中野治久、宮本賢治、高橋和貴、池田勝則、藤原大、長壁正樹
2. 発表標題 負イオンビーム集束性に関する考察
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenichi Nagaoka, Yasuaki Haba, Katsuyoshi Tsumori, Masashi Kisaki, Haruhisa Nakano, Katsunori Ikeda, Shingo Masaki, Kenji Miyamoto, Kazunori Takahashi and Masaki Osakabe
2. 発表標題 Optical characteristics of negative ion beam with multi-beam-axes produced by LHD-type negative ion source
3. 学会等名 The 18th International Conference on Ion Sources (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永岡賢一、波場泰昭、木崎雅志、中本峻也、津守克嘉、中野治久、宮本賢治、高橋和貴、池田勝則、藤原大、長壁正樹
2. 発表標題 負イオンビーム集束性に関する考察
3. 学会等名 一般社団法人 日本物理学会 第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田裕貴、山田翔太、畑山明聖、星野一生、矢口真子、北見尚久、青木康、高橋信明、野村真史
2. 発表標題 医療用水素負イオン源における水素負イオン生成量増大のための数値シミュレーション2
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	畑山 明聖 (AKIYOSHI Hatayama) (10245607)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・名誉教授 (32612)	
研究分担者	星野 一生 (KAZUO Hoshino) (50513222)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

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		
スイス	CERN研究所		