

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03002

研究課題名（和文）イオン性ペアプラズマの界面構造の解明と負イオンビームの高性能化

研究課題名（英文）Investigation of boundary structure of ionic pair plasma and development of high performance negative ion beam

研究代表者

永岡 賢一（Kenichi, Nagaoka）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：20353443

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：負イオン源プラズマから負イオンビームを引き出す界面に起因する2種類のビーム集束性劣化メカニズムを実験的に見出した。1つは、ビームレットの時間変動である。負イオン源プラズマの変動に応答する負イオンビームレット発散角とビームレット軸の変動現象がビーム集束性を劣化させる可能性があることを指摘した。このメカニズムは、RF負イオン源で特に重要となる。2つ目は、負イオンビームレットは3成分のガウスビームから構成され、それぞれのビーム軸の集束性がビーム全体の発散角に大きく影響していることを見出した。この結果は、従来のビーム集束性の概念を修正するのでもあり、従来の加速器設計では、不十分である可能性を指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

負イオンビームの高性能化は、核融合プラズマ研究、大型加速器を用いた素粒子物理研究、原子核物理研究、医療用加速器開発研究、先進材料開発研究など様々な科学技術分野の研究を加速することができる重要な技術開発である。本研究計画は、負イオンビームの高性能化を妨げている要因を実験的に指摘することができた。これにより、従来の負イオンビームの集束性の概念を修正する必要性を指摘した。すでに、本研究成果を元に、負イオンビーム高性能化研究に応用する研究に着手しており、今後応用研究としての成果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Two mechanisms those degrade negative ion beam focusing were experimentally identified in this study. One is dynamic behavior of beamlet such as time evolution of beamlet width and beamlet axis position responding to the plasma density in negative ion source. This mechanism is more important for RF negative ion source. The other is caused by behaviors of triple Gaussian beam identified in the phase space structure of negative ion beam. The coincidence of three beam axis is very important element for focusing of negative ion beamlet. These results modified the concept of negative ion beam meniscus, and pointed out that the conventional approach to negative ion beam meniscus modeling should be improve.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：負イオンビーム 負イオン源 ビーム発散角 位相空間構造 プラズマメニスカス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

負イオンビームは、大型加速器科学、磁場閉じ込め核融合プラズマ実験、医療用加速器開発など、現在の最先端科学技術を支える重要な要素である。核融合分野における現在の最重課題は、ITER用負イオン源のビーム集束性改善である。これまでの開発研究においては、RF方式の負イオン源の採用が決定されたのち、ドイツマックスプランク研究所での開発研究が行われ、負イオンビーム電流密度や長時間化に成功していた。ところが、近年このRF負イオン源の負イオンビーム発散角が大きく、ITERの仕様を満たせないという課題が明らかとなり、その解決が急務の課題となっていた。

一方日本では、大型ヘリカル装置(LHD) TJ-60U装置において、プラズマ加熱用直流アーク方式負イオン源開発が行われ、実際のプラズマ加熱に供されてきた。特に、LHDでは、先進的な負イオンビーム加速器の開発に成功し、発散角の小さいビームによるプラズマ加熱が実現されていた。これらの要素開発を可能とするための負イオン源開発研究用テストスタンド(NIFS-NBTS)での計測機器の充実が進展し、負イオン引き出し領域にペアイオンプラズマ状態が生成されることを発見するなど、様々な基礎研究が展開できる環境が整いつつあった。しかしながら、ペアイオンプラズマからの負イオンビーム引き出し界面形成は、全く理解されておらず、ビーム集束性劣化のメカニズムも明らかになっていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、ビーム集束性を実現している直流アーク方式負イオン源を用いて、ペアプラズマから負イオンビームが引き出される界面に積極的に擾乱を加え、ビーム引出界面の電場応答特性を実験的に明らかにする。この実験から得られるビーム引出界面を決めるパラメータ依存性に基づく理論モデルの構築と、それを用いたITER用RF負イオン源のビーム集束性改善に向けた指針を与えることを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

負イオンビーム引き出し界面(メニスカス)の性質を調べるためには、そのメニスカスの静電プローブ計測が最も直接的であるが、プローブ挿入による影響が無視できないという困難があった。そこで、ビームレットの詳細な計測を行うことにより、ビーム集束特性に影響を与えているメニスカスの振る舞いを実験的に調べる方針で研究を展開した。また、正イオン源を用いて同様の実験を行うことにより、理論モデルが確立し、よく理解されている正イオンメニスカスとの比較から負イオンメニスカス特性を明らかにすることも研究分担者の協力を得て行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 計測器開発

RF負イオン源におけるビーム集束性の劣化の原因の一つとして、RF電場の振動が考えられるため1MHzの高周波をカバーできる高い周波数応答特性を有する高速ビームレットモニター(FBM)の開発を行った。32chの2次元電極アレイと計測系全体を高電位にすることにより負イオンビームレットの2次元分布を40MHzの周波数応答特性で実現することに成功した。また、本研究を遂行する議論の中で、ビーム発散角だけでは、ビーム集束特性の理解に不十分な可能性が明らかとなり、その問題を回避するためにビームレットの位相空間構造を計測するペッパーポットタイプの位相空間計測器(PPSA)の開発も併せて行った。最終的には、2つの計測器を六角柱構造に搭載した新しい計測器の開発を行った。この計測器の開発研究は、国際会議のオーラル発表(Y. Haba, K. Nagaoka, et al., International Symposium on Negative Ions and Sources, Novosibirsk)に採用され、また、国際的な学術誌(Y. Haba, K. Nagaoka, et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 123303, (2018))にも掲載された。

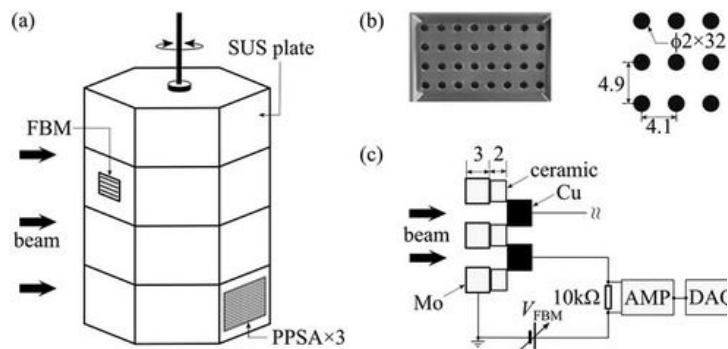


図1 .(a) FBMとPPSAを搭載した六角柱型計測BOX. (b) FBMの2次元電極アレイ. (c) 40MHz帯域をカバーする計測回路の概略図.論文Y. Haba, K. Nagaoka, et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 123303, (2018)より転載。

を回避するためにビームレットの位相空間構造を計測するペッパーポットタイプの位相空間計測器(PPSA)の開発も併せて行った。最終的には、2つの計測器を六角柱構造に搭載した新しい計測器の開発を行った。この計測器の開発研究は、国際会議のオーラル発表(Y. Haba, K. Nagaoka, et al., International Symposium on Negative Ions and Sources, Novosibirsk)に採用され、また、国際的な学術誌(Y. Haba, K. Nagaoka, et al., Rev. Sci. Instrum. 89, 123303, (2018))にも掲載された。

#### (2) 正イオンビームメニスカスのダイナミクス

負イオンビームメニスカスは、理論的にもよく理解されていないが、正イオンビームメニスカスは、正イオンシースと全く同じものであると考えられているため、ボームシース条件による

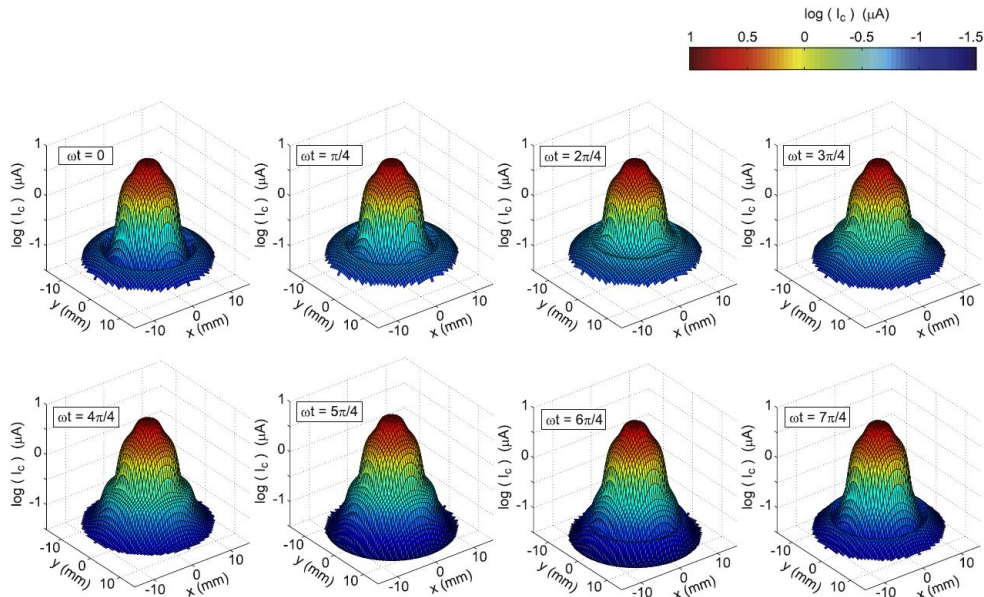


図 2. RF に同期したビーム強度分布 (対数スケール) の応答。論文 K. Takahashi, et al., New J. Phys. 21 093043 (2019)より転載。

界面形成モデルが適用できる。このようによく理解されている正イオンメニスカスに外部から一様な RF 電場を重畳し、ビームレットの応答を調べる実験が研究分担者である高橋氏 (東北大) により行われた。その結果を図 2 に示す。対数プロットであるため強調されているが、周辺部に RF に同期した変動がみられるが、コアのビームレットにはほとんど影響は見られないことがわかる。これは、電子による電場遮蔽効果が有効に効いているためと解釈することができ、ボームシース条件によるメニスカス形成モデルと整合する結果である。

### (3) 負イオンビームメニスカスのダイナミクス

同様の実験を NIFS-NBTS で行い、イオン源プラズマ密度変動に対する負イオンメニスカスの応答を調べた。その結果の一例を図 3 に示す。プラズマは、プラズマ電極に接続されたバイアス電源の出力変動により密度が時間的に変動している。この時、ガウスフィットから求めたビームレット幅、及び、ビームレット軸が、イオン源プラズマ密度変動に反応して変動していることがわかる。負イオンビームの場合は、ビームレットの中心付近でも大きく変動しており、この点は正イオンビームの場合と異なる点である。このことは、負イオンメニスカス形成は、正イオンメニスカス形成とは異なるメカニズムで形成されていることを示している。また、ビームレット軸の変動は、予想していなかった発見であった。プラズマ密度変動が空間的に一様であると仮定すると、負イオンメニスカスは、上下、左右に非対称な形状をしていることを示唆している。ビーム引き出し領域の PIC シミュレーションでも、磁場の影響や負イオン生成の局所性による密度不均一性に起因すると考えられる非対称なメニスカス形成が観測されており、実験観測との詳細な比較により、負イオンメニスカス形成メカニズムの検証が進むことが期待される。特に、メニスカス近傍の磁場構造と負イオン生成の局所性がどのように影響するのか？を理解することが重要と思われる。

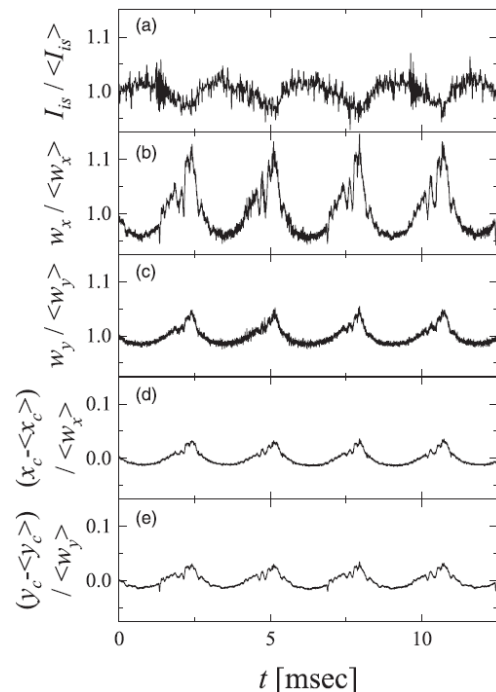


図 3 . (a)引き出し界面近傍で計測したイオン飽和電流、(b) イオン源から下流側約 1m の位置で計測したビームレットの水平幅、(c) ビームレットの垂直幅、(d) ビームレットの水平幅、(e) ビームレットの垂直幅の時間発展。論文 Y Haba, K Nagaoka, Jpn. J. Appl. Phys. 59, SHHA01 (2020)より転載。

#### (4) 負イオンビーム位相空間

ビーム集束性を議論するためには、発散角やエミッタンス（位相空間上の面積）を議論することが一般的である。核融合プラズマ加熱用のビームに対しては、粒子衝突実験のような極端なビーム集束は必要ないため発散角をベースに議論することが多い。実際に ITER 用負イオン源に求められているビーム集束条件の仕様も発散角だけである。ところが、ビーム発散角がどのようにして決まるのか？という物理メカニズムを調べるためには、発散角だけでは限界がある。そこで、ビーム位相空間そのものを議論するためにペッパーポット型の位相空間構造測定を行った。図4にその結果を示す。

x方向（水平）及び、y方向（垂直）で異なる位相空間構造を持つことがわかる。まず簡単なy方向から考察する。位相空間の構造が右肩上がりであるため発散ビームである。空間構造は、ほぼガウス分布であることから1成分の発散するガウスビームであることがわかる。一方で、x方向は、詳細な解析の結果、3つのガウスビームの合成とみなせることが分かった。

ビーム集束性にこの3つのガウスビームの振る舞いがどう影響するのか？を調べるために、加速電圧のスキャンを行い、静電レンズ効果の指標となる加速・引出電圧比で整理した結果を図5に示す。この比較では、速度方向に分離している3つの成分が、空間的にも速度方向にも移動し、過大集束、過小集束を作り出すことがわかる。つまり、ひとつひとつのガウスビームの速度分散の広がりだけでなく、ビーム軸位置のシフトがビームレット全体の集束特性に大きく影響していることが明らかとなった。また、レンズの曲率を変えることでこのような振る舞いを生じさせるためには、レンズの上流では空間的に異なる領域にそれぞれの粒子源が存

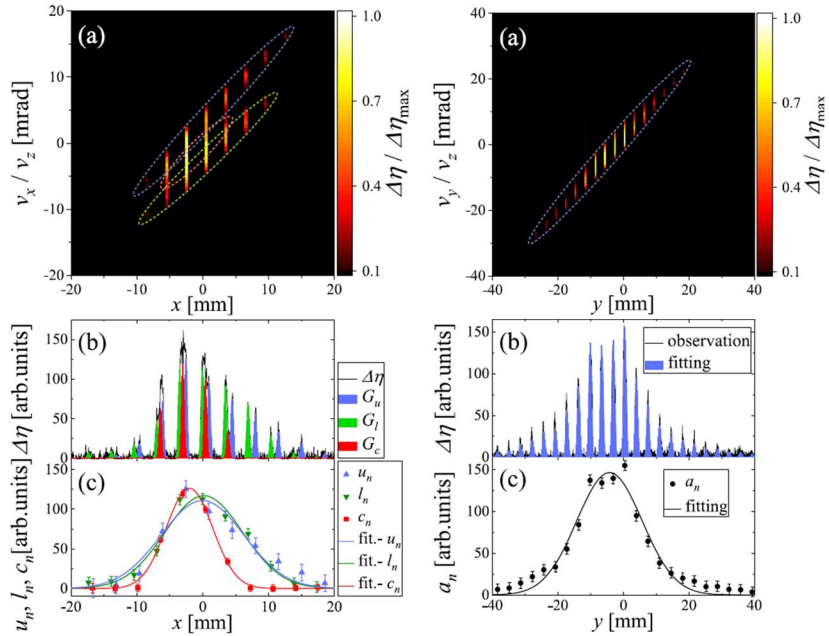


図4 . 左右は、それぞれx方向、y方向。上から、x方向位相空間構造、カプトン膜状の1次元黒色化レベル分布、モデル計算により得られた3成分のビーム強度分布。論文 Y Haba, New J. Phys. 22, 023017 (2020)より転載。

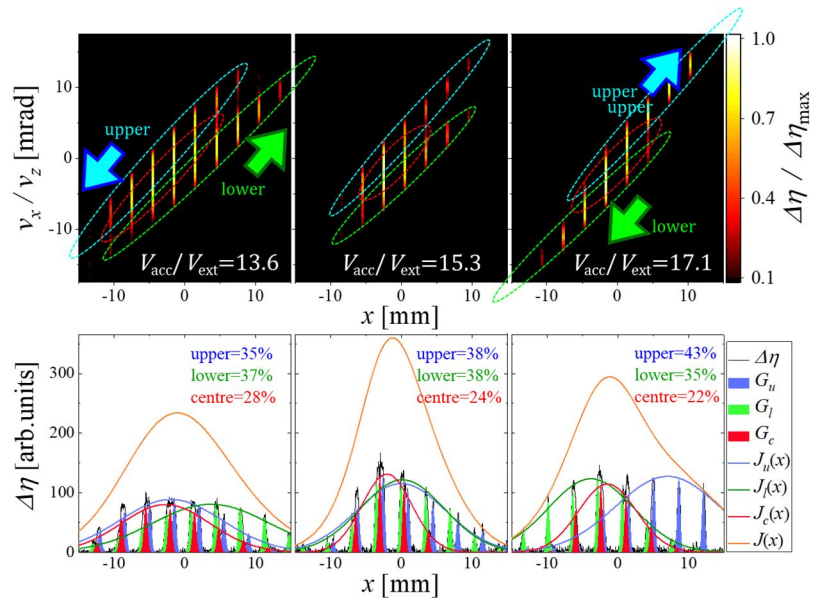


図5 .(上段) 電圧比( $V_{acc}/V_{ext}$ )を変えた場合の位相空間構造。(下段)カプトン膜上の黒色化レベル分布と3成分ビームモデル解析結果としてえられたビーム分布。論文 Y Haba, New J. Phys. 22, 023017 (2020)より転載。

在することが予想される。

メニスカス近傍における3成分の粒子源の分布を調べるために、実験観測された位相空間構造からビーム軌道計算を時間反転方向に行った。初期結果では3つのガウスビーム成分は、プラズマ電極孔内で、x方向に分離している可能性が示されている。今後は、これらの解析を進めることにより、メニスカスに入射する負イオンの起源に迫る研究へと展開したい。

#### (5) 本研究の成果のまとめ

成果のまとめとして、本研究で明らかとなった負イオンビーム集束性劣化の物理過程を挙げる。

- ・ 3成分ガウスビームの軸位置集束性の劣化
- ・ 負イオン源プラズマにダイナミックに応答するメニスカス曲率によるビームレット集束性の変動

本研究によりこれらの物理過程を実験的に示したことが新しい点であり、重要な意味を持っている。また、これらの研究から明らかとなった負イオンビームメニスカスの描像を図6に示す。

- ・ メニスカス内の3つの領域形成
- ・ 非対称なメニスカス形状
- ・ メニスカス曲率のダイナミックな変動

特にメニスカス曲率が変動し、ビーム集束性がダイナミックに変化することは、正イオンメニスカスと異なり、負イオンビームに特有の性質である点が重要である。

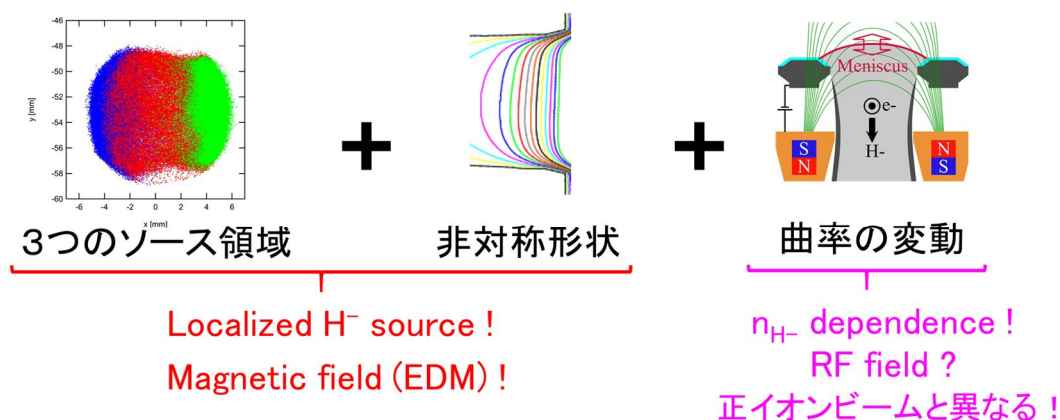


図6．本研究で明らかとなった負イオンビームメニスカスの描像

#### (6) 本研究成果に基づく新たな共同研究

本研究により負イオンビームの位相空間構造の詳細が得られたことにより、シミュレーション研究との詳細な比較が可能になった。粒子シミュレーションによる負イオン源プラズマ及び負イオンビームのモデリング研究を行っている鳴門教育大の宮本氏との共同研究を開始することができた。また、RF負イオン源におけるメニスカス振動の検証を行う共同研究をマックスプランク研究所(ドイツ)と検討し、国際共同研究強化Bの科研費獲得につなげることができた。これにより、実際にRF負イオン源の負イオンビーム集束性の問題解決に直接的に貢献できる研究へステップアップできたと考えている。

#### (7) 研究組織

- |                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| 研究代表者：永岡賢一        | 核融合科学研究所・准教授                       |
| 研究分担者：高橋和貴        | 東北大学大学院工学研究科・准教授                   |
| 研究協力者：波場泰昭        | 名古屋大学大学院理学研究科                      |
| 研究協力者：木崎雅志        | 核融合科学研究所・助教                        |
| 研究協力者：中野治久        | 核融合科学研究所・助教                        |
| 研究協力者：中本峻也        | 長岡技術科学大学大学院工学研究科                   |
| 研究協力者：Jelle Slief | Eindhoven University of Technology |

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Haba Y., Nagaoka K., Tsumori K., Kasaki M., Takahashi K., Nakano H., Ikeda K., Yoshimura S., Osakabe M.	4. 巻 59
2. 論文標題 Response of beam focusing to plasma fluctuation in a filament-arc-type negative ion source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SHHA01 ~ SHHA01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7473">https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7473</a>	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 Haba Yasuaki, Nagaoka Kenichi, Tsumori Katsuyoshi, Kasaki Masashi, Nakano Haruhisa, Ikeda Katsunori, Osakabe Masaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Characterisation of negative ion beam focusing based on phase space structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 023017 ~ 023017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab6d41">https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab6d41</a>	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 Takahashi Kazunori, Imagi Tsuyoshi, Ishitomi Masashi, Nagaoka Kenichi, Haba Yasuaki, Nakano Haruhisa, Ando Akira, Kasaki Masashi, Tsumori Katsuyoshi, Ikeda Katsunori	4. 巻 21
2. 論文標題 Spatiotemporal oscillation of an ion beam extracted from a potential-oscillating plasma source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093043 ~ 093043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab3f70">https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab3f70</a>	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 Haba Y., Nagaoka K., Tsumori K., Kasaki M., Nakano H., Ikeda K., Fujiwara Y., Kamio S., Yoshimura S., Osakabe M.	4. 巻 89
2. 論文標題 Development of a dual beamlet monitor system for negative ion beam measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	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) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5056260">https://doi.org/10.1063/1.5056260</a>	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 KISAKI Masashi, IKEDA Katsunori, NAKANO Haruhisa, TSUMORI Katsuyoshi, FUJIWARA Yutaka, HABA Yasuaki, KAMIO Shuji, NAGAOKA Kenichi, OSAKABE Masaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Demonstration of Beam Optics Optimization Using Plasma Grid Bias in a Negative Ion Source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1205110 ~ 1205110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1585/pfr.13.1205110">https://doi.org/10.1585/pfr.13.1205110</a>	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 Tsumori K., Wada M., Nakano H., Kisaki M., Ikeda K., Haba Y., Nagaoka K., Kamio S., Fujiwara Y., Osakabe M.	4. 巻 2052
2. 論文標題 Caesiated H- source operation with helium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 40015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1063/1.5083749">https://doi.org/10.1063/1.5083749</a>	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13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

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回年次会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 波場泰昭, 永岡賢一, 津守克嘉, 木崎雅志, 中野治久, 池田勝則, 吉村信次, 長壁正樹
2. 発表標題 プラズマ加熱用負イオンビーム位相空間構造に基づくビーム光学評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenichi Nagaoka, Yasuaki Haba, Katsuyoshi Tsumori, Masashi Kasaki, 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 18th International Conference on Ion Sources (ICIS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuaki Haba, Kenichi Nagaoka, Katsuyoshi Tsumori, Masashi Kasaki, Haruhisa Nakano, Katsunori Ikeda, Shinji Yoshimura, and Masaki Osakabe
2. 発表標題 Experimental observation of negative ion beam oscillation with a filament-arc-type negative ion source
3. 学会等名 International Conference on Phenomena in Ionized Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 波場泰昭, 永岡賢一, 津守克嘉, 木崎雅志, 中野治久, 池田勝則, 吉村信次, 長壁正樹
2. 発表標題 負イオンビームレット安定性的実験的評価
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H Nakano, A Mimo, M Kasaki, C Wimmer, I Mario, D Wunderlich, K Ikeda,
2. 発表標題 Characteristics comparison of negative ion density between negative ion sources at NIFS and IPP
3. 学会等名 18th International Conference on Ion Sources (ICIS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Y. Haba, K. Nagaoka, K. Tsumori, M. Kasaki, H. Nakano, K. Ikeda, Y. Fujiwara, S. Kamio, S. Yoshimura, and M. Osakabe
2. 発表標題 Development of a new beamlet monitor system: Time resolution and phase space structure
3. 学会等名 International symposium on Negative ion beams and sources (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nagaoka, Y. Haba, K. Tsumori, M. Kasaki, H. Nakano, K. Ikeda, Y. Fujiwara, S. Kamio, and M. Osakabe
2. 発表標題 Observation of low frequency oscillation in a filament-arc based negative ion source
3. 学会等名 International symposium on Negative ion beams and sources (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 波場泰昭, 永岡賢一, 津守克嘉, 木崎雅志, 中野治久, 池田勝則, 吉村信次, 長壁正樹
2. 発表標題 負イオンビームプロファイルの高時間分解能計
3. 学会等名 プラズマ核融合学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 波場泰昭, 永岡賢一, 津守克嘉, 木崎雅志, 中野治久, 池田勝則, 吉村信次, 長壁正樹
2. 発表標題 負イオンビームレット安定性の実験的評価
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Haba, K. Nagaoka, et al.,
2. 発表標題 Experimental observation of phase space structure of negative hydrogen ion beam for plasma heating
3. 学会等名 International Toki Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Haba, K. Nagaoka, et al.,
2. 発表標題 Experimental observation of phase space structure of negative hydrogen ion beam for plasma heating
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 波場泰昭、永岡賢一、他
2. 発表標題 プラズマ加熱用負イオンビームの位相空間構造の実験的評価
3. 学会等名 第73回日本物理学会年会
4. 発表年 2018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	高橋 和貴  (Takahashi Kazunori)  (80451491)	東北大学・工学研究科・准教授    (11301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	波場 泰昭 (Haba Yasuaki)	名古屋大学・大学院理学研究科  (13901)	
研究協力者	木崎 雅志 (Kisaki Masashi)	核融合科学研究所  (63902)	
研究協力者	中野 治久 (Nakano Haruhisa)	核融合科学研究所  (63902)	
研究協力者	中本 峻也 (Nakamoto Ryoya)	長岡技術科学大学  (13102)	
研究協力者	シュリーフ イエレ (Slief Jelle)	アイントフォーヘン工科大	