

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14903

研究課題名（和文）電子極薄プラズマ界面のモデル構築と先進的負イオンビーム加速への応用

研究課題名（英文）Modeling of meniscus formed in negative-ion-rich plasmas and its application to negative ion beam acceleration

研究代表者

木崎 雅志（Kisaki, Masashi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70598945

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）：プラズマ加熱用負イオン源内のプラズマは負電荷に占める電子の割合が負イオンに比べて極端に小さい、イオン性プラズマであることが近年の研究から明らかにされている。本研究は、イオン性プラズマにおける電界遮蔽の効果及び負イオン引出界面の形成に関わる物理機構を実験と計算により明らかにすることを目的とした。本研究の結果、負イオン引き出しにおいて電界遮蔽への電子の寄与が小さく、負イオン引出界面形成に対して負イオン密度が決定的な役割を果たすことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は核融合発電を実現する上で要となる中性粒子ビーム入射加熱装置の高性能化に関する研究である。核融合炉に必要とされる中性粒子ビームは1 MeVを超える高エネルギービームであり、プラズマに入射するまでに長距離輸送しなければならず、ビーム損失を抑えるために発散角の小さい良質のビームを生成することが最重要課題である。本研究では、ビームの広がりを決める初段の静電レンズである、負イオン引出界面の形状を制御する鍵となるプラズマパラメータが負イオン密度であることを初めて見出した。これにより、核融合炉用負イオン源に要求される低発散ビームの実現に向けて、研究開発への指針が明確になった。

研究成果の概要（英文）：In our recent study, it was clarified that the plasmas in negative ion sources for fusion consist of mainly positive and negative ions with small fraction of electrons. In this study, shielding effect of an applied electric field on ionic plasmas and mechanism of a meniscus formation were investigated by experiments and simulations. As a result, it was confirmed that the contribution of the electron to shielding of the applied electric field is minor, and that the negative ion density plays an important role for meniscus formation.

研究分野：ビーム光学、プラズマ計測

キーワード：負イオンビーム メニスカス 中性粒子ビーム 負イオン密度

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉(ITER)における負イオン源を用いた中性粒子入射加熱装置(NBI)の仕様と既存装置の実績値との間には、大きなギャップが存在するため、国際共同研究の下、個別の要素開発が行われてきた。これまでの開発研究により、耐電圧性能の向上、負イオン生成の定常化と高効率化には、一定の成果が上げられ、ITER-NBI の設計に反映されてきた。ところが、負イオンビーム集束性能だけは、未だに要求性能を達成する見通しを得ていない。欧州のグループが設計を検討し、負イオンビームの引き出し試験を行ってきたが、ITER 用 NBI のビーム発散角の仕様(7 mrad)に対して、達成値は3倍の 21 mrad が現状である。ビーム光学の設計では、プラズマから負イオンを引き出す界面の構造がビーム集束性能に大きな影響を与える。近年、電子による電界遮蔽が弱くなると、負イオン引出界面がプラズマ中に侵入することが数値計算と実験から明らかになってきたが、負イオン引出界面での物理過程は理解されていない(図 1)。そのため、負イオンビームの光学設計においても、正イオンビームの引出界面(ポームシース条件)がそのまま使われているのが現状である。したがって、ITER や原型炉に向けた負イオン源の性能向上のためには、電界遮蔽が弱まる電子極薄プラズマからの負イオン引出界面(負イオンシース)を決定するモデルを構築するなどして、現状を打開する必要があった。

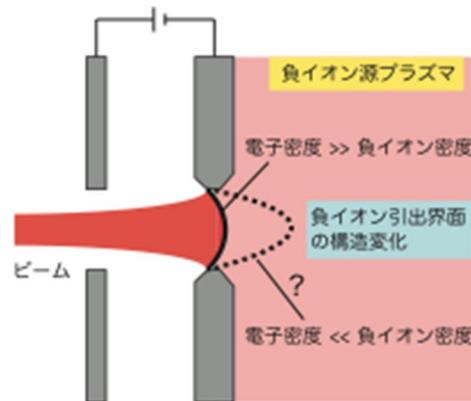


図 1. 負イオン引出界面(シース)の概念図。

### 2. 研究の目的

プラズマ加熱用水素負イオン源では、プラズマ放電室にセシウムを添加し、多数の引出孔が加工された金属電極表面の仕事関数を下げることで、金属表面で水素負イオンを生成する。セシウムの添加量を最適化することで、核融合科学研究所の開発用水素負イオン源(NIFS-RNIS)では  $10^{17} \text{ m}^{-3}$  を超える水素負イオン密度を達成している。この時、加速電極近傍のプラズマは主に正イオンと負イオンで構成されるイオン性プラズマになることが、研究代表者が所属する研究グループにより明らかにされている。NIFS-RNIS は、パワー密度が大型ヘリカル装置(LHD)で稼働しているプラズマ加熱用大型水素負イオン源(LHD-NNBI)に匹敵するものであり、プラズマ加熱用負イオン源においてもイオン性プラズマが実現していると考えられる。そこで、本研究では、電子が極僅かしか存在しないプラズマにおける、電界遮蔽の効果及び負イオン引出界面の形成に関わる物理機構を実験と計算により明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、LHD-NNBI と NIFS-RNIS を用いてビーム加速実験を行う。当初、プラズマ中の電子と負イオンの密度比を変化させて、表面波プローブを用いてシース長を計測する予定であったが、電源ノイズやプラズマからの熱入力により計測が困難であった。そこで、シース長を直接計測するのではなく、負イオン源の運転パラメータを適切に制御することにより、電子と負イオンの密度比及び負イオン引出界面の形状を変化させて、負イオン源プラズマパラメータと負イオンビーム幅を同時計測した。LHD-NNBI は、LHD プラズマの加熱に供される装置であり、ビーム計測装置は整備されているものの、イオン源プラズマを計測する装置は発光分光装置のみである。ただし、軽水素と重水素の負イオンを引き出し、加速できるという特徴を有している。一方、NIFS-RNIS にはビーム計測装置のみならず、水素負イオン密度をはじめとして各種プラズマパラメータを測定するための計測器が整備されているが、ビーム加速は軽水素のみ可能な仕様となっている。両装置の特徴を活かして、LHD-NNBI では負イオンビーム形成における、軽水素と重水素の相似と相違、つまり同位体効果を調べた。その方法は、バイアス電圧と呼ばれる、プラズマ放電容器と加速電極の間に印加する電圧を変化させて、ビーム幅の変化を調べるものである。これまでの研究から、バイアス電圧を変化させると、プラズマ粒子の構成比が変化することがわかっており、これにより負イオンと電子の比を能動的に制御できる。NIFS-RNIS では、バイアス電圧を変化させた時のプラズマパラメータとビーム幅の変化を同時に計測することで、負イオン引出界面の形成に決定的な役割を果たす、プラズマパラメータの同定を試みる。これにより、従来の負イオンビーム軌道計算で使用されてきたポームシースに基づく、負イオン引出界面形成の妥当性を議論できる。さらに、負イオンビームの位相空間情報(エミッタンス)の計測値を利用して、負イオンビームの軌道を加速器出口から入口にかけて逆方向に計算することで、ビーム引出界面における負イオン分布を明らかにする。

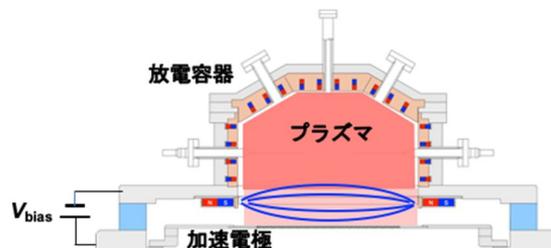


図 2. 水素負イオン源の断面図。

#### 4. 研究成果

図 2 に本研究で使用した水素負イオン源の断面図を示す。フィラメントを加熱して熱電子を放出させて、フィラメントと放電容器の間に印加した電圧で加速された熱電子が運転ガスと衝突することで雪崩的に電離を起こしてプラズマを生成する。放電容器内部には、一対の永久磁石により横磁場が形成されており、加速電極近傍のプラズマは低電子密度・低電子温度となる。これにより、加速器熱負荷の元となるビームに含まれる電子成分の低減と高速電子による負イオン崩壊の抑制を達成している。また、加速電極を放電容器に対して正にバイアスすることで電子密度を低減できることが実証されている。バイアス電圧を変化させることで能動的にプラズマ中の負イオンと電子の比を変化させて、ビーム光学の変化を調査した。図 3 に LHD-NNBI における実験結果を示す。軽水素放電と重水素放電において、引出電圧と加速電圧を固定したして様々な放電電力でバイアス電圧を変化させて、負イオンビームの幅を測定した。その結果、バイアス電圧を変化させるとビーム幅が変化し、放電電力によってビーム幅が最小となる最適バイアス電圧が変化することが明らかになった(図 3(a))。通常、イオン源の運転では、放電電力或いはガス圧力を変化させて、負イオン引出界面の形状が最適になるよう調整する。図 3(a) に示した結果は、従来、電子密度の制御ノブとして使用されてきたバイアス電圧が負イオン引出界面の形状を制御する新たなノブとして機能することを初めて実験的に示したものである。放電電力に依存してビーム幅の最小値が変化しているが、これは LHD-NNBI では多数のビームレットを引き出して1つのビームを形成しているため、放電電力によってプラズマの空間的な一様性が変化することで各ビームレットの最適条件が変化したためであると考えられる。また、図 3(b)に示したように、運転ガスを重水素にすると、各放電電力における最適バイアス電圧が軽水素に比べて 2 V 程度高くなること明らかになった。これは、重水素イオンの質量が軽水素イオンに比べて大きく、重水素放電ではプラズマ電位が高くなったためであると考えられる。

図 3 に示したように、バイアス電圧を変化させることで負イオン引出界面の形状を制御できることが明らかとなった。しかしながら、LHD-NNBI ではプラズマ計測装置が充実しておらず、バイアス電圧を変化させた時のプラズマパラメータとビーム光学の関係を調べることができなかった。そこで、NIFS-RNIS において、プラズマパラメータとビーム幅の同時計測を実施した。負イオン密度はキャピティリングダウン法で測定し、電子密度、電子温度、プラズマ電位は静電プローブで測定した。また、厚み方向の熱伝導率が幅方向に比べて大きな 1 次元炭素板にビームを照射し、炭素板の温度上昇を裏側から赤外線カメラで観察することでビーム幅を評価した。尚、この計測では各々のビームレットの断面が観察できるため、単一のビームレットの幅を評価した。図 4 に様々なバイアス電圧における静電プローブの正飽和電流と負飽和電流の比に対するビームレット幅の変化を示した。ここで、正飽和電流と負飽和電流の比は、負イオン密度と電子密度の比の指標となる。つまり、負電荷に占める負イオンの割合が高くなると 1 に近づき、電子の割合が高くな

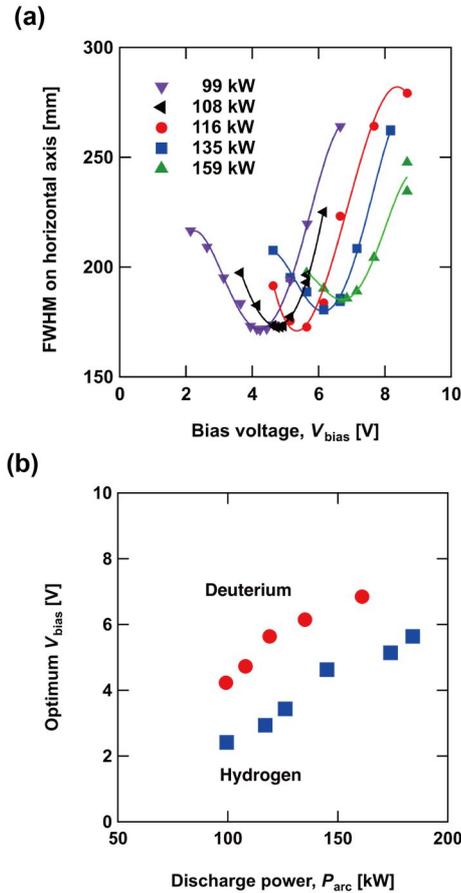


図 3. (a)様々な放電電力におけるビーム幅のバイアス電圧依存性と(b)ビーム幅が最小となるバイアス電圧の放電電力依存性。

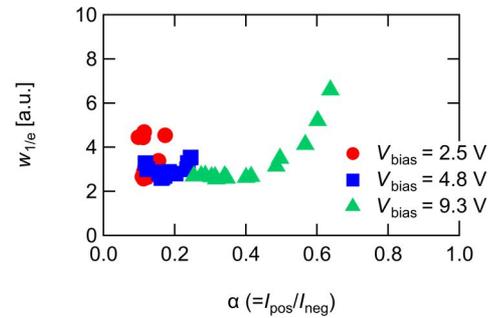


図 4. ビームレットの 1/e 半幅の負イオン/電子比依存性。

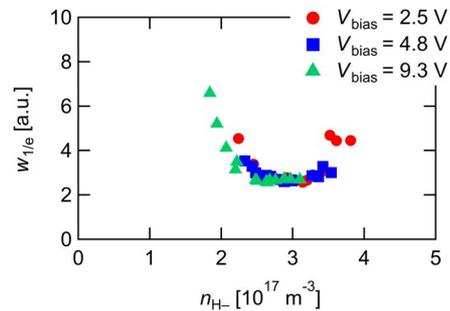


図 5. ビームレットの 1/e 半幅の負イオン密度依存性。

ると0に近づいていく。図4に示したように、負イオン/電子比が変化するとビームレット幅も変化し、ビームレット幅の最小値はバイアス電圧に依らず同じである。一方で、ビームレット幅が最小となる、負イオン/電子比はバイアス電圧に依存して変化する。次に、負イオン密度を横軸に取って、ビームレット幅の変化を見ると、ビームレット幅はバイアス電圧に依らず同じ曲線上を変化している(図5)。これは、負イオンビームの引き出しにおいては電界の遮蔽に対する電子の寄与が小さく、負イオン引出界面の形状を決定する重要なプラズマパラメータが負イオン密度であることを示唆している。また、これまで、LHDやITER用負イオン源の加速器の設計にはボームシースに基づく物理モデル、つまり、電子を水素負イオンに置き換えた物理モデルで負イオン引出界面を記述した計算コードが用いられてきたが、この実験結果はこの簡易モデルでも引出界面の形状がよく記述できる可能性も示唆している。一方で、研究代表者が所属する研究グループがビームレットのエミッタンスを計測した結果、ビームレットが3つのガウス成分で構成されることが明らかとなっている(参考文献)。従来、ビームレットは単一のガウス成分のみから構成されると考えられており、この結果はこの描像とはまったく異なる、新たな視点を与えるものである。そこで、エミッタンスの実測値をビーム軌道計算の入力(位置、速度)として加速器出口から入口に向けてビーム軌道を逆方向に計算した。その結果、3つのガウス成分が加速器入口の異なる場所から引き出されることが明らかになった(図6)。これは負イオン引出界面における負イオン分布の空間的不均一性を示しており、不均一性の原因を実験と数値計算の比較により明らかにすることで、界面形成のメカニズム解明に繋がるとともに、負イオン源加速器の最適化に向けた指針が得られることが期待される。

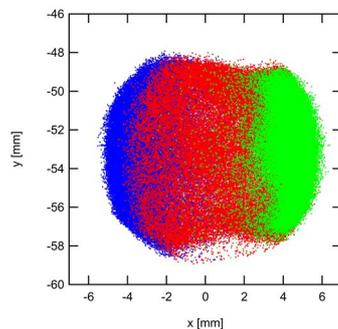


図6. 加速器入口におけるビームとして引き出された負イオンの空間分布。

#### <参考文献>

Yasuaki Haba *et. al*, 'Characterisation of negative ion beam focusing based on phase space structure', 22, 2020, 023017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

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) 10.1585/pfr.13.1205110	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 M., Nakano H., Tsumori K., Ikeda K., Masaki S., Haba Y., Fujiwara Y., Nagaoka K., Osakabe M.	4. 巻 91
2. 論文標題 Study of correlation between plasma parameter and beam optics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 23503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5131102	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Kisaki, K. Tsumori, K. Ikeda, H. Nakano, Y. Haba, Y. Fujiwara, S. Kamio, K. Nagaoka, and M. Osakabe
2. 発表標題 Effect of plasma grid bias on negative ion beam optics
3. 学会等名 17th International Conference on ion Sources (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Kisaki, H. Nakano, K. Tsumori, K. Ikeda, S. Masaki, Y. Haba, Y. Fujiwara, K. Nagaoka, M. Osakabe
2. 発表標題 Study of correlation between plasma parameter and beam optics
3. 学会等名 18th International Conference on Ion Sources (国際学会)
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
--	---------------------------	-----------------------	----