

生成負イオンのビーム集束制御に向けた小型負イオン源構築

日大生産工 ○波場 泰昭, 荒巻 光利

1. まえがき

負イオンを生成する装置は負イオン源と呼ばれ、負イオン源から引き出されたビームは負イオンビームと呼ばれる。高い電流密度 ($>100 \text{ A/m}^2$) の負イオンビームを生成するためには、負イオン源内の放電プラズマ領域で生成される負イオン (体積生成負イオン) に加えて、セシウムが添加された初段の電極 (プラズマ電極) の表面で生成される負イオン (表面生成負イオン) が必要となる。放電プラズマ領域にセシウムスパッタを行うことができる負イオン源はセシウム添加型負イオン源と呼ばれ、がん治療、素粒子実験、質量分析、核融合発電などに広く応用されている。

セシウム添加型負イオン源の開発で最も重要な課題の一つは、ビーム集束性を格段に向上させることである。核融合発電の実用化に向けて、良好な集束性を有する負イオンビーム (発散角 $3\text{-}7 \text{ mrad}$) が要請されているが、国際プロジェクトであるITER関連の負イオン源開発では、ビーム発散角 $14\text{-}16 \text{ mrad}$ の達成に留まっている¹⁾。負イオンビームの集束を困難にしている要因の一つは、負イオンビームの引出領域が、主たる負イオン生成領域と近接していることである。Fig. 1に示すように、体積生成負イオンは、プラズマ電極孔の中央領域から引き出されると考えられている。一方、表面生成負イオンには、プラズマ電極孔縁部から直接引き出される成分とプラズマ領域を経由した後に孔中央領域から引き出される成分とが混在することが示唆されている²⁾。また、負イオン源

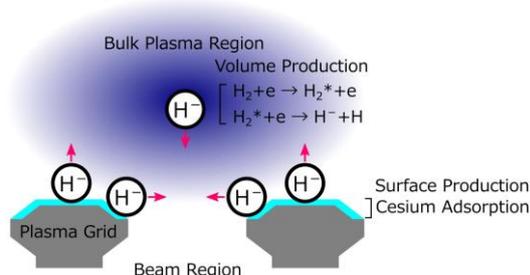


Fig.1 負イオンの生成と引出

には、負イオンが引き出されるのと同時に引き出される電子を除去するための磁場 (電子偏向磁場) が必須で、これも負イオンビームの集束性を劣化させる要因となる。負イオンビームが空間的に非対称な構造を有することは実験的に明らかにされており、上記の負イオン源特有の性質が影響していると考えられている³⁾。

講演者はこれまでに、核融合科学研究所の負イオン源から引き出されたビームの位相空間構造計測を行ってきた。単一の負イオンビームには複数の速度分布成分が内在しており、静電レンズ効果に依存して、各成分が位相空間上で大きく変動することが明らかにされた⁴⁾。しかし、各成分の起源は未解明の課題として残されている。最近の研究では、Fig.2に示すようなそれぞれの速度分布成分の全貌に基づき、各成分の含有率を実験的に評価する手法を提示した⁵⁾。含有率は、ビーム引出に至るまでの過程で決まり、プラズマ電極より下流に位置するビーム輸送過程では変化しない。したがって、ビーム引出に至るまでの過程で決まるパラメータを走査することで、各成分の起源が同定される可能性が大いにある。

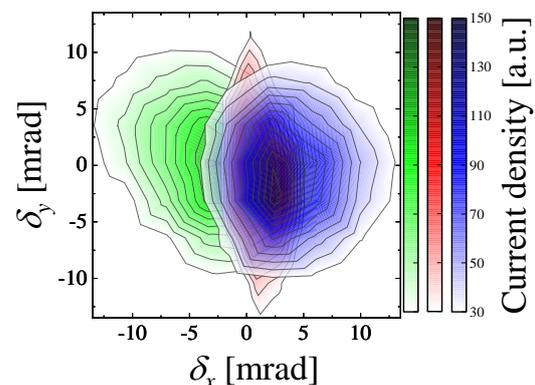


Fig.2 セシウム添加型の負イオン源から引き出されたビームを構成する複数の速度分布成分

2. 実験結果および検討

Setup of a compact negative ion source toward controlling beam divergence of surface produced negative ions

Yasuaki HABA, and Mitsutoshi ARAMAKI

本研究では、表面生成負イオンを起源とするビーム成分の集束特性を速度分布関数に基づいて実験的に評価するために、生産工学研究所でセシウム添加型の負イオンビーム実験装置を構築する。当該装置は、単孔から引き出された負イオンビームの速度分布を高い分解能で実験的に評価するために設計された。Fig.3に示すような、負イオン源内で純水素放電プラズマを生成し、生成された負イオンを静電的に加速させてビームとして引き出す。ビームライン上に速度分布情報を取得するための計測器を取り付ける。講演者は先行研究で角度分解能 2.4 mrad の位相空間構造計測器を用いて負イオンビームの計測を行ってきたが、本研究で新たに開発するビーム計測器はより高い角度分解能 (0.1-1 mrad) を実現する。本講演では、当該装置の開発状況を報告するとともに、本研究で遂行する今後の計画について紹介する。



Fig.3 生産工学研究所で開発中の負イオンビーム実験装置

3. 提案手法

負イオンビームに内在する複数の速度分布成分の起源を同定するために、本研究では以下に示す三つの段階で構成されたビーム計測実験を提案する。第一に、負イオン源内で純水素放電プラズマを生成し、セシウムフリーの状態、体積生成を起源とする負イオンのみで構成されたビームを引き出す。これにより、体積生成負イオンの速度分布関数の実験的な評価が可能となる。第二に、負イオン源内でセシウムスパッタを行い、体積生成を起源とする負イオンと表面生成を起源とする負イオンとから構成されたビームを引き出す。これにより、負イオンの生成起源と速度分布関数との関係を実験的に評価する。第三に、プラズマ電極孔の幾何構造を変化させて、ビームを引き出す。プラズマ電極孔の幾何構造がビーム発散角に与える影響を調査した先行研究はなく、本研究が初の試みである。

4. 実験方法および測定方法

ビーム速度分布の計測方法をFig.4に示す。当該計測器は、Ta製ピンホールアレイとカプトン箔で構成される。各ピンホールを通過したビーム成分が一定距離 L だけ走行した後にカプトン箔に入射されることで、箔上にビーム照射痕が記録される。各ピンホールの位置 (x_{mn}, y_{mn}) に対する各照射痕の位置 (X_{mn}, Y_{mn}) に基づき、ビーム径方向の速度分布が次式で評価される。

$$(\delta x_{mn}, \delta y_{mn}) = \left(\frac{X_{m,n} - x_{m,n}}{L}, \frac{Y_{m,n} - y_{m,n}}{L} \right)$$

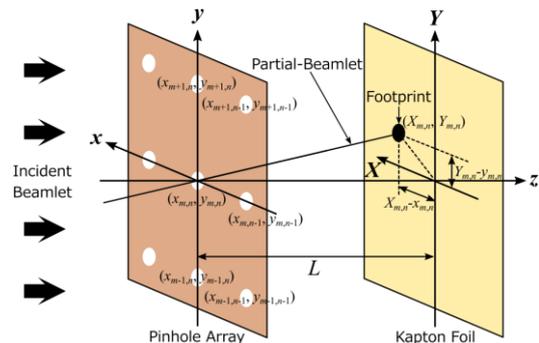


Fig.4 ビーム速度分布の計測方法

5. まとめ

生産工学研究所で、負イオンビーム集束性の向上に貢献する装置を開発している。本講演では、当該装置の開発状況と、今後の研究計画について紹介する。

参考文献

- 1) U. Fantz et al., "Negative Hydrogen Ion Sources for Fusion: From Plasma Generation to Beam Properties", *Frontiers in Physics*, **9**, 709651 (2021)
- 2) S. Mochalsky et al., "Beam formation in CERNs cesiated surfaces and volume H⁻ ion sources", *New J. Phys.*, **18** 085011 (2016)
- 3) A. Hurlbatt et al., "First direct comparison of whole beam and single beamlet divergences in a negative ion source with simultaneous BES and CFC tile calorimetry measurements", *AIP Advances*, **11**, 025330 (2021)
- 4) Y. Haba et al., "Characterisation of negative ion beam focusing based on phase space structure", *New J. Phys.*, **22**, 023017 (2020)
- 5) Y. Haba et al., "Abundance ratio of multiple velocity distribution components in a single negative ion

beamlet produced by a cesium-seeded negative ion source”, *AIP Advances*, **12**, 035223 (2022)