

水素負イオン源におけるプラズマメニスカス
および電位構造に関する研究

2025 年度

林 克哉

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	林 克哉
主 論 文 題 名： 水素負イオン源におけるプラズマメニスカスおよび電位構造に関する研究				
(内容の要旨) 加速器、がん治療装置、核融合プラズマ加熱などの最先端技術に用いられる水素負イオン源では、壁表面における負イオン生成（以下、表面生成）を利用した場合、引き出された負イオンビームの収束性が低下することが課題となっている。負イオン源におけるビーム収束性は、ビーム引き出し孔近傍の電位構造と、それにより形成されるビーム発生面であるプラズマメニスカス（以下、メニスカス）に強く依存する。負イオン源におけるメニスカスは、負イオンを引き出す外部電場とプラズマによるその遮蔽に加え、電子より負イオンが主要な負電荷粒子となるイオン性プラズマの物理特性に強く依存する。そのため、従来の正イオン源におけるメニスカスとは異なる特性を持つ可能性があるが、その理解は十分ではない。そこで本研究では、三次元静電粒子シミュレーションを用いて、負イオン源における電位構造の形成と、それがメニスカスに与える影響を明らかにすることを目的とする。 第1章は序論であり、研究背景ならびに本論文の目的と意義についてまとめている。 第2章では、負イオン源内部のプラズマと電位分布を解析する三次元静電粒子モデルについて説明している。負イオン源内で生成されたプラズマをソースとして仮定し、ビーム引き出し孔近傍を解析領域として、荷電粒子の運動方程式とポアソン方程式を自己無撞着に解くことで、メニスカスを含むプラズマの挙動および電位分布を解析する。 第3章では、ソースプラズマ密度を変化させた解析結果に基づき、電位構造およびメニスカス位置・形状のプラズマ密度依存性について議論している。負イオン源では、プラズマ密度に応じて負イオン生成量が増加し、それに伴って内部の電位構造も変化するため、正イオン源と同一の電位分布に基づく評価手法ではメニスカス位置の評価が困難であることを示した。そこで、代替手法として正イオン密度分布に着目し、これを用いてメニスカス位置を推定した結果、プラズマ密度の増加に伴いメニスカスはビーム引き出し方向へ移動し、正イオン源と同様のプラズマ密度依存性を示した。 第4章では、プラズマ密度を固定した条件下で表面生成量を変化させた解析を行い、電子密度に対する負イオン密度の比αをパラメータとして、メニスカスへの影響を議論している。表面生成量の増加によりαが増加すると、プラズマ電極近傍における電位構造が変化し、メニスカス位置が移動することを示した。さらに、この挙動を理解するために、正イオン源におけるメニスカスの理論モデルを負イオン源へと拡張し、理論的にもαの変化によりメニスカス位置が移動することを示した。 第5章では、これまでの結果を踏まえ、負イオン密度と電位構造の関係に着目して、負イオン源内部の物理特性について議論している。負イオン密度分布と電位分布の関係から、負イオン源内のプラズマを、(Ⅰ)負イオン密度がボルツマン関係式に従う領域、(Ⅱ)正イオン密度がボルツマン関係式に従い、かつ負イオン密度と準中性条件を満たす領域、(Ⅲ)プラズマ領域から加速領域への遷移領域、(Ⅳ)加速領域、の4つの領域に分類できることを明らかにした。各領域を支配する物理機構と電位構造の関係から、領域(Ⅲ)と領域(Ⅳ)との境界、もしくは領域(Ⅲ)自体が負イオン源におけるメニスカスに相当する可能性を示した。 第6章では、各章で得られた結果を総括し、本論の結論および今後の展望を述べている。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Katsuya Hayashi
Thesis Title Study of Plasma Meniscus and Electric Potential Structure on Negative Hydrogen Ion Source			
Thesis Summary Negative Hydrogen ion sources are essential for accelerators, cancer treatment devices, and fusion plasma heating. While surface-produced negative ions, generated on the electrode surface, enhance extracted beam intensity, they tend to degrade beam optics. The optics is governed by the electric potential structure near the extraction hole and the resulting beam emitting surface, the plasma meniscus. These structures are strongly affected by the positive extraction voltage, its shielding by the ion-ion plasma (consisting mainly of positive and negative ions), and the specific physical properties resulting from the dominance of negative ions. Consequently, the meniscus may exhibit characteristics distinct from those in conventional positive ion sources; however, its behavior remains not fully understood. The purpose of this study is to clarify the formation of the electric potential structure in ion-ion plasmas and its effect on the plasma meniscus using a three-dimensional electrostatic particle simulation. Chapter 1 introduces the background, purpose, and significance of this study. Chapter 2 describes the 3D electrostatic particle model. This model calculates plasma dynamics and potential structures by solving the equation of motion and Poisson's equation self-consistently, assuming plasma injection from the upstream region. Chapter 3 demonstrates the dependence of the potential structure and plasma meniscus on plasma density. Calculations reveal the limitations of using the theoretical model for positive ion sources, mainly due to density-dependent negative ion production modifying the potential structure. Alternatively, the meniscus position was determined from the positive ion density profile. The meniscus moves toward the extraction direction with increasing plasma density, showing a similar trend to positive ion sources. Chapter 4 discusses the influence of the ratio α (negative ion to electron density) at a fixed plasma density. Increasing α via enhanced surface production alters the potential structure near the plasma grid and shifts the meniscus position. Since this dependence is unpredictable by the positive ion source model, we developed a theoretical model incorporating negative ions, demonstrating that the meniscus position depends on α. Chapter 5 analyzes the relationship between negative ions and the potential structure in detail. Analysis of the internal distributions reveals that the plasma is classified into four regions: (I) the region where negative ions follow the Boltzmann relation, (II) the region where positive ions follow the Boltzmann relation and satisfy quasi-neutrality with negative ions, (III) the transition region, and (IV) the acceleration region. Based on the physical mechanisms linked to the potential structure, the boundary between Region (III) and Region (IV) likely corresponds to the meniscus. Chapter 6 summarizes the conclusions of this thesis.			