

別紙 4

報告番 -	※ 甲 第 号
----------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 負イオンビーム集束性に関する研究
氏 名 波場 泰昭

論 文 内 容 の 要 旨

近年、水素負イオンビームの応用は、半導体デバイス製造産業、医療用小型ビーム加速器、高エネルギー粒子加速器、核融合プラズマ加熱用ビーム加速器など、広がりを見せている。核融合炉は、次世代のエネルギー源として期待されている。現在の磁場閉じ込め型核融合プラズマ実験では、高エネルギー (>100 keV) を持つ中性ビーム入射により加熱・電流駆動されるため、高エネルギー領域でも荷電変換が容易な水素負イオンビームが必須である。

負イオンビームは、負イオン源と呼ばれる装置で、プラズマ中の負イオンが静電加速されることで生成される。日本では量子科学技術研究開発機構那珂研究所と核融合科学研究所で、セシウム (Cs) 添加型直流アーク放電方式負イオン源が開発され、ともに良好なビーム集束性 (5 mrad) が達成されている。他方、日本も参加する国際プロジェクトの国際熱核融合実験炉 (ITER) では、長パルス幅 (10³ s オーダ) の運転が求められ Cs 添加型高周波 (RF) 放電方式負イオン源が採用され、ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所を中心に開発が進められてきた。しかし、ビーム集束性が ITER の仕様に対して 3 倍以上悪く、その改善が核融合炉実用化に向けて急務の課題となっている。

イオン源内プラズマからイオンビームを引き出す場合、プラズマ領域とビーム領域との界面 (メニスカス) がビーム光学系で初段のレンズ効果を担うと考えられている。一般に、負イオン源では電子ビーム除去を目的とした磁場が存在する。さらに、Cs 添加型負イオン源では負イオン生成領域がメニスカスに隣接することによる負イオン流束の不均一性が存在する。しかし、このような負イオン源特有の性質がビーム集束

に与える影響が明らかにされていないため、ITER 用負イオン源のビーム集束性を改善する目処が得られていない。この背景を踏まえて、本研究では、単一孔から引き出されるビーム（ビームレット）の集束特性を調べることで、Cs 添加型直流アーク放電方式負イオン源のビーム集束性の劣化メカニズムの解明に挑んだ。

まず、高時間分解能を有するビームレット計測器を開発し、それを用いてイオン源プラズマの時間変動に対するビーム集束性の応答を調べた。イオン源内プラズマと負イオンビームレットの同時計測を行い、ビームレット幅の変動だけでなく、軸の変動も観測した。このことから、イオン源内プラズマの変動に対するメニスカスの応答を経て、ビーム集束性の劣化が起こることを指摘した。

次に、ペッパーポット方式の位相空間構造計測器を開発し、それを用いて位相空間構造（ビーム進行方向に垂直な方向の位置と速度の空間構造: $f(x, y, v_x, v_y)$ ）を計測した。その結果、負イオンビームレットが3つの速度成分から構成されることを見出した。さらに、ビーム集束性を変化させて各成分の変化を解析したところ、各成分の垂直方向の広がりだけでなく、各成分の軸の互いに逆行する変位が負イオンビームレット全体の集束性を劣化させることを明らかにした。

以上のように、本研究では、ビーム物理の視点から、Cs 添加型直流アーク放電方式負イオン源のビーム集束性の劣化メカニズムを実験的に二つ示した。これらは、ITER 用 RF 放電方式負イオン源のビーム集束性でも重要となることを指摘した。