

氏 名 馬 場 隆

学位（専攻分野） 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第574号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 タンデム加速器用高輝度連続負イオン入射器の開発研究

論文審査委員 主査教授 柴田 徳思
教授 平松 成範
教授 森 義治
教授 山崎 良成
助教授 野口 修一
教授 畑中 吉治 (大阪大学)

題目 「タンデム加速器用高輝度連続負イオン入射器の開発研究」

タンデム型静電加速器は数十 MeV 以下の MeV オーダーのエネルギー領域をカバーし、古くから新素材開発研究等のイオン注入装置や RBS・PIXE 等の分析装置として利用されている。一般的にタンデム加速器から得られるビーム電流は Cu ビームで $50 \mu\text{A}$ 程度であるが、いずれの応用においてもこのビーム電流の増強に対しては強いニーズがある。タンデム加速器の場合、ビーム電流の増大は、入射負イオンビーム電流強度の増大が必要不可欠であり、大強度の負イオン源が望まれる。1988 年にパルス動作のプラズマスパッタ型負イオン源：BLAKE-II が開発され、大強度パルスビームが得られるようになったが、直流動作での性能は未知数であった。しかし、大面積のスパッタターゲットをプラズマで一樣にスパッタしビームを発生する点など、大電流発生の大きな可能性が考えられたので、プラズマスパッタ型負イオン源の直流化を目指した。本研究では、プラズマスパッタ型負イオン源の直流化と、直流化したイオン源を用いたタンデム加速器用高輝度連続負イオン入射器の開発を行ったので、これを報告する。

第一章では、パルス動作のプラズマスパッタ型負イオン源の構造と動作について整理し、得られている負イオンビーム電流と従来使用している負イオン源の比較を行った。従来タンデム加速器に用いられていたセシウムスパッタ型負イオン源から得られる Cu 負イオンビーム電流は $150 \mu\text{A}$ 程度あるのに対し、プラズマスパッタ型負イオン源のパルスビームのピーク電流は 10mA という非常に大きな値であった。

第二章では、実際に製作した負イオンビーム生成装置について述べる。開発した装置は 2MV のターミナル電圧で最大 1mA のビームを発生するタンデム加速器のインジェクターとして設計製作し、現在はタンデム加速器の一部として物質・材料研究機構で稼働している。タンデム加速器の全体構成を説明し、開発した負イオンビーム生成装置の全体構成を示した。

次に負イオン源の構造を示し、プラズマスパッタ型負イオン源の直流動作について議論した。パルス動作と直流動作では、スパッタターゲット表面の負イオン生成過程が異なるが、これを負イオン表面生成モデルを用いて説明し、負イオン生成率を増やすためには表面のセシウム厚みを制御し仕事関数をさげることが重要であることを示した。実際の装置では、スパッタターゲットをある値に固定したときのセシウムオープン温度の変化による負イオンビームの変化のデータを得て、セシウム供給の増大により、仕事関数を下げ、高強度の負イオンビームを得ることが出来ることがわかった。そこで、セシウム供給の増大をねらい、セシウム供給ラインのコンダクタンスを約 10 倍に高くし、またセシウムのイオン源内壁での余分な消費を防ぐためにモリブデン製のライナーを組み込んだ。この結果、 25mg/hr 程度のセシウム消費量で、 5mA の直流 Cu 負イオンビームを得ることが出来た。

次に、プラズマスパッタ型負イオン源のエミッタンスについて、スパッタリングによるエネルギー分散と負イオン源の幾何形状で決まると考え、モデルを示した。このモデルからスパッタターゲットを小さくすればエミッタンスを小さくできると考えられたので、実際の装置でエミッタンス測定したところ、スパッタターゲットのサイズに比例してエミッタンスが変化することを確認することが出来た。さらに、エミッタンスで電流分布が一様とすると負イオン電流はエミッタンスの二乗に比例するので、これから負イオン電流は負イオン源形状によってある程度大きく出来ると考えられる。まず、スパッタターゲット形状が平面の場合に比べて球面の方がより多くの負イオン電流が得られると考えられたので、それぞれの形状でビーム電流の計測を行い、球面形状の場合、平面形状に比べて 2.15 倍の負イオン電流が得られることがわかった。また、スパッタターゲットとイオン源出口間距離を小さくすれば、その二乗に反比例してビーム電流を増やすことが出来ることがわかった。

また、プラズマスパッタ型負イオン源で生成した高輝度のビームを引き出すためにコンパクトな二段加速の引き出し系を考案した。さらに引き出した負イオンビームを安定に輸送するためにレンズエレメントとして磁場型 Q レンズを採用し、特に非常にコンパクトで電源が不要になる可変磁場型永久磁石 Q レンズを採用した。これらについて、ビーム光学設計と磁場設計、磁場測定結果を示した。

以上の個々の要素を組み込んだ負イオンビーム生成装置から最終的に 4mA の Cu 負イオンビームを得ることが出来た。

第三章では、スパッタターゲット表面のシース部で空間電荷制限電流を越えて負イオンビームが得られていることについて議論した。プラズマからの正イオンとスパッタターゲットからの負イオンとで空間電荷の中和が起こっていると考えられ、正イオンと電子、負イオンの三つの粒子で構成されるシースモデルを作り、ポアソン方程式からシースの電位分布を計算した。これから、負イオン比率が高くなるにつれてシース長さが短くなり、空間電荷制限電流が増加することが新たな知見として得られた。

第四章は結論として、得られた最終結果を述べている。負イオン入射器からは最大 4mA の Cu 負イオンビームを得ることが出来、また、この負イオン入射器を用いた 2MV タンデム加速器では、最大 1mA の Ni 正イオン(二価)ビームを得ることが出来ている。この値は従来のタンデム加速器から得られるビーム電流に比べて 20 倍程度大きな値であり、タンデム加速器を用いた新素材開発のスピードアップや新領域の開拓に貢献している。

タンデム型静電加速器は数十 MeV より低いエネルギー領域をカバーし、古くから新素材開発研究等のイオン注入装置や RBS・PIXE 等の分析装置として利用されている。得られているビーム電流は Cu ビームで $50 \mu\text{A}$ 程度であるが、いずれの応用においてもビーム電流の増強が望まれている。これには大強度の負イオン源が望まれる。1988 年にパルス動作のプラズマスパッタ型負イオン源 (BLAKE-II) が KEK で開発され、大強度パルスビームが得られるようになったが、直流動作での性能は未知数であった。馬場隆氏は、この方式の持つ大電流発生の大きな可能性に着目し、これまで困難とされていたプラズマスパッタ型負イオン源の直流化を目指した研究を行った。そして、開発した直流化プラズマスパッタ型負イオン源を用いたタンデム加速器用高輝度連続負イオン入射器の開発を行った。

第一章では、パルス動作のプラズマスパッタ型負イオン源の構造と動作について整理し、過去に得られているパルス負イオンビーム電流との比較がなされている。

第二章では、負イオン源の構造を示し、プラズマスパッタ型負イオン源の直流動作について考察されている。パルス動作と直流動作では、スパッタターゲット表面の負イオン生成過程が異なるが、これを負イオン表面生成モデルで説明し、負イオン生成率を増やすためには表面のセシウム厚の制御が重要であることを示した。

実際の装置で、セシウムオープン温度の変化による負イオンビーム強度の変化を測定し、セシウム供給の増大により、高強度の負イオンビームの得ることを示した。セシウム供給ラインのコンダクタンスを約 10 倍に高くし、セシウムのイオン源内壁での消費を防ぐためにモリブデン製のライナーを組み込んだ結果、 25mg/hr 程度のセシウム消費量で、 5mA の直流 Cu 負イオンビームを得ることを実験的に示した。

スパッタターゲットの形状の考察を行い、スパッタターゲットのサイズに比例してエミッタンスが変化すること、球面形状が平面形状に比べて 3.8 倍の負イオン電流が得られること、さらに、ビーム電流がスパッタターゲットとイオン源出口間距離の二乗に反比例することを実験的に示した。

プラズマスパッタ型負イオン源で生成した高輝度のビームを引き出すためのコンパクトな二段加速の引き出し系、負イオンビームを安定に輸送するための磁場型 Q レンズを用いたビーム光学系の開発を行った、特に非常にコンパクトで電源不要の可変磁場型永久磁石 Q レンズを開発した。

第三章では、正イオンと電子、負イオンの三つの粒子で構成されるシースモデルを作り、ポアソン方程式からシースの電位分布を計算した。これから、負イオン比率が高くなるにつれてシース長が短くなり、空間電荷制限電流が増加するという新たな知見を示した。第四章は結論である。

以上本研究では、開発研究した直流負イオン入射器を用い、数多くの大強度の直流負イオンビームの生成に成功した。例えば、直流 Cu 負イオンビームでは最大 4mA が得られている。さらに、この負イオン入射器を用いた 2MV タンデム加速器では、例えば、最大 1mA の Ni 正イオン(二価)ビームを得ることを実証した。この値は従来のタンデム加速器から得られるビーム電流に比べて 20 倍以上という大きな値である。このタンデム加速器を用

いることにより、新素材開発のスピードアップや新領域の開拓に大きく貢献するものと思われる。

本論文により得られた手法と知見は専門的にも極めて優れた研究であると認められる。従って、以上の研究は数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文としてふさわしい内容を持つものであると判断した。