

氏名 奥 山 利 久

学位（専攻分野） 博士（工学）

学 位 記 番 号 総研大甲第4号

学位授与の日付 平成4年 3月16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 体積生成負水素イオン源におけるセシウム効果の研究

論文審査委員 主 査 教 授 木 村 嘉 孝
教 授 木 原 元 央
教 授 水 町 芳 彦
教 授 小 方 厚
(高エネルギー物理学研究所)

教 授 小 林 正 典
(高エネルギー物理学研究所)

教 授 福 本 貞 義 (筑波大学)

助教授 森 義 治

論文内容の要旨

体積生成型の負水素イオン源に微量のセシウム蒸気を注入すると、ビーム強度が著しく増加することがわかってきた。体積生成型の負水素イオン源では、プラズマ中における励起水素分子と電子の解離性付着反応を利用して負水素イオンを生成する。このため、現在加速器のイオン源として使用されている表面生成型の負イオン源とは異なり、基本的にはセシウムの供給を必要とせず、加速器がセシウムによって汚染されることがない。したがって、体積生成型の負水素イオン源において微量のセシウムを注入するだけでビーム強度が増加することは、セシウムによる汚染がほとんど無い状態で表面生成型のイオン源に匹敵する高強度の負水素イオンビームが得られる可能性があり、加速器への応用を考えるに、極めて注目すべき現象である。しかしながら、何故ビーム強度が増加するかは明らかにされてはいない。したがって、その原因と基礎過程を明らかにすることは非常に大切なことである。そこで、本研究では、次の2つの研究によって、セシウム注入時にビーム強度の増加をもたらす負水素イオンの生成機構の解明を行った。

- (1) 体積生成型の負水素イオン源を利用して、セシウム効果に寄与している負水素イオン生成過程を特定する研究
- (2) セシウムを吸着させたモリブデン表面から離脱する熱運動速度の水素原子 (H^0) および低エネルギーの水素イオン (H^+ , H_2^+ , H_3^+) による負水素イオンの表面生成の研究

開発した体積生成型の負水素イオン源に、約20分間セシウム蒸気を注入した結果、ビーム強度はセシウム注入前と比較して4倍以上増加した。そこで、(1)の研究として、まずセシウム注入時のプラズマ電極の仕事関数の変化を測定し、ビーム強度増加との相関関係を調べた。その結果、表面の仕事関数が低下するとビーム強度が増加することがわかった。つまり、イオン源の内面にセシウムが吸着してこの表面の仕事関数が低下することによって、ビーム強度が増加していることがわかった。次に、アルゴンプラズマによるスパッタリングによって、プラズマ電極に吸着したセシウムのみを除去した時の負水素イオンビーム強度の変化を調べることによって、どの表面に吸着したセシウムが寄与しているかを調べる実験を行った。その結果、プラズマ電極のセシウムのみを除去するだけで、ビーム強度はセシウム吸着前の値である3 mAに戻った。これによって、プラズマ電極における負水素イオンの表面生成過程がセシウム効果の主因であることがわかった。この過程では、プラズマ中の水素原子や水素イオンが仕事関数の低下したプラズマ電極にあたって散乱する際に、表面との相互作用によって出てくる金属中の電子を捕獲して、負水素イオンになる。したがって、この時の負水素イオン

の生成効率を把握できれば、セシウム注入時のイオン源中における負水素イオン生成量を評価することができる。しかしながら、イオン源中の水素原子や水素イオンのエネルギーに対応する10 eV以下の低いエネルギー領域での負水素イオンの表面生成は、これまではほとんど研究されていない。

そこで、次に(2)の研究によって、表面生成による負水素イオンの生成効率を直接測定することにより、体積生成型の負水素イオン源のプラズマ電極表面における負水素イオン生成量を評価した。また、理論式との比較も行った。

まず、熱運動速度の水素原子からの表面生成による負水素イオン生成効率を求める実験を行った。実験では、水素解離器で発生させた約1250 Kの水素原子を、セシウムを吸着させたターゲット表面に入射させた。そして、ターゲットに入射している水素原子のフラックスとファラディカップで測定した負水素イオンの生成量から、負水素イオン生成効率を求めた。測定の結果、負水素イオン生成効率は、仕事関数 $\phi = 2.1$ eVの表面において 2.5×10^{-4} であった。この結果は、Blandin らによって提案された負水素イオン生成効率式から得られる理論値、 1.1×10^{-4} とオーダー的に一致する。

さらに、負水素イオンの生成効率の表面の仕事関数に対する依存性と水素原子の速度に対する依存性も測定した。その結果、仕事関数の変化に対する負水素イオンの生成効率の変化の実験値と理論計算値はよく一致した。また、水素原子の速度の変化に対する負水素イオン生成効率の変化の実験値も、理論値と比較するとその変化量は小さいものの、定性的な傾向は一致した。以上の結果、Blandin らによって提案された負水素イオンの生成効率式は、低エネルギー領域でも有効であることがわかった。

次に、低エネルギーの水素イオンからの表面生成による負水素イオンの生成効率を求める実験を行った。この実験では、イオン源で発生させた水素イオンを、表面に垂直な方向のエネルギーを約1 eVにして、ターゲット表面に入射させた。実験の結果、水素イオンからの負水素イオンの生成効率は、 $\phi = 2.1$ eVの表面において、 H^+ イオンでは 1.4×10^{-2} 、 H_3^+ イオンでは 2.9×10^{-2} であった。しかしながら、 H_2^+ イオンについては、ほとんど負水素イオンの生成が測定されなかった。表面に入射するイオンのエネルギーが低いために、 H_2^+ イオンは入射時にオージェ電子を捕獲すると安定な水素分子になるためと考えられる。

(2)の実験の結果をもとに、セシウムが吸着したプラズマ電極表面で水素原子と水素イオンから生成される負水素イオン量を算出し、ビーム強度増加への寄与を評価した。体積生成型の負水素イオン源中の水素原子($T = 0.5$ eV)は、その存在量が 1×10^{14} atoms/cm³以上と多量である。このため、水素原子からの負水素イオン生成効率は低いにもかかわらず、電流値に換算して200 mA/cm²

もの負水素イオンがプラズマ電極表面で生成されていると見積られる。この値は、負水素イオンのプラズマ中での消滅等を考慮しても、ビーム強度の増加を十分説明できる値である。一方、水素イオンからの負水素イオン生成量は、プラズマ中の水素イオンの密度が水素原子よりも2桁以上低いため、プラズマポテンシャルを1 e Vと仮定すると、数mA/cm²ぐらいの電流値にしかない。この結果、セシウム注入時にビーム強度が増加する原因は、セシウムが吸着して仕事関数が低下したプラズマ電極表面で、この表面にあたるプラズマ中の水素原子が表面生成で負水素イオンになるためであると結論づけられる。

論文の審査結果の要旨

負水素イオンを発生する方法として、表面生成法と体積生成法の二つがある。前者は、水素プラズマ中にコンバーター電極を配置し、電極表面を正水素イオンでスパッタする。この際電極表面に予めセシウムを吸着させて表面の仕事関数を十分小さくしておくこと、表面から散乱する水素原子やイオンにコンバーター金属中の電子が付着し、負水素イオンとなる。一方後者においては、プラズマ中で高い温度（5 eV以上）の電子によって水素イオンを発生する。大量にセシウムを使う表面生成型に比べ体積生成型ではセシウムによる後段加速器の汚染などがなく、より理想的である。しかし体積生成型には大きなイオン電流が得られないという欠点がある。一方最近この体積生成型の装置に極く微量のセシウムを注入するとイオン電流を大巾に増やせることが分かってきた。

今回奥山利久君が博士論文として行った研究は、この体積生成イオン源におけるセシウムの効果を分析し、イオン電流が増加する機構を解明したものである。同君は、まずいろいろな条件でのセシウム注入実験を行い、イオン電流の増加が、イオン引出し孔周辺に付着するセシウムによる表面生成効果であることを突き止めた。次いで金属表面において水素原子と正水素イオンが負水素イオンに変る過程を実験的かつ理論的に調べ、体積生成型負水素イオン源におけるセシウム効果を定量的に評価した。これは従来知られていなかった結果であり、この研究によって微量のセシウムを注入するタイプの体積生成型負水素イオン源について正確な性能予測に基づく装置の設計・製作が可能となり、実用化への道を開くことになった。

以上のように奥山利久君の論文は、負水素イオン源について極めて重要な結果を含んでおり、研究課題の提案、それに関する実験的、理論的取り組み、さらには結論へ向けての研究の展開とまとめまで、数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文として相応しい内容を有していると判断した。