

負水素イオンビームの電子銃を用いた荷電変換に関する研究 CHARGE EXCHANGE METHOD OF H- BEAM BY ELECTRON BEAM

岡部晃大[#]

Kota Okabe [#]

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

One of the important research themes for further enhancement of the proton accelerator is the advancement of the charge exchange injection method. At present, the charge exchange injection method in the high-intensity proton accelerator facility currently in operation mainly uses the charge exchange foil. However, this method has a problem in that activation of the around the charge exchange injection point due to beam scattering by the foil and neutrons generated from the foil. In order to solve this problem, new charge exchange injection methods such as laser charge exchange method are being researched in accelerator facilities around the world. In this research, we focus on the charge exchange method using electron beams and proceed with the basic experiments. In this presentation, we will report the progress of the charge exchange efficiency measurement of negative hydrogen ion beam using electron beam.

1. 序論

1.1 背景

日本における J-PARC 3 GeV シンクロトロン(RCS)や米国 SNS、英国 ISIS などの大強度陽子加速器では、大強度の陽子ビームをリング加速器に入射する有効な手法として荷電変換薄膜を用いた荷電変換ビーム多重入射方式を採用している。一般的なビーム入射方式では様々な要因によるビーム損失が発生するため残留線量は極めて高くなる。その一方で、荷電変換入射方式ではビーム損失がほとんど生じないと考えられてきたため、ビーム入射部放射化の要因としては着目されてこなかった。しかしながら、近年、J-PARC RCS における系統的なビーム試験の結果、荷電変換入射による加速器機器の放射化メカニズムは一般的なビーム損失によるものと異なっていることが判明した[1]。入射ビーム、およびリング周回ビームと荷電変換薄膜との核反応によって生成される 2 次粒子が荷電変換入射による放射化に大きく寄与

していることが分かった(Fig. 1)。

この結果から、従来の荷電変換薄膜を用いた荷電変換入射方式では、入射部周辺の放射化は本質的に避けられないことが明らかとなった。従って、荷電変換膜を使用しない入射方式の実現は次世代大強度加速器実現に向けて大きな課題となっている。

荷電変換膜の代わりに高強度レーザーを使用する荷電変換入射の研究は世界各地で進められている[2]が、今現在、電子ビームを使用する荷電変換入射方式の開発は手が付けられていない状況である。電子ビームは高強度レーザーよりもメンテナンスや制御が簡単であるため、電子ビームを用いた荷電変換入射方式が実現できれば、核反応に起因する加速器機器の放射化は原理的に発生しなくなり(Fig. 1)、次世代大強度加速器開発の道が開ける。ところが、現在のところ、電子ビームによる H-ビームの荷電変換反応断面積は数 100 eV 程度の低エネルギー領域でしか測定されていない[3]。そのため、通常、大強度加速器においてリング加速器の入射エネルギーとして採用されている数百 MeV 以上の反応断面積

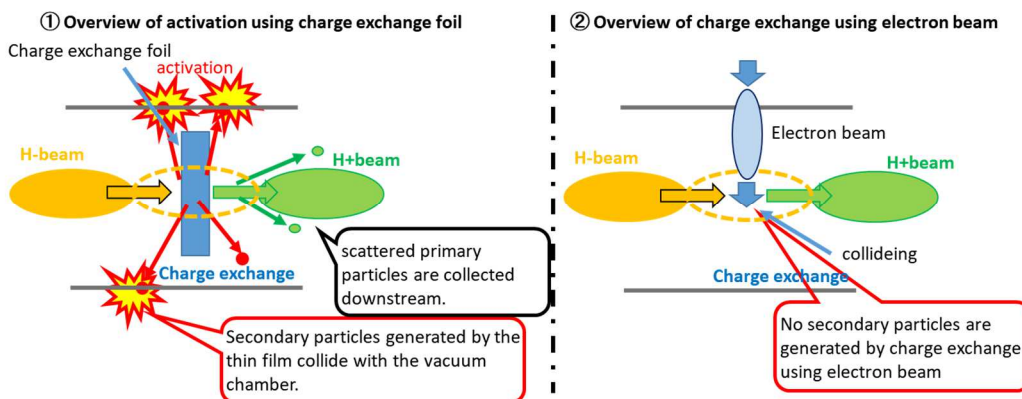


Figure 1: Difference in activation mechanism between charge exchange film and charge exchange injection system using electron beam.

[#]kota@post.j-parc.jp

の測定結果は存在しない。

1.2 研究目的

本研究の目的は、電子ビームとH-イオンビームを衝突させ、電子ビームによる数 MeV から数百 MeV の H-イオンビームの荷電変換効率、すなわち、荷電変換反応断面積を特定することである。現在、数 MeV 程度以上の負水素イオンビームに関する電子ビームによる荷電変換効率測定結果は存在しないため、計算による荷電変換効率の見積もりは難しい。従って、炭素薄膜などによる荷電変換効率の知見[4]を用いて、H-ビームのエネルギーが低いほど、荷電変換断面積は大きくなると予想した。それをもとに、以下に示したステップで電子ビームを用いた荷電変換効率測定を遂行している。

1st step: オフライン実験機を用いて、使用する電子銃および電子ビームのエミッタンスなどの特性を調べる。

2nd step: 性能評価した電子銃を J-PARC RFQ テストスタンドに設置して、3 MeV 負水素イオンビームに関する荷電変換効率測定を行う。

3rd step: 2nd ステップにより特定した 3MeV 負水素イオンビーム J-PARC 線形加速器(Linac) - RCS ビーム輸送ラインである L3BT ビームラインにて、400 MeV 負水素イオンビームの荷電変換効率測定を行う。

現在、オフライン試験機による電子銃の特性評価試験を終えて、2nd step の RFQ テストスタンドに設置しているところである。以下の章では特性実験結果を中心として報告する。

2. オフライン実験機を用いた、電子ビームの特性評価試験

2.1 オフライン試験機

電子ビームの特性評価試験に使用したオフライン試験機は日本原子力研究開発機構旧リニアック棟に設置されていたバイブレーションワイヤモニタ用オフライン試験機を流用したものである(Fig.2)。本実験で使用する電子銃はオメガトロン社製電子銃(特注品)でそのスペックは Table1 に示す。Figure 2 に示したオフライン試験機には、図中左側に設置した電子銃、及び、そのビームプロファイルを測定するスリットつきファラデーカップ、電子ビームの大まかなプロファイルを確認するための蛍光板及び、蛍光板を観察できるガラス窓を取り付けている。

Table 1: The Performance of the Electron Gun

Beam energy	10 eV – 1.1 keV
Beam current	Max 250 μ A
Time structure	Continues beam

2.2 電子銃の特性評価実験結果

RFQ テストスタンド設置時のパラメータを決めるため、電子銃先端部から約 20 cm の位置での引き大電圧と収

束電圧(アインツェルレンズ)に対するビームプロファイルを系統的なプロファイル測定を行った。

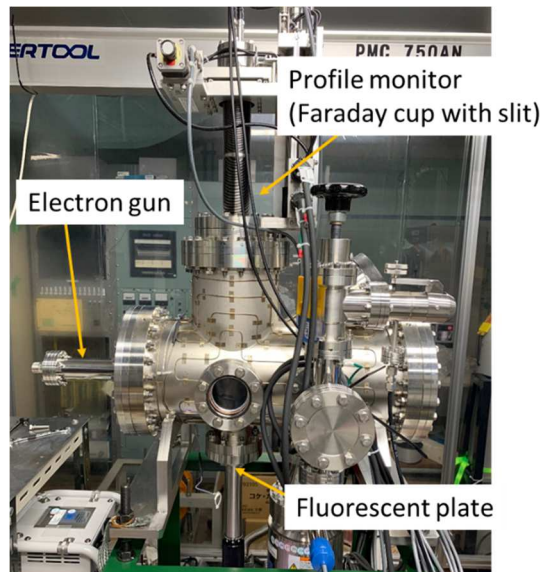


Figure 2: Off-line test stand for electron beam measurement.

その結果の一例を Fig. 3 に示す。Figure 3 はファラデーカップを用いて測定した水平及び垂直方向のビームプロファイルを合成して 3 次元プロットしたものである。

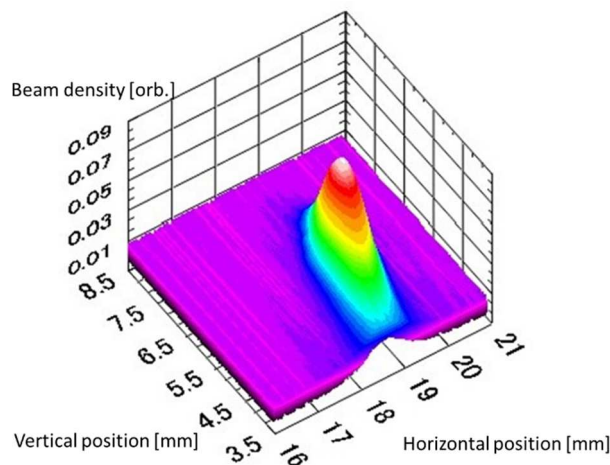


Figure 3: Horizontal and vertical beam profile of the electron gun.

系統的にプロファイルを測定した結果、電子ビーム先端部から約 20 cm の距離でプロファイルをガウシアンフィットした場合、水平垂直両方向で 1σ を 1 mm 以下までビームを絞れることが分かり、電子ビーム位置の調整ののち、RFQ テストスタンドの H-ビームに十分な強度を当てることができることを確認した。

3. J-PARC RFQ テストスタンドへの電子銃据え付け

J-PARCリニアック棟に設置されている RFQ テストスタン

ドのうち、ビーム照射設備に関する写真を Fig. 4 に示す。RFQ テストスタンドは J-PARC RFQ 加速器とほぼ同等の 3 MeV 負水素イオンビームを加速し、ビーム照射施設にてビームスクレーパ試験など様々な実験を行う施設である。ビーム診断系としてスリット入りファラデーカップ、ワイヤースキャナーモニター等が完備されている。特性評価試験が終わった電子銃をここに据え付け、3 MeV 負水素イオンビームの照射試験が行えるようにビーム診断系及び電子銃据え付け作業を進めている。

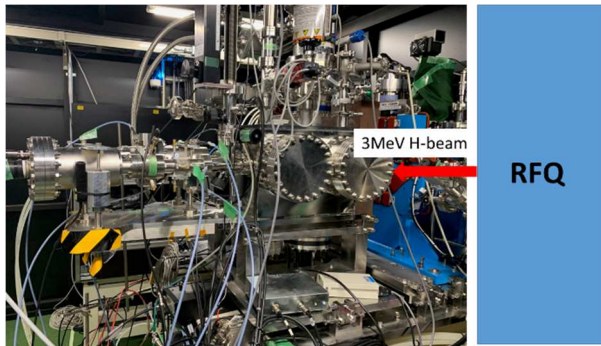


Figure 4: Horizontal and vertical beam profile of the electron gun.

4. まとめと今後

現在、一般的である荷電変換フォイルを用いた荷電変換入射方式に変わり、電子ビームを用いた荷電変換手法に着目し、その基礎実験を進めている。そのため、数 MeV から数 100 MeV の負水素イオンビームに関する荷電変換効率測定、すなわち、荷電変換断面積を測定する基礎実験を行っている。基礎実験にて使用する電子ビームのプロファイル等の予備試験を終えて、その結果をもとに RFQ テストスタンドにおける 3 MeV 負水素イオンビームの荷電変換試験の準備を行っているところである。3 MeV での荷電変換効率測定試験結果をもとに、ビーム診断システムの整備を行った後、400 MeV 負水素イオンビームを用いた荷電変換効率試験を行う予定である。

参考文献

- [1] E. Yamakawa, *et al.*, JPS Conf. Proc. 8, 012017, (2015).
- [2] P.K. Saha *et al.*, Proceedings of HB2016, 3795 (2016).
- [3] B. PEART *et al.*, J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., Vol. 3 (1970).
- [4] R. Webber, *et al.*, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-26 (1979).