

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05128

研究課題名(和文)大強度負水素イオンビームの電子ビームによる荷電変換に関する研究

研究課題名(英文) Research on charge exchange of high-intensity negative hydrogen ion beam by electron beam

研究代表者

岡部 晃大 (Okabe, Kota)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：90437286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、電子ビームを用いて大強度負水素イオンビーム荷電変換測定を行い、これまで明らかになっていない電子ビームによる荷電変換断面積を特定することを目的としている。電子銃据え付け用チェンバー及びビームモニタを製作して、J-PARC大強度負水素イオン源テストスタンドに取り付けた。現在、電子銃を用いた大強度負水素イオンビームの測定を行っているが、想定より荷電変換断面積が小さいのか、若しくは実験環境のノイズの影響なのか、残念ながら電子ビームによる荷電変換の兆候は掴めていない。これまで行ってきた研究成果を加速器学会2020年會にて"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"の題目で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、荷電変換薄膜に起因する2次粒子によって、非常に強い加速器機器の放射化が生じていることが分かった。そのため、我々は電子ビームを用いた負水素イオンビームの荷電変換に着目した。一方、現在のところ、電子ビームによる負水素イオンビームの荷電変換反応断面積は、数100eV程度の低エネルギー領域でしか測定されていないため、本研究では50KeVの負水素イオンビームと電子ビームとの相互作用による負水素イオンビームの荷電変換効率測定を行った。残念ながら本研究において電子ビームによる荷電変換の兆候は掴めていない。本研究課題の研究期間は令和2年度で終了したが、継続して実験を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to perform high-intensity negative hydrogen ion beam charge exchange measurement using an electron beam and to identify the charge exchange cross-sectional by an electron beam, which has not been clarified so far. A vacuum chamber for installing an electron gun and a beam monitor for measurement were manufactured and attached to the J-PARC high-intensity negative hydrogen ion source test stand. Currently, we are measuring a high-intensity negative hydrogen beam using an electron gun, but unfortunately there are signs of charge conversion by the electron beam, whether the charge conversion cross-sectional area is smaller than expected or the influence of noise in the experimental environment. I haven't grasped it. The results of the research conducted so far were presented at the 2020 Accelerator Society under the title of "Research on Charge Exchange of Negative Hydrogen Ion Beams Using Electron Guns".

研究分野：ビーム物理学

キーワード：大強度陽子加速器 大強度イオンビーム 荷電変換入射方式

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本における J-PARC 3GeV 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。入射ビーム、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。以上の成果より、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。したがって、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。

(2) 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が、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。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、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、電子ビームによる負水素イオンビームの荷電変換反応断面積は数 100eV 程度の低エネルギー領域でしか測定されていない。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 以上の反応断面積の測定結果は存在しない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子ビームと負水素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 の負水素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。

3. 研究の方法

(1) 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。したがって、炭素薄膜などによる荷電変換効率の知見を用いて、負水素イオン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。それを基に、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、使用する電子銃及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、3MeV 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、400MeV 負水素イオンビームの荷電変換効率測定を行う。しかし、後述するように加速器施設の安全性の都合上、J-PARC 加速器ビームラインに電子銃を設置することは取りやめて、より負水素イオンビームのエネルギーが低く機器設置が容易な J-PARC イオン源テストスタンドに電子銃を取り付けて実験を行うこととした。

(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)で購入したものである。荷電変換実験を行う前に、まずはこの電子銃の性能を評価した。電子銃を設置する予定のビームラインは、放射線管理及び高電圧機器が近くにある関係上、簡単にはアクセスできないため、あらかじめオフライン試験にてその特性を明らかにして

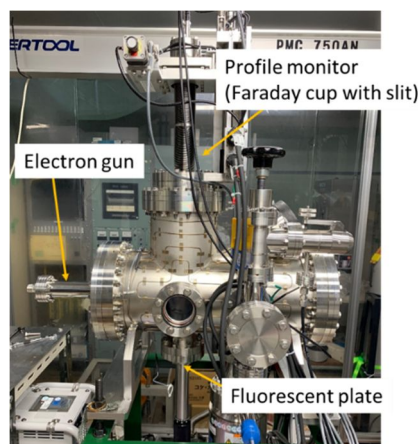


図 1: 電子銃性能評価のためのオフライン試験機

おく必要があった。そこで、電子銃をオフライン試験機(図1)に取り付けてエミッタンスモニタを使用した電子ビームのエミッタンス測定及びビーム強度測定、電子銃使用時の真空圧力変化の調査を行った。オフライン試験機は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。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 の位置での電子ビーム引き出し電圧と収束電圧(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。

(3) 電子銃のオフライン性能試験を終えたのち、可能であれば電子銃を J-PARC 加速器のビームラインに設置する予定だったが、設置予定箇所の近くで本件とは関係のないビーム照射によるビームダンプ窓破損事象が発生したため、ビームラインへの電子銃取り付け作業を取りやめた。そこで、大強度負水素ビームを生成可能、かつ、機器へのアクセスが容易な J-PARC イオン源テストスタンドにて実験を行うこととした。イオン源テストスタンドは J-PARC 加速器と同等の 50keV 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等が完備されている。電子銃を取り付けるため、電子銃据え付け用チェンバー及び本実験での使用を想定した測定用ビームモニタを製作して、荷電変換測定実験を行った。

4. 研究成果

(1) 本研究での使用を目的として購入した電子銃性能について、系統的に電子ビームの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がガウシアンフィットした場合、水平垂直両方向で 1 σ を 1 mm 以下までビームを絞れることが分かった(図2)。また、電子ビーム位置の調整ののち、イオン源テストスタンドの負水素イオンビームに十分な強度を当てることができると確認した。上記の結果を解析して、今回購入した電子銃が本研究での要求性能を満足することを確かめた。

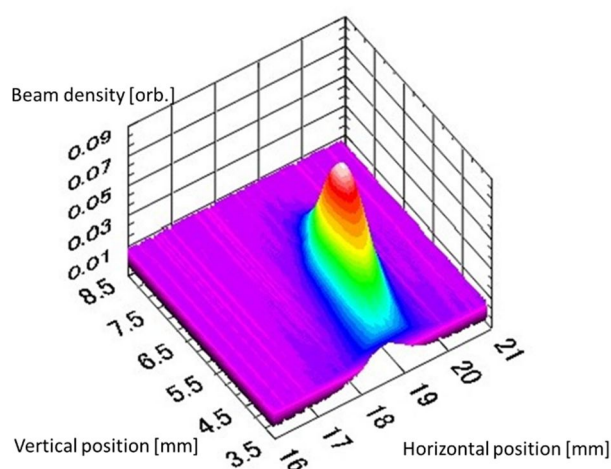


図2: 電子ビームの横方向ビームプロファイル.

(2) 現在、電子銃を用いた大強度負水素ビームの測定を行っているが、想定より荷電変換断面積が小さいのか、若しくは実験環境のノイズの影響なのか、残念ながら電子ビームによる荷電変換の兆候は掴めていない。電子ビームによる荷電変換実験はこれまで負水素イオンビームエネルギーが非常に低い状況でしか行われていないため、高エネルギー領域でその反応断面積を正確に予想することが難しい。そのため、荷電変換反応断面積が想定よりも大幅に低い可能性がある。本研究課題の研究期間は令和2年度で終了したが、ノイズ対策などの対処を行いつつ継続して実験を行う予定である。これまで行ってきた研究成果を加速器学会2020年会にて"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"の題目で発表した。

< 引用文献 >

- E. Yamakawa, et al., JPS Conf. Proc. 8, 012017, (2015).
- P.K. Saha et al., Proceedings of HB2016, 3795 (2016).
- B. PEART et al., J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., Vol. 3 (1970).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岡部 晃大	4. 巻 1
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 446-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡部 晃大
2. 発表標題 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
3. 学会等名 加速器学会2020年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------