

## 小型 ECR イオン源の引出電極位置の最適化

### OPTIMIZATION OF PULLER POSITION AT COMPACT ECR ION SOURCE

村松正幸<sup>#, A)</sup>, 神谷隆<sup>B)</sup>, 岡田高典<sup>B)</sup>, 片桐健<sup>A)</sup>, 杉浦彰則<sup>A)</sup>, 北條悟<sup>A)</sup>, 涌井崇志<sup>A)</sup>  
Masayuki Muramatsu<sup>#, A)</sup>, Takashi Kamiya<sup>B)</sup>, Takanori Okada<sup>B)</sup>, Ken Katagiri<sup>A)</sup>, Akinori Sugiura<sup>A)</sup>,  
Satoru Hojo<sup>A)</sup>, and Takashi Wakui<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation

#### Abstract

The NIRS-930 cyclotron supplies several ion beams for basic science and applied research in the fields of nuclear medicine, biology, and physics at the National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST). The main ion species used are protons and helium for these experiments. In addition, heavy ions such as carbon and neon are also supplied. These ions are produced by the compact ECR ion source with all permanent magnets (Kei-source). The Kei-source is installed on top of the NIRS-930, and the ions extract from the ion source pass through the low-energy beamline and enter the NIRS-930. In the future, the ion source will be required to produce highly charged ions of various ion species and increase the beam intensity. The Kei-source has not been optimized for the position of the extraction electrode because a sufficient beam current was obtained. In the case of  $\text{He}^{2+}$ , the transmission efficiency from faraday cup 2 (FC2) and faraday cup 3 (FC3) was about 60%. In this study, the position of the extraction electrode was optimized and the beam transmission efficiency of the low-energy beam transport will be improved by remotely controlling the extraction electrode of Kei-source. The distance of the extraction electrode and the plasma electrode can be change 28-54 mm. As a result of a beam test with  $\text{He}^{2+}$ , the transmission efficiency of FC2-FC3 increased to 93% when the distance of extraction electrode and plasma electrode was changed.

#### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構量子医科学研究所のサイクロトロン(NIRS-930[1])では、核医学、生物学、物理学分野における基礎科学・応用研究のためにビームの供給を行っている[2]。主に利用されるイオン種は陽子、ヘリウムである。また、炭素、ネオンなどの重イオンの供給も行っている。これらのイオンの生成には、永久磁石のみで閉じ込め磁場を形成する ECR イオン源(Kei-source[3])を使用している。Kei-source は NIRS-930 の上部に設置されており、イオン源から引き出されたイオンは低エネルギービームラインを通り、NIRS-930 に入射される。今後イオン源としては様々なイオン種の多価イオン生成と、ビーム強度の増強が望まれている。

NIRS-930 は Kei-source からの外部入射のみで陽子からネオンまでのビーム供給を行っている。そのため、各イオン種に切り替えて最大強度を得るためには、引出電極の位置を最適化する必要がある。したがって、サイクロトロンでビームを加速しながら電極間隔の調整ができるように、引出電極の駆動機構に遠隔操作機能を追加してある[4]。引出電極間隔は、上記のように引出電極を動かすことによって 28-54 mm まで変えることができる。

Kei-source の永久磁石、プラズマチェンバー、上流側真空箱にビーム引出のために引出電圧として正の高電圧が印加されている。引出電圧はサイクロトロンの入射エネルギーとなるため、サイクロトロンの運転条件によってきまる。イオンを多く引き出すためには、高い引出電圧が必要になるため、引出電極部分は、サイクロトロンの入射

エネルギーに対して、イオン源からの引出の電位を上げるために、引出電極とアインツェルレンズに減速電圧として負の高電圧を印加している[5]。

これまで Kei-source ではビーム利用において十分なビーム電流が得られていたため、引出電極位置の最適化は行われておらず、 $\text{He}^{2+}$ の場合 FC2-FC3 の透過効率は 60%程度であった。したがって Kei-source の引出電極位置の最適化を図りサイクロトロン入射系のビーム透過効率を上げ、サイクロトロン出口のビーム強度の増強を図った。今回の試験では引出電極間隔と減速電圧を変えることにより、ビーム引出の電場を変えてプラズマ境界面の形状をかえることと、マイクロ波のパワーを変えることによりプラズマ密度を変え、プラズマ境界面の形状を変えることにより、ビーム引出の最適化を目的とした。

#### 2. 実験セットアップ

Kei-source と NIRS-930 を  $\text{He}^{2+}$ を加速するパラメータで運転し、低エネルギービームトランスポート(LEBT)のファラデーカップ FC2,3,4、サイクロトロン出口のビームシャッターBS0 で  $\text{He}^{2+}$ ビーム電流の確認を行った。図 1 に NIRS-930 の概略図を示す。

プラズマの密度を変えるために、マイクロ波の出力を変えた。これまでの最適値(42 W)から下げたところ(13 W)と高いところ(58 W)にしたときに、引出電極位置を変え各ビーム電流モニタ位置での電流値を確認した。NIRS-930 の  $\text{He}^{2+}$ ビームのエネルギーは 34 MeV である。Kei-source パラメータは以下のとおりである。マイクロ波: CW, 9.9 GHz, 13 W, 42 W, 58 W。引出電圧: 5.4 kV。引

<sup>#</sup> muramatsu.masayuki@qst.go.jp

出電流:0.81mA@13W, 1.02mA@42 W, 1.16mA@58W。  
減速電圧:0, -3, -6, -11.4 kV。アインツェル電圧:0.4 kV。  
引出電極間隔: 28-54 mm。

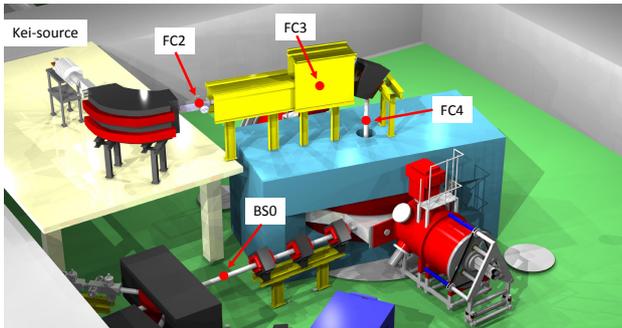


Figure 1: Schematic view of the NIRS-930 cyclotron. We measured the He beam current at the faraday cup of FC2, 3, 4 and the beam shutter of BS0.

### 3. 引出電極間隔依存性

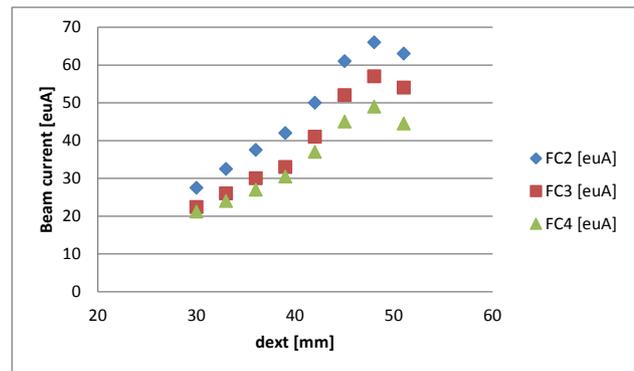
#### 3.1 電極間隔を変えた時のビーム電流の変化

図 2 に電極間隔(dext)を 30-51 mm まで変えた時の FC2,3,4 の He<sup>2+</sup>ビームの電流値を示す。(a)はマイクロ波出力 13 W, (b): 42 W, (c): 58 W とした。マイクロ波の出力を変えた時、どの条件においても電極間隔を広げると、ビーム電流は増加する傾向にあった。マイクロ波の出力が 13 W の時(プラズマ密度を下げた時)は、dext=48 mm の時にビーム電流値が最大となり、51 mm より広げると減少方向にあった。42, 58 W の時は電極間隔を広げた時に FC2,3 の電流値が上がったが、FC4 の電流値は dext=51 mm で下がった。これはビームの輸送効率が下がっているからと考えられる。

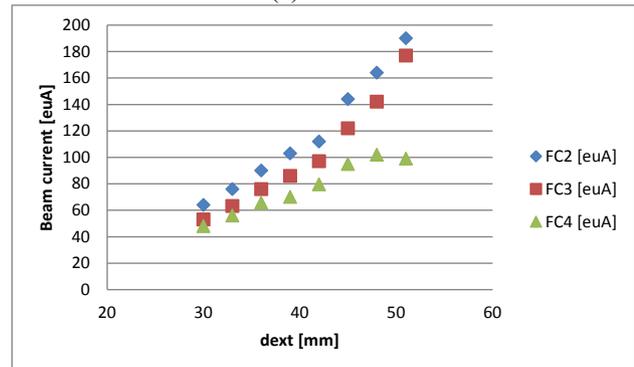
#### 3.2 ビームの透過効率

図 3 に電極間隔を 30-51 mm まで変えた時のビームの透過率を示す。(a)はマイクロ波出力 13 W, (b): 42 W, (c): 58 W とした。LEBT のパラメータは、マイクロ波出力 42 W, 引出電極間隔が 33.2 mm の時に最適化されているため、それぞれの透過効率はそこから外れると悪くなる傾向にある。FC2-FC3 の透過効率は、どのプラズマ密度でも引出電極間隔を広げた時に良くなる傾向にあった。FC3-FC4 の透過効率は、引出電極間隔を広げた時に悪くなる傾向にあるが、マイクロ波出力が 42, 58 W の時には dext=51 mm の時にそれぞれ 56, 69%とかなり悪くなった。図 2 の FC4 の電流値としてこの効果が表れている。FC2-FC3 の透過効率は、42 W の時に dext=50 mm で 93%となり、無調整の時(60%)より大幅に改善された。

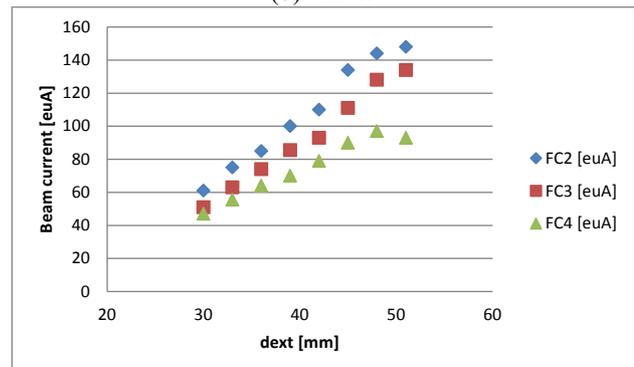
ビーム電流と透過効率の結果から、13 W の時は境界面がプラズマの方に大きくへこみ、42, 58 W の時と比べてエミッタンスの良いビームのみが引き出されているので FC2-FC3 の透過効率ではあまり差がないが、FC3-FC4 ではよくなる。また、ビーム電流は少ないが電極間隔依存性で最適値がみられるようになったと考えられる。



(a) 13 W



(b) 42 W



(c) 58 W

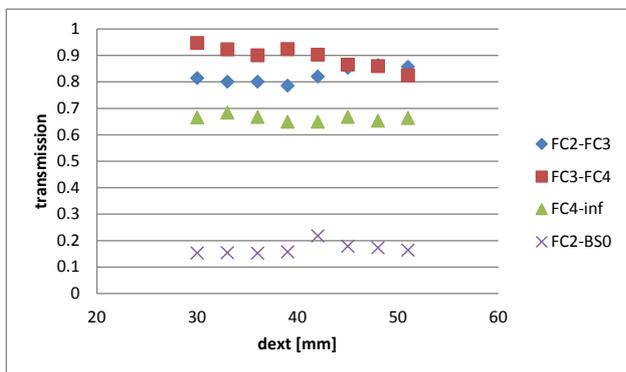
Figure 2: dependence of the distance between the extraction electrode and plasma electrode at the microwave power of 13 W (a), 42 W (b), and 58 W (c).

#### 3.3 減速電圧を変えた時の電極間隔依存性

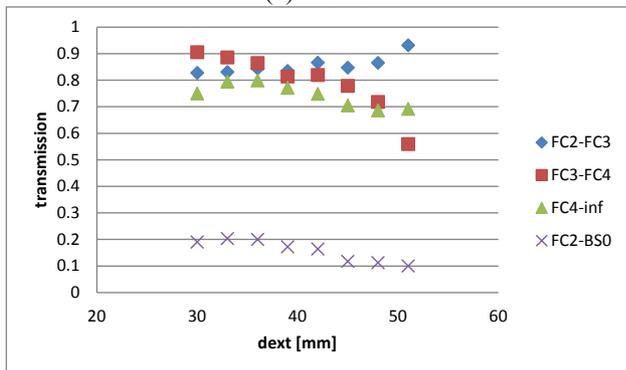
これらの結果から、おそらくビーム引出の電場が強すぎて、プラズマ境界面からは強い収束後の発散しているビームが引き出されていると考えられる。したがって、減速電圧を下げて電場を弱くすることによって電極間隔依存性に山が見えると考えられる(引出電圧を変えると、サイクロへの入射エネルギーが変わる。イオンを引き出す時の電圧は、引出電圧と減速電圧を足したものとなる。本実験の条件では、引出電圧として 5.4 kV 印加し、減速電圧として -11.4 kV 印加している。したがってイオンの引出は 16.8 kV で行われている。)。図 4 に減速電圧を 0, -3, -6, 11.4 kV にした時の電極間隔依存性を示す。減速電圧が 0 kV の時は FC2 で得られるビーム電流が少なく

なるため、縦軸はそれぞれの減速電圧時で得られた最大ビーム電流で規格化してある。減速電圧が 0 kV に近づくにつれて、最適な電極間隔が狭くなるようになるのがわかる。

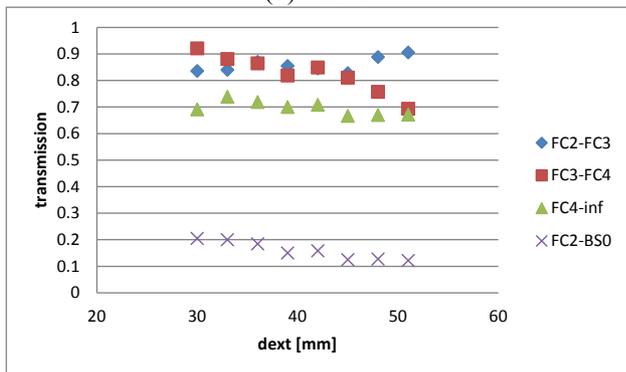
最後に、FC2 で一番多く He ビーム電流が得られた条件 (dext=51 mm, 42 W) において、BS0 での電流値が最大になるように最適化した。もともとの状態と比較して、15.7  $\mu$ A から 23  $\mu$ A まで増加した。



(a) 13 W



(b) 42 W



(c) 58W

Figure 3: beam transmission efficiency as a function of the distance between the extraction electrode and plasma electrode at the microwave power of 13 W (a), 42 W (b), and 58 W (c).

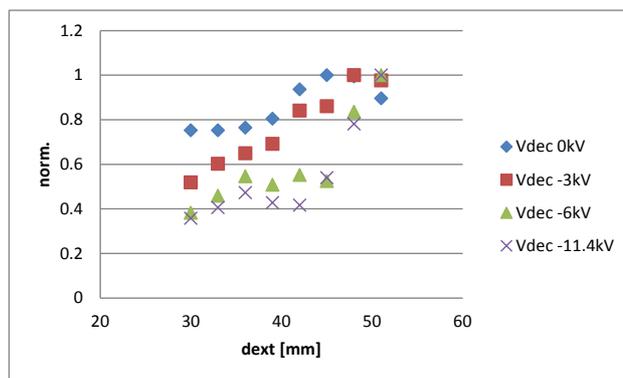


Figure 4: dependence of the distance between the extraction electrode when the deceleration voltage is changed.

#### 4. まとめと今後の予定

Kei-source の引出電極の駆動は、ビーム引出とビーム輸送に大きな効果があることが分かった。電極間隔の最適化を行うことにより、サイクロトロン出口でのビーム強度増強の可能性が示唆された。プラズマの密度を変えることにより、最適な電極間隔の違いを見ることができた。しかしながら、 $\text{He}^{2+}$ , 34 MeV の条件においては電極間隔が駆動範囲より大きくなることとなった。

今後は、他のイオン種 (Ne などのプラズマ密度が低いもの) での電極間隔の最適値の調査を行うことと、電極間隔を広げる改造を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Ogawa *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, No.2 (1978) p. 1988.
- [2] S. Hojo *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEP058, 2021.
- [3] M. Muramatsu *et al.*, Rev. Scientific Instr. Vol.73, No2 (2002) 573-575.
- [4] S. Hojo *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRSP03, 2020.
- [5] T. Honma *et al.*, Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications 2004, Oct. 18-22, 2004, RIKEN, Tokyo, JAPAN, p154-156.