

EMITTANCE MEASUREMENTS FOR RIKEN 28 GHz SC-ECRIS

Kazutaka Ozeki^{#, A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)} and Takahide Nakagawa^{A)}

^{A)} Nishina center for accelerator based science, RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako Saitama, 351-0198

Abstract

In order to investigate the ion optical parameters of the beam line of RIKEN 28 GHz SC-ECR ion source into the new heavy ion linac (RILAC II), we measured the emittance of the heavy ion beams from RIKEN 28 GHz SC-ECR ion source. In the test experiments, we observed that the emittance of the U^{35+} beam was $\sim 100\pi$ mm-mrad (4 rms emittance), which is smaller than the acceptance of the accelerator ($\sim 160\pi$ mm-mrad). The emittance with 28 GHz was almost same as that with 18 GHz and independent on the injected RF power (1~2 kW). The size of emittance increased with decreasing the charge state. We also measured the emittance of U and O ions under the same condition. In this experiment we observed that the emittance of O ions was always larger than the U ion beam for same M/q .

In this contribution, we report the experimental results for emittance measurement of highly charged U, Xe and O ions from RIKEN 28 GHz SC-ECR ion source in detail.

理研 28 GHz 超伝導 ECR イオン源のエミッタンス測定

1. はじめに

重イオン加速器の外部イオン源としての ECR イオン源は、ビーム増強を図るための開発研究ばかりでなく、ビーム安定性、エミッタンスといった質の向上を図ることも重要な課題の一つである。特に ECR イオン源は強いミラー磁場でプラズマを閉じ込めて多価イオンビームを生成するイオン源であるため、強磁場によるエミッタンスの増大が懸念される。理研仁科加速器研究センターにおいては、RIBF における更なるビーム増強のために 2007 年に超伝導 ECR イオン源の製作を開始し、2009 年には 18 GHz マイクロ波を用いて大強度多価イオンビームの生成に、2010 年には 28 GHz マイクロ波を用いて大強度多価イオンビームの生成に成功した^[1,2]。前述の観点から、ビーム生成開始とともにエミッタンスの測定を行ってきた。本稿ではこれまで行ってきたエミッタンス測定の結果について報告する。

2. エミッタンス測定

理研 28 GHz 超伝導 ECR イオン源に関する構造の詳細、生成された多価イオンビームの強度に関しては文献[1, 2]を参照されたい。エミッタンスの測定は分析電磁石の約 88 cm 下流に設置された可動式スリット(スリット幅 0.5 mm)と、更にその 4 cm 下流に設置されたビーム電流が測定できる可動式ワイヤーによって行われた。Root-mean-square emittance は

$$\begin{aligned}\varepsilon^{xx'-rms} &= \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2} \\ \varepsilon^{yy'-rms} &= \sqrt{\langle y^2 \rangle \langle y'^2 \rangle - \langle yy' \rangle^2}\end{aligned}\quad (1)$$

で定義される^[3]。ここで x, x' はビームラインに対して垂直面での水平方向位置(x)及び角度を表す。本実験ではこの計算を用いて多価イオンビームのエミッタンスを算出した。

3. 実験結果

図 1 に 18 GHz マイクロ波を用いた場合の U, Xe, 及び O イオンビームの規格化エミッタンスを示す。 B_{inj} , B_{min} , B_{ext} , 及び B_r はそれぞれ 2.3, 0.45, 1.2, 及び 1.2 T である。ECR イオン源のように通常強い磁場を持つイオン源に関するエミッタンスは、簡単なモデル計算から

$$\varepsilon^{xx'-rms} = \frac{0.0164r}{\pi} \sqrt{\frac{kT_i}{M}} + \frac{0.0402Br^2 q}{\pi M} \quad (2)$$

と表される^[3]。ここで r はビーム引き出し口半径、 T_i はイオン温度、 M はイオン質量、 B は引き出し口での磁場強度、 q はイオン価数を表わす。式(2)の第 1 項はイオン温度による効果、第 2 項は引き出し口部における磁場強度による効果である。通常、ECR イオン源のエミッタンスは、第 1 項の効果は第 2 項に比較して小さいと予測されている。この式から明らかかなように、磁場強度に関係する部分はイオン価数、磁場強度が大きくなればなるほどエミッタンスは大

[#] k_ozeki@riken.jp

きくなり、また質量(M)とイオン価数(q)との比のみで決定される。しかしながら図1から明らかなように、イオン価数の増加に従ってエミッタンスは小さくなり、かつ同じ M/q でもイオン質量が小さくなるとエミッタンスは大きくなる傾向にある事がわかる^[4]。

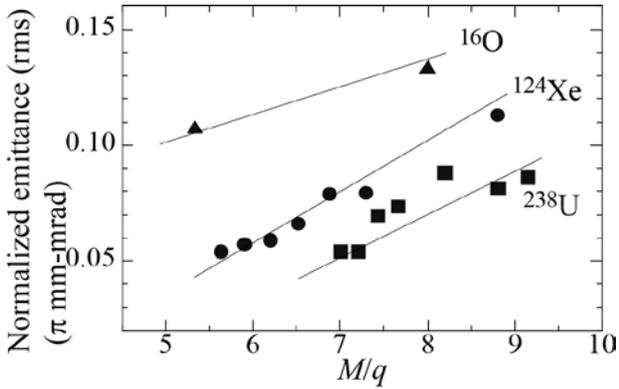


図1. U, Xe, O イオンビームの規格化エミッタンス

図2に18 GHz, 28 GHz マイクロ波を用いた場合の多価Uビームに関するエミッタンスを示す。28 GHzを用いた実験において B_{inj} , B_{min} , B_{ext} , 及び B_r は3.2, 0.6, 1.8, 及び 1.8 Tに設定された。両周波数ともイオン源は35+ビームを最大にするように調整され、イオン源の各パラメータ(ガス圧等)は変えずに測定された。引き出し電圧は22 kVである。

式(2)に従うならば 28 GHz の場合のエミッタンスは 18 GHz の場合の 1.5 倍ほどになるはずだが、図2から明らかなように測定されたすべての価数にわたって 18 GHz, 28 GHz とほぼ同じ値をとっている。

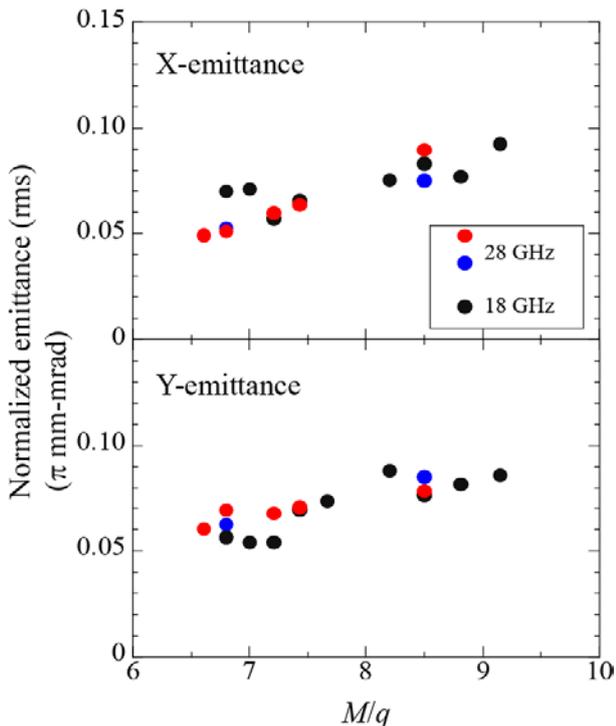


図2. 18 GHz, 28 GHz マイクロ波を用いた場合の U ビームのエミッタンス。青丸と赤丸はそれぞれ別個の測定を示す

式(2)で表されるモデル計算(実線)と実験値(白、黒丸)の比較を図3に示す。すべての価数に関し実験値は計算値よりも小さく、特に 36+イオンに関して、実験値は計算値の約半分の値になっている。

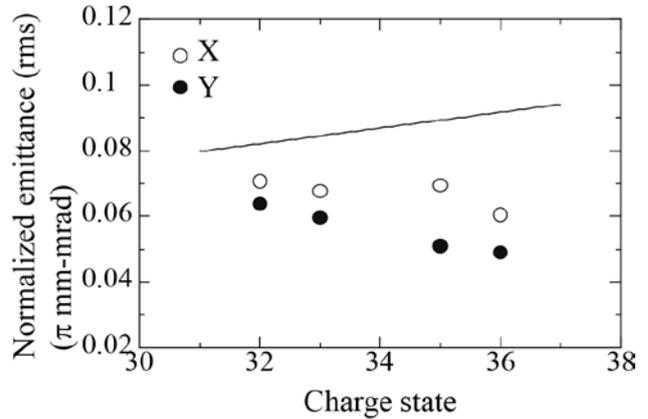


図3. U イオンビームエミッタンスのモデル計算、実験値の比較

図4はエミッタンスのマイクロ波パワー依存性である。10%程度のばらつきはあるが、ほぼ一定値を示している。

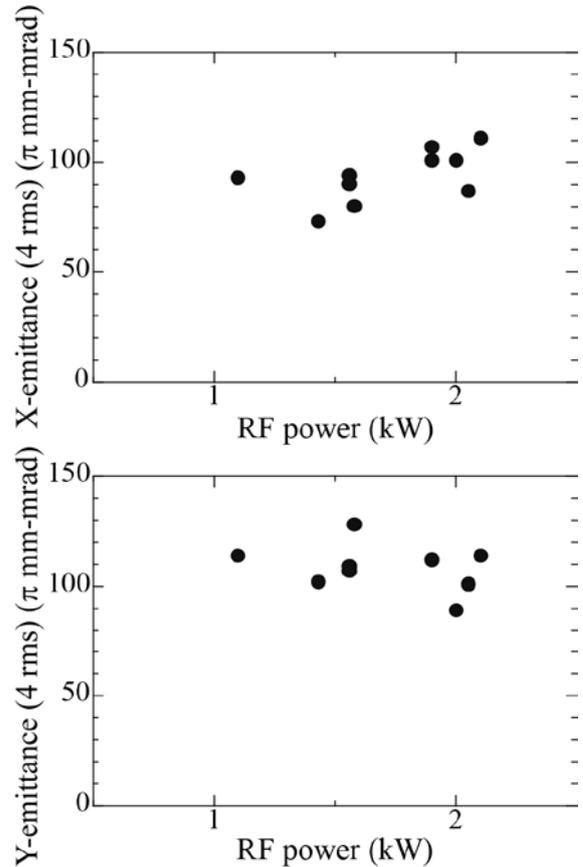


図4. U^{35+} イオンビームエミッタンスの RF パワー依存性

ECR イオン源からの多価イオンビーム強度増強のため種々の手法が考案され、利用されてきた。その手法のひとつとして bias disc 法がある^[5,6]。Bias disc 法は負電圧を印加した電極をプラズマチャンバー内に設置し、プラズマ中から逃走する電子をプラズマ中に押し戻し、プラズマポテンシャルの減少等を通してビーム強度を増強させるものである。この手法は簡便であるばかりでなく、多価イオンビームを数倍増強できるため、多くの研究所において利用されている。しかしながらエミッタンス等、ビームの質に与える影響に関しての研究はほとんどないのが現状である。前述のように加速器の外部イオン源としては、強度ばかりでなく質も含めた研究開発が重要である。このような観点から、bias disc 法のエミッタンスに与える影響について測定を行った。図 5 はビーム(Xe^{19+})の強度と輝度の bias disc に印加した電圧への依存性である。マイクロ波周波数、パワーは 28 GHz、 ~ 1000 W で、磁場強度は前述と同様の値とした。ビーム強度は負電圧とともに増加して -200 V を超えたところで最大値に達し、それ以上では減少する傾向がみられた。本実験でも、ビーム強度は 0 V 時(60~80 μA)と比較して -200 V 時には ~ 150 μA と、約 2 倍に増強された。

ビームの輝度を求めると電圧とともに若干の減少がみられた(図 5 下)。加速器のアクセプタンスがエミッタンスよりも十分大きいときは問題にならないが、エミッタンスよりも小さい場合はエミッタンスの大きさ、輝度のバイアス電圧依存性に注意を要する事がわかる。Bias disc 法のエミッタンスに与える影響の研究は始まったばかりであり、メカニズムの解明等のためにはより系統的な実験が必要となる。

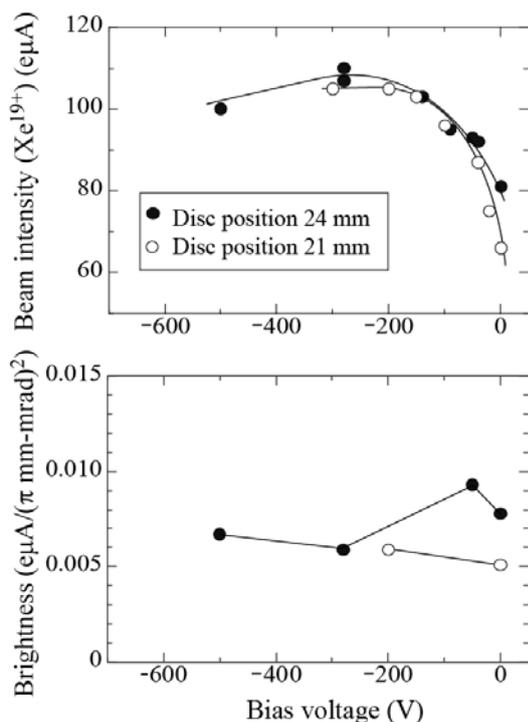


図 5. Xe^{19+} イオンビーム強度と輝度の bias disc 電圧依存性

4. まとめ

理研 28 GHz 超伝導 ECR イオン源から生成された多価イオンビームのエミッタンス測定を行った。その結果以下のことが判明した。

- 1) 測定の範囲内では、エミッタンスはイオン価数が大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。
- 2) 同じ M/q であっても質量の小さなイオンは大きなエミッタンスを持つ。
- 3) 18 GHz 及び 28 GHz を用いたビーム生成テストにおいてエミッタンスに大きな差が見られなかった。

加速器の外部イオン源としては、高周波数を使用すればするほどビーム強度の増強がみられるため、18 GHz、28 GHz と高周波数を使用する傾向にある。その反面、強磁場を使用せねばならないため、簡単なモデル計算からはエミッタンスの増大が懸念された。しかしながら本実験結果からははっきりとした磁場強度依存性はみられず、高周波数使用の優位性がより強調される結果となった。

Bias disc 法を用いた場合、ビーム強度の増強がみられるが、同時にエミッタンスも増大し、結果として輝度は逆に若干の減少がみられた。

- [1] Y. Higurashi et al., 「加速器」 vol. 6, No. 4 (2009) 346
- [2] Y. Higurashi et al., in these proceedings
- [3] I. Brown, *The physics and technology of ion sources* (Wiley, New York 1989) p94
- [4] D. Wutte et al., *Physica Scripta* T92 (2001) 247
- [5] G. Melin et al., Proc. Int. Workshop on ECR ion sources, Knoxville, 1990, Oak Ridge National Laboratory, 1991, p1
- [6] S. Biri et al., *Nucl. Instrum. Methods* B152 (1999) 386