

DEVELOPMENT OF COMPACT ECR ION SOURCE FOR CARBON THERAPY FACILITY

M.Muramatsu^{A)B)}, A.Kitagawa^{B)}, H.Ogawa^{B)}, Y.Sakamoto^{B)}, S.Sato^{B)}, Y.Sato^{B)}, S.Yamada^{B)},
H.Ogawa^{C)}, A.G.Drentje^{D)}, S.Biri^{E)}, Y.Yoshida^{F)}

- A) Graduate school of Mechanical Engineering, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-0815, Japan
B) National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan
C) Accelerator Engineering Corporation, Ltd., 2-13-1 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan
D) K.V.I, University of Groningen, 9747 AA Groningen, The Netherlands
E) Institute of Nuclear Research (ATOMKI), H-4026 Debrecen, Ben ter 18/c, Hungary
F) Department of Mechanical Engineering, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-0815, Japan

Abstract

A 10 GHz compact Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source with all permanent magnets has been developed. Peaks of the mirror magnetic field along the beam axis are 0.59 T at the extraction side and 0.87 T at the gas injection side, respectively, while the minimum B strength is 0.25 T. The source has a diameter of 320 mm and a length of 295 mm. The result of beam tests shows that a C⁴⁺ intensity of 500 μA was obtained under an extraction voltage of 30 kV. This paper describes the design detail and the experimental results for the new source.

普及型炭素線がん治療用小型ECRイオン源の開発

1. はじめに

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 (HIMAC)では、140から400 MeV/nの炭素イオンを使用したがん治療が行われている[1]。今後、世界的に炭素線がん治療施設を展開するにあたって、加速器の建設・維持コストに問題が集約されると考えられる。このため放医研では、小型かつ低コストの炭素線がん治療装置の開発を目指して研究を行っている[2]。この治療装置のイオン源部として、永久磁石のみで閉じ込め磁場を形成するECRイオン源の開発を行ってきた[3][4][5]。ECRイオン源の特徴として、原理的に消耗部品を使わないことから、再現性が良く、比較的大強度のビームを長時間安定に供給することが出来る。また、永久磁石型の特徴として、プラズマの閉じ込めを永久磁石で行っているため、電力とスペースが小さくてすむことと、部品数が少ないためにメンテナンスが容易であることがあげられる。逆に、磁場が固定であるために、必要なイオンの必要な価数に最適化するには非常に困難である。小型ECRイオン源(Kei2-source)は2003年春より設計を開始し、12月に完成した。Kei2-sourceの磁場はNIRS-ECRのビームテストの結果をもとに設計された。2004年1月からはイオン源の基本的な性能を知るためのビームテストを行ってきた。

2. ビームテスト

イオン源引き出されるビームとしては、C⁴⁺を生成し、ビーム強度が500 μA以上、エミッタンスが1.0 π mm mrad (normalized)、安定度が10%以下、1年間メンテナンス無しでトラブルの可能性がないこと、最後に、短時間で再現性が良くビームが供給できて、運転に特別な調整を必要としないことが要求されている。

小型ECRイオン源のビームテストは、テストスタンドにおいて行われた。現在までに、He, CH₄, N₂, O₂, Arのガスを使用して、ビームテストを行った。表1に現在までに得られた最大ビーム強度を示す。

| | 1+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7+ | 8+ | 9+ |
|----------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| H | >1000 | | | | | | | | |
| H ₂ | 550 | | | | | | | | |
| He | 1055 | 310 | | | | | | | |
| C | 155 | 290 | | 530 | 46 | | | | |
| N | 745 | 825 | 545 | 280 | 150 | 15 | | | |
| O | 82 | 125 | 217 | | 242 | 122 | 6.5 | | |
| Ar | 375 | 345 | 227 | 145 | | 112 | 117 | 146 | 65 |

表1. Kei2-sourceで得られた最大ビーム強度 [eμA]

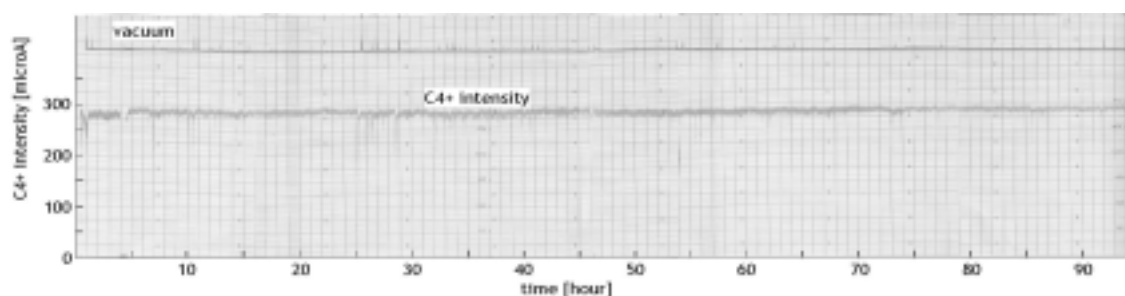


図1．安定度試験の結果

ビームの安定度は、治療用の装置として最も重要な性能のひとつである。イオン源としては、1年間トラブルなしで運転しつづけることが望まれる。そこで安定度のテストを次のように行った。運転パラメータは、 C^{4+} が最大になるように最適化した。マイクロ波の出力は300 W、パルス運転で(2 Hz, 4 ms)引出電圧が30 kVである。結果を図1に示す。ビーム強度と安定度はそれぞれ、280 μA 、6% (95時間無調整)であった。

この安定度試験のときに、イオン源に引出電圧として40 kV以上印加した場合に、連続放電が起きていることがわかった。調査の結果、連続放電は引出電極と、プラズマチェンバーの間で起きていることがわかった。したがって、安定度試験は、引出電圧30 kVで行われた。図2に安定度試験後の引出電極の状態を示す。銅の部分がスパッタされ、周りの絶縁セラミックに付着しているのがわかる。図3に引出電極下流側のセラミックの状態を示す。引出電極に取り付けた円盤によって、セラミックはほとんど汚れていないのがわかる。



図2．引出電極と絶縁セラミック



図3．絶縁セラミックを下流側からみた状態

3．引出電極の改造

上記に示した放電の原因としては、引出電極とプラズマチェンバーの間隔が狭かったことと、引出電極の胴体部分の材質が銅であったためであると考えられる。連続放電のトリガーとしては、プラズマチェンバーの先端から引出電極で放電を起こすことが考えられる。次に比較的スパッタされやすい銅が、引出電極付近の真空を悪くし連続放電を起こしていると考えられる。この問題を解決するために、引出電極とプラズマチェンバーの改造を行った。まず、引出電極とプラズマチェンバーの間隔を広げるために、引出電極の径を40 mmから34 mmに小さくすることと、プラズマチェンバーの内側をテーパ状にした。この変更により間隔が5 mmから8.5 mmに広がった。次に、引出電極の胴体部分に、比較的スパッタイールドが低いタンタルのカバーを取り付けることによって、連続放電を防ぐようにした。さらに、アノード電極の穴を10から6にすることにより、引出電極の先端に当たるビームを減らしてアウトガスの量を減らすようにした。図4に引出電極の比較図を示す。この改造により、引出電圧が40 kV以上のときでも安定にビームを引き出すことが可能となった。図5に引出電極改造後のビームテストの結果を示す。引出電圧が45 kVのときでも、安定にビームを引き出すことが出来た。

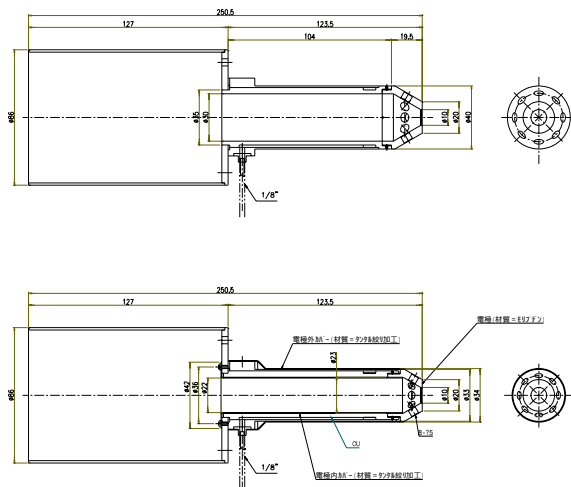


図4 . 引出電極の比較。下が改造後の引出電極

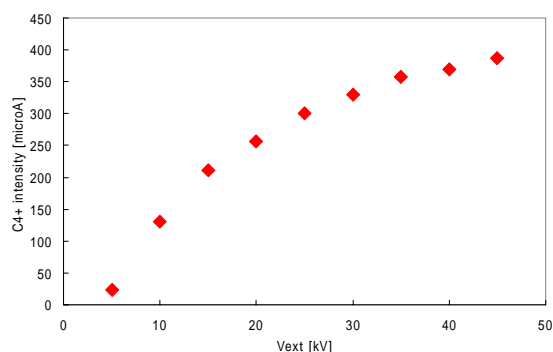


図5 . 引出電極改造後のビームテストの結果

4 . エミッタンス測定

イオン源に要求されているエミッタンスは、 1π mm mrad (normalized)である。今回は、 C^{4+} のビーム(引出電圧30 kV)の水平垂直エミッタンスの測定を行った。イオン源のパラメータは、 C^{4+} が最大になるように調整した。今回の測定には、開口部0.2 mmのシングルスリットと、スキャナーを組み合わせ使用した。水平側の測定においては、シングルスリットの580 mm下流側にスキャナーを配置した。 C^{4+} の強度は400 $e\mu A$ である。測定の結果、90%エミッタンスで、 1.25π mm mrad (normalized)であった(図6)。垂直側の測定においては、シングルスリットの420 mm下流側にスキャナーを配置した。 C^{4+} の強度は300 $e\mu A$ である。測定の結果、90%エミッタンスで、 1.01π mm mrad (normalized)であった(図7)。

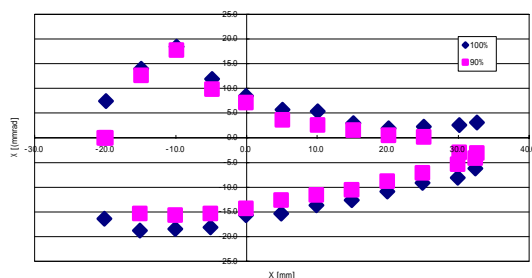


図6 . 水平

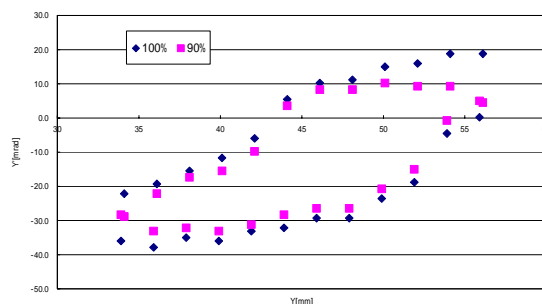


図7 . 垂直

5 . まとめ

今回、普及型がん治療装置用の小型ECRイオン源ビームテストおよび改良を行った。ビームテストの結果、 C^{4+} では最大500 $e\mu A$ の強度が得られた。エミッタンスは水平 1.25π mm mrad、垂直 1.01π mm mradであった。安定度は6%以下であった。また、引出電極の改造によって引出電圧が45kVのときでも、安定にビームを引き出すことが可能となった。

今後の予定としては、現在製作中である重粒子線治療施設用小型線型加速器(試作)に取り付け、炭素イオンの加速試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Hirao, Proc. of the Int. Conf. on Cyclo. and their Appl., East Lancing, May 2001
- [2] K. Noda et al., proceedings of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, p. 2631-2633
- [3] M. Muramatsu et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 71, No. 2, 984-986 (2000).
- [4] M. Muramatsu et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 73, No. 2, 573-575 (2002).
- [5] M. Muramatsu et al., Proceedings of the 15th International Workshop on ECRIS, 2002, p. 59.