

PRDUCTION OF HIGHLY CHARGED CARBON ION AT COMPACT ECR ION SOURCE “Kei2”

Masayuki Muramatsu¹, Atsushi Kitagawa, Satoru Hojo and Arne G Drentje
 National Institute of Radiological Sciences
 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan

Abstract

A compact ECR ion source for high-energy carbon-ion therapy facility has been developed at NIRS (National Institute of Radiological Sciences). The prototype compact ECR ion source Kei2 was designed for production of C^{4+} ions; its performance is by far better than necessary for the requirements for the carbon facility. The maximum current was more than 1 emA under the extraction voltage of 40 kV. In order to obtain highly charged carbon ion ($5+$, $6+$) with high intensity for reduce the size of injector LINAC for next carbon therapy facility, we investigate optimization of compound carbon gases and increase microwave power. Usually, carbon molecular gases (e.g. CH_4 gas) are applied for production of the carbon ions. In previous experiments, the CH_4 , C_4H_{10} and C_2H_2 gases were already tested at Kei2-source. In these measurements it was found that in C_2H_2 the ratio of carbon to hydrogen is the best for production of carbon ion. Results of beam test are described in this paper.

小型ECRイオン源Kei2における炭素の多価イオン生成試験

1. はじめに

小型ECRイオン源(Kei2)は、普及型治療装置で使われる、炭素イオンの4価を生成するのを目的として開発された[1]。これまで行ったビームテストの結果、目的の C^{4+} では600 eμA得られており医療用としてKei2は十分な性能が得られている[2]。今後、多価イオンのビーム強度の増強を行なうことによって、普及型がん治療装置で使用される入射器の小型化が期待できる。今回、Kei2において C^{5+} のビーム強度の増強を図った。また、 ^{13}C ガスを用いて $^{13}C^{6+}$ のビーム強度の確認を行なった。

2. 多価イオンのビーム強度増強

現在までにKei2では、90 eμAの C^{5+} のビームが得られている。ECRイオン源で多価イオンを増やすためには、1) 閉じ込め磁場を強くする、2) マイクロ波の出力を上げる、3) 真空度を良くするなどの改良が必要となる。Kei2は閉じ込め磁場を永久磁石で形成しているため、磁場の変更は困難となる。したがって今回の実験では、容易にビーム強度を上げるために、マイクロ波の出力を上げることと、ガス種の最適化を行なった。マイクロ波源は、今まで使用していた最大出力300 Wのマイクロ波源(Xicom: XTRD-300H)から、最大出力700 Wのマイクロ波源(NEC: LD79X75A1)への交換を行なった。また、今回炭素イオンを生成するために使用したガスは C_2H_2 である。 C_2H_2 を使用した理由は、これまでのビームテストの結果から、 CH_4 , C_4H_{10} と比較して多くの炭素のイオンが得られたからである。

図1に C^{5+} のビーム強度の引出電圧依存性を示す。縦軸が C^{5+} のビーム強度で、横軸が引出電圧である。引出電圧30 kVのときに C^{5+} は159 eμA得られた。また、引出電圧を40 kVまで上げたときには、189 eμAとなった。ガス種の最適化と、マイクロ波の出力を上げたことにより、ビーム強度の増強が確認された。また引出電圧を上げることにより、さらに多くビームが得られることが確認された。図2に、引出電圧40 kVにしたときの炭素イオンの価数分布を示す。縦軸がビーム強度で、横軸がイオンを分析するための分析電磁石の電流値である。 C_2H_2 ガスを使用しているため、1価から5価までの炭素イオンと、水素と水素分子のイオンが引き出されているのがわかる。今回の実験でマイクロ波の出力を上げたため、4価も C^{5+} と同様にビーム強度が上がり、1017 eμAとなった。

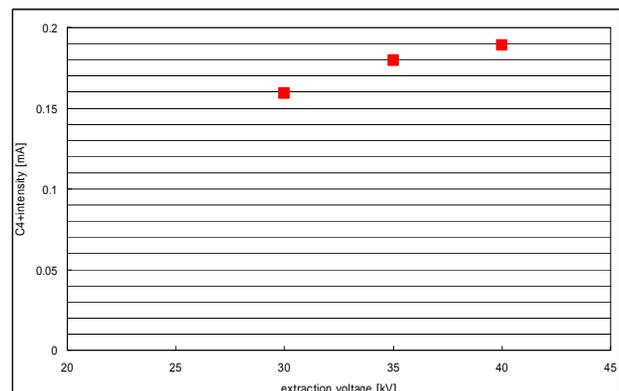


図1. C^{5+} のビーム強度の引出電圧依存性

¹ E-mail: m_mura@nirs.go.jp

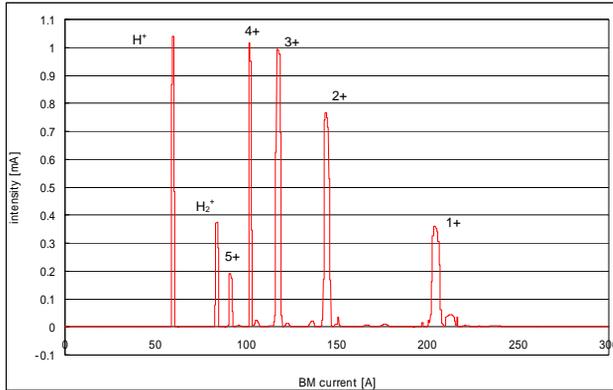


図2．引出電圧40 kVのときの炭素イオンの価数分布(C₂H₂ガス使用)

3. ¹³Cガスをを用いた炭素イオンの生成

通常Kei2では¹²CH₄, ¹²C₂H₂などの化合物ガスをを用いて炭素イオンの生成を行っているが、¹²C⁶⁺イオンは水素分子イオン(H₂⁺)とq/Aが同じになるため、扇形磁石を用いた磁場による分析ができない。本実験では¹³CH₄, ¹³C₂H₂ガスを用いて¹³C⁶⁺のビーム強度の確認を行った。図3に¹³C₂H₂と¹²C₂H₂の価数分布の比較を示す。また図4に拡大した価数分布を示す。縦軸が分析後にファラデーカップで検出されるビームの電流値で、横軸が分析電磁石の電流値である。イオン源のパラメータは¹³C₂H₂の場合は¹³C⁶⁺が最大になるように最適化した。一方、¹²C₂H₂のときはC⁴⁺が最大になるようにパラメータを最適化した。引出電圧は30 kVである。図3, 4から、¹³Cのピークが¹²Cのピークとずれているのがわかる。¹³C₂H₂は、6価の最適化を行なっているため、全体的に¹²C₂H₂より強度が低くなっている。これは多価イオン生成のため、ガス流量を減らしたからである。このときの¹³C⁶⁺のビーム強度は7.8 eμAであった(図4)。一方で、4価に最適化された¹²C₂H₂では、C⁴⁺の強度が約780 eμAであった。これはマイクロ波の出力が上がっているため強度があがったと考えられる。

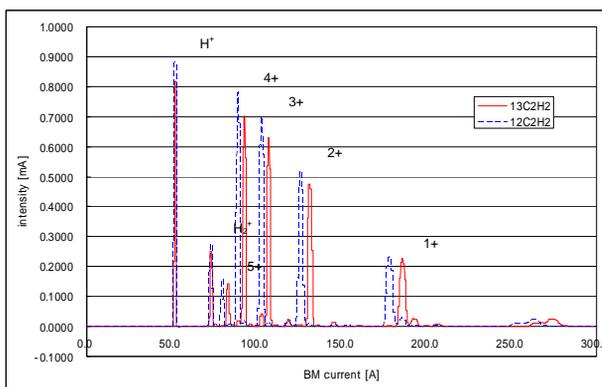


図3．¹³C₂H₂と¹²C₂H₂の価数分布の比較

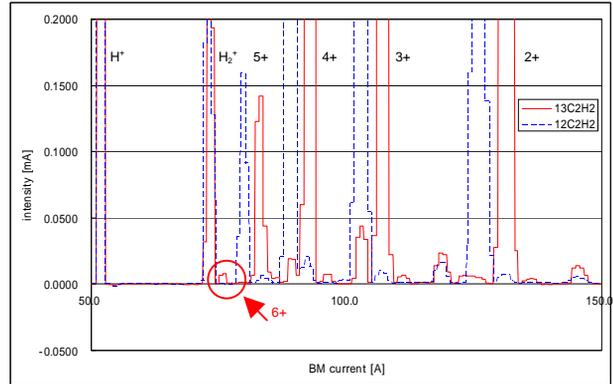


図4．¹³C₂H₂と¹²C₂H₂の価数分布を拡大した

図5に¹³CH₄と¹³C₂H₂の価数分布を示す。また、図6に¹³CH₄の拡大した図を示す。イオン源のパラメータは¹³C⁶⁺が最大になるように最適化した。引出電圧は30 kVである。¹³CH₄では、¹³C₂H₂と比較して価数分布が多価に移行しているのがわかるが、4, 5価の強度はほぼ同じとなっている。このときの¹³C⁶⁺のビーム強度は7.5 eμAであった(図6)。¹³CH₄と¹³C₂H₂を比較して6価の強度が¹³C₂H₂の方が高いのは、炭素の量が¹³CH₄より多いため、多くイオン化されるからと考えられる。¹³CH₄で炭素イオンを増やそうとガス量を増やしても、水素が炭素の4倍増えてしまうため、真空度が悪くなり炭素の多価イオンが逆に減ってしまう。

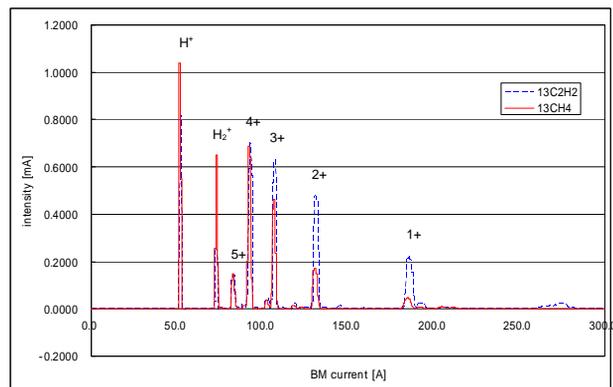


図5．¹³C₂H₂と¹³CH₄の価数分布の比較

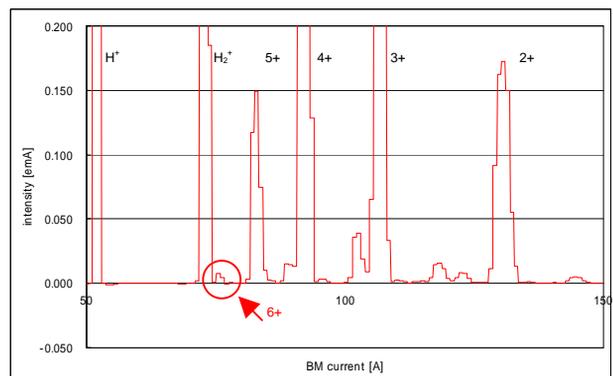


図6．¹³CH₄の価数分布を拡大した

4. まとめ

今回の実験から、ガス種の最適化と、マイクロ波の出力を上げたことにより、 C^{5+} のビーム強度の増強が確認された。引出電圧30 kVのときに C^{5+} は159 μA 得られた（ビーム強度増強前は90 μA ）。また引出電圧を上げることにより、 C^{5+} のビーム強度は189 μA となった（引出電圧40 kV）。

さらに C^{6+} のビーム強度は、 $^{13}C_2H_2$, $^{13}CH_4$ のガスを用いて $^{13}C^{6+}$ の強度の確認を行なった。 ^{13}C のガスを用いることによって、6価の強度を確認することができた。 $^{13}C_2H_2$ のときに $^{13}C^{6+}$ の強度は7.8 μA 、 $^{13}CH_4$ のときに7.5 μA となった。

参考文献

- [1] M. Muramatsu, et al., Review of Scientific Instruments, 76(11) (2005) 113304 1-6.
- [2] M. Muramatsu, et al., 17th International Conference on Ion Implantation Technology 2008, AIP conference proceedings, 1066 (2008) 509-516.