

Improvement of compact ECR ion source

M. Muramatsu^{#A)}, A. Kitagawa^{A)}, S. Hojo^{A)}, Y. Iwata^{A)}, A. G. Drentje^{A)}, T. Ueno^{B)}, H. Miyazaki^{B)}, K. Sawada^{B)},
M. Tsuchiyama^{C)}, S. Ueda^{C)}, Y. Kijima^{C)}, K. Torikai^{D)}, and S. Yamada^{D)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan

^{B)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 5-2 Soubiraki, Niihama, Ehime 792-8588, Japan

^{C)} Mitsubishi electric corporation, 1-1-2, Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555, Japan

^{D)} Gunma University, 3-39-22 Showa-machi, Maebashi, Gunma 371-8511, Japan

Abstract (英語)

A compact electron cyclotron resonance ion source (ECRIS), so-called Kei2, has been developed for high energy carbon ion therapy facility. It based on experimental studies for production of carbon 4+ ions with a 10 GHz ECR source at the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC), so-called NIRS-ECR, the field distribution of the mirror magnet for Kei2 was designed. A microwave source with the traveling-wave-tube (TWT) was adopted for Kei2, with a frequency range and maximum power of 9.75 - 10.25 GHz and 750 W, respectively. The Kei2 and prototype injector were installed in the HIMAC facility in 2009. Improvement of the Kei2 is described in this paper.

小型 ECR イオン源の性能向上のための開発

1. はじめに

小型 ECR イオン源 Kei2-source は、普及型重粒子線がん治療施設のイオン源として開発された[1]。これまでのビームテストの結果、目的の C^{4+} では最大 1000 μA 得られており、要求値を十分に満たしている。

現在 Kei2 では、HIMAC での治療用の供給運転に向けて、高効率小型線型加速器[2]とともにビーム調整を行っている。しかし、長時間運転を行なったときに引出電極付近で放電が多発し、安定な供給が行なえなくなる。これまでの調査の結果から、HIMAC 移設時に改造を行った引出電極に、炭素が付着しそれが原因で放電が多発していることがわかってきた。しかしながら、改造前の Kei2 (以下旧 Kei2) では、引出電極に炭素が付着していても、安定に供給できていた実績がある。改造後の Kei2 (以下新 Kei2) と旧 Kei2 の大きな違いは、1) 引出電極の冷却が不十分、2) 引出電極付近の真空度が悪くなっている、の 2 つがあげられる。今回新 Kei2 において、冷却の強化した引出電極に交換し、長時間安定度の試験を行った。

また、Kei2 では、炭素イオンだけでなく、様々なイオンの供給を目指して、新しいイオン種の生成試験を行っている。今回は、分子イオンの H_3^+ の生成試験を行った。

2. 引出電極の改造

2.1 引出電極の構造

今回試験に用いた引出電極は、旧 Kei2 の引出電極の構造に近づくように設計・製作された。図 1 に新・旧 Kei2 の引出電極の写真を示す。表 1 では、引出電極の特徴を比較する。

表 1: 引出電極の特徴の比較

イオン源	新 Kei2	旧 Kei2
電極材質	銅	銅
冷却	直接	直接
カバー	タンタル	タンタル
電極の直径	33 mm	33 mm
電極根元排気スリット	あり	あり
電極間隔	26 mm	可変
電極駆動機構	なし	あり
アノード電極の排気穴	あり	あり
遮蔽板の位置	60 mm	可変

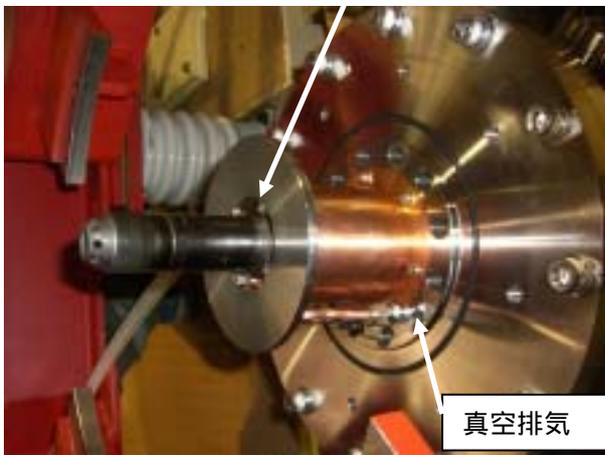
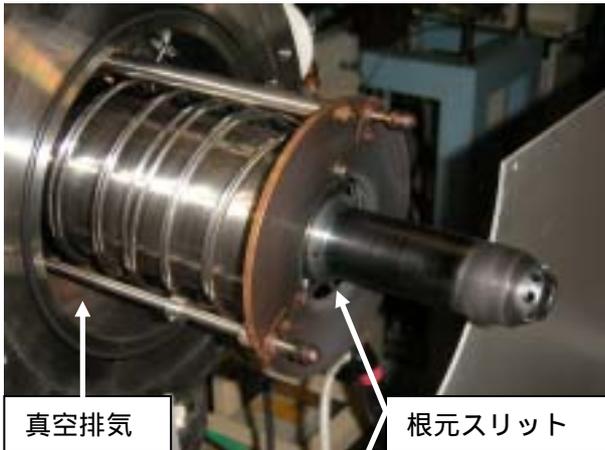


図 1 . 旧 Kei2 (上) 新 Kei2 (下)

新 Kei2 は、炭素イオンの供給のみを想定していたため、引出電極は固定式となっている。それにより、引出電極の固定部分では、旧 Kei2 と比較して、真空コンダクタンスが悪くなってしまっている。

2.2 安定度試験

Kei2 の運転は、1 月 10 日から 2 月 2 日まで行なった。1 月 10 日に電極の交換作業を行い、10、11 日はエージング作業を行なった。1 月 12 日から 26 日の間は夜間のみとなった。基本的に引出電圧 30 kV で運転していたが、16 日と 19 日はそれぞれ 29 kV、25 kV で運転している。1 月 27 日からは 2 月 2 日までは、1 日中の運転となっている。イオン源の立ち上げ(からし)では、2 日間(10, 11 日)で 27 kV まで引出電圧が印加できるようになり、5 日間(12-16 日)で 30 kV まで印加できるようになった。代表的なイオン源の運転パラメータを表 2 に示す。運転パラメータは、立ち上げ時に多少調整している。ガス流量は 0.0085 ~ 0.012 cc/min、マイクロ波のパワーが約 350 ~ 400 (検出値の構成ができていないため)、ディスク電圧が -40 ~ -50 V である。それ以外のパラメータは固定である。運転パルスは、KeiGM の場合、繰り返し率が 0.333 Hz、パルス幅が 50 msec

で、今回試験を行った新 Kei2 では、繰り返し率が 10 Hz、パルス幅が 50 msec である。

表 2 : 代表的な運転パラメータ

ガス流量	0.012 cc/min
マイクロ波周波数	10.13 GHz
マイクロ波パワー	約 400 W
パルス幅	50 msec
繰り返し周波数	10 Hz
バイアスディスク電圧	-40 V
引出電圧	30 kV
引出電流	9.5 mA
アインツェル電圧	22 kV
アインツェル電流	0.01 mA
上流側真空度	1.0e-4 Pa
下流側真空度	1.5e-4 Pa
分析後真空度	2.4e-5 Pa

2 月 2 日の 10:30 に放電が頻発し、安定なビーム引出ができなくなる(1 秒に 1 回程度)。14:41 まで安定なるようにガス流量とマイクロ波の周波数・パワーを調整したが、引出電圧 30 kV では復旧せず。ここでイオン源の寿命と判断する。表 3 にビーム引出時間のトータルと、30 kV でビームを引き出した時間を示す。トータルの運転時間は、196 時間 41 分となった。KeiGM の運転は、繰り返し率 0.333 Hz、パルス幅 50 msec のため、Duty で考えると、Kei2 は KeiGM の 30 倍となる。今回のトータル時間を 30 倍すると、5850 時間(243 日)となる。図 2 に安定なときと、放電が頻発した時のビーム波形を示す。放電が多発していた時の引出電流を見ると、ビームが出ていない時間に電流が多く流れているのがわかる。これは、ガス流量に依存しているため、引出電極とプラズマチャンバーの間で PIG 放電が起きていると考えられる。

表 3 : 運転時間のまとめ

Total 時間	195h 41min
Total 時間 × duty	5850h (243 日)
30 kV 引出のときの時間	121h 37min
30 kV × duty	3630 (151 日)

今回の試験で、供給のときと同じ電圧で引き出していた時間は、160 時間であった。放電の原因である炭素が付着するのは、プラズマがついているとき(炭素が単体で存在しているとき)と仮定すると、KeiGM の実績に duty をかけて評価することができると考えた(上記のとおり)この場合、運転時間は

3630 時間(151 日)と見積もることができる。図 2 のようにビームがないときでも電流が流れている。プラズマのない部分の電流が寿命に寄与するとすれば、121 時間ととても短い時間で供給ができなくなっている。

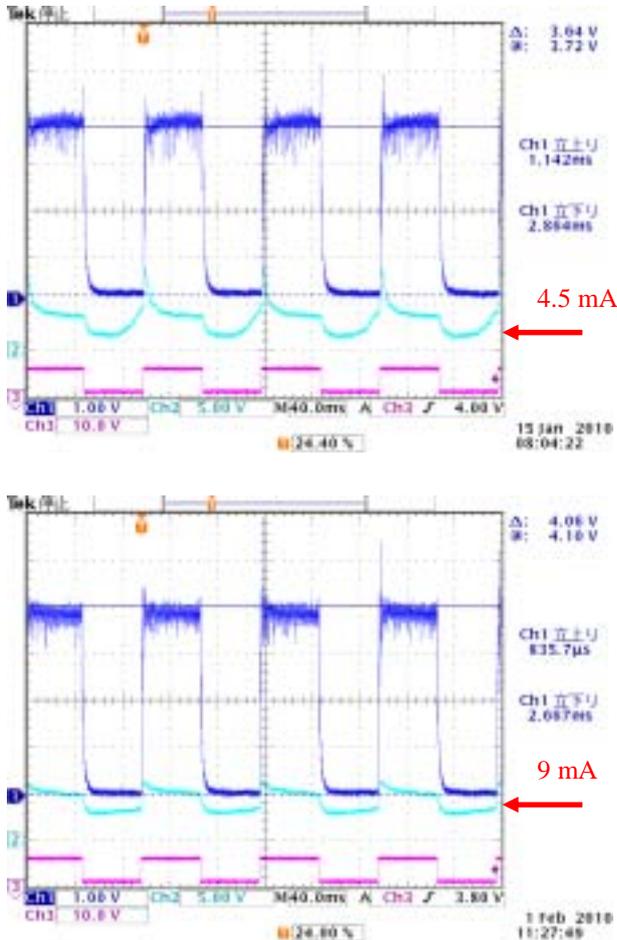


図 2 . 長時間運転開始時 (上) 長時間運転後 (下)。Ch1:ビーム電流(100 μ A/div)、Ch2:引出電流(15mA/div)、Ch3:運転パルス

2.3 引出電極付近の真空度改善

引出電極付近の真空度を改善して、放電の頻度が下がるか試験を行った。引出電極とプラズマチェンバーの状態を 2 月 2 日のままにして (掃除をしないで)、引出電極台座(アミアミ)と排気穴なしアノード電極(引出スリット)を取り付けた。アミアミは、引出電極とセラミックの間の真空排気を良くする効果が期待できる。また、排気穴なしアノード電極は、プラズマチェンバーに入れるイオン化ガスを、引出電極側に流れにくくする効果が期待できる。この 2 つにより、引出電極とプラズマチェンバー間の真空度改善が期待できる。図 3 に交換した部品の写真を示す。また、図 4 に交換後のビーム波形を示す。部品交換の結果、交換前と比較してビームが出ていない時間の電流値と、放電の頻度が下がった(20 秒に

1 回)。この試験結果から、引出電極付近の真空度を改善することにより、放電の頻度を下げることができるとわかった。



図 3 . 部品交換後の引出電極。台座を交換した。

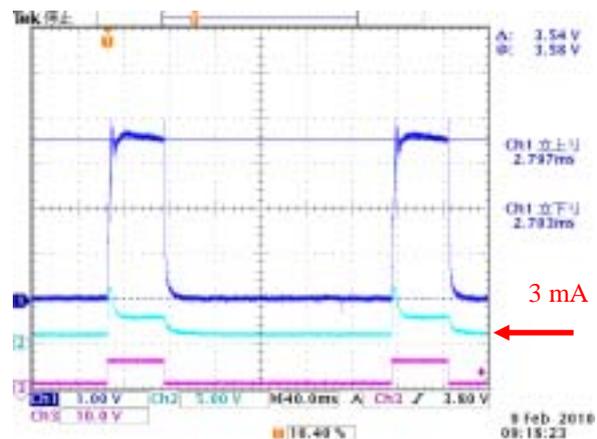


図 4 . 部品交換後のビーム。Ch1:ビーム電流 (100 μ A/div)、Ch2:引出電流(15mA/div)、Ch3:運転パルス

表 3 : 部品交換後の運転パラメータ

	変更前	変更後
ガス流量	0.012 cc/min	0.0045 cc/min
マイクロ波周波数	10.13 GHz	10.13 GHz
マイクロ波パワー	約 400 W	約 400 W
パルス幅	50 msec	50 msec
繰り返し周波数	10 Hz	4 Hz
ディスク電圧	-40 V	-60 V
引出電圧	30 kV	30 kV
引出電流	9.5 mA	5.5 mA
アインツェル電圧	22 kV	22 kV
アインツェル電流	0.01 mA	0.01 mA
上流側真空度	1.0e-4 Pa	2.2e-4

下流側真空度	1.5e-4 Pa	7.0e-5
分析後真空度	2.4e-5 Pa	1.0e-5

3. H₃⁺イオンの生成

現在建設予定中の粒子線治療施設では、炭素イオンの外的イオンを利用したいという要望がある。したがってイオン源では、さまざまなイオンを生成する必要がある。小型 ECR イオン源 Kei2 では、閉じ込め磁場が固定のため、さまざまなイオンを十分な強度で生成するのは困難である。これまでのビームテストの結果から、アルゴンなどの多価イオンの生成は非常に困難になる。しかし、炭素より軽いものの生成は比較的容易であると考えられる。今回は、水素分子イオンの生成を行った。イオン源で $q/A = 1/3$ の H₃⁺ を生成することによって、H⁺ ビームを加速するより空間電荷効果を緩和でき、大強度の加速が可能となる。図 5 に H₂ ガスを用いてビームを引き出した時の価数分布を示す。引出電圧は 30 kV である。ガス流量が少ない時(0.01 cc/min)は水素ビーム以外に炭素ビームが見える(図 5 上)。ガス流量を増やした時(0.12 cc/min)は、炭素ビームが見えなくなり、H₃⁺ ビームが見える。

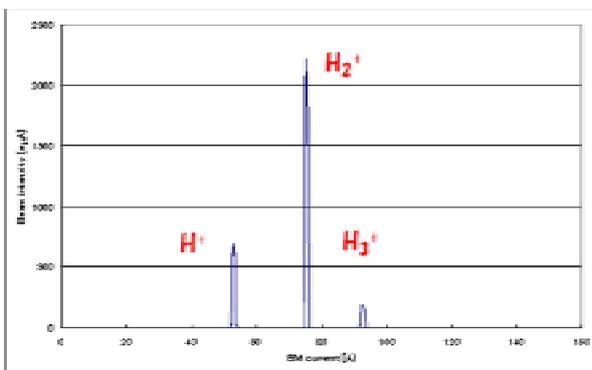
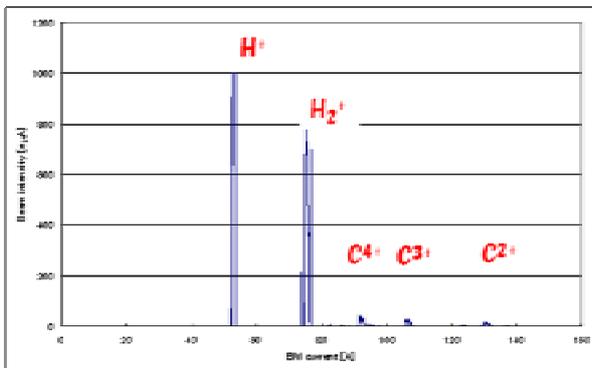


図 5 . H₂ ガス流量 0.01 cc/min のときの価数分布 (上) H₂ ガス流量 0.12 cc/min のときの価数分布 (下)

C⁴⁺ と H₃⁺ は電荷質量比が同じなので、分析電磁石では分けることができない。しかし、価数分布(図

5 下)を見ると炭素の 3 価 2 価が見えないので、H₃⁺ ビームの中に C⁴⁺ はほとんど含まれていないと考えられる。図 6 にガス流量を変えた時の H₃⁺ のビーム強度を示す。0.15 cc/min のときに 270 μA 得られた。これ以上ガス流量を増やすと、引出電極付近で放電が発生し、安定にビームを引き出すことはできなかった。

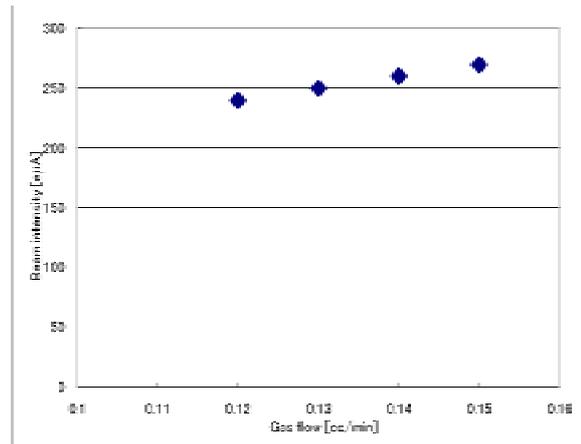


図 6 . ガス流量を変えた時の H₃⁺ のビーム強度

4. まとめと今後の予定

今回の改造の結果から、炭素イオンを生成するときの引出電極付近の放電を抑えるためには、電極付近の真空を改善すると効果があることがわかった。しかし、H₃⁺ 試験の時のようにガスを大量に必要とするときは、放電が発生することがある。したがって、さまざまなイオンの生成に対応するためには、さらに電極付近の改造が必要となる。

H₃⁺ の生成試験を行い、引出電圧 30 kV のときに 270 μA のビーム強度が得られた。今後は水素以外のイオンの生成試験を行う。

- [1] M. Muramatsu, A. Kitagawa, Y. Sakamoto, S. Sato, Y. Sato, Hirotsugu Ogawa, S. Yamada, Hiroyuki Ogawa, Y. Yoshida, A. G. Drentje, Rev. Sci. Instrum. 76, 113304 1-6 (2005).
- [2] Y. Iwata, S. Yamada, T. Muramaki, T. Fujimoto, T. Fujisawa, H. Ogawa, N. Miyahara, K. Yamamoto, S. Hojo, Y. Sakamoto, M. Muramatsu, T. Takeuchi, T. Mitsumoto, H. Tsutsui, T. Watanabe, T. Ueda, Nucl. Instr. and meth. B 572, 1007 (2007)