

## 普及型 ECR イオン源における長期運転パラメータの検討

### INVESTIGATION OF A LONG TERM OPERATION UNDER THE CARBON ION PRODUCTION AT COMPACT ECR ION SOURCE

鈴木太久<sup>#,A)</sup>, 高橋勝之<sup>A)</sup>, 佐々野利信<sup>A)</sup>, 白石直浩<sup>A)</sup>, 村松正幸<sup>B)</sup>  
Taku Suzuki<sup>#,A)</sup>, Katsuyuki Takahashi<sup>A)</sup>, Toshinobu Sasano<sup>A)</sup>, Tadahiro Shiraiishi<sup>A)</sup>,  
Masayuki Muramatsu<sup>B)</sup>

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

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

#### Abstract

A compact accelerator for high energy carbon-ion radiotherapy (C-ion RT) has been studied in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) at National Institute of Radiological Sciences (NIRS) since 2004. Compact accelerators have already been used for treatment at several C-ion RT facilities (Gunma, Saga and Kanagawa). The Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) with all permanent magnets (Kei series) are used at these facilities for production of  $C^{4+}$  ion. These ion sources were designed based on Kei2 of a prototype installed in NIRS. In recent years, dirt sticking to extraction electrode has become a problem. It is thought that the cause of dirt sticking is putting many  $CH_4$  gas into ion source. We thought that the gas mixing method is help with solving the problem. The gas mixing method is technique to help with production of highly charged ions. Therefore, we performed gas mixing test with helium gas at Kei2 ion source. In addition, we have performed long-term operation under the gas mixing parameter for measurement of the dark current at extraction electrode. As a result of gas mixing test, we confirmed that the beam currents of  $C^{4+}$  were obtained to more than 0.3 mA with  $CH_4$  gas reduced around 40% of than an original parameter. A result of long-term operation, the dark current increased to 3mA in the original parameter in 30 days, but was around 2mA in the gas mixing parameter. We performed additional experiment under  $C_4H_{10}$  gas using. As a result,  $C_4H_{10}$  gas was not suitable for long-term operation, because increase of the dark current was faster than using  $CH_4$  gas.

#### 1. はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)では、2004 年から重粒子線がん治療装置の小型化・低コスト化の研究が行なわれている。現在では群馬、佐賀、神奈川の3か所において実機が製作され、治療運用されている。各施設では、永久磁石だけで  $C^{4+}$ イオンを生成するのに最適化された閉じ込め磁場を形成する ECR 型イオン源(Kei シリーズ)を使用しており、普及型イオン源と呼ばれている。これらのイオン源は放医研に設置された試作機の Kei2[1]を基に設計されている。Kei2 は現在 HIMAC において、生物実験用の炭素ビームを供給しており、イオン源ファラデーカップ(FC)にて 300  $\mu A$  程度の  $C^{4+}$ ビームを供給している。

現在、普及型イオン源において引出電極に炭素由来の汚れが付着し、暗電流が増加することでビーム供給が困難になる現象が発生している[2]。暗電流増加の原因として、多量のメタン( $CH_4$ )ガスをイオン化ガスとしてイオン源内に導入することにより、イオン化した炭素が引出電極に付着していることが考えられる。Kei2 では、年2回の定期点検でイオン源内部の清掃を行うことにより対応しているが、治療利用の観点からより長期の安定性が求められている。この現象への対策として、ガスミキシング法が有効であると考えられる。ガスミキシング法は目的とするイオンよりも軽い核種のガスを同時に導入することにより、目的とするイオンの温度を下げて閉じ込め時間を長くする多価イオン生成のための手法である。ガスミキシング法

により  $C^{4+}$ 生成を行うことで、 $CH_4$  のみでの供給時と同等の  $C^{4+}$ ビームを確保しつつ  $CH_4$  ガス量を減らすことができると考えた。そこで、Kei2 を用いたガスミキシング試験を行い、 $CH_4$  の量を減らした上で  $C^{4+}$ ビーム強度を確保できるか確認を行った。ミキシングガスは炭素よりも十分に軽く、化学的に安定なヘリウム(He)とし、He ガスミキシングを用いた長期間の連続運転を行って引出電極の暗電流の変化を測定した。これを普段供給時と比較することで傾向の違いが見られるかを確認した。追加試験として、ブタン( $C_4H_{10}$ )ガスを用いて同様の試験を行った。

#### 2. 試験方法

##### 2.1 He ガスミキシング試験

Kei シリーズには2系統のガス配管ラインが接続されている。通常は、そのうち1系統のみ用いて  $CH_4$  ガスを導入し  $C^{4+}$ を生成している。流量制御にはリンテック製マスフローコントローラ MC-3102E(最大流量 1 cc/min)を使用している。今回は普段未使用のもう1系統を使用して He ガスを導入し、ミキシングを行った。また、試験前に Kei2 の内部点検及び清掃を実施することで、イオン源内部がクリーンな状態から試験を始めた。試験の順序として、最初に  $CH_4$  単体でパラメータサーチを行い 300  $\mu A$  以上の  $C^{4+}$ ビームが得られ、かつパルスごとの安定度が高いパラメータを作成した。そこから He ガスを導入してガスミキシング試験を実施した。その後、日々の  $C^{4+}$ ビーム供給を He ガスミキシングパラメータで行いながら、

<sup>#</sup> aec2g@qst.go.jp

長期運転時の暗電流変化を測定し、CH<sub>4</sub> 単体パラメータでの運転時と比較した。

## 2.2 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガスを用いた試験

これまでの経験から CH<sub>4</sub> よりも C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> をイオン化ガスに用いた方が、多価イオンをより多く生成できることが分かっている[3]。そこで、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガスを使用した C<sup>4+</sup>生成試験を実施することで、CH<sub>4</sub> ガス使用時と同等の C<sup>4+</sup>ビームを得つつ、さらにガス流量を減らすことができるか確認を行った。試験を行うに当たり、CH<sub>4</sub> ガスポンベを取り外して C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガスポンベを取り付けた。また、CH<sub>4</sub> での試験時と同様にイオン源内を清掃してから試験を開始した。C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガス単体パラメータと He ガスマキシングパラメータとでそれぞれ長期運転を行うことで、CH<sub>4</sub> と C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> で暗電流増加の傾向に違いがあるか調べた。

## 3. 試験結果

### 3.1 CH<sub>4</sub> ガス依存性

Figure 1 に CH<sub>4</sub> ガス量を変化させた時の C<sup>4+</sup>ビーム電流の変化を示す。Figure 1 において、1 つの測定点につき 10 回測定を行い、平均値をプロットした。エラーバーは 10 回の標準偏差である。試験時のマイクロ波進行波は 320 W、周波数は 10.21 GHz とした。また、引出電圧が 30 kV、アインツェルレンズ電圧が 20 kV、バイアスディスク電圧が -35 V である。Figure 1 より、CH<sub>4</sub> ガス流量が 0.047 cc/min のとき、C<sup>4+</sup>ビームは最も多くなった。CH<sub>4</sub> ガス流量が少ない時に C<sup>4+</sup>ビームが少ないのは、イオン化するための炭素原子が少ないことによるものと思われる。一方、CH<sub>4</sub> を 0.047 cc/min よりも多く流した時にも C<sup>4+</sup>ビームは減少傾向にあった。これはイオン源内部の真空度が悪化したことにより、多価イオンの生成が阻害されたためであると思われる。

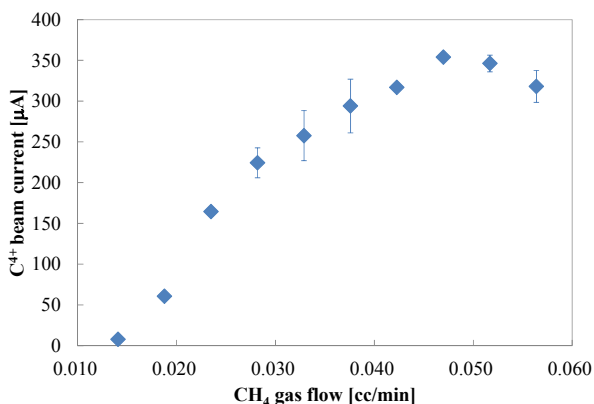


Figure 1: Dependence of CH<sub>4</sub> gas flow at Kei2.

### 3.2 He ガスマキシング試験

Figure 2 に CH<sub>4</sub> ガス量を変化させた 5 つの条件に対して、徐々に He ガスを導入した際の C<sup>4+</sup>ビーム電流値の変化を示す。Figure 2 において 1 つの測定点につき

10 回測定を行い、平均値をプロットした。エラーバーは 10 回の標準偏差である。Figure 2 より、CH<sub>4</sub> 流量が多い条件では He 流量が多くなると C<sup>4+</sup>ビームは減少する傾向にあった。一方で CH<sub>4</sub> 流量が少ない条件では He 流量に伴い C<sup>4+</sup>ビームが増加する様子が見られた。この結果から、特にイオン化ガスが少ない時はガスマキシングの効果によって多価イオン生成が助けられていることが分かった。一方で CH<sub>4</sub> ガス流量が多い時にはガスマキシングによるビームの増加が少なかったことから、イオン源の真空度が多価イオン生成の支配的な条件であると考えられる。

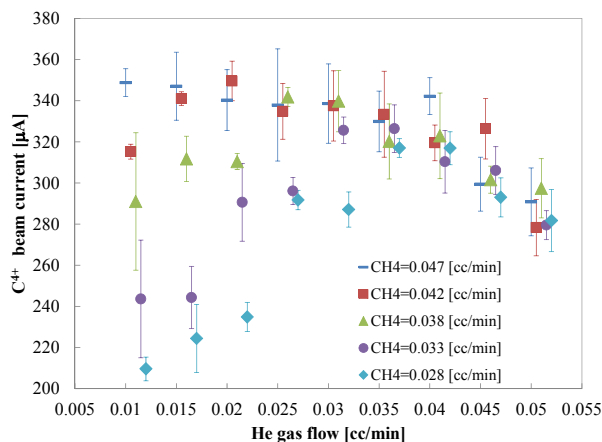


Figure 2: Helium gas mixing test at Kei2.

### 3.3 He ガスマキシングパラメータでの長期運転

Table 1 にそれぞれの条件における基本パラメータを示す。実際の供給時にはビームの状態によってマイクロ波及びガス流量を微調整し、300 μA 以上の C<sup>4+</sup>を確保しつつ、パルスごとの安定度が高くなるよう調整を行っている。Figure 3 にガスマキシングパラメータと CH<sub>4</sub> 単体パラメータでそれぞれ長期運転を行った際の引出暗電流の変化を示す。Figure 3 中の横軸は測定開始日を 0 とする経過日数、縦軸は引出暗電流をそれぞれ示している。Figure 3 より、30 日経過時点で CH<sub>4</sub> 単体パラメータでは暗電流が 3 mA 程度流れているのに対して、ガスマキシング時は 2 mA 程度であった。このことから、CH<sub>4</sub> ガス量を減らすことは引出暗電流の増加を抑えるために有効な手段であると考えられる。一方で 60 日以上たった段階ではどちらの条件においても暗電流値が不安定になる様子が見られた。

Table 1: Base Parameter of Long-term Operation

機器	単位	CH <sub>4</sub> 単体	He ミキシング
マイクロ波(進行波)	W	320	280
マイクロ波(周波数)	GHz	10.210	10.206
マイクロ波(パルス幅)	msec	30	30
イオン化ガス(CH <sub>4</sub> )	cc/min	0.047	0.035
サポートガス(He)	cc/min	未使用	0.027
引出電圧	kV	30	30
アインツェルレンズ電圧	kV	20	20
バイアスディスク電圧	V	-35	-30
イオン源 FC 電流	μA	350	310
上流側真空度	Pa	3.0E-4	2.7E-4
下流側真空度	Pa	9.9E-5	7.0E-5

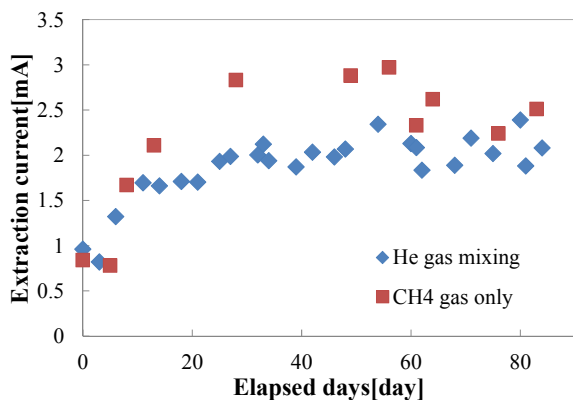


Figure 3: Long-term operation under helium gas mixing.

### 3.4 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>を用いた試験

Figure 4 に C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガス量を変化させた時の C<sup>4+</sup>ビーム電流の変化を示す。試験時のマイクロ波進行波は 300 W、周波数は 10.20 GHz とした。また、引出電圧が 30 kV、アインツェルレンズ電圧が 20 kV、バイアスディスク電圧が -40 V である。Figure 4 より、CH<sub>4</sub> 使用時よりも少ないガス流量で 500 μA 以上の C<sup>4+</sup>ビームが得られることが分かった。この結果から多価イオンの生成においては C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の優位性が認められた。Figure 5 に C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 単体パラメータと He ガスミキシングパラメータでそれぞれ長期運転を行った際の引出暗電流の変化を示す。測定期間は 60 日間とした。C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ガス単体パラメータではガス流量を 0.01 cc/min 付近でパルス安定度の高いパラメータとした。Figure 5 より、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 単体パラメータでは、30 日経過した時点で引出暗電流が 4 mA を超えており、CH<sub>4</sub> 使用時よりも変化が急であることが分かる。一方で、He ガスミキシングパラメータでは CH<sub>4</sub> 使用時と同様の傾向を示した。このことから、長期運転という観点では C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> を用いるのは不適切であると考えられる。He ガスミキシ

ングを用いれば暗電流の増加は抑えられたが、C<sup>4+</sup>ビーム電流は最大で 360 μA 程度であり、CH<sub>4</sub> と比較して優位性は認められなかった。

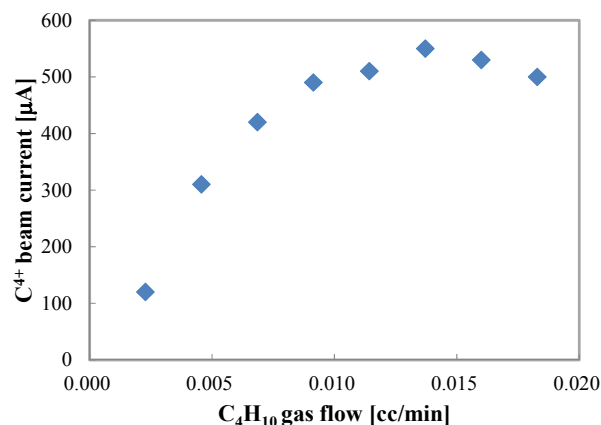


Figure 4: Dependence of C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> gas flow at Kei2.

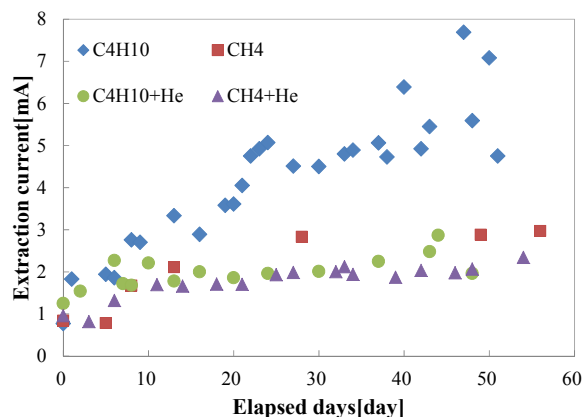


Figure 5: Long-term operation under C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> gas.

## 4. まとめ

He ガスミキシングを行うことにより、CH<sub>4</sub> ガスの導入量を最大 4 割程度減らしつつ、CH<sub>4</sub> 単体供給時と同等の C<sup>4+</sup>ビームを得られた。長期運転時の暗電流についてはミキシングを行うことで上昇が抑えられる様子が確認されたが、一方で最終的な暗電流値は CH<sub>4</sub> 単体の時と大きく異なるわけではない様子であった。

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> を使用することで CH<sub>4</sub> 使用時よりも少ないガス流量で 500 μA 以上の C<sup>4+</sup>が得られたが、暗電流の上昇が激しく長期運転には向かないことが分かった。

今後はイオン化ガスに CO<sub>2</sub> を用いたパラメータを検討するなどして、より安定な長期運転を目指す。

## 参考文献

- [1] M. Muramatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76, 113304 1-6 (2005).
- [2] Y. Kishi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 85, 02A506 (2014).
- [3] M. Muramatsu *et al.*, Proceedings of HIAT2015, 247-249 (2015).