

# マルチイオン供給用新規 ECR イオン源の開発に向けた炭素イオン生成試験

## BEAM TEST OF CARBON ION PRODUCTION FOR DEVELOPMENT OF NEW COMPACT ECR ION SOURCE FOR MULTI ION THERAPY

鈴木太久<sup>#, A)</sup>, 大内章央<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>, 岩田佳之<sup>B)</sup>  
Taku Suzuki<sup>#, A)</sup>, Fumihisa Ouchi<sup>A)</sup>, Katsuyuki Takahashi<sup>A)</sup>, Toshinobu Sasano<sup>A)</sup>, Tadahiro Shiraiishi<sup>A)</sup>,  
Masayuki Muramatsu<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>B)</sup>,

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

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

### Abstract

National Institute of Radiological Sciences (NIRS) promotes multiple ion therapies that form LET and dose distribution with ideal relative biological effectiveness in cancer treatment by irradiating several types of ions to the target. We are developing a compact ECR ion source of all permanent magnets that produces four ions ( $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{C}^{4+}$ ,  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{7+}$ ) used in multiple ion therapy. We produced four ions with NIRS-HEC in a fixed magnetic field. As a result, it was obtained ion beam with sufficient intensity for multi-ion treatment. At present, there is a request of high energy beams for biological/physical experiments in addition to therapeutic use in heavy ion radiotherapy facilities. Also, considering cost reduction of the injector, it is necessary to produce ions other than carbon in the ion source and to produce an ion beam having a higher charge than that during treatment supply. Therefore, it is confirmed whether the new ion source can be applied to applications other than treatment supply. We performed  $\text{C}^{4+}$  and  $\text{C}^{5+}$  production tests in a fixed magnetic field with NIRS-HEC. As a result of using two gases and afterglow tuning, it was obtained that sufficient ion beam of 800  $\mu\text{A}$  for  $\text{C}^{4+}$  and 500  $\mu\text{A}$  for  $\text{C}^{5+}$ .

### 1. はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)では、1994年に炭素による重粒子線治療が始まり、2004年からは重粒子線がん治療装置の小型化・低コスト化の研究を行っている。そして現在、数種類のイオンを照射する事で、患部をより効果的に治療する事が出来るマルチイオン照射を推進している[1, 2]。ヘリウム、炭素、酸素、ネオンの4種類の核種を想定しており、複数のイオン源を利用すれば容易に切替えが可能となるが、コストと運転・メンテナンスの観点から、イオン源1台で対応することが望まれる。そこで我々は、生物・物理実験に於いて様々な核種の供給実績のある18GHz ECR イオン源(NIRS-HEC) [3]を用いて  $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{4+}$  のイオン生成試験及び供給を行ってきた。

重粒子線治療用イオン源のさらなる普及のためには、ミラー磁場を永久電磁石により作成する ECR 型イオン源を用いて、省コスト、省スペース化を図ることが望ましい。しかし現在、群馬、佐賀、神奈川の治療施設で利用されている永久磁石型 ECR 型イオン源(Kei2) [4]では、ミラー磁場が  $\text{C}^{4+}$  に最適化されているため、炭素以外の核種について十分な量の多価イオンを得ることは困難である。そのため、我々はマルチイオン供給用の新規永久磁石型 ECR イオン源の設計を検討している。目標のイオンは  $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{C}^{4+}$ ,  $\text{O}^{6+}$ ,  $\text{Ne}^{7+}$  とした。これらのイオンは前述の治療施設で使用されている線形加速器で加速可能なもの(質量電荷比が 1/3 以上)である。これまでに NIRS\_HEC を用いた試験では、それぞれ最大で 1100  $\mu\text{A}$ 、570  $\mu\text{A}$ 、530  $\mu\text{A}$ 、390  $\mu\text{A}$  の治療供給に十分なビーム電流が得ら

れた[5]。

現在、普及型治療施設において、治療供給以外に生物・物理実験に高エネルギーイオンビームを利用したいと言う要求がある。また、入射器のコストダウンを考慮すると、イオン源において炭素以外のイオンを生成するとともに、多価のイオンビームが必要となる。そこで今回は、新規イオン源を治療供給以外の用途に応用できるか確認するために、NIRS-HEC を用いて新規イオン源のミラー磁場を再現し、 $\text{C}^{4+}$  及び  $\text{C}^{5+}$  の生成を行う事とした。

### 2. 実験方法

ECR 型イオン源について、電子は磁場によって閉じ込められるが、イオンもまた、電子と同様に磁場により閉じ込めを受ける。電子はイオンより質量が極めて小さいので、プラズマ中での熱運動の速度はイオンに比べて圧倒的に大きい。このため電子がまず先に拡散しようとする。するとプラズマの中性状態が崩れるが、同時に電子集団とイオン集団の間に互いに引き戻そうとするクーロン力が働く。そのため、電子はイオンに引っ張られて拡散が抑えられ、イオンは電子に引っ張られて拡散が加速される。こうして、プラズマは中性を保とうとして電子を保持しようとするが、全体として少し正に帯電することとなる。ここで、ミラー磁場に閉じ込められた電子のうち、ECR 加熱を受けたホット電子は、磁力線に対する垂直方向の速度成分が大きいことにより、ECR 加熱を受けていない電子よりもミラー磁場中心付近に非常によく閉じ込められる。このため、閉じ込められたホット電子の負電位によって、正に帯電しているプラズマの電位が、中心付近では少し低くなる。この正電位が低くなっているへこみのことをポテン

<sup>#</sup> acc2g@qst.go.jp

シャルディップと呼び、イオンはこのへこみに良く閉じ込められることとなる[6]。Figure 1 にプラズマポテンシャルとミラー磁場、電子密度の関係を示す。

パルス運転を行うイオン源では、 $\mu$  波出力が途切れた後に、ポテンシャルディップ内部に閉じ込められていた多価イオンが電子とともに流出するアフターグローが確認される。アフターグローの多価イオンを利用する調整を行うことは、閉じ込め磁場が固定である永久磁石型の ECR イオン源において、多価イオンを増やすための手法として有効であると考えられる。アフターグロー調整時のビーム波形の例を Fig. 2 に示す。Ch4 ( $\mu$  波出力) の波形が下がり始めると共に Ch1 (ビーム電流) の波形が上昇し始める事がわかる。今回の実験では NIRS-HEC を用いて、新規イオン源の磁場構造を再現し、 $C^{4+}$ ならびに  $C^{5+}$  のビーム調整を行った。イオン化ガスには  $CH_4$  を使用し、引出電圧は 30 kV とした。価数分布を取得し、通常の調整との比較を行った。また、 $\mu$  波パワーとガス流量の依存性を取得し、最適なパラメータの検討を行った。

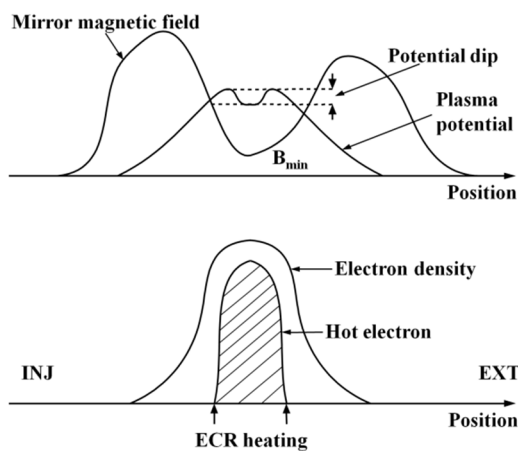


Figure 1: Relationship between plasma potential, mirror magnetic field and electron density.

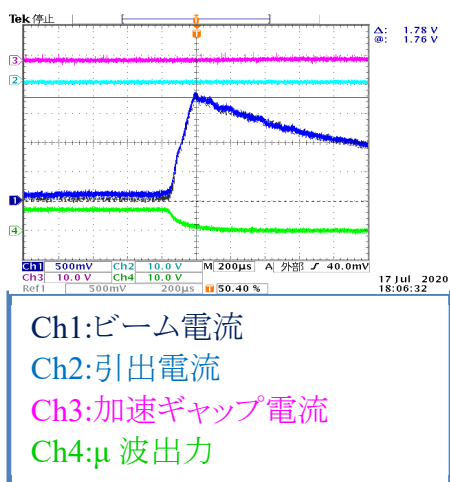


Figure 2: Waveform of afterglow tuning.

### 3. 試験結果

#### 3.1 価数分布の測定

アフターグローと通常の調整でそれぞれ  $C^{5+}$  生成に最適化し、価数分布を測定した。 $\mu$  波パワーはアフターグロー調整時には 1000 W、通常調整時には 2000 W である。 $CH_4$  ガス量はいずれも 0.011 cc/min である。測定結果から炭素イオンを抽出したものを Fig. 3 に示す。ただし、 $C^{6+}$  については質量電荷比が 1/2 であり、 $H_2^+$  が混入していると考えられるので除外した。Figure 3 より、特に  $C^{4+}$ 、 $C^{5+}$  においてアフターグロー調整の方が通常の調整に比べてビーム電流が増加した。 $\mu$  波パワーも抑えられることから、 $\mu$  波源の小型化にも寄与すると思われる。以下の試験は全てアフターグロー調整で行う事とした。

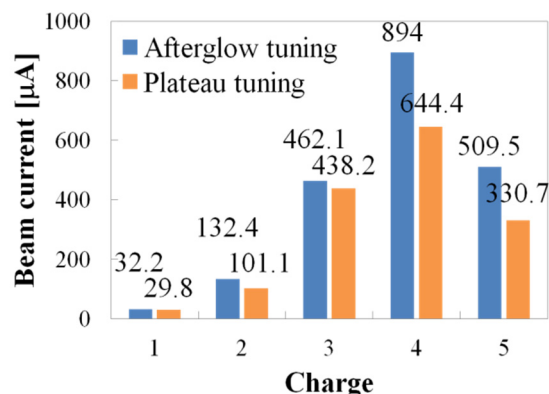


Figure 3: Charge state distribution of carbon ions.

#### 3.2 依存性の確認

Figure 4 に  $\mu$  波パワー依存性、Fig. 5 にガス流量依存性の測定結果をそれぞれ示す。パワー依存性測定時の  $CH_4$  ガス流量は  $C^{4+}$  調整時には 0.011 cc/min、 $C^{5+}$  調整時には 0.017 cc/min である。ガス流量依存性測定時の  $\mu$  波パワーは  $C^{4+}$ 、 $C^{5+}$  ともに 2000 W である。Figure 4 より、 $C^{4+}$ 、 $C^{5+}$  ともに 2000 W 付近でビーム電流が最大となった。ガス依存性については Fig. 5 より、いずれの場合も 0.014 cc/min 付近でビーム電流が最大となった。いずれの試験においても、それぞれのイオンビーム電流最大値は  $C^{4+}$  で 750  $\mu A$ 、 $C^{5+}$  で 480  $\mu A$  となっており、価数分布測定時の状態を再現しなかった。原因として、試験の時期の違いにともなうプラズマチャンバー内の汚れが多価イオン生成を阻害している事が考えられる。

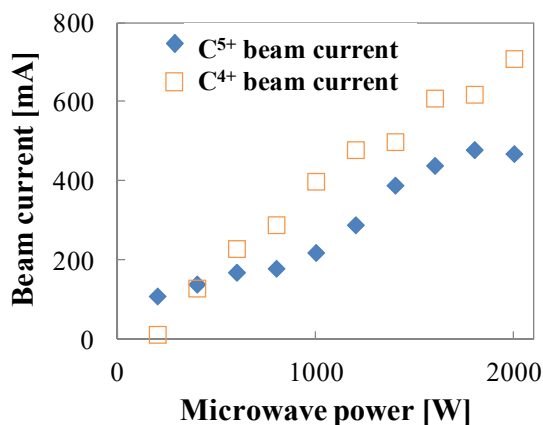


Figure 4: Dependence of microwave power at C<sup>4+</sup> and C<sup>5+</sup>.

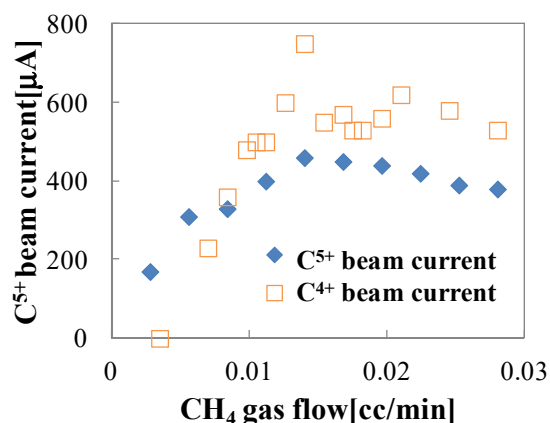


Figure 5: Dependence of CH<sub>4</sub> gas flow at C<sup>4+</sup> and C<sup>5+</sup>.

### 3.3 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>を使用した C<sup>5+</sup>ビーム調整

追加試験として、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>をイオン化ガスに使用して C<sup>5+</sup>ビーム調整を行った。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[7]。イオン源内部が汚れており、多価イオンが出づらい状況下において、イオン化ガスを変えて調整する事が有効か検討を行った。Figure 6 にパワー依存性、Fig. 7 にガス流量依存性をそれぞれ示す。Figure 6 より、1400 W で C<sup>5+</sup>が 500 μA 得られた。CH<sub>4</sub> 使用時よりも、少ないパワーで同等の多価イオンが得られることが分かった。ただし、1600 W の時には減少傾向が見えており、CH<sub>4</sub> 使用時と異なる様子が見えた。また、Fig. 7 より、0.002 cc/min で C<sup>5+</sup>ビームが最大となった。0.002 cc/min 以降は減少傾向が見えているが、真空度の悪化に伴い、多価イオン生成が阻害されているものと思われる。

## 4. まとめ

新規イオン源の磁場設計で炭素の多価ビーム出しを行い、C<sup>4+</sup>で 800 μA 以上、C<sup>5+</sup>で 500 μA 以上のビーム電流が確認できた。これらの値は実験供給を行うのに十分な量である。一方で、μ波パワー依存性、ガス流量依存性を取得した際には、ビーム電流が再現しなかった。

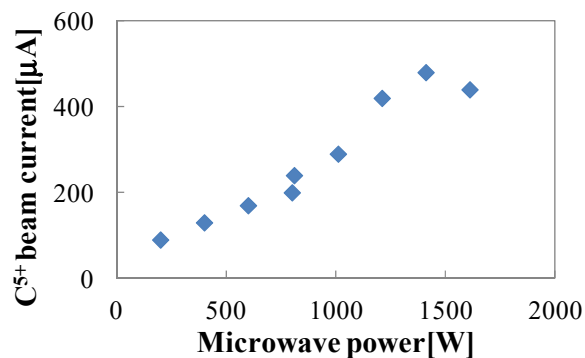


Figure 6: Dependence of microwave power under C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> gas.

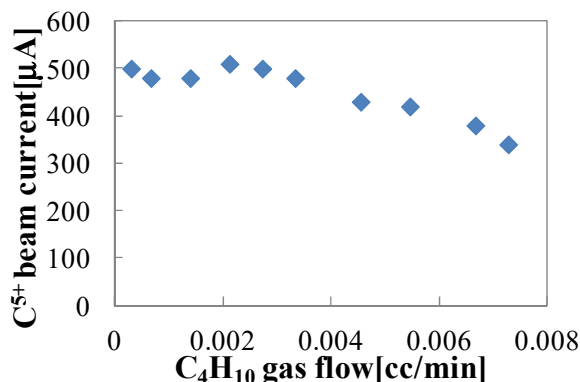


Figure 7: Dependence of C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> gas flow.

データの取得時期が異なるため、イオン源内部の汚れが結果に影響したと考えられる。

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>をイオン化ガスに利用すれば、CH<sub>4</sub>使用時よりも低いμ波パワーで多価イオンの生成が行える事が分かった。ただし、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>はCH<sub>4</sub>よりもイオン源内部の汚れを促進させる事が知られていることから、長期運転を行う上では対策を検討する必要がある。

今後、安定に長時間の供給が行えるイオン源の構造や、パラメータの検討を行っていく。

## 参考文献

- [1] T. Inaniwa, N. Kanematsu, Phys. Med. Boil. 61 542-550 (2016).
- [2] T. Inaniwa *et al.*, Phys. Med. Boil. 62-5180 (2016).
- [3] A. Kitagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 69 674 (1998).
- [4] M. Muramatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76, 113304 1-6 (2005).
- [5] F. Ouchi *et al.*, PASJ2019, WEPI037 (2019).
- [6] Thomas A. Carlson *et al.*, Atomic Data 2 (1970) 63.
- [7] M. Muramatsu *et al.*, Proceedings of HIAT2015, 247-249 (2015).