

# 小型 ECR イオン源でのガスミキシング法による多価イオンの強度増強実験 IMPROVEMENT OF HIGHLY CHARGED ION PRODUCTION WITH GAS MIXING METHOD AT KEI3

村松正幸<sup>#,A)</sup>, 高橋勝之<sup>B)</sup>, 鈴木太久<sup>B)</sup>, 福島恵太<sup>B)</sup>, 高橋伸明<sup>C)</sup>, 岩田佳之<sup>A)</sup>, 北川敦志<sup>A)</sup>  
Masayuki Muramatsu<sup>#,A)</sup>, Katsuyuki Takahashi<sup>B)</sup>, Keita Fukushima<sup>B)</sup>, Nobuaki Takahashi<sup>C)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>A)</sup>,  
and Atsushi Kitagawa<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

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

<sup>C)</sup> Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

## Abstract

There is a desire that a carbon-ion radiotherapy facility will produce various ion species for fundamental research. Although the present Kei2-type ion sources are dedicated for the carbon-ion production, a future ion source is expected: 1) carbon-ion production for medical use, 2) various ions with a charge-to-mass ratio of 1/3 for the existed linac injector, and 3) low cost for modification. A prototype compact electron cyclotron resonance (ECR) ion source, named Kei3, based on Kei series has been developed to correspond to produce these various ions at National Institute of Radiological Sciences (NIRS). We checked beam current of He<sup>2+</sup>, C<sup>4+</sup>, N<sup>5+</sup>, O<sup>6+</sup> and Ne<sup>7+</sup> to know the performance of Kei3. Beam intensity of He<sup>2+</sup>, C<sup>4+</sup>, N<sup>5+</sup>, and O<sup>6+</sup> reached to requirement value, however, Ne<sup>7+</sup> is not yet reach. Therefore, we try to increase the beam intensity of Ne<sup>7+</sup> using gas mixing method.

## 1. はじめに

現在、世界的に粒子線治療施設の建設が予定されている。それらの計画の中では炭素以外のイオンを加速し、研究などに用いることが計画されている。たとえば、H<sub>3</sub><sup>+</sup>, <sup>3</sup>He<sup>+</sup>, <sup>11</sup>B<sup>4+</sup>のようなイオンを利用する要求がある。これらの要求を達成するために、様々なイオンの供給を行える ECR イオン源(Kei3)の開発を行っている。Kei3 は、既存の炭素線がん治療装置用の小型 ECR イオン源と同様の閉じ込め磁場を採用しているため、C<sup>4+</sup>に近いイオンを生成することが可能となる。Kei3 では、基本的な性能を知るために、これまでにヘリウム、炭素、窒素、酸素、ネオンイオンの生成を行ってきた[1]。

## 2. Kei3 のビームテスト

Table 1 に Kei3 への要求値と、これまでに得られた最大強度の表を示す。最大のビーム強度は、それぞれ He<sup>2+</sup>: 1950 eμA, C<sup>4+</sup>: 565 eμA, N<sup>5+</sup>: 185 eμA、O<sup>6+</sup>: 99 eμA、Ne<sup>7+</sup>: 13.8 eμA であった。窒素、酸素、ネオンの調整には、ビーム強度増強のためにガスミキシング法を使用している。ガスミキシング法は多価イオンのビーム強度増強のための手法で、目的のイオンより軽いガスを導入することによって、目的のイオンの温度を下げ閉じ込め時間を長くする効果がある。窒素、酸素ではヘリウムガスをミキシングガスとして使用している。ネオンでは、ヘリウムより酸素を使用したときに効果が大きかった。Figure 1 にそれぞれのイオン種の価数分布を示す。この時の引出電圧は 30 kV である。ガス流量、バイアスディスク電圧、マイクロ波の周波数、出力はそれぞれのビームが最大になるように調整した。マイクロ波源には Xicom 製 XTRD-

300Hを使用した。周波数帯域は8–10 GHz、出力は350 W である。

Table 1: Requirement and Result Value of Beam Intensity

Ion	Requirement [eμA]	Result [eμA]	material
H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	500		H <sub>2</sub> gas
<sup>3</sup> He <sup>+</sup>	250	3100( <sup>4</sup> He <sup>+</sup> )	He gas, 50% <sup>3</sup> He
<sup>7</sup> Li <sup>3+</sup>	100		Vapor
<sup>9</sup> Be <sup>4+</sup>	50		BeF <sub>2</sub>
<sup>11</sup> B <sup>4+</sup>	50		C <sub>2</sub> H <sub>12</sub> B <sub>10</sub>
<sup>12</sup> C <sup>4+</sup>	300	565	CH <sub>4</sub> gas
<sup>14</sup> N <sup>5+</sup>	100	185(with He)	N <sub>2</sub> gas
<sup>16</sup> O <sup>6+</sup>	100	99(with He)	O <sub>2</sub> gas
<sup>19</sup> F <sup>7+</sup>	50		CF <sub>4</sub> gas
<sup>20</sup> Ne <sup>7+</sup>	50	13.8(with O <sub>2</sub> )	Ne gas

これまでの結果を見ると、O<sup>6+</sup>はかろうじて要求値を満たしているが、Ne<sup>7+</sup>は要求値にとどいていない。Ne<sup>7+</sup>の強度を上げるために、ヘリウムと酸素の間の質量となる炭素が含まれる CH<sub>4</sub> ガスをミキシングガスとして使用した。

<sup>#</sup> muramatsu.masayuki@qst.go.jp

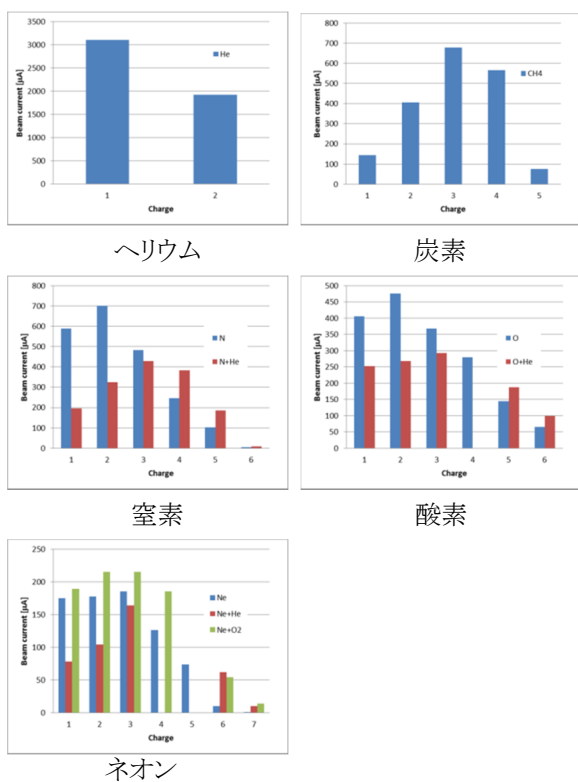


Figure 1: Charge state distribution.

Figure 2 にネオンの価数分布を示す。CH<sub>4</sub> を混ぜた時に、ヘリウム、酸素と比較して多価イオンの強度が上がっているのがわかる。Ne<sup>7+</sup>では目標値の 50  $\mu\text{A}$  得られた。

次に、CH<sub>4</sub> ガスがミキシングガスとしてふるまっているのか、炭素と水素がミキシングガスとしてふるまっているのか確認するために、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> をミキシングガスとして使用してみた。Figure 3 にメタンとブタンを混ぜた時のネオンの価数分布を示す。ネオンの価数分布に違いは見られなかった。この結果により、ミキシングガスとして作用しているのは分子ではなく、炭素と水素のイオンであることがわかった。

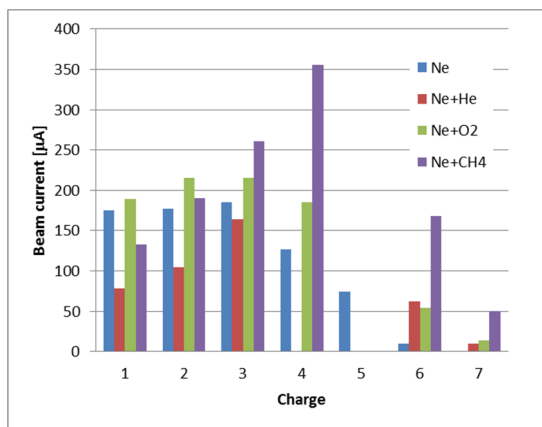


Figure 2: Charge state distribution of Neon.

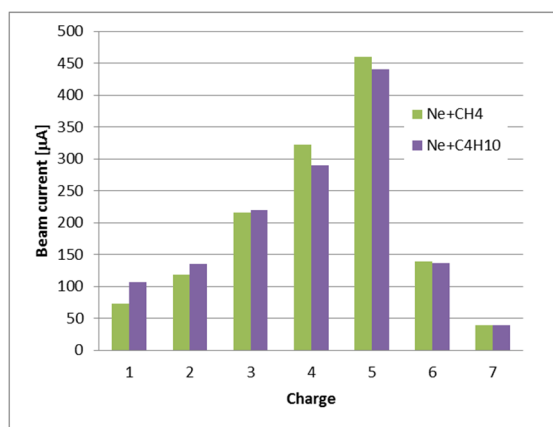


Figure 3: Charge state distribution of Neon with CH<sub>4</sub> and C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> gases.

次に、<sup>13</sup>CH<sub>4</sub> ガスをミキシングガスに使用し、ネオンの価数分布を確認した。Figure 4 にネオンの価数分布を示す。<sup>13</sup>CH<sub>4</sub> をミキシングガスとして使用した場合は、<sup>12</sup>CH<sub>4</sub> より価数分布が低い方へ移行しているのがわかる。

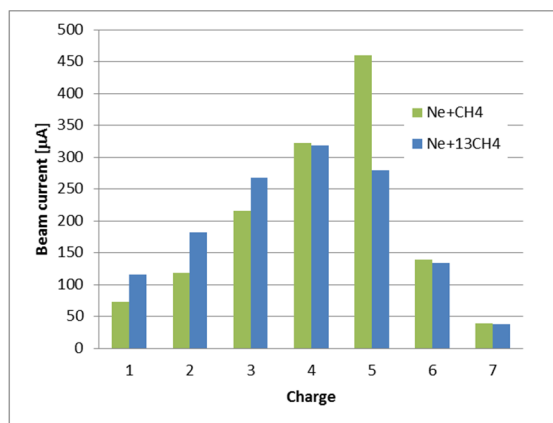


Figure 4: Charge state distribution of Neon with CH<sub>4</sub> and <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> gases.

### 3. まとめ

Kei3 ではこれまでに、ヘリウム、炭素、窒素、酸素、ネオンイオンの生成を行い、最大のビーム強度は、それぞれ He<sup>2+</sup>: 1950  $\mu\text{A}$ 、C<sup>4+</sup>: 565  $\mu\text{A}$ 、N<sup>5+</sup>: 185  $\mu\text{A}$ 、O<sup>6+</sup>: 99  $\mu\text{A}$ 、Ne<sup>7+</sup>: 13.8  $\mu\text{A}$  であった。ガスミキシング法による Ne<sup>7+</sup>の強度増強を図り、CH<sub>4</sub> を使用したときに最大となった。

### 参考文献

- [1] M. Muramatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 87, 02C110 (2016).