

## Present status of compact ECR ion source

Masayuki Muramatsu<sup>1,A,B)</sup>, Atsushi Kitagawa<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>B)</sup>, Hirotsugu Ogawa<sup>B)</sup>, Satoru Hojo<sup>B)</sup>,  
Yoshikazu Yoshida<sup>C)</sup>, Sandor Biri<sup>D)</sup>, Arne G. Drentje<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate school of Mechanical Engineering, Toyo University, Japan

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

<sup>C)</sup> Department of Mechanical Engineering, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-0815, Japan

<sup>D)</sup> Institute of Nuclear Research (ATOMKI), H-4026 Debrecen, Ben ter 18/c, Hungary

<sup>E)</sup> K.V.I, University of Groningen, 9747 AA Groningen, The Netherlands

### Abstract

The 10 GHz compact Electron Cyclotron Resonance (ECR) Ion Source with all permanent magnets (Kei2-source) has been developed since 2003. The maximum mirror magnetic field on the beam axis are 0.59 T at the extraction side and 0.87 T at the gas injection side. The minimum B strength is 0.25 T. The size of the source is 300 mm in diameter and 290 mm in length. Details of the improvement and the application of the source are reported.

## 小型ECRイオン源の現状

### 1. はじめに

小型ECRイオン源(Kei2-source)は、普及型がん治療装置で使われる炭素イオンの4価を生成するのが目的であり、現在までに最大530 eμAのビーム強度が得られている<sup>[1]</sup>。このビーム強度を得るために、ビーム強度を改善する手法として従来から行われているバイアスディスク法を採用し成功した(ディスクなしでは300 eμA)。ECRイオン源においてバイアスディスク法のほかにも多価イオンのビーム強度を上げるためのテクニックがいくつかあるが、大きな改造を必要としないでビーム強度増強を図るには、ガスミキシング法が最適であると考えられる。ガスミキシング法は、目的とするイオンとは別の軽いイオンを同時に生成すると(例えば、アルゴン生成時に酸素を混ぜる)、目的のイオンが軽いイオンと衝突し冷却され、イオンの閉じ込め時間を長くする手法である。今回は、ガスミキシング法を用いた炭素の多価イオンのビーム強度増強について報告する。

### 2. ビーム強度増強(ガスミキシング法)

ECRイオン源において炭素イオンを生成するとき、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)やメタン(CH<sub>4</sub>)などのガスが用いられる。これは炭素単体のときは、気体でなく固体で存在し、固体のままではイオン化を行うには困難だからである。気体の場合は、CO<sub>2</sub>の場合は酸素が、CH<sub>4</sub>の場合は水素がミキシングガスとなる。酸素は目的とする炭素より重いため、炭素の多価イオンを生成するのが困難になり、逆に水素は炭素の多価イオンの生成が容易になる。

今回は、水素の代わりに重水素がついているガスを用いて比較を行った。今回ビームテストに用いた

ガスは、CH<sub>4</sub>、CD<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>10</sub>、C<sub>2</sub>D<sub>10</sub>である。まずCH<sub>4</sub>とCD<sub>4</sub>の比較を行った。図1にビームテストの結果を示す。左の図は、C<sup>4+</sup>のビーム強度、右の図はC<sup>5+</sup>のビーム強度を示す(イオン源のパラメータはそれぞれに最適化した)。横軸が引出電圧で、縦軸がC<sup>4+</sup>(左)とC<sup>5+</sup>(右)のビーム強度である。テストの結果から、C<sup>4+</sup>では違いが見られないが、C<sup>5+</sup>ではCD<sub>4</sub>の方が多くなっていることがわかる。同様にC<sub>2</sub>H<sub>10</sub>とC<sub>2</sub>D<sub>10</sub>の比較も行った(図2)。これも、メタンのテストと同じように、C<sup>4+</sup>では違いが無く、C<sup>5+</sup>では重水素になっているほうが多くなっていることがわかった。これらの結果から、水素より重水素のほうが、ミキシングガスとしてよいということがいえる。また、メタンとブタンを比較してみると、ブタンのほうがビーム強度が多く得られているのがわかる。これは、ミキシングガス(水素または重水素)の割合が、メタンよりもブタンのほうがC<sup>4+</sup>を生成するのに適していたと考えられる。

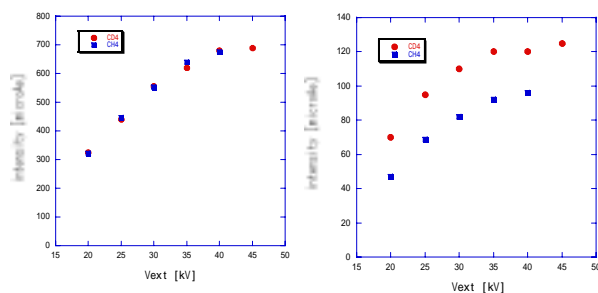


図1. CH<sub>4</sub>とCD<sub>4</sub>の比較。C<sup>4+</sup>のビーム強度(左)とC<sup>5+</sup>のビーム強度(右)

<sup>1</sup> m\_mura@nirs.go.jp

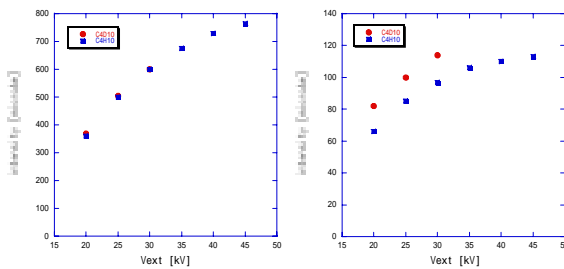


図2 . C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>とC<sub>4</sub>D<sub>10</sub>の比較。C<sup>4+</sup>のビーム強度(左)とC<sup>5+</sup>のビーム強度(右)

そこで、さらにミキシングガスの割合が少ないアセチレン(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)を試した。図3にメタン、ブタン、アセチレンの結果をまとめる。アセチレンは、メタン、ブタンと比較して、4, 5価ともに強度が高くなっているのがわかる。このときのC<sup>4+</sup>の最大強度は、引出電圧40 kVで700 eμAであった。この結果から、ミキシングガスはさらに少ないほうが、多価イオン生成には適していることがわかった。

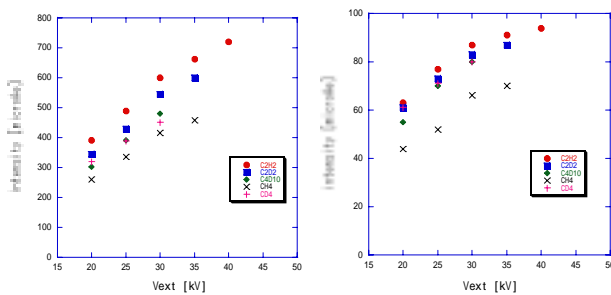


図3 . C<sup>4+</sup>のビーム強度(左)とC<sup>5+</sup>のビーム強度(右)

### 3 . 金属内包フラーレンの生成

現在、フラーレン(C<sub>60</sub>)内に鉄などの金属原子を内包させる研究が、さまざまな方法で行われている。我々はECRイオン源を用いて、C<sub>60</sub>+金属原子のプラズマを発生させ、金属内包フラーレンの合成を試みている。ECRイオン源の特徴として、イオンの閉じ込め時間が長いことから、フラーレンイオンに金属イオンが内包される確立が上がると考えている。

ECRイオン源内にてC<sub>60</sub>を蒸発させ、プラズマを発生させると、C<sub>58</sub>やC<sub>56</sub>など炭素原子が偶数個欠けた構造(C-two-loss)のフラーレンが生成されることが知られている。図4にKei2-sourceから引出された代表的なフラーレンイオンの価数分布を示す。この偶数個欠けたフラーレンには、大きな安定した穴が存在することがモデル解析されている。そこで、C<sub>60</sub>と同時に鉄をイオン源内で蒸発させECRプラズマを発生させることにより、鉄内包フラーレン(C<sub>60</sub>+Fe)の合成を試みる。

C<sub>60</sub>+Feの合成を行うにあたって重要な点は、できるだけピュアなC<sub>60</sub>とFeのプラズマを発生させること

である。これは、C<sub>60</sub>とFeが出会う確立を上げるためと、質量分析を容易にするためである。C<sub>60</sub>の蒸発にはmicro oven<sup>[2]</sup>を使用した。C<sub>60</sub>は500 程度の比較的低い温度で蒸発するため、困難無くピュアなプラズマを発生させることができる。鉄の蒸発は融点が1500 以上と高いため、ピュアな蒸気をつくりだすにはC<sub>60</sub>と比較すると非常に困難となる。今回は鉄の蒸発源として、フェロセンとインダクションオープン(IHオープン)<sup>[3]</sup>を使用した。フェロセン(Fe(C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>)は、鉄原子に水素と炭素がついた化合物で、常温で昇華する非常に扱いやすいものである。しかし、鉄以外のものが含まれているので、ピュアな鉄プラズマを生成することはできない。IHオープンは、誘導加熱で試料を直接過熱するため、フェロセンと比較すると、ピュアなプラズマの生成が可能となる。フェロセンを用いたとき実験では、C<sub>60</sub>+Feおよび、壊れたC<sub>60</sub>に鉄がついたイオンは観測することができなかった。Kei2-sourceは閉じ込め磁場を変化させてビーム調整を行うのができないので、C<sub>60</sub>+Feのビームを生成するのは非常に困難であることがわかった。

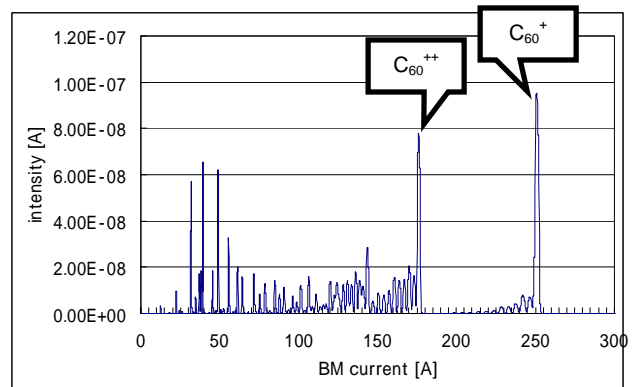


図4 . C<sub>60</sub>の価数分布

次にIHオープンの動作テストを行った。IHオープンの構造を図5に示す。オープンの外形は43 mmで長さが50 mmである。1 mmのモリブデンワイヤを4層構造にして巻き、そこに高周波電力を導入し磁場を発生させている。中心にセラミックの坩堝を置き、その中に試料である鉄を入れる。4層目のコイルには、外の部品との絶縁のためセラミックビーズを取り付けた。また、層間の絶縁のために、セラミックチューブをはさんである。電源の仕様は、20 kHz, 最大出力が2 kWである。IHオープンはKei2-sourceで動作させるのは初めての、まず単体での性能試験を行った。図6にイオン源に取り付けたときの配置図を示す。Kei2-sourceのプラズマチェンバーは内径50 mmと小さいため、プラズマから離れたところに配置することとなった。IHオープンを用いたときの価数分布を示す(図7)。鉄の1価を観測することができたが、強度が低く多価を観測することはできなかった。この測定の後、オープンのトラブルでフラーレンとの合成実験は行えなかった。



図5 . IHオープンの配置図。

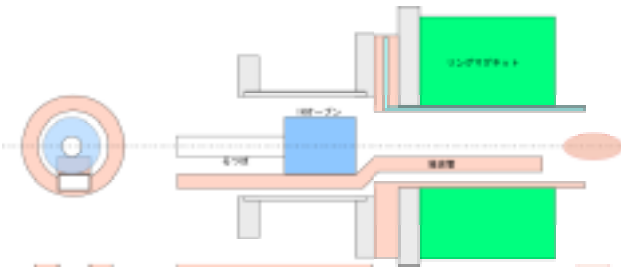


図6 . IHオープンの配置図

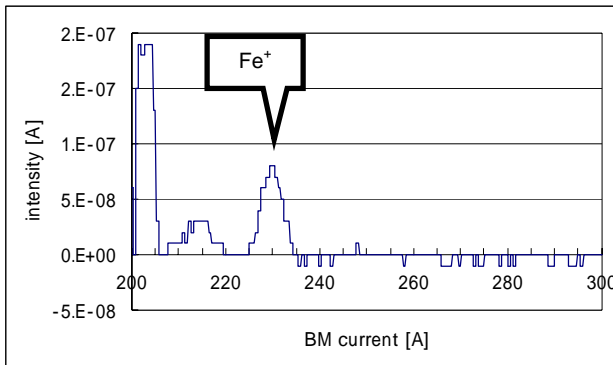


図7 . IHオープンを用いて鉄イオンを生成したときの価数分布。

次に、負イオンの引出しを試みた。フラーレンイオンの生成は、高密度のガスと低いマイクロ波のパワーが必要となる。これは、フラーレンが壊れないようにするためである。このパラメータは、負イオンの生成と近いところがあり、C<sub>60</sub><sup>-</sup>が生成されている可能性があると考えた。図8にフラーレンの負イオンを引き出したときの価数分布を示す。このビームテストの結果から、9 epAのC<sub>60</sub><sup>-</sup>のビームが得られた。価数分布を見ると、正イオンを引き出したときと違って、壊れたフラーレンイオンが観測されてい

ないのがわかる。

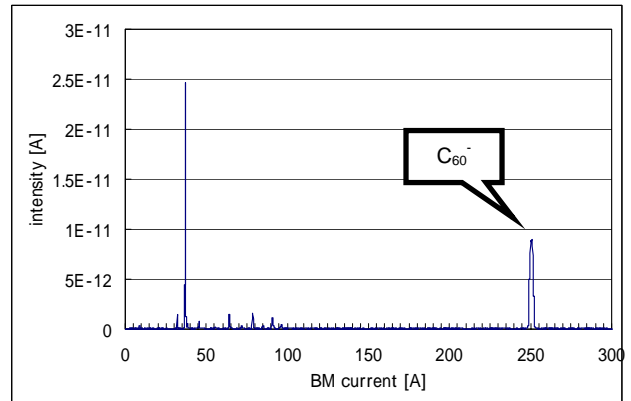


図8 . 負イオンを引き出したときの価数分布。

#### 4 . まとめ

今回行ったガスミキシングの結果として、5価のイオンを生成するには、重水素のほうが適していることがわかった。また、炭素の多価イオンを生成するには、今まで使用していたメタンガスより、アセチレンのほうが適していることがわかった。このとき、C<sup>4+</sup>では引出電圧40 kVで700 epAの強度が得られた。

金属内包フラーレンの生成実験では、フェロセンとIHオープンを用いて鉄の蒸発を行ったが、C<sub>60</sub>+Feイオンを観測することはできなかった。また、負イオンのビーム引出を行うと、C<sub>60</sub><sup>-</sup>のビームは観測できたが、壊れたフラーレンのビームを観測することができなかった。

#### 参考文献

- [1] M.Muramatsu et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 76, No. 11, pp. 113304 1-6 (2005).
- [2] M. Kidera et al., Proceedings of the 15th International Workshop on ECRIS, 74-76 (2002)
- [3] Y. Kato et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 75, No. 5, 1919-1921 (2004)