

## PRESENT STATUS OF THE HIMAC ION SOURCES

M.MURAMATSU, S.YAMADA, A.KITAGAWA, Y.SATO, K.TASHIRO, S.SHIBUYA\*,  
M.YAMAMOTO\*, T.KIMURA\*, H.SAKAMOTO\*, Y.HONDA\*, H.MATSUSHITA\*\*

National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba 263.

\*Accelerator Engineering Corporation, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba 263.

\*\*Sumitomo Heavy Industries Co. Ltd., 5-2, Soubiraki, Niihama, Ehime 792.

### ABSTRACT

Two types of ion sources, ECR and PIG, are in operation in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) at National Institute of Radiological Sciences. Ion beams like He, C, Ne, Si, and Ar are produced in the ECR and/or PIG ion sources and are utilized for the clinical trials or basic research experiments, including biology, physics, and chemistry. Recently, a movable extraction electrode was installed in the ECR ion source. Optimization of the electrode position results in the increase of the beam intensity by a factor of 2 compared to that of the previous system. For the PIG ion source, several ion source (IS) heads are prepared so that only replacement of the IS head, a very quick process, is required to change the ion species.

## 放医研HIMACイオン源の現状

### 1. はじめに

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置(HIMAC)には、ECRイオン源とPIGイオン源の2種類のイオン源が据え付けてある。通常、これら2つのイオン源からHe, C, O, Ne, Si, Ar, のイオンが生成される。イオン源から引き出されたビームが、RFQライナックの入射エネルギーに満たないときは、イオン源とライナックの間にある加速ギャップを介してイオン源全体に電圧を印加することにより、8keV/uのエネルギーに加速し、RFQライナックに入射する。入射ビームはRFQライナックとその後のアルバレイナックで6 MeV/uまで加速され、カーボンフォイルストリッパーによって、電子が全てはぎ取られる。その後、ビームは上下2つのシンクロトロンに交互に入射され、最大800 MeV/uまで加速される。シンクロトロンで加速されたビームは、3つの治療室、2つの実験用ビームライン、生物照射室に振り分けられ、がん治療の臨床試行及び物理・生物実験のために使用されている [1] [2]。

今回は、このHIMACの施設のうちイオン源の現状について報告する。

### 2. イオン源の概要

HIMACで使用されているECRイオン源の断面図を図1に、主な仕様を表1に示す。ECRイオン源

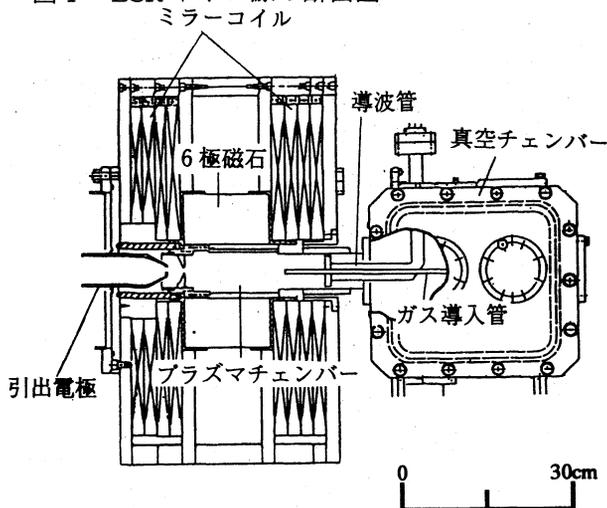
は、2つのミラーコイルと6極磁石によってプラズマの閉じこめ磁場を生成している。ミラーコイルは最大600 Aの電流で励磁され、最大磁場強度は上流側で9.3 kG、下流側で7.2 kGとなる。6極磁石の材質はNdFeBで、表面磁場は8.0 kGである。マイクロ波の周波数は10 GHzで、クライストロンによって増幅された最大1.8 kWの電力は、導波管によりプラズマチャンバーの内部に軸方向から導入される。マイクロ波源は、パルスとCWの両モードの運転が可能である。ECRゾーンの大きさは直径40 mm、長さ60 mmと評価されている。引出電圧は最大25 kVである [3]。

PIGイオン源の断面図を図2に、主な仕様を表2に示す。PIGイオン源は、熱陰極型のイオン源

表1 ECRイオン源の主な仕様

|                |              |
|----------------|--------------|
| ミラーコイル最大磁場強度   | 9.3/7.2 kG   |
| 6極磁石表面磁場       | 8.0 kG       |
| ECRゾーン全長       | 60 mm        |
| ECRゾーン直径       | 40 mm        |
| ECR磁場強度(10GHz) | 3.6 kG       |
| マイクロ波周波数       | 10 GHz       |
| マイクロ波最大出力      | 1.8 kW       |
| 運転モード          | パルス / CW     |
| パルス幅           | 2 ms 以上      |
| パルス周期          | 0.3~10 Hz    |
| 引き出し電源         | 25 kV, 20 mA |

図1 ECRイオン源の断面図



で、ガスモードとスパッタモードで運転することが可能である。PIGイオン源は、カソードの消耗を減らし寿命を長くすることと、多価イオンのビーム強度を増やすために、超低デューティのパルス運転をしている(デューティ 0.2%以下)。引出ビーム電流による電圧降下の影響を考慮して、引出電源は40 kV, 150 mAの電源を使用している [4]。

それぞれのイオン源で生成されるイオン種及び最大ビーム強度を表3に示す。表3の下線は、ライナックで加速できるイオン ( $q/m \geq 1/7$ )を示す。

RFQで加速できるビーム幅は最大1 msと短いので、ライナックに入射する場合、ビームチョッパーを使いビームの幅を500  $\mu$ s程度に短くしている。

### 3. 性能向上のための改良

最近行われた各イオン源での性能向上のための改良について以下に述べる。

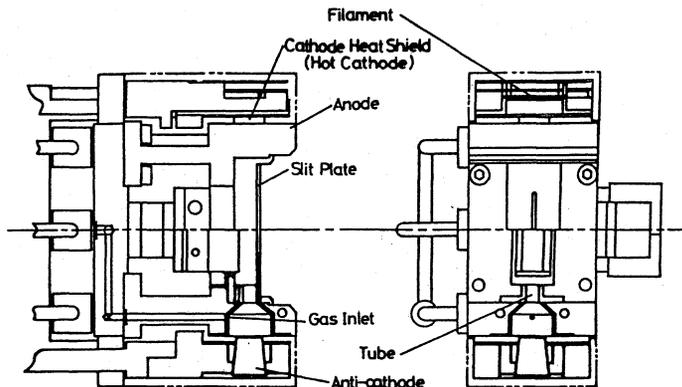
#### ・ECR引出電極の可動機構の追加

ECRイオン源では、引出ビーム電流に応じた最適な電極間隔が存在している [5]。従来、引出電極を動

表2 PIGイオン源の主な仕様

|             |              |
|-------------|--------------|
| 偏向電磁石最大中心磁場 | 7 kG         |
| 偏向電磁石曲率半径   | 10 cm        |
| 偏向電磁石回転角    | 140°         |
| スリット幅       | 1 mm         |
| アーク電源       | 10 A, 2 kV   |
| 運転モード       | パルス          |
| パルス幅        | 0.2 ms~8 ms  |
| パルス周期       | 0.3~10 Hz    |
| イオン源ガス      | 最大 2 cc/min  |
| サポートガス      | 最大 30 cc/min |

図2 PIGイオン源の断面図



かすには大気開放しなければならなかったが、電極可動機構を追加したことによって、最適な電極間隔が容易に見つけられるようになり、これによりC<sup>4+</sup>の場合は、改造前のほぼ2倍の強度が安定して得られるようになった。図4に代表的なC<sup>4+</sup>のビーム波形を示す。改造前のビーム強度は、電極間隔を最適化しない場合150から200 e $\mu$ A程度だったが、現在は300から400 e $\mu$ Aである。

#### ・PIGヘッ드의専用使用

これまでCイオンは、炭酸ガスを使い生成していた。ガスでCイオンを生成すると、炭素が周囲の電極等に付着する。特にカソードの周囲に付着すると、熱が逃げやすくなり、カソードの温度を安定に保つことが出来ず、調整が困難になる。これを防ぐため、現在PIGイオン源では、グラファイトをNeと

表3 各イオン源で得られた最大ビーム強度

|     |         | NIRS-ECR Beam Intensity (e $\mu$ A) |             |             |               |               |              |             |            |            |
|-----|---------|-------------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|--------------|-------------|------------|------------|
| Ion | m       | 1+                                  | 2+          | 3+          | 4+            | 5+            | 6+           | 7+          | 8+         | 9+         |
| H   | 1       | <u>2500</u>                         |             |             |               |               |              |             |            |            |
| He  | 4       | <u>3200</u>                         | <u>2100</u> |             |               |               |              |             |            |            |
| C   | 12      |                                     | <u>470</u>  | -           | <u>430</u>    | <u>50</u>     |              |             |            |            |
| N   | 14      |                                     | <u>790</u>  | <u>590</u>  | <u>340</u>    | <u>180</u>    | <u>23</u>    |             |            |            |
| O   | 16      |                                     | <u>660</u>  | <u>470</u>  | <u>(440)</u>  | <u>280</u>    | <u>130</u>   | <u>15</u>   |            |            |
| Ne  | 20      |                                     | <u>622</u>  | <u>700</u>  | <u>680</u>    | <u>(600)</u>  | <u>220</u>   | <u>54</u>   | <u>10</u>  | <u>0.6</u> |
| Ar  | 40      |                                     |             |             | <u>380</u>    | <u>340</u>    | <u>345</u>   | <u>270</u>  | <u>235</u> | <u>65</u>  |
|     |         | PIGIS Beam Intensity (e $\mu$ A)    |             |             |               |               |              |             |            |            |
| Ion | m       | 1+                                  | 2+          | 3+          | 4+            | 5+            | 6+           | 7+          |            |            |
| He  | 4       | <u>&gt;12000</u>                    | <u>3000</u> |             |               |               |              |             |            |            |
| C   | Gas     | 12                                  | 1000        | <u>5000</u> | <u>(3000)</u> | <u>700</u>    | <u>20</u>    |             |            |            |
| C   | Sputter | 12                                  | 200         | <u>950</u>  | <u>(2300)</u> | <u>400</u>    |              |             |            |            |
| N   | 14      |                                     |             | <u>3200</u> | <u>2800</u>   | <u>1200</u>   | <u>200</u>   |             |            |            |
| O   | 16      |                                     |             | <u>2000</u> | <u>2300</u>   | <u>(3000)</u> | <u>300</u>   | <u>30</u>   |            |            |
| Ne  | 20      |                                     |             | <u>2000</u> | <u>3800</u>   | <u>800</u>    | <u>(400)</u> | <u>20</u>   |            |            |
| Si  | Sputter | 28                                  |             |             | <u>400</u>    | <u>600</u>    | <u>300</u>   | <u>145</u>  | <u>10</u>  |            |
| Ar  | 40      |                                     |             |             | <u>1500</u>   | <u>1900</u>   | <u>1800</u>  | <u>1300</u> | <u>400</u> |            |

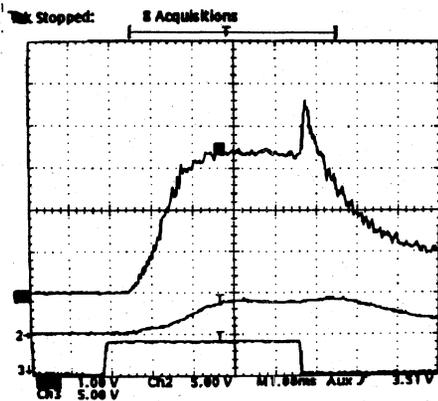


図4 ECRイオン源の $C^+$ ビームの波形  
 (上)ビーム波形 100  $e\mu A/div$   
 (中)引出電流 10 mA/div  
 (下)マイクロ波入力電力 1 kW/div, パルス幅 1 ms/div

$N_2$ の混合ガスでスパッタすることによって、Cイオンを生成している。それでも、ガスを使用したときほどではないが、スパッタされたCイオンがヘッドに付着するため、イオンを生成する場合、目的のイオンが生成しにくくなり、イオン種の変更に時間がかかる。さらに、ビームが出てても寿命が短い。このため、ヘッドの交換作業だけでビームを出せるように、各イオン種専用としてイオン源ヘッドの数を4台に増やした。

#### 4. 現在の運転状況

イオン源は毎週月曜日に立ち上げられ、土曜日の夜まで連続運転される。通常の運転では、火曜日の朝から金曜日の夕方までは、ECRイオン源による $C^+$ ビームの供給を、金曜日の夜から土曜日の夜(又は日曜日の朝)までは、実験ユーザーの要求に応じてイオン種や、イオン源の変更を行う。Cビームの供給は、寿命が長く、ビーム強度が安定しているECRイオン源を使用している。物理・生物実験では $C^+$ のほか $He^+$ ,  $O^+$ ,  $Ne^+$ ,  $Si^+$ ,  $Ar^+$ 等のビームを供給している。 $Ar^+$ はECRイオン源で、 $He^+$ ,  $O^+$ ,  $Ne^+$ ,  $Si^+$ は、PIGイオン源で生成される。イオン源の運転はパルスモードで行われ、ECRイオン源は、 $C^+$ の場合、繰り返し周期2 Hz、パルス幅5 ms、 $Ar^+$ の場合、パルス幅30 msで運転されている。また、PIGイオン源は、イオン種によらず、パルス幅2 ms程度で運転されている。図5にPIGイオン源による代表的な $C^+$ のビームの波形を示す。

通常、機器の操作は、計算機による遠隔操作で各機器の制御装置に値をおくり、各機器の制御が行わ

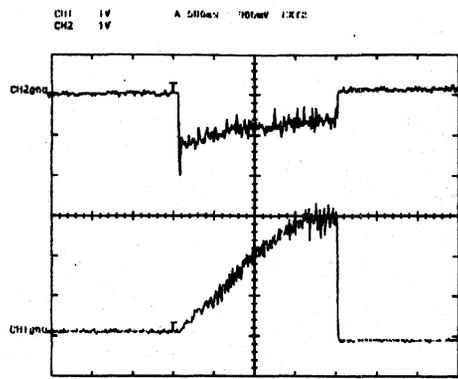


図5 PIGイオン源の $C^+$ ビームの波形  
 (上)アーク電圧 1 kV/div,  
 (下)ビーム波形 100  $e\mu A/div$

れている。イオン源の立ち上げは、計算機に保存されている過去のパラメーターをセットするだけでよく、立ち上げ後のビーム波形は、前回の値を再現している。立ち上げ後のイオン源の調整は、ほとんど行う必要がなく、1週間のビーム供給を安定に行うことができる。

#### 5. 今後の予定

今後は、ECRイオン源ではビーム強度増加のために、引出電極可動機構を使いCイオン以外のイオンについて、最適な電極位置の調査をする予定である。このほかに現在のECRイオン源では生成困難な金属イオンを生成する18GHz ECRの開発や、Cイオン専用の軽イオン源の開発などがある。

#### 謝辞

この報告書を書くにあたって、重粒子治療センターの村上健業務室長と高田栄一運転室長には、助言、指導をしていただきました。この紙面を借りて感謝いたします。

#### 参考文献

- [1]. 山田聰他, 重粒子線がん治療装置 [HIMAC] - その施設と前臨床実験-, アイオニクス, No.235, 1995.
- [2]. 村上健他, HIMAC入射器の現状, 第20回リニアック技術研究会報告集
- [3]. 松下浩他, NIRS-ECRの現状, 「多価イオン用ECRイオン源」研究会報告集, 東大核研INS-T-534, Dec., 1994.
- [4]. Y.Sato et al., J. Appl. Phys. 76(7), p3947, 1994.
- [5]. S.Fu et al., NIRS-M-96, HIMAC-005, 1993.