

[P 1–29]

STATUS OF THE HIMAC ION SOURCES

H.SAKAMOTO*, Y.HONDA*, M.YAMAMOTO*, T.OKADA*, T.KIMURA*, T.FUKUSHIMA*,
Y.SATO, T.MURAKAMI, A.KITAGAWA, J.YOSHIZAWA, M.MURAMATSU, K.TASHIRO, S.SATO,
H.OGAWA, and S.YAMADA

National Institute of Radiological Sciences,
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi 263, JAPAN
*Accelerator Engineering Corporation,
2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba-shi 263, JAPAN

ABSTRACT

Two types of ion sources, 10GHz ECR and PIG, have been in operation in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) at National Institute of Radiological Sciences. Ion beams, such as He, C, Ne, Si, and Ar, are produced with these ion sources and are utilized for the clinical trials and basic research experiments. The new ion source of 18GHz ECR has been installed in March of 1996, and the beam tests are in progress. Silicon beam is produced by sputtering a silicon block by Ar or Kr ions in PIG ion source. The output current of Si⁵⁺ reaches 350 eμA.

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 (通称 HIMAC) は、1994 年 6 月に臨床試行を開始して以来順調に運転を続けている。HIMAC ではイオン源は、ECR 型及び PIG 型の 2 種類のイオン源が稼働中である。ECR 型イオン源はマイクロ波の周波数が 10GHz であり、おもに治療用の C ビームを供給している。PIG 型イオン源は、物理実験及び生物実験等に C 以外のビームを供給している。また、平成 8 年 3 月には、Ar 以上の重いイオンや金属イオンを生成する目的で、18GHz ECR イオン源が HIMAC 入射器系のイオン源室に設置され、調整中である。

ここでは、昨年から現在までの HIMAC イオン源の運転状況と、Si イオンの生成について報告する。

2. イオン源の概要

(1) 10GHz ECR と PIG イオン源¹⁾

現在、治療及び実験のために使用されている 10GHz ECR と PIG イオン源の主な仕様を表 1 及び表 2 に示す。

(2) 18GHz ECR²⁾

平成 6 年から開発を開始した 18GHz ECR イオン源は、平成 7 年度中にイオン源室への設置を完

表 1 10GHz ECR の主な仕様

ミラーコイル最大磁場強度	9.3/7.2kG
6 極磁石表面磁場	8.0kG
ECR ゾーン全長	60mm
ECR ゾーン直径	40mm
ECR 磁場強度 (10GHz)	3.6kG
マイクロ波周波数	10GHz
マイクロ波最大出力	1.85kW
運転モード	パルス / CW

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	10cm
偏向電磁石回転角	140°
スリット幅	1 mm ~ 2 mm
アーク電源	10A, 2kV
運転モード	パルス

了した。このイオン源は、宇宙での放射線による生物・医学的影響の研究を行う際必要な Fe イオンや、物理実験用に Ar より重いイオンの生成を目的として製作された。このイオン源の主な特徴は次の通りである。

1) 引出電圧

引出電極付近の空間電荷効果による輸送効率の低下を防ぐため、現行の 10GHz ECR で最大 25kV である引出電圧を最大 56kV とした。

2) ミラー磁場・六極磁場強度

多価イオン生成の際要求される、イオンの閉じこめ時間を伸ばすため、ミラーコイル最大磁場強度を 12.5kG に強化したことで、六極磁場の強化のためボア径を 40 mm に小さくし、永久磁石の磁場配位を改善した。また、小型化を行うためマイクロ波周波数を 18GHz に高めた。

このほか、真空度の改善や金属生成器具設置スペースの確保、分析系分解能の向上、電子供給器具の設置の考慮等を行っている。

主な仕様を表 3 に示す。

表 3 18GHz ECR の主な仕様

ミラーコイル最大磁場強度	12.5 kG
6 極磁石表面磁場	13 kG
ECR ゾーン全長	20mm
ECR ゾーン直径	30mm
ECR 磁場強度 (18GHz)	6.5 kG
マイクロ波周波数	18GHz
マイクロ波最大出力	1.2 kW
運転モード	パルス/CW
引出電源	56 kV、20mA
目標生成イオン種	Xe まで (質量数 140 以下)
電荷質量比	q/m=1/7 以上

平成 7 年度末にはビーム引き出しに成功しており、現在試験運転中である。

3. 現在の運転状況

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 4、5 に示す。表中の下線は線形加速器で加速できるイオン、太字は新たに生成したイオン及び昨年よりビーム強度が増加したイオンを示す。また、() 付のものは、他のイオンが混入しているものを示す。

10GHz ECR はビーム輸送効率の向上を図るため昨年までに引出電極駆動機構の追加を完了している。¹⁾ さらに輸送効率の向上を図るため、引出電場のシュミレーション計算の結果と実際のビーム輸送測定の結果の比較検討を行ったところ、C⁴⁺ビーム輸送効率の向上には、

引出電流密度大 ⇨ 電極間隔を狭くする

引出電流密度小 ⇨ 電極間隔を広くする

という結論が得られた。他のイオンについてもイオン源の運転状態に即した引出電極間隔の最適化が出来たことによりビーム強度を増加させることが出来た。しかし、H⁺ビームについては、計算と一致せず上記のような結果が得られなかったのでさらに解析中である。

表 4 10GHz ECR のビーム強度 (eμA)

ION	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+
¹ H	<u>2500</u>								
⁴ He	3900	<u>2100</u>							
¹² C		<u>470</u>		430	50				
¹⁴ N		<u>790</u>	<u>590</u>	<u>340</u>	220	25			
¹⁶ O		660	590	<u>(440)</u>	<u>280</u>	<u>130</u>	<u>15</u>		
²⁰ Ne		622	<u>700</u>	<u>680</u>	<u>(600)</u>	<u>220</u>	60	<u>10</u>	<u>0.6</u>
²² Ne					340		52		
⁴⁰ Ar				410	345	365	300	280	105
⁸⁴ Kr								70	55

表 5 PIG イオン源のビーム強度 (eμA)

ION	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
⁴ He	<u>>12000</u>	<u>3000</u>						
¹² C	200	<u>950</u>	<u>(2300)</u>	800				
¹⁴ N		<u>3200</u>	<u>2800</u>	<u>1200</u>	<u>200</u>			
¹⁶ O		2000	<u>2300</u>	<u>(3000)</u>	<u>300</u>	<u>30</u>		
²⁰ Ne		2000	<u>3800</u>	1750	<u>(400)</u>	30		
²⁸ Si			400	<u>(600)</u>	350	(200)	<u>10</u>	
⁴⁰ Ar			1500	<u>1900</u>	<u>(1800)</u>	<u>1300</u>	<u>400</u>	<u>200</u>

現在がん治療の臨床試行は、10GHz ECR で生成された C ビームを用いて火曜日から金曜日の昼間 (原則 9 時から 20 時) に行われている。他の物理・生物実験等は、10GHz ECR 及び PIG を使用し、月曜から火曜日早朝までと、平日の夜間、金曜日夜間から土曜日に行われている。C 以外のビーム供給は、月曜から火曜日早朝までと、金曜日夜間から土曜日までである。

平成 7 年 9 月より平成 8 年 8 月までのイオン源からのビーム総供給時間は 3711 時間であるが、上記の理由により C イオン以外の供給時間は全体の約 18% である。また、イオン源別供給割合も 10GHz ECR が全体の約 91% を占めている。PIG は He⁺、Ne⁴⁺、Si⁵⁺、Si⁶⁺ の供給を行った。

C 以外のイオン別供給割合は、Ar³⁺ が約 27%、He⁺ が約 19% となっている。また、He²⁺、Ne⁷⁺、²²Ne⁷⁺ 等の多価イオンの供給も行った。

以上の結果を図 1 から図 3 に示す。

4. Si イオンの生成

(1) イオン生成

Si イオンは、PIG においてシリコン結晶を Ar、Kr などのガスイオンでスパッタして生成している。

(2) Si⁵⁺ の供給

本 PIG イオン源装置では、スパッタガスに Ar を

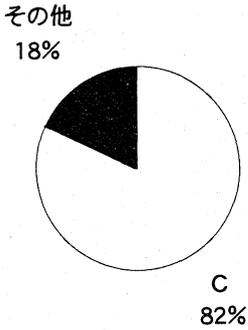


図1 Cとその他のイオン供給割合

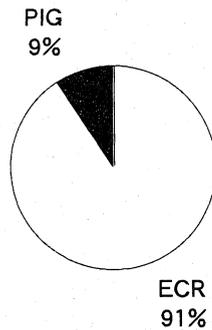


図2 イオン源別供給割合

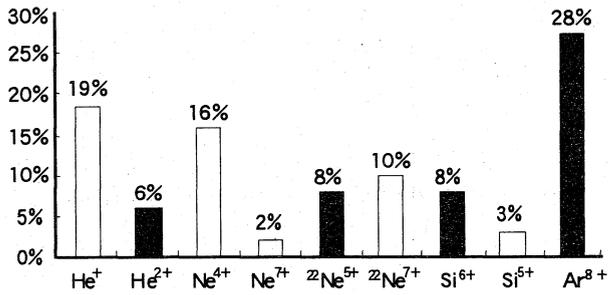


図3 C以外のイオン別供給割合

使用した場合、 Si^{5+} ($q/m=5.6$)と Ar^{7+} ($q/m=5.714$)の分離が難しい。図4のビームスペクトルに示したように Ar^{7+} のピークのすぐ後ろに Si^{5+} のピークがあり分離が難しいことが判る。このため、スパッタガスにはKrを使用している。さらに、他のイオン { C^{2+} ($q/m=6$)と O^{3+} ($q/m=5.333$)} との分離を良くするため、幅の狭いスリットを使用している。その代表的な Si^{5+} のビーム波形 ($I_{arc}=-4.5A$)を図5に示す。

(3) Si^{6+} の供給

アーク条件、スパッタ電圧、スリット幅等を同一とし、ビーム強度のガス依存性をNe、Ar、Krについて測定したところ、スパッタガスに、Arを使用した場合、ビーム強度が最も多く (Krの約30%増) なるため、スパッタガスにはArを使用している。

また、 Si^{6+} ($q/m=4.667$)の q/m に近いイオンは存在しないので、ビーム強度を増やすため、2mm幅のスリットを使用している。

5. まとめ³⁾

現在2台のシンクロトロンと中エネルギービーム利用室の3つのコースに異なるイオンを供給し、ビーム利用の効率化を図るため、入射器の時分割加

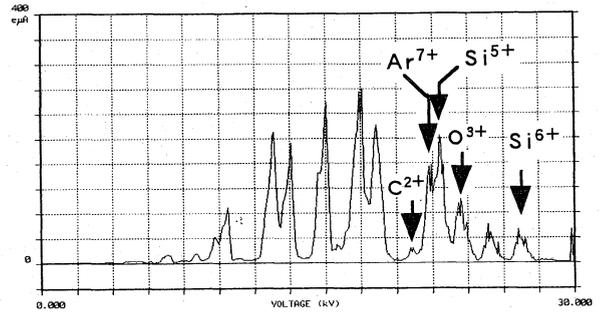


図4 ビームスペクトル
スパッタガス Ar
スリット幅 2 mm

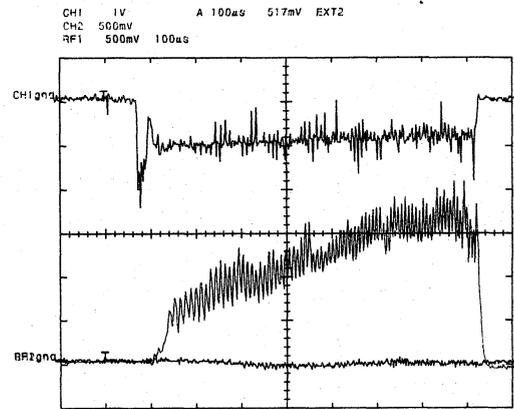


図5 Si^{5+} ビーム波形

上段 アーク電圧(1kV/div)
中段 Si^{5+} ビーム(50 μ A/div)
スパッタ電圧:500V時
下段 Si^{5+} ビーム(50 μ A/div)
スパッタ電圧0V時

速化改造が進められている。これが完成すると3台のイオン源の同時供給運転が可能となる。

今後は、10GHz ECRとPIGは、Arまでのイオンのビーム強度の増強と安定化を図り、PIGは、スパッタによるC、Si以外の金属イオン生成も合わせて行う予定である。

また18GHz ECRは、Ar以上の重いイオンや金属イオンの生成を目指す。

参考文献

1. 村松正幸他、放医研 HIMAC イオン源の現状、第20回リニアック技術研究会報告集 p94-96
2. A.KITAGAWA et al., DESIGN OF AN ECR ION SOURCE WITH 18GHz MICROWAVE FOR HIMAC, Proceeding of the 12th INTERNATIONAL WORKSHOP ON ECR ION SOURCES, INS-J-182, p254-258
3. 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 p91-93