

20a-3

## PRESENT STATUS OF THE HIMAC INJECTOR

S. YAMADA, A. KITAGAWA, T. KOHNO, T. MURAKAMI, M. MURAMATSU, H. OGAWA,  
 Y. SATO, K. TASHIRO, J. YOSHIKAWA, T. AOKI\*, T. FUKUSHIMA\*, Y. HONDA\*,  
 T. IWASAKI\*, T. KIMURA\*, T. KOBAYASHI\*, H. MATSUSHITA\*, K. NAGAKURA\*,  
 H. SAKAMOTO\*, S. SHIBUYA\*, K. UENO\*, M. YAMAMOTO\*

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

## ABSTRACT

The recent performance of the injector system of the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) is reported. The injector comprises two kinds of ion sources (a PIG ion source and an ECR ion source), a 100 MHz RFQ linac and a 100 MHz Alvarez linac. The beam energy is 6 MeV/u for heavy ions between  $^4\text{He}$  and  $^{40}\text{Ar}$ . The typical intensities of the injector are 357 e $\mu\text{A}$  for  $\text{He}^{2+}$  and 445 e $\mu\text{A}$  for  $\text{C}^{6+}$ . The typical normalized 90% emittance and the momentum spread are 0.7  $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  and 0.1%, respectively. These performances satisfied the requirement for the cancer therapy.

## HIMAC入射器の現状

## 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 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) は、世界初の医療専用重イオン加速器であり、 $^4\text{He}$ から $^{40}\text{Ar}$ までのイオンを体内30cmのレンジにて照射するために最大800MeV/u (価数対質量比=1/2の場合)までの加速を行うシンクロトロン2台と、最大16×16cmの一様な照射野を形成する高エネルギービーム輸送・照射装置、そして、2台のライナックによる入射器により構成されている。[1]

加速器については、平成5年3月にライナックのビーム調整を開始し、4月には性能試験を終了した。また、11月からはシンクロトロンの調整運転を開始し、平成6年2月に性能試験を完了している。また、3月以降は、臨床試行に備えた物理・生物実験に、安定したビームの供給が可能となっている。

本稿では、このHIMAC施設のうち、入射器の運転の現状について報告する。

## 2 HIMAC入射器の概要

HIMAC入射器は、2種類のイオン源と、RFQライナック、アルバレ・ライナック、および、荷電変換器、デバンチャーにて構成されている (図1)。各構成機器の設計仕様の詳細については、既に他の文献[2]-[4]にて報告したとおりであるが、概略を以下に説明する。

入射器の運転は、RFQ、アルバレ・ライナックともに、くり返し周波数3Hz、パルス幅1ms、最大デューティー0.3%のパルス運転で行われている。

イオン源は、PIGイオン源とECRイオン源が、60kVの高圧デッキ上に配置され、電価質量比 $q/m = 1/7$ 以上のイオンを8keV/uに加速して、RFQに入射する。PIGイオン源は、多価イオンのビーム強度を高め、また、寿命を伸ばすために低デューティーパルスにて運転されている。また、ECRイオン源は、DC/パルス運転を運転状態に合わせて選択することができる。

RFQライナックは、100MHzの高周波で運転され、イオンを800keV/uまで加速する。キャビティの内径は59cm、全長7.3mのベインは300のセルにて構成されている。電源の最大出力は、300kWである。アルバレ・ライナックは、同じく100MHzで運転され、加速

\*Accelerator Engineering Corporation

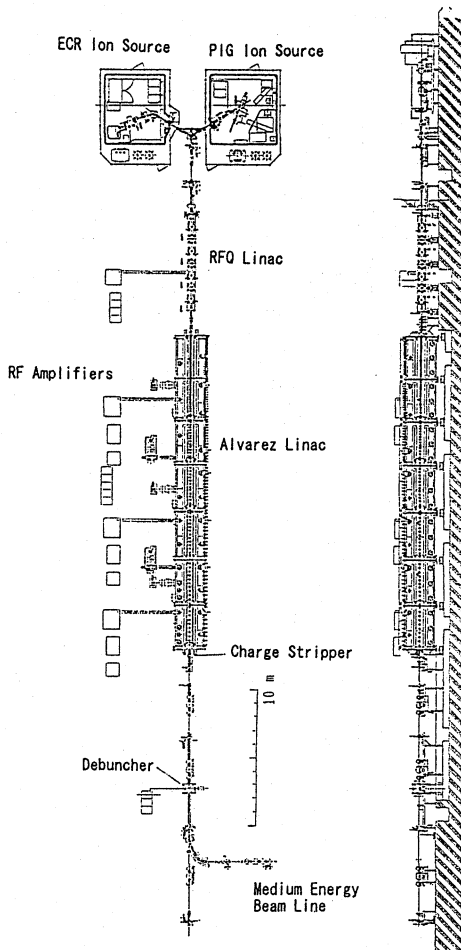


図 1: HIMAC 入射器概観

エネルギーは、6MeV/uである。3台の独立したキャビティが連結されており、それぞれ独立した電源により駆動され、電源一台当たりの最大出力は、1.4MWである。全セル数は106、空洞径は2.2m、また3台の全長は24mである。

アルバレ・ライナックによる加速後、イオンは、 $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜により全電子を剥離され、電価質量比 $q/m \sim 1/2$ にされる。また、ビームの運動量分散を小さくするため、アルバレ・ライナックの下流9mの位置に、100MHzシングル・ギャップのデバンチャーが設置されている。

ビーム輸送ラインには、ライナックと同期して動作する $20^\circ$ のパルス・マグネットが設けられている。シンクロトロン入射を行わないビーム・パルスでは、 $70^\circ$ のDCマグネットと併せて、ビームを $90^\circ$ 曲げ、運動量分析やビーム強度測定などのビーム診断を行える。また、ビームを中エネルギー実験室に輸送し、シンクロトロンへのビーム供給と同時に、ライナックのビームを用いた実験が行える。

### 3 運転状況とビーム性能

2種類のイオン源の役割分担については、特に低価数のイオンを大強度で使用するためには、PIGイオン源を用い、また、多価のイオン生成には、ECRイオン源を使用しているが、ともに表1のように治療上の要求ビーム強度を満たしている。なお、表中の下線で示した価数が、ライナックにて加速可能なイオンである。臨床試行開始当初の治療は $^{12}\text{C}$ イオンにより計画されているため、現在、通常の運転には、メンテナンスの簡略なECRイオン源を使用して、 $\text{C}^{4+}$ イオン( $q/m = 1/3$ )を生成し、ライナックに入射している。この際、PIGイオン源は、他方をバックアップする体制をとり、不測の故障に備えている。

表 1: イオン源におけるビーム強度 ( $e\mu\text{A}$ )

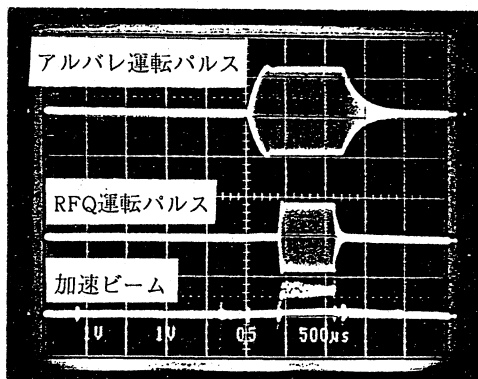
PIGイオン源							
Ion	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+
He	<u>3500</u>	<u>3000</u>					
C	1000	<u>3500</u>	(3000)	<u>600</u>	<u>20</u>		
Ne		2000	<u>2000</u>	<u>800</u>	<u>400</u>	<u>20</u>	
Si			400	<u>600</u>	<u>300</u>	<u>50</u>	<u>10</u>
Ar			1500	1900	1800	<u>800</u>	<u>400</u>

ECRイオン源								
Ion	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
He	<u>3200</u>	<u>2100</u>						
C		<u>470</u>		<u>430</u>	<u>50</u>			
Ne		622	<u>700</u>	<u>680</u>	<u>600</u>	<u>220</u>	<u>54</u>	<u>10</u>
Ar				380	340	<u>345</u>	<u>270</u>	<u>235</u>

$\text{C}^{4+}$ の加速の場合、ライナックに必要な加速電圧は設計値( $q/m = 1/7$ )の $3/7$ でよく、現在、RFQは、ピーク電力にて35kW(Q値=12000)で運転している。また、アルバレ・ライナックは、各タンクにつき、それぞれ、165kW(Q=82000)、220kW(Q=66000)、220kW(Q=66000)、にて運転を行っている。入射器はデューティー0.2%、2Hzのパルス運転を行っている。0.5Hz運転のシンクロトロン2台に対し、2パルスに1回のビーム入射を行い、シンクロトロンへ入射していないパルスは、中エネルギー・ラインへ導入し、ビーム強度および運動量の安定度を測定している。

図2は、通常の運転時に、荷電変換フォイルを通過後に変換されたイオンの、入射器出口付近でのビームパルス形状で、0.7ms幅のビームを得ている。ビーム強度の安定性は良好で、長時間運転においても、特に調整を必要とせず $\pm 5\%$ の変動度に押さえられている。

図 2:  $C^{6+}$  ビームのパルス形状

$C^{4+}$ 加速の場合、加速電圧が設計値の半分以下になるので、ライナックに特に長時間のエイジングを施すことなく、短時間のビーム調整でビームを供給できている。イオン源、真空系を除き、全ての電源が off の状態からシンクロトロンへビームを引き渡すために要する時間は、およそ2時間程度である。

運転パラメータの再現性は、概して良好であるが、イオン源からのビーム強度およびエミッタンスが若干変化するため、イオン源の運転パラメータの調整とイオン源下流の収束系の微調整は、毎立上時に必要となっている。この理由は、イオン源プラズマチェンバー内の真空度の再現性が低い(精度の良い測定も困難である)ため、その結果、イオン源出口での電流密度が変わり、ビーム強度・エミッタンスを変化させていることによる。

表2に、現在までに加速を行った各イオン種のうち、代表的なもののビーム強度、運動量分散、エミッタンス、および、輸送効率を示した。ただし、 $He^{1+}$ のデータは、イオン源ビーム強度が大きすぎるため、LEBT上の減衰器で1/3におさえている。低エネルギービーム輸送ライン(LEBT)での輸送効率が、各イオン種で大きく変化していることは、イオン源からのビームのエミッタンスが、イオン源出口での電流密度とプラズマの境界条件に依存していることによる。その他の中エネルギービーム輸送ライン(MEBT)等の輸送効率は、おおむね等しく、各数値の差異は、ビーム調整の熟達度の範囲である。

#### 4 まとめ

平成6年5月までに、照射装置を含めた加速器施設の試運転は、順調に終了している。臨床試行前の物理・生物データの取得も進み、世界的にユニークな重イオン照射時の生物反応の測定から、治療に適した大

表 2: 入射器のビーム性能

イオン種 電価質量比	$C^{4+}$ 1/3	$He^{1+}$ 1/4	$Ar^{8+}$ 1/5	$C^{2+}$ 1/6
イオン源強度 ( $e\mu A$ )	140	1450	105	300
LEBT 輸送効率 (%)	93	45	71	80
R F Q 輸送効率 (%)	92	93	93	92
アルバレ輸送効率 (%)	96	92	86	86
荷電変換効率 (%)	4→6 93	1→2 100	8→18 18	2→6 93
MEBT 輸送効率 (%)	95	96	81	84
ビーム強度 ( $e\mu A$ )	152	357	20	445
エミッタンス ( $\pi mm \cdot mrad$ )	X 0.7 Y 0.7	0.6	1.1 0.8	-
運動量分散 (%)	0.1	0.1	-	-

照射野での均一性や、レンジ形状等が、確認されている。さらに、これらの結果を踏まえ、94年6月下旬からは、最初の患者への臨床試行が開始されようとしている。

このように、HIMAC入射器は、がん治療の目的に十分適した運転が可能となっているが、がん治療以外の物理・生物の汎用実験の要請より、 $^{40}Ar$ より重いイオンの加速や、2台のシンクロトロンによる異種イオンの同時加速など、今後、検討が必要な改良項目もあがっている。これらの要請に答えるべく、HIMAC入射器としては、より大強度の多価イオン源の開発や、アルバレ・ライナックの増設によるシンクロトロンへの入射エネルギーのアップ、また、全ビーム輸送系のパルス化による時分割照射等の、装置高度化計画に取り組んでいる。

#### 参考文献

- [1] Y. Hirao, *et al.*, Nucl. Phys. **A538**, 541 (1992)
- [2] S. Yamada, *et al.*, Proc. of Linac Conf., Albuquerque, 1990, pp.593
- [3] Y. Sato, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **63**(4), 2904 (1992)
- [4] A. Kitagawa, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **65**(4), 1087 (1994)