

Beam Acceleration Test of The HIMAC Injector

K.Sawada, S.Hara, M.Akiyama, Y.Touchi, T.Sakata, O.Morishita, K.Uno, K.Okanishi
T.Murakami*, H.Ogawa*, Y.Sato*, A.Kitagawa*, J.Yoshizawa, T.Kohno*, S.Yamada*

Sumitomo Heavy Industries, Ltd.
5-2 Soubiraki-cho Niihama-shi Ehime-ken 792
*National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 260

Abstract

A heavy-ion synchrotron dedicated to medical use is under construction at National Institute of Radiological Sciences. The injector system, comprising a PIG source, an ECR source, an RFQ linac, and an Alvarez linac of 100MHz, accelerates heavy ions with a charge-to-mass ratio as small as 1/7, up to 6 MeV/u. First operation of the injector system has shown satisfactory performance.

HIMACインジェクタのビーム加速試験

1. はじめに

重粒子線がん治療装置(HIMAC)の入射器は、PIGイオン源・ECRイオン源・RFQライナック・アルバレイナック等から構成されるシステムであり、質量電荷比1/2から1/7の粒子を核子当たり6 MeVに加速する。本装置の放射線医学総合研究所への搬入・据付は1992年3月に開始され、冷却・電力関係など建屋設備の完成を待って、1993年3月にビーム加速試験を開始した。この試験は非常に順調に進み、3月末にはHe⁺、5月にはAr¹⁸⁺のビーム加速に成功した。現在、アルバレイナックの出口ではHe⁺約400μA、Ar¹⁸⁺約27μAのビーム電流値が得られており、また、RFQライナック・アルバレイナックでは、いずれも90%を超える透過効率が実現されている。今後は質量電荷比1/7の粒子の加速を目指して試運転・調整を進める予定である。

2. 入射器の概要

図1にHIMAC入射器の配置図を、表1に主要仕様を示す。装置本体は、PIGイオン源・ECRイオン源・RFQライナック・アルバレイナック・ビーム輸送系等から構成され、高周波増幅器・電源・ビーム診断機器・真空機器などの各機器は、3段階の階層構造を成す計算機システムに依って統括制御される。また、RFQライナック・アルバレイナックを励振する高周波増幅器の主要仕様は、周波数100MHz、最大繰り返し3Hz、最大パルス幅1.2msであり、0.2ms程度のビームパルスがシンクロトロンに供給される。

表1 HIMAC入射器の主要仕様

Ion species	⁴ He ~ ⁴⁰ Ar
Charge-to-mass ratio	≥ 1/7
Ion sources	PIG & ECR
Frequency	100 MHz
Repetition rate	3Hz max
Duty factor	0.3% max
Acceptance	0.6π mm·mrad (normalized)
RFQ linac	
Input/Output energy	8 / 800 keV/nucleon
Vane length	7.3 m
Cavity diameter	0.59 m
Max surface field	205 kV/cm (1.8 Kilpatrick)
Peak rf power	260 kW (70% Q)
Alvarez linac	
Input/Output energy	0.8 / 6.0 MeV/nucleon
Total length	24 m (3 rf cavities)
cavity diameter	2.20 / 2.18 / 2.16 m
Average axial field	1.8 / 2.2 / 2.2 MV/m
Shunt impedance	31 ~ 46 MΩ/m (effective)
Max surface field	150 kV/cm (1.3 Kilpatrick)
Peak rf power	840 / 830 / 770 kW (75%Q)
Focusing sequence	FODO (5.1 kG/cm max)
Output beam emittance	≤ 1.5π mm·mrad (normalized)
Momentum spread	≤ ± 1x10 ⁻³

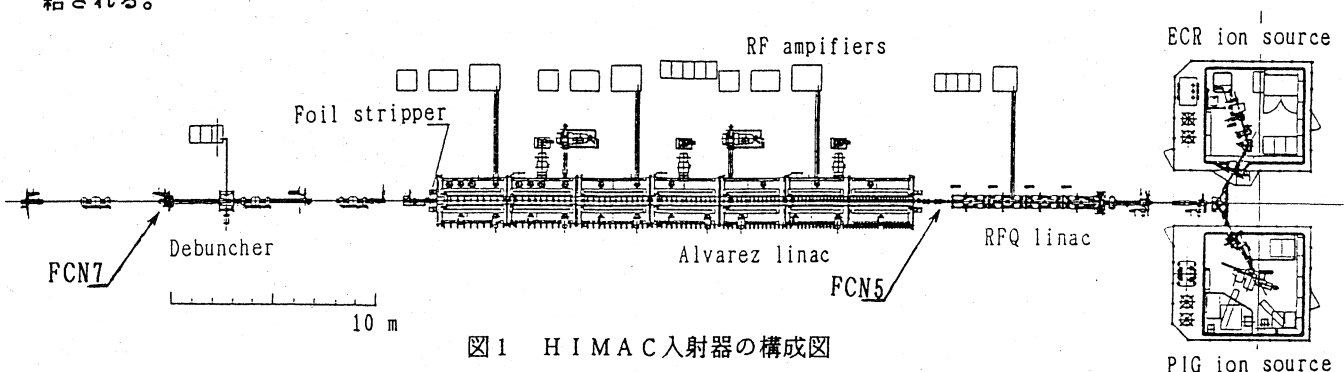


図1 HIMAC入射器の構成図

PIGあるいはECRイオン源から引き出された、 $\text{He} \cdot \text{C} \cdot \text{Ne} \cdot \text{Si} \cdot \text{Ar}$ など質量電荷比 $1/7$ 以上のイオンのエネルギーは、静電加速ギャップを経て核子当たり 8 keV に設定される。このため、イオン源はいずれも最大 60 kV の静電圧が印加できる絶縁架台上に設置されている。イオン源からのビームをRFQライナックに入射するビーム輸送系(LEBT)には、アインツェルレンズ・静電四極・ソレノイドコイル・偏向磁石などが使用されており、種々のビーム計測を行うと同時にRFQライナックへのマッチングがはかられている。ベイン全長約 7 m 、直径約 0.6 m のRFQライナックは、約 90% の効率で入射ビームをバンチし、核子当たり 800 keV に加速する。

RFQライナックの出射ビームは、全長約 1.9 m のビーム輸送系(LLBT)をへて、全長約 2.4 m 、直径約 2.2 m のアルバレイナックに入射され、核子当たり 6 MeV に加速される。また、ドリフトチューブに組み込まれた四極磁石の集束配列にはFODO配列が採用されており、約 $3.4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ の充分な規格化アクセプタンスと装置の簡略化とを両立させている。

アルバレイナックは3台の共振器から構成され、それぞれが独立の高周波系に依って励振される。この高周波系1系統当たりの構成を図2に、四極管アンプの設計パラメータを表2に示す。 100 MHz 発振器の出力はトランジスタアンプ1台と四極管アンプ3台によって最大 1.5 MW に増幅され、1台のRFカップラによって共振器に供給される。また、低電力部に設けられた振幅・位相制御回路では、共振器内の高周波位相・振幅が各々 $\pm 1 \text{ 度} \cdot 10^{-2}$ の精度で設定値に一致するように、高速・高精度のフィードバック制御が行われている。

アルバレイナックの出射ビームは、その直後に配置された炭素薄膜によってフルストリップ或いはそれに近い状態に変換され、中エネルギービーム輸送系(MEBT)を輸送される。さらに、アルバレイナックの後方約 10.5 m には、ビームのエネルギー幅を減少させるためのデバンチャが配置されている。

3. 工場試験

入射器を構成するほぼ全ての機器は、放医研への搬入に先立って、住友重機械工業の新居浜工場で工場試験を実施した。特に、主要装置であるRFQ・アルバレイナックでは、高周波電場調整、共振周波数調整、大電力高周波導入試験、高周波制御回路の動作試験が行われ、いずれも良好な性能が確認された。その詳細については、以前にも報告しており、ここでは省略する。(1)-(7)

4. ビーム加速試験

現在、入射器ではPIGイオン源とECRイオン源から引き出された He^+ のビーム加速試験とECRイオン源から引き出された Ar^{2+} のビーム加速試験が終了しており、表3に示す性能が得られている。アルバレイナック出口での最大ビーム電流値は、図3・図4に示すように He^+ 約 $400 \mu\text{A}$ 、 Ar^{2+} 約 $27 \mu\text{A}$ である。各構成要素の透過効率は、LEBTで 60 から 80% 、RFQ・アルバレイナックで 90% 前後、MEBTではほぼ 100% (荷電変換後の He^{2+} での値)であり、いずれも当初の目標性能を上回る値である。

さらに、上記の性能を確認した後、装置全体の性能を詳細に評価するため、 $\text{He}^+ \cdot \text{Ar}^{2+}$ を用いた加速

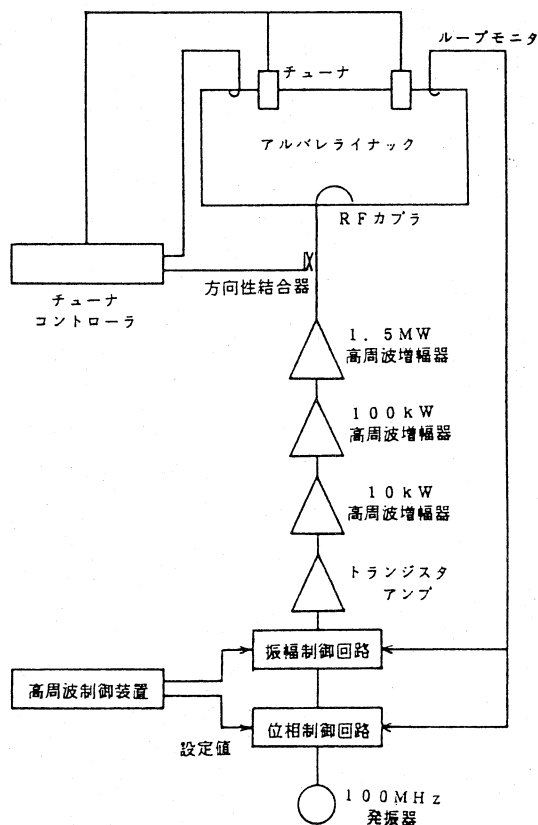


図2 アルバレイナック高周波系の構成図(1系統)

表2 アルバレイナック四極管アンプの設計パラメータ

Step no.	1st	2nd	Final
Tube type	RS2032CL	RS2058CJ	RS2074SK
Input power	0.03 kW	6.2 kW	110 kW
Output power	7.5 kW	130 kW	1500 kW
Plate voltage	6.5 kV	10 kV	20 kV
Screen voltage	0.8 kV	1 kV	1.5 kV
Grid voltage	$140 \pm 15 \text{ V}$	$255-315 \text{ V}$	$630-690 \text{ V}$
Plate current	1.7 A	18.5 A	101 A
Plate loss	3.5 kW	61 kW	610 kW
Efficiency	68 %	70 %	74 %
Load impedance	2000Ω	310Ω	120Ω

特性試験を実施した。ここでは、 He^+ での試験結果の概要を示す。図5は、RFQライナックのベイン電圧に対する透過効率の変化を示しており、グラフの縦軸はRFQ出口のファラディカップ(FCN5)で測定した He^+ のビーム電流値である。透過効率は規定電圧の 85% 付近で急激に立ち上がっており、規定電圧で 80% 以上に達している。図6はアルバレイナックの加速電圧に対する透過効率の変化を示しており、グラフの縦軸はMEBT終端付近のファラディカップ(FCN7)で測定した He^{2+} のビーム電流値である。透過効率は規定電圧の 85% 付近で急激に立ち上がっ

しており、規定電圧では90%に達している。これらの結果は、RFQ・アルバレイナックで良好な高周波電場分布の均一性が得られていることと、加速電場の設定が正確に行われていることを示している。

図7にはRFQライナックの高周波位相に対する透過効率の変化を示しており、グラフの縦軸はFCN7で測定した He^{2+} のビーム電流値である。ビーム加速シミュレーションでは、アルバレ入口でのバンチ位相長が約65度であり、また、アルバレイナックの位相アクセプタンスが90度であることから判断すると、ほぼ設計通りの加速特性が示されていると言える。

図8及び図9は、PIGイオン源からの He^+ ビームを加速した際の、LEBTとMEBTでのエミッタンス測定結果である。MEBTでの規格化エミッタンスは約 $1.6\pi mm \cdot mrad$ であり、LEBTでの測定値約 $0.5\pi mm \cdot mrad$ と比べると、3倍程度のエミッタンス増大がみられたが、シンクロトロン規格化アクセプタンス($3\pi mm \cdot mrad$)に対しては充分余裕ある値であり、装置全体の性能に対する観点から、全く問題ないと結論付けられる。

5. おわりに

1993年3月に開始されたHIMAC入射器のビーム加速試験では、現在までに He^+ と Ar^{8+} の加速に成功し、入射器としての優秀な性能が確認されている。今後は、質量電荷比1/7のイオンの加速に向けて入射器単体での機器調整を続け、さらに、本年11月以降にはシンクロトロンを含めての総合ビーム加速試験を実施する予定である。

参考文献

- (1) T. Sakata et al., Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan., 279(1990)
- (2) S. Hara et al., Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan., 282(1990)
- (3) H. Murata et al., Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan., 285(1990)
- (4) K. Sawada et al., Proc. 15th Linear Accelerator Meeting in Japan., 288(1990)
- (5) T. Sakata et al., Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan., 254(1991)
- (6) K. Sawada et al., Proc. 16th Linear Accelerator Meeting in Japan., 257(1991)
- (7) K. Sawada et al., Proc. 8th Snmp. on Accel. Sci. and Tech., Saitama, Japan, 158(1991)

表3 HIMAC入射器のビーム加速試験結果

イオン種		He^+	Ar^{8+}
アルバレ出口のビーム電流値		400 μA	27 μA
透 過 効 率	LEBT	62%	80%
	RFQ	80-90%	82%
	アルバレ	89%	90%
	MEBT ⁽¹⁾	100%	- ⁽²⁾

(1) 荷電変換後の透過効率である。

(2) 荷電変換装置により Ar^{8+} から Ar^{10+} が生成されるため測定不能。

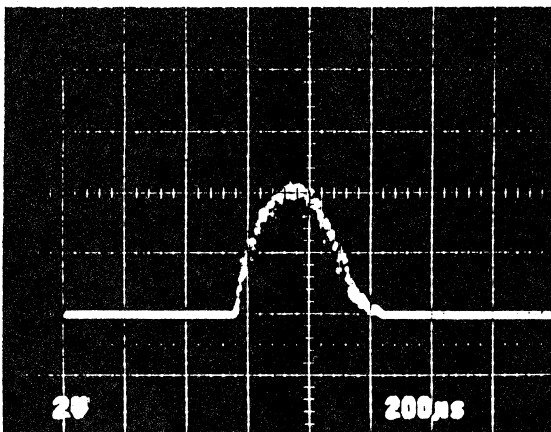


図3 アルバレイナックの出射ビーム波形 (He^+ , 200 $\mu A/div$)

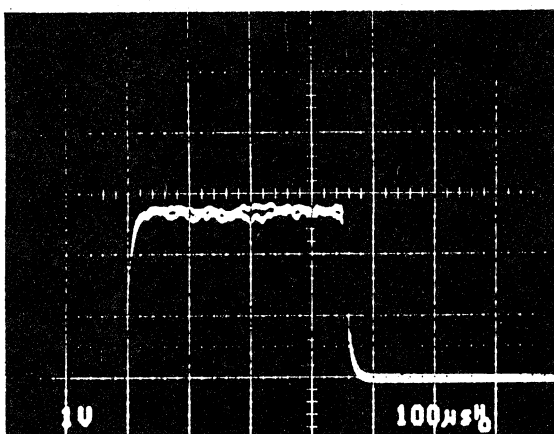


図4 アルバレイナックの出射ビーム波形 (Ar^{8+} , 10 $\mu A/div$)

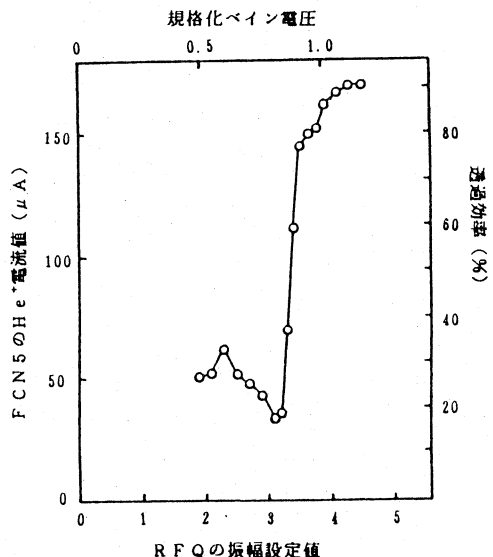


図5 RFQライナックのベイン電圧に対する出射ビーム電流値の変化

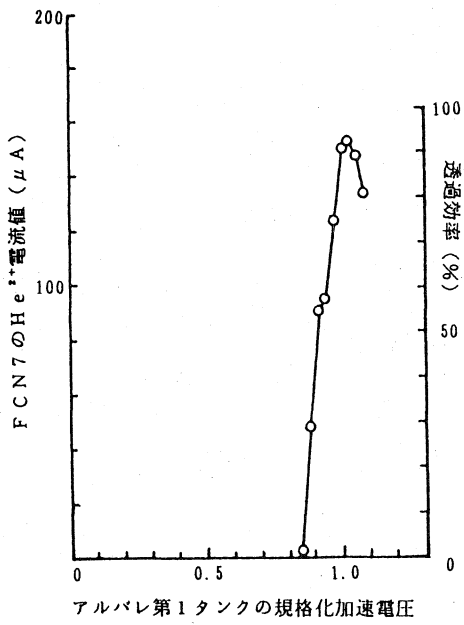


図6 アルバレ第1タンクの加速電圧に対する出射ビーム電流値の変化

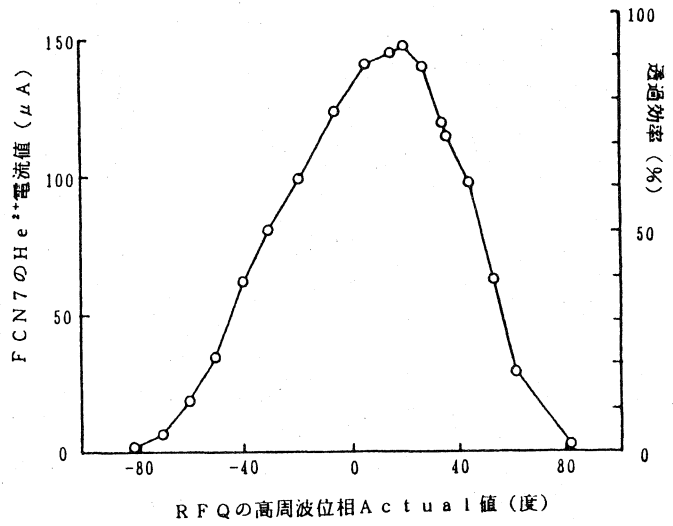


図7 RFQライナックの高周波位相に対するアルバレライナック出射ビーム電流値の変化

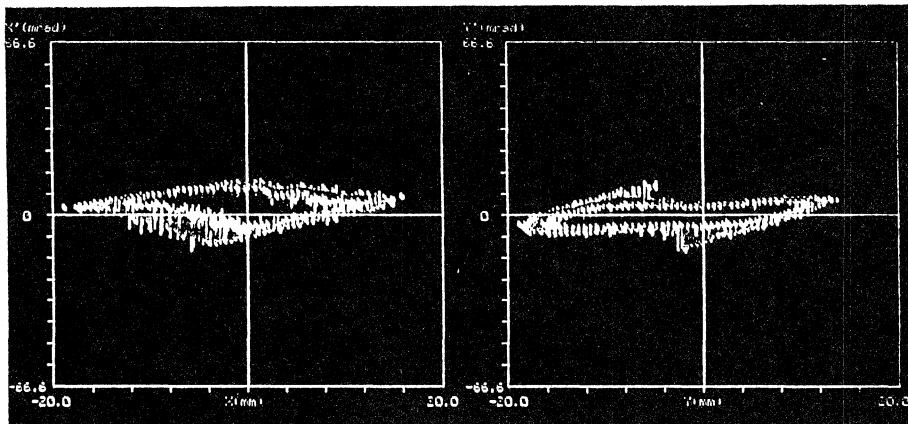


図8 He⁺加速時のLEBTでのエミッタンス測定結果(イオン源はPIGを使用)

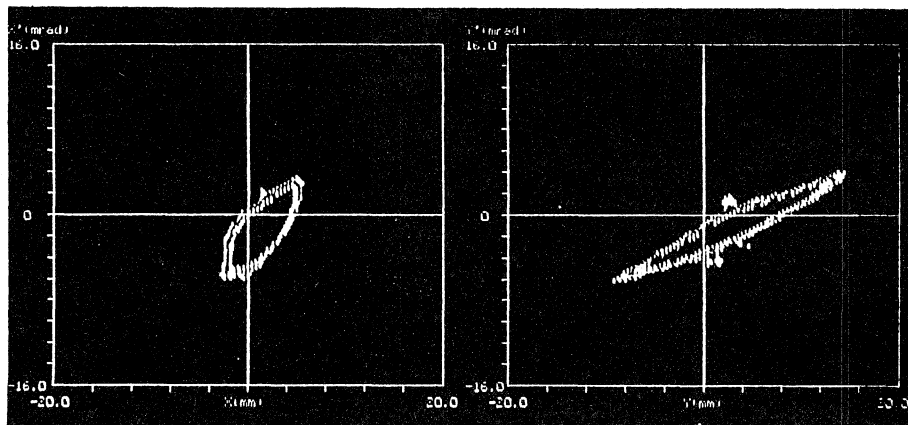


図9 He⁺加速時のMEBTでのエミッタンス測定結果(イオン源はPIGを使用)