

DEVELOPMENT OF MULTI-HARMONIC BEAM BUNCHER FOR AVF-930 CYCLOTRON

A. Sugiura^{A)}, M. Kanazawa^{A)}, S. Hojo^{A)}, T. Honma^{A)}, N. Suzuki^{A)}, N. Tasiro^{A)},
T. Okada^{B)}, T. Kamiya^{B)}, Y. Takahashi^{B)}, and K. Noda^{A)}

^{A)}National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba, Japan

^{B)}Accelerator Engineering Corporation, 3-8-5 Konakadai Inage Chiba Japan

Abstract

At National Institute of Radiological Science (NIRS), the AVF-930 cyclotron has been used for productions of short-lived radio-pharmaceuticals for PET diagnosis, research of physics, developments of the particle detectors in space, and so on. In productions of short-lived radio-pharmaceuticals for PET diagnosis, higher beam intensity is required. For this purpose, we are developing the multi-harmonic buncher. In this paper, we report development of the buncher for AVF-930 cyclotron.

AVF-930 サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発

1. はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)の AVF-930 サイクロトロンでは主に放射性薬剤の開発研究が行われている。この放射性薬剤の開発及びそれを使った研究の中で、P30 MeV, 20 μ A のビームを 8 時間照射した後、他施設へ放射性薬剤を提供している。提供施設を増やす可能性があるが、その場合ビーム強度を増やす必要がある。

ターゲット上でのビーム強度を上げるためにはビームの輸送効率を良くする、イオン源の強度を上げる方法が挙げられる。AVF-930 サイクロトロンのビーム輸送効率の中で、ヨークの入口からサイクロトロン中心部で一回転するまでの効率が一番悪く、P30 MeV で 30% となっている。そのサイクロトロンへの入射部分の構成は主に、バンチャー、インフレクター、プラーとなっている。以前プラー及びインフレクターの改良を行ったため[1]、今回は、ビームバンチャーの改良を検討している。

現在、AVF-930 サイクロトロンの入射系には共振型のダブルギャップビームバンチャーが設置されている。Sin 波形で最大 300 V の電圧かけることにより、サイクロトロンへの入射効率を 2~5 倍にしている。今回、バンチャーによる入射効率をさらに上げるため高調波ビームバンチャーの開発を行っている。

2. 高調波ビームバンチャー

ビームバンチャーは、イオン源から出てきた直流ビームをサイクロトロンの加速周波数に合わせてパンチングする装置である。RF 加速位相と比べて早いまたは遅いビームを減速または加速させることにより、うまく加速、取出しができる位相にビームを集める。そのため、このビームバンチャーの理想電圧波形は加速位相からずれた時間に比例して加速及び減速をする鋸波形となる[2]。鋸波形の電圧波形を作

るには、基本波に加えて基本波の整数倍の波形を足し合わせる必要がある。

開発を行ったビームバンチャーにかかる電圧の基本周波数は、AVF-930 サイクロトロンの加速周波数に合わせて 11~22 MHz とした。今回は 2 次及び 3 次の波形を足すことを考え、ビームバンチャーにかかる電圧の周波数範囲は 11~66 MHz とした。

AVF-930 サイクロトロンにバンチャーを設置するには、設置スペースの問題があり、現状の入射系ビームラインではそのスペースがほとんどない。バンチャーのために空けられる場所は 10 cm ϕ \times 15 cm の真空ボックス内の空間のみとなっている。ビームラインは少ないスペースで済むよう、バンチャー電極のみをビームラインに入れるシングルギャップバンチャーにした。構成図を図 1 に示す。



図 1 全体構成図(予定)

サイクロトロンの RF に同期したトリガー信号を、信号発生器に入力する。この周波数に位相を合わせて、1 次、2 次、3 次の合成波形を信号発生器で作成する。1 kW のアンプで増幅した後、インピーダンス変換器により 50 Ω から 200 Ω へ変換する。変換後、並列につないだ 200 Ω 抵抗とバンチャー電極へ電圧がかかる。

ビームバンチャーの理想的な電圧波形は鋸波であるが、インピーダンス変換器の動作周波数範囲を考え、3 次までの高調波としている。

今回、全体の内、バンチャー電極とインピーダンス変換器について開発を行ったので報告する。

2-1. バンチャー電極

バンチャー電極の図を図2に示す。メッシュでのビームロスはあるが、一様な電場が得られるメッシュ型を採用した。内径 $\phi 35\text{mm}$ の二つのリングに 3mm 間隔で $\phi 0.05\text{mm}$ のワイヤーを張り、ワイヤーを張ってある側を向かい合わせに 5mm の間隔を空けた。シングルギャップバンチャーの構造上、メッシュから後のグランド電位までの距離は 10cm 以上離さなければならないため、上流側に電極を寄せる構造にした。

ネットワークアナライザ(ADVANTESTR3751AH)と方向性ブリッジ(HEWLETT PACKARD 86205A)で測定した結果、電極の静電容量は 20pF であった。電極の容量リアクタンスは 11MHz で $753\ \Omega$ 、 22MHz で $414\ \Omega$ 、 44MHz で $269\ \Omega$ 、 66MHz で $233\ \Omega$ となっている。そのため、 $200\ \Omega$ の抵抗を並列につけた場合、ギャップにかかる電圧は入力電圧に対して 11MHz で 96% 、 22MHz で 88% 、 44MHz で 67% 、 66MHz で 52% となっている。1次、2次、3次の合成波形は、基本波に比べて2次高調波で必要な振幅は $1/3$ 、3次高調波で必要な振幅は $1/9$ であるため、十分な電圧をかける事が出来る。

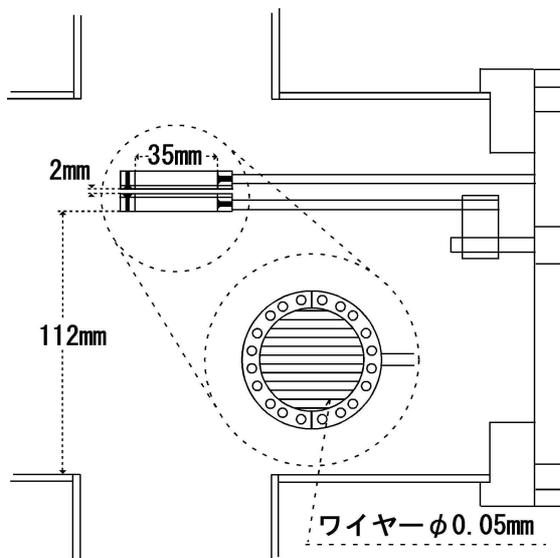


図2 シングルギャップバンチャー

2-2. インピーダンス変換器

電極のギャップに 300V の電圧を加えるには、 $50\ \Omega$ の場合だと1次、2次、3次の合計で 1300W 必要となる。アンプの最大出力を 1kW 以下に抑えるため、 $50\ \Omega$ を $200\ \Omega$ に変換するインピーダンス変換トランスを用いた。これより必要な最大出力は $1/4$ の 325W になる。

11MHz から 66MHz までの周波数に対応するためインピーダンス変換トランスには $1:4$ 伝送線路トランスを用いた[3]。FT140-77コア40個に $3\text{mm}\ \phi$ 、 1m

のより線を巻いている構造で、別件で試作された伝送線路トランスを流用している。



図3 インピーダンス変換トランス

インピーダンス変換トランスの入力VSWRを図4に示す。ネットワークアナライザと方向性ブリッジを使用し、インピーダンス変換トランスの出力部分に $200\ \Omega$ の抵抗をつけ、 $50\ \Omega$ の入力部分から反射波と減衰を測定した。

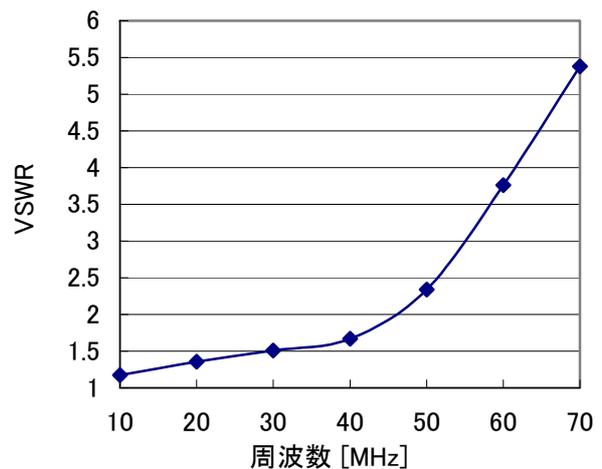


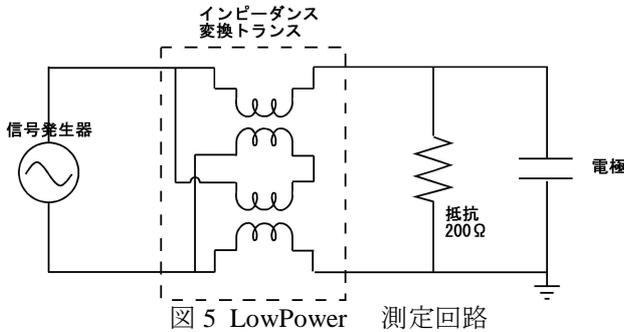
図4 VSWR

30MHz までVSWRは 1.5 に収まっているが、 60MHz でVSWRが 3.0 を越えている。VSWRが 1.5 で電力効率が 96% 、VSWRが 3.0 で電力効率が 75% 、VSWRが 5.0 で電力効率が 56% となっているため、現在検討中の最大許容反射電力が 250W の 1kW アンプであれば、十分な電圧が得られる。

しかし、別件で試作されたこのインピーダンス変換トランスは、使用周波数帯域が 1MHz から 8MHz で 10kW まで入れられるよう水冷に対応して制作されている。原理的にはより線を短くすることにより高周波まで反射電力を少なくすることができるため、現在検討をしている。

3. LowPower 試験

信号発生器(Tektronix AFG3102:1GS/s 100MHz) より1次、2次、3次の合成波形を発生させ、インピーダンス変換器を通した後、バンチャー電極に生じる電圧波形をオシロスコープ(Tektronix2247A)にて測定した。測定回路を図5に示す。



信号発生器から発生させた1.0V_{p-p}、11MHzの1次、2次、3次の合成波形を図6-1に示す。またこれを測定回路に入力した時のバンチャー電極の出力電圧波形を図6-2に示す。同様に22MHzの合成波形を図7-1に、測定回路に入力した時のバンチャー電極の出力波形を図7-2に示す。

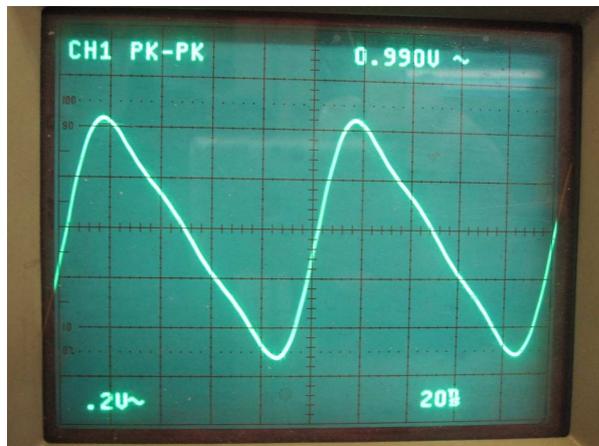


図6-1 信号発生器から発生させた1次、2次、3次の合成波形(基本周波数11MHz)

理想的な場合では、1.0V_{peak-peak}で入力された電圧はインピーダンス変換器により2.0V_{peak-peak}になる。測定した結果、11MHzで0.99Vの入力電圧は1.94Vの出力電圧、22MHzで0.942Vの入力電圧は1.85Vの出力電圧となりそれぞれ2%の減衰となっている。抵抗と電極の容量性リアクタンスから計算した場合、11MHzで4%、22MHzで12%減衰するはずであるため検討が必要である。

また、バンチャーで加速位相に集めるためには、鋸波部分の直線部がまっすぐになっている必要があ

る。しかし、電極の出力電圧波形は2次、3次の位相や振幅がずれて変形している。周波数毎に位相および振幅を調整をする必要があるが、現在の信号発生器では2次及び3次の位相と振幅の調整がしにくくなっている。

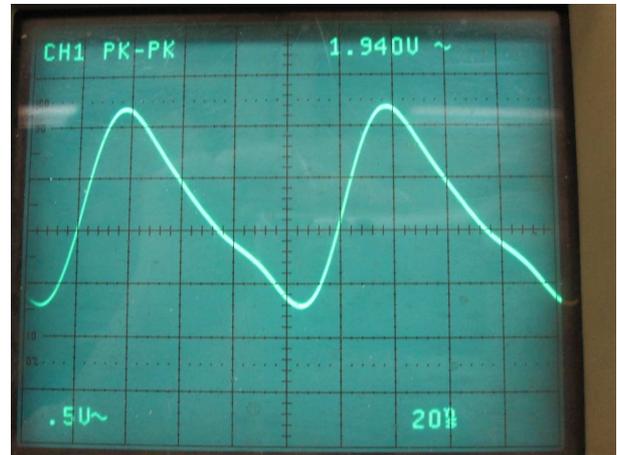


図6-2 6-1を入れた時の電極の出力電圧波形

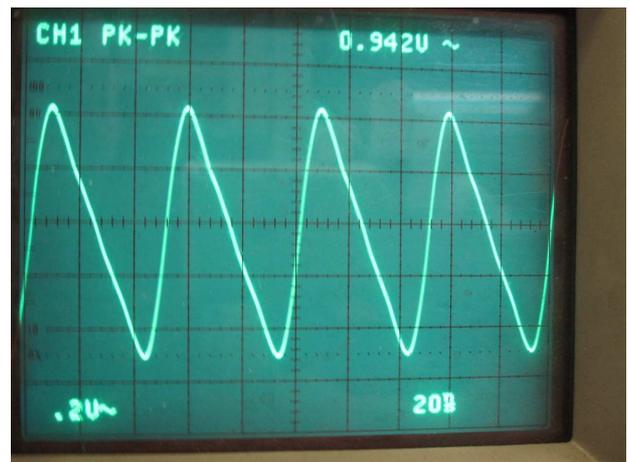


図7-1 信号発生器から発生させた1次、2次、3次の合成波形(基本周波数22MHz)

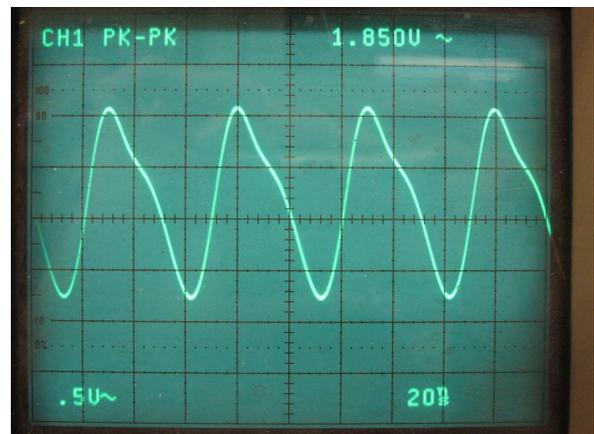


図7-2 7-1を入れた時の電極の出力電圧波形

4. シングルギャップ電極を使用したビームテスト

AVF-930 サイクロトロンの入射系に設置しているダブルギャップビームバンチャーの共振回路を使用して、シングルギャップバンチャーの電極に sin 波の電圧をかけてビームテストを行った。ダブルギャップバンチャーの回路図を図 8 に、シングルギャップバンチャーの回路図を図 9 に示す。テストに使用したビームは P12 MeV であり、加速周波数は 16.55MHz、Harmonic2 となっている。バンチャー電極に Sin 波を入力し、振幅と位相を変化させて、サイクロトロンから取り出されるビーム電流(BS0)が多くなるように調整した。

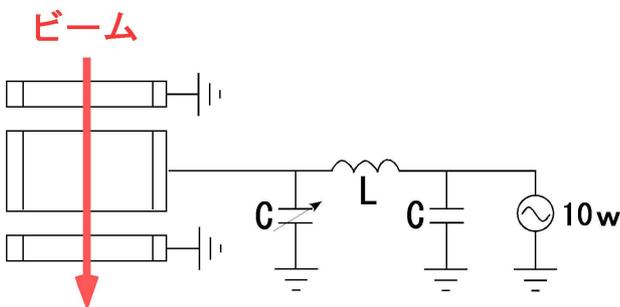


図 8. ダブルギャップバンチャー電極の回路図

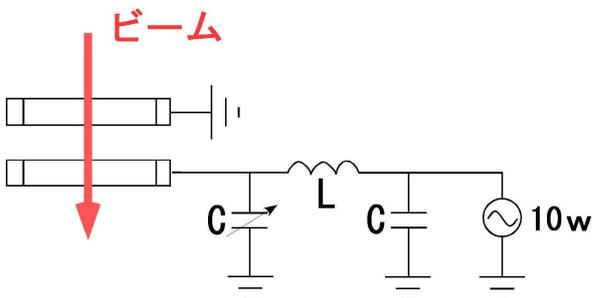


図 9 ビームテストを行ったときのシングルギャップバンチャー電極の回路図

表 1 電極を交換したときのバンチャー効率

モニター名称	バンチャーなし		現バンチャー電極 (ダブルギャップ バンチャー)		新バンチャー電極 (シングルギャップ バンチャー)	
	電流	輸送 効率	電流	輸送 効率	電流	輸送 効率
FCN2	140.2 μ A					
FCN3	65.0 μ A	46%				
FCN4	50.0 μ A	77%				
Inflector	42.0 μ A	84%	40.0 μ A	80%	41.0 μ A	82%
mainPro(r=100mm)	6.9 μ A	16%	12.5 μ A	31%	8.9 μ A	22%
mainPro(r=930mm)	5.3 μ A	77%	11.1 μ A	89%	7.5 μ A	84%
Extプローブ	4.7 μ A	89%	11.5 μ A	103%	7.3 μ A	97%
BS0	2.5 μ A	54%	6.2 μ A	54%	4.2 μ A	58%
バンチャー効果			2.46 倍		1.65 倍	
Pickup Vol (1/200)	-		1.320 V		0.978 V	
Phase	-		170.9 *		7.36 *	

ビームテストの結果を表 1 に示す。各ビーム測定

位置は次のようになっている。FCN2 はイオン源から出てきたビーム電流量。FCN3 はそのビームが分析電磁石を通った後、FCN4 はそのビームが垂直電磁石を通った後のビーム電流となっている。その下流にバンチャー電極を設置している。Inflector はインフレクターの電圧をオフにしている時にインフレクターに当たるビーム電流量。mainPro(r=100mm) はサイクロトロンに入射されたビームがサイクロトロンの加速位相に乗り一周したときの電流量。mainPro(r=930mm) は P12 MeV まで加速され、最外周まできたときの電流量。Ext プローブはサイクロトロンのビーム取り出し装置に入るときの電流量。BS0 はサイクロトロンから取り出されたときの電流量となっている。

ダブルギャップバンチャーの電圧は 264 V、シングルギャップバンチャーの電圧は 195V となった。計算上、シングルギャップバンチャーの電圧はダブルギャップバンチャーに比べて倍の電圧が必要だが、シングルバンチャーの電圧はダブルギャップバンチャーの 7 割ほどになっている。シングルギャップバンチャーの電圧を上げていくと、BS0 の電流量が減少するため、解決すべき問題を残している。

5. まとめ

AVF930 サイクロトロンのビーム強度を上げるため、高調波バンチャーの開発を行っている。今回はシングルギャップのバンチャー電極とインピーダンス変換器を開発し、低電力試験と、電極を現在使用しているバンチャーの回路を使用してビームテストを行った。開発を行ったシングルギャップの電極を使用してビーム強度を上げることができた。

今後、バンチング効率上げるため、改良を行い、高調波をかけるため試験及び調整を行う予定である。

参考文献

- [1] A. Sugiura, T. Honma, S. Hojo, M. Kanazawa, N. Suzuki, M. Muramatsu, Y. Sakamoto, T. Okada, T. Kamiya, K. Komatsu, K. Noda, STATUS REPORT OF NIRS CYCLOTRON FACILITY (2008), ARTA2009
- [2] K. Ikegami, A. Goto, Beam Buncher in the Injection Beam Line for the Injector AVF Cyclotron., RIKEN Accel.Prog.Rep.22(1988)
- [3] 山村英徳著, 定本トロイダルコア活用百科,CQ 出版社