

## DEVELOPMENT OF MULTI-HARMONIC BEAM BUNCHER FOR AVF-930 CYCLOTRON (II)

Satoru Hojo <sup>#A)</sup>, Akira Goto<sup>A)</sup>, Toshihiro Honma<sup>A)</sup>, Akinori Sugiura<sup>A)</sup>, Katsuto Tashiro<sup>A)</sup>,  
Takanori Okada<sup>B)</sup>, Takashi Kamiya<sup>B)</sup>, Yuichi Takahashi<sup>B)</sup>, and Kouji Noda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> National Institute of Radiological Sciences  
4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba, 263-8555

<sup>B)</sup> Accelerator Engineering Corporation  
3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba, 263-0043

### Abstract

At National Institute of Radiological Science (NIRS), the AVF-930 cyclotron has been used for production of short-lived radio-pharmaceuticals, research of physics, developments of particle detectors in space, and so on. In production of short-lived radio-pharmaceuticals for PET, high intensity proton beam is required. For this purpose, a sawtooth-wave beam buncher is being developed. In this paper, development of the beam buncher and some results of a preliminary beam test using it are reported.

### AVF-930 サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発(II)

#### 1. はじめに

放射線医学総合研究所の AVF-930 サイクロトロン(AVF-930)では主に放射性薬剤の製造や開発が行われている<sup>[1]</sup>。この放射性薬剤の開発およびそれを使った研究では、高強度陽子ビームによる長時間照射が多く行われている。そのため、高い強度での安定したビームを供給することが要求されている。

現在、AVF-930 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 (W-Gap バンチャー) が設置されている。W-Gap バンチャーは、正弦波を用いるビームバンチャーで、共振回路を用いることにより、低電力で高い電圧を発生することができるメリットがある。しかし、正弦波でのバンチング効率は、鋸歯状波によるバンチング効率と比較すると、理論的に低い。そのため、高いバンチング効率と高品質なビームが得られる鋸歯状波を用いるビームバンチャーの開発を進めている<sup>[2]</sup>。今回、鋸歯状波ビームバンチャーに用いるシングルギャップのバンチャー (S-Gap バンチャー) の電極を製作し、先ず正弦波電圧を用いたビームテストを行った。

#### 2. ビームバンチャー

##### 2.1 W-Gap バンチャー

現在、AVF-930 サイクロトロンの通常運転に用いられている W-Gap バンチャーは、正弦波を印加する高周波電極と、その前後にアース電極を設けた 2 つのギャップをもつバンチャーである。W-Gap バンチャーは、AVF-930 のメディアンプレーン(MP)より 1.53 m 上流に設置されている。W-Gap バンチャーを用いた AVF-930 の運転において最も高いバンチング効率が得られているのは、30 MeV 陽子の運転 (入射エネルギー 8.2 keV、加速ハーモニクス 1、

加速周波数 12.83 MHz) の場合で、5 倍のバンチング効率が得られている。表 1 に 30 MeV 陽子の場合の AVF-930 各位置における W-Gap バンチャーのバンチング効率を示す。R=0.05 m は AVF930 の加速初期で 2 ターン程度加速後の位置、R=0.93 m は、AVF-930 の最外周で静電デフレクタ入口での位置である。取出し後のビーム電流は、バンチャー OFF の時に 4.0  $\mu$ A であるのに対し、バンチャーを ON することにより 5 倍の 20  $\mu$ A が得られている。なお、この時のサイクロトロン入射直前のファラデーカップ(FC4)におけるビーム強度は 100  $\mu$ A であった。

表 1 : W-Gap バンチャーによるバンチング効率 (30 MeV 陽子)

	Buncher OFF [ $\mu$ A]	Buncher ON [ $\mu$ A]	バンチング 効率 [倍]
R=0.05 m	13.1	31.3	2.39
R=0.93 m	10.2	30.3	2.97
取出し後	4.0	20.0	5.00

##### 2.2 S-Gap バンチャー

新たに製作した S-Gap バンチャーの性能を調べる目的で、W-Gap バンチャーの 0.80 m 上流に設置してビームテストを行った。AVF-930 の M-P からの距離は 2.33 m になる。この設置位置において W-Gap バンチャーと同様に正弦波電圧を印加し、30 MeV 陽子を用いてバンチング効率を測定した。FC4 で 100  $\mu$ A のビームを入射したときの各位置におけるビーム強度とバンチング効率を表 2 に示す。S-Gap バンチャーの場合、バンチング効率は W-Gap バンチャーの 60%程度しか得られなかった。

<sup>#</sup>s\_hojo@nirs.go.jp

表 2 : S-Gap バンチャーによるバンチング効率  
(30 MeV 陽子)

	Buncher OFF [ $\mu$ A]	Buncher ON [ $\mu$ A]	バンチング 効率 [倍]
R=0.05 m	13.8	21.1	1.53
R=0.93 m	11.0	19.5	1.77
取出し後	4.3	12.8	2.98

### 3. ビームテスト

#### 3.1 バンチング効率のビーム強度依存性

100  $\mu$ A でのビーム強度でのビームテストにおいて S-Gap バンチャーによるバンチング効率が W-Gap バンチャーによる効率の 60%程度と低い結果となった原因として空間電荷による影響が考えられた。そのため、ビーム強度が低い場合においてもビームテストを行い、バンチング効率のビーム強度依存性を調べた。AVF-930 の R=0.05 m, R=0.93 m, 取出し後でのビーム強度依存性を、それぞれ図 1、図 2、図 3 に示す。図から、W-Gap バンチャーではビーム強度にかかわらずほぼ一定のバンチング効率が得られているのに対して、S-Gap バンチャーではバンチング効率は FC4 でのビーム強度が 50  $\mu$ A 以上になると低下し、逆に低いビーム強度では W-Gap バンチャーと比べて同程度かもしくはより高い効率が見られることが分かる。

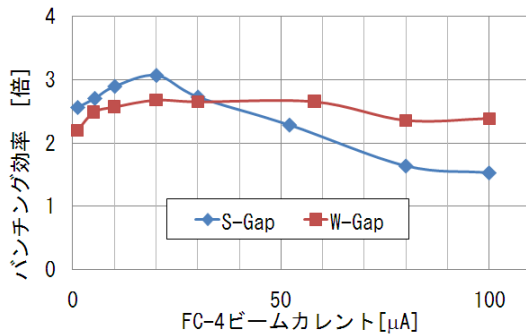


図 1 : R=0.05 m におけるバンチング効率のビーム強度依存性

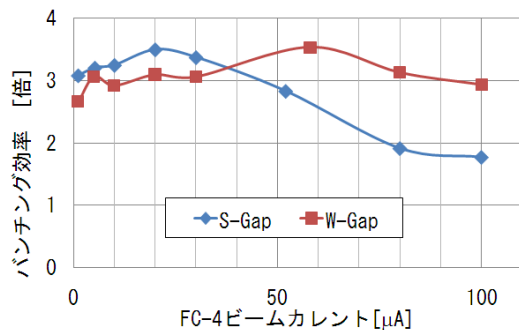


図 2 : R=0.93 m におけるバンチング効率のビーム強度依存性

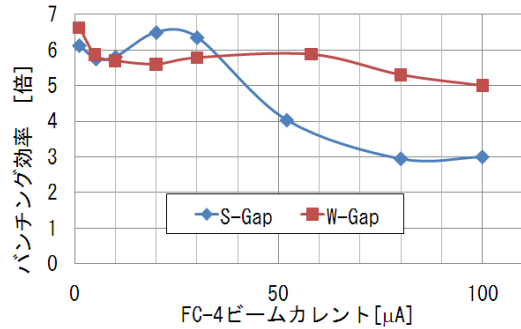


図 3 : 取出し後におけるバンチング効率のビーム強度依存性

#### 3.2 バンチ幅のビーム強度依存性

S-Gap バンチャーによるバンチング効率が FC4 でのビーム強度が 50  $\mu$ A 以上になると低下する原因として、空間電荷効果によりサイクロトロン位相アクセプタンスへのバンチ収束が十分に得られていないことが考えられた。そこで W-Gap バンチャーと S-Gap バンチャーにおいて、それぞれ AVF-930 の加速電圧との位相差を変えて、AVF-930 取出し後のビーム強度の変化について調べた。FC4 での強度を 1  $\mu$ A, 10  $\mu$ A, 50  $\mu$ A, 100  $\mu$ A としたときの位相差によるビーム強度の変化を、それぞれ図 4-7 に示す。FC4 のビーム強度が 1  $\mu$ A や 10  $\mu$ A のときは、S-Gap バンチャーと W-Gap バンチャーでの違いはほとんど見られなかった。ビーム強度の分布が三角形状をしていることから、この場合 AVF930 の位相アクセプタンスとバンチ幅が同程度であること、位相アクセプタンスの値が  $\pm 15$  度程度であることが分かった。しかし、FC4 のビーム強度を 50  $\mu$ A とした場合、S-Gap バンチャーでは、W-Gap バンチャーに比べバンチ幅が広がっており、100  $\mu$ A とするとさらに広がり、互いに 40 度離れたところに 2 つのピークが現れることが分かった。これはバンチ幅が位相アクセプタンス内に収まっていないことを示唆している。

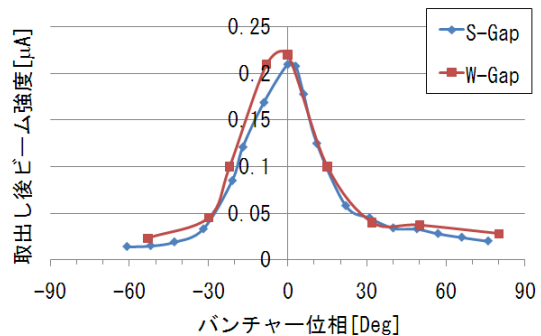


図 4 : FC4 1  $\mu$ A におけるバンチャー位相差によるビーム強度の変化 (ビーム強度が最大となる位相を 0 Deg とする。)

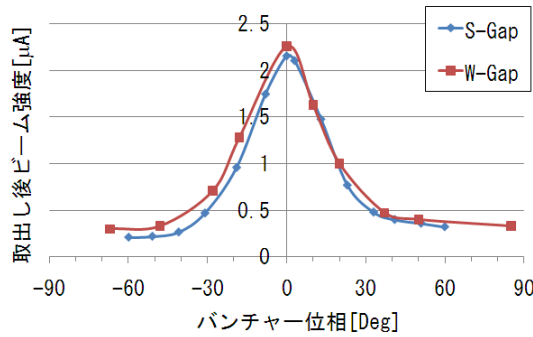


図 5 : FC4 10  $\mu\text{A}$  におけるバンチャー位相差によるビーム強度の変化 (ビーム強度が最大となる位相を 0 Deg とする。)

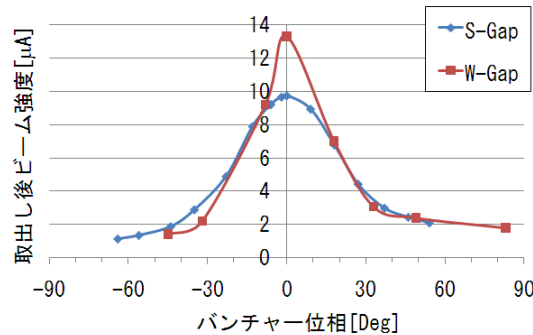


図 6 : FC4 50  $\mu\text{A}$  におけるバンチャー位相差によるビーム強度の変化 (ビーム強度が最大となる位相を 0 Deg とする。)

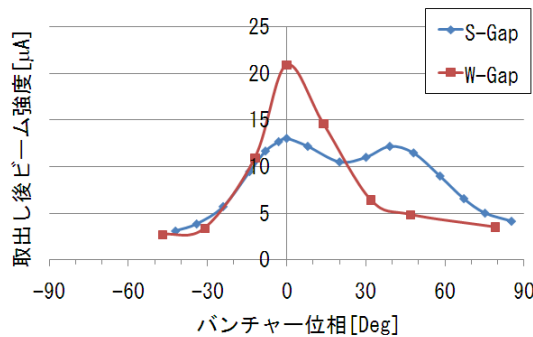


図 7 : FC4 100  $\mu\text{A}$  におけるバンチャー位相差によるビーム強度の変化 (ビーム強度が最大となる位相を 0 Deg とする。)

#### 4. 空間電荷効果

上述したバンチ幅のビーム強度依存性を理解するために空間電荷効果を含めたビームバンチのシミュレーションを行った。計算プログラムは参考文献[3]に基づいて作成したものを用いた。FC4 のビーム強度が 100  $\mu\text{A}$  の場合の W-Gap バンチャーと S-Gap バンチャーの計算結果をそれぞれ図 8 および図 9 に示す。W-Gap バンチャーの場合  $\pm 20$  度程度にバンチされているのに対して、S-Gap バンチャーでは  $\pm 50$  度程度に広がってしまっている。したがって、AVF-930 の位相アクセプタンスには入りきらず、図 7 のようにビーム強度が 2 つのピークを持つようになる、ということが理解できる。なお、双方ともさ

らに電圧を上げて、位相の 0 度にはこれ以上収束されず運動量幅が大きく広がってしまうだけである。

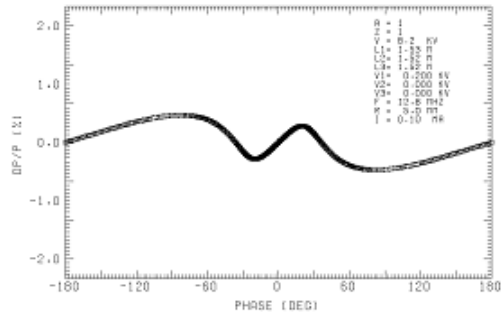


図 8 : FC4 100  $\mu\text{A}$  W-Gap バンチャーによる MP におけるバンチの計算結果 (距離 : 1.53 m、バンチャー電圧 200 V)

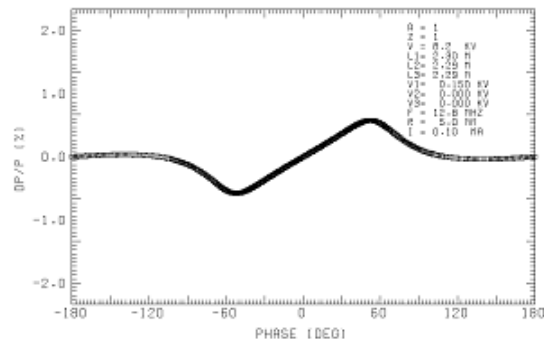


図 9 : FC4 100  $\mu\text{A}$  S-Gap バンチャーによる MP におけるバンチの計算結果 (距離 : 2.30 m、バンチャー電圧 200 V)

#### 5. まとめ

高いバンチング効率と高品質なビームが得られる鋸歯状波ビームバンチャーを製作し、先ず正弦波電圧を用いて陽子ビームによるビームテストを行った。

FC4 で 100  $\mu\text{A}$  のビーム強度の場合、ビームテストのために仮に据え付けた位置 (MP より 2.3 m 上流) では空間電荷効果により位相方向の収束が制限されバンチング効率に限界があることが分かった。空間電荷効果を軽減するためには MP との距離を短くすることが必要である。そのため、MP に近い既存のビームバンチャーの位置 (MP より 1.5 m 上流) に鋸歯状波ビームバンチャーを据え付け、再度ビームテストを行う予定である。

また、鋸歯状波を出力するシステムを構築することも今後の課題となっている。

#### 参考文献

- [1] A.Sugiura, et al., "Status report of NIRS cyclotron facility", Proceedings of the PASJ2011, MOPS031, (2011)
- [2] A.Sugiura, et al., "Development of multi-harmonic beam buncher for AVF-930 cyclotron", Proceedings of the PASJ2010, WEPS057, (2010)
- [3] R.Baartman, "SPUNCH - A Space Charge Bunching Computer Code", Proc. 11th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, (1986) 238.