

AVF-930 サイクロトロン用高調波ビームバンチャーの開発(III)

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

北條悟^{#,A)}, 涌井崇志^{A)}, 杉浦彰則^{A)}, 片桐健^{A)}, 中尾政夫^{A)},
岡田高典^{B)}, 高橋勇一^{B)}, 青山功武^{B)}, 野田章^{A)}

Satoru Hojo^{#,A)}, Takashi Wakui^{A)}, Akinori Sugiura^{A)}, Ken Katagiri^{A)}, Masao Nakao^{A)},
Takanori Okada^{B)}, Yuichi Takahashi^{B)}, Isamu Aoyama^{B)}, Akira Noda^{A)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

A NIRS-930 cyclotron (Thomson-CSF, Kb=110 MeV and Kf=90 MeV) has been used for radionuclide production since the first beam in 1973 at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). In recent years, the radionuclide production for Targeted Radionuclide Therapy (TRT) by using NIRS-930 has been one of the most important activities in NIRS. Since demand of radionuclide users on beam intensity is growing, the beam buncher is being improved to the multi-harmonic type from first harmonic type as one of means to increase beam intensity at NIRS-930. Until now, buncher electrode was improved to single gap electrode, and influence of space charge effect by the buncher location was investigated.

In this study, improvement of the RF system for beam buncher and beam test by using multi-harmonic beam buncher has been conducted to increase the beam intensity.

1. はじめに

放射線医学総合研究所の NIRS-930 サイクロトロン^[1]の主な目的の一つとして、放射性薬剤の製造及び開発が行われている。現在では、34 MeV He 垂直照射による ²¹¹At の製造^[2]をはじめとする標的アイソトープ治療(TRT)用核種の製造のために、高い強度のビームが要求されている。NIRS-930 では、さらに高いビーム強度を得るための方法の一つとして、正弦波バンチャーから、理論的な効率がより高い高調波バンチャーへの改良を進めている。これまで、加速電極の形状変更^[3]、電極位置による空間電荷効果の影響の調査^[4,5]などを行ってきた。

2. RF システム回路の改良

これまでのバンチャーシステムでは、加速周波数の基本波のみでビームバンチングをおこなっていたため、低出力アンプと整合回路を用いた共振電圧を電極に加えていた。

2次、3次の高調波を用いたバンチャーシステムにするために、整合回路をインピーダンス変換トランスと終端抵抗へ変更し周波数帯域を広げ、最終段の電力アンプの出力を 10 W から 500 W へと増強し、現在は入力波形整形を行う Low-level 回路の改良を進めている。最終的な Low-level 回路としては、任意信号発生器による合成波の波形整形を目標としているが、今回試験的に、基本波の入力に 2次と 3次の高調波をミキサーにより合成し、ビーム試験をお

こなった。

3. 高調波バンチャーを用いたビーム調整

34 MeV He ビームにて、ビームテストをおこなった。ビームテストの結果を Table 1 に示す。

まず、Inflector でのビーム電流は 46.1 μA であった。(ここで Inflector でのビーム電流とは、電圧をかけずにビームを Inflector 電極に当てて計測した電流値である。) この強度を入射し、バンチャーを off した状態でのデフレクタ入口である最外周(半径 920 mm)での強度は、9.6 μA で、さらにデフレクタ、マグネティックチャンネルを通過した取出し後のビーム電流は、8.6 μA であった。ここで、取出しの効率(取出し後のビーム電流/最外周でのビーム電流)は、90%であった。

さらに、同じ入射の強度で、バンチャーの影響を確認した。まず、ビーム供給の際に用いている基本波のみ、次に基本波に 2次高調波を加えた合成波形、さらに基本波に 2次 3次高調波を加えた合成波形でのビームバンチャーテストを行った。それぞれのバンチャー波形の振幅、位相等は、取出し後のビーム電流が最大となるように最適化されている。

基本波のみの場合では、通常のビーム供給と同等に取出し 20 μA を確認することができている。

さらに、2次高調波を加えて 21.5 μA 、2次 3次高調波を加えて 22.6 μA と取出しのビーム強度を増やせることが確認できた。

また、取出し効率についても、基本波のみの 93%に

[#] s_hojo@nirs.go.jp

対し、2次高調波を加えた場合は92%、2次3次高調波を加えた場合は92%と著しく低下することなく高い取出し効率を維持したまま、ビーム強度を増やすことができている。若干低下した取出し効率は、高調波を加えた状態での詳細な取出し調整を行っていないため、デフレクタ等の調整の余地があると考えられる。

次に、それぞれのバンチャー条件において、インフレクタに入射されているビーム電流 46.1 μA に対する入射加速効率を Table.2 に示す。バンチャー Off では、最外周では 21%、取出し後は 19%であった。これに対し、基本波のみのバンチャーでの最外周では 47%、取出し後は 43%となった。さらに2次3次高調波を加えることにより、最外周では 53%で取出し後では、49%と入射からの効率も向上させることができている。

Table 1: The Beam Current and Extraction Efficiency

Buncher	Beam Current at Radius = 920 mm [μA]	Extracted Beam Current [μA]	Extraction efficiency
Off	9.6	8.6	90%
1 st harmonic	21.5	20.0	93%
1 st ,2 nd harmonic	23.4	21.5	92%
1 st ,2 nd ,3 rd harmonic	24.5	22.6	92%

Table 2. The Through Pass Efficiency from Injection Beam at Inflector
(Injection Beam at Inflector = 46.1 μA)

Buncher	Radius = 920 mm	Extracted
Off	21%	19%
1 st harmonic	47%	43%
1 st ,2 nd harmonic	51%	47%
1 st ,2 nd ,3 rd harmonic	53%	49%

4. 出力波形

この時のバンチャー電圧の波形を Figure 1 に示す。基本波のみのバンチャー波形では、マイナスのピークとプラスのピークの位相幅は 180 度に対し、高調波バンチャーの波形では、マイナスピークが -150 deg からプラスのピークが 120 deg とバンチ可能な位相幅を 270 deg に広げることができた。しかし、高調波バンチャーでの波形を確認すると、高調波の位相と基本波の位相がずれており、通過する粒子を加速するマイナス側のピークよりも、減速させるプラス側のピーク電圧が高く表れている。

これは、バンチャーによる加減速されない中心位

相の粒子が、サイクロトロン加速高周波電圧に対する位相とのズレがある可能性があり、入射エネルギーや中心領域での調整により改善されると考えられる。これらの調整は今後の検討課題となっている。

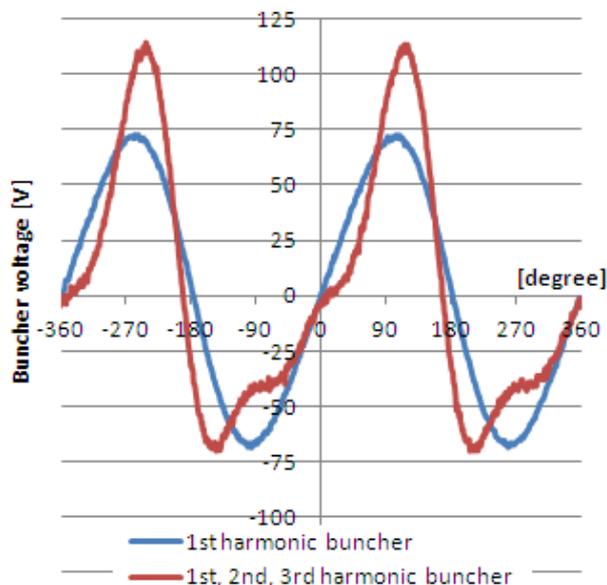


Figure 1: The wave forms of buncher voltage pickup.

5. 位相幅の測定

高調波バンチャーによるさらなる強度増強を目指すため、加速位相の確認を行った。加速位相の確認には、等時性磁場を調整したうえで周波数スキャンによるビーム電流の変化からの位相幅を求める手法^[6]を用いた。

34 MeV He の位相プローブでのビーム位相測定結果を figure2 に示す。最内周部のプローブでは、理想的な加速位相に近いほぼ 0 degree で加速されている。また、半径 300 以上での位相を見ると ± 5 degree で調整されている。ビームの位相幅を加速周

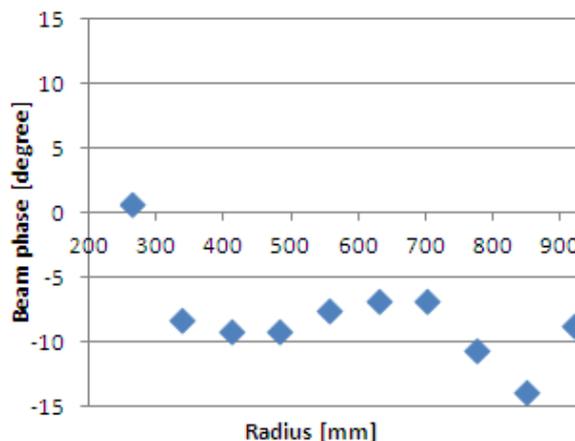


Figure 2: The beam phase of 34 MeV He²⁺.

波数のスキャンをして、ビーム電流が 25%減と 75%減のとなる位相から算出する。

加速周波数をスキャンして、ビーム電流の低下を計測した結果を Figure 3 に示す。この測定での Beam buncher は基本波のみである。Beam buncher の on-off ではビーム電流の低下の仕方は、変わらない、つまりビームの位相幅は変わらないという結果となった。また、 $\Delta f/f < 0$ では、ビーム電流の低下が一方的ではなく、ピークがみえてしまっている。そのため測定範囲では 75%減までがみられなかったため、 $\Delta f/f > 0$ の一方から位相幅を算出した。結果、加速周波数 13.65 MHz に対し、ターン数は 255 ターン、25%減となる周波数は 13.654 MHz、75%減となる周波数は 13.652 MHz で、これらの値より位相幅を算出すると、50 degree となった。

また、Inflector での入射電流は 46.1 eμA を 360 deg としたとき、Beam buncher off で加速される電流値 9.6 eμA を均一な分布のバンチとしてこの入射率から位相幅を算出すると、75 degree とさらに広い結果となっている。

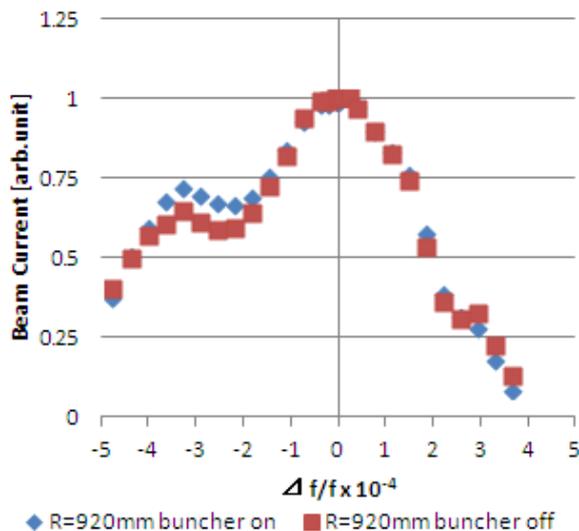


Figure 3: The beam current pattern with the acceleration frequency scanned of 34 MeV He²⁺.

6. まとめ

基本波の信号に 2 次、3 次の高調波を合成入力し、バンチャーシステムによるビームテストを行った。

ビームテストの結果、サイクロトロンからの取出し効率を低下させることなく、基本波のバンチャー 21.5 eμA から 24.5 eμA へと増強することができた。また、入射の効率では、50%の入射効率を実現することができた。しかしながら、出力波形にはひずみが生じており、今後の検討課題となっている。また、周波数スキャンによる位相幅の測定を行った。その結果、50 degree でありこの値をもとにさらに強度を上げた場合、どの程度の入射取出しが可能かを検討していく予定である。

参考文献

- [1] A. Sugiura, et al., “Status Report of NIRS-930 and HM-18 Cyclotron at NIRS”, Proceedings of the PASJ2015, Fukui, FSP021 (2015).
- [2] Kotaro Nagatsu, et al., “Production of 211At by a vertical beam irradiation method” Applied Radiation and Isotopes Volume 94, December 2014, Pages 363–371.
- [3] A. Sugiura, et al., “Development of multi-harmonic beam buncher for AVF-930 cyclotron”, Proceedings of the PASJ2010, WEPS057, (2010).
- [4] S. Hojo, et al., “Development of multi-harmonic beam buncher for AVF-930 cyclotron (II)”, Proceedings of the PASJ2011, TUPS113, (2011).
- [5] S. Hojo, et al., “Observation of Longitudinal Space Charge Effects in the Injection Beam Line of NIRS-930 Cyclotron” Proceedings of the IPAC2012 MOPPD028, 427-429 (2012).
- [6] S. Kurashima, et al., “Useful technique for analysis and control of the acceleration beam phase in the azimuthally varying field cyclotron” REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81, 033306 (2010).