

## ビームエネルギー位置モニターを用いたビームエネルギー幅の測定

### MEASUREMENT OF BEAM ENERGY WIDTH USING BEAM ENERGY POSITION MONITOR

宮脇信正<sup>#, A)</sup>, 柏木啓次<sup>A)</sup>, 渡辺茂樹<sup>A)</sup>, 石岡典子<sup>A)</sup>, 倉島俊<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>B)</sup>

Nobumasa Miyawaki<sup>#, A)</sup>, Hirotsugu Kashiwagi<sup>A)</sup>, Shigeki Watanabe<sup>A)</sup>, Noriko Ishioka<sup>A)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>A)</sup>,  
Mitsuhiro Fukuda<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Takasaki Institute for Advanced Quantum Science, National Institutes for Quantum Science and Technology

<sup>B)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

The energy spread of the beam accelerated by the TIARA AVF cyclotron could be measured by the beam energy and position monitor (BEPM). The beam energy spread was calculated by the difference between the time widths of the maxima and minima of the signals obtained from the upstream and downstream pickup electrodes, respectively, used in the TOF measurement by the BEPM. The measured beam energy spread was close to the energy resolution of the TOF measurement by the BEPM, depending on the beam conditions.

#### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設(TIARA)のAVFサイクロトロンでは、10 MeV H<sup>+</sup>から 490 MeV <sup>192</sup>Os<sup>30+</sup>までの多様なイオン種及びエネルギーのビームを材料・バイオ研究等の幅広い研究分野に提供している[1]。これらのいくつかの実験では、数百 MeV 級重イオンマイクロビーム[2]や均一拡大照射[3]など、特殊なビーム形成が求められてきた。これらのビーム形成では、サイクロトロンで加速されたビームの電流やエネルギーとその幅、形状等についてさまざまな要求がある。特にマイクロビーム形成では、1 μm のビーム径を達成するために 4 連四重極電磁石を用いた集束磁気レンズでの色収差の影響を低減する[4]ため、 $\Delta E/E = 2 \times 10^{-4}$  のビームエネルギー幅が求められた[5]。過去の  $\Delta E/E$  の測定は、ビーム輸送ライン上の既存の精密偏向電磁石とその前後にスリット、ビーム強度モニターを設置した測定システム[6]とマイクロチャンネル検出器とプラスチックシンチレータ検出器から成るビームの飛行時間(TOF)測定システム[7]によって実施された。前者はマイクロビーム照射に使用される 260 MeV <sup>20</sup>Ne<sup>7+</sup> ビームで予備テストが行われ、その結果、 $\Delta E/E$  が 0.1% 未満であるが報告された。しかし、他の条件のビームによるスリットの損傷などの理由で撤去された。後者を用いた測定は、30 MeV H<sup>+</sup>ビームの  $\Delta E/E$  を FWHM で 0.22% の値を得ることができた。しかし、このシステムも故障などの理由で撤去されたため、 $\Delta E/E$  を測定する機器が無い状態であった。

近年、アルファ線核医学治療の候補核種の一つである <sup>211</sup>At(半減期 7.2 時間)の高効率な製造のため、ビームエネルギーを非接触かつリアルタイムで測定可能なビームエネルギー・位置モニター(BEPM)が RI 製造用のビームラインに導入された[8]。<sup>211</sup>At の製造では、<sup>211</sup>Bi( $\alpha$ , 2n) <sup>211</sup>At の核反応を利用[9]し、<sup>211</sup>At の生成率は He ビームのエネルギーとともに増加するが、約 29 MeV 以上

では、<sup>211</sup>Bi( $\alpha$ , 3n) <sup>210</sup>At の核反応が生じて <sup>210</sup>At(半減期 8.1 時間)も生成する。<sup>210</sup>At は <sup>211</sup>At に対して化学的な分離が不可能であり、壊変によって高い毒性の <sup>210</sup>Po(半減期 138 日)が生じるため、臨床用に製造する薬剤では不純物として残って問題となる[10]。従って、ビームエネルギーの制御が必要であり、BEPM はこの測定を担っている。ビームエネルギーの制御として、サイクロトロンハーモニックコイルを用いて 1% の範囲で変更できる方法を開発した[11]。この方法は、サイクロトロン内のビーム周回軌道の中心位置をデフレクター電極の方向に変化させると取出しまでの周回数(加速回数)が減ってエネルギーが減り、逆に遠ざけるとエネルギーが増えることを用いている。しかし、デフレクター電極に入るビームに広がりを持たせるため、 $\Delta E/E$  の増加に寄与すると考えられる。 $\Delta E/E$  の増加はビームエネルギー制御を悪化させるため、 $\Delta E/E$  を測定する必要があった。そこで、BEPM で得られた信号から  $\Delta E/E$  の測定の可能性について検討を行った。

#### 2. ビームエネルギー幅の測定方法

BEPM の静電型ピックアップ電極上に誘起される信号の解析は[12, 13]で詳述されている。この中で、ビームのバンチ中の粒子の電流分布を、ビームの進行方向においてガウス分布と仮定し、静電型ピックアップ電極上に誘起される電圧の時間変化が示され、計算と測定の結果はよく一致したことが報告されている。Figure 1 に示すように、QST 高崎の BEPM は TIARA AVF サイクロトロンから直線上のビームラインに上流と下流の 2 か所にピックアップ電極を設置し、Fig. 2 に示すように同様の電圧の時間変化の測定結果が得られている。この信号の極大値と極小値の間隔は、ビームのバンチ中の粒子の電流分布の立ち上がりと立ち下りの幅であり、ビームの進行方向の広がりと考えることが出来る。このビームの進行方向の広がり、サイクロトロンから取り出されたビームに対して加減速されないため、サイクロトロンで加速されたビームのエネルギー差を反映する。

<sup>#</sup> miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

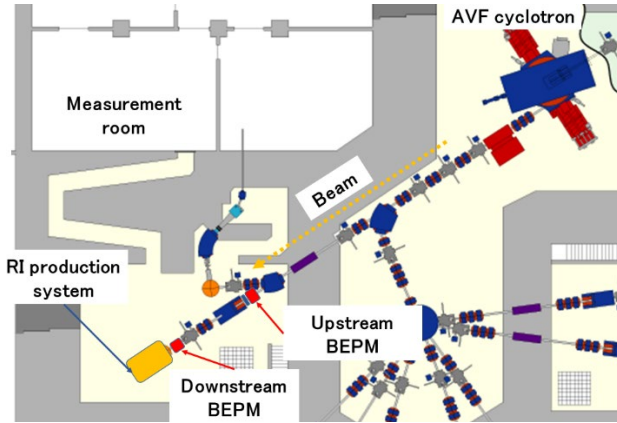


Figure 1: Schematic layout of the AVF cyclotron and beam transport line for RI production.

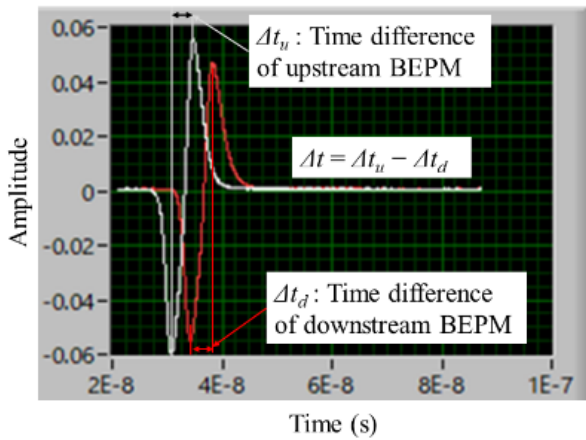


Figure 2: Example of measured signal.

エネルギー差である信号の極大値と極小値の時間間隔を、2か所のピックアップ電極で測定することによって、時間間隔の変化からビームエネルギー幅が得られる。ビームエネルギー $E$ は以下の通りです。

$$E = E_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{t \times c}\right)^2}} - 1 \right] = E_0 \left( \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $E_0$ は静止質量、 $L$ はピックアップ電極間距離、 $t$ はTOF、 $c$ は光速である。TOFは2か所のピックアップ電極の信号のゼロクロスの間隔である。ビームの $\Delta E/E$ は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1 + \sqrt{1 - \beta^2} \Delta \beta}{1 - \beta^2} \frac{\Delta t}{\beta} = \alpha \frac{\Delta t}{t} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta t$ はFig. 2に示すように2か所のピックアップ電極で測定した信号の極大値と極小値のそれぞれの時間間隔の差である。これを実際のビーム測定の結果から求める必要がある。

### 3. 測定結果

#### 3.1 ビームエネルギー分解能

加速ビームによってTOFの $t$ と $\alpha$ が異なるため、エネルギー分解能 $R$ も異なる。そこで、BEPMでのTOFによる $R$ を次式によって求めた。

$$R = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_m}{t}\right)^2} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta L$ はBEPM間距離の測定誤差として0.5 mm、 $\Delta t_m$ はデジタイザ等の測定誤差として20 psとする。今回測定したビームの $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R$ の一例をTable 1に示す。

Table 1: Energy Resolution and Parameters  $\alpha$  and  $\beta$

Beam	$\alpha$	$\beta$	$R$
20 MeV H <sup>+</sup>	2.065	0.204	4.53E-04
50 MeV <sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	2.040	0.161	3.73E-04
160 MeV <sup>16</sup> O <sup>6+</sup>	2.031	0.143	3.41E-04

速度比 $\beta$ が大きいくほど $R$ は大きくなるのが分かる。また、1  $\mu$ mのマイクロビーム形成で要求される $10^{-4}$ のオーダーの $\Delta E/E$ の測定では、 $R$ とほぼ同じになることが分かった。

#### 3.2 ビームエネルギー幅測定

前節と同じビーム条件で数十回のTOFの測定結果の平均からビームエネルギー幅を算出した。それぞれのビーム条件において、サイクロトロンに入射前に加速RFのアクセプタンス内にビームをバンチングして加速ビーム電流を増加させるバンチャーのON時とOFF時の $\Delta E/E$ の違いについても調べ、結果の一例をTable 2に示す。

Table 2: Beam Energy Spreads  $\Delta E/E$

Beam	Buncher ON	Buncher OFF
20 MeV H <sup>+</sup>	2.18E-03	2.28E-03
50 MeV <sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	3.09E-03	4.90E-03
160 MeV <sup>16</sup> O <sup>6+</sup>	7.93E-04	1.99E-03

測定したビームの $\Delta E/E$ は凡そ $10^{-3}$ オーダーであった。20 MeV H<sup>+</sup>ビームのエネルギー幅はバンチャーに関係なくほぼ一定であった。50 MeV <sup>4</sup>He<sup>2+</sup>ビームと160 MeV <sup>16</sup>O<sup>6+</sup>ビームはバンチャーによって $\Delta E/E$ が減少することが確認できる。他方、H<sup>+</sup>ビームは低エネルギーでのバンチングによる空間電荷効果の影響のため、バンチャーによる差が表れていないと考えられる。また、<sup>4</sup>He<sup>2+</sup>ビームはビームエネルギー制御によって取出し前にビーム軌道が広がり、マルチターン取出しとなったため、他に比べて $\Delta E/E$ が大きいと考えられる。反対に<sup>16</sup>O<sup>6+</sup>ビームはシングルターンに近づく調整を行っているため $\Delta E/E$ が最も狭くなったと考えられる。従って、H<sup>+</sup>ビームはバンチャーによる $\Delta E/E$ の減少の効果は無く、重イオンでは効果が認められた。また、サイクロトロン調整によって $\Delta E/E$ の減少が可能であることが分かった。

### 4. まとめと今後について

TIARA AVF サイクロトロンで加速されたビームに対してBEPMによるビームエネルギー幅の測定は可能であることを示した。しかし、エネルギー分解能が良く調整されたビームのエネルギー幅に近い場合、1  $\mu$ mのマイクロビーム形成に要求される $2 \times 10^{-4}$ 程度の $\Delta E/E$ の測定が困

難であることが分かった。これを解決するための TOF 測定での  $R$  の向上には、ピックアップ電極間の距離を広げる、または測定機器の測定時間の誤差を小さくする必要があるが、距離の拡大は機器の設置スペースに問題があり、測定誤差の縮小はデジタイザの性能に依存するため、現状では困難である。

エネルギー制御を行っている He ビームは  $\Delta E/E$  が大きいので、今後ビーム調整によって  $\Delta E/E$  の縮小の可能性を検討する。これにより、 $^{211}\text{At}$  の製造で行っている 1% の範囲でビームエネルギー制御について、現状の 0.3% の広がりを更に狭めて本制御の改善を試みる。

## 謝辞

BEPM システムでの本測定について理研の渡邊環氏より貴重なご助言を頂き感謝致します。

## 参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [2] T. Funayama, Quantum Beam Sci. 3, 13 (2019) 1-14.
- [3] Y. Yuri *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 642 (2011) 10-17.
- [4] M. Oikawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 85-90.
- [5] M. Fukuda *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 74 (2003) 2293-2299.
- [6] S. Okumura *et al.*, “Instrumentation for measurement of beam energy spread”, in *Proceedings of 17th. International Conference on Cyclotrons and Their applications*, Tokyo, Japan, 2004.
- [7] S. Okumura *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 76 (2005) 113106.
- [8] N. Miyawaki *et al.*, “Development of beam energy and position monitor system in the beam transport line for RI production at the TIARA AVF cyclotron”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 302-305.
- [9] K. Gagnon *et al.*, J. Label Compd. Radiopharm 2012, 55 436-440.
- [10] A. Alfarano *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 41 (2006) 115-122.
- [11] N. Miyawaki *et al.*, “Effect of cyclotron parameters on beam energy control for At-211 production”, Proc. PASJ2023 Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 680-682.
- [12] T. Watanabe *et al.*, “Development of beam energy and position monitor system at RIBF”, Proc. PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 1112-1117.
- [13] T. Watanabe *et al.*, “Development of beam energy position monitor system for RIKEN superconducting acceleration cavity”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 49-54.