

TIARA AVF サイクロトロンにおける RI 製造用ビームラインのビームエネルギー・位置モニターの開発

DEVELOPMENT OF BEAM ENERGY AND POSITION MONITOR SYSTEM IN THE BEAM TRANSPORT LINE FOR RI PRODUCTION AT THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正^{#, A)}, 渡辺茂樹^{A)}, 柏木啓次^{A)}, 石岡典子^{A)}, 倉島俊^{A)}, 福田光宏^{B)}

Nobumasa Miyawaki^{#, A)}, Shigeki Watanabe^{A)}, Hirotsugu Kashiwagi^{A)}, Noriko S Ishioka^{A)}, Satoshi Kurashima^{A)}, Mitsuhiro Fukuda^{B)}

^{A)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

The beam energy and position monitor (BEPM) was installed to evaluate the beam energy for RI production in the straight beamline from the TIARA AVF cyclotron. As a result of measurement of the beam energy for 50 MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ beam using BEPM in the real time, the fluctuation range was less than 0.1% during the experimental. The fluctuation of the beam energy for each experimental day was up to 1%, which was almost the same as the previously measured result by the analyzing magnet. The results of the beam position measured by BEPM showed that the direction of the beam position measured by the existing beam profile monitor was incorrect. It was confirmed that the beam energy and position in the straight beamline can be monitored by the BEPM in the real time.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設(TIARA)の AVF サイクロトロン(K=110)[1]は、多様な RI を製造するために数 μA の H や He 等のイオンビームを加速し、RI 製造装置に供給している。近年、アルファ線核医学治療に用いるための ${}^{211}\text{At}$ に関する研究が国内で活発化しており、TIARA においても研究利用のために ${}^{211}\text{At}$ を製造している。

加速器を用いた ${}^{211}\text{At}$ の製造では、一般的に He ビームを Bi ターゲットに照射して生じる ${}^{211}\text{Bi}(\alpha, 2n){}^{211}\text{At}$ の核反応を用いており、He ビームの入射エネルギーが 30MeV 程度までは ${}^{211}\text{At}$ の収量が大幅に増加する[2]。また、半減期が 7.2 時間と短い ${}^{211}\text{At}$ を核医学治療で用いるためには、GBq オーダーという大量の製造が不可欠であり、それにはビーム量の増強とともに ${}^{211}\text{At}$ の収量が最大となる He ビームのエネルギーで照射することが求められる。しかし、He ビームの Bi への入射エネルギーが 29MeV を超えると ${}^{211}\text{Bi}(\alpha, 3n){}^{210}\text{At}$ の核反応が生じ始め、半減期 8.1 時間の ${}^{210}\text{At}$ が生成する。これは同位体であるため化学的な分離が不可能であり、その後の壊変により毒性が高い RI である ${}^{210}\text{Po}$ (半減期 138 日)が生成し、不純物として混入する[3]。そのため、臨床用の製造プロセスで求められるような高純度化・高品質化においては不適合となる。従って、Bi ターゲットに入射する He ビームは、 ${}^{210}\text{At}$ が生成するエネルギーより低く、かつ ${}^{211}\text{At}$ の収量が最大となるエネルギーに制御する必要がある。

TIARA AVF サイクロトロンにおける ${}^{211}\text{At}$ の製造は、サイクロトロン出口から直線上のビームライン末端の RI 製造装置で実施している。本装置はターゲット部の冷却

に He ガスと水を使用しており、その構造はビームラインの真空を Ti 箔で隔てて冷却用 He ガス層があり、これと Bi ターゲットを Al 箔で隔てている。これらの箔やガス層を透過するために、He ビームを十分高いエネルギーに加速し、最終的に ${}^{211}\text{At}$ 製造に最適な入射エネルギーになるように Al 箔の厚さを調整している。しかし、サイクロトロンで加速した He ビームのエネルギーは、分析電磁石の磁場強度の測定値から求める方法によって、これまで実験毎に最大で約 1%の差があった。この差によって、実際の ${}^{211}\text{At}$ の製造では ${}^{210}\text{At}$ の生成や ${}^{211}\text{At}$ の収量が増減する影響を受けた。一方で、この分析電磁石を用いたビームのエネルギー測定では、RI 製造装置へのビームラインから他のビームラインに一時的に切り替える必要があり、この分析電磁石の励磁と消磁を繰り返して 30 分程度の時間を要するため、リアルタイムでの測定は不可能であった。また、サイクロトロンの運転スケジュールにおいても毎回のエネルギー測定が困難であった。さらに、事前にビームエネルギーを測定したとしても、実験では複数のターゲットを使用する場合があります。毎回複数の適切な厚さの Al 箔の準備と実験中の装着は現実的ではなかった。そのため、 ${}^{211}\text{At}$ の効率的な製造できるように、サイクロトロンで加速するビームのエネルギーを一定に制御することが求められた。

そこで本研究では、 ${}^{211}\text{At}$ の製造において ${}^{210}\text{At}$ の生成を防止しつつ、 ${}^{211}\text{At}$ の収量の最大化を目指したサイクロトロンの高精度ビームエネルギー制御技術の開発を行っており、加速後のビームエネルギーをリアルタイムで測定できるビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システムを導入した。本報告では、この設置状況と実ビームを用いた測定結果について報告する。

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

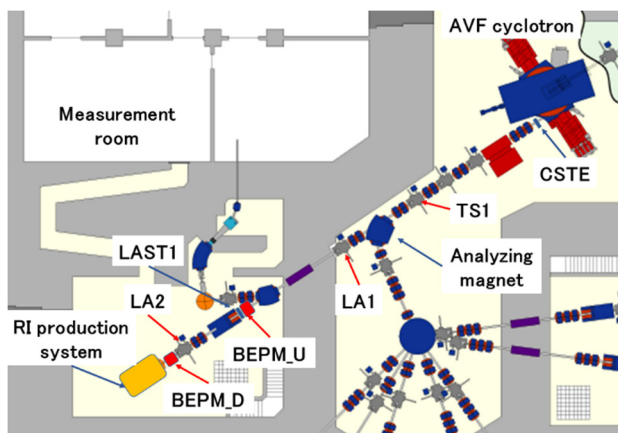


Figure 1: Schematic layout of the AVF cyclotron and beam transport line for RI production.

2. TIARA AVF サイクロトロン of the ビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システム

BEPM システムは、理研で開発され、超伝導線形加速器 (SRILAC) 等に導入されている [4, 5]。TIARA AVF サイクロトロンでは、BEPM を RI 製造装置に接続するビームラインに設置した。BEPM システムは、2 台の円筒静電型ピックアップの電極を用いて、これらを通るビームで誘起される信号から時間差 (飛行時間) を測定し、予め正確に測定した電極間距離からエネルギーを得ることができる。Figure 1 に示すように、ピックアップはサイクロトロンから直線上のビームラインの 2 か所 (上流側: BEPM_U、下流側: BEPM_D) に設置した。電極間距離は、レーザー距離計の測定結果から $5.840 \text{ m} \pm 1 \text{ mm}$ であった。BEPM によるビームの位置測定のためにピックアップの電極形状は、Fig. 2 のように円筒を $\text{COS}2\theta$ の曲線上 (U) 下 (D) 左 (L) 右 (R) に 4 分割した構造となっている。ビーム位置は電極の上下と左右の電極で測定した電圧の差から中心からのズレとして求められ、上流と下流の 2 か所のそれぞれで得ることができる。ピックアップの電極の内径はビームが当たらない様に、前後のビームダクト径の内径より大きい 104 mm 、長さは前後の機器寸法から 220 mm とした。BEPM_U のピックアップの設置では、ビームラインの沈下のため -7.2 mm 位置ずれ

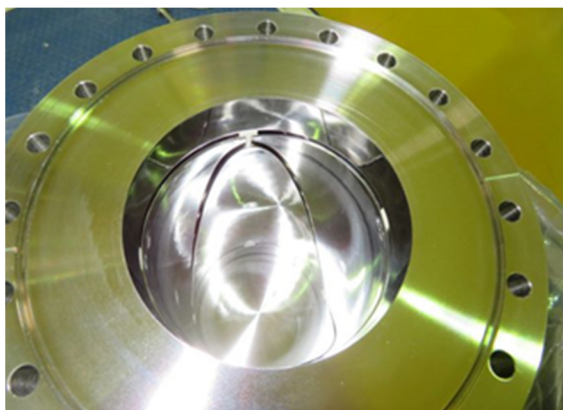


Figure 2: Photo of the BEPM pickup electrode.

が確認され、ビームの位置測定において考慮する必要が生じた。

2 つのピックアップのそれぞれ 4 つの電極から誘導された電圧信号は、N 型のフィードスルーを介して大気側に取出し、これに直接接続したアンプ (ABL0300-00-4030: WENTEQ Microwave) によって信号を増幅し、照射室の天井近くのスリーブに通した計 8 本の信号用同軸ケーブル (S_07262_BD: HUBER+SUHNER) によって計測室までの約 50 m を伝送した。この 8 本の同軸ケーブルの電気長のばらつきを小さくするため、事前に 10 MHz CLOCK GENERATOR にケーブルを接続してケーブル他端で反射した信号の時間差を計測し、その結果を基にケーブルを切り揃え、最終的に約 10 ps 未満に収めた。計測室では、上流と下流の信号をマルチプレクサ (PXIe-2746: NI) によって切替えてデジタイザ (PXIe-5160: NI) でデジタル化する信号処理を行った。デジタイザのトリガーはサイクロトロンの加速 RF 信号であるが、TTL レベルのデジタル信号が要求されるため、RF 信号を CFD に通して LEVEL ADAPTER (688AL: LeCroy) で生成した。また、サイクロトロンに入射するビーム量を制御するために、加速 RF ($11 \sim 22 \text{ MHz}$) に対して 3 kHz の周期で平行平板電極に印加する電圧によるキックでビームを間引くビームチョッパーを常時使用するため、データ収集するタイミングをこれに合わせる必要があった。そこで、 3 kHz の矩形波をマルチファンクション I/O モジュール (PXIe-6341: NI) に入力してデータ収集のトリガーとした。これらの信号処理は PC にインストールした LabVIEW 開発システムのプログラムによって統合化して処理され、それぞれの測定結果を PC に保存することとした。

3. He ビームを用いた測定結果

3.1 ビームエネルギー測定

TIARA AVF サイクロトロンにおいて ^{211}At の製造に使用している公称値 50 MeV のパラメータによって加速した $^4\text{He}^{2+}$ ビームについて、実験毎に BEPM と分析電磁石を用いたエネルギー測定結果を Fig. 3 に示す。

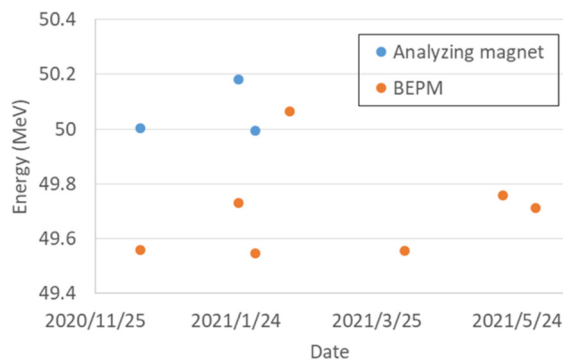


Figure 3: Measured $^4\text{He}^{2+}$ beam energy by BEPM and analysis bending magnet for each experiment.

BEPM と分析電磁石の両方の測定方法ともに、実験日毎にビームのエネルギーが変動する場合が多いことが確認できた。分析電磁石によるエネルギー測定は、

TIARA の運転スケジュールの都合により毎回実施できないため測定点は少ないが、BEPM の測定値と比較すると、常時約 0.4 MeV 高い結果が得られた。この測定では、磁石への入射前と出射後のアルミナ蛍光板を用いて目視によってビーム位置をビームダクト中心と一致するように調整するため、測定誤差が大きい。また、電磁石への入射ビームの方向に対しての制限がなく、入射のビーム位置が中心でも偏向方向に対して外側の向きで入射した場合、出口でのビーム位置を中心にするために磁場強度を高くしてビームの偏向量を増加するため、結果として実際のビームエネルギーよりも高い値になったと考えられる。これを補正するためには、角度制限スリットを用いるとともにさらなるビーム軌道の調整も必要となり、今以上に時間を要することになる。

BEPM によるビームエネルギー測定での実験日毎のエネルギーの変動は、これまでの分析電磁石による測定結果とほぼ同じ約 1% であった。一方で BEPM はリアルタイムでビームエネルギーをモニターできることから同一実験日内のビームエネルギーの変動も得られ、その変動は約 0.1% 未満であった。これは、実験日毎の変動よりも十分小さく、今後ビームエネルギーを変更した時のモニターとして使用できることが分かった。実験日毎のエネルギーの変動の原因についてサイクロトロンのパラメータを調べた結果、主に等時性磁場を形成するためのトリムコイルの励磁電流や加速電圧に差異があることがわかった。これらは実験日毎のビームエネルギーの変動要因であるとともに、これを制御すればエネルギーも制御できるパラメータであることも示しており、今後実験で確認する予定である。以上より、現状の分析電磁石を用いたエネ

ルギー測定より BEPM システムによる飛行時間測定の正確性やリアルタイム化の利点について確認できた。

3.2 ビーム位置測定

ビームエネルギーの変更に伴うサイクロトロンのパラメータの調整により、サイクロトロンから取出したビーム軌道が変わってビームの照射位置がターゲットから外れる可能性がある。そこで、ビーム軌道を素早く補正するため、ビーム位置の変化を非接触かつリアルタイムで得ることができる BEPM は重要である。この BEPM によるビームの位置測定を、サイクロトロンで加速された 50 MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームを用いて実施した。これと比較するため、既存の 3 線式のワイヤー位置検出器であるビームプロファイルモニター (BPM) も用いた。BPM の設置位置は、BEPM を設置した直線上のビームラインに、サイクロトロン出口から TS1、LA1、LA2 の順でビーム診断ポートにある。BEPM は LA2 を挟んで上流から順に BEPM_U と BEPM_D である。サイクロトロンからのビーム軌道の変化を模擬するため、TS1 より上流のステアリング電磁石 (CSTE) を用いて、これによるビーム位置の相対的な変化を BEPM と BPM によって測定した。CSTE への励磁電流に対する各ビーム位置検出位置での水平 (X) 方向と鉛直 (Y) 方向の相対位置について Fig. 4 に示す。BEPM によって測定したビーム位置は、Eq. (1) によって導出した。

$$\Delta x = \alpha \left(\frac{V_R - V_L}{V_U + V_D + V_R + V_L} \right)$$

$$\Delta y = \alpha \left(\frac{V_U - V_D}{V_U + V_D + V_R + V_L} \right)$$
(1)

ここで、 V_U , V_D , V_R , V_L はそれぞれの電極に誘起される電圧を表している。 α は理研 BEPM のマッピング測定結果の値を参考に、1.3 とした。BPM によって測定したビーム位置は、ワイヤー位置毎に測定された電流分布をガウス近似して導出した。なお、最下流の BEPM_D の Y 方向は、ビームの変化が大きいため測定ができなかった。

CSTE の励磁電流の変化で通常同じ方向の傾きになるはずが、破線で示すように X 方向では TS1 と LA1、Y 方向では TS1 の BPM の測定結果の傾きが逆になった。この原因は、20 年以上前に実施した制御系の改造時に、ビーム診断ポート毎に異なる BPM の方向への対応ができていないことが原因と推測される。そのため、TS1 と LA1 の X 方向と TS1 の Y 方向のそれぞれの位置の正負を逆にして実線でプロットした。この結果、BEPM と BPM とともに、CSTE からの距離に伴って相対位置の変化量が増加し、傾きが大きくなった。しかし、X 方向では、傾きは LA1 より下流の BEPM_U が小さく、同様に LA2 より BEPM_D が小さい。逆に Y 方向では、LA2 の傾きより上流の BEPM_U の方が大きい。これは、BEPM と BPM の位置の導出方法やビームの形状、広がり、絶対位置の差が原因と考えられ、特に CSTE から遠い BEPM は特にその影響を受けた。さらに、明らかなビーム強度の減少が確認できることから、ビームがダクトで損失することによって、ビームの形状が変化してビームの重心位置が変わり、測定位置が想定していた変化と異なると考えられる。そこで、位置変化を小さくするため LA2 の上流

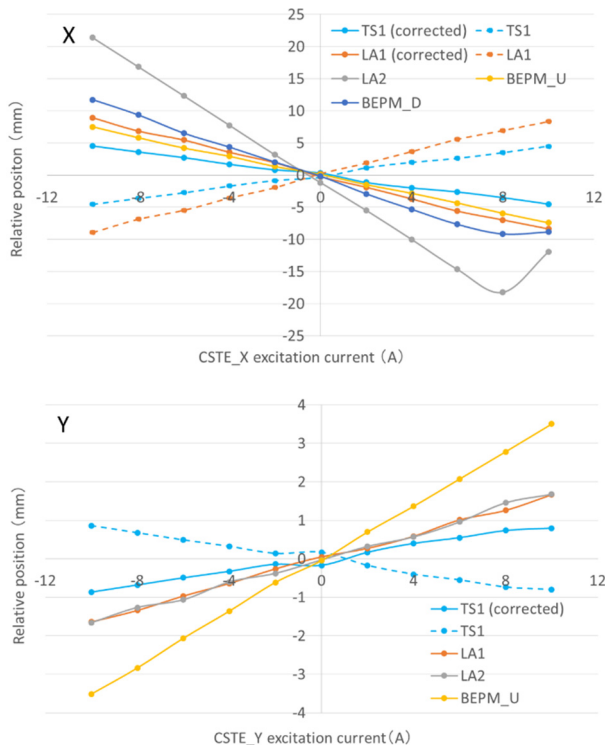


Figure 4: Relationship between relative position and CSTE excitation current for X and Y direction.

のステアラー電磁石(LAST1)を用いて、LAST1 が 0 の時に BEPM_D から約 0.83 m 下流のターゲット位置で中心になるようにビーム軌道を調整した状態で、LAST1 への励磁電流に対する LA2 や BEPM_D での X と Y 方向の相対位置について調べた。その結果を Fig. 5 に示す。

LAST1 と LA2 及び LA2 と BEPM_D の距離はそれぞれ、約 4.5 m と約 1 m で、測定場所が接近しているが、BEPM_D の方が LA2 より下流であるため、BEPM_D の傾きが大きいはずだが、ほぼ同じ傾きとなった。この結果から、BEPM によるビームの測定位置の導出に用いる α の値が合っていないことが考えられ、今後検討する必要があることがわかった。これらの結果から、BEPM の位置測定は今後最適化が必要であるが、サイクロトロンのパラメータの変更に伴って取出しビーム軌道が大きく変わった場合、BEPM でビーム位置をモニターしながらターゲットまでのビーム強度を最大化した上で、LAST1 等のターゲットに近いステアラーで調整することが適切であると考えられる。

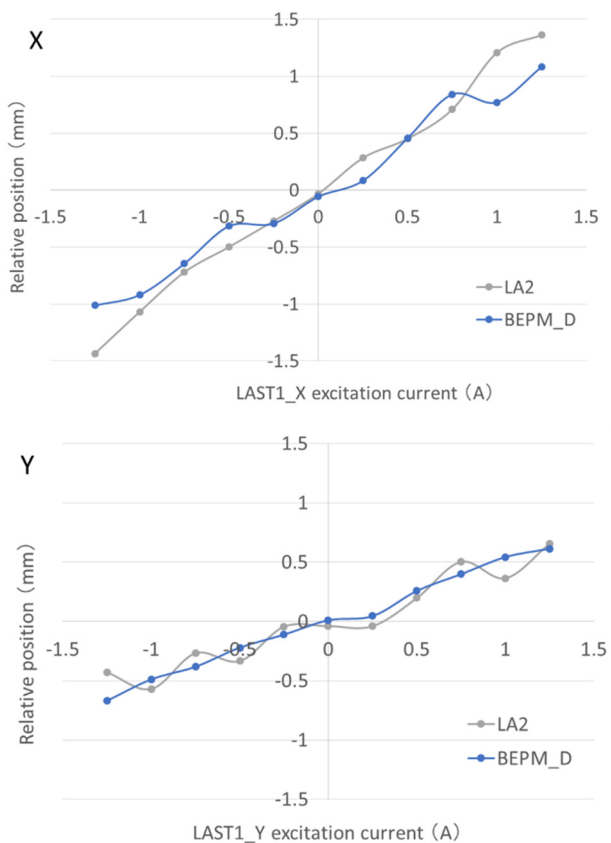


Figure 5: Relationship between relative position and LAST1 excitation current for X and Y direction.

4. まとめと今後について

TIARA AVF サイクロトロンにおける RI 製造用ビームラインに BEPM システムを導入にしたことにより、これまでの分析電磁石を用いた加速ビームのエネルギー測定に比べて、測定誤差が小さくなり、リアルタイムで精度の良い測定が可能となった。BEPM を用いた予備的な実験では、 ^{211}At の製造に使用する公称値 50 MeV に加速した

He ビームのエネルギーが磁場や加速電圧等のサイクロトロンいくつかのパラメータで変わることが分かり、ビームエネルギーの制御についての見通しが得られた。一方、ビームの位置測定においては、サイクロトロン出口からビームが大きく偏向した場合、BEPM や BPM の各ビーム位置モニターで正確な測定結果が得られないため、ビーム強度をモニターしながらビーム軌道の補正後に BEPM でモニターして位置調整する必要があることが分かった。

今後、BEPM によってビームエネルギーをリアルタイムでモニターしながら、サイクロトロン内のパラメータを変化させて、 ^{211}At の製造に最適なエネルギー制御方法を明らかにしていく予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP20K08014 の助成および国立研究開発法人科学技術振興機構産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JST、OPERA、JPMJOP1721)の支援を受けて実施しました。

本 BEPM システムの開発全般にわたっ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。測定システムのプログラムに関して日本ナショナルインスツルメンツ社の鴨志田敦史氏より貴重なご助言を頂き感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, Quantum Beam Sci. 1, 2 (2017).
- [2] K. Gagnon *et al.*, J. Label Compd. Radiopharm 2012, 55 436-440.
- [3] A. Alfaraño *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 41 (2006) 115-122.
- [4] T. Watanabe *et al.*, “理研 RIBF におけるビームエネルギー・位置モニターの開発”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1114-1117.
- [5] T. Watanabe *et al.*, “理研超伝導リニアック用ビームエネルギー・位置モニターのコミッションング”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 718-723.