

RI-BFにおける静電型ピックアップを用いた ビームエネルギー測定システムの開発

DEVELOPMENT OF BEAM ENERGY MEASUREMENT SYSTEM BY USING ELECTROSTATIC PICKUPS AT THE RIBF

渡邊環^{*A)}、藤巻正樹^{A)}、福西暢尚^{A)}

Tamaki Watanabe^{*A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}

^{A)}RIKEN

Abstract

It is important to evaluate the energy and phases of heavy-ion beams at the RIKEN RI beam factory (RIBF). Monitors with plastic scintillators as sensors (scintillation monitors) have been used to measure the energy and longitudinal profiles of heavy-ion beams. Two scintillation monitors installed in the beam transport lines are used to measure the particle time-of-flight (TOF) between the paired monitors. In this year, for the purpose of real time measurement of the beam energy, electrostatic pickups are newly designed, fabricated and installed in the beam transport line in the AVF cyclotron. These monitor systems and results of experimental measurements of heavy-ion beams are reported.

1. はじめに

理研のRIビームファクトリー（RIBF）では、加速された重イオンビームの位相やエネルギーを測定する事は、ビームの入射、加速、取り出し過程の調節において重要である。現在まで、ビームエネルギーを測定するために、シンチレーションモニターシステムを用いてきた^[1,2]。このシステムに於いては、ビームシグナルとRFクロックとのタイムラグを、Time-to-digital converter (TDC) によってデジタル化し、そのヒストグラムを取る事により、縦方向のビームプロファイルを得ている。さらに、モニター間の距離を正確に測定した2台のモニターを用い、ビームの飛行時間（TOF）を測定する事により、ビームのエネルギーが得られる。近年、AVFサイクロトロンをビームを用いて、有用RI製造のための核反応励起関数測定の実験が行われている。この実験に於いて、ビームエネルギーを精密に測定する事は、RI製造の収量に大きく関わるため、非常に重要になる。がん治療に利用が期待されている核医学核種²¹¹Atは、29.0 MeVの α ビームによって、²⁰⁹Bi($\alpha,2n$)²¹¹At反応を用いて製造するが、ビームエネルギーが高い方に3%ずれると収率は24%増え、低い方に3%ずれると収率は20%減る^[3]。また、長寿命で毒性の高い副反応生成物である²¹⁰Poの収率は、ビームエネルギーが高い方に3%ずれると収率は79%増え、低い方に3%ずれると収率は55%減る^[3]。現在、理研で行われている実験に於いて、シンチレーションモニターシステムを用いて、ビームエネルギーの測定を行っている^[4]。しかし、シンチレーションモニターシステムでは、ビーム強度を絞る必要があり、シンチレーターにビームを照射している測定時には、実験ユーザーはビームを使う事が出来ない。さらに、ビームの照射過多や長期間の使用で、シンチレーターが変色し、感度が低下する。この問題を解決するため、リアルタイムで測定をする事を目的として、静電型ピックアップの設計、製作を行った。現在、AVFサイクロトロンをビームラインにインストールし、ビームエネルギーの測定を、上記のシンチレーションモニターシステムと並行して行っている。

*wtamaki@riken.jp

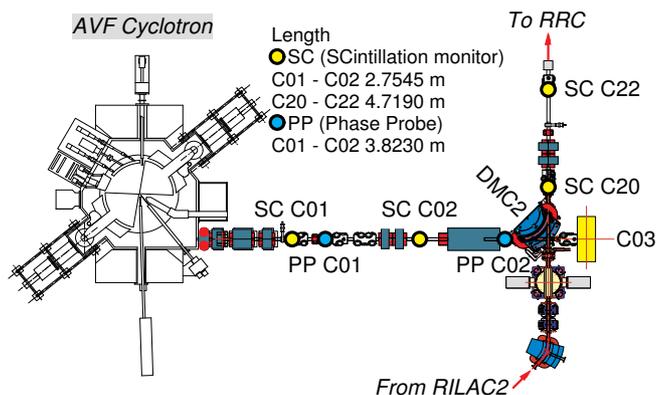


Figure 1: Schematic view of the AVF cyclotron and the beam transport line showing the positions of the scintillation monitors and the electrostatic pickup monitors.

2. ビームエネルギー測定システム

2.1 AVFサイクロトロンとビームライン

AVFサイクロトロンとビームラインの概略をFig. 1に示す。このFig. 1に於いて、SCはシンチレーションモニター（SCintillation monitor）を、PPは静電型ピックアップ（Phase Probe）を表している。RIBFに於いては、PPとは、各所にインストールしている位相プローブの略称で、このシステムでも統一した略称を用いている。有用RI製造の実験に用いているターゲットは、C03に設置されている。尚、AVFサイクロトロンは、実験の単独利用だけではなく、RRC（RIKEN Ring Cyclotron）の入射器としても用いられている。昨年までは、RILAC2（RIKEN Heavy-Ion Linac 2）で加速されたビームのエネルギーを測定する為に、シンチレーションモニターはSC C20とSC C22に設置されていた。また、AVFサイクロトロンで加速されたビームも、偏向電磁石 DMC2でビームを偏向させて測定を行っていた。しかし、偏向電磁石 DMC2の最大励磁磁場ではビームを曲げる事

が出来ない重陽子や α 粒子などのビームエネルギーを測定するため、SC C01 と SC C02 に移設を行った。磁場測定結果を用い、偏向電磁石 DMC2 の励磁電流からビームエネルギーを算出した値と、シンチレーションモニターシステムを用いたビームエネルギー値の比較では、0.2% の違いで一致している [1]。

2.2 シンチレーションモニターシステムに於ける解析

ビームエネルギーはビームの TOF から算出する為、縦方向のビームプロファイルのセンターを決める必要がある。現在、ビームプロファイルにカーブフィッティングを行っているので、フィッティングがどのように測定精度に影響を及ぼすか考察を行う。Fig. 2 に、AVF サイ

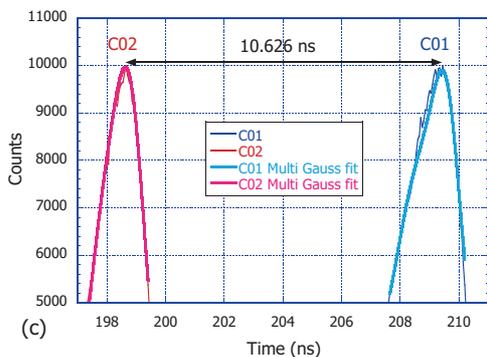
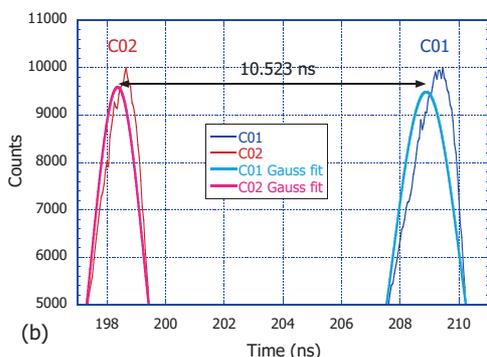
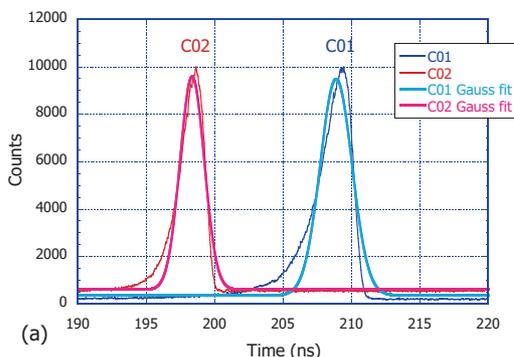


Figure 2: (a)(b) Longitudinal profiles of the D^+ beam measured at C01 and C02 (see Figure 1). Each profile is fitted with Gaussian function. (c) The measurement data over 5000 counts are fitted with two Gaussian functions.

クロトロンで加速された 12 MeV/u の重陽子ビームを、シンチレーションモニター SC C01 と SC C02 を用いて測定した結果を示す。この図では、時間軸の右方向に向かって、ビームは高エネルギー側となる。このように、サイクロトロンで加速されたビームは、高エネルギー側に集まり、低エネルギー側に裾野を引くのが特徴である。ここで、この非対称のカーブを、通常使われる 1 成分のガウス分布でフィッティングした結果を Fig. 2(a) に示す。ここで、この図を 5000 カウント以上で拡大した図を、Fig. 2(b) に示す。シンチレーターは、厚さ 5 mm、30 mm × 30 mm のサイズなので、測定前には近傍の (横方向) プロファイルモニターを用いて、ビームが中心にあり、シンチレーター内に収まっている事を確認している。Fig. 2(a) から解るように、SC C01 と SC C02 では、低エネルギー側の裾野の違いがあり、またノイズによるバックグラウンドが異なるため、ガウス分布の中心に僅かなずれが生じる。これを改善するため、5000 カウント以上のデータを選択し、高エネルギー側と低エネルギー側の両方にカーブフィッティングが合うように、以下の様に 2 成分のガウス分布を用いる。

$$Y(t) = Y_0 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(t-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)$$

ここで、それぞれのガウス分布の平均は μ_1 、 μ_2 、標準偏差は σ_1 、 σ_2 である。具体的には、以下のように m_1 から m_7 のパラメーターを用いてカーブフィッティングを行った。

$$Y(t) = m_1 + m_2 \exp\left(-\frac{(t-m_3)^2}{m_4^2}\right) + m_5 \exp\left(-\frac{(t-m_6)^2}{m_7^2}\right)$$

計算で得られた m_1 から m_7 のパラメーターを用いてビームプロファイルの再計算を行い、そのピーク値をビームの中心とした。Fig. 1(c) にその結果を示す。2 成分のガウス分布を用いたフィッティングは、測定されたビームプロファイルに、更に近い形になっている事が解る。Fig. 1(b) と Fig. 1(c) を比較すると、1 成分と 2 成分のカーブフィッティングの違いにより、TOF に約 100 ps の違いが表れるので注意が必要である。尚、シンチレーションモニター SC C01 と SC C02 に用いている信号ケーブルの電気長の差を、ネットワークアナライザーの遅延時間の測定と、パルサーからの信号をオシロスコープで測定する方法で、各々 10 ps 以内に収まっている事を確認している。信号ケーブルは、18 GHz までの帯域を持ち、優れたシールド性を有する、HUBER+SUHNER 社 [5] の S 04272 B を使用している。

2.3 静電型ピックアップモニターシステムと測定結果

リアルタイムでビームエネルギーを測定をする事を目的として、静電型ピックアップの設計と製作を行い、PP C01、PP C02 (Fig. 1) にインストールした。この静電型ピックアップは、現在 RIBF で用いられている位相ピックアップを改良したものである [6]。コンフラットフランジに用いているガスケットは、真空シールドだけではなく、ビームから静電型ピックアップが遮蔽される様、特別な設計を施している。ビームが静電型ピックアップに当たると、プリアンプが破損するので、その防止策として非常に有効である。静電型ピックアップの概要を Table 1 に、C02 にインストールした静電型ピッ

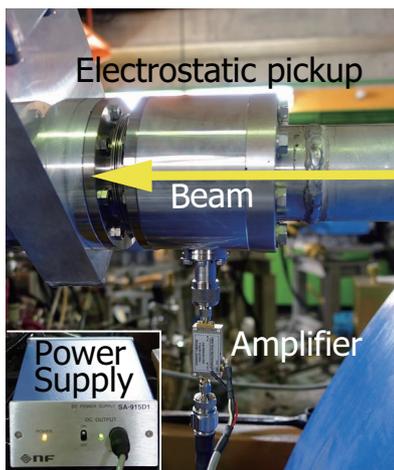


Figure 3: Photograph of a electrostatic pickup.

クアップの写真を Fig. 3 に示す。ビームが静電型ピックアップ内部を通過すると、静電的に電極に電荷が誘起され、即ちビームシグナルとなり、ICF34 フランジに溶接されたフィードスルーを介して大気側に伝えられる。高周波ノイズを減らすために、広帯域でローノイズのプリアンプを、ダイレクトでフィードスルーに接続し、ビームシグナルを増幅している。現在使用しているプリアンプの仕様を、Table 2 に示す。このプリアンプの電源には、NF 回路ブロック社^[8]のローノイズ電源 SA-915D1 (出力電圧リプルノイズ 300 μ V 以下) を使用している。Fig. 4 に、静電型ピックアップを使用したビームエネルギーシステムのブロックダイアグラムを示す。ビームトランスポートの PP C01 と PP C02 に設置された静電型ピックアップからのビームシグナルを増幅し、約 46 m の信号ケーブルを使用して加速器室外に送られ、オシロスコープ若しくは、ディジタイザーで測定し、その時間差 τ_{tof} を得る。予め測定されている両静電型ピックアップ間の距離 L (Fig. 1) を用いれば、 L/τ_{tof} よりビーム速度が得られ、ビームエネルギーを計算する事が出来る。約 10 μ A の重陽子ビームを、オシロスコープ (Tektronix 社^[9] DPO4104) によって測定

Table 1: Outline of the Electrostatic Pickup

静電容量	50 pF (@10 kHz)
長さ、内径、外径(Pickup)	60 mm、61 mm、66 mm

Table 2: Electrical Specifications of Preamplifier

メーカー	WENTEQ MICROWAVE CORP ^[7]
型番	ABL0300-00-3230
周波数帯域	9 kHz から 3.0 GHz
ノイズフィギュア	2.5dB typical, 3.0 dB Max @25 °C
ゲイン	32 dB @25 °C
1dB コンプレッション	+15 dBm minimum
DC 電源	110mA、+15V

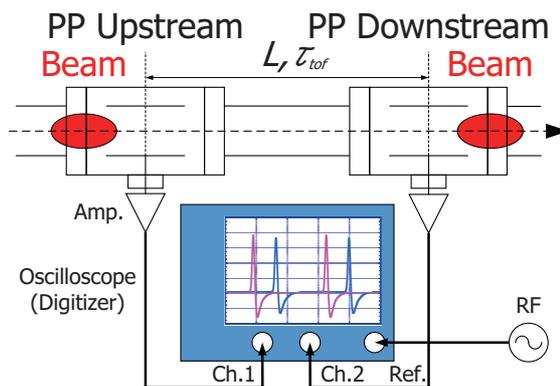


Figure 4: Block diagram of the electric static monitor system.

した結果を、Fig. 5 に示す。ここで、PP C02 のケーブルが 76 ps に相当する分だけ長く、オシロスコープのスキューが 100 ps あるので、その分を補正してプロットした。この測定は、上述したシンチレーションモニターによるビームエネルギー測定直後に行ったものである。信号ケーブルは、3 GHz までの帯域を持ち、優れたシールド性を有する、HUBER+SUHNER 社^[5]の S 07212 BD を使用している。これらの測定より、PP C01 と PP C02 の静電型ピックアップ間の TOF τ_{tof} は、32.328 ns という結果が得られた。

一方、TOF の解析を、日本ナショナルインスツルメンツ社^[10]のディジタイザー PXIe-5162 のデモ機を用いて行った。AVF サイクロトロン RF キャビティを励振している RF シグナルをトリガーとして、静電型ピックアップ PP C01 と PP C02 のビームシグナルの立下りエッジをそれぞれ検出し、その差分から TOF を得るプログラムを、同社の LabVIEW を用いて作成した。約 10 分間の測定結果を Fig. 6 に示す。この測定に於いても、ケーブルの電気長の差は補正されている。この TOF の平均値は、オシロスコープを使用した上述の測定結果と良く一致しており、32.320 ns という結果が得られた。また、このデータの標準偏差は、0.062 ns で、

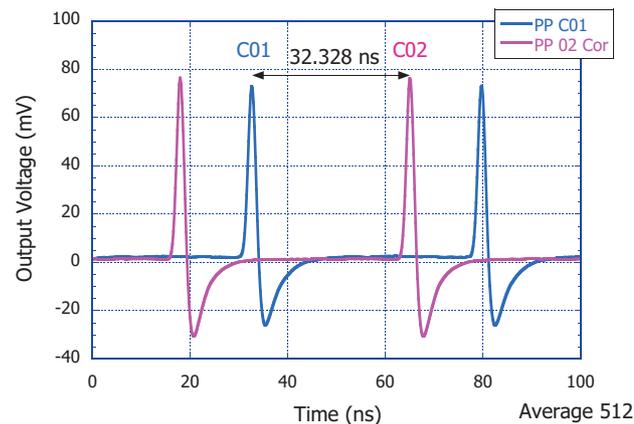


Figure 5: Beam signals measured with the electrostatic pickups of PP C01 and PP C02.

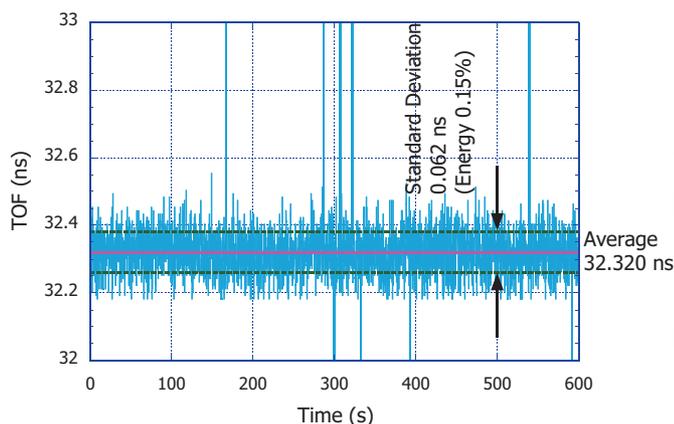


Figure 6: Analyzed TOF measurement for 10 minute using by a digitizer NI PXIe-5162 [10].

ビームエネルギーに換算すると、0.15%の広がり相当する。Fig. 6に於いて、所々ノイズのようにTOFが大きく外れている個所では、イオン源の放電等でビームが無くなり、演算が正常に行われていない、と推測される。シンチレーションモニターでは、この様なビームエネルギーの早い変化を測定する事が出来なかったが、静電型ピックアップではその変化を捉えることに成功している。静電型ピックアップの測定では、ビームアッティネーターを全て抜いたフルビームを用いているので、実験ユーザーにビームを供給している状況と同じと言える。

2.4 シンチレーションモニターシステムと静電型ピックアップモニターシステムに於ける測定結果の比較

重陽子ビームのビームエネルギー測定に於いて、5000カウント以上のデータを2成分のガウス分布でフィットした、シンチレーションモニターシステムによる測定結果は、12.14 MeV/uである。静電型ピックアップシステムで測定したビームエネルギーは、12.34 MeV/uであり、両者には約1.5%の開きがあった。シンチレーションモニターシステムでは、AVFサイクロトロンで加速する前段で、アッティネーターを用いてビーム強度を60万分の1に減弱し、更にビームスリットを上下左右0.6 mmまで絞ってビームの強度を減らしているため、アッティネーターを通過したごく一部分のビームの平均エネルギーが、全ビームの平均エネルギーと異なっている可能性がある。7月末に行われた、AVFサイクロトロンで加速された7 MeV/uの $^{12}\text{C}^{4+}$ ビームでは、両システムの測定結果の違いは0.6%であった。今後、両システムを使用したビームエネルギーの測定を増やし、測定毎にサイクロトロンの設定パラメータをデータベース化し、両者の相関を調査する予定である。

3. 謝辞

シンチレーションモニターや静電型ピックアップのビームラインへのインストール作業、距離やケーブルの電気長差の測定作業に於いて、住重加速器サービス(株)のオペレーターの方々からご協力を頂き感謝致します。また、有用RI製造に関して理研の羽場宏光氏よ

り、測定システムの構築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致します。

参考文献

- [1] T. Watanabe, et al., "BEAM ENERGY AND LONGITUDINAL BEAM PROFILE MEASUREMENT SYSTEM AT THE RIBF", Proc. of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'14, Dresden, Germany, 3566-3568, (2014).
- [2] T. Watanabe, et al., "BEAM ENERGY AND LONGITUDINAL BEAM PROFILE MEASUREMENT SYSTEM AT THE RIBF", Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 421-423, (2011).
- [3] Hermanne et al., "Experimental study of the cross-sections of α -particle induced reactions on ^{209}Bi ", Appl. Radiat. Isot. **63**, 1-9 (2005).
- [4] M. Murakami, et al., "Cross-section measurement of the $^{248}\text{Cm}(^{19}\text{F},5n)^{262}\text{Db}$ reaction", RIKEN Accel. Rep. 47, 265 (2014).
- [5] <http://www.hubersuhner.com/en/>
- [6] M. Fujimaki private communication (2015).
- [7] <http://www.wenteq.com/index.html>
- [8] <http://www.nfcorp.co.jp/>
- [9] <http://jp.tek.com/>
- [10] <http://japan.ni.com/>