

## Measurements of Beam Energy and Longitudinal Beam Profile using Plastic Scintillation Monitors for RIBF

Tamaki Watanabe<sup>1,A)</sup>, Masanori Wakasugi<sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Yasuteru Kotaka<sup>A)B)</sup>, Ryo Koyama<sup>A)B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Akira Goto<sup>A)</sup> and Yasushige Yano<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>B)</sup> Sumitomo Heavy Industries Accelerator Service Ltd., 1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

### Abstract

New plastic scintillation profile monitors (scintillation monitors) have been fabricated to evaluate the energy and longitudinal profiles of heavy-ion beams for the RIKEN RI beam factory (RIBF). Four sets of scintillation monitors (8 monitors) were installed into the transport lines of the RIKEN heavy-ion linac (RILAC), the RIKEN ring cyclotron (RRC), the fixed-frequency ring cyclotron (fRC) and the intermediate-stage ring cyclotron (IRC) to measure the accelerated energy of heavy-ion beams. Furthermore, two scintillation monitors were also installed into the transport line upstream of the injection point of the RRC and the fRC to optimize the phases of the rebunchers. Preliminary experimental results obtained during the commissioning of the RIBF using the heavy-ion beams are described in this article.

## RIBFにおけるプラスチックシンチレーションモニターを用いた ビームエネルギーと縦方向のビームプロファイルの測定

### 1. はじめに

理研のRIビームファクトリー(RIBF)では、1台の線形加速器と4台のサイクロトロンでカスケード加速を行っている。それぞれの加速器で加速・取り出された重イオンビームのエネルギー、位相、及び、縦方向のプロファイルを診断することは、次の加速器での入射マッチングにおいて非常に重要である。今回新しく、プラスチックシンチレーターを用いたモニターを開発し、その測定システムを構築した。モニター間距離が正確に測定されている2台のモニター・1セット使用すれば、ビームの飛行時間(TOF)を測定することにより、エネルギー値が得られる。また、サイクロトロンの入射効率を上げるために、ビームの位相を診断しながらリバンチャーの位相調節を行っている。

### 2. プラスチックシンチレーションモニター

#### 2.1 ハードウェア

RIBFのビーム輸送系にインストールされたプラスチックシンチレーションモニターの写真を図1(a)、装置の詳細図を図1(b)にそれぞれ示す。真空チャンバー内のフォルダーに固定されたプラスチックシンチレーターは、圧空式回転導入端子を90°回転駆動させることにより、ビームに照射される。ビームの照射によって発生した光は、ビューポートを通り、

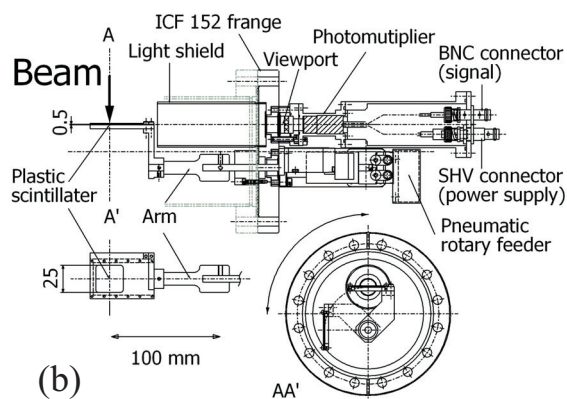
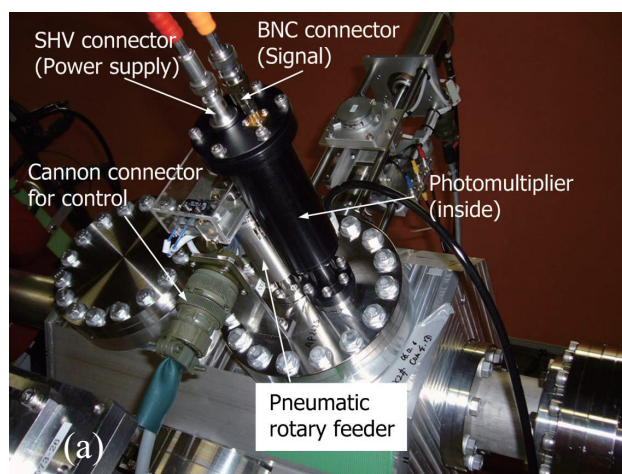


図1 : (a) ビーム輸送系にインストールされたプラスチックシンチレーションモニターの写真  
(b)モニターの詳細図

<sup>1</sup> E-mail: wtamaki@riken.jp

表 1 : プラスチックシンチレーターの概要

型式	NE-102
サイズ	30 x 30 mm
厚さ	0.5 mm
減衰時間	2.4 ns

表 2 : ホトマル (光電子増倍管) の概要

増倍管	Hamamatsu R7400U
タイプ	メタルパッケージ
チューブサイズ	16 mm Dia.
カソードサイズ	8 mm Dia.
波長	420 nm (peak)
ゲイン	$7.0 \times 10^5$ (Typ.)
アノード立ち上がり時間	0.78 ns (Typ.)

ホトマルに導かれ光電子が増倍される。プラスチックシンチレーターとホトマルの概要を表 1、表 2 にそれぞれ示す。ホトマルには 1 kV の電圧を供給している。モニターの駆動、ステータスの監視等の計算機制御は、EPICS システムにより行われている<sup>[1]</sup>。

## 2.2 信号処理系

信号処理系のブロックダイアグラムを図 2 に示す。ホトマルによって増幅された信号を、さらにプリアンプで増幅し、コンスタント・フラクシオン・ディスクリミネータによって、設置したしきい値以上の信号のみ選別する。そのシグナルをスタートパルスとし、RF のクロック (ストップパルス) とのタイムラグを Time-to-digital converter (TDC) を用いることによってデジタル化し、ビームの縦方向のプロファイルが得られる。TDC の仕様を表 3 に示す。さらに、モニター間距離が正確に測定されている 1 セット・2 台のモニターを使用し、ビームの飛行時間 (TOF) を測定することにより、エネルギー値が得られる。これら、TDC 等のデータ収集は CAMAC を介して PC Linux (Vine 4.0) が行い、測定結果を PAW++ を使って表示している。なお、運転時は、コントロールルーム内の PC Windows (XP) から、Ethernet を介してリモートコントロールを行っている。

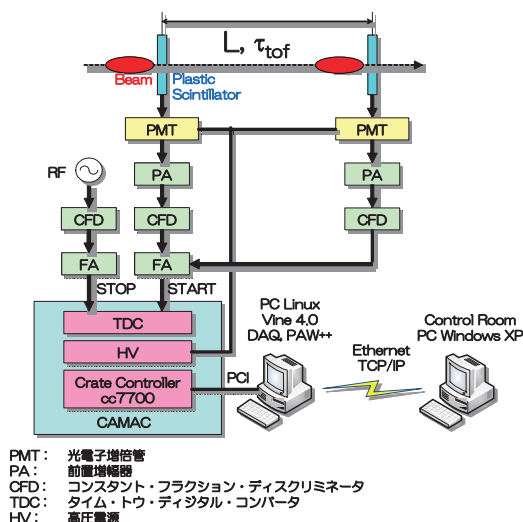


図 2 : 信号処理系のブロックダイアグラム

表 3 : TDC の仕様

型式	C-TS 102 (テクノランド)
入力	8 ch (NIM 信号)
フルスケール	150 nsec
分解能	12 ビット
交換時間	24 $\mu$ sec
筐体	標準 CAMAC 規格

## 2.3 システムの時間分解能の評価

このモニターシステムの時間分解能について、評価を行った。一番ビーム速度が遅いリニアック直後のビームを想定し、時間分解能を決める要因として、以下の項目に分け、考察を行った。

1. 正確なクロックジェネレーターを用いた実測では、TDC の時間分解能 ( $\Delta T_j$ ) は 100 ps 以内
2. ホトマルのジッター ( $\Delta T_i$ ) は 50 ps
3. シンチレーターの厚さ 0.5 mm を U ビームが通過する時間 ( $T_p$ ) は、リニアック出口では 19 ps ( $\beta = 0.0379$ )
4. ビームサイズ ( $R_b$ ) を 30 mm とすると、光がホトマルに到達する時間差 ( $\Delta T_b = R_b / c$ ) は 100 ps
5. ガウス関数によるフィッティングエラー ( $\Delta T_f$ ) は 40 ps

トータルの時間分解能 ( $\Delta T_{total}$ ) は以下の式 (1) で表わされ、上記の値を代入すると、 $\Delta T_{total}$  は 161 ps という結果が得られた。

$$\Delta T_{total} = \sqrt{\Delta T_i^2 + \Delta T_j^2 + T_p^2 + \Delta T_b^2 + \Delta T_f^2} \quad \text{----- (1)}$$

## 3. 縦方向のビームプロファイルとエネルギーの測定結果

プラスチックシンチレーションモニターの設置位置を図 3 に示す。ビームエネルギー測定のために、1 台の線形加速器と 3 台のサイクロトロン (超伝導リングサイクロトロン) のビーム取り出し後にそれぞれ、4 セット 8 台のモニターが設置されている。モニター間の距離は、測定精度が  $\pm 1.5$  mm であるレーザー距離計 (Leica DISTO A6) を用いて測定を行った。さらに、入射バンチャーの調節のために、ビームの縦方向プロファイルと位相を測定すべく 2 台のモニターが、それぞれ単独に RRC と fRC の上流に設置されており、現状では合計 10 台のモニ

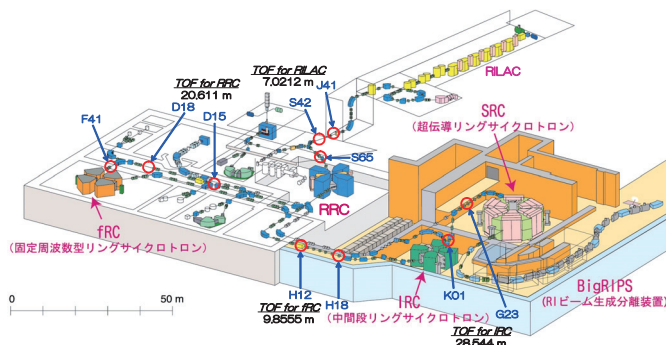


図 3 : プラスチックシンチレーションモニターの設置位置

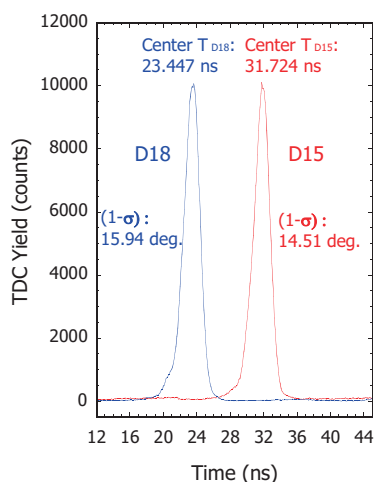


図 4 : RRCで加速された $^{84}\text{Kr}^{26+}$ の縦方向のビームプロファイル

ターが使用されている。

ビームエネルギー測定結果の一例として、RRCで加速され、D15とD18(図 3 参照)で測定された、 $^{84}\text{Kr}^{26+}$ の、縦方向のビームプロファイルを図 4 に示す。測定時には、Krビームは $200\text{ s}^{-1}$ から $300\text{ s}^{-1}$ のカウントレートになるように、ビーム強度を減らす。RF周波数は、 $36.5\text{ MHz}$ (周期 $\tau_{rf} = 27.3973\text{ ns}$ )であるが、ストップパルスはその半分の周波数のクロックを用いた。この時間スペクトルをガウス関数でフィットし、D15、D18の中心時間と縦方向の位相広がり(1- $\sigma$ )を表 4 に示す。

表 4 : D15、D18の中心時間と縦方向の位相広がり

測定箇所	中心値 (ns)	1- $\sigma$ (ns)	1- $\sigma$ (deg.)
D15	31.724	1.104	14.51
D18	23.447	1.213	15.94

ここで、D15とD18のTOF( $\tau_{tof}$ )は、以下の式(2)で表わされる。

$$\tau_{tof} = k \times \tau_{rf} + (T_{D15} - T_{D18}) \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 $k$ は波数である。D15、D18の距離 $L$ は実測で $20.611\text{ m}$ なので、ビームのエネルギー $T$ は、 $E_0$ を静止質量とすると、以下の式(3)で得られる。

$$\beta = L / (\tau_{tof} \times c), \quad \text{----- (3)}$$

$$T = E_0 (1 / \sqrt{1 - \beta^2} - 1)$$

TOF ( $\tau_{tof}$ )、 $\beta$ 、エネルギーの、設計値と実測値の比較を表に示す。これより、測定されたビームのエネルギーは、設計値より+0.48 %高めという結果が得られた。

表 5 : 設計値と実測値の比較

	TOF (ns)	$\beta$	エネルギー (MeV/u)
設計値	228.08	0.301462	45.4
測定値	227.56	0.302153	45.62
			$\Delta E/E = +0.48\%$

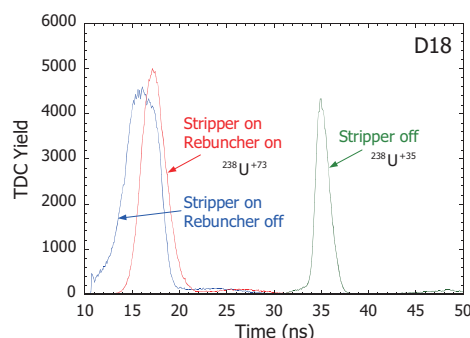


図 5 : RRCで加速された $^{238}\text{U}^{73+}$ のビームをfRCへ入射する際に測定した結果

RRCからfRCへの入射では、ビーム輸送系上流にリバンチャー(共振周波数:  $109.5\text{ MHz}$ )を用い、縦方向のビーム広がりを極力小さくして、入射効率を上げている。今回、プラスチックシンチレーションモニターを用いて、リバンチャーの位相調節を行った。チャージストリッパーがない状態の $^{238}\text{U}^{35+}$ ビーム、チャージストリッパー通過後の $^{238}\text{U}^{73+}$ ビームのリバンチャーの有無による違いを図 5 に示す<sup>[2]</sup>。この時間スペクトルをガウス関数でフィットし、その中心時間と縦方向の位相広がり(1- $\sigma$ )を表 6 に示す。リバンチャーとモニターとの距離は約 $11.096\text{ m}$ である。この結果から、チャージストリッパーを入れることによって、ビームの縦方向の広がりは $7.7$ 度から $26.4$ 度まで広がったが、リバンチャーによって、 $15.1$ 度まで改善されていることが解った。

表 6 : 各条件における位相広がり測定結果

条件	中心値(ns)	1- $\sigma$ (ns)	1- $\sigma$ (deg.)
リバンチャー-off	16.10	3.01	26.37
ストリッパー-off	53.10	0.88	7.71
ストリッパー-on	17.25	1.72	15.07

#### 4. まとめと今後の課題

RIBFにおいて、プラスチックシンチレーターを用いたモニターを開発し、その測定システムを構築した。コミッショニングにおいて、ビームの加速エネルギーの実測値は、ほぼ設計値に近い値であることが確認された。今年6月のコミッショニングでは、各加速器RILAC、RRC、fRC、IRCから取り出されたビームの速度の実測値と設計値の違いは、それぞれ、 $0.08\%$ 、 $0.69\%$ 、 $0.28\%$ 、 $-0.07\%$ であった。今後、fRCの下流に、チャージストリッパーで荷電変換する前にエネルギーを測定するべく、モニターの増設を行う。また、新しいシステムへの移行も検討を行う。

#### 参考文献

- [1] 込山 美咲他, “理研RIビームファクトリー制御系の現状”, in *this proceedings*.
- [2] 龍頭 啓充他, “ウラン加速のためのチャージストリッパーの選択”, in *this proceedings*.