

# JAEA AVF サイクロトロン の ビーム 位相 分布 測定 システム の 時間 分解 能

## TIME RESOLUTION OF BEAM PHASE DISTRIBUTION MEASUREMENT SYSTEM FOR THE JAEA AVF CYCLOTRON

宮脇信正<sup>#, A)</sup>, 福田光宏<sup>B)</sup>, 倉島俊<sup>A)</sup>, 柏木啓次<sup>A)</sup>, 奥村進<sup>A)</sup>, 荒川和夫<sup>C)</sup>, 神谷富裕<sup>A)</sup>  
Nobumasa Miyawaki<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>B)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>A)</sup>, Hirotsugu Kashiwagi<sup>A)</sup>, Susumu Okumura<sup>A)</sup>,  
Kazuo Arakawa<sup>C)</sup>, Tomihiro Kamiya<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

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

<sup>C)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center, Gunma University

### Abstract

The time resolution of the internal beam phase distribution measurement system for the JAEA AVF cyclotron was evaluated by measurement using a standard light pulser and the flight-time difference in a plastic scintillator. The flight-time difference of photons caused by fluctuation of a beam location in a 6-mm-long plastic scintillator mounted on the main probe was estimated to be 31.6 ps. The time jitter of a photomultiplier and the signal processing modules was measured by the light pulser, which generates the pulsed laser as scintillation light and the trigger signal as the RF signal. The time jitter of the measured time difference between the trigger signal and laser output was 31.1 ps full-width at half-maximum (FWHM), which included less than  $\pm 10$  ps of a nominal intrinsic time jitter in the light pulser. The time resolution based on these results was estimated to be 44.3 ps FWHM for the worst case. This time resolution, corresponding to 0.35 RF degrees FWHM at the maximum acceleration frequency of 22 MHz, satisfied the requirement of less than 1 RF degree for the measurement of the internal beam phase distribution.

### 1. はじめに

JAEA AVF サイクロトロンでは、最初の加速ギャップでの加速電圧の時間勾配によって次の加速ギャップに到達するビームの位相差を縮小する「位相バンチング」を実現し、マイクロビーム形成等のビーム応用の一助となっている<sup>[1]</sup>。位相バンチングは、第1から第2加速ギャップ間の開き角とディー電極の開き角とイオン源引出し電圧とディー電圧の比と加速ハーモニクス数( $h$ )の4つのパラメーターで決まること、また、第1と第2加速ギャップのそれぞれのビームの位相差の相関関係からその効果を評価できることを幾何軌道解析によって示した<sup>[2]</sup>。しかしながら、この解析によって示された位相バンチング効果を直接示すビームの位相差の相関関係は、これまでのビーム測定では得られておらず、位相バンチングの効果を評価するために必要である。

ビーム位相に対する強度分布(ビーム位相分布)の測定は、サイクロトロンから取出し後のビームによって行われてきたが、デフレクター電極等の狭い間隙によってビームが損失するため、位相バンチング効果の評価に適さない。そこで、サイクロトロン内部でのビーム位相分布を測定するために、空間的な制限や真空、高周波、高磁場中という測定環境に配慮し、プラスチックシンチレーターを付加したメインプローブを用いたビーム位相分布測定システムを開発した<sup>[3][4]</sup>。

位相バンチング効果を評価するには、数 RF 度以

下のビーム位相幅の変化を確認することが必要であることから、ビーム位相分布の測定では 1RF 度以下の時間分解能が必要となる。JAEA AVF サイクロトロンでは、最高加速周波数 22MHz の運転で 1RF 度当たりの時間が最も短く、126ps となる。従って、ビーム位相分布の測定は、システム全体の時間分解能をこの値より十分小さくする必要がある。そこで、システムの時間分解能について、シンチレーション光を模擬したパルスレーザーによる時間ジッターの測定とシンチレーターの形状によって生じる時間差の見積りによって評価し、サイクロトロン内部でシンチレーターを用いた測定における時間分解能の向上について検証した。

### 2. シンチレーションヘッド

JAEA AVF サイクロトロンのメインプローブは、半径 41.5mm から引き出し半径の 923mm の範囲を走査でき、サイクロトロン内部のビーム電流測定用のカーボンブロックを取り付けたインテグラルヘッドとビーム位相分布測定用のプラスチックシンチレーターを取り付けたディファレンシャルヘッドで構成される。メインプローブの先端部を Figure 1 に示す。ビーム位相分布測定は、ディファレンシャルヘッドをサイクロトロン中心方向に移動させ、プラスチックシンチレーターがカーボンヘッドから突出した状態で測定を行う。この時、ビーム強度は、入射ビームラインに設置された金属メッシュのビームアッチネーターによって、プラスチックシンチレーターに対して適切な計数率に調整される。一方、ビーム電流測定時は、カーボンブロックの後ろにプラスチッ

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

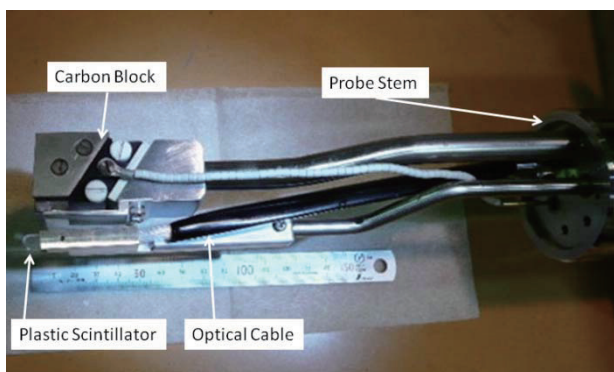


Figure 1: Photo of the main probe head with a plastic scintillator.

クシンチレーターを退避し、損傷を防ぐ。

ディファレンシャルヘッドに取り付けられたプラスチックシンチレーター (BC-400、サンゴバン) は、0.9ns の早い立ち上がり時間と 2.4ns の減衰時間を有する。シンチレーターの形状は、サイクロトロン中心側に直径 5mm の曲面を有する半円筒形状で、光ケーブル軸方向に長さ 6mm、幅と高さが 5mm である。先端部を曲面にすることで、短い飛程の低エネルギーイオンビームによる発光を光ケーブルの中心軸付近で受光でき、検出効率を高めた。シンチレーターの幅と高さは、光ケーブルに入る光の角度を抑えてケーブル内での光の時間広がり小さくするため、光ケーブルの直径とほぼ等しくした。一方で、鉛直方向にシンチレーターを移動できないため、加速ビームの全てを検出できない可能性がある。そこで、鉛直方向のビームの拡がり調べるため、カーボンブロックの後ろに高さ 8mm のタンタル板 3 枚を鉛直方向に並べた従来型のメインプローブによって、半径方向のビーム電流分布を測定した。Figure 2 に示す通り、プローブ中心の Middle タンタル板に当るビーム電流が大部分を占めており、特に、高半径ほど、AVF によるビーム集束の効果によってその傾向は強くなる。シンチレーターの高さはタンタル

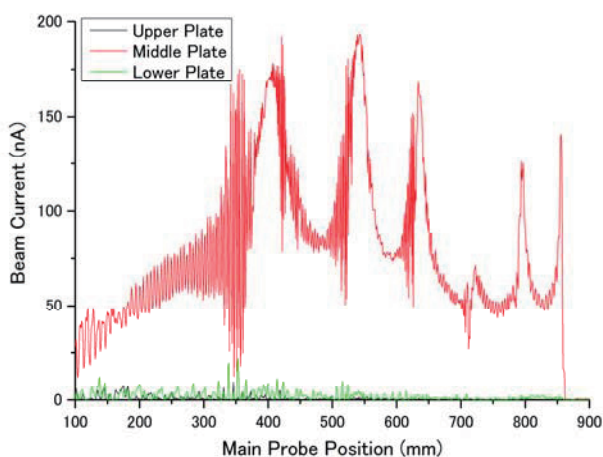


Figure 2: Measured differential beam current distribution with the three-finger tantalum plate of the original main probe.

板に比べて小さいが、引出し近くの高半径では、大部分のビームが検出できると考えられる。また、位相バンチング後のビームの位相差は空間電荷効果や半径方向の加速電圧勾配で生じる位相圧縮<sup>[3]</sup>等の効果が無ければ変化しないため、今回の高半径でのビーム位相分布の測定は位相バンチング後のビームの位相差を反映していると考えられる。

光の輸送は、シンチレーターに接着された光ファイバー (CK-20、三菱レーヨン) を約 70 本束ねて作られた光ケーブルを用いた。シンチレーターからプローブシステムまでの間で光ファイバーが曲がることによって、ディファレンシャルヘッドの駆動ストローク 25mm を可能にした。プローブシステム中のライトガイドと光ケーブルによって、プローブの他端にある光電子増倍管 (H6533、浜松ホトニクス) に接続した。

### 3. 測定システムの時間分解能の評価

#### 3.1 パルスレーザーを用いた時間ジッターの測定

ビーム位相分布の測定では、イオンビームとプラスチックシンチレーター間の相互作用により生じた光を光電子増倍管によって電気信号に変換し、信号処理モジュールを通して、RF 信号との時間差を得る。この時間差は、発光位置やプローブの光の輸送、信号処理によって広がる。そこで、プローブの光の輸送による時間差や信号処理の時間ジッターをオフラインで調べるため、ライトパルサー (PLP-04、浜松ホトニクス) を用いた。ライトパルサーは、波長 653nm のレーザーを最大 100kHz で出力し、±10ps 以下の時間ジッターでレーザーのトリガー信号も出力する。レーザーはシンチレーション光を、トリガー信号は RF 信号を模擬し、その他の測定機器はビーム位相分布の測定時と同じである。一方、シンチレーション光は波長 420nm 付近にピークがあり、光電子増倍管の感度波長のピークも 420nm であるため、実際の測定の方が条件は良い。

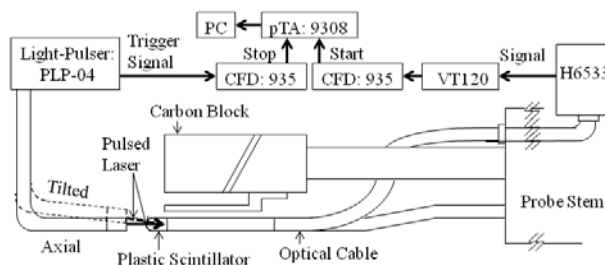


Figure 3: Block diagram for measurement of a time jitter using the light-pulsar.

パルスレーザーを用いた時間ジッターの測定ブロック図を Figure 3 に示す。レーザーをシンチレーター先端から光ケーブルに入射し、光電子増倍管で変換された信号を高速プリアンプ (VT120、ORTEC) で増幅した。その後、200MHz コンスタント・フラクション・ディスクリミネータ (CFD: 935、ORTEC) に入力し、得られた出力をピコ秒タイムアナ

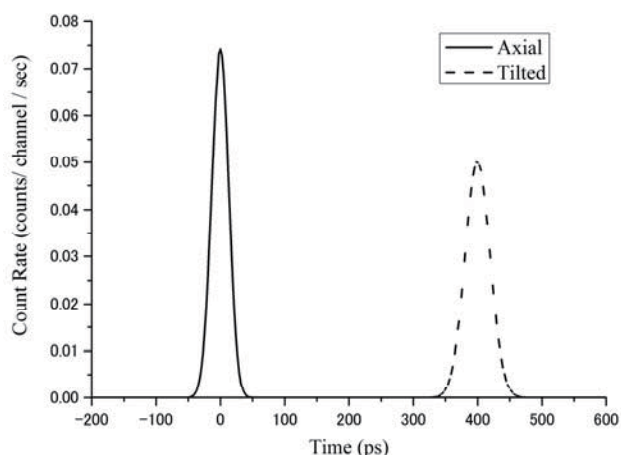


Figure 4: Measured time spectrum of the axial and tilted laser injection.

レーザー (pTA: 9308, ORTEC) にスタート信号として入力した。一方、ライトパルサーのトリガー信号も CFD に入力し、その出力を pTA にストップ信号として入力した。pTA に接続された PC で、この時間差を集計し、時間スペクトラムを得た。

光ケーブルへのレーザーの入射は、光ケーブルの断面に垂直な場合と傾けた場合の 2 つの条件で行った。使用したシンチレーターは光ケーブルと軸方向に断面の大きさが同じであるため、シンチレーター光は光ケーブルの軸上に入射する。これは、レーザーを垂直に入射した条件に等しい。一方、ディファレンシャルヘッドには鉛直方向にさらに大きなビームサイズに対応できる、光ケーブル断面よりも大きなシンチレーターを取付けることができる<sup>[3]</sup>。この場合、光ケーブル軸から外れて発生した光が角度を持って光ケーブルへ入射する割合が多くなる。この影響を調べるため、レーザーを傾けて入射した。両者の光ケーブル断面への光の入射角度が異なる時間スペクトラムを比較し、シンチレーターとビームのサイズによる時間分解能への影響を検討した。

### 3.2 測定結果

光ケーブルの断面へレーザーを垂直に入射した場合 (Axial) とカウントレートが変化しない範囲でレーザーを傾けて入射した場合 (Tilted) の時間スペクトラムを Figure 4 に示す。垂直に入射した場合のピークの幅は 31.1ps FWHM、ピークの最大カウントレートは 0.074 となった。一方、傾けて入射した場合のピークの幅は前者に比べて 1.5 倍の 45.8ps FWHM に広がり、ピークの最大カウントレートは 2/3 の 0.05 に減り、ピークの中心は 400ps 遅れた。これは、角度を持って入射された光は光ケーブル内での反射が多くなり、光電子増倍管まで到達する時間を要するとともに、ピーク内の時間差も広がったためと考えられる。これは、光ケーブル断面よりも大きなシンチレーターで、光ケーブルに入射可能な広がりを持つビームを測定した場合、時間スペクトラムのピークの幅も広がることを示す。従って、シンチレーターと光ケーブルの断面の大きさを等しく

することによって、ビーム位相分布測定的时间分解能が向上し、さらに、ビームサイズが小さくなる高半径の測定は時間分解能の向上に優位であることが確認できた。

### 3.3 時間分解能の評価

パルスレーザーを用いた測定で得られた時間ジッターは、±10ps 以下のライトパルサー固有の時間ジッターも含まれるが、測定結果が全てプローブの光の輸送と信号処理によって生じる最も悪い場合を想定すると、31.1ps FWHM と評価できる。また、測定システム的时间分解能を決める要因の一つとして、ビームの検出位置によって生じる時間差がある。これは、ビームが当たるシンチレーターの位置とシンチレーター内の光の速度に依存する。長さ 6mm、屈折率 1.58 のシンチレーターでは、最大 31.6ps の時間差が生じる。さらに、シンチレーターへのビームの入射角度やエネルギーで深さ方向に差が生じること等を考慮して、31.6ps FWHM に広がると仮定した。以上より、シンチレーターの大きさによって決まるビーム検出の時間差と測定した光電子増倍管及び電子回路系による信号処理において生じる時間ジッターから、測定システム的时间分解能を 44.3ps FWHM と評価した。

## 4. まとめ

JAEA AVF サイクロトロン内のビーム位相分布測定システム的时间分解能は、44.3ps FWHM と評価され、ビーム位相分布測定に必要な時間分解能 126ps より十分小さいことが確認できた。サイクロトロン内部でのプラスチックシンチレーターを用いたビーム位相分布の測定では、シンチレーターの形状と大きさ、ビームサイズ、さらに光電子増倍管までの輸送に用いる光ケーブルの断面の大きさが時間分解能に影響することを明らかにした。サイクロトロンの特徴として、高半径ほどビームエネルギーが高くなり、さらにビームサイズが相対的に小さくなることから、プラスチックシンチレーターの発光効率が高く、かつ時間分解能に有利な小さなサイズで測定できる高半径位置でのビーム位相分布の測定が有利である。

## 参考文献

- [1] N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, H. Kashiwagi, T. Nara, I. Ishibori, K. Yoshida, W. Yokota, Y. Nakamura, K. Arakawa and T. Kamiya, Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) 341.
- [2] N. Miyawaki, M. Fukuda, S. Kurashima, H. Kashiwagi, S. Okumura, K. Arakawa and T. Kamiya, Nucl. Instr. and Meth. A715 (2013) 126.
- [3] N. Miyawaki, et al., Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 604 (2007).
- [4] N. Miyawaki, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 400 (2008).
- [5] R. W. Müller and R. Mahrt, Nucl. Instr. and Meth. 86 (1970) 241.