

# サイクロトロン有位相プローブを用いたビーム強度測定

## MEASUREMENT OF BEAM INTENSITY USING A PHASE PROBE IN A CYCLOTRON

柏木啓次<sup>#</sup>, 宮脇信正, 倉島俊

Hirotsugu Kashiwagi<sup>#</sup>, Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

### Abstract

We investigated whether the relative intensity of the beam with a current below the nanoampere range can be measured with the phase probe, which has been used for the beam phase measurement in the TIARA AVF cyclotron. A frequency component with a high S/N ratio was determined from the frequency spectrum of the signal of the phase probe. By changing the beam current at the phase probe, the above determined frequency component of the output signal of the phase probe was measured with a lock-in amplifier. The beam current was changed by controlling the time width of the beam with the beam chopper in the injection line. As a result, output signals proportional to the beam current were obtained from 4.8  $\mu\text{A}$  to 70 pA. It was confirmed that the relative intensity of the beam with a current less than one nanoampere can be measured by using the phase probe.

### 1. はじめに

量研高崎 TIARA AVF サイクロトロン[1]では、材料・バイオ研究等のために様々な軽・重イオンビームを頻りに切り替えて提供している。このビーム切り替えに伴うビーム入射調整を効率的に行うため、入射ビームのエミッタンスとサイクロトロンのアクセプタンスの計測に基づいた入射調整方法を開発している[2]。

アクセプタンスの測定は、入射ビームの位相空間領域から微小領域をスリットで切り出し、その領域のビームが加速されるか否かをサイクロトロン内部で加速ビームの強度を測定することによって行われる (Fig. 1)。この加速ビームは数十ピコアンペアから数ナノアンペア程度であるが、現在測定に使用している電流測定プローブ (マグネティックチャンネルプローブ) は水冷等に起因するノイズにより低電流レンジでの S/N 比が低く、ナノアンペア以下の測定が困難である。そのため、これまではスリットを広げて、この電流プローブで測定可能な強度までサイクロトロンに入射する微小領域を大きくした低精度の測定のみが可能であった。

そこで、これまでサイクロトロン内部のビーム位相測定に用いていた非破壊型の測定装置である位相プローブ

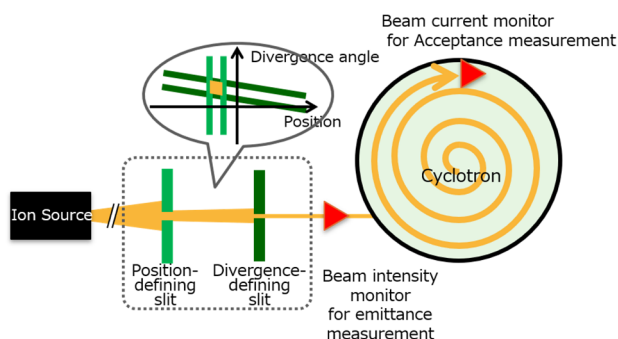


Figure 1: Transverse emittance and acceptance measurement system.

<sup>#</sup> kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp

で高感度なビーム強度測定が可能であるかを検証した。位相プローブでのビーム強度測定にはロックインアンプの振幅出力を用いる。本稿では、位相プローブ電極に誘起される電圧信号の周波数スペクトル測定に基づいた高 S/N 比でビーム強度検出が可能なロックイン周波数の決定、そして、位相プローブによるビームの相対強度の測定結果を報告する。

### 2. 位相プローブ

サイクロトロン内部に設置されている位相プローブを Fig. 2(a)に示す。位相プローブは、サイクロトロンの中心

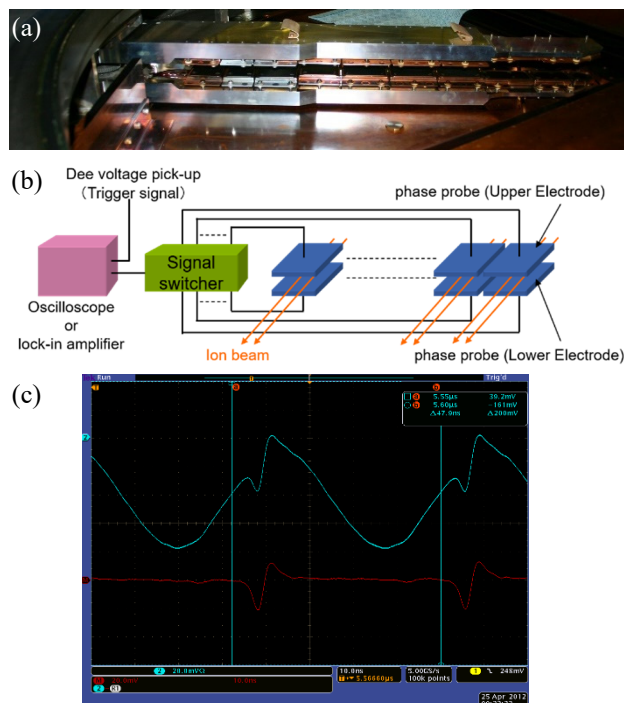


Figure 2: (a) Phase probe in the TIARA AVF cyclotron, (b) measurement system of phase probe signals, and (c) output signal of the phase probe (Blue) and beam signal obtained by subtracting the RF signal from the output signal (Red).

部から半径方向に並んで設置された上下 9 対の平行平板電極である。これらの電極の間隙を通ったビームが誘起した電圧信号と加速 RF 信号との位相差を測定し、その位相差が一定となるようにトリムコイル磁場を調整することで等時性磁場を形成する。位相プローブに誘起される電圧波形はビーム由来成分に加速 RF 由来成分が重畳されているため (Fig. 2 (b) 青線)、ビーム由来成分の測定にはオシロスコープでの RF 成分の減算機能 (Fig. 2 (b) 赤線) や、ロックインアンプを用いる [3]。

ロックインアンプは、参照信号と等しい周波数の信号成分のみを増幅し、その振幅と参照信号との位相差を出力する。これまでは、TIARA サイクロトロンでは等時性磁場形成に必要な位相差信号のみを用いていたが、振幅信号を用いることにより、位相プローブの電極間を通過するビーム電流に応じた出力信号が得られる。そこで、この振幅出力信号を用いた微小電流の相対強度測定を行った。

### 3. 位相プローブ出力電圧信号の周波数スペクトル測定

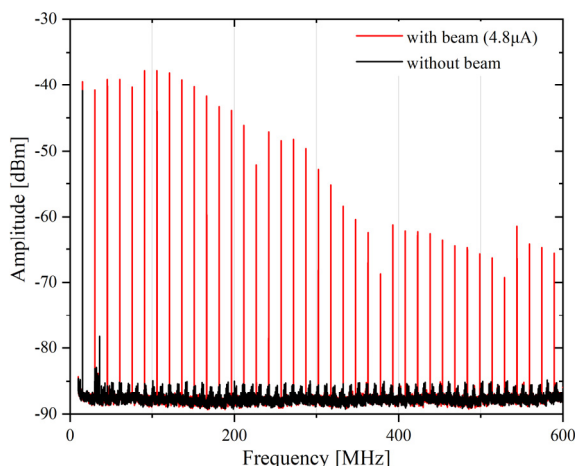


Figure 3: Frequency spectrum of the phase probe output signal with and without beam.

位相プローブでナノアンペア以下の微小信号の測定を行うためには、加速 RF 由来の信号を除去してビーム由来信号のみを高 S/N 比で抽出する必要がある。そこで、ロックインアンプで抽出する周波数成分を決定するため、加速 RF の条件を変えずに、ビームを ON、OFF した場合の位相プローブ出力信号をスペクトルアナライザ (Tektronix 製 RSA230) でその周波数スペクトル測定を行った。ビームは 4.8  $\mu\text{A}$  の 160 MeV  $^{16}\text{O}^{6+}$  を用いた。また、サイクロトロンで加速されたビームを測定に用いるため、最も外側の位相プローブ (No. 9) を用いた。その結果を Fig. 3 に示す。

ビーム無しの場合の出力波形は加速 RF 周波数の 15.11 MHz に大きなピークがあり、それより上の周波数では急激に減少する。ビーム有の場合は、6、7 倍波の 90.11 MHz、105.77 MHz 付近が最も振幅が大きく、900 MHz 程度まで広く分布していた (Fig. 3 は 600 MHz までの結果を表示)。ビーム有りのスペクトルからビーム無しのスペクトルを減算して S/N 比を求めると、100 MHz 付近の

6 倍波、7 倍波が高 S/N 比であることが明らかになった。

### 4. 位相プローブによるビーム相対強度測定

位相プローブによってナノアンペア以下のビームの相対強度が測定できることを確かめるため、加速ビーム電流を変えて位相プローブの出力電圧信号をロックインアンプ (Stanford Research Systems 製 SR844) で検出した。

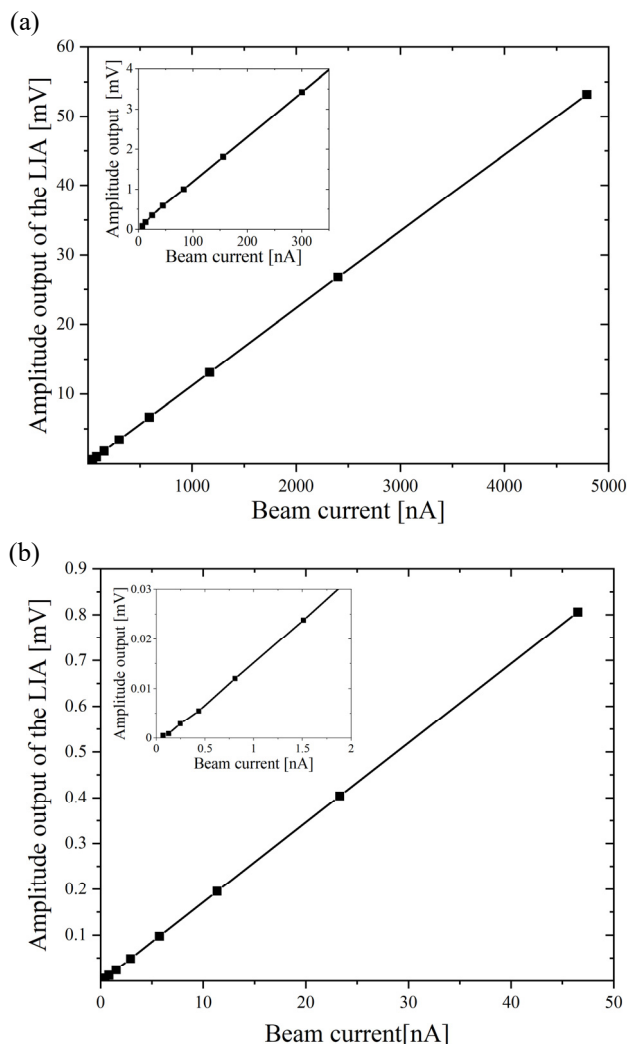


Figure 4: Result of relative beam intensity measurement by lock-in amplifier (LIA) at beam currents from 4.8  $\mu\text{A}$  to 7.2 nA (a) and from 47 nA to 70 pA (b).

ビームは 160 MeV  $^{16}\text{O}^{6+}$  を用いた。ビーム電流の制御はサイクロトロンの入射ビームラインに設置されたビームチョッパーにより行った。このビームチョッパーは、平行平板電極に与える矩形波のパルス幅を変えることによりサイクロトロンへの入射平均電流を無段階で変更することが可能である。チョッパーパルス幅とビーム電流値との相関は、サイクロトロン内部のビーム電流測定プローブにより測定し、電流測定プローブで測定不能なナノアンペア以下のビーム電流はチョッパーのパルス幅により算出した。4.8  $\mu\text{A}$  から 7.2 nA までのビーム電流における測定結果を Fig. 4 (a) に、47 nA から 70 pA までの測定結果

を Fig. 4 (b)に示す。どちらのグラフにおいてもビーム電流にほぼ比例したロックインアンプ出力が得られていることが分かる。これにより、従来の電流プローブで測定可能なナノアンペアからマイクロアンペアオーダーのビーム電流に加え、ナノアンペア未満のビームに関して 70 pA 程度まで相対強度が測定できることがわかった。

## 5. 今後の予定

今回の実験ではビーム電流の下限値は 70 pA であったが、これはチョッパーの最小時間幅で制限されていた。今後はピコアンペアオーダーの電流まで測定範囲を広げ、本方法による微小電流ビームの相対強度の測定下限を明らかにする。

## 参考文献

- [1] K. Arakawa *et al.*, “Construction and first year’s operation of the JAERI AVF Cyclotron”, Proc. 13th. Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 1992, pp. 119-122.
- [2] H. Kashiwagi *et al.*, “Test of beam transport based on beam emittance measurement in the injection line of the TIARA AVF cyclotron.” Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp. 1123-1125.
- [3] R. Koyama *et al.*, “Online monitoring of beam phase and intensity using lock-in amplifiers” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 729, 2013, 788-799.