

京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器における駆動型ビーム位置モニターの開発 DEVELOPMENT OF MOVABLE BEAM POSITION MONITORS (BPM) FOR FFAG ACCELERATOR AT KURRI

阪本雅昭 *A)、森義治 A)、石禎浩 A)、上杉智教 A)、栗山靖敏 A)、政宗貞男 B)

Masaaki Sakamoto *A), Yoshiharu Mori A), Yoshihiro Ishi A), Tomonori Uesugi A), Yasutoshi Kuriyama A), Sadao Masamune B)

A) Kyoto University Research Reactor Institute

B) Kyoto Institute of Technology

Abstract

We have studied on beam behaviors of the FFAG accelerator complex at KURRI to improve the beam intensity. To investigate the cause of beam losses during acceleration at the main ring, we have measured the betatron tune precisely with newly developed movable BPMs and beam exciter.

1. はじめに

京都大学原子炉実験所 FFAG 加速器複合系 [1] は、負水素イオン源、11MeV リニアック、100~150MeV FFAG シンクロトロン (主リング) から構成される。これらは加速器駆動未臨界炉 (ADS) 実験への核破砕中性子源として利用されるだけでなく、今後のビーム利用の多様化に向けて、さらなるビーム強度増強を目標としている。

現在、主リングでの加速途中にビームロスが観測されており、磁場の高次成分による非線形共鳴等が原因として考えられている。この問題の解決のために、高精度にベータトロンチューン測定を行う必要がある。以前にも既設のビーム位置モニター (BPM) を用いたベータトロンチューン測定が行われたが、ビームのエネルギーが上がるにつれて測定が困難になる状態であった。

そこで、エネルギー領域により周回軌道半径がシフトする FFAG 加速器の特性に適した、駆動型ビーム位置モニターを開発した。本発表では、開発した駆動型ビーム位置モニターの製作および本モニターを用いたベータトロンチューン測定の結果について報告を行う。

2. 駆動型ビーム位置モニター

2.1 三角板電極型ビーム位置モニター

ビームパイプ内の電極付近を荷電粒子ビームが通過すると、ビームからの電場によりビームと逆の電荷が電極に誘起される。この電荷により電極とビームパイプ (GND 電位) 間に電位差が生じる。これを測定することで、ビームの強度や位置情報を得ることができる。このようなビームモニターを静電誘導ピックアップ [2] という。概念図を Fig. 1 に示す。

ビームパイプ内に三角形の電極を設置すると、ビームの位置により電極を通過する距離が変わり、誘起される電荷量も変化する。その信号の強弱により、ビームの位置情報を得ることができる。このようなビーム位置モニターを三角電極型ビーム位置モニター [3] という。概念図を Fig. 2 に示す。

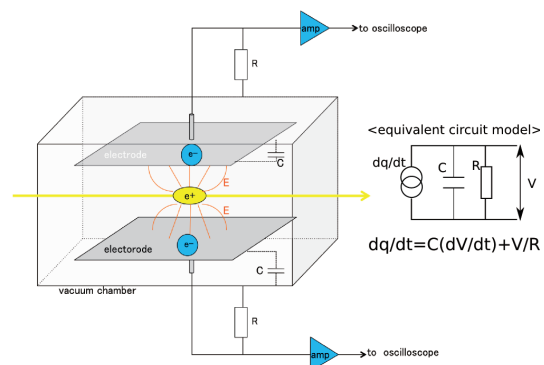


Figure 1: Image of Electrostatic Pickup.

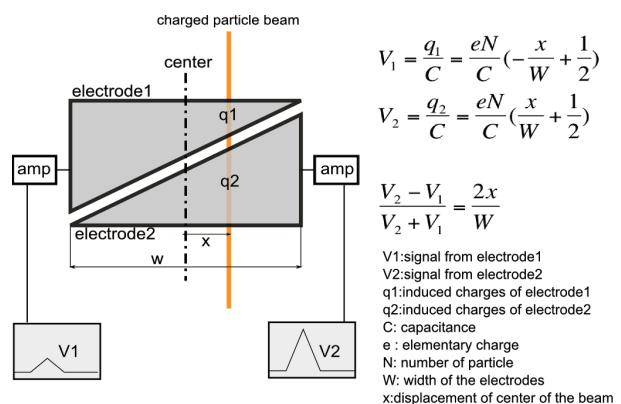


Figure 2: Image of Triangular Electrode BPM.

2.2 既設のビーム位置モニターの問題点

FFAG 加速器に三角電極型ビーム位置モニターを設置する場合、以下の点を考慮する必要がある。

- ビームが加速されるにつれて軌道が外側にシフトするため、ビームパイプが半径方向に長い扁平形状で大口径である。

* masa@rri.kyoto-u.ac.jp

- 半径方向のビーム移動領域（約 80cm）に合わせて電極を作ると、電極の幅が大きくなるため位置分解能が低くなる。
- 電極の大きさを小さくするために、FFAG 加速器では半径方向に三角板電極を 8 個並べたビーム位置モニターが設置されている。この方式では電極の個数分のアンプが必要となり、アンプの個体差（ゲインなど）を考慮する手間が多くなる。また、既設のビーム位置モニターは電極が上側のみのため、ビームの水平方向だけでなく垂直方向の変位信号を出力する可能性がある。加えて、電極間にビームが存在する場合に測定が難しい。

2.3 駆動型ビーム位置モニター

以上の問題点を考慮して、駆動型ビーム位置モニターを開発した。これは、対になった三角板を電極とした静電誘導型ビーム位置モニターを半径プローブの先端に取り付けて駆動させることで、ビームの位置および変位を高精度に検出することを狙ったものである。概念図を Fig. 3 に示す。

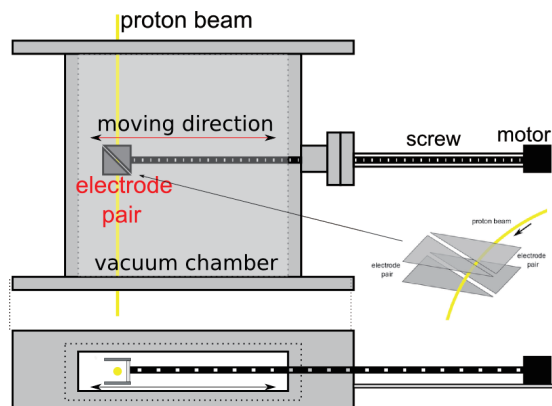


Figure 3: Image of Movable Beam Position Monitors.

この駆動型ビーム位置モニターの特徴は以下の通りである。

- ビームサイズ（水平方向：約 1cm）に合わせて電極を製作するので電極を小さくすることができ、位置分解能の良い測定が可能と考える。
- 上下の電極を接続することで、垂直方向の変位によらず、水平方向の変位信号のみを取得可能と考える。
- 電極を多数個並べる方式に比べて必要なアンプの個数が 2 個となる。これにより、アンプ間の個体差を考慮する手間を減らすことができる。
- 左右の電極からの信号の差を取ることで、共通モードノイズを除去することができる。と考える。

既設のビーム位置モニターを比較対象とするため、駆動型ビーム位置モニターの電極の大きさを既設のものと同じ等辺 97mm の直角二等辺三角形とした。また、上下電極間の距離は詳細を考慮せず 100mm とした。

半径プローブとビームパイプは、NW40 フランジを介して接続され、駆動部はウィルソンシールにより真空封止される。ロッド先端部に取り付けた電極から同軸ケーブルと電流導入端子（真空側：ピン、大気側：BNC）を通じて信号を取り出し、端子に直接プリアンプ（エヌエフ回路設計ブロック SA-220F5）を取り付けた。左右電極からの信号の差を取るために、アンプの出力後に方向性結合器を取り付けた。

設置された駆動型ビーム位置モニターを Fig. 4 に示す。

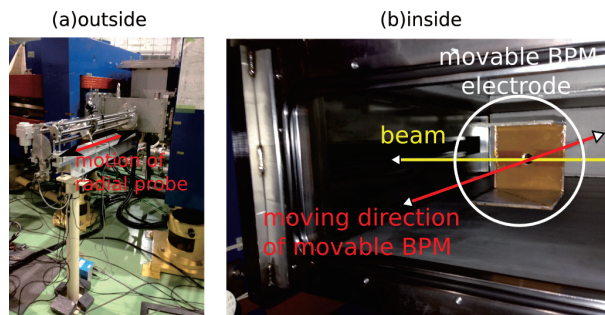
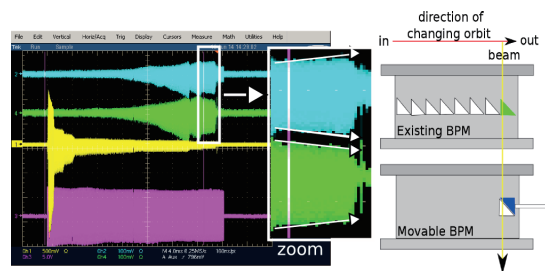


Figure 4: Movable BPM.

実際のビームを用いて測定し、オシロスコープ（テクトロニクス社製 TDS5104）に取り込んだ波形を Fig. 5 に示す。波形を拡大すると、軌道が変化するにつれて電極を通過する距離とともに出力電圧が変わる様子が見てとれる。



Ch.1:Bunch Monitor, 2:Movable BPM, 3:RF, 4:Existing BPM

Figure 5: Waveforms of Movable BPM etc.

3. ベータトロンチューン測定

3.1 ベータトロン振動の励振方法

ベータトロン振動の励振方法として、以下のものが挙げられる。

- 加速空洞に印加する加速高周波電圧にベータトロン振動を励振する高周波電圧を重畳
- 電極間に高周波電圧を印加することで、電極間を通過するビームを電場により励振（エキサイター）
- キッカー電磁石を用いた、磁場による励振

以前、水平方向のベータatronチューン測定において、エネルギーが高くなるとコヒーレント振動が見られなくなっていた。これは、エネルギーが高くなるに従って横方向のキック量が小さくなるため、コヒーレント振動が識別しにくくなると考えられる。そこで、ビームをより強く直接的に振動させる方法を検討する必要がある。ただし、水平方向はビーム位置モニターと同様にビームの移動距離が問題となるため、励振が困難であった。

3.2 駆動型エキサイター

FFAG 加速器のようにビームの移動領域が大きい場合、通常のスリッパライン電極を用いたエキサイターは電極間距離が長くなるため、強い電場を発生することができない。そこで、ビーム位置モニターと同様に、ビームの軌道に合わせて高周波電圧を印加する電極を動かす駆動型エキサイターを用いた。駆動型エキサイターの概念図を Fig. 6 に示す。

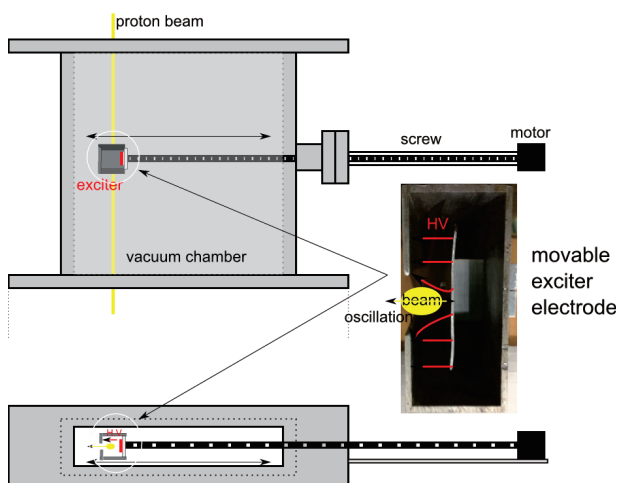


Figure 6: Image of Movable Exciter.

3.3 測定結果

駆動型ビーム位置モニターと駆動型エキサイターを用いて水平方向のベータatronチューン測定を行った。主リング加速空洞に印加する高周波電圧は、予め設定した加速時間を経過後にフラットトップとなるパターンを使用している。加速時間とビームエネルギーの換算例は、加速時間 23ms でビームエネルギーが約 100MeV である。ビーム位置モニターからの出力信号をスペクトラムアナライザー（テクトロニクス社製 RSA230）に入力し、FFT を行った。既設のビーム位置モニターと駆動型ビーム位置モニターの測定結果を比較した一例を Fig. 7 に示す。

駆動型ビーム位置モニターは電極間の信号の差を取っているため信号強度が弱い。しかし、既設のビーム位置モニターは周回周波数とサイドバンドの他にも様々なスペクトルが見えるため、必要とするベータatron振動由来の信号を同定しにくい。一方、駆動型ビーム位置モニターはサイドバンドを同定することが容易である。その後、垂直方向に関してもベータatronチューン測定

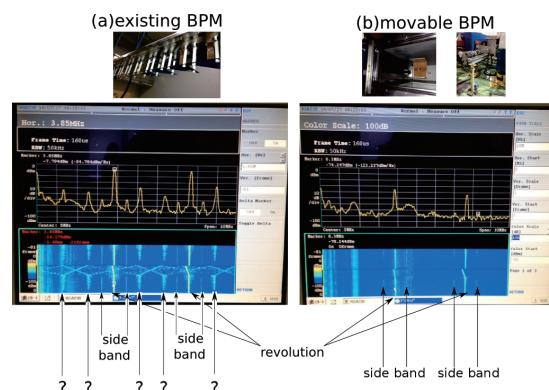


Figure 7: tune measurement result.

を行い、ビームエネルギー 11~100MeV のチューンダイアグラムを作成した。Fig. 8 に示す。

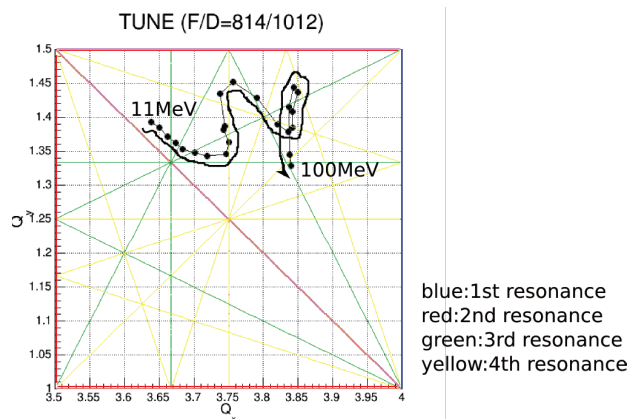


Figure 8: Tune Variation.

4. まとめと今後の課題

駆動型ビーム位置モニターと駆動型エキサイターを用いることで、今まで測定することができなかったエネルギー領域のベータatronチューンを測定することができるようになった。この結果を用いることで、主リングの磁場形状を補正する指標を得たことになる。ただし、現状では出力信号が小さいため、補正ミスによりビーム強度が下がった場合には測定できない可能性がある。今後は GND の取り方の変更や、ケーブル処理の変更などのノイズ対策を行うことで S/N 比を向上させる予定である。また、FFT に代わる周波数解析手法として、Movable Auto-Regressive System (MARS) [4] を取り入れることができるかも検討したい。

通常、ビーム位置モニターは設置前にビームを模擬したワイヤーを用いる較正 [5] が必要である。しかし、今回製作したビーム位置モニターの主な用途がベータト

ロンチューン測定であるため、現時点ではビームの位置よりも変位を示す信号が得られればよく、実際のビームにて軌道が変化する様子を測定できるかを確認するにとどめた。今後は、較正を行い、ビーム位置モニターとしての性能を確立したい。

参考文献

- [1] K.Misima, et al., “Research Project on Accelerator-driven Subcritical System Using FFAG Accelerator and Kyoto University Critical Assembly(1)”, Journal of Nuclear Science and Technology, vol44, No.3, pp 499-503, 2007.
- [2] N. Hiramatsu, “加速器のビームモニター”, KEK Internal 2004-4.
- [3] J. Kishiro, “シンクロトロン of ビームモニター”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'86 テキストより
- [4] S. Yamada, “Analysis of betatron tune in J-PARC MR by means of MARS”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRLR12. 2012.
- [5] N. Hayashi, “ビームモニター 1: ビーム位置モニター”, 高エネルギー加速器セミナー OHO'10 テキストより