

## J-PARC RFQ テストスタンド用ビームモニタリングシステム

### BEAM MONITORING SYSTEM FOR RFQ TEST STAND OF J-PARC LINAC

宮尾智章<sup>#A)</sup>, 三浦昭彦<sup>B)</sup>, 近藤恭弘<sup>B)</sup>, 森下卓俊<sup>B)</sup>, 杉村高志<sup>A)</sup>, 大内伸夫<sup>B)</sup>, 小栗英知<sup>B)</sup>, 丸田朋史<sup>A)</sup>,  
内藤富士雄<sup>A)</sup>

Tomoaki Miyao<sup>#A)</sup>, Akihiko Miura<sup>B)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>B)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>B)</sup>, Takashi Sugimura<sup>A)</sup> Nobuo Ouchi<sup>B)</sup>,  
Hidetomo Oguri<sup>B)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>A)</sup>, Fujio Naito<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Organization,

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

In J-PARC Linac, a project for energy and intensity upgrade has been progressed using 50 mA RFQ(Radio-Frequency-Quadrupole) linac cavity. Because the RFQ had already fabricated, test stand for its performance test was newly constructed. In the test stand, we designed and fabricated the monitoring system including beam current monitors for the beam transmission measurement and the beam phase monitors for the energy measurement. We will refer the detail of the monitoring system and the data obtained during the performance test.

#### 1. はじめに

J-PARC リニアックはエネルギー181 MeV、ビーム電流 30 mA で運転してきたが、平成 25 年度夏に ACS(Annular Coupled Structure)空洞をインストールすることでビームエネルギーを 400 MeV へと増強する予定である。さらに平成 26 年度にイオン源と RFQ を置き替えることにより、ビーム電流を 50 mA に上げて運転を行う予定である。ビーム電流 50 mA の運転に対応するべく、平成 24 年度末に RFQ(Radio Frequency Quadrupole)リニアック 3 号機が完成した。この RFQ 3 号機の性能を評価するために、テストスタンド用ビームラインを整備した。本稿では RFQ テストスタンドで使用するビームモニタリングシステムについて記述する。

#### 2. ビームモニタリングシステム

##### 2.1 RFQ テストスタンドについて

RFQ 3 号機のビームパラメータは加速周波数 324 MHz、繰り返し 25 Hz、ビーム幅 500  $\mu$ s、ビーム電流 50mA で運転することを目指している。今回のビーム試験において、実機のビームラインとの違いは、ビームチョップをせずに行う。下の Figure 1 はテストスタンドのビームラインを示す。ビームモニタは、イオン源から RFQ 入口までの LEBT と RFQ 出口の四重極電磁石(QM)にビーム電流モニタ(SCT: Slow Current Transformer)、RFQ 出口から各々の QM を通ったところと、エミッタンスモニタ出口の計 3ヶ所に位相モニタ(FCT: Fast Current Transformer)が配置されている。

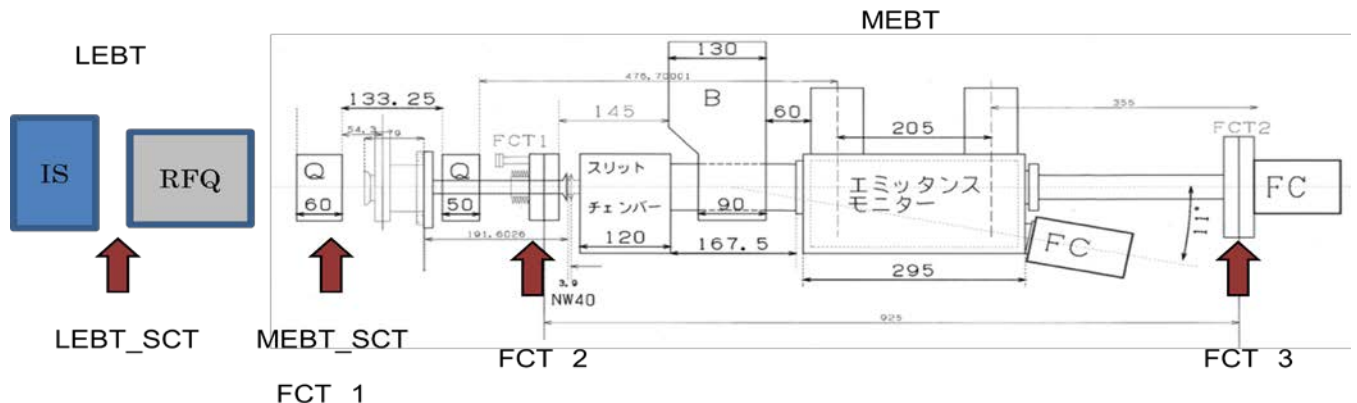


Figure 1: Schematic View of RFQ Test Beam Line.

<sup>#</sup> tomoaki.miyao@j-parc.jp

ビームモニタの配線は、モニタヘッドから出力される信号にそれぞれ電子回路を經由してデジタイザに観測データを取り込んでいる。

## 2.2 ビーム電流モニタ(SCT)

SCTはビーム電流を測るためのモニタであるが、主な目的はLEBT、MEBT間にあるRFQで加速されたビームの透過率を測定することである。コア材はファインメット（日立金属アドメット製、FT-3M型）、サイズは外径 x 内径 x 幅 = 59 x 45 x 10(mm)で、巻数は50ターンである。シールドは内側アルミと外側純鉄の二重構造になっている<sup>[1]</sup>。Figure2にSCTコアのパルス特性の測定の様子を示す。SCTコアに導線を巻く方向によって出力電圧も変わるため、擬似信号に10 V、500 μsのパルスを入れたときに正出力になるよう、コアの向きを決めている。



Figure 2: Pulse measurement of the SCT core.

SCT の出力信号はプリアンプで増幅しているが、J-PARC リニアックは H-ビームであり、負出力となるため、ここで反転させている。プリアンプ自体の校正はテストスタンドに SCT をセットし、10 V、500 μs の正パルスを入れたときの SCT プリアンプの出力ゲインと、パルスの立ち上がりを調整している。調整後の出力は 1.85 V、立ち上がりは 90 ns である。

次に SCT とプリアンプ、バッファアンプをつないだ状態で校正を行った。校正方法はパルスジェネレータから 100 Ω の抵抗を通して擬似電流を SCT 校正端子に流した時の、出力電圧をプリアンプで調整している。校正結果を Figure 3 に示す。横軸に擬似電流値(単位は mA)、縦軸は SCT の出力電圧(単位は V)である。校正は擬似電流 10 mA に対して出力電圧 1.0 V となるように行った。擬似電流 10 mA ~ 70 mA まで 10 mA 毎の入力パルスに対する出力電圧から、擬似電流と出力電圧の関係は、出力電圧を y、擬似電流値を x とすると以下の線形近似式で表される。

$$\text{LEBT\_SCT} : y=0.0998x-0.0063 \quad \dots(1)$$

$$\text{MEBT\_SCT} : y=0.1x-0.0057 \quad \dots(2)$$

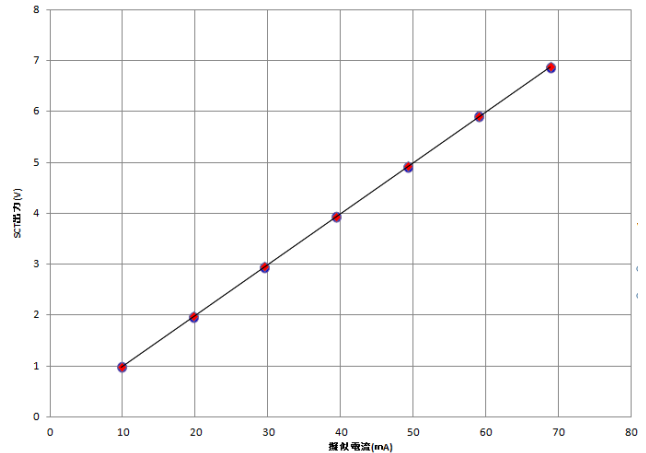


Figure 3: The results of SCT calibration.

2 つの得られた校正係数をもとに、テストスタンドでのビーム試運転においてモニタの性能評価を行った。測定波形を Figure 4 に示す。黄色が LEBT\_SCT、青が MEBT\_SCT である。パルス幅の違いはイオン源の加速変調によるもので、RFQ 出口ではビーム幅は 50 μs に狭められている。(1)式、(2)式から LEBT、MEBT での電流値はそれぞれ、LEBT:27.5 mA、MEBT:25.7 mA となり、RFQ の透過率は 93.5% となった。

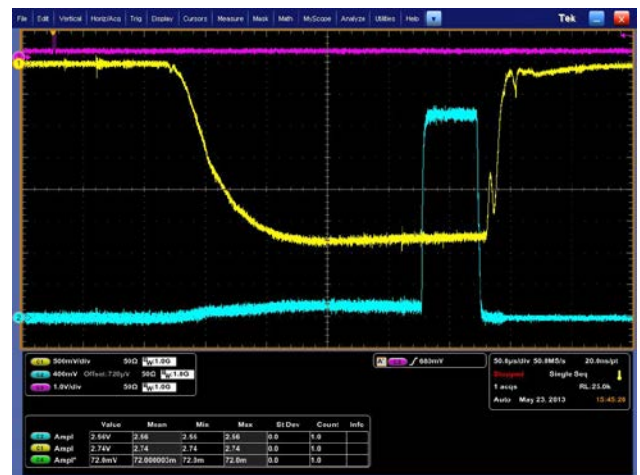


Figure 4: The waveform of SCT output.

## 2.3 位相モニタ(FCT)

FCTはビーム位相を測るためのモニタであるが、主な目的は2台のFCT間での位相差からビームエネルギーを測定することである。FCTの構造は前項のSCTと同様であるがコアサイズが外径 x 内径 x 幅 = 59 x 45 x 5(mm)で、巻数は1ターンとなっている<sup>[1]</sup>。テストスタンドのFCTはゲートバルブ内に1台、エミッタンスモニタの出入り口に2台の計3台設置しているが、今回のテストスタンドにおけるエネルギー測定は後者の2台で行った。

### 2.3.1 FCT ケースの位相測定

下の図5にエネルギー計算に使用するFCTを示す。フランジにFCTコアが入ったケースが内蔵している構造を採用している。通常、テストスタンドで校正測定(図6)を行うには全長が長く不安定なため、FCT ケースを取りだして位相測定を行った。測定方法は、FCTケース本体を2本のテーパー管で挟み、上側は50Ωでターネットしている。テーパー管の中は、RFを伝播するための銅導体が挿入されている。ネットワークアナライザからRF信号を下のテーパー管に入力し、FCTの端子からの出力と位相を測定した。校正台に附属している。テーパー管や測定治具、コネクタも位相の結果に左右されるので、別途測定を行う必要がある。

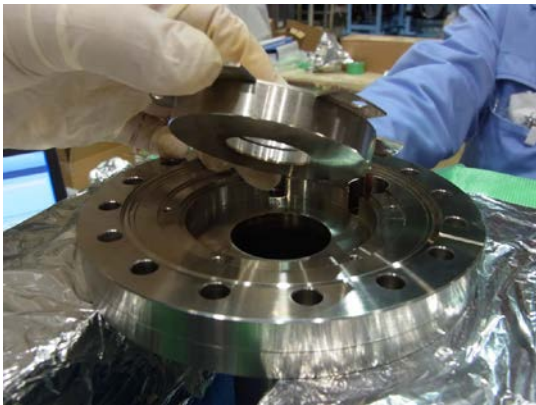


Figure 5: FCT for using the beam energy measurement.

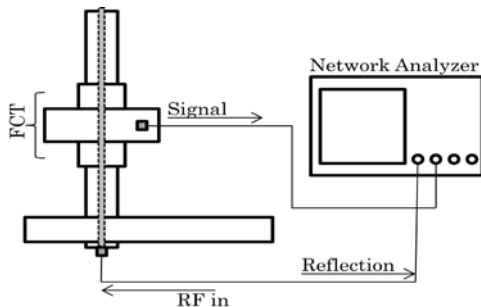


Figure 6: The outline drawing of FCT phase measurement.

### 2.3.2 エネルギー計算に必要なパラメータ

FCT を用いたエネルギー計算には飛行時間法 (Time-of-Flight)で以下の式で計算できる<sup>[2]</sup>。

$$K(\text{MeV}) = m_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \quad \dots (3)$$

$$\beta = \frac{L}{c \cdot \Delta t} \quad \dots (4)$$

$$\Delta t(\text{sec}) = \frac{\Delta \theta}{360 \cdot (324 \times 10^6)} \quad \dots (5)$$

$$\Delta \theta = \theta_{\text{FCT1}} - \theta_{\text{FCT2}} \pm (360 \times n) \quad \dots (6)$$

ここで、L は FCT コア間の距離、 $\Delta t$  は飛行時間、 $\theta$  は FCT1-2 間の最適位相に依存する。FCT 1、FCT2 それぞれの FCT から出力される位相が測定できれば、エネルギー計算が可能となるが、Figure 7 に FCT と電子回路の配線図を示す。FCT 本体やケーブル、コネクタ、位相検出器等の電子回路には各々オフセットを持っているため、校正を行った。

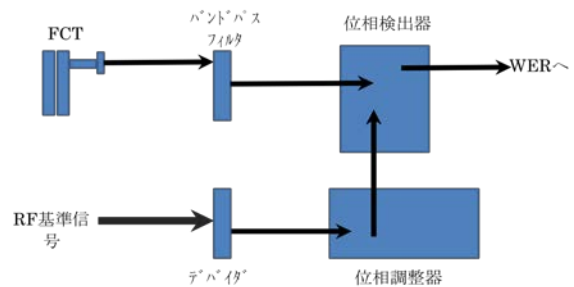


Figure 7: Diagram of FCT signal processing.

#### ① モニタ本体とケーブル位相の校正

FCT ヘッドの位相は先ほど記載した FCT ケースの位相測定結果から、測定に使用した治具と変換コネクタの位相、FCT ケース内を 324MHz の電磁波が高速で通過した時の位相変化、FCT ヘッド-バンドパスフィルタ-位相検出器までのケーブル位相を考慮に入れた。ケーブル位相の測定方法はビームラインに敷設した校正線にネットワークアナライザから RF を入れ、FCT につないでいるケーブルとの位相を測定した。校正線を同じにすることで、各々測定された位相測定結果の差分で位相差を計算することができる。

#### ② FCT 間の距離について

FCT ケース内のコアと、FCT が組み込まれているフランジ端面までの間隔は Figure 8 のようにアーム式 3次元測定器 (FARO 社製 GAGE) を用いて測定した。ビームラインに FCT チャンバーをインストール後、フランジ端面距離をレーザートラッカー (Leica ジオシステムズ製 AT401) で測定した。上記距離測定を組み合わせ、FCT の間隔を  $L=930.06\text{mm}$  見積もった。



Figure 8: The aspect of measuring distance from FCT core to the edge of flange.



③ 位相検出器

位相検出器は RF の基準信号と FCT からの出力信号を入力し、2 つの信号の位相差に応じて出力される信号を測定する電子回路である。Figure 9 に位相検出器のブロックダイアグラムを示す。FCT からの出力信号と RF 基準信号を 324MHz の加速周波数から位相情報を維持しながら、線形な位相検出が可能な 100MHz 前後の中間周波数に変換している。変換されたそれぞれの信号は増幅された後、位相比較をすることで、2 つの信号の位相差に応じて変調された方形波が得られ、積分回路を通すことで、出力電圧信号が得られる仕組みになっている。位相検出の精度を上げるために、位相検出範囲を 0° から 720° とし、両端を除く 360° の範囲で位相検出を行っている。また、最適位相値を検出するために、180° の位相反転構造も含まれている。

位相検出器は各々個性を持っており、位相検出器の換算係数(単位は V/deg)、位相検出器のオフセット電圧、位相反転時の位相を考慮に入れている。

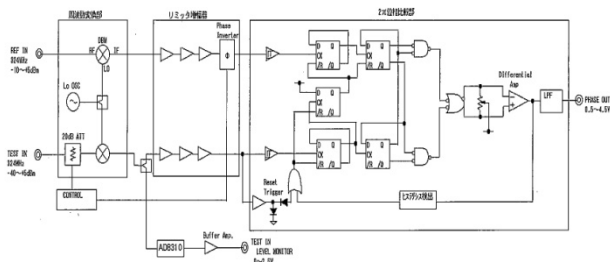


Figure 9: The block diagram of phase detector.

④ 位相調整器

位相調整器はトロンボーン構造を採用し、ダイヤルを回すことで、同軸管の線路長を変えることができる。ここでは、RF 基準信号のケーブルの位相遅れと位相検出器の参照信号を揃えるために、位相調整器のダイヤルを回して、3 台全て位相を 90° に揃えるよう調整した。Figure 10 に調整後の結果を示す。下側のグラフから調整後の位相は 90.048° であった。

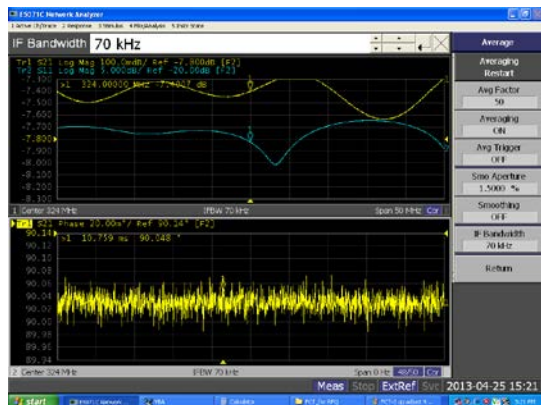


Figure 10: The result of phase stretcher.

以下の調整後、エネルギー用のソフトウェアに各パラメータを入れ、本テストスタンドでの RFQ3 号機で加速されたビームにより、試運転を行った。ここで、FCT 間の位相差  $\Delta\theta$  を求める。 $\beta\lambda = 73.9\text{mm}$ 、FCT 間の距離が 930.06mm より

$$930.06/73.9=12.58$$

FCT 間の位相差は  $\Delta\theta = 12 \times 360^\circ + 208.8^\circ$  となる。この位相差から、(3)~(5)式を用いてエネルギーを計算すると 3.012MeV となり、RFQ3 号機的设计値をほぼ再現していることから、エネルギー計算に必要なパラメータは特に問題ないと考えられる。

3. 今後の予定

我々はテストスタンドでのビームの透過率測定とビームエネルギーを測定できるようになったが、FCT 間の距離が長い(Figure 11 参照)のと、測定している FCT 間には四重極電磁石がないため、ビームが広がっている。ビームが広がると、ダクトにビームが当たり中性子が出る恐れがあるので、中性子を検知する He-3 型のビームロスモニタの設置を考えている。

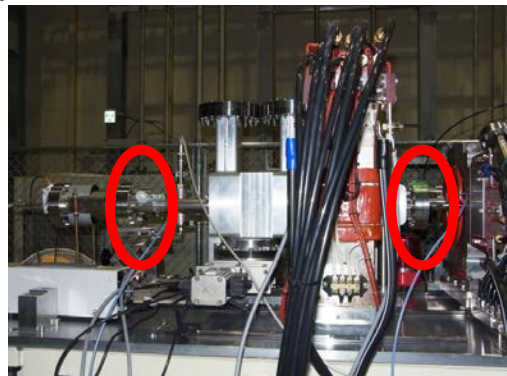


Figure 11: Picture of the FCT in the beam line.

4. まとめ

RFQ テストスタンドにある SCT と FCT の性能を測定した。RFQ の試運転時において、正確なビームエネルギー(3.0MeV)とビームの透過率を測定することができるシステムを構築した。今後の RFQ の性能評価に役立つものと考えている。

参考文献

[1] 五十嵐前衛 「統合計画陽子リニアック MEBT1 用ビーム・モニターとそのビーム・テスト」 第 27 回リニアック研究会  
 [2] S. Sato, et al., "Beam Energy Measurement at J-PARC LINAC", Proc. of PASJ2008