

# J-PARC陽子リニアックのRFチョッパーによるビームテスト

加藤隆夫<sup>1,A)</sup>、池上雅紀<sup>A)</sup>、王生<sup>2A)</sup>、傳成年<sup>2A)</sup>、穴見昌三<sup>A)</sup>、新井重昭<sup>A)</sup>、池上清<sup>A)</sup>、五十嵐前衛<sup>A)</sup>、上野彰<sup>A)</sup>、岡田雅之<sup>A)</sup>、門倉英一<sup>A)</sup>、上窪田紀彦<sup>A)</sup>、川村真人<sup>A)</sup>、小林仁<sup>A)</sup>、久保田親<sup>A)</sup>、高崎栄一<sup>A)</sup>、田中宏和<sup>A)</sup>、千葉順成<sup>A)</sup>、内藤富士雄<sup>A)</sup>、野口修一<sup>A)</sup>、福井佑治<sup>A)</sup>、山口誠哉<sup>A)</sup>、吉野一男<sup>A)</sup>、伊藤崇<sup>B)</sup>、木代純逸<sup>B)</sup>、小林鉄也<sup>B)</sup>、近藤恭弘<sup>B)</sup>、富澤哲夫<sup>B)</sup>、長谷川和男<sup>B)</sup>、廣木文雄<sup>B)</sup>、山崎良成<sup>B)</sup>、吉川博<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

<sup>B)</sup> 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

## 概要

J-PARCリニアックのMEBTに設置される高速チョッパーのビームテストを行った。約10nsのビーム立ち上がり時間が得られた。MEBT出口では、チョッパーが働いている時間帯のビーム信号は、測定限界以下であった。チョップパルス列は自在にコントロール出来るので、J-PARC加速器の運転に有益と思われる。

## 1. はじめに

J-PARC加速器は、400 MeV陽子リニアック、3 GeVシンクロトロン (RCS)、50 GeV シンクロトロンから構成される[1]。リニアックは、ピーク電流50 mA、パルス幅500 ms、繰り返し周波数25 Hzで運転する。RCSでのビーム損失を低減する為、高速のRFチョッパー[2,3]をリニアックの低エネルギー部分 (MEBT: 3 MeV RFQとDTL 間のビーム輸送系) [4]に設置して、ビームを整形する。チョッパーの性能を高めるには、チョップパルスの過渡部分を出来る限り短時間にする事が重要である。過渡部分のビームは、定常状態と違うので、ビーム損失となる可能性があるからである。KEKの60 MeVビームテストスタンドで行われたビーム試験[5,6]のチョッパーテストの結果について報告する。

## 2. MEBTの構成

図1にMEBTの構成を示す。MEBTは8台の収束磁

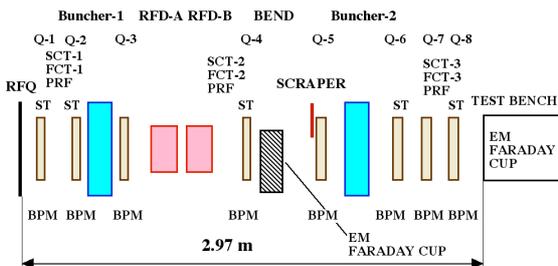


図1 : MEBTの構成

石、2台のバンチャー、2台の324 MHz チョッパー空洞 (RFD-A、RFD-B)、5セットのステアリング磁石、及びビーム測定システムから構成する。チョップビームのパルス構造を図2に示す。RCS高周波周波数に従うチョップ周波数はおよそ1 MHzである。

## 3. RFチョッパー (RFD) システム

RFDはTE11モードで励振する。大きなカップリング係数を持つ入出力用の2本の高周波ループを使って、空洞の負荷Q値はおよそ11に設定する。チョップビームの過渡特性を速くするには、以下の方法が考えられる。1) 使用電力が決まっている時に、2台の RFDをシリーズに使う (カップルシステム)。2) 与えられた電力のもとで、負荷Qを最適化する。3) パルスの終わり付近で入力高周波の位相を反転する[7]。4) 大きな高周波電力を使って、チョップに必要な空洞電場レベルに到達する時間を速める。5) 電力増幅器の過渡特性をよくする。我々のチョッパーシステムでは、2台のRFDを同軸管でシリーズにつなぐ。この結果、カップルド空洞システムとなり、必要電力は半減する。HFSS計算により、連結する同軸管の長さを決めた[8]。

30個のモジュールからなる最大出力36 kWの個体増幅器を製作した[9]。この電力増幅器の立ち上がりはおよそ15 nsである。増幅器の入力信号はダイオードスイッチ回路で振幅変調をする。

RFD電圧1.6 MV/mに対応する電力は22 kWである。

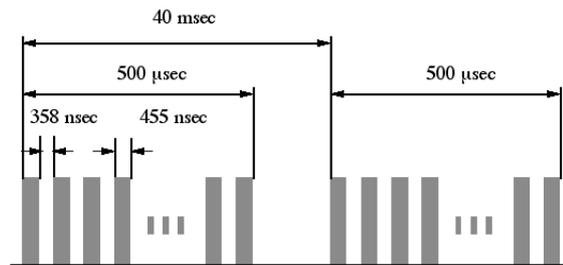


図2 : リニアックビームパルスの構造。チョップ比56%、リング周波数1.23 MHz。

<sup>1</sup> E-mail: [takao.kato@kek.jp](mailto:takao.kato@kek.jp) 2 現在、中国高能物理学研究所

これらは、チョップビームが定常ビームから4mm以上離れているという条件のもとで求めた値である。入射電力が36 kW の場合には、定格入力時の半分の時間で、定格電場に到達する。

表面がタングステンのビームスクレーパを、2番目のRFDから70 cm下流に設置する。スクレーパは、0.1 mm 刻みで50 mm 以上、横方向に移動出来る。表面にあたるビーム電流は測定出来る。

#### 4. チョップビーム測定の方法

2種類 (5 mAと25mA) のピーク電流を使う。スクレーパ表面の損傷を減らす為に、パルス幅は50ns、繰り返し周波数は5 Hzとした。

ビームテストは、3段階で行った。1) RFチョッパーシステムの基礎的な特性テストを目的として、一つの空洞を使い (シングルシステム)、低電流ビームを使って行う。2) カップルシステムの特性テストを目的として、カップルシステムを用い、低電流ビームを使って行う。3) システムの特性評価の為に、大電流ビームを使ってカップルシステムで行う。チョップビームは、遅い電流モニター (SCT)、速い電流モニター (FCT)、ビーム位置モニター (BPM)、ビームスクレーパ、そしてフラディカップで測定する。ビームテストは以下の手順で行った。1) MEFT内のビーム透過率が最大、横エミッタンス増加が最小となるように、収束磁場とステアリング磁場を設定する。2) 第1バンチャー電圧を定格に設定する。3) 平均エネルギーが変化しないように、第1バンチャーの位相を設定する。4) ビームスクレーパ位置は事前のビームサイズ測定結果に従って設置する。5) RFD入力電力を徐々に増やす。6) RFD の位相を最適値に設定する。これらの手順を繰り返して、最適化を行う。

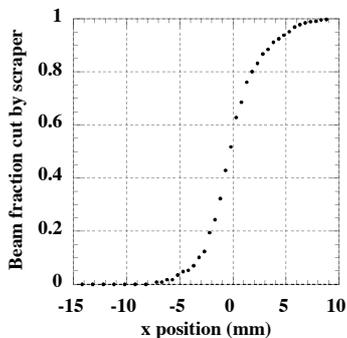


図3：スクレーパ位置を変えて測定したビームの割合。ビーム電流5 mA。

### 5. 実験結果

#### 5.1 ビームプロファイル

スクレーパ位置を変えながら第3SCT電流を測定して、スクレーパ位置でのビームプロファイル測定を行った。5 mAの結果を図3に示す。測定おビームサイズはより小さく、これはTRCE3D計算結果とほぼ一致する。この結果より、スクレーパは、ビーム軸から10mm 離れた位置に設置した。この設定は、ビーム電流25mAまでは、有効であった。

#### 5.2 ビーム変位

図4に1台のRFDシステムの場合のビームの偏向の様子を示す。スクレーパ位置のビーム変位( $\Delta x$ )は次式で表される。

$$\Delta x = \theta_1(L_1 + L_2) + \frac{qB'L_q}{2mv(L_1 + L_2)}L_2$$

ここで、 $\theta_1$ はRFD の偏向電場に比例する偏向角、 $q$ は単位電荷、 $B'$ は収束磁場勾配、 $m$ は陽子質量、 $v$ は粒子速度、 $L_1$ と $L_2$  は距離を表す。図5に、RFD-A

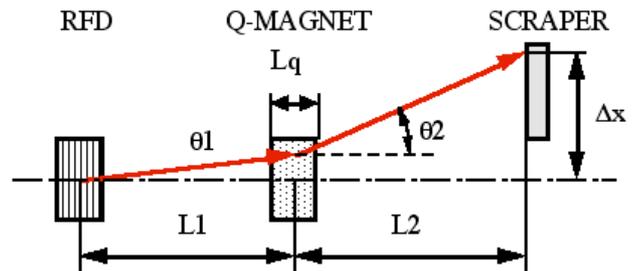


図4：シングルRFD システムのビーム変位。

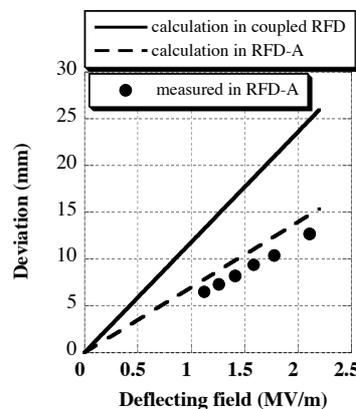


図5：シングル (RFD-A) システムのスクレーパ位置で測定した偏向ビーム位置。横軸は、RFD空洞電場。シングル及びカップルシステムの時の変位の計算値も図示した。

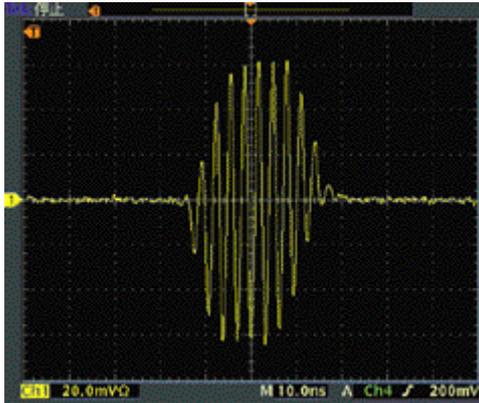


図6：MEBT出口のBPMで測定したチョップビーム信号。ピーク電流24 mA。入力電力36 kW。位相反転を効かしている。10 ns/div。

システムの場合の、ビーム変位の測定値と計算値を示す。諸々の誤差を考慮すれば、測定値は計算結果とほぼ一致する。

### 5.3 カップルシステムの測定結果

カップルシステムを使ったビームテストでは、良好な結果を得た。図6に、第8番（MEBTの最下流）のBPMで測定したチョップビームによる信号を示す。本図では、過渡部分を鮮明にする為に、非常に短いチョップパルスを作っている。ビームの立ち上がり立ち下がり、3マイクロバunch程度であり、およそ10 nsである。図7に、典型的なチョップパルス列を示す。偏向されたビームの殆どは、スクレーパによりカットされる。この部分に対応するMEBT出口での測定信号は、ノイズレベル以下であった。従って、チョッパーのON/OFF比は、相当高いと思われる。入射電力が18 kW あれば、ピークビーム電流が23mAの時に、チョップビームと定常ビームとの間に、許容できるビームセパレーションが達成出来る。しかし、この場合の立ち上がり時間は15ns程度であり、あまり速くない。それ故、過渡特性を改善するためには、一層大きな入力電力が望ましい。RFDの許容位相エラーの範囲は、充分広い。カップルドシステムで電流が5 mA の時、入力電力36 kWと18 kW に対応する許容位相範囲は、 $\pm 48^\circ$  と $\pm 26^\circ$ であった。チョップパルス列の幅と繰り返し周波数を自由に変化出来る事がわかった。又、RFDシステムが全体として極めて安定ある事が実証された。1ヶ月以上にわたるテストでは、故障・放電はなかった。

### 5.4 位相反転法

図6の測定では、RFパルスの立ち下がりから12ns程度前のタイミングで、入射電力の位相を高速で反転させている。この結果、ビームの立ち上がりは3ns以上改善された。

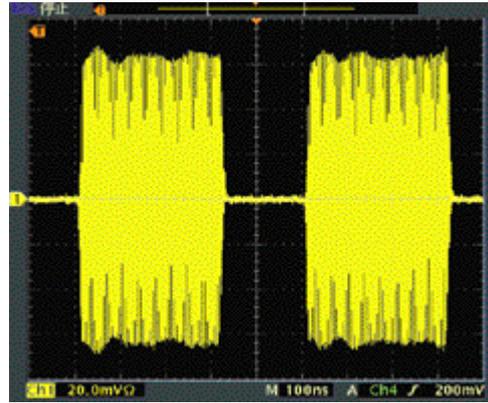


図7：MEBT出口のBPMで測定したチョップビーム信号。ピーク電流24 mA。入力電力36 kW。位相反転を効かしている。10 0ns/div。

## 6. まとめ

RF チョッパーシステムは、ビーム電流25 mA までの測定で、チョップビームに必要な基本的な要件を満足する事が実験によりわかった。負荷Q値が11で入射電力が36kWの下で得られたビームの立ち上がり立ち下がり時間10nsは、チョッパーシステムの限界に近い。MEBT出口では、チョッパーが働いている時間帯のビーム信号は、測定限界以下であった。チョップパルス列は自在にコントロール出来るので、J-PARC加速器の運転に有益と思われる

### 謝辞

チョッパー空洞を含むMEBT建設に際し、御尽力戴いた三菱重工株式会社三原機械・交通システム工場に感謝致します。チョッパー用大電力増幅器製作に御尽力戴いた日本電気株式会社に感謝致します。

### 参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC," KEK Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044.
- [2] T. Kato, "New Design of an RF beam Chopper," Proc. 7th Symp. on Accelerator Science and Technology, 228(1989).
- [3] S. Fu and T. Kato, "RF-chopper for JHF linac," Nucl. Instr. And Meth. A 440, 296(2000).
- [4] S. Fu and T. Kato, "Design Study on a medium-energy beam-transport line for the JHF proton linac," Nucl. Instr. And Meth. A 457, 423(2001).
- [5] M. Ikegami et al., "Beam Commissioning of the J-PARC Linac Medium Energy Beam Transport at KEK," submitted to PAC 2003.
- [6] T. Kato et al., "Beam Study with RF Choppers in the MEBT of the J-PARC Proton Linac," submitted to PAC 2003.
- [7] JHF Project Office, "JHF Accelerator Design Study Report," KEK Report 97-16, Section 4.1 to 4.3, 1998.
- [8] S. Wang et al., to be published.
- [9] S. Yamaguchi et al., "324 MHz RFチョッパー用30 kW高周波パルス増幅器の高周波特性," Proc. 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, 216(2001).