

Beam Energy Measurement at J-PARC LINAC

Susumu Sato^{1,A)}, ZenEi Igarashi^{B)}, Tetsuo Tomisawa^{A)}, Akihiko Miura^{A)}, Akira Ueno^{A)},
Hiroyuki Sako^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Guobao Shen^{A)},
Hisashi Akikawa^{B)}, Masanori Ikegami^{B)}, Takeshi Toyama^{B)}, Seishu Lee^{B)},

^{A)} JAEA, J-PARC center

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)} KEK, J-PARC center

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract (英語)

In the J-PARC LINAC, beam energy is measured with the Fast Current Monitor (FCT), which uses a Finemet core. Simplest way is to measure the time-of-flight, which is calculated from measured phase, for a pair of FCTs. Other way of measurement of beam energy is from dispersion measurement in the RCS (Rapid Cycle Synchrotron), or from circulation frequency of RCS. In this paper, a study for comparisons is reported. Also, trial to measure energy gain by single FCT is reported.

J-PARC リニアックにおけるビームエネルギー測定

1. はじめに

J-PARC リニアック [1, 2] においては、ファインメットコアを用いた Fast Current Transformer (FCT) を用いてビームの位相を測定し、ペアとなる FCT 間の位相差から、飛行時間 (TOF) を求めて、ビームのエネルギーを測定している [3]。この時用いる、飛行距離については、FCT の位置を専用の測量台座を設けて、測定してある (誤差は 0.3 [mm] 程度)。

今回の報告は、ビームのエネルギーを、飛行距離の異なる複数の TOF 組合せ間で比較をする。

また、リニアックの後段に続く、シンクロトロン (RCS) に入射した時、ビーム捕獲用の RF 源を用いて測定されている周回周波数を用いて、(周回軌道の長さを仮定した時の) 導出したビームエネルギーと、比較を試みる。更に、リニアックから RCS への入射エネルギーを変化させた時に生じる、RCS における (dispersion 項による) Closed Orbit Distortion (COD) の変化量を用いて、ビームエネルギーの変化量を推測し、リニアック側で FCT を用いて測定したビームエネルギーの変化量との対応関係について考察を行う。

2. 複数の FCT ペアにおけるエネルギー測定

複数の FCT ペア (TOF の組合せ) でのエネルギー測定を行った。運動エネルギー K は以下の式によ

て導出される。

$$K [MeV] = m_0 \cdot (\gamma - 1), \quad \left[\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}, \beta = L / (\Delta t \cdot c) \right]$$

$$\Delta t [sec] = \Delta \theta / \left\{ 360 \times \left(324 \times 10^6 \right) \right\}$$

$$\Delta \theta [deg] = \theta_{FCT1} - \theta_{FCT2} \pm (n \times 360)$$

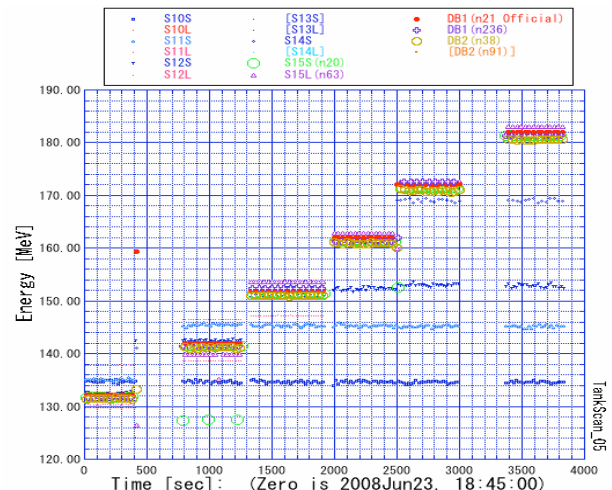


図 1: SDTL の後段 5 段で順次加速を追加した時の、複数の TOF 組合せによるビームエネルギーの測定

ここで θ_{FCT1} , θ_{FCT2} は、それぞれ FCT で検出さ

¹ E-mail: susumu.sato@j-parc.jp

れた位相(正確には、ケーブルやヘッドの位相差を較正した後の位相)である。 $m0$ は負水素イオンの質量であり、324[MHz]は空洞の加速周波数である(FCTは[324MHz]の位相を検波測定している)。

表1: リニアック後半部にあるFCTペア
(上流から下流に向けてリストしてある)

FCT ペアの通称 (n の典型値)	FCT ペアの位置	FCT ペアの距離 L [m]
S10.S (n=2)	S10 と S11 の間	0.707
S11.S (n=1)	S11 と S12 の間	0.734
S12.S (n=2)	S12 と S13 の間	0.759
S14.S (n=2)	S14 と S15 の間	0.805
S15.S (n=20)	S15 と DB1 の間	10.512
S15.L (n=63)	S15 と DB1 の間	32.332
DB1.S (n=21)	DB1 と DB2 の間	10.165
DB1.L (n=236)	DB1 と DB2 の間	118.624
DB2.S (n=38)	DB2 と 0 度 dump 間	19.500
DB2.L (n=91)	(DB2 後) arc 部後、RCS 前	45.574

リニアック SDTL 加速空洞の内、後段の5段のSDTL加速を順次追加していき測定した。この時利用した、FCTペアの通称と、FCT間の距離は表1である。図1はその測定値である。

各TOFの組合せには、位相検出器のもつ360度の不確定性が有るが、距離の短いTOF(n=20程度)を用いることにより、より距離の長いTOF(最長n=236程度)でのTOFの値を確定することができる。例えば典型的な値として、DB1の後のTOFの例を採ると、“DB1.S”ペアL=10.165[m]では、nの値として、“1小さい隣の整数

(n=20)”を採ると、エネルギーは26MeV程度離れた(大きな)値になってしまう(ため、非現実的である)。また、“DB1.L”ペア(L=118.624 [m])では、nとして“1小さい隣の整数(n=235)”を採ると、エネルギー値は2MeV程度離れた(大きな)値になってしまう。図2に示す分布は、これらのFCTペア、“DB1.S”ペア、“DB1.L”ペア、におけるエネルギー測定値分布図である。ガウス分布を仮定した時、分布の幅(sigma)は、それぞれ30keV程度、3keV程度である。

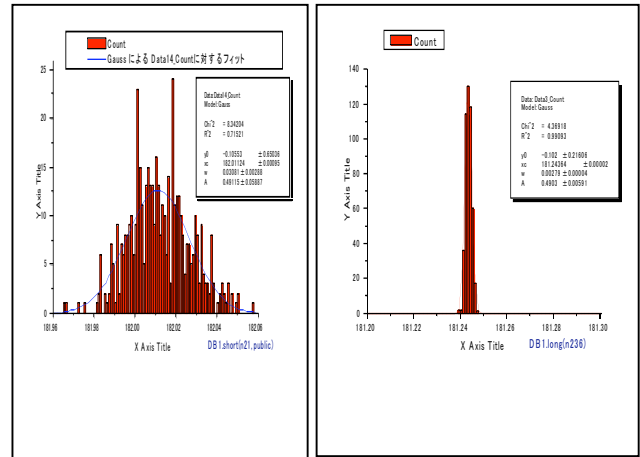


図2 エネルギー測定値分布図。左図は、“DB1.S”ペア(L=10.165[m], n=21)。右図は、“DB1.L”ペア(L=118.624 [m], n=236)である。

3. RCSのから求めたエネルギーとの比較。

Run17 (2008年6月を中心としたRun)の最初において、RCSのRFにおける周回周波数を、周回軌道長(348.333m)を仮定して、エネルギーを計算すると、181.3MeV相当であった。この時のLINACにおいて、(DB1.Sを用いて選定したnを用いた)DB1.Lにおけるエネルギー測定値は181.8MeVであった。

Run17の最後においては、Debuncher2 (DB2)の位相を変化させる事によりビームのエネルギーを1MeV弱変化させ、DB2.LペアのFCTを用い、エネルギー変化を測定した。この測定と同時に、RCSで(dispersionのある)arc部の6つのBPMを用い、Closed OrbitのDistortion(ΔCOD)を測定した。

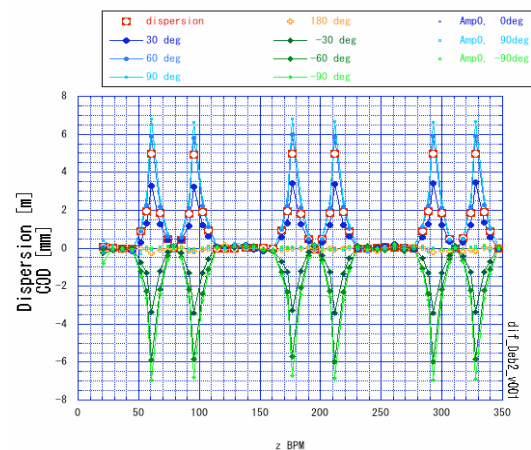


図3: DB2の位相を変化させた時の、 ΔCOD の値。比較の為、dispersion(η)の値も示した。横軸は、RCS軌道上のz座標[m]。

事前に求められている、各BPM位置での dispersion係数(η)を用いて、ビーム運動量の振幅をもとめた。

$$\frac{\Delta p}{p} \propto \frac{\Delta COD}{\eta}$$

図3は、測定された ΔCOD を η とともに示したものである。求めた運動量の変化量を、DB2の位相の関数として示したものが、図4である。Sinusoidal関数でfitした振幅は、 $\Delta p/p = 0.1365$ [%]であり、運動エネルギーの変化量に換算すると(運動量の中心値は、先の周回周波数からの値181.3MeVを仮定すると、) $\Delta K = 456 \pm 15$ [keV]が求まる。エラーの15keVは dispersion(η)の誤差によっている。

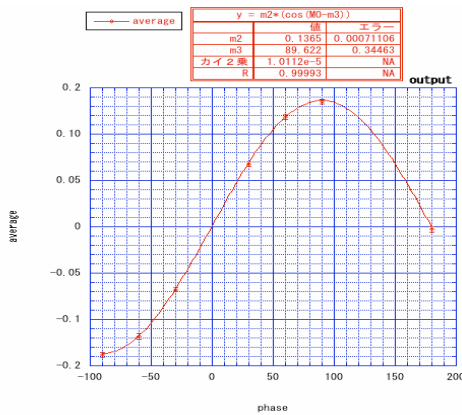


図4: DB2の位相を変化させた時の、運動量の変化率。縦軸は $\Delta p/p$ である。

FCTによるエネルギー測定の結果は、図5に示した。FCTペアで測定した運動エネルギーの変化量(上図)を sinusoidal関数でfitすると 420 ± 11 (fitting error) [keV]であった。又、単体のFCT(下左図と下右図。縦軸にはoffsetの可能性有)で測定した場合は、fitで得られた振幅は、 448 ± 8 (fitting error) [keV] (FCT50上流側)、及び 437 ± 3 (fitting error) [keV] (FCT63下流側)である。下流のFCTほど、又FCT間の差分を採ると値が小さくなる傾向がみられる。この2つの傾向は、BPM(の4電極信号の和信号)を用いてエネルギー変化量を(FCTと同様にして324MHz検波して)測定した場合にも、見られている(BPM52-BPM63の差分では 388 ± 16 (fitting error) [keV]、BPM52(上流側)単体では 440 ± 5 (fitting error)、BPM63(下流側)単体では 429 ± 8 (fitting error)である)。

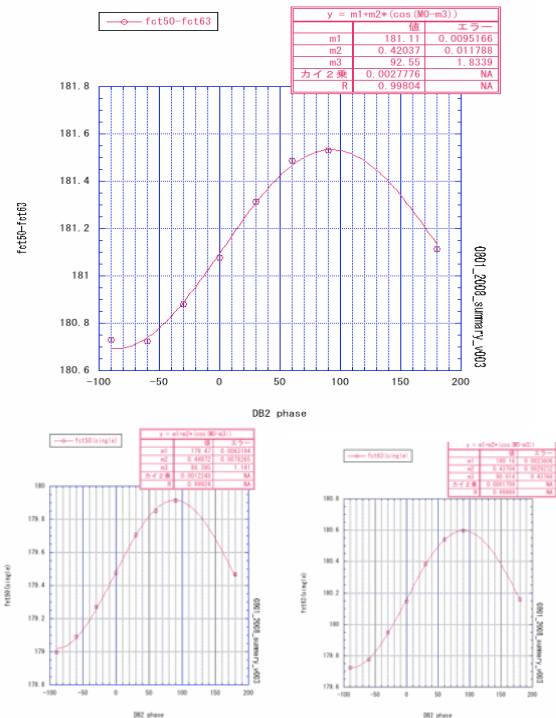


図5:DB2の位相を変化させた時の、FCTで測定した運動エネルギーの変化。上図は、DB2.Lペア(FCT50-FCT63)を用いた測定。下図は、FCT単体(左図FCT50、右図FCT63)で測定した運動エネルギーの変化[但し縦軸には、offsetの可能性有]。

4. まとめ

J- PARCリニアックではファインメットコアを用いたFCTを用いてビーム位相を測定し、ペアとなるFCT間の位相差からビームのエネルギーを測定した。飛行距離の異なる複数のTOF組合せを用いる事で、測定精度を上げる事が出来る。

リニアック続くRCSに入射した時、周回周波数から導出したビームエネルギーとの比較を行った。又、リニアックからRCSへの入射エネルギーを変化させ、RCSの dispersion項によるCODの変化量を用いて、ビームエネルギーの変化量を測定した。リニアック側でFCTを用いて測定した値と比較をすると、値が小さく見られる傾向がみられている。

参考文献

- [1] J-PARC Design Report(JAERI-Tech 2003-044, KEK Report 2002-13)
- [2] S. Sato, et al. Installation of Beam Monitor Sensors in the LINAC Section of J-PARC. EPAC'06pp.1151-1153 (2006).
- [3] Z. Igarashi, et al. 「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回リニアック技術研究会proceedings (2002年)