

KEK 20 MeV 陽子線型加速器のビームの性質

高工研, 名大理* 田中治郎 馬場春 稲垣慈見 元見昌三
角山泰一郎 竹中下てる 寺山義広 松本浩* 佐藤勇

Proton linac が Synchrotron の injector として使用する場合には, その Out-put Beam に次の仕様が要求される。

- (i) Out-put の Beam intensity が強いこと。
- (ii) Beam current とその energy が pulse 内, 及び pulse to pulse で変動しないこと。
- (iii) Beam の energy spread が小さいこと。
- (iv) Beam の emittance が小さく, しかも, pulse 内, 及び pulse to pulse で変動しないこと。

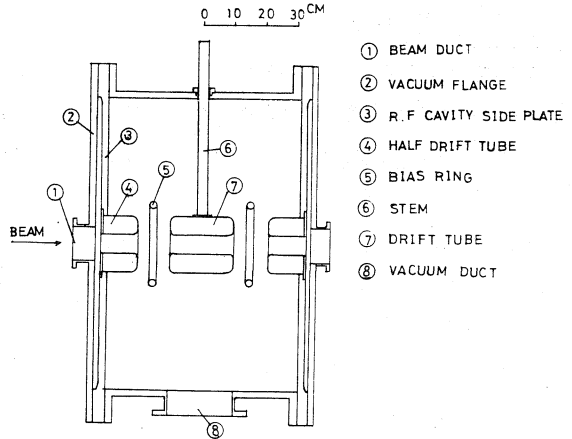


Fig 1 Debuncher structure.

この様な要求に対応するには, linac の動作特性と, beam との関連を把握する必要がある。そのためには, beam を常時 monitor して時々刻々の変化を測定しなければならぬ。KEK proton linac では, monitoring system の全てを, この要求に対応出来るように, pulse 内の各点で sampling し, その data を即刻処理して, beam がどの様な状態にあるかを判断出来るように Oscilloscope に display している。現在用意されている monitor は, core type の current transformer, Faraday cup, energy analyzer, profile monitor, 及び emittance monitor である。ここでは, これ等の monitor で測定した Beam の性質と, その結果に基づき debuncher の効果についての考察を述べることにする。

(A) Debuncher の効果

Proton linac から出て来る beam は, linac の phase space (energy と加速位相で表わされる位相空間) に於ける Separatrix の大きさが有限でないので, 有限の energy spread を持つ。その energy spread を $E_0 \pm \Delta E_0$ で表わすと, KEK - Proton - linac では $\Delta E/E \approx \pm 1\%$ である。この energy - spread を小さくするために, linac の下流 約 11.5m の位置に debuncher を設置した。この debuncher は (Fig 1 に断面構造が図示してある), 2つの加速 gap を有する drift tube 型 cavity である。この cavity によって, beam の energy spread は $\Delta E/E \approx \pm 0.3\%$ になっている。この cavity には, 上記の役割以外に, もう一つの重要な働きがある。それは, linac から出て来る beam の中心 energy が少々変動しても一定の energy に押え込む energy stabilizer としての作用である。debuncher の RF - field を適切に値にすると energy の変

動率を±0.1%以下にすることも可能である。

(i) Debuncher による energy spread の compression

Linac から出て来る bunching beam の energy spread を $E_0 \pm \Delta E$ とすると、beam 中の各粒子は、speed が違うので、linac から l (cm) 離れたところにある、debuncher cavity に到達する時間に差が出る。仮りに、2個の粒子の運動エネルギーをそれぞれ、 $E_1 = E_0 + \Delta E$ 、 $E_2 = E_0 - \Delta E$ とし、粒子の速度を光速で割った値を β_1 、 β_2 とすると、その粒子間の時間差は

$$\Delta t = \frac{l}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right) \quad (1)$$

で表わされる。ここで粒子の静止質量を M_0 とすると、

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sqrt{\gamma_1^2 - 1} / \gamma_1 \\ \beta_2 &= \sqrt{\gamma_2^2 - 1} / \gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表わされる量で、 γ_1 、 γ_2 は $\gamma = (E + M_0) / M_0$ なる関係を持っている。 E_0 の運動エネルギーをもった粒子が、Cavity の加速 gap を通過するとき、高周波位相 ϕ を $\phi = 0^\circ$ に作るように、linac tank と cavity との間の位相を調整して置くと、 E_1 、 E_2 の運動エネルギーを持つ粒子は、それぞれ、 $\phi = \pi \omega \Delta t / 2$ の位相のとき加速 gap を通過し、そのときの energy gain ΔE は、Cavity の debunching phase に乗せると

$$\Delta E \approx eV_0 \sin(\pi \omega \Delta t / 2) \quad (3)$$

となる。但しここで V_0 は Cavity の加速 gap に誘起される高周波電圧の最大値であり、 ω は、角周波数である。従って2個の粒子の Energy は、それぞれ $E_1^* = E_0 + \Delta E_0 - \Delta E$ 、 $E_2^* = E_0 - \Delta E_0 + \Delta E$ になり、Energy の spread は $|\Delta E|$ の Compression を受ける。Fig 2-(a) はこの様子を表わした energy spectrum の data で、右に示した分布は debuncher off の状態の energy spectrum で、右の peak の分布は、debuncher on の状態の energy spectrum である。

(ii) Debuncher による deviated energy の suppress

Linac の RF field が 何らかの原因で、Pulse 内、或いは Pulse to pulse に於いて変動したとある。為此のために、通常は E_0 である Beam の energy が ΔE_0 だけ deviate したとすると、仮りにその energy を $E_0 = E_0 + \Delta E$ とすると粒子は Cavity の遅い位相 ϕ に入り減速を受ける。ここで ϕ は (1)、(2) と同様の取り扱いをして、 $\Delta \phi = \omega l (1/\beta_1 - 1/\beta_2) / c$ になる。従って debuncher 通過後の粒子のエネルギーは $E_0' = E_0 + \Delta E_0 - eV_0 \sin(\Delta \phi)$ で表わされる。 V_0 を適当な値にすれば $\Delta E_0 - eV_0 \sin(\Delta \phi) = 0$ にすることも出来る。即ち debuncher は、linac の deviate した beam energy を元の値に戻す切替を要するので、energy-stabilizer である。Fig 2-(b) は、正常な linac の beam energy より ±1% 位の変動に耐えらした

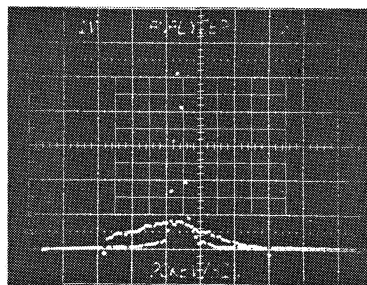


Fig 2-(a) Energy spectrum at the normal linac energy. $\Delta E/E = 0.1\%/\text{bin}$. Beam current: 100ma

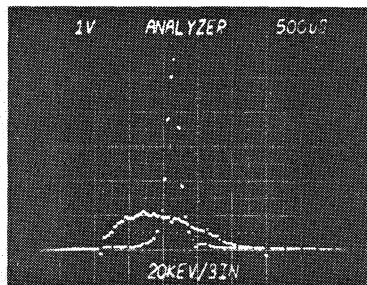


Fig 2-(b) Energy spectrum at the deviated linac energy. $\Delta E/E = 0.1\%/\text{bin}$. Beam current: 100ma

状態で, debuncher を on, off したとき energy spectrum が どう変わるかを測定したものである。Sharp な peak を持つ energy spectrum は, debuncher を on にしたときに測定したもので, 正常な linac の beam energy を示す Fig 2 - (A) の peak 値での energy と比較すると, 殆んど同値である。

Fig 3 は, typical な operation に於ける beam の energy spread を pulse の時間軸上の各時刻で測定したものである。pulse の後方部に於いて, energy spread が大きくなっているのは, pulse 中が長いので, Fig 4 に示した如く, beam loading に対して RF compensation が完全に行われずそのため beam の energy が大きく deviate することに起因する。

(B) Beam の emittance

Multi slit 方式による emittance の測定は, One pulse の beam があれば充分である。この方式では, Fig 5 に示してある如く 9 の slit と, 9 の stacked electrode を相対して並べて置き, beam の position と beam の角度の抜かりを 1 度で測定出来るようになっていている。角度の抜かりの測定は, 0.1 mm の厚さの銅板を 16 枚, 0.5 mm 厚さの絶縁物を挟んで, 積み重ねた electrode を用いて行い, 角度分解能が 0.3 mrad にするように slit と electrode の距離を調整している。

electrode から取り出された信号は hold されて, 144 ch の Multiplexier によって series の signal に変換され, Oscilloscope に position と角度との分けられて display される。Signal の大きさは, 輝度変調として用いられる。

PULSE WIDTH OF BEAM 17 μs
BEAM CURRENT 120 mA
RF POWER TO DEBUNCHER 20 KW

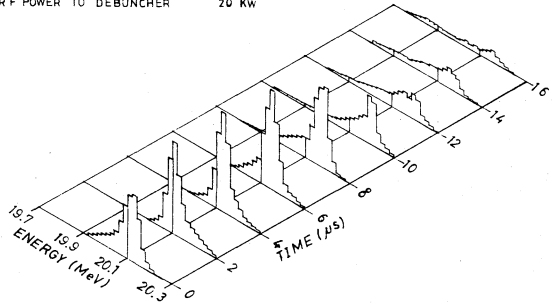
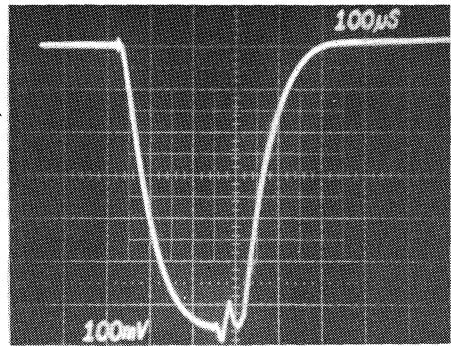


Fig 3 ENERGY SPREAD AT TYPICAL OPERATION



Beam loading effect
Fig 4 R.F level of linac tank.

Slit number : 9
Stacked electrode : 16 plate
Angular Resolution : 0.3 mrad
Angular Acceptance : ±2.4 mrad

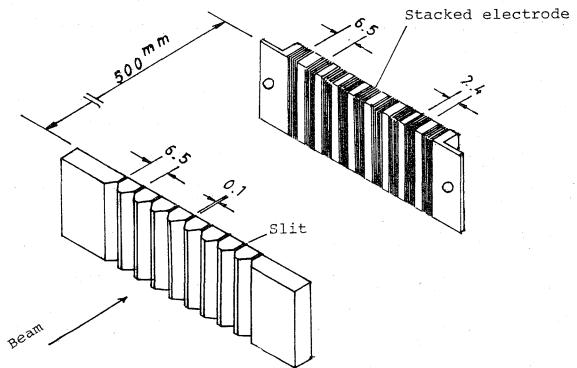


Fig 5 Multi Slit Emittance Monitor

Fig-6 は, electrode から signal を hold して Series to signal に変換したものを display したもので, 角度振りに於ける beam の current 分布を示している。Fig 7 は signal が emittance space に乗るよう処理して display したもので横軸が, Horizontal position で, 縦軸がその角度振りを表わしている。輝度のある point の total の emittance で, 1 point が normalized emittance $\beta \times X' = 0.0124 \pi \text{ cm mrad}$ になっている。

Beam の current ratio に対応する emittance は, 外部から輝度変調の Bias 電圧を変えることにより求めることが出来る。Fig 7 は Bias を 0.5 Volt にしその emittance を表わしたもので, Beam current が 100mA で 90% normalized emittance が $0.72 \pi \text{ cm mrad}$ であることを示している。Fig 8 は emittance と current ratio の関係を図表にしその一例を示したものである。

linear emittance は前段加速器部の operation の仕方によって大巾に変わっている。

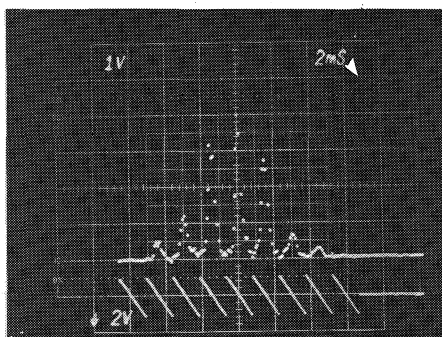


Fig 6 Beam current distribution on horizontal direction.

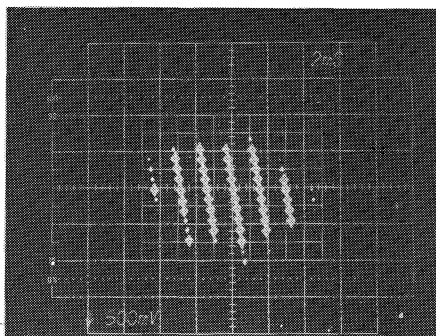


Fig 7 Emittance space
Bias:50, bright point:58, beam current: 100MA, 90% normalized emittance: $0.72 \pi \text{ cm mrad}$

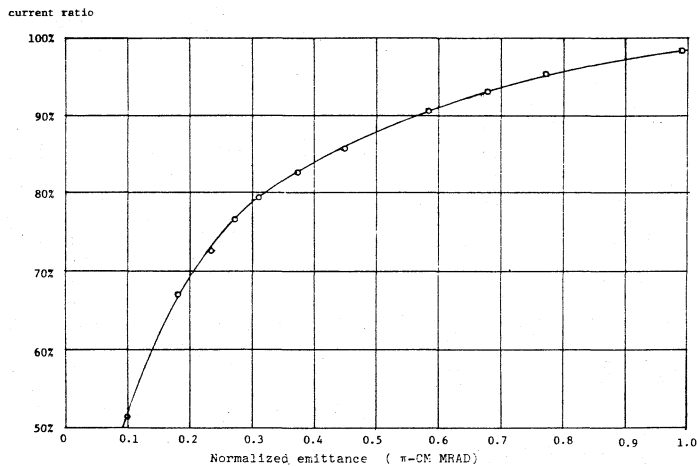


Fig 8 Horizontal direction emittance Beam current=116MA