

## LATTICE DESIGN OF MULTI-ENERGY INJECTOR LINAC FOR KEKB AND PF RING

Yukiyoshi Ohnishi\*, Mitsuo Kikuchi, Naoko Iida, Masanori Satoh,  
Kazuro Furukawa, Takuya Kamitani, Kazue Yokoyama, Yujiro Ogawa,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

### Abstract

We present a lattice design of the multi-energy injector linac for KEKB and PF ring. Recently, simultaneous injection to KEKB electron ring and PF ring has been proposed. The energy of KEKB electron ring is 8 GeV and 2.5 GeV for PF ring. In order to make continuous injection or top-up injection for the both rings simultaneously, it is necessary to transport two beams that have different beam energy. Fast phase-switch of the sub-booster rf and pulse-timing of each klystron can be utilized to adjust the appropriate beam energy since the solid-state phase shifters and timing system can be performed within 20 msec~1 sec in pulse-to-pulse basis. However, magnetic field for the focusing system can not change so fast. Therefore, the lattice with common magnetic field is necessary to transport beams of the different energy. The design of the lattice is discussed and the experimental results of the performance are reported.

### KEKB リングと PF リングのための異なるエネルギーに対応した 入射器ビーム光学系の設計

#### 1. はじめに

最近になって、KEKB 電子リングと PF リングへの同時入射が要求されている。KEKB は陽電子・電子衝突型加速器で、高いルミノシティを維持するためにビーム電流の減少分を連続的に入射器から 10 Hz のビーム繰り返しで補っている。こうした入射は continuous injection と呼ばれる。一方、PF リングは放射光実験施設電子貯蔵リングで continuous injection と同様に、放射光強度を一定に保つためにビーム寿命で減少したビームを入射器から実験中に補うことが検討されており、top-up injection と呼ばれる。このように双方の実験の性質上、同時にビームを入射する方法が必要とされている。ここで言う同時入射とは 1 つパルスで 2 つの異なるビームを加速し双方へ入射するのではなく、パルス毎にビーム・モードを切り替えて交互に入射することを目標としている。

KEKB 電子リングのエネルギーは 8 GeV、PF リングのエネルギーは 2.5 GeV である。従って異なるエネルギーのビームを損失なく入射器終端まで輸送することが要求される。また、KEKB 電子リングへの入射ビームの電荷量はパルス当たり 1 nC であり、PF リングに対しては 0.1 nC ないし 0.2 nC である。このように異なるエネルギーだけでなく異なる電荷量のビームにも対応できなければならない。入射器のビーム繰り返しは最大 50 Hz である。同時入射では 10 Hz を KEKB 電子リングへの入射に使用し、1 Hz のビーム繰り返しを PF 入射に使用する事が検討されている。従って、このようなビーム運転を実現するためには速いビーム・モード切り替えとビーム・ハンドリングが要求される。

入射器の 5 セクターには偏向磁石 (BM581) が設置

されており、入射ビームはこの偏向磁石により KEKB 電子リングへの輸送路または PF リングへの輸送路へと振り分けられる。現在、この偏向磁石は直流電流型電磁石であるが近い将来パルス電磁石へと交換される予定である。

本稿では異なるエネルギーのビームを輸送する方法を multi-energy linac と呼び、ビーム光学系の設計及びビーム実験で測定されたビーム光学系の性能について報告する。

#### 2. ビーム光学系

図 1 に入射器の鳥瞰図を示す。A セクターにある電子銃によって作り出された電子ビームはバンチングされた後 A、B セクターで 1.7 GeV のエネルギーまで加速される。その後ビームは 180°アークを通過する。KEKB 電子リングへビームを入射する場合、C から 5 セクターの間で 8 GeV まで加速される。PF 入射のために 8 GeV から 2.5 GeV のエネルギーにするためには、3 セクター前半のクライストロンをスタンバイ<sup>1)</sup>にして 3 セクター後半から 5 セクターまでのクライストロン位相を減速位相にする。実際には、個々のクライストロンの位相を動かすのではなくサブ・ブラスターに使用されている半導体移相器によって位相を動かす。2.5 GeV と 8 GeV とでは 3 セクターからエネルギーが異なり始める。2.5 GeV と 8 GeV のエネルギーの微調整は 5 セクターにあるエネルギー・フィードバック<sup>[1]</sup> によって行う。

収束系及び軌道補正の磁場については通常の直流電磁石を使用しているので速い磁場変更は不可能である。従って、同一の磁場の下で 2.5 GeV と 8 GeV のビームを輸送しなければならない。3 セクター以

\* Email: yukiyoshi.onishi@kek.jp

<sup>1)</sup>パルス・タイミングをビームから外す事。

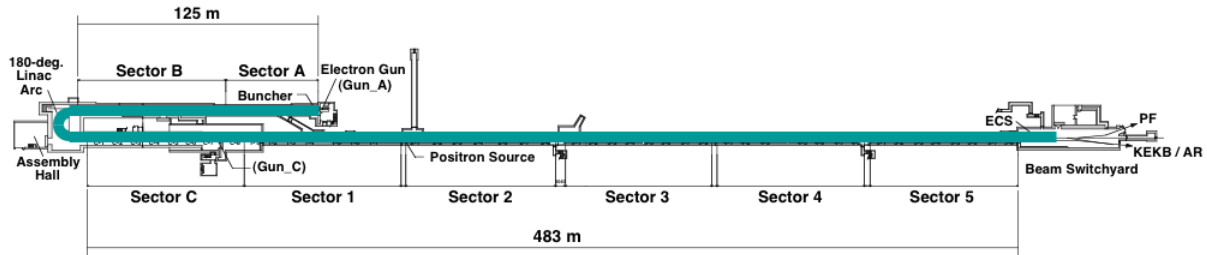


図 1: 入射器の鳥瞰図。

降のビーム光学系の設計については 2.5 GeV ビームを基本に考える。2.5 GeV オプティクスでは基本的にノーマル・セルのベータatron位相の進みを  $90^\circ$  としている。これによって 8 GeV オプティクスではノーマル・セルの位相の進みは約  $30^\circ$  となる。図 2 に C セクター以降のビーム光学系を示す。上段は 2.5 GeV オプティクス、中段は 8 GeV オプティクスのベータ関数を示し、下段はビーム・エネルギーを示す。入射器の四極磁石の配置は一部、収束型 (QF) と発散型 (QD) を組み合わせたダブレットのセルがあるが、ノーマル・セルの多くは QF を QD で挟むトリプレットである。これらの QD、QF の磁場の強さを調整してビーム光学系のマッチングを取る。ビーム光学系の計算には SAD (Strategic Accelerator Design)<sup>[2]</sup> と呼ばれる計算コードを用いた。SAD は KEKB、ATF、FFTB、ILC 等で幅広く使われている。

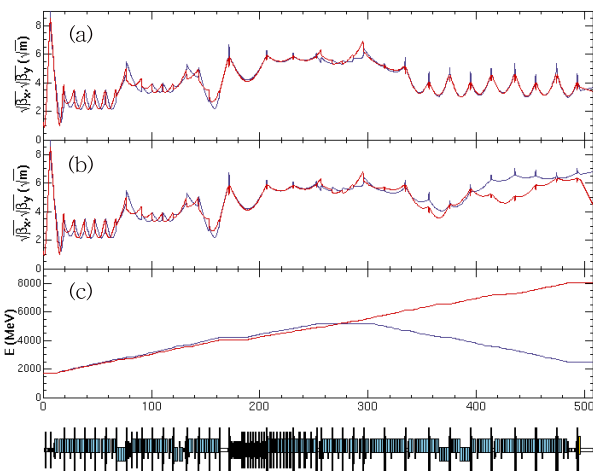


図 2: C から 5 セクターまでの (a) 2.5 GeV と (b) 8 GeV のオプティクス。青線は水平方向、赤線は垂直方向のベータ関数を示す。(c) ビーム・エネルギー。

### 3. ビーム実験

電子ビームの電荷量を 1 nC として C セクター入り口の Twiss パラメータを C セクターにあるワイヤースキャナー<sup>[3]</sup> で測定した。このビームライン入り口の Twiss パラメータをもとに下流に沿ってビーム光学系のマッチングを行う。まず、エネルギーを 2.5 GeV

付近となるように、3 セクター前半のクライストロンをスタンバイへ切り替え 3 から 5 セクターのサブ・ブースターを減速位相に設定した。減速位相を設定する場合、オン・クレスト位相にビームを乗せていれば  $180^\circ$  位相を変えればよいが、実際には進行方向のウエーク場の影響を考慮する必要がある。即ち、進行方向のウエーク場の影響によるバンチ後方のエネルギー低下をキャンセルするために約  $6^\circ$  ほどオフ・クレストに乗せている。従って、このオン・クレストからの位相のずれを  $\Delta\phi$  とすると減速位相は  $\phi_{dec} = \phi_{acc} + 180^\circ - 2\Delta\phi$  となる。収束系は 2.5 GeV オプティクスを設定し電子ビームを入射器 5 セクター下流のアナライザラインに導きエネルギーをスクリーン・モニターで確認しつつエネルギー・ノブ<sup>[1]</sup> によって微調した。2.5 GeV から 8 GeV ビームへの変更は収束系の磁場値は変更せず、クライストロンのスタンバイと加速パルス・タイミング、サブ・ブースターの位相調整のみで行う。

図 3 に 2.5 GeV ビームと 8 GeV ビームの軌道と電荷量の透過の一例を示す。図 3 では次に述べる軌道補正を行った後の結果である。軌道補正には BPM からのビーム位置測定をもとにステアリング磁石で補正する。 $i$  番めの BPM での軌道を  $\Delta x_i$  とし、 $j$  番めのステアリングの蹴り角を  $\theta_j$  とする。ステアリングから BPM までの  $2 \times 2$  転送行列の 1 行 2 列成分を  $R_{ij}$  とすると補正に必要なステアリングの積分磁場 ( $BL$ ) が次式より求められる。

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= R_{ij} \Delta \theta_j \\ &= \frac{e}{p_j} R_{ij} (BL)_j \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $p_j$  は  $j$  番目のステアリングでのビームの運動量である。 $\Delta x_i$  を 8 GeV と 2.5 GeV ビーム軌道の両方を合わせたベクトルとし、応答行列  $(e/p_j)R_{ij}$  も 8 GeV と 2.5 GeV の転送行列を合わせた行列を考え同時に SVD で両ビームに対する最小二乗解を求める。図 3 の軌道を見ると  $90^\circ$  と  $30^\circ$  というノーマル・セルのベータatron位相の進みの違いが見て取れる。このように multi-energy オプティクスの場合でも共通のステアリング磁場を用いた軌道補正が可能である。通常 PF 用 2.5 GeV ビームに要求されている電荷量は  $0.1 \sim 0.2$  nC であり、電荷量を設計値に設定しても結果はほとんど変わらないことを確認している。また、電荷量の透過率を見てもビームロスはほとんど問題なく、軌道も入射器下流の KEKB と PF 用の 2

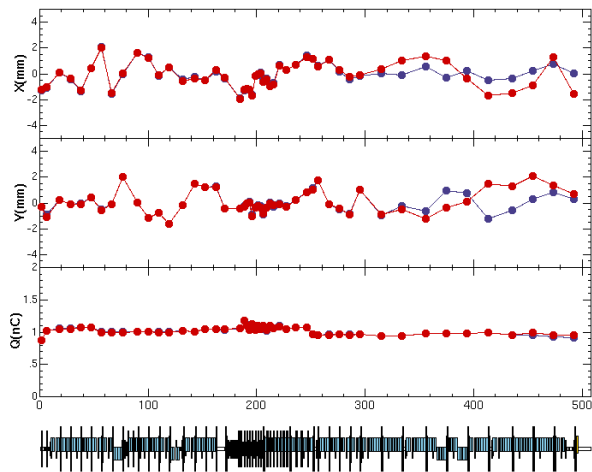


図3: 入射器 C から 5 セクターまでの軌道と電荷量。青線は 2.5 GeV、赤線は 8 GeV ビームの場合。

つのビーム輸送路において許容できる範囲に収まっている。

次に、入射器 5 セクターにてエミッタンス、Twiss パラメータを測定した。測定には 5 セクターに設置されているワイヤースキャナー 4 台を使用した。\$l\$ 番目のワイヤーで測定したビームサイズを \$\sigma\_l\$、\$l = 1 \sim 4\$ とし、ビームラインのある場所からそれぞれのワイヤーまでの \$2 \times 2\$ 転送行列の 1 行 1 列成分と 1 行 2 列成分を \$m\_{11,l}\$、\$m\_{12,l}\$ とする。残差の二乗和を

$$\chi^2 = \sum_{l=1}^4 \frac{1}{\sigma_{\Sigma_l}^2} \left( \Sigma_l - \sum_{k=1}^3 M_{lk} o_k \right)^2 \quad (2)$$

と定義する。ここで、\$\Sigma\$、\$o\$、\$M\$ は

$$\begin{aligned} \Sigma &= (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2) \\ o &= (\varepsilon\beta, \varepsilon\alpha, \varepsilon(1 + \alpha^2)/\beta) \\ M &= \begin{pmatrix} m_{11,1}^2 & -2m_{11,1}m_{12,1} & m_{12,1}^2 \\ m_{11,2}^2 & -2m_{11,2}m_{12,2} & m_{12,2}^2 \\ m_{11,3}^2 & -2m_{11,3}m_{12,3} & m_{12,3}^2 \\ m_{11,4}^2 & -2m_{11,4}m_{12,4} & m_{12,4}^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

である。\$\sigma\_{\Sigma\_l}\$ は \$\sigma\_l^2\$ の測定誤差である。残差の二乗和を最小にするように Twiss パラメータとエミッタンスを決定する。また、ビーム光学系の不適合の度合は

$$B_{mag} \equiv \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\beta}{\beta_0} + \frac{\beta_0}{\beta} \right) + \left( \alpha_0 \sqrt{\frac{\beta}{\beta_0}} + \alpha \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta}} \right)^2 \right\}$$

と定義される。\$\alpha\_0\$、\$\beta\_0\$ は設計値である。以上の方法により求めたビーム振り分け偏向磁石 (BM581) での Twiss パラメータと規格化エミッタンスを表 1 に示す。8 GeV、1 nC と 2.5 GeV、1 nC における規格化エミッタンス測定については測定誤差の範囲内で一致している。従って、減速位相によるエミッタンス増加は起きていない。2.5 GeV、1 nC と 2.5 GeV 0.2 nC を

表 1: Twiss パラメータとエミッタンスの測定結果。

E(GeV)	8	2.5	2.5
Q(nC)	1	1	0.2
\$\alpha_x\$	\$-0.4 \pm 0.2\$	\$0.2 \pm 0.2\$	\$0.1 \pm 0.1\$
\$\beta_x\$(m)	\$20 \pm 2\$	\$33 \pm 2\$	\$11 \pm 1\$
\$\alpha_y\$	\$0.2 \pm 0.4\$	\$2.7 \pm 1.3\$	\$3.1 \pm 0.7\$
\$\beta_y\$(m)	\$24 \pm 3\$	\$22 \pm 11\$	\$19 \pm 5\$
\$\gamma\varepsilon_x\$(μm)	\$96 \pm 13\$	\$110 \pm 16\$	\$1240 \pm 110\$
\$\gamma\varepsilon_y\$(μm)	\$77 \pm 22\$	\$43 \pm 20\$	\$52 \pm 11\$
\$B_{mag,x}\$	1.4	1.9	1.0
\$B_{mag,y}\$	1.2	2.8	3.6

比較すると垂直方向の規格化エミッタンスは一致しているが水平方向の規格化エミッタンスについて 0.2 nC の方が約 10 倍増大している。この原因としては、加速および減速位相の調整が不十分であったことが考えられる。今回、加速および減速位相は 0.2 nC と 1 nC で同じ位相で行った。その結果、電荷量の違いによりウエーク場の影響が変わったためにバンチ後方のエネルギーロスが軽減されビームエネルギーの均一化が崩れ、水平方向のステアリング等によって作られた分散によって水平エミッタンスが増大して見えていたと推測される。加速管、収束磁石の設置は一般的に垂直より水平方向の方が誤差が大きいと考えられるためステアリングによる分散が生じやすく水平エミッタンスの増大が顕著に現れていると考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では 2.5 GeV と 8 GeV のビームを輸送する入射器のビーム光学系について紹介した。エネルギー変更には半導体移相器によるサブ・ブースターの位相変更とクライストロンの加速・スタンバイの切替えを利用する。収束系については磁場変更は行わない。加速と減速を行うセクターではノーマル・セルのベータatron位相の進みを 2.5 GeV では \$90^\circ\$ となるようにマッチングを取る。その結果、8 GeV で約 \$30^\circ\$ となりベータ関数を両方のエネルギーで適度な大きさに抑えることができている。軌道補正についても、2.5 GeV と 8 GeV のビームに関して許容範囲内に抑えられる解が存在する。電荷量の透過率についても、ほとんど損失がみられない。エミッタンスも 2.5 GeV と 8 GeV ビームについて基本的に問題ないと思われるが 0.2 nC ビームについては調査が必要である。ビーム光学系の不適合の度合はワイヤースキャナーの測定をもとに C セクターの四極磁石を使ってマッチングを取ることによって下流へのビームラインへの接続を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, ICALEPCS '99, p.248-250.
- [2] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>.
- [3] N. Iida *et al.*, EPAC 2000, p.1738-1740.