

## ENERGY-SPREAD ESTIMATION FOR KEKB INJECTOR LINAC

T. Kamitani, F. Hanaki, A. Enomoto, S. Ohsawa, Y. Ogawa, J-Y Choi, H. Kobayashi

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

### ABSTRACT

This paper reports a realistic estimation of beam energy-spread for KEKB injector linac. The spread was estimated using a simulation including the initial particle distribution in longitudinal phase space, the jitters of RF system, magnetic (de)bunching in non-isochronous system. Stress is put upon the improvement of the spread by the magnetic bunch compression system and the energy-spread compression system.

### KEKB 入射ライナックのビームエネルギー幅の評価

#### 1. 始めに

現在 KEK 2.5GeV 電子陽電子ライナックは KEKB 計画のために改造を行っており、敷地の制限内で既存設備を最大限有効利用するために J 字型のライナックとなる [1]。電子ビーム (電荷量 1 nC) はまず 1.5 GeV まで加速し、そこで 180 度偏向させてさらに 8.0 GeV まで加速して電子蓄積リングへ入射する。陽電子については、まず電子銃からのビームを大電流電子ビーム (10 nC) に切り替え、同様に 1.5 GeV まで加速し、そこで 180 度偏向させてさらに 3.7 GeV まで加速して金属標的に当てて陽電子を生成させる。これを強いソレノイド磁場で集束し、さらに 3.5 GeV まで加速して陽電子蓄積リングへ入射する。この KEKB において、蓄積リングへの入射ビームのエネルギーアクセプタンスは途中の輸送系の制約より、電子、陽電子とも  $\sigma_E/E = 0.125\%$  の  $\pm 2\sigma_E$  以下と要請されている。これはこれまでの TRISTAN AR への入射の場合の約半分と厳しくなっている。特に陽電子ビームについては、電子ビームに比べてバンチ長が長いことエネルギー幅が大きくなり問題となる。これは陽電子生成に用いる電子ビームは入射用電子ビームより約 10 倍電荷量が大いいため、前段入射部での RF バンチングによるバンチの長さがあまり短くならない事に加えて、金属標的で生成された陽電子がソレノイド磁場で集束される際に速度差とらせん運動の軌道長差によりバンチ長が伸びるためである。

そこで陽電子については以下のような対策を取ることにした。(1) まず陽電子のバンチを短くするためにはそれを生成する電子のバンチを短くすればよい。しかし前段入射部での RF バンチングには限界があるので、標的を照射する直前で電子ビームのバンチの長さを磁気バンチ圧縮系を用いて短くする (Bunch Compression System: BCS)。それに加えて、(2) 加速している間はバンチは短いほうがよいが、リングへの入射に関してはバンチがある程度長くてもよい ( $\pm 10\text{mm}$  以下) ことを利用して、ライナック終端部でバンチ長を倍に伸ばすかわりにエネルギー幅が半分になるように縦方向位相空間内の分布を変

形させる (Energy Compression System: ECS)。この論文では粒子シミュレーションによりビームのエネルギー幅を評価し、またこれらの対策によりそれがどの程度改善されるかについて議論する。

#### 2. ビームのエネルギー幅

ビームのエネルギー幅をきめる一番重要な要素は加速する前の初期エネルギー拡がりやバンチ長さである。しかし、KEKB 入射ライナックの場合、初期ビームエネルギー拡がり値 (電子:  $\pm 1\text{ MeV}$ 、陽電子:  $\pm 3\text{ MeV}$ ) は最終エネルギー (電子: 8000 MeV、陽電子: 3500 MeV) に比べて小さいのであまり問題にならない。それより、ビームが加速マイクロ波の波長 (105mm) に対して無視できないバンチ長さ (位相にして電子で約 5 度、陽電子で約 20 度) を持つため、バンチの各部分で加速位相が異なることによるエネルギー拡がりが重要である。またバンチの電荷量が大い場合、バンチ内の後方にある粒子が前にいる粒子の作る減速方向の電場 (縦ウエーク場) の影響を受け、バンチ内のエネルギー分布が変形する効果も効いてくる。これに加えて、ライナックは 50 Hz の繰り返してパルス運転するがパルスごとの RF 系の変動により加速電界や加速位相にジッターを生じるため、加速されたビームのエネルギーもパルスごとに変化する。この変動は実効的にはエネルギー幅の増大と同じように見える。

これらの影響を考慮し、なるべく現実的なエネルギー幅の評価を行うために、バンチ内の各粒子が受ける加速エネルギーをシミュレーションによって計算した。まず初期の縦方向位相空間の分布 (横軸: 粒子の進行方向の位置、縦軸: 粒子のエネルギー) は、電子ビームについては電子銃と RF バンチングセクションの性能で決まるので、PARMELA コードによるバンチングシミュレーションで求めたものを用いる [2]。これらの初期分布に対して RF 加速の影響を各粒子の位置に応じた加速位相での加速エネルギーを RF 電界は正弦波として求め、それを各加速ユニット分足しあわせた。ちなみに、KEKB ライナックで

は加速ユニットが57あり、各ユニットは一つのクライストロンとそれからRFを供給される2m加速管4本よりなり、SLED空胴を使用して約160 MeV/unitの加速を行う。これらのユニットは8つのセクターにグループ分けされ、一つのセクターに属するクライストロン(4~8台)は同じサブプースター励振系より基準RF信号の供給を受ける。なおRF系のジッターで重要なものには以下のようなものがある[3]。まず(1)各クライストロンのパルス変調器の電圧変動(+/-0.15%)からくるRFパワーの変動による加速電界強度の変動:+/-0.19%、(2)同じ原因からくるクライストロンのRF出力の位相変動:+/-0.65 deg、なお(1)と(2)には相関がありそれも考慮している、(3)サブプースター励振系の基準RF信号の位相変動:+/-0.22 deg、これはそのセクターに属する全てのクライストロンに同じ変動を与える、(4)ビーム誘起波を用いて行うビームタイミングに対する各クライストロンの位相調整の誤差:+/-2.0 deg、(5)電子銃+RFバンチング部での変動によるビームタイミングのジッター(+/-1.0 ps)、これは下流の全てのユニットに対する位相変動:+/-1.0 degとなる。これらの変動要因については乱数を用いてその影響を組み込んでシミュレーションした。また縦ウエーク場の影響についてはその電界分布の形としてはWilsonの式[4]を用いて計算した。なお、この影響によりバンチの後の方がエネルギーが低くなるようにエネルギー分布が変形するので、これを相殺させるように加速位相の頂上から少し(5~10 deg)はずしてバンチの後の方ほど加速量が大きくなるようにする。

さて、入射電子ビームについて初期ビームの分布とライナック終端での分布を示す(Fig.1、Fig.2)。Fig.2で分布の右が縦方向に扇状に広がっているのは、主に位相変動のためウエーク場の影響と加速位相の肩での傾きの相殺

がずれるためである。エネルギー幅はリングへの入射アクセプタンスより少し広いがほぼ問題ない程度に収まっている。

次に陽電子ビームについては、それを生成するための大電流電子ビームのバンチ長がまず問題となる。その初期ビームの分布をFig.3に示す。電荷量が大いのでクーロン反発力のためRFバンチングしにくく、バンチ長が長くすそを引いている。これを約3.5 GeVまで加速して金属標的に当てて陽電子を生成させるが、それをソレノイド磁場で集束する際に速度差とらせん運動の軌道長差によりバンチ長が伸びる。これはソレノイド磁場の強さや加速電界の強さで決まるので、これは別途陽電子集束の粒子トラッキングシミュレーションを行って求めた[5]。この陽電子の初期ビーム(Fig.4)について、先程と同様にRF加速とそのジッターの影響を考慮して求めたライナック終端での陽電子ビームの分布をFig.5に示す。リングへの入射アクセプタンスによりずいぶん広いのがわかる。このままではライナックで加速した陽電子のうち4分の1以下しかリングには入射されないことになるので対策が必要となる。その対策について次節で述べる。

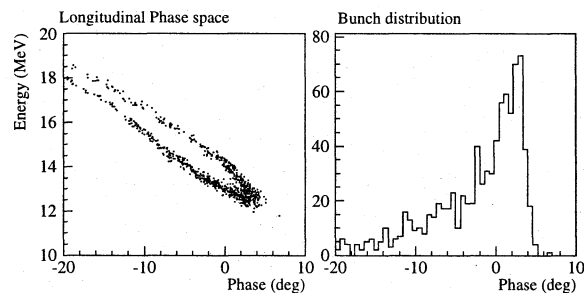


Fig.3 陽電子生成用電子ビームの初期分布

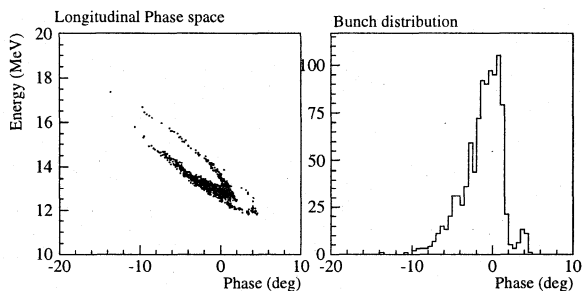


Fig.1 入射用電子ビームの初期分布

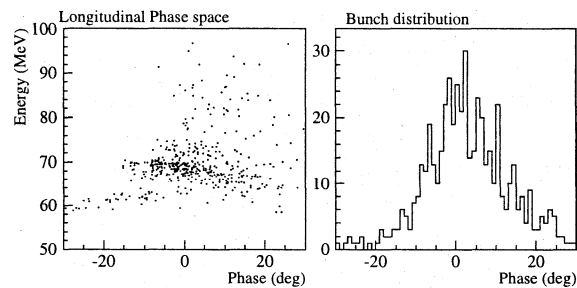


Fig.4 陽電子ビームの初期分布

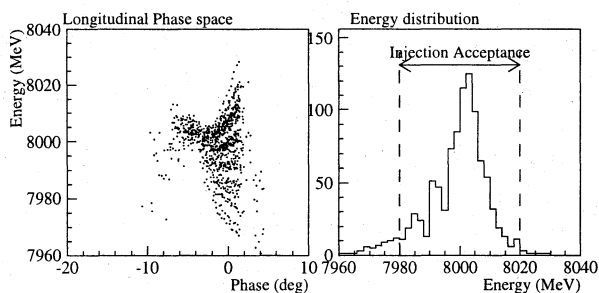


Fig.2 入射用電子ビームの最終分布

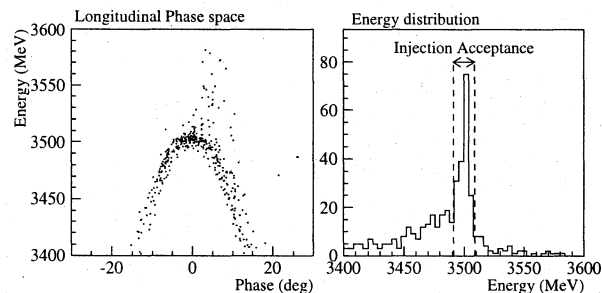


Fig.5 陽電子ビームの最終分布

### 3. BCS、ECS による陽電子エネルギー幅の改善

このようにこのままでは陽電子ビームのエネルギー幅は大きすぎるため2つの対策を取る。まずその一つが陽電子生成のための大電流電子ビームのバンチの長さを圧縮する BCS (Bunch Compression System) である。これにより縦位相空間内での分布をエネルギー幅を大きくするかわりにバンチ長さが短くなるような変形を生じさせる。これを行うためにまず180度偏向部以降の14台の加速ユニットにおいて加速位相の肩(例えば30 deg)で加速す

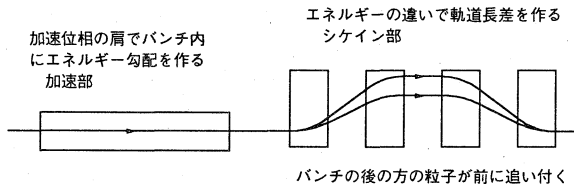


Fig.6 BCS の概念図

ることで、バンチの前よりも後の方がエネルギーが高くなるような勾配を作る。次に Fig. 6 のような偏向電磁石4台よりなるシケイン部 ( $R_{56} = -0.78 \text{ mm}/\%$ ) を通過させるとエネルギーの高い粒子ほど近道を通るのでバンチの後の方にいる粒子が前に追いつき、結果としてバンチ長が短くなる (Fig.7)。ただし、これにより電子ビームのエネルギー幅は大きくなるが、これを金属標的に照射して生

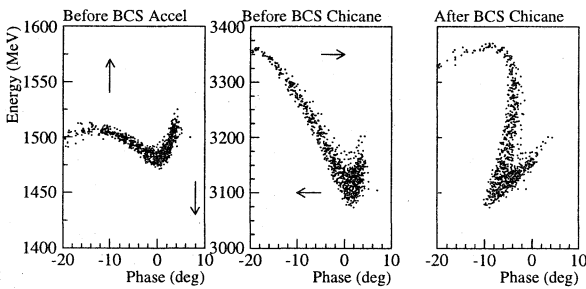


Fig.7 BCS による位相空間分布の変化

成される陽電子のエネルギー分布はこれにはほとんど依存しない。一方、陽電子のバンチ長さは元の電子のバンチ長さを反映するので BCS を用いることは効果的である。こうして得られた陽電子ビームの初期分布を Fig.8 に示す。これにはソレノイド収束系でのバンチの伸びが含まれている。Fig.4 の BCS を用いない場合に比べてバンチが短くなっているのがわかる。

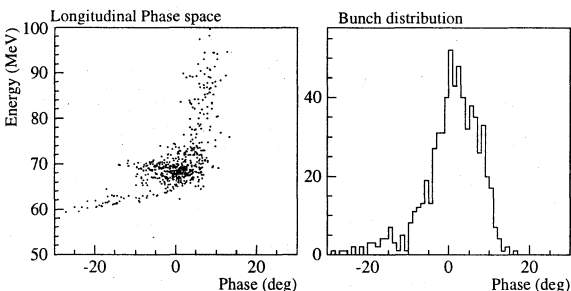


Fig.8 BCS を用いた場合の陽電子の初期分布

次にライナックの終端において BCS とは逆にバンチを長くするかわりに陽電子のエネルギー幅が小さくなるよ

うな変形を生じさせるのが ECS (Energy Compression System) である。ここではまずシケイン部 ( $R_{56} = -9.2 \text{ mm}/\%$ ) を通過させてバンチ内の前後の位置とエネルギーに相関を持たせる、次に加速部 (電界:  $20 \text{ MV}/\text{m}$ ) でこのエネ

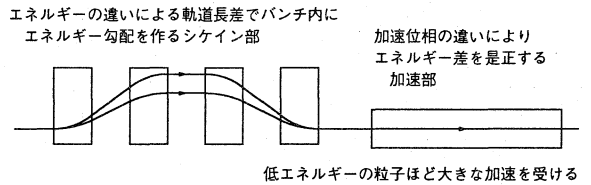


Fig.9 ECS の概念図

ギー勾配を是正するような加速(或いは減速)を行う (Fig.9、Fig.10)。

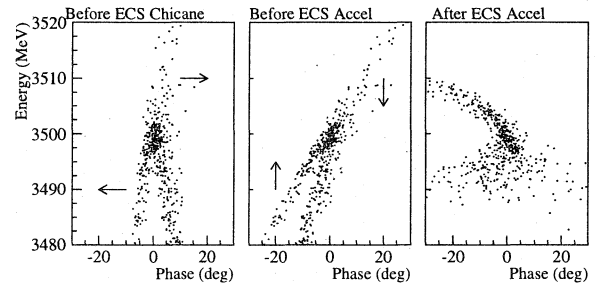


Fig.10 ECS による位相空間分布の変化

今度はこれにより陽電子のバンチ長が伸びるが、リングへの入射についてバンチ長さについてのアクセプタンスは位相にして全幅で  $60 \text{ deg}$  と比較的ひろいので問題ない。こうして得られた陽電子ビームのライナック終端でのバンチとエネルギー分布を Fig. 11 に示す。このように、入射アクセプタンスにはほぼ収まる程度にエネルギー幅が改善された。

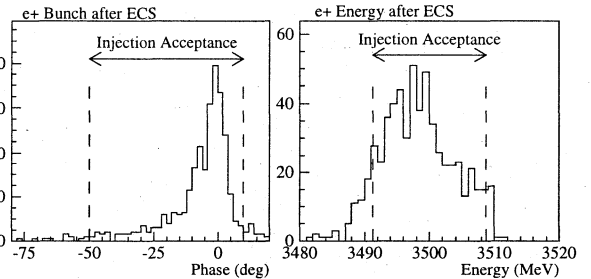


Fig.11 BCS+ECS を用いた場合の陽電子の最終分布

### 4. まとめ

RF系のジッター、縦ウエーク場の影響を含んだシミュレーションによりビームエネルギー幅の評価を行い、電子については問題なく、陽電子についても BCS、ECS を用いて改善することで入射アクセプタンスに収まるようにすることができると示された。

### 5. 参考文献

- [1] KEK Report 95-18 「放射光入射器増強計画」
- [2] J-Y. Choi et al., ライナック研究会 '95, p182
- [3] F. Hanaki, KEK Report 95-18, p188
- [4] P. B. Wilson, SLAC-PUB-2884
- [5] T. Kamitani et al., ライナック研究会 '95, p142
- [6] T. Kamitani et al., ライナック研究会 '91, p298