

ENERGY EQUALIZATION BY USING S-BAND AND X-BAND ACCELERATOR MODULES

Kazue Yokoyama¹, Takuya Kamitani

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

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

Abstract

To reduce the beam loss and to restrict the expanse of the bunch length of the positron beam from the KEKB injector, the energy spread of $\pm 0.25\%$ or less is required for the beam transport line of the KEKB ring. Generally, the positron beam has a large energy spread because the original bunch length is large and all positrons do not see the same accelerating field. Thus, an energy compression system which consists of six rectangular magnets and two 2-m S-band accelerating structures is implemented at the end of the linac but it has a demerit that the beam bunch is lengthened. We propose a new method to suppress the energy spread without enlarging the bunch length. This method utilizes the superimposed acceleration fields of the S-band modules and X-band modules.

S-BANDとX-BANDを用いたビームエネルギーの均一化

1. はじめに

KEKB入射器では、リングへのビーム輸送路でのビーム損失とバンチ長を抑えるために、 $\pm 0.25\%$ 以下のエネルギー拡がりが必要されている[1]。生成後の陽電子ビームはバンチ長が大きいので加速する間にエネルギー拡がりが大きくなる。このエネルギー拡がりを小さくする方法として、入射器の最後でエネルギー圧縮系(ECS: energy compression system)を用いているが、この方法だとバンチ長が伸びるというデメリットがある[2]。そこで、バンチ長を変えずにビームのエネルギー拡がりを抑える方法の1つとして、違う周波数の加速ユニットを用いた補正加速によるビームエネルギーの均一化を考案した。ここでは、現在のビームラインのS-band加速ユニットにX-band加速ユニットによる補正加速を用いた場合の陽電子ビームのエネルギー拡がりの圧縮について検討する。

2. 違う周波数の加速によるエネルギー圧縮

ビームのエネルギー利得は、最終的に必要とするビームのエネルギーを E_{e^+} とすると、近似的には

$$E_{total\ gain} = E_{e^+} \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_s}) \quad (1)$$

と表せる。 z はビーム進行方向の距離、 λ_s はS-band加速高周波の波長である。バンチの中心から離れる粒子ほど低いエネルギーゲインが与えられ、バンチ長が長い陽電子ではエネルギー分布が広がる。これを補正するためには、バンチの中心から離れるほど高いエネルギーゲインを与えればよい。補正関数は、 \cos のTaylor展開の2次の項までをとると、

$$E_{equalizer} = E_{e^+} - E_{e^+} \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_s}) \approx \frac{1}{2} E_{e^+} (2\pi \frac{z}{\lambda_s})^2 \quad (2)$$

と表せ、 z の2乗に比例する。S-bandと違う周波数帯を同じエネルギーゲイン ΔE にして重ね合わせてこのような補正関数を作ると、

$$\begin{aligned} E_{equalizer} &= \Delta E \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_s}) - \Delta E \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_a}) \\ &= \Delta E \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_s}) - \Delta E \cos(2\pi \frac{z}{\lambda_s} \times k) \\ &\approx \Delta E \times \frac{1}{2} (2\pi \frac{z}{\lambda_s})^2 (k^2 - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。 λ_a は補正加速に使用する加速高周波の波長で、 $\lambda_s = k \lambda_a$ とした。この次数についてのエネルギー拡がりを完全にキャンセルするのに必要なエネルギーは、式(2)と式(3)より、

$$\Delta E = \frac{E_{e^+}}{k^2 - 1}$$

となる。図1にKEKB入射器の1ユニット分 $\Delta E = 160\text{MeV}$ とした場合の周波数によるエネルギーゲインの違いを示す。同じエネルギー補正量で比較すると、周波数が高い方がエネルギー拡がりの圧縮効果が得られる。例えば、C-band ($k=2$) 加速ユニットを3.5GeVのKEKB陽電子のエネルギー拡がりの圧縮に使用した場合は約1166MeV必要になるが、X-band ($k=4$) 加速ユニットを使用する場合は約233MeVで済む。それ故、X-band加速ユニットを使用する方が、スペース面やコスト面においてもより現実的である[3]。また、X-band加速管のアーチャーはS-bandの4分の1程度に小さいが、現在のビームエミッタンスから考えるとビーム収束系の部分的な強化によりビームロスが起きないように対処することができる。

¹ E-mail: kazue.yokoyama@kek.jp

一方、図1からも分るように、高い周波数では高次の項の影響がでてくる。

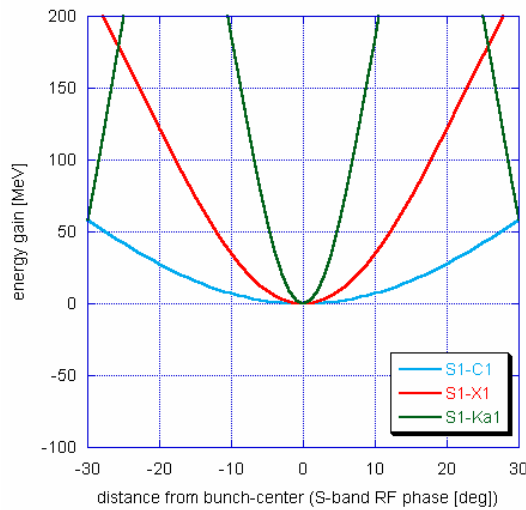


図1：同じエネルギー補正量で比較した場合の、周波数の違いによるエネルギー利得。下から順にS-bandにC-band (k=2)、X-band (k=4)、Ka-band (k=10)を重ね合わせて作成した補正関数を示す。

3. ビームシミュレーションと結果

3.1 ビームシミュレーションの方法

KEKB入射器現在のビームライン構成で、陽電子生成装置直後[4]の粒子をガウシアン分布と仮定し、以下の基本式でのビームエネルギー分布のシミュレーションを行った。

$$E_{total\ gain} = \sum_{i=1}^n E_i \cos(2\pi \frac{z_j}{\lambda_s} + \phi_i) \quad (4)$$

ここで、 z_j はバンチセンターからの粒子のビーム進行方向距離、 E_i は各S-band加速ユニットのエネルギーゲインを、 ϕ_i は各ユニットのビーム加速位相である。

初期粒子の中心エネルギーは11MeV ($1\sigma \sim 2\text{MeV}$)、バンチ長はFWHMで20ps、粒子数は 10^4 とした。この粒子が、25個のユニット(内1個は100MeV、他は160MeVで内2個はエネルギー調整用)によってlinac終端まで加速される。

3.2 ECSによるエネルギー拡がりの圧縮

KEKB入射器においては、現在、エネルギー拡がりを小さくする方法として入射器の最後でエネルギー圧縮系(ECS)を用いている。ECSはシケイン型のビームラインで6つのRectangular型偏向電磁石とS-bandの2m加速管2本からなる。エネルギーの違った粒子がシケインを通過した場合、各々の軌道長が変化する。デザイン粒子よりエネルギーの高い粒子は、進行方向の移動距離が遅れ、逆に低い粒子は進行方向の移動距離が進む。ECSではこのようにまずバンチ長を伸ばし、後ろの加速管で高周波の肩

にビームを乗せることによってビーム進行方向の位置の違いによりエネルギー差を取り除く。図2にECSを通過前後の粒子数のバンチ分布を示す。この図より、ECSを通過した後の粒子のバンチ長は伸びることがわかる。また、ECSはシケインを構成している偏向電磁石の磁極幅から決まるビームダクトの径(60mm)によって通過できるエネルギー拡がりに制限がかかるため、すべての粒子がエネルギー圧縮を受けるわけではない。図3に、ECS通過前後の粒子のエネルギー分布を示す。Linac終端(ECS通過前)での粒子の割合は44.2%であり、ECSによって74.1%の粒子が $\pm 0.25\%$ のエネルギー拡がりに収容される。しかし、リングからの要求を満たすバンチ長さのアクセプタンスは $\pm 6\text{mm}$ ($\sim \pm 2\sigma$)であるため、最終的にアクセプタンスを満たす粒子の割合は65.2%である。

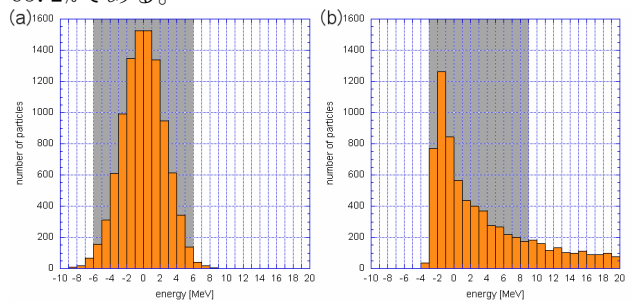


図2：入射器ECS通過前後の粒子のバンチ分布。(a)通過前、(b)通過後。灰色の領域が $\pm 6\text{mm}$ のアクセプタンスに相当する。

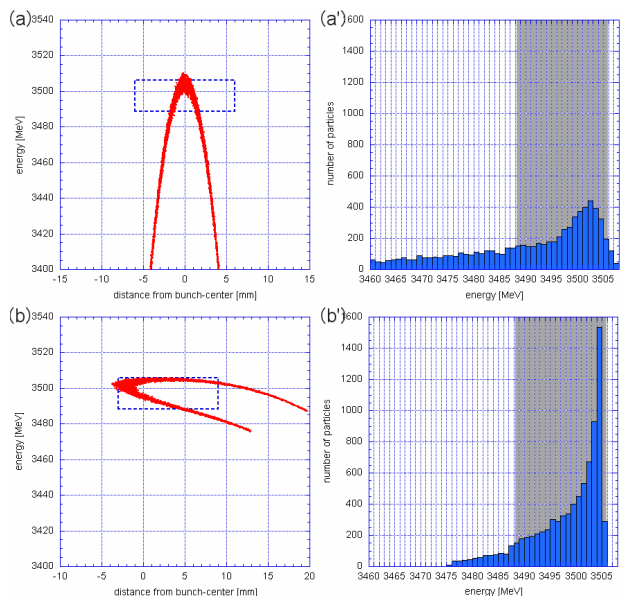


図3：入射器ECS通過前後の粒子のエネルギー分布。(a)はECS通過前のバンチの長さに対するエネルギー分布、(a')はエネルギーに対する粒子数を示す。(b)はECS通過後で同様に、バンチの長さに対するエネルギー分布とエネルギーに対する粒子数を示す。点線領域がアクセプタンスに、灰色の領域が $\pm 0.25\%$ のエネルギー拡がりに相当する。

3.3 補正加速による陽電子ビームのエネルギー拡がりの圧縮

違う周波数の加速ユニットを用いて補正加速を行う方法では、バンチ長を変えずにビームエネルギーの均一化を行うことができる。KEKB入射器においての現在のビームラインのS-band加速ユニット3.5GeVに補正加速を用いた場合の陽電子ビームのエネルギー拡がりについてシミュレーションを行った。補正加速を与える関数は(3)式で示したように、S-band加速ユニットとX-band加速ユニットを同じエネルギーゲインにして重ね合わせることで得られる。

図4に補正加速を使用した場合のlinac終端での粒子のエネルギー分布を示す。±0.25%のエネルギーアクセプタンスに入る粒子数の割合は、補正加速を利用しない場合は図3(a)で示したように44.2%であるが、補正加速(233MeV)を利用することにより92.6%に改善される。

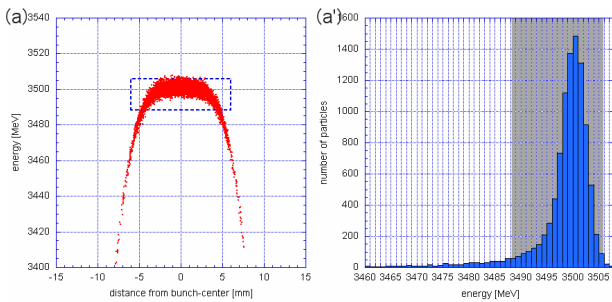


図4：X-bandの補正加速を使用した場合のバンチの長さに対するエネルギー分布と各エネルギーに対する粒子数。

3.4 ジッターによるエネルギー拡がりへの影響

次に、加速高周波の変動によるエネルギー変動を考慮した。エネルギー変動は、式(4)の ϕ_1 にサブブースターの位相変動とクライストロンの位相変動を、 E_1 にクライストロンのパワー変動を入れることによって、概ね計算できる。S-bandのサブブースター出力位相変動は±0.1%、クライストロン出力位相変動は±0.63°、クライストロン出力パワー変動は±0.375%とし、乱数を与えてシミュレーションを行った[5]。X-bandに関しては、S-bandと同様の変動を仮定した。計算は5回行い平均をとった。

表1にシミュレーション結果をまとめる。S-bandユニットのみの加速についてのシミュレーション結果ではジッターがないときに比べて0.8%粒子数が減少している。X-bandに関しては、ジッターがない場合に比べて粒子数は約2%減少し、これはS-bandのみの加速の約2.5倍影響が大きい。これは、X-bandのクライストロン出力位相変動のジッターが大きく効いているからだと思われる。例として、X-bandのクライストロン出力位相変動を-2.5°と大きくずらし

た場合(S-bandのrf変動の約4倍)のシミュレーション結果を図5に示す。この場合、アクセプタンスに入る粒子数は約80%に減少する。この位相量は、タイミングジッターの0.6psに相当するので、今回は入射部からの入射ビームタイミングジッターに関してはシミュレーションで考慮していないが、今後検討する必要がある。

4. まとめ

S-band、X-bandの加速ユニットによる加速と減速の重ね合わせによって、ビームエネルギーの均一化が可能であることがシミュレーションにより確かめられた。この結果は、従来のECS方式よりもエネルギー拡がり及びバンチ長さともに改善される。

表1：シミュレーション結果のまとめ。

	S-band加速とECSの組み合わせ[%]	X-bandの補正加速を用いた場合 [%]
ジッターなし	65.2	92.6
ジッターあり	64.4	90.6

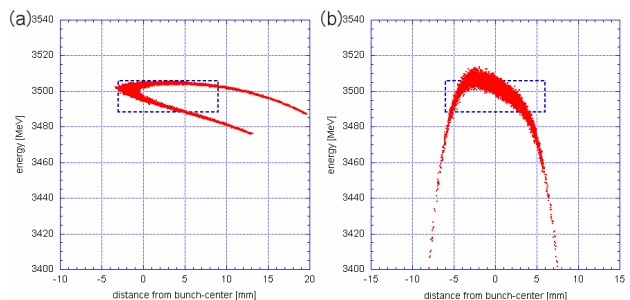


図5：ジッターを考慮した場合の粒子のエネルギー分布。(a)はS-bandのみの加速でECSを通過後の粒子のエネルギー分布、(b)はX-bandによる補正加速を使用した場合で、X-bandのクライストロン出力位相を-2.5°ずらした例。

参考文献

- [1] KEKB B-Facility Design Report, KEK Report 95-7, (1995) pp12-27 - 12-31.
- [2] Y. Ogawa, et al., "Commissioning of the KEKB Linac", Proceedings of the linac98, Chicago, USA, August 23 - 28, (1998) pp711 - 715. URL: <http://www.aps.anl.gov/conferences/LINAC98/papers/WE2005.pdf>.
- [3] 肥後 寿泰他, "常伝導リニアコライダー型加速管の高電界試験結果と今後の基礎試験展望", in these proceedings.
- [4] 紙谷 琢哉, 陽電子源, OH02002, (2002) pp19 - 23. URL: <http://acc-physics.kek.jp/OH/OH02/LectureNotePDF/PositronSource.pdf>.
- [5] 佐藤 勇他, 放射光入射器増強計画, KEK Report 95-18, (1996) pp188 - 196.