

SuperKEKB 入射器用低エミッタンス・高電荷電子ビームに向けた バンチ内時間構造制御

TEMPORAL MANIPULATION OF LOW EMITTANCE AND HIGH CHARGE ELECTRON BEAM FOR SUPERKEKB INJECTION

吉田 光宏^{#,A)}, 夏井 拓哉^{A)}, 周 翔宇^{A)}, 小川 雄二郎^{A)}, 杉本 寛^{A)}, 飯田 直子^{A)}, 臧 磊^{A)}, 佐藤 政則^{A)}
Mitsuhiro Yoshida^{#,A)}, Takuya Natsui^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}, Naoko Iida^{A)},
Lei Zang^{A)}, Masanori Sato^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Organization (KEK)

Abstract

The KEKB injector upgrade is required to obtain the low emittance and high charge beam corresponding to the short beam life and small injection acceptance of the SuperKEKB ring. The required beam parameters are 5 nC, 20 mm mrad and 4 nC, 6 mm mrad for the electron and positron respectively. For the electron beam, we installed new photocathode RF-Gun with the focusing electric field and temporal adjusting laser system. Further the projected emittance dilution in the LINAC is an important issue for the low emittance injection. The longitudinal bunch length and shape is an important key to avoid the space charge effect and the emittance dilution. The longitudinal manipulation using the temporal adjusting laser system, the bunch compression and the bunch flip will be required.

1. はじめに

SuperKEKB では非常に高いルミノシティを得るため、低エミッタンス化によるダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少はやむを得ない。これに対応して電子陽電子入射器も高電荷・低エミッタンスの電子源として、RF 電子銃の導入を進めている。KEKB-HER への電子入射の要求は、5nC の電荷において Y 方向の規格化エミッタンスが 20mm・mrad、エネルギー分散も 0.1% である。RF 電子銃からのビームは 5nC の電荷では、20ps で 6mm・mrad のエミッタンスが最適であり、このビームを途中の輸送系等も含めて入射の要求値を満たさねばならない。加速管の横方向ウエーク場による横方向の射影エミッタンスの増加はバンチ長が短い程小さくできるが、縦方向ウエーク場によるエネルギー分散は 10ps 程度が最適である。これらを満たすような条件として、時間方向のバンチ構造をレーザーの時間構造の制御によりガウシアン分布ではなく矩形波にし、全幅で 20ps を 10ps に圧縮した後、ビームを 1.6GeV のアーク部まで輸送し、アーク部でさらに 4ps に圧縮する事を検討している。さらに 4ps に圧縮するとエネルギー分散が大きくなるため、時間反転を行う検討を行った。これらのレーザーの時間構造制御及びビームオペティクスによる時間構造制御が重要となる。

2. 要求性能

SuperKEKB の入射に必要な電子ビームの要求性能は表 1 に示す通りである。KEKB 運転時と比較するとバンチ電荷は 5 倍で、エミッタンスは 20mm・

mrad が必要である。さらに HER ではシンクロトロン入射を採用しており、0.1% のエネルギー分散が必要である。

Table 1 : Required parameters for SuperKEKB

	KEKB(e ⁺ /e ⁻)	SuperKEKB(e ⁺ /e ⁻)
Beam Energy	3.5 / 8.0 GeV	4.0 / 7.0 GeV
Bunch Charge	1.0 / 1.0 nC	4.0 / 5.0 nC
Normalized vertical Emittance (1σ)	2100 / 300 mmmrad	6 / 20 mm mrad
Energy Spread	0.1 %	0.1 %

3. 横方向及び縦方向ウエーク場の相関

ビームの軌道を適切な調整した後、5nC の高電荷では、横方向エミッタンスの増加の主な原因となっているのは加速管のミスアラインメントによる横方向ウエーク場である。またエネルギー分散は縦方向ウエークと RF の位相によって決まる。横方向ウエーク場を減らすには、アラインメントと短いバンチ長が重要である。しかし短いバンチ長は強い縦方向ウエーク場を誘起し、エネルギー分散が大きくなる。従って横方向エミッタンスとエネルギー分散の要求の双方を満たすには、バンチ長を的確に選択する事が重要となる。

[#] mitsuhiro.yoshida@kek.jp

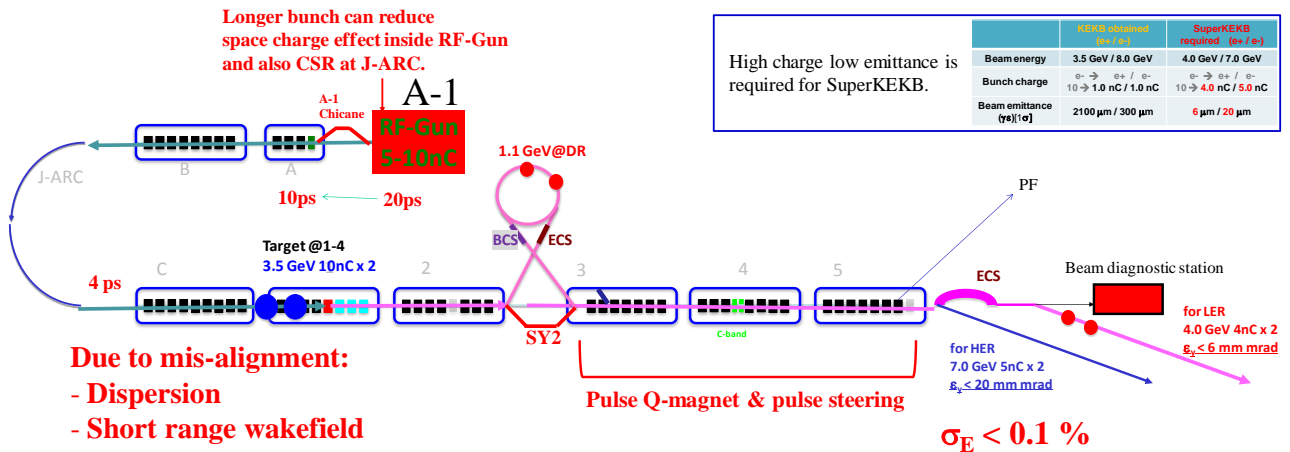


Figure 1: KEKB Injector upgrade to obtain the low emittance and the high charge for SuperKEKB injection.

3.1 横方向エミッタンス

図1は横方向の投影エミッタンスをいくつかのバンチ長やアライメントエラーに対して解析的に計算してのものである。要求されたエミッタンス増加を抑えるためには、アライメントエラーが0.3mmと0.1mmのそれぞれのケースの場合、バンチ長として4psまたは10ps以下が必要となる。

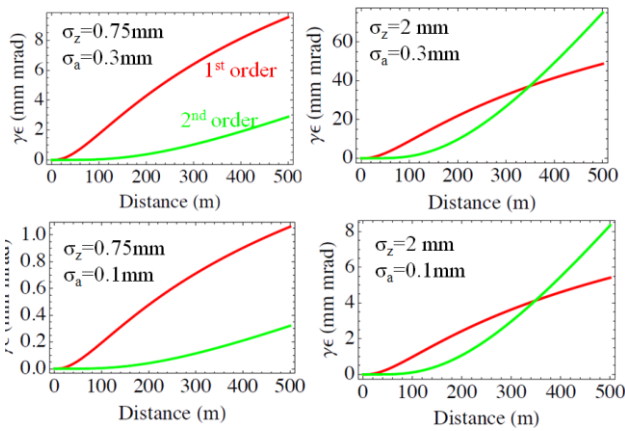


Figure 2: Transverse emittance for difference bunch length and alignment error.

3.2 初期オフセット

ビームに初期オフセットを加える事で、横方向ウェークによるエミッタンス増加の影響を補正する事ができる。初期オフセットとしてはベータatron位相が90°異なる2つのステアリングを使用する。図3は初期オフセットのスキャンによりエミッタンスを最適化した結果である。これを現実の加速器で実現するにはウェーク場の影響をモニターする必要があり、このためにはRFディフレクターによるバンチスライスのビーム形状モニターが有効である。

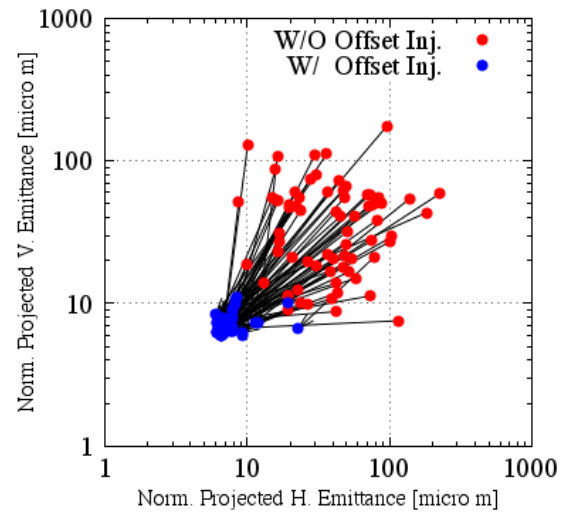


Figure 3: Initial offset to optimize the projected emittance.

3.3 縦方向ウェークによるエネルギー分散

5 nCの高電荷では、縦方向ウェークの影響が大きくなり、バンチが短くなるとRFの位相を傾けてもエネルギー分散を要求値まで小さくできなくなる。

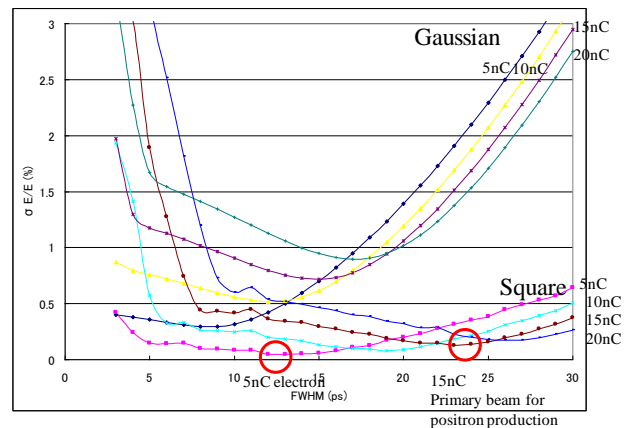


Figure 4: Energy spread vs bunch length.

そこで時間方向の分布をガウシアンから矩形波にする事で、図4のように大幅にエネルギー分散を減らす事ができる。

4. バンチの時間構造制御

短いバンチは横方向エミッタンスの増加を抑えるが、一方で縦方向ウェークが強くなり、それを補償するためには RF 位相を傾きのある方へずらす必要がある、これは加速電圧の低下につながる。これを抑えるには、バンチの時間構造を矩形にし、バンチ長を適切に選ぶ必要がある。さらに短いバンチ長でエネルギー分散を小さくするには、バンチの時間反転をするという事も検討している。

4.1 フォトカソード用レーザー

レーザーシステムに関しても、目標のエネルギー分散を得るには時間方向に矩形波のパルス形状が必要で、周波数領域制御により時間方向制御を行う。

レーザーの安定化には半導体励起が必須であり、効率を考慮すると Nd 系か Yb 系の媒質が候補となる。Nd 系は増幅が簡単であり高出力も得やすいが、帯域が狭く周波数領域の制御が難しく、Chirped Pulse Amplification (CPA)も難しいため、結晶断面積に対する出力限界がある。Yb 系は帯域が広く周波数領域の制御やが容易であり、CPA が簡単に可能であるため原理的にはレーザー密度を非常に高くできるが、Yb の吸収があるため高密度の励起が必要で、増幅が多段になりシステムとして複雑になる。

RF 電子銃用のレーザーとしては試験用には Nd 系の媒質を選択し、3-2 ユニットに導入して DAW 型 RF 電子銃と組み合わせて試験を行った。また A-1 RF 電子銃では Yb 系のファイバーレーザーとディスクレーザーを導入しビーム試験を行っている。

4.2 シケイン

RF 電子銃からの電子ビームのエミッタンスを要求値より十分に小さい $6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度で生成しようとすると、空間電荷からバンチ長は 20ps 程度になる。しかし 20ps では横方向ウェークの影響もエネルギー分散も大きすぎるため、シケインで 10ps に圧縮する。

4.3 J-ARC でのバンチ圧縮

J-ARC は 1.6GeV に位置し、アイソクロナスで使用されていたが、これをアクロマティックに設定し、残りの加速管のアラインメントエラーの要求値を少しでも緩和するために、バンチ圧縮を行う。例えば 4ps に圧縮した場合には必要なアラインメント精度が 0.3mm 程度になる。

4.4 バンチ反転

短いバンチは横方向エミッタンスの増加を抑制できるが、縦方向のウェーク場が強くなり、 4ps より短くなると、これをSバンドのRFのスローブでは補償できなくなる。C~5セクターの計6セクターの丁度中間には第二スイッチヤード(SY2)があり、

SuperKEKB の増強ではここにダンピングリングへの輸送路があるため、電子が逆側のシケインを通過する。図5のように、シケインのQ磁石の設定を変更し、直線部でのシングルキックを利用してディスパージョンを発生させる事ができれば、図6のように負の R_{56} と自らの縦方向ウェークによるエネルギーの傾きを利用してバンチが反転できる。

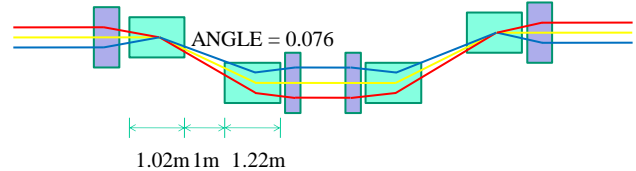


Figure 4: Bunch flip at SY2.

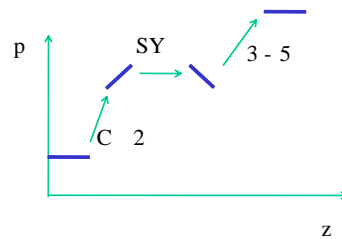


Figure 5: Longitudinal wakefield cancellation.

5. バンチ形状の測定系

以上のようにバンチの時間構造制御がエミッタンス保存やエネルギー分散の実現において重要である。時間構造を測定するには現在は 2ps 分解能のストリークカメラを使用しているが、今後XバンドのRFディフレクターをインストールし、バンチの形状をバンチスライスで観測しつつ、調整を行う。

6. まとめ

SuperKEKB 入射器において高電荷・低エミッタンスビームの輸送には時間構造制御が有効であり、このためのレーザー、ビーム光学、診断系等の開発を行っている。

参考文献

- [1] T. Natsui et al., "Quasi Traveling Wave Side Couple RF Gun for SuperKEKB", TUOCB103, IPAC13, Shanghai, China, proceedings of this conference.
- [2] X.Zhou, et al., "Ytterbium Laser Development of DAW RF Gun for SuperKEKB", WEPME018, IPAC13, Shanghai, China, proceedings of this conference.
- [3] Tor O. Raubenheimer, "The Generation and Acceleration of Low Emittance Flat Beams For Future Linear Colliders", SLAC-R-387
- [4] LCLS CDR Chapter 7 - Accelerator
- [5] Karl L. F. Bane, "Wakefield Effects in a Linear Collider", Proceedings of the U.S. Summer School on High Energy Particle Accelerators, Batavia, Illinois, Aug. 13-31, 1984.
- [6] J. Wang, "X-Band Deflectors Development at SLAC", X-Band RF Structure and Beam Dynamics Workshop - 44th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, December 2008