

KEK 電子陽電子入射器におけるパルス電磁石導入の光学的検討 OPTICAL INVESTIGATION OF NEW PULSED MAGNET INSTALLATION IN KEK e-/e+ INJECTOR LINAC

清宮裕史 *^{A)}、紙谷琢哉 ^{A)}、飯田直子 ^{A)}
Yuji Seimiya*^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Naoko Iida^{A)}
^{A)}KEK

Abstract

SuperKEKB injector Linac is performing continuous injection to SuperKEKB e-/e+, PF, and PF-AR ring. For high quality beam required in SuperKEKB rings, pulsed magnets were installed in the Linac and the number of the pulsed magnets are still not enough. Especially, there is not pulsed quadrupole magnet in around capture section after e+ generation target. In this section, not only e+ beam but also e- beam is transported. Therefore, beam optics for e- is disturbed, while that for e+ beam is optimized. It is difficult to replace all DC magnets to pulsed magnets because of both limited budget and personnel. We performed optical study to squeeze β function after e+ generation target by the minimum number of pulsed quadrupole magnets.

1. 導入

SuperKEKB は衝突点での e-/e+ のビームサイズを非常に小さく絞ることで、非常に高いルミノシティの達成を目的とする衝突型加速器である。ビームを非常に小さく絞るため、ビーム入射のアクセプタンスが KEKB 時代よりも非常に厳しくなっており、入射ビームについても高品質のビームが必要不可欠である。一方、KEK 電子陽電子入射器では、SuperKEKB e-/e+, PF, PF-AR の 4 つのリングへ電荷の異なるビームの連続入射を行なっている。一般的に、ビームが加速管で作る wake field は電荷量に比例するため、ビーム性能の指標となるエミッタンスやエネルギーブレッドが電荷量によって変化する。そのため、単一の Linac で複数のリングに高品質のビームを輸送するためには全ての機器をパルス化して、それぞれ電荷の異なるビームに対してそれぞれ最適の設定を行えば良い。しかし、予算や人員は限られているため全ての機器をパルス化することは現実的ではない。そのため、ここでは最低限の電磁石をパルス化することで効率良くビームの高品質化が行えるような光学的検討を行った。

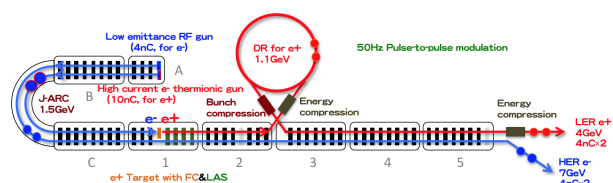


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector Linac.

SuperKEKB 入射器の概略図を Fig. 1 に示す。SuperKEKB 入射器はセクター A, B, J-ARC, C, 1~5 で構成されている。入射器では、2 種類のタイプの電子銃を用いて運転が行われている。1 つは e+ を生成

するための高電荷電子ビーム生成用の熱電子銃である。熱電子銃で生成された高電荷電子ビーム (10 nC) はセクター 1 のタングステンターゲットに衝突し制動放射、対生成が起こる。対生成によって生まれた e+ はターゲット直後の Flux Concentrator, 収束ソレノイドで効率良く捕獲される。陽電子は 2 セクター終わりからダンピングリングへ輸送され、そこで低エミッタンスとなった e+ ビームが SuperKEKB の e+ ビーム用リングへ輸送される。このように e+ ビームには専用のダンピングリングが存在するため、エミッタンスに対する要求は e- ビームと比べて厳しくない。もう 1 つは低エミッタンスビーム用のフォトカソード RF 電子銃である。フォトカソード RF 電子銃から生成された e- ビームはセクター 1 の e+ 生成ターゲットの孔を通過し、SuperKEKB の e- リングへ輸送される。e- ビーム用のダンピングリングは存在しないため、エミッタンス増大を最小限に抑えながら e- ビームを SuperKEKB リングまで輸送しなければならない。このエミッタンス増大に最も影響のある現象の 1 つが wake であり、SuperKEKB リングの入射効率、background に大きく影響する。つまり、リングの性能を左右する重要なパラメタである。

これまで、パルス電磁石の導入は主に 3~5 セクターで行われてきた。現在、e+ ターゲット直下流から 2 セクター終わりまでにパルス 4 極磁石は存在しないため e+ ビームには最適な光学系になっている一方で、e- ビームの光学系は乱れている。現状の e+ ターゲットから 2 セクター終わりまでの e- ビームの光学系を Fig. 2 に、e+ ビームの光学系を Fig. 3 に示す。e+ ビームの光学系を優先している理由は、e+ ビームは捕獲セクションではエネルギーが低くエミッタンスも大きいため物理アパーチャーいっぱい広がって輸送されてくる。そのため、光学系が乱れてビームサイズが大きくなると簡単にビームロスしてしまう。それに対し、e+ ターゲット付近での e- ビームはエミッタンスが小さくエネルギーも大きいため多少光学系が乱れたとしてもビームロスまでには至らないためである。しかし、後述するようにこ

* seimiya@post.kek.jp

の光学系の乱れがエミッタンス増大の要因となる可能性は高い。

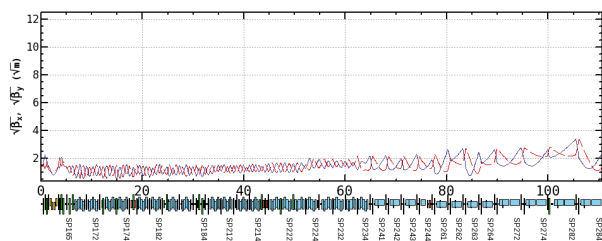


Figure 2: Current optics for e+ beam.

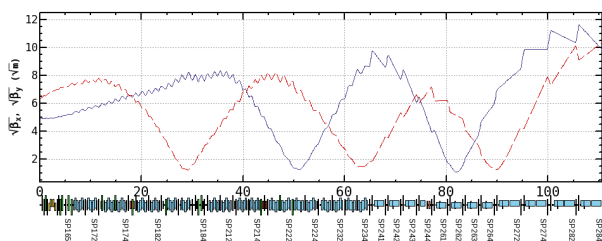


Figure 3: Current optics for e- beam.

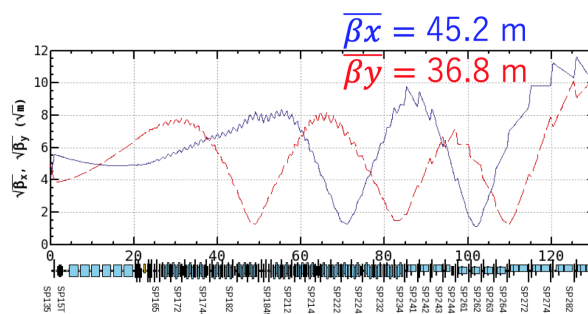


Figure 4: Current optics for e- beam.

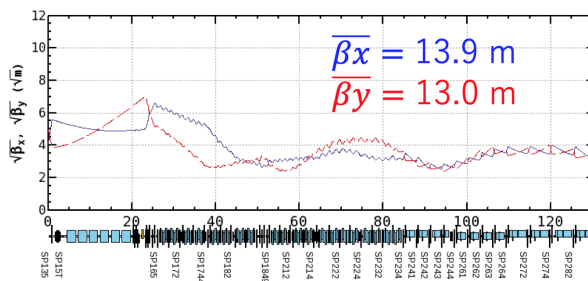


Figure 5: Optimum optics for e- beam.

2. パルス 4 極磁石の設置場所の検討

パルス 4 極磁石の設置場所の検討する上で、当たり前ではあるが重要なこととしては必要なパルス 4 極磁石の磁場は実現可能な磁場か、インストールするのに必要な場所は十分か、そもそも交換可能なものであるか、といったことに注意する必要がある。検討手順としては、

1. 全ての 4 極について、現実的な最大磁場の制限をかえた上でパルス化を行ったと仮定し最適な e-ビーム用 optics を計算。
2. 上流からパルス化した 4 極の値をに戻して optics が大きく乱れればパルス化、そうでなければ元値に戻す (DC のままで良いと判断する)。
3. 上記 1,2 を上流から下流に向けて繰り返し行う。

検討すべき 4 極磁石は約 100 台程度存在するため、ここでは optics に大きく影響を与えた 4 極にのみ結果を示す。このとき、たびたび特定領域のどれか 1 台をパルス化すれば同じような optics になるという結果を得ることがあったが、そういった場合には磁場の要求値が最も小さいものを最終的にパルス化する 4 極磁石として選択している。Figure 4、Fig. 5 はそれぞれ現在の optics、全ての 4 極をパルス化して最適化した場合の optics である。

Figure 6、Fig. 7 はそれぞれ 1 台の 4 極磁石をパルス化した場合、3 台の 4 極をパルス化した場合の optics である。

全てパルス化した場合の Fig. 5 と 3 台のみパルス化した場合の Fig. 7 を比較しても遜色ない値となっていることがわかる。また、この時選択した 3 台のパルス Q の設定磁場は Fig. 7 の上部にあるように、

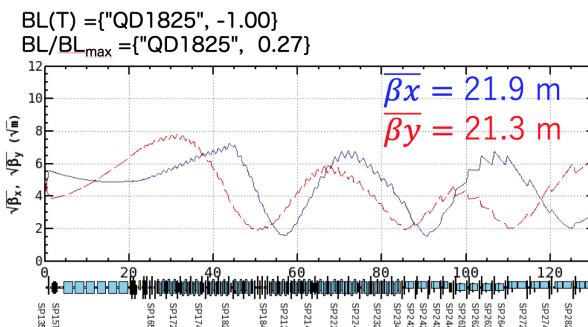


Figure 6: Optics calculation result if one pulsed quadrupole magnet is installed.

現状の 4 極の最大磁場のおよそ 1/2 程度以下であり、無理なく実現できる値となっている。

3. WAKE とエミッタンス増大

ビーム光学と wake field がエミッタンスに及ぼす影響を議論する。ここでは、あるビームの作る wake field が自身のビームに与える影響について考える (short range wake field)。wake field はビーム前方の粒子が、それより後方の粒子に影響を及ぼす電磁場であり、その性質上基本的にビーム後方の粒子がより影響を受ける。また、wake はビームダクト径が狭い場所から広い場所にビームが輸送される時に発生し wake の大きさはそれらのダクト径の半径の二乗の逆数の差に比例する。そのため、加速管の iris のように、径が小さく、径の変化が大きく、かつ同じ構造が繰り返し続くような場合無視できない影響をビームに与えることとなる。ここで、 x は水平方向の位置、 y は垂直方向の位置、 z は進行方向の位置、 δ は

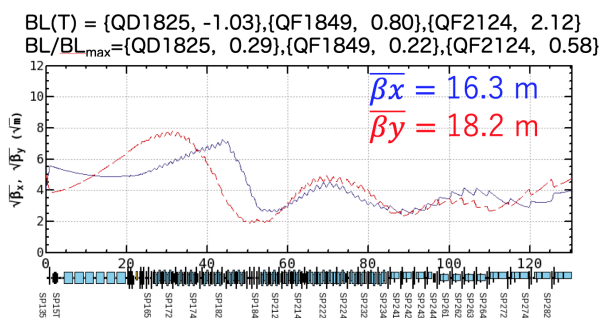


Figure 7: Optics calculation result if three pulsed quadrupole magnets are installed.

Table 1: Basic Parameter Set

Parameter	Value	Unit
Charge	2	nC
Initial emittance	10	μm
# of initial particles	10000	—
Distribution	Gaussian	—
S-band RF cavity aperture	$\sim \phi 20$	mm
LAS RF cavity aperture	$\sim \phi 30$	mm
Misalignment	1	mm

エネルギーブレッドとすると、Transverse wake は後方の粒子を蹴ることで、ビーム自体に x - z or y - z coupling を生じさせ、Longitudinal wake はビームローディングによって後方の粒子のエネルギーが減少することで、ビーム自体に z - δ coupling を生じさせるものであると理解できる。

ここで、Transverse wake による影響を定性的に考えてみる。軌道変化は $\sqrt{\beta}$ に比例する。ここで β は Twiss parameter である。つまり、wake によるキックでビーム後方の粒子の軌道変化は $\sqrt{\beta}$ に比例する。Wake によるキックではビーム先頭の軌道は変化せず後方のみ軌道変化するため、wake によるビームサイズ変化が生じ、その変化量は $\sqrt{\beta}$ に比例するはずである。通常、エミッタンスはビームサイズの二乗に比例するため、最終的にエミッタンス変化量は β に比例することとなる。

Wake とエミッタンス増大について評価するためにビームトラッキングシミュレーションを行った。シミュレーションには加速器ビーム設計用計算機コード SAD [1] を用いており、wake の計算には KEK 入射器にてよく用いられる横谷氏の計算式を使用した [2]。また、基本的なシミュレーションパラメータを Table 1 に示す。

Figure 8 は現状の光学系について、Fig. 9 はセクション 2 にて検討を行なった 3 台の 4 極磁石についてパルス化を行なった場合の光学系についてシミュレーションしたものである。現状の乱れた光学系では平均の水平 $\beta \sim 45\text{m}$ 、エミッタンス増大 $\sim 100\mu\text{m}$ であることに対して、検討後の光学系では平均の水平 $\beta \sim 16\text{m}$ 、エミッタンス増大 $\sim 40\mu\text{m}$ となっておりエミッタンス増大率が 1/2 以下に減少している。

また、シミュレーションにおけるそれぞれの値の比がほぼ同値であることから、定性的議論“エミッタンス変化量は β に比例する”ことに関して矛盾しないことを確認できる。

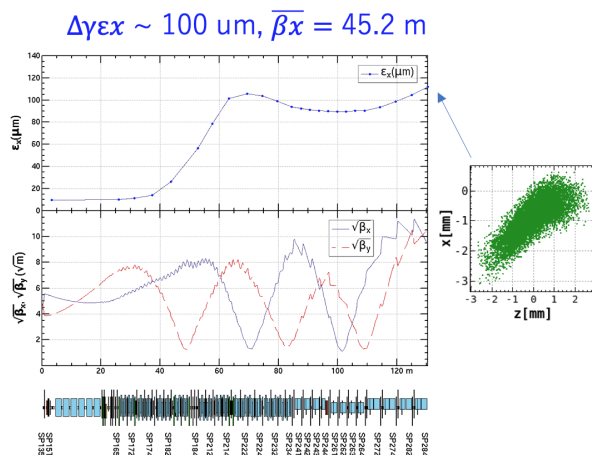


Figure 8: Emittance growth using current beam optics for e- beam.

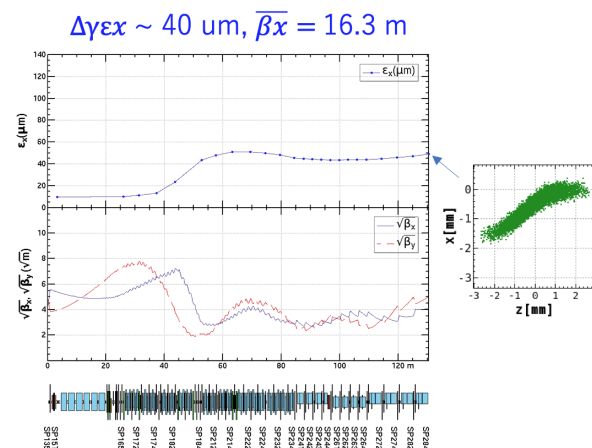


Figure 9: Emittance growth using investigated beam optics for e- beam.

4. まとめ

SuperKEKB で要求される low emittance beam のため、効果的に β 関数を絞ることのできるパルス 4 極磁石の設置場所の検討を行った。e- optics が乱れる e+ ターゲット付近に 120 台存在する DC 4 極磁石の内、3 台をパルス化することで β 関数、つまり wake によるエミッタンス増大率を 1/2 以下に抑制できるという結果を得た。

参考文献

- [1] Strategic Accelerator Design(SAD) home page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [2] K. Yokoya, “Short-Range Wake Formulas for Infinite Periodic Pill-Box”, 1998.