

# OPTIMIZATION OF A BUNCH COMPRESSION AT THE ARC SECTION OF KEK-ERL TEST FACILITY

Miho Shimada<sup>1</sup>, Atsushi Enomoto, Tsuyoshi Suwada, Kaoru Yokoya  
High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Energy Recovery Linac (ERL) gets a lot of attention as a next generation period light source instrument for producing a high brightness and short pulse synchrotron lights. To achieve high quality beam with low emittance and short bunch length it is important to reduce an emittance growth due to Coherent Synchrotron Radiation (CSR) generated at dipole magnets. The beam optics and lattice design of the first scheme in KEK-REL test facility, which is based on the previous design parameters, is optimized to suppress the emittance growth. The emittance growth rate is influenced by the matching between the transverse ellipse phase space and CSR kick direction as well as the spike in the bunch head appearing at the bunch compression, which causes strong CSR. In this paper, the effects were validated and optimize the beam optics and lattice design of KEK-ERL test facility.

## KEK-ERL試験機の周回部におけるバンチ圧縮の最適化

### 1. はじめに

次世代放射光施設のひとつとして期待されている Energy Recovery Linac (ERL)が多くの研究所で注目され、Jefferson labやJAEAでそれぞれ160MeVおよび17MeVのERL試験機が駆動している他、DaresburyなどでもERL試験機が建設中である<sup>[1]</sup>。KEKでも5GeV-ERLが計画されており、その試験機のビームダイナミクスの設計が急がれている。高品質の放射光を実現するために、低エミッタンスかつ短バンチの電子ビームが必要であるが、短バンチ電子ビームから発生するCoherent Synchrotron Radiation (CSR)がエミッタンス増加を引き起こし、その影響はバンチが短く、大電流、低エネルギーであるほど顕著である。チェンバー壁の遮蔽効果も期待できないため、エミッタンスの増加を最小に抑える光学系が必要である。本研究では、低エネルギーにおけるエミッタンス増加を防ぐため、加速後に周回部でバンチ圧縮を行う方法を採用した。当初の計画のパラメータに基づいて周回部の最適化を行ったので、その結果について報告する。

### 2. エミッタンス増加の最小化

#### 2.1 CSRの発生とエミッタンスの増加

偏極磁石で発生するCSRは進行方向に対して広い角度で直進、曲線を描くバンチに追いついて、縦方向にエネルギー分布を発生させる結果、起動のずれが生じ、エミッタンスの増加を引き起こす。ガウス分布であるバンチの場合、そのエネルギー変化量の平均 $\Delta E$ は次のような関係をもつ<sup>[2]</sup>。

$$\Delta E \propto -I(\rho^2 \sigma_z^4)^{-1/3} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_z$ ,  $\rho$ および $I$ はそれぞれrmsバンチ長、曲率半径および電流値である。式(1)より大電流や短バンチで $\Delta E$ が大きくなることが明らかである。また、 $\Delta E$ はビームエネルギーによらないので、低エネルギーであるほどエミッタンスが増加しやすい。

#### 2.2 エミッタンス増加の最小化

横方向の位相空間上では $\theta_{CSR}$ の方向にキックされる。ここで、 $\theta_{CSR}$ は偏極磁石の曲げ角 $\phi$ によって $\theta_{CSR} = \sin\phi/\rho(1-\cos\phi)$ と表される。

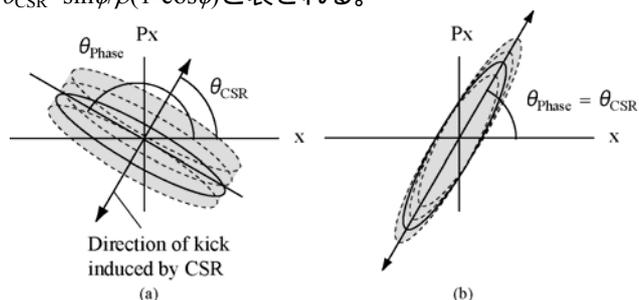


Fig.1 Relationship between the kick direction of CSR,  $\theta_{CSR}$ , and the long axes of the transverse phase spaces,  $\theta_{phase}$ . The emittance growth is minimized when the two angles match each other. Emittance growth is (a) : large, and (b) : small

この場合、Fig.1に示すように、ビームの位相空間上の楕円の方向 $\theta_{phase}$ が $\theta_{CSR}$ と同じであれば、エミッタンスの増加を最小に抑えることができる<sup>[3]</sup>。ここで、 $\theta_{phase}$ はtwiss parameterの $\alpha$ ,  $\beta$ および $\gamma$ で $\theta_{phase} = \alpha/(\gamma - \beta)$ と表すことができる。

<sup>1</sup> Present Affiliation : UVSOR, Institute of Molecular Science, Nishigonaka38, Okazaki, 444-8585 E-mail: shimada@ims.ac.jp

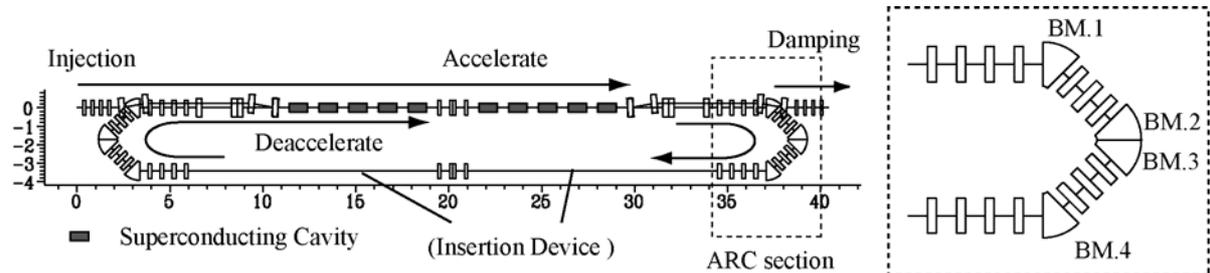


Fig.2 Lattice geometry of the KEK-ERL test facility

### 3 . ERL試験機の概要

#### 3.1 KEK-ERL試験機の光学設計

KEK-ERL試験機の模式図をFig.2に示し、各パラメータをTable 1にまとめた。規格化エミッタンス  $100\text{nm} \cdot \text{rad}$  で入射した電子ビームはシケインで超伝導加速空洞のある直線部に合流し、加速勾配  $20\text{-MV/m}$  で  $200\text{ MeV}$  まで加速される。Triple-Bend Achromat (TBA)の構造をもつ周回部を通過した後に挿入光源を設置する予定の  $13\text{ m}$  の直線部が続く。

Table 1 Main parameters of the KEK-ERL test facility

Main parameter	Design value
Injection beam energy	5 MeV
Maximum beam energy	205 MeV
Operating frequency	1.3 GHz
RF cavity gradient	20MV/m
Initial normalized emittance	100 nm · rad
Initial rms bunch length	1 ps
Final rms bunch length	0.1 ps
Initial rms energy spread	$5 \times 10^{-5}$
Total length	117.98 m

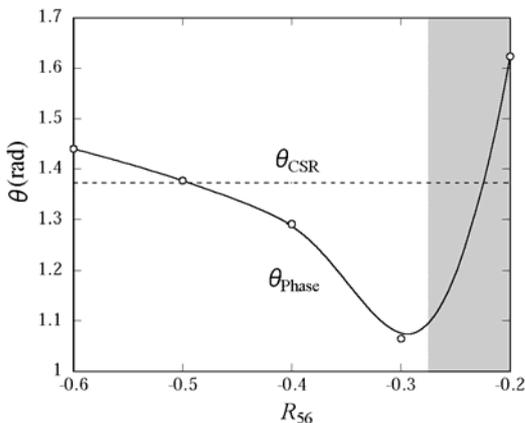


Fig.3 Phase space angles  $\theta_{\text{Phase}}$  at the end of the fourth dipole magnet are calculated by the Twiss parameters ( ) and direction in CSR kick,  $\theta_{\text{CSR}}$ , estimated by the curvature radius and bending angle of the dipole magnets (dotted line). In the gray zone, the phase space loses the ellipse shape because of large energy spread.

#### 3.1 周回部におけるバンチ圧縮

$1.0\text{ ps}$  のrmsバンチ長で入射した電子ビームは加速波の位相をずらして加速し、バンチ先頭と後尾にエネルギー差  $\Delta E$  の勾配を与える。光学系の移送行列 (5,6) の成分  $R_{56}$  をもつ non-isochronous の周回部に達すると、バンチ内の電子は  $\Delta z - R_{56} \Delta E / E_0$  だけ縦方向に移動する。ここで、 $z$  および  $E_0$  は参照粒子に対する縦方向の座標および参照粒子のエネルギーである。周回部の  $R_{56}$  に対して加速波の位相のずれを適切に調整すると、バンチ長を  $0.1\text{ ps}$  に縮めることができる。周回部の両側にはそれぞれ4つの四極磁石を配置し、他の光学系に影響を与えることなく、周回部の  $R_{56}$  をゼロから  $-0.6\text{ m}$  まで変えていった。

### 4 . 結果と考察

周回部両側の四極磁石を調整して、周回部最初の偏極磁石入り口の位相空間の方向  $\theta_{\text{Phase}}$  を変えることができるが、可変範囲は周回部の  $R_{56}$  によって異なる。Fig.3にその  $\theta_{\text{Phase}}$  可変範囲の上限を示す。これより、 $\theta_{\text{Phase}}$  と  $\theta_{\text{CSR}}$  を同じ角度にするには  $R_{56}$  を  $-0.5$  以下にする必要があることがわかる。一方、 $R_{56}$  が  $-0.2$  以上でも  $\theta_{\text{Phase}}$  と  $\theta_{\text{CSR}}$  を一致させることができる。しかし、粒子追跡の結果、加速波による  $\Delta E$  の勾配が大きすぎるために、電子ビームの位相空間の形状が楕円から大きく崩れてしまい、エミッタンスが非常に大きくなってしまったことがわかった。

挿入光源が入る位置の縦方向の位相空間およびヒストグラムを粒子追跡によって計算した。  $R_{56}$  が  $-0.3$ 、 $-0.45$  および  $-0.6$  としたときの結果をFig.4に示す。周回部の  $R_{56}$  が大きな負の値になるほど、CSRによってバンチ先頭に鋭いスパイクが現れる。それがさらに強いCSRの原因となりエミッタンス増加を引き起こす。スパイクの発生を防ぐには周回部の  $R_{56}$  を小さな負の値にするほうが望ましい。

Fig.3とFig.4から推定される周回部の  $R_{56}$  最適値が異なる。ここでFig.5に、Fig.4に対応する横方向の位相空間を示す。  $R_{56}$  が  $-0.3$  のときは  $\theta_{\text{Phase}}$  と  $\theta_{\text{CSR}}$  の不一致により、エミッタンスが大きくなってしまっていることがわかる。一方、  $R_{56}$  が  $-0.6$  のときは  $\theta_{\text{Phase}}$  と  $\theta_{\text{CSR}}$  はほぼ一致しているが、バンチ先頭のスパイクによってCSRによるキックが大きくなり、エミッタ

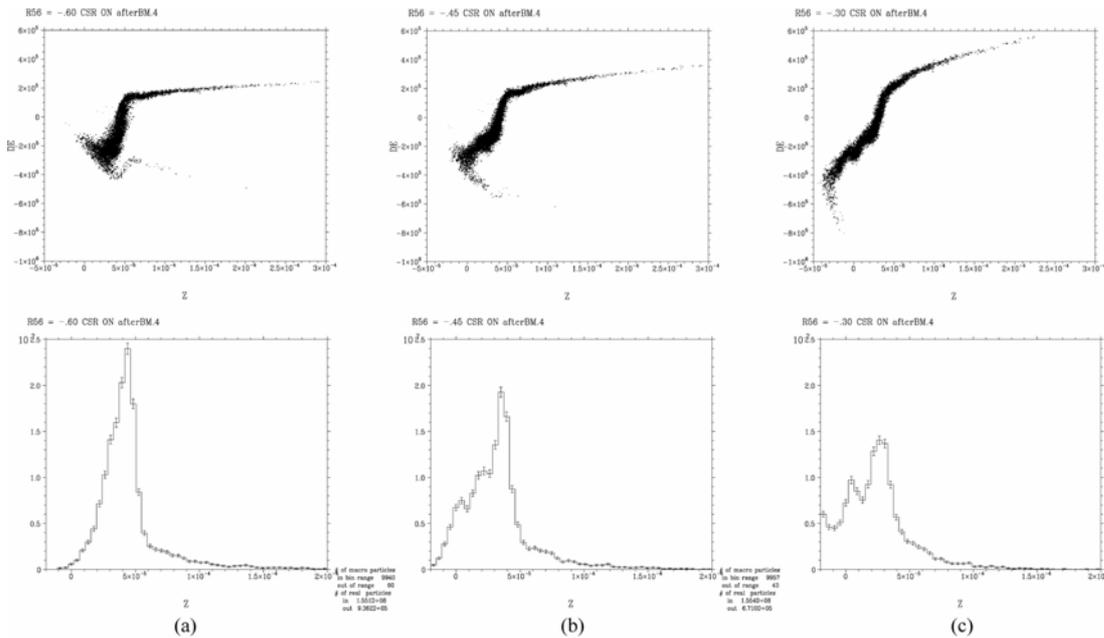


Fig.4 Longitudinal phase space distortion due to CSR and the histograms where  $R_{56}$  is -0.6 (a), -0.45 (b), -0.3 (c), respectively

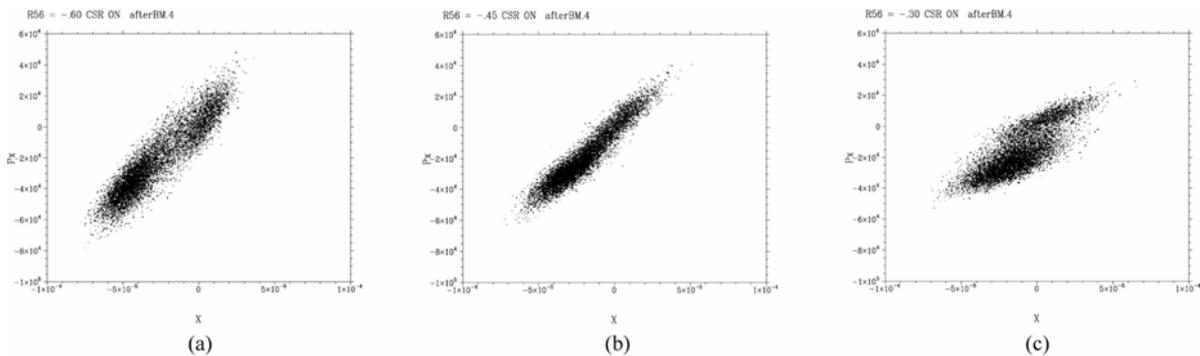


Fig.5 Transverse emittance growth due to CSR where  $R_{56}$  is -0.6 (a), -0.45 (b), -0.3 (c), respectively

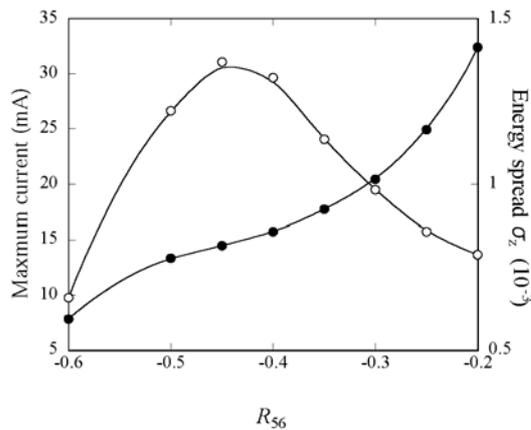


Fig.6 Maximum current (○) and final energy spread (◻) under the condition that  $\epsilon_x < 200 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  and  $\sigma_z < 0.1 \text{ ps}$  at the insertion devices.

ンス増加につながってしまった。そこで、挿入光源で規格化エミッタンスが入射時の2倍以下 ( $200 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ )、パンチ長が  $0.1 \text{ ps}$  以下を満たす最大電流値を各  $R_{56}$  で求めた。その結果を Fig.6 に示す。周回部の  $R_{56}$  が  $-0.45$  のときに最大  $30 \text{ mA}$  まで可能であることがわかる。また、そのときのエネルギー広が

りは  $8.6 \times 10^{-4}$  であった。

### 5 . 結論

横方向の位相空間上での楕円とCSRのキックの方向を一致させることによって効果的にエミッタンスの増加を抑えられることがわかった。しかし、その楕円の傾きは周回部の光学系に依存する。また、周回部の光学系によってはパンチ先頭にスパイクが現れ、大きなエミッタンス増加を引き起こすことも確認された。これらの影響を最適化した結果、本論で検討したKEK-ERL試験機は最大  $30 \text{ mA}$  の電子ビームを低エミッタンスおよび短パンチを実現できることがわかった。

### 参考文献

- [1] I.V.Bazarov, *et al.*, ERL 05-07, Cornell univ., URL: <http://www.lns.cornell.edu/public/ERL/2005>
- [2] Y. S. Derbenev *et al.*, TESLA-FEL 95-05, (1995).
- [3] R Hajima, Nucl. Instr. and Meth., A528 (2004) 335.
- [4] H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics I 2nd Edit.", springer, NewYork, 1999, p.152.