

OPTIMIZATION OF A BUNCH COMPRESSOR AT KEK-ERL TEST FACILITY

Miho Shimada, Kaoru Yokoya, Tsuyoshi Suwada, Atsushi Enomoto
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

To produce high brightness synchrotron radiation generated from an energy recovery linac, it is necessary to shorten the bunch length and reduce the emittance of electron beam. However, the energy loss and the emittance growth caused by a coherent synchrotron radiation (CSR) at a bending section are enormous for the short bunch with a length of a few 10-micro meters especially at a low energy. Therefore the bunch length is compressed gradually in the ARC after accelerating the beam up to the full energy. The beam optics for a bunch compression was optimized to suppress the growth of a transverse emittance and a energy spread.

KEK-ERL Test Facilityにおけるバンチ圧縮の最適化

1. はじめに

次世代放射光加速器として、エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) が生物、物理、医学などの幅広い分野から求められている。KEKでは放射光将来計画の一つとして、ERLの可能性を実証するために200MeVの試験加速器の設計を進めている。ERLの特徴は、硬X線領域において短パルス、超高輝度放射光を安定に供給することにある。このような放射光を実現するには、電子ビームの短パルス化と低エミッタンス化が要求されるが、2つのパラメータを同時に実現することは容易ではない。本報告では、低エミッタンス電子ビームを短パルス化するための周回部におけるバンチ圧縮スキームと、シミュレーション計算に基づき最適なスキームを解析したので、報告する。

2. バンチ圧縮の原理

2.1 電子ビームのエミッタンス

KEK-ERLでは、硬X線($\lambda=0.1\text{nm}$)を回折限界で発生させることを目標とする。これを実現する電子ビームの規格化エミッタンスは、 $\varepsilon_x=0.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ が要求される。ERL周回部では、規格化エミッタンスは主にエネルギー広がりが原因で増加する。これは、ディスパージョンがゼロでない周回部を通過することにより、エネルギー幅に依存してバンチは横方向に広がってしまうからで、周回部出口ではディスパージョンが用いる閉じる光学系が必要である。

2.2 周回部におけるバンチ圧縮

ERLでは、一般に周回部でバンチ圧縮を行う。バンチ圧縮の大きさは、式(2)に示すように、エネルギー広がり R_{56} が最適化すべきパラメータとなる。

$$\Delta z \equiv R_{56} \Delta E/E \quad (2)$$

ここで、 R_{56} は、エネルギー分散関数を軌道の曲率 ρ で割ったものを周回部全体にわたる積分で以下のように定義される。

$$R_{56} = \int_{\text{ARC}} \frac{\eta}{\rho} ds \quad (3)$$

ここで、バンチ圧縮は R_{56} を負の値にすることで行われる。 E は基準粒子のエネルギーであり、 z および E は、基準粒子に対する周回部前後でのエネルギーおよび z 座標の変化量である。主線形加速器では、加速位相をずらし、バンチ前方が高エネルギーになるよう勾配をつける。周回部では、エネルギー差は軌道長の差に変換され、バンチ前方(後方)が遅れる(進む)ためバンチ長が圧縮される。理論上は、エネルギー幅を固定すると、 R_{56} の絶対値が小さいほど短いバンチを得ることができる。

ここで注意したいことは、 E/E が大きい場所では z が E/E の高次の項を含むため、(2)式示すバンチ圧縮が適切に行われない場合である。

2.3 CSRによるエミッタンス増加

バンチ内のエネルギー幅を大きくする原因のひとつにCoherent Synchrotron Radiation (CSR) がある。バンチ内の電子が放射光を放射する際、その波長がバンチ長以上であれば、それぞれの光が干渉しあい増幅する。バンチが、偏向磁石を通過するとき、バンチ後方から放出したCSRは、偏向されずに直線的に進行するためバンチ前方に衝突する。この現象により、バンチ前方はエネルギーを失い、一方、後方ではエネルギーを得ることになり、バンチ内のエネルギー分布を大きく変えてしまうことになる。電荷 q のバンチが z 方向に分散 σ_z のガウス分布とすると、周回部(半径 ρ)を通過する前後のエネルギー差は、

$$\Delta E_{CSR} \propto q\rho^{1/3}\sigma_z^{-4/3} \quad (4)$$

で与えられる。この式により周回部の設計では、できるだけ周回半径を大きくすることが望ましい。

3．ERL Test Facilityの基本設計

3.1 全体設計

図1にERL Test Facilityの基本的な光学設計を、表1に主なパラメータを示す。入射部から出射した電子ビーム(5MeV, 規格化エミッタンス0.1mm·mrad)が主線形加速器に合流するものとし、TESLA型(rf周波数1.3GHz)の超伝導加速空洞により、205MeV(加速勾配20MV/m)まで加速する。周回部を通過した後の直線部(13m)でUV放射光を取り出し、その後再び帰還周回部を通り主線形加速器に戻る。このとき、加速RFに対し、位相 π だけずらして帰還させるとビームのエネルギーは空洞に蓄積され、次の入射ビームにより回収される。

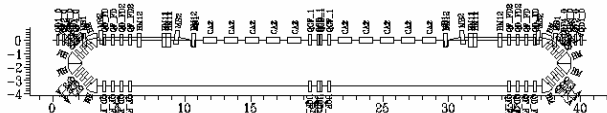


図1：ERL Test Facility Design

ビーム・エネルギー	205	GeV
入射エネルギー	5	GeV
加速周波数	1.3	GHz
加速勾配	20	MV/m
最大電流	100	mA
最大バンチ電荷	77	pC
規格化エミッタンス	0.1	mm mrad
エネルギー幅 (rms)	5×10^{-5}	
バンチ長 (rms)	1 ~ 0.1	psec
R_{56}	-0.5 ~ 0	m
周長	117.98	m

表1：ERL Test Facility のDesign 値

3.2 周回部の設計

周回部の基本構成を図2に示す。周回部は長さ0.5m、曲角90度の偏向磁石を4台、そのうち中央の2つを並べてTriple Bend Achromat (TBA)を構成する。偏向磁石に挟まれた部分は四極電磁石(Q磁石)のトリプレットを、周回部の入出口にはそれぞれダブレットを配置した。TBAを選択した理由は、ディスバージョン、バンチ長等のビームパラメータの制御が容易であること、エミッタンス劣化が生じにくい光学系を構成できるからである。ダブレットの配置は、周回部入出口での光学的整合を取るためには必要である。このように、バンチ圧縮は、周回部両端のオプティクスを変更することなく、トリプレット

の強度を変更することで、 R_{56} を制御することができる。

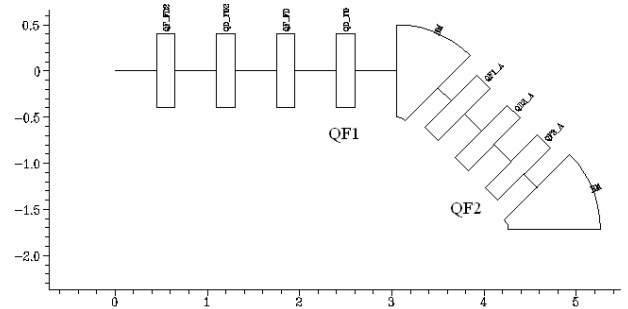


図2：周回部のデザイン

4．シミュレーションによるバンチ圧縮の最適化

周回部中央の偏向磁石の両側で光学系が左右対称となるため、7つのQ磁石の強度をコントロールし、 R_{56} を連続的に0から-0.5まで変化させた。図3に示すように、 R_{56} 成分と中央の偏向磁石における分散関数の関係は単調増加となる。

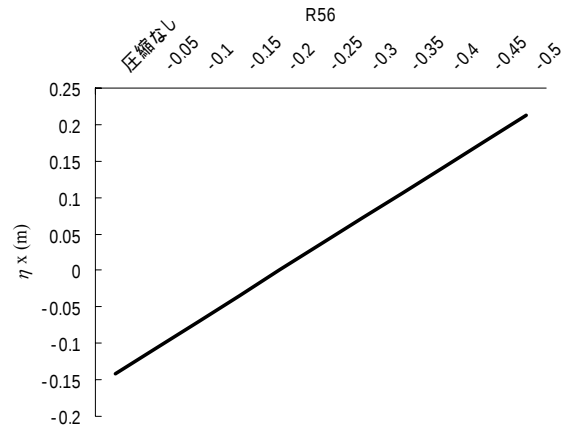


図3：周回部中央の分散関数 η_x と R_{56} との関係

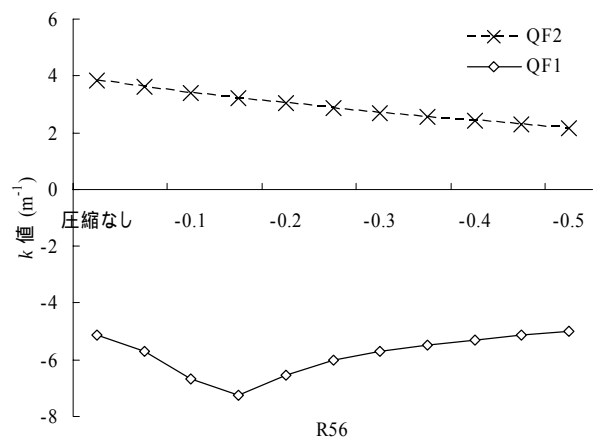


図4：図2中のQF1とQF2のk値の変化

また、7つのQ磁石のうち、 k 値が大きく変化したQF1とQF2の2つの例を図3に示す。 $R_{56}=-0.15$ でQF1が極小値を持ち、ここでARC中央の分散関数の符号が変わっている。

バンチ圧縮の効果を調べるために、各 R_{56} 成分に対し、周回後の直線部における σ_z および ε_{nx} を調べた。図5および図6にCSRの影響を入れた場合と入れない場合の結果を示す。この図から明らかにCSRによりバンチ圧縮の効果が制限されており、 ε_{nx} が増加していることがわかる。 σ_z は R_{56} が $-0.15 \sim -0.2$ の範囲で最小値をとり、それ以下ではバンチ圧縮の効果が小さい。 $R_{56}=-0.05, -0.1$ では、バンチ圧縮のためのエネルギーの広がりを大きな値にしたために、式(2)に示すような線形成が保たれず、バンチ圧縮がうまくいかない。図6では、CSRの有無にかかわらず、 $R_{56}=-0.05$ で ε_{nx} が増加している。これも、先に述べたように E/E の高次の項のために、すべてのバンチに対してAchromaticにすることができず、周回部出口の位相空間に広がりが発生したことが原因である。また、 $R_{56}=-0.15$ では、CSRの影響で ε_{nx} が増加している。これは、周回部内のバンチ長が十分短くなりCSRの効果が大きいことや、もともと大きくしたエネルギーの広がりがCSRによってさらに広がったこと、周回部出口直後のDefocus Q磁石が $\langle x^2 \rangle$ および $\langle x'^2 \rangle$ を広げてしまったことが挙げられる。

直線部の ε_{nx} が 0.2 mm-mrad 以下になるようにバンチの電荷を調整した結果を図7に示す。CSRがあるときは、 0.77 pC まで下げると目的とする ε_{nx} が得られることがわかった。

5. 結論

全体のオプティクスを変更することなく周回部の R_{56} 成分を制御することにより、バンチ圧縮の最適化を行った。 R_{56} 成分が小さすぎるときは、バンチ圧縮を適切に行うことが困難であり、オプティクスを合わせるために強くしたQ磁石が悪影響を及ぼす。直線部の σ_z および ε_{nx} をともに小さくするには R_{56} が $-0.2 \sim -0.25$ の範囲が適切であることが分かった。一方、目標とする ε_{nx} を得るにはバンチあたりの電荷量を設計地の $1/100$ まで(0.77 pC)まで下げる必要がある。

参考文献

- [1] 諏訪田剛、飯田厚夫編「放射光将来計画検討報告」高エネルギー加速器研究機構、2003、URL: <http://pfwww.kek.jp>
- [2] S. M. Gruner and M. Tigner, eds., "Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac (ERL) Synchrotron Light Source at Cornell University", CHESS Technical Memo 01-003, JLAB-ACT-01-04, 2001
- [3] E. Kim *et al*, "Design study for a 205 MeV Energy Recovery Linac Test Facility at the KEK",

- [4] 横谷馨 「ERL入門」高エネルギー加速器研究機構 OHO'03, 2003

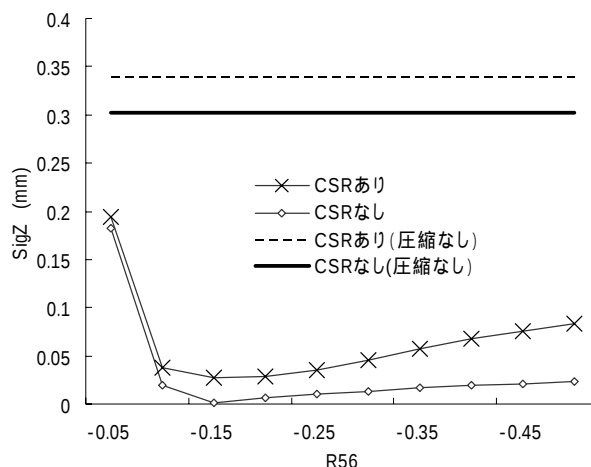


図5： R_{56} と13m直線部の σ_z の関係

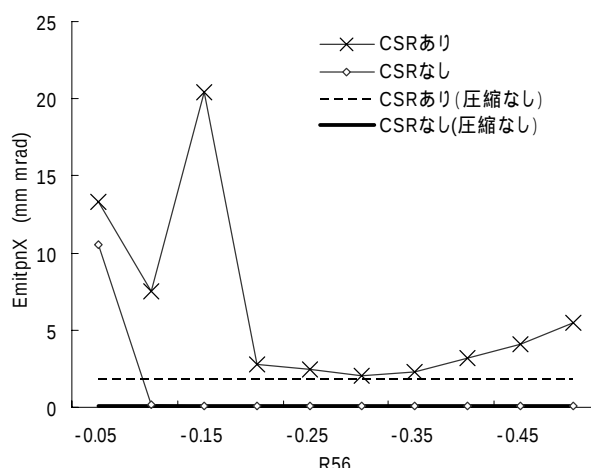


図6： R_{56} と13m直線部の ε_{nx} の関係

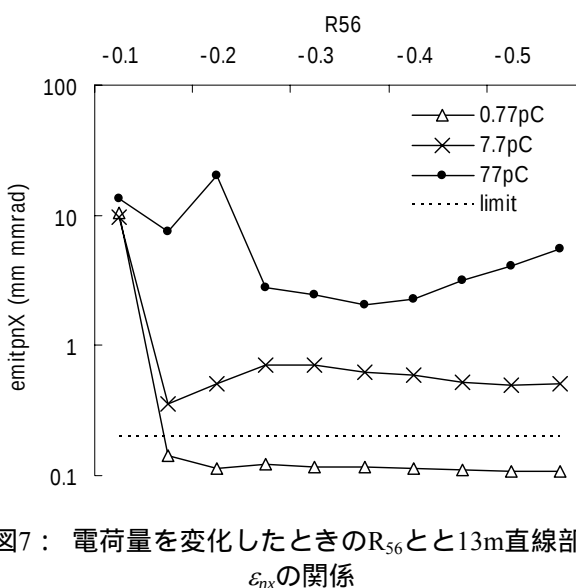


図7： 電荷量を変化したときの R_{56} と13m直線部の ε_{nx} の関係