

Design study of the compact ERL optics

Takashi Shiraga^{1,A)}, Norio Nakamura^{A)}, Kentaro Harada^{B)}, Miho Shimada^{B)}, Shogo Sakanaka^{B)},
Yoshinori Kobayashi^{B)}, Ryoichi Hajima^{C)},

^{A)} Synchrotron Radiation Laboratory, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo
5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa-shi Chiba-ken, 277-8581

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi Ibaraki-ken 305-0801

^{C)} Japan Atomic Energy Agency
4-49 Muramatsu Tokai-mura Naka-gun Ibaraki-ken 319-1184

Abstract

An energy recovery linac (ERL) is expected to be the next generation synchrotron radiation source that can provide synchrotron radiation of higher brilliance, shorter pulse and higher coherence than the existing third-generation synchrotron light sources. The compact ERL is planned to be constructed in order to solve some problems in achievement of such synchrotron radiation and to confirm advantages of ERLs. In the compact ERL, the bunch is compressed against CSR (Coherent Synchrotron Radiation) effects by using one TBA (Triple Bend Achromat) cell in bunch compression mode. We studied and optimized the compact ERL optics to achieve subpico-second bunch generation and efficient energy recovery and to transport the beam to the beam dump without serious beam loss. The design study of the compact ERL optics was done by using the simulation code Elegant. As a result, we succeeded in obtaining a 40-fs bunch with a charge of 77 pC just after the first TBA cell. Furthermore we could suppress the maximum beam size to less than 8.5 mm even after deceleration.

コンパクトERL電子ビーム光学系の設計研究

1. はじめに

エネルギー回収型リナック (ERL) は大電流、超低エミッタンス、超短パルスの電子ビームを生成できることから次世代放射光源用の加速器として期待されている。ERLは電子ビームを周回させ超伝導リナックで加速・減速することでエネルギー回収を行っている。

コンパクトERLは5GeVクラスのERL本機に向けたERL構成機器の動作実証、ビームダイナミクスの研究を行う。ERLに求められる技術課題のうち重要な一つが、高い時間分解能を持つサブピコ秒電子バッチの発生である。現時点では1-3ps程度で加速した電子を周回部においてバッチ圧縮するスキームを提案しているが、バッチ圧縮方式の決定にはコヒーレントシンクロトロン放射 (CSR) の影響を詳しく検討しなければならない。周回部で発生するCSRは短いバッチ長で強く、バッチあたりの電荷の自乗に比例して大きくなる。CSRは大強度テラヘルツ光源として有用であるが、一方ではバッチ圧縮とエミッタンス保存の障害にもなる。今回は、バッチ圧縮モードでの超短バッチの生成とその後の効率的なエネルギー回収やビームダンプまでのビ-

ムロスのないビーム輸送を達成するために、6極磁石による二次収差の補正を含めた電子ビーム光学系の最適化を、軌道計算ソフトElegantを用いた結果を示す。

2. バッチ圧縮モードにおける最適化

コンパクトERLでは必要に応じて高い輝度を要する超低エミッタンスモードと、高い時間分解能を持つ超短パルスモードを使い分ける。今回は超短パルスモードにおけるバッチ圧縮とそのオプティクス最適化を行った。図1に、コンパクトERLの配置構成を示す。

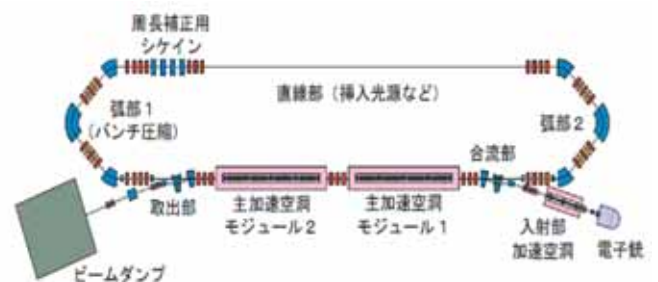


図1: コンパクトERLの配置構成

2.1 最適化の方針

バンチ圧縮では、加速空洞通過時にあえてバンチ内にエネルギー勾配がつくように加速を行い、その後の第1アーク部（弧部）で R_{56} と T_{566} 、エネルギーのずれを利用することによりバンチを圧縮する方法があり、これを用いた。エネルギーのずれによる進行方向の位置のずれは

$$\Delta z = R_{56} \left(\frac{\Delta E}{E} \right) + T_{566} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 + U_{5666} \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^3 + \dots (1)$$

のように展開される。まず1次の項のみを考えると

$$k_{RF} \sin \phi_{RF} = \frac{1}{R_{56}} \quad (2)$$

という条件で圧縮が出来る。（ k_{RF} は加速波の波数、 ϕ_{RF} は加速時の位相ずれ角）。ただこれだけでは2次以上の項が高次エラーとして発生するためまだ圧縮の余地があり、2次の補正として六極磁石を入れてバンチ長を最短となるように最適化を行う。加えて周回部以外では分散関数 η や η' を0にする。

また、効率的なエネルギー回収をし、ビームダンプ部まで問題となるようなビーム損失がないようなビーム輸送を実現するための最適化も行う。減速空洞でエネルギー回収を行う際、加速時の位相とは 180° ずれた位相に乗せる必要がある。そのため第2アーク部の R_{56} の値は前半アーク部における R_{56} とは符号を逆にした値にしなければならない。加速空洞出口のバンチと減速空洞入り口のバンチは完全に一致していることが理想であるので、第2アーク部の六極磁石によりバンチ長等が加速空洞出口のそれに近づくように最適化を行う。なお、特に断らない限り、以下ではバンチ長、運動量広がり、エミッタンス、ビームサイズ等の値は、分布の標準偏差の値を採用している。

2.2 最適化のシミュレーション結果

今回のシミュレーションではERL入射時のパラメータ初期値を表1の値として計算を行った。

$\phi_{RF} = 15^\circ$ であるため(2)式より前半アーク部で $R_{56} = 0.1419$ とすることで圧縮される。第1アーク部の四極により R_{56} を設定し、第1アーク部出口でバンチ長が最短となるように六極を最適化した結果、図2の結果が得られた。これは第1アーク部出口直後におけるバンチの進行方向位置と運動量の分布図であり、バンチ長を40.9[fs]まで圧縮することに成功している。またそこにおける規格化エミッタンスは水平方向、垂直方向それぞれ入射時の2.4倍、3.9倍であった。

入射エネルギー	5[MeV]
加速後のエネルギー	165[MeV]
加速周波数	1.3[GHz]
入射バンチ長	1[ps]
水平方向規格エミッタンス	1[mm·mrad]
垂直方向規格エミッタンス	1[mm·mrad]
バンチ内電荷	77[pC]
電流	100[μA]
運動量広がり	2×10^{-3}
加速時の位相角	15°

表1:初期パラメータ

次に第2アーク部で $R_{56} = -0.1419$ とした場合の結果を示す。進行方向の位置と運動量の分布について、加速空洞通過直後のバンチと減速空洞直前のバンチをそれぞれ図3に、入射バンチと減速直後のバンチを図4に示す。図3では、減速空洞直前のバンチの分布形状を加速空洞通過直後のバンチの分布に近い形まで戻すことが出来た。しかし、主にCSR効果によりバンチが完全には戻らず、バンチ前方(図中の左側)のエネルギーが高くなり、図4での減速後のバンチではそれによる運動量広がりが増大した結果となった。

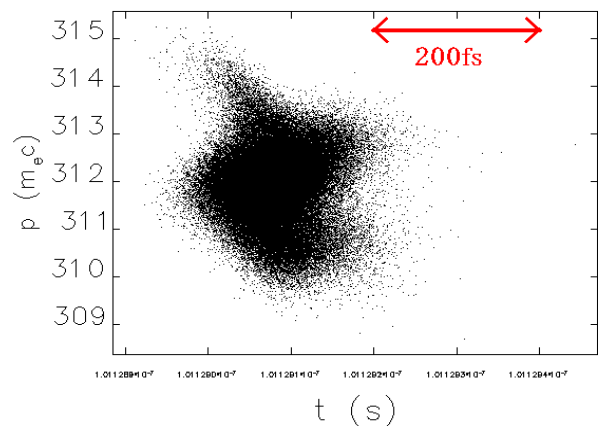


図2:前半アーク出口におけるバンチの進行方向位置及び運動量の分布。

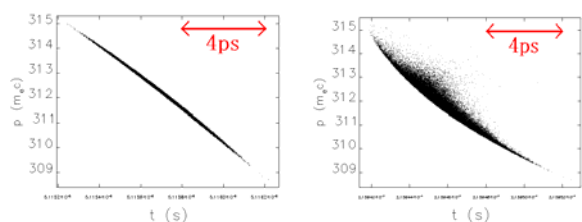


図3:バンチの進行方向位置及び運動量の分布。左図が加速空洞通過直後のバンチ、右図が減速空洞直前のバンチ。

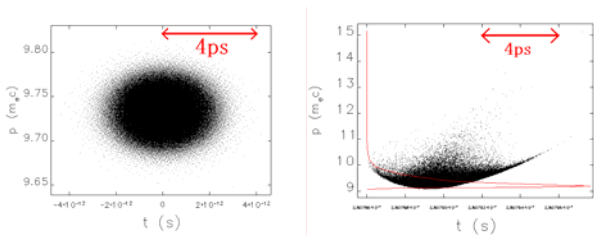


図4: バunchの進行方向位置及び運動量の分布。左図が入射バunch、右図が減速直後のバunch。

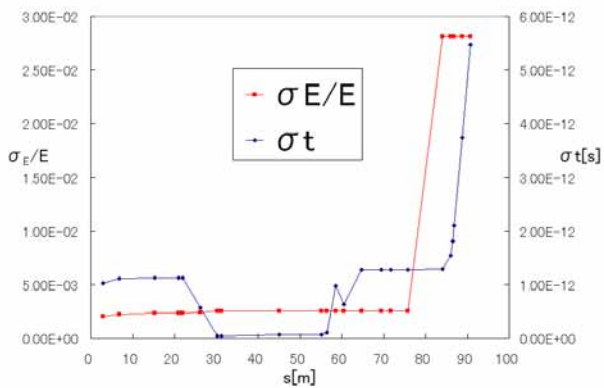


図5: 電子軌道に沿ったバunch長と運動量広がり。

図5に、ビーム入射位置からビームダンプ部までの電子の軌道に沿って、バunch長と運動量広がりをプロットしたものを示す。図5の $s=30\text{m}$ の地点が第一アーク部の出口であり、バunch長がそこで非常に良く圧縮されている。その後の第二アーク部によりバunch長が第一アーク部前のそれにほぼ戻っている。運動量広がりが急激に上昇している地点は2つ目の減速空洞通過後である。元々CSR効果によりバunch内のエネルギー広がりが発生していたが、加速後の電子のエネルギーが高く、相対的にはその広がりの影響は小さいものであった。しかし、減速後はCSRによる運動量広がりが相対的に無視できないほどの大きさになっている。そのためバunch内の個々の電子の速度差が表れ、バunch長の広がりを起こしている。

図6、図7に、電子ビーム光学系最適化後の関数とビームサイズの図をそれぞれ示す。

図7のビームサイズでは、全体を通して水平方向・垂直方向のサイズ 8.5mm を下回るような結果を出すことが出来た。

3. まとめ、考察

バunch圧縮モードにおいて、電子ビーム光学系の最適化によってバunchを約 40fs まで圧縮することに成功した。また、ダンプまでのビーム輸送に

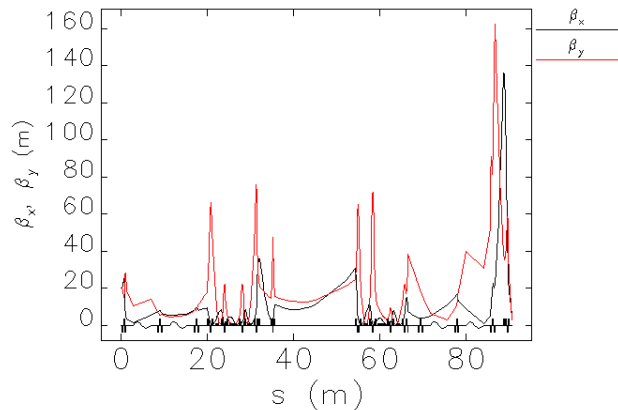


図6: 水平方向と垂直方向の関数

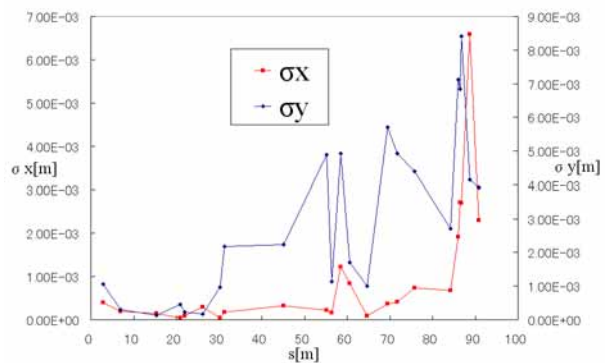


図7: 電子軌道に沿った水平・垂直方向のビームサイズ

おいても、最適化によってビームサイズを 8.5mm 以下まで抑え込むことができた。さらなる最適化作業を行い、減速後でのビームサイズや運動量広がり増大を抑えていく必要がある。

今回の発表ではバunch当りの電荷が 77pC での最適化の結果を報告したが、同じ光学系ではバunch内電荷を5倍にした 385pC では第1アーク部出口で約 100fs までバunch長が伸びてしまう。電荷に応じた最適化が必要である。また、電荷に限らず、初期のバunch長、エミッタンス、運動量広がりの変化に応じて最適化を行い、その影響について調べていく予定である。

参考文献

- [1] 羽島良一、中村典雄、坂中章吾、小林幸則（編）“コンパクトERLの設計研究” KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032, February 2008 A
- [2] 「放射光将来計画検討報告」2003年3月。高エネルギー加速器研究機構。諏訪田・飯田編集。ホームページ <http://pfwww.kek.jp>