

## コンパクト ERL におけるバンチ圧縮のオプティクス

### BEAM OPTICS FOR BUNCH COMPRESSION AT THE COMPACT ERL

島田 美帆<sup>#</sup>, 宮島 司, 中村 典雄, 本田 洋介, 上田 明, 帯名 崇, 高井 良太, 原田 健太郎  
Miho Shimada<sup>#</sup>, Tsukasa Miyajima, Norio Nakamura, Yosuke Honda, Akira Ueda, Takashi Obina, Ryota Takai,  
Kentarō Harada

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

#### Abstract

Bunch compression and its energy recovery are demonstrated at Compact Energy Recovery Linac (cERL) in KEK Tsukuba campus. A coherent optical transition radiation (CTR) measurement system is built up to confirm that the bunch length become shorter in the recirculation loop. The bunch length is extended to the initial bunch length in return arc for the beam deceleration and energy recovery without significant beam loss. The bunch compression is performed in several optics and the performance is compared with the simulation result of a start-to-end (S2E) tracking simulation.

#### 1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 ERL(Energy Recovery Linac)は、極めて質の高い電子ビームを 100 mA で供給することができることから、高輝度 X 線放射光源として期待されている。その実現を目指して、高輝度電子銃や CW 超伝導加速空洞などの開発を行っているほか 20 MeV の Compact ERL(cERL)を立ち上げてビームスタディを行っている。ERL の特徴の一つは 100 fs 以下の極短パルスであり、低いエミッタンスも兼ねたビームが実現できれば、CW XFEL や EUV-FEL などにも応用が可能である。この質の高い極短バンチのためには高度なバンチ圧縮の技術が必要不可欠である[1]。そこで、cERL においてバンチ圧縮のスタディを実施し、Start-to-end (S2E) simulation との比較および検証を行った[2,3,4]。

ERL においては、周回ループのアーカ部を通過した後にビームを利用することを想定している。アーカ部の CSR wake によるエミッタンス増加の影響を最小に抑えるため、バンチ圧縮は最大エネルギー (20 MeV) まで加速したのちに実施する方針である。オフcrest加速でバンチの先頭と後尾で運動量に差を与え、運動量によって周回時間が変わるようにアーカ部を通過させると、バンチ長をコントロールすることができる。バンチ長が短くなっていることを確認するために、THz 領域で放射する Coherent Transition radiation (CTR)を測定した。

#### 2. オプティクス設計とトラッキングシミュレーション

##### 2.1 ERL 周回ループにおけるバンチ圧縮

バンチ内における電子の進行方向の位置と運動量のずれをそれぞれ  $z$  および  $\Delta p$  とすると、アーカ部通過後の  $z$  の変化  $\Delta z$  は次のように表すことができる。

$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta p}{p_0} + R_{566} \left( \frac{\Delta p}{p_0} \right)^2 + \dots, \quad (1)$$

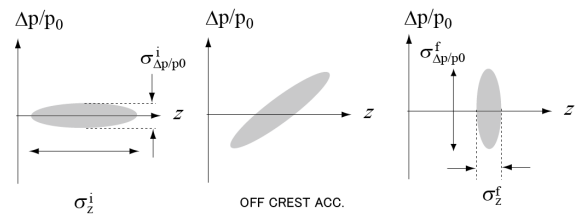


Figure 1: Schematic figure of longitudinal phase space in 1st order at bunch compression.

ここで、参照電子の運動量は  $p_0$ 、進行方向の位置は  $z=0$  であり、先頭が正、後尾が負の値を持つように定義した。一般的なアーカ部では、運動量の高いエネルギーが遅れるため、 $R_{56}$  の符号は負となる。

単純なモデルを用いると、最適な加速位相  $\phi_{RF}$  と最短バンチ長が  $R_{56}$  から推測することができる。

$$R_{56} \sim \frac{c}{2\pi f_{RF}} \frac{1}{\sin \phi_{RF}}, \quad \sigma_z^f \sim R_{56} \sigma_{\Delta p/p_0}^i, \quad (2)$$

ここで、 $f_{RF}$  は RF の周波数 1.3 GHz である。上付文字  $i$  および  $f$  は加速前とバンチ圧縮後を示す。

極短バンチを目指すには、運動量差による速度差、RF カーブやアーカ部の転送行列の高次項の影響も補正する必要がある。cERL では 2 次の項を補正するために、アーカ部に 6 極電磁石を設置してバンチ圧縮の最適化に用いた。

##### 2.2 cERL のレイアウトとオプティクス設計

Figure 2 に cERL のレイアウトとバンチ圧縮の縦方向の位相空間の推移を載せる。オフcrest加速に

<sup>#</sup> miho.shimada@kek.jp

よって電子バンチの前後で傾斜の与え、等時性のないアーク部を通過させるとバンチ長を変えることができる。2つのアーク部は quasi-triple bending achromat で構成され、2つの triplet で  $R_{56}$  を調整することができる。さらに

0.1m の厚さの六極電磁石が 2 つのアーク部にそれぞれ 2 台ずつ設置されており、 $R_{566}$  の調整に用いた[5]。

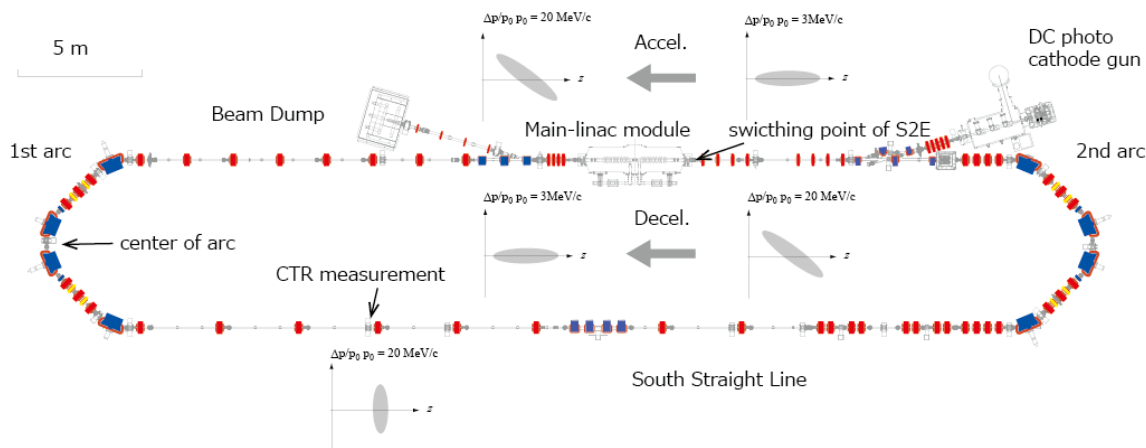


Figure 2: Schematic figures of longitudinal phase space of bunch compression and energy recovery in cERL. Simulation code used in start-to-end simulation is switched from GPT to elegant at the switching point.

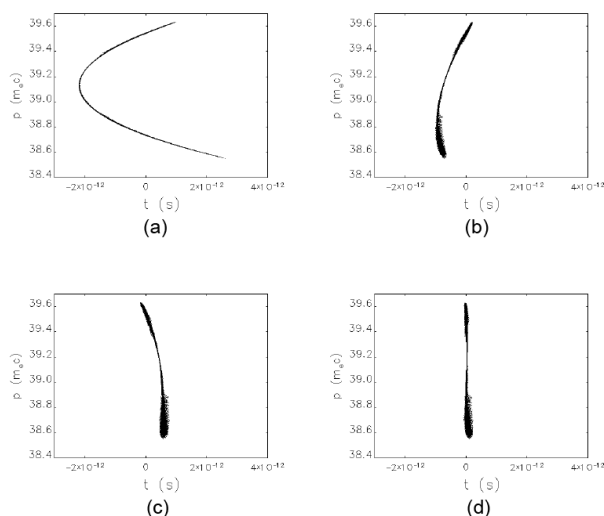


Figure 3: Longitudinal phase space at the CTR measurement system in which  $\phi_{RF}$  is 16 degree. (a) without SX  $\sigma_t = 890$  fs (b) sequential  $R_{56}$  and  $R_{566}$  optimization with ELEGANT command,  $\sigma_t = 300$  fs (c) sequential  $R_{56}$  and  $R_{566}$  optimization in the same manner as beam study,  $\sigma_t = 180$  fs (d) iteration of the optimization of  $R_{56}$  and  $R_{566}$  of (c),  $\sigma_t = 22$  fs

第1アークは CTR 測定個所でバンチ長を最短にするために最適化を行ったが、第2アークはエネルギー回収のときのビームロスを最低限に抑えるための調整を行っている。減速位相は加速位相から 180 度ずらした位相に

設定し、 $R_{56}$  を第1アークと逆符号に設定してバンチ長を元の長さに戻している。さらに、 $R_{566}$  の調整で2次の項を補正した。このような最適化によってエネルギー回収後のエネルギー広がりを最小に抑えることができ、ビームロスを少なくすることができる。

### 2.3 トラッキングシミュレーション

電子銃からエネルギー回収後までの start-to-end のトラッキングシミュレーションを General Particle Tracer (GPT) と ELEGANT の 2 つの計算コードで実施した [6,7,8]。GPT では低いエネルギーで顕著になる空間電荷効果を模擬することができ、電子銃から主加速空洞で加速する直前までのシミュレーションで使用した。下流の周回ループでは計算時間短縮のために ELEGANT のコードを利用しており、バンチ圧縮の最適化や 1次元の CSR wake の計算に使用した。2つのコードは Figure 2 に示した switching point で 6次元粒子分布を受け渡した。時間短縮のために 2k~20k の粒子分布のデータをオプションの最適化に使用し、最終的な結果を 100k の粒子数で求めた。

トラッキングシミュレーションはできる限りビームスタディと同じパラメータと手順で行った。バンチ電荷は 0.5 pC であり、入射エネルギーはおよそ 3 MeV である。主加速空洞の位相  $\phi_{RF}$  を固定した後、加速後のエネルギーが 20 MeV になるように加速空洞の電圧を調整している。第1アークでは achromat を維持しながら  $R_{56}$  を変えるが、ワンクリックで調整できるように専用のパネルを使用した。この調整では、triplet のうちアーク中心に近い 1 台を固定

し、残る 2 台の K 値を 1:2 の比率で変更している。そしてアーク内の 2 つの triplet は鏡対象になるように設定した。このような手順で、CTR を測定する個所でバンチ長が最短になるように  $R_{56}$  を最適化した後に  $R_{566}$  の最適化を行った。各アークに 2 つの六極電磁石があるが、そのうち上流の 1 台を使用した。Figure 3 に  $\phi_{RF}$  が 18 度の結果を載せる。六極電磁石を使用することによってバンチ長がより小さくなるのがわかる。(b)、(c)と(d)は  $R_{56}$  および  $R_{566}$  のマッチングの手法が異なる。(b)ではマッチングに ELEGANT の機能を使用した、(c)と(d)ではスタディで使用した調整パネルを再現した。(b)と(c)では  $R_{56}$  と  $R_{566}$  の最適化をそれぞれ 1 回ずつ行ったが、(d)では 2 回繰り返したものである。シミュレーションの結果によると、最適化を繰り返すことによってバンチ長がさらに小さくなるのがわかる。

Figure 4 が  $\phi_{RF}$  を 4, 8, 12, 16 度としたときの結果である。最適化の手法は Fig.3 の (b)と同じである。4 度のときは必要とする六極電磁石の強さが励磁可能な磁場を超えていたため、バンチ圧縮の効果が少なかった。8 度でバンチ長が最短となる。これは、RF カーブや転送行列の高次項などの影響が偶然キャンセルしたためと考えられる。

加速位相  $\phi_{RF}$  が 8 度の場合でエネルギー回収までトラックを行った。第 2 アークの調整は説明したように、バンチ長を元に戻して、エネルギー回収後のエネルギー広がりを小さく抑えることである。第 1 アークと同様に  $R_{56}$  の最適化を行った後に  $R_{566}$  の最適化を行った。Figure 5 に入射ビーム (Switching point) とエネルギー回収直後の縦方向の位相空間を比較する。バンチ長とエネルギー広がりもともに数 10% の誤差で元の大きさに戻すことができることが分かった。バンチ長とエネルギー広がり の推移を Fig.6 に示す。

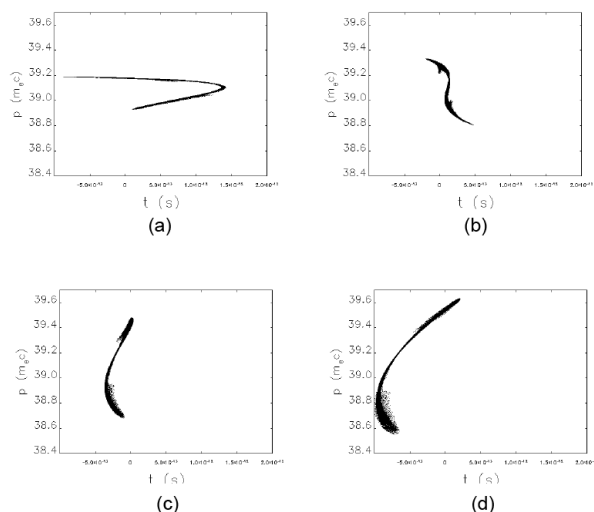


Figure 4: Longitudinal phase space at the CTR measurement system in which sequential  $R_{56}$  and  $R_{566}$  optimization with ELEGANT command. (a)  $\phi_{RF}$  is 4 degree,  $\sigma_t = 460$  fs (b)  $\phi_{RF}$  is 8 degree,  $\sigma_t = 64$  fs (c)  $\phi_{RF}$  is 12 degree,  $\sigma_t = 110$  fs (d)  $\phi_{RF}$  is 16 degree,  $\sigma_t = 300$  fs

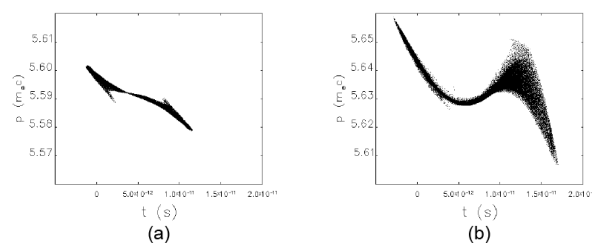


Figure 5: Longitudinal phase space of (a) entrance of the main linac before full acceleration (switching point) and (b) exit of the main linac after energy recovery.

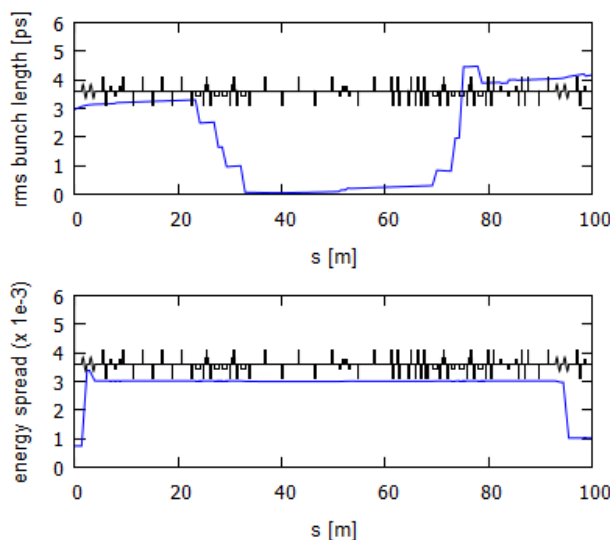


Figure 6: Numerical tracking results of S2E simulation in the recirculation loop.

### 3. バンチ圧縮の実施とオプティクス調整

ビームスタディでは、オンクレスト加速でエネルギー広がり の測定を行ったところ、RF カーブを含めたエネルギー広がりが  $2e-4$  であった。その後、加速位相  $\phi_{RF}$  が 4, 8, 16.5 と 16.5 度の場合で周回エネルギーが 20 MeV になるように加速電圧を調整して偏向電磁石で確認を行った。THz CTR の応答が最大になるように、 $R_{56}$  調整パネルと上流の六極電磁石で順番に調整した。THz CTR の測定は狭帯域の Schottky diode 検出器 (Virginia Diode Instruments, WR-3.4ZBD) を用いた。

ただし、 $R_{56}$  を直接測定することが困難であったため、分散関数  $\eta$  の測定結果から間接的に  $R_{56}$  を推定した。その関係式は次のように表すことができる。

$$R_{56} = \int \frac{\eta(s)}{\rho(s)} ds, \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は曲率半径であり、偏向電磁石のみで有限の値を持ち直線部では無限大となる。アーク部の線形オプティクスは鏡対称で achromat の条件を満たすように設計している。cERL の場合、アーク中心の分散関数  $\eta_c$  と  $R_{56}$  の関係が線形で近似することができ、 $R_{56} = 1.41 \eta_c -$

0.34 となる。Figure 7 に最適化したオプティクス の  $R_{56}$  と  $\phi_{RF}$  の関係を示す。実測値と式(2)の線形モデルとの結果はよく一致している。エネルギー広がり の測定結果を基にすると、8 度で 200 fs 程度、 $\pm 16.5$  度で 100 fs より短くなっていることが予想される。4 度と 8 度で S2E simulation の結果と開きが見られるが、現在調査中である。一つの要因として、rms バンチ長が最短になる条件と CTR の信号が最大になる条件が異なることが考えられる。 $\phi_{RF}$  が 8 度のときに、CTR の信号が最大となったのは六極電磁石を  $-50$  [ $m^{-3}$ ] 付近に励磁した時であった。一方で S2E simulation の結果は  $-67$  [ $m^{-3}$ ] であった。1 次の項で合っていないため 2 次の項の絶対量については議論できないが、符号の向きは一致している。

エネルギー回収は  $\phi_{RF}$  が 8 度で実施した。最初に第 2 アーク内の 4 つのステアリング電磁石で軌道長を調整することにより、減速ビームのエネルギーが最小になるように調整を行っている。その後、 $R_{56}$  と  $R_{566}$  の最適化を順番に行った。この調整により、エネルギー回収に成功し、十分に少ないビームロスで 50  $\mu A$  の CW 運転を行うことができた。Figure 8 に示すように、分散関数の測定値はデザイン値とよく一致した。

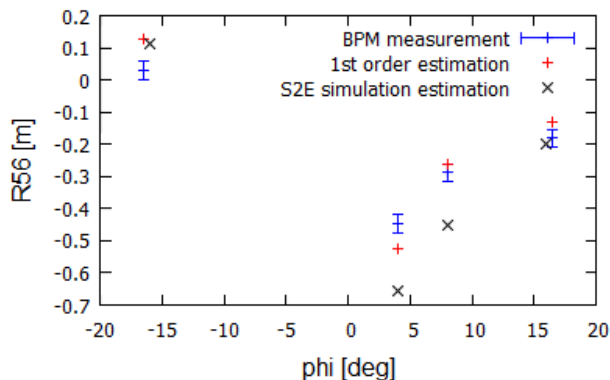


Figure 7: Relationship between RF phase and  $R_{56}$  of the first arc. The sign of  $R_{56}$  is opposite to the definition of ELEGANT.

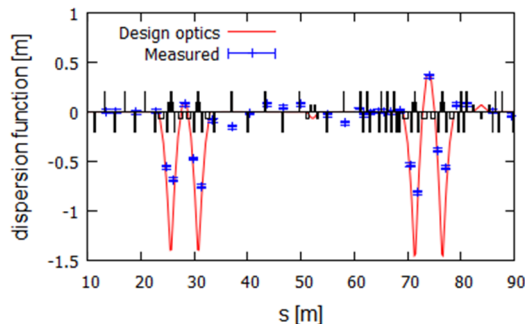


Figure 8: Dispersion function of the design optics of S2E simulation and measured one at energy recovery operation. The error bar is corresponding to 0.2 mm of BPM measurement.

#### 4. まとめ

バンチ圧縮を cERL で実施し、その結果をシミュレーションと比較した。S2E シミュレーションはビームスタディのパラメータと手順を再現した。定量的には不一致も見られたが、定性的な傾向は一致していた。今後は THz CTR の測定結果との比較や、定量的な評価を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] N. Nakamura *et al.*, “Simulation study on bunch compression and decompression for the compact ERL”, Proc. of IPAC’15, Richmond VA, USA, p.1591 (2015).
- [2] T. Obina *et al.*, “Recent developments and operational status of the compact ERL at KEK”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p.1835 (2016).
- [3] Yosuke Honda, “Bunch Length and Radiation Spectrum Measurement at Return Loop of cERL”, Proceedings of the 13-th Annual Meeting of Particle Society of Japan, MOP077, 2016.
- [4] M. Shimada *et al.*, “Bunch compression at the recirculation loop of Compact ERL”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p.3008 (2016)
- [5] A. Ueda *et al.*, “Design and fabrication of the compact-ERL magnets”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p.1111 (2016).
- [6] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>
- [7] User’s Manual for elegant, [http://www.aps.anl.gov/Accelerator\\_Systems\\_Division/Accelerator\\_Operations\\_Physics/manuals/elegant\\_latest/elegant.pdf](http://www.aps.anl.gov/Accelerator_Systems_Division/Accelerator_Operations_Physics/manuals/elegant_latest/elegant.pdf)
- [8] M. Shimada *et al.*, “Approach to a start-to-end simulation of 2-loop compact energy recovery linac”, Proc. of IPAC’11, San Sebastian, Spain, p.1909 (2011)