

ERL 試験加速器入射部における縦方向ビーム性能評価

LONGITUDINAL BEAM PERFORMANCE MEASUREMENT AT COMPACT-ERL INJECTOR

本田洋介 ^{*A)}、宮島司 ^{A)}、コンパクト ERL コミッショニンググループ ^{B)}
 Yosuke Honda ^{*A)}, Tsukasa Miyajima ^{A)}, Compact ERL commissioning group ^{B)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization
^{B)}KEK / JAEA / Hiroshima university

Abstract

Commissioning operation of Compact-ERL injector has started in KEK. It consists of a photo-cathode electron gun, a super conducting accelerator, and a beam diagnostic line. The beam diagnostic line was built for proving the performance of the injector. It has a bunch length monitor with an RF deflection cavity system, an energy spread measurement system at a dispersive section. We did a series of longitudinal beam characteristics measurements at bunch charge up to 7.7 pC/bunch.

1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) は、大平均電流、低エミッタンス、短バンチ、を実現できる次世代の加速器である。KEK では、その将来の放射光源への応用を目的の一つとして、開発を行ってきており、試験加速器 (コンパクト ERL) を建設している。目標は、建設を通じて要素技術の開発を行い、実際の運転の形態において動作実績を蓄積することである。また同時に、建設とビームコミッショニングを通じて人と組織を育て、将来の実機の建設の準備をすることも重要な目的である。

線形加速器では、ビーム性能は主に入射器の性能で決まる。電子銃から入射器加速空洞までの、非相対論的エネルギー領域の設計が特に重要である。次世代放射光源としての性能を検討する際、入射器における、高輝度、短パルスのビームの実証が重要になる。ビーム性能について十分な評価が出来るように、ビーム周回部とは独立のビーム診断専用のビームラインを準備した。

2013 年 4 月より、コンパクト ERL 入射部の運転が開始された。Figure 1 にビームラインのレイアウトを示す。光陰極 DC 電子銃で電子ビームを生成し、CW 運転の超伝導加速空洞により 5.6 MeV までの加速を行う。入射部だけの運転では、周回部に向かうマージャー部をオフにすることでビームを直進させ、診断ラインに導く。ビームは 16 度に偏向したあと調整用のダンプに到達する。ここでは、診断ラインにおける縦方向のビーム性能の評価の結果についてまとめる。

2. 入射器診断ライン

2.1 診断ラインの設計

入射器におけるビームパラメータの設計値を Table 1 に示す。診断ラインにおいては、ビーム電流、エネルギー、ビーム位置、プロファイルなどの基本的な測定に加えて、エミッタンス ^[1]、バンチ長、エネルギー拡がりについて評価を行う。

コミッショニング時は、ビーム輸送の確立を優先した調整を行った為、加速器のパラメータは最終的な設計値

では無い。具体的には、加速空洞は全てオンクレスト位相に調整されている点と、バンチャーの電圧は低めとしている点が異なる。また、電子銃の電圧は、設計の 500 kV ではなく、390 kV で運転している。

Table 1: Beam parameters to be measured

Parameter	design value	comment
Q	7.7 pC/bunch	1.3 GHz 繰り返しで 10mA 相当
γ	10.84	全エネルギー 5.54 MeV
σ_γ	0.0184	エネルギー拡がり 0.17%
ϵ_n	0.21 m	規格化エミッタンス
σ_t	2.13 ps	RMS バンチ長

2.2 ビームの運転モード

コンパクト ERL は、本来は CW ビーム運転を目標としている。しかし、ここでは破壊的な方法でビーム診断を行う必要があるため、マクロパルスモード ^[2] で運転を行った。このモードでは、加速空洞の RF や電子銃の高電圧は CW 運転状態であるが、電子銃カソードの励起レーザーを時間的に切り取って運転することで、ビームの時間幅を制限する。典型的には、5Hz で運転し、ビームモニタもこれに同期している。

Table 2: Beam operational mode for beam diagnostics.

Parameter	value
バンチの基本繰り返し	1.3 GHz
マクロパルス繰り返し	5 Hz (Typ.)
マクロパルス時間幅	1 s (Typ.)
マクロパルス立ち上り (立ち下り)	10 ns
マクロパルス内バンチ数	1300

3. バンチ長測定の設定アップ

Figure 2 に示す、RF 偏向空洞のシステムで測定を行う。ビームが空洞を通過する際に横方向に時間変化する

* yosuke@post.kek.jp

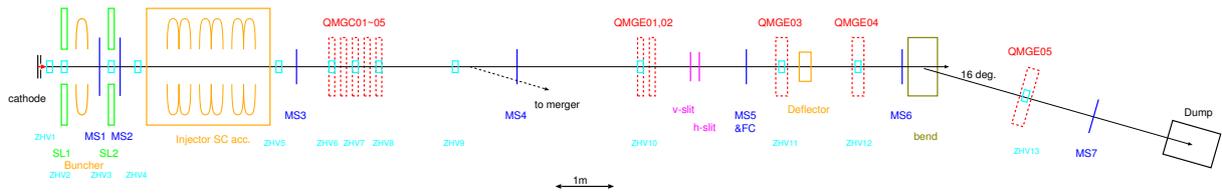


Figure 1: Layout of the compact-ERL injector and the beam diagnostic line.

キックを与え、下流のスクリーンモニタにおいて位置に時間軸を射影する。

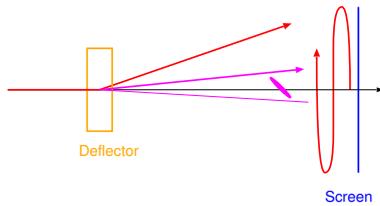


Figure 2: Scheme of the beam deflector system.

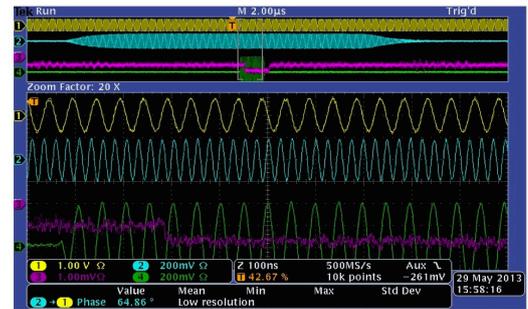


Figure 4: Operation of the deflection cavity.

3.1 偏向空洞

以前に電子銃のバンチ測定で用いていた偏向空洞のシステム^[3]を移設して使用した。空洞の構造を Figure 3 に示す。直方体型のダイポールモード空洞で、ビーム軸上の磁場により垂直方向にビームをキックする。空洞の周波数は 2.6 GHz で、バンチ繰り返しの 2 倍の周波数である。空洞の Q_L 値は 7000 である。周波数は冷却水温度によって微調整される。同軸ケーブルによってパワーを入力し、ピックアップポートからモニタされる。

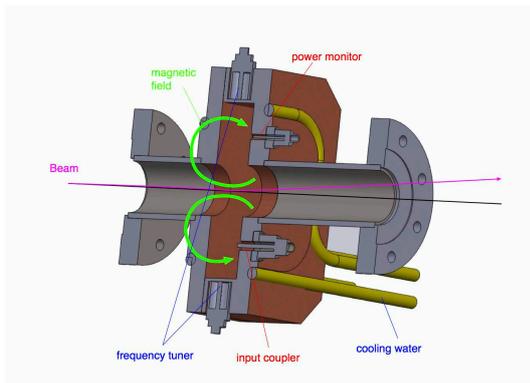


Figure 3: Structure of the deflection cavity.

ビームの時間幅は $1 \mu\text{s}$ なので、偏向空洞の RF 源はこれより十分大きな時間幅が得られれば、パルス動作でも構わない。大きなピークパワーが得られ、平均熱負荷も小さく済むので、 $10 \mu\text{s}$ の時間幅で 400 W を出力できる半導体パルスアンプを使用した。Figure 4 にピックアップポートからモニタした空洞信号 (ダウンコンバートしたもの) と、ビーム信号 (ファラデカップ) を示す。ビームのプリトリガ信号によってパルスアンプを起動し、パワーが立ち上がった時点でビームが到達する様子が分かる。

3.2 ビーム光学

限られた伝搬距離で感度を得る為に、Figure 5 に示すような発散光学系を設計した。偏向空洞とスクリーンの間に四極電磁石を設置し、空洞によるキックを拡大する。ただし、そのままではビームサイズも拡大されてしまい、分解能としては得しない。上流の電磁石を同時に調整し、スクリーンでビームを絞られた状態に保つようにする。

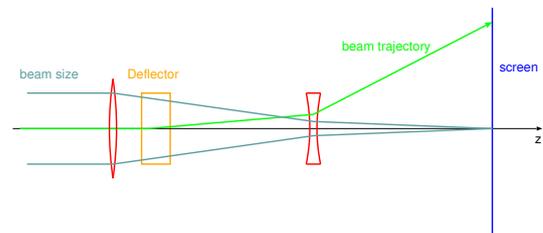


Figure 5: Beam optics for expanding sensitivity.

3.3 感度の校正と測定例

校正のために、スクリーンモニタでのビーム位置を偏向空洞の位相を変えて測定した例を Figure 6 に示す。位相をゼロクロスに合わせ、測定した例を Figure 7 に示す。偏向空洞のキックによって、十分に時間方向の情報が得られることが分かる。典型的な運転状況では、 2.9 pixel/ps の感度で、偏向空洞オフのときのスポットサイズが 2 pixel 程度なので、 0.7 ps の時間分解能が得られる。

4. エネルギー拡がり測定のセットアップ

4.1 エネルギー拡がりの測定

バンチのエネルギー拡がりは、偏向電磁石下流の運動量分散の大きな位置にあるスクリーンモニタを使用

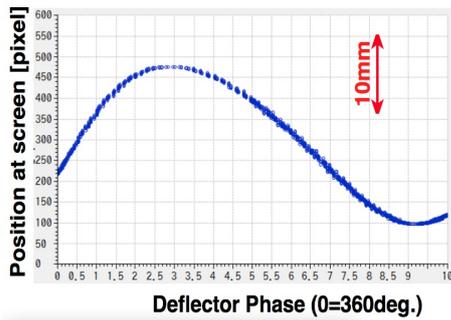


Figure 6: Calibration of deflector sensitivity.

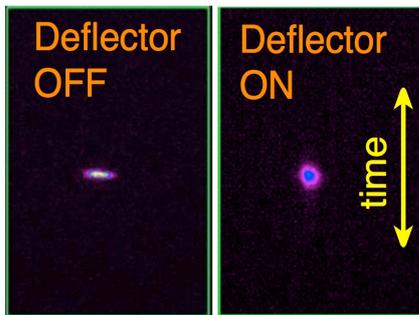


Figure 7: Example of bunch length measurement.

して測定した。

分散は偏向角度と距離で決まり、Equation 1 で与えられる。

$$\eta = L\theta \quad (1)$$

今、途中の四極電磁石はオフの状態、スクリーンモニタの位置での分散は $\eta = 0.825 \text{ m}$ である。ビームサイズは、Equation 2 のように、エミッタンスによる項と分散による項から成る。

$$\sigma = \sqrt{\beta\epsilon + (\eta \frac{\sigma_p}{p})^2} \quad (2)$$

偏向電磁石上流の四極電磁石を用いて水平方向に収束する条件とした。エミッタンスは十分小さいので^[1]、この条件ではエミッタンスによる項は十分小さくなり、スクリーンモニタで測定した水平方向プロファイルは、運動量分布を示すことになる。Figure 8 に、測定されるプロファイルの例を示す。

4.2 縦方向位相空間の測定

Figure 9 のように、エネルギー拡がり測定において、偏向空洞による垂直方向のキックを同時に行うと、スクリーンモニタの画像にエネルギーと時間を同時に示すことができ、縦方向位相空間の様子が分かる。このとき、そのままでは Figure 8 に示したように垂直方向にはビームサイズが大きくなってしまふ。このため、上流のスリットスキャナを併用して、垂直方向のビームサイズを制限して測定を行った。Figure 10 に測定例を示す。画像の横軸が運動量、縦軸が時間を示す画像が得られる。バンチがオンクレスト加速されていると、バンチ中央部のエネルギーが最大になるような、三日月型のプロファイルになる。

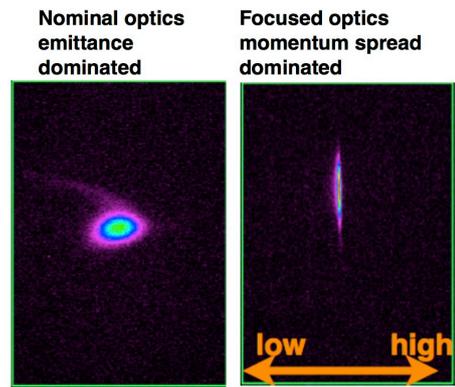


Figure 8: Beam profile at damp line screen monitor.

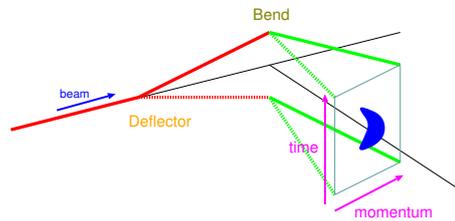


Figure 9: Setup for longitudinal phase space measurement.

5. 測定結果

5.1 ビーム条件

バンチ電荷を最大 7.7 pC/bunch(1.3 GHz で 10 mA に相当) まで変えて、診断ラインでバンチ長およびエネルギー拡がりの測定を行った。電子銃における初期バンチ長は、フォトカソードを励起するレーザーの運転状態が決まる。今回は 2 種類の運転条件で測定を行った^[2]。3 ps (RMS) のガウス型時間分布のレーザーで励起し、始めから短パルスのビームを生成する短パルス条件と、空間電荷効果を抑制するために、16 ps (FWHM) のフラットトップ時間構造でレーザーを照射する長パルス条件である。どちらの場合も、バンチャーは 50 kV の加速電圧で運転しており、診断部ではバンチが圧縮される。

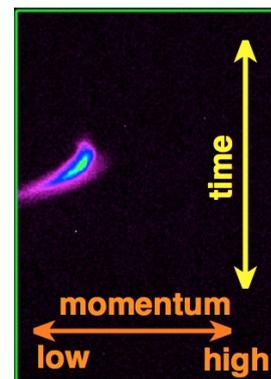


Figure 10: Example of longitudinal phase space profile.

5.2 バンチ長の測定結果

Figure 11 は、バンチ長測定においてスクリーンモニタで得られたプロファイルの一例である。これをガウス関数でフィッティングし、RMS サイズを得る。偏向空洞のオンオフでサイズを測定し、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ON}^2 - \sigma_{OFF}^2} \quad (3)$$

により、分解能の寄与を差し引いて評価し、校正係数からバンチ長を計算した。

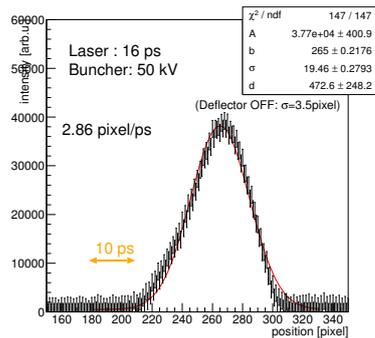


Figure 11: Bunch time structure at 7.7 pC/bunch.

バンチ電荷を変えて測定を行い、Figure 12 の結果を得た。レーザーの運転条件について、短パルスと長パルスで測定を行ったが、大きな違いは見られない。運転条件におけるシミュレーション計算の結果も同時に示した。実験結果は計算の 2 倍程度のバンチ長になっており、今後、詳細な調査が必要である。

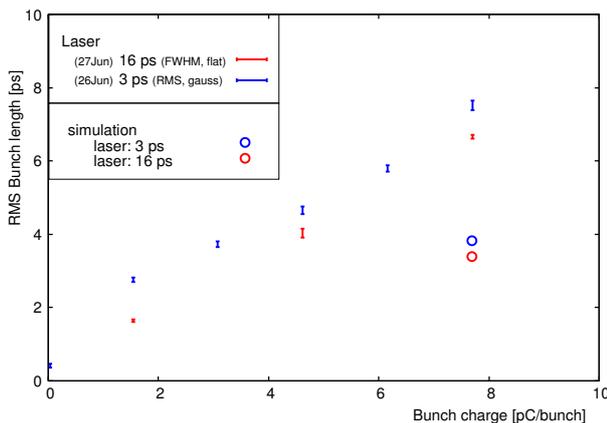


Figure 12: Result of bunch length measurement.

5.3 エネルギー拡がりの測定結果

Figure 13 は、エネルギー拡がり測定においてスクリーンモニタで得られたプロファイルの一例である。分布から直接に RMS 幅を計算した。バンチ電荷を変えて測定を行い、Figure 14 の結果を得た。はじめ、レーザー短パルス条件で一通りの測定を行ったあと、縦方向位相空間の測定を行いながらオンクレスト微調整を行った。このため、レーザー 3 ps のデータは少しエネルギー拡がり

が大きい。ただし、調整後に測定をやり直した 1 点 (7.7 pC/bunch) についてはエネルギー拡がりが小さくなったことが確認できる。実験結果はシミュレーション計算と大きな違いは無いと考えている。

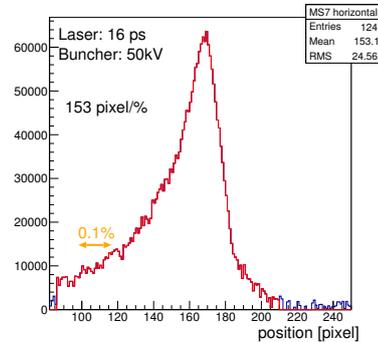


Figure 13: Momentum distribution at 7.7 pC/bunch.

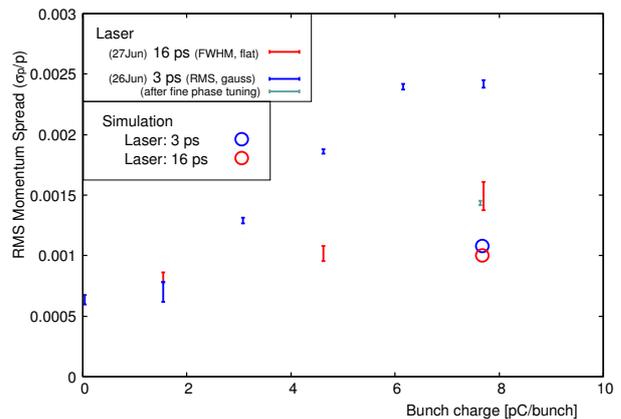


Figure 14: Result of energy spread measurement.

6. まとめ

コンパクト ERL 加速器は、入射器のコミッショニング運転が開始した。入射器の性能を評価するための診断ラインが設置され、偏向空洞システムと分散ラインを利用して、バンチ長とエネルギー拡がりが測定できる。バンチ電荷 7.7 pC/bunch において、RMS バンチ長は 7 ps、RMS エネルギー拡がりは 0.15 % が得られた。今期のビーム運転は一通りの立ち上げを行うことが第一の目標で、系統的なビームの調整には時間がとれていない。詳細なビーム調整は今後の課題である。

参考文献

- [1] Y. Honda *et al.*, "TRANSVERSE BEAM PERFORMANCE MEASUREMENT AT COMPACT-ERL INJECTOR", 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SUPO10
- [2] Y. Honda *et al.*, "PHOTO CATHODE LASER SYSTEM FOR COMPACT-ERL INJECTOR", 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SAP107
- [3] S. Matsuba *et al.*, "DEFLECTING CAVITY FOR BUNCH LENGTH DIAGNOSTICS AT COMPACT ERL INJECTOR", 第 7 回日本加速器学会年会, 姫路, 2010, THPS071