

ERL 試験加速器入射部における横方向ビーム性能評価

TRANSVERSE 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 an emittance measurement system with a slit scanner. We did a series of emittance measurements by changing bunch charge up to 7.7 pC/bunch. We also did the measurement at different conditions of initial pulse length aiming to check space charge effects.

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エミッタンス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 診断ラインの設計と運転状況

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、バンチ長、エネルギー拡がりについて評価を行う [1]。

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: Designed beam parameters at the exit of the injector.

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で運転を行った [2]。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、5 Hz で運転し、ビームモニタもこれに同期している。このモードのパラメータを Table 2 に示す。

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

* yosuke@post.kek.jp

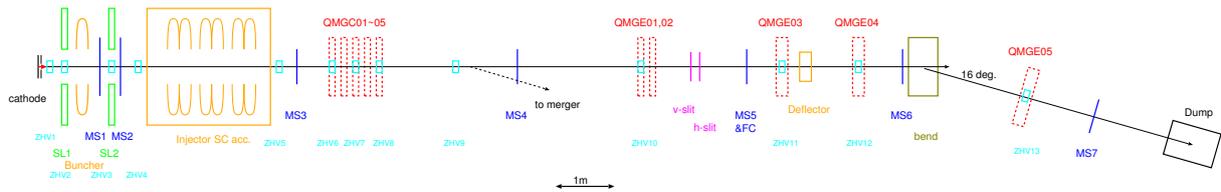


Figure 1: Layout of the compact-ERL injector and the beam diagnostic line.

2.3 ビームモニタ

スクリーンモニタ ビームプロファイルの測定は、スクリーンモニタで行う。厚み 0.1 mm の Ce:YAG シンチレータを、ビーム軸にたいして 45 度に挿入し、90 度方向のビューポートからカメラで観測するセットアップである。Figure 2 にセットアップを示す。加速器システムは CW で動作しているため、暗電流によって、あるいはマクロパルス切り出しの消光比が悪いと、スクリーンモニタが連続的に発光してしまう恐れがある。Ce:YAG シンチレータは、発光の時定数が短い為、短い露光時間で撮影することで、ビームタイミングに制限した測定が可能である。Ethernet 接続の CCD カメラ (Allied Vision Technologies 社 Prosilica GC650) を用いている。画素数は 659×493 で、ダイナミックレンジは 12-bit である。f35 のレンズをとりつけてシンチレータを結像し、画像における 1 ピクセルがスクリーンでのサイズ 54 μm に対応する。ビームタイミングでトリガし、典型的に露光時間 10 μs で読み出している。分解能は、水平方向 72 μm、垂直方向 33 μm と見積もられている。

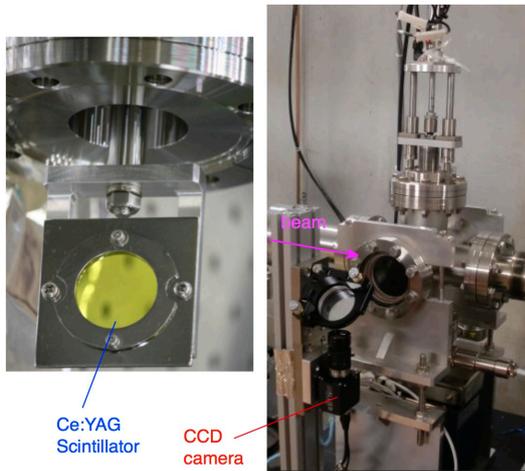


Figure 2: Setup of the screen monitor.

スリットスキャナ エミッタンスの測定は、スリットスキャン法で行った。厚み 1 mm のタングステン板にワイヤー放電加工で幅 100 μm のスリットを加工したターゲットを、ダブルベローズ式のスキャナチャンバに設置した。水平方向のスリットが垂直方向に移動するもの (v-slit、垂直エミッタンス測定用) と、垂直方向のスリットが水平方向に移動するもの (h-slit、水平エミッタンス測定用) が独立に設置されている。Figure 3 にセットアップを示す。

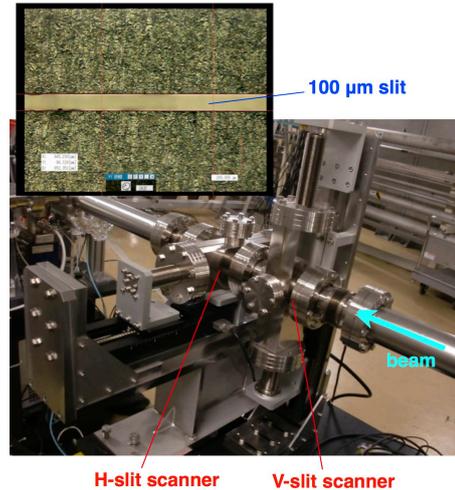


Figure 3: Setup of the slit scanner.

2.4 ビーム調整

診断ラインには、四極電磁石が設置されており、それらは 0.5 mm 以下の精度で設置されている。ビーム軌道は補正電磁石を用いて行うが、ビーム応答から、これら電磁石の磁場中心に調整している。加速空洞とバンチャー空洞についても同様に、ビーム応答から軌道の調整を行っている。

3. エミッタンス測定の設定アップ

電子銃のみ 390keV での運転時の入射部のエミッタンスと、超伝導加速空洞により 5.6MeV に加速した診断部のエミッタンスの測定を行った。入射部については、ソレノイド電磁石によって収束させるウェストスキャン法を用いた。ただし、空間電荷効果が影響しない低電荷条件の測定である。診断部については、低電荷条件では四極電磁石で収束するウェストスキャン法で、高電荷条件ではスリットスキャン法で測定を行った。

3.1 ウェストスキャン法による測定

点 1 に収束力 k の要素があり、そこから L だけ下流の点 2 においてビームサイズを測定する状況を考える。測定されるビームサイズ σ_2 は、Equation 1 で与えられる。(σ_1 は初期ビームサイズ、 α, β は Twiss パラメータである。)

$$\sigma_2 = \sqrt{L^2 \sigma_1^2 \left(k - \left(\frac{1}{L} - \frac{\alpha_1}{\beta_1} \right) \right)^2 + \frac{L^2 \epsilon^2}{\sigma_1^2}} \quad (1)$$

収束力 k を変えながらビームサイズ σ_2 を測定することで、エミッタンス ϵ を得る事ができる。

入射部では、収束にソレノイドを用いた。ソレノイドは収束と同時に像を回転させる作用もあるので、水平垂直の独立な測定にはならない。ここでは、円筒対称と仮定し、区別せず扱っている。診断部では、収束に四極電磁石を用いた。なお、電磁石の電流と収束力 k の関係が分かっている必要はないが、四極電磁石のビーム応答から確認している。

Figure 4 に、測定例を示す。スクリーンモニタの画像を射影して得たプロファイルがガウス関数でフィットし、RMS ビームサイズを得た。これを k にたいしてプロットしたものである。双曲線関数でフィットし、エミッタンスを求めた。

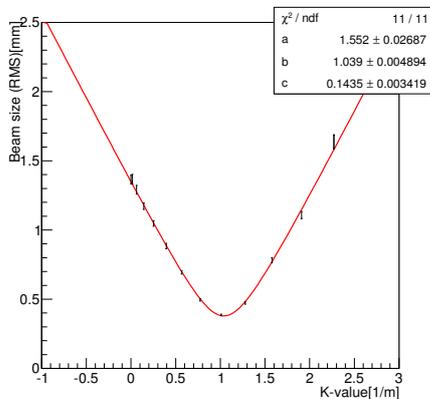


Figure 4: Example of a waist scan emittance measurement at the gun.

3.2 スリットスキャン法による測定

ウェストスキャン法では、距離を伝搬させながらビームを収束して測定する。このため、バンチ電荷が大きく空間電荷による発散力が無視出来ない領域では、単純な測定が出来ない。スリットスキャン法では、スリットで一部を切り取って、空間電荷効果の無視出来る低電荷としたうえで伝搬させる為、高バンチ電荷条件でも測定が可能である。Figure 5 に示す、スリットとスクリーンモニタによるセットアップで測定を行った。

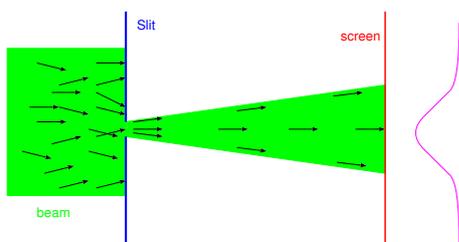


Figure 5: Scheme of slit-scan measurement.

スリットの位置 x をきめ、下流で測定したビームサイズから角度 x' の分布が分かる。 x をスキャンして測定し、位相空間での強度分布 $I(x, x')$ が得られる。Figure 6 は、測定した $I(x, x')$ の例である。そこから、Equation

2 の定義に従ってエミッタンスを計算した。

$$\epsilon = \sqrt{\overline{x^2 x'^2} - (\overline{x x'})^2} \quad (2)$$

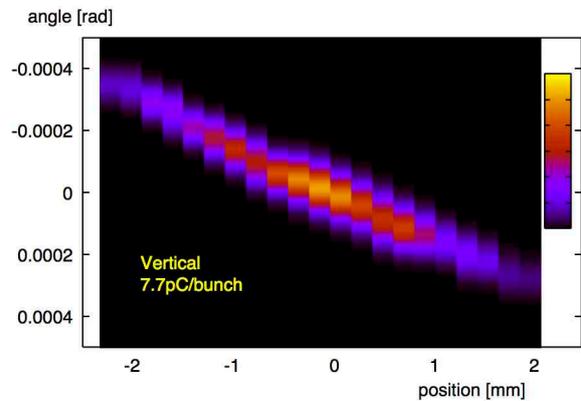


Figure 6: Phase space distribution measured by the slit-scanner system.

4. 測定結果

4.1 入射部のエミッタンス

電子銃で、カソードの特性で決まるビームが実現出来ていることを確認するため、10 fC/bunch 程度の低バンチ電荷で測定を行った。電子銃電圧は 390 kV である。ソレノイドとスクリーンモニタの組み合わせを変えて、同一のビーム条件で3種類のセットアップで測定した。結果を Figure 7 に示す。スクリーンモニタの水平および垂直方向のサイズ測定から別々に結果を得ているが、像の回転効果がある為これらは独立では無い。これらを合わせて、規格化エミッタンスは $\epsilon_n = 0.070 \pm 0.007 \mu\text{m}$ と評価された。

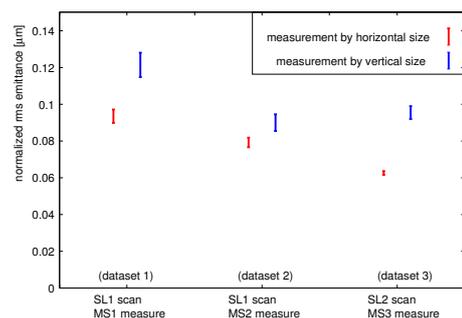


Figure 7: Emittance measurement at the gun.

今、カソード上でのレーザースポット直径は、 $D = 1.1 \text{ mm}$ と評価されている。エミッタンスは、カソードから放出時の1自由度辺りの横方向の運動エネルギーの平均 $\langle E_{k_x} \rangle$ と Equation 3 の関係になる。これより、 $\langle E_{k_x} \rangle = 16.6 \text{ meV}$ と見積もられ、NEA GaAs カソードで期待されている値が実現できている [3]。

$$\epsilon_n = \frac{D}{4} \sqrt{\frac{2\langle E_{k_x} \rangle}{m_0 c^2}} \quad (3)$$

4.2 診断部のエミッタンス

はじめに、同一条件のビームについて低電荷で2つの方法で測定を比較した。Figure 8 に結果を示す。測定方法に依らず一致した結果が得られることが確認できた。5.6 MeV まで加速後の規格化エミッタンスは、 $\epsilon_n = 0.195 \pm 0.005 \mu\text{m}$ である。入射部に比べ僅かにエミッタンスの増大が見られるが、問題になる程度では無い。

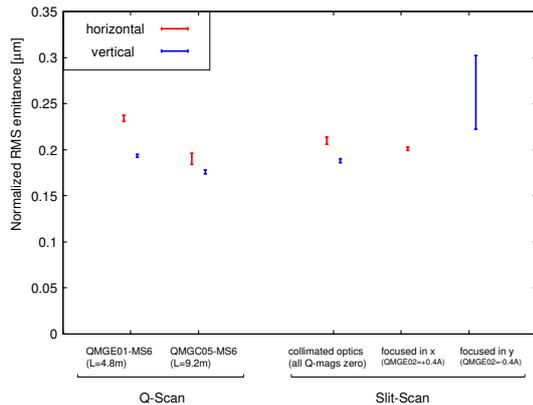


Figure 8: Comparison of Q-scan and Slit-scan measurements at low bunch charge.

高バンチ電荷条件では、スリットスキャン法で測定を行った。電子銃出射直後における電荷密度は、電子銃の光陰極を励起するレーザーのパルス時間幅に依存し、これによって空間電荷効果の様子が変わり、エミッタンスに影響すると期待される。レーザーの運転条件として、ガウス型の時間構造で RMS 幅が 3 ps の短パルスモードと、FWHM 幅が 16 ps の平坦な時間構造の長パルスモードが用意されている [2]。2 種類のレーザーの条件において、バンチ電荷を最大 7.7 pC/bunch (1.3 GHz 繰り返しにおいて 10 mA に相当) まで変えてエミッタンスを測定した。結果を Figure 9 に示す。バンチ電荷が高くなるにつれて、エミッタンスが大きくなる傾向が見られる。バンチ電荷 7.7 pC/bunch において、規格化エミッタンス $\epsilon_n = 0.8 \mu\text{m}$ が得られた。今の運転パラメータにおける、シミュレーション計算の値を同時に示している。レーザーが長パルスモードにおいては、エミッタンスが改善すると期待された。しかし、垂直方向についてはエミッタンスが小さくなる結果が得られたが、水平方向については改善せず、はっきりとした効果は得られていない。

5. 考察

レーザー長パルスモード、バンチ電荷 7.7 pC/bunch において、診断部スクリーンモニターで観測されたビームプロファイルを Figure 10 に示す。四極電磁石は全てオフの状態ビームを輸送しており、理想的には円筒対称のプロファイルになるべきであるが、大きく歪んでいる。バンチ電荷が高いほど、また、バンチャーの電圧が高いほど、プロファイルの歪みが顕著になる傾向がある。水平方向のエミッタンスが大きいのは、これを反映していることと思われる。今後、詳細な調査が必要である。

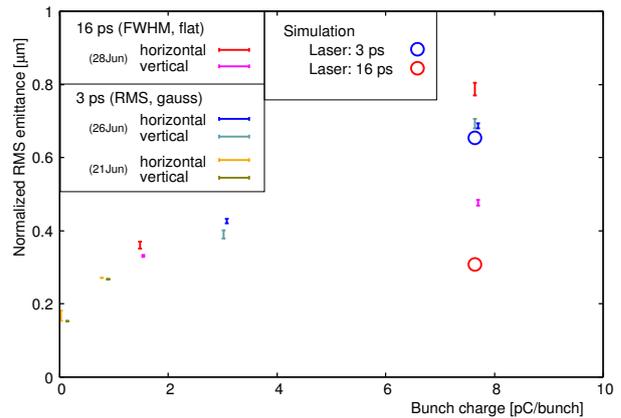


Figure 9: Result of emittance measurement.

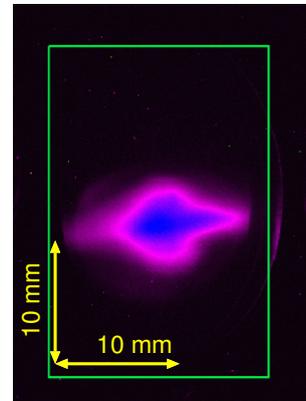


Figure 10: Beam profile at diagnostic line at high bunch charge of 7.7 pC/bunch.

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、スリットスキャン法によってエミッタンスの測定を行っている。バンチ電荷 7.7 pC/bunch において、規格化エミッタンス $1 \mu\text{m}$ 、の最初の目標は達成された。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.*, "LONGITUDINAL 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, SUP011
- [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.*, "EMITTANCE AND TEMPORAL RESPONSE MEASUREMENTS OF NEA GaAs PHOTO-CATHODES", 第 8 回日本加速器学会年会, つくば, 2011, MOPS073