

Beam dynamics in test beamline of cERL injector

Tsukasa Miyajima*, Yosuke Honda, Masahiro Yamamoto, Toshiya Muto, Takashi Uchiyama, Kotaro Sato, Shunya Matsuba, Shunsuke Nozawa, Makoto Tobiyama, Toshiyuki Mitsuhashi, Ryota Takai, Takeshi Takahashi, Toshiyuki Ozaki, Akira Ueda, Shinya Nagahashi, Miho Shimada, Kaiichi Haga, Tohru Honda, Shogo Sakanaka and Yukinori Kobayashi
KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

The compact ERL (cERL) is a test facility for future ERL light sources. The injector for the cERL consists of 500 kV photo cathode DC gun, two solenoid magnets, buncher cavity, three super conducting RF cavities and merger section to return pass. To test the cERL injector, a test beamline, which consists of DC gun, two solenoids and buncher cavity, have been developed in KEK AR south experimental hall since 2009. The layout of the test beamline is same as the cERL injector before super conducting cavities. The test beamline has a diagnostic beamline to measure emittance and bunch length after the second solenoid magnet. In this paper, beam dynamics simulation results in the cERL injector test beamline is reported.

cERL 入射器テストビームラインでのビームダイナミクス

1. はじめに

GeV クラスのビームエネルギーをもつエネルギー回収型リニアック (ERL) は、有力な次世代光源として、米国コーネル大学や APS など多くの研究所で研究開発が進められている。Compact ERL (cERL) 計画^[1] は、KEK、JAEA を中心とした日本の大学・研究機関によって ERL の実証機を建設し、キーとなる要素の開発、エネルギー回収の実証を行うための計画である。cERL 計画において建設予定の実証機は、2012 年稼働開始を目標に KEK 敷地内の東カウンターホールに、設計・建設が進められている。実証機建設に先立ち、ERL においてキーとなる要素である超伝導加速空洞、DC フォトカソード電子銃の開発が現在進められている。

ERL 光源では電子銃から生成された低エミッタンスをもつビームを、挿入光源などの放射光を発生させる位置まで、その品質を保って輸送することが重要となる。特に、電子銃から主加速空洞までのいわゆる入射器では、ビームエネルギーが低いために、空間電荷効果が重要な物理現象となる。ここでのビームダイナミクスを十分に理解し、ビーム調整法を確立することは、ERL 光源を実現する上で欠かせない項目である。また、フォトカソード電子銃はカソード寿命を長く保つために、非常に低い真空圧力 ($< 10^{-10}$ Pa) が要求されるが、実際には単独で運転されるわけではなく、複数の機器が接続されて運転されるため、ビームライン全体での真空やビームへの影響を、十分に調べておく必要がある。これらの目的のために、cERL 入射器テストビームラインとして、KEK 敷地内にある AR 南棟実験室に入射器の超伝導空洞手前までのビームラインを構築し、テストする計画が 2009 年より開始されている。本報告では、cERL 用入射器テストビームラインの概要について紹介し、そこでのビームダイナミクスの計算結果について報告する。

2. CERL 入射器

cERL 入射器は、コンパクト ERL のための入射器であり、DC フォトカソード電子銃 (DCG01)、ソレノイド電磁石 (SLA01, 02)、バンチャー空洞 (BCA01)、超伝導加速空洞 (SCA01, 02, 03)、ビーム光学関数調整用の 4 極電磁石 5 台、そして合流部より構成される。図 1 に、cERL 入射器のレイアウトを示す。cERL 入射器の主要パラメータは、ビームエネルギー: 5 - 10 MeV、ビーム電流: 10 - 100 mA、パンチ長: 0.5 - 1.0 mm、パンチ電荷: 7.7 - 77.0 pC/bunch、規格化 rms エミッタンス: 0.1 - 1.0 mm mrad である。

入射器のビームダイナミクスでは、空間電荷効果、ソレノイドによるエミッタンス補償、RF 電磁場による収束作用が重要となる。入射器では、これらの影響が最小になるように各機器のパラメータを最適化し、合流部出口で目標とするエミッタンス、パンチ長を得られるようにする必要がある。ビームラインパラメータ最適化のために、Multi-objective method を用いた方法^[2] を使用している。また、シミュレーションコードとして GPT^[3] を使用している。図 2 に最適化されたビームラインパラメータを設定したときの、入射器中でのエミッタンスの変化を示す。このときのビームラインパラメータは表 1 のようになる。計算では、初期粒子分布はピア缶分布とし、パンチ電荷 -80 pC、粒子数 nps = 200 k とした。

cERL 入射器テストビームランでは、図 1 内の超伝

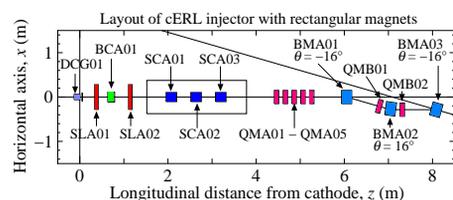


図 1: cERL 入射器のレイアウト。

* E-mail: tsukasa.miyajima@kek.jp

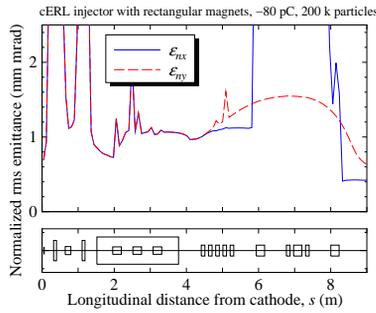


図 2: cERL 入射器中でのエミッタンスの変化。合流部出口での規格化 rms エミッタンスは 0.63 mm・mrad、バンチ長は 0.62 mm、ビームエネルギーは 8.7 MeV、バンチ電荷は -80 pC/bunch である。

表 1: 合流部出口でエミッタンスおよびバンチ長が最適になるようなビームラインパラメタ。

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{gun}	500 (kV)	$E_{acc,SCA01}$	7.2 (MV/m)
r_0	1.26 (mm)	$E_{acc,SCA02}$	15.0 (MV/m)
t_0	37.5 (ps)	$E_{acc,SCA03}$	15.0 (MV/m)
B_{SLA01}	0.038 (T)	ϕ_{SCA01}	-28°
B_{SLA02}	0.029 (T)	ϕ_{SCA02}	-10°
V_{BCA01}	115 (kV)	ϕ_{SCA03}	-5°

導加速空洞 SCA01 の手前までの区間のテストビームラインを PF-AR 南棟実験室に建設し、電子銃の開発を進めるとともに、ビーム調整法の開発を進めることを目標としている。

3. CERL 入射器テストビームライン

cERL 入射器ビームラインでは、機器の開発とビーム調整法の開発が主要なテーマとなる。機器の開発では、電子銃、極高真空装置、バンチャー空洞、レーザー導入ポート、ビームモニターシステムなど多岐に渡る開発項目があり、これらが入射器システムとして稼働することを確認する必要がある。ビームダイナミクスについては、ビームエネルギーが 500 keV と空間電荷効果が重要となる領域であり、空間電荷効果やフォトカソードによるビーム生成を研究するとともにビーム調整法を開発することが、入射器テストビームラインでの目標となる。図 3 に cERL 入射器テストビームラインのレイアウトを示す。第二ソレノイド (SLA02) までは、図 1 と同じ配置を採用し、その後方にエミッタンスやバンチ長などのビームパラメタを測定するためのビーム診断部を設ける。エミッタンス測定にはダブルスリット (SLT01, 02)、ビームプロファイル測定には view screen (VSA01, 02, 03, 04)、ビーム位置測定にはストリップライン、バンチ長測定に偏向空洞 (DCA01) を使用する予定である。

入射器テストビームラインは、電子銃やバンチャー空洞の開発の進展に合わせて拡張される。ビームラインの設計・建設は 2009 年より開始され、2009 年度

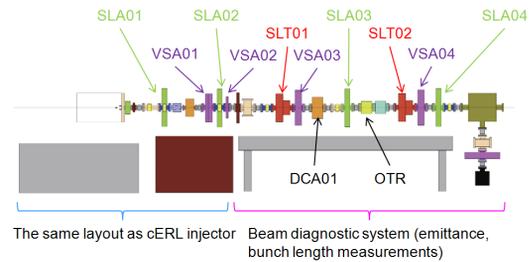


図 3: AR 南棟に建設予定の cERL 入射器テストビームラインのレイアウト。

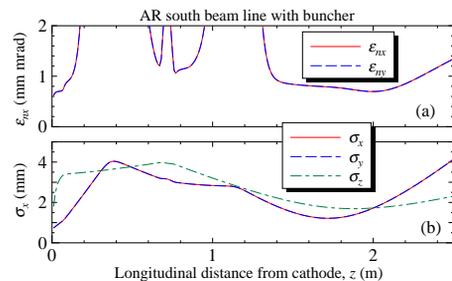


図 4: cERL 入射器テストビームラインでの (a) エミッタンス、および (b) ビームエンベロープの時間発展。各機器のパラメタは入射器全体で最適化した場合の値 (表 1) を使用。

末に最初のビームライン完成を目指している。2010 年度は名古屋大学で開発された 200 kV 電子銃を使用してビームテストを行う。開発中の 500 kV 電子銃の進展に合わせて、2011 年度より 200 kV 電子銃から 500 kV 電子銃に切り替えることを予定している。その後、バンチャー空洞を導入し、バンチ圧縮の試験も行う予定である。最終的に 2012 年初頭までにビーム試験を終了し、東カウンターホールへの移設を目指す。

3.1 ビームダイナミクス

cERL 入射器テストビームラインで実現可能な最小エミッタンス、最短バンチ長を見積もるために、GPT を用いてビームダイナミクスの計算を行った。実際のテストビームラインでは、ビーム運転開始時はバンチャー空洞のない状態となるため、バンチャー空洞ありの場合とバンチャー空洞なしの場合の両方に

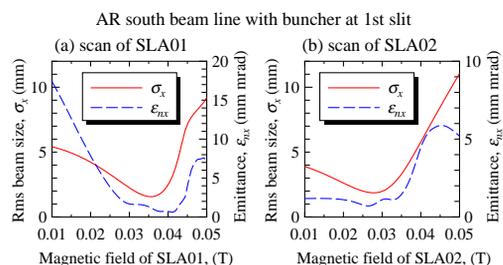


図 5: ソレノイド磁場をスキャンしたときの影響。(a) BSLA01 をスキャン、(b) BSLA02 をスキャン。

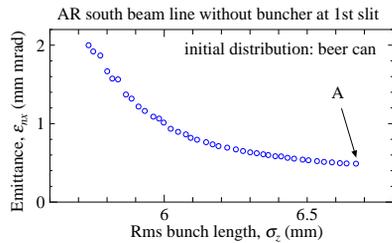


図 6: バンチャー空洞なしの場合のビームラインパラメータ最適化結果。短いバンチ長かつ小さいエミッタンスが得られるように最適化。

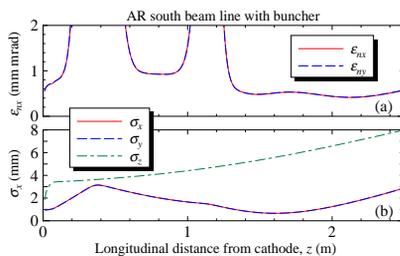


図 7: バンチャー空洞なしの場合の (a) エミッタンス、および (b) ビームエンベロップの時間発展。

ついて計算した。

まず、図 1 の cERL 入射器全体で最適化したパラメータ (表 1) を用いた場合のエミッタンスおよびビームサイズの時間発展を紹介する。これは、バンチャー空洞を導入後の状態であり、入射器テストビームラインでの最終目標となる。図 4 にエミッタンスおよびビームエンベロップの時間発展を示す。エミッタンス測定は診断部に設置された第 1 スリット (SLT01) で行うことになり、この位置でのエミッタンスおよびバンチ長は、 $\epsilon_{nx} = 0.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\sigma_z = 1.7 \text{ mm}$ となる。図 5 に、SLA01 あるいは SLA02 をスキャンしたときの SLT01 の位置での水平方向エミッタンスとビームサイズの変化を示す。SLA01 をスキャンしたときの最小エミッタンスは $\epsilon_{nx} = 0.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、SLA02 をスキャンしたときの最小エミッタンスは $\epsilon_{nx} = 0.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ となる。

次に、テストビームライン運転開始当初に予定されるバンチャー空洞なしのビームラインでの最小エミッタンス、最小バンチ長の計算結果を紹介する。入射器全体のパラメータ最適化と同じ multi-objective method を用いて、エミッタンスとバンチ長を最小化した結果を図 6 に示す。図 6 の A のパラメータについてエミッタンスとビームエンベロップの時間発展を計算した結果を図 7 に示す。このときのビームラインパラメータは初期レーザー半径 $r_0 = 1.91 \text{ mm}$ 、レーザーパルス全幅 $t_0 = 41.5 \text{ ps}$ 、SLA01 の強さ $B_{SLA01} = 0.039 \text{ T}$ 、SLA02 の強さ $B_{SLA02} = 0.026 \text{ T}$ である。SLT01 の位置でのエミッタンスとバンチ長は、 $\epsilon_{nx} = 0.42 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\sigma_z = 6.7 \text{ mm}$ となった。このように、バンチャー空洞がない場合はバンチ長は空間電荷効果によって長くなる。

最後に、バンチャー空洞導入後のビームラインで

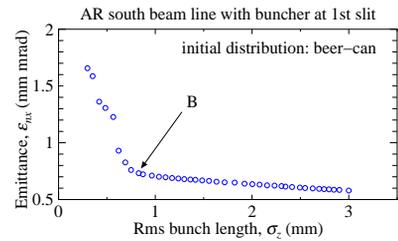


図 8: バンチャー空洞ありの場合のビームラインパラメータ最適化結果。短いバンチ長かつ小さいエミッタンスが得られるように最適化。

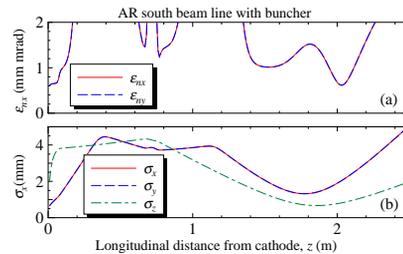


図 9: バンチャー空洞ありの場合の (a) エミッタンス、および (b) ビームエンベロップの時間発展。

の最小エミッタンス、最小バンチ長の計算結果を紹介する。エミッタンスとバンチ長を最適化した結果を図 8 に示す。図 8 の B のパラメータについてエミッタンスとビームエンベロップの時間発展を計算した結果を図 9 に示す。このときのビームラインパラメータは $r_0 = 1.02 \text{ mm}$ 、 $t_0 = 41.4 \text{ ps}$ 、 $B_{SLA01} = 0.037 \text{ T}$ 、 $B_{SLA02} = 0.028 \text{ T}$ 、バンチャー電圧 $V_{BCA01} = 134.9 \text{ kV}$ である。SLT01 の位置でのエミッタンスとバンチ長は、 $\epsilon_{nx} = 0.65 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\sigma_z = 0.85 \text{ mm}$ となった。バンチャー空洞を導入後は、短い区間ではあるが 1 mm 以下のバンチ長を得ることができる。

4. まとめ

cERL 入射器のテスト施設として、入射器テストビームラインを KEK 敷地内の AR 南棟に建設することを予定している。このための準備として、テストビームラインでのビームダイナミクスについて計算した。バンチ圧縮を行うためのバンチャー空洞は、ビーム試験途中から導入されるため、空洞導入前後でのエミッタンス、バンチ長を計算した。計算の結果、どちらの場合でも $1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下のエミッタンスを得ることができ、さらに空洞導入後はバンチ圧縮によって 1 mm 以下の十分短いバンチ長を作ることが可能であることが確認できた。

参考文献

- [1] R. Hajima et al. (ed.), KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008) (in Japanese).
- [2] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams **8**, 034202 (2005).
- [3] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>