

コンパクト ERL 入射器の現状

PRESENT STATUS OF THE INJECTOR AT THE COMPACT ERL AT KEK

田中織雅 #, 宮島司, 谷川貴紀

Olga Tanaka #, Tsukasa Miyajima, Takanori Tanikawa

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The Compact ERL (cERL) at KEK is a test accelerator to develop ERL technologies and its possible applications. The first target of injector operation to demonstrate IR-FEL was to generate high bunch charge electron beams with low longitudinal emittance and short bunch length. In 2020, the injector was operated with the bunch charge of 60 pC, the DC gun voltage of 480 kV, the injector energy of 5 MeV and the bunch length of 2 ps rms, and the required beam quality for the IR-FEL has been achieved for a single-pass operation mode. The next target is to demonstrate IR-FEL generation for recirculation mode. The injector energy is decreased to 3.5 MeV due to a limitation of energy ratio between injection and recirculation beams. Moreover, the DC gun voltage decreases to 390 kV due to troubles of the DC gun. Therefore, control of the space charge effect is more important to design and optimize the beam transport condition of the injector. In this report, a strategy of the injector optimization together with its realization results and future prospects are summarized.

1. はじめに

KEK のコンパクトエネルギー回収リニア加速器 (cERL) は当初、高い平均ビーム電流とビーム品質[1]の運転をするために建設された。cERL は光電陰極 DC 電子銃、エネルギー回収運転を備えた超伝導加速空洞 (主リニア加速器)、周回ループ、およびビームダンプを用いた入射器で構成されている (Fig. 1 参照)。2019 年に、cERL IR-FEL プロジェクトが cERL[2]を使用した高効率レーザー加工用の高出力中赤外レーザーの開発という目標を達成するため発足した。その後、IR-FEL 光の生成を成功させるための入射器最適化に関する研究が行われ[3]、目標は単一パス運転モードで達成された[4]。その時、入射器は、60 pC のバンチ電荷、480 kV の DC 電子銃電圧、5 MeV 入射エネルギー、および主リニア加速器出口で 2 ps rms のバンチ長で運転された。

IR-FEL 光の生成のための cERL 運転の次の目標は、エネルギー回収モードで前の結果を再現することである。新しい目標を達成するため、入射エネルギーは、 $1/5 (E_{inj} = 3.5 \text{ MeV} / E_{circ} = 17.5 \text{ MeV})$ のエネルギー比でエネルギー回収を可能にする 3.5 MeV に減少された。また、DC 電子銃でいくつかの問題が発生した。そのため、電子銃電圧は 390 kV に落とされた。ビーム性能は、DC 電子銃の安定した高加速電圧供給によって保証される。電圧が低下すると、入射器での空間電荷制御がより困難になる。したがって、我々の目標は、適切な品質のビームを主リニア加速器出口に送り、FEL 生成とエネルギー回収の両方を保証することである。cERL 入射器のレイアウトを Fig. 2 に示す。対応するビームパラメータを Table 1 に示す。この表には、単一パス FEL と周回を伴うものの、2 つの異なる運転モードのマシンパラメータの比較も含まれている。cERL 入射器の最適化戦略と手法の詳細については、[3]参照のこと。

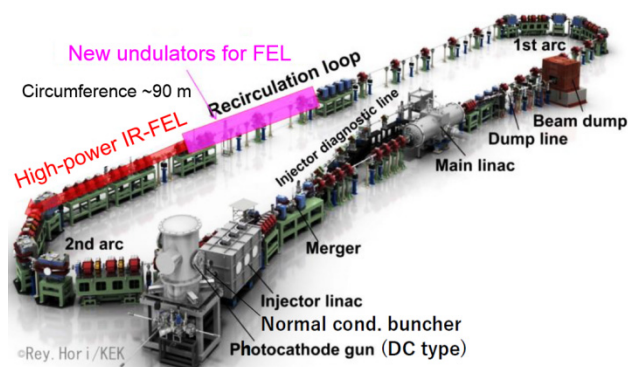


Figure 1: Schematic of the cERL.

Table 1: Design Parameters of the cERL

	Single-pass FEL	Recirculation mode
DC gun voltage	480 kV	390 kV
Repetition rate	1.3 GHz	1.3 GHz
Injector energy	5 MeV	3.5 MeV
Recirculation energy	17.5 MeV	17.5 MeV
Charge per bunch	60 pC	60 pC ¹
Rms bunch length ²	2 ps	3.5 ps
Norm. rms transverse emittance ²	< 3π	< 3π
	mm mrad	mm mrad
Laser temporal distribution (FWHM)	40 ps single Gaussian	40 ps single Gaussian ³

2. 入射器の設計

研究の最初のステップでは、多目的遺伝的アルゴリズム

¹ 運転中で 1 pC

² 主リニア加速器出口で

³ 運転中で FWHM 40 ps シングルガウスおよび 3 ps rms シングルガウス

olga@post.kek.jp

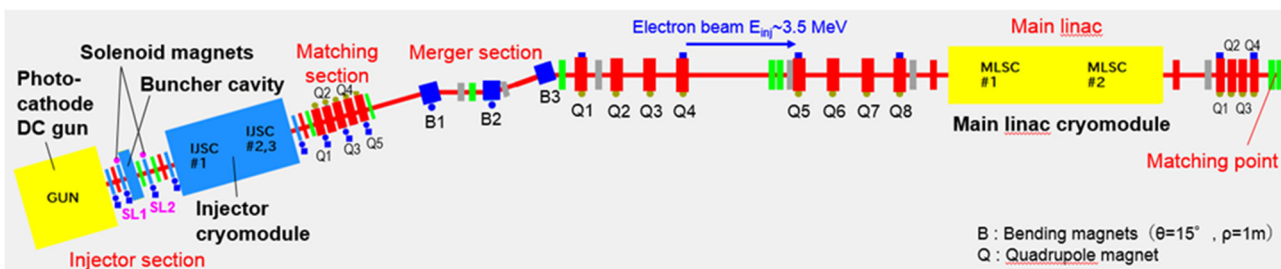


Figure 2: Layout of cERL injector line.

ム(MOGA, [6])を備えた General Particle Tracer(GPT、[5])を使用して入射器パラメータを最適化した。主リニア加速器出口の目標は、バンチ長と縦方向エミッタンスを同時に最小化するように設定されており、横方向エミッタンスが 3π mm mrad 未満であるという追加条件がある。必要な入射エネルギー (3.5 MeV) と電子銃電圧 (390 kV) について、アルゴリズムは、1 番目と 2 番目のソレノイドの電流、バンチャの電圧と位相オフセット、入射空洞の加速フィールド、1 番目の入射空洞の位相オフセット、および選択した四極電磁石の K 値 (Fig. 2 参照)、を含む 13 変数のセットを提示した。

入射器最適化手法の詳細な記述は[7]にあり、先行研究の結果は[3]に示されている。緒言で述べたように、ビームの再循環(つまりエネルギー回収)は、FEL 光の生成に加えてこの入射器設計で達成する必要がある。光の生成のみを考慮した以前の入射器設計では、マッチングポイントで次のビーム性能が必要である (Fig. 2、[8] 参照):

- 60 pC のバンチ電荷;
- 2 ps の rms バンチ長;
- %のエネルギー拡散;
- 3π mm mrad を超える正規化された rms 横方向エミッタンス。

入射器を介した Twiss パラメータの時間的進化の比較を Fig. 3 に示す。480 kV の電子銃電圧と 5 MeV の入射エネルギーと、390 kV の電子銃電圧と 3.5 MeV の入射エネルギーのための入射器設計パラメータは対照的である。上のグラフから下へ: 横方向のビームサイズ、バンチ長とエネルギー拡散、横方向エミッタンス、および縦方向エミッタンスが比較されているより低い電子銃電圧および入射エネルギー条件では、空間電荷効果の影響により、主リニア加速器出口でのビーム性能が低下すると結論付けることができる。横方向のビームサイズは比較的同じままだが、バンチ長とエネルギー拡散は、対応して 1.9 倍と 1.4 倍に増加した。Table 2 にまとめたが、マッチングポイントでは横方向エミッタンスが 1.2~1.5 倍、縦方向エミッタンスが 1.2 倍に増加した。

実際には、単一パス FEL モードから周回モードにスムーズに切り替えるために、2 ステップ戦略を導入した。ステップは次の通り:

1. 最初に単一粒子のダイナミクスに一致させるため入射器を低電荷(バンチあたり約 1 pC)で調整し、それからエネルギー回収を確立する。
2. FEL 電力を確保するために、入射器をバンチあたり 60 pC の目標高電荷に調整する。

低電荷での入射器調整により、単一粒子のダイナミクスを調整できる。線形モデルはより単純で扱いやすい。

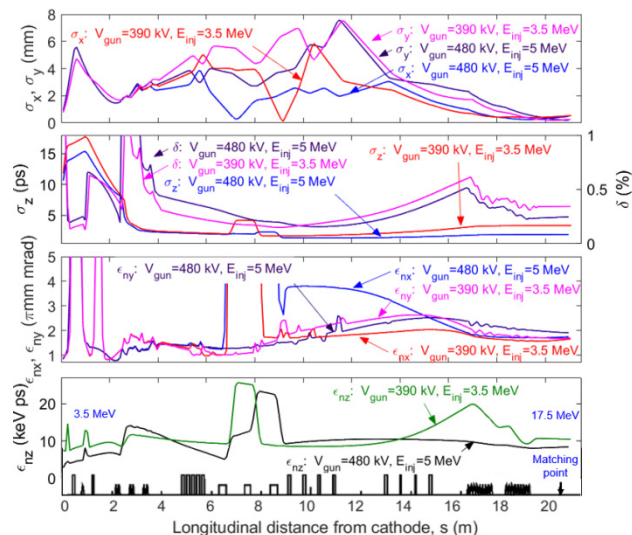


Figure 3: Comparison of temporal evolutions of Twiss parameters through the injector (480 kV gun, 5 MeV injection vs 390 kV gun, 3.5 MeV injection).

Table 2: Beam Parameters at the Main Linac Exit¹

Design	Single-pass FEL	Recirculation mode
Beam parameters		
Hor. beam size	0.69 mm	0.72 mm
Ver. beam size	0.35 mm	0.38 mm
Energy spread	0.25%	0.34%
Bunch length	1.8 ps	3.5 ps
Hor. emittance	1.74 π mm mrad	2.61 π mm mrad
Ver. emittance	1.92 π mm mrad	2.39 π mm mrad
Long. emittance	8.4 keV ps	10.47 keV ps

このステップが完了するならば、効果的な FEL 生成を可能にする高電荷モードに切り替える。しかし、多粒子ダイナミクスを扱うことは、モデルと実際のマシン間の不一致が露呈し、困難である。モデルベースの調整が適切なビームベースの調整によって補完される場合は、必要なマシンパフォーマンスが達成される可能性がある。これ

¹ rms の値

は次の論文の題材である。

3. モデルベースの入射器調整

次に、入射器調整の全体的な戦略について議論する。入射器の調整の目的は、適切なビームを生成し、アンジュレーターセクションの入口に輸送することである。cERL 入射器戦略の更なる情報は、[9]を参照のこと。我々の典型的な調整手順は、主空洞によって 1 pC ビームを 3.5 から 17.5 MeV に加速し、設計に近い条件下でビームをマッチングポイントに輸送するタスクから始まる。

設計された性能と測定結果を比較するため、最初に、下流の画面でのソレノイド SL1-2 のシミュレーションされた応答を、同じ状況での実際の測定値と位置合わせした。次に、ビームベースの位置合わせを使用し軌道が適切に中央に配置されるならば、エネルギー調整を開始できる。エネルギー調整は、入射器の出口でのエネルギーが目標のエネルギーと等しくなるよう、バンチャ空洞と入射空洞 1-3 の位相と振幅の調整をすることが含まれる。縦方向のダイナミクスを調整するため、バンチャ位相に対するエネルギー応答が測定される。ビームエネルギーは、合流部の画面で測定される。測定結果を Fig. 4 に示す。測定の飽和点は、ビームスポットが画面の領域外にあるとき発生した。加速器の電圧と位相を微調整後、測定された応答は設計応答と完全に一致する。

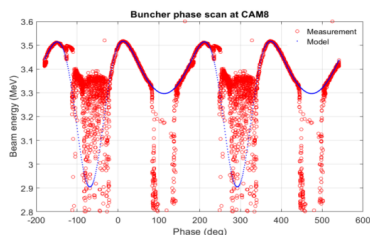


Figure 4: Buncher cavity phase response.

線形光学系を接続し、多粒子運動を調整するため、よく知られている四重極スキャン応答測定が使用されている。測定された応答マトリックスは、逆測定応答マトリックスを解くことにより、四重極磁石の補正値を計算するために役立つ。四重極スキャン応答が各マッチングポイントで補正された後、入射部の各スクリーンでのビームサイズが主リニア加速器出口まで測定される。これは、モデルに対して入射器の調整結果がどれだけ近いかを判断するためのもう 1 つのステップである。Figure 5 では、測定されたビームサイズは、2 つのスクリーンを除いて光学マッチングが行われる場所での設計ビームサイズとよく一致している。約 10 m の位置で垂直ビームサイズがずれている理由は、一致するノブがないためである。主リニア加速器出口でのビームサイズの不一致は、主リニア加速器キャビティによって導入された非線形外乱によるものである(クライオモジュールの後に走査型四重極磁石が配置され、補正用の四重極はその前にある)。したがって、加速空洞の影響を回避するために、このマッチングポイントの新しいマッチング手順を開発している。

最後のステップは、主リニア加速器出口のエミッタンス

の調査だった。設計値は $\epsilon_{nx} = 0.69 \pi \text{ mm mrad}$ 、 $\epsilon_{ny} = 0.44 \pi \text{ mm mrad}$ であるのに対し、測定値は $\epsilon_{nx} = 0.64 \pm 0.02 \pi \text{ mm mrad}$ と $\epsilon_{ny} = 0.56 \pm 0.01 \pi \text{ mm mrad}$ であった。測定された水平方向エミッタンスが設計値とよく一致していることが容易にわかる。ただし、実際の値は設計値と異なる場合があるため、垂直方向エミッタンスの違いは依然として残っている。

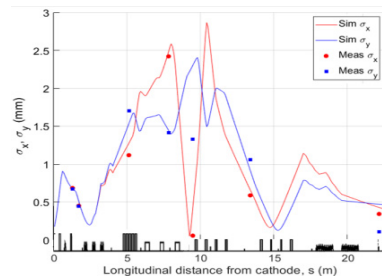


Figure 5: Designed and measured horizontal and vertical beam sizes after optics matching.

4. 結論

FEL の生成とエネルギー回収の両方を同時に可能にする入射器設計を確立した。最初のステップとして、低電荷運転モードのモデルに合わせてマシンパラメータを調整した。次のステップは、このセットアップで FEL 光を生成するために高電荷 (60 pC) で運転して、CW-FEL を実現するために電子バンチャの繰り返し率を上げることである。

謝辞

cERL チームのすべてのメンバーに感謝したい。この論文は、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の支援を受けた。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy recovery linac at KEK”, *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 877, pp. 197-219, 2018.
- [2] R. Kato *et al.*, “Construction of an Infrared FEL at the Compact ERL”, in *Proc. IPAC'21*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 1608-1611.
- [3] O. A. Tanaka, N. Higashi, and T. Miyajima, “Injector Optimization for the IR-FEL Operation at the Compact ERL at KEK”, in *Proc. IPAC'21*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 4531-4534.
- [4] Y. Honda *et al.*, “Construction and commissioning of mid-infrared self-amplified spontaneous emission free-electron laser at compact energy recovery linac”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 92, p. 113101, Nov. 2021.
- [5] General Particle Tracer; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [6] S. B. van der Geer, M. J. de Loos and B. D. Muratori, “Multi-objective Genetic Optimization with the General Particle Tracer (GPT) Code”, in *Proc. IPAC'15*, Richmond, USA, May 2015, pp. 492-494.
- [7] O. A. Tanaka, N. Nakamura, T. Miyajima, and T. Tanikawa, “Injector design towards ERL-based EUV-FEL for lithography”, in *Proc. IPAC'22*, Bangkok, Thailand, June 2022, pp. 2296-2298.

PASJ2022 THP057

- [8] R. Kato, private communications, Jan. 2021.
- [9] T. Miyajima, “Injector Development at KEK”, presented at the 63rd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL'19), Berlin, Germany, Sep. 2019, paper THCOZBS04, unpublished.