

# cERL 入射器ビームのエネルギーチャープおよび縦方向電子分布における誤差の影響

## THE EFFECT OF ERRORS ON THE ENERGY CHIRP AND LONGITUDINAL ELECTRON DISTRIBUTION OF THE CERL INJECTOR BEAM

田中織雅#, 中村典雄, 宮島司, 島田美帆

Olga Tanaka#, Norio Nakamura, Tsukasa Miyajima, Miho Shimada

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### Abstract

In KEK's Compact ERL (cERL), a mid-infrared free electron laser (IR-FEL) was constructed in 2020, and the IR-FEL oscillation test was conducted in June-July 2020 and February-March 2021. The short bunch of 1 ps or less (RMS) required for FEL oscillation is generated by off-crest acceleration in the main acceleration cavity and bunch compression by R56 control in the arc part. But the bunch quality also depends on the longitudinal electron distribution, including the energy (momentum) chirp before entering the main acceleration cavity. Due to the chirp of the beam exiting the injector, there will be a difference between the maximum acceleration phase of the main cavity and the acceleration phase (reference chirp phase) where the energy spread is minimized in the arc section. When the chirp was measured by scanning the acceleration phase, it was found that there was a difference between the maximum acceleration phase and the reference chirp phase in the simulation and actual measurement. This is because the chirp of the beam transported from the injector is smaller than that in the simulation, and the longitudinal electron distribution of the injector also differs from the design distribution. Therefore, in this study we evaluated the change in the vertical distribution including the chirp by adding errors to various RF parameters to the injector model by simulation, and investigated the cause of the observed discrepancies.

### 1. はじめに

今年度コンパクト ERL の FEL 光発振実験のための運転は 2 月と 3 月に行われた。cERL IR-FEL プロジェクトは、世界初の ERL ベースのシングルパス FEL を実現した。この結果は[1 - 3]で詳細に報告されている。

FEL 光の生成を成功させるには、入射部で適切な品質のビームを生成して、アンジュレータの入口に輸送する必要がある(図 1(a)を参照)。そのために、入射器はシミュレーションスタディで最適化され、運転中に適切に調整された[4]。横方向のビームダイナミクスが設計モデルに従っていることを証明した[5]。しかし、縦方向のビームダイナミクスが設計通り行かなかったことを確認した。

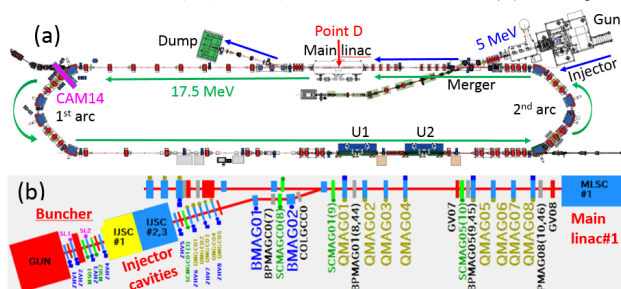


Figure 1: (a) layout of the cERL; (b) layout of the cERL injector line.

バンチ圧縮によって生成される(図 1(a)を参照)。そのバンチ品質は主加速空洞に入る前のエネルギーチャープを含む縦方向電子分布にも依存する(図 2 を参照)。

# olga@post.kek.jp

入射器からのビームが持つチャープのために主空洞最大加速位相とアーク部入口 (Cam14 での観察) でエネルギー拡がり最小となる加速位相との間に差が生じる。従って、基準チャープ位相というのは Cam14 でエネルギー拡がり (Horizontal beam size の測定) が最小となる加速位相である。

本研究の目標はシミュレーションと実測で最大加速位相と基準チャープ位相の差が起きる理由を調査することである。この目的のために入射器モデルに各誤差を入れてチャープを含む縦方向分布の変化をシミュレーションによって評価した。誤差のシミュレーションスタディでは 9 つのパラメータ(図 1(b)を参照): レーザー、バンチャー (BUN)、入射空洞#1、#2-3 (INJ1、INJ2-3 はベクターサムである)、メインライナック#1 (ML1) の位相、およびバンチャー、INJ1、2-3、ML1 の振幅の影響を調査した。加速器モデルと実測の差の原因が分かれば、実際に近い設計が得られる。

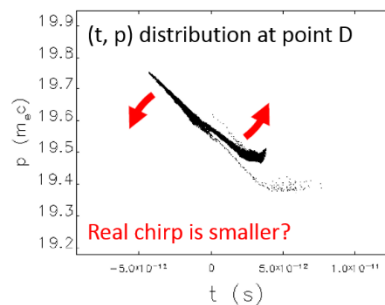


Figure 2: Energy chirp at D point (in the middle of the main linac, between ML1 and ML2).

第2章では、測定と計算の違いについて説明する。次に、各パラメータの影響に関する詳細な分析を行なった。結論として、測定結果に最も強い影響を与える要因を選択した。

## 2. 測定 vs シミュレーション

前章で説明したように、シミュレーションで第1アーク部にあるCam14での基準チャープ位相測定の結果を再現することにより、ビームの縦方向の挙動をチェックしようとしている。したがって、入射部におけるRFパラメータ(レーザー、BUN、INJ1、2-3、ML1の位相、およびパンチャー、INJ1、2-3、ML1の振幅)を測定時と同じにして、GPT(General Particle Tracer、[6])というトラッキングコードでML2の位相スキャンを行った(図3を参照)。シミュレーションの設定は下記のようなものである。粒子数は10k、電子銃電圧は480kV、入射エネルギーは5.1MeV、パンチ電荷は60pC、レーザー初期時間分布は40psFWHMのフラットトップ分布、レーザーXY分布: radial gaussian (rms = 1.191 mm) + 2 mm pinhole である。

図3に続いて、Cam14にて2種類のML2位相スキャンを行った。ML2の振幅を一定にして、最大加速位相を決めた(赤線)。ML2のエネルギーを一定にして、基準チャープ位相(Cam14でのHorizontal beam sizeの最小)を決めた(青線)。図3(a)は測定結果、(b)は計算結果である。スケールは一緒である。結果をまとめると、同じ条

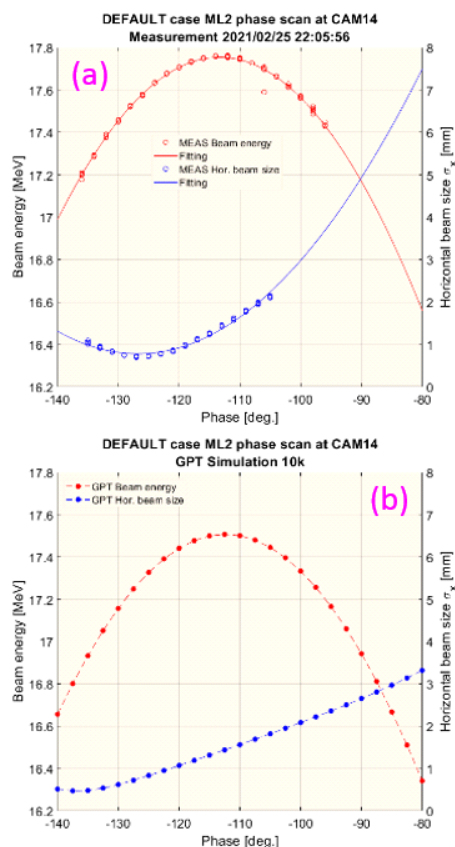


Figure 3: Constant reference amplitude (red) and constant energy (blue) ML2 phase scan results at Cam14; (a) measurement; (b) simulation.

件で測定結果は、ML2の最大加速位相は-114度、Horizontal beam sizeが最小になるML2の位相は-127度で、その差は13度になる。計算結果は、ML2最大加速位相は-113度、Horizontal beam sizeが最小になるML2の位相は-137度、その差は24度になる。次章でこの大きな差について詳しく調べる。

## 3. 誤差のシミュレーションスタディ

最大加速位相と基準チャープ位相の差を調べるため、Cam14での二次元スキャンを実施:

- 各 Laser, BUN, INJ1, 2-3, ML1の位相を $\pm 20$ 度に振りながら、ML2の位相を $\pm 30$ 度にスキャンする;
- 各 BUN, INJ1, 2-3, ML1の振幅を $\pm 5\%$ に振りながら、ML2の位相を $\pm 30$ 度にスキャンする。

そして、Cam14でのHorizontal beam sizeの変化を調べた。例えば、図4(a)はINJ2-3の振幅を $\pm 5\%$ 振って、ML2位相オフセットを $\pm 30$ 度に振った時の二次元画像となる。かなりの勾配が見られる。

9つのノブのうち、最も実チャープに影響があるノブを調べるために、2次元スキャン結果の解析を行った。そのため、ML2位相オフセットをゼロに固定して、Cam14におけるHorizontal beam sizeの勾配を線形フィットした。

線の角度が最も大きい(勾配が大きい)ノブが実チャープに影響が大きいことになる。例えば、図4(b)は(a)図に現れた勾配のML2位相オフセットがゼロのときのHorizontal beam sizeの線形フィットの結果になる。

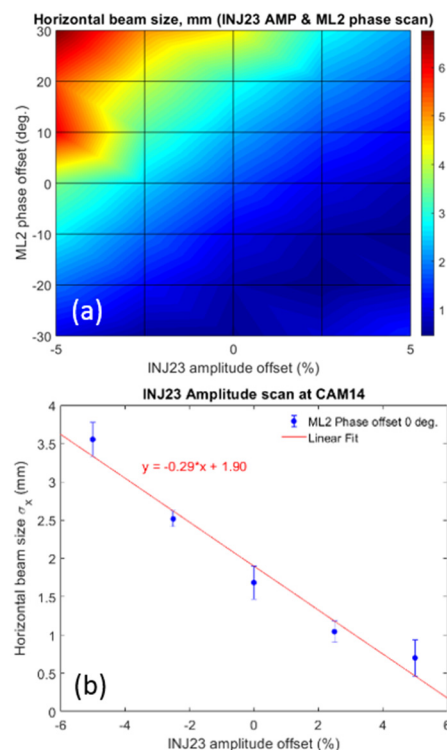


Figure 4: (a) 2D scan result at Cam14 (INJ2-3 amplitude  $\pm 5\%$  vs ML2 phase offset  $\pm 30$  deg.); (b) Linear fit of the horizontal beam size gradient at Cam14 at ML2 phase offset fixed to zero.

すべてのパラメータの角度は表 1 にまとめてある。最大角度が付いている INJ2-3 の振幅の重要度を 100 % とすると、INJ1 の位相と振幅は各 39 %、レーザーの位相は 24.14 %、バンチャーの位相は 20.69 %、バンチャーの振幅、INJ2-3 の位相と ML1 の位相は各 13.79 %、ML1 の振幅は 6.9 % になる。結論から言うと、INJ1 の位相と振幅と INJ2-3 の振幅のノブの 3 つの影響が大きいと判断した。

Table 1: Parameters' Importance

Parameter	Gradient linear fit angle
Laser phase	-0.07
BUN phase	0.06
BUN RefAmp	-0.04
INJ1 phase	-0.11
INJ1 RefAmp	-0.11
INJ2-3 phase	0.04
INJ2-3 RefAmp	-0.29
ML1 phase	0.04
ML1 RefAmp	-0.02

#### 4. まとめ

シミュレーションモデルの各種誤差の影響を評価して、最大加速位相と基準チャープ位相の差の原因を調べた。シミュレーションスタディで 9 つのノブ(レーザー、BUN、INJ1、2-3、ML1 の位相と BUN、INJ1、2-3、ML1 の振幅)の中で影響が大きいパラメータは 3 つ (INJ1 の位相と振幅、および INJ2-3 の振幅)であった。例えば、図 5 は ML2 の位相が最大加速位相のとき INJ2-3 の振幅を-5、0、+5 %に振ったとき、Cam14 での Horizontal beam size の最小値がどの様に変化するかを表している。シミュレーション結果を確認するため、次の cERL の運転のときに適切な測定を行う予定がある。計算の推進については、

今回のスタディで RF パラメータの個別調査を行った。しかし、さらなる研究では、要因の合計の影響を調べる必要がある。最終的な分析には、要因の相互影響(相互相関)を含める必要がある。

#### 謝辞

本発表は、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果に基づいている。本研究の一部は科研費(18H03473)のサポートを受けている。

#### 参考文献

- [1] H. Sakai *et al.*, “Compact ERL を用いた中赤外 FEL の開発と FEL 発振”, 18<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, MOPOA04.
- [2] H. Sakai, “Industrial Applications of cERL”, presented at ERL'19, Berlin, Germany, Sep., 2019, paper MOCOZBS02, unpublished.
- [3] R.Kato *et al.*, “Development of mid-infrared free-electron laser based on cERL and its lasing experiment”, presented at PASJ2020, Online, Sep., 2020, paper THOT07, unpublished.
- [4] O. Tanaka *et al.*, “High bunch charge injector operation of cERL for infrared free electron laser test”, in Proc. 16<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul. - Aug., 2019, pp. 1086–1090.
- [5] O. Tanaka *et al.*, “コンパクト ERL における中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化”, 18<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, THOB03.
- [6] General Particle Tracer;  
<http://www.pulsar.nl/gpt/>

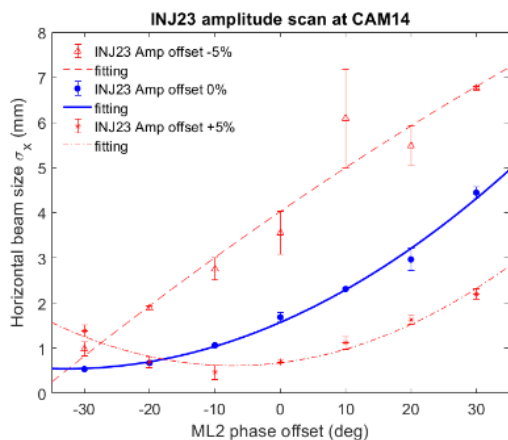


Figure 5: Impact of the INJ2-3 amplitude to the minimum of the horizontal beam size at Cam14; amplitude offset - 5 % (red dashed); amplitude offset 0 % (on crest, blue solid); amplitude offset +5 % (red dot dash).