

# 赤外線自由電子レーザー試験に向けた cERL 入射器の 60 pC 運転 HIGH BUNCH CHARGE INJECTOR OPERATION OF CERL FOR INFRARED FREE ELECTRON LASER TEST

田中 織雅<sup>A)</sup>、Nora Norvell<sup>B)</sup>、宮島 司<sup>\*A)</sup>、本田 洋介<sup>A)</sup>、島田 美帆<sup>A)</sup>、高井 良太<sup>A)</sup>、  
帯名 崇<sup>A)</sup>、加藤 龍好<sup>A)</sup>、中村 典雄<sup>A)</sup>

Olga Tanaka<sup>A)</sup>、Nora Norvell<sup>B)</sup>、Tsukasa Miyajima<sup>\*A)</sup>、Yosuke Honda<sup>A)</sup>、Miho Shimada<sup>A)</sup>、Ryota Takai<sup>A)</sup>、  
Takashi Obina<sup>A)</sup>、Ryukou Kato<sup>A)</sup>、Norio Nakamura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup>SLAC National Accelerator Laboratory

## Abstract

In May 2020, an infrared free electron laser (IR FEL) test is planned in the compact ERL (cERL) at KEK. Toward the IR FEL test, we designed a beam transport condition in an injector beamline for 60 pC bunch charge, and operated the cERL accelerator to confirm the designed beam performance and to develop the method of beam tuning to control space charge effect. The beam transport condition from a photocathode electron gun to the exit of a main linac were optimized with different injector energies. Based on the optimized results and the results of conditioning operations of the superconducting cavities, we selected 4 MeV injector energy for beam operations in June 2019. After the beam tuning, beam sizes, normalized emittances, bunch length and energy spread were measured. The measured injector performance satisfied the requirements for the IR FEL test, which were 4 ps RMS bunch length and  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  normalized emittance.

## 1. はじめに

compact ERL (cERL) はエネルギー回収型線形加速器 (ERL) の試験機であり、これまでに平均ビーム電流 1 mA での安定なエネルギー回収運転を実証している。ERL の特徴である高い平均ビーム電流を活かした応用先として、我々は ERL と自由電子レーザー (FEL) を組み合わせた大出力 FEL 光源開発を進めており、2019 年度中に赤外線自由電子レーザー発振試験を予定している [1]。FEL 発振に必要なビーム性能は、発振点である挿入光源において、RMS バunch長 250 fs、規格化射影エミッタンス  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、バunch電荷 60 pC である。

これまでの cERL のビーム試験では、バunch電荷 7.7 pC (1.3 GHz CW 運転において平均ビーム電流 10 mA に相当) においてビーム性能検証と調整法の開発を進めてきており、ほぼ設計に近い輸送条件を実現できるようになってきている。次の目標である FEL 試験においては、これまでのバunch電荷の約 10 倍となるバunch電荷 60 pC が要求され、低エネルギー領域において空間電荷効果を制御することがさらに重要となる。目標となる FEL 光を生成するには 250 fs という短いバunch長が必要となるが、エネルギーの低い入射器においてバunch長を短くすると電荷密度が極めて高くなり、空間電荷効果によって主空洞 (Main linac) まで短いバunch長を維持することができず、さらに射影エミッタンスも悪化するという事態になる。そこで、入射器ではビーム性能目標を RMS バunch長 2 ps、規格化射影エミッタンス  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  とし、周回部において磁気圧縮を利用し RMS バunch長を 2 ps から 250 fs に圧縮する方針とした。Figure 1 に、cERL の配置図を示す。

2017 年から 60 pC 輸送試験を開始しているが、低エネ

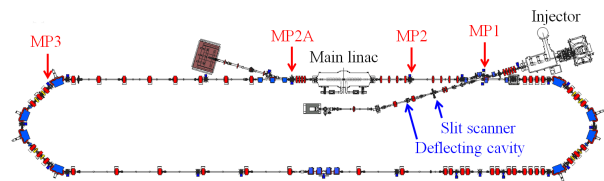


Figure 1: Layout of cERL. MP1, MP2, MP2A and MP3 are optics matching points.

ルギー領域におけるプロファイルの歪みや射影エミッタンスの増加が発生し、まだ設計ビーム性能を達成できていない。しかしながら、これまでの 60 pC 輸送試験を通して、ビーム性能悪化の原因となり得る現象を幾つか見つけることができている。そこで、本研究では、1. これまでの試験結果を基にした加速器モデルの改良、2. FEL 発振に向けた入射器輸送条件の最適化、3. 設計輸送条件を実現するための調整法の確立とビーム性能の検証、という 3 つを目的とする。

## 2. 入射器輸送条件の設計

### 2.1 加速器モデルの改良

入射器輸送条件の設計にあたっては空間電荷効果を取り入れることが必要であり、General Particle Tracer (GPT) を利用している。2017 年から開始した 60 pC 輸送試験結果を基に、GPT で使用する加速器モデルの改良を実施した。

- 入射器超伝導加速空洞のモデル改良 [2]
- 実際に測定した励起レーザー分布の使用
- 磁場分布を再現するための四極電磁石モデルの改良

入射器超伝導加速空洞のモデルとして Poisson Superfish を用いた円筒対称モデルを用いていたが、2-cell 空洞

\* tsukasa@post.kek.jp

の前後に配置された入力結合器と HOM 結合器によって電磁場の歪みが生じていることが明らかになってきた。新たに結合器を含んだ 3 次元モデルを作成し、シミュレーションと実験のシングルキック応答が一致することを確認した上で、輸送条件設計に用いることとした。励起レーザー分布としてピア缶形状(時間方向は一様矩形分布、 $xy$  方向は一様円分布)を用いていたが、時間方向分布、 $xy$  分布ともに測定された分布を用いることとした。四極電磁石モデルは、GPT に付属のハードエッジモデルから、新たに作成した有効磁場長とフリンジ場を考慮したモデルに変更し、低エネルギー領域の四極電磁石モデルとして用いることとした。

## 2.2 入射エネルギーとビーム性能

FEL 試験では、最終的にエネルギー回収による CW 運転が必要となる。cERL でエネルギー回収運転を実現する上で重要となるのが、入射エネルギーと周回エネルギーの比である。これは、入射・周回ビームが通過する合流シケインにおいて、周回ビームが真空チェンバ内壁上に当たらずに通過する条件として、エネルギー比に制限が課せられるためである。この制限によりエネルギー比を 1:5 よりも小さくすることができない。

一方、60 pC 運転では空間電荷効果が支配的となり、ビーム性能を向上させるには入射エネルギーを上昇させることが重要である。この場合、エネルギー比の制限により、同時に周回エネルギーも上昇させる必要がある。しかしながら、周回エネルギーは主空洞の性能によって制限されており、2019 年 4 月の運転では入射全エネルギー 2.9 MeV、周回全エネルギー 17.5 MeV として設計を開始した。主空洞出口まで輸送条件最適化を行ったが、2.9 MeV 入射の場合、エミッタンスとパンチ長を同時に目標値に維持することが難しいことがわかってきた。そこで、シミュレーションによって入射エネルギーと主空洞出口におけるビーム性能の関係を調査した。

主空洞出口におけるエミッタンスとパンチ長の最適化結果を Fig. 2 に示す。図の縦軸の  $\max(\epsilon_{nx}, \epsilon_{ny})$  は、水平エミッタンスと垂直エミッタンスのうち大きい方を示している。また、一つのエネルギーにつき、50 個の異なる輸送条件に対するビーム性能を示している。Figure 2 より、入射エネルギー 3 MeV では RMS パンチ長 5 ps 付近でエミッタンスが急激に悪化し、2 ps で輸送する解がないことがわかる。入射エネルギーを 5 MeV まで上げるとより短いパンチ長でも解が存在し、RMS パンチ長 2 ps、規格化射影エミッタンス  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  を満たす解があることがわかる。

## 2.3 4 MeV 入射輸送条件設計

シミュレーション結果と超伝導加速空洞の試験運転結果および冷凍機の熱負荷を考慮して、4 MeV で入射器を運転することとした。また Fig. 2 に示した 4 MeV の最適化結果より、パンチ長が少し変動してもエミッタンスが急激に変化しない領域を選択し、主空洞出口で 4 ps となる条件をビーム試験で用いることとした。入射器におけるパンチ長の目標値は 2 ps であり、4 ps は 2 倍の値になってしまいが、長くなった分は周回部における圧縮で取り戻す方針とした。設計輸送条件におけるエミッタンス、ビームサイズ、エネルギー、エネルギー拡がりの

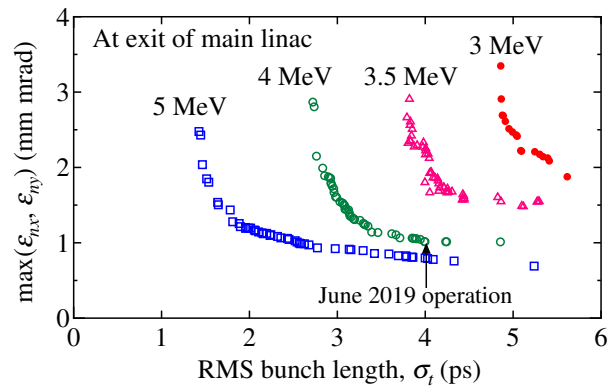


Figure 2: Optimization results for 3, 3.5, 4, and 5 MeV injection energies. Both bunch length and normalized emittance were minimized at the exit of main linac.

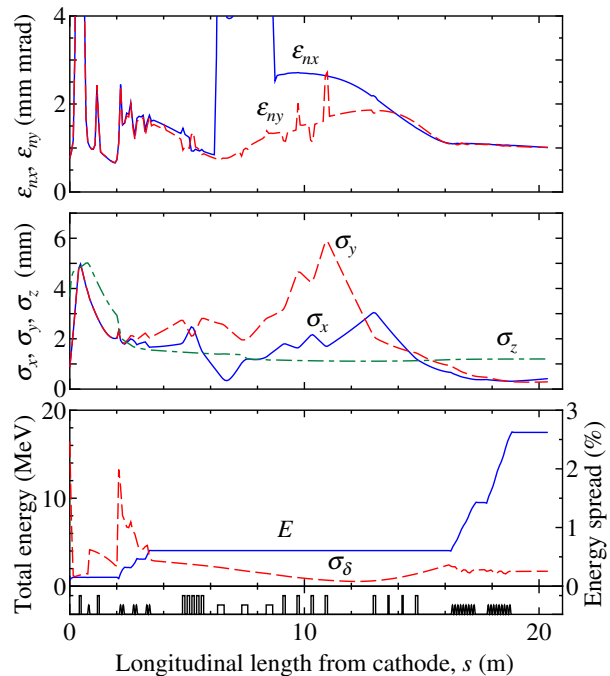


Figure 3: Time evolution of emittances, beam sizes, energy and energy spread for 4 MeV injection energy.

時間発展を Fig. 3 に示す。4 MeV 入射ビームは主空洞で 17.5 MeV まで加速され、周回部へ輸送される。Figure 3 の右端は主空洞出口に対応し、周回部と接続するためのビーム光学関数のマッチング条件を満たしている。2019 年 6 月のビーム試験では、この設計条件に向けて調整を行った。

## 3. 入射器ビーム調整

低パンチ電荷で主に重心運動に関する調整を行った後に、パンチ電荷 60 pC で集団運動に関する調整を行うという二段階でビーム調整を実施した。

### 3.1 低バンチ電荷における調整

ビームの軌道・エネルギー調整では、ビームの重心運動を主に測定することになるが、測定精度を向上させるにはビームサイズが小さい方が望ましい。空間電荷効果によるビームサイズの増大を極力小さく抑えるために、バンチ電荷 1 pC による調整を行った。軌道調整では主に入射空洞の中心をビームが通るように上流の軌道補正電磁石の調整を行った。

軌道調整を実施したあとに、入射器超伝導加速空洞の電圧・位相調整を行った。空間電荷効果が支配的なバンチ電荷では、エミッタンス補償とバンチ圧縮を両立するために、入射空洞は最大加速位相からずらした条件で運転される。調整ではまず最上流の 2-cell 空洞のみを立ち上げて、電圧・位相調整を実施した。設計エネルギー 2.15 MeV に対して、位相差設定後のエネルギーは 2.13 MeV であった。次に、二番目と三番目の空洞を立ち上げて、電圧・位相調整を実施した。設計エネルギー 4.05 MeV に対して、4.05 MeV に調整することができた。最後に、バンチャー空洞を立ち上げて、位相を変えたときのエネルギー変化を測定した。Figure 4 にバンチャー位相を変えたときのエネルギー応答のモデル計算結果と測定結果を示す。エネルギーは合流部の中に設置されたスクリーンで測定されたため、スクリーンの幅によってエネルギー測定範囲が制限されている。また、 $-180$  度から  $-120$  度の範囲では、ビーム分布が二つに分裂したために、エネルギー測定精度が悪くなっている。Figure 4 に示すように、調整によって進行方向の重心運動をほぼ設計条件に合わせ込むことができた。

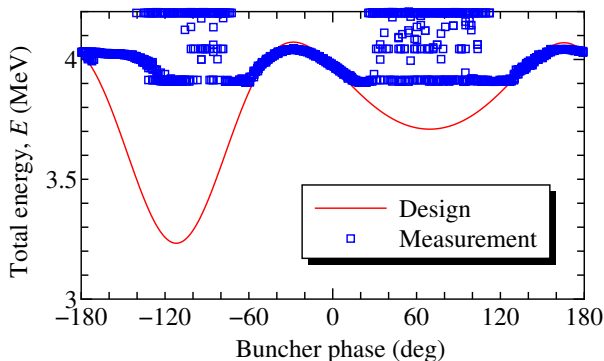


Figure 4: Designed and measured responses of injector energy to buncher phase. The measured energy was limited by the size of a beam profile monitor.

### 3.2 バンチ電荷 60 pC における調整

60 pC では空間電荷効果が支配的になるため、ある 1 点で、またはある 1 つの条件においてビームサイズを合わせるだけでは、設計輸送条件を再現することにはならない。また、Fig. 3 に示すように主空洞より上流の間では、射影エミッタンスは不変量とはならない。このような条件下で輸送条件を比較・補正するために、四極電磁石の強さを変えたときのビームサイズの応答を測定し、モデル計算から求めた設計応答に合わせる方法 [3] を用いてオプティクス補正を行った。オプティクス補正

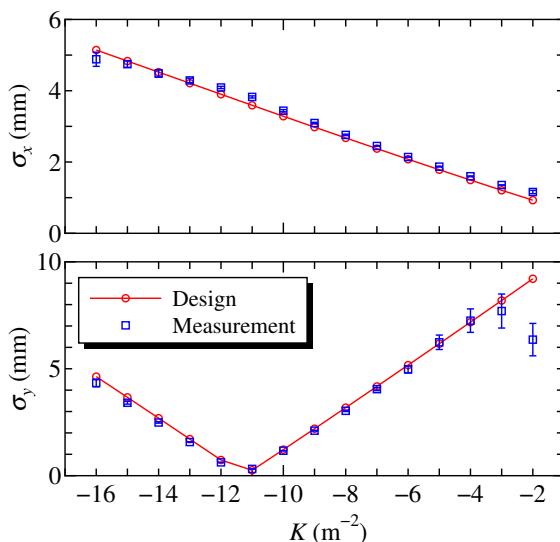


Figure 5: Designed and measured responses of beam size to quadrupole strength after optics matching at MP2 in Fig. 1.

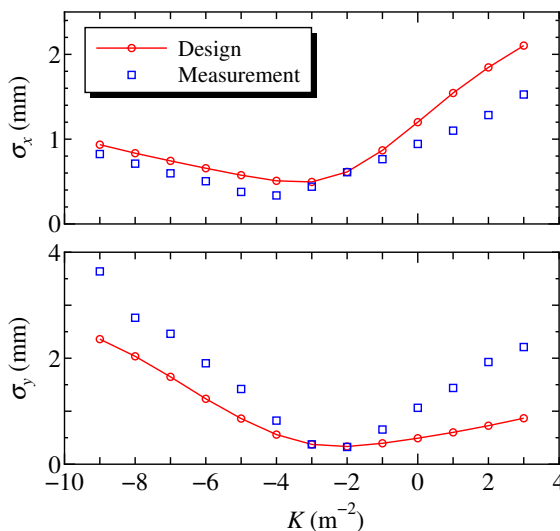


Figure 6: Designed and measured responses of beam size to quadrupole strength after optics matching at MP2A in Fig. 1.

を実施した箇所は、Fig. 1 に示した MP1, MP2, MP2A, MP3 の 4 箇所である。Figure 5 にオプティクス補正後の MP2 における応答測定結果、Figure 6 にオプティクス補正後の MP2A における応答測定結果を示す。Figure 5 の  $\sigma_y$  のグラフの右端の点では、ビームサイズが大きいくフィットिंगが正常にできないため、ビームサイズを正しく評価できていない。

Figure 5 に示すように、合流部下流の MP2 におけるビームサイズの応答を、ほぼ設計通りの応答に調整することができた。これまでの 60 pC ビーム試験では補正があまり機能しないことが多かったが、加速器モデルの修正と調整方法の改良を継続することにより、2019 年 6 月の試験で初めて、60 pC でも応答測定結果をほぼ設計

応答に合わせ込むことができた。一方で、主空洞下流のMP2Aでは、ある程度設計応答に近づけられたが、ずれが残っている。試験後に、主空洞下流の4台の四極電磁石の設定が測定時に設計条件と異なっていたことが判明し、これがずれの原因になっている可能性がある。次の試験ではこれらの四極電磁石の設定値を設計条件に合わせた上で再測定を行う予定である。

## 4. ビーム性能測定結果

輸送条件調整後に、バンチ電荷 60 pC に対するビームサイズ、エミッタンス、バンチ長、エネルギー拡がりを測定した。

### 4.1 ビームサイズ

オプティクス補正後に、電子銃から主空洞出口までの区間に設置された7つのスクリーンモニタ上でのビームサイズ測定を行った。Figure 7 にビームサイズの設計値と測定値を示す。入射空洞下流のスクリーンモニタで測定された垂直ビームサイズ  $\sigma_y$  (Fig. 7 下段の左から3つ目の測定結果) が設計ビームサイズから顕著にずれているが、それ以外のスクリーンモニタ上ではほぼ設計と同じビームサイズに調整できるようになった。

入射空洞下流において垂直方向にビームが引き延ばされる現象は、入射空洞の入力・HOM 結合器の影響により引き起こされていると考えている [2]。入射空洞下流のビームサイズは入射空洞内のビーム通過位置にも依存することがわかってきており、この原因を理解し軌道調整に反映することが次の課題である。

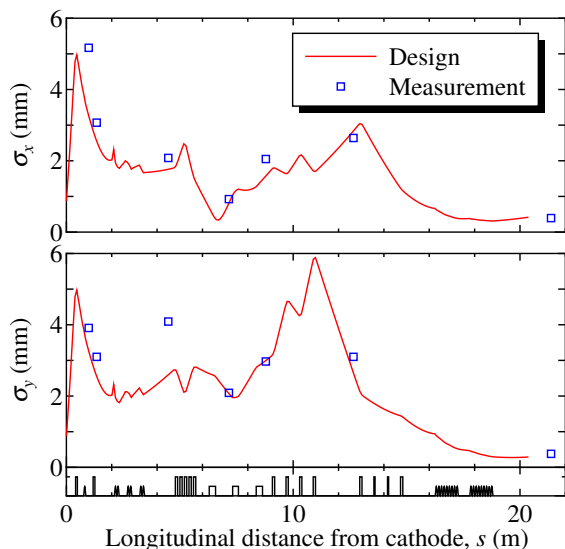


Figure 7: Designed and measured horizontal and vertical beam sizes after optics matching.

### 4.2 規格化 RMS エミッタンス

Slit scan 法と四極電磁石を用いた waist scan 法の二つの方法により、射影規格化 RMS エミッタンスを測定した。

Slit scan 法によるエミッタンス測定では、Fig. 1 に示した入射診断ラインのスリットスキャナを用いて、位相

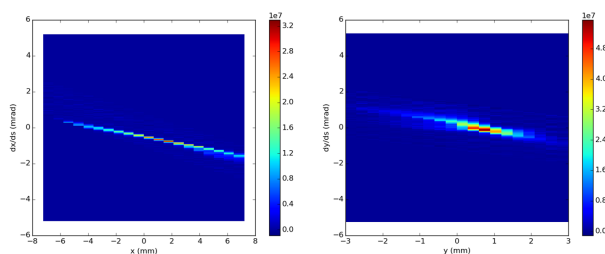


Figure 8: Measured horizontal and vertical phase space distributions by slit scanner in injector diagnostic line.

空間分布と規格化 rms エミッタンスを測定した。入射診断ラインに向けたビーム輸送では、合流部偏向電磁石の残留地場の影響を小さくするために電磁石の消磁を行い、ビームを直進させている。このため、入射診断ラインのビーム性能測定においては合流部における分散関数と空間電荷効果が結合した影響は含まれない。

Figure 8 に入射診断ラインで測定された、位相空間分布を示す。測定された位相空間分布を基に、

$$\varepsilon_{nx} = \gamma\beta \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}, \quad (1)$$

を用いて規格化 RMS エミッタンスを計算した。位相空間分布にはバックグラウンドノイズが含まれるため二つの異なる手法でエミッタンスを計算した。一つ目の方法 (Analysis 1) は位相空間分布から直接 Eq. (1) を数値積分で求める方法である。この場合、エミッタンス計算値に対するバックグラウンドノイズの影響が大きいので、バックグラウンドノイズの閾値レベルを変えながらエミッタンス計算値の変化を求め、バックグラウンドノイズの影響が収まったときの値をエミッタンスの測定値とした。Figure 9 にバックグラウンドノイズの閾値レベルを変えたときのエミッタンスの計算値を示す。

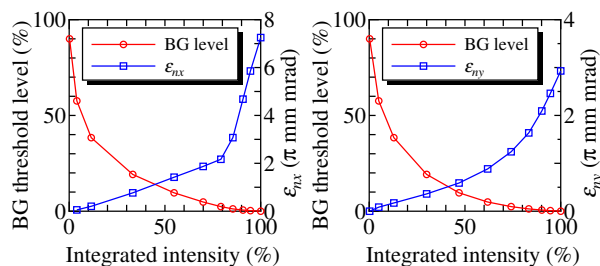


Figure 9: Horizontal and vertical emittances are calculated from measured phase space distributions in Fig. 8 as functions of background threshold level.

二つ目の方法 (Analysis 2) は、各スライスの分布をバックグラウンドレベルも自由変数として gaussian フィッティングし、分布の拡がりを求めてからエミッタンスを計算する方法である。この方法では、フィッティングの段階でバックグラウンドノイズの影響が差し引かれることになる。Table 1 に、スリットスキャナにおけるエミッタンスの設計値と測定値を示す。Table 1 に示すように、二つの異なる解析手法でもほぼ同じエミッタンス値を得ることができた。しかし、設計値と比較すると、測定

では水平方向ではエミッタンスが増加し、垂直方向ではエミッタンスが減少する結果となった。これらの結果より、FEL 試験の目標値である  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  を達成できてはいるが、周回部輸送に比べると診断ライン輸送ではまだ設計条件と現実のギャップが残っており、原因調査が必要である。

Table 1: Normalized RMS Emittance at Slit Scanner

	Design	Analysis 1	Analysis 2
$\varepsilon_{nx}$ ( $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	1.42	1.87	$1.937 \pm 0.286$
$\varepsilon_{ny}$ ( $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	1.48	0.88	$0.826 \pm 0.018$

合流部下流におけるエミッタンス測定は、四極電磁石を用いた waist scan 法によって行われた。Figure 10 に、Fig. 5 に示した MP2 における  $\sigma_y$  のスキャンデータについてのフィッティング結果を示す。Figure 3 より設計エミッタンス  $\varepsilon_{ny} = 1.86 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  に対して、測定結果は  $1.99 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  であり、ほぼ設計と一致する結果が得られた。水平方向はスキャン結果が最小ビームサイズを含まないため参考値となるが、設計エミッタンス  $\varepsilon_{ny} = 2.26 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  に対して、フィッティングによって求めたエミッタンスは  $2.89 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  となり、ある程度近い値になっていることが確認された。

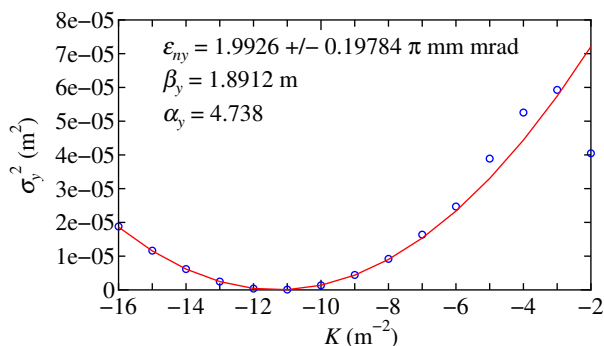


Figure 10: Estimation of normalized RMS emittance from measured quadrupole scan result at MP2 as shown in Fig. 5.

#### 4.3 バンチ長とエネルギー拡がり

バンチ長は、Fig. 1 に示す入射診断ラインの偏向空洞を用いて測定された。設計 RMS バンチ長  $4.1 \text{ ps}$  に対して、測定結果は  $4.5 \text{ ps}$  となり、少し長くなっているが、設計値に近い条件で輸送できていることが確認された。

エネルギー拡がりは、入射診断ラインの偏向電磁石下流における最小ビームサイズ測定結果から推定された。設計値  $0.062 \%$  に対して、測定結果は  $< 0.21 \%$  となり、3 倍程度大きい値が得られた。

### 5. 考察

バンチ電荷  $60 \text{ pC}$  の場合、空間電荷効果が支配的であり、6 次元位相空間のうちの幾つかの方向で設計条件を満たすだけでは不十分で、ビームサイズ、エミッタンス、

バンチ長、エネルギー拡がりの全てを設計条件に近づけることが要求される。今回のビーム試験では、ビームサイズの時間発展、入射診断ラインと合流部下流におけるエミッタンス、バンチ長、エネルギー拡がりを測定し、設計条件との比較を行った。

加速器モデルの改良と系統的なビーム調整の結果、主空洞に向けた輸送路のビームサイズの時間発展 (Fig. 7)、ビームサイズの四極電磁石に対する応答 (Fig. 5)、エミッタンス (Fig. 10) を設計輸送条件に近づけることができた。これらの結果は、主空洞に向けた輸送における横方向 ( $xy$  方向) の運動をよく制御できるようになってきたことを示している。一方入射診断ラインに向けた輸送では、Table 1 に示したようにエミッタンス制御にまだ課題が残っている。また、Fig. 3 に示される主空洞出口におけるエミッタンス補償条件が成立しているかを検証することが、横方向運動における重要な課題である。

進行方向位相空間の運動については、まず低バンチ電荷で重心エネルギーの位相応答調整を実施し、Fig. 4 に示すように、ほぼ設計通りの応答に調整することができた。そのあとにバンチ電荷  $60 \text{ pC}$  におけるバンチ長測定とエネルギー拡がり測定を入射診断ラインで実施した。バンチ長については設計 RMS バンチ長  $4.1 \text{ ps}$  に対して、測定結果は  $4.5 \text{ ps}$  となり、設計にかなり近づけることができている一方で、エネルギー拡がりについては、3 倍程度のずれが生じている。エネルギー拡がりの測定手法の検証を含めて、ずれの原因を調査することが次の課題となる。

### 6. まとめ

cERL における FEL 試験に向けて、バンチ電荷  $60 \text{ pC}$  における cERL 入射器の輸送条件最適化とビーム試験を実施した。入射エネルギーを変えたときのビーム性能をシミュレーションによって調査し、 $4 \text{ MeV}$  入射、RMS バンチ長  $4 \text{ ps}$  の条件を設計輸送条件として選択し、2019 年 6 月にビーム試験を実施した。ビーム性能を評価するために、ビームサイズ、エミッタンス、バンチ長、エネルギー拡がりの測定を実施した結果、 $4 \text{ MeV}$  入射の条件で目標とした RMS バンチ長  $4 \text{ ps}$ 、規格化射影エミッタンス  $< 3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  の条件を満たすことが確認された。

### 謝辞

本研究は NEDO 事業「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の支援の下で行われている。

### 参考文献

- [1] R. Kato *et al.*, “cERL を用いた高繰返し中赤外自由電子レーザーの開発”, 第 16 回日本加速器学会年会 (2019), THPI015.
- [2] T. Hotei *et al.*, “Evaluation of coupler kick of cERL injector cavity for high brightness beam realization”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, pp.143-146.
- [3] T. Miyajima *et al.*, “Optimization of beam optics in low emittance electron linac”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, August 5-7, 2015, pp.963-967.