

## cERL における IR-FEL に向けたバンチ圧縮

### BUNCH COMPRESSION OPERATION FOR IR-FEL AT THE COMPACT ERL

島田美帆<sup>\*A)</sup>、本田洋介<sup>A)</sup>、中村典雄<sup>A)</sup>、加藤龍好<sup>A)</sup>、宮島司<sup>A)</sup>、帯名崇<sup>A)</sup>、内山隆司<sup>A)</sup>

Miho Shimada<sup>\*A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>,

Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>

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

#### Abstract

The compact ERL has a plan to install undulators and demonstrate SASE-FEL in the infrared region. For the first light, it is necessary to realize the high intense density electron beam, such a short bunch length, a small energy spread and small transverse emittance at the high electron charge. Therefore, we performed systematic measurements of the bunch compression to survey the achievable bunch length, transverse emittance, and energy spread under the present accelerator condition. In addition, it is successful to decelerate and transport the beam to the main beam dump even in the bunch compression operation at the high electron charge.

#### 1. はじめに

電子銃で生成された高輝度のビームを維持しながら線形加速器で加速されたビームは、低いエミッタンスや短いバンチ長で輸送することができ、ビーム電荷密度を高くすることができる。その特性から、多くの線形加速器が自由電子レーザー (FEL) として利用されている。その中でも超電導線形加速空洞は、空洞内部表面の電気抵抗が小さく、RF 印可に伴う発熱が少ないため、長いパルス長や CW で運転することができる。加速ビームの平均電流に対する消費電力が常伝導加速空洞に比べて小さいことから、大電流を必要とするアプリケーションで注目されている。この数年では、European XFEL で 600  $\mu$ s の長いパルスの X 線 FEL (XFEL) がユーザー利用として供されているほか [1]、LCLS-II や SHINE など CW 運転の XFEL の計画が着実に進行している。エネルギー回収型線形加速器 (ERL) では、加速したビームを周回ループで加速空洞に輸送する。そのビームエネルギーを加速空洞が回収することによって、入力 RF パワーが少なくなり、ダンプの放射線・熱負荷が下がるため、蓄積リング並みの大電流運転が可能となる。そこで、コンパクト ERL [2] では、産業利用を目的とした大電流の EUV-FEL 光源を提案している。最初のステップとして、アンジュレータを設置して、赤外領域の自発発振 FEL (SASE-FEL) の実証を行う計画を進めている。本発表では、FEL 発振に向けたビーム調整方法とその最初の結果について報告する。

#### 2. 研究課題と目的

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おり、固体レーザーでは困難とされている赤外領域 (IR) の波長 20  $\mu$ m 付近の SASE-FEL 発振を実証する予定である [3]。長さ 3 m のアンジュレータを設置予定であり、今年度末に IR 光のファーストライトの観測を目指している。FEL 発振のためには、小さな規格化エミッタンス ( $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ )、

短い rms バンチ長、小さなエネルギー広がりを同時に満たす必要がある。計算コード GENESIS で目標とすべきパラメータのシミュレーションを行った。周回エネルギー 17.5 MeV、バンチ電荷量 60 pC という条件では、( $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ ) = (3, 3) mm · mrad 以下、rms バンチ長が 250 fs 以下、エネルギー広がりが 1% 以下を満たせば問題なく発振できるという結果を得たため、このパラメータを目指したバンチ圧縮のビーム調整を系統的に実施した。また、今後の大電流運転に向けて、60 pC バンチ圧縮の状態でのエネルギー回収を目指している。

#### 3. コンパクト ERL におけるバンチ圧縮

コンパクト ERL のレイアウトおよびバンチ圧縮の模式図を Fig. 1 に示す [4,5]。今回の運転では、加速空洞が安定に運転可能な範囲で、目標のビーム性能を達成することができるように、入射ビームのエネルギーは 4 MeV、周回ビームは 17.5 MeV でビーム運転を行った。バンチ圧縮とは、オフレスト加速で電子バンチにチャープを与えて、高い (低い) エネルギーがアーク部で遅れる (進む) ことにより、バンチ長を短くする手法である。

$$\Delta z = R_{56}\delta + T_{566}\delta^2 \dots \quad (1)$$

ここで、 $\delta = \Delta E/E_0$  を示す。バンチ圧縮後のバンチ長  $\sigma_z$  とエネルギー広がり  $\sigma_\delta$  は、線形近似で  $\sigma_\delta$  は、 $\sigma_z \sim R_{56}\sigma_\delta^{in}$  と  $\sigma_\delta \sim \sigma_z^{in}/R_{56}$  となる。ここで、上付き  $in$  はバンチ圧縮前を表す。

コンパクト ERL のレイアウトを Fig. 1 に示す。オフレスト加速は、二つの主加速空洞うち下流の空洞 (ML2) の位相を変更し、加速エネルギーが 17.5 MeV と一定になるように加速勾配を調整して行っている。アーク入口の 45 度偏向電磁石直後のスクリーンモニタ (cam14) で重心エネルギーおよびエネルギー広がりを測定している。重心エネルギーが最大となる位相とエネルギー広がりが最小となる位相が数度ずれており、主空洞上流でチャープしていると思われる。バンチ圧縮ではチャープが重要であ

\* miho.shimada@kek.jp

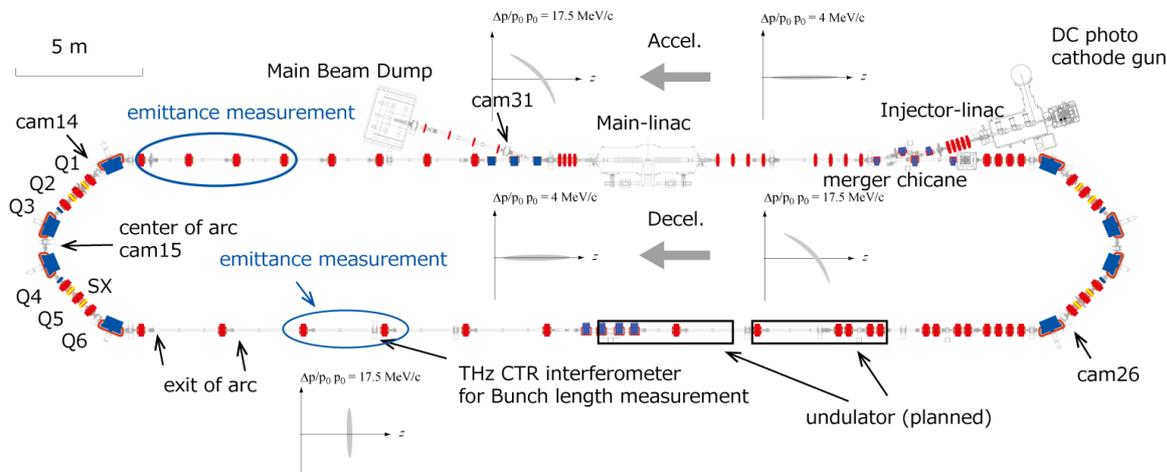


Figure 1: Layout of the compact ERL and schematic figure of the longitudinal phase space at the bunch compression operation.

るため、エネルギー広がり最小となる位相を基準位相と定義する。主空洞 ML2 でオフレスト加速したビームは下流のアーク部でバンチ圧縮される。その下流の直線部で Coherent Transition Radiation(CTR) を測定しており、THz 領域のスペクトルからバンチ長を推定した [6, 7]。このビーム運転では、ビームバンチ繰り返し 1.3 GHz、電子銃レーザーパルス繰り返し 5 Hz、パルス長 100 ns のバースト運転で行った。本発表では基準位相から +8 度シフトしたオフレスト加速の結果を報告する。

#### 4. オプティクス調整手順

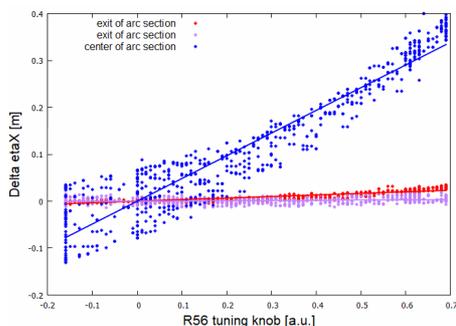


Figure 2: Beam position at the arc section during  $R_{56}$  tuning. The ratio of Q1:Q2:Q3 is settled at -1:1.7:0.



Figure 3: Beam profile measured with screen monitor in the arc section.

アーク部はアクロマートを維持しながら、バンチ圧縮最適化のため  $R_{56}$  を調整する必要がある。分散

関数は、主加速空洞で周回エネルギーを 1% 下げたときのビーム位置のずれを用いて測定する。現状は直接  $R_{56}$  を測定できないため、分散関数の測定値から  $R_{56}$  を推定している。そのためには、アーク内部が対称的なオプティクスになっている必要がある。計算コード ELEGANT による設計にしたがって四極電磁石を設定した後、Q1:Q2:Q3=Q4:Q5:Q6=1:0:0 の割合で収束力を増減させて、対称性を維持しながらアクロマートに合わせた。垂直方向に分散関数が漏れている場合は、六極電磁石に装着している補正コイルでスキューの磁場を与える。分散関数の測定の際は、ビーム軌道が電磁石中心から水平方向に大きくずれているため、六極電磁石のメインコイルは励磁しなかった。引き続き、 $R_{56}$  の調整をする際もオプティクスが対称性を維持するようにしなければならない。いくつかの Q1:Q2:Q3 の比率でアーク中央とアーク出口 2 か所の BPM 信号のスキューを行い、最適な比率を探した。Figure 2 に Q1:Q2:Q3=1:-1.7:0 の測定結果を示す。アーク出口の位置が変化せず、アーク中央のみが変化していることから、アクロマートを維持しつつ  $R_{56}$  を変化させることができることがわかる。この日の測定では、変化量の比率 1:-1.7:0 が最適であった。二次の項である  $T_{566}$  はアーク内部の六極電磁石で調整を行った。この際、 $T_{566}$  と  $R_{56}$  を独立に制御するために、六極電磁石の中心を通すことが重要であり、特に六極電磁石の両側に設置されている四極電磁石の中心を通すように軌道調整を行っている。

アーク内部の四極電磁石はアクロマートや  $R_{56}$  の調整に特化しており、ビーム断面方向のプロファイル(ベータ関数)のマッチングには直線部の四極電磁石を用いる。アーク部は、全体的に水平方向に収束するオプティクスとなっているため、垂直方向に発散しないように調整する必要がある。調整例を Fig. 3 に示すが、アーク中央で絞り、対称的なビームプロファイルになるように調整している。CTR の THz

測定システムでは、rms ビームサイズが水平方向で 1.1 mm、垂直方向で 0.63 mm に収束した。

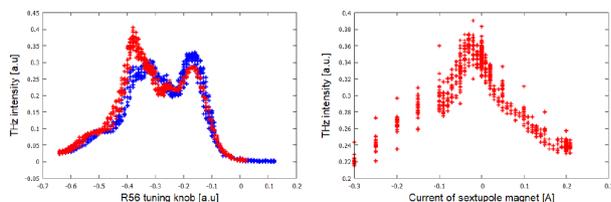


Figure 4: Optics scan for maximization of the THz CTR intensity. (Left):  $R_{56}$  scan result. Red/blue dots indicate after/before making the electron gun laser pulse flatterd. Horizontal axis is the same as the Fig. 2. (Right): Sexupole scan result.

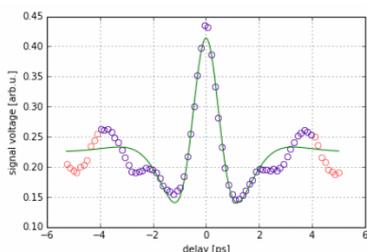


Figure 5: Measurement and fitting results of the temporal response of THz interferometer.

バンチ圧縮調整では、CTR の THz 強度が最大となる条件を探している。Figure 4 に  $R_{56}$  と  $T_{566}$  の調整例を示す。先に述べたような手法で  $R_{56}$  でスキャンを行たところ、二つのピークが現れた。これは、進行方向のビーム分布も複数のピークがあることが原因と思われる。また、THz の強度は電子銃レーザーの変化に敏感である。電荷量が大きい場合は、空間電荷効果によるエミッタンス増加を抑えるために、パルススタッキングという手法を用いて電子銃レーザーのパルス長を 50 ps まで伸ばし、その下流にあるバンチャー空洞でバンチ長を短くしている。気温や湿度に敏感であるため、時間の経過とともに電子銃レーザーの進行方向の分布が変化してしまうこともある。パルススタッキングの調整を行った前後の  $R_{56}$  スキャンの結果を Fig. 4 に示す。 $R_{56}$  が最適となる条件がシフトしていることがわかったため、レーザーパルスが平坦になるように調整を行っている。その後、六極電磁石のスキャンを行い、六極電磁石の励磁電流が大きい場合は、 $R_{56}$  のスキャンを繰り返した。

## 5. バンチ圧縮のビーム測定

THz 強度が最大となる条件で、CTR を干渉計で測定した結果を Fig. 5 に示す。進行方向のバンチ形状がガウシアン分布であると仮定したときの rms バンチ長は 360 fs となった。この時の THz 輸送系のカットオフ周波数は 0.2 THz と仮定している。引き続き、Q scan 法と呼ばれる手法でエミッタンスの測定を行った。こ

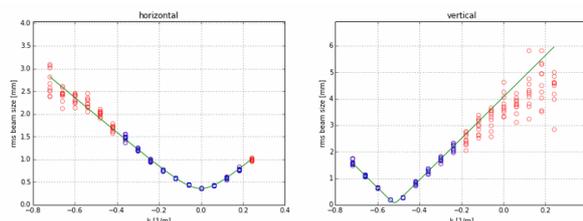


Figure 6: Q scan emittance measurement at the exit of the arc section.

のときに使用した四極電磁石とスクリーンの位置を Fig. 1 に示している。アーク部通過後のエミッタンスは  $(\epsilon_{nx}, \epsilon_{ny}) = (6.1 \pm 0.1, 2.6 \pm 1.6) \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  となり、水平方向で大きいことがわかった (Fig. 6)。アーク部手前では  $(\epsilon_{nx}, \epsilon_{ny}) = (5.2 \pm 0.05, 3.7 \pm 0.1) \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  となり、同様に水平方向で大きく、アーク部での顕著なエミッタンス増加は見られなかった。トラッキングコード General Particle Tracer によるシミュレーション結果  $(\epsilon_{nx}, \epsilon_{ny}) = (1.0, 1.0) \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  よりも大きく、その原因を調査中である。エネルギー広がり測定をアーク部手前の cam14 で行ったところ、0.17% 以下となった。これは、オフレスト加速によるエネルギー広がりと考えられる。FEL 発振には、アーク部通過後のエネルギー広がりが重要であるためその測定を試みた。本来ならアーク部出口直後や FEL 設置予定の場所で測定すべきであったが、曲げ角の大きい偏向電磁石がなくエネルギー広がりを測定することができないため、リターンアーク部の入口近くのスクリーン cam26 まで輸送した (Fig. 1)。ベータ関数とエミッタンスの影響を最小限にするために、上流の四極電磁石でオプティクスを調整し、水平方向のビームサイズが最小になるようにしたところ、エネルギー広がり は 0.49% 以下という結果となった。また、アーク部手前の cam14 と比べて増加していることが分かる。その原因として、CSR wake やバンチ圧縮による空間電荷効果の増加が挙げられる。

今回のビームスタディでは、入射部で空間電荷効果によるエミッタンス増加を避けるため、通常より長い rms バンチ長で入射しており、入射診断部の偏向空洞による測定でおよそ 4 ps であるという結果も得られていた [8]。ここで、入射合流部からアーク部までの輸送中にエネルギー広がりが増加しているかどうかを基準加速位相 (エネルギー広がりが最小) で測定をした。高い精度で測定するために、アーク部中央のスクリーン cam15 (Fig. 1) で測定をおこなった。この測定では、アーク部内部の四極電磁石の収束力をゼロに設定して、分散関数を大きくした。cam15 での分散関数はデザイン値では 2.3 m、測定結果は 2.4 m であり、エネルギー広がりはおおよそ 0.1% という結果が得られた。これはバンチ長 4 ps に相当する。低い電荷量においてもその変化は数 10% であり、入射合流部からアーク部までの空間電荷効果によるエネルギー広がりの増加は深刻ではないと思われる。しかし、先に述べたように、主空洞手前のバンチ長が長い場合、オフレスト加速によってエネ

ルギー広がり広がる。FEL 発振の目標値が0.1%であることから、入射部で短いパンチ長と低いエミッタンスを両立することもひとつの目標となる。

以上の測定結果から FEL の場所で実現可能と思われるパラメータを、Table 1 にまとめる。目標値に到達していないパラメータもあるが、パンチ圧縮と低いエミッタンスを両立させる運転が可能であることが分かった。

Table 1: The Target Parameters for IR-FEL and Achieved Parameter at the Bunch Compression Operation

	target	achieved	unit
$\sigma_z$	250	$360 \pm 15$	fs
$\varepsilon_{nx}$	3	$6.1 \pm 0.1$	mm · mrad
$\varepsilon_{ny}$	3	$2.6 \pm 1.6$	mm · mrad
$\sigma_\delta$	0.1	0.49	%

## 6. エネルギー回収

パンチ圧縮を行った状態で、バーストモードのエネルギー回収を試みた。これまでに低い電荷量で実証したことはあったが、60 pC の電荷量では初の試みとなる。これまで、エネルギー回収の際は、入射ビームと周回ビームの運動量の比率を 1:6 以上に維持していた。これは、入射合流部シケインやダンプ取り出しシケインのビーム軌道がチャンバーからはみ出ないようにするためであり、入射合流部シケインの軌道を Fig. 7 に示す。これまででは、その比率を維持するために、周回ビームのエネルギーを固定し、入射ビームのエネルギーを下げていた。しかし今回のスタディでは、低いエミッタンスで運転するために、入射ビームのエネルギーを 4 MeV に維持し、冷凍機の圧力を高めに調整することで、周回ビームのエネルギーを 19 MeV に上げて運転することとなった。このときの運動量比はおよそ 1:5 であるが、Fig. 7 に示すように、入射合流部シケインの軌道はチャンパー内に収まる。ダンプシケインの偏向電磁石は入射エネルギーと同じ 4 MeV でダンプライン中心を通過するように励磁した。主空洞のダブルビームを BPM 信号で確認しながら軌道調整を行い、リターンループのアーカ部でバンプを立て、加速空洞の周波数 1.3 GHz の減速位相に乗るように周長補正を行ったところ、主ダンプに輸送することができた。Figure 8 にダンプライン入り口のビームプロファイルを載せる。パンチ圧縮でオフクレスト加速をしている際、エネルギー回収後のエネルギー広がりを小さくすることが重要である。そのためにはリターンアーカ部の  $R_{56}$  を逆符号にして、進行方向の位相空間分布を元の状態に戻す必要がある。模式図を Fig. 1 に図示するが、リターンアーカ部の分散関数が閉じていることを確認した後、同じ方法で  $R_{56}$  のスキャンを行った。また、ベータatron関数の調整にはリターンアーカ下流の四つの四極電磁石を使用し、加速ビームに影響を与えないように減速ビームの調整

を行った。このようにして、ダンプシケイン直後のスクリーン cam31 で水平方向のビームサイズをできる限り小さくした結果を Fig. 8 に示す。水平ビームサイズと分散関数のデザイン値 0.36 m から、減速後のエネルギー広がり率は 1.7% と推定した。リターンアーカがアイソクロナス ( $R_{56} = 0$ ) であった場合の 2.3% に比べてやや減少している。しかし、ビームロスが多いため、さらなる調整が必要となる。

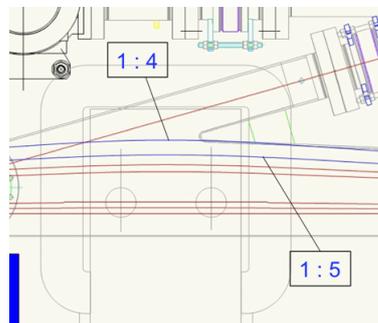


Figure 7: Beam orbit of the injection and recirculation at the momentum ratio of 1:6 and 1:5.

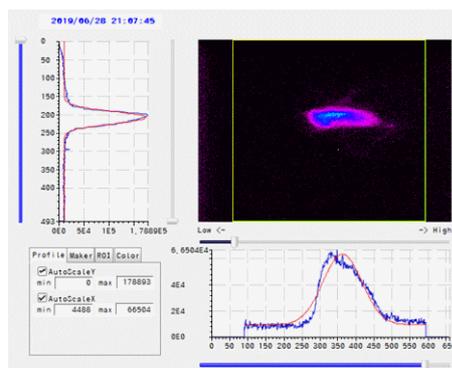


Figure 8: Beam profile at the screen monitor just after the dump chicane.

## 7. まとめ

コンパクト ERL において、赤外領域の FEL 発振を目的として 60 pC のパンチ圧縮を実施した。電子銃レーザーパルス形状、オフクレスト加速とエネルギー広がりスキャン、 $R_{56}$  調整の際の四極電磁石の最適な比率など、パンチ圧縮の手順やパラメータの調査を行った。8 度のオフクレスト加速でパンチ圧縮の最適化を行い、パンチ長、エネルギー広がりやエミッタンスを同じ条件で測定し、同時に達成可能なパラメータを求めた。また、4 MeV 入射・19 MeV 周回エネルギーで 60 pC のエネルギー回収に成功した。今後は、アンジュレータのインストールを行った後、赤外領域の SASE-FEL 発振の実証および大電流運転を目指す。

## 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] D. Kostin *et al.*, “SRF operation at XFEL: lessons learned after more than one year”, Proceedings of IPAC19, Melbourne, pp12-16 Australia, 2019.
- [2] M. Akemoto *et al.*, “Constraction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, Nucl. Instrum. Methods A 877 (2018) 197-219.
- [3] 加藤 龍好、他、“cERL を用いた高繰り返し中赤外自由電子レーザーの開発”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug.3, 2019.
- [4] M. Shimada *et al.*, “Bunch compression at the recirculation loop of compact ERL”, Proceedings of IPAC16, Busan, Korea, pp.3008-10 2016.
- [5] M. Shimada *et al.*, “Systematic measurements of the coherent THz spectra by magnetic bunch compression at the Compact ERL”, Proceedings of IPAC19, Melbourne, Australia, pp1486-8, 2019.
- [6] Y. Honda *et al.*, “Beam tuning and bunch length measurement in the bunch compression operation at the cERL”, Nucl. Instrum. Methods A 875 (2017) 156-164.
- [7] A. Murokh *et al.*, “Bunch length measurement of picosecond electron beams from a photoinjector using coherent transition radiation”, Nucl. Instrum. Methods A 410 (1998) 452-460.
- [8] 田中 織雅、他、“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”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug.3, 2019.