

# cERL 周回部におけるバンチ長と放射スペクトルの測定

## BUNCH LENGTH AND RADIATION SPECTRUM MEASUREMENT AT RETURN LOOP OF CERL

本田洋介<sup>\*A)</sup>、島田美帆<sup>A)</sup>、高井良太<sup>A)</sup>、アリシェフアレクサンダー<sup>A)</sup>、ミハイルシェベレフ<sup>A)</sup>、加藤龍好<sup>A)</sup>  
Yosuke Honda<sup>\*A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A)</sup>, Shevelev Mikhail<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

One of the features of Energy Recovery Linac is the possibility to operate a short bunched beam in a high repetition rate. Using a coherent radiation from a short bunch, it can be a high power THz source. At cERL, we started commissioning of a bunch compression operation which controls the longitudinal dispersion of the arc section with an off-crest operation of the main accelerator. For a precise beam tuning of the bunch compression, a bunch length monitor is necessary. We have developed a spectrometer system based on an interferometer detecting a coherent transition radiation. We observed that the spectrum reached up to 1.4 THz, which corresponded to RMS bunch length of 150 fs.

## 1. はじめに

ERL(エネルギー回収型線形加速器)は、線形加速器の特長である低エミッタンスで短バンチのビームを、エネルギー回収の原理で大平均電流で連続運転できる加速器である。KEKでは、将来の大型ERL加速器のための試験加速器としてcERLが建設され、現在コミッショニングが続けられている [1]。

cERLのバンチ圧縮モードの運転においては、入射器で生成する数psのバンチ長のビームを、主加速器のオフ Crest 運転とアーク部の縦方向分散によって圧縮し、周回部の直線部において短バンチビームを得る。RMSバンチ長 $\sim 100$  fsのビームが得られると、THz領域のコヒーレント放射が発生でき、大強度テラヘルツ光源として利用できると期待されている。

cERLでは、バンチ圧縮の詳細な調整を目的として、2016年の運転から新たにアーク部の6極電磁石を追加設置した。また、バンチ圧縮の調整の際に指標とするモニタとして、周回部直線部においてコヒーレント遷移放射(CTR)の測定を行う装置の開発を行って来た [2]。

2016年2~3月の運転では、初めてバンチ圧縮運転の試験を本格的に行い、ビーム調整の手順を確立した [3]。CTRの自己相関干渉計によって放射のスペクトルを測定し、そこからバンチ長の評価を行った。また、バンチ圧縮モードでのCW運転の実証試験も行い、コヒーレントシンクロトロン放射(CSR)の観測を行った。

## 2. セットアップ

### 2.1 加速器のレイアウト

Figure 1に、cERLにおけるバンチ圧縮運転試験のレイアウトを示す。バンチ圧縮運転時でも、入射器の運転条件は通常運転と同じである。一方、主加速空洞は通常運転から位相をシフトさせ、オフ Crest 位相で運転する。このとき、加速後のエネルギーを通常

運転時と合わせるために、加速空洞の振幅を上げて運転する必要がある。

周回部は、2つのアーク部と直線部から構成される。各アーク部は4つの45度偏向電磁石とその頂点を基準に対称に設置された3連の4極電磁石からなり、アクロマートでアイソクロナスな設計を基本としながら、縦方向分散( $R_{56}$ )を正負に調整できるようになっている。また、各アークに2台ずつの6極電磁石が追加され、高次の分散の補正を行う。バンチ圧縮運転時の典型的なビームパラメータをTable 1に示す。

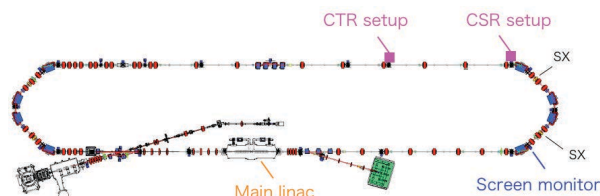


Figure 1: Layout of cERL.

バンチ長の測定の目的で、直線部にCTRのモニタを設置した。ビーム軸に対して45度に標的(アルミコートしたシリコン板)を挿入するものである。ビームの衝突によってCTRが90度方向に発生する。これを石英窓から真空チェンバの外に取り出して測定する。CTRモニタはビームを破壊して測定するため、CW運転では使用出来ない。そのため、CTRを測定してのビーム調整は、バーストモードと呼ぶ $1 \mu\text{s}$ の間幅のマクロパルス運転で行う。

アーク部の最終偏向電磁石には、25度の接線方向に石英窓のポートが用意されている。偏向電磁石からのCSRをここから取り出し、CW運転時のモニタとして使用している。

### 2.2 CTR干渉計モニタ

CTRモニタの構成をFig. 2に示す。標的から $1/\gamma$ の発散角で放射されるCTRをまずパラボラミラーで平行光線にして輸送する。装置は2つの部分から成つ

\*yosuke@post.kek.jp

Table 1: Beam Parameter for Bunch Compression Operation

Parameter	Value
Kinetic energy of the return loop	19.5 MeV
Kinetic energy of the injector	2.4 MeV
Acc. gradient of the main linac	$2 \times 8.5$ MeV/cavity
Off-crest phase of the main linac	8 degree (typ.)
Bunch charge	0.23 pC/bunch
Macro-pulse width	1 $\mu$ s
Micro-pulse repetition	162.5 MHz

ており、途中の切り替えミラーで光路を切り替えることができる。

切り替えミラーが挿入されると、CTRは狭帯域のダイオード検出器に輸送される。検出器は2次元に移動できるステージにマウントされており、複数の検出器の切り替えや、マッピングによるプロファイル測定が出来る。検出器によって測定帯域を決め、相対的な強度の変化をモニタするのに使用する。この実験では、用意した狭帯域のダイオード検出器のうち比較的高周波で有意な信号が観測しやすいもの(帯域 140~220GHz, Virginia Diodes 社 WR5.1ZBD)を使用した。

切り替えミラーを外すと、CTRはマイケルソン型の干渉計に入力される。3.5 mm厚の高抵抗シリコン板のビームスプリッターを用いて2つの光路に分岐し、ミラーで反射して重ね合わせ、パラボラミラーで集光して検出する。検出器は、広帯域で平坦な特性のものが望ましいので、He冷却型のSiボロメータを使用した。干渉計の片方の光路のミラーは、ステージでスキャン出来るようになっており、自己相関の遅延をスキャンして干渉波形を測定することが出来る。また、干渉計の各光路にはマイクロ波吸収体を挿入できるようになっており、光路の強度バランスやベースラインを確認できる工夫をしている。

Figure 3にセットアップの写真を示す。最初に、検出位置にはステージに乗せたダイオード型の検出器を置き、これをスキャンして信号光の位置を確認、および2つの光路の重なるの確認を行った。そのうえで検出器をボロメータに交換し、広帯域の測定が出来るようにした。検出器の開口を大きくすると、光路のミスアライメントによって干渉波形のビジビリティが悪化するおそれがある。ボロメータの開口はアルミ窓で直径8mmに制限して使用している。ボロメータの液体Heは約20時間しか保たないため、ビーム調整の状況を見ながら検出器を冷却して準備し、運転途中に一度入域して設置する、という手順で行っている。

### 3. バンチ圧縮のビーム調整

cERLの通常モードでは、主加速空洞はオンcrest(最大加速位相)、アーク部はアイソクロナス( $R_{56} = 0$ )で運転する。この時、バンチ長はほぼ入射器のままの3 ps程度で、エネルギー拡がり小さく輸送しや

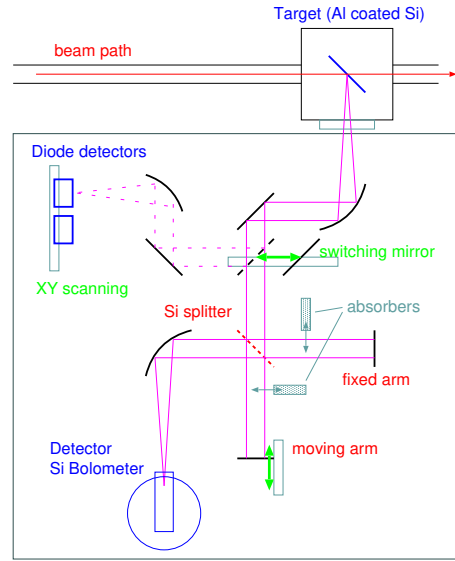


Figure 2: Setup of the CTR measurement.

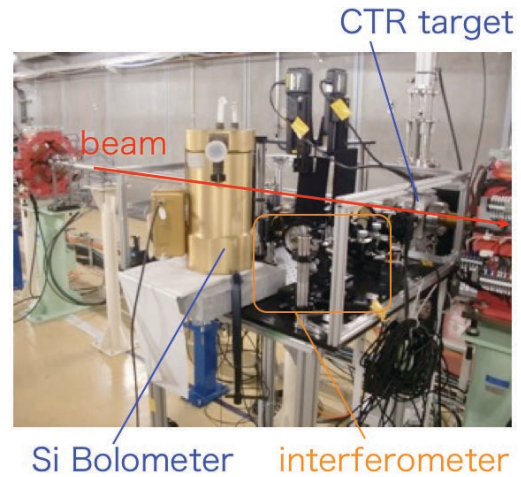


Figure 3: Picture of the setup.

すい条件である。一方、バンチ圧縮モードでは2台の主加速空洞の位相を最大加速位相からシフトさせる。そのままだとシフトした分だけエネルギーは下がり、以降のビーム光学系が影響を受けてしまうので、同時に振幅を上げ、ビームエネルギーが変化しないようにする。これはアーク部のスクリーンモニターでビーム位置を確認しながら微調整する。ここでは、主加速空洞のオフcrestを+8度で調整した結果を示す。限られた試験時間の測定例のうち、最もバンチ長が短い結果が得られたと思われる例である。

アーク部の3連の4極電磁石を組み合わせて調整することによって、アクロマートの条件を維持しながら $R_{56}$ を連続的に変化させることができる。バンチが短くなるとダイオード検出器で検出されるCTRの強度が増加するはずである。Fig. 4に示すように、CTRの強度を測定しながら $R_{56}$ スキャンを行い、CTR強度が最大になる条件に設定した。さらに、高次の分

散補正を期待して6極電磁石をスキャンして同様の測定も行った。しかし、これまでの試験では、6極電磁石によってCTRがさらに強くなる条件は確認できず、6極電磁石は0Aで運転することとした。

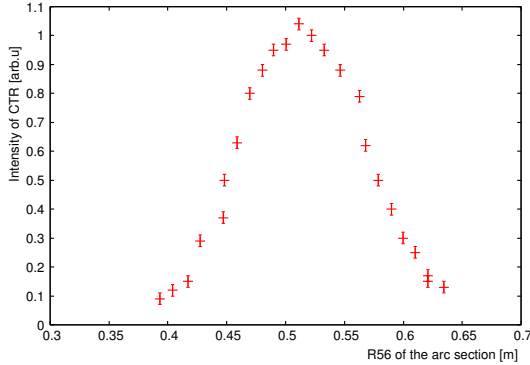


Figure 4: CTR intensity v.s.  $R_{56}$ .

#### 4. バンチ長とスペクトルの解析

上述のようにバンチ圧縮を最適化した条件でマイケルソン干渉計をスキャンして得た、自己相関の干渉波形を Fig. 5 に示す。干渉計のそれぞれの光路の強度バランスも合わせて示した。ビジビリティが良く、概ね対称な干渉波形が得られていることから、干渉計のアライメントは十分良く為されていると考えられる。

得られた干渉波形をフーリエ変換し、放射のスペクトルに直したものを Fig. 6 に示す。理想的には、バンチ形状がガウス型で

$$\rho(t) \propto e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

とすると、そのフーリエ変換のガウス型のスペクトル、

$$\hat{f}(t) \propto e^{-(2\pi\nu)^2\sigma^2} \quad (2)$$

が得られることになるが、現実的には、さらに輸送系および検出器の周波数特性が掛かったものが測定されることになる。400 GHz 以下の低周波数側は検出器のカットオフのため測定されていないと考えられる。また、1.2 THz および 1.5 THz 付近のディップは、大気中の輸送における水蒸気の吸収の影響であろう。1.4 THz 程度までの周波数成分が放射されていることが確認できることから、粗い評価で RMS バンチ長は 150 fs と見積もられた。正確なバンチ形状の評価には、全帯域の測定が必要であるが、低周波数帯は外挿により評価している為、ここでのバンチ長の見積りはバンチ形状をガウス型と仮定の上での値と理解される。

#### 5. CW 運転での CSR の測定

大強度テラヘルツ光源としての利用を目指すには、CW-ERL 運転で THz 放射を発生する必要がある。このとき、THz 放射の発生は非破壊な過程でなければならず、偏向電磁石からの CSR を利用することが考えられる。cERL では通常モードで約 1 mA の CW 運転を実証しているが、バンチ圧縮モードでの CW 運

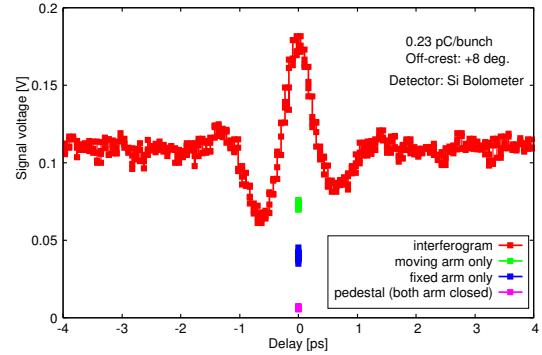


Figure 5: Interferogram of the Michelson interferometer.

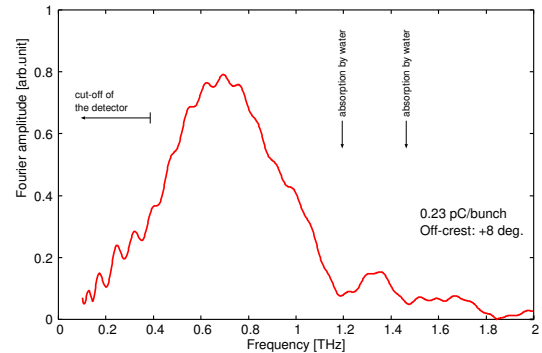


Figure 6: Fourier spectrum obtained from the CTR interferogram.

転は、エネルギー拡がりの大きなビームの輸送や、短バンチに起因する発熱など、新たな問題もあり得るので、低電流から慎重に試験を開始したところである。

CSR ポートにおかれた焦電センサ (Gentec 社 THz-2I-BNC) で測定された信号をビーム電流の関数としてプロットしたものを Fig. 7 に示す。ビーム電流に従って放射強度が増加する様子が測定されている。バンチ圧縮ではまだ最大 50  $\mu$ A までの試験に留まっているが、通常運転より速い立ち上がりを示していることが確認できた。

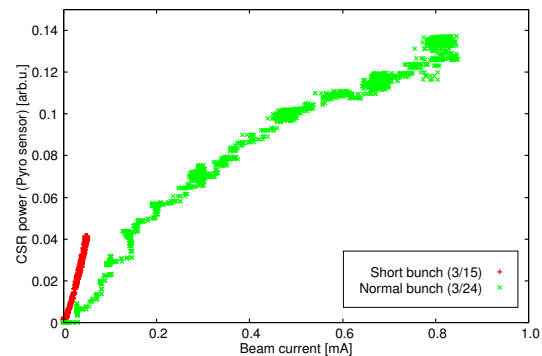


Figure 7: Beam current dependence of CSR intensity.

## 6. まとめ

cERLにおいてバンチ圧縮運転の試験を行った。バンチ圧縮のビーム調整は、直線部のCTRの強度を指標にして行い、CTR干渉計によりスペクトルを測定して、バンチ長を評価した。1.4 THzまでの放射が確認でき、RMSバンチ長は150 fsと見積もられた。バンチ圧縮でのCW運転の試験も開始し、CSRの測定も行っている。

## 謝辞

本研究で使用したポロメータは大阪大学の木村真一氏より借用しました。また、そのHe冷却には、小島裕二氏ほかcERL冷凍機グループに協力して頂きました。本研究の一部は、光・量子融合連携研究開発プログラムによるものである。

## 参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, “Operations with 1-mA beam current at the compact ERL”, Proceedings of 13-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2016.
- [2] Y. Honda *et al.*, “Bunch Length Measurement at Return Loop of cERL”, Proceedings of 12-th Particle Accelerator Society Meeting in Japan, Aug. 2015.
- [3] M. Shimada *et al.*, “Beam optics for bunch compression at the compact ERL”, Proceedings of the 13th Particle Accelerator Society meeting in Japan, Aug. 2016.