

# ERL 試験加速器における周回部バンチ長計測の検討状況

## DEVELOPMENT OF BUNCH LENGTH MONITOR SYSTEM AT THE RETURN LOOP OF KEK ERL TEST ACCELERATOR

本田洋介<sup>\*A)</sup>、Aryshev Alexander<sup>A)</sup>、Shevelev Mikhail<sup>A)</sup>、島田美帆<sup>A)</sup>、高井良太<sup>A)</sup>、宮島司<sup>A)</sup>  
Yosuke Honda<sup>\*A)</sup>、Alexander Aryshev<sup>A)</sup>、Mikhail Shevelev<sup>A)</sup>、Miho Shimada<sup>A)</sup>、Ryota Takai<sup>A)</sup>、Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

Possibility to produce a short bunch beam is one of the features of an Energy Recovery Linac. In order to tune the beam condition and to prove the realized bunch length, a bunch length diagnostic system is essential. We have started to develop an interferometer based bunch length monitor utilizing a coherent transition radiation (CTR) at the KEK ERL test accelerator. As a pre-experiment, we have measured a CTR profile from a beam target and confirmed that its intensity depended on bunch length.

## 1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) は、線形加速器でありながらも、大平均電流で運転することが出来る、新しい方式の加速器である。その特長を活かし、次世代の各種光源等への応用が期待されている。必要となる要素技術と人的資源の開発を目的として、ERL 試験加速器 (cERL) が KEK に建設され、2013 年からコミッショニングを開始している。

高繰り返しの短パルスビームが得られる事は、cERL の特長の一つである。通常運転では数 ps、バンチ圧縮モードの運転では 100fs のバンチ長が実現できるよう設計されており、そのコヒーレント放射により得られる THz 光の利用が計画されている。

ビームの縦方向位相空間をうまく制御してバンチを圧縮するが、ビームの調整の過程、また、実現されたバンチ長の実証の為に、バンチ長のモニタが必要である。しかしながら、現時点まで cERL の周回部においてバンチ長モニタは検討されておらず、バンチ圧縮の試験を開始するまでにモニタを開発することが急務になっている。

既存のビームチェンバに大きな変更を加えずに試験を開始できる方法として、コヒーレント放射の干渉計によるバンチ長計測装置の開発を検討している。

## 2. 測定の原理

### 2.1 干渉計信号の表式

ここでは、OTR あるいは ODR によるコヒーレントな放射過程を想定する。これを、Fig.1 に示すような干渉計で測定する。

バンチからの放射の振幅スペクトルは、時間方向の密度分布  $\rho(t)$  のフーリエ変換に相当し、それを、干渉計で片方の光路に時間差  $\tau$  をつけて重ね合わせて得られる振幅スペクトル  $h(\omega)$  は、

$$h(\omega) = \int \rho(t)e^{-i\omega t} dt + \int \rho(t)e^{-i\omega(t+\tau)} dt \quad (1)$$

である。検出器では、このパワーを理想的に全スペクトル積分したものを測定するとすると、 $\tau$  をスキャンして

\*yosuke@post.kek.jp

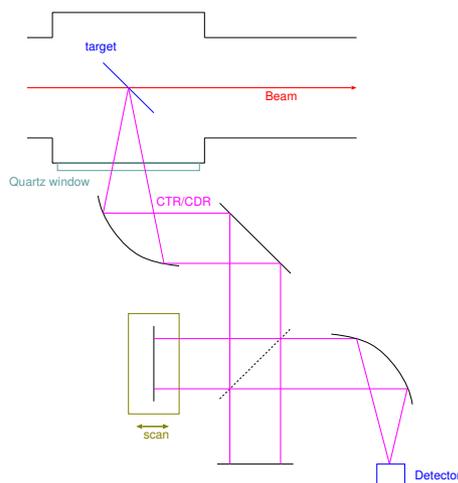


Figure 1: セットアップの概念.

得られる信号  $V(\tau)$  は、

$$V(\tau) \propto \int \rho(t)\rho(t+\tau)dt + const. \quad (2)$$

となる。つまり、密度分布の自己相関を測定していることになる。RMS 幅  $\sigma$  のガウス型のバンチを測定すると、RMS 幅  $\sqrt{2}\sigma$  のガウス型の信号波形が得られることになる。

ところが実際は、検出器までの輸送経路および検出器の帯域による制限を受け、全スペクトルが検出される訳ではない。この影響を、ガウス型のフィルタ関数として表現することが出来る。カットオフ周波数が  $\xi$  の  $n$  次の低周波カットフィルタを、

$$u_n(\omega) = \left[1 - e^{-\xi^2 \omega^2}\right]^n \quad (3)$$

また、カットオフ周波数が  $\eta$  の  $m$  次の高周波カットフィルタを、

$$v_m = \left[e^{-\eta^2 \omega^2}\right]^m \quad (4)$$

として導入して、現実的な干渉計信号を計算する [1][2]。

具体的に表式を示すと、例えば、最も単純な  $n = 1, m = 0$  の場合、

$$V(\tau) \propto \int e^{-(\sigma^2 + 2\eta^2)\omega^2} e^{i\omega\tau} (1 - 2e^{-\xi^2\omega^2} + e^{-2\xi^2\omega^2}) d\omega \quad (5)$$

$n = 3, m = 1$  の場合、

$$V(\tau) \propto \int e^{-(\sigma^2 + 2\eta^2)\omega^2} e^{i\omega\tau} (1 - 6e^{-\xi^2\omega^2} + 15e^{-2\xi^2\omega^2} - 20e^{-3\xi^2\omega^2} + 15e^{-4\xi^2\omega^2} - 6e^{-5\xi^2\omega^2} - e^{-6\xi^2\omega^2}) d\omega \quad (6)$$

となる。

## 2.2 得られる信号波形の計算

ここで、次の具体的な2種類の検出器を例として信号波形を計算する。帯域140~220GHzのダイオード検出器(ZBD) (WR5.1ZBD, Virginia Diodes inc.)、および、帯域100~1000GHzの準光学検出器(QOD) (Virginia Diodes inc.)である。ここでは、帯域として示されている周波数端に、低周波数側は3次、高周波数側は1次のカットオフがあるとした。Fig.2はZBD、Fig.3はQODの場合の干渉計信号波形である。バンチはRMS幅 $\sigma$ のガウス型とし、 $\sigma$ を変えて波形の変化の様子を示した。ZBD

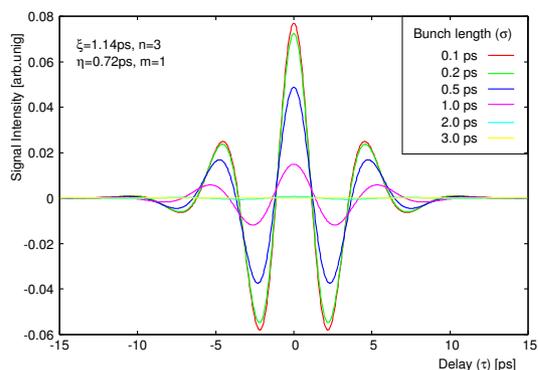


Figure 2: ZBDを仮定した場合。

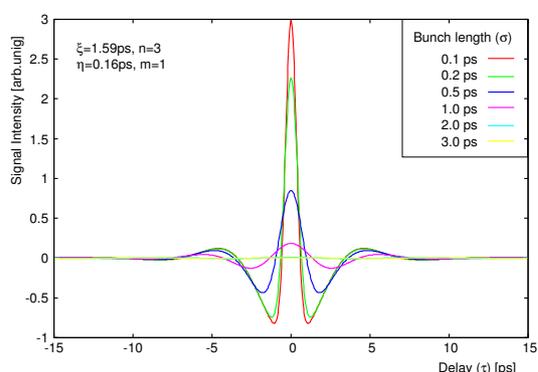


Figure 3: QODを仮定した場合。

は、帯域が狭いため、バンチ長が変化しても信号波形に変化が無く、検出器のスペクトル幅を測定しているだけになる。強度変化として応答は得られるが、絶対的なバンチ長の計測には不向きである。QODは、帯域が広く、0.2~1psの範囲で、バンチ長に依存した特徴的な波形が得られる。今の目的には、QODあるいはそれに相当した帯域の検出器が適当である。

## 3. THz計測の準備の為にテストベンチ

限られた加速器の運転時間を考慮すると、THz光源を利用できるテストベンチがあれば、装置の立ち上げ準備において有用である。光伝導アンテナ(PCA)により、低パワーながらTHz光を発生し利用できるベンチを製作した。

Fig.4は、製作したYbファイバモードロックレーザー発振器である。波長1030nm(波長幅10nm)、繰り返し40MHz、パルスエネルギー1.3nJ/pulse(46mW)、RMSパルス幅183fsの出力が得られる。これを光伝導アンテナ(bPCA-180-05-10-1060-c-l, BATOP)に入射することで、100~500GHzの放射が得られる。PCAの種類を変えることで、放射の帯域を変更できる。

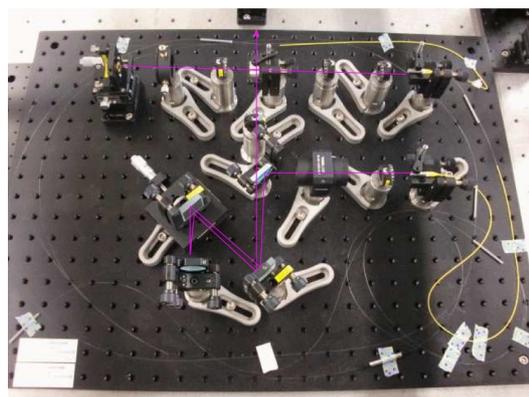


Figure 4: ファイバモードロックレーザー。

放射のピークパワーは微弱であるが、繰り返しが高い為、ロックイン検出によってダイオード検出器で測定することが可能である。ビューポートやスプリッタの透過特性を確認するのに利用出来る。Fig.5は、試しに干渉計を構成した様子である。遅延をスキャンすると、Fig.6のような波形を観測することが出来る。この波形自体は、放射および検出器の帯域で決まる信号でしかないが、光路のアライメントや機器の健全性のチェックに有用である。

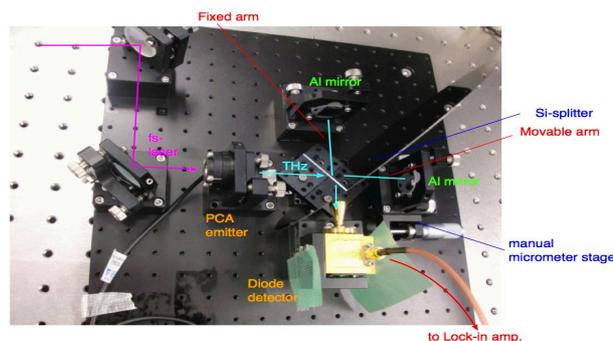


Figure 5: テストベンチで干渉計を試験した様子。

## 4. ビームを使った準備試験

上述のように、干渉計システムには広帯域の検出器が必要であるが、2014年5,6月のcERL加速器の運転

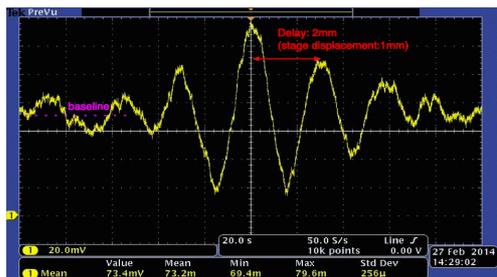


Figure 6: テストベンチで測定される干渉計信号.

では未だ用意できていない。今期のビーム運転では、狭帯域の検出器を使用し、まず、実際にコヒーレント遷移放射 (CTR) の信号を観測し、それがバンチ長に応答することを確認することを目的とした。

#### 4.1 実験のセットアップ

Fig.7に cERL 加速器のレイアウトを示す。今期の運転では、入射器は全エネルギー 2.9MeV、2 台の主加速空洞で 20MeV まで加速し、ビームを周回させている [4]。1 台目の主加速空洞を通過時には 11.5MeV になり、この時点でほぼ光速と考える。アーク部は、アイソクロナスに設計されており、分散関数を測定して設計に合わせるように一応調整された状態である。空洞通過時のバンチ長はそのまま保持されて周回部に到達すると期待している。

第 1 アークを通過後の直線部のスクリーンモニタの一つを流用して実験を行った。なお、スクリーンモニタでビームを破壊的に測定する際には、調整モードと呼ばれる、1 $\mu$ s 時間幅のマクロパルスモードで運転している。ここでの測定は、バンチ繰り返し 1.3GHz、マクロパルス内電流 1mA(0.77pC/bunch)、マクロパルス繰り返し 5Hz、の条件で行った。

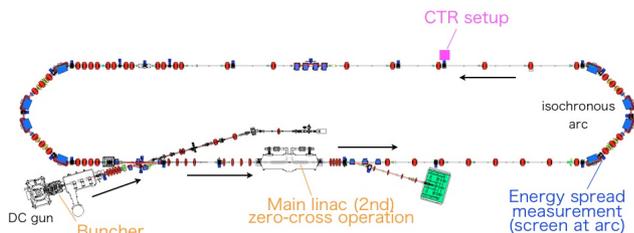


Figure 7: 加速器のレイアウト.

スクリーンモニタのシステムには OTR 標的 (アルミコートされたシリコンウエハ) が備えられている [3]。取り出しのビューポートは THz 光を透過するように合成石英のものである。セットアップを Fig.8, Fig.9 に示す。1/ $\gamma$  の拡がりを持つ放射を、パラボラミラー 2 枚 ( $F = 230\text{mm}$ ) で等倍で結像するような光学系である。検出器は、ZBD(140~220GHz) を用いた。この検出器は偏光特性があり、電場が垂直方向の成分に感度がある。検出器は 2 軸のステージに設置し、位置を調整できる。

#### 4.2 ゼロクロス加速によるバンチ長の評価と調整

ゼロクロス加速の手法で、間接的なバンチ長の確認を行った。通常、2 台の主加速空洞は最大加速位相 (クレ

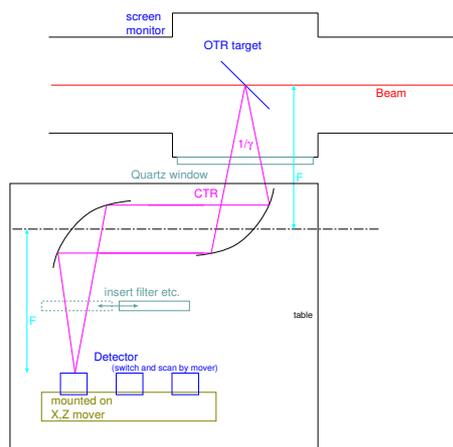


Figure 8: 今回のビーム試験でのセットアップ.

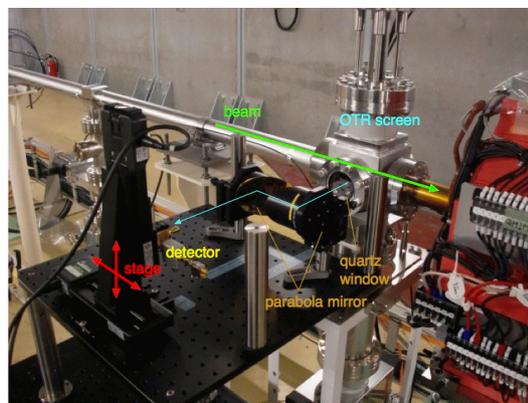


Figure 9: セットアップ写真.

スト) で運転し、8.5MeV/cav の加速を行う。ここでは、下流側の空洞の位相だけを 90 度ずらして運転し (ゼロクロス)、バンチ内に時間に依存したエネルギー変化を与える。アーク部入口の分散部での水平ビームサイズの測定からエネルギー拡がり測定することで、空洞通過時のバンチ長を評価することが出来る。

分散部のスクリーンモニタでビーム像を測定する。まず、空洞の位相をゼロクロス付近で数度変化させ、スクリーンでのビーム重心位置の動きを測定した (Fig.10)。この結果で時間軸を校正し、ビームサイズを時間幅に変換することができる。

電子銃下流に設置されているバンチャー空洞によって、入射器のバンチ長を調整することができる。バンチャーの振幅を変えながら、主加速空洞ゼロクロス運転でバンチ長を測定した結果を Fig.11 に示す。バンチャー振幅によって、バンチ長が変化する様子が確認できる。6/11 の測定では、この結果が最小になるように、バンチャー振幅を調整した。最小の時で、RMS バンチ長は 1.2ps と評価された。

#### 4.3 CTR 信号の観測

OTR 標的を挿入し、THz 検出器の位置をスキャンしながら信号強度を測定した。Fig.12 は水平方向の、Fig.13 は垂直方向の強度分布の測定結果である。放射はラジアル偏光であるが、検出器の特性でその垂直偏光成分

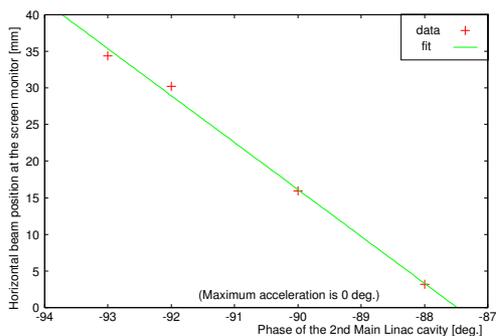


Figure 10: エネルギーと時間対応の校正.

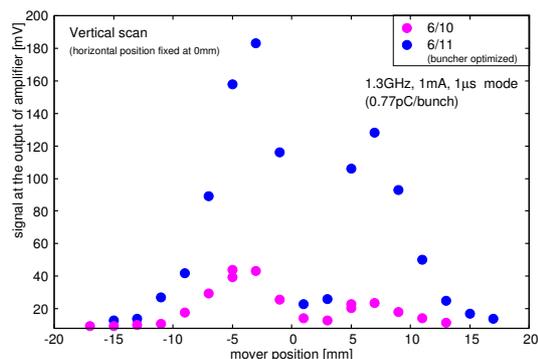


Figure 13: 垂直方向スキャンの結果.

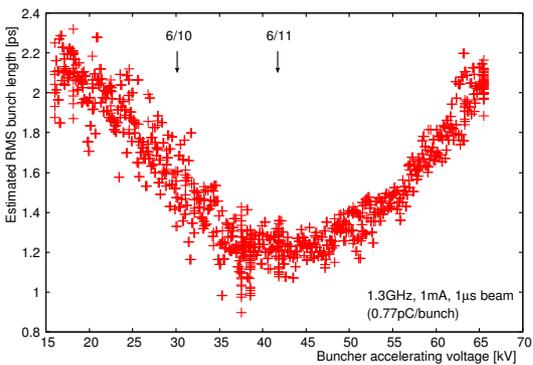


Figure 11: バンチャー振幅の調整.

だけを測定しているため、垂直には2山の分布になる。非対称性があるのは、輸送系の開口が十分でない為であろう。測定は、6/10と6/11の2回、どちらも同じビーム電荷で行ったが、6/11にはバンチャーを調整し、バンチ長が最小になるよう調整したことを反映して、4倍大きな信号が得られた。

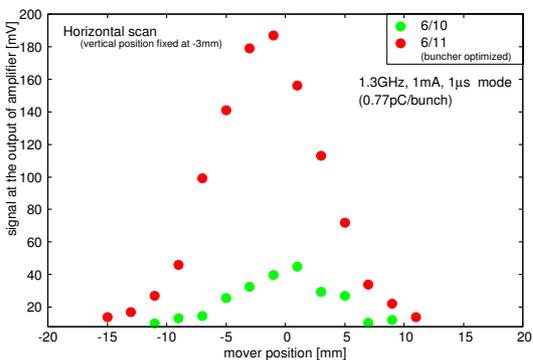


Figure 12: 水平方向スキャンの結果.

## 5. まとめ

cERLの周回部でのバンチ長診断の為に、コヒーレント遷移放射の干渉計のシステムを検討している。0.1~1THzの帯域の検出器を用いて0.1~1psのバンチ長を測定できるはずである。

準備試験として、狭帯域の検出器での測定であるが、実際のビーム運転で、CTRによる信号を観測し、それ

がバンチ長にตอบสนองすることを確認できた。

## 参考文献

- [1] A.Murokh, et al., "Bunch length measurement of picosecond electron beams from a photoinjector using coherent transition radiation", Nucl. Instr. Meth. A 410 (1998) 452-460.
- [2] A.Muller, et al., "Modeling the shape of coherent THz pulses emitted by short bunches in an electron storage ring", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p2094.
- [3] R.Takai, et al., "Development of beam position monitors and screen monitors for compact ERL", 第10回加速器学会年会プロシーディングス.
- [4] M.Shimada, et al., "Beam commissioning of compact ERL", 第11回加速器学会年会プロシーディングス.