

ERL 試験加速器入射部における光陰極電子銃用レーザーシステムの開発 PHOTO CATHODE LASER SYSTEM FOR COMPACT-ERL INJECTOR

本田洋介^{*A)}、宮島司^{A)}、コンパクト ERL コミッショニンググループ^{B)}
Yosuke Honda^{*A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Compact ERL commissioning group^{B)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization
^{B)}KEK / JAEA / Hiroshima university

Abstract

Commissioning operation of Compact-ERL injector has started in KEK. It consists of a photo-cathode electron gun, a super conducting accelerator, and a beam diagnostic line. Development of the photo-cathode laser system is one of the key in the accelerator system. Beam quality, stability, and operational mode depend on the photo-cathode laser system. A laser transport system from the laser room to the gun cathode has been made at the final time of the construction. In the first commissioning period, the laser system have shown a good enough performance for the beam operation. In order to realize an ideal beam profile, we did spatial and temporal shaping of the laser pulse and tested with a beam.

1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) は、大平均電流、低エミッタンス、短バンチ、を実現できる次世代の加速器である。KEK では、その将来の放射光源への応用を目的の一つとして、開発を行ってきており、試験加速器 (コンパクト ERL) を建設している。目標は、建設を通じて要素技術の開発を行い、実際の運転の形態において動作実績を蓄積することである。また同時に、建設とビームコミッショニングを通じて人と組織を育て、将来の実機の建設の準備をすることも重要な目的である。

線形加速器では、ビーム性能は主に電子源の性能で決まる。コンパクト ERL では、光陰極 DC 電子銃を用いて高繰り返しの低エミッタンスビームを生成する設計である。特に光陰極を励起するレーザーシステムは、電子の発生点と時間構造を制御し、加速器全体の性能と安定性に関わる重要な要素である。

2013 年 4 月より、コンパクト ERL 入射部の運転が開始された^{[1][2]}。レーザー装置自体の報告は既になされている^[3]ので、ここでは、実際の加速器のコミッショニング運転におけるレーザーシステムの実装についてまとめる。

2. レーザーシステム

2.1 ビーム運転モード

ERL 加速器は、本来は CW 運転を目標としている。しかし、现阶段のコミッショニングにおいては破壊的な方法でビームの診断を行う必要がある為、マクロパルスモードで運転を行った。このモードでは、加速空洞の RF や電子銃の高電圧は CW 運転状態であるが、電子銃カソードの励起レーザーを制御して、ビームの時間構造を変更する。

Table 1 および Figure 1 にビーム構造についてまとめる。レーザー装置 (とくに発振器周辺やタイミングシステムに) に大きな変更無しに、本来の繰り返し 1.3 GHz での CW 運転との間の切り替えが出来るように、ビームの基本繰り返しは 1.3 GHz としている。これを、あ

る時間幅に切り取ることで平均パワーを制限し、調整時にビームを全損失しても問題が生じない程度とする。

ビーム調整において、繰り返しは 5 Hz で必要十分とし、また、ビーム負荷による電子銃や空洞の電圧変動が無視出来るように 1 μ s のマクロパルス幅とした。バンチ電荷はマクロパルス内で一定であることが望ましいが、切り出しの立ち上がり下がりの寄与は十分小さい。また、デューティが 5×10^{-6} と非常に小さいが、切り出しの消光比はこれにたいして十分小さくなければならない。

Table 1: Beam operational mode for beam diagnostics.

Parameter	value
バンチの基本繰り返し	1.3 GHz
バンチ電荷	~ 7.7 pC/bunch
マクロパルス繰り返し	5 Hz (Typ.)
マクロパルス時間幅	1 s (Typ.)
マクロパルス立ち上り (立ち下り)	10 ns
マクロパルス内バンチ数	1300

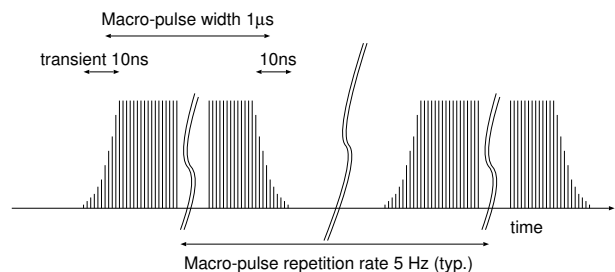


Figure 1: Beam structure in the macro-pulse mode.

2.2 レーザーシステム

Figure 2 にレーザー装置の構成を示す。繰り返し 1.3 GHz、波長 1064 nm、のモードロックレーザー発振器をシード光として用いる。発振器のパルス幅は 8 ps

*yosuke@post.kek.jp

(FWHM)である。発振器は、加速器のRFシステムと位相同期されており、基準信号にたいするタイミングジッタは0.3 ps (RMS)と評価されている。これを2段階のYbファイバ増幅器(プリアンプとメインアンプ)で増幅する。これらはCW運転できるように作られているが、現時点では必要となっていないので、メインアンプは時間幅1.6 msのパルス動作で運用している。

マクロパルス切り出しは、ポッケルスセルによるゲートシステムで実現される。ビームトリガ信号を受けて、メインアンプの出力から1 μ sの時間幅だけを切り出す。これが非線形結晶(NCPM-LBO)に入射され、2倍高調波である波長532 nmに変換される。切り出しの消光比を稼ぐため、532 nmにおいてもポッケルスセルゲートシステムでもう一度切り出しを行う。メインアンプがパルス動作している事も踏まえて、消光比は 10^{-9} 以上と見積もられている。

今回のビーム運転では、十分にパワーに余裕をもってビーム運転が出来るように、メインアンプの後段、基本波での切り出しの後に、バースト増幅器を追加した。Nd:YAGのロッド結晶による増幅器で、パルス動作しか対応できないものである。

生成された、波長532 nmのレーザー光は、パワーの調整と、後述のパルス時間幅の整形を行ったうえで、レーザー室から加速器室へ輸送される。また、加速器のインターロックシステムに連動してレーザー光を停止するシャッターシステムも備えられている。1 μ sの時間内に高速に動作するポッケルスセル電気シャッターと、確実に光を遮る機械シャッターが併用される。

3. レーザー輸送システム

加速器のコミッショニングを行う上で、プロファイルが一定で安定したレーザー光をカソードに供給することは、非常に重要である。レーザー室から電子銃までFigure 3に示す輸送経路が構成されている。レーザー室からの長い距離を輸送する部分と、プロファイルを決めてカソードに転送する部分とから成っている。

3.1 レーザー光の輸送

Figure 4に示す光学系を構成した。倍率 M で拡大したうえで長い距離 L を輸送し、最後に $1/M$ に縮小するものである。出射側から見て実効的な光路長が $\sim L/M^2$ になる。ここでは、 $M=3$ の設計としており、実効的に1.5 m程度の輸送と同等である。

3.2 カソードへの転送

プロファイルを良く定義するために、輸送後のレーザー光は、一旦、ピンホールで円形に切り取ったうえでカソードに像転送している。Figure 5の光学系で、ピンホールが倍率1でカソードに結像する。ピンホールの直径は1.2 mmで、全レーザーパワーの約1/3がピンホールを通過する状態である。

輸送系の最後の光学テーブルには、結像用のレンズの他、スポット位置を上下左右に調整する可動ミラー、レーザー光を一部サンプルしパワーをモニタするフォトダイオード、および、カソードと同等の距離に置かれたCCDカメラによるプロファイルモニタが設置されている。Figure 6は、このプロファイルモニタで測定したカ

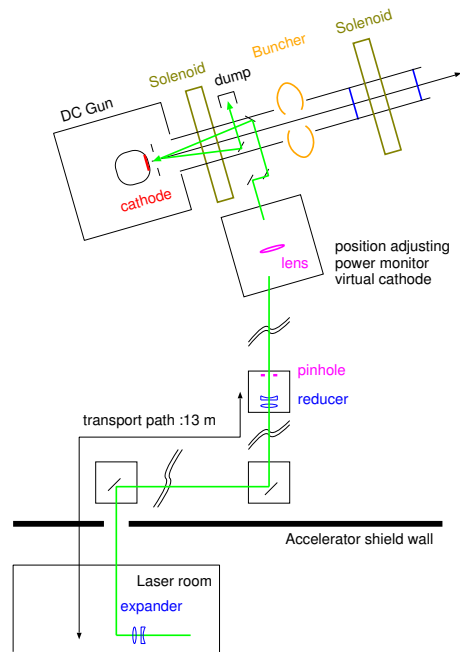


Figure 3: Laser transport line.

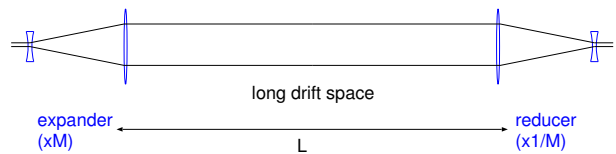


Figure 4: Optics for laser transport.

ソード上のレーザープロファイルである。ピンホールで切り取られた円形が確認できる。(回折構造が見られるのは、設置の都合で結像条件が完全には合っていないためである。)

ビーム運転中のレーザーパワーの安定性のデータをFigure 7に示す。変動の原因は、ピンホールに到達するレーザー位置の揺らぎで、変動量は5 % (RMS)程度である。

4. パルス時間構造の整形

空間電荷効果を低減させるため、電子銃においては、平坦な時間構造で時間幅の長いビームを生成するのが望ましい。対応する時間構造のレーザーパルスを生成する必要がある。レーザーシステムでは、時間構造はガウス型で比較的時間幅の短いパルスが生成されるが、これを時間整形し、平坦パルス化した。

Figure 8に示す、複屈折結晶を用いたパルス重ね合わ

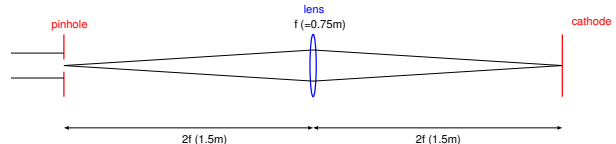


Figure 5: Optics for profile imaging.

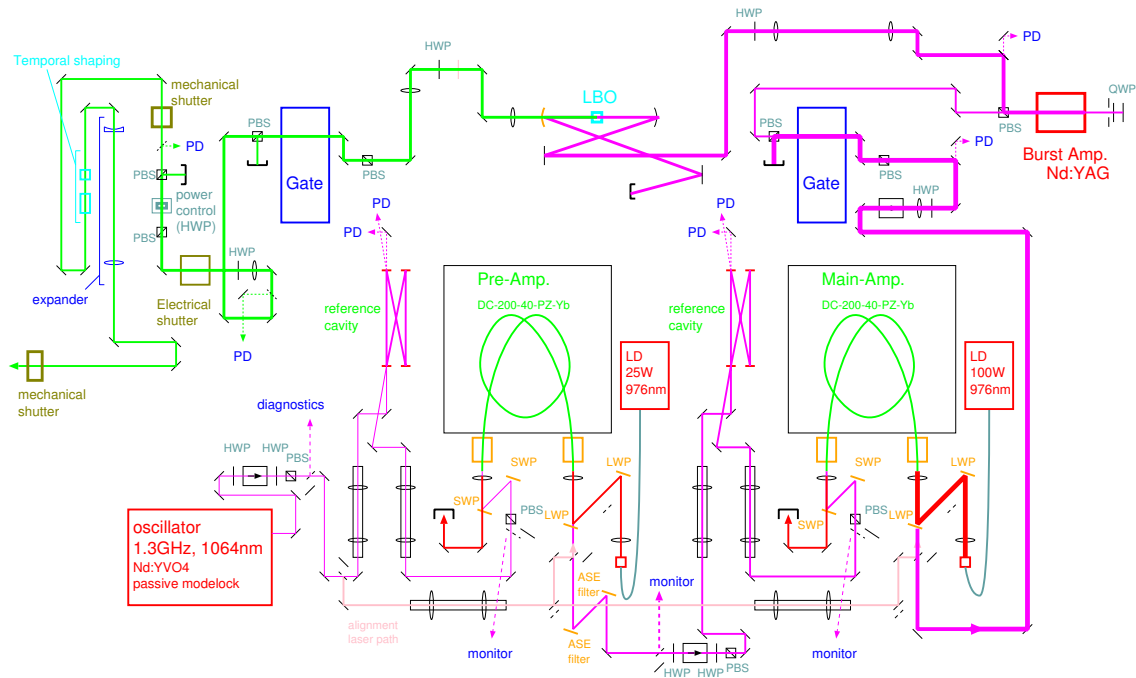


Figure 2: Setup of the laser system.

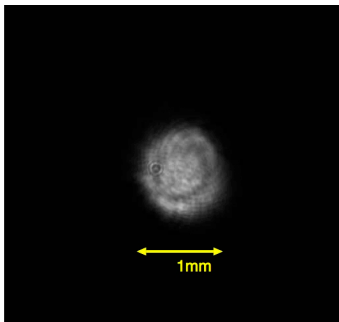


Figure 6: Laser profile at virtual cathode CCD camera.

せの手法を利用した。直線偏光のレーザーパルスを、結晶の固有軸にたいして45度傾けて通過させると、それぞれの偏光成分が異なる速度で結晶を通過し、時間的にずれた2つのパルスになる。今、厚みが11.6mmと5.8mmの2枚のYVO₄結晶を同時に使用することで、4つのパルスに分解されたものが滑らかに繋がって平坦な時間構造になるようにした。

5.6 MeVまで加速後のビーム診断部において、電子ビームのバンチ長を測定できる^[2]。バンチャーがオフで、加速空洞がオンクレスト条件であれば、初期バンチ長をそのまま確認できる。

Figure 9は、時間整形を行わない時のバンチ長測定の結果である。RMS時間幅が3.3psのガウス型の構造であることが確認出来る。Figure 10は、2枚の複屈折結晶を使用し、平坦構造を作った結果である。15.7ps (FWHM)の平坦構造が実現できた。

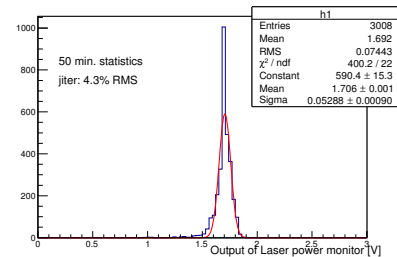
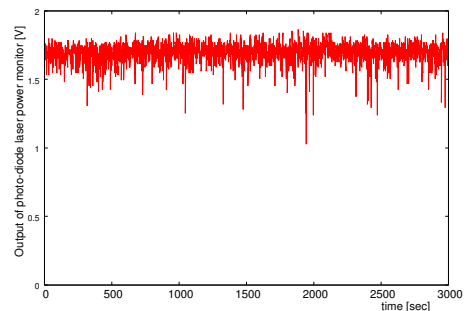


Figure 7: Stability of laser power.

5. ビーム運転状況

必要とされるレーザーパワーは、カソードの量子効率(QE)に依存する。運転期間中に測定した、レーザーパワーのモニターと、ファラデカップによって測定したビーム電流値から、量子効率を見積もった結果をFigure 11に示す。現状の運転形態であれば、概ね量子効率3.5%を維持出来ており、バンチ電荷7.7pC/bunchを生成するのに十分なレーザーパワーを余裕を持って供給出来ている。

レーザー室の構成について、Figure 12に示す。空調

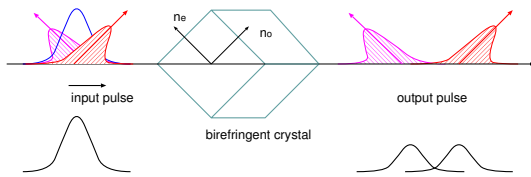


Figure 8: Scheme of temporal shaping with a birefringent crystal.

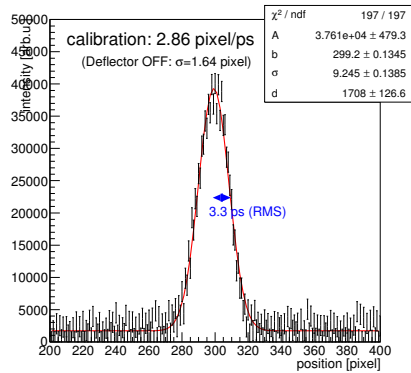


Figure 9: Bunch length measurement without temporal shaping.

設備が無い実験ホールに、断熱材で構成したレーザー室を設置した。レーザー室内部にクリーンブースを設置し、その中を精密空調する構造とした。これまでのビーム運転において、気温が急に上昇した日に、レーザー室の温度が制御しきれなくなり、レーザー発振器が不調になったことが一度だけあったが、その後、断熱材の強化と空調設定温度の再調整の対策をした結果、室温変動は0.2度以内に抑えられ、安定な運転を行う事が出来ている。

6. まとめ

コンパクト ERL 加速器のコミッショニング運転に供するため、レーザーシステムを立ち上げた。コミッショ

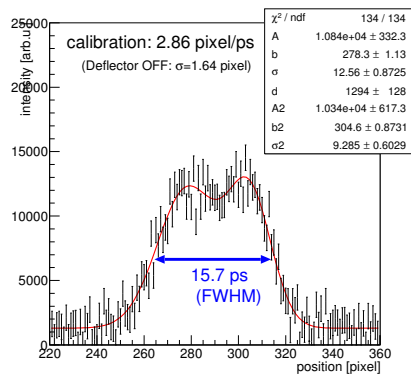


Figure 10: Bunch length measurement with temporal shaping.

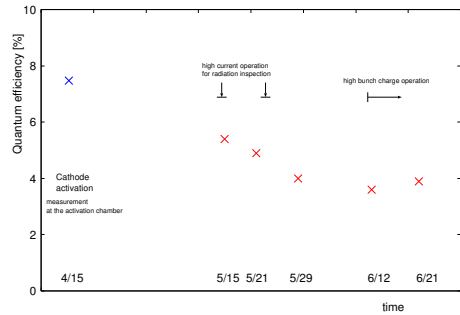


Figure 11: Trend of cathode quantum efficiency.

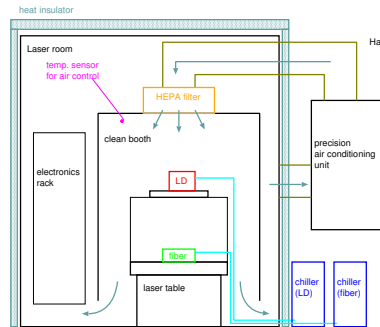


Figure 12: Environment control of the laser room.

ニングは、マクロパルス運転で行っており、この運転モードにおいてバンチ電荷 7.7 pC/bunch を安定して生成している。パルスの時間整形によって平坦な長パルス構造を生成することも出来ている。CW モードでの高出力運転が次の課題である。

参考文献

- [1] Y. Honda *et al.*, “TRANSVERSE BEAM PERFORMANCE MEASUREMENT AT COMPACT-ERL INJECTOR”, 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SUP010
- [2] Y. Honda *et al.*, “LONGITUDINAL BEAM PERFORMANCE MEASUREMENT AT COMPACT-ERL INJECTOR”, 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SUP011
- [3] Y. Honda *et al.*, “DEVELOPMENT OF A PHOTO-INJECTOR LASER SYSTEM FOR KEK ERL TEST ACCELERATOR”, 第 9 回日本加速器学会年会, 大阪大学, 2012, THPS120

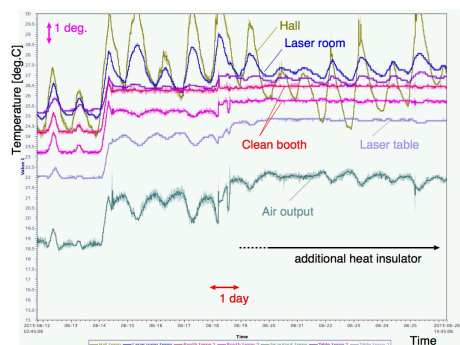


Figure 13: Temperature trend of the laser room.