

# SuperKEKB の Phase-III コミッショニングに向けた電子銃システムのアップグレード

## UPGRADE OF ELECTRON BEAM GENERATION SYSTEM FOR PHASE-III COMMISSIONING OF SUPERKEKB PROJECT

周 翔宇<sup>#</sup>, 張 叡, 本田 洋介, 吉田 光宏, 小川 雄二郎  
Xiangyu Zhou<sup>#</sup>, Rui Zhang, Yosuke Honda, Mitsuhiro Yoshida, Yujiro Ogawa  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

RF gun and laser source have been developing in the Linac of SuperKEKB. Several nC electron beam with low emittance has been achieved at the end of Linac, and injected to the HER ring. The electron source runs well during the Phase-II and Phase-III commissioning.

## 1. 背景

SuperKEKB リングへの入射が可能になるように、最上流部 A1 ユニット部を二階建て構造とし、従来から用いられている熱電子銃と SuperKEKB 電子ビームのために開発されたフォトカソード高周波電子銃の 2 種類が配置されている。2010 年に撤去した DC 熱電子銃を復活させ、2015 年 6 月から下段の RF 電子銃と併用可能とした。SuperKEKB 立ち上げのための調整運転と Phase-I から Phase-II に運転が行われる。放射光施設 PF、PF-AR への入射は熱電子銃で生成した電子ビームを用いていた。SuperKEKB の HER リングへは、RF 電子銃から入射をした。一方で、DC 熱電子銃から HER リングに入射した。電磁石、加速管の LLRF システムを Pulse-to-pulse の切り替え運転が可能になる機器に置き換えて HER・LER・PF・PF-AR の 4 リング同時入射を行っていく。

SuperKEKB プロジェクトの Phase-III が 2 月に開始した。入射器の最終目標 20 mm-mrad, 4 nC を達成するため、電子銃及びレーザー光源の改善を続けている。現在、長寿命高量子効率の Ir<sub>5</sub>Ce 固体カソード及び擬似進行波型空洞を採用し、ファイバーと Nd:YAG ハイブリッドレーザー光源を用い、Linac 加速後、2 nC、50 μm 以下のエミッタンスを達成した。Phase-II 運転によって、RF 電子銃及びレーザー光源の安定性も検証されるので、長時間運転も行っていた[1]。そして、低エミッタンスを得るため、レーザービームの整形及び軌道調整を行っている。そして、長時間安定運転するため、無人化に向けて自動化プログラムを開発している。

## 2. Yb/Nd ハイブリッドレーザー光源のアップグレード

### 2.1 Yb/ファイバー発振器のアップグレード

RF 電子銃用のレーザーシステムは、Yb ドップファイバー発振器、Yb ドップファイバー増幅器及び Nd:YAG ロード結晶増幅器を含む、ハイブリッドシステムである[2]。半導体レーザー (LD) 励起ファイバーレーザーは高発

振効率によって、高安定性を備え、数年間連続運転実施している。特に、SOA、ファイバー増幅、及び EO パルスピッカーの部分が非常に安定しており、数年間メンテナンスいらずであった。ファイバー発振器は RF 同期を実施しているので、RF ジッターなどの要因でトラブル発生可能性がある。そして、発振器は構造的に複雑なため、すぐ復旧することが難しい。従って、発振器を 3 台用意して、2 台が市販品 (Menlo systems)、1 台は自分で開発した全正常分散 ANDi (all normal dispersion) タイプ共振器である。そのうち、一台がパルスを供給して、2 台がバックアップ、24 時間 2856 MHz の RF トリガーと同期させ、連続運転している。Mems スイッチによるリアルタイムでレーザー源を切り替えることが実現される。

ファイバーレーザーは高い発振効率で小型・軽量・高ビーム品質といった利点を備えて、イッテルビウム (Ytterbium: Yb) ドップファイバー発振器及び増幅システムを開発した。しかし、ファイバーレーザーに対して、μJ 以上パルスエネルギーを増幅すると、非線形効果による制限がある。したがって、mJ レベルパルスエネルギーを得るため、ファイバーレーザーの後に Yb:YAG 増幅システム (1030 nm) 及び Nd:YAG 増幅システム (1064 nm) が採用された。

Phase-II 運転の時、1 台目の Menlo 発振器の中心波長は 1030 nm で、1064 nm の増幅器と対応できない。

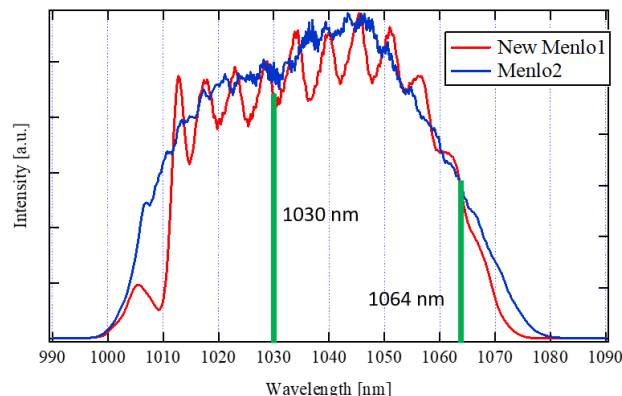


Figure 1: Spectrum of Menlo Oscillator.

<sup>#</sup> xiangyu.zhou@kek.jp

解として、発振器後に一段ファイバー増幅で SPM 非線形効果を利用し、シグナルの波長領域を広げた。Phase-III 運転終了後、新しい広帯域 Menlo 発振器を交換した。図1は Menlo 発振器の発光スペクトルである。今、2台の Menlo 発振器は 1030 nm と 1064 nm 成分を両方カバーできる (Fig. 1)。各発振器から生成されたシグナルパルスバンドパスフィルター (bandpass filter) によって、Nd:YAG 利得領域に対応できるスペクトルを整形し、Mems に合わせる。各シグナルパルスの出力パワーを一致するように調整した。

## 2.2 Nd:YAG 増幅システムのアップグレード

ファイバー増幅後に、高強度多光源を達成するため、シグナルを 2 つに分けて、ダイオード励起固体 (DPSS) Nd:YAG を用いて、マルチパス増幅を行い、それぞれに増幅ラインを構築した。

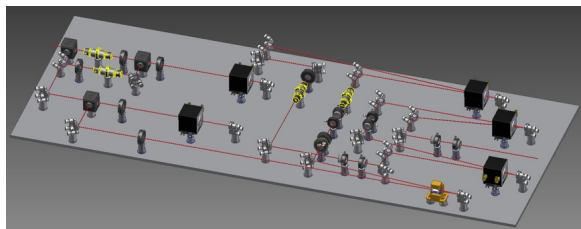


Figure 2: Nd:YAG 増幅段階.

同じ構造の 1st ラインと 2nd ラインを Fig. 2 に示す。1 段と 2 段では、 $2 \times 79$  mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を用いて高利得の往復 2 パス増幅を行った。偏光ビームスプリッターキューブによって入射と出射パルスが分離される。その後、ポッケルスセル (P.C.) を挿入し、ノイズ信号を切る上、シングル・ダブルパンチを切り替える。3 段と 4 段増幅では  $4 \times 93$  mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を採用し、低利得の往復 2 パス増幅を行った。高強度集光パルスに対する偏光ビームスプリッターキューブを使わないので、戻り光の方向をずらし、反射ミラーで取り出した。4 段まで増幅したパルスエネルギーは 4.0 mJ を超えた。4 倍波変換によって、電子銃カソード直前のパルスエネルギーは約 450  $\mu$ J である。 $\phi$  6 mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を用い、5 段目の 2 パス往復増幅を行った。出力は約 2 倍の 8 mJ で、4 倍波変換後の最終エネルギーは約 800  $\mu$ J である。

Nd:YAG 増幅段階にレーザービームは  $4 \times 0.8$  m のスペースに往復させ、全体の伝搬距離は約 22 m である。

近年に垂直共振器面発光型レーザー (VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は注目されている。VCSEL の共振器は半導体端面を LD のようにへき開する必要がなく、誘電体の積層構造から成る高反射 DBR (Distributed Bragg Reflector) を用いることにより、半導体の基板面に対して垂直方向に形成されている。よって、レーザー光も基板面に垂直に射出される。既存の LD に比べて、低消費電力で 2 次元アレイ集積が可能という特徴に加え、温度変化に対する特性変化の幅が少なく温度制御装置が簡易化できる利点がある。安定性及び寿命が上がるのが期待できる。

最初、全 Nd:YAG 増幅段階に LD 励起 Nd:YAG ロッド結晶モジュールが採用されていた。LD モジュール



Figure 3: VCSEL モジュール.

の寿命が約 1 年~3 年であるので、これから、VCSEL タイプ Nd:YAG ロッド結晶モジュールの切り替えが進んでいる (Fig. 3)。

## 2.3 トランスポートラインの改造

エネルギー分散を抑え、低エミッタンスを得るため、最終生成したレーザーパルスの強度は時間及び空間領域に一致するように整形する必要がある。

最初にビームの空間プロファイル整形を行った。通常のレーザービームのビームプロファイルは、ビーム中心の強度が高いガウシアン分布であり、中央部が強く周辺部が弱い不均一な強度分布になっている。均一な光強度分布のビームプロファイルに変換することで、いくつかの手段がある。Fig. 4 のように、大きいサイズの光ビームを円形状アパーチャーにより中心部分を通過した。中心の高強度のレーザー光だけを使用することでエネルギーが安定している部分を取り出す。

Fig.5 のように、直径異なる 12 ポジションアパーチャーが設計されている。アパーチャーは電動筐体で切り替える上に、X/Y 軸調整機能を付ける。アパーチャーを 4 倍波生成した後に、1st ラインと 2nd ラインにそれぞれに設置した。

結果として、Fig. 6 は紫外光のプロファイルを示す[3]。

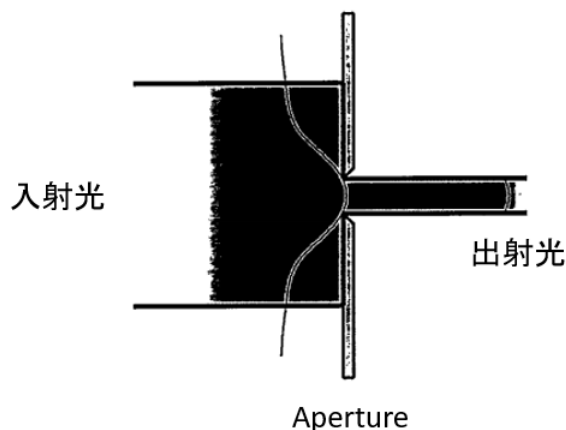


Figure 4: Aperturing of the beam illustrated.

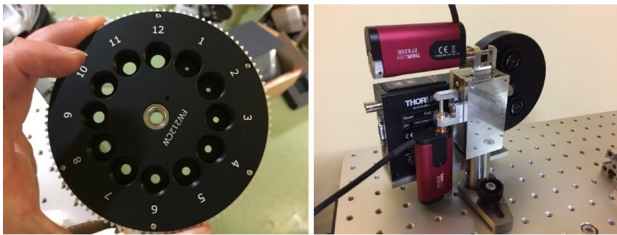


Figure 5: Aperture setting.

両方光のプロファイル形とビームサイズがほぼ同じに調整した。

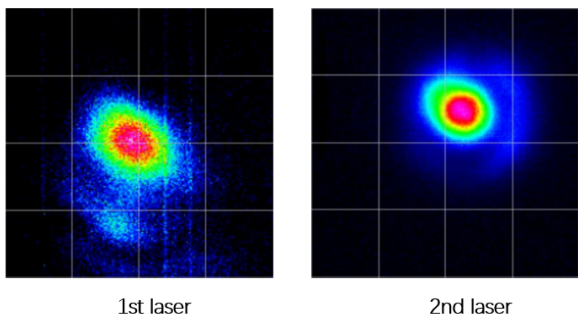


Figure 6: Beam profile.

アパーチャー装置はビームプロファイル周りの成分を修正するが、空間領域に強度均一化することができない。そして、ロスが大きいためレーザー出力に十分余裕が必要である。今後、回折光学素子 (DOE、Diffractive Optical Elements) を用い、均一な光強度分布のビームプロファイルに変換する予定である。

さらに、時間領域光強度均一化のため、パルス・スタッキング (Pulse stacking) という単純にパルスの時間領域でパルスを重ねる方法を採用する予定である[4]。

### 3. ビームコミッションング

#### 3.1 High-charge テスト

電子銃コミッションングでは 5 Hz 運転において 5.1 nC のビーム発生を確認しているが、Linac エンドまで維

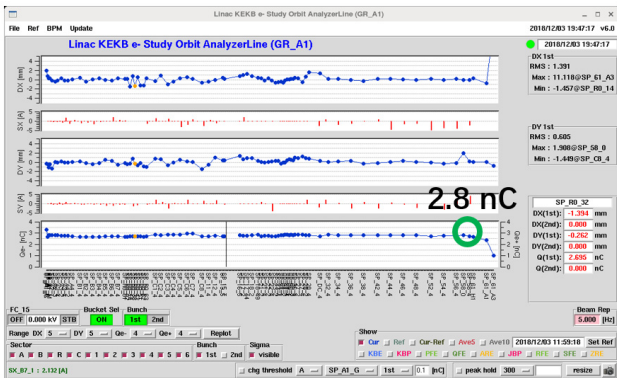


Figure 7: Orbit in Linac.

持できない。そして、Linac エンドに電荷量を最高を目指す軌道修正を行った。結果として、Linac エンドに 2.8 nC が得られた (Fig. 7)。今後電子ビームのエミッタンスを抑制する必要がある。

#### 3.2 HERリングへ電子の供給

そして、RF 電子銃を使って、HER リング入射を行った。2 つのレーザー光を Ir<sub>3</sub>Ce カソードに同時に両サイド入射し、3 ヶ月高安定度で 1 nC の電子ビームの供給が達成できた。レーザービームをアパーチャー装置で整形し、パルスエネルギーを 250 μJ を抑え、各ラインに 0.5 nC 電子量を放出した。RF 電子銃及びレーザー光源をメンテナンスいらず、信頼性を検証された。

一方、レーザーの監視システムを立ち上げできた。RF 同期度、励起光源の状況、各段階のパルス形と出力パワー、室温などのデータをモニターリングし、リアルタイムでネットに表示する (Fig. 8)。さらに、電子を出さない時間帯にレーザービームをフリップミラーで取り出し、パルスエネルギーが測定できる。プロファイルモニターでレーザービームの位置及びプロファイル形を確認し、日 1 回にリモートコントロールでミラー角度を修正していた。それらの措置によって、レーザー室と電子銃現場の無人化を実現した。

ビーム輸送には、横方向エミッタンスの増加はパンチ圧縮により小さくできるが、縦方向ウェーク場によるエネルギー分散は大きくなってしまふ。電子銃後の B セクター、C セクター、3 セクター、Linac エンドの 5 セクターにワイヤースキャナーでエミッタンス測定を行った。レーザーが両側同時入射、電荷量 1.2 nC において、B-sector で  $\gamma_{ex}=12.655$ 、 $\gamma_{ey}=11.225$  が得られた。しかし、5 セクターのワイヤースキャナー結果が 100 μm 近辺になる。Phase-II コミッションングの 50 μm よりエミッタンスを増大することが分かる。直線部の分散影響を改善する必要がある。

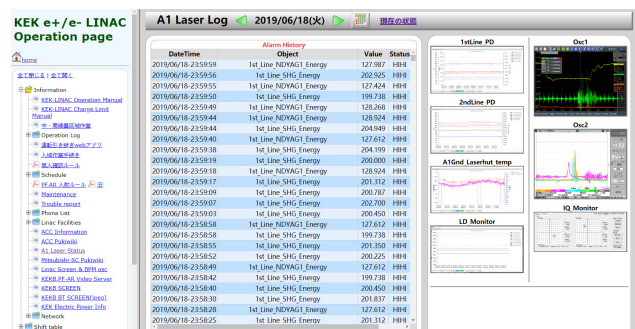


Figure 8: Laser Status Monitoring.

### 4. まとめ

HER リング用フォトカソード RF 電子源として、Yb ドップファイバー及び Nd:YAG 型ハイブリッドレーザー光源を両サイドで Ir<sub>3</sub>Ce カソードに注入し、擬似進行波型サイドカップル空洞で加速する。直線部加速によって、Linac エンドに 2.8 nC の電荷量が得られた。そして、3 ヶ月にわたり高安定度で 1 nC 電子ビームを HER に連続供給が達成できた。



## 参考文献

- [1] R. Zhang *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器の現状”, FSP1003, 第 16 回加速器学会, 京都, in these proceedings.
- [2] X. Zhou, *et al.*, “SuperKEKB 用 RFgun の Phase-II コミッショニング”, WEP006, 第 15 回加速器学会, 長岡, 2018.
- [3] R. Zhang, *et al.*, “Hybrid Yb/Nd Laser System for RF Gun in SuperKEKB Phase II and Phase III Commissioning”, THPGW037, IPAC, Australia, 2019.
- [4] Y. Honda *et al.*, “コヒーレントパルススタッキングによる電子銃励起レーザーの時間整形”, FRPI028, 第 16 回加速器学会, 京都, in these proceedings.