

# SuperKEKB 用 RFgun の Phase-II コミッショニング

## PHASE-II COMMISSIONING OF RF GUN FOR SUPERKEKB

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

### Abstract

For high charge and low emittance requirement, a photocathode RF gun system with an advanced RF cavity structure, a new photocathode material and a hybrid laser system have been developing in the SuperKEKB injector linac. Furthermore, many monitors and remote controls program were built to increase the stability of operation. By the injection system, the required charge and emittance for Phase-II were achieved.

### 1. 背景

KEK の電子陽電子入射用線形加速器では SuperKEKB に向けた増強を進めている。KEKB 電子源として使用された熱カソード DC gun が高電荷低エミッタンスを得るのは非常に困難であるので、SuperKEKB ではフォトカソード RF gun を使用することに決めた。低エミッタンス化の 20 mm-mrad、電荷量増加の 5 nC を達成するため、電子銃及びレーザー光源を開発している。

SuperKEKB プロジェクトの第一段階である Phase-I の運転が 2016 年 6 月に終了しました。Linac への増強要求に対応するため、入射部に大電流用旧熱電子銃及び低エミッタンス用 RF 電子銃を 2 階建て導入した[1]。熱電子銃には、長期間にわたって安定な電荷量で入射を続けることができた。一方、フォトカソード RF 電子銃には長寿命高量子効率の Ir5Ce カソード[2]及び擬似進行波型サイドカップル空洞[3]を開発した。そして、RF 電子銃用のレーザー光源として Yb ドープファイバー及び Yb:YAG 増幅レーザーシステムを構築した。10 日間に RF 電子銃が入射し、低エミッタンスビームの生成に成功した。また、2017 年に Cut disk structure (CDS)の空洞を用い、RF 銃も試験するために、Linac ビームラインとは 90 度方向にも新たに入射ラインを作った[4]。

2018 年から低エミッタンスビーム調整が必要となる Phase-II が開始である。RF 電子銃を数ヶ月以上長期連続運転のめどが立って、電子銃用光源を改造した。Yb:YAG 媒質を代わりに、均一性が高く、破壊閾値が高い Nd:YAG 利得媒質を採用され[5]、高信頼性レーザー増幅システムを開発した。そして、電子銃システムは運用に向けてリモート制御・マニュアル化を進めて、無人化・自動化運転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

#### 2.1 Yb/Nd ハイブリッドレーザーシステム

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)ドー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、 $\mu\text{J}$  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 増幅システムが採用された。

半導体レーザー (LD) 励起 Yb ドープ固体増幅は、高効率・高出力パルス増幅にとって利点となる。さらに、Nd ドープ固体レーザーと比較して蛍光スペクトルも広いいためパルスの整形に用いることができる。Phase-I には高強度パルス増幅するため、thin disk タイプの薄い結晶を用い、再生増幅法で複雑な共振器を構築必要である。長時間運転すると、熱による媒質の変形及び破壊することが発生し、復旧することが難しい。

一方、Nd 系利得媒質には、Yb 系媒質と同じ、LD 直接励起なので、構造簡単である。さらなる高光学均一性や高破壊閾値を備え、ロッドタイプ長結晶を用い、再生増幅の複雑共振器が不要、高強度増幅に対応できる。波長領域は Yb 系レーザーとほぼ変わらないため同レーザーの代替として利用できる。

#### 2.2 Yb ドープファイバーレーザーシステム

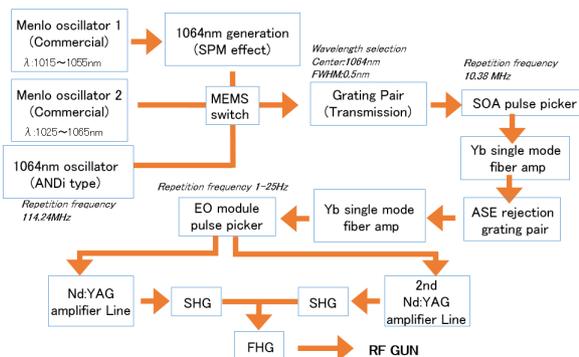


Figure 1: Layout of Laser system.

Figure 1 のように、Yb ドープファイバー発振器が 114 MHz の種光パルスを生成する。バックアップ用装置を含む発振器は 3 台を用意した。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)タイプファイバー発振器である。3 台の発振器を外部 114.2 MHz 信号によってロックさせる。

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

そして、位相器によって、2856 MHz の RF トリガー位相と同期させ、安定な光パルスを供給している。Mems スイッチによるパルス源の切り替えることが実現される。

Nd:YAG の狭帯域スペクトルを対応するため、透過型回折格子ストレッチャーにより中心波長 1064 nm、バンド幅 0.5 nm、時間幅 $\sim$ 10 ps に種光を整形した。高速光スイッチ(切り替え速度 $\sim$ 1ns)半導体光増幅(semiconductor optical amplifier: SOA)はパルスピッカーとして使用して、パルス列を 10.38 MHz に下げる。パルスのエネルギーロスを補償するため、コア径 4  $\mu$ m のシングルモード Yb ドップファイバー増幅を行った。ノイズを増幅しないように、750 mW のポンプパワーを 3 つに分け(15%、35%、50%)、3 段増幅システムを採用し、SOA 後に設置した。その後、透過型グレーティングペアとスリットの組み合わせで、SOA 及びファイバー増幅で発生した 1030 nm 成分のノイズを除去した。3 段増幅したパルスは電気光学効果(EO)パルスピッカーによりを低繰り返し 1-25 Hz のダブルパンチに変更した。そこまで、数十 nJ ピーク強度の低繰り返し 20 ps 光源が得られた。[2]

発振器自体が安定的に働いているが、外部トリガー信号のドリフトなどの原因で、位相同期を外れることが何回に発生した。運転し始めると、トリガー信号の安定性を上げて、位相同期の外れることがなくなった。そして、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、メンテナンスいらず、1 年以上連続運転している。

### 2.3 Nd:YAG 増幅システムによるダブル光源

mJ まで増幅するため、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った。レーザー光源として多様な運用を対応するため、ファイバーから増幅したシグナルを EO で 2 つに分けて、それぞれに増幅ラインを構築した。

1st ラインは 4 段階のマルチパス増幅を設置した。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、戻り光の方向をずれ、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 に超えた。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。ストリークカメラで測ったパルスの時間幅が 17 ps であり、プロファイルをきれいに測定した。

一方、同じ構造の 2nd ライン Nd:YAG 増幅システムを構築した[6]。1st ラインの高安定性・高ビーム品質の目標に対して、2nd ラインはより高強度パルスエネルギーを目指す。従って、4 段増幅した後、 $\Phi$  6 mm ロッドタイプ Nd:YAG 結晶を用い、もう 1 段の 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。

### 2.4 トランスポートライン

Figure 2 のように、望遠鏡テレスコープレンズを用いて、2 倍波に変換した。1st ラインと 2nd ラインのビーム径が 2.5 cm に拡大され、ビームスプリッターキューブで合流された。シグナルビームを約 12 m 以上のトランスポートラインによる地上のレーザーハットから、地下の RF 銃近辺に転送した。そして、重ねているビームをビームスプリッターキューブで分離させ、テレスコープレンズでビーム径 5 mm の平行光を調整し、BBO 結晶で 4 倍波に変換した。変換したそれぞれの紫外ビームを両側でカソードに照射する。その設置によって、片方の光源で電子を生成することができるし、両側の光源を同時入射することもできる。さらに、偏光板の回りによって、1st ラインと 2nd ラインを切り替えることもできる。そして、光路差の補償するため、2nd ラインにディレイステージを設置した。

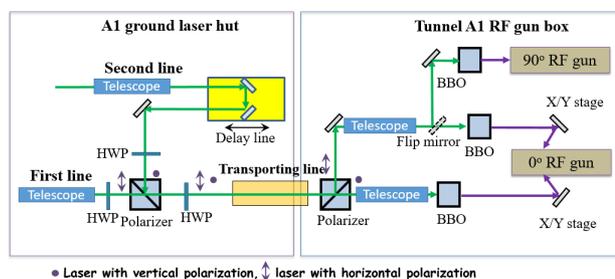


Figure 2: トランスポートライン。

片方のビームラインにフリップミラーを設置し、90 度方向の CDS 電子銃に入射するパスを構築した。

そのビームラインによって、二種類の RF 電子銃にレーザービームを入射できる。主の擬似進行波型 RF 銃に対して、両側の同時入射も対応できる。

## 3. 監視・制御システム

運転するため、レーザーシステムの監視及び制御を PC の外部コントローラからリモート操作を行い、リモート制御のプログラムを作成する必要がある。

### 3.1 発振器の操作



Figure 3: 発振器操作パネル。

レーザーの心臓部といえるパルス発振器は、3 台装置を用意している。発振器のモード同期を動作しなくトラブルはほぼなく、パルス源の安定性を確保する。しかし、コミッションングのビームスターディに RF 位相を調整す

る場合、RF 位相のドリフトによって、RF とレーザー発振器の同期を外すことが発生する。その問題を対応するため、同期信号のオシロ波形をモニターしている。Figure 3 に 2 台発振器の同期信号を監視し、直線であれば、同期が掛かっている状態。直線以外であれば同期が外れている。同期を外れて回復する場合、発振器制御パネルでステップモーターの電圧を変え、発振器の共振器長を補正し、同期を回復する操作ができる。

同期を回復した後、位相を調整するため、位相調整プログラムを開発した。Figure 4 に位相調整パネルを示す。10.38 MHz、114 MHz、2856 MHz の各位相が手動で調整できる。さらに位相モニターパネルで位相自動調整機能を付き、青丸からずれた位置(目標値)に赤点(現在値)が来ることも実現した。

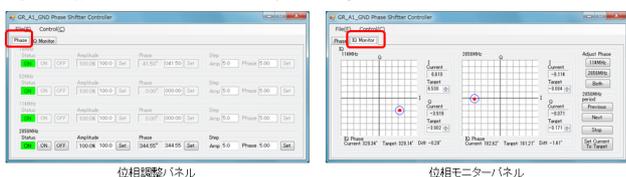


Figure 4: 位相調整パネル.

### 3.2 SOA、EO、ファイバー増幅部の波形

パルスがうまく選択されることを確認するため、オシロで波形を確認する。Figure 5 のようなファイバー増幅・SOA 波形タイミング関係、波高値であれば正常である。波高値が低い、波形が崩れている等があれば、レーザータイミング信号の Delay 調整が必要である。

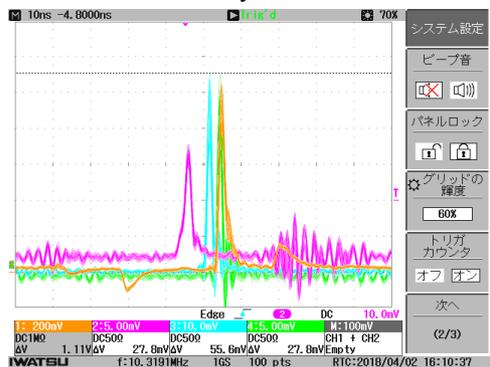


Figure 5: ファイバー増幅部の波形.

### 3.3 レーザー増幅部の出力状況

レーザーの状況を把握するため、ファイバー増幅、LD ポンプ光源、Nd:YAG 増幅、波長変換ステージの各段階の出力パワーを記録した。さらに、室温と光学テーブルの温度をモニターリングした。ログ曲線の変動があれば、アラームが自動的に表示され、レーザー部品を破壊することが考えられる。

### 3.4 レーザー出力波形

レーザーラインに各波形の値をモニターしている(Fig. 6). Ch1(黄)は RF 波形である。Ch2(緑)はファイバーレーザー一部の最終段である。この波形が出ていればファイバー部分は正常に動作している。ここまでは常に 2 bunch レーザーが出ている。Ch3(橙)はレーザー増幅後の 2 倍

波波形。出力変化及び 1 bunch と 2 bunch の切り替えることが確認できる。



Figure 6: レーザー出力波形.

### 3.5 レーザー運転操作パネル

Figure 7 は、レーザーの操作パネルを示す。レーザーの安全シャッター操作、繰り返し周波数変更、電子銃の切り替えることが操作できる。そして、レーザー光源のパルスエネルギー及びレーザービームプロファイルの確認もできる。



Figure 7: レーザー運転操作パネル.

### 3.6 レーザー調整操作パネル

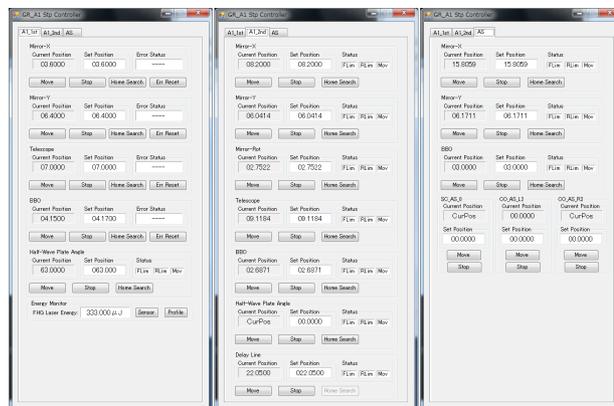


Figure 8: レーザー調整操作パネル.

Figure 8 には、電子銃の操作パネルである。1st ラインと 2nd ラインはそれぞれに時間タイミングと空間 X/Y 光軸の調整が実現できる。さらに、テレスコープレンズの前後移動によるビームサイズの変動もできる。

#### 4. ビームコミッショニング

Phase-II が始まり、RF 電子銃のコミッショニングも行っている。主リングにビーム入射、蓄積が安定して行えるように軌道修正、バンチ圧縮、dispersion 補償などの操作を行った。[7]

##### 4.1 電荷量測定

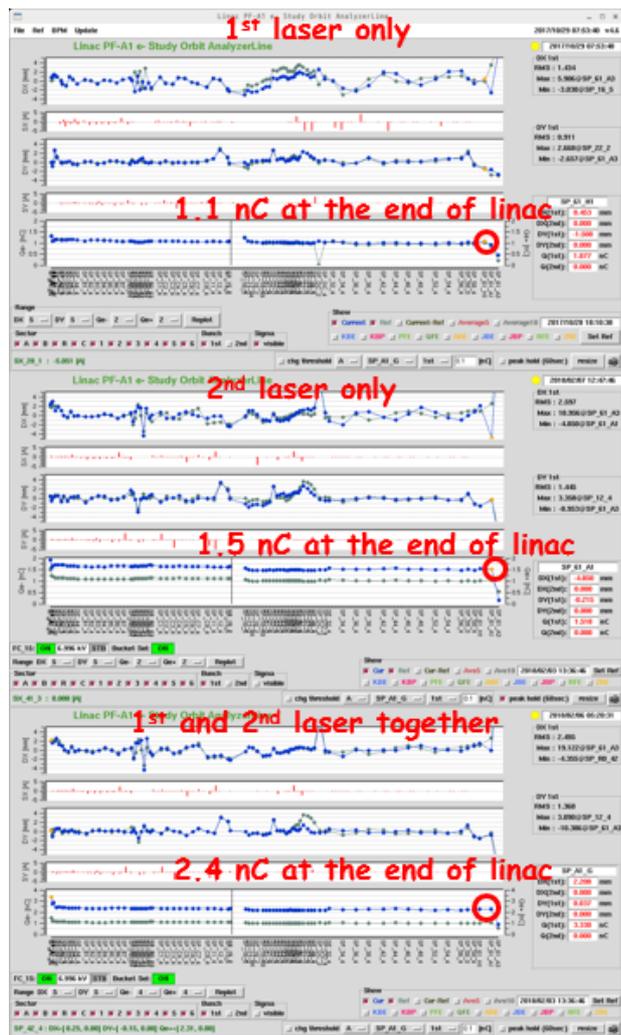


Figure 9: 電荷量.

Phase-II では、1 nC の入射ビームが要求される。Figure 9 は二つレーザー光源に対して、Linac 全体の電荷量を示す。1st ラインのみを照射する場合、先頭で 1.4 nC、Linac エンドで 1.1 nC を得る。2nd ラインのレーザーエネルギーが 1st ラインより約 2 倍が強いので、電子銃から出た電荷量が 2 nC に超えた。途中のロス量が若干多く、Linac エンドで 1.5 nC を得る。1st ラインと 2nd ラインが両側同時入射の場合、先頭で 3.5 nC、Linac エンドで 2.4 nC が得られる。

##### 4.2 エミッタンス測定

低エネルギー・大電荷量の電子ビームを精度良く測定するため、ワイヤースキャナーを用いてエミッタンス測定を行った。レーザーが両側同時入射の場合、電子銃後の B-sector で  $\gamma\epsilon_x=24.958$ 、 $\gamma\epsilon_y=18.640$  が得られた。その後、バンチ圧縮・J-arc の Dispersion 補正・軌道修正などの調整を行い、Linac のエンドの 5 sector にエミッタンスは  $50 \mu\text{m}$  を達成した (Figure 10)。一方、5 sector に熱電子銃で電子ビームのエミッタンスを約  $200 \mu\text{m}$  で測定した。

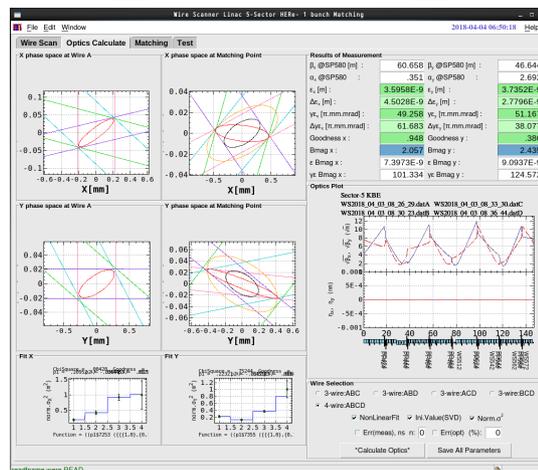


Figure 10: 5sector ワイヤースキャナー.

#### 5. まとめ

Phase-II ビームコミッショニングに向けて、フォトカソード RF 電子銃には長寿命高量子効率の Ir5Ce カソード及び擬似進行波型サイドカップル空洞を開発した。光源として、Yb ドップファイバー及び Nd:YAG 型ハイブリッドレーザーダブル光源を開発し、リモート制御・自動化運転を進めている。Linac エンドで電荷量 2.4 nC が得られた。5 sector にエミッタンスは  $50 \mu\text{m}$  以下を達成した。

#### 参考文献

- [1] Y. Seimiya *et al.*, “電子陽電子入射器の現状”, FSP006, 第 15 回加速器学会, 長岡, in these proceedings.
- [2] D. Satoh *et al.*, “SuperKEKB 電子入射器のためのイリジウム・セリウム光陰極の高性能化”, WEP106, 第 14 回加速器学会, 札幌, 2017.
- [3] T. Natsui *et al.*, “Quasi-traveling Wave Side Couple RF Gun Commissioning for SuperKEKB” MORPI033, IPAC14, Dresden, Germany, 2014
- [4] T. Natsui *et al.*, “SuperKEKB 用 RF gun の開発状況”, TUP004, 第 14 回加速器学会, 札幌, 2017.
- [5] X. Zhou *et al.*, “SuperKEKB の Phase-II コミッショニングに向けた RF 電子銃用 Yb ファイバーと Nd:YAG ハイブリッドレーザーシステム”, WEP116, 第 14 回加速器学会, 札幌, 2017.
- [6] R. Zhang *et al.*, “SuperKEKB phase II での RF 電子銃用 Yb/Nd ハイブリッドレーザーシステム”, THP005, 第 15 回加速器学会, 長岡, in these proceedings.
- [7] M. Yoshida *et al.*, “SuperKEKB 用 RF 電子銃のコミッショニング”, FROM06, 第 15 回加速器学会, 長岡, in these proceedings.