

SuperKEKB 用 RF 電子銃およびレーザーシステムの現状

CURRENT STATUS OF RF ELECTRON GUN AND LASER SYSTEM FOR SUPERKEKB

周翔宇^{#, A), B)}, 張叡^{A), B)}, 熊野宏樹^{C)}, 豊富直之^{C)}, 吉田光宏^{A), B)}

Xiangyu Zhou^{#, A), B)}, Rui Zhang^{A), B)}, Hiroki Kumano^{C)}, Naoyuki Toyotomi^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{A), B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI)

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

To ensure long-term stable operation of SuperKEKB, the laser system has been upgraded to improve beam injection performance. The introduction of a large-diameter, high-power VECSEL module has enhanced laser output stability, while strengthened monitoring and automatic measurement systems allow for the prompt detection and resolution of operational issues. During the 2024 operation period, the electron gun continuously delivered a stable, high-quality electron beam over several months. However, challenges such as discharges and degradation of the gun window have emerged. As a result, replacement of the RF electron gun's resonant cavity is scheduled for 2025.

1. はじめに

SuperKEKB 電子・陽電子衝突型加速器プロジェクトでは、電子ビームは電子銃によって生成され、線形加速器(Linac)により 7 GeV まで加速される[1]。低エミッタンス大電流電子ビームの実現のために、quasi-traveling wave Side Coupled (QTWSC) 空洞、IrCe 光陰極、mJ 級のピコ秒紫外(UV)パルスを発生させるレーザー光源を開発した。レーザーシステムはファイバーレーザーと Nd:YAG 固体レーザーを組み合わせたハイブリッド型であり、完全に独自開発され、世界で初めて大規模加速器プロジェクトにおいて実用化に成功した。高いビーム品質と長期安定性を両立しつつ、スケラブルな構成を維持しており、SuperKEKB 加速器の厳しい運用要件に適合するソリューションである。

本システムは、長期安定運転を実現するために継続的なアップグレードと運用中の改善を重ねている。数か月にわたり、安定して高品質な電子ビーム出力を連続的に実現している。

2. レーザーシステム

Fig.1 は、SuperKEKB で使用している現在の Yb/Nd ハイブリッドレーザーシステムのレイアウトを示す[3,4]。本システムは、主に増幅システム、パルス選択システム、およびビーム整形システムの 3 つのサブシステムで構成される。

シードレーザー信号は、Menlo Systems 社製の Yb 添加ファイバーオシレータによって生成する。励起には 976 nm のファイバー結合型 LD (最大出力 600 mW) を使用し、波長多重合器(WDM)を通じて注入する。非線形効果の抑制および空間コヒーレンスの維持のため、励起出力の一部のみを使用して利得を調整している。この構成により、基本モード(TEM₀₀)のまま、ピコ秒領域で歪みのない効率的な増幅が可能となる。

ファイバー増幅による高エネルギーパルスでは非線形効果が問題となるため、ミリジュール級のパルスを得るには Nd:YAG 固体レーザーによる増幅段へ移行する。電子銃の運用に柔軟性を持たせるため、2 系統のレーザービームラインを設計しており、個別実験への対応や、同時運用による高電荷・低エミッタンス化も可能とする。

電子銃カソード用の UV パルスは、2 段の第二高調波発生(SHG: Second Harmonic Generation)を通して変換される。紫外光の損失を低減するため、2 倍波(532 nm)から 4 倍波(266 nm)への変換は、地下トンネル内の電子銃近傍に設置した第 2 段 SHG ステージで行う。

本レーザー光源は、1 バンチおよび 2 バンチ注入モードの両方に対応可能であり、2 バンチ間の時間間隔は 96.3 ns に設定している。繰り返し周波数は 1~25 Hz の範囲で可変である。

まず、ファイバーオシレータによって生成されたシード信号は、SuperKEKB Linac の 2856 MHz RF トリガー信号と同期した 114.24 MHz で動作する。SOA (半導体光増幅器)により繰り返し周波数を 10.38 MHz まで減少させ、バンチ間の固定間隔(96.3 ns)を実現する。次に、電気光学素子(EO ステージ)にて 96.3 ns 間隔の 2 パルスが 1~25 Hz の繰り返しで選択される。Nd:YAG 主増幅器内のポッケルスセル(PC)は、1 バンチモードと 2 バンチモードの切り替えを制御する。

空間電荷効果を抑制するため、フォトカソード上のレーザー強度分布は三次元的に均一な円筒形とすることが重要である。縦方向(時間方向)のプロファイル最適化には、複屈折結晶を用いたパルススタッキング(Pulse stacking)技術[5]を採用し、空間強度分布の均一化には回折光学素子(DOE: Diffractive Optical Element)[6]を用いている。

レーザービームの安定性は、自動ビーム位置フィードバックシステムとレーザーエネルギーのフィードバック制御によって維持されている。

[#] xiangyu.zhou@kek.jp

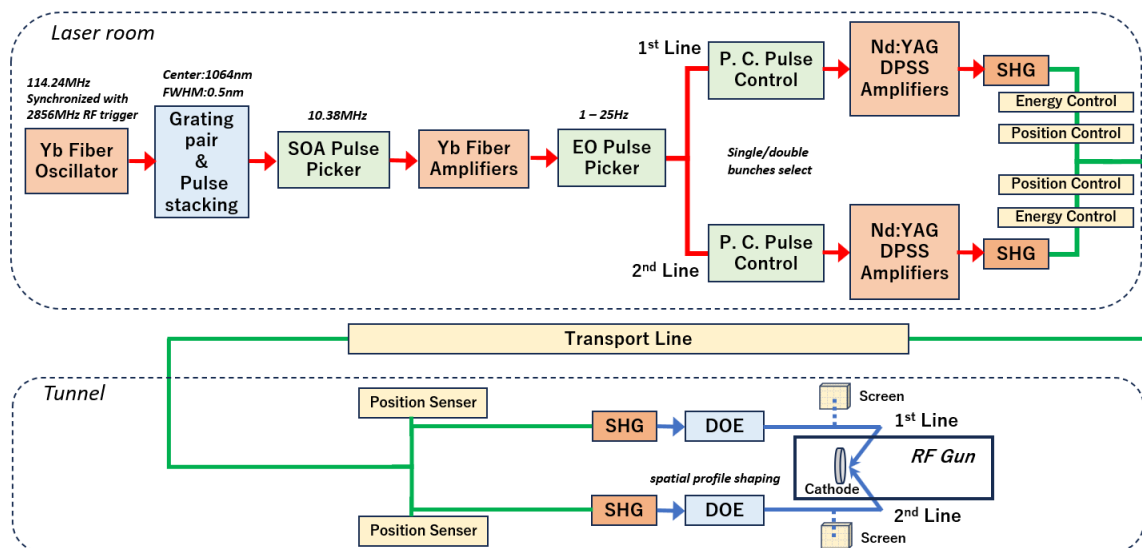


Figure 1: Layout of the Yb/Nd hybrid laser system

3. レーザーアップグレード

3.1 増幅モジュールのアップグレード

現在、Linac エンドにおける電子量の目標値を 4 nC と仮定すると、必要なレーザー強度は約 1 mJ となる。SHG 用の非線形結晶における変換効率を考慮すると、赤外領域の基本波は 10 mJ 以上のパルスエネルギーが必要である。しかし、12 m におよぶトランスポートラインおよび DOE によるビーム整形などにより、光学的ロスが顕著である。さらに、運転中に電子銃の入射窓が紫外線により劣化するため、レーザー強度をいくら高めても十分ではない場合がある。

最終段(第5段)のVPSSモジュールは、数mJから数十mJまでのパルス増幅を担っており、最終的なパルスエネルギーはこのモジュールの性能に大きく依存する。より高いパルス出力を実現するためには、ポンプ光の強度を向上させる必要があるが、増幅結晶の熱レンズ効果により、エネルギーの上限が制限される(Fig. 2)。

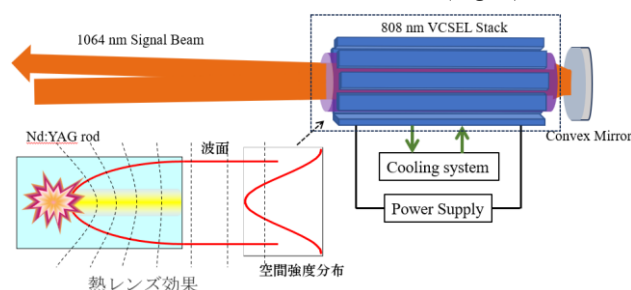


Figure 2: Nd:YAG VPSS amplifier at the fifth stage.

従来は直径7 mmのNd:YAG ロッド結晶を使用していた。熱レンズ効果を補償するため、反射鏡として凸面鏡を採用していたが、最終的には結晶の端部で焦点が合い、結晶が破損するという問題が発生した。

この課題を解決するため、第 5 段増幅モジュールの設計を改良し、結晶の直径を 10 mm に拡大するとともに、VCSEL 配のレイアウトを再構築することで、ポンプパワ

も増加させた。現在の第 5 段 VPSS 主増幅モジュールは、直径 10 mm、長さ 100 mm の Nd:YAG ロッド結晶と反射型凸面ミラーを組み合わせ、入射ビーム径を拡大することで、熱レンズ効果を低減している。さらに、ドープ濃度を 0.8% に低下させることで、熱負荷を抑制しつつ、ビームの空間均一性を向上させた。

その結果、最終段の増幅により基本波のパルスエネルギーは 25~30 mJ に達し、SHG 変換後 1.5mJ の 4 倍波パルスを得る。最後に電子銃のフォトカソードに到達する UV パルスは約 850 μ J のエネルギーを得ている。

3.2 パルス時間プロファイルの常時自動計測システム

Linac では運転前にストリークカメラを用いて電子バンチの時間構造を測定するが、運転中にその形状が変化しているかどうかをリアルタイムで監視することはできない。電子ビームの縦方向形状はレーザー光源の時間プロファイルに強く依存しているため、レーザーの時間波形を常時監視するシステムを開発した。

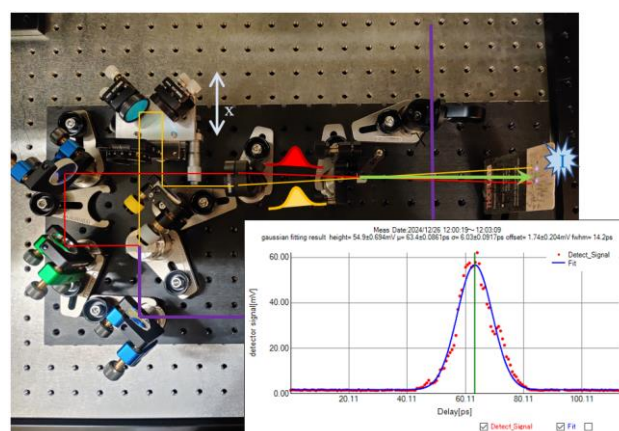


Figure 3: Auto-correlation system.

Fig. 3 に示すように、このシステムは自己相関法 (Auto-Correlation) を用いてレーザーパルスの時間プロファイルを測定する。レーザー光は二つのビームに分割

され、非線形結晶にて再結合し、和周波 (SFG: Sum-frequency generation) を発生させる。片方のビームの光路長を可変させることで、時間領域における 2 パルスの重なり位置が変化し、対応する SFG 光の強度が変化する。光路長をスキャンすることで、自己相関信号を再構築し、パルスの時間プロファイルを取得する。

この自己相関測定は第 1 段 SHG ステージにおいて行う。SHG 生成後に残る基本波の一部を用いて自己相関系に導くことで、主ビームラインを妨げることなく測定が可能である。そのため、本システムでは 1 日 2 回、運転中のパルス形状を自動で測定している。

なお、このシステムはあくまでパルスの時間プロファイルの変化を監視するものであり、時間領域における光信号と RF 信号との同期精度については測定しない点に注意する必要がある。

3.3 カソードに入射ビームジッタの監視システム

レーザービームの X/Y 方向の位置ずれは、Linac 終端での電子ビーム品質に大きく影響する。そのため、ビームポジションの変動を補償する自動位置フィードバックシステムを構築しており、レーザーの方向ずれを補正する。監視対象のビーム位置は地下トンネル内の光軸上にあり、補正用の調整ミラーは地上部のレーザーハットに設置している (Fig. 1)。しかし、フォトカソード表面におけるビームジッタは直接的に電子バンチの生成に影響するため、より精密な監視が必要となる。

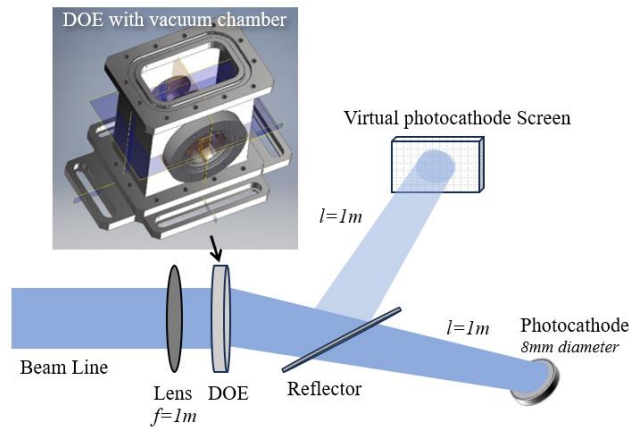


Figure 4: Setup of the DOE near the photocathode.

Fig. 4 に示すように、DOE で整形されたレーザーパルスの一部は、反射率 5% のビームスプリッターにより分岐され、観察用スクリーンへ導かれる。このスクリーンは「バーチャルカソード」として機能し、実際のフォトカソードと同じ光学経路上に配置されている。そのため、スクリーン上で観測されるスポットサイズは、実カソード上のスポットサイズと厳密に一致するよう設計されている。

Fig.5 はバーチャルカソードスクリーンの像である。楕円形像は、直径 8 mm の円形フォトカソードに対して、レーザービームが水平方向に斜入射 (60°) すること起因しており、観察画像上では垂直軸 8 mm、水平軸 4 mm の楕円形として現れる。

取得されたレーザー画像に対しては、非線形最小二乗法を用いてガウス関数でフィッティングを行う。ここで使用しているのは Python のライブラリ「lmfit」であり、フィッ

ティング関数は以下の通りである：

$$F(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) + C \quad (1)$$

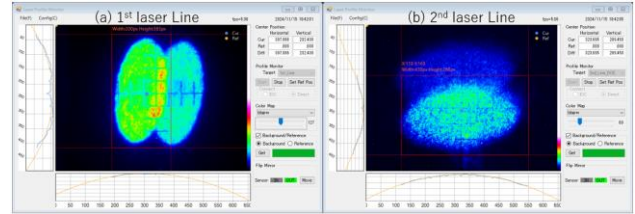


Figure 5: Laser profiles on the virtual cathode screen.

ここで、 A は振幅 (最大値と最小値の差)、 μ は分布の中心位置 (ピーク位置)、 σ は標準偏差 (ビームの広がりを表す指標)、 C はオフセット (背景信号のレベル) を意味している。この手法により、Pulse-to-Pulse のデータから、入射ビームの X/Y 方向ジッタを定量的に解析している。

運転期間に、入射ビームの X/Y 方向ジッタは平均 20 μm である。

4. 2024 電子銃運転実績

2024 年秋季運転では、数か月にわたり中断のない連続運転が実現された。本期間中、レーザーシステムは 2 系統のビームラインの一方に対して最大 850 μJ の UV パルスを安定供給し、1~25 Hz の繰り返し周波数および Single/Double Bunch 設定に応じた連続運転を行った。本運転ではビームスタディーを妨げないよう、レーザーの時間構造整形 (パルススタッキング) は使用しなかった。

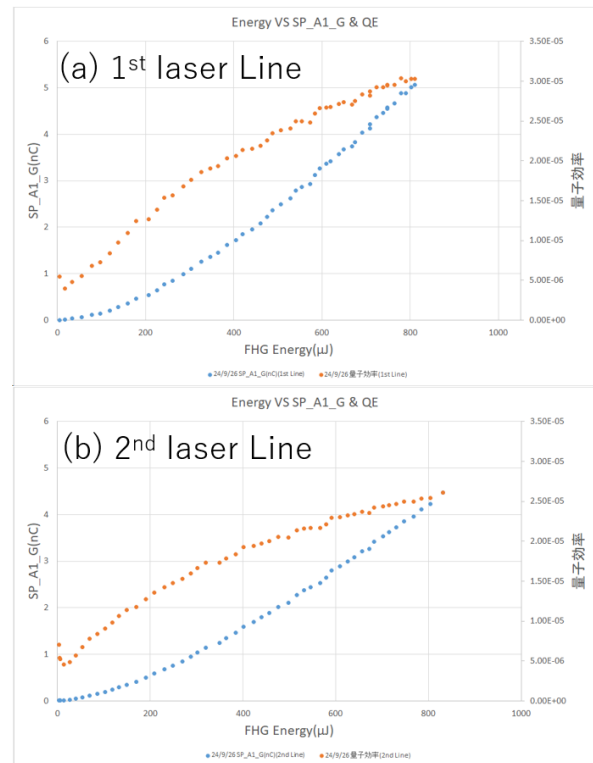


Figure 6: Output energy and quantum efficiency of the RF electron gun.

Fig. 6 に示すように、1st および 2nd ビームラインに対応して、片方光源入射で RF 電子銃から最大 5 nC の電子ビームを得ることができた。フォトカソードの量子効率 (QE) は 3×10^{-5} に達した。

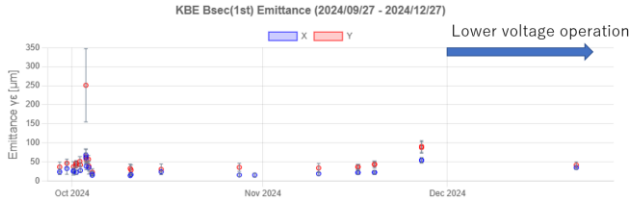


Figure 7: 2nC Emittance history for 2024 Operation.

運転期間中、電子銃はおおむね 2 nC の電荷で動作していた。Fig. 7 には、運転期間中に B セクター位置で測定された全エミッタンスデータを示している。全体として、X/Y 方向のビームエミッタンスは 30~50 μm の範囲に安定しており、高品質な電子ビームが長期間維持されたことが確認できる。

なお、12 月以降は電子銃内部での放電発生に伴い、加速電圧を低減した運転が行われた。この期間中もエミッタンスの顕著な悪化は見られず、システムの安定性およびレーザー照射制御の有効性があらためて確認された。

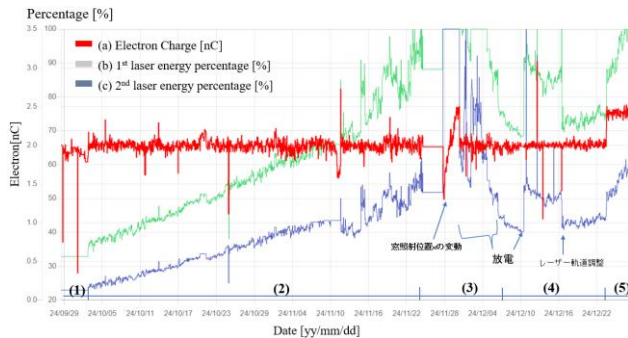


Figure 8: Operation of the electron gun in the SuperKEKB accelerator during the autumn run in 2024.

Fig. 8 には、2024 年最終運転期間における電子銃出力電荷の時間変化が示されている。運転状況は以下の通りである：

(1) 運転初期では、レーザーパルスをフォトカソードに照射し、2 つビームラインスキャン・位相調整・ビーム圧縮・軌道調整などのビームチューニングにより、Linac 全域に 2 nC の安定した電子ビーム電荷を得た。

(2) 運転が継続するにつれて、電子銃の真空窓表面における汚染や劣化により、紫外光の透過率が徐々に低下し、同時にフォトカソードの量子効率も劣化した。これに対応するため、レーザーエネルギーの自動フィードバック制御を導入し、2 nC の電荷量を供給している。

(3) の期間中に電子銃内部で放電が頻発した。これに対処するため、フォトカソード表面の汚染除去を目的にレーザー注入エネルギーを一時的に増加させ、さらに真空窓の透過率改善を狙ってレーザービーム透過位置の微調整を行った。レーザー強度は運転状況に応じて動的に制御され、2 nC の安定電荷の維持とクリーニング効果の両立を実現した。

(4) 最終的には、レーザー照射による汚染除去が奏功し、加速器システムは安定動作へと復帰した。期間中、放電や真空窓のアライメント調整によって、レーザー入射エネルギーは 2 度大きく変動していた。

(5) 運転最終段階では、レーザー注入エネルギーをさらに引き上げることで、ビーム電荷を 3 nC にまで増加させた。25 Hz での連続出力を維持しつつ、真空窓やフォトカソードの性能は徐々に劣化したものの、運転最終日には瞬間ルミノシティの世界記録を達成した[7]。

なお、レーザーシステムにおけるわずかな変動であっても、レーザー位置・タイミング同期など時間軸/空間軸での再調整か、ビームの軌道確認が必要となり、通常は再最適化に数時間を要する。レーザーは継続的に作動し、いくつかの小さな障害はすぐに発見され、加速器全体の動作に影響を与えることなく対処されました。運転中に放電や真空窓の交換が生じても、すべてのレーザー運転パラメータを安定に維持でき、ビーム電流の迅速な回復および長期安定運転を実現した。

このように、長期間にわたる連続運転を通じて、レーザーシステムは極めて高い信頼性と安定性を示し、SuperKEKB 加速器の安定運転と世界記録達成に対して重要な役割を果たした。

5. まとめ

SuperKEKB 電子・陽電子衝突型加速器における高品質な電子生成を実現するため、Yb ドップファイバーレーザーと Nd:YAG レーザーを統合したハイブリッド型増幅システムを開発した。本システムは、高い増幅効率と優れた熱管理能力に加え、自動フィードバック機能を備えており、数か月間にわたってメンテナンスなしで安定運転を継続できる性能を有している。

このように、長期間にわたる連続運転を通じて、レーザーシステムは極めて高い信頼性と安定性を示し、SuperKEKB 加速器の安定運転とルミノシティ世界記録達成に対して重要な役割を果たした。本システムは、大規模加速器において RF 電子銃光源を実用化した初期の成功例の一つであり、今後の高輝度電子源の構築における重要な技術的指針となる。

2024 年度運転中に、電子銃空洞の放電や電子銃窓の劣化などの問題が発生し、RF 電子銃空洞の交換は 2025 年秋に実施されることを進んでいる。電子銃交換と共に、レーザーシステムも再構築する予定である。

参考文献

- [1] Furukawa *et al.*, “SuperKEKB injection improvement plan at KEK electron positron injector linac”, Proc. PASJ2021, Takasaki, Japan, 2021, pp. 320–324.
- [2] M. Yoshida *et al.*, “Generation and Acceleration of Low-emittance, High-current Electron Beams for SuperKEKB”, Proc. LINAC2014, Geneva, Switzerland, 2014, pp. 21–25.
- [3] X. Zhou *et al.*, “Upgrade of electron beam generation system for Phase-III commissioning of SuperKEKB project”, Proc. 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 487–490.
- [4] R. Zhang *et al.*, “Laser system for SuperKEKB RF gun and its multi-functionalized application”, Proc. 19th Annual

Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 668-670.

- [5] X. Zhou *et al.*, “Temporal reshaping of lasers through the coherent pulse stacking technique in the SuperKEKB Electron/Positron Injector”, Proc. 21th Annual Meeting of

Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 399-402.

- [6] R. Zhang *et al.*, “Laser system for SuperKEKB RF gun in phase III commissioning”, Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, June. 2022, THPOTK059.

- [7] <https://www2.kek.jp/ipns/en/news/7015/>