

KEK 電子陽電子入射器における SLED 調整の現状

STATUS OF SLED TUNING AT KEK ELECTRON-POSITON LINAC

牛本信二^{#, A)}, 恵郷博文^{B)}

Shinji Ushimoto^{#, A)}, Hiroyasu Ego^{B)}

A) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

B) KEK

Abstract

The KEK e-/e+ injector linac uses 57 pulse compressors that amplify the RF signal from the klystron. 56 of them are the SLED (SLAC Energy Doubler) type with two cylindrical resonant cavities. It is necessary to tune the resonant frequencies of the cavities so that the SLEDs are in the optimal condition. Conventional tuning work involves measuring the RF waveform with an oscilloscope and manually tuning the SLED installed at a high place. This work took 30 to 40 minutes on average. In order to improve the work, we developed a waveform analyzing program and a removable and remote tuning driver. By using these tools, the SLEDs can be effectively and precisely tuned in about 10 minutes. In this paper, we report the details of the tools and the work of SLED tuning.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(以下、入射器)では現在 60 台のクライストロンを運転に使用している。Figure 1 に入射器で一般的な加速ユニットの構成を記す。クライストロンから出力された RF は SLED(SLAC Energy Doubler)[1] と呼ばれるパルスコンプレッサーにより圧縮・増幅された後、4 本の加速管に投入される。SLED は 3 dB 結合器と 2 つの円筒空洞から構成されており、現在 56 台が使用されている。近年では SCPC[2]と呼ばれる単一球形空洞型の新しいパルスコンプレッサーも運転に使用している。本稿では、入射器における SLED の調整手法の改善と最新の調整結果について紹介する。

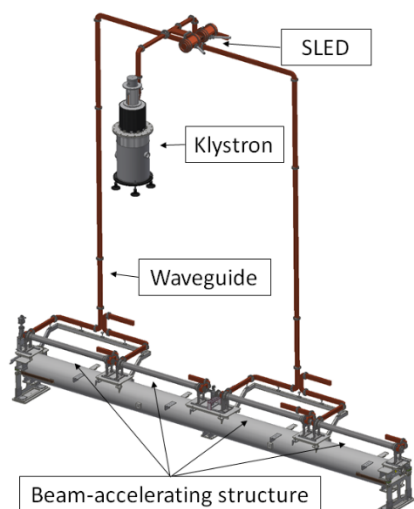


Figure 1: Layout of standard accelerator unit.

2. 従来の調整と問題点

SLED 調整は入射器運転時の状況に応じて不定期に実施されてきた経緯から、作業の改善が長い間実施されていなかった。具体的な調整方法は、クライストロンおよび SLED 出力部の導波管に設置されている方向性結合器からの RF 信号(SLED からの反射波と出力波)をオシロスコープでモニタしながら、SLED の空洞端面にある空洞周波数調整用のねじ操作をおこなうというものである。調整は

- SLED 出力の増加
- クライストロンへの反射波の減少

を目標に作業者の主観で判断をおこなっていた。以下に従来の調整方法における問題点をあげる。

2.1 オシロスコープによる RF 信号波形のモニタ

方向性結合器からの SLED 出力波形は RF 信号計測ラック内の RF モニタ、反射波形はクライストロン電源内に設置された VSWR メーターで測定され、それぞれ別筐体に各信号が接続されている。SLED 調整時はこれらの機器からモニタ用のオシロスコープへ配線をおこなう必要があり、準備に時間を要していた。

2.2 高所作業と放射線被爆

入射器の SLED はレイアウトの都合上、クライストロンよりも高所(床面から 2.8 m 程度)に設置されているため、調整時は脚立などを使用し、不安定な体勢で作業をおこなうことが多かった。また、SLED 表面は最大で数 10 $\mu\text{Sv/h}$ の放射線が観測される場合があり、そのような箇所は事前に鉛シートのシールドを設けてはいるものの、調整に時間がかかった場合などは被爆の影響が無視できない。

2.3 調整の曖昧さ

これまでの調整は SLED 出力が増加することを優先しており、二つある空洞のバランスが崩れていた場合などの判断は不可であった。また、長きにわたって調整自体が熟練度を必要とする特殊作業と認識されていたため、

[#] ushimoto@post.kek.jp

積極的な調整がおこなわれない状況となっていた。

3. 調整方法の改善

これまで不定期におこなわれていた SLED 調整であったが、2018 年に SuperKEKB に向けた高品質のビーム供給を実現する一環として、全 SLED 波形の確認と調整をおこなうこととなった。この時から従来の SLED 調整の見直しをおこない、以下のような改善を進めてきた。

3.1 SLED 調整用プログラム

下流の蓄積リングへ同時トップアップ入射をおこなうための入射器高度化[3]において、制御システムが大幅に改良された。なかでも Event System[4]と呼ばれる新しいタイミングシステムの導入により、20 ms 毎に異なるパラメータのビームを供給することが可能となった。それに合わせて、入射器で使用するパラメータの多くが EPICS[5]をベースとした制御システムにより、RF 波形モニタ[6]も遠隔で容易に利用できる環境が整備された。

これを機に、従来調整時に用いたオシロスコープに代わる新たな波形モニタとして、PC 上で動作する SLED 調整専用の LabVIEW プログラムの開発を開始した。Figure 2 に最新の調整プログラムを記す。LabVIEW は豊富な関数モジュールと様々なグラフツールを有しており、CaLab[7]と呼ばれるモジュールを追加することで、EPICS データも直接扱うことができる。デバッグ機能も充実しており、スクリプト言語に対して比較的短時間で GUI を含めたプログラム開発が可能であった。

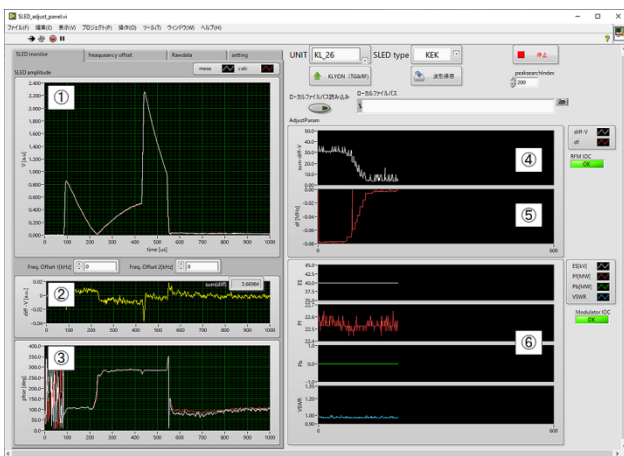


Figure 2: LabVIEW program for SLED tuning.

プログラムは左側に現在波形、右側に調整開始時からの履歴表示を配置した。各データは以下の通りとなる。

- ① 振幅(実測波形と最適波形)
- ② 振幅の差分(最適波形-実測波形)
- ③ 位相(実測波形と最適波形)
- ④ 振幅差分(②)の積算値履歴
- ⑤ 共振周波数の履歴
- ⑥ クライストロンのパラメータ

ここで表示する最適波形とは SLED の入力波形(クライストロンからの出力波形)を基に入射器で使用する SLED のパラメータ(Q 値、共振周波数(2856 MHz)、結合係数 β) から 4 次ルンゲクッタ法による数値計算で求めた波形を指す。また⑤に表示する現在の共振周波数は、

前述の最適波形の数値計算する際に周波数をパラメータとして変えて、現状波形との差分が最小となる値を探索して求めた値となっている。

実際の作業時は、④が最小となるように調整をおこなう。その際、急激な反射の増加などにより、クライストロン電源のインターロックが作動する可能性があるため、⑥に表示したクライストロンの各パラメータ(モジュレータ充電電圧(Es)、クライストロン出力(Pf)、反射(Pb)、VSWR)を確認しながら、不要なインターロックの発生を未然に防ぎ、効率良く調整作業を進めることができる。

3.2 リモート調整機構

2018 年の調整時以降も、調整ねじの操作は従来どおり脚立などを使用した高所作業としておこなっていた。これを改善するため、2023 年から SLED 調整のリモート化を検討した。これは SLED の調整ねじにステッピングモーターを取り付け、地上部から遠隔でモーター操作をおこない周波数調整をするというものである。Figure 3 に開発した SLED 調整コントローラーとステッピングモーターユニット、Fig. 4 にステッピングモーターユニットを SLED に取り付けた様子を記す。



Figure 3: SLED tuning controller and motor units.

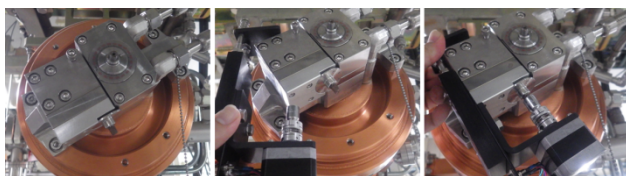


Figure 4: Motor unit attached to SLED.

3.2.1 SLED 調整コントローラー

従来の SLED 調整と同様に、地上部からでもアナログ的な感覚で調整がおこなえるよう、押しボタン式のコントローラーを作成した。コントローラーはフロントパネル状に配置した各種ボタンの操作に対して制御をおこなう Arduino Mega2560[8]と 2 台のストロベリーリナックス製 DRV8825 ステッピングモータードライバモジュール[9]、各機器用の DC 電源から構成される。

このコントローラーは 2 台分の押しボタンがあり、それぞれの回転方向に対応したボタンを押すと、あらかじめ切り替えスイッチで設定した速度(低速あるいは高速の 2 段階)でモーターを動かすことができる仕様とした。使用したモータードライバはデジタル制御ではなく、パルス

信号の入力数に対応してモーターをステップ制御することができるため、Arduino のアナログ出力を使用して制御をおこなっている。なお、ステップモーターユニットとの間は複数の制御線が必要なため、D-sub ケーブル 1本で接続する仕様とした。

3.2.2 ステッピングモーターユニット

SLED 周波数調整ねじにステッピングモーターを取り付けるにあたり、短時間で容易に取り付けがおこなえるように、モーターを含めた小型のユニット構造を採用した。このユニットの脱着はバネを使用することにより、工具を不要としている。取り付けの際は、モーターと連結した 9.5 sq のソケット部を SLED 調整機構部の調整ねじにはめ込み、ユニット反対側のバネで動作する固定プレートで調整機構部を挟み込むことで脱落を防止する。Figure 4 は実際に SLED にモーターユニットを取り付けた状態を示す。ユニット自体の重量が増加すると調整ねじに不要なテンションがかかるため、ユニットの構造を単純化し、材料もアルミを使用することで軽量コンパクトなユニット構造を実現した。

4. 改善後の SLED 調整

4.1 調整による波形の変化

SLED 調整プログラムを用いて調整した SLED 波形の変化(振幅および位相)を Fig. 5 に記す。

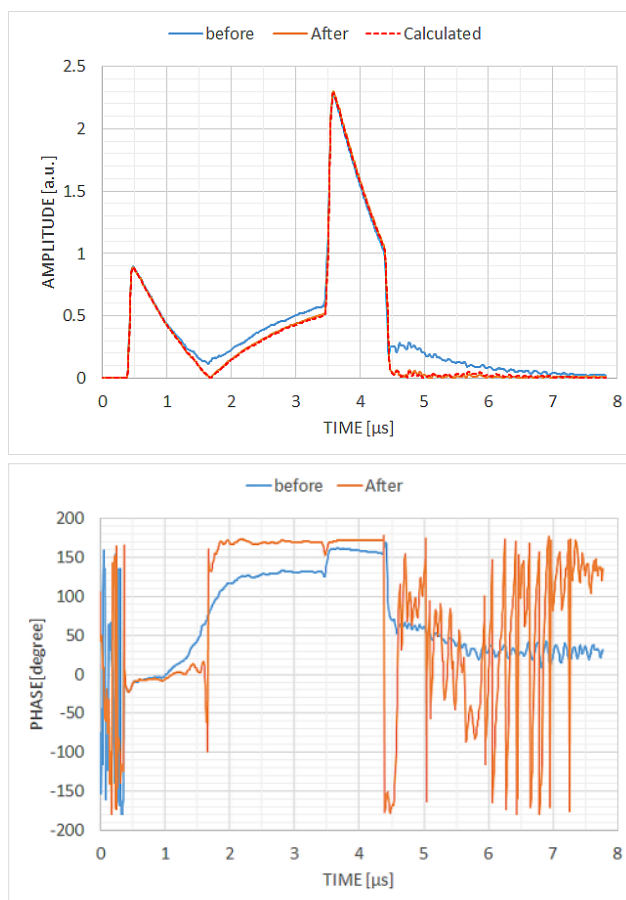


Figure 5: Waveforms before and after the SLED tuning.

なお、振幅波形には、入力波形から計算した理想的な出力波形も併せて表示している。調整後の波形は立ち上がりからおよそ 1 μs 後にあるディップがほぼ 0 となり、4 μs 以降に見られたテールが減少し、理想的な出力波形をほぼ再現していることが確認できる。同様に位相も振幅で見られたディップ付近で緩やかに変化していた箇所が改善され、結果的に入力波位相反転前後(立ち上がりから 3 μs 後)に見られた位相差もほぼなくなっている。また調整により SLED のピーク出力もわずかながら増加しており、理想的な調整結果となった。

4.2 調整時間の変化

SLED 調整用のプログラム開発を開始した 2018 年、およびリモート調整機構を整備後の 2024 年に入射器では SLED 全個所の波形確認と調整をおこなっている。この 2 度の全数確認の作業状況の結果と改善による作業時間の短縮状況を Table 1 に記す。なお、改善以前の SLED 調整は作業員 1~2 名でおこなっており、準備から作業終了まで 1 時間程度の時間を要することもあった。

4.2.1 2018 年時の調整

SLED 調整プログラムを導入した最初の調整であり、2 人 \times 2 チーム体制で作業をおこなった。これは作業時に 1 名が PC での調整用プログラムチェックと調整作業の補助をおこない、もう 1 名が脚立に上り調整ねじの操作をおこなう想定である。また、作業中に担当を交代することで、特定の作業員が SLED 近傍に接近する時間を分散し、個々の放射線被曝量を減らすことを考慮した。この時は最終的に、2 チームによる実作業 20 時間程度で全 56 箇所の調整を完了しており、1 か所あたり 20~30 分程度の所要時間となっていた。

4.2.2 2024 年時の調整

新たにリモート調整機構を実際に使用して全個所の波形確認および調整をおこなった。この時、作業員は 1 名で、モーターユニット設置後、PC でプログラムを確認しながらコントローラーで調整をおこない、調整終了後にモーターユニットを取り外すという順で作業を進めた。最終的には実作業 10 時間程度で作業完了したため、1 か所あたり 10~15 分程度の作業時間となり、従来の調整に比べて大幅な人員削減と時間短縮を実現した。

Table 1: Summary of Adjustment Status

	~2018	2018	2024
Tuning Program	—	○	○
Remote adjust unit	—	—	○
Number of work unit	—	56	49
Number of workers	1~2	2 \times 2	1
Total working time[hour]	—	20	10
Working Time [min]	~60	20~30	10~15

4.3 調整による出力および位相の変化

2024 年の SLED 調整結果を Fig. 6, Fig. 7 に記す。Figure 6 は出力最大値の変化率を示しており、調整をおこなったほとんどの出力が増加していることが確認できる。3%以上の増加率が見られたユニットは、SLED 調整に加えて、位相反転タイミングの最適化もおこなっている。

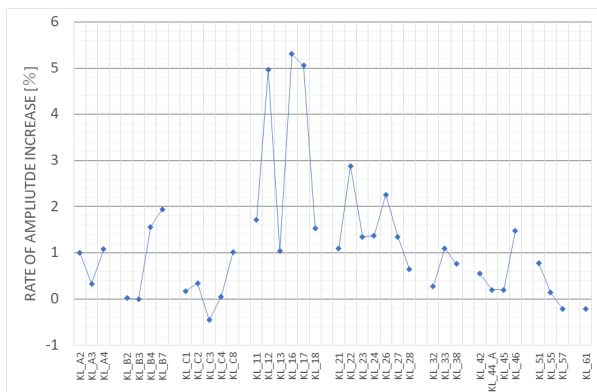


Figure 6: Change in maximum output value by the SLED tuning.

次に Fig. 7 は SLED 入力波位相反転前後の位相変化を示した結果である。調整前は位相差が $+40^\circ \sim -20^\circ$ にわたってばらついていたのに対し、調整後は $\pm 10^\circ$ 以内に収束していること確認できる。理想的には 0° であるが、実際にはクライストロン出力位相の変動などが影響している。調整手法の改善により、短時間の調整であっても、最適な調整がおこなえたことが確認できる。

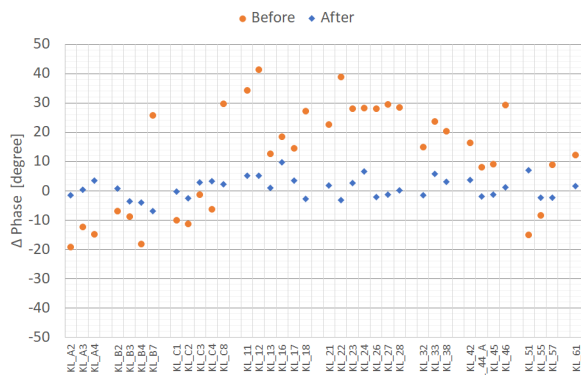


Figure 7: Phase change at the SLED-output peak before and after the SLED tuning.

5. まとめ

これまでの SLED 調整の問題点から、より安全でかつ短時間で調整をおこなえるようにプログラムの開発と周波数リモート調整化を検討し、チューニング装置の作成および導入をおこなった。その結果、従来の手法に比べて大幅な時間短縮を達成するとともに、容易に最適な SLED 調整が可能であることを確認した。今後は調整の自動化を視野に、さらに機器の改良を進めたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Shidara, "高周波源", 高エネルギー加速器セミナー OHO '90, August, Tsukuba(KEK), 1990. <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-1990/txt-1990-%E2%85%A2.pdf>
- [2] H. Ego *et al.*, "S バンド球形単空洞型コンパクトパルスコンプレッサー実機の製作", Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, Online (Kyushu University), Oct. 18-21, 2022.
- [3] M. Satoh *et al.*, "高速ビームモード切り替えのための KEK 入射器アップグレード", Proceedings of the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [4] T. Kudou *et al.*, "THE EVENT TIMING SYSTEM IN KEK LINAC", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, Himeji, Japan, 2010.
- [5] <https://epics.anl.gov/>
- [6] H. Katagiri *et al.*, "同時入射に対応した RF モニタユニットの開発", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.
- [7] <https://github.com/epics-extensions/CALab>
- [8] <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [9] <https://strawberry-linux.com/catalog/items?code=12025>