

# KEK 電子陽電子入射器における RF 位相フィードバックの導入

## RF PHASE FEEDBACK AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

三浦孝子<sup>#, A) B)</sup>, 荒川大<sup>A)</sup>, 片桐広明<sup>A)</sup>, 松本利広<sup>A) B)</sup>, 矢野喜治<sup>A)</sup>, 工藤拓也<sup>C)</sup>

Takako Miura<sup>#, A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>, Takuya Kudo<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.

### Abstract

The KEK electron/positron LINAC delivers the beams to the four storage rings with the top-up injection. The RF timing and phase are changed for each ring in repetition rate of 50 Hz. The RF feedback had not been introduced, therefore the phase stability depended on the stability of the klystron high voltage and the cooling water of accelerating structure. The phase feedback by using non-injection mode (NIM) without beam acceleration was newly introduced, and the RF phase in each beam mode was stabilized. Consequently, it has been possible to stably accelerate the beams even when the cooling water temperature is unstable.

### 1. はじめに

KEK の電子陽電子入射器は、ビームエネルギーの異なる 4 つの蓄積リング(SuperKEKB HER: 7 GeV e<sup>-</sup>、LER: 4 GeV e<sup>+</sup>、PF: 2.5 GeV e<sup>-</sup>、PF-AR: 6.5 GeV e<sup>-</sup>)に対し、ビームを 50 Hz で振り分けてトップアップ入射している[1]。

Figure 1 に RF 励振系を示す。入射器の RF は、周波数が 2856 MHz で、クライストロンから出力される RF パルス幅は 4 μs である。RF は SLED でパルス圧縮され、4本の加速管に分配される。LLRF コントロールユニット[2]は、Event timing system から光ファイバー経由で直接ビームモード情報や RF 設定位相を 50 Hz のパルス毎に受信し、RF パルスを生成している。入射器には約 60 台のクライストロンがあり、8 つのセクターに分けられている。通常の励振系では、セクター毎に 1 台の LLRF コントロールユニットで生成された RF を 60 kW サブブースタークライストロン(SB)で増幅し、最大 8 台のクライストロンに RF を供給している[3]。一方、ビームエネルギーを微調するた

めのエネルギーノブや、エネルギー圧縮システム(ECS)、バンチ圧縮システム(BCS)などに使用する特別なユニットでは、1 対 1 の独立励振系となっている。各クライストロンユニットには、各々 RF モニター[4]が設置されており、クライストロンや SLED、加速管出口の RF の振幅・位相がパルス毎に測定される。データはモード毎に振り分けて EPICS レコード化される。RF は、パルス幅が短く、SLED でピーク形状を成すため、フィードバックは行われてこなかった。振幅については、入力 RF の変動の影響を小さくするため、クライストロンの飽和領域でドライブされている。RF の位相安定度は、クライストロンモジュレータの電圧安定度や冷却水温の安定度に大きく依存する。一時期、加速管用冷却水の温度制御が不調となり、水温制御のハンチングにより加速管出口の RF 位相が大きく変動し続けることがあった。安定したビーム加速が難しくなったため、新たに RF 位相フィードバックを導入し、安定にビーム運転を継続させることが可能となった。本発表では、位相フィードバックの詳細と運転上の注意事項などについて報告する。

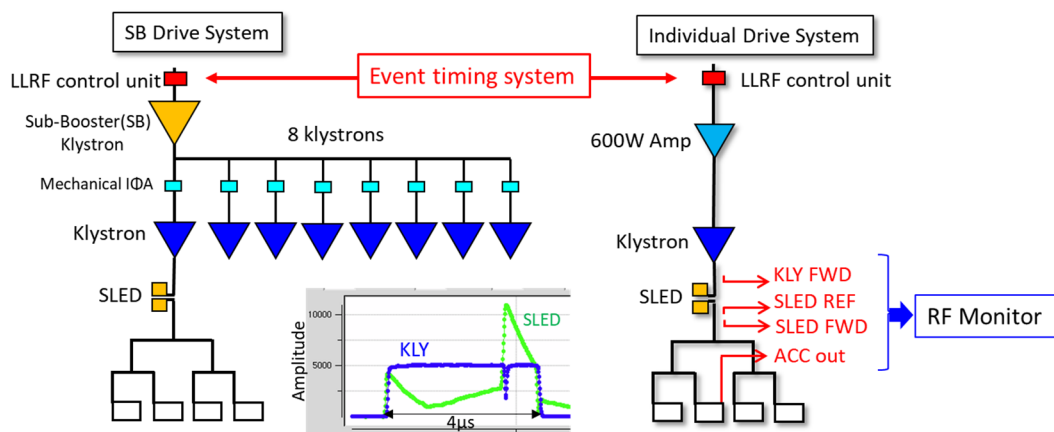


Figure 1: RF drive system at the KEK e<sup>-</sup>/e<sup>+</sup> injector LINAC.

## 2. 水温変動補償用位相フィードバック

冷却水温度が変化すると加速管の共振周波数に変化し、位相にずれが生じる。加速管には、アイリス径が異なる数種類があり、加速管総移相量が 7.80, 8.60, 9.44 °/°C のものがある。Figure 2 に、冷却水温変動に対する加速管出口の RF 位相、SLED 出力(加速管入力)の RF 位相の 1 例(KL B3 ユニット)を示す。図中では最大で 0.27°C の水温変動がみられ、それに対応する移相量は設計パラメータで計算すると 2.10°, 2.32°, 2.55° に相当する。Figure 2 では、0.27°C の変化に対する加速管出口の位相変化量は 5.6° と大きいが、SLED で位相が 2.9° 変化しており、加速管総移相量は、その差分の 2.7° に相当する。この値は設計値とほぼ同等で、位相の測定値は、妥当な値であることがわかる。

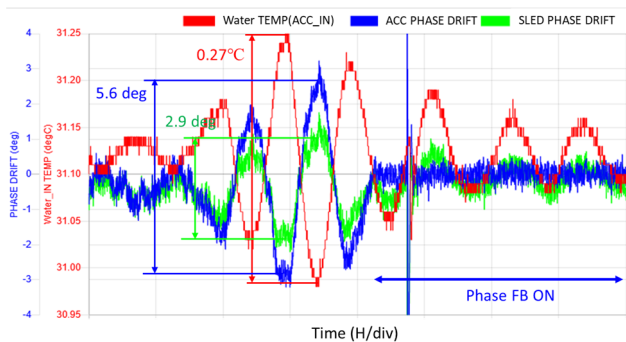


Figure 2: Temperature drift of the cooling water and the phase drift of the accelerating structure and SLED output RF.

RF 位相フィードバックは、Fig. 2 に示すように、加速管出口の RF 位相を一定に保つように行われる。入射器は、4 リングにビームを供給しており、運転に応じてビームを出さない場合もある。再入射するときにずれた位相で加速を始めてしまうとビームロスが発生させるため、ビームに対する位相は水温の変化に依存せず、再現性を良くする必要がある。そのため、ビーム入射を伴わない Non-Injection-Mode(NIM)を利用してフィードバックの位相補正量を常時計算し、各モードの設定位相にその補正量を加えたものを LLRF コントロールユニットにセットする。NIM モードは、フィードバックに使用しているため、50 Hz のうち、少なくとも 1 Hz を割りてるようにしている。RF は、クライストロンの電圧が違くと位相が大きく変化するため、RF の振幅をモニターし、運転値に対して±1%以内であればフィードバックをするというロジックを組んだ。しかし、季節による温度変動などで測定される振幅にずれが生じたため、現在は±2%を許容している。

熱電子銃側で使用している 114MHz と 571MHz のサブハーモニックバンチャーにも同様に位相フィードバックを導入した。一方、低エミッタンスビーム生成用の RF 電子銃は、定在波空洞で空洞内にピックアップが無いので、Fig. 3 に示す反射波を利用してフィードバックをおこなっている。振幅データの 2 つ目のピーク波形は、入力 RF が OFF となった直後に空洞に蓄積された RF が出力されるもので、この部分の位相情報を用いてフィードバックを

行っている。

現在、全ての RF ユニットに対して位相フィードバックが導入されている。入域やトラブルなどで全クライストロンがダウンした後の運転では、水温が安定するまでに 1 時間待つ必要があったが、位相フィードバックの導入により数分程でビーム運転を再開することが可能となった。

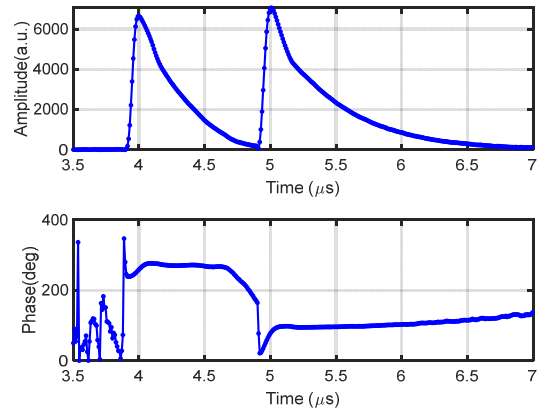


Figure 3: Reflection wave form of the RF gun.

## 3. クライストロンダウン後の RF 位相変動

定常運転中に、VSWR で RF が OFF となる場合、通常 5 秒待つてからすぐに RF を ON するため、ほとんど位相変動は生じない。一方、クライストロン電源がインターロックでダウンした場合には、現場まで行って確認した後に運転を再開させるため、数分のダウンタイムが生じる。この場合、クライストロン 1 台だけのダウンのため、冷却水温度に変化は見られないが、SLED や加速管が冷えるため、Fig. 4 に示すように復帰直後の位相は大きく変化し、元の値に戻るまで 3 分程要する。独立励振系の場合は、復帰後すぐに位相フィードバックを開始するが、サブブースター励振系の箇所では、これを補正するようにフィードバックすると他の安定動作しているユニットに影響がでてしまうため、位相が落ち着くまで 3 分間待つてからフィードバックを再開させるようにした。それに伴い、ビーム加速も復帰後 3 分待機するようにしている。

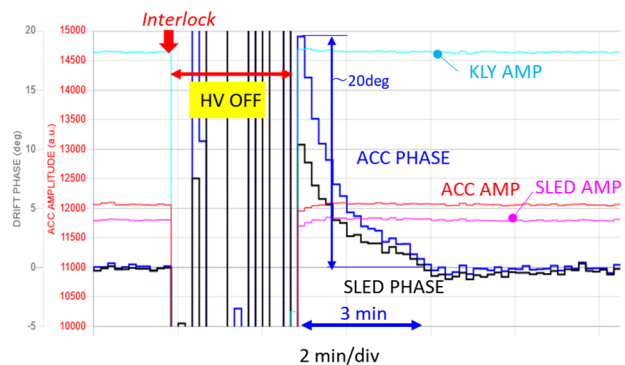


Figure 4: Amplitude and phase after HV down.

Figure 5 に、RF 電子銃が VSWR でダウンした前後の位相補正量と RF 位相を示す。RF 電子銃は、VSWR でダウンすると、その後同インターロックが多発するため、設定電圧(チャージング電圧)を 1 kV 下げて、ゆっくりと運転電圧まで上げている。位相フィードバックは、振幅が運転値到達後すぐに再開され、RF 電子銃の位相は速やかに安定化されている。位相補正量を見ると、定格振幅到達後、フィードバック無しでは安定するまでに 3~4 分間程度かかることがわかる。

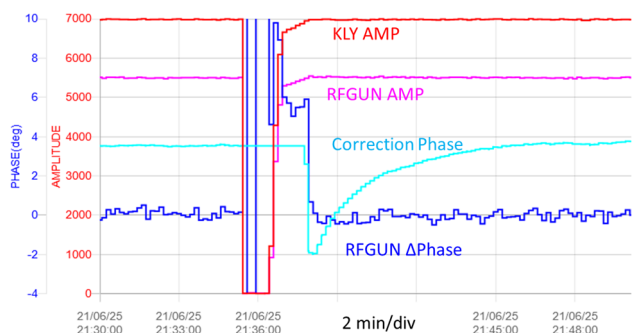


Figure 5: Phase drift compensation of the RF gun after RF down.

#### 4. 位相補正量の長期ドリフト

位相フィードバックの補正量は、運転開始時に 0°にセットしているため、通常運転時は 0°付近に戻ることを期待された。しかしながら、運転を継続しているうちに、値にオフセットがのるようになった。原因を調べた結果、Fig. 6に示すように、湿度と相関が見られ、湿度が低下するにつれて、補正移相量もマイナス側にシフトすることがわかった。

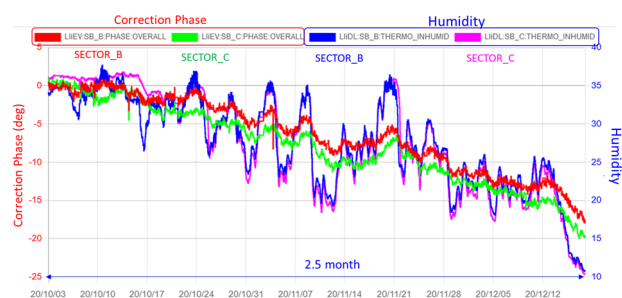


Figure 6: Long-term phase drift of the correction phase and the humidity.

湿度に依存するという事は、信号の伝送ラインや RF 励振系やモニター系などが原因と考えられる。各セクターに送っている基準信号伝送系での位相ドリフトの湿度依存性については、すでに報告がなされている[5]。位相補正量にオフセットがのることで、ビームとの相対位相にずれが生じることが懸念される。そこで、Fig. 6 の期間の初めと終わりの時期に AR ビームに対するクレスト位

相を測定し、位相補正量による影響を調べた。その結果、多少バラツキがあるものの、入射器上流側の A~I セクターでは、クレスト位相はほぼ変わらなかった。一方、2~5 セクターでは、10°前後の違いが見られた。この違いについて考察すると、SHB やバンチャーも含め、全て位相フィードバックをおこなっているため、励振系やモニター系などでのドリフトの効果が同じであれば、クレスト位相が一致すると考えられる。一方、入射器下流側の 2~5 セクターでは、基準信号生成部から各セクターまでの基準信号伝送ラインに同軸ケーブルではなく位相安定化光ファイバーを用いているため、そこでのドリフト量の違いがクレスト位相のずれになって現れるのではないかと推測される。未だクレスト位相の測定回数が少ないため、今後再度測定し、影響を調べてきたい。

#### 5. まとめ

KEK 電子陽電子入射器では、全 RF ユニットに RF 位相フィードバックを導入した。位相フィードバックは、ビーム加速を伴わない NIM モードを利用して位相補正量を求め、各モードの設定値に加えて RF コントロールユニットに設定している。NIM モードは少なくとも 1 Hz で継続しているため、各リングへの入射の有無によらず、全てのモードの位相を常に安定化することが可能となる。トラブルや入域などでクライストロンをオフした後は、水温が落ち着くまで 1 時間待つてからビーム運転を再開していたが、位相フィードバックを導入後は、数分で運転が再開できるようになった。一方、長期運転していると補正量にオフセットが現れ、湿度に依存していることがわかった。これによるビームへの影響について、クレスト位相の測定を定期的に行い、調査・検討をしていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “同時トップアップ入射のための KEK 電子陽電子入射器の加速モード切替の高度化”, Proc., PASJ2020, Online, Sept. 2-4, 2020, pp. 1-6.
- [2] T. Miura *et al.*, “LLRF Control Unit for SuperKEKB Injector LINAC”, Proc. IPAC’18, Vancouver, Canada, 2018, paper WEPAK018, pp. 2134-2136.
- [3] T. Matsumoto *et al.*, “Low-Level RF System for the SuperKEKB Injector LINAC”, Proc. IPAC’18, Vancouver, Canada, 2018, paper WEPAK017, pp. 2131-2133.
- [4] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitor System for SuperKEKB Injector LINAC”, Proc. IPAC’18, Vancouver, Canada, 2018, paper WEPAK016, pp. 2128-2130.
- [5] N. Liu *et al.*, “Measurement of the RF Reference Phase Stability in the SuperKEKB Injector LINAC”, Proc. IPAC’18, Vancouver, Canada, 2018, paper THPML073, pp. 4815-4818.