

# RF 信号発生器を用いたパルスコンプレッサー出力波形の最適化

## OPTIMIZING THE OUTPUT WAVEFORM FROM A PULSE COMPRESSOR USING AN RF SIGNAL GENERATOR

牛本信二<sup>#,A)</sup>, 惠郷博文<sup>B)</sup>

Shinji Ushimoto<sup>#,A)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup> KEK

### Abstract

The KEK  $e^-/e^+$  S-band LINAC, injects electron and positron beams with different energies into five storage rings. The injection into SuperKEKB main rings requires especially high precision and stable beam delivery. Currently, utilize rectangular RF signals generated by klystrons to compress and amplify their RF power by using pulse compressors. Due to the waveform's sharp rise and gradual decay by the pulse compressor, energy and phase discrepancies occur to accelerating multi-bunch beams, resulting in uneven beam quality. As a means to obtain ideal beam acceleration, it is necessary to more precisely control the low-power RF signal input to the klystron. This report presents the method and results of precise waveform generation tests using an arbitrary waveform generator.

### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(以下、入射器)では、下流の5つの蓄積リングへ異なるエネルギーの電子および陽電子ビームを供給しており、SuperKEKB(HER/LER)への入射では効率的な入射を実現するため、96.3 ns 間隔の2バンチビーム加速をおこなっている。

入射器では最大で7 GeVのビーム加速を実現するため、クライストロンから出力したRFをパルスコンプレッサーで圧縮・増幅した後、最大4本の加速管へ供給する。

運転で使用するクライストロンへ入力する低電力のRF(LLRF:Low-level RF)は全幅4  $\mu$ sの矩形波で、パルスコンプレッサーで圧縮された出力を得るために位相を3  $\mu$ s後に180度反転する仕様となっている[1, 2]。

パルスコンプレッサーの空洞内に貯められたRFエネルギーは位相反転したタイミングで放出され、急峻な立ち上がりを持ったピークパワーを発生した後、出力が減衰する。クライストロン出力の変動に応じて、振幅や位相も変化するため、多バンチビーム加速ではバンチ毎にビーム加速の状態が変化する。

本報告では、多バンチビーム加速における位相の安定化を実現するため、従来の矩形制御のみの低電力RF生成システムから任意波形が出力できるRF信号発生・変調器を使用して構築した低電力システムを紹介する。このシステムを用いて、パルスコンプレッサー出力の観測とクライストロン入力波形を制御するプログラムを開発し、出力波形における振幅・位相の最適化試験結果について報告する。

### 2. 試験環境

本試験は入射器内の加速管試験施設でおこなった。この施設の概要をFig. 1に記す。通常この施設では入射器の運転で使用している低電力RF(LLRF)のシステムとクライストロン用のモジュレータ電源を使用し、高電力の

RFを隣接したテストホールにあるコンクリートシールド内に供給し、加速管のコンディショニングやRF機器の評価試験などをおこなっている。

この施設では2023年末から2025年2月にかけてクライストロン用のモジュレータ電源にスカンジノバ社製のK-300を設置し電源の長期試験をおこなった[3]。電源の変更に併せて、LLRFもNational Instruments社のPXI[4]ユニットのIQ変調・復調システムを導入した。Figure 2に使用したPXIユニットを記す。この変更により、これまで不可能であった任意波形生成試験が可能となった。

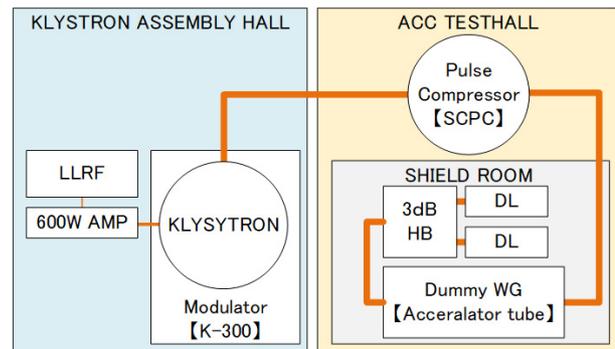


Figure 1: Layout of rf components.



Figure 2: PXI unit (IQ modulator and demodulator).

<sup>#</sup> ushimoto@post.kek.jp

### 3. RF 信号発生器およびモニタシステム

本試験で使用したPXI 機器の構成を Table 1 に記す。

Table 1: PXI Configuration

PXIe-1082	PXI chassis.
PXIe-5673E	6.6 GHz PXI Vector Signal Generator
PXIe-5450	400 MS/s I/Q Signal Generator
PXIe-5611	I/Q Vector Modulator
PXIe-5652	RF Signal Generator
PXIe-5663E	6.6 GHz Vector Signal Analyzer
PXIe-5601	RF Downconverter
PXIe-5622	16-Bit IF Digitizer
PXIe-5652	RF Signal Generator

このシステムでは、同一の PXI シャーシ内に IQ 変調器を含む RF 信号発生器(PXIe-5673E)と RF 信号をモニタする信号検出器(PXIe-5663E)が組み込まれており、各機器は LabVIEW で制御をおこなう。本試験用に作成した信号発生器・検出器プログラムを Fig. 3 に記す。このプログラムでは、パネルの左側に RF 信号発生器、右側に信号検出器の制御パラメータを配置し、機器毎に独立した処理をおこなう。

RF 信号発生器の制御では基準となる RF 周波数を 2856 MHz、サンプリングレート 50 MS/s に設定し、10 マイクロ秒(500 点)分の振幅と位相の変調データを作成する。これらの値から IQ 信号を計算し、IQ 変調器(PXIe-5450)から RF を出力する。

信号検出器では、導波管に設置された方向性結合器(Directional Coupler)からの信号を IQ 復調し、振幅と位相に変換する。振幅のデータは電圧信号として処理されるため、モニタラインの減衰量を考慮することで、実際のパワーに換算した。

本試験時は最大 100 Hz のパルス繰り返しで運転したが、信号発生器および信号検出器はいずれも正常に動作した。



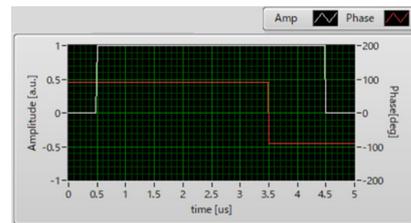
Figure 3: Signal generator/detector program.

### 4. RF 波形整形

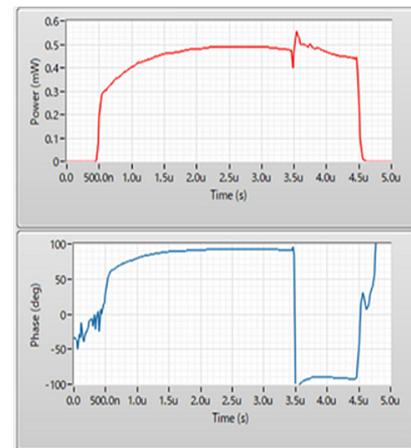
信号発生器プログラムによる RF 波形の整形手順を Fig. 4 と以下に記す。

- (1) 矩形出力 RF(a)を作成
- (2) 作成した RF 信号をクライストロンへ入力
- (3) クライストロンから出力された RF 波形(b)を測定
- (4) 波形(b)に対してパワーの振幅を規格化(b')
- (5) 振幅および位相に対して(a)-(b')を求め、これを RF 整形用の出力波形(c)とする

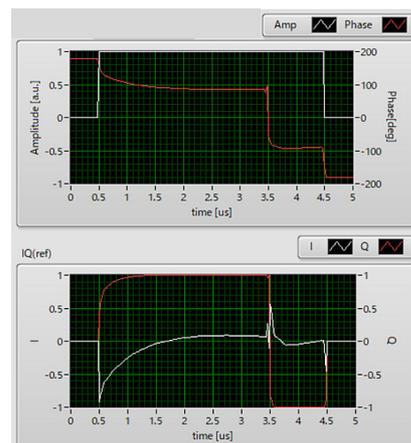
なお、各パルスでのモニタ波形には多少のばらつきが生じるため、波形整形に使用する際は平均したデータを使用している。



(a) Ideal output waveform (amplitude & phase)



(b) Measured waveform (amplitude & phase)



(c) Optimized output waveform

Figure 4: Process of waveform shaping.

#### 4.1 クライストロン出力波形の最適化

実際のシステムにおいて RF 整形の手法を使用し、クライストロン出力波形の最適化をおこなった。試験結果を Fig. 5 に記す。表示波形における各プロットは

- FWD1(白): クライストロン出力
- FWD2(緑): パルスコンプレッサー出力
- FWD3(黄): ダミーロード入力

である。図の上段がパワー、下段が位相を示す。

試験時に設定した LLRF は入射器の運転で使用する波形と同じ全幅4マイクロ秒の方形波で、パルスコンプレッサーからの出力を得るために立ち上がりから 3  $\mu$ s 後に位相が 180 度変化するように設定した。

理想的にはモジュレータ電源から 4  $\mu$ s の平坦部を持つ高圧がクライストロンに印可される。クライストロンで増幅された RF はこの高圧波形の影響によって振幅と位相が変化するため、運転に使用するモジュレータ電源では平坦な高圧出力を得るように内部の CR 回路を調整する。この作業は実際の出力を確認しながら、高圧回路内の調整をおこなうため、危険を伴う作業となる。通常、新規電源の導入後や高圧部品の交換時に調整を実施する。

試験時に使用した K-300 電源では出力補正回路が組み込まれており、運転用のモジュレータ同様に高圧の平坦度を確保している。今回の試験時はピーク出力を上げるため、メーカー技術者による電源内の補正回路を OFF しており、出力がなだらかに変化する状態で運転をおこなった。その結果、Fig. 5-(a) FWD1 では高圧波形の影響を受け、振幅・位相ともに変化している。

この状態からクライストロン出力(FWD1)の振幅を保持した状態で位相補正をおこなった出力が Fig. 5-(b)となる。実際に FWD1 の位相が一定となっている。なお、パルスコンプレッサー出力(FWD2)に関しては、位相反転前後での位相の流れが見られるが、これはパルスコンプレッサーの周波数調整不足によるものであり、調整をおこなうことで改善することが可能である。

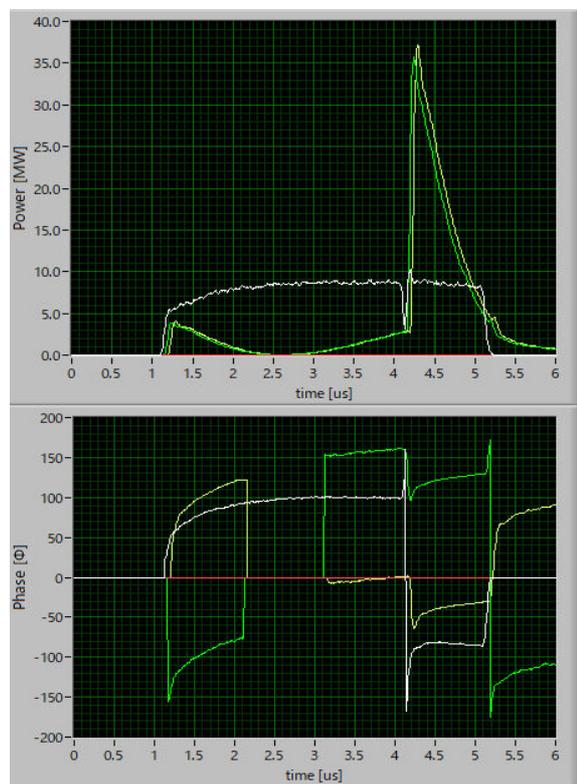
#### 4.2 多バンチビーム加速用波形

現在はパルスコンプレッサー出力ピークの両脇で加速電圧が同じになるタイミングで2バンチ加速を行っている (Fig. 6-(a))。次に4バンチ加速を想定する場合、パルスコンプレッサーの出力を大きく変調させた波形が必要となる。これは加速管のパラメータに依存するので、Fig. 6-(b)に新型加速管[5]を使用する場合の運転波形と加速電圧、Fig. 6-(c)にクライストロン波形とパルスコンプレッサー出力波形を示す。これに合わせるように作成した RF 波形を Fig. 7 に記す。Figure 7-(a)は信号発生器の出力波形、Fig. 7-(b)がクライストロンから出力された波形である。

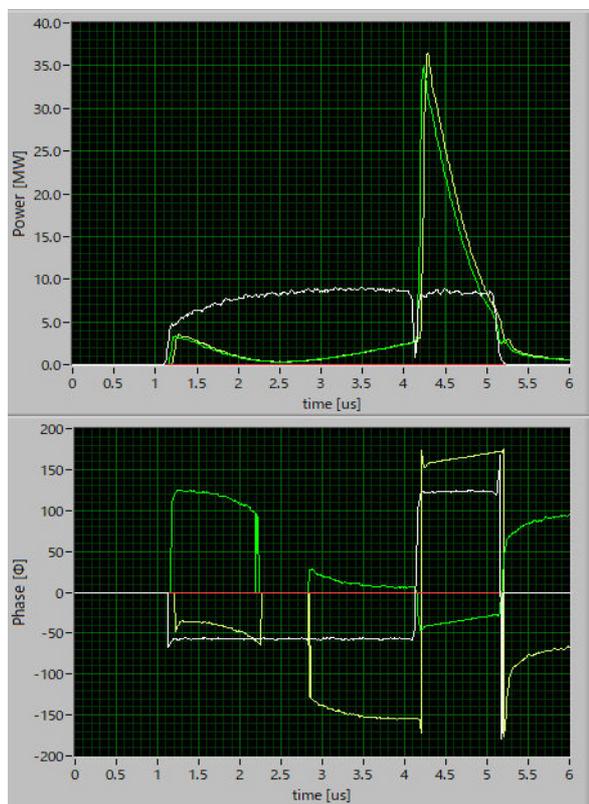
信号発生器で出力する波形は、これまでと同様にまず理想的な RF 波形を作成・出力し、実際にクライストロンから出力された信号を観測、基準波形へフィードバックをおこなった。通常の波形におけるパルス幅が 4  $\mu$ s に対し、多バンチビーム加速を想定した波形ではパルスの全幅/位相反転後の幅が 4.2/1.25  $\mu$ s となる。

入射器で使用している S バンド加速管[5]では入力された RF がおよそ 0.5  $\mu$ s の時間をかけて加速管内に充填された後、実際にビームを加速する電場が発生する。今回生成した波形では、位相反転後の振幅と位相を変調し

ながら出力波形の位相を一定に保持するよう調整した。

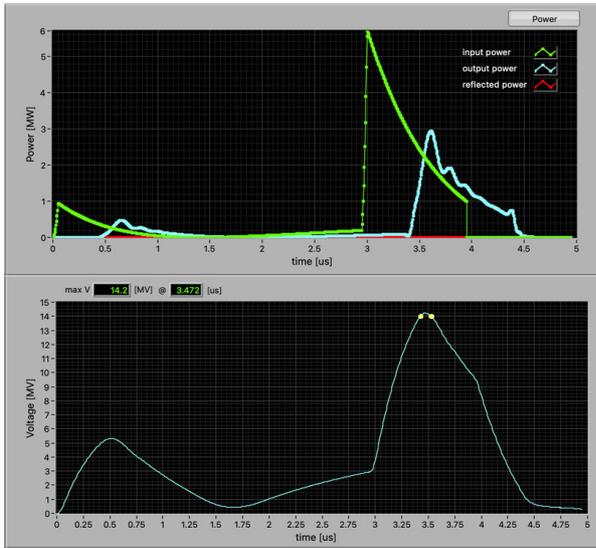


(a) Waveform before shaping

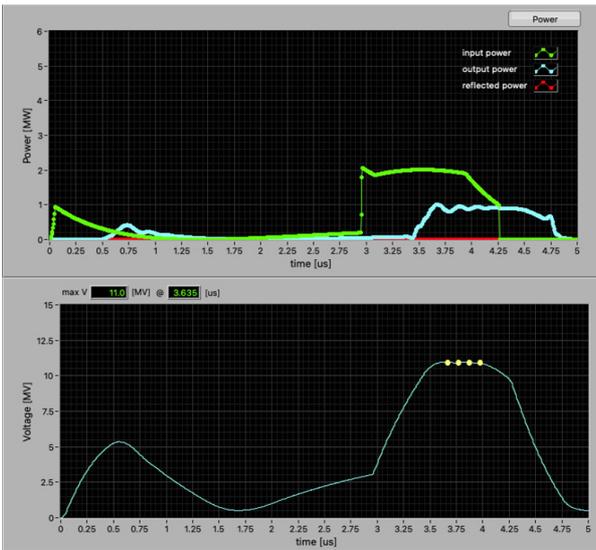


(b) Waveform after shaping (only the phase)

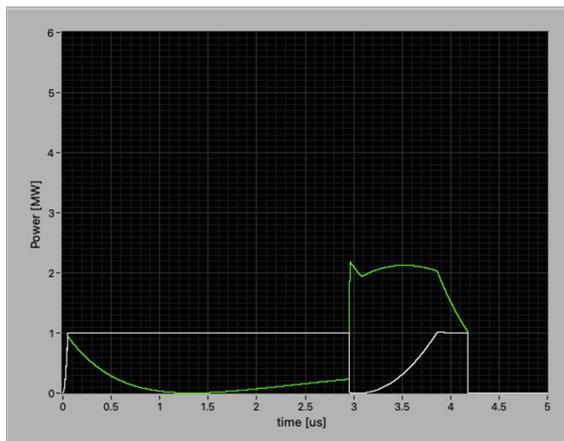
Figure 5: Optimized klystron output RF signal.



(a) 2bunch beam acceleration.

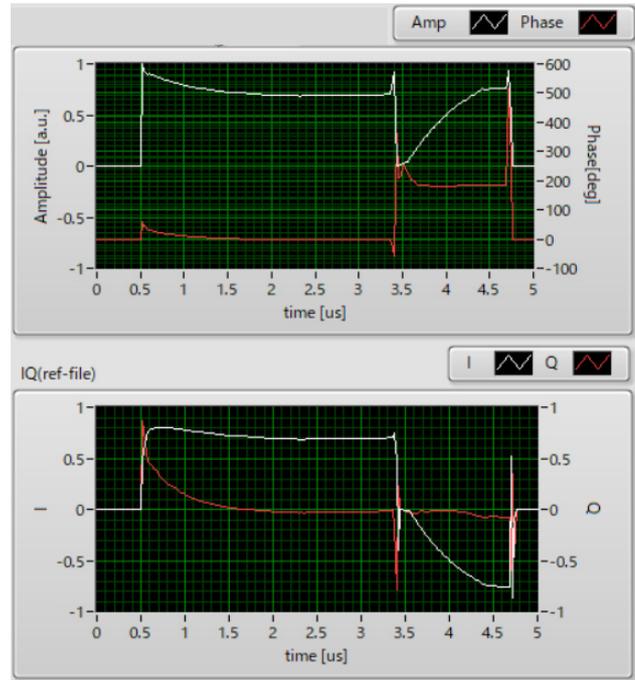


(b) 4bunch beam acceleration.

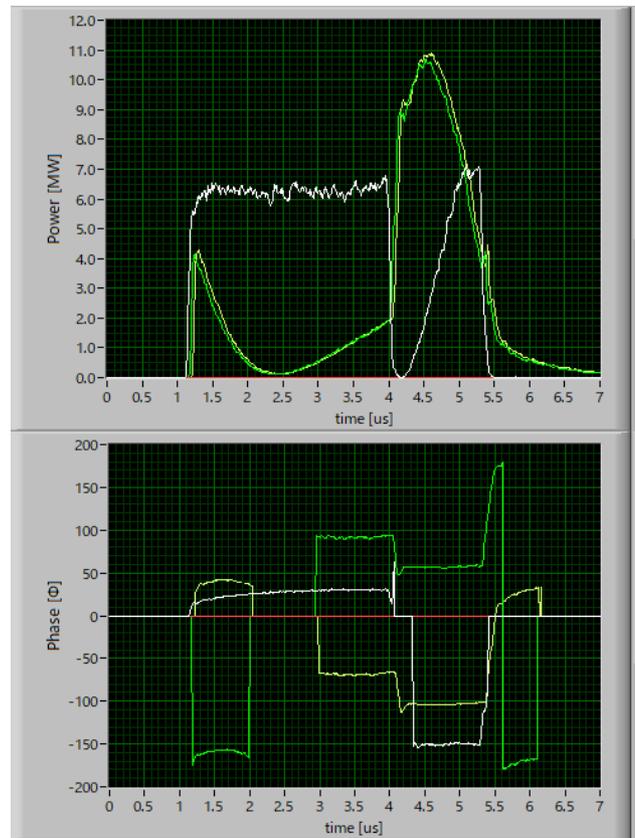


(c) Output waveform (Klystron & pulse-compressor)

Figure 6: RF waveform for multi bunch beam acceleration.



(a) Configured waveform.



(b) Output waveform (amplitude & phase)

Figure 7: Generated RF waveform for multi bunch beam acceleration.

調整の結果、パルスコンプレッサーで増幅された RF のピークパワーは通常の波形に比べて低下するが、この波形を加速管に入力すると約  $0.4 \mu\text{s}$  の一様な加速電界が生じ、4 バンチのビームを同じエネルギーと位相で加速することが可能となる。機器保護を考慮して、クライストロン運転出力を低く設定した試験のため、ノイズが大きく、振幅波形も設計からのずれがあるが、今後、変調システムの精度や確度を上げていく。

## 5. まとめ

今回、加速管試験施設にて RF 信号発生器を用いたクライストロンおよびパルスコンプレッサー出力の補正試験をおこなった。クライストロン出力の補正では出力信号をモニタし、信号発生器の基準波形に対してフィードバックをおこなうことで、理想的な出力波形が得られた。また、パルスコンプレッサー出力波形に対しても、同様の手法でクライストロン出力波形を最適化することにより理想的な波形を確認した。

今後、入射器運転において多バンチビーム加速が検討されており、また、現状の 2 バンチ運転においても高

い安定化が要求される可能性を踏まえ、今回の試験で使用したパルス変調法を加速管試験施設に導入し、長期試験などをおこなっていく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Natsui, “入射器の概略・全体”, 高エネルギー加速器セミナー-OHO19, Japan, September 10-13, 2019, [http://accwww2.kek.jp/oho/oho19/OHO19\\_txt/03\\_Natsui\\_Takuya.pdf](http://accwww2.kek.jp/oho/oho19/OHO19_txt/03_Natsui_Takuya.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 Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, October 18 - 21, 2022.
- [3] S. Matsumoto *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器での Scandivova K-300 モジュレータのテスト”, Proceedings of the 22th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, August 6 - 8, 2025.
- [4] <https://www.ni.com/ja/shop/pxi.html>
- [5] H. Ego *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器用 S バンド加速管の開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Takasaki, Japan, August 9 - 12, 2021.