

# 電子・陽電子入射器用 RF モニタの開発

## DEVELOPMENT OF RF MONITORING SYSTEM FOR KEK INJECTOR LINAC

片桐広明

Hiroaki Katagiri

High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory

### Abstract

KEK 電子・陽電子線形加速器に於いて、SuperKEKB LER/HER、PF、PF-AR の 4 リング同時入射運転に対応した RF モニタを開発した。同時入射運転では、50Hz のパルス毎に大電力 RF 源の出力タイミングや位相が変化するため、RF モニタには 50Hz で確実にデータ取得し、ビームモード(入射先のリング)毎に振り分けることが要求された。アナログ I/Q 検出器、ADC/DAC ボード、FPGA ボードから構成される RF モニタユニットを新たに開発し、この要求を達成した。FPGA に組み込んだイベントレシーバ回路によりビームモード情報を直接受信する手法は、開発当時では前例のないことであった。RF モニタは約 60 台の大電力 RF 源を常時監視し、加速器の安定運転に寄与している。RF 源で異常が発生した際のデータを自動的に保存することが可能となり、維持管理にも役立てられている。最近では RF モニタの測定値を使用してフィードバック制御を行うなど、ビーム調整への利用も進められている。

### 1. はじめに

KEK 電子・陽電子線形加速器(入射器)では SuperKEKB 計画のためのアップグレードの一つとして、RF モニタシステムを更新した[1]。入射器では 2009 年に複数リングへの同時入射運転を開始し[2]、現在は SuperKEKB HER 及び LER、PF リング、PF-AR リングへの同時入射を行っている。これら 4 つのリングでは入射ビームのエネルギーが異なり、大電力 RF 源から供給する RF パルスのタイミングや位相を 50 Hz 運転のパルス毎に切り替えることで、4 種類のビームを供給している。RF 源の振幅・位相を測定する RF モニタには、50 Hz で取りこぼしなくデータを取得し、入射先のリングを表すビームモード毎にデータを振り分けることが求められた。KEKB 建設期に導入された以前の RF モニタ[3]では、ハードウェアの能力の不足により要求を満たすことが困難であったため、新たなシステムを導入することにした。

新しい RF モニタ開発の詳細と、その成果について報告する

### 2. RF モニタシステムの概要

Figure 1 に入射器のクライストロンギャラリに設置された大電力 RF 源と、RF モニタシステムの主要ハードウェアを収容する計測ラックの位置関係を示す。入射器では上流から A,B,C,1,2,3,4,5 のセクターと呼ばれる単位ごとに装置の管理や制御がなされている。大電力クライストロン、パルス電源、パルス圧縮装置の SLED から構成される大電力 RF 源は、入射器の全長に渡り約 60 台設置されている。計測ラックは 30 台設置され、次章で述べる RF モニタユニット 2 台を収容するほか、RF 源 2 台分のモニタ信号と、2856 MHz の基準信号、114.24 MHz のクロック信号が配線されている。ラック本体とモニタケーブル類は以前のシステムから継続して使用している。Figure 2 は RF モニタシステムのブロック図である。新たに導入した RF モニタユニットが、クライストロン出力進行波(KLY Pf)、SLED 出力進行波(SLED Pf)及び反射波(SLED Pb)、

加速管出力(ACC out)の 4 系統の信号を常時測定する。以前は複数の信号をスイッチで切り替え逐次測定していたのに対して同時測定が可能となり、各モニタ信号の間の相関が明確に得られるようになった。



Figure 1: Layout of RF source and RF monitor rack.

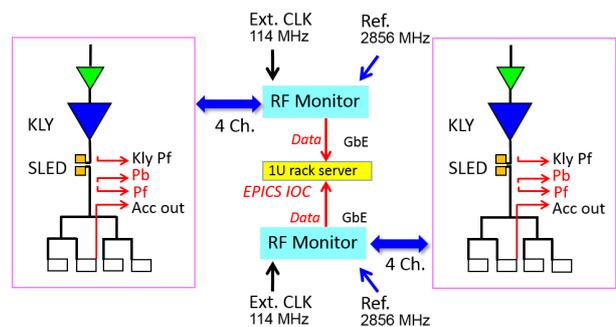


Figure 2: Block diagram of RF monitor system.

Table 1: Comparison to the Previous Monitor System

	PREVIOUS SYSTEM	NEW SYSTEM
Specification of ADC	8bit, Max 1 GHz	14bit, 100/114 MHz
Phase measurement range	<40 deg.	360 deg.
Number of RF input channels	8CH (selective)	5CH(simultaneous sampling)
50Hz data acquisition	NG(25 Hz)	OK
Identification of the beam modes	NG	OK
Amplitude/Phase precision	0.15 %rms, 0.2 deg. rms	0.1 %rms, 0.1 deg. rms

Table 1 に新旧システムの仕様、性能の比較を示す。旧システムでは、ピークパワーセンサと位相検出器が検出した振幅波形と位相波形を VXI 規格のデジタイザで捕捉していた。デジタイザの能力に制限があり、50 Hz のデータ取得ができなかった。分解能も不足しており、振幅・位相ともに測定範囲を狭め、パルス波形のピーク部に限定することで測定精度を確保していたことから、同時入射運転によりパルス毎に位相が大きく変化すると、追従できなかった。

### 3. RF モニタユニットの開発

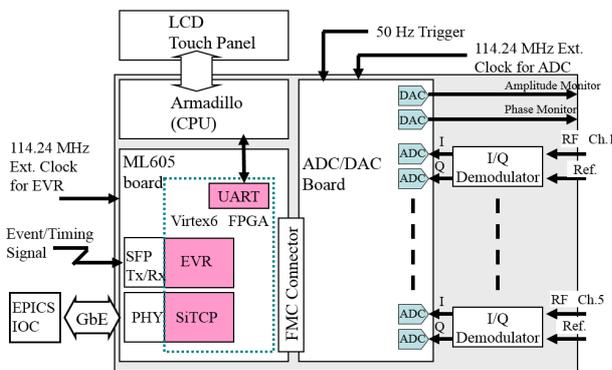


Figure 3: Block diagram of RF monitor unit.

#### 3.1 振幅・位相測定範囲と分解能の両立

Figure 3 は RF モニタユニットの概略図である。2856 MHz の RF 信号をアナログ I/Q 検出器を用いてベースバンドの I (cos 成分) と Q (sin 成分) に分け、RF 励振系やトリガシステムに同期した 114.24 MHz のクロックを用いて 14 bit ADC でサンプリングすることで、パルス波形全体の捕捉と必要な分解能を両立させた。大電力クライストロンが出力する約 4 $\mu$ s 幅の RF パルスは、SLED により約 1 $\mu$ s 幅でピーク値を高めたパルスに成型される。SLED 出力パルスの立ち上がり時間は約 100ns で運用されている。114 MHz クロックならばパルス立ち上がり部を 10 点程度捕捉する事ができ、時間分解能は十分である

と判断した。時間軸方向の波形捕捉範囲は加速 (ACC) タイミング 1024 点 (約 9 $\mu$ s)、待機 (STB) タイミング 1024 点とした。ACC はビーム加速に使用、STB は RF 出力タイミングを 100 $\mu$ s 遅らせ加速に使用しないモードである。パルス波形の捕捉はビームトリガ検出時点で開始することで、ビーム出力タイミングを基準とし、RF パルスのジッターやタイミング変化を確実に検出できるようにした。

#### 3.2 50Hz データ取得のための設計

RF モニタユニットの測定データを入射器運転で利用するには EPICS への登録が欠かせない。FPGA ボードには、開発期間とコストの削減用するため既製品 (Xilinx 社 ML605 評価ボード) を採用した都合上、FPGA 内に EPICS IOC を構築することは困難であった。そこで外部に Linux サーバを置き、ギガビットイーサネット (GbE) で接続することにし、FPGA に GbE インターフェースの SiTCP を組み込んだ。ADC が捕捉したデータを FIFO に蓄積し、1 パルス分のデータ取得が完了するとサーバに転送する。1 パルス当たりのデータ量は 50 k バイト程度であり、50 Hz のデータ取得に十分な通信速度が確保されている。また I/Q 信号から振幅、位相への変換には平方根や三角関数など浮動小数点演算が必要となるが、この部分はサーバ計算機に任せることで、FPGA の組み込み回路を簡略化し、動作速度を高めた。

#### 3.3 イベントレシーバの組み込み

入射器ではビームモードとタイミングはイベントジェネレータ (EVG) とイベントレシーバ (EVR) とで構成されるイベントタイミングシステムが管理している [4]。EVG はビーム繰り返し情報を基にイベントコードを生成し EVR に配信する。ビームモードの識別は EPICS を経由してソフトウェアで行うことも検討したが、この場合ネットワークでの遅延の恐れがあり、測定データとの同時性が保証されない。ML605 は光ファイバを通信機器に接続するために用いられる SFP ポートを装備しており、光トランシーバを装着すればイベント信号を取り込むことは可能である。そこで、EVR を FPGA に組み込み、ビームモードの識別をハードウェアで行うことにした。入射器の EVG や EVR が既存のハードウェアで構成されているのに対し、独自に作成した EVR を FPGA に組み込むことは、当時ではほぼ前例のないことであった。また MRF 社がソースコードを公開しておらず、イベント信号のデータ構造など自力で解析する必要があった。

イベント信号は高速シリアル通信の 8b/10b で符号化されている。これは 8 ビットのデータを 10 ビットのパターンに変換し、データとクロックを同じ経路で同時に配信するものである。まず、Xilinx 社の汎用高速シリアルインターフェースである GTX トランシーバを使用し、8b/10b の復号化回路を試作、イベント信号を受信する試験を行った。この回路では 114.24MHz のクロック 1 周期ごとに 16 ビット幅のデータを受信する。Figure 4 は MRF 社製 EVR のユーザーガイドに記載されているイベント信号の構造である。入射器では Fig. 4 の B を採用している。この情報からイベントコードは受信データの上位 8 ビットに格納されるものと予測したが、組み込み EVR では下位 8 ビットに割り当てられていた。また Table 2 に示した、制御に使用されるイベントコードが配信される頻度は 50 Hz の周期

内で数回と低く、それ以外のクロック周期のほぼ半数には 8b/10b のビット・アラインメントに使用される K28.5 コードが挿入されていることも判明した。

後にイベントタイミングシステムでは、データバッファ領域を利用し、制御情報を配信する運用が開始された。このなかには、ダンピングリングのタイミング制御データや、RF 励振系の位相制御データのほか、ショット ID と呼ばれる、パルスカウント数の識別コードが含まれる。RF モニタでもショット ID を取得すると、ビーム位置モニタ等、他のモニタと測定データの同期を取ることができるようになる。そこで組み込み EVR にショット ID を取得する機能を追加した。データバッファは 16 ビット幅 1025 ワードの配列として定義されており、ショット ID はこの配列の 1 要素に格納される。ショット ID を抽出するには、まずデータバッファ配列の先頭を検出する必要がある。前出の EVG ユーザーガイドの情報から、8b/10b の K28.0 コードが検出されたクロックサイクルを配列の先頭と判断することにした。さらに Fig.4 から、Distributed Bus と Data Buffer が交互に配信されるため、4 サイクル分の受信データを保持し、Data Buffer の上位 8 ビットと下位 8 ビットを結合することでショット ID 抽出することが可能となった

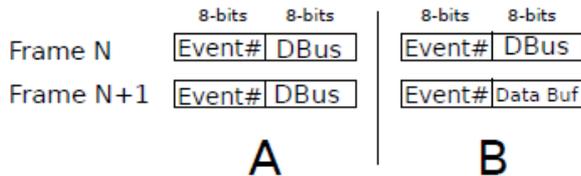


Figure 4: Allocation schemes of the event-timing signal.

Table 2: Sample of Event Code

KEKB e+ (41~50) kbp		
41	準備イベント(42の1パルス前に発生)	出力ポートDELAY設定(ACC/STB)
42	ダブルパルス 1st. KLY HV	
43	ダブルパルス 2nd	
44	Main O7 Level 信号に使用	DELAYを大きく調整するために使用
45	SHB HV	
46	RF Gun用	
PF (51~60) pfe		
51	準備イベント(52の1パルス前に発生)	出力ポートDELAY設定(ACC/STB)
52	ダブルパルス 1st. KLY HV	
53	ダブルパルス 2nd	
54	Main O7 Level 信号に使用	DELAYを大きく調整するために使用
55	SHB HV	
56	RF Gun用	

## 4 アプリケーションソフト

### 4.1 Waveform viewer

Waveform Viewer は、RF モニタユニットが取得した振幅・位相波形をリアルタイム表示するソフトウェアである。Figure 5 は KL\_52 (5 セクターの 2 番目) ユニットのクライストロン出力進行波を表示している。上が振幅波形、下が位相波形である。表示領域の前半が ACC タイミング、後半が STB タイミングとなる。プルダウンメニューから、ユニット番号、信号種類、ビームモードを選択することができる。さらに、振幅・位相とも、ピーク値・平均値を計算するためのゲートを設定することができる。Figure 5 の例では、位相反転後の 10 点をカバーするようゲートを設定している。EPICS IOC は設定されたゲート範囲内のピーク値・平均値を求め、アーカイバに蓄積する。蓄積されたデータは、Archive Viewer によりトレンドグラフとして閲覧することができる。

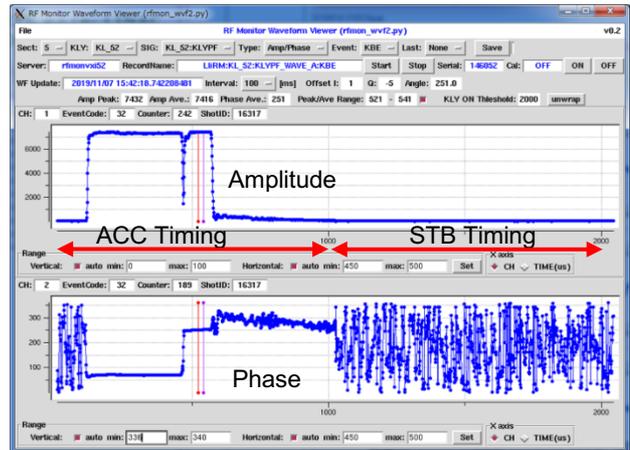


Figure 5: Waveform viewer,

### 4.2 異常時の波形データ保存

大電力 RF 源 1 台ごとに RF モニタユニットを設置し、4 系統の信号を 50 Hz の繰り返しで常時監視することが可能となった。この機能を活用し RF 源で異常が発生した際の波形データ自動的に保存するプログラムを運用している。

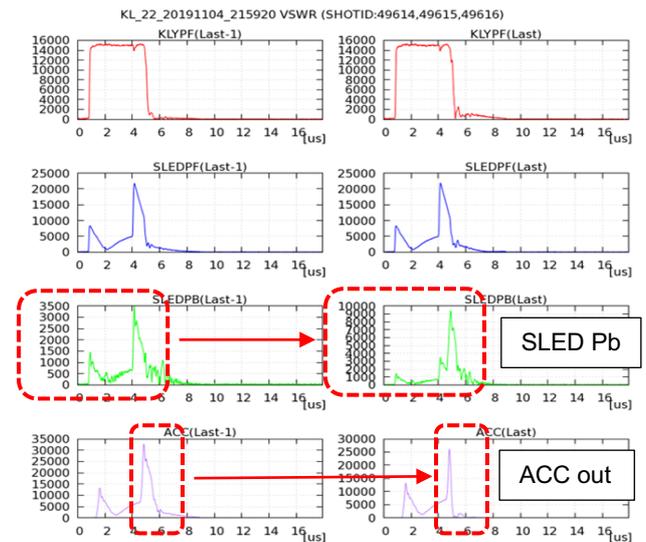


Figure 6: Pulse waveform at VSWR detection.

Figure 6 は VSWR のセーフティインターロックが作動し RF 源がトリップする直前の波形データである。右列が VSWR 検出時、左が 1 サイクル前の正常時の波形である。ACC out 波形の変化から、加速管を通過せずに反射した電力により SLED への反射波 (SLED Pb) 振幅が正常時の約 3500 から 9000 程度 (値は FPGA 内部で処理するデジタル値) に増大している。複数の信号の同時計測が可能となったことで、それらの相関からトラブル時の原因究明により有効なデータが得られるようになった。

Figure 7 は大電力クライストロンのパルス欠け [6] が発生した際の波形である。パルス欠けとはクライストロン出力パルス幅が所定の値よりも短くなる現象であり、クライストロン管内での放電が原因と考えられる。Fig. 7 の右がパルス欠け検出時、左が 1 サイクル前の正常時である。

Fig. 6 のように SLED への反射が増大しているわけではなく、KLY Pf 波形の変化からクライストロン出力パルス幅自体が通常の  $4\mu\text{s}$  から約  $2.5\mu\text{s}$  と短くなっていることがわかる。ショット ID を用い、他のモニタのデータも含めて解析した結果、パルス欠けによる入射ビームエネルギーの変化が、リングの蓄積ビームにも影響する可能性があることが判明している。パルス欠け自動検出は、頻度の高いユニットではクライストロンの印加電圧を下げて運用するなど対策に役立てられている。

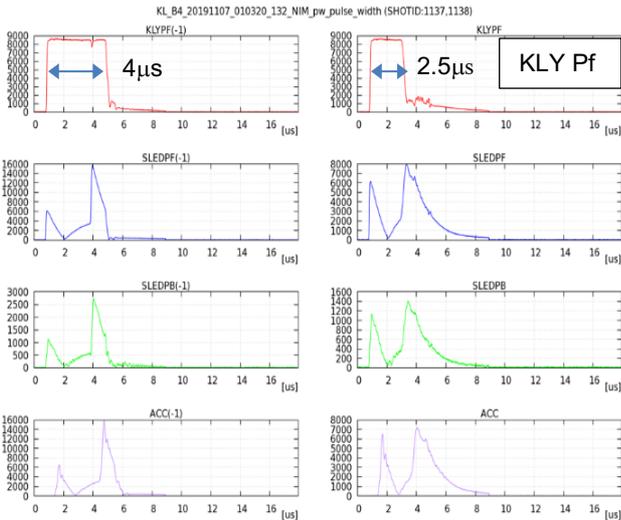


Figure 7: Shortened-pulse waveform

## 5 ビーム運転への応用

### 5.1 フィードバック制御

新たに導入した RF モニタは、RF 源の安定度監視だけでなく、ビーム調整にも利用され始めている。Figure 8 は加速管の冷却水温度と KL\_B3 及び KL\_B5 (B セクターの 3 番目と 5 番目) ユニットの加速管出力信号の位相測定値をトレンドグラフ表示したものである。冷却系のトラブルにより水温制御が正常に行われておらず、温度変化に伴い位相測定値が大きくなっていった。位相の変化はビームエネルギーに影響し、その変化が大きいとビーム入射の妨げになる。Fig.8 のフィードバック ON の区間では位相測定値が一定になるように、大電力クライストロンへの入力 RF 位相を自動的に調整している。水温の変化は依然としてあるが、位相は一定の値を維持していることがわかる。

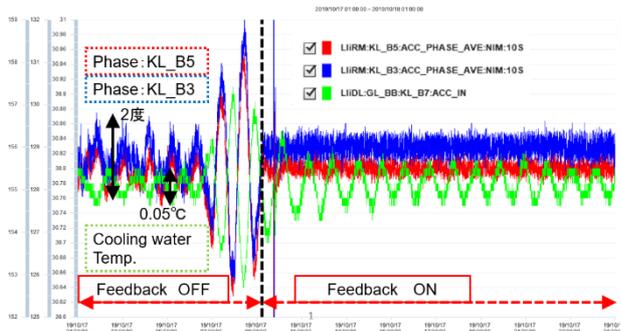


Figure 8: Automatic phase adjustment using RF monitor.

### 5.1 ビーム誘起波測定

ビーム誘起波とは、ビームバンチが加速管を通過する際に発生する RF 電力である。ビーム加速中に大電力クライストロンを ACC モードから STB モードに設定すると、加速管出力ポートではビーム誘起波と大電力 RF パルスが時間的に分離した状態で観測される。RF を停止させず STB とするのは、加速管の熱負荷の変化による測定への影響を避けるためである。PF と TRISTAN 実験期間のロングパルスビームでは位相測定が十分可能な誘起波電力が得られており、RF の位相調整に用いられていた[5]。KEKB 実験以降のシングルバンチビームでは、誘起波と大電力高周波パルスとの間には、電荷量にも依るが概ね 40dB 以上のゲインの差があり、測定器のダイナミックレンジを越えてしまう。旧システムでは位相検出器に高速に ON/OFF 可能な 30dB 減衰器を内蔵してダイナミックレンジの不足を補いビーム誘起波測定を行ったが、期待された測定精度が得られず位相調整には用いられなかった。現行の RF モニタ導入当初、誘起波測定は想定していなかったが、ビーム診断や調整に誘起波を利用する案が出されたことから、旧システムで使用していた ON/OFF 式減衰器を流用し誘起波測定を試みた。ON/OFF 式減衰器は Figure 9 に示したように、SPDT スwitch を 2 つ用いて、減衰器を通過するパスとスルーを切り替える構造で、ON/OFF での位相差は  $\pm 1$  度以下に抑えられている。陽電子生成用一次電子ビーム (1 バンチ当たり約 10 nC) では、30dB の減衰器で誘起波と大電力 RF が同程度の振幅で観測された。1 nC のビームでは誘起波の振幅が小さく測定精度が悪化したため、40dB 及び 46dB の減衰器も試験した。これにより誘起波と大電力 RF の相対的な振幅の差を小さくなるが、RF モニタユニットへの入力レベルも低下するため、ローノイズアンプを挿入し入力レベルが適正値となるよう調整した。Figure 10 にビーム誘起波の測定例を示す。

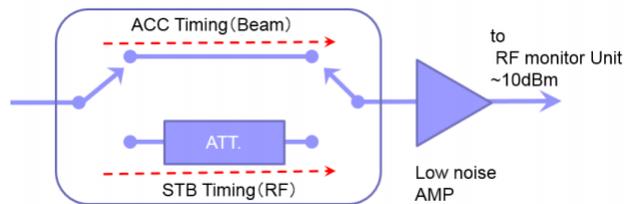


Figure 9: Block diagram of the attenuator unit.

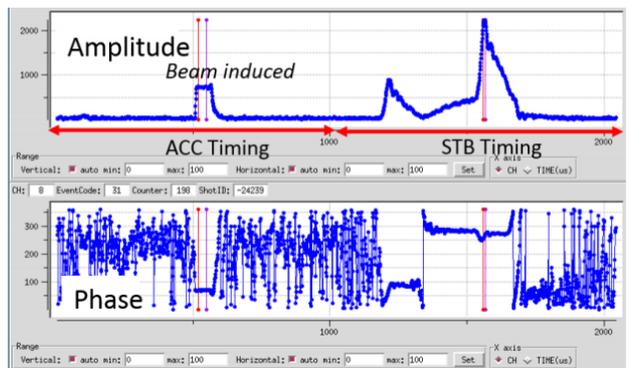


Figure 10: Measurement of beam-induced field.

## 6. まとめ

電子・陽電子線形加速器で、SuperKEKB で求められる 4 リング同時入射運転に対応した RF モニタを導入した。60 台の大電力 RF 源 1 台ごとに RF モニタユニットを設置し振幅・位相の常時測定が可能となった。IQ 方式を採用した RF モニタユニットにより、50Hz データ取得を達成、振幅・位相波形全体の取得と要求される分解能を両立させた。ビームモード及びパルスカウントの識別は、イベントレシーバを FPGA に組み込み、イベントタイミングシステムから配信されるイベント信号を直接受信することで実現した。インターロック作動時やパルス欠け発生時の波形データを自動的に保存することが可能となり、RF 源の維持管理にも役立てられている。ビーム誘起波測定やフィードバック制御など、RF モニタのビーム調整への利用が進んでいることから、測定精度、安定性のさらなる向上が求められる。温度に依存した測定値の変動や、基準信号ラインへのノイズ混入による測定精度の悪化が確認されており、対策が必要である。

## 謝辞

RF モニタの開発は入射器低電力 RF グループが協力して進めてきた。イベントレシーバの開発や試験、ソフトウェアの開発では制御グループの支援も得ている。技術賞に推薦していただいた三浦孝子准教授、応募に関して助言いただいた橋本義徳技術調整役、山野井豊技術調整役、大森千広教授、松本修二教授、松本利広准教授、サポートいただいた皆様に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] H. Katagiri et al., “RF Monitor System for SuperKEKB Injector Linac”, Proceedings of the IPAC18, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 – May 4, 2018, WEPAK016.
- [2] M. Satoh et al., “First Simultaneous Top-up Operation of Three Different Rings in KEK Injector Linac”, Proc. LINAC’10, Tsukuba, Japan, 2010, pp.703-707.
- [3] H. Katagiri et al., “RF Monitoring System in the Injector Linac”, Proceedings of the 7th international conference on accelerator and large experimental physics control systems, ICALEPCS’99, Trieste, Italy, 1999, pp. 69-71
- [4] T.Kudou., et al., “The Event Timing System in KEK Linac”, Proceedings 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, August 4-6, 2010
- [5] H. Hanaki et al., “Phase Control System of the KEK 2.5 Linac”, in Proc. 1986 International Linac Conference, Stanford, California, USA, pp. 481-483
- [6] M. Yoshida, et al., “Study on Klystron RF Pulse Shortening and Development of Waveform Diagnostic FPGA Board”, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu, Japan, 20P030.