

ATF バケットセレクションおよびタイミングシステムのアップグレード案 UPGRADE PLAN OF THE BUCKET SELECTION AND TIMING SYSTEM AT ATF

梶裕志、内藤孝

Hiroshi Kaji*, Takashi Naito

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The upgrade of the ATF timing system is designed. It enhances the roles of the Event Timing System and suppress the maintenance effort of the timing system. The bucket selection function is included in the new Event Timing System. The degradation of the bucket selection ability at ATF is solved by changing its operation parameters. Besides, the new timing system provides the test environment of the White Rabbit system. The test operation of the ATF with the proto-type system was carried out, successfully, on July 9th, 2021 and the feasibility of the upgrade was confirmed.

1. はじめに

加速器タイミングシステムの伝統的な役割は、加速器ハードウェアに運転タイミングを通知することである。ビームライン上の個々のハードウェアの動作がトリガー信号（通知）で同期され、ビームの輸送が実現される。

しかしタイミングシステムの用途は、近年の加速器の大型化・複雑化に伴い拡大している。例えば KEK 入射器ではビームライン上ハードウェアの運転パラメータを同時に設定・変更し、4 つの実験リングへの 4 種類のビーム供給を 1 つのビームラインで実現している [1]。またタイミングシステムの時刻同期性能を応用した distributed DAQ システムも検討されている [2]。このようなタイミングシステムの役割の増加傾向は Higgs Factory に代表される次世代の大型コライダーではさらに拡大していくと考えられる。

KEK はタイミングシステムとして主に Event Timing System [3] を用いている。しかし同システムモジュールの供給は寡占状態であり、より大型化・長期化される将来加速器計画において「大量供給」「長期供給」「多様なプラットフォームニーズへの対応」に不安が指摘されている。

この解決策として、KEK ではオープンハードウェアのタイミングシステムである White Rabbit [4] の利用が検討され、すでに SuperKEKB 加速器には部分的に導入されている [5]。また独自のシステム開発も少しずつ始められており、今後も用途を拡大していく予定である。

KEK 先端加速器試験施設 (ATF, Accelerator Test Facility) は加速器要素技術の開発を目的とした試験型加速器である。対象となる次世代加速器として特に ILC [6] が挙げられるが、その他多くの次世代加速器開発にも門戸が開かれており [7]、White Rabbit モジュールの研究開発でも利用が予定されている。

本講演では ATF タイミングシステムの改造案について論じる。これは今後予定されている White Rabbit を用いた ATF 運転の前段階として検討されたもの

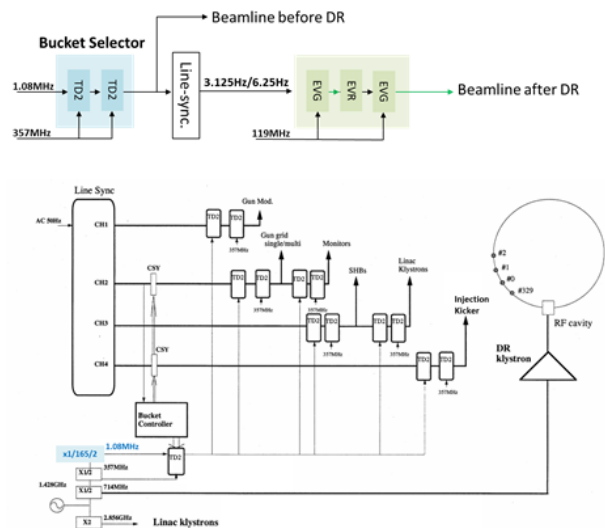


Figure 1: Schematic view of the ATF timing system: the upper figure shows the entire system with Event Timing System. The green part in the upper figure show the master EPICS IOC of the Event Timing System. The slave EPICS IOC is omitted here. The lower figure focuses on the ATF linac region. It consists of many TD2 modules.

で、この改造の実現後には KEK で開発された White Rabbit システムの動作検証等が予定されている。

2. ATF TIMING SYSTEM

2.1 タイミングシステム

ATF タイミングシステムは、入射部である linac、ダンピングリング (DR)、取り出しビームラインへ各種トリガー信号を配信している。このうち取り出しビームラインには Event Timing System が採用されているが [8]、残りの大部分はまだ “TD2” と呼ばれる旧式の delay モジュール [9] を直列・並列させた構造になっている。その詳細は文献 [8, 10] に譲るが、概略図を図 1 に示す。

TD2 などの delay モジュールを大規模に展開した

* hiroshi.kaji@kek.jp

タイミングシステムの最大の弱点はメンテナンスコストである。ビームライン各所に多数の delay モジュールを用意するだけでなく、各モジュールを同期させるための RF clock 入力もモジュールごとに用意する必要がある。もちろんこの RF clock 供給用の配線もトリガー信号線とは別に用意する必要がある。またこれら delay モジュールをネットワーク制御するならば、相当数の CPU モジュールも必要である。

運用上も、DR の周長補正などで RF clock の位相がドリフトした場合に、TD2 の出力タイミングに入力 RF の 1 clock 分のタイミング跳びがおきる問題がある。TD2 を大規模に展開したタイミングシステムでは、これがいつ・どこで起こったかを判別するのが非常に困難である。

2.2 RF バケット選択条件

ここで ATF linac から DR への入射の際に RF バケットを選択 (Bucket Selection) する条件について説明する。RF バケット選択は「選択された RF バケットが入射点を通過するタイミング」と「入射ビームが入射点に到達するタイミング」を合わせることで実現され、通常は入射ビーム側のタイミングを delay モジュールで制御する。この入射タイミングは基準となる revolution 信号にそれぞれの RF バケットに調整された delay を与えて作られる。

ATF では DR revolution を基にした基準信号に DR RF 周波数 714 MHz を 2 分周した 357 MHz clock の単位で delay を調整し、Bucket Selection を実施している。一般に「RF 周波数から delay 単位 clock への分周数」と「入射リングのハーモニック数」の関係は互いに素である (公約数を持たない) ことが要求され、これが満たされない場合には Bucket Selection の能力が低下してしまう。上述の RF 周波数からの分周値 “2” と DR ハーモニック数 “330” の間には公約数 “2” が存在するため、DR RF バケットの半分には linac パルスを入射することができない。

3. ATF タイミングシステム新デザイン

この節では ATF タイミングシステムの新デザインを紹介する。これは前節で議論された問題点を改善するアップグレード版であるとともに、White Rabbit の実装と動作試験を実現する仕様になっている。

3.1 Event Timing System

図 2 に新デザインの Event Timing System 部分の概略図を示す。新デザインでは Event Timing System からのトリガー配信を DR 上流の linac へも拡大し、TD2 を無くすことでそれに類するメンテナンスコストを低減する。またトリガーライン最上流の TD2 が担っていた Bucket Selection 機能も Event Generator (EVG) の delay 機能により補うことで、メンテナンス性向上とともに Bucket Selection 性能の向上も行う。

マスター IOC の構成は、従来システムで中段の Event Receiver (EVR) が担っていた delay 制御を EVG に実装することでモジュール数を EVG の 1 台だけにする。モジュールの種類についてもすでに生産

が終了した VME-EVG-230, VME-EVR-230RF から、SINAP が開発と供給を行っている VME-EVO, VME-EVE, STD-EVE [11] などに変更する。

EVG の入力 RF clock は 714 MHz とし、Event Timing System の動作クロック (Event clock) はそれを 7 分周した 102 MHz とする。DR RF 周波数からの分周値 “7” と DR ハーモニック数 “330” は互いに素であるため、Bucket Selection の能力低下は起こらない。

Event 送信には EVG の sequence-Event 機能を用いる。EVG の sequence RAM に登録する Event リストを表 1 にまとめた。この sequence を 3.125 Hz でトリガーし、リストされた Event がそれぞれに指定された入力トリガーからの delay で送信される。6.25 Hz に相当する Event は 1 回の sequence で 2 度送信することで実現する。Event モジュールは最大 $2^{32} - 1$ clock までの delay を設定でき、このように 300 ms に及ぶ delay も課すこともできる。取り出し側トリガー用 Event (#61, #31) は linac 側用の Event (#60, #30) よりも 140 ms 遅く出力される。ビーム運転における DR 蓄積時間 (入射タイミングと出射タイミングの差) は 220 ms だが、残りの 80 ms の delay は EVR 側に課される。実際には表 1 の delay 値に Bucket Selection の delay 値を足したものが、EVG の sequence RAM に書き込まれることになる。

EVR には上述の 80 ms の他に、トリガー信号を各ハードウェアが持つ固有の運転タイミングに調整するための delay が課される。delay を EVG, EVR に分けて課すもう一つの理由は、EVR を 6.25 Hz (160 ms 間隔) で動作させるためである。そのためには各 EVR モジュールに課す delay は 160 ms 未満でなければならない。

3.2 White Rabbit システムによる機能拡張

White Rabbit は多機能型のタイミングシステムモジュールであるが、そのうち以下の 2 つの機能の ATF での動作試験を考えている。

Beam Gate system

電子銃や入射キッカー電磁石などのパルス動作機器へのトリガー信号の供給・停止を制御し、ビーム運転自体の ON/OFF を制御する信号を KEK では “Beam Gate” と呼んでいる。このとき ON/OFF を決定する論理回路は、一般に NIM レベル電気信号の回路モジュールかもしくは FPGA 上に実装される。しか

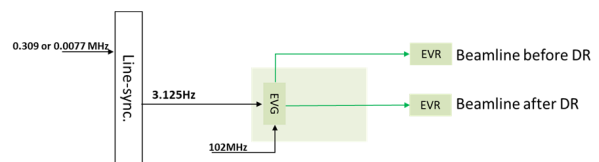


Figure 2: Schematic view of the upgrade design of the ATF timing system: the Event Timing System is utilized for the ATF linac beamline and the extraction beamline. Both slave nodes are directly connected with EVG configured by the VME-EVO module.

Table 1: List of the sequence-Event for each injection trigger: the Event-codes are listed together with its delay from the input timing.

Event code	Delay (ns)
#60	0
#30	8.4
#61	139999160
#31	139999168
#60	160000000
#61	299999160
#32	299999168

しその出力制御信号の供給先が遠方の場合、電気信号を光信号へ変換する場合がある。

タイミングシステムモジュールのように光通信機能を持つ FPGA モジュールに「ON/OFF 決定の論理回路」「末端でのトリガー出力制御回路」を実装することができれば、信号輸送のためだけに行っている「電気 → 光 → 電気」変換を省略でき、その他の部分も大幅に簡略化可能である。

KEK では PCIexpress 型 White Rabbit モジュール (SPEC) を利用したプロトタイプシステムが完成したところであり、今回の ATF タイミングシステムのアップグレード後に動作試験を検討している。従来タイミングシステムでこの動作試験を行う場合、大量にある TD2 の 1 台ごとに制御信号を用意しなければならず、White Rabbit のスレイブモジュールも多数必要になる。新デザインのスレイブモジュール (EVR) は VME-EVE、STD-EVE であり、これらには INHIBIT 入力端子が実装されている。ここに White Rabbit からの制御信号を入力することで、1 つの制御信号で、モジュールから出力される全トリガー信号の ON/OFF を同期制御することが可能である。

Revolution and RF clock delivery system

White Rabbit システムには “RFoWR (RF signal distribution over White Rabbit)” という機能がある。KEK ではまだこの機能に関する開発実績はないが、世界的には、例えば ESRF が開発に成功しており [12]、SPring-8 も運転での利用に向けて精力的に開発を進めている [13]。

その出力 RF clock の精度は「peak-to-peak の jitter で 10ps 未満」と多くの用途を満足させるものである。スレイブノード間の光配線にはリアルタイムの cable delay 補正があるため、温度によるケーブル長変化に起因する位相ドリフトも補正され、長期的な安定性も実現している。

ATF 運転で使用する同期された 2856 MHz, 1428 MHz, 714 MHz, 357 MHz のすべてを White Rabbit で取り扱うことができる。課題となっているのは revolution を生成するための分周で、例えば SuperKEKB のハーモニック数 5120 のような大きな分

周値を SPEC モジュール内に実現することはできていない。

4. プロトタイプ試験

新デザインの feasibility 調査ため、プロトタイプシステムによる ATF の試験運転を行った。プロトタイプシステムの構成は図 2 とほぼ同じだが、一部、現行システムの仕様を踏襲している。Event clock は、本来は 102 MHz だが、現行システムと同じ 119 MHz で動作させている。Bucket Selection 機能もまだ EVG に実装しておらず、Line-Sync. 上流にある TD2 が担っている。

図 3 は ATF に設置されたマスターノード (左)、スレイブノード (右) の写真である。マスターノードとしては SINAP 製の VME 型 EVG モジュール VME-EVO を実装した VME 型の EPICS IOC を構築した。CPU ボードは MVME5500 を用い、OS は VxWorks6.8.3 である。これらは SuperKEKB で運用実績のあるものを採用した。スレイブノードは standalone 型の EVR モジュール STD-EVE を設置した。現行システムは、2 つのスレイブノードで計 11 種類の信号を供給しているが、プロトタイプシステムでは 1 台のスレイブノードからそのすべての信号を供給する。

2021 年 7 月 9 日にプロトタイプによる ATF 試験運転を行った。図 3 でもわかるとおり、プロトタイプノードはそれぞれ既存の EVG、EVR ノードのすぐそばに設置し、並列に両方の信号ラインが生きた状態で試験を行った。これにより通常どおりに「linac→DR→取り出しビームライン」とビーム輸送する運転を確認したうえ、DR でビームエネルギーをランプさせてから取り出す運転も問題なく実現できた。

試験運転の成功により、秋以降の ATF 運転ではプロトタイプシステムが本格的運用されることになった。この決定は「今回のアップグレードデザインの一部がすでに実現した」と考えることもでき、これは大きな一歩だと言える。

5. まとめ

ATF タイミングシステムのアップグレードデザインを提案した。この案は、トリガー配信における Event Timing System の役割を拡大し、TD2 モジュールを取り除くことで、メンテナンス性を向上させる。また Event Timing System 自体も構成を整理することでモジュール数を減らし、さらに生産中止された VME-EVG-230, VME-EVR-230RF モジュールから、SINAP が供給する最新モジュールに変更する。

タイミングシステムのモジュール数の低減は、今後に予定している White Rabbit システムの動作試験にとっても適した環境になる。これはタイミングモジュールを制御する White Rabbit のスレイブノードも低減することができるからである。

2021 年 7 月 9 日にはプロトタイプシステムによる ATF 試験運転が行われた。この試験によりアップグレード案の feasibility が確認され、秋以降にはプロトタイプシステムの本格運用が決まった。これは今回

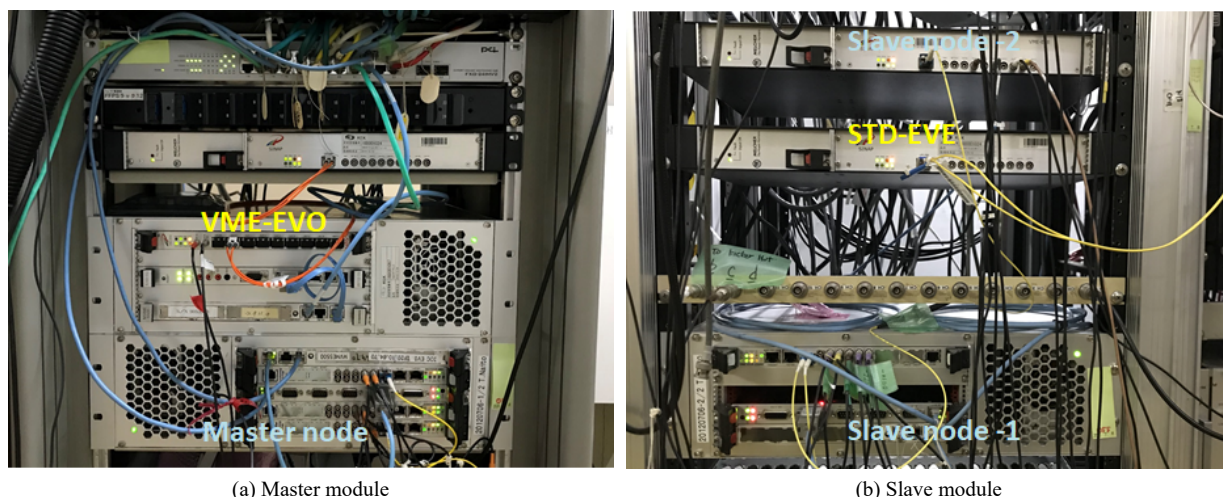


Figure 3: Pictures of master module (left) and slave module (right): the modules with the yellow label are the master (EVG) and slave (EVR) nodes of the proto-type system. The modules with the light blue label are those of the current Event Timing System.

の ATF タイミングシステムアップグレードにとり大きな一歩である。

謝辞

本研究は ATF 施設の皆様のご協力の基に実現いたしました。特に KEK 応用超電導加速器センターの照沼信浩教授、奥木敏行博士、関東情報サービスの塚田義則氏には、プロトタイプシステムの ATF 実装とビーム運転において多大なご協力をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Kaji *et al.*, “Injection Control System for the SuperKEKB Phase-2 Operation”, in *Proc. of 15th Annual Meeting of PASJ*, Nagaoka, Japan, 2018.
- [2] D. Lampridis *et al.*, “The Distributed Oscilloscope”, in *Proc. ICALEPCS2019*, New York, USA, 2019.
- [3] <http://www.mrf.fi>
- [4] <https://white-rabbit.web.cern.ch/>
- [5] H. Kaji *et al.*, “Performance Test and Initial Application of White Rabbit system at SuperKEKB”, in *Proc. of the 17th Annual Meeting of PASJ*, September 2 - September 4, 2020, Online.
- [6] <https://www2.kek.jp/ilc/en/>
- [7] ATF 利用意見交換会;
<https://kds.kek.jp/event/35387/>
- [8] Y. Tsukada *et al.*, “High precision trigger distribution for KEK-ATF using Event System”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of PASJ*, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.
- [9] T. Korhonen *et al.*, “Performance Evaluation of a High Bandwidth Timing Module”, KEK Internal, 96-3 1996.
- [10] T. Naito *et al.*, “Timing System for Multi-Bunch/ Multitrain operation at ATF” , Linac Meeting 2000, Himeji, pp. 234-236.
- [11] M. Liu *et al.*, “DEVELOPMENT STATUS OF SINAP TIMING SYSTEM” , in *Proc. of IPAC2013*, WEPME032,

Shanghai, China, 2013.

- [12] G. Goujon *et al.*, “Refurbishment of the ESRF Accelerator Synchronisation System Using White Rabbit” in *Proc. ICALEPCS2017*, Barcelona, Spain, 2017.
- [13] T. Masuda “Timing Signal Distribution for Synchrotron Radiation Experiments Using RF over White Rabbit”, in *Proc. ICALEPCS2019*, New York, USA, 2019.