

SuperKEKB イベントタイミングシステム 6 年間の運用報告

STATUS REPORT OF THE SUPERKEKB EVENT TIMING SYSTEM FOR SIX YEARS

杉村仁志^{*,A)}, 梶裕志^{A)}

Hitoshi Sugimura^{*,A)}, Hiroshi Kaji^{A)}

^{A)} KEK

Abstract

Six years have passed with event timing system in SuperKEKB project. We added various fluctuations, pulse information via Data Buffer, beam gate transmission via Distributed Bus Bit, timing synchronization of abort trigger system and injection efficiency determination of injection bucket. And we upgraded some functions, bucket selection with pulse to pulse RF phase modulation and timing compensation between trigger and beam. Especially, the fluctuation of commercial 50 Hz had the greatest effect on the timing system. To deal with this fluctuation, we improved sequence length from 16/18 to 8/9, and bucket selection algorithm. The RF phase modulation method at Linac has made it possible to shorten the sequence length.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器の運転は 2016 年 2 月に始まり 6 年が経過した。ピークルミノシティは KEKB 加速器の 2.5 倍程度まで到達し、世界記録を毎年更新している。

タイミングシステムは光ケーブルで接続された遠隔モジュールに信号を送り、受け取り側のモジュールがトリガーを生成して、加速器のパルス機器を動作させるシステムである。KEK 入射器では、SuperKEKB メインリング (MR) へ電子および陽電子ビームを供給するだけでなく、PF リングや PF-AR リングへのビーム供給も担っており、パルス機器はそれぞれに対して異なるタイミングで動作させる必要がある [1, 2]。そこで信号を“イベント”という 8-bit のデータ形式で送信し、255 通りのイベントから対応したイベントを利用してパルス機器を駆動する“イベントタイミングシステム”を採用した。このシステムは KEKB プロジェクト終盤に試験的に導入され、SuperKEKB プロジェクトで本格運用された。イベントタイミングシステムを利用することで、一本の光ファイバーでタイミングや付随する情報を配ることが可能になり、3 章で述べる機能を追加するたびに施設の信号配線は簡素化されていった。

MR への入射タイミングはバケットセレクションシステムを用いて計算する。これは、共有メモリネットワークを利用してリング内のバンチ電流情報や、タイミングの基準点となる商用電源周波数 50 Hz の変動をパルスごと (20 ms ごと) に取得し、リング内の特定の RF バケットに入射するための最適なタイミングを計算している。計算されたタイミングは共有メモリネットワークを介して VME 規格のイベント送信モジュール (Event Generator (EVG)) で設定され、入射器やリングの各制御機器が持つ受信モジュールへ送信される [3]。イベントタイミングシステムは KEKB から SuperKEKB への移行期間中に基礎設計が行われ [4]、プロジェクト開始後も様々な機能を追加した。

2. 運用の歩み

SuperKEKB のイベントタイミングシステムは入射器途中に陽電子用ダンピングリング (DR) が設けられたことにより、陽電子ビームのタイミングは“DR への入射タイミング”と“DR からの出射タイミング”という 2 種類が新たに必要となった。これを実現するために 2 つの EVG を利用して一つのビームモードを DR 入射までの入射器前半と DR 出射後の入射器後半で異なるタイミングを送信するという設計がなされた。Figure 1 はこの設計を元に構築したメインタイミングステーションの写真である。2016 年 2 月より始まった Phase-1 運転では DR はまだ完成前であったが、この設計を基に MR への入射が成功した [5]。

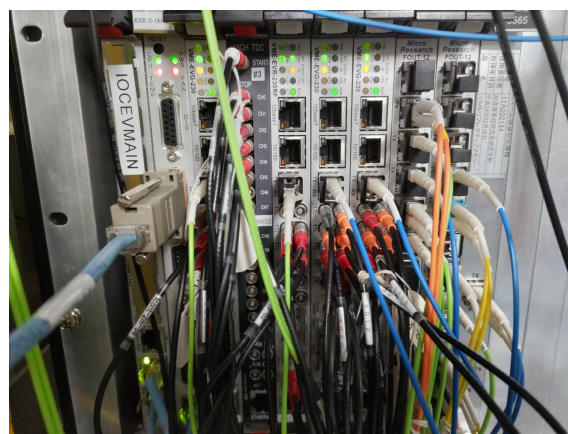


Figure 1: Picture of main timing station.

2018 年 1 月より始まった Phase-2 運転では DR の運転が開始した。上記の 2 種類のタイミングを利用して DR での入射、出射および MR への入射が成功した。また、DR 入出射キッカー用の充電トリガーのタイミングを一つ前のパルスの時点で計算し、次のパルスで発行される放電トリガーの間の時間差は常に一定になるように遅延情報を追加するようなシステムを構築した。これによりキッカー、セプタムでの入出射制御が正しくできていることが確認された [6-9]。

* hitoshi.sugimura@kek.jp

Phase-3 運転では RF 位相変調を用いたバケットセレクションを 2020 年 10 月の運転より導入し、DR での 2 パルス蓄積運転が可能となった [10]。これにより陽電子ビームの入射頻度は 50 Hz まで上げられるようになった。

2021 年の運転ではバケットセレクションのプログラムの改修を行い、EVG でのシーケンス長を半分に短くした。これにより商用電源周波数 50 Hz の変動の影響 [11-13] が小さくなり、より安定な運転ができるようになった。また、蓄積電流の増加に伴い、運転形態は 2 バンチ同時加速による入射方式になった。これは 96 ns 離れた二つのバンチを一度のパルスで入射する方式である。

3. 機能の追加

我々が用いている MRF 社製のイベントモジュール [14] ではトリガーの発行だけでなく他の用途としても利用できるように拡張性をもった作りになっており、様々な機能を追加した。

3.1 パルス毎の各種情報の送信

末端の機器にはタイミングだけでなく様々な設定情報をパルス毎に切り替える必要がある。例えばビームモードに応じた RF 位相の値やどの RF バケットに入射するかなどのビームの情報を受け取るとそれを用いて様々な評価ができるようになる。

これらをイベントタイミングシステムの “Data Buffer” 機能を用いて送信し、末端の機器にデータとして送りパルス毎に設定できるような機能を追加した。“Data Buffer” 機能とはイベント送信に混ぜて最大 57 Mbps (@Event clock : 114 MHz) でデータを送信することが可能な機能である。

3.2 Beam Gate 送信機能

DR では一つのパルス内で入射と出射を同時に行ったり、入射のみ出射のみ行うようなモードが必要であった。これを “Distributed Bus Bit” 機能を用いてイベントシステム用の光ケーブルでビームゲートのレベル信号も送信できる仕組みを追加した [15, 16]。電子、陽電子それぞれのビームゲートのレベル信号を EVG に入力し、Distributed Bus Bit で EVR ヘビームゲートを送信する。この際に Bit 毎にパルス単位でビームゲートの遅延時間を操作できるように設定した。これにより、末端機器の種類に応じてビームゲートを遅延させることが可能になり、DR の出射トリガー用のビームゲートを蓄積パルス数に応じて遅延させることで入射が停止した後に蓄積されているバンチを全て出射できるようにした。

3.3 アポートトリガーシステムとの時刻同期

アポートトリガーシステムはメインリングの各所から発報されるアポート要求信号を集約してアポートキッカーへ送信するシステムである。アポート信号がどこでどの順序で起こったかをより精度よく記録するために 10 MHz の内部クロックを利用して 100 ns の精度で記録している。このシステムはリング内にある各制御室とその信号を集約した中央制御室でそれぞれ旧式のイベント

タイミングシステムから送信された 1 Hz の信号を外部クロックとして入力することでクロックのリセットを行い、時刻を計算している [17]。また、MRF イベントタイミングシステムから CPU 時刻を Rb クロックを利用した精度のよい 1 Hz でアポートトリガーシステムへ配信し、アポートトリガーシステム内の CPU に対して時刻を書き込むことで、イベントタイミングシステムとアポートトリガーシステムの時刻同期を実現した [18]。

3.4 バンチカレントモニターを利用した入射効率の同定

メインリングへの入射効率はこれまでリングの全蓄積電流に対して求めていたが、ビーム寿命の影響が大きく、入射 RF バケットに対してどれだけの入射効率が得られているのかが分かりにくかった。そこで新たに入射 RF バケットに対する入射効率を同定する機能を追加した。これは、イベントタイミングシステムから Data Buffer で送信される一つの情報としてある入射 RF バケットの情報を取り出し、この情報から対応するバンチカレントモニターの値を読み出す。これをパルス毎に行い、入射パルス前後でのバンチ電流の差から入射効率を求めることができるようにした。これを利用することで、ビームの状態を知る一つの判断材料となり、運転中の調整がよりスムーズにできるようになった。 [19]。

4. 機能の改良

4.1 RF 位相変調を用いたバケットセレクション

従来方式ではバケットセレクションを用いて MR の入射 RF バケットからタイミングを決定し、そのタイミングから DR の蓄積 RF バケットを決定していた。この方式では DR の蓄積 RF バケットの制約がないため、どこに蓄積されるかは MR の入射 RF バケット次第となっていた。しかし、陽電子ビームの入射頻度が上がると、DR で最低蓄積時間 40 ms の制約¹により、DR で 2 パルス蓄積して蓄積時間を伸ばす運転に切り替える必要がある。この場合、既に蓄積されているバンチを避けつつ次のパルスを特定の RF バケットに蓄積させる必要があり、これを満たすためには入射器 3~5 セクターの RF 位相をパルスごとに変調し、DR/MR の RF 位相に同期させてビームを入射する方式にする必要があった²。バケットセレクションのプログラムで DR の蓄積 RF バケットに応じた設定位相を計算し、この値を “Data Buffer” を利用して RF 移相器へ送信し、設定する仕組みを開発した [10, 20]。この仕組みは 2020 年 10 月より導入し、2022 年現在では繰り返しによらず常時 2 パルス運転で運用を行っている。

4.2 シーケンス長の短縮

イベント送信モジュールにはタイミングの原点として SuperKEKB の revolution 信号の 2254 分周された信号 (rev/2254 信号) が入力されており、一定の間隔で商用電

¹ 40 ms の蓄積すると、水平方向のエミッタンスは 1/50 に垂直方向にエミッタンスは 1/500 になる

² 変調しない場合、20 ms 間隔のパルスに対する遅延時間は最大で約 11 ms となり、入射器クライストロン仕様 (pulse-to-pulse で 18 ms 以上 22 ms 未満) を満たすことができなくなる

源周波数 50 Hz からのずれを補正するように設計している。当初の設計 [21] では、rev/2254 信号の入力のうち、8 回もしくは 9 回に 1 回商用電源周波数 50 Hz からのずれを補正する (以降 8/9 シーケンスと呼ぶ) ことで安定した回路になると見積もっていた。しかしながら、当初のバケットセレクションでは DR での出射タイミングをそのパルスの入射タイミングの時点で決める必要があったため、入射から出射までの時間に最大値を設け³、8/9 シーケンス長を 16/18 シーケンスに伸ばすという方式で運用を行っていた。16/18 シーケンスでの運用は商用電源周波数 50 Hz の補正では追いつかないような量の変動が生じることが時々起こり、タイミングシステムが停止する事態が生じていた。RF 位相変調を用いたバケットセレクションに変更することで出射タイミングは出射直前にタイミングを決定できるようになったため、当初の設計の 8/9 シーケンスに変更することができた。また、次のシーケンス開始時の商用電源周波数 50 Hz の位相予測を現在の位相と位相ドリフトの傾きから予測するように変更したことで安定した運用ができるようになった。Figure 2 は 16/18 シーケンスと 8/9 シーケンスで商用電源周波数 50 Hz と運転パルスとのタイミング差を示している。8/9 シーケンスでは補正の頻度が上がったことにより、商用電源周波数 50 Hz のふらつきを抑制し、安定した回路が実現できている。

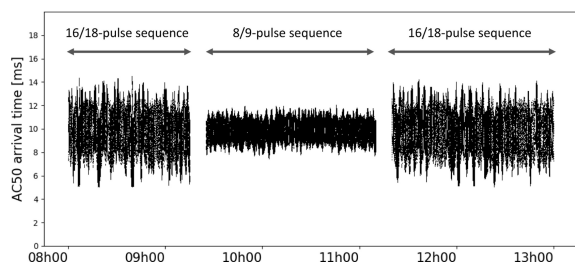


Figure 2: Comparison of AC50 arrival timing between 16/18-pulse sequence and 8/9-pulse sequence. This figure is taken in [11].

4.3 RF 位相変調に伴うビームとトリガーの時間差の補正

RF 位相変調を行うことにより、MR/DR の RF 位相と入射器 3~5 セクターの RF の位相は揃った状態になった。しかし、イベントクロックの生成元である RF は変調していないため、ビームとトリガーには時間差が生じる。この時間差は最大 2.2 ns となっており、これを補正するかどうかでビームの性能が変化する。RF のスレドタイミングについては時間差が生じることでエネルギージッターが生じるが、入射に影響がない程度であることが確認されたため [10]、補正を行っていない。一方、BT ラインの BPM に関しては測定時間幅が狭いため、補正を行う必要があり、高精度 (最小 5 ps) の遅延設定が可能な SINAP 製イベント受信モジュールで補正を行っている。

DR の出射キッカーについては水平方向の位置ジッ

³ 商用電源周波数 50 Hz のゆらぎから 200 ms を最大値と設定した

ターが生じるものの、影響は小さいため当初補正は行わない予定だったが、2022 年の運転より DR 出射キッカー直後に 2 バンチ目補正用ストリップラインキッカーが導入され、タイミングジッター 1 ns 以下の仕様のため、新たに補正を行うように仕様を変更した。DR で用いられている MRF 製のイベント受信モジュールには CML 出力で最小 400 ps の遅延設定というのが標準で搭載されていたが、最近になり最小 8 ps の遅延設定が可能なユニバーサル基板が新たに開発されたため、これを利用してストリップラインキッカーと出射キッカーも含めて補正を行うことにした。Figure 3 は出射キッカー下流の 1 バンチ目 (赤と桃) と 2 バンチ目 (青と水色) の水平方向の位置の変動を示している。①の時間は補正を行わない状態を示しており、②の時間で補正を行い、水平方向のジッターが小さくなったことがわかる。この状態でストリップラインキッカーを動作させ 2 バンチ目のみ軌道が変化したことがわかる。

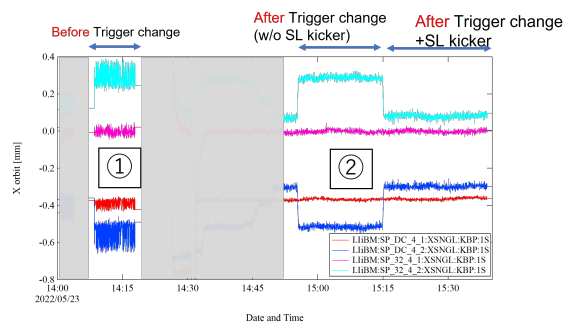


Figure 3: Beam position at downstream of the DR extraction kicker. Red and magenta lines show horizontal position of the first bunch. blue and sky line show horizontal position of the second bunch.

4.4 商用電源周波数のゆらぎが及ぼすトリガー抜けとその対策

改善に一番の時間を要したのが商用電源周波数 50 Hz の変動によるトリガー抜けであった。これは外的要因ということもあり様々な困難があった。長期的なドリフトにより、数時間程度非常に抜けるような時間があることも多々あり、安全のため、クライストロンインターロックが作動し停止し、回復するまで運転が中断するという事象が数多くあった [22]。

この対策として商用電源周波数 50 Hz の周期が 20 ms から大きくずれたときには強制的にトリガーを発行し、クライストロンなどのパルス機器へは 50 Hz のトリガー発行を維持するが、ビームは止めるという論理回路を作り運転を行った。この方式の運転は対症的な扱いであり、4.1, 4.2 で述べた RF 位相変調によるバケットセレクションの導入とシーケンス長の短縮により、商用電源周波数 50 Hz に対する補正頻度が上がったため、トリガー抜けは起こらなくなった。

5. 今後に向けて

長期的に維持可能なハードウェアの検討

今後 SuperKEKB 加速器は積分ルミノシティ 50 ab^{-1} を目指し、徐々に性能を上げていく。少なくとも 10 年はプロジェクトを継続する必要がある、既存システムの維持をしつつ新システムの導入を検討する必要がある。既存の MRF 社製イベントタイミングモジュールは基板に搭載された FPGA が生産終了となっており、それに伴いモジュールも生産を終了している。そのため、予備品が無くなり次第後継機を利用するか別の製品を用いるかを検討する必要がある。MR のイベントタイミングシステムでは SINAP 製のイベントタイミングシステムを用いてサブタイミングステーションを構築している (Fig. 4) ため、SINAP 製を継続して使用する方針である。一方で、入射器や DR では MRF 社製の後継機を数台購入しているが、実運用には至っていない。また、VME-CPU も 2000 年代初頭の機器を用いているため、長期的に持続可能な運用にするために microTCA 規格を用いたタイミングシステムの開発も検討している。



Figure 4: Picture of MR sub-timing station.

6. まとめ

SuperKEKB のイベントタイミングシステムは 6 年間の運用で機能の追加・改良を行い安定な運用を目指してきた。その中で商用電源周波数 50 Hz の変動に対する補正は回路の安定化に不可欠であり、RF 位相変調を用いたバケットセレクションへの変更とシーケンス長の短縮によりトリガー抜けがなくなり、安定になった。また、RF 位相変調を用いたバケットセレクションは DR での 2 パルス蓄積運転を実現化し、当初の設計が完成した。今後は長期的な運用のために新たなハードウェアの検討を行っていく計画である。

参考文献

[1] F. Miyahara *et al.*, “Timing System for Multiple Accelerator Rings at KEK e^+e^- Injector LINAC”, Proceedings, 12th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC 2018),

Hsinchu, Taiwan, Oct. 2018, pp. 207–209; doi:10.18429/JACoW-PCaPAC2018-THP19

[2] F. Miyahara *et al.*, “KEK 電子・陽電子入射器 タイミングシステム”, Proceedings of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, August 7–10, 2018, pp. 544 – 548; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEPO/WEPO82.pdf

[3] H. Kaji *et al.*, “Bucket Selection System for SuperKEKB”, Proceedings of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, August 5–7, 2015, pp. 1278 – 1281; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP100.pdf

[4] H. Kaji *et al.*, “Construction and Commissioning of Event Timing System at SuperKEKB”, Proceedings of 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC’14), Dresden, Germany, 15. Jun – 20. Jun 2014, pp. 1829 – 1832; doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-TUPRI109

[5] H. Kaji *et al.*, “Injection Control System for the SuperKEKB Phase-I Operation”, Proceedings of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, August 8–10, 2016, pp. 1146 – 1149; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP092.pdf

[6] H. Sugimura *et al.*, “Synchronized Timing and Control System Construction of SuperKEKB Positron Damping Ring”, Proceedings of 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2017), Barcelona, Spain, Oct. 2017, pp. 229–231; doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUCPL02

[7] H. Sugimura *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリングでの Event Timing System の開発状況”, Proceedings of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, August 1–3, 2017, pp. 607 – 609; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP094.pdf

[8] H. Kaji *et al.*, “Injection control system for the SuperKEKB Phase-2 operation”, Proceedings of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, August 7–10, 2018, pp. 124 – 128; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THOM/THOM03.pdf

[9] H. Sugimura *et al.*, “Injection and Extraction Timing Controls at SuperKEKB Damping Ring”, Proceedings, 12th International Workshop on Personal Computers and Particle Accelerator Controls (PCaPAC 2018), Hsinchu, Taiwan, Oct. 2018, pp. 201–203; doi:10.18429/JACoW-PCaPAC2018-THP17

[10] H. Sugimura *et al.*, “SuperKEKB における位相変調を用いたバケットセレクション”, Proceedings of 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, September 2–4, 2020, pp. 78 – 82; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEOT/WEOT10.pdf

[11] D. Wang *et al.*, “Analysis and stabilization of AC line synchronized timing system for superKEKB”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 1015, 165766; doi:10.1016/j.nima.2021.165766

[12] D. Wang *et al.*, “The Fault Analysis of Timing System in SuperKEKB”, Proceedings of 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, September 2–4, 2020,

- pp. 280 – 283; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WEPP/WEPP24.pdf
- [13] D. Wang *et al.*, “Analysis of AC Line Fluctuation for Timing System at KEK”, Proceedings of 18th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2021), Shanghai, China, Oct. 2021, pp. 923–926; doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2021-THPV028
- [14] <http://mrf.fi/>
- [15] H. Kaji *et al.*, “Beam Gate Control System for SuperKEKB”, Proceedings of 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC’18), Vancouver, Canada, 29. Apr – 4. May 2018, pp. 2124 – 2127; doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPAK015
- [16] H. Sugimura *et al.*, “Trigger control system with Beam Gate at SuperKEKB Injector LINAC and Damping Ring” Proceedings of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, August 7–10, 2018, pp. 1078 – 1081; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP0/THP091.pdf
- [17] S. Sasaki *et al.*, “SuperKEKB 用アポート・トリガー・システムのタイムスタンプ記録システムの開発”, Proceedings of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, August 1–3, 2017, pp. 610 – 612; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP096.pdf
- [18] H. Kaji *et al.*, “Time Synchronization for distant IOCs of the SuperKEKB Accelerators”, Proceedings of 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC’17), Copenhagen, Denmark, May 14 – 19, 2017, pp. 3982 – 3985; doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB113
- [19] H. Kaji *et al.*, “Archive System of Beam Injection Information at SuperKEKB”, J. Phys. Conf. Ser. 1350 012150; doi:10.1088/1742-6596/1350/1/012150
- [20] H. Kaji, “Bucket selection for the SuperKEKB phase-3 operation”, Proceedings of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, August 7–10, 2018, pp. 1114 – 1116; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/THP1/THP100.pdf
- [21] H. Kaji *et al.*, “Installation and Commissioning of New Event System for SuperKEKB”, Proceedings of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, August 5–7, 2015, pp. 223 – 227; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FROL/FROL15.pdf
- [22] D. Wang *et al.*, “The Fault Diagnosis of Event Timing System of SuperKEKB”, Proceedings of 17th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS2019), New York, NY, USA, Oct. 2019, pp. 741–745; doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2019-TUBPR04