

## White Rabbit を用いたビームゲート制御システムの開発

○伊藤史哲<sup>A)</sup>、梶裕志<sup>A)</sup>、飯塚祐一<sup>B)</sup>

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

B) 東日本技術研究所

### 概要

ビームゲートシステムは、入射器から SuperKEKB メインリング (MR) へのビーム供給を制御するシステムである。Machine Protection System (MPS) 及び、加速器を効率的に動作させるための運転システムにより、ビームゲート信号が決定され、当信号を基に電子銃、入射キッカー・セプトラム、Beam Transport-BPM 等の入射器からメインリングにビームが入射される際に動作する機器が制御される。MPS といった安全システムの要請でビームを止める際には、できるだけ確実な入射の停止が望ましく、通常の加速器運転時には、正確に定められた順序で入射機器を開始/停止させていかなければ効率的な運転が行えない。本仕事に関しては、ビームゲート信号を基に入射を制御する機構の現状を見直し、問題点の解決を図った。それについての報告を行う。

### 1. はじめに

KEK つくばキャンパスに存在する SuperKEKB (SKB) 加速器は世界最高のルミノシティの更新を続けている[1]。図1はSKB加速器全体の概略図であり、電子加速器リング (HER) と陽電子加速器リング (LER) の二つのメインリング (MR)、ダンピングリング (DR) 及び入射器からなる。

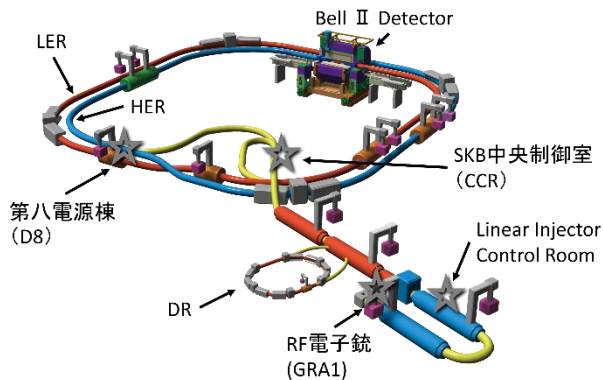


図1. SKB 概略図

SKB では高い積分ルミノシティを実現するため、トップアップ入射運転を行っている。トップアップ入射においては、リングの蓄積ビーム電流が常に高い値となるよう、頻繁な入射を続けている。その際、蓄積ビーム電流値が設定値内に収まるよう、入射の開始と停止が頻繁に切り替わっている。また機器の保護を目的とした Machine Protection System (MPS) によってもビーム入射が制御されている。このビーム入射制御システムをKEKではビームゲートシステムと呼んでいる。MPSからの要請でビームゲートを閉じる場合、入射は速やかかつ確実に止めなければならない。そのため、ビームゲート信号は運転周波数とは非同期的に変化し、電子銃に直接的に繋がれたビームゲート信号線が電子銃を止め、ビーム供給を停

止する。一方トップアップ入射等を行う平常運転時は、ビーム入射時に働く各入射機器 (電子銃や、入射・出射キッカー、セプトラム電磁石等) の動作を正確に制御 (開始/停止) することが求められるため、電子銃以外の制御は、イベントシステム[2]を介して行われている。

イベントシステムはイベントジェネレータ (EVG) で発生させた情報を、スター型に光ファイバで接続された多数のイベントレシーバ (EVR) または EVG が受け取り、必要な機器に制御情報やタイミング信号を伝達するシステムである。EVGの動作クロック毎にシリアル化された2 Byteの情報を下流のモジュールへと送信している。2 Byteのうち最初の1 Byteはイベントコードに使用され、後の1 Byteは Distributed bus bit (Dbus) と data buffer で交互に利用されている。イベントコードはあらかじめEVGのメモリ内に書き込まれたタイミングで配信され、EVRはイベントコードを受け取ると、イベントコード毎に設定された遅延量を掛けた後、トリガー信号を出力する。送信される Dbus の情報は、例えばEVGに入力した複数のレベル信号により、bit毎に書き換えることができ、Dbus情報を基にレベル信号出力や、イベントコードとの論理演算を行うことができる。それにより、トリガー出力や、より下流へのイベントコード列の書き換え等を制御することができる。図2にビームゲートシステムの概略図を示す。ビームゲート信号は LER と HER 用の二つがあり、電子銃へと繋がる AND 回路と最上流の EVG に入力されている。ビームゲートが閉じられると、AND 回路の出力が Low となり、LER 用の熱電子銃はトリガー供給が止まり、HER 用の RF 電子銃に関しては物理シャッターが閉じて強高度レーザーを遮り、いずれの場合も入射が停止される。ただし HER に関しては、物理シャッターの動作時間が 20 ms であるため、シャッター動作中のレーザー照射を避ける目的で、レーザー照射に同期するための Pulse Delay Module (PDM) が存在する。ビームゲート信号が運転周波数とは非同期的のため、PDM は毎回異なる遅延量をかけることになる。その他の入射機器はイベントシステムの

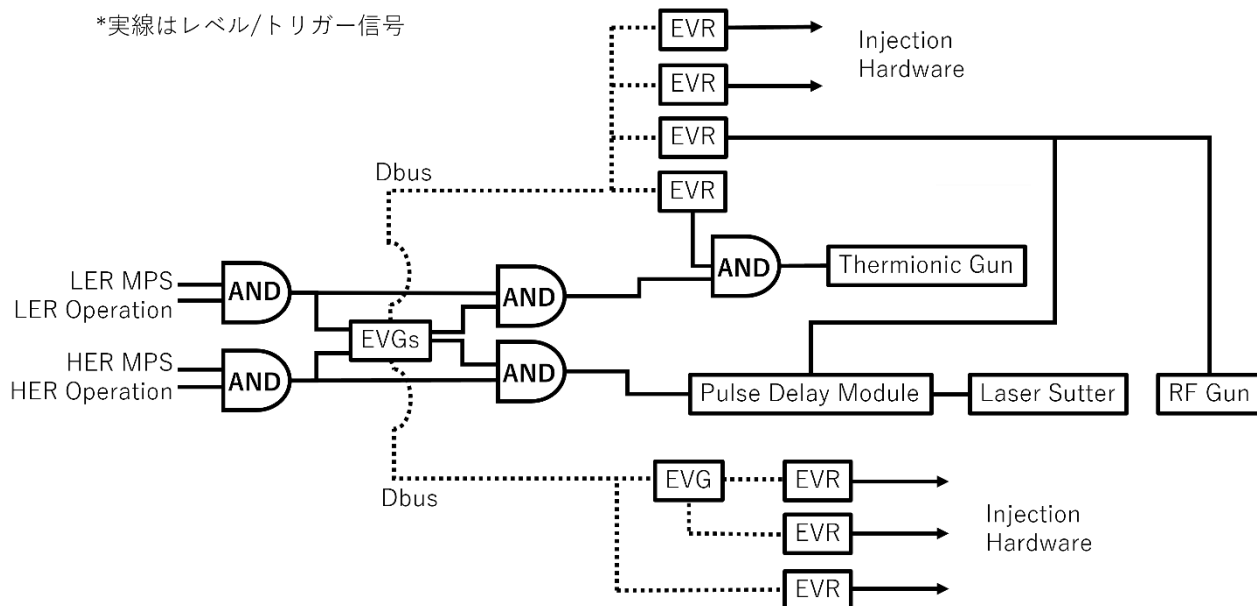


図2. ビームゲートシステム概略図

Dbus を用いたシステムにより制御される。最上流の EVG に入力されたビームゲート信号が Dbus 情報を書き換え、その Dbus 情報が下流の EVR へと配信されることで、順次入射機器が停止される。

## 2. 研究の目的と手法

入射器は 50 Hz での運転を行っており、HER、LER の両リングに加え、PF、PF-AR の計 4 リング同時トップアップ入射 (DR を含めれば 5 リング) を実現している。そのために、入射器等の各構成機器の設定をそれぞれのリングに合わせ 20 ms 毎に変更している。また効率的な入射のため、電流値の低い箇所 (バケット) を狙って入射を行う、バケットセレクションシステムが用いられており、狙うバケットにより入射機器が作動するタイミングは毎回微調整される。そのため、イベントシステム自体の設定も 20 ms 毎に書き換えられている。イベントシステムの設定書き換えは入射と入射の間で確実に終わらせる必要があるため、入射の 2 回前 (40 ms 前) に書き込む内容を計算・決定し、書き込みタイミングも運転に同期し、入射の直後から行うようなシステムとしている。Dbus を用いたビームゲート制御システムもこの一連のプロセスに組み入れられている。しかし、ビームゲート信号の運転周波数との非同期性、電子銃停止がビームゲート信号により独立に制御されていること、入射頻度の変更時の例外処理等により、正確な入射機器のビームゲートによる制御は非常に困難となっている。電子銃が動作したにも関わらず、キッカー等が動作しなかった場合、ビームが加速管の壁に衝突し、ビームロスを検知した MPS が、せっかく蓄積したビームをダンプして (捨てて) しまう可能性がある。現在は、ビームダンプを確実に起こさないようにするため、安全サイドに空打ち (入射ビームがない時の入射機器の動作) を許容するシステムとなっている。し

かし、電子銃のみが先に停止すると、キッカー等は空打ちしてしまい、無駄に MR の蓄積ビームを乱すことで、ピークルミノシティを低下させてしまう。上述した通り、MR にはトップアップ入射が行われているため、入射の開始と停止が頻繁に繰り返され、不必要な空打ちもそれだけ頻繁に起こってしまっている。本研究目的はこの空打ちをできる限り抑制することである。

### 2.1 White Rabbit の活用

電子銃が停止した情報を、その他の入射機器のトリガー配信を制御する EVR へと転送し、トリガー出力時に AND 演算を行うことで、過不足なく入射機器へのトリガー信号を出力させることができると考えられる。EVR は INHIBIT 端子が実装され、レジスタに設定を行うことで、INHIBIT 信号との論理演算により、トリガー出力が決定されるようなシステムが既に備わっている。信号の転送方法は、光ファイバで直に配線する方法も考えられるが、電気光変換モジュールと光電気変換モジュールが対で必要になること、場合によってはディレイモジュールや光 FANOUT モジュールが必要になり、運用面においても柔軟性に欠けることから White Rabbit (WR) テクノロジーを用いることとした。WR はキロメートル単位で離れたモジュール間のサブナノ秒単位の正確な時間同期、スケラビリティ、Gigabit Ethernet 通信などの性質を持つテクノロジーである [3]。これらのテクノロジー情報は CERN Open Hardware License に従って、Open Hardware Repository (OHWR) [4] で自由に入手可能である。そのため比較的安価に入手することができ、改良・改造も行いやすいという利点がある。また SKB においては、ビームロスを検知するシステム全体を精度よく時刻同期するため、既に導入・運用実績がある。KEK では加速器の分散制御システムとして、EPICS [5] というフレームワークを利

用しているが、EPICS と WR との橋渡し役となるデバイスサポートの開発が多くの部分で完了しているという利点もあった。

### 3. ビームゲート制御システムの構築

#### 3.1 各モジュールのセットアップ

ビームゲート制御は LER の場合、DR を含めた制御となり、HER よりも複雑となる。そのため、まずは HER のビームゲート制御システムの構築から始めることとした。今回の仕事においては WR モジュールとして、FPGA Mezzanine Card (FMC) のキャリアボードである Simple PCIe FMC Carrier (SPEC) [6] と FMC-DIO カード [7] を使用した。これらを PC (Ubuntu20.04) の PCIe スロットに差し込み、WR ノードとしてセットアップを行った。FMC-DIO は 5 チャンネルの TTL 信号の入出力端子を持ち、TTL 信号変化時の時刻を記録することができる。TTL 信号の変化をトリガーにして、記録された時刻 (T0) と任意の遅延時間 (Td) 及び TTL の bit 情報を、WR ネットワーク経由で転送し、別の FMC-DIO で T0 + Td に TTL 信号出力を変化させる機能の実装が行われた。時刻が T0 + Td を過ぎて情報が転送された場合は、即座に受信側の TTL 信号が変化することとなる。TTL 信号変化の時刻の記録や転送は、EPICS ソフトウェア上で動作させている。また EVR の INHIBIT 信号によるトリガーの制御は、トリガーパルス出力動作と非同期に行われていたため、例えばトリガー出力時間中に INHIBIT 信号に変化があると、トリガーパルスが途中から出力、または消失することになった。特にトリガーパルスが途中から出力される場合、入射機器へのタイミング自体がずれる原因となる。そのため、パルス出力中は INHIBIT 信号の変化を受けつけないような変更を行った。

#### 3.2 WR ノードの時刻同期

WR ノード設置場所は入射器の GR\_A1 レーザーハット (GRA1) 内と HER 入射機器へのトリガー配信を行う EVR が設置された第 8 電源棟高周波加速器室 (D8) 内である (図 1 参照)。両ノードは SKB 中央制御室 (CCR) に設置された WR スイッチを介して接続された。この WR スイッチは両ノードを含めて、全ての接続されたモジュールの時刻基準となり、グランドマスターモジュール (WRGM) と呼ばれる。WR の信号伝送媒体としては、Gigabit Ethernet 対応のシングルモード (SM) 光ファイバ中に送受 2 波長を双方向伝送する 1000BASE-BX10 が標準指定されている。CCR から GRA1 までの経路は既に同ファイバが敷設されていたが、CCR から D8 の経路に関してはマルチモード (MM) 光ファイバしか敷設されていなかった。WR は拡張された Precision Time Protocol (PTP) を用いて、高精度な時刻同期を行う。まずは MM 光ファイバで接続した際の PTP 時刻同期精度を確認することとした。WR ノードと WRGM である WR スイッチに MM 光ファイバ用 Small Form-factor Pluggable (SFP) モジュール (AFBR-57R5APZ) を差し込み、長さ 1m の MM 光ファイバケーブルで接続

し、PTP 通信を開始した。その際の両モジュールからの Pulse Per Second (PPS) 信号の出力時刻差をデジタルオシロスコープで測定した。この PPS 信号の出力時間差がそのまま時刻同期差になるが、その値が 14.5 ns 以上となり、時刻同期が不十分であることが分かった。この誤差は主に PTP 通信時の FPGA に書き込まれたタイムスタンプ出力時間と、実際にファイバ先端から信号を出力するまでの時間差 (TX)、SFP モジュールに信号が到達してから、FPGA 内にタイムスタンプされるまでの時間差 (RX) の値が、MM ファイバ用 SFP では SPEC ボードで参照できないことから生じていた。この TX と RX の値と共に、光ファイバ信号伝送方向による伝送速度の非対称性 ( $\alpha$ ) を SPEC ボード内のフラッシュメモリに書き加えた。このとき書き加えた TX と RX の値は、SFP モジュールによる違いはあまりないと思われたため、SM 用の SFP (AXGE-1254-0531) と同じ値とした。 $\alpha$  は、SM ファイバの様に大きくないと思われるので、0 とした。その上で実際使用する倍の長さ (1.2 km) のファイバで WR ノードと WR スイッチを接続し、PPS 信号の時刻差を測定した。その結果、WR ノードと WR スイッチが 0.19 ns 程度で時刻同期が出来ていることを確認できた。SM ファイバにおいても、実際に使用するおよそ倍の長さ (2 km) を用いて接続した上で、上述した MM ファイバ使用時と同程度の精度で時刻同期ができていることを確認した。

#### 3.3 信号転送試験

GR1A と D8 に WRGM に接続された WR ノードをそれぞれ設置し、TTL 信号転送試験を行った。転送用の信号はファンクションジェネレータを用いて 12.5 Hz、duty 比 1:1、4 Vpp、オフセット 2 V の矩形波を生成した。この生成した信号を GRA1 の WR ノードに入力し、その信号状態を D8 の WR ノードに転送した。実際の WR ノード間の経路を図 3 に示す。

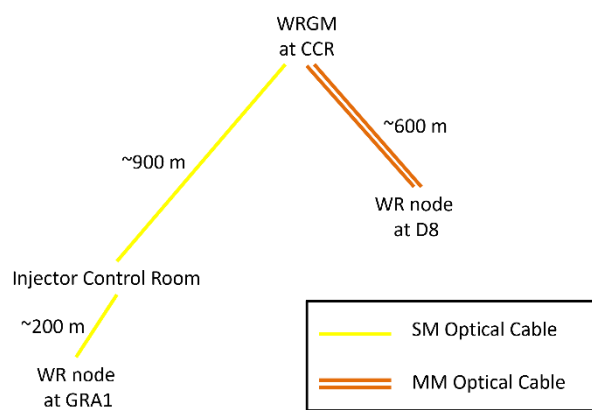


図 3. WR ノード接続経路略図

転送側の WR ノード上で動く EPICS ソフトウェアでは、TTL 信号の変化を検知すると、プログラムされた MAC アドレス先に T0、Td と TTL 信号の bit 情報を転送する。転送先のノードでは、情報を受け取ると、T0 + Td に TTL 出力信号が変化する。この両ノードで、T0 及び、実際に転送先での出力変化時刻をモ

ニタし続けた。Tdの値が0であれば、転送先ノードは情報を受け取るとすぐにTTL信号を変化させるため、両ノードの記録時刻差が信号転送に係る遅延量ということになる。Tdが0のときの記録した時刻差分布を図4に示す。

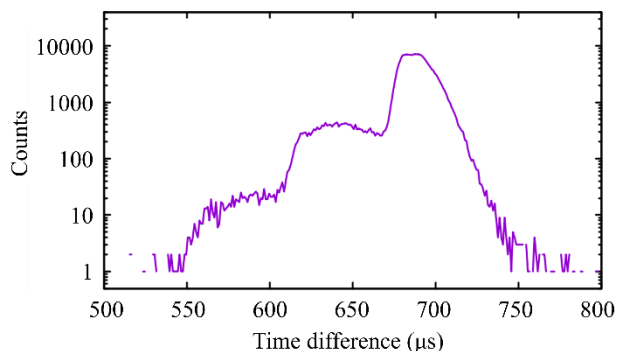


図4. 両WRノードにおける記録時刻差

今回の条件においては、遅延量はおよそ700 μs弱であった。またさまざまなTd設定値においても、転送試験を行い合わせて1千万回以上の試行を行い、全ての場合において転送の失敗はなかった。これらの転送試行回数は実際の運転時の数年分に当たる。稀にソフトウェア遅延と思われる大きな遅延が発生しており、Tdを1、2msに設定しても、設定したTd値にならない事象が発生していたが、その遅延も最大でT0から5ms程度であった。これらの測定から、実際に使用する際には、大きなTd値を許容できるのである、十分な信頼度で精度よく信号の転送が適うことが確認された。

### 3.4 遅延量の許容度確認

トリガー信号を転送するにあたりWRの比較的大きな遅延量を許容できるか調査するため、HER用電子銃を制御するレーザーシャッターへのトリガー信号(LST)と、キッカー等の入射機器へのトリガー信号の出力時間差を調べた。まずLSTであるが、運転周波数とは非同期のビームゲート信号をレーザー照射と同期させるため、PDMにはビームゲート信号と共に、レーザー照射に同期したレベル信号(Signal A)が入力されている。ビームゲート信号が変化すると、Signal Aの立上りを待って、LSTを変化させる。そのため、Signal Aの立上りからLST変化までの時間と、Signal Aと入射機器へのトリガー信号の時刻差を測定した。Signal AとLSTの時間差(T1)はデジタルオシロスコープで測定し、約7.55msであった。入射機器へのトリガー信号は様々なものがあるが、HERの入射キッカーとの時刻差を、時刻同期を行った2台のWRノードを用いて測定した。しかし、両トリガーの時間差はイベントシステムによって制御されており、測定は加速器のロングシャットダウン(LS1)中であったため、通常運転時の設定と同一である保証がない。そのため、測定時の両トリガーの起点となるイベントコードの出力時間差や、EVRでの遅延量などをモニタし、過去のログと比較することで、全て

が通常運転時の値と相違がないことを確認した。また両トリガーの時刻差は3 μsであったが、確認した設定値と信号伝達時間から予測される時間差と同程度であった。なお、パケットセレクションによるトリガータイミングの調整時間幅は最大2ms程となっている。

これらから、シャッター動作後に実際にレーザーが止められるまでは、25 HzでのHERへの入射運転時において、最小幅で約30.5msであり、この間にLSTをD8へと転送すればよいことが分かった。つまり十分に大きいTdの値を設定することができるため、WRを用いたトリガー転送は十分な確度と精度で行うことができる。

### 3.5 簡易動作確認

D8に設置されたEVRのトリガー出力を、INHIBIT信号での制御が有効となる設定に変更し、ビームゲート制御が想定通りに動作することを確認した。図5はINHIBIT信号での制御を有効にしたトリガー出力チャンネルが、WRを用いて転送したビームゲート信号により正しく制御されていることを確認したときのデジタルオシロスコープの波形である。INHIBIT信号による制御を有効にしたチャンネル(水色線)は、ビームゲートがOpenの時のみ、トリガー信号が出力されていることが分かる。このトリガー信号はHER入射時に動作するキッカー用である。

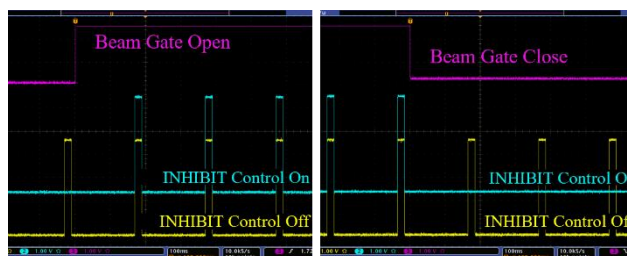


図5. 動作確認時のデジタルオシロスコープ波形

## 4. まとめと今後について

キッカー等入射機器の空打ちを防ぐため、WRを用いたビームゲート制御システムの開発を行った。ビームゲートによる正確な入射機器の制御は、イベントシステムの設定変更の時刻制約、ビームゲート信号の運転周波数との非同期性、電子銃停止がイベントシステムとは独立に制御されていること、入射頻度の変更等により、非常に難しくなっている。WRテクノロジーを用いて、電子銃が止められた情報をEVRへと時刻制約なく転送し、トリガー出力時にAND演算を行うことで、過不足なく入射機器を動作させることができると考えた。そこで二つのWRノードをkm単位で離れた場所に設置し、正確に時刻同期した後、信号転送試験を行った。その結果、ミリ秒単位の遅延量を許容すれば、十分な確度と精度でのトリガー転送が適うことが確認された。また、実際に転送する際の遅延量の許容度もトリガー時刻差測定結果等から確認した。ビームゲートシステムとして正しく動作されることも実際にレベル信号を転送し、

確認した。

最終的な動作確認は、本年1/29より再開した加速器運転中に行っている。導入に際しては既存のシステムと並行して走らせることで、本システムがうまく動作しなくとも、既存のシステムでビームゲート制御が行われるため、比較的安全に導入が可能である。しかし、WR等に問題が生じた際、ビームが入射できなくなる可能性等を考慮し、現在エラー時の対応を含めたシステムの構築を行っているところである。イレギュラーな状況の対処は、検討事項が多く、複雑であるが、できるだけ速やかに本システムの導入を進めていきたいと考えている。またLERのビームゲート制御についても検討を進めている。

## 参考文献

- [1] Y. Funakoshi et al., “The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity”, in Proc. IPAC'22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1-5. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPLXGD1. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2022/papers/moplxd1.pdf>
- [2] H. Kaji et al., “Construction and Commissioning of Event Timing System at SuperKEKB”, in Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14), Dresden, Germany, June 2014, pp. 1829-1832, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-TUPRI109. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2014/papers/tupri109.pdf>
- [3] White Rabbit Project. <https://white-rabbit.web.cern.ch>
- [4] OHWR. <https://ohwr.org/welcome>
- [5] EPICS. <https://epics-controls.org/>
- [6] <https://ohwr.org/project/wr-cores/wikis/spec-to-spec>
- [7] <https://ohwr.org/project/fmc-dio-5chttla/>