

White Rabbit を用いた Distributed TDC システム DISTRIBUTED TDC SYSTEM BASED ON WHITE RABBIT

梶裕志*

Hiroshi Kaji*

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The distributed TDC system is applied at the SuperKEKB collider for the first time in the world. The system was developed based on the White Rabbit timing system. The PCIexpress type slave nodes are installed at the SuperKEKB beamline and operated as TDC. The timestamp of the signal from the newly installed beam loss monitors is detected with the GPS time. The beam loss caused by the injection beam-bunch can be determined with the timestamp of the injection trigger. Besides, we can determine the bunch number which caused the beam loss. They give a large advantage to studying the sudden beam loss accident, and partially, revealed the mechanism of the beam loss. The expansion of the distributed TDC system is planned for the further study of the sudden beam loss.

1. はじめに

SuperKEKB は世界最高ルミノシティでの電子・陽電子衝突実験を行う加速器である。そのデザインルミノシティは $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、これは前プロジェクト KEKB 加速器が実現したルミノシティの 40 倍にも及ぶ。建設・試運転を経て 2018 年より衝突実験を開始し、物理ランにおける最高ルミノシティは世界最高記録である $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。今後もこれを更新しながら運転を続けていく予定である。

本講演の主題である「distributed TDC システム」は加速器ビームライン上の異なる複数の位置に設置された TDC (Time to Digital Converter) が共通時計を持つ統合システムである。それぞれのノードが測定した信号入力時刻 (タイムスタンプ) は直接比較することができ、あたかも 1 つの巨大な TDC が加速器ビームライン全てをカバーしているように振る舞う計測システムである。これは SuperKEKB のようにビームラインが長距離に及ぶフロンティア加速器においてのビーム診断に大きなアドバンテージをもたらす。

SuperKEKB の Distributed TDC システムは White Rabbit (WR) タイミングシステム [1] をベースに構築されている。本講演では KEK つくばキャンパスに構築された WR システムの全容に簡単に触れたのち、distributed TDC の応用例として sudden beam loss 事象の解析結果についても紹介する。

2. WHITE RABBIT タイミングシステム

本節では KEK つくばキャンパスに構築されている WR タイミングシステムについて紹介する。

2.1 Grand-master モジュール

WR の grand-master モジュールは配下に接続された slave モジュール FPGA の動作クロックを自身の動作クロックと同期させる機能を持つ。WR システ



Figure 1: Picture of the grand-master module and the GPS receiver.

ム各ノードのシステム時計はこの FPGA クロックをベースにしているため、必然的に WR 全ノードは共通時計を持つことになる。このときノード間の時計同期精度は $O(100\text{ps})$ である [1,2]。

SuperKEKB の grand-master モジュールは中央制御棟 (Central Control Building, CCB) に設置されている。同所にあるルビジウムクロック内臓の GPS 受信機からの PPS (Pulse Per Second) 信号と 10 MHz クロックを grand-master モジュールに入力することで、システム全体の時刻を GPS 時刻と同期させている。Figure 1 は grand-master モジュール及び GPS 受信機の写真である。

2.2 Slave モジュール

Distributed TDC システムの個々の TDC の役割を担うのが、SPEC (Simple PCIe FMC Carrier) [3] をベースとしたスレイブモジュールである。PCIexpress の空きスロットに SPEC を挿入した計算機で EPICS IOC (I/O Controller) を構築することで、加速器運転での運用を実現している。

我々は TDC 機能を担う FMC カードとして FMC-DIO カードを用いている。SPEC と FMC-DIO を載せた EPICS IOC は各チャンネルの TTL レベル信号入力が HIGH/LOW ステータスの間で遷移した瞬間の時刻を EPICS Process Variable (PV) で通知する。この時刻は FPGA の動作クロックである 125MHz がベースとなっているため時刻測定精度は 8 ns になる。EPICS デバイスサポートについては [4] で公開している。Ubuntu18.04LTS もしくは Ubuntu20.04LTS

* hiroshi.kaji@kek.jp



Figure 2: Picture of FMC-DIO (left) and FMC-TDC(right).

上での動作が確認されており、EPICSはver3.15.8を用いている。

TDC機能を持つWRスレイブノードとしては、他にもSPECとFMC-TDCカードの組み合わせも可能である。この構成のTDCノードでは時刻測定精度は81psとFMC-DIOを用いた場合よりも大幅に向上する。まだKEKでの実運用の例はないが、EPICSデバイスサポートはすでに開発済みで[5]で公開されている。

Figure 2にFMC-DIOとFMC-TDCの写真を載せる。White Rabbitのスレイブノードの機能は、搭載するFMCカードにより決定される。スレイブノード本体となるキャリアボードは、どのプラットフォームタイプでもすべてのFMCカードを搭載可能なように開発されており、この汎用性はWhite Rabbitの持つ長所の1つである。そのためそれぞれの加速器環境に合ったプラットフォームでスレイブノードを構築し、そこに必要な機能のFMCカードを実装することが可能である。

3. DISTRIBUTED TDC システム

SuperKEKBにおけるdistributed TDCシステムは、SPECとFMC-DIOを組み合わせたWRスレイブノードで構成されている。現在のところ5台のスレイブノードがこの目的でSuperKEKBビームライン上に設置されている。

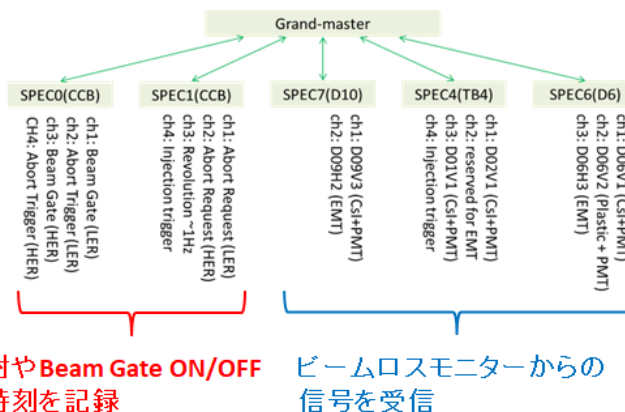
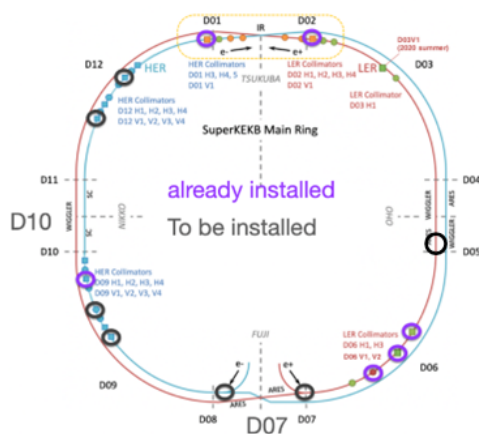


Figure 3: Overview of the distributed TDC system at SuperKEKB: the signals from the beam loss monitor at D06, D10 and the Tsukuba hall are monitored (left). Five TDC nodes are installed and operated so far. Three of them are used to monitor the signal from the beam loss monitor while the remaining two are used to monitor the injection trigger, abort request signal, revolution, and so on (right).

Figure 3はSuperKEKBに構築したdistributed TDCの概略図である。左図がdistributed TDCに接続されたビームロスモニターの場所を表し、右図はその入力信号を含めた全入力信号のチャンネルマップを表している。5台中3台はビームロスモニターからの信号の到達時間を測定しており、D06, D10電源棟の制御室とTsukubaホール地下4階フロアのモニター室に設置されている。残りの2台は中央制御棟内に設置され、ビーム入射トリガー信号、ビームアポート信号の発報時間、ビームゲート信号の遷移時間を記録している。

各チャンネルに信号入力(エントリー)があった時刻はすべてEPICS Process Variable (EPICS PV)で提供され、EPICS Archiver Applianceに記録されている。オフラインでのデータ解析はこのアーカイバ上のデータに対し行われる。

4. オフラインデータ解析

この節ではオフラインデータ解析の方法と応用例としてsudden beam loss (SBL)事象の解析結果を示す。オフラインデータ解析は各スレイブノード・チャンネルのエントリー時刻を比較し、ひも付けしていくことが基本である。

4.1 時刻同期処理

各ビームロスモニターからのエントリーとビーム入射トリガー信号やビームアポートトリガー信号のエントリーの時刻を比較することで「ビームロスがそれらと関連しているか?」を判定することができる。

Figure 4はD06-TDCノードが稼働コリメータ付近に設置したロスモニターのエントリー時刻とLER入射トリガー・エントリー時刻の時差をプロットしたものである。時差分布に10 μ sごとのスパイクが見られるのは入射直後から常に同じバンチがビームロスが発生していることを示しており、入射起因のビー

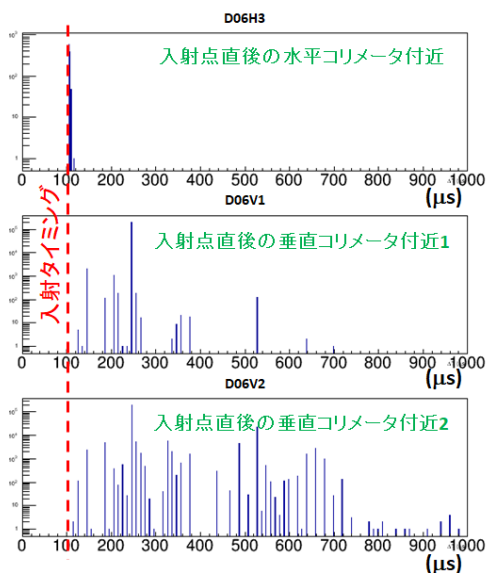


Figure 4: Time difference between the positron injection trigger and the signal entry from the beam loss monitor in the D06 region: the results from the loss monitors near the horizontal (up) and vertical (middle, down) collimators are shown. the injection trigger is provided about 100 μs before the injection beam. Therefore, the vertical red line on the figures indicates the injection-beam timing.

ムロスを持つ特徴である。特に D06 区域は LER 入射点の直下流にあり、ここに設置されたロスモニターは LER 入射ビームに起因するビームロスに感度が高く、入射から 100 ターン以上に及びビームロスを観測することも少なくない。

またビームロス・エントリーと revolution 信号・エントリーの時間関係からは「そのビームロスがどのバンチから発生したものか?」を同定できる。revolution タイミングとビームロス発生バンチの相関関係は、前述した入射起因のビームロス・エントリーを用いて以下のように求めることができる。

1. ビームロス・エントリーと入射トリガー・エントリーの時差から、入射ビーム起因のビームロス・エントリーを同定する。

2. 入射起因のビームロス・エントリーと revolution 信号エントリーの時差 Δt^{rev} を求める。
3. Δt^{rev} を入射 RF バケットの関数としてみた相関図を作る。

こうして作られた相関関係を Fig. 5 に示す。この相関関係はビームロス発生バンチが自明な入射起因のビームロス・エントリーを使って、各バンチのビームロス・タイミングと revolution 信号・タイミングのキャリブレーションを行っていることになる。

測定されたビームロス・バンチと revolution 信号相関関係は入射起因のビームロス・エントリーだけでなく、ストレージビーム起因のビームロス・エントリーにも当てはめられる。このため distributed TDC で測定されたすべてのビームロスは、その発生バンチを同定することができる。これは次節で議論するアクシデント事象などの原因究明において大きなアドバンテージをもたらす。

4.2 Sudden Beam Loss

SuperKEKB は運転中に蓄積電流の数割を、突然に、1, 2 ターンのうちにロスするアクシデント事象が多発している。我々が Sudden Beam Loss (SBL) と呼んでいるこの事象は、衝突点の超電導収束電磁石 (QCS) をクエンチしたり、QCS や Belle II 検出器などの保護を目的に設置した稼働コリメータを損傷するため、高パフォーマンスでの長期的な運転を困難にしている。SBL を引き起こすビームの不安定性の原因はまだわかっていないが、この事象発生時にコリメータ付近で大量のビームロスが観測されること、いくつかの SBL 事象後にコリメータに損傷が確認されたことから、「不安定性により振動したビームが開口幅の狭いコリメータ部でそのヘッドに衝突し、ビームロスを発生している」と考えられている。

この Sudden Beam Loss の原因究明に distributed TDC データが用いられている。Figure 6 (上) の概念図は、衝突点付近のビームロスモニターからの信号の測定ラインを表したものである。ビームロスモニターからの信号を 2 つに分け、オシロスコープと distributed TDC の両方に入力することで、distributed TDC はオシロスコープの波形データの複数点にランドマークとなる GPS 時刻を与えることができる。

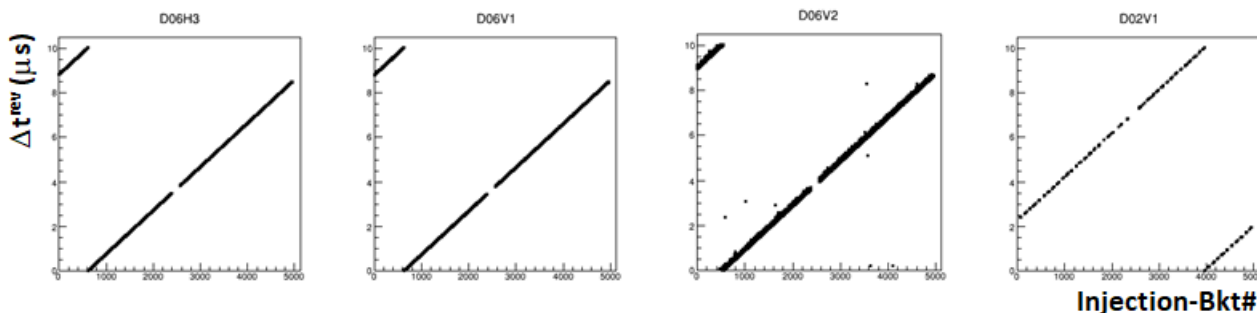


Figure 5: These examples are the circular charts showing the shares of PC's OSs used to write the papers for IPAC10.

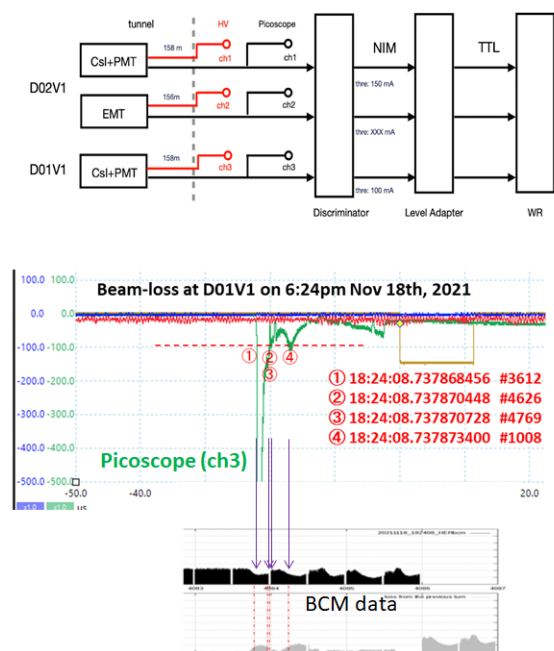


Figure 6: Schematic view of the signal line from the beam loss monitor to the distributed TDC (up), the raw signal waveform of the beam loss measured with the oscilloscope (middle), and the bunch current on the same timing (down).

Figure 6 (中) はその 1 例である。オシロスコープ画像上の緑の波形データは、電子リングの衝突点直前の垂直コリメータ (D01V1) 付近に設置したロスモニターからの生データである。distributed TDC への入力矩形波を生成するディスキミネータの閾値を -100 mA としていたため、この波形データ上の -100 mA 部分の GPS 時刻を知ることができ、またビームロス発生バッチまで同定することができた。この情報を基に Bunch Current Monitor のターン毎の電流減少値 (Fig. 6 (下)) と直接比較することが可能になり、この SBL 事例におけるこのコリメータ付近で発生したビームロスの寄与を明らかにすることができた。

また同じ方法で離れた場所に設置されたロスモニター間で、ロス信号波形データを直接比較することも可能である。陽電子リングで発生した SBL 事例について、入射点直後の垂直コリメータ (D06V1, D06V2) と衝突点直前の垂直コリメータ (D02V1) からの波形データを Fig. 7 に示す。D06 電源棟と Tsukuba ホールに設置されたオシロスコープの信号波形を直接比較することができ、D06 区域の 1 つ目の垂直コリメータで最初にビームロスを観測し、その後、ビームがアポルトされるまでにリングの複数の箇所までビームロスが発生していることがわかる。

5. まとめ

SuperKEKB 加速器は distributed DAQ システムの 1 つである distributed TDC システムを世界で初めて運用した。同システムは White Rabbit タイミングシステムをベースに構築され、個々の TDC に相当す

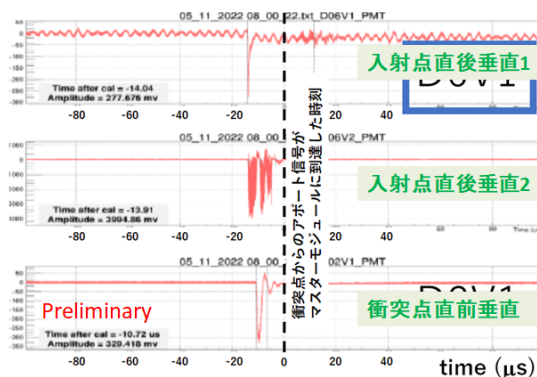


Figure 7: The raw signal waveform from the beam loss monitors at D06 and D02 vertical collimators.

るスレイブノードは PCIexpress 型のポートが採用されている。加速器ビーム診断の最初の応用として、SuperKEKB ビームラインに設置された高時間分解能ビームロスモニターからの信号を用いて、正確なビームロス発生時刻の測定を行っている。

distributed TDC システムは入射トリガー信号、ビームアポルト要求信号や revolution 信号の時刻も記録しているため、上述モニターからのビームロス・エントリーとそれらの時間関係を知ることが可能である。例えば「ビームロスが入射ビームによりもたらされたものか?」を同定することが可能であり、またストレージビームによるビームロスにおいても発生させたバッチの場所を $\pm 4 \text{ RF-bucket}$ の精度で同定することが可能である。

これらの機能の用いて、現在、SBL 事象の発生点の同定と原因究明が進められている。今後、同目的でビームロスモニターを増設し、そのすべてが distributed TDC に接続される予定であり、同システムが SBL の研究に大きく貢献すると期待される。

謝辞

本研究で用いたビームロスモニターは、SuperKEKB/Belle II 合同ビームロスモニターチームにより開発されました。同グループからは本公演に関しましてたくさんのご助力をいただきました。特に掲載したロスモニターデータは総研大の Yuxin Liu さんの解析結果を提供していただきました。こころより感謝いたします。またその他の皆様にも研究を遂行するうえで貴重な助言をたくさんいただきました。重ねて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/home>
- [2] H. Kaji and Y. Iitsuka, "Performance test and initial Application of White Rabbit system at SuperKEKB", in *Proc. of the 17th Annual Meeting of PASJ, online, Japan, Sep. 2020*.
- [3] <https://ohwr.org/project/spec/wikis/home>
- [4] <https://ohwr.org/project/fmc-tdc/wikis/how-to-set-up-the-spec-and-fmc-dio-with-epics>

- [5] [https://ohwr.org/project/fmc-tdc/wikis/
how-to-set-up-the-spec-and-fmc-tdc-with-epics](https://ohwr.org/project/fmc-tdc/wikis/how-to-set-up-the-spec-and-fmc-tdc-with-epics)