

SuperKEKB 用アボート・トリガー・システムの開発

DEVELOPMENT OF ABORT TRIGGER SYSTEM FOR SUPERKEKB

佐々木信哉^{#,A)}, 秋山篤美^{A)}, 岩崎昌子^{A)}, 内藤孝^{A)}, 中村達郎^{A)}

Shinya Sasaki^{#,A)}, Atsuyoshi Akiyama^{A)}, Masako Iwasaki^{A)}, Takashi Naito^{A)}, Tatsuro Nakamura^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have developed the new abort trigger system for SuperKEKB. The abort trigger system collects more than 130 abort signals and issues the abort kicker trigger signal. Since the response time of the system is required to be less than 20 μ s, the abort signals are transmitted as optical signals. The system also has the timestamp function to record the abort signal received time with a 0.1 μ s time resolution. Based on the performance tests, the response time of the modules is considered to be much shorter than cable delay. In the new system, the timestamp information gives the order of the received abort signals. This paper describes the design and the result of the performance test of the new abort trigger system.

1. はじめに

現在建設が進められている SuperKEKB 加速器は KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティの実現を目指す電子・陽電子衝突型加速器である^[1]。

SuperKEKB は 7 GeV の電子リング (HER) と 4 GeV の陽電子リング (LER) により構成される。加速器の構成機器や Belle II 測定器を保護する加速器保護システム (MPS) として、それぞれのリングにはビームアボートシステムが備え付けられている。ビームアボートを要求するアボート信号の数は 130 点を超え^[2]、アボート・トリガー・システムはそれらのアボート信号を集約し、アボートキッカーへ送信する役割を果たす。

KEKB 初期のアボート・トリガー・システムはローカル制御室 (LCR) と中央制御室 (CCR) の間をツイストペアケーブルで繋ぎ、アボート信号の伝達をしていた。ノイズ除去のため入力にはローパスフィルター (LPF) を入れていた。LPF の影響により、アボート・トリガー・システムの応答時間は 100 μ s 程度であった。その後、KEKB でも光信号によってアボート信号の伝達を行うように改良を行い、システムの応答時間はケーブル伝送時間による遅れとモジュールのゲート遅れ時間のみに依存するようになり、20 μ s 程度で動作するようになった。SuperKEKB のアボート・トリガー・システムも KEKB 後期と同様に光信号でアボート信号を伝達することで、システムの応答時間を極力短くするようにしている。

また、SuperKEKB のアボート・トリガー・システムでは、アボート信号を受信した時間をタイムスタンプとして記録する機能を持たせている。タイムスタンプの時間分解能は 0.1 μ s である。このタイムス

タンプによってアボート信号を検出した順序関係を明らかにすることが出来るようになるため、ビームアボートがトリガーされた原因の究明に役立てることが出来る。

本稿では、開発中のアボート・トリガー・システムの詳細と試験結果について報告する。

2. アボート・トリガー・システムの構成

2.1 システム構成モジュール

アボート・トリガー・システムは主に 2 つのモジュールから構成される。

1 つは、電気的なアボート信号を光信号に変換する 2ch ビームアボート光出力回路 (1424) である。1424 は TTL・RS-422・接点信号のアボート信号入力を光変換して出力を行う。入力信号の種類切り替え、極性の切り替えはスライドスイッチによって行う。1424 の写真を Figure 1 に示す。

もう 1 つは、光信号となったアボート信号を集約し論理和出力として光信号を出力する 8ch ビームアボート光入力回路 (18K15) である。18K15 はアボート信号を検出したチャンネル入力をラッチして保持するため、瞬間的なアボート信号であってもどの信号が作動したか確認できる。また、18K15 がリセットされるまでラッチした入力は解放せず、論理和をとったアボート信号を出力し続ける。18K15 はアボート信号入力をラッチした時間を内部クロックのカウンタと外部クロックのカウンタによってタイ



Figure1: 2ch beam abort optical output module (1424).

[#] shinya.sasaki@kek.jp

ムスタンプを付与する機能も備えている。タイムスタンプの機能については 2.2 で詳解する。以上のモジュールの動作にはソフトウェアが介在せず、基板上の FPGA によって処理される。また VMEbus により計算機からアボート信号の読み取り、タイムスタンプの読み取り、リセット信号の送信、入力チャンネルごとの Enable/Disable が可能である。18K15 の写真を Figure 2 に示す。



Figure 2: 8ch beam abort optical input module (18K15).

2.2 タイムスタンプ機能

アボート信号が単独で発生することは極めて稀であり、通常は複数のアボート信号が連鎖的に発生する。連鎖的に発生した信号の順序関係はビームアボートがトリガーされた原因を究明する際に有益な情報となる。したがって、SuperKEKB におけるアボート・トリガー・システムでは、検出したアボート信号に対してタイムスタンプの付与を行う。付与されたタイムスタンプを参照することにより、発生した複数のアボート信号の順序関係を明らかにすることが出来る。

アボート信号の集約を行う 18K15 は、アボート信号を検出・ラッチした時間をタイムスタンプとして保持しておく機能が入力チャンネルごとに備わっている。

タイムスタンプとして保持するのは 2 つのカウンタの値である。1 つは 18K15 内部に備える 10 MHz クロックをカウントするアボート計数カウンタ。もう 1 つは、18K15 に入力される外部クロックをカウントするトリガーパルス計数カウンタである。それぞれのカウンタは 32 ビットで構成される。アボート計数カウンタは外部クロック入力を検出するたびに 0 クリアされる。また 18K15 がリセットされた場合、アボート計数カウンタ・トリガーパルス計数カウンタがともに 0 クリアされる。リセット後、外部クロックを受信して初めて 2 つのカウンタがカウン

トを開始する。カウンタのタイミング図を Figure 3 に示す。

外部クロック入力 は 18K15 のモジュール間でのカウンタの同期のために利用される。アボート計数カウンタは外部クロック入力によって 0 クリアされるため、全ての 18K15 が 1 つの信号源からの外部クロックを受信するように構成することで、システム全体のカウンタの同期をとることが出来る。

このタイムスタンプの機能はソフトウェアを介さずに実装されており、アボート計数カウンタが 10 MHz でカウントするため、0.1 μ s の分解能を実現することができる。一方で、18K15 が保持するタイムスタンプ情報のみではアボート信号を検出した相対的な時間差を知ることはできるが、絶対的な日時を算出することは出来ない。絶対的な日時を算出するためには、信号原が外部クロックを発信した日時を記録するといったソフトウェア的な処理を必要とする。

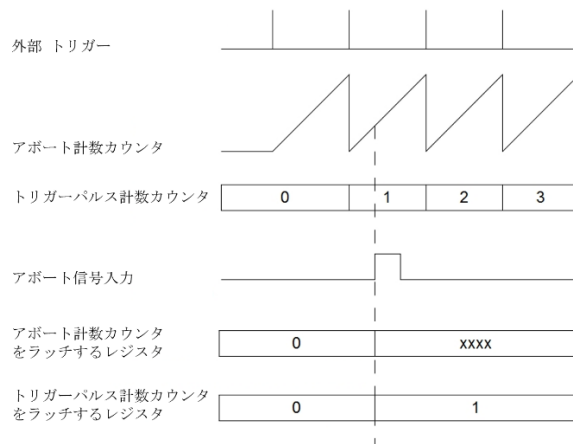


Figure 3: Timing diagram of two counters for abort timestamps.

2.3 システム全体構成

システムの全体構成を Figure 4 に示す。機器から発信される電気的なアボート信号は 1424 により光信号に変換され送信される。光信号として送信されたアボート信号は周長 3 km の加速器リングに点在する LCR に置かれた 18K15 で一度集約される。各 LCR で集約されたアボート信号は再び光信号として CCR に置かれた 18K15 で集約され、アボートキッカーへトリガー信号を送信する。LCR から CCR までの伝送距離は最長で 2 km であり、その伝送時間は 10 μ s である。

システムには他に 18K15 のタイムスタンプの同期をとるための外部クロックが必要になる。外部クロックの発信には KEKB の頃から使用されているイベントシステム^[3]を採用することにした。このイベントシステムは各地に点在する機器や IOC (Input/Output Controller) の同期に利用されており、タイムスタンプの同期をとるための外部クロックの

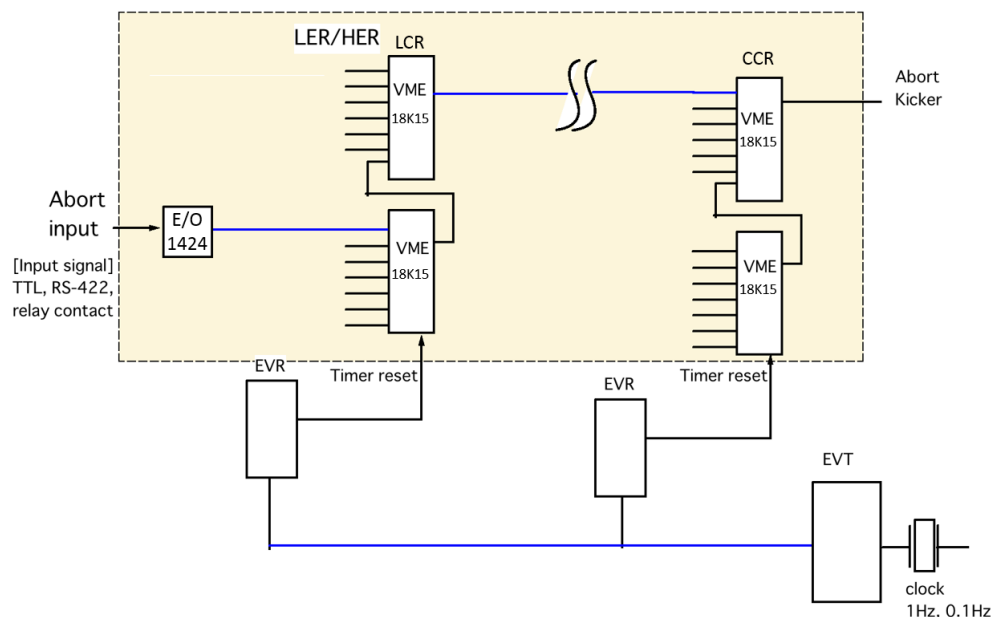


Figure 4: Schematic diagram of abort trigger system for SuperKEKB.

分配に適している。タイムスタンプの絶対的な日時
の算出のために、CCR に置かれたイベントシステム
の EVR が外部クロック出力のイベントを受信した
日時を IOC が取得するようにしている。取得した日
時は IOC が EPICS レコードとして読み出せるよう
にする。

3. 動作試験

3.1 応答試験

アボート・トリガー・システムがアボート信号を
受信し、アボートキッカーへのトリガー信号を発信
するまでの応答を確認するために figure 5 に示す構
成で試験をおこなった。1424、18K15 にはとも
に光信号の出力の他にテスト用の TTL 信号の出力が
あるため、オシロスコープではその TTL 信号を観測
した。1424、18K15 はアボート信号を検出した場
合、出力が Hi から Lo に切り替わる。また、1424
の入力は Hi Active の TTL 信号に設定した。信号を
伝達するための各ケーブルは数 m の長さのものを使
用した。

FUNCTION GENERATOR によってパルス幅 50 ns
の瞬間的なアボート信号を生成し、出力した結果を
figure 6 に示した。生成されたパルス幅 50 ns のア

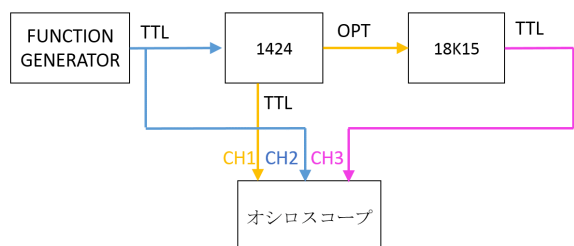


Figure 5: Schematic diagram of response time measurement of abort trigger system.

ボート信号 (CH2) は 1424 で光信号に変換され出
力されている (CH1)。1424 で光信号に変換された
アボート信号は 18K15 で受信され論理和光出力と
して出力されている (CH3)。以上の結果より、パル
ス幅 50 ns の瞬間的なアボート信号であってもア
ボート・トリガー・システムが作動することが確認
できる。また、FUNCTION GENERATOR によって
TTL のアボート信号が発信されてから 18K15 の論理
和信号が出力されるまで 150 ns かかっている。こ
の時間の遅延はケーブル伝送時間による遅れとモ
ジュールの処理時間によるものであると考えられる。
LCR から CCR までのケーブル伝送時間が最長 10 μs
であることを考えると 150 ns という遅延時間は十
分小さいため、1424・18K15 はアボート・トリ
ガー・システムとして使用するのに十分な応答速
度であるということが出来る。また、システム全体
の応答時間はケーブル伝送時間に大きく依存する
ということが出来る。

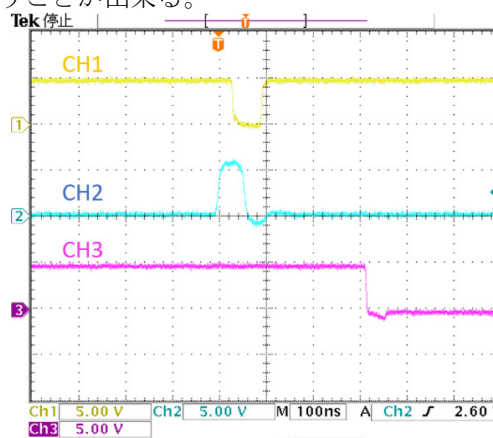


Figure 6: Response of abort trigger system to 50 ns abort signal input.

3.2 タイムスタンプ機能の動作確認

SuperKEKB の制御システムでは EPICS^[4]を採用しているため、IOC を通じて 18K15 の監視・制御を行うシステムを構築した。また、制御画面は CSS (Control System Studio) ^[5]によって構築した。

構築した制御システムで 18K15 のタイムスタンプ機能の動作確認を行った。動作確認では、1 枚の 18K15 に複数のアボート信号を任意のタイミングで入力し、ラッチされるタイムスタンプの結果を確認した。チャンネルごとにラッチされたカウンタのタイムスタンプを Figure 7 に示した。ラッチされたカウンタの値によって、アボート信号を受信した順序関係が理解できる。







		TRIG_TIME	ABORT_TIME
	CH1	0x20	0x92E8A
	CH2	0x23	0xDF10B
	CH3	0x2B	0xEF747
	CH4	0x2B	0x7DDAA
	CH5	0x32	0x5B32C6
	CH6	0x2F	0x3207FC

Figure 7: Hardware timestamps of each abort signal input.

CCR に置かれた EVR が外部クロック出力のイベントを受信した日時を基準にしてタイムスタンプを日時表示にした結果を Figure 8 に示した。このタイムスタンプの日時はソフトウェア処理によって取得した日時を使用する。そのため、実際の日時からは数 ms の誤差が発生することが想定される。しかし、それぞれのタイムスタンプ間の相対時間の精度は 18K15 がラッチしたカウンタのタイムスタンプの精度に依存する。ラッチしたカウンタのタイムスタンプの精度はアボート計数カウンタのカウントクロックである 10 MHz の精度、各 18K15 に分配した外部クロックによる同期の精度に依存する。したがって、タイムスタンプ間の相対時間の誤差は数 μ s であると考えられるが、実際どれほどの精度で測定できるかは今後試験する必要がある。

CH1	2014/07/16 11:40:51.752964056
CH2	2014/07/16 11:40:54.784157756
CH3	2014/07/16 11:41:02.790870956
CH4	2014/07/16 11:41:02.744340056
CH5	2014/07/16 11:41:10.290467656
CH6	2014/07/16 11:41:07.020674656

Figure 8: Timestamps of time and date format calculated by software process.

4. まとめと今後の課題

各機器が発信するアボート信号を集約するアボート・トリガー・システムの開発を SuperKEKB に向けて進めている。システムの応答時間はケーブル伝送時間に大きく依存し、SuperKEKB の場合は最大 10 μ s ~ 20 μ s 程度になる見込みである。本システムではアボート信号を受信した時間をタイムスタンプとして記録することで、発生した各アボート信号の順序関係を把握することが出来るようになる。

今後の課題として、2つの課題が挙げられる。

1つは各地に点在する 18K15 のタイムスタンプの同期である。同期に使用しているイベントシステムを用いた外部クロックは伝送距離に応じた遅延が発生するため、18K15 が外部クロックを受信する時間にはばらつきが生まれる。したがって、場所によってどれだけの遅延が発生するかを事前に測定しておく、ソフトウェアにより補間する必要がある。

もう1つはタイムスタンプの精度の測定である。タイムスタンプの精度はカウンタクロックである 10 MHz の精度と、外部クロックによる同期の精度に依存する。したがって、外部クロックの伝送時間の遅延の測定・補間がどれだけの精度で可能であるかを含めて検討する必要がある。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi et al., "Accelerator design at SuperKEKB", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, 03A011.
- [2] H. Fukuma et al., "Progress in KEKB beam instrumentation systems", Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A007.
- [3] T. Naito et al., "Performance of the timing system for KEKB", ICALEPCS'99, Italy, Oct. 4-8, 1999.
- [4] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [5] <http://www.aps.anl.gov/epics/eclipse/>