

# SuperKEKB における高速光ファイバービームロスモニターシステムの開発 DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED BEAM LOSS MONITOR SYSTEM WITH OPTICAL FIBER IN SuperKEKB

小笠原 舜斗<sup>#</sup>, 池田 仁美, 小林 鉄也, 西脇 みちる

Shunto Ogasawara<sup>#</sup>, Hitomi Ikeda, Tetsuya Kobayashi, Michiru Nishiwaki  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

SuperKEKB is the e-/e+ collider that aims the world's highest luminosity. To achieve the target luminosity, the design beam current has been set at a remarkably high value of 3.6 A. Large beam loss from high current beam may seriously damage Belle II detector and/or other equipment. As a countermeasure, it is required to detect dangerous beam loss as fast as 1 microsecond and abort stored beam immediately. In recent operations, arc sensors using optical fiber, which are adopted at some RF stations, have triggered unwanted(accidental/incorrect) RF-interlock due to beam loss frequently. These events are not the intended use of the arc sensor, but they were useful when regarded as high-speed loss monitors. Therefore, we have developed and installed a new high-speed beam loss monitor system using an optical fiber and a high-speed signal processor. It was confirmed that this system shortened the time to beam abort by several microseconds.

## 1. はじめに

SuperKEKB[1]は、標準理論を超える物理探索を目的とした、周長 3 km の電子陽電子衝突型円形加速器である。SuperKEKB は、前身である KEKB の数十倍のルミノシティ(衝突頻度)を目標としており、蓄積ビーム電流も最大 3.6 A(設計値)という世界最大級に設定されている。

大電流ビームに由来する巨大なビームロス、ビームラインを構成する各種機器に深刻な故障をもたらす恐れがある。特に最近では、Sudden Beam Loss (SBL)[2]と呼ばれる原因不明のビームロス事象が問題となっている。SBL の特徴として、1~数ターン(10  $\mu$ s/turn)以内に前兆なく発生する事、ロス電荷量が非常に大きい(パンチトレインの半分以上)場合がある事などが挙げられる。特に高感度な素粒子検出器の集合体である Belle II検出器[3]にとっては重大な脅威であり、原因究明と検出器保護対策の両方が急がれている。

検出器保護対策の一つとして、ビームアボートの高速化が要求されている。現状では、信号伝達距離が長いことなどから、アボート要求から実際にアボートされるまで数十  $\mu$ s 程度のタイムラグがある。これを 1  $\mu$ s でも短縮することが、リスク低減に資すると考えられている。

SuperKEKB の高周波加速システム[4]では、ビーム加速のために最大 1 MW 級の連続波 RF を加速空洞 (ARES 空洞)[5]に貯蔵する。空洞内での放電は故障や真空悪化の原因となるため、ARES 空洞には放電を検知してアボート要求を出すためのアークセンサ[6]が設置されている。一部の RF ステーションでは、空洞壁に光ファイバーの一端を直接取り付け、放電光を地上の光センサ(光電子増倍管:PMT)へ直接輸送する方式のアークセンサを装備している。

ビームロスなどの荷電粒子が光ファイバーを横切ると、チェレンコフ光を発生させることが知られている[7]。ARES 空洞のアークセンサにおいても、ビームロスによるチェレンコフ光を PMT が放電光と誤認し、空洞放電のインターロックによってアボートを要求する事象がしばしば発生していた。これはアークセンサの本来の目的を考

ると誤検知に他ならないが、アークセンサ自体が応答性を追求したシステムであることに加えて設置場所の関係もあり、結果的に本職のロスモニターよりも数  $\mu$ s 早くアボートを出している事象がしばしば見られた。これは検出器保護の観点からは有用なので、しばらくの間アークセンサは実質的なロスモニターとしても(むしろ積極的に)運用されていた。しかしこれでは空洞放電のアボートと区別がつかず、運転判断(アボート原因の解析)に支障が生じる。

そこで、独立したロスモニターとして使用するための光ファイバーを、アークセンサとは別に新規にビームラインへ敷設した。さらに、FPGA を用いた高速な信号処理装置をあわせて製作し、空洞アークセンサに代わる高速ロスモニターシステムとして構築した。

## 2. 光ファイバーの敷設

### 2.1 SuperKEKB の概要

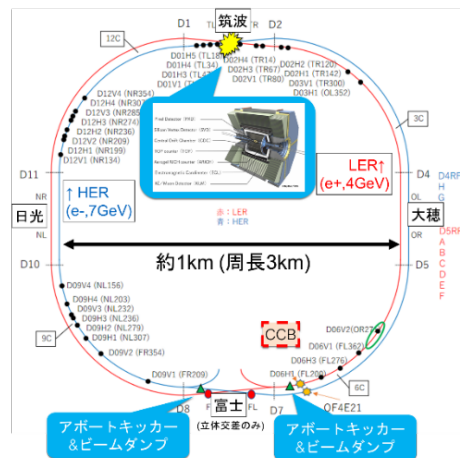


Figure 1: Overview of SuperKEKB.

Figure 1 に、SuperKEKB 主リングの概要を示す。SuperKEKB は 7 GeV 電子リング(High Energy Ring, HER) と 4 GeV 陽電子リング(Low Energy Ring, LER)で構成される。トンネルは 4 つの直線部(筑波、大穂、富士、日光)を 4 つの曲線部でつないだ構成である。Belle II 検出器を含む衝突点は、筑波直線部にある。

SuperKEKB のアボートキッカー[8]およびビームダンブは富士直線部に設置されており、筑波直線部とは反対側にあたる。中央制御棟(CCB)は、富士直線部に比較的近い位置にある。CCB では、リング各所からのアボート要求を一旦集約してアボートキッカーを立ち上げている[9]。

筑波以外の 3 つの直線部には 6 つの RF セクション(D4, D5, D7, D8, D10, D11)があり、両リング合わせて 30 式の加速空洞(ARES または超伝導空洞)が設置されている。特に D5 セクション(大穂直線部)に設置されている 6 台の ARES 空洞(D05A~F, LER)のアーケセンサが光ファイバーを使用しており、ビームロスに反応する。

## 2.2 光ファイバーの敷設

ARES のアーケセンサが SBL に反応した事象では、D5 セクションのうち LER 上流側(富士直線部側)のアーケセンサほど強い信号が観測される傾向があった。そこで、光ファイバーの敷設場所は D5 セクションの上流にあたる南曲線部(富士直線部と大穂直線部を結ぶ曲線部)とした。ここには D6 電源棟と呼ばれる地上建屋があり、CCB への距離も比較的短いため、配線経路の面でも有利である。Figure 2 に、敷設方法の概略を示す。

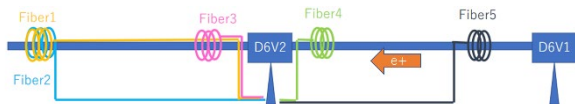


Figure 2: Arrangement of optical fibers.

光ファイバーはコア径 62.5  $\mu\text{m}$  の市販の単芯ファイバーで、南曲線部の D6V2 コリメータを中心に 5 本、それぞれ経路を変えて敷設した。敷設したファイバーは 6 芯光ファイバーで集約し、D6 電源棟の受光装置へ接続した。

受光装置は ARES 用アーケセンサ向けの NIM モジュールをそのまま流用した。PMT(浜松ホトニクス H6780)を 4 つ内蔵しており、4 ch の光信号を強度に応じた電気信号に変換する機能を有する。H6780 の信号立ち上がり時間は 0.78 ns であり、今回の目的に対して十分な応答性を持つ。

Figure 3 に、オシロスコープで観測したビームロス信号の例を示す。典型的な SBL では、ビームロス信号は幅 10  $\mu\text{s}$  程度のピーク 2 山となることが多い。チャンネルごとに強度は異なるものの、概形は他のロスモニターで観測される信号とも一致しており、正しくビームロスを観測できていると考えられる。

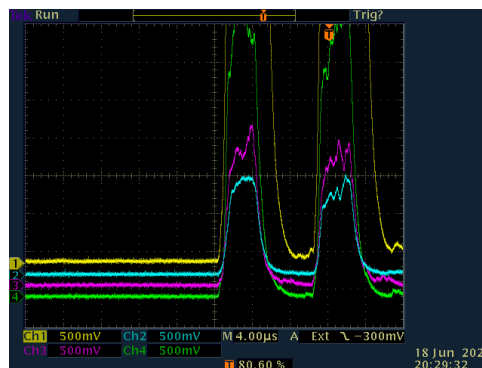


Figure 3: Example of a typical beam loss signal.

## 3. 信号処理装置

### 3.1 信号処理装置概要

受光装置によってアナログ電気信号に変換したビームロス信号を高速に処理し、アボートの必要性を素早く判断するための信号処理装置を新規に製作した。Figure 4 に、装置の外観を示す。

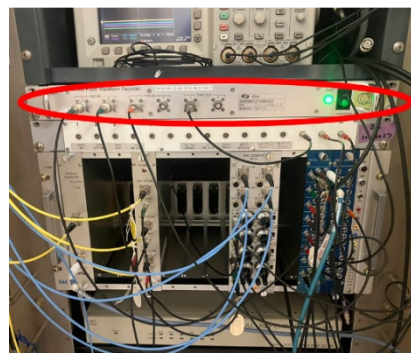


Figure 4: The signal processing unit (red ellipse).

信号処理装置は 19 インチ規格 1U の大きさで、アナログ入力、外部トリガ出力、外部トリガ入力用の BNC ポートをそれぞれ 2CH ずつ持つ。

Figure 5 に、信号処理装置のタイムチャートを示す。アナログ入力に入ってきた信号は、40 Msps で AD 変換(16bit)され、リングバッファへ記録される。入力信号が一定の条件(後述)を満たした場合は、速やかに外部トリガ出力ポートよりアボート要求信号を発する。これらの基本的な仕様は KEK で策定し、詳細設計および実機製作は(株)三光社へ依頼した。

ビームアボートを要求するからには、その事象(アボート原因)を後から担当職員が解析できることは必須である。そこで、アボート要求に至った波形データを保存するため、アボート後はリングバッファのデータを外部サーバーへ転送するようにした。転送されたデータは後述の加工ツールで加工され、担当者や運転シフト職員らが確認できるようになる。

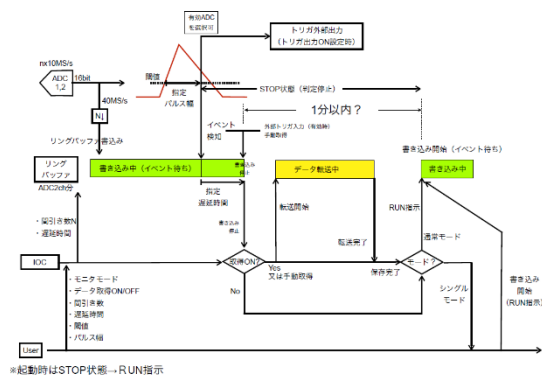


Figure 5: Time chart of the signal processing unit.

### 3.2 ビームアボートの判定

ビームアボートの判定方法は、実績のあるアークセンサの判定方法を踏襲して決定した。Figure 6 に、標準の判定ロジックを示す。

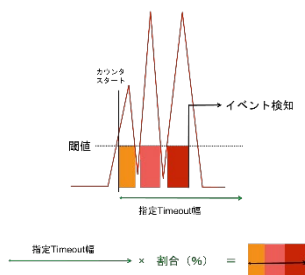


Figure 6: Abort decision logic.

アボートを判定するために、ADC 閾値(以下閾値)、タイムアウト時間(以下 TO)、時間割合の 3 つのパラメータをあらかじめ定める。ADC 入力が閾値を超えると、信号処理装置はクロックカウンタをスタートさせる。その後 TO に達するまでのクロックのうち、閾値を超えていたクロック数が TO に対して指定した割合を超えた場合、その時点でアボート要求を出す。指定の割合を超えないまま TO に達した場合は、何もせずクロックカウンタをリセットする。

このような判定方法を採用しているのは、宇宙線による信号とビームロスとを区別するためである。これらはその信号幅で概ね区別することができる。一方で、Fig. 3 に示したようにビームロスは 2 山以上のピークとなる場合も多いので、「ADC 入力が閾値を下回るまでのクロック数」とすると、このような信号を見誤る可能性がある。

本装置の導入の目的(1  $\mu$ s を争う高速なアボート判断)を考えると、TO 時間を可能な限り短く(または割合を少なく)することが重要である。しかし TO 時間を短くするほど、宇宙線による誤作動の頻度が上昇する。具体的な TO と割合は、これらのトレードオフを考慮して試行錯誤で決めるしかない。幸いにして我々の場合はアークセンサの運用経験があったため、比較的スムーズに調整を進めることができた。現在は、TO が 10  $\mu$ s、割合 30% (ピーク幅

3  $\mu$ s で発報)に設定している。

### 3.3 VETO 機能

本システムは SBL 等の大きなビームロスへの対応を主眼としている。アボートの必要がない軽微なビームロスでは、当然反応しないことが望ましい。特に SBL はビーム入射とは関係がないとされているため、入射タイミングで発生する比較的大きな(しかしアボートするほどでもない)ビームロスは無視したい。そこで、信号処理装置にはトリガ信号入力による VETO 機能を設けた。トリガ信号として入射トリガ信号を受信すれば、入射タイミングのみアボート判定を短時間(1 ms)休止させることができる。

本機能が存在することにより、アボート判定における閾値を引き下げることができる。これはビームロスの立ち上がりに対してカウンタの開始タイミングを早めることを意味するため、結果としてアボート判定を更に高速化できると考えられる。ただし、本機能は SuperKEKB の長期シャットダウン(LS1)開始後に追加されたもののため、実際のビーム運転ではテストされていない。具体的な閾値の再調整は、運転開始後の課題となる。

### 3.4 積分によるビームアボート判定

ビームアボートの判定方法として、3.2 節で述べた方法のほかに、一定期間の ADC 値の積分を用いる方法も考えられる。積分による判定機能も LS1 開始後に追加され、3.2 節で述べた判定方法と選択(または並立)できる。

ADC(40 Msps)の入力値から、過去一定時間(最大 100 $\mu$ s)の積分値が常にリアルタイムで算出され、その積分値が積分用の閾値を超えた場合にアボート要求を出す。蓄積するデータ点数は 2 の累乗で選択可能で、128 から 4096 点まで選択できる。また、積分用に蓄積する値はオフセット値を加えることもでき、ノイズレベルを差し引いての積算が可能である。

本機能も、実際のビーム運転では未だテストされていない。VETO 機能と同様に、調整は今後の課題となる。

### 3.5 その他の機能

リングバッファやアボート判定等の信号処理は、FPGA(Zynq 7000)上に実装することで高速化を図っている。動作クロックは 40 MHz の内部クロックである。CPU 上では Linux(Ubuntu 18.02)および EPICS IOC を動作させている。アボート判定の閾値をはじめとした各種パラメータを全て EPICS レコード化することで、ネットワークを通じた設定変更を容易に行えるようにした。

リングバッファの外部サーバーへの転送は、外部サーバーが信号処理装置の Linux ファイルシステムを NFS マウントすることで実現している。

## 4. データ解析ソフトウェア

外部サーバーへ転送されたリングバッファのデータは独自フォーマットのバイナリ形式であり、解析に手間がかかるものである。担当職員が後から腰をすえて解析するためには問題ないが、運転シフト職員やオペレータの立場からは、アボートの原因はアボート発生直後に確認したい。本システムによるアボートの場合は、ビームロスを正しく検知した(または誤検知した)という事実、ビームロスの様態(概形や信号強度)といった基本的な情報を、ア



ポートから遅くとも数分程度で提供することが望ましい。

そこで、転送されたデータを更に扱いやすく加工するソフトウェアを製作した。このソフトウェアは、データ転送先となるサーバー上で常時稼働する Python スクリプトであり、転送先ディレクトリを定期的に巡回する。新たなファイル転送を確認すると、アボート前後 5 ms および 50  $\mu$ s の範囲のデータを切り出し、その波形の画像ファイルおよび csv ファイル(5 ms のみ)、イベントの概要(ピーク高さ、アボート時のビーム電流など)を json 形式のテキストでまとめたファイルを作成する。Figure 7 に、作成されたグラフ画像(アボート前後 50  $\mu$ s)の例を示す。

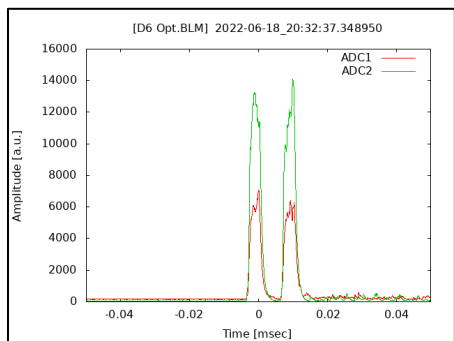


Figure 7: Example of picture (50  $\mu$ s) generated by analyze software.

さらに、これらのデータを簡単に確認できるよう、専用の web ページを合わせて整備した。web ページでは json ファイルを基にイベントの一覧を表示するほか、各イベントに対して人間がコメントを書き込むこともできる。Figure 8 に、web ページの表示例を示す。

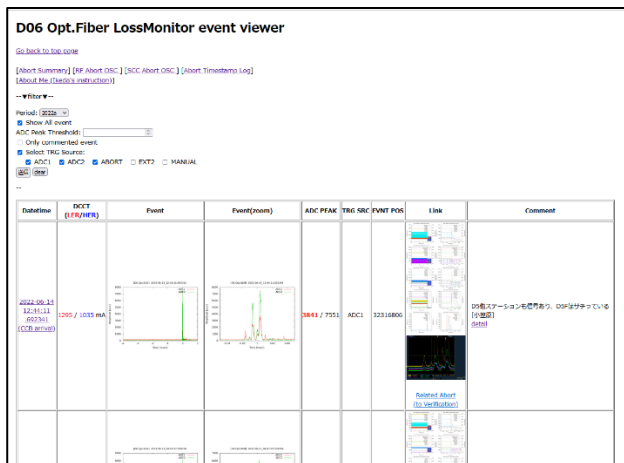


Figure 8: Event summary web page.

## 5. 運用結果

本システムは試験運用期間(アボートを出さずにイベントの波形だけを収集する)を経て、2022年6月より本格運用(実際にアボート要求を出す)を開始した。運用開始の2週間後に SuperKEKB は LS1 に入ったが、停止ま

での間に本システムでは 9 回の発報(宇宙線起因と思われる誤発報 3 回を除く)があった。そのうち、本システムのアボート信号が最も早く CCB へ到達した事象は 7 回だった。Figure 9 に、そのような事象の一例を示す。

SuperKEKB では、アボート信号の時刻を高精度に記録するシステム[10]が整備されており、Fig. 9 は CCB へアボート要求信号が到達した時刻と順序を示している。リング各所から出たアボート要求信号は、点在する集約モジュールを経由して CCB へ送られる。「Time」が集約モジュールへの信号到達時刻を、「Central Time」が CCB へのアボート信号到達時刻を示している。つまり「Central Time」は、集約モジュールから CCB までの配線距離に応じて「Time」よりも遅れる。ただし光ファイバーロスモニターについては、集約モジュールを経由せず直接 CCB へ信号を送信している。

RING	Source	Central Time	Signal	Time	Delta
LER	Loss Monitor D6 (Optical Fiber)	2022-06-18 20:32:37.322304000	Loss Monitor D6 (Optical Fiber)	2022-06-18 20:32:37.322304000	0.000 005 200
			Loss Monitor D7-1	2022-06-18 20:32:37.322305900	0.000 007 100
			RF D7-A	2022-06-18 20:32:37.322333100	0.000 034 300
LER	D7	2022-06-18 20:32:37.322307400	RF D7-B	2022-06-18 20:32:37.322339500	0.000 036 700
			RF D7-E	2022-06-18 20:32:37.322344400	0.000 045 600
			RF D7-D	2022-06-18 20:32:37.322352000	0.000 053 200
			Loss Monitor D4-3	2022-06-18 20:32:37.322305700	0.000 006 900
LER	D4	2022-06-18 20:32:37.322310400	Loss Monitor D4-2	2022-06-18 20:32:37.322307800	0.000 009 000
			Loss Monitor D4-1	2022-06-18 20:32:37.322308100	0.000 009 300
LER	D2	2022-06-18 20:32:37.322316900	Belle2 CLAWS	2022-06-18 20:32:37.322298800	0.000 000 600
			Belle2 VVD diamond	2022-06-18 20:32:37.322306300	0.000 007 500
			Belle2 CLAWS	2022-06-18 20:32:37.322300200	0.000 001 400
HER	D2	2022-06-18 20:32:37.322313500	Belle2 VVD diamond	2022-06-18 20:32:37.322307700	0.000 008 900

Figure 9: Example of abort timestamp.

Figure 9 の例では、Belle II 測定器に取り付けられた CLAWS と呼ばれるロスモニターからのアボート要求が最も早く発行されている(「Time」が最速)が、CCB までの信号伝達に 12.1  $\mu$ s を要している。その間に光ファイバーロスモニター[Loss Monitor D6 (Optical Fiber)] の信号が CCB へ到達しており、これが最初(「Central Time」最速)であった。時系列で整理した図を、Fig. 10 に示す。

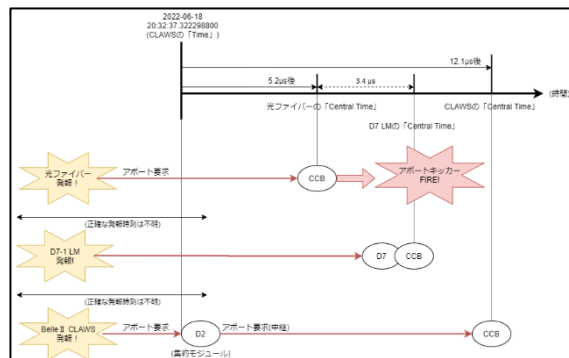


Figure 10: Time chart of the event.

光ファイバーロスモニターの「Central Time」は、2 番目の信号(Loss Monitor D7-1, 既存のロスモニター)よりも 3.4  $\mu$ s 早い。LS1 直前の時点での SuperKEKB 運転では、アボートギャップを 2 つ(5  $\mu$ s 間隔)設けているので、

3.4  $\mu\text{s}$  の高速化は、68%程度の確率で半周早くアボートできると解釈できる。

## 6. まとめ

SuperKEKBにおいて、光ファイバーを用いた高速ロスモニターシステムを導入した。本システムの導入によってビームアボートを数  $\mu\text{s}$  高速化することができ、RF のトラブルとビームロスによるアボートが紛らわしい問題も解決することができた。

SuperKEKB の運転再開後は、VETO 機能や積分機能など新規に追加した機能の検証・調整を進め、さらなる性能向上を目指していく予定である。

## 謝辞

(株)三光社の皆様には、信号処理装置の開発において、FPGA 処理の実装を含む多大な貢献をいただきました。また新規機能の追加・改修に際しても、大変なご助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] Y. Funakoshi *et al.*, "The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity", Proc. of IPAC2022, pp. 1-5.
- [2] H. Ikeda *et al.*, "Fast Trigger System for Beam Abort System in SuperKEKB", Proc. of IPAC2022, pp. 754-756.
- [3] <https://www.belle2.org/>
- [4] K. Akai *et al.*, "RF System for SuperKEKB", Proc. of PASJ2010, pp.177-181.
- [5] T. Kageyama *et al.*, "Development of High-Power ARES Cavities", Proc. of PAC97, 1997, pp. 2902-2904.
- [6] K. Nakanishi *et al.*, "Evaluation of the optical fiber for arc sensor for the RF system in SuperKEKB", Proc. of PASJ2014, pp.819-822.
- [7] Y. Yano *et al.*, "Optical Fiber Beam Loss Monitor", Proc. of PASJ9, pp.902-906.
- [8] T. Mimashi *et al.*, "The Abort System of SuperKEKB High Energy Ring", Proc. of PASJ2017, pp.279-282.
- [9] S. Sasaki *et al.*, "Development of Abort Trigger System for SuperKEKB", Proc. of PASJ2014, pp.1267-1270.
- [10] S. Sasaki *et al.*, "Development of time stamp recording system for SuperKEKB abort trigger system", Proc. of PASJ2017, pp.610-612.