

SuperKEKB 加速器ビームアボートシステムアップグレード UPGRADE OF BEAM ABORT SYSTEM AT SuperKEKB

梶 裕志 ^{*,A)}, 小玉 恒太 ^{A)}, 多和田 正文 ^{A)}, 三増 俊広 ^{A)}, 宇野 健太 ^{A)}, 中山 浩幸 ^{A)}, 角野 秀一 ^{B)}, 北村 和樹 ^{B)},
ウアブシャト ベラ ^{C)}, アヴェルサーノ ミケーレ ^{C)}, 吉原 圭亮 ^{D)}

Hiroshi Kaji ^{*,A)}, Kota Kodama ^{A)}, Masafumi Tawada ^{A)}, Toshihiro Mimashi ^{A)}, Kenta Uno ^{A)}, Hiroyuki Nakayama ^{A)},
Hidekazu Kakuno ^{B)}, Kazuki Kitamura ^{B)}, Bela Urbchat ^{C)}, Michele Aversano ^{C)}, Keisuke Yoshihara ^{D)}

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

^{B)} Tokyo Metropolitan University

^{C)} Nagoya University

^{D)} University of Hawaii at Manoa

Abstract

The upgrade of Beam Abort System is carried out at SuperKEKB. It is necessary to speed up the beam abort action so that the abnormal beam is quickly thrown. The accelerator hardware can be protected from the large radiation that is caused by the beam loss accidents like Sudden Beam Loss (SBL). We installed the new abort detector at the D05 region which is upstream from the interaction region in March 2024. It realized the more earlier detection of SBL. In 2024 spring operation, We had 168 SBL accidents at the positron ring. The new abort sensor provided the first abort request signal in 148 of them. Besides, the transfer time of beam abort signals plans to be shortened by installing the abort master system near the power supply circuit of the abort kicker pulse magnet.

1. はじめに

KEK つくばキャンパスに建設された電子陽電子衝突型加速器 SuperKEKB では、たった 1,2 ターンのうちに蓄積ビーム電流の数割を失うアクシデント事象が頻発している。Sudden Beam Loss (SBL) と名付けられたこの突発的事象は、ビームロスに伴い発生する放射線による機器の損傷が深刻であり、SuperKEKB にとって目下の一番の問題となっている。2024 年春期運転では Belle II 検出器の最内層に設置されたピクセル型崩壊点検出器への被害が深刻となり、現在、同検出器の運用を停止している。

SBL 被害の軽減策として「ビームアボートシステムの応答を高速化」により「異常状態にあり放射線を発生しているビームを直ちに破棄 (アボート) し機器を保護することが構想され、現在、そのためのアップグレード計画が実行されている。この計画は「SBL 事象の早期検知」「経路改善によるアボート要求信号の伝達時間の短縮」の 2 要素を実現するものである。

本稿では、SBL 事象の特徴をアップグレードの着想に至った経緯と共に説明し、その後、ビームアボートシステムとそのアップグレード計画について報告する。

2. SUDDEN BEAM LOSS

図 1 は SBL 事象における全バンチ電流の各周回時の測定結果の 1 例である。ビームロスが始まってから、アボートされるまでの 3 ターンで蓄積電流の約半分が失われていることがわかる。SBL の原因はいくつか仮説が存在するものの、その究明はまだ途上であり完全な理解はなされていない。また特徴の異なる複数種類の SBL 事象が存在することからも、SBL に至るメカニズ

ムも 1 つではないと考えられている。

SBL は SuperKEKB 加速器・Belle II 検出器に大量の放射線を照射するため、これら機器を損傷する場合がある。またその発生頻度が蓄積電流とともに上昇することが経験的にわかっており、ルミノシティ増強に向けた運転計画に遅れを生む原因になっている。

2022 年春期運転中に陽電子リングで発生した SBL 事象について、最初にビームロスを検知した場所を図 2 (上) にまとめた。この測定は CsI クリスタルシンチレータと光電子増倍管で作られた時間分解能の良いビームロス検出器をリング全周のコリメータ付近に設置することで実施した [1]。これらビームロス検出器からの信号は White Rabbit システムを応用した TDC [2] に入力されており、リンク全周でビームロス発生時刻を共通の時計で測定することができる。

多くの場合に D06 区域に設置された垂直方向コリメータ (D06V1, D06V2) で最初にビームロスを検知していた。図 2 (下) に衝突点とこれらコリメータの位置関係を示す¹。この結果から SBL 事象の原因がこの D06

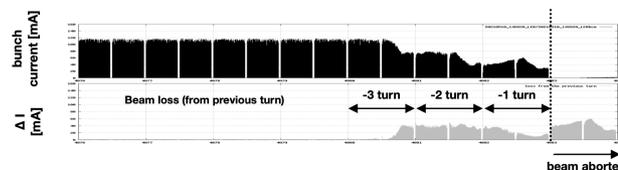


Figure 1: An example of SBL: the figure shows the bunch current (up) and the change in bunch current from the previous turn (low) for the seven turns before the beam abort. The post-abort beam loss indicates the amount of beam dumped due to the abort itself.

* hiroshi.kaji@kek.jp

¹ 図において陽電子ビームは反時計回りに進む。

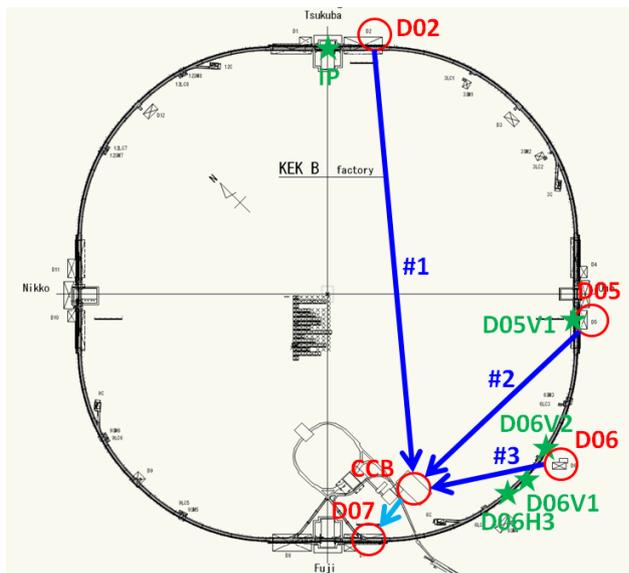
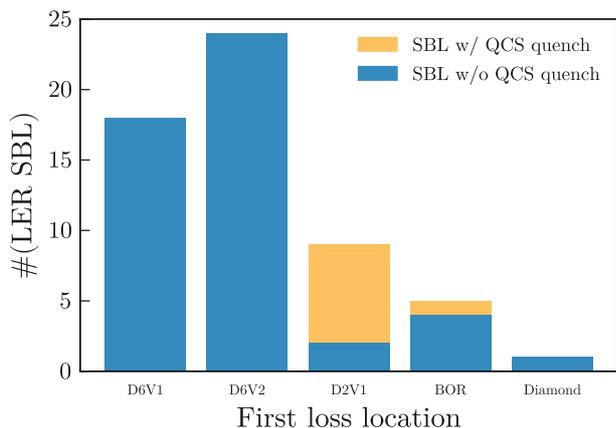


Figure 2: Summary of SBL events during the 2022 machine operation (up) and the schematic view which indicate the positional relationship between the key collimators and the experimental halls (low).

区域かより上流にあることが明らかになった。

3. BEAM ABORT SYSTEM

ビームや加速器機器に異常が発生した際にビームをアボートし加速器運転を停止するビームアボートシステムは「アボート検出器」「アボートトリガーシステム」「ビームダンプ及びアボートキッカー電磁石」からなる複合システムである。本節ではこのうちでアップグレード計画に関連する「アボート検出器」「アボートトリガーシステム」についてのみ言及する。ビームダンプ及びアボートキッカー電磁石は、異常発生時にビーム軌道を蓄積ビームラインからビームダンプラインへ誘導しアボートする機器である。こちらについては [3] を参照されたい。

3.1 アボート検出器

アボート検出器には加速器機器の異常を検知する「機器異常検出器」とビーム診断システムを応用しビー

ム異常を検知する「ビーム異常検出器」の2種類が存在する。異常検知時にアボート要求信号を発報し近隣のアボートトリガーシステムに送信する点はどちらも同じである。機器異常検出器は、機器の印加電流・電圧の異常、温度や圧力などの変化を検知しアボート要求する。一方、SBLにおいてアボート要求信号を発報するのは主にロスモニター型のビーム異常検出器である。

SBL の多くの場合にアボート電磁石トリガー回路が設置されている中央制御棟 (CCB) に最初にアボート要求信号を届けているのは、衝突点に設置された CLAWS (sCintillation Light And Waveform Sensors) と呼ばれるアボート検出器で、これはプラスチックシンチレータと SiPM 光検出器からなるビームロス検出器である。

衝突点が CCB とはリングのほぼ反対位置 (図 2 参照) であるにも関わらず、CLAWS のアボート要求信号が最初に届けられるのは、同検出器のビームロスに対する応答速度が速いからである。

次節で取り上げるビームアボートシステムのアップグレードにおいては、衝突点より上流への CLAWS 設置による SBL の早期検知について議論する。

3.2 Abort Trigger System

アボートトリガーシステム [4] は SuperKEKB リング全周の各機器からのアボート要求信号を集約し、アボートキッカー電磁石のトリガー信号を制御するシステムである。図 3 にその概要を示す。

アボートトリガーシステムのマスターノードとスレイブノードは共通の VME 型モジュールにより構築されている。これは光信号を入出力とした fan-in モジュールであり、8 チャンネルの光入力信号を 1 つにまとめ、上段のモジュールへの信号を出力する。システムの堅牢性を担保するため、fail-safe ロジックが採用されており、アボート要求信号の入力はラッチされる仕様となっている。

アボートトリガーシステム全体の応答を律速するのは、アボート要求信号のスレイブ・マスターモジュール間の転送時間である。そのため転送経路の短縮によるアボートトリガーシステム応答の高速化も次節で議論するアップグレードの対象となっている。

4. BEAM ABORT SYSTEM アップグレード

「衝突点 CLAWS からアボート要求信号が CCB に最初に届けられていること」「最初にビームロスを検出するのは衝突点より上流の D06 区域であること」が多量の SBL で示されているため、ビームロスが最初に検出される区域にアボート検出器を設置することで、以下 2 つの利点を得ることが示唆された。

- SBL 事象を早期に検知可能
- 立地的に衝突点より短い輸送時間 (輸送距離) でアボート要求信号をアボートダンプに伝搬可能

この節では上記に基づきビームアボートを高速化するアップグレード計画について言及する。

4.1 予備実験

アップグレード計画の有効性実証のため、図 2 の試験で D06V1 コリメータに設置したシンチレータ型ビー

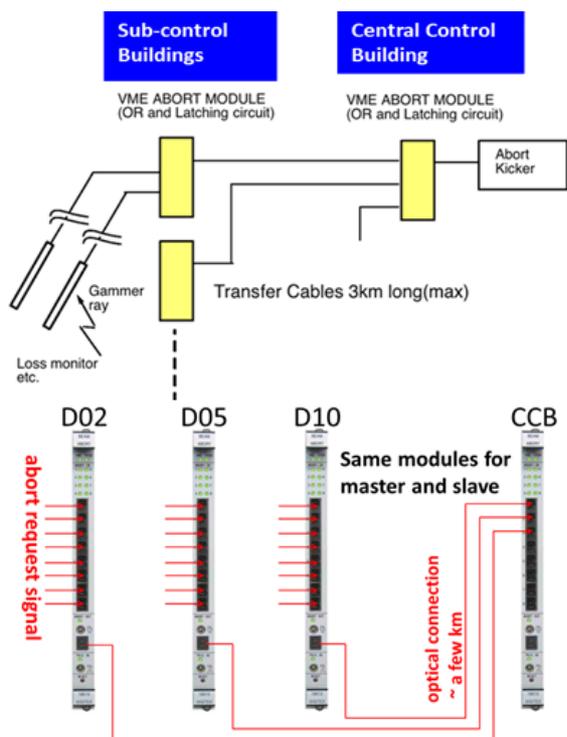


Figure 3: Schematic view of Abort Trigger System: the entire system is demonstrated (up) and the optical connection between the VME-type abort module is shown with its picture (low).

ムロス検出器からビームロス検知時に疑似アボート要求信号を発報させ、それと実際のアボート要求信号のそれぞれがCCBに届く時間の時差を測定した。

図4は同実験を2022年6月に実際におきた陽電子リングSBL事象で同実験を行った結果まとめたものである。D06V1付近で最初にビームロスを検知した場合、疑似信号は正規信号より5~10マイクロ秒早くCCBへ届けられていた。これはD06V1が衝突点より~1km上流にあることと、D06電源棟からCCB(図2(下)のルート#3)はD02電源棟からCCB(同ルート#1)より輸送時間が5.6マイクロ秒短いことが主に起因している。

この予備試験を受け、衝突点ですでに運用されSBL時のアボート応答に実績があるCLAWSをD05, D06区域のコリメータ付近に増設することが決定し、その最初の設置場所としてD05V1垂直コリメータ付近が選ばれた。D05V1は2022-2023年長期運転停止期間中に設置され、2024年以降の運転でビーム背景事象抑制のために積極的に用いられる主コリメータであり、SBL時にも大きなビームロスが検出されると考えられた。

4.2 CLAWS 増設

2024年春期運転よりD05V1コリメータ付近にCLAWSセンサー(CLAWS@D05V1)を4つ増設した。図5はD05V1とCLAWS設置個所を示した写真である。4つのセンサーのうち1つはコリメータより上流に、残りはコリメータより下流に設置している。

これらセンサーのコミッショニングは2024年2月

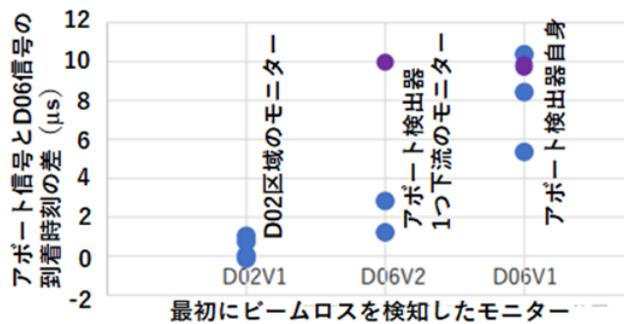


Figure 4: Summary of SBL events during the 2022 machine operation (upper figure) and the positional relationship between key collimators in LER (square marks) and the experimental hall (lower figure).

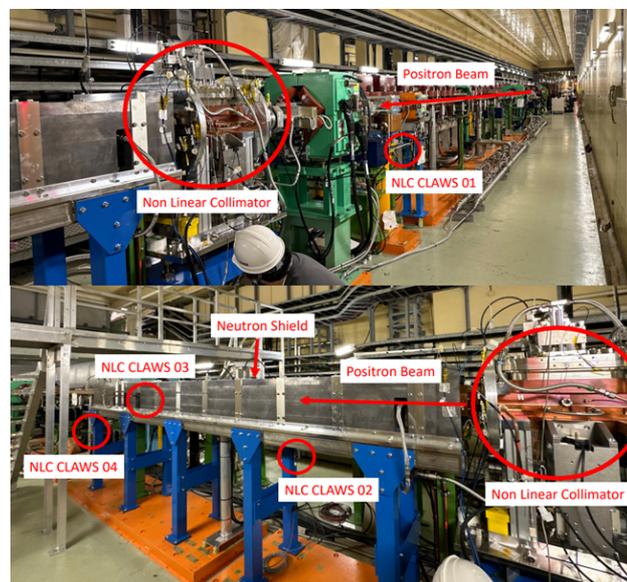


Figure 5: D05 vertical collimator and CLAWS sensor: the vertical collimator is highlighted with the large red circle. It is called Non-Linear Collimator (NLC). The position of the CLAWS sensor is highlighted with the red circles.

及び3月のSuperKEKB運転中に行われた。図6は新設CLAWSで測定された典型的なビームロス信号である。ビームロス起因の陽電子リングアボート時にCLAWSで測定されるビームロス波形は、多くの場合このように最上流と最下流のセンサーで大きいビームロスを観測していた。アボート検出器には4つのうちビームロス感度が最も低いセンサー#2が選ばれた。これはアボート要求信号発報条件として、ビームロス波高の閾値に広い選択幅をもたせるためである²。事実として、同アボートセンサーの運用開始時はアボート要求発報の閾値条件を35mVとしていたが、その後の陽電子ビーム

² SBL事象の場合、ビームロス量が非常に大きいため、4センサーすべての測定値が飽和(saturation)状態になってしまう。そのため最も感度の低いセンサー#2が最も広い閾値調整幅を持つことになる。

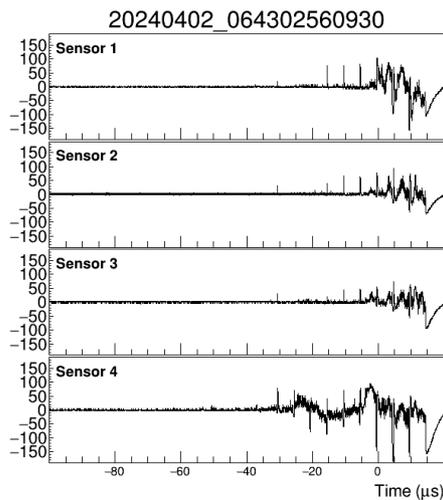


Figure 6: An example of signals from CLAWS at D05V1.

運転電流の増加に伴い適宜調整を加え、2024年春期運転の終了時には100mVの閾値で運用していた。

アボート要求信号の発報条件には、閾値だけでなく閾値を超えていた時間幅が180ナノ秒以上になることも課している。SBL事象では、通常、ビームロスが数マイクロ秒にも及び継続される。そのためこの時間幅条件は、ビームアボートを必要としないシングルバンチからの小規模なビームロスやノイズによるアボート要求信号の不要な発報を防ぐ有効な条件である。

上記2種類の発報条件加えて、陽電子ビームのメインリングへの入射から一定の期間はアボート要求の発報を禁止(veto)する期間を設けている。このveto期間は運用開始時には5ミリ秒間に設定していたが、その後には運転状況を見つつ1ミリ秒まで短縮された。

2024年3月23日から3月27日の運転期間、CLAWSセンサー#2より疑似アボート要求信号を発報し、それを用いてアボートキッカー電磁石トリガーを発報し、実際のアボートキッカートリガーとの時差を測定した。表1はこの期間のビームロス起因の陽電子リングアボートで上述の時差を測定した結果である。この試験時、CLAWSのアボート要求の閾値は35mVに設定していた。このCLAWSがアボート発報したばほぼ全ての場合、現在よりも早くアボートできることが示され、その時差は最大で45マイクロ秒に及んだ。

表の”Mitigation”はCLAWSの応答速度が早かったSBLについて、図1のようなバンチ電流測定値を確認し、そのロスの一部(もしくは全部)よりも早いタイミングでアボートできる場合について”Yes”としている。

また同期間中にCLAWS@D05V1が単独で発報した事象は1回のみであった。この事象はビーム運転を阻害する不要なアボートである懸念もあるが、それでも1週間の運転中に1度の頻度であればビームコミッションの観点で言って問題ない。運用中の他のアボート検出器にも同頻度で単独発報するものがある。

試験結果を受けて、3月29日に新設CLAWSのSuperKEKB運転への投入がSuperKEKB加速器、Belle II検出器両グループの打ち合わせにおいて議論された。

Table 1: Time interval of the abort kicker triggers which are issued with the abort request in operation and the pseudo-abort request launched by new CLAWS, Δt : the negative value means the early arrival of the trigger issued with the pseudo-abort. The fastest abort source and possibility of loss mitigation in the case of SBL also are described.

Date & Time	1st source	Δt (μ s)	Mitigation
03-23 07:08	CLAWS	-10	No
03-23 09:14	D06V1Pin	-10	No
03-23 13:48	CLAWS	-25	No
03-23 15:40	CLAWS	-5	Yes
03-23 17:17	CLAWS	-10	Yes
03-23 18:26	Fiber	+5	No
03-24 08:03	CLAWS	-5	No
03-24 16:58	D06V1Pin	-5	No
03-24 20:47	D06V1Pin	-15	No
03-24 21:04	CLAWS	-5	Yes
03-25 07:47	CLAWS	-15	Yes
03-25 14:07	CLAWS	-5	Yes
03-25 16:23	CLAWS	-5	No
03-25 18:05	CLAWS	-10	No
03-25 18:41	D06V1Pin	-15	No
03-27 04:11	Fiber	-45	No
03-27 06:12	D06V1Pin	-35	No
03-28 05:26	Fiber	-25	Yes

どちらの打ち合わせでも運転への投入が承認され、同日中にCLAWSの運転実装が行われた。

その後、2024年6月末のまで大きなトラブルはなく運用された。その間、陽電子リングで168回発生したSBLのうち、148回で、CLAWS@D05V1が最初にアボートリクエストを発報していた。そのとき2番目に発報されたアボート要求との時差は5-10マイクロ秒程度あり、この結果よりCLAWS@D05V1の運用がSBLによる機器の被害を軽減していたことが期待できる。

2024年夏期シャットダウン期間中には、アボート応答速度のさらなる高速化に向けて、D06領域へもCLAWS増設が予定されている。

4.3 アボートマスター増設

「アボート要求信号の伝送経路の短縮」はビームアボートシステム応答高速化のもう一つの改善点である。前項で述べたCLAWSのD05区域への増設は、図2(下)において経路#2のアボート要求信号を新設したことになり、これも伝送経路短縮を実現している。

本項ではビームアボートシステムのマスターシステム(アボートマスター)の増設に基づくさらに積極的な改善策について述べる。図7にCLAWS@D05V1のアボート要求信号およびアボートキッカー電磁石のトリガー信号の伝送経路(経路#2)と本節で述べるさらなる改善経路を示す。

アボートマスターは、アボートトリガーシステムの

マスターノード及びキッカー電磁石トリガー回路からなり、現在はこれがCCBに構築されているため、すべてのアボート要求信号が一度CCBに集められる。しかしアボートマスターをD07電源棟にも設置しアボート検出器からの信号を直接に輸送することで、さらに信号経路が短い図7の赤矢印の経路を実現できる。

同経路はアボートに関する信号輸送経路として考える最短の経路であり、信号伝送時間3.5マイクロ秒(同距離700m)である。参考までCLAWS@D05V1からの信号伝送時間は、測定されている部分だけでも6.1マイクロ秒(D05-CCB間4.7マイクロ秒、CCB-D07間1.4マイクロ秒)かかり、D05V1-D05電源棟間の信号輸送時間、CCB内、D07電源棟内の信号輸送時間がこれに加わる。このため現在のSBLに対する最速応答時間よりさらに2.6マイクロ秒以上早いビームアボートを見込まれる。

2024年夏期シャットダウン期間にD06V1垂直コリメータ付近に増設するCLAWSでも同様の議論が可能である。まずD07電源棟への信号伝送時間は1.5マイクロ秒(同距離300m)であり、ここから4.6マイクロ秒の信号伝送時間短縮が見込まれる。さらにD06V1がD05V1より400m程度上流であることからSBLの検知も1.3マイクロ秒早くなる。これらを加味すると現在のCLAWS@D05V1の場合より5.9マイクロ秒以上の応答速度短縮が見込まれている。

これを実現するため、D07電源棟のアボートキッカー電磁石電源横にアボートマスターをもう1台新設し、アボートマスターを2台体制としたうえでCLAWS@D05V1のようなSBL対策用アボート要求信号はこちらに直接輸送することにした。図8は新設したアボートマスターの写真である。新設マスター、キッカー電磁石電源、そしてアボート検出器からの信号をトンネルから引き上げる竪穴が互いに近く、信号経路に無駄が生まれない配置となっている。

2024年春期運転中はCLAWS@D05V1が発報したアボート要求信号を用いて動作検証を行い、運転投入に向けたコミッシュニングまで実現できた³。

2系統のアボートマスターからのキッカー電磁石トリガーをまとめるため、信号線のキッカー電磁石電源直前にオプティカルカップラー(図9(左))を設置し

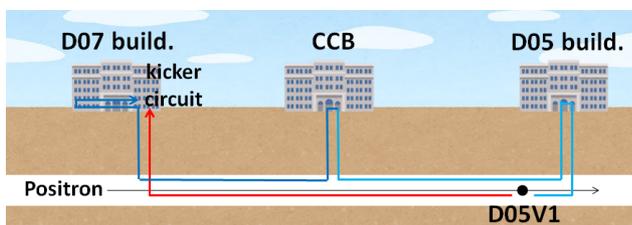


Figure 7: Schematic view of shortening of the abort signal path: the red path is the upgrade plan. The blue and light blue path corresponds to #2 in Fig. 4.

³ CLAWSからのアボート要求信号はD05電源棟制御室で分け、そのうち1つをCCBを経由せず直接にD07電源棟に伝送した。

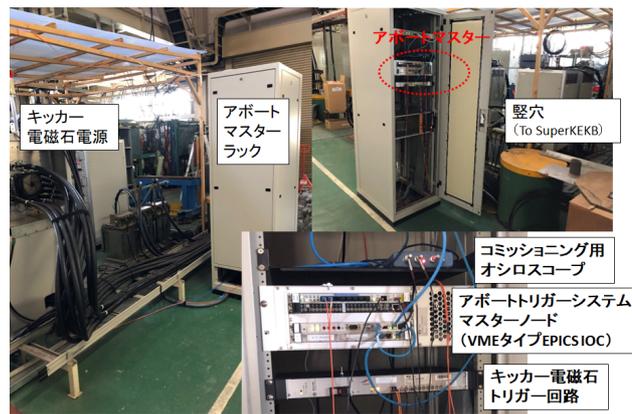


Figure 8: Pictures of new abort master at D07.

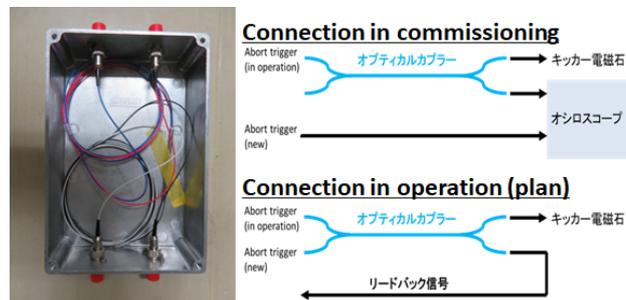


Figure 9: Picture of optical coupler (left) and its connection (right).

た⁴。図9(右上)の配線で2024年春期運転中アボートキッカー電磁石は問題なく運転されたことは、秋期運転でのアボートマスター2系統化配線(図9(右下))での運転に問題がないことを実証している。

5. CONCLUSION

SBL時の被害軽減のためビームアボートシステムの応答を高速化するアップグレードを実施している。

ビームロスに対して応答の速い衝突点アボート検出器CLAWSを上流のD05区域に設置し陽電子ビームのSBL早期検知を実現した。CLAWS@D05V1は2024年3月29日よりアボート検出器としての運用を開始し、以後168回あった陽電子ビームSBLのうち148回でアボート要求信号をCCBに最初に届けることができた。

さらなる応答高速化に向けて「アボートマスターのD07電源棟への増設」と「CLAWS@D05V1やD06に新設するCLAWSからそこへの直接配線」も2024年夏の長期運転停止期間に実施する。これによりアボート信号の伝送時間がさらに5.9マイクロ秒短縮される見込みである。

⁴ アボートマスターが生成するキッカー電磁石トリガー信号は、光信号としてキッカー電源に供給される。

参考文献

- [1] Y. Liu *et al.*, “Study of beam aborts of SuperKEKB based on new loss monitor system for Belle II”, <https://kds.kek.jp/event/41394/contributions/209334/attachments/154298/195935/16aA561-03.pdf>
- [2] H. Kaji, Y. Iitsuka, “Performance Test and Initial Application of White Rabbit system at SuperKEKB”, in *Proc. of 15th Annual Meeting of PASJ*, online, 2020.
- [3] SuperKEKB Design Report, <https://www-linac.kek.jp/linac-com/report/skb-tdr/>
- [4] S. Sasaki *et al.*, “Upgrade of Abort Trigger System for SuperKEKB”, in *Proc. ICALEPCS2015*, Melbourne, Australia, 2015.