

SuperKEKBでのビームロスとの戦い

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

吉原 圭亮

keisuke.yoshihara@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

KEK 加速器研究施設

梶 裕志

hiroshi.kaji@kek.jp

2023年(令和5年)5月21日

1 はじめに

2020年6月にKEKBの瞬間ルミノシティの記録を抜き、いよいよSuperKEKBが本格的にルミノシティフロンティアマシンとなった頃、時を同じくして謎のビームロスが観測され始めていた。われわれがSudden Beam Loss (SBL)と呼んでいるこのビームロス(図1参照)は、厄介なことにビームが数周回(以後ターンと呼ぶ)するうちにビームの大半を失い、リング内に大量の放射線を撒き散らす。このSBL事象により、これまでにBelle II検出器最内層のピクセル検出器や真空コリメータのような加速器機器が損傷を受ける事態が発生している。放射線量はビーム電流に比例するため、われわれは電流を上げることに慎重にならざるを得ず、これがルミノシティ向上の妨げとなってきた。

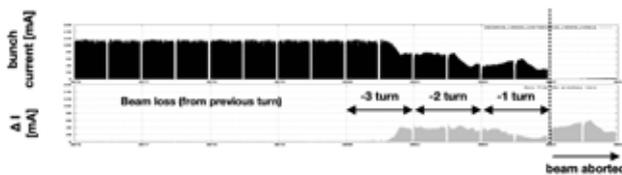


図1: SBL事象の一例。図はビームアポート前7ターンにおけるバンチ電流(上段)と、前のターンからのバンチ電流変化量(すなわちビームロス量)(下段)を示している。アポート前の3ターンでビームをロスしたことがわかる。アポート後のビームロスはアポートそのものでダンプしたビーム量を示している。

2021年に入ると、今回のビームロスが一過性のものでなく、何か根本的な原因が背後にあり、ルミノシティを上げていくうえで避けては通れない問題であるという共通認識が芽生えはじめた。本格的な解決へ向けて議論が活発になる中、筆者(吉原)を含むBelle IIグルー

プのメンバーが加速器グループと共同でビーム診断システム開発に着手することになったのがこの始まりである。現在もこのSBL事象の原因究明に奮闘しているのだが、今回の記事では解決へ向けてわれわれが取り組んでいる研究のいくつかを皆さんに紹介する。

2 主要加速器サブシステムの紹介

SBL解決へ向けて取り組んでいる研究の詳細を説明する前に、本研究で重要となる加速器のサブシステム、特にコリメータシステムやビームアポートシステムについて簡単に紹介する。

2.1 コリメータ

リング内の残留ガスとビーム粒子の散乱、バンチ内粒子との相互作用(Touschek効果)、ビーム入射振動などによって通常の軌道から逸脱したビーム粒子群は、やがてビームパイプに衝突し二次粒子シャワーを形成する。これがBelle II検出器でビームバックグラウンドとして観測される。各サブシステムごとにバックグラウンドの許容範囲を定義し、運転中はシフターとエキスパートが注意深くバックグラウンド量をモニターしている。バックグラウンドが大きいとトリガーレートが上がりDAQシステムが不安定になったり、物理データの質の低下を招く。

そこでコリメータの出番である。SuperKEKBのリングには加速器コンポーネントの一つであるコリメータが設置されている(図2参照)。真空側の可動部の先端にタングステンヘッドがついていて、これをビーム軌道に近づけることで、Belle II検出器に到達する前にできる限り軌道から外れたビーム粒子を削り落とす。また最終

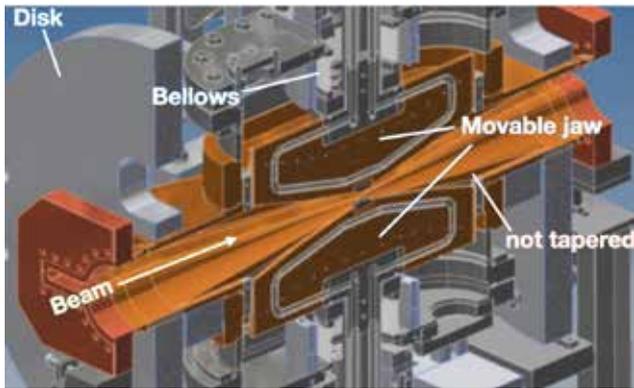


図 2: SuperKEKB タイプ垂直方向コリメータ。真空側にある可動部 (Jaw) がそれぞれ独立に上下に動く [1]。

収束超伝導磁石群 (QCS) をクエンチから守るためにもコリメータは欠かせない。電子リング (HER) と陽電子リング (LER) それぞれの衝突点より上流側に、水平方向、垂直方向コリメータが合わせて 31 個設置されている。KEKB 時代より使われているものは上または下 (水平コリメータの場合はリングの内または外側) の片持ちヘッドのコリメータであるが、SuperKEKB で新たにインストールされたものは両持ちで、上下それぞれのヘッドが独立に操作できるようになっている。各コリメータ口径は重要なマシンチューニングパラメータとなっており、常に最適な状態に調整することが求められる。運転中は各コリメータの口径が、広いところでは 1 cm 程度、狭いところでは 1 mm 程度に設定されており、50 μm の精度で制御されている。

余談だが、2020 年より筆者 (吉原) は田中秀治氏や中村勇氏と共に現場でのコリメータ調整を主導してきた。メンテナンス日の夕方は毎回マシン立ち上げに参加し、日が変わるまで現場に張り付いていた。またトラブル発生時は真夜中に現場に駆けつけることもあり、なかなかハードな役割だったと思う。マシンが安定して走り出したと思ってもなかなか落ち着かない。時事刻々と変化する運転状況の中、コリメータ調整も度々行うわけだが、コリメータを開けすぎてバックグラウンドが高くなると Belle II グループからお叱りを受けることになる。逆に締めすぎてビーム入射がうまくいかなかったり、入射起因のビームアポートが頻発すると加速器グループのミーティングで槍玉に上げられることになる。自分なりの信念を持って調整を行うことがまず重要だが、これは手動での調整の限界ともいえる。ゆくゆくはコリメータ調整を含めたビーム調整を機械学習などを用いて自動でおこなっていく必要性を強く感じている。

SBL 事象によりコリメータが損傷する (図 3 参照) とコリメータ口径を広げざるを得ず、バックグラウンドの制御が難しくなる。もちろんリング内にはたくさんのコリメータがあるため、他のコリメータで代用を試みるわ

けであるが、Belle II 検出器にもっとも近い垂直方向コリメータのような主要コリメータを損傷すると替えが効かない。損傷の具合によってはコリメータヘッドの交換をすることもありますが、交換作業ではローカルに真空が破れることになるため、再び真空焼き出し運転¹から始める必要がある。この場合、元の運転状態に復帰するまでに最低でも一週間かかる。運悪くメインリング入射点から近い主要コリメータが損傷した場合、コリメータ付近の放射線レベルが高いため、交換作業をすぐに行うことができない。放射線が冷めるまで待っていると一ヶ月以上の時間がかかるため、運転中の交換は現実的ではない。コリメータをいかに損傷せずに運転するかはマシン運転における最重要課題の一つで、そのためにはやはり SBL 事象の発生機構についてきちんと理解をしなければならない。



図 3: 実際に損傷したコリメータヘッドの様子。ビーム軸方向にスクラッチが見える。

2.2 ビームアポートシステム

何かしらの理由でビーム異常が生じたとき、また加速器機器に異常が発生しビーム運転の継続が困難と判断されたとき、速やかに、そして安全にビームを捨てるシステムがビームアポートシステムである。現行システムではリング各所に設置されたアポートセンサーからのアポートリクエスト信号を光通信により主制御棟に集約し、それを受けてアポートキッカー電磁石へとトリガー信号を転送する。最終的にビームはキッカー電磁石の磁場で蹴られビームダンプへと捨てられる。SuperKEKB ではアポートセンサーとして、PIN PD、イオンチェンバー、光ファイバー、ダイヤモンド、(プラスチックシンチレータを SiPM で読み出す) CLAWS、などの様々な

¹開放後はリング内の圧力が高くなり、残留ガスとビームの衝突によるバックグラウンドが高い状態となる。このため真空度が十分に低くなるまで数日間は、ビームが衝突しない状態でマシン運転を行う必要がある。

デバイスが用いられている。PIN PD や光ファイバーはコリメータ付近などリング内でも口径が小さくビームロスが観測されやすい場所に設置されおり、ビームアポートだけでなくオンタイムでビームロスをモニターするためにも使用されている。一方で、イオンチェンバーはアポートにフォーカスしたセンサーで、各々が数メートルに及ぶ長さであり、リング内を広くカバーするように設置されている。ダイヤモンドや CLAWS といったセンサーは、「Belle II 検出器は Belle II グループが責任を持って守るべき！」という考えに基づいて、Belle II グループが主導して検出器付近（正確には QCS まわり）に設置したもので、検出器を放射線損傷から守るために有用である。SuperKEKB のビームは 2 つのバンチトレインからなっていて、バンチトレイン間には約 200 ns 程のギャップ（アポートギャップ）がある。このギャップはキッカー電磁石の立ち上がりにかかる時間を考慮して設定された時間間隔で、実際のビームアポート時には、このアポートギャップのタイミングでトリガー信号を送ることで、正しくビームダンプ方向に偏向させる磁場を全バンチに与えることができる。異常感知からビームがダンプされるまでにかかる時間は、最初にロスを感知したセンサー位置やロスしたバンチとアポートギャップの位置関係に依存するが、大体 20 μs 程度である。

3 高速ビーム診断システム

ビームロスをより詳しく理解するために、まずリング内のどこでビームロスが始まっているのかを知ることが重要である。現行ロスモニター（PIN PD）は広いダイナミックレンジをカバーする目的と読み出しエレクトロニクスの仕様のため、積分時間、応答時間ともに長く、ビームロスタイミングの測定精度はせいぜい 2-3 μs である。これではビームロスがはじまる位置の特定には不十分であり、高速ビームロスモニターの設置が望まれていた。高速ロスモニターといっても、コリメータ間隔は短くとも 10 m のオーダーなので、 ~ 30 ns の精度が出れば十分で、これまでにないような特段応答の早い検出器を新規開発する必要はない。

高エネルギー物理実験で一般的に使用するようなシンチレータを設置するくらいであれば、加速器の高度な専門知識のないメンバーでもできるのではないかと考えるから、Belle II グループ主導でロスモニターを新たに設置することになった。こうすることで Belle II グループの立場としては、加速器グループに余計な負担をかけないで済むし、プロジェクトに融通も効くようになる。とはいったものの、トンネル内での作業は Belle II グループとしてはあまり経験のないことだったので、これまで PIN PD ロスモニターの設置を主導してきた池田仁

美氏をはじめとする加速器グループのメンバーにも協力を仰ぎ、プロジェクトに参加してもらうことになった。

再び余談だが、そもそも Belle II グループと加速器グループが共同で何か新しいことに取り組むという例は過去にあまりなかったため、今後 SuperKEKB のルミノシティを上げていく上でも「両グループの共闘」という前例を作ることは重要な意義があったと思う。実際、本記事で紹介しているプロジェクトはビーム診断システム開発を契機に派生したもので、共闘体制は確立できたのではないかと感じている。

ビームロスはトンネル内でもコリメータや QCS などの物理口径の小さい部分で起こりやすいので、試しに Belle II 検出器にもっとも近い LER の垂直方向コリメータ付近に CsI 結晶の付いた PMT を設置してみた。すると綺麗なビームロス信号を観測することに成功した（図 4 参照）。アポートするよりも 2 ターン前²⁾にはロスが始まっていることがわかる。あとはロスモニターの数を増やして同様な観測を行い、ロスモニター間の時間同期ができれば、どのロスモニターが最初にビームロスを検知したのかがわかることになる。このような複数のロスモニターと時間同期システムを組み合わせたものが高速ビーム診断システムである。

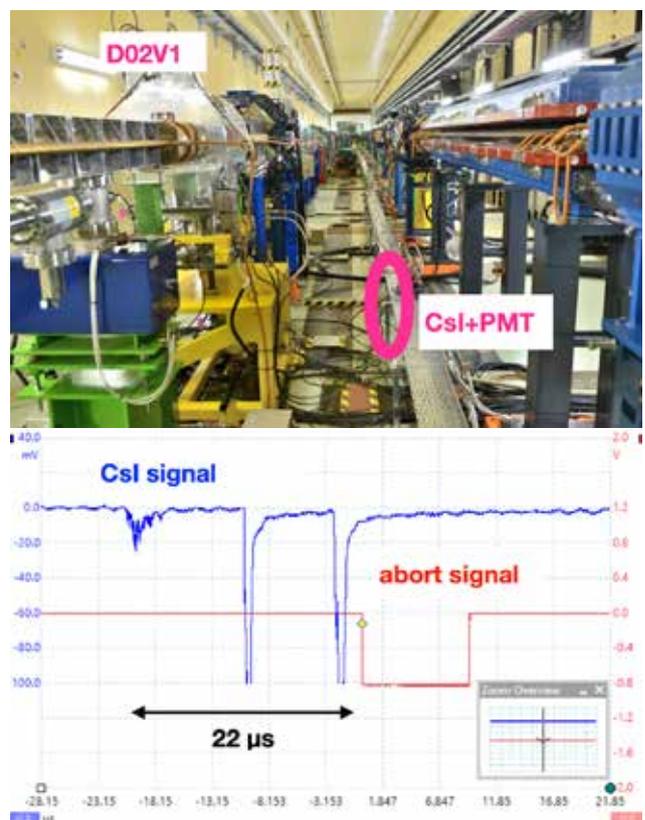


図 4: LER 垂直コリメータ (D02V1) 付近に設置したロスモニター（上の写真）とロスモニターで観測した信号（下図の青線）。3 ターンに渡ってロスが見える。

²⁾ 1 ターンは大体 10 μs に相当する。

3.1 ビームロスモニター

今回、先ほど紹介した CsI 結晶を付けた PMT に加え、Electron Multiplier Tube (EMT) をロスモニターとして採用した(図 5 参照)。前者は時定数が 20 ns 程度と短く、われわれの要求する時間精度を満たしている。一方後者は元々 T2K 実験における前置検出器のミューオンビームモニターとして開発検討されてきたものである [2]。ダイノード部分は一般的な PMT と同じ構造であるものの、光電面がアルミ膜で置き換えられている。このため光子に対する感度は低いが、放射線耐性という点では SiPM のような最近よく使われる光センサーよりも優れていることが予想される。



図 5: EMT(R15435-01)。実際設置する際にはアルミの箱に入れて遮蔽している。

名古屋大の前田朱音さんをはじめとした大学院生が中心となり、2022 年に KEK の PF-AR 施設に新設されたばかりのテストビームラインの電子ビームや放射線源を用いて EMT の性能評価を行った。EMT の信号パルス幅は 10 ns 程度と短く要求精度を満たすことが確認できた。またビーム試験の際は、図 6 のように EMT の前後に設置したカウンターでビームトリガーを作り、EMT の検出効率など基本特性の評価も行った。今後は中性子や荷電粒子に対する放射線耐性試験も進める予定である。

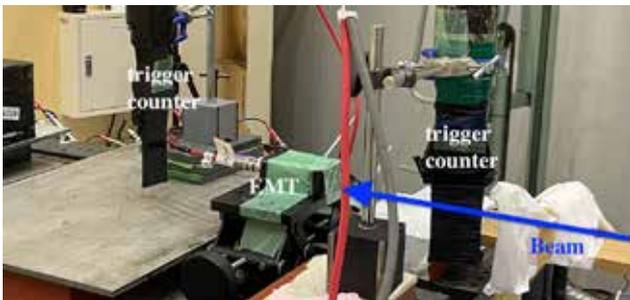


図 6: KEK PF-AR 施設に新設されたテストビームラインの 4 GeV 電子ビームを用いた EMT 試験のセットアップ。

マシン運転中トンネル内は全域に渡り放射線レベルが高いが、リングの入射点直下流部は入射ビームのロスのため特に高くなる。このためリングの入射点に近い上流部に EMT を、そして下流部に CsI+PMT を設置することにした。同様の理由でロスモニターのデータ収集シス

テムはトンネル内に設置することができない。このためデータ収集システムは最寄りの電源棟に設置し、トンネル内に 100–300 m 程度の長い信号線や電源線を這わせている。これまでは LER の主要コリメータ付近を中心に計 7 カ所ロスモニターを設置してきた。現在の Long Shutdown 期間中にメインリング入射点付近や HER の主要コリメータ付近にもロスモニターを増設中である。

3.1.1 時間同期システム

ロスモニター間の相対時間差を比較するために White Rabbit (WR) という高精度時間同期システム [3] を採用した。WR は光ケーブル³で接続された異なる機器の内部時刻 (CPU タイムなど) を「PTP によるサブマイクロ秒の時刻同期」「同期イーサネット (Sync-E) による内部クロック同期」「digital dual mixer time difference による同期されたクロック同士の位相差同定とその補正」の 3 段階で同期させることで、サブナノ秒以下の高精度の時刻同期を実現する。元々 CERN を中心に開発が進められてきたが、WR 規格は全て Open Hardware Repository (OHR) で公開されており、現在は様々な物理実験で同システムの開発実装が進められている。WR には Master と Slave の 2 種類のノードがあり、互いにシングルモード光ファイバーで接続されていて、ノード間でのタイムスタンプの共有が可能である。ノード間は最大 80 km の光ファイバーで接続可能であるが、図 7 にあるようにデージーチェーン接続が可能であるため、boundary module を設置することでより遠隔地にあるノード間でも時刻同期を実現することが可能である。まさに大型加速器施設のタイミング制御にはうってつけのシステムである。われわれが使用している WR-TDC⁴ は 125 MHz クロックで動作しているため、時間決定精度は 8 ns となっており、われわれの要求精度を十分に満たしている。

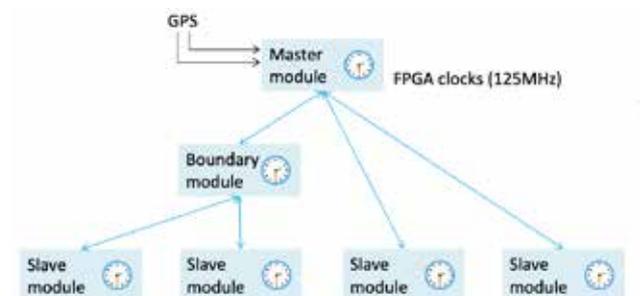


図 7: White Rabbit システムのイメージ図。

³SFP に直結する direct attach cable でもよい。

⁴WR はタイミング信号分配器としてだけでなく、搭載する FMC カード次第で TDC や ADC としても使用可能である。

3.2 データ収集システム

ロスモニターのデータ取得には WR-TDC に加え、USB オシロスコープ (Picoscope 3403D) も使用している。オシロスコープでアポート信号前後 1 ms (大体前後 100 ターン相当) の波形データを取得しており、ビームロスの時系列に調べることができる。図 8 に示すように、ロスモニター信号は最寄りの電源棟で二つに分けられ、片方はオシロスコープに、もう片方は WR-TDC に接続されている。

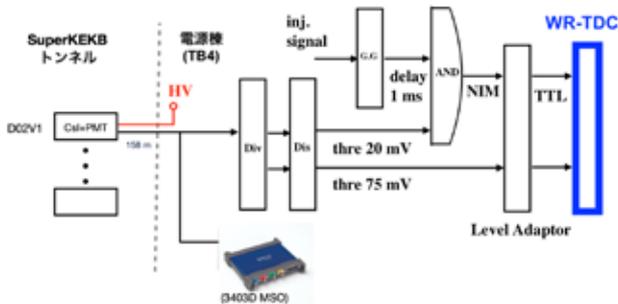


図 8: ロスモニターデータ収集システム概略図。

ロスモニターでは SBL 事象だけでなく、ビームの入射振動に由来する入射バックグラウンドの観測も可能である。このため WR 側の信号ラインは、SBL 事象に加え、入射バックグラウンドのスタディ用のデータも取得する目的でさらに二つに分岐している。SBL 事象をターゲットとした方は、信号閾値を限界まで下げ、入射振動が収まるまでの時間に相当する入射 VETO を嘯ませてから WR-TDC へと入力している。

3.3 ビームロス解析

ここでも総研大 Liu Yuxin さんら大学院生が中心となって、2022 年の運転で実際に観測された SBL 事象の解析を行った。SBL 事象自体は LER, HER の両リングで起こっているのだが、その頻度は LER で高く、またロスモニターは LER を中心に設置しているため、まずは LER における SBL 事象にフォーカスして解析を行なった。時間基準にはビームアポート信号タイミング (主制御室アポートトリガージョジュールがアポートセンサーからのアポートリクエストを受け、信号を発報したタイミング) を選び「どのロスモニターが最初にビームロスを観測したか」を調べたところ、リング上流 (すなわち衝突点よりも入射点に近い方) に位置する D06V1 や D06V2 で最初にビームロスが観測されやすいことがわかった (図 9 参照)。

また、上流のコリメータをすり抜け、Belle II 検出器に近い D02V1 で最初のロスが観測された場合は QCS クエンチを伴う確率が高いことも明らかになった。D06V1

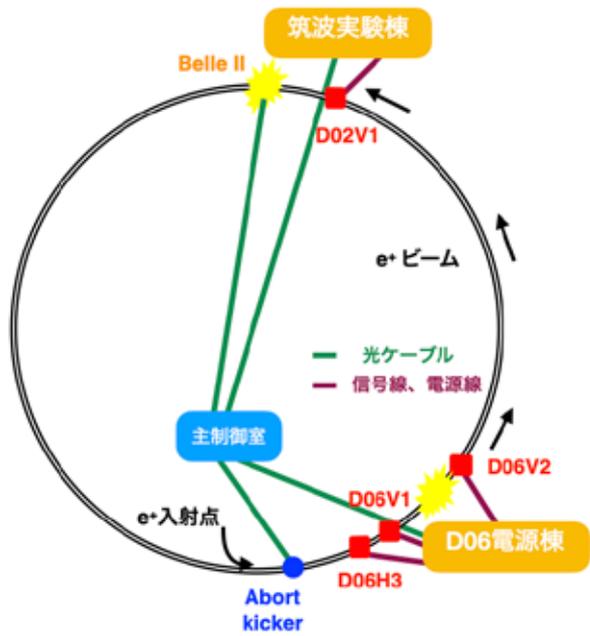
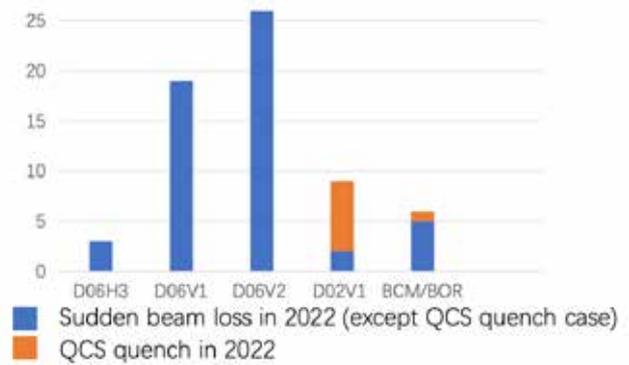


図 9: 2022 年のマシン運転における SBL 事象のまとめ (上図) と LER 主要コリメータ (四角印) と実験室の位置関係 (下図)。

よりも上流でビーム軌道が乱れ、D06V1 コリメータ付近でビームをロスし、その際に生成されたシャワーがロスモニターで観測されていると想像できる。D06V2 で SBL 事象数が多くなったのは、マシン運転期間中に何度か D06V1 を損傷し、その度にコリメータ口径を広くしていった結果、D06V1 をすり抜け、D06V2 に当たる事象が増えたためだと思われる。加えて、ビームロスが上流で観測されているにもかかわらず、最初のアポートリクエストは、D06V1 や D06V2 に置かれたアポートセンサーではなく、Belle II 検出器付近に置かれた CLAWS によって発報されていることも明らかになった。⁵

⁵ アポートリクエスト自体はリングの各所から出ているが、もっとも早くリクエスト信号を主制御室に送り、アポートを実行させているのは CLAWS ということ。

4 ビームアボート高速化

ビームアボートを高速化し、ビームロスによる被害を最小限にとどめることも、SBLを理解することと同様に重要な課題である。図9からわかるように、D06電源棟は、地理的にCLAWSのある衝突点よりも主制御室やアボートキッカー電磁石近くに位置している。ところが前節で述べたように、本来遠くに位置しているはずのCLAWSにより最初のアボートリクエストが発報されているのだ。この事実を考慮すれば「CLAWSではなくD06に置かれたセンサーから最初のアボートリクエストを出すことができればアボートを高速化できるはずである」ということになる。これがビームロス解析によって得られた重要な示唆である。

実際にこの効果を検証するために、われわれがD06V1に設置したロスモニターを用いて擬似アボートリクエストを出力し、CLAWSが発報したアボートリクエストと比較してどの程度早く主制御室に到達可能かをビーム運転期間の最後（2022年6月）に検証し、最大10 μs の改善が可能であることを実証することができた。もちろん、アボートシステムはアボートリクエストの不発・誤発が許されないデリケートなシステムであるため、実際にはアボート閾値が適切であるか慎重に確認しなければならないが、この結果にはかなり勇気づけられた。そしてD06領域やコリメータを新設するD05領域といったリング上流部にCLAWSを増設をすることを決めた。10 μs は、大体1ターンに相当するので、図1を例にとれば20%程度リング内でのビームロスを減らすことができることになる。SBL事象によっては更に大きな改善が期待される。

また図10に示すように、主制御室を経由せずアボートキッカーのパルス電源があるD07電源棟へ、D06電源棟から直接アボートリクエスト信号を送ることができれば、さらに大きな改善が見込めるはずである。加えて電源棟間の信号伝送を光ファイバー通信からレーザー通信に置き換えることができれば、より一層の高速化が可能である。現在はこのような野望を持って、D07電源棟へのアボートモジュールの増設とレーザー輸送のR&Dに取り組んでいる。

4.1 アボートモジュールの増設

アボートリクエスト信号経路の改善によるさらなるアボート応答高速化を実現するべく、アボートトリガーシステムのマスターモジュールをD07電源棟に設置することも検討している。D05、D06電源棟からアボートキッカー電源のあるD07電源棟には直通の光配線が存在し、もしマスターモジュールがD07電源棟にあれば、この

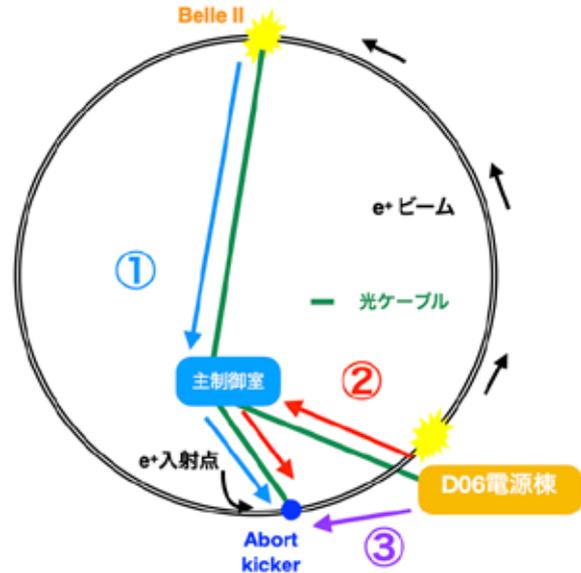


図10: アボート高速化のアイデア。矢印はそれぞれ、①がCLAWSからアボートリクエストを出す現状、②はD06からアボートリクエストを出せる場合、そして③は主制御室を経由しない場合、を示している。

信号線を用いて主制御室を経由させずにアボート応答させることが可能である。これは図10において②の経路を③の経路に変更することになる。この場合、アボートシステムの応答時間はD05の場合に1.4 μs 、D06の場合には1.9 μs 短縮することが見込まれている。実際にはアボートキッカー電磁石の動作タイミングがアボートギャップと同期し、5 μs 間隔に量子化されているため、15% (D05)、20% (D06)の確率で5 μs 早くビームアボートが実行されることになる。



図11: 試験用アボートマスターモジュール及びアボートキッカー電磁石トリガー回路。VMEサブラック最上段スロットに挿入されているのがアボートマスターモジュール、その上にある1U高のモジュールがEvent Timing Systemモジュール。

現在、この効果を実証するための試験用アボートトリガーシステムの構築を進めている。まず主制御室に設置されているアボートトリガーシステムのマスターモジュールとアボートキッカー電磁石トリガー回路と同機

能をもつ試験用システムを D07 電源棟に新設する。図 11 に現在構築中の試験用システムの写真を載せる。マスターモジュールは、各電源棟のスレイブモジュールからのアボートリクエスト信号を集約し、アボートキッカー電磁石トリガー回路にトリガー信号を出力させる装置である。試験用マスターモジュールは、運用中のマスターモジュールと全く同じ VME 型プラットフォームの回路ボード [6] を採用している。同モジュールへ入力するアボートリクエスト信号は、D05 電源棟及び D06 電源棟に設置するスレイブモジュール (2ch アボート光出力回路 [6]) により発報する。それぞれのスレイブモジュールは新設の CLAWS をアボートセンサーとして動作させる予定である。

アボートキッカー電磁石トリガー信号は、加速器の周回信号 (ビームの 1 ターン周期を知らせる信号) を 2 倍した信号を基準とし、そこにアボートギャップに同期させた遅延時間を課した信号である。同トリガーを出力する回路として、D07 電源棟に新設予定の周回信号出力用の Event Timing System モジュール⁶を利用することとし、その出力端子の一つをアボートキッカー電磁石トリガーにすべくセットアップする。試験用マスターモジュールからのアボートリクエスト信号を Event Timing System モジュールの INHIBIT 入力端子に入力することで、キックトリガー出力端子の制御を実現する。

試験用システムは、現在のところ、主制御室の運用アボートマスター付近において動作検証中だが、近いうちに D07 電源棟に移設される予定である。これにより「D05, D06 での SBL 早期発見」と「アボートリクエスト信号経路の短縮」の 2 つの効果を合算したアボート応答の高速化を実際に検証することができる。同システムの検証試験は SuperKEKB の次期運転で予定している。また、その他にも次項で説明するレーザーアボートシステム開発の試験環境としての利用も期待されている。

4.2 レーザーアボートシステム

アボートリクエスト信号の新しい転送技術としてレーザーを用いることを検討し、その試験も始めている。これはわれわれのアボートシステムでは、アボートリクエスト信号が 820 nm 波長のただの光であることから着想を得た。アボートトリガーシステムのマスター・スレイブモジュール間は、通常運転 (異常なし) 状態では常に光を送信しており、これを途絶えさせることをアボ-

⁶余談だが、Event Timing System モジュールにも時刻同期機能が存在する。ただし SuperKEKB が採用している MRF230 シリーズの Event Timing System モジュールには時刻同期信号のケーブル伝搬時間を補正する機能がなく、スレイブノードごとの伝搬時間の違い (10 μ 秒程度) を同期の誤差として運用しなければならない。また TDC ノード構築に必要な費用も WR ノードに比べ約 5 倍必要とする。これら理由により、現在、SuperKEKB では WR ノードを積極的に採用している。

ートリクエスト信号とする負論理仕様となっている。このようにシンプルな技術を用いているのは、アボートトリガーシステムに堅牢性をもたらすためであるが、一方でそこに本研究の可能性が生まれた。

光信号を光ファイバーで転送するのではなく、指向性の高いレーザーを用いることで屈折率の分だけ早く光を転送することが可能である。通常の光ファイバー材質に用いられる石英 (屈折率 1.5 程度) より大気中 (同 1 程度) の方が光を 1.5 倍早く伝搬可能である。加速器トンネル内の D05, D06 領域から D07 領域へ光ファイバーとレーザーで光送信した場合の伝搬時間の差はそれぞれ、0.7 μ s, 0.9 μ s ほどあり、これも考慮する価値のある性能向上である。もちろん本研究開発は次世代コライダー実験も見越した上のものである。将来計画では SuperKEKB 以上にビームラインの長い加速器が建設されることが十分に考えられ、その場合の伝搬時間の短縮はより大きくなる。

レーザーを用いたアボートリクエスト信号システムの概念図を図 12 に載せる。CLAWS などのアボートセンサーの信号でダイオードレーザーの電源を制御し、レーザーの ON・OFF を実現する。輸送されたレーザー光は最終的にアボートマスターモジュール近傍で集光レンズにより光ファイバーに集光され、アボートマスターモジュールに入力される。

本システムの開発は、KEK 入射器グループで電子銃用レーザーの開発と運用を担ってきた張叡氏の技術協力により進めている。すでに輸送後のレーザーを効率よくファイバーに集光する技術を確認することができた。本システムの開発に参加している東京都立大の大学院生である北村和樹さんの活躍もあり、90%以上の集光効率を実現している。また同条件において、レーザーの ON・OFF によるアボートマスターモジュールの動作制御も確認できている。現在は数 100 m に及ぶ大気中のレーザー輸送における軌道の安定化を実現すべく、開発を継続している。

5 ファイヤーボール仮説の検証

アボート高速化により SBL 事象による機器損傷リスクを最小化し、ビーム診断システムによってビームロス発生地点に関しての知見を得ることはできたが、SBL 事象の根本的な原因究明には至っていない。では一体どのような機構によってビームロスが引き起こされるのか。これは未だ謎に包まれている。実は、他の加速器においても謎のビームロスというものはこれまでに観測されている。例えば、SLAC の PEP-II では真空絶縁破壊 (ブレイクダウン) による早いビームロスが観測されている。通過するバンチによって励起される高次高周波を吸収する



図 12: レーザーアポートシステムの概念図。

ためのタイルがあるのだが、衝突点から 2 m 程上流に位置するこのタイルの損傷が原因であったことがわかっている [4]。また CERN の LHC においても Unidentified Falling Objects (UFO) と呼ばれている謎の飛行体によりビームロスが観測されており、こちらは現在も調査中であるらしい [5]。SBL 事象に関しての関心は国際的にも高く、現在は SuperKEKB/Belle II グループ主導で、International Taskforce が結成され、SBL 事象を議論するための定期的な会合もたれており、CERN, SLAC, IHEP など他の研究所とも頻繁に情報を交換できる環境が整ってきている。

SuperKEKB における SBL 事象の発生機構を説明するモデルとして、加速器グループの阿部哲郎氏より「ファイヤーボール仮説」が提案されている。1000°C 以上の高温微粒子（ファイヤーボール）は、UHF 帯常伝導高周波加速空洞（連続波）におけるブレイクダウンの主要な引き金となることが知られていて [7]、同様なブレイクダウンがコリメータ周辺でも起こっているのではないかというのがこの仮説である。

ひとたびコリメータヘッドが損傷するとその周辺のビームパイプ表面に無数の金属微粒子がばらまかれることになる。これら微粒子がビーム電流によって作られる電磁場で熱くなりビームパイプ内を浮遊し、やがてビームパイプ表面に着弾すると、その周囲にはプラズマが発生する。このプラズマがマイクロ波を吸収するとやがて大真空放電に発展し、ビーム粒子と激しく相互作用をすることで SBL 事象を引き起こす、というものである。ファイヤーボールが浮遊して着弾するのにかかる時間はミリ秒から秒のオーダーであるのに対して、着弾してから大放電に発展するまでは 100 ns という早い時間スケールであると予想され、これは SBL 事象が早いビームロスであるという観測事実と一致する。またファイヤーボール微粒子が高融点（高昇華点）物質であり、着弾場所の金属が低融点を持つことがプラズマ発生条件となるが、コリメータヘッドに使われているタンゲステンやタンタルが高融点であり、ビームパイプが銅でできていることを考えれば、この条件を満たすことができる。

「そもそも SBL 事象が起こる前からコリメータ周辺に微粒子がないといけないのでは？」と思われる方もおられるかもしれないが、実は 2022 年のマシン運転開始

直後に入射キッカー電磁石のスイッチに使われているサイクロトロンが暴発⁷し、D06V1 の一つ上流にある水平コリメータ D06H3 がすでに激しく損傷していたため、そこで生成された微粒子がファイヤーボールになることは十分に考えられる。

実際にファイヤーボール仮説を検証するためには、放電時に引き起こされる高周波信号を高い時間分解能で観測するか、ファイヤーボールの発光信号を観測すればよいが、コリメータ周辺部でこれらを観測することは難しい。そこで音響観測という案がでたのである。放電電流が金属表面に衝突したときの熱衝撃から発生する音波を、環境ノイズの少ない超音波領域で測定するのである。ロスモニターが「新しい目」であるならば音響センサーは「新しい耳」とでもいえようか。

実機のコリメータにセンサーを設置する前に、シンシナティ大学の大学院生である Alex Gale さんが中心となって、現在センサーの性能評価やセンサー固定に使用する接着剤の選定を既存のビームパイプ上でおこなっている。今後はコリメータ予備機を用いてセンサー位置や数の最適化も行う予定である。現実問題としてコリメータの真空側にセンサーを設置するのは難しいため、まずは外表面に取り付けたセンサーで信号が観測できるかの試験を行う。また、SuperKEKB の常伝導空洞の大電力試験の際に真空放電時の音響信号、すなわちファイヤーボール信号がどのように見えるのかも確認する予定である。



図 13: コリメータ周辺への設置を検討している音響センサー (AE124AT)。

⁷サイクロトロンは真空管から派生した熱陰極管で、大電力のスイッチとして使用されている。

6 おわりに

今回は SBL 事象を理解するためのステップとして高速ビーム診断システムの開発、アポートシステムの高速化、そしてファイヤーストール仮説の検証といった研究の紹介をさせていただいた。これらの研究は、いわゆる Machine Detector Interface (MDI) 領域のプロジェクトで、Belle II グループと加速器グループが共同で進めている研究である。MDI は安定したマシン運転の実現に向け近年ますます重要な位置づけとなってきたが、これらのプロジェクトを着実に進められているのは加速器グループメンバーからの多大な協力に加え、Belle II グループからも国内外の多くの大学院生が参加してくれているおかげである。そしてもちろんこれは指導教員の先生方の MDI への理解があってこそ成り立っている。またビーム診断システムやアポート高速化の研究は科研費 (22H03867) から助成を受けていることを付け加えておきたい。

アポートの高速化により SBL 事象のリスクを最小化しつつ、音響センサーの設置により SBL 事象の解明へ向けての準備は着々と進んでいる。少しずつではあるがプロジェクトが前進していくことを非常に嬉しく思う。近い将来 SBL 事象を理解することで、SuperKEKB のルミノシティ向上に、そしてゆくゆくは目標ルミノシティの達成、SuperKEKB/Belle II 実験の成功に繋がってほしいと思っている。

最後に今回このような記事の執筆の機会を下さった高エネルギーニュース委員の方々に深く感謝したい。

参考文献

- [1] T. Ishibashi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 053501 (2020).
- [2] Y. Ashida *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, 103H01(2018).
- [3] <http://white-rabbit.web.cern.ch/>
- [4] M. Sullivan *et al.*, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, MOPLS049
- [5] B. Lindstrom *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 124501 (2020).
- [6] S. Sasaki *et al.*, Proceedings of ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, MOPGF141
- [7] <https://www2.kek.jp/accl/topics/topics181227.html>