

SuperKEKB におけるアボート事象分類 web システムの構築

DEVELOPMENT OF THE ABORT VERIFICATION WEB SYSTEM FOR SuperKEKB

小笠原 舜斗[#], 池田 仁美, 佐々木 信哉
Shunto Ogasawara[#], Hitomi Ikeda, Shinya Sasaki
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB is the e-/e+ collider that aims the world's highest luminosity. In order to accumulate more physics data, it is important to keep stable run for a long time. In the winter operation of 2024 (2024c), 1444 beam aborts (excluding manual aborts) occurred during the 80-day operation. Some of these aborts have clear causes such as equipment malfunctions or human error, and conversely, some are not easily identified. For the continued stable operation of the accelerator, it is important to correctly classify these abort events and analyze them in detail. Therefore, we built a web-based system for supports analysis of these abort events. This system automatically links abort information to certain related information and provides the information to users through a web server. Users can view abort information through any web browser and can manually assign a category to each abort event and write comments. In this presentation, we will report on the design and implementation.

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り、前身である KEKB の数十倍のピーク luminositiy を目標としている。2024 年冬の運転(2024c)では、7 GeV 電子リング(HER)において 1.35 A、4 GeV 陽電子リング(LER)において 1.70 A のビーム電流を蓄積し、世界最高記録となるピーク luminositiy $5.1 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ を達成[2]した。

2024c の運転では、HER と LER を合わせて 1444 回のビームアボート(マニュアルアボートを除く)が発生した。この中には突発的ビームロス (Sudden Beam Loss、SBL)[3]のように迅速な解析や対策が要求されるものもあれば、装置の故障やインターロックの誤動作、スタディに伴うアボート、地震の影響なども含まれ、その原因は多種多様である。これらのアボート事象を分類・整理することは、各アボート事象の原因や発生頻度等を分析し、効率的に対策を講じるために有用である。そこで、これらのアボート事象を取りまとめ、手軽にカテゴリやコメントを付加できる web システム(以下、本システム)を構築した。本システムは、当初は SBL に関する情報提供を主眼に開発したため、「SBL Verification」という名称となっているが、最終的には SBL に限らないアボート全体の情報集約の場となった。

2. システム構成

2.1 先行システム

SuperKEKB では、アボート要求信号のタイムスタンプを記録して web 上で表示するシステム(アボートタイムスタンプ)[4]や、Belle IIグループ向けにアボート情報をまとめる web システム(アボートサマリー)が従来から存在している。前者はアボートトリガーの時系列が μs 以下の精度で判明するため、アボート原因の特定には非常に有用であるが、タイムスタンプ以外の情報は取り扱わない。

アボートサマリーは、大きなビームロスに伴うアボートの情報を Belle IIグループへ提供することが主な目的である。そのため、必ずしもアボート事象を網羅的に取り扱うようには設計されていない。

本システムはこれらの先行システムと相補的な位置づけとして、主に加速器担当者に向けた情報の集積・整理を主眼に開発した。

2.2 全体構成

Figure 1 に、本システムの全体構成を示す。

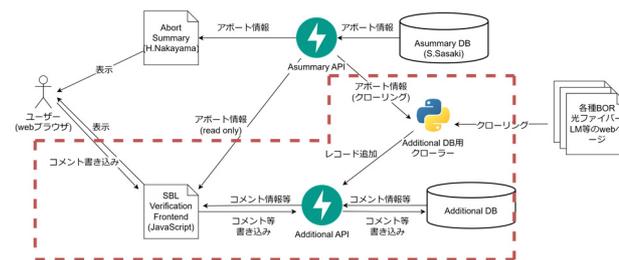


Figure 1: Scheme of the SBL Verification.

Figure 1 のうち、赤点線で囲った範囲が今回の開発範囲である。

Asummary DB は、先行システムであるアボートサマリーのためのデータベース (およびアクセスするための web API)である。これを除いた、本システムのために開発した要素は以下のとおりである。

- web ページ(フロントエンド)
- Additional DB (+web API)
- Additional DB 更新用クローラー

これらの(赤点線内の)要素は全て、KEK 所内 LAN に存在する単一のサーバーにて稼働している。

[#] shunto.ogasawara@kek.jp

3. バックエンド

3.1 Additional DB

先行システムの一部である Asummary DB では、アボート時刻の他にアボートが起きたリング(HER または LER、もしくは両方)、アボート時のビーム電流、入射とアボートの時間差など、アボートの基本的かつ定量的な情報を主に保存している。Additional DB は、各アボートに対するコメント等の情報を保存するためのデータベースであり、本システムのために新規に立ち上げたものである。本システムでは、Asummary DB で扱っている項目についてはそのまま Asummary DB を参照し、コメント等の本システム独自のデータは Additional DB に保存する、という構造とした。

Additional DB は SQLite3[5] で構築されており、アボート時刻を主キーとする単一テーブルで構成される。アボート時刻の他、カテゴリ、コメント、記述者名、両リングアボートの場合に原因となったリング(source_ring、3.1.2 項参照)、関連するロスモニター等(3.1.3 項参照)のタイムスタンプなどの属性がある。

3.1.1 カテゴリ

カテゴリは、アボートごとに選択して付与することができる属性である。2024c 終了時点では、以下の 10 種類のカテゴリ(および Uncategorized)がある。

- SBL
- BeamLoss (SBL を除くビームロス)
- Injection (入射ビームに起因)
- RF (RF 関係トラブル)
- Mag (電磁石トラブル)
- VA (真空トラブル)
- EQ (Earthquake、地震)
- Tuning (ビーム調整やスタディ中)
- Others
- Manual (マニュアルアボート)

3.1.2 アボート原因リング

Asummary DB では、アボートが起きたリングの情報として「HER」「LER」「both」のいずれかが登録される。ただし、両リングアボート(both)のほとんどは、実際には HER または LER のどちらか片方だけに原因がある。そこで、Additional DB では「source_ring」という属性を用意し、両リングアボートの場合はどちらのリングが原因だったかを登録することができるようにしている。両 DB の情報を組み合わせると、アボートは以下の 5 つに区分できる。

- HER 単独アボート
- LER 単独アボート
- HER 起因の両リングアボート
- LER 起因の両リングアボート
- 原因リング未登録の両リングアボート

3.1.3 ロスモニター等

「関連するロスモニター等」とは、SuperKEKB 各所に備え付けられた光ファイバーロスモニター[6]や音響センサ [7]、CLAWS センサ[8, 9]などを指す。これらのロスモニターはアボート発生をトリガーとしてデータを保存するもので、各アボート事象を分析するのに有用である。各

アボート事象とロスモニターのイベントを 1:1 で対応付けられると便利であるが、ロスモニターのデータは各装置の担当グループがそれぞれ独自に管理しており、ロスモニターのイベントのタイムスタンプがアボートのタイムスタンプと一致するとは限らない。そこで、各アボートについて、「関連するロスモニターのイベントのタイムスタンプ」をロスモニターごとに保持している。具体的な項目はユーザーからの要望等に応じて随時増やしており、2024c 終了時点では 10 項目存在している。

3.2 web API

Additional DB へは、全て FastAPI[10]で構築された web API を介してアクセスする。API は GET、POST、PATCH のいずれかのリクエストを受け付け、それぞれアボート情報の読み出し、新規登録、編集に対応する。レスポンスは全て JSON 形式である。GET リクエストでは、URL パラメータによりアボートの期間指定などが可能である。POST メソッドの新規登録では、原則としてタイムスタンプ以外の属性は全て空文字列で初期化される。

以降、DB へのアクセス(読み出し、書き込み、更新など)は、特に指定のない限り全て web API を通じた操作を指す。

Asummary DB についても同様に、全て web API を通じたアクセスを行っている。本システムから Asummary DB の内容へ影響を与えることは適切ではないと考えられるので、Asummary DB に対してはシステム全体で GET リクエスト以外は送らないというポリシーで開発した。

3.3 クローラー

クローラーは、データベースや API と同一の計算機上で常時稼働する Python アプリケーションであり、以下の 2 つの役割がある。

1. Additional DB への新規レコードの追加
2. Additional DB の既存レコードへの、各種ロスモニター情報の追加

まず、クローラーは 1 分毎に Asummary DB と Additional DB の両方へアクセスして、一定期間内の全てのアボート事象のリストを作成する。その後、クローラーは 2 つのデータベースの各レコードについてタイムスタンプを比較する。Asummary DB に存在して Additional DB に存在しないレコードを検出した場合、Additional DB へ POST リクエストを送信し、該当する事象を新規登録する。このとき、タイムスタンプ以外の属性は空文字列で初期化される。通常の運用では、Additional DB へ POST リクエストを送るのはこの時のクローラーのみであるため、Additional DB のレコードは原則として Asummary DB のいずれかのレコードとタイムスタンプが常に厳密に一致することとなる。

続いてクローラーは、各ロスモニターの情報をまとめる web ページを解析し、一定期間内のロスモニターイベントの一覧を作成する。その後、再び全てのアボート事象を確認し、ロスモニター情報が未登録のレコードを抽出する。

該当するレコードがあった場合には、対応するロスモニターのイベント一覧を参照し、アボート発生から一定時

間(ロスモニターごとに数十秒から数分)以内に発生したロスモニターイベントのタイムスタンプを探す。そのようなイベントが発見された場合は、Additional DB へ登録(PATCH リクエストによるレコード編集)する。この処理は一定期間内の全アボート事象、全ロスモニターに対して繰り返し実施される。

このような動作を行っているのは、ロスモニターの中にはアボート発生から情報の登録まで数十分以上かかるものもあるためである。Additional DB へのレコード追加(POST リクエスト)の時点ではロスモニターの情報が web に反映されていない可能性が高いため、1 分毎に一定期間内の全ての(ロスモニター情報が未登録の)レコードについて再調査している。

各ロスモニターの情報は担当グループがそれぞれ独自の web ページ等でまとめており、その形式もさまざまである。web ページの解析は、ロスモニターごとに個別に HTML パーサーを作成して行っている。

4. フロントエンド

4.1 Summary ページ

フロントエンドとなる web ページは、特定のフレームワークなどを用いない、いわゆる Vanilla JavaScript と HTML で構成される。Summary ページは本システムの

基本となる web ページで、指定期間のアボート情報を一覧表示する。Figure 2 に、Summary ページの表示例を示す。

Summary ページは、最上部からフィルタ選択部、表示項目選択部、アボート統計表、アボートリストで構成される。

4.1.1 フィルタ選択部

最上部のフィルタ選択部では、表示するアボートの期間や条件を指定することができる。指定できる項目は以下のとおりである。

- アボートの期間
- カテゴリ
- リング (HER か LER、あるいは両リング)
- マニュアルアボートの非表示
- HER、LER それぞれのビーム電流の下限
- CCG の圧力バーストを伴うアボートか否か

フィルタ選択部は、method が GET の form 要素で構成されている。これらの選択結果は URL パラメータとして反映される。また、ページ読み込み時に実行される初期化処理(JavaScript)により、URL パラメータの内容が form の初期状態(チェックボックスのチェックの有無など)に自動的に反映される。

アボート期間は from と to の 2 つを指定することができ

SBL Verification

[Abort Summary] [RF Abort Verification]

From: 2024/12/24 << set today >> 00:00 0:00 1:00 9:00 17:00 23:59

To: 2024/12/24 << set today >> 23:59 0:00 1:00 9:00 17:00 23:59 2021ab 2021c 2022ab 2024ab 2024c

Select category : SBL BeamLoss Injection RF Mag VA EQ (Earthquake) Tuning Others Manual (Uncategorized)

Select ring: Both(LER) Both(HER) Both (no source ring) LER HER

Hide Manual Aborts

LER current > 0 mA

HER current > 0 mA

Show aborts with pressure burst Specify location: _____

Show more images:

Opt. Fiber (LER) Opt. Fiber (HER) Diamond D05V1 CLAWS D05V1 CLAWS (additional images) BOR Calib BOR RFSoc LM Timing Loss Monitors RF arcmon Pressure Burst AE sens

▶ Abort count table (Only shown aborts)

timestamp	trigger (1st arrival)	ring	DCCT (LER/HER)	Inj [μs]	category	Comment	BOR	LER Opt.Fiber	Diamond	Pressure Burst	EDIT
2024-12-24 14:40:56.492667 (CCB arrival)	Belle2 CLAWS	Both (LER)	1534 / 1078	No Sync	SBL	QCS quench [ikeda]			 2311 mRad	D04_L03 QDWOP.5	EDIT
2024-12-24 13:20:47.698874 (CCB arrival)	Loss Monitor D6 (Optical Fiber)	Both (LER)	1593 / 1038	No Sync	SBL	[ikeda]			 249 mRad	D06_L12 D06V1collimator D11_L25 QDWNP.3/GV(D10_L01)	EDIT

Figure 2: Example of Summary page.

る。デフォルトで全期間を検索すると表示に時間がかかるため、URL パラメータが未指定の場合は、to に当日の日付が、from にその 1 週間前の日付が自動的に入る。また、5 章で述べる各種入力支援の機能を実装している。

カテゴリのフィルタを有効にすると、それぞれ指定したカテゴリに該当するアボートののみが表示される。リング指定はアボートの対象となったリングを指定するもので、3.1 節で述べた 5 種類それぞれについて表示か非表示を選べる。

圧力バーストの有無によるフィルタは、SBL とアボート時の圧力バーストの関係が指摘されたことに関連して追加した項目である。アボートと同時に圧力バーストが発生した場合、その CCG 名が DB に記録されるので、何らかの文字列が登録されているアボートののみを表示する。また、CCG 名で更にフィルタをかけることも可能である。

4.1.2 表示項目選択部

前述の通り、本システムではアボートに関連したロスモニターの情報を 10 個程度持っているが、これを毎回すべて表示するとリストが巨大となり視認性を損ねる。そこで、アボートリスト(4.1.4 項)の表示項目(列)も指定できる機能を設けた。

光ファイバロスモニターや CLAWS などの各種ロスモニターの情報はデフォルトでは非表示だが、チェックボックスによって任意に列を追加できる。選択部はフィルタ同様に method が GET の form 要素で構成されており、選択内容はやはり URL パラメータとして反映される。

4.1.3 アボート統計表

アボートリストとして表示したアボート事象について、カテゴリおよび原因リング毎に計数して数を表示する。Figure 3 に、アボート統計表の表示例を示す。

▼ Abort count table (Only shown aborts)
2024-10-09 00:00:00 ~ 2024-12-27 23:59:59

ring	SBL	BeamLoss	Injection	RF	Mag	VA	EQ	Tuning	Others	Manual	Uncategorized	TOTAL
TOTAL	114	352	423	63	4	13	9	440	17	664	9	2108
Both(LER)	80	53	31	2	1	-	-	76	6	-	-	249
Both(HER)	18	69	354	-	1	1	-	233	1	2	1	680
Both	-	-	-	-	1	5	2	-	-	26	-	38
LER	15	161	13	32	1	3	1	27	9	328	-	590
HER	1	69	25	29	-	4	6	104	1	308	4	551

Figure 3: Example of the abort count table.

この表の内容は、4.1.1 節で述べたフィルタの状態が全て適用される。例えばマニュアルアボートを非表示に設定すれば、「Manual」列の値は全て 0 となり、TOTAL の数にも反映される。同様に、HER の電流下限を 100 mA に設定すれば、HER の蓄積電流 100 mA 以上で起きたアボートの数をカテゴリごとに容易に知ることができる。

4.1.4 アボートリスト

アボートリストは、選択したフィルタおよび表示項目に合わせて JavaScript で生成される。このとき、カテゴリが SBL に設定されている行は背景色を変えて強調表示するようにしている。

4.1.2 項で述べたように、アボートリストに表示する項目(列)は、任意に追加することができる。デフォルトでは、ア

ボートリストは以下の項目からなる。

- アボートの時刻
- 最初に到達したアボートトリガー
- アボート対象リング
- アボート時の電流
- 入射との時間差 (No Sync の場合もある)
- カテゴリ
- コメントおよびリンク、記述者氏名
- BOR[11]の画像
- 編集画面(4.2 節参照)へのリンク

コメント列では、アボート事象ごとに書き込まれたコメントおよびリンクが表示される。リンクは原則として<a>タグを用いてハイパーリンクとして表示されるが、拡張子が .jpg, .png, .gif のいずれかだった場合は、タグで直接画像を表示するようにしている。

4.1.5 JavaScript 動作

Summary ページでは、読み込み時にフィルタ選択部および表示項目選択部の form を初期化した後、Asummary DB と Additional DB の 2 つのデータベースへ GET リクエストを送り、指定期間におけるアボートの一覧を受け取る。3.3 節で述べた通り、2 つのデータベースのレコードは原則としてタイムスタンプが厳密に一致するので、タイムスタンプをキーとして容易に結合できる。

アボートの一覧を受け取った後、JavaScript はアボートリストを作成する。アボート全件について URL パラメータに応じてフィルタ判定を行い、全てのフィルタを通過したアボートについてアボートリストに加える。このとき、アボート統計表のための計数も同時に行う。全てのアボートについて判定が終われば、最後にアボート統計表へ計数結果を反映して処理が終了する。

4.2 Edit ページ

アボートリストの最後の列には、コメント等の編集を行うための Edit ページへのリンクが掲載されている。Edit ページの html 自体は単一で、Summary ページ同様に URL パラメータでタイムスタンプを指定し、合致するアボート事象があればその事象のコメントを編集することができる、というものである。Figure 4 に、Edit ページのうち、コメント編集部分のスクリーンショット例を示す。

Edit ページでは、表示項目選択にかかわらず表示可能な全ての項目を表示するため、特定のアボートの詳細を掲載したページとしても機能する。このページで編集できる項目は以下のとおりである。

- アボートのカテゴリ
- アボートの原因リング(source_ring)
- コメント
- リンク
- 記述者氏名

リンク欄へ URL を記載すると、4.1.4 項で述べたようにハイパーリンクとして Summary ページに表示することができる。また、画像ファイルの URL を指定することで画像を直接表示させることができる。

submit ボタンを押すと、Edit ページの JavaScript が Additional DB に対して PATCH リクエストを送信し、入力内容を DB に反映させる。

comment edit form

複数のリンクを入力するときは改行で区切ってください。

Category: Source Ring:

Comment:

links:

Author:

Figure 4: Comment edit part of the edit page.

5. ユーザー向けの工夫

本システムは、あくまでも人間が判断した情報を書き留めるためのものであって、アボート事象に対して何らかの判断を自動的に行うものではない。そのため、編集作業に活発に参加するユーザーが存在し、各アボートに確実にカテゴリ付与等が行われることが、本システムが有効に機能するための重要な前提となる。カテゴリの付与やコメント書き込みの作業がユーザーから面倒と思われてしまった場合、カテゴリ未登録のアボートが増加して統計の信頼性を失い、余計にユーザーが離れていくという悪循環に陥りかねない。

そこで本システムの構築にあたっては、情報の検索や編集作業ができるだけ簡便に行えるように留意し、情報入力が楽になるような機能を適宜実装した。

5.1 フィルタ選択部 期間指定入力支援

フィルタ選択部のうち期間指定(from および to)では、日付と時刻をそれぞれ指定する。このとき入力が容易になるよう、以下の入力支援ボタンを実装した。

- 日付に今日の日付を自動入力するボタン
- 日付を1日前または後にずらすボタン
- プリセットされた時刻を自動入力するボタン (0:00, 23:59 のほか、SuperKEKB においてシフトの交代時刻となる 1:00, 9:00, 17:00 の5つ)
- 過去の運転期間 (2021ab から最新の運転期間まで)を自動で入力するボタン

これらのボタンは全て、クリックされた時に form の各要素の入力値を操作するだけの簡単な JavaScript で実装している。

5.2 マニュアルアボート 自動判定

本システムにおいて、アボート事象に対して何らかの判定を自動的に行う唯一の例外が、マニュアルアボートのカテゴリ登録である。クローラーが新規レコードを Additional DB に登録する時、最初のアボートトリガーが「Manual Abort」だった時のみ、カテゴリに「Manual」を自動的付与する。

5.3 入射起因アボート ワンクリック判定

入射ビームに起因するアボートは、アボートと入射のタイミングが近接していることや、アボートの瞬間に Belle II 検出器のバックグラウンドが増大することなどから判別可能である。特にアボートと入射の時間差は μs 単位で分かるようになっており、Summary ページにおいてもその時間差を表示している。

入射起因のアボートは、特に運転開始直後などの入射が確立されていない状況では、短時間に数十回以上連続して起こることも珍しくない。そのような場合、一件ずつ Edit ページに遷移してカテゴリを付与する作業を行うのは非常に面倒である。そこで、入射との時間差が具体的な数字で表示されている(「No Sync」表記ではない)アボートについては、その数字をクリックすることで Summary ページから直接ワンクリックで「Injection」カテゴリを付与できるようにした。

ハードウェアの誤動作が偶然入射タイミングで起こった場合など、入射ビーム起因とは言えない入射同期アボートも当然存在する。あくまでも自動判定ではなく入力支援にとどめることで、そのような場合でも必ず人の目によるチェックが介されるようにした。

6. まとめ・今後の展望

SuperKEKB において、アボート情報を網羅的にとりまとめ、カテゴリの付与やコメント投稿を通じて分析を支援する web システムを構築した。本システムによってアボート原因や発生頻度を整理しやすくなったことで、対策の立案や集合知の集積に貢献できた。

一方で、特に先行システムであるアボートサマリーとは機能的に重複する部分も多く、似たシステムが並立することで情報が分散してしまう懸念もある。そこで、今後はアボートサマリーと SBL Verification を統合した新アボートサマリーを開発する予定である。

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] Y. Ohnishi, "Recent Performance of SuperKEKB", presented at the 70th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Luminosity Circular e+e- Colliders (eFACT2025), Tsukuba, Japan, March 2025, paper MOA04.
- [3] H. Ikeda *et al.*, "Observation and Cause Investigation of Sudden Beam Loss at SuperKEKB", Proc. of PASJ2024, pp. 897-900, FRP023.
- [4] S. Sasaki *et al.*, "Development of time stamp recording system for SuperKEKB abort trigger system", Proc. of PASJ2017, pp. 610-612, TUP096.
- [5] <https://sqlite.org/index.html>
- [6] S. Ogasawara *et al.*, "Development of high-speed beam loss monitor system with optical fiber in SuperKEKB", Proc of PASJ2023, pp. 489-493, WEP08.
- [7] I. Okada *et al.*, "Sudden Beam Loss 原因究明に向けた音響センサーテスト", Flavor Physics Workshop 2023.
- [8] H. Kaji *et al.*, "Upgrade of Beam Abort System at SuperKEKB", Proc. of PASJ2024, pp.12-17, WEOT01.
- [9] B. Urbchat *et al.*, "SuperKEKB 加速器におけるビームアボートの高速化とアボート用ビームロス検出器の改良と増設", Flavor Physics Workshop 2024.
- [10] <https://fastapi.tiangolo.com/ja/>
- [11] M. Tobiyama *et al.*, "Development of bunch current and oscillation recorder for SuperKEKB accelerator", Proc. of IBIC'12, 2012, pp.138-142, MOPA36.