

## SuperKEKB でのアボート診断

### BEAM ABORT DIAGNOSTICS AT SuperKEKB

池田仁美<sup>#</sup>, 福岡均, フラナガンジョン, 古屋貴章, 飛山真理  
H. Ikeda<sup>#</sup>, J. W. Flanagan, H. Fukuma, T. Furuya and T. Tobiyama,  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-080

#### Abstract

Beam commissioning of SuperKEKB Phase-I finished in June, 2016 and we continue an upgrade work for Phase-II operation which starts in this fiscal year. In order to protect the hardware components of the accelerator against higher beam intensity and shorter beam lifetime of SuperKEKB than that of KEKB, the controlled beam abort system was updated. The abort system was triggered by interlock signals from hardware components, loss monitor signals, manual switch and so on. It is important to diagnose each abort reason and feed back to accelerator operation for protection of hardware and stable beam operation. Then a beam abort monitor system was prepared and collected the data of all aborts, totalling more than 1500 in Phase-I operation. This paper will give the outline of the monitoring system, typical examples of aborts and preparation status for Phase-II operation.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は電子陽電子衝突型加速器で、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  のルミノシティを目指して5年に亘るアップグレード作業を行った後、加速器の試験のために2016年2月から6月までの間Phase-I運転を行った[1]。Table 1に示す通り、KEKBと比較して40倍のルミノシティを達成するために、衝突点でのビームサイズをnmレベルに絞り、ビーム電流を最高2.6A(電子:HER)と3.6A(陽電子:LER)まで積み上げる。

ビーム電流が高くなると共に、寿命も短くなるため、ビーム不安定性によるビームロスが起こった場合、加速器機器が受ける損傷は大きくなる。そこで、問題が起きた時により速く正確にビームを捨てる事が出来る様にビームアボートシステムのアップグレードが行われた[2]。

アボートシステムはKEKB初期から備えられており、トラブルと原因解明を繰り返すことで、加速器全体の改良にも繋がって来た。例えば、検出器へのバックグラウンドを減らすためのコリメーターをビームが直撃して溶かすという事象が起こったため、速い信号を出すPINロスモニターや、ビーム振動のRF基準位相に対するずれを検出するビーム位相モニターを導入してアボートトリガーの高速化を図った。同時にコリメーター自身の改良も繰り返されている[3]。アボートトリガー信号がキッカー電源へ正しく送られていなかったため、ビームが正しくダンプへ捨てられなかったという問題が運転初期には起こっていたが、原因究明の後改善することができた。この様な問題点をBelle-II検出器が据え付けられ、衝突運転が始まる前に見つけ出し、改善しておくことは重要である。そこでアボートモニターシステムを使って、Phase-I運転中に起こったアボートすべてを精査し、原因究明と問題解決を繰り返し、今年度後半に始まるPhase-II運転に備えている。

Table 1: Machine Parameters of SuperKEKB

Parameter	LER	HER	DR	unit
Energy	4.0	7.0	1.1	GeV
No. of bunches	2500		4	
Circumference	3016		135.5	m
Max. stored current	3.6	2.6	0.07	A
Emittance (h)	3.2	4.6	42.5	nm
Emittance (v)	8.64	12.9	3150	pm
Bunch length	6.0	5.0	6.53	mm
$\beta_x/\beta_y$ at IP	32/0.27	25/0.30		mm
Luminosity	$8 \times 10^{35}$			$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
RF frequency	509			MHz

#### 2. アボートとアボートモニターシステム

##### 2.1 アボートキッカーとトリガーシステム

アボート時に大電流ビームによって取り出し窓が損傷されることを防ぐために、アボート窓でのビームの断面積を広げる必要がある。そのため、アボートキッカーは傾斜を持った垂直方向電磁石、水平方向電磁石、ランバートゾンDCセプトラム電磁石、及びLERはパルス4極電磁石、HERは6極電磁石からなる。アボートの所要時間は、ビームの1周回時間に相当する $10 \mu\text{s}$ 以内で、キッカーの立ち上がり時間は200nsである。ビームバンチは2nsを単位とした間隔で入射されているが、正しくアボートするために、キッカーの立ち上がりに必要な200ns間はバケットが空になっており、このキッカータイミングとビームとタイミングを正しく合わせることは重要である。

アボートトリガーは以下の5種類のリクエスト信号のORを取って、素早くキッカーへ信号を送る[4]。

- RF、真空、電磁石、モニターの各機器から直接出るインターロック信号。
- ビームロスを検知するロスモニター信号。

<sup>#</sup>hitomi.ikeda@kek.jp

3. ビームタイミングの RF 位相に対するずれを検出するビーム位相信号。
  4. ビームスタディ等のために人為的にアボートをを行うためのマニュアルスイッチ。
  5. 各機器の制御ソフトウェアから出される信号。
- 1、2、3 の信号は、加速器リングに 12 か所あるローカル制御室 (LCR) で光信号に変換された後、VME モジュール内で OR を取って、中央制御室 (CCR) に光ケーブルで伝送される。LCR からの信号、4、5 の信号が CCR で集められキッカーへのトリガー信号が作られるが、これに要する時間は、 $20\mu\text{s}$  以内である。

## 2.2 アボートモニターシステム

要求された信号に対して正しくアボートされているか、そのアボートはなぜ起こったのかを調べるために導入したアボートモニターシステムは、4 台のデータログから成る。Figure 1 にその概略を示す。周長 3km の SuperKEKB 加速器トンネル内に、ロス

モニターはほぼ均等に設置されており、その信号は 4 か所の LCR で集められる。RF 加速空洞は、トンネルの直線部 3 か所に設置されており、RF 関係の信号は 6 か所の LCR でやり取りされる。アボートモニター用データログはロスモニター信号と RF 信号にアクセスしやすい 4 か所の LCR に設置した。

ログへは、ロスモニターからは、主にコリメーター部に付けた PIN フォトダイオード (PIN) 信号とその他の広い範囲をカバーするためのイオンチェンバー (IC) 信号の一部、RF からは空洞電圧、クライストロンの出力パワーを入力している。その他に、ビーム電流値、ビーム位相、入射トリガータイミング、アボートトリガータイミングも入力した。これらの信号を、アボートトリガーの前後 300ms から 600 ms の間、 $1\mu\text{s}$  または  $5\mu\text{s}$  のサンプリングタイムで記録する (時間の違いはログの種類による)。記録されたデータは、アボートが起こってから数分以内に制御ネットワークで CCR に送られ、運転シフト員が原因解明に役立てることができる。

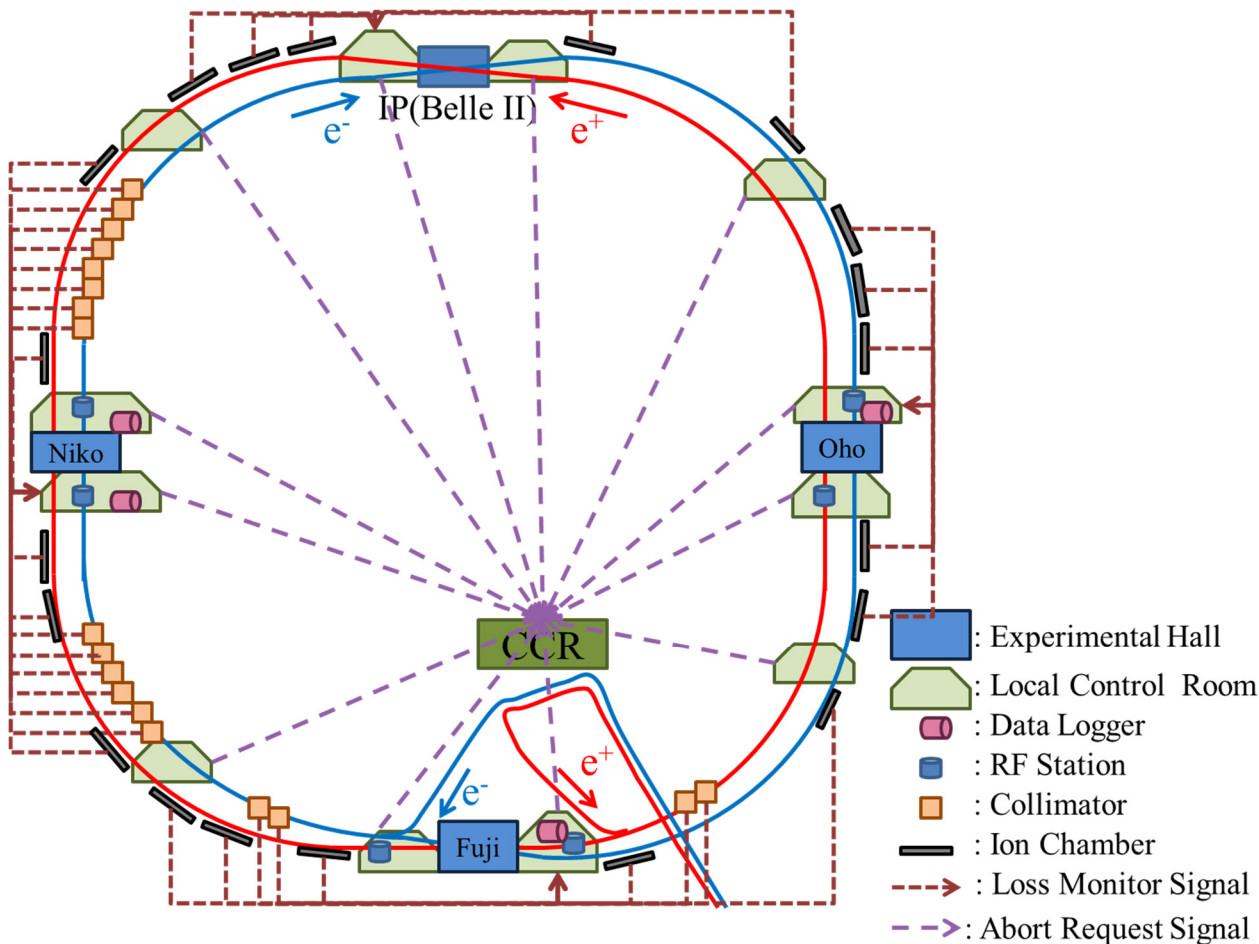


Figure 1: Overview of beam loss monitor and abort monitor system at SuperKEKB phase I.

### 3. データ解析

Phase-1 運転中のアボート回数は 1500 回以上に上り、4 か所のログに記録されたデータ数は 5000 を超える。記録できたデータは実際のアボートの 95% で、取りこぼした 5% は、運転初期の入射調整、アボートキッカータイミング調整のために行ったマニュアルアボートの時間間隔が短かったため、ログのトリガーが間に合わなかったことによる。以下に特徴的なアボート例を示す。

まず、正しくアボートがリクエストされ、ビームがダンプに捨てられた場合の基準データとしてマニュアルアボート例を Figure 2 に示す。ビーム電流信号は DCCT で測定しているために生じる回路内の遅れと LCR の場所による信号ケーブル内での遅れがあり、実際にビームが切られた時刻より遅く見える。この図では  $45\mu\text{s}$  の遅れが見られるが、LCR の場所によってこの時間は  $20\sim 100\mu\text{s}$  になる。また、ビーム減衰時間も  $90\mu\text{s}$  に見えるが、実際には 1 ターン  $10\mu\text{s}$  以内に  $0\text{A}$  まで落ちている。RF 空洞電圧は、ビームが切られた瞬間に振れるので、アボートトリガー直後にビームが切れていることがわかる。これらの信号を基準とし、それぞれの信号のタイミングや傾きが異なっている場合は何らかの異常が起きたとみなせる。

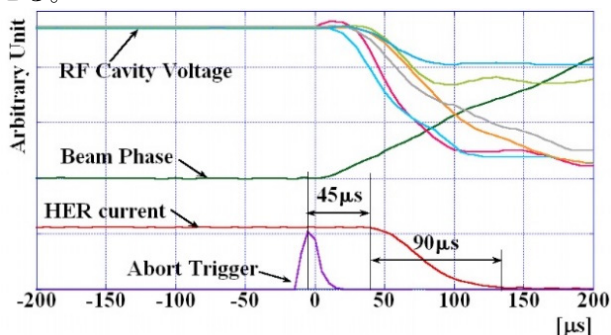


Figure 2: Manual abort.

#### 3.1 加速器機器のインターロック信号によるアボート

加速器機器は、それぞれにインターロック信号を備えているが、真空システムのゲージや温度計、電磁石の電源信号等は遅いため、これらの異常信号がアボートトリガーを出すころには、ビームの状態は悪化し、ロスモニターやビーム位相信号が先にトリガーを出してしまう。

RF はビーム不安定性から空洞を守るために様々なインターロック信号を準備している。RF アボートが出た場合、アボートトリガーより前に変動している RF 電圧を探す。Figure 3 の場合、アボートトリガーの  $3\text{ms}$  前に紫で表示されている空洞の電圧が他の空洞電圧より先に変動している。空洞電圧が空洞を守るための閾値として設定された  $80\%$  を切ったところで、インターロックが発動してアボートに至っている。その後の調査で、この時の変動の原因はピエゾ

チューナーの故障で、その結果空洞の振動数がデチューンされたためだということが分かった。

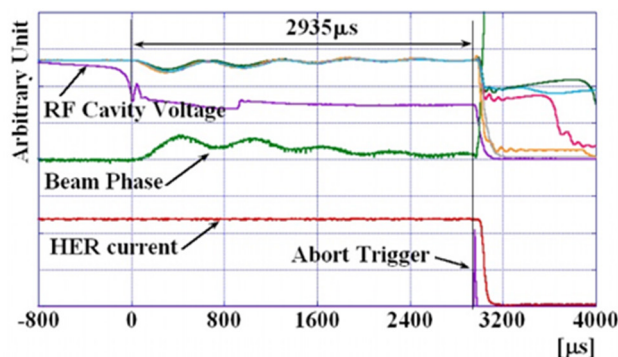


Figure 3: RF hardware abort.

#### 3.2 ロスモニターアボート

急激なビームロスから機器を守るために、PIN と IC からなるロスモニターシステムを整備した。PIN はコリメーターや、入射点等のアパーチャーの狭いところに取り付けて、ビームロスが HER と LER のどちらで起きたかも判定して、必要なリングだけを素早くアボートする。IC はトンネルの壁側に取り付けているため、ビームロスがおきたリングを判定することはできないが、広い範囲を網羅することができる[5]。

Figure 4 はビームロスが原因で起こった両リングアボートの例である。この場合 HER 電流がアボートトリガーより  $2.5\text{ms}$  前にロスし始めていることが分かる。しかし、HER ビームロスが始まったと同時に LER アボートが発報して、LER ビームがアボートされた。トリガーとなった信号は RF のアークセンサーで、HER ビームのロスした場所が LER RF のある直線部だったため、そのノイズが空洞のセンサーに引っかかったために起こった。HER はロスモニター PIN 信号によってアボートされたが閾値が高かったため時間がかかっている。この後、無駄な LER アボート为了避免するために、PIN の閾値を調整した。

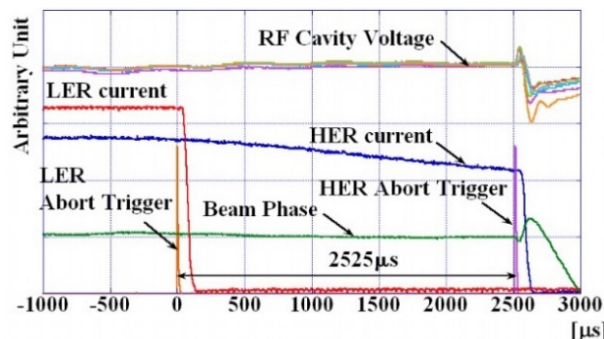


Figure 4: Loss monitor abort caused by HER beam loss.

Phase-I の初めには、入射が始まった瞬間や入射が終わった瞬間にロスモニターアボートが発報することがよくあった。その原因を調べるために、入射キッカーやセプトラムへのトリガー信号を他の信号と一緒にログに入力して様子を見た。入射キッ

カーは、入射点の上流と下流にあり、それぞれにトリガー信号を送っている。Figure 5 に示した様に、入射終了の瞬間にアボートが起きた時の信号を見ると、上流側のキッカーへの最後のトリガーが抜けていることが分かった。その結果、蓄積ビームは下流のキッカーでのみ蹴られて不安定になりビームロスしてアボートに至っている。この問題は、入射トリガーシステムのソフトウェアの問題で、この後修正された。

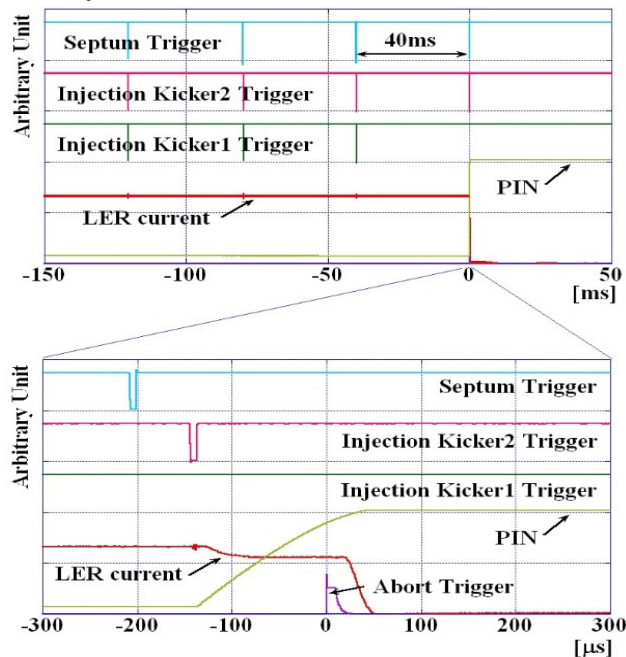


Figure 5: Beam loss that synchronized for injection timing.

運転が進み、ビーム電流が上がってくると、ビーム位相の振動を伴ったロスモニターアボートが増えた。Figure 6 では、ビーム位相の振動と同時にゆっくりとビームがロスを始め、PIN が閾値に達したところでアボートされていることが分かる。このタイプのビームロスの原因を調べた結果、同時にリングのどこかで真空のバーストが起きていることが判明した。圧力バーストはリング内の各所で起きているが、ビームロスは必ずアパーチャーの狭い入射点付近で起こっていた。そこでコリメーターの位置を調整すると、コリメーター部の PIN が先に発報するようになった。この種のアボートは、真空チャンバー内でダストがビームと衝突した結果、ビームが振動を始め、最終的にリング内のアパーチャーの狭いところで大きくビームがロスしてロスモニターの閾値に達したと考えられている[6]。

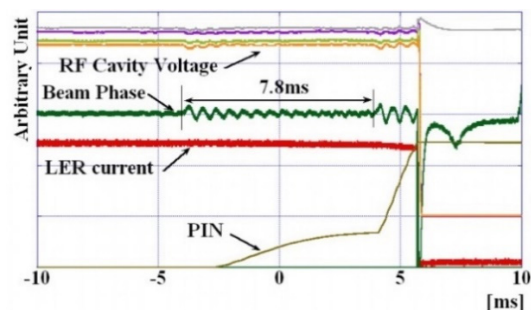


Figure 6: Loss monitor abort with beam phase oscillation.

### 3.3 ビーム位相アボート

加速ビームと RF 空洞は強い相互作用があるため、大電流が一瞬でなくなると空洞はトリップしてしまう。反対に空洞がトリップすると、ビームはコヒーレントシンクロトロン振動を始めビームロスを引き起こす。そこで、ビーム位相の閾値をアボートトリガーに導入することで、RF の異常時や、ロスモニターが検知しない様なビームロスでも、ビーム位相アボートで検出できるようになった。

ビーム位相アボートが発報した場合、まずすべての RF 空洞電圧が正常かどうか確認する。Figure 7 では、RF 空洞電圧がクエンチにより一瞬変動していることが分かる。この時落ちた電圧を保証するためにクライストロンパワーがゆっくりと上昇している。75ms 後にクライストロンパワーがリミットに到達して OFF された結果、RF 電圧が保証されなくなってトリップする。それに伴い、ビーム位相が変動し始め 335μs 後に閾値に達してアボートトリガーを発報したことが分かる。

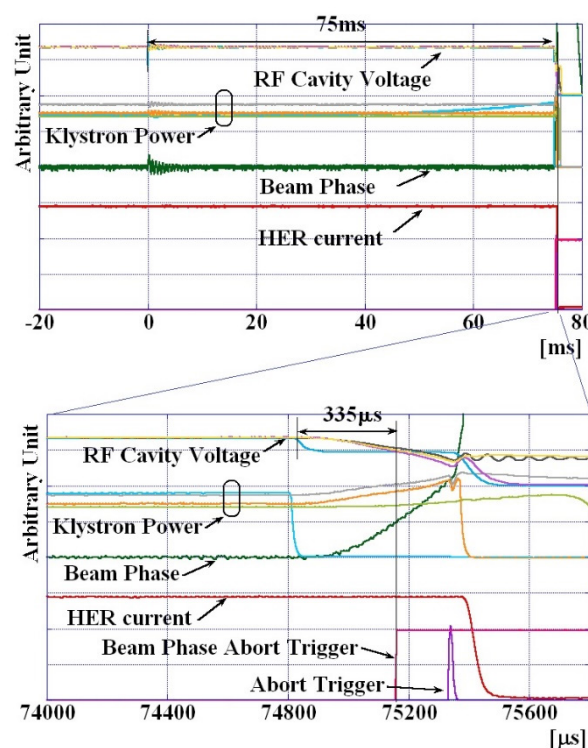


Figure 7: Beam phase abort caused by RF down.

Figure 8 ではビーム位相アボートトリガーの 1.5ms 前に空洞電圧が異常なふるまいを始め、その後トリップしている。ビーム位相は RF 電圧減少に伴って上昇し始め、アボートと同時にロスモニターPIN 信号も跳ねている。この現象は、RF 空洞を含む加速器機器が物理的に振動した時に起こる。この時は実際に体感出来るほどの地震が起こっていた。

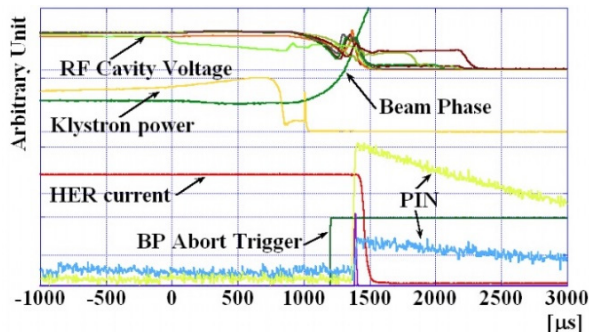


Figure 8: Beam phase abort caused by earthquake.

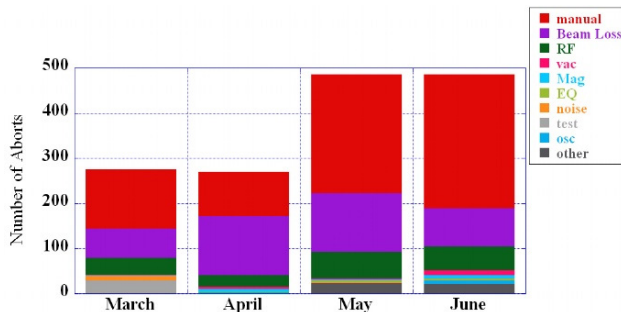


Figure 9: Abort statistics.

#### 4. まとめ

SuperKEKB Phase-I 運転中に起こった 1500 以上のアボートについてすべて診断し、原因を分類した。Figure 9 は月毎の統計である。マニュアルアボートが多いのは、アボートキッカーのタイミング調整のために、キッカー電圧やオプティックスを変えて 1 バンチ入射とアボートを繰り返したためである。アボートタイミング調整の後には、ビームは正しくダンピングされるようになった。5 月、6 月に RF 関連のアボートが多いのは、周波数チューナーの故障と、HOM ダンパーの調整が不十分だったせいである。真空の圧力バーストを伴うビームロスアボートはビーム電流値が上がるにつれて増加した。すべてのアボートについて原因を究明し、改善できるところは改善したつもりである。

LER アボートシステムは Phase-II の前にビーム取り出し前でのビームの断面積を広げるための改良がなされ、低エミッタンスビームに備える。

アボートモニターシステムは Phase-I での診断に十分役立ったので、Phase-II に備えてログの数を増やし同様の測定を行う。Phase-II の前にダンピングリングのコミショニングも始まるので、その立ち上

げ時にメインリングと同様の信号を観察することで、ビーム調整に役立てたい。

#### 参考文献

- [1] Y.Funakoshi, “SuperKEKB のフェーズ1のビームコミショニング”, 第13回日本加速器学会年会 千葉県 MOOL02.
- [2] T.Mimashi, “SuperKEKB 電子リングのビームアボートシステム”, 第14回日本加速器学会年会 北海道 TUP001.
- [3] T.Ishibashi *et al.*, “LOW IMPEDANCE MOVABLE COLLIMATORS FOR SUPERKEKB”, IPAC2017, Copenhagen, Denmark, WEPIK009.
- [4] S. Sasaki *et al.*, “Upgrade of abort trigger system for SuperKEKB”, ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, MOPGF141.
- [5] H. Ikeda *et al.*, “Beam loss monitor at SuperKEKB”, IBIC2014, Monterey, CA, USA, TIPD22
- [6] S.Terui 他, “SuperKEKB での圧力バーストの観測”, 第14回日本加速器学会年会 北海道 WEOM09.