

## SuperKEKB 電子リングのビームアポートシステム THE ABORT SYSTEM OF SUPERKEKB HIGH ENERGY RING

三増俊広<sup>#, A)</sup>, 飯田直子<sup>A)</sup>, 菊池光男<sup>A)</sup>, 森隆<sup>A)</sup>, 小玉恒太<sup>A)</sup>, 阿部和彦<sup>B)</sup>,  
徳地明<sup>C)</sup>, 黄瀬圭祐<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, Tsukuba Ibaraki Japan

<sup>B)</sup> Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., Hitachi, Ibaraki Japan

<sup>C)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd., Kusatsu, Shiga Japan

### Abstract

The new beam abort system is installed in the SuperKEKB High Energy Ring (HER) for Phase I operation. [1] The new abort system enlarges the extracted beam horizontal size to protect the extraction Ti window and the beam abort gap is shortened from 500 nsec to 200 nsec for the stable operation of cavities.

### 1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、ビームエネルギーが非対称な電子陽電子衝突型加速器で、7GeV の電子リング(HER)と、4GeV の陽電子リング(LER)からなる。加速器の運転停止時に、ビームをダンプに導くビームアポートシステムは、Phase I [1]に備えて電子リングに新たに設置された。電子リングのビーム電流の設計値は、2.6A で、水平エミッタンスは、4.6nm である(Table 1)。

Table 1: Parameters of SuperKEKB HER

Beam Energy	7GeV
Beam Current	2.6A
Horizontal Emittance	4.6nm
$\sigma_x @ \text{Window}$	1.1mm

### 2. 電子リングビームアポートシステム

#### 2.1 性能要求

KEKB 加速器と比べて、SuperKEKB では、ルミノシティを 40 倍高くするために、ビーム電流を増やし、エミッタンスを小さくし、衝突点でのベータ関数を絞るという方策を取っている。エミッタンスが小さい大電流のビームをアポートするため、チタン製の取り出し窓を通過するビーム電流密度は、極端に大きくなり取り出し窓は、破壊されてしまう。取り出し窓を通過する電流密度を下げるため、水平方向にはビームを広げ、垂直方向には、ビーム位置を移動しながら取り出す方法をとることになった。

ビームアポートシステムに対するもう一つの要求として、アポートキッカーの立ち上がり時間の短縮が挙げられる。SuperKEKB 加速器の周回時間は、約 10 $\mu$  秒である。アポートキッカー電磁石の磁場が立ち上がる途中の時間

は、ビームをダンプまで導けないので、あらかじめ、アポートキッカー電磁石の磁場が立ち上がる時間を確保しなければならない。これを、ビームを埋めることのできないアポートギャップというが、KEKB では、500nsec であったものを SuperKEKB では、200nsec 程度にすることが、要求されている。これは、加速空洞を安定的に運転するために、ビームローディングをなるべく一定に保ちたいことに起因する。

#### 2.2 電子リングビームアポートシステム

電子リングのビームアポートシステムは、ビームを水平方向に蹴り出すための4台の水平方向アポートキッカー電磁石、10 $\mu$  秒の間ビーム位置を垂直方向に移動するための1台の垂直方向キッカー電磁石、水平方向にビームを広げるための6極電磁石、チタンで製作された取り出し窓、取り出し窓から取り出されたビームを垂直方向に曲げて、ビームダンプまで導いていくランバートソープタム電磁石、鉄とコンクリートで作られたビームダンプからなる。[2] また水冷のセラミックチェンバーが、キッカー電磁石で挿入されている。[3] 各バンチが取り出し窓で移動しながら、取り出される概念図を Figure 1 に示す。

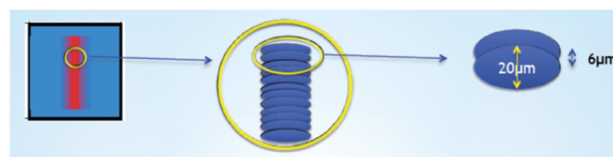


Figure 1: Vertical sweep of the beam spot at the extraction window.

<sup>#</sup> toshihiro.mimashi@kek.jp

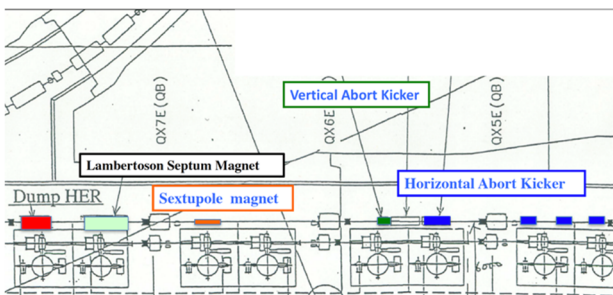


Figure 2: HER beam abort system configuration.

水平方向のビームサイズを広げるために、6極電磁石の上流に設置された水平方向キッカー電磁石でビームを水平方向に曲げ、6極電磁石の中心からずれたところを通し、6極電磁石の非線形磁場を利用して、取り出し窓の水平方向のビームサイズを大きくする設計になっている。[4] 取り出し窓を通過するビームの密度は、KEKBで達成されたビームの密度以下になるように設計されている。

Figure 2 に各電磁石の設置位置を示す。アボートシステムで使用している6極電磁石の非線形性をキャンセルするために、ベータロンのフェーズが 180 度離れた場所に、もう1台の6極電磁石が、設置されている。

### 3. ハードウェア

#### 3.1 キッカー電磁石及び電磁石電源

Table 2 にキッカー電磁石の設計性能を示す。キッカー電磁石は、標準的なフェライトをリターンヨークとして用いたウインドウフレーム型のキッカー電磁石で、水平方向キッカー電磁石では、1台のコイルで、385mm の長さのフェライトコア2台に磁場を励磁している。(Figure 3 参照)

Table 2: Kicker Magnets Parameters

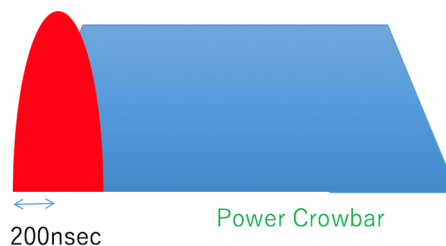
	H Kicker	V Kicker
$\theta$ (mrad)	2.72	1.38
B(T)	0.02	0.092
I(kA)	1.12	2.1
Length of Ferrite (mm)	385x8	350x1
# of coils	4	1
Length of ceramic(mm)	500x8	500x1

全てのキッカー電磁石は、1台の電磁石電源に接続されていて、共通のスイッチング素子(サイラトロン)によって制御されている。つまり、電源に故障があった場合には、全てのキッカー電磁石が動作しなくなる設計で、一部のキッカー電磁石のみが動作するということはない。一部のキッカー電磁石のみが動作した場合、チタン取り出し窓以外の真空ビームパイプにビームが当たってしまい、

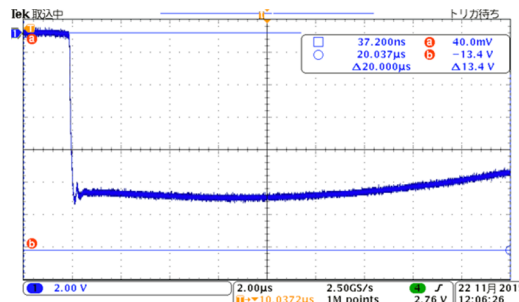
真空パイプに損傷を与えることになる。一方、キッカー電磁石電源に故障が発見された場合、1台の磁場の弱い偏向電磁石をゆっくり落とし、ビームが局所的に当たらないようにするシステムになっている。



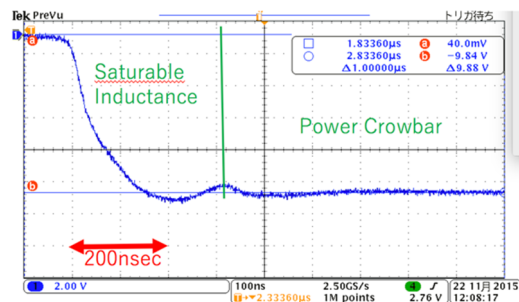
Figure 3: Horizontal abort kickers.



(a) Two components of the coil current.



(b) During One revolution time kicker current is almost constant.



(c) Rise Time is 150nsec.

Figure 4: Output current of Horizontal kicker power supply.

キッカー電磁石電源は、2つの部分に分けられる。充電器(高電圧電源)と、スイッチング素子(サイラトロン)は、地上のクライストロンギャラリーに設置されている。トンネル内のキッカー電磁石の真下には、主コンデンサー、パワーローバー用のダイオード、磁気スイッチ回路が設置されている。

Figure 4 に、水平方向キッカー電磁石の電流波形を示す。磁気スイッチ回路は、200nsec 以下の早い立ち上がりを得るために使用されており、パワーローバー回路は、1周回時間(10 $\mu$  秒)以上の間、電流を一定に保つために使用されている。

### 3.2 セラミックチェンバー

水冷式セラミックチェンバー(Figure 5)は、キッカー電磁石に挿入されている。セラミック磚子の内側には、薄いチタンの膜が蒸着されていて、ビームのイメージ電流による発熱を緩和し、ビームからの電磁場がチェンバーの外に漏れるのを防ぐようになっている。通常、セラミックのロウ付けのためのメタライズは、Mn-Mo が使用されるが、Mn-Mo は、水に弱いので、このチェンバーでは、チタン活性化法によるメタライズを行っている。アルミナセラミックは、真空パイプとして採用されているが、これは、機械的に十分な強度を保ち、メタライズも容易であることによる。セラミックチェンバーの内径は、レーストラック型で、水平方向に 60mm 垂直方向に 40mm となっている。今回、製作した、セラミックは、冷却水路を含んだ、一体型の 500mm の長さを持ったセラミックである。冷却水路を含んだ一体型のセラミックを開発することによって、スリーブ、フランジを含んだセラミックチェンバー全体の構造が簡単になり、その直線性、強度、コンパクト化に優れた性能を達成できた。このセラミックチェンバーの開発成功により、キッカー電磁石の Gap が、KEKB では、90mm であったのが、SuperKEKB では、70mm に減らすことに成功し、キッカー電磁石電源のパワー大きく減らすことに成功した。

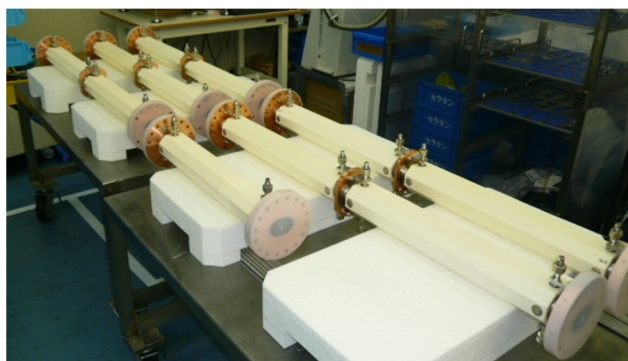


Figure 5: The water-cooled ceramic chambers.

KEKB では、コバルドで製作された、セラミックとフランジをつなぐスリーブでのビームイメージ電流による発熱が問題になったので、SuperKEKB では、コバルドの内壁に 100 $\mu$ m の銅の電鍍を施し、発熱を抑えることとした。Phase I 運転に置いて、500mm のセラミック部分での発熱が測定された。そのデータを外挿すると、設計ビーム

電流値 2.6A、2500 バンチ運転における冷却水温度の温度上昇は、3L/分の冷却水量で、9 $^{\circ}$ C程度と予想され、問題とならない。コバルスリーブでの発熱は、最大で 20 $^{\circ}$ C程度と予想され、これも設計通りである。

## 4. Phase I 加速器運転

Phase I の加速器運転に置いて2つのアボートシステムの性能測定が行われた。一つ目が、取り出し窓での水平方向のビームサイズが、設計通り広げられていて、かつ垂直方向のビームの移動が、設計値通りになっているかを確認することである。単バンチでの水平方向のビームサイズは、取り出し窓の直後に置かれた、スクリーンモニターを画像解析することによって測定された。200 $\mu$ m 厚の alumina fluorescent screen を用いて測定したものを Figure 6 に示す。水平方向のビームサイズは、1.18 $\pm$ 0.16 (mm)となり、設計値の 1.1mm とほぼ一致する結果を得た。

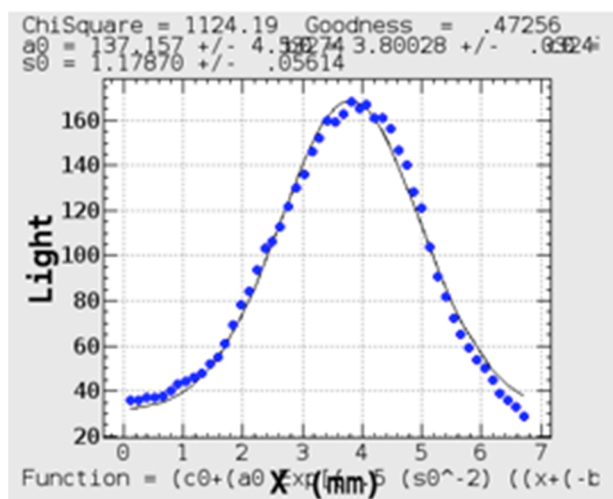
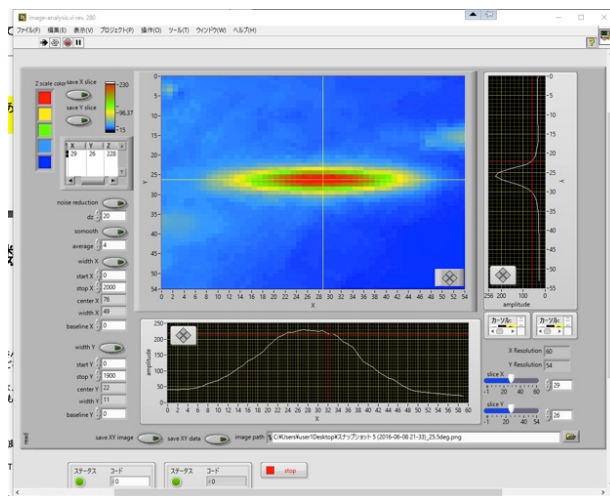


Figure 6: A beam profile behind the extract window.

計算では、6極電磁石の電流が 0 であった場合の取り出し窓での水平方向のビームサイズは、0.104mm となる。KEKB 加速器のビームを使った Ti 取り出し窓の破壊試験によると、Ti の窓は、取り出し窓を通過する電流の密度が 260mA/mm<sup>2</sup> と 400mA/mm<sup>2</sup> の間の値から、変形、破壊が始まる。[5] アボートシステムの設計では、これを 80mA/mm<sup>2</sup> 以下にするようになっている。アボートシステムが水平方向のビームサイズを広げなかった場合、設計ビーム電流をアボートした時の窓を通過するビーム電流密度は、830mA/mm<sup>2</sup> となり、取り出し窓は、破壊されてしまうこととなる。



Figure 7: Abort beam position monitor in front of the beam dump.

取り出し窓でのビーム位置は、Figure 7 に示すビームダンプ前に設置されたビーム位置モニターを通して測定された。[6] Figure 8 にその測定結果を示す。これは、ビームダンプ前で、10μ 秒の間にどのようにビームが移動したかを示す。この位置での垂直方向の 6.5mm 移動は、取り出し窓での 15mm 移動に対応し、設計値とほぼ合致する。

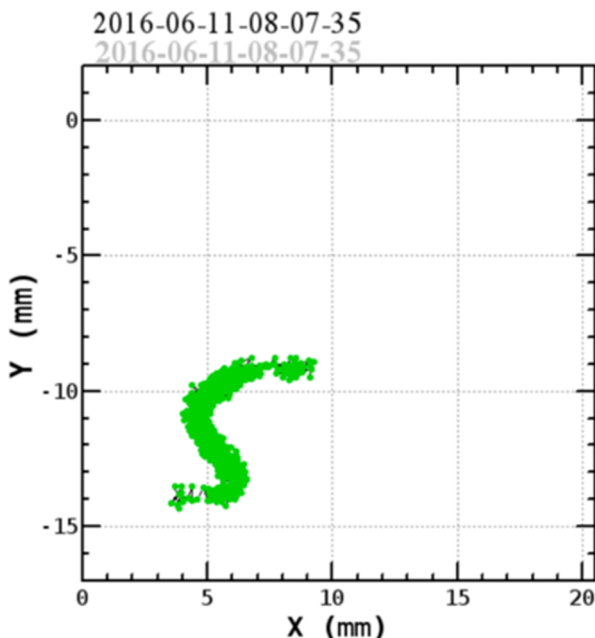


Figure 8: Beam position in front of the beam dump.

垂直／水平アボートキッカー電磁石の励磁は、単一の高電圧電源によって行われているため、水平方向キッカー電磁石と垂直方向キッカー電磁石の磁場の相対的な強さは、水平方向には、インダクタンスを、垂直方向には、抵抗をコイルと直列に接続することによって、微調整されている。



Figure 9: Bunch current monitors.

もう一つのアボートシステムの性能評価は、アボートギャップが、200nsec 以下になったかどうかの測定である。(Figure 9 参照)アボートギャップの長さは、単バンチをアボートしながら、アボートされたビームが、取り出し窓を通ったかをスクリーンモニターで確認しながら行った。トリガー信号のタイミングをずらすことによって、相対的なバンチの位置を変えて、測定を行った。アボートギャップは、約 160nsec 程度まで縮められることが確認され、これはアボートシステムへの要求(200nsec 以下)を満たしている。

## 5. まとめ

HER のビームアボートシステムは、設計通りに動作していることが確認された。アボートギャップは、KEKB の 500nsec から 200nsec に短縮され、取り出し窓での水平方向のビームサイズもほぼ設計値通りの、1.18mm となっていることが確認された。垂直方向のビーム位置の移動も設計値と同じ 15mm と調整された。セラミックチェンバーでの発熱も、ほぼ設計通りとなり、問題はない。

## 参考文献

- [1] Y.Funakoshi *et al.*, “Beam Commissioning of SuperKEKB”, IPAC 2016, Busan, Korea, May 2016, TUOBA01, p.1019.
- [2] T. Mimashi *et al.*, “SuperKEKB Beam Abort System”, IPAC 2014, Dresden, Germany, June 2014, MOPRO023, p.2444.
- [3] T. Mimashi *et al.*, “Ceramic Chamber Used in Super-KEKB High Energy Ring Beam Abort System”, IPAC 2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, WEPIK011.
- [4] N. Iida *et al.*, “Abort System for the KEKB”, IPAC 2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, WEPIK007.
- [5] T. Mimashi *et al.*, “The Beam Test for The Ti Extraction Window Damage”, IPAC 2014, Dresden, Germany, June 2014, MOPRO024, p.2447.
- [6] N. Iida *et al.*, “A Position Monitor for The Aborted Beam in KEKB”, EPAC 2008, Geneva, Italy, June 2008, WEPP06, p.2659.