

## 電子リング低エミッタンスビーム取り出しシステム用

### アボートキッカー電磁石電源の開発

#### DEVELOPMENT OF ABORT KICKER ELECTROMAGNET POWER SUPPLY FOR ELECTRON RING LOW EMITTANCE BEAM TAKING SYSTEMS

黄瀬圭祐<sup>#, A)</sup>, 徳地明<sup>A)</sup>, 三増俊広<sup>B)</sup>

Keisuke Kise<sup>#, A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Toshihiro Mimashi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. PPJ)

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

Research and development of the SuperKEKB electron accelerator which are large current and a low emittance electron accelerator are advanced by the amount on high energy accelerator research organization (KEK). A SuperKEKB electron accelerator needs kicker electromagnets with a faster rise time than those in ordinary KEKB accelerator from a request of larger beam current. The abort kicker system used for a electron ring consists of four magnets for horizontal direction and one magnet for vertical direction. This paper is concerned with development of the abort kicker electromagnet power supply which achieve a current at rise time of 200 ns, a peak current of 2.1kA, a current flattop duration of 10us on a horizontal kicker magnet of  $2.2 \mu$  H, and a peak current of 2.1kA on a vertical kicker magnet.

#### 1. はじめに

現在高エネルギー加速器研究機構では大電流かつ低エミッタンス加速器である SuperKEKB 加速器の研究開発が進められている。SuperKEKB 加速器では、大電流を加速する空洞の要求から、KEKB で使用されたようなアボートキッカーの立上り時間では不十分で、より速い立上りのキッカー電磁石が必要とされている。電子リング用低エミッタンスビーム取り出しシステムに使用されるアボートキッカー電磁石は、水平方向 4 台、垂直方向 1 台からなる。またこのシステムは、その他ビームを広げる為の六極電磁石 1 台、ビームをビームダンプへ導くランバートソンプタム電磁石 1 台及び、チタンの取り出し窓からなる。本発表は水平方向  $2.2 \mu$  H というインダクタンスに対して、立上り時間 200ns、ピーク電流 1.7kA、電流ピーク持続時間 10us と垂直方向マグネットに対して  $10 \mu$  s の電流が 2.1kA を実現した、アボートキッカー電磁石電源の開発に関するものである。

#### 2. 電子リング低エミッタンスビーム取り出しシステム

高エネルギー円形加速器にはアボートキッカーマグネットが必要である。周長 3km とした大型の円形加速器の中には高エネルギーの電子、陽電子、が光の速さに近い速度で回っている。これらの粒子は真空容器の中を磁石の力で制御されながら、壁に衝突しないように回転している。ところが、加速器に異常が起きたり、制御に問題が発生した場合は、急峻にこれらの高速粒子を回収しないと、粒子がビームパイプや他の機器に当たり、機器に損傷を与えたり

壁に穴をあけるなどの障害を与える。アボートキッカーはこのように加速器を緊急停止する場合に、急速にマグネットに電流を流して、高速粒子を安全にビームダンプに回収させるためのものである。円形加速器の中で高速粒子は円形軌道に連続的に存在しているが、この円形軌道に一部高速粒子が存在していない隙間がある。アボートキッカーはこの隙間部分が通過するわずかの時間の間に電流を立ち上げることで、この隙間の後から侵入してくる高速粒子をビームダンプに捕捉する。アボートキッカーの電流立ち上がりが早くなると、その分、円形軌道上の粒子の隙間は狭くすることが出来るので、加速器の中を周回する粒子の量を増やすことが出来、加速器、加速空洞の利用効率が向上する。

SuperKEKB 加速器は非対称な電子/陽電子コライダーである。この加速器は、7GeV 電子リング (HER) および 4GeV 陽電子リング (LER) により構成されている。デザインビーム電流は LER の HER と 3.1A の 2.62A である。そして、デザイン水平方向エミッタンスは HER の 4.6nm および LER の 3.2nm である。アクセラレータコンポーネントとベル II 検出器の保護、および放射線安全のために、個々のリングはビームアボートシステムを持っている。それらは、蓄えられたビームをビームダンプに回収し、リング上のどこにおいてもビームが加速器の機器に衝突することを防止している。加速器のビーム仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Emittance, Beam Current and Beam Size at the Extraction Window in the SuperKEKB Accelerator Complex

	HER	LER
Beam Energy	7 GeV	4 GeV
Beam Current	2.62A	3.6A
Horizontal Emittance	4.6nm	3.2nm
$\sigma_x$ @window	0.36mm	0.74mm

### 3. アポートキッカー電源

#### 3.1 目標仕様

電子リング用低エミッタンスビーム取り出しシステムに使用されるアポートキッカー電磁石は水平方向4台、垂直方向1台で、各々のキッカー電磁石のインダクタンスはTable 2に示す通りである。5台の負荷を一台の充電器で充電し、1台のサイラトロンで同時に放電する。水平電磁石に立ち上がり時間200nsecで1.7kA電流を流し、それを10 $\mu$ sec間持続させる。垂直電磁石には10 $\mu$ secで2.1kAの電流を流す。

Table 2: Specifications of Power Supplies for Abort Kicker Magnets

	H Kicker	V Kicker
Inductance	2.4 $\mu$ H	7.5 $\mu$ H
Output Current	1.7kA	2.1kA@10usec
Wave Rise Time (2%-90%)	$\leq$ 200nsec	-
Output Duration	$\geq$ 10 $\mu$ s	-

#### 3.2 設計構成

充電器は出力電圧 DC40k を使用し、スイッチング素子はサイラトロン CX1175C を使用する。1台の充電器、サイラトロンで水平電磁石4台、垂直電磁石1台に電力を供給する。Fig. 1 にアポートキッカー電源のブロック図を示す。

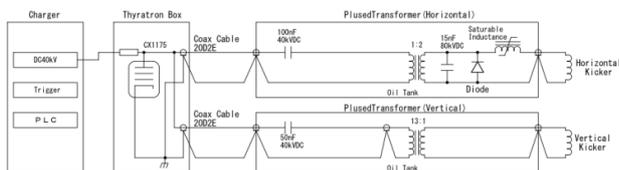


Figure 1: Block diagram of the power supply for kicker magnet.

#### ① 水平用磁気圧縮回路

出力電流を 10  $\mu$  s 間持続させるために、パワークローバ回路を基板実装で使用している。電流の立ち上りを高速化 (200ns) する為磁気スイッチを使用している。1台の放電スイッチで水平電磁石電源、水平電磁石用パワークローバ電源、垂直電磁石電源、四極電磁石電源、四極電磁石用パワークローバ電源にパルス電源を供給するため、パルストランスを使用する。

パルストランス、磁気スイッチに使用するコアの形状は全て同じ同心構造であることから、実装方法として、全てのコアを同一中心軸上に並べて配置し、円筒状の油タンクの中に収納した。パワークローバ回路基板、コンデンサも同様に円形で実装した。円筒の片端面が入力端子側になり、もう一方の端面が出力端子側になるが、それぞれの端面の中心部分に絶縁貫通端子を設け、大気側から油中へバイアス電流を通電できる構造とする。両端面に取り付けた絶縁貫通端子間は油タンク内で中心軸上に沿って電氣的に接続されており、この端子間に電流を導通することで全てのコアにバイアス電流を流すことができる。出力端子部に CT を実装し、出力電流のモニターを行っている。油はシリコンオイルを使用している。Fig. 2 にタンク内部組立図、Fig. 4 に外観写真を示す。

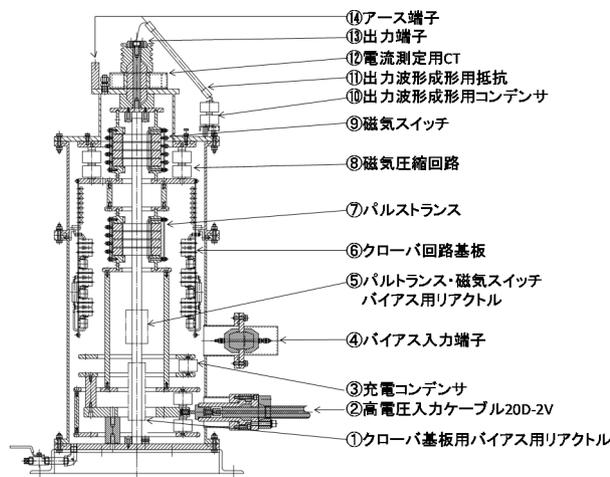


Figure 2: Inner structure of pulse compressor for horizontal magnet.

② 垂直パルストランス

垂直パルストランスは負荷 7.5uH に対して 10 μ sec 時に 2.1kA の電流が出力されるように内部パラメータを調整し設計した。水平用磁気圧縮回路と同様に円筒状の油タンクに収納した。出力端子部に CT を実装し、出力電流のモニターを行っている。油はシリコンオイルを使用している。Fig. 3 にタンク内部組立図、Fig. 4 に外観写真を示す。

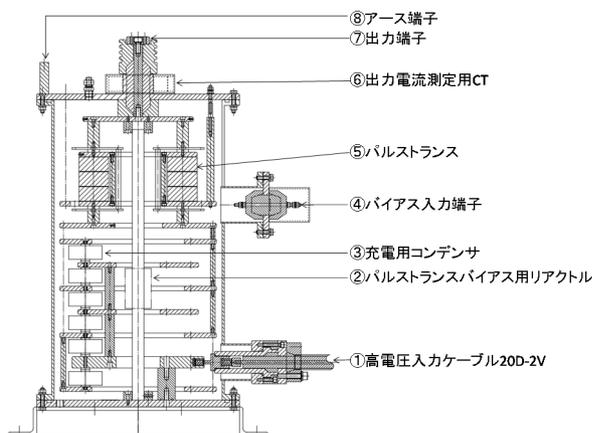


Figure 3: Inner structure of pulse transformer for vertical magnet.



Figure 4: photographs of a pulse compressor for a horizontal magnet (left) and a pulse transformer for a vertical magnet (right).

3.3 評価試験結果

単体での評価試験結果を以下に示す。Fig. 5 は水平用磁気圧縮回路のタンク内に実装したカレントモニターの出力電流波形である。立上り時間 200ns、ピーク電流 1.7kA、10 μ sec 間持続している。Fig. 6 は垂直用パルストランスのタンク内に実装したカレントモニターの出力電流波形である。10 μ sec で 2.1kA の出力を確認した。

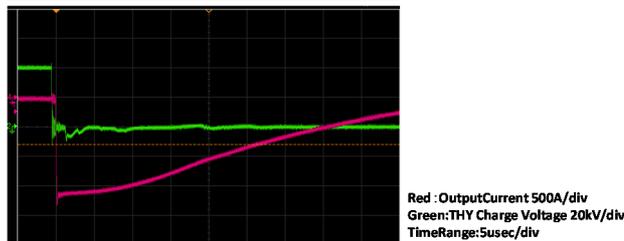
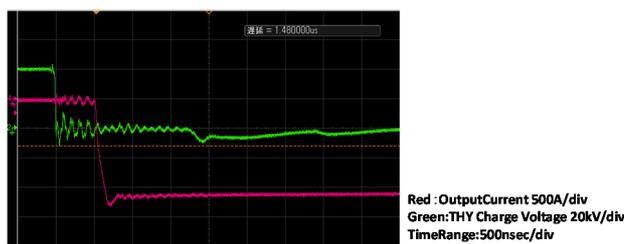


Figure 5: Output Current Pulse Forms (Horizontal).

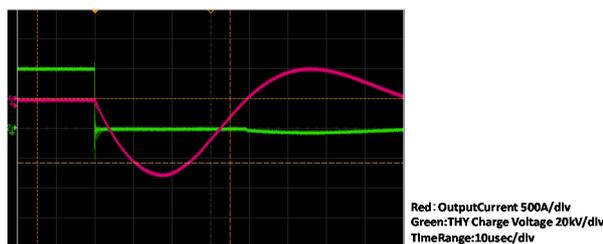


Figure 6: Output Current Pulse Forms (Vertical).

4. 今後の展望

従来のアボートキッカーの立ち上がり時間は 2 μ sec 程度あり、それがさらに 0.5 μ sec 程度まで改善されてきた。今回、われわれが開発したアボートキッカー電源はそれを更に 0.2 μ sec にまで短縮出来ることが確認できた。アボートキッカー電源は立ち上がりを早くしようとする、電源の電圧が 100kV 以上と非常に高くなり、その放電スイッチの実現が技術的に非常に困難であったが、今回、磁気圧縮回路と言う新しい回路方式を採用することにより、従来方式に対して圧倒的な高速化を実現できた。

単体評価試験により目標仕様どおりの特性を確認できた。次のフェーズとして、水平 4 台、垂直 1 台の 5 台を同時での性能評価、電磁石と接続しての性能評価を経て、本年度(2015 年)中に設置完了する予定である。

参考文献

[1] T.Mimashi, et al., "THE DESIGN OF BEAM ABORT SYSTEM FOR THE SUPERKEKB", IPAC'10, The 1<sup>st</sup> International Particle Accelerator Conference Kyoto, Japan/May 23-28, 2010.