

SuperKEKB ダンピングリング用入出射キッカー電源の開発

DEVELOPMENT OF INJECTION AND EXTRACTION KICKER POWER SUPPLY FOR THE SUPERKEKB DAMPING RINGS

天神薫^{#, A)}, 徳地明^{A)}, 菊池光男^{B)}, 坂本裕^{B)}, 多和田正文^{B)}

Kaoru Tenjin^{#, A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Mitsuo Kikuchi^{B)}, Yutaka Sakamoto^{B)}, Masafumi Tawada^{B)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

KEK has worked in research, development and construction of SuperKEKB in order to upgrade KEKB. The positron beam produced by a linear accelerator (LINAC) cannot meet dynamic aperture restrictions of SuperKEKB, because its positron emittance is oversize. Positron emittance needs to be damped, to pass reduce of C-Band. In this upgrade plans, we construct Damping Ring (DR), and inject the beam lowering it to 1/100 of its original emittance. DR needs the kicker power supply systems which can inject and extract the two bunches beams (each beams located interval is 96ns) and whose rise and fall time does not exceed 100ns. Especially, in order to extract high-quality beam from the DR, it is vital to pass a high-precision electric current. This paper is regarding the development of two successive semi-sinusoidal pulse current generator which is able to performs the functions of Output Peak Current 2.1kA, Output Stability 1.0×10^{-3} MAX, Switching Jitter 1ns MAX and Frequency of Repetition 50Hz.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、衝突型加速器 KEKB のアップグレード(SuperKEKB)に向けて研究開発及び建設が進められている。線形電子加速器(LINAC)で生成・加速された陽電子ビームはエミッタンスが大きすぎ、そのままではSuperKEKB 衝突リングに入射できない。このアップグレード計画では、ダンピングリング(DR)を建設し、陽電子ビームのエミッタンスを 1/100 以下として入射する。DR では立ち上がり・立ち下がり時間 100ns 以下で、96ns 離れた 2 バンチのビームを同時に入出射するキッカー電源が必要である。特に、DR から質の良いビームを出射するためには、高精度の電流を電磁石に流すことが不可欠である。本稿は、出力ピーク電流 2.1kA、ピーク電流安定度 1.0×10^{-3} 以下、スイッチングジッター 1ns 以下、繰返運転 50Hz を実現した 96ns 間隔 2 連正弦半波パルス電流発生電源の開発に関するものである。

2. SuperKEKB ダンピングリング

SuperKEKB では、LINAC で生成される陽電子のエミッタンスを十分に下げておくために、LINAC 途中で、新たに周長 136m の DR を建設する。DR から取出された陽電子ビームは再度 LINAC に戻し、4.0GeV まで加速された後 LER に入射される。

DR のパラメータを table 1 に示し、DR の建設レイアウトを Figure 1 に示す。

Table 1: Damping Ring Parameters

Beam Energy	1.1 GeV
# of Bunches	2
Emittance(injected)	4200 um(normalized)
Emittance(extracted)	10 um(normalized)

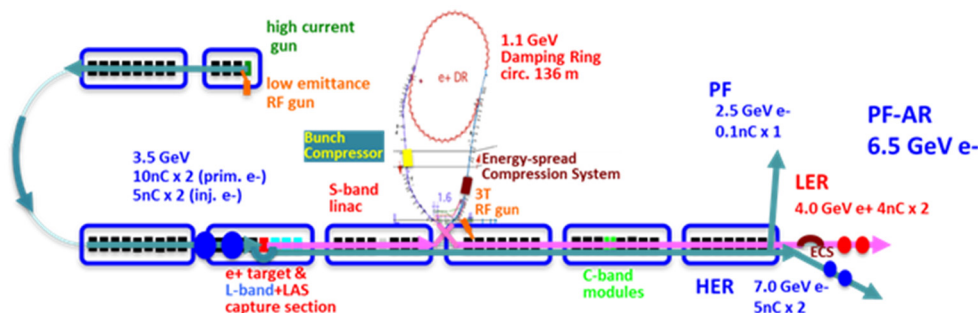


Figure 1: SuperKEKB injector LINAC.

[#] tenjin@myppj.com

3. ダンピングリング用キッカー電源

3.1 目標仕様

SuperKEKBにてルミノシティ向上には、衝突点においてビームを細く絞ることが重要となる。そのため、衝突リング(SuperKEKB LER リング)のダイナミックアパーチャ(力学口径)は狭くなってしまふ。その際、DRを出た後のパルス機器(キッカー磁石、セプタム磁石)に磁場安定度が重要となるため、DRのキッカー電源においては、高精度の安定度が必要である。又 KEKB-LINACの共通周波10.38MHz(=96ns)間隔の1パルス2バンチのパルス電源が不可欠となる。Table 2 Figure 2にDR用キッカー電源の出力電流パルス応答の要求仕様を示す。尚、プリパルス、テールノイズに依る周回ビームへのキックについては、bunch-by-bunch フィードバックシステムにより、ビーム振動を抑制する予定である。

Table 2: Requirement of Output Current Pulse Forms

Parameters	Requirement Specifications
Pulse Form	two successive semi-sinusoidal pulse
Interval of Bunches	96ns (f=10.38MHz)
Pulse Repetition Freq.	50Hz MAX
Output Peak Current	2.1kAp MIN. *1
Output Stability	0.1% MAX.
Switching Jitter	1ns MAX.
Pre-Pulse Noise	5% MAX. *2
Tail Noise	5% MAX. *2

*1 kicker for Injection: 1708Ap TYP.
kicker for Extraction: 1574Ap TYP.
*2 based on tR/tF<100ns

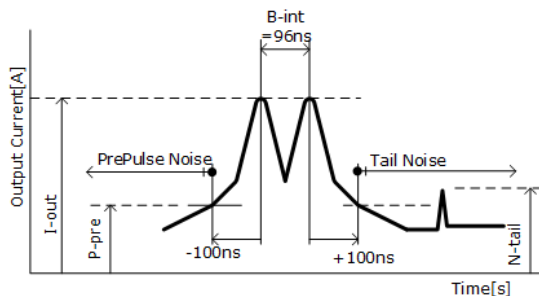


Figure 2: Output Current Pulse Forms.

3.2 設計構成

Figure 6にDR用入射電源のブロック図を示す。図に示すとおり、充放電の制御を司る①充放電システムラック、充電トランス及びサイラトロン各2回路を内蔵する②サイラトロンタンク、パルストランス及び磁気スイッチ各4回路の組合せにて一つの負荷コイルに接続される③磁気スイッチタンクから構成される。

①及び②は、シーケンサを含めた制御ラックとともに、DRの地上に設置し、同軸ケーブル(20D)を介してトンネル内の③に接続される。

充放電システムラックは、サイラトロンタンク内の充電トランス2回路の充電電圧制御を行う充電制御盤2ユニット、及びサイラトロン2回路の放電トリガを生成するグリッドパルサーユニットより構成される。充電制御盤の回路構成は、出力のピーク電流の安定度0.1%以内を満足させるために、Figure 3に示すとおり、基準電圧出力として±2ppm/°Cの精度を持つ20bitDACと充電トランス出力に接続される分圧器出力との誤差増幅により100kHzのフルブリッジインバータをPWMにて帰還制御し、サイラトロンに印加する充電電圧を与える。

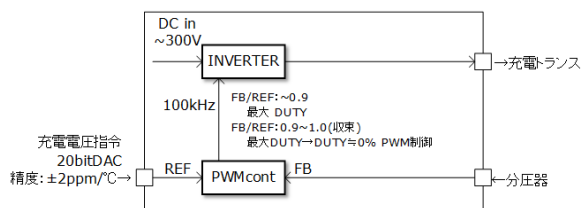
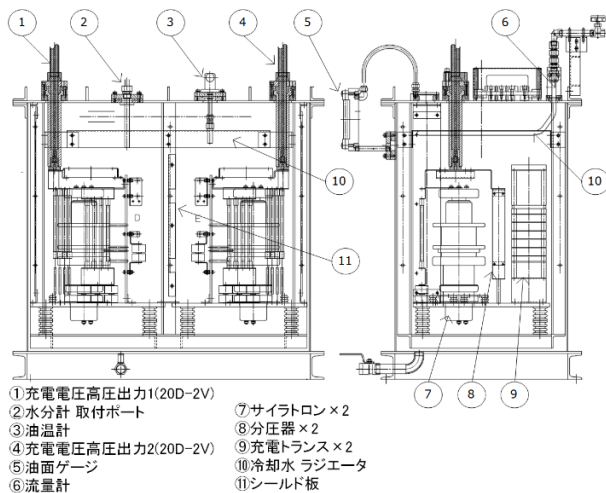


Figure 3: High voltage charger system.

グリッドパルサーユニットの回路構成は、希少RIビームキッカー電源(理化学研究所 和光)にて実績のある回路構成^[1]を踏襲し、放電トリガ信号を光信号にて入線可能とする様にO/E変換ユニットを設けた。本O/E変換ユニットは、出力スイッチングジッターに大きく影響を及ぼすため、遅延温度ドリフト500ps以内、ジッター100ps以内のモジュールを搭載した。本キッカー電源は、コマンド充電方式を採用し、充電トリガにて充電を開始し、約10ms後、放電トリガにてサイラトロンを放電させている

Figure 4にサイラトロンタンクの内部構造を示す。



- ① 充電電圧高圧出力(20D-2V)
- ② 水分計 取付ポート
- ③ 油温計
- ④ 充電電圧高圧出力2(20D-2V)
- ⑤ 油面ゲージ
- ⑥ 流量計
- ⑦ サイラトロン×2
- ⑧ 分圧器×2
- ⑨ 充電トランス×2
- ⑩ 冷却水 ラジエータ
- ⑪ シールド板

Figure 4: Internal structure of thyatron tank.

Figure 5 にサイラトロンタンクの内部構造を示す。

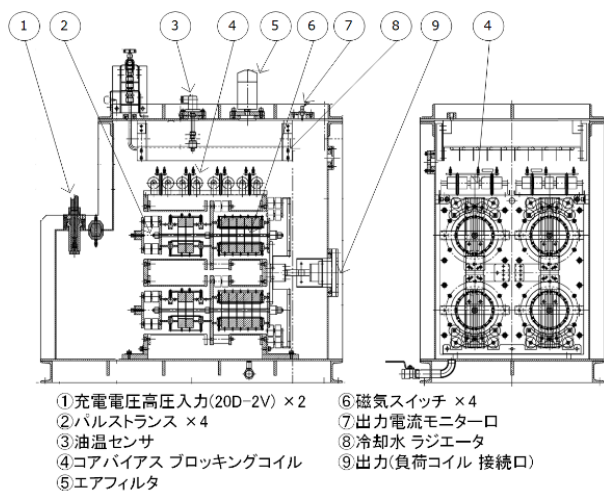


Figure 5: Internal structure of magnetic SW tank.

サイラトロンタンクは、昇圧比約 160 の充電トランスと分圧比 1 : 10000 の分圧器(出力は充電制御盤の帰還信号となる)及びサイラトロン各 2 回路が含ま

れる絶縁オイルタンクである。冷却はタンク上蓋に取付のφ12mm 銅管シームレスラジエータの水冷に拠る。サイラトロン交換などのメンテナンス性を考慮し、タンク内の全ての構成部品は、上蓋に吊り下げる構造とした。サイラトロンのスイッチングジッターを軽減のため、ヒーター及びリザーバーの電源は直流電源を用いている。

サイラロンタンクにて 2 バンチ間隔(96ns)の時間差を持って放電された高圧を約 30m の同軸ケーブル(20D-2V)を介して、各 2 対のパルストランス及び磁気スイッチにて同一負荷にて出力する。依って磁気スイッチスイッチタンク内には、4 組のパルストランス及び磁気スイッチ回路が含まれ、各々を構成するファイメットコア飽和軽減 DC バイアス印加時のブロッキングコイルを具備する。冷却方法は、サイラトロンタンクと同様に、上蓋に取付のラジエータに拠る水冷である。

サイラトロンタンク、磁気スイッチタンクともに絶縁オイルは、ジメチルシリコンオイルを使用し、油面、油温、及び冷却水流量監視機能を有する。又オイル中の水分量を監視するポートを設けてある。

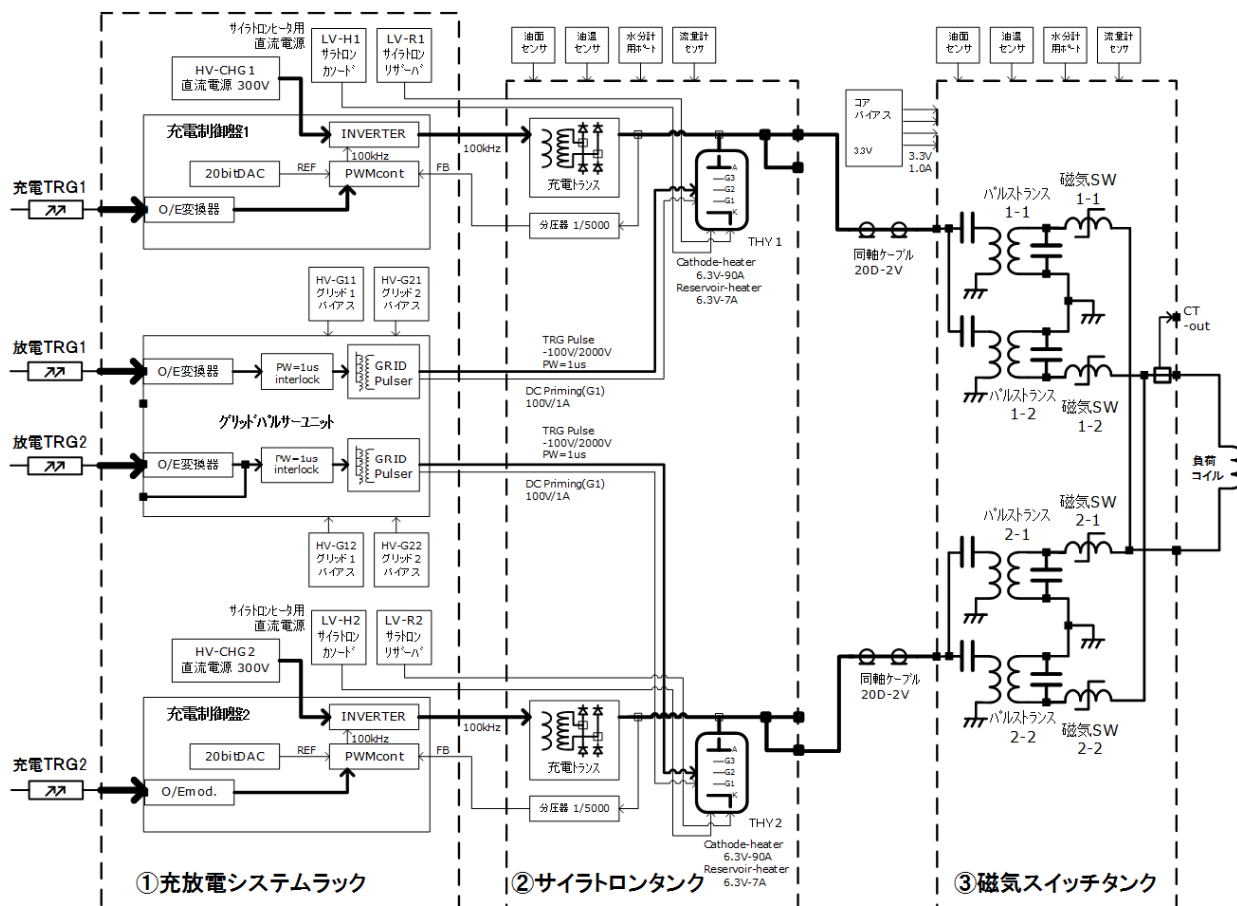


Figure 6: Block diagram of kicker power supply for DR/SuperKEKB.

3.3 工場試運転結果

工場試運転結果を以下に示す。Figure 7~9 は磁気スイッチタンク内の出力に配置されたカレントモニター出力の波形である。Figure 7に1パルス2バンチのパルス波形を示し、Figure 8 に充電電圧精度の指標として充電電圧の繰返計測のヒストグラム値、Figure 9 にスイッチングジッターを示し、結果の取り纏めを Table 3 に示す。

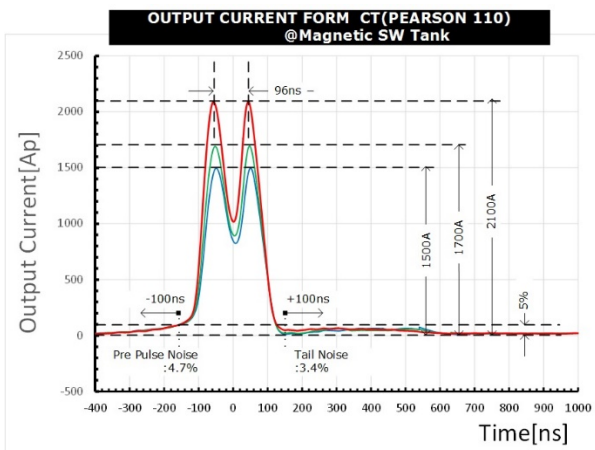


Figure 7: Output current pulse forms.

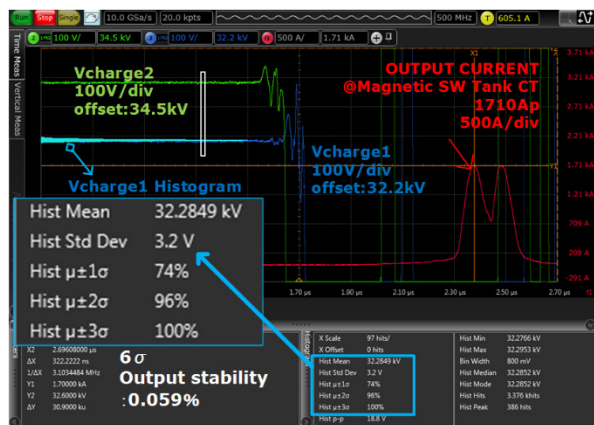


Figure 8: Output stability.

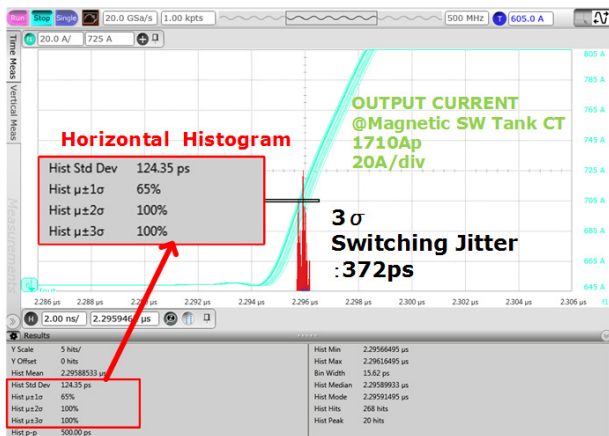


Figure 9: Switching jitter.

Table 3: Results of Factory Test Run @ PPJ

Parameters	Requirement Specifications	Results of Test Run
Interval of Bunches	96ns	96ns
Pulse Repetition Freq.	50Hz MAX	Can be 50Hz Operation
Output Peak Current	2.1kAp MIN.	~2.1kAp Variable
Output Stability	0.1% MAX.	0.059%
Switching Jitter	1ns MAX.	0.379ns
Pre-Pulse Noise	5% MAX.	4.7%
Tail Noise	5% MAX.	3.4%

Test Conditions

20D-2V Coaxial Cable Length:27m 2wire
Thyratron Tank~Magnetic SW Tank

4. 今後の展望

Table 3 に示すとおり、工場試運転にて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、キッカー用セラミックダクト、チタン薄膜コーティングの厚さの評価などを経て、本年度(2015 年)中に、DR に設置完了する予定である。

本キッカー電源の放電素子は、サイラトロンを使用した。SuperKEKB では光学口径が小さいため、ビーム寿命が短いことが予想されている。そのため常時ビームを入射して、衝突リングを回っているビーム電流を一定に保つ必要がある。本キッカー電源も最大50Hz で連続動作させるため、サイラトロン寿命及び 経年後の繰返し動作の安定度が懸念される。

KEK と PPJ では、サイラトロン代替の半導体スイッチ(SI サイリスタを使用)の研究開発を、既に進めている。今後 SiC 素子の採用等も考慮しつつ、サイラトロン代替の半導体スイッチの開発を加速させたいと考える。

参考文献

- [1] Keisuke Kise, et al., "Development of Fast Grid Pulser and Rapid High-Voltage Charger for kicker System of RIKEN Rare RI", EAPPC 2014 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference Sep 8-12.2014 Kumamoto JAPAN.