

## BEAM-CHARGE LIMIT SYSTEM FOR RADIATION SAFETY AT THE KEKB INJECTOR LINAC (II)

Tsuyoshi Suwada<sup>1</sup>, Eiichi Kadokura, Masanori Satoh, and Kazuro Furukawa  
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

A new interlock system based on a beam-charge measurement is under development for radiation safety at the KEKB injector linac. This system is required for the injector upgrade plan, where a fast beam switching is performed for the simultaneous injection to downstream different four storage rings. The system comprises a wall-current monitor, a beam-charge detection electronics, and a PLC-based control system. An integrated amount of the beam charges are measured basically at three locations along the injector linac and at another location near the PF-AR injection point. The system generates and transmits interlock signals for a beam abort-request directly to the safety control system through a hard-wire cable when an integrated amount of the beam charges are beyond a certain threshold level prescribed at each location. In this report we describe the design of the new interlock system for radiation safety, its performance of the detection electronics, and the beam tests.

## KEKB入射器における放射線安全のためのビーム電荷制限システム (II)

### 1. 概要

KEKB入射器では、放射線安全のためのビーム電荷制限システムの更新を計画している。入射器を通過するビームは、積算電荷量が計算機上で常に監視され、高いレベルの放射線安全が保証されている。現システムでは、ソフトウェアを基本とするシステムが動作しているが、ハードウェアを基本とするシステムに移行することで、より信頼性を高めることができる。本稿では、新たに開発したビーム電荷制限システムの概要とビームによる性能評価試験について報告する。

### 2. はじめに

昨年の本研究会で、ビーム電荷制限システムの更新の意義と目的をすでに報告している[1]。ここでは、本システムに要求される性能仕様との関連において簡単にまとめておく。

本システムは、PF・KEKB両リングへの連続かつ同時入射[2]を実現するために必要となる放射線安全のためのビーム電荷制限システムである。各リングの蓄積電流を可能なかぎり一定に保持するには、蓄積ビームの寿命に応じた入射率でビームを連続的に入射する(連続入射)必要がある。複数のリングに連続かつ同時入射を行うには、入射器の最大繰返し50Hzのパルス・ビームを有効利用し、各リングに対応した入射ビームをパルス毎に適当な割合で配分することで実現できる。同時入射では、これまでのような各リングに対応した入射モードの切替えを必要とせず、対応する入射ビームがパルス毎に切替わるので、

リング側から見ればあたかも連続入射が行われることになる。このように、本システムは、同時入射という複雑な入射でも高いレベルの放射線安全を保証するものでなければならない。

入射ビームのパルス当たりの電荷量は、各リングに対応して、0.1nC/pulse(PF,PF-AR), 1x2nC/pulse(KEKB電子), 1x2nC/pulse(KEKB陽電子), 10x2nC/pulse(KEKB陽電子生成用1次電子)である。ここで、KEKBにおけるx2は、2バンチ同時入射時の係数である。パルス当たりのビーム電荷量は、200倍のダイナミック・レンジをもち、最大50Hzでパルス毎に変化することになる。このような複雑な入射は、計算機制御による高度なビーム・タイミング・システムにより実現される予定であるが、何らかの原因によりビーム加速が誤動作すれば、加速器本体の放射線汚染のみならず、下流のリングに間違ったビームが輸送される恐れがある。このように、本システムは、入射器を通過するビーム電荷を常に監視し、異常なビームが加速・輸送された場合は、速やかにビーム停止要求を安全系に送信することを役割とする。

本システムは、単なる電流モニターではない。何らかの原因でビーム電荷が低減した場合は、放射線安全の立場からは余り問題とならず、むしろ、異常なほどの大電流ビームが加速された時にこそ、確実にその電荷を計測し、放射線汚染が甚大になる前に速やかなビーム停止要求を送信することも必要とされる。このように、できるだけ広いダイナミック・レンジで、ある程度の精度でパルス毎のビーム電荷が計測可能なことが重要である。また、本システムの信頼性を高めるために、可能な限り計算機ネット

<sup>1</sup> E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

ワーク、ビーム・ゲートなどの外部装置との接続を排除し、停電時以外は常に安定に動作し続けるという単純かつ強固なシステムであることが重要である。

### 3. ビーム電荷制限システム

#### 3.1 システム概要

本システムは、基本的に入射器ビーム・ラインとPF-AR入射路の四箇所でビームの積算電荷を監視し、規定の閾値を越えたときは速やかにビーム停止要求信号を安全系へ送信する。監視箇所[1]は、(1)アーク部、(2)陽電子標的部、(3)ビームスイッチヤード、(4)PF-AR入射路である。(1)では、陽電子生成用1次電子の積算電荷を監視し、(2)では、陽電子標的直後を監視する。(3)では、各リングに対応する入射路入口での積算電荷を監視する。PF-ARの監視は、入射器終端から途中までKEKB入射路とビーム・ラインを共有するためにリング入射点近傍まで移動させる必要があった。表1に各監視場所と対応する制限電荷量をまとめる。

表1：電荷制限監視場所と対応する制限電荷量

場所	名称	(A)	(B)	(C)
アーク部	R0-01	2500/s	50	60
		$4.5 \times 10^6$ /h	25	
標的直後	22-44	1250/s	25	30
		$2.25 \times 10^6$ /h	12.5	
Linac	61-A1	$2.25 \times 10^5$ /h	1.25	10
KEKB	61-H0 ( $e^-$ ) 61-8 ( $e^+$ )	$5.76 \times 10^5$ /h	3.2	10
PF	61-F1	$7.8 \times 10^4$ /h	0.867	8
PF-AR	PF-AR	$2.88 \times 10^4$ /h	0.32	1.6

ここで、(A)は、1秒間又は1時間の制限電荷量[nC/s, nC/h]を、(B)は、(A)を最大ビーム繰返し(KEKB:50Hz, PF/PF-AR:25Hz)で除したパルス平均電荷量[nC/pulse]を、(C)は、ビームテストにより決められた回路の最大入力電荷量[nC/pulse]を表す。KEKB入射路への電荷制限は、電子・陽電子の積算電荷和で定義されることに注意されたい。

図1に、電荷制限システムの構成を示す。ビームモニターには、KEKB建設時に開発された壁電流モニター(WCM)の一部を転用することにした[3]。WCMは、ビーム電荷に比例したパルス応答をする。信号は、35-60m長の同軸ケーブルで伝送され、ギャラリーに設置した電荷積分回路(NIM)に入る。電荷積分回路は、パルス毎に信号電荷を積分しAD変換した後、較正係数を用いてビーム電荷に変換する。ビーム電荷は、常に1秒間と1時間の積算電荷として積算される。積算電荷が、制限電荷を越えた場合は、すみやかにビーム停止要求信号を生成し、ツイスト線を通して安全系PLCに直接伝送する。

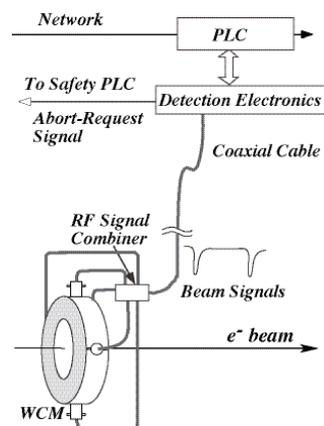


図1. 電荷制限システムの構成。

#### 3.2 電荷制限回路の開発

電荷制限回路は、本システムの中核となるモジュールである。図2に回路のブロック図を示す。

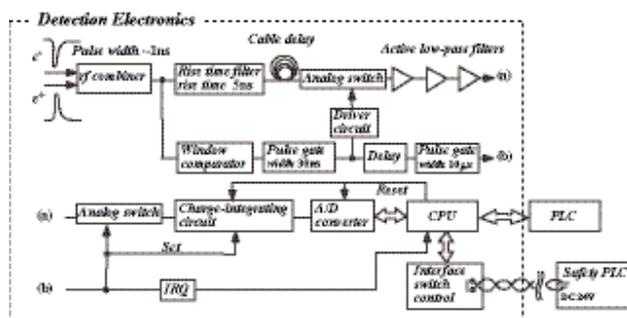


図2. 電荷積分回路のブロック図。

本回路は、パルス信号の積分回路であるが、単バンチビーム(バンチ幅~10ps)に反応したWCM信号は、高速パルス(幅~2ns)として同軸ケーブルを伝送するので、回路にはそれなりの工夫が要求される。回路の入力部では、電子・陽電子両ビームの電荷和に対応できるように、rf combiner (Mini-Circuits, ZFSC-2-4)で信号を合成し、50Ωに整合したストリップラインを通して回路基板に入力する。ガウシアン型ロー・パス・フィルタ(Picosecond Pulse Labs, Model5915, rise time 5ns)により、信号波形を保持しながらパルス幅を~5nsに拡大させる。その後、ゲート信号とのタイミング調整のための遅延ケーブルを経て、高速analog switch (TI, TS5A2053)により30nsのゲート幅で信号を切出す。これは、信号に重畳するノイズを抑制し、S/Nを向上させるためである。その後、5段のデジタル・ローパス・フィルタ(AD, AD8045)に通してさらにパルス幅を拡大させ(~4μs)、再度 analog switch (TOSHIBA, TC7W53F)を用いて10μsゲート幅で信号を切出す。信号は、積分回路によりパルス電荷が積分され、電荷に比例した遅いパルス信号となり、ADC入力部でピーク・ホールドされ電圧がAD変換される。ADC (AD, AD7894AR-10)は、正負の入力電圧(最大±10V)に対応でき、14ビット

トの分解能で計測する。これで、電子・陽電子による両極性のパルス信号に対応できる。符号ビットを省いた実質の分解能は、13ビット( $\pm 8192$ )である。

一方、ゲート信号は、rf combiner出力をハイ・インピーダンスで取り出し、両極性のパルスにตอบสนองするウインドウ・コンパレータ(MAXIM, MAX9600)で生成させる。回路のダイナミック・レンジの下限は、ウインドウ・コンパレータへの入力レベルで決まる。ゲート信号のパルス幅を調整した後、前後段の analog switchへのゲート信号として、また、CPU(RENESAS, H8/3694)への割り込み信号(IRQ)、積分回路へのセット信号としてそれぞれに配信される。

CPUは、ADCと積分回路にリセット信号を配信し、次の入力まで待機する。パルス毎にAD変換されたパルス電荷は、CPUを通してレジスターに格納され、パルス毎に積算される。演算結果は、1秒間又は1時間積算用レジスターに格納され、PLCによりデータが読み出される。積算時間の時間管理は、内蔵した水晶時計が行い、CPUを通してこれらのレジスターを所定時間後にリセットし計測を継続する。

積算電荷は、常に制限電荷と比較され、これを越えた場合は、ただちに、ビーム停止要求が安全系PLCに送信される。安全系PLCとは、ツイスト線を通してI/Oモジュールと無電圧接点(24VDC)で接続される。フェイル・セーフの考えに基づき、この接点は通常閉とし、ハイ・レベルである。1時間積算でビーム停止要求が発生すれば、この接点を開きロー・レベルに移行させる。一方、1秒間積算では、前者と区別するために接点の開閉を100ms幅のパルスで行う。

### 3.3 PLCによる制御

本回路の制御は、PLC(横河電機, FM-M3)により行われる。親PLCを主制御室に配置し、四カ所の監視場所には子PLCを分散配置し、光ネットワークでこれらを結ぶ。親PLCは、子PLCを統括制御する。各子PLCは、本回路と通信することでデータの設定と読出しを行う。基本的に通常計測時は、積算電荷データの読出しのみを行い、複雑な制御を一切行わない。これは、PLC制御の安定性をできるだけ高めるためである。また、本回路は、PLCの停止に関わらず自走し続け積算電荷の監視を行うので、ビーム停止要求信号の生成は可能である。PLC制御の詳細は、他で報告される[4]。

## 4. ビームテスト

入射器でビーム試験を行い本回路の性能評価を行った。図3は、アーク部においてKEKB入射用の電子及び陽電子生成用1次電子ビームを測定した結果である。測定時のパルス当たりの電荷量は、それぞれ、1.1nC、9.3nCである。回路のダイナミックレンジは、入力部に9dBの固定アッテネータを挿入す

ることで調整した。試験結果から充分満足できる回路特性(ダイナミックレンジ: 40dB、積分非直線性: <1%、S/N: >200、最小感度: 0.1nC/bunch(アッテネータ無の場合は0.01nC/bunch))が得られた。

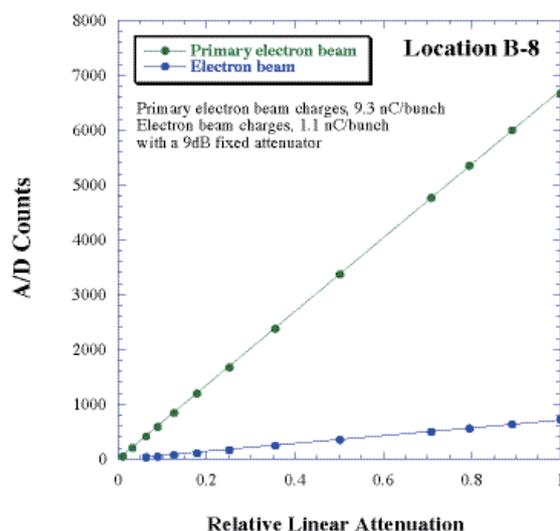


図3. KEBK入射ビームによる電荷制限回路の入出力特性。

ノイズレベルは、回路の内部雑音が支配的(最大入力レンジに対し0.3%程度)で、入力の大さに関わりなくほぼ一定であった。精密な電荷測定を要求するならば、図3に示す入力レベルが最善であるが、放射線安全システムとしては、想定外の電荷量まで検出する必要がある。例えば、アーク部では、パルス平均として50nC/pulseの検出が要求される。回路として余裕をみて、入力部の固定アッテネータ値を調整(23dB)することで、60nC/pulseまでの検出が可能のようにしている。表1の(C)に本回路の許容するパルス当たりの最大電荷量をまとめている。

## 5. まとめと今後の予定

KEKB・PF両リングへの同時連続入射を実現するために要求される放射線安全のためのビーム電荷制限システムの概要とビームによる性能評価試験を報告した。現在は、電荷積分回路の最終試験を終え、PLC制御による総合動作試験に向けた準備を始めている。2007年夏期シャットダウン時に全システムの構築を行い、秋からの運用開始を目指す。

## 参考文献

- [1] T.Suwada, et al., Procs. the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, p. 565.
- [2] M.Satoh, et al., Procs. the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, p. 499.
- [3] T.Suwada et al., Nucl. Instrum. & Methods. A396 Nos.1,2 September (1997) p. 1.
- [4] E.Kadokura et al., in this meeting.