

PIN PD を使用したビームロスモニター

池田仁美、有永三洋、平松成範、フラナガンジョン、古屋貴章

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEKB 加速器はこれまでにない大電流で運転されるため、安全な運転及び加速器、検出器のハードウェア保護の為にアポートシステムを整備している。特にビーム軌道が不安定になった時に数ターン内にアポートできるように PIN フォトダイオード(PD)を使用したビームロスモニターを開発した。またこの信号をデータログに入力し、アポート毎に信号を解析することにより、アポートの原因究明と条件の最適化を行ったので、その結果を報告する。

1 KEBB アポートシステム

KEKB 加速器は高ルミノシティを得るためにデザイン値で電子 1.1A、陽電子 2.6A という大電流加速器である。また Belle 検出器は崩壊点の精密測定のためにシリコン崩壊点検出器(SVD)をビームラインに近接して設置している。そこで、ビームの不安定性から来るビームロスや RF トラブルが起こったときに、この高電流から加速器、検出器を守るため素早くビームを捨てられるシステムが必要である。そこで運転開始時からビームアポートシステムが準備されていた[1]。

このシステムではトリガーがかかったのち約 500n 秒でアポートキッカー電磁石が立ち上がり、1 ターンでビームをダンパーに捨てることができる。トリガーにはロスモニター、RF ステータス信号、Belle からの信号、地震センサー等が使われる。電子リング(HER)、陽電子リング(LER)はそれぞれ独立なアポートが可能である。

しかしアポート条件の最適化が行われていなかったため、ハードウェアの損傷やインターロックは働いたものの原因のわからないことがたびたびあった。

2 ビームロスモニター

2.1 設置目的

ビームロスモニターはリング全周で起こるビームロスを検知しアポートトリガーを出すことで、急なビーム不安定性からハードウェアを守ることを目的としている[2]。

そのため全周にわたってほぼ等間隔に約 100 本のイオンチェンバーを設置した。ビームロスがおこってからトリガー信号を出すまでの時間はチェンバー内での粒子のドリフト時間に依存し、約 1m 秒である。

しかし、Belle 検出器へのバックグラウンドを減らすためにリングに導入された可動マスクがビームによって削られるという事象が何度か観測された。これは急なビーム軌道の変動にアポートが間に合わず、ビームがダンパーに捨てられることなく可動マスクに打ち込まれたためであ

る。そこでビームロスが起こってから数ターン以内にアポートトリガーを出せるように、速い信号が求められた。ここで導入されたのが PIN PD である。

2.2 PIN PD

PIN PD は Belle 検出器のアポート信号としても使われており、これにヒントを得て作ったものである。PIN PD の導入によりこれまで時間がかかりすぎていたロスモニターアポートのトリガー生成時間は 20 μ 秒にまで短縮できた。

現在 PIN PD モニターは特に可動マスクの保護を目的として使用している。HER、LER それぞれ 16 箇所あるマスクに 2 \times 4 個の PIN PD (2.65mm \times 2.65mm) をアルミの箱に入れて取り付けた。図 1 にロスモニターを取り付けた最新型可動マスクの写真を示す。マスクにビームが直接当たったときに生じる電磁シャワーを検知しパルス信号を発生するため、ビームの下流側に取り付けている。

PIN PD は無バイアスで使用し、信号はそのままトンネル内から数 10m 離れたグラウンドレベルにあるローカル制御室内の読み出しエレクトロニクスに送り込まれる。

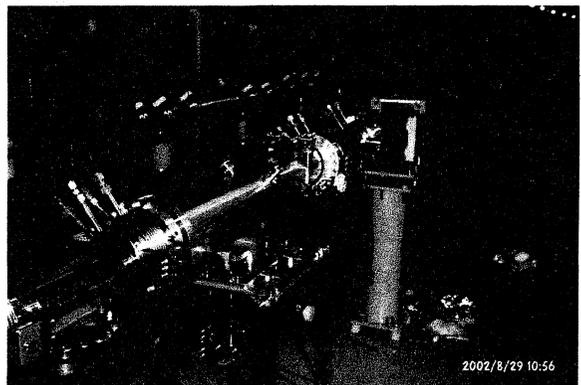


図 1: 縦方向マスクに取り付けた PIN PD ロスモニター

2.3 信号検出回路

PIN PD の信号検出回路は、図 2 に示したとおりである。パルス信号を ADC で読み出すために track & hold 回路を採用し 3.3m 秒の減衰時間を持たせた。

イオンチェンバーのシステムと互換性を持たせるために倍率調整を行い、倍率切り替え部以降はイオンチェンバーと同じものを使用している。

出力はインターロックレベルを超えたときにアポートのトリガーとして使われる TTL 信号と、ADC 読み出しとモニターのためのアナログ信号の 2 種類がある。TTL 信号は各制御室内のアポートモジュールへ送られる。

インターロックレベルは次の節で説明する通り加速器の運転効率とハードウェアの保護のバランスで決定し

たが、PIN PD は非常に感度が高く、入射中のビームに同期して図 3 のような信号を出す。この信号は約 0.1nC の電荷量に相当し、マスクを傷つける心配はない。そこでこのような信号が出た場合はアボート信号を出さないようにした。実際には入射キッカーのトリガータイミングから 3m 秒の不感時間をつくり、この間にインターロックレベルを超えたとしてもアボートトリガーを出さないようにしている。

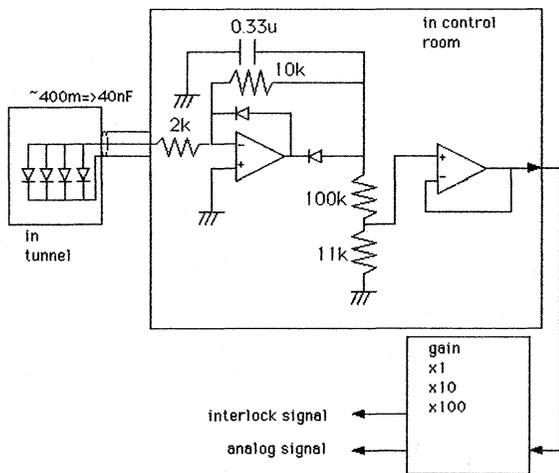


図 2 : PIN PD ロスモニターの信号検出回路

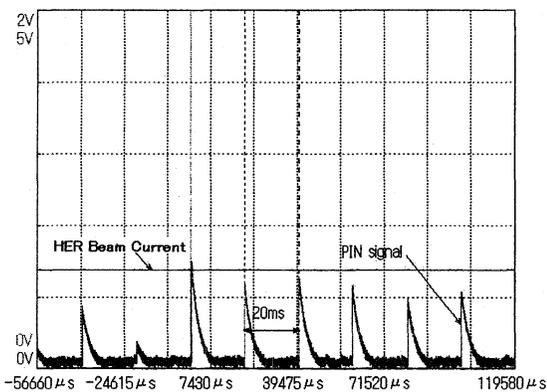


図 3 : 50Hz 入射に同期した PIN 信号

3 データロガの導入

アボート条件を最適化するためにはアボートの瞬間に何が起きているかを知る必要がある。アボート後の運転でどのパラメータを変える必要があるのか、どのハードウェアを調節する必要があるのかを判別するためにもアボートの原因を知ることは重要である。しかし実際のアボートでは様々なインターロックが短時間にいっせいに働くため、ビームの不安定性が RF ダウンを引き起こしたのか、RF ダウンの結果ビームが不安定になったのか、それともインターロック信号が誤動作してしまったのかという判断が難しかった。そこでデータロガを導入してアボートが起こった瞬間の様々な信号を捉えることによって原因診断を行うことにした。

アボートの原因究明のためにはビームとの相互作用が強く、かつ数ターン内に反応する信号が必要である。そこでデータロガへの入力信号としては PIN PD ロスモニター信号のほかに、電流値を示す DCCT 信号と RF ステータス信号を選んだ。記録時間は 5 μ 秒単位でアボートの前後 300m 秒である。PIN PD のアボートトリガー信号とデータロガへの信号の流れは図 4 の通りである。電流値の変化の仕方、ロスモニター信号のレベル及びその形、RF 位相や電圧の変動タイミングからアボートの原因を判断できる。またこれらの情報を使って、ハードウェアを守るためには十分厳しくするが、無駄なアボートで運転時間を短縮することの無い様にトリガーレベルの最適化も行った。

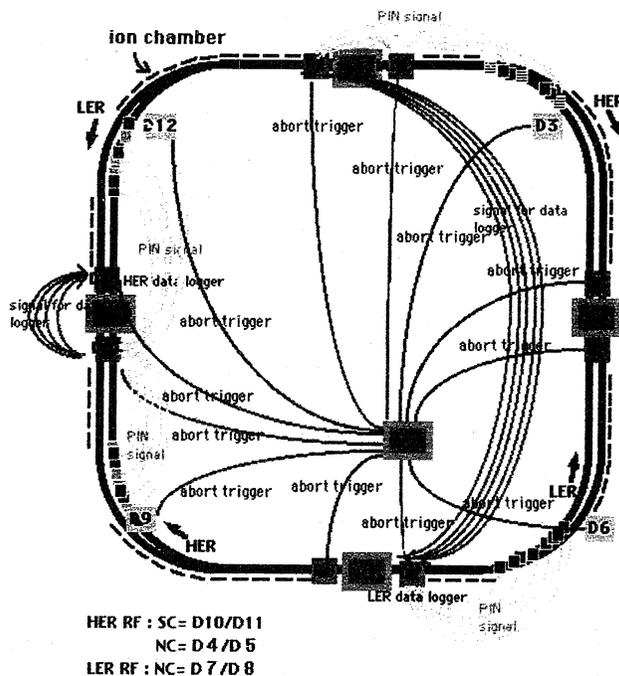


図 4 : リング内のロスモニター配置及び信号の流れ (データロガは D7 と D11 に設置)

図 5 に実際にマスクが損傷を受けたときのアボートの様子を示す。2001 年のデータだが、まず初めに RF voltage down が起こりビーム位相が大きなシンクロトロン振動を始めている。その結果ビームを安定に保てなくなり数ターンでビームは失われた。失われたビームは PIN 信号が示すとおり可動マスクにぶつかって大きな損傷を及ぼした。アボートトリガーはどれも間に合わなかったため、この後ロスモニターアボートとビーム位相アボートのトリガーレベルを厳しくし、RF down 検知もアボートトリガーに加えた。

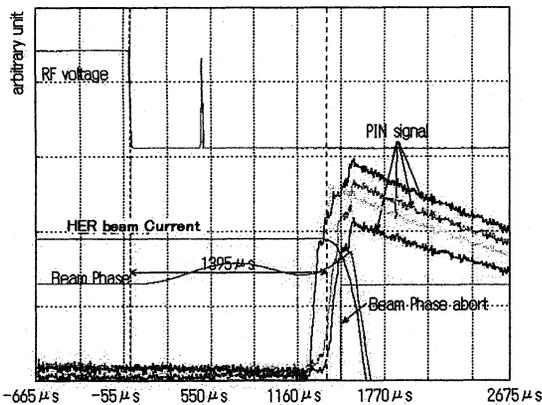


図5：データログでのアボート時の信号

図6 にデータログを導入し、統計を取り始めた2001年11月から2003年6月までの月毎の一日平均アボート回数を示す。これを見てわかるとおり、アボートの主原因はビームロス及びRFトラブルである。RFアボートはハードウェアに問題が生じたときに続けざまに起こることがあるが、通常は一定の割合でブレイクダウンする。ビームロスの原因はビーム調整の不完全さから来る不安定性やチューン設定の不具合が主である。これらの原因の違いもPIN PD信号から見分けることが可能であり、FB調整やパラメータ変更の手がかりにすることが可能である。

最後の月(2003年6月)にアボート回数が多いのはマシンスタディーの日が多かったためである。それ以外の月はアボート原因の診断、解決、トリガーレベルの最適化の繰り返しで増減がありビーム電流の増加とは比例していない。

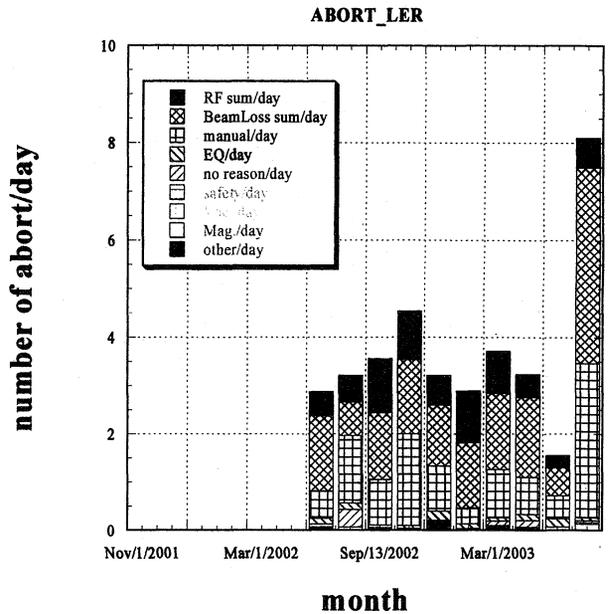


図6：月毎の一日平均アボート回数とその原因

4 まとめ

KEKBの高電流に備えたビームアボートシステムは運転当初から整備されていたが、条件の最適化はされておらず、加速器、検出器ともに原因不明のアボートによる損傷が何度か見られた。反応速度の速いPIN PDロスモニターを導入することで素早いアボートを可能にした。それと同時にアボート毎にPIN PD信号とRFステータス信号を記録するデータログを導入した。このデータ解析によりビームアボートの原因やビームロスの原因を特定し、最も良い方法でアボートが出来るようになった。その結果、Belle検出器での放射線照射量は減り、加速器可動マスクの致命的な損傷もなくなった。

参考文献

- [1] T. Naitoh, KEKB MEMO No.187 (2001).
- [2] M. Arinaga, et al., "KEKB Beam Instrumentation System" KEKB Accelerator Papers, KEK Preprint 2001-157(2001).

