# PF-AR のビーム電荷量制限装置

長橋進也<sup>A)</sup>、諏訪田剛<sup>B)</sup>、古川和朗<sup>B)</sup>、帯名崇<sup>A)</sup>、春日俊夫<sup>A)</sup> <sup>A)</sup>高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 <sup>B)</sup>高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

### 概要

PF-ARでは、リングへの入射電荷量の監視と制限を行っている。入射路のビームダクトに設置された壁電流モニターからの波形をオシロスコープに取り込み、オシロスコープの面積計算機能を用いてビームパルス内の電荷量を求めた。求めた電荷量をPCに取り込んで積算し、1時間当たりの入射電荷量の制限には信頼性の高い Programmable logic controllerを採用した。装置の概要と運用結果を報告する。

## 1 はじめに

PF-AR は X 線領域の放射光源用電子ストレージリング である。リングへは、25Hz/N (N=1, 2, 3, ...)の繰り返し 周波数で単一バケットへの入射を行っている。その1パル スあたりの電荷量は約 0.1nC である。入射器を出たビーム は KEK-B ファクトリー(KEKB)、PF-AR 共通入射路を通 り、KEKB、PF-AR 入射路分岐点の偏向電磁石の励磁電流 を制御することにより両リングに振り分けている。入射の 制御は、EPICS レコードの Beam gate open request のビット が立つと接点信号が Programmable logic controller(シーケ ンサー, PLC)の Beam gate controller に送られ、そこで入射 に関する条件を判断した後、入射器に Beam gate 信号を送 りビームが出る仕組みとなっている。

既に KEKB と PF-AR は、リングへの入射電荷量の監視 と制限を行うシステムを導入し、安定した運用を行ってい る。このシステムでは、電荷量測定のために入射器の第6 セクターのビームダクトに設置されたビーム位置検出用 モニター(BPM)からの信号を使用している。BPM 信号 は、オシロスコープを用いて電子ビームに同期した 1Hz の トリガーでその波形が捕捉された後、その最大波高値が取 り出され、較正係数を用いて電荷量、ビーム位置が算出さ れる。得られたデータをワークステーション(WS)に取 り込み、その WS 上のソフトウェアで入射の繰り返し周波 数をかけることによって10秒間の積分電荷量を算出して いる。入射電荷量の制限としては、単位時間当たり(1時 間)の積分電荷量に上限値を設定し、WS 上のソフトウェ アが Beam gate open request のビットを下ろすことで行って いる。

ここで紹介するシステムは、このシステムのバックアッ プ装置として運用することにより、システムが二重化され ることによる信頼性の向上を第一の目的として開発した ものである。また、全入射パルス波形データを取得するこ とにより正確な電荷量に対する制限を可能とし、システム 自体の信頼性を向上させることを目標とした。電荷量の検 出には、前述のシステムに使用されている BPM の直下流 に設置された壁電流モニター(Wall current monitor, WCM) を使用し、波形の Peak-to-peak ではなく実面積を計算する ことによりビームの電荷量を正確に測定することができ る。

### 2 高信頼性のための工夫

本装置では高い信頼性を得るための手段として、ネット ワークに工夫を凝らし、単位時間当たりの電荷量の制限に は信頼性の高い PLC を用いた。

#### 2.1 ネットワークの工夫

各機器間の通信手段として、接続の簡便性、通信の高速 性、信頼性を考慮し、イーサネットを採用した。また、通 信プロトコルとして、信頼性のあるセッション指向の通信 が行える TCP を採用した。

図1のシステム概略図からもわかるように、PC に挿さ れた2枚のネットワークカードにより物理的にネットワー クが切り離されている。WCM の設置してあるビームダク トには、KEKB と PF-AR へ入射される電子ビームが両方通 過するため、入射モードの判断を行うために制御ネットワ ーク上の EPICS IOC と通信する必要がある。他にも、単位 時間当たりの電荷量や本システムの運転状態等もそこへ 送られる。ここでも、これらの情報の送受信を行う相手を 1ヶ所だけとし、ネットワークによるトラブルの発生が少 なくなるような工夫をした。一方、ネットワークのトラフ ィック増大による遅延の発生を最小限にするため、オシロ スコープ、PC、PLC 間の通信は制御ネットワークから切り 離し、スイッチングハブにより各機器間を接続した。これ により高速でかつ安定したデータの送受信が行えるよう になる。



### 2.2 PLC の使用

PLC はマイクロコンピューターを内蔵し、リレー入出力 を直接コントロールすることができる機器で、その信頼性 の高さから広範囲に使用されている。プログラミングはPC 上で動作するサポートソフトを使ってラダー図を作成す ることにより行う。入射を制御している Beam gate controller もまた PLC を使用していることから、それぞれ の PLC 間をハードワイヤーで結ぶことにより信頼性の高 い動作が期待できる。

最近では制御する機器に合わせて、ADC やイーサネッ ト等のユニットも存在する。本システムではリレー接点出 カユニットの他にイーサネットユニットを使用し、データ の通信に用いている。また、このイーサネットユニットに PC を繋いでプログラミングや動作チェックを行うことも できる。

通信プロトコルには他の機器同様 TCP プロトコルを使 用し、PLC 内の特定ビットを操作することによってソケッ トサービス機能を動作させている。この方法による送受信 の処理時間を計測するための簡単なプログラムを作成し、 オシロスコープの測定結果を送受信するのにかかる時間 を測定してみたところ、約120ms であった。マニュアルに よると、送受信処理時間は、

送信処理時間=受信処理時間

=PLC サイクルタイム×5+A×2+B (ms)

ただし、Aは次の式を満たすサイクルタイムの整数倍の値

20≦PLC サイクルタイムの整数倍(ms) B は次の式を満たすサイクルタイムの整数倍の値

送信(受信)バイト数×0.01+20

≦PLC サイクルタイムの整数倍(ms)

で求めることができる。ここで、この測定時の PLC サイク ルタイムは 0.1ms、送受信バイト数は 20Byte より、

送信処理時間=受信処理時間

 $=0.1 \times 5 + 20.0 \times 2 + 20.2 = 60.7$  (ms)

となり実測値とほぼ同じ値を示した。この結果より、PLC は送受信を1秒間に25回行えないことがわかった。そこ で、PLCに直接オシロスコープの測定結果を取り込むこと はせずに、いったん PCに取り込んで1秒間の積算値とし てから PLCに送ることとした。

### 3 システムの構成

本システムは、WCM、オシロスコープ、PC、PLC で構成されている(図1)。

3.1 壁電流モニター

電荷量の測定には、前述したように、KEKB、PF-AR 共 通入射路のビームダクトに設置してある WCM を使用した。 WCM は、ビームダクト内を電子ビームが通過するとき、 同時にダクト内壁に逆電荷をもつ電流(壁電流)が誘起さ れる。ダクト上を流れる壁電流を回路抵抗に通すことによ りパルス電圧として取り出し、その波高値又はパルス面積 として演算を行い、較正係数を用いてビーム電荷量へ変換 する。WCM の周波数特性によりビームパルス幅に対応し た電圧パルスが検出される[1,2]。本システムでは、電圧パ ルス波形の面積を計算することにより電荷量を求めた。

WCM 信号には、ビーム信号の振幅に対して最大で約 15%のクライストロンから発せられる電磁ノイズが含まれ ている (図 2)。このノイズのパルス幅はビームのパルス幅 に比べてはるかに大きく(~µs)、ビーム信号にとっては DC のように見えることから、ノイズも含めた値を積算す れば最終的にはノイズ分は相殺されると判断し、そのまま の値を用いた。

電荷量の較正は、既存システムに用いられている BPM は既に較正が行われている[3]ことから、既存システムの測 定値から行った。



(a) クライストロンのノイズ波形



図2:壁電流モニターの出力波形

3.2 オシロスコープ

本システムではオシロスコープの面積計算機能を用い てビーム電荷量を求めている。そこで、面積計算機能を有 し、イーサネットによる高速データ転送が可能な LeCroy 製のオシロスコープ(型番:LT372)を採用した。測定す る波形(図 2(b))は立ち上がりが 1ns 程度なので、500MHz、 最大 4G サンプルの機種で十分測定を行うことができる。

トリガー信号はビーム自身の立ち上がりを使用し、トリ ガーモードをノーマルとすることで、トリガーの状態から ビームのあるなしを判断する。

#### 3.3 パーソナルコンピューター

PC の OS として安定している Linux を選択した。これに より、万が一 PC 内のプログラムに不具合が出るようなこ とがあっても、遠隔から Secure Shell (SSH) を使って安全 にログインすることができ、管理が容易となる。また、セ キュリティーの面からも安心できる。

前述したように、この PC にはネットワークカードが 2 枚挿してあり、それぞれ制御ネットワーク用、専用ネット ワーク用となっている。制御ネットワークにおける通信は、 主に EPICS レコード値の授受だが、前述したように、SSH で遠隔からログインするときにも使用される。専用ネット ワークにおける通信は、オシロスコープからの測定データ の受信、PLC への積算データの送信である。 この PC では、入射モードが PF-AR になっているかどう かの判断を EPICS レコード値の変化で行っており、入射モ ードが PF-AR になっていればオシロスコープから得られ たデータを1秒毎に積算し、PLC にその結果を送信すると 同時に、EPICS レコード値への書き込み、ログファイルへ の保存も行っている。このプログラムは C 言語で書かれて いる。

### 3.4 Programmable logic controller

単位時間当たりの入射電荷量を制限する装置として、 PLCを採用した。PLCは信頼性が高く動作が安定しており、 監視を行う装置としては最適と言える。また、Beam gate controller も PLC であることから、ハードワイヤーを用い た接点信号の受け渡しと綿密なプログラミングにより入 射を確実に止めることができ、フェールセーフな動作が保 障される。

PCより送られてきた1秒間の積分電荷量をPLC内で積 算し続け、単位時間当たりの制限電荷量の90%を超えた時 点でBeam gateを閉じるようなプログラムとした。また、 PCとの通信が5秒間途絶えると、Beam gateを開くことが できないようにし、ネットワークやPCの不調時にも、確 実に入射ビームを止めることができる。

## 4 運用の結果

2003 年 4 月から、既存システムのバックアップ装置とし て運用を開始した。運用開始直後の軽微なバクによるシス テムの停止を除けば、6 月末のシャットダウンまで順調に 運用を続けることができた。後述する電荷量較正に関する 問題を除けば両システム間の動作に矛盾はなく、第一の目 的である既存システムのバックアップ装置としての役割 を十分に果たすことができた。また、目標として掲げた全 入射パルス波形データの取得は概ね成功し、既存システム に比べ測定精度が大幅に向上させることができた。また、 システム自体の信頼性の向上に関しても、ネットワークや PC の不調時には PLC の Beam gate を閉じて確実に入射を 止めることで達成できた。

しかし、すべて順調であったわけではなく以下のような 事象も発生している。

- PCの内部クロックが正確でないためにPLCへのデー タ送信に失敗し、PCのプログラムが停止した。
- 制御ネットワークの不調により EPICS IOC との通信 が途絶えてしまい、PCのプログラムが停止した。
- 全入射パルス波形データを取得できないことがあった。
- 既存システムのオシロスコープが故障し、正常な状態 に比べて 25%ほど低い値を出力していたのにもかか わらず、本システムの電荷量をその値に合わせてしま い正しく動作しなかった。

始めの2つの事象は発生頻度が低く、PLCが異常事態を 検知しBeam gateを開くことができないようにしたため問 題とはならなかった。3つ目の事象は、入射の繰り返し周 波数が25Hz/N(N=1, 2, 3, ...)であることから、1秒間の 入射パルス波形データ取得回数が14回以上のときは、

1秒間の積算値÷1秒間のデータ取得回数×25 とすることにより対処できた。原因をオシロスコープへの 通信頻度が高過ぎてオシロスコープが波形を捕捉できな かったのではないかと予想し、現在、オシロスコープへの 通信頻度を減らし全入射パルス波形データの取得を確実 に行えるプログラムを開発中である。4 つめの事象は再較 正を行い正常な値に戻すとともに、入射時間の監視と制限 もプログラムに追加することにより対処した。今後は両シ ステムの値に矛盾があるときにはシステムの再チェック を必ず行うこととした。

## 5 まとめ

入射電荷量を制限するシステムの二重化による信頼性 の向上は成功した。全入射パルス波形データの取得とシス テム自体の信頼性の向上を目標に開発を行い、下記のよう な特徴を持ったシステムを構築することができた。

- WCM を使用し、ビームパルスの Peak-to-peak ではな く実面積を計算することにより電荷量を求めた。ビー ムパルス幅が大きく変わらなければ正確な電荷量を 求めることができる。
- 全入射パルス波形データを取得し、正確な電荷量に対 する制限が可能となった。波形データの取得に失敗す ることがあっても、大きな狂いもなく動作した。
- ネットワークの工夫により、入射の繰り返しが 25Hz であっても安定した動作が可能となった。
- PLCの採用によりシステム不調時にも確実に入射を 止めることで、高い信頼性を得ることができた。

このシステムを更に安定したものとするための課題と して、下記のような事柄が挙げられる。

- 両システムの値を監視し警告を出すソフトの開発。
- 全入射パルス波形データが取得できないことの原因 究明と改善。
- PC の内部クロックが正確でないことによる通信エラ 一の解消。
- ネットワークの不調によるシステム停止を最小限に するための開発。
- 正確なビーム電荷量を測定するために、WCMの正確 な較正係数を求める。

現状でもシステム不調時はフェールセーフに動作し入 射を止めることができるようにはなっているが、上記の課 題を達成することにより更に安定したシステムとなるよ う開発を続けていく。

## 参考文献

- [1] 諏訪田剛, "ビーム計測 I", OHO'02 高エネルギー加速 器セミナー, 2002.
- [2] T. Suwada, K. Tamiya, T. Urano, H. Kobayashi and A. Asami, "New analysis and performance of a wall-current monitor", Nucl. Instrum. & Methods. A396 Nos.1,2 September (1997) pp.1-8, KEK Preprint 95-216 (1996).
- [3] T. Suwada, S. Ohsawa; K. Furukawa and N. Akasaka, "Absolute Beam-Charge Measurement for Single-Bunch Electron Beams", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39 (2000) pp. 628-634, Part 1, No. 2A, February 2000.