

## 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、 $25\text{Hz}/N$  ( $N=1, 2, 3, \dots$ ) 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  $0.1\text{nC}$  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、校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 ケ所だけとし、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。

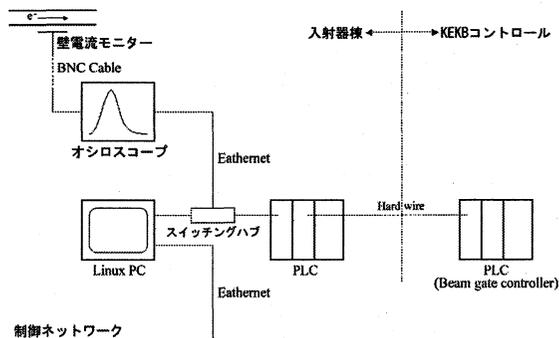


図 1: システム概略図

#### 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力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、

$$\text{送信処理時間} = \text{受信処理時間}$$

$$= \text{PLC サイクルタイム} \times 5 + A \times 2 + B \text{ (ms)}$$

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

$$20 \leq \text{PLC サイクルタイムの整数倍 (ms)}$$

B は次の式を満たすサイクルタイムの整数倍の値

$$\text{送信 (受信) バイト数} \times 0.01 + 20$$

$$\leq \text{PLC サイクルタイムの整数倍 (ms)}$$

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、

$$\text{送信処理時間} = \text{受信処理時間}$$

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

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、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)。

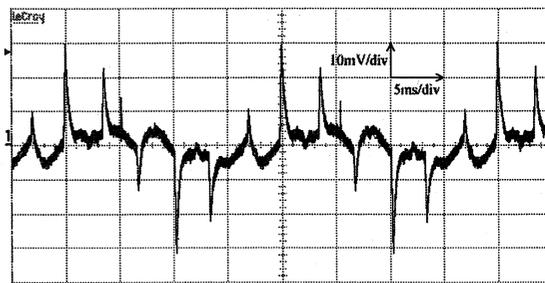
#### 3.1 壁電流モニター

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、校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。

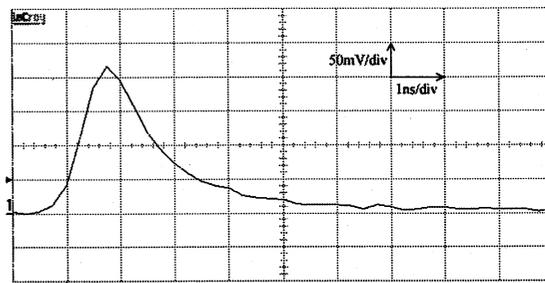
WCM 信号には、ビーム信号の振幅に対して最大で約 15% のクライストロンから発せられる電磁ノイズが含まれている (図 2)。このノイズのパルス幅はビームのパル

ス幅に比べてはるかに大きく ( $\sim \mu\text{s}$ )、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。

電荷量の校正は、既存システムに用いられている BPM は既に校正が行われている [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



(b) PF-AR 入射ビーム波形

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、

$$1 \text{ 秒間の積算値} \div 1 \text{ 秒間のデータ取得回数} \times 25$$

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できるプログラムを開発中である。4 つ目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ーの解消。
- 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なってはいるが、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.