

ビームカレントモニタの開発

Development of a Beam Current Monitor

栗田哲郎^{*1}、羽鳥聡^{*1}、二宮重史^{*2}、安達利一^{*2}、福本貞義^{*1}

Tetsuro KURITA^{*1}, Satoshi HATORI^{*1}, Shigeshi NINOMIYA^{*2}, Toshikazu ADACHI^{*2}
and Sadayoshi FUKUMOTO^{*1}

Abstract

We developed and installed a beam current transformer appropriate for monitoring beam of an accelerator having operating period of less than a few seconds. The beam monitor is a new type CT which can measure DC component of beam using a negative impedance circuit. The principle and the installation of the new beam monitor is reported.

要約

数秒程度の繰り返し周期のシンクロトロン of ビームモニタとして適した Current Transformer (CT) を開発し若狭湾エネルギー研究センター (WERC) のシンクロトロンにインストールした。WERC のシンクロトロンには、ビームモニタとして高周波帯域の CT と静電誘導型のバンチモニタが設置されているが、交流成分しか測定できないため、リング内を周回している粒子数を常に測定することができない。今回開発及び設置したビームモニタは電流の負性抵抗回路を応用した直流成分を測定できる新方式の CT であり、その原理及び設置、動作状況について報告する。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロン of ビームモニタとしては、高周波帯域の Current Transformer (CT) と静電誘導型のバンチ形状モニタが設置されている。高周波帯域(400Hz-7MHz)の CT はマルチターン入射電流のモニタに使用され、静電誘導型バンチモニタで加速中の粒子数をモニタしている。

いずれのモニタも以下の欠点がある。

- ビームがバンチを形成していないと出力が得られない。このため、バンチ形成していない入射直後や出射期間の Coasting Beam をモニタできない。
- 高周波信号を伝送するため、ケーブルの周波数特性の影響を受け正確な測定が難しい。

そこで、これらの欠点を補うために高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同研究で直流電流を測定できる負性抵抗を用いた新しい方式の CT を開発し、WERC のシンクロトロンにインストールした。その結果を報告する。

II. 新しい CT の原理

Current Transformer(CT)は電流が発生する磁場をトロイダルコイル(ピックアップコイル)で電圧に変換することによって電流を測定する。一般に、CT にはバンドパスフィルターの特性がある。ピックアップコイルの終端抵抗及びコイル自身の抵抗の和を R_1 とし、ピックアップコイルのインダクタンスを L とすると、低域のカットオフ周波数は、 $f_c = R_1/L$ で表される。

リング内の電流をバンチに依存せずに測定するためには、低域カットオフ周波数をキャンセルもしくは小さくすることにより直流成分を測定する必要がある。低い周波数にも感度を持たせる方法として、ピックアップコイル

^{*1} 若狭湾エネルギー研究センター 加速器グループ、^{*2} 高エネルギー加速器研究機構

に巻き線を追加し、その巻き線に出力をフィードバックし、等価的に L を大きくすることにより低域カットオフ周波数を下げた HERWARD transformer が使われている¹⁾。

我々の開発した CT は負性抵抗回路を用いて R_1 を完全にキャンセルする方法である²⁾。その原理図を図- 1 に示す。オペアンプの入力インピーダンス Z_{in} は次式で表される。

$$Z_{in} = -R \frac{R_i}{R_f}$$

インピーダンスが仮想的に負になるので、抵抗値を調整することにより R_1 をキャンセルすることができる。これにより、ビーム電流の直流成分を測定することができるようになる。

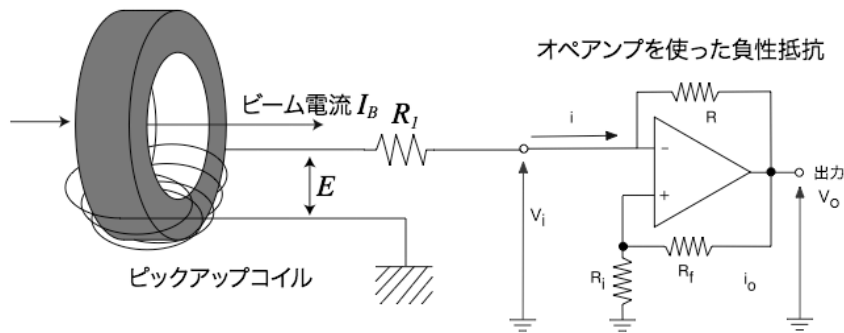


図- 1 負性抵抗回路を用いた直流 CT の原理

III. CT のインストールと磁気シールド

これまで、当センターのシンクロトロンで CT が設置できる絶縁セクションは、図- 2 に示すように偏向電磁石の直下流に配置されていた。このため、偏向電磁石の漏れ磁場信号が CT を飽和させてしまうので、漏れ磁場を遮蔽する磁気シールドを設置した。しかし、十分な遮蔽効果を得ることができず、一か所の偏向電磁石の漏れ磁場だけを遮蔽するのでリングの対称性を崩し大きな Closed Orbit Distortion (COD) を発生させてしまう。そこで、図- 2 に示すように、RF Kicker と Q 電磁石の間の真空ダクトを交換し、新たな絶縁セクションを設け CT を移設した。

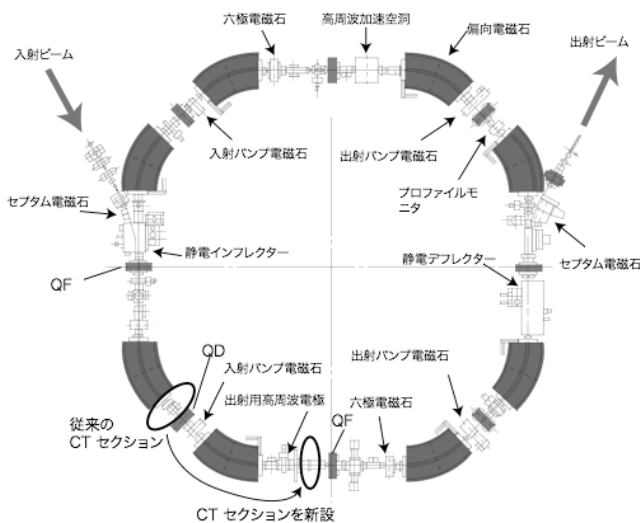


図- 2 リング内での CT セクション

設置した CT を図- 3 に示す。隣接している Q 電磁石からの漏れ磁場が CT に影響することが予想されたので鉄の薄板を重ねた磁気シールドを設置した。

IV. 信号処理回路

CT の信号処理回路を図- 4 に示す。ピックアップコイルと負性抵抗回路で検出されたビーム電流信号は、制御室まで同軸ケーブルで輸送される。ビーム電流信号は制御室の Control Module で増幅

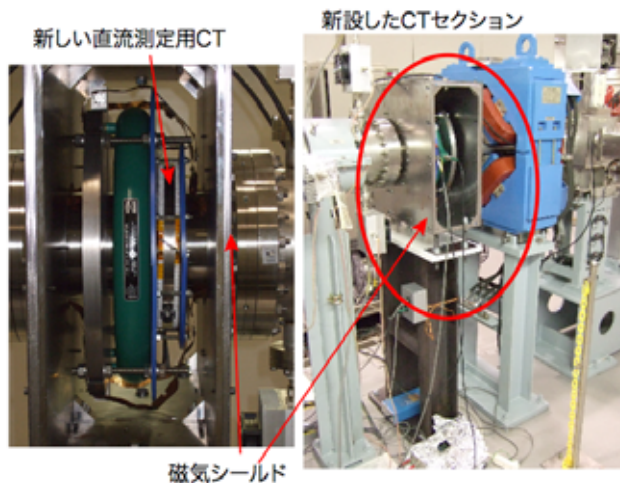


図- 3 インストールした CT と磁気シールド

されて、DSP の信号演算モジュールに入力される。信号演算モジュールは、MTT 社の DSP 開発キット sBox を利用して製作した。ビーム電流信号は信号演算モジュール内で加速高周波の周波数信号で割り算され粒子数信号に変換される。

さらに、信号演算モジュールでは、CT に隣接している Q 電磁石、ステアラ電磁石などからの漏れ磁場信号を完全にキャンセルするために、ビームを入射していないときの信号を記録しビーム電流信号から引き算する。

また、ビーム電流信号のオフセットを自動的に補正するために、ビーム入射 22 msec 前のタイミング信号(入射基準タイミング)を各モジュールに入力し、そのタイミングで信号のオフセットをリセットしている。

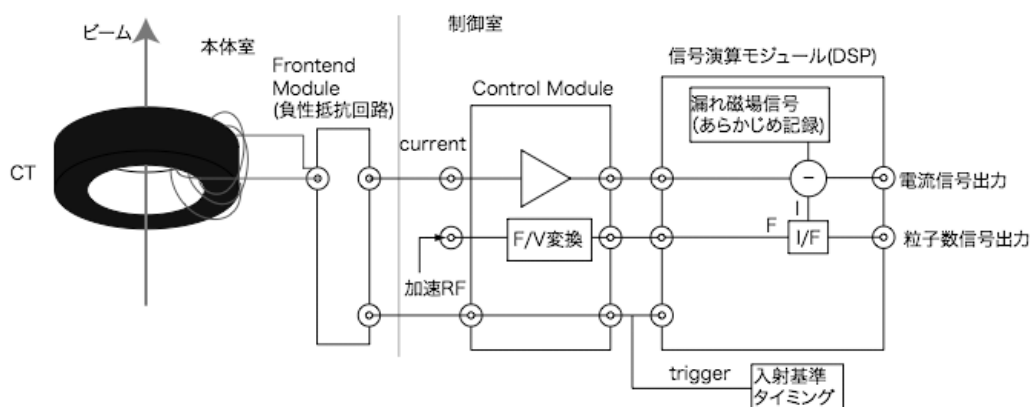


図- 4 CT の信号処理回路

V. 出力信号

1. テストパルス信号

図- 6に矩形波のテストパルスをピックアップコイル内の校正用ケーブルに入力したときの、Control Module の電流出力の波形を示す。テストパルスの 1sec 幅の矩形波を再現できており、DC 領域からの周波数特性があることを示している。テストパルスの入力が54.4mA のとき、電流出力が1.11Vpp であった。これにより、電流出力の感度が 20.4mV/mA と校正される。

2. 漏れ磁場信号の消去

図- 7の赤線に Carbon 660MeV を加速するときの磁場パターンの漏れ磁場信号を示す。このように、ビームを入射していなくても電磁石をパターン励磁しただけで、加速パターンに同期した数 10mV の出力が発生する。CT の近傍にある、Q 電磁石(QF3)及び水平ステアラ(STH2)の磁場を検出していると考えられる。この信号を DSP で記録し、記録した波形を電流出力から差し引くことにより、漏れ磁場信号のキャンセルを行う。

漏れ磁場信号として記録する波形として、16 周期の波形を記録して平均化し、トリガタイミング及びトリガから 1.9msec のタイミングでの値が 0 になるようにオフセットの校正を行った。記録した漏れ磁場信号を電流出力から差し引いた信号が図- 7の緑線である。漏れ磁場信号がキャンセルされ、オフセットの変動が ±20mV に抑制されていることが分かる。

3. 粒子数出力信号

Carbon 660MeV を加速した時の粒子数出力を図- 5に示す。緑線が電流信号を加速高周波の周波数(すなわち粒子の周波数)で割り算することによって得られるリング内を周回している粒子数信号である。赤線が静電誘導型のバンチモニタの信号である。同じ校正値に合わせてあり、両者の信号はほぼ一致している。これにより、CT で正しく粒子数をモニタできていることが分かる。また、捕獲-加速初期の段階で静電誘導型モニタより、CT の信号出力が大きい。これは、入射した Carbon ビームの一部を加速高周波で捕獲することができず、静

電誘導型モニタでは検出できない成分が有ることを示している。一方でCTはバンチ波形に依存せずリング内の粒子数をより正確にモニタできていることを意味している。このように、バンチ信号とCTの粒子数モニタ信号を比較することにより、リング内の粒子の状況の更なる知見が得られることが期待できる。

4. 測定精度

現在、CTの測定精度は主にオフセットの安定性で決定される。図-7より、オフセットの安定度は一周期で $\pm 20\text{mV}$ である。減速領域すなわち加速周期の後半は無視できるので、問題となるオフセットの変動幅は、およそ $\pm 10\text{mV}$ である。フラットトップでのCarbon 660MeV及びProton 200MeVの周回電流は、それぞれおよそ5mAと40mAである。したがって、測定精度はそれぞれ $\pm 10\%$ 及び $\pm 1.3\%$ 程度である。

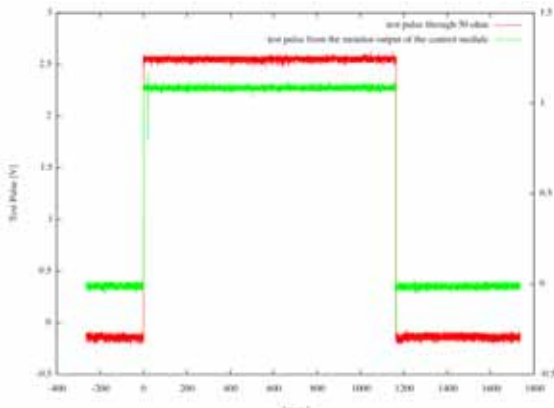


図-6 テストパルス信号及びその出力

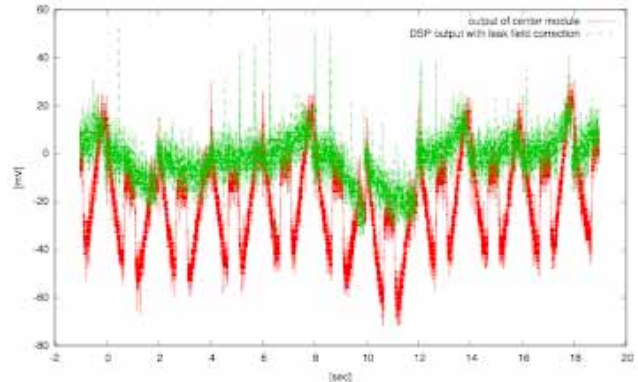


図-7 漏れ磁場信号及びそのキャンセル

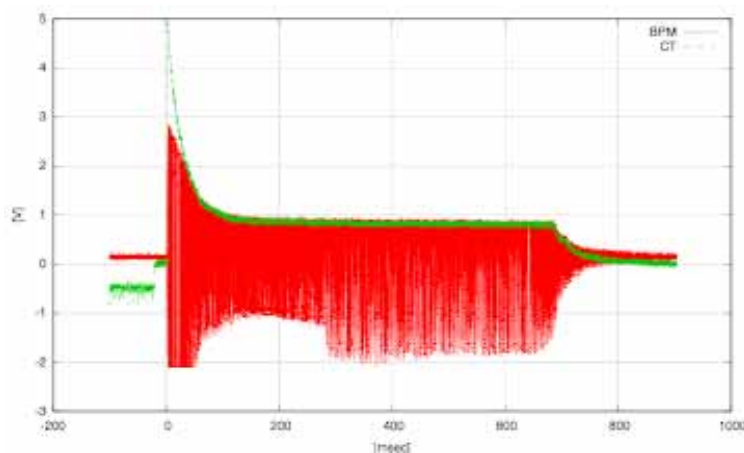


図-5 粒子数信号とバンチ信号

VI. まとめ

負性抵抗を用いた新しい原理の直流帯域を持ったCTの開発及び若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンへのインストールを行った。バンチ波形に依存せず、リング内の粒子数をモニタできるようになり、加速器の運転及び調整の高度化への貢献が期待できる。現在、常時モニタできるように、信号処理回路及び周辺設備を整備中である。

参考文献

- 1) J. Borer and R. Jung, "DIAGNOSTICS", CERN 8415, pp385-467, (1984)
- 2) S.Ninomiya et al., EPAC2004 Proceeding, p1145, (2004)