

ビームチョッパーを用いたシンクロトロン診断と加速効率の改善

金澤光隆^{A)}、大森千広^{B)}、高木 昭^{B)}、野田耕司^{A)}、上杉智教^{B)}、白壁義久^{B)}、
杉浦彰則^{A)}、森 義治^{B)}、武藤正文^{B)}、川島祐洋^{C)}

^{A)} 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉市稲毛区穴川 4-9-1

^{B)} 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

^{C)} 加速器エンジニアリング (株) 〒263-8555 千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

シンクロトロンの運転を診断するため、入射ビームをリングの高周波に同期してチョップすることは有用と考えられる。そこで HIMAC イオン源と RFQ 型線形加速器の間にビームトランスフォーマー型チョッパーを設置し、チョップされたビームを作った。その結果、通常の運転では気づけなかったビームバンチのシンクロトロン振動が観測された。これは加速周波数を決めるために利用している、Bクロック発生器の問題であることがわかった。そこで振動の原因を作っている Bクロック発生器を改良し、振動を小さく押さえる事が出来た。その結果加速効率の改善も得ることが出来たので、その結果について報告する。

1 始めに

シンクロトロン内のビームの位置やビームバンチの振る舞いを測定することは、リングの高周波電場をかけてビームバンチを作って初めて出来る。このためには約数 ms の時間を必要とし、ビームがリングに入った直後には測定できない。しかし、入射するビームをリングの RF に同期してチョップして入射させれば、ビーム入射直後からビームバンチを測定できる。又、この測定によりリングの運転調整に利用することが出来る。たとえば高周波電場をかけなくても、ビームバンチが出来ていることから、ビームがリングを一周する以前でも、ビームがリングのどこまで来ているかを見ることが出来る。これは通常リングに用意されている COD モニターを使う事が出来、そのために特別なモニターを用意しなくてもすむ。又、周回し始めた直後のビームの振る舞いについても観測する事を可能にしてくれる。さらに今回行ったように十分短い中にビームをチョップする事により、ビームバンチの振る舞いをよりよく観測する事が出来る。このように、様々な用途に利用出来るビームチョッパーとして、ファインメットコアを利用したビームトランスフォーマー[1]を開発した。これはビームエネルギーをこのトランスフォーマーで変化させて、下流に配置されている RFQ 型線形加速器の運動量アクセプタンスの外に出す事によってビームを切る。このタイプのチョッパーは高圧電場を利用して横方向にビームを切るタイプのものに比べて、トランスフォーマー本体がコンパクトに出来るメリットがある。又、ファインメットコアのトランスフォーマーは Q 値が約 0.5 と小さいため、任意波形の加速電場を作る事が出来、十分短くチョップしたビームを作る事が出来る。そこで、ファインメットコアを利用したトランスフォーマーを開発し、HIMAC イオン源と RFQ 型線形加速器の間に設置してビームテストを行った。

2 ビームチョップ

2.1 チョッパー

トランスフォーマー型のチョッパー本体は内径 10 cm 外径 50 cm 厚さ 2.5 cm のファインメットコアを 3 枚用いている。コアの冷却については、パワーを入れている時間の割合は小さく、コアの発熱は小さいので、特別の冷却構造は持たせていない。図 1 にチョッパーの断面図を示すが、コアを納めたケースのビームライン方向の長さは 11.6 cm と非常にコンパクトに出来ている。このチョッパーは 5 kV (±2.5 kV) の高圧パルスが発生できる FET スイッチで駆動した。このスイッチは FET 自体では 10 ns の立ち上がり及び立ち下がり時間が得られ、チョッパーに一ターンのループでパワーが入るようにした場合、50 ns の値が得られている。従って、シンクロトロンの入射時の RF の周期に比べて十分に短時間にビームをチョップすることが出来ている。

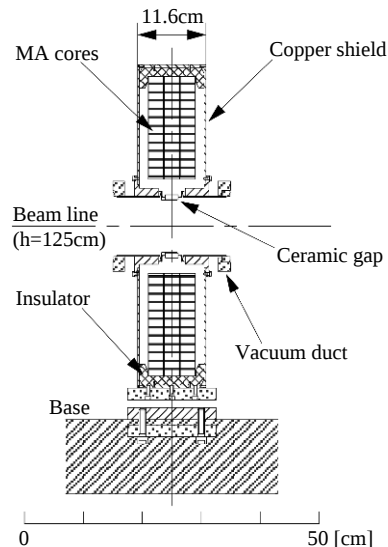


図 1: チョッパー本体の断面図

2.2 チョップされたビーム特性

ビームチョップは RFQ のエネルギーアクセプタンスの外にビームエネルギーを変化させることによって行う。図 2 にビームエネルギーを変化させて測定した RFQ のトランスミッションをシミュレーションの値とともに示す。

この結果から、中心値に対して10%だけエネルギーを変化させる事でビームが切られることがわかる。チョッパーの所でのビームエネルギーは核子当たりのエネルギーが8 keV であるので、実験に使った He^{2+} では 1.6keV の電圧が必要であり、今回の FET を使ったパワーで十分ビームを切ることが出来る[2]。図3にはチョッパー電圧に対して得られるビーム信号を示す。

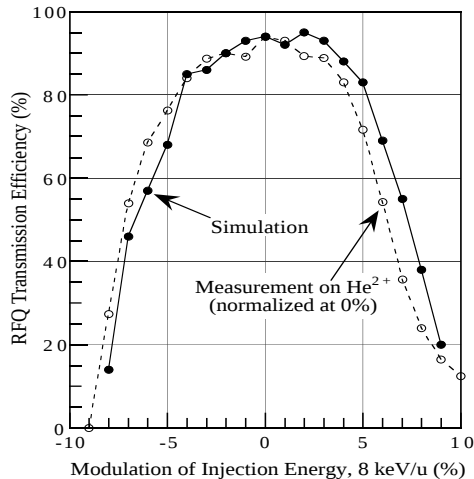


図2：RFQの加速効率の測定値とシミュレーションの値。横軸はビームエネルギーの中心値からのズレ量を%で表している。測定値はRFQ及びアルバレー型線形加速器で加速されたあと、実験室に輸送して、ファラデーカップを利用して測定した。絶対値については定数をかけて中心で規格化している。

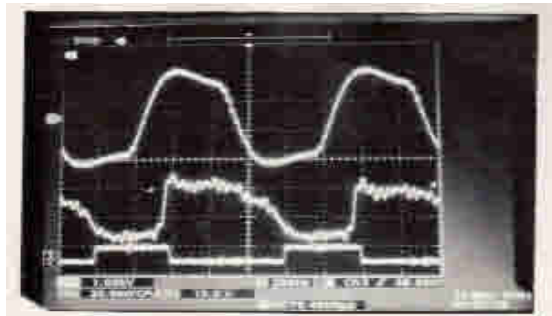


図3：チョップされたビーム信号を真ん中に示す。上の信号はチョッパーのギャップ電圧で、下はトリガー信号(200ns/div)。

3 チョップされたビームによるシンクロトロン振動の観測

リング内のビームバンチをチョッパーによってバンチ巾を短くシャープな信号にするには、シンクロトロンのRF信号に同期してチョップする必要がある。そのために加速に利用しているRF信号の分岐出力を利用してチョッパーのFETをON/OFF制御した。従って、チョッパーへの信号の遅延時間を調整して、チョップされたビームをシンクロトロンのRFの任意の位相へ入射させる事が出来る。実際にはリングのバンチ信号を見ながら、信号が大きく、かつ入射直後にはビーム振動が起こらない様な位相にチョップしたビームが入る様に遅延時間を調節した。このように調節して得られたバンチ信号を図4-2に示が、バンチ間

隔が962nsにたいして、ビームバンチの中は300ns程度に小さく出来ている。又、この観測の結果、ビームバンチは途中からダイポール振動を起こしている事がわかった。図4-1にはチョップしない場合のバンチ信号を示すが、同じように振動が起こっているはずであるが、ハッキリとはわからない。このことは、このビームチョッパーが確かにビームの振る舞いを見るためのモニターとして有効である事を示している。

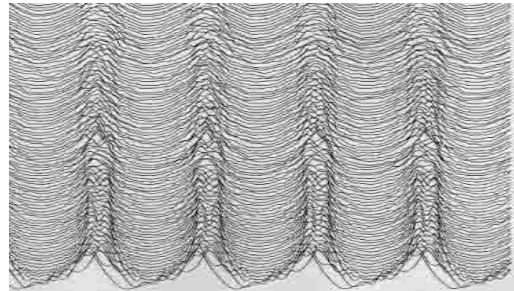


図4-1：チョップされないビームバンチ信号のマウンテンレンジプロット。バンチ間隔は962ns。

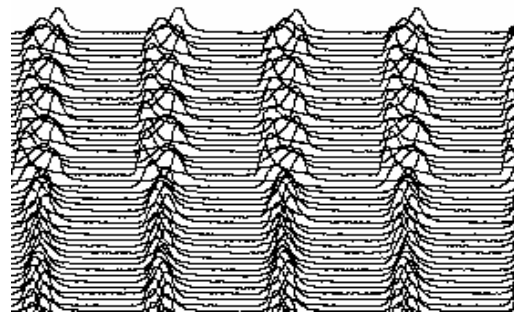


図4-2：チョップされたビームバンチ信号のマウンテンレンジプロット。バンチ間隔は962nsで、縦軸の中央部分でBクロックでの制御に移り、加速が開始されている。

4 Bクロック信号の改善とその結果

HIMACシンクロトロンではDDSをRFの信号源として使っており、主電磁石の磁場に応じて周波数を制御するためにBクロック信号を使っている。Bクロック信号はパターンメモリで受け取られて、DDSに新しい周波数のデジタルデータを送り、DDSの出力を更新する。この周波数のステップ的な変化は、ビームエミッタンスの増大の原因になる。そこでBクロックステップを0.2 Gaussに小さくしてあり、それに応じて出力を双極性にして周波数を低くするマイナスのクロックも出力出来るようにしてある。又、入射器からのビームをRFキャプチャーする時とフラットトップでビーム取り出しする時は、BクロックによるRFの制御を止め、10kHzのクロックによりパターン制御を行なっている。周波数に関してはフラットベース及びフラットトップとも一定値のパターンで運転を行っている。今回のチョップしたビームがダイポール振動の振幅が大きくなっているタイミングを調べたところ、Bクロックによって周波数制御し、加速を始める所であった。そこでBクロックの出力パルス調べた。その結果を図5-1に示すが、加速途中でも周波数を小さくするBクロックが30Hz程度のレートで出力されており、これが振動を起こす原因のひとつと考えられた。そこでBクロックをほとんど出

さないように調整可能なモジュールを作った。その結果を図 5-2 に示すが、加速時間の 1 秒程度では B-クロックを出さないように調整できた。そこで改良されたモジュールで制御し、チョップされたバンチ信号を見たのが図 5-3 である。確かに B-クロックによって周波数制御をしている所でのシンクロトロン振動の振幅の増大を小さく押さえる事が出来た。ただし、いぜん加速に移ってから振動が起っており、まだ他の原因が残っていると考えられる。又、この改良された B-クロックモジュールを使って運転したフラットトップでのビーム強度は図 6-2 に示すように、改善する前に比べて約 10% 程度の強度上昇を得ることが出来た。これは B-クロックモジュール以外変更が無い場合である。シンクロトロン振動を小さく押さえることが出来て、ビームエミッタンスの増大が小さくなっている事が予想される。これに応じて加速電圧を小さく調節して、さらにビーム強度向上の可能性を持っている。

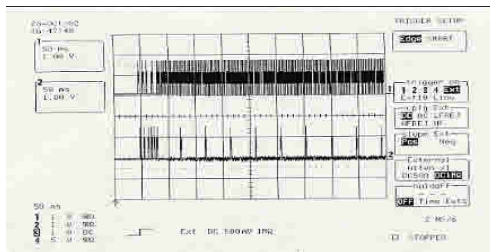


図 5-1：旧 B-クロックモジュールの出力

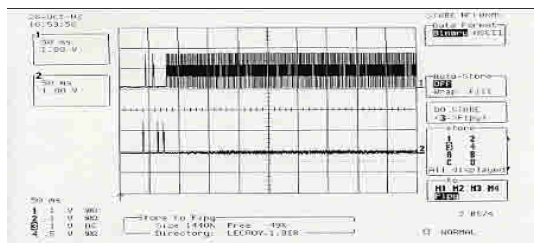


図 5-2：改良型 B-クロックモジュールの出力

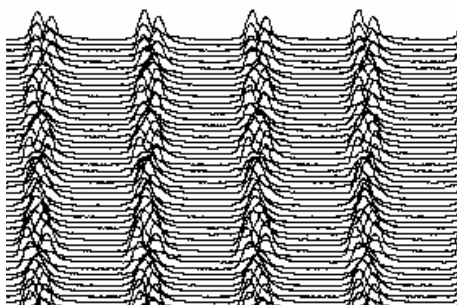


図 5-3：改良型 B-クロックモジュールを使った場合のチョップされたビームバンチ信号。最初のバンチ間隔は 962ns で、縦軸の中央部分で B-クロックを有効にして、加速を開始している。図 5-1,2 はともに上が B⁺パルス出力で下が B⁻パルス出力 (50ms/div)。

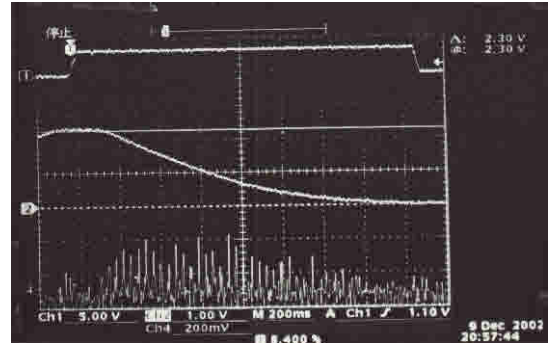


図 6-1：古い B-クロックモジュールでのビーム加速

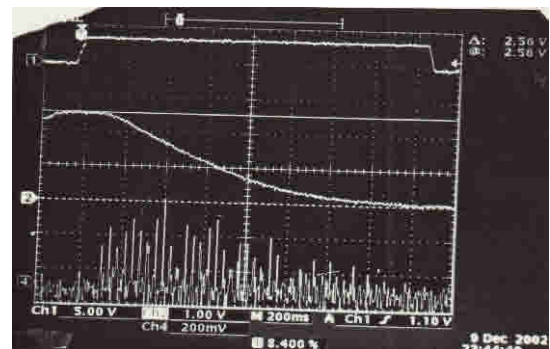


図 6-2：新しい B-クロックモジュールでのビーム加速。ともにフラットトップでの信号で、上がビーム取り出し用 6 極電磁石の電流パターン、真ん中が DCCT で測定したビーム電流信号、下が取り出されたビームスピル (200ms/div)。

5 まとめ

トランスフォーマー型ビームチョッパーを RFQ 型線形加速器の上流に設置して、シンクロトロンのビームバンチを十分短くでき、ビームバンチのシンクロトロン振動を感度よく観測できる事がわかった。観測されたシンクロトロン振動は、B-クロック発生器の改良により、小さくすることができた。この結果、加速されるビーム強度を約 10% 改善することができた。ただし依然小さな振幅の振動が残っており、改善されるべき課題が依然残っている。

6 謝辞

この実験は HIMAC 共同利用実験としておこなわれた。又、加速器の運転に関しては AEC のオペレーターグループに大いにお世話になったことを感謝する。

参考文献

- [1] Y. Shirakabe, *et al.*, "Fast Beam Chopper with MA Cores" Proceedings of the 7th EPAC, Vienna, (2000)2468.
- [2] C. Ohmori, *et al.*, to be published