

T-CLOCK ACCELERATION TEST AT HIMAC SYNCHROTRON

Tetsuya Fujimoto^{1,A)}, Mitsutaka Kanazawa^{B)}, Toshiyuki Shirai^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Koji Noda^{B)}, Kota Watanabe^{C)},
Kazunao Maeda^{D)}, Kazutaka Hayashi^{E)}, Teruhiko Nakai^{E)}

A) Accelerator Engineering Corporation, 3-8-5 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

B) National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

C) Toshiba Medical Systems Corporation, 1385 Shimoishigami, Otawara, Tochigi, 324-0036

D) Toshiba Corporation, 1 Toshiba-cho, Fuchu, Tokyo, 170-0013

E) Mitsubishi Electric TOKKI systems Corporation, 4-11 Techno-park, Sanda, Hyogo, 669-1339

Abstract

Beam acceleration test has been carried out with only T-clock at HIMAC synchrotron. In order to synchronize the RF frequency with the synchrotron power supply that is synchronized with the power line frequency of 50Hz, new T-clock generator was developed and used for this test. As a result of T-clock acceleration, acceleration efficiency of 78% and longitudinal bunch width after acceleration of $\pm 48^\circ$ were obtained. These results are better than that of B-clock acceleration. And also it was found that the T-clock frequency could be decreased down to 10kHz without deterioration of the acceleration efficiency and beam bunch width. The plan to install the T-clock acceleration system in the HIMAC system is progressing.

HIMACシンクロトロンにおけるT-CLOCK加速

1. はじめに

HIMACシンクロトロンではリング偏向電磁石の0.2gaussの磁場変化からクロック(B-CLOCK)を発生させ、このクロックを使って磁場と同期するようにRF周波数を制御しビーム加速を行っている^[1]。HIMACシンクロトロンは通常3.3秒周期のパターン運転を行っているが、偏向電磁石は24相サイリスタ整流型の電源で励磁しているため電力ラインの周波数である50Hzの揺らぎに合わせて3.3秒のパターンが伸び縮みする。B-CLOCKは実際の磁場を検出して発生するクロックであるため、このような磁場パターンの揺らぎに対応してクロック出力が変わり磁場と加速周波数を同期させることができている。しかしクロックの生成にモニター用偏向電磁石に取り付けられたコイルの出力電圧からB-CLOCKを発生させているため、アナログ回路使用によるノイズを除ききれないという限界がある。この場合磁場と周波数にずれが生じ、RFパケット内でビームが揺さぶられることによる-E空間上でのシンクロトロン振動の励起、パンチサイズの増大が引き起こされる原因となる。これらの現象は周波数ステップが粗くまたB-CLOCK周波数が低い加速直後の低エネルギー時に起こりやすく、また低エネルギー時はエミッタンスも大きいいためビームロスも起こしやすい。そこでノイズの影響がなく、また周波数ステップを細かく設定できとえられる時間周期クロック(T-CLOCK)による加速が実現できないか試験を行った。そのために磁場パターンの揺らぎに同期したT-CLOCK発生器を開発し、加速空洞にはガン治療施設の普及小型化のために開発しHIMACに組み

込まれたCo基アモルファスコアによる無同調空洞^[2]を使用してビームテストを行った

2. 試験方法

2.1 機器構成

T-CLOCK加速試験の機器構成を図1に示した。今回の試験では加速空洞に無同調空洞を用いた。この空洞を用いることで

(1) ギャップ電圧、フェライトバイアス関係のフィードバック制御が必要ない。

(2) 加速に必要な4kVのギャップ電圧を得るのに2kW×4台の半導体アンプのみで可能。

という利点があり、図1に示したように非常に簡単な構成で試験することが可能である。この試験で重要となるT-CLOCK発生器には三菱電機特機システム製のものを使用し、最大出力周波数はB-CLOCKよりも十分に速い192kHzとした。またパターンメモリは192kHz×3.3秒のT-CLOCK運転に十分対応可能な最大1MHzで動作するものを使用している。

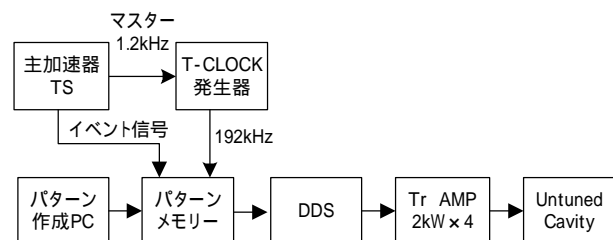


図1 T-CLOCK加速試験機器構成

¹ E-mail: t.fujimoto@aec-beam.co.jp

2.2 磁場パターン同期T-CLOCK発生器

今回使用したT-CLOCK発生器は主加速器タイミングシステム (TS) からのリング電磁石パターン出力に使われる電源同期1.2kHzのクロックを受けて、これに同期した192kHzのT-CLOCKを出力するものである。動作原理を図2に示した。当初1.2kHzの入力に対して192kHzのクロック数に数100程度のずれが生じることがあったが、これはTSからの1.2kHzの周期に想定外の大きなデジタル的変動が乗っていたためであった。この対策として入力信号の平均化、隔周期ごとに行っていた周期計測およびパルス列生成を毎周期ごとに行うなどの改良により、同期誤差の全く無い出力パルスの生成が可能となった。

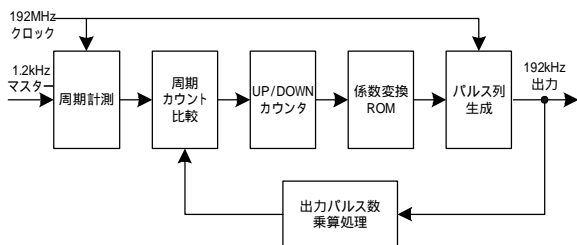


図2 T-CLOCK生成処理ブロック図

2.3 T-CLOCK加速の周波数パターン作成

T-CLOCK加速の周波数パターンはリング偏向電磁石の電流設定パターンから作成した。電流を磁場に換算し、以下の式に従って周波数を求めた。

$$f = \frac{hc}{2\pi R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{AE_0}{qcB\rho}\right)^2}} \text{ [Hz]}$$

ここで、 E_0 は静止エネルギー、 A/q は質量電荷比、 h はプランク定数、 R はリング平均半径そして ρ はビーム軌道の曲率半径である。

周波数パターンの作成を簡単に行うために電流設定値を用いたが実測値とは多少のずれがあるため、これが f となって周回軌道のずれ (R) を生じさせる。これについては R モニターの測定結果を使って周波数補正した。

3. 結果

T-CLOCKによる加速試験のパラメータを表1に示した。T-CLOCK周波数はB-CLOCKよりも十分速い192kHzをベースとしたが、ビーム (加速効率、パン

表1: T-CLOCK加速実験パラメータ

イオン種		C6+
蓄積粒子数		2×10^{10}
入射エネルギー	[MeV/n]	6
加速エネルギー	[MeV/n]	400
RF周波数	[MHz]	1.0418 ~ 6.612
加速電圧(最大)	[kV]	4
T-CLOCK周波数	[kHz]	3.2 ~ 192

チ幅)に影響が出はじめるクロック周波数を見極めるためにも3.2kHzまで周波数を下げて実験を行った。

3.1 f 補正

図3はT-CLOCKで加速を行ったときの R を示している。2.3で述べたように周波数パターンを偏向電磁石の電流設定値から作成したため加減速領域でビーム軌道の位置ずれが生じている。これを補正するため R から f に換算し、元の周波数パターンに反映させると同図中に示したように R をほぼ0にすることができた。このようにT-CLOCK加速ではB-CLOCKのようなノイズの影響が無く、さらに f 補正を行った周波数パターンをパターンメモリに書き込むだけで、 R フィードバック制御なしでもビーム軌道のずれが無い安定した加速が可能である。

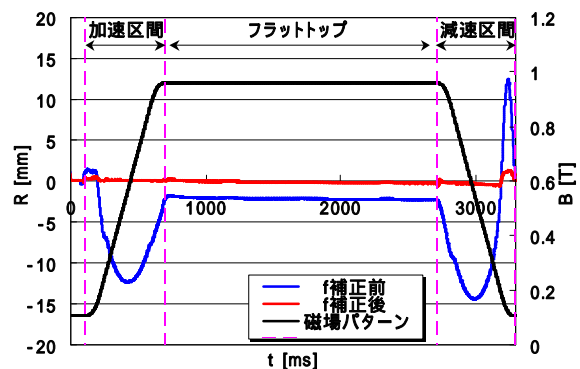


図3 T-CLOCK加速時の R とBM励磁パターン

3.2 加速効率

リング電磁石の励磁パターンに同期したT-CLOCKを使うことで、T-CLOCKによる加速は問題なく実現できた。そこでT-CLOCK周波数を下げて加速可能な周波数範囲を調査した。図4はT-CLOCK周波数の加速効率への影響で比較のためB-CLOCKによる加速効率も示した。B-CLOCKは一定周期で出力されないがここではdB/dt一定時の出力周期で表示した。加速効率は加速直前と加速後の粒子数の比から求めている。試験はリング蓄積粒子数 2×10^{10} で行っているがこの粒子数では低エネルギー時のチェーンズプレッドが大きい。よってこの加速効率には共鳴線によるTransverseのロスも含まれている。

T-CLOCK加速では9.6kHzまで周波数を下げても加速効率に影響が無く77%が得られ、普段のB-CLOCK (0.2gauss unit) の68%よりも約10%効率が良くなることが確認された。これはB-CLOCKでは加速開始直後で起こるビームロスがT-CLOCKでは低減されるためと考えられる。なおB-CLOCK unitを粗くすると急激に加速効率が悪くなるが、このビームロスは加速開始後30ms以内のみで起こり、それ以降の加速効率はB-CLOCK unitに依存しなくなる。

T-CLOCK周波数を3.2kHzまで低下させるとほとんど加速できなくなる。このときのビームロスは加

速開始から70ms後のスプライン区間の中心で起こっている。ここから磁場の変化 (dB/dt) が大きくなる部分であり3.2kHzの周波数更新周期では磁場とのずれが大きくRFパケットからビームがこぼれることでビームロスが起こっていると考えられる。

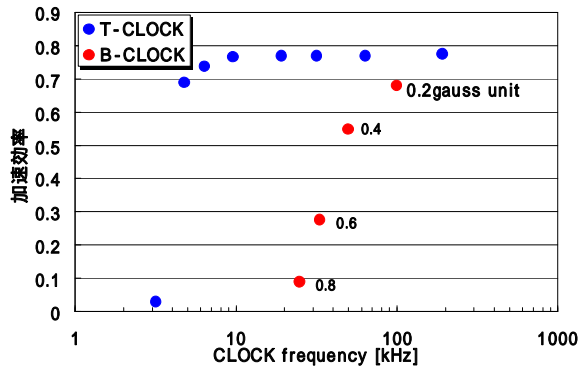


図4 CLOCK周波数の加速効率への影響

3.3 バンチ幅

加速中に加速周波数のずれが生じ、その f がシンクロトロン振動の周期より十分速い時間で変動するとバンチがRFパケットの中心からずれ、バンチ全体がシンクロトロン振動を始める。またこれはバンチ幅の増大を引き起こすと考えられる。そこでT-CLOCK加速後のバンチ幅の測定をフラットトップで行った。図5はT-CLOCKおよびB-CLOCKによる加速後のバンチ幅を示している。T-CLOCKでは加速後のバンチ幅が $\pm 48^\circ$ 程度で普段のB-CLOCK (0.2gauss unit) よりも $\pm 5^\circ$ 程度短くなり、磁場と周波数の同期がより取れていることが分かる。バンチ幅に関しても9.6kHzまでほとんど変化がないことから、T-CLOCK周波数の下限は10kHz程度と考えることが出来る。

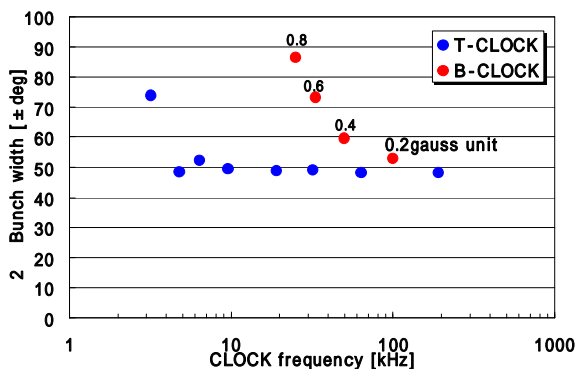


図5 CLOCK周波数のバンチ幅への影響

3.4 次世代照射用パターンのT-CLOCK加速

HIMACで進行中のスポットスキャンによる次世代照射では一つのパターンに幾つものエネルギー段を持たせた運転を行う。現在430 ~ 140MeV/n

までの11段パターンで試験を行っている。このパターンをB-CLOCKで行うと低エネルギー段でビームロスが生じる。これはB-CLOCK加速での縦方向のエミッタンス増大によると考えられる。図6はこのパターンをT-CLOCKで行ったときの R と粒子数である。T-CLOCKでは全てのエネルギー段でビームロスが見られず良好な結果が得られた。

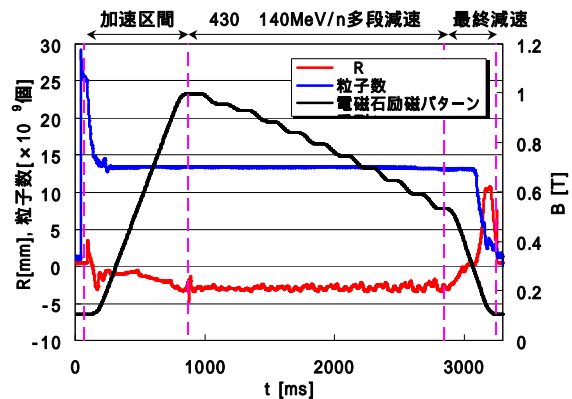


図6 T-CLOCK加速時の R とBM励磁パターン

4. まとめ

電磁石の励磁パターンが電力ラインの周波数50Hzに同期しているHIMACシンクロトロンでT-CLOCK加速試験を行った。電磁石系に使用している電源同期クロックと同期したRF用T-CLOCK発生器を開発し、これを使用することで安定した加速が出来るだけでなくB-CLOCK以上の加速効率が実現できた。また加速後のバンチ幅もB-CLOCKによる加速時より短く、BM磁場とRF周波数の同期が良く取れた加速ができることを確認できた。

今回の良好な結果を受けて、無同調空洞を含めてT-CLOCK加速システムをHIMACに組み込む計画を進めている。これによりT-CLOCK加速をHIMACで進められている次世代照射における複雑な励磁パターンに対して利用する予定である。

参考文献

- [1] C. Ohmori, et al., Nucl. Instr. and Meth. A526 (2004) 215-221
- [2] M. Kanazawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A556 (2006) 195-204