

ACCELERATION TEST WITH MIXED HIGHER HARMONICS IN HIMAC

M.Kanazawa^{1,A)}, A.Sugiura^{A)}, T.Misu^{A)}, T.Uesugi^{A)}, K.Noda^{A)}, C.Ohmori^{B)}, A.Takagi^{B)}, Y.Shirakabe^{B)},
M.Yoshii^{B)}, Y.Mori^{B)}, M.Kawashima^{C)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{C)} AEC, 2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba 263-0043, Japan

Abstract

In HIMAC synchrotron, beam tests with a magnetic ally loaded cavity have been performed. This cavity has very low Q-value of about 0.5, and can be added higher harmonics with fundamental acceleration frequency. In our tested system for higher harmonics, wave form of a DDS (Direct Digital Synthesizer) can be rewrite, and arbitrary wave form can be used for beam acceleration. In the beam test, second and third harmonic wave were added on the fundamental acceleration frequency, and increases of the accelerated beam intensity have been achieved. In this paper, results of the beam test and the acceleration system are presented.

HIMACシンクロトロンでの高調波を混入した加速テスト

1. はじめに

シンクロトロンでのビーム強度を制限するものとして空間電荷効果がある。この効果は現在建設が進められている大強度陽子シンクロトロンで大きい事は良く知られている。一方、現在設計研究が進められている、重粒子線を使ったガン治療専用のシンクロトロンにおいても、大きな効果を持つと思われる。これは、ガン治療専用ということから、可能な限りコンパクトなシンクロトロンの設計をすることからくる。又、入射器の線形加速器を小さくするために、リングへの入射エネルギーも出来るだけ低く設計する事からさらに大きくなる。この空間電荷効果制限を緩和するために、最適なワーキングポイントを探したり、ビームサイズをわざと大きくしたりと、いくつかの対策が考えられる。一方加速システムでは、このような空間電荷効果による制限の緩和策として、ビーム加速で高調波を混入する方法がある。この高調波の混入によりパンチングファクターを下げ、空間電荷密度の最大値を下げて、リング内のビーム強度を上げようというものである。これを実現するために、無同調加速空洞は同一の加速空洞に加速のための基本波と共に、高調波も加える事が出来るので、ハイパワーシステムが単純に出来るメリットがある。又、今回の様にキャプチャー周波数が1 MHzで、空洞のインピーダンスの最大値が2 MHzで、高周波数側でゆっくり小さくなっているような無同調加速空洞では、2次及び3次の高調波が小さな高周波パワーで作れるというメリットもある。しかも空間電荷効果が強く効くのは、高調波が入れやすい加速初期である。つまり、この加速初期の周波数領域で高

調波の振幅と位相を、最適に調整出来れば、それ以外の周波数領域で最適値からずれても、加速のビーム強度増加の目的が達成される可能性を持つ。そこで今回、ビーム実験では高調波をデジタルシンセサイザーの波形データそのものに加えることで行った。この場合、シンセサイザーから出力される高調波はその位相と振幅が一定で、これらの値をビームロスに最も効く周波数領域で最適になるように調整することになる。このような制約条件は有るが、高調波を基本波に混ぜる時に、特別のハード的な制御がいらず、混ぜる高調波の数の制約も小さくなる。又、制御システムが単純であり、出来るだけコストを抑えたいガン治療専用のシンクロトロンでは重要な要素である。そこで、このように単純なシステムでどの程度ビーム強度の増加が得られるかテストするためにHIMACのシンクロトロンでビーム実験を行う事にした。

2. 制御システム

2.1 パターンメモリー

パターンメモリーはHIMACでビームテストが行えるように現有のシステムと同じ同期信号を受けて動作出来る様になっている。ただし、現行の0.2 Gaussクロックより細かい方がエミッタンスの増大を起こさない事がわかっているので[1]、0.2 Gaussクロックより細かい磁場のクロックを受け取れるよう

¹ E-mail: kanazawa@nirs.go.jp

に 1 MHz のクロックレートでの動作が出来るようにしてある。又、周波数データを表すビット数もこれまでの 20 ビットから 24 ビットにしてよりスムーズな周波数掃引が出来るようにしてある。パターンの長さとしては、このクロックレートでも 1 秒程度の加速周波数のパターンが出来るように 6 MB の長さを持っている。ただし、今回の実際の実験では現有的なものと同じ 0.2 ガウスクロックを使って実験を行った。B クロック発生器としては、前回の会議で報告した、改良されたものを使って実験を行った[2]。パターンデータの変更は HIMAC の制御とは独立に出来るように、同じ VME バスに PC ボードをおき、この Windows システムからパターン生成、変更が出来るようにした。

2.2 デジタルシンセサイザー

パターンメモリからの 24 ビットの周波数データを受けて高周波のアナログ信号を出力する。ブロックダイアグラムを図 1 に示すが、高調波の入った高周波信号を調整して出力出来るように、ROM の波形データは PC のシリアルポートから書き込み可能にした。

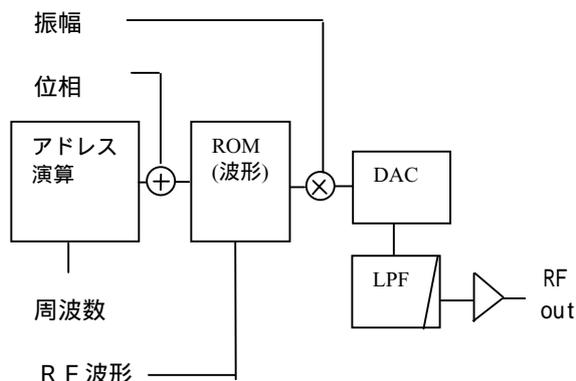


図 1 デジタルシンセサイザーのブロックダイアグラム

内部クロックには 40MHz を使い、出力部のローパスフィルターの周波数は 10MHz にしてある。最大出力は +10dBm で、振幅は外部デジタル信号により制御出来るが、実験では一定値(最大出力)で使用し、別途外部に振幅制御用のアナログ波形発生器とダブルバランストミキサーにより高周波振幅の制御をおこなった。このデジタルシンセサイザーは任意の波形を出力して加速出来るが、実際のビーム試験では 3 次までの高調波を入れて行った。

3 . 高周波加速空洞

加速には、図 2 に示す、金属磁性体を使った無同調高周波加速空洞を使った。金属磁性体の内径は 305mm, 外径は

670mm で、厚さ 26mm のものを加速ギャップを挟んで左右 2 枚ずつ、合計 4 枚使っている。コアの冷却は直接水につける方式を取っており、コアが冷却水との反応で酸化しないように BT レジン等でコアをカバーしてある。キャビティーの長さは 40 cm で、インピーダンスは図 3 に示すように 2 MHz 付近でピークを持ち、最大値は 400 である。この空洞は 4CW30,000A を 2 つ使ったプッシュプルで駆動され、1 から 6 MHz で 3 kV を出せるようになっている[3][4]。このキャビティーで 2 次高調波を入れる場合、空間電荷効果が重要なのは、キャプチャーから加速初期である。HIMAC の場合キャプチャーの基本周波数は 1 MHz であり、2 次高調波を入れる場合、加速初期の 2 MHz 付近で正しくいれられれば良く、この空洞はインピーダンスのピークを 2 MHz に持つので、小さい高周波パワーで必要な 2 次高調波が入れられる。



図 2 実験で使った無同調高周波加速空洞。空洞の後ろが push-pull の高周波増幅器で、ドライバーアンプ及び真空管の電源は別の部屋に設置してある。

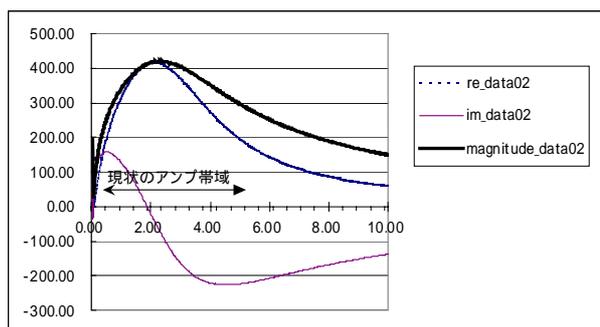


図 3 無同調高周波加速空洞のシャントインピーダンスの周波数依存性。絶対値を実線で示す以外、実数部と虚数部も示す。

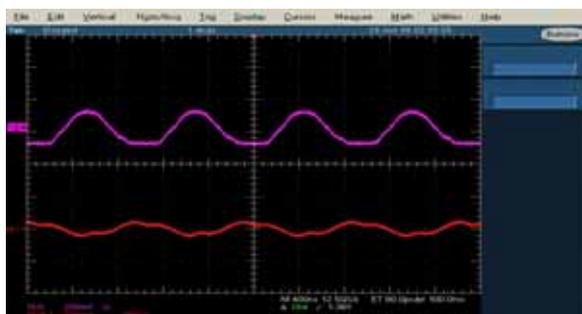
4 . ビーム試験

ビーム試験は炭素 (C^{6+}) イオンを入射エネルギー (6 MeV/u) から 100MeV/u まで加速する運転で行った。この場合の加速周波数(基本波)は 1.04MHz から 3.98MHz まで掃引する。運転周期は

3.3 秒で、加速の時間はスムージング区間（フラットベースから、及びフラットトップへのスムージングにそれぞれ 60ms 使っている）を入れて 740ms とした。実験では前もって HIMAC シンクロトロンを調整して、出来るだけ加速されるビーム強度が大きくなるように調整した。その結果、基本波だけで 2.1×10^{10} 個（リングに入っている粒子数）を 100MeV/u まで加速出来る状態で、高調波を加える実験を開始した。加速されるビーム強度が大きくなるようにシンセサイザー出力の振幅及び位相を調整して得られたバンチ波形データを図 4 - 1, 2, 3 に示す。波形データのタイミングは、波形の違いが見やすいフラットベースのところでのものを示す。確かに高調波を使う事によりバンチ幅が広くなり、空間電荷効果を緩和していることがわかる。表 1 にバンチ幅のデータとともに加速されたビーム強度を示したが、3 次までの高調波を加える事により、約

表 1 ビーム試験の結果

	基本波のみ	+ 2次	2次、3次
2次割合		38%	38%
3次割合			14%
バンチ巾 (FWHM)			
フラットベース	152°	200°	200°
加速後 80ms	104°	114°	119°
ビーム強度			
(基本波に対して)	100%	137%	143%



40%の強度向上が得られた。
図 4 - 1 基本波のみで高周波捕獲した場合のバンチ波形（上）。下は加速ギャップの電圧波形。0.4μs/div.

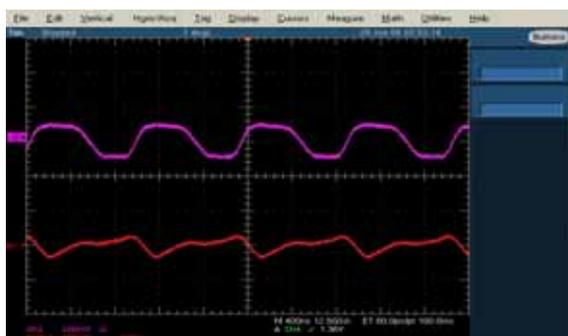


図 4 - 2 基本波に 2 次高調波を加えた場合

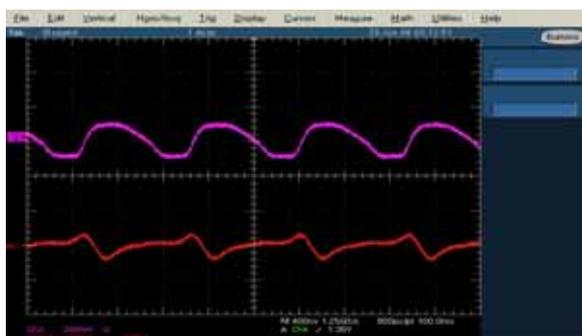


図 4 - 3 基本波に 2 次と 3 次高調波を加えた場合。

5. まとめ

無同調高周波加速空洞の特徴を生かして、高調波を基本波に加えてビーム加速を行い、加速されるビーム強度を上げる試験を行った。特に今回のシステムの特徴は、デジタルシンセサイザーが持つ波形データそのものを、通常の sin 波ではなく、高調波の位相と振幅を調整した高調波が混じったデータを使った点にある。これにより高周波制御システムが複雑になるのを避けた。実験ではこのように単純な方式で高調波を加えた加速システムで、ビーム強度の向上が得られることを確認できた。

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] M.Kanazawa, et al., "HIMAC RF system with a digital synthesizer", NIM A 443(2000)205-214
- [2] C. Ohmori, et al., "Beam Diagnostics using A Chopped Beam", to be published NIM A
- [3] Y. Sato, et al., "WIDE-BAND PUSH-PULL AMPLIFIER FOR HIGH GRADIENT CAVITY" Proceedings of the 1999 PAC, N.Y., (1999)1007.
- [4] C. Ohmori, et al., "HIGH FIELD-GRADIENT CAVITIES LOADED WITH MAGNETIC ALLOYS FOR SYNCHROTRONS" Proceedings of the 1999 PAC, N.Y., (1999)1007