

## Digital 制御 RF 加速

金澤 光隆\*

## Acceleration with Digital RF Control System

M. KANAZAWA\*

## Abstract

We have developed a digital RF control system with DDS (Direct Digital Synthesizer) for HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) synchrotron. In advance, this control system with beam feedbacks was tested in TARN-II ring successfully with very low beam intensity. Now, this tested acceleration system is operating in HIMAC synchrotron with good condition; we found there is no need to use the tested beam feedback system.

現在私が所属している放射線医学総合研究所（放医研）で、ガンの放射線治療専用の重イオンシンクロトロン<sup>1)</sup>を建設しようとしたのは今から約20年前である。そのころに比べて、重イオンシンクロトロンのいろいろな部分で技術が進歩して来ていると思う。その中でも最も大きく変わったものの一つがシンクロトロンの高周波加速システムではないだろうか。当時は、加速システムと言えばフィードバックループが何重にも重なっており、お互いのフィードバックループが干渉しあっている、非常に複雑なものに見えた。それが、今日では非常に簡単になってきたように思っている。この理由の一つがデジタル制御技術の利用であり、もう一つがアモルファス金属磁性体を使った無同調高周波加速キャビティ<sup>2)</sup>の利用だと思う。この結果全くフィードバックループのいらぬシステムが、ガン治療用のシンクロトロンで可能になってきている。現在、放医研のHIMACではビームの位相フィードバックも、位置のフィードバックも使わないで10年以上安定にビーム供給が出来ている。ただし、現在のHIMACはフェライト空洞なので、そのチューニングフィードバックと加速電圧フィードバックは使っているが。しかし、HIMACの設計が始まった頃は、シンクロトロンで周波数を大きく掃引してビーム加速した経験は、日本ではKEKのPSでしか経験が無かった。しかもそれはプロトンであり、重イオンの場合はさらに周波数掃引の範囲が広い分、難しさが大きくなると予想された。私が放医研に就職した時に

は、加速空洞については東大原子核研究所のTARN-II用に開発したもの<sup>3)</sup>があり（板野明史さんと佐藤健次さんが開発された）、HIMACで必要とされる「8倍の周波数の掃引」を十分に達成していた。（それでも実際にHIMAC用に作って、HIMACに必要な加速電圧を出す試験で、寄生共振のため銅板を溶かしてしまう現象が起り、苦労させられたが）そこで、残されている問題の加速制御については、実際にTARN-IIでビーム加速をしてみて、システムの試験をしようという事になっていた。こう考えていたのは放医研側だけでなく、加速システム全体を設計・製造し、その性能に責任を持っていた東芝も同様な考えであった。何しろ、誰も実際にシンクロトロンでのビーム加速を経験したことがある人はいなかった。そこで、まずはフィードバック制御に使うビームモニター回路の製作が先行していたので、これをTARN-IIに設置してビームテストを始めることにした。このビームモニターの信号を使って、まず突き当たる問題はTARN-IIのビーム強度が非常に小さいことだった。周長約78mのリングに入っているヘリウム原子核の数が $10^7$ 個ある時は良い方で、時には $10^6$ 個台で実験を行わざるを得ないことも多かった。そこで最初にやったことは、HIMAC用に開発されたビームモニター用のエレクトロニクスを使い、TARN-IIのビーム強度で加速制御に使えるかどうか見てみることから始めた。図1が最初の頃記録したバンチ波形だった。自分でバンチ波形を測定するのは初めてだったので、

\*独立行政法人・放射線医学総合研究所 加速器物理工学部 NIRS  
(E-mail: kanazawa@nirs.go.jp)

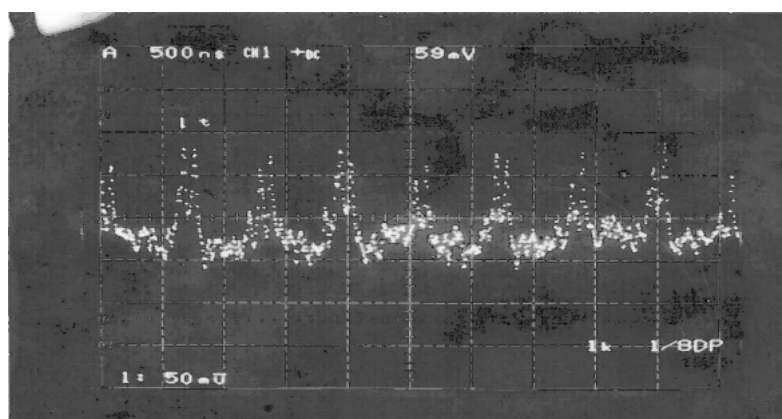


図1 TARN-IIで実験を始めた頃に測定したバンチ波形. よく見るとバンチ波形に2つの山が見えるのは, 加速空洞の上流と下流の2カ所につけたモニター電極の信号を足し合わせて見ているため. これは加速空洞からのノイズを落とすための佐藤健次さんのアイデアであった.

はっきりした波形が見えてほっとしたのを覚えている. さて次は加速制御に使うビーム重心位置と位相をうまく出力できるかということになる. この回路ではホワイトノイズを落として, 少ないビームでも精度良い出力が出せるように, バンド幅 150 kHz のバンドパスフィルターを利用した. これを加速途中の周波数を掃引している間も使えるようにビーム信号の基本波を一定周波数の 50 MHz に変換してからバンドパスフィルターを通すようにした<sup>4)</sup>. このおかげで, 非常にビーム強度が弱いにもかかわらず, まずまずの精度でビーム位置と位相の出力を得ることが出来た. ただし, このフィルターはキャビティーから漏れてくる加速周波数のノイズを除去するには無力だ. 正常なモニター信号を得て, 加速に使うにはこのノイズを出来るだけ落としておくことが重要であった. そこでマシンタイムの前に核研に行って, ノイズ対策をいろいろためして, 出来るだけノイズを落とすようにした. この結果, TARN-IIでのビーム実験では, 何かが調子悪くて非常にビーム強度が弱いときにも, 確実に使えるモニターとして, いつも利用されるようになり, ほっとした事を覚えている.

次の問題は加速のための高周波信号を作り, 制御するところであった. そこで前提になっていたことは, ガン治療に利用する加速システムは安定で再現性が良く無ければいけないということだった. 又, 多くの治療患者数をこなすためには, ビームのエネルギーを短時間で切り替えて, 治療室まで持っていく必要があった. この要求を満たすためによく使われている VFC では, 周波数信号の純度や安定性, 再現性が不十分なように思えた. 是非シンセサイザーの信号のような信号の純度や安定性を持ったものを加速に使いたいと考

えた. そこで候補に挙がっていたのが, アンリツ製の位相連続シンセサイザーであった. (私が放医研に来たときには, すでに佐藤健次さんが, このシンセサイザーを加速のための高周波信号源として検討を始めていた.) これは, デジタルの周波数設定値に応じて, 位相が連続になるようにアナログ信号を  $10 \mu\text{s}$  ごとに切り替えて周波数を掃引するタイプのものだった. ただ問題は, MHz 単位の周波数が変わることによる位相の変化が大きすぎる事だった. このような問題をなかなか解決できないまま時間が過ぎ, ローレベルの制御系を含んだシステム全体を決める必要に迫られた. 結局この問題に対しては, 位相変化は再現性があるということが判明し, MHz 単位の周波数が変わる時に, この位相変化をうち消す様に変化を補正する仕組みを作る事にした. 又, ビーム信号を使ったフィードバック系については, この位相連続シンセサイザーを制御するために, フィードバック信号をデジタル化する必要があった. それならば, できるだけノイズの混入の心配を減らすために, モニター回路の位相 ( $\Delta\phi$ ) と位置 ( $\Delta R$ ) 信号の演算出力をすぐデジタル化し, フィードバック制御はこのデジタル信号を使うこととした. このようなデジタル信号を使った制御系を作った場合, それぞれの信号はどの程度のスムーズさでデジタル化する必要が有るかが問題であった. ビーム信号については KEK の二宮さんが OHO に書いていた, KEK で実際に使っているモニター信号の精度を参考にして, それより小さな値に 1 ビットを決めた. 一番悩んだのは加速周波数をリングの磁場に追従させるために使われていた, B クロックの細かさであった. 当時良く使われていたのは, 磁場の増加に対してパルスを出す B クロックは, 1 ガウスを単

位にしていた。ただし、システムを全面的にデジタル化する場合は、このBクロックに対応したステップ状の周波数が出力され、ビームへの悪影響が心配された。だが、これを細かくすることは、Bクロック信号発生器がノイズでパルスを出しやすくなり、周波数に誤差信号を持ち込みやすくなる心配があるほか、周波数データを発生させるパターンメモリが大容量になり、さらに高速動作が要求され、限度があった。自分でも1ステップの周波数巾がどの程度の影響を持ちそうか、加速の安定領域に対する割合をみて検討した。ただ最後はやはり経験が大事だと考えて、1987年のPACのプロシーディング<sup>5)</sup>にデジタルシステムを使ったAGS (BNL)での加速テストの結果が報告されていたので、これも参考にして0.2 Gaussステップとした。この様に設計が徐々に決まりつつあった時に、アメリカのローレンス・バークレイ研究所 (LBNL) からジョン・ステーブルズという人が3ヶ月の予定で我々の所に来ていて、いろいろ我々の設計をみてアドバイスをしてくれた。彼はAGSでデジタルシステムでのビーム加速をしている人とその現状も良く知っていた。彼の意見では、AGSでの加速はいろいろ問題を持っていて、シンセサイザーを使った加速システムは時期尚早であり、採用すべきではないと言うものだった。自分のしている事に強く反対されるのは初めての経験であり、押し出しの強いアメリカ人と議論して、非常に気分的に疲れたのを覚えている。彼に比べて経験も知識も無い私にとっては、デジタル高周波システムが使えるようになった場合のメリットを上げて、この方式をテストしてみるべきだと主張するのがやっとだったのを覚えている。(逆に、その後うまく加速が出来てHIMACが運転しているときに会ったときには、congratulationと言って握手してくれたのが強く印象に残っている)ただシステムで肝心なところのシンセサイザー自体がMHzが変わるところでの位相変化を相変わらず抱えていたので、これがだめだった場合の代わりになるものを探し始めていた。アナログの発振器が念頭にあったが、そのうち直接合成方式のデジタルシンセサイザー (DDS) が使えるかもしれないと教えられ、東芝が試作したもののテスト結果を見た。周波数が変化した場合、どの周波数をとっても位相飛びの様なことは起こしていないように見えた。その上、フィードバック制御には都合の良いことに、周波数の更新速度が速かった。そこで、これをバックアップとして使うことにした。(こんな訳で、もし最初からこのシンセサイザーを仮定してシステムを作っていたら、必要ない部分をいくつか、

HIMACの制御システムでは持つことになってしまった。)とにかくこれでバックアップの発振器も作り(最初に考えていた、実績のあるアナログの発振器ではなかったが)、核研のTARN-IIでのビーム加速試験に臨もうと言う事にした。まず最初にしなければならなかったことは、TARN-IIのRFシステムの中にHIMACの制御システムを組み込むことだった。取り合いは出来るだけ簡単に、ただしHIMAC用の制御は出来るだけ使ってテストしたかった。それでも、スペースは限られており、肝心のデジタル制御の部分は、枯れ葉が入ってくるような、廊下に置かざるを得なかった。又、持ち込めるものも自然と制約があり、ハイパワー部分はTARN-IIのものを出来るだけ使うことにした。その結果、キャビティーのチューニングはTARN-II側で、その高周波電圧の大きさの制御はHIMAC用のものを使う様な、いろいろシステムが入り交じった状態でのテストとなった。まず最初に行ったのは、磁場一定のままでビーム信号を使った制御系のテストだった。ビーム位相信号を使ったフィードバックをONにしてみ、ビームの強度がどう変わるか見てみた。最初は位相演算回路のちょっとした間違いで何の効果も無かったのを覚えている。何の成果も無かったマシンタイムの後で解散する前に、東芝のエンジニアと対策を議論し、次のマシンタイムまでにしておくことを打ち合わせた。このとき東芝側で加速制御システムの動作全体に責任を持っていたのは、山岸俊雄さんだった。彼は、その後、このシステムのビームフィードバックに関する事で論文を書き博士号を授与された。そのタイトルは「イオンシンクロトロンの高周波加速制御系の設計法に関する研究」であった。いろいろ問題点が出てきて直す必要があるとき修正方法に関しても、彼を説得出来ればこちらが言うように会社としても動いてくれた。何回か失敗しては悪いところをつぶしていった確か4回目には、一定磁場で位置と位相のビームフィードバックの正常動作を確認することが出来た。そのマシンタイムの最後の方で、時間が無かったがとにかく、ビーム位相( $\Delta\phi$ )と位置( $\Delta R$ )のフィードバックを入れて、加速にトライしてみた結果が図2である。この日はこのデータを取っただけで終わり、その時は加速できていないことがわかった。放医研に帰ったあとで、気を取り直して不成功の理由を考え始めた時に加速開始のタイミングを運転パラメータを聞いて書いたのが図中の縦線だった。全く加速できなかったわけではなく、加速に移って約1秒ほどの間わずかにビームが残っていることがわかりほっとした。気を取り直して

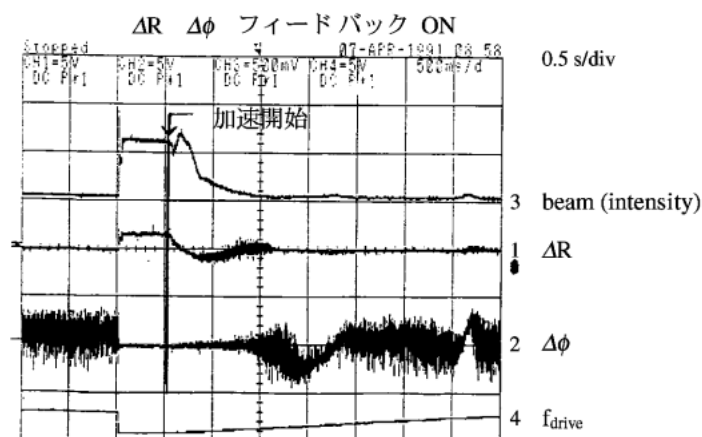


図2 最初の加速試験のオシロスコープのデータ。横軸のスケールは 0.5 s/div. で、一番上はビームバンチの基本波成分を平滑して得られた信号（当時のノートより）。

システムのチェックをしていって、ビーム位置を使ったフィードバック制御で使っている積分制御でカバーする量が小さすぎる事がわかり、すぐフィードバック回路を変更した。アナログ回路であればその場でも出来そうな、わりと簡単な変更だが、デジタル系となればそうはいかず、2階構造の回路基盤に増設して、何とか次のマシンタイムまでに直すことが出来た。そのほかにも重要ではないが直すべきものがありこれも修正して、次のマシンタイムに臨んだ。この少ししか加速できなかった試験の直後 KEK でビームモニターの研究会有って、その席で、現状を示すためにこのデータを講演の最後に使った。その研究会で現在は消滅した SSC 研究所から出席していた Robert C. Weber から、この DDS は位相ノイズが小さいだろう、と言ったコメントをもらい、次はいつビームテストをするか、といった質問を受けた。DDS を使ったデジタル制御を利用しようと思っているのは我々だけでないと感じさせてくれた研究会だった。図3が2回目の加速テストでうまくできた時のデータで、加速中ビーム強度が徐々に減っていてまだ問題があるがビーム試験はこれで終了した。図の右上に書いてあるが、1991年の4月27日だった。これ以上はシンクロトロン以外の問題である可能性もあるし、この制御システムが使えるかどうかの判断には十分に思えたので。この一連のビーム試験で、最初に使う予定だった位相連続シンセサイザもテストしたが、残念ながら周波数が 2 MHz になるところでビームが全部失われてしまいうまく加速できなかった。補正すべき位相を自分で調整してみただけに残念だった。ただその他にも DDS の方がデータ更新の時間が短いなど、いい点があったので HIMAC ではこちらを使う

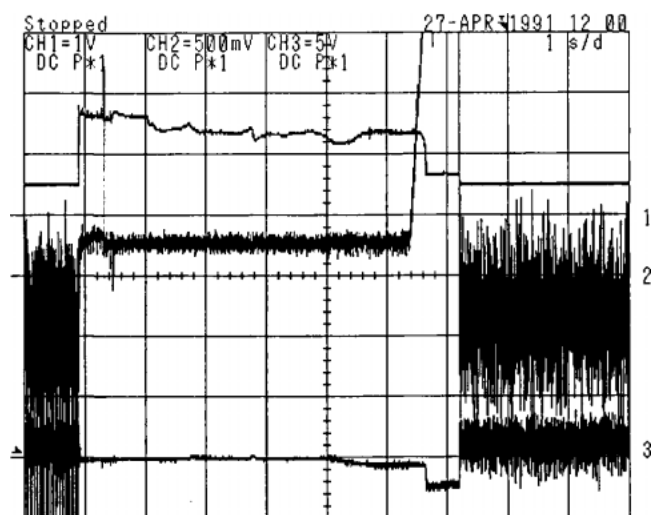


図3 一番上がビーム強度の信号で加速がフラットトップまでうまくいった時の記録（図2の一番下の周波数パターン以外は同じ信号）。横軸のスケールは 1 s/div. 上から2つ目はビーム位置の信号。最後にフラットトップに行ってから上に跳ね上がっているのは、フラットトップの周波数に乗り換えようとしたが、その周波数が大きすぎたためにビームを実際外側に持って行って失っている。

ことに決めた。またこの成功に気を良くして、次の年の 1992 年ベルリンで開催された EPAC に行かせてもらって、発表した<sup>6,7)</sup>。この会議には COSY の高周波加速システムのデジタル制御に関する発表<sup>8)</sup>があったが、まだ実際のビーム加速テストはまだとのことだった。その後 HIMAC の立ち上げは短時間で言うことができた。また現在までほぼ TARN-II でのテスト時のシステムのままで 10 年以上安定に動いてくれている。ビームフィードバックは全く使わずに！

## 参考文献

- 1) Y. Hirao et al., "Heavy Ion Synchrotron for Medical Use", Nucl. Phys. A538, 541c (1992).
- 2) Y. Mori et al., "A New Type of RF Cavity for High Intensity Proton Synchrotron using High Permeability Magnetic Alloy", Proceeding of the 6th European Particle Accelerator Conference, EPAC98 (1998) 299.
- 3) K. SATO, et al., "Broadband RF Accelerating Cavity for TARN IIz", Proc. of 6<sup>th</sup> symp Acc. Sci. and Tech., 117-119, 1987. K. SATO et al., "RF Accelerating System for TARN II", Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. On Cyclotrons and their Applications, 333-336.
- 4) M. Kanazawa, et al., "BEAM MONITORS FOR RF FEEDBACK CONTROL IN THE HIMAC SYNCHROTRON" Proc. Of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation, 504-513, 1991.
- 5) V. Kovarik, et al., "LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR THE AGS LIGHT ION PROGRAM" Proc. of PAC, 1987, 1585-1587.
- 6) M. Kanazawa, et al., "The RF System of the HIMAC Synchrotron", EPAC, 1179, 1992. M. Kanazawa, et al., "Beam Acceleration with the Digital Beam Feedback in HIMAC Synchrotron", EPAC 1972, 1994.
- 7) M. Kanazawa, et al., "RF control system of the HIMAC synchrotron" Proc. of 8<sup>th</sup> symp Acc. Sci. and Tech., 323-325, 1991. M. Kanazawa, et al., "Beam test with the HIMAC RF control system" Proc. of 8<sup>th</sup> symp Acc. Sci. and Tech., 326-328, 1991.
- 8) A. Schnase et al., "A Digital Synthesizer and Phase Control System for RF-Acceleration in COSY" Proc. of the Third European particle accelerator conference, 1220-1222, 1992.