

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

小型200MeV陽子・300MeV/u重イオンシンクロトロンの研究開発

(平成16年度)

Development of Compact 200MeV Proton and 300MeV/u Heavy Ion Synchrotron in 2004

概要

小型シンクロトロンリングを構成する主要な機器として電磁石システムと高周波加速システムの開発研究に主力を注いできた。平成16年度はこれまでに製作された電磁石や加速空洞などの性能試験とこれらの組み合わせ同期試験に重点を置き同期運転について検討を行ってきた。さらにビーム入射に関する問題としてシンクロトロンリング側で対処しなければならない課題に対するハードウェアの対策を行った。多重回転入射の入射時間に見合うフラット磁場を形成する入射用補助電源を製作し、すでに納入されている偏向電磁石パルス電源に組み込んだ。この結果、偏向磁場が入射磁場から加速磁場へ急激に移るため、同期運転の上で四極電磁石電源の電流制御が困難になった。このため四極電磁石電源の電流制御をIGBTモジュールによる多並列制御に直すと同時に、サイクル毎に偏向電磁石電流波形を読み込み、四極電磁石電流の波形制御をコンピュータで行う方法を採用した。さらに、加速器の全体制御としてファクトリーオートメーションに採用されているイーサネット情報ネットワークを遠隔制御の中核システムとして構築することにし、上記の2つのシステムについて対処した。

Abstract

For the development of the compact synchrotron, the special emphases have been placed on two major magnet and RF accelerating systems which compose the synchrotron ring. In the fiscal year of 2004, the performance tests of the components such as the pulse dipole and quadrupole magnets and the RF cavity were carried on, and their synchronized operations were investigated so as to track to the dipole field variation. In addition, the problem concerning to the multi-turn beam injection in very short period of the rapid ramping dipole field has been considered by making a flat injection field which is formed by an additional power supply of which current is superposed to that of the pulse power supply of the dipoles. As a result of this modification the dipole field changes abruptly from the almost dc injection field to the accelerating field which introduces the transient current for the quadrupole power supply. Therefore its current regulation was intensified by adding several IGBT modules in parallel to switch them in shorter time so that the quadrupole field tracks accurately to the dipole field and the quadrupole current pattern is generated with the help of the computer by sensing the dipole current waveform at every cycle. As a global computer control of the accelerator components, the Ethernet information network system, which is commonly used for the Japanese factory automation, is adopted and the remote control sequencers based on this network have been already considered in above two systems.

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

1. はじめに

平成15年度に製作した偏向電磁石と四極電磁石の磁場測定を実施した。偏向電磁石の大きな変更点はモデル電磁石に使用したストランドケーブルをホローコンダクターへ変えたことである[1, 2]。同じパルス電源で励磁したときの磁場分布および励磁曲線を測定し比較を行った。

イオン源の開発要素を少なくするため、ビーム電流を低く抑えて多重入射を行うことで検討し、必要な時間幅のフラットな入射磁場を形成する入射用補助電源を製作した。これに伴い入射磁場から加速磁場に切り替わるとことで急変する磁場変化に精度よく四極磁場を追従させるために四極電磁石電源の制御を高精度化する必要が生じた。

偏向電磁石に現れる不整磁場成分の四極磁場と六極磁場の補正を行う必要があるので、数値シミュレーションを通して詳細な検討を行った[3]。四極磁場成分は比較的小さいので四極電磁石電流の微調整で対応可能である。そのため四極電磁石電源の電流を偏向磁場に追従させるとともに、微調整電流を重畳できる制御プログラムを作成することにした。

六極磁場成分についてはビームに対する影響が大きく、低磁場側は偏向電磁石に取り付けた補正コイルを使用して補正し、高磁場側では独立の補正用六極電磁石を使用する必要がある。補正コイルが発生できる六極磁場は弱いので、高磁場側ではほぼ全面的に六極電磁石による補正に頼らざるを得ない。幸い加速によりビームエネルギーとともにビームの運動量幅が小さくなるので、六極磁場の補正が比較的容易になる[3]。

高周波加速システムについては、平成15年度に実施した高レベル試験を続行するとともに、低レベル試験を実施できる状態になった。高レベル試験では加速に必要な周波数帯域において加速電圧の設計値を越えることができ、この種の加速空洞としては世界最高の加速電圧勾配(60 kV/m)を達成することができた[4, 5]。低レベル試験では偏向磁場に同期する加速周波数の発生とフィードバックによる加速電圧のプログラム制御に成功した。実用に耐える高電圧プローブが問題であったが、新規に製作したプローブの周波数特性がよく、これをフィードバックのループに組み込むことによって5ミリ秒の加速時間における加速電圧の制御が可能になった。

2. 小型パルスシンクロトロンのリング構成

この小型シンクロトロンの特徴は現在までに建設された医用陽子シンクロトロンで達成されているサイズをさらに小型化し、価格的にも魅力あるものを目指すことにある[6]。重イオンの核種としては今日悪性腫瘍の治療に威力を発揮している炭素イオンを念頭に置いている。荷電質量比が陽子の1.0に対して炭素イオンは完全電離状態で0.5であるため、陽子シンクロトロンで開発された装置をそのままの形で流用できないまでも、技術的に達成できたパラメータを設計に生かすことにより比較的短期間に従来技術による重イオンシンクロトロンを大幅に小型化できる[7]。

一昨年度このプロジェクトにおいて当初検討していたリングをより小型化する方向でラティスを見直し、磁場実測値に基づくシミュレーションからもっと簡単な図1のDOBラテ

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

イスでもチューンの微調整が可能であることが分かった[3, 7]。

小型化した偏向電磁石の磁場には鉄心の飽和による不整磁場成分、主として四極磁場成分と六極磁場成分が現れる。偏向電磁石の磁場測定によれば、これらの磁場成分は励磁の強さに応じて時間とともに図2のように変化する[1, 3]。四極磁場成分はそれほど大きくないので、QDの励磁の強さをプログラムすることで危険な共鳴を避けることができる。図3のチューンは図2の四極磁場成分を考慮して求めたものである。

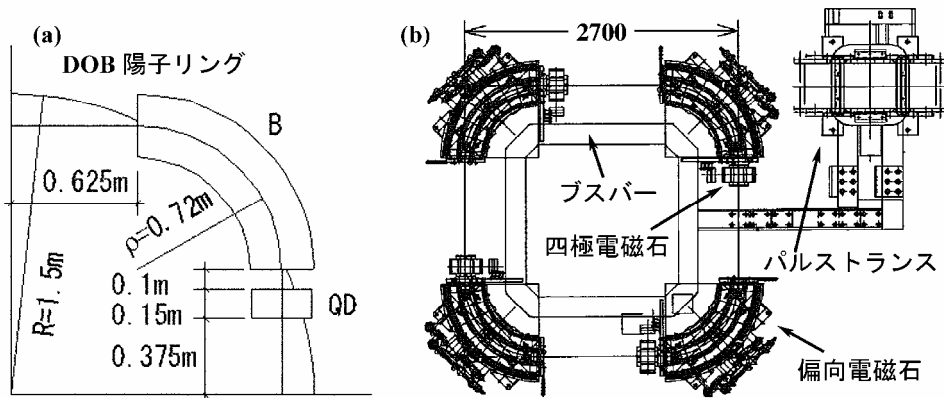


図1 (a) 陽子DOBラティス、(b) リング構成、偏向電磁石と四極電磁石を配置したシンクロトロンリング、パルストランスを介してパルス電流が供給される。

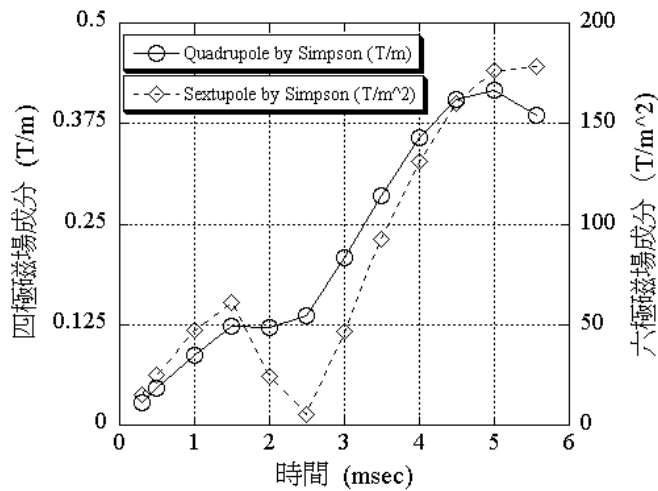


図2 偏向電磁石の磁場に含まれる四極と六極の磁場成分の時間的変化。

3. 補正コイルによる六極磁場成分の補正 (低磁場側補正)

偏向電磁石の磁場に含まれる六極磁場成分の補正方法については平成15年度に検討しているので、平成16年度は補正コイルを励磁するための電源の検討を行い、そのモデル電源の製作を行った。補正コイルは偏向電磁石の上下磁極にそれぞれ1ターンずつ取り付けて直列接続し、それぞれ独立の電源で励磁する。補正コイルを採用する理由は、ビームサイズの大きな低エネルギー領域ではビーム安定性の上から発生場所(偏向電磁石の中)においてできる限り補正しなければならないためである[3]。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

偏向電磁石の磁束変化により補正コイルに誘導電圧が発生する。偏向電磁石の励磁電流波形（擬似正弦波半波）によって正負の誘導電圧が現れるので、適切な補正コイル電流を流すためには誘導電圧を打ち消しながら通電できる回路構成にしなければならない。動的磁場解析によって求めた補正コイルの励磁による六極磁場の強さを図4に示す[1]。ビームエネルギー2 MeVに対応する入射磁場において $|\Delta p/p| < 1\%$ の運動量幅を確保するためには300～400 A程度の補正コイル電流が必要である。

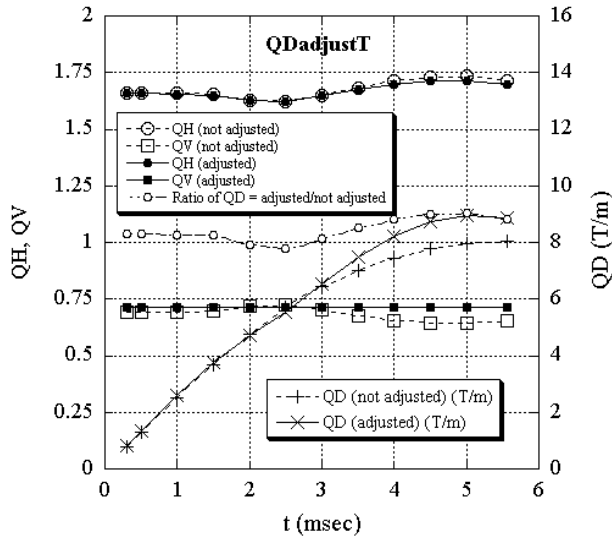


図3 DOB ラティス（図1）におけるチューンの微調整、QV = 一定になるように QD の励磁電流を微調整した場合の例。

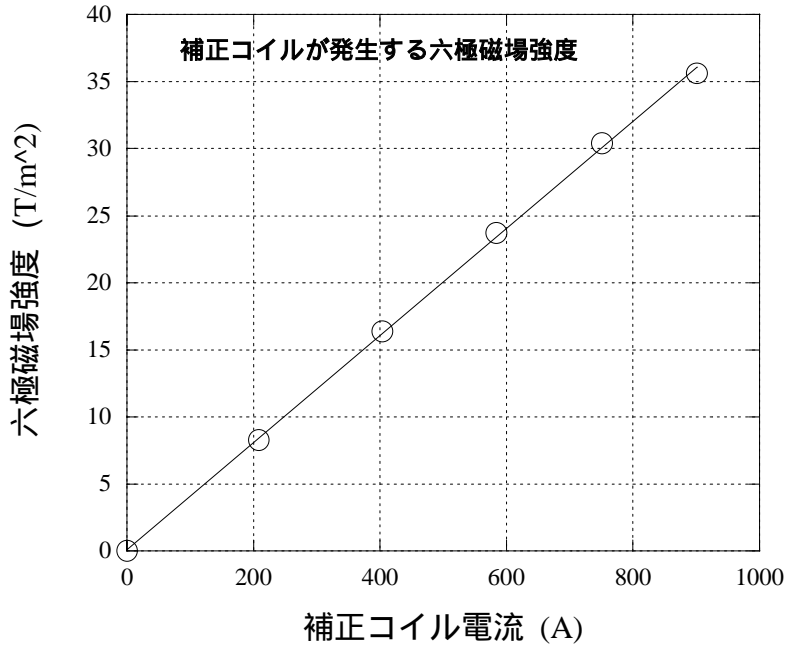


図4 補正コイルの電流と六極磁場の強さの関係。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

補正コイル1セットあたりの概略パラメータは自己インダクタンスが $12 \mu\text{H}$ 、抵抗が 4 m である。誘導電流を下げるための 40 m の外部抵抗を直列に接続した回路構成において動的磁場解析を行った。偏向電磁石に取り付けられた補正コイルの寸法を図5に示す。補正コイルに流れる誘導電流と補正コイルが受ける磁束変化から求めた逆算誘導電流と誘導電圧を図6に示す。逆算誘導電流は次式による。

$$I_{calc} = \frac{1}{R} \left| \frac{d\Phi_{corr.coil}}{dt} \right|$$

ここで、 $R =$ 補正コイル自己抵抗 + 外部抵抗である。磁束変化は磁場解析で得られた値を利用した。誘導電圧は補正コイル1台あたり約 210 V である。誘導電流をさらに下げるために外部インダクタンスを直列に接続することも可能で、補正コイル1台あたり $80 \mu\text{H}$ の外部インダクタンスと 80 m の外部抵抗を接続した場合の誘導電流と誘導電圧を図7に示す。誘導電流は緩和されるが誘導電圧が若干増加する。また、時定数が大きくなるため補正六極磁場の立ち上がりが遅れる。

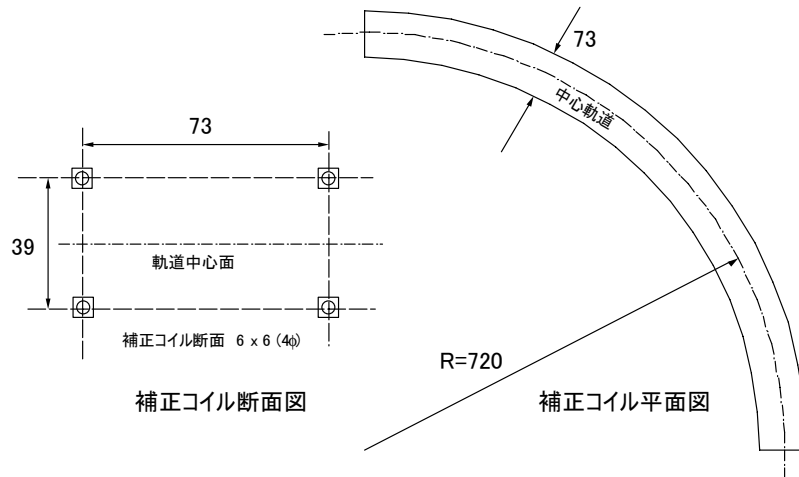


図5 補正コイルの製作寸法。

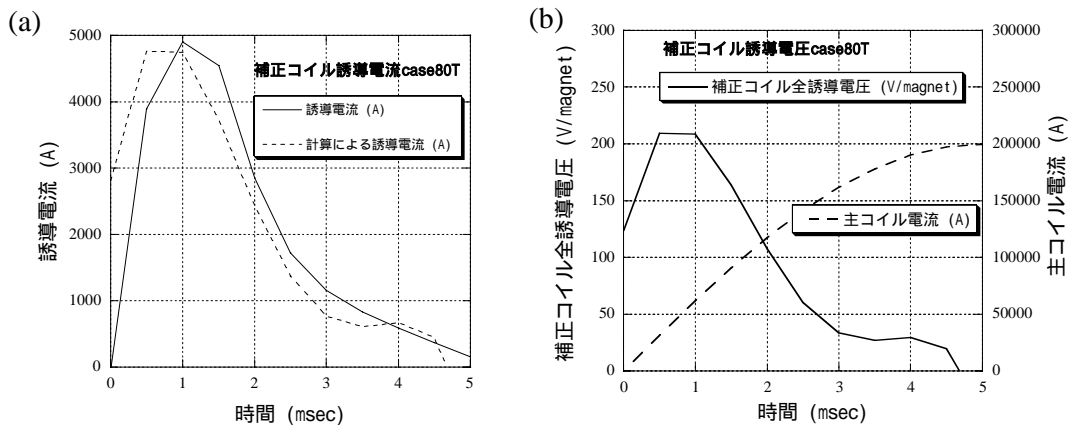


図6 抵抗負荷がある場合の(a) 逆算誘導電流(点線)、
(b) 補正コイル1セットあたりの誘導電圧。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

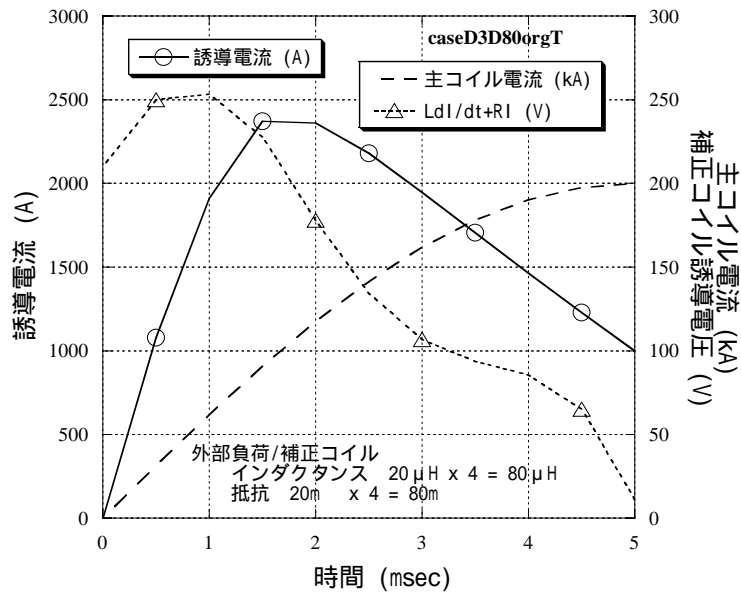


図7 補正コイルに外部インダクタンス（80 μ H）と外部抵抗（80m Ω ）を直列に接続した場合の誘導電流と誘導電圧。

図2に示した偏向電磁石低磁場側の六極成分を補正するために必要な補正コイルの電流を図8に示す。鉄心が飽和しない範囲内では六極磁場強度は図4のように補正コイルの電流に比例して増加する。しかし、飽和が強くなればこの比例関係は成立しなくなり、補正コイルの寄与は飽和とともに減少する。この限界は図8の1.5~2.0 msecあたりである。2.5 msec以上では鉄心の飽和がどんどん強くなるため補正コイルの寄与は無くなる。そのため、加速の早い段階から補正六極電磁石の通電を開始する必要がある。

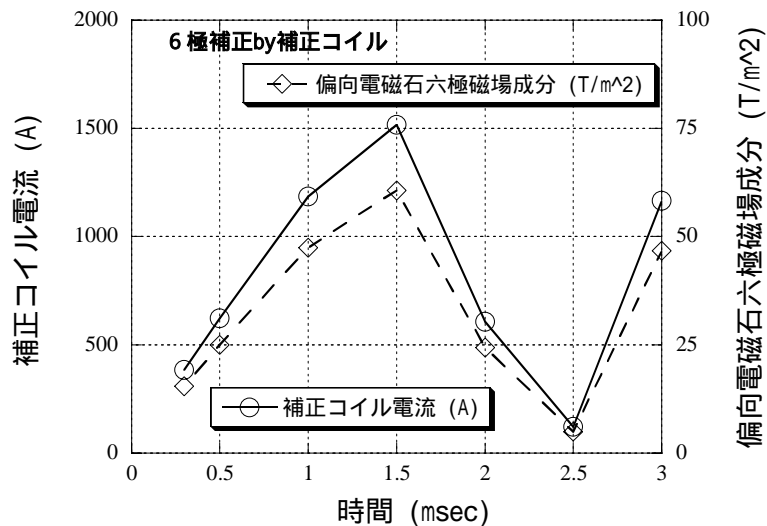


図8 偏向電磁石の六極磁場成分の補正に必要な補正コイル電流。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

4. 入射用フラット磁場発生用補助電源

小型リングでは利用できるスペースには限りがあるため、狭い直線部を利用して必要なビーム強度まで入射する方法として負水素イオンの荷電変換による多重入射が最適である。図 9 に示すように偏向電磁石のパルス励磁ではリング 1 回転ごとのビームの運動量変化が大きく、入射磁場において、(1) 運動量 0.06 GeV/c、(2) 回転周期 494 nsec、(3) 運動量変化率 202 GeV/c/sec から、1 回転当たりの運動量変化は

$$202 \times 10^9 \times 494 \times 10^{-9} = 10^5 \text{ eV/c}$$

従って、1 回転あたりの運動量変化は

$$10^5 / 0.06 \times 10^9 = 0.17 \%$$

運動量アパーチャを 1% とすれば、理論的には最大

$$1 / 0.17 = \text{約 } 5 \text{ ターン}$$

程度の入射が可能である。しかし、偏向磁場と運動量の相違による軌道の拡がりのためビーム損失が起こり、実際にはよくても数ターン以下である。入射器として市販の RFQ (四重極ライナック、エネルギー 2 MeV、負水素イオンビーム電流 10mA、425 MHz、1.6m 長) を想定すれば、10~20 nA の平均治療ビームを仮定した場合、得られるビーム電流の強さから 10 ターン程度の多重入射が必要である。

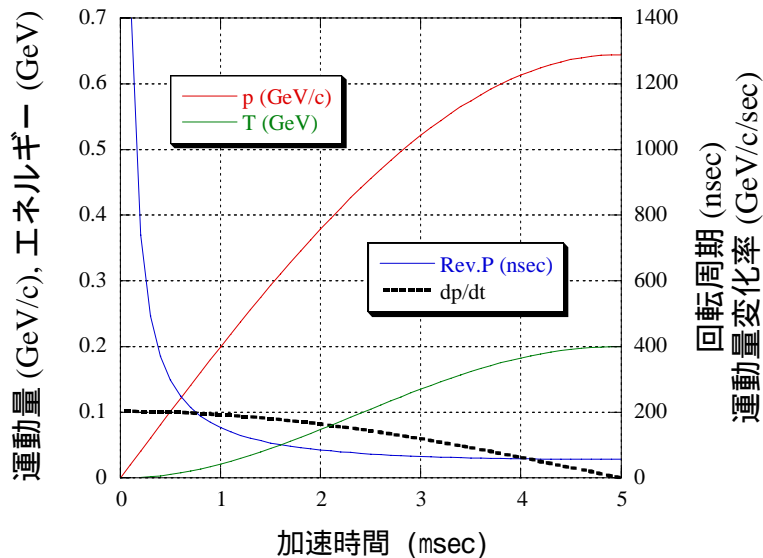


図 9 加速による運動量の変化。

以上のような考察から 2 MeV の入射エネルギーにおいて 10 μsec 程度のフラットな入射磁場を設けることにした。この短い時間幅の間の磁場変化を 10⁻⁴ 以下に抑えるため、100~200 Hz 程度の周波数のあまり高くない ~1/4 正弦波を大電流パルスの立ち上がり部分に重畳させることにより図 10 の電流パターンを形成する[8]。このような電流パターンを形成するために、平成 13 年度に製作した偏向電磁石用パルス電源に図 11 の補助電源を増設した[9]。補助電源を立ち上げた後にある時間遅れを持たせてパルス電源を立ち上げるこ

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

とで、電流したがって磁場が入射から加速へスムーズに接続される。回路シミュレーションによれば入射から加速に移るときの過渡電流は図 1 2 のようにわずかの擾乱が現れるだけである。増設した入射用補助電源を図 1 3 に示す[10]。

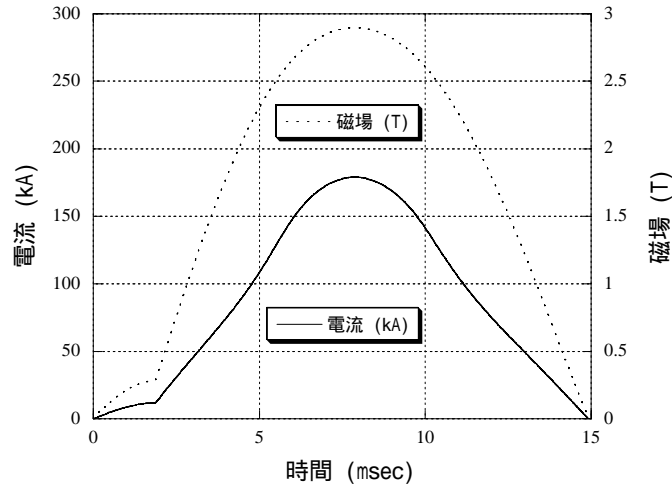


図 1 0 入射用フラット磁場のある偏向電磁石電流パターン。

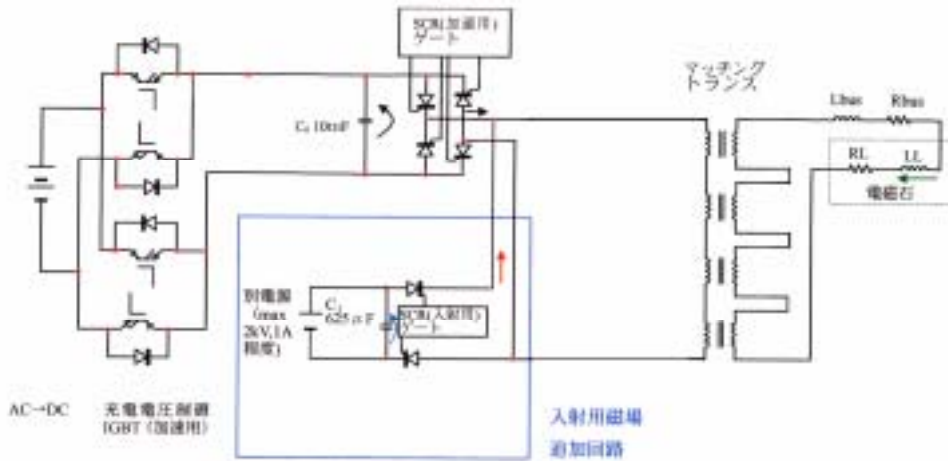


図 1 1 偏向電磁石パルス電源と入射用補助電源の接続。

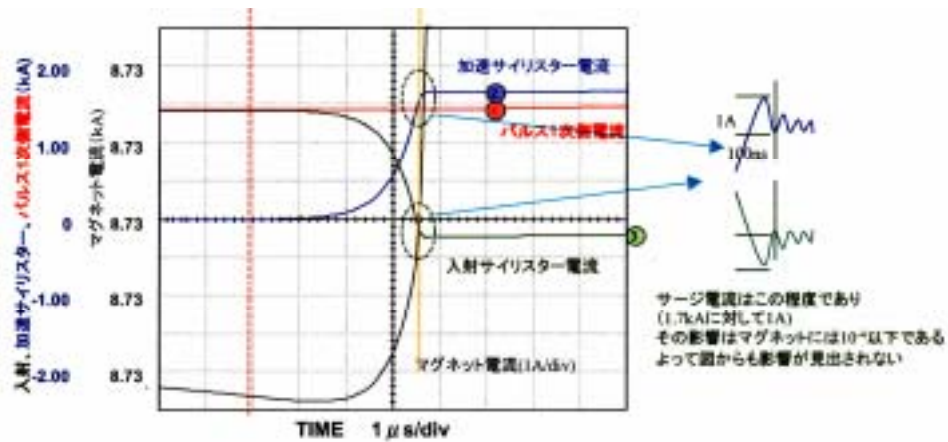


図 1 2 入射から加速に移るときの過渡電流。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング



図 1 3 入射用補助電源。

5 . 四極電磁石電源の電流制御

前節の偏向電磁石磁場に入射用フラット磁場を追加したことにより入射から加速に移るところで四極電磁石電流の制御が不安定になり、偏向磁場への四極磁場追従性が失われる。 $\sim 0.1\%$ 以内の追従性を確保するために四極電磁石電流の高精度制御が要求されることになった。大電流のスイッチング素子として使用する IGBT の制御周波数は最高 20 kHz であるので、IGBT パワーモジュール (IPM) を 10 並列に増やし、 $5 \mu\text{sec}$ ずつシフトさせて 2 回路ずつ同じパルス幅制御することによって実質 100 kHz のスイッチング周波数で電流を制御することにした。100 kHz と 20 kHz のスイッチング制御に対する過渡電流の大きさの比較を図 1 4 に示す。理論上は 200 kHz の制御まで可能であるが、回路シミュレーションから 100 kHz で $\pm 0.15\%$ の追従性を達成できることが確認できた[11]。

偏向電磁石への追従性は、通電サイクル毎に測定した偏向電磁石電流を四極電磁石電流パターンに変換することによって保証される。この四極電磁石電流パターンに四極磁場成分補正データやチューン微調整データを重畳させたものが実際の電流パターンである。

高精度電流制御のための回路構成を図 1 5 に、完成した四極電磁石電源を図 1 6 に示す。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

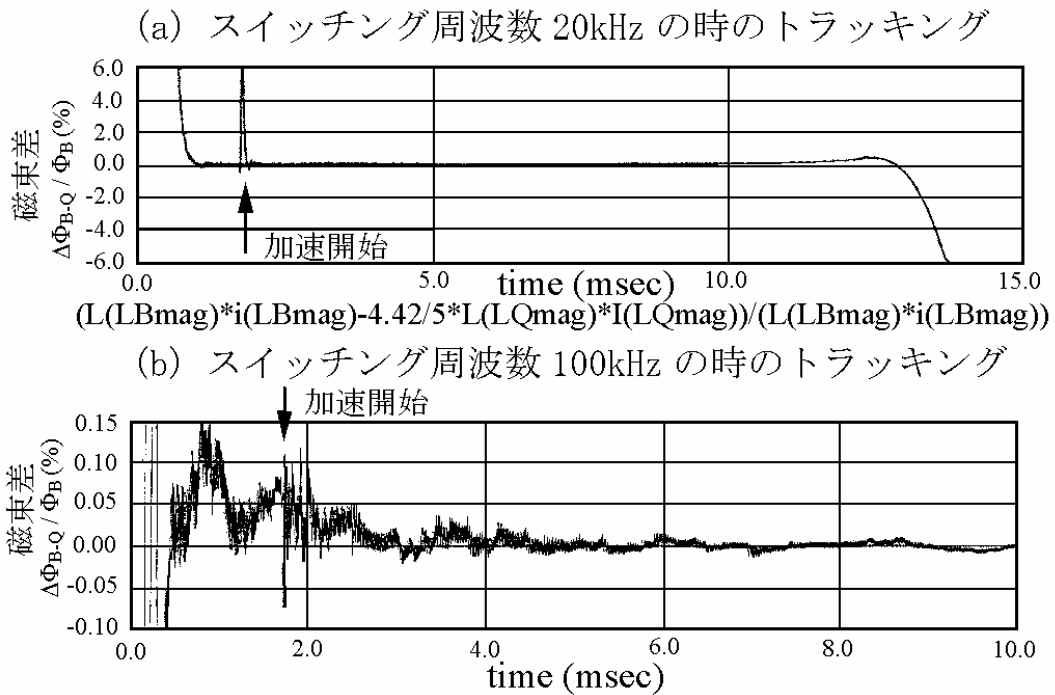


図 1 4 回路シミュレーターによる四極電磁石電流の偏向電磁石電流への追従性能。Switching周波数は(a) 20kHz、(b) 100kHz のとき、縦軸は偏向電磁石の磁束に対する比を表し、縦軸の値の 1.50m は 0.15% に相当する。

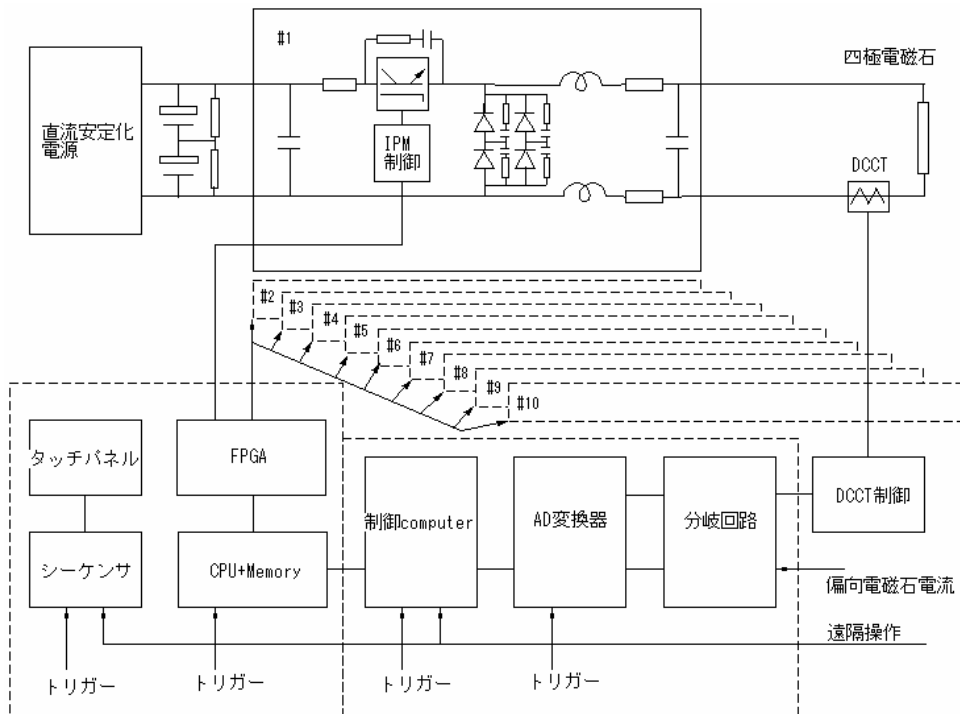


図 1 5 四極電磁石電源の回路構成。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング



図 1 6 完成した四極電磁石電源（手前から充電 / 制御盤、電流パターン発生盤、電流制御スイッチ盤）。

6 . 偏向電磁石の磁場測定

平成 1 3 年度に製作した偏向電磁石 1 号機のコイルにはパルス励磁による渦電流の影響を避けるためストランドケーブルを使用した。しかし、その後の詳細な動的磁場解析から磁場への影響はストランドケーブルでもホローコンダクターでもあまり差のないことが分かり、コイルの作りやすさ、熱伝導の良さなどから 1 号機も含めてホローコンダクターに変更した[1, 2]。平成 1 3 年度に製作したストランドケーブルのコイルによる偏向電磁石の磁場分布と、今回のホローコンダクターの偏向電磁石の磁場測定との比較を図 1 7 に示す。鉄心の機械的寸法は両者で同じである。しかし、両者とも同じ種類の磁性鋼板を採用したが、鋼板に製造時期（またはロット）の相違により、ストランドケーブルによる 1 号機の磁気特性と昨年度製作したときの鋼板の磁気特性は異なる。このことを考慮して、1 号機も同じロットの鋼板の鉄心に置き換えた。1 号機磁場測定時の鉄心の磁気特性は異なるものの磁場分布の傾向は似かよっている。磁場計算結果と一致してホローコンダクターの偏向電磁石の方が全体として周辺の磁場が増加している。渦電流と表皮効果によりホローコンダクター内面（中心軌道側の面）に電流が集中する結果、電流が直接寄与する磁場が増加したためと思われる。

磁場測定は本事業で製作したパルス電源を用いて行い、そのときの様子を図 1 8 に示す。半径方向に 5 mm ピッチで並べた 1 5 個のサーチコイル（この図では偏向電磁石の中に押し込まれている）からの出力は各々 1 6 ビットのデジタル信号に変換され、データロガーに記録され、パーソナルコンピュータで解析される。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

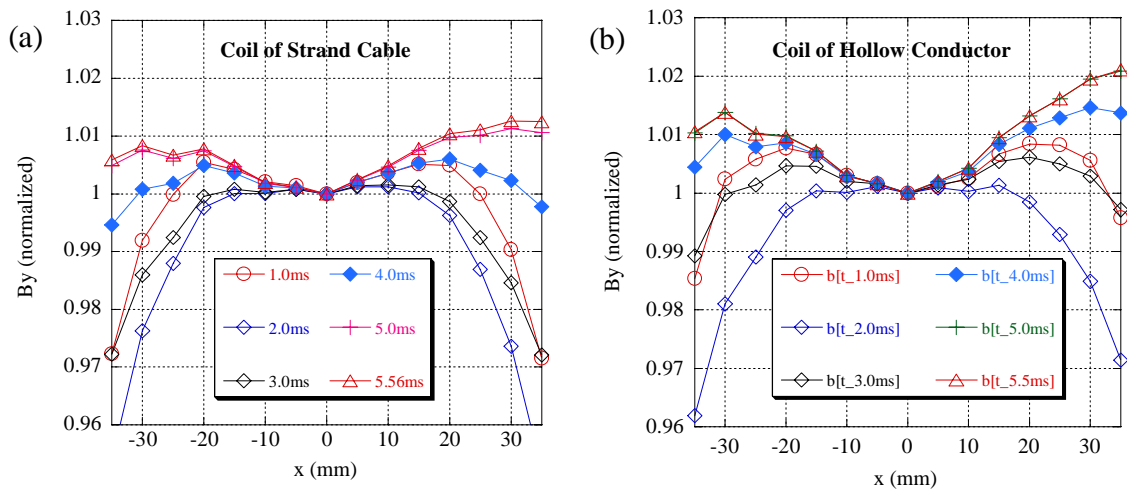


図 17 偏向電磁石中心における磁場分布の比較、(a) スtrandケーブルで製作した偏向電磁石 1号機、(b) ホローコンダクターで製作した偏向電磁石。

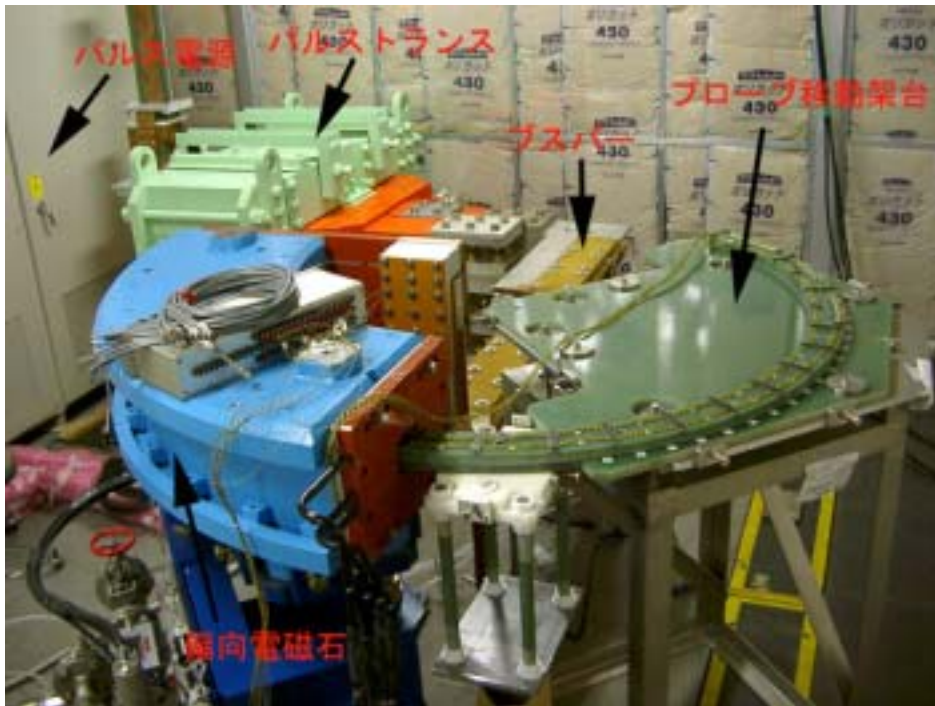


図 18 偏向電磁石磁場測定の設定アップ。この写真ではサーチコイルからの信号線は接続前の状態である。

7. 高周波加速システムの高・低レベル試験

昨年度に引き続き高レベル試験を行い、40 cm 長の加速空洞で加速周波数の全領域 2 ~ 18 MHz にわたって設計値を上回る加速電圧の発生に成功した[4, 5, 12]。前段増幅器と加速空洞の周波数特性に優れた周波数 5 ~ 6 MHz における平均の加速電圧勾配は 60 kV/m という世界最高レベルの性能を発揮した[4, 13]。この周波数領域の 8.5 MHz と 13.35 MHz に寄生発振が認められた。加速空洞は 2 つの加速ギャップを有し、2 本の増幅用四極真空管

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

4CX35,000C をプッシュプル接続してそれぞれのギャップに電力を供給している。2つのギャップの加速電圧測定から、寄生振動の周波数に若干の相違（0.1 MHz 程度の差）があり、真空管の動作に非対称性が認められた。この寄生振動は2本の真空管のアノードに接続されているチョークコイルの浮遊容量に起因するものと考えられ、回路シミュレーター ICAP/4 による計算からも 160 μH のチョークコイルに 0.89 pF の浮遊容量があれば 13.35 MHz のところで 600 kV 以上の高圧の発生が予想された。高レベル試験の最中に筐体との間で放電が起ったので、これはシミュレーション結果に符合している。チョークコイルのインダクタンスを下げることで寄生振動を避けることができるので、80 μH 、60 μH および 40 μH の3つの値で高レベル試験を行ったところ 40 μH で寄生振動が完全に除去できることが分かった。80 μH では 9 MHz 付近に寄生振動が残り、60 μH では 15 MHz 付近に寄生振動が現れた。この様子を図 19 に示す。この結果からアノードのチョークコイルのインダクタンスを寄生振動のない 40 μH に設定し、各周波数において加速ギャップの電圧最大値を測定した結果を 160 μH の場合の結果と比較して図 20 に示す。

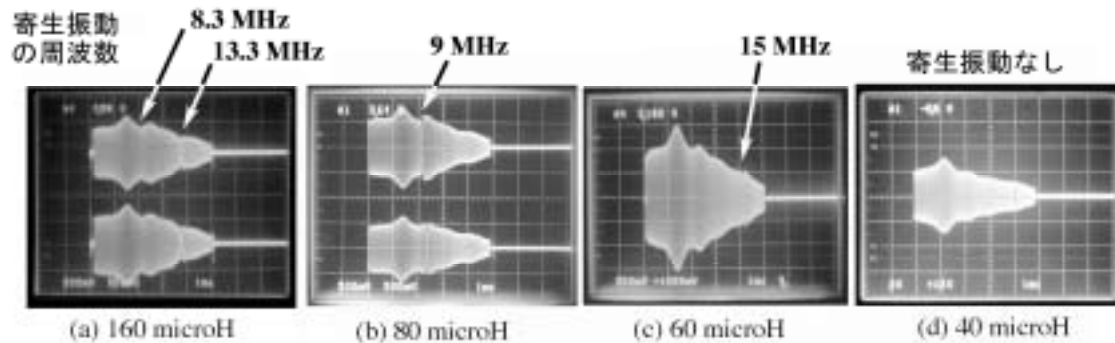


図 19 アノードチョークコイルのインダクタンスの違いによる寄生振動。チョークコイルのインダクタンスは(a) 160 μH , (b) 80 μH , (c) 60 μH , (d) 40 μH 。(a) と(b)は2つのギャップ電圧を別々に測定し、(c)と(d)は差分で測定した。横軸の目盛は 1ms/div で、2 MeV \rightarrow 200 MeV まで 5 ミリ秒の加速に相当する。

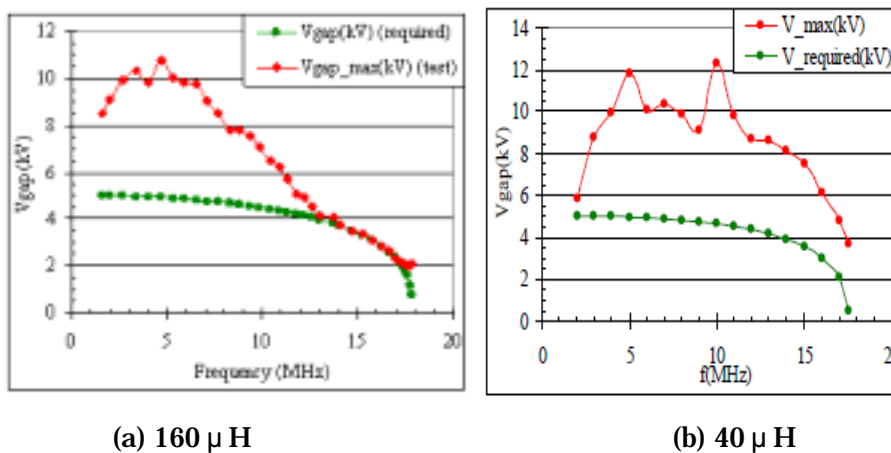


図 20 アノードチョークコイルのインダクタンスが(a) 160 μH と (b) 40 μH のときの最大加速ギャップ電圧。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

チョークコイルのインダクタンスを下げることによって加速空洞へ電力が入りやすくなり、入射周波数付近を除き設計値の約2倍の加速電圧が得られた。入射周波数付近では設計値以上ではあるが、最大加速電圧は減少する結果になった。これは加速空洞を含めた負荷インピーダンスの低下によるものである。

加速電圧波形は偏向電磁石磁場波形に同期させる必要があるため、5ミリ秒の加速区間でプログラムされた電圧波形を発生しなければならない。加速空洞のギャップに現れる電圧は周波数による加速空洞のインピーダンス変化の影響や前段増幅器のゲインなどの影響を受けるため、プログラム電圧と比較しながらフィードバック制御する必要がある。広い周波数帯域における信頼できる高電圧プローブが必要であるが、一般的に使用されている高周波プローブでも周波数特性に問題があり使用できない。そこで、静電容量を正確に決めることのできる図2-1の円筒型高電圧プローブ2個を独自に設計・製作した。その試験結果を図2-2に示す。静電容量が機械的寸法で決まるので非常に良好な結果が得られ、このプローブを加速電圧フィードバックに使用することとし、それぞれの加速ギャップに1個ずつ図2-3に示す様に取り付けた。図2-2から製作した高周波高電圧プローブの電圧分割比は凡そ2500:1である。最終的には分割比の周波数依存性を考慮して加速電圧のフィードバックが行われる。



図2-1 試作した円筒型高電圧プローブ。左端は組み立てた状態。

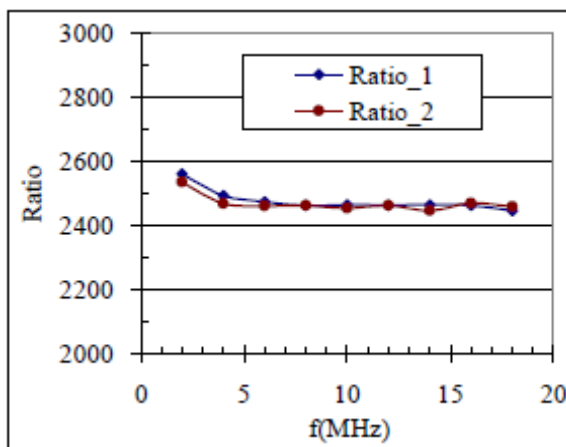


図2-2 ベクトル電圧計による2個の円筒型高電圧プローブの較正結果。



図2-3 加速空洞に取り付けた円筒型高周波高電圧プローブ。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

図 2 1、図 2 3 に示した高周波高電圧プローブを使用した加速電圧フィードバック制御の試験を行った。そのときの各機器のセットアップを図 2 4 に示す。このときの試験結果を図 2 5 に示す。この試験では関数発生器による偏向電磁石電流に同期した加速周波数の発生を行った。2 MeV 陽子ビームの多重回転入射に対するフラットポーチ付きの偏向電磁石電流を想定し、10 μ s 程度の入射時間を考慮して DDS による加速周波数の発生と加速電圧がプログラム通りに制御されていることが確認できた[14]。

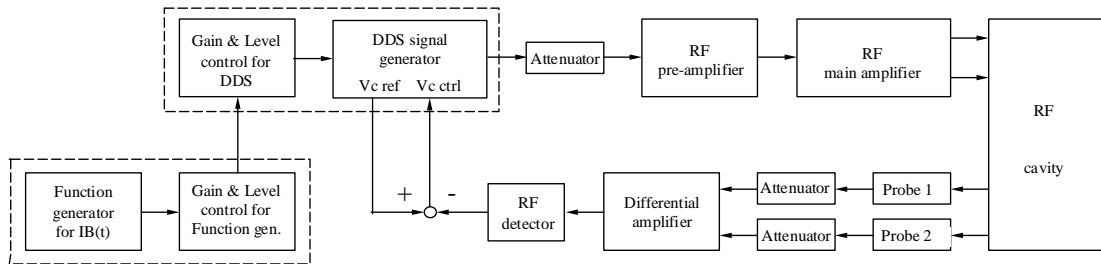


図 2 4 高周波加速電圧フィードバック試験回路ブロック図。試験時の減衰器の値は DDS 出力に対して-13 dB、高電圧プローブに対して-14 dB である。

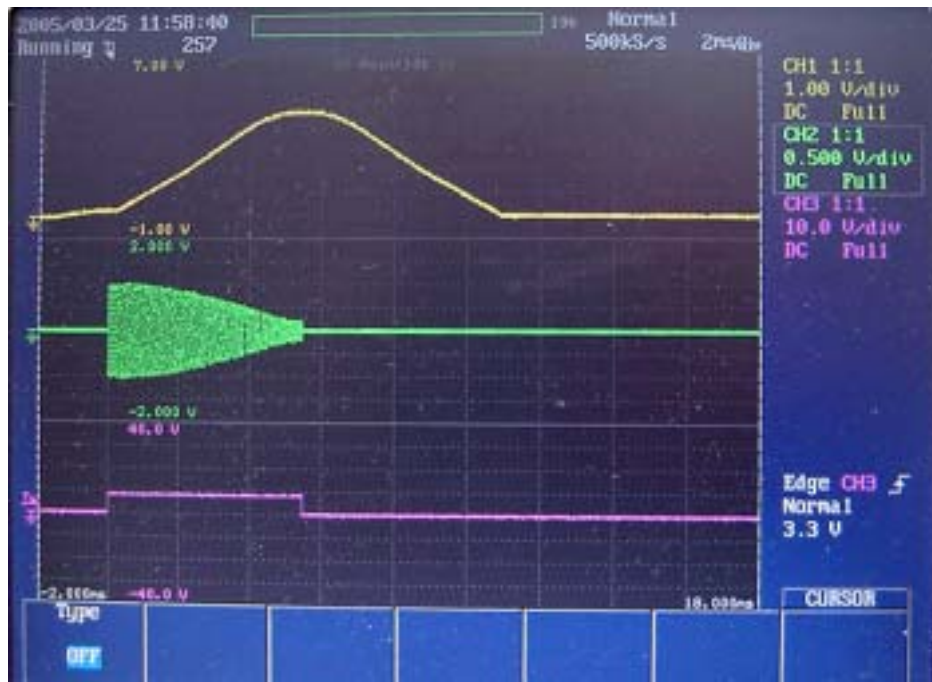


図 2 5 加速電圧フィードバック試験結果、オシロスコープ波形は上から順に入射ポーチ付き偏向電磁石電流波形、加速電圧波形（2 MHz から 18 MHz までスイープされている）、高周波増幅器運転ゲート信号。横軸目盛は 2 ms/div。

高周波電圧の位相フィードバックの試験を行うため、関数発生器で擬似ビーム信号を作り、加速電圧波形と比較することによって位相制御試験を実施した。ビーム信号としては不完全であるが、位相制御の方法を確認する手段として図 2 6 に示す回路を構成し、周波

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

数を固定した状態（偏向電磁石電流一定の状態）で、位相の参照値を直流電圧で与えて試験した。実際には位相参照値はプログラムされた波形で与えることになる。この回路で 2, 5, 10, 15, 20 MHz の各周波数において試験を行い、図 2 7 に示すように ± 300 deg の範囲において直線的な関係が得られ、広い範囲で位相フィードバックが有効であることが確認できた。

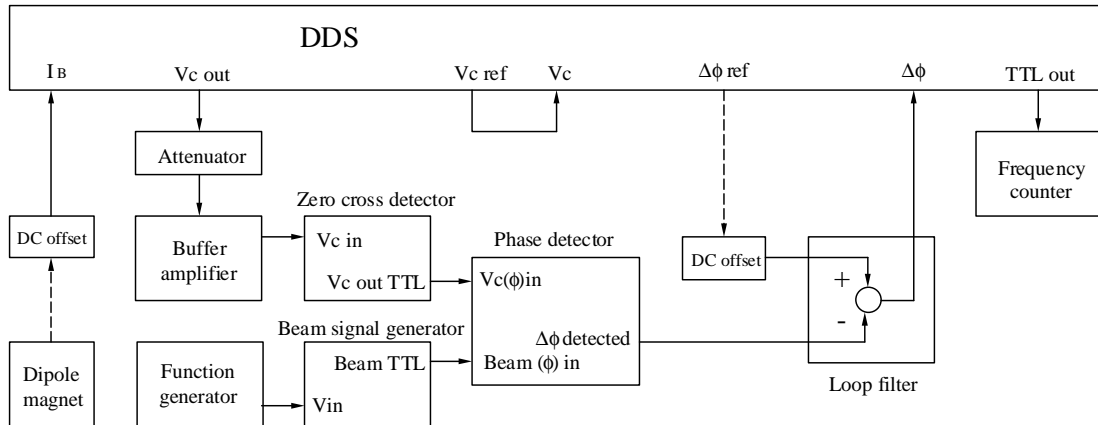


図 2 6 位相フィードバック試験のブロック図。

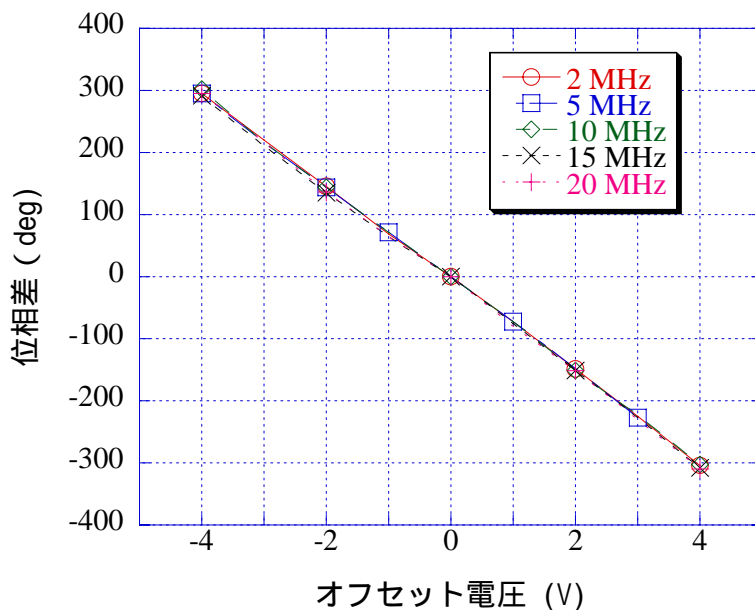


図 2 7 高周波位相フィードバック試験結果。ここでは位相誤差を直流オフセット電圧で与え、電圧フィードバックはオフの状態である。

8 . 遠隔制御システム

加速器を遠隔制御するため汎用的なシステムとして市販されている図 2 8 のようなイーサネット情報ネットワークを採用する方向で検討し、電源装置などに内蔵されるシーケンサーはこのネットワークに接続できる回路構成にしている。この図は将来的なネットワークの全体像であるため、上位コンピュータはまだ整っていない。現段階では図 2 8 の下に

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

示したインタフェースモジュールを接続すればグループごとに遠隔制御可能である。高周波加速システムは USB 接続で直接 DDS コントローラに接続され、すでに低レベル制御の試験に使用されている。加速器構成要素をグループ単位にまとめてイーサネットインタフェースモジュールを介してネットワークに接続すれば遠隔制御が可能になる。

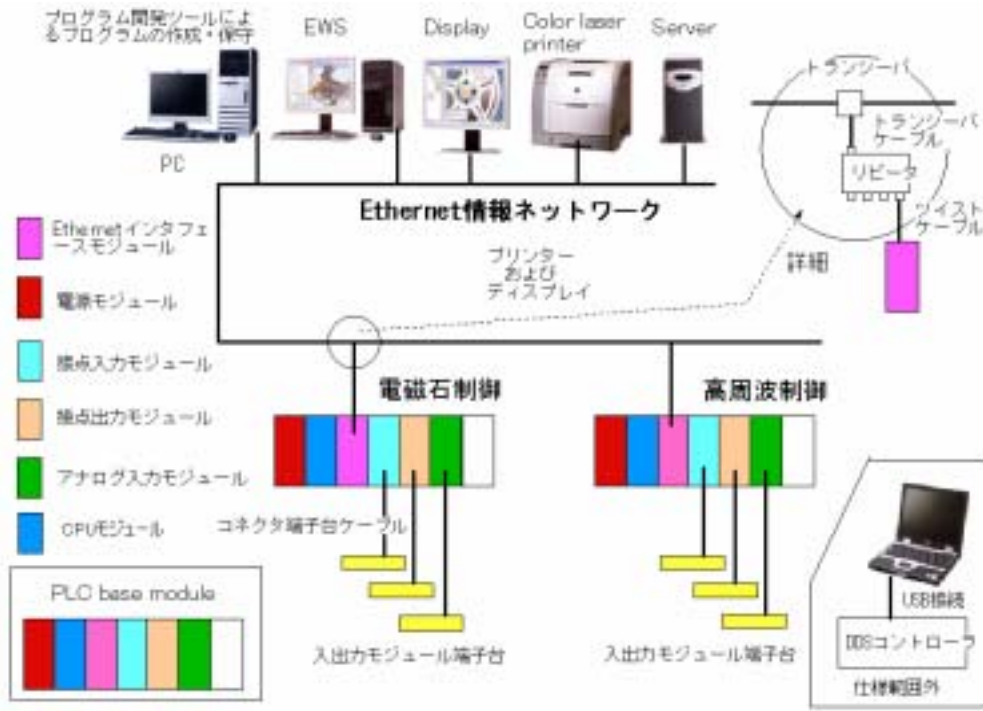


図 2 8 イーサネット情報ネットワークによる全体制御。

9 . 総括

偏向電磁石と四極電磁石の磁場性能評価と高周波加速システムの高・低レベル動作確認を行い、小型パルスシンクロトロン実現へ向けた第一歩を踏み出すことができたので、四極電磁石電源電流制御の高精度化と次のステップとしてビーム入出射の検討および偏向磁場に含まれる四極・六極磁場成分の補正のビームシミュレーションによる検討を行った。

平成 1 6 年度に達成できた主な内容は、

- (1) 多重入射のためのフラットな入射磁場を形成する入射用補助電源の製作
- (2) 四極磁場の追従性を向上するための四極電磁石電源制御の高精度化
- (3) 高周波加速のフィードバック制御のための電圧モニターと制御回路の追加
- (4) イーサネットによる遠隔制御のための信号入出力インタフェースの設定
- (5) 補正コイルのモデル電源製作
- (6) 高周波加速システムの高・低レベルの連携試験

などである。

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

開発スタッフ

責任者： 遠藤有聲（高エネルギー加速器研究機構）

担当者： 江川一美（高エネルギー加速器研究機構）

方 志高（放医研博士号取得若手研究員）

山中信司（放医研博士号取得若手研究員）

参考文献

- [1] K. Endo, K. Egawa, Z. Fang and S. Yamanaka, Magnet and RF System of Small Pulse Synchrotron for Radiotherapy, Proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004), Switzerland, 2661-2663, Jul. 2004.
- [2] K. Endo, K. Egawa, Z. Fang, M. Mizobata, J. Matsui, K. Sako, Y. Kijima, A. Nishikawa, F. Ohtani, S. Tokura and A. Yamamoto, High Field Pulse Dipole and Quadrupole Magnets for Compact Medical Pulse Synchrotron, Proc. APAC2004, Gyeongju, to be published.
- [3] K. Endo, K. Egawa, Z. Fang and S. Yamanaka, Compact Synchrotron for Radiotherapy Based on Pulse Technology, Proceedings of the 6th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application (ARTA 2004), Japan, 7-10, Jun. 2004.
- [4] Z. Fang, K. Endo, K. Egawa, S. Yamanaka, T. Hirashima, T. Fusato and Y. Cho, RF System for Compact Medical Proton Synchrotron, Proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004), Switzerland, 1039-1041, Jul. 2004.
- [5] Z. Fang, K. Endo, K. Egawa, S. Yamanaka, T. Hirashima, T. Fusato and Y. Cho, High Power Test of RF System for Compact Proton Synchrotron, Proceedings of the 6th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application (ARTA 2004), Japan, 11-14, Jun. 2004.
- [6] K. Endo, K. Mishima, S. Fukumoto, S. Ninomiya and G. Silvestrov, Table-Top Proton Synchrotron Ring for Medical Applications, Proc. EPAC2000, Wien, pp.2515-2517.
- [7] 遠藤有聲、シンクロトロン、放射線医学総合研究所医科学シンポジウム、2004、to be published.
- [8] S. Yamanaka, Z. Fang, K. Egawa and K. Endo, Excitation Current Waveform Ornamentation of a Synchrotron Pulse Power Supply, Proceedings of the 1st Japan Particle Accelerator Conference (JPAC 2004) and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 456-458, Aug. 2004.
- [9] K. Endo, K. Egawa, Z. Fang, M. Mizobata, A. Teramoto, G. Silvestrov, Development of High Field Dipole and High Current Pulse Power Supply for

事業課題	小型陽子・重イオンシンクロトロン製作
開発項目	小型シンクロトロン主加速リング

Compact Proton Synchrotron, Proc. PAC'03, Portland, pp.1071-3.

- [10] S. Yamanaka, Z. Fang, K. Egawa and K. Endo, Power Supply for Magnet of Compact Proton and/or Heavy Ion Synchrotron for Radiotherapy, Proc. PAC'05, to be published.
- [11] K. Endo, K. Egawa, Z. Fang and S. Yamanaka, Hardware Tracking Related to Compact Medical Pulse Synchrotron, Proc. PAC'05, to be published.
- [12] Z. Fang, K. Endo, K. Egawa and T. Hirashima, Test Results of RF Cavity and Power Amplifier for Compact Medical Proton Synchrotron, Proc. APAC2004, Gyeongju, to be published.
- [13] Z. Fang, K. Endo, K. Egawa, S. Yamanaka, T. Hirashima, T. Fusato and Y. Cho, R&D of Wideband RF System for Compact Medical Proton Synchrotron, Proceedings of the 1st Japan Particle Accelerator Conference (JPAC 2004) and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 190-192, Aug. 2004.
- [14] Z. Fang, K. Endo, K. Egawa, S. Yamanaka, T. Hirashima, T. Fusato and Y. Cho, Present Status of RF System for Medical Proton Synchrotron, Proc. PAC'05, to be published.