

原研 AVF サイクロトロンにおけるフラットトップ加速システムの開発

倉島 俊, 福田光宏, 宮脇信正, 奥村 進, 奈良孝幸
上松 敬, 石堀郁夫, 吉田健一, 中村義輝, 荒川和夫

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用センター

〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

概要

原研 AVF サイクロトロンでは、高エネルギーマイクロビーム形成に必要なビームエネルギー幅の縮小化を目指して第 5 高調波を用いたフラットトップ加速システムの開発を行っている。計算コード“MAFIA”を用いた電磁場解析により、加速周波数全域 (11 ~ 22 MHz) において、基本波の 5 倍の周波数を励振できる共振器の開発を行った。260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ イオンビームの加速周波数である 17.475 MHz の 5 倍波 87.375 MHz においてハイパワー試験を行い、安定した加速電圧を得ることができた。260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ イオンビームの加速試験では、フラットトップ加速の必要条件であるシングルターン引出に極めて近い条件で加速を行うことに成功した。

1 はじめに

原研 AVF サイクロトロンは、材料科学・バイオ技術専用のサイクロトロンとして世界で初めて建設され、イオン種・エネルギーを短時間で切り替えるカクテルビーム加速技術、大面積均一照射技術、パルスビーム生成技術、イオン源技術などを開発し、イオンビーム利用研究を先導する最先端の加速器技術を生み出してきた。世界のサイクロトロンに共通の課題であったビーム電流の時間変動対策にも取り組み、サイクロトロン電磁石の鉄心定温化により極めて安定したビームを提供することに成功した[1]。バイオ技術分野においては、微細孔 (マイクロアパーチャ) を用いたコリメート方式によりビームスポット径約 10 μm の数百 MeV 級重イオンマイクロビーム形成技術と自動照準高速シングルイオンヒット技術[2]が生物細胞への局部照射など生体機能解明研究に応用されている。さらに、ビームスポット径の高分解能化と照準位置の高精度化を図り、最先端のバイオ・材料研究に資するサブミクロンビーム形成を実現するため、サイクロトロン加速器技術の高度化を進めている。従来のサイクロトロンより加速電場及び磁場の安定性とビームのエネルギー分解能を 1 桁以上向上させ、4 連四重極レンズを用いたビーム集束方式によりスポット径 1 μm 以下の数百 MeV 級重イオンサブミクロンビーム形成の実現を目指している[3]。本報告では、サブミクロンビーム形成に必要なサイクロトロン加速器技術開発として第 5 高調波用共振器の開発に関する主な成果について述べる。

2 フラットトップ加速システムの開発

イオンビームをスポット径 1 μm 以下に集束させるためには、四重極レンズで生じる色収差の影響を考慮すると、ビームのエネルギー幅を $\Delta E/E \leq 0.02\%$ にする必要がある。ところが、従来のサイクロトロンでは加速電圧波形

として正弦波を用いるため、加速されるタイミングの違いによってエネルギー利得に差が生じ、引き出されたビームのエネルギー幅は 0.1% 程度である。そこで、基本波にその整数倍の周波数を持った高調波を重ね合わせることでより加速電圧の平坦化 (フラットトップ化) を図る手法を採用し、基本波電圧を発生させる共振器に第 5 高調波を重ねさせるための共振空洞を連結させて、エネルギー幅を縮小化するフラットトップ加速技術を開発した[4]。これまでに開発されたフラットトップ加速システムは、ある特定のイオン種・エネルギーのみを加速の対象とする場合が多かったが、原研 AVF サイクロトロンでは、バイオ・材料研究に必要とされる幅広い加速イオン種・エネルギーに対応するため、周波数可変型第 5 高調波共振空洞の開発を行った。

図 1 にサイクロトロン共振器の概念図を示す。基本波用共振器は同軸ショート板駆動型であり、基本波の共振周波数範囲は、11 ~ 22 MHz である。第 5 高調波用の共振空洞は、基本波用共振器外筒のクライオポンプ取り付けポートを流用して設置された。このポートは、共振器外筒に対し斜め下 45 度の角度で設けられているため、床面との間の空間が限られている。そこで、共振空洞の設計にあたっては、計算コード“MAFIA[5]”を用いた電磁場解析により低消費電力、省スペース化が実現するように形状及び構造に工夫を凝らした。基本波用共振器と第 5 高調波用共振空洞は平板電極 (図中 C5) により静電的にカップリングしている。第 5 高調波用共振空洞も同軸型であり、ショート板を移動することにより高調波の共振周波数を変化させることができるが、限られた空間内ではショート板のみの駆動で 55~110 MHz という幅広い共振周波数範囲をカバー

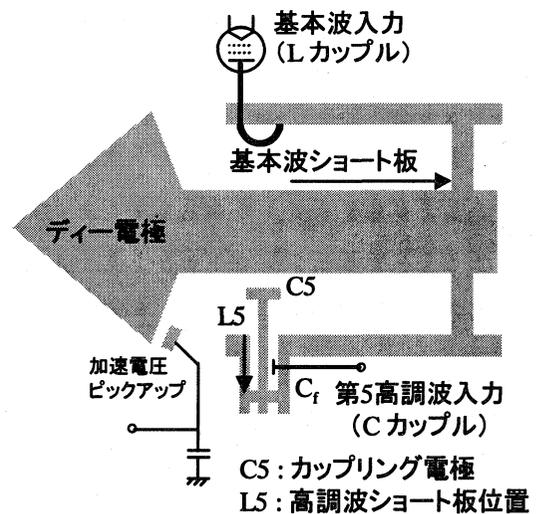


図 1 サイクロトロン共振器の概念図

表 1 フラットトップ加速システムの諸元

共振周波数範囲	55 ~ 110 MHz
カップリング電極 (C5) のサイズ	130 mm × 150 mm
カップリング電極 (C5) のギャップ可変範囲	6 ~ 50 mm
ショート板の駆動範囲	250 mm
同軸部の内筒外径	70 mm
同軸部の外筒内径	300 mm
チューナー補正範囲 $\Delta f/f$	最大 2 %
トランジスタアンプの最大出力	3 kW (50 Ω)
電圧安定度	$\pm 5 \times 10^{-4}$
位相安定度	0.1 deg

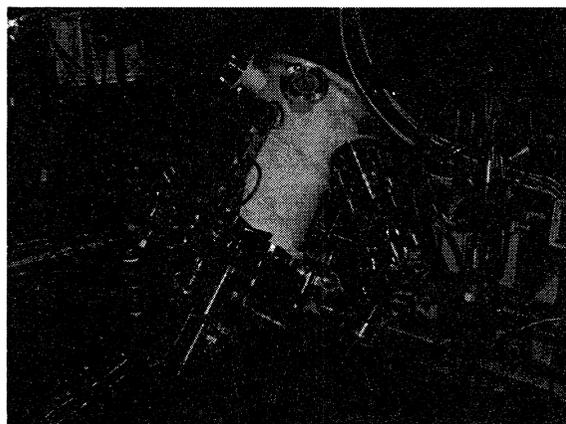


図2 基本波用共振器の外筒に取り付けられた第5高調波用の共振空洞。

一することは難しい。そこで、カップリング電極 C5 と基本波用共振器内筒とのギャップ、つまりカップリング容量を可変型とすることにより 55~110 MHz の幅広い周波数範囲で共振させることに成功した[6]。

消費電力を小さくするためには、第5高調波用共振空洞の同軸部の径を大きくして電流経路の抵抗値を下げる事が望まれる。しかし、第5高調波用共振空洞を伝送線路として取り扱った場合、内筒径を大きくして特性インピーダンスを下げてしまうと、取り付けポート境界での位置角(位相)の進みが遅くなり、結果としてショート板の駆動距離が長くなるものと考えられる。そこで、計算から求まる共振器の Q 値がショート板の駆動距離の許容範囲内で大きくなるような同軸サイズを採用した。表1に、MAFIAによる計算により最終的に決定されたフラットトップ加速システムの諸元を示す。

2002年3月には、サイクロトロン本体への新しい共振空洞の据付工事が完了した。図2に、第5高調波用共振空洞の外観を示す。第5高調波の共振周波数を最低の55MHzとなるようにショート板位置を設定した時のショート板支持具と床面のクリアランスは90mm程度である。図3に、ネットワークアナライザによる静特性試験から求めた高調波用共振器のパラメータの相関を示す。図中、斜線部はショート板が駆動できる領域(L5の長さ)を示しており、

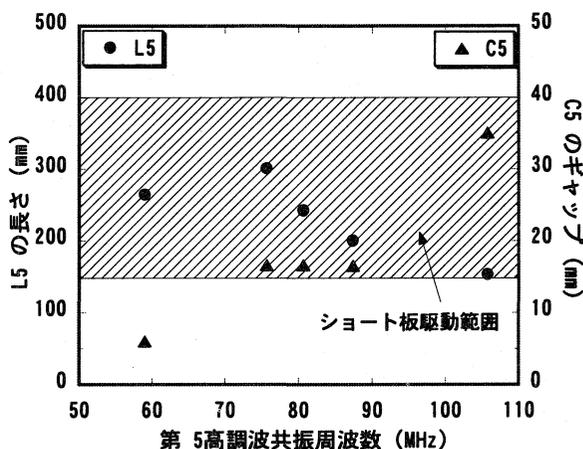


図3 第5高調波用共振空洞のパラメータの相関

L5の原点は共振空洞取り付けポート面に一致する。低い周波数では、ショート板は外側に、カップリング電極は内側に設定されるが、高い周波数ではショート板は内側に、カップリング電極は結合が弱くなるように外側に設定される。ディー電極に効率よく電圧を発生させるためにはカップリング電極の結合を強くすることが望ましいが、高い周波数ではショート板が内側リミットの位置150mmまで移動してもカップリングが強すぎて共振点が上がらないため、電極のギャップを広げてカップリングを弱くする必要がある。

3 ハイパワー試験

静特性試験で得られた励振パラメータを元にハイパワー試験を行った。共振周波数は、バイオ研究ユーザからマイクロビーム形成の要望がある260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ イオンビームの加速周波数である17.475 MHzの5倍波87.375 MHzとした。当初は第5高調波のみで励振を行っていたが、放電が多発し、安定に運転することが困難であった。後日、ディー電極の表面を観察したところ、これまでには確認さ

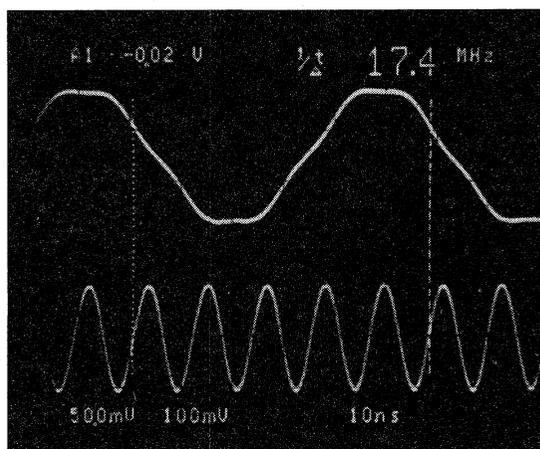


図4 基本波(周波数17.475 MHz, 電圧25kV)に第5高調波(87.375 MHz, 下の波形)を重ね合わせて得られたフラットトップ電圧波形(上の波形)。

れなかった無数の放電痕が確認された。これは、基本波とは全く異なる周波数、電圧 (2~3 kV) で運転したために発生したマルチパクタリングによる放電痕であると思われる。そこで、マルチパクタリングを避けるため、基本波と同時に第5高調波を励振して印加電圧を上げたところ安定して運転することが可能となった。図4に、加速電圧のピックアップ電極で得られたフラットトップ電圧波形を示す。

ディー電極加速ギャップに沿った電圧分布がほとんど一定ならば図4に示すようなフラットトップ電圧波形を用いて加速を行えばよいが、原研 AVF サイクロトロンでは、第5高調波の電圧分布は周波数に依存して大きく変化する。図5に、ベクトル電圧計により測定した第5高調波の電圧分布を示す。低周波数側である 59.2 MHz ではディー電極先端部に対するビーム引出半径 92.3 mm 付近の電圧の落ち込みは約 1 割であるが、高周波数側である 105.2 MHz においては電圧が約 5 割まで落ち込んでしまう。ビームの平衡軌道半径は加速回転数の平方根に比例して増加し、電圧が落ち込む大きな半径での加速回転数が増えるため、第5高調波電圧値を高めめに設定する必要がある。そこで、フラットトップ加速によりビームのエネルギー幅 $\Delta E/E \leq 0.02\%$ を実現するため、得られた電圧分布に基づいた軌道計算により、加速ハーモニクスと加速周波数に応じた最適な第5高調波電圧値の解析を進めている。

の縮小化を行う予定である。

参考文献

- [1] S. Okumura, et al., "Temperature control of a cyclotron magnet for stabilization of the JAERI AVF cyclotron beam", Proc. 16th Int. Conf. on Cyclotron and their Applications, East Lansing, USA, 330 (2001).
- [2] T. kamiya, et al., "Development of an automated single cell irradiation system combined with a high-energy heavy ion microbeam system", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **181**, 27 (2001)
- [3] M. Oikawa, et al., "Design of a focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAERI AVF cyclotron", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **210**, 54 (2003)
- [4] M. Fukuda, et al., "Flat-top acceleration system for the variable-energy multipurpose AVF cyclotron", Rev. Sci. Instrum. **74**, 2293 (2003)
- [5] The MAFIA collaboration, User's Guide MAFIA Version 4, CST GmbH, Lauteschlägerstraße 38, D-64289, Darmstadt, Germany.
- [6] S. Kurashima, et al., "Design of the flat-top resonator for the JAERI AVF cyclotron", Proc. 13th Symp. on Accelerator Science and Technology, Suita, Japan, 232 (2001).

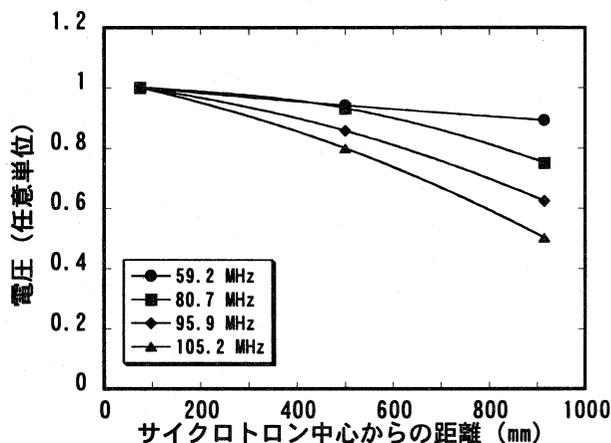


図5 ディー電極の加速ギャップに沿って測定した第5高調波の電圧分布。測定には、ベクトル電圧計を用いた。

4 ビーム加速試験

現在、260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$ イオンビームのフラットトップ加速試験を進めており、ビームのエネルギー幅を縮小化する基本波と第5高調波電圧の比や位相差などの最適化を目指した加速試験を行っている。930型 AVF サイクロトロンにおける基本波のみの加速では、引出直前のターンセパレーションの大きさに比べて半径方向のビームの拡がりが大きく、マルチターン引出が常であったが、フラットトップ加速によって半径方向のビームの拡がり小さくなり、引出のマルチターン数が大幅に減少してシングルターン引出に極めて近い条件を作ることに成功した。今後は、ビーム加速試験を続けると共に、マイクロスリットを用いたビームエネルギー測定技術を開発し、ビームエネルギー幅