

DEVELOPMENT OF FLAT-TOP ACCELERATED BEAMS AT THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

Mitsuhiro Fukuda^{1,A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)}, Takane Saito^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)},
Satoshi Kurashima^{B)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

^{B)} Department of Advanced Radiation Technology, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

Development of the flat-top accelerated beam is in progress at the RCNP cyclotron facility. New dee-voltage pickup electrodes of the K140 AVF cyclotron were developed to substantially improve dee-voltage control and monitoring for flat-top acceleration. Four individual pickup electrodes were mounted in an oxygen-free copper block, placed near the acceleration gap at a distance of 60 mm from the side face of the dee electrode. Three pickup electrodes have a number of ceramic chip capacitors soldered in parallel in between two copper disks. The pickup electrodes were designed to produce a signal with a pickup-to-dee voltage ratio of $1/10^4$ and $1/10^5$. The pickup signal from the remaining electrode, without ceramic chip capacitors, is mainly used for harmonic-voltage phase control. We have applied the flat-top acceleration technique to 87 MeV $^4\text{He}^{2+}$ (400 MeV after a ring cyclotron), and studied characteristics of the beam accelerated using the fifth-harmonic voltage superimposed to the fundamental one.

RCNPサイクロトロンにおけるフラットトップ加速ビーム開発

1. はじめに

大阪大学核物理研究センターのサイクロトロン施設は、AVFサイクロトロン (K=140MeV) 及びそれを入射器としたリングサイクロトロン (K=400MeV) から構成され、陽子、重陽子、 ^3He 、 ^4He などの軽イオンからArやKrなどの重イオンに至るまで、多様なイオンビームが原子核物理や核化学、遮蔽物理などに幅広く利用されている。

近年、392MeV 陽子を1次ビームとして、重元素 (鉛やタンゲステン) ターゲットとの核破砕反応により二次的に発生した中性子の利用研究が精力的に行われるようになった^[1,2]。特に超冷中性子 (UCN: Ultra Cold Neutron) 源開発では、既に世界トップレベルのUCN密度を達成し、陽子ビーム強度のさらなる増強が求められている。また、約 $1\mu\text{A}$ の392MeV陽子ビームをタンゲステン・ターゲットに照射して得られる 30° 方向の中性子束を用いた半導体照射試験が産学連携の共同研究によって実施されており、中性子束の大強度化への強い要望が寄せられている。

18GHz超伝導ECRイオン源の開発^[3]に伴い、多様な重イオンの生成が可能となったことから重イオンビーム利用のニーズが高まっている。特に、アルゴンやそれより大きな質量数を持つ重イオンの高エネルギー化を図るためには、より大きな価数の重イオンを生成する必要がある。ところが、価数が大きくなるにつれてビーム強度も小さくなることから、多価重イオンの加速においては、イオン源から末端の

ターゲットまでの全体的なビーム透過効率を向上させる必要がある。

一方、超高分解能スペクトロメータ “Grand-RAIDEN” を用いた精密原子核実験では、エネルギー幅が小さく、ハロー・フリーの良質な軽イオンビームが必要とされており、リングサイクロトロンでの加速のみならず、入射器であるAVFサイクロトロンでの加速ビームの質の向上が重要な鍵を握っている。

そこで、AVFサイクロトロンにフラットトップ (FT) 加速システムを導入し、リングサイクロトロンに入射ビームの質と量を向上させるビーム開発を進めている^[4,5]。

AVFサイクロトロンのFT加速電圧は、基本波電圧 (6~18MHz) を発生させる主共振器に、その5倍、7倍、9倍の周波数帯域 (50~80MHz) の高調波電圧を発生させるFT空洞を結合させて生成する。加速ギャップに近いディー電極先端側部にはピックアップ電極を配置し、基本波・高調波電圧の制御・モニターなどに使用している。ところが、従来のピックアップ電極のピックアップ電圧比 (ディー電圧に対するピックアップ電極信号レベルの比) は、幾何学的構造のみで決まる静電容量を持つため、ピックアップ信号の出力レベルの周波数依存性が大きく、高調波電圧の振幅制御などに難があった。そこで、比較的周波数特性に優れたセラミック・チップ・コンデンサを用いた新しいピックアップ電極を開発し、高調波電圧・位相の制御性を高めた。

¹ E-mail: mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

FT加速システムを用いたビーム開発では、これまでに87 MeV $^4\text{He}^{2+}$ 、53 MeV陽子、19 MeV重陽子、640 MeV $^{86}\text{Kr}^{21+}$ などの加速テストを行い、リングサイクロトロンへのビーム輸送・入射効率の向上とビーム強度増強を目指した開発を進めている。

2. ディー電圧ピックアップ電極の更新

RCNP K140 AVFサイクロトロンの主共振器は、ショート板方式の変可周波数型同軸共振空洞、開き角 180° のシングル・ディー電極、終段増幅器 (THALES RS2042SK) 及びそのパワー・フィーダーなどから構成される。基本波の周波数範囲は6~18MHzで、加速ハーモニクス数は1と3が可能である。FT空洞は、基本波パワー・フィーダーと軸対称な位置で主共振器に容量結合している。

数十kVのディー電圧に対し、基本波及び高調波の電圧・位相制御やモニターに適した $1/10^4 \sim 1/10^5$ の電圧比のピックアップ信号を得るためには、ピックアップ電極とグラウンドとの間の静電容量を1000pFより大きくする必要がある。しかし、ピックアップ電極の現実的な形状・サイズからして、ピックアップ電極とグラウンド電極との間に1000pFを越える静電容量を確保することは困難であり、ピックアップ電圧比の周波数依存性も無視し得ない。

そこで、厚さ5mmと12mmの無酸素銅製円板の間の外周に沿って周波数特性に優れたセラミック・チップ・コンデンサを半田付けし、1000pFより大きな静電容量を有する新しいピックアップ電極を開発した。ディー電極先端の側部から60mmの位置に設置したピックアップ電極を図1に示す。独立した4種類のピックアップ電極は無酸素銅ブロックを加工した台座に固定され、ピックアップ電極Aの径は $\phi 50\text{mm}$ 、電極B、C、Dの径は $\phi 34\text{mm}$ で、電極AとDの電極中心は加速平面上に一致させている。得られたピックアップ電圧比は、電極AとCが約 $1/10^4$ 、電極Dが約 $1/10^5$ である。電極Dのピックアップ電圧比の周波数

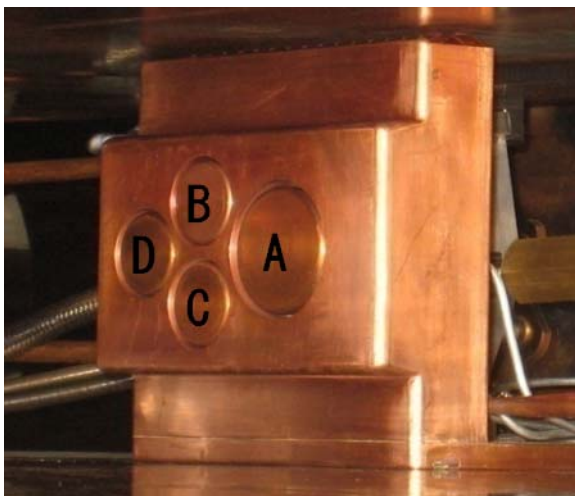


図1 台座に固定された4個のディー電圧ピックアップ電極

特性 (計算値) を図2に示す。電極Aの信号は、基本波に高調波が重畳された状態で基本波電圧の振幅・位相を安定化制御するのに使用され、FT加速の場合でも基本波加速 (FT OFF) と同じ最大ディー電圧を発生させることができる。ピックアップ電極Bの信号は、ハイパスフィルターを通してFT電圧の位相制御などに使用される。また、ピックアップ電極Cの信号はビーム・バンチャーやビーム・チョッパーの制御信号などに、電極Dの信号はコンソールでのディー電圧波形モニターなどに利用している。

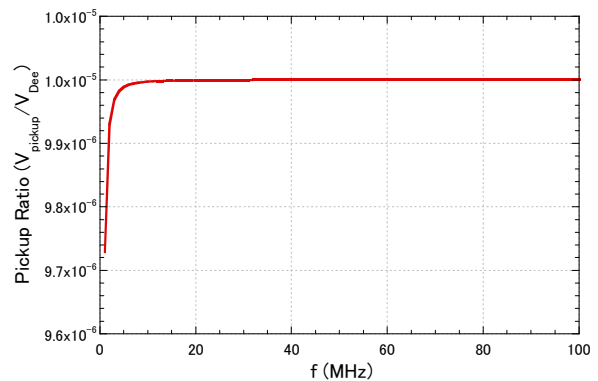


図2 電極Dのピックアップ電圧比の周波数特性 (計算値)

3. 87MeV $^4\text{He}^{2+}$ FT加速ビーム開発の現状

基本波加速用に最適化した運転パラメータを基に、基本波加速電圧の約 $1/25$ の振幅の第5高調波電圧を重畳したディー電圧を用いて87MeV $^4\text{He}^{2+}$ のビーム開発を行った。厳密には、基本波単独の加速電圧波形と第5高調波を重畳した電圧波形は異なるため、中心領域のバンブ磁場による位相スリップや等時性磁場からのズレによるビーム位相ドリフトなどに起因して、FT加速のビーム軌道は基本波加速のそれと異なる。従って、基本波電圧に第5高調波を単純に重畳しただけでは基本波加速と同様にビームを引き出すことは難しく、ベータatron振動や軌道中心の歳差運動などの最適化調整が必要とされる。

サイクロトロンからの引出ビーム電流が増えるように第5高調波の位相や基本波電圧の振幅、バレー・コイル電流 (引き出し前のビーム軌道中心を調整) などを調整したときのビーム引き出し前のターン・パターンの一例を図3に示す。ターン・セパレーションは、位相スリットでビーム位相を厳しく制限した基本波加速の場合と同様に5mm程度であったが、各ターンの半径方向の拡がりやビーム軌道の芯ズレによるターンの粗密の様子は異なっている。このとき、ビームのエネルギー幅は $\Delta E/E=5.5 \times 10^{-4}$ FWHMであり、基本波加速の場合とほぼ同等であった。但し、この第5高調波を重畳させたディー電圧ピックアップ信号は理想的なフラットトップ波形にはなっておらず、基本波に対する第5高調波の

相対位相を約 106° シフトさせた状態であったことから、理想的なFT加速に向けたビーム調整の最適化がさらに必要である。

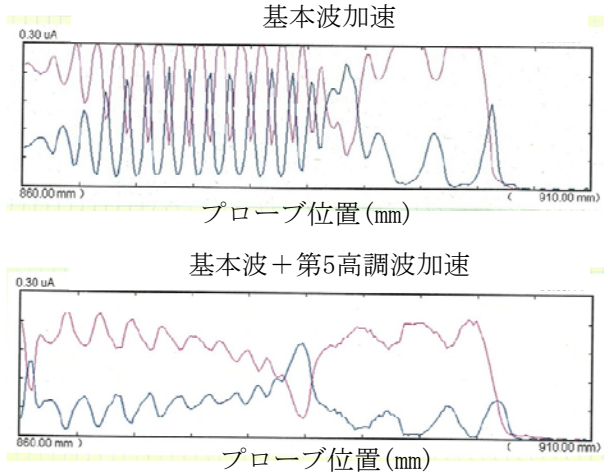


図3 87MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ ビームの引き出し前のターン・パターンの一例。上が基本波加速の場合、下が基本波に第5高調波を重畳した加速の場合。

基本波加速の場合はもちろん、FT加速の場合でも加速粒子がディー電圧波形の最大値付近で加速されるように中心領域でのビーム位相スリップを最適化する必要がある。サイクロトロン加速領域に設置されている位相プローブにより相対的なビーム位相の変化は測定できるものの、ディー電圧波形に対するビーム位相の絶対値を知ることはできない。そこで、A. A. Garren and L. Smithの手法^[6]に従い、RF周波数を数kHzずつ何点か変えてビームが加速位相からフェーズ・アウトする半径を測定することによりビーム位相の絶対値を見積もった。

1ターン当たりのエネルギー利得とビーム位相の変化などの関係から、ターン n_0 、 n_1 とそのときの半径 $R(n_0)$ 、 $R(n_1)$ の間には次の近似式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \sin \phi(n_1) &\simeq \sin \phi(n_0) \\ +2\pi \frac{m_0 c^2}{2QeV_0} &\left(\frac{2\pi f_{RF}}{hc} \right)^2 \left(\frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF}} - \int_{n_0}^{n_1} \frac{\Delta B}{B_{iso}} dn \right) \\ \times \frac{R(n_1)^2 - R(n_0)^2}{2} \end{aligned}$$

ここで、 $\phi(n)$ はターン n でのビーム位相、 $m_0 c^2$ は加速粒子の質量、 Q は価数、 e は電気素量、 V_0 はディー電圧ピーク値、 h は加速ハーモニクス数、 c は光速、 Δf_{RF} はRF周波数の変化量、 $\Delta B(R(n))$ は等時性磁場からの変化量を表す。これにより、フェーズ・アウトする半径 $R(n_1)$ においてはビーム位相が $\phi(n_1) = \pm 90^\circ$ となることから、元の半径 $R(n_0)$ におけるビーム位相 $\phi(n_0)$ を見積もることができる。

RF周波数を ± 5 、 ± 7 kHz変化させたときにフェー

ズ・アウトした半径を図4に示す。位相プローブで測定した相対的なビーム位相の変化量から ΔB による寄与も補正した結果、 $R(n_0) = 180$ mmでのビーム位相は $\phi(n_0) = +4^\circ$ (+は遅れ方向)と見積もられ、ディー電圧波形のピーク付近で加速されていたことが確かめられた。

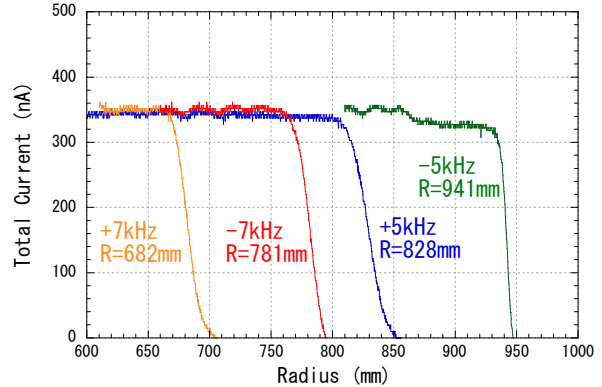


図4 87MeV ${}^4\text{He}^{2+}$ 基本波加速において、基本波周波数を $\Delta f = \pm 5$ 、 ± 7 kHz変化させたときのプローブ・パターン。ビーム電流値が1/2になった半径位置をフェーズ・アウト半径と見なした。

参考文献

- [1] K. Hatanaka *et al.*, "Development of the RCNP Cyclotron Cascade", Proc. Cyclotrons2007, Giardini Naxos, Italy (2007) pp125-127.
- [2] K. Hatanaka *et al.*, "RCNPサイクロトロン施設現状", 第5回日本加速器学会年会報告集, 東広島市 (2008).
- [3] T. Yorita *et al.*, "RCNPにおける18GHz SCECR-ISによる大強度多価イオンの生成", 第5回日本加速器学会年会報告集, 東広島市 (2008).
- [4] K. Hatanaka *et al.*, "Upgrade Project of the RCNP AVF Cyclotron Facility", Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp115-117.
- [5] M. Fukuda *et al.*, "Development of the Flat-top Acceleration System for the RCNP AVF Cyclotron", Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp470-472.
- [6] A.A. Garren and L. Smith, "Diagnosis and Correction of Beam Behaviour in an Isochronous Cyclotron", Proc. of Int. Conf. on Sector-Focused Cyclotrons and Meson Factories", Geneva, Switzerland (1963) pp16-23.