

Status of the RCNP Cyclotrons

Mitsuhiro Fukuda^{1,A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Takane Saito^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)},
Mitsuru Kibayashi^{A)}, Keiichi Nagayama^{A)}, Hiroyuki Okamura^{A)}, Atsushi Tamii^{A)}, Shunpei Morinobu^{A)}

^{A)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan 567-0047

Abstract

An 18 GHz superconducting ECR ion source and a flat-top acceleration system for the RCNP K140 AVF cyclotron have been commissioned to improve the beam quality and intensity. The 18 GHz superconducting ECR ion source has been developed to extend the variety and intensity of highly-charged heavy ions. Production of gaseous ions such as O, N, Ar and Kr is under development. The highly-charged ions like $^{16}\text{O}^{6+}$ and $^{86}\text{Kr}^{23+}$ have already been provided for use. In the AVF cyclotron, flat-top accelerated beams have become available. The high quality beam with energy spread better than before has been extracted from the AVF cyclotron without substantial decrease of the beam intensity using a pair of phase slits. The beam transmission to the K400 ring cyclotron has been improved more than 90 %. The energy spread of the 300 MeV proton beam, transferred from the ring cyclotron to the spectrometer "Grand-RAIDEN" in achromatic mode, has been improved to $\Delta E/E = 1 \times 10^{-4}$. The beam intensity of the high quality 300 MeV proton beam has been remarkably increased by a factor of four.

阪大RCNPサイクロトロンの現状

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics) のサイクロロン施設では、H16年度よりビームの高品質化と高強度化、老朽化した機器の更新などを目指したアップグレードを進めてきた^[1]。これまでに、18GHz超伝導ECRイオン源の導入、AVFサイクロロンにおけるフラットトップ加速システムの開発、それに伴うデー電極及び基本波終段アンプ系の改造、トリムコイル電源や制御システムの更新、ビーム診断用バイパスビームラインの新設などを実施した^[2]。

RCNPにおける原子核物理実験では、陽子、重陽子、 ^3He 、 ^4He などの軽イオンビームの利用が大半を占めているが、近年、ArやKr等の重イオンの利用ニーズも次第に増えてきている。高エネルギーの重イオンビームを加速するためには重イオンの多価化が必要である。そこで、加速イオン種・エネルギー範囲の拡大とビーム強度増強を目指し、多価重イオン生成に実績のある18GHz超伝導ECRイオン源の開発に着手した。

RCNPでは、AVFサイクロロン (K値140MeV) を入射器とするリングサイクロロン (K値400MeV) で加速した軽イオンビームを用いて、超高分解能の原子核物理実験が行われている。リングサイクロロンは第3高調波加速電圧を発生するフラットトップ共振空洞を有し、 10^{-4} オーダーのエネルギー幅を持つ良質の軽イオンビームを提供している。さらにビームラインと高分解能スペクトロメーター "Grand-RAIDEN" において dispersion matching法を用いたビーム輸送を行うことにより、 $\Delta E/E = 5 \times$

10^{-5} の世界最高のエネルギー分解能を達成している。しかし、小エネルギー幅・低エミッタンスのビームを得るためには、スリット等でビームを厳しく制限する必要があるため、ビーム強度の著しい低下が避けられなかった。リングサイクロロンの加速ビームの質と強度は、入射ビームであるAVFサイクロロンのビームの質と強度にも依存しており、AVFサイクロロンの性能向上が、より質の高いビームをより多く供給するための重要な鍵である。

そこで、AVFサイクロロンの加速ビームのエネルギー幅、エミッタンス、ビーム強度等の改善を目指し、リングサイクロロンと同様にフラットトップ加速システムを開発した。AVFサイクロロンへのフラットトップ加速システムの導入により、従来の基本波加速に比べて位相アクセプタンスを大幅に拡大できることから引出しビーム強度を大幅に増やすことができるようになり、リングサイクロロンへの入射ビームの増強が期待される。

本稿においては、第2章にRCNPサイクロロンの運転状況、第3章に18GHz超伝導ECRイオン源の開発状況、第4章にAVFサイクロロンにおけるフラットトップ加速システムの開発状況とビーム開発の現状について示す。

2. サイクロロンの運転状況

加速ビームの実験利用、ビーム調整、ビーム開発などに要したH18年度の総運転時間は5,848時間である。図1に加速粒子別の運転時間を示す。最も運転時間が多かったのは陽子で総運転時間の約半分を占めている。偏極陽子及び偏極重陽子ビームの利用は

¹ E-mail: mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

約1/4で、陽子からHeイオンまでの軽イオンだけで全体の約86%にも及んでいる。一方、 ^{16}O や ^{40}Ar をはじめとした重イオンビームの利用も増えつつあり、Li以上のイオンの運転時間は約800時間であった。

年度別の運転・保守時間の推移をみても、H18年度は陽子と重イオンの加速に要した時間の伸びが他の年度に比べて大きかった。これは、フラットトップ加速システム及び18GHz超伝導ECRイオン源の開発が本格化したことの現れでもある。

サイクロトロン of 老朽化に伴う不具合やトラブルの発生頻度は少なくはないが、ほぼ短時間で復旧していることもあり、unscheduled shutdownの時間は比較的少ない。

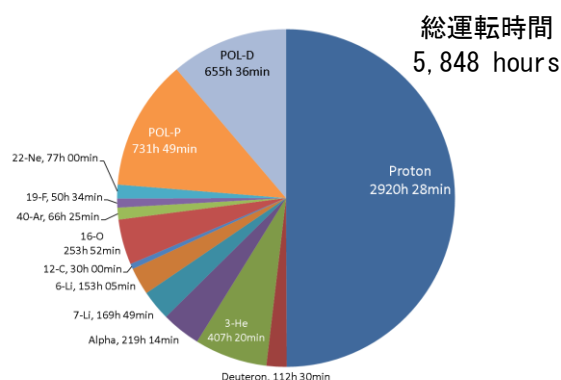


図1: H18年度の加速粒子別の運転時間

3. 18GHz超伝導ECRイオン源の開発

18GHz超伝導ECRイオン源は、理研のRAMSES^[3]の設計をベースに、六極磁石の内径を90mmに、プラズマチャンバーの内径を80mmに拡大するなどの改良を加えたものである。プラズマチャンバー内壁には、厚さ1mmのアルミニウム製ライナーを設置し、さらにプラズマチャンバーの中心軸に沿って上流側からバイアスプローブを挿入し、プラズマチャンバーに対して最大-500Vの電位を印加することができる。

18GHz超伝導ECRイオン源の制御システムやビーム診断機器を整備し、定常的に重イオンを生成できるようになった。これまでのイオン生成テストでは、バイアスプローブの先端位置が170~190mm、即ちプローブ先端がミラー磁場のピーク近傍にある場合にイオン電流の最大値が得られている。これまで、 ^{16}O 、 ^{15}N 、 ^{40}Ar 、 ^{86}Kr などのガス状イオン生成テストを行い、 $^{86}\text{Kr}^{21+}$ で $26\mu\text{A}$ 、 $^{86}\text{Kr}^{23+}$ で $13\mu\text{A}$ などのビーム電流が得られている^[4]。

4. AVFサイクロトロンにおけるフラットトップ加速ビームの開発

4.1 フラットトップ加速システムの開発

AVFサイクロトロンにおけるフラットトップ加速では、加速粒子がディー電極の加速電場を通過する時間に依らずにエネルギー利得を均一化するため、

基本波電圧にその整数倍（5倍、7倍、9倍のいずれか）の周波数を持つ高調波電圧を重畳させることによってピーク電圧付近を平坦化した加速電圧波形を用いている。一般に、開き角 180° のディー電極でフラットトップ加速された粒子の1ターン当たりのエネルギー利得は次の式で表される。

$$E(t) = 2QV_1 \left(\cos(2\pi f_1 t + \phi_1) - \frac{1}{n^2} \cos(2\pi n f_1 t + \phi_n) \right)$$

ここで、 Q は加速粒子の価数、 V_1 は基本波ピーク電圧、 f_1 は基本波周波数、 t は時間、 n は高調波次数、 ϕ_1 及び ϕ_n は基本波及び高調波の位相である。

高調波電圧は、外径170mm、長さ700mmの同軸型共振空洞を主共振器に容量結合させた伝送回路を用いてディー電極先端部に発生させている。基本波及び高調波の振幅・位相制御は、ディー電極の先端部に設置されたピックアップ電極で得られる信号を用いて行っているが、従来のピックアップ電極に直結された信号処理回路の周波数特性やピックアップ信号レベルなどが最適化されていないことから、現在、ピックアップ電極の更新を進めている。

4.2 フラットトップ加速ビームの開発

RCNPサイクロトロンにおける加速の仕方は、質より量を優先する「大電流モード」と、高分解能実験に必要なとされるようなハロー・フリーでエネルギー幅が小さく、質の高さが求められる「高分解能モード」の2種類に大別される。

大電流モードの場合には、AVFサイクロトロンに入射したビームをより多く加速して引き出しビーム電流を増やし、リングサイクロトロンへの入射効率が向上するような低エミッタンスで大強度のビームを生成する必要がある。基本波加速の場合、一般に位相アクセプタンスは $20\sim 30^\circ$ 程度であり、マルチ・ターン引き出しによってエネルギー幅 $\Delta E/E = 0.1\%$ 前後のビームが得られる。これに対し、フラットトップ加速の場合には広い位相範囲にわたってエネルギー利得を揃えることができることから加速可能な入射ビームを増やすことができ、 0.1% 程度の一般的なエネルギー幅を持つビームの強度は大幅に増強される。但し、ビームの位相幅が広がることによって、AVFサイクロトロンの基本波周波数の3倍や5倍の周波数で加速するリングサイクロトロンの位相アクセプタンスを超えることになるため、AVFサイクロトロンの下流でのビーム・バンチングが不可欠である。

高分解能モードでは、エネルギー利得の均一性を高めるため、限られた位相領域のビームだけを加速する必要がある。基本波加速の場合には、 0.1% 以下のエネルギー幅を実現するため、ビーム位相を $\pm 2.7^\circ$ 以下に制限する必要がある、ビーム強度の激減は避けられない。フラットトップ加速の場合には位相アクセプタンスを拡げることができることから、許容されるエネルギー幅のビーム強度を増やすことができる。

エネルギー幅の小さなビームをより多く得るためには、(a)AVFサイクロトロンに入射したビームの位

相幅を数度以内に制限すること、(b)制限されたその位相幅内にできるだけ多くビームを入射させること、(c)理想的な等時性磁場を形成して引出しまでのビーム位相の変動幅を最小限に留めること(変動幅を最小化することによって(a)のビーム位相の制限幅を緩くすることができる)、(d)磁場及び加速電圧・位相を高安定化することなどが必要とされる。

ビーム位相幅の制御には、中心領域に設置された2種類の位相スリットを用いている。ダミーディー側に設置された位相スリットは、インフレクターから引き出された1ターン目のビームの軌道を、回転駆動式の1対のスリットピラーで挟むことによりビーム位相を制限している。また、ディー電極側に設置された位相スリットは、直線駆動式の1対のスリットピラーの位置を調整することによって、2ターン目のビーム軌道を制限している。

位相スリットで制限されたビーム位相幅内にできるだけ多くの加速粒子を入射させるため、垂直入射ラインに設置されたビームバンチャーを用いている。基本波電圧波形に2倍波と3倍波を重畳して鋸歯状波に近い電圧波形をシングル・ギャップ電極に発生させ、イオン源から輸送されてくる直流ビームに速度変調を加えてバンチングを行う。陽子の場合、5~7倍のバンチング効率が得られている。

RCNPのAVFサイクロトロンは開き角 180° のディー電極を有しており、加速ギャップに近い先端部でディー電圧をピックアップすることにより加速電圧波形を直接観測できるという利点を持っている。従って、ピックアップ信号波形を頼りに基本波と高調波の電圧比や相対位相を最適化することが可能であるが、前述のように現時点では信頼性の高いピックアップ信号が得られていないことから、最適化された基本波加速のパラメータをベースにし、高調波電圧を印加した状態で引出前のターンセパレーションが大きくなり、かつ1ターンのビーム幅が小さくなるようにパラメータ調整を行っている。53MeV陽子のフラットトップ加速の時のターンパターンを図2に示す。

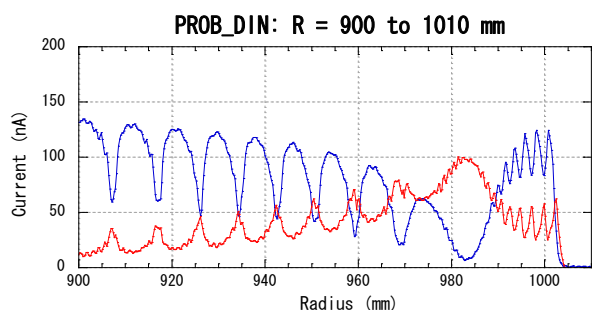


図2 : 53 MeV 陽子加速の時の引出前のターンパターン

AVFサイクロトロンから引き出されたビームを dispersive mode で分析ビームラインに輸送し、運動量分散にほぼ比例した水平方向のビーム幅を測定

することによって、シングルターン引出しの調整も行っている。

これまで、高分解能実験に用いられるビームに対して優先的にフラットトップ加速法を適用し、53 MeV陽子($f_5=77.084$ MHz)、44 MeV重陽子($f_5=50.582$ MHz)、88 MeV $^3\text{He}^{2+}$ ($f_5=58.250$ MHz)、87 MeV $^4\text{He}^{2+}$ ($f_5=50.720$ MHz, $f_7=71.008$ MHz)、19 MeV重陽子($f_9=60.750$ MHz)などのフラットトップ加速ビームを実用化した。今後も順次フラットトップ加速ビームを増やしていく予定である。

4.3 エネルギー分解能とビーム強度の向上

AVFサイクロトロン及びリングサイクロトロン双方においてフラットトップ加速を行った300MeV陽子ビームを高分解能スペクトロメーター“Grand-RAIDEN”にAchromatic modeで輸送し、金ターゲットでの弾性散乱ピーク幅が小さくなるようにサイクロトロンのパラメータを最適化した。その結果、従来の性能を上回る $\Delta E/E = 1 \times 10^{-4}$ FWHMのエネルギー分解能を達成し、しかもビーム強度を従来の約4倍に高めることに成功した。このとき、AVFサイクロトロンの引き出し効率率は約90%に、リングサイクロトロンへのビーム入射効率も90%以上に大幅に改善した。

参考文献

- [1] K. Hatanaka *et al.*, “Upgrade Project of the RCNP AVF Cyclotron Facility”, Proc. Cyclotrons2004, Tokyo, Japan (2004) pp115-117.
- [2] M. Fukuda *et al.*, “RCNPサイクロトロン施設の現状”, 第3回日本加速器学会年会報告集, 仙台 (2006) pp21-23.
- [3] T.Nakagawa *et al.*, “Intense beam production from RIKEN 18 GHz ECRIS and liquid He free SC-ECRISs”, Rev. of Sci. and Instr., 73 (2002) pp513-515.
- [4] T. Yorita *et al.*, “RCNPにおける18GHz超伝導ECRイオン源の開発”, 第4回日本加速器学会年会報告集, 和光市 (2008).