

STATUS OF THE RCNP CYCLOTRON FACILITY

Mitsuhiro Fukuda^{1,A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Takane Saito^{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, 567-0047

Abstract

Development of ion sources and improvement of cyclotron performance are in progress at the RCNP cyclotron facility to increase primary proton beam intensity for production of secondary particles such as neutrons, pions and muons. A 2.45 GHz ECR ion source with three permanent magnets of ring type has been developed to produce a high-intensity and low-emittance proton beam. The intensity of a 15 keV proton beam was more than 0.5 mA and a proton ratio more than 80 %. A flat-top cavity of the AVF cyclotron was improved for providing an intense high-quality beam to the ring cyclotron for improvement of beam transmission through the ring cyclotron. A capacitive coupling type power feeder of the flat-top cavity was modified into an inductive coupling type using a loop coupler. Beam emittance and energy spread of a 44 MeV deuteron beam was improved by flat-top acceleration using the 7th harmonic voltage.

阪大RCNPサイクロトロン施設の現状

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics) のサイクロトロン施設では、1976年にAVFサイクロトロン (K値140MeV) の供用を開始して以来、陽子、重陽子、³He、⁴Heなどの軽イオンビームの利用を中心とした原子核物理実験が行われてきた。1991年にはAVFサイクロトロンを入射器とするリングサイクロトロン (K値400MeV) が稼働を開始し、陽子は420MeV、³Heは150MeV/n、⁴Heは100MeV/nの最大エネルギーまで利用可能になった。

数年前より、 $\sim 1.1 \mu\text{A}$ の392MeV陽子ビームと重元素ターゲットの核破砕反応で生成した中性子の利用が可能となり、鉛ターゲットを用いた超冷中性子 (UCN: Ultra Cold Neutron) 源開発では世界トップレベルのUCN密度を達成し、UCNを用いた基礎物理研究が本格的にスタートしている。また、タングステン・ターゲットに392MeV陽子ビームを照射して得られる30°方向の白色中性子束を用いて、中性子に起因した半導体デバイスのシングルイベント効果などを研究する産学連携の共同研究も行われている。これらのユーザーからは、中性子生成量の増強への強い要望が寄せられており、一次ビームである392MeV陽子ビームの大強度化が喫緊の課題である。

一方、ミュオンやパイオンを用いた学際的研究の新展開を目指し、392MeV陽子ビームをグラフィット・ターゲットに照射して生成されるパイオンを大立体角の超電導ソレノイドコイルで捕獲し、輸送中にパイオンが崩壊して得られるミュオンを利用するためのビームラインと実験装置の整備も開始した。ミュオンビームの大強度化を図るため、数 μA 以上の陽子ビームが求められている。

RCNPでは、永久磁石型10GHz ECRイオン源

NEOMAFIOSを用いて陽子ビームを供給しており、イオン源で得られる最大ビーム電流は100 μA 程度である。現状では、AVFサイクロトロンに入射からターゲットまでの陽子ビームの透過効率は1%前後であり、建屋の遮蔽能力に起因した制約もあり、ターゲット上で得られる最大ビーム電流は1.1 μA に留まっている。

そこで、陽子ビーム強度の増強を図るため、陽子比が高く、低エミッタンスの大強度陽子ビームが得られる永久磁石型2.45GHz ECRイオン源の開発に着手した。また、リングサイクロトロンへのビーム輸送・入射効率などを改善するため、AVFサイクロトロンに導入したフラットトップ (FT) 加速システムの改良とそれを用いたビーム開発を進めている。

18GHz超伝導ECRイオン源の開発に伴い、重イオンを利用した実験も増えており、加速イオン種・エネルギー範囲の拡大へのニーズも高い。特に、ArやKr、Xeなどの多価重イオンビームの強度増強が強く求められていることから、18GHz超伝導ECRイオン源の改良も進めている。多価イオンのビーム電流を増やすため、ミラー磁場の大きさや分布形状、プラズマ電極の形状・配置、バイアスプローブの形状・サイズなどの最適化を行っている^[1]。

高温超伝導線材の新たな加速器応用を目指し、Bi系高温超伝導線材を用いた粒子線がん治療用スクヤニングコイルの開発も進めている。高温超伝導線材は、臨界温度が100Kを超え、クエンチングに対するマージンも大きいことから、AC運転が必要な電磁石への応用が期待されている。高温超伝導スクヤニング磁石の交流損失などを測定した結果については、^[2]で報告されている。

本稿においては、第2章にRCNPサイクロトロンの

¹ E-mail: mhfkuda@rcnp.osaka-u.ac.jp

運転状況、第3章に2.45GHz ECR陽子源の開発状況、第4章に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状況とビーム開発の現状について示す。

2. サイクロトロンの運転状況

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H20年度の総運転時間は5,642時間であった。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、非偏極陽子ビームが全体の46%、偏極陽子ビームの利用は22%で、ビームタイムの約2/3を占めている。重陽子及びHeイオンも含めると、これらの軽イオンビームの利用は全体の約83%にも及び、ここ数年は、この傾向は変わっていない。Li以上のイオンの利用は937時間であった。

サイクロトロンの老朽化に伴い、不具合やトラブルの発生頻度は増えつつあるが、応急処置も含めて比較的短時間で復旧していることもあり、計画外のシャットダウン時間は116時間程度に留まっている。H20年度に実施した大きな修理作業は、AVFサイクロトロンの共振器異形部で漏水していた冷却水配管の補修・補強である。また、電源の老朽化対策として、H20年度には、230V/420A及び115V/420Aの偏向電磁石用電源を2台、50V/70Aの四重極電磁石用電源を6台更新した。

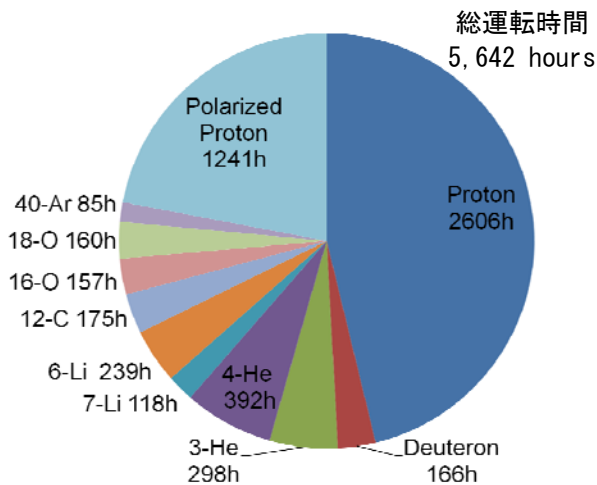


図1: H20年度の加速粒子別の運転時間

3. 2.45GHz ECR陽子源の開発

CEA(フランス)/Saclayにおいて、ソレノイドコイルを用いた2.45GHz ECR陽子源SILHIが開発され、陽子比80%以上で150mAを超える100keV陽子ビームの生成に成功している[3]。三連のリング状永久磁石を用いた陽子源開発では、磁場分布や引出電極等の最適化がまだ十分ではないものの、100keVで110mAのビーム強度が得られている[3]。規格化rmsエミッタ

ンスも 0.2π mm mrad程度と報告されており、低エミッタンスのビームが生成可能である。RCNPの場合には、必要とされる陽子ビームのエネルギーが15keVと低いものの、1mAに近い高輝度ビームの生成が期待されることから、コンパクトで運転操作性・安定性・保守性などに優れた永久磁石型2.45GHz ECR陽子源の開発を進めている。

リング状永久磁石は、径方向の厚さが35mm、軸方向の幅が50mmまたは60mmの12個の永久磁石 (NEOMAX-48BH、主成分はNd-Fe-B) を内半径75mmでステンレス容器内に並べて製作した。上流側に幅50mmの2つのリング状永久磁石を間隔20mmで設置し、さらに下流側に幅60mmのリング状永久磁石を15mmの間隔を空けて配置して2.45GHzマイクロ波を用いたECR条件 (875G) を満たす軸方向の磁場分布を形成した。2.45GHz ECR陽子源の外観を図2に、軸方向の磁場分布を図3に示す。

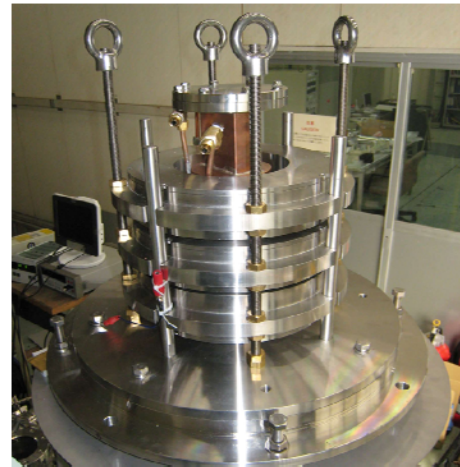


図2: 永久磁石型2.45GHz ECR陽子源の外観

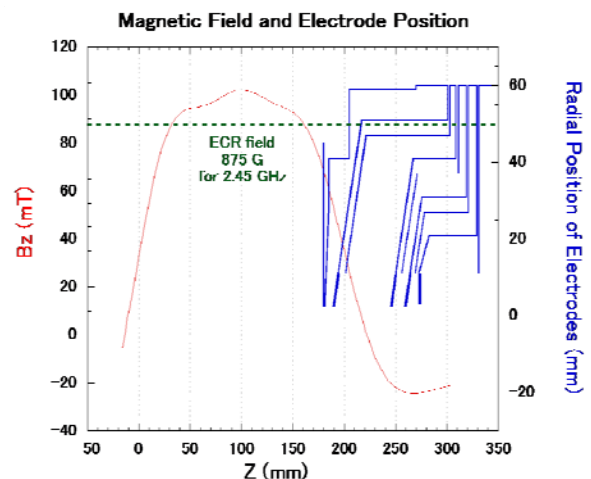


図3: 2.45GHz ECR陽子源の軸方向の磁場分布と引出電極の配置

銅製のプラズマチェンバーの内径はφ90mmで、マイクロ波と水素ガスをプラズマチェンバーの上流側から軸方向に導入している。この導入部とプラズマ電極の直前にはBNディスクを設置し、陽子比の改善を図っている。プラズマ電極の下流には、4つの電極（引出電極、ギャップ電極1、ギャップ電極2、接地電極）を配置し、これらの引出領域の電極形状・配置の設計にはビーム軌道シミュレーションコードIGUNを用いた。低エミッタンスのビームを得るため、プラズマ電極と上流側の3つの電極の孔径はφ5mm、接地電極の孔径はφ6mmに小さく抑えている。

15kVの加速電圧でビーム生成試験を行った結果、引出領域の真空度が $4\sim 7\times 10^{-3}$ Paの状態では2.45GHzマイクロ波パワーを60W程度導入したとき、500μA前後の陽子ビーム強度が得られることを確認した。このとき、陽子とH₂⁺イオンの比は0.85 : 0.15であった。マイクロ波周波数を変更できる進行波管増幅器を用いてECR条件を満たす磁場の位置を変えたところ、2.54GHz前後で陽子ビーム強度が最大となり、700μAを超える陽子ビームの引き出しに成功した。進行波管の周波数を変えたときの陽子ビーム強度の変化を図4に示す。これは、引出領域の最適化の余地が十分にあることを示しており、陽子ビームの高輝度化に向けて引出領域の改良が今後の課題である。

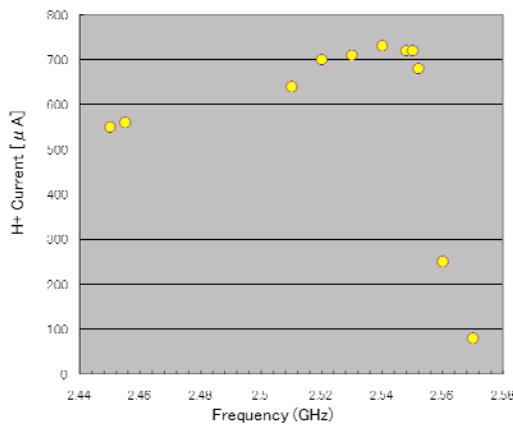


図4：進行波管増幅器のマイクロ波周波数を変えたときの陽子ビーム強度の変化

4. AVFサイクロトロンでのFT加速システム開発

初期設計のFT空洞のパワーフィーダーは、真空可変コンデンサーを介して空洞内筒に直接連結する方式を採用していたが、高パワーを必要とする77MHzでの励振条件でのコンディショニング運転の際に真空可変コンデンサーで大きなパワーロスが生じ、コンデンサーを焼損するトラブルが発生したことから、元々ショート板に近い位置にあったフィーダーを

ループ結合方式に改良し、ループ電極の角度を変えることによって入力波の整合を取るよう改良した。この際、これまで真空領域にあったフィーダー、ショート板、チューナーを大気側に変更し、保守性も高めた。図5に今回改造したパワーフィーダーを示す。これにより、FTシステムの運転が安定になり、高エネルギー陽子の加速に必要な80MHz前後の高い周波数帯域でも50Ω整合がとりやすくなった。

FT加速ビーム開発では、基本波周波数10.116MHzの7倍波(70.814MHz)を用いた44MeV重陽子のFT加速を行った。AVFサイクロトロンから引き出されたビームの電流値が2μAのとき、基本波加速の場合には、エネルギー幅が42keV FWHM、水平方向のエミッタンスが 15π mm mradであったのに対し、FT加速の場合には32keV FWHM、 9π mm mradであり、FT加速によるビームの質の改善が明確に観測された。このとき、ビーム輸送ラインでのビーム透過効率も基本波加速の場合に43%であったのが、FT加速により75%に向上することも確認できた。今後、さらに他のFT加速条件についてもビーム開発を進めていく予定である。

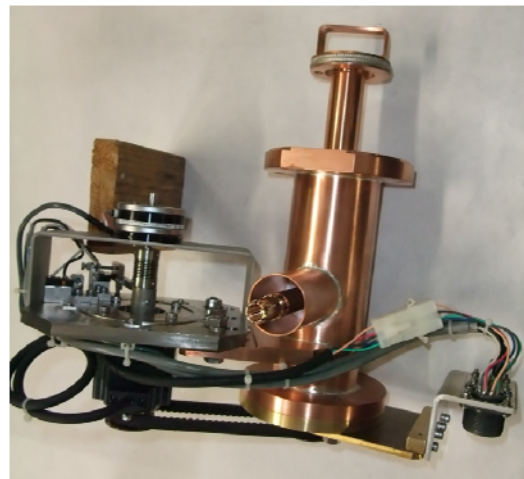


図5：ループ結合方式に改造したフラットトップ空洞のパワーフィーダー

参考文献

- [1] T. Yorita *et al.*, “RCNPにおける18GHz SCECRによる重イオン多価ビームの生成”, 第6回日本加速器学会年会報告集, 東海村 (2009).
- [2] K. Hatanaka *et al.*, “高温超電導スキャニング磁石の交流損失測定”, 第6回日本加速器学会年会報告集, 東海村 (2009).
- [3] R. Gobin *et al.*, “Development of a permanent magnet high intense beam production from ion source at CEA/Saclay”, Rev. of Sci. and Instr., 77 (2006) pp03B502-1-3.