

DEVELOPMENTS FOR INCREASE OF PROTON BEAM INTENSITY AT RCNP CYCLOTRON FACILITY

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

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

^{B)} Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

The upgrade program for increase of the proton beam intensity is in progress at the RCNP cyclotron facility. A 2.45 GHz ECR proton source was installed in the injection beam line of the AVF cyclotron. A 15 keV proton beam produced by the proton source was successfully injected into the AVF cyclotron. An extraction system of the proton source has been re-designed to improve reliability for long term operation. Structure of the extraction electrodes will be modified for cooling reinforcement. For the AVF cyclotron, analysis of the dee voltage distribution along the acceleration gap of the 180 degree dee electrode has been started to optimize the operation parameters of the flat-top acceleration which is required for improvement of the proton beam intensity and quality.

RCNP サイクロトロンにおける陽子ビーム強度増強のための開発

1. はじめに

近年、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、高エネルギー陽子ビームを用いて生成した中性子やパイオンなどの二次粒子の利用へのニーズが高まっている。パルス化された 392MeV 陽子ビームと鉛ターゲットの核破砕反応で発生した中性子を減速させて生成する超冷中性子 (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、タンダステン・ターゲットに 1.1 μ A の 392MeV 陽子ビームを照射して 30° 方向に放出される白色中性子束は、空から地上に降り注ぐ中性子のエネルギースペクトルとほぼ同じ分布を有することから、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定期的に行われている。

一方、392MeV 陽子ビームをグラフィイト・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、超電導ソレノイドコイルと偏向コイルを組み合わせた輸送システム内をパイオンが飛行中に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が新たに完成した。ミュオンやパイオンを用いた素粒子物理のみならず、学際的研究を広範に進展させるためには、ミュオンビームの大強度化が必須である。

現状の陽子ビーム強度は、放射線管理上の制約から 1.1 μ A に制限されているが、上記のユーザーからは、さらに数 μ A 以上に陽子ビームを増強するよう強い要望が寄せられており、高エネルギー陽子ビームの大強度化が喫緊の課題である。

陽子ビーム強度を増強するためには、①イオン源の大強度化、②イオン源から入射器である AVF サイクロトロンへのビーム輸送と入射効率の向上、③ AVF サイクロトロンからのビーム引出効率及びビームの質の向上、④リングサイクロトロンへのビーム輸送の高効率化、⑤リングサイクロトロンへのビーム入射軌道と加速軌道の整合、⑥リングサイクロトロンへのビーム引出効率の向上など、多数の課題に取り組む必要がある。

イオン源での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 イオン源を開発し、これまでに 15keV の引出エネルギーで 500 μ A 以上の陽子ビームを得ることに成功した。

また、AVF サイクロトロンから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 サイクロトロンにフラットトップ (FT) 加速システムを導入し、基本波周波数に 5 倍または 7 倍または 9 倍の高調波を重畳して得られる FT 加速電圧を用いたビーム開発も進めている。

本稿においては、2.45GHz ECR 陽子源の開発・導入状況、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などについて示す。

2. 2.45GHz ECR 陽子源の開発

リング状永久磁石を用いた 2.45GHz ECR 陽子源は、高い陽子比で mA 級のビーム電流が得られる性能が期待され、さらにコンパクト性・運転操作性・安定性・保守性などに優れた特徴を有している。CEA (フランス)/Saclay においては、100keV で 100mA 以上のビーム強度が得られており、規格化エミッタンス (rms) も 0.2 π mm mrad 程度で低エミッタンスの

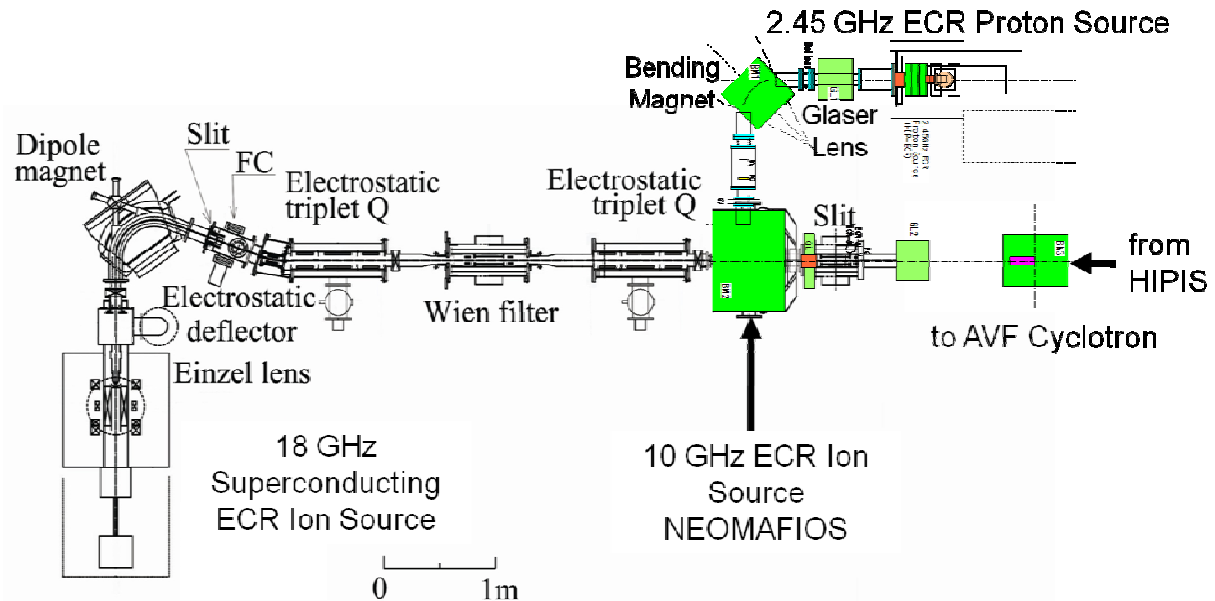


図1：AVFサイクロトロンの入射ビームライン。2.45GHz ECR イオン源用ビームラインを10GHz ECR イオン源（NEOMAFIOS）の反対側に配置。

ビームを実現している。RCNP では、AVF サイクロトロンの入射エネルギーが 10~15keV と低いものの、mA 級に近い高輝度陽子ビームの生成が期待されている。

これまで、15kV の加速電圧でビーム生成試験を行い、引出領域の真空度が $4\sim 7\times 10^{-3}\text{Pa}$ の状態で 2.45GHz マイクロ波のパワーを 60W 程度導入したとき、500 μA 前後の陽子ビームが得られることを確認した。このとき、陽子と H_2^+ イオンの比は 0.85 : 0.15 であり、高い陽子比を達成している。進行波管増幅器を用いてマイクロ波周波数を 2.54GHz 前後に変更することにより 700 μA を超える陽子ビームが得られることも確認しており、ECR 条件を満たす磁場の位置と引出電極の位置関係についての最適化が今後の課題である。

この陽子源を AVF サイクロトロン入射ビームラインに連結するため、10GHz ECR イオン源（NEOMAFIOS）用ビームラインの反対側に新しいビームラインを拡張し、90° 分析電磁石を配置してその上流に陽子源とグレーザーレンズを設置した。2.45GHz ECR 陽子源も含む入射ビームライン全体のレイアウトを図1に示す。陽子源は、軸方向に可動する台座の上に固定し、イオン源の改良やメンテナンスのために引出電極部分で分離して上流側に 50cm 程度スライドできるような構造になっている。マイクロ波を導入する導波管が上流側から軸方向にプラズマチェンバーに取り付けられ、導波管は 90° 下方に曲げて固定されている。ビームラインに設置された 2.45GHz ECR 陽子源の写真を図2に示す。グレーザーレンズは引出電極の下流約 50cm の位置に配置し、90° 分析電磁石の入口で集束するように設計されている。ビームビューアーやファラ

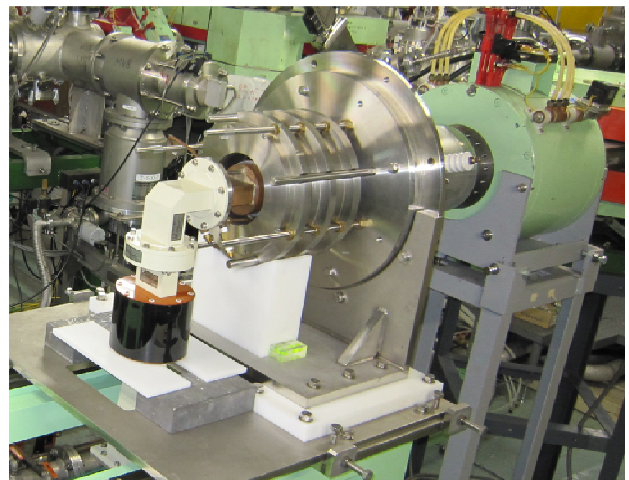


図2：ビームラインに連結された 2.45GHz ECR 陽子源

デーカップなどのビーム診断ステーション、真空排気ステーションは 90° 分析電磁石の下流に設置した。

一方、陽子源の実用に当たっては、長時間の連続運転での安定性が大前提となるが、当初の設計では、真空中に配置された引出電極の除熱対策が十分ではなかったため、15keV で 500 μA 程度のビームを引き出した状態で約 100 時間連続運転した後に、引出電極間の絶縁部分が溶融するトラブルが発生した。そこで、引出電極の除熱効果を高めるため、電極を取り付けている支持板を大気側まで伸ばして固定し、空冷できるように改良を施す予定である。また、電極支持板には水冷用銅パイプを這わせ、除熱効果をさらに高められるようにすることも検討している。

3. フラットトップ加速システムの開発

AVF サイクロトロンでの FT 加速に使用できる高調波周波数帯域は、50~90MHz である。リングサイクロトロンで陽子を 392MeV まで加速する場合の入射エネルギーは 65MeV であり、AVF サイクロトロンでは 16.845MHz (加速ハーモクス 1) の基本波加速周波数を用いている。FT 加速を行うためには 5 倍波 (84.225MHz) の励振が必要とされるが、高調波を発生させる FT 空洞の Q 値は周波数が上がるに伴って減少してくるため、この周波数近傍ではより大きな入力パワーが必要となる。ところが、現状では、終段アンプ (10kW) のパワー不足により、理想的な FT 電圧分布は形成されていない。しかしながら、ディー電圧ピックアップ電極の信号をスペクトラムアナライザで解析する限り、必要とされる基本波と 5 倍波の電圧比 25/1 に対応する振幅差 28dBm に対して、30dBm の差まで 5 倍波を励振できており、オシロスコープで観測される電圧波形は、かなりフラットに近い。この状態でどの程度の FT 加速効果が得られるかの確認は今後の課題である。

また、5 倍波を重畳した状態でディー電極 (開き角 180°) の加速ギャップの両端付近に設置したディー電圧ピックアップ電極の信号を見比べると、5 倍波の振幅が両端で 7dBm 程度異なり、加速ギャップに沿った電圧分布が一様ではない可能性が示唆されている。

一方、50~60MHz の帯域では、ディー電極の横方向 (加速ギャップに沿った方向) に励振されるモードがあり、この帯域を利用した FT 加速を困難にしている。実際に、87MeV 4He²⁺ (基本波周波数 10.144MHz) の FT 加速条件である 50.720MHz で励振した時のディー電極両端のピックアップ信号の振幅を見比べると、片方が FT 化されているときに、もう一方は反対の極性の電圧が基本波に重畳されており、ディー電極の中心軸に設けたスリット部分を節とした横共振モードが励振されていることが確認できた。

これを逆にとり、ディー電極両端で電圧の極性が反対になる 4 倍波をこの横共振モードを用いて励振し、FT 加速に活用する可能性を探ってみた。例えば、47MeV 陽子 (基本波周波数 14.496MHz) の 4 倍波である 57.986MHz で励振した場合、両端のピックアップ電圧信号の振幅は 10dBm も差があり、明らかに振幅の周波数依存性が確認された。42~62MHz の帯域において 4 倍波を励振したときに観測されたディー電極両端のピックアップ信号の基本波電圧に対する 4 倍波電圧の比を図 3 に示す。両端の電圧が等しくなる周波数が 48~50MHz の間に存在するものの、電圧比は顕著な周波数依存性を示しており、横共振モードを利用した 4 倍波による FT 加速はかなり困難であることが判明した。これらの現象については、3 次元高周波電場解析コードを用いて、今後、詳細に解析を進める予定である。

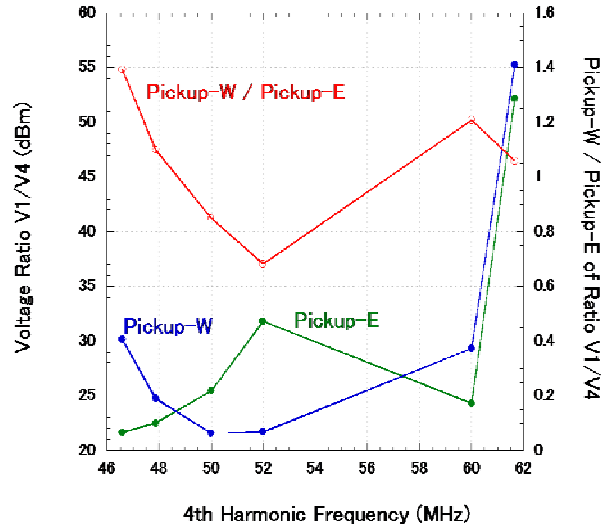


図 3 : 基本波加速電圧に 4 倍波を重畳させたときに観測されたディー電極両端のピックアップ信号の基本波と 4 倍波の電圧比の周波数依存性