

DEVELOPMENT OF 2.45GHz PERMANENT-MAGNET PROTON SOURCE

Hirofumi Yamamoto ^{*}, Keita Kamakura, Kichiji Hatanaka^{A)}, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita,
Takane Saito, Hitoshi Tamura, Mitsru Kibayashi, Keiichi Nagayama, Shunpei Morinobu,
Hiroshi Ueda, Yuusuke Yasuda
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

A 2.45GHz ECR proton source of a permanent magnet type was developed to increase a 400 MeV proton beam intensity to more than 5 μA at the RCNP cyclotron facility. The 200 W, 2.45 GHz microwave power supply was replaced by a 2 kW magnetron, and the microwave guide system was upgraded for 2 kW power feeding. A beam intensity of a 15 keV proton beam extracted from the 2.45 GHz ECR source was increased to more than 0.8 mA and the normalized emittance of the proton beam was improved to 0.3 – 1.0 π mm-mrad by positioning the plasma electrode close to the ECR zone and modifying the structure of the extraction electrode system. Dependence of the beam emittance and transmission efficiency on the extraction-electrode voltages was evaluated for improvement of the proton beam brightness.

永久磁石型 2.45 GHz ECR 陽子源の開発

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics) サイクロトロン施設では 2 次粒子 (neutron, muon 等) の生成量を増大させるための陽子ビームの強度増強を目指した研究を行っている。その研究の一環として、mA 級の低エミッタンス・高安定陽子ビームを生成するための永久磁石型 2.45GHz ECR 陽子源の開発を進めている。

これまでに開発してきた陽子源では、マイクロ波出力 200W、加速電圧+15 kV でおよそ 0.6 から 0.7 mA のビーム強度、50~100 π mm \cdot mrad のビームエミッタンスが得られていた。そこでさらなる高輝度化 (大強度化・低エミッタンス化) と陽子源の安定性向上を目指し、マイクロ波導入部とビーム引き出し電極部の改良を行った。

陽子ビームの大強度化を図るために、これまで使用していた出力 200W のマイクロ波電源を最大出力 2kW のマグネトロン型電源に更新するとともに、高出力対応の水冷絶縁導波管を導入し、マイクロ波のハイパワー化を行った。

また、引出ビームの高輝度化を図るためプラズマ電極の位置を ECR 領域にほぼ一致させると共に、ビームの大強度化に伴う空間電荷効果の影響を考慮したビーム引出軌道計算により引出電極部の形状、配置を見直した。その際、これまでビームの安定性を欠く原因になっていた引出電極間での放電対策として、電極間の絶縁体のサイズ・形状なども併せて見直し、高安定化を図った。

本稿では第 2 章でマイクロ波の高出力化について、第 3 章では引出電極領域の改良点について議論する。また、第 4 章では改良後の永久磁石型 2.45GHz ECR

陽子源によって得られた陽子ビームの性能評価結果について述べる。

2. マイクロ波出力の増強

プラズマ密度を高め、陽子ビームの大強度化を図るために 2.45GHz マグネトロン型マイクロ波電源の出力を最大定格 200W から 2000W に変更した。図 1 にマイクロ波電源と導波管の構成を示す。電源の増強に伴い、絶縁導波管を高出力マイクロ波に対応した水冷式に更新した。マイクロ波電源から方向性結合器までの導波管は WR340、真空窓までは WR430 で接続し、プラズマチェンバーへの連結部において WR-284 に変換している。以上の更新によってハイパワーのマイクロ波が導入可能になった。さらに、プラズマチェンバー内のマイクロ波電場を高めるためにプラズマチェンバーの導波管導入部の形状の最適化を行う予定である。

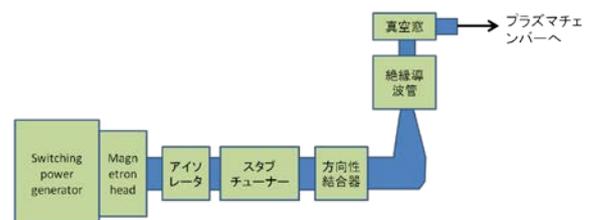


図 1 : マイクロ波電源及び導波管の構成

[#] hyamamoto@rcnp.osaka-u.ac.jp

3. 引出電極領域の改良

図2に改良後の電極の配置図と組み立て後の外観を示す。

これまでの引出電極システムでは、各電極を支持する放熱用の銅板の間に挟んでいた絶縁碍子の厚さは全て30mmであったが、沿面距離が短かったため隣り合う電極間の電位差を大きくしたときに大気側の絶縁碍子表面での沿面放電が起きやすくなってしまったという問題が発生していた（特に電位差が20kV以上になる引出電極Aと引出電極Bの間で顕著であった）。これを解決するために絶縁碍子（テフロン製）の厚さを60mmに大きくして銅板間に十分な距離を確保するとともに、凹凸をつけることで沿面距離を十分に長くするような設計に改良した。以上の改良により、引出電極Aと引出電極Bの電位差を30kVに上げてても大気側での電極間放電は抑えることができた。

また、これまでのプラズマ電極は ECR 条件を満たす磁場 (0.0875T) 領域から 10mm 程下流の位置に固定していたため、プラズマ電極の位置を 10mm 上流へ移すように電極を再設計した。それに合わせて他の引出電極全体の位置も上流側に移動させるとともに、ビーム引き出し軌道計算コード IGUN を用いて各電極の形状と配置をあらためて最適化した。再設計に当たっては、ビームの大電流化に因る空間電荷効果を考慮したうえで、引出ビームの透過効率が最大かつ低エミッタンスになるように決定した。

IGUN により得られた改良後の引出電極におけるビーム軌道シミュレーション結果を図3に示す。この計算では、プラズマ電極電位+15kV、引出電極A電位+11.5kV、引出電極B電位-20kV、引出電極C電位+4kV、D電位をGND、初期電流値2mAに設定している。電極間の距離は、プラズマ電極とA電極の間が9mm、A電極とB電極の間が36mm、B電極とC電極の間が14mm、C電極とD電極の間が14mmである。この時、計算上のビームの透過効率は85%、ビームエミッタンスのRMSは $12\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、輝度は $2.4\times 10^{-6}\text{A}/(\text{mm}\cdot\text{mrad})^2$ であった。

2.45GHz ECR 陽子源の実ビーム生成試験においては、引出電極近傍の真空度 $3.1\times 10^{-3}\text{Pa}$ 、マイクロ波電源の周波数2.45GHz、出力300W、プラズマ電極電位+15kV、引出電極A電位+8.0kV、引出電極B電位-12kV、引出電極C及びDの電位GNDの運転条件で最大電流0.8mA以上の陽子ビームの生成を確認した。また、陽子源から引き出したビームを ECR スリットで水平及び鉛直方向に $\pm 3\text{mm}$ 、Iris スリットの開口径を約10mmに制限して輸送した場合、AVF サイクロトロン of 垂直軸入射ラインのファラデーカップで $72\mu\text{A}$ 観測した時の加速・引き出し後のビーム電流は $\sim 5\mu\text{A}$ 、90%エミッタンスは $\varepsilon_x=6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ （水平方向） $\varepsilon_y=10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ （鉛直方向）であった。図4に陽子源から AVF サイクロトロン of インプレクター電極までの機器配置図を示す。

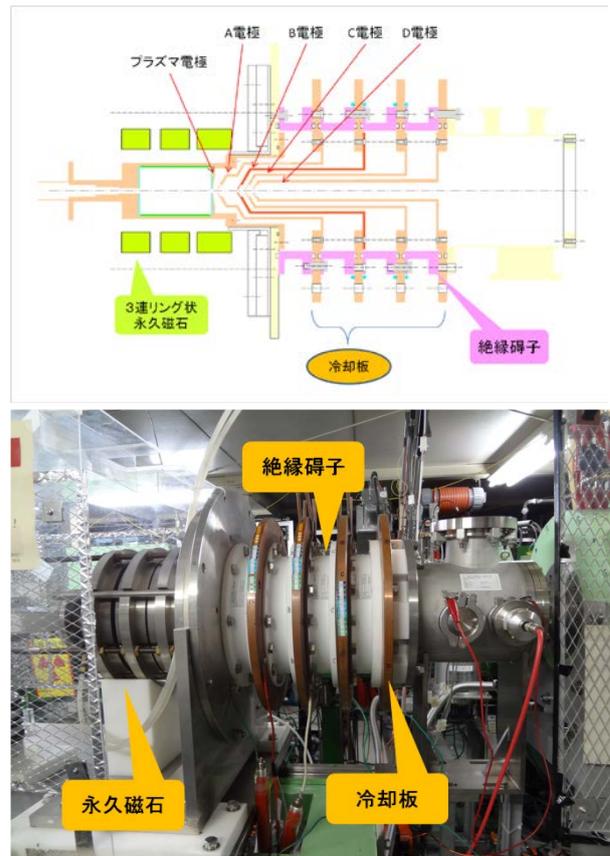


図2：絶縁碍子改良後の2.45GHz ECR 陽子源

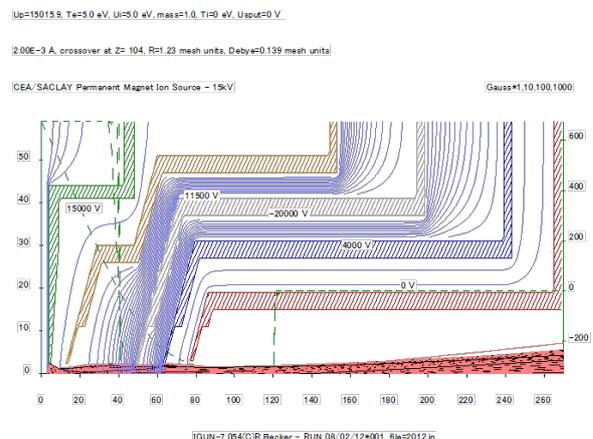


図3：IGUN による引出ビーム軌道のシミュレーション結果

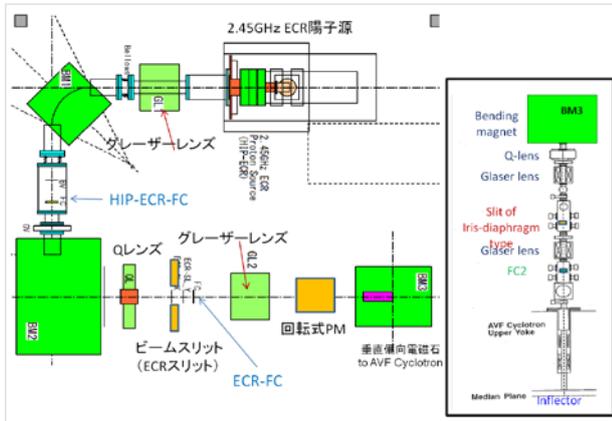


図 4 : 2.45GHz ECR 陽子源とビームライン

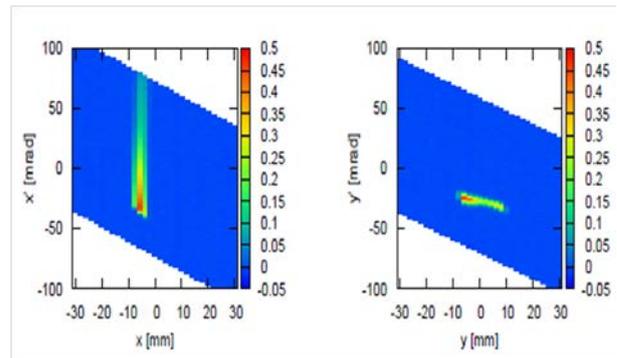


図 5 : 2.45GHz ECR 陽子源のビームエミッタンス測定結果。左図が水平方向の位相空間粒子密度分布 ($x-x'$)、右図が鉛直方向の位相空間粒子密度分布 ($y-y'$)。

4. ビームの性能評価

今回改良した陽子源から引き出されるビームのエミッタンス及び輝度のパラメータ依存性やサイクロトロン入射時のビーム輸送効率との関係を明らかにするため、引出電極の電圧を変えたときのビーム電流値とエミッタンスなどを測定した。ファラデーカップ (FC)、ビームスリット、ビームプロファイルモニター (PM) などの主要機器の配置は図 4 の通りである。ビームエミッタンスは、偏向電磁石 BM2 の下流に位置するビームスリット (ECR スリット) のギャップを 3mm に固定した状態で水平方向及び鉛直方向に 3mm ずつ移動させ、その下流に位置する回転式ビームプロファイルモニター (回転式 PM) によりビームの電流密度分布を逐次測定する方法により計測した。

4.1 ビームエミッタンスのパラメータ依存性

2.45GHz ECR 陽子源の運転条件を真空度 2.6×10^{-3} Pa、マイクロ波電源の出力 800W、プラズマ電極電位 +15 kV、引出電極 A 電位 +5.7 kV、引出電極 B 電位 -17 kV、引出電極 C 及び D 電位 GND に設定し、引出電極下流に設置した水平方向のビームスリットや分析電磁石 BM1 の下流に位置する鉛直方向のビームスリットは全開 (分析後の陽子ビーム電流値 $380 \mu\text{A}$)、ECR スリットは水平方向、鉛直方向とも $\pm 3\text{mm}$ の状態でビームのエミッタンスを測定したところ、鉛直方向のエミッタンスは $60 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化エミッタンス $0.34 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)、水平方向のエミッタンスは $190 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化エミッタンス $1.1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$) であった。エミッタンス測定結果を図 5 に示す。

また、陽子源のパラメータ (引出電極 A 電圧 (VA)、引出電極 B 電圧 (VB)) を変化させたとき

の鉛直方向のビームエミッタンス及び ECR-FC でのビーム電流値の依存性を調べた (図 6-a~d)。

引出電極 A の電圧を変化させたときの結果 (6-a) から、 $V_A = +3\text{kV}$ の点に注目すると VB の値に関わらずエミッタンスはほぼ一定だが、VB をマイナスの方に大きくすることで得られるビーム電流値は増大している (6-c)。つまり、 V_A と VB の電位差を大きくすることにより輝度が大きくなるのが分かる。また V_A を大きくするとエミッタンスも小さくなり (6-a)、より輝度が大きくなっていることが見てとれる。しかしながら、今回のテストでは、引出電極 A の電圧を上げるにより陽子源の安定性が悪くなってしまったため、これ以上の電圧での測定は行っていない。

引出電極 B の電圧を変化させたときの結果からは、 $V_A = +3\text{kV}$ の点を除いて、VB に印加するマイナス電圧を大きくするほど (よりプラズマ電極との電位差を大きくするほど) エミッタンスが小さくなり (6-b)、且つビーム電流値が大きくなる (6-d)、つまり高輝度のビームが得られることが分かる。この結果は IGUN による引出ビーム軌道計算の結果によく一致している。計算結果によると $V_B = -35\text{kV}$ 付近で得られるビームの輝度が最大になることが予想されるが、現在使用している高圧電源の定格電圧は $\pm 20 \text{kV}$ であるため、今後電源の更新も検討している。

4.2 ビーム輸送効率の測定

2.45GHz ECR 陽子源にて生成された陽子ビームを AVF サイクロトロンに入射し加速した時のビームの輸送効率を調べるため、垂直軸入射部のファラデーカップ (FC2) とインフレクター電極 (Inf) でのビーム電流について測定を行った。(測定機器の場所については図 4 を参照)

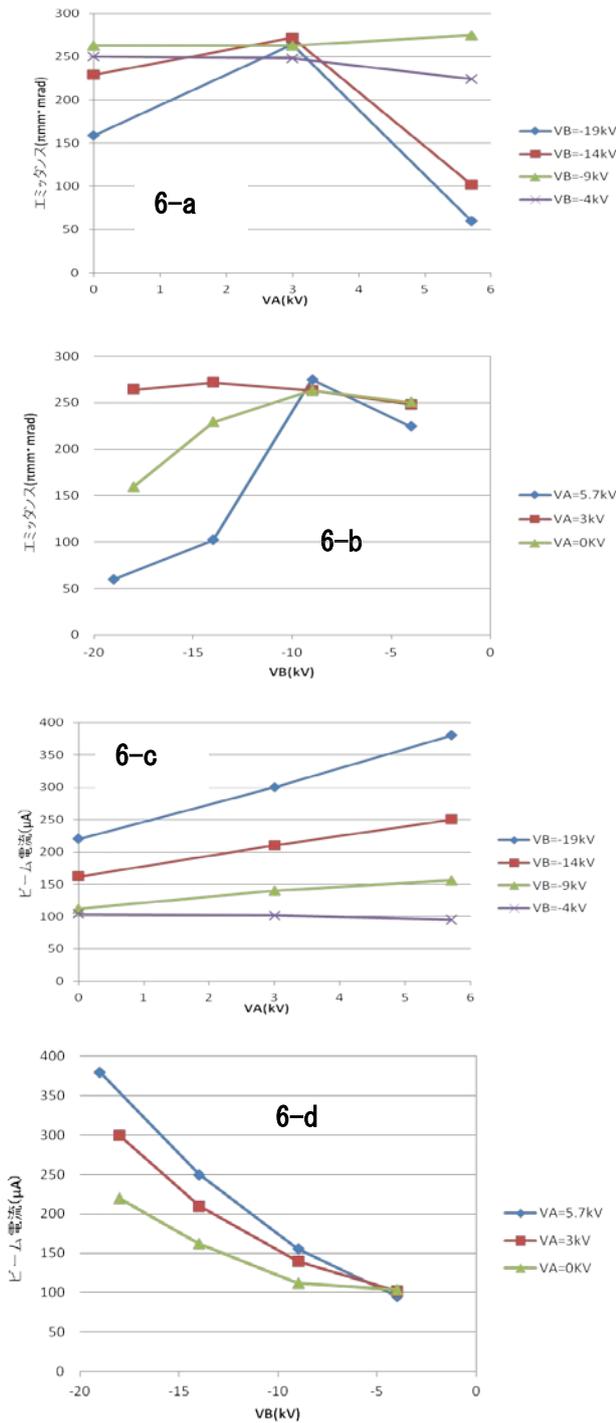


図 6：鉛直方向のビームエミッタンス及び ECR-FC でのビーム電流のパラメータ（引出電極 A 電圧及び B 電圧）依存性

運転条件を真空度 $2.7 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 、マイクロ波電源の周波数 2.45GHz 、出力 500W 、プラズマ電極電位 $+15 \text{ kV}$ 、引出電極 A 電位 $+8.1 \text{ kV}$ 、引出電極 B 電位 -16.7 kV 、引出電極 C 電位及び D 電位を GND に設定して、ECR スリットを上下 $\pm 3 \text{ mm}$ 、左右 $\pm 3 \text{ mm}$ に制限した状態で入射ビーム強度及び透過効率の測定を行った。（図 7）

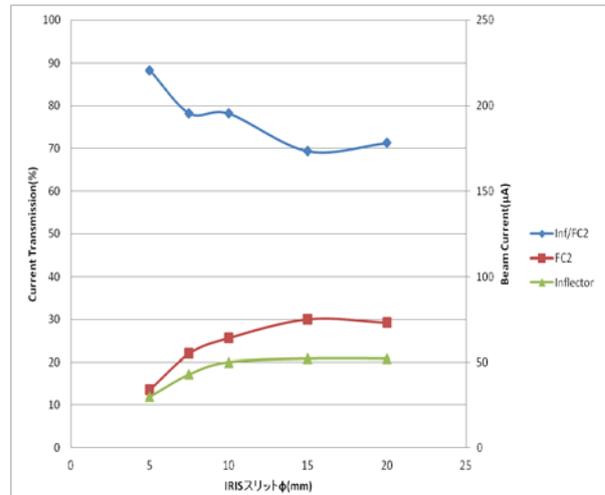


図 7：IRIS スリットの開口径を変えたときの AVF サイクロトロン垂直軸入射時のビーム強度とビーム透過効率の変化

その結果、AVF サイクロトロンへの垂直軸入射時の FC2 から Inf への陽子ビームの透過効率は、Iris スリットによるビームの制限を行わなかった場合においても 7 割以上は確保可能であった。

また、Iris スリットを $\phi 10 \text{ mm}$ 以下に制限することでビームの 8～9 割をサイクロトロンに入射させることが可能であることが分かる。このことは、サイクロトロンへの入射効率を高め、加速されるビーム強度を増強するためには更なる陽子源の高輝度化が必要であることを示唆している。

参考文献

- [1] H.Yamamoto, et al., “永久磁石型 2.45GHz 陽子源の開発とエミッタンス測定”, 第 8 回日本加速器学会年会報告集, つくば市 (2011).