

# DEVELOPMENT OF 2.45GHz PERMANENT-MAGNET PROTON SOURCE AND EMITTANCE MEASUREMENT

Hirofumi Yamamoto<sup>#</sup>, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Takane Saito,  
Tetsuhiko Yorita, Hitoshi Tamura, Mitsuru Kibayashi, Keiichi Nagayama, Shunpei Morinobu,  
Hiroshi Ueda, Yuusuke Yasuda  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University  
10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

The upgrade program for increase of the proton beam intensity is in progress at the RCNP cyclotron facility. A 2.45GHz ECR proton source installed in the injection beam line of the AVF cyclotron, has become available for providing a 15 keV proton beam with intensity of 0.7 mA. Structure of the extraction electrode support of the 2.45 GHz ECR proton source was modified for cooling reinforcement to improve reliability for long term operation. A beam profile monitor was installed in the injection beam line of the AVF cyclotron to measure beam emittance by combining a set of beam slits. Emittance of the 15keV proton beam from the 2.45GHz ECR proton source was around  $50 \pi$  mm-mrad for a vacuum pressure of  $3.9 \times 10^{-3}$  Pa, and an extracting voltage of 15kV.

## 永久磁石型 2.45GHz 陽子源の開発とエミッタンス測定

### 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, pion, muon) 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、大電流・低エミッタンス・高安定な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。

従来の陽子源では最大出力 200W のマイクロ波電源を用い、数十~150W の出力、加速電圧 (プラズマ電極の印加電圧) +15kV にておよそ 600~700  $\mu$ A の陽子ビームが得られていた。

しかし、当初の設計では、引出領域の電場を形成する 4 連のギャップ電極は、絶縁碍子 (ホットベール) を介してプラズマ電極に固定されていたため、除熱能力が十分ではなく、ギャップ電極にビームが当たることによって電極が高温になり、電極を固定している PEEK ボルトが溶融する、という問題が発生していた。そこで冷却能力を向上させ、安定した長時間運転を実現するために陽子源の引き出し電極部の設計を見直した。

また、イオン源にて生成されたイオンビームの質を評価するため、AVF サイクロトロンの入射ビームラインにある既存のビームスリットの下流に回転式ビームプロファイルモニターを新たに設置し、ビームスリットとビームプロファイルモニターを組み合わせたエミッタンス測定システムを開発した。これにより、ビームエミッタンスの陽子源パラメータ依存性などを調べた。

### 2. 永久磁石型 2.45GHz ECR 陽子源の開発

図 1 に改造した引出電極部の構造を示す。4 つのギャップ電極を直径 400mm、厚さ 15mm の銅板に個別に接続し、銅板の間に絶縁碍子を挟んで大気側への放熱による除熱能力の強化を図った。また、冷却水循環用の銅パイプを銅板の外周部にロー付けし、水冷も可能な構造にした。その結果電極の除熱能力が高まり数か月の連続運転で問題がないことを確認した。0.7mA 程度のビーム電流においては空冷のみで十分に安定しており、長時間運転での発熱に因る問題は特に発生していない。

陽子ビーム強度は、マイクロ波のパワーに依存して増加することから、最大定格 200W のマイクロ波電源から 2000W の電源 (Alter 社製 SM840E 及び TMA20) に更新した。これに伴い、導波管のサイズを、従来の WR430 から、新しいマイクロ波電源のマグネトロン・ヘッド出力部フランジの規格である WR340 に変更し、アイソレーター、スタブ・チューナー、方向性結合器も併せて更新した。図 2 にマイクロ波電源と導波管の構成を示す。現状では絶縁導波管と真空窓がハイパワー仕様になっていないことから、マイクロ波電源の出力は 200W 程度に抑えて運転している。マイクロ波電源出力を 210W に設定して運転したところ、従来と同様に 0.6~0.7mA のビーム強度が得られることを確認した。今後、絶縁導波管と真空窓を水冷型の高出力対応のものに変更する予定である。

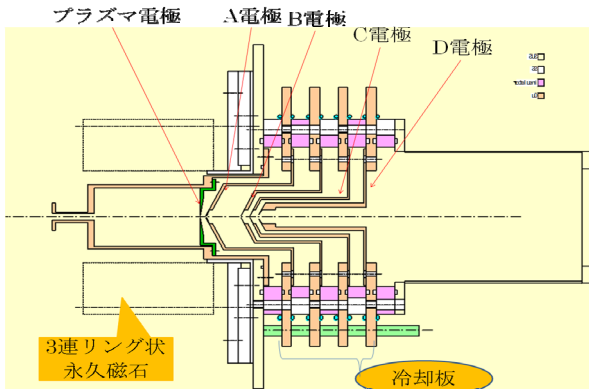
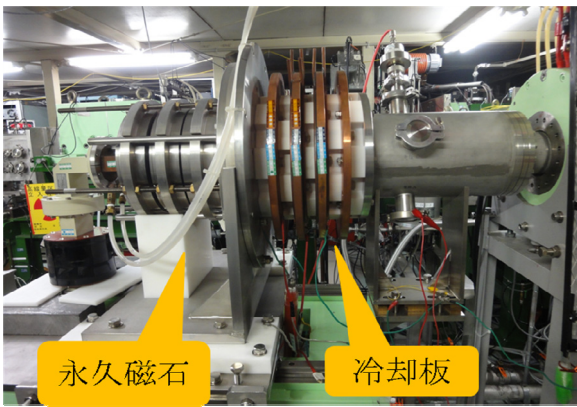


図1：引出電極部の冷却機能を強化した永久磁石型 2.45GHz ECR 陽子源

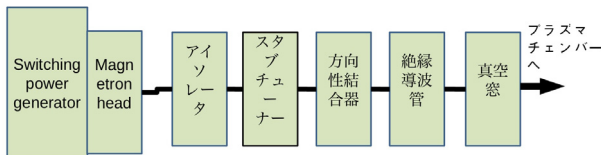


図2：2.45GHz マイクロ波電源と導波管の構成

一方、ギャップ電極 B に加えるマイナスの電圧を高くして前後のギャップ電極との間での加減速を大きく行うことにより、引き出されるビーム電流を増加させることができるが、ギャップ電極 A との間の電位差を 25kV 以上に上げ過ぎると大気側の銅板間で放電が起きやすくなることから今後改良する予定である。

### 3. エミッタンス測定

#### 3.1 エミッタンスモニターの整備

イオン源にて生成されたビームのエミッタンスを測定するため、既存のビームスリットと、その下流約 1m の距離に新たに設置した回転式ビームプロファイルモニターを組み合わせたエミッタンスモニター

を AVF サイクロトロンへの入射ビームライン上に整備した。図3に入射ビームラインに配置された陽子源、ビームスリット、回転式ビームプロファイルモニター、電磁石等の機器配置を示す。

エミッタンス測定の手順は以下の通りである。

①スリットのギャップを固定 (例えば 3mm に固定)、②スリットによって制限されたビームの広がりを下流に設置したビームプロファイルモニターで測定。但し、x 方向スリットから測定点までの距離は 1012mm、y 方向スリットから測定点までは 1018mm である。③スリット幅を保ったままスリットの位置を 3mm 移動させ、同様の測定を繰り返す。

回転式ビームプロファイルモニターのワイヤーは 18cps で連続的に回転し、1 回転する間に x 方向及び y 方向にビームを横切る。ビームがワイヤーに当たると 2 次電子が放出され、その電流変化をオシロスコープで観測する。オシロスコープ上の時間軸をワイヤーの回転周期で較正することにより x 方向及び y 方向のビーム強度分布が得られる。

ビームスリットと回転式ビームプロファイルモニターの間にはグレーザーレンズがあるため、エミッタンス測定時はグレーザーレンズの電流値を 0A に設定している。また、回転式ビームプロファイルモニターの測定範囲内にビームが収まるようにビームスリットの上流に設置された Q レンズのコイル電流値の調整を行った。

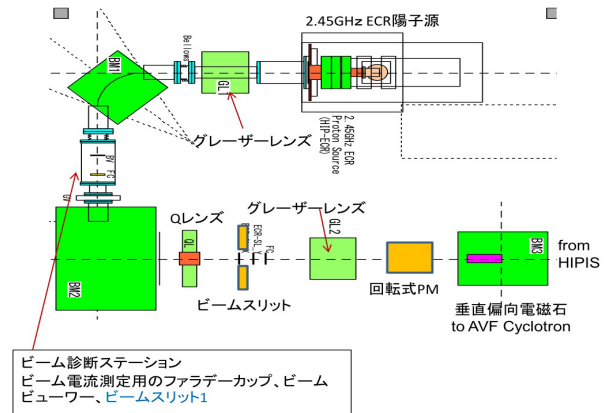


図3：入射ビームラインの機器配置図

#### 3.2 測定結果

2.45GHz ECR 陽子源の運転条件を、真空度  $3.9 \times 10^{-3}$  Pa、進行波管型マイクロ波電源の周波数 2.45GHz (信号源出力レベル +5.6dB)、プラズマ電極電位 +15kV、ギャップ電極 A 電位 +10.8kV、引出電極 B 電位 -16.3kV、ギャップ電極 C 及び D の電位 GND に設定し、エミッタンス測定を行った。

その結果、陽子ビームの水平方向のエミッタンスはおよそ  $50 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、鉛直方向のエミッタンスはおよそ  $15 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  であった。このときの位相空間内のビーム強度分布を図4に示す。ただし、鉛直方向については Q レンズを用いてもワイヤーの走査

範囲内にビームが収まらなかったため、上流のビームスリットを用いてビームを制限したことから、エミッタンスが小さく観測されている。

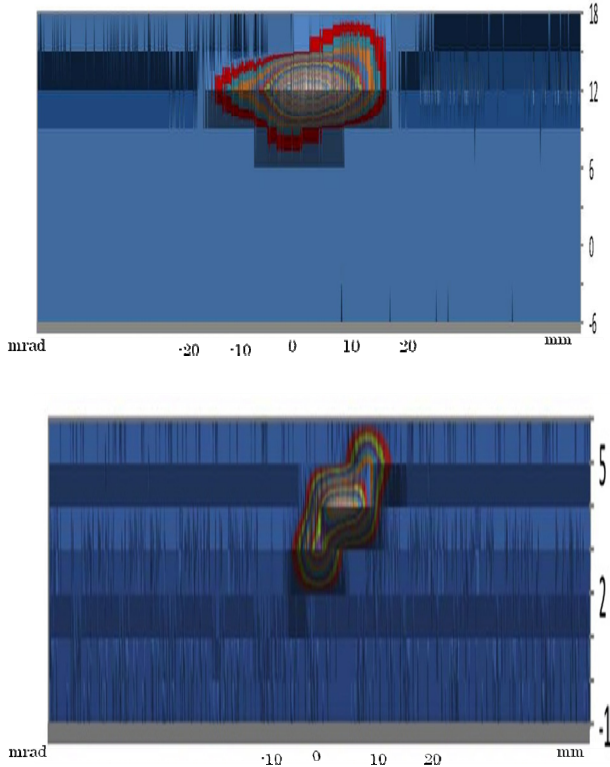


図 4 : 2.45GHz ECR 陽子源のビームエミッタンス測定結果。上図が位相空間  $x$  (mm)- $x'$  (mrad)、下図が  $y$  (mm)- $y'$  (mrad) のビーム強度分布。

また、陽子源の各パラメータ（引出電圧、ガス流量（真空度）、マイクロ波のパワー）を変化させたときのビームエミッタンスを図5に示す。

測定されたビームのエミッタンスはおよそ  $50\pi \sim 150\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  の範囲で変化し、明らかなパラメータ依存性が見られた。ギャップ電極 A の電圧を変化させた結果から、低エミッタンスで且つより大きなビーム電流を得るためには  $+10 \sim 11 \text{ kV}$  が適していることがわかった。水素ガスの流量を手動のニードルバルブにより変化させた場合には、真空度が  $5.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  のときにエミッタンスが最小であった。マイクロ波電源のパワーを大きくするとビーム電流も大きくなる傾向にあるため、ビーム強度を増強するためにはより大きなパワーのマイクロ波電源が必要であることを示している。

以上の結果を踏まえ、現在、陽子源のハイパワー化に向けた改良を進めている。

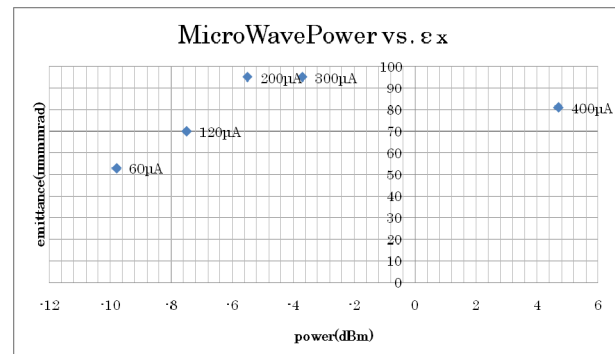
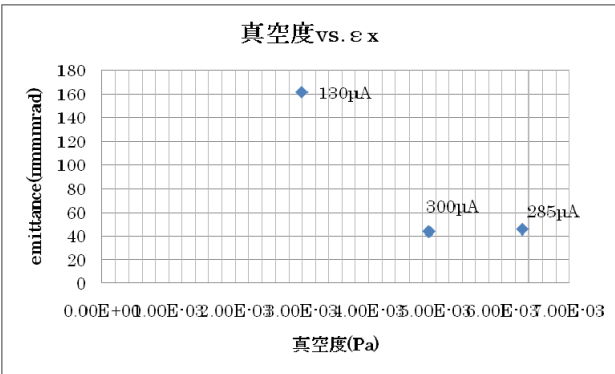
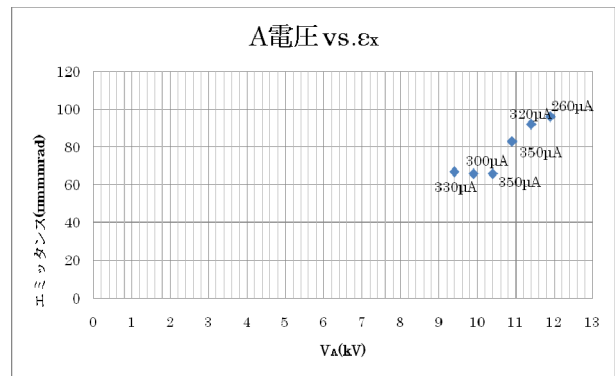


図 5 : エミッタンスの陽子源パラメータ依存性。上からギャップ電極 A の電圧 ( $V_a$ )、真空度（ガスの流量）、マイクロ波電源のパワーへの依存性を示す。