

## RCNP における高輝度陽子源の開発

### DEVELOPMENT OF HIGH-BRIGHTNESS PROTON SOURCE AT RCNP

大本恭平<sup>#</sup>, 福田光宏, 依田哲彦, 神田浩樹, 畑中吉治,  
森信俊平, 齋藤高嶺, 中尾政夫, 安田裕介, 鎌倉恵太,  
原周平, Koay Hui Wen, 森田泰之, 武田佳次郎, 原隆文  
Kyohei Omoto<sup>#</sup>, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Kichiji Hatanaka,  
Shunpei Morinobu, Takane Saito, Masao Nakao, Yuusuke Yasuda, Keita Kamakura,  
Shuhei Hara, Hui Wen Koay, Yasuyuki Morita, Keijiro Takeda, Takafumi Hara,  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

The RCNP AVF cyclotron is currently being upgraded with the goal of increasing the proton beam intensity for production of intense secondary particles fluxes to contribute to further development of neutron and muon applications such as soft error rate testing for semiconductor devices and nondestructive element analysis. For enhancement of beam brightness and transmission from a proton source to the AVF cyclotron, we aim in particular at increasing the beam intensity and reducing the emittance of the output beam from a 2.45 GHz proton ECR source by raising the maximum acceleration voltage of the proton source from the conventional 15 kV to 50 kV. In order to improve performance of the extraction electrode system of the proton source, we redesigned the extraction electrode insulation device and configuration of extraction electrodes by analyzing dependence of the extraction beam intensity and emittance on a supplied high voltage and an electrode position with the beam trajectory simulation code IGUN. And we examined the optimal placement and voltages of the extraction electrode of the proton source.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (Research Center for Nuclear Physics) では、現在、二次粒子 (中性子、ミュオン、不安定核など) のビーム強度増強などを目標に AVF サイクロトンのアップグレードを進めている。RCNP では、このアップグレードにより、陽子ビーム強度を現行の 10 倍以上に増強することを目指している。これにより、原子核物理学、核化学、ミュオン科学などといった基礎科学を始めとして、中性子照射による半導体デバイスソフトウェア評価試験や RI 製造などの産業利用や医学利用などの応用研究が、より発展することが期待される。

この AVF サイクロトンのアップグレードの一環として、特に陽子源の高輝度大強度化を目指す。サイクロトンのビーム強度増強のためには、イオン源からの出力ビーム強度を増やすだけでなく、サイクロトンの入射アクセプタンスにマッチしたより小さなエミッタンスで高強度の陽子ビームを陽子源から供給する必要がある。これらを実現するために、RCNP で用いるイオン源の最大加速電圧を従来の 15 kV から 50 kV に引き上げることで、低エミッタンス化と高強度化を目指す。

今回は、2.45 GHz ECR 陽子源で生成される陽子ビームの加速電圧を 50 kV に高めるための引出電極システムの改良を目標とし、引出電極の絶縁支持体を設計し直した。新たに制作した引出電極絶縁装置を Fig. 1 に示す。この絶縁支持体に取りつける引出電極を設計するため、引き出しビーム強度とエミッタンスの加速電圧依存性についてビーム軌道シミュレーションコード IGUN[1]を用いて解析を行い、最適な陽子源の引き出し電極の配置

と印加電圧などを検討した。ここではその手順と結果について述べる。

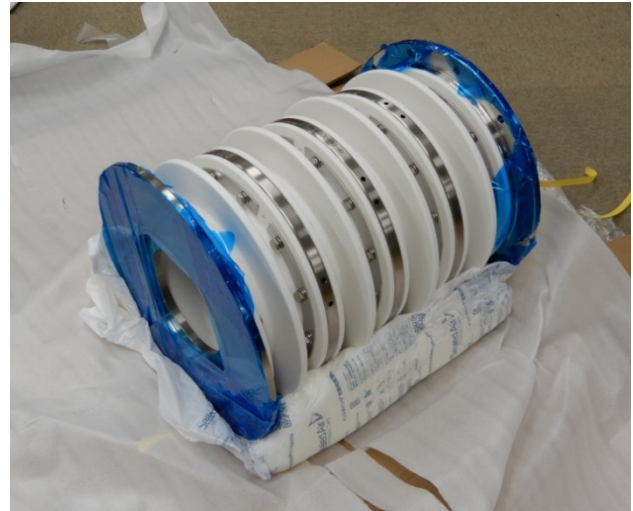


Figure 1: Extraction electrode insulation device made to raise the maximum acceleration voltage to 50 kV.

#### 2. IGUN による解析

陽子源の最適な電極構造を調べるにあたり、従来使用されていた電極構造を参考にして[2-4]、IGUN を用いてビーム軌道のシミュレーション計算を行った。Figure 2 にシミュレーション計算に用いた引出電極モデルの一例を示す。左側がビームの上流で、右側が下流に相当する。上流側にはプラズマチャンバーが接続しており、今

<sup>#</sup> omotok@rcnp.osaka-u.ac.jp

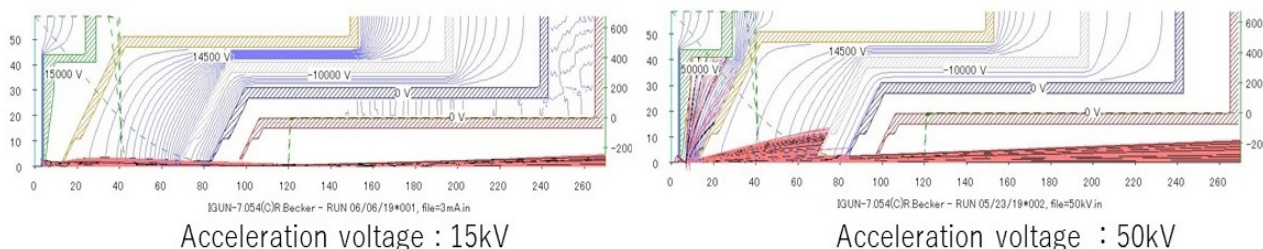


Figure 2: Simulation results by IGUN at acceleration voltages 15 kV (left figure) and 50 kV (right figure).

回はこのプラズマチャンバーから 3 mA の陽子が供給されるという仮定で解析を行った。また、引出電極全体は軸対象な構造とし、各電極のビームアパーチャーは直径 5 mm とした。なお、横軸と左の縦軸の数字は位置を表し、単位は mm、右の縦軸は軸方向の磁束密度を表し、単位は Gauss である。さらに、青色の線は等電位線を表し、赤色の部分がビームの軌道を表す。Figure 2 従来の電極構造において、加速電圧が 15 kV (左図) と 50 kV (右図) の 2 つの場合における IGUN のシミュレーション結果を示す。Figure 2 の緑色のプラズマ電極に 15kV と 50kV の加速電圧がそれぞれかかっている。

今回の解析では、加速電圧を 50 kV に固定して、より大きなビーム強度かつ低エミッタンスのビームを得るために、下流側の引出電極の電圧や位置の最適値を調べた。Figure 3 に示すように最適化する引出電極を上流側からそれぞれ A, B, C, D 電極と呼ぶ。Figure 2 における A, B, C, D 電極のそれぞれの印加電圧は、+14.5 kV, -10 kV, 0 kV, 0 kV である。

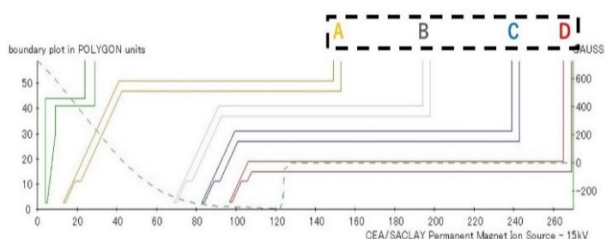


Figure 3: Arrangement of electrodes.

Figure 2 に示すように、単純に加速電圧を 50 kV に上げただけでは 15 kV の場合と比べて、ビームが大きく発散して B 電極以降の電極に衝突することが分かる。大強度かつ低エミッタンスのビームを得るためには、プラズマからのビームが電極にほとんど衝突することなく、ビームを引き出す必要がある。したがって、加速電圧が 15 kV の場合のビームのような大きな収束、もしくは発散がないような平行ビームに近いビームが望ましい。

そこでまず、ビームの A 電極の電圧依存性を調べるために、プラズマ電極を通過した直後のビームの電流値と陽子源出口 ( $z=270$  mm) での電流値の比 (以下、透過効率と呼ぶ) を調べた。ここで、プラズマ電極を通過した直後の電流値を  $I(Z=10)$ 、また陽子源出口での最終的な電流値は  $I(\text{exit})$  と表すとすると、透過効率は  $I(\text{exit}) /$

$I(Z=10)$  である。Figure 4 に、A 電極の電圧と透過効率の関係を示す。透過効率は A 電極の電圧が大きいくほど良く、プラズマ電極と A 電極の電位差は小さいほうが大きく発散しないビームを得ることができる。Figure 5 に A 電極の電圧が、-35 kV と +45 kV の時のビーム軌道を示す。また、A 電極の電圧を固定したまま、電極の位置を変えた場合もプラズマ電極と A 電極の距離が長いほど透過効率が良くなるという、同様の結果が得られた。したがって、プラズマ電極との間にかかる電場が大きすぎると、ビームの過収束が起こり結果的にビームの発散につながるということが分かった。

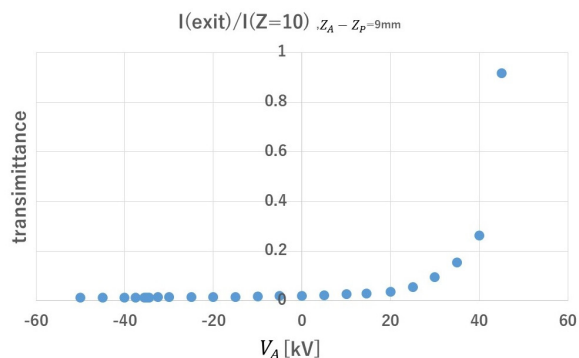


Figure 4: Voltage (at A-electrode) dependence of transmittance.

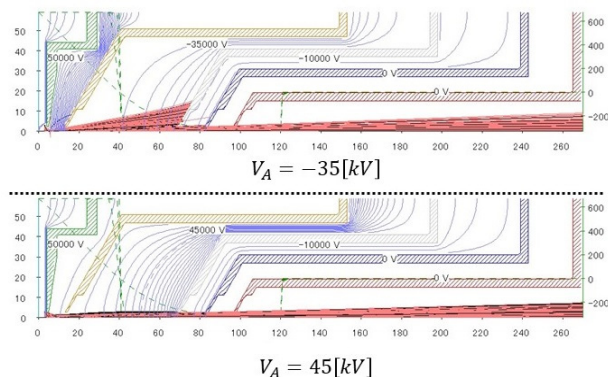


Figure 5: Beam appearance at voltages of A-electrode -35 kV (upper) and 45 kV (lower).

Figure 4 に示したように A 電極の電圧は+45 kV の時がより良い結果を得ることができることから、A 電極の電圧を+45 kV にした後、A 電極の位置、縦方向の位置、印加電圧といった順に変化させ、透過効率がより良い値となる条件を調べた。その結果、A 電極の最適な条件は、プラズマ電極からの距離が 12 mm、印加電圧が+45 kV であった。

次に、ビームの B 電極の電圧や位置に対する透過効率の依存性を調べた。Figure 6 に、Fig. 3 と同様に電流比の B 電極電圧の依存性を示す。この図より、B 電極の電圧が-35 kV よりも小さい電圧では透過効率は 100 % となる。

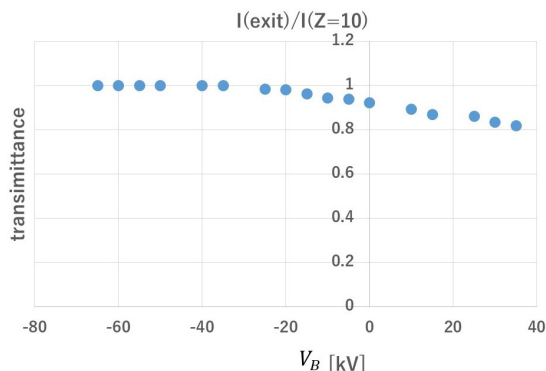


Figure 6: Voltage (at B-electrode) dependence of transmittance.

また Fig. 7 には陽子源出口でのエミッタンス [ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ]の B 電極の電圧依存性を示す。この図に示すように、上で述べた透過効率が 100 %となる B 電極の電圧の範囲では、エミッタンスにほとんど差はみられない。B 電極の電圧が大きいく所ではエミッタンスが小さくなってしまっている。したがって、この領域においてエミッタンスが小さくなっているのは、発散したビームが A, B, C, D 電極に衝突し、発散角の小さなビームのみが陽子源出口にたどり着いたことが一つの要因であると考えられる。

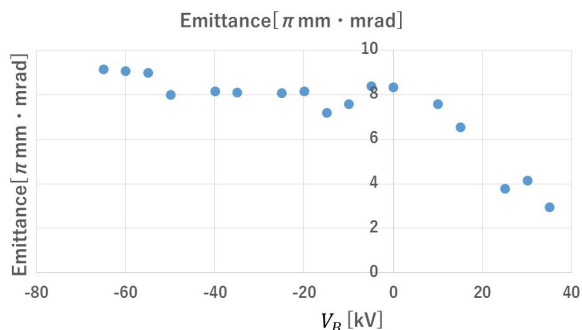


Figure 7: Voltage (at B-electrode) dependence of emittance.

低エミッタンス化だけでなく、ビームの大強度化も目指すところであるため、B 電極の電圧は透過効率が 100 % となる範囲である必要がある。また電極間の電位差によ

る放電の危険性をなるべく抑えることも考慮して、B 電極の電圧は-35 kV とした。その後、B 電極に関しても z 方向の位置などを変えてより最適な B 電極の条件を決定した。

さらに、C, D 電極に関しても電圧や位置を変化させたが透過効率、エミッタンスともにほとんど変化は見られなかったため、従来通りの電圧と位置のままにしておく。

最後に、最終的に決定した条件でのビームの様子を Fig. 8 に、引出電極の最適パラメーターを Table 1 に示す。ただし、 $V_{A,B,C,D}$  は各電極の電圧、 $Z_{A,B,C,D}$  は先端の位置を示し、 $\phi$  は全ての電極に共通したビームアパーチャーである。

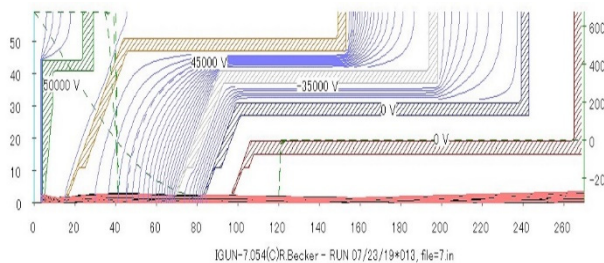


Figure 8: Beam appearance under the determined condition.

Table 1: The Determined Conditions and the Results

Conditions	$V_A = 45 \text{ kV}$ $V_B = -35 \text{ kV}$ $V_C = V_D = 0 \text{ kV}$ $Z_A - Z_P = 12 \text{ mm}$ $Z_B - Z_A = 53 \text{ mm}$ $Z_C - Z_B = 14 \text{ mm}$ $Z_D - Z_C = 14 \text{ mm}$ $\phi = 5 \text{ mm}$
Results	$I(\text{exit})/I(Z=10) = 100 \%$ $I(\text{exit}) = 2.931 \text{ mA}$ $\text{Emittance} = 8.1174 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$

### 3. まとめ

今回、2.45 GHz ECR 陽子源のアップグレードを目指した設計において、プラズマ電極に印加する加速電圧を 15 kV から 50 kV に引き上げたときの最適な引出電極構造を IGUN を用いて決定した。今後は、引出電極の上流側のプラズマチェンバー内の磁場分布を計算することによる永久磁石の配置の決定や、マイクロ波導入によるプラズマチェンバー内の電場計算などを行い、今回決定した引出電極の構造も含め、陽子源全体の最適化設計を行う。Figure 9 に想定されるプラズマチェンバー、引出電極、永久磁石等の配置図を示す。その後、陽子源の組み立て、実ビーム調整などを行う予定である。

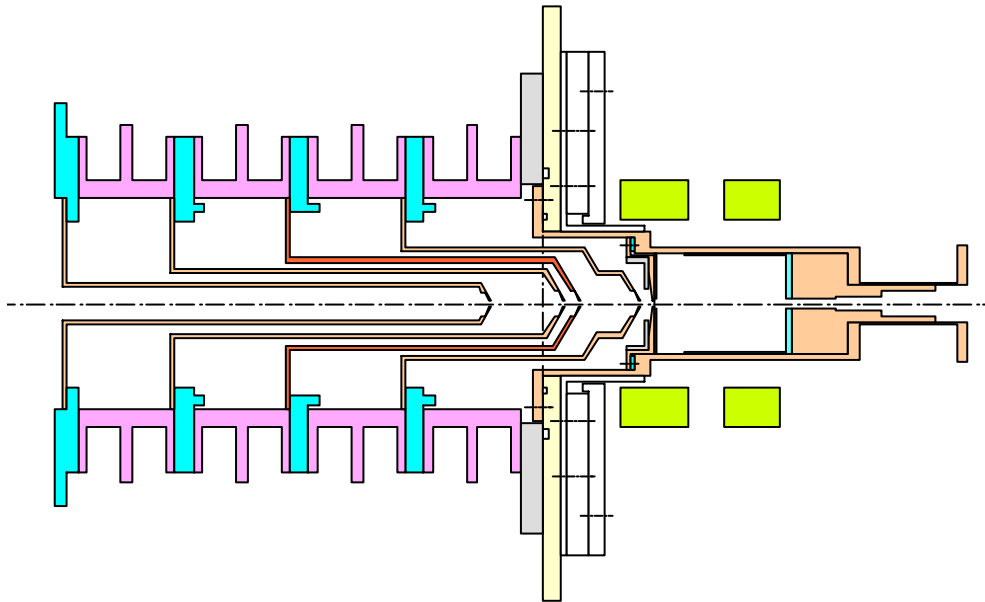


Figure 9: Configuration of the 2.45 GHz ECR proton source corresponded to acceleration voltage 50 kV.

#### 参考文献

- [1] <http://egun-igun.com>
- [2] H. Yamamoto *et al.*, “Development of 2.45 GHz Permanent-Magnet Proton Source and Emittance Measurement”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2012, pp.1156-1158.
- [3] H. Yamamoto *et al.*, “Development of 2.45 GHz permanent-magnet proton source”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp.1092-1095.
- [4] 竹村真哉, “陽子ビーム高輝度化のための 2.45 GHz ECR 陽子源の改良”, 大阪大学大学院修士論文, 2014.