

## RCNP イオン源の高輝度化

### IMPROVEMENT OF THE BRIGHTNESS OF ION SOURCES AT RCNP

橋高正樹<sup>#</sup>, 福田光弘, 依田哲彦, 神田浩樹, 畑中吉治, 齋藤高嶺, 田村仁志,  
安田祐介, 森田泰之, 武田佳次朗, 原隆文, 荘浚謙, ZHAO HANG, 松井昇大朗  
Masaki Kittaka<sup>#</sup>, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Kichiji Hatanaka, Takane Saito, Hitoshi Tamura,  
Yuusuke Yasuda, Yasuyuki Morita, Keijiro Takeda, Takafumi Hara, Tsunhim Chong,  
Hang Zhao, Syoutaro Matsui,  
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

#### Abstract

At the Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, the use of secondary beams such as RI production, neutrons, and  $\mu$ -particles has been expanding in recent years. Therefore, the primary beam from the accelerator is being enhanced. In this study, the voltage of the extraction electrode of the Superconducting (SC) ECR ion source is increased from 15 kV to 50 kV to create a high intensity electric field in order to increase the beam intensity drawn from the ion source to the AVF cyclotron. In order to achieve the stability of the acceleration voltage at the extraction electrode up to 50 kV, an electromagnetic field simulation has been performed using OPERA 3D. It was found that taking distance between electrodes is enough to achieve the stability of high voltage application.

#### 1. はじめに

近年、大阪大学核物理研究センター(RCNP)では RI 製造や中性子、ミュオン粒子といった 2 次粒子ビームの利用拡大により、ビーム強度の増大が求められている。RCNP ではビーム強度の増強に対応するべく、AVF サイクロトロンアップグレードを実施している[1]。さらに、ビーム強度の大強度化として既存の超伝導 ECR イオン源(SC-ECR イオン源)の高輝度化を実現するために、従来の加速電圧 15 kV を 50 kV まで増強し、発生した高強度の電場により大強度イオンビームを生成することを目指している。しかし、これまでの実験で、加速電圧を増加すると不安定になり、50 kV に達する前に放電することが確認されている。

#### 2. SC-ECR イオン源

RCNP の SC-ECR イオン源は多価の大強度重イオンビームの生成を目的とし、2005 年に建設された[2]。この 18 GHz の ECR イオン源の概要は Fig. 1 に示す。4 つのニオブチタン(NbTi)線材の超伝導コイルがミラーコイルと

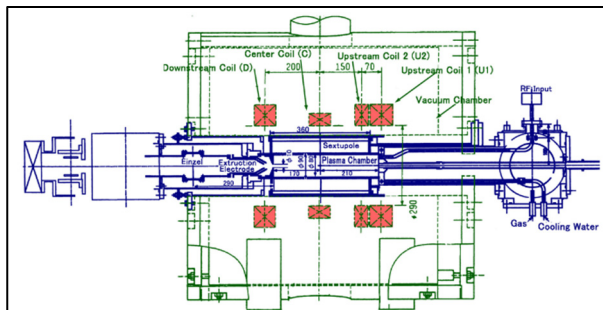


Figure 1: SC-ECR ion source [2].

して配置されており、その内部に NEOMAX による六極磁石が設置される構造をしている。さらにその内側にプラズマチェンバー、プラズマ電極および引き出し電極が設置される。

このイオン源は多価の重イオン(C,O,~Ar,Kr,Xe)を大強度で生成しており、これまでも超伝導コイル電流やガスの流入量の最適化によりイオンビームの著しい増強を実現してきた。また、加速電圧は 15 kV で稼働しており[2]、設計上の最大印加電圧は 20 kV であった。

#### 3. 加速電圧の高電圧化

RCNP では 2019 年度から AVF サイクロトロンアップグレードに着手した[1]。このアップグレードではビーム強度を 10 倍以上に増強することを目的としている。そして、AVF サイクロトロンアップグレードに伴い、イオン源の大強度化が求められている。大強度化の一環として SC-ECR イオン源の加速電圧を従来の 15 kV から 50 kV に増強する。電圧の増強によるメリットは

1. Child-Langmuir 効果(Eq. 1)によるビーム強度増強
  2. エミッタンス低減によるビームロス低減
  3. AVF 入射半径拡大による入射効率の向上
- が挙げられる。これらの効果により AVF サイクロトロンから供給されるビームの大強度化が期待される。

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2q}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (1)$$

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

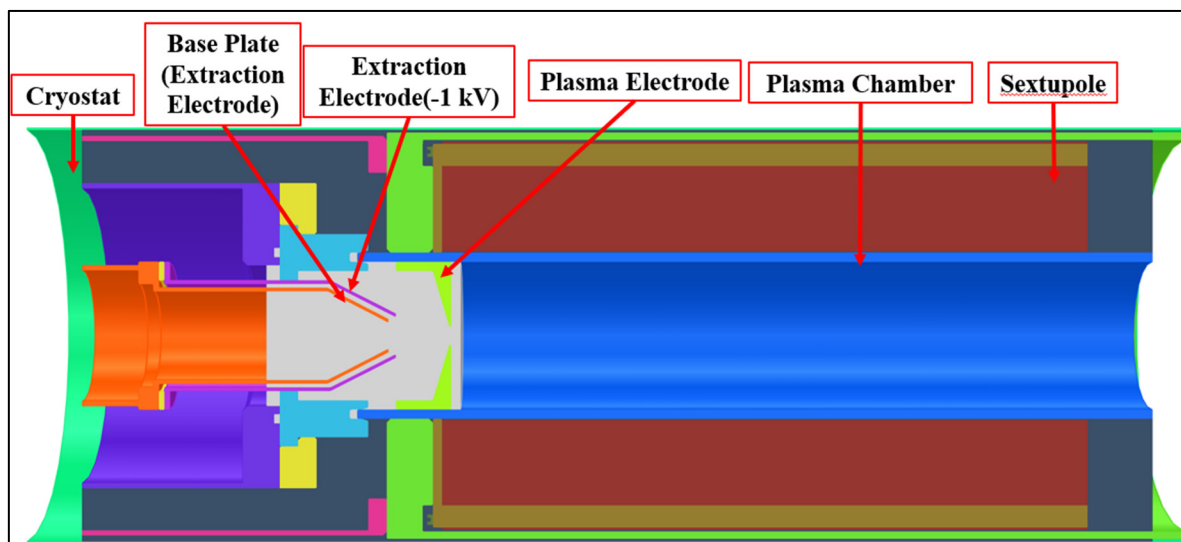


Figure 2: Simulation model of SC-ECR ion source.

#### 4. 電場シミュレーション

高電圧化に向けた改造を施すにあたり、電極構造に対する静電場のシミュレーションを実施した。シミュレーションは OPERA 3D(TOSCA)を利用した。

##### 4.1 計算モデルの構築

電場シミュレーションに用いたモデルの概要を Fig. 2 に示す。この ECR イオン源はプラズマチェンバー外側に配置する六極磁石周辺の空気領域と、チェンバー内側に配置するプラズマ電極や引き出し電極周辺の真空領域がある。空気領域では六極磁石を絶縁体のガラスエポキシで囲い、さらに外側にクライオスタットが配置されている。なお、プラズマチェンバー外側の六極磁石周辺(空气中)での放電対策については別途、電場計算に基づく対策が取られている[3]。そして、プラズマチェンバー内側の真空領域にはプラズマ電極と 2 枚の引き出し電極が配置されている。これらの電極は外側に補助電極、内側に主電極が配置される。さらに、電極同士は絶縁板(MC ナイロン)を間に挟んだ状態で絶縁ボルトを用いて、固定されている。本研究ではイオンビームの引き出し口周辺の真空領域での電場解析を報告する。電場シミュレーションをするにあたり、モデルの電極に印加した電圧を Table 1 に示す。

Table 1: List of Applied Voltage

Electrode	Voltage [kV]
Plasma Chamber	50
Sextupole	50
Cryostat	0
Base Plate (Extraction Electrode)	0
Extraction Electrode	-1

Table 1 の条件で OPERA 3D による電場計算により、放電基準値(1.0E+7 [V/m])に達する箇所の確認をし、放電基準値を超えない構造の模索を行う。

##### 4.2 最大メッシュサイズ

電場を計算する際、計算モデルの最大メッシュサイズは計算結果に大きく影響する。本研究では、電場シミュレーションをするにあたり、オートメッシュを使用した。引き出し電極周辺の真空領域の模式図を Fig. 3 に示す。Figure 3 の真空領域の最大メッシュサイズを変えた場合の電極周辺での電場計算への影響を確かめる。最大メッシュサイズは 0.5, 1, 5, 50 [mm]の 4 種類で電場を計算した。

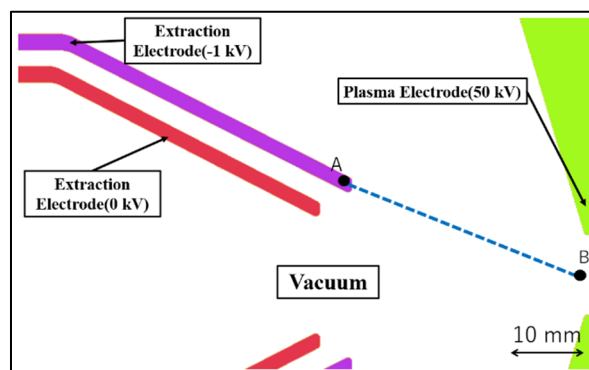


Figure 3: Schematic diagram around electrode.

各メッシュサイズ条件下における補助電極先端でのメッシュの様子を Fig. 4 に示す。Figure 4 から放電限界を探る際に重要となる電極先端付近でのメッシュの様子は、最大メッシュのサイズ設定によって大きく変化しないことが分かった。また、Fig. 3の補助電極の先端に位置するAとイオンビーム引き出し口の中心に位置する B にかけて示してある破線上の電場を Fig. 5 に示す。Figure 5 は原点を位置 A とし、横軸は位置 A から位置 B までの距離

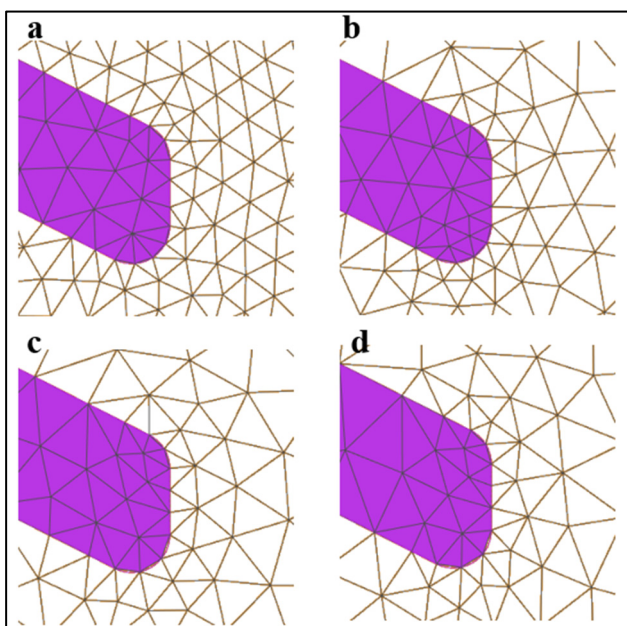


Figure 4: Schematic views of meshes. a is for maximum mesh size of 0.5 mm, b for 1 mm, c for 5 mm and d for 50 mm.

を表している。各メッシュサイズでの電場計算結果に最も大きな差がみられたのは補助電極先端付近であり、その差は  $2.4E+5$  [V/m] 以内に収まっている。よって、Fig. 5 から 4 種類の最大メッシュサイズ設定による電場の値に大きな差はないことが分かった。本研究では最大メッシュサイズを 1 mm として電場を計算した。

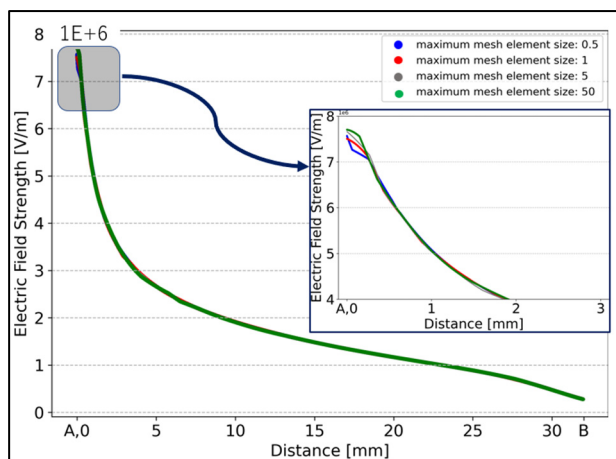


Figure 5: The lines show the electric field strength along the dashed line in figure 3.

#### 4.3 電場計算

Table 1 で示された電圧を印加し、真空領域の電場を計算した結果を Fig. 6 に示す。補助電極の表面で電場が強くなっている。さらにその範囲でも補助電極の角(領域I)と補助電極の先端(領域II)において特に電場が集中している。

主電極と補助電極は絶縁ボルトで固定されており、連

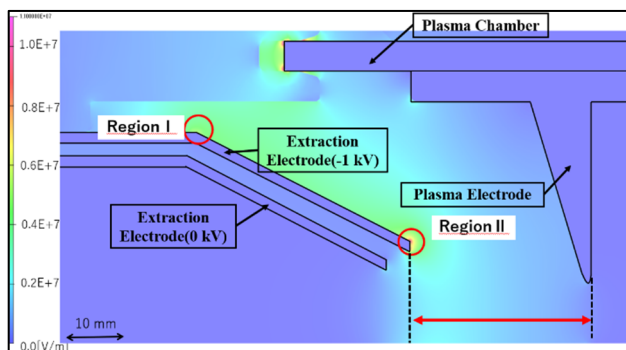


Figure 6: Electric field distribution around the electrodes.

動で平行移動させることができる。プラズマ電極口と補助電極の先端との距離を 10~40 mm とし、5 mm 毎の領域Iと領域IIでの最大電場を示したものが Fig. 7 である。領域Iでは距離 15 mm 以下の場合、放電基準値 ( $1.0E+7$  [V/m]) に達しており、20 mm を超えると放電基準値を下回る。これは、距離が 15 mm 以下では領域Iがプラズマチャンバ先端の真下に位置し、チャンバ先端からの影響を最も強く受けるため放電基準値に達していると考えられる。一方、領域IIではプラズマ電極と補助電極先端の距離が 40 mm の場合のみ放電基準値を下回ることが分かった。

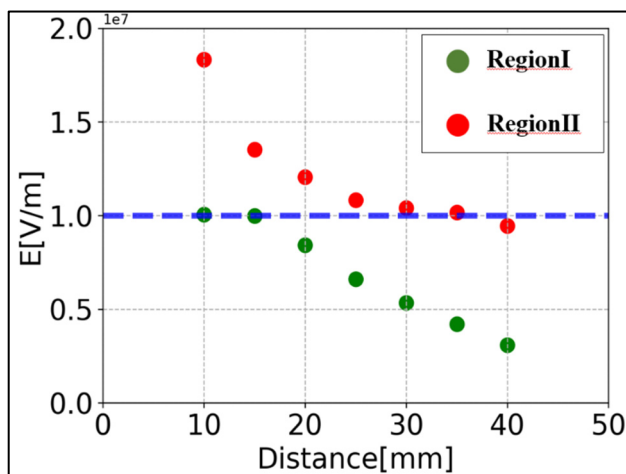


Figure 7: Distance dependences of electric field at region I and II.

#### 5. まとめ

SC-ECR イオン源の高電圧化に向けた放電対策として OPERA 3D を用いた真空領域での電場の計算を行った。真空領域での最大メッシュサイズによる電場計算への影響はみられなかった。電場計算により補助電極先端とプラズマ電極との間隔が 15 mm 以下であると放電基準値を上回ることが確認された。

そして、補助電極先端付近の電場はプラズマ電極口から 40 mm 離すと放電基準値を下回ることが分かった。よって電極間を 40mm 以上離すことでイオン源を安定に運転できると期待できる。

今後は電極間距離 40mm 以上、電圧 50kV という条件で、引き出しビームを最適化するため、IGUN などによる

シミュレーションを実施していく。

## 参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, Proceedings of PASJ2022 FROA04.
- [2] T. Yorita *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81, 02A332 (2010).
- [3] N. Yamasaki *et al.*, Proceedings of PASJ2022 TUP005.