

# RCNP 超伝導 ECR イオン源の高耐圧構造の開発

## DEVELOPMENT OF A HIGH-VOLTAGE-RESISTANT STRUCTURE FOR THE SUPERCONDUCTING ECR ION SOURCE AT RCNP

辻坂 匡\*, 松田 洋平, 福田 光宏, 依田 哲彦, 神田 浩樹, 友野 大,  
莊 俊謙, 趙 航, Shali Ahsani Hafizhu, 松井 昇大朗, 井村 友紀, 石畑 翔, 板倉 菜美  
Tasuku Tsujisaka\*, Yohei Matsuda, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroki Kanda, Dai Tomono,  
Tsun Him Chong, Hang Zhao, Shali Ahsani Hafizhu, Shotaro Matsui, Tomoki Imura, Sho Ishihata, Nami Itakura  
RCNP, Osaka University

### Abstract

The accelerator at RCNP, Osaka University, has made significant contributions to a wide range of fields, including nuclear physics, the production of radioactive isotopes, and medical applications. Enhancing accelerator performance, particularly increasing beam intensity, is expected to greatly advance research in these areas. At RCNP, an upgrade of the AVF cyclotron has been underway since 2019. As part of this upgrade, the acceleration voltage of the ion source was raised from the conventional 15 kV to 50 kV to improve injection efficiency. For light ion sources such as NEOMAFIOS, extraction at 50 kV has already been achieved. We aim to enable the application of 50 kV to the SCECR for heavy ions as well. In this study, electric field simulations based on the finite element method were carried out, focusing primarily on discharges occurring upstream of the plasma chamber. Based on these results, the shape of the insulator was examined with the aim of preventing discharge. In this presentation, we report the current status and recent progress of the SCECR.

### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) は、サイクロトロンによるビームのさらなる高分解能化・大強度化を目指している。ビームの高分解能化により原子核の精密な測定が可能となり、反応過程や核構造の解明につながる。また大強度なビームは科学の発展のみならず、医療や産業など様々な分野で需要が高まっている。

本研究では、大強度化のためのアプローチとしてビームエミッタンスの低減を考える。エミッタンスが増大する要因となる空間電荷効果は、プラズマ源から出た直後の低エネルギービーム粒子で特に顕著であり、ビームエネルギーを高くすることでその影響を抑えられることが知られている。この粒子を高エネルギー化するにはイオン源の加速電圧を高くするのが効果的である。RCNP では 2019 年より AVF サイクロトロン の改造が実施されており、その一環として、各種イオン源の加速電圧を従来の 15 kV から 50 kV まで引き上げる取り組みが進行している。超伝導 ECR (SCECR) イオン源 [1,2] では、放電の問題があり、加速電圧 50 kV は達成できていない。ゆえに、電極や絶縁体の材質・構造を見直し、放電なく高電圧印加ができるようにするのが急務である。

### 2. SCECR の放電対策と現状

Figure 1 に、SCECR イオン源の簡略図を示す。赤色は高電位、青色は 0 V を付与した箇所、白色は絶縁体である。放電問題は SCECR イオン源の複数箇所にわたって起こり、都度放電対策が講じられてきた。これらの対策により現在では、従来の 15 kV に比べて遙かに高い電圧でイオンを加速できている。本章では、各

箇所の問題点と対策について述べた後、放電対策を経た現在のイオン供給状況について紹介する。

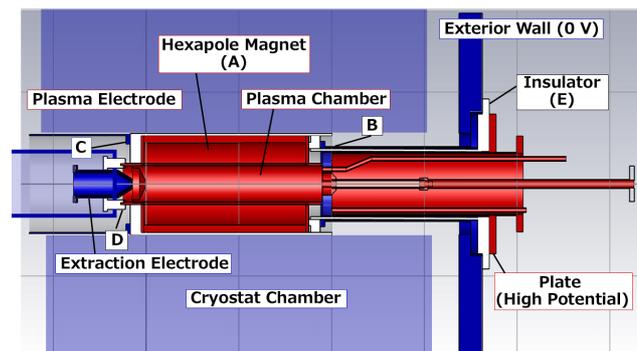


Figure 1: Schematic of SCECR ion source.

#### 2.1 六極永久磁石

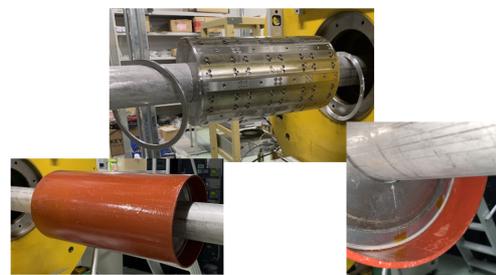


Figure 2: Hexapole magnet. Indicated by A in Fig. 1.

Figure 2 に示された六極永久磁石は周辺のクライオスタットチャンバーとの間に限られた隙間しか存在しなく、絶縁には工夫が必要であった。この六極永久磁石の放電対策については、先行研究 [3] により、永久磁

\* tasukut@rcnp.osaka-u.ac.jp

石のケーシングのボルトを低頭のものに変えることでガラスエポキシ絶縁材を厚くする余地を増やす工夫や、ボルトが飛び出している部分を導体のカバーを施すことで放電しにくくするなどした。これにより単体では 50 kV の耐圧を実現している。

## 2.2 六極磁石水平支持具（上流）

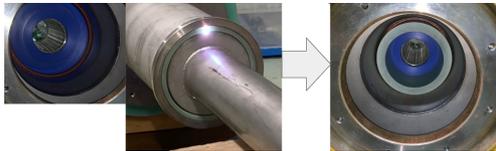


Figure 3: Hexapole magnet supporter (upstream part). Indicated by B in Fig. 1.

六極永久磁石は上下流方向に動かないように、Fig. 3 のような支持具によって押さえられている。上流側は SUS 製の支持具で MC ナイロンを介して磁石を押す構造になっている。この支持具は 0 V 側に接地されているが、内側にある高圧印加されるプラズマチェンバーとの絶縁はガラスエポキシの筒で行われている。この筒の端の部分、支持具とチェンバーが隣接しており、放電が起こりやすい状況であった。これについて、SUS 製の押さえ具を短くし、短くなった分をガラスエポキシ筒におきかえることで解決した。

## 2.3 六極磁石水平支持具（下流）

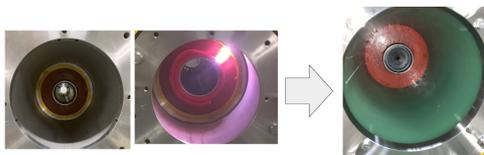


Figure 4: Hexapole magnet supporter (downstream part). Indicated by C in Fig. 1.

下流側についても、Fig. 4 のような SUS 製の水平支持具が導入されていた。水平支持具は 0 V であり、高電圧 (35 kV) 印加時に金属製のプラズマチェンバーとの間で放電が起こっていた。ここでは対策として、水平支持具を SUS 製からガラスエポキシ製に変更したことで、放電を克服している。

## 2.4 引き出し部のボルト

引き出し電極とプラズマチェンバーに触れている絶縁体 (Fig. 5) においても放電が起きていた。絶縁体を固定するためのボルトを伝って放電していたため、ボルトが直接チェンバーに触れないよう、絶縁板を追加して二重構造でボルトをとめた。

## 2.5 イオンの供給状況

2.1~2.4 の対策を経た現在のビーム供給状況について紹介する。イオン源からは、同じ核種であってもさまざまな荷電状態のイオンが引き出される。それらのイ

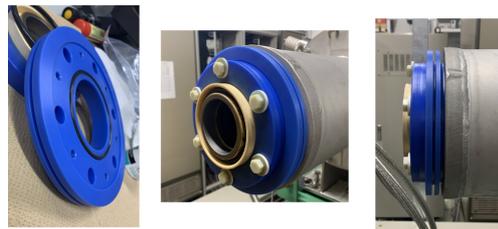


Figure 5: Bolt. Indicated by D in Fig. 1.

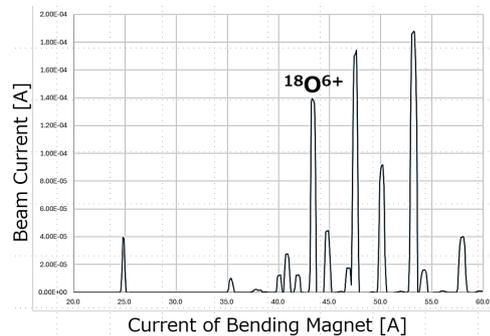


Figure 6: Beam current spectrum as a function of the bending magnet current.

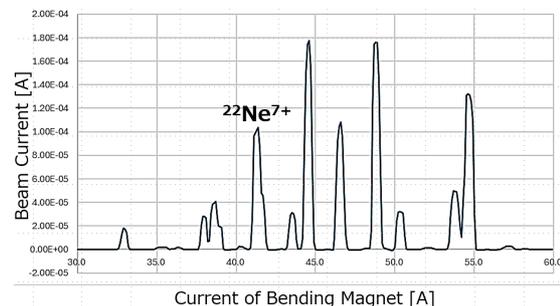


Figure 7: Beam current spectrum as a function of the bending magnet current.

オンを偏向電磁石の磁場、すなわち偏向電磁石の電流値を調整して分離し、目的のイオンを取り出す。Figure 6 は  $^{18}\text{O}^{6+}$  を 32.4 kV で、Fig. 7 は  $^{22}\text{Ne}^{7+}$  を 28 kV で加速したときの偏向電磁石の電流値に対するビーム電流のスペクトルであり、 $A/Q$  が同じイオンが各ピークに現れる。RCNP では、 $^{18}\text{O}^{6+}$  や  $^{22}\text{Ne}^{7+}$  のイオンを加速し、これらの大電流 1 次ビームを生成することを目指している。そこにおいて、イオン源での加速電圧を大幅に引き上げられたのは大きな進歩と言える。

## 3. さらに高電圧化に向けた取り組み

### 3.1 上流の絶縁体

SCECR イオン源の外壁 (黄色) は 0 V であり、Fig. 8 のステンレス部分との間に高電圧が印加される。Figure 8 は、印加した高電圧によってガラスエポキシ製絶縁体の表面に沿って沿面放電が起きている様子である。ここでは 39 kV にて放電が起き、未だ解決していない。本研究ではこの箇所の絶縁体を改良し、放電が起きない構造を目指す。

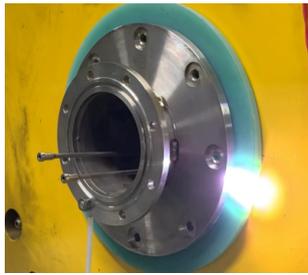


Figure 8: Creeping discharge. This part is indicated by E in Fig. 1.

### 3.2 電場シミュレーション

一般に沿面放電は、電場の大きさがおよそ  $10^5$  V/m ~  $10^6$  V/m 程度で発生し始めると言われているが、それは周囲の環境（湿度や埃の有無、表面の質など）に依存する。そこで本研究では以下を仮定する。

- 絶縁体と物体（0 V）の境界近傍の点における電場の、絶縁体表面に対して平行な成分を調べる。
- 放電が起きるかどうかの閾値には、39 kV を印加した際の値を採用する。

これらの仮定を用いて、電場シミュレーションによる放電の評価を行う。SCECR イオン源の 3DCAD データを 3DCAD ソフトウェア「Vectorworks」で作成し、CST Studio Suite を用いて電場シミュレーションを行った。導体部分は完全導体（PEC）とし、該当する部分に高電位（50 kV）や 0 kV を付与する。また絶縁体は、それぞれの素材の物性パラメータを登録し、実際の縮尺・形状を正確に再現した。Figure 9 に、電場シミュレーションにより得られた電場分布の画像を示す。

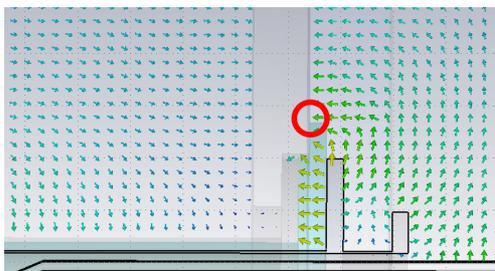


Figure 9: Electric field distribution.

Figure 9 は、Fig. 1 で示した SCECR イオン源上流部の断面図で、矢印の向きが各点での電場の向き、またその色は強さを表し、深青色から赤色に近づくにつれ強くなる。本研究の仮定ですでに述べた「絶縁体と物体（0 V）の境界近傍の点」は、Fig. 9 の赤い○で囲まれた部分である。

件の絶縁体は、中がくりぬかれたドーナツのような形状をしている。この物体の半径を変化させ、電場の大きさの変化を観察し、放電が起こらないと考えられる半径を特定する。Figure 10 が、半径とそのときの電場の関係を表したものである。

Figure 10 の青色の点は、現在の絶縁体で放電が起き始

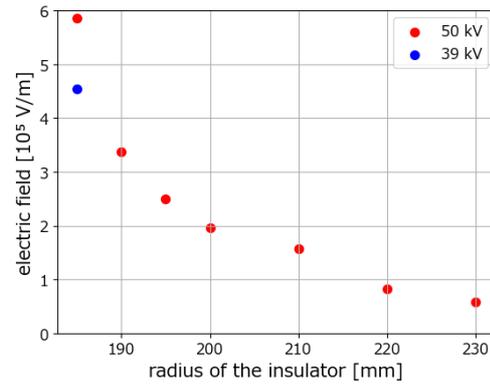


Figure 10: The relationship between the radius of the insulator and the magnitude of the electric field.

めた電圧であり、設定した沿面放電の閾値である。赤色の点は、絶縁体の半径を変化させたときの電場の大きさを表す。これによると、現在の半径である 185 mm に次ぐ 190 mm で、電場の大きさはすでに放電の閾値を下回っている。沿面放電は周囲の環境に左右されるため、半径を 190 mm にすれば完全に解決すると断定することはできない。しかしシミュレーションの結果によると、現在の絶縁体と比較して極端に大きくする必要はなく、イオン源上流側の放電も解決の糸口が見えたと言える。

### 4. まとめと展望

SCECR イオン源は、科学やその応用分野の発展に重要な役割を担っている。その機能をさらに向上させるアプローチとして、イオン源の加速電圧を 50 kV に引き上げる取り組みが進んでいる。しかし高圧化には放電問題が付随しており、その対策を行うことが急務となっている。そこで本研究では、イオン源上流部で電場シミュレーションを行うことで、「放電解決が現実的か」、「絶縁体の半径をどの程度変更すべきか」を検討した。

シミュレーションの結果に則ると、現在の絶縁体は半径をあと 5 cm 大きくすると放電なくなると結論づけられ、放電克服まではあと数歩であると言える。この程度であれば、絶縁体の表面に溝を作り、沿面距離を稼ぐことで放電を防止する方法も浮上する。これは電場シミュレーションで定量的に評価することは難しいため今回は議論しない。しかし上記の手法が可能であれば、新たに絶縁体を用意せずとも工作のみで放電を解決できる可能性がある。今後はこのようなことも含めて最適な絶縁体の構造を検討し、実際に製作へと進みたい。そして実際に高電圧印加試験やビームエミッタンスのモニタリングを行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] T. Yorita *et al.*, Rev. of Sci. Instrum. 79 (2008) 02A311.
- [2] T. Yorita *et al.*, Rev. of Sci. Instrum. 81 (2010) 02A322.
- [3] N. Yamasaki *et al.*, “Numerical simulation of low energy beam transportation for a high-power compact cyclotron”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Ac-

**PASJ2025 WEP046**

celerator Society of Japan, Kyushu, Japan, Oct. 18-21,  
2022. [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2022/  
proceedings/PDF/TUP0/TUP005.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP005.pdf)