

RCNPにおけるイオン源引出し系及び輸送系の改良と重イオンビーム開発 DEVELOPMENTS OF HEAVY ION BEAM BY MODIFICATION OF EXTRACTION AND TRANSPORT SYSTEM OF ION SOURCE AT RCNP

依田哲彦^{#, A)}, 福田光宏^{A)}, 畑中吉治^{A)}, 鎌倉恵太^{A)}, 安田裕介^{A)}, 森信俊平^{A)}, 民井淳^{A)}
Tetsuhiko Yorita^{#, A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Keita Kamakura^{A)},
Yuusuke Yasuda^{A)}, Shunpei Morinobu^{A)}, Atsushi Tami^{A)}
^{A)} RCNP, Osaka Univ.

Abstract

An 18 GHz superconducting ECRIS is installed to increase beam currents and to extend the variety of ions, especially for highly charged heavy ions which can be accelerated by RCNP cyclotrons. The production development of several ions like B, O, N, Ne, Ar, Ni, Kr and Xe has been already done and the further studies for those beam extraction and transport have been done in order to increase the beam current more injected to cyclotron. The extraction electrode and einzel lens are modified to be applied minus voltage for the beam extraction and the extracted beam is increasing as the electrode voltage rising. Additional steering magnets have been installed to reject the effect of magnetic field leakage from AVF Cyclotron and the transmission of transport line has been improved with these steering magnets successfully.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センター（RCNP）では、AVF サイクロトロン及びリングサイクロトロンでの加速ビームの強度の増強及び加速イオンの多様化を目指し、18GHz 超伝導 ECR イオン源を導入し開発を進めてきた。これまで B, C, O, N, Ne, Kr, Xe などのイオン生成の開発が行われ、既に実験ユーザーにも供給されてきた。今回、更なる加速ビーム増強のため、イオン源出口電極構造の大幅な改造を行った。具体的には開口の拡大、及び印加電圧の最適化を行った。また、引出されたイオンビームの AVF サイクロトロン入射までのビーム透過効率の向上を目指し、漏れ磁場が問題となっているビーム輸送系へのステアリングマグネットの設置などを行った。これらの改造を基にビームテストを行ったところ、AVF への入射ビーム強度の向上が見られた。これらの改良を詳しく見るため、エミッタンスの測定も行われた。

2. 引き出し系の開発

2.1 引き出し電極の改造

イオンビーム増強のため、引き出し電極系の改造を行ったが、改造前の構造は Figure 1 の(a)に、改造後の構造は Figure 1(b)に示しめされたとおりである。(a), (b)ともプラズマ電極が青色、引き出し電極が赤色、アインツェルレンズが緑色で示されている。改造のポイントとしては、まずプラスに印加されているプラズマ電位に対し、引き出し電極を最大 -20kV まで印加可能とした。マイナスに印加された引き出し電位はアインツェルレンズの領域を超え更に下流のバップル部分でグランドに戻るようになっている。これにより、引き出しビームの大強度化、低エミッ

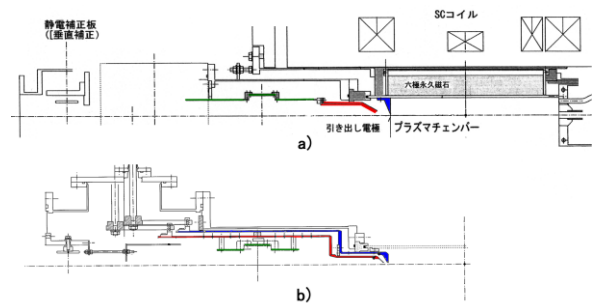


Figure 1: 今回改造を行った出口電極の構造図。a)が改造前。b)が改造後を示す。いずれの図において、プラズマ電極を青色、引き出し電極を赤色、アインツェルレンズを緑色で示す。

タンス化が期待される。次のポイントとしては、引き出し電位の中に設置されたアインツェルレンズは設置位置に自由度が持たせられている。これにより、アインツェルレンズの最適化が可能になる。最後のポイントとして、プラズマ電極位置、及び引き出し電極位置、双方をビームテストの最中、真空を破ることなしに大気側から変更可能な構造とした。これは、一つは引き出し電極位置の最適化をビーム強度を見ながら調整可能とするためである。また、他方、プラズマ電極を調節可能とすることで、できるだけ条件を変えずに、プラズマチェンバーにおける、ミラー磁場条件、プラズマ電極位置、そして、バイアスディスク位置それぞれのビーム強度に関する相関を詳細に調べることが可能となる。

2.2 ビームテストと結果

新しい引き出し電極が製作され、設置が完了し、ビームテストが行われた。但し、新しい電極の耐電圧に多少の問題があり、引き出し電極を -6 kV まで印加するところまでを、一旦 20Ne⁶⁺ビームによ

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

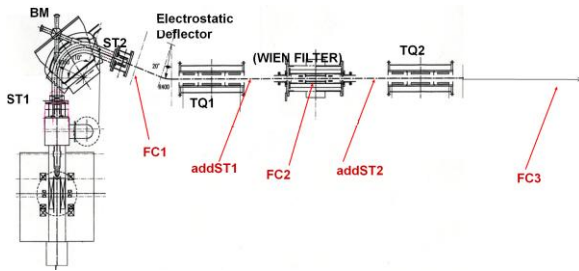


Figure 2: SC-ECRのビーム輸送系と各コンポーネントの配置図。ST1, ST2 はステアリング、BM は偏向電磁石、TQ1, TQ2 は静電 Triplet Q lens、FC1, FC2, FC3 はファラデーカップ、addST1, addST2 はステアリング電磁石である。

るテストを行った[4]。その後、調査を行いポテンショメータと高圧部の接続箇所の絶縁材に問題があったことを突き止め、改良したものの再設置を行い、ビームテストを行った。但し、一旦解決した絶縁だが、長時間運転の結果、別の個所でカーボン汚れと思われる絶縁不良が再発したため、今回も結局のところ、引き出し電極-6 kVまでの印加でのビームテストとなった。

12C5+で行ったビームテストの結果を、Figure 3 に示す。Figure 3 の左図が引出電圧とビーム強度の相関について、右図は引出電圧と Einzel 電圧の差分とのビーム強度の相関についてである。データ点が丸や三角等と種類が違えてるのは、引出電圧の違いを示すことで左図と右図とでデータ点の同定が出来るようにしている。電極の径は、プラズマ電極、引き出し電極ともにφ10、電極間の距離は20mmとした。ビーム電流はFigure 2 中のFC1 で示したファラデーカップで測定した。ビーム電流が50uA以下と150uA以上の2群あるのは、CO2 ガス導入により生成した低強度の12C5+ビームと、CH4 ガス導入による12C5+ビームのデータが両方記載されていることによる。

ビームテストの結果、CO2 ガスによる低強度の12C5+の場合は引出電圧をあげるに従いビーム強度

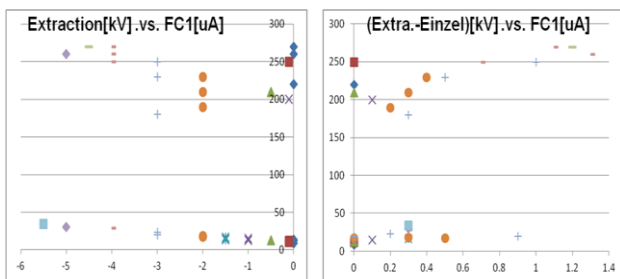


Figure 3: 12C5+ビーム強度と引出電圧、Einzel 電圧との相関。左図が引出電圧との相関について、右図は引出電圧と Einzel 電圧の差分との相関について。データ点の丸や三角等の種類の違いは引出電圧の違いを示し、これにより左図と右図のデータ点の対応がつく。

が増加する、一方、CH4 ガスによる大強度の12C5+ビームの場合も引出電圧を印加することによりビーム強度が増大するが、印加電圧-4kV のところで最適値となることがわかった。また、Einzel の印加電圧の最適値は引出電圧に対して1.2kV程度であった。

MAINC	ION	addST1	addST2	FC1	FC2/FC1	FC3/FC1
[A]		[A]	[A]	[uA]	[%]	[%]
0	12C5+	0	0	240	87.5	83.3
1000	12C5+	0	0	240		31.3
1000	12C5+	0.28	0.3	240	79.2	75
0	16O6+	0	0	690	78.3	72.5
1035	16O6+	0.45	0.28	630	66.7	66.7

Table1: MAINC:AVF メインコイル電流, FC1~3:Fig.2 で示した各ファラデーカップ及びそこまでのビーム透過率, addST1,2:新設ステアラー電流(A)。addST1 は水平方向に Figure 4 のLからRへの補正を、addST2 は垂直方向に上から下への補正を行っている。MAINC=1000 の12C5+の透過効率は、MAINC=0 の場合において、最適化された Triplet Q 等のコンポーネントのパラメータそのままに MAINC のみ励磁して測定されたもの。それ以外は各々の MAINC の状態において、各イオンビームがFC3において最大電流になるように各コンポーネントが最適化されている。

3. ビーム透過率の改善

3.1 漏れ磁場対策としてのステアリング電磁石

AVFへ入射されるビーム増強のためビーム輸送系の見直しも行った。特にかねてから問題とされてきた、AVFからの漏れ磁場のビーム透過率に対する影響[3]を低減するためビーム輸送ラインにステアリング電磁石を2台設置した。Figure 4 にイオン源のビーム輸送系とAVFのマグネット等を上方から重ねてみた図を示す。イオン源ビームラインとAVFのMedian Planeは6mの高さの差がある。また、Figure 2 中でaddST1, addST2 で示したのが増設したステアリング電磁石である。Figure 2 を見てわかるように TQ1, TQ2 の領域には今回設置した addST1, addST2 を除いてはビーム方向を制御できるコンポーネントが無かったが、今回の設置により、ビームの透過率の向上が期待された。

3.2 ビームテストと結果

AVFのメインコイルを励磁して、新設のステアリング電磁石によるビーム透過率の改善が見られるか、12C5+及び16O6+でのビームテストを行った。結果はTable 1 に示した通り。ステアリング設置以前はAVFメインコイル励磁なしのときFC3/FC1が80~90%となるのに対し、AVFメインコイル電流がおよそ1000Aのとき50%まで低減していたが、ステアリングを使った場合はビーム透過効率が改善することが分かった。但し、励磁なしの場合に比べ依然透過効率が数%劣るので、更なる最適化の方法を検討する必要がある。一方、AVF励磁

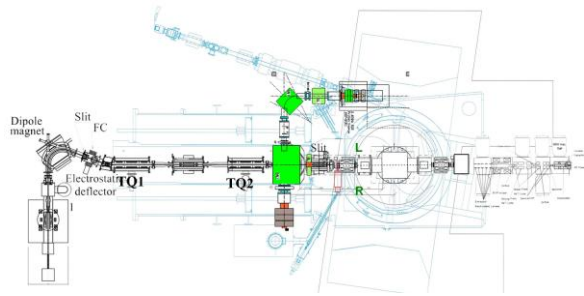


Figure 4: イオン源ビーム輸送系とAVF電磁石等を上方から重ねてみた様子。イオン源ビームラインとAVFのMedian Planeは6mの高さの差がある。

なしのときの1606+の透過効率が12C5+の場合に比べて小さいのはビーム強度の違いによる空間電化効果の影響などが考えられる。

3.3 引出電圧とエミッタンス

引出電極の改造によりビーム増強が実現したがエミッタンス改善の寄与があるのか確認するためビームエミッタンスの引出電圧依存性を測定した。1606+ビームに対する測定結果はFigure 5に示すとおり。エミッタンスはXYスリットとNEC BPM82を使用した高速測定型のもの[5]を使用した。測定の結果は、ビーム透過効率及びエミッタンスは引出電圧に依存せず一定値をとった。この結果は、エミッタンス測定装置がFC3の直下流に設置されており途中でビームが切られてしまっていることを示している可能性が考えられる。一方、Figure 3の12C5+のビーム強度の引出電圧依存性の傾向に対して、600uA超の1606+は引出電圧に対して単調増加の傾向を示している。これは空間電化効果の寄与が複雑である可能性を示していると考えられる。

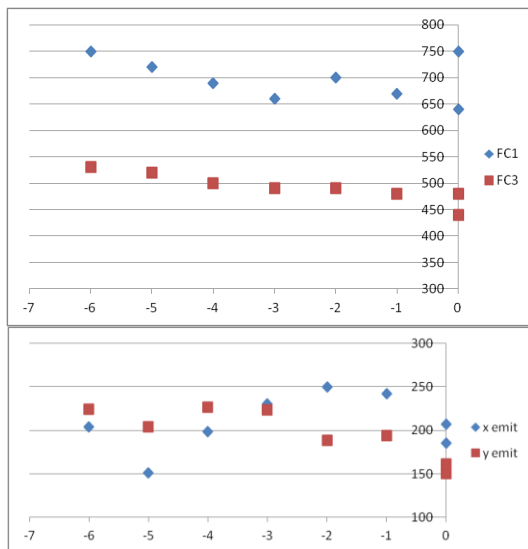


Figure 5: 1506+のビーム強度及びエミッタンスの引出電圧依存性。ビーム透過効率FC3/FC1は引出電圧によらず約70%、ビームエミッタンスも引出電圧によらず約200 pi mm mradである。

4. まとめ

重イオンビームの更なるビーム強度の増強を目指して、RCNPの18GHz SC-ECRの引き出し系、及び輸送系の開発を行った。

引き出し系は電極の改造を行った。放電などの解決すべき問題が残っているものの、簡単な引き出し電圧印加テストを行った。その結果、引き出し電圧によってビームが大幅に増強されることが示された。

また、輸送系におけるビーム透過率に関して、透過率を悪化させる原因と考えられるAVFメインコイルの漏れ磁場をキャンセルさせるためにステアリング電磁石を2台新設した。これにより、ビーム透過率の向上が見込まれたが、AVF励磁なしの場合の透過率80~90%を達成するためには更に詳細な開発が必要であることが分かった。また、エミッタンス測定を通して、途中でビームが切られている可能性が高いが、これらの詳細な調査、改善により更なるビーム透過効率の改善が期待される。

今後、実ビームの測定と並行してシミュレーション計算による検証も行うことで、更なるビーム増強を目指す。

参考文献

- [1] T. Yorita, et. al, Rev. Sci. Instrum. 79, 02A311 (2008)
- [2] T. Yorita, et. al, Rev. Sci. Instrum. 81, 02A332 (2010)
- [3] T. Yorita, et. al, Rev. Sci. Instrum. 83, 02A335 (2012)
- [5] T. Yorita, et. al, Proc. of PASJ'12, WEPS019
- [4] K. Kamakura, et. al, Proc. of PASJ'12, WEPS075