

14 GHz Hyper ECR イオン源を用いた ECR プラズマの研究 STUDIES ON ECR PLASMA USING 14 GHz HYPER ECR ION SOURCE

鎌倉恵太 *^{A)}、小高康照 ^{A)}、中川孝秀 ^{B)}、武藤英 ^{C)}、大西純一 ^{B)}、畑中吉治 ^{D)}、
後藤彰 ^{E)}、山口英齊 ^{A)}、今井伸明 ^{A)}、下浦享 ^{A)}、酒見泰寛 ^{A)}

Keita Kamakura*^{A)}, Yasuteru Kotaka^{A)}, Takahide Nakagawa^{B)}, Hideshi Muto^{C)}, Jun-ichi Ohnishi^{B)}, Kichiji Hatanaka^{D)},
Akira Goto^{E)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Nobuaki Imai^{A)}, Susumu Shimoura^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)}

^{A)}CNS, the University of Tokyo, ^{B)}Nishina Center, RIKEN, ^{C)}Suwa University of Science,

^{D)}RCNP, Osaka University, ^{E)}IMSS, KEK

Abstract

CNS 14 GHz Hyper ECR ion source provides various ion beams to RIKEN AVF cyclotron. We have been focusing on the enhancement of the intensity of multiply charged heavy ions by improving extraction electrodes, metal vapor generation methods, etc. Recently, studies on ECR plasma have been performed for further improvements. A state of ECR plasma is defined by a combination of several operating parameters, such as the excitation current of mirror coils, RF power, the flow rate of ionization/support gases, and so on. We used Kr gas as ionization gas to study the effect of those parameters on ion production. This report will discuss the hysteretic and transitional behavior of ECR plasma observed in the experiments.

1. 概要

東京大学 CNS では 14 GHz Hyper ECR イオン源を用いて理研 AVF サイクロトロンに様々なイオンを供給している [1]。本イオン源では、これまで引出系の改良や固体試料蒸気生成技術の開発などにより、多価重イオンビームの大強度化が行われてきた [2]。現在さらなる大強度安定供給を目指し、ECR プラズマの研究が進められている。

一般的に、プラズマ状態は電子密度・電子温度・イオン閉じ込め時間などの物理量で決まる。これらはメインガス・サポートガスの流量、ミラーコイルの電流値、マイクロ波出力、プランジャーの位置など様々な運転パラメータで制御される。それらのパラメータが多価重イオン生成に与える影響について、Kr をイオン化ガスに用いて実験を行った。今回はその実験で観測された ECR プラズマの履歴を持った遷移現象を中心に報告する。

2. HYPER ECR イオン源

本イオン源は、RF 周波数 14 GHz の ECR イオン源である。Figure 1 にその概略図を示した。ミラーコイルは常伝導で MC1(上流)と MC2(下流)の 2 系統、六極磁石は永久磁石である。プラズマチェンバは内径 50 mm、全長 195 mm で、チェンバ容積は約 380 cm³ である。また上流側から可動式のステンレス製プランジャーを挿入し、RF キャビティ条件を調整することができる。このプランジャーは固体試料でのビーム生成を行う場合は、リチウム・マグネシウム増殖や鉄試料ホルダーに交換される。イオン化ガスとサポートガスは上流側のガスチェンバから導入される。ガスチェンバと高圧ガスボンベの 2 次側 (~0.1 MPa) はニードルバルブを介して接続されており、このバルブ開度を調整することでプラズマチェ

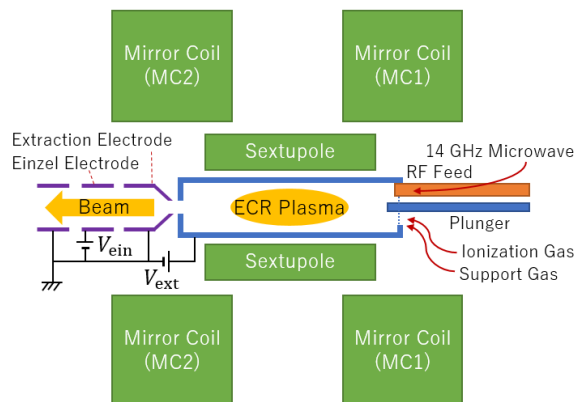


Figure 1: Schematic diagram of Hyper ECR ion source. Magnetic components are shown in green, the extraction system is in purple, geometrical elements affecting RF cavity condition are in blue and the RF feed is in orange.

ンバ内のガス圧制御を行っている。マイクロ波は進行波管 RF 源で生成され、プラズマチェンバ上流側に設置された導波管を通して供給される。プラズマチェンバはグラウンドに対して引出電圧 (V_{ext}) だけ浮いている。今回の実験では $V_{ext} = 15$ kV に設定している。イオンはプラズマチェンバの出口に位置するプラズマ電極と引出電極の間で加速されビームとなる。引き出されたビームは正電圧 (V_{ein}) に印加されたアインツェル電極により集束され下流に輸送される。この引出系は光軸に沿って位置を調整することができ、加速ギャップを変更することが可能になっている。

引出系の下流には四重極磁石と 90° の偏向磁石が設置されている。偏向磁石でビームの分析を行い、ビームスリット及びファラデーカップで任意のイオン種のビーム電流値を計測している。

* kamakura@cns.s.u-tokyo.ac.jp

ビームの調整は前述のイオン源パラメータ6つとビーム輸送系パラメータ3つで行われる。ビーム電流の最大化を行うにはこれらの多変数問題を解かなければならない。特に ECR イオン源を運転する上で最も難しいのは、制御パラメータ、プラズマ状態を決めている物理量、観測量が一对一対応していないという点にある。例えば、イオン化ガスの流量を増やすと、電子密度は上昇する一方で、電子の平均温度は下降する。

3. ECR プラズマの遷移現象

これまで前述の各パラメータが重イオンビーム量に与える影響について実験を行ってきた。イオン化ガスには Kr を、サポートガスには He, Ne, N₂ を用い、制御パラメータを独立に動かしてビーム電流の測定を行った。その結果、いくつかの条件で履歴を持ったプラズマ状態の遷移現象が観測された。こういった遷移は通常のビーム供給時にも発生していたが、今回初めて系統的なデータが得られた。

3.1 マイクロ波出力

サポートガスに N₂ を用いて、⁸⁴Kr⁷⁺ の電流値を最大化するように各制御パラメータを調整してから、TWTA のマイクロ波出力を上下させた。Figure 2 にマイクロ波出力に対する ⁸⁴Kr⁷⁺ ビーム量と TWTA で計測された反射波の推移を示す。測定の都合により 1 W 以下の反射波は計測出来なかったため 1 W 以下は 1 W としてある。

マイクロ波出力を 100 W から上昇させていくと、ビーム量は増加していき、300 W 弱でビーム量の最大値 (36.5 eμA) を迎える。さらに出力を上げると 300 W 付近で遷移が起こりビーム量は 13.5 eμA まで急落する。続いて出力を 600 W まで増加させてもビーム量が増えることはない。そこから逆に RF 出力を減少させたところ、遷移が起こった領域まで下げてもビーム量は回復せず、166.5 W で再度遷移が起こり元のビーム量に戻った。もう一度 200 W まで RF 出力を上昇させたが、最初出力を上げていった

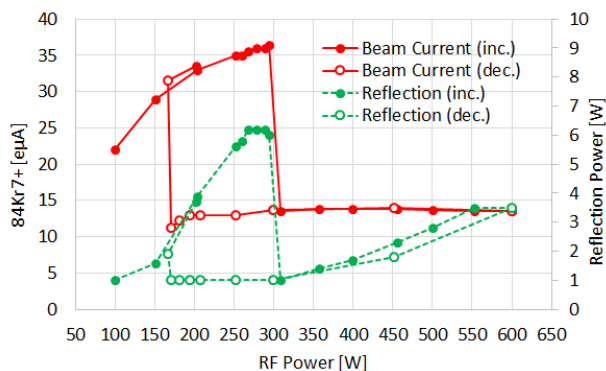


Figure 2: Beam current of ⁸⁴Kr⁷⁺ and reflected power vs. input RF power. The red solid line indicates the beam current and the green broken line indicates the reflected power. Closed circles are measured when input power is increased, and open circles when it is decreased.

ときと同様の振る舞いを見せた。

この実験のパラメータでは、プラズマの状態に少なくとも 2 つの準安定状態が存在していることがわかる。またデータとしては記録できていないが、目視ではプラズマ光の明度の変化が観測された。

⁸⁴Kr⁷⁺ ビーム量が高いほうの準安定状態を維持できる時間は、マイクロ波出力に依存している。ビーム量を確保しようと RF 出力を上げて 300 W に近づくほど遷移が起こるまでの時間が短くなる。例えば 270 W ではビーム量の高いほうの状態に安定するが、285 W では 2 分程で遷移が起こってしまう。ビーム供給のために調整を行う場合、この点に注意する必要がある。

3.2 上流側ミラーコイル電流 (MC1)

マイクロ波出力を 274 W に設定し、ミラーコイル磁場を変化させて、その ⁸⁴Kr⁷⁺ ビーム電流への影響を調べた。

Figure 3 に下流側ミラーコイル (MC2) 電流値を 504 A に固定し、上流側ミラーコイル (MC1) 電流を変化させた場合の ⁸⁴Kr⁷⁺ ビーム量と真空度を示す。

MC1 を 400 A から徐々に上げていくと 545 A で一旦ビーム量は極大値をとり、555 A でプラズマ遷移を起こし、ビーム量が急落する。このとき真空度は 3% ほど不連続に上昇している。この真空度は引出チェンバで計測している。これはプラズマの状態の変化により、電子およびイオンのプラズマチェンバ内壁・引出部への当たり方 (強度と場所) が変化して、脱ガスの量が変わったためと考えられる。

前述の実験では測定一点につき 30 秒かけている。従って遷移領域を通過するのに数分の時間が経過している。もう一度遷移前の MC1: 530 A から 562 A まで 10 秒程度で一気に遷移領域を越えてコイル電流値を変化させるとプラズマに遷移が起こらず、ミラーコイル電流の最大値: 588 A で ⁸⁴Kr⁷⁺ ビーム量の最大値を得ることができた。

この結果から、MC1: 555 A, MC2: 504 A の磁場分布

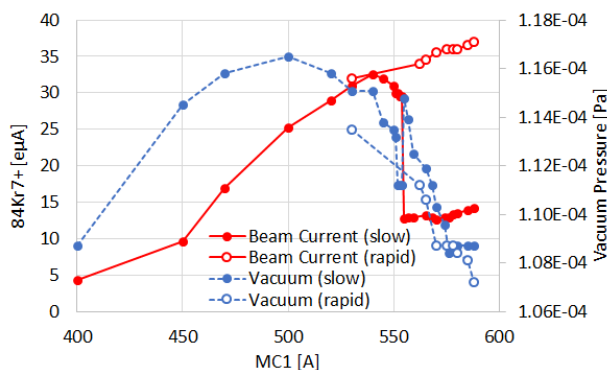


Figure 3: Beam current of ⁸⁴Kr⁷⁺ and vacuum pressure vs. MC1 current. The red solid line indicates the beam current and the blue broken line indicates the vacuum pressure in the extraction chamber. Closed circles are measured when the coil current is swept slowly, and open circles when it is done rapidly.

でプラズマの不安定性は特に増加するものの、MC1: 530 A や 562 A が作る磁場分布では比較的安定した状態であると推測できる。また不安定な磁場分布でも 10 秒程度では遷移が起こらないため、その不安定領域を素早く通過することで元の準安定状態のまま MC1 を上げることができると考えられる。

3.3 下流側ミラーコイル電流 (MC2)

次に同様の試験を、上流側ミラーコイル電流 (MC1) を 588 A に固定し、下流側ミラーコイル電流 (MC2) を変化させて $^{84}\text{Kr}^{7+}$ ビーム量と真空度の測定を行った。その結果を Fig. 4 に示す。MC2 を 400 A から上げていくと 470 A でビーム量は極大値を迎え、480 A で遷移が起こりビーム量が激減する。そのまま MC2 を最大値の 588 A まで上昇させてもビーム量にほとんど変化はない。元の準安定状態に戻すためには、MC2 を一旦 425 A まで下げる必要がある。MC2 では一気に遷移領域を通過させる方法で遷移を回避することはできなかった。

再度 MC2 を 500 A まで上げた。プラズマの遷移が起き、ビーム量は 20 e μ A 程度まで下がっている。この状態で一旦マイクロ波出力を 274 W から数十 W まで下げ、再度 274 W まで戻すと、 $^{84}\text{Kr}^{7+}$ ビーム量は 36 e μ A 程度まで上げることができ、このイオンのビーム量が多く取れる準安定状態に戻すことができた。さらに MC2 を上げると 511 A 付近で再度遷移が起き、ビーム量は 20 e μ A 程度まで戻った。

このように各制御パラメータに履歴があると同時に、多次元のパラメータ空間で通る経路も運転性能に関わる。

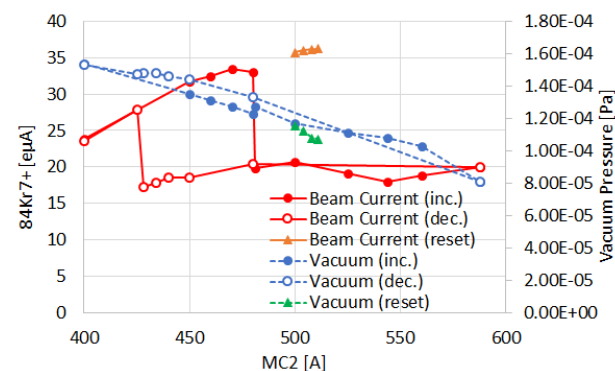


Figure 4: Beam current of $^{84}\text{Kr}^{7+}$ and vacuum pressure vs. MC2 current. The red solid line indicates the beam current and the blue broken line indicates the vacuum pressure in the extraction chamber. Closed circles are measured when input power is increased, and open circles when it is decreased. Triangles show the beam current (orange solid line) and the vacuum pressure in the extraction chamber (green broken line) after the RF power reset at 504 A.

4. プラズマ遷移前後での価数分布

MC1 を 526 A に固定し、MC2 を 400 A, 500 A, 588 A と変化させ、それぞれの組み合わせでビームの分析を行い、価数分布 (2+~11+) を測定した。結果を Fig. 5

に示す。各測定でその他のプラズマ生成に関わるパラメータは変えていないものの、ビーム輸送系 (インツェルレンズ・四重極磁石・分析磁石) の微調整を行った。これはイオンがプラズマチェンバから引き出された後の輸送系でのビームロスを抑え、プラズマ状態のみからくる効果を調べるためである。

MC2 を 400 A から徐々に上げていくと、542 A で遷移が起こった。従って測定された価数分布は 400 A 及び 500 A に遷移前、588 A のとき遷移後となっている。価数分布の形に着目すると、MC2: 400 A→500 A は同様の傾向を示しており、2 価から 11 価まで全体的にビーム量は上昇している。一方で MC2: 500 A→588 A は遷移前後で 11 価を除いて全体的にビーム量は低下しており、特に低価数のビーム量が顕著に減少している。前章の実験では $^{84}\text{Kr}^{7+}$ のみに着目してきたが、プラズマの準安定状態からビーム量を受ける影響は、その価数によって異なることがわかった。

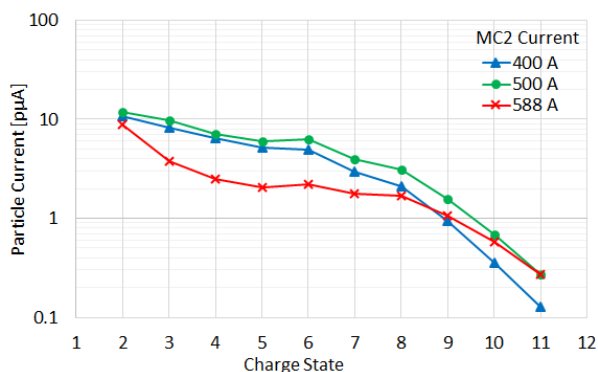


Figure 5: Charge state distributions of Kr beams. Three trends are the results of their measurements when MC2 is set to 400 A (indicated as blue triangles), 500 A (as green circles), and 588 A (as red X-marks), while MC1 is fixed to 526 A.

5. 考察とまとめ

Kr を用いたビーム生成実験で、これまで断片的にしか認識できていなかった ECR プラズマの準安定状態間の遷移現象に関して、より系統的な知見が得られた。今回、プラズマ状態に多次元の制御パラメータ空間での経路や履歴が寄与していることがわかってきた。遷移現象はプラズマに内在する不安定性が外部条件により顕在化した結果と考えられるが、物理的な議論にはさらなる実験が必要である。今後は、これらの知見を用いて ECR イオン源最適化制御の研究をさらに推進していく予定である。

参考文献

- [1] K. Ozeki *et al.*, Proceedings of the 19th PASJ Meeting, TWP001 (2022).
- [2] K. Kamakura *et al.*, CNS Annual Report 2020, 45-46 (2021).