

DEVELOPMENTS OF RIKEN 28GHz SC-ECRIS

Yoshihide Higurashi^{#,A)}, Jun-ichi Ohnishi^{A)}, Takahide Nakagawa^{A)}, Hiromitsu Haba^{A)},
Masashi Tamura^{B)}, Toshimitsu Aihara^{B)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Akito Uchiyama^{B)},
Osamu Kamigaito^{A)},

^{A)} RIKEN Nishina Center

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

^{B)} SHI Accelerator Service Ltd.

1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

Abstract

To increase the bema intensity of highly charged heavy ions, we injected 28GHz microwaves into the RIKEN SC-ECRIS in 2011. Using this microwave, we produced $\sim 120\mu\text{A}$ of Xe^{20+} and $\sim 20\mu\text{A}$ of U^{35+} at the RF power of $\sim 1\text{kW}$. We observed that the higher frequency gives higher bema intensity of highly charged Xe ions at the same RF power. It may be due to the frequency effect predicted by the model calculation based on the Fokker-Planck equation. We also measured the emittance of the U^{35+} ion beam. The 4rms X- emittance was $\sim 110\pi\text{mm mrad}$, which is almost same as that with 18 GHz microwave.

28GHz 超伝導 E C R イオン源の開発

1. はじめに

Fragmentation 反応を用いた R I ビーム生成において、ビーム強度の増強は重要な要素の一つであることは言うまでもないが、特に $\sim 200\text{MeV/u}$ を超えたエネルギー領域においては R I ビーム生成用重イオン加速装置の製作コストを低減するうえで最も重要な要素の一つであることが予測されている。^[1] このことから R I ビームを用いた実験を主たる目的とする研究施設では R I ビーム生成ターゲット上でのビーム強度増強のために新しいイオン源の設計、製作に力を注いでいる。理化学研究所仁科加速器研究センターでは、特に U ビームを用いた R I ビーム生成量を増加させるために 2007 年より、超伝導 E C R イオン源の製作を開始した。2010 年には 18GHz のマイクロ波を用いて多価イオンビーム生成試験を行い、既存のイオン源の約 10 倍の強度の U^{35+} イオンビーム生成に成功している。ビーム強度の更なる増強をはかる有力な方法の一つはより高い周波数を用いること^[2]であるが、仁科加速器センターにおいても 2011 年から超伝導 E C R イオン源の高周波数化を図るために、28GHz ジャイロトロンのパワー試験、多価イオンビーム生成を開始した。本稿ではマイクロ波入射部の詳細、28GHz を用いた実験の結果および今後の計画について報告する。

2. 超伝導 E C R イオン源

超伝導 E C R イオン源の基本的な構造、18GHz マイクロ波を用いたビーム生成実験の詳細に関しては文献^[3,4]を参照されたい。本章では 28GHz マイクロ波導入のために改造された点の詳細について報告する。図 1 はマイクロ波の発生、輸送、イオン源内への導入の概略図である。マイクロ波は 28GHz ジャイロトロンを用いて発生させる。発生したマイクロ波は TE02 モードであるため TE01 モードへ変換するためのモード変換器、モードフィルターを通し、DC カット (耐圧 35 kV, 最大許容パワー 10 kW)、気密窓 (最大許容パワー 10 kW) を介してイオン源内に導入される。ジャイロトロンから発生するマイクロ波パワーは主にジャイロトロンに印加される電子加速電圧によって制御される。図 2 は発生マイクロ波パワーのジャイロトロンからの電子加速電圧依存性である。マイクロ波パワーはダミーロードを用いて測定された。図にはモードフィルターの下流にテーパ導波管を接続した場合 (赤丸)、テーパ導波管 + DC カットを接続した場合 (青丸)、テーパ導波管 + DC カット + 90 度ベンド導波管を接続した場合 (白丸)、テーパ導波管 + DC カット + 90 度ベンド導波管 + 真空窓を接続した場合 (黒丸) が示されている。図から明らかなようにマイクロ波パワーは接続装置に依存せず、ほぼ同じ値を示し、各装置の通過効率ほぼ 100% であることが分かる。

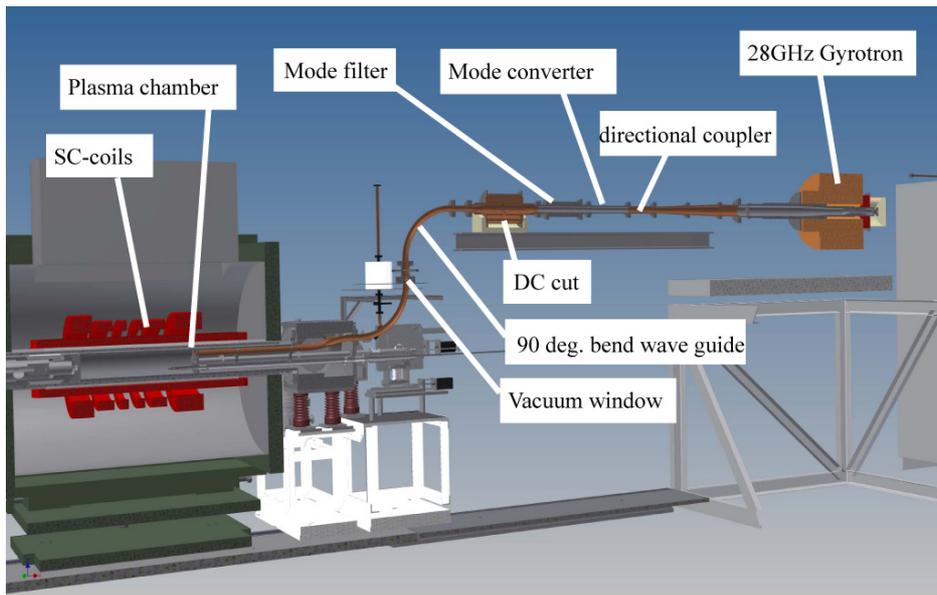


図 1: 28GHz ジャイロトロン及び立体回路概略図

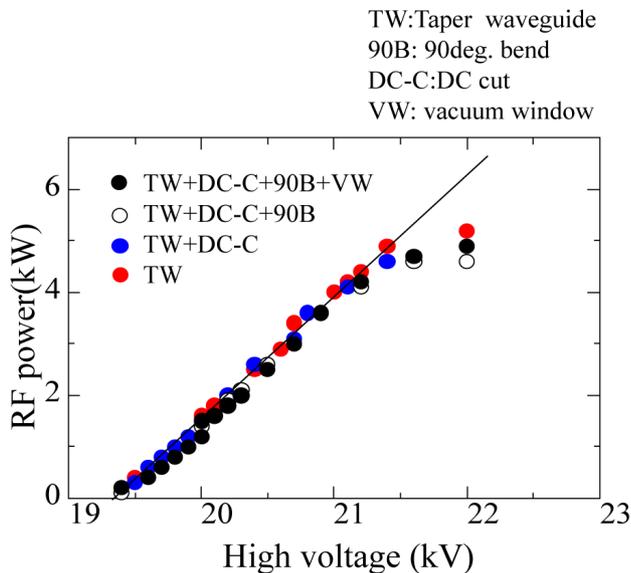


図 2: マイクロ波パワーの電子加速電圧 (High voltage) 依存性、

3. 実験結果

図 3 は 18GHz と 28GHz を用いて得られた Xe²⁵⁺ イオンの価数分布である。28GHz を用いた場合の B_{inj} 、(RF 入射側最大磁場) B_{min} 、(ミラー磁場の最小値) B_{ext} (ビーム引き出し側最大磁場) 及び B_r (プラズマチャンバー内壁面における同径方向磁場) はそれぞれ 3.0, 0.74, 1.7, 1.8T である。18GHz の場合は磁場の最適化に関する経験則に基づき 28GHz で用いた値の 65% に設定されている。マイクロ波パワーは約 500W である。フォッカープランク方程式を用いたシミュレーション計算から

予測されるように、同じ入射パワーであるなら 18GHz を用いた場合よりも 28GHz を用いた方が多価イオンのビーム強度が強くなる傾向にあることが判明した。今回の実験では Xe²⁵⁺ イオンビームの強度に関しては 18GHz 入射に比較して約 2 倍程度のビーム強度が得られた。図 4 はプラズマから発生した高エネルギー X 線によるクライオスタットの熱負荷である。横軸は B_{min} と B_{cer} (共鳴磁場, 28GHz の場合は 1T) の比をとっている。同じマイクロ波周波数、パワーである場合、 B_{min}/B_{cer} が大きくなるとともに熱負荷が大きくなっている。 B_{min}/B_{cer} が大きくなるにつれて、共鳴点での磁場勾配が緩やかになり、電子が一回共鳴点を通過するときに得られるエネルギーは大きくなり高エネルギー電子の生成が促進される。このためクライオスタットの熱負荷は B_{min}/B_{cer} の比とともに大きくなる傾向にある。図から明らかのように今回の実験では同じ B_{min}/B_{cer} の比、同じマイクロ波パワーであるにも関わらず、28GHz を用いた場合、18GHz の場合より大きな熱負荷が観測された。高周波数のマイクロ波は電子の閉じ込め時間を長くすることがフォッカープランク方程式を用いたシミュレーション計算によって予測されている。つまりより高い周波数の使用は高エネルギー電子の生成を促進することになり、クライオスタットの X 線による熱負荷が増加したと推測される。図 5 は入射パワー約 600 W 時の Xe²⁰⁺ イオンビーム強度の価数分布である。イオン源は Xe²⁰⁺ ビーム強度を最大にするように調整された。

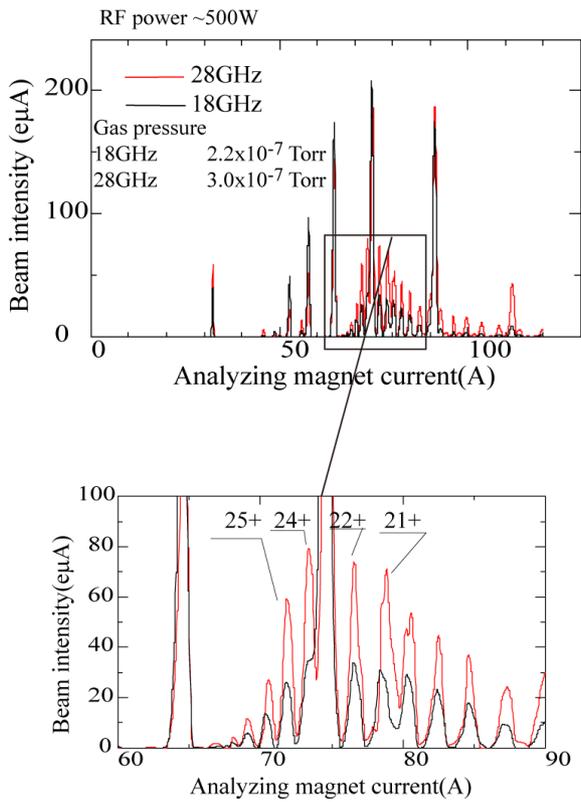


図3: 18GHz, 28GHz マイクロ波を用いた時の Xe イオンビームの価数分布。イオン源は Xe^{25+} ビーム強度を最大にするように調整された。

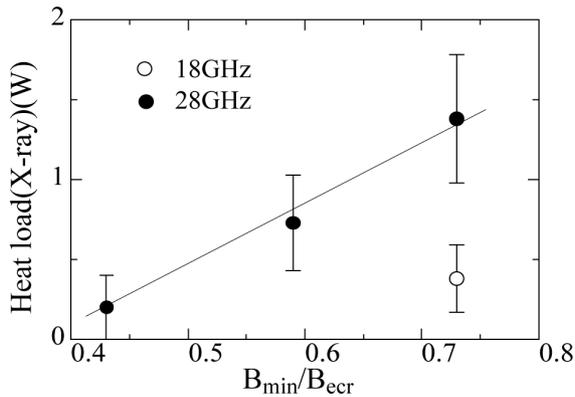


図4: 高エネルギーX線による熱負荷の B_{min} 依存性

図6はスパッター法を用いて得られた多価Uイオンビームの価数分布である。プラズマ生成、Uロッドをスパッターするために酸素を用い、入射パワーは約 1 kW である。イオン源はガス圧等を変化させ U^{35+} イオンビーム強度を最大にするように調整された。现阶段で 20eμA のビーム強度が得られている。同条件下でエミッタンスを測定し、予備的な結果ではあるが二乗平均エミッタンスで

約 $110\pi mm\ mrad$ (X-エミッタンス) が得られた。通常 ECR イオン源の場合、ビーム引き出し磁場が強くなるほど、ビームのエミッタンスは大きくなると予測されているが、18GHz を用いての実験結果および今回も実験結果 (28GHz を使用) を比較すると磁場強度に強く依存する傾向は見られなかった。より定量的な比較を行うには今後系統的な測定が不可欠であるが、今回の実験結果から高周波数のマイクロ波を用いることでビーム強度ばかりでなく多価イオンビームの輝度を上げられる可能性があることが推察される。

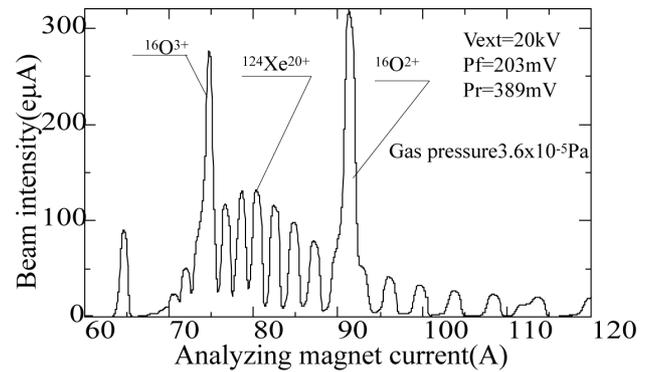


図5: Xe イオンビームの価数分布。イオン源は Xe^{20+} イオンビーム強度を最大にするように調整された。

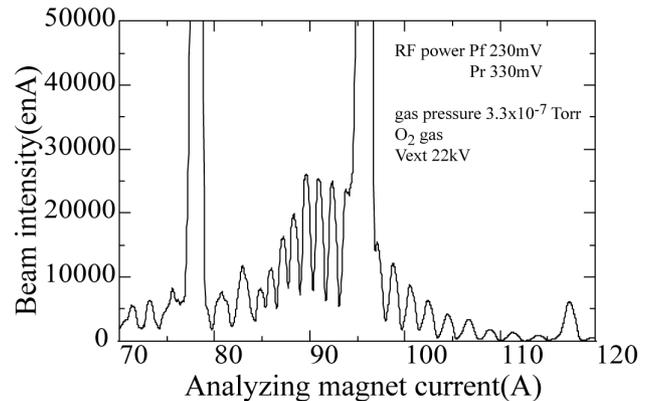


図6: U イオンビームの価数分布。イオン源は U^{35+} イオンビームを最大にするように調整された。

4. 今後の計画

28GHz ジャイロトロン稼働成功からわずか3カ月でUビーム生成に成功し今後のビーム強度の増加に期待が持てるが、現在ビーム強度増強に向けてのいくつかの改良を計画している。28GHz マイクロ波を用いた多価イオンビーム生成は開始されたら

かりで、磁場分布、ガス圧、RFパワー等が多価イオンビーム生成に対し最適化されているとは言い難い状況にある。

前述のように、28GHz マイクロ波を用いた場合、高エネルギー X-線によるより大きな熱負荷が観測された。現在一台の GM-JT 冷凍機 (4.2K における冷凍能力 4.2W) によってクライオスタットを冷却していたため、2~3 kW 程度のマイクロ波の入射が可能な状態である。より高いパワーの入射を可能にするため、この冬に同性能の GM-JT 冷凍機の追加を検討している。この冷凍機の追加によって 3~6 kW 程度のパワーを使用することが可能となる。クライオスタットの冷凍能力の増加とともに最適化を進め、多価イオンビーム強度の更なる増加を計画している。

4. まとめ

28GHz マイクロ波を超電導 ECR イオン源に入射することで、多価 Xe イオンおよび多価 U イオンビームの生成に成功した。18GHz マイクロ波入射による結果と比較することで、ビーム強度の周波数依存性を確認し、28GHz マイクロ波を用いることで、更なるビーム強度増強が可能となった。

参考文献

- [1] C. L. Jiang et al, Nucl. Instrum. Methods A492(2002)57
- [2] A. Girard et al, Rev. Sci. Instrum. 75(2004)1318
- [3] T. Nakagawa et al, Rev. Sci. Instrum. 81(2010)02A320
- [4] Y. Higurashi et al, 「加速器」 No.4 (2009) p.346
- [5] Y. Higurashi et al, Proc.PASJ7 (2010) p.243