

## 理研 28GHz 超伝導 ECR イオン源の開発 RECENT DEVELOPMENTS IN RIKEN 28-GHZ SC-ECRIS

日暮祥英<sup>#, A)</sup>, 大西純一<sup>A)</sup>, 大関和貴<sup>A)</sup>, 羽場宏光<sup>A)</sup>, 木寺正憲<sup>A)</sup>, 中川孝秀<sup>A)</sup>  
Yoshihide Higurashi<sup>#, A)</sup>, Jun-ichi Ohnishi, Kazutaka Ozeki<sup>A)</sup>,  
Hiromitsu Haba<sup>A)</sup>, Masanori Kidera<sup>A)</sup> and Takahide Nakagawa<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center

### Abstract

We improved the performance of the RIKEN 28GHz SC-ECRIS with several methods. For production of the U vapor, we chose the sputtering method. Using sputtering method, it is possible to install the large amount of material in the plasma chamber for achieving the long term operation without break. We also used the Al chamber instead of stainless steel one. Using these methods, we successfully produced  $\sim 185\mu\text{A}$  of  $\text{U}^{35+}$ ,  $\sim 230\mu\text{A}$  of  $\text{U}^{33+}$  at the injected RF power of 2~3kW (28GHz). We observed that the beam intensity and stability are strongly dependent on the sputtering voltage, material position, biased disc voltage and its position. We continuously produced intense  $\text{U}^{35+}$  ion beam for Riken RIBF experiment longer than one month without break. In this contribution, we will report the beam intensity of highly charged U ions as a function of various parameters (RF power, sputtering voltage etc.) We also present the experience of the long term operation of the ion source for the RIKEN RIBF experiments.

### 1. はじめに

理研、仁科加速器研究センターではRIBF計画 [1] における大強度ウランビーム生成のために 28GHz マイクロ波入射可能な超伝導 ECR イオン源の開発を進めてきた。2009 年に 18GHz マイクロ波を用いてファーストビーム生成に成功し、2011 年には 28GHz マイクロ波の入射、プラズマの生成を開始した。並行して多価ウランビーム生成、ビーム強度増強の研究を行い、2012 年春には  $60\mu\text{A}$  の  $\text{U}^{35+}$  ビームを生成した。2012 年夏からさらなるビーム強度ため、種々の手法を導入し、2013 年には  $\sim 185\mu\text{A}$  の  $\text{U}^{35+}$  ビーム、 $\sim 230\mu\text{A}$  の  $\text{U}^{33+}$  ビームの生成に成功している。

本稿では 2012 年から現在に至る U ビーム強度増強に関する開発の結果について報告する。

### 2. 超伝導 ECR イオン源

本イオン源の特徴は 6 個の超伝導ソレノイドコイルによってミラー磁場を生成するため共鳴領域の大きさ、磁場の傾きを独立に変えられ、従来のイオン源に比較して大きな共鳴領域、緩やかな磁場勾配を同時に生成可能であることである。また所謂、"classical Bmin" と "Flat Bmin" [2] 両方の磁場配位を生成できる特徴を持っている。超伝導 ECR イオン源の構造の詳細については文献 [3,4] を参照されたい。

本実験では中性ウラン原子をプラズマ中に供給するためにスパッター法を採用した。スパッター法の

利点は金属試料に高電圧 (数 kV) を印加することで中性粒子が供給できるため装置が比較的単純な構

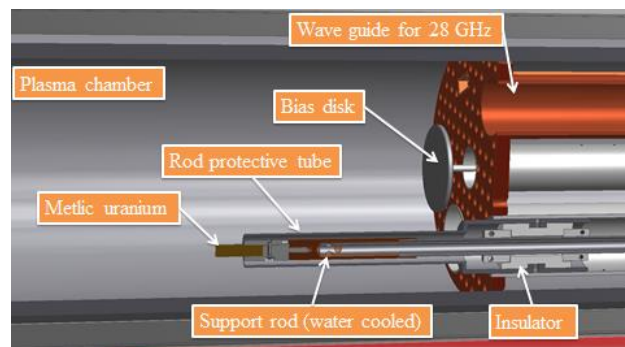


Figure 1: RIKEN 28-GHz SC-ECRIS におけるスパッターリング法

造で済むこと、オープン法と比較してビーム強度は低いが、大量の金属ウラン (10g 以上) をプラズマチャンパー中に挿入できるために、中断することなく長時間 (1 か月以上) ウランビームの供給が可能なことである。Fig. 1 に本手法の概略図を示す。金属ウランロッドは図に示すようにサポートロッドの先端に取り付けられ、遠隔操作によってスパッターリングのための高電圧の印加、ロッドの位置を変えることが可能である。スパッターリングのためのイオンはプラズマ中から供給される。イオン供給量はプラズマ密度、ロッド位置、印加電圧に強く依存する。金属ウランは高温で他の金属と激しく反応し合金を作ってしまうためプラズマによる金属ウランの温度上昇を極力抑える必要がある。このためサポートロッドを 2 重管構造し、冷却水を流すことによって

<sup>#</sup> higurasi@riken.jp

金属ウランの温度上昇を防ぐようになっている。また高電圧は金属ウランばかりでなくサポートロッドにも印加されるため、サポートロッドもスパッターされる危険性がある。このサポートロッドのスパッターを防ぐためにサポートロッドを覆うようにチューブを設置しかつプラズマチャンバーと同電位にしてある。Fig. 1にあるように、チャンバー軸上には金属ディスク（バイアスディスク）が設置されている。ディスクは遠隔操作によって位置、負荷される電圧を変えることができ、電圧および位置は要求された多価ウランビーム強度を最大化するように調整される。

プラズマチャンバーはステンレス鋼を用いて製作されたもの（SS-chamber）を使用していたが、2012年夏より、安全に大強度のマイクロ波をチャンバー内に入射可能とするために、ステンレス鋼より熱伝導率が良いアルミニウムで製作されたチャンバー（Al-chamber）を用いてテスト実験を行った。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2はAl-chamberとSS-chamberを用いた時の多価ウランイオンビームの強度分布を示したものである。ビーム引出電圧は22kV、マイクロ波パワーは約1kWである。本研究において28GHzのマイクロ波パワーは、オフラインにてジャイロトロンを水冷式ダミーロードに接続し、測定された電力とジャイロトロンの電子ビームの引出電圧の関係より計算されたものを使用しているRF入射側最大磁場( $B_{inj}$ )、最小ミラー磁場( $B_{min}$ )、ビーム引出側最大磁場( $B_{ext}$ )、プラズマチャンバー内壁における同径方向磁場( $B_r$ )はそれぞれ3.1T, 0.7T, 1.8T, 1.9Tである。プラズマ生成のための電離ガスは酸素を用いている。イオン源は $U^{35+}$ ビーム強度を最大にするように、ガス圧等を調整された。典型的なガス圧は $4\sim 5 \times 10^{-5}$ Paであった。図から明らかなようにAl-chamberを用いた場合の $U^{35+}$ イオンビーム強度(110  $\mu$ A)はSS-chamberのビーム強度(60  $\mu$ A)の倍近い値となっている。通常アルミニウムは大気中で表面が酸化しやすく、酸化アルミニウムの被膜を作りやすい。1991年に酸化アルミニウムをプラズマチャンバー内壁に塗布することで、ECRイオン源からの多価イオンビーム強度が増強するとの報告がなされた。[5] 酸化アルミニウムの2次電子放出率が他の金属に比べ高い。(放出率2以上)このためプラズマから逃走した電子が表面をたたくことで逃走電子数よりも多い電子が壁面から放出される。この電子がプラズマ中に戻ることによってプラズマポテンシャルの低減等、多価イオンビームを出すのに有利な条件が整うためと考えられている。本実験の結果はこの効果が作用しビーム強度が増強したものの推測される。さらに詳しくFig. 2のスペクトルを調べると、多価酸素イオンビーム強度にも差異がみられる。Al-chamberを用いた場合、酸素イオンビーム強度がSS-chamberを用いた場合の半分から3分の2程度に減少していることがわかる。このメカニズムは明らかではないがAl-chamberを用いた場合、全取り出し電流値が下

るので、低速イオンビーム輸送に大きな問題となる空間電荷効果を低減することが可能となる。

Fig. 3は $U^{35+}$ ビーム強度、およびスパッター電流のスパッター電圧依存性である。閉じ込め磁場は前述の値に設定し、ガス圧などは $U^{35+}$ ビーム強度が最大になるように調整されている。図から明らかなようにビーム強度、スパッター電流はスパッター電圧

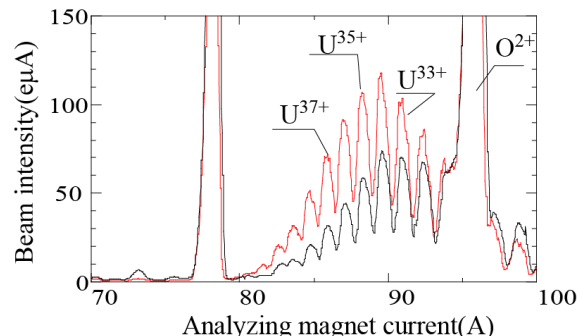
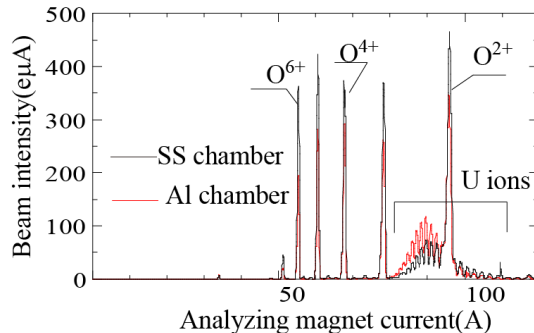


Figure 2: Al-chamberとSS-chamberを用いた時の多価ウランイオンビームの強度分布。赤線がAl、黒線がSSである。

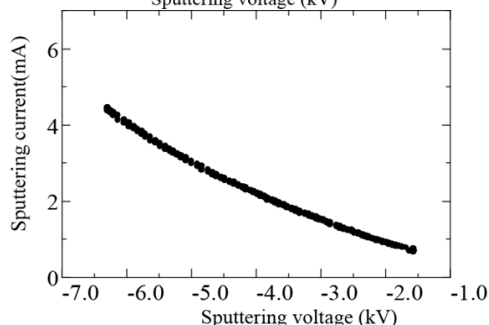
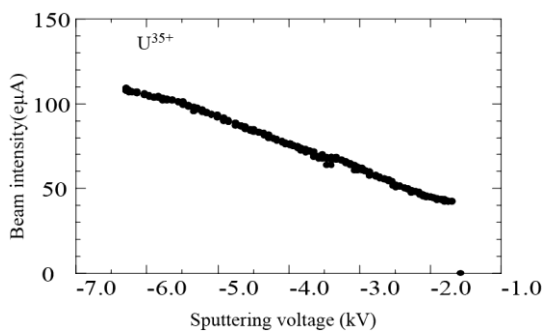


Figure 3:  $U^{35+}$ ビーム強度、およびスパッター電流のスパッター電圧依存性。

とともに-6.5kV まで単調に増加している。一般にスパッター率は電圧ともに増加する。また全放出中性粒子数は入射粒子の数(スパッター電流)に比例する Fig. 3 下図から明らかなように、スパッター電圧(Sputtering voltage)の上昇に伴い、入射粒子速度の増加に加え入射粒子数の増加しているため、電圧とともにスパッターによって放出されたウラン原子の数は急激に増加していると思われる。実験中の最高電圧(-6.5kV)でビーム強度、スパッター電流値とも一定値に達していないため、より高電圧でビーム強度増強の可能性が示唆される。本テスト実験では金属ウランへの高電圧の印加による放電の可能性、およびビーム強度の不安定性の増大のため-6.5kV までしか印加しなかった。また放出される中性粒子の数はプラズマ中から入射されるイオンの数に比例するため、金属ウランロッドのプラズマにさらす面積を大きくすることで低電圧でもビーム強度増強の可能性はある。本テスト実験ではロッドのプラズマにさらされている面の表面積は約 400mm<sup>2</sup> であったが構造的にはより広い面積のロッドの挿入は可能である。これらの点を検討してビーム強度の増強のテスト実験を計画している。

これらの手法(スパッタリング法、Al-chamber の使用)を用いて、入射 RF パワー 2~3 kW 時に~185  $\mu$ A の U<sup>35+</sup>イオン、~230  $\mu$ A の U<sup>33+</sup>イオンビームの生成に成功している。

高周波マイクロ波(18GHz 以上)を用いた超伝導 ECR イオン源は大強度の多価イオンビームを供給できる可能性を持っているため、理研 RIBF 計画のためのイオン源としてばかりでなく、現在計画中の FRIB(米国)[6]、RISP (韓国) [7]でもその使用が検討されている。両計画の要求するウランビームの価数は 33+~34+でビーム強度は約 6p  $\mu$ A (2つの価数(33+, 34+)の同時加速の場合) ~12p  $\mu$ A (1 価数加速の場合) である。Fig. 4は VENUS と理研 28GHz SC-ECRIS の U<sup>33+</sup>ビーム強度のマイクロ波パワー依存性である。VENUS[7]は LBL における多価イオンビームの強度増強および FRIB 計画用のイオン源開発のためのプロトタイプとして設計、製作されたものである。中性ウラン蒸気供給には高温用オーブンを使い、28 GHz および 18 GHz のマイクロ波を同時に入射している(Two frequency 法[9])。この Two frequency 法は 1990 年代に提案、テスト実験が行われた。通常主たるマイクロ波周波数(VENUS の場合は 28GHz)より低い周波数(18GHz)を同時に入射させることで、両周波数の加算的な効果よりもより強いビーム強度が得られたことから着目され、現在では多くの研究所がビーム強度増強のための手法として用いている。

図から明らかなように VENUS は約 4.5kW で 200  $\mu$ A、8.5kW で 400  $\mu$ A を超えるビーム強度の生成に成功している。一方理研 28GHz SC-ECRIS は 2~3kW のマイクロ波パワー(28GHz 単独)、スパッタリング法ですでに 230  $\mu$ A のビーム生成に成功している。同じマイクロパワーまで外装して、両イオン源のビーム強度を比較すると、理研のイオン源が LBL

の 1.5~2 倍のビーム強度が得られることが推測される。この差は前述のように理研 ECRIS が広い共鳴領域と適切な磁場勾配を同時に作り出せることによるものと思われる。

加速器の外部イオン源としてはビーム強度ばかりでなくビームの質(エミッタンス等)も重要な要素であることは言うまでもない。U<sup>35+</sup>イオンビーム~100  $\mu$ A 生成時のエミッタンスは約 0.06  $\pi$  mm mrad (normalized rms emittance)であり、VENUS と比較しても同等であることが分かった。

仁科加速器研究センターではすでに 345MeV/u のウランビームを供給し、原子核研究等の実験を行っている。イオン源からは平均で 80~90  $\mu$ A の U<sup>35+</sup>イオンビームを前述の手法を用いて 1 か月以上連続供給に成功している。

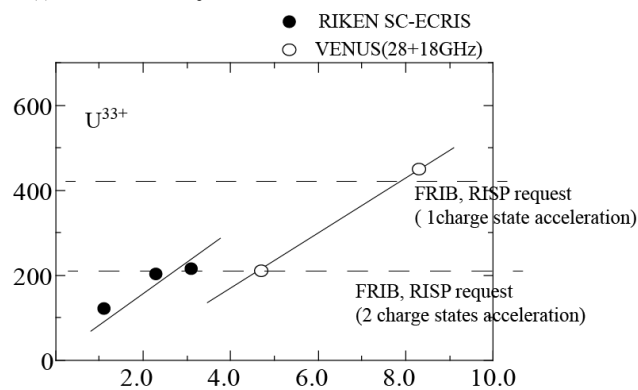


Figure 4: VENUS と理研 28GHz SC-ECRIS の U<sup>33+</sup>ビーム強度のマイクロ波パワー依存性、Venus のビーム強度は文献[10,11]を参照

#### 4. まとめ

ファーストビーム生成以来種々の手法を用いてビーム強度増強を図ってきた。2011 年からは 28GHz マイクロ波、およびスパッタリング法を用いた多価ウランイオンビーム強度増強に努めた。プラズマチャンバーをステンレス鋼製からアルミニウム製に変えることで倍近いビーム強度の増強が見られ、~185 $\mu$ A の U<sup>35+</sup>および~230 $\mu$ A の U<sup>33+</sup>イオンビーム生成に成功している。

現在さらなるビーム強度増強のために高温用オーブンの開発、スパッタリング法の改良に着手している。

#### 参考文献

[1]Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B216(2007)1009  
 [2] G. D. Alton and D. N. Smithe, Rev. Sci. Instrum. 65, 775 (1994).  
 [3]Y. Higurashi et al, 「加速器」 No4(2009)346  
 [4]日暮他 第9回加速器学会報告集 p183(2012)  
 [5]T. Nakagawa, Jpn. J. Appl. Phys. 30(1991)L930  
 [6]M. Thoennessen, Nucl. Phys. A834(2010)688c  
 [7] Rare isotope science project web site, URL <http://risp.ibs.re.kr/> .

- [8]D. Leitner et al, Rev. Sci. Instrum. 79(2008)02C710
- [9]Z. Q. Xie et al, Rev. Sci. Instrum. 66(1995)4218
- [10]D. Leitner et al, proceedings of The 17<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Sources, Lanzhou, China, (2006).
- [11]G.Machicoane et al, proceedings of The 20<sup>th</sup> International Workshop on ECR Ion Sources, Sydney, Australia (2012).