

解 説

ECR イオン源によるウランイオン生成

中川 孝秀*

Production of U Ion Beam from ECR Ion Sources

Takahide NAKAGAWA*

Abstract

For production of multi-charged U ion beam for RIKEN Radio isotope beam factory (RIBF) project, we chose two methods (UF_6 and sputtering of metal U). We produced few μA of medium charge state ($14\sim 18+$) U ion beam with use of UF_6 . For production of higher charge state of U ion beam, we used the sputtering method. Using this method, we produced ~ 80 pA of U^{35+} ion beam. These beams were used for commissioning of the accelerator complex of RIKEN RIBF.

1. はじめに

ウランビームは近年, in-flight fission reaction (入射エネルギー $30\sim 1500$ MeV/u)¹⁾による Radio-isotope 生成効率の良さから Radio-isotope beam 生成のためのビームとしての有用性が認識され, RIKEN Radio Isotope Beam Factory (RIBF) Project²⁾, 米国 RIA 計画等における最も重要なビームのひとつとして開発が進められている. ECR イオン源は多価ウランビーム供給には必要不可欠な構成要素のひとつであるが, その発明以来, 重イオン加速器の外部イオン源として長年にわたり開発, 改良がなされ現在では O^{6+} , Ar^{9+} 等のイオンに関して mA のオーダーのビーム供給が可能となっている. 開発の詳細, イオン生成機構に関しては文献 [3, 4] を参照していただきたい.

理化学研究所 (理研) では 2005 年から, ウランビーム生成のテストを開始し, 2007 年には加速器に供給, 加速に成功している. 本稿では理研においてどの様にウランビームを生成しているかの概要について報告する. 第 2 章では今回のウラン生成に用いた理化学研究所の 18 GHz ECR イオン源の概要について述べ, 第 3 章ではウラン生成について, 4 章ではウラン生成の将来計画に関して言及する.

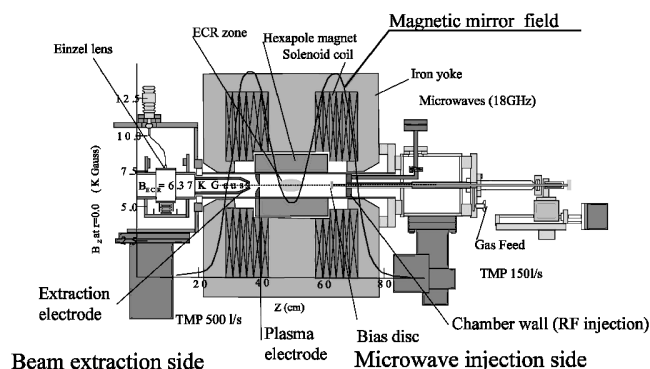


図 1 RIKEN 18 GHz ECR イオン源の概略図

2. RIKEN 18 GHz ECR イオン源

理研の 18 GHz ECR イオン源は 1995 年にリニアックの外部イオン源として Ar^{8+} , Xe^{20+} の様な中間的な価数のイオンを大強度で生成する目的で製作され, ファーストビームの生成から種々の改良を加えることでビームの増強を図ってきた⁵⁻⁷⁾. このイオン源の構造, 性能の詳細に関しては文献 8) に記載されている. 図 1 は ECR イオン源の概略図, 図 2 は代表的なイオンのビーム強度のマイクロ波パワー依存性である. 図 3 は供給されるビームの代表例 ($\text{Ar}^{8+} \sim 2$ mA, $\text{Kr}^{13+} \sim 0.6$ mA, $\text{Xe}^{20+} \sim 0.3$ mA) である.

* 理化学研究所, 仁科加速器研究センター
Nishina center for accelerator based science, RIKEN
(E-mail: NAKAGAWA@RIKEN.JP)

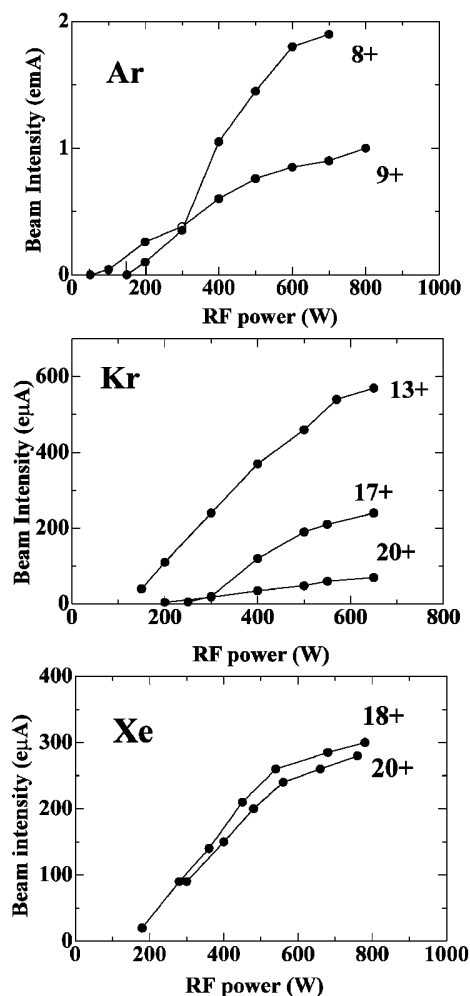


図2 RIKEN 18 GHz ECR イオン源からの代表的なイオンビームのマイクロ波パワー依存性

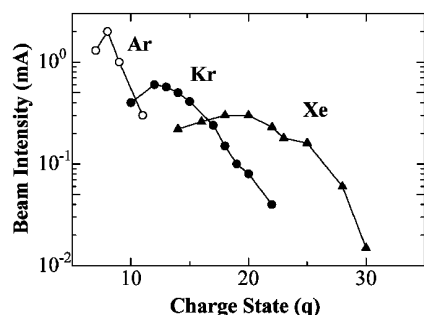


図3 RIKEN 18 GHz ECR イオン源から生成された代表的なイオンビームの強度

3. ウランビーム生成

理研 RIBF project における要求は 1) U^{14+} ビームを供給し、重イオンリニアックで加速の後ストリッパフォイルによって U^{35+} に変換し RIKEN Ring

Cyclotron (RRC) に入射する方式においてコミッション時のイオン源からの最低ビーム強度は $1 \mu A$ 以上であること、2) U^{35+} イオンビームをイオン源から直接生成し加速の後 RRC に入射する方式においてビーム強度は 60 pA 以上であること、であった。いずれの手法に関しても将来の実験条件からビームの生成時間は 1 ヶ月以上が要求される。ECR イオン源からのウランビームの生成法にはいくつかの手法があるがこれらの条件を満たすために理研では UF_6 、金属ウランのスパッタリング法を採用した。日本におけるウランの取り扱い規制が厳しく通常の物質に比べ数多くの苦労があったが、詳細に関しては文献 9) を参照していただきたい。

3.1 UF_6

UF_6 は常温で約 50 Torr の蒸気圧を持つため、通常のガスと同様に取り扱える。 UF_6 ガスの流量調節は希ガス供給と同様のバリアブルリークバルブを用いている。図 4 は UF_6 を用いたときにイオン源から生成されるイオンの価数分布を示している。図 5 は $U^{16+}, 18+$ イオンのビーム強度のマイクロ波パワー依存性である。図 6 はマイクロ波パワーが 160 W と 260 W 時のウランイオンの価数分布を示している。図 6 から総生成粒子数を計算すると、マイクロ波パワーによらずほぼ一定の値 ($\sim 3.7 \mu A$) を示し、パワーの増加と共に平均価数が高くなっている。この現象は MIVOC 法¹⁰⁾ によるビーム生成時と同じであり、プラズマ中のウラン原子数が十分でなく、マイクロ波の増加に伴う電離イオン数の増加が見られないことを示している。図 7 は UF_6 を用いて得られた多価ウランイオンのビーム強度を示している。多価イオン ($> 20+$) 生成の場合には O_2 ガスを混入させる手法(ガスミキシング法¹¹⁾)を採用しビーム強度の増強を図った。30+ 以上の価数のビーム強度は急激に減少し U^{35+} イオンの同定は不可能であり、この手法は主に U^{14+} を生成し加速器に供給するために使用された。

UF_6 使用時の問題点は UF_6 が完全に分離ガス化せずに UF_4 等の物質を多量に発生させること、運転時間が長くなると共に、チャンバー内での放電が頻発し、安定なビーム供給が困難になる点である。特に UF_4 等の残留物はイオン源のクリーニング時に吸引、飛散による汚染の拡大等の危険が伴い、イオン源でのビーム生成が簡便な反面、その取り扱いを厄介なものにしている。

3.2 スパッタリング法

スパッタリング法は金属のロッドをイオン源プラズマ中に挿入し、ロッドに 1~数 kV の負電圧を印加す

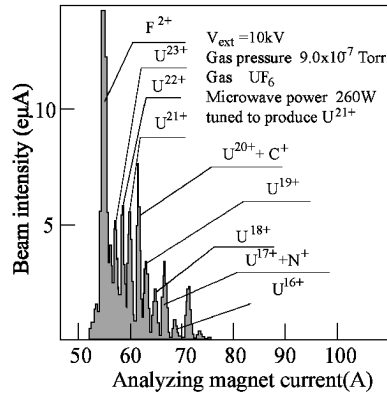


図4 UF₆を用いたときのウランイオンビームの価数分布

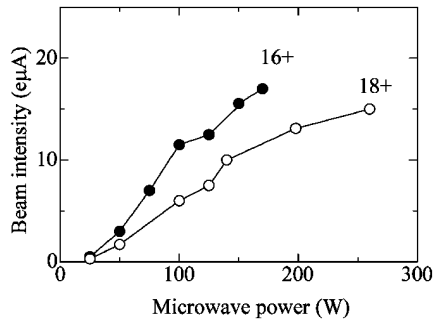


図5 U¹⁶⁺, U¹⁸⁺ のビーム強度のマイクロ波パワー依存性

ることで金属ロッド表面をスパッターし、中性金属原子をプラズマ中に供給する手法である。他の手法に比較して、中性原子数の供給が少ないため、ビーム強度はそれほど取れないが、大量の物質をプラズマ中に装填できるため、長期間中断することなくビーム供給できる利点がある。プラズマ生成のためのガスは酸素を用いている。スパッタリング率は試料に印加する電圧、イオン種に強く依存することが知られており、特

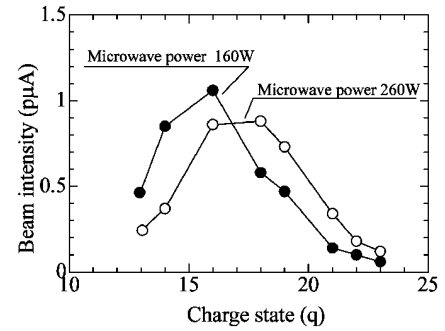


図6 マイクロ波パワー 160 W, 260 W 時のウランイオンビームの価数分布

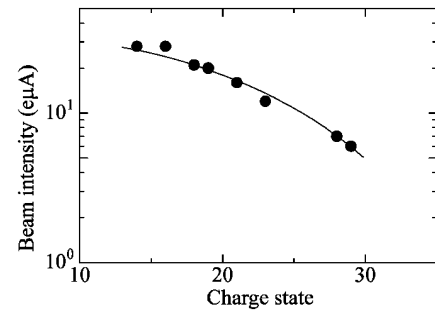


図7 多価 U イオンビームのビーム強度

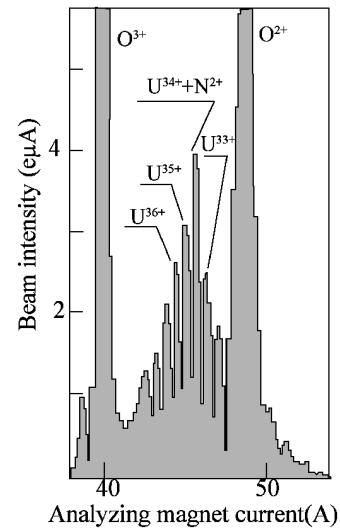


図8 スパッタリング法を用いた時のウランイオンビームの価数分布

に質量の大きなイオンほどスパッタリング率が増加する。つまり、酸素より Ne, Ne より Ar とスパッタリング率は大きくなるが、同時にプラズマ生成のガスとしても用いられるため使用ガス決定に複雑さを加える。Ne 等は電離エネルギーが酸素よりも高く、プラズマ中での電子密度を十分に上げることが困難である。さ

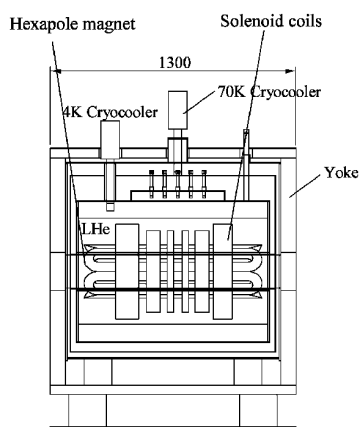


図9 理研超伝導 ECR イオン源の概略図

らにプラズマポテンシャルも質量の増加と共に高くなり、イオン閉じ込め時間を短くする効果が働くと考えられる。ガスの種類を変えての実験とこれらの点を考慮した結果、 O_2 をプラズマ生成のガスとして採用した。

典型的なスパッター電圧は $1\sim 1.5$ kV, 入射マイクロ波パワーは 550 W, ガス圧は 1×10^{-6} Torr である。ロッドの大きさは $6\times 3\times 25$ mm³ で、ロッドは図1中で chamber wall (RF injection) と示された隔壁から ECR plasma 方向に約 3 cm の位置に配置された。図8はスパッター法によって得られたウランビームの価数分布である。 U^{35+} ビーム強度は $3\mu A$ (~ 86 pA) 程度であり、最大 $3.7\mu A$ のビーム強度がこの手法で得られた。この手法で約1ヶ月に渡り途切れることなく加速器への安定なビーム供給を行ったが詳細は文献12)を参照されたい。

4. ウランビームの大強度化

理研 RIBF project におけるウランビーム強度の要求量はターゲット上で $1\mu A$ である。この要求を満たすためにはイオン源から少なくとも U^{35+} イオンビームを $15\mu A$ 以上生成する必要がある。現有のイオン源では到達不可能であり、新しいイオン源の製作が必要不可欠である。理研では約5年前からこの問題点を考慮し、新しいイオン源を開発するための理論的なガイドライン作りを行うために、ECR イオン源内プラズマに与える周辺要素（磁場強度、ガス圧、チャンバー形状等）の影響に関する研究を精力的に進めてきた¹³⁻¹⁸⁾。図9は新しい超伝導 ECR イオン源の概略図である。このイオン源の特徴はマイクロ波として従来よりも高い 28 GHz を採用したこと、それにあわせ十分なプラズマの閉じ込め条件を作るために最大ミ

ラー磁場を ~ 4 T としたこと、ECR 点での最適なエネルギー吸収率を確保するため6つのソレノイドコイルを配置し ECR 点での磁場勾配を従来よりも大きく変化させられる構造にしたことである。またこのコイル配置によって、従来のイオン源に比較して数倍の共鳴領域が確保でき、プラズマの生成効率が格段に向上する可能性がある。プラズマチャンバーの大きさも理研 18 GHz ECR イオン源（約 1 L）に比べ 10 倍大きくイオンの閉じ込め時間を長くでき、 U^{35+} 等の多価イオン生成に適した構造になっている。詳しい構造は文献19)を参照されたい。このイオン源は現在製作中であり、2008 年中の完成を目指している。

おわりに

理研におけるウランイオンビーム生成には数多くのスタッフが参加し、ビーム供給成功はこれらの方々に負うところが多い。特にイオン源開発グループの日暮氏、木寺氏、住重加速器サービスの藍原氏は幾多の困難にもくじけることなく、原動力としてビーム供給を成功に導いた。3氏の活躍がなければビーム供給は困難であったことを記し終わりたい。

参考文献

- 1) T. Enqvist et al., Nucl. Phys. A658 (2000) 47.
- 2) Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B in press.
- 3) 中川孝秀, 矢野安重, 日本物理学会誌 54 (1999) 629.
- 4) 中川孝秀, 日本物理学会誌 62 (2007) 329.
- 5) S. Biri et al., Nucl. Instrum. Methods B152 (1999) 386.
- 6) Y. Higurashi et al., Nucl. Instrum. Methods A510 (2003) 206.
- 7) T. Nakagawa and Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B241 (2005) 935.
- 8) T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. Methods B226 (2004) 239.
- 9) 上養義明, 加速器学会誌.
- 10) T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. Methods A396 (1997) 9.
- 11) M. Mack et al, 7th Int. workshop on ECR Ion Sources (Jülich) p152.
- 12) 福西暢尚, 加速器学会誌 4 (2007) 112.
- 13) Y. Higurashi et al., Rev. Sci. Instrum 73 (2002) 598.
- 14) M. Imanaka et al., Rev. Sci. Instrum 73 (2002) 529.
- 15) H. Arai et al., Nucl. Instrum. Methods A491 (2002) 9.
- 16) Y. Higurashi et al., Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 1467.
- 17) M. Imanaka et al., Nucl. Instrum. Methods B237 (2005) 647.
- 18) T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 1394.
- 19) J. Ohnishi et al., High energy physics and Nuclear physics 31 (2007) 37.