

研究成果報告書

研 究 題 目		ECR イオン源を用いたアルミニウム多価イオン生成における基礎検討	実 施 年 度
			2019 年度
代 表 研 究 者	所 属	独立行政法人 国立高等専門学校機構 大島商船高等専門学校 電子機械工学科・准教授・博士（工学）	
	氏 名	中村 翼	印

1. 研究の目的・背景

平成 24 年度に大島商船高専に導入された、電子サイクロトロン共鳴（ECR）イオン源（図 1）は、フィラメント等を用いない無電極イオン源のため長寿命であり、産業化しやすい多価イオン源として期待されている。しかしながら、もともと大型加速器への多価イオン供給源として開発されている背景があるため、近年は超伝導コイルや数十 GHz の高周波数マイクロ波を用いるなど、産業化へはほど遠い開発傾向となっている。それに対して、共同研究者らは産業界出身であるため、マイクロ波モードを制御するなどの手法で効率の良い ECR イオン・プラズマ源の開発を進めてきた（Furuse et al., J. Vac. Sci. Technol, 1999）。この経験を踏まえて、中程度の価数（2～4 価）の多価イオンビームを生成でき、小型で加速電圧も低く、材料研究者にも使いやすいイオン源を開発したいと考えている。そのカギを握る技術は、汎用的な 2.45 GHz マイクロ波をベースとした装置での多価イオン生成の高効率化である。また、加速電圧が低い状態でターゲットとなる金属イオンの生成が達成できれば、省エネルギー化にもつながると考える。

平成 30 年度までの研究実績で、ターゲットとしているアルミニウム 4 価（ Al^{4+} ; 約 120 eV）とイオン化エネルギーの近いアルゴン 7 価（ Ar^{7+} ; 約 124 eV）の検出に成功した（河野星希ほか、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-PA1-9, 2018.9）。これにより理論的にアルミニウム 4 価の生成が可能となった。また平成 30 年 10 月までの研究成果として、1 価のアルミニウムイオン（ Al^{+} ）を検出・確認できている（久保蓮太郎ほか、第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-PA1-8, 2018.9）。

そこで本研究では、アルミニウム多価イオンを生成するための基礎的検討を目的とする。具体的には、ターゲットとしているアルミニウム多価イオンの生成および、その生成量を向上させるため、多価イオンを生成するチャンバー内の圧力低下や磁場強度調整、引き出し電極位置や印加電圧等の最適条件を検討する。なお本研究の課題は、企業も注目している課題の一つである。

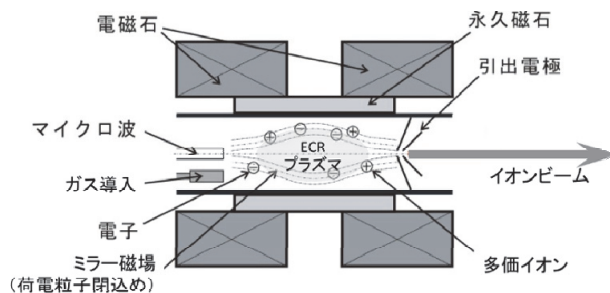


図 1. ECR イオン源原理図

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究で行なった内容は以下の通りである。項目別に、その成果ならびに考察をまとめる。

1. 真空チャンバー内の圧力を低下させるため、既設のターボ分子ポンプをオーバーホールする
2. ソレノイドコイルで磁場強度を変え、最適化することができるため、多価イオン生成における最適条件を探る
3. アルミニウム供給源設計・開発、およびアルミニウム多価イオンの生成確認を行う

(1) 【達成度合：100】

本校所有の ECR イオン源は導入されて 5 年が経過しており、真空排気を行うターボ分子ポンプの磨耗等により、真空機能の維持が難しくなっているため、オーバーホールを行なった。その結果、2019.12.18 に 1.52×10^{-5} Pa に到達した。この圧力は、導入当初の圧力 (1.92×10^{-5} Pa 程度) よりも低いため、計画に対する達成度合は 100 となる。

(2) 【達成度合：85】

ソレノイドコイルで磁場調整を行なった結果の一例を図 2 に示す。x 軸の m/z とは質量電荷比（原子数／電荷）を示しており、 Ar^{1+} は 40、 Ar^{2+} は $40/2$ で 20 となる。この結果から、ターゲットとしていた Ar^{7+} は約 70 nA と、過去最大の約 130 nA と比較して半分程度である。その理由はイオンビームの中心軸のズレなどが考えられ、現在検証・考察中である。そのため、達成度合を 85 とした。

(3) 【達成度合：50】

現状では、アルミニウム供給源として、蒸発源とスパッタが挙げられる。設計・製作した蒸発源でアルミニウム多価イオンの生成を試みたが、急激な温度上昇（アルミの融点 660°C まで上昇）に伴い、チャンバー内の圧力が上昇し、磁場で閉じ込めているプラズマが消失した。

次にスパッタを用いてアルミニウム多価イオンを生成した結果を図 3 に示す。スパッタ源電圧が -400 V の時、昨年度の Al^{1+} (m/z : 27) の電流量（約 32.3 nA）と比較して、約 2 倍の約 59.7 nA を検出することができた。しかし 2 価以上については、1 価の電流量が少ないため、確認できていない。そのため、達成度合を 50 としている。

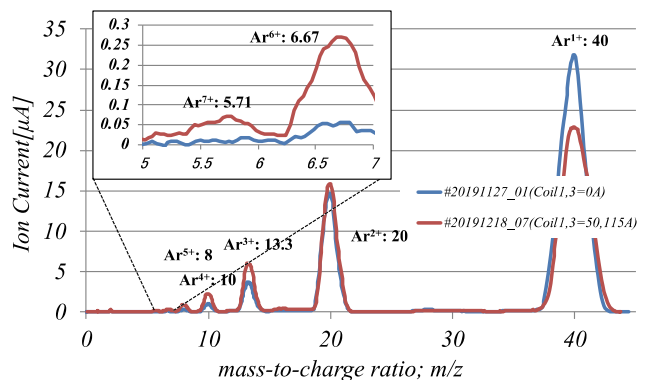


図 2. 磁場調整時のアルゴン多価イオンのスペクトル

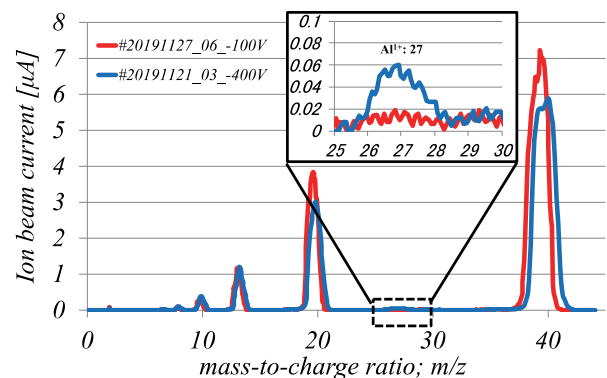


図 3. スパッタによるアルミニウム多価イオンのスペクトル

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

本校所有の ECR イオン源は導入されて 5 年が経過しており，真空排気を行うターボ分子ポンプの磨耗等により，真空機能の維持が難しくなっている。そのため，玉軸受形複合ターボ分子ポンプ定期オーバーホール 1 式（374,760 円／予算額 32 万円）を実施した。その結果，2019.12.18 に 1.52×10^{-5} Pa に到達した。この圧力は，導入当初の圧力（ 1.92×10^{-5} Pa 程度）よりも低く，多価イオンの生成効率向上が望める。

研究成果の報告ならびにアルミニウム多価イオンを効率的に生成する手法等についての意見交換のため，旅費 8 万円を計上した。2019 年 9 月に北海道大学にて行われた，第 80 回応用物理学会秋季学術講演会に参加した。旅費の総額は 75,240 円であった。アルミニウム多価イオンの効率的な生成について，現時点で蒸発源よりもスパッタの方が有用であるとの意見もいただき，令和 2 年度以降も引き続き，助言等を基に検証を進めていく予定である。

予定していた，真空部品の余剰部分を短縮する作業は，ターボ分子ポンプのオーバーホールの予算が予定より超過したため，実施できなかった。令和 2 年度以降に，この対策を行い，少しでもチャンバー内の圧力を低下させる予定である。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

今後の発展性のキーポイントとなる，アルミニウム多価イオンの生成について，本研究成果として達成することはできなかったが，学会発表等による意見交換で，その対応策が挙げられた。

令和 2 年度以降は，イオンビームの中心軸等の調整を行いながら，アルミニウム供給源として，蒸発源とスパッタの有用性について検証する予定である。蒸発源では，圧力が 10^{-4} Pa 程度の時，約 120°C で昇華する塩化アルミニウムを用いて，チャンバー内の圧力上昇を抑えながらアルミニウム多価イオンの生成を確認していく。またスパッタでは，スパッタガスを現状のアルゴンに加え，分子量の多い（重い）クリプトンを用いて，アルミニウム 1 価イオンの生成量向上を検証する。

これらの検証には 1, 2 年かかる見込みであるが，検証結果次第では実用化の目処が立てられる予定である。

最後になりましたが，貴財団の研究助成をいただき，円滑に本研究を進められたことに対し，感謝申し上げます。ありがとうございました。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【発表予定】：応用物理学会秋季学術講演会 9月中旬, 国際会議 STI-Gigaku 11月

※ 新型コロナウイルス感染症の状況により, 見送る可能性もあります。

1. Yutaro Matsui, Lontsi Chrisko Jules Vidal, Tsubasa Nakamura et al, “PRODUCTION OF MULTI-CHARGED ALUMINUM IONS USING AN EVAPORATION SOURCE IN AN ECR ION SOURCE”, The 4th International Conference on “Science of Technology Innovation” 2019, 2019年11月8日
2. 松井悠太郎, 中村翼, 笹岡秀紀, 浅地豊久, 古瀬宗雄, “ECR イオン源を用いたアルミニウム多価イオン生成における基礎検討”, 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (20p_PB2_9) , 2019年9月20日