



2018 年 1 月

報道関係各位

プラズマ分光法を用いた重イオン ECR イオン源の制御 ～革命的な制御方法の発見～

諏訪東京理科大学

諏訪東京理科大学 共通教育センター・武藤 英(むとう ひでし) 准教授ならびに、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター(東大 CNS) および理化学研究所仁科加速器研究センターの共同研究グループは、酸素イオンビームに含まれるほぼ q/m の等しい炭素イオンビームを大幅に排除する技術をプラズマ分光を駆使することで確立した。

* この論文は、米科学誌 *Review of Scientific Instruments*(RSI)に 2018 年 1 月 16 日(現地時間)に Online 掲載された。

* さらにこの論文は Editor's pick に選ばれ Journal の表紙にタイトルが掲載される他、RSI の Editor の Facebook および Twitter にコメントも掲載される。

1. 概 要

加速器からのイオンビームは、広く自然科学だけでなく、医学や考古学などに広く用いられている。しかし、イオンビーム核種とほぼ同じ電荷対質量比(q/m)を持つ他種のイオンが混入する場合があります。加速器技術の大問題となっていて、この混入を除去する技術は長年の開発課題であった。 $^{18}O^{6+}$ ビームを加速する場合、 $^{12}C^{4+}$ ビームの除去がこれまで不可能であった。

今回、我々は、わずかの Li 蒸気をプラズマ領域に導入しイオンポンピング効果を用いることにより、イオン源内部の不純物イオン $^{12}C^{4+}$ を抑制するための革新的な方法を開発した。ECR ゾーン内のイオン分布は、プラズマ光の回折格子型分光器と光電子増倍管(ホトマル)による観察によって得られた。この方法を使用することで $^{12}C^{4+}$ イオンは 10 分の 1 以下に抑制されたが、 $^{18}O^{6+}$ ビームはほとんど変化しなかった。また、ここで用いた分光法の使用は、イオン源開発の分野では世界で初めてであり、この方法を使うことで、この成果が初めて得られた。

2. 成果とポイント

理化学研究所仁科加速器研究センターの AVF サイクロトロン (Azimuthal Varying Field Cyclotron) の運転・開発は、理化学研究所仁科センター、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター、諏訪東京理科大学武藤英准教授との共同で進められてる。研究に必要な加速するイオンビームは、ECR イオン源 (14GHz Hyper-Electron Cyclotron Resonance、通称 Hyper-ECR) から供給されている。我々は今回、原子核物理の研究に必要な $^{18}O^{6+}$ ビームを供給するにあたり、これまで不可避免的に混入する $^{12}C^{4+}$ イオンビームの除去する技術を開発した。

実験は、最初に混入イオンビームを定量化するために、上記のモノクロメータを、この分野で世界に先駆けて導入に成功した。(論文; H. Muto, Y. Ohshiro, S. Yamaka, S. Watanabe, M. Oyaizu, S. Kubono, H. Yamaguchi, M. Kase, T. Hattori, and S. Shimoura, Rev. Sci. Instrum. **84**, 073304 (2013).) これまでは、分析電磁石で分析をしてきたが、ほぼ同じ電荷対質量比をもつビーム種は区別がつかなかったため、混入ビーム制御する検討すらできなかった。次に、このモノクロメータで直接イオン源のプラズマを観測しながら、混入ビームの制御する方法を実験的に検討した結果、Li の蒸気が混入ビーム抑制に非常に有効であることを突き止めた。以下、研究概要を述べる。

今回の場合、電荷対質量比 (q / m) は、 $^{18}\text{O}^{6+}$ が 0.33335 であり、 $^{12}\text{C}^{4+}$ が 0.33333 である。通常用いる偏向電磁石のみならず、AVF サイクロトロン ($\Delta m / m = 1/12000$) でさえ、これらの 2 つのイオンを分離することはできないことが問題となっていたのである。

イオンビームを生成するイオン源には、通常プラズマ槽のベーキングなどをして、残留ガスや真空槽壁からのガスなどによる他のイオン種の混入を極力抑える手法をとる。しかし、真空排気系などからのポンプ油の逆流などから、どうしても炭素イオンの混入は避けられない。研究実験の要請から $^{18}\text{O}^{6+}$ ビームの要求があった時、イオン源部も加速器制御部もこの他イオン種ビームがどの程度混入しているかわからないのが現状である。加速された後のビームは、高度の技術で分析する可能性はあるが、通常はイオン源調整準備には用いられていない。今回の手法は、イオン種の分布を見ながら、その場で、イオン状態を観測し、混入イオンを低減化する方法である。

実際の運転では、Hyper-ECR イオン源にモノクロメータを設置し、プラズマの光を観察しながら $^{18}\text{O}^{6+}$ ビームを Hyper-ECR イオン源で生成し、引き出し、理研 AVF サイクロトロンに注入した。その後、 $^{18}\text{O}^{6+}$ ビームを $5.5\text{MeV} / u$ に加速し、核天体物理実験に使用した。しかしながら、ビーム時間が開始された後、ユーザは、 $^{18}\text{O}^{6+}$ ビームに $^{12}\text{C}^{4+}$ イオンによる無視できない量のコンタミネーションに気づいた。通常、イオン源は、ビーム調整前に十分な脱ガス (プラズマチェンバーベーキング) が行われる。普通プラズマチェンバー内の真空ゲージの読みは、運転中 $2.0 \sim 3.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ である。2 つのターボ分子ポンプ ($1500 \text{ L} / \text{s}$) がプラズマチェンバーからのガスの排気のために使用される。しかしながら、チェンバーは炭化水素を含まないので、この炭素イオンの存在については、ロータリーポンプ油の逆流が最も疑われる。メインビームに混ざった $^{12}\text{C}^{4+}$ ビーム電流を測定しなければならないが、直接測定は不可能であった。

そこで、ビーム実験中の C IV 線スペクトルの光強度を測定した。実験を通じて常に 2.5mV を示した。 2.5mV の光強度は、図 3 に示すように $12\mu\text{A}$ の $^{12}\text{C}^{4+}$ ビームに対応していた。トータルのビーム電流がチューニングにより、 $30 \sim 50\mu\text{A}$ だったので、全ビーム中の $^{12}\text{C}^{4+}$ イオンの混入率は $24 \sim 40\%$ であった。この混入率は、原子核実験には受け入れられない。この不純物問題を解決するために、我々は様々なビーム種を含む実験において C IV 光強度を監視することに決めた。 $^7\text{Li}^{2+}$ ビームの実験の時、Hyper-ECR イオン源から C IV の光が全く出ていないことに我々は偶然気が付いた。図 4 は、 ^7Li を蒸発させながらの残留ガスプラズマ中の $^{12}\text{C}^{5+}$ イオンビーム強度および ^7Li II 光強度 ($\lambda = 548.35\text{nm}$ 、遷移; $2p \sim 2s$) のタイムチャートを示す。 $^{12}\text{C}^{5+}$ イオンは、るつぼからの Li 蒸気によってプラズマチェンバーから完全に排気された。図 5 は、 ^7Li を蒸発させながらの $^{16}\text{O}^{6+}$ ビームのタイムチャートである。酸素イオンは、Li イオンポンピング効果によってプラズマから除去する方がはるかに容易であった。Li II 光強度が増加するにつれて、 $^{16}\text{O}^{6+}$ ビーム強度は減少した。

これらの結果から、Li 原子のイオンポンピング効果は、例えば、 $^{12}\text{C}^{4+}$ イオンのみを排気し、 $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンをプラズマチェンバーに残すような選択性を有さないように見えた。しかし、ビームチューニング中に O_2 と He ガスが連続的に供給され、ロータリーポンプオイルの逆流があっても、カーボンが真空チェンバー内に少量存在するだけである。

そこで、我々はプラズマチェンバー内に少量の Li 原子を蒸発させながら $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンビームを調整しようと試みた。図 6 は、Li 蒸発による $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンビームチューニング中の $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンビーム電流および C IV 光強度のタイムチャートを示す。Li るつぼとプラズマとの間の距離を調整することにより、Li II 光度の輝度を 1.1mV に維持した。過剰な Li るつぼの加熱を防ぎながら、C IV 光強度を 0.9mV 未満に保ち、 $^{16}\text{O}^{6+}$ ビーム電流を $48\text{e}\mu\text{A}$ にチューニングできた。この C IV 輝度を図 3 に示すようにビーム電流に変換すると、 $^{12}\text{C}^{4+}$ ビーム電流は約 $1.0\mu\text{A}$ 以下になる。Li イオンポンピング効果により、不純物量は 40% から約 2% に大幅に改善された。

3. 今後の展開

今回、加速器研究でほぼ q/m の等しいイオンビームの混入を制御する新しい方法を $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンビーム生成について成功した。この不純物イオンビームの問題は、加速器からのイオンビームを用いる物理実験では、異なる核反応が混じったり、またがん治療薬の製造実験では、不純物ビームによる核反応によって有害物質が一緒にできてしまう可能性があり、今後この方法が広く有用となる可能性がある。

イオン源の開発は、純度が高く、しかも多価の大強度イオンビームを加速器に供給することが重要課題である。今回、我々は、プラズマ分光を用いることで、イオン源中に、直接どのようなイオンがどれだけできているかが判定できるようになった。この技術を利用して、更にプラズマ中の多価のイオン分布などの特性を直接観測し、高純度・大強度の多価イオンを生成する技術を確認していく計画である。

～本件に関するお問い合わせ～

東京理科大学 研究戦略・産学連携センター

〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

TEL : 03-5228-7440 FAX : 03-5228-7441

【参考資料】

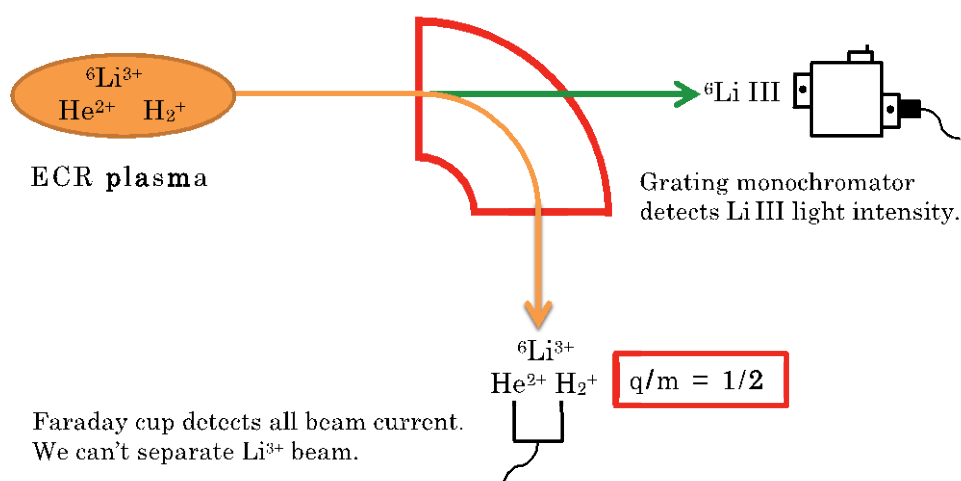


図 1. 分光器の概念図（この場合同じ $q/m=1/2$ のイオンを分ける方法を示している）



図 2. 偏向電磁石下流の石英窓とそこに取り付けられた分光器とホトマル

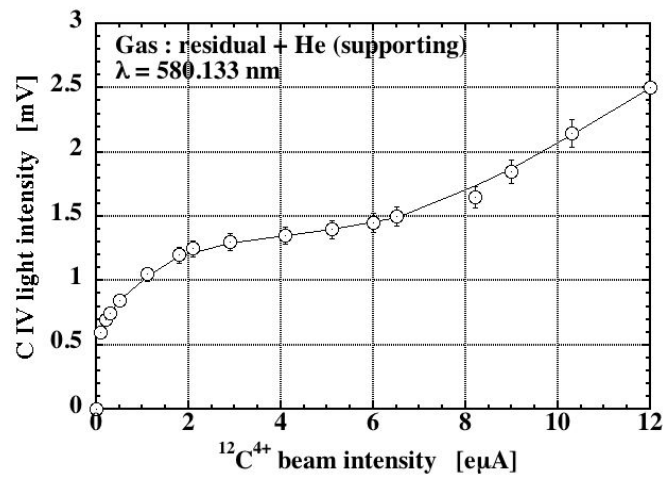


図 3. C IV の光強度と $^{12}\text{C}^{4+}$ ビーム電流の関係

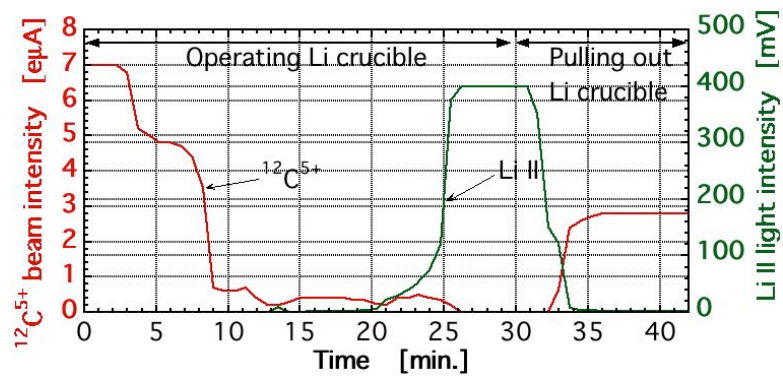


図 4. Li を蒸発させながら $^{12}\text{C}^{5+}$ イオンを取り去る実験のタイムチャート

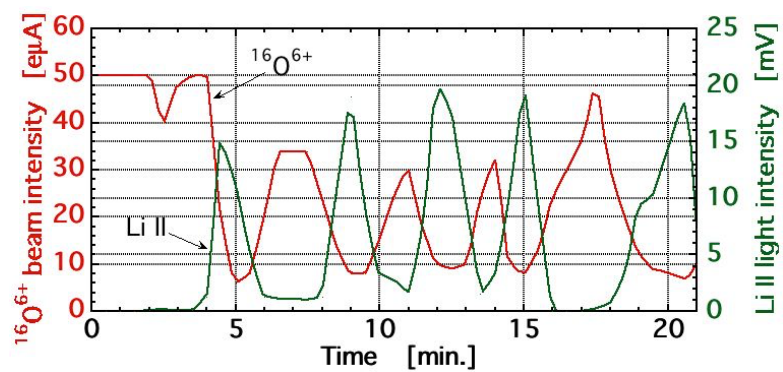


図 5. Li を蒸発させながら $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンを取り去る実験のタイムチャート

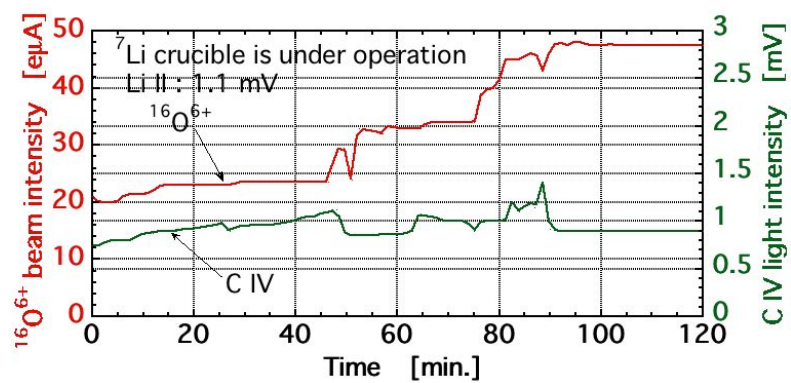


図 6. Li II を 1.1mV にしながら $^{12}\text{C}^{4+}$ イオンを取り去り $^{16}\text{O}^{6+}$ イオンを増やす実験のタイムチャート