JAEA-Technology
2008-090

TIARA イオン注入装置における イオン生成法の開発

Ion Generation Method for TIARA Ion Implanter

山田 圭介　大越 清紀　齋藤 勇一　織茂 貴雄*
大前 昭臣*　山田 尚人*　水橋 清

Keisuke YAMADA, Kiyonori OHKOSHI, Yuichi SAITOH, Takao ORIMO*
Akiomi OHMAE*, Naoto YAMADA* and Kiyoshi MIZUHASHI

高崎量子応用研究所
放射線高度利用施設部

Department of Advanced Radiation Technology
Takasaki Advanced Radiation Research Institute

March 2009

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

JAEA−Technology 2008-090

TIARA イオン注入装置におけるイオン生成法の開発

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所
放射線高度利用施設部
山田　圭介、大越　清紀+、齋藤　勇一、織茂　貴雄*、大前　昭臣*、山田　尚人*、水橋　清

(2008 年 12 月 19 日受理)

高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設(TIARA)の 400kV イオン注入装置では、搭載しているフリーマンイオン源を使用して、材料科学やバイオ技術に関する研究開発を中心とする数多くの実験利用にイオンビームとして提供してきた。これまで、フリーマンイオン源によるイオン生成は、ガス状試料を使用するガス方式、固体で蒸気圧が高い試料を用いるオーブン方式が用られてきた。しかし、実験の高度化及び多様化が進むにつれ、これらの方式では生成が困難なイオン種への要望が多くあった。したがって当施設では、各々の試料物性に適したイオン発生方式の開発を進めてきた。その結果、高融点の物質に対してはディスク方式、高融点かつ低蒸気圧の物質に対しては SF_6 プラズマ方式、2400℃以上の融点を有する金属に対してはフィラメント方式を新たに開発し、物質の特性に合った方式を選択することで、これまでに水素からビスマスまでの元素のうち、44 種類のイオンを生成し加速した。更に、加速エネルギーを高めることを目的に多価イオンの生成が容易な小型 ECR イオン源(MINI-ECR)を開発した。

本報告書では、これらのイオン生成技術と生成したイオン種について、その生成方法、得られるビーム電流量、マススペクトル及び各イオンを安定に引き出すための運転パラメータ等をまとめ報告する。

高崎量子応用研究所：〒370-1292　群馬県高崎市綿貫町 1233
+ J-PARC センター　加速器ディビジョン
*ビームオペレーション株式会社

JAEA-Technology 2008-090

Ion Generation Method for TIARA Ion Implanter

Keisuke YAMADA, Kiyonori OHKOSHI[+], Yuichi SAITOH,
Takao ORIMO*, Akiomi OHMAE*, Naoto YAMADA* and Kiyoshi MIZUHASHI

Department of Advanced Radiation Technology
Takasaki Advanced Radiation Research Institute
Japan Atomic Energy Agency
Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received December 19, 2008)

The 400kV ion implanter at the Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application facility (TIARA) provides ion beams for various experiments of research and development (R&D's) mainly on materials science and biotechnology using Freeman ion sources. Two methods of ionization are generally used to a Freeman ion source. In one method, a sample gas is directly fed to the plasma chamber, and in the other, vapor of a solid material having high vapor pressure is vaporized by an oven and fed. Those methods, however, can supply limited number of ion species of those required from various R&D's. We have developed new methods available to materials which are difficult to vaporize by an oven: the disc method for high melting point materials, the SF_6 plasma method for high melting point and low vapor pressure materials, the filament method for metals with melting point higher than 2400℃, and one of them is chosen according to the nature of a material. Forty four ion species from hydrogen to bismuth are generated by using the Freeman ion sources to date. Furthermore, a small ECR (electron cyclotron resonance) ion source is also developed to generate multiply charged ions for acceleration to higher energies.

The report describes the details of the new methods, operational procedure, expected ion intensity, mass spectrum and operational parameters of the ion source for each ion species.

Keywords: Ion Implanter, TIARA, Freeman Ion Source, ECR Ion Source, Ion Generation

---

[+] Accelerator Division, J-PARC Center

*Beam Operation Corporation

目　次

1. はじめに 1
2. イオン注入装置の概要 3
3. イオン源 8
3.1 フリーマンイオン源 8
3.1.1 構造と原理 8
3.1.2 運転 12
3.1.3 保守 14
3.2 MINI-ECR イオン源 18
3.2.1 構造と原理 18
3.2.2 運転及び保守 21
4. イオン生成法 22
4.1 フリーマンイオン源によるイオン生成 22
4.1.1 ガス方式 22
4.1.2 オーブン方式 25
4.1.3 ディスク方式 27
4.1.4 SF_6(六フッ化イオウ)プラズマ方式 29
4.1.5 フィラメント方式 32
4.2 MINI-ECR イオン源によるイオン生成 34
4.2.1 ガス方式 34
4.2.2 MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) 35
4.2.3 SF_6 プラズマ方式 35
5. 各イオンの生成条件とマススペクトル 37
5.1 フリーマンイオン源 42
5.1.1 水素(H)イオン 42
5.1.2 ヘリウム(He)イオン 43
5.1.3 リチウム(Li)イオン 44
5.1.4 ボロン(B)イオン 45
5.1.5 炭素(C)イオン 46
5.1.6 窒素(N)イオン 47
5.1.7 酸素(O)イオン 48
5.1.8 フッ素(F)イオン 49
5.1.9 ネオン(Ne)イオン 50
5.1.10 マグネシウム(Mg)イオン 51
5.1.11 アルミニウム(Al)イオン 52
5.1.12 シリコン(Si)イオン 53
5.1.13 リン(P)イオン 54

5.1.14 硫黄(S)イオン 55
5.1.15 塩素(Cl)イオン 56
5.1.16 アルゴン(Ar)イオン 57
5.1.17 カリウム(K)イオン 58
5.1.18 チタン(Ti)イオン 59
5.1.19 バナジウム(V)イオン 60
5.1.20 クロム(Cr)イオン 61
5.1.21 マンガン(Mn)イオン 62
5.1.22 鉄(Fe)イオン 63
5.1.23 コバルト(Co)イオン 64
5.1.24 ニッケル(Ni)イオン 65
5.1.25 銅(Cu)イオン 66
5.1.26 ゲルマニウム(Ge)イオン 67
5.1.27 砒素(As)イオン 68
5.1.28 クリプトン(Kr)イオン 69
5.1.29 ニオブ(Nb)イオン 70
5.1.30 モリブデン(Mo)イオン 71
5.1.31 銀(Ag)イオン 72
5.1.32 アンチモン(Sb)イオン 73
5.1.33 キセノン(Xe)イオン 74
5.1.34 バリウム(Ba)イオン 76
5.1.35 ランタン(La)イオン 77
5.1.36 セリウム(Ce)イオン 78
5.1.37 ユーロピウム(Eu)イオン 79
5.1.38 テルビウム(Tb)イオン 81
5.1.39 エルビウム(Er)イオン 82
5.1.40 タングステン(W)イオン 83
5.1.41 白金(Pt)イオン 84
5.1.42 鉛(Pb)イオン 85
5.1.43 ビスマス(Bi)イオン 86
5.1.44 フラーレン(C_{60})イオン 87
5.2 MINI-ECR イオン源 89
5.2.1 ボロン多価イオン (B^{n+}) 89
5.2.2 シリコン多価イオン (Si^{n+}) 90
5.2.3 アルゴン多価イオン (Ar^{n+}) 91
5.2.4 鉄多価イオン (Fe^{n+}) 92
5.2.5 タンタル多価イオン (Ta^{n+}) 93
6. おわりに 94

謝辞 94

参考文献.....95

Contents

1. Introduction 1
2. Outline of the Ion Implanter 3
3. The Ion Source 8
3.1 The Freeman Ion Source 8
3.1.1 Structure and Principle 8
3.1.2 Operation 12
3.1.3 Maintenance 14
3.2 The MINI-ECR Ion Source 18
3.2.1 Structure and Principle 18
3.2.2 Operation and Maintenance 21
4. Development of Ion Generation Method 22
4.1 Ion Generation Method by Freeman Ion Source 22
4.1.1 Gas Method 22
4.1.2 Oven Method 25
4.1.3 Disk Method 27
4.1.4 SF_6 Plasma Method 29
4.1.5 Filament Method 32
4.2 Ion Generation Method by MINI-ECR Ion Source 34
4.2.1 Gas Method 34
4.2.2 MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) 35
4.2.3 SF_6 Plasma Method 35
5. Generation Condition and Mass Spectrum of Each Ion 37
5.1 Freeman Ion Source 42
5.1.1 Hydrogen (H) Ion 42
5.1.2 Helium (He) Ion 43
5.1.3 Lithium (Li) Ion 44
5.1.4 Boron (B) Ion 45
5.1.5 Carbon (C) Ion 46
5.1.6 Nitrogen (N) Ion 47
5.1.7 Oxygen (O) Ion 48
5.1.8 Fluorine (F) Ion 49
5.1.9 Neon (Ne) Ion 50
5.1.10 Magnesium (Mg) Ion 51
5.1.11 Aluminium (Al) Ion 52
5.1.12 Silicon (Si) Ion 53
5.1.13 Phosphorus (P) Ion 54

5.1.14 Sulfur (S) Ion 55
5.1.15 Chlorine (Cl) Ion 56
5.1.16 Argon (Ar) Ion 57
5.1.17 Potassium (K) Ion 58
5.1.18 Titanium (Ti) Ion 59
5.1.19 Vanadium (V) Ion 60
5.1.20 Chromium (Cr) Ion 61
5.1.21 Manganese (Mn) Ion 62
5.1.22 Iron (Fe) Ion 63
5.1.23 Cobalt (Co) Ion 64
5.1.24 Nickel (Ni) Ion 65
5.1.25 Copper (Cu) Ion 66
5.1.26 Germanium (Ge) Ion 67
5.1.27 Arsenic (As) Ion 68
5.1.28 Krypton (Kr) Ion 69
5.1.29 Niobium (Nb) Ion 70
5.1.30 Molybdenum (Mo) Ion 71
5.1.31 Silver (Ag) Ion 72
5.1.32 Antimony (Sb) Ion 73
5.1.33 Xenon (Xe) Ion 74
5.1.34 Barium (Ba) Ion 76
5.1.35 Lanthanum (La) Ion 77
5.1.36 Cerium (Ce) Ion 78
5.1.37 Europium (Eu) Ion 79
5.1.38 Terbium (Tb) Ion 81
5.1.39 Erbium (Er) Ion 82
5.1.40 Tungsten (W) Ion 83
5.1.41 Platinum (Pt) Ion 84
5.1.42 Lead (Pb) Ion 85
5.1.43 Bismuth (Bi) Ion 86
5.1.44 Fullerene (C_{60}) Ion 87
5.2 MINI-ECR Ion Source 89
5.2.1 Boron (B^{n+}) Ion 89
5.2.2 Silicon (Si^{n+}) Ion 90
5.2.3 Argon (Ar^{n+}) Ion 91
5.2.4 Iron (Fe^{n+}) Ion 92
5.2.5 Tantalum (Ta^{n+}) Ion 93
6. Summary 94

Acknowledgments 94

Reference 95

1. はじめに

高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設(TIARA)[1)2)]はイオンビームによる材料科学及びバイオ技術を中心とした拠点的研究施設として建設・整備され、1993 年に完成した。TIARA は 3MV タンデム加速器、3MV シングルエンド加速器及び 400kV イオン注入装置(以下、イオン注入装置)の 3 基の静電加速器と AVF サイクロトロン加速器により、イオン種毎によって利用可能なエネルギー範囲は異なるが、20keV から最大で 900MeV までの広いエネルギー範囲に亘り、水素イオンから金イオンまでの多種類のイオンが利用できる施設として、放射線高度利用研究を支援している。また、3 基の静電加速器を複合的に利用し、2 種類あるいは 3 種類のイオンビームを同時に照射できることが大きな特徴である。

このうち、イオン注入装置は 20keV から 400keV までの低いエネルギー領域において、多種類のイオンを提供し、新機能材料や新しい半導体の開発などの研究を支援している。イオン注入装置としては、最大加速電圧が 400kV であることを除くと、一般的な産業界(特に半導体関連)等において使われているものと変わらぬ汎用的な装置である。ただし、産業界での使用では、その産業目的に応じて使用するイオン種や条件が限られるため、新しいイオン種を積極的に開発し利用可能なイオン種を増やすことよりは、特定のイオン種を長期間に亘り安定に運転することが重要であると考えられ、これが主要な開発課題となる。一方、TIARA の様な研究開発施設では研究目的が多様であるため、実験利用者からのイオン種、電流量、安定度及びビームの均一度等の様々な照射条件に関する要求に応えていく必要があり、常に既存のイオン注入装置を改善・改良し、新しい目的に合わせ開発していかなければならない。特に、研究施設用イオン注入装置に求められるものとしては、1)実験の目的や進捗状況に応じて使用可能な多種類のイオンビーム生成・加速、2)注入量を一定にし、均一な注入を行なうための安定なビーム発生、3)効率良いイオン注入を行うための大電流化等のイオン発生技術に関係するものがある。それ以外としては、4)大面積をより均一に照射する技術、5)低エネルギービームを可視化し、より正確な照射を行なうための技術、6)照射したイオン電流量をより正確に測定する計測技術等があり、実験の種類に応じた照射技術の開発が必要である。本書では 1)〜3)のイオン発生技術について報告する。イオン発生技術におけるイオン生成の困難さはイオン種毎に異なり、目的のイオンを生成するために用いる試料(以下、試料)の物性に応じたイオン生成法の開発が必要である。TIARA のイオン注入装置では、多種類のイオン生成が比較的容易なフリーマンイオン源を使用して、利用者からの要求に応じている。

イオン注入装置が完成した当初は、ガス又はオーブンによる既存の方法で発生できる 6 種類のイオン種(H、P、Ar、Mn、As、Ag)に限定し、これらのイオンを安定に生成・加速することに重点を置いた。しかし、実験利用者の新たな要求に応え、Ti、V などの低蒸気圧金属に対してはディスク方式(低融点金属にはるつぼを使用)、Nb、Mo などの超高融点金属に対してはフィラメント方式を、さらに通常 B、Si などの生成には毒劇物ガス(BF_3、SiH_4)が用いられているが、TIARA では無毒で安定な SF_6 ガスを用いる SF_6 プラズマ方式を開発するなど、新しい生成方法を開発してきた。これらの開発によって、利用できるイオン種は拡大し、運転を開始してから約 15 年が経過した現在では安定に供給できるイオン種は 44 種類になった。開発過程においては、同じ型式の

イオン源を我々が使用する以前から運用していた大阪府のイオン工学研究所(旧イオン工学センター)から得たイオン源の改良に関する指針[3]は非常に有益であった。また、400kV イオン注入装置で 1MeV までの重イオン加速をするためにフリーマンイオン源との互換性を高め、多価イオンの生成が可能な MINI-ECR イオン源を開発し、本イオン注入装置に搭載し高エネルギー化を図った。

本報告書は MINI-ECR イオン源も含めこれまでに生成・加速したすべてのイオン種について、その生成方法、イオン源から引き出されたビームのマススペクトルなどを詳細に記し、TIARA 及び他の研究機関等でイオン注入装置の運転管理に携わる技術者にとって、その一助とするためにまとめた。

2. イオン注入装置の概要

TIARA イオン注入装置は、日新電機(株)製「NH-40SR 型」で最大加速エネルギーが 400keV、加速イオン電流量が数十 μA である。イオン注入装置本体は試料からイオンを生成するイオン源、イオン源で発生したイオン種群の中から目的とするイオンを選択する質量分析電磁石、選択されたイオンを加速する加速管(大気開放型)、加速管に最大 370kV の電圧を印加するための高電圧発生回路(コッククロフト回路)、高電圧デッキ内のイオン源、電磁石、真空ポンプ等の機器に電力を供給する絶縁トランス等から構成される。

イオン注入装置の外観写真を図 1 に示す。写真上部の光沢あるステンレス製の箱状のものが高電圧デッキであり、その下面中央部から下に伸びている白い円柱状物が高電圧発生回路である。左壁面に向かって延びている 2 本の白い円柱状物の内、手前が加速管、奥側が絶縁トランスからの電力供給ラインで両者共 400kV 以上の耐圧を有している。イオン源、質量分析電磁石は高電圧デッキ内に設置されており、デッキ真下の高電圧発生回路によって発生した電圧によってデッキ全体が一定の高電位に保たれる。高電圧発生回路は 19 段の対称型コッククロフト回路であり、16kHz、±10kV の高周波電力を入力することで最高 370kV まで昇圧することができる。

高電圧デッキ内部及び装置の平面及び側面構造を図 2 に示す。高電圧デッキ内構造物は主にイオン源、ターボ分子ポンプ、質量分析電磁石、各種電源及びイオン源内でプラズマを生成するための Ar ガスを基本とした 3 種類のガスボンベが搭載されている。イオン源部は高電圧ターミナル電位に対し最大で 30kV 高い電圧が印加され、引出し電極によりイオン源内で生成された正イオンが引き出される。イオン源内には目的とするイオン以外に多くの種類のイオンが生成され、引き出されたビーム中には同様に多くのイオンが混在する。質量分析電磁石は混在するイオンビームの中から目的とするイオン種のみを選択し、下流にそのイオンだけを輸送する。質量分析電磁石は曲率半径が 30cm、偏向能力 3.125(amu･MeV)で質量分解能(M/ΔM)が 100 である。偏向能力は引出電圧が 20kV のときで 156amu、10kV で 312amu までの質量を有するイオンの偏向が可能であることを意味する。但し、これらの値はイオンの価数が 1 であるときの値である。また、質量分解能は質量数が 100 以上の核種については質量数が 1amu 異なる同位体の分離はできないことを表している。加速管は高電圧デッキとアース間に設置され、この間の電位差によりイオンは加速される。加速管の全長は 1115.5mm でアルミニウム電極とセラミックス絶縁体による 24 段構造になっている。各電極間は 33MΩ(100MΩ 3 本並列)の抵抗で均等に電位分割されている。側面図にコッククロフト昇圧回路外観を示した。昇圧回路全体は 19 個のモジュールで構成され、モジュールの電圧測定抵抗(合計 4.8GΩ)が高電圧部とアース間に接続され、ここを流れる電流によって電圧は制御される。電圧安定度はイオン注入が主目的であるため $\Delta V/V=1\times10^{-3}$ 程度に設計されており、他の分析等を目的とした TIARA 静電加速器のタンデム加速器($\Delta V/V=3\times10^{-4}$)やシングルエンド加速器($\Delta V/V=1\times10^{-5}$)と比べ 10^{-1}～10^{-2} 低い安定度である。イオン注入装置内の真空度はイオン源部、分析電磁石部及び加速管部に設置された 3 台のターボ分子ポンプ(TMP)によって保たれている。各 TMP の排気速度はそれぞれ 600ℓ/sec、300ℓ/sec、及び 500ℓ/sec であり、真空度はそれぞれイオン源部:1×10^{-4} Pa、加速管部:1×10^{-6} Pa 程度に保たれている。最高電圧 370kV の高電位部に設置されるイオン源、分析電磁石、真空排気系などの機器類はアース側より光ファイバーを介

して制御され、それらの電力はアース側より絶縁トランスを介して供給される。また、高電圧電位にあるイオン源部、分析電磁石の冷却は電気的絶縁性の高いパーフルオロカーボンクーラントを使用しており、アース側からポンプにより循環している。光ファイバー、バルブ開閉用の圧縮空気配管及びイオン源パージ用窒素配管の高電圧デッキとアース間は塩化ビニル製ダクトに収納され、加速管との間で生じる放電防止のため加速管の中間 2 箇所で電位固定されている。高電圧デッキは 4 本の絶縁支柱で支持されており、各支柱間は 3 分割され各段それぞれは 1000MΩ のカラム分割抵抗で電位固定されている。図 3 にイオン注入装置の電位配置図を示す。コッククロフト昇圧回路には±10kV、16kHz の交流電源が供給され、整流されながら整流器 1 段当たりのコンデンサーに最大 19.5kV の電圧が充電される。同コッククロフト昇圧回路は 19 段の整流回路を有するため、最大+370kV の電圧を発生することができる。高電圧ターミナル全体が最大で 370kV の電位となり、その電位の上に引出電極電源によってイオン源自体はさらに+30kV の電圧が印加され、合算されるイオン源の電位はアースに対し+400kV となる。このため、1 価のイオンは最大 400keV にまで加速される。また、加速エネルギー20keV から 400keV まで連続可変で運転することが可能である。高電圧ターミナルの電位は 4.8GΩ の電圧測定抵抗で測定され、フィードバック制御される。また、24 段から成る加速管は 1 段当たり 33MΩ の抵抗 24 本によって 400kV の電位からアース電位に向けて均一な電位勾配を形成しイオンを加速する。

本イオン注入装置は発生電圧が 400kV と非常に高く、かつ大気開放型であるため、運転中のイオン注入装置室の大気環境条件が安定な運転に大きな影響を与えている。370kV の高電圧が印加される高電圧ターミナルや相対する壁面は強い静電気を帯び､空気中の塵埃を多量に静電吸着し､それらの表面に付着した塵埃は放電の原因となる。したがって、安定な運転を行うためには室内の塵埃の発生を抑え、高電圧ターミナル外面や壁面の頻繁な塵埃除去を目的とした清掃が必要である。また、室内湿度が重要でグロー放電等による電圧変動を抑えるためには湿度を 60%以下に保つ必要がある。現在のところ、大気中で発生できる合算電圧としては 380kV が限界であり、400kV での安定な運転には先に述べた大気環境条件に加え室内湿度を大幅に下げるなど大気条件を十分に整える必要がある。

また、加速したイオンを目的のチェンバ内にまで導くためのビームラインには、ビームを効率良く輸送するためにビーム径を制御するレンズ系、ビーム位置を調整するシフター等のビーム輸送に関わる機器やビームサイズや電流量を計測する BPM(Beam Profile Monitor)や FC(Faraday Cup)等のビーム診断機器及びビームラインを高真空に保つための排気系から構成される。更に、イオン注入装置本体やビームライン機器を遠隔から制御するための制御装置を有している。

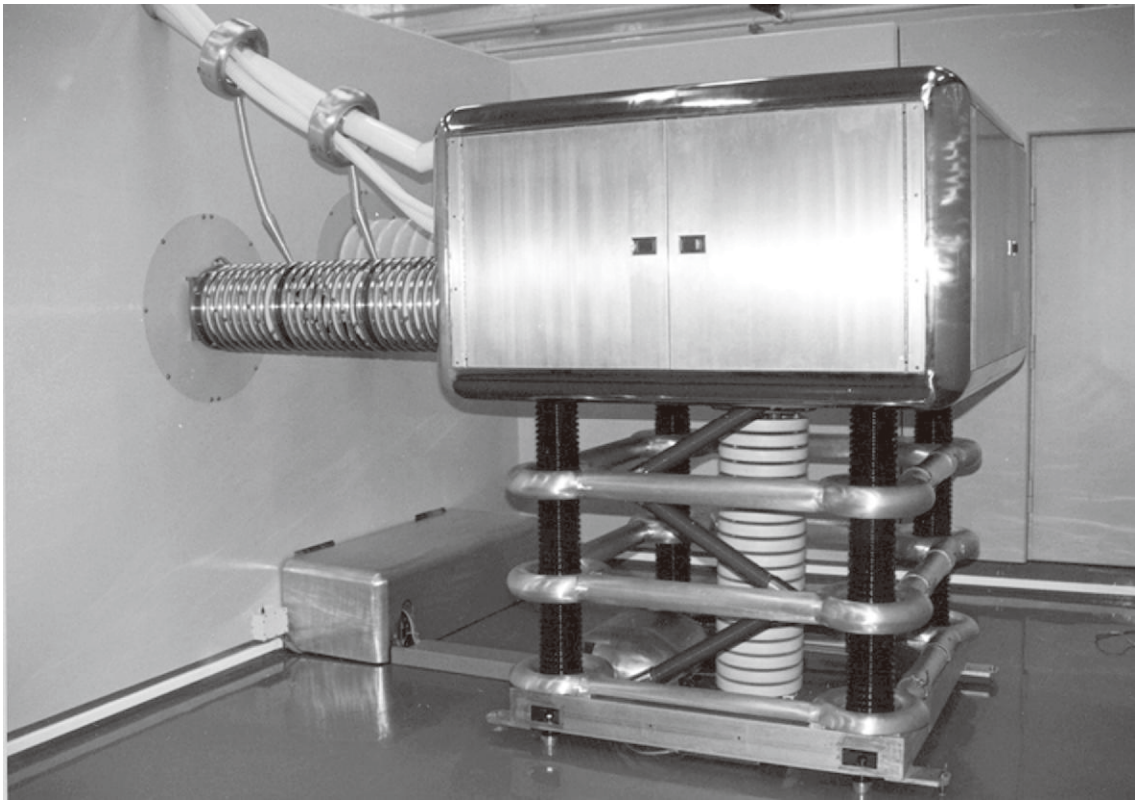
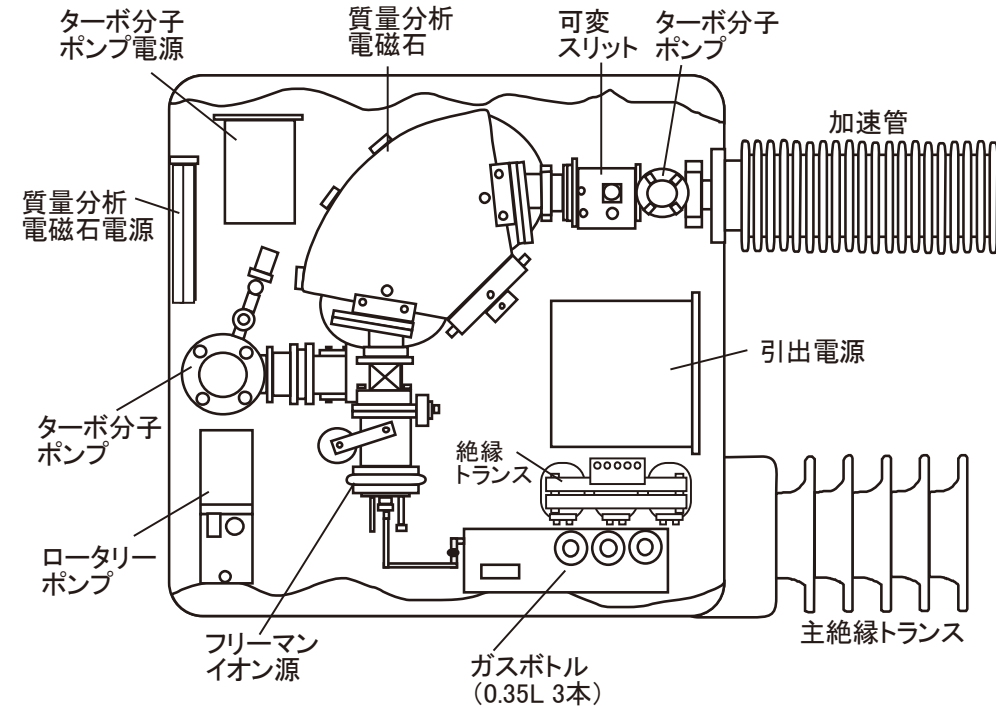
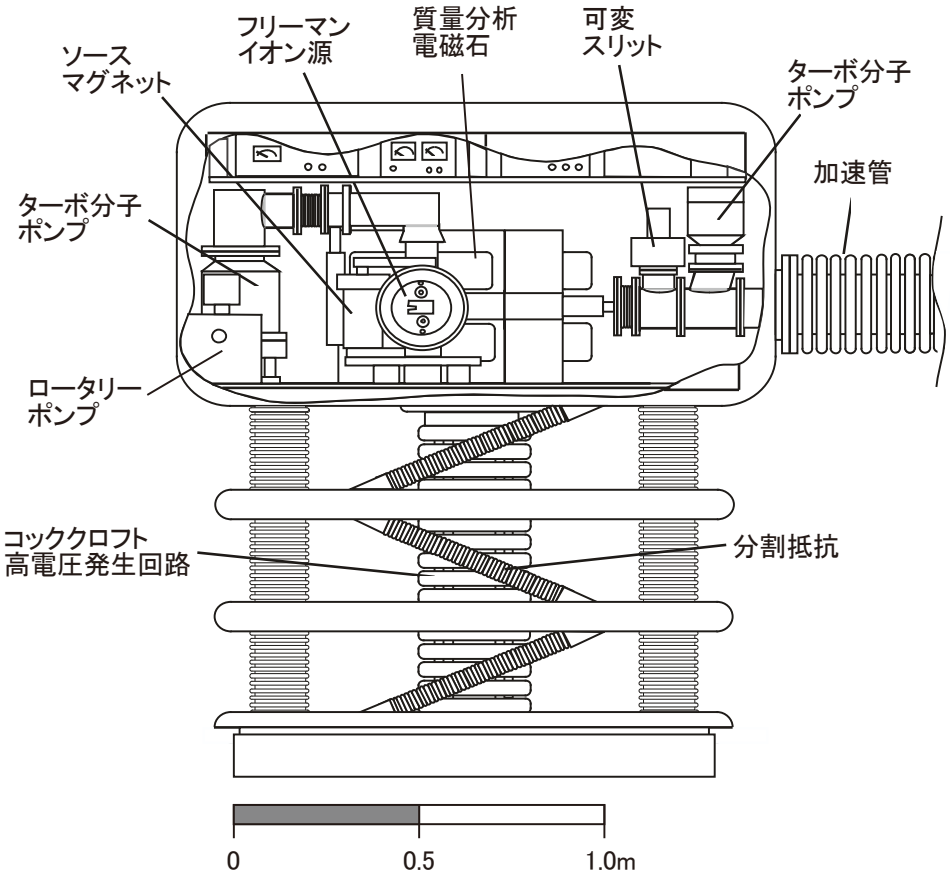


図 1　イオン注入装置(日新電機㈱製 NH-40SR 型)の外観



（平面図）



（側面図）

図 2　イオン注入装置の構造図

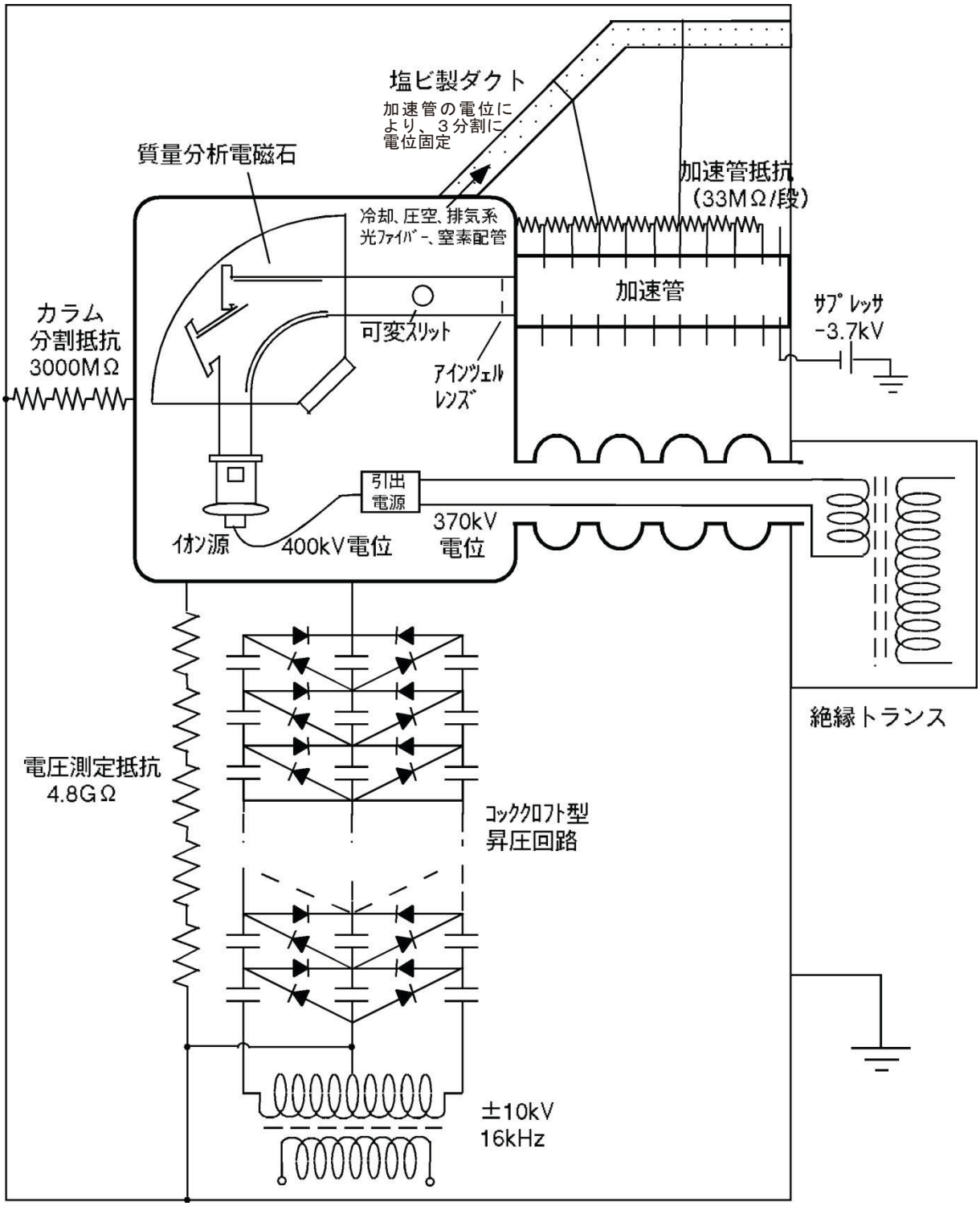


図３　イオン注入装置電位配置

3. イオン源

1960 年代のはじめに、フリーマンイオン源 [4]は同位元素分離用イオン源として J.H.Freeman により開発された。本イオン源はそれまで使用されていたカルトロンの問題点であったプラズマの不安定さやメンテナンス性の悪さを改善したものであり、長時間に亘り安定に動作し、大電流のイオンが取り出せることから、イオン注入装置のイオン源として急速に普及した。TIARA では、比較的容易に多種類のイオンを発生し大電流のイオンが得られ易いことから 400kV イオン注入装置用イオン源として導入した。

また、TIARA には 3 台の静電加速器があり、イオン注入装置は 20keV～400keV、タンデム加速器は 0.8MeV～18MeV までの重イオンの加速が行え、シングルエンド加速器では 0.4MeV～3MeV までの軽イオンの加速を行うことができる。したがって、TIARA では加速エネルギー0.4～0.8MeV での重イオンを加速することができなかった。静電加速によるイオンの加速エネルギー(E)は加速電圧(V)とイオンの価数(N)によって決まり、加速電圧を高めずに加速するイオンのエネルギーを高めるには価数を上げる必要がある。そこで、400kV イオン注入装置により、このエネルギー範囲をカバーするために、イオン注入装置に搭載可能で多価イオンの生成が可能な小型 ECR イオン源(MINI-ECR)[5]を開発した。

3.1 フリーマンイオン源

3.1.1 構造と原理

TIARA で使用している高温オーブン型イオン源(NIB-01353:日新電機(株)製)の写真を図 4 に示す。上部に見える四角い箱状部分がアークチェンバ部で、この中でイオン化が行なわれる。チェンバ部の上面にアークチェンバスリットを有し、この写真では上方に向かってイオンが引き出される。また、中央部の白い円柱状部がオーブンで、試料がこの中で気化されチェンバ内に導かれる。アークチェンバ部分は図 5 に示す高温用オーブンタイプのイオン源と図 6 に示すガスタイプのイオン源の両者に共通で、ガスタイプに高温オーブンを取り付けたものが高温用オーブンタイプとなっている。アークチェンバ(モリブデン製)はアーク放電のアノード電極を兼ね、アークチェンバスリットの近くに設置された 2mmφ のフィラメント(タングステン製)から放出された熱電子がガスをイオン化する。

図 7 にフリーマンイオン源の電位配置を示す。フィラメントには 200A の電流が流れ熱電子を放出する。アーク電圧はフィラメントとアークチェンバ間に 100V 又は 60V が印加され、フィラメントから放出された熱電子はガスをイオン化しながらアークチェンバに流れる。このとき、外部コイル(ソースマグネット)により、フィラメントと平行に約 0.012T の磁場が加えられるため、フィラメントから放出された熱電子は磁場に拘束され旋回運動をしながらアークチェンバに向かって加速される。試料ガスを供給すると旋回運動している熱電子と衝突してガスがイオン化されプラズマが発生する。高電圧デッキ電位をベースに引出電圧(～+30kV)がイオン源に印加される。したがって、イオン源電位はアース電位に対して最大で+400kV となり、この電位差によってイオンはアース電位に向かって加速される。

フィラメントをイオン引出孔近くに置いたこの構造は、弱い磁場でも安定な強いプラズマをイオン引出孔近くに集めることができる反面、フィラメントがプラズマ中にあるためフィラメントの消耗が著しくフィラメントの寿命を短くする。そのため、フリーマンイオン源の連続運転可能時間はフィラメントの寿命で決まってしまう。Ar^+ビームを加速したときのタングステン製フィラメント(2mmφ)の寿命を測定し、その結果を図 8 に示した。この図は Ar ビームを約 20μA 生成させたときの測定結果である。フィラメント電流は 150(A)から 0(A)へとフィラメントの消耗に従い減っていくが、Ar ビーム量はフィラメントが断線するまで一定で非常に安定であった。これは定電圧電源によってフィラメントの消耗に応じて抵抗値が高くなった分、主電流量は減少するが放出される熱電子量が一定(アーク電流が 0.1A で一定)に保たれる様にフィラメント電流が微少制御されているためである。従って、基本的にはフィラメントの寿命はその太さに比例するが、フィラメント電源容量や発生する磁場の大きさ等から 2mmφ を選択している。このときのフィラメントの寿命は約 100 時間であった。

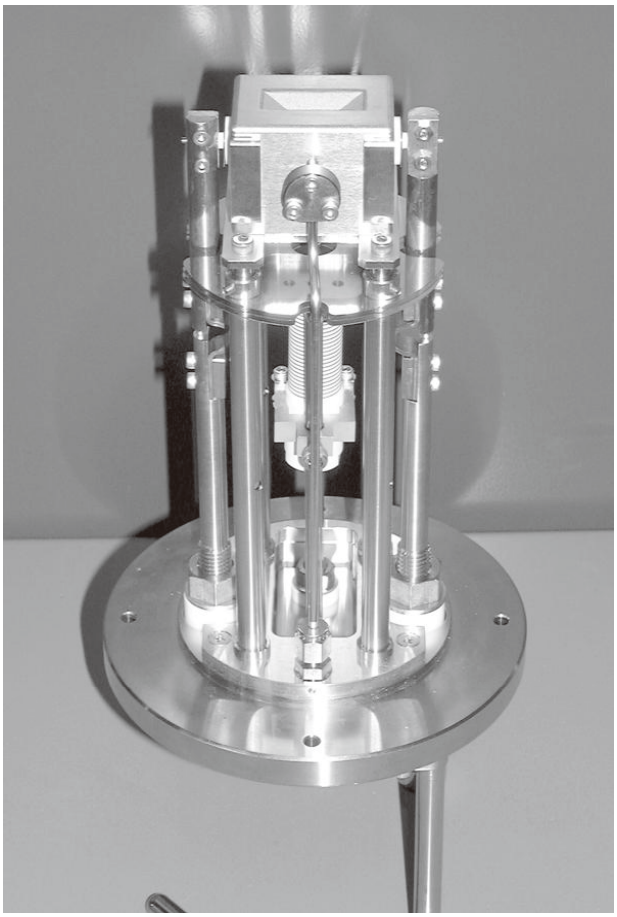


図 4　高温オーブン型イオン源(日新電機(株)製)

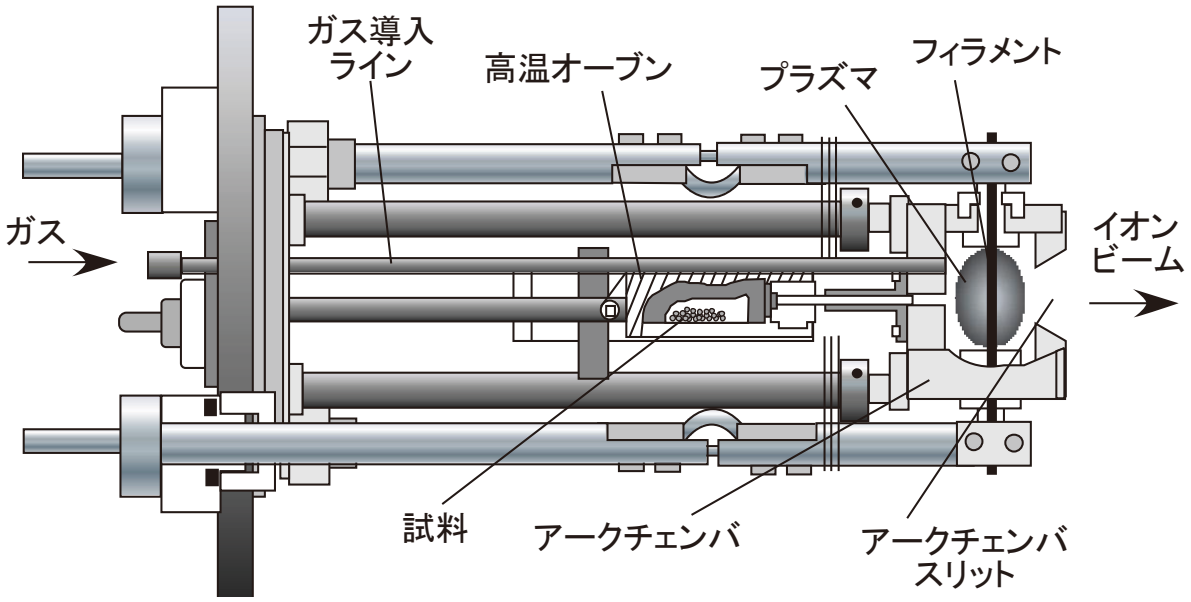


図 5　フリーマンイオン源(高温オーブン型)の構造

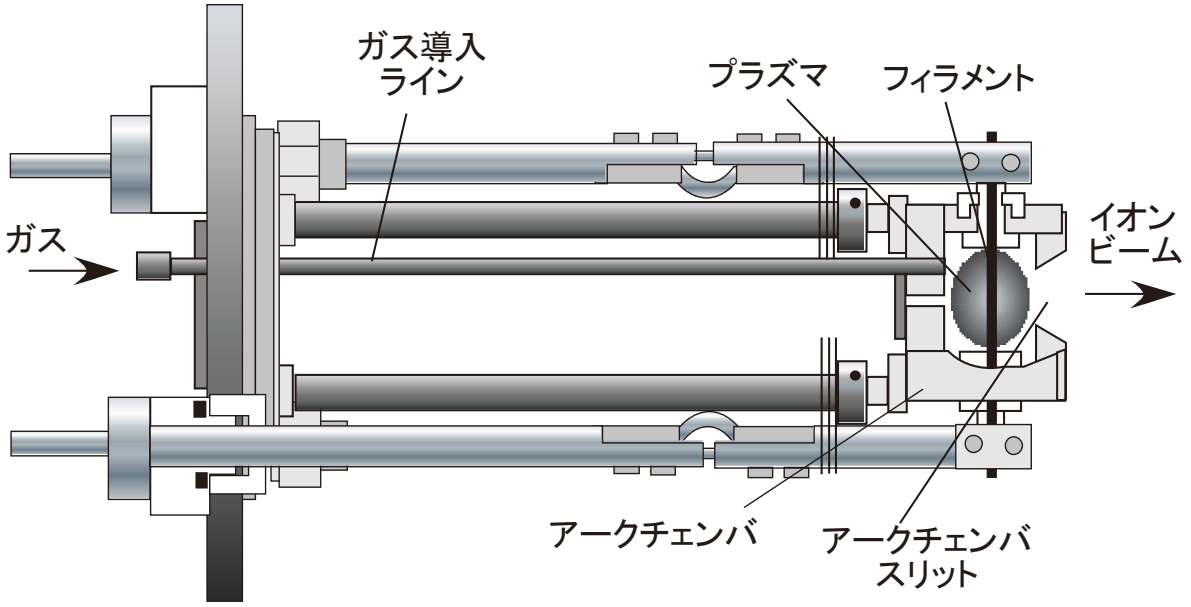


図 6　フリーマンイオン源(ガス用)の構造

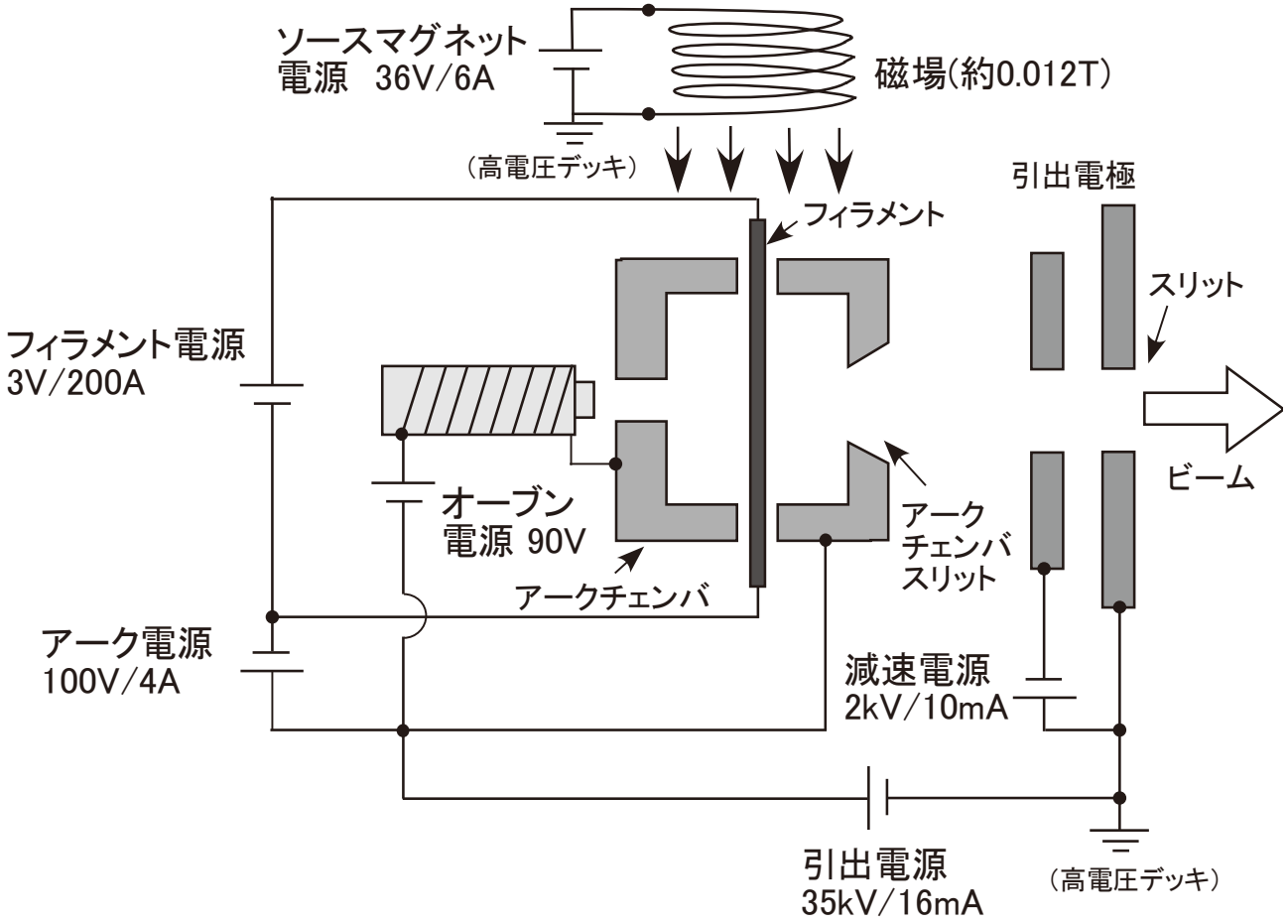


図 7　フリーマンイオン源の電位配置

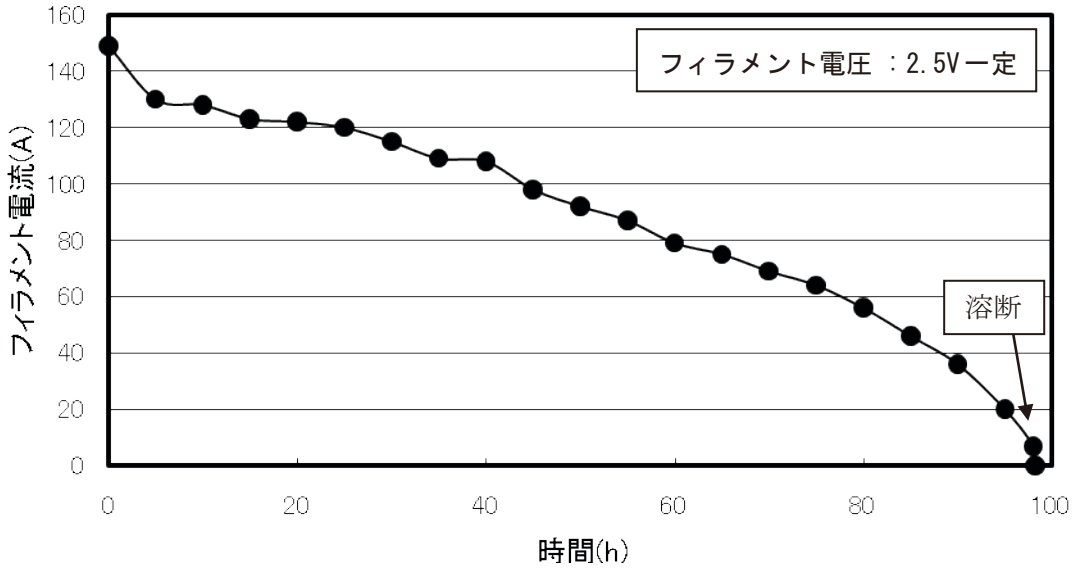


図 8　Ar^{+}ビーム生成時のタングステン製フィラメントの寿命

3.1.2　運転

新品のフリーマンイオン源やメンテナンス後の最初の運転時では、イオン源や試料から多量のガスが放出される。放出されたガス量はイオン源部の真空度の変化として現れる。ガス放出量が多すぎるとTMP保護回路が動作し、ガス放出に多大な時間を要するので真空度を注視しながら、フィラメント電流を増やす必要がある。平均的には100A程度でガス放出が始まり、ガス用イオン源の場合は比較的ガス放出量は少ないが、オーブン用イオン源の場合はフィラメントの熱によってオーブン部が加熱されるため試料から多量のガスが発生する。フィラメントからの熱が試料に伝わるまでには時間的な遅れがあるので、時間をかけて徐々にフィラメント電流を増やし温度を上げていく必要がある。アウトガスはオーブン温度が80℃から150℃のとき最も多く発生し、150℃でほぼ枯れた状態となり、それ以上温度を高めても放出ガス量は増えずに減少していく。本イオン注入装置の制御機能には、イオン源のガス出しを自動で行う「デガス」モードがあり、このモードでの運転では、あらかじめ設定された真空度以上に真空値が上がらないように自動的にフィラメント電流を制御し、ガス出しを行う。また、オーブン用イオン源の場合にはオーブンに充填する試料によってガス出しに要する時間は大幅に異なり、3時間から6時間を必要とする。特に、試料の中でも塩化物の場合には6時間以上、条件が悪い場合には2日間を要する場合がある。

ガス出しが終了した後は、オーブン温度をイオン種毎の設定値まで上げ、フィラメント電流を最大(ー200A)にして外部コイルよりフィラメントと平行に約1.2×10^{-2}Tの磁場を加える。アーク電圧を印加することによってアーク放電は開始しプラズマが形成される。一方、フィラメント電流はアーク電流を一定に保つように、0.1Aから4Aの間で制御される。生成するイオン量はアーク電流量やガス流量(固体状のものはオーブン温度)によって影響されるため、これらを調整することでビーム電流量は調整される。図9にアーク電流と引き出されたビーム電流量の関係を示す。アーク電流が1A以上ではほぼ一定の値となる。また、図10に引出電圧とビーム電流強度、図11に加速電圧とビーム電流強度の関係を示す。これらのビーム電流量は加速管直後のFCの測定値である。図11からビームのエネルギーが一定(加速電圧+引出電圧＝一定)の場合には引出電圧が高い方が得られる電流量は多く、図10では引出電源の最大電圧(30kV)以上に最適値があることを示唆している。また、引出電圧一定の条件において、加速電圧が高い方が得られるビーム量が多くなる傾向にあるのは加速電圧が高い方が加速管のレンズ効果が有効に働き、ビームエミッタンスもエネルギーが高い方が小さくなる傾向にあるためである。

また、本イオン注入装置の構造的特徴として、イオン源の取り付けや取り外し作業後及びイオン種変更のためのイオン源の交換等によって、アークチェンバスリットと引出電極のスリットとの間の軸ずれが生じる恐れがあり、軸だし調整をする必要性から引出電極の位置や角度を外部から制御できる構造になっている。従って、イオン源を交換した後は必ず軸だし調整を行い、最適な位置関係であることをビーム電流の最大値を求める方法で確認する。

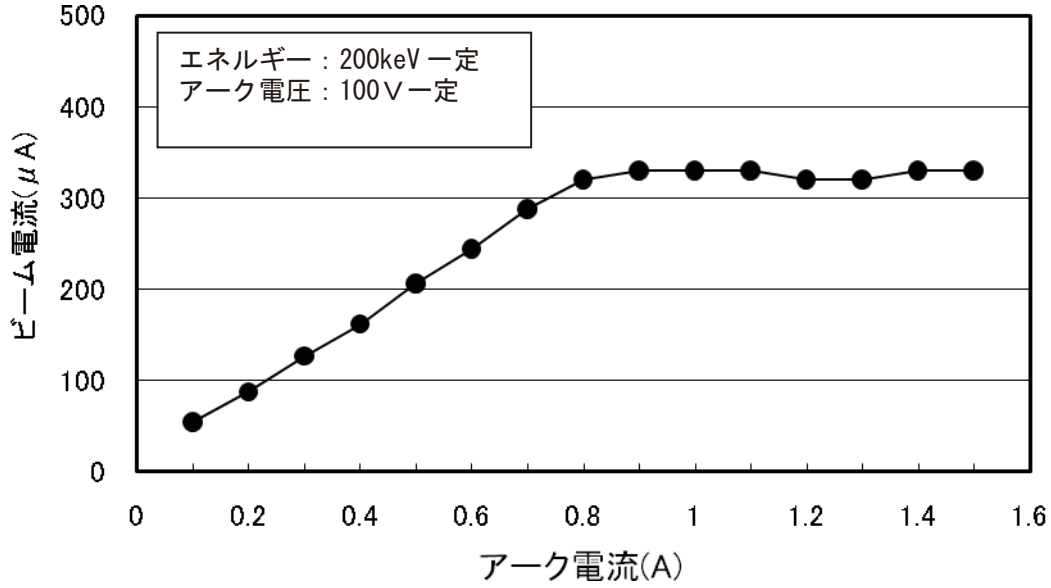


図 9　アーク電流に対する Ar ビーム電流の変化

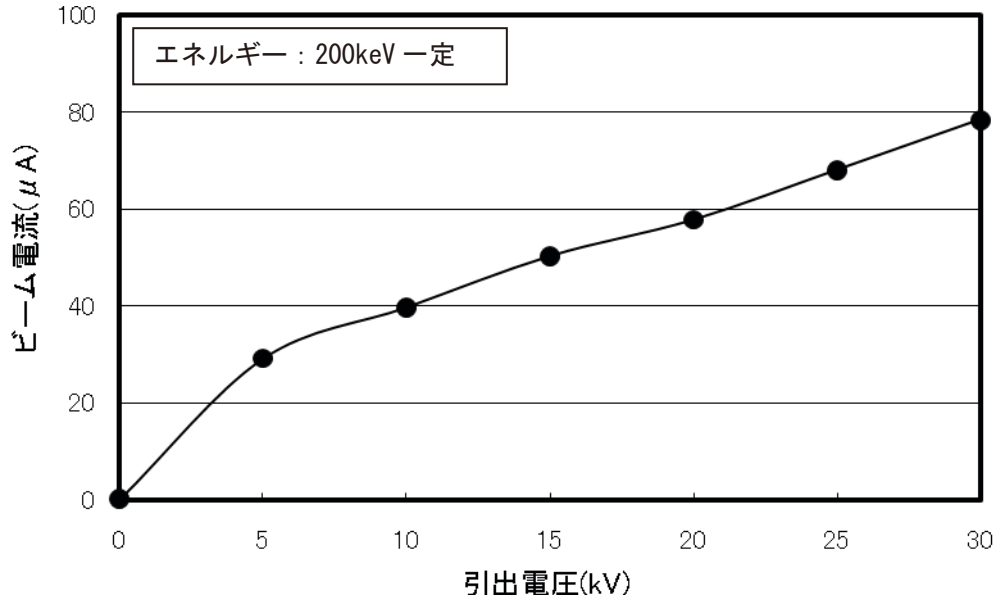


図 10　引出電圧に対する Ar ビーム電流の変化

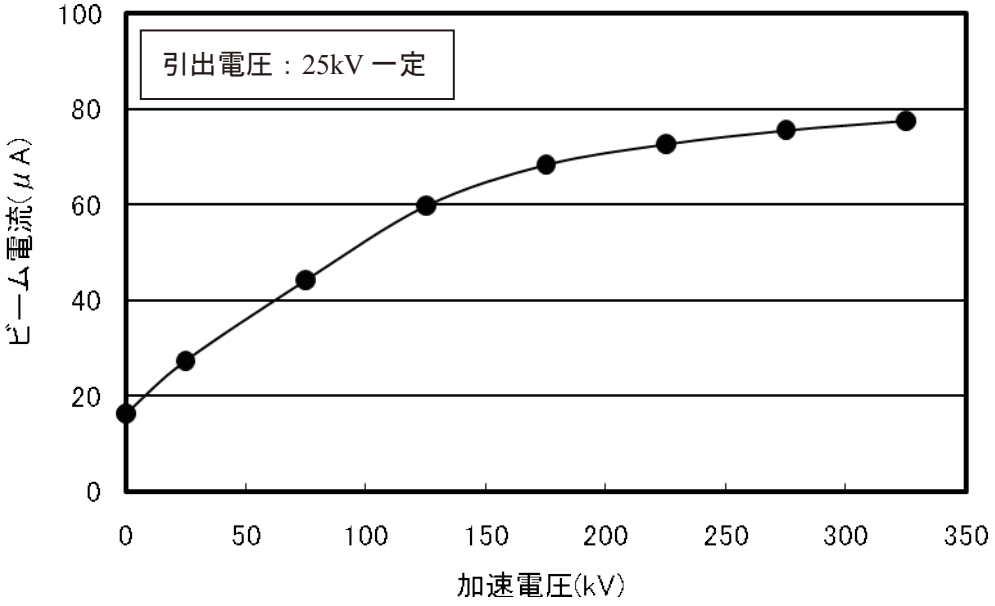


図 11　加速電圧に対する Ar ビーム電流の変化

3.1.3　保守

一般にイオン源は使用時間や使用条件に応じてその内部が汚れ、安定にイオンビームを引き出すことが難しくなる。安定な運転を継続するため、イオン源の状態を常に把握し必要に応じてクリーニングをすることが必要となる。フリーマンイオン源は RF イオン源や他のイオン源と比較して汚れ易く、頻繁にクリーニングをしなければならない。特に、CO_2 ガスや SF_6 ガスの使用後及びオーブンによる金属イオンの生成後は、特に入念なクリーニングが必要である。比較的汚れの程度が軽い不活性ガスを用いたイオン生成の後でも図 12 に示す様にアークチェンバ内及び絶縁物が煤状物質で汚れる。これらの汚れは絶縁不良を引き起こし、プラズマを不安定にし、安定な運転の妨げとなる。したがって、イオン源を運転した後は必ずイオン源、引出電極及びハウジングのクリーニングが必要である。イオン源の分解清掃に当たっては、生成したイオンの種類や生成方法によって有害物質が付着するため、必ず手袋やマスク等を着用するか、ドラフト内で作業する必要がある。使用後のイオン源はアークチェンバを分解し、図 13 に示すサンドブラスターにより付着物を除去する。サンドブラスターは研磨剤が循環して使用されるため 2 台準備し、写真の後方が真空内機器や高電圧機器のブラストに使用し、手前がそれ以外の機器等用として区別して使用している。サンドブラスターは圧縮空気によりガラス粉末を吹きつけて構造体表面を削り取ることを目的とした装置であるため、アークチェンバ及び引出電極のネジ山が削れないように、ネジ山をマスキングテープ等で塞いでから行うことが重要である。また、通常は 6kgf/cm^2 程度の圧縮空気でブラストするが、軟らかい材質に対しては圧力を弱めるなどの材質に合わせた調整を行なうことが部品を傷めないために重要である。窒化ボロン(BN)は軟らかく非常にもろいの

でサンドブラスターは使用せずにサンドペーパー等で金属付着物のみを軽く削り取る。消耗が激しいと思われる BN は早めに新品と交換した方が安定な運転が行なえる。サンドブラスターを使用した後は隙間等に入りこんだガラス粉を圧縮空気で吹き飛ばした後、アルコールを含ませたウエスで油分を取り除く等の表面処理を行う。清掃後は水分がつかないようにデシケータ内で保管する。特に、引出電極支持用絶縁碍子(セラミックス製)の汚れは絶縁破壊の原因となるので、2ヶ月に 1 回程度は取り外してサンドブラスターで清掃する。また、イオン源部の真空度を監視するコールドカソードゲージ(真空ゲージ)は、イオン源と同様の環境条件にあるため、ゲージ内も容易に汚れ正常な値を示さなくなる。したがって、イオン源の使用状況によっても異なるが 3 ヶ月に 1 度の頻度で真空ゲージも清掃することが必要である。

オーブン用イオン源では定期的なオーブンヒータの交換が重要である。図 14 に高温オーブン用ヒータを示した。オーブン用ヒータ線は 0.4mmφ のタンタルワイヤーで、加熱によって硬化し断線しやすくなる。したがって、清掃時にはタンタルワイヤーに力をかけないように作業する必要がある。また、運転中の断線を避けるためには 600℃以上で使用した後や 10 回使用後は新品のタンタルワイヤーに交換している。交換は図 14 に示した通り、タンタルワイヤーの一端をボルト❶で固定し、金属部分に触れる可能性のある部分のワイヤーは絶縁管で絶縁し、窒化ボロン(BN)製のオーブン容器の外周に刻まれた溝に沿って隙間なくワイヤーを巻きつけ❷、最終端をボルト❸で固定する。

イオン源周りの全てのフランジ部分には O リングシールが使用されており、イオン源運転時にはかなりの高温に晒されるため劣化が激しく、定期的に新品と交換することが必要である。また、イオン源材料として塩化物を使用した場合にはロータリーポンプの排気側のオイルミストエリミネータに腐食が生じるので、3 ヶ月に 1 度はフィルターの交換と内部の清掃をすることがトラブル防止上重要である。イオン源の使用状況にも因るがロータリーポンプは、年 3 回のオイル交換が必要で、特にイオン源に近いポンプは汚れが激しく、オイル交換をするときには一度フラッシングを行ってから交換するのが望ましい。

以上、安定なイオン生成をするための保守の重要性等について述べてきたが、多種類のイオンを安定に発生するために重要なこととしてイオン源の専有化が必要である。基本的には 1 つのイオン源で試料を換えるだけで全てのイオンは生成できるはずであるが、イオン種によってはイオン源の僅かな汚れやイオン源等との相性が悪くイオン生成量が非常に少なくなるケースや不安定になる場合がある。したがって、これらのトラブルを避けるために当施設では、オーブンイオン源を 6 台、ガス用イオン源を 5 台保有し、イオン種毎又はタイプ毎に専有化して使い分けている。

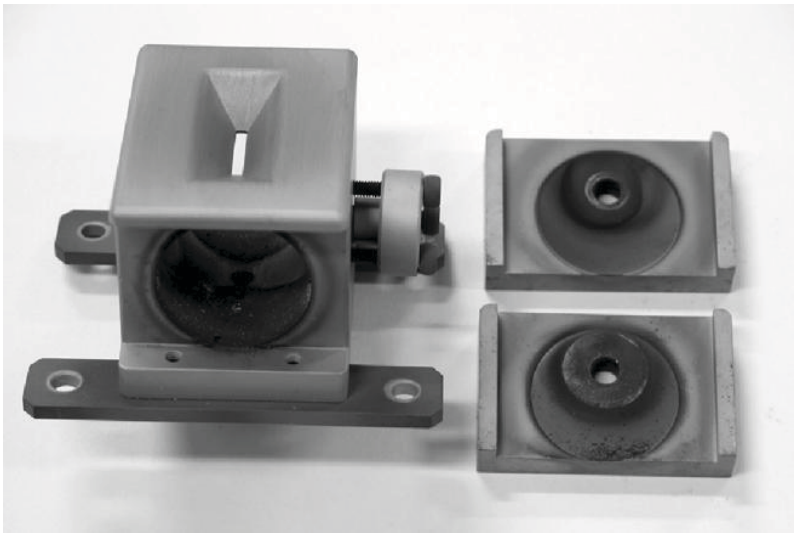


図 12　イオン生成後のアークチェンバとそのキャップ

図 13　サンドブラスター

手前：㈱不二製作所 PNEUMA BLASTER SGK-3

奥側：㈱ニッチュー AIR BLASTING MACHINE AMT-8

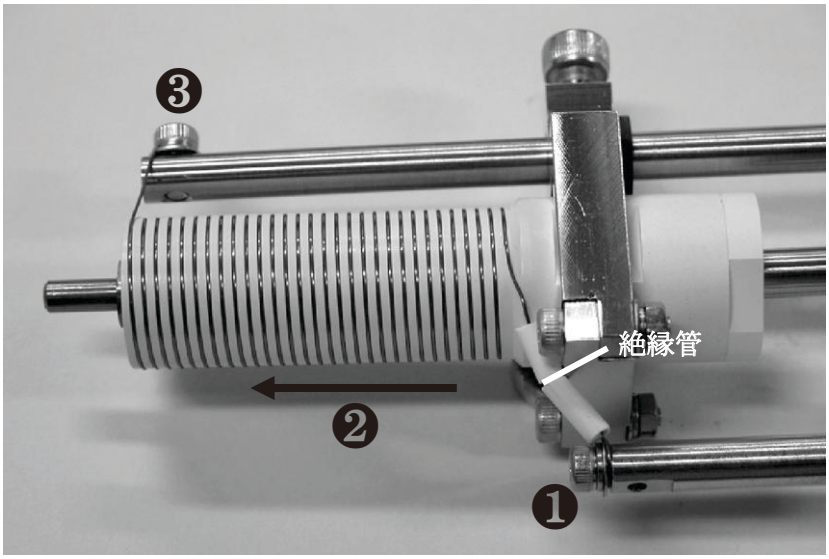


図 14　高温用オーブン

0.4mmφTa ワイヤーを❶のボルトで固定し、絶縁管を通してオーブン(BN 製)の溝に沿って隙間なく巻き付ける(❷)。最後にワイヤーのたるみが無いことを確認し、❸のボルトでワイヤーを留める。

3.2 MINI-ECR イオン源

3.2.1 構造と原理

図 15、16 に MINI-ECR イオン源の外観写真及び構造図を示す。ECR (Electron Cyclotron Resonance)イオン源は多価イオンを大電流で生成可能であり、主にサイクロトロン用のイオン源として使用されてきた。

ECR イオン源はエネルギーの高い電子をプラズマ中で生成し、それらと原子又はイオンとの衝突で、イオンを多価電離させるものである。したがって、目的とする多価イオンを生成するためには次の二つの条件を満たす必要がある。一つは、その多価イオンの電離エネルギー以上の電子を生成させること、二つ目はイオンを逐次電離により目的の価数になるのに十分な時間、イオン源内に閉じ込めておくことである [6]。プラズマ中の電子は、チェンバに投入されたマイクロ波から、その周波数と電子サイクロトロン共鳴する磁場の位置で、共鳴吸収によりエネルギーを受け取る。このときの周波数と磁場の関係は

$$\omega = \frac{qB}{m} \qquad (1)$$

ω : マイクロ波の角周波数、q : 電子の電荷、B : 磁場の強さ、 m : 電子の質量

で定義される。プラズマは軸方向に対しては永久磁石によるミラー磁場により、径方向に対しては多極磁場によってプラズマチェンバ内に閉じ込められる。

MINI-ECR イオン源はイオン注入装置高圧デッキ内の限られた空間と消費電力、及びフリーマンイオン源との互換性に配慮し開発した。そのため、磁場形成のための磁石は全て永久磁石を使用することで小型化し、マイクロ波アンプの増幅形式をソリッドステートトランジスタにすることで消費電力を抑える仕様としている。また、小型化したことで、プラズマ閉じ込め磁場を減少させると、多価イオン生成能力が低下することが考えられるため、小型で強い閉じ込め磁場を形成することが可能な永久磁石の最適な配置を考案した。軸方向閉じ込めのためのミラー磁石はそれぞれ系方向内側と外側に磁化方向をもつ 2 つのドーナツ状の永久磁石を張り合わせ、その外周を磁性体の鉄で覆った磁気回路で構成した。径方向閉じ込めのための多極磁石は、六極磁石を用いた。ただし大型の ECR イオン源では 24 分割された磁石ピースが多く用いられるが、小型の MINI-ECR イオン源ではミラー磁石が作る逆磁場により磁力を保持することが困難であった。そこで磁石を 12 分割とし､小型の磁石でも 1 つのピースを大きくすることで磁力を保持する構造とした。イオン源は軸方向及び径方向のプラズマ閉じ込めのための永久磁石、プラズマチェンバ、マイクロ波導入管及び 13GHz マイクロ波発生器で構成される。

またフリーマンイオン源との互換性を高めるため、微少流量のマスフローコントローラを使用する以外は、フリーマンイオン源で使用している真空排気系及びガス供給系はそのまま使用可能とし、さらに、フリーマンイオン源用の各電源を設置したまま、新たに MINI-ECR イオン源用の各電源及びマイクロ波発生器を ECR イオン源の運転時のみ取り付けられる仕様とした。

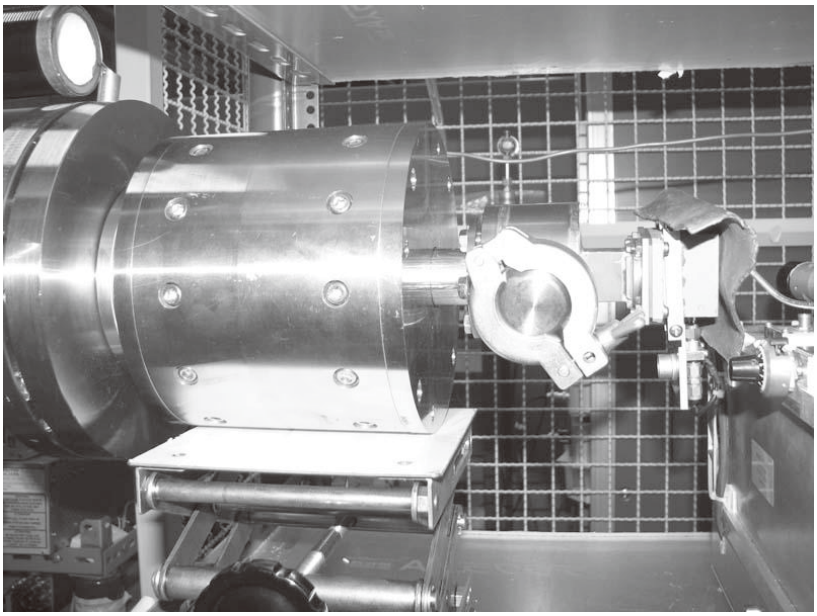


図 15　MINI-ECR の写真

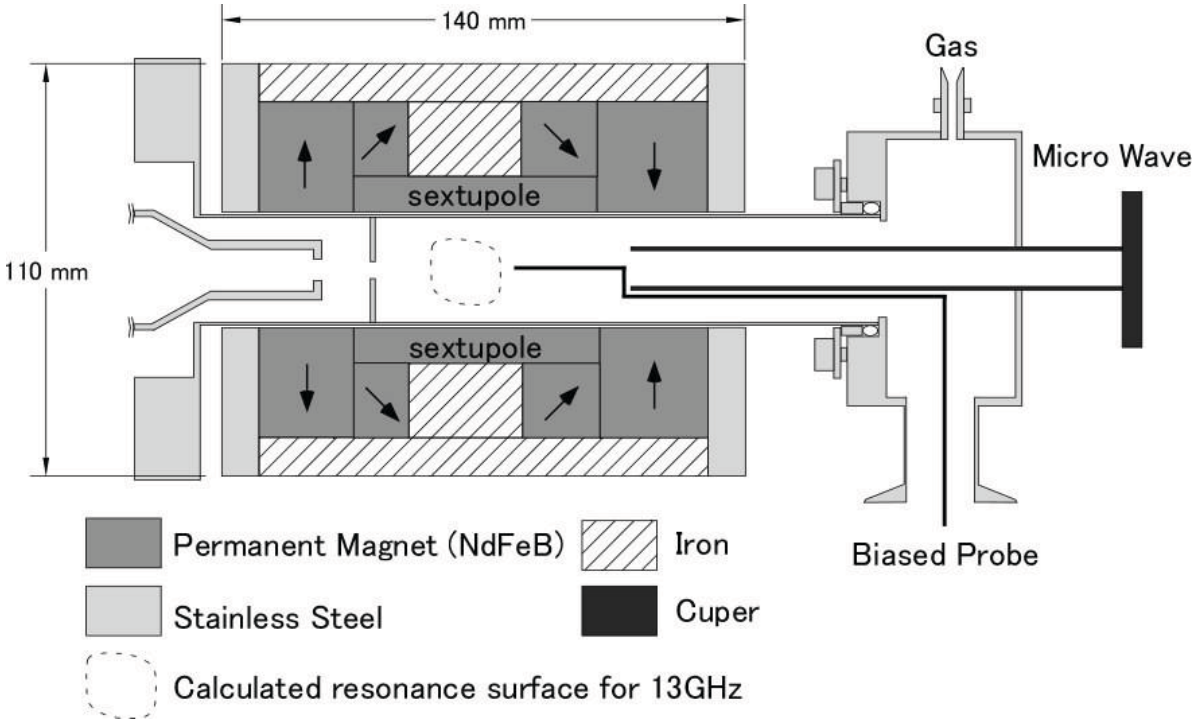


図 16　MINI-ECR の構造図

MINI-ECR の主な緒元

1) ミラー磁場形成

材質	ネオジ鉄永久磁石(NdFeB)
磁場強度	
引出側	0.60 T
ガス導入側	0.62 T
最小磁場配位	0.40 T

2) 6 極磁場形成

材質	ネオジ鉄永久磁石(NdFeB)
磁場強度	1.1 T (表面)
内径	30 mm

3) 総磁石重量 12kg

4) 磁石外形寸法 直径 110mm、長さ 140mm (ヨーク及びステンレスカバーを含む)

5) マイクロ波

周波数	13GHz
最大出力	10W
増幅形式	ソリッドステートトランジスタ
発生器寸法	幅 300mm、奥行き 180mm、高さ 120mm

6)プラズマチャンバ

材質	ステンレス(SUS304)
寸法	内径 28mm、外径 30mm

3.2.2　運転及び保守

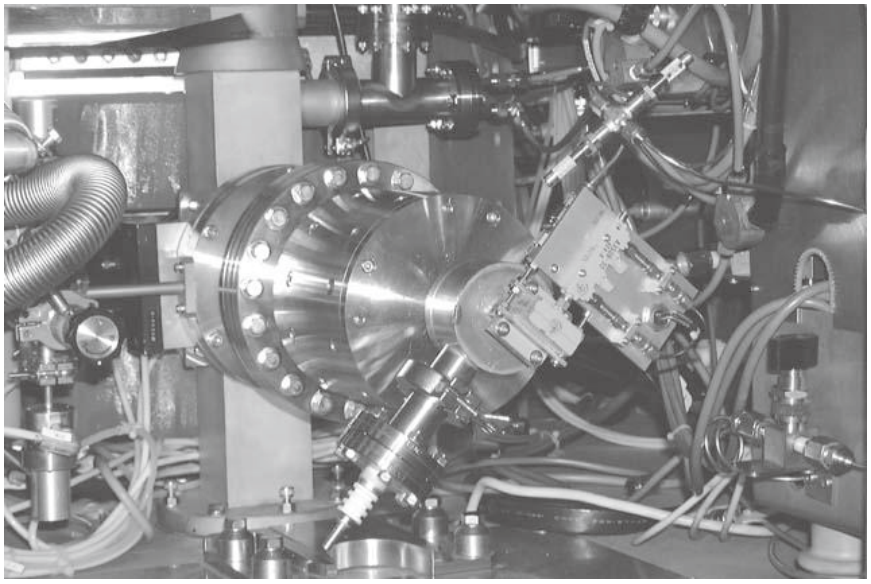


図 17　400kV イオン注入装置に MINI-ECR イオン源を搭載したときの写真

MINI-ECR イオン源をイオン注入装置に搭載したときの写真を図 17 に示す。MINI-ECR イオン源の制御は既存フリーマンイオン源の制御系と同一の制御ソフトで行うことができる。パラメータはガス流量(0-0.1cc/min)、バイアスプローブ電圧(0-500V)及びフォーカス電圧(0-5000V)を制御可能である。

ECR イオン源は、微量のガスで効率良く多価イオンの生成を行うため、試料蒸気圧が十分でないイオン種でも μA オーダーでのイオン生成が可能である。このため、残留ガス等が存在する場合、多くの種類の不純物イオンとそれらの多価イオンが同時に発生するという問題を生じる。発生する価数の種類が多いため、価数と質量の組み合わせが複雑で、質量分析用電磁石で特定のイオン種を選別することが非常に難しい場合がある。特に H、C、N 及び O はイオン源内から完全に除去することが難しいため、例えば、酸素混入下で Ar イオンを生成した場合には Ar^{5+}は O^{2+}と完全に重なりあって分離するができない。したがって、質量数と価数の組み合わせによって分離ができないことや選別したイオンに不純物が混入している可能性があることに注意が必要である。

ECR イオン源はイオン源内部の汚れも少なく、フラメント等のカソードを有しないため、運転毎の保守作業を必要としない。現状では長期間イオン注入装置に搭載した運転を実施していないが、ガス方式のみの運転であればその寿命はガスの容量で決定されるため、メンテナンスなしで長期の運転が可能である。フリーマンイオン源との交換作業を有する場合には、イオン源の取付け、真空引き及び調整に最低でも 2 日を要するため、実際に本イオン源をマシンタイムで使用するには 1 日の実験に対して最低 5 日間が必要となる。

4. イオン生成法

4.1 フリーマンイオン源によるイオン生成

フリーマンイオン源は基本的にはガス方式又はオーブン方式でイオンを生成するが、この 2 方式だけでは生成可能なイオン種に限度があるためユーザーの要求には応じきれない。そのため、フリーマンイオン源を用いた新しいイオン生成方法の開発を行ってきた。新しい方式の開発によって、既存の方法では 33 種類しかユーザーの要求に応じることができなかったイオン種数を 44 種類にまで拡大した。既存の方法以外で発生したイオン種数は今現在 11 種であるが、これらのイオン種はいずれも本来安定に生成することが難しいイオン種である。

新たに開発した手法は 1) 試料が固体状で 10^{-1}ー10^{-0}Pa の蒸気圧が得られる温度が 800℃以上であるものに対してはディスク方式、2) 物質をフッ素化しなければ、蒸気圧を高めることができない試料に対しては SF_6 プラズマ方式、3) 試料の融点が 2400℃以上の金属に対してのフィラメント方式の 3 種類である。現在までに、水素からビスマスまでの 83 種類の元素のうち 44 種類については、これらのイオンを生成する試料の性状に合わせて、既存の方法も含めた 5 方式で対応しイオンを生成している。当面は残りの元素に関してもユーザーの要求に応じて、イオン種毎に最適な試料を選択しながらこれらの方法で新しいイオンを生成していく予定であるが、これらの方法で安定に、また、充分なイオン電流量のイオンが生成できない場合にはさらに新しい方法を開発していく予定である。

4.1.1 ガス方式

ガス方式は最も基本的なイオン生成方式であり、ガス状物質をアークチェンバ内に導入し、アークチェンバ内では加熱したフィラメントから放出された熱電子が外部から加えられた磁場等によって旋回運動をしながら 100V のアーク電圧によって加速されチェンバ内のガスを電離し、放電を誘発することでプラズマが形成される。形成されたプラズマ中にはプラスイオンと電子が同数存在し電気的には中性が保たれている。このプラズマ中に存在するプラスイオンを引出電極によって引き出し、加速することでイオンビームとして利用する。一般に試料が常温でガス状のものは、図 18 に示すガス供給ラインによって直接アークチェンバに送り込みプラズマ化する。本注入装置に搭載できるボンベ数は 3 本で 3 種類のガスが利用できる。イオン源へのガス供給ラインは 2 系統あり基本的にはマスフローコントローラでガス流量を遠隔で制御し供給するが、マスフローコントローラが故障したときを想定してニードルバルブ側からも供給できるようにした。

発生させることのできるイオン量は導入するガスの種類やガス量、アーク電圧、フィラメント電流量等によって決まるが、安定なプラズマが形成できる条件内でのみビーム生成量は制御される。ガス方式の場合には供給可能なガス量はボンベ容量で決まるが、イオンの生成に必要な量が少ないため長時間に亘り安定に供給することが可能である。フィラメントの寿命は運転条件により異なるが、その消耗量(抵抗値)は運転時間に従い時々刻々変化する。その抵抗値の変化に応じてフィラメント電流量も減少していくが、発生する熱電子量を一定に保つ様に制御されるため、フィラメント電流の変化に関係なく発生するイオン電流量は一定に保たれる。したがって、フィ

ラメントの消耗によるイオンビーム電流量への影響はない。イオン電流量は図 9 及び図 10 に示す様にアーク電流量及び引出電圧によって制御することが可能である。生成するプラズマの安定度はガス種により異なり、プラズマが点灯・消滅を繰返す様な不安定なガスに対しては Ar ガス 30%程度を目安に混入させることで安定させることが可能である。ただし、混入させる Ar ガス量によって、引き出せる最大イオン電流量は異なり混入量が多いほど引き出される電流値は低くなる。しかし、Ar ガス量を減らし過ぎるとプラズマは安定しない。単一ガスだけで安定にプラズマが形成され、引き出したイオン電流量が安定であるガス種には窒素、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンがある。これらのガスによって、N、Ne、Ar、Kr、Xe の正イオンが安定に引き出される。一方、水素、ヘリウム、二酸化炭素、六フッ化硫黄ガスは単独では放電が不安定であるためアルゴンガスを混入することでプラズマを安定にし、目的とするイオンを安定に引き出すことができる。これら Ar ガスを混合することで安定に引き出すことができるイオンは、H、He、C、O、F、S の正イオンである。ただし、これらのガスのうち、二酸化炭素ガス及び六フッ化硫黄ガスによるイオン生成では分解生成物である炭素やフッ素、硫黄がイオン源内を著しく汚すため、運転条件にもよるが 15 時間程度の使用によってイオン源が不安定となる場合があるため注意が必要である。また、これらのガスを使用し運転した後はイオン源内を充分に清掃しないと、次の運転が不安定になる。これらガス方式によって引き出されるイオンの種類とその電流量を表 1 にまとめた。表に示すように、単独ガスで引き出すことができる N から Xe までのイオン生成量が数 10μA 程度あるのに対し、アルゴンガスを 30%程度混入して生成するイオン量は数 μA と希釈されたことを考慮しても平均的に少なめになる傾向がある。

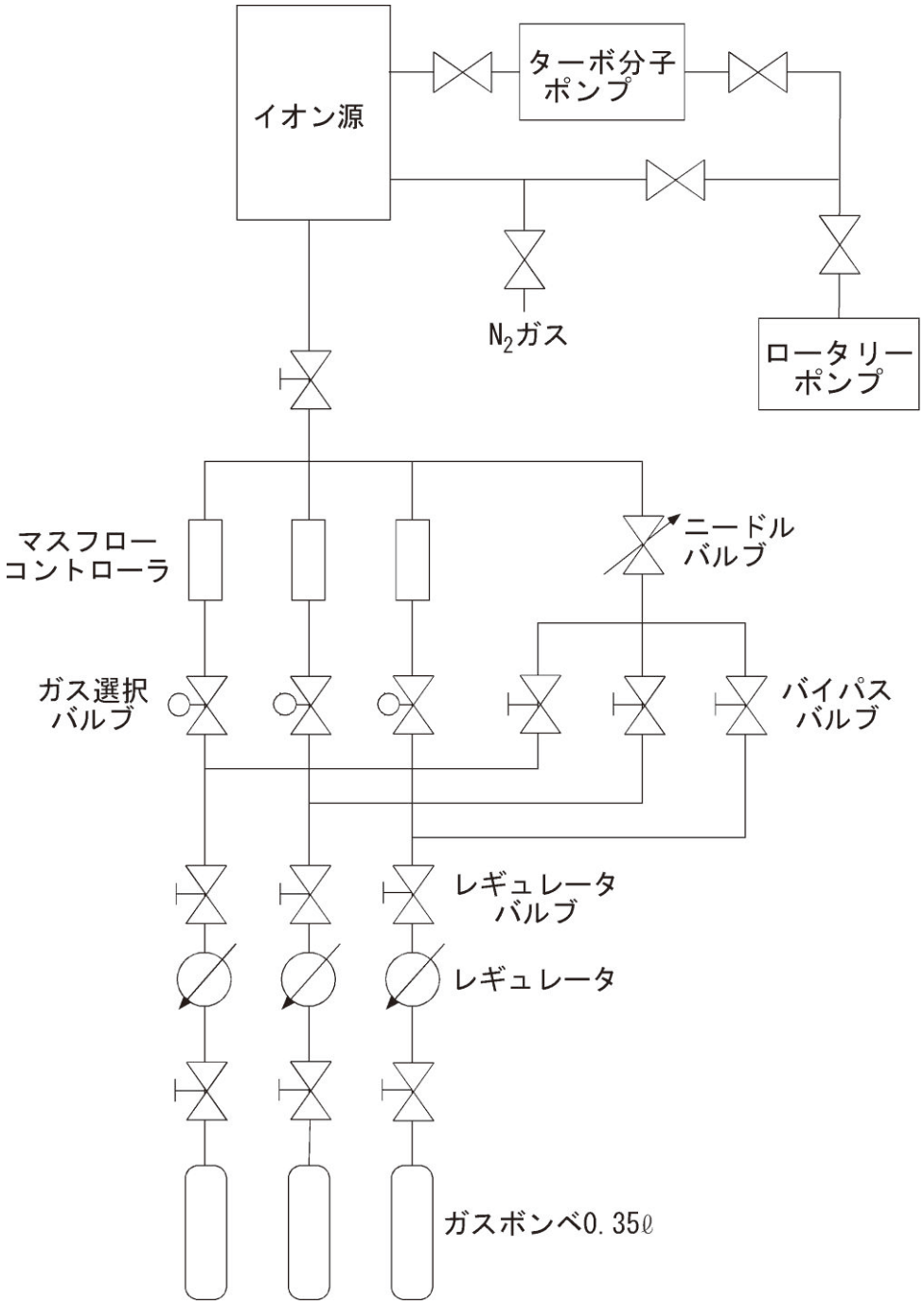


図 18　イオン源ガスの供給ライン

表 1　ガス方式で得られるビーム電流量

イオン種	電流(μA)	イオン種	電流(μA)	イオン種	電流(μA)
N	25	Xe	17	*O	6.2
Ne	30	*H	2.3	*F	2.3
Ar	50	*He	6.5	*S	8.7
Kr	32	*C	2.6		

＊Ar との混合ガスで生成

4.1.2　オーブン方式

試料が固体状のものは、オーブンにより加熱し試料蒸気を発生させ、アークチェンバに送り込むことでガス方式と同様にイオンを生成することができる。アーク放電が安定に継続するガス圧が 10^{-1}Pa～10^{-0}Pa であるため、同蒸気圧になるための温度が 300℃ー600℃の試料の場合には低温用オーブンを使用し、500℃ー750℃の場合は高温用オーブンを使用する。図 19 に低温用オーブン、図 20 高温用オーブンを示す。オーブン部は高温用と低温用で構造が異なり、低温用オーブンはステンレス製円筒に 2.5mmφ のステンレスチューブに入ったヒータが 16 回巻かれステンレス製円筒に溶接されている。試料は図 19 のステンレス円筒の左部分に直接入れる構造になっている。蒸気は左端の細管から放出され、アークチェンバ内にガスを供給する。試料が入る内容積は約 14mmφ×22mm であるが、半分以上入れると融解した試料が蒸気出口を塞ぐ恐れがあるので充填する分量には充分な注意が必要である。高温用オーブンは、試料を入れる円筒が窒化ボロンで造られており、この円筒外周に刻まれた螺旋状の溝に沿ってタンタル製ワイヤー(0.4mmφ)が約 30 回巻かれている。試料が入ったカーボン製カートリッジをこの筒の中にセットする構造になっている。これは使用した後、オーブンから高融点物質を排出し試料を交換するのが困難なためである。蒸気はキャップ先端の細管から放出される。試料が入るカートリッジの内容積は低温用より小さく 9mmφ×22mm であるが、試料の交換はカートリッジを外し、他の試料が入ったカートリッジと入れ換えるだけで済む。したがって、カートリッジは試料毎に用意し、使用しないときはシリカゲル中で保管し試料の劣化を防いでいる。カートリッジ内の試料が消耗し無くなった場合には、再度充填して使用することも可能だが、試料の品質を保つために使い捨てとしている。低温用オーブンと高温用オーブンで大きく異なる点は高温用オーブンではヒータの交換ができるのに対し、低温用オーブンではヒータの交換ができなく使い捨てとなる。表 2 にオーブン別に生成したイオン種をまとめた。

オーブン方式で用いる試料の多くは単元素から成る材料ではなく、蒸気圧がより高い塩化物等の化合物材料を使用することが多い。そのために、目的とするイオンを含む化合物の中からオーブンにより安定した蒸気圧が得られる可能性の高い試料を選択し、試験を繰り返しながら充分な電流が得られ安定にビームが引き出せる試料を最終的に決定している。ビーム電流量は試料蒸気の発生量に大きく依存するため、長時間に亘り安定した蒸気が発生できる温度を如何に一定に保つかが安定なビーム引き出しにとって重要となる。オーブン温度は K 熱電対(アルメルークロメル)を使用したフィードバック回路により自動的に制御されるが、フィラメント電流を流しただけでオーブン温度が 300℃付近まで上昇してしまうため、これ以下の温度を一定に保つことは不可能である。この様に蒸気圧が高いだけでなく温度範囲の制約も考慮した上での試料の選択が安定なビーム引き出しにとって重要である。

オーブン方式ではアークチェンバ内にオーブンによって生成する試料蒸気に加え、サポートガスとして Ar ガスを供給する。TIARA では 1 日 10 時間以上の長時間運転を行う場合があり、試料蒸気のみではアークチェンバ内の汚れが進み絶縁が保てなくなる、又は長時間運転により試料が無くなる場合がある。サポートガスを供給しオーブン温度をできるだけ低く抑えることによって、これらの問題を回避し、かつ安定なプラズマを生成することによって長時間運転に対応している。また、試料に塩化物等を使用したときには、オーブン温度が 80℃程度に達した時点で急激なガス

発生が生じ、真空悪化から加速器を停止させてしまうことがあるため特に注意する必要である。このときに発生するガスは、温度から推測して塩化物に吸収されていた水分が急激的にガス化するものと考えられる。この温度を過ぎると再び安定したガス放出状態となる。

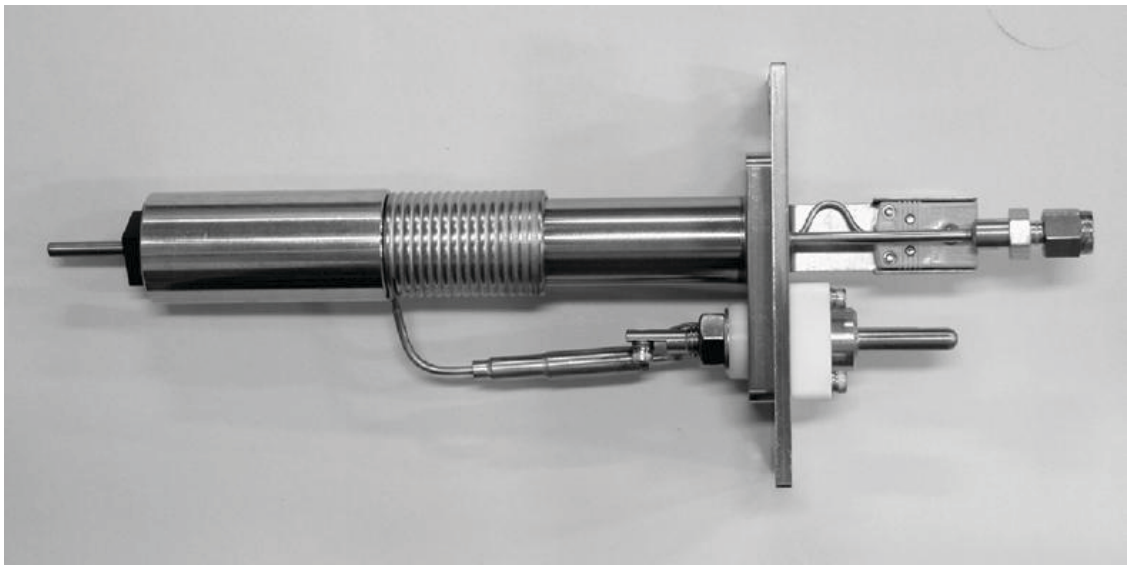


図 19　低温用オーブン

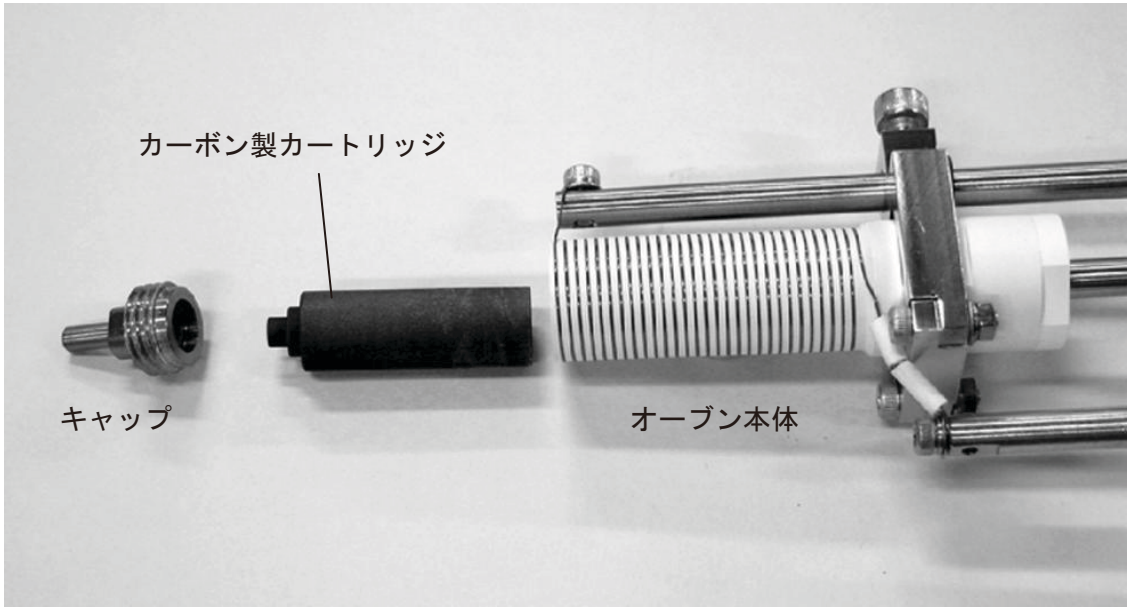


図 20　高温用オーブン

表 2　オーブン別生成イオン種

低温オーブン	P、Cu、As、Sb
高温オーブン	Li、C_{60}、Mg、Al、Cl、K、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Ag、Ba、La、Ce、Eu、Bi

4.1.3　ディスク方式

フリーマンイオン源用オーブンの最高加熱温度は約 750℃であるが、この温度でも十分な蒸気が得られない様なバナジウムやチタンは既存のオーブンでは蒸気化が難しくイオン生成が困難である。高温用オーブンでも充分な蒸気が得られない高融点物質に対して、ディスク方式を開発した。ディスク方式はアークチェンバ内のプラズマ中にディスク状に整形した試料を設置し、フィラメントの熱等によって直接材料を蒸気化しイオン化する方式で、試料形状がディスク状であることからディスク方式と命名した。

開発当初は図 21 に示すように、アークチェンバ中心部にディスク状試料を装荷し、引出電位(+25kV)に対し充分小さい電位(-24V)を印加してプラズマ中の Ar^+によるスパッタ効果によってイオンを生成することを考えた。しかし、このプラズマスパッタ方式では必要なビーム強度が得られない上に、-24V を印加したことによって試料表面にフィラメントが気化したことによるタングステンが多く付着し、時間とともにビーム電流が減少してしまう結果となった。このため、プラズマスパッタ方式に代わるものとして、フィラメント熱を直接利用する新たなディスク方式を開発することで 750℃以上の温度を必要とする物質のイオン生成に成功した。新しい方法は 10mmφ×3mmt のディスク型試料に穴を開け、フィラメントを通してアークチェンバ下部に設置し、Ar ガスを供給してアーク放電を起こさせる。このときのアークチェンバ内の温度は経験上から 1000℃ー1500℃と思われる。この方式では、試料がアークチェンバ壁面に近いほどビーム電流が少なく、プラズマ中心に近くなるに従いイオン電流が増加する傾向を示す。しかし、中心付近に試料を設置すると得られる電流量とは逆にアーク放電が不安定になり安定なビーム引き出しが困難である。従って、アーク放電が安定に保たれる領域内でビーム電流が最も多く得られる位置を探った結果、試料の表面がアークチェンバ内壁から 8mm 程度が最適であった。この結果に対応させるために、通常使用している 2mm 厚のＢＮ絶縁物を 3mm 厚くした 5mm 厚の絶縁物を使用し、ディスク厚の 3mm と合算することで試料表面が 8 mm の位置になる設計をした(図 22)。この設計した方式のアークチェンバで今まで充分な電流が得られなかった V、Ti、Er 及び Tb イオンの安定な引き出しに成功した。引き出される電流量は 0.5μA 程度と少ないが、利用できなかったイオンが長時間に亘って安定に引き出すことができるため有効に利用されている。

この方式で一定の成果を得たが、試料の中には高温オーブンでは充分な蒸気が得られず、またディスク方式では溶融又は変形してしまう材料があり、これらには対応できない。こうした材料にも適応させるため、ディスク方式の延長として、るつぼ方式を開発した。図 23 に示すように、BN 絶縁物を器状に加工した試料ホルダーをアークチェンバ内下部のフィラメント周りに設置した。この BN 製るつぼ内にワイヤー状試料を充填し、フィラメント熱で過熱する。フィラメント電流が規定値に達した後、Ar ガスを供給して安定なプラズマを形成する。一方、フィラメント熱によって蒸気となった試料はプラズマ中でイオン化され、ビームとして引き出される。このとき、試料は融解するがるつぼ内に留まり、アークチェンバ内に飛散することがないためアーク回路の短絡や絶縁破壊及び試料の損失は起こらない。この方式に適した材料には金、白金及びアルミニウムがある。運転試験した結果では電気的な不安定性の問題は発生せずに安定な運転はできたが、時間の経過によってビーム電流が減少したり、急激なビーム変動が生じたりと、ビームの安定性に問題があるため、改良によって安定性を高める必要がある。

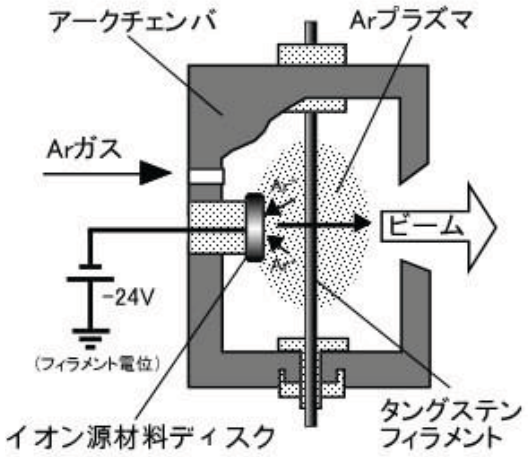


図 21　プラズマスパッタ方式

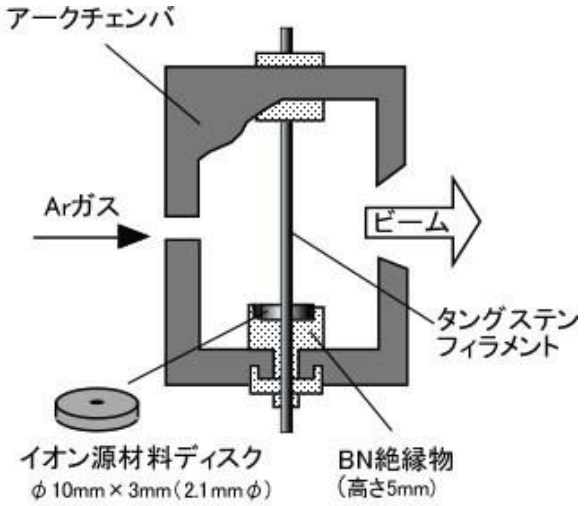


図 22　ディスク方式

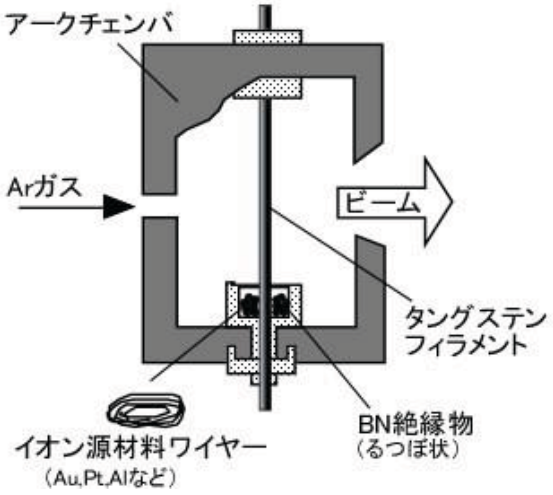


図 23 るつぼ方式

4.1.4　SF_6(六フッ化イオウ)プラズマ方式

1). SF_6プラズマ方式によるビーム開発

半導体開発に有用なボロン(B)やシリコン(Si)は高融点、低蒸気圧等の特性から蒸気化することが困難であり、一般的に、イオン生成にはBF_3やSiH_4などの毒劇物ガスが使用されている。TIARAでは有害ガス除去装置等が設置されていないため、毒劇物ガスを使用してのイオン生成は行うことができなかった。また、高融点用に開発したディスク方式でも十分なビーム電流が得られず、新しい方法を開発する必要があった。

検討を重ねた結果、既に報告されていたSF_6プラズマを用いたエッチング技術[8)]にヒントを得てSF_6プラズマ法を開発した[9)](図 24 参照)。フッ化物はフッ化物でない単体の元素より一般に蒸気圧が高く、例えばB単体での蒸気圧は室温状態ではほとんどゼロであるが、フッ素化合物であるBF_3では10^5Pa 以上と高くなり蒸気に成りやすい。SF_6ガスを含むArプラズマ中にはSF_6ガスが分解されることにより生成したフッ素原子やフッ素イオンが存在する。これらのフッ素により高融点物質であるホウ素(B)の表面がフッ素によって腐食される。このフッ素化されることによって蒸気圧が極端に高くなり、フッ化ホウ素ガスとして放出される。しかもイオン源内はフィラメント熱により高温になるので容易にボロンのフッ素化合物蒸気がプラズマ中に供給されやすくなる。プラズマ中に取り込まれたフッ素化合物は電子との衝突によって分解・電離され単体のB^+イオンが生成される(図 25)。エッチング技術の場合には腐食し削り取られた物質は不純物として速やかに真空外に排気されるが、SF_6プラズマ方式では削り取られた物質が重要で、これを積極的にイオン生成のための試料として使用している点が大きく異なる。このSF_6プラズマ方式によってB、Si、Geのイオンをそれぞれ 1.9μA、5μA、5μA 得ている。

SF_6プラズマ方式ではアークチェンバ内にディスク方式とは異なりSF_6ガスを導入する。また、試料の形状及び設置位置はディスク方式と同様であり、下部チェンバ壁面から 8mm の位置にディスク状試料を設置して行なう。SF_6ガスは、電気絶縁性に優れ、無毒、無害、無臭で安定なガスであり電気設備用絶縁ガスとして一般的に使用されている。ただし、使用に関しては多量に漏れたときの酸欠と、温暖化係数が二酸化炭素の 23,900 倍であることから大気中への漏れには充分な注意を払う必要がある。また、純粋(100%)なSF_6ガスを使用するとSF_6ガスの分解生成物である硫黄やフッ素によってイオン源内が著しく汚れ、短時間でプラズマ及びイオン源が不安定になってしまう。また、使用後のメンテナンス時においても、硫黄臭さや汚れが酷く大変な作業となる。これらの問題を緩和しSF_6ガスの使用量をできる限り少なくするために、Arガス(95%)とSF_6ガス(5%)を混合したガスを使用している。

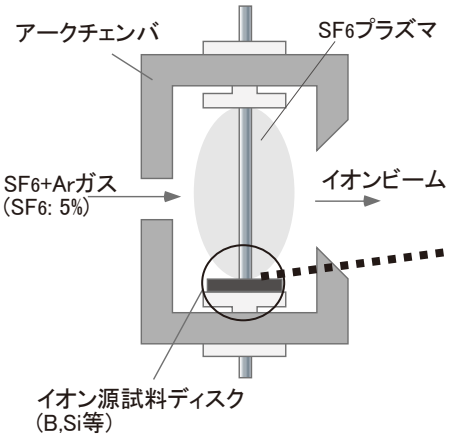


図 24　SF_6 プラズマ方式

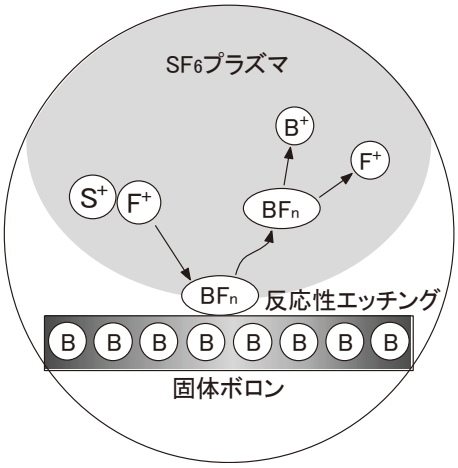
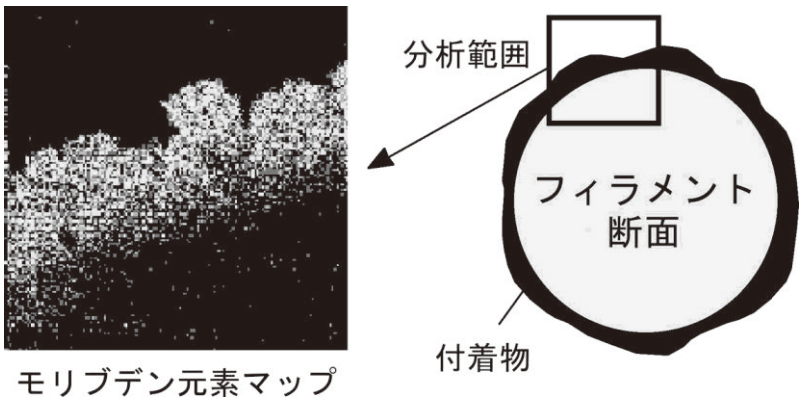


図 25　SF_6 プラズマ方式の B イオン生成機構

2).SF_6 プラズマ方式によるフィラメントの長寿命化

フリーマンイオン源の連続使用時間は、フィラメントの寿命で決定される。一般に、フィラメントの寿命はイオン源の運転条件によって大幅に異なるが、図 8 に示した様に最大でも 100 時間程度である。運転条件やイオン種によっては 6 時間程度で断線してしまうことがある。こうした問題を解決する方法として、SF_6 プラズマ方式を応用することでフィラメント寿命を改善することに成功した [10]。フリーマンイオン源のフィラメントは構造上プラズマの中心に位置し Ar ガス等を用いた通常の運転では図 8 に示す通り、運転開始と共にフィラメントは消耗し時間と共に細っていく。定電圧電源によるフィラメント電流も時間と共に減少していく。しかし、Ar ガス中に 5%程度の SF_6 ガスを混入したプラズマ中ではフィラメントの消耗は起こらずに反対に太る現象が観察される。このフィラメントを太らせている物質を TIARA のイオンビーム分析(マイクロ PIXE)で分析した結果、そのほとんどがモリブデンであることが分かった(図 26)。本図に示す明るい部分がモリブデンの存在箇所である。このフィラメントを太らせるモリブデン源はアークチェンバ自身であり、アークチェンバ材料がモリブデンであることから発生する。Ar だけのプラズマではこうした現象は見られず、SF_6 プラズマ特有の現象である。これは先に述べた B イオンの発生と同様に、SF_6 プラズマによってフッ化モリブデン蒸気が発生し、プラズマ中で分解されることによって Mo 原子や Mo^+イオンが生成されフィラメント上に蓄積されると考えられる。したがって、Ar ガス中に SF_6 を適量混合することで消耗と付着とをバランスさせることによりフィラメントを長寿命化することができる。図 27 に Ar(100%)と SF_6(5%)+Ar(95%)プラズマで運転した場合のフィラメント電流の計測結果を示す。この図から明らかな様に、SF_6 ガスを含むプラズマ中で運転した場合には、運転開始時からフィラメント電流の減少は無く一定であり、このことからフィラメント細り(消耗)のないことが証明される。結果として同方式で運転した場合にはアークチェンバが存在する限り(Mo が存在する限り)フィラメントの寿命は無限大であると推測される。実際に運転した後に取り出したフィラメントに細りは見られなかった [8]。



マイクロ PIXE 分析による元素分布測定(H^+ ,2MeV)、 測定範囲：500μm×500μm

図 26　フィラメント付着物の分析結果

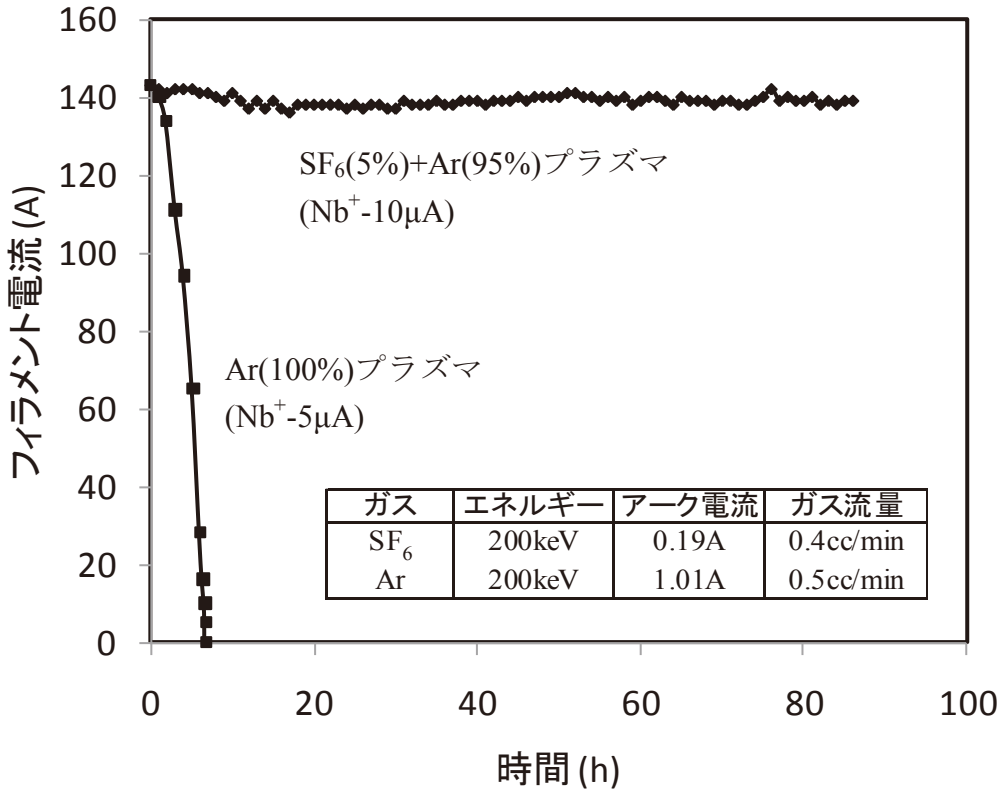


図 27　SF_6+Ar プラズマ及び Ar プラズマによる Nb^+生成時のフィラメント電流の変化

4.1.5　フィラメント方式

発生したイオンの質量分析を行なうと、目的のイオンとは別に W イオンが観察される。これは、使用しているタングステン製フィラメントによるものであり、高融点物質のタングステンであってもフィラメントとして通電し充分に加熱されると熱電子が放出されるのと同時に、フィラメント自身が気化されることを意味している。この現象からの発想で、超高融点物質材料をフィラメントとして使用し直接加熱することによって、気化し、イオン化を行うフィラメント法を開発した(図 28 参照)。超高融点物質として使用した材料はタングステン(W)の他にニオブ(Nb)、モリブデン(Mo)、バナジウム(V)、チタン(Ti)、イリジウム(Ir)であり、これらの材料は融点及び抵抗値が高く、加工も可能である。フィラメントを試作し試験した結果、W、Nb 及び Mo は充分実用に耐え、Ar プラズマ(SF_6 プラズマではない)で得られるタングステンイオン電流量が 0.5μA 程度であるのに対し、ニオブとモリブデンは 2μA と充分なイオン電流量を得ることができた。試験した各試料の融点及び抵抗率を表 3 に示す。

タングステンの融点は 3387℃と最も高い金属であり、アーク電流 0.1A の運転条件で Ar イオンを約 20μA(内 W イオンは 0.5μA)引き出したときの W フィラメントの寿命は図 8 で既に示したように連続運転で約 100 時間であった。これに対し、Nb フィラメントの寿命は Nb イオンビームを約 2μA 引き出したときで約 14 時間、5μA を引き出したときで約 9 時間であった。このときの Nb フィラメント電流値変化を図 29 に示した。フィラメント電圧は何れの場合も 2.5V 一定である。引き出しビーム電流を 2μA から 5μA に増やすためにはアーク電流を増やす必要があり、アーク電流を増やすためにフィラメント電流を 17%程増やしている。これによってフィラメントでの発熱量は 37%増加し、フィラメントの寿命が 36%減少する結果となった。Mo フィラメントの寿命は Ar プラズマ中では Nb と同程度であったが、Mo の場合にはアークチェンバ材料も Mo であることから、4.1.4 で記した SF_6 プラズマ方式によるフィラメントの長寿命化が有効に機能するものと判断される。また、SF_6 プラズマ方式ではアークチェンバからも Mo 蒸気がプラズマに供給されることから、引き出される Mo イオンの電流量も SF_6 プラズマ方式の方が高いと予想される。一方、V、Ti は W、Nb、Mo、Ir に比べ融点が低く、通常時はフィラメント電流を 200A 流して使用するが 80A 程度流した時点でこれらのフィラメントは溶断してしまうため利用できない。Ir フィラメントはフィラメント電流 200A で 2.3μA のビームを得たが、10 分程度で溶断してしまった。融点は Nb と同程度であることからフィラメント形状や太さの最適化を図ることにより充分使用に耐えると期待している。以上の結果から、フィラメント方式に採用できる金属は最低でも 2400℃以上の融点を持つことが必要である。

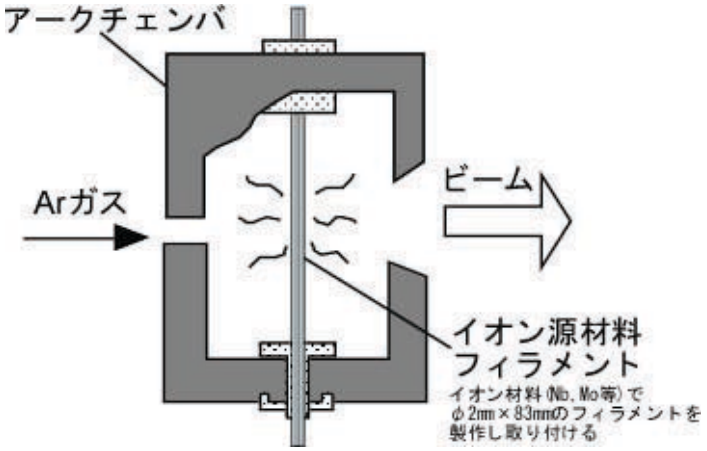


図 28　フィラメント方式

表 3　試作したフィラメント試料の融点及び比抵抗

試料	融点［℃］	比抵抗［$10^{-8}\Omega$・m］
W	3,387	5.5　(293K)
Nb	2,468	14.6　(293K)
Mo	2,610	5.78　(300K)
V	1,900	24.8　(293K)
Ti	1,668	55　(293K)
Ir	2,454	5.3　(273K)

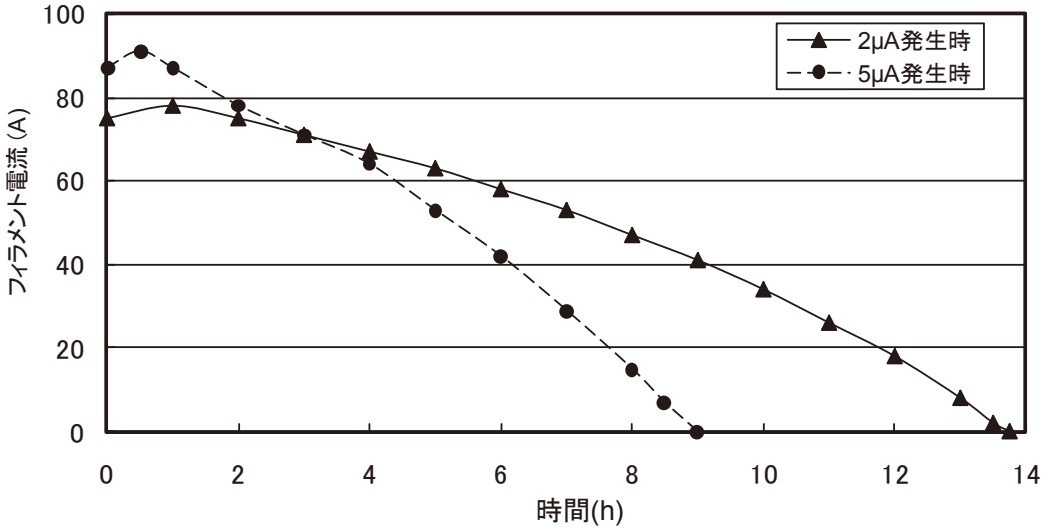


図 29　Nb フィラメントの電流値変化

4.2　MINI-ECR イオン源によるイオン生成

4.2.1　ガス方式

一般的に ECR イオン源はガス状物質からイオンを生成するが、ここでは後に示す MIVOC 法及び SF_6 プラズマ法と区別するため、ガス方式と記載した。イオン化させる物質が大気中でガスとして存在する場合、試料をガスボンベよりプラズマチャンバ内に供給し、プラズマを生成することによってイオンを生成する方法である。

図 30 に MINI-ECR イオン源に Ar ガスを供給したときに得られた Ar ビームの価数とそのときのビーム電流値(eμA)を示した。測定されたイオンの価数は 1 価から 6 価までで、1 価から 3 価までのイオンについては 15eμA 程度が得られている。4 価、5 価については数 eμA、6 価については 0.5eμA 程度が得られている。測定条件は 91 項(5.2.3 項)に示す。イオン注入装置の加速電圧を 380kV とした場合、これらのイオンによって 380keV(1 価)から 2.28MeV(6 価)までのエネルギーで加速することが可能となる。

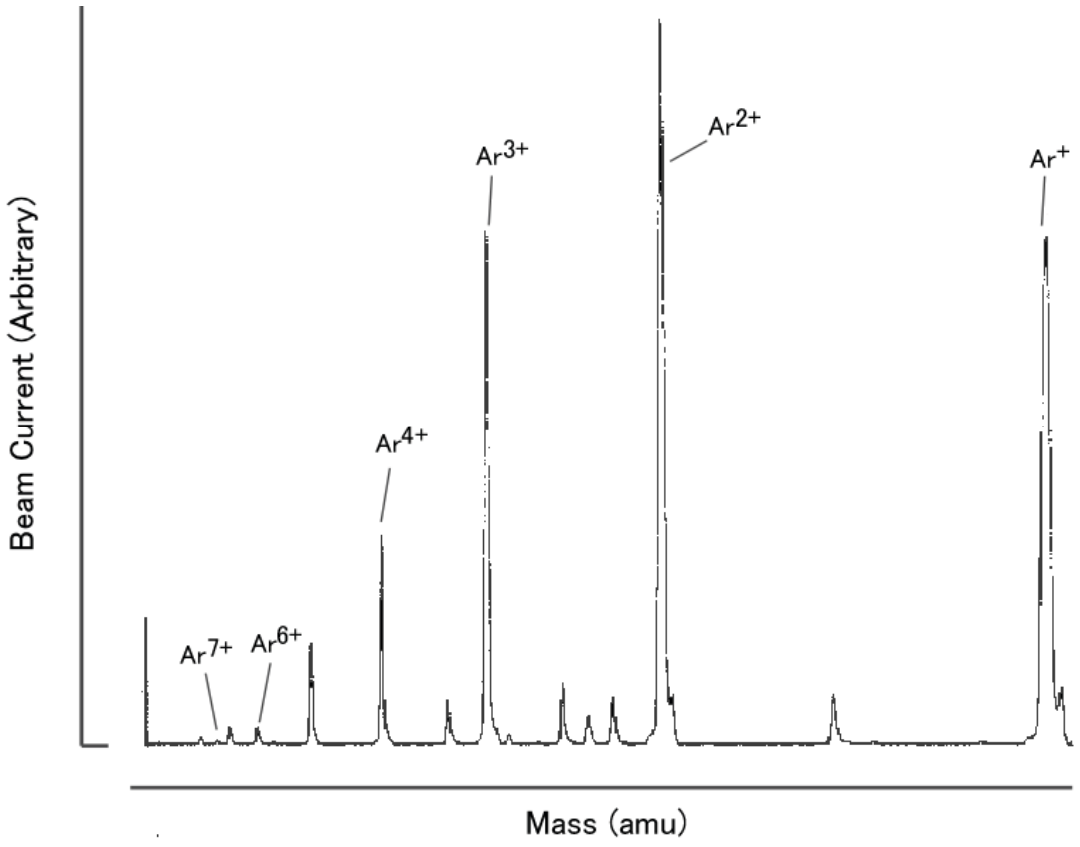


図 30　MINI-ECR で Ar ビームを引き出したときの価数分布

4.2.2　MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds)

MIVOC 法は図 31 に示すように室温で 10^{-3}Pa 以上の蒸気圧を有する金属有機化合物を試料に用いることにより、ECR プラズマ中に目的とする金属を含んだ気体を導入して、金属イオンを生成する方法である [7]。比較的容易に金属イオンを生成することができるが、この方法では蒸気をプラズマチェンバに導入するための付加的なポートが必要となる。また、揮発性金属化合物は毒性を有する場合が多いため、取扱いに注意を要する。MINI-ECR イオン源では、Fe や Si 等のイオンの生成・加速に成功し、Fe^{3+}が 1.7eμA、Si^{3+}が 3.6eμA が得られている。

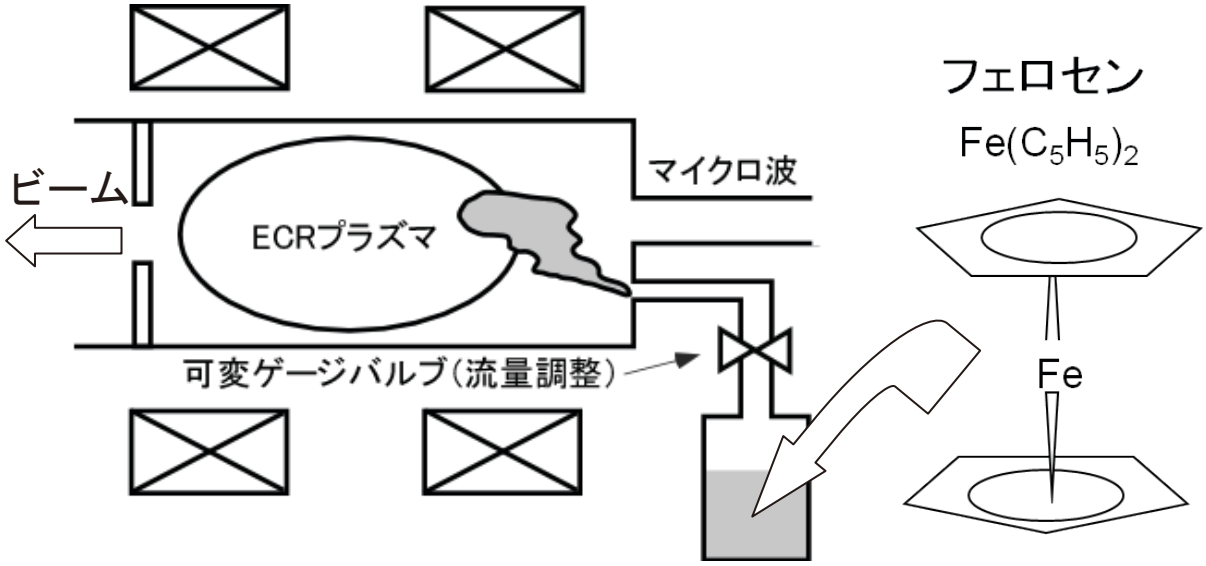


図 31　MIVOC 法による金属イオンの生成

4.2.3　SF_6プラズマ方式

ECR イオン源を用いた高融点金属のイオン生成は、他のイオン源と同様にガス方式と比べ困難であるが、これまでに 4.2.2 項に示した MIVOC 法等いくつかのイオン化法が開発されている。いずれも固体である金属又はその化合物を気化してプラズマに導入するもので、これらの方法は、蒸気をプラズマチェンバに導入するための付加的なポートや加熱機器及びその電源等が必要となる。また、イオン源内への金属等の付着で長時間の安定運転が困難なものもある。

そこで、金属試料と SF_6 プラズマとの化学反応を利用することによりフッ化金属蒸気を生成し、プラズマ中に導入、イオン化する技術を開発し、ホウ素、タンタルの多価イオンの生成に成功した。フッ化物は毒性や腐食性を有するものが多いが、プラズマチェンバ内でフッ化物の効率的な生成・消費により、それらの影響が低く押さえられ、長時間の安定運転が可能になった。

SF_6 プラズマ方式は、図 32 に示すようにプラズマチェンバ内に金属試料を設置し、SF_6 プラズマにより気化及びイオン化させるものである。金属試料はプラズマチェンバ引き出し開口に丁度

重なる 6mmφ の孔が中央にあいた外径 28mmφ のアニュラー型で、厚さは 1mm である。ただし、ホウ素ではこの形状を製作するのが困難なため BN セラミックを用いた。金属のフッ化物には元の金属に比べ蒸気圧が非常に高いものが多く、今回用いた金属のフッ化物の蒸気圧は常温でも、ECR イオン源でイオンが生成されるに十分な値（約 10^{-1} Pa）に達している。ECR イオン源の中で SF_6 から解離したフッ素により金属試料がフッ化金属の蒸気となりプラズマ中に導入され、高エネルギー電子との衝突で解離及び電離される。これらのフッ化物を直接使用するとその腐食性により、長期間の運転でイオン源及びポンプなどの真空機器が腐食される。SF_6 プラズマ法ではイオン生成を 4 ヵ月以上行ったが、イオン源の腐食はほとんど見られず、長時間の安定運転が可能であることが実証されている。これから、金属フッ化物はイオン源チェンバ内で生成された後、ECR プラズマにより直ちに金属イオンとフッ素イオンに分解され、かつ生成と分解の速度が近いことが考えられる。

また、プラズマによる金属試料のスパッタリング及び過熱による気化の影響を調べるため、SF_6 に代えて Ar プラズマで実験を行った。その結果、金属イオンは観測されず、これらの影響は無視できることが分かった。表 4 にホウ素とタンタルの各価数において得られた電流値を示す。

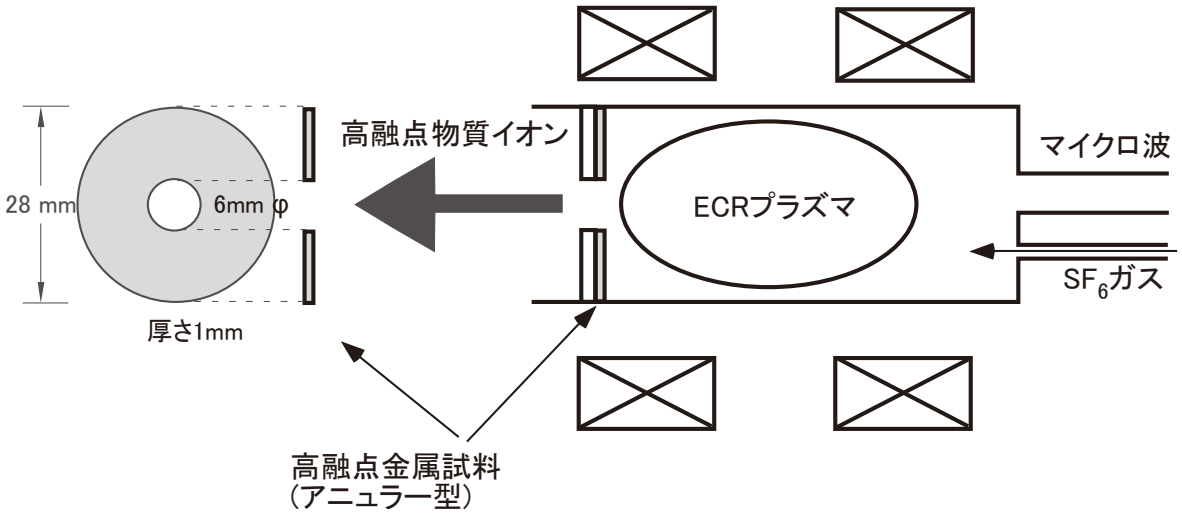


図 32　SF_6 プラズマ方式における金属試料の設置

表 4　SF_6 プラズマ方式で生成されたイオンビーム電流値(eμA)

Charge State	1^+	2^+	3^+	4^+	5^+	6^+	7^+	8^+
^{11}B	6.0	2.5	0.3	-	-	-	-	-
^{181}Ta	0.20	1.43	1.75	2.13	2.28	-	-	0.31

5. 各イオンの生成条件とマススペクトル

フリーマンイオン源でこれまでに加速してきた 44 種類のイオンと MINI-ECR イオン源で生成し加速した 5 種類の多価イオンについて、イオン種毎にそれらの 1)同位元素存在比 [11]、2)元素単体の性状 [12)13)]、3)イオンを生成する方式、4)イオンを生成するための試料及び試料の性状、5)イオン源運転時の運転パラメータ、6)生成したビーム電流量とそれを得たときの加速エネルギー、7)ビームの安定性、8)アウトガスに要する時間 9)連続して使用可能な目安としての時間・日数、10)そのイオンを発生することによるイオン源チェンバ内の汚れ、11)その他として注意事項等についてまとめた。MINI-ECR イオン源ではアウトガス及びイオン源チェンバ内の汚れが非常に少なく、イオン注入装置に搭載し長期間の運転を行っていないため、上記 1)〜6)、11)についてのみまとめた。

記載した各イオンのビーム電流量は加速管出口の FC で測定した実測値であり、基本的には 10 時間以上に亘って安定に生成することができた値を示した。ただし、長時間に亘って運転した実績のないイオン種については加速試験で得られた電流値を記載した。また、ビーム電流が安定であるかどうかの評価については、発生条件によっても異なるが、次の 3 段階に分けて評価し記載した。連続 10 時間の運転を基本としているため、安定度の評価は 10 時間の運転におけるビーム電流の変動率で評価した。変動率が 10%以下の場合を「A」、10ー30%のものを「B」、30ー50%のものを「C」として表記した。また、50%以上の変動率のものは「D」と表記し、その都度詳細を記した。表 5 にフリーマンイオン源で生成・加速した 44 種類のイオンについて、生成方法、試料及び得られたビーム電流を示した。

また、イオン源から特定のイオンだけを発生し引き出すことができれば最も効率的であるが、同時に幾種類かのイオンが発生する。発生したイオンのマススペクトルを、質量分析電磁石の磁場とビーム電流量の関係として測定し、表に示した。ビーム電流は同様に加速管出口の FC で測定した。FC は銅製で、カップ部の寸法は直径 50mmφ、深さ 12mm であり、カップにイオンが衝突するときに放出される二次電子を抑制するサプレッサー電圧として-500V を印加し測定した。スペクトルの記録には X-Y レコーダを用い、X 軸にホールプローブで測定した質量分析電磁石の磁束密度、Y 軸に FC の電流値を入力し記録した。また、質量分析電磁石の質量分解能が 100 であることから測定されたマススペクトルにおいては質量数が 100 以上のイオン種については、質量差が 1 であるようなアイソトープの分離はできない。質量分解能は質量分析電磁石前後の可変スリット幅を狭めることでも高めることが可能であるが、輸送できる電流量が減ってしまうことから、質量分解能 100 の条件で全ての測定を行なった。また、マススペクトルの縦軸の単位は「Arbitrary」で示した。

フリーマンイオン源でイオンを生成・加速し測定したマススペクトルについてはアークチェンバ内やオーブンノズル部等の汚れのため、試料やサポートガスだけでは考えられない質量ピークが見えることがある。また、サポートガスに Ar ガスを使用した場合のスペクトルの特長として質量数 20 と 40 に大きなピークが見える。これは Ar イオンにはイオンの価数としてプラス 2 価とプラス 1 価が存在するためであり、最初に見える質量数 20 に相当するピークが Ar^{2+}で後に現れるピークが Ar^{1+}である。またオーブン方式のマススペクトルの中には Ar のピークがないもの

がある。運転開始初期にはサポートガスを供給せず、イオン生成を行っていたためである。サポートガスの有無によるマススペクトルの違いは、前述した質量数 20 と 40 のピークの有無のみであり、これを除いたイオンビーム強度の比は変化しない。代表例として Ni イオン生成時にサポートガスを供給しないものを図 33 に、サポートガスを供給したものを図 34 に示す。ここで、図 33 の K イオンのピークは前述した汚れによるものである。

表 6 に各元素の同位元素存在比 [11]、表 7 に各元素の最大電離断面積、電離電圧 [12]、融点及び沸点 [13]の一覧表を示す。

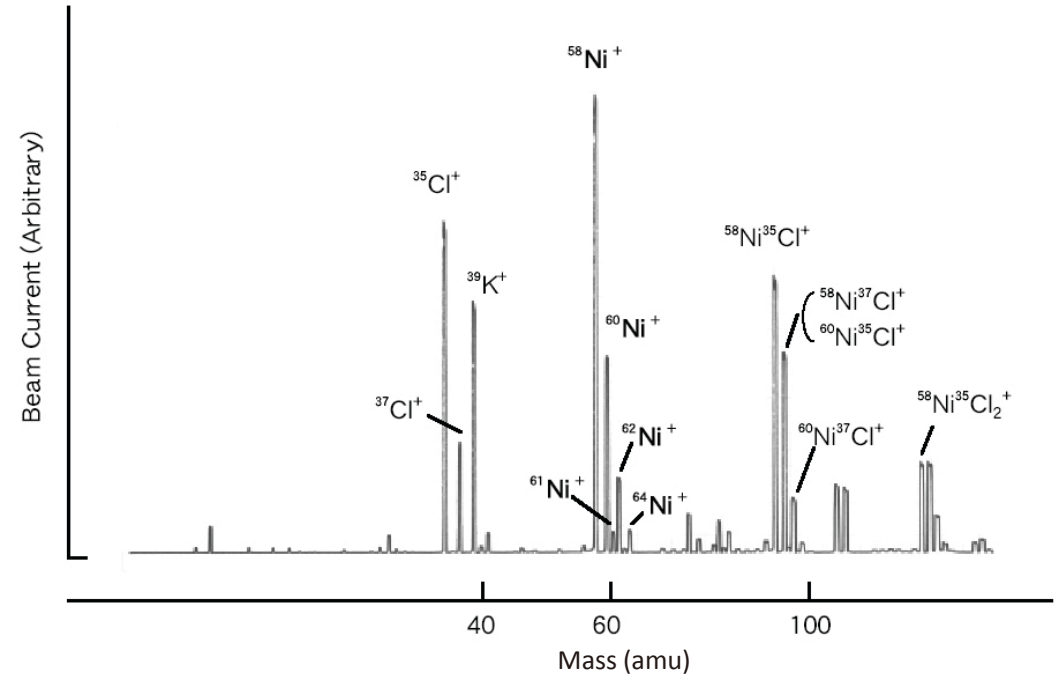


図 33　サポートガスを供給しない場合のマススペクトル

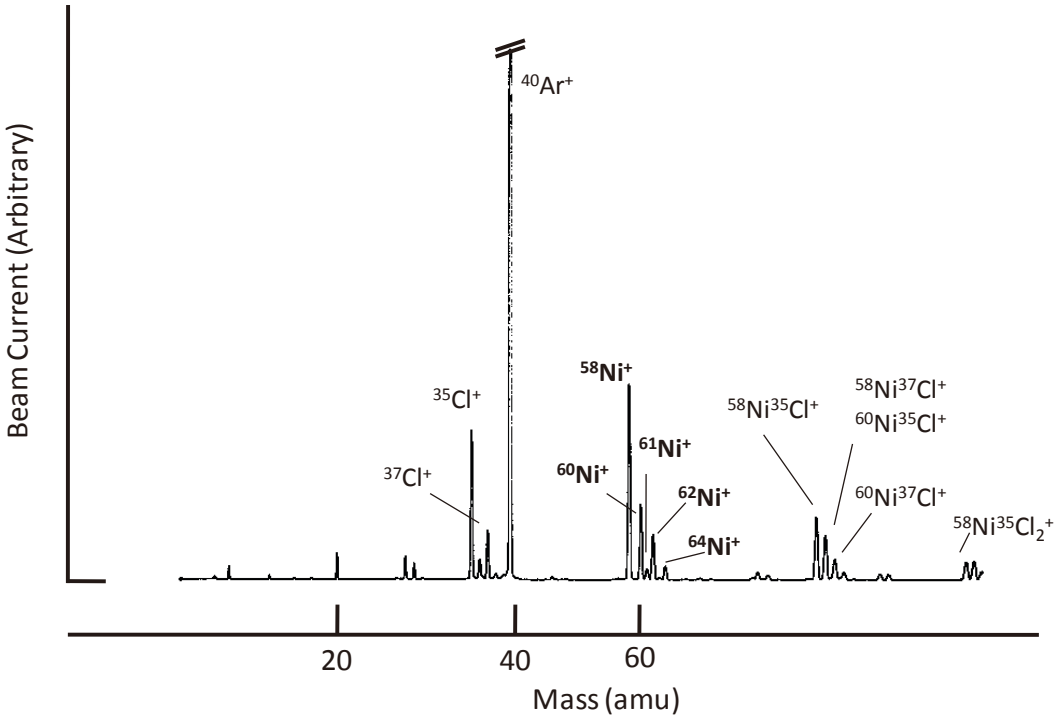


図 34　サポートガスを供給した場合のマススペクトル

表 5　フリーマンイオン源で生成・加速したイオン種とビーム強度

イオン種	生成方式	試料	ビーム電流(μA)
H	ガス	H_2+Ar	2.3
He	ガス	He+Ar	6.5
Li	高温オーブン	LiF	2
B	SF_6プラズマ	B	1
C	ガス	CO_2+Ar	2.6
N	ガス	N_2	25
O	ガス	CO_2	6.2
F	ガス	SF_6+Ar	2.3
Ne	ガス	Ne	30
Mg	高温オーブン	Mg	38
Al	高温オーブン	AlF_3	4
Si	SF_6プラズマ	Si	4
P	低温オーブン	P	13
S	ガス	SF_6+Ar	8.7
Cl	高温オーブン	AgCl	4.2
Ar	ガス	Ar	50
K	高温オーブン	KCl	4
Ti	ディスク	Ti	0.7
V	ディスク	V	0.5
Cr	高温オーブン	$CrCl_3$	15
Mn	高温オーブン	$MnCl_2$	4
Fe	高温オーブン	$FeCl_2$	6
Co	高温オーブン	$CoCl_2$	10
Ni	高温オーブン	$NiCl_2$	4
Cu	低温オーブン	CuCl	12
Ge	SF_6プラズマ	Ge	5
As	低温オーブン	As	30
Kr	ガス	Kr	30
Nb	フィラメント	Nb	2
Mo	フィラメント	Mo	3.5
Ag	高温オーブン	AgCl	6
Sb	低温オーブン	Sb	3
Xe	ガス	Xe	17
Ba	高温オーブン	Ba	2
La	高温オーブン	$LaCl_3$	1.5
Ce	高温オーブン	$CeCl_3$	0.5
Eu	高温オーブン	Eu	5
Tb	ディスク	Tb	0.3
Er	ディスク	Er	0.2
W	フィラメント	W	0.3
Pt	SF_6プラズマ	Pt	0.1
Pb	高温オーブン	Pb	1.6
Bi	高温オーブン	Bi	10
C_{60}	高温オーブン	C_{60}	0.1

表6　同位元素存在比(%)

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8			1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0
1	^{1}H 1 100																	^{2}He 4 100
2	^{3}Li 6 7.5 7 92.5	^{4}Be 9 100											^{5}B 10 19.8 11 80.2	^{6}C 12 98.9 13 1.1	^{7}N 14 99.6	^{8}O 16 99.8	^{9}F 19 100	^{10}Ne 20 90.5 22 9.2
3	^{11}Na 23 100	^{12}Mg 24 79.0 25 10.0 26 11.0											^{13}Al 27 100	^{14}Si 28 92.2 29 4.7 30 3.1	^{15}P 31 100	^{16}S 32 95.0 34 4.2	^{17}Cl 35 75.8 37 24.2	^{18}Ar 40 99.6
4	^{19}K 39 93.3 41 6.7	^{20}Ca 40 96.9 44 2.1	^{21}Sc 45 100	^{22}Ti 46 8.2 47 7.4 48 73.7 49 5.4 50 5.2	^{23}V 51 99.8	^{24}Cr 50 4.4 52 83.8 53 9.5 54 2.4	^{25}Mn 55 100	^{26}Fe 54 5.8 56 91.8 57 2.2	^{27}Co 59 100	^{28}Ni 58 68.3 60 26.1 61 1.1 62 3.6	^{29}Cu 63 69.2 65 30.8	^{30}Zn 64 48.6 66 27.9 67 4.1 68 18.8	^{31}Ga 69 60.1 71 39.9	^{32}Ge 70 20.5 72 27.4 73 7.8 74 36.5 76 7.8	^{33}As 75 100	^{34}Se 76 9.0 77 7.6 78 23.5 80 49.8 82 9.2	^{35}Br 79 50.7 81 49.3	^{36}Kr 80 2.3 82 11.6 83 11.5 84 57.0 86 17.3
5	^{37}Rb 85 72.2 87 27.8	^{38}Sr 86 9.8 87 7.0 88 82.6	^{39}Y 89 100	^{40}Zr 90 51.5 91 11.2 92 17.1 94 17.4 96 2.8	^{41}Nb 93 100	^{42}Mo 92 14.8 94 9.3 95 15.9 96 16.7 97 9.6 98 24.1 100 9.6	^{43}Tc	^{44}Ru 96 5.5 98 1.9 99 12.7 100 12.6 101 17.0 102 31.6 104 18.7	^{45}Rh 103 100	^{46}Pd 102 1.0 104 11.0 105 22.2 106 27.3 108 26.7 110 11.8	^{47}Ag 107 51.8 109 48.2	^{48}Cd 106 1.3 110 12.5 111 12.8 112 24.1 113 12.2 114 28.7 116 7.5	^{49}In 113 4.3 115 95.7	^{50}Sn 112 1.0 116 14.8 117 7.8 118 24.3 119 8.6 120 32.4 122 4.6 124 5.6	^{51}Sb 121 57.3 123 42.7	^{52}Te 122 2.5 124 4.6 125 7.0 126 18.7 128 31.7 130 34.5	^{53}I 127 100	^{54}Xe 128 1.9 129 26.4 130 4.1 131 21.2 132 26.9 134 10.4 136 8.9
6	^{55}Cs 133 100	^{56}Ba 134 2.4 135 6.6 136 7.9 137 11.2 138 71.7	57-71	^{72}Hf 176 5.2 177 18.6 178 27.1 179 13.7 180 35.2	^{73}Ta 181 100	^{74}W 182 26.3 183 14.3 184 30.7 186 28.6	^{75}Re 185 37.4 187 62.6	^{76}Os 186 1.6 187 1.6 188 13.3 189 16.1 190 26.4 192 41.0	^{77}Ir 191 37.3 193 62.7	^{78}Pt 194 32.9 195 33.8 196 25.3 198 7.2	^{79}Au 197 100	^{80}Hg 198 10.0 199 16.8 200 23.1 201 13.2 202 29.8 204 6.9	^{81}Tl 203 29.5 205 70.5	^{82}Pb 204 1.4 206 24.1 207 22.1 208 52.3	^{83}Bi 209 100	84	85	86

57 — 71	^{57}La 139 99.9	^{58}Ce 140 88.5 142 11.1	^{59}Pr 141 100	^{60}Nd 142 27.2 143 12.2 144 23.8 145 8.3 146 17.2 148 5.7 150 5.6	^{61}Pm	^{62}Sm 144 3.1 147 15.1 148 11.3 149 13.9 150 7.4 152 26.6 154 22.6	^{63}Eu 151 47.9 153 52.1	^{64}Gd 154 2.1 155 14.8 156 20.6 157 15.7 158 24.8 160 21.8	^{65}Tb 159 100	^{66}Dy 160 2.3 161 19.0 162 25.5 163 24.9 164 28.1	^{67}Ho 165 100	^{68}Er 164 1.6 166 33.4 167 22.9 168 27.1 170 14.9	^{69}Tm 169 100	^{70}Yb 170 3.1 171 14.4 172 21.9 173 16.2 174 31.6 176 12.6	^{71}Lu 175 97.4 176 2.6			

小数点第2桁にて四捨五入　1未満の存在比のものは未表記

表7　元素の最大電離断面積、電離電圧、融点及び沸点

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8			1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0
1	^{1}H 0.22 13.5 -259 -253																	^{2}He 0.21 24.5 -272 -269
2	^{3}Li 3.3 5.4 181 1336	^{4}Be 3.2 9.3 1284 2970											^{5}B 2.6 8.3 2100 2600	^{6}C 2.0 11.2 3727 4830	^{7}N 1.5 14.5 -210 -196	^{8}O 1.3 13.6 -219 -183	^{9}F 1.0 17.3 -218 -188	^{10}Ne 0.82 21.5 -249 -246
3	^{11}Na 4 5.1 98 892	^{12}Mg 5.4 7.6 650 1107											^{13}Al 6.2 6.0 660 2467	^{14}Si 5.4 8.1 1414 2355	^{15}P 4.5 10.9 590 281	^{16}S 3.9 10.3 119 445	^{17}Cl 3.4 13.0 -101 -34	^{18}Ar 2.8 15.7 -189 -186
4	^{19}K 7.2 4.5 64 760	^{20}Ca 10.4 6.1 845 1420	^{21}Sc 9.5 6.7 1539 2730	^{22}Ti 8.7 6.8 1668 3260	^{23}V 9.7 6.7 1900 3000	^{24}Cr 5.1 6.7 1875 2482	^{25}Mn 6.8 7.4 1245 2150	^{26}Fe 6.3 7.8 1536 3000	^{27}Co 6.0 7.8 1495 2900	^{28}Ni 5.5 7.6 1453 2730	^{29}Cu 3.8 7.7 1083 2595	^{30}Zn 4.9 9.4 420 907	^{31}Ga 5.9 6.0 30 2403	^{32}Ge 5.7 8.1 959 2830	^{33}As 5.0 10.5 817 613	^{34}Se 5.0 9.7 217 685	^{35}Br 4.6 11.8 -7 59	^{36}Kr 4.1 13.9 -157 -153
5	^{37}Rb 8.4 4.2 39 688	^{38}Sr 12.9 5.7 770 1380	^{39}Y 11.9 6.5 1509 2927	^{40}Zr 10.9 6.9 1852 4380	^{41}Nb 7.7 6.9 2468 4742	^{42}Mo 6.9 7.4 2610 5560	^{43}Tc - 7.5 2140 -	^{44}Ru 6.7 7.7 2500 4900	^{45}Rh 6.2 7.7 1966 3727	^{46}Pd 6.1 8.3 1552 2900	^{47}Ag 5.1 7.5 961 2210	^{48}Cd 6.3 9.0 321 765	^{49}In 7.7 5.8 156 2000	^{50}Sn 7.7 7.3 232 2270	^{51}Sb 7.2 8.5 631 1750	^{52}Te 7.1 9.0 450 990	^{53}I 6.8 10.6 114 185	^{54}Xe 6.2 12.1 -112 -107
6	^{55}Cs 10.8 3.9 29 690	^{56}Ba 17.3 5.2 725 1640	57-71	^{72}Hf 10.4 6.8 2222 5400	^{73}Ta 9.6 7.9 2996 5425	^{74}W 9.2 8.1 3387 5927	^{75}Re 9.1 7.9 3180 5900	^{76}Os 8.1 8.7 3045 5027	^{77}Ir 7.7 9.1 2454 5300	^{78}Pt 6.6 8.9 1769 3800	^{79}Au 5.9 9.2 1063 2808	^{80}Hg 6.4 10.4 -39 357	^{81}Tl 7.8 6.1 303 1457	^{82}Pb 7.9 7.4 327 1740	^{83}Bi 17.3 8.0 271 1447			
57 | 71	^{57}La 16.1 5.6 920 3469	^{58}Ce 15.9 5.6 795 3468	^{59}Pr 16.0 5.8 935 3127	^{60}Nd 15.6 6.3 1024 3027	^{61}Pm - - - -	^{62}Sm - 6.6 1072 1900	^{63}Eu 14.6 5.6 826 1439	^{64}Gd 12.9 6.7 1312 3000	^{65}Tb 12.7 6.7 1356 2800	^{66}Dy 13.9 6.8 1407 2600	^{67}Ho 13.4 6.0 1461 2600	^{68}Er 13.2 6.1 1497 2900	^{69}Tm 13.0 6.2 1545 1727	^{70}Yb 12.8 7.1 824 1427	^{71}Lu 10.9 6.2 1652 3327			

原子番号
元素記号
最大電離断面積
(10^{-16}cm^2)
電離電圧 (eV)
融点 (℃)
沸点 (℃)

5.1　フリーマンイオン源

5.1.1　水素(H)イオン

イ オ ン 種	水素(H)　原子番号：1
1.同位元素存在比 [11]	^{1}H：99.985%　^{2}H：0.0148%
2.元素単体の性状	電離電圧：13.5eV[12]　最大電離断面積：0.22(10^{-16}cm^{2}) [12] 融　　点：-259℃[13]　沸点：-253℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	H_2(70%)+Ar(30%)混合ガス　(H_2 ガスは火気厳禁)
5.運転パラメータ	ガス流量 0.8cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー250 keV で 2.3μA アーク電流を上げると約 8μA まで生成可能
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)　ビーム加速開始から 1 時間程度は電磁石の温度変化に伴う磁場変動があるため、ビーム電流が半分程度まで減少することがある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 4 日程度
10.汚れ	フィラメントからの金属片が付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	H_2 ガスのみではプラズマが点灯しないため、Ar との混合ガスを使用する

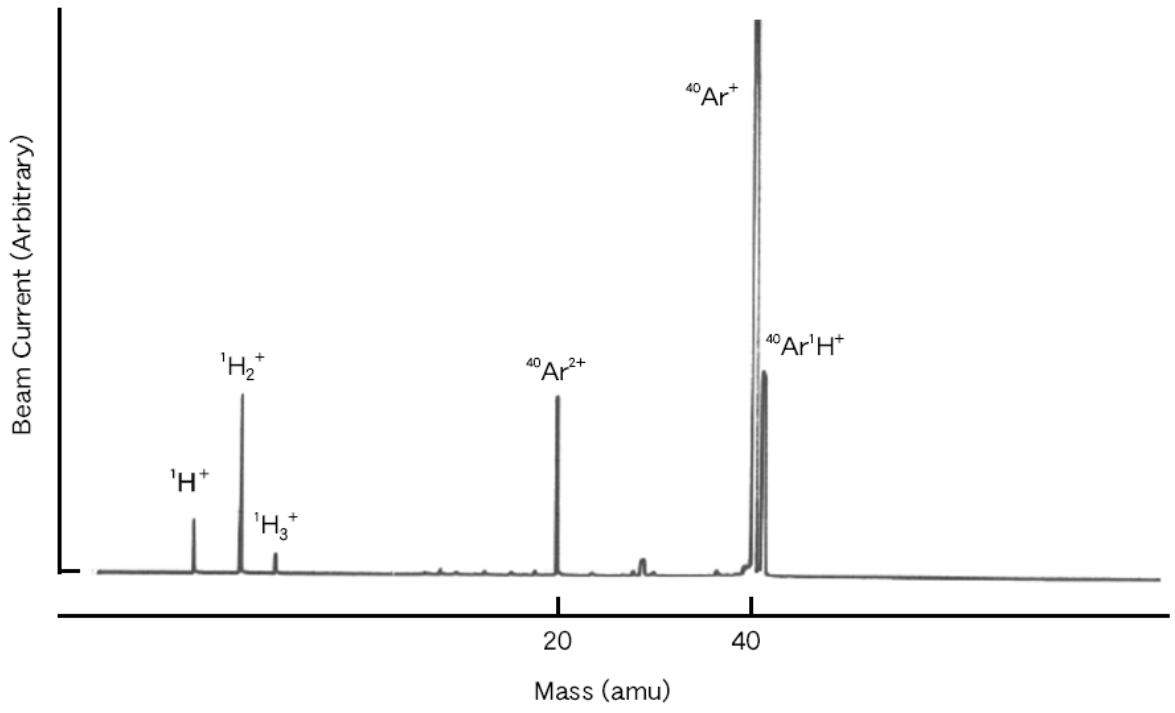


図 35　H_2+Ar ガスで H イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.2　ヘリウム(He)イオン

イ オ ン 種	ヘリウム(He)　原子番号：2
1.同位元素存在比 [11]	^{4}He：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：24.5eV[12]　最大電離断面積：0.21(10^{-16}cm^{2}) [12] 融点：-272℃ (at 26atm) [13]　沸点：-269℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	He(70%)+Ar(30%)混合ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.58cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 6.5μA アーク電流 0.25A にすると 13μA 生成できる
7.ビーム電流 安定性	A (10%以下)　ビーム加速開始から 1 時間程度は電磁石の温度変化に伴う磁場変動があるため、ビーム電流が減少することがある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 3 日程度
10.汚れ	フィラメントからの金属片が多少付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	He ガスのみではプラズマが点灯しないため、Ar との混合ガスを使用する

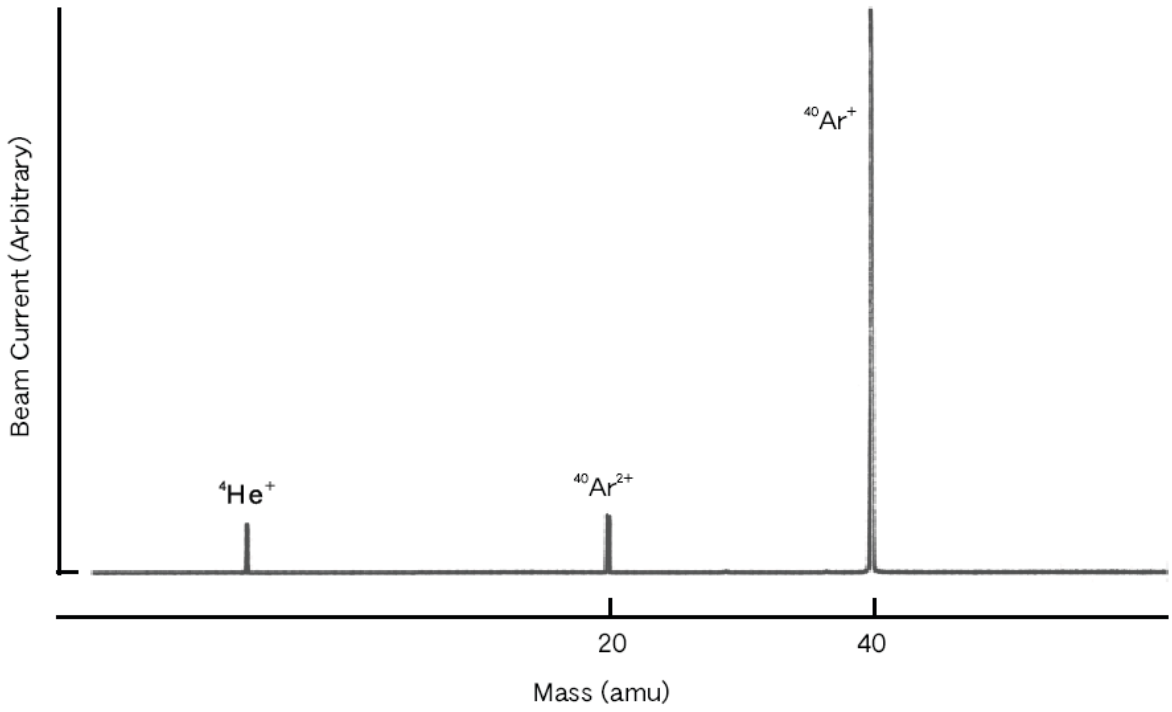


図 36　He+Ar ガスを用いて He イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.3　リチウム(Li)イオン

イ オ ン 種	リチウム(Li)　原子番号：3
1.同位元素存在比 [11]	^{6}Li：7.5%　^{7}Li：92.5%
2.元素単体の性状	電離電圧：5.4eV[12]　最大電離断面積：3.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：181℃[13]　沸点：1336℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	LiF(粒状)　純度 99.9%　融点 870℃[13]　沸点 1670℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 650℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 2μA
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)
8.アウトガス	オーブン温度 80℃から多く発生し始め、200℃を過ぎると減少するので、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	内部は黒くなるが、オーブン方式の中では汚れは少ない
11.その他	アルカリ金属に属するリチウム(Li)金属は、水分に激しく反応し、取扱いが面倒であるため、試料に LiF を用いる

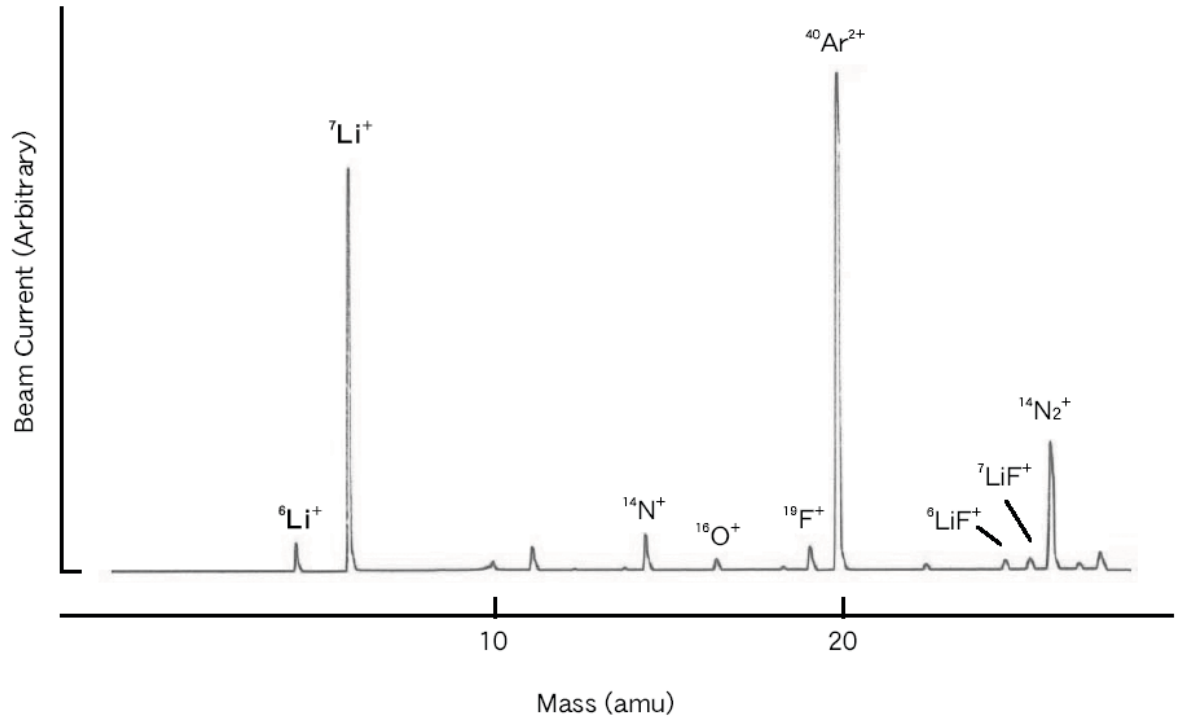


図 37　LiF を用いて Li イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.4　ボロン(B)イオン

イ オ ン 種	ホウ素(B)　原子番号：5
1.同位元素存在比 [11]	^{10}B：19.8%　^{11}B：80.2%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.3eV[12]　最大電離断面積：2.6(10^{-16} cm^2) [12] 融点：2100℃[13]　沸点：2600℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6 プラズマ方式
4.試料	B ディスク(10mmφ×5mmt)
5.運転パラメータ	SF_6+Ar ガス流量 0.4cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 1μA
7.ビーム電流 安定性	C (30～50%)　プラズマ生成後 30 分は多少変動するが、1 日(10 時間)のビーム変動は小さい
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが生成し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 1μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	混合ガスの SF_6 割合を減らし、汚れを軽減しているが、それでも 1 日(10 時間)運転した後は、アークチェンバ内は硫黄分らしき物質が黒く付着するため、アークチェンバ及び引出電極の清掃が必要
11.その他	運転中に B ディスクが割れることがあるため、絶縁物をるつぼ状にして落下しないようにする

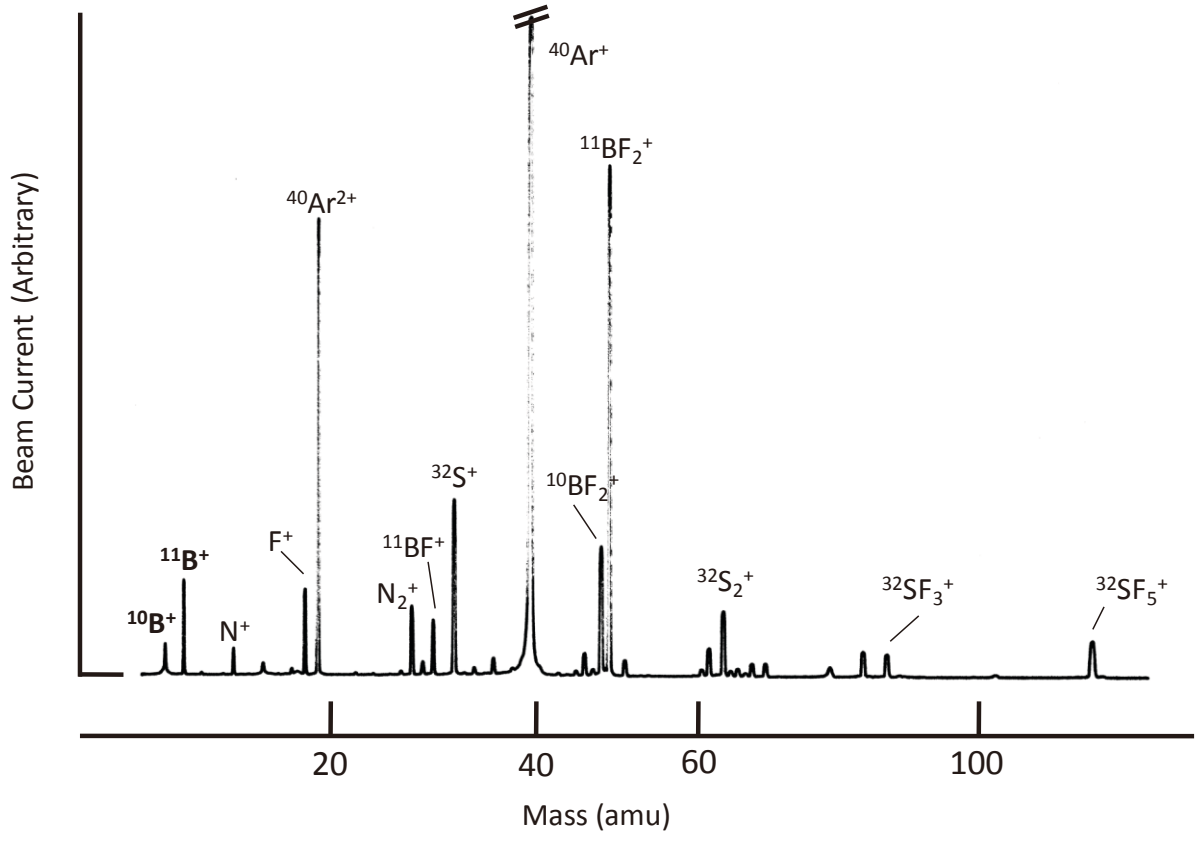


図 38　SF_6 プラズマ方式により B イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.5　炭素(C)イオン

イ オ ン 種	炭素(C)　原子番号：6
1.同位元素存在比 [11]	^{12}C：98.89%　^{13}C：1.11%
2.元素単体の性状	電離電圧：11.2eV[12]　最大電離断面積：2.0(10^{-16} cm^2) [12] 融点：3727℃[13]　沸点：4830℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	CO_2(30%)+Ar(70%)混合ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.5cc/min　ソースマグネット電流 1.6A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 2.6μA
7.ビーム電流 安定性	A (10%以下)　3 日以上の連続運転では、C がアークチェンバ内に多く付着して、プラズマが不安定になる場合がある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 3 日が限度
10.汚れ	カーボンがアークチェンバ内壁全体に黒く付着する 運転後はアークチェンバ及び絶縁物の清掃が必要である
11.その他	プラズマが不安定になる現象を減らすため、CO_2 でプラズマを点灯する前に、Ar プラズマで 1 時間程度の調整運転をする

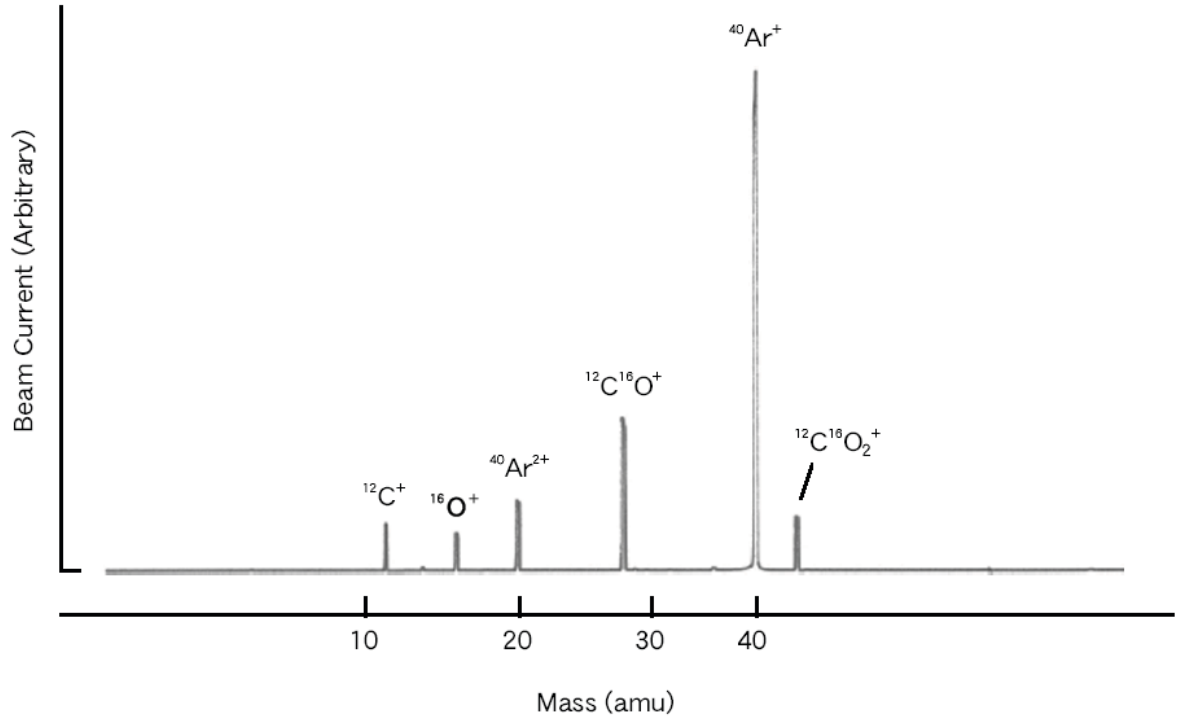


図 39　CO_2+Ar ガスを用いて C イオン生成したときのマススペクトル

5.1.6　窒素(N)イオン

イ オ ン 種	窒素 (N)　原子番号：7
1.同位元素存在比 [11]	^{14}N：99.63%　^{15}N：0.366%
2.元素単体の性状	電離電圧：14.5eV[12]　最大電離断面積：1.5(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-210℃[13]　沸点：-196℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	N_2ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 1.0cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー300keV で 25μA アーク電流 0.25A に上げると 60μA 生成できる
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 25μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 4 日である
10.汚れ	フィラメントからの金属片が多少付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	N_2^+イオンが N^+イオンの 2 倍以上生成する

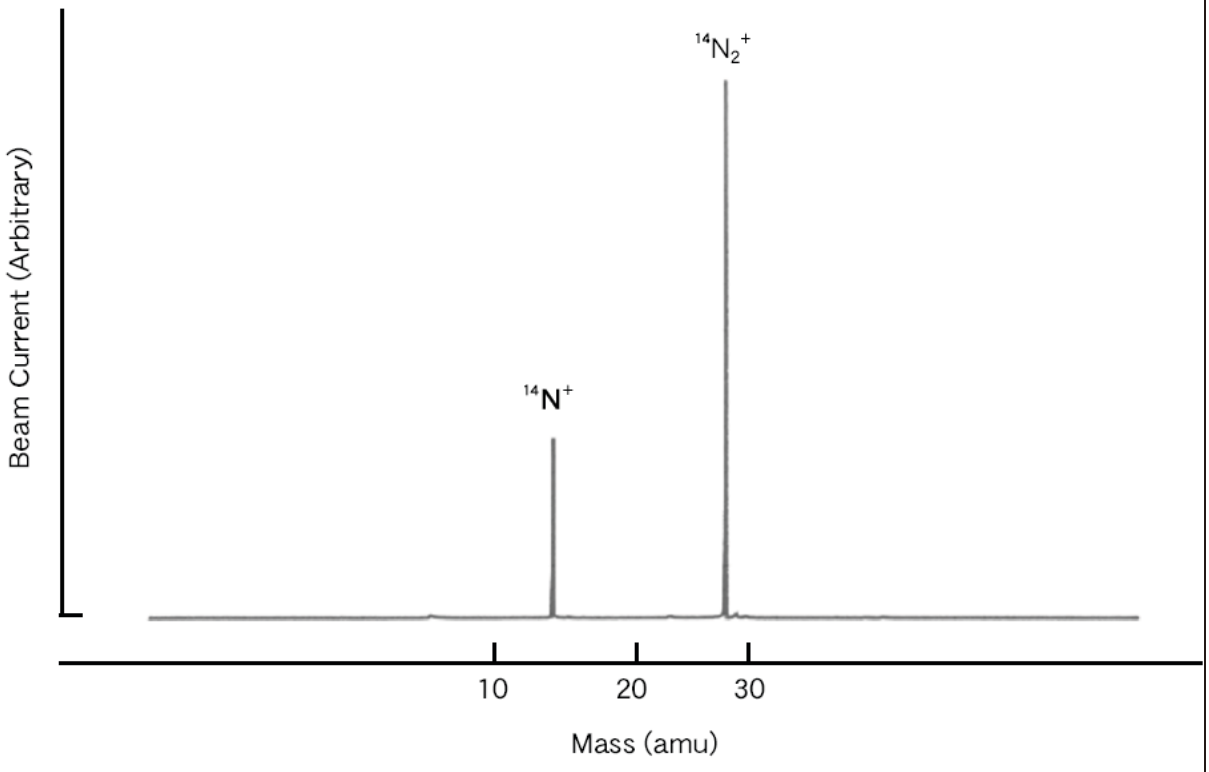


図 40　N_2ガスを用いて N イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.7　酸素(O)イオン

イ オ ン 種	酸素(O)　原子番号：8
1.同位元素存在比 [11]	^{16}O：99.76%　^{17}O：0.038%　^{18}O：0.204%
2.元素単体の性状	電離電圧：13.6eV[12]　最大電離断面積：1.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-219℃[13]　沸点：-183℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	CO_2(30%)+Ar(70%)混合ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.43cc/min　ソースマグネット電流 2.2A　アーク電流 0.18A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 6.2μA
7.ビーム電流 安定性	A (10%以下)　3 日以上の連続運転では、C がアークチェンバ内に多く付着して、プラズマが不安定になる場合がある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 6μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 3 日が限度
10.汚れ	カーボンがアークチェンバ内壁全体に付着する 運転後はアークチェンバ及び絶縁物の清掃が必要である
11.その他	CO_2 でプラズマを点灯する前に Ar ガス(100%)を供給し、1 時間程度の調整運転をすると安定したプラズマが生成可能である

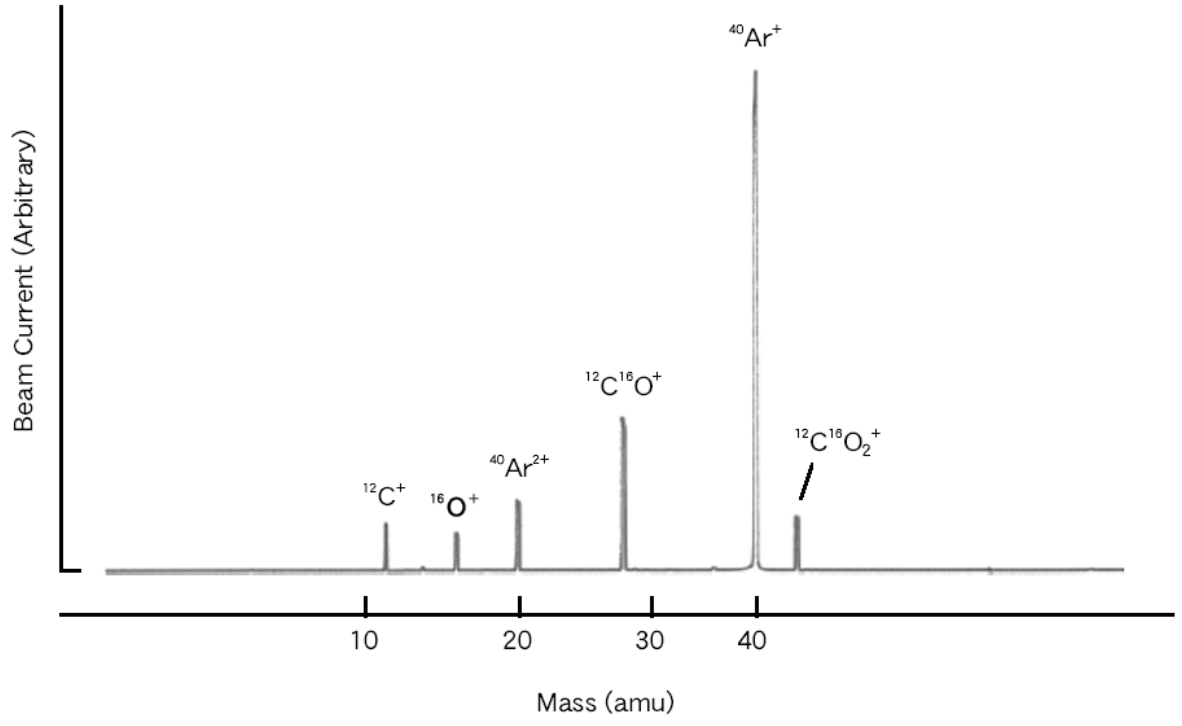


図 41　CO_2+Ar ガスを用いて O イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.8　フッ素(F)イオン

イ オ ン 種	フッ素(F)　原子番号：9
1.同位元素存在比 [11]	^{19}F：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：17.3eV[12]　最大電離電圧断面積：1.0(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-218℃[13]　沸点：-188℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	SF_6(5%)+Ar(95%)混合ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.5cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.17A
6.ビーム電流	エネルギー360keV で 2.3μA
7.ビーム電流 安定性	A (10%以下)　2 日以上の連続運転では、アークチェンバ内の汚れにより、プラズマが不安定になる場合がある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	汚れは多く、アークチェンバ及び絶縁物は黒い付着物で覆われる
11.その他	フッ素ガス(F_2)は反応性、腐食性が非常に強いため使用しない AlF_3 を用いてオーブン方式でも可能だが、ガス出しに時間を要するため、安定な SF_6 を用いてガス方式で行なう

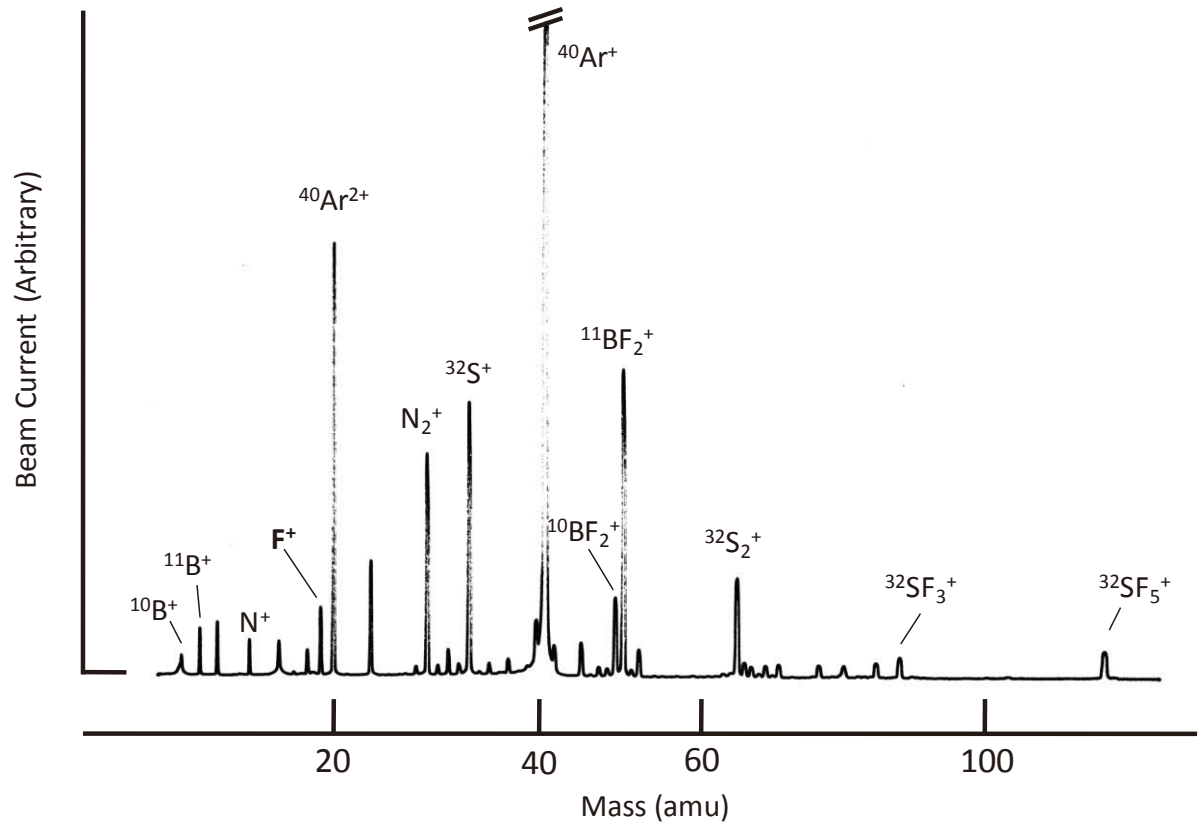


図 42　　SF_6+Ar ガスを用いて F オンを生成したときのマススペクトル

5.1.9　ネオン(Ne)イオン

イ オ ン 種	ネオン(Ne)　原子番号：10
1.同位元素存在比 [11]	^{20}Ne：90.51%　^{21}Ne：0.27%　^{22}Ne：9.22%
2.元素単体の性状	電離電圧：21.5eV[12]　最大電離電圧断面積：0.82(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-249℃[13]　沸点：-246℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	Ne ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 2.1cc/min　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー300keV で 30μA アーク電流を上げると 100μA まで生成可能
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、約 30 分でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 30μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 5 日程度である
10.汚れ	フィラメントからの金属片が多少付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	Ar ガスで運転した直後に Ne ガスで運転するときは、$^{20}Ne^{+}$と $^{40}Ar^{2+}$は分析電磁石の磁場が重なり分析できないため、Ar 残留ガスを十分除去する

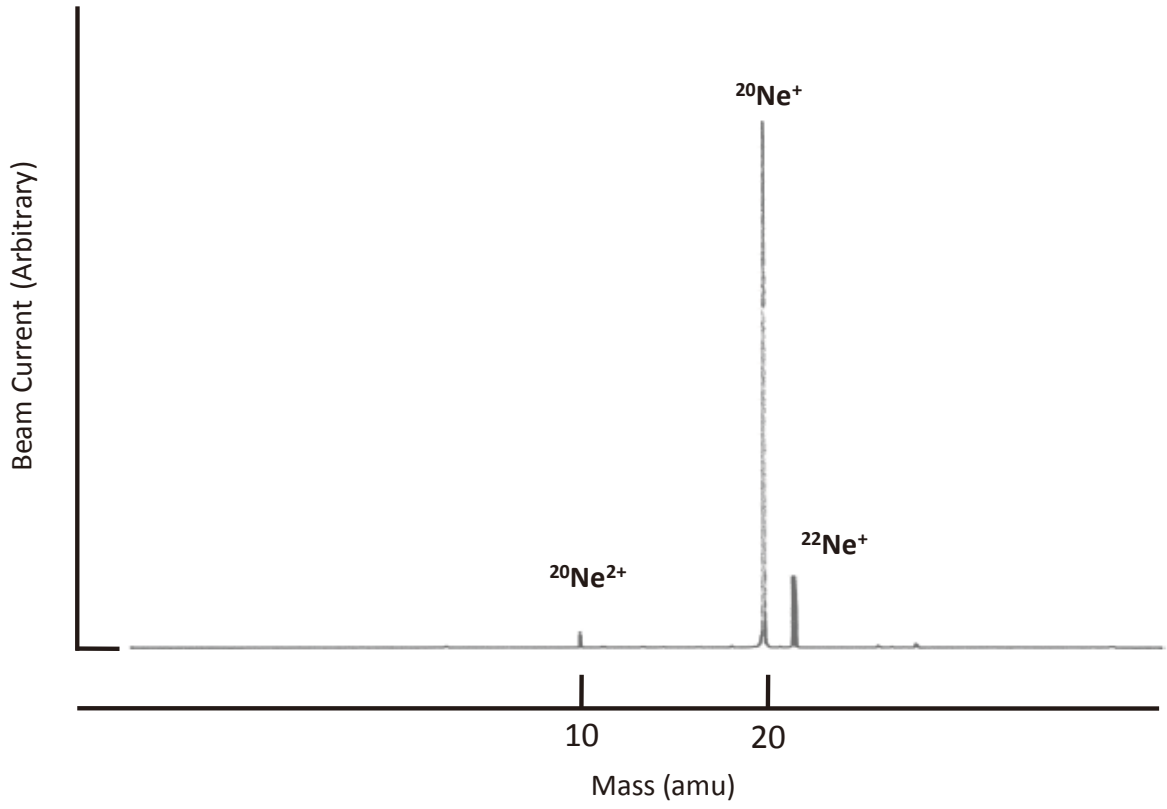


図 43　Ne ガスを用いて Ne イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.10　マグネシウム(Mg)イオン

イ オ ン 種	マグネシウム(Mg)　原子番号：12
1.同位元素存在比 [11]	^{24}Mg：78.99%　^{25}Mg：10.00%　^{26}Mg：11.01%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.6eV[12]　最大電離電圧断面積：5.4(10^{-16} cm^2) [12] 融点：650℃[13]　沸点：1107℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	マグネシウム(粒状)　火気に注意
5.運転パラメータ	オーブン温度 430℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 38μA
7.ビーム電流 安定性	B (10～30%)　Mg 蒸気のみでプラズマを生成できるが、Mg が引出電極に多量に付着して連続放電を起こすため、Ar ガスでプラズマを維持し、オーブン温度を必要最小限に留めることが望ましい
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、約 2 時間でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 30μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日程度である
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では、汚れは少ない
11.その他	マグネシウム粉末はスパークにより発火する恐れがあるため、試料は大きめの粒状を使用する

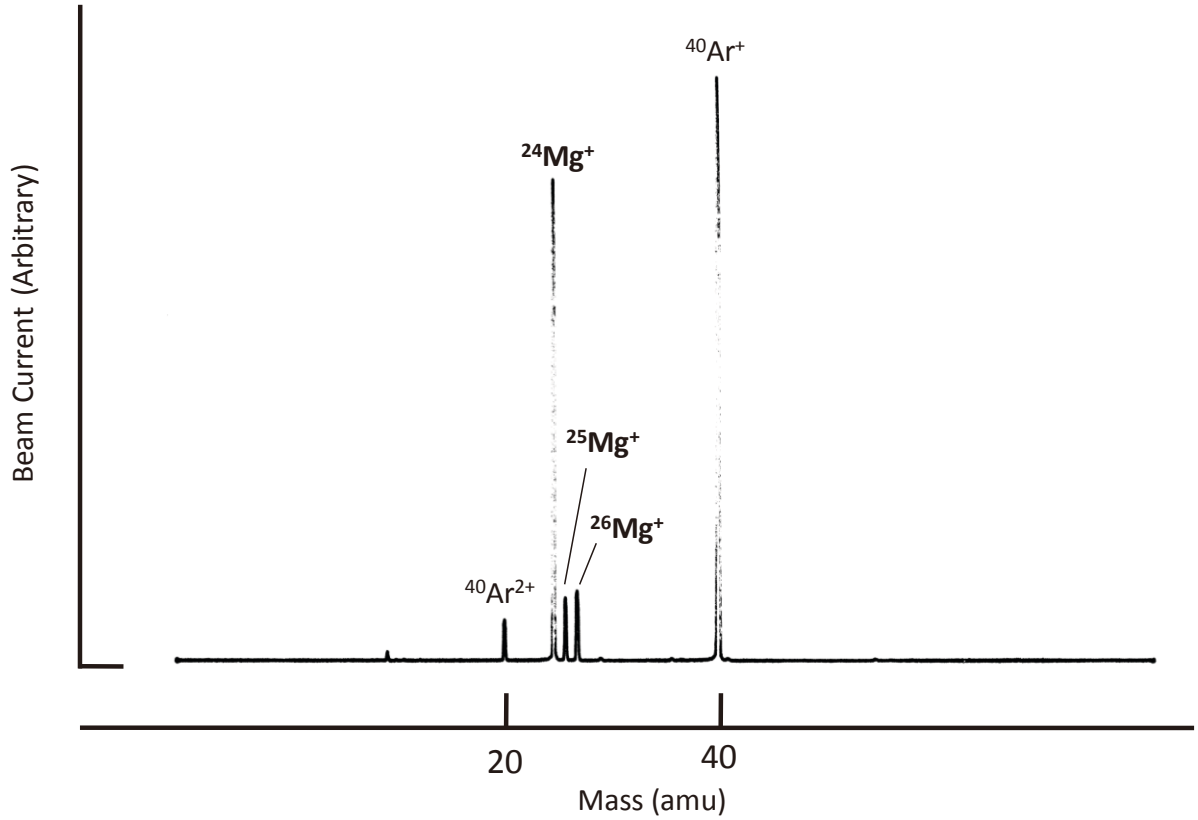


図 44　粒状 Mg を用いて Mg イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.11　アルミニウム(Al)イオン

イ オ ン 種	アルミニウム(Al)　原子番号：13
1.同位元素存在比 [11]	^{27}Al：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.0eV[12]　最大電離断面積：6.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：660℃[13]　沸点：2467℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	AlF_3(粉末)、融点 1040℃[13]、沸点 1260℃(昇華) [13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 600℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー340keV で 4.6μA
7.ビーム電流 安定性	C (30～50%)　しかし、AlF_3 を一度 600℃付近まで加熱し冷ますと、その後は加熱しても全くビーム発生しない
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、約 2 時間半でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では、汚れは少ない
11.その他	Al ワイヤーを用いた、るつぼによりイオン生成試験の結果、ビーム電流は約 1μA 程度生成できるが、数分単位で突然 3μA 程度まで増える現象が起き、Al ワイヤーでは安定に生成することはできなかった

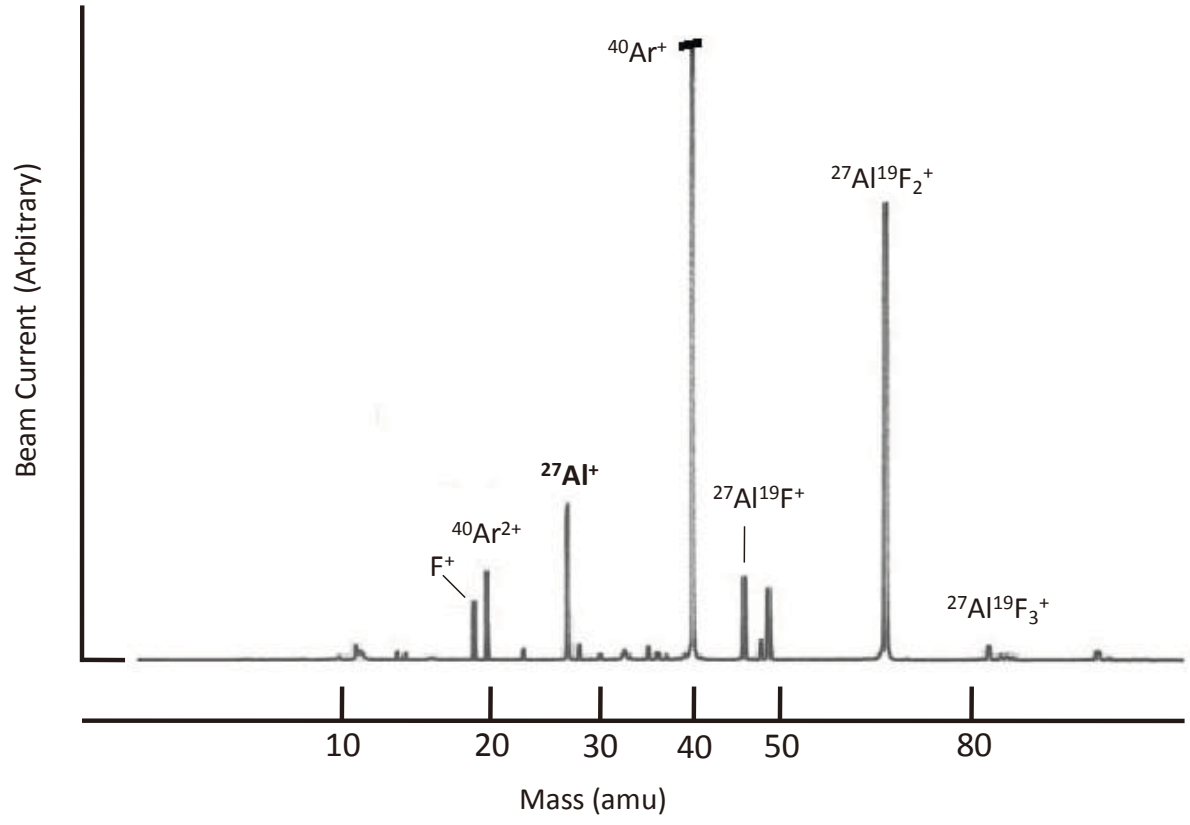


図 45　AlF_3 を用いて Al イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.12　シリコン(Si)イオン

イ オ ン 種	シリコン(Si)　原子番号：14
1.同位元素存在比 [11]	^{28}Si：92.23 %　^{29}Si：4.67%　^{30}Si：3.10%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.1eV[12]　最大電離断面積：5.4(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1414℃(43atm) [13]　沸点：2355℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6 プラズマ方式
4.試料	Si ディスク(10mmφ×3mmt)
5.運転パラメータ	SF_6+Ar ガス流量 0.5cc/min　ソースマグネット電流 2.3A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー340keV で 5μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)　フィラメント電流を最大まで上げると、図 46 に示す様に Si ディスクと接触する部分のフィラメントが消耗し、実験途中で溶断する可能性があるため、フィラメント電流は最大まで上げずにプラズマが維持できる最小電流(新品時 150A 以下)で運転を行う
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、約 30 分でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	汚れは多い。アークチェンバ及び絶縁物は黒い付着物で覆われる
11.その他	Si は質量数 28 で N_2 と重なるため、アークチェンバ内で使用する絶縁物の材質を BN から Al_2O_3 に変更する

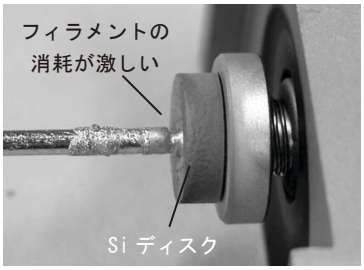


図 46　運転後のフィラメント

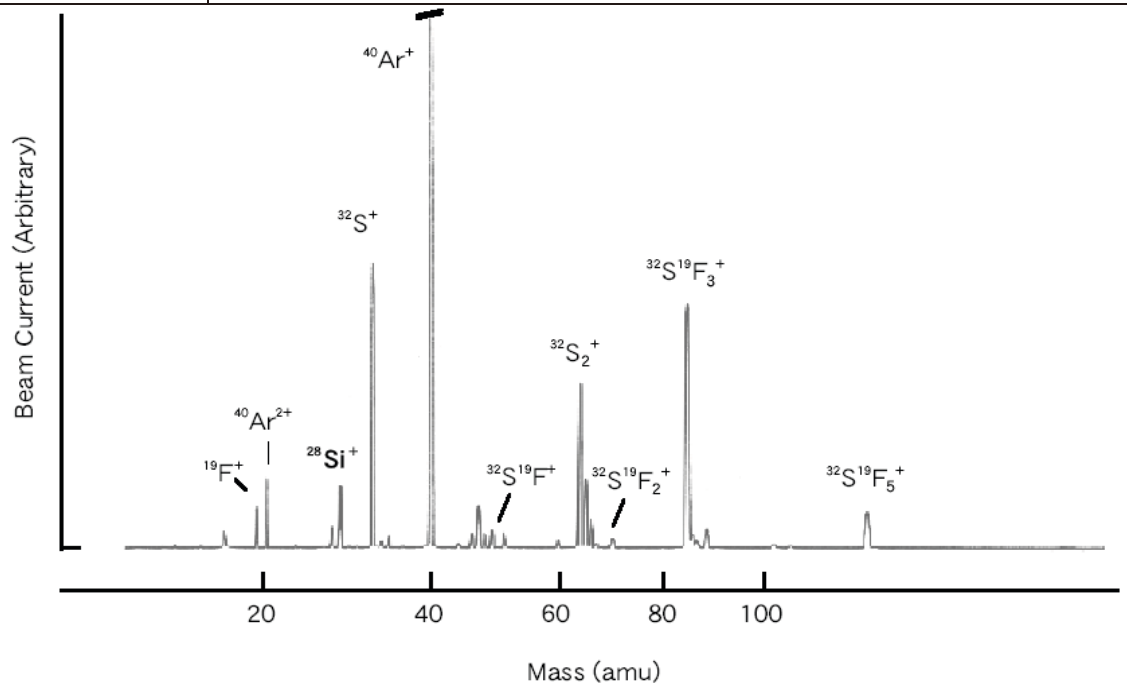


図 47　Si ディスクを用いて Si イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.13　リン(P)イオン

イ オ ン 種	リン (P)　原子番号：15
1.同位元素存在比 [11]	^{31}P：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：10.9eV[12]　最大電離断面積：4.5(10^{-16} cm^2) [12] 融点：590℃(43atm) [13]　沸点：281℃[13]
3.イオン生成方式	低温オーブン方式
4.試料	赤燐(粉末)　火気注意　危険物第 2 類
5.運転パラメータ	オーブン温度 320℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー140keV で 13μA
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 13μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ないが、オーブン温度を高めに設定するとフィラメント支柱にリン金属が多量に付着する
11.その他	リン蒸気のみでプラズマは生成できるが、サポートガス(Ar)でプラズマを安定させ、オーブン温度を低めにする

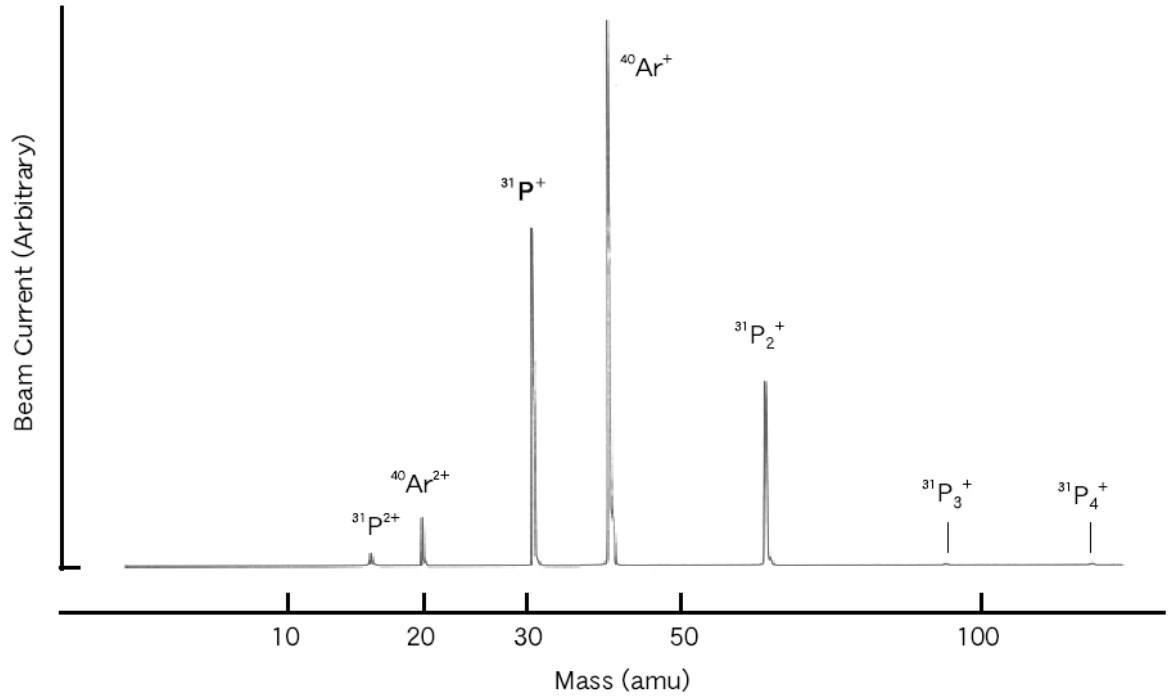


図 48　赤燐（粉末）を用いて P イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.14　硫黄(S)イオン

イ オ ン 種	硫黄 (S)　原子番号：16
1.同位元素存在比 [11]	^{32}S：95.02%　^{33}S:0.75%　^{34}S：4.21%　^{36}S：0.017%
2.元素単体の性状	電離電圧：10.3eV[12]　最大電離電圧断面積：3.9(10^{-16} cm^2) [12] 融点：119℃[13]　沸点：445℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	SF_6(5%)+Ar(95%)混合ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.4cc/min　ソースマグネット電流 2.0 A　アーク電流 0.22A
6.ビーム電流	エネルギー150keV で 8.7μA
7.ビーム電流 安定性	B (10～30%)　2 日以上の連続運転では、アークチェンバ内の汚れにより、プラズマが不安定になる場合がある
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 8μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	汚れは多い。アークチェンバ及び絶縁物は黒い付着物で覆われる
11.その他	絶縁碍子に BN を使用しているため、B^+、N^+、BF^+などのピークが現れる

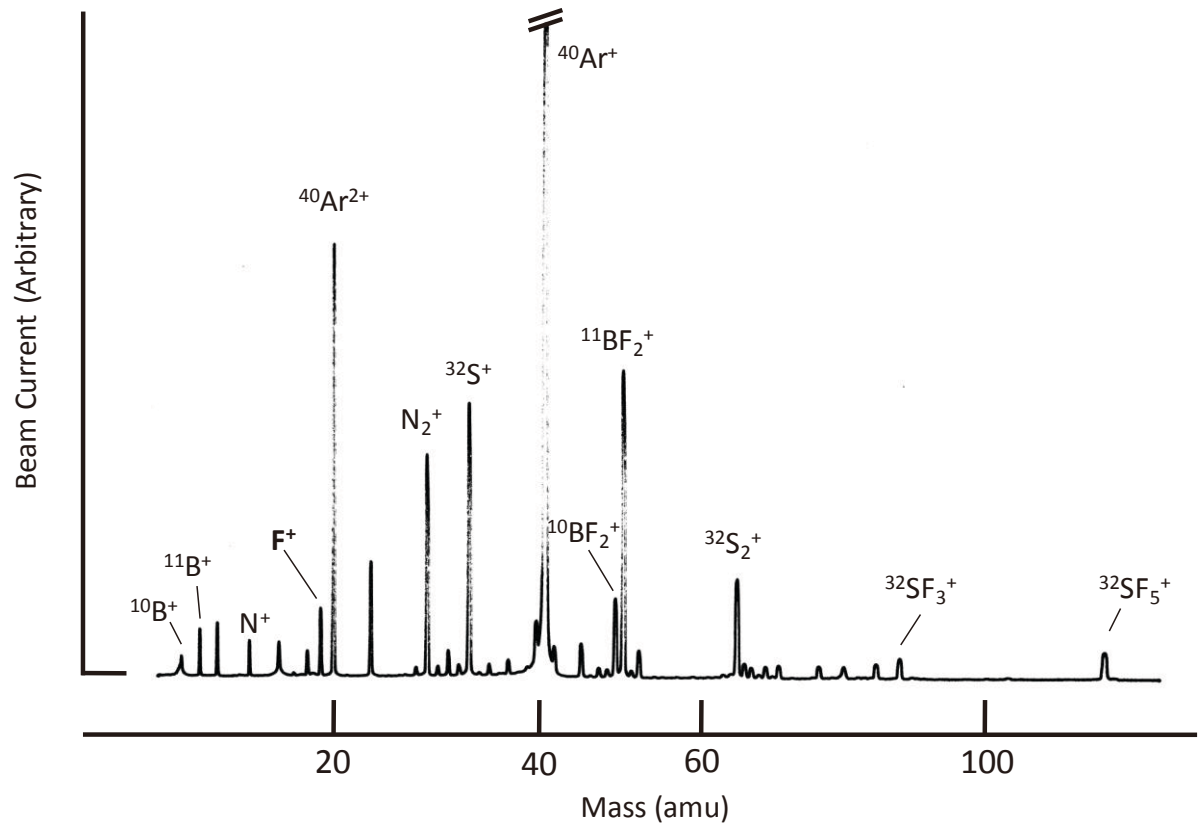


図 49　SF_6+Ar ガスを用いて S イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.15　塩素(Cl)イオン

イ オ ン 種	塩素 (Cl)　原子番号：17
1.同位元素存在比 [11]	^{35}Cl：75.77%　^{37}Cl：24.23%
2.元素単体の性状	電離電圧：13.0eV[12]　最大電離断面積：3.4(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-101℃[13]　沸点：-34℃[13]
3.イオン生成方式	オーブン方式
4.試料	AgCl　KCl　その他の塩化物でも可能
5.運転パラメータ	AgCl 使用時：オーブン温度 580℃　Ar ガス流量 0.3cc/min ソースマグネット電流 1.8A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 4.2μA
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)　しかし、2 日目以降はビーム電流がゆっくりと減少する
8.アウトガス	塩化物はアウトガスが多く、ガス出しに要する時間は最低でも 2 時間半である。また、塩化物は大気中の水分を吸収しやいため、イオン源にセットするときは大気に触れる時間を最小限にする 運転する前日に本体にセットして一晩真空引きを行うことでガス出しに要する時間を短縮できる
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	汚れは多い 運転した後は、アークチェンバ、絶縁物及び引出電極を清掃する
11.その他	試料としては、比較的アウトガスが少なく、ビーム電流の安定性が良い AgCl が適している

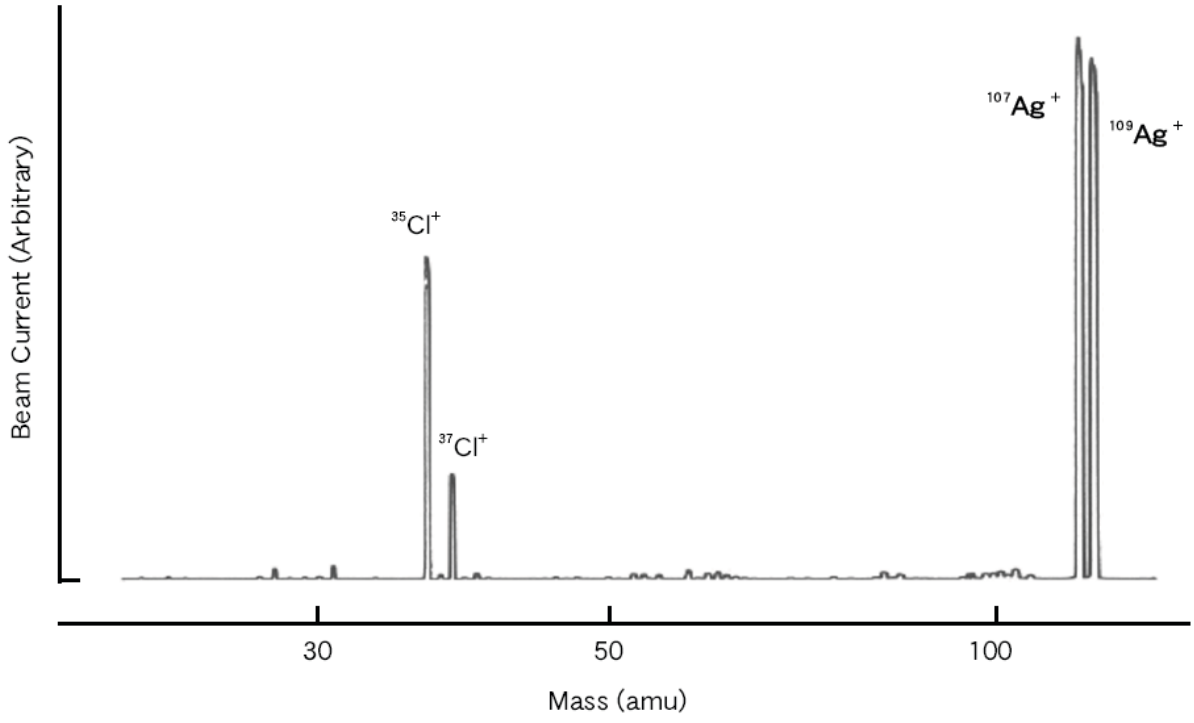


図 50　AgCl を用いて Cl イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.16　アルゴン(Ar)イオン

イ オ ン 種	アルゴン(Ar)　原子番号：18
1.同位元素存在比 [11]	^{36}Ar：0.337%　^{38}Ar：0.063%　^{40}Ar：99.60%
2.元素単体の性状	電離電圧：15.7eV[12]　最大電離断面積：2.8(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-189℃[13]　沸点：-186℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	Ar ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.2cc/min　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー300keV で 50μA
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、約 30 分でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 20μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 5 日である
10.汚れ	フィラメントから発生した金属片が付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	ビーム電流 20μA(引出電圧 20kV)で連続運転を行ったときのフィラメント寿命は、約 100 時間であった　(図 8 参照)

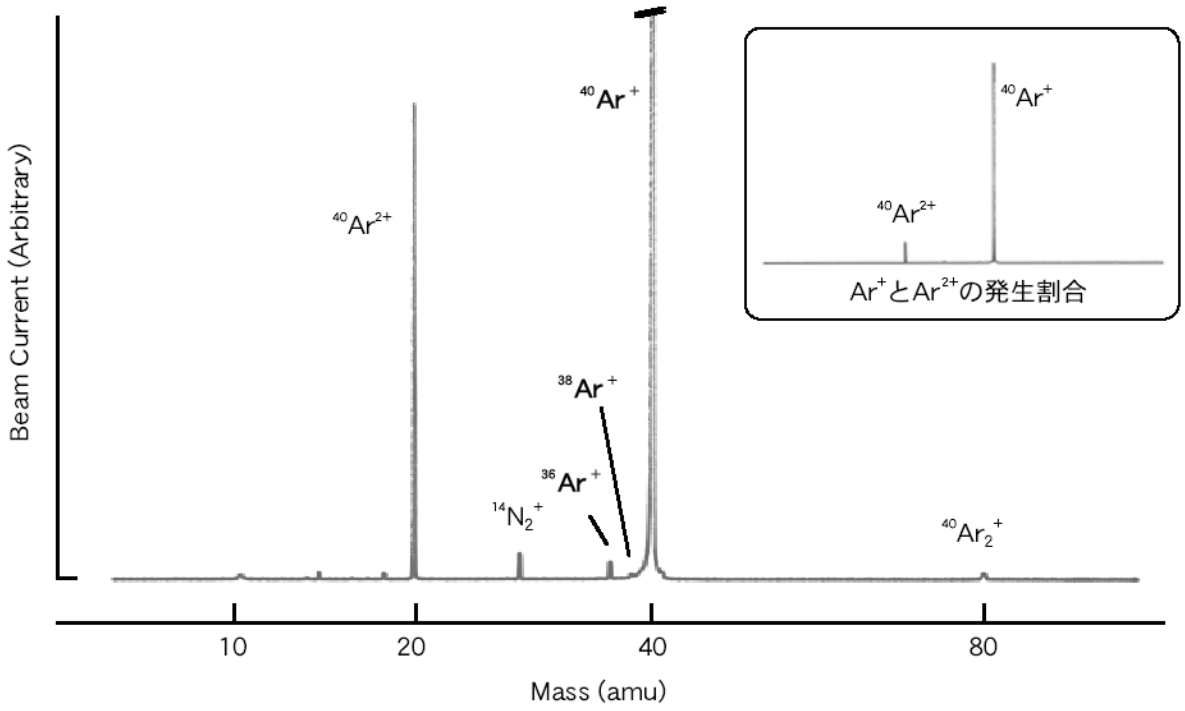


図 51　Ar ガスで Ar イオンを生成したときのマススペクトル

Ar^+が約 70μA 生成しているときの Ar^{2+}の生成量は約 7.7μA
また、質量数 80 のところに、$^{40}Ar_2^+$と思われるピーク(約 100nA)が存在する

5.1.17　カリウム(K)イオン

イ オ ン 種	カリウム(K)　原子番号：19
1.同位元素存在比 [11]	^{39}K：93.26%　^{40}K：0.0117%　^{41}K：6.73%
2.元素単体の性状	電離電圧：4.5eV[12]　最大電離断面積：7.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：64℃[13]　沸点：760℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	KCl(粉末)　融点 776℃[13]　沸点 1500℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 450℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 3.6A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 4.3μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	アウトガスは多く、オーブン 200℃程度までは特に多い ガス出しは約 2 時間半で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では、汚れは少ない
11.その他	カリウムは劇物であり、水と反応して水素を発生し爆発的に燃焼するため、試料として用いることは適さない

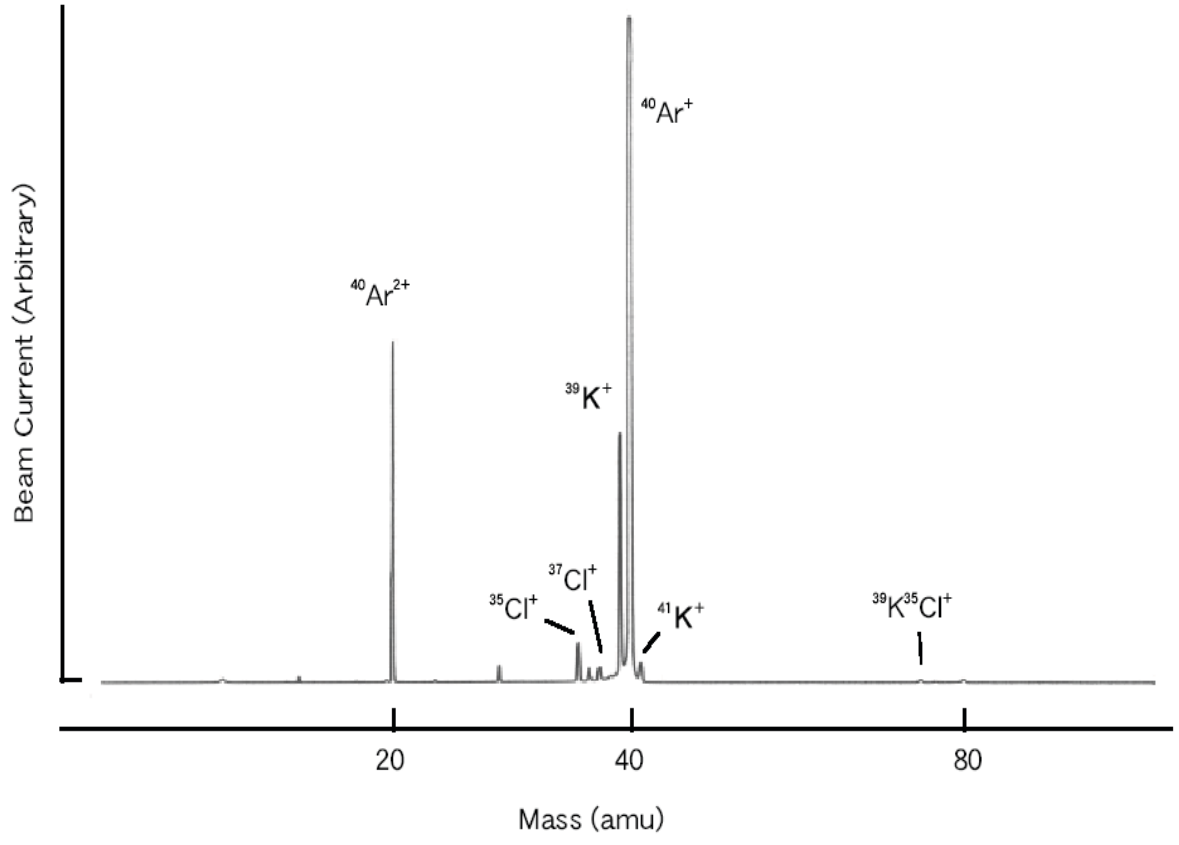


図 52　KCl を用いて K イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.18　チタン(Ti)イオン

イ オ ン 種	チタン (Ti)　原子番号：22
1.同位元素存在比 [11]	^{46}Ti：8.2%　^{47}Ti：7.4%　^{48}Ti：73.7%　^{49}Ti：5.4%　^{50}Ti：5.2%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.8eV[12]　最大電離断面積：8.7(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1668℃[13]　沸点：3260℃[13]
3.イオン生成方式	ディスク方式
4.試料	Ti ディスク(10mmφ×3mmt)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.3cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.4A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 0.7μA
7.ビーム電流 安定性	D (50%以上) 時間とともにゆっくり減少し、3 時間後には半分程度まで下がる フィラメントが消耗して 100A 以下になると、再び増加する
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 0.7μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である フィラメントの寿命は、アーク電流 0.4A のとき、約 10 時間である
10.汚れ	汚れは少ない
11.その他	スパッタ方式では最大で約 50nA しか生成できず、時間とともにビーム電流が減少する フィラメント方式では、アーク放電が起こる前の約 80A で溶断した

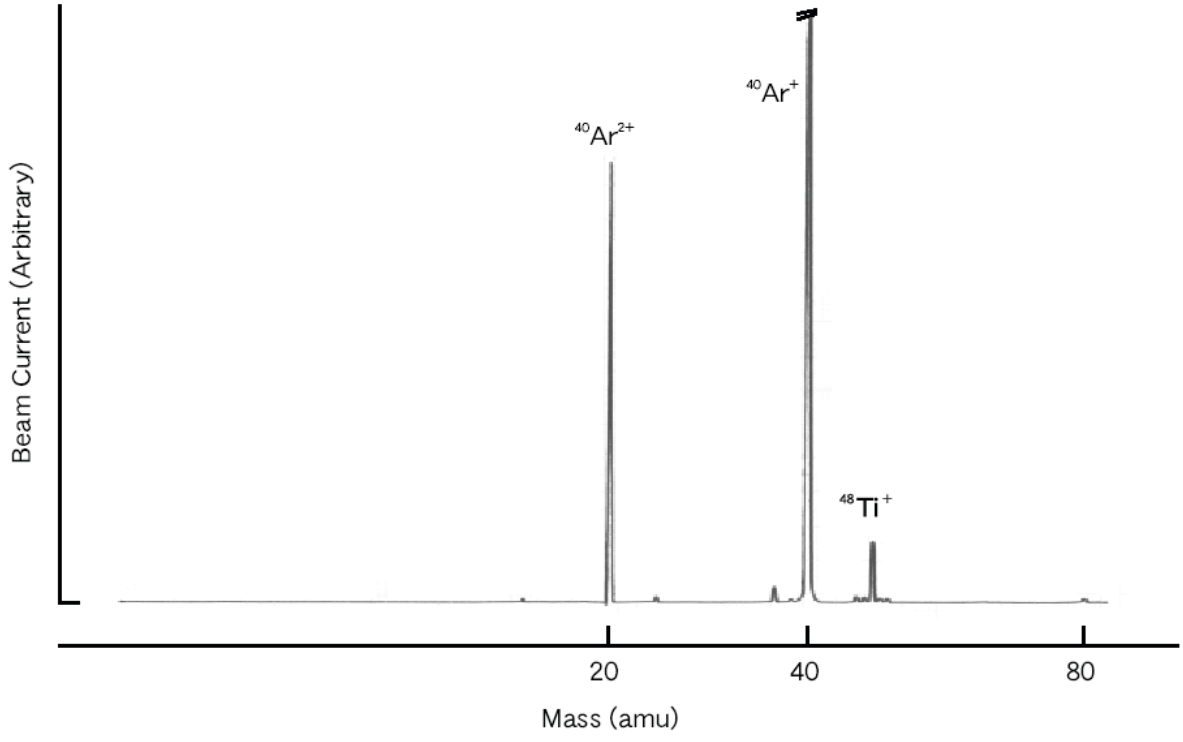


図 53　Ti ディスクを用いて Ti イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.19　バナジウム(V)イオン

イ オ ン 種	バナジウム(V)　原子番号：23
1.同位元素存在比 [11]	^{50}V：0.25%　^{51}V：99.75%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.7eV[12]　最大電離断面積：9.7(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1900℃[13]　沸点：3000℃[13]
3.イオン生成方式	ディスク方式
4.試料	V ディスク(10mmφ×3mmt)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.4cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.7A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 2.7μA
7.ビーム電流 安定性	D (50%以上) 時間とともにゆっくり減少し、3 時間後には約半分まで下がる フィラメントが消耗し、100A 以下になると増加し始める
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2.7μA 生成時、フィラメントの寿命は約 5 時間である フィラメントの寿命を 1 日の運転時間である 10 時間以上に延ばすには、アーク電流 0.4A 以下にする必要があり、その場合ビーム電流は数百 nA に減少する
10.汚れ	汚れは少ない
11.その他	オーブン及びスパッタ方式では、どちらもビーム強度が得られなかったフィラメント方式ではアーク放電が起こる前の約 100A で溶断した

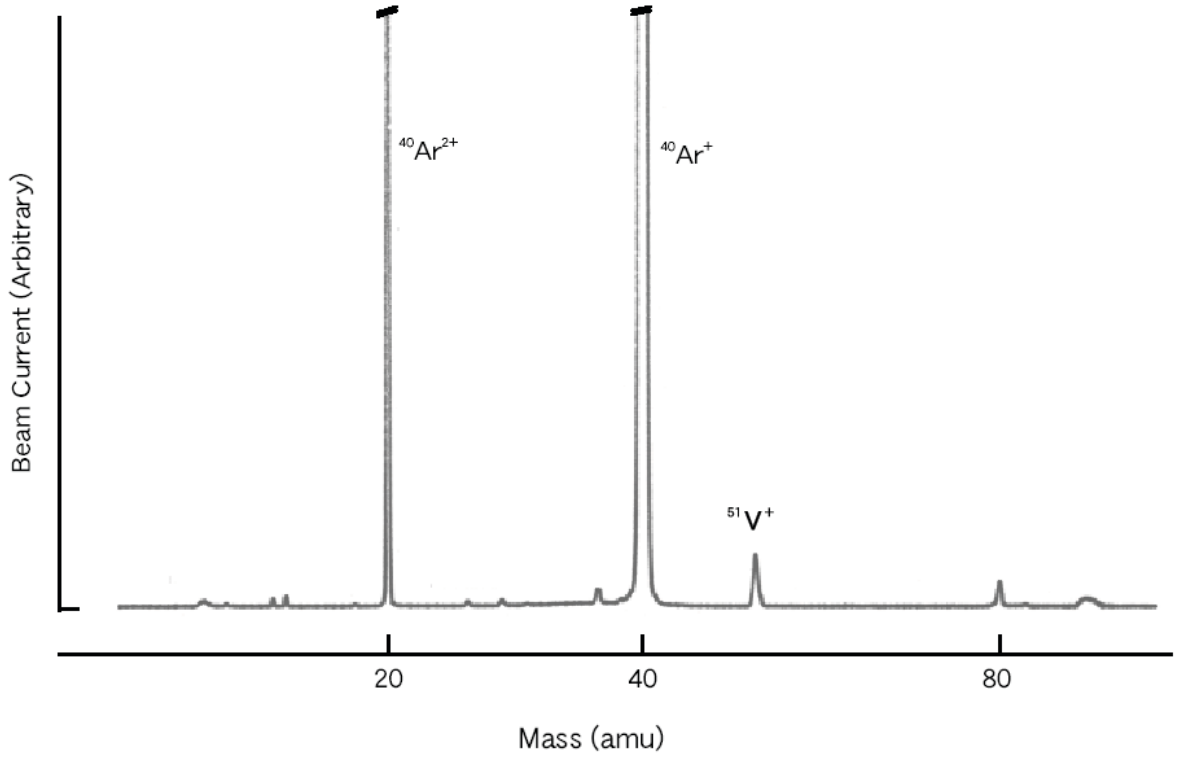


図 54　V ディスクを用いて V イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.20　クロム(Cr)イオン

イ オ ン 種	クロム (Cr)　原子番号：24
1.同位元素存在比 [11]	^{50}Cr：4.35%　^{52}Cr：83.79%　^{53}Cr：9.50%　^{54}Cr：2.36%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.7eV[12]　最大電離断面積：5.1(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1875℃[13]　沸点：2482℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$CrCl_3$(紫色の粉末)　融点 1150℃[13]　沸点 1300℃(昇華) [13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 460℃　Ar ガス流量 0.25cc/min ソースマグネット電流 3.0A　アーク電流 0.12A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 15μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	塩化物の中でも特にアウトガスが多く、オーブンに通電した直後に急激なアウトガスが発生する。真空値が 4×10^{-2}Pa 以上になるとインターロックが作動し、イオン注入装置を停止させるため、10^{-2}Pa 台に入らないように昇温する。ガス出しに要する時間は約 3 時間である
9.連続使用時間	ビーム電流 15μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	引出電極やオーブンノズルに Cr が多く付着し、大気に触れると 10 分程度で緑色に変色し、液体状になる。オーブン温度を高め過ぎると、Cr 金属が引出電極に多量に付着し、連続放電を起こすことがある
11.その他	$CrCl_3$ は特に水分を吸収しやすいため、イオン源に組み込むときは、できるだけ大気に触れさせないようにし、運転前に一晩程度真空引きを行う

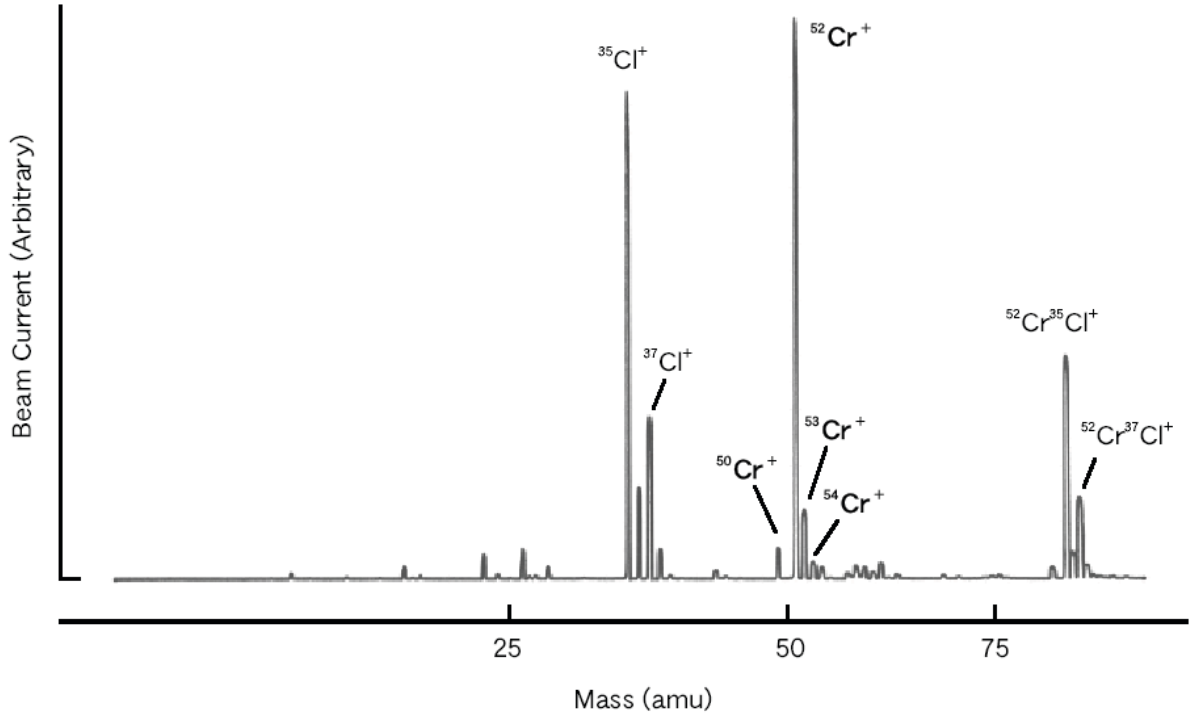


図 55　$CrCl_3$ を用いて Cr イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.21　マンガン(Mn)イオン

イ オ ン 種	マンガン (Mn)　原子番号：25
1.同位元素存在比 [11]	^{55}Mn：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.4eV[12]　最大電離断面積：6.8(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1245℃[13]　沸点：2150℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$MnCl_2$(粉末)　純度 99.9%以上　融点 650℃[13]　沸点 1190℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 420℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 2.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 4.5μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	アウトガスは多く、オーブン 200℃程度までは特に多い ガス出しは 2 時間半程度で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない 引出電極に Mn が多く付着して連続放電を起こすので、運転後は必ず引出電極を交換する
11.その他	Mn はスパッタ方式で最大 1 μA 生成できたが、すぐに減少する

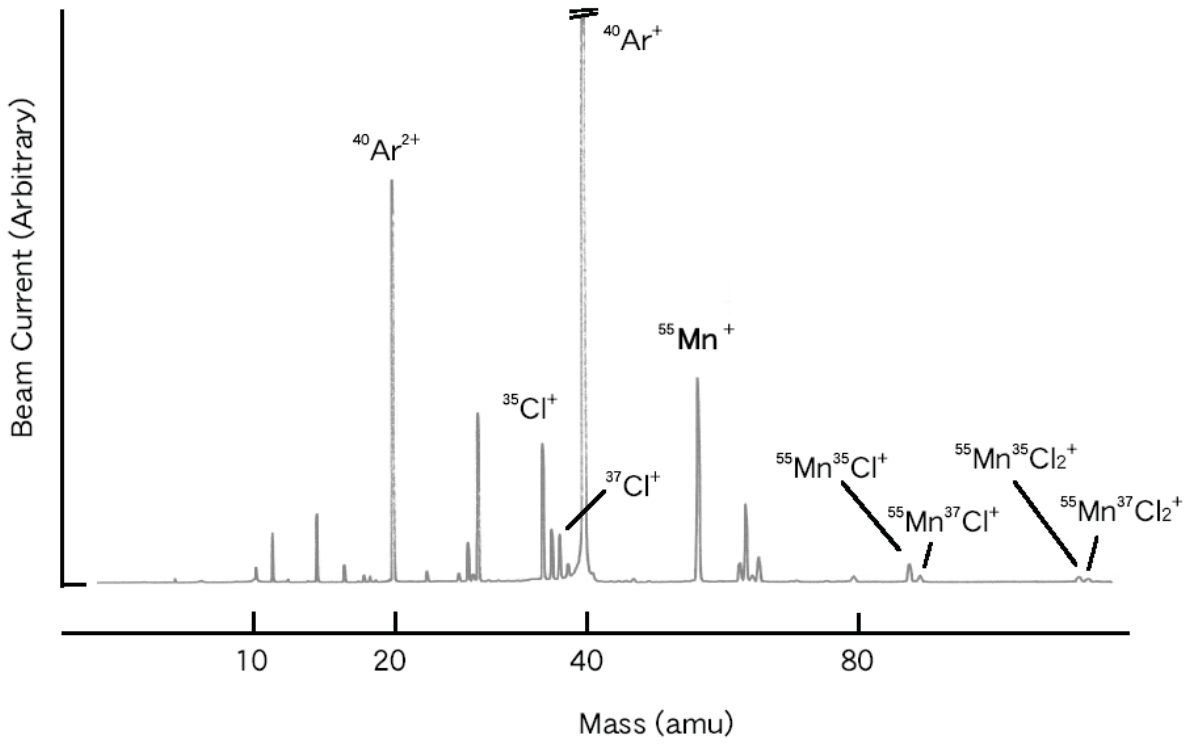


図 56　$MnCl_2$ を用いて Mn イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.22　鉄(Fe)イオン

イ オ ン 種	鉄 (Fe)　原子番号：26
1.同位元素存在比 [11]	^{54}Fe：5.8%　^{56}Fe：91.8%　^{57}Fe：2.15%　^{58}Fe：0.29%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.8eV[12]　最大電離断面積：6.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1536℃[13]　沸点：3000℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$FeCl_2$(粉末)　融点 670℃(昇華)[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 405℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 2.5 A　アーク電流 0.14A
6.ビーム電流	エネルギー150keV で 6.9μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	アウトガスは多く、オーブン 200℃程度までは特に多い ガス出しは約 2 時間半で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 6μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない。引出電極に Fe が多く付着して連続放電を起こすので、運転後は必ず引出電極を交換する 運転後の引出電極及びイオン源は、大気中に数時間置いておくと、表面に付着した $FeCl_2$ が水分を吸い、濡れた状態になる
11.その他	$FeCl_2$ は密封して保管する

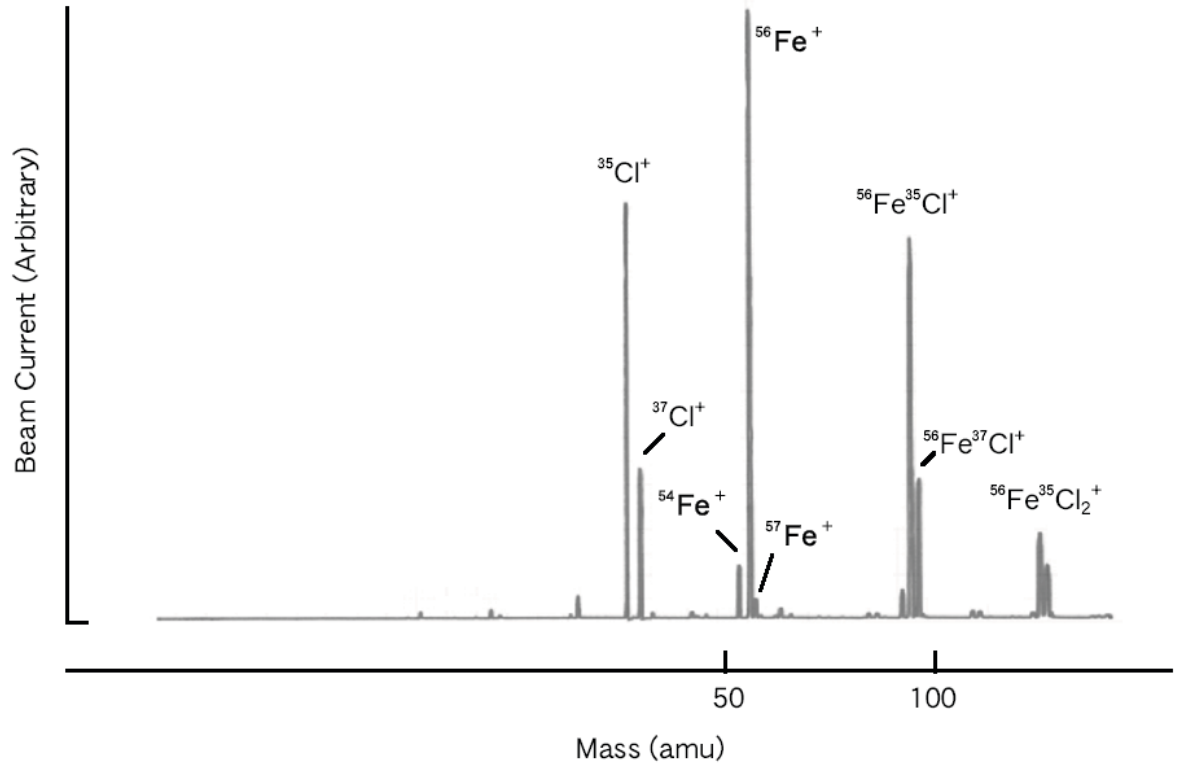


図 57　$FeCl_2$ を用いて Fe イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.23　コバルト(Co)イオン

イ オ ン 種	コバルト (Co)　原子番号：27
1.同位元素存在比 [11]	^{59}Co：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.8eV[12]　最大電離断面積：6.0(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1495℃[13]　沸点：2900℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$CoCl_2$(粉末)　融点 724℃[13]　沸点 1049℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 450℃　Ar ガス流量 0.3cc/min ソースマグネット電流 3.0A　アーク電流 0.11A
6.ビーム電流	エネルギー90keV で 10μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	塩化物の中でも特にアウトガスが多く、ガス出しに要する時間は通常は約 3 時間であるが、イオン源組込み時に水分を吸収してしまうと、ガス出しに丸 1 日(約 10 時間)費やしてしまう場合もある 作業は素早く行い、運転前に一晩真空引きを行うようにする
9.連続使用時間	ビーム電流 10μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない。引出電極に多量に Co が付着して、連続放電を起こすため、運転後は引出電極を必ず交換する
11.その他	運転後、引出電極に付着した Co は、最初薄いピンク色をしているが、大気に触れると数分で青色になり、数時間後にピンク色になり剥がれ落ちる

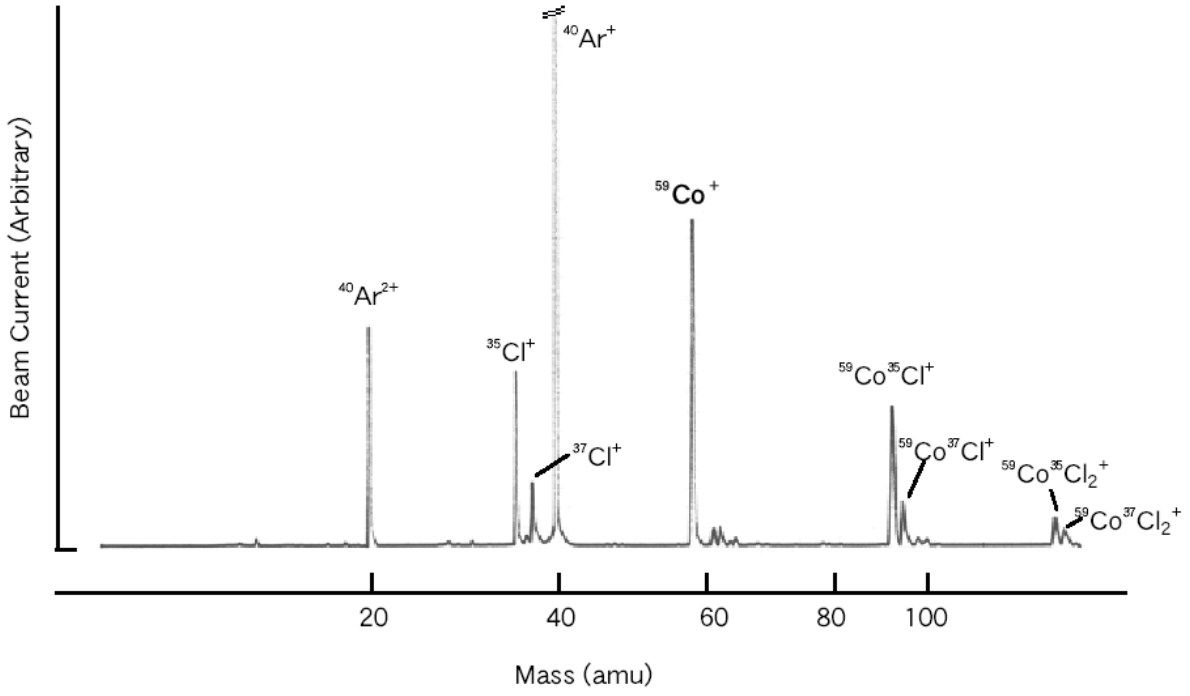


図 58　$CoCl_2$ を用いて Co イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.24　ニッケル(Ni)イオン

イ オ ン 種	ニッケル (Ni)　原子番号：28
1.同位元素存在比 [11]	^{58}Ni：68.3%　^{60}Ni：26.1%　^{61}Ni：1.13%　^{62}Ni：3.59%　^{64}Ni：0.91%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.6eV[12]　最大電離断面積：5.5(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1453℃[13]　沸点：2730℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$NiCl_2$(粒状)　融点 1001℃[13]　沸点 973℃(昇華) [13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 435℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 2.2A　アーク電流 0.1 A
6.ビーム電流	エネルギー300keV で 4.2μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	アウトガスは多く、オーブン 200℃程度までは特に多い ガス出しは約２時間半で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 4μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない。引出電極に Ni が多く付着して連続放電を起こすので、運転後は必ず引出電極を交換する 運転後の引出電極及びイオン源は、大気中に数時間置いておくと、表面に付着した $NiCl_2$ が水分を吸い、濡れた状態になる
11.その他	$NiCl_2$ は密封して保管する

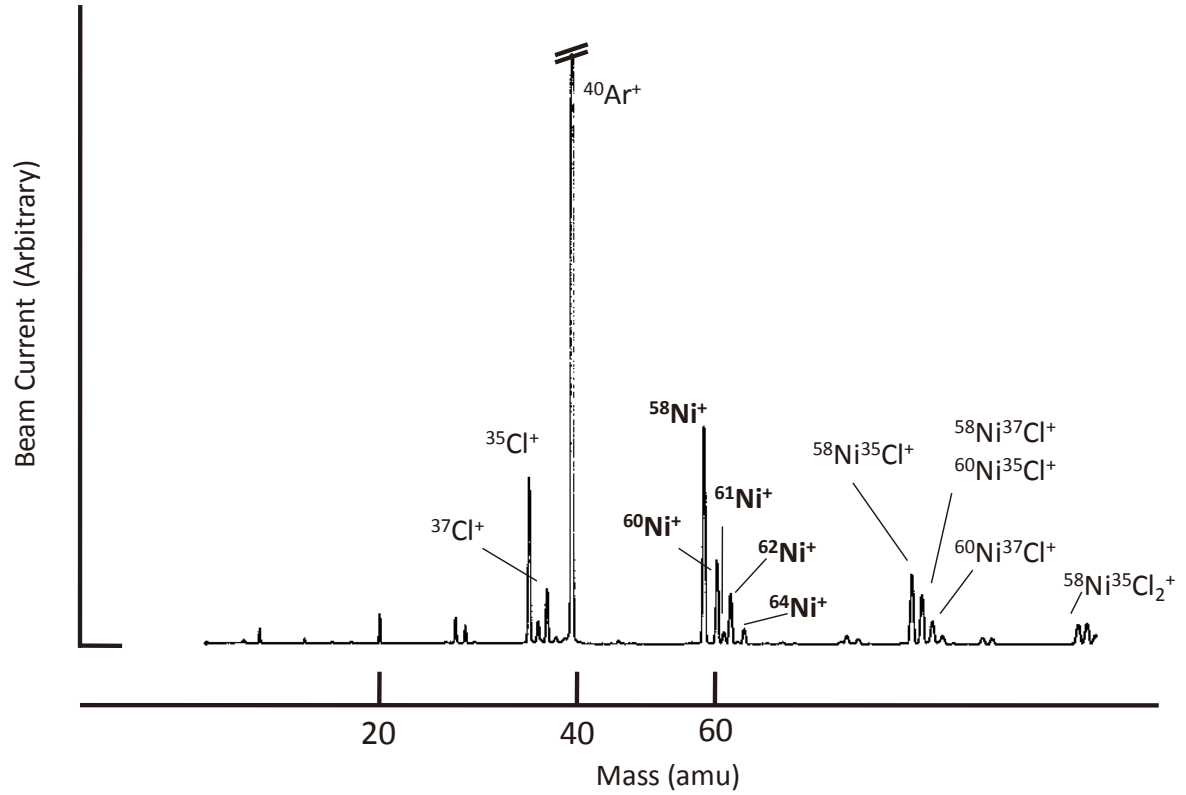


図 59　$NiCl_2$ を用いて Ni イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.25　銅(Cu)イオン

イ オ ン 種	銅 (Cu)　原子番号：29
1.同位元素存在比 [11]	^{63}Cu：69.2%　^{65}Cu：30.8%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.7eV[12]　最大電離断面積：3.8(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1083℃[13]　沸点：2595℃[13]
3.イオン生成方式	低温オーブン方式
4.試料	CuCl(白色の粉末)　劇物　融点 422℃[13]　沸点 1366℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 390℃　Ar ガス流量 0.35cc/min ソースマグネット電流 2.4A　アーク電流 0.13A
6.ビーム電流	エネルギー100keV で 12μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	塩化物の中ではアウトガスは少なく、ガス出しは約 2 時間半で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 12μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない 引出電極に多少 Cu が付着する
11.その他	CuCl は劇物であり、イオン源への組込みや運転後のイオン源クリーニング作業は、ドラフト内で定められた手順通りに行う

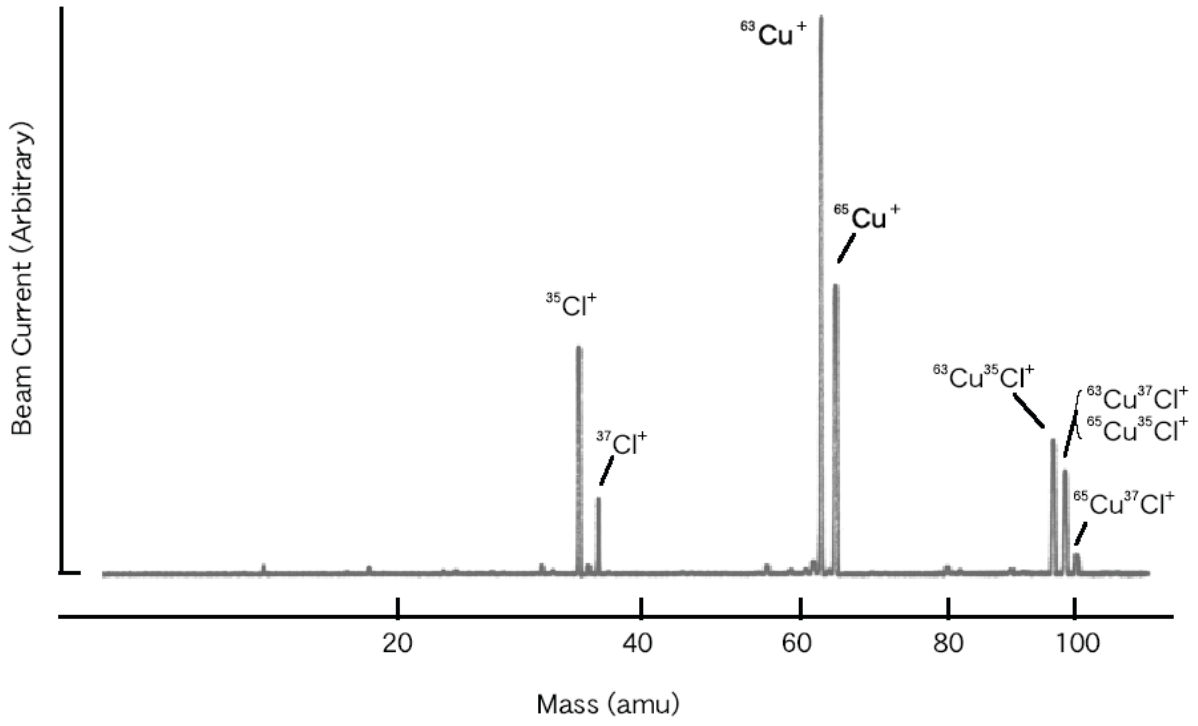


図 60　CuCl を用いて Cu イオンを生成したときのマススペクトル

$^{63}Cu^+$が 12μA に対し、$^{65}Cu^+$は 5μA で、同位元素存在比とほぼ同じ割合である

5.1.26　ゲルマニウム(Ge)イオン

イ オ ン 種	ゲルマニウム (Ge)　原子番号：32
1.同位元素存在比 [11]	^{70}Ge:20.5%　^{72}Ge:27.4%　^{73}Ge:7.8%　^{74}Ge:36.5%　^{76}Ge:7.8%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.1eV[12]　最大電離断面積：5.7(10^{-16} cm^2) [12] 融点：959℃[13]　沸点：2830℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6プラズマ方式
4.試料	Ge ディスク(10mmφ×3mmt)　SF_6(5%)+Ar(95%)混合ガス
5.運転パラメータ	SF_6+Ar ガス流量 0.2cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 5μA
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)　数時間の生成試験のみ
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	長時間の運転は行っていないが、試験運転後の試料の状態から 10 時間は運転が可能と思われる
10.汚れ	アークチェンバ内は硫黄分らしき物質が黒く付着するため、アークチェンバ及び引出電極の清掃が必要
11.その他	Ge ディスクをフィラメントに接触させると、すぐに試料がなくなる フィラメントとディスクを離し、間に Al_2O_3 スリーブを設置し試験運転を行った結果、3 時間の安定なイオン生成を確認した

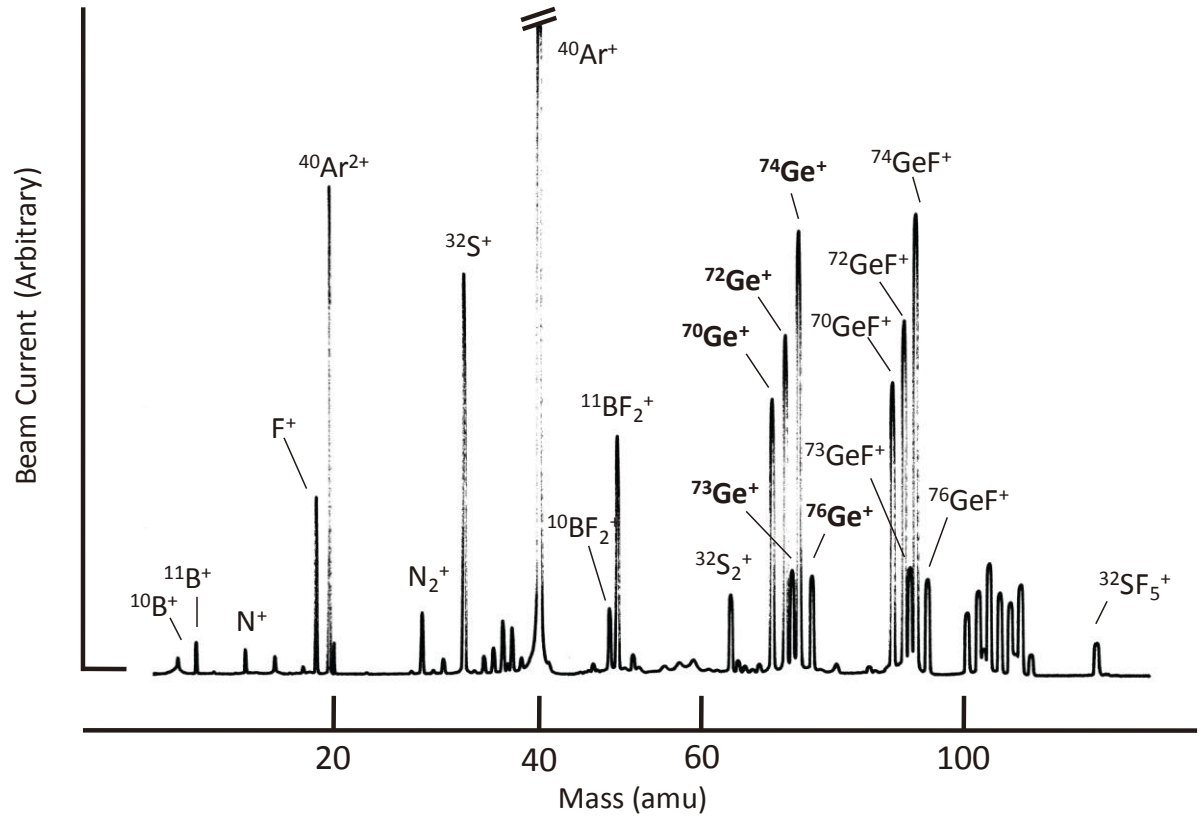


図 61　SF_6プラズマ方式により Ge イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.27　砒素(As)イオン

イ オ ン 種	砒素 (As)　原子番号：33
1.同位元素存在比 [11]	^{75}As：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：10.5eV[12]　最大電離断面積：5.0(10^{-16} cm^2) [12] 融点：817℃[13]　沸点：613℃[13]
3.イオン生成方式	低温オーブン方式
4.試料	As(粒状)　毒物
5.運転パラメータ	オーブン温度 320℃　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 30μA アーク電流 0.2A にすると 100μ A 生成可能
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 30μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では汚れは少ない方である
11.その他	砒素は毒物であり、その取り扱いや管理、運転後のイオン源保守の厄介さを考慮し、現在は As イオンの利用は行なっていない

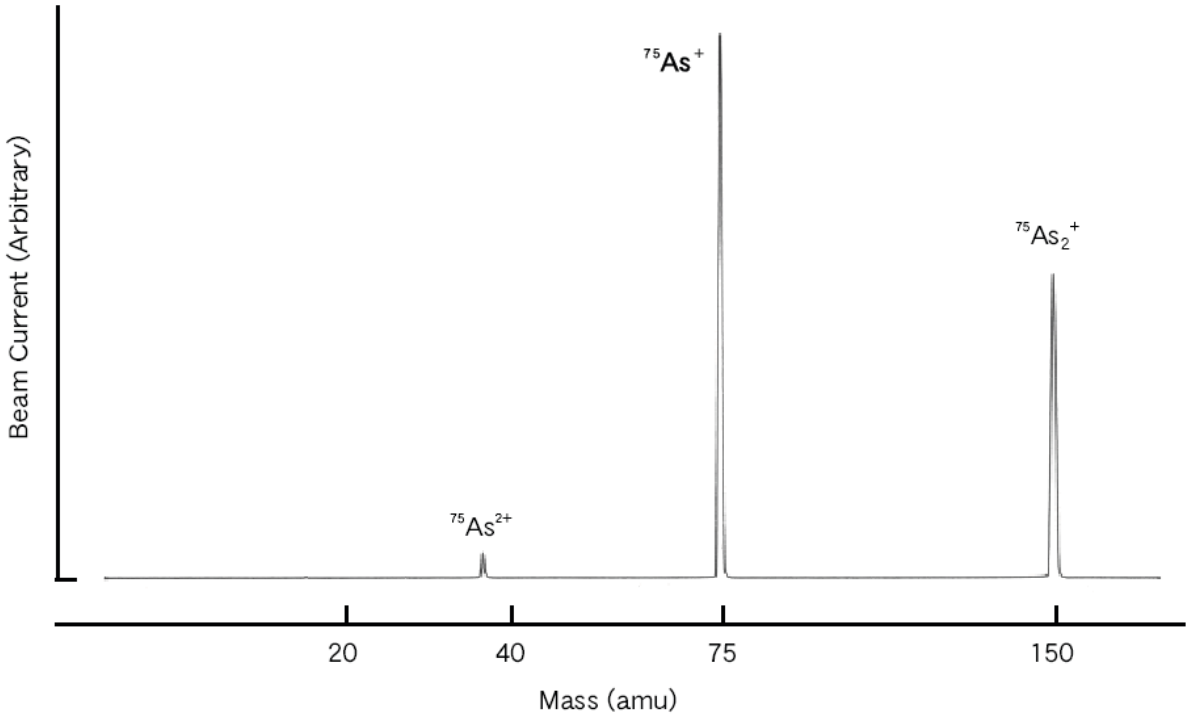


図 62　固体状 As を用いて As イオンを生成したときのマススペクトル

As^+が 75μA 生成時、As_2^+はその半分以上の 42μA 生成している

5.1.28　クリプトン(Kr)イオン

イ オ ン 種	クリプトン(Kr)　原子番号：36
1.同位元素存在比 [11]	^{78}Kr：0.356%　^{80}Kr：2.27%　^{82}Kr：11.6%　^{83}Kr：11.5%　^{84}Kr：57.0% ^{86}Kr：17.3%
2.元素単体の性状	電離電圧：13.9eV[12]　最大電離断面積：4.1(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-157℃[13]　沸点：-153℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	Kr ガス　99.995%(purity)
5.運転パラメータ	ガス流量 0.2cc/min　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200 keV で約 32μA アーク電流を上げると 100μA まで生成可能
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 30μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 5 日である
10.汚れ	フィラメントから発生した金属片が付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	同位体数が多く質量差が接近しているため、加速イオン種が目的の質量数であることを確認する

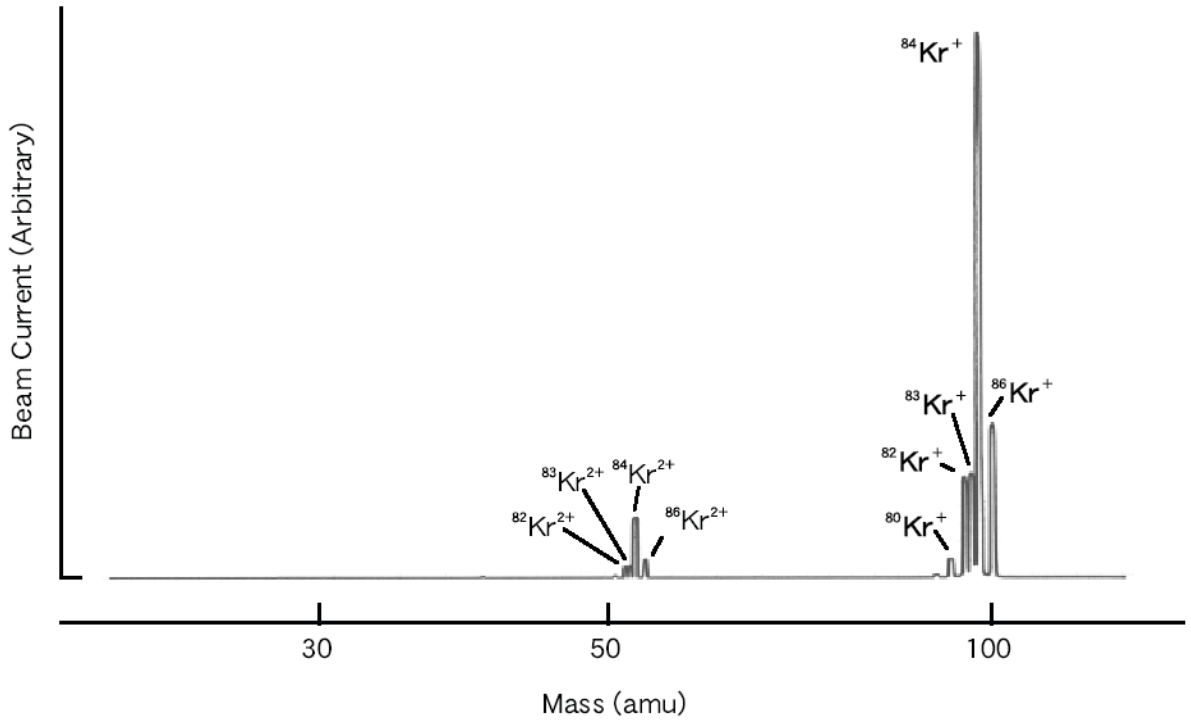


図 63　Kr ガスを用いて Kr イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.29　ニオブ(Nb)イオン

イ オ ン 種	ニオブ(Nb)　原子番号：41
1.同位元素存在比 [11]	^{93}Nb：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.9eV[12]　最大電離断面積：7.7(10^{-16} cm^2) [12] 融点：2468℃[13]　沸点：4742℃[13]
3.イオン生成方式	フィラメント方式
4.試料	Nb フィラメント(2mmφ×83mm)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.2cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 100nA アーク電流 0.4A で 6μA まで生成可能　(短寿命)
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)　ビーム電流はゆっくりと増加傾向
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 2μA 生成時、フィラメント寿命は約 14 時間である ビーム電流 5μA 生成時は約 7 時間である　(図 29 参照)
10.汚れ	フィラメントから発生した金属片が付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	SF_6 プラズマ方式により Nb イオンを生成することも可能である

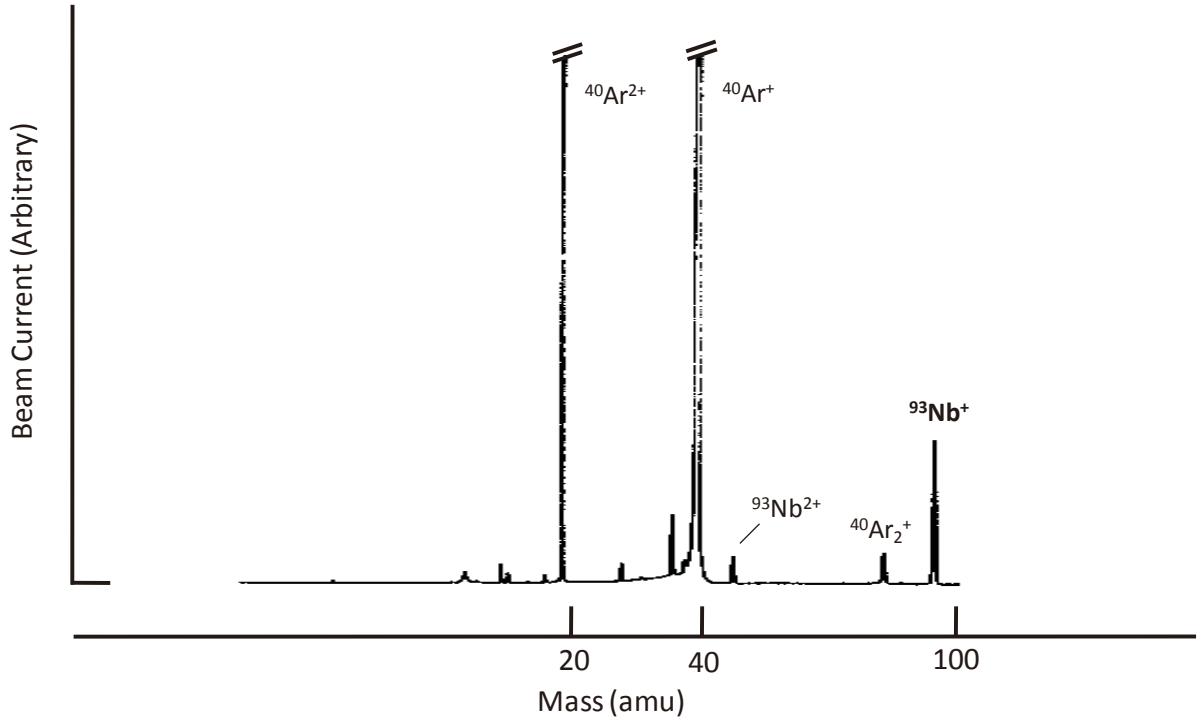


図 64　Nb フィラメントを用いて Nb イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.30　モリブデン(Mo)イオン

イ オ ン 種	モリブデン(Mo)　原子番号：42
1.同位元素存在比 [11]	^{92}Mo：14.8%　^{94}Mo：9.3%　^{95}Mo：15.9%　^{96}Mo：16.7%　^{97}Mo：9.6% ^{98}Mo：24.1%　^{100}Mo：9.6%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.4eV[12)]　最大電離断面積：6.9(10^{-16} cm^2) [12)] 融点：2610℃[13)]　沸点：5560℃[13)]
3.イオン生成方式	フィラメント方式
4.試料	Mo フィラメント(2mmφ×83mm)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.4cc/min　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.64A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 3.5μA(短寿命)
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)　ビーム電流はゆっくりと増加傾向
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	長時間の運転は行なっていないが、Nb フィラメントと同程度と考えられる　(アーク電流 0.1A で約 14 時間)
10.汚れ	フィラメントから発生した金属片が付着するが、汚れは非常に少ない
11.その他	同位体が近接しているため、加速イオン種が目的の質量数であることを確認する

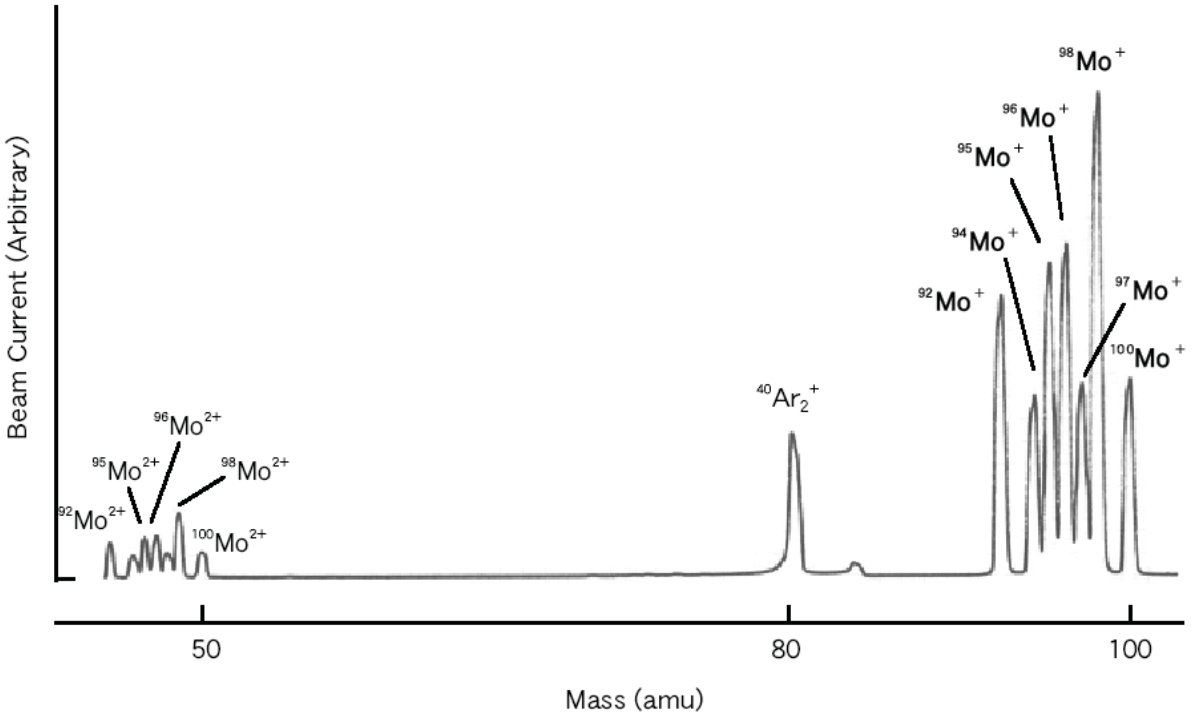


図 65　Mo フィラメントを用いて Mo イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.31　銀(Ag)イオン

イ オ ン 種	銀 (Ag)　原子番号：47
1.同位元素存在比 [11]	^{107}Ag：51.83%　^{109}Ag：48.17%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.5eV[12]　最大電離断面積：5.1(10^{-16} cm^2) [12] 融点：961℃[13]　沸点：2210℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	AgCl(粒状)　融点 455℃[13]　沸点 1550℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 580℃　Ar ガス流量 0.3cc/min ソースマグネット電流 1.8A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー350keV で 6μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	オーブン 300℃程度までは特に多いが、それ以上では減少する ガス出しは 2 時間半程度で完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 6μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ない 引出電極に多少 Ag が付着する程度
11.その他	質量数 107 と 109 は存在比が同程度なので、加速イオン種が目的の質量数であることを確認する

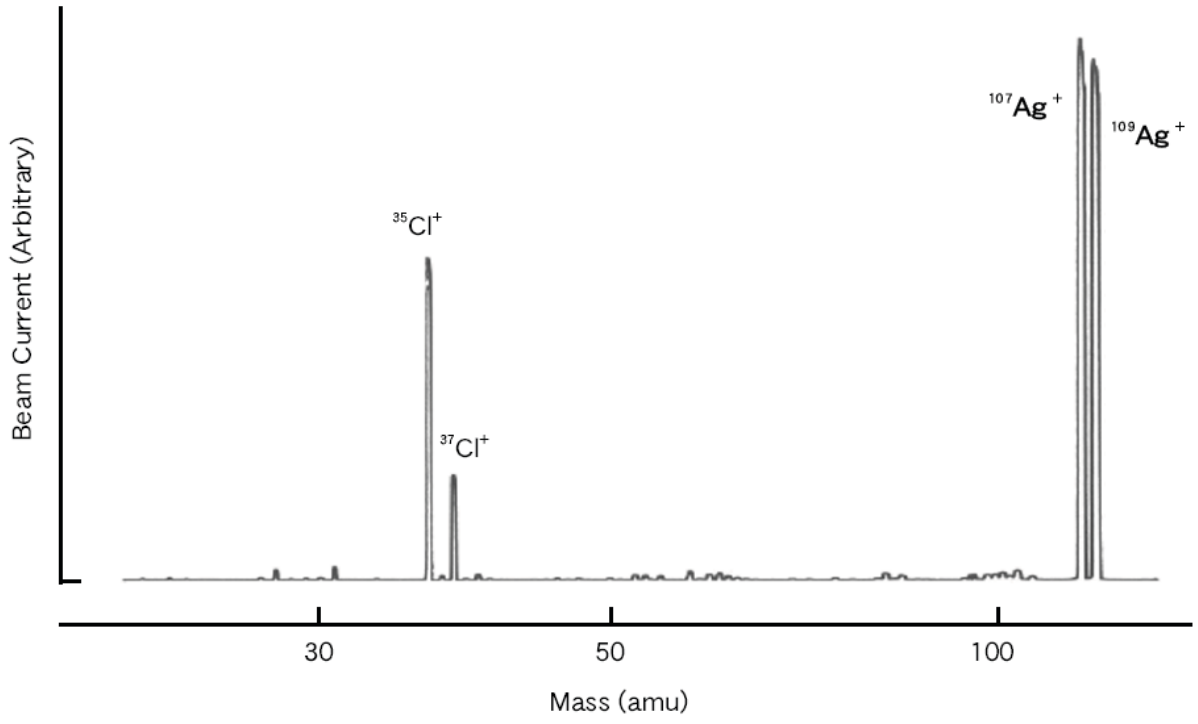
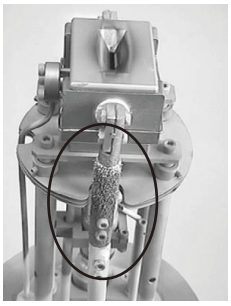


図 66　AgCl を用いて Ag イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.32　アンチモン(Sb)イオン

イ オ ン 種	アンチモン (Sb)　原子番号：51
1.同位元素存在比 [11]	^{121}Sb：57.3%　^{123}Sb：42.7%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.5eV[12]　最大電離断面積：7.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：631℃[13]　沸点：1750℃[13]
3.イオン生成方式	低温オーブン方式
4.試料	Sb(粒状)
5.運転パラメータ	オーブン温度 450℃　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 3.8μA
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 3μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ないが、 オーブンを高めに設定すると図 67 のように フィラメント支柱に Sb 金属が多く付着する Sb 蒸気のみでプラズマを生成できるが、 Ar でプラズマを維持し、オーブン温度を抑えるようにする  図 67　運転後のフィラメント支柱
11.その他	-

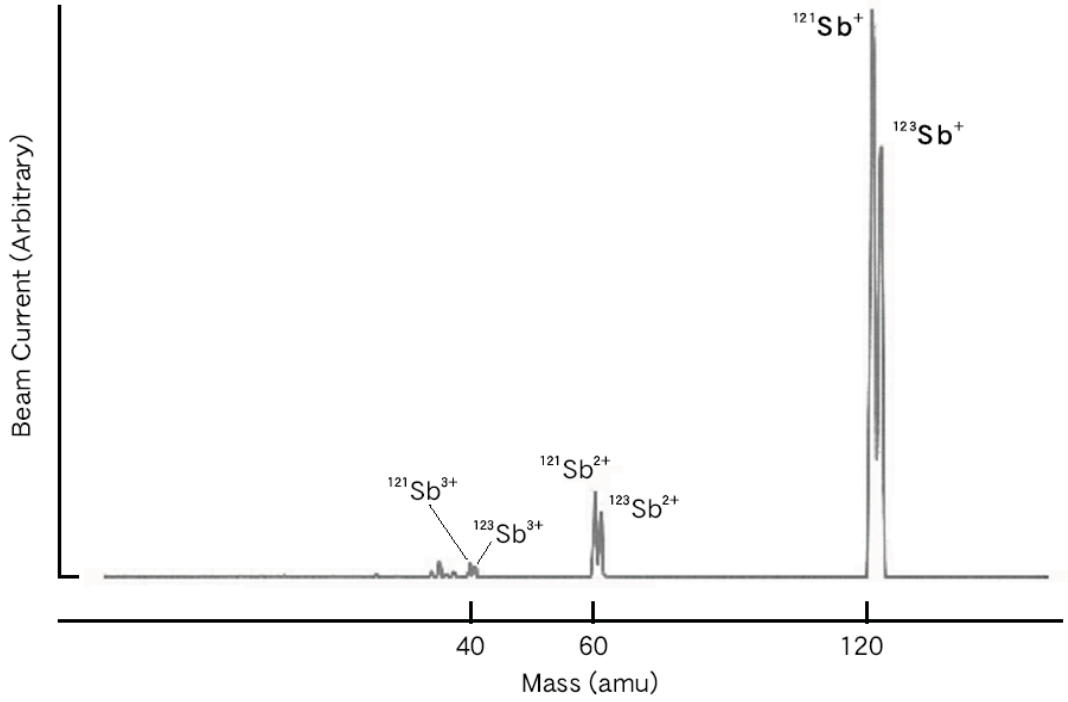


図 68　固体 Sb を用いて Sb イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.33　キセノン(Xe)イオン

イ オ ン 種	キセノン (Xe)　原子番号：54
1.同位元素存在比 [11]	^{124}Xe：0.096%　^{126}Xe：0.090%　^{128}Xe：1.92%　^{129}Xe：26.4%　^{130}Xe：4.1% ^{131}Xe：21.2%　^{132}Xe：26.9%　^{134}Xe：10.4%　^{136}Xe：8.9%
2.元素単体の性状	電離電圧：12.1eV[12]　最大電離断面積：6.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-112℃[13]　沸点：-107℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	Xe ガス
5.運転パラメータ	ガス流量 0.21cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A、
6.ビーム電流	エネルギー350keV で約 17μA
7.ビーム電流安定性	A (10%以下)　連続運転の 2 日目頃には、プラズマは安定だがビームが突然半分近く(12μA→7μA)に減少することがある。運転後のアークチェンバ内部は図 69 に示すように、フィラメントから発生したと思われる金属片が多く付着し、これがビーム減少の原因と考えている 図 69　運転後のアークチェンバ内部
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 17μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 2 日である
10.汚れ	フィラメントから発生した金属片が多く付着する
11.その他	Xe ガスと Ar ガスでは同じガス流量でもコールドカソードゲージの真空値が Ar に比べて、Xe は 2 倍程度高い数値を表示する Xe ビーム 10μA 以上で長時間ターゲットへ輸送しているときや FC やビームシャッターでビームを停止したときに、ビームラインの真空が急激に悪化し、イオンポンプ(IP)が停止することがある。IP は希ガスの排気には不向きであり、不安定な動作をすることがある。頻繁に IP が停止するようであれば、補助排気(ターボポンプ)を行う。IP を停止したときに、IP から発生するアウトガスを四重極型質量分析計で分析した結果を図 70 に示す。IP のセルに吸着していた Xe 等の希ガスが、高電圧を停止すると多く発生していた

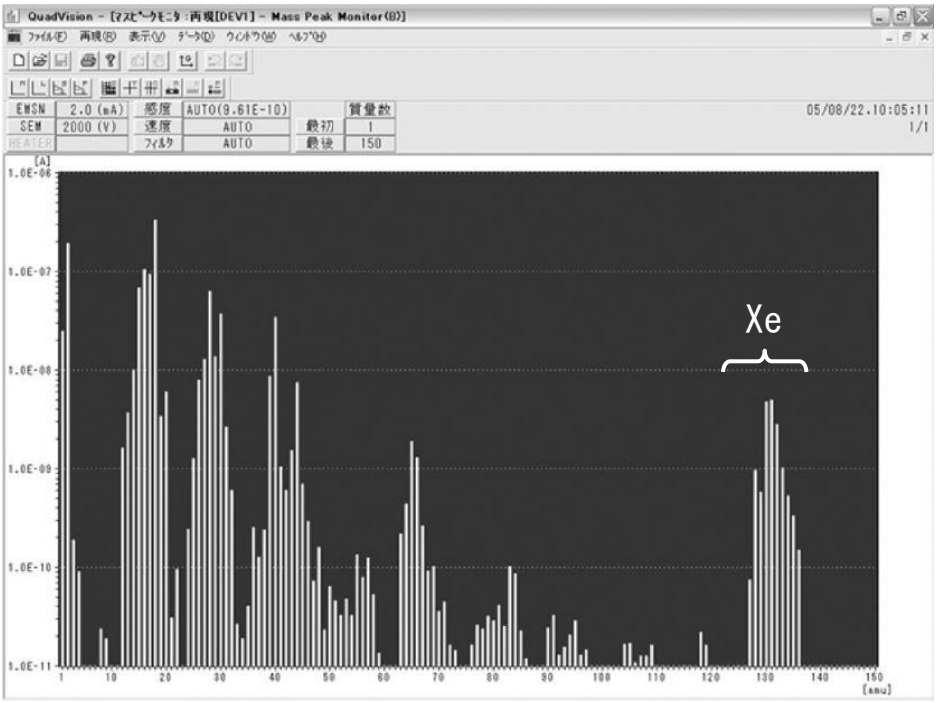


図 70　イオンポンプ停止後のビームライン中の残留ガス分析
(ANELVA M-200QA 計測)

イオンポンプ稼働中は、ほとんど Xe ピークは無かったが、
停止直後、多量の Xe ガスが発生する

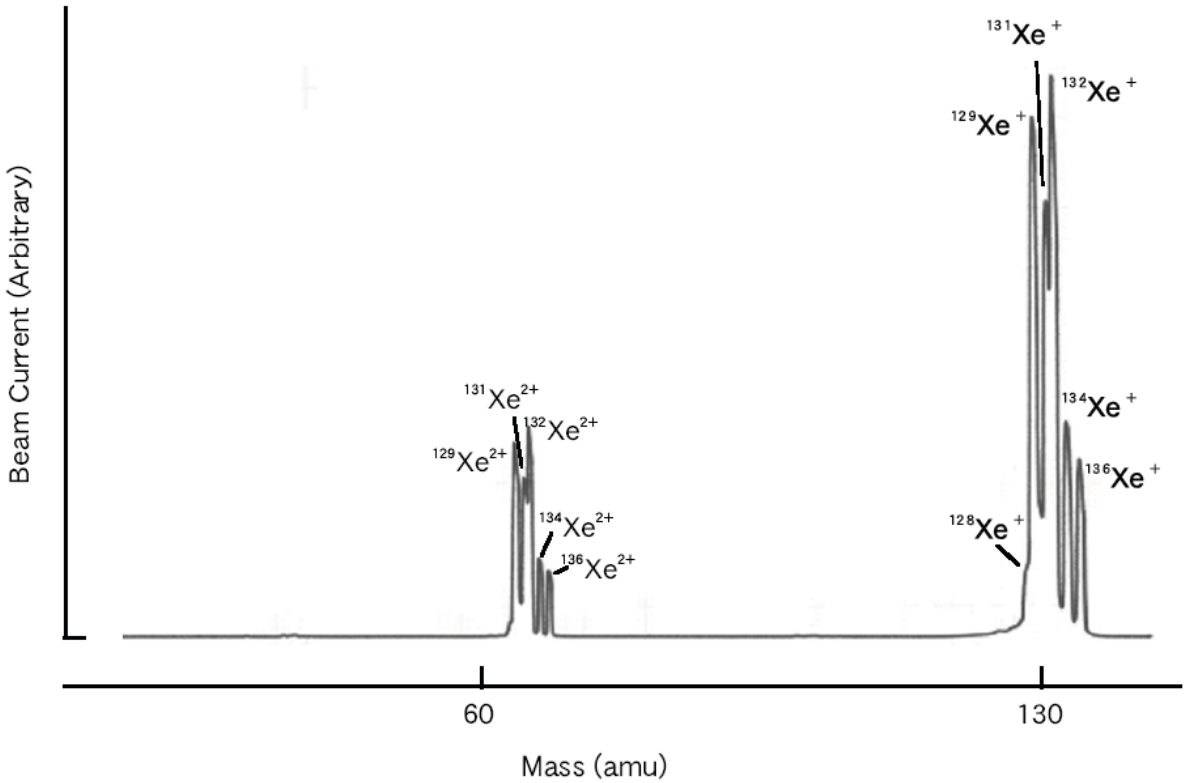


図 71　Xe ガスを用いて Xe イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.34　バリウム(Ba)イオン

イ オ ン 種	バリウム (Ba)　原子番号：56
1.同位元素存在比 [11]	^{130}Ba : 0.106%　^{132}Ba : 0.101%　^{134}Ba : 2.42%　^{135}Ba : 6.59%　^{136}Ba : 7.85% ^{137}Ba : 11. 2%　^{138}Ba : 71.7%
2.元素単体の性状	電離電圧：5.2eV[12]　最大電離断面積：17.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：725℃[13]　沸点：1640℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	Ba(板状)　パラフィン中保存
5.運転パラメータ	オーブン温度 550℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 2μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)　数時間の生成試験のみ
8.アウトガス	試料表面にパラフィンが付着しているので、オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多量に発生し、ガス出しに要する時間は約 3 時間である
9.連続使用時間	長時間の生成試験は行なっていないため不明だが、運転後のイオン源の状態から判断して、1 日の運転時間の 10 時間は可能と思われる
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ないが、引出電極に多量の Ba が付着する
11.その他	Ba はアルカリ土類金属で、パラフィン中で保管する イオン源に組み込むときは素早く行い、組み上がったイオン源は真空引きする

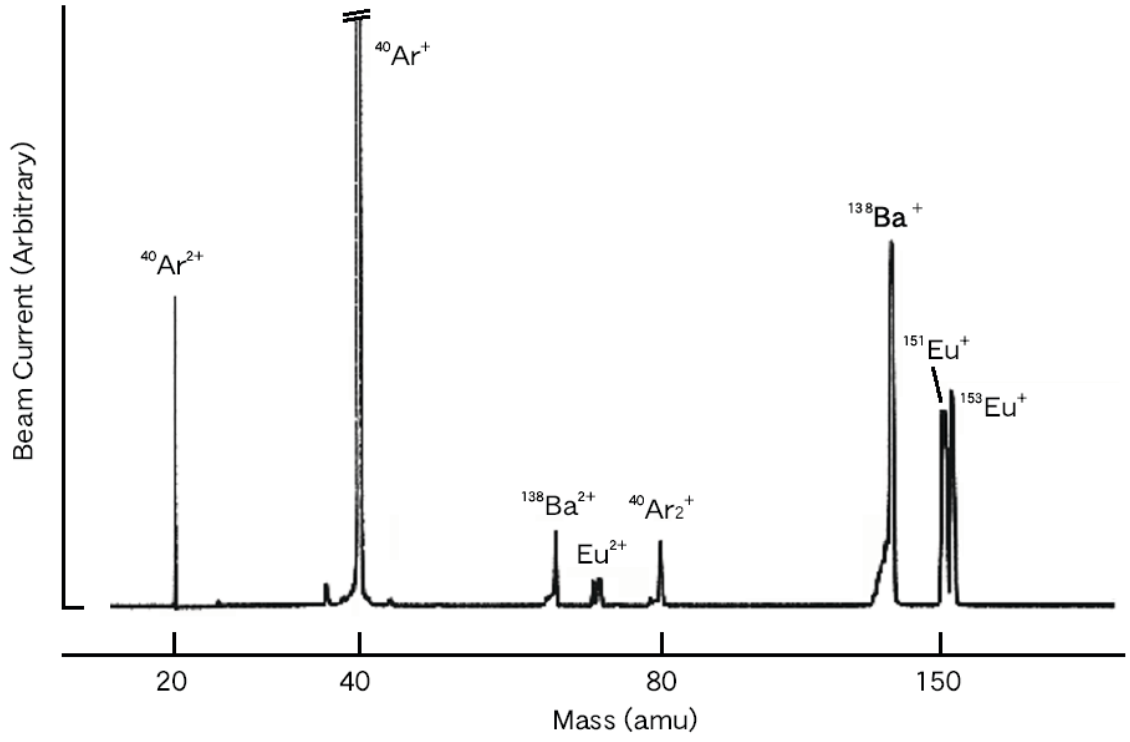


図 72　板状 Ba を用いて Ba イオンを生成したときのマススペクトル
Eu ビームピークは、前回使用時の残存付着物のためである

5.1.35　ランタン(La)イオン

イ オ ン 種	ランタン(La)　原子番号：57
1.同位元素存在比 [11]	^{138}La：0.089%　^{139}La：99.911%
2.元素単体の性状	電離電圧：5.6eV[12]　最大電離断面積：16.1(10^{-16} cm^2) [12] 融点：920℃[13]　沸点：3469℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$LaCl_3$(粒状)　融点 860℃[13]　沸点 1000℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 720℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.33A
6.ビーム電流	エネルギー390keV で約 1.5μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	塩化物の中でも特にアウトガスが多く、ガス出しに要する時間は通常 3 時間程度であるが、イオン源の組込み時に水分を吸収してしまうと、さらに時間を費やす場合もある
9.連続使用時間	ビーム電流 1.5μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少ないが、引出電極に La が多量に付着し、連続放電を起こすので、運転後は引出電極を交換する
11.その他	オーブン温度が 720℃と高いため、ヒータ線の断線の恐れあり 運転前にヒータ線を新品に巻き直す

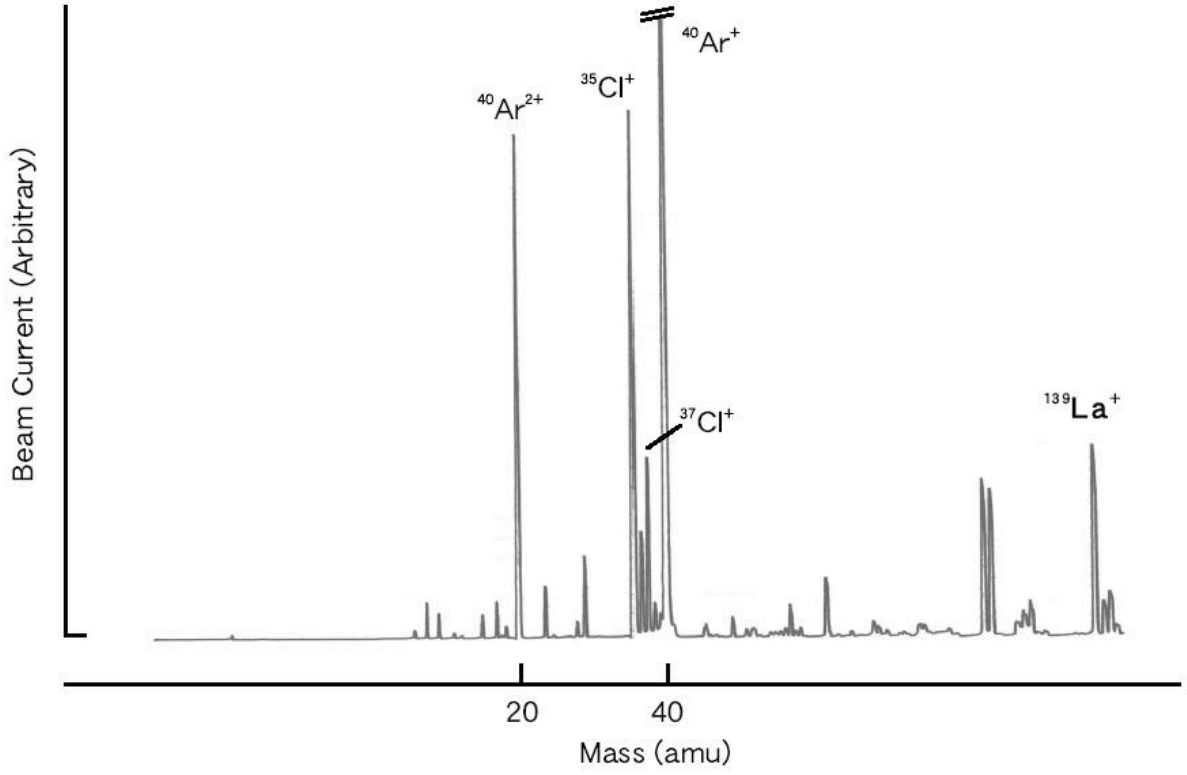


図 73　$LaCl_3$ を用いて La イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.36　セリウム(Ce)イオン

イ オ ン 種	セリウム (Ce)　原子番号：58
1.同位元素存在比 [11]	^{136}Ce:0.190%　^{138}Ce:0.254%　^{140}Ce:88.5%　^{142}Ce:11.1%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.5eV[12]　最大電離断面積：15.9(10^{-16} cm^2) [12] 融点：795℃[13]　沸点：3468℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	$CeCl_3$(白色粉末)　融点 822℃[13]　沸点 1727℃[13]
5.運転パラメータ	オーブン温度 720℃　Ar ガス 0.2cc/min ソースマグネット電流 3.0A　アーク電流 0.2A
6.ビーム電流	エネルギー300keV で 0.26μA アーク電流を 0.3A にすると 0.5μA まで生成できる
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)　ヒータ線の断線の恐れあり
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではガス放出は多いが、2 時間半程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 0.5μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは少なく、引出電極に多少 Ce が付着する程度
11.その他	オーブン温度が 720℃と高いため、ヒータ線の断線の恐れあり 運転前にヒータ線を新品に巻き直す

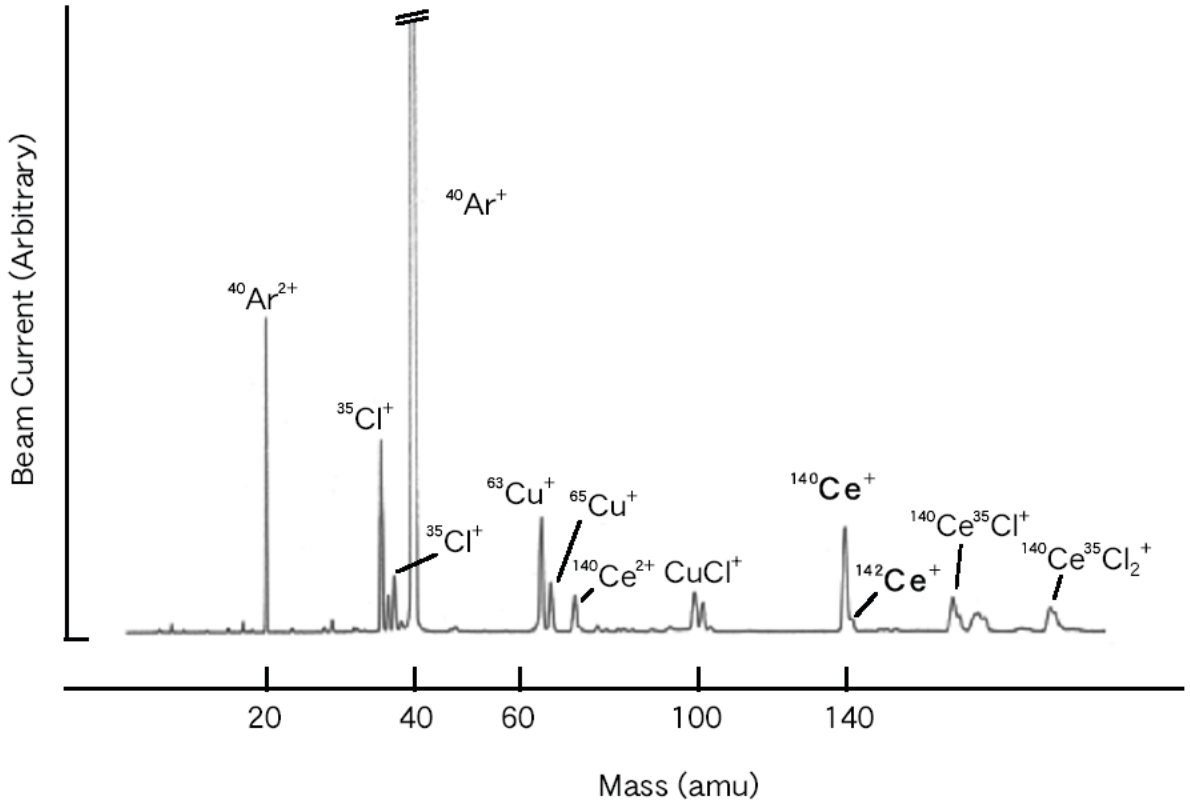
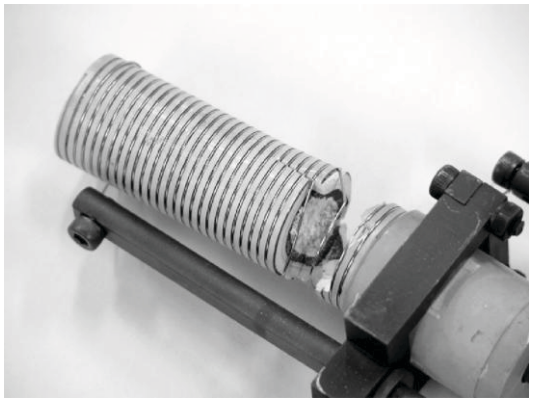


図 74　$CeCl_3$ を用いて Ce イオンを生成したときのマススペクトル
Cu イオンのピークは、前回使用時の残存付着物のためである

5.1.37　ユーロピウム(Eu)イオン

イ オ ン 種	ユーロピウム (Eu)　原子番号：63
1.同位元素存在比 [11]	^{151}Eu：47.9%　^{153}Eu：52.1%
2.元素単体の性状	電離電圧：5.6eV[12]　最大電離断面積：14.6(10^{-16} cm^2) [12] 融点：826℃[13]　沸点：1439℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	Eu(5-10mm 粒状)　パラフィン中保管
5.運転パラメータ	オーブン温度 580℃　Ar ガス流量 0.3cc/min ソースマグネット電流 3.0A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 5μA
7.ビーム電流 安定性	C (30～50%)　フィラメント電流が 80ー150A の間で大きく変動し、それに伴いビーム電流も大きく変動する場合がある。その場合、オーブン温度を上げて Eu 蒸気を増やことで安定させることができる
8.アウトガス	アウトガスは非常に多く、ガス出しに 5 時間程度要する 前日からイオン源の真空引きを行なう
9.連続使用時間	ビーム電流 5μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	アークチェンバ内の汚れは多く、特にオーブンノズル部に多く Eu が付着する。運転後のオーブンは、図 75 ように BN 絶縁部分とカーボンカートリッジが完全に割れることが多い。これは Eu 運転時のみに起こる現象で、Eu がカーボンカートリッジ内で膨張しているためと考えられる  図 75　Eu イオン生成後の破損したオーブンと Eu 試料
11.その他	ユーロピウム(Eu)は反応性の高い希土類金属で、大気中で急激に変色するためパラフィンで保管する Eu をイオン源にセットするときは、パラフィン中から取り出した Eu をガーゼ等で拭き取り、カートリッジに入る適当な大きさ(2mm 角程度)にペンチで切断する。Eu は鉛のように柔らかく、ペンチで簡単に切断することができる。ニッパーで強く切断すると火花が発生することがあるので、切断はペンチでゆっくり行う

	適当な大きさに切断した Eu をカートリッジに入れるが、半分以上入れると融解した Eu がカートリッジ出口で冷え固まり、蒸気孔をふさぐ恐れがあるので 1/3 程度にする。次に 2mm 角程度に砕いた BN(窒化ボロン)を半分以上入れる。これはアークチェンバへの Eu の突沸防止と融解した Eu の流出防止のためである アークチェンバ周辺に付着した Eu は取れにくく、サンドブラスターで時間をかけて削り取る。このとき、ガラスビーズと Eu の接触により小さな火花が発生する

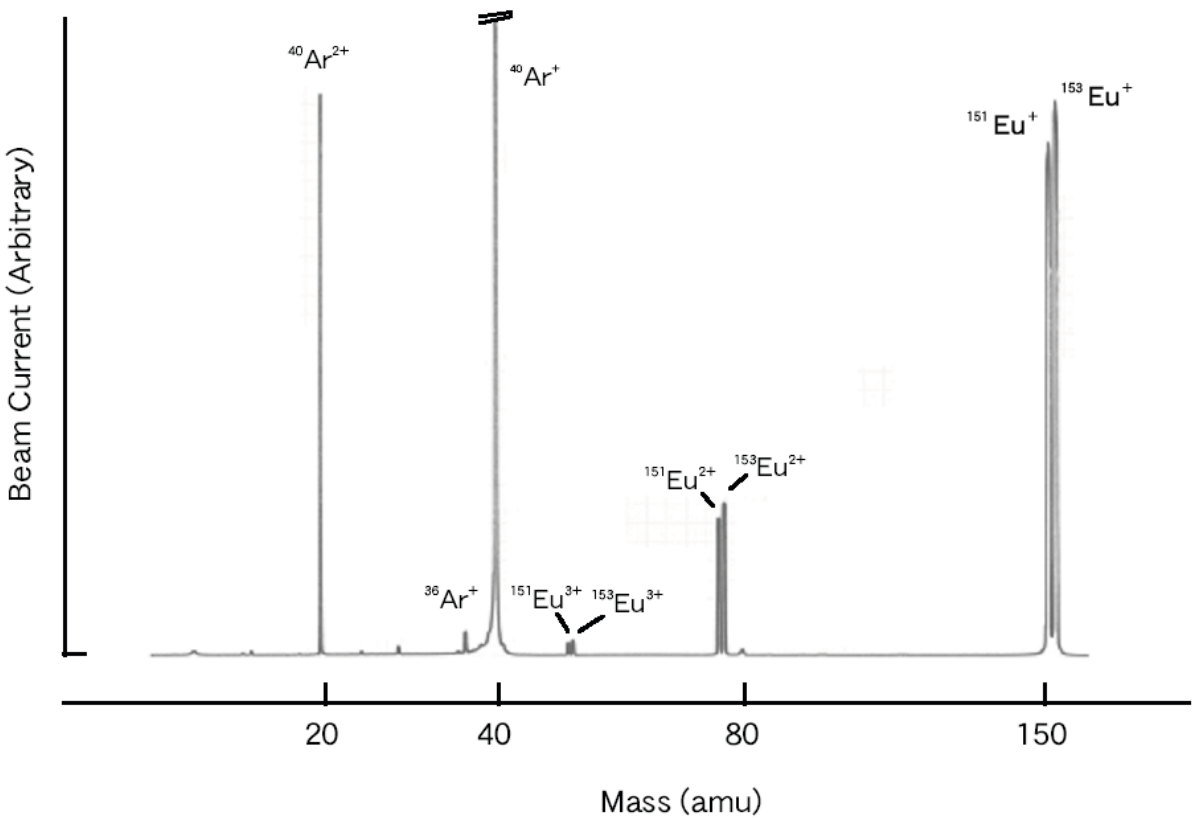


図 76　　粒状 Eu を用いて Eu イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.38　テルビウム(Tb)イオン

イ オ ン 種	テルビウム(Tb)　原子番号：65
1.同位元素存在比 [11]	^{159}Tb：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.7eV[12]　最大電離断面積：12.7(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1356℃[13]　沸点：2800℃[13]
3.イオン生成方式	ディスク方式
4.試料	Tb ディスク(10mmφ×3mmt)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.3cc/min　ソースマグネット電流 2.5 A　アーク電流 0.23A
6.ビーム電流	エネルギー100keV で 0.3μA、10 時間後には 0.02μA
7.ビーム電流安定性	D (50%以上)　時間とともにゆっくり減少する
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からガス放出が開始されるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	アーク電流 0.23A のとき、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	汚れは少ない
11.その他	Tb は溶融するため、絶縁物が受け皿状になっているものを使用する プラズマ点灯時が最も Tb ビームが得られるので、実験開始時間に合わせてプラズマを生成するようにすると効率的に提供できる

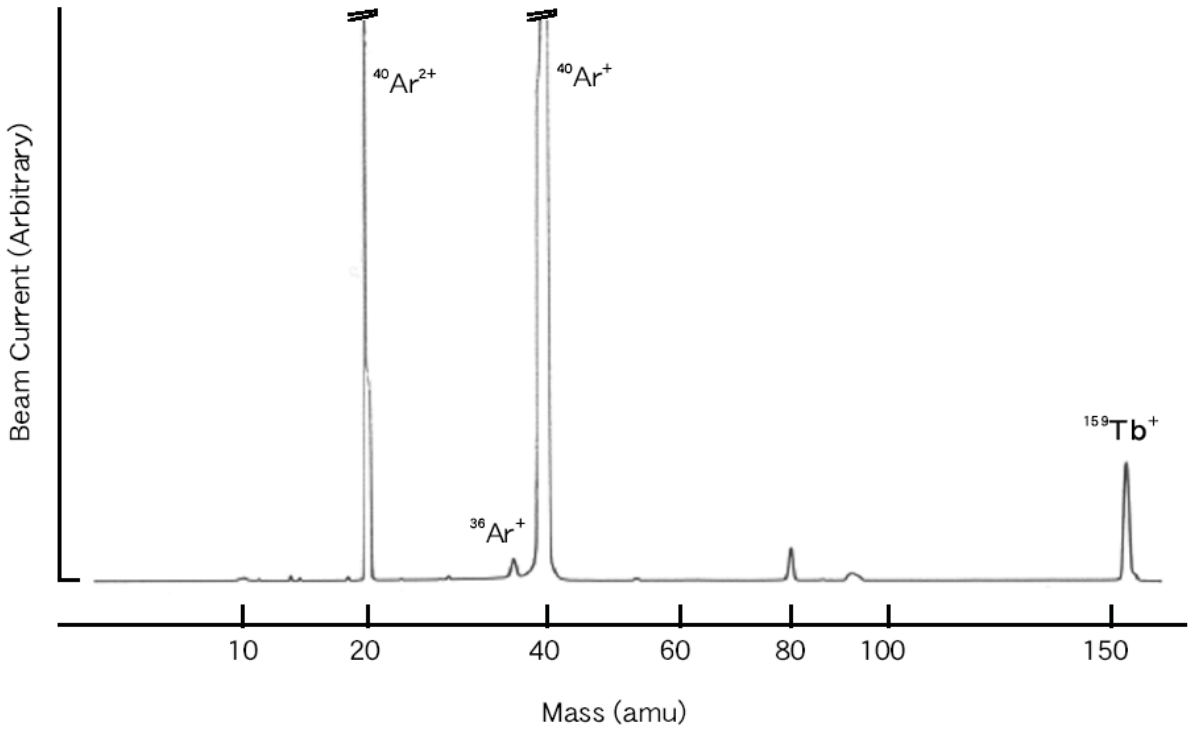


図 77　Tb ディスクを用いて Tb イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.39　エルビウム(Er)イオン

イ オ ン 種	エルビウム(Er)　原子番号：68
1.同位元素存在比 [11]	^{162}Er：0.14%　^{164}Er：1.56%　^{166}Er：33.4%　^{167}Er：22.9% ^{168}Er：27.1%　^{170}Er：14.9%
2.元素単体の性状	電離電圧：6.1eV[12]　最大電離断面積：13.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1497℃[13]　沸点：2900℃[13]
3.イオン生成方式	ディスク方式
4.試料	Er ディスク(10mmφ×3mmt)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.2cc/min　ソースマグネット電流 2.0A　アーク電流 0.18A
6.ビーム電流	エネルギー350 keV で約 1μA、10 時間後には 0.2μA
7.ビーム電流安定性	D (50%以上)　時間とともにゆっくり減少する
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	アーク電流 0.2μA のとき、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	汚れは少ない
11.その他	Er は大気中に放置しおくと、すぐに酸化してしまうため、イオン源への組込み作業は短時間で行う プラズマ点灯時が最も Er ビームが得られるので、実験開始時間に合わせてプラズマを生成するようにすると効率良く提供できる

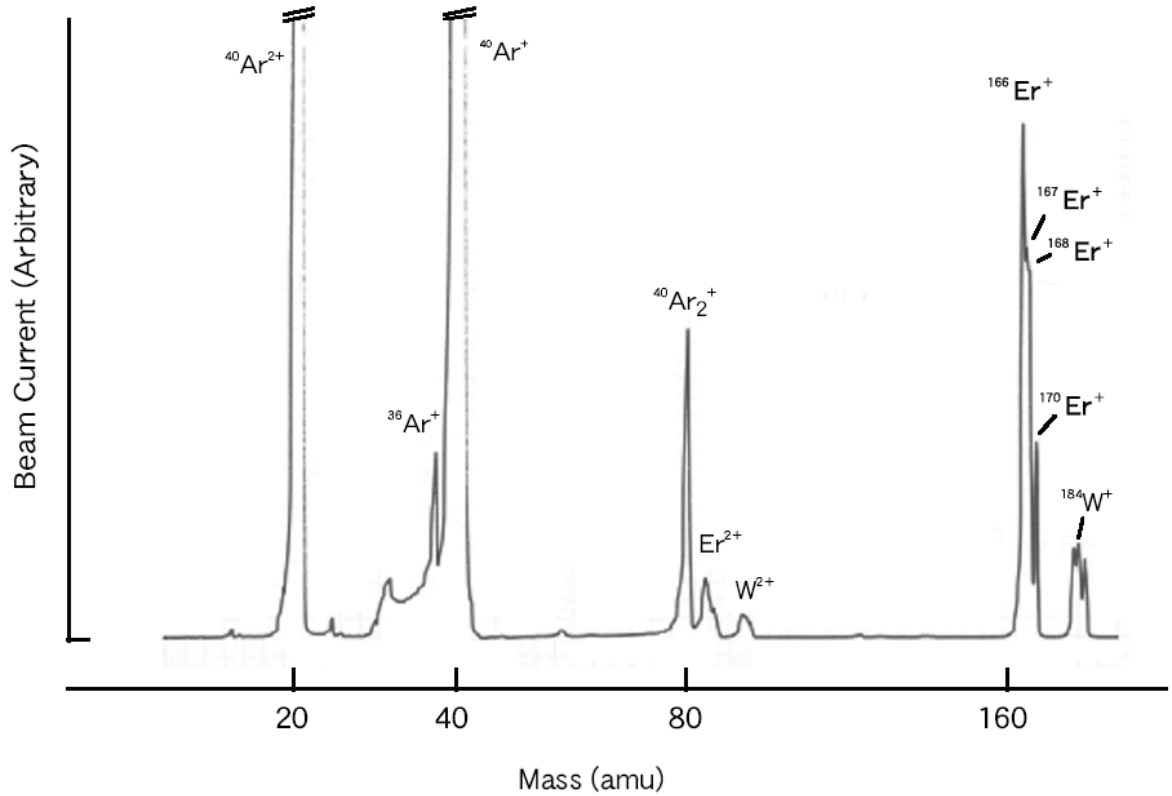


図 78　Er ディスクを用いて Er イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.40　タングステン(W)イオン

イ オ ン 種	タングステン(W)　原子番号：74
1.同位元素存在比 [11]	^{180}W：0.13%　^{182}W：26.3%　^{183}W：14.3%　^{184}W：30.7%　^{186}W：28.6%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.1eV[12]　最大電離断面積：9.2(10^{-16} cm^2) [12] 融点：3387℃[13]　沸点：5927℃[13]
3.イオン生成方式	フィラメント方式
4.試料	W フィラメント(2mmφ×83mm)
5.運転パラメータ	Ar ガス流量 0.4cc/min　ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.8A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で 1.9μA
7.ビーム電流安定性	C (30～50%)
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 1.9μA 生成時のフィラメント寿命は 5 時間が限界である ビーム電流を約 300nA に抑えることで、10 時間は生成可能である
10.汚れ	フィラメントからのタングステン金属片が多く堆積する
11.その他	タングステンは同位元素が近接しているため、特定の質量数のみを加速することは困難である

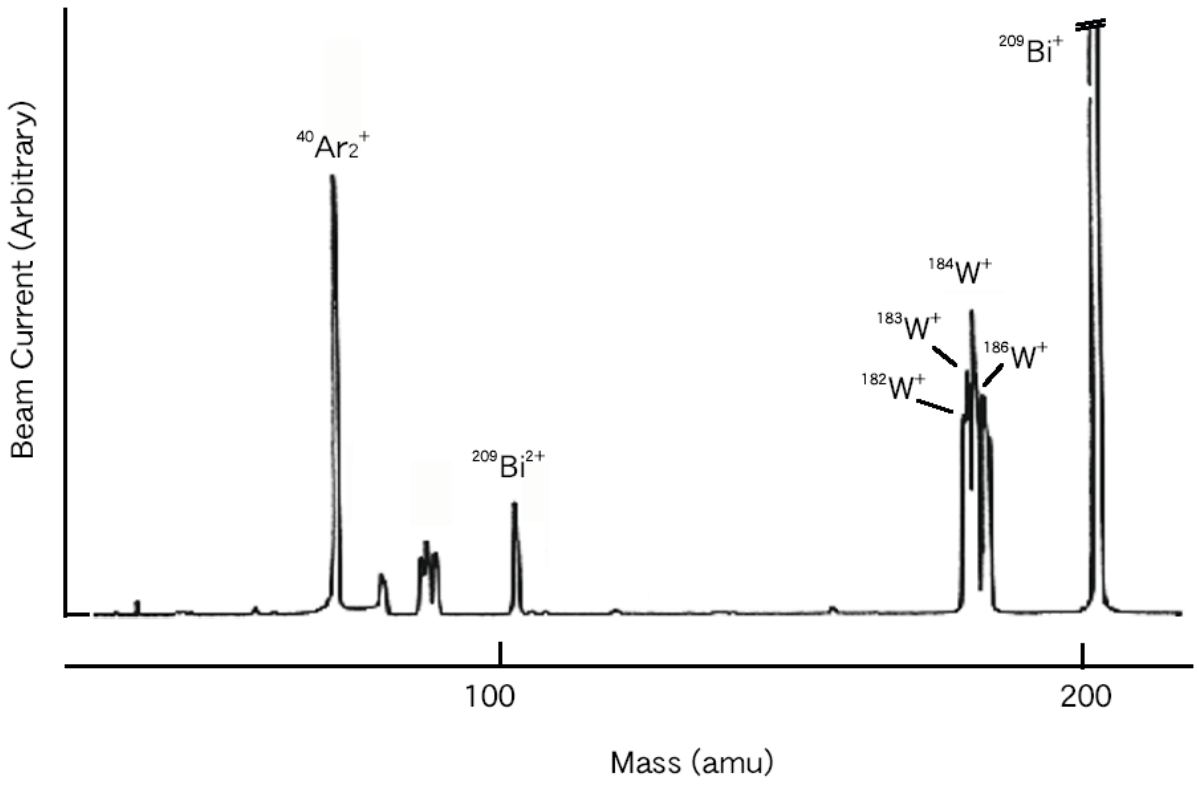


図 79　W フィラメントを用いて W イオンを生成したときのマススペクトル
Bi イオンのピークは、前回使用時の残存付着物のためである

5.1.41　白金(Pt)イオン

イ オ ン 種	白金 (Pt)　原子番号：78
1.同位元素存在比 [11]	^{190}Pt：0.013%　^{192}Pt：0.78%　^{194}Pt：32.9%　^{195}Pt：33.8% ^{196}Pt：25.3%　^{198}Pt：7.2%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.9eV[12]　最大電離断面積：6.6(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1769℃[13]　沸点：3800℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6プラズマ方式
4.試料	Pt ディスク(10mmφ×2mmt)
5.運転パラメータ	SF_6+Ar ガス流量 0.3cc/min　ソースマグネット電流 1.5A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 100nA
7.ビーム電流 安定性	C (30～50%)　ゆっくりと減少する
8.アウトガス	フィラメント電流 100A 以上からアウトガスが発生し始めるが、その量は少なく、30 分程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	アーク電流 0.15A のとき、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	混合ガスの SF_6 割合を減らし、汚れを軽減しているが、それでも 1 日(10 時間)運転した後は、アークチェンバ内は硫黄分らしき物質が黒く付着するため、アークチェンバ及び引出電極の清掃が必要
11.その他	同位元素が接近しているため、特定の質量数のみを加速することは困難

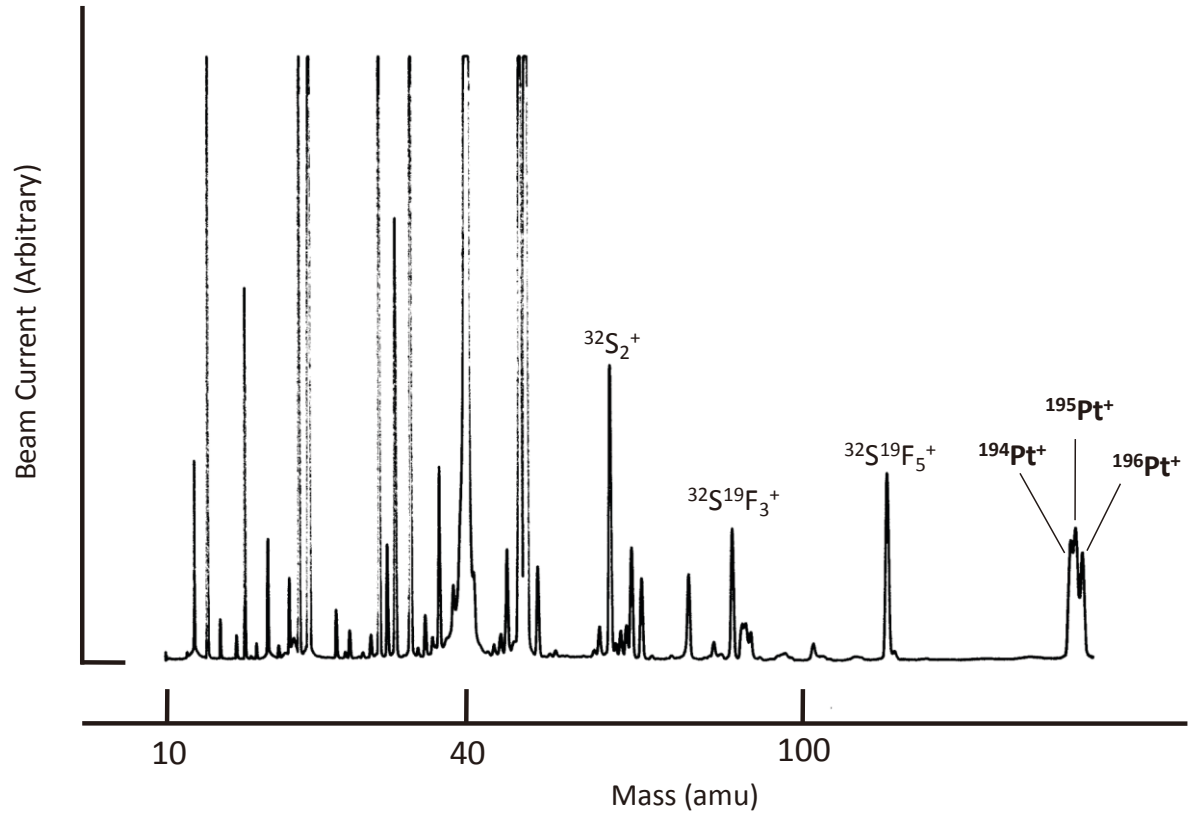


図 80　SF_6プラズマ方式により Pt イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.42　鉛(Pb)イオン

イ オ ン 種	鉛(Pb)　原子番号：82
1.同位元素存在比 [11]	^{204}Pb：1.42%　^{206}Pb：24.1%　^{207}Pb：22.1%　^{208}Pb：52.3%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.4eV[12]　最大電離断面積：7.9(10^{-16} cm^2) [12] 融点：327℃[13]　沸点：1740℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	Pb(粒状)
5.運転パラメータ	オーブン温度 510℃　Ar ガス流量 0.2cc/min ソースマグネット電流 1.5 A　アーク電流 0.1A
6.ビーム電流	エネルギー200keV で約 1.6μA
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	生成試験にて 5 時間連続で生成可能なことを確認した
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では汚れは少ない
11.その他	鉛は同位元素が近接しているため、特定の質量数のみを加速することは困難である

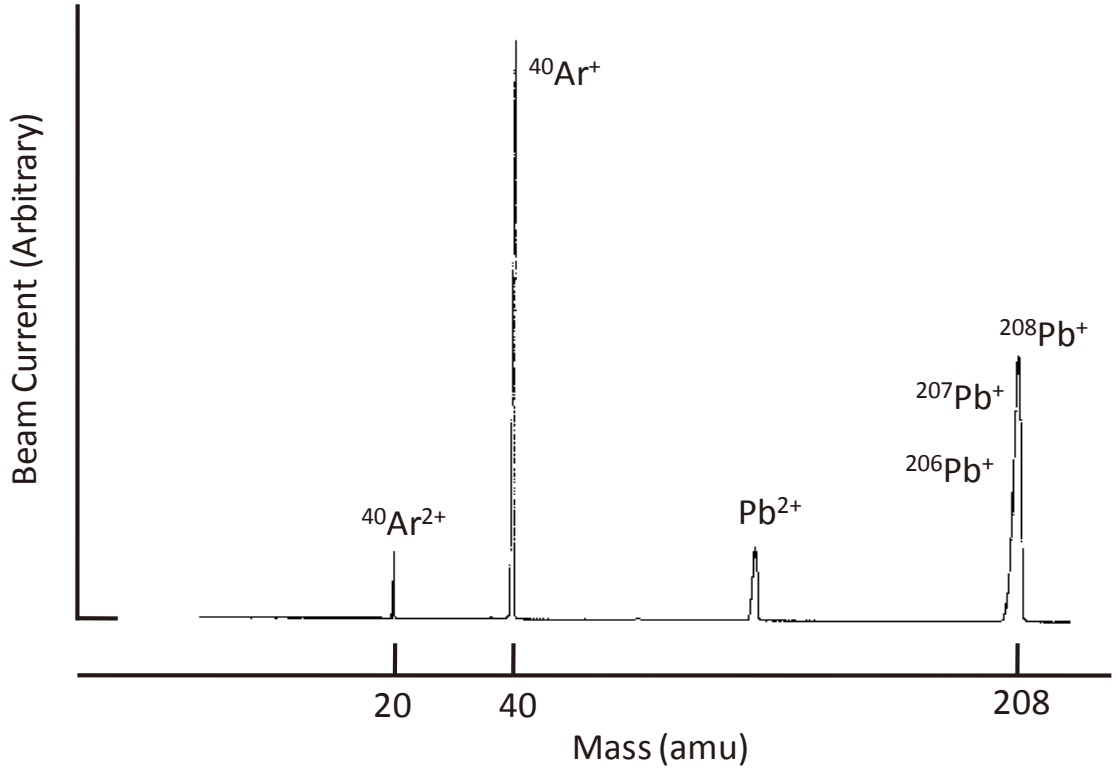


図 81　粒状 Pb を用いて Pb イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.43　ビスマス(Bi)イオン

イ オ ン 種	ビスマス(Bi)　原子番号：83
1.同位元素存在比 [11]	^{209}Bi：100%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.0eV[12]　最大電離断面積：17.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：271℃[13]　沸点：1447℃[13]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	Bi(粒状)
5.運転パラメータ	オーブン温度 585℃　Ar ガス流量 0.3cc/min ソースマグネット電流 2.0 A　アーク電流 0.1 A
6.ビーム電流	エネルギー200 keV で約 10μA
7.ビーム電流安定性	B (10～30%)
8.アウトガス	オーブン温度 150℃程度まではアウトガスが多く発生するが、2 時間程度でガス出しは完了する
9.連続使用時間	ビーム電流 10μA 生成時、1 日あたり 10 時間の運転で 1 日である
10.汚れ	オーブン方式を利用するイオン種の中では汚れは少ない
11.その他	質量数が大きいため、引出電圧を 13kV 以下にしなければ輸送できない

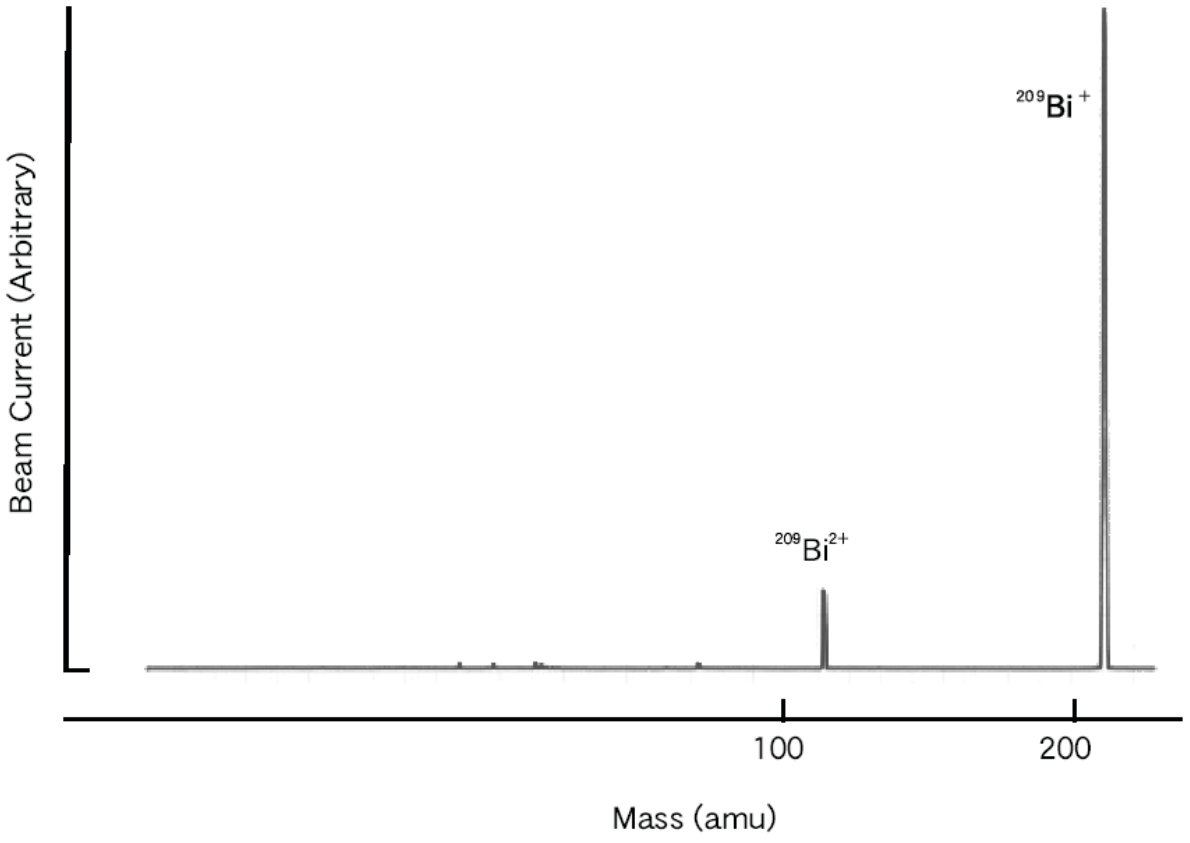
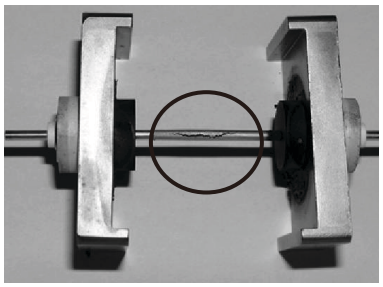
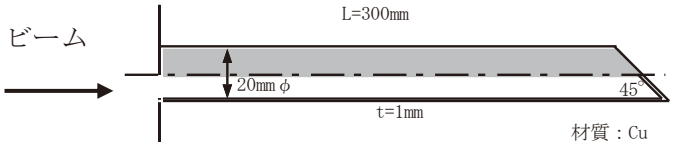


図 82　粒状 Bi を用いて Bi イオンを生成したときのマススペクトル

5.1.44　フラーレン(C_{60})イオン

イ オ ン 種	C_{60}(フラーレン)
1.同位元素存在比 [11]	-
2.元素単体の性状	分子量:720.66[14]　　融点:1180 ℃[14] 電子衝撃による電離断面積:(38eV) $(53.5\pm5.6)\times10^{-20}m^2$ [15] 電離ポテンシャル:8.1±0.5eV[15] or 7.6±0.2eV[16]
3.イオン生成方式	高温オーブン方式
4.試料	C_{60}(顆粒、99.5%)、10 時間運転の場合 0.2g を使用する
5.運転パラメータ	オーブン温度 430℃　Ar ガス流量 0.2 cc/min　ソースマグネット電流 0.8A
6.ビーム電流	アーク電流 0.1A　エネルギー350keV で 0.1μA(図 89 の FC で計測)
7.ビーム電流 安定性	C (30～50%)　オーブン温度を 460℃以下すれば、多少の減少はあるが 10 時間の運転が可能。オーブン温度が約 500℃ではビーム電流が最大になるが、すぐに減少し、3 時間後にはほぼ無くなる
8.アウトガス	オーブン温度 120℃までは、多少アウトガスは発生するが、急激なアウトガスはなく、約 2 時間でガス出しは完了する
9.連続使用時間	オーブン温度 460℃の場合、1 日あたり 10 時間運転で 1 日である
10.汚れ	CO_2 運転より汚れは激しく、アークチェンバ内にカーボンが多く堆積してしまい絶縁が保てなくなる 図 83　運転後のアークチェンバ内部 カーボンがフィラメント表面に付着し、 それが剥がれ落ちた形状
11.その他 1 (フィラメント)	C_{60}イオン発生後は、タングステンフィラメントの中心部に必ず亀裂が入る(図 84)。この状態でも使用は可能であるが、タンタルフィラメントでは、この現象が起こらないのでタンタルフィラメントの使用を推奨する  図 84　運転後のタングステンフィラメント
その他 2 (ビーム計測)	通常のサプレッサー付き FC ではクラスターイオンによって FC がスパッタされ、そのために正の二次イオンが FC 側から大量に放出されることによって測定されるビーム電流の値は正イオン計測であるのも関わらずマイナスの値を示す。したがって、二次電子抑制用サプレッサー電極(-500V)をグ

	ランド電位にして二次プラスイオンの引き出しを抑えることでプラスの値として計測する。しかし、サプレッサー電位が無いために発生した二次電子が抑制できないため増幅された値として計測される。従って、通常の FC では電流変化の相対値としてのみの測定が可能である。正確なビーム電流値を計測するには、図 85 に示すような開口径に対して、深さが充分あり、サプレッサーが無くても発生した二次電子や二次イオンが FC から逃げにくい構造のものを用いる  図 85　クラスター用 FC
その他 3	質量数が 720 と非常に大きいので、分析電磁石の性能上、引出電圧 4kV に下げなければ C_{60}^{+}は選別できない

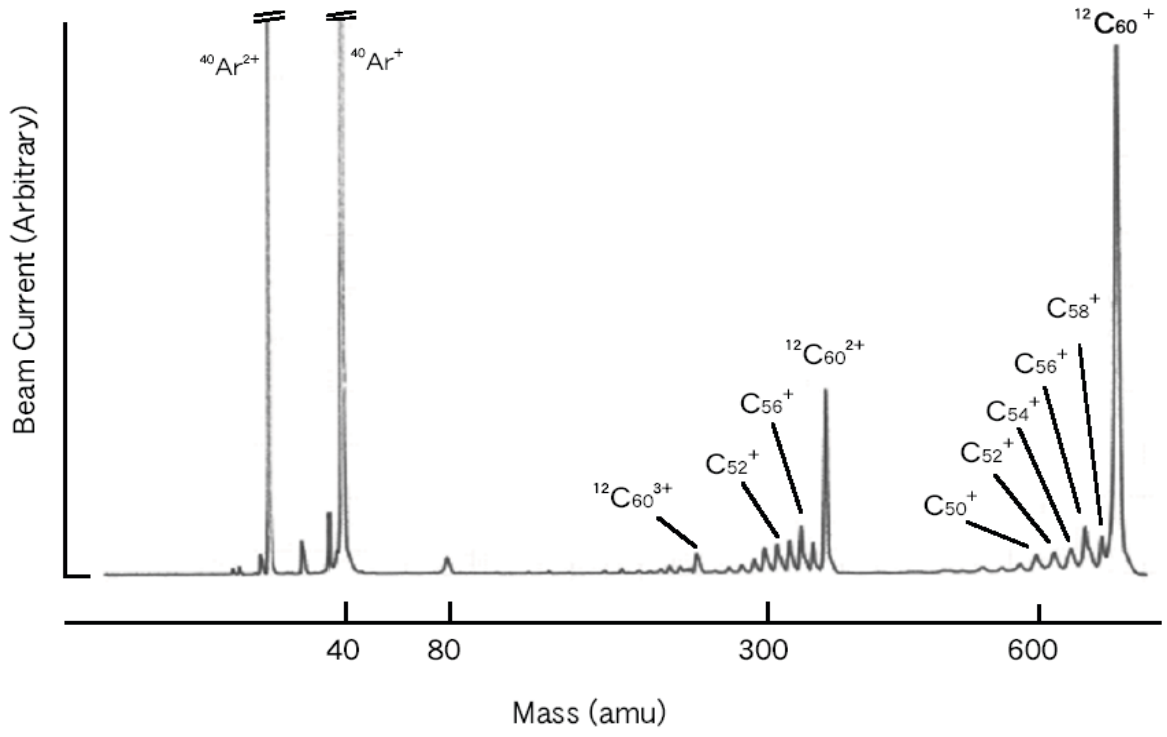


図 86　C_{60} を用いてオーブン方式により C_{60} イオンを生成したときのマススペクトル

$^{12}C_{60}^{+}$が最も多く、C_{58}、C_{56}、C_{54}…と $^{12}C_2$(24amu)ずつ解離したフラグメントイオンが確認できる

5.2 MINI-ECR イオン源

5.2.1 ボロン多価イオン (B^{n+})

イ オ ン 種	ホウ素 (B)　原子番号：5
1.同位元素存在比 [11]	^{10}B：19.8%　^{11}B：80.2%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.3eV[12]　最大電離断面積：2.6(10^{-16} cm^2) [12] 融点：2100℃[13]　沸点：2600℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6プラズマ方式
4.試料	BN(窒化ボロン)ディスク　(28mmφ×6mmφ×1mmt)
5.運転パラメータ	フォーカス電圧 2.5kV　SF_6ガス流量 0.0034cc/min
6.ビーム電流	1.5eμA ($^{10}B^+$)　5.8eμA($^{11}B^+$)　0.4eμA($^{10}B^{2+}$)　1.6eμA($^{11}B^{2+}$)
7.ビーム電流 安定性	-
8.アウトガス	-
9.連続使用時間	-
10.汚れ	-
11.その他	-

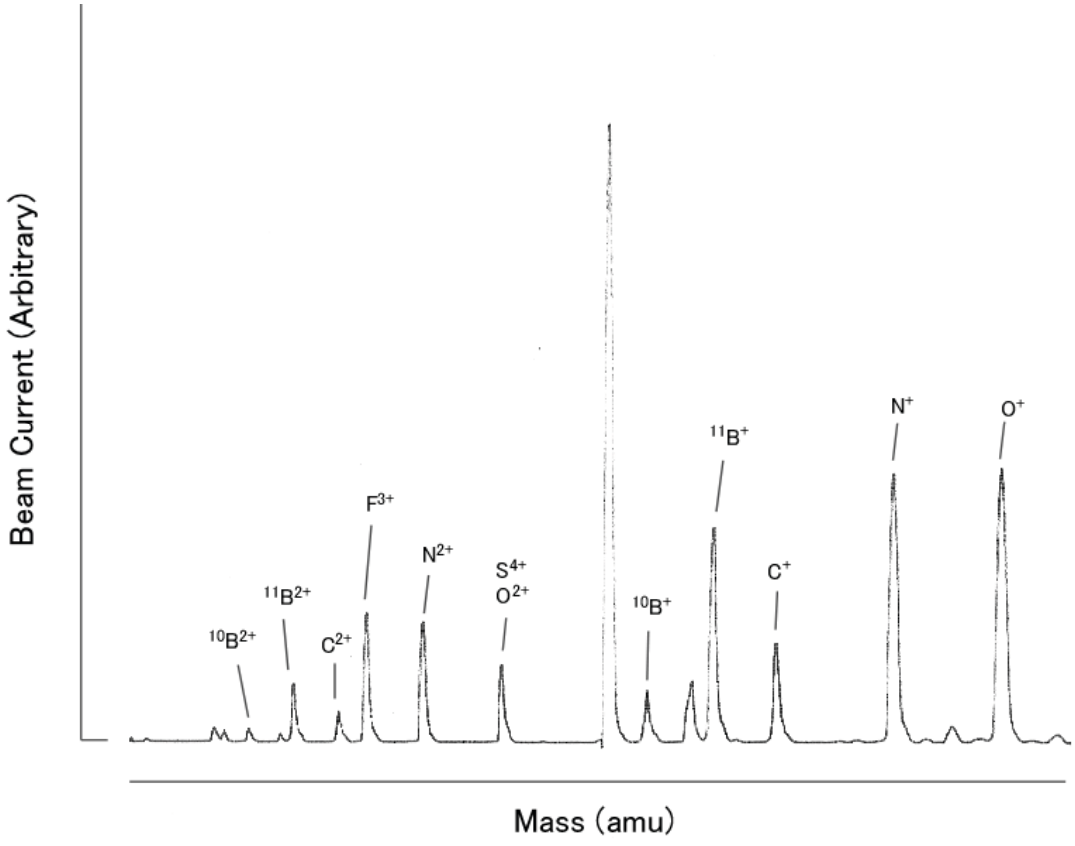


図 87　SF_6プラズマ方式で B 多価イオンを生成したときのマススペクトル

5.2.2　シリコン多価イオン (Si^{n+})

イ オ ン 種	シリコン(Si)　原子番号：14
1.同位元素存在比 [11]	^{28}Si：92.23 %　^{29}Si：4.67%　^{30}Si：3.10%
2.元素単体の性状	電離電圧：8.1eV[12]　最大電離断面積：5.4(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1414℃(43atm) [13]　沸点：2355℃[13]
3.イオン生成方式	MIVOC 法
4.試料	Tris(Trimethylsilyl)methane　$[(CH_3)_3Si]CH$
5.運転パラメータ	フォーカス電圧 2.25kV
6.ビーム電流	加速電圧 200kV で 3.6 eμA (Si^{3+})　0.9 eμA (Si^{5+})
7.ビーム電流 安定性	-
8.アウトガス	-
9.連続使用時間	-
10.汚れ	-
11.その他	Si^{3+},Si^{5+}以外は他のイオンと質量数が重なるため、単独で分離できない

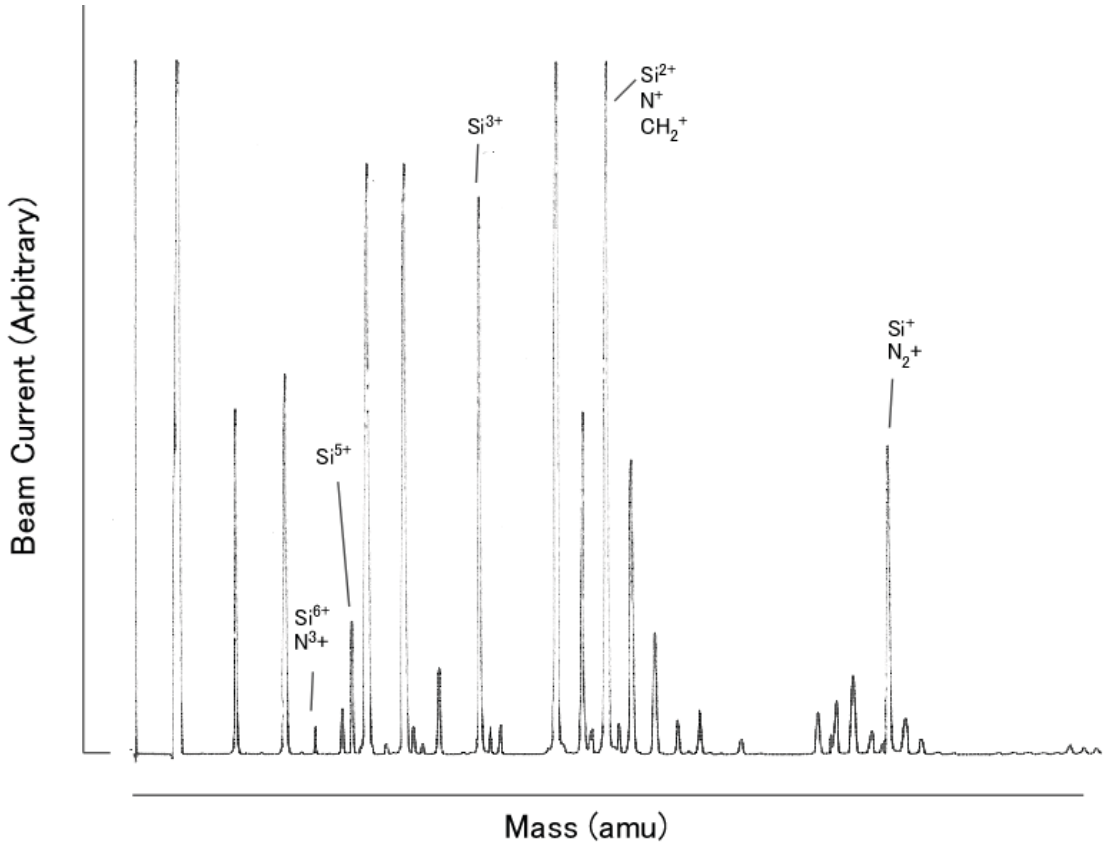


図 88　MIVOC 法で Si 多価イオンを生成したときのマススペクトル

5.2.3　アルゴン多価イオン (Ar^{n+})

イ オ ン 種	アルゴン(Ar)　原子番号：18
1.同位元素存在比 [11]	^{36}Ar：0.337%　^{38}Ar：0.063%　^{40}Ar：99.60%
2.元素単体の性状	電離電圧：15.7eV[12]　最大電離断面積：2.8(10^{-16} cm^2) [12] 融点：-189℃[13]　沸点：-186℃[13]
3.イオン生成方式	ガス方式
4.試料	Ar ガス
5.運転パラメータ	フォーカス電圧 2.5kV　バイアスプローブ電圧 300V
6.ビーム電流	13eμA (Ar^+)　20eμA (Ar^{2+})　13eμA (Ar^{3+})　5eμA (Ar^{4+})
7.ビーム電流 安定性	-
8.アウトガス	-
9.連続使用時間	-
10.汚れ	-
11.その他	-

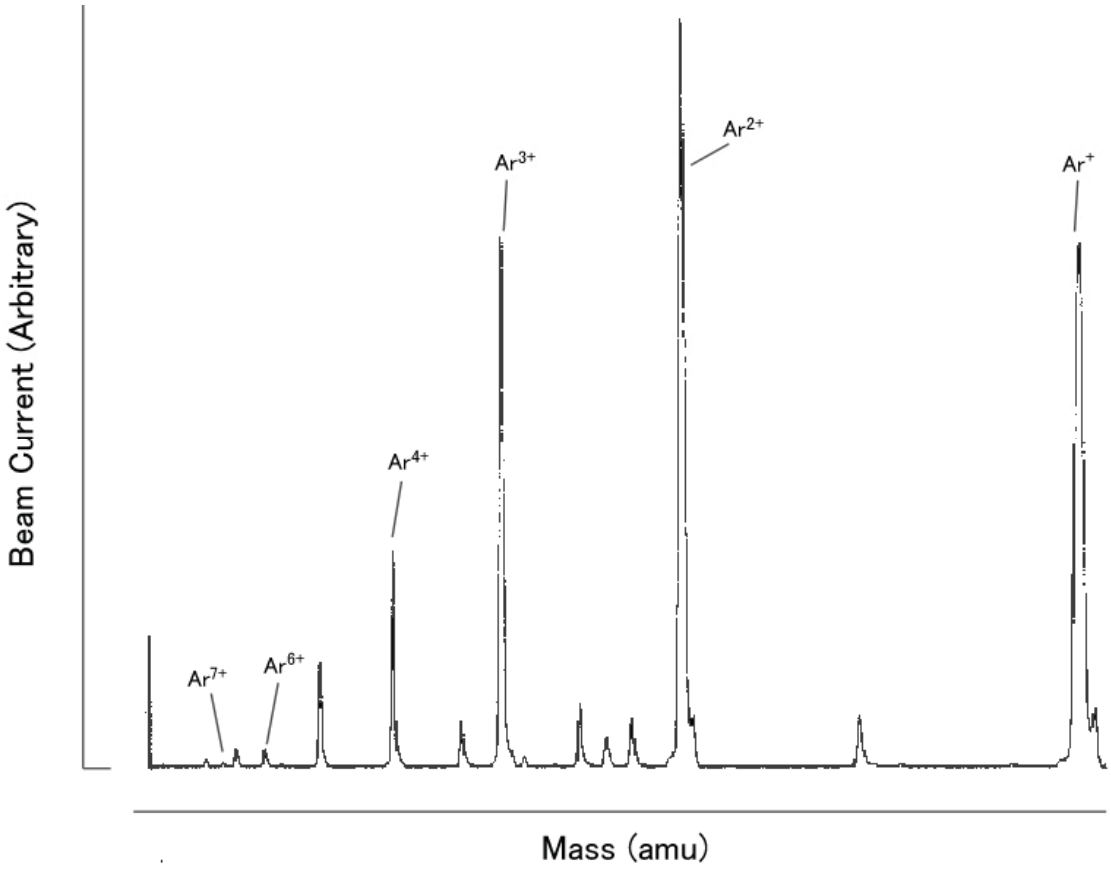


図 89　Ar ガスで Ar 多価イオンを生成したときのマススペクトル

5.2.4　鉄多価イオン (Fe^{n+})

イ オ ン 種	鉄 (Fe)　原子番号：26
1.同位元素存在比 [11]	^{54}Fe：5.8%　^{56}Fe：91.8%　^{57}Fe：2.15%　^{58}Fe：0.29%
2.元素単体の性状	電離電圧：7.8eV[12]　最大電離断面積：6.3(10^{-16} cm^2) [12] 融点：1536℃[13]　沸点：3000℃[13]
3.イオン生成方式	MIVOC 法
4.試料	フェロセン　$Fe(C_5H_5)_2$　融点 174-176℃[17]　沸点 249℃[17]
5.運転パラメータ	フォーカス電圧 2.05kV　バイアスプローブ電圧 110V
6.ビーム電流	加速電圧 117kV で 1.7 eμA (Fe^{3+})　2.1 eμA (Fe^{5+})　1.3 eμA (Fe^{6+})
7.ビーム電流 安定性	-
8.アウトガス	-
9.連続使用時間	-
10.汚れ	-
11.その他	-

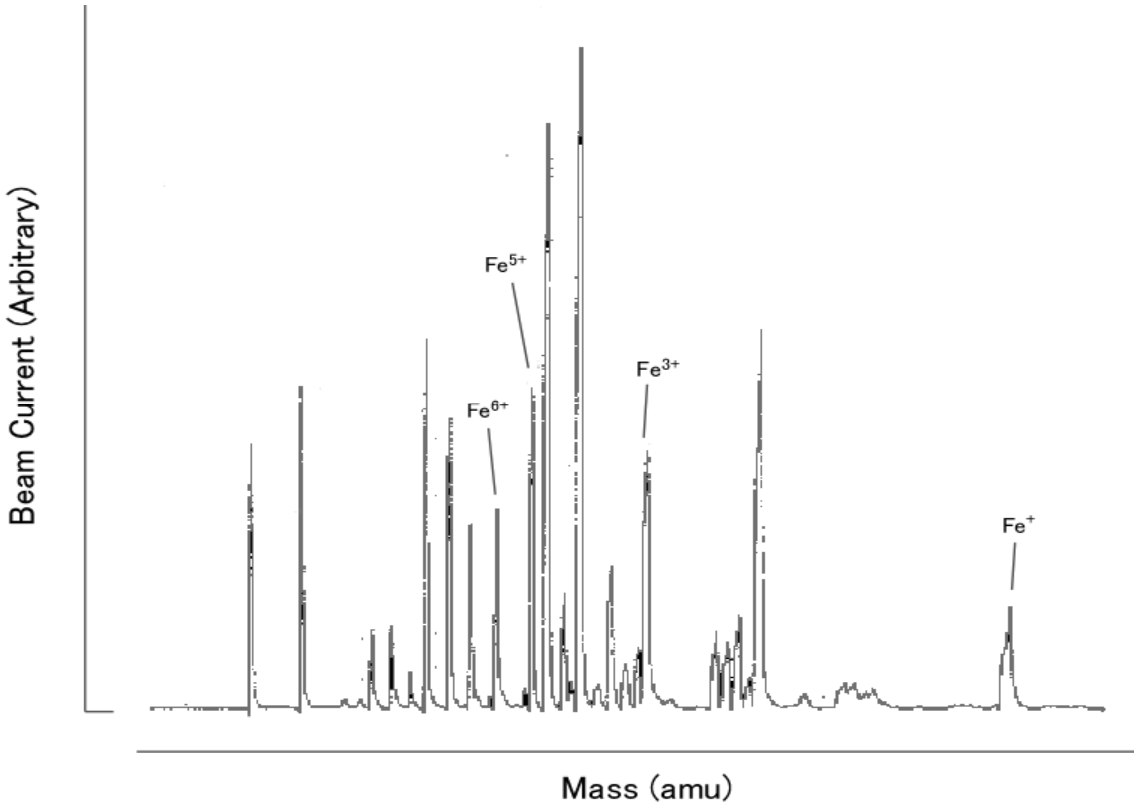


図 90　MIVOC 法で Fe 多価イオンを生成したときのマススペクトル

5.2.5　タンタル多価イオン (Ta^{n+})

イ オ ン 種	タンタル(Ta)　原子番号：73
1.同位元素存在比 [11]	^{181}Ta：100 %
2.元素単体の性状	電離電圧：9.6eV[12]　最大電離断面積：7.9(10^{-16} cm^2) [12] 融点：2996℃[13]　沸点：5425℃[13]
3.イオン生成方式	SF_6 プラズマ方式
4.試料	Ta ディスク(φ28mm×φ6mm×1mmt)
5.運転パラメータ	フォーカス電圧 3kV　SF_6 ガス流量 0.0012 cc/min
6.ビーム電流	加速電圧 200kV で 120enA(Ta^+)　650enA(Ta^{2+})　880enA(Ta^{3+})　1.1eμA(Ta^{4+}) 1.4eμA(Ta^{5+})
7.ビーム電流 安定性	-
8.アウトガス	-
9.連続使用時間	-
10.汚れ	-
11.その他	-

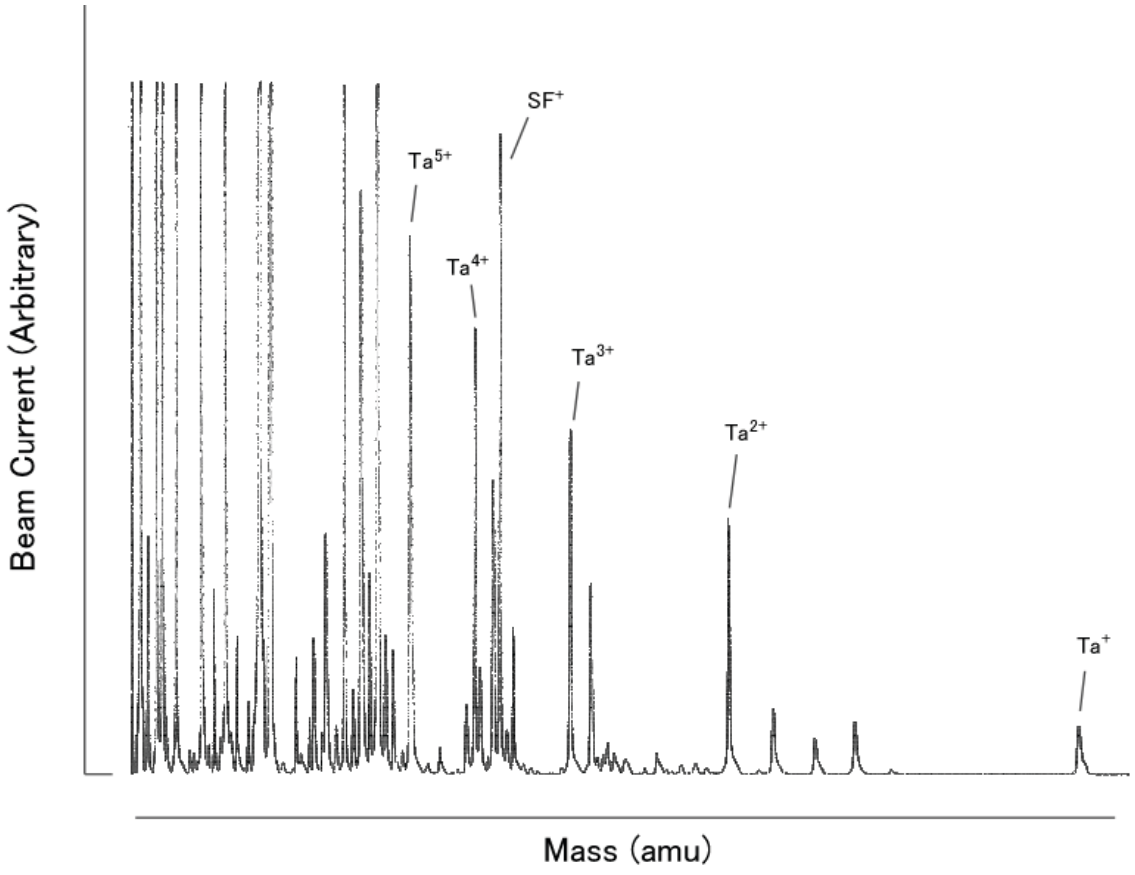


図 91　SF_6 プラズマ方式で Ta 多価イオンを生成したときのマススペクトル

6. おわりに

TIARA400kV イオン注入装置はこれまでの 15 年間に 26,000 時間以上の利用運転を行い、主に新機能材料の研究開発、無機材料に対する照射効果のその場電子顕微鏡観察、宇宙用半導体の耐放射線性の研究、半導体へのイオン注入に関する研究及び核融合炉材料の照射損傷の研究などの放射線高度利用研究に利用されてきた。これらの研究の進展と共に、加速器施設に要求されるイオン種の種類は新しい単原子イオンだけでなく、多価イオン、分子イオンなど多様なイオン種の利用が多くなってきている。新しいイオンの開発には、イオン源の改造や新イオン源の開発が伴うので、今後もイオン源の研究開発を積極的に進め放射線高度利用研究を支援する。本報告書は現在までのイオン生成技術ついてまとめたもので、研究利用者の要請に応えるべく精力的に開発を進めていく予定である。

謝辞

最後にイオン注入装置のビーム開発や運転・保守及び本報告書の作成に協力していただいた TIARA 静電加速器係の諸氏並びに報告書の作成に当り助言を頂いた横田渉イオン加速器管理課長、及び荒川和夫氏に感謝の意を表します。

参考文献

1) Y. Saitoh, S. Tajima, I. Takada, K. Mizuhashi, S. Uno, K. Ohkoshi, Y. Ishii, T. Kamiya, K. Yotumoto, R. Tanaka, E. Iwamoto, Nucl. Instum. Methods phys. Res., B, 89, (1994) pp.23-26.
2) 田島訓、高田功、水橋清、宇野定則、大越清紀、中嶋佳則、齋藤勇一、石井保行、神谷冨裕：“TIARA 静電加速器施設”、 JAERI-Tech 96-029 (1996).
3) 株式会社イオン工学センター“イオン注入装置ご利用の手引き”
4) J. H. Freeman, Nucl. Instrum. Methods, 22, (1963) pp.306-316.
5) Y. Saitoh, W. Yokota, Rev. Sci. Instrum., 67, (1996) pp.1174-1176.
6) A. Girad, G. Melin, Nucl. Instr. Meth., A 382 (1996) pp.252-266
7) H. Koivisto, J. Ärje and M. Nurmia, Nucl. Instrum. Methods, B, 94, (1994) pp.291-296.
8) Picsrd A, Turban G, Plasma Chem. Plasma Process, 5(4) (1985) pp.333-352.
9) K. Ohkoshi, Y. Saitoh, T. Orimo and S. Tajima, JAERI-Review, 98-016 (1998) pp.250-251.
10) K. Ohkoshi, Y. Saitoh, T. Kamiya, T. Sakai, S. Tajima, Rev. Sci. Instrum., 71 (2000) pp.1174-1176.
11) C. M. Lederer, V. S. Shirley: “Table of Isotopes, 7th ed.,”
12) 石川順三：”イオン源工学”、アイオニクス株式会社、(1986) pp.336-340.
13) 株式会社高純度化学研究所“GENERAL　CATALOGUE High Purity Chemetals”2003 年度版
14) 篠原久典、齋藤弥八：“フラーレンの化学と物理”、名古屋大学出版会、(1997) p.57.
15) M. S. Baba, T. S. L. Narasiman, R. Balasubramanian, and C. K. Matthews, Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc., 114 (1992) pp.R1-R8.
16) H. W. Kroto, A. W. Allaf and S. P. Balm, Chem. Rev., 91, (1991) pp.1213-1235.
17) SIGMA-ALDRICH Co. “Handbook of Fine Chemicals and Laboratory Equipment 2000-2001”

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m^2 sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm^2=10^4m^2
リットル	L，l	1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=$10^{-3}m^3$
トン	t	1t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm^2 s^{-1}=$10^{-4}m^2$ s^{-1}
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} 10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド(c)	Oe	1 Oe ≙ (10^3/4π)A m^{-1}

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています