



# オープン法による ECR イオン源からの 金属イオンビーム生成

Production of Metal Ion Beams from ECR Ion Source by Using Oven Method

仲野谷 孝充 松田 誠

Takamitsu NAKANNOYA and Makoto MATSUDA

東海研究開発センター  
原子力科学研究所  
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator  
Nuclear Science Research Institute  
Tokai Research and Development Center

July 2010

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, 2010

オープン法による ECR イオン源からの金属イオンビーム生成

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

仲野谷 孝充、 松田 誠

(2010 年 4 月 12 日 受理)

原子力機構－東海タンデム加速器では気体元素の多価イオンを生成・加速する目的で ECR イオン源が高電圧端子内に設置されている。ECR イオン源はその特性上、気体元素の大電流の多価イオンビームを容易に生成できるが、金属元素のイオンの生成は容易ではない。そのため、金属イオンは負イオン源で生成して通常のタンデム加速方式で加速している。しかし、ECR イオン源から金属イオンを生成・加速できれば、負イオン源に比べてビーム強度、ビームエネルギーが飛躍的に増加する可能性があり、加速器施設の利便性を大きく向上させることができる。そのため ECR イオン源からの金属イオン生成と加速を目指して、オープン法による金属ビームの開発を行った。

開発したオープンを用いて実験室内に設置したテスト用 ECR イオン源にて各種金属元素のイオン生成試験を実施した。その結果、16 種類の金属元素のイオン化に成功し、運転パラメータ、質量スペクトルデータを得ることができた。

本報告では開発したオープンの構造及び性能、金属イオンビームを生成する際の元素ごとの特徴や質量スペクトルデータ等についてまとめた。

Production of Metal Ion Beams from ECR Ion Source by Using Oven Method

Takamitsu NAKANOYA and Makoto MATSUDA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute  
Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 12, 2010)

An ECR ion source has been installed for producing highly charged ion beams of gaseous elements, in the 20 MV high-voltage terminal of the JAEA-Tokai tandem accelerator. The ECR ion source can easily produce intense ion beams for gaseous elements, but not for metal-ion beams. We have developed an oven method in order to produce intense metal-ion beams from the ECR ion source. We have carried out the production test for various metals on a testing stand of the ECR ion source. We have investigated operational parameters for producing 16 different metal-ion beams. In this article, we describe the oven developed in this work, and summarized experimental data of the ionization properties and mass spectrum for each metal element.

Keywords: ECR Ion Source, Oven Method, Metal Ion, Tandem Accelerator

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置概要	3
2.1 ECR イオン源の原理と構造	3
2.2 ビームライン構成と各電源配置	6
2.3 金属オープンの設計	8
3. オフライン試験	12
3.1 昇温特性試験	12
3.2 熱輻射影響特性	12
4. 金属イオン生成試験	14
4.1 試験の概要	14
4.1.1 Mg イオン	16
4.1.2 Al イオン	17
4.1.3 Ca イオン	18
4.1.4 Mn イオン	19
4.1.5 Fe イオン	20
4.1.6 Ni イオン	21
4.1.7 Cu イオン	22
4.1.8 Zn イオン	23
4.1.9 Ge イオン	24
4.1.10 Sr イオン	25
4.1.11 Ag イオン	26
4.1.12 In イオン	27
4.1.13 Sn イオン	28
4.1.14 Au イオン	29
4.1.15 Pb イオン	30
4.1.16 Bi イオン	31
4.2 結果と考察	32
5. まとめ	34
参考文献	35

Contents

1. Introduction-----	1
2. Experimental equipment -----	3
2.1 Principle and structure of the ECR ion source -----	3
2.2 Beam line components and power source layout -----	6
2.3 Design of the metal oven -----	8
3. Off line test -----	12
3.1 Temperature raising test -----	12
3.2 Thermal radiation test -----	12
4. Metal ion production test -----	14
4.1 Overview of the test -----	14
4.1.1 Mg ion -----	16
4.1.2 Al ion -----	17
4.1.3 Ca ion -----	18
4.1.4 Mn ion -----	19
4.1.5 Fe ion -----	20
4.1.6 Ni ion -----	21
4.1.7 Cu ion -----	22
4.1.8 Zn ion -----	23
4.1.9 Ge ion -----	24
4.1.10 Sr ion -----	25
4.1.11 Ag ion -----	26
4.1.12 In ion -----	27
4.1.13 Sn ion -----	28
4.1.14 Au ion -----	29
4.1.15 Pb ion -----	30
4.1.16 Bi ion -----	31
4.2 Results and discussion -----	32
5. Conclusion -----	34
References -----	35

## 1.はじめに

タンデム加速器の高電圧端子部には図1に示すようにRF周波数14.5GHzの永久磁石型ECRイオン源（以下ターミナルイオン源）が設置されている<sup>1)</sup>。このイオン源はSUPERANOGANと呼ばれるフランスPANTECHNIK社の製品である。主に、希ガスや酸素等の気体元素の大強度多価イオンを生成可能であり、各種の実験に用いられている。ECRイオン源は気体元素の多価イオンを容易に生成することができるが、金属元素のイオンを生成するのは容易ではない。金属イオンの生成には、ECRイオン源の内部で $10^{-1}$  Pa程度の金属蒸気圧<sup>2)</sup>が必要であり、大部分の金属ではこの蒸気圧を得るには $1000^{\circ}\text{C}$ 以上に加熱しなければならないためである。逆に、ターミナルイオン源より金属元素のイオンビームを生成することが可能となればタンデム加速器の有用性をさらに飛躍的に向上させることができる。

図2に加速電圧18MVにおいて、負イオン源より加速したイオンビームを荷電変換フォイル（炭素薄膜： $5\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）によって荷電変換した際の平均電荷及びターミナルイオン源より生成するイオンの実用電荷<sup>\*注)</sup>を示す。これより、金のように重いイオンをターミナルイオン源より生成した場合、負イオン源からのビームと比較して約2倍の価数を得られるため、加速エネルギーも約2倍に向上させることができる。また、負イオン源から重いイオンを加速した場合、荷電変換フォイルの消耗が激しいため、数時間毎にフォイルの交換とそれに伴うビーム調整が必要となるが、ターミナルイオン源では荷電変換フォイルを必要としないため、フォイルの寿命からは完全に解放される。その他、負イオン源ではイオン化が非常に困難なアルカリ金属やアルカリ土類金属のイオンもターミナルイオン源であれば生成の可能性がある、加速可能なイオン種を増やすことができる。

ECRイオン源からの金属ビームの生成には、イオン源の内部に小型のるつぼを挿入しこれにより金属を加熱し蒸気を発生させるオープン法という手法が広く用いられている。この他に金属ビームを生成する方法として、金属のロッドをECRプラズマに接触させスパッタリングにより金属イオンを生成させるスパッタ法や、低温でも高い蒸気圧を持つフェロセン ( $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ) 等の有機金属化合物の蒸気をイオン源内部に導入してイオン生成させるMIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) 法などがある。スパッタ法では原理的には大部分の金属のイオンを簡単な装置で得ることができるが、生成するイオンの量が少ないといった欠点がある。またMIVOC法は大電流のイオンを容易に得ることができるが、イオン源が試料を構成する炭素によって汚れるため頻繁なクリーニングが必要となり長時間の連続運転が難しい。このため、タンデム加速器の高電圧端子部に設置したECRイオン源より金属ビームを得るには不向きである。一方でオープン法は上述の方法に比べて構造が複雑ではあるが、大強度のイオンを得ることができ、生成した金属イオン以外にイオン源を汚す物が発生しないといった特徴がある。そこで、我々はオープン法によりECRイオン源から金属ビームを生成させるため、新規にオープンの開発を行い、金属イオンビームの生成を試みた。

\*注) 実用電荷： $1\ \mu\text{A}$ 以上の電流値を持つ最大の価数

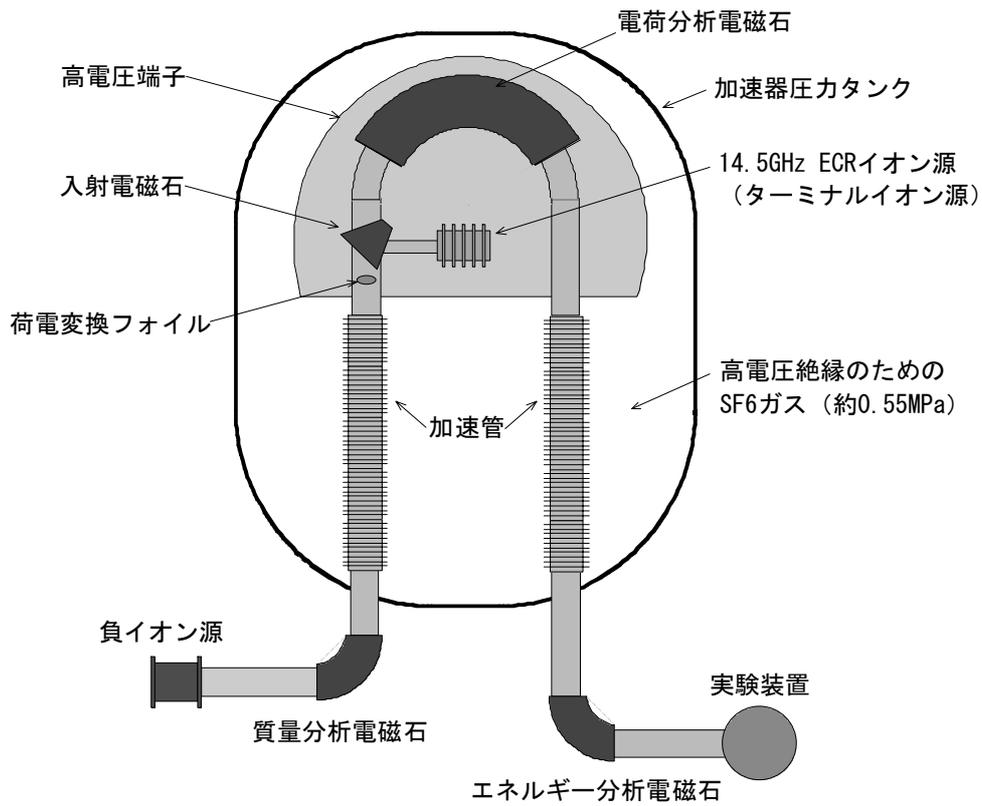


図1 タンデム加速器断面図

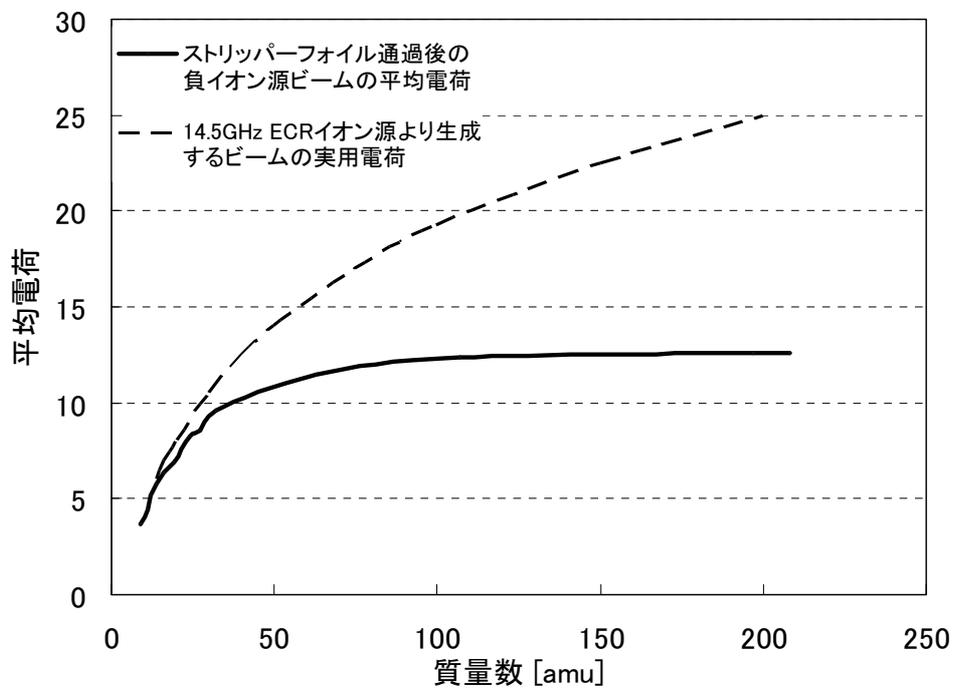


図2 各イオン源での電荷状態

## 2. 実験装置概要

### 2.1 ECR イオン源の原理と構造

ECR イオン源は、主に気体元素の多価イオンを容易に生成可能なイオン源である。イオン源には、軸方向の磁場を形成するミラー磁石と径方向の磁場を形成するカスプ磁石が取り付けられている。これらの磁石の合成磁場により、イオン源内部の電子は磁場に対し垂直な平面で円運動を行う。この電子のサイクロトロン運動の周波数と等しい周波数のマイクロ波を外部より入射すると電子サイクロトロン共鳴吸収 (Electron Cyclotron Resonance) が起こり、電子はエネルギーを得て選択的に加速される。イオン源内部の中性原子は、高エネルギー状態となった電子と逐次的に衝突することで多価イオン化が生成される。プラズマはミラー磁場とカスプ磁場によりプラズマチェンバー内に閉じ込められる。この磁場によりプラズマが効率的に長時間閉じ込められると逐次電離の機会が増え、より高多価のイオンが生成される<sup>3)</sup>。

実験に使用した ECR イオン源は NANOGAN と呼ばれるもので SUPERNANOGAN の下位機種であり、非常にコンパクトなイオン源である<sup>4)</sup>。通常、我々はこのイオン源をターミナルイオン源に搭載されるガス試料の質量スペクトル確認や調整等に用いている。図3にこのイオン源の概略と、図4にその外観及びイオン源の諸元表を示す。

このイオン源は、ミラー磁石、カスプ磁石ともにネオジウム永久磁石で構成されている。バイアス電極は、ビーム強度を増加させるために広く用いられている。電極には通常数 10～数 100 V の負電圧が印加される。これにより磁場閉じ込めより逃げ出した電子は再びプラズマ中へ押し戻され、電子密度が増加してビーム強度の増強につながる。電極には直径 10 mm の銅棒を使用している。RF アンプの周波数は 10 GHz で最大出力は 200 W である。高周波はセラミック製の RF 窓を通じてプラズマチェンバー内部へ導入される。RF 導入口と直交する面には RF チューナーが取り付けられており、RF の入射効率が最適になるよう調整可能である。

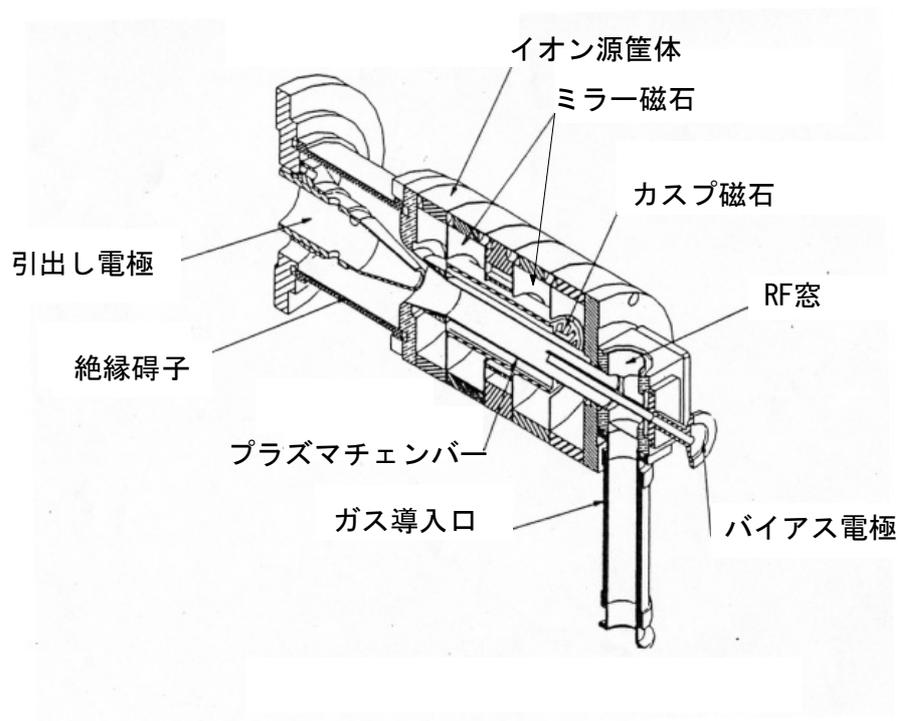


図3 NANOGAN 断面図

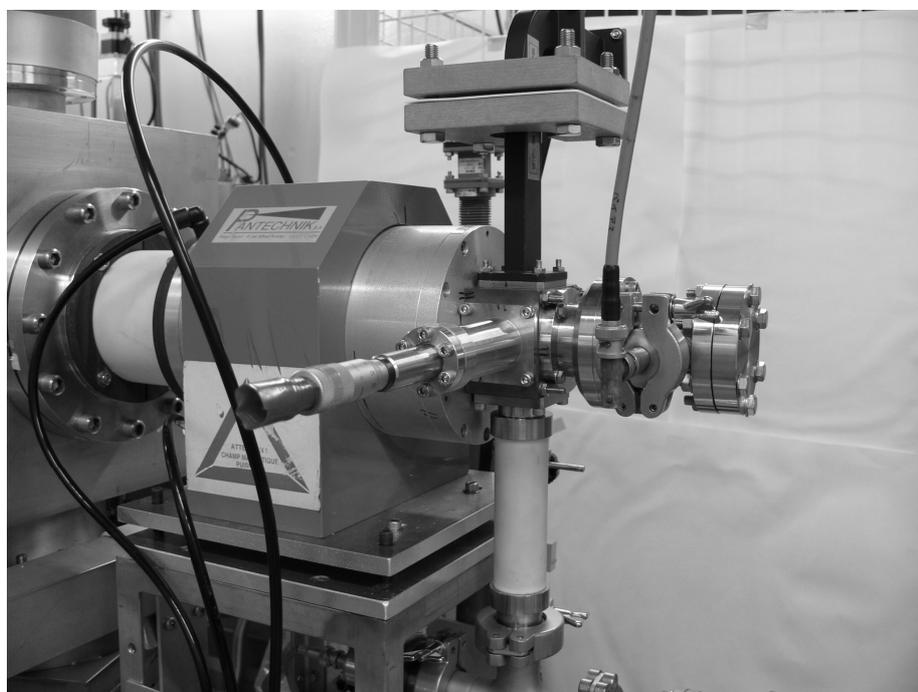


図4 NANOGAN 外観

ECR イオン源 (Nanogan) 諸元

1. ミラー磁場

永久磁石材質	FeNbB
磁場強度	
RF 側	0.75 T
引出側	0.50 T

2. カスプ磁場

永久磁石材質	FeNbB
極数	8 極

3. イオン源本体

重量	12 kg
寸法	直径 130 mm×全長 250 mm
冷却方式	空気コンプレッサによる強制空冷

4. プラズマチェンバー

材質	アルミニウム製
寸法	内径 25 mm×全長 200 mm

5. バイアスロッド

材質	純銅
寸法	直径 8 mm×190 mm

6. RF アンプ

周波数	10 GHz
最大出力	200 W

## 2.2 ビームライン構成と各電源配置

図5にイオン源とビームラインの配置を示す。イオン源の下流のフォーカスチェンバーにはビームを収束させるためアインツェルレンズが備わっており、最大 20 kV が印加できる。イオン源本体とフォーカスチェンバーはアルミナ製の絶縁管により電氣的に絶縁されている。Y ステアラーは磁場型偏向器であり、両極性電源により励磁されるのでビームを±Y 方向に偏向させることが可能である。最大発生磁場は 20 mT である。引き出されたイオンビームはその後、分析電磁石により 90° 曲げられ質量分離される。分析電磁石の曲率半径は 0.5 m であり、最大磁場は 200 mT、偏向能力 0.48 amu・MeV である。質量分離されたビームは X-Y ステアラーにより位置の微調が可能である。このステアラーは静電型であり、それぞれの方向に対し最大 1kV の静電圧が印加可能である。ファラデーカップの直前には X-Y スリットが配置されている。このスリットは±X, ±Y の4方向をそれぞれ独立に開度調整が可能である。ビームを受け止めビーム電流を測定するファラデーカップはタンタル製でカップ径は 25.4 mm である。カップの外側にはイオンビームの衝突により発生する二次電子を抑制するため、-600 V のサプレッサー電圧が印加されている。

フォーカスチェンバー直下には主にイオン源を排気するため排気能力 800 l/s のターボ分子ポンプが設置されている。また X-Y ステアラーのチェンバーの直下にはビームライン排気用として排気能力 600 l/s のターボ分子ポンプが設置されている。イオン源運転時の真空度はイオン源ガス導入部で  $1 \times 10^{-3}$  Pa、ビームライン上流側（イオン源周辺）で  $1 \times 10^{-5}$  Pa、ビームライン下流側（ファラデーカップ周辺）で  $5 \times 10^{-6}$  Pa 程度である。

図6にイオン源本体の電位配置図を示す。イオン源の引出し電圧は最大 30 kV で、通常は 20 kV で使用している。イオン源本体に引出し電圧が印加されるため、地上電位に対して絶縁されている。引出し電位の上にバイアス電源が配置される。バイアス電源は最大で -1 kV 印加できるため、バイアス電極は地上電位から見て ~19 kV となる。さらにバイアス電位上にオープン電源が配置されている。これらの引出し電位の上に配置された電源の制御は光ファイバーを介して行われる。

イオン源の冷却はスクロールコンプレッサからの圧空の連続送風により行う。送風量は 220 l/min である。送風配管の入口及び出口で圧空の温度や圧力を監視しており、温度異常（イオン源入口側：30°C以上、出口側 35°C以上）や圧力低下（100 kPa 以下）を検出した際、自動的に RF 電源及びオープン電源の出力をゼロにするインターロック機構が備えられている。

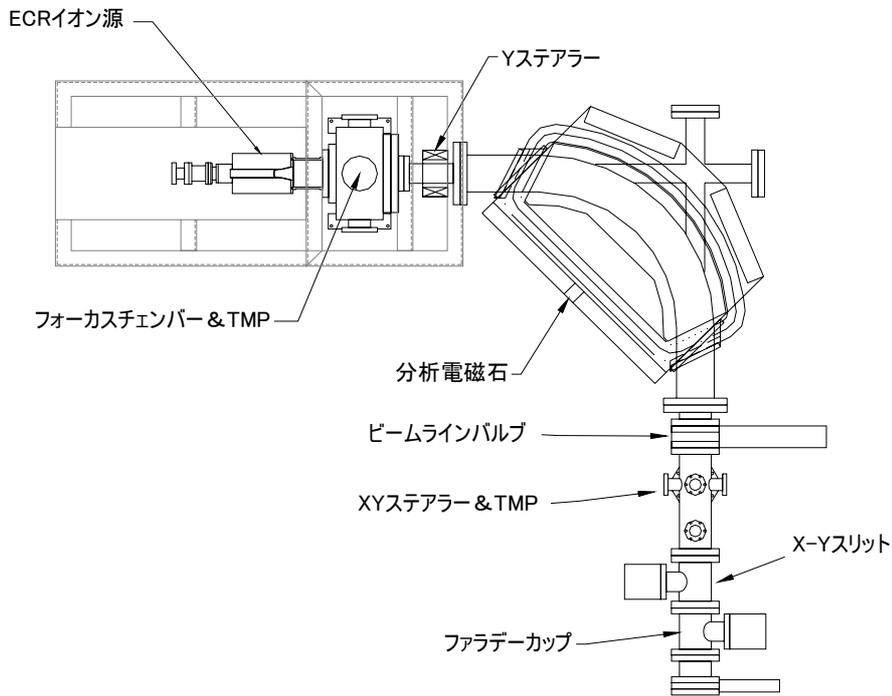


図5 ビームライン配置図

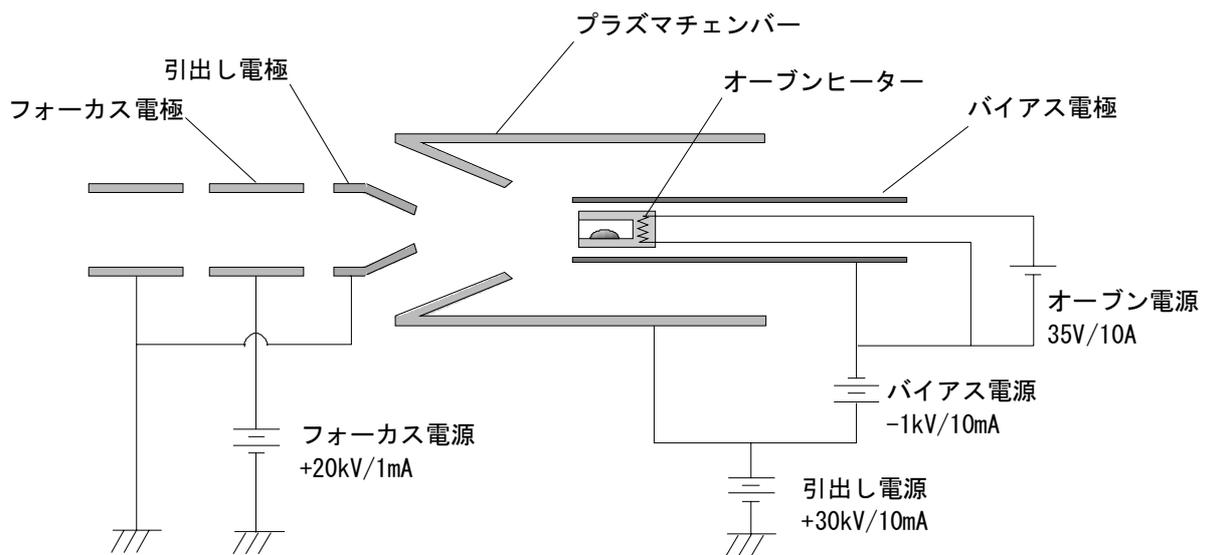


図6 高電圧配置図

### 2.3 金属オープンの設計

新規にオープンを開発するに当たり、最も重要視したのはオープンの到達温度である。表1に様々な金属の融点と蒸気圧  $10^{-1}$  Pa を示す温度（以下  $T_v$  とする）を示す<sup>5,6)</sup>。ECR イオン源の内部で金属イオンを生成するのに必要な蒸気圧は  $10^{-1}$  Pa 程度と言われている。この蒸気圧を示す温度は金属によって様々であり、各金属の融点には依存せず、概ね 1000 °C 以上の高温が必要である。したがって、オープンの到達温度が低ければ生成できる金属イオンの種類は少なくなり、蒸気圧の調整幅も狭くなってしまふ。一方、オープンの温度が高くなると輻射熱による磁石への悪影響が大きくなる。このため、すでに他機関で実用化されているオープンの設計温度の多くは 1000°C~1500°C である<sup>7)</sup>。我々は、需要が期待される鉄や金等を生成するのに十分と思われる 1500 °C を目標到達温度として設計を行った。また、実際にタンデム加速器で使用した場合、一度装填した試料は約 4 ヶ月のマシンタイム中は交換ができない。このため、試料を格納するつぼの容量はなるべく大きい方が望ましい。一方でプラズマチャンバーの内径は 25 mm しかないため、オープン筐体の寸法は大きく制限される。したがって、つぼの容量を確保しつつ、オープン筐体を可能な限り小型にする必要があった。

表1 様々な金属の融点と蒸気圧  $10^{-1}$  Pa を示す温度

元素	蒸気圧 $10^{-1}$ Pa を示す温度 $T_v$	融点 $T_{mp}$
Zn	293	420
Mn	867	1246
Fe	1332	1536
Ni	1387	1455
Au	1272	1064
In	832	157
Al	1097	660

図7、8に開発したオープンの断面図と写真を、表2に各部品の仕様を示す。オープン本体はタンタル製であり、オープン支持ロッドはステンレス製である。オープン本体とオープン支持ロッドは M4 細目ネジにより接続される。ロッドの中心を通るタンタル線によりオープンヒーターに電流が供給される。ヒーターは線径が 0.3 mm のタングステンをコイル状に巻いたもので先端部にてタンタル製のキャップにより留められている。ここでオープン筐体と電氣的に接続されるため、オープン電流は筐体とロッドを通じて電源に戻る。キャップには幅 1 mm のスリットが切っており、かしてオープン本体と接続する。つぼはアルミナ製で内容積は 0.20 cm<sup>3</sup> である。オープンを構成する部品は可能な限り交換可能な構造とした。このため、キャップ、ヒーター、絶縁碍子及びるつぼ等、汚れや破損が生じ易い箇所でも簡単に着脱、交換することができるため、ランニングコストを押さえることができる。

オープンはイオン源の後方よりイオン源内部へ挿入する。このままでは、図3に示したバイアス電

極と干渉してしまうため、バイアス電極の形状を棒状から中空薄肉のチューブに置き換え、このチューブの内側にオープンを導入する様にした。バイアス電極を取外しても、オープンロッドをイオン源筐体から電氣的に絶縁してバイアス電圧を印加すればバイアス電極と同様の効果を得ることは可能である。しかし、以下に示す2つの理由によりバイアス電極を残すこととした。

一つはオープンをプラズマから保護するためである。オープン本体はECRプラズマに絶えず晒されスパッタリングによる損傷を受ける。つまり中空状のバイアス電極でオープンを覆うことによりスパッタ損傷を低減させ、オープンの寿命を長くするためである。

もう一つは永久磁石をオープンの輻射熱から保護するためである。オープンはプラズマチェンバー内で1000℃以上の高温になるが、チェンバーのすぐ外側の位置にはミラー磁場とカスプ磁場を形成するネオジウム磁石が配置されている。ネオジウム磁石は非常に強力な磁石であるが、熱減磁が大きく高温環境に弱いため80℃が使用限界である。したがって、磁石は常に圧空により冷却されているが、オープンの輻射熱の影響が大きければ深刻な損傷を受ける恐れがある。このため、バイアス電極により輻射熱をしゃへいし、内部で発生した熱をイオン源の外部に効率的に逃がすヒートシールドとヒートダンプの役割をさせる。

実際の使用では図9に示すようにロードロック室で予備排気された後、バイアスチューブ内を通過してプラズマチェンバー内に導入される。ロードロック機構により、イオン源本体の真空を破ることなく試料やオープンの交換が可能となっている。

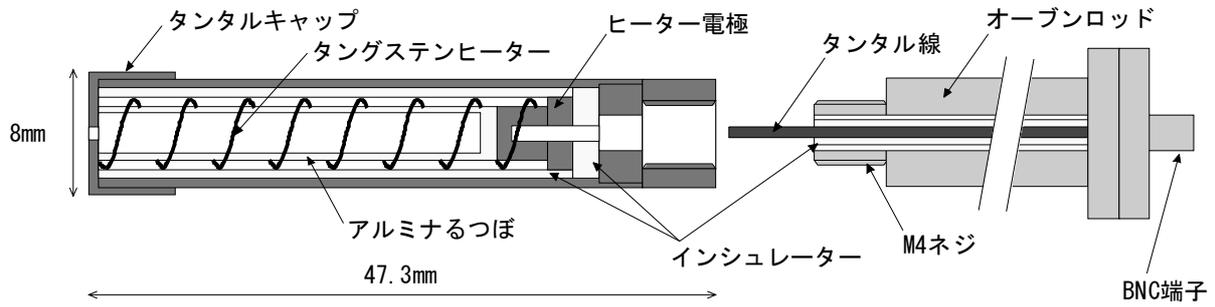


図7 オープン断面図

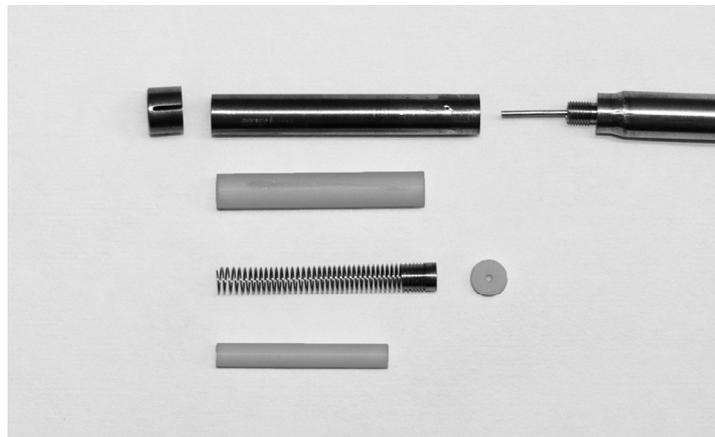


図8 オープン部品外観

表2 オープン諸元

オープン筐体	
材質	タンタル
形状	外径 7 mm × 全長 47.3 mm
るつぼ	
材質	高純度アルミナ
形状	内径 3 mm × 全長 30 mm 外径 4 mm
容積	0.2 cm <sup>3</sup>
ヒーター	
材質	タングステン
形状	巻径 4.5 mm × 全長 35 mm 43 ターン 線形 0.3 mm、
オープンロッド	
材質	ステンレス 304
形状	外径 7 mm × 全長 314 mm

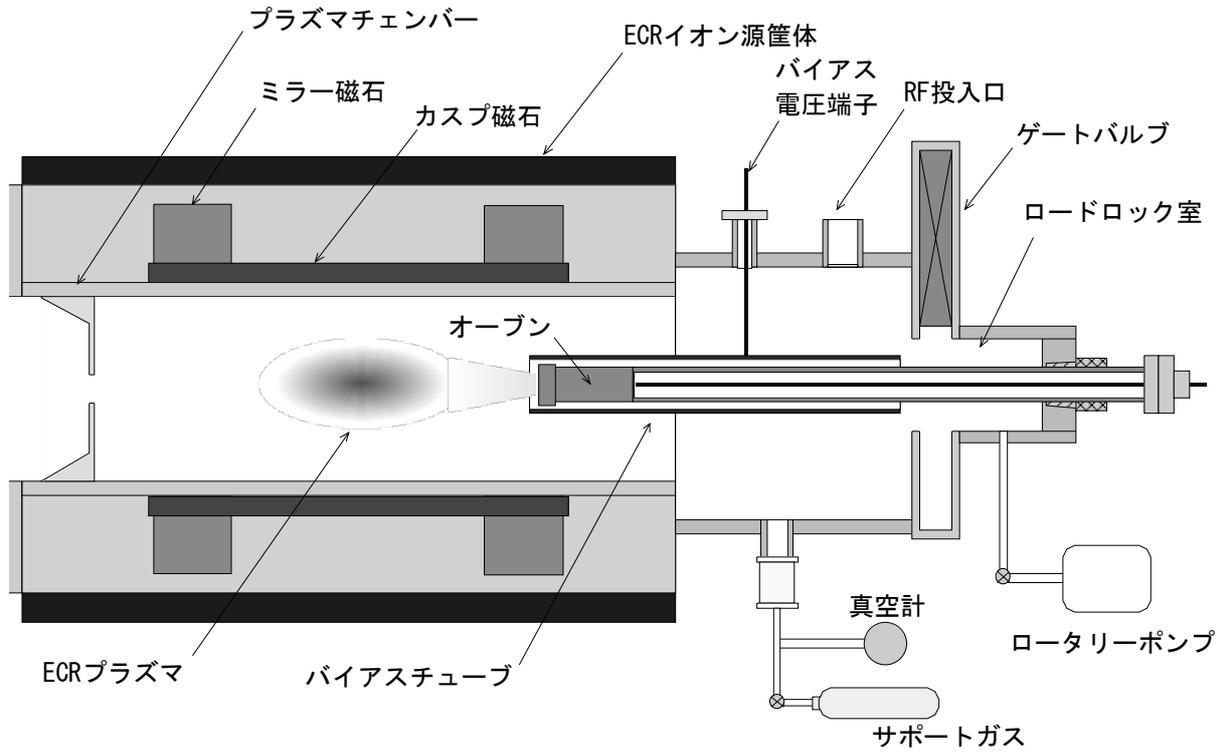


図9 オープン取り付け時のECRイオン源模式図

3.オフライン試験

3.1 昇温特性試験

開発したオーブンを ECR イオン源を模擬した真空容器内部（図 11 参照）で昇温試験を行った。ダミープラズマチェンバーは実際に ECR イオン源で使用されているものと全く同じ物である。温度の測定は R 熱電対をオーブン内部のるつぼに接触させた状態で測定した。昇温試験の結果を図 10 に示す。50 W の投入電力でるつぼ内の温度は 1650 °C に達した。開発当初の目標温度 1500 °C を十分満足する性能であることが確認できた。また、るつぼ内部の温度変化は非常に安定しており、オーブン出力を 50 W に固定した状態で 30 分間での温度変化は±2 °C 以下であった。投入電力にまだ余裕があるが、絶縁材料として使用しているアルミナの耐熱温度が 1800 °C であるため、昇温試験は 1650 °C で終了した。

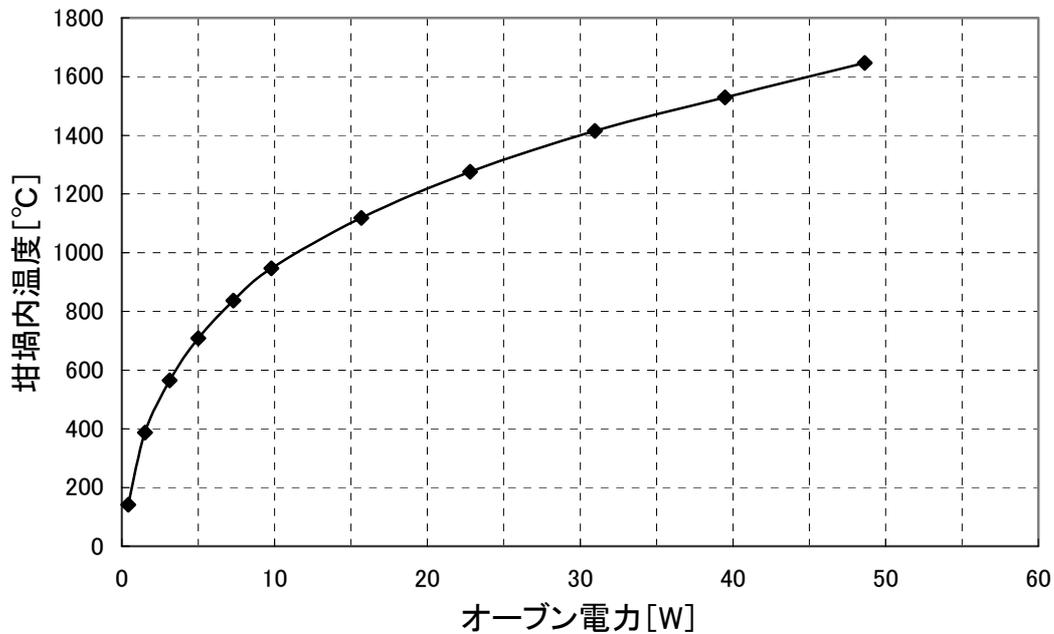


図 10 オーブン性能曲線

3.2 熱輻射影響特性

投入電力を 50 W に固定し室温中に 30 分静置した状態で熱輻射によるプラズマチェンバーへの影響を調べた。図 11 にオーブンと温度測定点の位置関係を示す。ダミーチェンバーの温度は K 熱電対を用いて測定した。結果、オーブン近傍が最も温度が低く、オーブンから離れるに従い温度が高くなり、バイアスチューブを支える D の位置で最も高くなった。これはオーブンを取り巻くバイアスチューブが熱輻射を遮り、チェンバー後方に効果的に熱を逃がしたためと考えられる。実際の ECR イオン源ではプラズマチェンバーと永久磁石は絶えず圧空により冷却される。さらに、バイアスチューブを支持

しているバイアス電圧端子も真空外部より空冷される。このため、オーブンを最高温度 1650 °C で長時間使用し続けてもネオジウム磁石に対して十分安全だと考えられる。

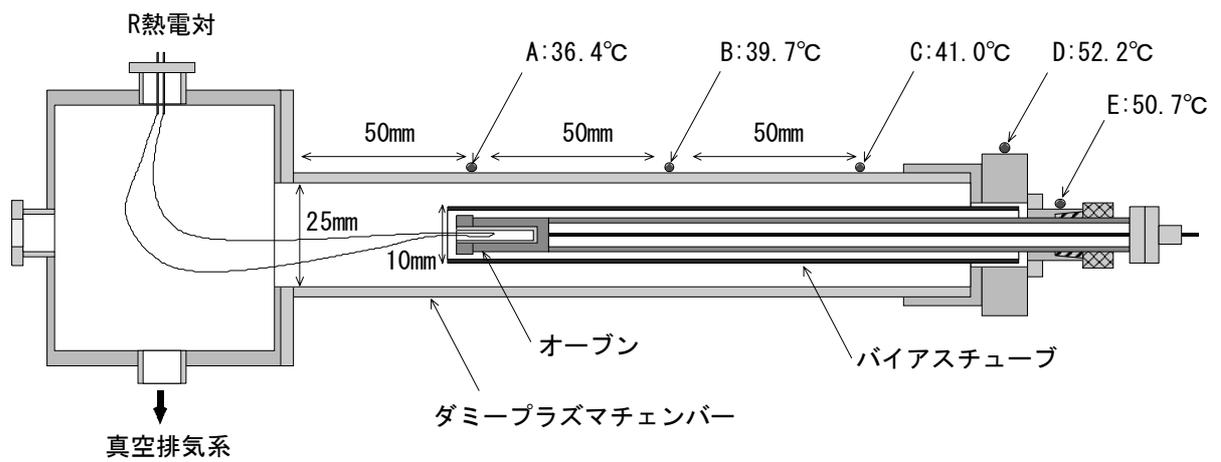


図 11 輻射熱影響

## 4. 金属イオン生成試験

## 4.1 試験の概要

オフライン試験の結果より、開発したオーブンの性能が十分であることが確認できた。このため、実際に ECR イオン源に組込んで様々な金属元素ビームの生成を試みた。結果をイオン種ごとに試料形状、同位対比、物性値、運転条件、ビーム電流、コメント、質量スペクトルとして表にまとめた。ここで試料は余分なマスピークを避けるため可能な限り単体金属としたが、単体が得にくい元素は化合物を用いている。

全ての測定に対してイオンの引出し電圧は 20 kV に固定し、サポートガス<sup>\*注)</sup>は窒素を用いた。記載したイオンビームの電流値は分析電磁石直下のファラデーカップの実測値である。質量スペクトルの記録は X-Y レコーダーで行った。X 軸にホールプローブで測定した分析電磁石磁場を、Y 軸にビーム電流の実測値を記録した。また、全ての測定に対して X-Y スリットは全開の状態で行った。得られるイオンビームは多価イオンであるため、イオン種毎に最適化する価数と質量数を決め、そのイオンに対してビーム電流が最大となるように RF 電力やフォーカス電圧の値を調整した。最適化した質量数と価数は表中で太字で示した。また用いた試料は全て天然同位対比である。

比較のために図 12 に十分にチェンバー内が清浄な状態で窒素ガスのみを供給した場合の質量スペクトルを示す。観察される主要なピークは H、N<sup>III</sup>、C<sup>III</sup>、O<sup>III</sup>、OH<sup>+</sup>、H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>である。チェンバー内が有機物で汚染されていると C<sup>III</sup>のピークが大きくなり、また脱ガスが不十分であれば O<sup>III</sup>、OH<sup>+</sup>、H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>のピークが顕著になる。

なお、本節の図中に用いた用語は下記の通りである。

$T_v$  : 蒸気圧  $1.33 \times 10^{-1}$  Pa を示す温度である。

EXT : 引出し電圧及び引出し電流

FOC : フォーカス電圧

BIAS : バイアス電圧

真空度 : サポートガス導入部での真空度

オープン電力 : オープンに投入した電力

(オープン電力の後に括弧書きで示した温度は図 10 より求めたるつぼ内温度の推測値)

RF 電力 : RF パワーメーターの実測値

\*注) サポートガス : 目的とする元素の多価イオンの生成量を増やすために導入する軽いガス

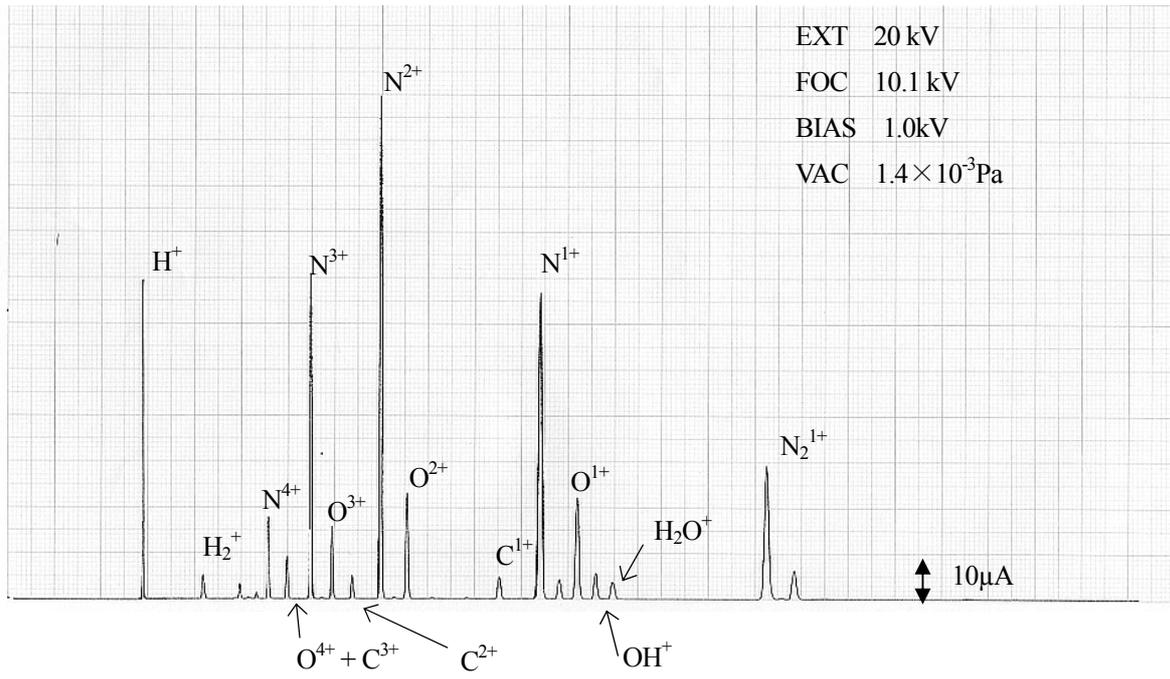
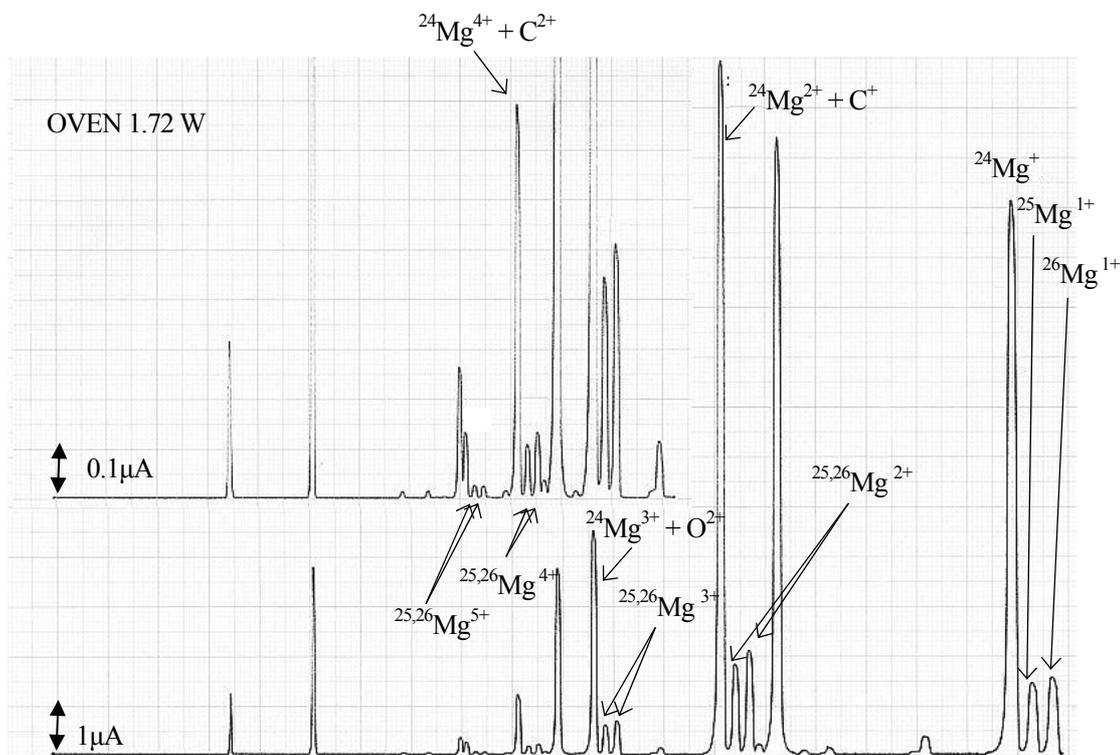


図 12 窒素ガスのみを供給した場合の質量スペクトル

4.1.1 Mg イオン

イオン種	Mg
試料形状	Mg リボン 純度 99.9%
同位体比	$^{24}\text{Mg}$ : 79.0% $^{25}\text{Mg}$ : 10.0% $^{26}\text{Mg}$ : 11.0%
物性値	融点 : 650 °C 沸点 : 1095 °C $T_v$ : 369 °C
運転条件	EXT : 20 kV、0.34 mA FOC : 10.5kV BIAS : -1000 V 真空度 $1.8 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 1.72 W (~420°C) RF 電力 : 7.5 W
ビーム電流	$^{26}\text{Mg}^{3+}$ : 0.75 eμA、 $^{26}\text{Mg}^{5+}$ : 0.02 eμA、 $^{26}\text{Mg}^{2+}$ : 2.1 eμA
コメント	<p>試料導入後の真空の回復は早い。</p> <p><math>^{24}\text{Mg}</math> は C や O とピークが一致するため分離不可能。このため <math>^{26}\text{Mg}^{3+}</math> で最適化する。</p> <p>オープン 0.3 W から Mg のピークが現れる。</p> <p>必要温度が低いため、オープン電力はわずかで十分である。またオープン電力はゆっくり上昇させないと急激にビーム電流及び引出し電流が増えてしまい放電する。</p> <p>イオン化は容易でありビーム電流も非常に安定している。ただし RF を上げて 5 価以上の多価イオンは出ない。</p> <p>るつぼの汚れは比較的多く全体的に濃い灰色に変色する。また、Mg の供給過剰となりやすくチェンバーを汚し Mg のピークが残留する。</p> <p>試料の熔融や流出は無い。</p>

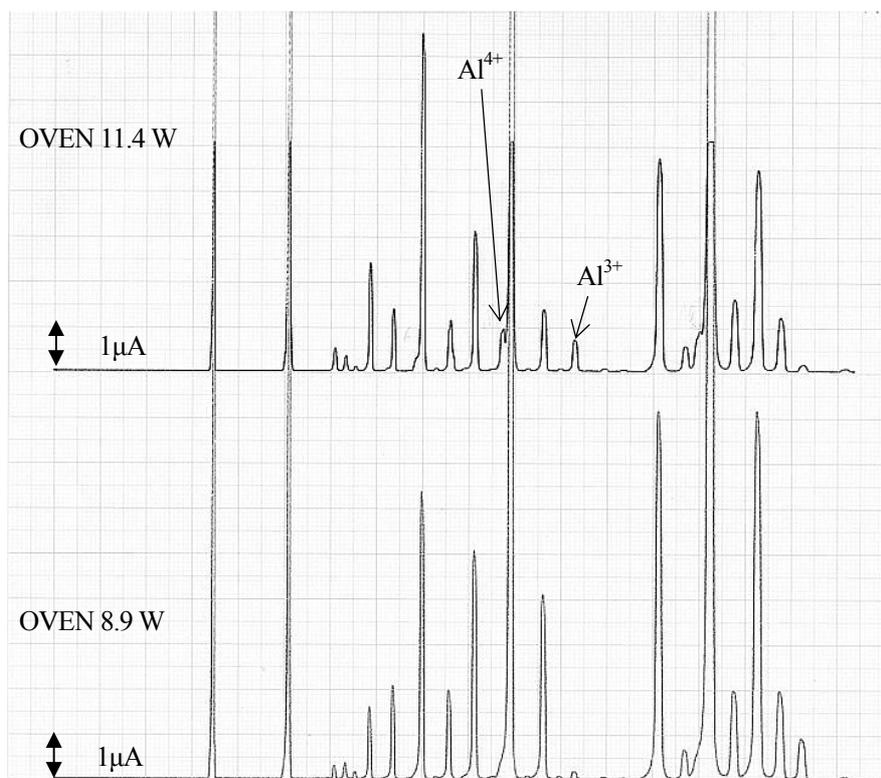
質量スペクトル



4.1.2 Al イオン

イオン種	Al
試料形状	単線 φ1.0 純度 99.9%
同位体比	<sup>27</sup> Al 100%
物性値	融点 : 660 °C 沸点 : 2520 °C $T_v$ : 1097 °C
運転条件	EXT : 20 kV、- mA FOC : 10.0 kV Bias : -1000 V 真空度 $2.0 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 11.4 W (~1000°C) RF 電力 : 7.5 W
ビーム電流	$Al^{3+}$ : 0.8 $\mu A$ 、 $Al^{4+}$ : 1.0 $\mu A$
コメント	試料導入後の真空度は速やかに回復する。 $Al^{2+}$ 、 $Al^{5+}$ 、 $Al^{6+}$ は残留気体のバックグラウンドに隠れて判別不能。 オープン電力 4.0 W (~650°C) 投入した時点で $Al^{3+}$ 20 enA を確認。その後オープン電力に比例して電流値は上昇し、オープン 11.4 W で $Al^{3+}$ 0.8 $\mu A$ 。17W 投入時点で $Al^{3+}$ は一時 2.5 $\mu A$ まで増える。その後、ビーム電流は急激に減少し、オープン電流も不安定となる。原因は、溶融した Al がるつぼからヒーター部に流れ込みショートさせたため。 $Al$ は溶融時の濡れが良く、るつぼの外へ流出しやすい。

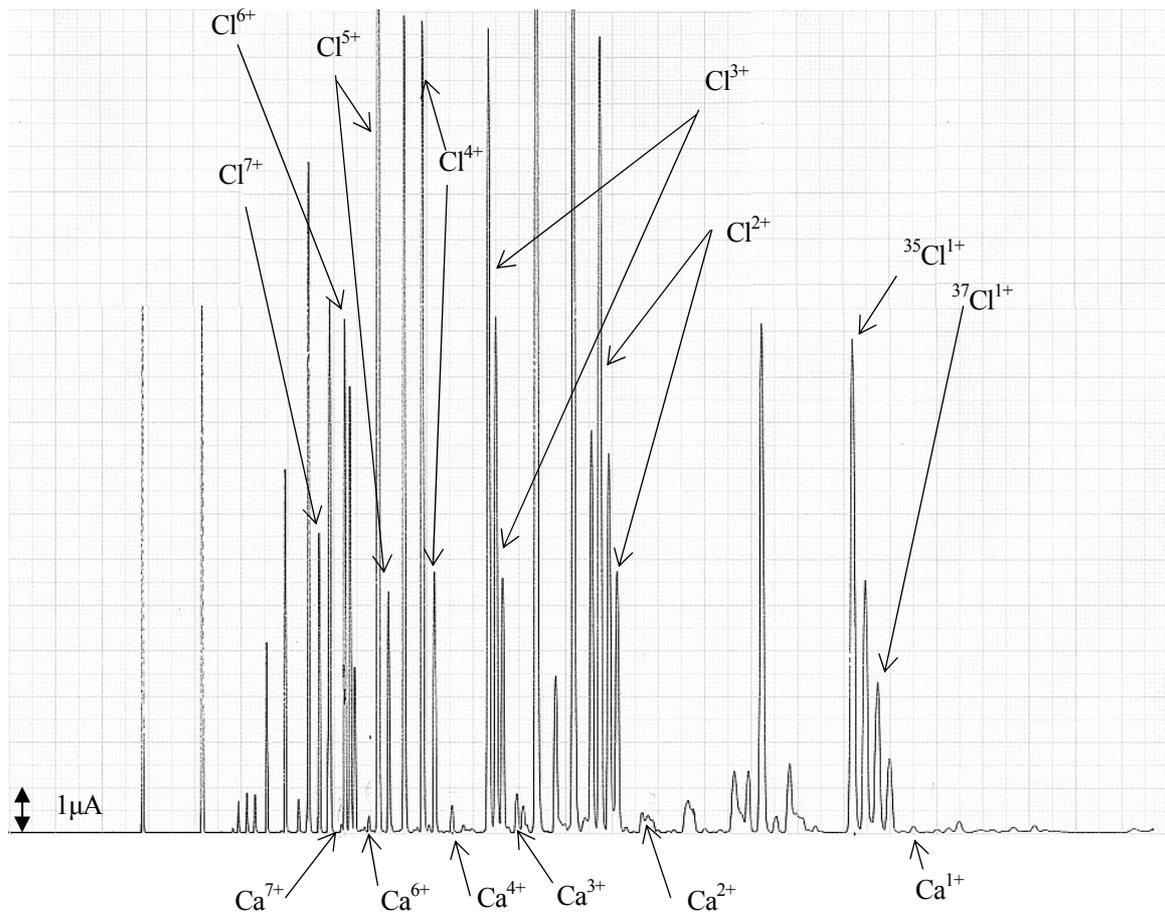
質量スペクトル



4.1.3 Ca イオン

イオン種	Ca
試料形状	CaCl <sub>2</sub> 粉末 純度 99.9%
同位体比	<sup>40</sup> Ca : 96.9% <sup>42</sup> Ca : 0.6% <sup>44</sup> Ca : 2.1%
物性値	融点 : 772 °C 沸点 : 1935 °C T <sub>v</sub> : - °C
運転条件	EXT : 20 kV、2.19 mA FOC : -kV Bias : -721V 真空度 3.5×10 <sup>-3</sup> Pa オープン電力 : 9.45 W (~950°C) RF 電力 : 29.4 W
ビーム電流	Ca <sup>7+</sup> : 0.2 eμA、 Ca <sup>3+</sup> : 0.8 eμA、 <sup>35</sup> Cl <sup>5+</sup> : 45 eμA
コメント	塩化物は多量の水分を吸着しているため、試料導入後の真空の回復は非常に悪い。このため、RF 印加前に十分な脱ガスが必要である。また、オープン電力に比例し多量のアウトガスを発生するので、オープン電力は真空の回復に十分注意し徐々に上げる。目的の Ca に対して Cl のピークが非常に多い。試料によるオープン本体及びプラズマチャンバーへの汚染は非常に多く、試料交換後も Cl のピークがかなり残る。 CaCl <sub>2</sub> 粉末により Ca ビーム生成可能だが、試料としては不適當。

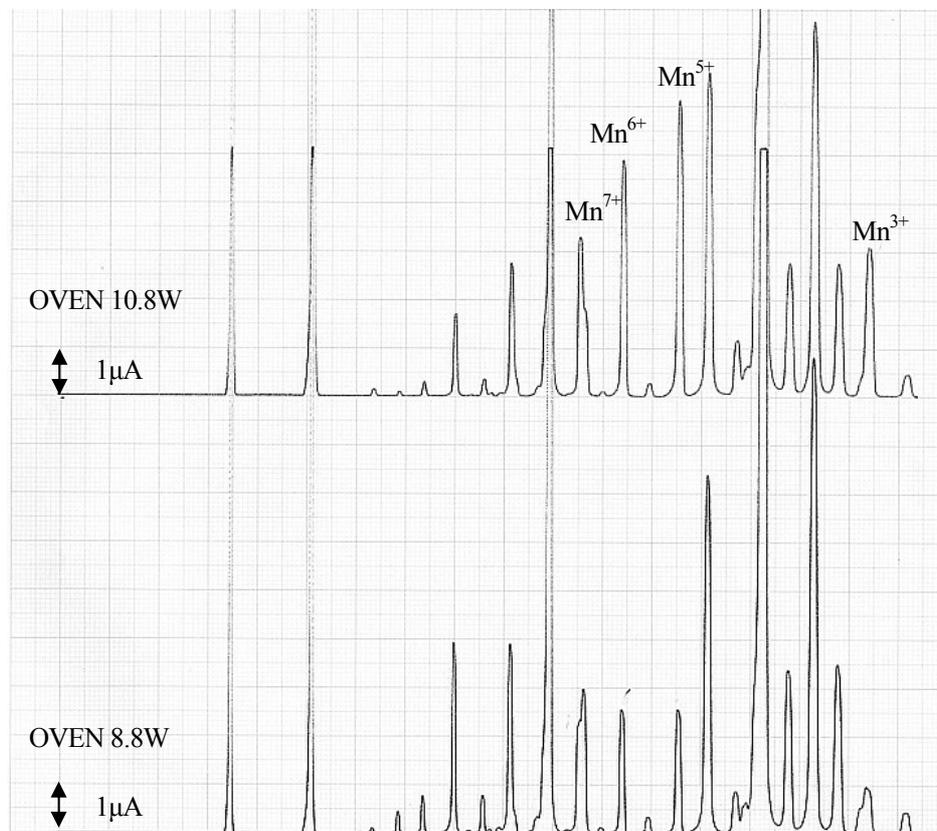
質量スペクトル



4.1.4 Mn イオン

イオン種	Mn
試料形状	粉末 純度 99.9%
同位体比	<sup>55</sup> Mn 100%
物性値	融点 : 1246 °C      沸点 : 2062 °C      T <sub>v</sub> : 867 °C
運転条件	EXT : 20 kV、0.51 mA      FOC : 10.2 kV      Bias : -1000 V 真空度 1.9×10 <sup>-3</sup> Pa オープン電力 : 10.8 W (～1000°C)      RF 電力 : 7.5 W
ビーム電流	<b>Mn<sup>5+</sup> : 6.2 eμA</b> 、 Mn <sup>7+</sup> : 3.3 eμA
コメント	試料導入後の真空の回復は遅い。真空が回復した後も RF を印加すると試料に吸着した酸素や水分の影響により、再び真空が悪化する。この状態では O、OH、H <sub>2</sub> O のピークが非常に多く引出し電流が 5mA を超える。このため、実験開始まで 6 時間程度 RF コンディショニングが必要。また、オープン投入直後も多量のアウトガスがでるため注意を要する。  オープン電力 3.3W 程度投入した時点で Mn <sup>5+</sup> のピークを確認。その後オープン電力に比例し Mn <sup>5+</sup> の電流値は上昇するが、約 10W (～1000°C) 以上でほぼ平衡となる。大電流のビームを安定して生成可能。

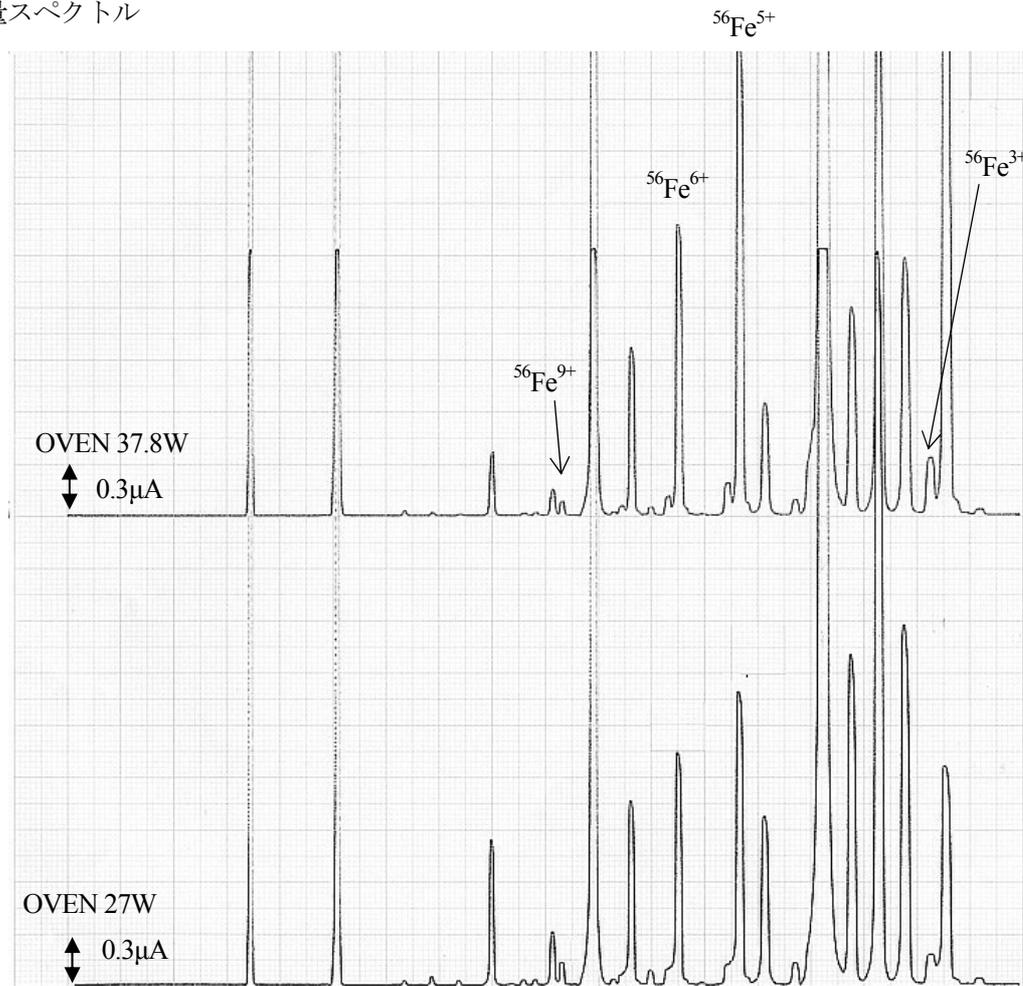
質量スペクトル



4.1.5 Fe イオン

イオン種	Fe
試料形状	Fe 単線 φ1.0mm 純度 99.9%
同位体比	$^{54}\text{Fe}$ : 5.8% $^{56}\text{Fe}$ : 91.7% $^{57}\text{Fe}$ : 2.2%
物性値	融点 : 1536 °C 沸点 : 2863 °C $T_v$ : 1332 °C
運転条件	EXT : 20 kV、-mA FOC : 9.7kV Bias : -1000 V 真空度 $3.0 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 37.8 W (~1500°C) RF 電力 : 11.2 W
ビーム電流	$^{56}\text{Fe}^{6+}$ : 1.8 $\mu\text{A}$ 、 $^{56}\text{Fe}^{5+}$ : 2.8 $\mu\text{A}$ 、 $^{56}\text{Fe}^{9+}$ : 0.14 $\mu\text{A}$
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。オープン投入後 350°C付近で一時的に急激に真空が悪化するが、速やかに回復する。オープン 14 W で Fe のピークが現れる。その後、オープン電力の増加に比例し Fe ビーム電流は増えるが 27W (~1400°C) 以上ではほぼ平衡となる。 ビーム電流は安定しており、融点以下で十分なビーム強度を得ることが可能。

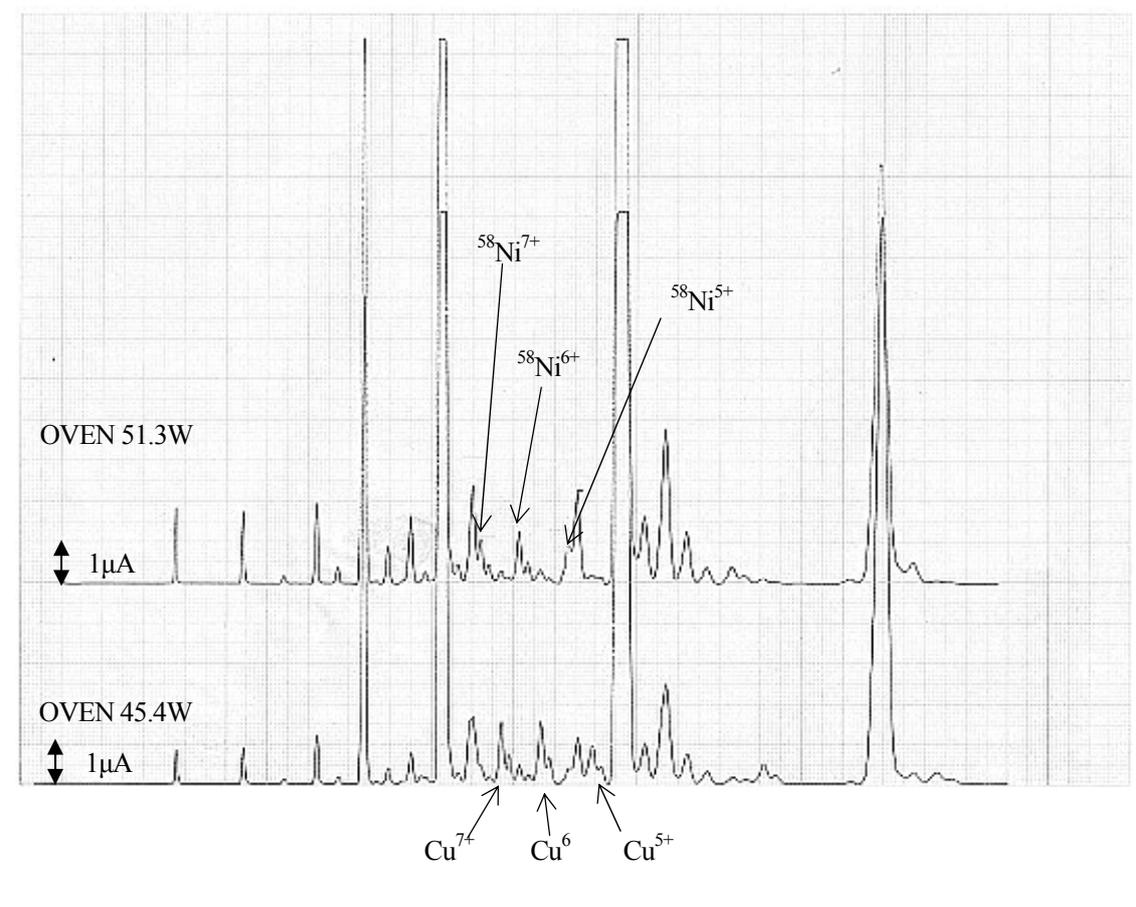
質量スペクトル



4.1.6 Ni イオン

イオン種	Ni
試料形状	Ni 単線 φ1.0mm 純度 99%
同位体比	$^{58}\text{Ni}$ : 68.3% $^{60}\text{Ni}$ : 26.1% $^{62}\text{Ni}$ : 3.6%
物性値	融点 : 1455 °C 沸点 : 2890 °C $T_v$ : 1387 °C
運転条件	EXT : 20 kV、2.5 mA FOC : 9.7kV Bias : -1000 V 真空度 $8.8 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 51.3 W (~1650°C) RF 電力 : 22.0 W
ビーム電流	$^{58}\text{Ni}^{6+}$ : 1.1 $\mu\text{A}$ 、 $^{58}\text{Ni}^{7+}$ : 1.0 $\mu\text{A}$ 、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。しかし、オープン投入後の真空は悪化し回復しない。オープン 32 W で Ni のピークが現れる。その後、オープン電力の増加に比例し Ni ビーム電流は増えるがオープンの使用限界 (1650°C) に達する。ビーム電流は非常に安定している。 オープン電力 45.4 W 時に見える Cu のピークは前回実験で使用した Cu 試料の蒸発残存物である。時間の経過とオープン電力の上昇に伴い小さくなり最終的に消滅した。

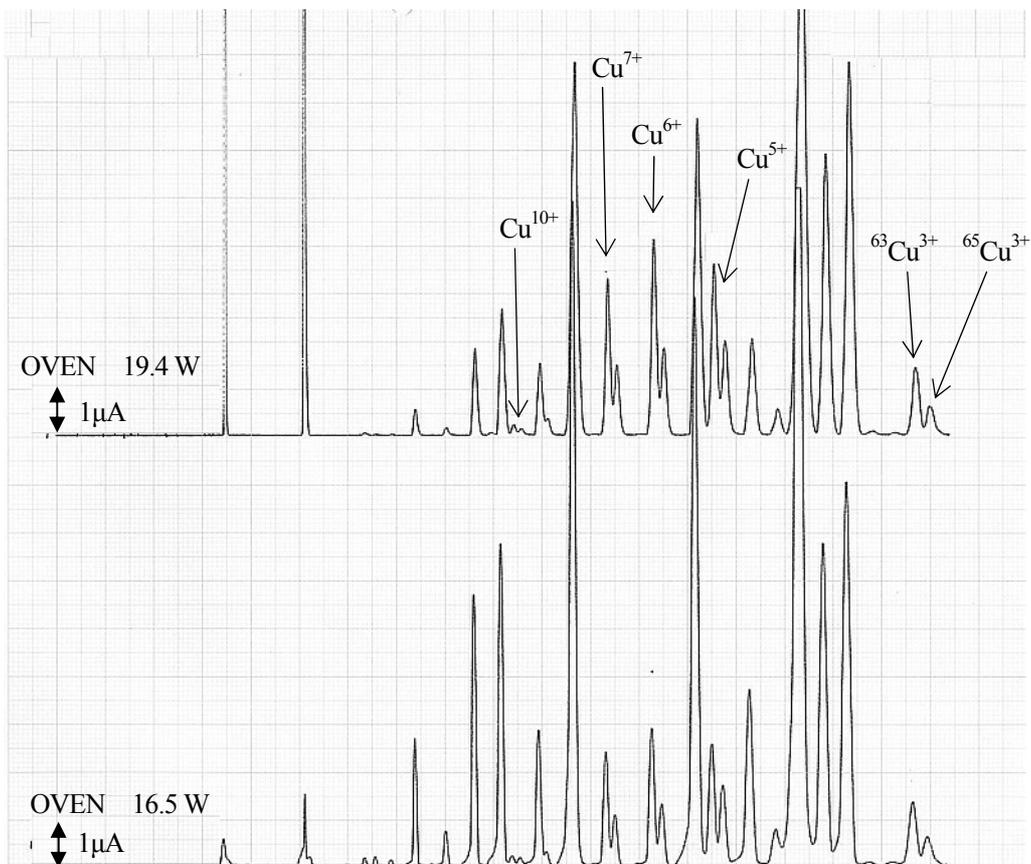
質量スペクトル



4.1.7 Cu イオン

イオン種	Cu
試料形状	Cu 単線 φ1.0mm 純度 99.9%
同位体比	$^{63}\text{Cu}$ : 69.2% $^{65}\text{Cu}$ : 30.8%
物性値	融点 : 1084 °C 沸点 : 2571 °C $T_v$ : 1127 °C
運転条件	EXT : 20 kV、1.53 mA FOC : 11.9 kV Bias : -1000 V 真空度 $2.0 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 19.4 W (~1200°C) RF 電力 : 18.5 W
ビーム電流	$^{63}\text{Cu}^{6+}$ : 4.2 eμA、 $^{63}\text{Cu}^{10+}$ : 0.2 eμA、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。オープン温度 350 °C 付近で一時的に真空が悪化するが、速やかに回復する。 オープン 9 W で Cu のピークが現れる。その後、オープン電力の増加に比例し Cu ビーム電流は増えるが 20 W 以上でほぼ平衡となる。 大電流のビームを安定して得ることが可能。 Cu 試料は溶融するも流出せずにつぼの底に溜まる。

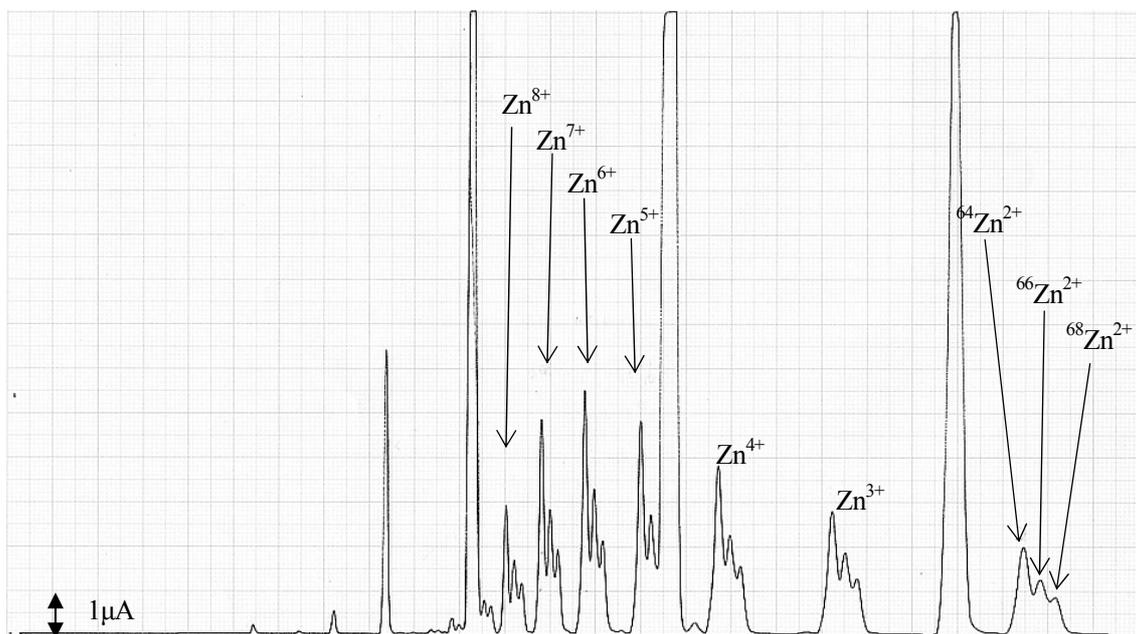
質量スペクトル



4.1.8 Zn イオン

イオン種	Zn
試料形状	Zn 単線 φ1.0mm 純度 99.9%
同位体比	$^{64}\text{Zn}$ : 48.6% $^{66}\text{Zn}$ : 27.9% $^{68}\text{Zn}$ : 18.8%
物性値	融点 : 420 °C 沸点 : 907 °C $T_v$ : 293 °C
運転条件	EXT : 20 kV、1.89 mA FOC : 10.1 kV Bias : -1000 V 真空度 $9.7 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 0.8 W (~200°C) RF 電力 : 19.9 W
ビーム電流	$^{64}\text{Zn}^{6+}$ : 5.5 $\mu\text{A}$ 、 $^{64}\text{Zn}^{8+}$ : 3.0 $\mu\text{A}$ 、
コメント	試料導入後の真空の回復は遅い。 オープン電力投入前では Zn のピークは全く観察されないが、オープン投入すると真空度が急激に悪化するとともに Zn のピークが現れる。 オープン電力は非常にわずかで十分なビーム強度を安定して得られる。試料による汚れは多く、蒸発した Zn がチェンバーやバイアスチューブに付着し、試料交換後も Zn のピークが残る。Zn の蒸気は極わずかなオープン電力で得られるため、Zn が供給過多にならないよう注意が必要である。

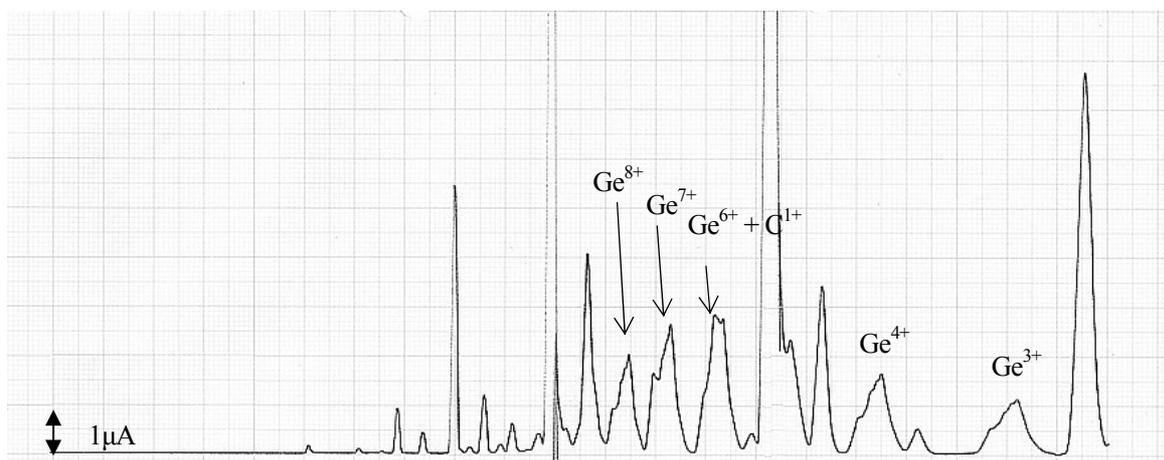
質量スペクトル



4.1.9 Ge イオン

イオン種	Ge
試料形状	Ge 粉末 純度 99.9%
同位体比	$^{70}\text{Ge}$ : 20.5% $^{72}\text{Ge}$ : 27.4% $^{73}\text{Ge}$ : 7.7% $^{74}\text{Ge}$ : 36.5%
物性値	融点 : 937 °C 沸点 : 2834 °C $T_v$ : 1247 °C
運転条件	EXT : 20 kV、1.24 mA FOC : 11.1 kV Bias : -1000 V 真空度 $2.4 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 4.9W (~700°C) RF 電力 : 17.2 W
ビーム電流	$^{74}\text{Ge}^{8+}$ : 2.0 $\mu\text{A}$ 、 $^{74}\text{Ge}^{7+}$ : 2.5 $\mu\text{A}$ 、
コメント	<p>試料導入後の真空の回復は非常に悪い。オープン投入でさらに悪化するものの、時間の経過と共に徐々に回復する。</p> <p>オープン電力 4.9 W で Ge のピークが現れる。予想されるオープン電力 20 W よりもかなり低い。その後、オープン電力を上げるとビームは減り、約 20 W 以上でビームの減少は止まる。</p> <p>試料の一部が自然に酸化し GeO を形成し、これが昇華したため予想より低温で Ge のピークが観察されたと思われる。GeO は蒸気圧が高い物質であり、約 600°C 以下で蒸気圧 <math>10^{-1}\text{Pa}</math> を示す。オープン 20 W 以上では試料の Ge が直接蒸発していると考えられる。</p> <p>Ge ビームを得るには単体 Ge よりも GeO の方が適当である。</p>

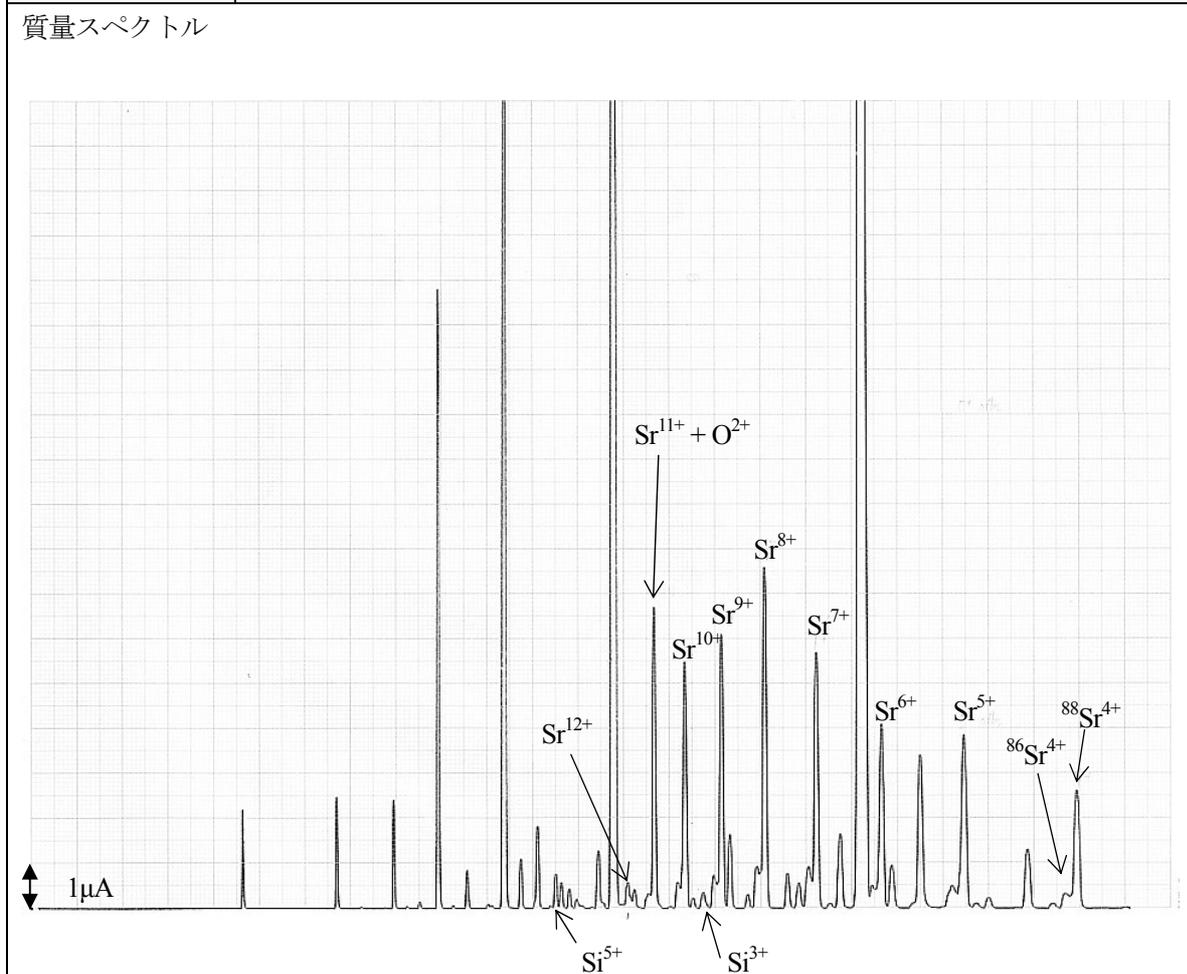
質量スペクトル



4.1.10 Sr イオン

イオン種	Sr
試料形状	SrSi <sub>2</sub> 粉末 純度 99.9%
同位体比	<sup>86</sup> Sr : 9.9% <sup>87</sup> Sr : 7.0% <sup>88</sup> Sr : 82.6%
物性値	融点 : 1120°C 沸点 : - °C T <sub>v</sub> : - °C
運転条件	EXT : 20 kV、2.47 mA FOC : - kV Bias : -1000 V 真空度 2.7×10 <sup>-3</sup> Pa オープン電力 : 13.2 W (~1050°C) RF 電力 : 30.2 W
ビーム電流	<sup>88</sup> Sr <sup>8+</sup> : 7.8 eμA、 <sup>88</sup> Sr <sup>12+</sup> : 0.6 eμA、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。 オープン出力上昇中のアウトガスは少ない。3.3W 付近で一時的に真空が悪くなるも速やかに回復する。 オープン電力 10W 付近から急激に Sr のピークが増え始め、すぐに平衡に達する。SrSi <sub>2</sub> は加熱すると Sr が優先的に蒸発するため Si のピークはわずかにしか観測できない。Si <sup>5+</sup> : 0.7 eμA 大電流のビームを非常に安定して得ることが可能。

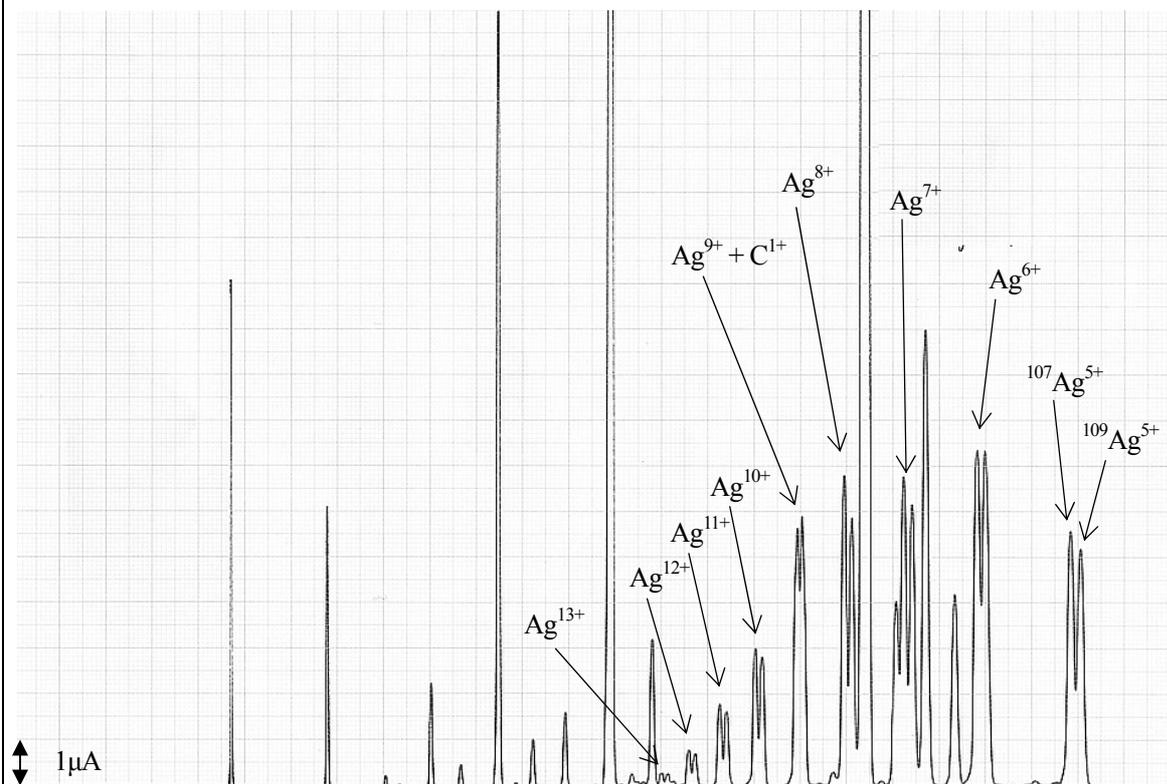
質量スペクトル



4.1.11 Ag イオン

イオン種	Ag
試料形状	Ag 粉末 純度 99.9%
同位体比	$^{107}\text{Ag}$ : 51.8% $^{109}\text{Ag}$ : 48.2%
物性値	融点 : 962 °C 沸点 : 2162 °C $T_v$ : 917 °C
運転条件	EXT : 20 kV、2.79 mA FOC : - kV Bias : -1000 V 真空度 $9.1 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 16.6W (~1100°C) RF 電力 : 31.3 W
ビーム電流	$^{107}\text{Ag}^{10+}$ : 3.0 $\mu\text{A}$ 、 $^{107}\text{Ag}^{8+}$ : 6.8 $\mu\text{A}$ 、 $^{107}\text{Ag}^{13+}$ : 0.3 $\mu\text{A}$
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。また、オープン電力上昇に伴うアウトガスも少ないが、4W 付近で一時的に真空が悪くなる。 オープン 8W 付近から Ag のピークが出始める。10W 以下ではビーム電流は安定しているが、これを超えると溶解した Ag がヒーター部に流出するため、ビーム電流は変動幅が大きくなり不安定となる。

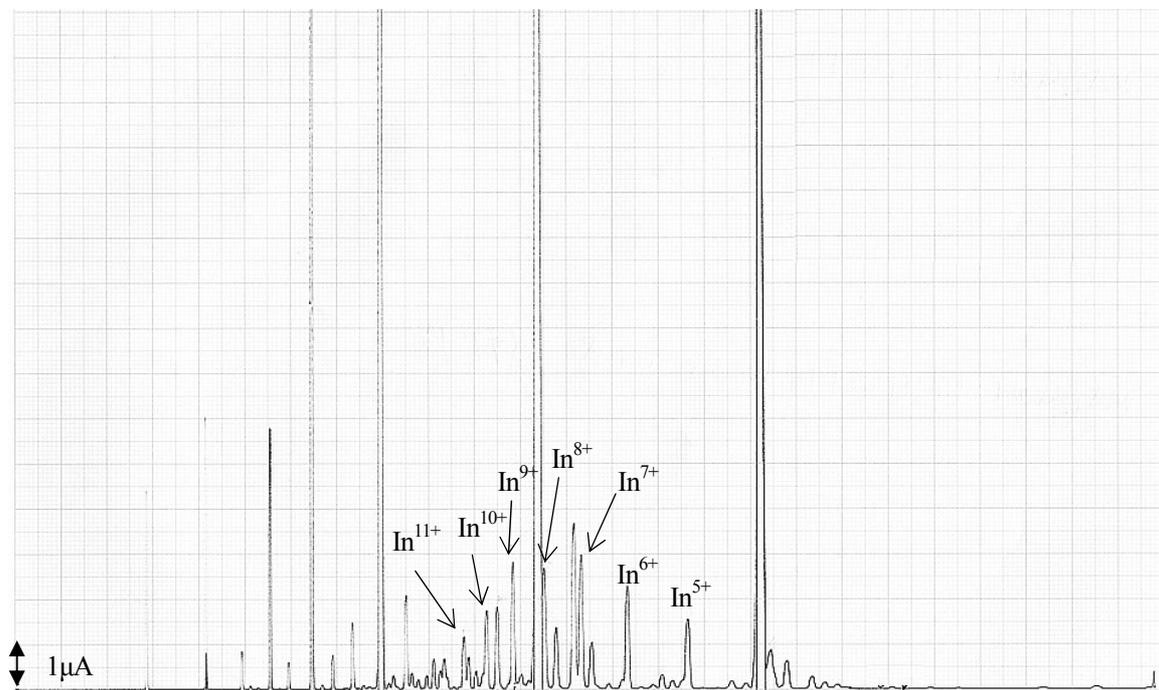
質量スペクトル



4.1.12 In イオン

イオン種	In
試料形状	In 単線 $\phi 1.0 \text{ mm}$ 純度 99.9%
同位体比	$^{113}\text{In}$ : 4.3% $^{115}\text{In}$ : 95.7%
物性値	融点 : $157 \text{ }^\circ\text{C}$ 沸点 : $2072 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_v$ : $832 \text{ }^\circ\text{C}$
運転条件	EXT : 20 kV、1.85 mA FOC : - kV Bias : -1000 V 真空度 $8.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ オープン電力 : 8.5 W ( $\sim 850^\circ\text{C}$ ) RF 電力 : 31.0 W
ビーム電流	$\text{In}^{10+}$ : 1.8 $\mu\text{A}$ 、 $\text{In}^{13+}$ : 0.3 $\mu\text{A}$ 、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。 オープン 6.7 W 付近より In のピークが現れる。ビーム電流はオープン電力に比例して増えるが、11 W 以上では溶融した In がヒーター部に侵入し、オープン電流が不安定となる。その結果ビーム電流も大きく変動する。 大電流を安定に得るのは難しい。

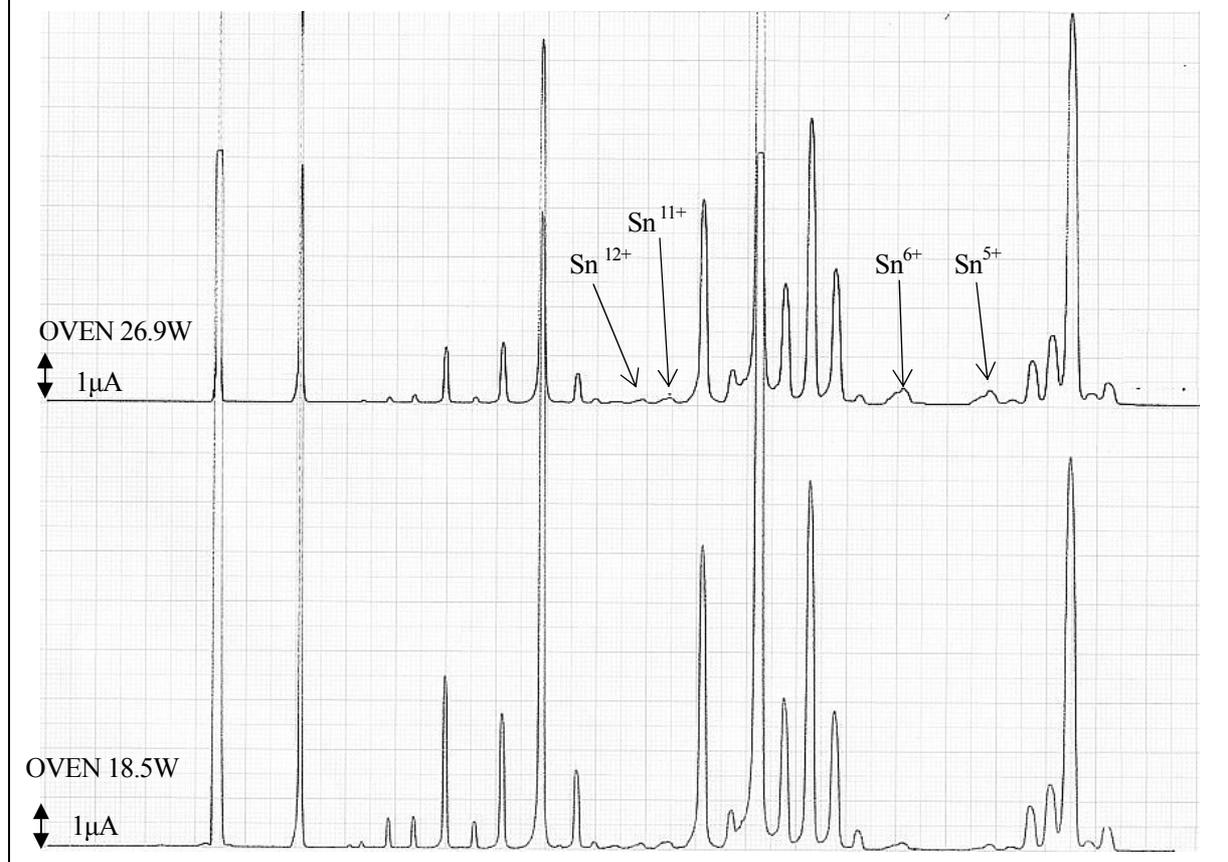
質量スペクトル



4.1.13 Sn イオン

イオン種	Sn
試料形状	Sn 単線 φ1.0 mm 純度 99.9%
同位体比	$^{116}\text{Sn}$ : 14.5% $^{118}\text{Sn}$ : 24.2% $^{119}\text{Sn}$ : 8.6% $^{120}\text{Sn}$ : 32.6%
物性値	融点 : 232 °C 沸点 : 2603 °C $T_v$ : 1107 °C
運転条件	EXT : 20 kV、1.85 mA FOC : 10.5 kV Bias : -1000 V 真空度 $2.9 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 26.9 W (~1350°C) RF 電力 : 21.7 W
ビーム電流	$\text{Sn}^{12+}$ : 0.1 $\mu\text{A}$ 、 $\text{Sn}^{6+}$ : 0.4 $\mu\text{A}$ 、
コメント	オープン電力 13 W で Sn のピークが現れる。 オープン電力 20 W 以上では Sn のビーム電流はほぼ飽和する。 Sn の複数ある同位体を分離できないため、ピーク幅は極めて広い。 溶融した Sn はるつぼの先端に溜まり、一部はるつぼ内部よりキャップ孔を伝って流出し、キャップ表面に一様に付着する。ヒーター部への流出は無いため、オープン電流が不安定になることは無いが、ビーム電流は大きく変動する。 大電流のビームを安定に得ることは難しい。

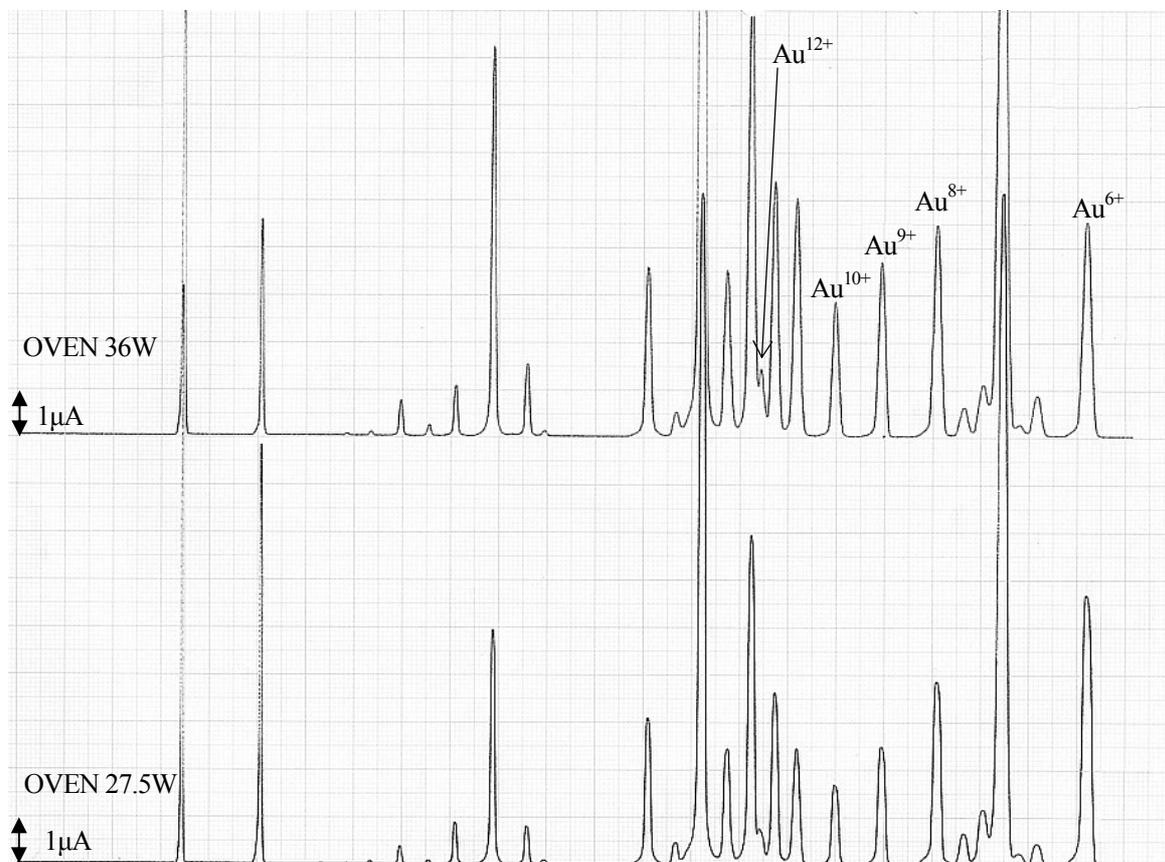
質量スペクトル



4.1.14 Au イオン

イオン種	Au
試料形状	Au 単線 φ1.0 mm 純度 99.9%
同位体比	<sup>197</sup> Au : 100%
物性値	融点 : 1064 °C 沸点 : 2857 °C $T_v$ : 1272 °C
運転条件	EXT : 20 kV、- mA FOC : 9.9 kV Bias : -1000 V 真空度 $2.8 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 36.0W (~1500°C) RF 電力 : 15.7 W
ビーム電流	<b>Au<sup>9+</sup> : 3.6 <math>\mu</math>A</b> 、 Au <sup>11+</sup> : 1.5 $\mu$ A、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。 オープン電力の増加に伴う真空度の悪化はほとんど無く、安定している。 オープン電力 8.5 W で Au のピークが現れる。26 W でほぼ平衡となる。 溶融した Au はるつぼの外へ流れ出すことなくつぼの先端に集中する。試料による汚れはほとんど無い。 大電流のビームを安定に得ることができる。

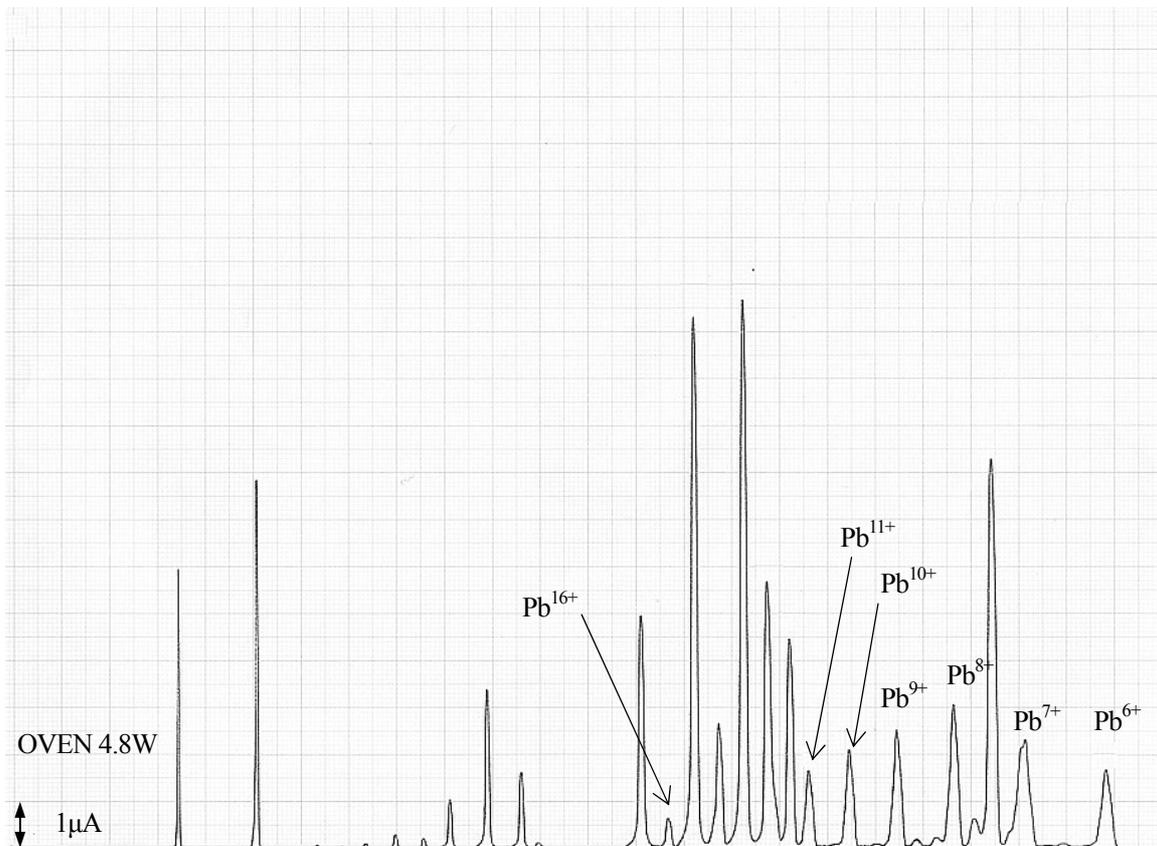
質量スペクトル



4.1.15 Pb イオン

イオン種	Pb
試料形状	Pb 単線 φ1.0 mm 純度 99.9%
同位体比	$^{206}\text{Pb}$ : 24.1% $^{207}\text{Pb}$ : 22.1% $^{208}\text{Pb}$ : 52.4%
物性値	融点 : 327 °C 沸点 : 1750 °C $T_v$ : 627 °C
運転条件	EXT : 20 kV、0.42 mA FOC : 10.2 kV Bias : -1000 V 真空度 $1.6 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 4.8 W (700°C) RF 電力 : 20.0 W
ビーム電流	<b>Pb<sup>11+</sup> : 1.7 eμA</b> 、Pb <sup>16+</sup> : 0.6 eμA Pb <sup>8+</sup> : 3.1 eμA、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。オープン出力を上げても真空の悪化はほとんど無い。また、引出し電流も少なく安定である。 Pb の同位体は全く質量分離できない。 溶融した Pb はるつぼの底に溜まる。オープン及びるつぼの汚れは少ない。

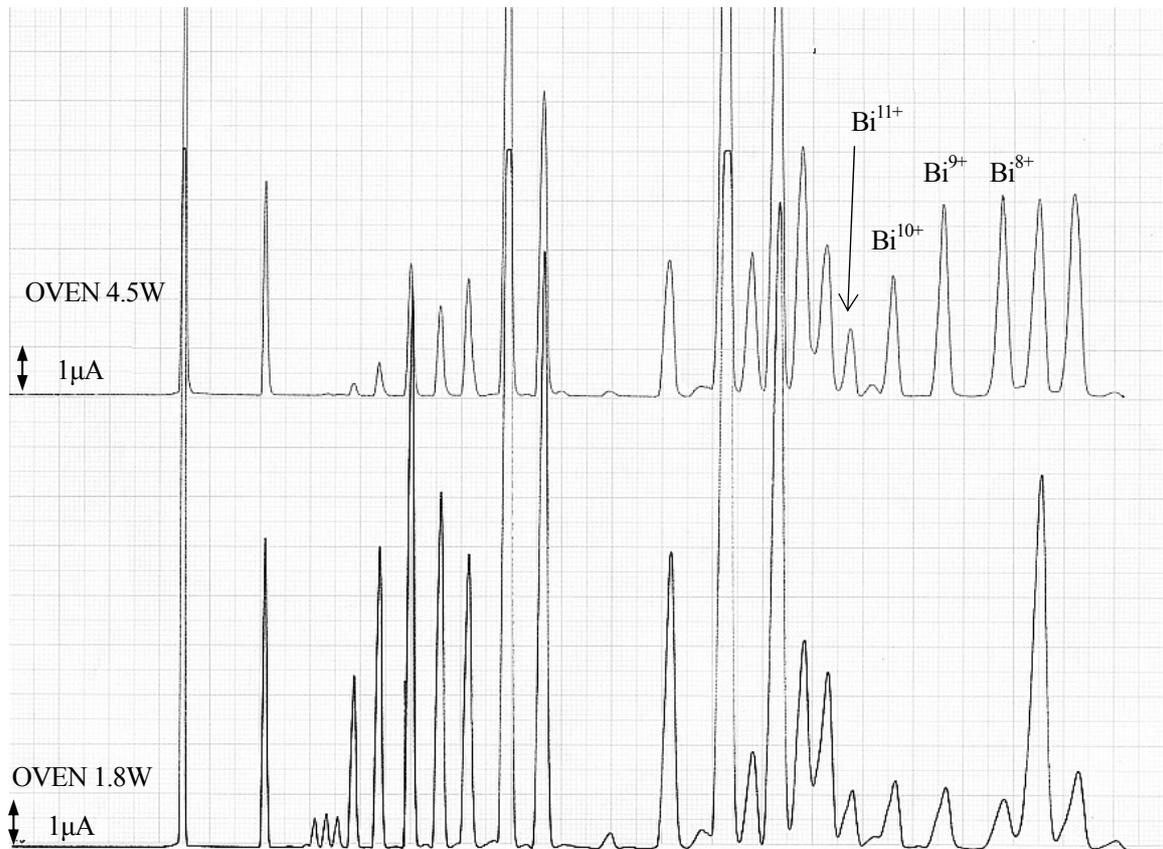
質量スペクトル



4.1.16 Bi イオン

イオン種	Bi
試料形状	Bi 単線 $\phi 1.0$ mm 純度 99.9%
同位体比	$^{209}\text{Bi}$ : 100%
物性値	融点 : 271 °C 沸点 : 1561 °C $T_v$ : 595 °C
運転条件	EXT : 20 kV、- mA FOC : 10.2 kV Bias : -281 V 真空度 $2.3 \times 10^{-3}$ Pa オープン電力 : 4.5 W (650°C) RF 電力 : 15.5 W
ビーム電流	$\text{Bi}^{10+}$ : 2.5 $\mu\text{A}$ 、 $\text{Bi}^{8+}$ : 4.2 $\mu\text{A}$ 、
コメント	試料導入後の真空の回復は早い。 オープン電力 1.8W で Bi のピークが現れる。 るつぼ内より溶融した Bi がキャップの隙間からヒーター側へ流れ込む。このためオープン電流が不安定になりやすい。

質量スペクトル



## 4.2 結果と考察

開発したオープンを用いて 16 種類の金属のイオンを生成することができた。図 13 に得られた金属イオンの価数毎の電流量を示す。核種の存在比によるビーム強度への影響を排除するため、ビーム電流は各核種の存在比に対して規格化している。(例： $^{107}\text{Ag}^{8+}$ の場合、見かけの電流値は  $6.8\mu\text{A}$  であるので規格化した電流値はこれを  $^{107}\text{Ag}$  の存在比 51.8% で除した  $13.1\mu\text{A}$  となる) なお、質量分離が不可能であった Sn や Pb の電流値は規格化していない。

ほぼすべての単体試料において、 $1\mu\text{A}$  オーダーのビームを得るのにるつぼ温度を  $T_v$  と同程度まで上げる必要があることがわかった。これは参考文献 2) に示された内容と一致する。例として図 14 に Mg、In、Cu に対する規格化したイオン電流と蒸気圧の関係を示す。温度はオープン電力をもとに図 10 より換算したものである。Mg の場合、蒸気圧曲線に対してより低い温度でビーム電流が増加している。るつぼはオープン電力以外にもプラズマにより常に加熱される。このため、 $T_v$  が低い Mg ではプラズマによる加熱の影響が顕著になり、見かけ上少ないオープン電力で必要な温度  $T_v$  に達するためだと考えられる。

金属単体を試料として用いた場合、イオン生成の安定性よりおおよそ 3 種類のグループに分類することができる。

### I グループ (Zn、Mg)

$T_v$  が融点よりも低い金属はわずかなオープン電力で大強度のイオンビームを安定に得ることができ。しかし、低温領域ではオープンの温度勾配が急峻であり、またプラズマによる熱がオープン本体にも加わるため詳細な温度制御が難しい。このため金属蒸気の供給過剰な状態となりやすく、試料交換後もチェンバー内部やオープンに付着した金属の再蒸発によってマスピークが残留する。残留したピークは長時間 RF コンディショニングとオープンの空焚きを続けることにより消すことができる。

### II グループ (Cu、Ag、Au、Fe、Ni、Mn、)

$T_v$  と融点が同程度の金属も大強度のビームを安定に得ることが可能である。これらの金属は  $T_v$  が  $1000^\circ\text{C}$  以上にあるものが多く、オープンの温度制御が容易であるため、出力調整がしやすい。また、融点以上に加熱しても溶融した試料がるつぼ外へ流出することは無い。

### III グループ (Sn、Al、In、)

これらの  $T_v$  が融点よりも著しく高い元素はイオンを生成することが可能であっても、溶融した金属がヒーター部等に流出しヒーターをショートさせてしまう現象が頻発する。これにより金属イオンは全く生成しなくなったり、ビーム電流が著しく不安定になったりする。これらの元素のイオンを安定に得るには蒸気圧が高い化合物試料を用いるか、るつぼの形状を変えて溶けた試料が容易に流れ出さないような工夫が必要である。

単体試料が得にくいものや、 $T_v$  が非常に高い金属に対して化合物を用いる方法は有効である。特に  $\text{SrSi}_2$  のように一方の元素が優先的に蒸発する物質<sup>8)</sup> は不必要なマスピークが発生しないため、価数選択の幅を広げることができる。また、金属酸化物は目的の金属以外に酸素のピークを伴うが、酸素は残留気体として常に存在するため、余分なマスピークを発生させない試料として適当である。

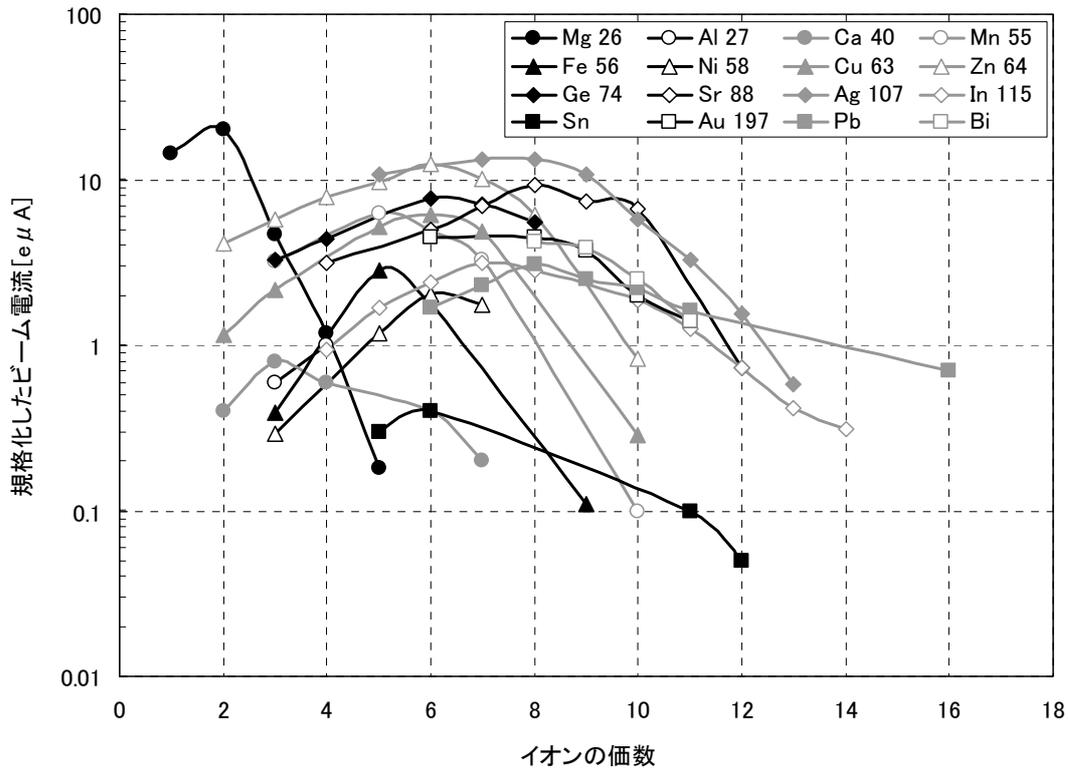


図 13 各金属元素のイオン電流と価数分布

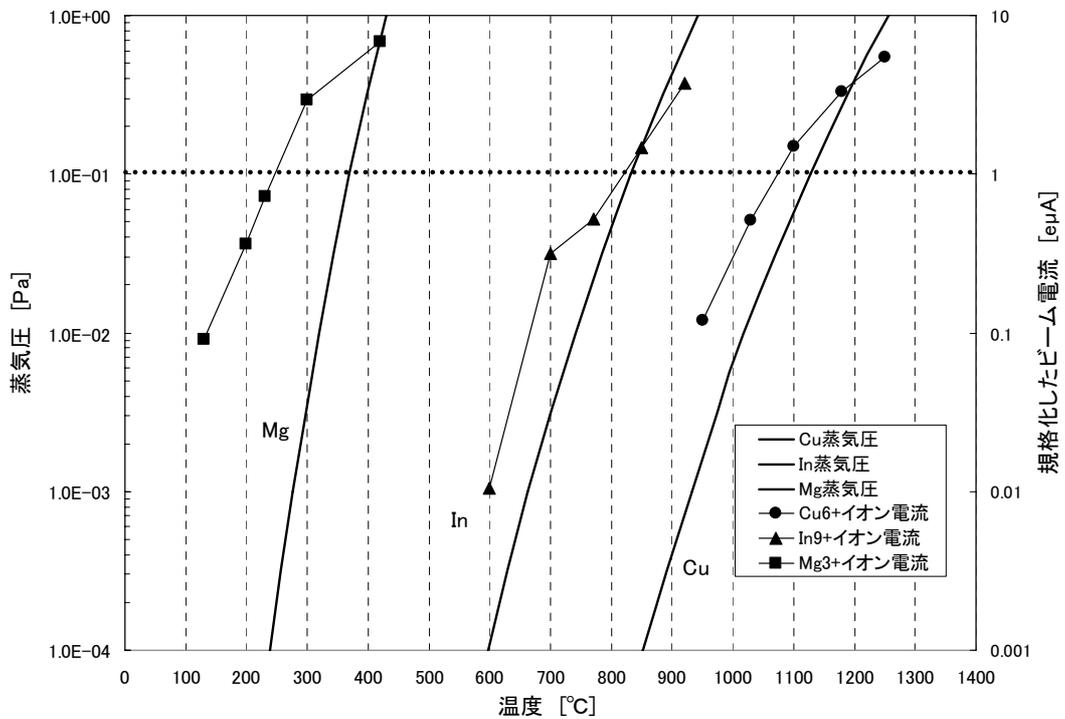


図 14 各金属元素のイオン電流と蒸気圧

## 5.まとめ

タンデム加速器ターミナルイオン源から金属イオンの生成を可能にするため、オープン法による金属イオン生成を試みた。

開発したオープンの到達温度は 1650°C に達し、設計温度を十分に満足する性能であった。また、バイアスチューブによるシールド効果により最高温度で使用してもイオン源の永久磁石に対して十分に安全であることが確認できた。

このオープンとテスト用 ECR イオン源を用いて金属イオンの生成試験を行い、16 種類の金属イオンを生成することができた。イオンビームの安定度や強度は金属の種類に大きく依存し、 $T_v$  が融点付近、もしくは融点よりも低い金属は大強度のイオンビームを安定に得られた。一方で、 $T_v$  が融点よりも著しく高い場合はイオンを生成することが可能であっても、熔融した金属がヒーター部等に流出しビーム電流が不安定になることがわかった。

これらの結果より、オープン法によるターミナルイオン源での金属イオンの生成は十分可能であることが確認できた。今後、実際にターミナルイオン源に搭載するためには、長時間にわたるビームの安定性の検証や  $SF_6$  ガスに対する耐圧性能の確認及び耐圧電源、制御機器の開発が必要である。

参考文献

- 1) M.atsuda, T.Asozu, T.Nakanoya, K.Kutsukake, S.Hanashima and S.Takiuchi J.Physi. Conference Series **163**, 012112 (2009)
- 2) C.Barue, J.Bossler, S.Schennach, H.Schulte, and B.H.Wolf, Rev. Sci. Instrum. **67**, p.1368 (1996)
- 3) 平尾泰男他 “加速器工学ハンドブック” 日本原子力産業会議 (2000)
- 4) PANTECHNIK 社 “THE PANTECHNIK CATALOGUE” (2004)
- 5) アルバック編 “真空ハンドブック” オーム社 (2002)
- 6) 国立天文台編 “理科年表 2002”
- 7) R.Geller “Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas” Institute of physics publishing
- 8) G.Balducci, S.Brutti, A.Ciccioli, G.Gigli, G.Trionfetti, A.Palenzona, M.Pani, Intermetallics **14**, p.578 (2006)

This is a blank page.

# 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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	ルクス	lx		lm/m <sup>2</sup>
放射線当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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、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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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	1 h=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	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

