

JAERI - M
89-090

水素負イオンビーム中の不純物測定

1989年7月

奥村 義和・花田磨砂也・小島 啓明

松田 恭博*・大原比呂志

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 株式会社 高野高速印刷

水素負イオンビーム中の不純物測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

奥村 義和・花田磨砂也・小島 啓明

松田 恭博^{*}・大原比呂志⁺

(1989年6月22日受理)

負イオンビーム中に含まれる不純物イオンを磁場質量分析器と分光器を用いて測定した。体積生成型負イオン源からの水素負イオンビーム中には、 O^- 、 OH^- 、 O_2^- の不純物負イオンがあるが、それらの量は1%以下である。イオン源のプラズマ密度が高くなると、解離が進むために OH^- イオンは減少し、 O^- イオンが増加する。質量分析器を $M=200$ まで掃引したが、金属負イオンは観測されなかった。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

+ JT-60 試験部

* 外来研究員，日新電機株式会社

Measurement of Impurities in a Volume Produced H^- Ion Beam

Yoshikazu OKUMURA, Masaya HANADA, Hiroaki KOJIMA
Yasuhiro MATSUDA* and Hiroshi OOHARA⁺

Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 22, 1989)

Impurity content in a negative ion beam was measured by a momentum mass analysis and a doppler shifted spectroscopy. The ion beam produced in a volume H^- source contains O^- , OH^- and O_2^- ions, whose contents are less than 1%. The O^- impurity increases with plasma density because of an enhancement of dissociation of OH^- . Although the momentum mass analyzer was scanned up to $M=200$, no metal impurity was found.

Keywords: Impurity, Ion Source, Negative, Volume Production, Mass Analysis, Spectroscopy, Neutral Beam Injector

⁺ Department of JT-60 Facility

^{*} On leave from Nissin Electric Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	1
3. 質量分析結果	2
3.1 不純物負イオンの種類	2
3.2 不純物量の推定	2
3.3 アーク電流依存性	3
3.4 ガス圧依存性	4
3.5 時間変化	4
4. 分光測定	4
5. 考察	5
6. おわりに	6
謝辞	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental set-up	1
3. Experimental results on mass analysis	2
3.1 Species of impurities	2
3.2 Estimation of impurity contents	2
3.3 Dependence on arc discharge current	3
3.4 Dependence on gas pressure in arc chamber	4
3.5 Time evolution	4
4. Doppler shifted spectroscopy	4
5. Discussion	5
6. Conclusion	6
Acknowledgement	6
References	7

1. はじめに

負イオンビームを用いた粒子入射加熱装置(NBI)は、核融合プラズマを高い効率で加熱できるのみならず、トカマク型装置において電流駆動や分布制御を行える可能性を持ち核融合炉用の加熱装置として極めて有望である。この加熱装置の実現のためには数アンペアから数十アンペアの大電流負イオン源が必要であり、各国でその開発が精力的に行われている。¹⁾

負イオン生成法には、主なものに表面生成法、荷電交換法、体積生成法があるが、これらのうち核融合用に最も有望と考えられるのは体積生成法である。この方式では、負イオンは水素プラズマ中において、主として振動励起された水素分子の電子付着解離反応によって生成され、静電的に加速される。現在、世界最大の負イオン源は原研において開発されたアンペア級負イオン源である。²⁾ このイオン源は、多極磁場型プラズマ源と多孔型加速電極を用いて、75 keV, 3.4 Aの負イオンビームを発生することが出来る。³⁾

本論文は、このアンペア級負イオン源によって生成された負イオンビーム中の不純物イオンの量について報告する。これは、体積生成型負イオン源の不純物量について、世界で初めての報告であるばかりでなく、実際の核融合炉で使用されるものと同等の大電流負イオン源に関するものとして、核融合用の加熱装置の設計のデータベースとなり得るものである。

また、本論文では、ドップラーシフトした水素ビームのバルマー光を分光器で検出することにより、主要な不純物であるOH⁻の量を、簡単に、かつ非接触で測定する方法についても言及する。

2. 実験装置

実験は負イオン源テストスタンド(ITS-2M)を用いて行った。装置の全体図を図1に示す。

負イオン源は、75 keV, 3.4 A, 50 msecの水素負イオンビームを発生できるが、本実験においては、200 msecのビームを安定に、時間変化なく出したいという要請から、50 keV, 1.0 A程度の比較的低い出力で測定を行った。

イオン源の下流7.5 mの位置にビームターゲットがあり、ビームターゲットの中心の孔を通過したビームが質量分析器に入る。質量分析器の入口スリットの直径は4 mmφである。60度磁場偏向型の質量分析器であって、偏向されたビームは焦点に設置されたファラデーカップにより検出される。質量分析器の本来の分解能は、

$$R = M / \Delta M = 85 \quad \Delta M : \text{ピークの半値幅}$$

であるが、本実験に於いては、分解能よりも感度が重要であったので、ファラデーカップの位置を偏向磁場に近づけ、感度を高めて測定した。分解能Rは40程度に落ちている。

偏向磁場の偏向半径は47 cm、最大磁場は10.6 kGであるので、検出できる最大の質量数は50 keVのビームエネルギーに対してM=240である。負イオン源の運転パルス幅200 msecの間に、偏向磁場を掃引した。1ショットのパルスの間に掃引できる磁場の範囲は約3 kGであった

1. はじめに

負イオンビームを用いた粒子入射加熱装置(NBI)は、核融合プラズマを高い効率で加熱できるのみならず、トカマク型装置において電流駆動や分布制御を行える可能性を持ち核融合炉用の加熱装置として極めて有望である。この加熱装置の実現のためには数アンペアから数十アンペアの大電流負イオン源が必要であり、各国でその開発が精力的に行われている。¹⁾

負イオン生成法には、主なものに表面生成法、荷電交換法、体積生成法があるが、これらのうち核融合用に最も有望と考えられるのは体積生成法である。この方式では、負イオンは水素プラズマ中において、主として振動励起された水素分子の電子付着解離反応によって生成され、静電的に加速される。現在、世界最大の負イオン源は原研において開発されたアンペア級負イオン源である。²⁾ このイオン源は、多極磁場型プラズマ源と多孔型加速電極を用いて、75 keV, 3.4 Aの負イオンビームを発生することが出来る。³⁾

本論文は、このアンペア級負イオン源によって生成された負イオンビーム中の不純物イオンの量について報告する。これは、体積生成型負イオン源の不純物量について、世界で初めての報告であるばかりでなく、実際の核融合炉で使用されるものと同等の大電流負イオン源に関するものとして、核融合用の加熱装置の設計のデータベースとなり得るものである。

また、本論文では、ドップラーシフトした水素ビームのバルマー光を分光器で検出することにより、主要な不純物であるOH⁻の量を、簡単に、かつ非接触で測定する方法についても言及する。

2. 実験装置

実験は負イオン源テストスタンド(ITS-2M)を用いて行った。装置の全体図を図1に示す。

負イオン源は、75 keV, 3.4 A, 50 msecの水素負イオンビームを発生できるが、本実験においては、200 msecのビームを安定に、時間変化なく出したいという要請から、50 keV, 1.0 A程度の比較的低い出力で測定を行った。

イオン源の下流7.5 mの位置にビームターゲットがあり、ビームターゲットの中心の孔を通過したビームが質量分析器に入る。質量分析器の入口スリットの直径は4 mmφである。60度磁場偏向型の質量分析器であって、偏向されたビームは焦点に設置されたファラデーカップにより検出される。質量分析器の本来の分解能は、

$$R = M / \Delta M = 85 \quad \Delta M : \text{ピークの半値幅}$$

であるが、本実験に於いては、分解能よりも感度が重要であったので、ファラデーカップの位置を偏向磁場に近づけ、感度を高めて測定した。分解能Rは40程度に落ちている。

偏向磁場の偏向半径は47 cm、最大磁場は10.6 kGであるので、検出できる最大の質量数は50 keVのビームエネルギーに対してM=240である。負イオン源の運転パルス幅200 msecの間に、偏向磁場を掃引した。1ショットのパルスの間に掃引できる磁場の範囲は約3 kGであった

ので、正と負のイオンについて $M=200$ まで掃引するには、数ショットのビームを要した。

イオン源と質量分析器の間の距離が長いので、負イオンが中性化して失われないように、真空容器は $2,000 \text{ l/s}$ のターボ分子ポンプ3台と、 $10,000 \text{ l/s}$ のクライオソープションポンプ1台、 $100,000 \text{ l/s}$ の大容量クライオポンプ3台で排気されている。また、質量分析器の内部の真空度は、2台の油拡散ポンプにより、測定中においても $2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ に保たれた。

3. 質量分析結果

3.1 不純物負イオンの種類

図2(a), (b)に質量分析器で得られたスペクトルの一例を示す。不純物イオンとして、 O^- , OH^- , O_2^- が検出された。 $M=15.1$ にあるピークは、 OH^- イオンが解離してできた O^- イオンである。つまり、解離によりオネルギーが $16/17$ になるので等価質量が、 $16 \times 16/17 = 15.1$ になったものである。また、真空容器中の残留ガスとの衝突によってできた O^+ , OH^+ , O_2^+ などの正のイオンも観測される。質量分析器を $M=200$ まで掃引したがそれ以外の負イオンは観測されなかった。金属負イオンは生成されていないか、あるいはあったとしても検出限度以下である。

図3は $M=1$ から $M=17$ までをゲインを上げて測定したものである。水素と酸素不純物の間には、不純物のピークは観測されない。一般に、正のイオン源においては、この領域に炭素あるいは炭化水素のピークが存在するが、負イオン源においては、それらの不純物イオンは生成されないようである。

なお、水素のピークを拡大すると、図3でわかるように、テールの部分が非対称になっている。この原因は、ビーム中に、加速途中で電子脱離したエネルギーの低い水素イオンが存在しているからである。

3.2 不純物量の推定

質量分析器で得られたスペクトルの高さの比がそのままイオン源から引き出されたビーム中のイオンの成分比に対応する訳ではない。ビーム中のイオンは真空容器の中を進むあいだに、残留ガスと衝突し、解離や電離を受ける。水素負イオンの場合には、中性粒子や正イオンに変換されるが、それらの断面積を σ_{nm} として、

$$\frac{d I^-}{d x} = -(\sigma_{-10} + \sigma_{-11}) I^- + \sigma_{0-1} I^- + \sigma_{1-1} I^-$$

$$\frac{d I^+}{d x} = -(\sigma_{10} + \sigma_{1-1}) I^+ + \sigma_{01} I^+ + \sigma_{-11} I^+$$

$$I^0 = 1 - I^+ - I^-$$

の関係がある。ここで、 I^- , I^+ , I^0 は、それぞれ負イオン、正イオン、中性粒子の割合である。

ので、正と負のイオンについてM=200まで掃引するには、数ショットのビームを要した。

イオン源と質量分析器の間の距離が長いので、負イオンが中性化して失われないように、真空容器は2,000 ℓ/sのターボ分子ポンプ3台と、10,000 ℓ/sのクライオソープションポンプ1台、100,000 ℓ/sの大容量クライオポンプ3台で排気されている。また、質量分析器の内部の真空度は、2台の油拡散ポンプにより、測定中においても 2×10^{-6} Torrに保たれた。

3. 質量分析結果

3.1 不純物負イオンの種類

図2(a), (b)に質量分析器で得られたスペクトルの一例を示す。不純物イオンとして、 O^- , OH^- , O_2^- が検出された。M=15.1にあるピークは、 OH^- イオンが解離してできた O^- イオンである。つまり、解離によりオネルギーが16/17になるので等価質量が、 $16 \times 16 / 17 = 15.1$ になったものである。また、真空容器中の残留ガスとの衝突によってできた O^+ , OH^+ , O_2^+ などの正のイオンも観測される。質量分析器をM=200まで掃引したがそれ以外の負イオンは観測されなかった。金属負イオンは生成されていないか、あるいはあったとしても検出限度以下である。

図3はM=1からM=17までをゲインを上げて測定したものである。水素と酸素不純物の間には、不純物のピークは観測されない。一般に、正のイオン源においては、この領域に炭素あるいは炭化水素のピークが存在するが、負イオン源においては、それらの不純物イオンは生成されないようである。

なお、水素のピークを拡大すると、図3でわかるように、テールの部分が非対称になっている。この原因は、ビーム中に、加速途中で電子脱離したエネルギーの低い水素イオンが存在しているからである。

3.2 不純物量の推定

質量分析器で得られたスペクトルの高さの比がそのままイオン源から引き出されたビーム中のイオンの成分比に対応する訳ではない。ビーム中のイオンは真空容器の中を進むあいだに、残留ガスと衝突し、解離や電離を受ける。水素負イオンの場合には、中性粒子や正イオンに変換されるが、それらの断面積を σ_{nm} として、

$$\frac{d I^-}{d x} = -(\sigma_{-10} + \sigma_{-11}) I^- + \sigma_{0-1} I^- + \sigma_{1-1} I^-$$

$$\frac{d I^+}{d x} = -(\sigma_{10} + \sigma_{1-1}) I^+ + \sigma_{01} I^+ + \sigma_{-11} I^+$$

$$I^0 = 1 - I^+ - I^-$$

の関係がある。ここで、 I^- , I^+ , I^0 は、それぞれ負イオン、正イオン、中性粒子の割合である。

また、 x は残留ガスの線密度であって、

$$x = \int n_0(l) dl$$

n_0 : 残留ガス密度

l : イオン源からの距離

である。

この連立微分方程式を、 $x = 0$ において I^- が 100% という境界条件で解くと図 4 の実線のカーブが得られる。即ち、線密度とともに負イオンは単調に減少し、正イオンと中性粒子が増加する。

さて、実験的に線密度を変えて質量分析を行った結果を表 1 に示す。線密度は、100,000 l/s のクライオポンプ 3 台を順次動作させることにより、真空容器の残留ガス圧を下げて変化させた。予想される通り、線密度の増加とともに H^- イオンは減少し、 H^+ イオンが増えてくる。クライオポンプを全て停止した時 ($x = 6.5 \times 10^{16}$ molecules/cm²) の H^- イオンと H^+ イオンの比率は 1 : 62 であり、これは図 4 において、 $x = \infty$ の時の平衡値 1 : 72 に近い。線密度が 3.10×10^{15} molecules/cm² の時の負イオンの量が図 4 のカーブにのるように表 1 の値を規格化し、同じ図にプロットした。計算値と実験値は比較的良く一致しているのがわかる。これらのことから、図 4 において線密度をゼロに外挿した値を、イオン源を出たところの H^- イオンの量とした。

一方、 O^- イオンについては、水素ガス中での断面積が不足している。そこで、以前に本実験装置を用いて正のイオンビームの質量分析を行った際に得た断面積データを使用することにした。例えば、図 5 は文献 4 から転載した H_3O^+ の線密度に対する変化を示したものであるが、この図から酸素の正イオン、負イオン、中性粒子の割合は線密度が 1×10^{16} molecules/cm² 程度で平衡状態に達し、 $O^+ : O^- : O^0 = 1 : 1.4 : 3.2$ であることがわかる。今回の実験でも、表 1 に示す様に線密度とともに図 5 と同様に平衡値に近づいており、 O^+ に対する O^- の比率は平均すると 1.3 ± 0.15 と文献 4 の値に近い。そこで、イオン源をでたところの負イオンの量は中性粒子に変換されたものも含めて平衡状態の O^+ の量の 5.6 倍とした。

OH^- イオンは、解離を考慮しなければならないため、もう少し複雑である。表 1 にみるように、 OH^- イオンは線密度とともに減少し、解離した O^+ と O^- イオンが増加する。しかし、解離した O^- イオンに対する平衡値は 1.2 ± 0.28 であり、これもやはり文献 4 の値に近い。よって、イオン源をでたところの OH^- イオンの量は、 O^- イオンの場合と同様に OH^+ イオンと解離した O^+ イオンの合計を 5.6 倍したものと考えた。

O_2^- イオンについても、同様に考えることにする。 O_2^- イオンの信号量は少なく、もともと、 $\pm 50\%$ 程度の誤差を含んでいるので、断面積にあまり神経質になる必要はない。

以上の考察により求めた、イオン源での不純物の量は表 1 に示すように、水素負イオンを 100% とすると O^- イオンは 0.85%、 OH^- イオンは 0.77%、 O_2^- イオンは、0.04% 程度であろうと見積られる。

3.3 アーク電流依存性

アーク電流を変えた場合の不純物イオンの量を図 6 に示す。不純物イオンの量は、水素負イオン

ンに対する百分率で表わしている。アーク電流を増やすとともに、即ち、プラズマ密度を増やすとともに、 OH^- イオンの量は減少し、逆に、 O^- イオンの量は増加する。これは、プラズマ密度の増加に伴って OH^- イオンの解離が進むためだと考えられる。 O_2^- イオンの量に関しては、アーク電流とともに減少する傾向があるようだが、なにぶん信号量が少ないため明確にはわからなかった。

3.4 ガス圧依存性

イオン源のガス圧を変化させて、不純物の量をみたのが図7である。ガス圧の上昇とともに、不純物イオンの割合は急激に下がり、2 Pa では、 OH^- イオン、 O^- イオンとも0.4%以下になる。この主な原因は、実は、不純物の絶対量が減ったのではなく、負イオン生成効率が高くなったためである。体積生成される負イオンの量は、ガス圧の強い関数であって、1 Pa から2 Pa にかけて急激に増加する。そのため、相対的に不純物の割合が減ったのである。

不純物の絶対量は、ガス圧とともにわずかに減少する傾向にある。これは、水素ガス圧の増加により、不純物ガス(酸素)の分圧が低くなるためであろう。

3.5 時間変化

O^- イオンの時間変化の波形を図8に示す。パルスの中に、殆ど変化しないことがわかる。他の不純物イオンについても同様であり、少なくとも0.2秒という短い時間スケールでは不純物の量は変化しない。

4. 分光測定

高速のビーム粒子は、真空中を走行する際に、真空中に残存するガスと衝突して励起され発光する。ビーム方向に対してある角度 θ をもってそれらの光を見た場合、波長 λ_0 の光はドップラーシフトによって波長 λ の光として観測される。

$$\lambda = \frac{1 - \beta \cos \theta}{1 - \beta^2} \lambda_0, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

ここで、 v は粒子の速度、 c は光速である。

したがって、ビームの発する光を詳細に分光すれば、その波長のずれから、ビームの速度 v を知ることが出来る。また、ビームがさまざまなエネルギーの粒子から構成されている場合には、分光スペクトルから発光の断面積等を考慮して、ビームのエネルギー分布が求められる。

さて、水素負イオンビーム中に不純物イオンとして OH^- イオンがある場合、残留ガスと衝突して解離し、加速エネルギーの1/17のエネルギーを持つ水素ができる。この水素の発光量から、不純物量を推定することを試みた。なお、分光測定の詳細については、文献5を参照されたい。

光は、水素のバルマーアルファ光($\text{H}\alpha$)を用いた。図1に示すようにイオン源の下流4.5 mの

ンに対する百分率で表わしている。アーク電流を増やすとともに、即ち、プラズマ密度を増やすとともに、 OH^- イオンの量は減少し、逆に、 O^- イオンの量は増加する。これは、プラズマ密度の増加に伴って OH^- イオンの解離が進むためだと考えられる。 O_2^- イオンの量に関しては、アーク電流とともに減少する傾向があるようだが、なにぶん信号量が少ないため明確にはわからなかった。

3.4 ガス圧依存性

イオン源のガス圧を変化させて、不純物の量をみたのが図7である。ガス圧の上昇とともに、不純物イオンの割合は急激に下がり、2 Pa では、 OH^- イオン、 O^- イオンとも0.4%以下になる。この主な原因は、実は、不純物の絶対量が減ったのではなく、負イオン生成効率が高くなったためである。体積生成される負イオンの量は、ガス圧の強い関数であって、1 Pa から2 Pa にかけて急激に増加する。そのため、相対的に不純物の割合が減ったのである。

不純物の絶対量は、ガス圧とともにわずかに減少する傾向にある。これは、水素ガス圧の増加により、不純物ガス(酸素)の分圧が低くなるためであろう。

3.5 時間変化

O^- イオンの時間変化の波形を図8に示す。パルスの中に、殆ど変化しないことがわかる。他の不純物イオンについても同様であり、少なくとも0.2秒という短い時間スケールでは不純物の量は変化しない。

4. 分光測定

高速のビーム粒子は、真空中を走行する際に、真空中に残存するガスと衝突して励起され発光する。ビーム方向に対してある角度 θ をもってそれらの光を見た場合、波長 λ_0 の光はドップラーシフトによって波長 λ の光として観測される。

$$\lambda = \frac{1 - \beta \cos \theta}{1 - \beta^2} \lambda_0, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

ここで、 v は粒子の速度、 c は光速である。

したがって、ビームの発する光を詳細に分光すれば、その波長のずれから、ビームの速度 v を知ることが出来る。また、ビームがさまざまなエネルギーの粒子から構成されている場合には、分光スペクトルから発光の断面積等を考慮して、ビームのエネルギー分布が求められる。

さて、水素負イオンビーム中に不純物イオンとして OH^- イオンがある場合、残留ガスと衝突して解離し、加速エネルギーの1/17のエネルギーを持つ水素ができる。この水素の発光量から、不純物量を推定することを試みた。なお、分光測定の詳細については、文献5を参照されたい。

光は、水素のバルマーアルファ光($\text{H}\alpha$)を用いた。図1に示すようにイオン源の下流4.5 mの

位置を見込むように分光測定用の望遠レンズを設置した。ビームの光は、望遠レンズにより大口径光ファイバーに集光され、50 m 伝送された後、1000 mm の焦点距離を持つ分光器に入射光学系を介して入射される。望遠レンズの焦点距離は 90 mm、光ファイバーのコア径は 0.8 mm、分光器は日本光学 CT-100C 型を用いた。分光器の分解能は、0.008 nm (半値幅) である。

得られたスペクトルの一例を図 9 に示す。分光器とビームのなす角は 4.5 度である。 $\theta < 90^\circ$ であるため、高速粒子からの H α 光は短波長側にずれる。652.6 nm にあるピークがフル加速された水素に対応し、655.05 nm のピークは引き出し電極で中性化された 3.3 keV の水素である。656.3 nm には、ドップラーシフトしていない、ビームプラズマ中の水素原子からの光がある。各ピークの間には、引き出し途中、または加速途中で中性化された水素による連続スペクトルが見える。

さて、655.45 nm に見える小さなピークが問題の OH $^-$ が解離してできた水素の光である。加速エネルギーが 30 keV であるので、解離した水素のエネルギーは 1.76 keV、上記の式から、ドップラーシフトした波長は 655.41 nm であり、一致する。このピークの面積とフル加速された水素のピークの面積の比及び文献 5 の発光断面積のデータから OH $^-$ イオンの量は約 1.2 % と推測される。この結果は質量分析の結果とほぼ一致する。

5. 考 察

本測定結果を、同じ質量分析器で測定された、バケット型正イオン源からの不純物と比較するのは興味深い。文献 4 にみるように、正のイオン源の場合には、酸素系の不純物の他に、C $^+$ 、CH $_n^+$ の炭化水素系の軽元素不純物と、カソード材料である W $^+$ 、電極材料である Cu $^+$ 、Mo $^+$ 、Ag $^+$ 、Zn $^+$ 、Fe $^+$ などの金属イオンがビーム中に混入している。また、その量も水素イオンに対して、軽元素不純物で数%、金属不純物で数分の 1% と多い。体積生成型負イオン源の場合、イオン源の構造や材質は、バケット型正イオン源に非常に似ているので、ソースプラズマ中には同じように炭素や金属の粒子、イオンが混入していると考えられる。にも拘らず、負イオンビーム中にそれらの負イオンが観測されないのは、炭素及び金属の負イオンの生成断面積が極めて小さいためだと考えられる。

また、酸素系の負イオン不純物についても、その絶対量は正のイオンに比べて遥かに少ない。正のイオン源の場合、同様の構造のプラズマ源においては、酸素系不純物イオンビームの電流密度は 5 mA/cm 2 程度に達する。一方、負イオン源の場合には、酸素系負イオンの電流密度は、水素負イオンビームの電流密度 10 mA/cm 2 の 1% であるから、0.1 mA/cm 2 である。よって、プラズマ中の酸素イオンの正負の割合を概算すると、約 50 : 1 である。酸素イオンについても負イオン生成断面積は小さいといえる。

一方、水素イオンについては、プラズマ密度と負イオン電流値の関係からプラズマ中の正負のイオンの割合を推定すると、引き出し電極近傍においては、3 : 1 に達する。つまり、体積生成型負イオン源は、水素についてのみ、選択的に負イオンをつくること出来るイオン源であるといえる。ともかく、不純物イオンが少ないというのは、本方式の負イオン源の大きな利点である

位置を見込むように分光測定用の望遠レンズを設置した。ビームの光は、望遠レンズにより大口径光ファイバーに集光され、50 m 伝送された後、1000 mm の焦点距離を持つ分光器に入射光学系を介して入射される。望遠レンズの焦点距離は 90 mm、光ファイバーのコア径は 0.8 mm、分光器は日本光学 CT-100 C 型を用いた。分光器の分解能は、0.008 nm (半値幅) である。

得られたスペクトルの一例を図 9 に示す。分光器とビームのなす角は 45 度である。 $\theta < 90^\circ$ であるため、高速粒子からの H α 光は短波長側にずれる。652.6 nm にあるピークがフル加速された水素に対応し、655.05 nm のピークは引き出し電極で中性化された 3.3 keV の水素である。

656.3 nm には、ドップラーシフトしていない、ビームプラズマ中の水素原子からの光がある。各ピークの間には、引き出し途中、または加速途中で中性化された水素による連続スペクトルが見える。

さて、655.45 nm に見える小さなピークが問題の OH $^-$ が解離してできた水素の光である。加速エネルギーが 30 keV であるので、解離した水素のエネルギーは 1.76 keV、上記の式から、ドップラーシフトした波長は 655.41 nm であり、一致する。このピークの面積とフル加速された水素のピークのアーク面積の比及び文献 5 の発光断面積のデータから OH $^-$ イオンの量は約 1.2 % と推測される。この結果は質量分析の結果とほぼ一致する。

5. 考 察

本測定結果を、同じ質量分析器で測定された、バケット型正イオン源からの不純物と比較するのは興味深い。文献 4 にみるように、正のイオン源の場合には、酸素系の不純物の他に、C $^+$ 、CH $_n^+$ の炭化水素系の軽元素不純物と、カソード材料である W $^+$ 、電極材料である Cu $^+$ 、Mo $^+$ 、Ag $^+$ 、Zn $^+$ 、Fe $^+$ などの金属イオンがビーム中に混入している。また、その量も水素イオンに対して、軽元素不純物で数%、金属不純物で数分の 1% と多い。体積生成型負イオン源の場合、イオン源の構造や材質は、バケット型正イオン源に非常に似ているので、ソースプラズマ中には同じように炭素や金属の粒子、イオンが混入していると考えられる。にも拘らず、負イオンビーム中にそれらの負イオンが観測されないのは、炭素及び金属の負イオンの生成断面積が極めて小さいためだと考えられる。

また、酸素系の負イオン不純物についても、その絶対量は正のイオンに比べて遥かに少ない。正のイオン源の場合、同様の構造のプラズマ源においては、酸素系不純物イオンビームの電流密度は 5 mA/cm 2 程度に達する。一方、負イオン源の場合には、酸素系負イオンの電流密度は、水素負イオンビームの電流密度 10 mA/cm 2 の 1% であるから、0.1 mA/cm 2 である。よって、プラズマ中の酸素イオンの正負の割合を概算すると、約 50 : 1 である。酸素イオンについても負イオン生成断面積は小さいといえる。

一方、水素イオンについては、プラズマ密度と負イオン電流値の関係からプラズマ中の正負のイオンの割合を推定すると、引き出し電極近傍においては、3 : 1 に達する。つまり、体積生成型負イオン源は、水素についてのみ、選択的に負イオンをつくること出来るイオン源であるといえる。ともかく、不純物イオンが少ないというのは、本方式の負イオン源の大きな利点である

う。

本実験は、負イオン源の大気解放後、数日の内に行った。大気解放後のショット数は約2000ショット、積算ビーム引き出し時間は約7分間である。正イオン源の場合、酸素不純物の量はイオン源の運転時間とともに次第に減少してくることが知られている。特に、1秒以上の長パルスの運転は酸素不純物の量を減らすのに極めて有効であって、これにより約1桁減少させることが出来る。例えば、JT-60用バケット型イオン源の場合には、大気解放後数日中の酸素系不純物量は数%であるが、長パルスのエージングを続けることによって、0.3%程度に減少する。本実験で用いた体積生成型負イオン源の基本的構造はJT-60用イオン源とほぼ同じであることを考えると、負イオン源においても同様の減少を期待することが出来る。

6. おわりに

体積生成型負イオン源は、不純物という観点からも非常に優れたイオン源であることがわかった。同イオン源においては、プラズマ源中で水素負イオンのみが選択的に生成され、炭素系の負イオン、金属負イオンは生成されない。酸素系の負イオン、即ち、 OH^- 、 O^- 、 O_2^- イオンがビーム中に混入するが、その量は、1%以下であった。長期間のエージング、また、長パルス運転により、イオン源内の酸素が枯れてくれば不純物の量は更に1桁下がるであろう。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、原子力エンジニアリング株の阿部宏幸氏には装置の運転、保守に多大の協力を頂きました。感謝致します。加熱工学第一研究室の関昌弘室長、小原祥裕副主任研究員を始めとするメンバーには、貴重なコメントと討論をして頂きました。また、本実験を行う機会と激励を与えて頂きました田中正俊那珂研究所長に感謝致します。

う。

本実験は、負イオン源の大気解放後、数日の内に行った。大気解放後のショット数は約2000ショット、積算ビーム引き出し時間は約7分間である。正イオン源の場合、酸素不純物の量はイオン源の運転時間とともに次第に減少してくることが知られている。特に、1秒以上の長パルスの運転は酸素不純物の量を減らすのに極めて有効であって、これにより約1桁減少させることが出来る。例えば、JT-60用バケット型イオン源の場合には、大気解放後数日中の酸素系不純物量は数%であるが、長パルスのエージングを続けることによって、0.3%程度に減少する。本実験で用いた体積生成型負イオン源の基本的構造はJT-60用イオン源とほぼ同じであることを考えると、負イオン源においても同様の減少を期待することが出来る。

6. おわりに

体積生成型負イオン源は、不純物という観点からも非常に優れたイオン源であることがわかった。同イオン源においては、プラズマ源中で水素負イオンのみが選択的に生成され、炭素系の負イオン、金属負イオンは生成されない。酸素系の負イオン、即ち、 OH^- 、 O^- 、 O_2^- イオンがビーム中に混入するが、その量は、1%以下であった。長期間のエージング、また、長パルス運転により、イオン源内の酸素が枯れてくれば不純物の量は更に1桁下がるであろう。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、原子力エンジニアリング㈱の阿部宏幸氏には装置の運転、保守に多大の協力を頂きました。感謝致します。加熱工学第一研究室の関昌弘室長、小原祥裕副主任研究員を始めとするメンバーには、貴重なコメントと討論をして頂きました。また、本実験を行う機会と激励を与えて頂きました田中正俊那珂研究所長に感謝致します。

う。

本実験は、負イオン源の大気解放後、数日の内に行った。大気解放後のショット数は約2000ショット、積算ビーム引き出し時間は約7分間である。正イオン源の場合、酸素不純物の量はイオン源の運転時間とともに次第に減少してくることが知られている。特に、1秒以上の長パルスの運転は酸素不純物の量を減らすのに極めて有効であって、これにより約1桁減少させることが出来る。例えば、JT-60用バケット型イオン源の場合には、大気解放後数日中の酸素系不純物量は数%であるが、長パルスのエージングを続けることによって、0.3%程度に減少する。本実験で用いた体積生成型負イオン源の基本的構造はJT-60用イオン源とほぼ同じであることを考えると、負イオン源においても同様の減少を期待することが出来る。

6. おわりに

体積生成型負イオン源は、不純物という観点からも非常に優れたイオン源であることがわかった。同イオン源においては、プラズマ源中で水素負イオンのみが選択的に生成され、炭素系の負イオン、金属負イオンは生成されない。酸素系の負イオン、即ち、 OH^- 、 O^- 、 O_2^- イオンがビーム中に混入するが、その量は、1%以下であった。長期間のエージング、また、長パルス運転により、イオン源内の酸素が枯れてくれば不純物の量は更に1桁下がるであろう。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、原子力エンジニアリング株の阿部宏幸氏には装置の運転、保守に多大の協力を頂きました。感謝致します。加熱工学第一研究室の関昌弘室長、小原祥裕副主任研究員を始めとするメンバーには、貴重なコメントと討論をして頂きました。また、本実験を行う機会と激励を与えて頂きました田中正俊那珂研究所長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Proc. of the 4th International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, 1986, edited by J.G. Alessi, AIP Conference Proceedings No.158 (American Institute of Physics, New York, 1986)
- 2) 奥村義和;核融合研究 第60卷, 1988, p.329
- 3) M. Hanada et al.; Proc. of the 12th Symp. on Ion Source and Ion-Assisted Technology, Tokyo, 1989, p.17
- 4) Y. Okumura, Y. Mizutani, Y. Ohara, and T. Shibata; Rev. Sci. Instrum. 52, 1981, p.1
- 5) 奥村義和, 小原祥裕, 柴田猛順; JAERI-M 9653, 1981

表 1 質量分析スペクトルの線密度依存性

線密度 (molecules/cm ²)	3.15 x 10 ¹⁵	4.61 x 10 ¹⁵	8.58 x 10 ¹⁵	6.5 x 10 ¹⁶	線密度→0
H ⁻ (mV)	17.2	10.5	3.5	0.9	122.9 (100%)
H ⁻ →H ⁺ (mV)	26.7	34	54	56	-
O H ⁻ →O ⁻ (mV)	0.07	0.08	0.155	0.18	-
O H ⁻ →O ⁺ (mV)	0.065	0.085	0.12	0.13	-
O ⁻ (mV)	0.26	0.24	0.23	0.22	1.04 (0.85%)
O ⁻ →O ⁺ (mV)	0.155	0.165	0.185	0.17	-
O H ⁻ (mV)	0.09	0.055	0.04	-	0.95 (0.77%)
O H ⁻ →O H ⁺ (mV)	0.065	0.06	0.04	-	-
O ₂ ⁻ (mV)	0.01	0.01	0.005	-	0.05 (0.04%)
O ₂ ⁻ →O ₂ ⁺ (mV)	0.01	0.012	0.01	-	-

NEGATIVE ION TEST STAND (ITS-2M)

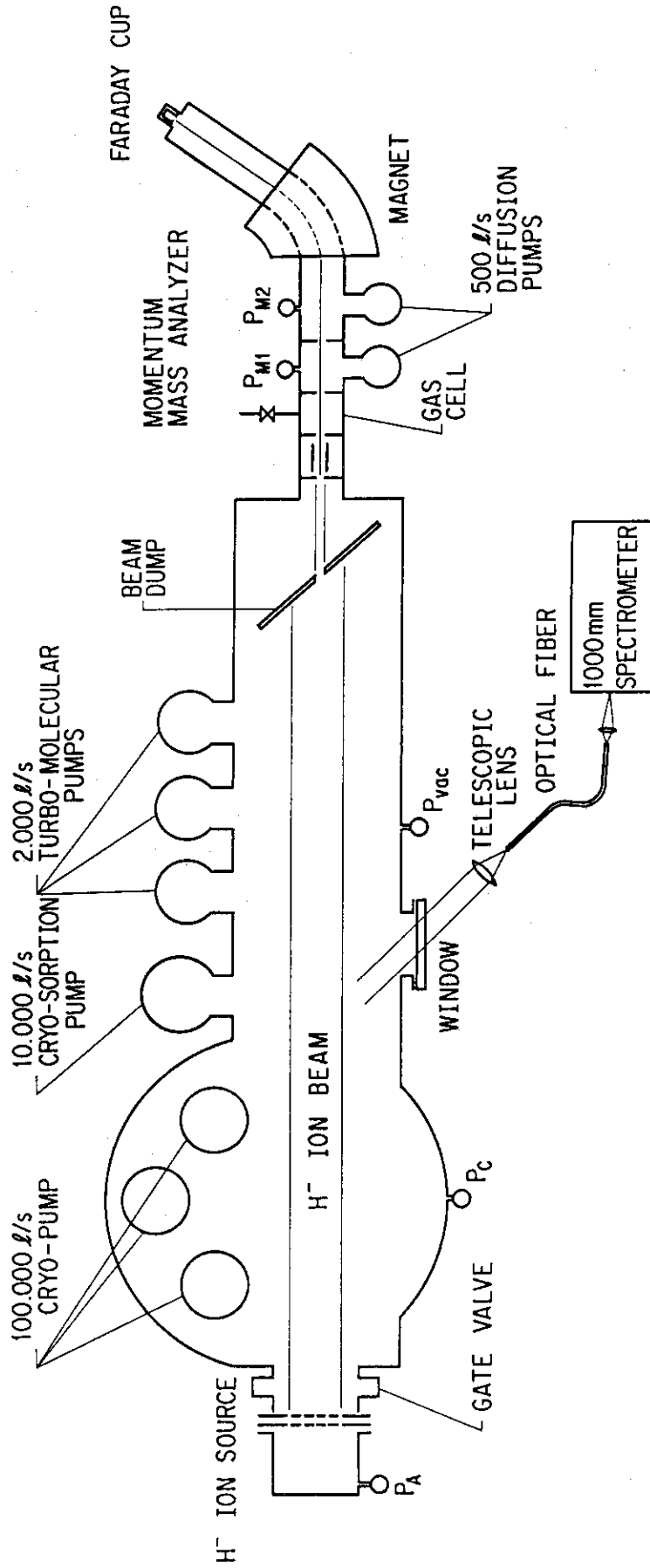


図1 負イオン源テストスタンド模式図

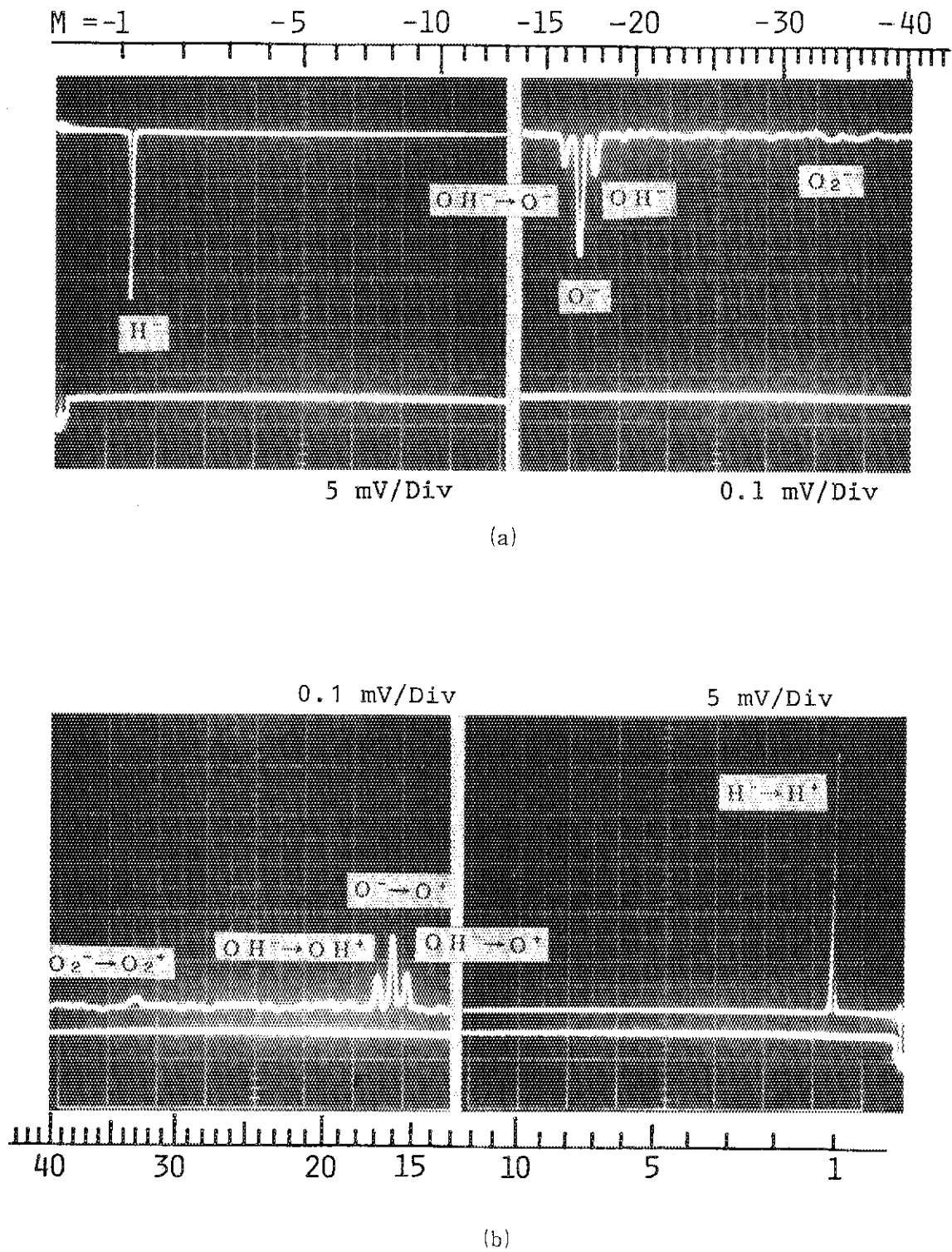


図2 質量分析スペクトルの一例。(a)は負イオン,(b)は正イオンのスペクトルである。ビームエネルギー50 keV, $V_{arc}=70 \text{ V}$, $I_{arc}=400 \text{ A}$, $P_A=1.0 \text{ Pa}$, クライオポンプ3台を運転している。

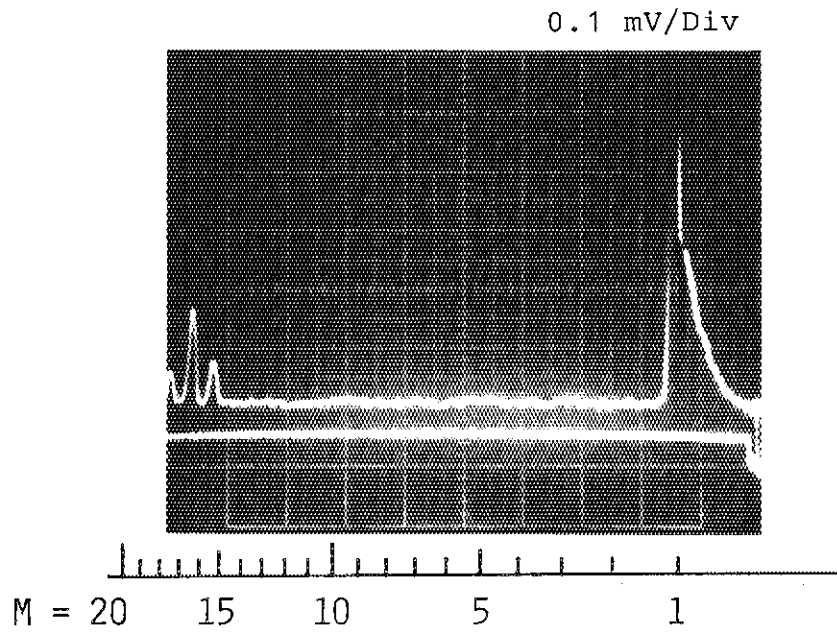


図3 正イオンのスペクトルの拡大図。 図2(b)の右図のゲインを50倍したものである。

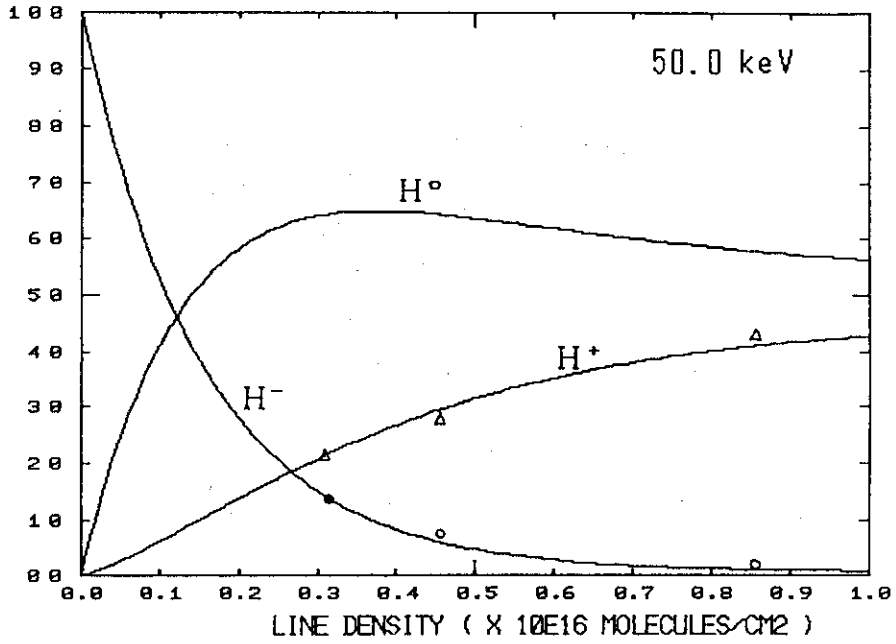


図4 ビーム種の線密度依存性。水素負イオンは残留ガスと衝突し、中性粒子と正イオンに変換されていく。実線は断面積から求めた計算値。△と○印は表1に示す測定値を線密度 3.15×10^{15} molecules/cm²の時の負イオン量(●で図中に示す)で較正したものである。

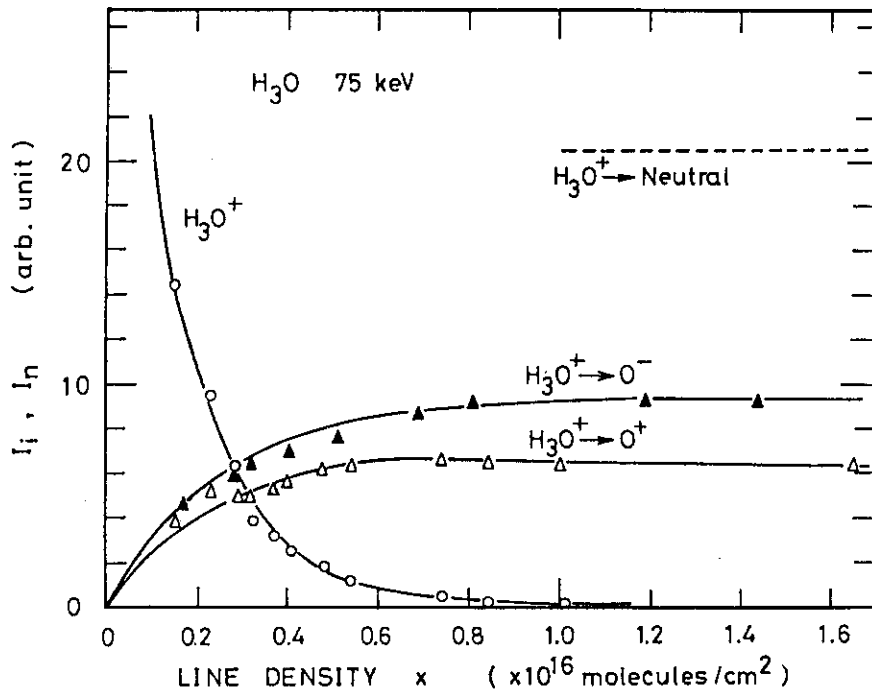


図5 H_3O^+ の線密度依存性。残留ガスと衝突し、解離するとともに、中性粒子と正イオンに変換される。点線は、線密度を零に外挿した値から正、負のイオンの平衡値を引いた中性粒子の量である(文献4から転載)。

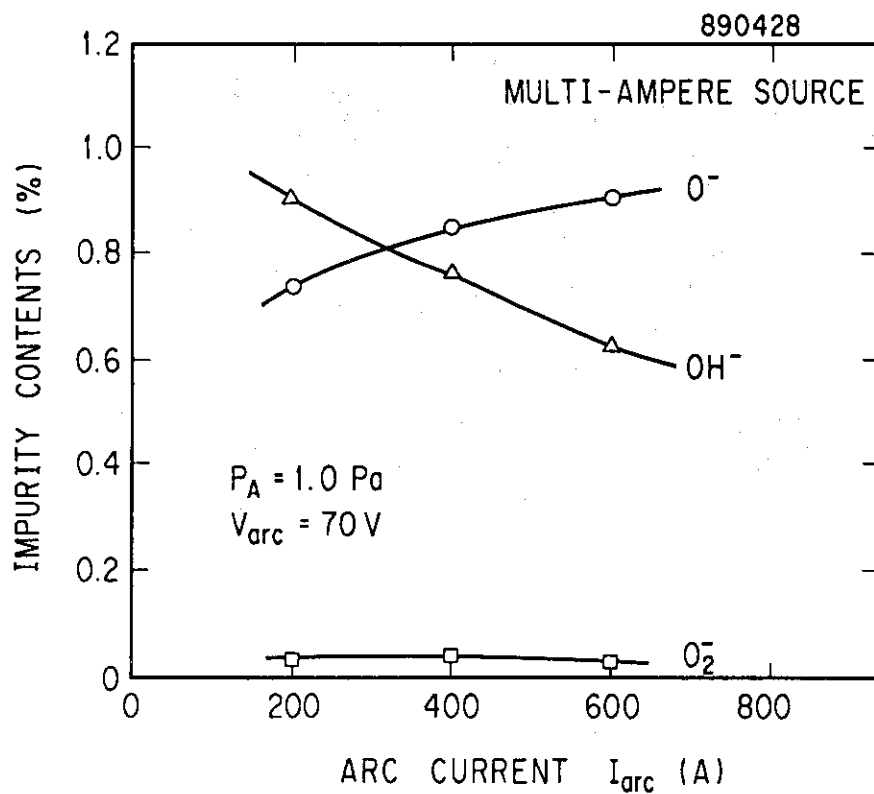


図6 不純物のアーク電流依存性。 水素負イオンに対する百分率で表わしている。

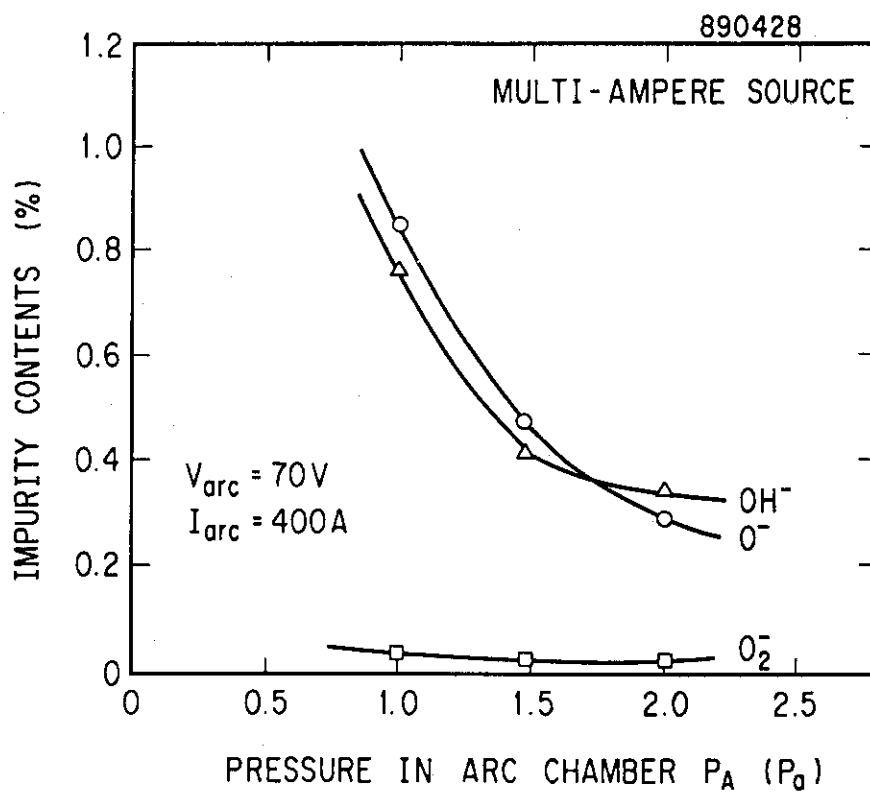
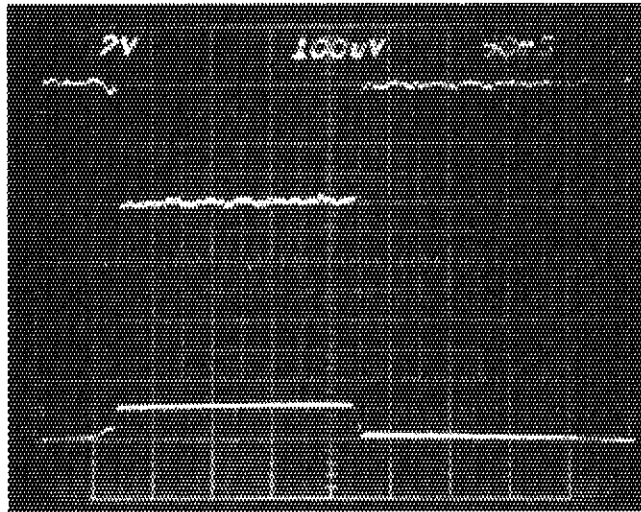


図7 不純物のイオン源のガス圧依存性。 水素負イオンに対する百分率で表わしている。



O^- イオン

0.1 mV/Div

加速電流

4 A/Div

図8 O^- イオンの時間変化。 200msec のパルスの間には時間変化は無い。

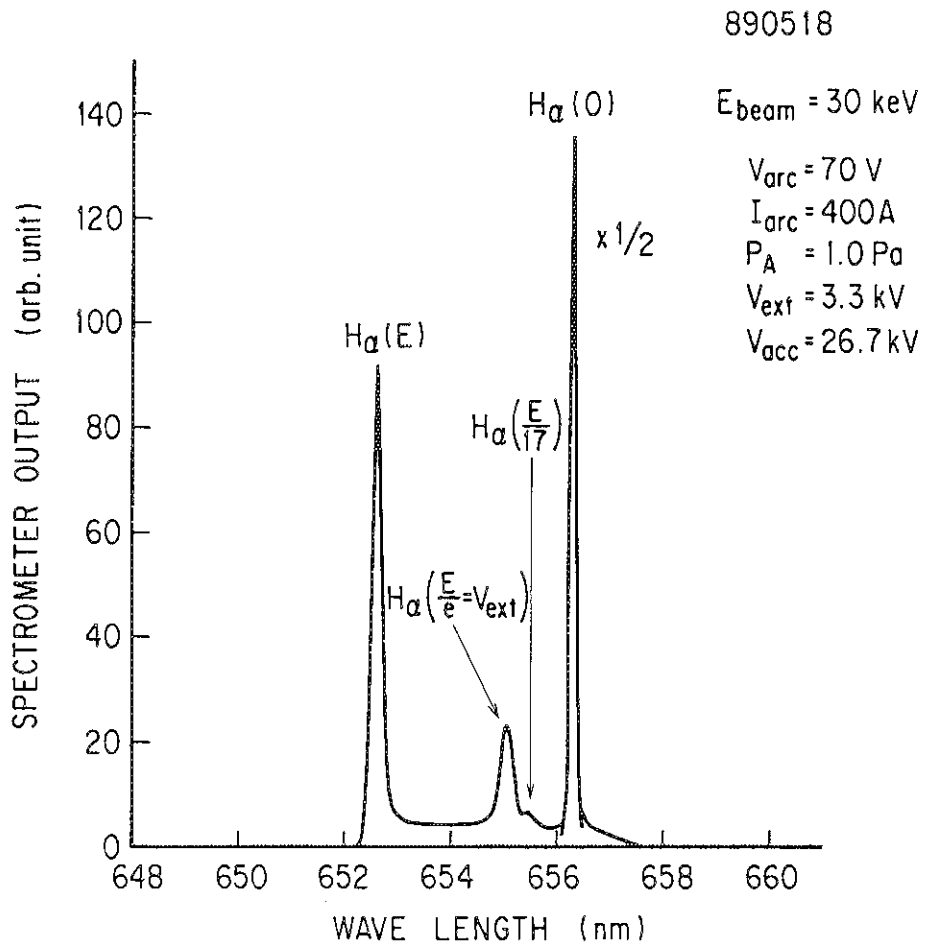


図9 分光スペクトルの一例。 ビームエネルギーは30 keV, アーク電流, ガス圧, その他の条件は表1と同じである。各ピークの半値幅が異なるのは, 各粒子の熱運動エネルギーが異なるからである。