

JAERI-M

9 6 5 3

分光によるビーム組成と不純物量の測定

1981年9月

奥村 義和・小原 祥裕・柴田 猛順

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

分光によるビーム組成と不純物量の測定

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

奥村義和・小原祥裕・柴田猛順

(1981年8月13日受理)

ビーム中の高速水素から発せられる、ドップラーシフトしたバルマーアルファ光を使ってビーム組成と不純物量を求め、質量分析器の結果と比較した。ビーム組成に関しては両者は約10%以内の精度で一致し、また、1%程度の酸素不純物の量まで分光によって測定可能であることがわかった。分光はビーム組成と不純物量の測定に有力な手段である。

Measurement of Ion Species Composition and Impurity  
Level by Doppler Shift Spectroscopy

Yoshikazu OKUMURA, Yoshihiro OHARA and Takemasa SHIBATA

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 13, 1981)

The ion species composition and impurity level in intense hydrogen beams have been measured by observing the Doppler-shifted Balmer alpha radiation emitted from fast hydrogen atom. These results have been compared with the results obtained by magnetic mass spectrometer and found that those results for species composition were in agreement within ~ 10 %. Oxygen impurities at the level of one percent can be identified by the spectroscopy. The spectroscopy turned out to be an useful method as a beam diagnostic technique.

Keywords : Ion Species Composition, Balmer Alper Radiation,  
Hydrogen Beam Neutral Atom Beam Injection, Impurity,  
Doppler Shift Spectroscopy, JT-60

## 目 次

1. はじめに	1
2. ビーム組成測定の原理	1
3. 実験装置	3
4. ビーム組成の測定	4
4.1 $H_{\alpha}$ スペクトルの例	4
4.2 発光強度の時間依存性	4
4.3 発光強度の真空容器圧力依存性	4
4.4 イオン種ごとの発散角	5
4.5 ビーム組成の測定	5
5. 不純物の測定	6
6. おわりに	7
謝 辞	7

## Contents

1. Introduction	1
2. Principle of Measurement	1
3. Experimental Apparatus	3
4. Measurement of Ion Species Composition	4
4.1 An Example of $H_{\alpha}$ Spectra	4
4.2 Time Evolution of Intensity of Emitted Light	4
4.3 Dependence of Intensity of Emitted Light on Pressure in Vacuum Chamber	4
4.4 Divergence of Each Ion Species	5
4.5 Measurement of Ion Species Composition	5
5. Measurement of Impurity Concentration	6
6. Conclusion	7
Acknowledgements	7

## 1. はじめに

中性粒子入射装置 (NBI) において入射ビームの発散角やビーム組成 (水素ビームのエネルギースペクトル), ビーム中に含まれる不純物の量は重要なパラメータであり, 従来, 発散角はカロリメータを用いた熱的測定法により, ビーム組成と不純物量は質量分析器を用いて測定されてきた。しかしながら, ビーム強度及びビームパルス幅が増加すると, それらの検出器はビームによる熱で破壊され使用できなくなる。このため, 強いビーム中に検出器を入れる必要のない光学的診断法が求められており, 最近各研究所において開発が進められている。

まず, イギリスのカラム研究所においてドップラーシフトした Balmer alpha ( $H_{\alpha}$ ) 光を高速掃引の分光器でみることによりビーム組成が求められた。このビーム組成は磁場質量分析器の結果と比較され,  $H_{\beta}(E)$  の比率の良い一致をみている。<sup>1)</sup> 米国のオークリッジ研究所ではファブリ・ペロ干渉計を用い, その高い分解能を利用してビーム組成のみならずビーム発散角, ビームプラズマ温度を測定している。<sup>2)</sup> ビーム全体の発散角についてはカロリメータの測定と一致する結果を得ているが, イオン種ごとの発散角の違い, ビーム組成については, 信号レベルが小さく, 精度が問題であるように思われる。米国のローレンス・バークレー研究所では 500 チャンネルの optical multi-channel analyzer を用いてビーム組成, ビーム発散を測定し, それぞれ磁場質量分析器, カロリメータによる測定結果と良く一致する結果を得ている。<sup>3)</sup> 特にイオン種ごとの発散角をかなりの精度で測定しているのが注目される。ただ, ビーム組成を求める際に, 水素原子の励起の断面積が不備なため彼等のビームのエネルギー領域まで断面積の外挿を行っており, その妥当性をチェックする必要があるだろう。日本では, 東京大学において, ビーム組成測定のための基礎的な研究が進められている。<sup>4)</sup>

一方, 原研でもフォトダイオードを使った光ビームモニターが開発され,<sup>5)</sup> 長パルスイオン源のビーム発散角の測定に用いられた。<sup>6)</sup> また, JT-60 NBI 原型ユニットにおいては, ビーム発散角, ビーム組成をファブリ・ペロ干渉計を用いて測定することが計画されている。

ここでは, 分光によるビーム組成測定技術を確立するために行った基礎的な実験について報告する。そして得られた測定結果を磁場質量分析器の結果と比較し, 得られた値の妥当性をチェックする。また, 新しい試みとして, ビーム中の酸素と銅の不純物量をコントロールし, 不純物から解離した水素の発光, あるいは不純物それ自体の発光により, 不純物の定量ができるかどうかについても調べた。

## 2. ビーム組成測定の実験

イオン源から引出された水素ビームは, 真空中を走行する際に, 真空中に残存する水素分子と衝突して励起され発光する。(ビームプラズマ中のイオンや電子との衝突による発光もあるが, ほとんど無視できる。) ビーム方向に対して,  $\theta$  の角度をもってそれらの光をみた場合, 波長  $\lambda_0$

## 1. はじめに

中性粒子入射装置 (NBI) において入射ビームの発散角やビーム組成 (水素ビームのエネルギースペクトル), ビーム中に含まれる不純物の量は重要なパラメータであり, 従来, 発散角はカロリメータを用いた熱的測定法により, ビーム組成と不純物量は質量分析器を用いて測定されてきた。しかしながら, ビーム強度及びビームパルス幅が増加すると, それらの検出器はビームによる熱で破壊され使用できなくなる。このため, 強いビーム中に検出器を入れる必要のない光学的診断法が求められており, 最近各研究所において開発が進められている。

まず, イギリスのカラム研究所においてドップラーシフトした Balmer alpha ( $H_{\alpha}$ ) 光を高速掃引の分光器でみることによりビーム組成が求められた。このビーム組成は磁場質量分析器の結果と比較され,  $H_{\beta}(E)$  の比率の良い一致をみている<sup>1)</sup>。米国のオークリッジ研究所ではファブリ・ペロ干渉計を用い, その高い分解能を利用してビーム組成のみならずビーム発散角, ビームプラズマ温度を測定している<sup>2)</sup>。ビーム全体の発散角についてはカロリメータの測定と一致する結果を得ているが, イオン種ごとの発散角の違い, ビーム組成については, 信号レベルが小さく, 精度が問題であるように思われる。米国のローレンス・バークレー研究所では 500 チャンネルの optical multi-channel analyzer を用いてビーム組成, ビーム発散を測定し, それぞれ磁場質量分析器, カロリメータによる測定結果と良く一致する結果を得ている<sup>3)</sup>。特にイオン種ごとの発散角をかなりの精度で測定しているのが注目される。ただ, ビーム組成を求める際に, 水素原子の励起の断面積が不備なため彼等のビームのエネルギー領域まで断面積の外挿を行っており, その妥当性をチェックする必要がある。日本では, 東京大学において, ビーム組成測定のための基礎的な研究が進められている<sup>4)</sup>。

一方, 原研でもフォトダイオードを使った光ビームモニターが開発され<sup>5)</sup> 長パルスイオン源のビーム発散角の測定に用いられた<sup>6)</sup>。また, JT-60 NBI 原型ユニットにおいては, ビーム発散角, ビーム組成をファブリ・ペロ干渉計を用いて測定することが計画されている。

ここでは, 分光によるビーム組成測定技術を確立するために行った基礎的な実験について報告する。そして得られた測定結果を磁場質量分析器の結果と比較し, 得られた値の妥当性をチェックする。また, 新しい試みとして, ビーム中の酸素と銅の不純物量をコントロールし, 不純物から解離した水素の発光, あるいは不純物それ自体の発光により, 不純物の定量ができるかどうかについても調べた。

## 2. ビーム組成測定の実験原理

イオン源から引出された水素ビームは, 真空中を走行する際に, 真空中に残存する水素分子と衝突して励起され発光する。(ビームプラズマ中のイオンや電子との衝突による発光もあるが, ほとんど無視できる。) ビーム方向に対して,  $\theta$  の角度をもってそれらの光をみた場合, 波長  $\lambda_0$

の光はドップラーシフトして波長 $\lambda$ の光として観測される。

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

ここで $v$ は粒子の速度、 $c$ は光速である。

一方、光の強度 $I$ は、

$$I = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \frac{N^*}{\tau} \quad (2)$$

で与えられる。ここで $\Omega$ は分光器の立対角、 $N^*$ は励起された粒子の密度、 $\tau$ はその励起粒子が発光するまでの平均寿命である。イオン源から距離 $L$ だけ離れた観測点での $N^*$ は

$$N^* = \frac{1}{v} \int_0^L J(x) n_0(x) \sigma \exp\{- (L-x)/v\tau\} dx \quad (3)$$

で与えられる。ここで $J(x)$ は位置 $x$ での注目している粒子の電流密度、 $n_0(x)$ は位置 $x$ での残留水素分子の密度、 $\sigma$ は水素分子との衝突により励起される断面積である。いま観測点の付近において、長さ $v\tau$ よりもはるかに長い範囲で $J(x)$ 、 $n_0(x)$ が一定であるとき、(3)式の積分は近似的に

$$N^* = J n_0 \sigma \tau \quad (4)$$

となる。ここで $J$ と $n_0$ はそれぞれ観測点付近での電流密度と残留水素分子密度である。このような条件は、次章に述べるような場合に成立している。即ち、本実験では観測点は中性化セルの出口から約120 cm下流であり、 $J(x)$ 、 $n_0(x)$ はその間ほぼ一定であると考えられる。一方、 $v$ は75 KeVの水素原子の場合、 $3.8 \times 10^8$  cm/s、 $\tau$ はたとえば $\tau(3d \rightarrow 2s) = 1.55 \times 10^{-8}$  sであるから $v\tau = 5.9$  cmとなり、120 cmよりもはるかに小さな値である。そこで、(4)式を(3)式に代入して

$$I = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot n_0 \sigma J \quad (5)$$

を得る。

イオン源からの水素ビームは一般に、異った速度をもつ3種類の粒子グループから成る。即ち① $H_1^+(E)$ とそれが中性化した $H_1^0(E)$ 、② $H_2^+(E)$ と $H_2^0(E)$ 、それらが解離してできた $H_1^+(E/2)$ 、 $H_1^0(E/2)$ ③ $H_3^+(E)$ と $H_3^0(2E/3)$ 、 $H_2^0(2E/3)$ 、 $H_1^+(E/3)$ 、 $H_1^0(E/3)$ である。ここで $E/e$ はイオン源の加速電圧である。これらのグループからの光はそれぞれ(1)式に従ってドップラーシフトし、分光器によってたやすく分離できる。それぞれのグループからの光の強度は、

$$I_j = n_0 \sum_j J_{ij} \sigma_{ij} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $i=1, 2, 3$ は上記の3種類のグループ、 $j$ はそれぞれのグループ中の粒子を表わす。係数 $\Omega/4\pi$ は省いた。いま、イオン源を出た直後の $H_1(E)$ の電流密度を $J_0^1$ 、 $H_2(E)$ を $J_0^2$ 、 $H_3(E)$ を $J_0^3$ とすると(6)式は、

$$I_i = n_0 J_0^i \sum_j \frac{J_{ij}}{J_0^i} \sigma_{ij} \quad (7)$$

と書ける。(7)式において、 $J_{ij}/J_0^i$ は $E$ とイオン源から観測点までの残留水素分子の線密度によ



り一義的に決まる。また  $\sigma_{ij}$  は E のみに依存するから、 $\sum_j J_{ij}/J_o^i \cdot \sigma_{ij}$  は E と線密度の関数である。これを  $\sigma_{eq}^i$  とおくと、

$$I^i = n_o J_o^i \sigma_{eq}^i \quad (8)$$

よって

$$J_o^1 : J_o^2 : J_o^3 = \frac{I^1}{\sigma_{eq}^1} : \frac{I^2}{\sigma_{eq}^2} : \frac{I^3}{\sigma_{eq}^3} \quad (9)$$

即ち、分光器で求めた光の強度をそれぞれ  $\sigma_{eq}$  で割れば、イオン源を出た直後のビーム組成を求めることができる。

$\sigma_{eq}$  を求めるためには、 $\sigma_{ij}$  のデータが必要である。 $\sigma_{ij}$  は次の5つの断面積である。

1.  $H_1^+ + H_2 \rightarrow H^*$
2.  $H_1^0 + H_2 \rightarrow H^*$
3.  $H_2^+ + H_2 \rightarrow H^*$
4.  $H_2^0 + H_2 \rightarrow H^*$
5.  $H_3^+ + H_2 \rightarrow H^*$

水素原子の Balmer alpha 光の断面積について、1の反応については文献7に、3と5の反応については文献8によった。これらの反応の断面積は我々の興味のある範囲(10 KeV~75 KeV)でデータがあるが、反応2については、文献9に10 KeV~35 KeVの領域のデータしかない。そこで、我々もローレンス・バークレー研究所の Burrell らと同様にこれを75 KeVまで外挿したデータを使用することにする。4の反応については、データがない。そこで、3の反応と同じ断面積をもつと仮定する。實際上、4の反応の寄与は小さいのでこのように仮定しても問題ないと思われる。一方、 $J_{ij}/J_o^i$  は文献10のデータを基に、森田氏の開発した計算コード<sup>11)</sup>を使用して求めた。これらのデータから  $\sigma_{eq}^1$ ,  $\sigma_{eq}^2$ ,  $\sigma_{eq}^3$  をエネルギー E と残留水素ガスの線密度の関数として求めた。結果を付-1, 2, 3図に示す。

### 3. 実験装置

実験はイオン源テストスタンド ITS-2<sup>12)</sup>で行った。装置の概要を図1に示す。イオン源はバケット型長パルスイオン源を使用した。9 cm × 6 cmの矩形の引き出し電極から、70 KeV, 6 Aの水素イオンビームを最大10秒間発生できる。イオン源に引き続いて、断面積14 cm × 29 cm, 長さ220 cmの矩形の中性化セルが取り付けられている。真空容器は2000 l/sの排気速度をもつターボ分子ポンプ6台と、必要な場合には、15000 l/sのクライオポンプによって排気されている。水素ガスはイオン源に注入される。ガス流量 Q はサーマル・マス・フローメーターで測定した。イオン源プラズマ生成部のガス圧  $P_A$  はピラニ真空計で、中性化セル入口ガス圧と真空容器のガス圧は電離真空計でそれぞれ測定した。これらは全て、水素ガスに対して校正してある。

中性化セル出口から約120 cmの位置を見込むように分光器を置いた。分光器とビームのなす角  $\theta$  は約142°である。分光器は日本分光株製 CT-25 ND型ダブルモノクロメーターを使用し

り一義的に決まる。また  $\sigma_{ij}$  は  $E$  のみに依存するから、 $\sum_j J_{ij}/J_o^i \cdot \sigma_{ij}$  は  $E$  と線密度の関数である。これを  $\sigma_{eq}^i$  とおくと、

$$I^i = n_o J_o^i \sigma_{eq}^i \quad (8)$$

よって

$$J_o^1 : J_o^2 : J_o^3 = \frac{I^1}{\sigma_{eq}^1} : \frac{I^2}{\sigma_{eq}^2} : \frac{I^3}{\sigma_{eq}^3} \quad (9)$$

即ち、分光器で求めた光の強度をそれぞれ  $\sigma_{eq}$  で割れば、イオン源を出た直後のビーム組成を求めることができる。

$\sigma_{eq}$  を求めるためには、 $\sigma_{ij}$  のデータが必要である。 $\sigma_{ij}$  は次の5つの断面積である。

1.  $H_1^+ + H_2 \rightarrow H^*$
2.  $H_1^0 + H_2 \rightarrow H^*$
3.  $H_2^+ + H_2 \rightarrow H^*$
4.  $H_2^0 + H_2 \rightarrow H^*$
5.  $H_3^+ + H_2 \rightarrow H^*$

水素原子の Balmer alpha 光の断面積について、1の反応については文献7に、3と5の反応については文献8によった。これらの反応の断面積は我々の興味のある範囲(10 KeV~75 KeV)でデータがあるが、反応2については、文献9に10 KeV~35 KeVの領域のデータしかない。そこで、我々もローレンス・バークレー研究所の Burrell らと同様にこれを75 KeVまで外挿したデータを使用することにする。4の反応については、データがない。そこで、3の反応と同じ断面積をもつと仮定する。實際上、4の反応の寄与は小さいのでこのように仮定しても問題ないと思われる。一方、 $J_{ij}/J_o^i$  は文献10のデータを基に、森田氏の開発した計算コード<sup>11)</sup>を使用して求めた。これらのデータから  $\sigma_{eq}^1$ ,  $\sigma_{eq}^2$ ,  $\sigma_{eq}^3$  をエネルギー  $E$  と残留水素ガスの線密度の関数として求めた。結果を付-1, 2, 3図に示す。

### 3. 実験装置

実験はイオン源テストスタンド ITS-2<sup>12)</sup>で行った。装置の概要を図1に示す。イオン源はバケット型長パルスイオン源を使用した。9 cm × 6 cmの矩形の引き出し電極から、70 KeV, 6 Aの水素イオンビームを最大10秒間発生できる。イオン源に引き続いて、断面積14 cm × 29 cm, 長さ220 cmの矩形の中性化セルが取り付けられている。真空容器は2000 l/sの排気速度をもつターボ分子ポンプ6台と、必要な場合には、15000 l/sのクライオポンプによって排気されている。水素ガスはイオン源に注入される。ガス流量  $Q$  はサーマル・マス・フローメーターで測定した。イオン源プラズマ生成部のガス圧  $P_A$  はピラニ真空計で、中性化セル入口ガス圧と真空容器のガス圧は電離真空計でそれぞれ測定した。これらは全て、水素ガスに対して校正してある。

中性化セル出口から約120 cmの位置を見込むように分光器を置いた。分光器とビームのなす角  $\theta$  は約142°である。分光器は日本分光(株)製 CT-25 ND型ダブルモノクロメーターを使用し

た。分光器の前に焦点距離 15 cm, 径 7 cm のレンズを置いて光を集光した。出口スリットに 2 次電子増倍管を置き, その出力を直接オシロスコープで観測した。波長の掃引は, CT-25 ND 型の電動波長駆動機に制御回路を附加して, ビームパルスごとに自動的に掃引するようにした。掃引には約 0.5 秒要する。

ビームダンプ後方に磁場質量分析器を置き, ビーム組成と不純物量を測定した。ビームダンプ中央のスリット(幅 0.7 cm)を通過した荷電粒子は, 0.4 cm  $\phi$  のコリメータを通過して質量分析器に入り, 磁場によって 60° 曲げられ, フェラデーカップにて捕促される。

## 4. ビーム組成の測定

### 4.1 $H_{\alpha}$ スペクトルの例

$H_{\alpha}$  スペクトルの一例を図 2 に示す。これは加速電圧  $E/e = 60$  KV, 加速電流  $I_{acc} = 4.5$  A のときのデータである。分光器とビームのなす角  $\theta > 90^{\circ}$  であるため, 高速粒子からの  $H_{\alpha}$  光は長波長側にずれている。

### 4.2 発光強度の時間依存性

$H_{\alpha}$  スペクトルのうちのひとつのピークの発光強度の時間依存性をみた。図 3 に一例を示す。発光強度が一定になるのに, ビーム引出開始後数秒間を要することがわかる。この場合, 水素ガスは定常的に流しており, かつ電流値もほぼ一定である。にもかかわらずこのように発光強度が変化するのは, ビーム引出によって真空容器圧力が一旦減少し, あと徐々に増加して平衡値に達するからである。(真空容器圧力変化に関しては文献 6 を参照) 分光器の波長の掃引には 0.5 秒というかなり長い時間を要する。そこで, 以下の実験においては, 掃引はビーム引出開始後 3 秒後に, 発光強度がほぼ一定になったところで開始した。

### 4.3 発光強度の真空容器圧力依存性

前章(8)式によれば, 発光強度は  $n_0$  に, 即ち, 真空容器圧力に比例する。その確認を行った。真空容器に水素ガスを直接導入することにより, 真空容器圧力を  $3.5 \times 10^{-4}$  Torr (0.047 Pa) から  $1.4 \times 10^{-3}$  Torr (0.19 Pa) まで変化させ,  $H_{\alpha}$  光の各ピークの発光強度の変化をみた。ここで注意しなければならないのは, このときイオン源から観測点までの残留ガスの線密度が増加し, (8)式の  $\sigma_{eq}$  が変化する可能性があることである。本実験の場合は, 上記の圧力に対応して, 線密度は  $0.24$  Torr  $\cdot$  cm ( $0.83 \times 10^{16}$  個/cm<sup>2</sup>) から  $0.57$  Torr  $\cdot$  cm ( $2.0 \times 10^{16}$  個/cm<sup>2</sup>) まで増加するが, そのときの  $\sigma_{eq}$  の変化は附 1, 2, 3 図によれば,  $E = 60$  KeV のとき,  $H_1$  で 7%,  $H_2, H_3$  では 1 - 2% に過ぎない。よって本実験では発光強度は圧力にはほぼ比例すると予測される。

た。分光器の前に焦点距離 15 cm, 径 7 cm のレンズを置いて光を集光した。出口スリットに 2 次電子増倍管を置き, その出力を直接オシロスコープで観測した。波長の掃引は, CT-25 ND 型の電動波長駆動機に制御回路を附加して, ビームパルスごとに自動的に掃引するようにした。掃引には約 0.5 秒要する。

ビームダンプ後方に磁場質量分析器を置き, ビーム組成と不純物量を測定した。ビームダンプ中央のスリット(幅 0.7 cm)を通過した荷電粒子は, 0.4 cm  $\phi$  のコリメータを通過して質量分析器に入り, 磁場によって 60° 曲げられ, ファラデーカップにて捕捉される。

## 4. ビーム組成の測定

### 4.1 $H_{\alpha}$ スペクトルの例

$H_{\alpha}$  スペクトルの一例を図 2 に示す。これは加速電圧  $E/e = 60$  KV, 加速電流  $I_{acc} = 4.5$  A のときのデータである。分光器とビームのなす角  $\theta > 90^{\circ}$  であるため, 高速粒子からの  $H_{\alpha}$  光は長波長側にずれている。

### 4.2 発光強度の時間依存性

$H_{\alpha}$  スペクトルのうちのひとつのピークの発光強度の時間依存性をみた。図 3 に一例を示す。発光強度が一定になるのに, ビーム引出開始後数秒間を要することがわかる。この場合, 水素ガスは定常的に流しており, かつ電流値もほぼ一定である。にもかかわらずこのように発光強度が変化するのは, ビーム引出によって真空容器圧力が一旦減少し, あと徐々に増加して平衡値に達するからである。(真空容器圧力変化に関しては文献 6 を参照) 分光器の波長の掃引には 0.5 秒というかなり長い時間を要する。そこで, 以下の実験においては, 掃引はビーム引出開始後 3 秒後に, 発光強度がほぼ一定になったところで開始した。

### 4.3 発光強度の真空容器圧力依存性

前章(8)式によれば, 発光強度は  $n_0$  に, 即ち, 真空容器圧力に比例する。その確認を行った。真空容器に水素ガスを直接導入することにより, 真空容器圧力を  $3.5 \times 10^{-4}$  Torr (0.047 Pa) から  $1.4 \times 10^{-3}$  Torr (0.19 Pa) まで変化させ,  $H_{\alpha}$  光の各ピークの発光強度の変化をみた。ここで注意しなければならないのは, このときイオン源から観測点までの残留ガスの線密度が増加し, (8)式の  $\sigma_{eq}$  が変化する可能性があることである。本実験の場合は, 上記の圧力に対応して, 線密度は  $0.24$  Torr  $\cdot$  cm ( $0.83 \times 10^{16}$  個/cm<sup>2</sup>) から  $0.57$  Torr  $\cdot$  cm ( $2.0 \times 10^{16}$  個/cm<sup>2</sup>) まで増加するが, そのときの  $\sigma_{eq}$  の変化は附 - 1.2.3 図によれば,  $E = 60$  KeV のとき,  $H_1$  で 7%,  $H_2, H_3$  では 1 - 2% に過ぎない。よって本実験では発光強度は圧力にほぼ比例すると予測される。

実験結果を図4に示す。エネルギーが0eVのドップラーシフトしていない  $H_{\alpha}$  については、発光強度と圧力は比例している。しかしながら、ドップラーシフトしている  $H_{\alpha}$  光は、予測に反して、圧力の高いところで発光強度が飽和する。この理由として、励起水素原子が光を放出する前に水素ガスと衝突して別の準位に移ることが考えられる。以下の計算はこの解釈をするための概算である。励起水素原子の寿命は、たとえば  $\tau(3d \rightarrow 2s) = 1.55 \times 10^{-8}$  sec。一方、60 KeVの水素原子の速度は  $v = 3.4 \times 10^8$  cm/sec であるから  $H(3d)$  ができてから発光するまでに走行できる距離  $l$  は5.3 cm。水素ガス中を走行すれば、光を放出する前に脱励起される可能性がある。 $H^*(n=3) \rightarrow H^*(n=n')$  の断面積  $\sigma$  のデータはないがここでは  $\sigma \sim 3 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup> と予想する。(  $n=3$  では軌道半径は約  $4 \text{ \AA}$  なので  $\sigma \sim 30 \text{ \AA}^2$  と仮定した。) 水素ガス圧力が  $1 \times 10^{-3}$  Torr (0.13 Pa) のとき、 $H(3d)$  が発光するまでの距離 5.3 cm の間に脱励起される割合は  $1 - \exp(-n\sigma l) = 0.43$  となり、励起原子の半分近くが光を放出せずに脱励起される。

ビーム組成の測定は、発光強度と圧力が比例する領域で行うことが必要である。が、ガス圧力があまり低いと十分な光の強度が得られないため、以下の実験は比例領域の上限である。 $5.9 \times 10^{-4}$  Torr (0.078 Pa) で行った。このときプラズマ生成部のガス圧力は  $5 \times 10^{-3}$  Torr (0.67 Pa)、中性化セル入口のガス圧は  $1.6 \times 10^{-3}$  Torr (0.21 Pa)、イオン源へのガス流量は  $2.7 \text{ Torr} \cdot \ell / \text{sec}$  ( $0.36 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{sec}$ )、イオン源から観測点までの残留ガスの線密度は  $0.32 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$  ( $1.1 \times 10^{-16}$  個/cm<sup>2</sup>) である。

#### 4.4 イオン種ごとの発散角

ビーム組成を求める時に注意しなければならないのは、イオン種ごとの発散角の違いである。 $H_2^+$  及び  $H_3^+$  から解離した  $H_1(E/2)$ 、 $H_1(E/3)$  などは解離エネルギーのためビームに対し直角方向の速度成分をもち、発散が悪くなっている可能性がある。実際、前述のバークレー研究所の分光測定<sup>3)</sup>の結果では  $H_1(E/2)$  や  $H_1(E/3)$  は  $H_1(E)$  に比べ  $0.2^\circ \sim 0.6^\circ$  程度発散角が大きい。その場合、ビーム中心からの  $H_{\alpha}$  光をみるか、ビーム周辺部からの  $H_{\alpha}$  光をみるかでビーム組成が異なることが考えられる。これについて調べるため、分光器のレンズの直前にスリットを入れ視野角を小さくした状態で分光器とスリットをビームに対し垂直方向に移動して、 $H_1(E)$ 、 $H_1(E/2)$ 、 $H_1(E/3)$  の空間的な分布を測定した。図5にその結果を示す。3者ともほとんど同じ分布であって、イオン種ごとの発散の違いは検出できなかった。本実験ではスリットの幅が1 cm と広いため空間分解能が悪く、かつ  $H_1(E)$  の発散自体が図5の場合で約  $1.2^\circ$  と悪いため、たとえば  $0.2^\circ$  とかいう小さな発散角の差を検出できると思われず、この結果から一概に発散の差はないと結論することはできない。しかし、少なくとも分光器の出力波形は分光器の垂直位置にほとんど依存しないということがわかったので、本実験では分光器をビーム中心に向けた。

#### 4.5 ビーム組成の測定

イオン源の引き出し電流値を変えた場合に、イオン源を出た直後のビーム組成について、分光器と質量分析器を用いて同時測定した結果を図6に示す。引き出し電流が増すにつれて  $H_1^+(E)$

の比率は増加し、 $H_2^+(E)$ の比率は減少するという傾向については分光器、質量分析器とも良い一致を示す。しかし、絶対値をみると、分光の結果は $H_1^+(E)$ の比率が低め、 $H_2^+(E)$ の比率が高めになっている。この理由としてひとつには励起発光の断面積の精度があろう。2章に述べた反応のうち1, 3, 5の反応については精度 $\pm 10\%$ といわれている。また、2の反応においては10 KeV $\sim$ 35 KeVの領域のデータを60 KeVまで外挿したため、当然かなりの誤差を含んでいるだろう。もうひとつ考えられる理由は、質量分析器では $H_1^+(E)$ の比率を高めに観測している可能性である。質量分析器はイオン源から約8 mという遠さにおいて、イオン源のごく小さな領域からのビームを見ているために、もしイオン種ごとの発散の差があるならば、その影響は分光器におけるよりも大きい。そのため、解離エネルギーのため発散角の大きな $H_1^+(E/2)$ や $H_1^+(E/3)$ の比率を実際よりも小さく観測しているかもしれない。

## 5. 不純物の測定

ビーム中には、炭素や酸素などの軽元素不純物と、銅やタンゲステンなどの重金属不純物が存在する。分光により、これらの不純物の定量ができるかどうか調べた。2種類の方法が考えられる。ひとつは、不純物と水素との化合物から解離してできた水素からの光を利用する方法、もうひとつは、不純物それ自体の光をみる方法である。

まず、解離した水素による軽元素不純物の定量を試みた。軽元素不純物の中で最も多いのは酸素であるが、これに関係した発光として $H_2O^+$ や $OH^+$ 、 $H_3O^+$ から解離した水素からの発光がある。図1において、エネルギー約 $E/18$ のところにある小さなピークがこれに対応する。附-図1の $\sigma_{eq}$ の曲線を、低いエネルギーのところまで外挿し、 $E/18$ のピークの高さからイオン源を出た直後の $H^+(E/18)$ の電流密度を求める。不純物は全て $H_2O^+$ であると仮定すると(実際には、ソースプラズマ密度の低いときやプラズマ生成ガス圧の高い時には、 $H_3O^+$ が多く、密度の高いときやガス圧の低い時には $O^+$ や $OH^+$ が多くなるので、これはかなり粗い仮定である)、水素原子2個あたり1個の酸素があることになるので、その電流密度の半分をもって、イオン源を出た直後の酸素不純物の電流密度とする。図7に、そうして求めた不純物量と、質量分析器により求めた不純物量との関係を示す。ここで不純物量は、イオン源を出た直後の、 $H_1^+$ や $H_2^+$ 、 $H_3^+$ に対する個数比で表わしている。図7で、記号●は3章で述べたバケット型イオン源で得られたデータであるが、記号○のデータは、デュオピガトロン型長パルスイオン源<sup>6)</sup>を使って得られたデータである。酸素不純物量が3%以上のデータは、デュオピガトロン型イオン源に水素と同時に酸素を導入することによって得た。不純物量が少い時には、分光と質量分析の結果は比較的良く一致している。不純物量が多くなると分光の結果が大きめになる。これは、イオン源に多量に酸素ガスを流したため、真空容器内の酸素分圧が上昇し、分光の断面積が変化したせいかもしれない。実際には、軽元素不純物量は個数比で数%程度なので、分光測定は十分実用になると思われる。

次に、不純物それ自体の光をみることを試みた。そのため、ビーム中の酸素原子からの発光を捜したが、弱いものしかなく、水素分子スペクトルとはっきり区別できるものはなかった。しか

の比率は増加し、 $H_2^+(E)$ の比率は減少するという傾向については分光器、質量分析器とも良い一致を示す。しかし、絶対値をみると、分光の結果は $H_2^+(E)$ の比率が低め、 $H_3^+(E)$ の比率が高めになっている。この理由としてひとつには励起発光の断面積の精度があろう。2章に述べた反応のうち1, 3, 5の反応については精度 $\pm 10\%$ といわれている。また、2の反応においては10 KeV $\sim$ 35 KeVの領域のデータを60 KeVまで外挿したため、当然かなりの誤差を含んでいるだろう。もうひとつ考えられる理由は、質量分析器では $H_2^+(E)$ の比率を高めに観測している可能性である。質量分析器はイオン源から約8 mという遠さにおいて、イオン源のごく小さな領域からのビームを見ているために、もしイオン種ごとの発散の差があるならば、その影響は分光器におけるよりも大きい。そのため、解離エネルギーのため発散角の大きな $H_2^+(E/2)$ や $H_2^+(E/3)$ の比率を実際よりも小さく観測しているかもしれない。

## 5. 不純物の測定

ビーム中には、炭素や酸素などの軽元素不純物と、銅やタンゲステンなどの重金属不純物が存在する。分光により、これらの不純物の定量ができるかどうか調べた。2種類の方法が考えられる。ひとつは、不純物と水素との化合物から解離してできた水素からの光を利用する方法、もうひとつは、不純物それ自体の光をみる方法である。

まず、解離した水素による軽元素不純物の定量を試みた。軽元素不純物の中で最も多いのは酸素であるが、これに関係した発光として $H_2O^+$ や $OH^+$ 、 $H_3O^+$ から解離した水素からの発光がある。図1において、エネルギー約 $E/18$ のところにある小さなピークがこれに対応する。附-図1の $\sigma_{eq}$ の曲線を、低いエネルギーのところまで外挿し、 $E/18$ のピークの高さからイオン源を出た直後の $H^+(E/18)$ の電流密度を求める。不純物は全て $H_2O^+$ であると仮定すると(実際には、ソースプラズマ密度の低いときやプラズマ生成ガス圧の高い時には、 $H_3O^+$ が多く、密度の高いときやガス圧の低い時には $O^+$ や $OH^+$ が多くなるので、これはかなり粗い仮定である)、水素原子2個あたり1個の酸素があることになるので、その電流密度の半分をもって、イオン源を出た直後の酸素不純物の電流密度とする。図7に、そうして求めた不純物量と、質量分析器により求めた不純物量との関係を示す。ここで不純物量は、イオン源を出た直後の、 $H_2^+$ や $H_2^+$ 、 $H_3^+$ に対する個数比で表わしている。図7で、記号●は3章で述べたバケット型イオン源で得られたデータであるが、記号○のデータは、デュオピガトロン型長パルスイオン源<sup>6)</sup>を使って得られたデータである。酸素不純物量が3%以上のデータは、デュオピガトロン型イオン源に水素と同時に酸素を導入することによって得た。不純物量が少い時には、分光と質量分析の結果は比較的良く一致している。不純物量が多くなると分光の結果が大きめになる。これは、イオン源に多量に酸素ガスを流したため、真空容器内の酸素分圧が上昇し、分光の断面積が変化したせいかもしれない。実際には、軽元素不純物量は個数比で数%程度なので、分光測定は十分実用になると思われる。

次に、不純物それ自体の光をみることを試みた。そのため、ビーム中の酸素原子からの発光を捜したが、弱いものしかなく、水素分子スペクトルとはっきり区別できるものはなかった。しか

し、それらの中でも最も水素分子スペクトルと区別しやすかったOIの7775.4, 7774.2, 7771.9 Åの線を用いて定量の可能性を調べた。前述のH $\alpha$ 光での実験と同様にデュオビガトン型イオン源に酸素ガスを導入し、酸素不純物量を変化させ、OIの強度をみた。図8に、イオン源に酸素ガスを入れた時のOIのスペクトルを示す。静止している酸素からの光と同時に、ドップラーシフトした高速酸素からの光がみえる。図9には、ドップラーシフトした光の強度を引き出し電流値で割った値と、質量分析器で求めたイオン源を出た直後の不純物量の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあり、OIのピーク値から補正係数を用いて定量できそうなのがわかる。しかし、酸素不純物量が1%以下のときの定量は、水素分子からの発光と重なり合うので、かなり困難である。

重金属の不純物としては、通常、銅が最も多いので、<sup>13</sup>銅からの光を直接検出することを試みた。このため、イオン源のフィラメント導入端子に銅をはさんだモリブデン板を接続してルツボとし、銅イオンの引出しを行った。銅がイオン組成の数10%のときに、CuIの5218.2 Åのドップラーシフトしたものを検出できた。通常の場合には、銅の検出は無理なことがわかった。

## 6. おわりに

分光により、ビーム組成、不純物の定量を試みたが、両者とも、質量分析器の測定結果とかなり良く一致し、分光が有力な測定手段であることがわかった。むしろ、質量分析器が、ビームのほんの一部分をサンプリングするだけなのに対し、分光測定ではビーム全体についての情報が得られ、その意味ではより有力な手段であろう。現在のところ、発光の断面積が不備なため、絶対値に関して誤差が大きいと思われるが、実際に使用しながら断面積を修正していけば、かなりの精度が得られるのではないかと。

解離した水素からの発光によって軽元素不純物量を求める場合、ここでは不純物はH $_2$ O $^+$ のみと仮定した。しかし、実際にはO $^+$ , OH $^+$ , H $_2$ O $^+$ , H $_3$ O $^+$ の存在比は、広い範囲にわたって変化する。また、イオン源運転の初期には多量の炭化水素も存在する。実際、運転条件によっては、E/18のピークがシフトするのが観測されている。不純物のピークのエネルギーから不純物の存在比を求め、それからO $^+$ の量、C $^+$ の量を推定することが必要であり、それはこれからの課題である。

## 謝 辞

本実験の遂行にあたっては、日新電機株の水谷泰彦氏には、分光器の自動掃引コントローラーの製作をして載くとともに、本実験のかなりの部分において協力して載きました。感謝致します。また、不断の激励と御指導を載いた白形弘文加熱工学第1研究室長に、終始、協力と議論を惜しまれなかった秋場真人氏、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝するとともに、この実験を行う機会を与えて載いた小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。



し、それらの中でも最も水素分子スペクトルと区別しやすかったOIの7775.4, 7774.2, 7771.9 Åの線を用いて定量の可能性を調べた。前述のH $\alpha$ 光での実験と同様にデュオピガトロン型イオン源に酸素ガスを導入し、酸素不純物量を変化させ、OIの強度をみた。図8に、イオン源に酸素ガスを入れた時のOIのスペクトルを示す。静止している酸素からの光と同時に、ドップラーシフトした高速酸素からの光がみえる。図9には、ドップラーシフトした光の強度を引き出し電流値で割った値と、質量分析器で求めたイオン源を出た直後の不純物量の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあり、OIのピーク値から補正係数を用いて定量できそうなことがわかる。しかし、酸素不純物量が1%以下のときの定量は、水素分子からの発光と重なり合うので、かなり困難である。

重金属の不純物としては、通常、銅が最も多いので、<sup>13</sup>銅からの光を直接検出することを試みた。このため、イオン源のフィラメント導入端子に銅をはさんだモリブデン板を接続してルツボとし、銅イオンの引出しを行った。銅がイオン組成の数10%のときに、CuIの5218.2 Åのドップラーシフトしたものを検出できた。通常の場合には、銅の検出は無理なことがわかった。

## 6. お わ り に

分光により、ビーム組成、不純物の定量を試みたが、両者とも、質量分析器の測定結果とかなり良く一致し、分光が有力な測定手段であることがわかった。むしろ、質量分析器が、ビームのほんの一部分をサンプリングするだけなのに対し、分光測定ではビーム全体についての情報が得られ、その意味ではより有力な手段であろう。現在のところ、発光の断面積が不備なため、絶対値に関して誤差が大きいと思われるが、実際に使用しながら断面積を修正していけば、かなりの精度が得られるのではないかと。

解離した水素からの発光によって軽元素不純物量を求める場合、ここでは不純物はH<sub>2</sub>O<sup>+</sup>のみと仮定した。しかし、実際にはO<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の存在比は、広い範囲にわたって変化する。また、イオン源運転の初期には多量の炭化水素も存在する。実際、運転条件によっては、E/18のピークがシフトするのが観測されている。不純物のピークのエネルギーから不純物の存在比を求め、それからO<sup>+</sup>の量、C<sup>+</sup>の量を推定することが必要であり、それはこれからの課題である。

## 謝 辞

本実験の遂行にあたっては、日新電機(株)の水谷泰彦氏には、分光器の自動掃引コントローラーの製作をして載くとともに、本実験のかなりの部分において協力して載きました。感謝致します。また、不断の激励と御指導を載いた白形弘文加熱工学第1研究室長に、終始、協力と議論を惜しまれなかった秋場真人氏、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝するとともに、この実験を行う機会を与えて載いた小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。

し、それらの中でも最も水素分子スペクトルと区別しやすかったOIの7775.4, 7774.2, 7771.9 Åの線を用いて定量の可能性を調べた。前述のH $\alpha$ 光での実験と同様にデュオビガトロン型イオン源に酸素ガスを導入し、酸素不純物量を変化させ、OIの強度をみた。図8に、イオン源に酸素ガスを入れた時のOIのスペクトルを示す。静止している酸素からの光と同時に、ドップラーシフトした高速酸素からの光がみえる。図9には、ドップラーシフトした光の強度を引き出し電流値で割った値と、質量分析器で求めたイオン源を出た直後の不純物量の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあり、OIのピーク値から補正係数を用いて定量できそうなことがわかる。しかし、酸素不純物量が1%以下のときの定量は、水素分子からの発光と重なり合うので、かなり困難である。

重金属の不純物としては、通常、銅が最も多いので、<sup>13</sup>C銅からの光を直接検出することを試みた。このため、イオン源のフィラメント導入端子に銅をはさんだモリブデン板を接続してルツボとし、銅イオンの引出しを行った。銅がイオン組成の数10%のときに、CuIの5218.2 Åのドップラーシフトしたものを検出できた。通常の場合には、銅の検出は無理なことがわかった。

## 6. お わ り に

分光により、ビーム組成、不純物の定量を試みたが、両者とも、質量分析器の測定結果とかなり良く一致し、分光が有力な測定手段であることがわかった。むしろ、質量分析器が、ビームのほんの一部分をサンプリングするだけなのに対し、分光測定ではビーム全体についての情報が得られ、その意味ではより有力な手段であろう。現在のところ、発光の断面積が不備なため、絶対値に関して誤差が大きいと思われるが、実際に使用しながら断面積を修正していけば、かなりの精度が得られるのではないかと。

解離した水素からの発光によって軽元素不純物量を求める場合、ここでは不純物はH<sub>2</sub>O<sup>+</sup>のみと仮定した。しかし、実際にはO<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の存在比は、広い範囲にわたって変化する。また、イオン源運転の初期には多量の炭化水素も存在する。実際、運転条件によっては、E/18のピークがシフトするのが観測されている。不純物のピークのエネルギーから不純物の存在比を求め、それからO<sup>+</sup>の量、C<sup>+</sup>の量を推定することが必要であり、それはこれからの課題である。

## 謝 辞

本実験の遂行にあたっては、日新電機株の水谷泰彦氏には、分光器の自動掃引コントローラーの製作をして載くとともに、本実験のかなりの部分において協力して載きました。感謝致します。また、不断の激励と御指導を載いた白形弘文加熱工学第1研究室長に、終始、協力と議論を惜しまれなかった秋場真人氏、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学第1研究室の諸氏に感謝するとともに、この実験を行う機会を与えて載いた小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合研究開発推進センター長に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) D. Stork and R.S. Hemsworth ; "The measurement of particle species produced by intense neutral beam sources", 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco, Nov. 1979
- 2) D.H. McNeill and J. Kim ; Oak Ridge National Laboratory Report TM-7259 (1980)
- 3) C.F. Burrell, W.S. Cooper, R.R. Smith, and W.F. Steele ; Rev. Sci. Instrum. 51 (1980) p.1451
- 4) 二瓶 仁 他 ;私信
- 5) 河合視己人, 大賀徳道, 奥村義和, 柴田猛順 ; JAERI-M 8778 ( 1980 )
- 6) Y. Okumura, S. Matsuda, Y. Mizutani, Y. Ohara, and T. Ohga ; Rev. Sci. Instrum. 51 (1980) p.728
- 7) R.H. Hughes, Sabrina Lin, and L.L. Hatfield ; Phys. Rev. 130 (1963) p.2318
- 8) L.L. Hatfield and R.H. Hughes, Phys. Rev. 131 (1963) p.2556
- 9) R.H. Hughes, H.M. Petefish, and H. Kisner ; Phys. Rev. A5 (1972) p.2103
- 10) C.F. Barnett, et al.; ORNL 5206 (1977)
- 11) 森田洋昭 ;私信。計算結果の例については JAERI -M 7655 P. 74 参照
- 12) 大賀徳道 ; JAERI -M 7604 ( 1978 )
- 13) Y. Okumura, Y. Mizutani, Y. Ohara, and T. Shibata ; Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) p.1

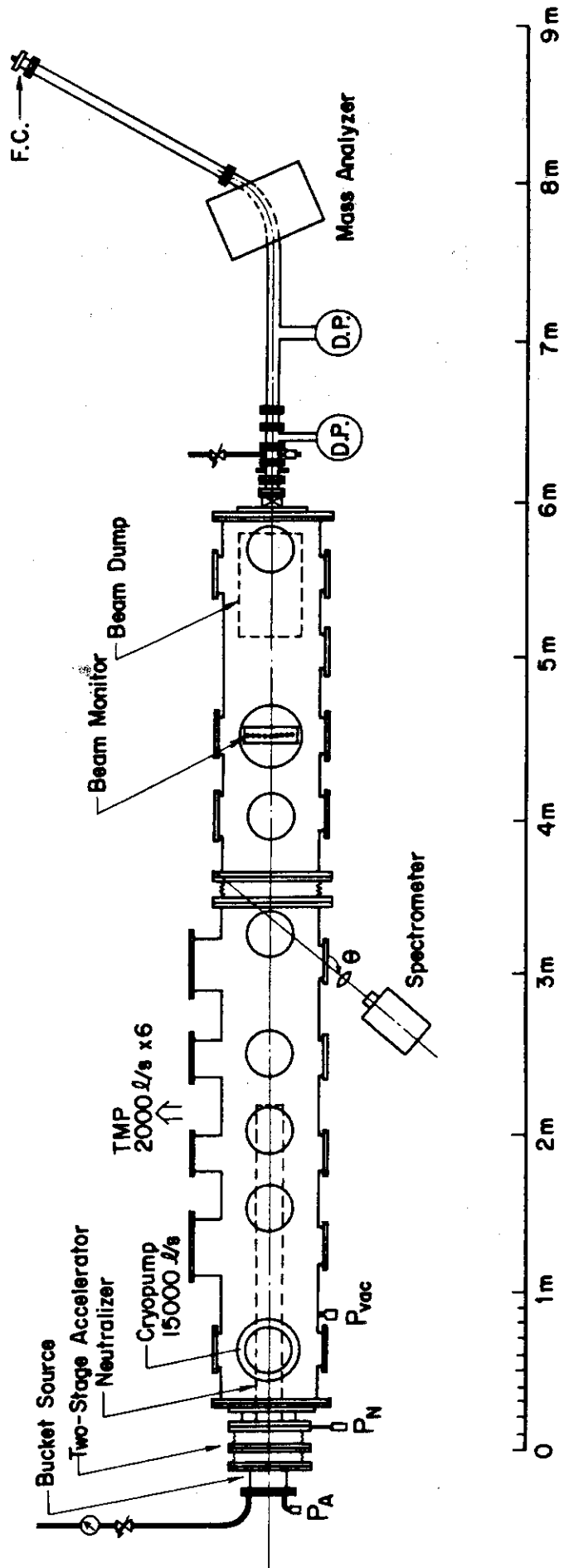
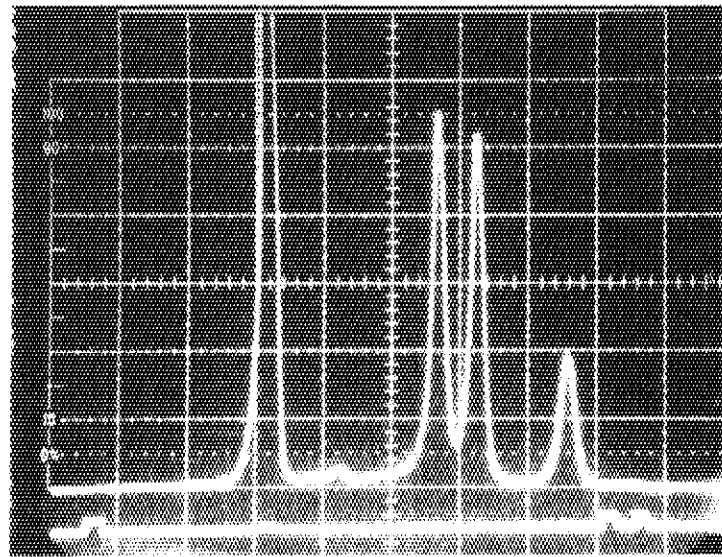


図1 実験装置



$6563 \text{ \AA}$        $H_{\alpha}(E/18)$        $H_{\alpha}(E/3)$        $H_{\alpha}(E/2)$        $H_{\alpha}(E)$        $6622 \text{ \AA}$

図2  $H_{\alpha}$  スペクトルの一例

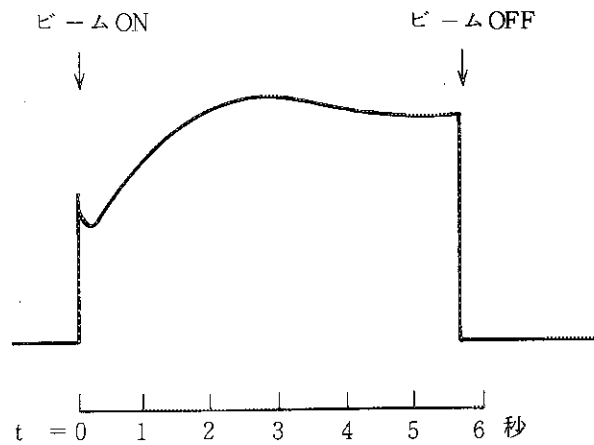


図3  $H_{\alpha}(E/2)$  の発光の時間変化

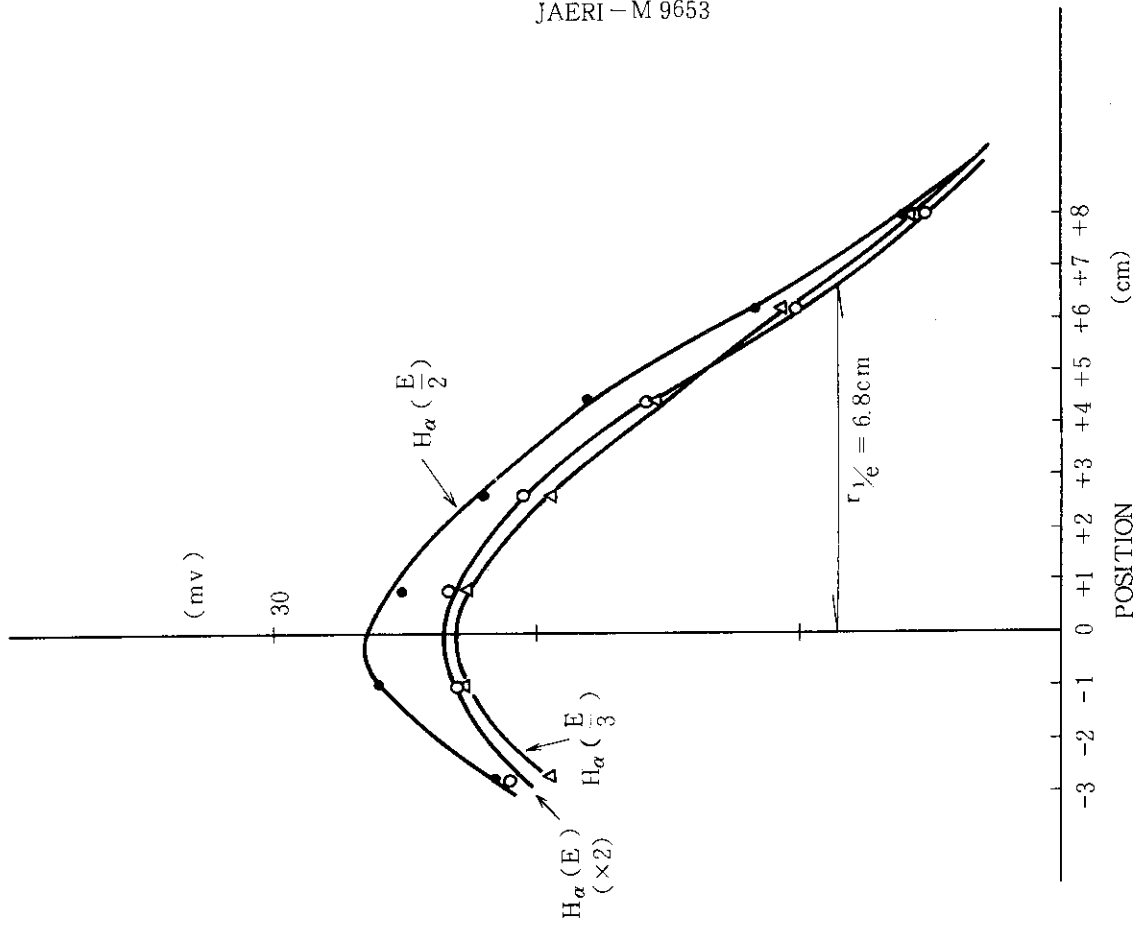


図5 H $\alpha$ 光のプロファイル

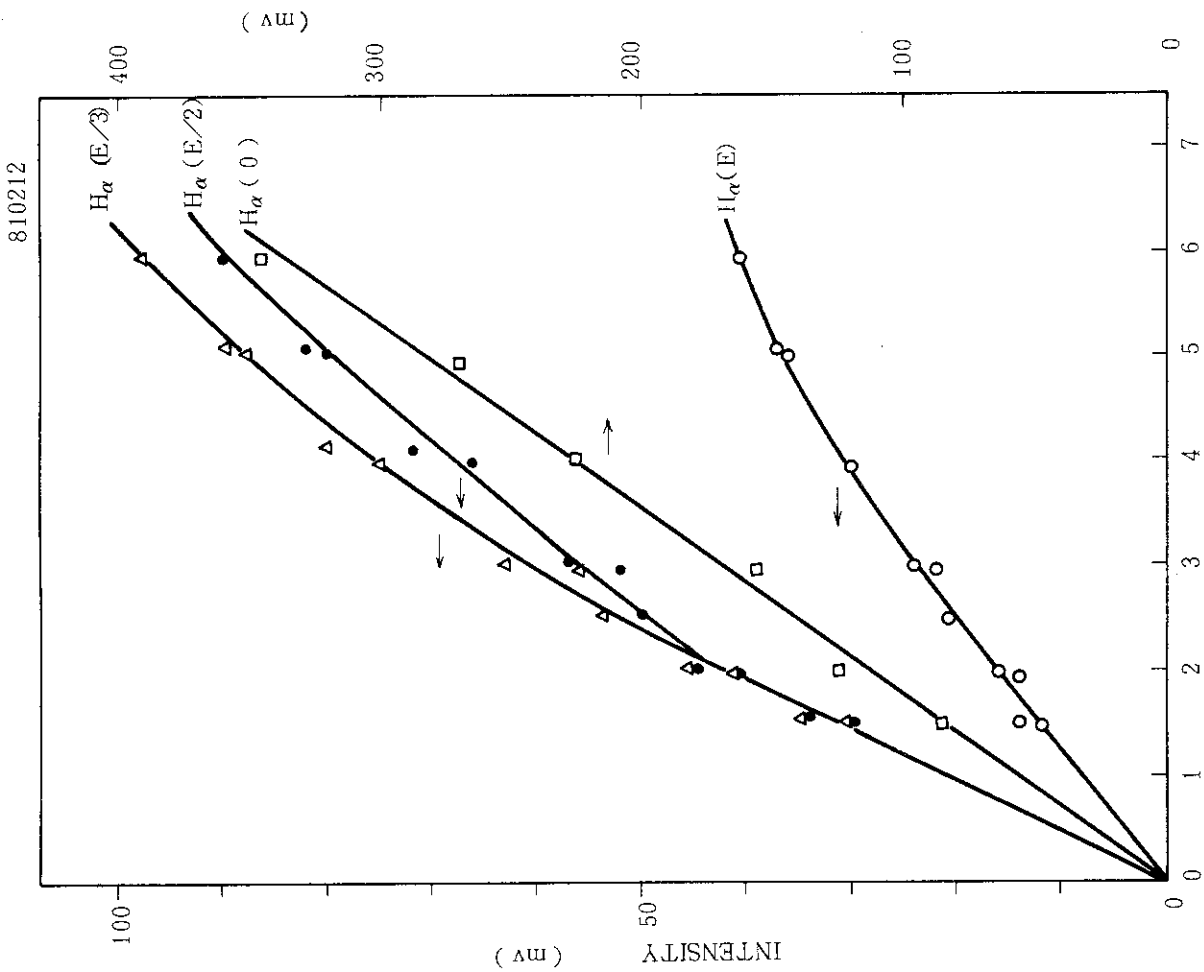


図4 H $\alpha$ 強度のガス圧依存性  
Pvac ( $\times 10^{-4}$  Torr - reading)

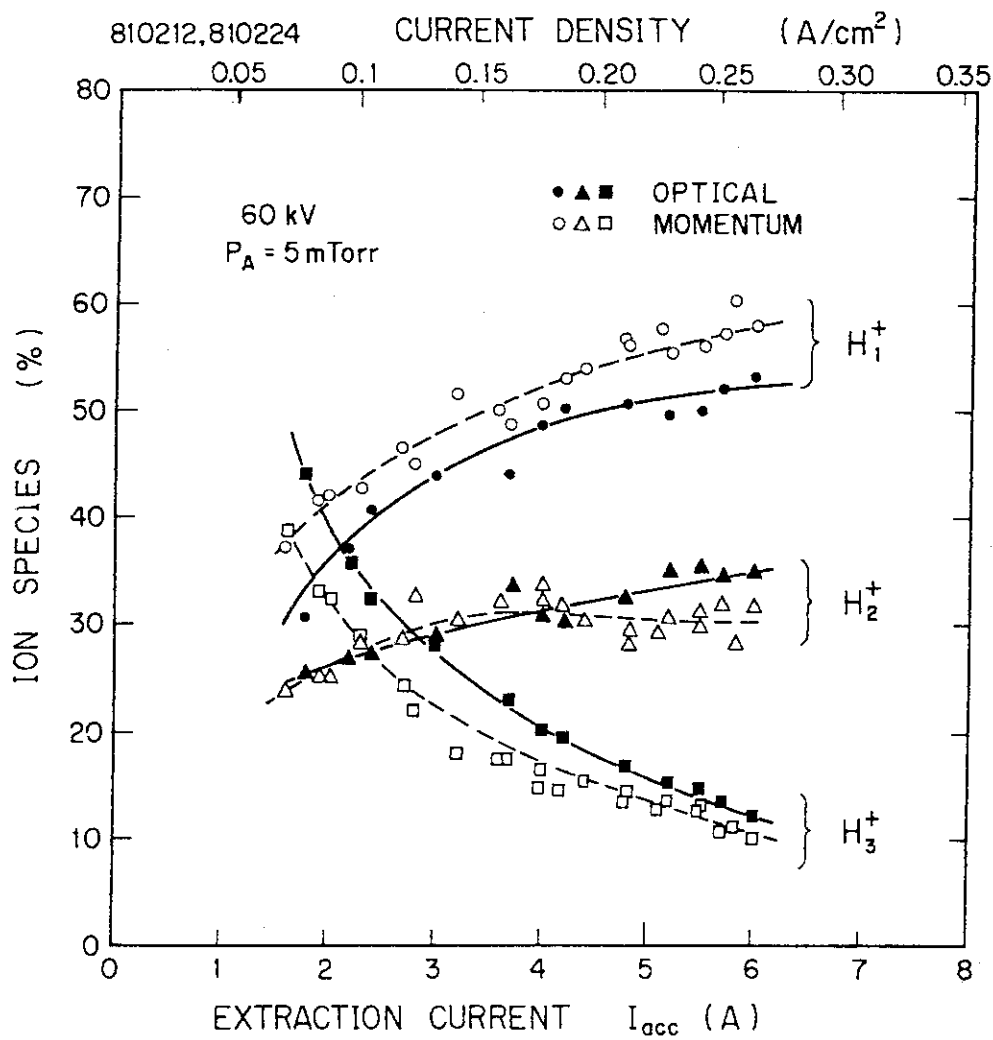


図6 ビーム組成の引き出し電流値依存性。  
黒点は分光器で測定したもの、白点  
は質量分析器で測定したものである。

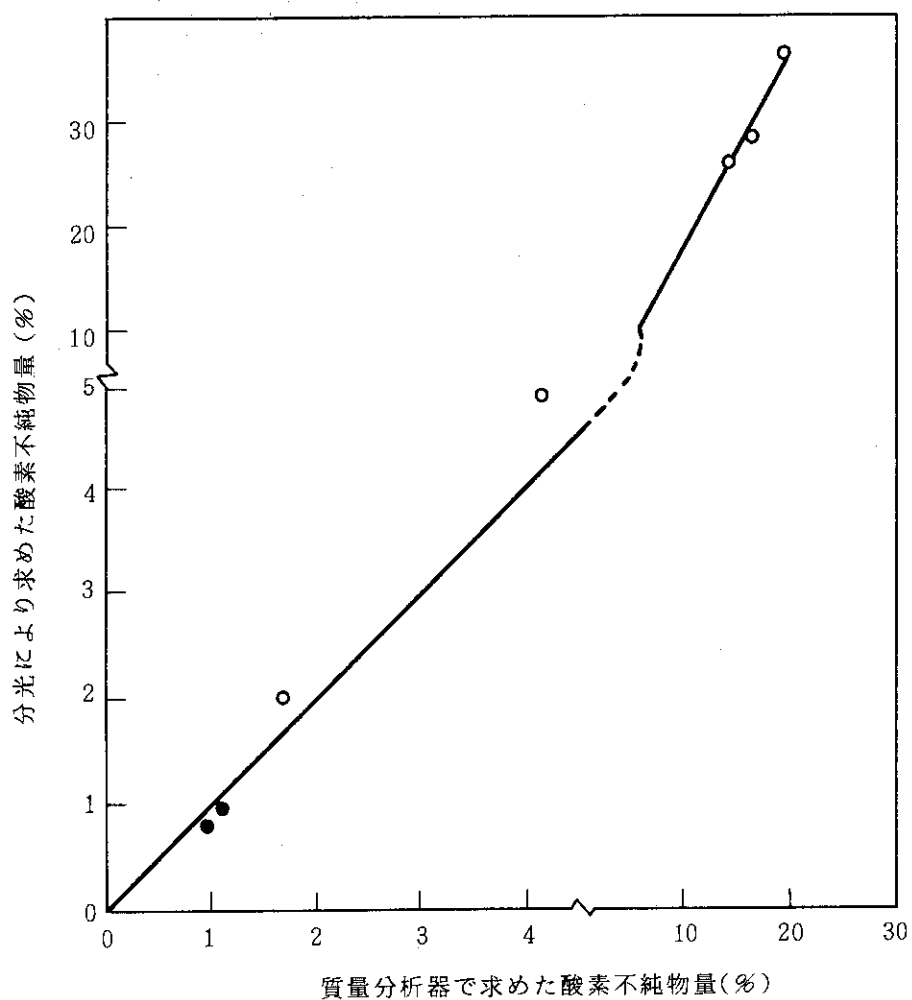


図7 分光と質量分析器で求めた酸素不純物量 ○ のデータはデュオピガトン型イオン源を用いE = 70 keVのとき、● のデータはバケツト型E = 60 keVのときのものである。



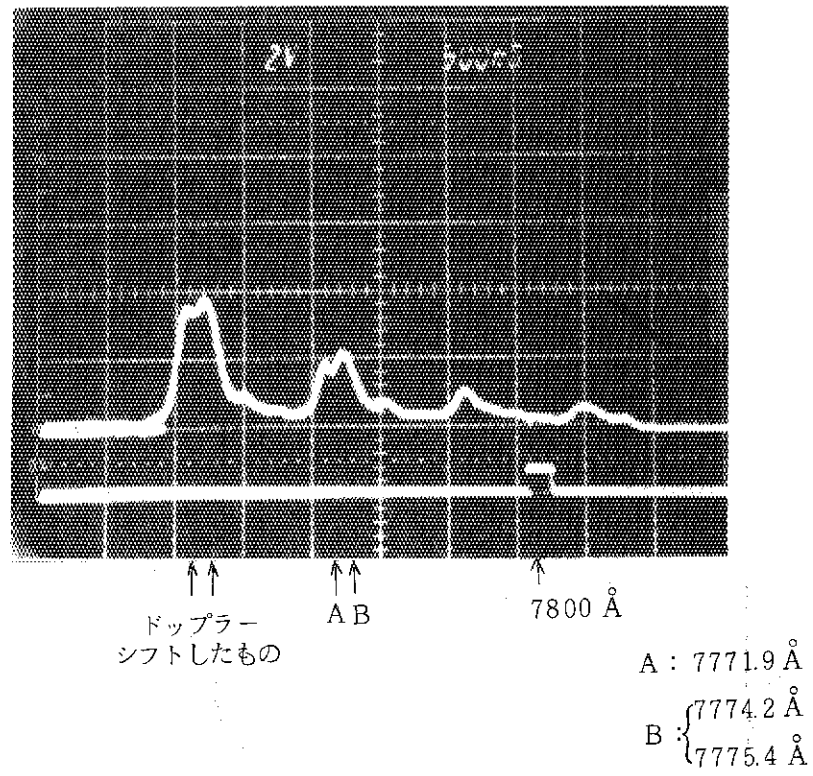


図8 イオン源に酸素ガスを入れたときのOIスペクトル

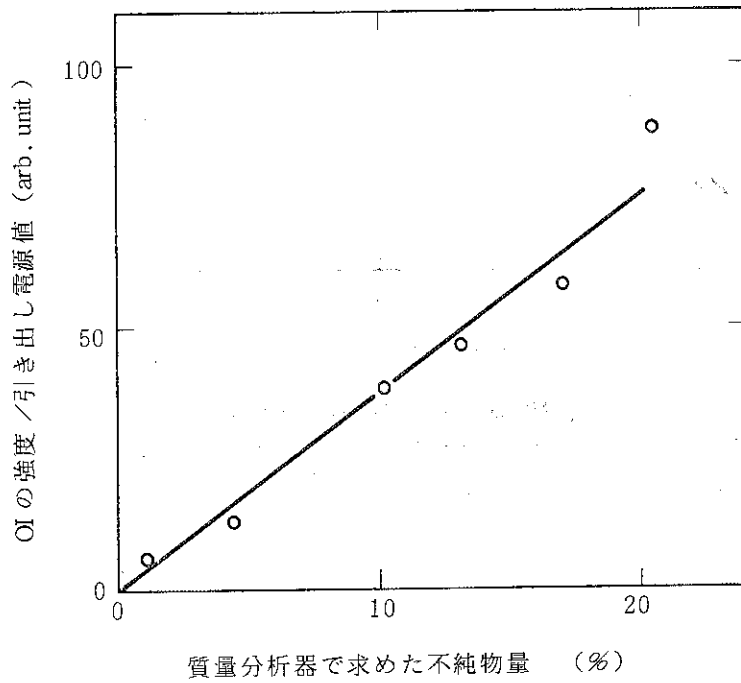
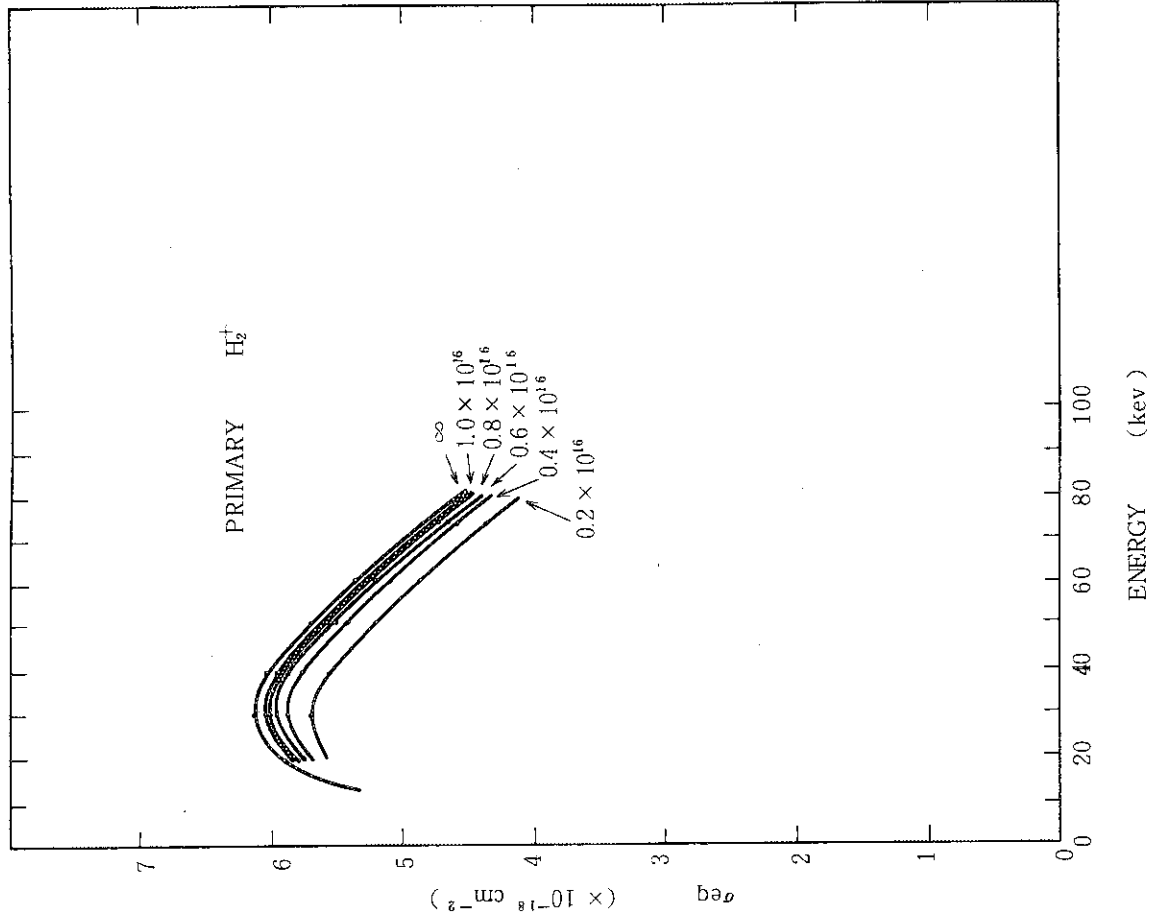
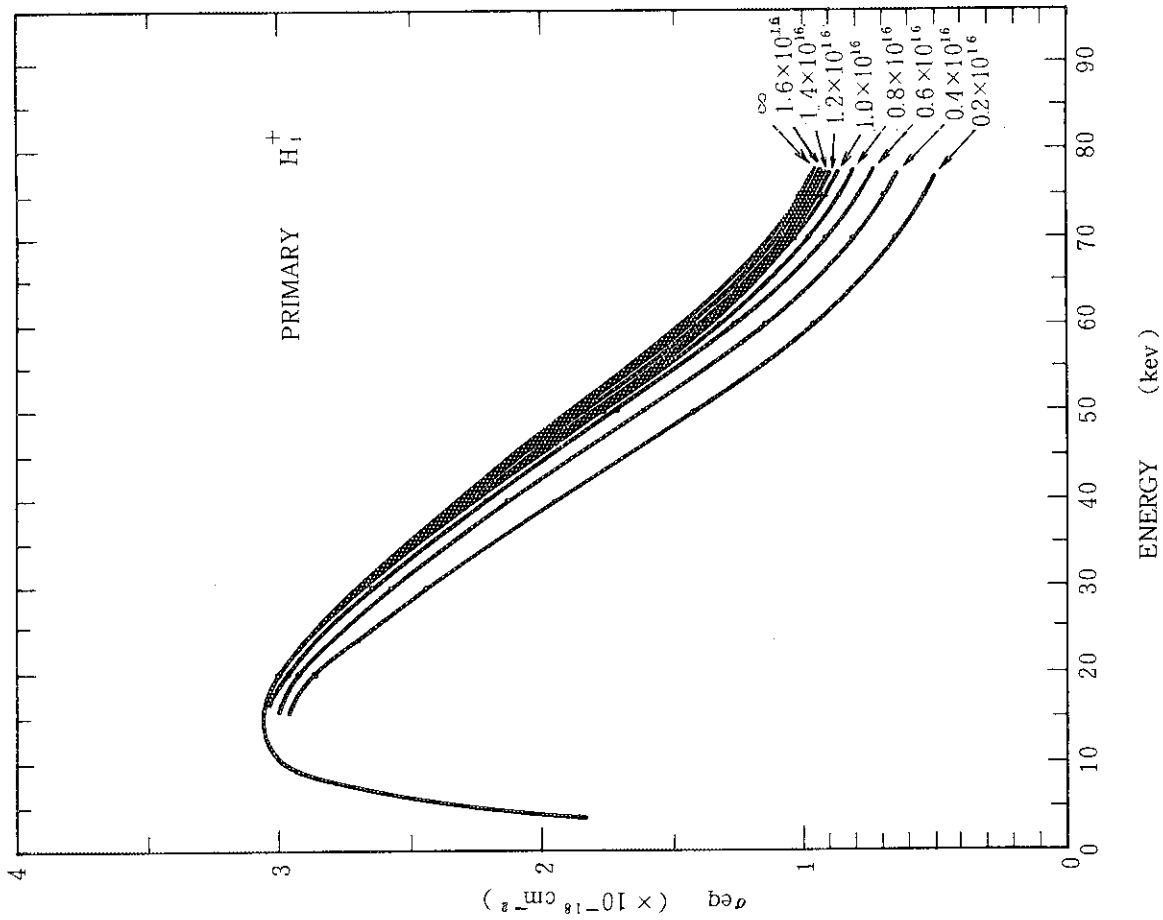


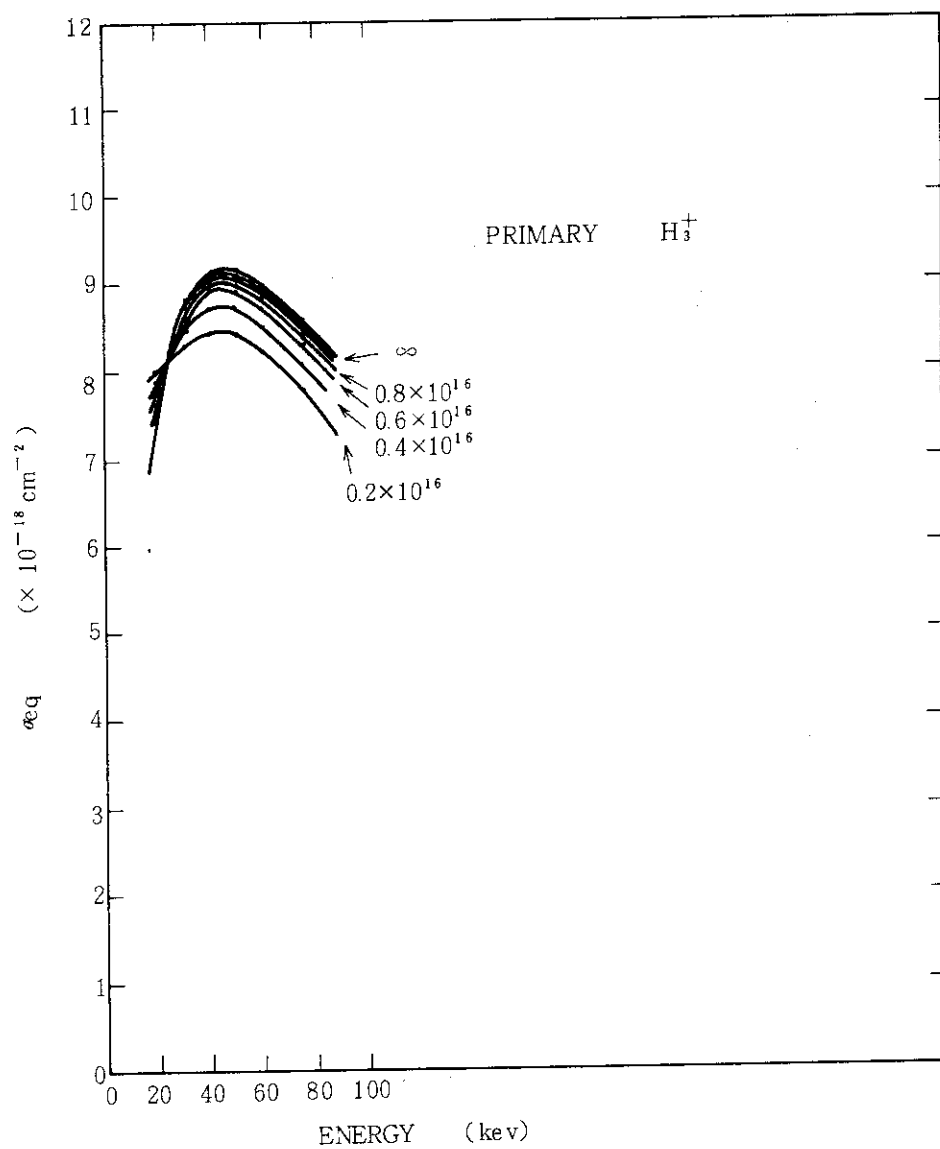
図9 ドップラーシフトしたOIの強度と不純物量との関係



附-2図  $H_{\alpha}(\frac{E}{2})$  の補正係数



附-1図  $H_{\alpha}(E)$  の補正係数



附 - 3 図  $H_\alpha (\frac{E}{3})$  の補正係数