

JAERI-M

7 2 1 7

直入射真空分光器の感度較正と  
DIVAにおける分光測定（波長  
範囲 1000～2000 Å）

1977年8月

杉江 達夫・志甫 諒\*・河西 敏・小田島 和男  
永見 正幸・前田 彦祐・下村 安夫

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、お申しこしてください。

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.

直入射真空分光器の感度較正とDIVA における分光測定  
(波長範囲 1000~2000 Å)

日本原子力研究所 東海研究所 核融合研究部  
杉江達夫・志甫 諒\*・河西 敏・小田島和男  
永見正幸・前田 彦裕<sup>添</sup>・下村安夫

(1977年7月21日受理)

真空紫外域直入射分光器 (Shimadzu RGV-50) の感度較正を分子分岐線対法を用いて波長範囲 1000 Å から 2000 Å にわたって行った。これを使って、DIVA プラズマ中に含まれている気体不純物、C II, C III, C IV, O V, N V の定量測定を、スペクトル線の強度にコロナ平衡モデルを適用する事によって行った。その結果、DIVA プラズマ中の気体不純物は酸素が電子密度の 1~2%, 数密度でいって約  $1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  存在しており、N V がその半分、C II, C III, C IV が酸素に比べて約 1 ケタ低いことが解った。またダイバータ内にチタンを蒸着した場合に、酸素、炭素がそれぞれ 1/2 に減少できたことを示した。さらに Au 不純物が DIVA プラズマ中に含まれている事を確認した。

---

\*核融合研究部特別研究生, 現在東京大学基礎科学科

Intensity Calibration of a Vacuum Monochromator in a  
Wavelength Region of 1000-2000Å and Spectroscopic  
Measurement in DIVA.

Tatsuo SUGIE, Makoto SHIHO\*, Satoshi KASAI, Kazuo ODAJIMA,  
Masayuki NAGAMI, Hikosuke MAEDA and Yasuo SHIMOMURA

Division of Thermonuclear Fusion Reseach, Tokai Research Establish-  
ment, JAERI

(Received July 21, 1977)

A normal incidence vacuum-ultraviolet monochromator (Shimadzu RGV-50) was calibrated in the wavelength region of 1000 to 2000Å by molecular branching-ratio technique. In tokamak-plasmas of DIVA device, oxygen, nitrogen and gold lines were measured. Absolute intensities of CII, CIII, CIV, OVI and NV lines were measured by vacuum-ultraviolet monochromator. Applying the coronal model to the intensities, the ground state populations of ions were determined. Oxygen was 1~2%, NV~0.5%, and CII, CIII and CIV  $\leq 0.1\%$  of the electron number density of DIVA plasmas. By evaporating titanium in to the divertor region, the number densities of oxygen and carbon atoms were reduced to half the concentrations.

Keywords: Normal Incidence Vacuum-ultraviolet Monochromator, Calibration, Impurity, DIVA Device, Plasma, Carbon, Oxygen, Spectroscopic Measurement.

---

\*) On leave from Tokyo University, Tokyo, Japan.

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 真空紫外域直入射分光器の感度較正 .....	1
2.1 分子分岐線対法による感度較正 .....	1
i) 方 法 .....	1
ii) 実験および結果 .....	2
3. DIVA プラズマにおける気体不純物スペクトル線の測定 .....	3
3.1 DIVA 装置とプラズマパラメータ .....	3
3.2 写真測定 .....	3
3.3 スペクトル線の時間経過 .....	3
3.4 気体不純物の定量測定 .....	4
4. 結果および考察 .....	5
謝 辞 .....	6
参 照 文 献 .....	6

## 1. 序 言

高温トカマクプラズマでは壁およびリミターからプラズマ中に混入した不純物は、プラズマ中の電子と衝突することによって電離や励起を起し、スペクトル線を放射する。このことは、プラズマのエネルギーの一部が不純物を電離したり、励起したりすることに使われ、更に光という形でプラズマの外へ逃げる事を意味する。またこれら不純物はプラズマの実効電荷数に密接に関係するので、粒子の輸送現象、加熱特性に大きな影響を与える。したがって核融合を目指す高温トカマクプラズマでは現在プラズマ中での不純物の特性、振舞を研究することが、重要な研究課題の1つとなっている。DIVA装置は不純物対策の一環としてダイバータを取りつけ、プラズマ中に混入する不純物を除去するための研究を続けている。我々はそのDIVA装置によるプラズマ中の不純物の効果を調べる一連の研究の中で、分光学的手法を用いて実験を行った。以下の第2節では真空紫外域直入射分光器(Shimadzu RGV-50)の絶対分光感度較正について述べ、第3節では測定結果について言及し、測定された不純物の種類および量を報告する。

## 2. 真空紫外域直入射分光器の分光感度較正

分光器の感度較正を行う方法として、放射の標準光源を使う方法、絶対的検出器を使う方法等があるが、そのいずれも真空紫外域では装置が大がかりになったり、あるいは特殊な経験が必要とされたりする。本実験では、真空紫外域でも比較的簡便で、一般的に行われている分子のバンドスペクトルを利用する分子分岐線対法を使って直入射分光器および検出系の絶対分光感度較正を $1000 \text{ \AA} \sim 2000 \text{ \AA}$ の波長域に対して行った。

### 2.1 分子分岐線対法による感度較正

#### 1) 方法

分岐線対法は、原子あるいは分子が光を放射する時、同一上準位からの遷移に注目して、異なる下準位に対応するスペクトル線の強度がそれぞれの遷移確率に比例することを利用する方法である。本実験では分光器が直入射型であるので、 $1000 \text{ \AA}$ から $2000 \text{ \AA}$ の波長範囲で、分子のバンドスペクトルを使い分子分岐線対法<sup>1-3)</sup>によって較正を行った。具体的には $1000 \text{ \AA}$ から $1300 \text{ \AA}$ の範囲は水素の $O^1\pi_u - X^1\Sigma_g^+$ (Wernerバンド)系、 $1100 \text{ \AA}$ から $1650 \text{ \AA}$ の範囲は水素の $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$ (Lymanバンド)系、 $1350 \text{ \AA}$ から $2000 \text{ \AA}$ の範囲は窒素の $a^1\pi_g - X^1\Sigma_g^+$ (Lyman-Birge-Hopfieldバンド)系を使って分光器と検出系を一体として相対感度較正を行った。次にNOガス(30 Torr)をつめたイオンチェンバーによって、水素の $L\alpha$ 線( $1215.7 \text{ \AA}$ )に対して分光器および検出系の絶対

## 1. 序 言

高温トカマクプラズマでは壁およびリミターからプラズマ中に混入した不純物は、プラズマ中の電子と衝突することによって電離や励起を起し、スペクトル線を放射する。このことは、プラズマのエネルギーの一部が不純物を電離したり、励起したりすることに使われ、更に光という形でプラズマの外へ逃げる事を意味する。またこれら不純物はプラズマの実効電荷数に密接に関係するので、粒子の輸送現象、加熱特性に大きな影響を与える。したがって核融合を目指す高温トカマクプラズマでは現在プラズマ中での不純物の特性、振舞を研究することが、重要な研究課題の1つとなっている。DIVA 装置は不純物対策の一環としてダイバータを取りつけ、プラズマ中に混入する不純物を除去するための研究を続けている。我々はそのDIVA 装置によるプラズマ中の不純物の効果を調べる一連の研究の中で、分光学的手法を用いて実験を行った。以下の第2節では真空紫外域直入射分光器 (Shimadzu RGV-50) の絶対分光感度較正について述べ、第3節では測定結果について言及し、測定された不純物の種類および量を報告する。

## 2. 真空紫外域直入射分光器の分光感度較正

分光器の感度較正を行う方法として、放射の標準光源を使う方法、絶対的検出器を使う方法等があるが、そのいずれも真空紫外域では装置が大がかりになったり、あるいは特殊な経験が必要とされたりする。本実験では、真空紫外域でも比較的簡便で、一般的に行われている分子のバンドスペクトルを利用する分子分岐線対法を使って直入射分光器および検出系の絶対分光感度較正を  $1000 \text{ \AA} \sim 2000 \text{ \AA}$  の波長域に対して行った。

### 2.1 分子分岐線対法による感度較正

#### 1) 方法

分岐線対法は、原子あるいは分子が光を放射する時、同一上準位からの遷移に注目して、異なる下準位に対応するスペクトル線の強度がそれぞれの遷移確率に比例することを利用する方法である。本実験では分光器が直入射型であるので、 $1000 \text{ \AA}$  から  $2000 \text{ \AA}$  の波長範囲で、分子のバンドスペクトルを使い分子分岐線対法<sup>1-3)</sup>によって較正を行った。具体的には  $1000 \text{ \AA}$  から  $1300 \text{ \AA}$  の範囲は水素の  $O^1\pi_u - X^1\Sigma_g^+$  (Werner バンド) 系、 $1100 \text{ \AA}$  から  $1650 \text{ \AA}$  の範囲は水素の  $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$  (Lyman バンド) 系、 $1350 \text{ \AA}$  から  $2000 \text{ \AA}$  の範囲は窒素の  $a^1\pi_g - X^1\Sigma_g^+$  (Lyman-Birge-Hopfield バンド) 系を使って分光器と検出系を一体として相対感度較正を行った。次にNOガス (30 Torr) をつめたイオンチェンバーによって、水素の  $L\alpha$  線 ( $1215.7 \text{ \AA}$ ) に対して分光器および検出系の絶対

感度を求め、この値を使って  $1000 \text{ \AA}$  から  $2000 \text{ \AA}$  の波長範囲を絶対感度に変換した。

## ii) 実験および結果

Fig. 1 に真空紫外域直入射分光器 (Shimadzu RGV-50) および検出系の較正実験の配置図を示す。キャピラリー放電管 (B) と分光器の間は差圧排気され、分光器の中は  $\sim \times 10^{-4}$  Torr に保たれている。キャピラリー放電管 (B) を出た光は分光器の入口スリット ( $S_1$ ), 絞り ( $A_1$ ) を通り凹面回折格子 (G;  $\text{MgF}_2$  コーティング, 曲率半径  $50 \text{ cm}$ ,  $1200$  本/mm, ブレーズ波長  $1500 \text{ \AA}$ ) にあたり分散された後、絞り ( $A_2$ ), 分光器の出口スリット ( $S_2$ ) を通り検出器 (C) に導かれる。入口スリットは巾  $15 \mu$  高さ  $4 \text{ mm}$ , 出口スリットは巾  $15 \mu$  高さ  $20 \text{ mm}$  (この時分光器の波長分解能は  $0.6 \text{ \AA}$  となる) とした。絞り  $A_1$  はそれを通った光はすべて回折格子 G の中にあたるような大きさを選んだ。光の検出は、サルチル酸ソーダを塗布したガラス板の背後に光電子増倍管 (RCA7265) を置き、負高圧  $1500 \text{ V}$  をかけて行った。

$1000 \text{ \AA}$  から  $1650 \text{ \AA}$  の較正は前述したような、 $\text{C}^1\pi_u - \text{X}^1\Sigma_g^+$  (Werner バンド) 系と、 $\text{B}^1\Sigma_u^+ - \text{X}^1\Sigma_g^+$  系を、選択的に強く光らせる<sup>4)</sup> ために水素にアルゴンを加えた混合ガス ( $0.5 \text{ Torr}$ ) を放電電流  $150 \text{ mA}$  で、 $1350 \text{ \AA}$  から  $2000 \text{ \AA}$  の範囲の較正は、チッ素ガス ( $0.1 \text{ Torr}$ ) を放電電流  $180 \text{ mA}$  でキャピラリー放電管内で光らせて行った。文献 1 より引用した水素の  $\text{B}^1\Sigma_u^+ - \text{X}^1\Sigma_g^+$  系、 $\text{C}^1\pi_u - \text{X}^1\Sigma_g^+$  系そしてチッ素の  $\text{a}^1\pi_g - \text{X}^1\Sigma_g^+$  系の波長および相対強度等を TABLE I, TABLE II, TABLE III に示す。スペクトル線の検出信号強度を上に掲げた表に示した相対強度で割る事により分光器と検出系を一体とした相対感度を求め、NO ガス ( $30 \text{ Torr}$ ) をつめたイオンチェンバー<sup>5-7)</sup> を使って絶対感度に直した。ここで使ったイオンチェンバーは Fig. 2 に示すように  $1 \text{ mm}$  厚の  $\text{MgF}_2$  窓を持ち、NO ガス  $30 \text{ Torr}$  をつめ  $120 \text{ V}$  の電圧をかけたものである。これは NO の yield が  $1300 \text{ \AA}$  程度まで、 $\text{MgF}_2$  窓が  $1150 \text{ \AA}$  以上の光のみ透過することから、ほとんど水素の  $L\alpha$  線にのみ感度をもつ検出器である。実際にこの検出器を使い、この較正実験の際使用した光源からのスペクトル線を測定してみると、水素の  $L\alpha$  線にくらべて他のスペクトル線は無視出来るほど強度が弱い事が確められた。また、NO ガスの  $1215.7 \text{ \AA}$  での量子効率<sup>5)</sup> は  $0.81 \text{ electrons/photon}$ ,  $1 \text{ mm}$  厚  $\text{MgF}_2$  窓の透過率は  $0.57$ <sup>8)</sup> であるから、ここで使った NO ガスイオンチェンバーの全体の量子効率は、 $0.46 \text{ electrons/photon}$  ( $7.37 \times 10^{-20} \text{ amp}\cdot\text{sec/photon}$ ) となる。以下に  $1215.7 \text{ \AA}$  での絶対較正の手順を述べる。NO ガスイオンチェンバーを  $A_1$  の回折格子側に取り付け、分光器に入ってくる水素の  $L\alpha$  線 ( $1215.7 \text{ \AA}$ ) の photon 数を求めた後、C の位置に付け換えてそこでの  $L\alpha$  線の photon 数を求め、回折格子 G の反射率  $R_E$  を求めた。次に C の位置に、サルチル酸ソーダを塗布したガラス板の背後に光電子増倍管 (RCA7265) を配置した検出器を置き、その検出感度  $\eta_\alpha$  を求めた。以上の事から  $R_E = 0.15$ ,  $\eta_\alpha = 5.76 \times 10^{-16} \text{ amp}\cdot\text{sec/photon}$  の結果を得た。いま、分光器にはいってくる  $L\alpha$  線の photon 数を  $P_0$ , 分光器と検出系を一体として考えた感度を  $K_\alpha$ , 出力電流を  $I$  とすると、

$$P_0 K_\alpha = I \quad (1)$$

$$K_\alpha = R_E \eta_\alpha \quad (2)$$



と書ける。(2)式より  $L\alpha$  線の所での分光器と検出系を一体として考えた感度は、 $8.64 \times 10^{-17}$  amp·sec/photon となる。この値を使ってさきに求めた相対感度を絶対感度に変換し、結果を Fig. 3 に示した。

### 3. DIVA プラズマにおける気体不純物スペクトル線の測定

真空紫外域直入射分光器 (Shimadzu RGV-50) を使い  $1000 \text{ \AA}$  から  $2000 \text{ \AA}$  までの範囲で DIVA プラズマから発せられるスペクトル線の写真測定と光電測定を行った。光電測定の際は第 2 節で述べた方法で絶対感度校正した分光器と検出系を使いスペクトル線の強度を測定し、気体不純物量の定量を行った。以下に測定時の DIVA プラズマのパラメータについて、写真測定と光電測定について詳しく述べる。

#### 3.1 DIVA プラズマ装置とプラズマパラメータ

DIVA 装置を上から見た図を Fig. 4 に示す。真空紫外域直入射分光器は図の中で 6 番と 7 番のトロイダルコイル間の  $D_5$  ポートに付けられており、Fig. 5 にその場所の断面図を示す。

この実験における DIVA プラズマのパラメータは、トロイダル磁場  $10 \text{ KG}$ 、ダイバータループ電流とプラズマ電流との比  $I_D/I_p = 1.1$  である。また Fig. 6 にループ電圧、プラズマ電流、平均電子密度 (マイクロ波干渉計より出した値) の時間経過を示す。

#### 3.2 写真測定

光電測定に先だち、DIVA プラズマから発せられるスペクトル線の写真測定を行った。フィルムはコダック社製 SWR フィルムを使い、露光は  $300$  ショット重ね取りで行った。結果をマイクロフォトトレースし、Fig. 7 に示す。気体不純物のスペクトル線の他に、金のスペクトル線が認められている。

#### 3.3 スペクトル線の時間経過

真空紫外域直入射分光器の検出器を、サルチル酸ソーダを塗布したガラス板の背後に光電子増倍管 (RCA 7265) を置いたものにし、TABLEN にあげたスペクトル線について光電測定を行った。この中で CII については  $1334.53 \text{ \AA}$  と  $1335.66 \text{ \AA}$  と  $1335.71 \text{ \AA}$  のスペクトル線を、 CIV については  $1548.2 \text{ \AA}$  と  $1550.8 \text{ \AA}$  のスペクトル線を、そして OIV については  $790.2 \text{ \AA}$  と  $787.7 \text{ \AA}$  と  $790.1 \text{ \AA}$  のスペクトル線をそれぞれ合せた形で測定を行った。結果をピークで規格化して Fig. 8 に示した。この結果から電子温度を決定し<sup>9)</sup> Fig. 9 に示した。

と書ける。(2)式より $L\alpha$ 線の所での分光器と検出系を一体として考えた感度は、 $8.64 \times 10^{-17}$  amp·sec/photon となる。この値を使ってさきに求めた相対感度を絶対感度に変換し、結果をFig. 3に示した。

### 3. DIVA プラズマにおける気体不純物スペクトル線の測定

真空紫外域直入射分光器 (Shimadzu RGV-50) を使い $1000 \text{ \AA}$ から $2000 \text{ \AA}$ までの範囲でDIVA プラズマから発せられるスペクトル線の写真測定と光電測定を行った。光電測定の際は第2節で述べた方法で絶対感度較正した分光器と検出系を使いスペクトル線の強度を測定し、気体不純物量の定量を行った。以下に測定時のDIVA プラズマのパラメータについて、写真測定と光電測定について詳しく述べる。

#### 3.1 DIVA プラズマ装置とプラズマパラメータ

DIVA 装置を上から見た図をFig. 4に示す。真空紫外域直入射分光器は図の中で6番と7番のトロイダルコイル間の $D_5$ ポートに付けられており、Fig. 5にその場所の断面図を示す。

この実験におけるDIVA プラズマのパラメータは、トロイダル磁場 $10 \text{ KG}$ 、ダイバータループ電流とプラズマ電流との比 $I_D/I_p=1.1$ である。またFig. 6にループ電圧、プラズマ電流、平均電子密度(マイクロ波干渉計より出した値)の時間経過を示す。

#### 3.2 写真測定

光電測定に先だち、DIVA プラズマから発せられるスペクトル線の写真測定を行った。フィルムはコダック社製SWRフィルムを使い、露光は $300$ ショット重ね取りで行った。結果をマイクロフォトトレースし、Fig. 7に示す。気体不純物のスペクトル線の他に、金のスペクトル線が認められている。

#### 3.3 スペクトル線の時間経過

真空紫外域直入射分光器の検出器を、サルチル酸ソーダを塗布したガラス板の背後に光電子増倍管(RCA 7265)を置いたものにし、TABLENにあげたスペクトル線について光電測定を行った。この中でCIIについては $1334.53 \text{ \AA}$ と $1335.66 \text{ \AA}$ と $1335.71 \text{ \AA}$ のスペクトル線を、CNについては $1548.2 \text{ \AA}$ と $1550.8 \text{ \AA}$ のスペクトル線を、そしてONについては $790.2 \text{ \AA}$ と $787.7 \text{ \AA}$ と $790.1 \text{ \AA}$ のスペクトル線をそれぞれ合せた形で測定を行った。結果をピークで規格化してFig. 8に示した。この結果から電子温度を決定し<sup>9)</sup> Fig. 9に示した。

## 3.4 気体不純物の定量測定

2.1で述べた様に、 $1000 \text{ \AA}$ から $2000 \text{ \AA}$ の波長域について分光器が感度較正できたので、その範囲でスペクトル線の絶対強度を測定し、不純物の定量を行った。CIIについては $1334.53 \text{ \AA}$ 、 $1335.66 \text{ \AA}$ 、 $1335.71 \text{ \AA}$ のスペクトル線をいっしょに、CVについては $1548.2 \text{ \AA}$ 、 $1550.77 \text{ \AA}$ のスペクトル線をいっしょに出口スリットから検出器に導いて測定した。また、OVIについては、 $1031.95 \text{ \AA}$ と $1037.63 \text{ \AA}$ のスペクトル線について別々に測定し、NVについても $1238.8 \text{ \AA}$ と $1242.80 \text{ \AA}$ のスペクトル線について別々に測定を行った。実験装置の配置はFig. 5に示した通りである。ここで、プラズマから出た光はシェルにあげられた穴を通り、パイプP（内面に反射防止用に絞りが入れている）を通過して入口スリット $S_1$ から真空分光器の中に入る。

今、波長 $\lambda$ のところで分光器と検出系を一体とした感度を $K(\lambda)$ 、検出抵抗 $R$ を通した検出系からの出力を $D$ 、スペクトル線の単位体積単位時間あたりの発光光子数を $N(\lambda)$ 、プラズマ中心から入口スリットを見た時の立体角を $\omega$ 、入口スリットの巾を $S_1$ 、高さを $h_1$ 、プラズマ中で光を取り出している所の有効体積を $V$ 、プラズマ中心から入口スリットまでの距離を $\ell$ とし、発光光子数がプラズマ中で一様であると仮定すると、

$$D = K(\lambda) \cdot N(\lambda) \cdot \frac{\omega}{4\pi} \cdot V \cdot R \times 10^3 \quad (3)$$

となる。（ただし、 $D$ は $\text{mV}$ 単位、 $R$ は $\Omega$ 単位、 $V$ は $\text{cm}^3$ 単位である。）

(3)より単位体積単位時間あたりの発光光子数 $N(\lambda)$ は

$$N(\lambda) = \frac{D \cdot 4\pi}{K(\lambda) \cdot \omega \cdot V \cdot R \times 10^3} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{S_1 h_1}{\ell^2}$$

と書ける。本実験では、 $R = 1.47 \times 10^4 \Omega$ 、 $\ell = 232.5 \text{ cm}$ 、 $V = 182 \text{ cm}^3$ 、 $h_1 = 1.0 \text{ cm}$ 、 $S_1$ についてはCII、CV、OVIスペクトル線測定の際は $5 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 、NVスペクトル線測定の際は $1 \times 10^{-2} \text{ cm}$ を用いた。これらの値を(4)式に代入し、 $D$ にデータを入れて計算した結果をFig. 10に示す。

ここで、電子密度を $n_e$ 、電子温度を $T_e$ 、基底状態 $g$ にある原子の個数を $n_g$ 、 $p$ 状態にある原子の個数を $n_p$ 、基底状態から $p$ 状態に上げられる時の励起係数を $Q_{gp}$ 、 $p-q$ 遷移の遷移確率を $A_{pq}$ 、その時の発光スペクトルの波長を $\lambda_{pq}$ 、単位体積単位時間あたりの発光個数を $N(\lambda_{pq})$ とし、コロナ平衡モデルを適用すると（Fig. 11 参照）、

$$n_e n_g Q_{gp} = n_p \sum_{q < p} A_{pq} \quad (5)$$

$$N(\lambda_{pg}) = n_p A_{pg} \quad (6)$$

となる。(5), (6)より

$$n_g = \frac{N(\lambda_{pg})}{n_e Q_{gp}} \cdot \frac{\sum_{q < p} A_{pq}}{A_{pg}} \quad (7)$$

となる。本実験で測定したスペクトル線については、 $\sum_{q < p} A_{pq} / A_{pg} = 1$  であることから、

$$n_g = \frac{N(\lambda_{pg})}{n_e Q_{gp}} \quad (8)$$

(4)式で出した $N(\lambda)$ を代入して、基底状態にある原子の個数 $n_g$ を出した。ここで $Q_{gp}$ については、POSTの式<sup>10)</sup>

$$Q_{gp} = \frac{1.2 \times 10^{-5}}{E_{gp} \cdot T_e^{1/2}} \cdot f_{gp} \cdot S\left(\frac{E_{gp}}{T_e}\right) \quad (9)$$

$E_{gp}$ ; 励起エネルギー, eV

$f_{gp}$ ; 吸収の振動子強度

$$S(y) = \int_y^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz$$

$$y = \frac{E_{gp}}{T_e}$$

と、MEWEの式<sup>11)</sup>

$$Q_{gp} = \frac{1.58 \times 10^{-5}}{E_{gp} \cdot T_e^{1/2}} \cdot f_{gp} \cdot \bar{g}(y) \cdot 10^{-0.434} \frac{E_{gp}}{T_e} \quad (10)$$

$$\bar{g}(y) = A + (By - Cy^2 + D)e^{yS(y)} + Cy$$

を用いた。なお $Q_{gp}$ についてはそれぞれの場合についての計算結果をFig. 12, 13, 14に示しておいた。

#### 4. 結果および考察

各イオンの基底状態にある原子の個数を(8)式より計算し、その時間経過をFig. 15に示す。図の中で、実線はPOST、破線はMEWEの式より計算した $Q_{gp}$ を使い $n_g$ を出した場合を示している。この2つの場合で $n_g$ の値はあまり変らない事が解る。4 msecの所で観てみると、OMは $n_g \sim 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\bar{n}_e = 9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ であるから、OMの量は $\bar{n}_e$ の約1.8%程度である事が解る。放電中期8 msec付近まで来るとOMの密度がかなり低くなり

$$N(\lambda_{pg}) = n_p A_{pg} \quad (6)$$

となる。(5), (6)より

$$n_g = \frac{N(\lambda_{pg})}{n_e Q_{gp}} \cdot \frac{\sum_{q < p} A_{pq}}{A_{pg}} \quad (7)$$

となる。本実験で測定したスペクトル線については、 $\sum_{q < p} A_{pq} / A_{pg} = 1$  であることから、

$$n_g = \frac{N(\lambda_{pg})}{n_e Q_{gp}} \quad (8)$$

に(4)式で出した  $N(\lambda)$  を代入して、基底状態にある原子の個数  $n_g$  を出した。ここで  $Q_{gp}$  については、POST の式<sup>10)</sup>

$$Q_{gp} = \frac{1.2 \times 10^{-5}}{E_{gp} \cdot T_e^{1/2}} \cdot f_{gp} \cdot S\left(\frac{E_{gp}}{T_e}\right) \quad (9)$$

$E_{gp}$ ; 励起エネルギー, eV

$f_{gp}$ ; 吸収の振動子強度

$$S(y) = \int_0^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz$$

$$y = \frac{E_{gp}}{T_e}$$

と、MEWE の式<sup>11)</sup>

$$Q_{gp} = \frac{1.58 \times 10^{-5}}{E_{gp} \cdot T_e^{1/2}} \cdot f_{gp} \cdot \bar{g}(y) \cdot 10^{-0.434} \frac{E_{gp}}{T_e} \quad (10)$$

$$\bar{g}(y) = A + (By - Cy^2 + D)e^{yS(y)} + Cy$$

を用いた。なお  $Q_{gp}$  についてはそれぞれの場合についての計算結果を Fig. 12, 13, 14 に示しておいた。

#### 4. 結果および考察

各イオンの基底状態にある原子の個数を(8)式より計算し、その時間経過を Fig. 15 に示す。図の中で、実線は POST, 破線は MEWE の式より計算した  $Q_{gp}$  を使い  $n_g$  を出した場合を示している。この2つの場合で  $n_g$  の値はあまり変らない事が解る。4 msec の所で観てみると、OM は  $n_g \sim 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\bar{n}_e = 9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  であるから、OM の量は  $\bar{n}_e$  の約 1.8% 程度である事が解る。放電中期 8 msec 付近まで来ると OM の密度がかなり低くなり

$n_g \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  になっているのは、電子温度の上昇にもなってOVの電離電圧138 eVをのりこえOVの基底状態に移行している酸素原子があるからである。4 msec 付近では酸素についてはほとんどがOVであると考えられるから、DIVA プラズマにおける酸素不純物の量は、4 msec の時の値を使って  $1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  となる。これは  $\bar{n}_e$  の1~2%程度となる。またNVについては  $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、Cについては  $\lesssim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  となる事がこの実験の範囲から結論づけられる。また、8 msec におけるOVの量を、 $1.6 \times 10^{11} - 7 \times 10^{10}$  (8 msec におけるOVの量) から計算し、 $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  とし、

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum n_K Z_K^2}{\sum n_K Z_K}$$

より  $Z_{\text{eff}}$  を求めると、 $\sim 1.4$  となる。またダイバータ部の真空容器壁1/2に  $T_i$  をフラッシュした場合<sup>12)13)</sup>、軽元素不純物(C, O)が、Fig. 16のように1/2に減少した。これは、軽元素不純物(C, O)はほとんど、ダイバータ部の真空容器壁からプラズマ中に混入していること、そして、金蒸着面をもつシエルは軽元素に関しては不純物の発生源とはなっていないであろうということの意味している。上記のように軽元素不純物のみを考慮した  $Z_{\text{eff}}$  は1.4であり、 $T_i$  をフラッシュした場合は1.2である。しかし、プラズマ抵抗と電子温度から求めた  $Z_{\text{eff}}$  は3程度である。さらに  $T_i$  をフラッシュした場合としない場合とで  $Z_{\text{eff}}$  および全輻射損失の変化がなかった。<sup>13)</sup> すなわちDIVA プラズマにおいて軽元素の  $Z_{\text{eff}}$  への影響、全輻射損失への影響はほとんどないといえる。

## 謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々議論していただいた当研究部プラズマ計測グループ船橋昭昌氏、的場徹氏ならびにJFT-2a装置運転に関して核融合研究部装置技術管理室諸氏に感謝申し上げます。また本研究に対し、ご助言、お励みをいただきました森茂核融合研究部長、田中正俊氏(当時プラズマ実験室長)に謝意を表します。また、種々議論していただいた理科学研究所森一夫氏に感謝申し上げます。

## 参 照 文 献

1. Michal J. Mumma: J. Opt. Soc. Am. 62, 1459 (1972)
2. M. J. Mumma and E. C. Zipe: J. Opt. Soc. Am. 61, 83 (1970)
3. K. H. Becker, E. H. Fink, and A. C. Allison: J. Opt. Soc. Am. 61, 495 (1971)
4. S. Takezawa, F. R. Innes, and Y. Tanaka: J. Chem. Phys. 45, 2000 (1966)
5. T. Masuoka and T. Oshio: Rev. Sci. Instrum. 45, 1012 (1974)
6. L. Dunkelmann: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2, 533 (1962)

$n_g \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  になっているのは、電子温度の上昇にともなってOVの電離電圧138 eVをのりこえOVの基底状態に移行している酸素原子があるからである。4 msec付近では酸素についてはほとんどがOVであると考えられるから、DIVAプラズマにおける酸素不純物の量は、4 msecの時の値を使って  $1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  となる。これは  $\bar{n}_e$  の1~2%程度となる。またNVについては  $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、Cについては  $\lesssim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  となる事がこの実験の範囲から結論づけられる。また、8 msecにおけるOVの量を、 $1.6 \times 10^{11} - 7 \times 10^{10}$  (8 msecにおけるOVの量) から計算し、 $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  とし、

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum n_K Z_K^2}{\sum n_K Z_K}$$

より  $Z_{\text{eff}}$  を求めると、 $\sim 1.4$  となる。またダイバータ部の真空容器壁1/2に  $T_i$  をフラッシュした場合<sup>12)13)</sup>、軽元素不純物(C, O)が、Fig. 16のように1/2に減少した。これは、軽元素不純物(C, O)はほとんど、ダイバータ部の真空容器壁からプラズマ中に混入していること、そして、金蒸着面をもつシエルは軽元素に関しては不純物の発生源とはなっていないであろうということを意味している。上記のように軽元素不純物のみを考慮した  $Z_{\text{eff}}$  は1.4であり、 $T_i$  をフラッシュした場合は1.2である。しかし、プラズマ抵抗と電子温度から求めた  $Z_{\text{eff}}$  は3程度である。さらに  $T_i$  をフラッシュした場合としない場合とで  $Z_{\text{eff}}$  および全輻射損失の変化がなかった。<sup>13)</sup> すなわちDIVAプラズマにおいて軽元素の  $Z_{\text{eff}}$  への影響、全輻射損失への影響はほとんどないといえる。

## 謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々議論していただいた当研究部プラズマ計測グループ船橋昭昌氏、的場徹氏ならびにJFT-2a装置運転に関して核融合研究部装置技術管理室諸氏に感謝申し上げます。また本研究に対し、ご助言、お励みをいただきました森茂核融合研究部長、田中正俊氏(当時プラズマ実験室長)に謝意を表します。また、種々議論していただいた理科学研究所森一夫氏に感謝申し上げます。

## 参 照 文 献

1. Michal J. Mumma: J. Opt. Soc. Am. 62, 1459 (1972)
2. M. J. Mumma and E. C. Zipe: J. Opt. Soc. Am. 61, 83 (1970)
3. K. H. Becker, E. H. Fink, and A. C. Allison: J. Opt. Soc. Am. 61, 495 (1971)
4. S. Takezawa, F. R. Innes, and Y. Tanaka: J. Chem. Phys. 45, 2000 (1966)
5. T. Masuoka and T. Oshio: Rev. Sci. Instrum. 45, 1012 (1974)
6. L. Dunkelmann: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2, 533 (1962)

$n_g \sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  になっているのは、電子温度の上昇にともなってOVの電離電圧 138 eV をのりこえOVの基底状態に移行している酸素原子があるからである。4 msec 付近では酸素についてはほとんどがOVであると考えられるから、DIVA プラズマにおける酸素不純物の量は、4 msec の時の値を使って  $1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  となる。これは  $\bar{n}_e$  の 1~2% 程度となる。またNVについては  $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、Cについては  $\lesssim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  となる事がこの実験の範囲から結論づけられる。また、8 msec におけるOVの量を、 $1.6 \times 10^{11} - 7 \times 10^{10}$  (8 msec におけるOVの量) から計算し、 $n_g \sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  とし、

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum n_K Z_K^2}{\sum n_K Z_K}$$

より  $Z_{\text{eff}}$  を求めると、 $\sim 1.4$  となる。またダイバータ部の真空容器壁 1/2 に  $T_i$  をフラッシュした場合<sup>12)13)</sup>、軽元素不純物 (C, O) が、Fig. 1.6 のように 1/2 に減少した。これは、軽元素不純物 (C, O) はほとんど、ダイバータ部の真空容器壁からプラズマ中に混入していること、そして、金蒸着面をもつシエルは軽元素に関しては不純物の発生源とはなっていないであろうということの意味している。上記のように軽元素不純物のみを考慮した  $Z_{\text{eff}}$  は 1.4 であり、 $T_i$  をフラッシュした場合は 1.2 である。しかし、プラズマ抵抗と電子温度から求めた  $Z_{\text{eff}}$  は 3 程度である。さらに  $T_i$  をフラッシュした場合としない場合とで  $Z_{\text{eff}}$  および全輻射損失の変化がなかった。<sup>13)</sup> すなわち DIVA プラズマにおいて軽元素の  $Z_{\text{eff}}$  への影響、全輻射損失への影響はほとんどないといえる。

## 謝 辞

本実験を遂行するにあたり、種々議論していただいた当研究部プラズマ計測グループ船橋昭昌氏、的場徹氏ならびに JFT-2 a 装置運転に関して核融合研究部装置技術管理室諸氏に感謝申し上げます。また本研究に対し、ご助言、お励みをいただきました森茂核融合研究部長、田中正俊氏 (当時プラズマ実験室長) に謝意を表します。また、種々議論していただいた理科学研究所森一夫氏に感謝申し上げます。

## 参 照 文 献

1. Michal J. Mumma: J. Opt. Soc. Am. 62, 1459 (1972)
2. M. J. Mumma and E. C. Zipe: J. Opt. Soc. Am. 61, 83 (1970)
3. K. H. Becker, E. H. Fink, and A. C. Allison: J. Opt. Soc. Am. 61, 495 (1971)
4. S. Takezawa, F. R. Innes, and Y. Tanaka: J. Chem. Phys. 45, 2000 (1966)
5. T. Masuoka and T. Oshio: Rev. Sci. Instrum. 45, 1012 (1974)
6. L. Dunkelmann: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2, 533 (1962)



7. A.K.Stober: NASA TN D-1180 (1962)
8. K.Mori: private communication
9. S.Kasai, A.Funahashi, T.Sugie, and K.Mori: J.Phys.Soc.Japan. 43, 2061 (1977)
10. R.F.Post: Plasma Physics 3, 273 (1961)
11. R.Mewe: Astron & Astrophys 20, 215 (1972)
12. DIVA EQUIPE: to be published
13. H.MAEDA .et al: IAEA conf.on Plasma Physics and Controlled Fusion, Berchtesgaden. (1976) Paper CN-35/A-18

TABLE I. Wavelengths and transition Probabilities of  $H_2$  ( $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$ ) lines.<sup>2)</sup>

Band	Line	$\lambda$ ( $\text{\AA}$ )	A ( $\times 10^8 \text{ s}^{-1}$ )	Relative intensity
3,0	R(0)	1062.8	0.336	0.141
	P(2)	1066.8	0.705	0.296
3,1	R(0)	1112.0	0.759	0.319
	P(2)	1116.2	1.518	0.637
3,2	R(0)	1162.7	0.305	0.128
	P(2)	1167.1	0.555	0.233
3,3	R(0)	1214.9	0.046	0.019
	P(2)	1219.4	0.125	0.052
3,4	R(0)	1268.4	0.546	0.229
	P(2)	1273.0	1.110	0.466
3,5	R(0)	1322.8	0.232	0.097
	P(2)	1327.5	0.401	0.168
3,6	R(0)	1377.7	0.093	0.039
	P(2)	1382.5	0.240	0.100
3,7	R(0)	1432.6	0.600	0.251
	P(2)	1437.4	1.205	0.506
3,8	R(0)	1486.8	0.132	0.055
	P(2)	1491.6	0.196	0.082
3,9	R(0)	1539.3	0.325	0.136
	P(2)	1543.9	0.779	0.327
3,10	R(0)	1588.6	1.187	0.498
	P(2)	1593.3	2.382	1.000
3,11	R(0)	1634.0	0.542	0.227
	P(2)	1638.0	0.955	0.400
3,12	R(0)	1672.7	0.0071	0.0029
	P(2)	1676.1	0.0054	0.0022
3,13	R(0)	1702.6	0.0054	0.0022
	P(2)	1705.2	0.0131	0.0054

TABLE II Wavelengths and relative intensities for Q1 lines of H<sub>2</sub> (C<sup>1</sup>π<sub>n</sub>-X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>) Werner band system.<sup>2)</sup>

v'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	319 1009.9	809 1054.1	974 1099.5	386 1146.0	98 1193.3	12 1241.2							
1	780 986.9	551 1029.1	13 1072.3	759 1116.5	1000 1161.3	437 1206.7	76 1252.1	4 1297.2					
2	745 966.2	49 1006.6	411 1047.9	270 1090.0	126 1132.8	905 1175.9	711 1219.0	168 1261.7	10 1303.4				
3	475 947.5	21 986.3	307 1026.0	10 1066.3	358 1107.2	11 1148.3	463 1189.4	728 1230.0	227 1269.6	12 1307.6			
4	245 930.6	86 968.1	84 1006.2	119 1045.0	61 1084.2	142 1123.6	105 1162.9	151 1201.7	580 1239.5	231 1275.7	8 1309.4		
5	114 915.7	93 951.9	6 988.8	102 1026.3	2 1064.0	101 1101.9	15 1139.7	125 1177.0	30 1213.5	413 1249.0	193 1282.9	2 1315.0	1 1344.8
6	50 902.2	67 937.3	2 973.1	43 1009.3	27 1045.8	16 1082.4	54 1118.8	2 1154.8	82 1189.9	3 1224.0	289 1256.6	134 1287.3	
7	21 890.1	40 924.3	8 959.1	11 994.3	28 1029.7	28 1069.1	12 1100.4	12 1135.1	14 1169.0	39 1201.9	214 1233.3	68 1262.9	8 1315.3

TABLE III. Wavelengths and relative emission intensities for the  $N_2$  ( $d^1\pi_g - X^1\Sigma_g^+$ ) Lyman - Birge - Hopfield system. 2)

$v'$	$v''=0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	215	683	1000	896	552	247	83	21	4										
	1450	1501	1555	1612	1672	1736	1805	1878	1956										
1	665	1000	371	2	337	624	518	266	95	24	5								
	1416	1464	1515	1570	1627	1688	1752	1821	1895	1973	2057								
2	1000	513	16	463	325	2	211	458	389	195	65	16	3						
	1384	1430	1479	1530	1585	1642	1703	1768	1838	1911	1990	2074	2165						
3	1000	61	338	275	15	313	183	1	196	340	254	114	34	8					
	1354	1398	1444	1493	1545	1600	1658	1719	1785	1854	1928	2007	2092	2182					
4	1000	35	493	2	325	133	64	293	88	30	246	310	189	72	19	4			
	1325	1368	1412	1459	1508	1560	1616	1674	1736	1801	1871	1945	2025	2109	2200	2297			
5	1000	348	315	210	308	47	353	25	184	268	14	119	333	296	143	47	10	1	
	1299	1339	1382	1427	1474	1523	1576	1631	1690	1752	1818	1888	1963	2042	2127	2218	2315	2420	
6	1000	926	45	654	20	470	88	257	282	17	352	178	14	298	430	276	106	26	4
	1273	1312	1353	1396	1441	1489	1539	1592	1648	1707	1756	1835	1906	1981	2060	2145	2236	2333	2438

TABIE IV. Wavelengths and other spectroscopic data for measured lines.

	$\lambda$ (Å)	Transition	$g_i$	$g_k$	$f_{ik}$	$A_{ki}$ ( $10^8$ sec)
C II	1335.71	$2p^2P^0 - 2p^2D$	4	6	0.24	6.0
	1334.53	$2p^2P^0 - 2p^2D$	2	4	0.26	4.9
	1335.66	$2p^2P^0 - 2p^2D$	4	4	0.027	1.0
C III	977.03	$2s^1S - 2p^1P^0$	1	3	0.81	19
C IV	1548.20	$2s^2S - 2p^2P^0$	2	4	0.190	2.65
	1550.77	$2s^2S - 2p^2P^0$	2	2	0.095	2.63
CV	2270.91	$2s^3S - 2p^3P^0$	3	5		
O IV	790.20	$2p^2P^0 - 2p^2D$	4	6	0.13	9.6
	787.71	$2p^2P^0 - 2p^2D$	2	4	0.15	8.0
	790.10	$2p^2P^0 - 2p^2D$	4	4	0.014	1.5
OV	629.73	$2s^1S - 2p^1P^0$	1	3	0.53	30
O VI	1031.95	$2s^2S - 2p^2P^0$	2	4	0.131	4.09
	1037.63	$2s^2S - 2p^2P^0$	2	2	0.065	4.02
NV	1238.81	$2s^2S - 2p^2P^0$	2	4	0.156	3.38
	1242.80	,	2	2	0.0778	3.36
H	1215.67 (L $\alpha$ )	1 - 2	2	8	0.4162	4.699

from NBS TABLE

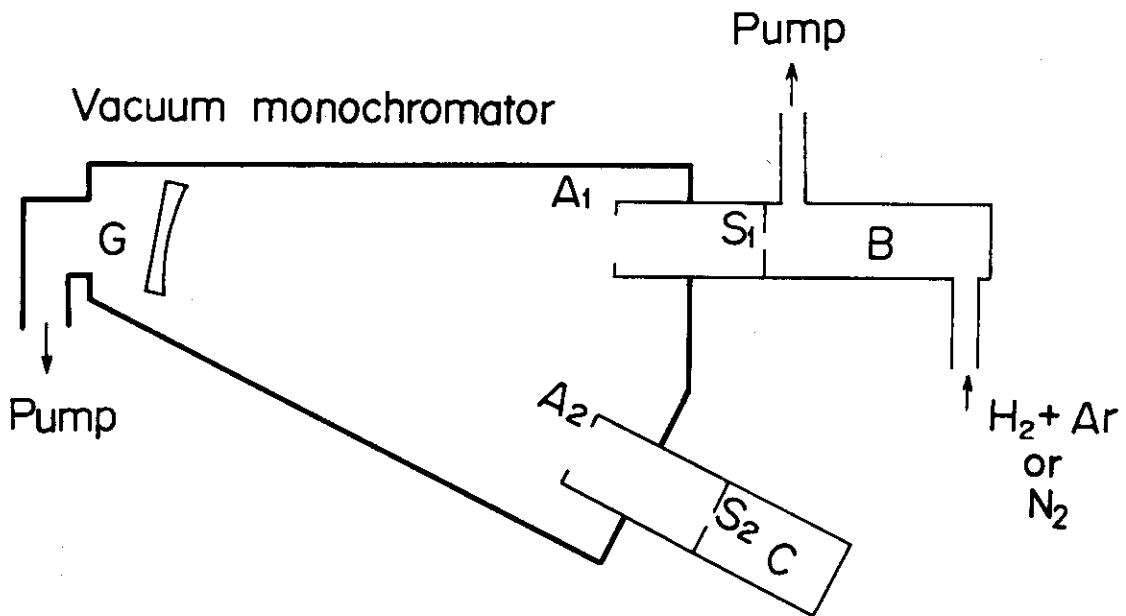


Fig.1 Experimental set-up to calibrate a normal vacuum-ultra-violet monochromator for the wavelength region of 1000 to 2000 Å.

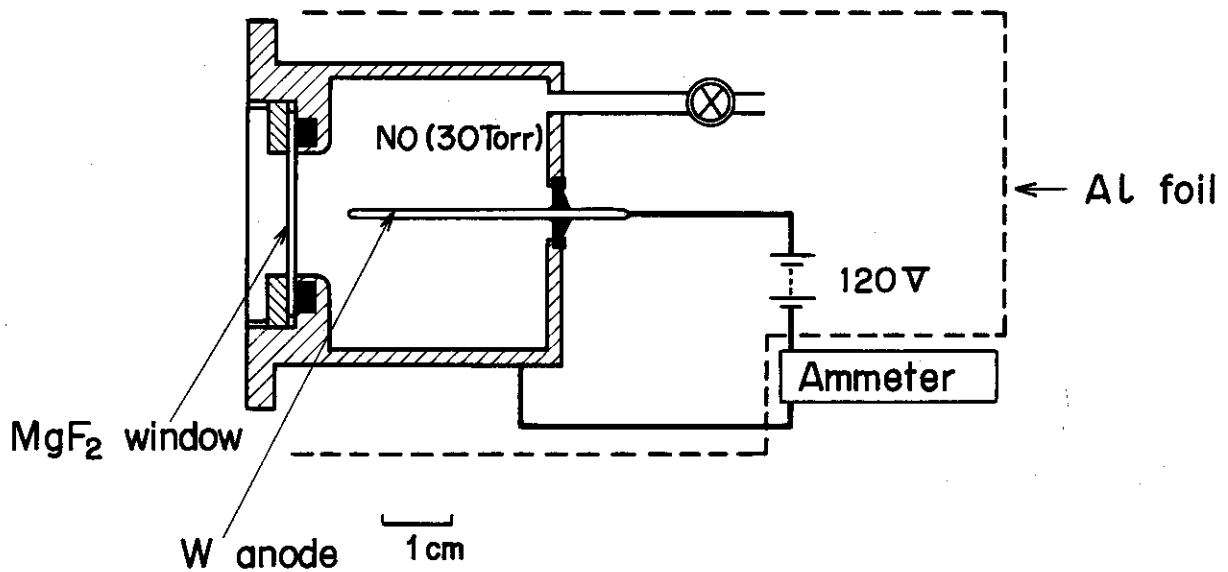


Fig.2 Cross-section of the ion chamber used in the calibration experiments.

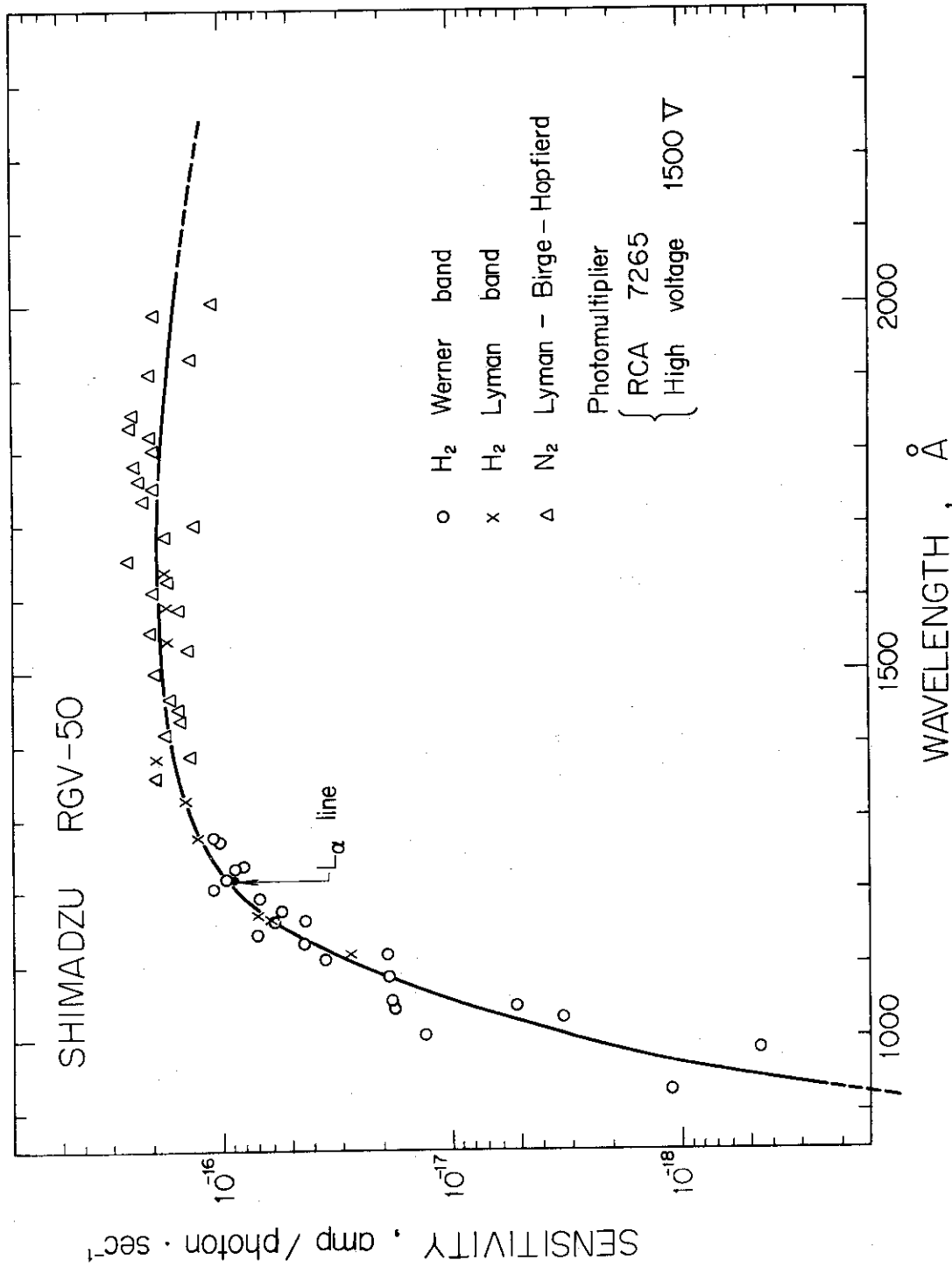


Fig.3 Absolute sensitivity of the monochromator included a detector. ○ Werner band of H<sub>2</sub>, × Lyman band of H<sub>2</sub>, △ Lyman - Birge-Hopfield bands of N<sub>2</sub>, • L<sub>α</sub> line of H.





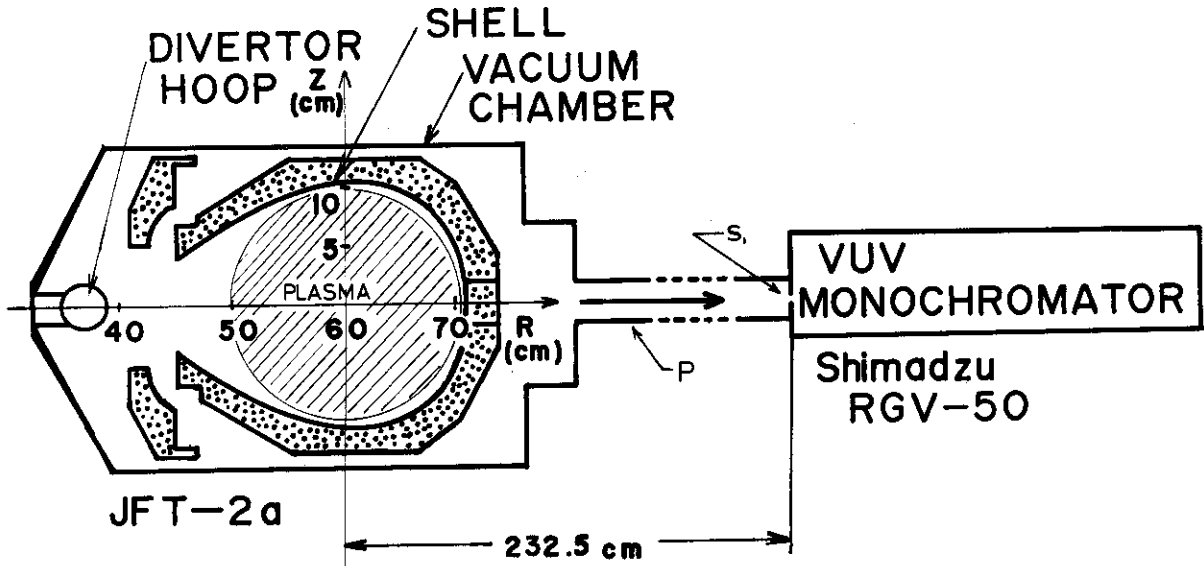


Fig.5 Cross-section view of the DIVA device and spectoscopic measurements .

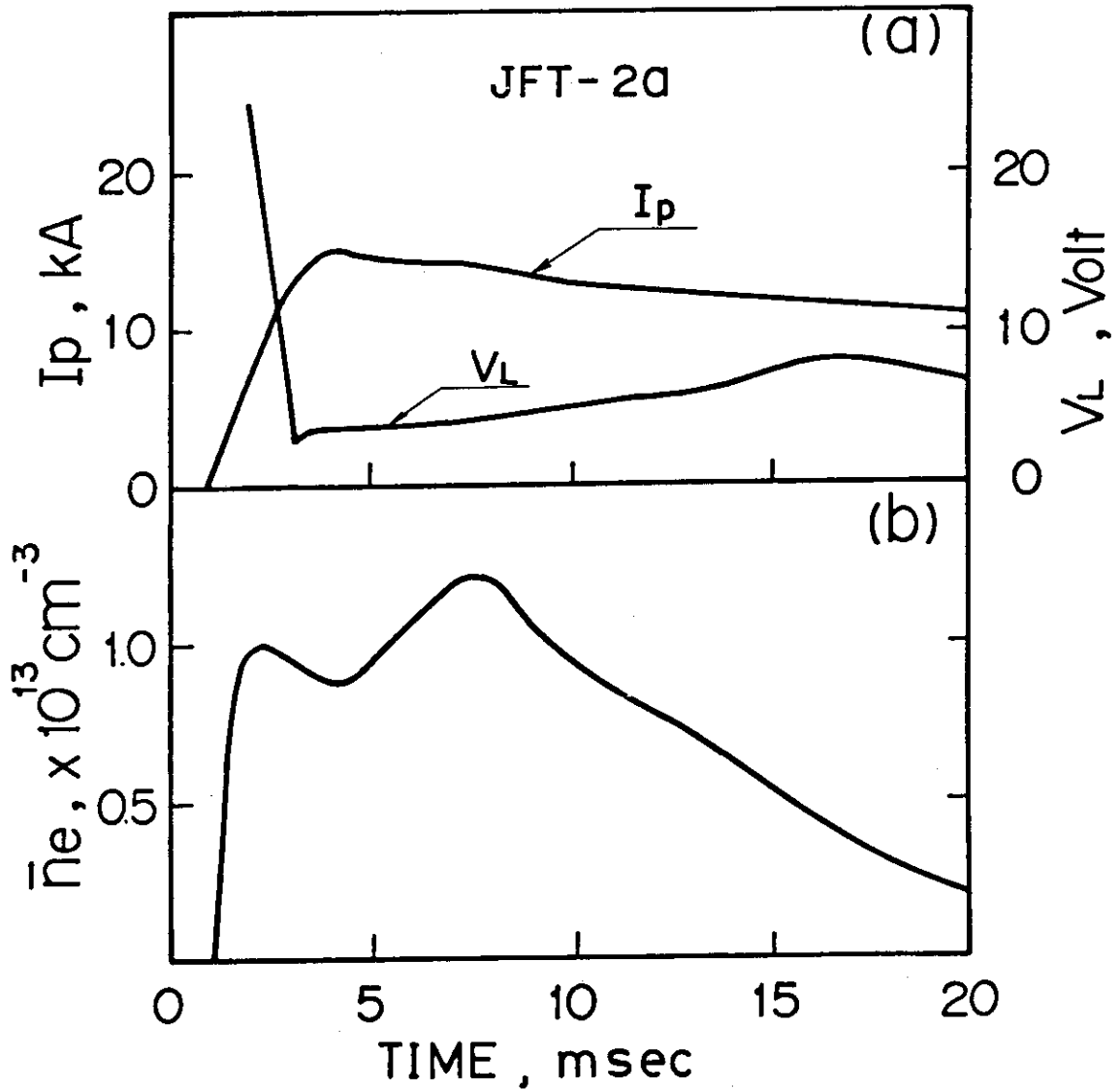


Fig.6 Time evolution of the plasma current  $I_p$  and loop voltage  $V_L$  (a), and average electron density (b) obtained in the DIVA discharge .

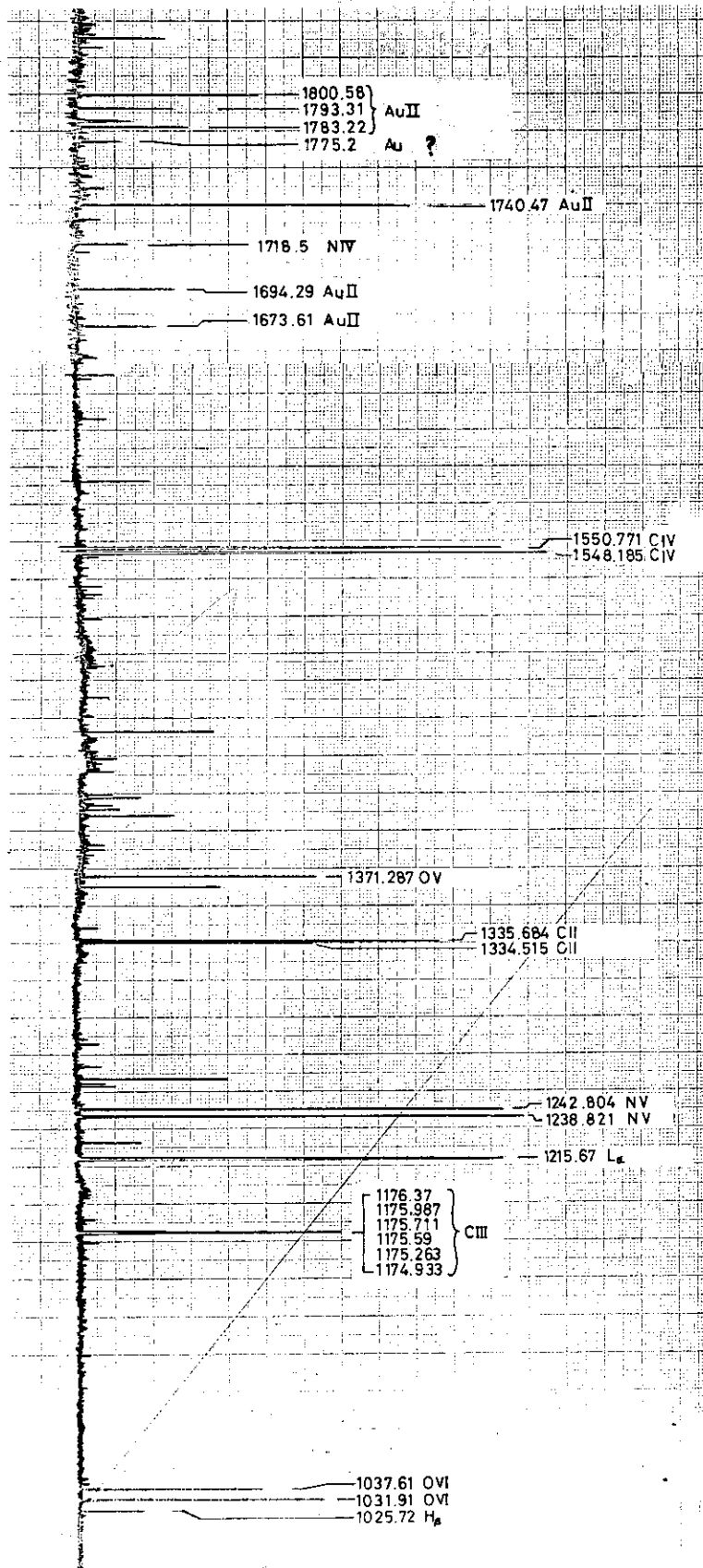


Fig.7 Observed spectra of radiation from DIVA plasmas for the wavelength region of 1000 to 1850Å.

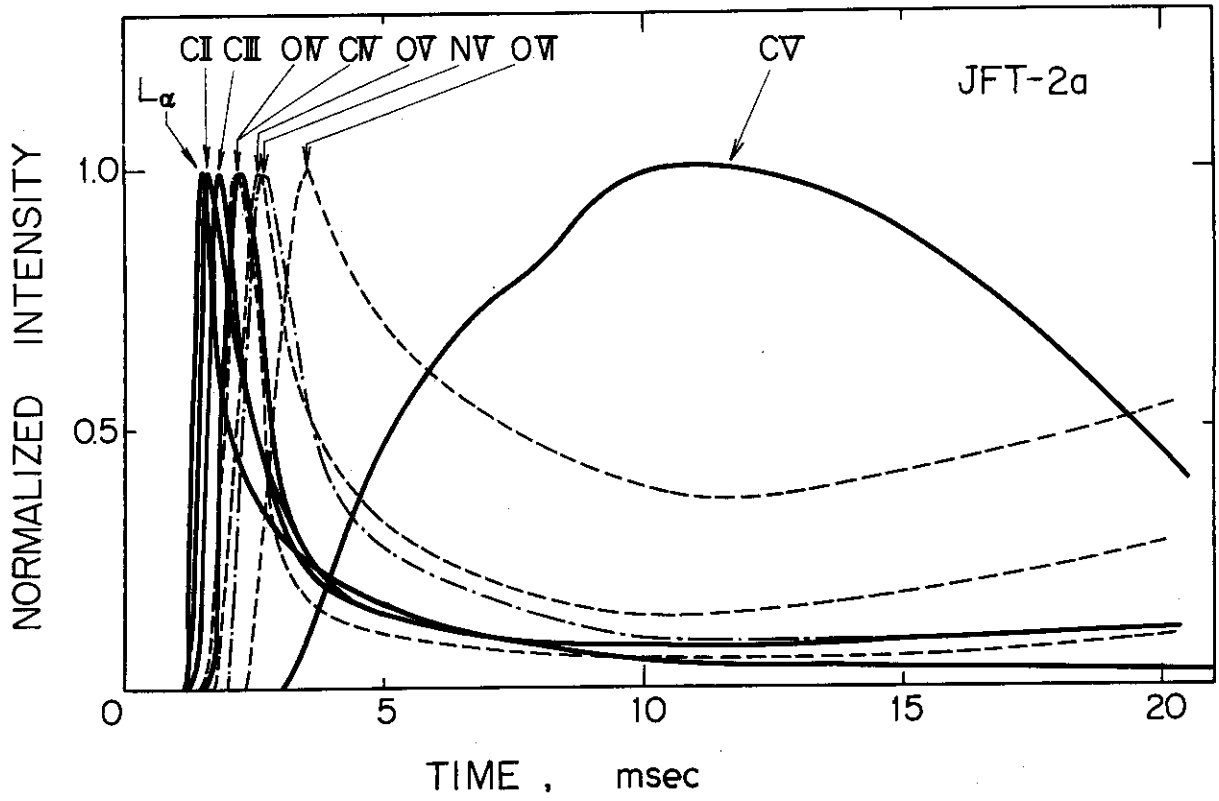


Fig.8 Observed time-histories of impurity line intensities.

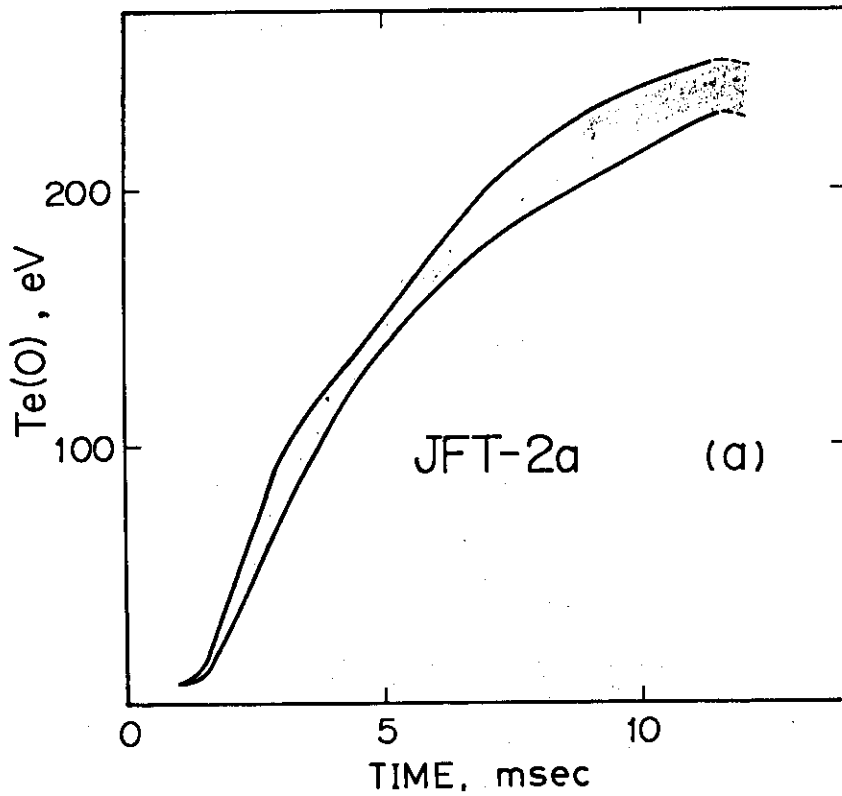


Fig.9 Central electron temperature obtained from the observed time-histories of impurity line intensities<sup>9)</sup>.

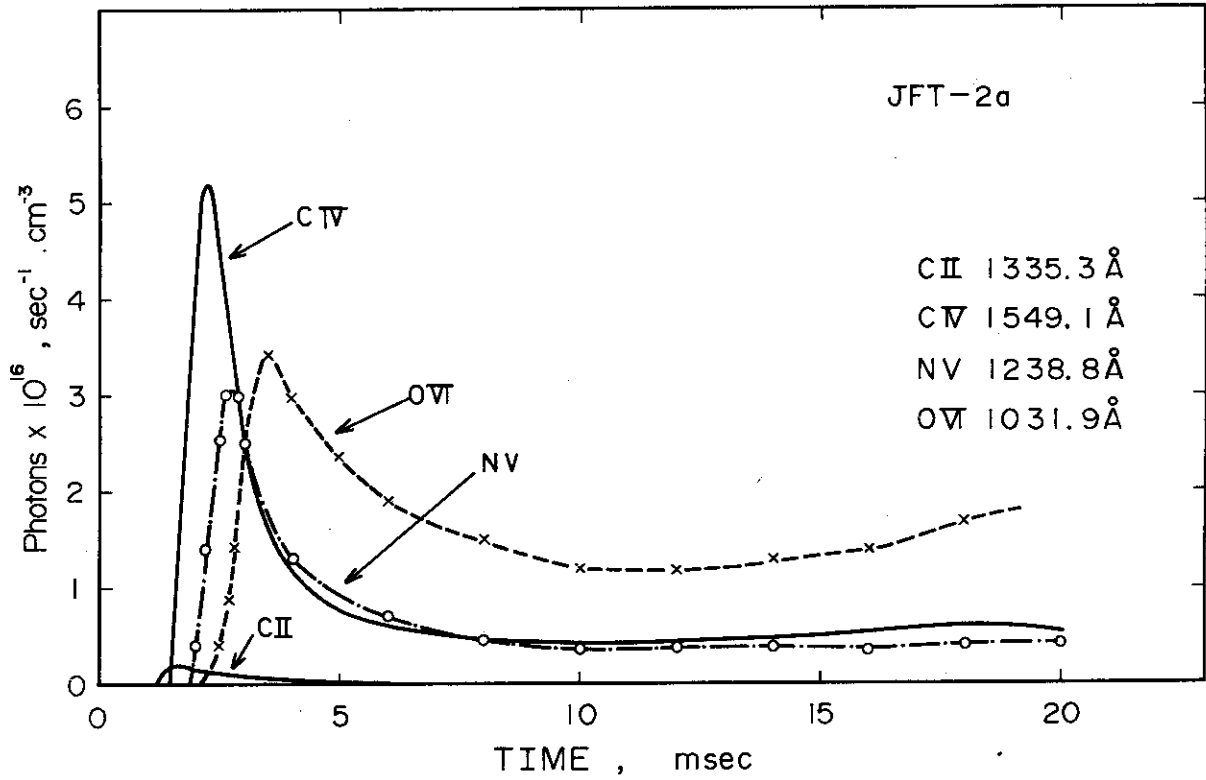


Fig.10 Time evolution of photon emission for CII(1335.3Å), CIV (1549.1Å), NV(1238.8Å), OVI(1031.9Å) lines.

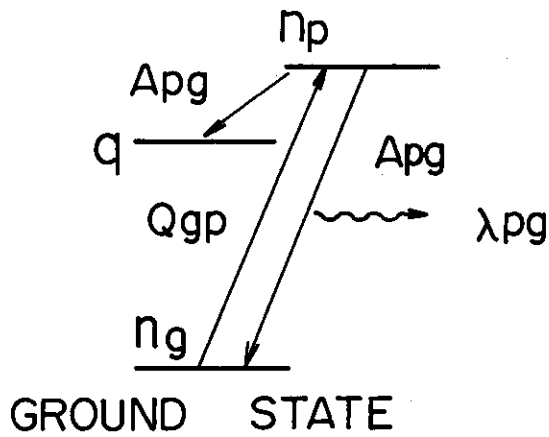


Fig.11 Illustration of the coronal model.

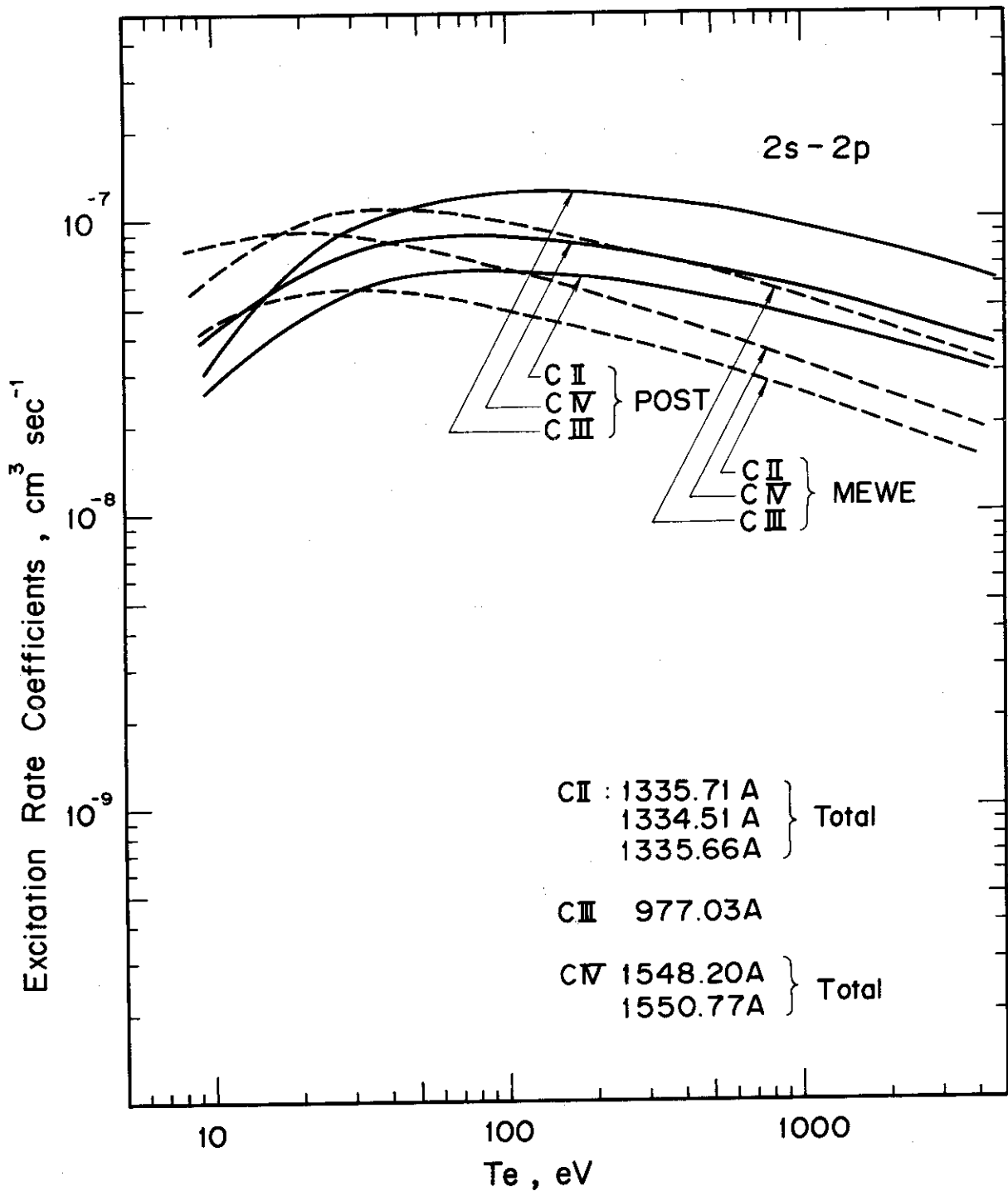


Fig.12 Excitation rate coefficients for carbon vs electron temperature. — Post<sup>10)</sup>, --- Mewe<sup>11)</sup>.

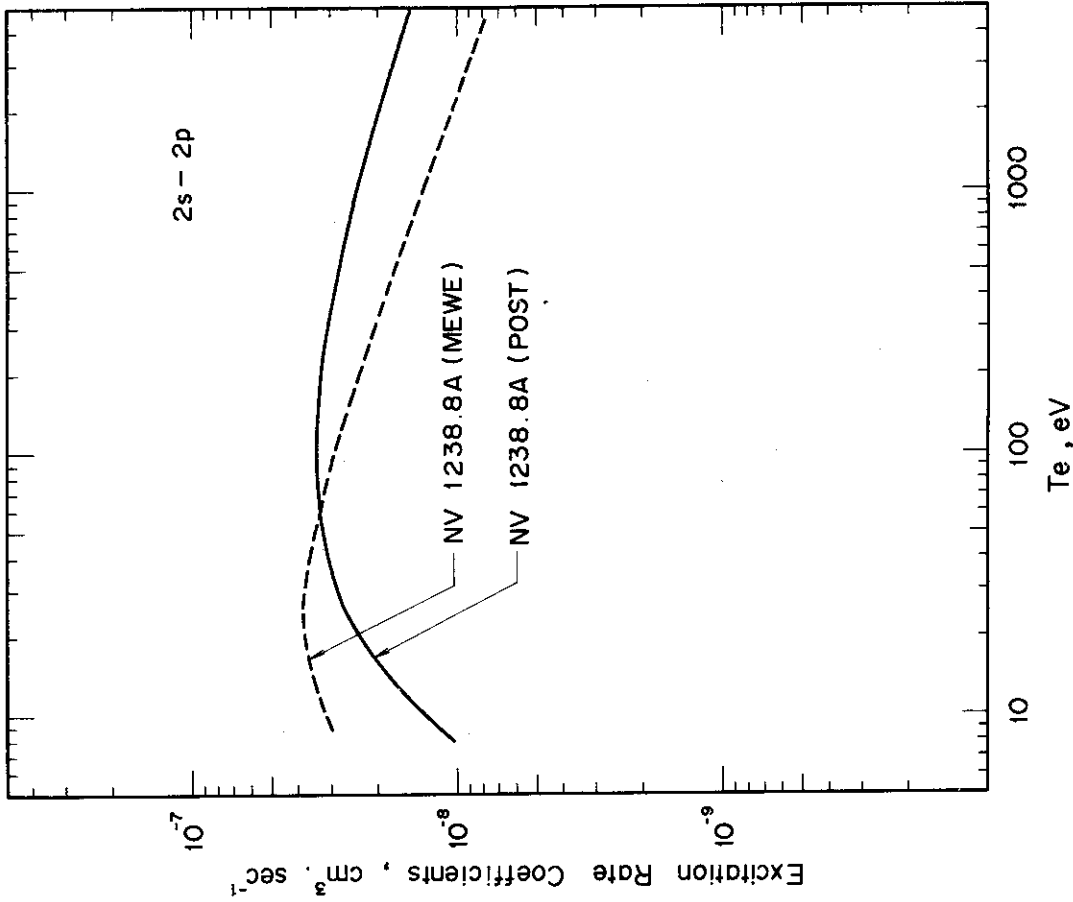


Fig.14 Excitation rate coefficients for nitrogen vs electron temperature. — Post<sup>10)</sup>, - - - Mewe<sup>11)</sup>

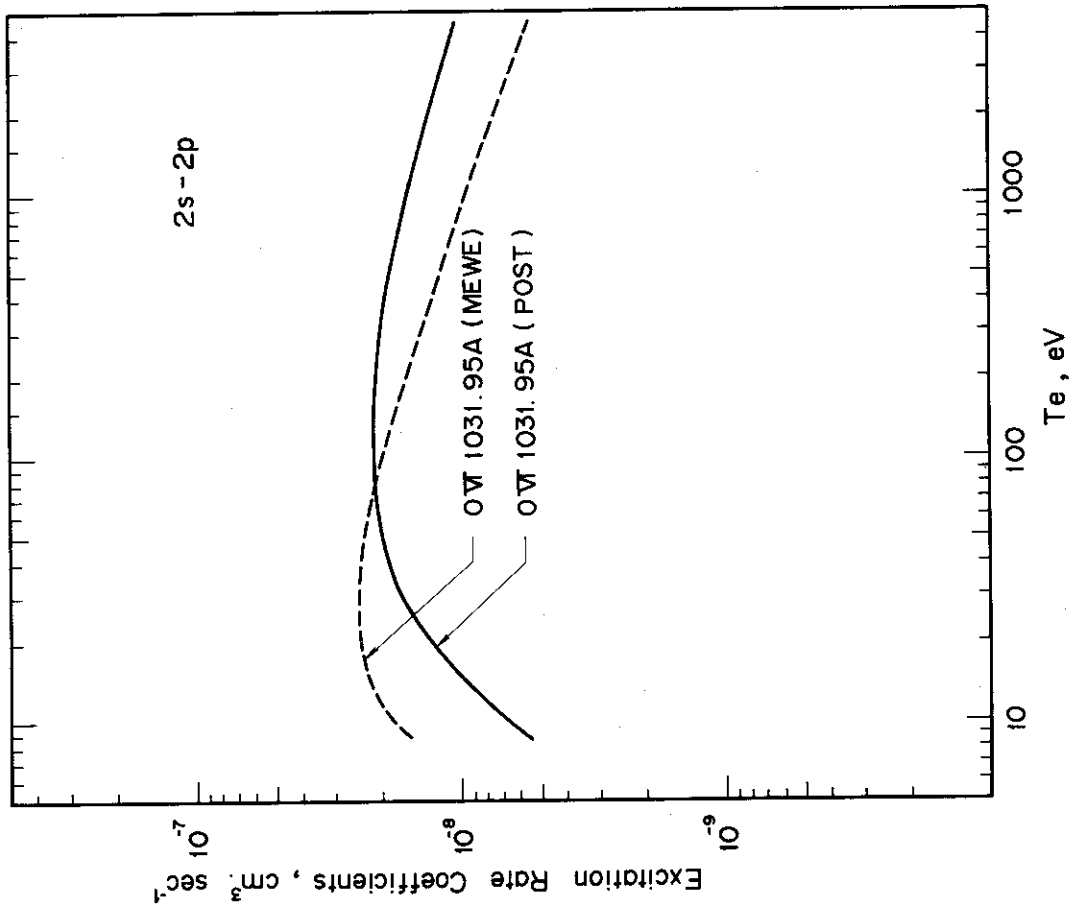


Fig.13 Excitation rate coefficients for oxygen vs electron temperature. — Post<sup>10)</sup>, - - - Mewe<sup>11)</sup>

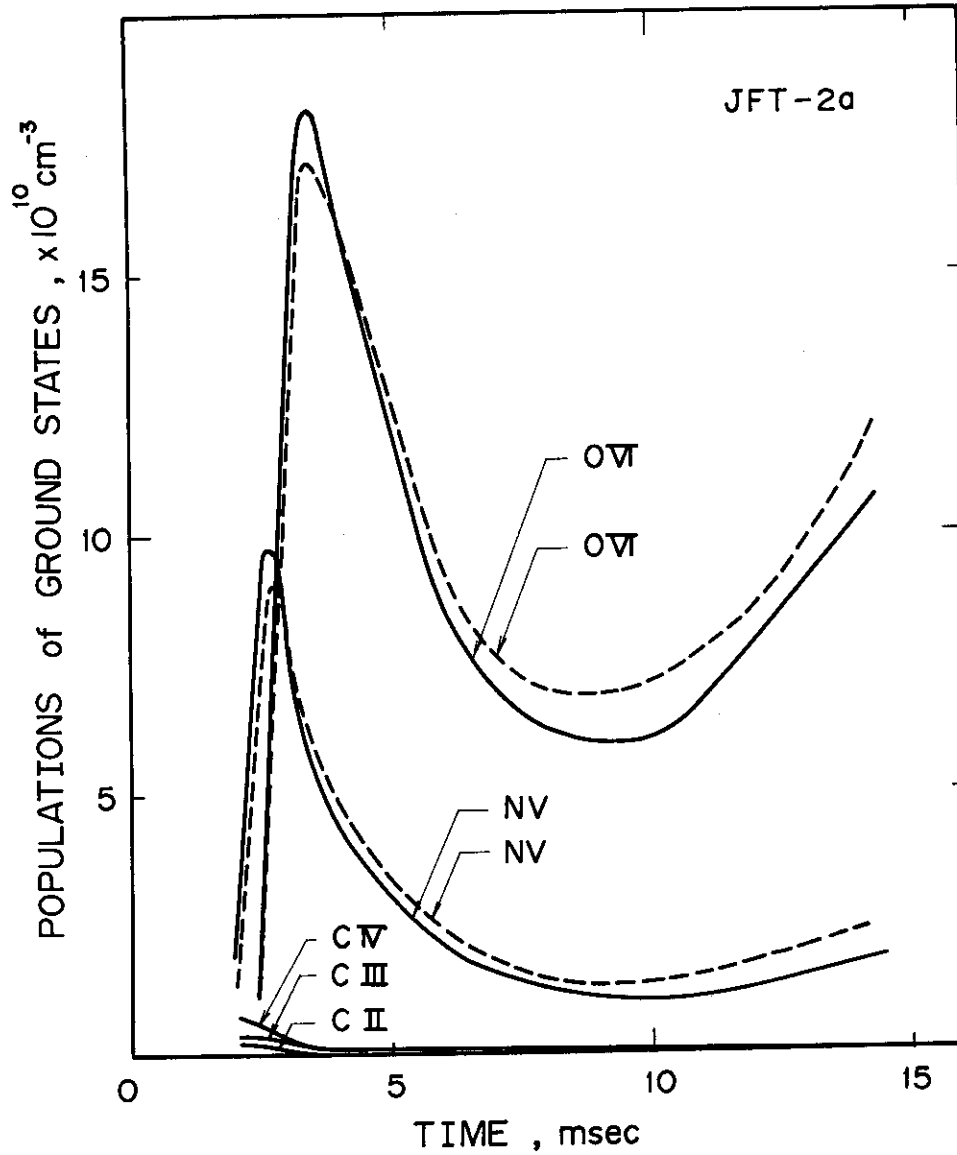


Fig.15 Time evolution of populations of the ground states for CII, CIII, CIV, NV and OVI ions on the DIVA discharge.

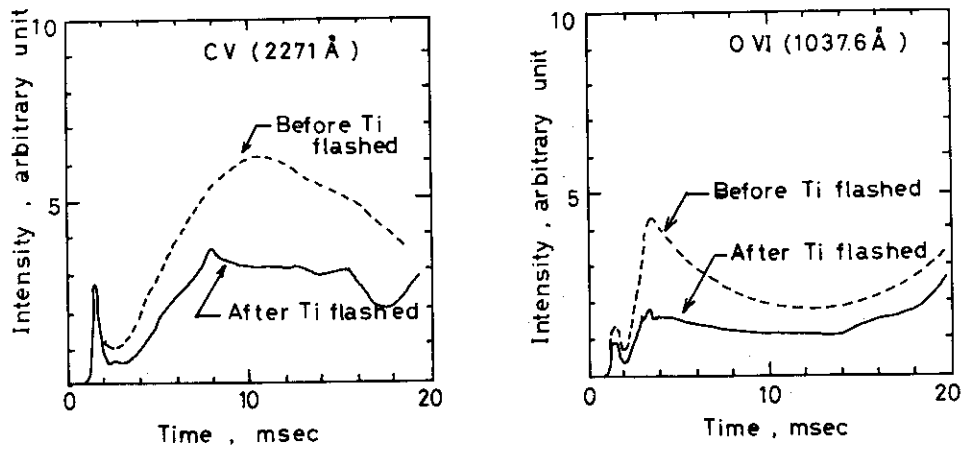


Fig.16 Reduction of light-impurity concentration by evaporating titanium.