

IPPJ-DT  
JIPP T-IIU トカマクにおける  
二種類導入ガス混合比制御

広倉 覚、谷口能之、棚橋秀伍、東井和夫

IPPJ-DT-123

1986年1月

**IPPJ-DT**  
**JIPP T-IIU トカマクにおける**  
**二種類導入ガス混合比制御**

広倉 覚、谷口能之、棚橋秀伍、東井和夫

**IPPJ-DT-123**

**1986年1月**

Control of Mixing Ratio of Two Species of  
Fuel Gases in the JIPP T-IIU Tokamak

S. Hirokura, Y. Taniguchi, S. Tanahashi, and K. Toi

Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya 464, Japan.

ABSTRACT

The gas-feed system controlling the mixing ratio and total pressure of two species of fuel gases has been constructed and tested in the JIPP T-IIU tokamak. The each of two species of pure gases is independently fed through piezo-electric valves respectively. The voltages applied to those valves are feedback-controlled by the each mass signals of which are measured by a quadrupole type of mass spectrometer. This system is successfully used during ICRF heating experiments.

Further communication about this report is to be sent to the Research Information Center, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya 464, Japan.

\*\*\* 目次 \*\*\*

JIPP T-IIUトカマクにおける二種類導入ガス混合比制御

1 .	序論	1
2 .	制御系の概要	1
2 . 1	機器の全体構成	1
2 . 2	混合比圧力コントローラーの構成	2
2 . 3	全制御系のブロック線図	3
3 .	制御系の動作特性	4
3 . 1	マスフィルターによる分圧測定の修正	4
3 . 2	システムの過渡応答特性	4
4 .	ICRF加熱実験時の試験結果	6
4 . 1	マスフィルター出力と分光計との関係	6
4 . 2	混合ガスによるトカマク放電及びICRF加熱実験	7
5 .	結論	7

## 1 序論

トカマクプラズマを有効に加熱する方法として、従来から行なわれて来た中性ビーム入射加熱に代って、最近は大電力による加熱、特にICRF加熱が注目されている。

JIPP-T-IIUトカマクでは、大電力ICRF加熱実験が精力的に行なわれている。ICRF加熱においては、燃料ガスである $H_2$ 、 $D_2$ 、 $^3He$ 等の混合比に応じて加熱機構や加熱効率が大きく変る。このため燃料ガスの混合比をできるだけ正確に制御することが必要である。

我々は、四重極型マスフィルターをセンサーとして用い、ピエゾバルブの流量をフィードバック制御して二種類の燃料ガスを任意の圧力、混合比で連続導入できる「二種類導入ガス混合比制御装置」を製作した。本装置は、ICRF加熱実験において有効に使用された。本報告書では、装置の構成、動作特性及び実際の使用結果について述べる。

## 2. 制御系の概要

### 2.1 装置の全体構成

図1に、二種類ガス混合比制御系の全体構成図を示す。本制御系は、概略、ピエゾバルブ等で構成される「ガス導入部」、「トーラス状真空容器」、各分圧の測定を行なうマスフィルターからなる「検出部」、及び制御パラメーターの設定を行なう「混合比圧力コントローラー」から構成されている。

「ガス導入部」は、超高純度(99.99999%)の軽水素 $H_2$ 、重水素 $D_2$ ガスボンベより、それぞれ純度を下げることなくピエゾバルブまで適当な圧力【通常 $\sim 1.5$ atm.(絶対圧)]で導いている。ピエゾバルブを通過するガス流量は、「混合比圧力コントローラー」により調整され任意の圧力、混合比に設定し、容器内に導入する。導入するポートとしては、接続ポートを使用した。

「トーラス状真空容器」は、主半径93cm、副半径32cm、厚さ25mmのステンレス製であり、ポート数は30である。容器内には、ICRF加熱実験のための高周波アンテナ[Fast Wave加熱(FWH)及びIon Bernstein Wave加熱(IBWH)アンテナ]及びカーボン製のリミターが設置されている。線平均電子密度( $\bar{n}_e$ )は、波長2mmのマイクロ波干渉計によりモニターしている。また真空紫外分光器、可視分光器により燃料ガスに対応したスペクトル線 $L_{\alpha}(H)$ 、 $L_{\alpha}(D)$ 、 $H_{\alpha}$ 、 $D_{\alpha}$ をモニターしている。

「検出部」<sup>1)</sup>は、漏洩磁場の影響を考慮して真空容器から約2m離して設置されている。その間には、トーラス状真空容器を排気するための主排気系のマニホールドやマスフィルター分析管内の圧力を $10^{-5}$ Torr以下に保持するための差動排気系のためのチェンバー等が接続されている。トーラス状真空容器内の圧力は、燃料ガスを導入しない時、主排気系のポンプにより $10^{-9}$ Torr台に到達する。プラズマ生成時は、あらかじめ約 $1 \times 10^{-4}$ Torrの圧力となるように燃料ガスを導入する。燃料ガスの各分圧はマスフィルターで検出するが、マスフィルターはその正常な動作範囲が圧力により限られており $10^{-4}$ Torr台になるとガスの分圧に対する信号の線形性が失われてくる。そこで、その分析管を設置する部分に差動排気系を取付けて、トーラス状真空容器内の圧力が $10^{-4}$ Torr台の燃料ガス導入時でも $10^{-5}$ Torr台以下となるようにした。

「混合比圧力コントローラー」には、マスフィルター分析管により50ms毎にサンプリングされた分圧信号を入力する。そして、この分圧が設定値に一致するようピエゾバルブに電圧を印加しフィードバック制御される。

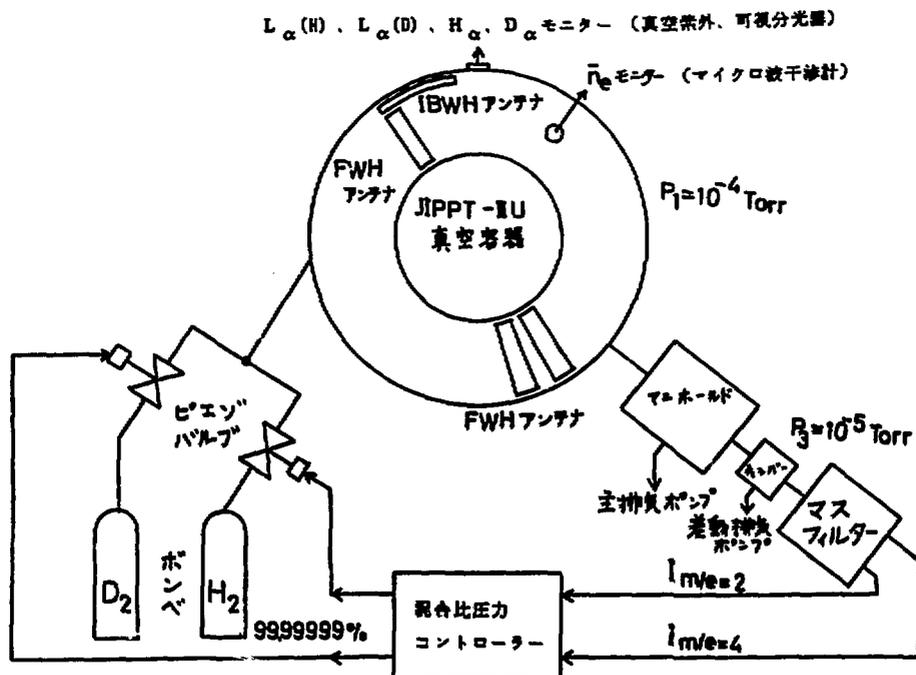


図1. 二種類ガス混合比制御系構成図

## 2. 2混合比圧力コントローラーの構成

図2に、混合比圧力コントローラーの回路構成を示す。本コントローラーは、 $H_2$  ガス及び  $D_2$  ガス用の2系統から成立っている。各分圧を検出するセンサーとしてのマスフィルターの出力は、希望の設定値入力と差動アンプで増幅される。さらにメインアンプによってピエゾバルブを駆動し得る電圧(最大150V)まで増幅している。差動アンプにおけるフィードバック用の抵抗  $R_3$  は制御利得を、コンデンサー  $C_1$  は制御時定数を変える目的で挿入されている。また  $C_2$  は18.8  $\mu F$  のかなり大容量のコンデンサーで、準定常における誤差信号を積分増幅し定常偏差を零に近づける目的で挿入してある。

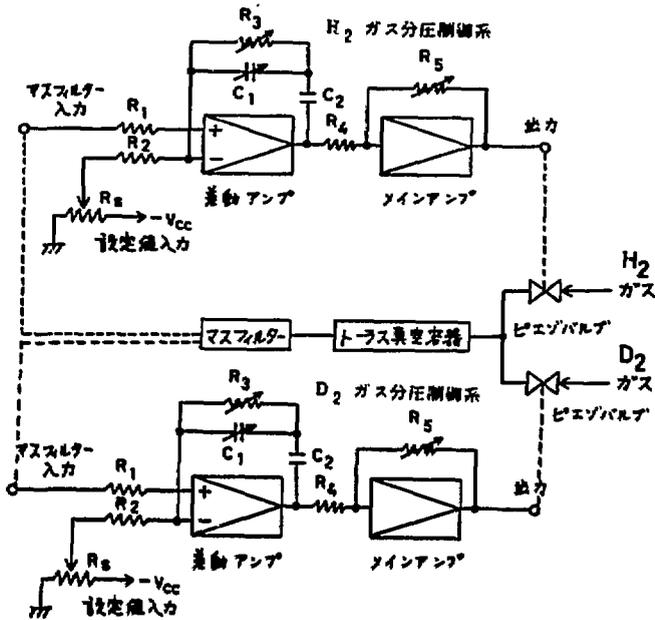


図2．混合比圧力コントローラ構成図

### 2.3 全制御系のブロック線図

図3に、 $H_2$  ガスまたは  $D_2$  ガスのガス圧力制御のブロック線図を示す。2.2項で述べたように圧力設定値  $V_{ref}$  を希望の値に設定すれば、マスフィルタからの分圧モニター出力  $V_{mf}$  との差電圧に応じて、混合比圧力コントローラから制御電圧  $V_p$  が出力される。これによりピエゾバルブが動作し、ガス流量  $Q_0$  が制御される。このようにしてトラス状真空容器内は所要の分圧  $P_1$  にまで充填される。

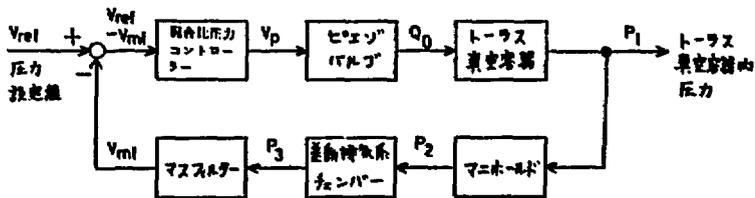


図3．ガス圧力制御 ( $H_2$  ガスまたは  $D_2$  ガス) のブロック線図

### 3. 本制御系の動作特性

#### 3.1 マスフィルターによる分圧測定の校正

前述のようにマスフィルターに基づいた制御系を実際に適用する前に校正用混合ガスを使って信号の妥当性をチェックした。図4は、校正用混合ガスを導入した場合のガス成分比とマスフィルター出力比の関係を示している。横軸は、校正用ガス成分比  $P_{H_2} / (P_{H_2} + P_{D_2})$  を示し、縦軸は、マスフィルターの出力比  $I_{H_2} / (I_{H_2} + I_{D_2})$  を示している。両者はよく一致している。このことは本試験の条件下では  $D_2$  のクラッキングの影響、即ち  $D^+$  の影響はあまり問題とならないことを示しており、マスフィルター出力比をガスの混合比とみなし得る。今後さらに高精度の制御を行なう場合、 $D_2$  のクラッキングの影響を注意深く考慮する必要がある。

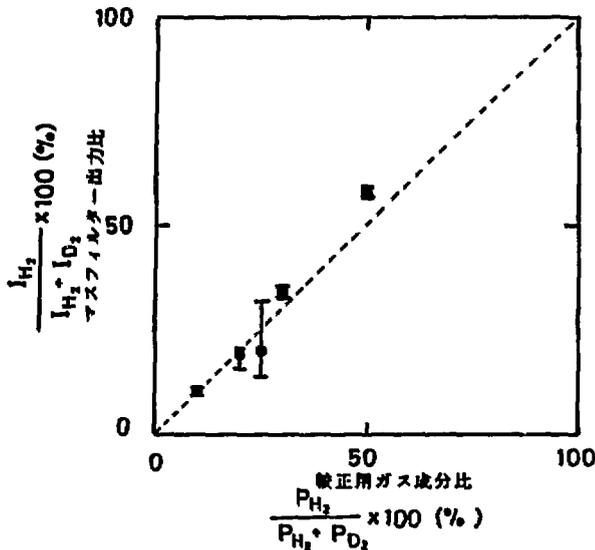


図4. 校正用ガス成分比とマスフィルター出力比の関係

#### 3.2 システムの過渡応答特性

制御系の過渡応答特性を調べることは、制御系の最適化を行なう上で重要である。ここでは、システムのインディシャル応答を調べることにより最適化を行なった。図5は、設定値  $P_{H_2} = 2.8 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  に至るまでの制御系のインディシャル応答を示している。所要圧力に相当する設定値  $V_{ref}$  をステップ波形で入力して系全体のインディシャル応答を測定したものである。図2に示す差動アンプの利得  $G$  が大きすぎる時 ( $G = 400$ ) は、分圧信号  $P_{H_2}$  は周期  $T = 38 \text{ sec}$ 、減衰率  $0.01 \text{ [1/sec]}$  の減衰振動となる。利得  $G$  を多少下げる ( $G = 300$ ) とかなりのオーバーシュートがみられるが、所要の値に近づく。利得  $G$  を適正 ( $G = 200$ ) に設定すると振動やオーバーシュートはなく、すばやく所要の圧力に到達する。以後の実験では、この利得を上記の最適値 ( $G = 200$ ) にした。

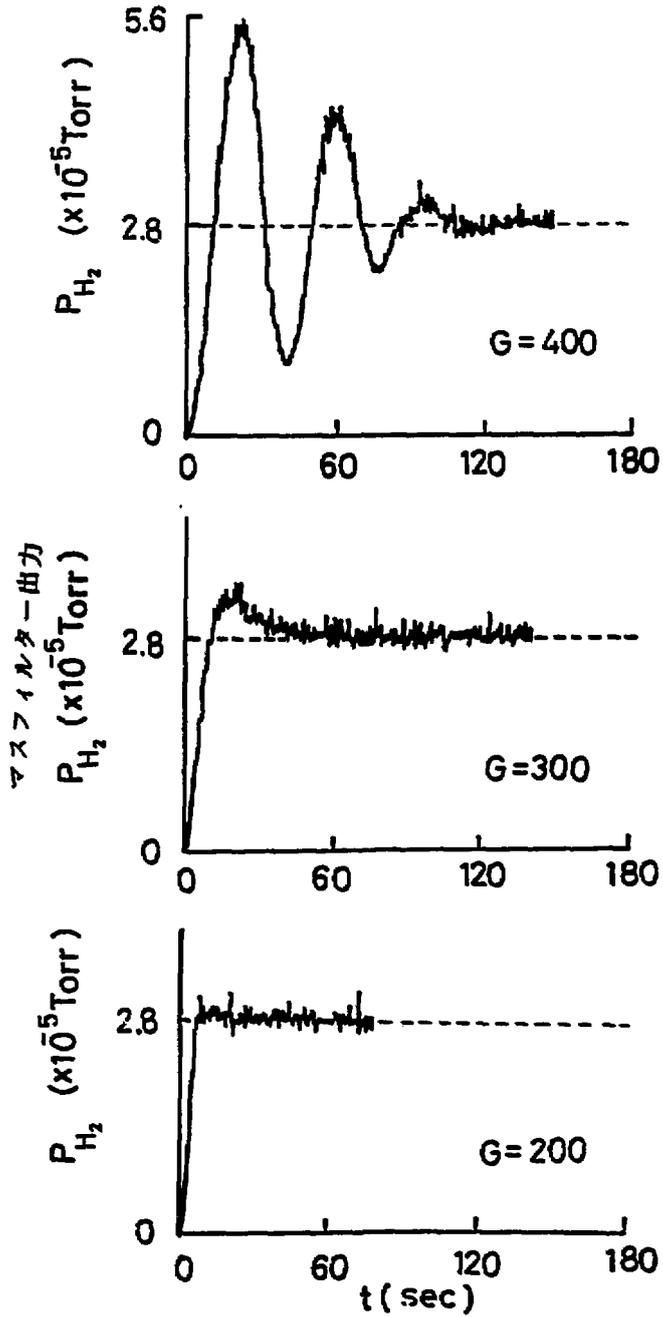


図5. 制御系のインディシャル応答

#### 4. ICRF加熱実験時の試験結果

##### 4. 1マスフィルター出力と分光データーとの関係

3. 1項の図4において校正用混合ガスを用いて、マスフィルターによって得られる混合比の校正を行なった。ここでは、本制御装置によって調整導入された混合ガスを用いて実際にトカマク放電を行ない、プラズマ中に取り込まれる各成分ガスの混合比を調べた。真空紫外分光器等によりH及びDに対応するスペクトル線を測定することにより、それらの強度比から求めた混合比と、マスフィルターから得られるそれとの比較を行なった。図6の○印及び●印に、トカマク放電の初期に現われるスペクトル線強度のピーク値の比  $I_H / (I_H + I_D)$  と、その時のマスフィルター出力比  $I_{H_2} / (I_{H_2} + I_{D_2})$  の関係を示す。また、×印はプラズマ電流がピーク値に達する放電中期での値を示している。放電初期の測定値は、マスフィルターによる値と満足な一致がみられ、所要のHとDの混合比のプラズマが放電初期に生成されたことを示している。一方放電途中では両者の差がやや大きいように見える。これはプラズマと壁とのリサイクリング等の影響によるものと思われる。また、H<sub>2</sub> ガスのみを導入した放電でも  $I_H / (I_H + I_D) = 1$  とならないのは、真空容器壁やリミターとプラズマとの相互作用によりDが少しずつ放出されるためと考えられる。以上の結果から、ほぼ期待どおりの混合比で放電できると思われる。

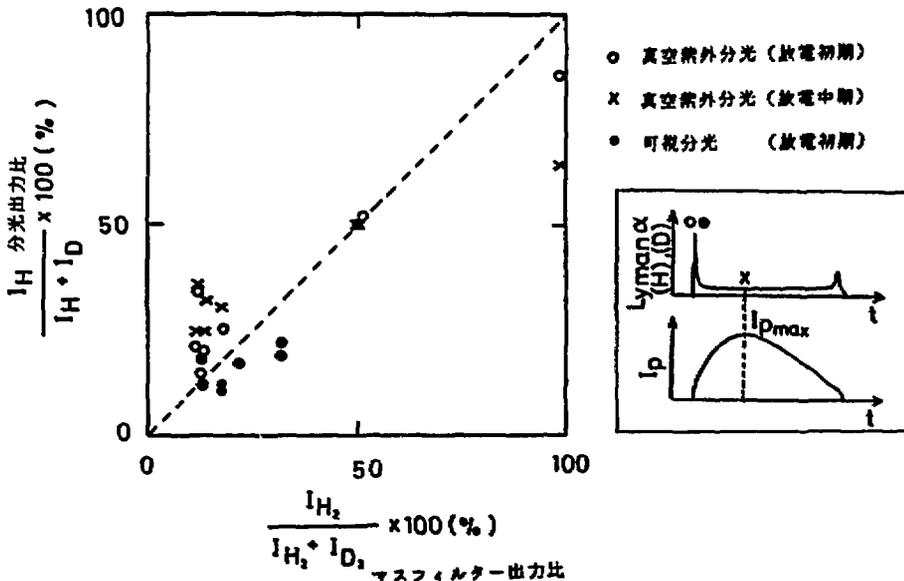


図6. 分光出力比とマスフィルター出力比の関係

#### 4. 2 混合ガスによるトカマク放電及びICRF加熱実験

図7は、ショット間で  $H_2$  及び  $D_2$  ガスの混合比を変えて放電を行なった時の各ショット間のマスフィルターによる  $H_2$  及び  $D_2$  ガスの分圧の様子を示している。すなわち、まずガスの混合比を  $H_2$  25%、 $D_2$  75%に設定し3ショットの放電後  $H_2$  50%、 $D_2$  50%に変えて4ショットの放電を行なった。その次のショットからは  $H_2$  100%、 $D_2$  0%としてガス導入し放電を続けた場合のマスフィルター出力の推移を示している。上部の矢印と数字は放電のタイミングとショット番号を示している。放電後に信号がいったん下がっているのはコントローラ自体が放電後いったん電圧を零としてピエゾバルブを閉にし、真空容器内を排気するシーケンスになっているためである。 $H_2$  100%、 $D_2$  0%にした後、数ショット間は、 $D_2$  の信号が出ているが、これはプラズマと壁との相互作用により以前に容器壁に吸着されていた  $D_2$  が出て、配管等の遅れを経たのち検出されたものである。

図8は、トカマク放電中に真空紫外分光器によって測定された Lyman  $\alpha$  線強度の時間変化を示している。図8(a)は、ガスの混合比を  $H_2$  25%、 $D_2$  75%にした時の放電特性である。トロイダル磁場  $B_t \sim 2.9$  T、最大プラズマ電流  $I_{pmax} \sim 200$  kA、線平均電子密度  $\bar{n}_e \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、ICRF加熱用RF電力  $P_{ICRF} \sim 620$  kW時の主なプラズマパラメータを示す。真空紫外分光器により、Lyman  $\alpha$  (H) ( $1215.67 \text{ \AA}$ ) と Lyman  $\alpha$  (D) ( $1215.34 \text{ \AA}$ ) を測定している。ICRF加熱用パルス印加直後に上記のスペクトル線強度が増加するのはRFにより、リサイクリング粒子束が増大したものと考えられる。図8(b)及び(c)はオーミック加熱放電の放電特性を示す。 $H_2$  50%、 $D_2$  50%にした場合(図8(b)) 放電初期及び放電中期においてもHとDの分光出力比はほぼ1対1とガスの混合比と一致しており、この放電ではリミターや容器壁でのリサイクリングの影響があまり大きくないものと考えられる。 $H_2$  100%の場合(図8(c))には、 $H_2$  50%、 $D_2$  50%の混合ガスによる数ショットの放電の直後であったため Lyman  $\alpha$  (H) だけでなく Lyman  $\alpha$  (D) も観測された。

#### 5. 結論

二種類の燃料ガスの混合比制御装置を製作した。本制御装置により  $H_2$  と  $D_2$  ガスを任意の混合比で定常導入することが可能であることを明らかにした。また実際にトカマク放電及びICRF加熱実験に使用し、良好な結果を得た。本報告書では、 $H_2$  と  $D_2$  ガスで行なった結果を示したが、他種のガスでも全く同様に行なえる。ただし、今回は放電直前に導入するガスの混合比の定常制御を主目的として試験を行ない、放電中の混合比の制御を行なわなかった。なお放電中におけるガスパフについては、定常制御時の混合比に等しい混合比でガス追加を行なうという形をとった。したがって、今後の重要な発展としてはプラズマ生成中の燃料イオン密度のガスパフによるフィードバック制御が考えられ、この場合にはイオンの検出としては分光器を用いる方法が有効であると考えられる。なおピエゾバルブは印加電圧と流量との関係に不感領域やヒステリシス特性を持つものであるが、今回は線形動作範囲とみなし得る領域で動作させた。

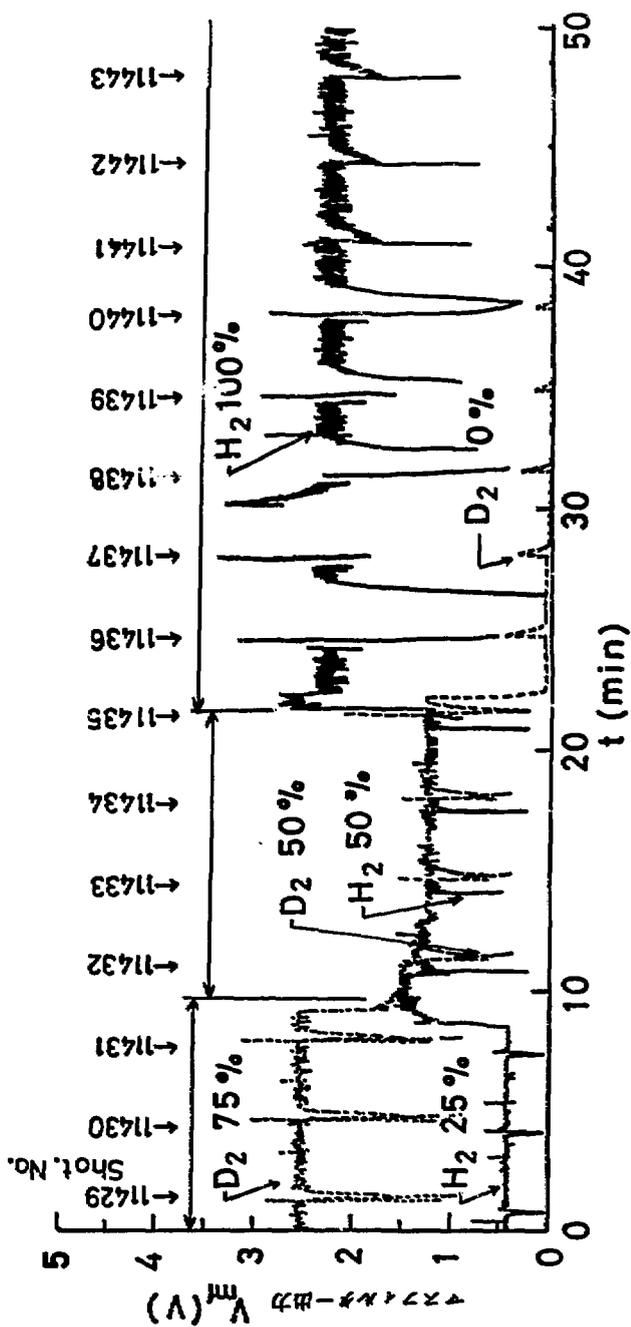


図7. 二種類導入ガス混合比制御時のマスフィルタ-出力

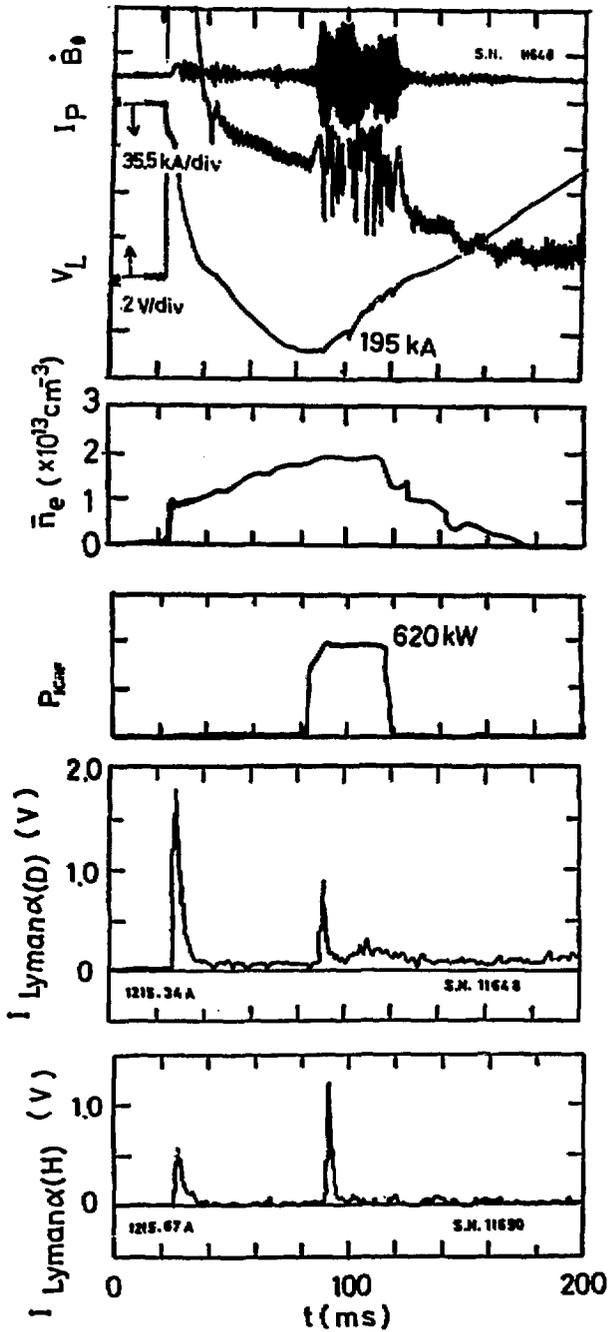


図 8 (a) . ICRF加熱実験時の主なプラズマパラメーターと分光出力 (混合比  $\text{H}_2$  25% ,  $\text{D}_2$  75% ;  $B_t = 2.94 \text{ T}$ )

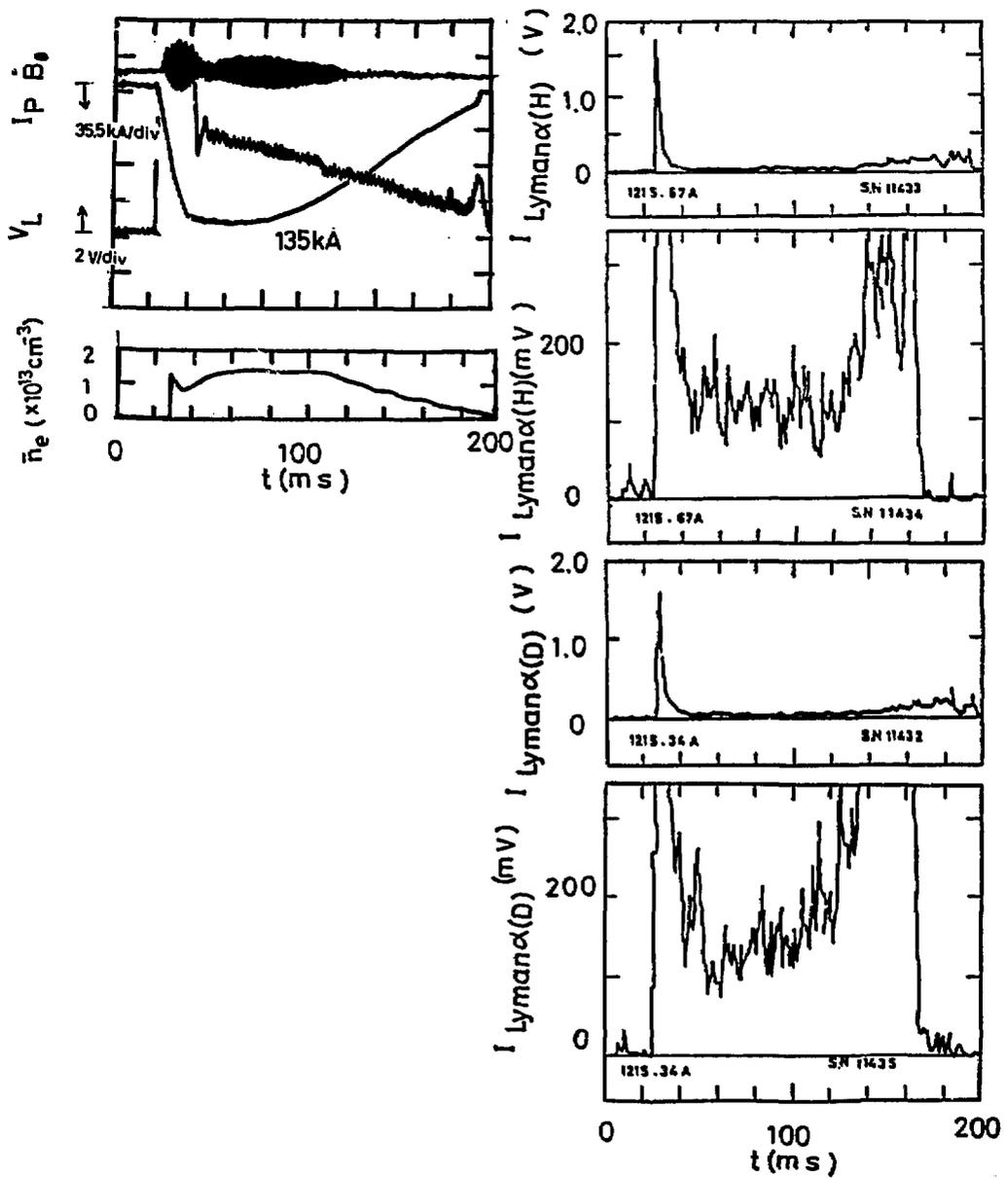


図8 (b) . 混合比 (H<sub>2</sub> 50% , D<sub>2</sub> 50%) 時の主なプラズマパラメーターと  
分光出力 (E t = 2.1 T)

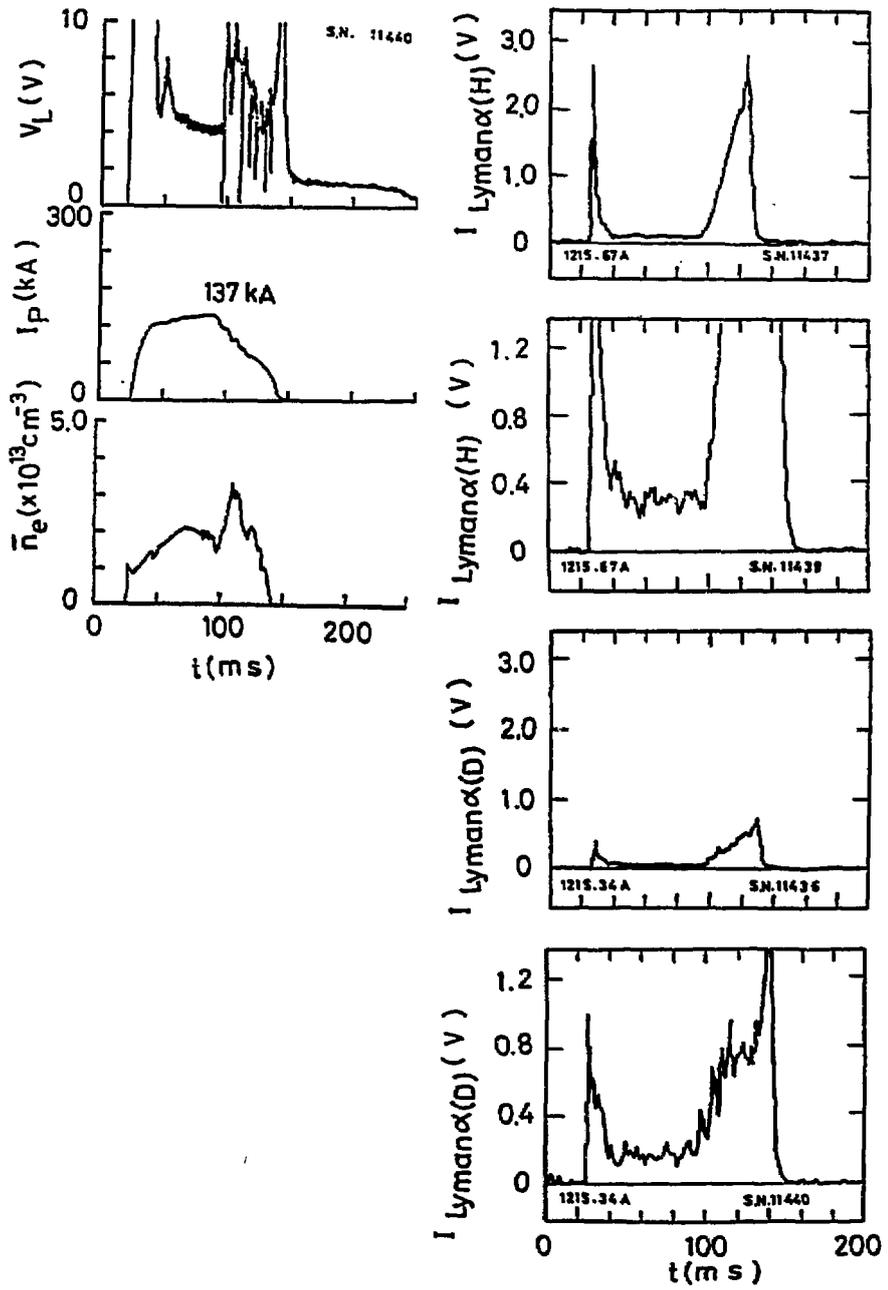


図 8 (c) . 混合比 ( $\text{H}_2$  100%) 時の主なプラズマパラメーターと分光出力  
( $B t = 2.1 \text{ T}$ )

## 謝辞

最後に、本ガス混合比制御の機会を与えて下さった渡利徹夫氏に深く感謝致します。また、分光測定においては、佐藤国憲氏、阪市大原研の三村三木夫氏に御協力いただき感謝致します。

## 参考文献

- 1) 広倉 覚、田端富繁、桜井桂一、小野能之、棚橋秀伍、伊藤智之、JIPP T-IIグループ  
IPPJ-DT-92 (1982) 「JIPP T-II用高速マスアナライザー」
- 2) 富田智之、小野能之、鶴見淳治、棚橋秀伍、伊藤智之、松浦清剛  
IPPJ-DT-55 (1978) 「JIPP T-IIにおける高速パフ、圧力自動制御系」