

JAERI - M  
87-162

水素-重水素混合ペレット (Hydrogen-Deuterium  
Mixed Pellet) の生成射出試験

1987年10月

長谷川 浩一・河西 敏・三浦 幸俊・石堀 郁夫

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。

入手の問い合わせは、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, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 山 田 軽 印 刷 所

水 素 - 重 水 素 混 合 ペ レ ッ ト  
(Hydrogen-Deuterium Mixed Pellet) の生成射出試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部  
長谷川浩一・河西 敏・三浦 幸俊・石堀 郁夫

(1987年9月14日受理)

高性能トカマク開発試験装置(JFT-2M)におけるイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱プラズマへの粒子補給とこれによるプラズマ特性の改善に利用することを目的として、水素と重水素が混合したペレットを作る試験を実施し、水素あるいは重水素ペレットと変りなく混合ペレットを生成することに成功した。混合比が異なる3種類の混合ガスから作ったペレットの組成は、混合ガスのそれと異なることを明らかにした。また、混合ペレットは約800 m/sの高速で打ち出しても破壊されずに飛行することを確認し、ICRF加熱プラズマへの入射実験に使用できる見通しを得た。この結果は、将来の核融合炉で使用する重水素とトリチウム燃料についても、これらを混合ペレットとして炉心プラズマに供給できる可能性を示すものである。

Production and Injection of Hydrogen-Deuterium Mixed Pellet

Kouichi HASEGAWA, Satoshi KASAI, Yukitoshi MIURA  
and Ikuo ISHIBORI

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

(Received September 14, 1987)

A mixed solid pellet of hydrogen and deuterium could be produced in the single pellet injector. The pellet is used to examine an improvement of plasma confinement in ion cyclotron range of frequency (ICRF) wave heated discharges. The mixed pellets were made from the mixed gas with the different ratio of hydrogen to mixed gas (H + D). The composition of the pellet is not equal to that of the mixed gas before freezing. The in-flight mixed pellets with about 769 m/s keep their cylindrical shape, e.g. the pellets are not broken. The present results will indicate the possibility of pellet mixed deuterium and tritium, which will be necessary to in future thermonuclear fusion reactor.

Keywords: Solid Pellet, Pellet Injector, Mixed Pellet, Fuel, Tokamak

目 次

1. はじめに .....	1
2. ペレット入射装置の構造 .....	1
3. 混合ペレットの生成及び射出試験 .....	3
4. まとめ .....	5
謝 辞 .....	5
参考文献 .....	6

Contents

1. Introduction .....	1
2. Structure of Pellet Injector .....	1
3. Production and Injection of Mixed Pellets .....	3
4. Summary .....	5
Acknowledgement .....	5
References .....	6

## 1. はじめに

高温、高密度プラズマを生成し、長時間保持して核融合反応を実現するために、多種多様な実験装置が考案され、建設されてプラズマに関する実験研究が進められて来た。現在、TFTR（米国）、JET（ヨーロッパ共同体）、JT-60等の大型トカマク装置により、一層核融合反応領域に近い領域における実験が実施されつつある。<sup>(1-5)</sup> 中型、大型装置での実験においては、プラズマの高温、高密度化、高閉込め化及び高ベータ化等、プラズマ諸量の改善策を見出すことが最重要課題となっている。この改善策の一つとして注目されている固体水素同位体の氷の粒（ペレット）を高速でプラズマの内部に注入する方法は、効率良く粒子を補給できると同時に、プラズマの閉込めを飛躍的に向上させることができると期待されており、今までに、多くの装置において、このことが実証されている。<sup>(6-9)</sup>

将来の核融合炉では、重水素 ( $D_2$ )、三重水素 ( $T_2$ ) を燃料とする D-T 炉が当面の目標とされている。T は炉の内部では極力完全燃焼させて、炉壁への T の蓄積量を少なくすることが、炉の設計、保守、修理の点から解決すべき重要な課題として上げられている。プラズマの高温、高ベータ化を実現するために、ジュール加熱に加えて、中性粒子入射 (NBI)、高周波 (RF) 加熱等が用いられている。後者の加熱の内、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波を使った加熱が今のところ最も良い結果を出している。この加熱法では、動作ガスに混合気体が使われる (例えば、水素 ( $H_2$ ) と重水素 ( $D_2$ ))。ガスの混合比が加熱の効率、加熱モード (電子加熱、イオン加熱) に関与しているため、加熱中この比をほぼ一定値に保つようになっている。

プラズマの高温化と同時に高密度化を実施するために、ペレットを加熱中のプラズマに入射する実験が JFT-2M を始め多くの装置で行われている。<sup>(10-13)</sup> しかし、ICRF 加熱中に  $D_2$  あるいは  $H_2$  ペレットを入射すると、プラズマの高密度化はできるものの混合比がペレット入射前後において変わり、加熱特性の解析等を複雑にする可能性がある。従って、ペレット入射後もこの比が変わらないようなペレットの生成と射出が、ICRF 加熱実験では必要である。

JFT-2M では、 $H_2$  と  $D_2$  の混合ガスから固体ペレットを生成する試験を行った。その結果、 $H_2$ 、 $D_2$  ペレットと変わりなく混合ペレットが作れることを確認した。本報告書では、ペレット入射装置の概要を 2 章で述べ、3 章で混合ペレットの生成と射出試験の結果について述べる。最後の章において全体のまとめを述べる。

## 2. ペレット入射装置の構造

1 ペレット入射装置は、ペレット生成系、差圧排気系、冷却系、ガス供給系、制御系及び測定系から構成されている。その概略を第 1 図に示す。

ペレット生成系の主要部は、主ハウジング、バレルハウジング (いずれも材質：無酸素銅 (OFCu))、

## 1. はじめに

高温、高密度プラズマを生成し、長時間保持して核融合反応を実現するために、多種多様な実験装置が考案され、建設されてプラズマに関する実験研究が進められて来た。現在、TFTR（米国）、JET（ヨーロッパ共同体）、JT-60等の大型トカマク装置により、一層核融合反応領域に近い領域における実験が実施されつつある。<sup>(1-5)</sup> 中型、大型装置での実験においては、プラズマの高温、高密度化、高閉込め化及び高ベータ化等、プラズマ諸量の改善策を見出すことが最重要課題となっている。この改善策の一つとして注目されている固体水素同位体の氷の粒（ペレット）を高速でプラズマの内部に注入する方法は、効率良く粒子を補給できると同時に、プラズマの閉込めを飛躍的に向上させることができると期待されており、今までに、多くの装置において、このことが実証されている。<sup>(6-9)</sup>

将来の核融合炉では、重水素 ( $D_2$ )、三重水素 ( $T_2$ ) を燃料とする D-T 炉が当面の目標とされている。T は炉の内部では極力完全燃焼させて、炉壁への T の蓄積量を少なくすることが、炉の設計、保守、修理の点から解決すべき重要な課題として上げられている。プラズマの高温、高ベータ化を実現するために、ジュール加熱に加えて、中性粒子入射 (NBI)、高周波 (RF) 加熱等が用いられている。後者の加熱の内、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波を使った加熱が今のところ最も良い結果を出している。この加熱法では、動作ガスに混合気体が使われる (例えば、水素 ( $H_2$ ) と重水素 ( $D_2$ ))。ガスの混合比が加熱の効率、加熱モード (電子加熱、イオン加熱) に関与しているため、加熱中この比をほぼ一定値に保つようになっている。

プラズマの高温化と同時に高密度化を実施するために、ペレットを加熱中のプラズマに入射する実験が JFT-2M を始め多くの装置で行われている。<sup>(10-13)</sup> しかし、ICRF 加熱中に  $D_2$  あるいは  $H_2$  ペレットを入射すると、プラズマの高密度化はできるものの混合比がペレット入射前後において変わり、加熱特性の解析等を複雑にする可能性がある。従って、ペレット入射後もこの比が変わらないようなペレットの生成と射出が、ICRF 加熱実験では必要である。

JFT-2M では、 $H_2$  と  $D_2$  の混合ガスから固体ペレットを生成する試験を行った。その結果、 $H_2$ 、 $D_2$  ペレットと変わりなく混合ペレットが作れることを確認した。本報告書では、ペレット入射装置の概要を 2 章で述べ、3 章で混合ペレットの生成と射出試験の結果について述べる。最後の章において全体のまとめを述べる。

## 2. ペレット入射装置の構造

1 ペレット入射装置は、ペレット生成系、差圧排気系、冷却系、ガス供給系、制御系及び測定系から構成されている。その概略を第 1 図に示す。

ペレット生成系の主要部は、主ハウジング、バレルハウジング (いずれも材質：無酸素銅 (OF Cu))、

ペレットキャリアー (SUS 304), 熱交換器 (OFCu), 射出弁 (電磁弁: スキナー社製 V52 HDB 10502), 熱シールド板, 真空容器及びペレットキャリアー回転用モータから構成されている。キャリアー先端にある円盤内の小孔の径は,  $1.65 \text{ mm } \phi \times 1.65 \text{ mm L}$  である (1985年3月の改造終了後の大きさ)。銃身の内径は  $1.69 \text{ mm } \phi$ , 長さは  $180 \text{ mm}$  である。キャリアーはモータにより  $180$  度を  $2000$  パルスで回転する (1パルス当りの回転角 =  $0.09$  度)。液体ヘリウムは, 約  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  に加圧されたデュワーからトランスファーチューブを経て熱交換器, 生成部, 熱シールド板へと送られる。その流量は, 液体ヘリウムを温水槽内で一度ガス化し, これをニードルバルブ (第1図の NV-27) を介してロータリーポンプで排気することにより調節している。射出弁 (MV-17) は,  $400 \text{ V}$  のパルス電圧により駆動する (パルス幅は  $5 \text{ msec}$  以下である)。真空容器内は  $50 \text{ l/s}$  ターボ分子ポンプで排気している。ペレット生成部の6箇所 (第2図の①-⑥) に金鉄クロメル製熱電対 (Chromel / Gold 0.07 atomic% Fe) を取り付け, 各部の温度をモニターすることができる。ペレットの生成, 射出シーケンスの制御には, 第2図中の②番目の熱電対の出力を用いている。生成, 射出をサイクル運転しているときは, 主に③, ④, ⑥番の熱電対出力をモニターしている。

差圧排気系の低真空槽は, ペレット射出時に, 銃身から出る多量の加速用ガスを排気するために  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  (実効排気量は途中の配管のコンダクタンスのために, 約  $67 \text{ l/s}$  である) のメカニカルブースタポンプ (MBP) とロータリーポンプ (RP,  $1600 \text{ l/min}$ ) を備えている。高真空槽は, 低真空槽との間にある内径  $4 \text{ mm } \phi$  のガイドチューブから漏れ出る加速用ガスを排気するため,  $100 \text{ l/s}$  のターボ分子ポンプを備えている。ドリフト容器は, ペレットを JFT-2M プラズマへ入射する直前でその大きさ (補給粒子数), ペレットの状態 (幾何学的形状, 純度) 等を測定するための容器である。  $100 \text{ l/s}$  のターボ分子ポンプによって, 内部を排気している。ガイドチューブは, 低真空槽と高真空槽, 高真空槽とドリフト容器の間にある内径  $4 \text{ mm } \phi$  と  $10 \text{ mm } \phi$  の管である。これらは, コンダクタンスを小さくして加速用ガスの差圧排気を容易にするために有効である。また, 各ガイドチューブには高速電磁バルブ (VACO社 SOV-050-05-SS) を設け, ペレット射出直前で瞬時に開き, 通過直後に閉じることにより, 加速用ガスのプラズマへの流入量を極力少なくしている。ガス供給系は, 燃料用 ( $\text{H}_2$  または  $\text{D}_2$ ) ガス, ペレット加速用ガス ( $\text{H}_2$  または  $\text{He}$ ), 液体ヘリウムデュワー内加圧用ヘリウムガスの供給系から構成されている。供給中の燃料ガスの圧力をペレット生成部の近傍にある絶対圧力計のブルドン管及びバロトロン管 (MKS社製; 222 BHS-BB-1000, 測定範囲  $1 \sim 1000 \text{ Torr}$ ) でモニターすることができる。圧力の上限と下限を示す接点が付いたブルドン管をサイクル運転時のシーケンス制御に使用している。加速用ガス供給系は配管の途中に, 約  $1 \text{ l}$  容積のリザーバタンクを備え, 最大  $30 \text{ kg/cm}^2$  の圧力を加えられる構造になっている。デュワー内加圧用ヘリウムガス系は, 液体ヘリウム供給時にデュワー内を約  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  に加圧するために用いられる。これにより, 供給中にデュワー内の圧力が大気圧以下 (負圧) に下がらず, 液体ヘリウムを安全に供給することができる。

制御系は, ペレットの生成, 射出の制御及び真空排気ポンプの運転をするための系である。

測定系は, ペレットに関する諸量を測定するための系である。スピード測定は, 長さ  $1 \text{ m}$  のガイドチューブの両端に取り付けたフォトインタラプタ (フォトダイオード: Bell & Howell社製



シリコンピンフォトダイオード 509-01 発光ダイオード：東芝製 GaAs 赤外発光ダイオード TLN 105) 間をペレットが通過する時間を計測して求めている。ペレットの大きさ(補給粒子数)は、ドリフト容器にペレットを入射して容器内の圧力上昇値から求めている。圧力測定には、バラトロン管(MKS社製：2222 BHS-BB-10, 測定圧力範囲：0.01 ~ 10 Torr)を用いている。射出されたペレットの影絵(Shadowgraph)を撮影して、ペレットの大きさ及び形状を予測することができる(射出後のペレットは回転しつつ飛行するため、ペレットを異なる角度から見た影絵が写る)。発光時間が非常に短いパルス光源(Xenon Corporation社製：ランプ 787 B, パルサー 437 A)をペレットの射出時刻から僅に遅れた時刻に発光させて、ペレットの影絵をポラロイドフィルムあるいは通常の35mmフィルムに写す方法である(第3図参照)。

### 3. 混合ペレットの生成及び射出試験

$H_2$ ,  $D_2$  あるいはこれらの混合ガスを固化させ、ペレットをつくるためには、ペレット生成部の温度を各ガスの固化に適した値にすることが重要である。 $H_2$  あるいは  $D_2$  ペレットの生成条件の詳細は文献(4)に記述されている。 $H_2$  ペレットの場合、約 5.6 °K(ただし熱交換器近傍での測定値)、 $D_2$  ペレットの場合、9.2 °Kで再現性の良いペレットを生成できている。これらの温度は直接ペレット生成部の温度(実際は前記の値よりも若干高いことが予測される)を示してはいないが、 $H_2$ ,  $D_2$  の3重点温度を考慮して経験的に決められている。一方、混合ガスについて3重点に相当する3相の存在する状態は曲線(3重点線または3相線と呼ばれている)上の点で表わされるが、この曲線は計算が複雑であるため混合ペレットの生成に当り、冷却温度は次のように設定した。 $H_2$  と  $D_2$  の混合ガスが固化する温度が  $H_2$  と  $D_2$  ペレット生成時の温度の中間の領域にあるだろうと推定して、液体ヘリウム流量を約 70  $\ell/\text{min}$  ( $D_2$  ペレット生成時には約 48 ~ 56  $\ell/\text{min}$ ) に設定し、熱交換器部の温度が約 7 °K になるようにした。

混合ペレットの生成は、 $H_2$  と  $D_2$  の混合比が異なるガス3種類について行った( $n_H/n_D = 6.3\%$ , 23.5%, 39.8%)。生成時における混合ガスの流量は、 $H_2$ ,  $D_2$  ペレットの場合と同様に約 1.8  $\ell/\text{min}$  である。また、このガスの供給を停止する上限圧力も同様に約 420 Torr であり、温度以外の条件はほぼ  $H_2$  と  $D_2$  ペレットのときと同じである。射出されたペレットが正常か否かを、ペレットのスピードが理想気体モデルに基づいて計算した値の 70 ~ 80 % 以内にあること、及び大きさ(ドリフト容器内における圧力上昇値)がペレットキャリア内の小孔の大きさから求めた値にできるだけ近いことから判定した。更に、飛行中のペレットの影絵を撮影して実際の形から判定した。

次の3つの異なる組成の燃料ガスについて混合ペレットを作った。

混合ガス1 :  $n_H = 10.39\%$ ,  $n_D = 53.4\%$ ,  $n_{HD} = 36.2\%$

混合ガス2 :  $n_H = 19\%$ ,  $n_D = 81\%$

混合ガス3 :  $n_H = 5.9\%$ ,  $n_D = 94.1\%$

なお、燃料ガスの組成は、質量分析測定から明らかにしたものである。混合ガス1は、貯蔵用ボ

シリコンピンフォトダイオード 509-01 発光ダイオード：東芝製 GaAs 赤外発光ダイオード TLN 105) 間をペレットが通過する時間を計測して求めている。ペレットの大きさ (補給粒子数) は、ドリフト容器にペレットを入射して容器内の圧力上昇値から求めている。圧力測定には、バラトロン管 (MKS 社製：2222 BHS-BB-10, 測定圧力範囲：0.01 ~ 10 Torr) を用いている。射出されたペレットの影絵 (Shadowgraph) を撮影して、ペレットの大きさ及び形状を予測することができる (射出後のペレットは回転しつつ飛行するため、ペレットを異なる角度から見た影絵が写る)。発光時間が非常に短いパルス光源 (Xenon Corporation 社製：ランプ 787 B, パルサー 437 A) をペレットの射出時刻から僅に遅れた時刻に発光させて、ペレットの影絵をポラロイドフィルムあるいは通常の 35mm フィルムに写す方法である (第 3 図参照)。

### 3. 混合ペレットの生成及び射出試験

$H_2$ ,  $D_2$  あるいはこれらの混合ガスを固化させ、ペレットをつくるためには、ペレット生成部の温度を各ガスの固化に適した値にすることが重要である。 $H_2$  あるいは  $D_2$  ペレットの生成条件の詳細は文献(4)に記述されている。 $H_2$  ペレットの場合、約 5.6 °K (ただし熱交換器近傍での測定値)、 $D_2$  ペレットの場合、9.2 °K で再現性の良いペレットを生成できている。これらの温度は直接ペレット生成部の温度 (実際は前記の値よりも若干高いことが予測される) を示してはいないが、 $H_2$ ,  $D_2$  の 3 重点温度を考慮して経験的に決められている。一方、混合ガスについて 3 重点に相当する 3 相の存在する状態は曲線 (3 重点線または 3 相線と呼ばれている) 上の点で表わされるが、この曲線は計算が複雑であるため混合ペレットの生成に当り、冷却温度は次のように設定した。 $H_2$  と  $D_2$  の混合ガスが固化する温度が  $H_2$  と  $D_2$  ペレット生成時の温度の中間の領域にあるだろうと推定して、液体ヘリウム流量を約 70  $\ell/\text{min}$  ( $D_2$  ペレット生成時には約 48 ~ 56  $\ell/\text{min}$ ) に設定し、熱交換器部の温度が約 7 °K になるようにした。

混合ペレットの生成は、 $H_2$  と  $D_2$  の混合比が異なるガス 3 種類について行った ( $n_H/n_D = 6.3\%$ , 23.5%, 39.8%)。生成時における混合ガスの流量は、 $H_2$ ,  $D_2$  ペレットの場合と同様に約 1.8  $\ell/\text{min}$  である。また、このガスの供給を停止する上限圧力も同様に約 420 Torr であり、温度以外の条件はほぼ  $H_2$  と  $D_2$  ペレットのときと同じである。射出されたペレットが正常か否かを、ペレットのスピードが理想気体モデルに基づいて計算した値の 70 ~ 80 % 以内にあること、及び大きさ (ドリフト容器内における圧力上昇値) がペレットキャリア内の小孔の大きさから求めた値にできるだけ近いことから判定した。更に、飛行中のペレットの影絵を撮影して実際の形から判定した。

次の 3 つの異なる組成の燃料ガスについて混合ペレットを作った。

混合ガス 1 :  $n_H = 10.39\%$ ,  $n_D = 53.4\%$ ,  $n_{HD} = 36.2\%$

混合ガス 2 :  $n_H = 19\%$ ,  $n_D = 81\%$

混合ガス 3 :  $n_H = 5.9\%$ ,  $n_D = 94.1\%$

なお、燃料ガスの組成は、質量分析測定から明らかにしたものである。混合ガス 1 は、貯蔵用ボ

ンベ内において $H_2$ 、 $D_2$ ガスが化学反応した結果、HDガスが生成されている。従って、この成分のままガスで固化した場合にペレットの組成がどうなるかは興味深いところである。

まず、射出されたペレットの組成と燃料ガスの混合比との関係を調べた。これは、ペレットを一度ドリフト容器内で蒸発させて混合ガスとした後、JFT-2M真空容器（容積約 $8.5\text{ m}^3$ とした）内に封入して、質量分析計（NAG-515 B）を使ってガスの組成を調べる方法により行った。この測定を始める前にJFT-2M真空容器内の $H_2$ 、 $D_2$ 、HD等のガスのバックグランド圧力を測定し、これらが低い状態で測定を実施した。

混合ガス1から作ったペレットの組成は、第4(a)図に見るようにHDガスはそのまま固化して氷になっていることを示している。第4(a)図のマススペクトルを感度補正すると全体に対するHDガスの割合は $n_{HD} = 31.9\%$ である。また、 $n_H = 6\%$ 、 $n_D = 62.1\%$ である。混合ガス1についてはHDガスが元から存在しており、氷にした場合にもHDのまま氷になっている。第4(b)図に混合ガス2と3のペレット蒸発後のマススペクトルを示す。以上の結果からHとDの数の比として示した混合ペレットの組成（ただし、HDガスは最終的にプラズマ内でHとDに別れることから、それぞれをHとDに分離して計算している）をドリフト容器内の圧力上昇値（この値は蒸発したペレットによる圧力上昇値とこの容器内に流入する加速用ガスによる圧力上昇値の和である）の関数として第5図に示した。混合ガス1の場合、ペレットの組成と燃料ガスの組成はほぼ同じである（ペレットの組成： $n_H/n_D = 40\%$ ）。一方、混合ガス2と3については、組成が氷の場合と燃料ガスのときとで異っている。混合ガス2から作ったペレットの組成は約 $60\%$ （ $n_H/n_D$ ）であり、燃料ガス時の約2.6倍である。また、混合ガス3では、ペレットの組成が $2\sim 5\%$ の広い範囲を示し、氷る前の状態よりも比率が小さくなっている。以上3種類の混合ガスから作ったペレットの組成を調べた結果、ガスの時と固体の時とで異なる組成を示す場合があることが分かった。これが水素と重水素の同位体からなる混合気体において妥当な結果であるかは、このガスの気体、液体、固体の状態図を示すことで明らかにできるが、ここでは状態図には触れないことにする。

次に、混合ペレットを速いスピードで打ち出した場合、砕けて壊れることがなくプラズマまで到達できるかを影絵（Shadowgraph）により調べた。ドリフト容器の入口部に付けたフォトインタラプタからペレットがここを通過する時の信号を受けて適当な時間遅れて（遅延パルサー使用）光源を光らせる。発光量を適度に調節することにより鮮明な像を写すことができる。第6図は、混合ガス2から作ったペレットの影絵である。ペレットのスピードは約 $714\sim 741\text{ m/s}$ である。若干ペレットの端が欠けているが、ほぼ健全な形である。ただし、ペレットの端が丸く見える写真は、飛行中のペレットが回転しているためにたまたま円柱形の丸い部分が視野方向に向いているためである。圧力上昇測定から求めたペレットの大きさは、文献(4)に示した $H_2$ 、 $D_2$ ペレットよりも若干小さい。3種類の混合ガスから作ったペレットの射出スピードの実測値を加速用ガス圧力の関数として第7図に示した。加速用ガスは、ほぼ常温の水素である。実線は、MiloraとFosterが示した理想気体モデルに基づいて計算したスピードの加速用ガス圧力に対する変化である。加速ガスは広い範囲で変えていないが、 $8\sim 10\text{ kg/cm}^2$ の間に設定している。混合ガス1、2、3について作ったペレットのスピードは計算値の約 $90\%$ に相当している。ただし、第4図に示したペレットの組成を使って計算した値である。加速ガスは水素である。

以上から、水素と重水素の混合ペレットを水素あるいは重水素ペレットと同様に生成することができ、健全な状態に近い形で打ち出せることが明らかになった。

#### 4. ま と め

JFT-2M用に開発、製作した1ペレット入射装置において、水素と重水素の混合ペレットを作る実験を行い以下のような結果を得た。

- (1) 混合ペレットは、水素あるいは重水素ペレットの場合と同様に作ることができる。ただし、冷却温度は $H_2$ と $D_2$ ペレットの場合のほぼ中間に近い値である。
- (2) 混合比が異なる3種類の混合ガスから作ったペレットの組成は、混合ガスのそれとは異なる場合がある。
- (3) 混合ペレットは、打ち出された後もほぼ健全な形を保って飛行することが分かった。また、スピードも理想気体モデルに基づく計算値に近いことを示した。

以上の結果は、今後のJFT-2MのICRF加熱プラズマへのペレット入射実験において役立つものである。また、混合ペレットは将来のD-T炉において用いられるものと考えられるため、本報告書で述べた混合ペレットの生成、射出に関する技術は、将来において重要となるであろう。

#### 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、ペレット装置の開発、製作に渡って終始御支援頂いたプラズマ実験研究室船橋昭昌室長、装置技術管理室鈴木喜八郎室長、核融合研究部田中裕二次長に深く感謝致します。ペレット入射装置の運転、保守等に尽力下された装置技術管理室松崎誼室長代理、谷孝志係長及び同室の諸氏に御礼申し上げます。また、ペレット入射装置の開発及び実験に御鞭達頂いた核融合研究部田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所所長及び森茂副理事長に心から感謝の意を表します。

以上から、水素と重水素の混合ペレットを水素あるいは重水素ペレットと同様に生成することができ、健全な状態に近い形で打ち出せることが明らかになった。

## 4. ま と め

JFT-2M用に開発、製作した1ペレット入射装置において、水素と重水素の混合ペレットを作る実験を行い以下のような結果を得た。

- (1) 混合ペレットは、水素あるいは重水素ペレットの場合と同様に作る事ができる。ただし、冷却温度は $H_2$ と $D_2$ ペレットの場合のほぼ中間に近い値である。
- (2) 混合比が異なる3種類の混合ガスから作ったペレットの組成は、混合ガスのそれとは異なる場合がある。
- (3) 混合ペレットは、打ち出された後もほぼ健全な形を保って飛行することが分かった。また、スピードも理想気体モデルに基づく計算値に近いことを示した。

以上の結果は、今後のJFT-2MのICRF加熱プラズマへのペレット入射実験において役立つものである。また、混合ペレットは将来のD-T炉において用いられるものと考えられるため、本報告書で述べた混合ペレットの生成、射出に関する技術は、将来において重要となるであろう。

## 謝 辞

本報告書をまとめるに当り、ペレット装置の開発、製作に渡って終始御支援頂いたプラズマ実験研究室船橋昭昌室長、装置技術管理室鈴木喜八郎室長、核融合研究部田中裕二次長に深く感謝致します。ペレット入射装置の運転、保守等に尽力下された装置技術管理室松崎誼室長代理、谷孝志係長及び同室の諸氏に御礼申し上げます。また、ペレット入射装置の開発及び実験に御鞭達頂いた核融合研究部田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所所長及び森茂副理事長に心から感謝の意を表します。

以上から、水素と重水素の混合ペレットを水素あるいは重水素ペレットと同様に生成することができ、健全な状態に近い形で打ち出せることが明らかになった。

#### 4. ま と め

JFT-2M用に開発、製作した1ペレット入射装置において、水素と重水素の混合ペレットを作る実験を行い以下のような結果を得た。

- (1) 混合ペレットは、水素あるいは重水素ペレットの場合と同様に作ることができる。ただし、冷却温度は $H_2$ と $D_2$ ペレットの場合のほぼ中間に近い値である。
- (2) 混合比が異なる3種類の混合ガスから作ったペレットの組成は、混合ガスのそれとは異なる場合がある。
- (3) 混合ペレットは、打ち出された後もほぼ健全な形を保って飛行することが分かった。また、スピードも理想気体モデルに基づく計算値に近いことを示した。

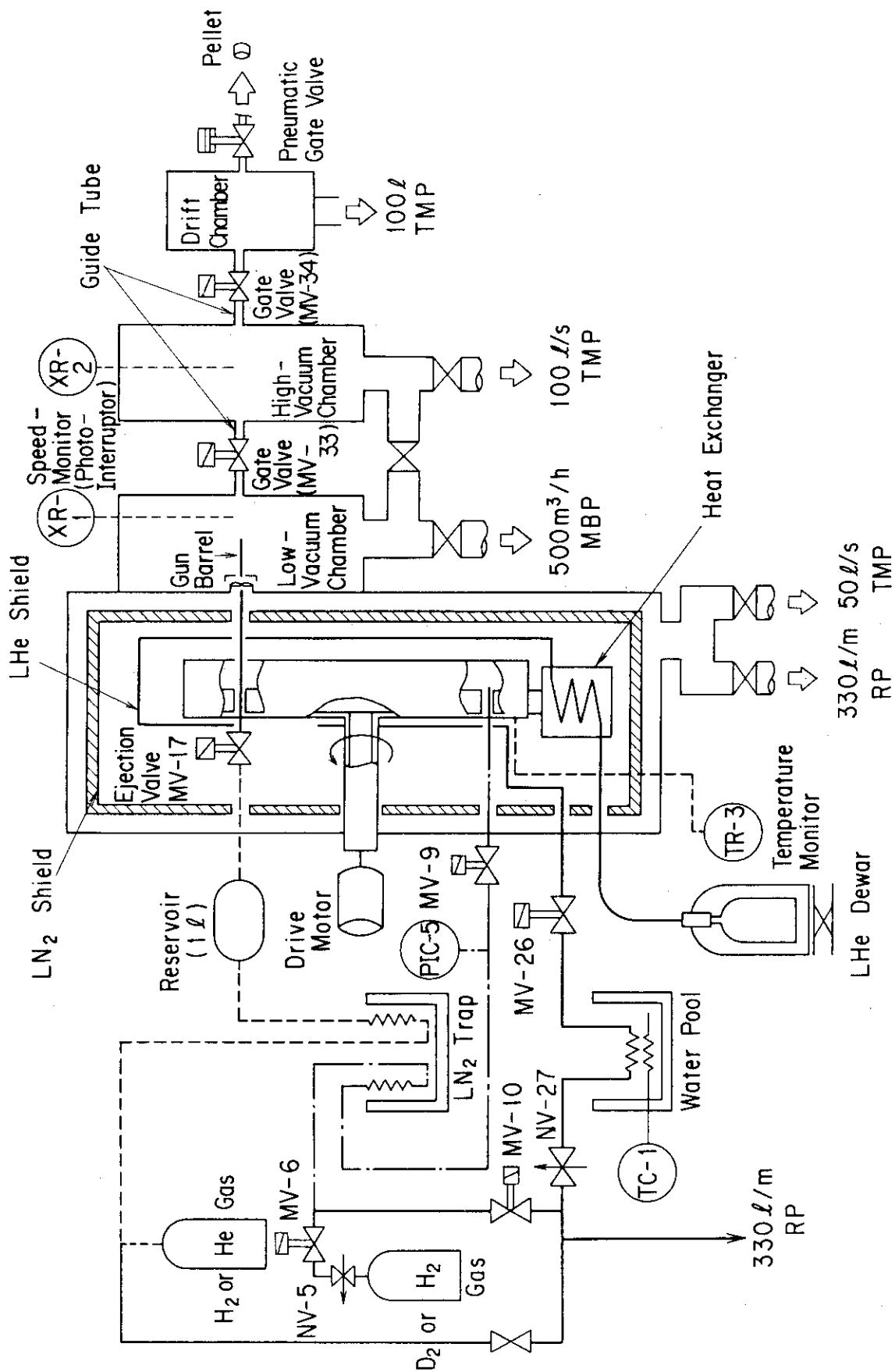
以上の結果は、今後のJFT-2MのICRF加熱プラズマへのペレット入射実験において役立つものである。また、混合ペレットは将来のD-T炉において用いられるものと考えられるため、本報告書で述べた混合ペレットの生成、射出に関する技術は、将来において重要となるであろう。

#### 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、ペレット装置の開発、製作に渡って終始御支援頂いたプラズマ実験研究室船橋昭昌室長、装置技術管理室鈴木喜八郎室長、核融合研究部田中裕二次長に深く感謝致します。ペレット入射装置の運転、保守等に尽力下された装置技術管理室松崎誼室長代理、谷孝志係長及び同室の諸氏に御礼申し上げます。また、ペレット入射装置の開発及び実験に御鞭達頂いた核融合研究部田中正俊部長、苫米地顕那珂研究所所長及び森茂副理事長に心から感謝の意を表します。

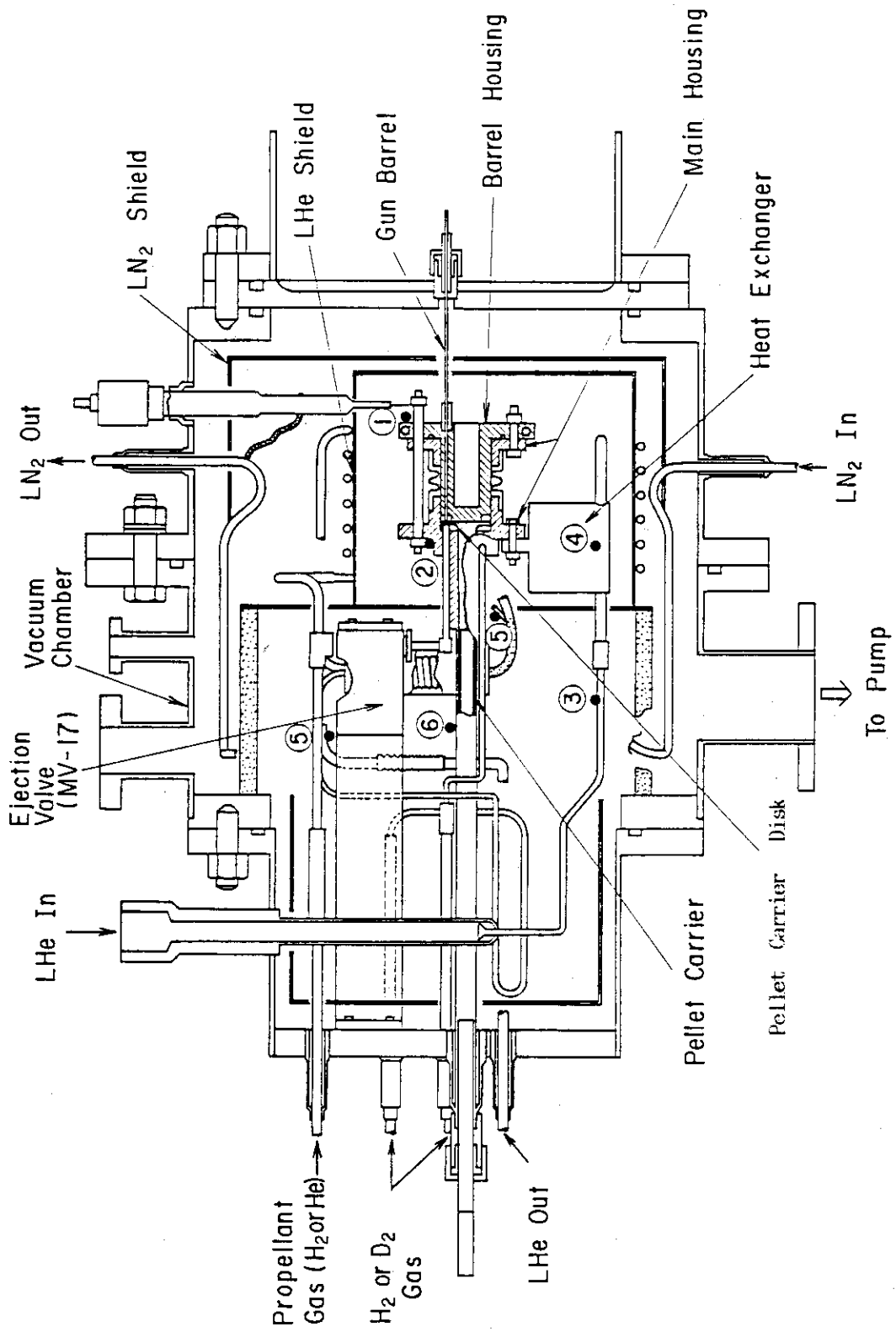
## 参 考 文 献

- (1) D.V. Bartlett, V. Bhatnagar, R.J. Bickerton, M. Bures, J.D. Callen, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-II-3, (Kyoto, 1986).
- (2) JET Team, 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-I-2, (Kyoto, 1986).
- (3) T. Tanga, M. Keilhacker, D. Bartlett, K. Behringer, R.J. Bickerton, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/(Poat Deadlins Paper), (Kyoto, 1986).
- (4) R.J. Hawryluk, V. Arunasalam, M.G. Bell, M. Bitter, W.R. Blanchard, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-I-3, (Kyoto, 1986).
- (5) M. Yoshikawa, T. Abe, H. Akaoka, H. Aikawa, H. Akasaki, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-I-1, (Kyoto, 1986).
- (6) G.L. Schmidt, S.L. Milora, V. Arunasalam, M.G. Bell, M. Bitter, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-CN-47/A-III-4, (Kyoto, 1986).
- (7) A. Gondhaleker, A. Cheetham, M. Bures, D. Campbell, S.A. Cohen, et al., 11th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA-I-1-6 (Poster Session) (Kyoto, 1986).
- (8) S. Sengoku, M. Abe, K. Hoshino, K. Itoh, A. Kameari, et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 10th Int. Conf. IAEA, London, 1984) Vol.1, Vienna (1985) 405.
- (9) M. Greenwald, J. Parker, M. Besen, C.L. Fiore, M. Food, et al., in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 11th Europ. Conf., Aachen, 1983), Vol.7D, Part I, European Physical Society (1983) 7.
- (10) S. Kasai, Y. Miura, K. Hasegawa, S. Sengoku, H. Ogawa, et al., "First Results of Pellet Injection Experiments in JFT-2M Additionally Heated Plasmas", JAERI-M 86-109 (1986).
- (11) Y. Miura, S. Kasai, S. Sengoku, K. Hasegawa, N. Suzuki, et al., "Characteristics of Pellet and Neutral-Beam Injected Single Null Divertor Discharges of the JFT-2M Tokamak", JAERI-M 86-148 (1986).
- (12) S. Kasai, Y. Miura, S. Sengoku, K. Hasegawa, H. Ogawa, et al., "Improvement of Confinement in Auxiliary-Heated (ICRF) Divertor Discharges by Pellet Injection", JAERI-M 87-159 (1987).
- (13) 河西 敏, 長谷川浩一, 三浦幸俊, 石堀郁夫, "固体水素同位体ペレット (Single Pellet) の生成, 射出試験" JAERI-M 86-035 (1986 1月)。

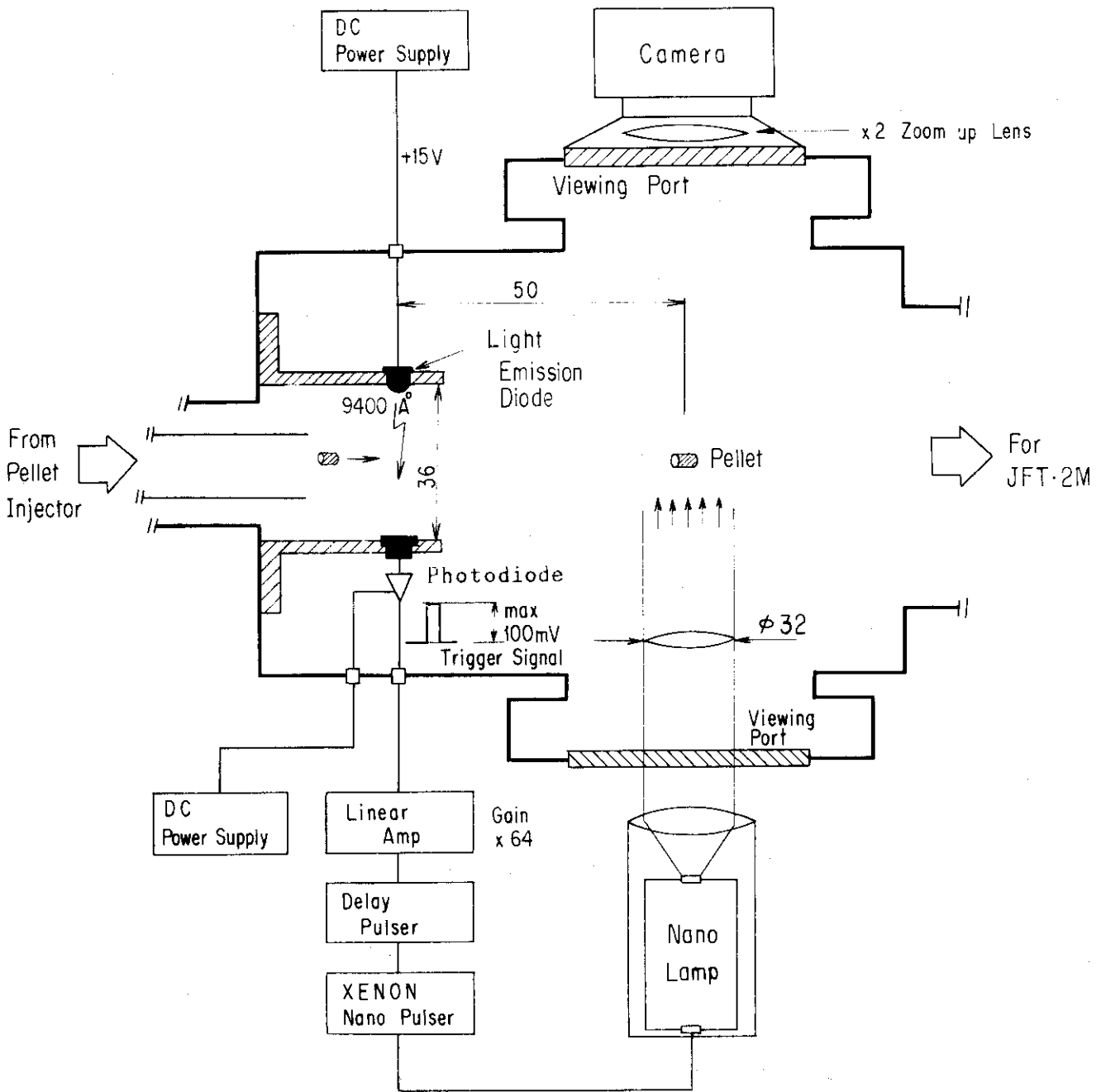


第1図 ペレット入射装置の構成

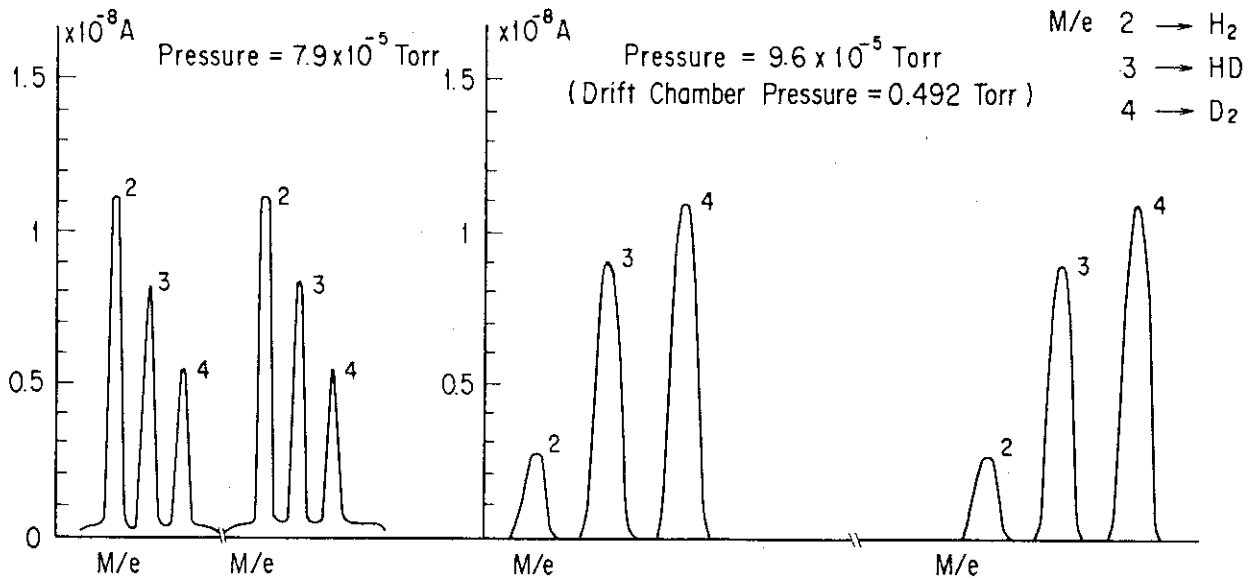




第2図 インジェクター内部の構造



第3図 ペレットの影絵 (Shadowgraph) 測定系の構成

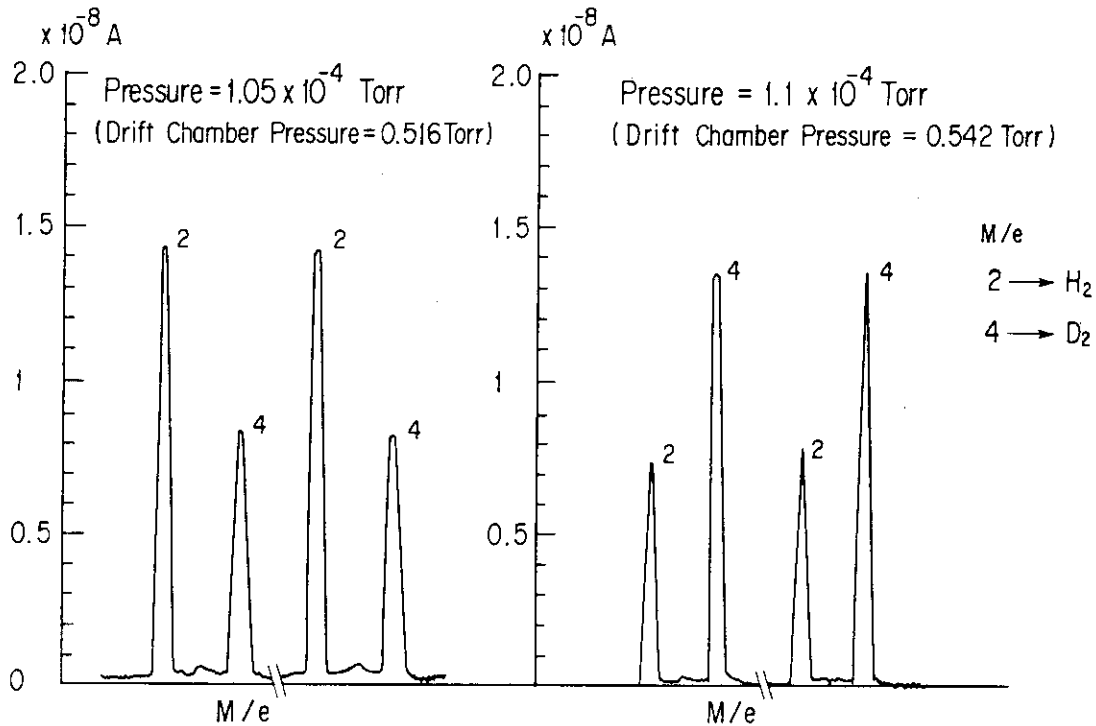


混合ガス1のマススペクトル

混合ガス1による混合ペレットのマススペクトル

( $n_H = 10.39\%$ ,  $n_D = 53.4\%$ ,  $n_{HD} = 36.2\%$ )

(a)



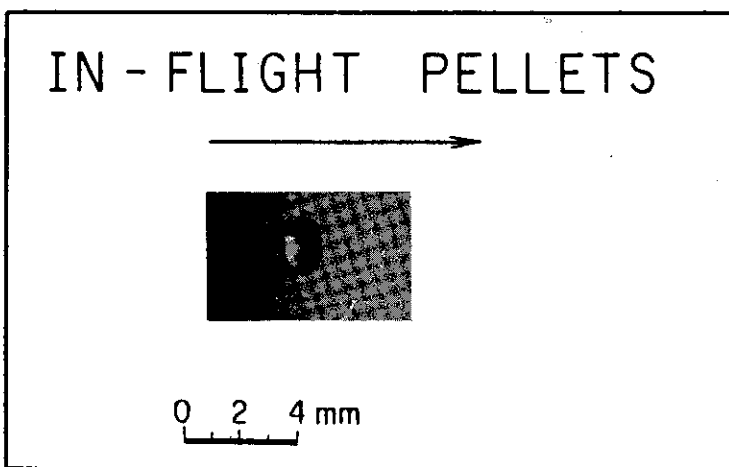
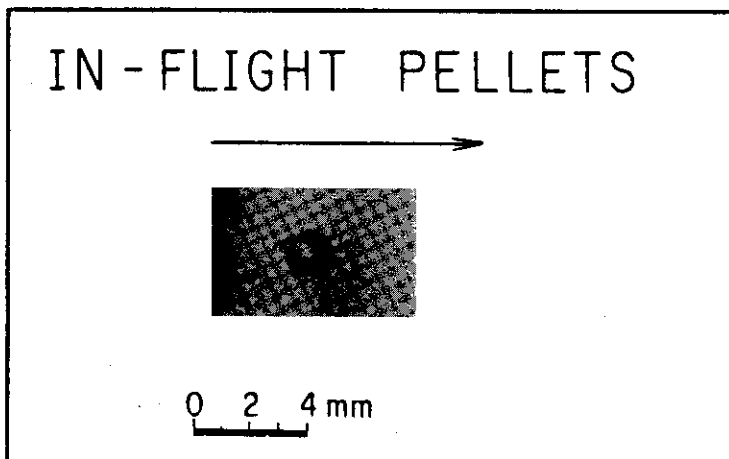
混合ガス2による混合ペレットのマススペクトル  
( $n_H = 19\%$ ,  $n_D = 81\%$ )

混合ガス3による混合ペレットのマススペクトル  
( $n_H = 5.9\%$ ,  $n_D = 94.1\%$ )

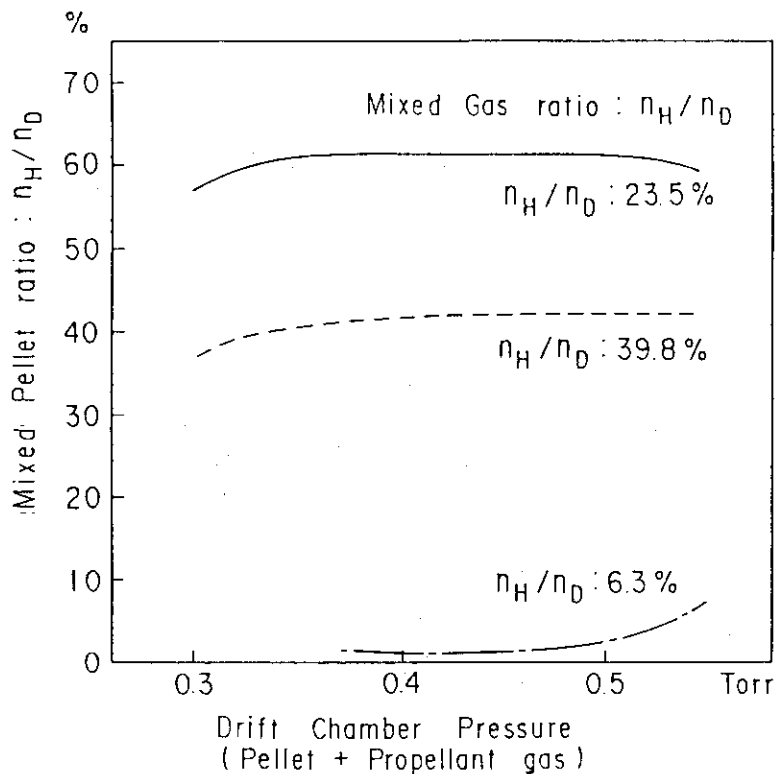
(b)

第4図 (a)混合ガス1のマススペクトル (JFT-2M真空容器内に封入したときの圧力上昇値 =  $7.9 \times 10^{-5}$  Torr) 及び混合ガス1による混合ペレットのマススペクトル (JFT-2M真空容器内に封入したときの圧力上昇値 =  $9.6 \times 10^{-5}$  Torr, ドリフト容器内に封入したときの圧力上昇値 = 0.492 Torr), (b)混合ガス2による混合ペレットのマススペクトル (JFT-2M真空容器内に封入したときの圧力上昇値 =  $1.05 \times 10^{-4}$  Torr, ドリフト容器内に封入したときの圧力上昇値 = 0.516 Torr) 及び混合ガス3による混合ペレットのマススペクトル (JFT-2M真空容器内に封入したときの圧力上昇値 =  $1.1 \times 10^{-4}$  Torr, ドリフト容器内に封入したときの圧力上昇値 = 0.542 Torr)。

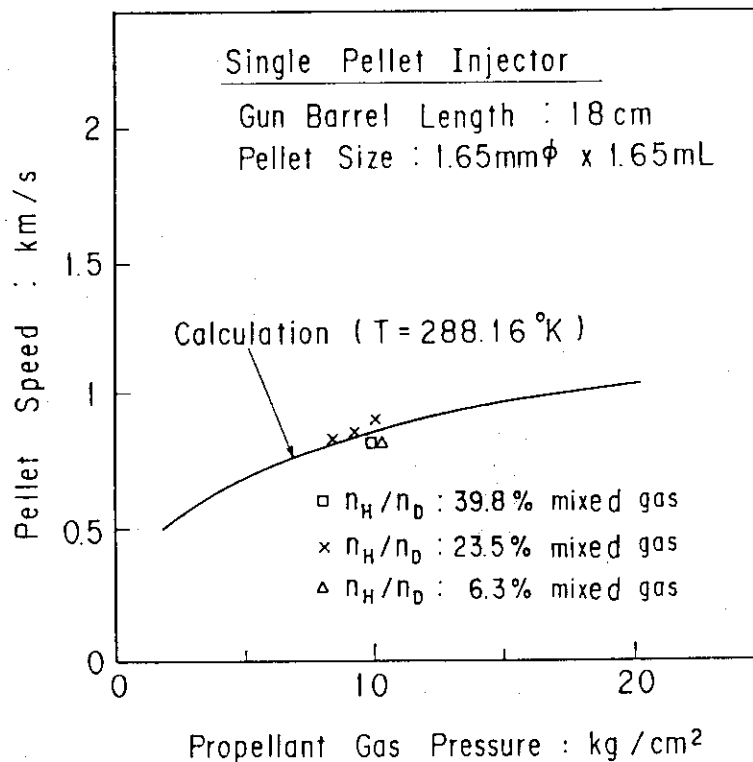
# Shadowgraph of Pellet



第6図 飛行中の混合ペレットの影絵 (Shadowgraph)



第5図 ドリフト容器内の圧力上昇に対する混合ペレットの $n_H$ と $n_D$ の比率 ( $n_H/n_D$ )



第7図 加速ガス圧力に対する混合ペレットの射出スピード

$\square$  :  $n_H/n_D = 39.8\%$ ,

$\times$  :  $n_H/n_D = 23.5\%$ ,

$\triangle$  :  $n_H/n_D = 6.3\%$ ,

実線は理想気体に基づく計算値である