

JAERI - M
86-035

固体水素同位体ペレット (Single Pellet) の
生成・射出試験

1986年3月

河西 敏・長谷川浩一・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、お申しこしてください。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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 原子力資料サービス

固体水素同位体ペレット (Single 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
河西 敏・長谷川浩一・三浦幸俊
石堀郁夫

(1986年 1月31日 受理)

高性能トカマク開発試験装置 (JFT-2M) において、固体水素同位体ペレットを高速でプラズマに入射する粒子補給、これによるプラズマ特性の向上 (高密度化、高閉じ込め等の高性能化) の可能性を探ること及び大型装置への適用性の見通しを得ることを目的として、1ペレット射出装置 (ペレット大きさ: $1.65\text{mm}\phi \times 1.65\text{mmL}$ 及び $1\text{mm}\phi \times 1\text{mmL}$, 円柱形) を製作し、その基本性能に関する試験を行い、以下の結果を得た。この射出装置により水素 (H_2) 及び重水素 (D_2) ペレットを生成することができる。最大射出スピードは約 900m/s (H_2 ペレット, 14kg/cm^2 ヘリウムガス加速) であり、プラズマへの入射実験におけるスピードは $714\sim 833\text{m/s}$ (10kg/cm^2 加速用ガス圧力) である。射出スピードの再現性は $80\sim 90\%$ である。このスピードは理想気体モデルに基づく計算値の $80\sim 95\%$ に相当する。補給できる粒子数は設計値の $71\sim 90\%$ ($1.65\text{mm}\phi \times 1.65\text{mmL}$ ペレット) 及び $46\sim 56\%$ ($1\text{mm}\phi \times 1\text{mmL}$ ペレット) である。ペレット飛行軌道の拡がりはプラズマ中心の位置で約 $26\text{mm}\phi$ である。

Production and Ejection of Solid Hydrogen-Isotope Pellet
(Single Pellet)

Satoshi KASAI, Koichi HASEGAWA, Yukitoshi MIURA
and Ikuo ISHIBORI

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

(Received January 31, 1986)

The pneumatic gun type pellet injector (single pellet) has been constructed, which is basic type used at ORNL. The pellet in the carrier is 1.65 mm in diameter and 1.65 mm in length, and another is 1 mm ϕ \times 1 mmL. Hydrogen pellet velocity of about 900 m/s was observed at propellant gas (He) pressure of 14 kg/cm². In the injection experiment into a plasma, typical velocity is 714 ~ 833 m/s. These values are 80 ~ 95 % of velocity calculated from the ideal gun model. The ejected pellet size is 71 ~ 90 % of the hole size in the carrier disk (1.65 mm ϕ \times 1.65 mmL) and 46 ~ 56 % (1 mm ϕ \times 1 mmL). The spread in the pellet trajectories is about 26 mm in diameter at a plasma center.

Keywords: Solid Pellet, Fuelling, Tokamak, Plasma, Pellet Injector
Hydrogen Isotope

目 次

1. 序 論	1
2. ペレット射出装置	2
2.1 生成・加速の原理	2
2.2 ペレット射出装置の構造	3
3. 生成・射出試験	7
3.1 生成条件	7
3.2 ペレット射出スピード	8
3.3 ペレットの大きさ(補給粒子数)	9
3.4 ペレットの飛行軌道の拡がり	10
4. 考察と結論	11
謝 辞	13
参考文献	14

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Pellet Injector	2
2.1 Principle of pellet production and acceleration	2
2.2 Structure of pellet injector	3
3. Production and Ejection of Pellet	7
3.1 Condition of pellet production	7
3.2 Pellet speed	8
3.3 Pellet size (number of particle)	9
3.4 Spread of trajectories of pellet	10
4. Discussion and Summary	11
Acknowledgements	13
References	14

1. 序 論

熱核融合反応を利用したエネルギー供給源である核融合炉の実現を目標として、プラズマ発生装置の開発、実験研究が続けられているが、熱核融合反応が起こるために必要な高温プラズマの生成は、トカマク装置の開発によって、10年余の間に飛躍的な進歩を遂げた。^{1), 2)} ローソン条件が示すプラズマ温度 (T)²⁾、プラズマ密度 (n) とエネルギー閉じ込め時間 (τ_E) との積の値¹⁾へあと一歩と近づいた (最近、米国のALCATOR装置において、 $(0.6 \sim 0.8) \times 10^{14} \text{ sec} \cdot \text{cm}^{-3}$ なる $n\tau_E$ が得られ、この条件を満足することが報告されている)。また、炉の経済性の点から重要な物理量であるベータ値もPBX装置において、約5.5%の高い値が達成された。³⁾

最近のトカマクプラズマの研究方向は、TFTR, JET, JT-60等の大型装置による臨界プラズマの達成、閉じ込め(スケールアップ則)、追加熱等の研究と、中型装置によるプラズマ特性の改善、即ち、プラズマの高性能化の研究にあると言っても過言ではない。前者の場合、^{4), 5), 6)} 既に実験が開始され、従来の比例則に従う実験結果が発表されつつある。^{4), 5)} 後者について見ると、幾つかの装置において、プラズマ諸物理量の改善が報告されている。特筆すべきは、前記したALCATORとPBXの結果であるがALCATORでの $n\tau_E$, n_e の値は、固体水素の氷の粒(ペレット)による粒子補給において、初めて得られたものである。¹⁾

ペレットによる粒子補給法は、オークリッジ国立研究所(ORNL)において開発され、ORMAK, ISX-A, B装置で実験が行われ、⁷⁾ その後、ALCATOR,¹⁾ PLT,⁸⁾ PDX,⁹⁾ DIII,¹⁰⁾ ヨーロッパではASDEX,¹¹⁾ TFR¹²⁾ 等での実験が実施されるに至った。また、TFTR,¹³⁾ JET¹⁴⁾ でも計画され、既に、TFTRでは、ペレット入射による粒子補給により $n_e \tau_E$ の改善が見られている。¹³⁾

この補給法は、液体ヘリウムを冷媒として使い、水素同位体(水素(H_2), 重水素(D_2), 将来の炉では三重水素(T_2)も使われる)を固化させ、ペレット状(通常、 $1 \text{ mm} \phi \sim 4 \text{ mm} \phi$)にして、高速でプラズマの高温領域へ粒子を供給する方法である。これは、従来のガスパフ法に比べると、プラズマのスクレイプオフ層を越えて充分プラズマ内部の閉じ込めの良い領域へ粒子を補給できるため、効率良くプラズマ密度を上げられること及び閉じ込めの良いプラズマが作れることで優れていると言える。ペレットの加速法には、圧縮気体(例えば、ヘリウム、水素)の膨張を利用した空気銃方式(ニューマチック方式)と遠心力を使った方式がある。現時点では、いずれの方式も一長一短があり、一方の方式に固執することはできないが、ペレットのスピードの点では、空気銃方式が勝っている。

日本原子力研究所では、高性能トカマク開発試験装置(JFT-2M)用のペレット射出装置の開発が昭和57年度から始められ(三菱原子力工業への委託研究¹⁵⁾)、実機を58年度に完成させた。この装置では、直径 $1 \text{ mm} \phi \times 1 \text{ mm L}$ の水素、及び重水素ペレットを生成、加速することができる。また、このペレットをプラズマへ入射した実験の結果を基に、59年度に大きさを $1.65 \text{ mm} \phi \times 1.65 \text{ mm L}$ に改造した。

このペレット射出装置を用いたJFT-2Mにおける実験の目的は、次の3つに要約すること

ができる。

- (1) 中規模装置へのペレット入射による粒子補給が、プラズマを破壊せず、安定かつ効率良くできることを実証する研究。従って、この課題ではプラズマ内でのペレットの溶発 (Ab-lation) 機構と粒子拡散について調べる。
- (2) プラズマの閉じ込め (エネルギー, 粒子) と加熱効率等に関する特性を改善するための研究。特に, 高速中性粒子入射 (NBI), 高周波 (例えば, イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF)) 等の追加熱における閉じ込め性能劣化の防止と高密度化によるベータ値の向上に関する研究。
- (3) ペレットによる粒子補給とダイバータの組合せによる不純物及び灰 (炉心プラズマにおけるヘリウム) 排気能力の向上に関する研究。

上記は, いずれも並行して進める必要のある課題である。また, これらの実験からペレットによる粒子補給が大型装置に適用できるかを明らかにすることも重要な研究である。

本報告書では, 2章において実機製作したペレット射出装置の構造及びペレット生成・射出シーケンスについて, 3章で生成, 加速の試験について記述する。また, 4章で試験結果のまとめと考察, 及び将来計画について述べる。

2. ペレット射出装置

本章では, 1章に記述した研究目的を遂行するために製作した単発式ペレット射出装置について述べる。装置の基本構造は, オークリッジ国立研究所のMilora等により開発されたニューマチック式である。以下にペレット射出装置の生成・加速の原理, 構造, シーケンス, を述べる。また, 射出されたペレットの基本量の測定法についても記述する。

2.1 生成・加速の原理

ORNL式装置⁷⁾のペレット生成原理は, 冷媒 (ここでは液体ヘリウム) によって, 表1に示す三重点の値以下の極低温に水素 (H₂) (重水素 (D₂)) ガスを冷却すると同時に圧力を三重点の値以上にすることにより, 容易にガスを液化し, 固化するというものである。また, ペレットの加速法は, 圧縮気体を利用したニューマチック方式である。その原理は, 気体が膨張するとき, その内部エネルギーが運動エネルギーに変換され, 希薄波が形成されることに基づいている⁷⁾。理想気体を仮定すると, 圧縮ガスが放射された後 t sec の時刻におけるペレットのスピードは容易に評価できる。^{注1)} ペレットは, 加速に常温のヘリウムガス (He) ガスを用いた場合, 最大 3000

注1) 時刻 t におけるペレットスピード (U(t));

$$U(t) = \frac{2C_0}{r-1} \left[1 - \left(1 + \frac{(r+1)A_p}{2MC_0} P_0 t \right)^{- (r-1)/(r+1)} \right]$$

C₀ : 加速ガスの音速

r : 加速ガスの比熱比

M : 加速ガスの質量

P₀ : 加速ガスの初期圧力

A_p : 銃身の断面積

ができる。

- (1) 中規模装置へのペレット入射による粒子補給が、プラズマを破壊せず、安定かつ効率良くできることを実証する研究。従って、この課題ではプラズマ内でのペレットの溶発 (Ab-lation) 機構と粒子拡散について調べる。
- (2) プラズマの閉じ込め (エネルギー, 粒子) と加熱効率等に関する特性を改善するための研究。特に、高速中性粒子入射 (NBI), 高周波 (例えば, イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF)) 等の追加熱における閉じ込め性能劣化の防止と高密度化によるベータ値の向上に関する研究。
- (3) ペレットによる粒子補給とダイバータの組合せによる不純物及び灰 (炉心プラズマにおけるヘリウム) 排気能力の向上に関する研究。

上記は、いずれも並行して進める必要のある課題である。また、これらの実験からペレットによる粒子補給が大型装置に適用できるかを明らかにすることも重要な研究である。

本報告書では、2章において実機製作したペレット射出装置の構造及びペレット生成・射出シーケンスについて、3章で生成、加速の試験について記述する。また、4章で試験結果のまとめと考察、及び将来計画について述べる。

2. ペレット射出装置

本章では、1章に記述した研究目的を遂行するために製作した単発式ペレット射出装置について述べる。装置の基本構造は、オークリッジ国立研究所のMilorca等により開発されたニューマチック式である。以下にペレット射出装置の生成・加速の原理、構造、シーケンス、を述べる。また、射出されたペレットの基本量の測定法についても記述する。

2.1 生成・加速の原理

ORNL式装置⁷⁾のペレット生成原理は、冷媒 (ここでは液体ヘリウム) によって、表1に示す三重点の値以下の極低温に水素 (H₂) (重水素 (D₂)) ガスを冷却すると同時に圧力を三重点の値以上にすることにより、容易にガスを液化し、固化するというものである。また、ペレットの加速法は、圧縮気体を利用したニューマチック方式である。その原理は、気体が膨張するとき、その内部エネルギーが運動エネルギーに変換され、希薄波が形成されることに基づいている⁷⁾。理想気体を仮定すると、圧縮ガスが放射された後 t sec の時刻におけるペレットのスピードは容易に評価できる。^{注1)} ペレットは、加速に常温のヘリウムガス (He) ガスを用いた場合、最大 3000

注1) 時刻 t におけるペレットスピード (U(t)) ;

$$U(t) = \frac{2C_0}{r-1} \left[1 - \left(1 + \frac{(r+1)A_p}{2MC_0} P_0 t \right)^{- (r-1)/(r+1)} \right]$$

C₀ : 加速ガスの音速

r : 加速ガスの比熱比

M : 加速ガスの質量

P₀ : 加速ガスの初期圧力

A_p : 銃身の断面積

m/s, 水素の場合 6500m/s のスピードを得ることができる。しかし、現実には理想気体ではなく、摩擦抵抗等もあるために達成できるスピードは、理想的な場合の70~90%である。

次に、1図に基づいてペレットの生成、射出を説明する。ペレット生成部分（ペレット生成部と呼ぶ）を真空排気した容器内に保持し、外部からの輻射及び対流による熱を遮へいしている。ペレットキャリア先端部（図中の円盤部）及びこの近傍にある水素ガス供給管を液体ヘリウムで極低温（通常、5~10°K）に冷却する。そしてこの先端部の下側にある小孔及び水素用配管の一部に固体水素を作る。外部のモーターに直結したペレットキャリアを回転することにより、ペレットの大きさを小孔の大きさに規定することができる。更に、この回転により、図中上側の射出位置へペレットを移すことができる。加速用ガス（HeまたはH₂）をコントロールバルブ（射出弁）を介して瞬時に放出することにより、キャリアからペレットを射出し、銃身内で加速することができる。また、トカマク装置との間に差圧排気系を置き、加速用ガスがプラズマ内に極力流入しないようにしている。

2.2 ペレット射出装置の構造

製作したペレット射出装置は、ペレット生成系、差圧排気系、ガス供給系、制御系及び測定系から構成されている。その概略図を2図に示す。

(1) ペレット生成系

生成系の構造を3図に示す。これは、ペレットを製造し、射出する系である。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））、ペレットキャリア（SUS 304）、熱交換器（OFCu）、射出弁（電磁弁：スキナー社製V52 HDB10502）、熱シールド板、真空容器及びペレットキャリア回転用のモーターである。キャリア先端部にある円盤内の小孔の径は1mmφ、深さは1mmである。銃身の内径は1.12mmφ、長さは180mmである（ただし、改造後の小孔は1.65mmφ×1.65mmLであり、銃身の内径は1.69mmφである）。キャリアは、モーターにより180度を2000パルスで回転する（1パルス当たりの回転角≒0.09度）。液体ヘリウムは、約0.2kg/cm²に加圧されたジ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（2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、48Vのパルス電圧により駆動する（パルス幅は0~90msecまで可変できる）。熱シールド板は、内側の板を液体ヘリウムの排ガスで冷却し、外側の板を液体窒素で冷却する二重構造になっている。また、板の表面を銀メッキし、輻射による熱の侵入防止を効果的に行っている。伝導による熱侵入を防ぐためにペレット生成部を薄肉のSUS管と細いSUS線で保持し、更に、真空容器内を50ℓ/sの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（3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、3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。

(2) 差圧排気系

これは、低真空槽、高真空槽、ドリフト容器及びガイドチューブから構成されている。

低真空槽は、ペレット射出時に、銃身から多量の加速用ガスを排気できるように $500 \text{ m}^3/\text{h}$ (実効排気量は途中の配管のコンダクタンスのため、約 67 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 l/min) を備えている。また、この槽内には、射出されたペレットの速さを測定するためのフォトインタラプタ (発光ダイオードとフォトダイオードを組合せたもの) を設けてある (2節(5)で説明)。

高真空槽は、低真空槽との間にある内径 4 mm 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、約 100 l/s のターボ分子ポンプを備えている。また、この槽の入口部にフォトインタラプタを備えてある。

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。容積は、約 2.47 l (後に改造して約 4.98 l とした) である。約 100 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の間及び高真空槽とドリフト容器の間にある内径 4 mm (前者) と 14 mm (後者) 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、各管には、高速電磁バルブ (VACO社 SOV-050-05-SS; ここではゲート弁と呼ぶ) 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小さくしている。通常の射出試験 (加速用ガス圧力 $\approx 10 \text{ kg/cm}^2$) では、 50 ms のパルス (電圧 100 V) を加えてこのバルブを開閉している。

(3) ガス供給系

これは、燃料用 H_2 (D_2) ガス、ペレット加速用ガス (H_2 あるいは He)、液体ヘリウムジ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。

H_2 (D_2) ガスは、約 $2.5 \sim 2.3 \text{ kg/cm}^2$ の圧力で供給される。ガス中の水蒸気を除くために配管の一部は、液体窒素内 (トラップ) を通してある。また、ガス中の塵を取るために 15 及び $0.5 \mu\text{m}$ のフィルターを管の途中に設けてある。供給中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ートロン管 (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、サイクル運転するときのシーケンス制御に使用している。

加速用ガス供給系においてもガス中の水分、塵を除くために水素系と同様なトラップとフィルターを用いている。また、この系は、配管の途中に、約 1 l 容積のリザーバタンクを備え、最大 30 kg/cm^2 の圧力を加えられる構造になっている。

ジ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ジュワー内を約 0.02 kg/cm^2 に加圧するために用いられる。これにより、供給中にジュワー内の圧力が大気圧以下 (負圧) に下らず、液体ヘリウムを安全に供給することができる。

(4) 制御系

これは、射出装置の真空排気ポンプに関する運転とペレットの生成・射出制御を行うもので

あり、現場盤、制御室用制御盤から構成されている。

現場盤上では、真空排気ポンプの運転及びバルブの開閉操作を手動モードで行うことができ、ガス供給、冷媒供給、ペレットキャリアの回転、ペレットの射出操作を独立に手動で行うことができる。また、運転の手動と自動のモード切換えもこの盤上で行う。制御室用制御盤では、全自動モード（JFT-2Mプラズマの生成と同期してペレットの生成、射出を行う運転モード）と半自動モード（ペレットの生成開始と射出指令のみを手動で行い、他は全て自動化されている運転モード）の切換え操作及びペレット生成・射出シーケンスの制御を行う。また、冷却温度、水素ガス供給圧力、差圧排気系各槽内の真空度モニター、スピード測定及びドリフト容器内圧力上昇の測定が、この盤上においてできる。

(5) 測定系

これは、ペレットに関する諸量を測定するための系である。現在、スピード測定、ペレットの大きさ（補給粒子数）測定、飛行軌道の拡がり測定、ペレットの形状測定及び溶発（Ablation）量測定をすることができる。ペレット入射時のプラズマ物理量の測定は、従来使われているプラズマ診断機器により行うことができるので、これについての記述は省略する。また、ペレット溶発量の空間分布を測定できる多チャンネル H_{α}/D_{α} 測定系は、別の文献（16）にまとめられている。

スピード測定：この測定系は、2図及び4図で示すように長さ1m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TLN105）から構成されている。この測定法は、2個のフォトインタラプタ間をペレットが通過する時間を計測する方法である（飛行時間測定法）。2個のフォトインタラプタの出力波形は、現在オシロスコープのADDモードにより2つの出力を加算した信号波形として得ている。将来は、CAMAC電子回路系とパーソナルコンピューターにより処理する予定である。

ペレットの大きさ（補給粒子数）：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換算表を作って求められる。圧力測定には、バラトロン管（MKS社製；222 BHS-BB-10、測定圧力範囲；0.01~10 Torr）を用いている。この方法では、加速用ガスによる圧力上昇も含まれるために誤差を伴う。そこで、加速用ガスのみによるドリフト容器内の圧力上昇を最初に測定する。次に、ペレットをこの容器内に入射したときの圧力を測定して、これから前者の圧力を差し引くことによってペレットのみによる圧力上昇を得ることができる（ただし、ペレットが無い状態で加速用ガスを放出すると、ペレットがあるときに比べ、射出されるガス量が多いため、ペレットの大きさを若干過小評価することとなる）。将来、この測定法をマイクロ波共振器を使った測定法と併用し、¹⁷⁾測定精度を上げる予定である。また、射出弁（MV-17）が開いている時間を短くすることにより（約5 msec以下）、ドリフト容器への加速用ガスの流入が無視できるようにする予定である。

飛行軌道の拡がり測定：これは、射出したペレットの飛行軌道がずれる量（銃身の中心軸に一致する軌道からのずれ）を調べるための測定である。ドリフト容器の一端に取り付けた厚さ約15 μ mのアルミニウム箔を張ったフランジにペレットを当て、そのときできる穴の散乱程度から軌道の拡がりを求める。

ペレットの形状測定：これは、射出されたペレットの影絵 (Shadowgraph) を撮影して、ペレットの形状及び大きさを予測する (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) ための測定である。発光時間が非常に短い光源 (Xenon Corporation 社製；ランプ 787B, パルサー 437A) をペレットの射出時刻に同期して発光させ、ペレットの影絵をポラロイド写真器で写す方法を用いている。詳細は、文献 (18) に記述されている。

溶発 (Ablation) 量測定：これは、ペレットがプラズマ中で溶発する量及び溶発量の空間分布を知るための測定である。溶発時に生ずる水素原子が放射する H_{α} 、あるいは D_{α} 線強度の時間変化を、水平方向から干渉フィルターと組合せたフォトダイオード (浜松ホトニクス社製；S 1226-5BQ) を用いて測定する。更に、実測したペレットのスピードを使うと、 H_{α} (D_{α}) 線強度の時間変化からプラズマ断面に補給される粒子数のプラズマ小半径方向の分布を求めることができる。垂直方向から行う多チャンネルの H_{α} (D_{α}) 線強度の測定からも上記の分布を得ることができるが、詳細は文献 (16) に記述されているので省略する。 H_{α} (D_{α}) 線の放射強度 (時間及び空間分布) が、ペレットで供給される粒子数分布を良く示すことが、Chang と Thomsen によって計算されている。¹⁹⁾

(6) ペレット生成・射出シーケンス

ペレットの生成・射出は、全自動、半自動、手動のモードで行うことができるが、ここでは、全自動モードにおけるシーケンスを記述する。5 図に生成・射出シーケンスの流れを示す。全系準備完了後、ペレット生成部 (ペレットキャリア小孔内及び H_2 (D_2) 供給配管内) の真空排気が完了 (タイマーによって設定された時間だけ排気を行うこと) し、更に、その生成部の温度 (温度調節計 TR-3 によるモニター) が 20°K 以上になると、排気を停止する (MV-10 の弁を閉とする)。冷却モードに入るために液体ヘリウムを供給する (MV-26 弁を開とする)。TR-3 でモニターしている温度が約 5°K に達した時点で、冷却完了となる。この間約 54 sec である。次に、ペレット製造モードに入るために H_2 (D_2) ガスを供給する (MV-6 弁開)。前もって設定してある上限圧力 (ブルドン管 PIC-5 により設定、 $300 \sim 430$ Torr) に達した時、ガス供給を停止して、 H_2 (D_2) ガスの固化領域内の圧力が数 10 Torr 以下に下るまで待機する。この圧力以下になると、固体水素ペレットが生成されたことになる (ガスが液体から固体になるにつれて、固化領域内のガス圧力は下るから)。この後のシーケンスは、JFT-2M の放電に関する指令信号に従って進む。まず、JFT-2M の放電開始 20 sec 前を示すパルス信号によって、ペレットキャリアが回転を始める。ペレット射出位置まで移動するのに、約 10 sec 必要とする。次に、JFT-2M 放電開始のパルス信号を受けると、制御室用制御盤にある遅延パルス発生器で決められるペレットの射出時刻に射出弁 (MV-17) を開いて、加圧されたガスによりペレットが射出する。この弁が開く $40 \sim 30$ msec 前に、ゲート弁 (MV-33, 34) が開いてペレットがガイドチューブ内を通過できるようになる。このゲート弁が開いている時間は、約 40 msec である (ただし、駆動パルスの幅が 50 msec の場合)。射出弁を開くためのパルス信号が出てからペレットが最初のフォトインタラプタ (銃身先端部に近い位置にあるフォトインタラプタ、2 図の XR-1) に到達するまでに、約 14 msec の時間が必要である (ただし、 10 kg/cm^2 で加速した場合である。加速用ガス圧力を上げ

るとこの時間は長くなる)。ペレット射出後、次のサイクルに移るために、ペレットキャリア一回転終了後、約12sec（この時間は、外部タイマーTR-1により0～900secの間の任意の値に設定できる）後に冷却を停止し、生成部の昇温及びこの内部の真空排気を開始する（約3分排気する）。以上で生成、射出の1サイクルが完了する。この周期は約6.5分である。ただし、最近、射出後に行う排気時間を1secに短縮（ほとんど排気しない）することにより、この周期を約3.5分にすることができた。また、これによりペレットの射出スピードの再現性が、非常に改善された（80～90%以上の再現性）。以後、このモードにより実験を行うこととした。

3. 生成・射出試験

本章では、ペレット射出装置による H_2 (D_2) ペレットの生成条件とペレットに関する諸量（例えば、射出スピード、ペレット大きさ（粒子数、幾何学的大きさ）、射出後のペレット飛行軌道の拡り（散乱角）等）の実測結果及びその再現性について記述する。

3.1 生成条件

H_2 (D_2) ガスは、ペレット生成部が充分極低温（5～10°K）であれば、比較的容易に固化する。ここでは、生成したペレットが大きく、且つ、再現性良く生成、射出できた条件について記述する。

H_2 と D_2 ガスでは、1表で示すように三重点（気体、液体、固体が共存するときの温度、圧力）が異なるから、それぞれについてペレット生成条件を求めることが必要である。生成条件が主に液体ヘリウムの流量（生成部の温度）、 H_2 (D_2) ガスの供給量及び H_2 (D_2) ガスの供給を停止するときの圧力（上限圧力）によって決まることは、両方のペレットに共通している。 H_2 ペレットの場合、液体ヘリウム流量を約100 l/min（このとき熱交換器の温度は、約5.6°Kである）にし、 H_2 ガス流量を約12～13 l/min、上限圧力を400～430 Torr（ただし、1mm ϕ × 1mmL ペレットの場合、約300 Torr）にした条件において、最も良いペレットを生成及び射出することができた。一方、 D_2 ペレットの場合、冷媒流量を48～56 l/min（熱交換器の温度は約9.2°K）にし、 D_2 ガスの流量、上限圧力は水素の場合と同じにすると、最も再現性の良いペレットを生成、射出することができた。いずれの場合も、生成・射出サイクルは、前述したように生成部内の排気時間を約1secにすると、約3.5分である。以上の条件を得るにあたり、 H_2 (D_2) ガスの供給量を0.5 l/min～2 l/min、上限圧力を170～700 Torrまで変えて試験を行った。冷媒流量については、110～30 l/minの範囲で変えた。また、他の条件として、ペレットの生成が完了してからペレットキャリアを回転するまでの時間（待機時間：0～4分）及び H_2 (D_2) ガス供給開始温度（熱電対の出力値で-5.20mV～-4.95mV）等を変化させてみた。後者の2つの条件は、いずれも生成条件を大きく左右するものではない。銃身の中心とペレットキャリア内小孔の中心とのずれ量についても、小孔中心をこれが回転する円周に沿って約40 μ m（2パルスに相当する）ずつ \pm 10 mmの範囲で移動し、ペレットを射出してその大きさとスピ

るとこの時間は長くなる)。ペレット射出後、次のサイクルに移るために、ペレットキャリア一回転終了後、約12sec（この時間は、外部タイマーTR-1により0～900secの間の任意の値に設定できる）後に冷却を停止し、生成部の昇温及びこの内部の真空排気を開始する（約3分排気する）。以上で生成、射出の1サイクルが完了する。この周期は約6.5分である。ただし、最近、射出後に行う排気時間を1secに短縮（ほとんど排気しない）することにより、この周期を約3.5分にすることができた。また、これによりペレットの射出スピードの再現性が、非常に改善された（80～90%以上の再現性）。以後、このモードにより実験を行うこととした。

3. 生成・射出試験

本章では、ペレット射出装置による H_2 (D_2) ペレットの生成条件とペレットに関する諸量（例えば、射出スピード、ペレット大きさ（粒子数、幾何学的大きさ）、射出後のペレット飛行軌道の拡がり（散乱角）等）の実測結果及びその再現性について記述する。

3.1 生成条件

H_2 (D_2) ガスは、ペレット生成部が充分極低温（5～10°K）であれば、比較的容易に固化する。ここでは、生成したペレットが大きく、且つ、再現性良く生成、射出できた条件について記述する。

H_2 と D_2 ガスでは、1表で示すように三重点（気体、液体、固体が共存するときの温度、圧力）が異なるから、それぞれについてペレット生成条件を求めることが必要である。生成条件が主に液体ヘリウムの流量（生成部の温度）、 H_2 (D_2) ガスの供給量及び H_2 (D_2) ガスの供給を停止するときの圧力（上限圧力）によって決まることは、両方のペレットに共通している。 H_2 ペレットの場合、液体ヘリウム流量を約100 l/min（このとき熱交換器の温度は、約5.6°Kである）にし、 H_2 ガス流量を約12～13 l/min、上限圧力を400～430 Torr（ただし、1mm ϕ × 1mmL ペレットの場合、約300 Torr）にした条件において、最も良いペレットを生成及び射出することができた。一方、 D_2 ペレットの場合、冷媒流量を48～56 l/min（熱交換器の温度は約9.2°K）にし、 D_2 ガスの流量、上限圧力は水素の場合と同じにすると、最も再現性の良いペレットを生成、射出することができた。いずれの場合も、生成・射出サイクルは、前述したように生成部内の排気時間を約1secにすると、約3.5分である。以上の条件を得るにあたり、 H_2 (D_2) ガスの供給量を0.5 l/min～2 l/min、上限圧力を170～700 Torr まで変えて試験を行った。冷媒流量については、110～30 l/minの範囲で変えた。また、他の条件として、ペレットの生成が完了してからペレットキャリアを回転するまでの時間（待機時間：0～4分）及び H_2 (D_2) ガス供給開始温度（熱電対の出力値で-5.20mV～-4.95mV）等を変化させてみた。後者の2つの条件は、いずれも生成条件を大きく左右するものではない。銃身の中心とペレットキャリア内小孔の中心とのずれ量についても、小孔中心をこれが回転する円周に沿って約40 μ m（2パルスに相当する）ずつ \pm 10 mmの範囲で移動し、ペレットを射出してその大きさとスピ

ードを測定した。その結果、両者の中心が一致していた常温時、あるいは液体窒素による冷却時の位置から約200 μm (10パルスに相当) 進んだ位置におけるペレットの射出が、最適であることを確認した。

3.2 ペレット射出スピード

4図にフォトインタラプタを使用したスピード計による代表的な出力波形を示す。同図(a)は、ペレットが射出時、あるいは飛行途中で割れずに1個のペレットとして射出した場合の信号であり、立上りの速い2個のパルス信号を示している。このパルス間の時間は、ペレットが1 mの距離を飛行するに要した時間である。従って、これを正確に測ることによりスピードを求めることができる。時間の読取り誤差(スピードの誤差)は、約±4%である。割れたペレットの場合の出力波形を(b)図に示す。スピード計の出力波形をモニターすることによって、ペレットが正常に射出しているかをある程度判定することができる。例えば、(b)図のような場合以外に、ペレット生成部内に外部から空気の漏洩があると、N₂、O₂等が生成部の内壁で固化するため、熱交換器との熱伝導度が低下して、水素が充分固化できず、液状で射出されることがある。このときの出力波形は、半値幅が広がったパルス波形を示し、2番目のフォトインタラプタの出力波形は現れない。これは、ペレットが液状であるため、銃身から出た瞬間に飛び散ってほとんど2番目のフォトインタラプタまで到達できないためである。

6図(a), (b)に1mmφ×1mmLペレットについて、加速用ヘリウムガスの圧力を変えて射出試験を行った結果を示す。図中実線は、Miloraが与えた理想気体モデルに基づく式^{注2)}に従って計算した加速ガス圧力(P₀)に対するペレットのスピード(U_m)である。パラメータとして加速用ガスの温度(T)を与えた。同図(a)は、H₂ペレットについての計算値と実測値である。P₀=10 kg/cm²では、約72回の射出試験の結果を記入してある。また、12, 14, 16, 18, 20 kg/cm²に対しては2~3回の結果を示した。P₀=10 kg/cm²の場合、ペレットスピードは、660~770 m/sの間にあり、この値の幅は、平均値に対して約±8%である。このことから、スピー

注2) ペレットスピード(U_m)を得るために必要な加速用ガス圧力(P₀)は、次式で与えられる。

$$P_0 = \frac{2MC_0}{(r+1)A_p} \frac{U_{max}}{L} \left[\frac{r-1}{2} + \left(1 - \frac{U_m}{U_{max}} \right)^{- (r+1) / (r-1)} - \frac{(r+1)}{2} \left(1 - \frac{U_m}{U_{max}} \right)^{- 2 / (r-1)} \right] \quad (\text{dyne/cm}^2)$$

C₀ : 加速用ガスの音速 = $\sqrt{rRT/m}$

r : 加速用ガスの比熱比

R : 気体定数 = $8.314 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

T : 加速用ガスの温度

m : 加速用ガスの分子量

M : ペレット質量

A_p : 銃身の断面積

L : 銃身の長さ

U_{max} = $2C_0 / (r-1)$

ドの再現性は非常に良いと言える。P₀を変えてもスピードの増加は余り見られない。実験結果は、加速用ガス温度を100~80°Kとして計算した理想曲線と見かけ上良く一致しているが、これは、加速に使われたHeガスの温度がこの値であることを示すものではない（加速用ガス供給配管は、一部液体窒素により冷却されているが）。T = 288.16°Kの理想曲線からの実験値のずれ量は、試験した各P₀について、28~23%（実測スピードは、理想曲線の72~77%に相当する）である。6図(b)は、D₂ペレットについての実測結果と計算結果（実線）である。P₀=10, 15 kg/cm²の2つの場合について試験を行った。理想曲線が示すように加速用ガスの温度及び圧力が同じ場合、D₂ペレットの方がH₂ペレットと比べて、スピードは約22%遅くなる。これは、ペレットの質量の差によるものである。D₂ペレットの場合も、スピードは理想曲線（T = 288.16°K）の74~81%である。また、T = 80, 100°Kの曲線上に実測値があることもH₂ペレットの場合と同じである。スピードの再現性についてもH₂ペレットと同程度である。

次に、1.65 mmφ×1.65 mm Lペレットの射出試験結果を6図(c)に示す。図中の実線は、H₂ペレットをHeガス（温度T = 288.16°K）で加速したときの計算結果である。●印は、P₀=10, 12, 14 kg/cm²の各場合について実測したペレットスピードである（P₀=10 kg/cm²の結果は、200回以上の射出データを示した）。14 kg/cm²で加速した場合、最大約900 m/sのスピードを実現できた。大きいペレットの場合、理想曲線からのずれは、非常に小さく、スピードは計算値の80~95%内にある（ただし、10 kg/cm²では、試験初期におけるスピードの遅い結果も示してある）。×印は、D₂ペレットを10 kg/cm²圧力のH₂ガスで加速したときのスピードの実測結果である。水素で加速すると、ペレットのスピードは速くなるため、この一連の試験では、H₂ペレットをHeガスで加速した結果とほとんど同じである。大きいペレットのスピードは、試験初期の結果を除いて、ほとんど714~833 m/sの間にあり、再現性は、80~90%以上であることが明らかになった。なお、スピードにおける再現性の向上は、ペレット生成部内の排気時間を極めて短かく（約1 sec）したことによるものである。

3.3 ペレットの大きさ（補給粒子数）

プラズマへの入射直前におけるペレットの大きさ（ここでは、プラズマに供給する粒子数を意味する）は、バトロ管を用いてドリフト容器内の圧力上昇値から求める。ペレットが昇華した後のガス温度が瞬時に300°Kになると仮定して求めた粒子数（N_{H,D}）対圧力上昇値（ΔP_d）の換算値（ただし、粒子数は、原子の数で示した^{注3)}）を7図に示す。ただし、1 mmφ×1 mm Lペレットについての計算結果であり、ドリフト容器の容積（V_d）は約2.47 ℓである（ドリフト容器改造後の容積は、約4.98 ℓである）。また、図中に、主半径R = 131 cm, 小半径a = 30 cmとしたプラズマへペレットを入射したときの電子密度の上昇値を、体積平均値（<Δn_e>）

注3) 7図に示す原子の数（N_{H,D}）とドリフト容器内圧力上昇値（ΔP_d）との関係式は、

$$N_{H,D} = 1.9307 \times 10^{22} \frac{\Delta P_d (\text{Torr}) \cdot V_d (\ell)}{T (^\circ\text{K})}$$

である。V_dはドリフト容器の容積である。

で示した(点線)。

1mm ϕ ×1mmLの小さいペレットについての実測結果は、次の通りである。H₂ペレットの場合、 ΔP_d はほとんど0.119～0.131 Torrの範囲にある(加速用ガス圧力 $P_0=10\text{ kg/cm}^2$)。この値から予測される水素原子の数は $1.9\times 10^{19}\sim 2.1\times 10^{19}$ 個であり、 $\langle \Delta n_e \rangle$ は $(8.2\sim 9)\times 10^{12}\text{ cm}^{-3}$ である。これは、1mm ϕ ×1mmLペレットが供給する原子数(約 4.2×10^{19} 個)の45～50%に相当する。一方、D₂ペレットの場合、 ΔP_d は0.14～0.168 Torrである。これは、粒子数にして $(2.2\sim 2.7)\times 10^{19}$ 個に相当し、1mm ϕ ×1mmLペレットの46～56%に当たる。いずれの場合もペレットキャリアの小孔から決まる幾何学的大きさの約半分である。

次に、大きいペレット(1.65mm ϕ ×1.65mmL)の場合には、D₂ペレットを714～833m/sで射出したときの結果を示す。この大きさのペレットが生成できるとすれば、ドリフト容器(ただし、 $V_d\approx 4.98\text{ l}$)へ入射したときの圧力上昇値 ΔP_d は、前述した計算式から約0.66 Torrである(原子数に換算すると約 2.12×10^{20} 個である)。一方、実測した ΔP_d は、0.46～0.59 Torrであり、粒子数にして $(1.5\sim 1.9)\times 10^{20}$ 個であった。これは、1.65mm ϕ ×1.65mmLのペレットに含まれる原子の数の71～90%に相当する。このときの大きさの不確定さは、約±12%である。これは非常に小さいと言える。プラズマの体積を約4.5 m³(D-形プラズマの典型的な大きさ)とすれば、このペレットによる体積平均で示した電子密度の上昇($\langle \Delta n_e \rangle$)は、 $(3.15\sim 4.2)\times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ である。

以上の試験においてペレットの大きさが減少する原因として、下記のことが考えられる。

- ① 銃身の中心とペレットキャリア小孔の中心の不一致(軸ずれ)。
- ② 融解、昇華によるペレットの減少。
- ③ 生成条件が最適化されていない。
- ④ その他。

これらの原因については、4章において考察する。

3.4 ペレットの飛行軌道の拡がり

プラズマの直前で、射出されたペレットの飛行軌道が、銃身の中心軸に一致する軌道からずれる量を調べた。2図に示すドリフト容器のニューマチックゲートバルブ側にアルミニウム箔(厚さ:約15 μm)を付け、これにペレットを打ち当てることで軌道の拡り量を測定した。約16回の射出により得た結果を8図に示す。銃身の先端から約171cmの位置にあるアルミニウム箔上での拡りは、最大約14mm ϕ である。これは、プラズマ中心を通る垂直面上(アルミニウム箔面から約150.6cm離れている)に換算すると約26mm ϕ になる。立体角で示すとこれは約 $5.3\times 10^{-5}\text{ sr}$ に相当する。この結果は、ペレットが溶発(Ablation)量(水平方向からの測定)と多チャンネルH₂(D₂)光の測定領域から外れないことを示している。従って、この程度の拡がり(は上記の測定に全く支障を来たさないことが分った)。

4. 考察と結論

現在の射出装置の問題点は、ペレットの大きさ（供給できる粒子数）の再現性を、長期間維持できないことである。この原因を明らかにすることは難しいが、3章で記述した4つの原因について考察する。

ペレット生成部を極低温にすると、構造材の収縮により円盤が両側から締めつけられ、接触抵抗が大きくなる。その結果、この抵抗に打ち勝ってペレットキャリアを回転しようとするとき、振れがキャリアの軸（キャリアを通して外部から伝導による熱侵入を少なくするため、薄いステンレスパイプを軸に使用している）に生じ、キャリアの円盤が回転した量と生成槽外で検出しているキャリア軸の回転量の間に差が現われる。回転式構造の装置では、このずれはある程度避けられない。また、試験結果が示すように大きいペレットと小さいペレットで大きさの減少量が異なる理由は、9図から予測できる。この図は、銃身の中心軸とペレットキャリア内の小孔の中心軸のずれ量（ Δl ）に対する射出ペレットの断面積（ただし、射出ペレットの断面積 ΔS と小孔の断面積 S の比 $\Delta S/S$ で示した）を示したものである。軸ずれ量が同じと仮定すれば、小孔径(r)の大きい場合が断面積の減少量が少ない。 Δl を約 $415\ \mu\text{m}$ とすれば、 $2r=1\text{mm}$ では約50%減少するが、 $2r=1.65\text{mm}$ では約30%の減少である。試験では、約 $20\ \mu\text{m}$ ずつペレットキャリアを回転し、最大約 $\pm 10\text{mm}$ まで軸をずらしてペレットの射出を行った。ペレットが再現性良く射出できたのは、常温あるいは液体窒素で冷却した温度で軸合せを行った位置から約 $200\ \mu\text{m}$ 進んだ位置に軸を合せたときであった。これは計算結果（9図）が示す $\Delta l = 415\ \mu\text{m}$ の約 $1/2$ である。このことから軸ずれのみによるペレットの減少を考えるとすれば、ペレットキャリア円盤の円周に沿う方向のみでなく、円盤の半径方向にも軸ずれがあると考えねばならない。しかし、現状では、この確認及び補正はできない。

次に、融解、昇華によるペレット大きさの減少は、その熱量を評価することから予測できる。水素の融解熱は、約 $58.4\ \text{J/g}$ である。ペレットが約50%（ $1\text{mm}\phi \times 1\text{mmL}$ ペレットでは、 $\sim 70.13\ \mu\text{g}$ に相当する）だけこの熱によって溶けると仮定すれば、このとき必要なエネルギーは、約 $2.05 \times 10^{-3}\ \text{J}$ である。ペレットが銃身を通過している間（計算では、約 $275\ \mu\text{sec}$ 、ただし、スピードを 655m/s としたとき）にこの融解が起こるとすれば、外部から約 $7.5\ \text{W}$ の熱入力が必要となる。一方、昇華の場合、その熱は、約 $428.15\ \text{J/g}$ （ただし、ペレット温度を 6°K と仮定）である。昇華は、ペレットが昇華の蒸気圧（約 $1.35 \times 10^{-3}\ \text{Torr}$ ）よりも低い圧力の雰囲気中にさらされたときに起こる。従って、円盤が回転し、ペレットが射出位置に置かれ、射出されるまでの間に最も昇華が行われると考えられる。射出されるまで1分間待つとすれば、ペレットが50%減少するために要する熱量は、約 $500\ \mu\text{W}$ 、1sec待つとすれば、約 $3\ \text{mW}$ である。ペレットキャリア、銃身、主ハウジング支持ワイヤー、ガス供給用配管からの伝導による熱の流入量は、最大約 $1.13\ \text{W}$ （ただし、温度勾配を 300°K から 4.2°K と仮定したときの計算値）である。以上の数値を比較して見ると、ペレットが融解することは考えられない。昇華による減少は充分ありうるが、 $1.13\ \text{W}$ もの熱侵入があれば、ペレットは、射出前に完全に昇華してしまうこと

になる。実際の試験では、待機時間が1分以内であればペレットの大きさに顕著な差は見られなかった。

3.3節に記述した③の原因については、 H_2 (D_2) ガスの流量、上限圧力、ガス供給開始温度、液体ヘリウムの流量及び待機時間を変えて生成、射出試験を繰り返したが、3章で述べた条件が、現在使用している生成シーケンスにおいて、最適に近いものであることが判明した。以上、ペレットの大きさの減少を起す原因について考察したが、この他の原因による可能性も否定できないことから、今後も生成、射出試験が必要である。

次に、射出装置の改良について記述する。射出弁 (MV-17) 駆動用の電圧パルス幅を20msecとしたとき、射出弁が正常に動作 (ペレットを射出) できる加速用ガス圧力は、0 から20 kg/cm^2 までであり、これを越えると射出弁は開かなくなる。ただし、パルス幅を広く (50msec) すれば、30 kg/cm^2 までの圧力においても弁は動作するが、プラズマへの加速用ガスの流入量が増大するため好ましくない。従って、高い電圧 (例えば100~400V) を狭いパルス幅 (5msec以下) で印加して、弁が開く立上りを速くすることにより、高いガス圧力での射出を可能にし、ペレットの高速化をはかることができる。また、これにより、加速用ガスのプラズマへの流入量を少なくすることもできる。ペレット測定系については、プラズマに入射する直前でペレットの大きさを測定するために、ペレットの影絵 (Shadowgraph) の撮影を開始し、既に、その一部の結果が得られている¹⁸⁾。また、マイクロ波用共振器を用いたペレットの大きさの測定法を、現在準備中である¹⁷⁾。この方法によってペレットの大きさを毎回精度良く測定することができる。従って、この測定から求めるペレットの大きさと、ペレット入射時の電子密度の増加量とからペレットによる粒子の捕捉効率を評価することができる。

JFT-2Mのジュール加熱プラズマへペレット入射したときの一例を10図に示す。これは、平均電子密度 $\bar{n}_e \approx 2.4 \times 10^{13} cm^{-3}$ 、中心の電子温度 $T_{e0} \approx 800 \sim 900 eV$ のプラズマへ、1mm ϕ \times 1mmLの H_2 ペレットを入射したときの溶発 (Ablation) 量分布である (水素原子から放射されるバルマー- H_α 線強度をプラズマ小半径方向の分布として示した)。プラズマの端から約24 cm (プラズマ中心から約6 cm) の所で、強度が最大値を示す。即ち、この位置に最も多く粒子が補給されたことを示している。また、ジュール加熱の場合、ペレットは、プラズマの中心まで到達できる (ただし、スピードは約769m/s) ことが分る。図の結果は、769m/sの場合について示したものであるが、スピードが690~769m/sの間であれば、ほとんど同じ溶発量分布を示す。また、11図に H_α 線強度が最大になる位置 (プラズマの端からの距離) を平均電子密度の関数として示した。 \bar{n}_e が約 $2 \times 10^{13} cm^{-3}$ を越えると、最大の位置は、プラズマの外側へ移る。 \bar{n}_e がこの値より低くなると、前と同様に最大点は外へ移る傾向を示す。また、ペレットの到達距離 (Penetration Depth) についても、 \bar{n}_e に対して同じ結果が得られている。ジュール加熱の場合、ペレットの溶発を支配しているプラズマ粒子は熱電子であることが文献(7)で明らかにされている。前者の結果は、この粒子が増えて周辺領域でペレットが多く溶けることによるものである。一方、低密度になるとトカマク放電ではエネルギーの高いRunaway ElectronあるいはSuperthermal Electronが現われ、これらの粒子による溶発が促進されるためにペレットの到達距離が短くなると考えられる。実測データの拡がり、ペレットスピードの差よりもペレットの大きさの再現性によるものと考えられる。追加熱プラズマへのペレット入射実験の結

果は、文献(20)に記述されている。

空気銃方式（ニューマチック方式）による固体水素同位体ペレット射出装置を製作し（ペレットの大きさは、 $1\text{mm}\phi\times 1\text{mmL}$ 及び $1.65\text{mm}\phi\times 1.65\text{mmL}$ である）、その性能試験を行った。その結果、 H_2 及び D_2 ペレットを再現性良く生成射出できる条件を見出した。両者における生成条件の主な違いは、 D_2 ペレットの生成では、 H_2 ペレットの場合より生成部の温度（温度を実測した場所は、熱交換器である）が高いことである（ D_2 ペレット；約 9.2°K 、 H_2 ペレット；約 5.6°K ）。他の条件は、両者共ほとんど同じである。 H_2 ペレットでは加速用 He ガス圧力が約 $14\text{kg}/\text{cm}^2$ のとき、最大約 $900\text{m}/\text{s}$ のスピードを達成できた（ただし、 $1.65\text{mm}\phi\times 1.65\text{mmL}$ ペレット）。また、再現性の良いスピードは $714\sim 833\text{m}/\text{s}$ である（ D_2 ペレットを約 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ の H_2 ガスで加速した場合と H_2 ペレットを同じ圧力の He ガスで加速した場合）。射出スピードの再現性は $80\sim 90\%$ である。また、実測スピードは理想気体モデルに基づく計算値の $80\sim 95\%$ である。ペレットによって補給できる粒子の数は、設計値の $71\sim 90\%$ （ $1.65\text{mm}\phi\times 1.65\text{mmL}$ ペレット）及び $46\sim 56\%$ （ $1\text{mm}\phi\times 1\text{mmL}$ ペレット）である。

以上の結果は、製作したペレット入射装置が1章で記述した実験に充分使用できることを示すものである。

最後に将来計画について述べる。現在1ペレット射出装置を使ってICRF、NBI及びこれらの複合加熱したJFT-2Mプラズマにおいて、1章で記述した研究を進めている。しかし、数 100msec の放電時間及び $200\sim 300\text{msec}$ の追加熱時間に渡ってペレット補給を行い、プラズマ特性の改善を試みるには、複数個のペレットを射出できる装置が必要である。JFT-2Mでは、次の段階として国産技術で製作できる4ペレット射出装置を製作し、プラズマへの入射実験を進める。その後、本格的な多ペレット射出装置の製作に入り、長時間放電におけるペレットでの粒子補給とプラズマの高性能化の両面から、この補給方式の有効性を実証する。

謝 辞

ペレット入射による粒子補給の研究及び射出装置の製作にあたり、当初から御指導、御助言を賜りました船橋昭昌プラズマ実験研究室長、田中裕二核融合計画室長（前プラズマ実験研究室長）及び鈴木喜八郎装置技術管理室長に心から感謝申し上げます。また、装置の運転に御尽力頂きました装置技術管理室の松崎誼係長、谷孝志係長及び同室の諸氏に御礼申し上げます。終始御指導、御鞭撻を賜りました田中正俊核融合研究部長、小幡行雄情報技術部長（前核融合研究部長）及び森理事に深く感謝の意を表します。

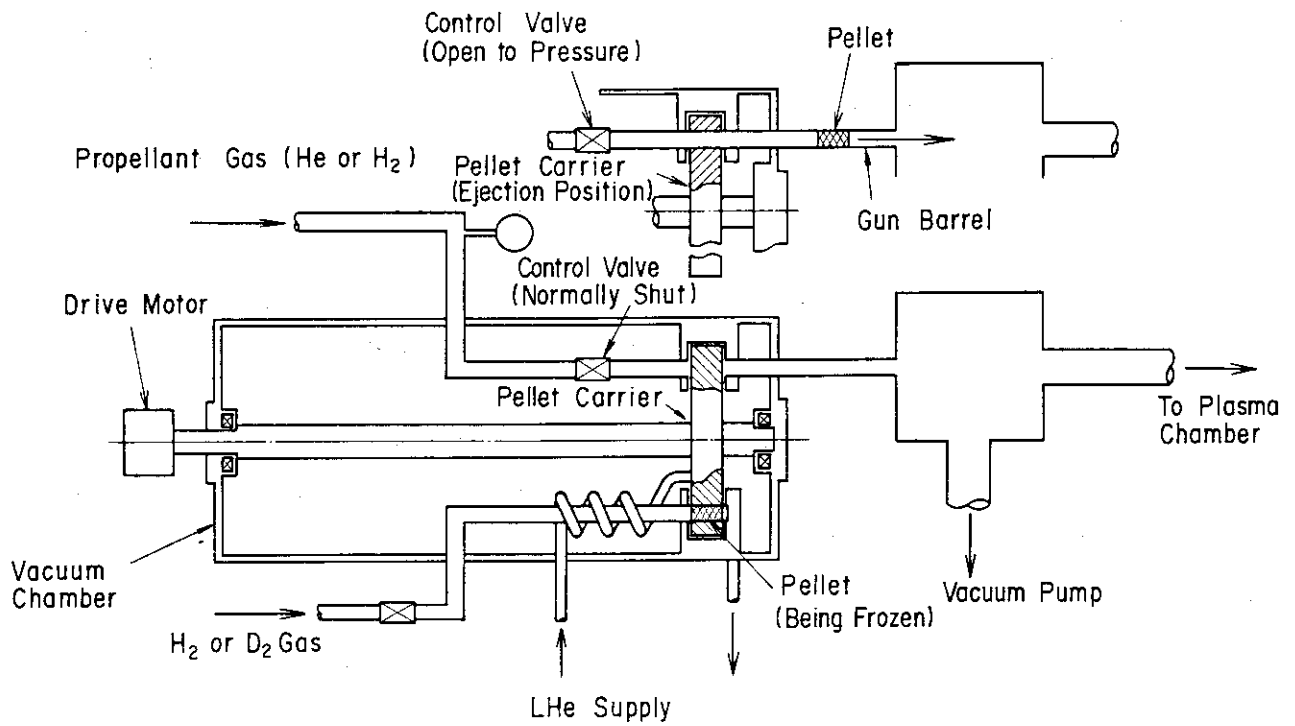
参 考 文 献

- [1] M.Greenwald, D.Gwinn, J.Parker, R.Parker, S.Wolfe, et al.; "Energy Confinement of High Density Pellet-Fueled Plasmas in Alcator C", Massachusetts Institute of Technology Rep. PFC/JA-84-3 (1984), M.Greenwald, D.Gwinn, S.Milora, J.Parker, R.Parker, et al. ; "Confinement Results from Pellet Fueled Discharges in Alcator C", Massachusetts Institute of Technology Rep. PFD/CP-84-12 (1984), M.Greenwald, D.Gwinn, S.Milora, J.Parker, R.Parker, et al.; "Pellet Fueling Experiments in Alcator C", Massachusetts Institute of Technology Rep. PFC/CP-84-13 (1984).
- [2] M.Greenwald, J.Parker, M.Besen, C.L.Fiore, M.Foord, et al.; in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 11th Europ. Conf. Aachen, 1983), Vol.7D, Part I, European Physical Society (1983) 7.
- [3] H.Takahashi, K.Bol, D.Buchenauer, P.Couture, H.Fishman, et al.; "PBX Experimental Results in 1984", Princeton Plasma Physics Lab. Rep. PPPL-2227 (1985).
- [4] C.E.Singer, D.B.Heifetz, D.E.Post; J Vac. Sci. Technol. 1 (1983)964, M.Murakami, V.Arunasalam, J.D.Bell, M.G.Bell M.Bitter, et al.; "Confinement Studies in TFTR", Princeton Plasma Physics Lab. Rep. PPPL-2224 (1985).
- [5] C.Andelfinger, K.Büchl, R.S.Lang, H.B.Schilling, M.Ulrich; "Pellet Injectors for JET", Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Rep. IPP1/193 (1981).
- [6] JT-60 Team; "Initial Experiments in JT-60"; Plasma Physics and Controlled Fusion, in press.
- [7] S.L.Milora; J. Fusion Energy 1 (1981) 15, C.T.Chang, L.W.Jørgensen, P.Nielsen, L.L.Lengyel; Nucl. Fusion 20 (1980)859, S.L.Milora, C.A.Foster, C.E.Thomas, C.E.Bush, J.B.Wilgen, et al.; Nucl. Fusion 20 (1980) 1491.
- [8] J.Hosea, R.Bell, M.Bitter, A.Cavallo, S.Cohen, et al.; in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 12th Europ. Conf. Budapest, 1985), Vol.9F, Part II, European Physical Society (1985) 120.
- [9] S.L.Milora, G.L.Schmidt, W.A.Houlberg, V.Arunasalam, S.E.Attenberger, et al.; Nucl. Fusion 22 (1982) 1263, R.J.Fonck; "Particle Fueling and Impurity Control in PDX", Princeton Plasma Physics Lab. Rep. PPPL-2175 (1984).

- [10] S.Sengoku, M.Abe, K.Hoshino, K.Itoh, A.Kameari, et al.; in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1984 (Proc. 10th Int. Conf. London, 1984), Vol.1, IAEA, Vienna (1985) 405.
- [11] G.Vlases, K.Büchl, D.Campbell; in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 11th Europ. Conf. Aachen, 1983), Vol.7D, Part I, European Physical Society (1983) 127.
- [12] Equipe TFR; in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1984 (Proc. 10th Int. Conf. London, 1984), Vol.1 IAEA, Vienna (1985) 103.
- [13] C.E.Singer, D.B.Heifetz, D.E.Post; J. Vac. Sci. Technol. A, 1 (1983) 964, G.L.Schmidt, S.L.Milora, M.G.Bell, M.Bitter, C.E.Bush et al.; in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 12th Europ. Conf. Budapest, 1985), Vol. 9F, Part II, European Physical Society (1985) 674.
- [14] C.Andelfinger, K.Büchl, D.Jacobi, W.Sandmann, J.Schiedeck, et al.; "Pneumatic Pellet Injector for JET", Max-Planck-Institut für Plasma-physik, Garching, Rep. IPP1/219 (1983).
- [15] 三菱原子力工業株式会社; 57年度委託研究報告書 "燃料補給用高速ペレットインジェクター部の開発", 昭和58年3月.
- [16] 三浦幸俊, 河西 敏, 玉井広史, 長谷川浩一; "フォトダイオードを用いたH_α光のポロイダル分布測定装置と校正", Japan Atomic Energy Research Institute Rep. JAERI-M 85-192 (1985).
- [17] P.B.Jensen, V.Andersen; J Phys. D : Appl. Phys. 15 (1982) 785, 仙石盛夫, 河西 敏, 長谷川浩一, 三浦幸俊; JAERI-Mに投稿予定.
- [18] 長谷川浩一, 三浦幸俊, 河西 敏, 石堀郁夫.; JAERI-Mに投稿予定.
- [19] C.T.Chang, K.Thomsen; Nucl. Fusion 24 (1984) 697.
- [20] S.Kasai, Y.Miura, S.Sengoku, K.Hasegawa; "JFT-2M Pellet Injection Experimental Results", Int. Pellet Fueling Workshop, San Diego (1985).

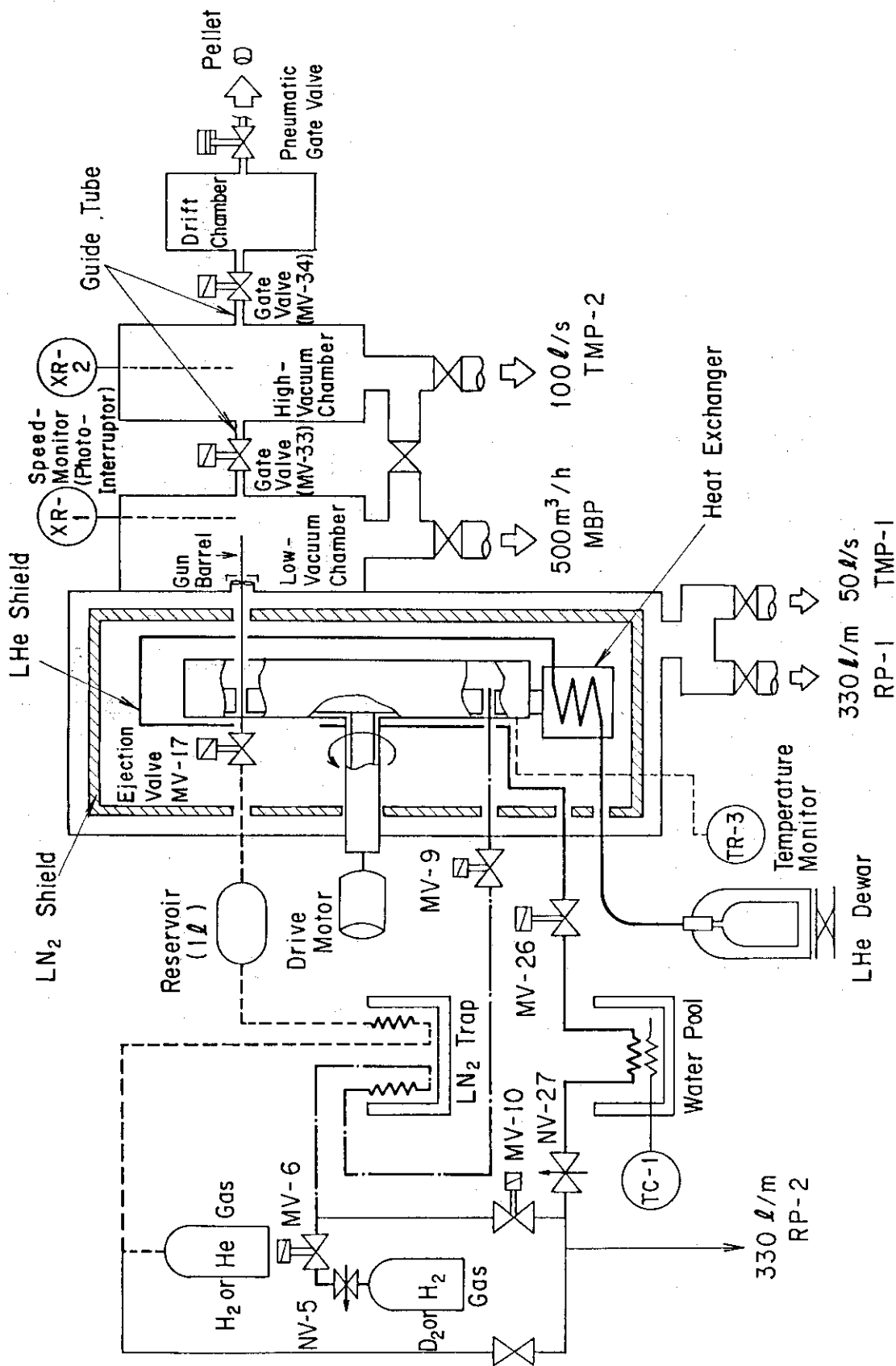
表1 固体水素同位体 (H₂, D₂) ペレットの性質

	H ₂	D ₂
(1) Mass Density (g/cm ³) (Solid at T=4.2°K)	8.93 x 10 ⁻²	2.04 x 10 ⁻²
(2) Triple Point T (°K)	13.8	18.7
P (Torr)	53	169
(3) Sublimation Energy (cal/g) (at 4.2°K)	97.22	71.06

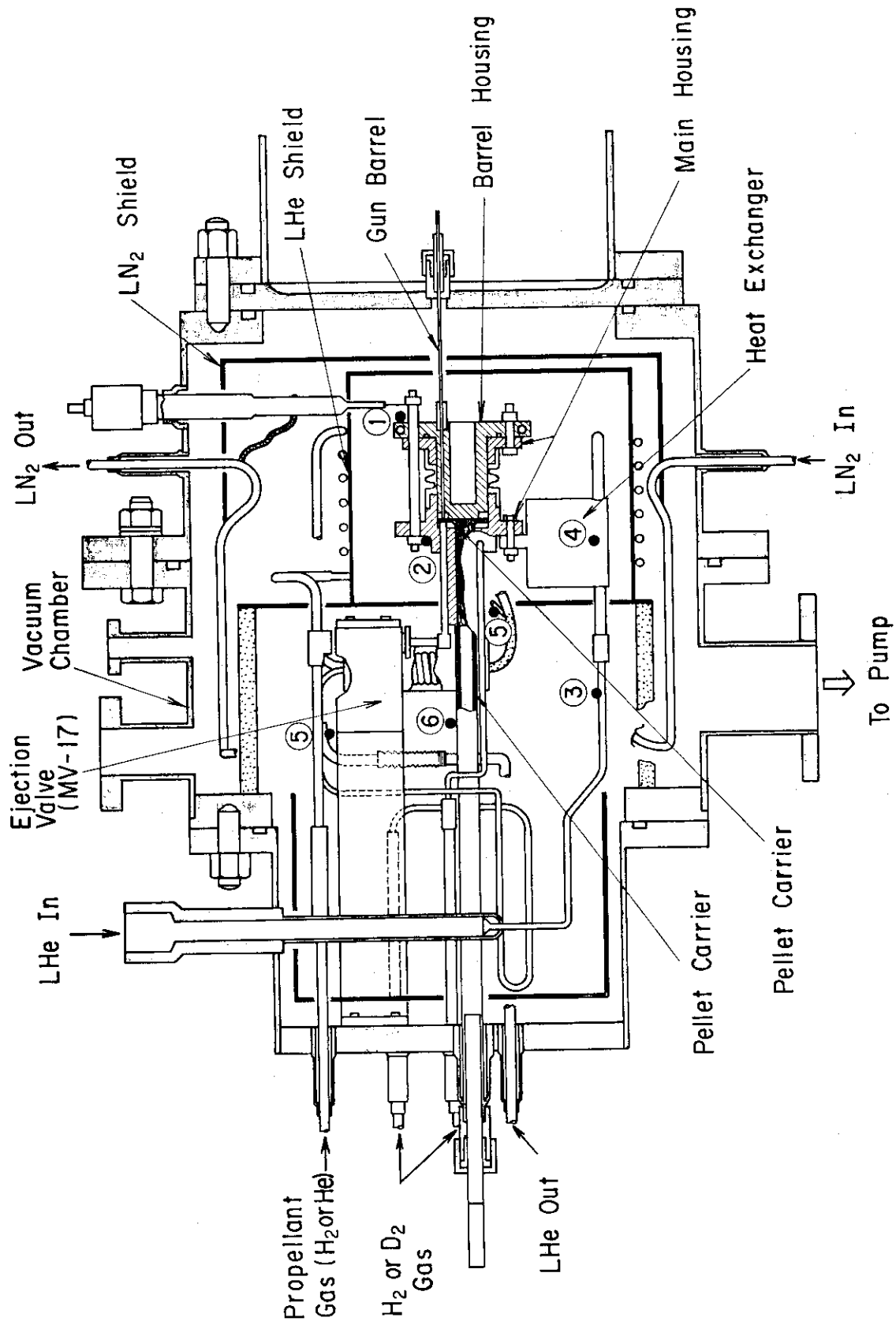


Pneumatic Pellet Injector

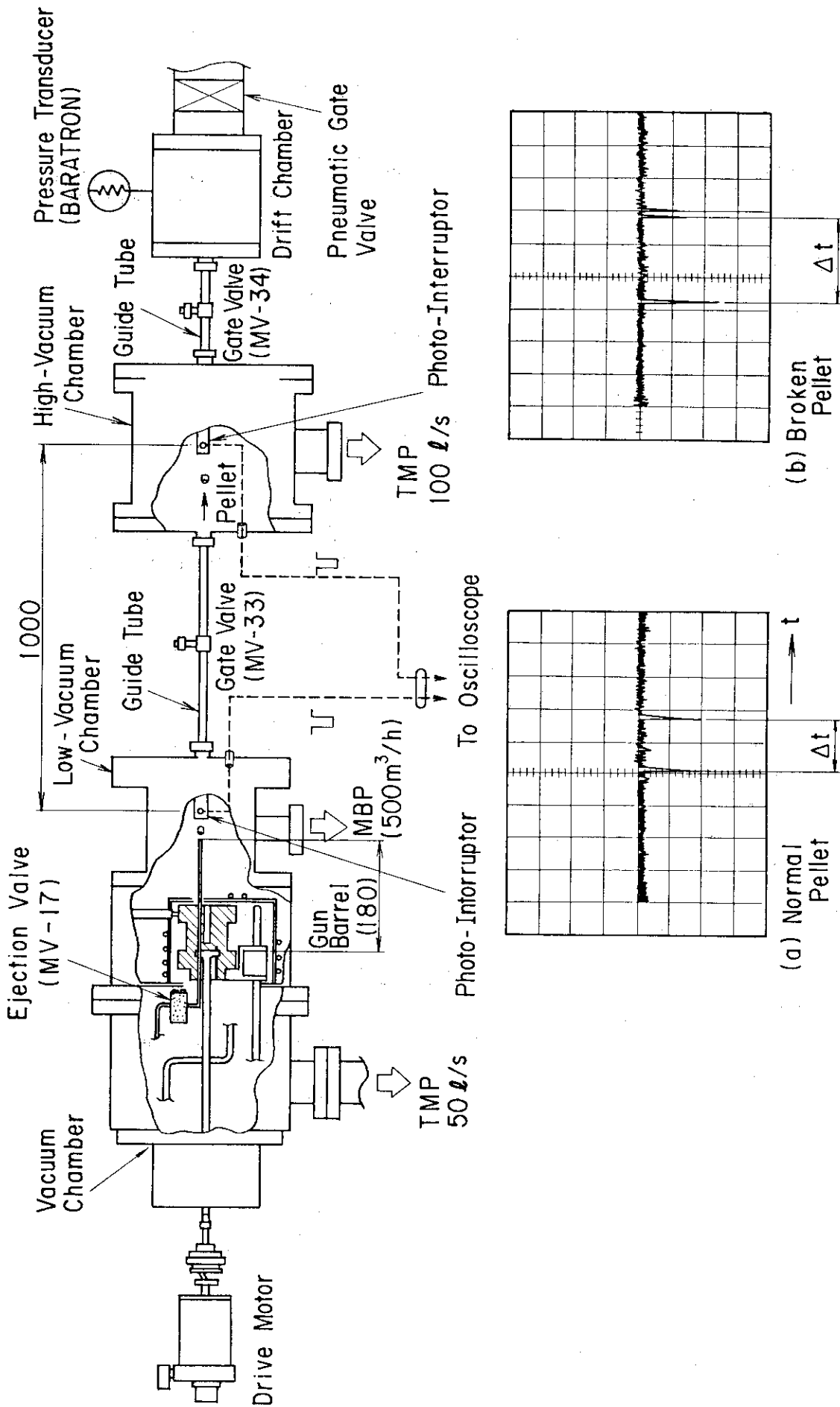
第1図 ニューマチック式ペレット射出装置の概念図。



第2図 JFT-2M用ペレット射出装置の全体構成。



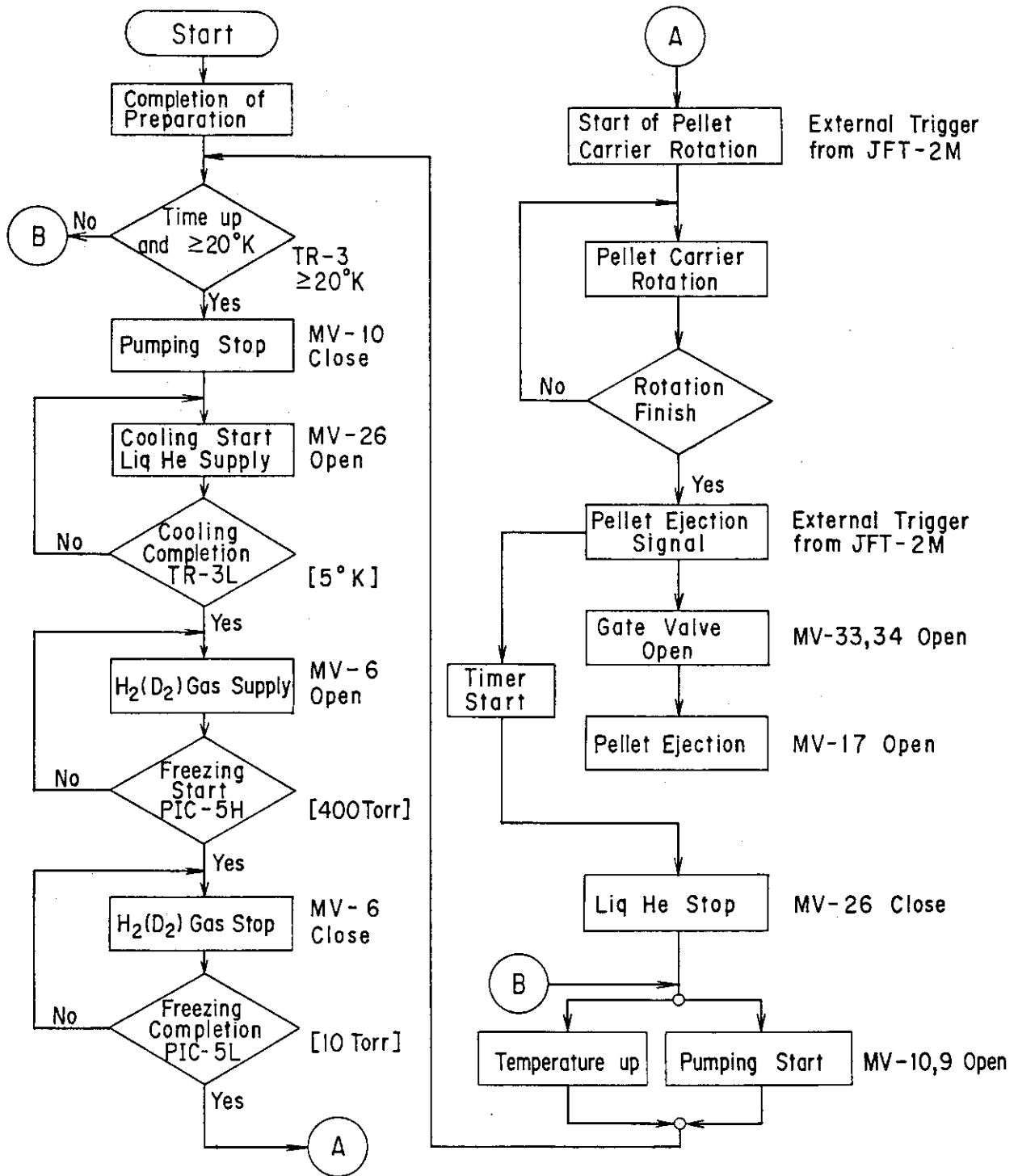
第3図 JFT-2M用ペレット射出装置のペレット生成系の構造。



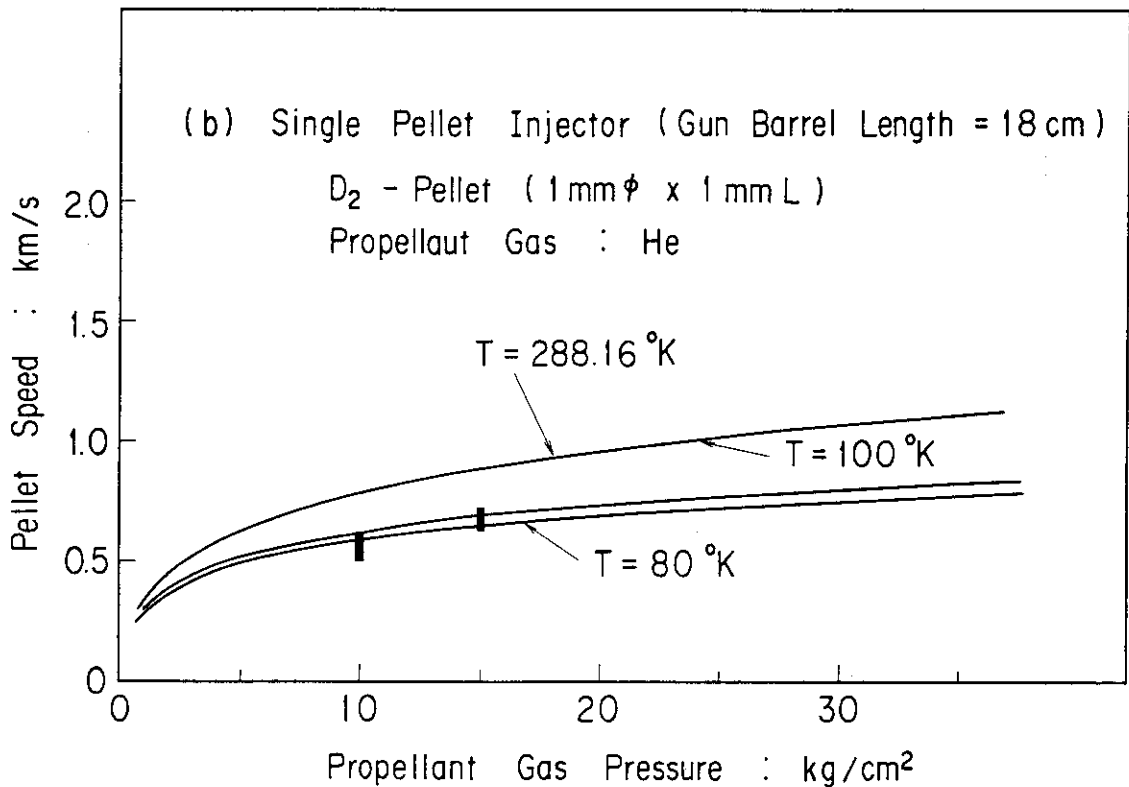
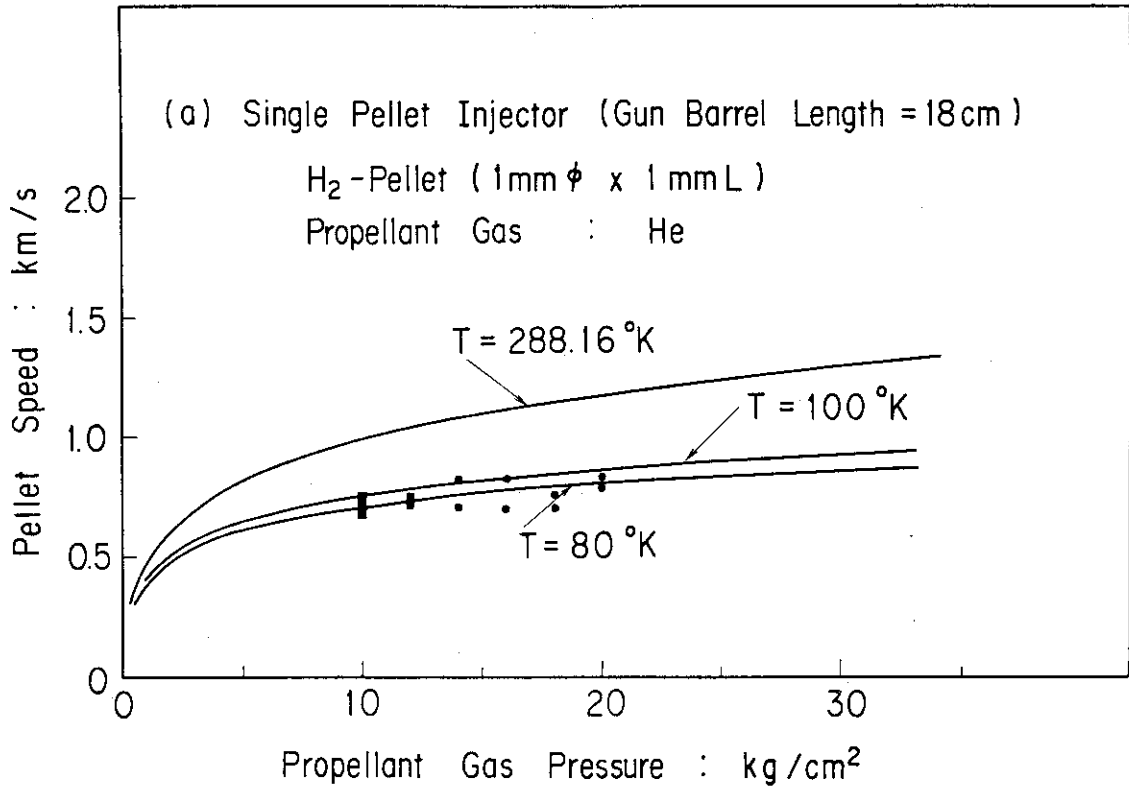
Signal of Photo-Interruption on Oscilloscope

第4図 飛行時間測定法によるペレットスピード測定系, 及びスピード計出力信号のオシロスコープ波形

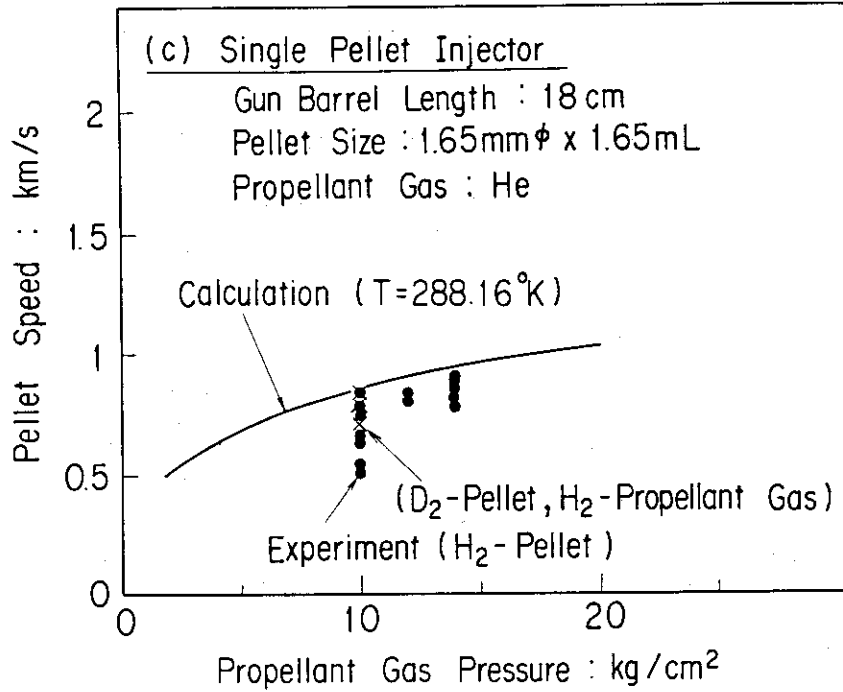
(a)正常なペレットの場合 (b)割れたペレットの場合。



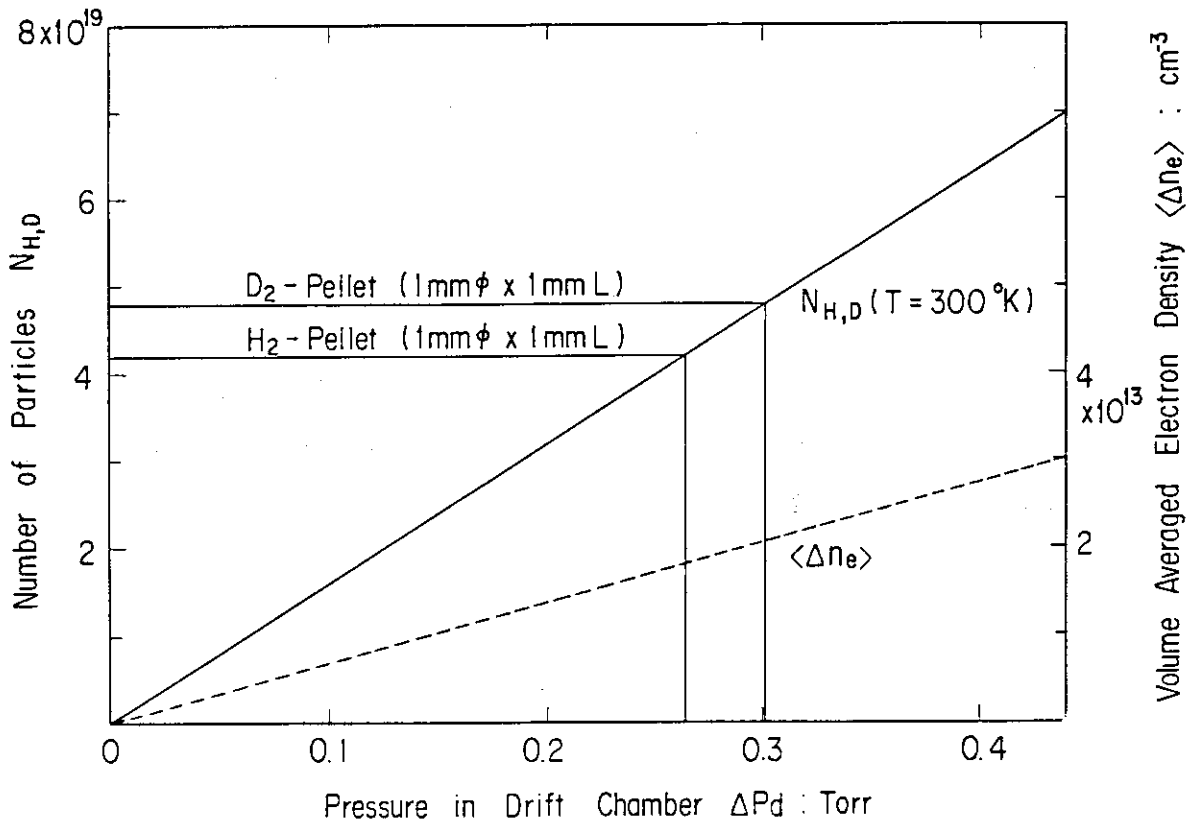
第5図 ペレットの生成、射出シーケンスの流れ。



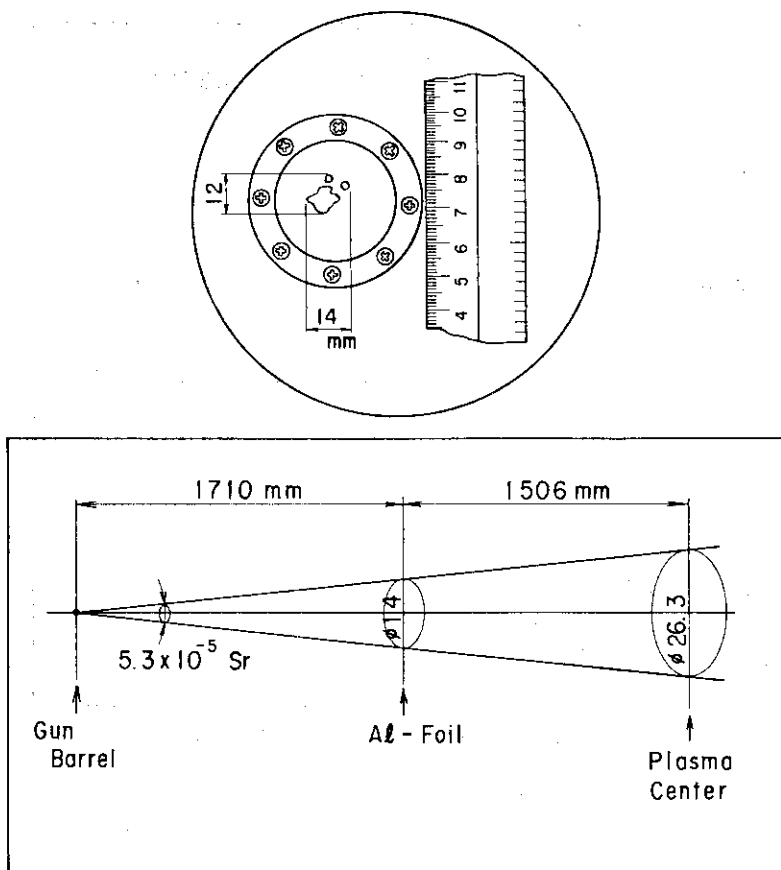
第6図 加速用ガス圧力に対するペレットスピード ;(a)1mm ϕ ×1mmLの D_2 ペレットをHeガスで加速した場合及び(b)1mm ϕ ×1mmLの D_2 ペレットをHeガスで加速した場合の実験結果とペレットをHeガスで加速したときのスピードを理想気体モデルに基づいて計算した結果(実線)。



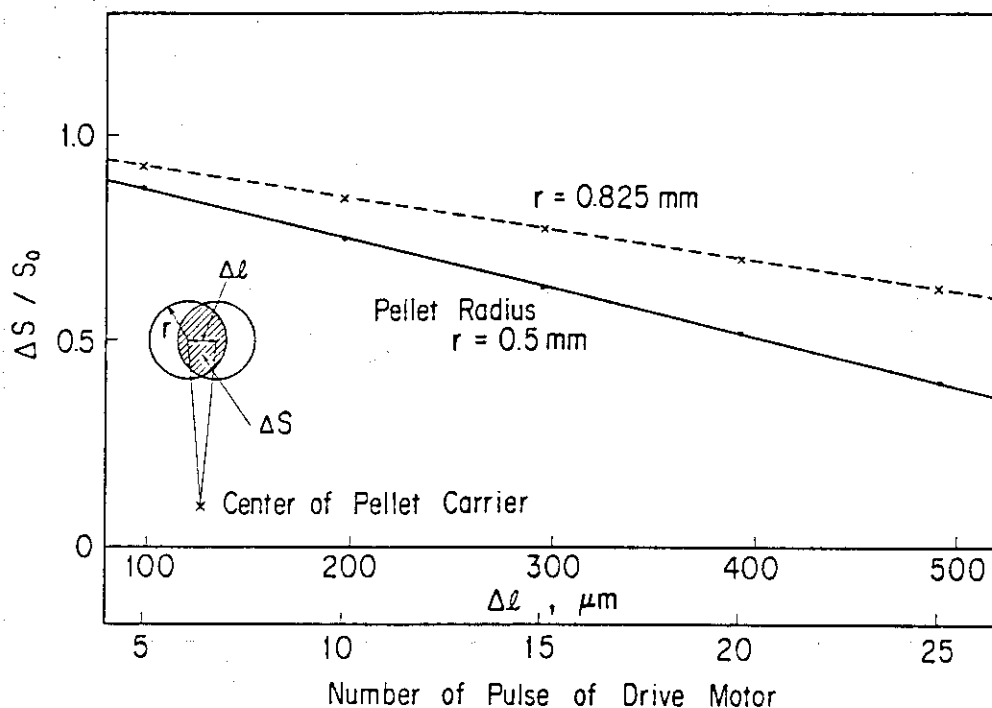
第6図 (つづき) 加速用ガス圧力に対するペレットスピード ;(c) 1.65mm ϕ ×1.65mmLのH₂ペレットをH₂ガスで加速した場合、及び同じ大きさのD₂ペレットをH₂ガスで加速した場合の実験結果とH₂ペレットをHeガスで加速したときのスピードを理想気体モデルに基づいて計算した結果(実線)。



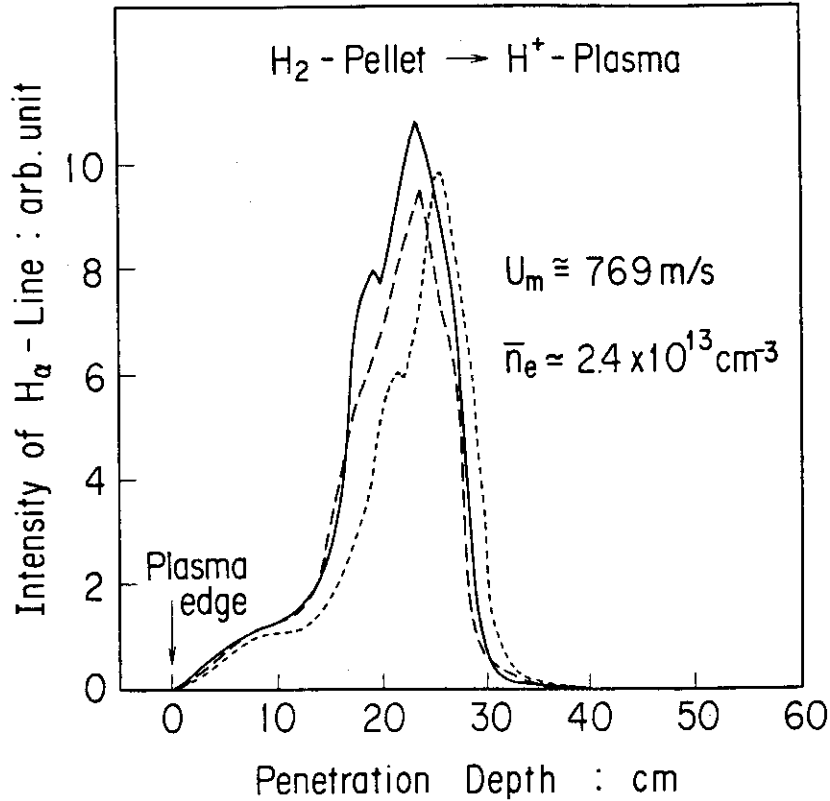
第7図 1mm ϕ ×1mmLのペレットが2.47ℓのドリフト容器内で昇華したときの圧力上昇値 ΔP_d に対する粒子数(原子の数で表示) $N_{H,D}$ (実線),及びプラズマ小半径を30cmと仮定したとき、体積平均した電子密度の上昇値 $\langle \Delta n_e \rangle$ (点線)。



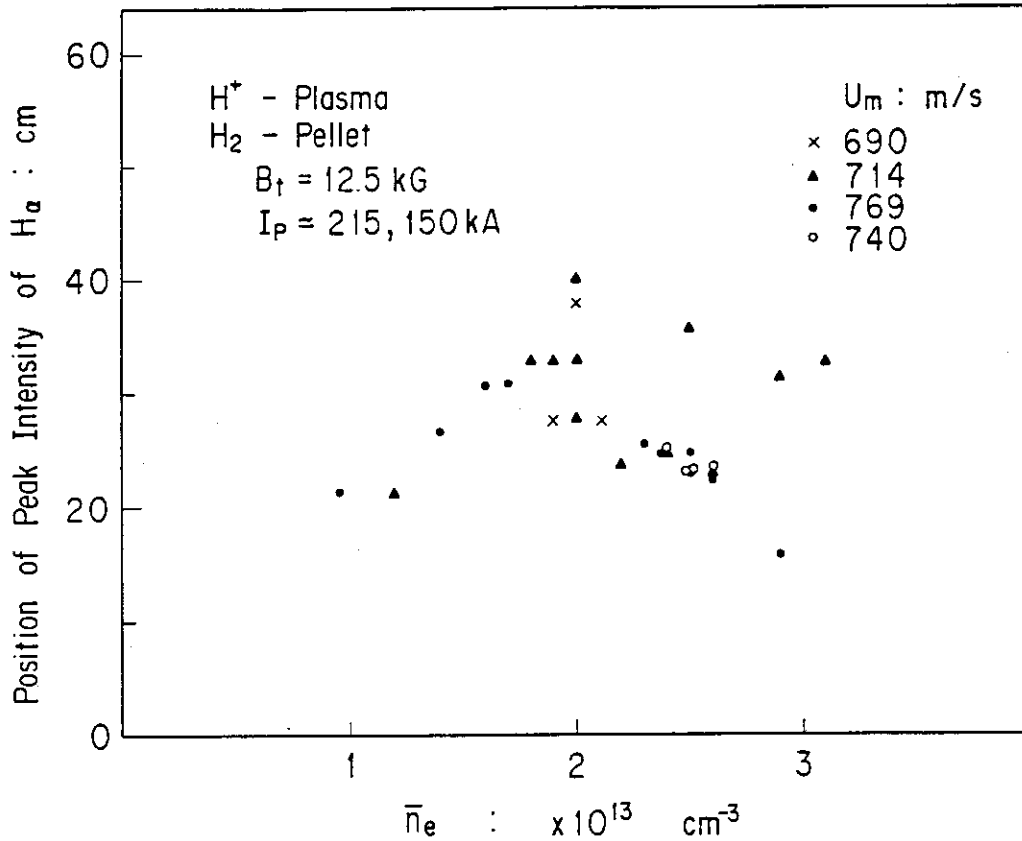
第8図 ペレットを厚さ15 μ mのアルミニウム箔に打ち当てることにより測定したペレット飛行軌道の拡がり。



第9図 銃身の中心軸とペレットキャリア円盤内の小孔の中心軸とのずれ量 ($\Delta \ell$) に対する射出ペレットの大きさ ($\Delta S / S_0$), S_0 はペレットキャリア小孔の断面積, ΔS は斜線部の面積である。



第10図 1mmφ×1mm LのH₂ペレットをJFT-2Mジュール加熱プラズマに入射したときの溶発量 (H_α線強度)のPenetration Depthである。ペレットスピードU_mは約769m/sである。



第11図 1mmφ×1mm LのH₂ペレットをJFT-2Mジュール加熱プラズマに入射したとき、溶発量 (H_α線強度)が最大になる点の平均電子密度に対する依存性。