

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

LHDにおける燃料供給用ペレット入射システム
Pellet Injector Systems for Plasma Refueling on LHD

坂本隆一、山田弘司
R. Sakamoto, H. Yamada

(Received - Mar. 28, 2005)

NIFS-TECH-13

Apr. 2005

RESEARCH REPORT
NIFS-TECH Series

Inquiries about copyright should be addressed to the Research Information Center,
National Institute for Fusion Science, Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 Japan.
E-mail: bunken@nifs.ac.jp

<Notice about photocopying>

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Phone: 81-3-3475-5618 FAX: 81-3-3475-5619 E-mail: jaacc@mtd.biglobe.ne.jp

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone: 1-978-750-8400 FAX: 1-978-646-8600

LHD における燃料供給用ペレット入射システム

Pellet injector systems for plasma refueling on LHD

坂本隆一，山田弘司

核融合科学研究所

Ryuichi Sakamoto, Hiroshi Yamada

National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

Abstract

Hydrogen pellet injection is one of the leading candidates for a refueling to magnetic confined fusion plasmas, since it can provide particles directly to core plasma. In order to investigate appropriateness of the pellet injection as a plasma refueling method, two types of solid hydrogen pellet injector systems have been developed and plasma experiments with pellet injection have been carried out on LHD (Large Helical Device). One is an *in-situ* pipe gun type pellet injector, which is the simplest of all pellet injector concepts. The *in-situ* pipe gun injector has 10 independent controlled barrels and each barrel can inject $3\text{ mm}\phi \times 3\text{ mm}\ell$ pellets with a velocity of $\sim 1200\text{ m/s}$. The other is a repetitive pellet injector with a screw extruder. The screw extruder can form $2.5\text{ mm}\phi$ solid hydrogen rod continuously at a extruding rates of $\sim 35\text{ mm/s}$ and, therefore, the repetitive pellet injector can inject pellets in infinitum with repetitive rate of 10 Hz. Common feature of these injectors is employing a compact cryocooler to solidify hydrogen and, therefore, these injectors can be operated with just electricity instead of liquid helium supply system.

Keywords: plasma fueling, solid hydrogen, pellet

目次

1	緒言	1
1.1	はじめに	1
1.2	LHD におけるペレット入射システム	2
2	パイプガン式ペレット入射装置	4
2.1	概要	4
2.2	固体水素生成と射出	4
2.3	差動排気	13
2.4	ペレットの計測	13
2.5	遠隔制御システム	15
2.5.1	装置制御	15
2.5.2	ペレット射出制御	15
2.6	機能拡張	16
2.6.1	ネオン添加ペレット	16
2.6.2	低速射出機構	17
2.6.3	湾曲ガイド管を用いたペレット搬送	17
3	スクリュウ押出式連続ペレット入射装置	25
3.1	概要	25
3.2	固体水素生成と射出	26
3.2.1	スクリュウ押出式固体水素生成部	26
3.2.2	固体水素ロッド切断とペレットの加速	27
3.3	差動排気	29
3.4	遠隔制御システム	30
3.5	長時間射出特性	31
4	結言	41

1 緒言

1.1 はじめに

磁場閉じ込め核融合装置における核燃焼プラズマを想定した場合、より高い核融合反応率を得るためにはより高密度のプラズマが望ましく、かつ外部からの燃料供給は核燃焼制御の主要な制御因子となることから、コアプラズマへの粒子供給は重要な課題の一つである。これまでの核融合を目指したプラズマ実験において、粒子供給手段として必須かつ最も典型的に使用されてきたのはガスパフ法である。ガスパフ法は水素ガスを容器内へ注入する方法で、これまでの磁場閉じ込め装置において燃料供給手段としての役目を果たしてきた。しかしながら、大型装置における高温プラズマでは中性ガスの侵入長が相対的に浅くなってしまい、ガスパフではコアプラズマへの効率的な燃料供給が困難となることが懸念される。ガスパフに代わるコアプラズマへの燃料供給手段として、固体水素の粒(ペレット)を 1000 m/s 程度の速度でプラズマ中へ入射するペレット入射法がある。ペレット入射法は水素をコアプラズマへ直接供給できることから、高効率な燃料供給を実現できる。また、そのことに起因してプラズマ周辺部における中性粒子密度を抑えることができ、過度の中性粒子によるプラズマの閉じ込め劣化や荷電交換粒子による第一壁のスパッタリングを抑制することができる。加えて、D-T 炉を考えた場合、プラズマ中ヘトリチウムを直接供給することによって、プラズマ対向材料へのトリチウム蓄積を少なくすることも期待される。ペレット入射実験やプラズマ中におけるペレットの溶発に関する研究は 1970 年代から行われてきており [1, 2, 3]、これまでの研究でペレット入射は燃料供給のみならず、閉じ込め改善にも寄与していることが示されている [4]。しかしながら、これまでのプラズマ実験装置においてペレット入射装置は常時使用できる基本設備としては未だ位置付けられてきていない。

ヘリカル系の磁場閉じ込めは、エネルギー閉じ込め時間がプラズマ密度と正の相関があり [5]、トカマクにおける Greewald 密度限界 [6] のようなハードな密度限界は観測されおらず、密度限界が主にパワーバランスで決定される [7]。さらに、閉じ込め磁場は外部磁場コイルによって生成するため、電流駆動(高密度領域で劣化)を必要としないことから高密度での運転に適したシステムである。また、閉じ込め磁場を外部磁場コイルのみで形成するために、原理的にプラズマの定常維持が可能である。これらのことをふまえ、大型ヘリカル装置(LHD)では高密度定常プラズマを実証するために、ペレット入射装置は設計計画段階より基本設備として位置づけられ [8]、実際に常時稼働可能な基本設備として位置づけ、基本設備としての高い信頼性と稼働性を有したペレット入射装置を開発し [9, 10]、プラズマ実験へ供している。ここでは LHD 用に開発した 2 種類のペレット入射装置についての技術的な報告を行う。

1.2 LHD におけるペレット入射システム

Figure 1 は LHD におけるペレット入射装置の設置位置を示したものである。LHD には設計思想の異なる 2 種類のペレット入射装置が設置されており、幅広い実験の要求に対応できるようになっている。一方はパイプガン式ペレット入射装置 [9] で、in-situ ペレット生成法を採用したニューマチックパイプガンを 10 系統並列設置している。この装置はペレット入射実験を行う上での再現性、安定性を重視して設計されている。他方はスクリュウ押し出し連続ペレット入射装置 [10, 11, 12] で、将来の核融合炉での使用を想定する長時間高繰り返し入射の実現を目指した。この装置ではスクリュウ押し出し方式の固体水素連続生成法を採用することによって連続ペレット射出を可能としている。これらの LHD 用ペレット入射装置における共通の特色として、固体水素生成部冷却手段として液体ヘリウムを用いず、小型冷凍機を使用していることが挙げられる。ペレット入射装置における小型冷凍機の使用は世界でも初めての試みで、従来、装置を稼動する上で制約となっていた液体ヘリウムの供給から開放され、基幹設備として最も安定して供給可能な電気のみで装置運転が可能となった。このことによって、LHD ではペレット入射装置を常時使用可能な基幹設備として用いることができるようになっている。加えて、両装置とも LHD への導入以来継続して装置改良を行い (Table 1), 運転領域を広げている。次章以降では各々の装置の技術的特性について詳説する。

Table 1 Chronological table of the pellet injector systems on LHD.

年度	パイプガン式 ペレット入射装置	スクリュウ押し出し 連続ペレット入射装置
1998年 (第2実験サイクル)	・装置導入 (単バレル)	
1999年 (第3実験サイクル)	・5バレル化改造 ・内側ポート湾曲ガイド管設置	
2000年 (第4実験サイクル)	・大口径化改造 ・低速射出機構導入 ・上部ポート湾曲ガイド管設置	
2001年 (第5実験サイクル)	・10バレル化改造 ・真空容器内湾曲ガイド管設置	・固体水素生成部開発
2002年 (第6実験サイクル)	・真空容器内湾曲ガイド管設置	・装置導入
2003年 (第7実験サイクル)	・冷凍機増強 ・制御システム最適化	・計測装置増強

Large Helical Device; LHD

Major radius: 3.9 m

Minor radius at injection location: 1 m

Plasma volume: 30 m³

Magnetic field on axis: ~ 3 T

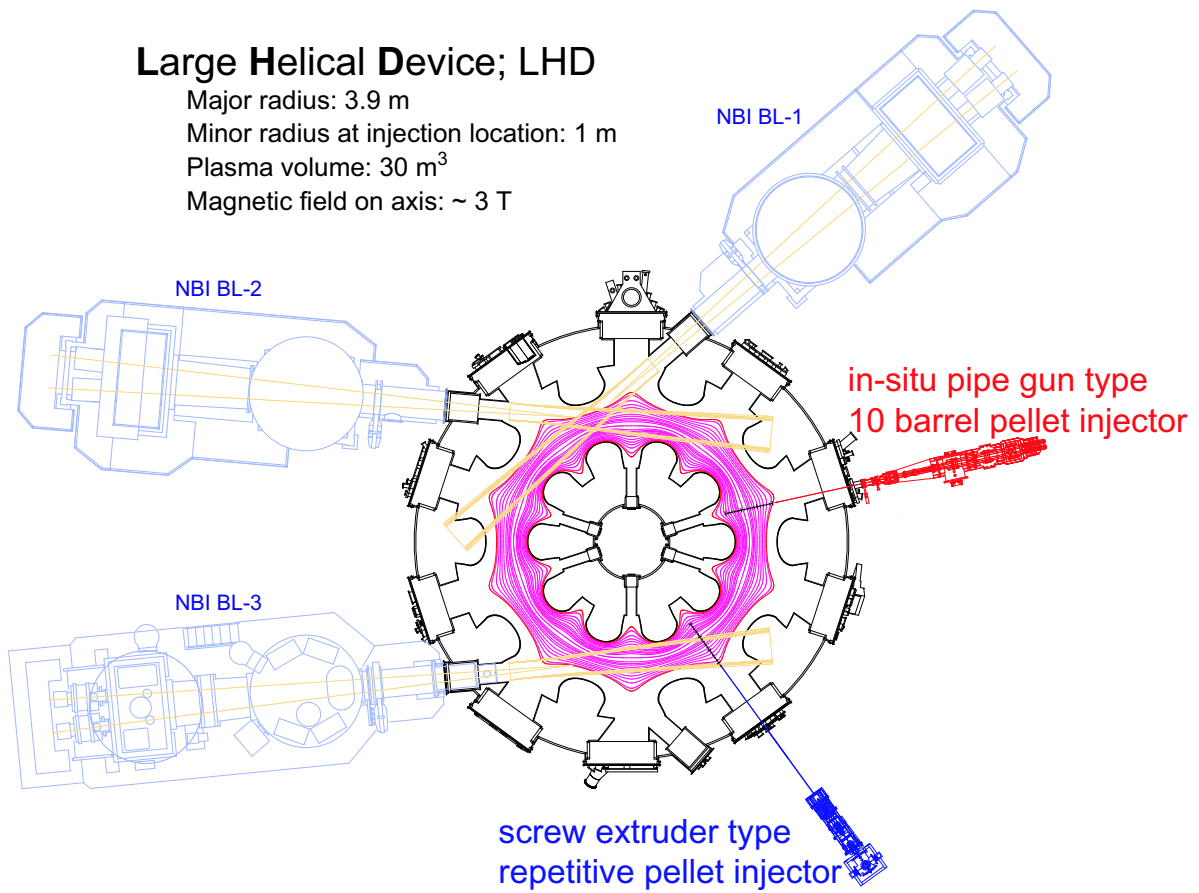


Figure 1 Top view of the pellet injectors and LHD.

2 パイプガン式ペレット入射装置

2.1 概要

LHD 用パイプガン式ペレット入射装置はペレット入射実験を行う上での再現性，安定性を重視し，極低温部に可動部がない in-situ ペレット生成法 [13] を用いたニューマチックパイプガン方式を採用した．固体水素生成部の冷却には小型冷凍機を用いている．in-situ ペレット生成法は原理的に単発のペレット射出となるが，本装置では射出バレルを 10 系統並列設置することにより，10 発の連続射出を可能としている．本装置はペレット入射装置本体および制御システムから構成され，装置運転に関する全ての操作が制御室に置かれた計算機にておこなえる．また，ペレット入射装置本体は Figure 2 に示すように，ペレット生成チャンバおよび 3 段の差動排気チャンバから構成される．

2.2 固体水素生成と射出

固体水素を生成するためには水素ガスを三重点温度まで冷却する必要がある．水素同位体の三重点温度は Table 2[14] に示すように同位体依存性があり，質量の大きい同位体ほど高い温度で固化する．LHD のプラズマ実験で用いることができるガス種の制限から，本装置では軽水素を用いた固体水素生成を扱っており，10 K 程度の冷凍システムが必要となる．一方，将来の核融合炉では三重水素もしくは重水素を使用することになるため，必要となる冷凍条件は本装置よりも緩和されるであろう．水素の状態図は Figure 3 のようになっており，水素ガスを三重点温度（13.9 K）以下に冷却することによって固体水素を生成することができる．これまで固体水素ペレット入射装置の冷凍システムとしては，液体ヘリウムを用いたシステムが用いられてきたが，本装置では世界でも初めての試みとして，Gifford-McMahon サイクル小型冷凍機（SHI SRDK-415D, 10 W @ 8 K）を 2 台用いた冷凍システムを構築した．

Table 2 Triple point temperature of the hydrogens.

Hydrogen isotope	Temperature [K]	Pressure [Pa]
H ₂	13.96	7200
D ₂	18.73	17150
T ₂	20.62	21600

in-situ ペレット生成法はペレット射出バレル内で直接ペレットを生成する方法であり，Figure 4(a) に示す様にガスの供給のみでペレットの生成・射出運転が可能である．

- 1) 一方を真空引きしている射出バレル（ステンレスパイプ）内へ他端から水素ガスを導入するとバレル内壁の冷却部で水素が固化し始める．
- 2) 水素ガスを導入し続けると 1 分程度で固体水素が成長し，バレルが閉塞する．
- 3) バレルの閉塞に伴い水素供給側の圧力が上昇し始め，ペレットの生成が完了する．水素ガスの供給を止め，バレル内の余分なガスを真空排気し，ペレット射出トリガを待つ．
- 4) 射出トリガを受けたら高速射出弁を駆動し，パルスの (~ 1 ms) に高圧のヘリウムガス (2.5 - 5.0 MPa) を印加し，ペレットを射出する．

in-situ ペレット生成法では原理的に射出バレルの内径で円筒形ペレットの直径が決まる．本装置ではペレット 1 個あたりの LHD プラズマ密度の上昇が $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となるようにペレットサイズを選んだ．具体的には LHD のプラズマ体積は約 30 m^3 であるので，ペレットに含まれる水素原子数が約 1×10^{21} 個となる $3 \text{ mm}\phi \times 3 \text{ mm}\ell$ の正円柱ペレットを標準のサイズとした．Figure 4(b) にペレット生成部の概略図を示す．ペレット生成部は内径 $3 \text{ mm}\phi$ のステンレス製バレルが銅ヒートシンクへ幅 3 mm で口付けされた構造となっている．銅のヒートシンクは小型冷凍機の冷却ヘッド (2nd stage) に接続されて 10 K 程度に冷却されており，上述の過程により $3 \text{ mm}\phi \times 3 \text{ mm}\ell$ の固体水素ペレットが生成される．なお， 10 K 以下になる銅ヒートシンクは，冷凍機の 1st stage に接続されて約 40 K に冷却されたサーマルシールドで囲むことによって熱侵入を極力抑えている．

先に述べたように円筒形ペレットの直径は射出バレルの内径で固定されるが，ペレット長さを変える事により供給粒子数を調整することが可能である．本装置では次の 2 つの方法によりペレットサイズを調整している．先ず，射出バレルに沿った温度勾配を調整し，極低温領域の長さを変えることによって水素の固化領域を調整する．次に，三重点圧力 (7 kPa) までの圧力範囲では供給圧力が上昇すると水素が固化する温度が上昇することを利用し，水素ガス供給圧力を変化させることによってペレットの固化領域を調整できる．Figure 5 はバレルの境界条件（サーマルアンカーの温度条件）を変えた場合のバレルに沿った温度分布を計算した結果を示す．点線は 5 cm 離れた場所にある 40 K のサーマルシールドに射出バレルを熱的に固定した場合，実線はサーマルアンカーを用いず， 25 cm 離れた生成チャンバのフランジ部（室温）に射出バレルが熱的に固定されている場合の計算結果である．境界条件をサーマルシールドに取った場合，冷却部より外側の温度勾配が緩くなるために水素が固化する温度領域 ($< 12 \text{ K} @ 1500 \text{ Pa}$) が 3 mm 幅の冷却部よりも拡張し，生成されるペレットの長さは 5.5 mm となる．対して，真空容器壁を境界条件とした場合は温度勾配がきつくなるために冷却部より拡張されるペレット生成領域は狭くなり， 3.2 mm 程度の固体水素が生成されると予測される．Figure 6 は上に示した計算条件でペレットを生成・射出したペレットのシャドウグラフ像である．計算で予想されたように，射出バレルの熱的な境界条件を変えることによってペレットサイズを調整できる

ことがわかる．ペレットの径はバレル内径で固定されているので，ペレットに含まれる水素原子数はペレット長さに比例し，供給粒子数を 1.7 倍程度調整することが可能である．この方法では境界条件を変えるためには生成槽内部の作業が必要となるので，現状ではショット毎に条件を変えることは不可能である．境界条件を遠隔操作で変更するためにはヒーター等でサーマルシールド温度を調整する等の工夫が必要となる．

Figure 7 は水素ガス供給圧力を変えてペレットを生成射出したときのペレットサイズをプロットした図である．左縦軸は射出されたペレットが密閉チャンバ内で気化したことによる圧力上昇であり，右縦軸はチャンバの容積を使って圧力上昇を水素粒子数（原子数）に変換した値である．ペレットサイズは水素ガス供給圧力が 7 kPa 前後で大きく異なり，7 kPa 以下の水素ガス供給圧力では圧力上昇に伴ってペレットサイズが微増している．一方，7 kPa 以上の圧力領域ではペレットサイズが小さくなり，水素ガス供給圧力に依存しなくなる．この現象は水素の三重点（13.9 K，7200 Pa）から説明できる．すなわち，三重点圧力以下の圧力領域では水素は液相を経ずに気相から固相へ相変換し，水素ガスは冷却部へ凝縮し，固体水素を生成する．7 kPa 以下ならば圧力が高いほど高い温度でも固化することから，圧力が高いほどペレットサイズが大きくなる．一方，三重点圧力（7 kPa）以上の圧力領域では，圧力に依存せずに三重点温度（13.8 K）以上になると水素は液化し，液体水素との接触によって一度固化した固体水素が冷却能力と入熱がバランスするところ（冷却部幅）まで溶け，ペレットサイズが縮小する．この様に，水素ガス供給圧力を変えることによって供給粒子数を 25 % 程度調整することができる．この方法は水素ガス供給を停止する圧力の設定のみで実現できるので，ショット毎に条件を変えることが可能である．

ペレットの射出は，ペレット生成後にペレット後方からパルス的に高圧のガスを印加することによっておこなう．射出バレル内の加速ガスの伝播は圧縮性気体における 1 次元の膨張波 (rarefaction wave) の伝播で記述され [15]，射出バレル内におけるペレットの運動は加速ガスの伝播速度に等しいと仮定すると，その運動方程式は次式のようなになる．

$$\frac{M}{A_p} \frac{dU(t)}{dt} = \frac{2}{3} d \rho_s \frac{dU(t)}{dt} = P_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(\gamma - 1)U(t)}{C_0} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}. \quad (1)$$

ただし， $U(t)$ はペレット速度， d は正円筒形ペレットの直径， $M = 4\pi(d/2)^3\rho_s/3$ はペレット質量， $A_p = (d/2)^2\pi$ はペレット投影面積， P_0 は加速ガス初期圧力， γ は加速ガスの比熱比， ρ_s は固体水素の密度， $C_0 = \sqrt{\gamma kT/m}$ は加速ガスの音速である．微分方程式 (1) を解くと，下式が得られる．

$$U(t) = \frac{2C_0}{\gamma - 1} \left[1 - \left(1 + \frac{3(\gamma + 1)P_0}{4d\rho_s C_0} t \right)^{-\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \right]. \quad (2)$$

すなわち，ペレットの最大到達可能速度 $U_{max} = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = 2\sqrt{\gamma kT/m}/(\gamma - 1)$ はガス種とガス温度で決まり，高速射出のためには軽元素かつ高温のガスが有利である．例

えば常温ガスを用いた場合，水素においては $U_{max} \approx 6600$ m/s，ヘリウムにおいては $U_{max} \approx 3100$ m/s となり，加速ガスとして水素ガスを用いるとヘリウムガスに比して2倍の速度を得られることが予測される．プラズマへの粒子供給としてはペレット速度が早い方が好ましいが，安全上の観点から本装置ではヘリウムガスを使用している．式(2)を積分することにより $U(t)$ に到達するのに要する長さ，すなわち必要となるバレル長が得られる．

$$L = \int U(t)dt = \frac{2C_0}{\gamma-1} \left[t - \frac{2d\rho_s C_0}{3P_0} \left(1 + \frac{3(\gamma+1)P_0}{4d\rho_s C_0} t \right)^{\frac{2}{\gamma+1}} \right] + \frac{4d\rho_s C_0^2}{3(\gamma-1)P_0}. \quad (3)$$

上述のように $t \rightarrow \infty$ のとき，すなわち $L \rightarrow \infty$ のとき最大速度が得られるが，実際の装置では合理的な射出バレル長を決める必要がある．バレル長のペレット速度に及ぼす影響を調べた S.K. Combs らの実験ではバレル長が 800 mm を越えると，速度の増加が飽和する傾向にあり [16]，射出バレル長が長くなると理論予測からのずれが顕著になることが示唆される．このため，本装置ではバレル長を 790 mm とした．

式(2)と式(3)を連立して t を消去すると，速度 $U(t)$ と加速ガス圧 P_0 の関係が得られる．数値計算によって速度 $U(t)$ と加速ガス圧 P_0 の関係求めた結果を Figure 8 に示す．射出バレル長が 790 mm のときの，加速ガス初期圧に対する到達ペレット速度の計算値を実線で表した．実際のペレット射出においてはペレットと射出バレル間の摩擦や熱伝達，粘性の影響で速度が 20% ほど減少することが報告されており [16, 17]，計算値の 70 - 90% の速度を設計値（予測値）とした．実験的に得られたペレットの速度を Figure 8 に示しているが，これらの値は設計値の範囲に入っている．3.5 MPa 以上の加速ガス圧でペレットを射出することによって，1000 m/s 以上の速度が達成可能であり，最大到達速度は 1200 m/s であった．なお，約 1 MPa 以下の圧力ではペレットが生成部から剥離しなくなるために射出の信頼性が落ち，ニューマチック方式では最低速度は 800 m/s であった．このため，800 m/s 以下の低速射出のためには他の方式のペレット射出機構が必要となる．

上記のようにして射出されたペレットはペレット直径よりやや大きい内径（1.2-2 倍）を持つステンレス鋼製のガイド管によって LHD まで導かれるが，ペレット加速に用いたヘリウムガスを排気するために，ガイド管には断続部を設ける必要がある．ペレットガイド管の断続部において，上流側のガイド管を出てフリーフライトするペレットを損傷無く下流側のガイド管へ入れるためにはペレットの直進性が確保されていなければならない．Figure 9 にガイド管を出たペレットの発散角をシャドウグラフによって調べた結果を示す．横軸はガイド管出口を原点としたペレット飛行方向の距離，縦軸はペレットガイド管の中心軸を原点とした距離である．ペレットガイド管の内径は 5.35ϕ であるため，ペレット中心の初期（ $X=0$ ）位置はペレット半径分（1.5 mm）内側にオフセットした $Y=\pm 1.175$ mm の範囲内にあるので，その位置を基準として 0.5° と 1.0° の線をそれぞれ実線と点線で記した．グラフ中 "+" でプロットしたものがシャドウグラフから求めたペレットの中心

位置であり，全ての点が 1° の線よりも内側に位置している．Figure 9(b) はペレットの Y 方向の分布を示したものであり，90 % 以上のペレットの発散角は 0.5° 以下に収まっていることがわかる．このようなことから，本装置では余裕を見て発散角を 1.5° としてガイド管断続部を設計した．すなわち，断続部長さを ℓ ，上下流側ガイド管内径をそれぞれ d_1, d_2 とした場合， $d_2 > d_1 + 2\ell \tan 1.5^\circ$ となるように設計した．

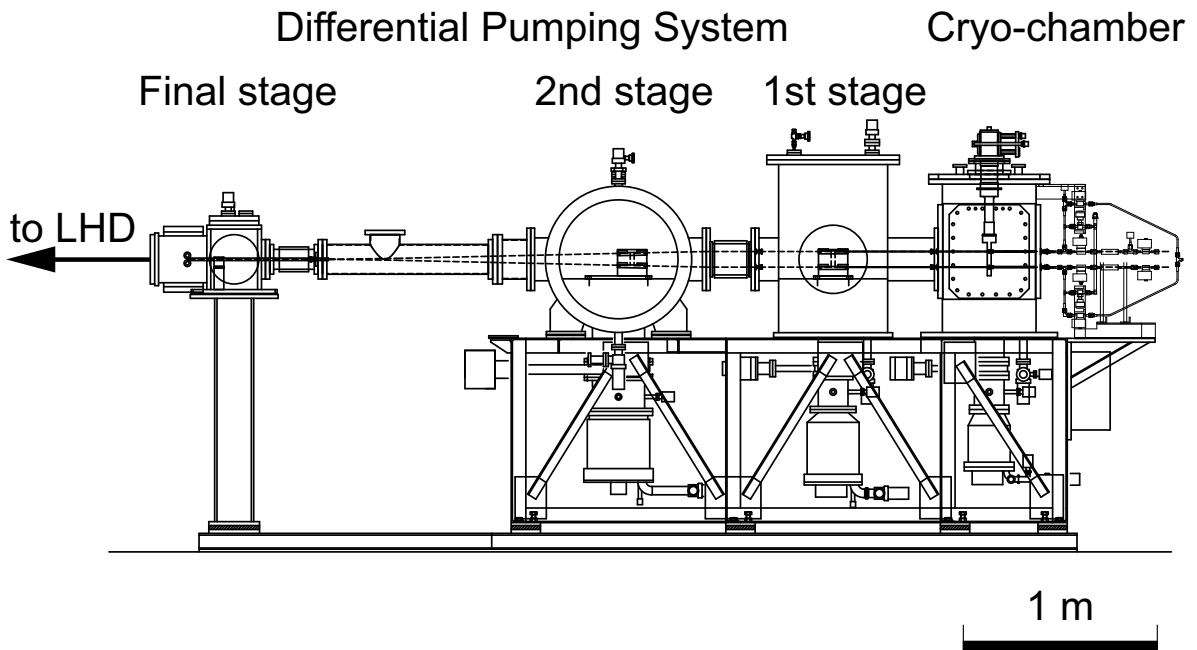


Figure 2 Schematic elevation of the in-situ pipe gun type pellet injector for LHD.

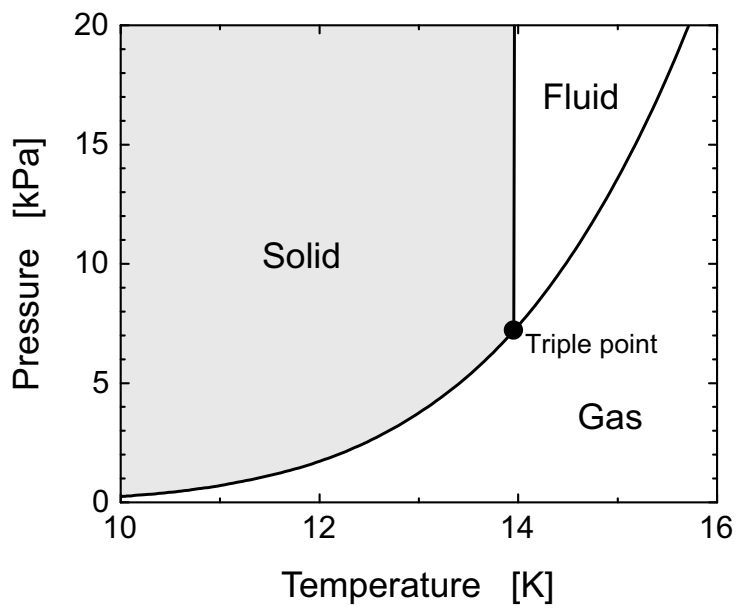


Figure 3 Phase diagram of the hydrogen.

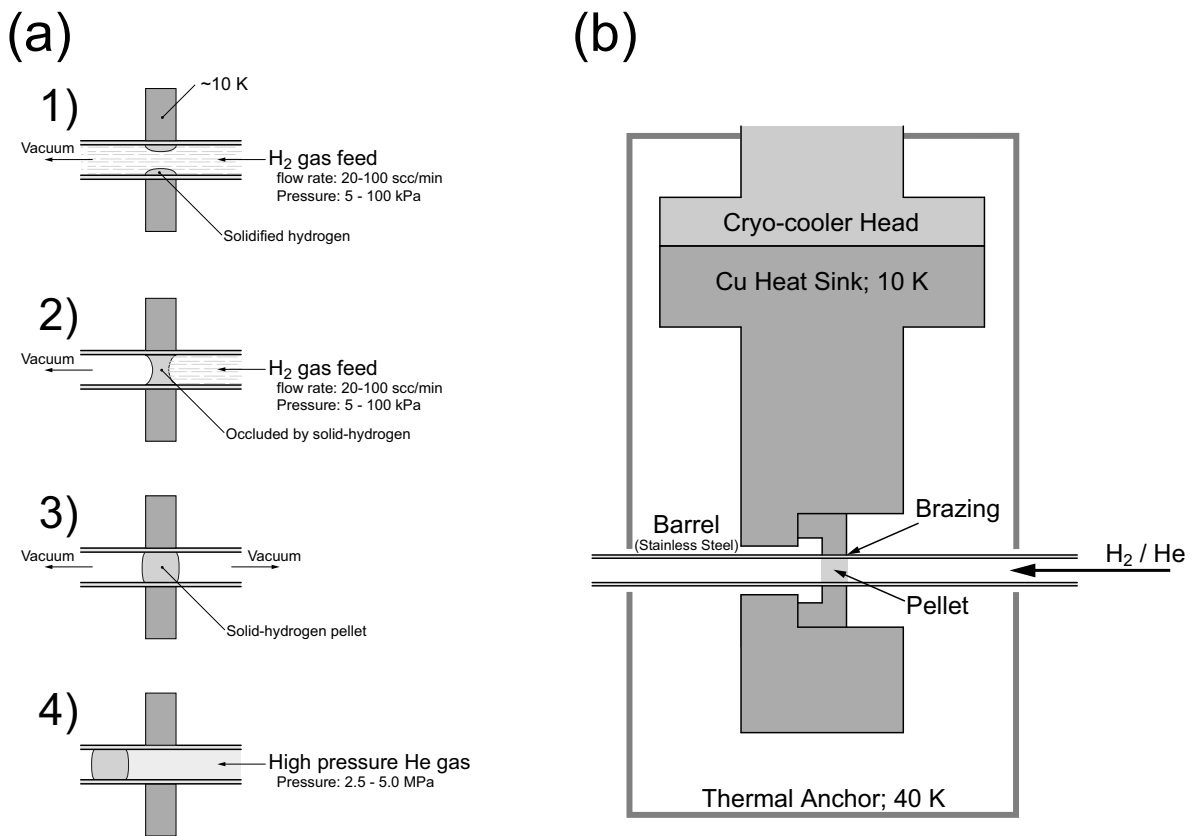


Figure 4 (a) Principles of operation for "in-situ pipe gun pellet injector" and (b) diagrammatic illustration of the solid hydrogen formation section.

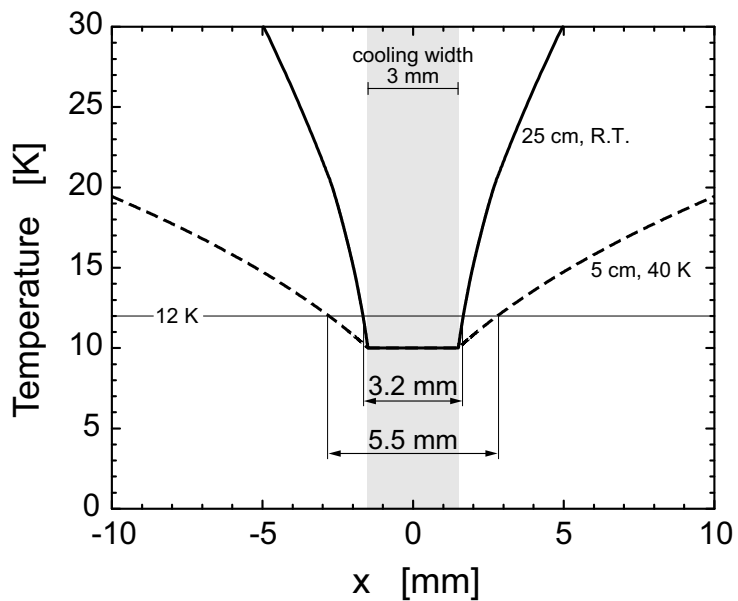


Figure 5 Calculated temperature distribution along the injection barrel.

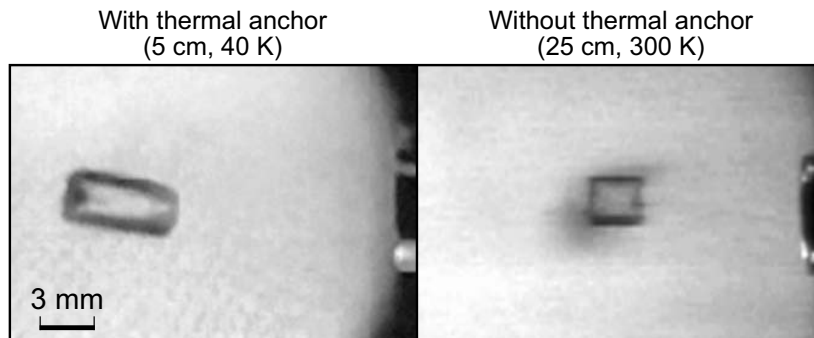


Figure 6 Shadowgraph images of the pellets which were formed under the different condition. Pellet length can be controlled by temperature gradient along the barrel.

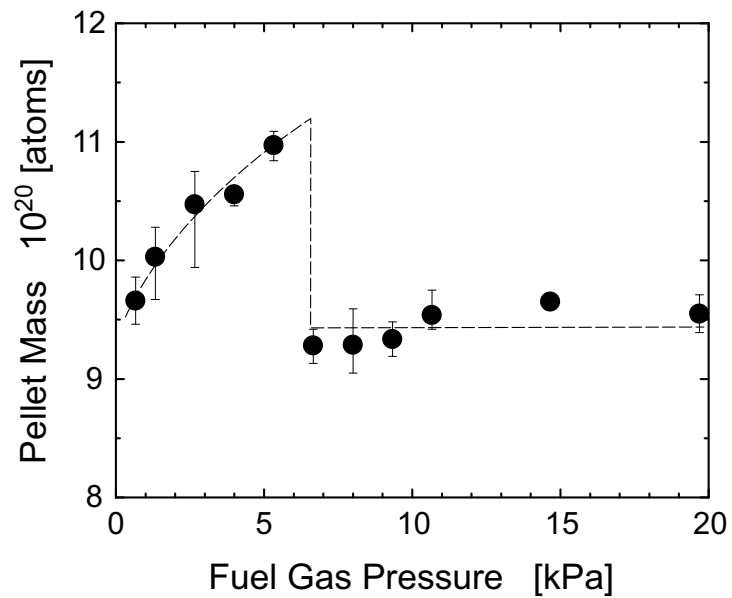


Figure 7 Dependence of the pellet mass on supply pressure of hydrogen.

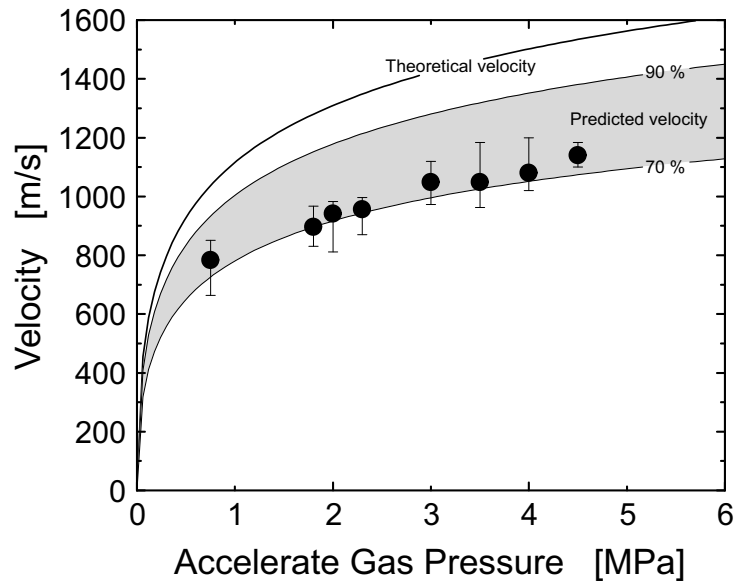


Figure 8 Muzzle velocity of nominal 3 mm diameter pellets accelerated in pipe gun pellet injector for LHD.

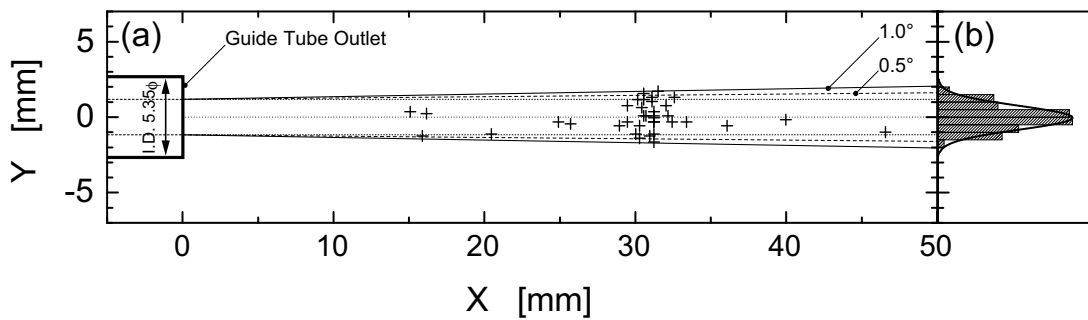


Figure 9 Dispersion angle of the free flight pellet.

2.3 差動排気

本ペレット入射装置はペレットの加速方法としてニューマチック方式を採用しているために、ペレット射出時に加速ガス（ヘリウム）が真空内へ導入される。ヘリウムガスが LHD 真空容器内へ流入することを防ぐために大排気量の真空ポンプを備えた大容量真空チャンバを用いて 3 段の差動排気をおこなっている (Figure 10)。ここでは差動排気システムのヘリウムガス排気特性について検討する。

加速ガス流入量を $I_{acc}\delta(t)$ 、拡散チャンバの容積を V_i 、ポンプの実効排気速度を S_i 、拡散チャンバ間のコンダクタンスを $c_{i,i+1}$ 、各チャンバにおけるリーク量および脱ガス量の和を L_i とすると、各真空チャンバの圧力 (P_i) は下式で表される。

$$\begin{cases} V_1 \frac{dP_1}{dt} = I_{acc}\delta(t) + c_{12}(P_2 - P_1) - S_1P_1 + L_1, \\ V_2 \frac{dP_2}{dt} = c_{12}(P_1 - P_2) + c_{23}(P_3 - P_2) - S_2P_2 + L_2, \\ V_3 \frac{dP_3}{dt} = c_{23}(P_2 - P_3) - S_3P_3 + L_3. \end{cases} \quad (4)$$

ペレット入射 ($t = 0$) によって加速ガスが流入した後の真空度変化を、式 (4) を用いて計算した結果を Figure 11 に示す。なお、本計算に使用した各パラメータは下記のとおりである。

$$\begin{cases} I_{acc}\delta(t) = 15 \text{ Pa m}^3 & @t = 0 \\ V_1 = 0.3 \text{ m}^3, & V_2 = 0.4 \text{ m}^3, & V_3 = 0.037 \text{ m}^3 \\ S_1 = 0.27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}, & S_2 = 1.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}, & S_3 = 0.047 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \\ C_{12} = 7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1}, & C_{23} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \\ L_1 = 3.0 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3\text{s}^{-1}, & L_2 = 1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa m}^3\text{s}^{-1}, & L_3 = 0.5 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3\text{s}^{-1} \end{cases}$$

横軸は射出タイミングを基準とした時間、縦軸は各段の圧力変化および最終段への粒子流入量を示した。ペレット射出時に第 1 段へ加速ガスがパルス的に流入すると、最終段への加速ガス流入量は 0.4 s ほど遅れて最大になり、その後流入量は減少する。最終段の最大到達圧力上昇は 10^{-5} Pa 以下であり、プラズマ実験時における LHD 真空容器真空度より小さい値であることから LHD 真空容器へのガス流入量は無いと考えられる。また、最終段への総流入量は 1.0×10^{14} 原子程度であり、もし最終段へ流入したヘリウムガス全量が LHD 真空容器へ流入すると仮定しても、ペレットに含まれる粒子数 (1.0×10^{21}) に比べて十分小さい値である。

2.4 ペレットの計測

本ペレット入射装置における計測データは 2 つに分類できる。ひとつはペレット入射装置運転上必要な装置状態監視のための計測、もう一つは射出したペレットの状態を確認す

るための計測であり，プラズマへの入射実験において重要なデータとなる．前者は装置が稼働している間常時 3 s 毎にログデータとしてデータ収集保存をしている．また，これらの値が異常を示した場合はインターロックが働き，装置を保護するようにロジックが組まれている．これらの装置制御に関しては 2.5 で説明する．後者はペレットを射出したときのみデータ収集をおこなっており，下記計測が含まれる．

1) ペレット速度測定：第 2 拡散チャンバに 140 mm の間隔をあけて 2 対，約 2 m 離れた第 3 拡散チャンバに 1 対の半導体レーザーとフォトダイオードの対が設置されており，高速で飛翔するペレットがレーザー光を遮る時間差からペレットの速度を測定する．

2) ペレット質量（粒子数）測定：ペレット質量の計測法としては，密閉したチャンバ内へ入射したペレットの蒸発による真空度上昇よりペレットの粒子数が推定できる．すなわち，理想気体を仮定するとペレットの粒子数（原子）は $N = 2\Delta p V/kT$ で求められる．しかしながら，この方法ではペレットを壊すことによって粒子数を測定しているため，実際にプラズマへ入射したペレットの粒子数を計ることはできない．

プラズマへ入射したペレットの粒子数を求めるためにマイクロ波キャビティを用いた非破壊型のペレット質量計を用いた．この質量計はマイクロ波キャビティ内をペレットが通過する際に引き起こす周波数変化を用いるものである．周波数 f の波が共振しているマイクロ波キャビティ内を誘電率 ϵ_H の誘電体（ペレット）が通過する際，球状のペレットを仮定するとペレット内部の電場はファクター $3\epsilon_0/(\epsilon_H + 2\epsilon_0)$ 減少し，共振周波数は下式で表されるわずかな擾乱を受ける [18]．

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = - \left(\frac{3(\epsilon_r - 1)}{2(\epsilon_r + 2)} \right) \frac{\iiint_{\Delta V} |E_0|^2 dV}{\iiint_V |E_0|^2 dV}. \quad (5)$$

ここで， $\epsilon_r = \epsilon_H/\epsilon_0$ は固体水素の比誘電率である．分母はキャビティ全領域における電場の体積積分，分子はペレット部における電場の体積積分である．マイクロ波キャビティの共振周波数として $f = 4.6$ GHz (TE₁₀₅) を用いている．ペレットの通過によって共振周波数はペレット体積に応じた擾乱 ($\Delta f \approx 1$ MHz) を受け，その周波数変化をマイクロ波検出器で検出し電圧信号へ変換することによって，ペレット粒子数の非破壊測定ができる．周波数信号のペレット粒子数への変換は先に述べた真空度変化を用いた粒子数測定値にて校正した．Figure 12 は水素供給ガス圧を変化させてサイズの異なるペレットを生成・射出したときのマイクロ波キャビティ出力とチャンバ真空度上昇をプロットしたものである．マイクロ波キャビティの出力はペレット粒子数に対して比例関係にあり，マイクロ波キャビティの出力を V_{MWC} ，ペレット粒子数（原子数）を N とした場合下記の関係で表現される．

$$N = 6.28 \times 10^{20} V_{MWC}. \quad (6)$$

3) ペレット形状測定：ペレット入射装置から射出されたペレットは、CCD カメラと短パルス光源の対によって撮影され、プラズマに入射する直前の形状を確認している (Figure 6)。この方法は "シャドウグラフ" と呼ばれており、即座にペレット状態を確認できるので、有用な計測ツールである。ペレットの飛翔速度は 1000m/s 以上程度なので、露光時間を非常に短くして運動による像のボケをおさえる必要がある。ボケの許容度をペレットサイズ (3 mm) の 5 %、すなわち 0.15 mm とすると、露光時間は $0.15 \mu\text{s}$ 以下の必要がある。実際の撮影ではパルス幅 75 ns の高速放電ランプおよびパルス幅 5 ns の窒素レーザー励起色素レーザーを使用して十分短い露光時間を得ており、カメラは通常のビデオレートの汎用 CCD を用いている。シャドウグラフ撮影のためのトリガとしては速度測定に用いている半導体レーザーとフォトダイオード対によってペレットを検出し、トリガを発生させている。

2.5 遠隔制御システム

LHD 実験中は装置本体へのアクセスができないという制約があるため、全ての装置制御を制御室から遠隔にて行う必要がある。ペレット入射装置の制御は真空排気や温度制御等の装置を維持管理するための制御 (装置制御) と、ペレット生成・射出を行うための制御 (ペレット射出制御) に区分される。いずれの制御においても Figure 14 に示すように、制御室の制御計算機 (Windows PC) 上で動作する Visual BASIC で組まれた GUI プログラムから、TCP/IP を用いた通信によって LHD 本体室のペレット入射装置近傍に設置したプログラマブルコントローラ (PLC) を介して装置制御をおこなっている。

2.5.1 装置制御

装置制御は装置の真空排気、冷却、ガス供給等の制御を行う。制御系統は Figure 13 のようになっており、制御信号は約 150 点の接点入出力 (出力：バルブの開閉指令信号等、入力：真空ポンプの状態信号等) および 23 点のアナログ入出力 (出力：水素ガス流量設定信号等、入力：真空計信号等) より構成されている。これらの制御信号は全て PLC に取り込まれている。PLC は制御室計算機からの指令と PLC 自身のインターロックプログラムに従って、制御信号を装置へ出力するとともに、入力信号を 3 s 毎に制御計算機へ送信する。PLC から送られたデータは制御計算機上に表示されるとともにログファイルとして制御計算機の固定ディスクへ保存される。

2.5.2 ペレット射出制御

入射制御は固体水素ペレットの生成および射出の制御をおこなう。これらの制御においては、制御シーケンスの要素プログラムは PLC に記述されており、それらの要素を制御計算機が適切なタイミングに働かせている。ペレット入射タイミング制御には制御計算機

の PCI スロットに搭載したファンクションジェネレータボードおよびカウンタボードを用いている。LHD 中央制御装置からのタイミングトリガを起点として、ファンクションジェネレータが発生する 1 kHz パルス波の波数をカウンタボードで数え、予め設定したカウント数との一致信号によって入射タイミングを制御している。なお、これらのパルスカウントはバレル毎に独立におこなっており、入射タイミングはバレル毎に任意に設定できるようになっている。

2.6 機能拡張

2.6.1 ネオン添加ペレット

荷電交換分光計測や不純物輸送に関する研究を行う上で、プラズマ中に微量のネオンを入れることが有効であるが、ガスパフによるネオンガス注入ではプラズマ中心部へ効率よくネオンを供給することができない。プラズマ中心部へ微量のネオンを導入することを目的として、ネオンを微量添加したペレットの生成・射出実験を行った。ネオン添加ペレットにおいて最も問題になると考えられるのは、水素とネオンでは三重点の温度が異なる (H_2 : 13.8 K, Ne : 24.56 K) ためにペレット生成時に添加比が変わってしまうこと、成分の不均一性に起因してペレットが壊れやすくなること等があげられる。あらかじめネオンを 0.5%、1%、5% 添加した水素ガスを用意し、ペレットの生成・射出を行い、四重極質量分析計 (QMS) を用いてペレット射出後の真空容器内の分圧上昇を測定することにより、ペレットに含まれているネオンの量を求めた。ネオン 5% 添加水素ガスを用いた実験では、ペレットの生成はできるものの、射出時もしくはガイドパイプを通過する間にペレットが壊れてしまい、健全なペレットを生成することができなかった。ネオンの添加割合が低くなると健全なペレットが生成・射出できるようになる。Figure 15 にネオン添加ペレットのシャドウグラフを示した。Figure 15(a) に示すようにネオン 0.5% 添加水素ガスを用いた場合は純水素の場合とほぼ同様な質のペレットが安定に射出できる。ネオンの添加量が 1% になると若干信頼性が落ちて Figure 15(c), (d) に示すように割れて射出される場合もある。

ペレット中に含まれるネオンガスの量を確認するために、ペレットが蒸発した後の分圧測定を四重極質量分析器 (QMS) で測定した。ペレット蒸発直後はガス圧が高すぎるために QMS 測定が不可能であるので、真空排気によって真空度が 10^{-3} Pa 以下になってから (約 10 s 後) QMS の測定を行っている。ネオンと水素の排気特性の違いから分圧の比は刻々と変化し、ペレット射出直後の組成比とは異なるため、各分圧の時間変化よりペレット射出直後の組成比を推定した。Figure 16 は水素とネオンの分圧測定結果である。分圧変化を指数関数でフィットすると、排気の時定数は水素が約 2 s、ネオンが約 4 s である。ペレット蒸発直後 ($t=0$ s) における水素に対するネオンの比は 1% 添加ガスを使用した場合は 1.1%、0.5% 添加ガスを用いた場合は 0.56% であり、使用したガスとほぼ同比率

でネオン原子が含まれていることが確認できた。

2.6.2 低速射出機構

ペレット入射条件が粒子供給特性やプラズマ特性に及ぼす影響を調べる上で重要なペレットパラメータは質量と速度である。ペレット質量はバレル内径を変えることによって比較的簡単に換えられるパラメータであるが、ターゲットプラズマの体積でペレットの適正サイズがほぼ決まってしまうために、ペレット質量を大きく変化させたペレット入射実験は難しい。一方、ペレット速度に関してはペレット入射装置の技術的な問題から速度が制限される。すなわち、in-situ パイプガン方式においては 2.2 で説明したように速度の上限は加速ガスのガス種とその温度で制限され、最低速度はバレルに凍り付いたペレットを剥離するのに必要な最低限の加速ガス圧によって制限され、単純には 800 m/s から 1200 m/s の間でしか変化させることができない。

速度を上げるための手段としては断熱圧縮による加速ガス温度の上昇を利用して速度を上げる 2 段式パイプガン方式 [19] 等があり 3000 m/s 以上の速度が達成されている。しかしながら、断熱圧縮によって高温高圧になった加速ガスによるペレットの破壊等の技術的課題があり、安定した射出性能を得ることはできてない。一方、ペレット速度の低速化に関してはバレルに凍り付いたペレットを機械的に剥離することによって比較的容易に低速化を実現する方法（メカニカルパンチ法）がある。本装置ではこの方法を考案した ORNL の協力を得て低速ペレット射出を可能にした。加えて、プラズマに対して任意の場所からペレットを入射する場合、曲がったガイド管を用いてペレットを任意の場所へ導く必要がある（2.6.3）が、その場合はガイド管内壁にペレットが衝突して破損することを防ぐために、ペレット射出速度を遅くする必要があり、このような観点からもペレットの低速化には大きなメリットがある。

Figure 17 にメカニカルパンチの原理図を示す。加速ガスを用いる場合は凍り付いたペレットがバレルから剥離した後も、バレルの中で広がるガスの伝播によりペレットが加速されつづけるのに対して、メカニカルパンチではソレノイドで駆動したロッドを用いてペレットを突いて加速するために、ロッドのストロークや速度によってペレットに与える力積を制御でき、低速化が可能である。また、メカニカルパンチで加速した後に加速ガスを加えることによってガスを利用した追加速ができ、Figure 18 に示すように 100 m/s の低速から加速ガスで達成できる高速領域まで運転領域を広げることができるようになった。

2.6.3 湾曲ガイド管を用いたペレット搬送

プラズマ中でペレットが溶発して生じる高密度プラズモイドが低磁場側ヘドリフトし、通常のトラス外側からのペレット入射では粒子供給効率が悪化する一方、高磁場側からのペレット入射によって燃料供給効率が劇的に改善する現象がトカマク装置において観測されている [20]。この現象はペレット溶発プラズモイド内に形成される電場と閉じこめ磁

場に起因するドリフトに依るものと考えられており，その機構を検証するために LHD の多様な磁場構造を用いたペレット入射実験を行っている．この研究の遂行には異なった場所からペレットを入射することが求められるために，湾曲ガイド管を用いてペレットを任意の場所へ搬送する必要がある．しかしながら，固体水素の強度は金属に比して非常に弱いので，ガイド管の曲げ半径が小さいとガイド管内壁との接触による応力および衝突によりペレットが壊れてしまうことが容易に想像できる．ここでは LHD における内ポートからのペレット入射実験に用いた湾曲ガイド管のペレット通過特性を調べた．LHD 実験で使用する湾曲ガイド管の形状を Figure 19 に示す．湾曲部は曲げ半径 0.8 m の 90° 曲げが 3 ヶ所，曲げ半径 0.3 m の 90° 曲げが 1 ヶ所あり，湾曲部間は直管でつながられている．また，用いたガイド管の内径と全長は 7.5 mm ϕ ，19 m である．このガイド管を通過した後のペレットのシャドウグラフを撮影し，ペレット速度と通過後のペレット健全性を調べた結果を Figure 20(a) に示す．通常の直管ガイド管を用いた場合は 1200 m/s を超える速度でも健全なペレットが射出できていたのに対して，湾曲ガイド管を用いた場合，450 m/s 以上の速度領域では健全なペレットを得ることができなかった．射出速度を下げるにつれて健全なペレットの割合が増加し，300 m/s 以下の速度領域になるとほぼ確実に健全なペレットが得られるようになる．湾曲ガイド管通過後のペレット形状は Figure 20(b) に示すように，射出時形状（3 mm 正円柱）を維持しており，速度条件が適当であれば湾曲ガイド管内における顕著な損耗はない．また，湾曲ガイド管通に伴う速度低下は ORNL との共同研究で行った模擬試験より，5-10 % であることが確認されている [25]．すなわち，300 m/s 以下の低速ペレットを用いることによって，湾曲したガイドチューブを通じて多様な場所へペレットを導くことが可能であり，ペレット入射条件の選択肢を広げることができるようになった．

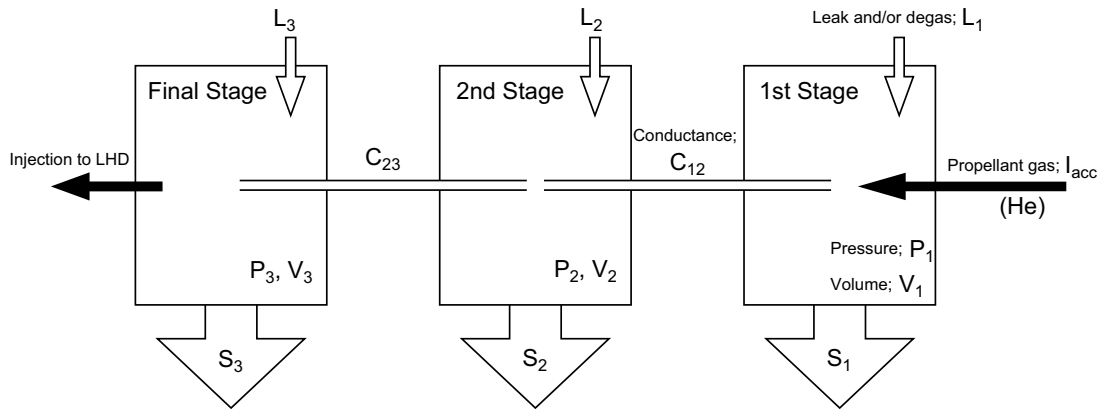


Figure 10 Diagram of the three stage differential pumping system.

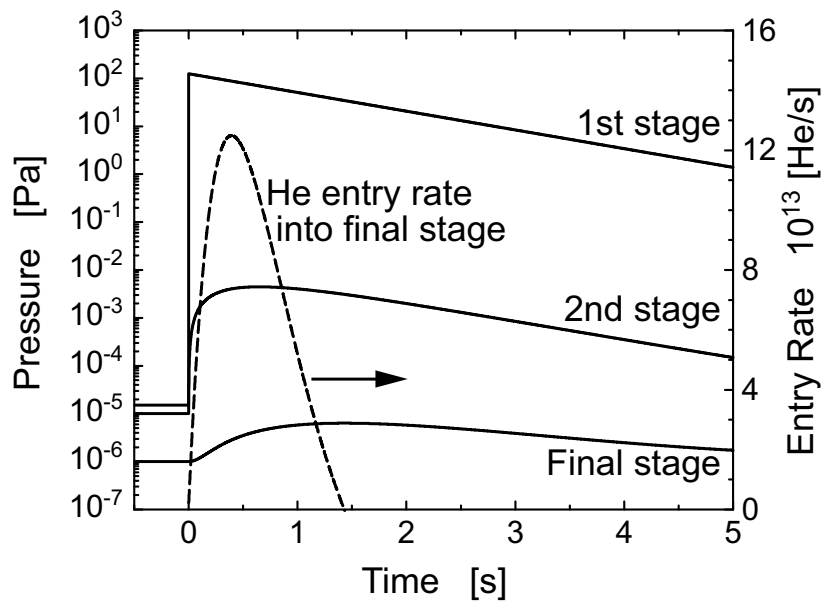


Figure 11 Propellant gas exhaust characteristic of the three stage differential pumping system in pipe gun pellet injector.

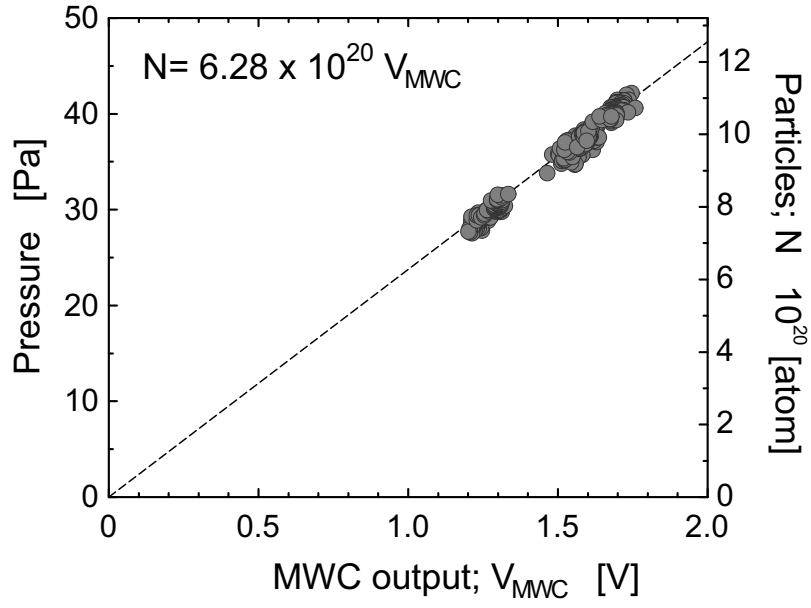


Figure 12 Calibration of the microwave cavity pellet mass measuring device.

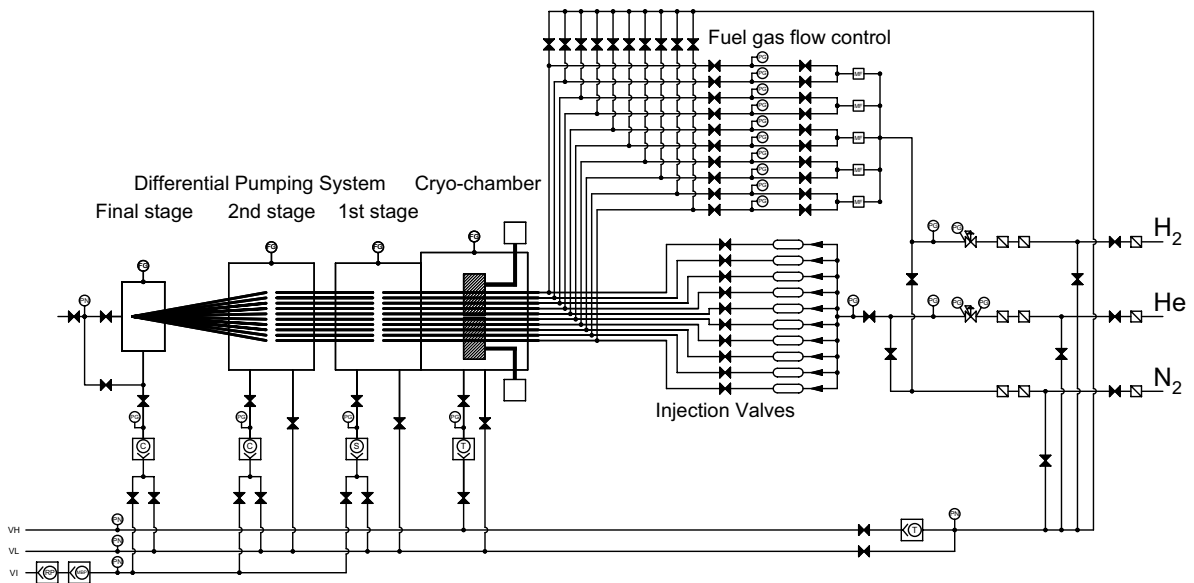


Figure 13 Schematic diagram of the pipe gun pellet injector.

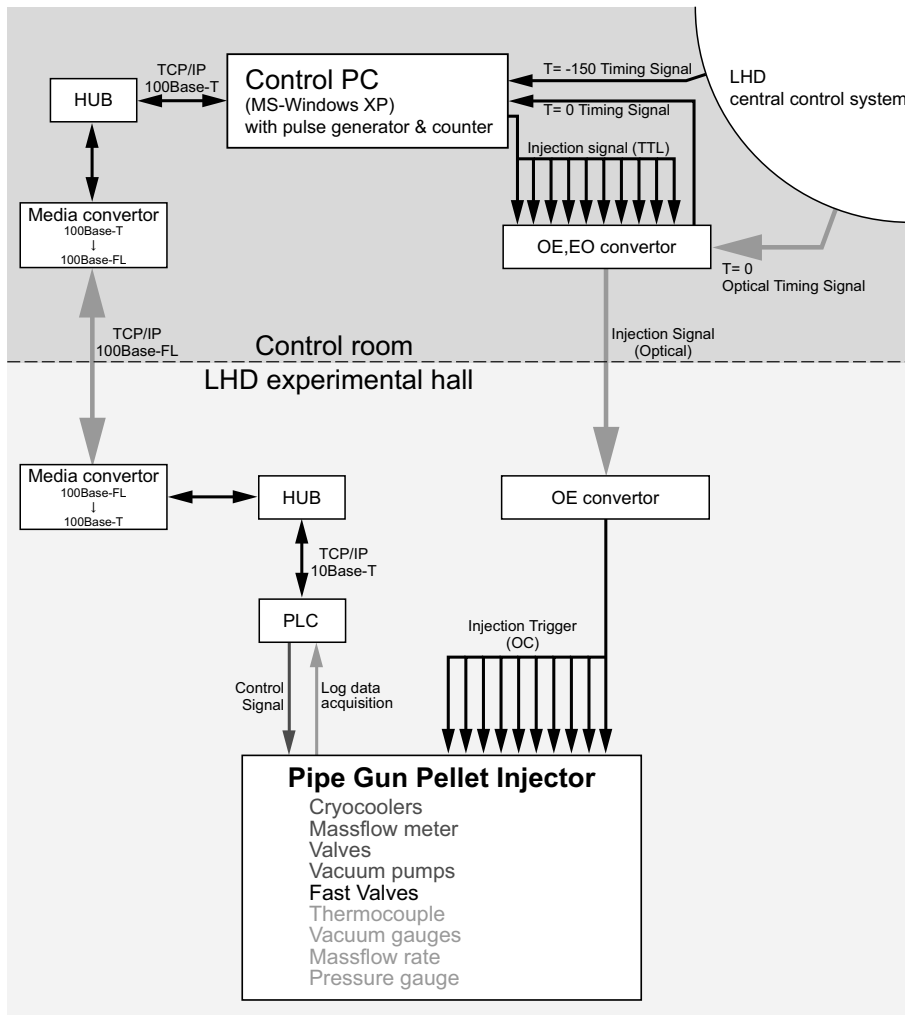
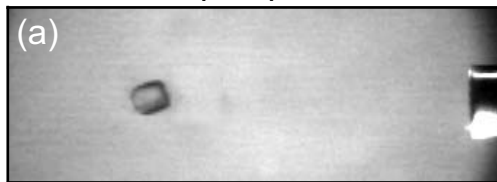


Figure 14 Control signal flow chart of the pipe gun pellet injector.

Ne 0.5 % doped pellet



Ne 1.0 % doped pellet

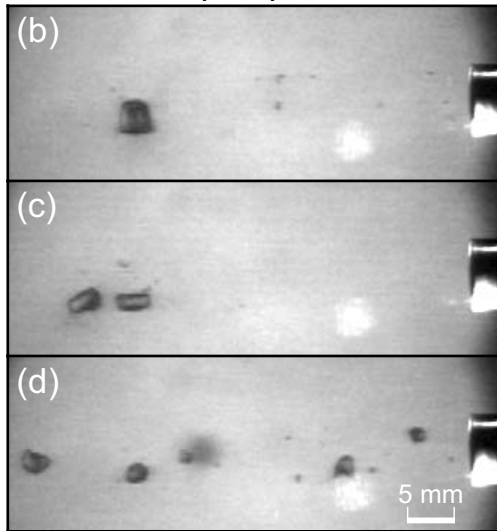


Figure 15 Shadowgraph images of the neon doped pellet.

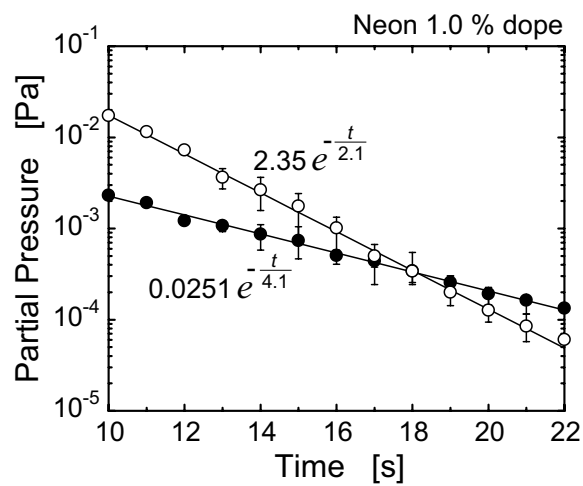
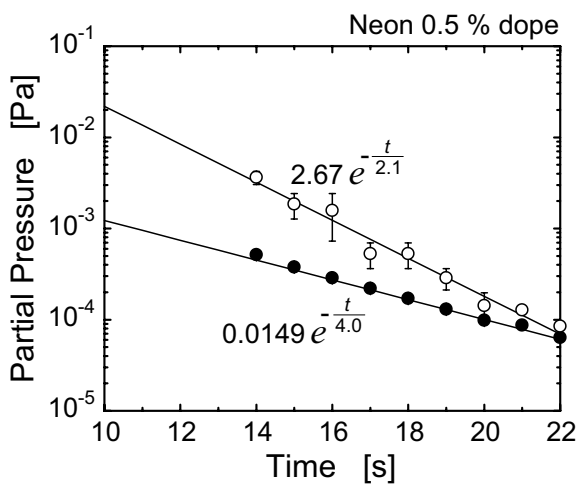


Figure 16 Temporal change in partial pressure after evaporation of the neon doped pellet.

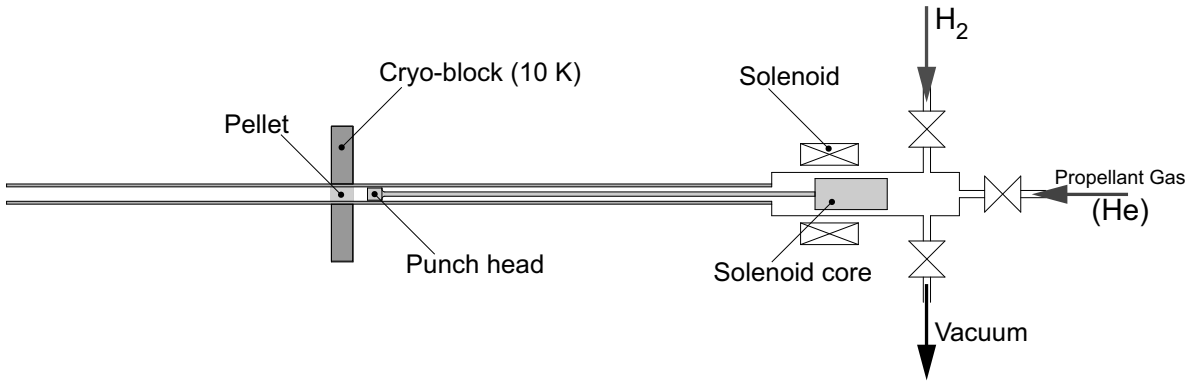


Figure 17 Diagrammatic illustration of the mechanical punch system for slow pellet injection.

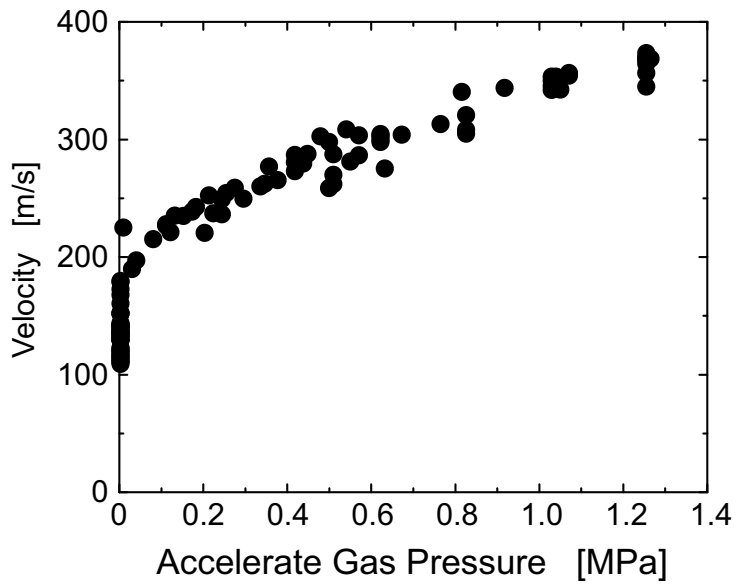


Figure 18 Pellet velocity control by using mechanical punch and additional propellant gas.

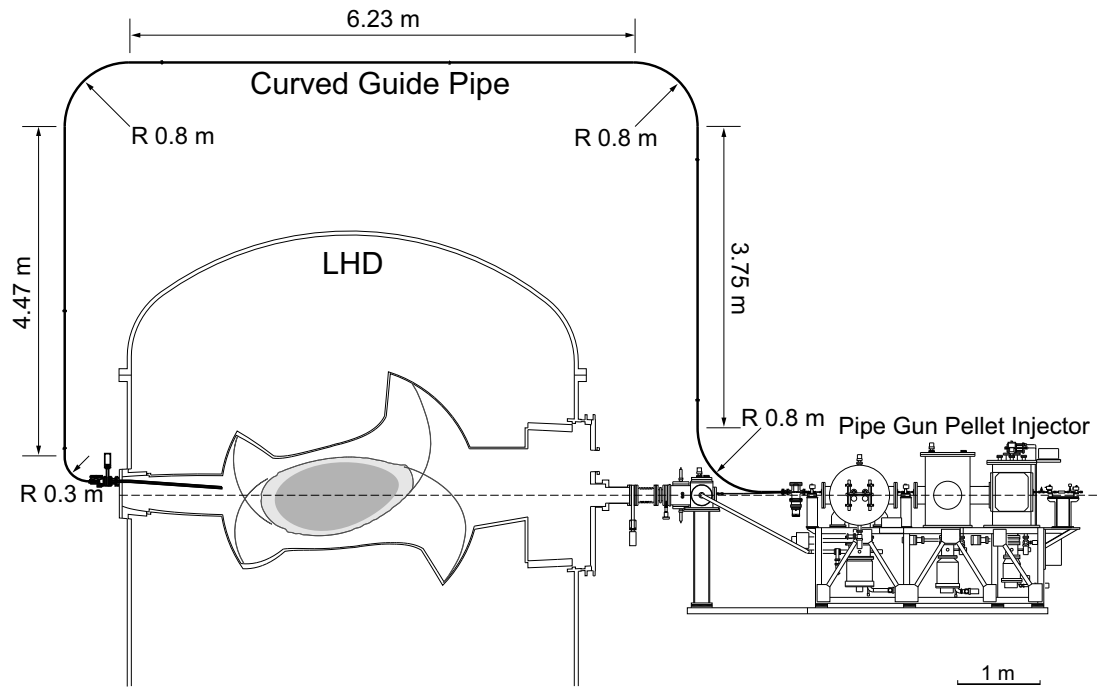


Figure 19 Curved guide tube layout for inside launch on LHD.

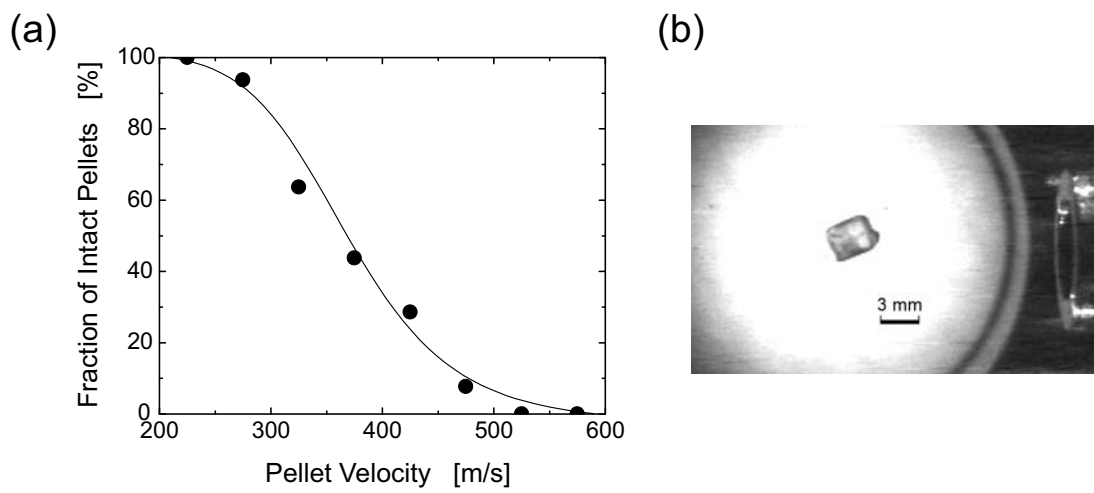


Figure 20 Pellet survival result from the curved guidetube.

3 スクリュー押出式連続ペレット入射装置

3.1 概要

LHD 第 2 実験サイクルに開始したパイプガンペレット入射装置を用いた LHD プラズマへのペレット入射実験によって、ペレット入射による粒子供給は閉じ込め特性の劣化を抑制しつつ、ガスパフでは達成できない高密度にまで LHD の運転領域を伸展させることができることが明らかになった [21, 22]。ペレット入射による運転領域の伸展はペレット入射後の密度分布が緩和する過程で達成され、そのメカニズムは明らかになっていないが、現象的には断熱的なペレット溶発現象直後の輸送が改善されて温度の回復が密度減少よりも顕著であることに起因している。しかしながら、これまで使用してきたパイプガン式ペレット入射装置ではペレット入射数に制限があるために、一度達成した高密度状態を維持することができず、運転領域の伸展は過渡的な現象であった。この過渡的に得られた高閉じ込め特性のメカニズムを明らかにし、その長時間維持を目指した研究を行うためには長時間連続してペレットを入射できる装置が必要となる。以上のことを踏まえ、連続ペレット入射装置の開発を行った。

連続ペレット入射装置はペレット入射装置開発の初期段階（1980 年代）から開発されてきており [16, 23, 24]、既に JET, ASDEX-Upgrade, DIII-D, JT-60U では連続ペレット入射を用いたプラズマ実験が行われている。これらの連続ペレット入射装置では固体水素生成方法として、予めクライオシリンダ内で固化させた水素をピストンにて押し出す方法を用いているために、シリンダ容量でペレット射出数が制限（数 10～100 発）されるものの、現在行われている典型的なプラズマ実験の放電時間（ < 10 s）を考慮すれば、これらの方法は十分な性能を有しているといえる。一方、近年三菱重工業で発案され [26]、ロシアの PELIN で開発された固体水素生成方式 [27][28] はスクリュー内蔵のクライオシリンダ内で連続的に水素の液化、固化プロセスを進めながら固体水素を押し出すため、原理的に完全定常で固体水素生成が可能である。われわれは核融合炉での使用を想定しうる粒子供給装置を目指し、このスクリュー押し出し方式を用いて LHD 用連続ペレット入射装置の開発を行った。装置に要求する性能としては、これまでのプラズマ実験の結果を反映し、以下に挙げた項目を設定した。

1. LHD プラズマに与える擾乱を抑制するために、ペレット 1 個あたりの密度上昇を $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とする。すなわち、ペレット質量は $3 \sim 6 \times 10^{20}$ atoms となる。
2. 柔軟な密度制御性を確保するために、LHD における典型的な粒子閉じ込め時間よりも短い繰り返し間隔でペレットを射出できるようにする。すなわち、射出周波数は 10 Hz 以上とする。
3. プラズマの中心部への粒子供給には高速度のペレット入射が有効である一方、任意

の場所からのペレット入射実験を行う際に必要となる屈曲ガイド管を用いるためには 300 m/s 以下の低速度入射が必要となる [25] ので、ペレット入射速度は 200 m/s から 700 m/s 以上までの間で可変とする。

4. ペレット入射継続時間は現在の LHD 実験の目標である 1000 s 以上とするが、原理的には制限の無いものとする。

加えて、既設パイプガン式ペレット入射装置の経験を生かし、固体水素生成部の冷却に液体ヘリウムの供給を必要としない Gifford-McMahon サイクル小型冷凍機 (SHI SRDK-415D, total 20 W @ 8 K) を 2 台用いて常時稼動可能な装置とした。ペレット加速方法としては、パイプガンと同様なニューマチック加速方式の他に遠心加速方式が選択可能である。遠心加速方式は回転体の遠心力を利用した加速方式で、加速ガスを必要としないために扱う総ガス量を少なくでき、定常射出時においては大きなメリットがある反面、加速に用いる部品とペレットの衝突に伴うペレット損耗の問題がある。また、射出タイミングは回転体と同期させる必要があるために射出タイミングの設定に制約があり、本装置は基礎実験のツールであることを考慮し、射出タイミングの柔軟な設定が可能なニューマチック加速方式を採用した。

本装置の制御系は前述のパイプガン式ペレット入射装置と同様な形態を採っており、装置運転に関する全ての操作が制御室に置かれた制御計算機にて行えるようにした。また、連続ペレット入射装置本体は Figure 21 に示すように、固体水素連続生成部および 3 段の差動排気チャンバから構成される。

3.2 固体水素生成と射出

3.2.1 スクリュー押出式固体水素生成部

本装置における固体水素生成部の構成図を Figure 22 に示す。スクリューを内蔵した銅製シリンダの最下部を 2 台の冷凍機冷却ヘッド (2nd stage) に接続しており、銅製シリンダ下部は待機時は 6 K 以下に冷却されている。一方、スクリューを回転させて固体水素を押し出す際は極低温にて硬くなった固体水素によって装置に加わる負荷を低減するために銅製シリンダに貼り付けたヒータにて 10 K まで温度を上昇させている。銅製シリンダの周囲は冷凍機の 1st stage (40 K) で冷却された銅製サーマルシールドで全方向囲まれており、シリンダへの輻射熱の侵入を防いでいる。固体水素生成部の冷却特性を Figure 23 に示す。冷却速度は -1.0 K/min であり、約 4 時間で室温から運転温度まで冷却することが可能である。冷凍機を停止させた後の自然な昇温速度は 0.14 K/min であり、約 12 時間かけて 150 K まで上昇する。

固体水素生成部へ供給した水素ガスはサーマルシールドと同温度で冷やされた熱交換器にて低温のガスにしてから、スクリューが回転しているシリンダ内へ供給される。シリンダ内でガスはさらに冷却され、シリンダ下部へ凝縮する。最も低温になっているシリンダ

最下部では液体水素がさらに冷却されて固化し、スクリーにて固体水素が内径 2.5 mm ϕ のノズルより押し出される。このとき固体水素はスクリーによる圧縮、せん断、摩擦に起因する発熱によって局所的に液化するが、ノズル部において再固化し、最終的にはノズルと同径の固体水素ロッドが押し出される (Figure 24)。この固体水素生成法では水素ガスの供給、液化、固化、押し出し過程を同時に進行させているために原理的に完全定常運転が可能である。

最終的には生成された固体水素ロッドを 2.5 mm のペレット形状に切断して射出するが、切断の際に無駄になる長さが 20 % 程度あると仮定すると、射出周波数の目標値である 10 Hz を達成するためには 30 mm/s 以上の固体水素押し出し速度が必要である。一方、押し出し速度を上昇させると、発熱により固体水素の生成に支障を来すようになる可能性がある。固体水素生成部温度は三重点温度 (13.9 K) 以下に保つ必要があるが、本装置では固体水素生成運転の安定性を確保するために余裕を持たせて 13 K を運転限界としている。すなわち、固体水素連続生成時の許容温度上昇としては、押し出し開始温度 (10 K) から固体水素生成運転限界までの 3 K である。本装置における固体水素連続生成時の冷却部温度上昇を Figure 25 に示す。横軸は固体水素押し出し継続時間、縦軸は押し出し開始時からの温度上昇分を示している。押し出し速度が 17 mm/s 以下の場合、押し出しによる冷却部の温度上昇が全く見られないが、わずかに押し出し速度を上昇させた 20 mm/s では徐々に温度が上昇してゆく傾向が見られ、さらに目標値である 30 mm/s まで押し出し速度を増やすと温度上昇が大きくなっている。しかしながら、600 s 後の到達温度はわずか 0.4 K 程度であり、許容温度上昇 (3 K) に比べると小さい値となっている。また、実験で得られた温度上昇を指数関数でフィットすると、250 s 程度の時定数で飽和する傾向にあり、予測される到達最大温度上昇は 20 mm/s のとき 0.3 K、30 mm/s のときでもわずか 0.45 K であった。すなわち、本装置で用いているスクリー押し出し式固体水素生成部は固体水素を 10 Hz で定常射出するのに十分な固体水素を生成でき、更なる高繰り返し射出にも対応できる性能を持っている。

3.2.2 固体水素ロッド切断とペレットの加速

固体水素生成部のノズルからはロッド状の固体水素が連続的に押し出されるため、プラズマ中へ射出するためにはペレット形状に切り出す必要がある。本装置ではニューマチック加速方式を採用するために、固体水素の切り出し方法としてパイプ形状のカッターを用い、固体水素の切り出しと射出を一連の操作で行っている。固体水素ロッド切断およびペレット加速部の構造図および動作過程を Figure 26 に示す。この部分は固体水素押し出しノズルの直下に加速バレルの断続部を設け、その上に加速バレル外径とフィットする内径を持つステンレスパイプ (カッティングデバイス) を被せた構造になっている。カッティングデバイスの一端にはソレノイド駆動用の鉄心がついており、他端は固体水素を通過させるための縦穴が開いており、以下の過程でペレットを射出する。

- 1) 待機位置ではバレルの断続部とカッティングデバイスの縦穴が一致しており，ノズルから押し出される固体水素ロッドはバレルを通過し，下方へと伸びる．
- 2) 射出時は先ずカッティングデバイスがソレノイドによって駆動され，固体水素が切断されてパイプ内に装填されると同時にバレル断続部はカッティングデバイスによって封じられる．なお，待機時にバレル径よりも長く押し出された余剰な固体水素はペレット切り出し時に下へ落ち，蒸発して真空ポンプによって排気される．
- 3) 10 ms 遅らせて高速射出弁を開き，加速ガス（ヘリウム）をバレルに印加してペレットを射出する．
- 4) 射出後，カッティングデバイスを待機位置に戻し，固体水素ロッドを再びバレル断続部を通過させて，次の射出タイミングトリガを待つ．

Figure 27 はシャドウグラフによって得られた典型的なペレット像である．シャドウグラフ上のペレット像は正方形に投影されているが，実際は円形断面の固体水素ロッドを直角方向から円形断面のカッタで切り出しているために円柱の角を丸めたような形状をしている．ペレットの実際の形状を考慮して画像上のサイズより体積を推定し，加えて個々のペレットのばらつきも考慮して約 700 個のペレットの平均からペレットに含まれる粒子数を評価した結果，ペレットに含まれる粒子数は約 5×10^{20} atoms であった．

固体水素ロッドの押し出し速度が十分速い場合，上述のペレットサイズが得られる．逆に，射出と射出の間にバレル径よりも短い固体水素ロッドしか押し出されなかった場合は，小さめのペレットが射出されることとなる．すなわち，固体水素押し出し速度と射出間隔を調整することによって，バレル径よりも小さなサイズの固体水素ペレットを射出することも可能である．このようにして得られたペレットの形状は対称性のない形状をしているため，シャドウグラフから質量を推定することができない．また，動的平衡状態でペレットサイズを調整しているために単発のペレットを射出することができず，真空度ビルドアップによる質量測定も不可能である．よって，ここでは押し出し速度が十分速い条件において得られたシャドウグラフより求めたペレット質量で較正したマイクロ波キャビティ質量計を用いて質量を計測した．Figure 28 は射出間隔を 10 Hz 一定として，固体水素ロッドを押し出すスクリューの回転速度を変化させた場合のペレット質量をプロットしたものである．なお，本装置ではスクリューの回転速度が 1 rpm のとき約 1 mm/s の固体水素が引き出されるが，ここでは設定パラメータであるスクリューの回転速度を横軸にとっている．このように固体水素の押し出し速度にほぼ比例した質量のペレットを射出することが可能である．ただし，回転速度が 11 rpm 以下でのペレット射出においてはペレット射出の再現性が極端に落ちる現象が観測された．すなわち，本装置では $1.5 \sim 5 \times 10^{20}$ atoms のペレットを安定して射出することが可能である．

ペレットの射出速度に関しては，ニューマチック加速方式を採用しているので，前述のパイプガン式ペレット入射装置と同様に式 (2)，(3) から予測されるべきだが，実際に得ら

れたペレット速度は Figure 29 に示すように最大でも予測値の半分以下であった。また、加速ガス圧を高くすると速度も速くなることが予測されるのに対して、実際の速度は加速ガス圧が高くなるにつれて低下する傾向にある。この現象は高速射出弁の閉動作が加速ガスの圧力に依存していることに起因している。すなわち、本装置で採用している高速射出弁は高繰り返し周波数でバルブを高速開閉させる必要があることから、加速ガスの圧力によって弁体の閉動作を行わせる方式を採用している。この方法の利点としては、(1) 弁体の閉保持に強力なバネを使用しないことから、開操作時に必要となる電力を小さくできるために駆動電源の充電時間を短くでき、高い射出周波数にも対応できる、(2) パイプガン方式の加速方法では加速ガスの排気が問題となるが、加速ガス流量が大きくなってしまいう高圧領域では自動的にガス量を抑制する特性があり、使用する加速ガス圧に依らず差動排気システムに応じた最大流量を設定できる、がある。このことは加速ガスの使用量からも裏付けられる。Figure 30 は 1 ショットあたりの加速ガス流量をプロットしたものである。バルブの開度が一定であれば流量は加速ガス圧にほぼ比例して増加するはずであるのに対して、加速ガス流量は 0.5 MPa までは圧力に比例して流量が増加しているが、それ以上の加速ガス圧領域においては流量が減少し、ペレットの速度が低下している 4 MPa 以上の圧力ではほとんど加速ガスを供給しなくなっている。本装置では 2~3 MPa の加速ガスに最適化したシステムとしており、このときの加速ガス流量は 1 ショットあたり 0.5 Pa m^3 以下である。この値はパイプガン式ペレット入射装置における 1 ショットあたりの加速ガス流量、約 15 Pa m^3 、の 1/30 以下の量であり、3.3 で述べるように 10 Hz 射出時においても十分に排気できる量に抑えられている。

得られるペレット速度が加速ガス圧からの予測値より遅いのは、上記の理由でガス供給量が抑えられており、実効的な印加ガス圧が低下していることに起因している。例えば、2 MPa における加速ガス流量は 0.6 Pa m^3 であるが、ペレット初期位置よりも上流側のバレル内体積（内径 2.5 mm、長さ 250 mm）で除して実効的な印加圧力に直すとおおよそ 0.5 MPa となる。加速ガス圧が 0.5 MPa のときの予測される速度は 550-700 m/s 程度であり、加速ガス圧が 2 MPa のとき実験で得られた速度（550 m/s）が説明できるようになる。

3.3 差動排気

連続ペレット入射装置における差動排気システムもパイプガン式ペレット入射装置と同様に 3 段の差動排気システムを採用している。しかしながら、パイプガン式ペレット入射装置はパルス的なガス流入であったのに対して、本装置では定常的な差動排気を行う必要がある。そのため、真空容器の容量で圧力上昇を抑える方式は使用できず、実時間で流入ガスを排気しなければならない。差動排気の第 1 段、第 2 段では比較的高い圧力でも十分な排気特性を有するヘリカル溝ポンプを使用し、特に第 1 段目は大容量ルーツポンプも併設した。最終段では LHD の真空容器圧力と同程度以上の高真空度を達成するために十分

な容量を持つターボドラッグポンプを用いている．10 Hz でペレットを射出していることを想定し，差動排気システムの加速ガス排気特性を式 (4) にて評価した結果を Figure 31 に示す．なお，本計算で用いた各パラメータを下に示す．

$$\begin{cases} I_{acc} = 1.5 \text{ Pa m}^3 \times 10 \text{ Hz} = 15 \text{ Pa m}^3/\text{s} \\ V_1 = 0.07 \text{ m}^3, \quad V_2 = 0.07 \text{ m}^3, \quad V_3 = 0.015 \text{ m}^3 \\ S_1 = 0.27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}, \quad S_2 = 0.27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}, \quad S_3 = 0.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \\ C_{12} = 1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1}, \quad C_{23} = 4.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \\ L_1 = L_2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3\text{s}^{-1}, \quad L_3 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3\text{s}^{-1} \end{cases}$$

横軸は時間，縦軸は各段の圧力上昇および最終段への加速ガス粒子流入量を示した．定常的に 15 Pa m^3 のガスが流入することにより第 1 段の真空度は直ぐに 100 Pa 近くまで上昇するが，最終段は 10^{-6} Pa 以下の真空度が維持されており，プラズマ放電中の LHD 真空容器 ($> 10^{-4}$) よりも十分低い値であるので LHD 真空容器へのガス流入はないと考えられる．また，最終段への粒子流入量を評価すると，最終段の真空度が定常状態に達するまでの約 2 秒間はガスが流入するが，その量は 10^{12} のオーダーであり，この粒子が全てプラズマ真空容器へ流入したとしてもペレット粒子数 ($5 \times 10^{21} \text{ H/s}$) に比べて無視しうる値である．

3.4 遠隔制御システム

本装置の制御系統は Figure 32 のようになっており，約 100 点の接点入出力および約 30 点のアナログ入出力より構成されている．これらの制御信号は前述のパイプガン式ペレット入射装置と同様に，現場制御盤内に置かれた PLC に取り込まれている．装置近傍に置かれた 2 台の PLC と制御室の制御計算機 (Windows PC) はプライベートネットワークを構成しており，TCP/IP プロトコルによって通信している (Figure 33)．全ての制御パラメータは制御計算機上で動作している Visual BASIC で組まれた GUI プログラムにて設定し，PLC は制御計算機から設定された制御パラメータに則り要素プログラムを実行するようになっており，運転者は制御室に置かれた制御計算機から装置運転に関する全ての操作が行える．PLC へ取り込まれた温度や真空度，装置状態等の測定データは PLC 上の A/D 変換器でデジタル化された後，制御計算機に送信され，ログデータとして常時 3 秒毎に固定ディスクへ保存されている．

ペレット射出タイミング制御は制御計算機の PCI スロットに搭載したファンクションジェネレータおよびカウンタユニットを用いている．LHD 中央制御装置から受けた $t=0$ トリガを起点として，ファンクションジェネレータが発生する 1 kHz パルス波の波数をカウンタユニットで数え，予め設定した射出タイミングに相当するカウントと一致したとき射出トリガを生成している．また，射出トリガを射出電源へ入力する前に信号比較器を用いたトリガフィルタを挿入しており，プラズマ密度信号と設定密度を比較し，プラズマ密

度が設定密度よりも高い場合は射出トリガをフィルタリングしている．同時にプラズマからの放射強度信号も入力しており，プラズマが存在しない場合も射出トリガをフィルタリングしている．この機能により，連続ペレット入射による密度負帰還制御を可能とし，かつ不必要なペレットが LHD 真空容器内へ入ることを防いでいる．

3.5 長時間射出特性

本装置の最大の特徴である長時間連続射出時の特性を調べるために 10 - 11 Hz の射出周波数で 100 s および 1000 s の連続射出試験を行った．ペレットは高速で飛翔しているために，その計測には μs オーダーのサンプリングが必須である一方，本試験では長時間の計測も必須となり，データ収集手段が制限される．本試験ではペレットの状態を最も確実に把握可能なシャドウグラフにてペレットの計測を行った．速度測定に関しても Figure 34 に示すように，遅延パルサを用いたフラッシュランプの 2 重露光を用いて，1 枚のシャドウグラフ画像上の異なるタイミングに露光したペレット位置と遅延時間からペレット速度を求めている．100 s 射出試験では 1000 発全てのペレットのシャドウグラフおよび速度を記録し，それらの変化を調べた．Figure 35(a) は 100 s の連続射出試験時のペレット速度を射出継続時間に対してプロットしたものである．平均速度はおおよそ 550 ± 70 m/s で，全体的に見て速度のバラつきが大きいものの，射出終了まで安定した射出が行われている．また，射出開始から 50 発目付近までは射出速度が変化しており，不安定な傾向が見られる．同様な傾向はペレット像 Figure 35(b) にも現れており，射出開始直後のペレットは形状が不安定で，壊れて射出されているものもある．一方，100 発目以降は 1000 発目まで安定したペレットが得られている．この現象の理由としてはカッター温度の変化が考えられる．すなわち，カッターは可動部品故に積極的な冷却を行っていないが，切断動作の際に固体水素と触れるために射出開始後，間接的に冷却されるようになる．そのため，射出開始直後はカッターからの熱侵入によって固体水素温度が上昇し，ペレットの質が落ちてしまう．一方，固体水素との接触によりカッターが十分に冷却され，一定温度になった後は安定した固体水素切断およびペレット射出が行えるようになる．このように射出開始初期に壊れたペレットが数発観測されたが，射出が安定してからは壊れたペレットが観測されていない．よって，実際にプラズマ実験で使用する際は，ペレット入射タイミングより前に固体水素の切断を行い，カッターを冷却することによって安定した射出を得ている．これらのペレット入射タイミングよりも前に切断，射出されたペレットがプラズマ中へ入射されることを防ぐために，第 2 段真空容器には圧空駆動回転導入器を用いたシャッターが設けられており，入射タイミング前に切断，射出されたペレットはシャッターへ衝突，蒸発し，差動排気システムで排気されるようになっている．

1000 s に関しては画像記録メモリの制限上，全てのデータを保存することができないため，約 120 s 毎に 100 個 (10 s 間) のペレットのデータを収集した．Figure 36 には 10 Hz

で 1000 s の連続射出試験を行った結果を示す．100 s 連続射出時と同様に約 550 ± 70 m/s の速度が 1000 s 後の射出終了時まで維持されている．また，固体水素生成部の温度上昇は最終的に 0.5 K 程度でほぼ飽和しており，10000 発目のシャドウグラフを見ても健全なペレットが得られている．このようなことから，これ以上の長時間射出を妨げる要因は見当たらず，本装置は優れた長時間射出特性を有していることが示された．

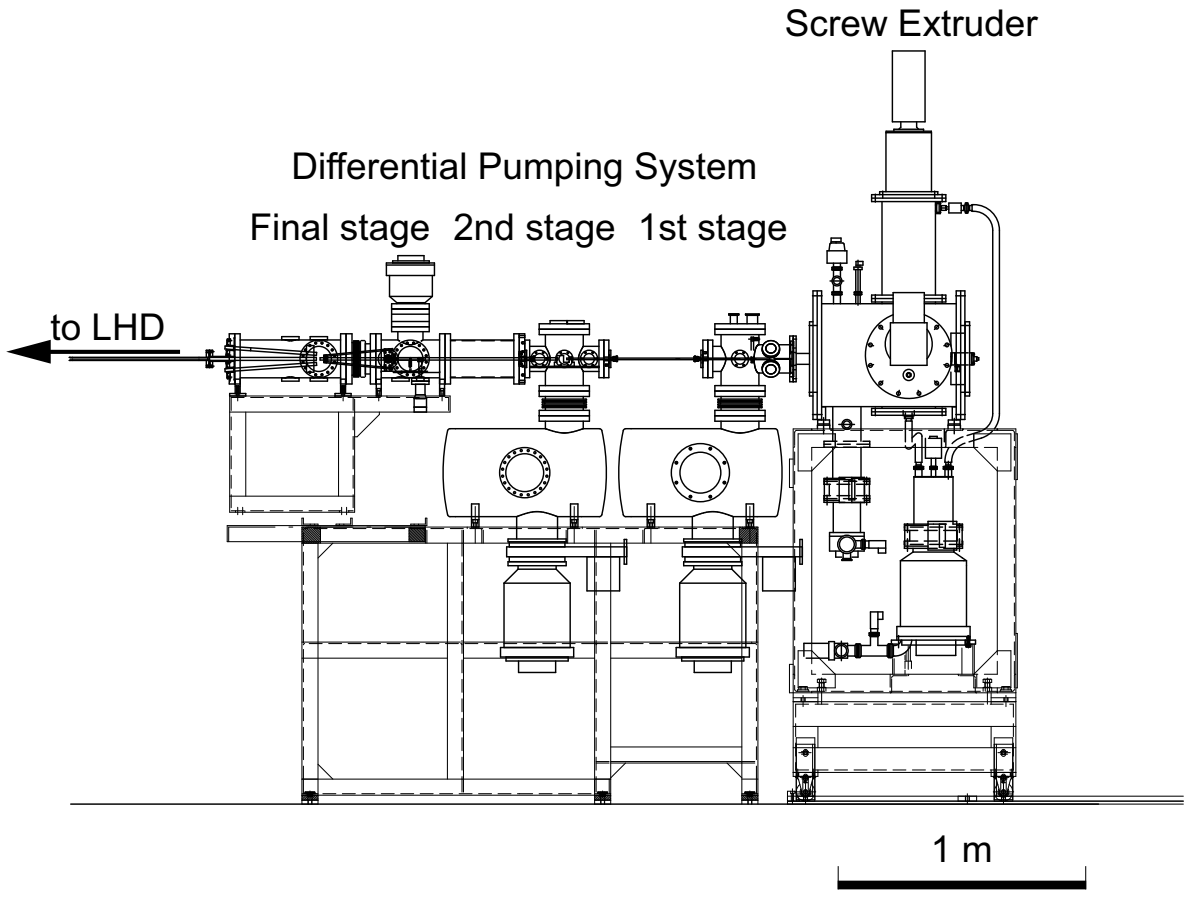


Figure 21 Schematic elevation of the repetitive pellet injector for LHD.

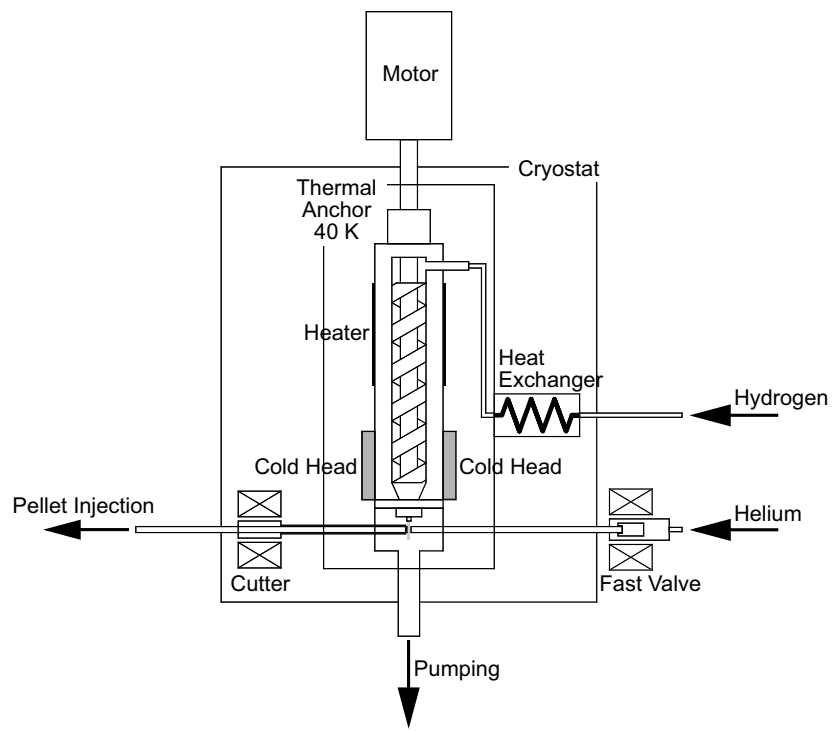


Figure 22 Schematic diagram of the screw extruder for continuous hydrogen solidification.

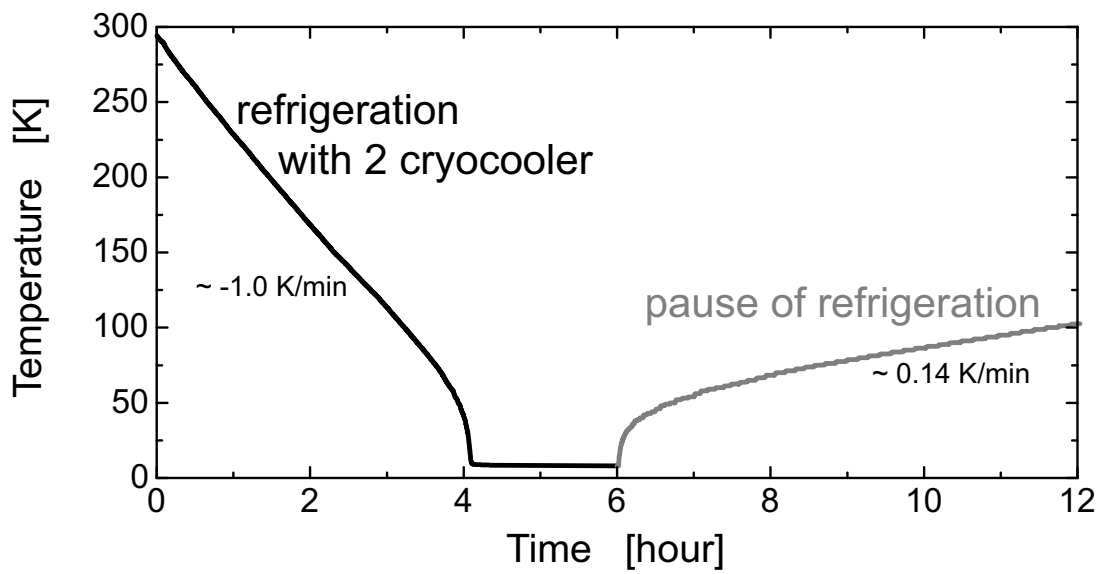


Figure 23 Temperature at screw extruder during cooling down and paused phase.

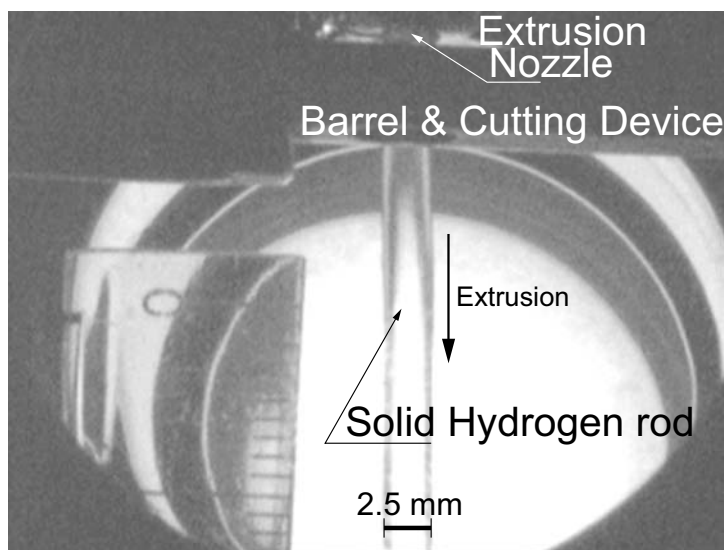


Figure 24 Extruded solid hydrogen rod from the screw extruder.

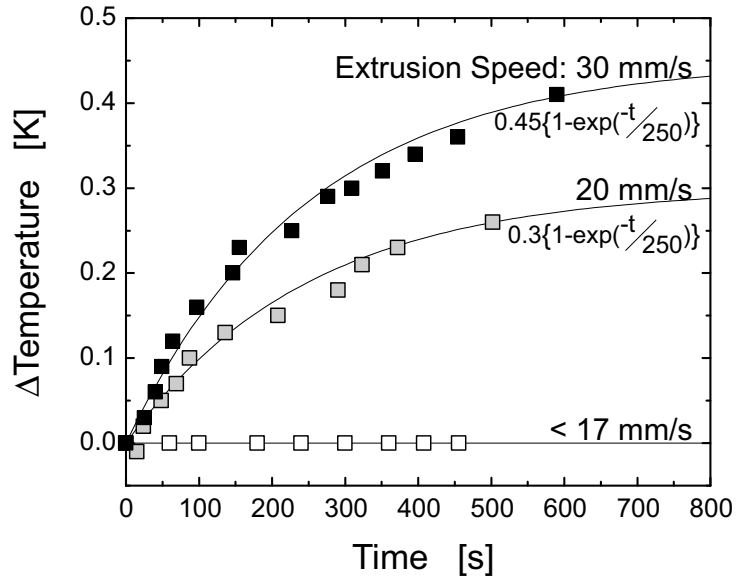


Figure 25 Temperature rise during solid hydrogen extrusion.

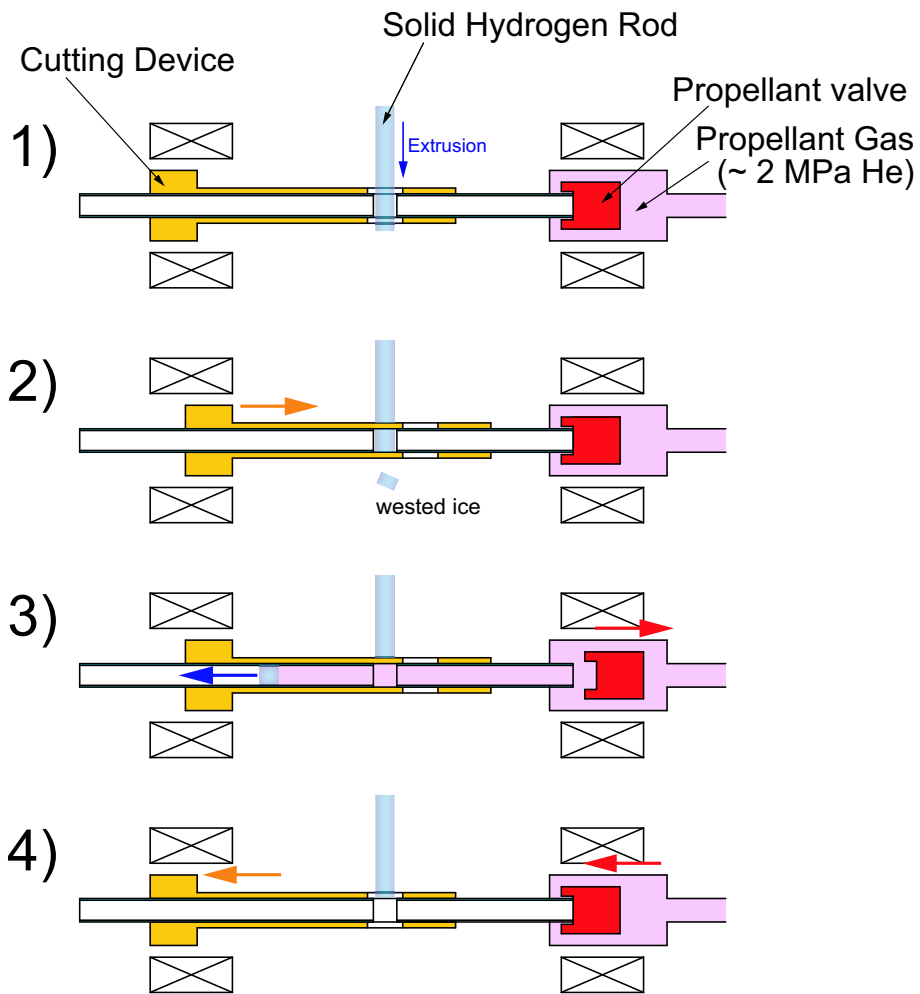


Figure 26 Mechanism of the solid hydrogen cutting and injection.

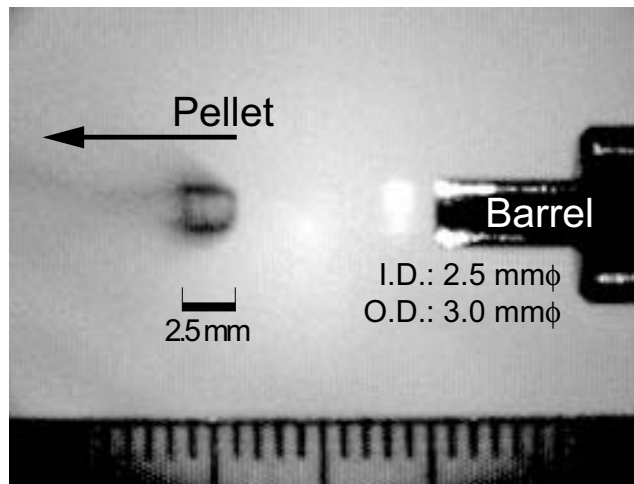


Figure 27 Shadowgraph image of the pellet.

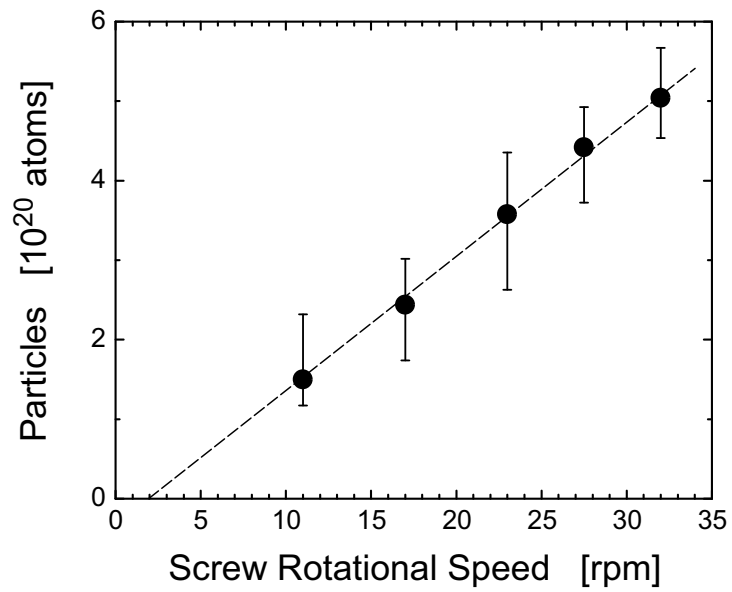


Figure 28 Dependence of pellet mass on extruding speed.

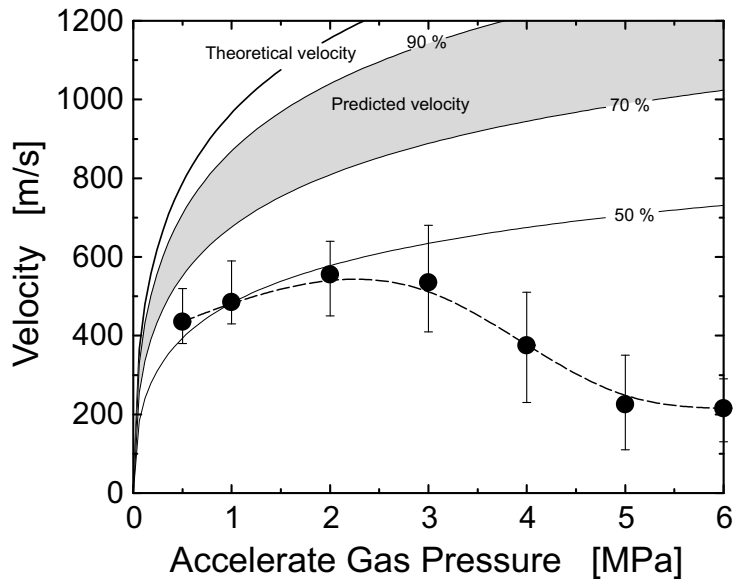


Figure 29 Muzzle Velocity of nominal 2.5 mm diameter pellets accelerated in the repetitive pellet injector.

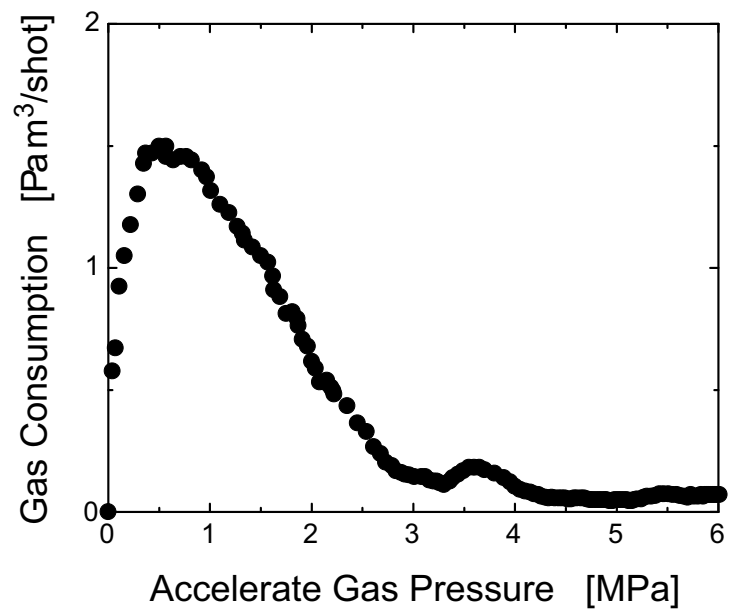


Figure 30 Propellant gas consumption in the repetitive pellet injector.

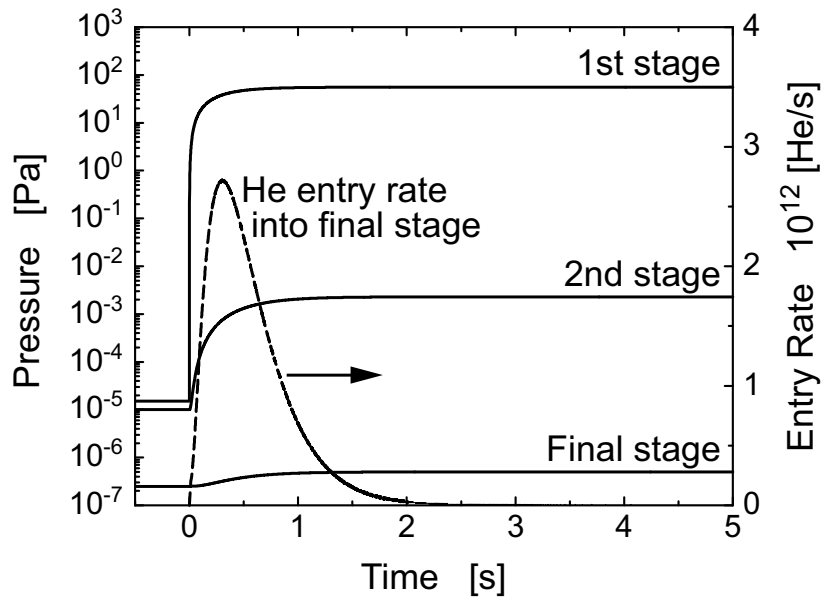


Figure 31 Propellant gas exhaust characteristic of the three stage differential pumping system in the repetitive pellet injector.

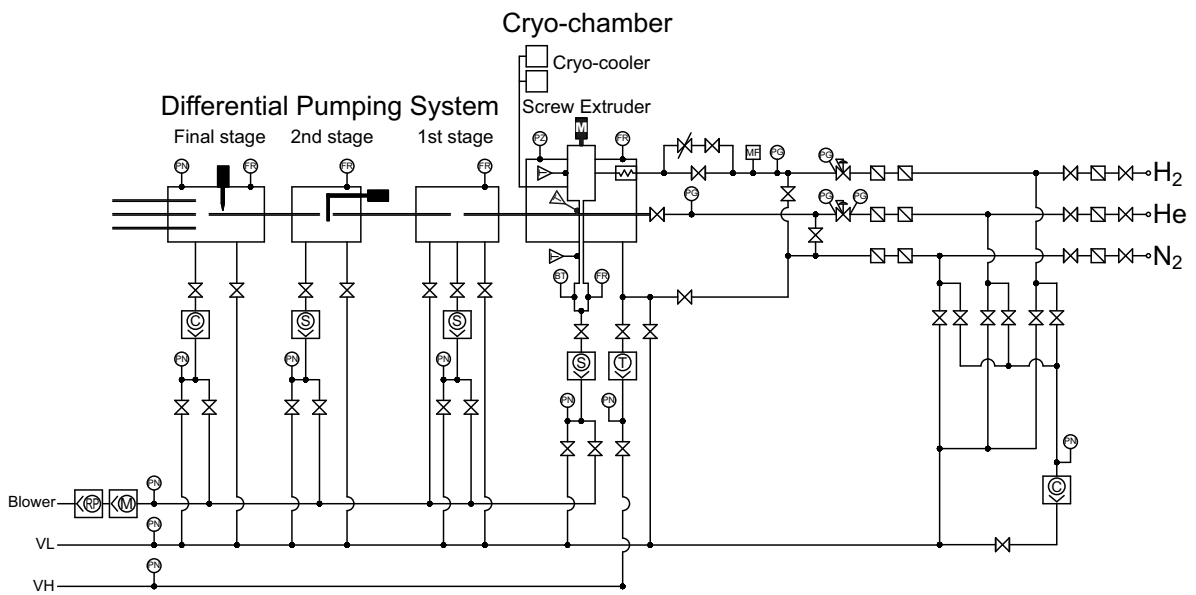


Figure 32 Schematic diagram of the repetitive pellet injector.

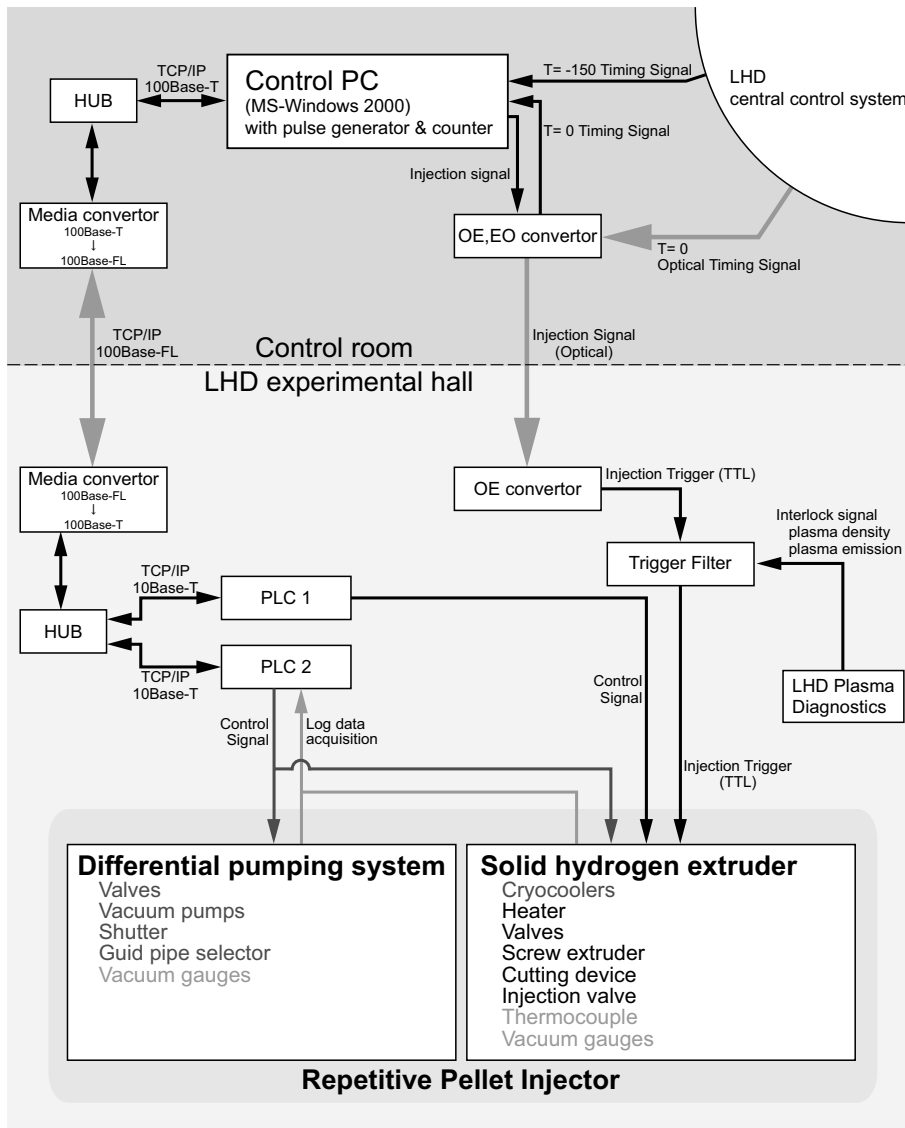


Figure 33 Control signal flow chart of the repetitive pellet injector.

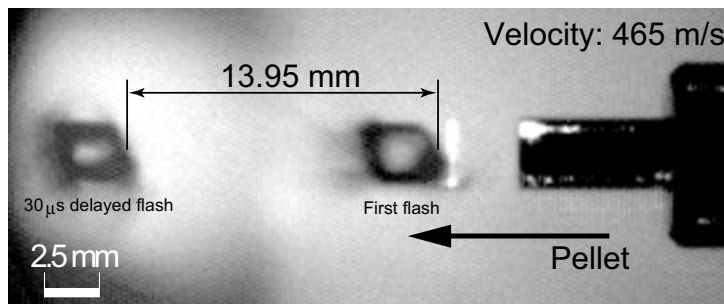


Figure 34 Shadowgraph image with double exposure for velocity measurement on endurance tests.

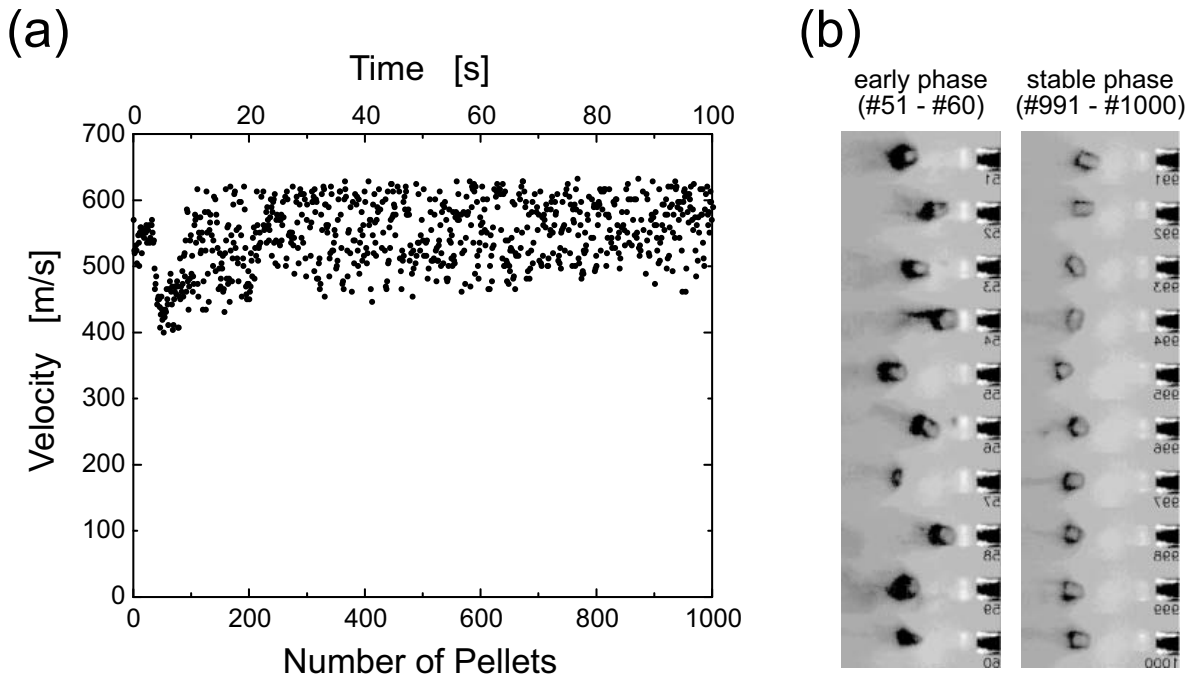


Figure 35 1000 pellets injection test with 11 Hz repetitive rate.

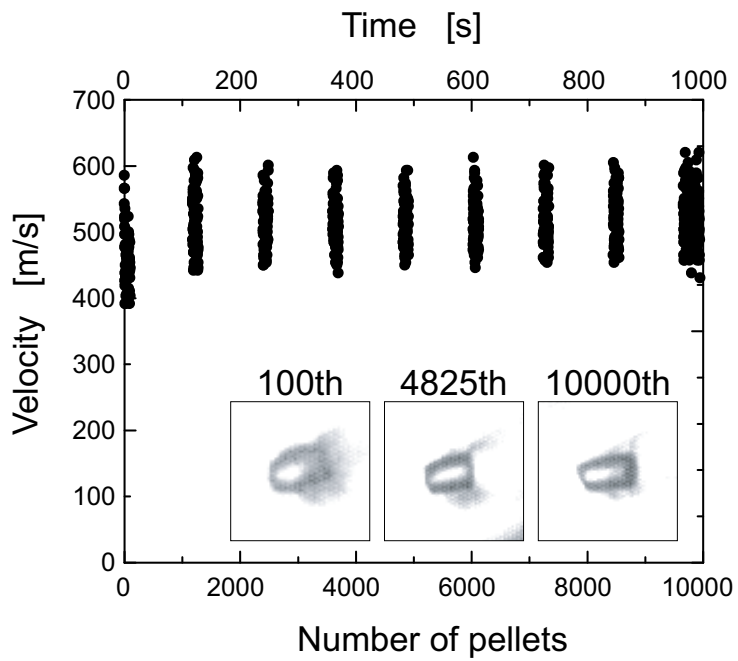


Figure 36 10000 pellets injection test with 10 Hz repetitive rate.

4 結言

LHD 実験計画ではペレット入射によるプラズマへの粒子供給を常時利用可能な基幹設備と位置づけ、実験開始の初期の段階からペレット入射実験を視野に入れていた。このようなプラズマ実験からの要請を受けて、稼働率や信頼性の高いペレット入射装置を開発するために、極低温部に可動部が無い in-situ ニューマチックパイプガン方式のペレット入射装置を開発した。この装置はペレット射出性能としてはコンベンショナルな仕様となっているが、世界でも初めての試みとして固体水素冷凍部に小型冷凍機を用いており、液体ヘリウムの供給は必要なく、基幹設備として最も安定して供給可能な電気のみで常時稼働可能な画期的な装置となっている。

in-situ ニューマチックパイプガン方式ペレット入射装置で3年間のプラズマ実験を行った結果を反映し、ペレット入射による定常的な粒子供給をおこなえる連続ペレット入射装置を開発した。この装置はスクリュウ押し方式の固体水素連続生成法を採用することにより原理的に完全定常射出を可能としている。実際に 10 Hz で 1000 秒間、計 10000 発の射出試験を遂行し、更なる長時間射出を阻害する問題がないことを示しており、将来の核融合炉での実機使用を想定しうる装置となっている。また、この装置も固体水素冷凍部に小型冷凍機を用いており、電気のみで常時稼働可能である。

これらのペレット入射装置はそれぞれの特色を相補的に生かし、LHD プラズマ実験における有効な粒子供給手法として用いられている。今後の装置開発研究の方針としては、プラズマの密度や温度を参照信号として、ペレットのサイズや速度を実時間で変化させ、より燃焼制御を見据えた効果的なペレット入射を行うための制御法確立を目指している。

謝辞

本ペレット入射装置システムを開発するにあたり多くの人の協力を頂きました。当初の開発目標を達成し、LHD でのペレット入射実験を遂行できているのは下記の人々の協力によるものが大きく、心より感謝します。ペレット入射装置開発の先達として米国オークリッジ国立研究所の Dr. P.W. Fisher, Dr. S.K. Combs, Dr. L.R. Baylor, Dr. S.L. Milora, Dr. M.J. Gouge, 独国マックスプランクプラズマ物理研究所の Dr. P.T. Lang, 三菱重工業の小田泰嗣氏, 菊池浩一氏, PELIN 研究所の Dr. I.V. Viniar には適切な助言と指導を頂きました。本装置の制御システムのソフトウェア開発には核融合科学研究所技術部制御技術課の小川英樹氏, 井上知幸氏, 鷹見重幸氏に尽力を頂きました。本装置の LHD への設置に関しては加藤眞治氏に協力を頂きました。

最後に、本開発の立ち上げ時から継続して開発を支えていただいた本島修核融合科学研究所長と須藤滋核融合科学研究所副所長に感謝します。

参考文献

- [1] C.A. Foster, R.J. Colchin, S.L. Milora, K. Kim, R.J. Turnbull, Nucl. Fusion **17**, 1067(1977).
- [2] S.L. Milora, C.A. Foster, IEEE Trans. on Plasma Sci. **PS-6**, 578(1978).
- [3] P.B. Parks, R.J. Turnbull, Phys. Fluids **21**, 1735(1978).
- [4] S.L. Milora, Nucl. Fusion **35**, 657(1995).
- [5] U. Stroth, M. Murakami, R.A. Dory, H. Yamada, S. Okamura, F. Sano, T. Obiki, Nucl. Fusion **36**, 1063(1996).
- [6] M. Greenwald, J.L. Terry, S.M. Wolfe *et al.*, Nucl. Fusion **28**, 2199(1988).
- [7] S. Sudo, Y. Takeiri, H. Zushi, F. Sano, K. Itoh *et al.*, Nucl. Fusion **30**, 11(1990).
- [8] M. Kanno, S. Sudo, H. Yamada, O. Motojima, T. Baba Proc. of 19th Symp. on Fusion Technology **2**, 1133(1996).
- [9] H. Yamada, R. Sakamoto, Y.Oda, T. Hiramatsu, M. Kinoshita *et al.*, Fusion Eng. Des. **49-50**, 915(2000).
- [10] H. Yamada, R. Sakamoto, I. Viniar, Y. Oda, K. Kikuchi *et al.*, Fusion Eng. Des. **69**, 11(2003).
- [11] H. Yamada, R. Sakamoto, I. Viniar, M. Goto *et al.*, Plasma Sci. Technol. **6**, 2275(2004).
- [12] I. Viniar, A. Geraud, H. Yamada, R. Sakamoto, Y. Oda *et al.*, Plasma Sci. Technol. **6**, 2286(2004).
- [13] J. Lafferranderie, G. Claudet, F. Disdier, P. Kupschus, K. Sonnenberg, Proc. of 14th Symp. on Fusion Technology **2**, 1367(1986).
- [14] P.C. Souers, *Hydrogen properties for fusion energy* (Berkeley : University of California Press, 1986).
- [15] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, *Fluid mechanics* (Pergamon Press, 1987)
- [16] S.K. Combs, S.L. Milora, C.R. Foust, C.A. Foster, D.D. Schuresko, Rev. Sci. Instrum. **56**, 1173(1985).
- [17] S.K. Combs, Rev. Sci. Instrum. **64**, 1679(1993).
- [18] M.J. Gouge, S.K. Combs, S.L. Milora, Rev. Sci. Instrum. **61**, 2102(1990).
- [19] S. Sudo, T. Baba, M. Kanno, S. Saka, Fusion Technol. **20**, 387(1991).
- [20] P.T. Lang, K. Büchl, M. Kaufmann, R.S. Lang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79**, 1487(1997).
- [21] R. Sakamoto, H. Yamada *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 381(2001).
- [22] R. Sakamoto, H. Yamada *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES **3**, 477(2000).
- [23] C. Andelfinger, E. Buchelt, P. Cierpka, H. Kollotzek, P.T. Lang *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **64**, 983(1993).

- [24] Y. Oda, M. Onozuka, T. Shimomura, S. Iwamoto, N. Hashiri *et al.*, *Vacuum* **41**, 1510(1990).
- [25] S. K. Combs, L. R. Baylor, P. W. Fisher, C. R. Foust, M. J. Gouge *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **58-59**, 343(2001).
- [26] Y. Oda, K. Azuma, M. Onozuka, S. Kasai, K. Hasegawa, *Proc. of 18th Symp. on Fusion Technology* **1**, 661(1994).
- [27] I. Viniar, A. Geraud, H. Yamada, R. Sakamoto, Y. Oda *et al.*, *Instrum. Exp. Tech.* **43**, 722(2000).
- [28] I. Viniar, S. Sudo, A. Geraud, J. P. Perin, J. Manzagol *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **58-59**, 295(2001).