

JT-60ペレット入射装置の高速化

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

平塚 一・川崎 幸三⁺・三代 康彦

吉岡 祐二・太田 和也・清水 正亜

(1989年5月31日受理)

臨界プラズマ試験装置(JT-60)では、プラズマ特性の向上を目的に昭和63年5月、ペレット射出速度1.5 km/s(目標)を有するペレット入射装置をJT-60本体に取り付けプラズマ実験を開始した。得られた実験結果によると、約10MWのNBI入射時に最大40%のエネルギー閉じ込み特性の改善や電子密度のピーキングした分布や密度上昇などの改善が見られた。エネルギー閉じ込み特性の改善は、ペレットのプラズマ中への侵入距離に強く依存し、安全係数 q が $q < 1$ 領域までペレットが侵入することが重要であるため、ペレット射出速度のより高速化が要求された。そのため、昭和63年度に、既設のペレット入射装置の一部を改良してペレット射出速度1.9 km/s(目標)が得られる入射装置を製作した。新たに製作した範囲は、ペレットを生成射出する生成槽、加速ガスの高速射出弁及びガス配管の一部である。ペレット射出速度性能に関しては、高速射出弁の動作時間を短縮(開閉動作速度の向上)し、加速ガス圧力を50 kgf/cm²から100 kgf/cm²に上昇させることでペレット射出速度向上を実現した。新たに製作した生成槽では、ペレットサイズ $\phi 3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mmL}$ と $\phi 4.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mmL}$ のペレットをそれぞれ2個ずつ生成し、独立に射出することが可能である。性能試験の結果、(1)最大ペレット射出速度約2.3 km/sを得た。これは、ガス銃方式(ニューマチック方式)のペレット入射装置(ガス圧力の一段加速の場合)で、従来得られている記録をしのぐものである。(2)粒子補給率約60~65%のペレットを安定に生成する生成条件が確立された。

Upgrade of JT-60 Pellet Injector for Higher Velocity

Hajime HIRATSUKA, Kouzo KAWASAKI⁺, Yasuhiko MIYO
Yuji YOSHIOKA, Kazuya OHTA and Masatsugu SHIMIZU

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 31, 1989)

Pellet injection experiments have been performed to improve the plasma performance by the JT-60 tokamak from June, 1988. From the results of the experiments, it was found that the plasma confinement time increased up to 40% with pellet injection (velocity over 1.5 km/s), in which was obtained with 10 MW neutral beam injection highly peaked electron density profile. The experimental results suggested that improvement of the plasma confinement time depends on the penetration depth of the pellet into the plasma column, especially into " $q < 1$ " region. This fact require the higher pellet velocity to achieve the improved plasma confinement time.

The pellet injector was upgraded to obtain the injection velocity over 1.9 km/s in the end of 1988. In this upgrade, some major components such as a pellet gun assembly, fast-opening magnetically driven valves (FMV) and a part of piping line for propellant gas were replaced.

The 2.3 km/s of pellet velocity has been attained by the combination of the shorter response time of the newly developed FMV from 1.1 ms to 0.5 ms, increased working pressure and temperature from 50 kg/cm² to 100 kg/cm² and from 80°C to 200°C, respectively. The upgraded pellet injector can inject, independently, four pellets, two of which are 3.0 mm in diameter × 3.0 mm in length and the other two of which are 4.0 mm in diameter × 4.0 mm in length.

+ Department of HTTR Project, Oarai Research Establishment

Main results obtained from the performance tests of the upgraded JT-60 pellet injector are summarized as: Maximum pellet velocity is about 2.3 km/s; The operation conditions have been optimized to make the pellet with the fueling efficiency of 60-65% in average.

Keywords: JT-60 Tokamak, Pneumatic-type Pellet Injector, Fast-Opening Magnetically Driven Valve, Fueling Efficiency

目 次

1. はじめに	1
2. 装置の概要及び構成	1
2.1 装置の概要	1
2.2 装置の構成	2
3. 高速射出弁の開発	3
3.1 開発仕様	3
3.2 構造	3
3.3 設計	4
3.4 特性試験結果	5
4. 性能試験	6
4.1 冷却特性	6
4.2 ベレット生成特性	6
4.3 ベレット射出特性	7
4.4 耐圧気密試験	8
4.5 圧力応答試験	8
5. おわりに	9
謝辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of system	1
2.1 System configurations	1
2.2 Major specifications	2
3. Development of FMV	3
3.1 Specifications	3
3.2 Configuration	3
3.3 Design	4
3.4 Characteristics of FMV	5
4. Performance tests	6
4.1 Cooling test	6
4.2 Pellet making test	6
4.3 Pellet injection test	7
4.4 Pressure and airtight test	8
4.5 Pressure response test	8
5. Summary	9
Acknowledgement	9
References	9

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、プラズマ特性の向上を目的にペレット射出速度 1.5 km/s（目標）を有するペレット入射装置¹⁾を JT-60 本体に取り付け、昭和 63 年 5 月からプラズマ実験を開始した。得られた実験結果によると、約 10 MW の NBI 入射時に最大 40% のエネルギー閉じ込め特性の改善や電子密度のピーキングした分布や密度上昇などの改善が見られた。エネルギー閉じ込め特性の改善は、ペレットのプラズマ中への侵入距離に強く依存し、安全係数 q が $q < 1$ 領域までペレットが侵入することが重要であるため、ペレット射出速度のより高速化が要求された。そのため、昭和 63 年度に、既設ペレット入射装置の一部を改良してペレット射出速度 1,900 m/s（目標）が得られる入射装置を製作した。新たに製作した範囲は、ペレットを生成射出する生成槽、高速射出弁及びガス配管の一部である。ペレット射出速度性能に関しては、高速射出弁の動作時間を短縮（開閉動作速度の向上）し、加速ガス圧力を 50 kgf/cm² から 100 kgf/cm² に上昇させることでペレット射出速度の向上を実現した。

新たに製作した生成槽では、ペレットサイズ $\phi 3.0$ mm \times 3.0 mm L \times $\phi 4.0$ mm \times 4.0 mm L のペレットをそれぞれ 2 個ずつ生成し、独立に射出することが可能である。性能試験の結果、

- (1) 最大ペレット射出速度約 2,300 m/s を得た。これは、ガス銃方式のペレット入射装置（ガス圧力の一段加速の場合）で、従来得られている記録をしのぐものである。
- (2) 粒子補給率平均して約 60~65% のペレットを安定に生成する生成条件が確立された。

本報告では、第 2 章で装置概要、第 3 章で新規に開発した高速射出弁の設計及び試験結果を述べ第 4 章でペレットの生成射出に関する性能試験の結果についてまとめた。

2. 装置の概要及び構成

2.1 装置の概要

2.1.1 基本仕様

JT-60 ペレット入射装置は、ガス銃方式のペレット入射方式を基本にして、既に開発した 4 ペレット入射装置のペレットサイズを大型化すると共にペレット高速化を図り、短期間にプラズマ実験に供することを目的として仕様を定めた。

基本仕様を以下に示す。ペレットの射出系統は、ペレットキャリア寸法順に 4 系統配列し、ペレットキャリア寸法直径 3.0 mm \times 長さ 3.0 mm から順に A, B, C, D と称している。

ペレット種類	；水素ガス（H ₂ ）及び重水素ガス（D ₂ ）
ペレット個数	；3 個（保証），4 個（目標）
ペレットキャリア寸法	；直径 3.0 mm \times 長さ 3.0 mm 2 個（# A, B） 直径 4.0 mm \times 長さ 4.0 mm 2 個（# C, D）
ペレット射出速度	；1,600 m/s 以上（保証），1,900 m/s 以上（目標） 但し、ペレット射出速度は H ₂ に関する値とする。

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60)では、プラズマ特性の向上を目的にペレット射出速度 1.5 km/s (目標)を有するペレット入射装置¹⁾をJT-60本体に取り付け、昭和63年5月からプラズマ実験を開始した。得られた実験結果によると、約10MWのNBI入射時に最大40%のエネルギー閉じ込め特性の改善や電子密度のピーキングした分布や密度上昇などの改善が見られた。エネルギー閉じ込め特性の改善は、ペレットのプラズマ中への侵入距離に強く依存し、安全係数 q が $q < 1$ 領域までペレットが侵入することが重要であるため、ペレット射出速度のより高速化が要求された。そのため、昭和63年度に、既設ペレット入射装置の一部を改良してペレット射出速度 1,900 m/s (目標)が得られる入射装置を製作した。新たに製作した範囲は、ペレットを生成射出する生成槽、高速射出弁及びガス配管の一部である。ペレット射出速度性能に関しては、高速射出弁の動作時間を短縮(開閉動作速度の向上)し、加速ガス圧力を 50 kgf/cm² から 100 kgf/cm² に上昇させることでペレット射出速度の向上を実現した。

新たに製作した生成槽では、ペレットサイズ $\phi 3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm L} \times \phi 4.0 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm L}$ のペレットをそれぞれ2個ずつ生成し、独立に射出することが可能である。性能試験の結果、

- (1) 最大ペレット射出速度約 2,300 m/sを得た。これは、ガス銃方式のペレット入射装置(ガス圧力の一段加速の場合)で、従来得られている記録をしのぐものである。
- (2) 粒子補給率平均して約 60~65%のペレットを安定に生成する生成条件が確立された。

本報告では、第2章で装置概要、第3章で新規に開発した高速射出弁の設計及び試験結果を述べ第4章でペレットの生成射出に関する性能試験の結果についてまとめた。

2. 装置の概要及び構成

2.1 装置の概要

2.1.1 基本仕様

JT-60ペレット入射装置は、ガス銃方式のペレット入射方式を基本にして、既が開発した4ペレット入射装置のペレットサイズを大型化すると共にペレット高速化を図り、短期間にプラズマ実験に供することを目的として仕様を定めた。

基本仕様を以下に示す。ペレットの射出系統は、ペレットキャリア寸法順に4系統配列し、ペレットキャリア寸法直径 3.0 mm×長さ 3.0 mmから順にA, B, C, Dと称している。

ペレット種類	；水素ガス(H ₂)及び重水素ガス(D ₂)
ペレット個数	；3個(保証), 4個(目標)
ペレットキャリア寸法	；直径 3.0 mm×長さ 3.0 mm 2個(#A, B) 直径 4.0 mm×長さ 4.0 mm 2個(#C, D)
ペレット射出速度	；1,600 m/s以上(保証), 1,900 m/s以上(目標) 但し、ペレット射出速度はH ₂ に関する値とする。

2.1.2 生成・射出部

ペレット入射装置の生成槽内の構造（生成・射出部の構造）を図 2.1 に示す。生成・射出部は、加速ガスを封じ込めるリザーバタンク（高速射出弁の手前に設置）、リザーバタンクとペレットキャリア間にある高速射出弁、ペレットを生成するペレットキャリア、ペレットを打出す射出管（銃身）等からなり、生成槽内に設置される。リザーバタンク内に封じ込められた加速ガスは、高速射出弁の「開」動作によって圧縮波を形成し、伝播しながらペレットを加速するよう移動する。

2.2 装置の構成

ペレット入射装置の外観を図 2.2 に示す。図中の生成槽は新規に製作した。それ以外は既設ペレット入射装置を再利用している。

2.2.1 ペレット入射装置本体

(1) ペレット生成・射出系

ペレット生成・射出系は、プラズマ燃料ガス（水素，重水素）を液体ヘリウム（LHe）冷却することによって 4 個の固体ペレットを生成し、加速ガスによって射出するための系で、ペレット生成・射出部，燃料ガス供給部，加速ガス供給部，液体ヘリウム供給部（デュワ内加圧のヘリウムガス供給部も含む）から構成される。

(2) 排気系

排気系は、生成槽排気系，ヘリウム排ガス排気系，差圧排気系（第 1 測定槽排気系，第 2 測定槽排気，第 3 測定槽排気系），水素排ガス排気系，二重配管排気系，ガスポンベ排気系の 8 系統から構成され，各真空槽及びガス配管内を真空に排気する。

ペレット生成・射出時の不用ガスとヘリウム排ガスは，生成槽排気系と水素排ガス排気系及びヘリウム排ガス排気系を用いて排気する。差圧排気系は，ペレット射出後，各測定槽の加速ガスを排気する。二重配管排気系は，液体ガスの二重配管を断熱排気する。ガスポンベ排気系は，ポンベ交換時の配管部を排気する。

(3) 測定系

測定系は，射出されたペレットの射出速度（レーザを用いた飛行時間法）とペレット補給粒子数（ペレット質量）の測定（測定槽内の圧力上昇法及びマイクロ波共振法），各真空槽とポンプ入口側配管部の真空度及びペレット生成状態（温度，ガス供給圧力と流量，液体ヘリウム排ガス流量）を測定する系から構成される。

(4) 架台

架台は，支持架台及びステージングから構成され，ペレット入射装置本体及び制御設備の中で，JT-60 本体上架台上に設置される機器を安定性よく組み込むためのものである。支持架台は，ペレット入射装置本体の内 JT-60 本体に接続される部分を支持するもので，JT-60 本体上架台上に設置され，その他の機器は，ステージング上に設置される。ペレット入射装置据付図を図 2.3 に示す。

2.2.2 制御設備

制御設備は、ペレットの生成・射出を制御し、ペレット入射装置の各排気系の操作と運転を行うための設備である。JT-60 制御棟中央制御室の指定された場所に設置された中央制御盤、JT-60 実験棟計測調整室(I)に設置された現場制御盤及びステージング上の現場盤から構成される。

2.2.3 ガスボンベ保管設備

ガスボンベ保管設備は、加速ガス供給系(高圧ガス系)、燃料ガス供給系(低圧ガス系)、冷媒加圧用ヘリウムガス供給系、排気系パージ用窒素ガス供給系の各ガスボンベ(7 m³, 150 kgf/cm²:高純度ガス)を設置するための設備であり、JT-60の実験棟北側の屋外に設置されている。

3. 高速射出弁の開発

3.1 開発仕様

高速射出弁の開発仕様を従来の射出弁と比較して表 3.1 に示す。従来の射出弁では、加速ガス圧力 50 kgf/cm² でペレット射出速度約 1,600 m/s が得られた。新規に製作する生成槽による改良装置のペレット射出速度は 1,900 m/s (目標)を要求されるので、従来の射出弁の動作ガス圧力のみを増加することだけでは目標速度を達成しにくい。そのため、開発する高速射出弁は、(1)加速ガス圧力を従来にくらべて 2 倍高めた 100 kgf/cm² とする。(2) ガスの伝播速度を速める為ガス温度を従来の 80℃ から 200℃ に上昇させる。(3)高速射出弁は最高圧力 100 kgf/cm² で温度 200℃ の水素ガスを動作時間 1.0 ms 以下で開動作するものとする。また、水素ガスのリークに対しては、外部リーク量 1.3×10^{-8} Pam³/s 以下、弁座リーク量 1.3×10^{-6} Pam³/s 以下と仕様を定めた。

開発する高速射出弁は、高圧ガス取締法に基く耐圧強度を有し、公的機関による検査を受け認定されるものである。

3.2 構造

従来の射出弁は、プランジャーとシール材が一体構造になっており、コイルに通電するとプランジャーが引揚げられて「開」状態となる。通電を停止すると付勢力でシール面に衝突的にあたり射出弁はシールされるが、シール材を損傷する。新たに開発する高速射出弁は、プランジャーとシール材の押えバネを個々に設け、衝突力を緩和するとともに加速力を速める構造にした。また、高温中での使用に耐えるようにバイトンシール材よりポリイミドに変更した。

開発する高速射出弁の構造を図 3.1 に示す。コイル⑤に流れる電流によってプランジャー⑦が引揚げられる。約 2.0 mm 引揚げられた後シール弁体(バルブディスク)⑩をプランジャーの加速

2.2.2 制御設備

制御設備は、ペレットの生成・射出を制御し、ペレット入射装置の各排気系の操作と運転を行うための設備である。JT-60 制御棟中央制御室の指定された場所に設置された中央制御盤、JT-60 実験棟計測調整室(I)に設置された現場制御盤及びステージング上の現場盤から構成される。

2.2.3 ガスボンベ保管設備

ガスボンベ保管設備は、加速ガス供給系(高圧ガス系)、燃料ガス供給系(低圧ガス系)、冷媒加圧用ヘリウムガス供給系、排気系パーヅ用窒素ガス供給系の各ガスボンベ(7m³, 150kgf/cm²:高純度ガス)を設置するための設備であり、JT-60の実験棟北側の屋外に設置されている。

3. 高速射出弁の開発

3.1 開発仕様

高速射出弁の開発仕様を従来の射出弁と比較して表 3.1 に示す。従来の射出弁では、加速ガス圧力 50 kgf/cm² でペレット射出速度約 1,600 m/s が得られた。新規に製作する生成槽による改良装置のペレット射出速度は 1,900 m/s (目標)を要求されるので、従来の射出弁の動作ガス圧力のみを増加することだけでは目標速度を達成しにくい。そのため、開発する高速射出弁は、(1)加速ガス圧力を従来にくらべて 2 倍高めた 100 kgf/cm² とする。(2) ガスの伝播速度を速める為ガス温度を従来の 80℃ から 200℃ に上昇させる。(3) 高速射出弁は最高圧力 100 kgf/cm² で温度 200℃ の水素ガスを動作時間 1.0ms 以下で開動作するものとする。また、水素ガスのリークに対しては、外部リーク量 1.3×10^{-8} Pam³/s 以下、弁座リーク量 1.3×10^{-6} Pam³/s 以下と仕様を定めた。

開発する高速射出弁は、高圧ガス取締法に基く耐圧強度を有し、公的機関による検査を受け認定されるものである。

3.2 構造

従来の射出弁は、プランジャーとシール材が一体構造になっており、コイルに通電するとプランジャーが引揚げられて「開」状態となる。通電を停止すると付勢力でシール面に衝突的にあたり射出弁はシールされるが、シール材を損傷する。新たに開発する高速射出弁は、プランジャーとシール材の押えバネを個々に設け、衝突力を緩和するとともに加速力を速める構造にした。また、高温中での使用に耐えるようにバイトンシール材よりポリイミドに変更した。

開発する高速射出弁の構造を図 3.1 に示す。コイル⑤に流れる電流によってプランジャー⑦が引揚げられる。約 2.0mm 引揚げられた後シール弁体(バルブディスク)⑩をプランジャーの加速

力で瞬時に引揚げることで弁の動作時間（加速ガスが所定の圧力に対し90%まで上昇する時間）を短くすることができる。真空シールは、ポリイミドのバルブディスクによって確保される。

3.3 設 計

3.3.1 高速射出弁作動時間とプランジャー引揚げ力

射出弁の動作に関する運動方程式は以下の式で示される。

$$m\ddot{x} + k\dot{x} = F \quad \dots\dots\dots(1)$$

m : プランジャー質量 (w/g)

k : バネ定数 (180 kgf/m)

w : プランジャー重量 (48.5×10^{-3} kgf)

\ddot{x} : プランジャー変位量

F : プランジャー引揚げ力

プランジャーの変位 \dot{x} が最大ストローク δ 4.0 mm 移動する際の時間 T と引揚げ力は(1)から

$$F = k\delta / (1 - \cos(\omega T)) \quad \dots\dots\dots(2)$$

作動時間とプランジャー引揚げ力の関係を図 3.2 に示す。開発する高速射出弁の作動時間 1 ms 以下にするにはプランジャー引揚げ力 39.7 kg 以上にする必要がある。作動時間 0.5 ms 以下にするには約 158.5 kg 以上が必要となる。

3.3.2 コイル電流とプランジャー引揚げ力

鉄外被つきプランジャー形磁石モデルを図 3.3 に示す。プランジャー引揚げ力とコイル電流は、モデル図の関係から次のように求まる。

$$F = B^2 S / 2\mu \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$B = \mu H = \mu NI / \delta \quad \dots\dots\dots(4)$$

B : 磁束密度

I : コイル電流

S : プランジャー断面積 ($\pi/4 (1.64^2 - 0.6^2)$ cm²)

N : コイル巻数 (221 T)

δ : プランジャーストローク (4×10^{-1} cm)

μ : 透磁率 (12.57×10^{-9} H/m)

開発する高速射出弁では、コイル巻数 221 回、プランジャーストローク約 0.4 mm、断面積 2.41 cm² からプランジャー引揚げ力とコイル電流は図 3.4 の関係にある。これよりプランジャー引揚げ力が 39.5 kg 以上にするには 33.4 A 以上の電流をコイルに流す必要がある。また、プランジャー引揚げ力 158.5 kg 以上にするには、69.9 A 以上の電流をコイルに流す必要がある。

3.3.3 コイル電流と電源回路

電源回路図 3.5 に示すような外部のコンデンサに電荷を蓄積させコイルに通電させる R-L-C 回路であるからコイル電流の最大値は容易に求まる。

$$I_{\max} = \sqrt{C/L} E e^{-(\alpha/\omega)\theta} \dots\dots\dots(5)$$

C : コンデンサ容量 (2000×10^{-6} F)

L : コイルインダクタンス (4.22×10^{-3} H)

R : コイル抵抗 (1 Ω)

E : 電源電圧

α : $R / 2L$

ω : $\sqrt{1/LC - (R/2L)^2}$

θ : $\tan^{-1}(\omega/\alpha)$

以上の結果について I_{\max} と E の関係を図 3.6 に示す。コイル電流を 33.4 A 以上にするためには電源電圧 75.9 V 以上にする必要がある。また、コイル電流を 66.9 A 以上にするためには電源電圧を 152.1 V 以上にする必要がある。

3.4 特性試験結果

3.4.1 圧力応答試験

圧力応答試験結果を図 3.7 に示す。高速射出弁までの導入管長は、167.5 mm \times ϕ 4.5 mm である。一次側の圧力を 100 kgf/cm² として 90% に到達する時間 (圧力応答時間) は約 0.5 ms となる。また、圧力応答速度は約 200 kgf/cm²/ms であり、非常に良好な速度性能が得られた。

射出弁の全開維持時間は約 15.0 ms であり、ペレット射出時の加速には十分である。

3.4.2 リーク試験

弁座のリーク量は、常温でヘリウムガスを圧力 100 kgf/cm² に加圧した状態で、約 1.45×10^{-7} Pam³/s、弁温度が 200℃ の場合で約 4.68×10^{-6} Pam³/s であり、十分仕様を満足している。

弁本体のリーク量は、ヘリウムガスを圧力 100 kgf/cm² に加圧した状態で、常温で 1.2×10^{-10} Pam³/s 以下、200℃ で 7.2×10^{-9} Pam³/s 以下で十分仕様を満足している。

3.4.3 耐久試験

耐久試験は、200℃ の高温で高速射出弁の一次側に 100 kgf/cm² を負荷した状態で 10^4 回の繰り返し動作試験を行った。耐久試験結果を図 3.8 に示す。仕様動作回数の 5,000 回ではリーク量に変化が見られずほぼ一定の値を示す。約 8,000 回でリーク量の増加がみられるが使用する上で問題はないものと思われる。

以上の試験結果から開発した高速射出弁は、高速応答性、耐久性を有した開発仕様を満足することが確認できた。

4. 性能試験

本章では、生成槽の冷却特性、ペレット生成特性及び射出特性について述べる。

4.1 冷却特性

ペレット入射装置は、主バレルハウジング部を液体ヘリウムにより冷却して燃料ガスを固体水素同位体（ペレット）にするため、液体ヘリウムで生成槽内を冷却した時の冷却特性を確認した。冷却時の主バレルハウジング部の温度の時間変化を図 4.1 に示す。常温からペレット生成開始温度 31 K までは、約 220 分で到達する。燃料ガスを固体水素同位体に変える主バレルハウジングは、熱伝導の良い銅ブロックで熱交換に接続されている。また、熱交換器内には液体ヘリウムが流れている。図 4.2 に約 120 K からの冷却特性を示す。冷却時間は、液体ヘリウムの流量に影響される。液体ヘリウム温度（4.2 K）に対して主バレルハウジング温度は、約 40 分後に 6.5 K に達する。従来の生成槽に比べ室温から約 6 K までの到達時間は約 30 分短縮された。また、自然昇温時の温度特性も併せて図 4.2 に示すが、ペレット生成温度から約 130 K まで約 1.3 時間要している。これらは、液体ヘリウムのシールドパネル外面保温層を密な構造に改良して設けた事によって断熱効果が増加したものと考えられる。

4.2 ペレット生成特性

ペレットの粒子補給率と主バレルハウジング温度（生成開始温度）の関係を図 4.3 に示す。粒子補給率は主バレルハウジング温度約 30-32 K で最大となる。液体ヘリウムは #A から #D に流れるため、#A と #D ではペレットの生成温度が異なる。主バレルハウジング温度を高めると #D の粒子補給率は低下し、主バレルハウジング温度を低くすると #A ペレットに射出中の割れが発生し、ともに粒子補給率が下がることがわかった。主バレルハウジング温度を 31 K に設定し燃料ガス圧力を変え補給率を調べた。その結果、粒子補給率は燃料ガス圧力に影響されずほぼ同じ値を示している。

ペレット生成から約 1 分後の温度と生成射出で得られた粒子補給率の関係を図 4.4 (1)~(4) に示す。粒子補給率は、ペレット生成直後の温度降下に強く依存する。温度を下げ過ぎると射出中のペレットの割れを引起し、温度が高いと柔らかいペレットになり射出しても到達点（測定点）までにペレットがガス化してしまい粒子補給率の低下につながる。試験結果からは 1 分後の温度約 17~18 K/min で高い粒子補給率が得られ、ペレットの割れ等も見られない。図 4.5 (1)~(3) に、割れたペレットを射出した場合、生成状態が悪く柔なペレットを射出した場合、正常なペレット射出した場合の典型的な圧力上昇波形、速度波形及びマイクロ波出力波形を示す。割れたペレットを射出した場合は、速度計の検出部（レーザー検出器）を複数のペレットが通過するために速度波形が乱れ、マイクロ波キャビティー内の通過時間によりマイクロ波

出力波形も鈍い出力となる。生成状態が悪く柔なペレットを射出した場合は、速度計の検出部は信号を検知しにくく、速度波形が乱れ、マイクロ波出力波形から推定される圧力上昇も小さくなる。

4.3 ペレット射出特性

ペレットを生成、射出した場合のペレット射出速度、粒子補給率及び射出直線性について確認した。

4.3.1 速度特性試験

ペレット射出速度は、加速ガス圧力を変化させて試験した。速度の測定は、第1測定槽と第2測定槽間に設置されているレーザー式速度測定装置を用いた。速度特性試験の結果を図4.6に示す。ペレット射出速度は、ペレットサイズの小さいほど、また、加速圧力の高いほど速い結果が得られた。どちらのサイズも十分仕様値を満足した。

加速ガス温度とペレット速度の関係を図4.7に示す。ガス温度を高めるに従いペレット速度は増加することがわかる。ペレットの最高射出速度は、ペレットサイズ $\phi 3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mmL}$ で約 $2,300\text{ m/s}$ が、また、ペレットサイズ $\phi 4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mmL}$ では約 $2,250\text{ m/s}$ が得られた。

高速射出弁の動作時間とペレット射出速度の関係を図4.8に示す。ここでは、加速ガス圧力は 50 kgf/cm^2 である。高速射出弁動作時間が短いとペレット射出速度が速くなることがわかる。つまり、ペレットは加速ガス圧力が増すに従い配管の摩擦力に抵抗できなくなり、銃身内で動きだす。ペレットが銃身内を移動している間に加速ガス圧力が高まるとペレットの射出速度は、増加することになる。従来のペレット射出速度（平均 $1,500\text{ m/s}$ ）では、銃身内を飛行する時間が約 $533.3\text{ }\mu\text{s}$ （銃身長さ 80 cm ）であるのに対し、新たに開発した高速射出弁（平均 $1,700\text{ m/s}$ ）では $470\text{ }\mu\text{s}$ となる。

ペレット入射装置本体に取り付いている高速射出弁の動作時間は約 0.5 ms であることから動作時間 1.1 ms の従来の射出弁に比べ加速ガスの膨張力を十分にペレット射出速度の増加に役立っていることがわかる。

ペレット速度について速度-圧力の関係の解析値と測定結果（加速ガス $40\text{ }^\circ\text{C}$ の場合）を比較して図4.9に示す。高速射出弁の新規開発によって理論値の約90%に相当する約 $2,300\text{ m/s}$ のペレット射出速度が得られた。

4.3.2 ペレット粒子補給率試験

ペレットの粒子補給率は、理想圧力と射出時の第3測定槽の上昇圧力から求めた。理論的には、サイズ $\phi 4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mmL}$ のペレットで 93.3 Pa 、サイズ $\phi 3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mmL}$ のペレットで 33.3 Pa に相当する圧力上昇が得られる。圧力上昇から判断するとサイズ $\phi 4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mmL}$ のペレットで平均粒子補給率約57%、サイズ $\phi 3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mmL}$ のペレットで平均粒子補給率約62%を生成している。最高粒子補給率は、サイズ $\phi 3.0\text{ mm} \times 3.0\text{ mmL}$ のペレットで約80%、サイズ $\phi 4.0\text{ mm} \times 4.0\text{ mmL}$ のペレットで約75%得られているが、これらは装置の中央部に配置されて

いる# B, # Cで得られている。

粒子補給率は、装置の固有特性やペレットの生成条件等により異なることがわかる。

4.4 耐圧気密試験

ペレット入射装置のガス供給系には、燃料ガス、加速ガス、液体ヘリウム加圧ガス及びパージガスと圧空弁操作用窒素ガス系がある。燃料ガス系は、元圧 150 kgf/cm^2 を 9 kgf/cm^2 に減圧する。加速ガス系は、元圧 150 kgf/cm^2 を 110 kgf/cm^2 、さらに 100 kgf/cm^2 に減圧する。液体ヘリウム加圧ガス及びパージガスと圧空弁操作用窒素ガス系は、元圧 150 kgf/cm^2 を 9 kgf/cm^2 に減圧する。試験は、各供給系毎及び圧力区分毎に対応した設計圧力の 1.5 倍の圧力で耐圧試験を行い、気密試験は最大常用圧力で行った。試験には、窒素ガスを用いた。試験の結果、配管、フランジ及び計測機器の接続部からのリークや変形の無いことが確認できた。

4.5 圧力応答試験

高速射出弁を動作させた場合の各槽の圧力を確認した。高速射出弁を動作させた場合の第3測定槽のガス流入量特性を図 4.10 に示す。高速射出弁は、背圧 100 kgf/cm^2 、リザーバタンク温度 200°C で動作させた。第3測定槽の圧力は、 12.8 Pa (0.096 Torr) に達した。高速射出弁が動作してから高速遮断弁(シャッター弁)が動作する時間と第3測定槽の圧力応答特性を図 4.11 (ペレット無で高速射出弁を動作させた場合の特性)に示す。約 10 ms 以内に全閉しないと真空容器へのガス流入量は、仕様値 ($0.67 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3$) を満足しないことになる。ペレットの射出速度特性は、遮断弁の全開時間に依存せず一定の値を示している。このことから遮断弁の全閉時間は、約 20 ms にした方が良い。しかし、約 70 ms でもプラズマ生成に際し影響を与えないことも確認されている。

5. おわりに

JT-60 ペレット入射装置の高速化 ($1.5 \text{ km/s} \rightarrow 1.9 \text{ km/s}$) をめざして、新たに製作したのは、生成槽、高速射出弁及び配管の一部である。ペレット高速性能に関しては、高速射出弁の動作時間の向上 ($1.1 \text{ ms} \rightarrow 0.5 \text{ ms}$)、加速ガス圧力の上昇 ($50 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 100 \text{ kgf/cm}^2$) 及び加速ガス温度の上昇 ($80^\circ\text{C} \rightarrow 200^\circ\text{C}$) の改良を行ったことによりガス伝播速度が増し、性能試験の結果、ペレット射出速度 2.3 km/s が得られた。

新たに製作した生成槽は、既に運転されている JT-60 ペレット入射装置の設計及び製作経験に基づいて改善、改良及び性能向上を行い、それを設計、製作に反映したが、試験段階において更に新しい問題点も生じた。一例として、高速射出弁の動作不良が上げられる。高速射出弁は、加速ガス圧力 100 kgf/cm^2 で動作するように新規開発を行い、繰り返し動作試験 (10,000 回) においても正常に動作することを確認した後、実機に組み込まれた。ところが試験段階において 4 台中 2 台に異常動作不良が発見された。動作不良の原因は、コイル励起時に動作するプランジャ (鉄片) が弁筐体に衝突し衝突面が摩耗し駆動面が噛み合うことで動作を妨げたことであることが判明し、プランジャの衝突対策 (ストッパリングの追加及びプランジャ上端面バネ穴入口の面加工) を行うことで、この問題を解決した。

生成槽は、昭和 63 年 12 月から既設ペレット入射装置の生成槽と取替、平成元年 2 月からプラズマ実験に用いてプラズマ性能向上に役立てられている。

謝 辞

JT-60 ペレット入射装置のペレット射出速度の増加及びペレットサイズの大型化を目的に、短期間に生成槽及び射出弁の開発を行い装置の製作及び据付を行うことが出来た。計画立案及び仕様決定にあたっては、JT-60 試験部・飯島勉部長、田中祐二次長、臨界プラズマ試験部計画室・岸本浩室長より終始ご激励を頂いたことに感謝致します。本装置の設計、製作、据付調整にご支援を頂いた JT-60 試験部 JT-60 第 2 試験室・近藤育朗室長、はじめ第 2 試験室の関係各位、さらに本装置の製作にあたった三菱重工業㈱神戸造船所の各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) JAERI-M 88-214 JT-60 ペレット入射装置

5. おわりに

JT-60 ペレット入射装置の高速化 ($1.5 \text{ km/s} \rightarrow 1.9 \text{ km/s}$) をめざして、新たに製作したのは、生成槽、高速射出弁及び配管の一部である。ペレット高速性能に関しては、高速射出弁の動作時間の向上 ($1.1 \text{ ms} \rightarrow 0.5 \text{ ms}$)、加速ガス圧力の上昇 ($50 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 100 \text{ kgf/cm}^2$) 及び加速ガス温度の上昇 ($80^\circ\text{C} \rightarrow 200^\circ\text{C}$) の改良を行ったことによりガス伝播速度が増し、性能試験の結果、ペレット射出速度 2.3 km/s が得られた。

新たに製作した生成槽は、既に運転されている JT-60 ペレット入射装置の設計及び製作経験に基づいて改善、改良及び性能向上を行い、それを設計、製作に反映したが、試験段階において更に新しい問題点も生じた。一例として、高速射出弁の動作不良が上げられる。高速射出弁は、加速ガス圧力 100 kgf/cm^2 で動作するように新規開発を行い、繰り返し動作試験 (10,000 回) においても正常に動作することを確認した後、実機に組み込まれた。ところが試験段階において 4 台中 2 台に異常動作不良が発見された。動作不良の原因は、コイル励起時に動作するプランジャー (鉄片) が弁筐体に衝突し衝突面が摩耗し駆動面が噛み合うことで動作を妨げたことであることが判明し、プランジャーの衝突対策 (ストッパリングの追加及びプランジャー上端面バネ穴入口の面加工) を行うことで、この問題を解決した。

生成槽は、昭和 63 年 12 月から既設ペレット入射装置の生成槽と取替、平成元年 2 月からプラズマ実験に用いてプラズマ性能向上に役立てられている。

謝 辞

JT-60 ペレット入射装置のペレット射出速度の増加及びペレットサイズの大型化を目的に、短期間に生成槽及び射出弁の開発を行い装置の製作及び据付を行うことが出来た。計画立案及び仕様決定にあつたては、JT-60 試験部・飯島勉部長、田中祐二次長、臨界プラズマ試験部計画室・岸本浩室長より終始ご激励を頂いたことに感謝致します。本装置の設計、製作、据付調整にご支援を頂いた JT-60 試験部 JT-60 第 2 試験室・近藤育朗室長、はじめ第 2 試験室の関係各位、さらに本装置の製作にあつた三菱重工業(株)神戸造船所の各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) JAERI-M 88-214 JT-60 ペレット入射装置

5. おわりに

JT-60 ペレット入射装置の高速化 ($1.5 \text{ km/s} \rightarrow 1.9 \text{ km/s}$) をめざして、新たに製作したのは、生成槽、高速射出弁及び配管の一部である。ペレット高速性能に関しては、高速射出弁の動作時間の向上 ($1.1 \text{ ms} \rightarrow 0.5 \text{ ms}$)、加速ガス圧力の上昇 ($50 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 100 \text{ kgf/cm}^2$) 及び加速ガス温度の上昇 ($80^\circ\text{C} \rightarrow 200^\circ\text{C}$) の改良を行ったことによりガス伝播速度が増し、性能試験の結果、ペレット射出速度 2.3 km/s が得られた。

新たに製作した生成槽は、既に運転されている JT-60 ペレット入射装置の設計及び製作経験に基づいて改善、改良及び性能向上を行い、それを設計、製作に反映したが、試験段階において更に新しい問題点も生じた。一例として、高速射出弁の動作不良が上げられる。高速射出弁は、加速ガス圧力 100 kgf/cm^2 で動作するように新規開発を行い、繰り返し動作試験 (10,000 回) においても正常に動作することを確認した後、実機に組み込まれた。ところが試験段階において 4 台中 2 台に異常動作不良が発見された。動作不良の原因は、コイル励起時に動作するプランジャー (鉄片) が弁筐体に衝突し衝突面が摩耗し駆動面が噛み合うことで動作を妨げたことであることが判明し、プランジャーの衝突対策 (ストッパリングの追加及びプランジャー上端面バネ穴入口の面加工) を行うことで、この問題を解決した。

生成槽は、昭和 63 年 12 月から既設ペレット入射装置の生成槽と取替、平成元年 2 月からプラズマ実験に用いてプラズマ性能向上に役立てられている。

謝 辞

JT-60 ペレット入射装置のペレット射出速度の増加及びペレットサイズの大型化を目的に、短期間に生成槽及び射出弁の開発を行い装置の製作及び据付を行うことが出来た。計画立案及び仕様決定にあつたては、JT-60 試験部・飯島勉部長、田中祐二次長、臨界プラズマ試験部計画室・岸本浩室長より終始ご激励を頂いたことに感謝致します。本装置の設計、製作、据付調整にご支援を頂いた JT-60 試験部 JT-60 第 2 試験室・近藤育朗室長、はじめ第 2 試験室の関係各位、さらに本装置の製作にあつた三菱重工業(株)神戸造船所の各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) JAERI-M 88-214 JT-60 ペレット入射装置

表 3.1 高速射出弁仕様

	従来装置 (市販品改良)	改良装置 (開発品)
流体	水素ガス	
圧力	~ 50 kgf/cm ²	~ 100 kgf/cm ²
温度	常温~ 80 °C	常温~ 200 °C
圧力応答速度	30 kgf/cm ² /ms	100 kgf/cm ² /ms
動作時間	< 1.0 ms	< 1.0 ms
シートリーク	$\leq 10^{-8}$ Pam ³ /s	
耐久回数	10,000回	5,000回
電源	400 μ F 300V	2,000 μ F 200V

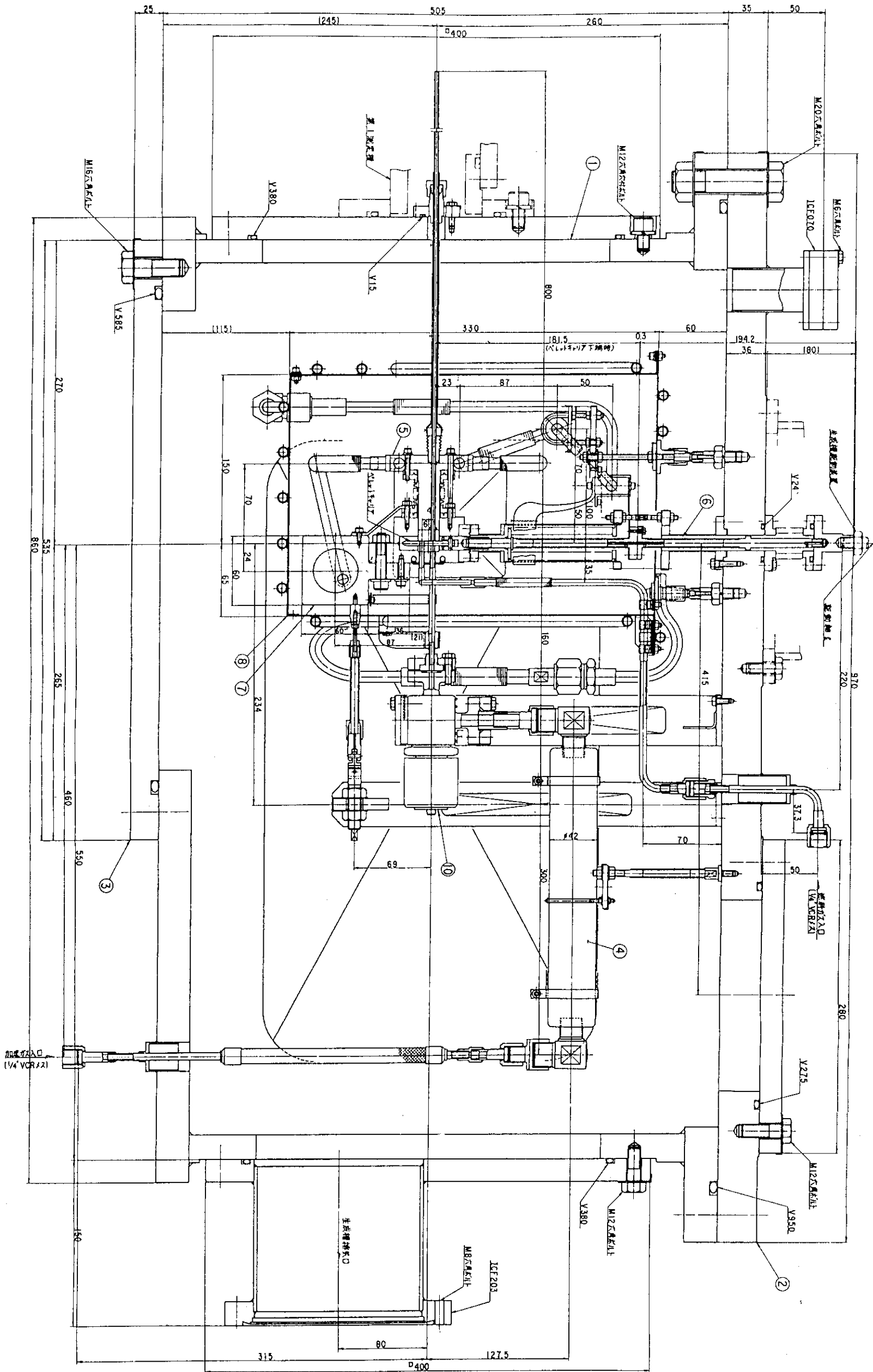


図 2.1 JT-60ペレット入射装置生成槽内構造

番号	名 称	材 質
1	生成槽本体	SUS 304
2	生成槽上面取付フラ ンク	"
3	生成槽下面取付フラ ンク	"
4	リザーバタンク	SUS 316
5	生成射出部	C1020P, SUS 316L等
6	駆 動 部	SUS 316L等
7	熱交換器	C1020P
8	冷媒He用熱シールド 板	C1100P, C1220T等
9	LiHeトランスフオー ム	SUS 316L
10	加速ガス系高速射出 弁	SUS 304等

総重量 約750 kg

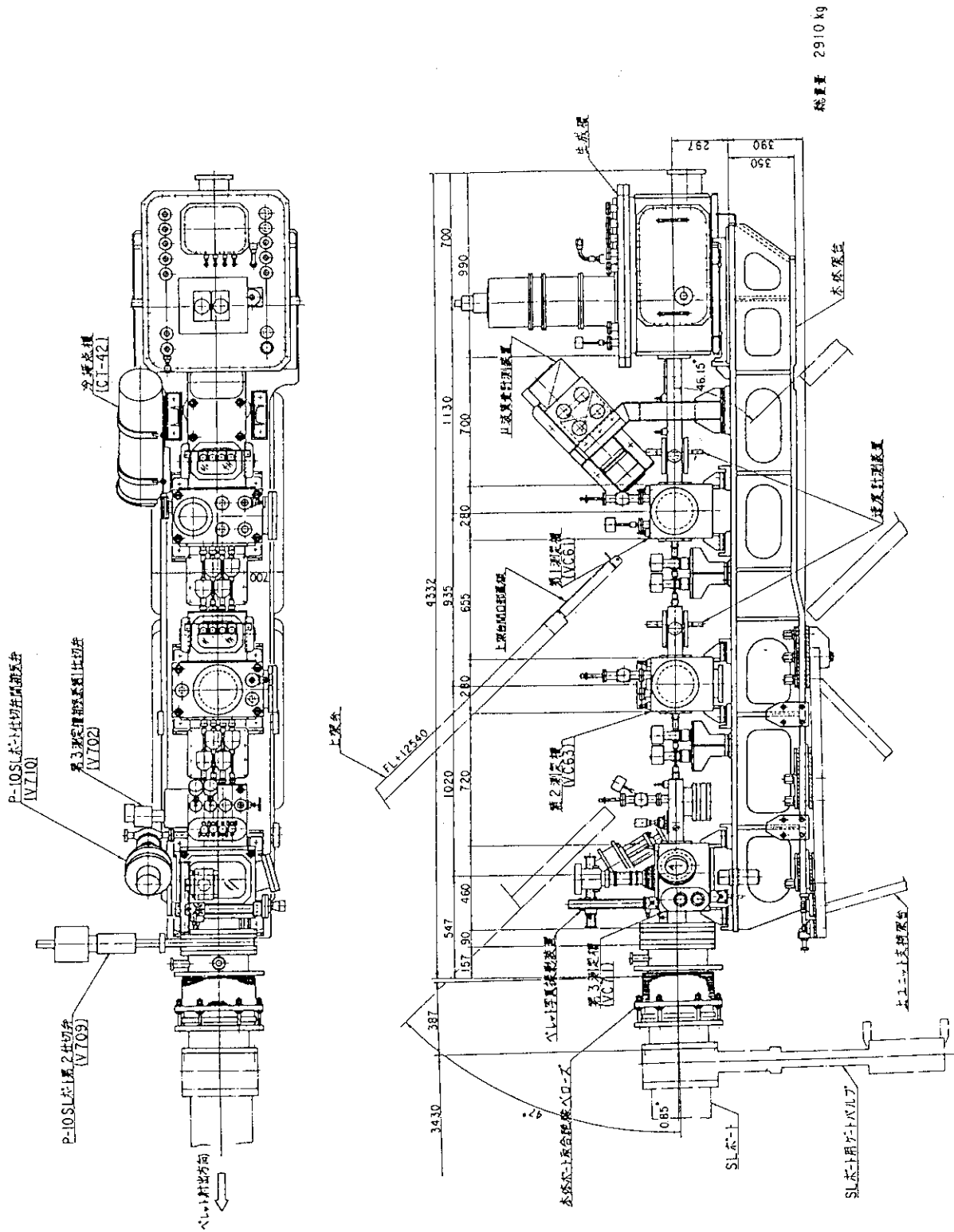


図 2.2 JT-60 ペレット入射装置の外観

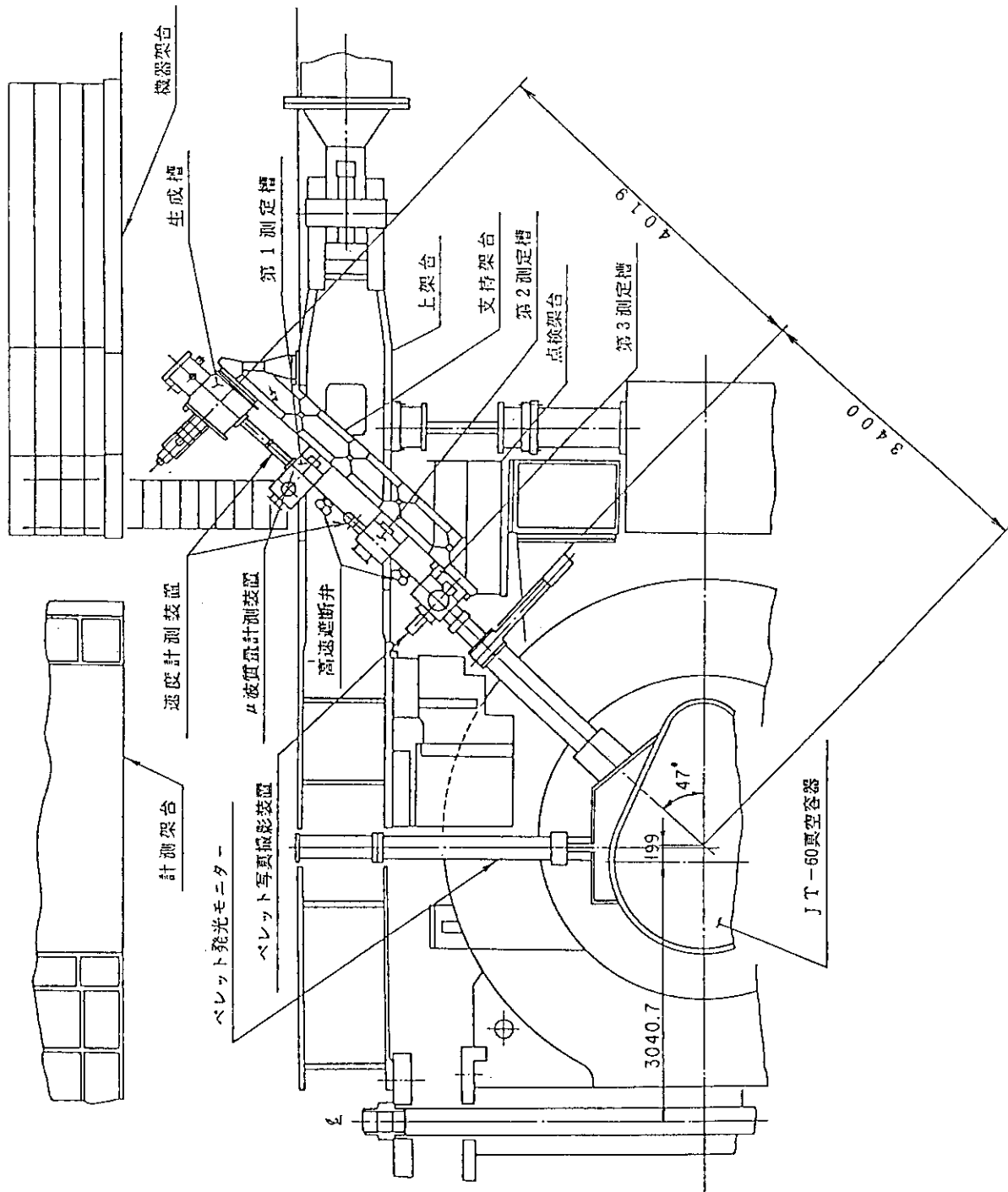
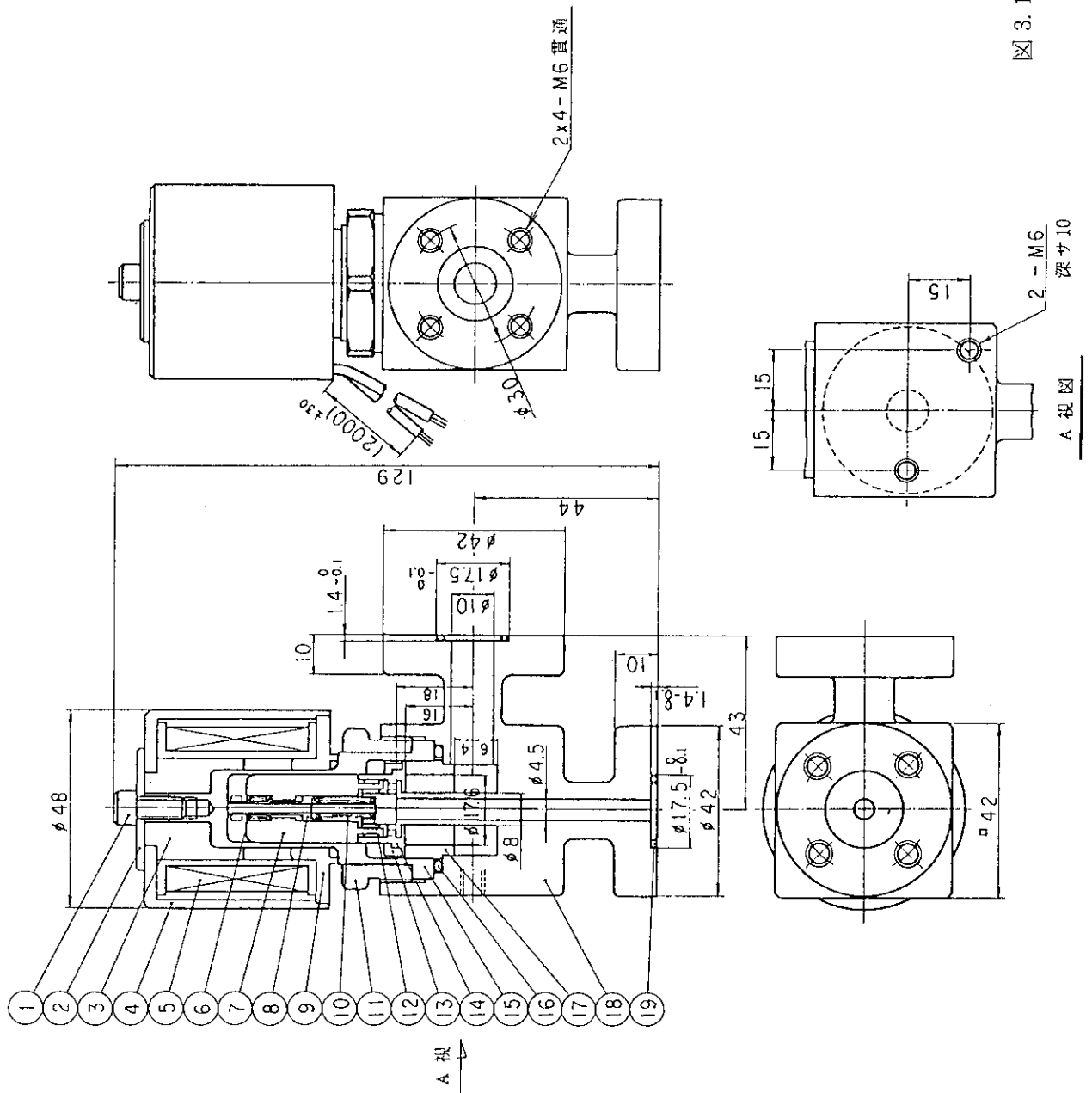


図 2.3 JT-60 ペレット入射装置据付図



品番	部品名	材質	数量	備考
19	Oリング	ヘリコフレックス	6	
18	バルブボチイ	SUS304	1	
17	ストップバ	SUS304	1	
16	Oリング	ヘリコフレックス	3	
15	バックレススリーブ	SUS304	1	
14	缶キャップ	SUS405	1	
13	ストップベアリング	ポリイミド	1	
12	バルブボチイスク	ポリイミド	3	ベスベルSP1
11	スリーブナット	SUS304	1	
10	スプリング	SUS304	1	
9	リングコナー	SUY	1	
8	バネロッド	SUS304	1	
7	フランジヤ	SUS405	1	
6	スプリング	SUS304	1	
5	コイル		1	
4	ボンネット	SUY	1	
3	コア-A	SUS405	1	
2	ボンネットピース	SUY	1	
1	六角穴付ボルト	SCM3	1	

図 3.1 高速射出弁の構造

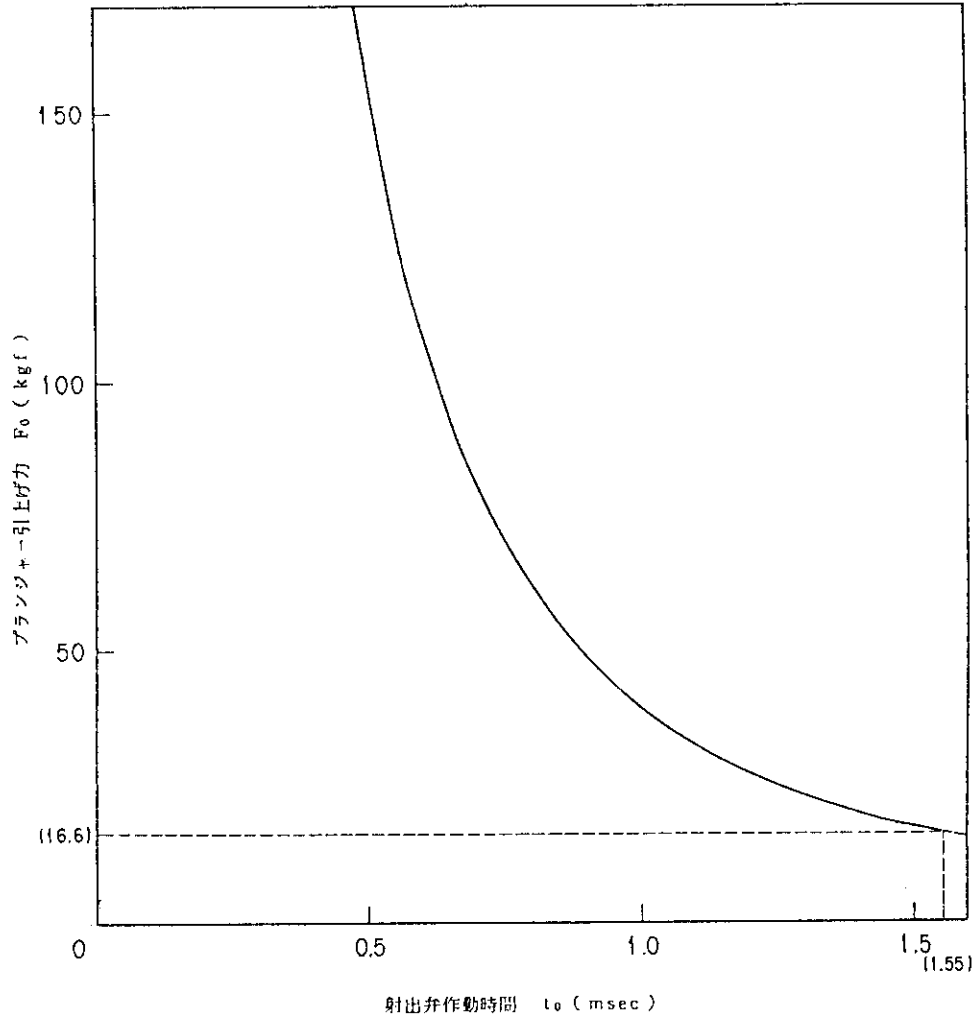


図 3.2 作動時間とプランジャー引上げ力の関係

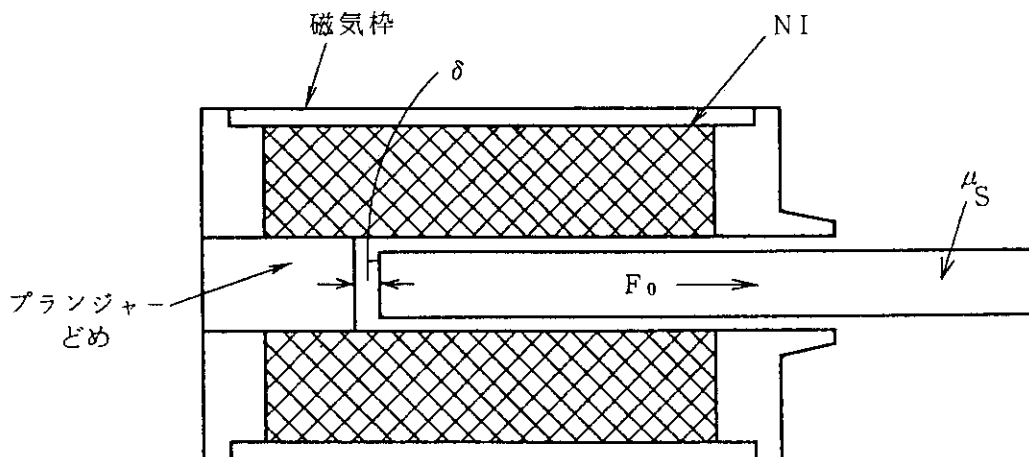


図 3.3 鉄外被つきプランジャー形磁石

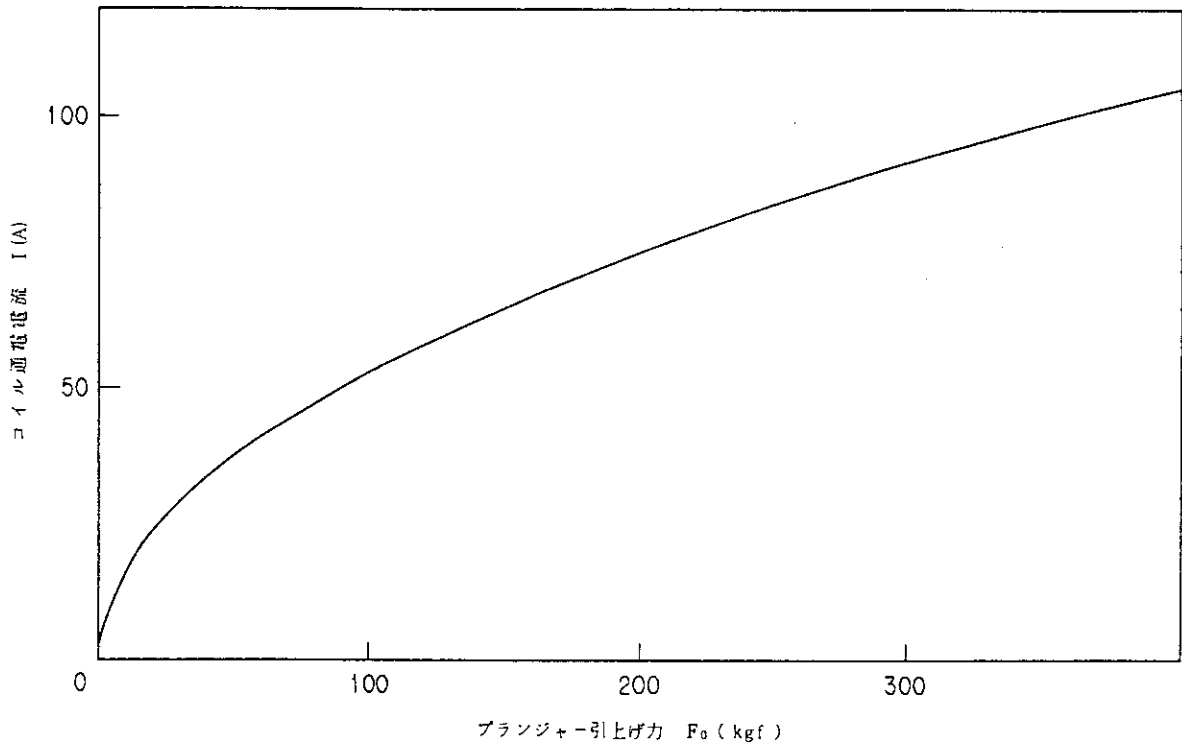


図 3.4 プランジャー引上げ力とコイル通電電流

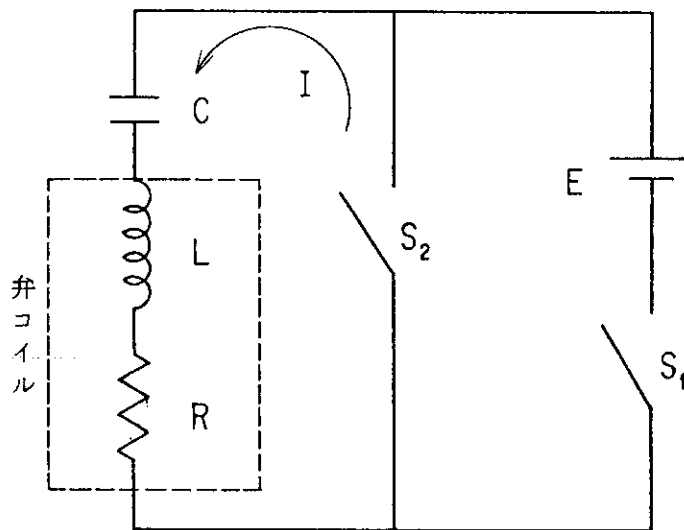


図 3.5 弁駆動回路図

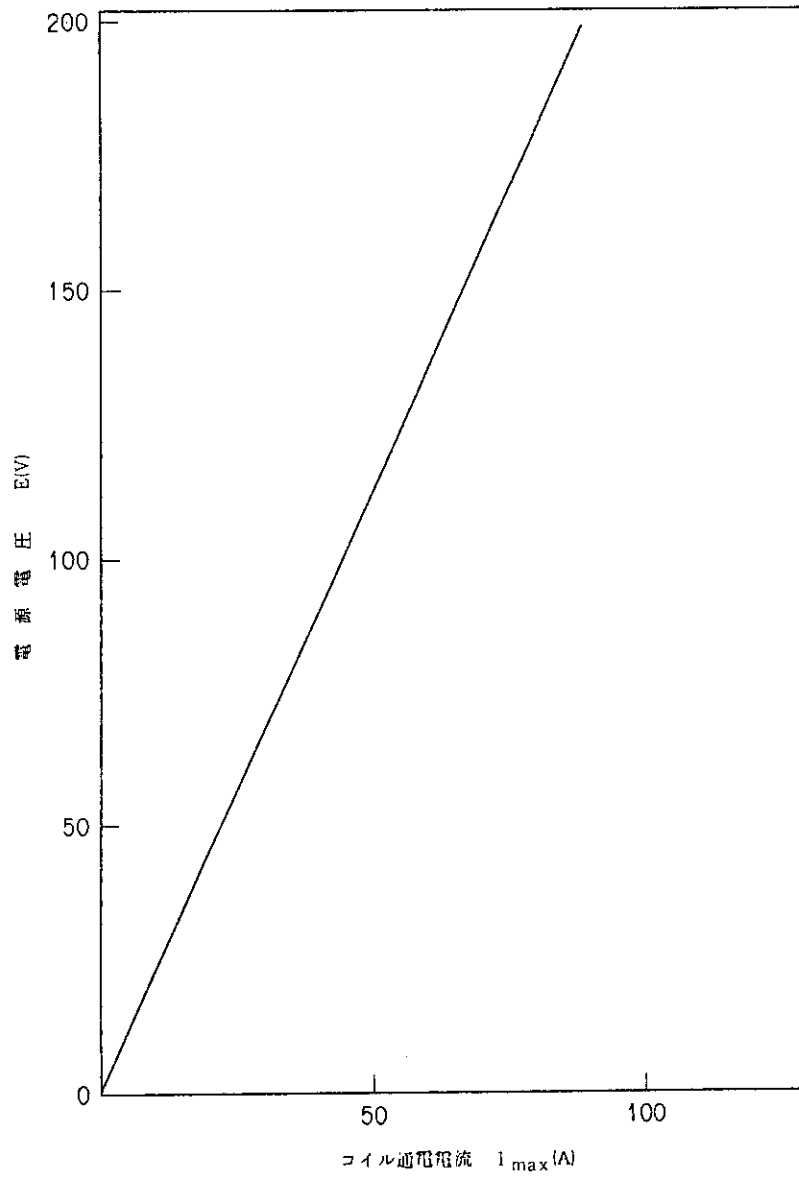
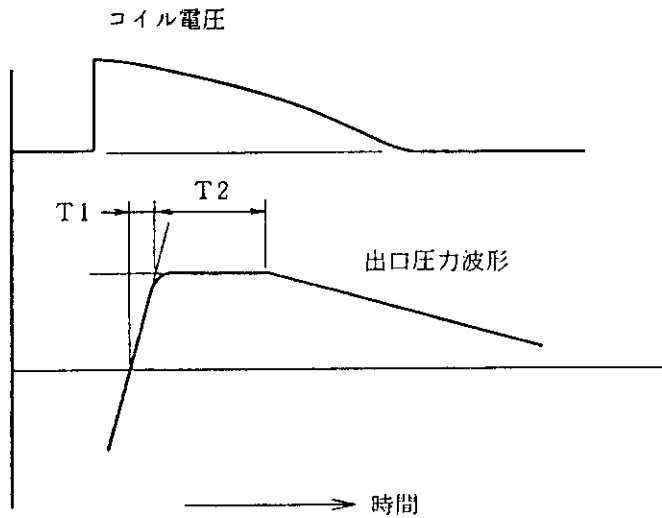
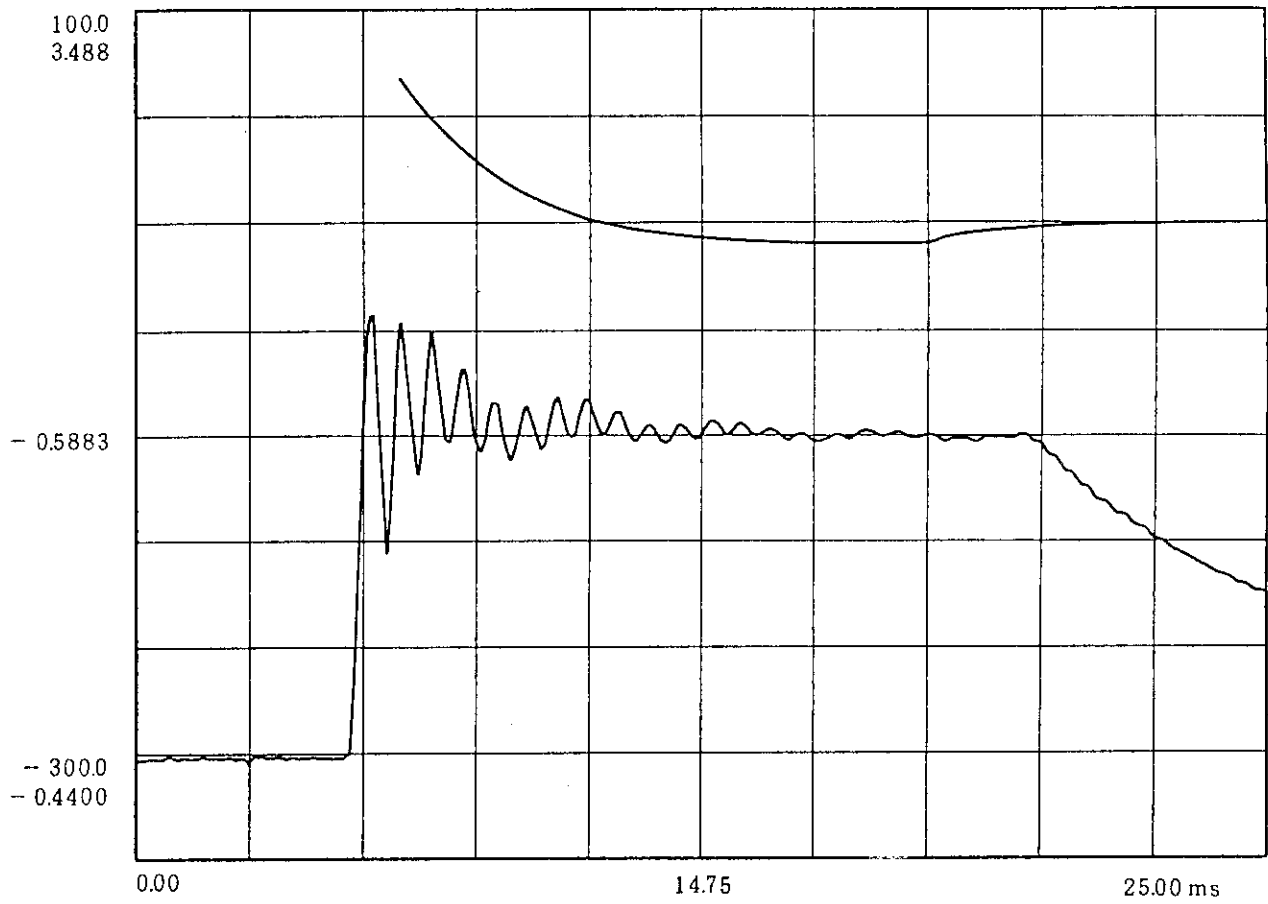


図 3.6 コイル通電電流と電源電圧



ヘリウムガス 100 kgf/cm²G 29°C
 T1 立上がり時間 ~ 0.5 ms
 T2 開保持時間 ~ 15.0 ms

図 3.7 高速射出弁の圧力応答特性

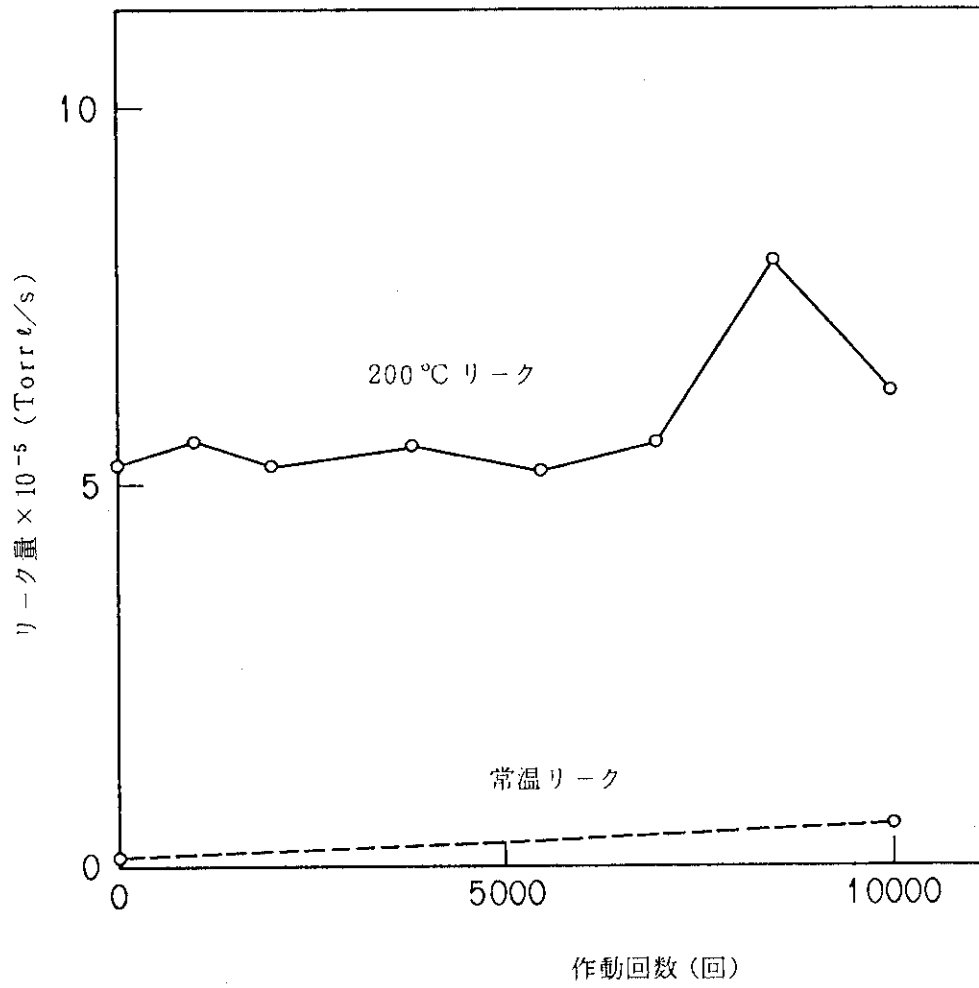


図 3.8 開閉回数の経過に伴うリーク特性の変化

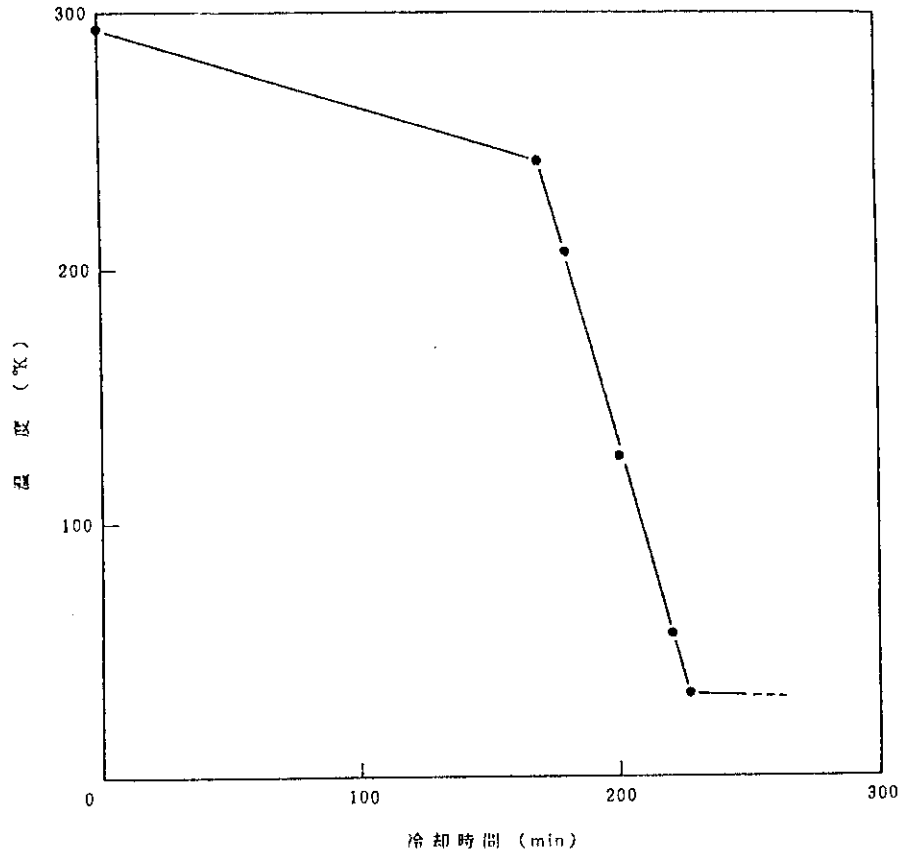


図 4.1 常温からの冷却特性

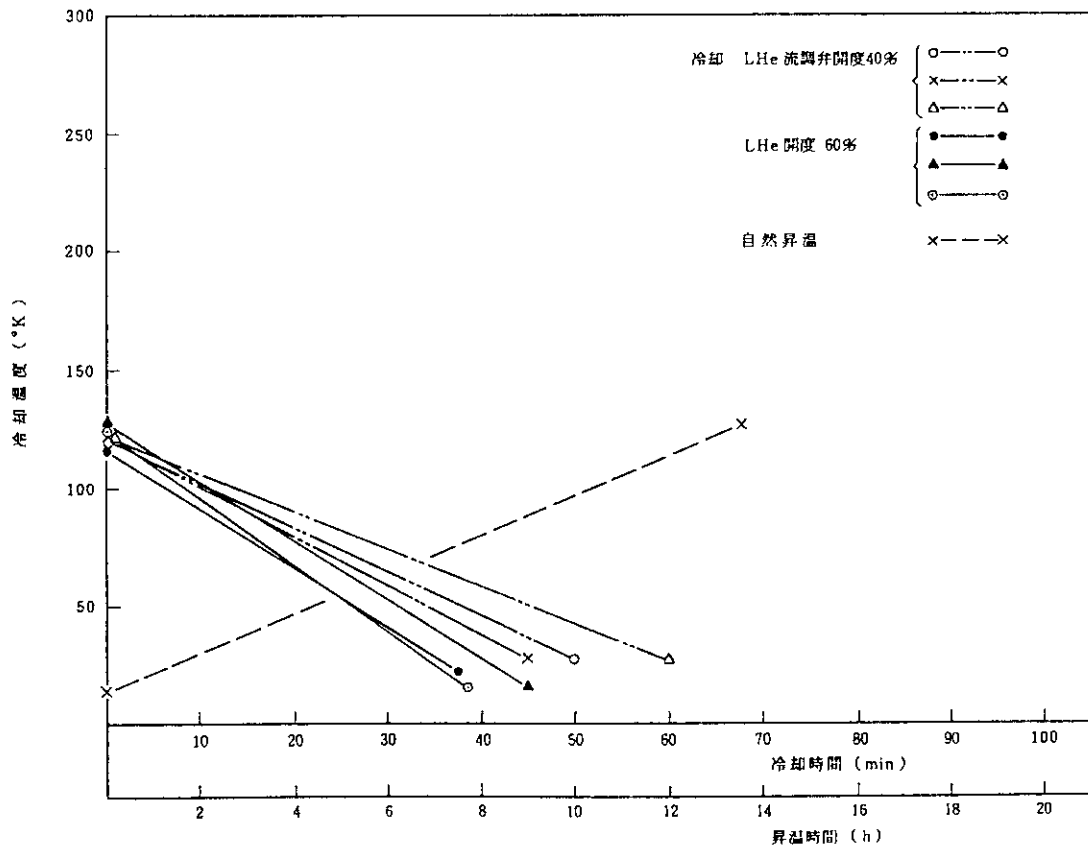


図 4.2 冷却特性

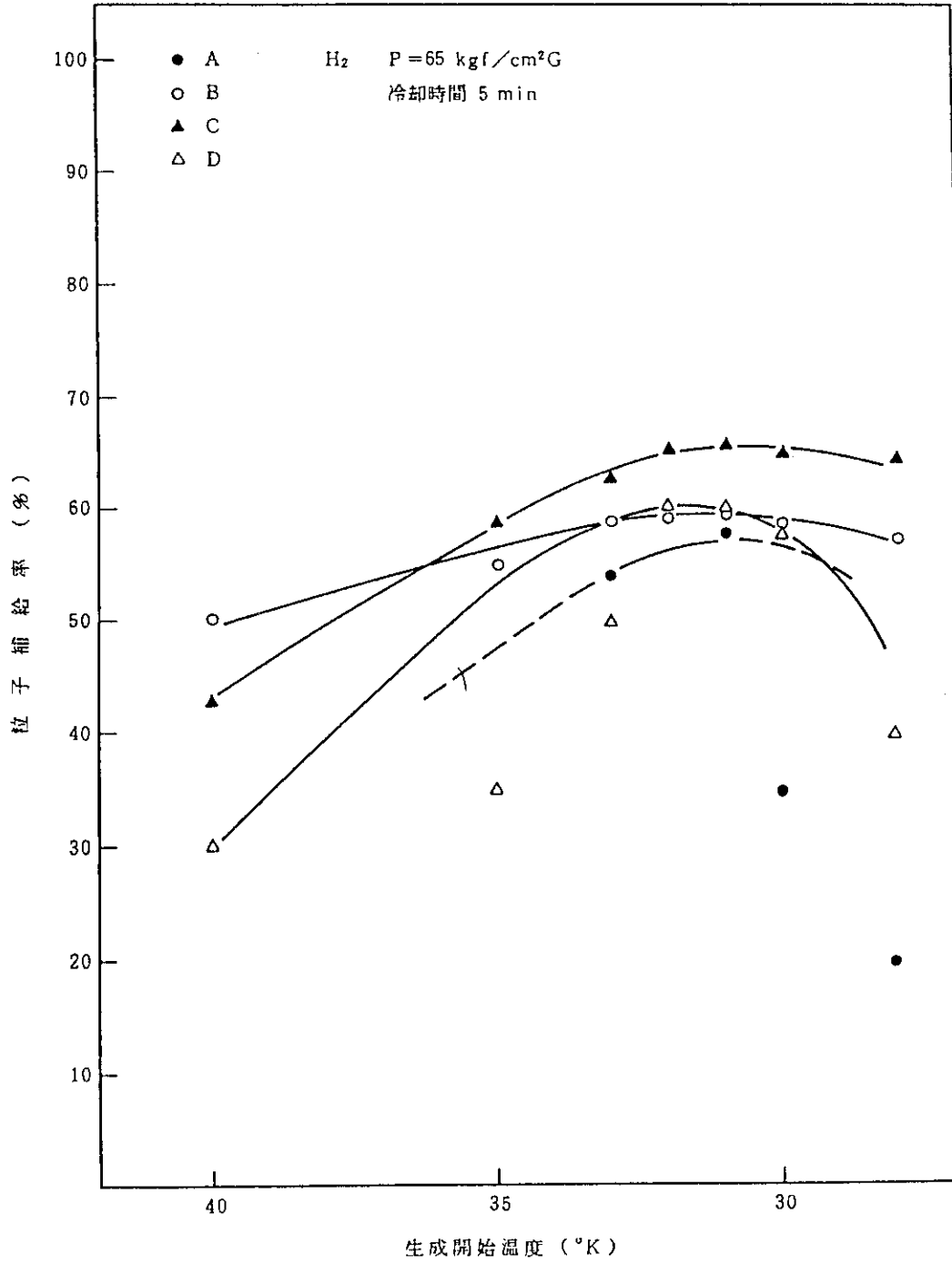


図 4.3 生成開始温度 - 補給率特性

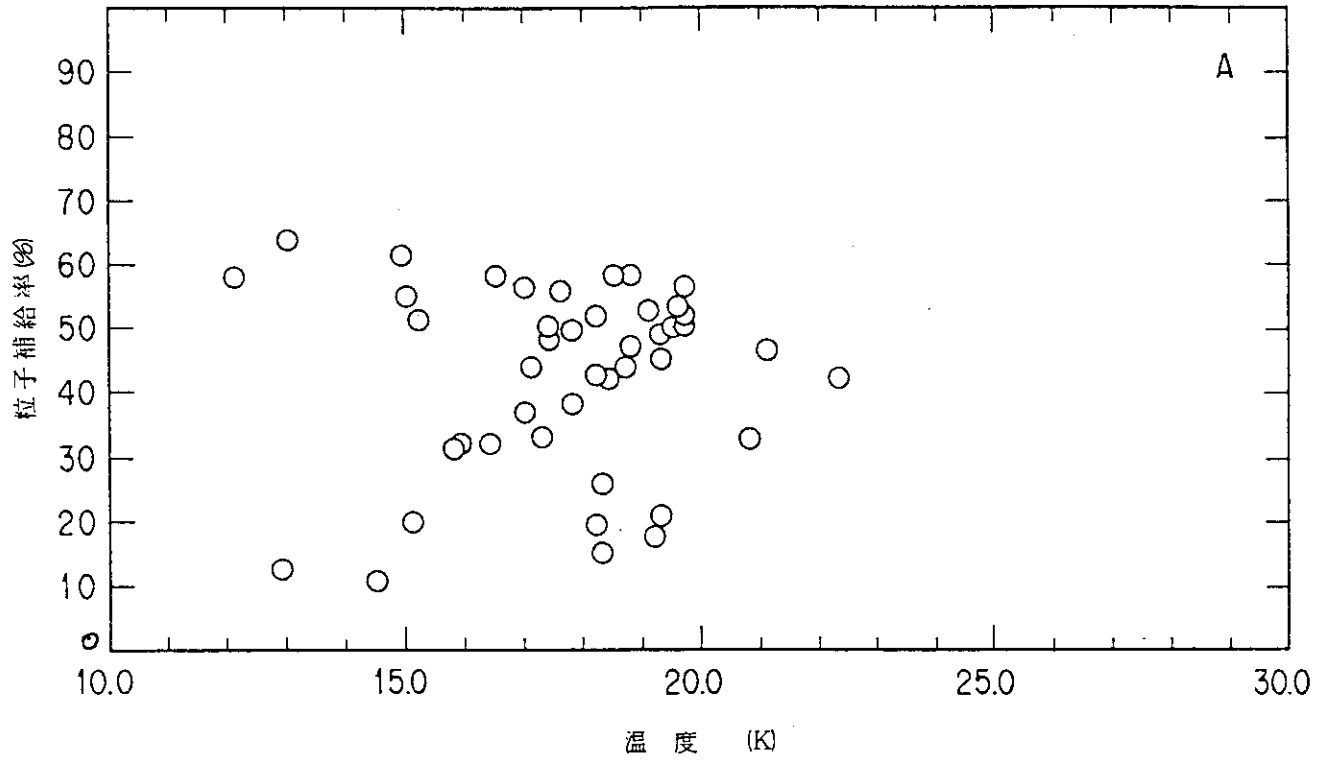


図 4. 4 (1) 1 分後の温度と粒子補給率 (A)

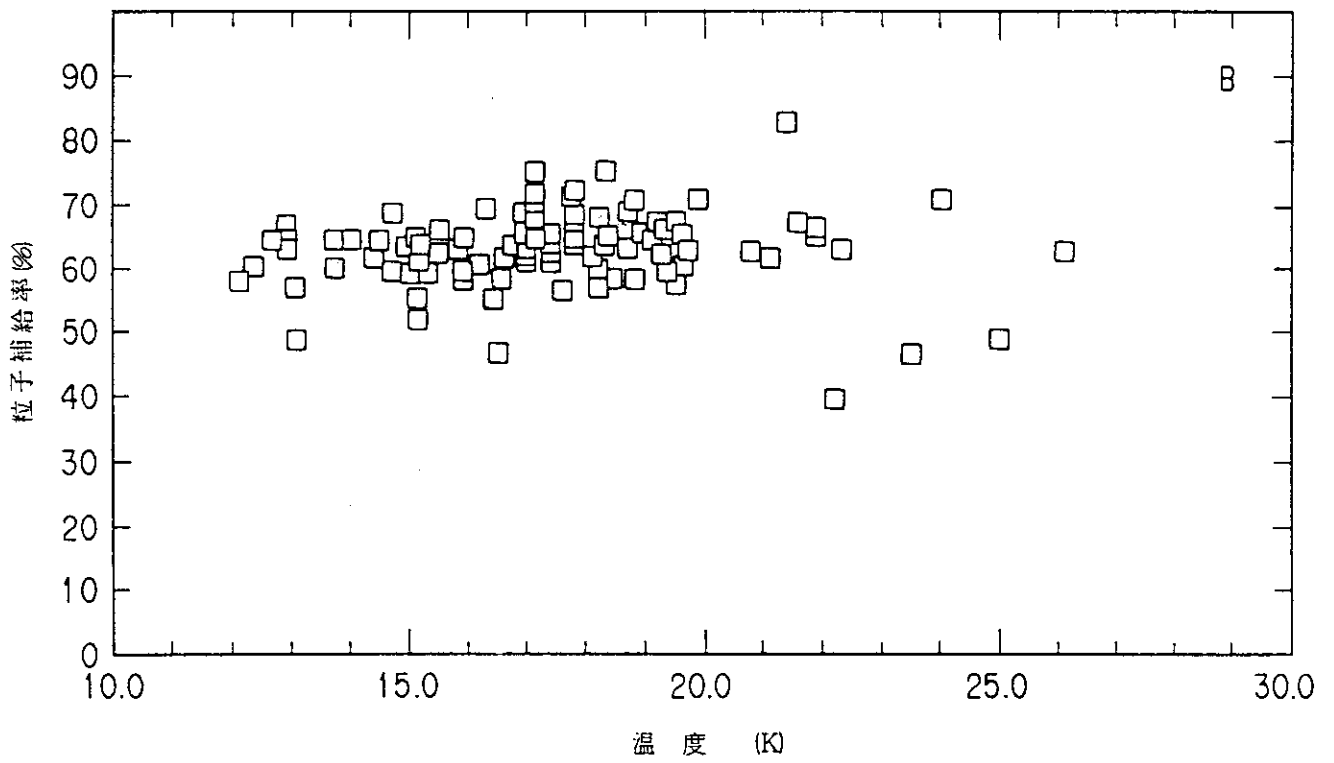


図 4. 4 (2) 1 分後の温度と粒子補給率 (B)

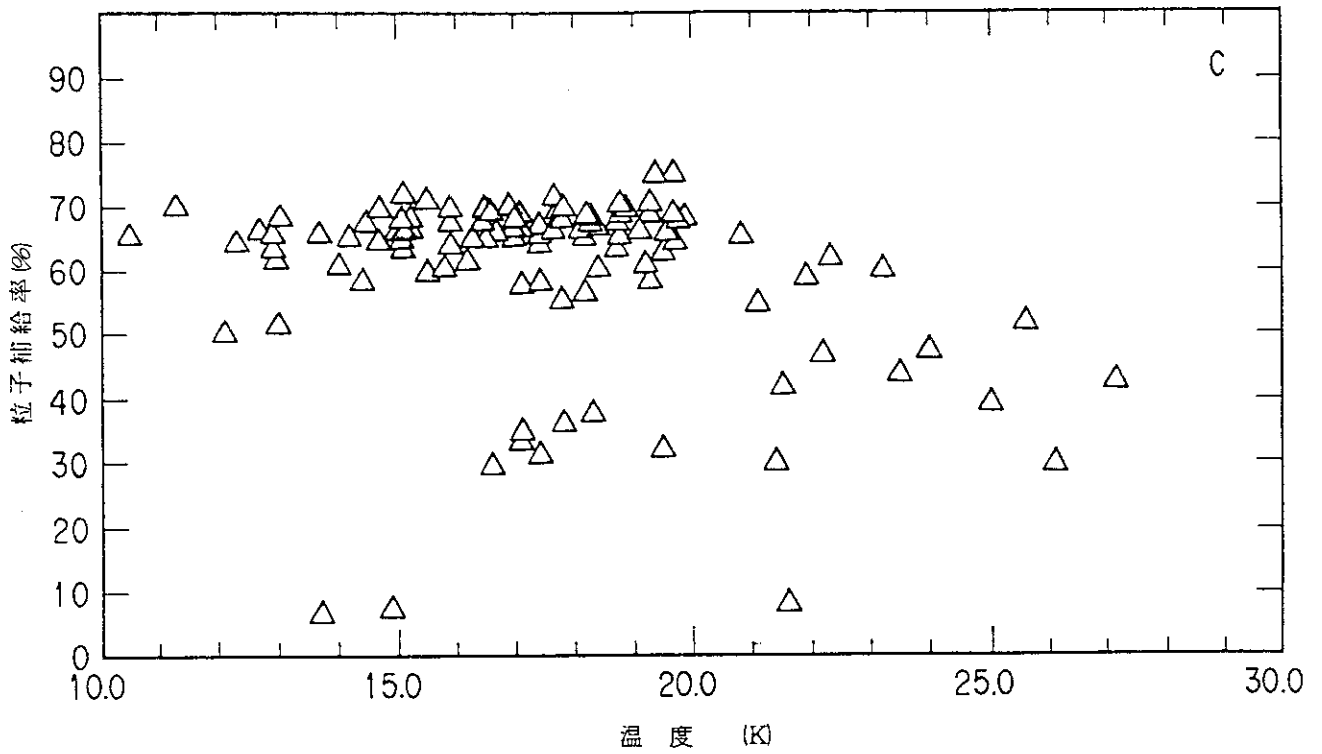


図 4.4(3) 1分後の温度と粒子補給率 (C)

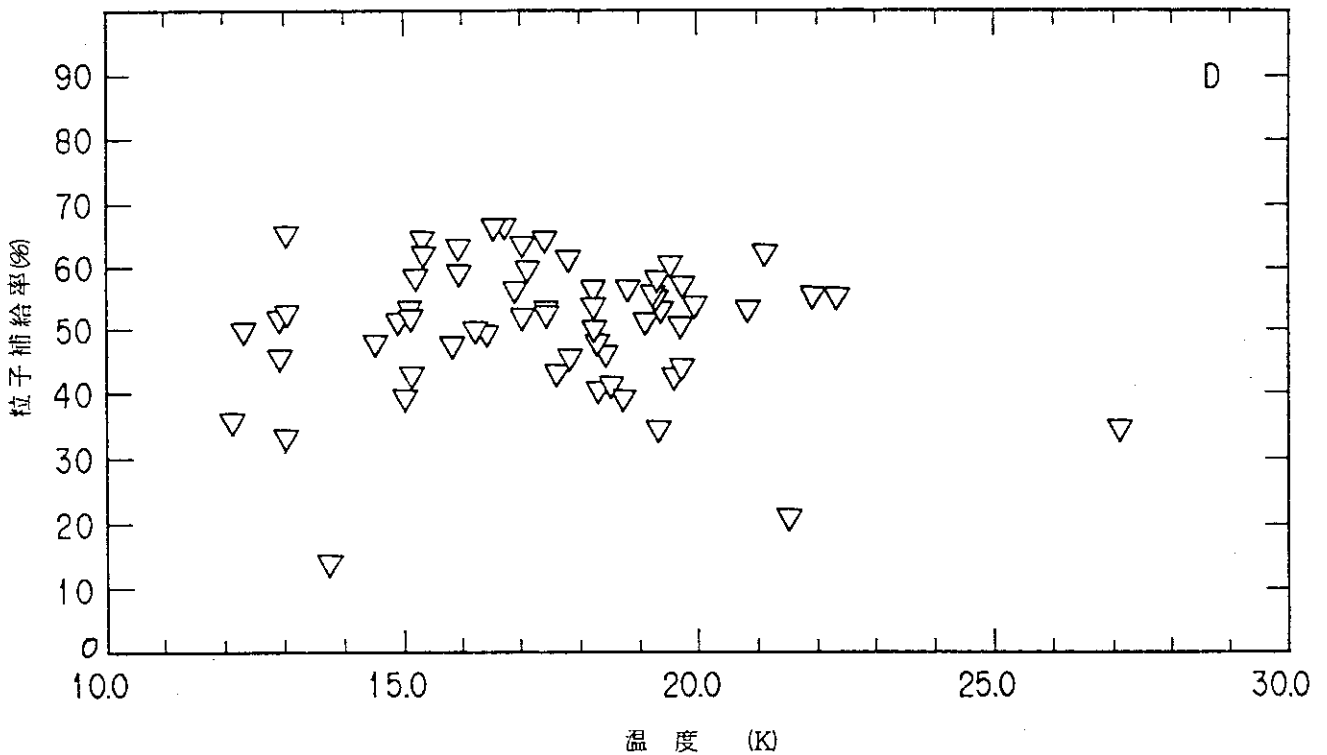


図 4.4(4) 1分後の温度と粒子補給率 (D)

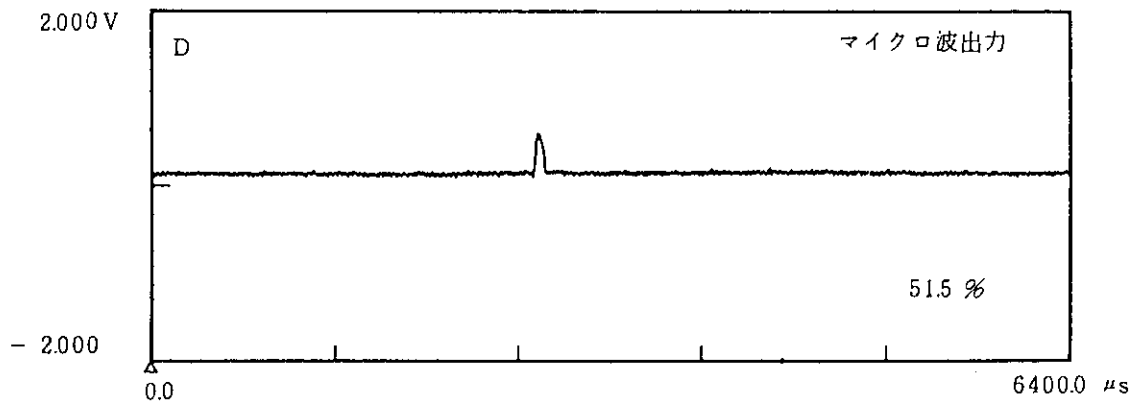
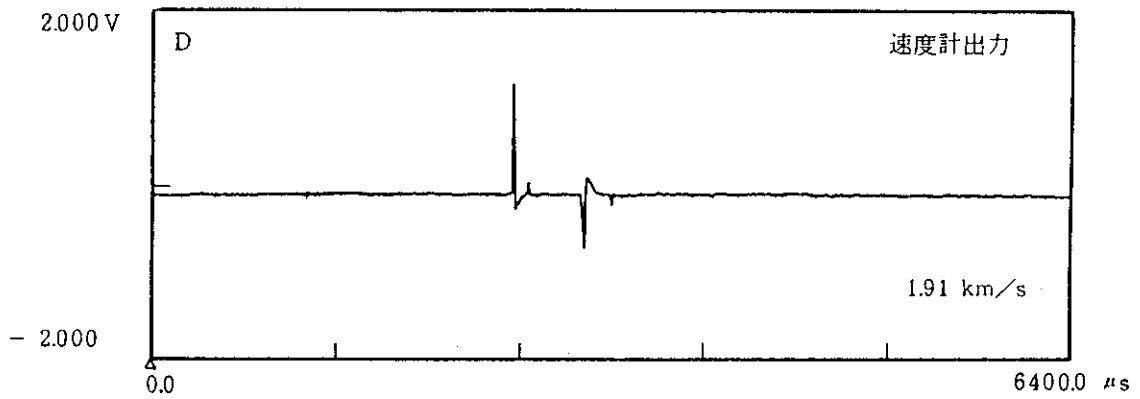
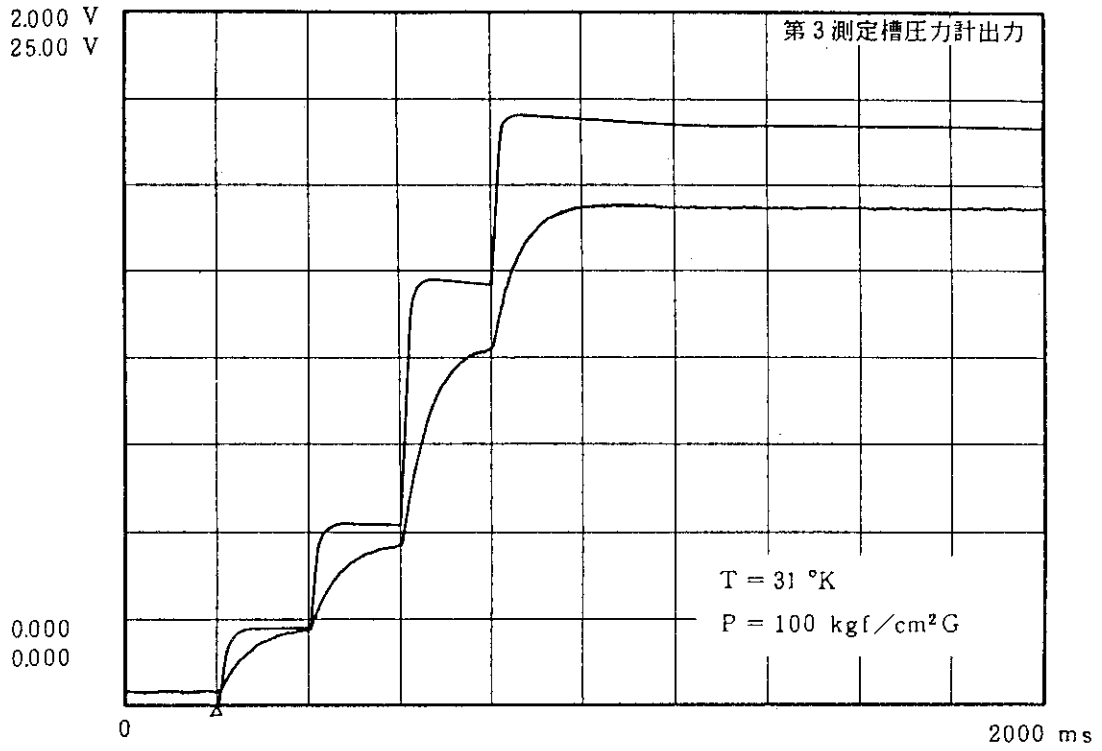


図 4.5 (1) 射出特性 (割れたペレットが射出された場合)

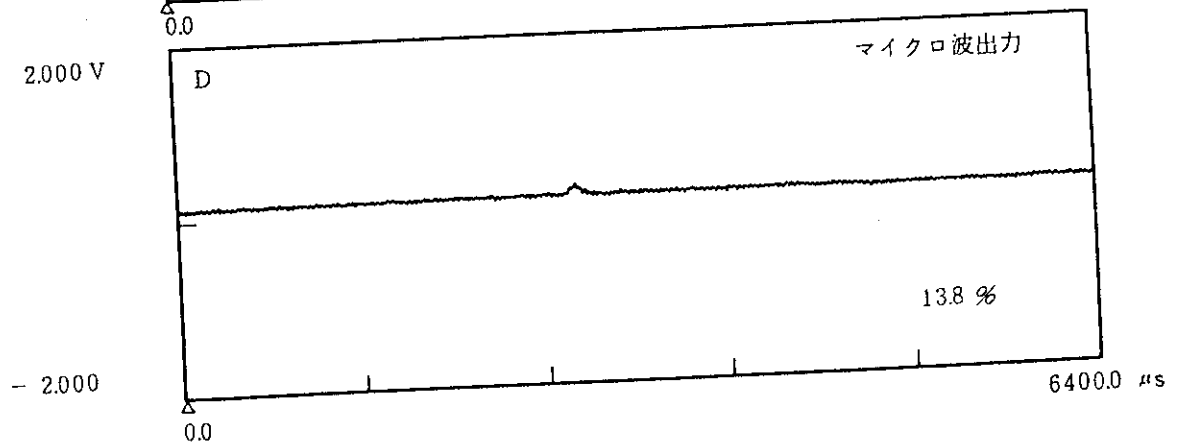
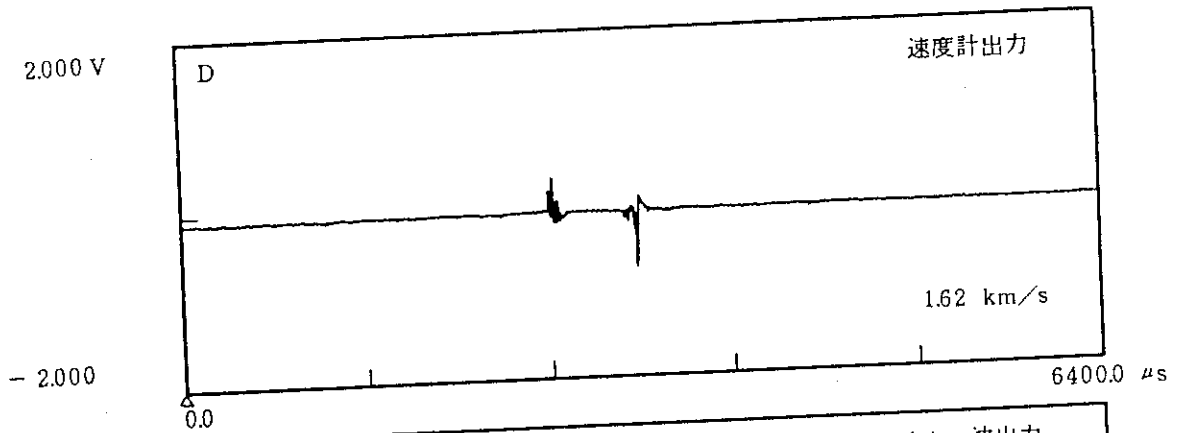
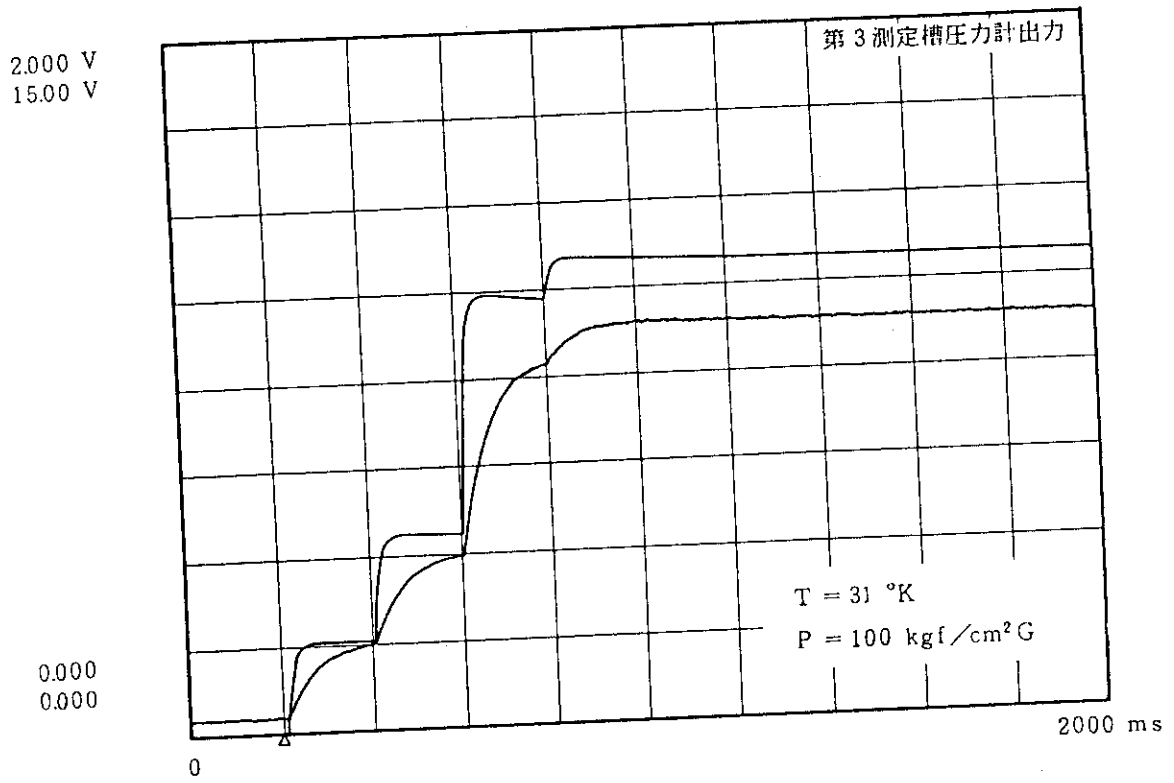


図 4.5 (2) 射出特性 (柔なペレットが射出された場合)

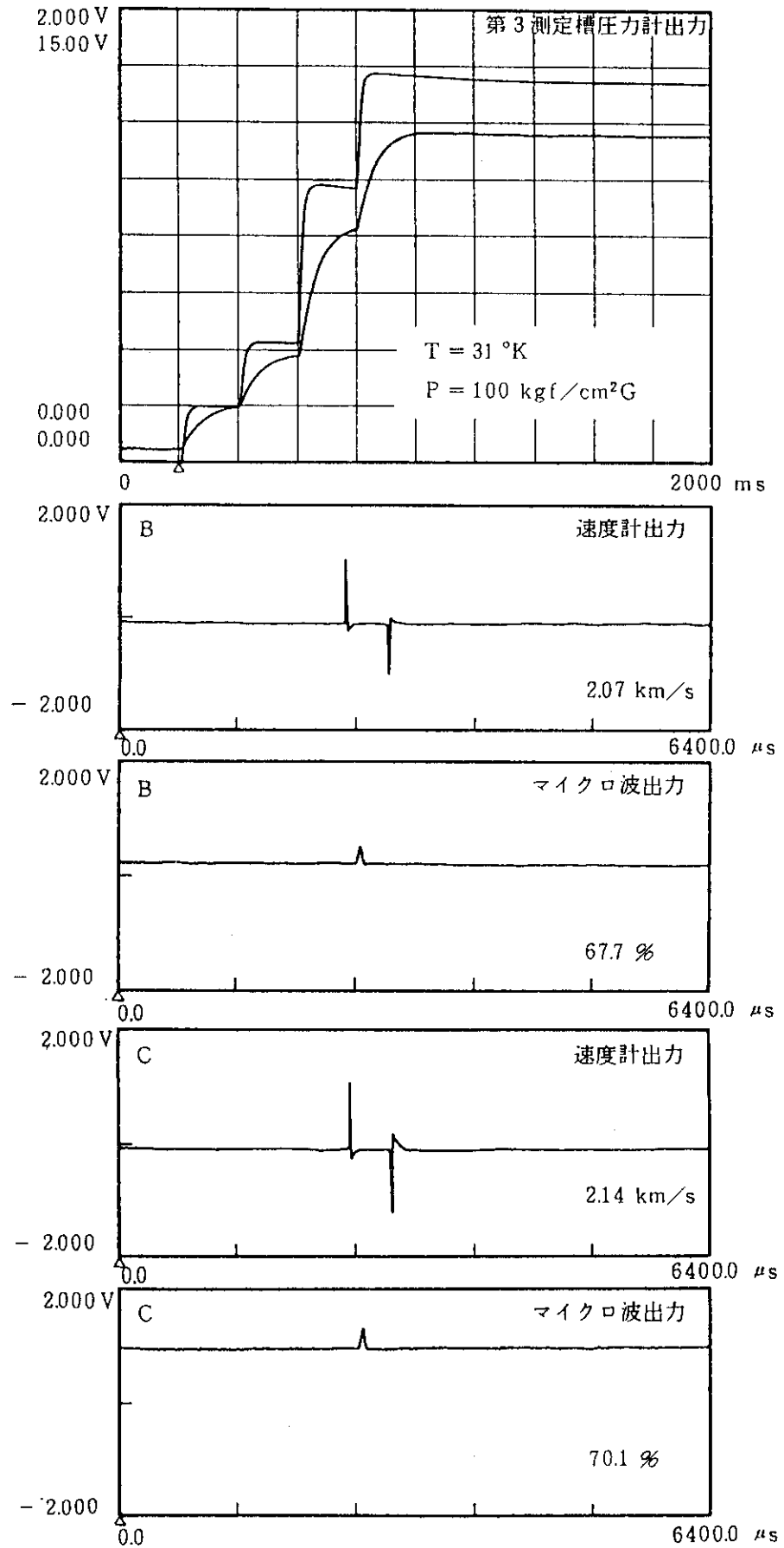


図 4.5 (3) 射出特性 (正常)

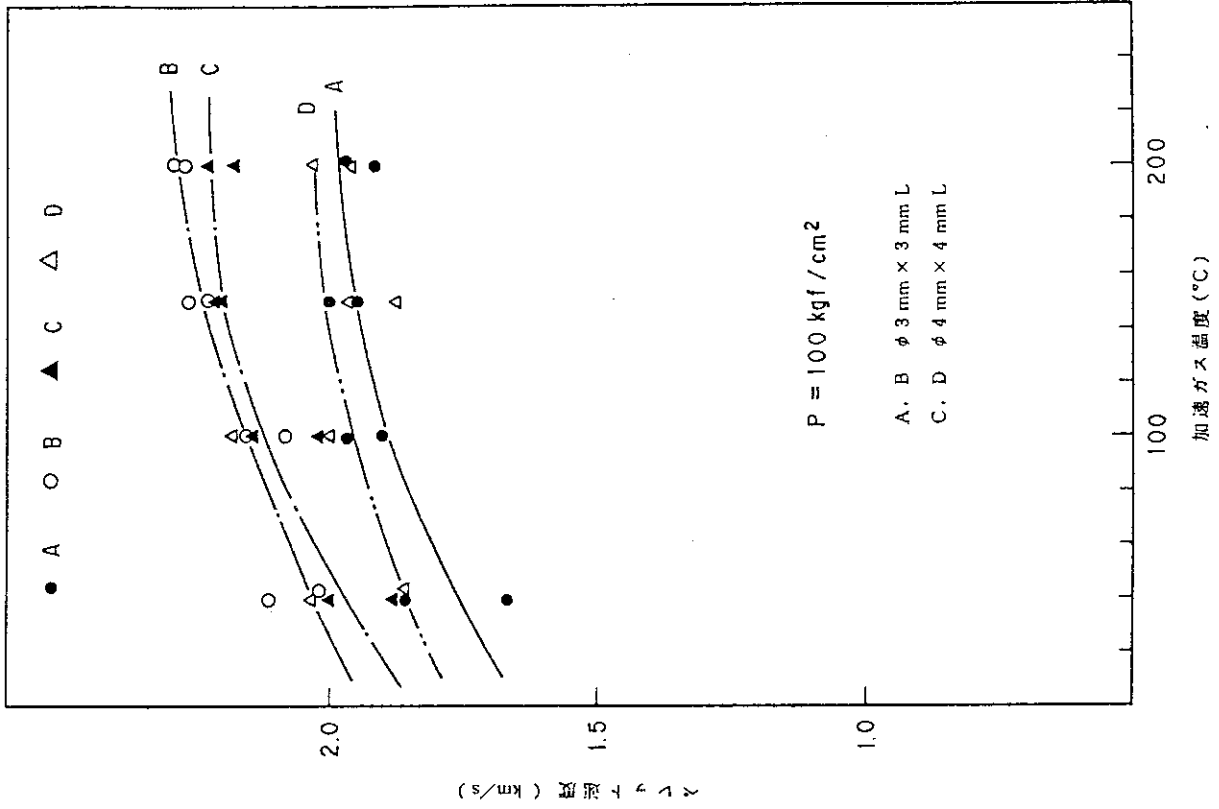


図 4.7 加速ガス温度-ペレット速度特性

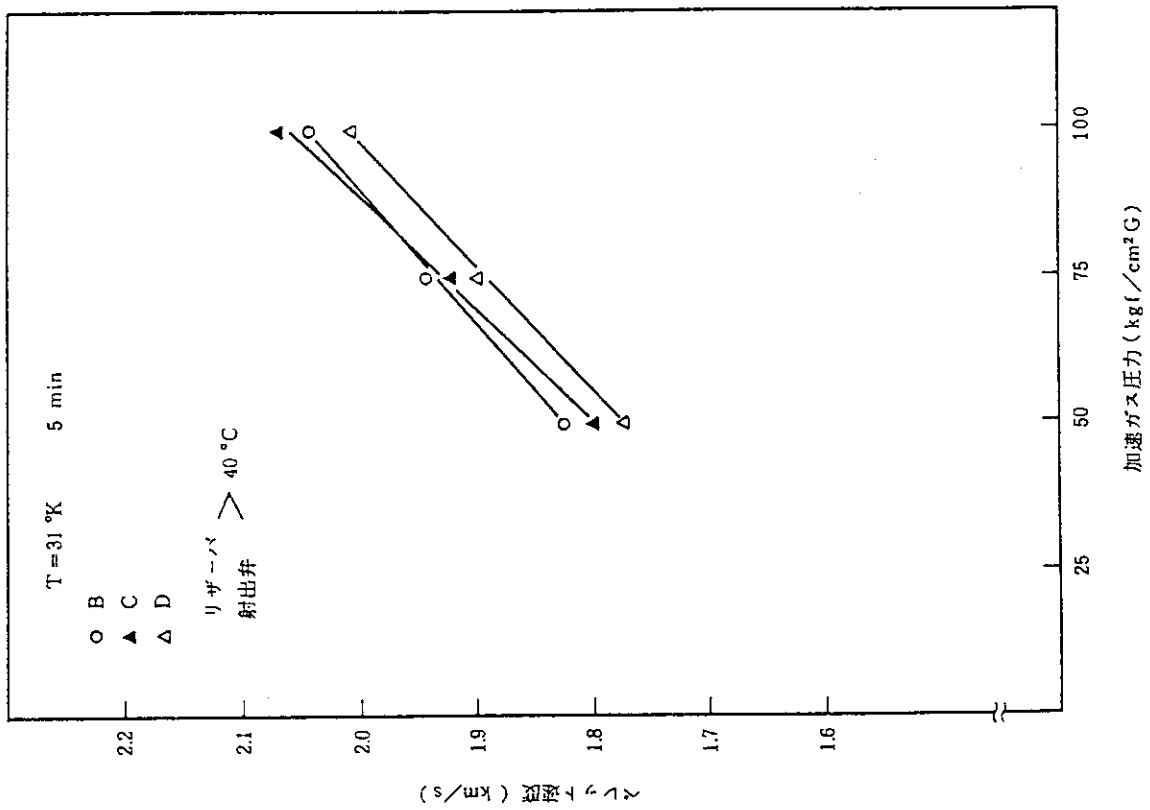


図 4.6 加速ガス圧力-ペレット速度特性 (B, C, D)

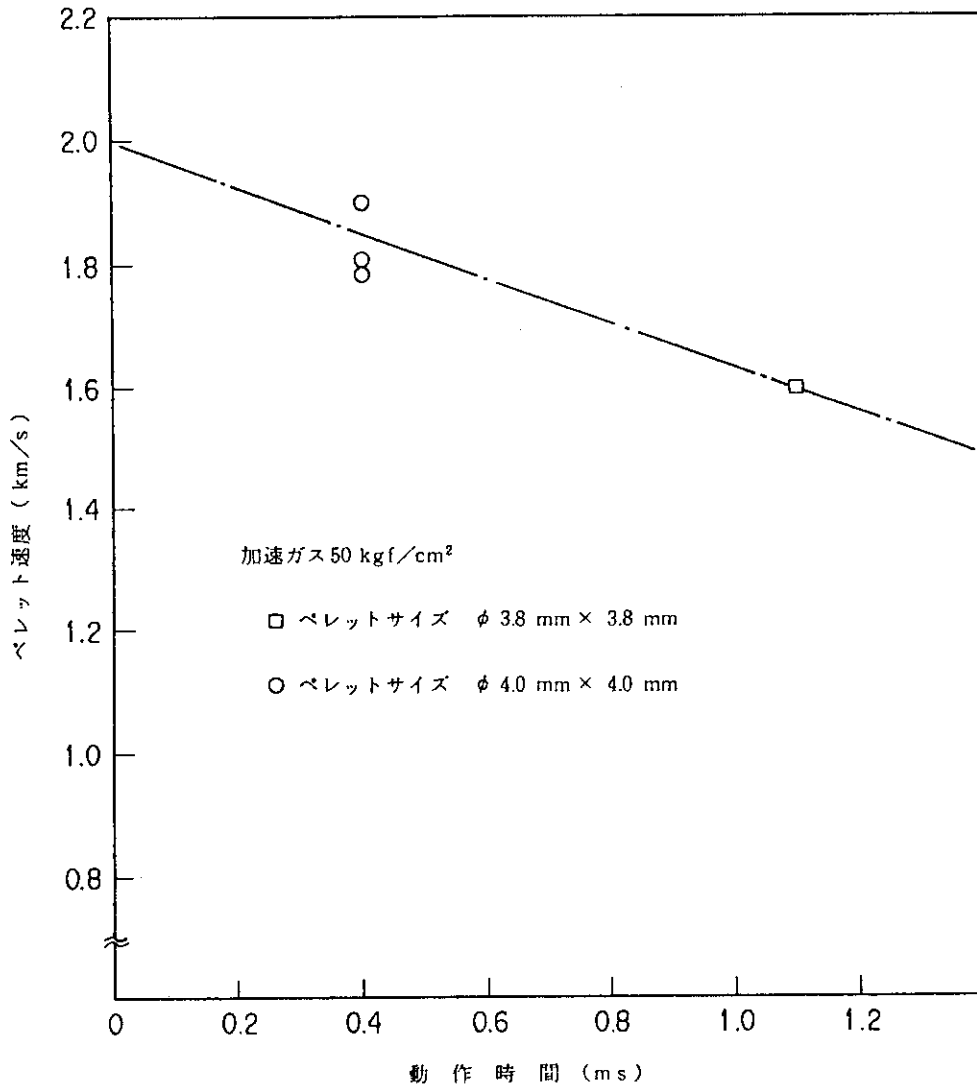


図 4.8 動作時間 - ペレット速度特性

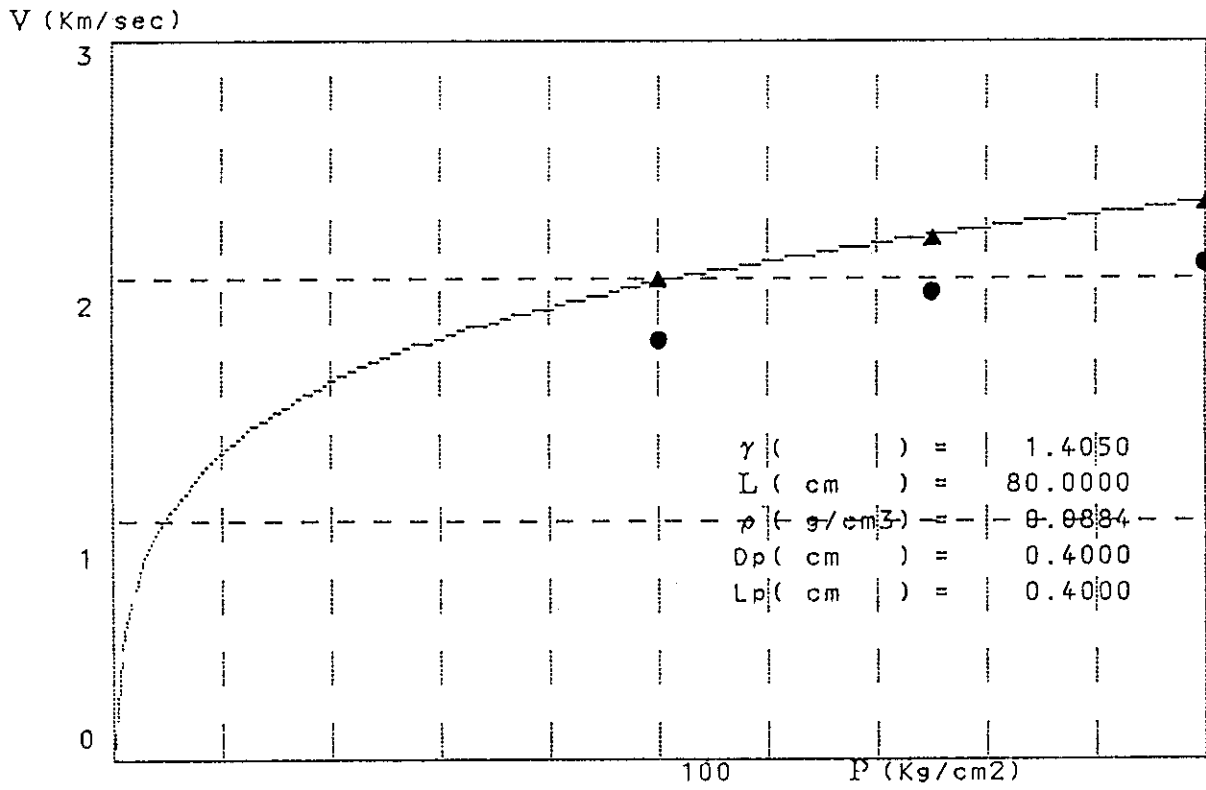
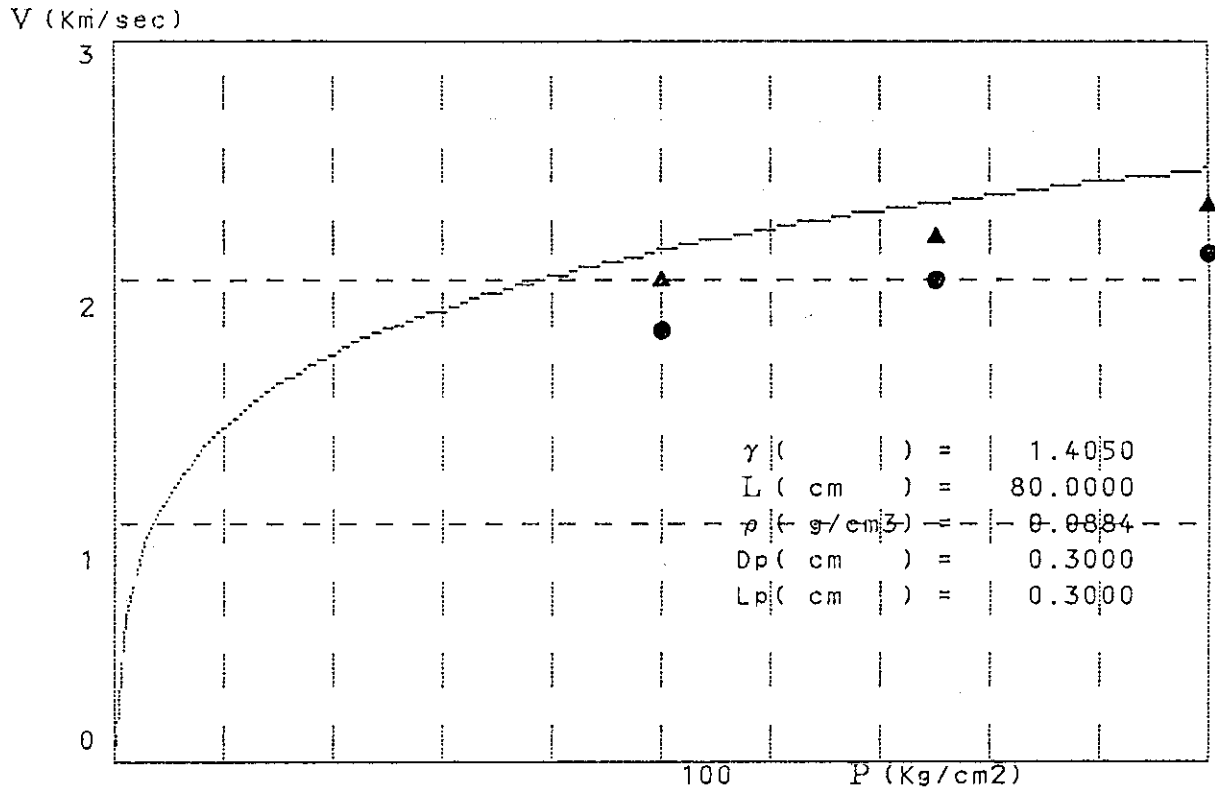


図 4.9 速度-圧力特性の計算値との比較

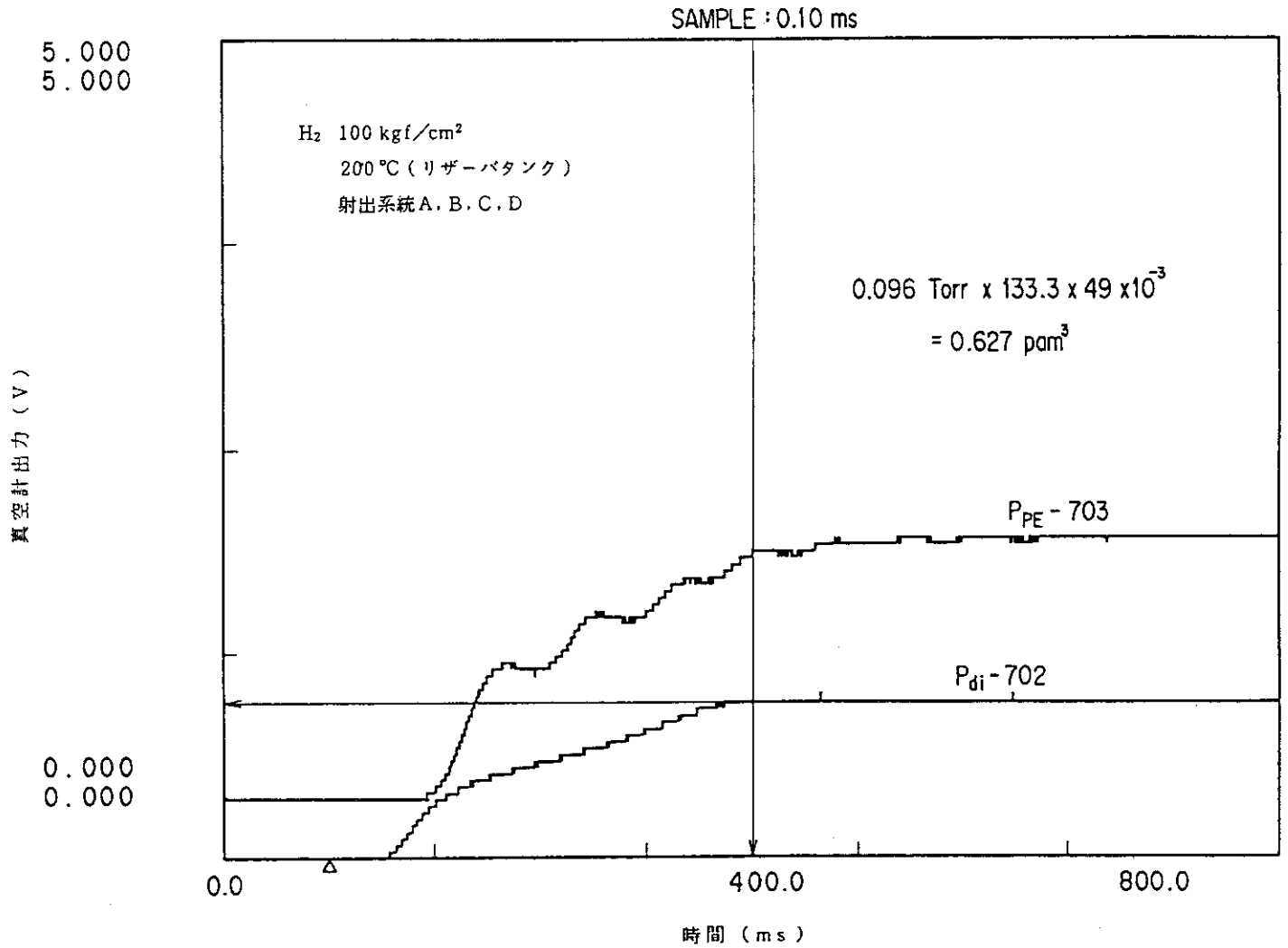


図 4.10 加速ガス注入量特性

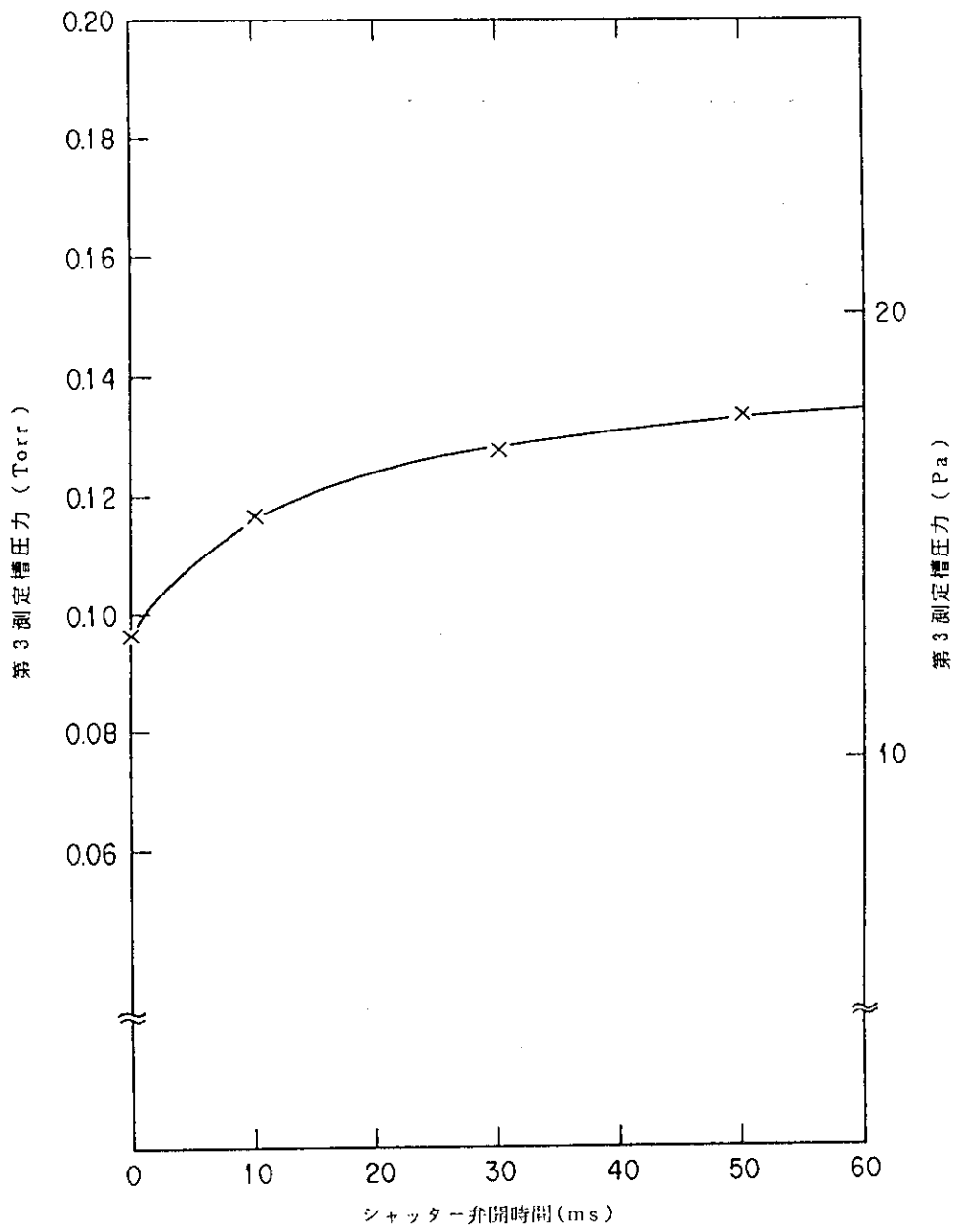


図 4.1.1 シャッター弁開時間 - 第3測定槽圧力特性