



JAERI-Tech

JP0150366

2001-019



JT-60 ペレット入射装置のための ペレット切断装置の開発

2001年3月

平塚 一・市毛 尚志・木津 要・岩橋 孝明
本田 正男・加藤 敦史*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

C Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60 ペレット入射装置のためのペレット切断装置の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

平塚 一・市毛 尚志・木津 要・岩橋 孝明

本田 正男・加藤 敦史*

(2001年2月5日受理)

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、高温プラズマへの燃料供給及びプラズマ高密度の長時間維持を目的に重水素ペレットを連続的に入射するペレット入射装置の開発を進めている。本ペレット入射装置は、立方体状のペレットを遠心力により加速する遠心加速方式を採用している。この加速方式においては、ペレットの安定供給、軌道の乱れ防止や射出方向の安定が重要である。ペレット入射装置の高性能化を目的として、立方体状のペレットを安定に繰り返し切断できるペレット切断装置を開発した。

ペレット切断装置は、ソレノイドにより高真空、低温下（約14K）で生成された固体重水素をペレット形状に切断し、加速部に装填する機能を持つ。単体動作試験の結果、気密性 $1 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、作動時間 3ms 以下、周期 1~20Hz、ストローク 2.5mm の性能を満足した。このペレット切断装置をペレット入射装置本体に組み込んでの動作試験を行った結果、ペレット射出周波数～10Hz、ペレット速度～690m/s、ペレット入射時間～3.5s の性能を得た。

これにより、ペレット切断装置の開発が JT-60U ペレット入射装置の高性能化に大きく寄与できた。

Development of a Pellet Cutting and Loading Device for the JT-60 Repetitive Pellet Injector

Hajime HIRATSUKA, Hisashi ICHIGE, Kaname KIZU, Takaaki IWASHI,
Masao HONDA and Atsushi KATOH*

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

(Received February 5, 2001)

In JT-60, a pellet injector that repetitively injects deuterium pellets is under development to supply fuel to high temperature plasmas and sustain high-density plasmas.

The pellet injector generates cubic pellets and accelerates them with a straight-arm rotor by centrifugal force. In this acceleration method, it is important to supply pellets reliably and stably, to prevent pellet orbits from disordering and to stabilize the launching direction. To achieve higher performance of the injector, a pellet cutting and loading device that cuts a deuterium ice rod into cubic pellets and loads them to the pellet injector successively and stably has been developed.

The pellet cutting and loading device can cut a deuterium ice rod produced at low temperature of <14K and in the high vacuum into cubic pellets with a solenoid and loads them to the accelerator of the pellet injector. The device specifications of seal leak of $<1 \times 10^{-8}$ Pam³/s, cutting time of <3 ms, cutting frequency of 1-20 Hz and cutter stroke of 2.5 mm were confirmed in the device test. In the operation test after assembling this device to the centrifugal pellet injector, the operational performance of pellet injection frequency of \sim 10 Hz, pellet speed of \sim 690 m/s and pellet injection duration time of \sim 3.5 s was achieved. Thus, the development of the pellet cutting and loading device contributed to the upgrade of the JT-60 pellet injector.

Keywords; Centrifugal Pellet Injector, Cutting and Loading Device, Pellet, Ablation, Vacuum Insulation, Low-temperature, Plasma

* CKD Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. ペレット切断装置の設計	2
2.1 遠心加速方式ペレット入射装置の基本構造	2
2.2 高性能化のための改造内容	2
2.3 設計仕様	3
2.4 高性能化後の構造	3
3. 動作特性	7
3.1 単体試験	7
3.2 組込試験	9
4. 不具合と対策	11
4.1 プランジャー破損	11
4.2 真空リーク	12
4.3 プランジャーのバウンド現象	12
5. おわりに	14
謝辞	15
参考文献	15

Contents

1 . Introduction	1
2 . Design of a Pellet Cutting and Loading Device	2
2.1 Basic Structure of Centrifugal Pellet Injector	2
2.2 Contents of Improvements Aiming at Higher Performances	2
2.3 Design and Specifications	3
2.4 Structure after Improvements	3
3 . Characteristic of Components	7
3.1 Inspection Test	7
3.2 Assembly Test	9
4 . Troubles and Countermeasure	11
4.1 Plunger Damaging	11
4.2 Vacuum Leak	12
4.3 Bound Phenomenon of the Plunger	12
5 . Conclusion	14
Acknowledgments	15
References	15

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、高温プラズマへの燃料供給及びプラズマ高密度の長時間維持を目的に、重水素ペレットを連続的に入射するペレット入射装置の開発を進めている。ペレットは、高速でプラズマの内部まで侵入することからガス状の燃料供給より有利である。ペレットの加速方式には空気銃方式 1),2)と遠心加速方式 3),4)がある。前者は方向性に優れているが高繰り返しには限界がある。一方、後者は一定範囲の方向性を有し、高周期、連続性にも優れている。そこで、JT-60 では、遠心加速方式によるペレット入射装置の開発を目指した。

平成 10 年度に使用を開始した遠心加速方式ペレット入射装置は、加速の安定、供給量及び入射連続性の問題があったため、平成 11 年度より、ペレット入射装置の高性能化 5),6)を進めてきた。高性能化は、装置全体を考慮した高性能機器の取付け、構成機器の配置変更等が考えられたが、現装置を効果的に改造し、短期間で成果を上げるのは容易ではないと判断した。そこで、最も高性能化に重要な部分であるペレット装填部品に着目して改良を進めた。ペレット装填部品は、固体燃料供給管、ペレット切断装置、ペレットガイド管、インナーロータ、ストップシリンダー等の総称である。この中でも、特にペレット切断装置は、固体燃料である固体重水素をペレットに切断し、遠心加速部に装填する役割を果たす重要な装置である。ペレット切断装置の性能が、遠心加速方式ペレット入射装置の高性能化を左右すると言っても過言ではない。

一般に、固体重水素は丸棒状で生成された後、外部からの力で押し出してペレット切断装置に導入してペレットに切断する。ペレット切断装置は全体を液体ヘリウムにより冷却し、内部を加速槽の排気系により真空排気できる構造にしている。しかし、加速槽にペレット切断装置があると、ペレットの昇華ガス等により真空中度が劣化し、真空中断熱が破壊されて冷却温度が不安定になるとともに、生成ペレットの溶発、昇華を引き起こす問題が生じる。また、生成したペレット断面が安定面でないと、加速時の安定性に欠ける問題が生じる。そこで、遠心加速方式ペレット入射装置の性能を向上させる上で、これらの問題を解決した装置が必要とされた。そのため、生成槽、加速槽についての配置を変更するとともに、立方体断面のペレットを生成するペレット切断装置の改良・開発を行った。

本報告は、高性能のための開発したペレット切断装置の設計、構造、動作特性及び開発途上の不具合と対策等について纏めたものである。

2. ペレット切断装置の設計

2. 1 遠心加速方式ペレット入射装置の基本構造

遠心加速方式ペレット入射装置は、液化器、冷却器、ピストン駆動ユニット、ペレット切断装置及びペレットを加速するアウターロータ等で構成され、これらは、各々真空排気された生成槽、加速槽内に配置されている。その構成を Fig.2-1 に示す。遠心加速方式ペレット入射装置は、まず、生成槽内で燃料となる重水素ガスを液体ヘリウムにより冷却・固化して固体燃料（固体重水素）を生成する。次に、固体重水素をピストン駆動により押し出してペレット切断装置に導入する。そこで、ペレット切断装置の動作により立方体（立方体状）のペレットに切断され、遠心加速部に装填される。最終的に高速回転しているアウターロータにてペレットを加速、射出するしくみである。

2. 2 高性能化のための改造内容

遠心加速方式ペレット入射装置の高性能化には、固体燃料供給管、ペレット切断装置、ペレットガイド管、インナーロータ、ストップシリンダー等のペレット装填部品の改良が重要と考えた。特に、ペレット切断装置は、固体燃料を立方体状のペレットに切断し、遠心加速部に装填する重要な役割を果たす装置である。

固体重水素は、冷却器に生成して丸棒状に押し出し、それを装填装置に導入して円滑な駆動をするプランジャー（可動鉄心）に取り付けられた丸型カッターにより切断をしている。高性能化前の従来装置においては、ペレット切断装置の部分をペレット装填装置と称しており、その取付例を Fig.2-2 に、その外観と構造を Fig.2-3 に示す。ペレット装填装置は、ソレノイド部と切断部に区分され、ステンレスと無酸素銅を主材料としていた。切断部からソレノイド部に液体ヘリウム (LHe) が流れ、装置全体を冷却する構造である。併せて、ソレノイド部側から生成槽排気ラインによる真空排気、切断部側から加速槽排気ラインによる真空排気がなされる構造になっている。つまり、ペレット装填装置の取り付け位置においては、外部の排気ラインを区分けしてもペレット装填装置を介してどちらかの槽に真空的影響を受ける構造である。さらに、ペレット装填装置が加速槽にあると、ペレット昇華等のガスにより真空度の劣化し、真空断熱が破壊されて温度が不安定となる。もとより、ペレットは、空気銃方式ペレット入射装置でキャリア方式による円柱状ペレット生成の実績から円柱形が適當と想定していた。しかし、実際、切断後は俵状のペレットになるため、この形状では、遠心加速部への装填及びペレットとアウターロータの接面が不足してペレット運動の乱れや射出方向の不安定が生じる。また、ペレット装填装置の固定部やソレノイド部から切断部位への熱侵入が生じ、生成ペレットが加速前に、溶発、昇華される等の問題が生じた。

そこで、遠心加速方式ペレット入射装置の性能を向上させる上で従来のペレット装填装置に変わり、これらの問題を解決した装填装置が必要とされた。問題解決の方法としては、ペレット装

填装置を真空度変化の大きい加速槽から真空度変化のない生成槽に移すとともに、以下の点を考慮した。ただし、槽内構造から従来のペレット装填装置と外形上の寸法互換性をとること及び冷媒ガスである液体ヘリウムとの取合継手の互換性考慮した上で、新しいペレット装填装置の開発を行った。高性能化において、開発したペレット装填装置をペレット切断装置と称する。

- ① 切断部とソレノイド部を熱遮断し、固定部からの熱侵入を防止する。
- ② 切断部の温度変化を少なくし、破壊しにくいペレットを切断する。
- ③ 装填装置の外部と内部を真空遮断による真空断熱をする。
- ④ カッターの高速、高繰り返し動作によって立方体状ペレットを生成する。
- ⑤ 安定してペレットを加速部に装填する等を考慮した。

2. 3 設計仕様

遠心加速方式ペレット入射装置は、最大周波数 10Hz、最高速度 1000m/s 及び最大射出時間 5s 以上を目標仕様としていることからペレット切断装置の仕様をこれに合わせて決定する必要がある。Table 2-1 に従来装置であるペレット装填装置の仕様を示す。遠心加速方式ペレット入射装置の高性能化の目的には安定加速や供給量の増大がある。供給量増大のためには従来の $\phi 2\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ の円柱状ペレットから約 1.5 倍の体積に相当する $2.1\text{mm} \times 2.1\text{mm} \times 2.1\text{mm}$ の立方体状ペレット(温度 14K)にする必要がある。ペレット切断装置は、従来のペレット装填装置を基本に仕様を検討した。

遠心加速方式ペレット入射装置は、5s 間に 124.2mm の長さの固体燃料を生成する能力を有している。この長さは、2.1mm のペレット 60 個分に相当する。ペレット切断装置は、10Hz でペレットを切断することが仕様条件であることから、2.1mm 立方体状ペレットを 100ms 毎に切断・装填する必要がある。円柱形ペレットと立方体状ペレットの大きな違いは、切断ストロークと切断面である。繰り返し動作が速い場合、押し出された固体重水素とカッターの干渉（カッターの往復動時間によるペレットサイズへの影響など）が懸念される。そこで、高速で、かつ、高繰り返し性能がカッターの往復動作に要求される。また、確実な切断ストロークに加えて、切断部への温度による影響や真空度の変化による影響が懸念される。そこで、切断部を温度絶縁構造、ガス通路以外を真空断熱構造とする仕様とした。Table 2-2 に求められるペレット切断装置の性能仕様を示す。切断周期は、より高速動作が必要なことから仕様条件の倍とし、一連の動作時間が 50ms 以内に完了することとした。

2. 4 高性能化後の構造

ペレット切断装置は、従来装置の問題点を克服するために生成槽に配置し、加速槽からのガス侵入を阻止して各々を独自に排気可能な構造とした。Fig.2-4 にペレット切断装置の組込図を示す。ペレット切断装置は、固定金具により熱絶縁された構造で装置の中心に配置した。Fig.2-5 にペレット切断装置の外観と構造を、Fig.2-6 にペレット切断装置内に組み込まれるプランジャーの外形を示す。ペレット切断装置は、大きく分けるとソレノイド部、接続部及び切断部となり、

各々、ステンレス、ガラス入りエポキシ樹脂及び銅を主材料とした。ペレット切断装置における主な使用材料を Table 2-3 に示す。ソレノイド部、接続部及び切断部の内部は、固体燃料供給管及びペレットガイド管を介して固体燃料やガス等と同じ雰囲気になるためにペレット排出口より排気できるように真空シール構造とした。切断部は他部と熱絶縁する構造で、固体燃料を低温に維持するために専用の液体ヘリウム(LHe ; Liquid Helium)供給管により LHe を供給して強制冷却した。また、固定具やソレノイド部からの熱は、接続部の FRP (エポキシ・ガラスクロス積層板) により熱絶縁されて切断部に伝わらない構造にした。

ペレット切断装置の動作は、コイルに通電することによりプランジャーが動作し、それに取り付けられているカッター（外 2.4mm、内 2.1mm）が供給してきた固体重水素を 2.1mm の立方体状のペレットを切断する。ストロークは、固体燃料供給管との取合を考慮するとともに、確実に所定寸法のペレットが切断できる距離となる 2.5mm とした。動作後のプランジャーの復帰は、衝撃力を伴うため、プランジャースプリング、止め板及びクッションスプリングで吸収する構造とした。

2.4.1 熱絶縁

ソレノイド部と切断部の接続部は、ソレノイド部からの熱侵入等がないように SUS 材 (SUS316；熱伝導率 $\lambda = 0.694 \text{ W/m/K}$) に変えて、低温脆性の少ない FRP を用いた。また、コンパクトな形状 ($\phi 14 \times \phi 8 \times 15$) にし、熱伝達量を従来の 1/10 以下になる構造とした。FRP の熱伝導率 λ は以下のとおりである。

FRP の熱伝導率

層方向	：常温(RT)	0.694 W/m/K
	77K(液体窒素)	0.577 W/m/K
	4K(液体ヘリウム)	0.075 W/m/K
貫層方向	：常温(RT)	0.698 W/m/K
	77K(液体窒素)	0.264 W/m/K
	4K(液体ヘリウム)	0.053 W/m/K

プランジャーに取り付くカッターが口形状になったことから、従来装置に比べて固定鉄心の内径形状が大きくなり、コイルの領域を狭くする結果となった。磁気回路において、断面積の減少は吸引力の減少につながることから、従来装置より吸引力の小さくなる可能性はあるが、プランジャーとカッターの重量を軽くするため、性能への影響は少ないと考えられる。

2.4.2 作動時間

ペレット切断装置の動作時間は、ストローク量、プランジャーの質量、バネ定数により決まる。プランジャーの変位量と動作時間の関係は、質量(m)のプランジャーを k のバネ定数を持つスプリングで押さえ、力(F)でそれを持ち上げ、変位量(χ)を得ようとする簡易モデル運動方程式より表される。

$$m\ddot{x} + kx = F \quad (1)$$

m ; プランジャー質量(w/g)

F ; プランジャー駆動力(kg)

k ; バネ定数(kg/m)

x ; プランジャーの変位量(m)

(1)式から、プランジャー動作によりストローク変位量(δ)を得るためのプランジャー駆動力は、次式で表せる。

$$F = k\delta / (1 - \cos \omega \cdot t) \quad (2)$$

t ; 動作時間(s)

$$\omega = \sqrt{k/m} = \sqrt{k(g/w)}$$

w ; プランジャー重量(kg)

g ; 重力加速度

バネ定数 0.28kg/mm、動作時間 10ms とした場合、5.5g のプランジャーを駆動させる力は(2)式より、710g 必要となる。また、従来装置と同様にコンデンサーにチャージした電圧(max 140V)を瞬時にコイルに流して作動させる方式の電源を用いることから、コイル巻線仕様 ($\phi 0.55 \times 340t \times 1\Omega$) も同じであるとすれば、プランジャーを持ち上げる駆動力(吸引力)は、鉄心の断面積比から算出できる。電流 10A の時、従来装置の場合はストローク 0.0mm で 1825g、ストローク 2.5mm で 700g であった。形状から磁気回路断面積減量比は約 80% になるので、ペレット切断装置の場合はストローク 0.0mm で 1460g、ストローク 2.5mm で 560g となり、このとき、運動方程式の値を満足する。

この吸引力からペレット切断装置の作動時間を算出推定する。 $\alpha = F/m = 2St/t^2$ より、

$$t = \sqrt{(2St \cdot W) / (F \cdot g)} \quad (3)$$

F ; $F_{sol} - F_{sp}$

F_{sol} ; ソレノイド吸引力 (kg)

F_{sp} ; バネ荷重 (kg)

St ; プランジャーストローク (mm)

W ; プランジャーとカッターの組立質量 (kg)

プランジャーストローク 2.5mm を得る時、ソレノイド荷重 670g、バネ荷重 280g、プランジャーとカッターの組立質量 5.5g とすると、ON 動作時 2.05ms、OFF 動作時 3.17ms となり、仕様条件の往復時間を十分満足するものと推定される。しかし、実際の吸引力、バネ荷重、質量の誤差及び復帰(OFF)動作時の衝突反動等による推定値からのずれる影響が生じる可能性が多少懸念される。

従来装置の動作時間は、実測において、ON 動作 2.7ms、OFF 動作 5.9ms (維持時間 4.4ms 含む) であることから、各動作時間は、3ms 以下となることが期待される。

2.4.3 真空シール

JT-60 真空容器と接続する設備は、真空管理基準($1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、放出ガスの少ないこと)を満足する必要がある。また、低温での使用となるため、耐低温脆性が要求される。この観点から、本装置の切断部の本体は、耐低温脆性以外に低温熱伝導性、ろう付け性等も考慮した真空シール構造とした。また、リード線内は、擦り線としてコンダクタンスを小さく見込んだ特殊構造とした。

3. 動作特性

開発したペレット切断装置を遠心加速方式ペレット入射装置の装填部品として使用するに当たり、単体試験と組込試験を行って、全体としての健全性を確認した。

3. 1 単体試験

ペレット切断装置の性能、動作特性を確認するために以下の試験、検査を行った。

3.1.1 単体試験の検査内容

1) 外観、寸法検査

- ①各部の傷、割れ及び真空シール面等に異常の無いことを確認する。
- ②主要部、取合部の寸法をノギス、マイクロメータで測定確認する。

2) 耐圧気密検査

- ①LHe 供給管からペレット切断装置の LHe 供給ラインは、LHe 供給時、最大 0.12MPa の圧力がかかるところから LHe 出口側を閉止し、窒素ガスにおいて 0.2MPa の耐圧（1.5 倍耐圧）を確認する。
- ②ペレット切断装置の LHe 供給ラインは、真空維持を目的に真空排気されることから LHe 出口側を閉止し、LHe 入口側から真空排気を行い、ヘリウムリーク量を確認する。判定値は、 $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ とする。Fig.3-1 に LHe 供給ラインの He リーク試験図を示す。
- ③固体燃料である固体重水素が導入されるラインは、ペレット切断装置内部とガス供給、真空排気及び真空断熱のために同じ雰囲気になることから、固体燃料供給管、ペレットガイド管及びペレット排気口を閉止し、試験ポート（組込時は閉止）を用いてヘリウムリーク量を確認する。判定値は、 $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ とする。Fig.3-2 に固体燃料導入ラインの He リーク試験図を示す。

3) ソレノイド確認試験

- ①ソレノイド部内のコイルと筐体間の絶縁を確認する。判定値は、DC500V メガにて $100\text{M}\Omega$ 以上とする。
- ②ソレノイド部内のコイルと筐体間の電圧を印加し、耐電圧により異常のないことを確認する。判定値は、AC1500V、1 分間する。
- ③コイルに電圧を印加し、サージ電圧により異常のないことを確認する。判定値は、DC3000V、1 秒間する。
- ④コイルの抵抗を常温にて測定確認する。判定値は、 $1 \pm 0.25\Omega$ とする。

4) 吸引力検査

- ①常温、無負荷時において、コイルに規定電流を流し、プランジャーが固定鉄心との吸着状態から離脱方向に移動するときの吸引力を測定し、ペレット切断力を確認する。測定は、プランジャーの先端にロードセル（荷重変換装置）を設置して実施する。判定値は、

10A で 9.8N(0.98kgf) 以上とする。Fig.3-3 にソレノイド吸引力試験図を示す。

5) 作動試験

- ①常温、無負荷、大気圧において、ストローク 2.5mm の ON 動作、OFF 動作の時間を確認する。判定値は、各々 3ms 以下とする。Fig.3-4 に作動試験図を示す。
- ②常温、無負荷、大気圧において、ストローク 2.5mm の ON-OFF 繰り返し動作を確認する。判定値は、1~20Hz とする。

3.1.2 単体試験の検査結果

1) 外観、寸法検査

- ①ソレノイド部、接続部、切断部及びカッター等に傷、割れ等のないことを確認した。また、真空シール部に異常のないことを確認した。組込み前のペレット切断装置の外観写真を Photo3-1 に、ペレット切断装置内に仕込んだプランジャーの外観写真を Photo3-2 示す。
- ②主要部の取り合い寸法を測定し、取合等に問題のないことを確認した。Fig.3-5 に固体燃料切断装置の外観寸法測定部位と結果を、Fig.3-6 にプランジャーの寸法測定部位と結果を示す。プランジャーについては、微細構造のために実測できないことから投影機を用いて寸法を確認した。また、カッター部を含めたプランジャーの重量は、5.47g であった。

2) 耐圧気密検査

- ①LHe 供給管の出口側に閉止プラグを取り付け、入口側より窒素ガス 0.2MPa を 10 分間加え、LHe 供給ラインにおける切断部のろう付部、継手等に異常のないことを確認した。
- ②LHe 供給管の出口側に閉止プラグを取り付け、入口側にリウムリークディテクターを取り付け、LHe 供給ラインにおける切断部のろう付部、継手等に真空リークのないこと確認した。プローブ法及びフード法により $2 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と、十分に判定値を満足した。
- ③固体燃料供給管、ペレットガイド管及びペレット排出管の取合を真空シールふたにより閉止し、ペレット切断装置のソレノイド部、接続部、切断部の真空シール部位及び固体燃料導入ラインをソレノイド部上部の試験ポートにヘリウムリークディテクターを取り付け、真空リークのないこと確認した。プローブ法及びフード法により $1.4 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と、判定値を満足した。

3) ソレノイド確認試験

- ①コイルと筐体間の絶縁が 100MΩ 以上であることを確認した。
- ②コイルと筐体間に AC1500V を印加し、耐電圧性能を確認した。
- ③コイルに DC3000V を印加し、サージ電圧に対する性能を確認した。
- ④常温において、コイル抵抗が 1.03Ω であることを確認した。

4) 吸引力検査

ペレット切断装置に 10A、8A、6A、4A、2A の電流を流し、ストローク 0~3.0mm における各々の吸引力を確認した。Fig.3-7 にソレノイド吸引力測定結果を示す。電流 10A (無負荷時) では、18.6N(1.86kgf) と判定値の 2 倍近い値を得え、仕様を十分に満足することを確認した。

5) 作動試験

- ①動作は、固体燃料導入口にレーザー光（幅 2.5mm）を透過させ、カッター作動による遮断時間の測定により確認した。Fig.3-8 に作動時間を確認したレーザー出力データを示す。ON 動作は、電流を流してから動作維持までの時間(T2-T1)を測定し、1.3ms であることを確認した。OFF 動作は、動作維持から初期状態に復帰までの時間(T4-T3)を測定し、2.3ms であることを確認した。また、レーザー光に遮断信号より 2.5mm のストロークを確認した。
- ②ON-OFF 繰り返し動作を 1Hz、5Hz、10Hz、20Hz について、2.5mm のストロークを安定に連続動作することを確認した。1Hz の場合は Fig.3-8 のレーザー出力データに試験結果を示し、以下、Fig.3-9 に 5Hz の場合を、Fig.3-10 に 10Hz の場合を、Fig.3-11 に 20Hz の場合の試験結果を示す。

3. 2 組込試験

単体試験において、ペレット切断装置としての性能を満足したので遠心加速方式ペレット入射装置の装填部品として組込み、その性能試験を行った。ペレット切断装置は、Fig.2-1 に示すように従来装置と異なり、生成槽仕切フランジを境界に生成槽に配置される。ペレット切断装置の内部は、冷却器や固体燃料供給管も含めて加速槽の排気ラインにより真空排気される構造である。

3.2.1 性能試験項目

1) 真空試験

- ①生成槽及び加速槽側から真空排気を行い、プローブ法によりペレット切断装置の He リーク量を確認する。判定値は、 $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下とする。また、真空断熱のために到達圧力を確認する。
- ②生成槽の真空排気を行い、ペレット切断装置の LHe 供給ラインの He リーク量を確認する。

2) 冷却試験

- ①ペレット切断装置の LHe 供給ラインに LHe を供給し、生成槽及び加速槽真空度への影響の確認する。
- ②ペレット切断装置の LHe 供給ラインに LHe を供給し、ペレット切断装置の冷却温度を確認する。
- ③常温及び低温状態での無負荷時の切断動作を確認する。

3) 動作試験

- ①固体燃料として重水素の固体を冷却器で生成し、それを 2.1mm の角柱状に押し出してペレット切断装置に導入する。固体重水素が固体燃料入口側から排出口に供給される様子を確認する。
- ②2.1mm 角柱状の固体重水素をペレット切断装置に導入するとともに、ペレット切断装置を動作させ、立方体状ペレットの切断状態を確認する。

3.2.2 性能試験結果

1) 真空試験結果

- ①ペレット入射装置の生成槽に He リークディテクターを接続し、燃料ガス供給ラインに He ガスを流してペレット切断装置の真空リーク量が $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下となることを確認した。また、高真空の到達圧力 ($1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下) を得て、真空断熱に適していることを確認した。
- ②ペレット入射装置の生成槽に He リークディテクターを接続し、LHe 供給ラインに He ガスを流してペレット切断装置 LHe 供給ラインの真空リーク量が $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下となることを確認した。

2) 冷却試験結果

- ①ペレット切断装置の LHe 供給ラインに LHe を供給して、生成槽、加速槽の真空状態に影響のないことを確認した。
- ②生成槽内の液化器、冷却器等の LHe 供給機器とペレット切断装置の LHe 供給ラインに LHe を供給し、冷却到達温度を確認した。温度はペレット切断装置の切断部に取り付けた金鉄クロメル熱電対により、14K となったことを確認した。
- ③固体燃料生成温度条件（固体燃料無しの状態）において、動作周波数 1Hz、5Hz、10Hz、20Hz の正常動作を確認した。

3) 動作試験結果

- ①固体燃料生成温度条件（液化器 22K、冷却器 12K、固体燃料供給管 32K、固体燃料切断装置 28K）で固体燃料を生成し、2.1mm の立方体状固体重水素が、正常に切断部に供給されることを確認した（CCD カメラによる）。Fig.3-12 に生成槽内の温度条件を示す。
- ②固体燃料生成温度条件で固体燃料を生成し、各周波数によるペレット切断を確認した。ペレットの確認は、Fig.3-12 に示すようにペレット切断装置とペレットガイド管間の加速槽内仕切フランジに組み込んだ落下センサーにて確認した。落下センサーは幅 3mm、高さ 1mm のレーザーで、ここをペレットが遮断する様子を確認した。固体重水素を押出速度 3mm/s、周波数 5Hz で切断した場合のレーザー信号結果データとペレット落下の想定図を Fig.3-13 に示す。レーザー信号の立ち上がり時間、立ち下がり時間及び通過時間等から判断して 2.1mm の立方体状ペレットが切断されているとともに、2.5m/s の速度で安定に落下していることが解る。

4. 不具合と対策

仕様を満足するペレット切断装置の完成までには、種々の不具合が発生した。本装置は、電磁力を利用したソレノイド方式の特殊構造物で、高周波数、真�断熱、極低温体切断等を特徴とした構造となっている。そのため、高性能化前のペレット装填装置の製作及びペレット切断装置の開発途中においては、プランジャー破損、真空リーク及びプランジャーのバウンド現象等を経験した。以下に、これらの不具合及びその対策等について述べる。

4. 1 プランジャー破損

従来装置のペレット装填装置を加速槽組込み、ペレット装填装置に LHe を供給して冷却し、3Hz の周波数で繰り返し動作を実施したところ、プランジャー（コイルの電磁力により作動する磁性体；可動鉄心）動作に異常が現れた。そのときのペレット装填装置温度は 40K であった。

4.1.1 不具合の原因

常温にて分解確認をしたところ、フェライト系 3%ケイ素鋼(MES3F)のプランジャーが破損していることを確認した。Fig.4-1 に 3%ケイ素鋼プランジャーの外形を示す。破断部位は、R0.3mm プランジャーストップバーの根元であった。Photo 4-1 にプランジャーストップバー根元 R0.3mm の場合の破断面を示す。固定鉄心と可動鉄心であるプランジャーのトップバーが動作時衝突するためにトップバーの根元に応力が集中して破損したと思われる。プランジャーの応力集中緩和のためにトップバーの根元を R0.3mm から R1.0mm に変更した。再度、低温動作、繰り返し試験を行ったところ、プランジャー動作に異常が現れた。異常部位は、プランジャーストップバーの破損であった。Photo 4-2 にプランジャーストップバー根元 R1.0mm の場合の破断面を示す。破断面より、フェライト系の低温切り欠き脆性と推定された。

4.1.2 対策

磁性特性と低温実績から、当初プランジャー材料に 3%ケイ素鋼を選定したが、結果として低温脆性についての検討に問題があった。そこで、3%ケイ素鋼の磁束密度と同等の磁束密度を有し、耐低温及び高透磁率材料であるオーステナイト系パーマロイ B (45%Ni) に変更した。Table4-1 に 3%ケイ素鋼とパーマロイ B の主な特性を示す。パーマロイ B は、飽和磁束密度も 1.4T 以上と 3%ケイ素鋼と比べて劣らない性能を有している。ただし、通常、線、帯材であるために、加工に課題が生じた。そのため、プランジャー、カッターパーはロウ付構造とした。パーマロイ B で製作したプランジャーをペレット装填装置に組み込み、同様の試験をしたところ、正常な動作が可能であることを確認した。

4. 2 真空リーク

ペレット切断装置において、固体燃料、ペレットの通路及び LHe の流路となる部分については、大気圧状態でフード法による真空リーク試験を実施した。LHe 流路については、基準値以下の真空リーク量であったが、固体燃料、ペレットの通路については、大きな真空リークが確認された。

4.2.1 不具合の原因

プローブ法にて確認したところ、接続部の FRP 及びリード線引出部にリークのあることが明らかになった。詳細試験の結果、接続部のリークは、ゴム O リングを介してソレノイド部の SUS 製ベースと FRP 製ソレノイドハウジングがリングにより押さえられている部位からのリークであった。リード線引出部のリークは、リード線スリープや押さえからのリークである。前者は、FRP の加工、仕上面とゴム O リングとの非接触によるもの、また、後者は巻線とリード線スリープや押さえとの非接触及び巻線の熱による影響によって生じたものと推定された。

4.2.2 対策

1)ソレノイドハウジング

ソレノイドハウジングのゴム O リングと接する部分については、細密加工と低温を考慮してシリコンゴムを均一に塗布した。試験の結果、基準値を満足した。

2)リード線引出部

リード線引出部は、巻線（ポリアミド・イミド被覆線）にパッキンを介してブッシュと接触して真空シールを行っていた。Fig.4-2 に改良前の真空シール方法を示す。リークは、被覆の透過及び被覆と線間か（被覆線内）ら生じたために、リード線引出部のシール性能を考慮し、透過の無い細密な表面を有して温度による収縮がないリード線を採用する事にした。Fig.4-3 に改良後の真空シール方法を示す。リード線にはフッ素樹脂系被覆電線を用い、被覆線内からのリークを防止するため、ハンダ、シールゴム、チューブによる強固な接続を行った。フード法、プローブ法にて、改良後のリーク試験の結果、基準値を満足した。

4. 3 プランジャーのバウンド現象

ペレット切断装置は、コイルに電流を供給すると、プランジャーとカッターが 2.5mm のストローク距離を動作する。また、電流の供給を停止すると、初期位置に作動復帰する。プランジャーの復帰作動衝撃力は、プランジャースプリング、止め板及びクッションスプリングで吸収する構造となっている。しかし、単体作動試験において、カッターが再びストローク領域に侵入するバウンド現象が生じた。

4.3.1 不具合の状態

ペレット切断装置のプランジャーの復帰作動応力は、約 $440\text{N}/\text{mm}^2$ になる。電流供給を停止すると、プランジャーの復帰作動衝撃力を止め板とクッションスプリングで吸収し、静止する構

造である。この部位は、止め板後部にクッションスプリングを配置、衝撃吸収用の止め板の材料（PEEK 材）及び形状の工夫、プランジャーの軽量化を図ったが、ストローク領域を約 40% も占有した。そのバウンドは、周波数が大きくなるとバウンドが繰り返され、1Hz で 1 回、10Hz で 2 回、20Hz で 3 回確認できた。そのストロークは、回数とともに小さくなる。Fig.4-4 に 1Hz の場合のバウンド現象におけるレーザー出力を、Fig.4-5 に 10Hz の場合のバウンド現象におけるレーザー出力を、Fig.4-6 に 20Hz の場合のバウンド現象におけるレーザー出力を示す。どの周波数においても、2.5mm のストローク域に 1mm 前後のストロークによよぶバウンド現象が発生した。

4.3.2 対策

バウンドを抑えるために、止め板の質量を増して止め板の復帰する速度を小さくすれば、プランジャーの復帰反動が小さくなるので、3 枚の止め板材質及び組み合わせを変更することとした。止め板の材質を Table4-2 に、スプリングの仕様を Table4-3 に示す。スプリングは変えず、3 枚の止め板のうち、1 枚の材質と厚み（銅、2.02mm）を変えることにより、バウンドを抑えられた。

Table4-4 に周波数 1Hz、5Hz、10Hz、20Hz 時の対策前後のバウンドストローク測定結果を示す。対策によりバウンド数は、2 回から 1 回、バウンド寸法（大きさ）も最大 1.1mm から 0.18mm にすることができた。この寸法は、最大ストロークの約 7 % となる。

この寸法と固体燃料を固体重水素しての切断する場合について検討する。冷却器と $\square 2.2\text{mm}$ 型固体燃料供給管及びペレット切断装置の固体燃料導入口は、精密に接続されている。冷却器で生成された固体重水素は、固体燃料供給管を通過し、ペレット切断装置に導かれる。カッターは 2.5mm ストロークを有すること及びバウンド量から、固体燃料供給管の中心より 1.25mm の位置を待機位置（初期位置）として取り付けられている。つまり、カッターに 0.2mm の余裕をとり、バウンド寸法 0.18mm があっても 2.1mm の立方体状ペレットを切断するには影響の無いものと判断した。

5. おわりに

遠心加速方式ペレット入射装置の性能向上を目的とし、最も重要な要素であるペレット切断装置の高性能化改造を行った。その仕様は、高速動作、高周波数、長ストローク、低温及び真空と厳しい使用条件を満たすものである。製作過程において、ペレット切断装置内に組む込むプランジャーの破損、コイルに電流を供給するリード線の引出部及びFRPの真空リーク、ペレット切断装置作動後においてプランジャーのカッター部が再びストローク領域に侵入するバウンド現象等の不具合を経験した。これらは、各々適切な対策を講じることにより、周波数～20Hz、動作速度3ms以下、ストローク2.5mmの性能を持つ完成度の高いペレット切断装置を開発できた。

ペレット切断装置は、遠心加速方式ペレット入射装置の生成槽内の指定位置に取り付けられ、真空試験では $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、冷却試験では低温雰囲気を満足した。ペレット生成条件化では、約14Kの固体重水素を切断周波数5Hzにおいて生成した。□2.1mm(許容範囲)のペレット切断を速度2.5m/sで安定に繰り返された。

単体試験と組込試験の結果、その後の遠心加速方式ペレット入射装置によるプラズマペレット入射において、重水素、周波数5Hzで射出時間7s、周波数10Hzで射出時間3.5sの連続入射が行え、プラズマの電子密度の上昇が確認できた。また、軽水素プラズマの密度上昇用に固体軽水素ペレットを、プラズマ安全停止用に固体ネオンペレットを切断し、顕著な成果を確認できた。

今回のペレット切断装置の高性能化改造が、遠心加速方式ペレット入射装置の性能向上に寄与できることから、今後、高密度領域における炉心プラズマ研究に最大限活用されることが期待される。

謝　　辞

ペレット切断装置の設計、製作、試験において、ご助言、ご指導を頂いた細金延幸 JT-60 第 1 試験室室長（前 JT-60 第 2 試験室長）、並びに、本試験の遂行に活発なコメント及び協力を頂いた JT-60 第 2 試験室の各位、CKD(株)の関係各位に感謝いたします。本報告書を纏めるにあたり、ご意見、ご指導を頂いた宮直之 JT-60 第 2 試験室長に感謝いたします。また、終始激励、ご支援して頂いた清水正亜 核融合装置試験部長、栗山正明 核融合装置試験部次長に感謝いたします。

参考文献

- 1) 平塚一 他、「JT-60 ペレット入射装置」 JAERI-M88-214 (1988)
- 2) 平塚一 他、「JT-60 ペレット入射装置の高速化」 JAERI-M89-081 (1989)
- 3) P.T.Lang et al, 「The new centrifuge high-speed pellet injector for ASDEX Upgrade」 IPP 1/274 (1993)
- 4) S.K.Combs et al, 「New extruder-based deuterium feed system for centrifuge pellet injection」 REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS Vol.68, No.12 (1997)
- 5) 平塚一 他、「JT-60U における遠心加速方式ペレット入射装置の開発」 プラズマ・核融合学会誌 Vol.76, No.11 (2000)
- 6) Kaname KIZU et al, 「Development of The Centrifugal Pellet Injector for JT-60U」 JAERI-Tech 2001-022 (2001)

This is a blank page.

図、表、写真 目次

Fig.2-1 遠心加速方式ペレット入射装置の構成	22
Fig.2-2 ペレット装填装置の取付例（高性能化前の従来型）	22
Fig.2-3 ペレット装填装置の外観と構造（高性能化前の従来装置）	23
Fig.2-4 ペレット切断装置の組込図	24
Fig.2-5 ペレット切断装置の外観と構造	25
Fig.2-6 プランジャー外形	26
 Fig.3-1 LHe 供給ラインの He リーク試験図	26
Fig.3-2 固体燃料導入ラインの He リーク試験図	27
Fig.3-3 ソレノイド吸引力試験図	27
Fig.3-4 作動試験図	28
Fig.3-5 ペレット切断装置の寸法測定部位と結果	29
Fig.3-6 プランジャーの寸法測定部位と結果	30
Fig.3-7 ソレノイド吸引力測定結果	31
Fig.3-8 作動時間確認のレーザー出力データ（1Hz の場合の作動試験結果）	32
Fig.3-9 5Hz の場合の作動試験結果	32
Fig.3-10 10Hz の場合の作動試験結果	33
Fig.3-11 20Hz の場合の作動試験結果	33
Fig.3-12 生成槽内の温度条件	34
Fig.3-13 レーザー信号と落下想定図	34
 Fig.4-1 3%ケイ素鋼プランジャーの外形	35
Fig.4-2 改良前の真空シール方法	35
Fig.4-3 改良後の真空シール方法	35
Fig.4-4 1Hz の場合のバウンド現象レーザー出力	36
Fig.4-5 10Hz の場合のバウンド現象レーザー出力	36
Fig.4-6 20Hz の場合のバウンド現象レーザー出力	37
 Table 2-1 ペレット装填装置の仕様（従来装置）	19
Table 2-2 ペレット切断装置の仕様	19
Table 2-3 ペレット切断装置における主な使用材料	20
 Table 4-1 3%ケイ素鋼とパーマロイ B の主な特性	20
Table 4-2 止め板の材質	20

Table 4-3 スプリングの仕様	21
Table 4-4 対策前後のバウンドストローク測定結果	21
Photo 3-1 ペレット切断装置の外観	38
Photo 3-2 プランジャー外観 (パーマロイ B)	38
Photo 4-1 プランジャー破断図 (ストッパー根元 R0.3mm)	39
Photo 4-2 プランジャー破断図 (ストッパー根元 R1.0mm)	39

Table 2-1 ペレット装填装置の仕様（従来装置）

項目	仕様 値
型式	円筒型 ソレノイド通電押出形
耐圧 (LHe 回路リーク量)	0.2MPa ($1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下)
カッターストローク	2.5mm
切断ストローク	2.0mm
吸引力	9.8N 以上
作動時間 (往復作動)	3ms 以下
周期 (周波数)	20Hz (max)
環境温度	4~313K
雰囲気	真空
カッター形状	○型

Table 2-2 ペレット切断装置の仕様

項目	仕様 値
型式	円筒型 ソレノイド通電押出形
耐圧 (LHe 回路リーク量)	0.2MPa ($1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下)
カッターストローク	2.5mm
切断ストローク	2.1mm
吸引力	9.8N 以上
作動時間 (片作動)	3ms 以下
周期 (周波数)	20Hz (max)
リーク量 (装置内部)	$1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下
冷却温度	14K (目標)
環境温度	4~313K
雰囲気	真空
カッター形状	□型

Table 2-3 ペレット切断装置における主な使用材料

項目	材 料	備 考
切断部：本体	無酸素銅	C1020BE
接続部：ハウジング	FRP(エボキシ・ガラスクロス積層板)	SL-ES30
ソレノイド部：コイル	ポリアミド・イミド	ボビン TI-5013
	フッ素樹脂系被覆電線	内側 LF-R 外側 TF80295-1
	ポリアミド・イミド被覆線	巻線
：ブッシュ	ポリイミド	SP21
：プランジャー	45%Ni パーマロイ	(パーマロイ B)
：固定鉄心	3%ケイ素鋼	MES3F
：シール材	フッ素ゴム	FKM
	インジウム線	

Table 4-1 3%ケイ素鋼とパーマロイ B の主な特性

材料名	3%ケイ素鋼	パーマロイ B
鉄以外の主成分 (%)	3Si	45Ni
初比透磁率 μ_i	4,000	4,500
最大比透磁率 μ_m	70,000	60,000
磁束密度 B_s	1.65 T	1.50 T
保持力 H_o	$8.0 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$	$6.4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
抵抗率 ρ	$48 \times 10^{-2} \mu \Omega \cdot \text{m}$	$45 \times 10^{-2} \mu \Omega \cdot \text{m}$
形状	棒	線、帯
適用	高周波用鉄心	カメラ用鉄心、小型 Tr 用鉄心
規格		JIS C2531(PB)

Table 4-2 止め板の材質

止め板番号	対策前		対策後	
	厚み (mm)	材質	厚み (mm)	材質
No.1 (上)	2.09	PEEK	2.09	PEEK
No.2 (中)	2.02	PEEK	2.00	Cu
No.3 (下)	1.48	PEEK	1.48	PEEK

Table 4-3 スプリングの仕様

外形	φ 6.7
線形	φ 0.55
有効巻数	5 巻
材質	SUS304-WPB
動作時荷重	5.1 N
取付時荷重	1.8 N
ばね定数	1.1 N/mm
動作時応力	440N/mm ²

Table 4-4 対策前後のバウンドストローク測定結果

	対策前	対策後	備考
1Hz			
作動応答時間 (ms)	1.5	1.5	T2-T1
復帰応答時間 (ms)	2.3	2.27	T4-T3
バウンド数 (回)	1(2)	1	
バウンド寸法 (mm)	0.9	0.18	
5Hz			
作動応答時間 (ms)	-	1.47	T2-T1
復帰応答時間 (ms)	-	2.34	T4-T3
バウンド数 (回)	-	1	
バウンド寸法 (mm)	-	0.16	
10Hz			
作動応答時間 (ms)	1.5	1.4	T2-T1
復帰応答時間 (ms)	2.3	2.38	T4-T3
バウンド数 (回)	2	1	
バウンド寸法 (mm)	1.1	0.16	
20Hz			
作動応答時間 (ms)	1.5	1.47	T2-T1
復帰応答時間 (ms)	2.3	2.52	T4-T3
バウンド数 (回)	2	1	
バウンド寸法 (mm)	1.0	0.09	

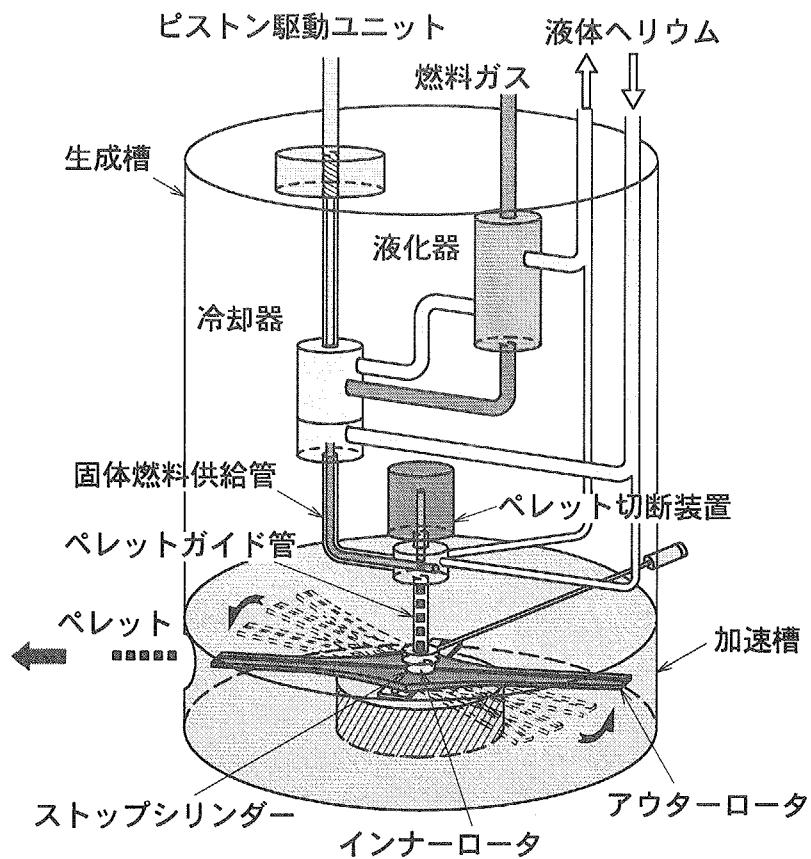


Fig. 2-1 遠心加速方式ペレット入射装置の構成

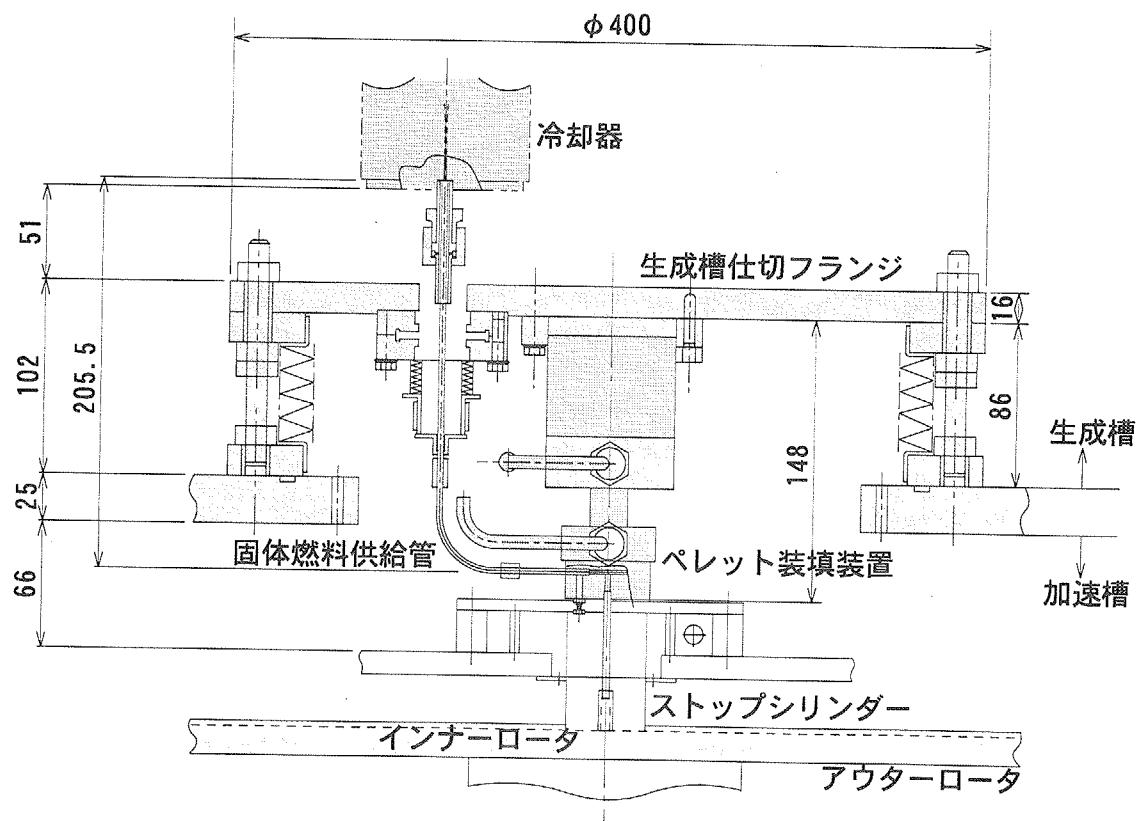


Fig. 2-2 ペレット装填装置の取付け例
(高性能化前の従来型)

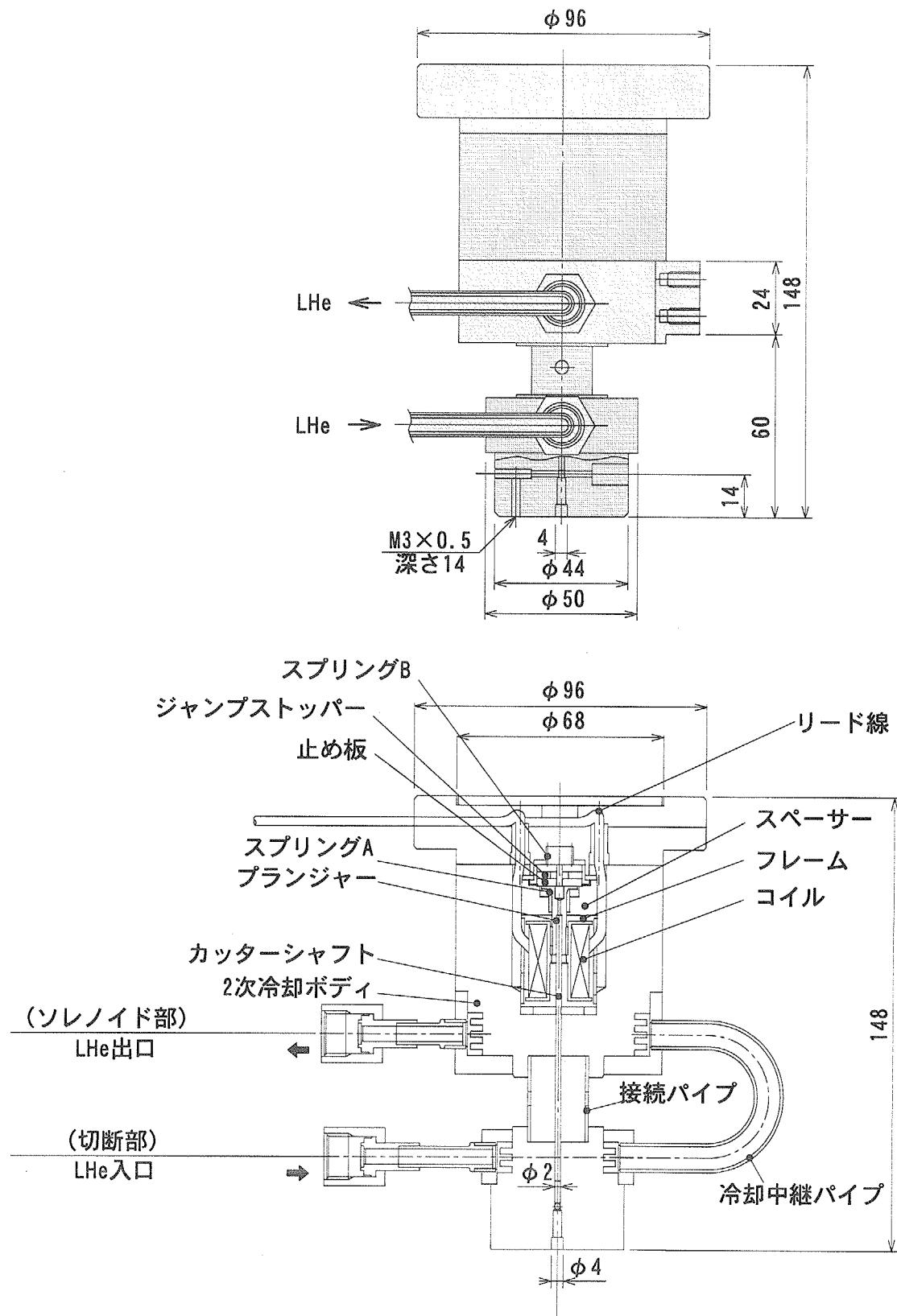


Fig. 2-3 ペレット装填装置の外観と構造
(高性能化前の従来装置)

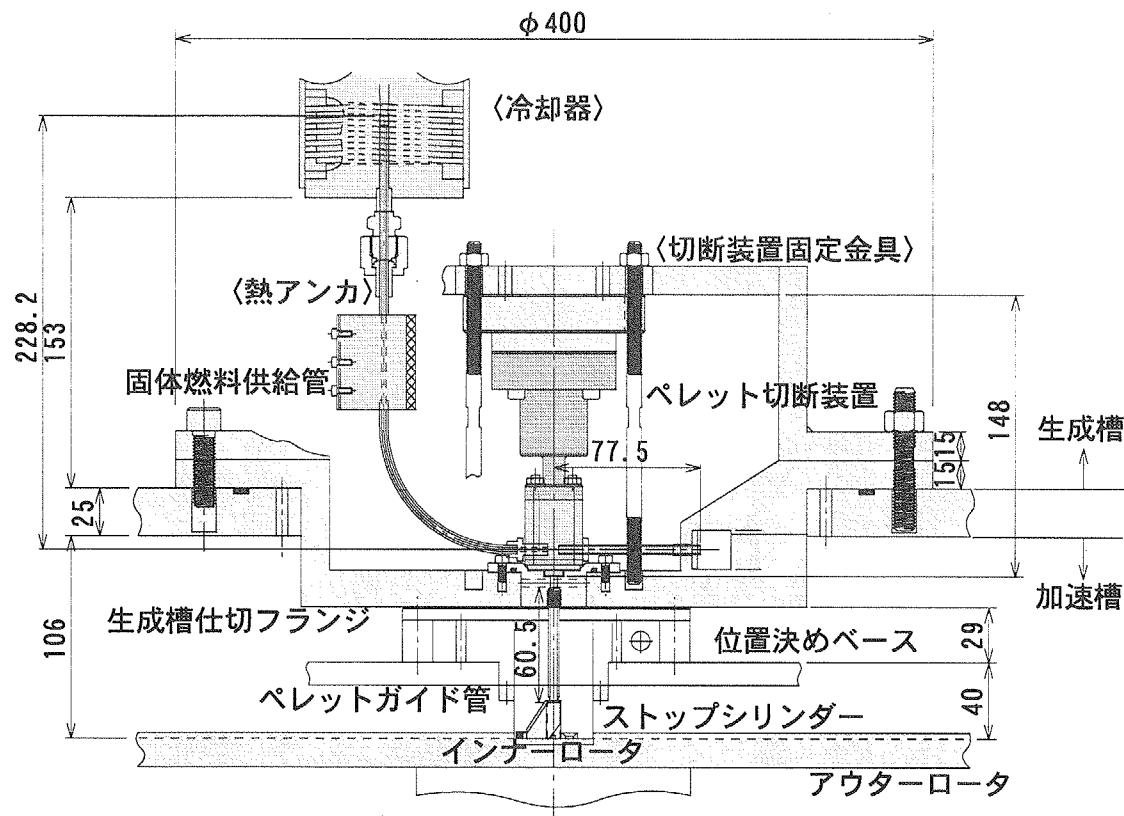


Fig. 2-4 ペレット切断装置の組込図

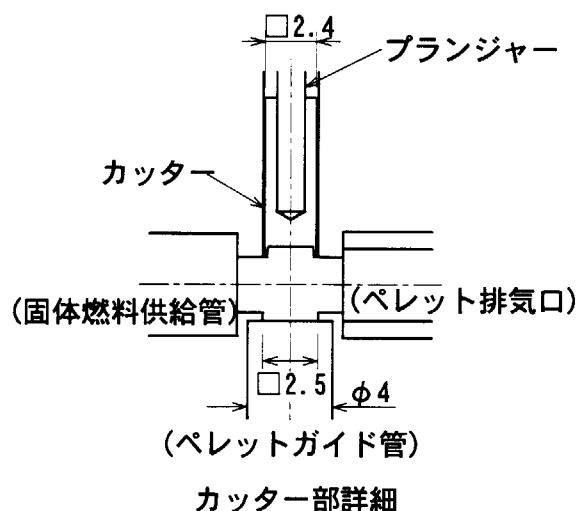
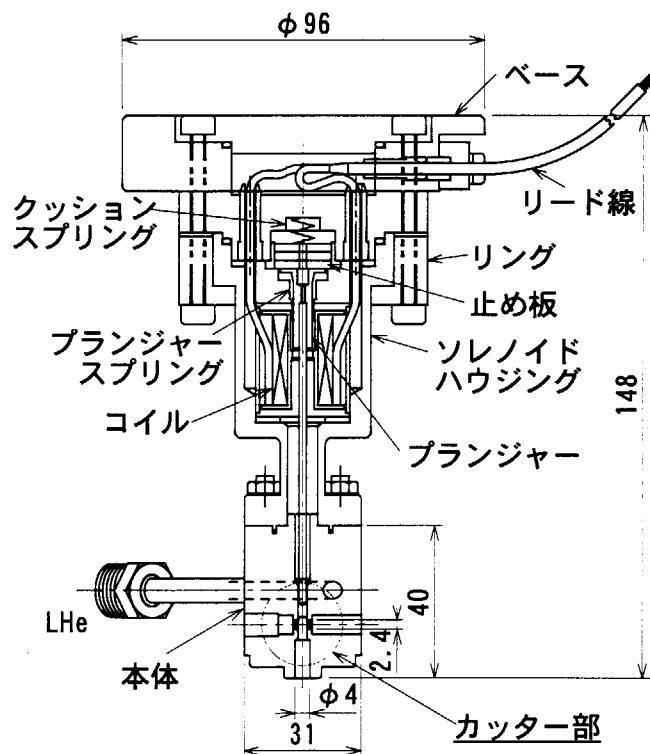
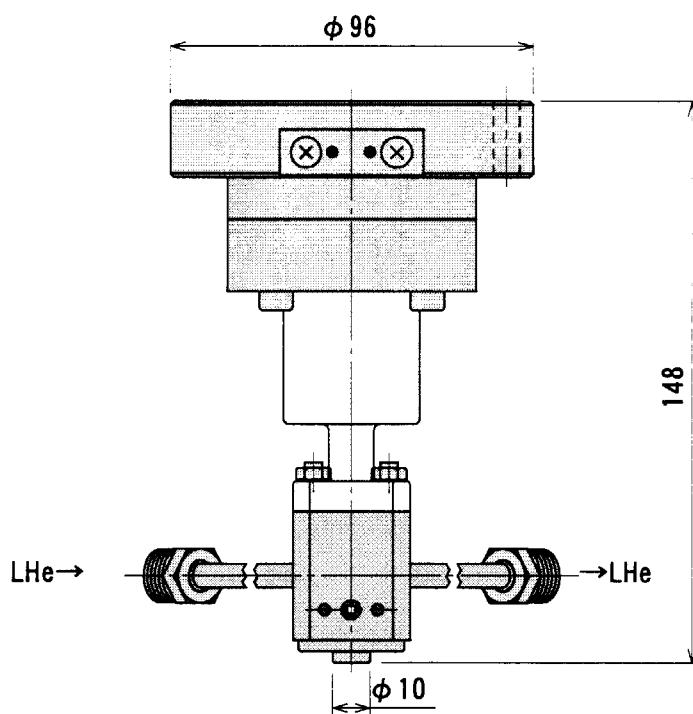


Fig. 2-5 ペレット切断装置の外観と構造

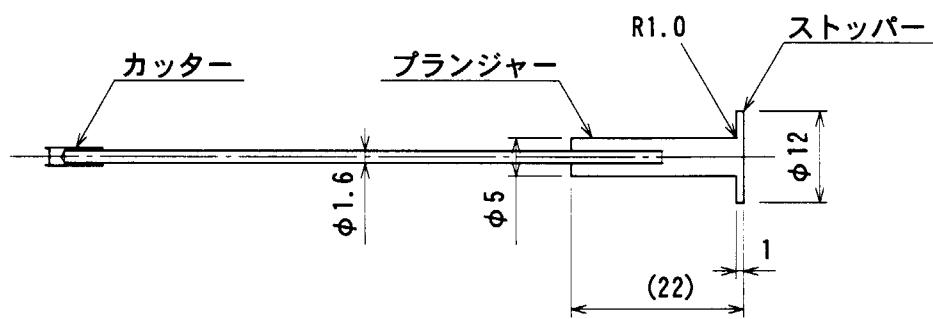


Fig. 2-6 プランジャー外形

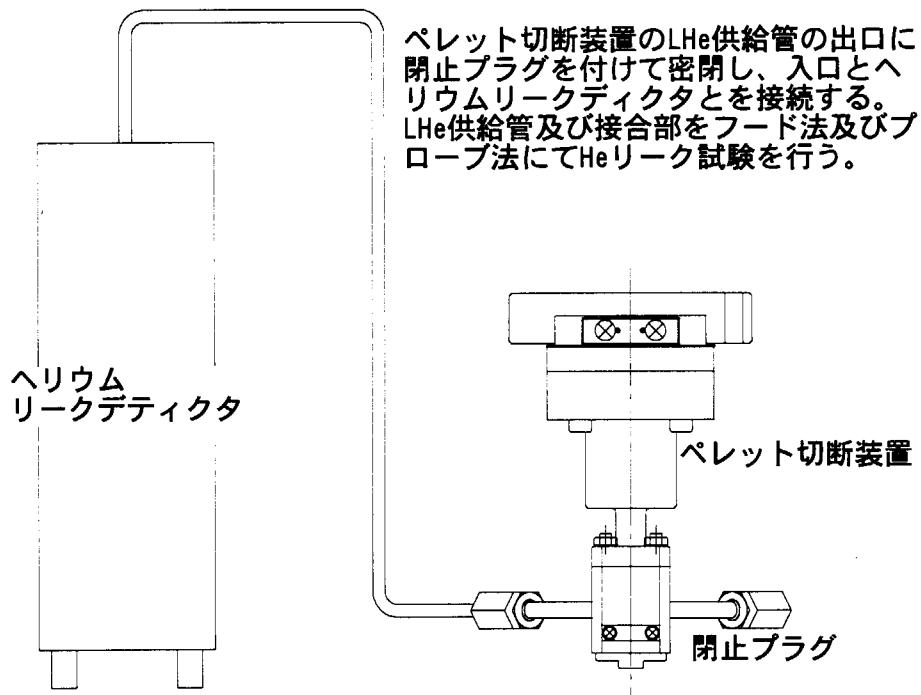


Fig. 3-1 LHe供給ラインのHeリーク試験図

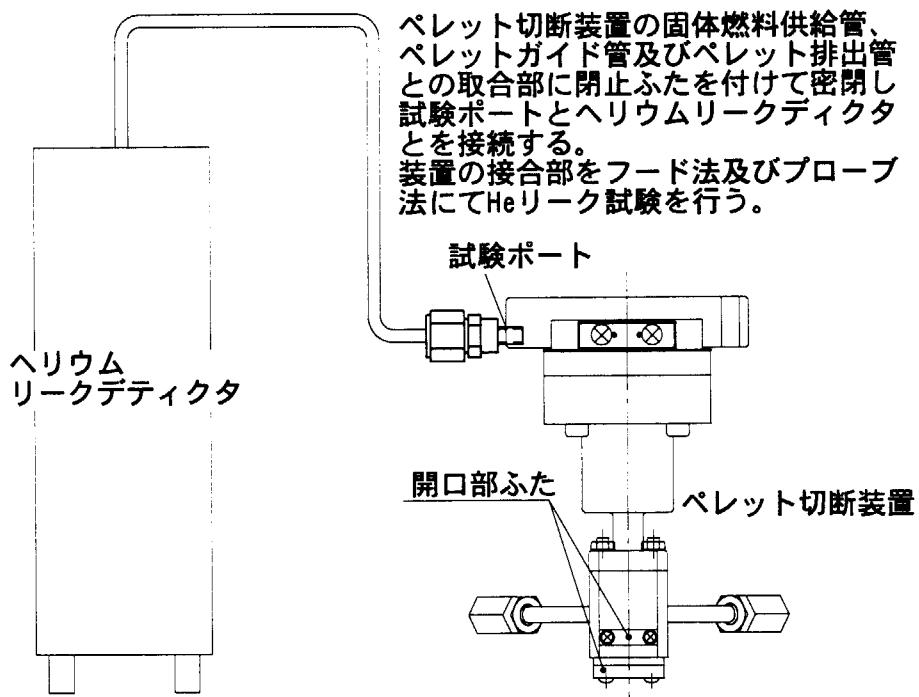


Fig. 3-2 固体燃料導入ラインのHeリーク試験図

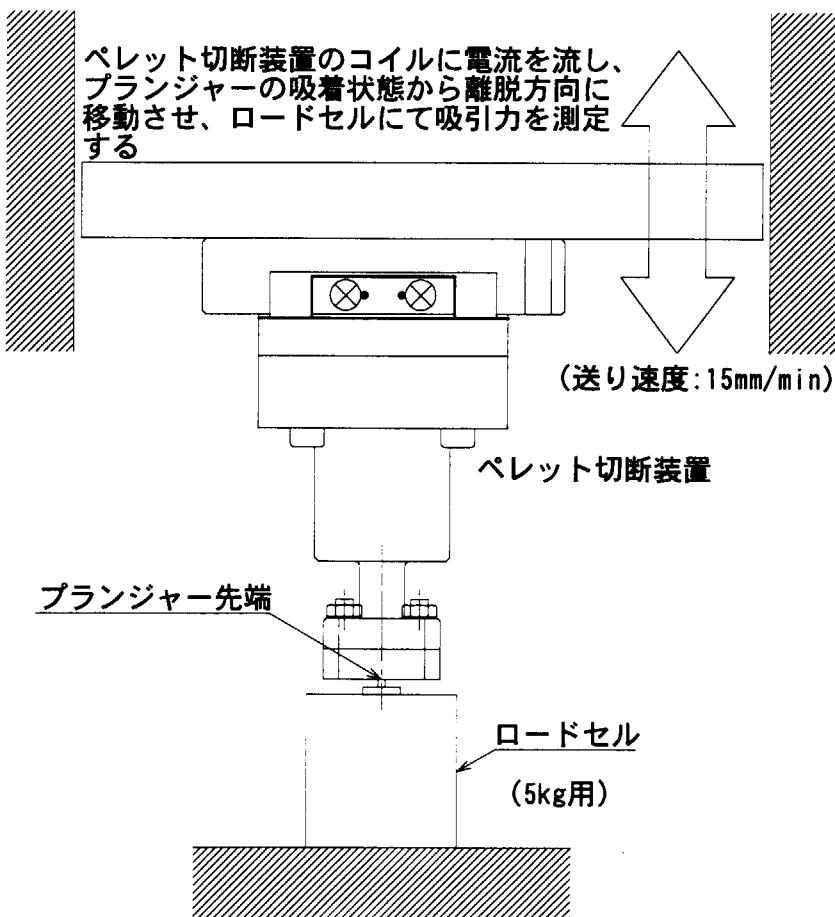


Fig. 3-3 ソレノイド吸引力試験図

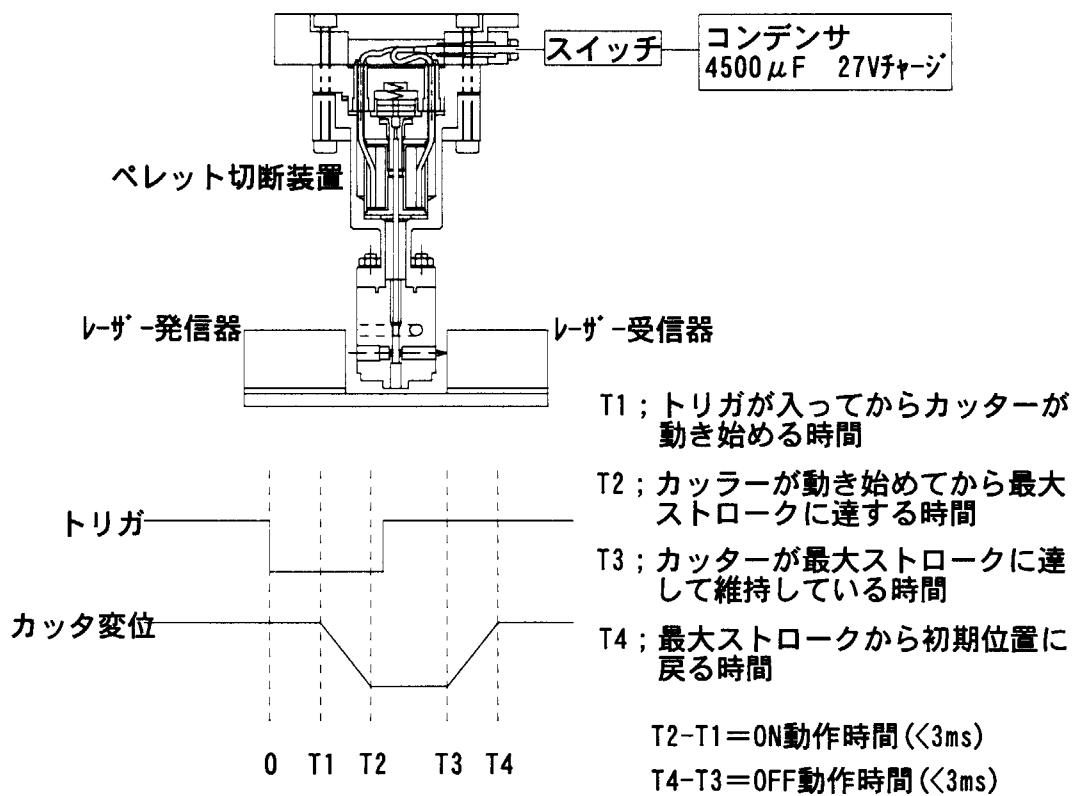


Fig. 3-4 作動試験図

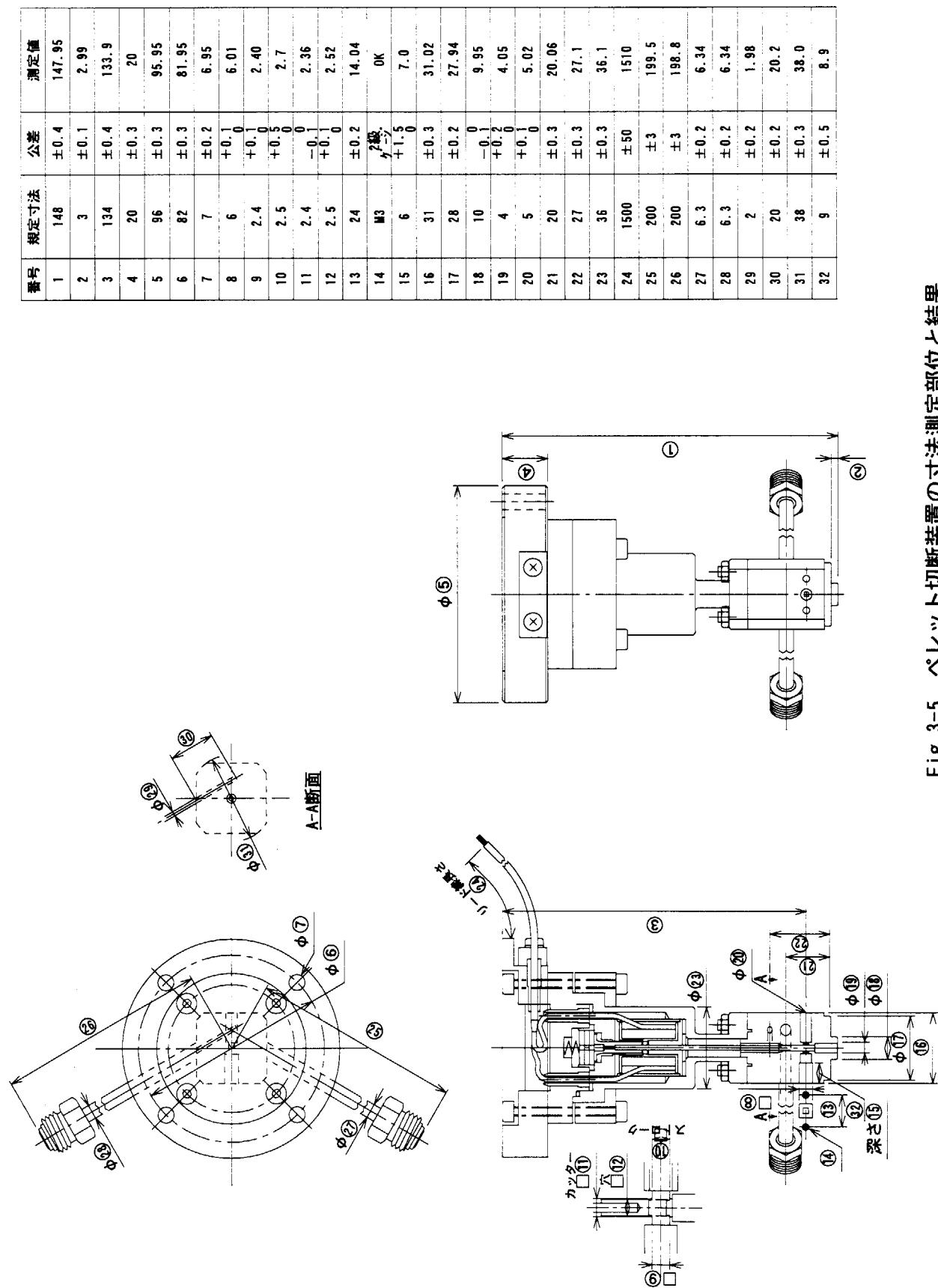
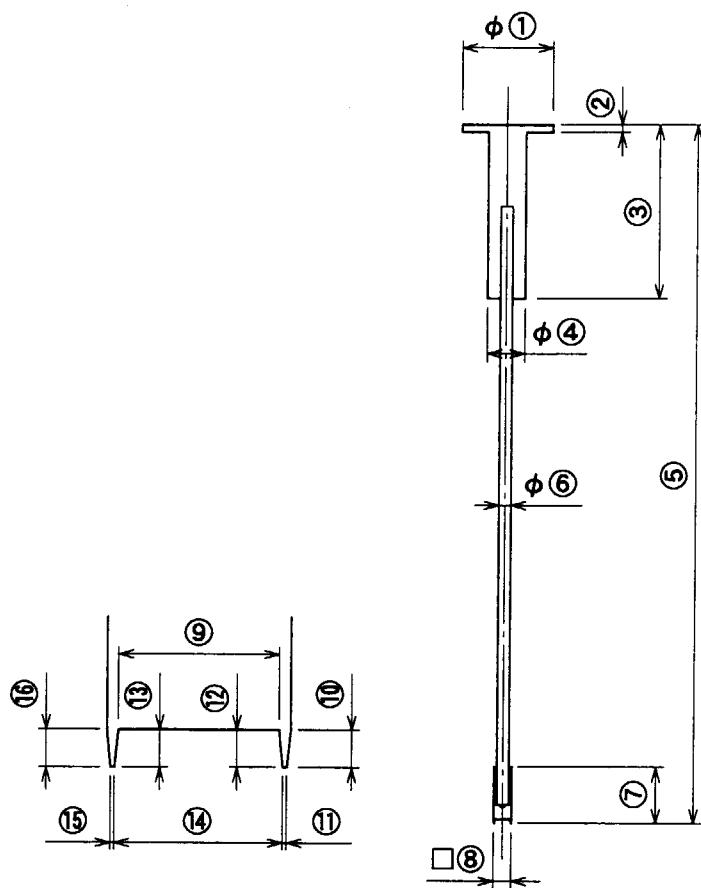


Fig. 3-5 ペレット切断装置の寸法測定部位と結果
(寸法単位: mm)



番号	規定寸法	公差	測定値	番号	規定寸法	公差	測定値
1	12	0 -0.10	11.9	9	2.1	-	2.029
2	1	±0.03	1.0	10	0.5	-	0.5
3	21.75	-	21.86	11	0.05	-	0.02
4	5	-0.05 -0.1	4.90	12	0.5	-	0.473
5	92.75	±0.05	92.77	13	0.5	-	0.487
6	1.6	0 -0.03	1.60	14	2.2	-	2.181
7	8	-	8.07	15	0.05	-	0.018
8	2.4	0 -0.10	2.36	16	0.5	-	0.5

(重量5.47g)

Fig. 3-6 プランジャーの寸法測定部位と結果
(寸法単位: mm)

ストローク (mm)	吸引力 (g)				
	電流 10A	電流 8A	電流 6A	電流 4A	電流 2A
0	1860	1800	1720	1600	1420
0.25	1490	1400	1320	1200	910
0.5	1230	1140	1050	900	620
0.75	1080	1000	900	740	460
1	970	880	780	630	350
1.25	890	800	700	550	280
1.5	830	730	640	500	230
1.75	770	680	580	450	190
2	730	640	540	410	160
2.25	700	610	510	380	150
2.5	670	580	480	360	130
2.75	640	550	460	340	120
3	620	530	440	320	110

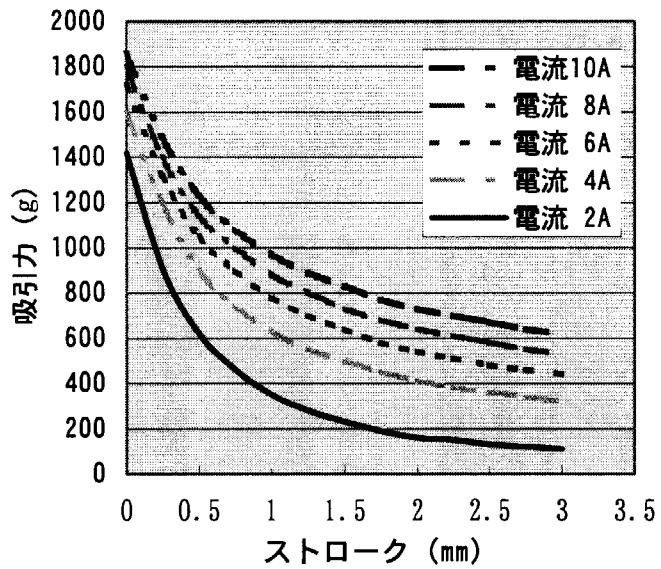


Fig. 3-7 ソレノイド吸引力測定結果

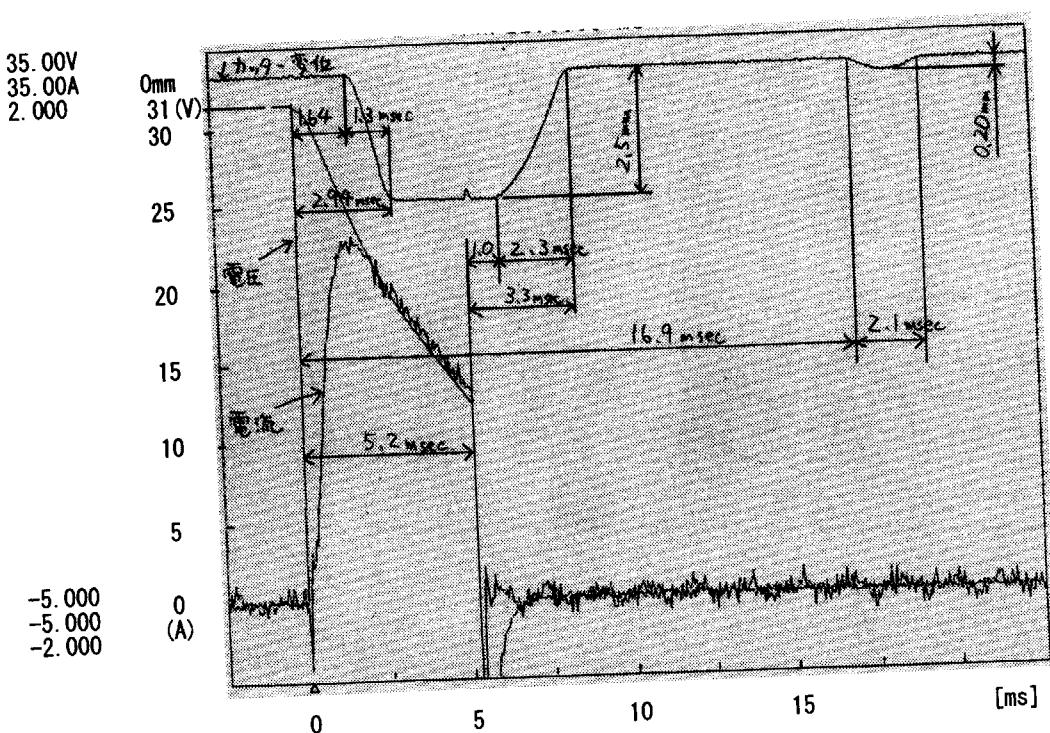


Fig. 3-8 作動時間確認のレーザー出力データ
(1Hzの場合の作動試験結果)

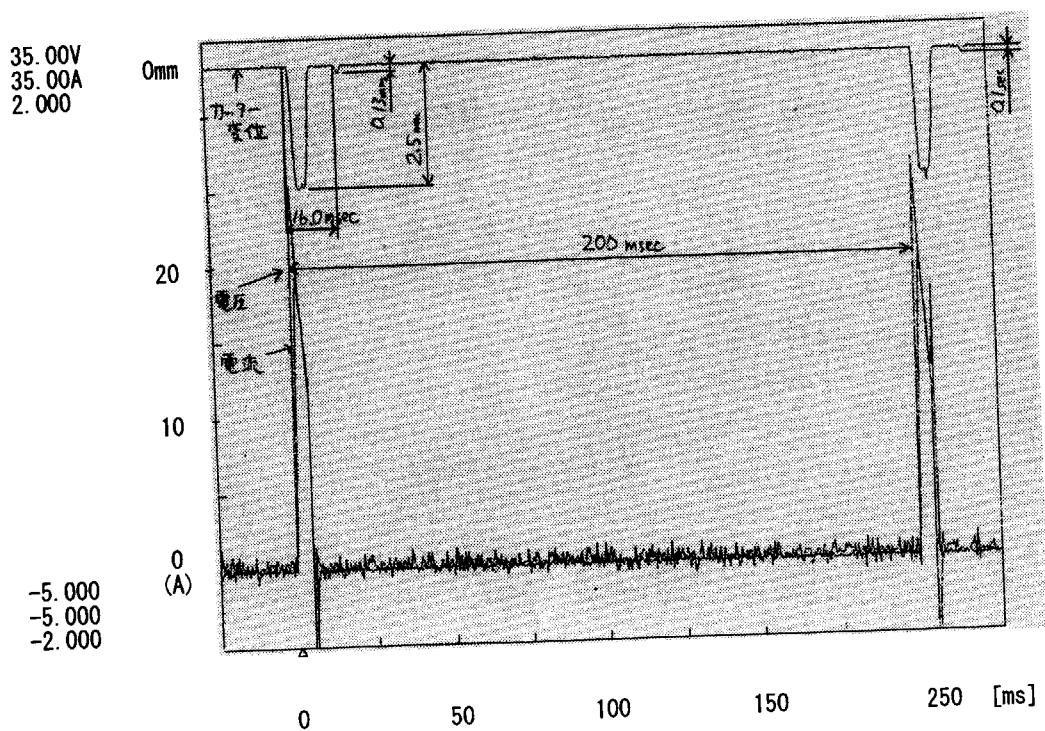


Fig. 3-9 5Hzの場合の作動試験結果

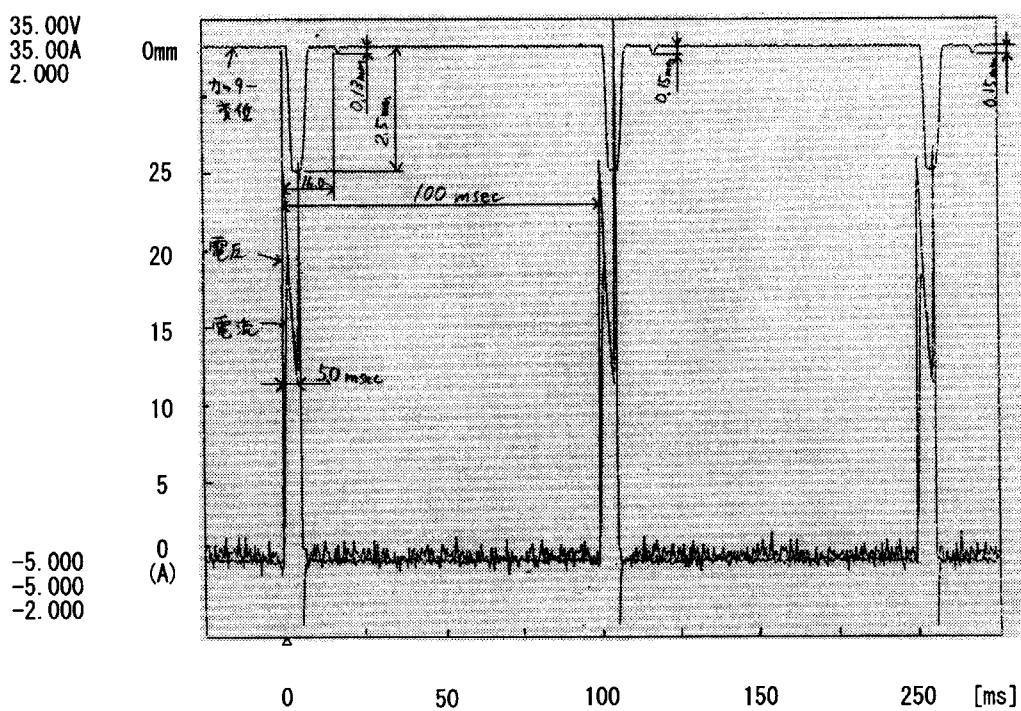


Fig. 3-10 10Hzの場合の作動試験結果

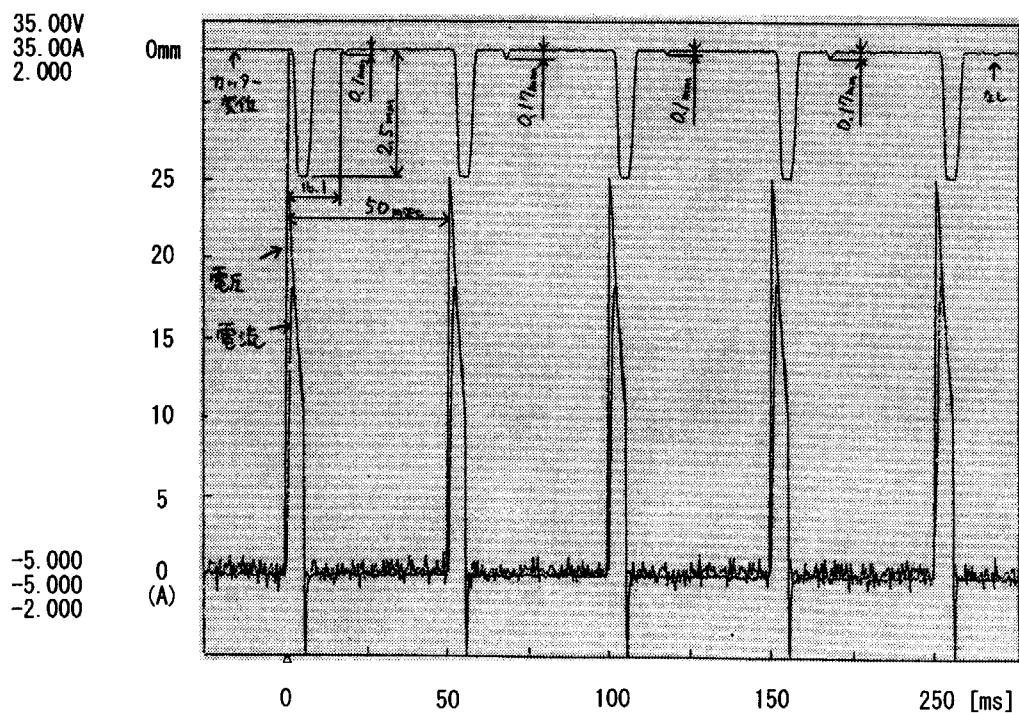


Fig. 3-11 20Hzの場合の作動試験結果

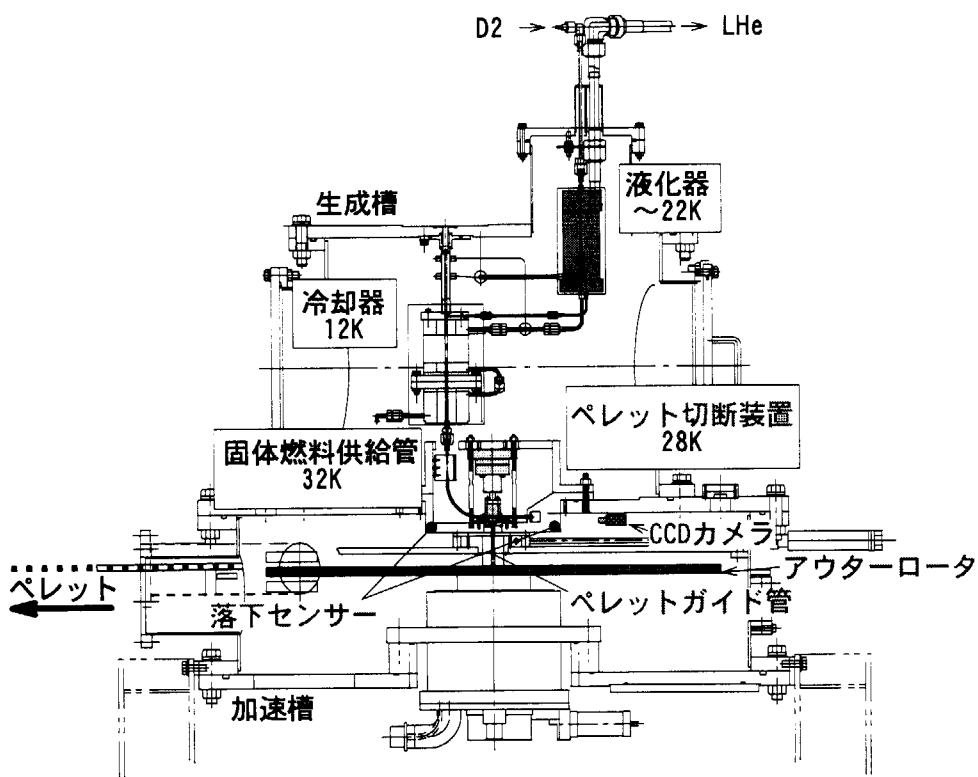


Fig. 3-12 生成槽内の温度条件

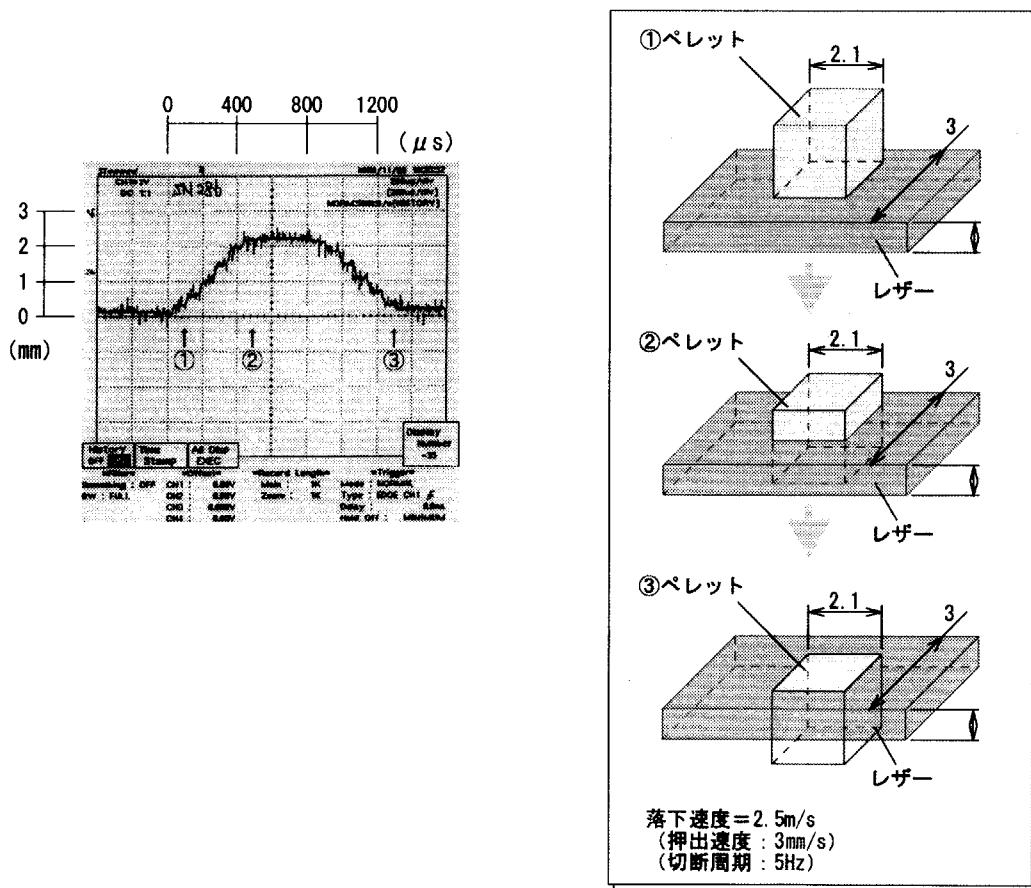


Fig. 3-13 レーザー信号(左図)と落下想定図(右図)

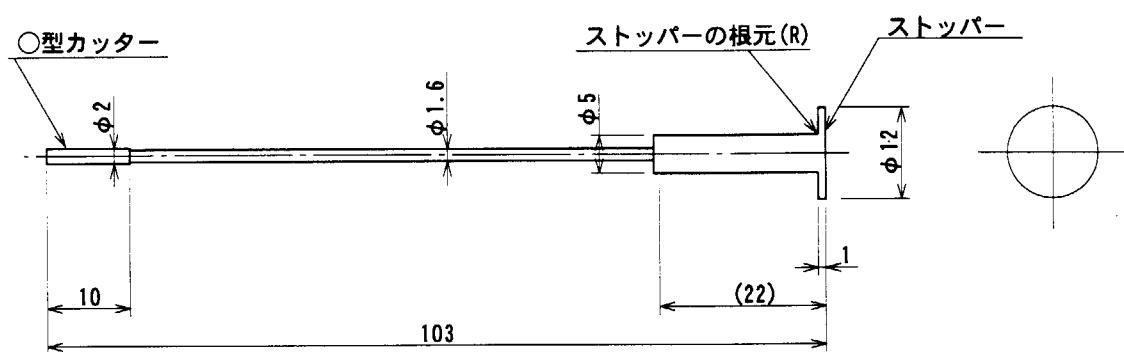


Fig. 4-1 3 %ケイ素鋼プランジャーの外形

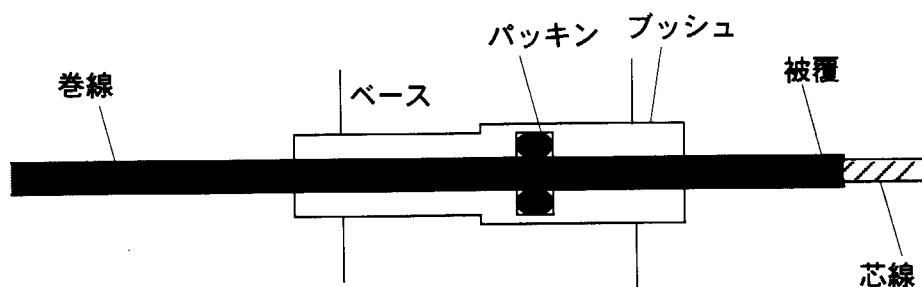


Fig. 4-2 改良前の真空シール方法

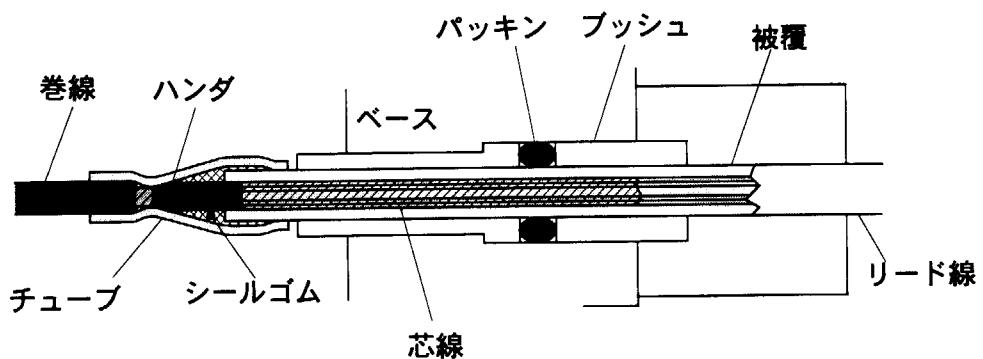
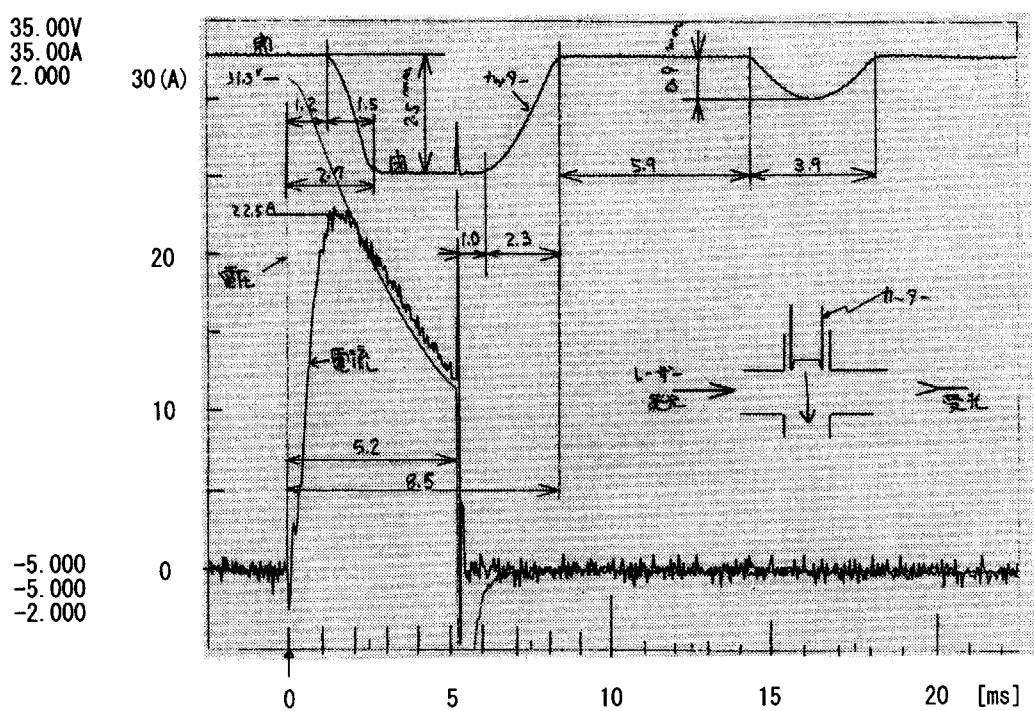


Fig. 4-3 改良後の真空シール方法



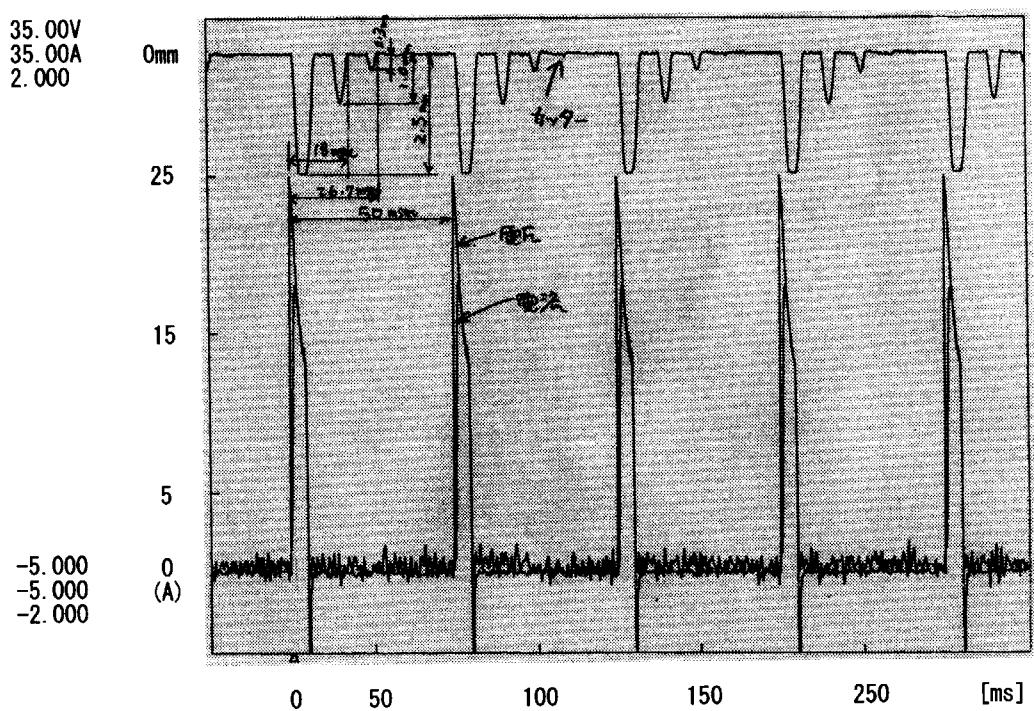


Fig. 4-6 20Hzの場合のバウンド現象レーザー出力（対策前 止め板；3枚PEEK）

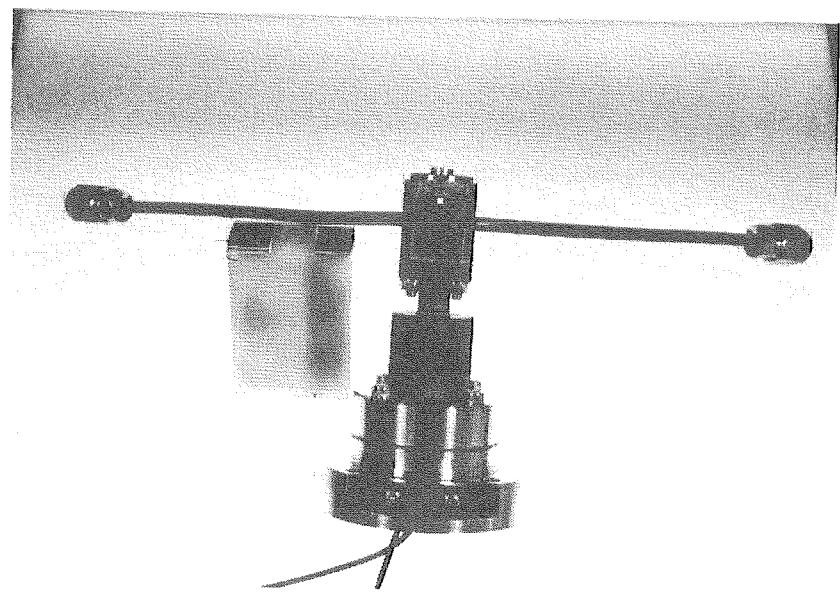


Photo3-1ペレット切断装置の外観



Photo3-2 プランジャー外観
(パーマロイB)

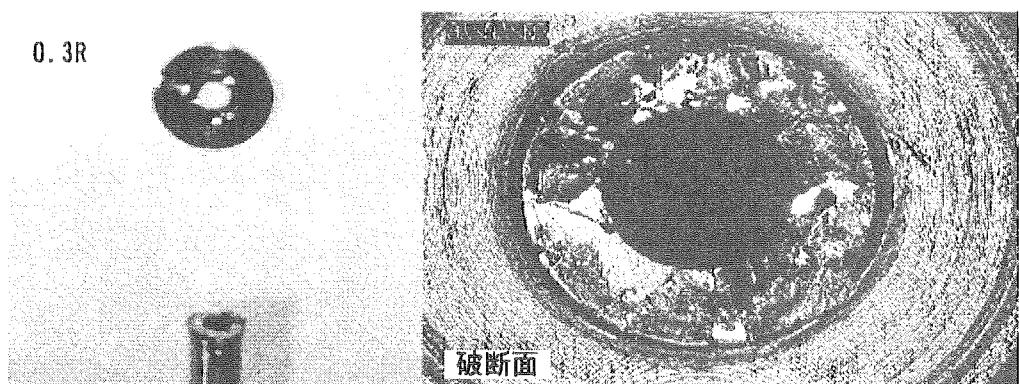


Photo4-1 プランジャー破断図
(ストッパー根元R0.3mm)

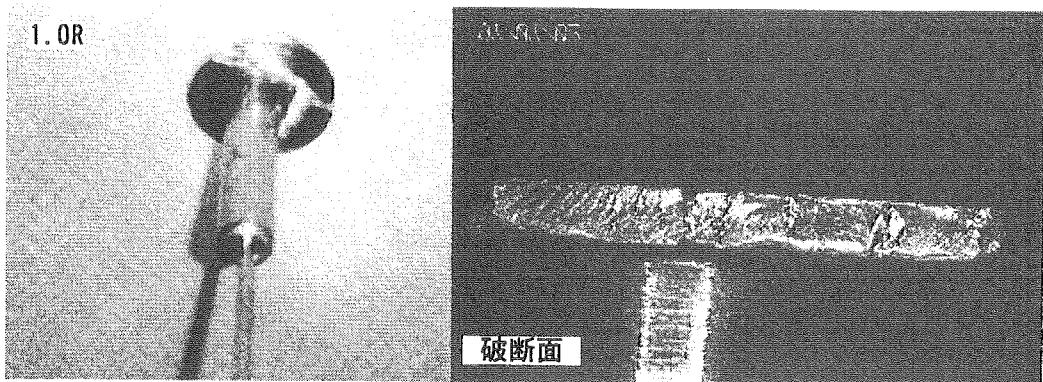


Photo4-2 プランジャー破断図
(ストッパーの根元R1.0mm)

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アatto	a

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813 $\times 10^{-4}$	0.737562	6.24150×10^{-18}	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487 $\times 10^{-3}$	7.23301	6.12082×10^{-14}	= 4.184 J(熱化学)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{-25}	= 4.1855 J(15°C)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{-19}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{-21}	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-1}	1	8.46233×10^{-18}	= 75 kgf·m/s
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JT-60ペレット入射装置のためのペレット切断装置の開発