

JAERI-Tech

JP0250506

2002-076



高速動作ゲートバルブの開発

2002年10月

平塚 一・市毛 尚志・木津 要・本田 正男・宮 直之

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、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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おこなっております。

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.

高速動作ゲートバルブの開発

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・本田 正男・宮 直之

(2002年8月6日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、遠心加速方式ペレット入射装置を用いて重水素ペレットの連続入射による高密度プラズマの実験運転を行っている。ペレット入射装置は、プラズマの状態によりペレット入射の緊急停止や入射個数制御が要求される。そのような場合の手法として高速シャッター弁を用いることが有効である。しかし、従来の高速シャッター弁は、その動作速度や真空性能に限界があったため、飛行ペレットの停止、ペレット入射個数制御及び真空維持などのシャッター機能及び真空シール機能を有したゲートバルブを開発した。

開発した高速動作ゲートバルブは、衝撃吸収タイプの電磁弁構造を適用することにより、気密性 $1 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、弁体ストローク長 20mm 以上及び動作応答時間 100ms 以下の仕様を満足する結果を得た。この結果、遠心加速方式ペレット入射装置に適用可能であることを確認した。

Development of Fast Action Gate Valve for the JT-60 Pellet Injector

Hajime HIRATSUKA, Hisashi ICHIGE, Kaname KIZU, Masao HONDA and Naoyuki MIYA

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

(Received August 6, 2002)

In JT-60, a pellet injector that repetitively ejects deuterium pellets supplies fuel to high temperature and high-density plasmas.

The pellet injector sometimes requires an emergency stop and pellet number control due to the conditions of the plasma. Use of a high-speed shutter valve is one of the effective techniques. However, the high-speed shutter valve had problems in operation speed and vacuum performance. Therefore, we developed fast action gate valve with shutter function and vacuum seal function, which that meet requirements such as a pellet stop, number control, and vacuum maintenances.

The solenoid structure that can absorb a mechanical shock is applied to the fast action gate valve. This resulted that the specifications of the valve, seal leak $<1 \times 10^{-8} \text{ pam}^3/\text{s}$, stroke length $>20\text{mm}$, response time $<100\text{ms}$ were satisfied in the device tests. Thus, results confirm that the performance of the fast action gate valve is applicable for the pellet injector equipment.

Keywords; Fast Action Gate Valve, Centrifugal Pellet Injector, Pellet Control, Shutter Function, Vacuum Seal Functions

目 次

1. はじめに	1
2. 高速動作ゲートバルブの設計	2
2.1 ペレット入射装置における高速シャッター弁等の役割	2
2.2 開発の経緯	2
2.3 設計仕様	3
2.4 高速動作ゲートバルブの構造・設計	3
3. 予備試験	8
3.1 連続動作試験	8
3.2 不具合対策	8
4. 動作特性	10
4.1 単体試験	10
4.2 動作特性試験	11
5. 組込対策	13
5.1 対策構造	13
5.2 組込対策後の高速動作ゲートバルブ	13
6. おわりに	14
謝辞	15
参考文献	15

Contents

1 . Introduction	1
2 . Design of Fast Action Gate Valve	2
2.1 Role of Fast Action Gate Valve in a Pellet Injector	2
2.2 Circumstances of Development	2
2.3 Design and Specifications	3
2.4 Structures and Design of Fast Action Gate Valve	3
3 . Preliminary Test	8
3.1 Repetition Action Test	8
3.2 Troubles and their Countermeasures	8
4 . Operating Test	10
4.1 Single Operation Test	10
4.2 Operational Characteristic Test	11
5 . Assembly	13
5.1 Structure Adjustment for Assembly	13
5.2 Decided Fast Action Gate Valve after Adjustment	13
6 . Conclusion	14
Acknowledgments	15
References	15

表、図、写真 目次

Table 2.1	遠心加速方式ペレット入射装置の基本性能	16
Table 2.2	高速動作ゲートバルブの基本仕様	16
Table 4.1	主な材料	16
Fig.2.1	遠心加速方式ペレット入射装置の配置と構成	17
Fig.2.2	高速シャッター弁の構造	18
Fig.2.3	高速動作ゲートバルブの基本構造	19
Fig.2.4	簡易モデル図	19
Fig.2.5	吸引力測定試験図	20
Fig.2.6	吸引力特性	21
Fig.2.7	開閉動作応答時間	21
Fig.2.8	高速動作ゲートバルブの全体構造	22
Fig.3.1	動作試験図	23
Fig.3.2	異常現象の部位（開状態）	24
Fig.3.3	対策後の高速動作ゲートバルブ構造	25
Fig.3.4	衝撃吸収構造の動作断面分解図	26
Fig.3.5	プランジャーの動作とセンサの検知範囲	27
Fig.3.6	スプリングの種類による動作時間特性	28
Fig.4.1	高速動作ゲートバルブの主要部寸法	29
Fig.4.2	シートリーク試験図	30
Fig.4.3	筐体リーク試験図	31
Fig.4.4	電圧、レーザーの実働波形図	31
Fig.4.5	電圧及びレーザーの出力波形	32
Fig.4.6	高速動作ゲートバルブの動作時間	33
Fig.5.1	出側フランジ構造	34
Fig.5.2	入側フランジ構造	34
Fig.5.3	組込対策後の高速動作ゲートバルブの外観図	35
Fig.5.4	高速動作ゲートバルブの設置図	36
Photo 5.1	組込対策後の高速動作ゲートバルブ	37

This is a blank page.

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60U）では、高温プラズマへの燃料供給効率の向上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実験運転を行っている。ペレットの入射は、燃料ガスを極低温で冷却して固体立方体形状のペレットにしたものを遠心力により加速して高温プラズマに入射する遠心加速方式ペレット入射装置¹⁾²⁾を採用している。本装置は、平成8年(1996年)より開発を始め、平成11年(1999年)よりプラズマへの入射を開始した。JT-60Uとペレット入射装置の間の真空遮断にはゲートバルブを使用している。一般に、ゲートバルブは、ディスクポートに平行な内面に動くことができ、入口と出口の開口と同軸上にある仕切弁である。しかし、ゲートバルブは、圧空で制御することからゆっくり動作するとともに大型形状となる。また、高速シャッター弁も使用しており、例えば、ペレットの入射中にプラズマ放電が終了した場合のペレットの緊急停止時には高速シャッター弁を動作させてペレットの真空容器への入射を阻止している。プラズマの密度が高くなりすぎたときのペレットの入射個数制御に対しても、この高速シャッター弁、又は、ペレット切断装置³⁾等を用いて行っている。高速シャッター弁は、ディスクポートに平行に動くことができ、開口からの流れがディスク（シャッター）に当たるようにしてディスクがじやま板の役をするシャッター弁である。また、その駆動方式が電気式であることから圧空駆動式ゲートバルブより速い動作はするが、真空シール性能が劣るためにコンダクタンスバルブとして利用されることが多い。また、高速シャッター弁によるペレットの緊急停止や入射個数制御は、弁の動作速度が300msと要求する遮断速度に比べて遅く、このため必要以上のペレットがシャッター弁を通過する場合があった。さらに、シャッター機構による真空シールは、弁に衝突したペレットが昇華してシートリークの原因となることも懸念された。一方、ペレット切断装置についてはペレットを加速する前の個数制御は可能であるが、一端、ペレットが加速された後の制御ができない問題があった。そこで、ペレットの緊急停止や入射個数制御に有効な高速シャッター弁のシャッター機能と真空シール機能を併せ持った高速動作ゲートバルブの開発を目指すことになった。

本報告は、高速動作ゲートバルブの設計仕様、構造、動作特性等について纏めたものである。

2. 高速動作ゲートバルブの設計

2. 1 ペレット入射装置における高速シャッター弁等の役割

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、ペレット切断装置が収納された生成槽、トップシリンダー、インナーロータ、アウターロータが収納された加速槽、質量検出器、高速シャッター弁、ゲートバルブが取り付けられた測定槽等で構成される。Fig.2.1にJT-60Uにおけるペレット入射装置の配置とその構成を示す。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(D_2)を液体ヘリウム(LHe)により冷却・固化して固体燃料(固体重水素等)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される。そこで、ペレット切断装置により立方体のペレットに切断される。立方体のペレットは遠心加速部に装填され、高速回転しているアウターロータによって加速、射出される。射出されたペレットは、質量検出器により大きさが測定され、「開」状態にある高速シャッター弁及びゲートバルブ内を通過してJT-60U真空容器、又は、試験時の真空槽などの使用設備に入射されるしくみである。

しかし、射出されたペレットは、使用設備側の状態によっては、入射を停止、遮断する必要がある。その役割をするものが高速シャッター弁である。ペレット入射時には高速シャッター弁は「開」であるが、遮断時は瞬時に「閉」となり、ディスクにペレットが衝突し、その場にて排気される。また、真空容器へのペレット入射方向は、トーラスの上側及び内側の2方向があり、その方向は切換器により行われる。

2. 2 開発の経緯

JT-60では昭和63年(1988年)から平成8年まで空気銃方式のペレット入射装置を開発し、プラズマ実験に使用していた。空気銃方式ペレット入射装置⁴⁾⁵⁾における高速シャッター弁は、高圧の加速ガスを瞬時に遮断し、遮断された加速ガスを真空排気することを目的に2段に配置して用いられたバルブである。平成11年より開始した遠心加速方式ペレット入射装置の高速シャッター弁は単発の空気銃方式とは異なり、真空容器側と装置側の真空遮断を含め、連続してペレットが射出されるペレットの緊急停止を目的としたバルブとして設置された。連続ペレット入射においては、ペレット停止のみならず、真空遮断及び射出個数の制御が要求された。しかし、当初の高速シャッター弁は動作応答速度が約300 msであったことから、射出されたペレットが必要以上に通過することがあった。また、長期に閉状態が続くと弁体とシールゴムが焼き付きを発生し、また、繰り返しの開閉動作によりシールゴムOリングが溝から離脱することによるシリーケークの問題が生じた。あわせて、プラズマ状態によりペレット入射のシーケンスが停止し、射出されたペレットが高速シャッター弁に衝突した場合、ペレットの昇華ガスが高速シャッター弁の弁体と弁座部の隙間において、漏れの原因となることが懸念された。そこで、高速シャッター弁の高速動作、シャッター機能において、ゲートバルブの真空シール機能の性能をえたバル

ブ機能が要求された。

シャッター弁では、作動構造等として、電気式、圧空式のもの、シール、ノンシール構造のもの、数百 ms から 1 s 程度の動作速度のものなどが知られている。特に、ペレット入射装置で使用される高速シャッター弁は、より高速な動作を要求される電磁力を利用した直動形（ソレノイドの吸引力だけでなく、弁の開閉をする小口径のもの）電磁弁の一種であるソレノイド通電引上形のノーマルクローズタイプの高速シャッター弁が適当である。高速シャッター弁は、コイルに電圧を供給することにより発生する電磁力によってプランジャーを吸引し、それに連結した弁体を移動させて開閉動作をするもので、その構造を Fig.2.2 に示す。

真空シール機能を満足するシャッター弁やゲートバルブ等の調査を実施したが、国内外を問わず要求を満足するものがなかった。そこで、シャッター弁とゲートバルブの役割も果たせることを念頭に、新たな高速動作のシャッター機能及び真空シール機能等の性能を有した高速動作ゲートバルブを開発^{⑥)}することとした。

また、従来使用していた高速シャッター弁が製造中止となったこともあり、このようなバルブの国産化も合わせて図ることとした。

2. 3 設計仕様

遠心加速方式ペレット入射装置の基本性能は、Table 2.1 に示すように重水素 (D_2) ペレットサイズ 2.1 mm 立方体、周波数 1~10 Hz、射出速度 100~1000 m/s 及び射出時間~7 s である。装置の真空性能は、筐体リーク量 1.3×10^{-9} Pam³/s 以下、弁体と弁座部のシートリーク量は 1.3×10^{-8} Pam³/s 以下であった。この条件を基にして開発する高速動作ゲートバルブの仕様を決定する必要があった。動作時間は、ペレットの最大射出周期が 10 Hz であることから 100 ms 以下にする必要があった。筐体リーク量及びシートリーク量は、ペレット（ペレット 1 個のあたりの燃料供給量 2.0 Pam³）が内部で昇華することによる圧力上昇も考慮し、ペレット入射装置と同等以上の性能を確保することとした。Table 2.2 に高速動作ゲートバルブの基本仕様を示す。動作時間は、開指令（電圧印加）を受けて弁の開完了、又は、閉指令（電圧遮断）を受けて弁の閉完了までを意味するが、実際には、ペレットを遮断する場合、弁体が動作するストローク時間も関係する。

2. 4 高速動作ゲートバルブの構造・設計

高速動作ゲートバルブは、従来の高速シャッター弁の問題点を克服し、新たにゲートバルブ性能を有した構造とした。また、動作構造は、従来装置と同様にコイルへ AC100V ± 10% (50Hz) を瞬時に印加して「開」「閉」作動をさせる方式とした。Fig.2.3 に高速動作ゲートバルブの基本構造を示す。高速動作ゲートバルブは、通常、弁体が 2 つの弁座間にあって、この状態で「閉」で、コイルに電圧を印加すると「開」となる。開時の弁体ストロークは、外径 $\phi 15\text{mm}$ 程度の遠心加速ペレット入射装置用ファンネル等が組み込まれるため、20mm 以上のストロークを確保する必要がある。実際、「閉」時のオーバーラップ及び裕度を考慮するとプランジャーとしてのス

トrokeは 29mm 程度になる。

2.4.1 可動鉄心の選定

直動形電磁弁構造の場合、動作時間は、ストローク量、プランジャー等の質量及びバネ定数により決定される。つまり、プランジャーのストローク量と動作時間の関係は、プランジャー質量(m)をスプリング(バネ定数: k)で押さえ、吸引力(F)でそれを持ち上げ、ストローク量(χ)を得ようとする簡易モデルによる運動方程式より表される。Fig.2.4 に簡易モデル図を示す。

$$m\ddot{\chi} + k\chi = F \quad (1)$$

F ; プランジャー駆動力(kg)

m ; プランジャー質量(w/g)

k ; バネ定数(kg/m)

χ ; 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の吸引力(F)は、次式で表せる。

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

δ ; 変位量(m)

t ; 動作時間(s)

ω ; $\sqrt{k/m} = \sqrt{k(g/w)}$

w ; プランジャー等の重量(kg)

(プランジャーと弁体を合わせた重量)

g ; 重力加速度

バネ定数 35.7kg/m(350N/m)のスプリングを組み込み 100ms で動作させた場合、プランジャー重量 375g、弁体重量 75g、スプリング平均荷重が 0.7kgf とすると、吸引力は(2)式より、最低駆動ストローク 20mm の場合が約 0.9kgf、ストローク 29mm の場合が約 1.3kgf と算出される。つまり、ソレノイド最小荷重は、20mm のストロークを駆動させる吸引力とスプリング平均荷重から約 1.6kgf が必要となる。コイルをコア(固定鉄心)とプランジャー(可動鉄心)の外側に配置する直動形の場合、コイルに電圧を供給すると、発生する電磁力によってプランジャーが動作する。プランジャーを駆動する吸引力は、プランジャーが衝突するコイルの内側となる部位の長さ(コア長)に影響される。そのため、コア長によるソレノイドの吸引力を測定した。Fig.2.5 に吸引力測定試験図を示す。ソレノイドは、プランジャーと引張試験器の間に設けたロードセル(荷重変換器)により測定した。コアは、Fig.2.5 に示すコア長の値が 21mm の標準品、17mm の A タイプ、15mm の B タイプ、13mm の C タイプ及び従来の高速シャッター弁(VACOA)の 5 種について測定した。吸引力は電流値に比例して変化する。Fig.2.6 に各コアによるストロークと吸引力特性を示す。結果、コアに 10A 以下の電流を供給したとき、20mm のストローク

一クにおいて 1.6kgf 以上の吸引力を得られ、安定性のあるコアー長 15mm のコアー (B タイプ) を選定した。このコアーは、コイル電流 9.8A において、ストローク 29mm 時、1.95kgf の吸引力を有し、ほぼ計算値と合致する。

ここで使用したコイルは、電流 10A 以下、周囲温度 40°C 及び温度上昇 140°C 以下を想定して、コイル巻線仕様 1034t×6.6Ω、絶縁種別 JIS C4003 H 種 (180°C) と実績のあるコイルとした。コイルの上昇温度 ΔT は、温度上昇がある時の電気抵抗を考慮して、次式より算出できる。

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = (R_2 - R_1) / R_1 \times (234.5 + T_1) \quad (3)$$

$$R_2 = R_1 \{ 1 + \alpha (T_2 - T_1) \}$$

T_1 : 初期コイル温度 (°C)

T_2 : 温度上昇後の周囲温度 (°C)

ΔT : 温度差 (°C)

R_1 : 初期抵抗値 (Ω)

R_2 : 温度上昇後の抵抗値 (Ω)

2.4.2 動作時間の推定

ソレノイド吸引力による高速動作ゲートバルブの動作時間 t を次式から推定する。

$$\alpha = F / m = 2S_t / t^2 \text{ より}$$

$$t = \sqrt{(2S_t \cdot W) / (F \cdot g)} \quad (4)$$

t : 動作時間 (s)

F : ソレノイド吸引力 (kgf)

S_t : プランジャーストローク (m)

W : プランジャーと弁体の組立質量 (kg)

プランジャーストローク 29mm を得る時の電圧を印可して開動作完了までの応答時間(開動作応答時間) 及び電圧を遮断して閉動作完了までの応答時間(閉動作応答時間) を Fig.2.7 に示す。開動作時間(t_o)は、ソレノイド荷重 (1.95kgf)、スプリング荷重 (0.7kgf) とプランジャーと弁体の組立質量 (450g) から約 46ms となる。また、閉動作時間(t_c)は、プランジャーと弁体の組立質量とスプリング荷重から約 62ms となり、共に仕様条件を満足する。しかし、実際の吸引力、スプリング荷重、質量の誤差及び動作時の衝突反動等により、推定値からのずれが生じる可能性はある。

2.4.3 弁体の強度

ペレットの緊急停止のために高速動作ゲートバルブが閉動作した場合、ペレットは最大 1000 m/s、10Hz の高速度で連続的に弁体に衝突する。そのため、弁体はその衝撃に耐えられる必要がある。併せて、そのときの昇華ガスによるシートリークを防止できる構造である必要がある。ここで、ペレットの衝突応力を推定する。ペレット (1 個の重さ約 1.61 mg) が弁体に衝突して

停止すると考えると1秒間に当たる力積は、

$$I = m_p v_p \quad (5)$$

m_p ; ペレットの質量

v_p ; ペレットの速度

となる。よって、弁体が受ける平均的な力は、

$$I = F \Delta t = 10 m_p v_p$$

$$F = (10 m_p v_p) / \Delta t \quad (6)$$

となる。式(2)から弁体の平均的な力は、0.0161 N になる。また、その応力は、

$$P = F / S \quad (7)$$

となる。よって、弁体は、2.1 mm 立方体の断面積 S から約 3,651 N/m² の応力（圧力）を受けることになる。

弁体に用いる材料 (SUS304) は、耐力 300N/mm²、引張強さ 600N/mm² と十分な強度を有している。また、真空シールは、鏡面加工の弁体面と FKM (フッ素ゴム) の実績のある面接触とした。

2.4.4 全体構造

選定したコアーや真空シール構造により製作した高速動作ゲートバルブの全体構造を Fig.2.8 に示す。高速動作ゲートバルブの弁座内径は $\phi 18.2\text{mm}$ とし、ボディを配管の入口側及び出口側より押さえ込むように内径 $\phi 16.6\text{mm}$ の配管に接続された ICF フランジが連結される。また、高速動作ゲートバルブの取合フランジとなる ICF フランジ面間は、遠心加速方式ペレット入射装置に取り付けられる場合の距離 (245mm) に合うように設定された。

2.4.5 真空シール

JT-60 真空容器と接続する設備は、JT-60 の真空管理基準（真空リーキ量が $1.33 \times 10^{-8}\text{Pa}\text{m}^3/\text{s}$ 以下、放出ガスの少ないこと）を満足する必要がある。この観点から、本バルブの本体は、弁座シール部を除きオールメタル化とし、取合部は、すべて金属ガスケットによる真空シール構造とした。

また、従来のシャッター弁などは、弁体と接触する弁座の O リングが O リング溝にはめ込まれていたが、焼き付きや連続摺動による脱落が懸念された。そこで、これを防止する目的として、Fig.2.8 に示すように弁座の溝を O リングが飛び出しにくいアリ溝 (O リングをはめ込む凹型の溝) とし、弁体の高速開閉動作により弁座の O リングが溝から外れにくい構造とした。さらに、弁体の片面と PTFE (テフロン) O リング側弁座面を傾斜構造にして高速、且つ、連続摺動を容

易にした。他方の弁体面は、最終的な真空シール時以外は、FKM（フッ素ゴム）O リング面を摺らずにし、FKM（フッ素ゴム）O リング側弁座面と垂直に密接して真空シールを増強した。

3. 予備試験

高速動作ゲートバルブは、電磁力を利用したソレノイド方式の構造物である。そのため、類似方式の機器に観られるプランジャー破損、Oリングの脱落、プランジャーバウンド現象等の発生の有無について測定、試験した。

3. 1 連続動作試験

連続動作試験は、電圧の印加・停止による弁体の開閉動作状況及び全開後に弁体がバウンド現象を起こすかどうかについて確認した。確認手法としてレーザ式判別センサが有効であるが、入側管及び出側管の内径に合致するセンサがないことから、それ以下である検出範囲 10mm のレーザを応用した。このレーザでは配管内を 10mm 範囲の検知となり、配管内径をカバーできていない。そのため、動作による換算にて、AC100V 印可時の連続動作開閉動作及びバウンド現象などの弁動作異常の有無を確認した。動作試験図を Fig.3.1 に示す。レーザの発信器、受信器は、高速動作ゲートバルブの両サイドに設置し、弁体のバウンド確認試験はレーザ端を配管内面上部レベルに、弁体開閉動作試験はレーザ中心を配管中心レベルに合わせて連続的に実施した。

連続動作試験において、激しい衝突音とともに開直後にセンサの検出範囲内に弁体が再度侵入したことを検知した。連続動作後、高速動作ゲートバルブ本体を分解してプランジャーを確認すると、衝突による頭部のダレと摩耗等によるツバ部の金属粉が確認された。これは、プランジャーが吸引力により高速でコアーと衝突し、その勢いで全開後に弁体が閉方向にバウンドしたものと考えられる。Fig.3.2 に異常現象の部位を示す。本動作試験の範囲ではプランジャーの破損や O リングの脱落等の異常はなかったものの、これは、後の動作不良や真空シール異常につながることが予想されるため、以下の対策を行った。

3. 2 不具合対策

3.2.1 対策後の構造

連続動作試験において、プランジャーとコアーの衝突により、衝突音、弁体のバウンド、プランジャーのダレ及び金属粉発生などの不具合が明らかになった。これらの不具合対策としては、可動鉄心であるプランジャーの衝突前における運動エネルギーの低減が必要であると判断し、衝撃吸収材（クッション材）を導入した。

対策後の高速動作ゲートバルブの構造を Fig.3.3 に示す。構造は、プランジャーの運動エネルギーを低減する目的でガイドウェイトの配置を、衝撃吸収・緩和を目的で衝突部位へのクッション材の挿入を行った。これらの吸収構造における構造区動作ゲートバルブボディ内のプランジャー、ガイドウェイト、弁体等の動作を弁体正面からの断面分解図として Fig.3.4 に示す。弁体動作前状態(a)にある高速動作ゲートバルブのコイルに電圧を印加すると、プランジャーが動作を開始する(b)。次に、ピンにより引っかけられて弁体が開き始め(c)、半開状態(d)を経由してガイド

ウェイトとプランジャーのツバ部が接して全開前のプランジャーに負荷を加える(e)。さらに、弁体が全開する(f)と、コアーとプランジャー及びガイドウェイトとクッション材が当接して開動作が終了する(g)。

3.2.2 対策後の動作時間

ソレノイド吸引力による高速動作ゲートバルブの動作時間は、(4)式から推定したが、プランジャーと弁体の組立質量(450g)にガイドウェイト(150g)が加わることから動作速度に影響することが予想される。これらの総質量は約600gであることから、開動作時間及び閉動作時間を推定すると、各々53ms、71msとなる。

対策後の動作時間が2.4.2章で述べた初期設計より遅くなつたため、さらに、この点を改善することを試みた。開動作がやや遅くなるがスプリングによる弁体を復帰させる力を強くして閉動作時間を速くできるようにスプリングのバネ定数を変えることを検討した。

スプリングは、スプリングA; 0.35N/mm(設計品)、スプリングB; 0.421N/mm、スプリングC; 0.469N/mm、スプリングD; 0.513N/mmの4種を準備し、各々高速動作ゲートバルブに組み込み開閉動作の動作応答時間やストローク時間を測定した。試験は、Fig.3.1に示した弁体バウンド確認試験において、バウンド現象のないことを確認したあとに、Fig.3.1に示す弁体開閉動作試験により開閉動作時間の測定を実施した。センサは配管の中心部にセットしたが、未検出部位ができる。この未検知部は、プランジャーの移動距離(ストローク)29mm、弁体のストローク26mmから16mmになる。Fig.3.5にプランジャーの動作とセンサの検出範囲を示す。高速動作ゲートバルブは、電圧を印可すると、プランジャー、弁体、ガイドウェイトの順に動き、動作が完了するので、未検知部の動作時間は、検知部の時間より算出した。Fig.3.6にスプリングの種類による動作時間特性を示す。スプリングのバネ定数を大きくすると、閉動作は速くなるが、開動作が遅くなる。また、閉動作を速くすると弁体やコアーの閉動作による衝撃の影響が懸念されるため、仕様を満足し、開ストローク時間及び閉ストローク時間の類似したスプリングAを使用した。

4. 動作特性

設計及び予備試験の結果を反映して製作した高速動作ゲートバルブの単体特性及び性能等を確認するために以下の試験、検査を行った。

4. 1 単体試験

1) 外観、材質、寸法検査

- ①外観に傷、割れ及び真空シール面等に異常の無いことを確認した。
- ②主要材料をミルシートにて確認した。主な材料を Table 4.1 に示す。
- ③ノギス、マイクロメータを用いて高速動作ゲートバルブの主要部及び取合部の寸法を確認した。主要部寸法を Fig.4.1 に示す。
- ④重量計を用いて全体の重量が 11kg であることを確認した。

2) 作動状態検査

- ①大気圧状態において、閉状態から徐々に作動電圧を上昇させ、開状態となる電圧（最低作動電圧）が AC81V であることを確認した。
- ②大気圧状態において、開状態から徐々に電圧を降下させ、閉状態に復帰する電圧が AC45V であることを確認した。

3) シートリーク試験

- ①Fig.4.2 にシートリーク試験図を示す。閉状態において、入側に He リークディテクターを接続して真空排気し、高速動作ゲートバルブの出側の弁体と弁座のシートリーク量を測定した結果、 $7.7 \times 10^{-11} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と基準値 ($1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下) を満足することを確認した。また、He リークディテクターにおいて、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下の到達圧力を確認した。
- ②Fig.4.2 にシートリーク試験図を示す。閉状態において、出側に He リークディテクターを接続して真空排気し、高速動作ゲートバルブの入側の弁体と弁座のシートリーク量を測定した結果、 $8.7 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と基準値 ($1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下) を満足することを確認した。また、He リークディテクターにおいて、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下の到達圧力を確認した。

4) 筐体リーク試験

- ①Fig.4.3 に筐体リーク試験図を示す。閉状態において、出側に He リークディテクターを接続して真空排気し、入側に閉止フランジを取り付け、筐体をフードした中に He を充填（フード法）して筐体リーク量を測定した結果、 $1.8 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と基準値 ($1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下) を満足することを確認した。
- ②閉状態において、出側に He リークディテクターを接続して真空排気し、入側に閉止フランジを取り付け、全体のリーク量をプローブ法にて測定した結果、基準値 ($1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下) を満足することを確認した。

5) 電気特性試験

- ①高速動作ゲートバルブのコイルに定格電圧（AC100V）を印加して全開状態時における電流は858mAであり、規定電流範囲内（760～960mA）であることを確認した。
- ②高速動作ゲートバルブの非充電部分である筐体とコイル端子間の耐電圧（AC1800V、1秒間）が良好（カットオフ電流0.5mA以下）であることを確認した。
- ③高速動作ゲートバルブの非充電部分である筐体とコイル端子間の絶縁抵抗が良好（DC1000V、100MΩ以上）であることを確認した。
- ④常温雰囲気において、高速動作ゲートバルブに連続通電を行い、コイル部等の表面温度を表面温度計にて測定した。周囲温度は、通電から10分後25.5°C、160分後105°Cであった。測定の結果、各部の温度はコイル上面102°C、コイル側面83°C、ボディ40°Cと規定温度（140°C以下）以下であることを確認した。

4. 2 動作特性試験

1) 動作時間特性試験

動作時間特性試験は、Fig.3.1に示す動作時間試験図と同様な構成にて実施したが、Fig.3.5に示すように10mmのレーザーでは検出できない未検知部分が現れる。この未検知部分は、検出される10mmの時間範囲から動作時間を換算することとし、各部の時間はFig.4.4に示す高速動作ゲートバルブを開から閉へと作動させた場合の電圧波形、レーザー出力波形及び実働波形図より算出した。

高速動作ゲートバルブに定格電圧を印加して開動作をさせたときの電圧とレーザー出力波形及び電圧を遮断して閉動作をさせたときの電圧とレーザー出力波形の測定結果をFig.4.5に示す。測定波形から電圧印加から開動作検知終了(t_o')までの時間が40.2ms、弁体10mm開ストローク時間(t_{oi}')が16.4ms、電圧遮断から閉動作検知終了(t_c')までの時間が64.6ms、弁体10mm閉ストローク時間(t_{ci}')が12.8msであることが解った。この測定結果から高速動作ゲートバルブの各動作速度を算出した。Fig.4.6に10mmストローク時間により換算した時の開動作及び閉動作における高速動作ゲートバルブの動作時間を示す。

- ①電圧を印加して全開までの応答時間を確認した。電圧を印加して全開になるまでにはプランジャーが吸引力により29mm移動する。よって、開動作の応答時間は、実測した電圧を印加してから開検出終了時間に未検出部の算出時間を加味することにより算出できる。その結果、50.04msとなり、仕様を満足する結果を得た。
- ②閉から開までの弁体開動作ストローク時間を確認した。閉状態から開状態までの弁体の移動距離は、プランジャーと一緒に移動するが、そのあそび分を差し引いた26mmを移動する。よって、弁体開動作ストローク時間は、実際の10mm開ストローク時間より算出できる。その結果、42.62msとなり、仕様を満足する結果を得た。このことから、弁体が開動作を開始するまでの遅れ時間は、7.4msと推定できる。
- ③電圧を遮断して全閉までの応答時間を確認した。電圧を遮断して全閉になるまでにはプランジャーが自重とスプリング力により29mm移動する。よって、閉動作の応答時間は、実

測した電圧を遮断してから閉検出終了時間に未検出部の算出時間を加味することにより算出できる。その結果、77.4msとなり、仕様を満足する結果を得た。

④開から閉までの弁体閉動作ストローク時間を確認した。開状態から閉状態までの弁体の移動距離は、開と同様の距離を移動する。よって、弁体閉動作ストローク時間は、実際の10mm 閉ストローク時間より算出できる。その結果、33.28msとなり、仕様を満足する結果を得た。このことから、弁体が閉動作を開始するまでの遅れ時間は、44.12msと推定できる。

2) 耐久性試験

①Fig.4.2 及び Fig.4.3 に示すリーケ試験図において、シートリーク及び筐体リークを確認後、差圧 0 の状態において、定格電圧（AC100V、50Hz）を印加させて ON/OFF（ON-1s、OFF-9s の間隔）動作を 10,000 回実施した結果、高速動作ゲートバルブとして健全であることを確認した。

②Fig.4.2 及び Fig.4.3 に示すリーケ試験図において、10,000 回の動作後にシートリーク及び筐体リークを確認した結果、各々、 $2.8 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、 $3.0 \times 10^{-10} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下と基準値（シートリーク； $1.33 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、筐体リーク； $1.33 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下）を満足することを確認した。

③耐久性等を確認後、ペレット入射装置のファンネルや飛行管が高速動作ゲートバルブの内部に挿入、組込ができる事を確認した。

④ペレット入射装置を模擬し、高速動作ゲートバルブをペレット入射装置の測定槽及び切換槽間に組めることを確認した。ただし、従来の高速シャッター弁のように入側にウルトラトールシール機構がないため、槽間取合における配置、据付調整が難しいことが明らかになった。

5. 組込対策

ここでは完成した高速動作ゲートバルブを実際のペレット入射装置に組み込むために必要な対策について述べる。高速動作ゲートバルブは、リーク等の観点から金属シール構造とした。そのため、従来の高速シャッター弁のようにウルトラトールシール機構を付加しなかったことにより、ペレット入射装置に組み込む際に切換器槽と測定槽間のフランジ取合時の微調整が難しくなった。ウルトラトールは、バイトンOリングを利用した真空シール機構であるため、高速動作ゲートバルブの目的には適さない。そこで、以下のように溶接ベローズを用いた微調整機構を設ける対策を行った。

5. 1 対策構造

高速動作ゲートバルブの出側は切換器槽と取り合う。高速動作ゲートバルブ内にはファンネル及び飛行管が精密に挿入される。そこで、出側は配管長とフランジを、入側は配管構造を改造して装置への組込みが容易になるように対策した。

1) 出側の対策

出側の取合 ICF フランジは、回転方向の微調整が行えるように回転タイプとした。また、配管は、外径 $\phi 19\text{mm}$ 、肉厚 $t1\text{mm}$ のものを用い、やや内径を広くした。Fig.5.1 に出側のフランジ構造を示す。

2) 入側の対策

入側の配管は、長手方向の調整が行えるように溶接ベローズを用いて ICF フランジと接続し、その中に垂直方向をサポートする外径 $\phi 19\text{mm}$ 、肉厚 $t1\text{mm}$ の配管を仕込むようにした。このベローズの自由長は $\pm 10\text{mm}$ ある。Fig.5.2 に入側のフランジ構造を示す。

5. 2 組込対策後の高速動作ゲートバルブ

1) 外観

組込対策後の高速動作ゲートバルブの外観図を Fig.5.3 に示す。その外観を Photo5.1 に示す。ボディ部の寸法に変更はないが、ベローズの自由長分 ($\pm 10\text{mm}$) の調整しろを有して配管長の関係から全長が短くなった。

2) 試験

組込対策後において、前記の方法にて、動作試験、シートリーク試験、筐体リーク試験を実施した。試験の結果、正常な動作を確認した。また、真空性能においても、シートリーク $1.0 \times 10^{-8}\text{Pam}^3/\text{s}$ 以下、筐体リーク $1.0 \times 10^{-9}\text{Pam}^3/\text{s}$ 以下を確認した。

3) 設置

高速動作ゲートバルブをペレット入射装置の切換器槽と測定槽に設置した場合を Fig.5.4 に示す。ファンネルや飛行管は、ペレットがその中を安定して飛行できるように衝突限界角度や散乱角度を考慮して設置する。

6. おわりに

遠心加速方式ペレット入射装置より射出されたペレットは、プラズマの状態により緊急停止やペレットの入射個数に対する制御が要求された。その手法として、シャッター機構及び真空シール性能を有する高速動作ゲートバルブを開発した。開発した高速動作ゲートバルブの主な仕様は、真空リーグ量が $1.0 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下、応答速度が 80ms 以下、ゲート径が $\phi 17\text{mm}$ であり、これを満たす設計や試験を進めた結果、ソレノイド方式による高速、小型の国産ゲートバルブを実現した。これにより、高耐久性、摩耗粉の減少、衝突騒音の減少、設置調整機構など従来の性能を大幅に改善した。

今後、本高速動作ゲートバルブが取り付けられたペレット入射装置が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。さらに、本高速動作ゲートバルブは、ペレット入射装置だけにとどまらず、真空機器のゲート弁としての利用が期待される。

謝辞

高速動作ゲートバルブの設計、製作、試験において、活発なコメント等を頂いた JT-60 第 2 試験室の各位に感謝いたします。本報告書を纏めるにあたって終始ご支援して頂いた清水正亜 核融合装置試験部長、二宮博正 核融合装置試験部次長に感謝いたします。また、高速動作ゲートバルブの試作、開発、試験において、協力を頂いた CKD(株)の関係各位、特に、広瀬泰久氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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)
- 2) Kaname KIZU et al, 「Development of The Centrifugal Pellet Injector for JT-60U」 JAERI-Tech 2001-022 (2001)
- 3) 平塚 一 他、「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」 JAERI-Tech 2001-019(2001)
- 4) 平塚 一 他、「JT-60 ペレット入射装置」 JAERI-M 88-241(1988)
- 5) 平塚 一 他、「JT-60 ペレット入射装置の高速化」 JAERI-M 89-081(1989)
- 6) 平塚一 他、「高速動作ゲートバルブの開発」 プラズマ・核融合学会 第 18 回年会(2001)

Table 2.1 遠心加速方式ペレット入射装置の基本性能

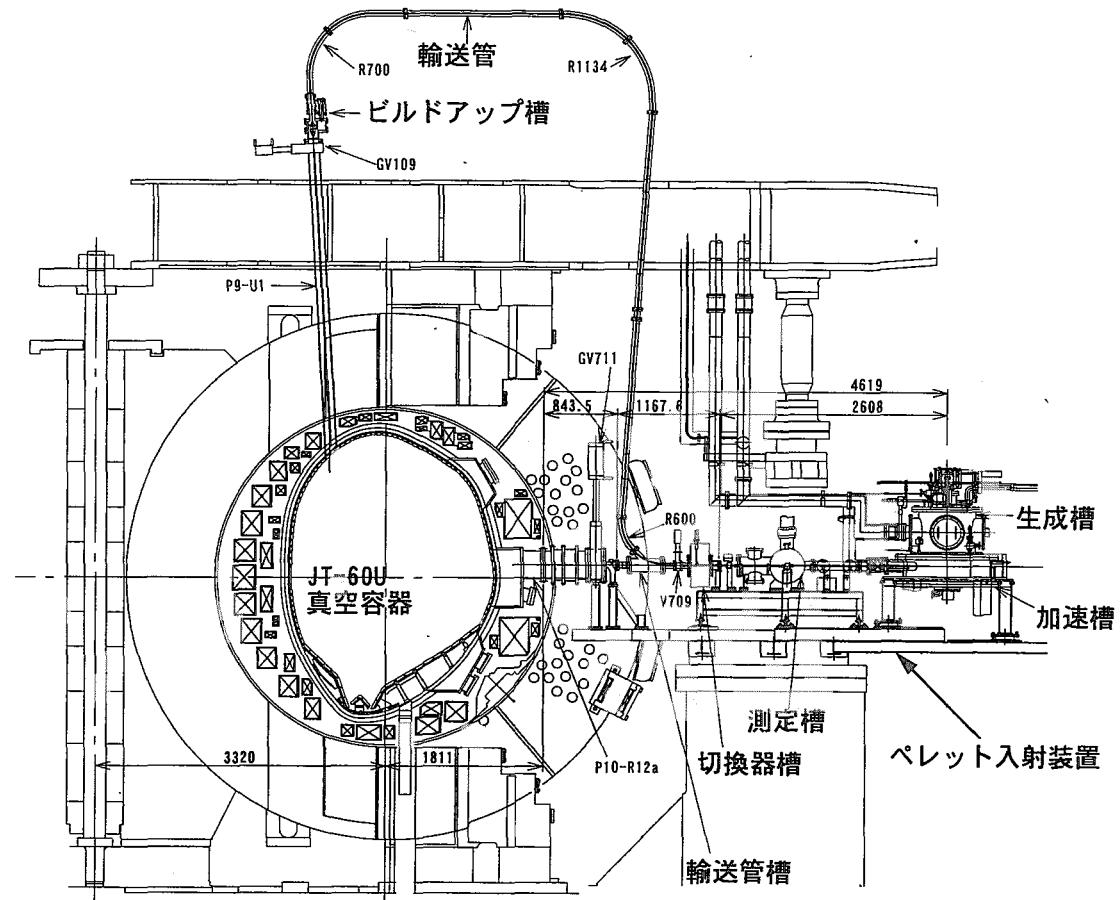
項目	仕様
ペレット形状	2.1mm立方体
射出速度	100~1000m/s
射出周波数	1~10Hz
射出時間	~7s
ガスの種類	D ₂ 、H ₂ 、Ne
加速方式	直線型アウターロータ
回転周波数	25~250Hz
生成方式	エクスツルーダー(ピストン押出方式)

Table 2.2 高速動作ゲートバルブの基本仕様

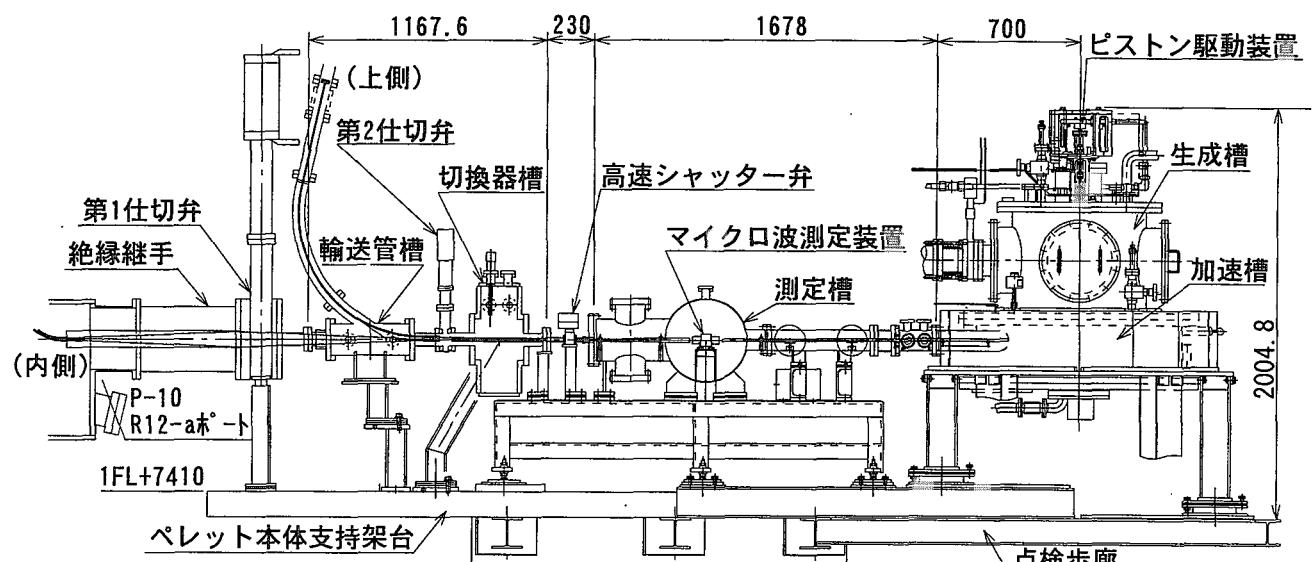
項目	仕様
動作時間	100 ms以下(ストローク)
ストローク	20mm以上
筐体リーク量	1.3×10 ⁻⁹ Pam ³ /s以下
シートリーク量	1.3×10 ⁻⁸ Pam ³ /s以下
型式	ソレノイド通電形(ノーマルクローズ)
電源	2相、100V±10V、50Hz
材質	SUS等
取合フランジ	ICFフランジ類

Table 4.1 主な材料

番号	名称	材料名	備考
	コア	K-M31	開発鋼(磁性ステンレス材)
	プランジャー	SUS430	
	弁座	SUS304	
	弁体	SUS304	
	ボディ	SUS304	



(a) 配置



(b) 構成

Fig. 2.1 遠心加速方式ペレット入射装置の配置と構成

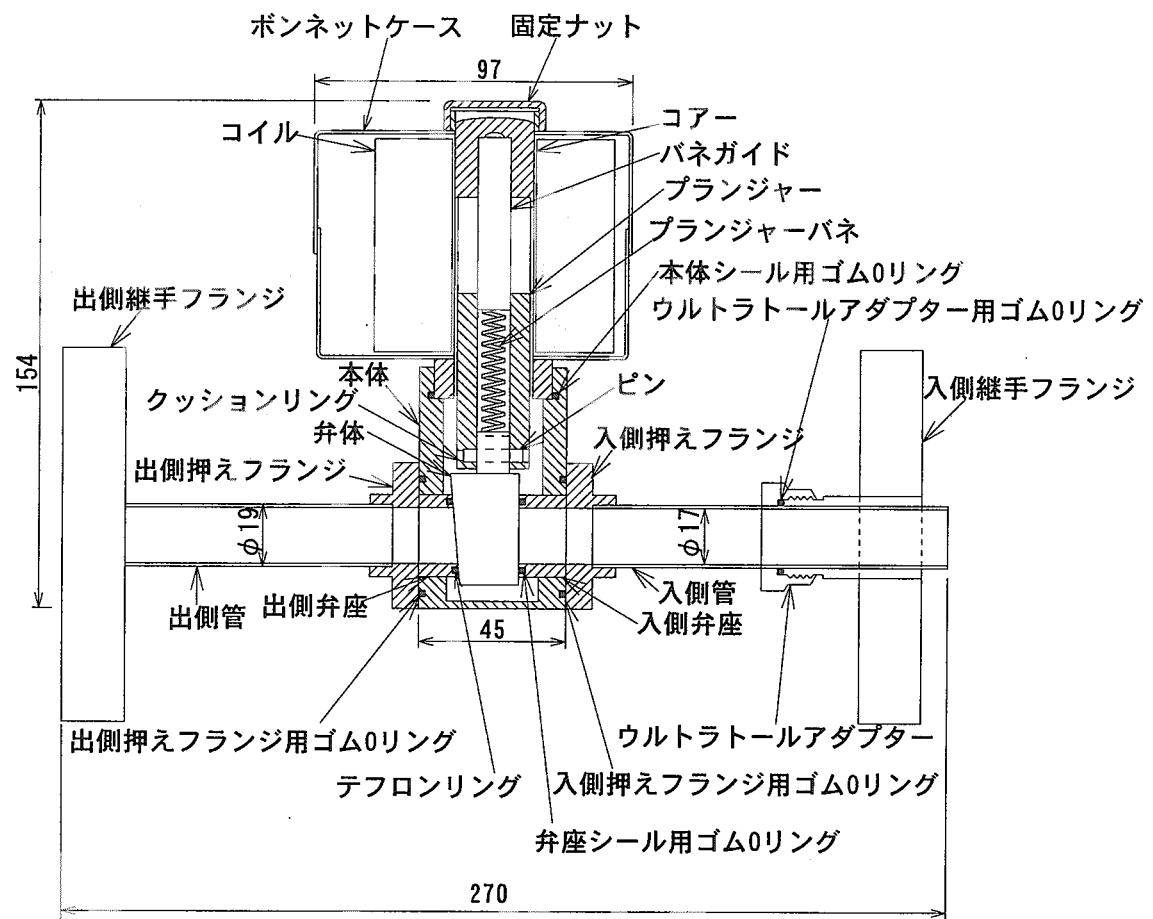


Fig. 2.2 高速シャッター弁の構造

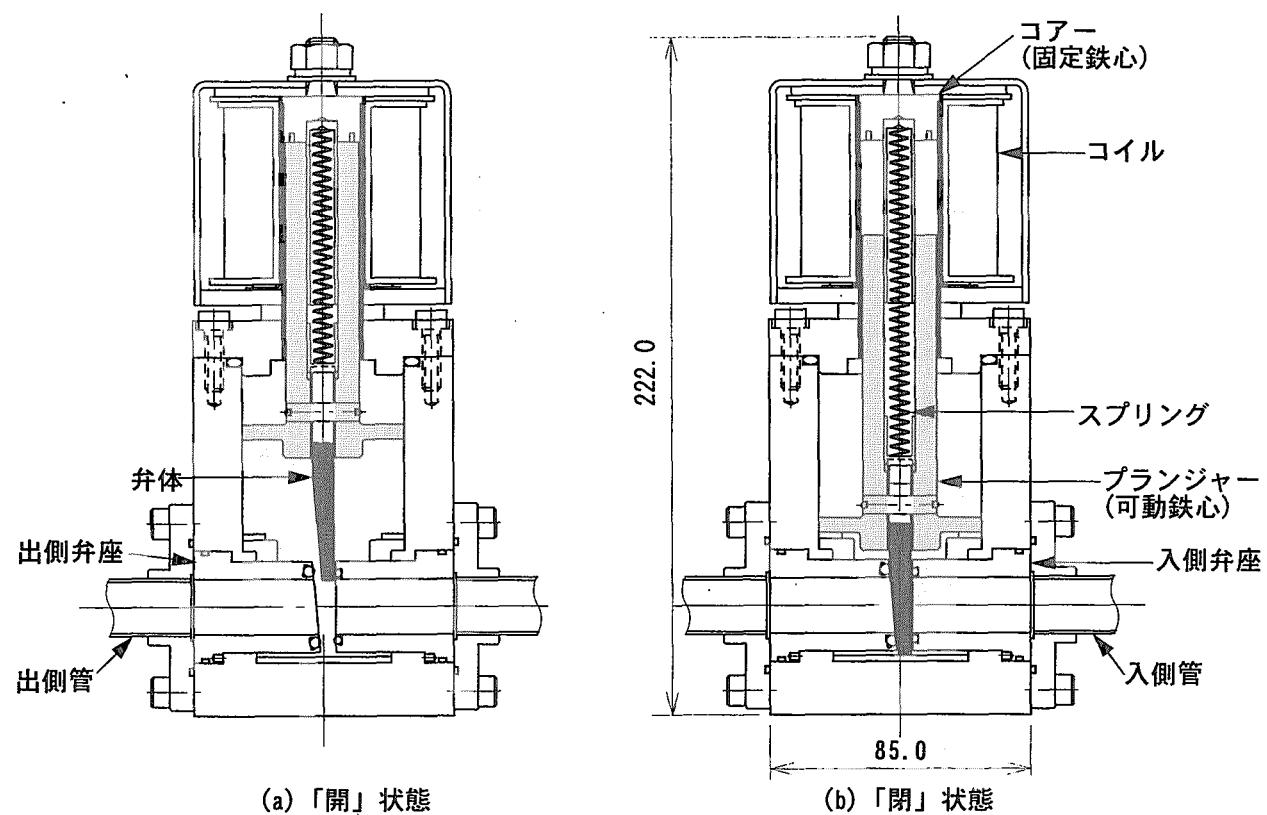


Fig. 2.3 高速動作ゲートバルブの基本構造

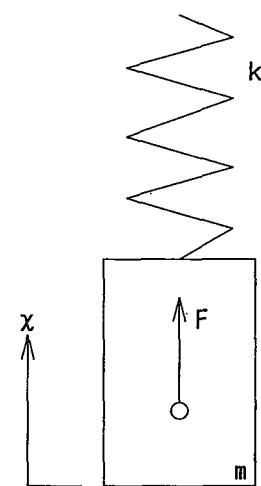
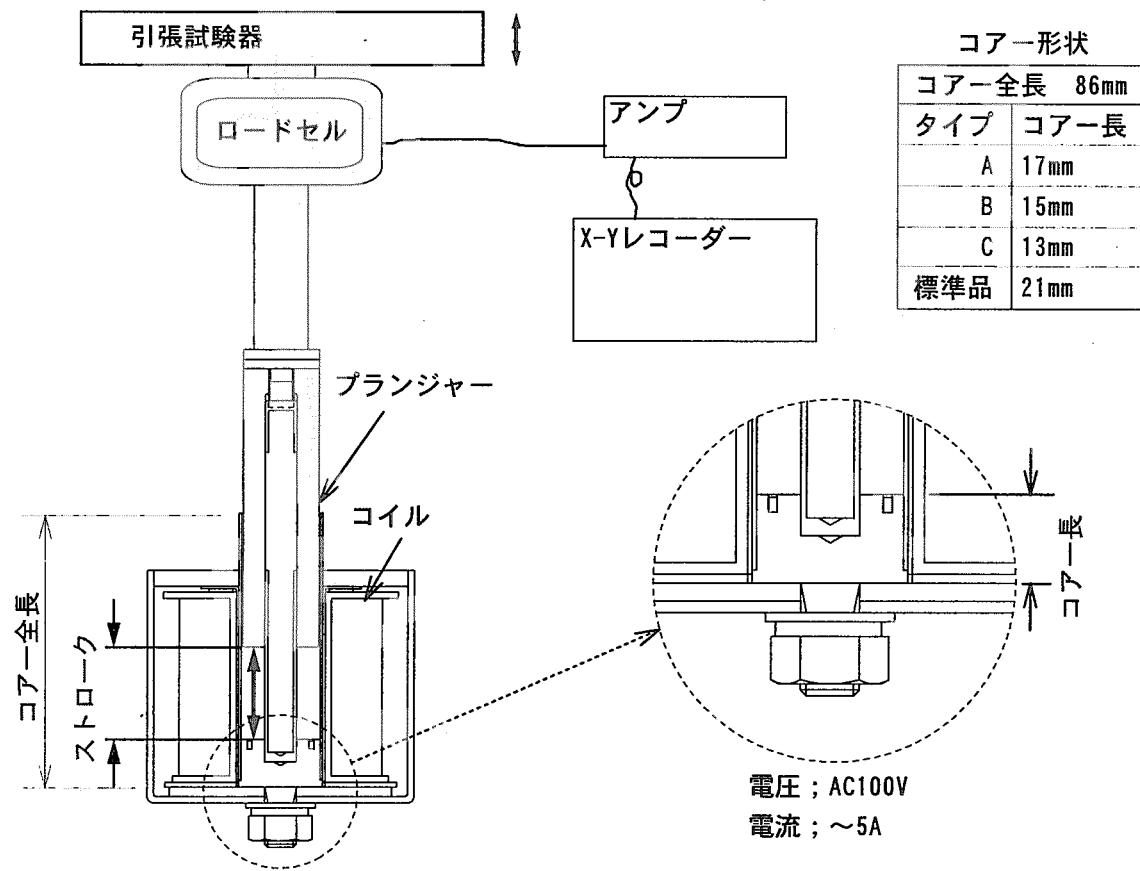


Fig. 2.4 簡易モデル図



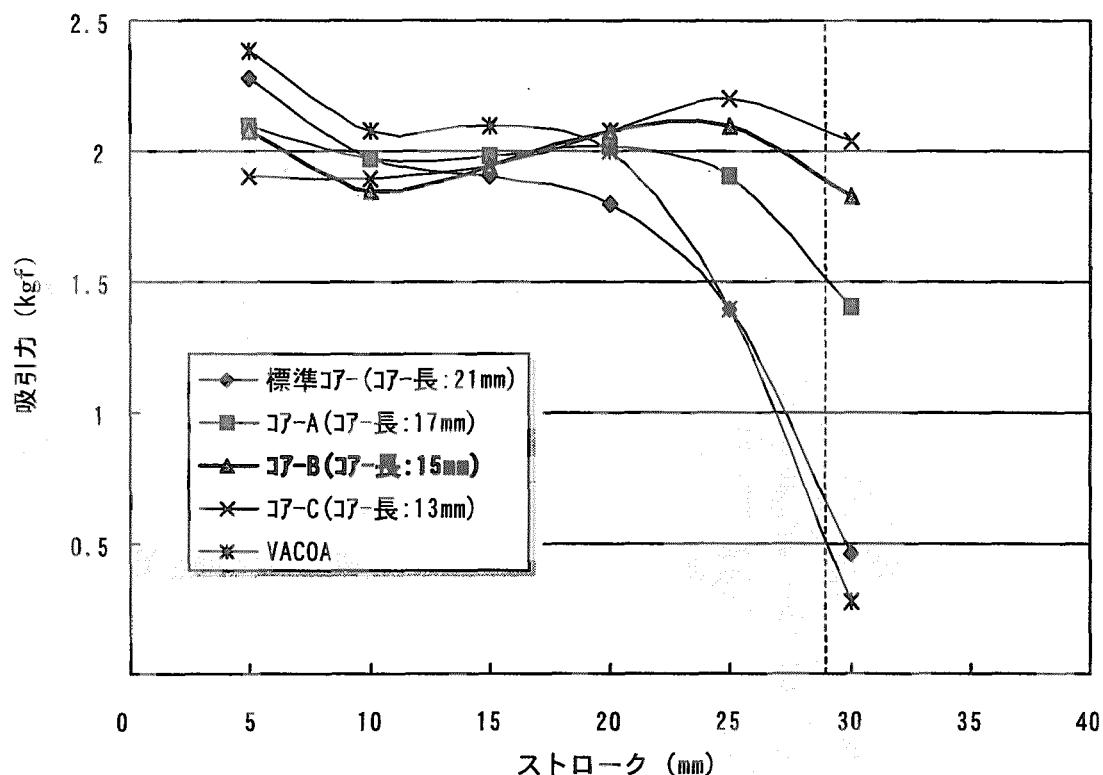
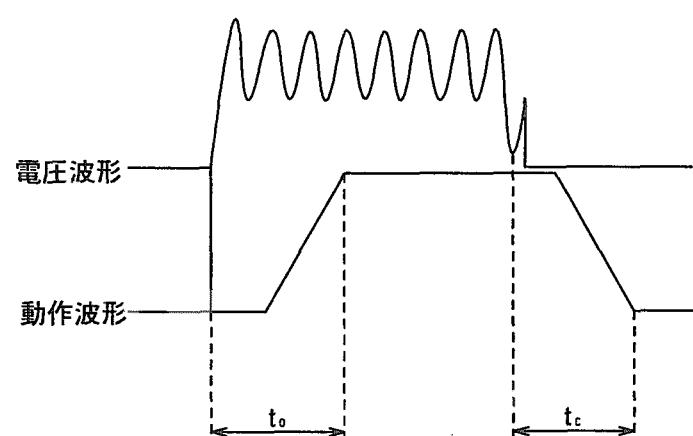


Fig.2.6 吸引力特性



開動作応答時間；電圧印加から開動作完了までの時間 : t_o
 閉動作応答時間；電圧遮断から閉動作完了までの時間 : t_c

Fig. 2.7 開閉動作応答時間

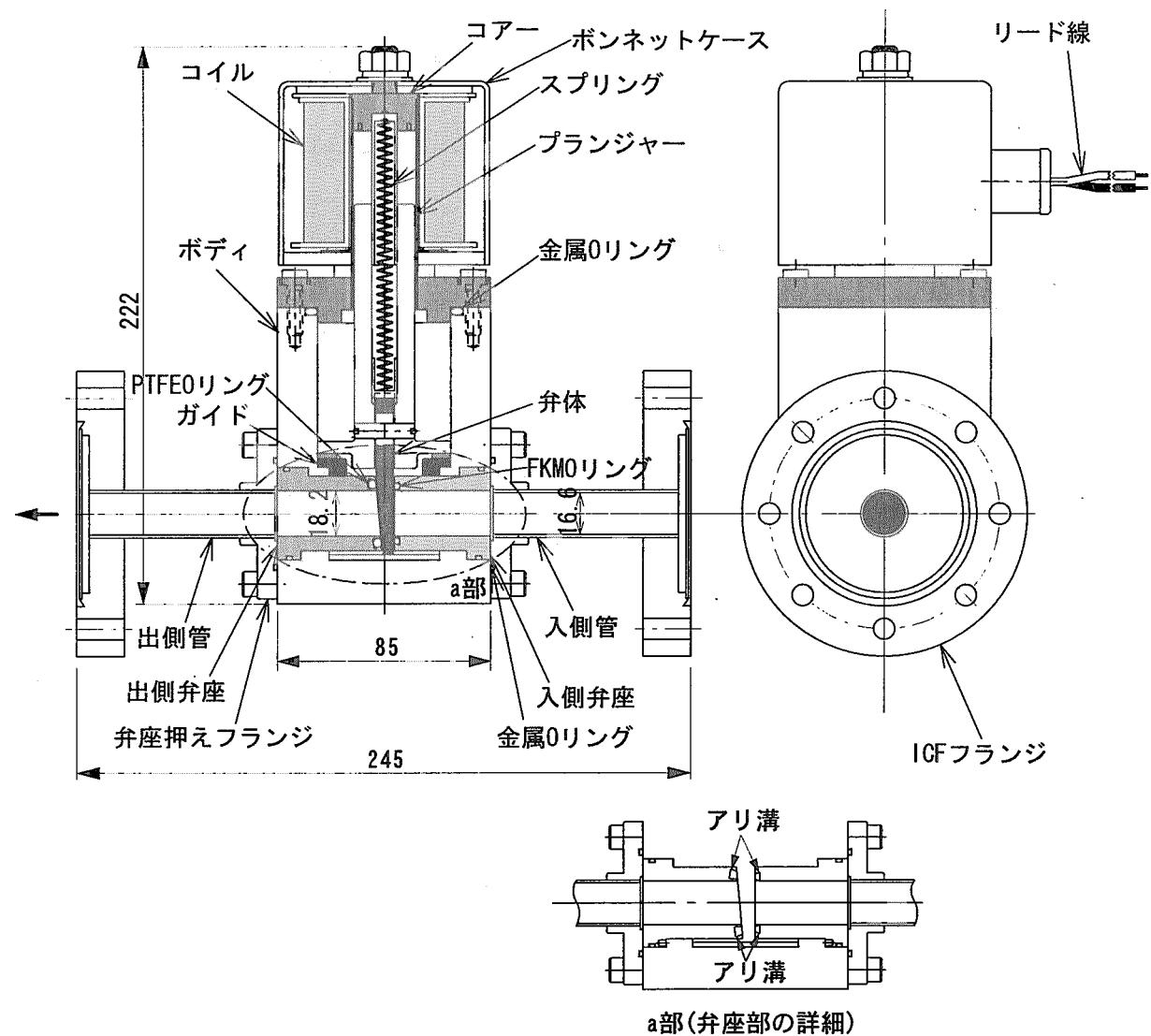
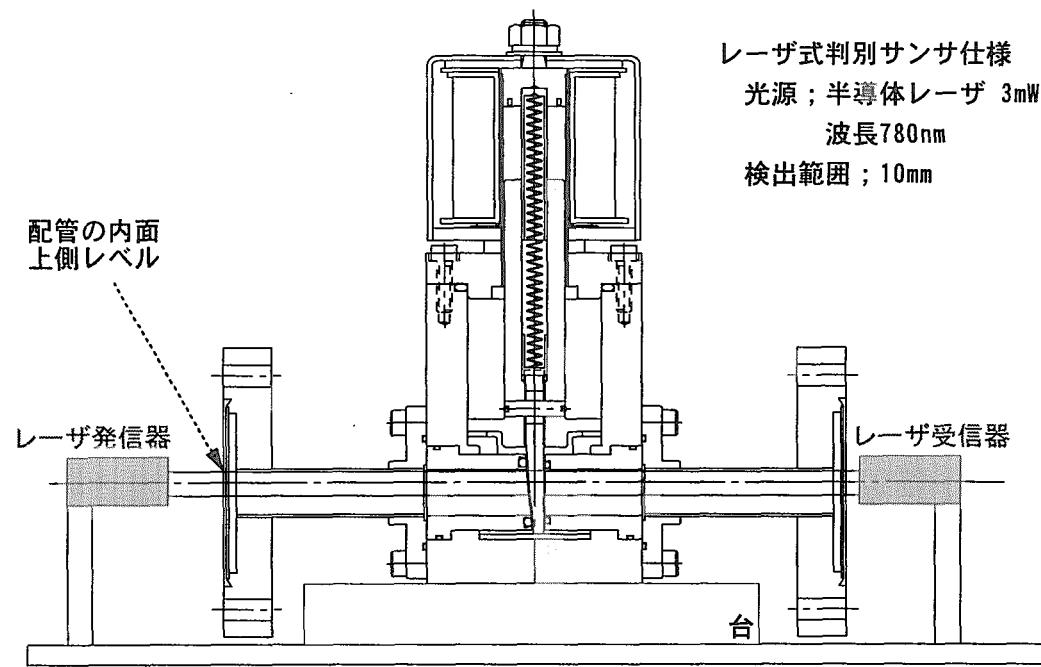
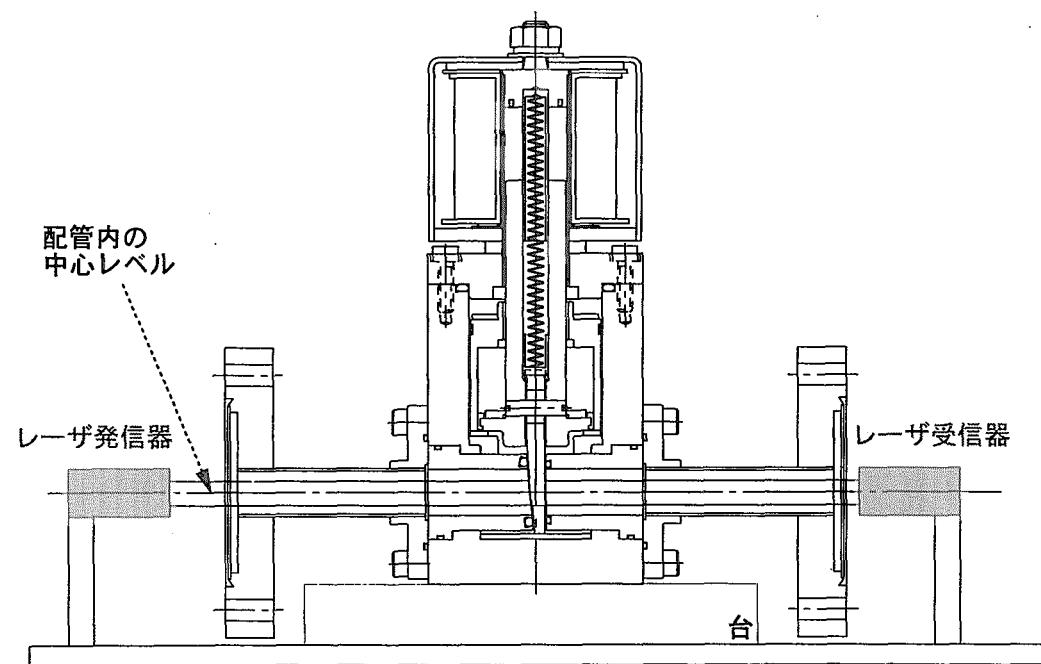


Fig. 2.8 高速動作ゲートバルブの全体構造



a) 弁体バウンド確認試験



a) 弁体開閉動作試験

Fig. 3.1 動作試験図

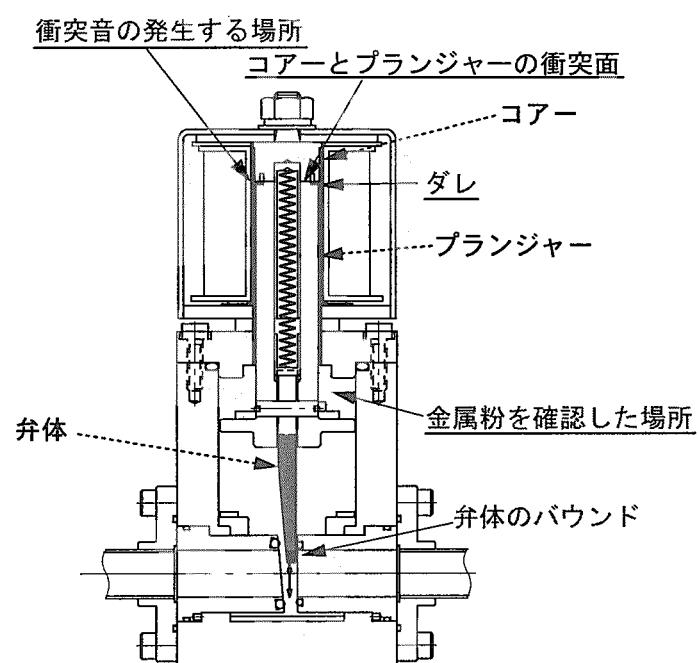


Fig. 3.2 異常現象の部位（開状態）

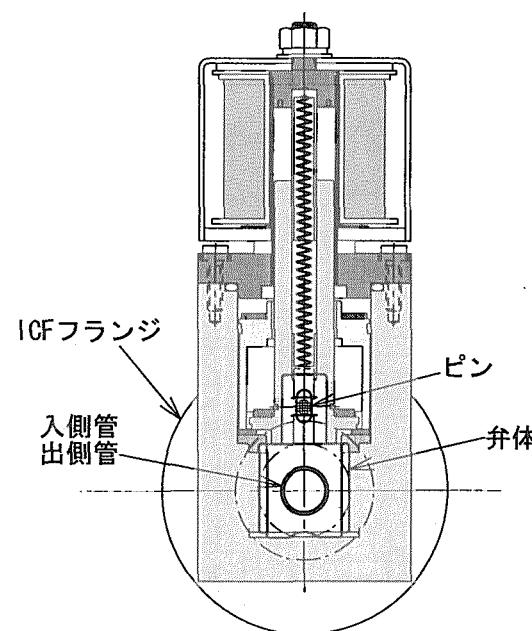
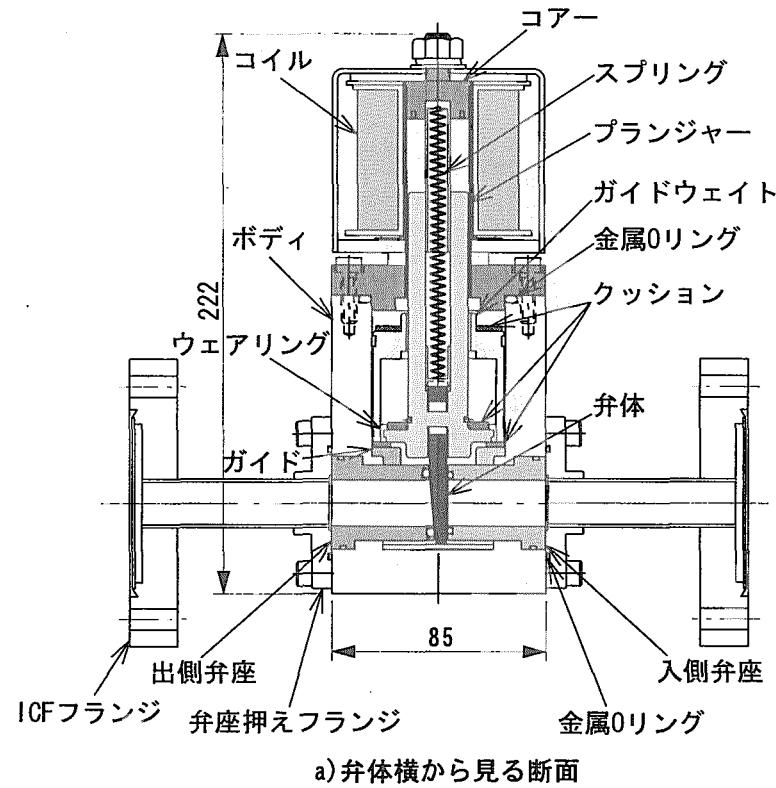


Fig. 3.3 対策後の高速動作ゲートバルブ構造

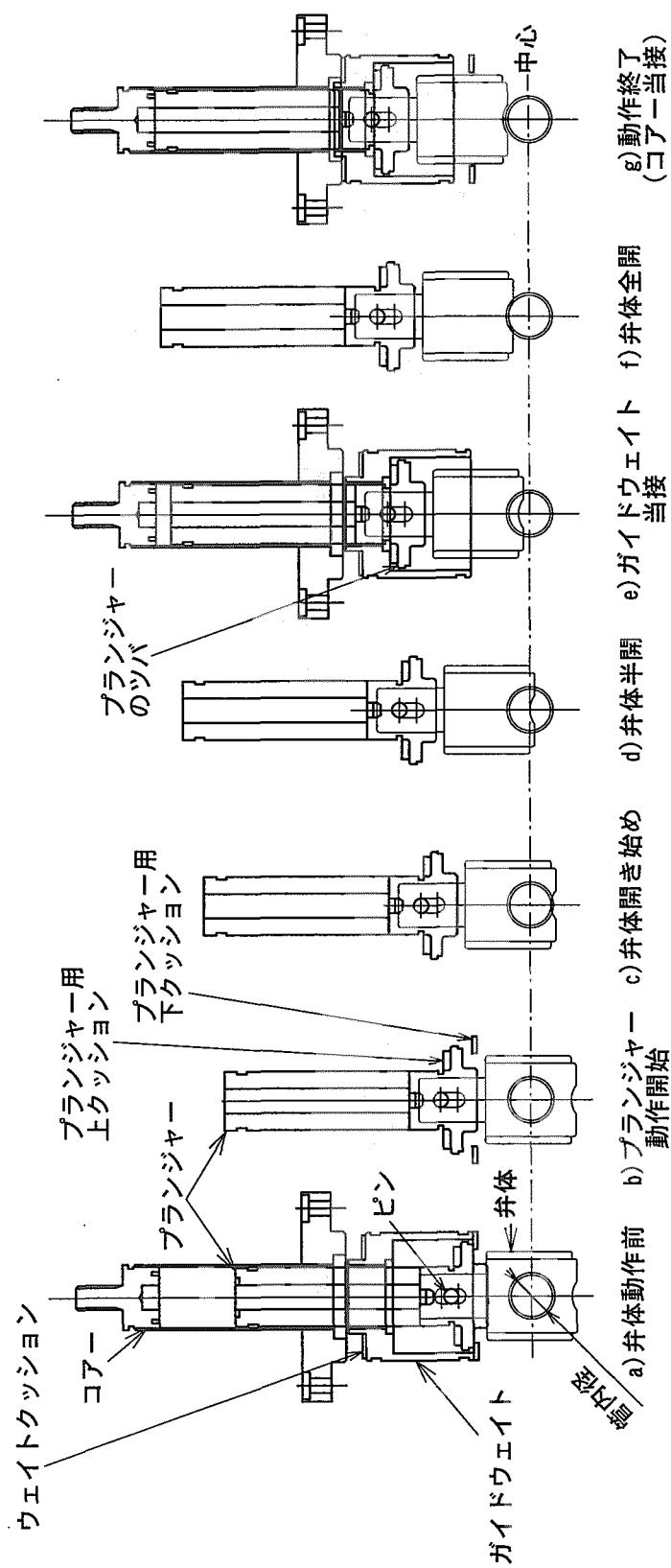


Fig. 3.4 衝撃吸収構造の動作断面分解図

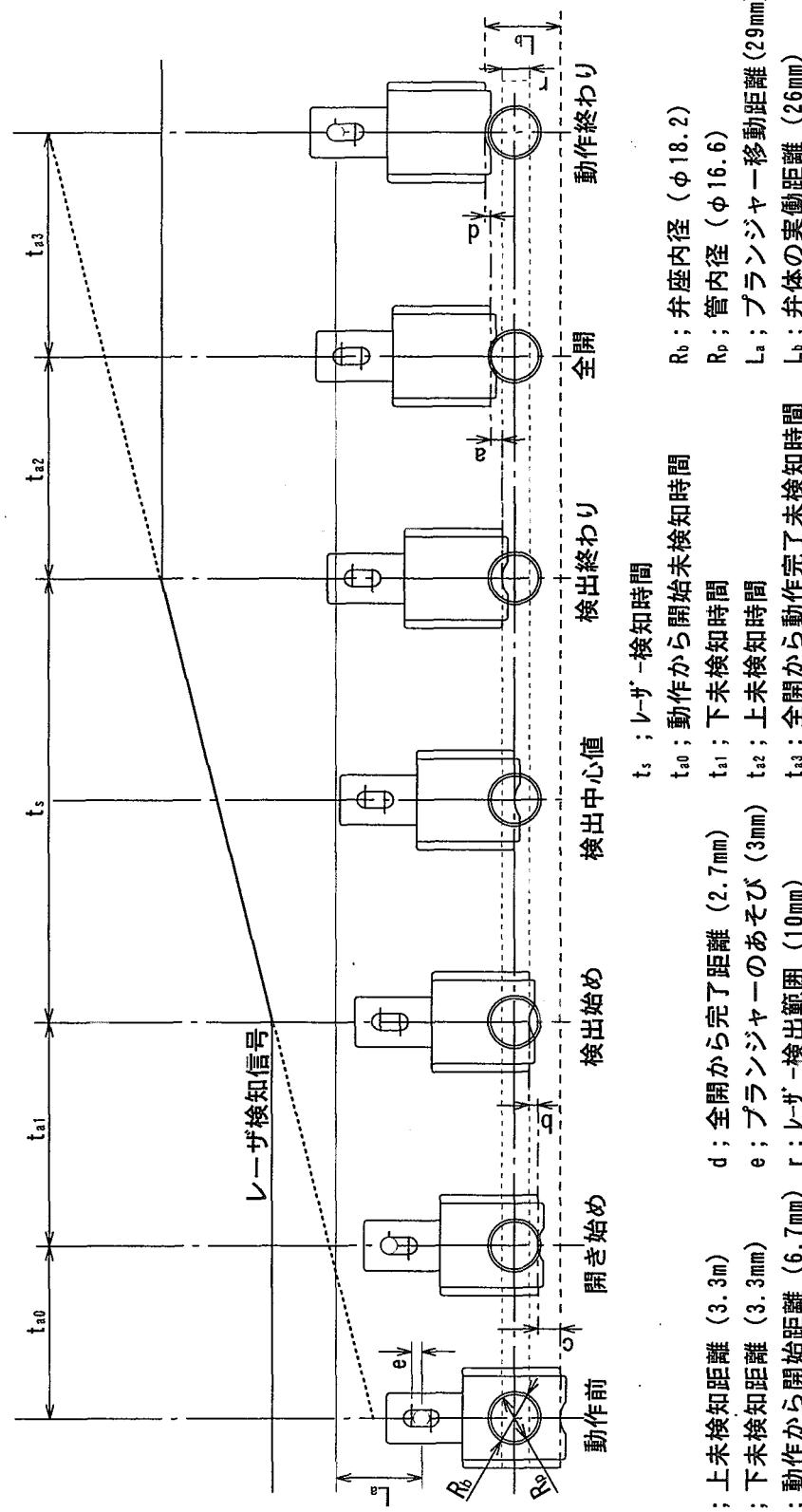


Fig. 3.5 プランジャーの動作とセンサの検知範囲

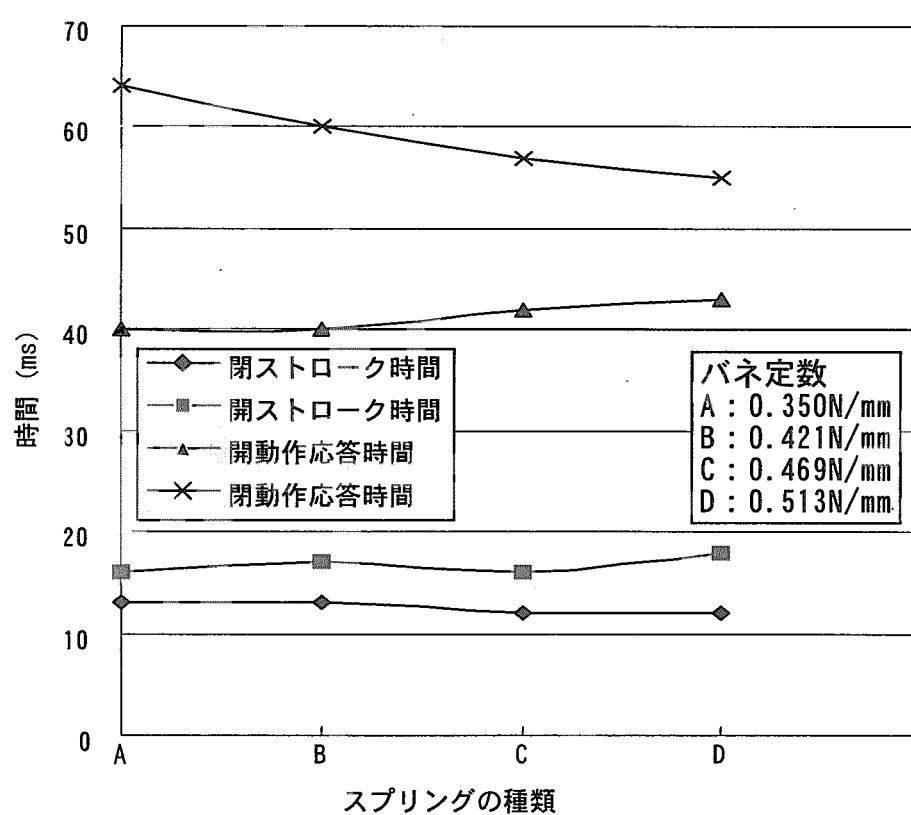
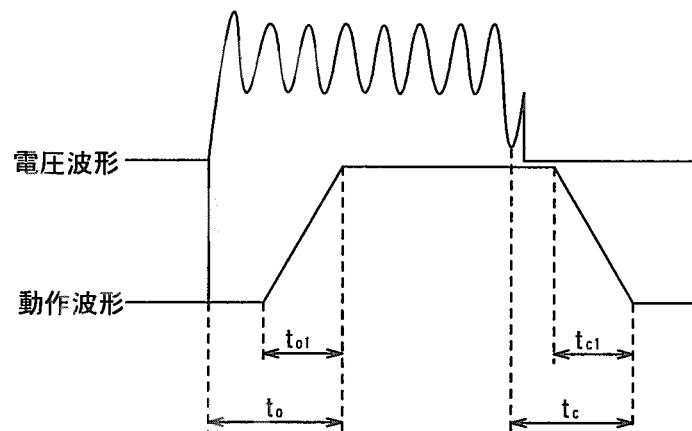
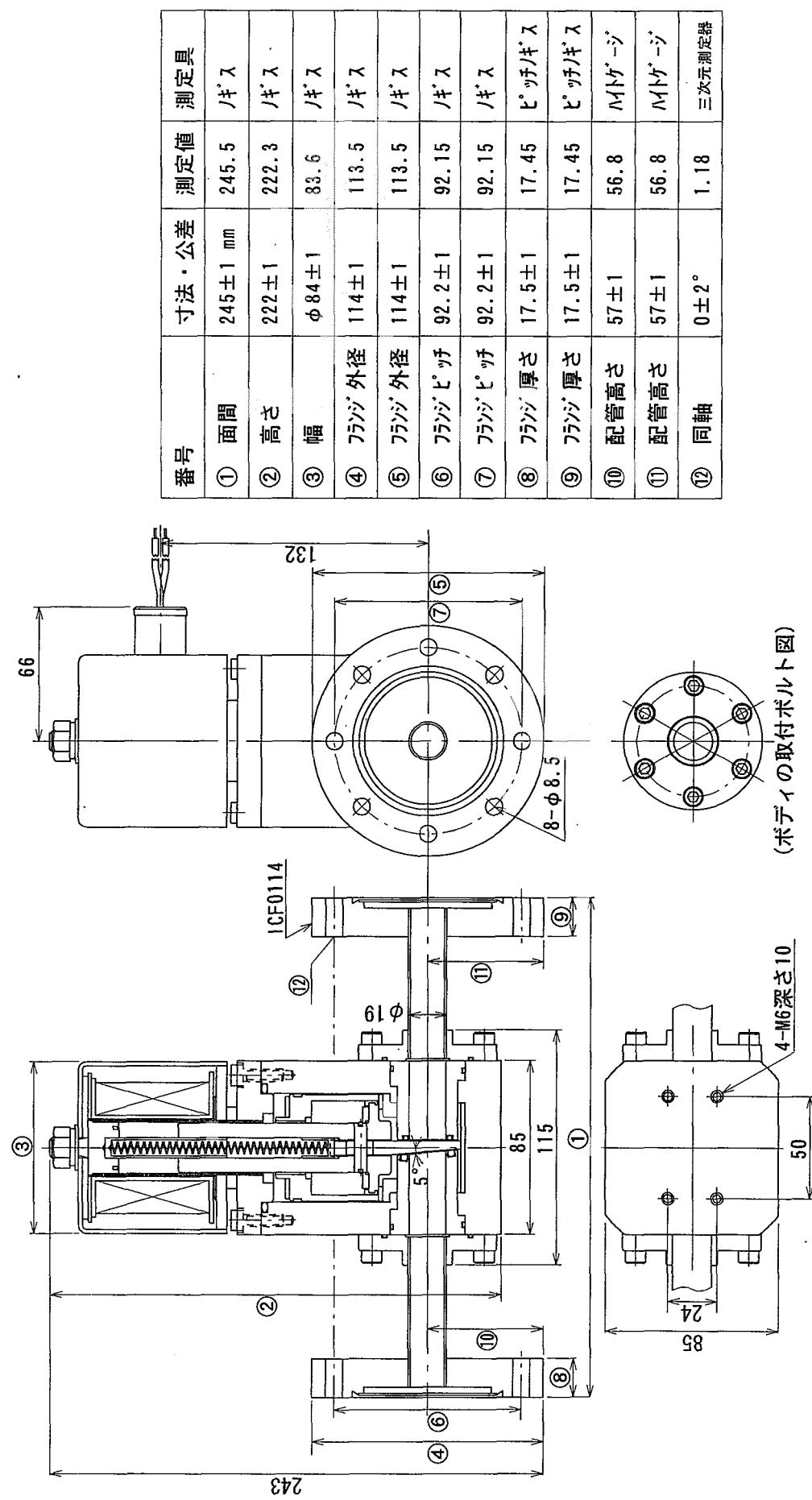
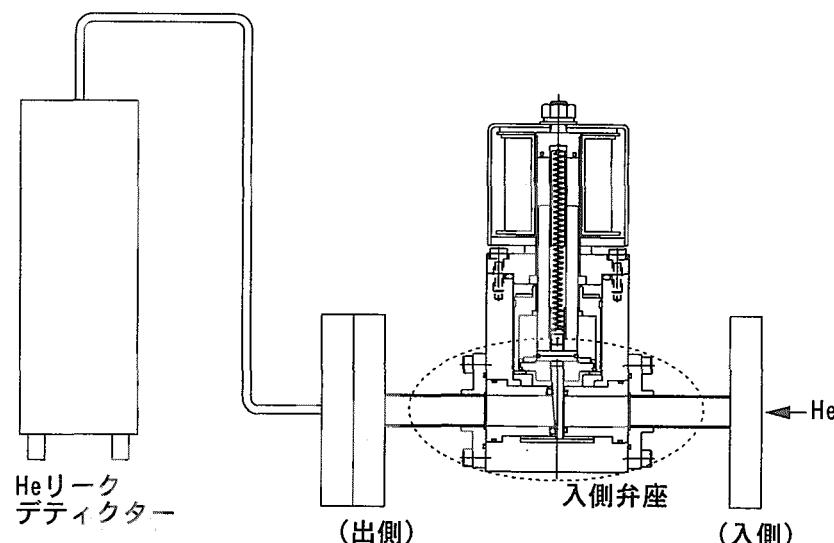
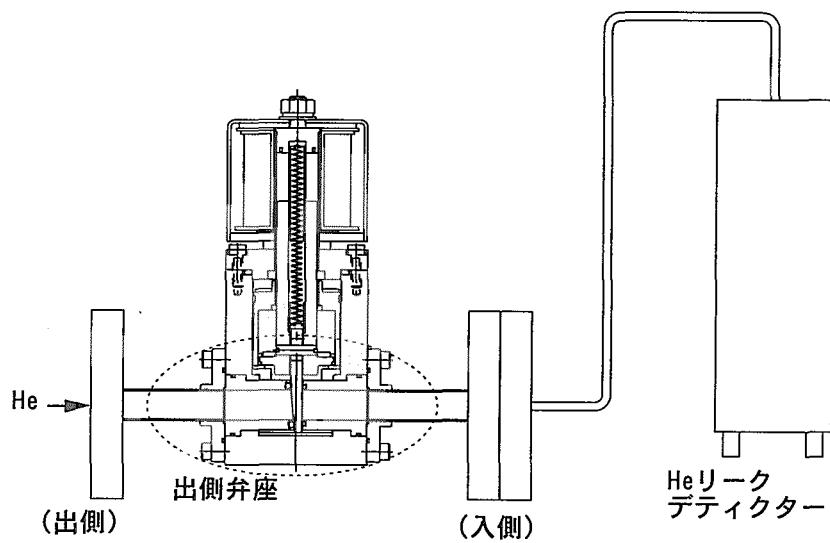


Fig. 3.6 スプリングの種類による動作時間特性

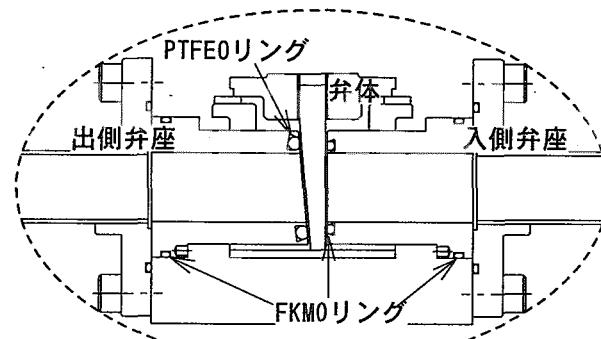




(a) 入側弁座シートリーク



(b) 出側弁座シートリーク



(c) 弁座シール部

Fig. 4.2 シートリーク試験図

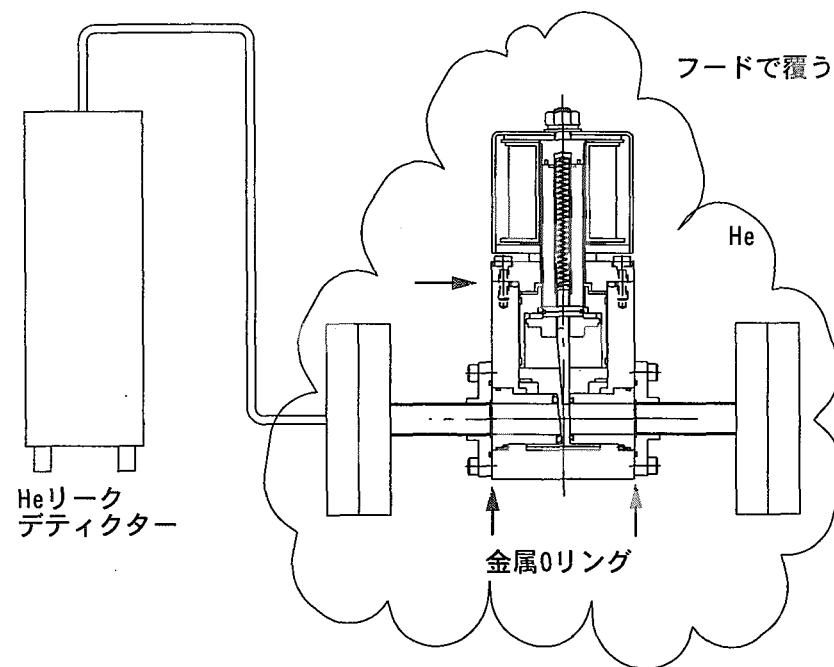


Fig. 4.3 缶体リーク試験図

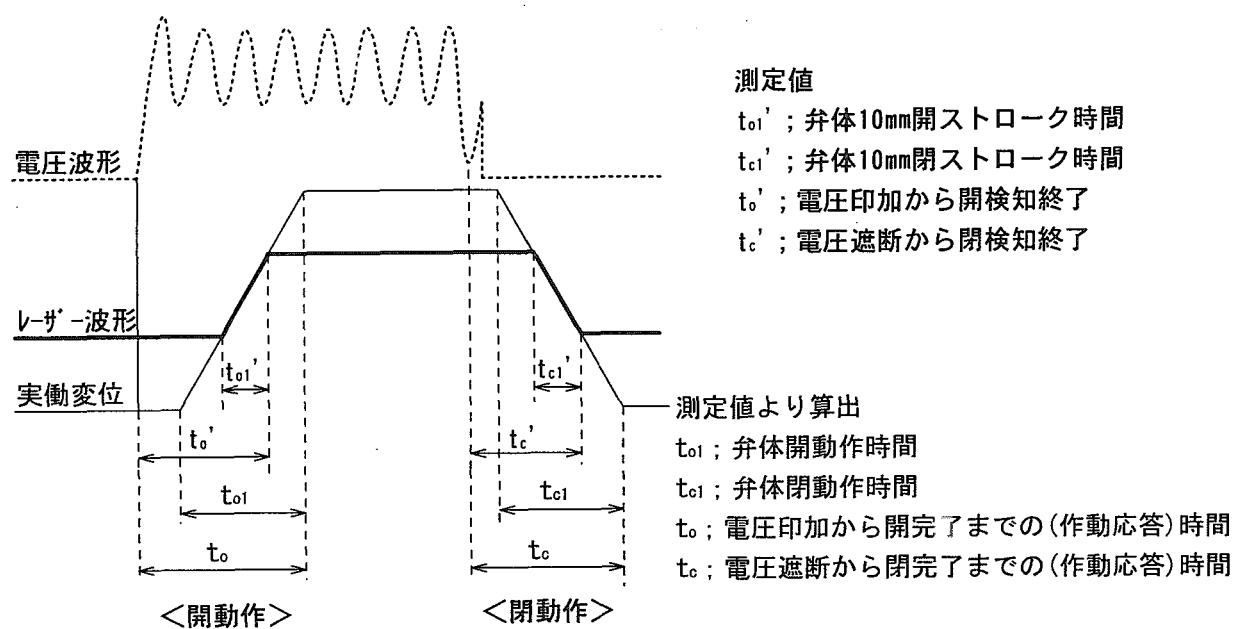


Fig. 4.4 電圧、レーザーの実働波形図

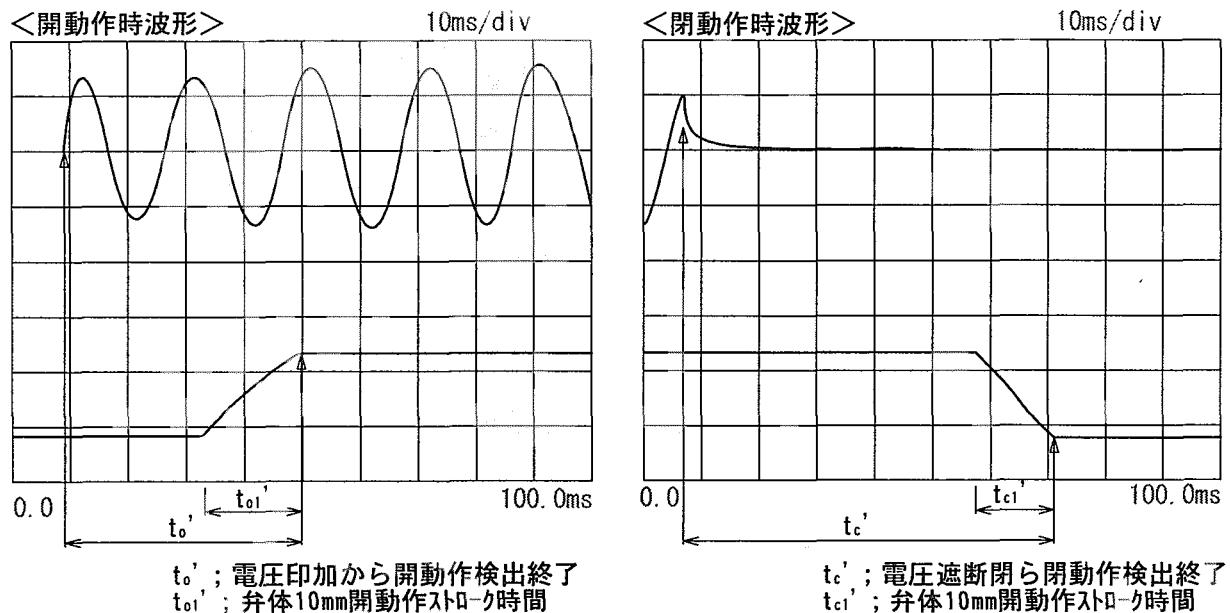
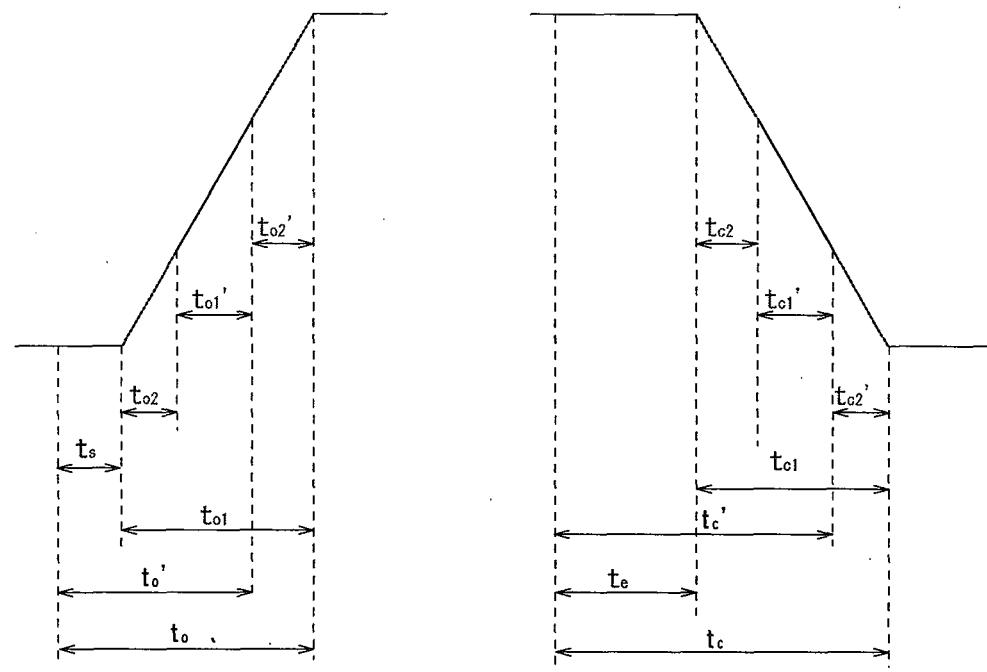


Fig. 4.5 電圧及びレーザーの出力波形
 (上：電圧波形 下：レーザー出力波形)



開動作弁体ストローク距離

$$\begin{aligned} &= c+b+r+a+d \\ &= 6.7+3.3+10+3.3+2.7=26\text{mm} \end{aligned}$$

弁体開動作ストローク時間

$$t_{o1}=26 \times t_{o1}' / 10=42.64\text{ms}$$

開動作プランジャー移動距離

$$\begin{aligned} &= c+b+r+a+d+e \\ &= 6.7+3.3+10+3.3+2.7+3=29\text{mm} \end{aligned}$$

開動作応答時間

$$\begin{aligned} t_o &= t_o' + (a+d) \times t_{o1}' / 10 \\ &= 40.2+(3.3+2.7) \times 1.64=50.04\text{ms} \end{aligned}$$

弁体開動作遅れ時間

$$t_s=t_o-t_{o1}=7.4\text{ms}$$

(a) 開動作

閉動作弁体ストローク距離

$$=2.7+3.3+10+3.3+6.7=26\text{mm}$$

弁体閉動作ストローク時間

$$t_{c1}=26 \times t_{c1}' / 10=33.28\text{ms}$$

閉動作プランジャー移動距離

$$=2.7+3.3+10+3.3+6.7+3=29\text{mm}$$

閉動作応答時間

$$\begin{aligned} t_c &= t_c' + (b+c+e) t_{c1}' / 10 \\ &= 64.6+(3.3+6.7) \times 1.28=77.4\text{ms} \end{aligned}$$

弁体閉動作遅れ時間

$$t_e=t_c-t_{c1}=44.12\text{ms}$$

(b) 閉動作

Fig. 4.6 高速動作ゲートバルブの動作時間
(10mmストローク時間による換算値)

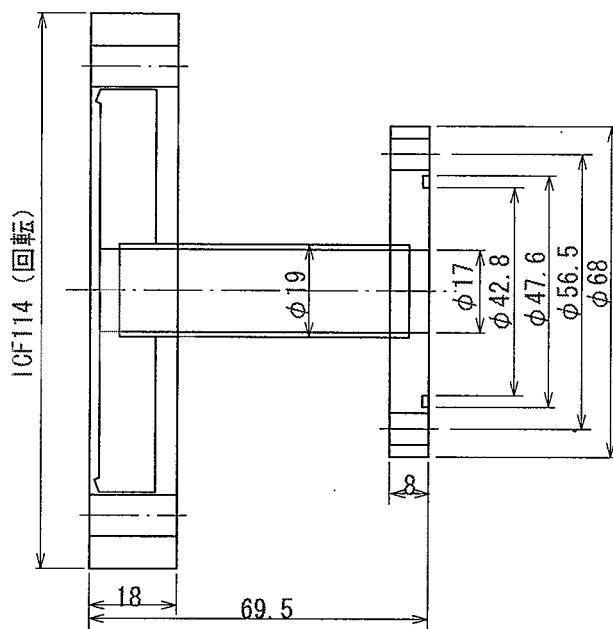


Fig. 5.1 出側フランジ構造
(単位 ; mm)

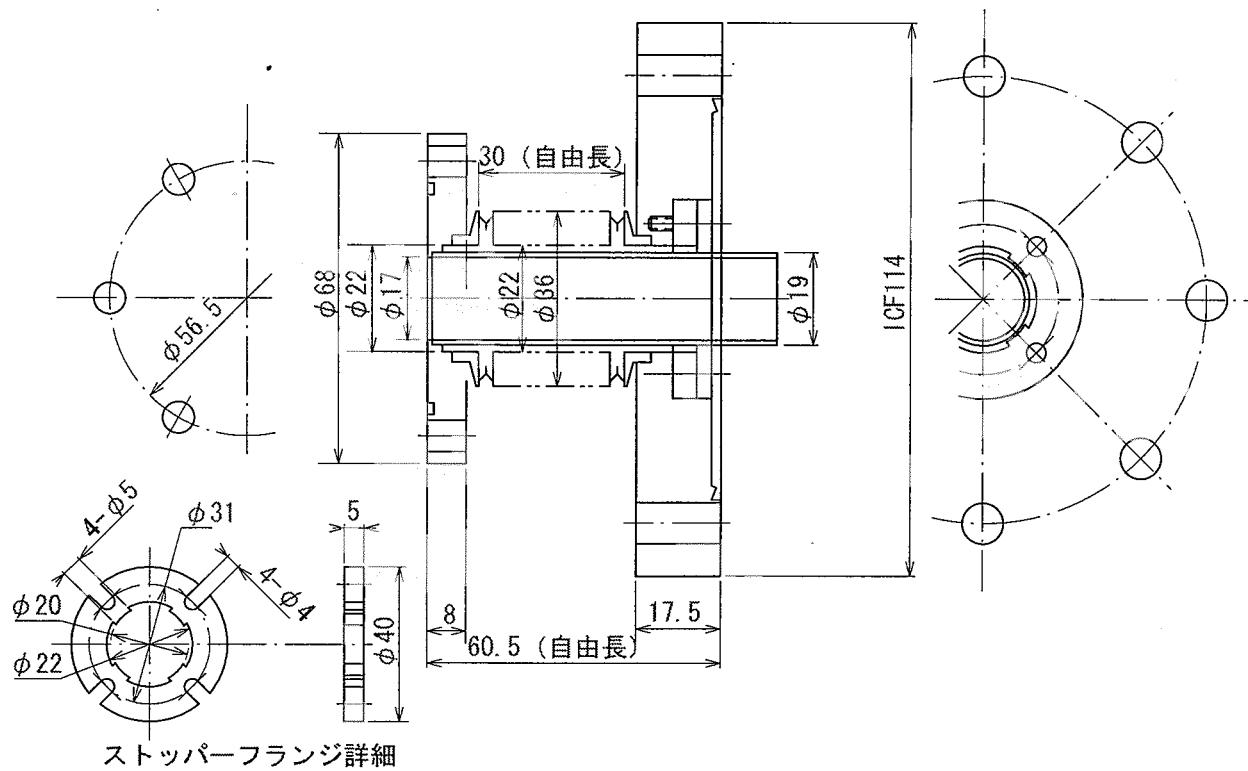


Fig. 5.2 入側フランジ構造
(単位 ; mm)

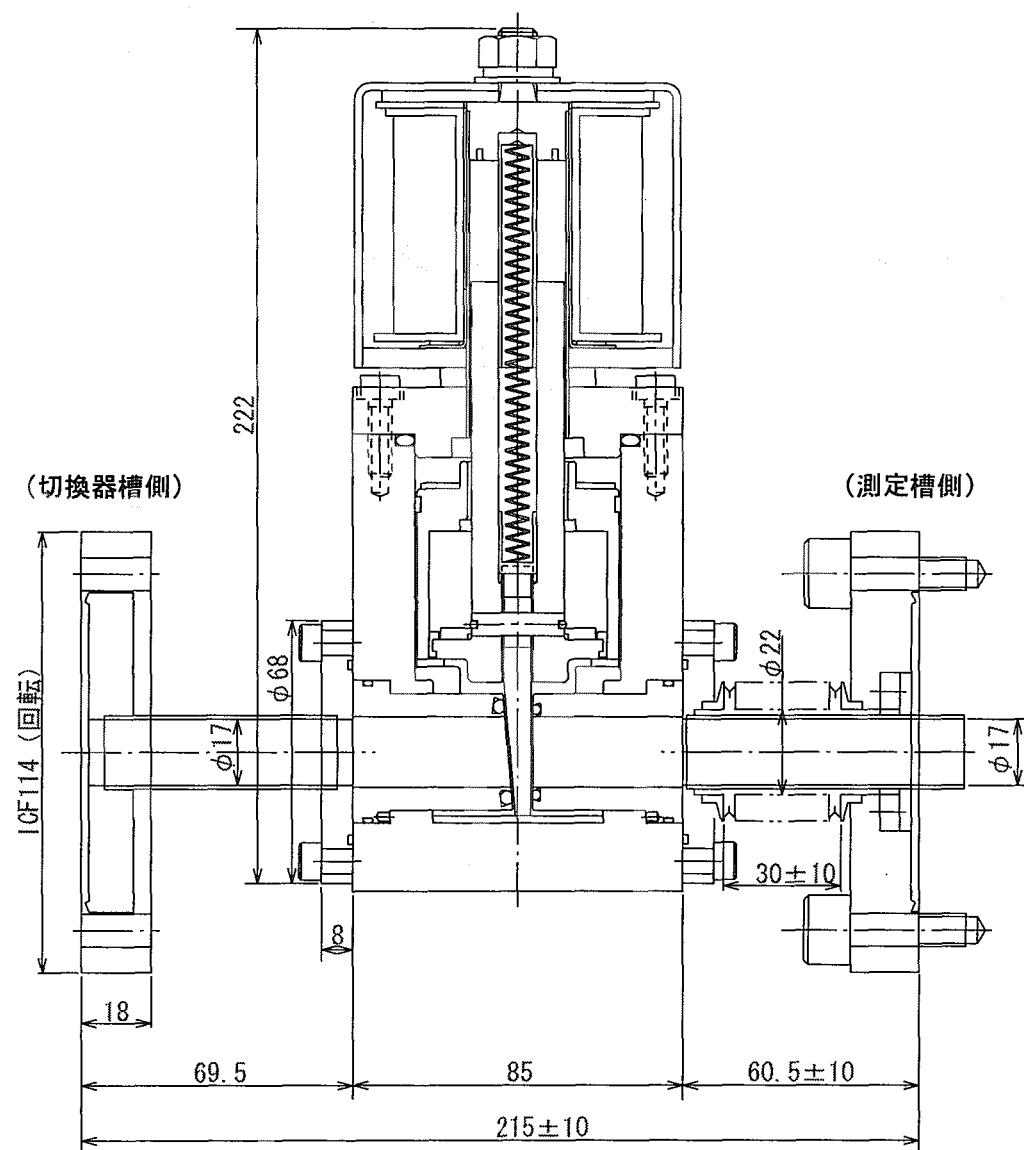
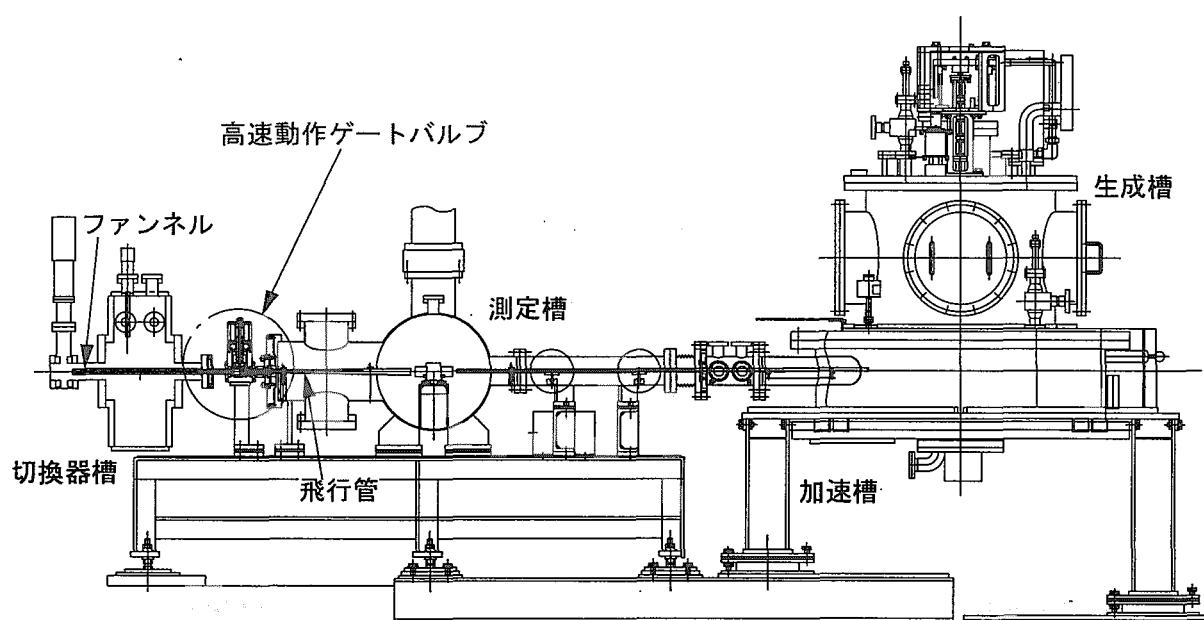
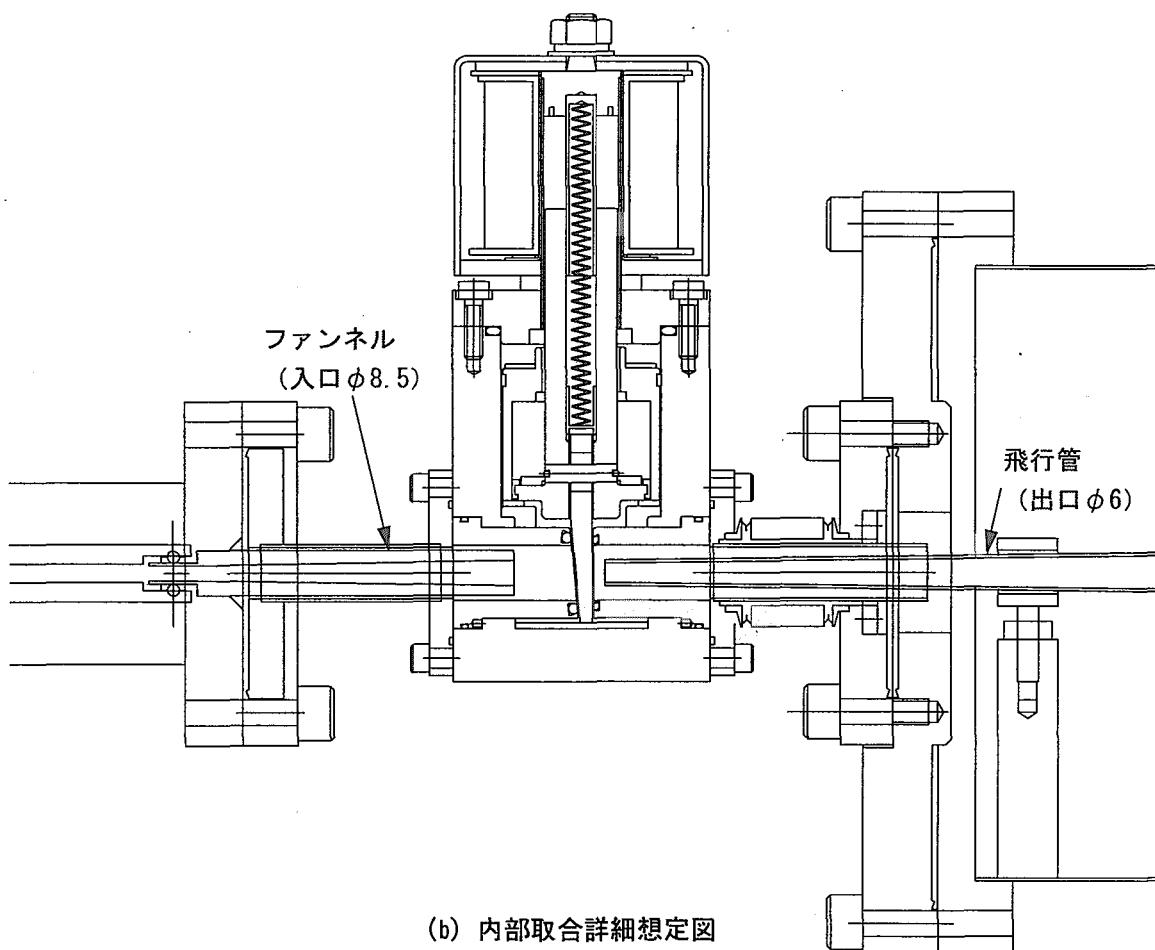


Fig. 5.3 組込対策後の高速動作ゲートバルブの外観図
(単位: mm)



(a) 高速動作ゲートバルブの設置位置



(b) 内部取合詳細想定図

Fig. 5.4 高速動作ゲートバルブの設置図

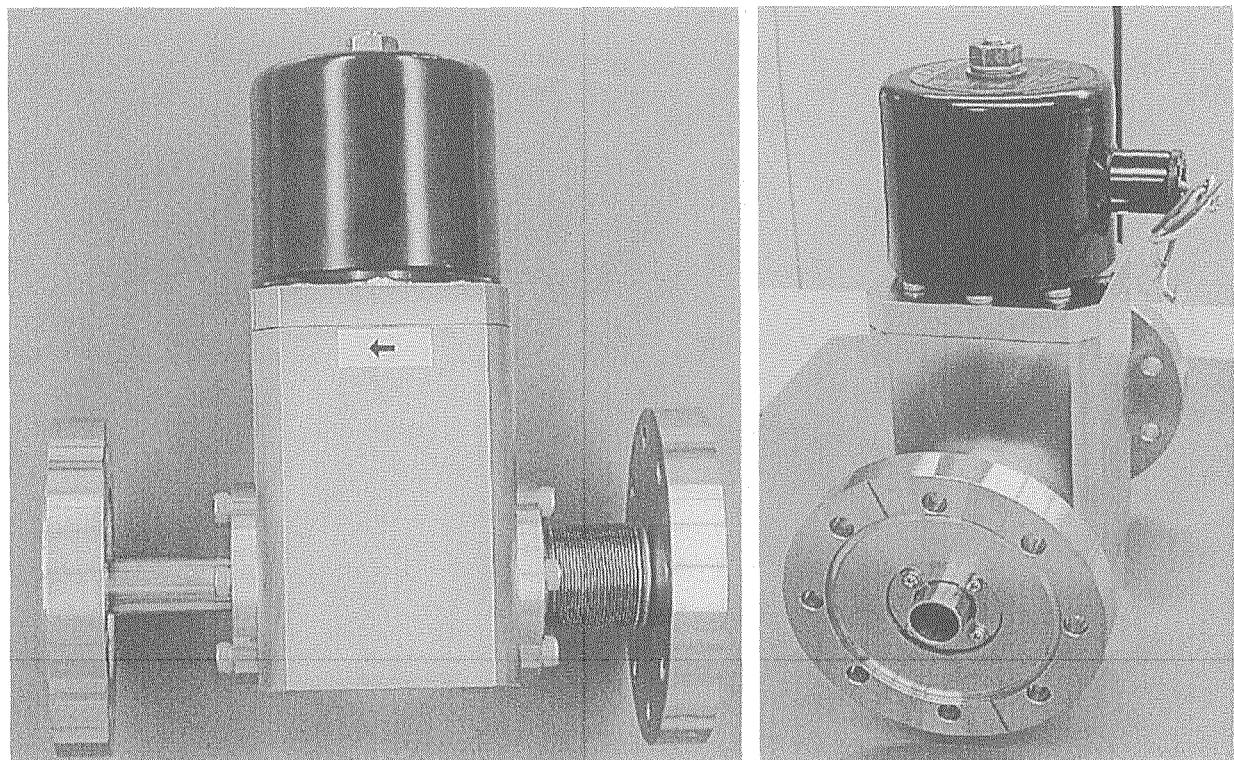


Photo 5.1 組込対策後の高速動作ゲートバルブ
(←はペレット飛行方向を示す)

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
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アーディ	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²
セルシウス温度	ヘンリー	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	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	アト	a

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(注)

- 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。
- 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省略した。
- 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。
- 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	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P}(\text{ポアズ})(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

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

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
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 cal = 4.18605 J(計量法) = 4.184 J(熱化学) = 4.1855 J(15 °C) = 4.1868 J(国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		
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		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

高速動作ゲートバルブの開発



古紙配合率100%