JAEA-Technology 2015-041 DOI:10.11484/jaea-technology-2015-041



JT-60SAの計測ポートプラグ観測窓保護用 シャッターの真空中動作試験

Vacuum Operation Test for Optical Window Protective Shutters of JT-60SA Diagnostic Port-plugs

> 石仙 茂晴 吉田 麻衣子 東條 寬 Shigeharu KOKUSEN Maiko YOSHIDA and Hiroshi TOJO

> > 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

Department of Advanced Plasma Research Naka Fusion Institute Sector of Fusion Research and Development February 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

JT-60SAの計測ポートプラグ観測窓保護用シャッターの真空中動作試験

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

石仙 茂晴*、吉田 麻衣子、東條 寬+

(2015年12月2日 受理)

JT-60SA のプラズマ計測に利用されるポートプラグの観測窓の前面には、放電洗浄や調整放 電時の蒸着膜形成などによる窓の汚損を防ぐため、シャッターが設置される。これまで2つの タイプのシャッターを設計してきた。一つは軽いシャッター板(0.5 kg)を駆動する回転式シャッ ターであり、もう一つは重いシャッター板 (3 kg)を駆動する上下動式シャッターである。両シ ャッターとも真空中で動作することから、摺動部の摩擦係数が増加して動作不良や機器の損壊 を生じる可能性がある。ここでは、シャッターの開閉機構を模擬する試験機を製作し、これを 真空中で繰返し動作させる試験を行って、耐久性、摺動部の摩耗状態、摩擦係数の変化を調査 するとともに、現開閉機構の設計の妥当性について評価を行った。軽いシャッター板を駆動す る回転式シャッターは、実機の想定開閉回数分(4,000回)の繰返し動作に耐え、設計が妥当であ ることを確認した。一方、重いシャッター板を駆動する上下動式シャッターは、摺動部の摩擦 係数が増加して試験機の駆動が困難になり、摺動部品の素材を摩擦係数の増加を抑えるものに するか、あるいは構造を軸棒とベアリングを組合わせたプーリ方式にして、摺動部を無くす必 要があることが分かった。上下動式シャッターの開閉機構を模擬する試験機により行った、大 気中および真空中での摺動回数に対する摩擦係数の変化の調査では、総じて摺動を繰返すと摩 擦係数が増加する傾向を示し、摩擦係数の最大,最小値は、大気中が 2.5, 0.4、真空中が 4.5, 1.3 の結果を得た。

那珂核融合研究所:〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

⁺ ITER プロジェクト部

[※] 技術開発協力員

Vacuum Operation Test for Optical Window Protective Shutters of JT-60SA Diagnostic Port-plugs

Shigeharu KOKUSEN*, Maiko YOSHIDA and Hiroshi TOJO+

Department of Advanced Plasma Research Naka Fusion Institute Sector of Fusion Research and Development Japan Atomic Energy Agency Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received December 2, 2015)

Shutters will be installed in front of vacuum windows of some diagnostics in JT-60SA to avoid deposition of impurity onto the vacuum window during wall cleaning and plasma conditioning. Two types of shutter systems had been designed. One has a light shutter (0.5 kg) with rotary motion in vacuum. Another has a heavy shutter (3 kg) with vertical motion in vacuum. For the both types, malfunction due to increase of friction coefficients of the sliding parts in vacuum is concerned. In the present paper, Durability, abrasion and friction coefficient of the sliding parts has been investigated and the shutter designs have been validated. The light shutter with rotary motion successfully rotated required times (4000 times), and the design was validated. On the other hand, for the heavy shutter with vertical motion, the test could not be carried out due to the large friction of the sliding parts. This result suggests that we should change the material of the sliding parts to reduce the friction or change the design from the sliding structure to other ones such as a structure using pulleys and bearings. In the test of the heavy shutter with vertical motion, the friction coefficient increased from 1.3 to 4.5 in the vacuum chamber and from 0.4 to 2.5 in the air.

Keywords : JT-60SA, Diagnostic, Vacuum Window, Shutter, Coefficients of Friction,

⁺ Department of ITER Project

X Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. ポートプラグとシャッターの構造	2
 シャッター動作試験方法	2
3.1 回転式シャッター試験	2
3.2 上下動式シャッター試験	3
4. シャッター開閉機構の動作試験結果および考察	4
4.1 回転式シャッターの耐久性	4
4.2 回転式シャッターの摺動部の摩耗	4
4.3 上下動式シャッターのワイヤーロープとガイドの摩擦係数	5
4.4 上下動式シャッターの耐久性	6
5. 結 論	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1.	Introduction	1
2.	Structures of Port-plug and Shutter	2
3.	Arrangement of Operation Test for Shutters	2
3	.1 Test of Rotary Motion Shutter	2
3	.2 Test of Vertical Motion Shutter	3
4.	Results and Discussion	4
4	.1 Durability of Rotary Motion Shutter	4
4	.2 Abrasion of Sliding Part of Rotary Motion Shutter	4
4	.3 Friction Coefficient of Wire Rope and Guide of Vertical Motion Shutter	5
4	.4 Durability of Vertical Motion Shutter	6
5.	Conclusion	6
Ack	nowledgements	7
Ref	erences	7

This is a blank page.

1. はじめに

日欧が実施する核融合研究の早期実現に向けた幅広いアプローチ活動として、超伝導コイル を用いた大型トカマク装置 JT-60SA の建設が行われている ¹⁾。JT-60SA の真空容器内にプラズ マを囲むように安定化板が設置され、真空容器外に超伝導のポロイダル磁場コイルとトロイダ ル磁場コイルが設置される。これらは、超伝導コイルを極低温に保持するためのクライオスタ ットで囲まれている。プラズマ表面からクライオスタットまでの距離は約 3,000mm あるため、 プラズマから近い位置(安定化板の直近)に視点を置く計測装置は、計測装置に適合した形状と 真空窓を有するポートプラグを挿入し、ポートプラグの内部(大気中)に光学機器や検出器とい った計測機器を設置する。

プラズマから放射される光を計測する装置にとって、真空窓の透過率低下は正確な計測を行 う上での大きな障害になることから、真空窓のプラズマ側前面にシャッターを装備し、放電洗 浄などの計測休止中これを閉じて蒸着膜形成などによる汚損を防ぐことにしている。シャッタ ーは、大気側に設置するアクチュエータにより真空中に設置する部品(シャフトやワイヤー等) に直線的な動力を与え、摺動部を介してシャッター板を開閉する。また、シャッターの用途か ら設置場所はプラズマの直近となるため、材料には非磁性、耐熱性、耐放射線性、真空中での 低放出ガス性を兼備したオーステナイト系ステンレス鋼を使用することが考えられている。

シャッターの摺動部にステンレス鋼を用いた場合、真空中での金属部品同士の摩擦係数の増加は見落とせない観点である。固体潤滑剤を使用して摩擦係数を下げる方法もあるが、固体潤滑剤は摩擦とともに必ず摩耗を生じて寿命に限りがあり、片当たりにより皮膜が摩耗すると寿命が激減する場合がある。また、運転環境により潤滑性能が大幅に異なる場合があることから、取扱いやメンテナンス時期の予測が難しいといった欠点が存在する³⁾。JT-60SA でのシャッターを含むポートプラグのメンテナンスは、数年間隔の JT-60SA 全体の定期点検期間に行うことになるため、本シャッターに固体潤滑剤を使用することは適切ではない。そこで、固体潤滑剤を使用しないシャッターの開閉機構を模擬する試験機を製作し、実機の想定開閉回数分シャッターを真空中で開閉させる試験を行って、耐久性、摺動部の摩耗状態、摩擦係数の変化を調査し、開閉機構の設計の妥当性について評価を行った。

2. ポートプラグとシャッターの構造

JT-60SA に設置を予定しているポートプラグのうち、トムソン散乱計測装置と荷電交換分光 計測装置で共用するタイプの構造を図 1(a)、主要寸法を図 1(b)に示す。角管のポートプラグを 真空容器のポートに挿入し、長方形のフランジでクライオスタットポートのフランジと真空を 取り合う。このポートプラグは、先端上方に配置する円筒管の部分を荷電交換分光計測装置が 使用し、角管の約中央から下方部分をトムソン散乱計測装置が使用する。各々、プラズマを見 込む位置に真空窓とシャッターを設置する。

シャッターの方式は、φ100mm の真空窓を設置する荷電交換分光計測装置に適用する回転式 シャッターと、φ340mm の真空窓を設置するトムソン散乱計測装置に適用する上下動式シャッ ターの2式である。回転式シャッター開閉機構の概念を図2(a)、シャッター開閉状態を図2(b) に示す。回転式シャッターは、シャッター板の軸受をポートプラグに設置する軸棒にはめ、こ れを中心に回転させて開閉する。上下動式シャッター開閉機構の概念を図3(a)、シャッター開 閉状態を図3(b)に示す。上下動式シャッターは、シャッター板をポートプラグに設置するガイ ドレールに沿って上下動させて開閉する。いずれのシャッターも、大気側に設置するエアシリ ンダの往復運動を、ベローズ付きフランジを介して真空側に設置する開閉機構に伝達しシャッ ター板を駆動する。

実機におけるシャッターのメンテナンス間隔を5年とし、年間のシャッター開閉回数は800 回 ((4 回/日)×(200 日/年))を想定した場合、真空側のメンテナンスが無い条件で4,000 回 (5年×(800 回/年))のシャッター開閉動作が求められる。

3. シャッター動作試験方法

回転式と上下動式シャッターの開閉機構を模擬する試験機を製作し、これらを真空チャンバーに取付けて、以下の動作試験を行った。

3.1 回転式シャッター試験

回転式シャッター試験機の構造を図 4(a)、主要寸法を図 4(b)、主な仕様を表1に示す。真空 チャンバーと試験機を接続するフランジ(VF150)に取付けた 2 つのベローズを貫くロッド各々 に、エアシリンダ(CKD 製 SSD-LF-25-21)を接続、これらに圧縮空気を交互に供給して得られる 交互往復運動を、ワイヤーロープとガイドでシャッター板(0.5 kg)に変向伝達し駆動する。真空 中で摺動する機械要素部品は、軸受と軸棒、シャッター板と脱落防止板、ワイヤーロープとガ イドで、これらは交換可能な構造になっている。軸受は3種(軸棒と同素材(SUS304)、黄銅製ブ ッシング、ベアリング(Koyo 製 SE626ZZSTM3C4 YS))を、軸棒、シャッター板、脱落防止板、 ガイドは、摺動部の表面粗さを変えた2種(Ra1.6, Ra0.2)を用意して、機械要素部品の組合せを 変えた3パターンの試験を行い、摺動性と摩耗状態を比較した。各試験パターンの機械要素部 品の組合せを表2に示す。試験パターン1は、軸受と軸棒が同素材(SUS304)のため摺動性は劣 るが構造を簡単にできる利点があり、摺動性が使用に十分であるか評価した。試験パターン2 は、ベアリングの耐久性を評価した。試験パターン3は、黄銅製ブッシングによる良好な摺動 性と構造の簡素化の両立を評価した。

試験は、先ず真空中で 4,000 回の開閉動作を行って耐久性を調査してから、試験機を一旦分 解して摺動部の摩耗状態を目視により調査した。その後、再度試験機を組上げて追加 4,000 回 (合計 8,000 回)の開閉動作と目視調査を行った。試験パターン2は、軸受にベアリングを使用し 摺動性が優れることから、前段 4,000 開閉動作後の分解と目視調査は省略し、一度に 8,000 回 の開閉動作を行っている。

3.2 上下動式シャッター試験

上下動式シャッター試験機の構造を図 5(a)、主要寸法を図 5(b)、主な仕様を表 3 に示す。真 空チャンバーと試験機を接続するフランジ(φ70CF)に取付けたベローズを貫くロッドに、エア シリンダ(CKD 製 SSD-LF-25-50)を接続、これに圧縮空気を供給して得られる往復運動をワイヤ ーロープとガイドでシャッター板の重量に相当する錘(3 kg)に変向伝達し駆動する。真空中で摺 動する機械要素部品はワイヤーロープとガイドで、これらは回転式シャッター試験機と同様に 交換可能な構造になっている。

本試験機は、支持構造が無い錘をワイヤーロープで吊るす構造のため、駆動する際に錘の全 重量がワイヤーロープとガイド間の荷重となって摺動摩擦力を生じる。このため、ワイヤーロ ープとガイド間の摺動摩擦力 Fi は、真空チャンバーを大気開放し内外に圧力差が無い状態で は、錘の吊上げ駆動に要する力 Fo(Atmosphere)の測定値から錘の荷重 W(3kgf≒29.4N)を引けば求め られ、

$$F_1 = F_{0(Atmosphere)} - W$$
(1)

真空チャンバーを減圧した真空状態では、錘の吊上げ駆動に要する力 Fo(Vacuum)の測定値から錘 の荷重 W と、ベローズが伸縮する方向の面に作用する大気の圧縮力 P(660mm²× 0.1N/mm²=66N)を引けば求められる。

$$F_1 = F_0(v_{acuum}) - W - P \tag{2}$$

また、摩擦係数μは、ワイヤーロープをガイドに押し付ける力(錘の荷重W)に対する摺動摩擦 力 F1の比であることから、次式により算出できる。

$$\mu = F_1 / W \tag{3}$$

試験は、先ず錘の吊上げ駆動に要する力の測定と、(3)式から摩擦係数を算出し、摺動回数に

対する吊上げ駆動力と摩擦係数の変化を調査した。その後、試験機を真空中で繰返し動作させ る耐久性の調査を行った。錘の吊上げ駆動に要する力の測定方法を図6に示す。測定器にはデ ジタルフォースゲージ(日本電産シンポ FGJN-50)を使用。これを、エアシリンダに替えてロッ ドに繋ぎ、ゲージを手で引いて錘が動き出した瞬間の測定値をピークホールド機能により保持 して読取った。測定中の真空チャンバー内の圧力は、大気開放または窒素充填による大気圧の 状態(10⁵Pa)から、真空状態(10⁻²~10⁻⁵Pa)の範囲で任意に設定し、各設定圧力で複数回(10~120回) の測定を行った。

4. シャッター開閉機構の動作試験結果および考察

4.1 回転式シャッターの耐久性

回転式シャッター試験機を真空中で 4,000 回開閉動作させた場合、全試験パターンで開始か ら数百回までの開閉動作中に軋み音の発生があり、試験パターン1のみ全過程を通してシャッ ター板の小刻みな振動が不規則に発生した。試験機を分解調査した後に行った追加 4,000 回の 開閉動作では、試験パターン1のみ前段の 4,000 回動作時と同様の軋み音の発生があった。し かし、観測されたこれらの現象によってシャッターの本質的な機能が阻害されることはなく、 試験では終始円滑に開閉動作を繰返したことから、回転式シャッターの耐久性は全試験パター ンの組合せで良好であると判断する。

4.2 回転式シャッターの摺動部の摩耗

前段 4,000 回と追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後に行った、摺動部の目視調査の結果を、 それぞれ図 7(a)~(i),図 8(a)~(n)に示す。軸受と軸棒間の摺動部は、表面粗さを Ra1.6 同士の組 合せとし、両部品の素材を同じ SUS304 にした試験パターン1 では、同素材金属部品の真空中 摺動によって凝着摩耗を生じ ³⁴⁰⁵⁾、双方に摺動方向に沿って同程度の筋状の傷がついた(図 7(a)(b),図 8(a)(b))。試験パターン2は、この部品間に摺動が無いため、軸受のベアリングと軸 棒のどちらにも損傷は無かった(図 8(f)(g))。表面粗さを Ra0.2 同士の組合せとし、軸棒の素材は SUS304、軸受の素材は被削性に優れる黄銅にした試験パターン3 では、硬質素材(SUS304)の表 面突起や摺動面に残留する硬質の粒子によって軟質素材(黄銅)の表面を傷つけるアブレシブ摩 耗(研削摩耗)を生じ³⁾⁵⁾、軸棒に比較的浅い擦傷、軸受には摺動方向に沿って比較的深い筋状の 傷がつき、軸棒表面には黄銅削粉の付着があった(図 7(f)(g),図 8(j)(k))。摺動部の表面粗さの違 いによる摩耗状態の比較は、各試験パターンで軸受の種類を変えているため、これを一概に比 較することはできないが、軸受の違いによる摺動性の優劣については、一般的な経験則に従い 試験パターン 2(ベアリング)→3(黄銅製ブッシング)→1(同素材(SUS304))の順で優れる結果が得 られた。本試験で使用したベアリングは、外輪、内輪、および玉の素材に、炭素含有量が多く、 焼入れー焼戻し処理によって高硬度を確保したマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C を使 用しており、これは強磁性体である。このため、磁場中で使用すると磁場を乱したり軸受の回 転トルクが大きく変動することがあるので、これらの点が問題にならない場合にのみ使用でき る。また、黄銅に含有する亜鉛は蒸気圧が高いことから、昇温時に真空装置を汚染することが あるので注意が必要である。よって、この場合は、黄銅に替えて無酸素銅や銅合金を使用する ことが望ましいが、銅は電気伝導率が高いことからプラズマディスラプション時に生じる電磁 力の増大に注意が必要であり、この点が問題にならない場合にのみ使用できる。

シャッター板と脱落防止板間の摺動部は、表面粗さ Ral.6 同士を組合せた試験パターン1お よび2、Ra0.2 同士を組合せた試験パターン3 に使用した全部品に、摺動方向に沿って浅い擦傷 がついた。摺動部の表面粗さの違いによる摩耗状態の比較は、試験パターン1(図 7(c)(d), 図 8(c)(d))と3(図 7(h)(i), 図 8(l)(m))に使用した部品は摺動面の全体に一様に傷がつき、試験パタ ーン2(図 8(h))に使用した部品には摺動面全体の傷の他に中央に集中して傷がついたことから、 表面粗さの違い(Ral.6 と Ra0.2)が摩耗状態に大きく影響することはないと考える。

ワイヤーロープとガイド間の摺動部は、ガイドの表面粗さを Ra1.6 にした試験パターン1 お よび 2、Ra0.2 にした試験パターン3 に使用した全てのワイヤーロープに素線切れを生じ、ガイ ドにはワイヤーロープの表面形状を倣って傷がついた。ワイヤーロープの素線切れの例を図 9 に示す。4,000 回の開閉動作によって生じたワイヤーロープの素線切れの最多本数は、試験パタ ーン3の10本であり、これは全素線数133本の7.5%に相当する。この結果から、仮にワイヤ ーロープの引張強度と素線数に比例関係があるとすれば、破断荷重に対して1.1 以上の安全率 をとってワイヤーロープを選定すれば、4,000 回の開閉動作によって破断することはないとで きる。しかし、引張強度と素線数の関係は前述のように単純ではないと推察されるため、ワイ ヤーロープの安全率は、本試験機の設計仕様に準拠して2.5 以上を目安に選定することが望ま しい。摺動部の表面粗さの違いによる摩耗状態の比較は、試験パターン1と2を通して同一物 を使用したガイド(図7(e)図8(e)(i))と、試験パターン3のみに使用したガイド(図8(n))についた 傷に明確な差がなかったことから、シャッター板と脱落防止板間の摺動部同様、表面粗さの違 い(Ra1.6とRa0.2)が摩耗状態に大きく影響することはないと考える。

4.3 上下動式シャッターのワイヤーロープとガイドの摩擦係数

上下動式シャッター試験機による錘の吊上げ駆動に要した力の測定結果を表4に、(1)(2)式により算出した摺動摩擦力F₁と、(3)式により算出した摩擦係数 µ を表5に示す。真空チャンバー内を大気圧の状態にして測定した摺動摩擦力F₁の最大,最小値は74.2N,11.2N、真空状態にした測定では132.3N,39.2Nである。また、摩擦係数 µ の値は、大気圧状態での最大,最小値が2.5,0.4、真空状態では4.5,1.3となり、この結果は、真空中で摺動する金属部品の摩擦係数が大気中に比べ増加するという一般的な経験則に従っている。

真空チャンバー内を真空状態にして錘の吊上げ駆動に要する力 F_{0(Vacuum)}と、摩擦係数 μ との 関係は(2)(3)式から次式で表せ、

$$F_{0(Vacuum)} = \mu \cdot W + W + P \tag{4}$$

摩擦係数μを1とした場合、錘の吊上げ駆動に要する力は124.8N(=1×29.4N+29.4N+66N)となる。真空チャンバー内を真空状態にして、実際に測定した錘の吊上げ駆動に要する力の最大値は227.7N(表4)で、摩擦係数μを1とした場合の算出値の1.8倍(=227.7N/124.8N)に相当する。 この結果と、シャッターの駆動に用いるエアシリンダ(微速形)が安定動作するためのメーカー 推奨負荷率≦50%から、エアシリンダは摩擦係数μを1とした時の予想荷重に対して負荷率が 27%(=124.8N/227.7N×50%)以下になる機種を選定し、ワイヤーロープの安全率は1.8以上と って選定する必要があることが分かる。

真空チャンバー内を大気圧の状態にして測定した場合でも、摺動を繰返すと摩擦係数が増加 する傾向を示したことから、同素材の金属部品を摺動させれば、大気中であっても摩耗の度合 いによって真空中のような無潤滑の状態となり、結果、摩擦係数を増加させるのだと考えられ る。

4.4 上下動式シャッターの耐久性

真空中で繰返し錘を上下動させる耐久試験は、10回程度の上下動の繰返しで摺動部にスティ ックスリップ(凝着とすべり)が発生して動作が不安定になり、錘を駆動することが困難となっ たため試験を中断した。原因は、試験機に用意したエアシリンダの推力不足である。エアシリ ンダのピストンを大径化し推力を増せば駆動は可能であるが、推力を増した場合、シャッター を構成する機械要素部品の剛性を高めることも必要になる。また、エアシリンダの大径化は、 機器の設置に必要な占有空間の拡張も必要になり、有限であるポートプラグ内空間の有効利用 を考慮すれば、この方法は合理的ではない。よって、このシャッターの場合は、ガイドの素材 をワイヤーロープの素材(SUS304)と凝着しにくい異種金属にするか、4.2節で示したベアリン グの使用条件に適合するのであれば、構造を軸棒とベアリングを組合せたプーリ方式に変更し て摺動部を無くすことが望ましい。

以上のことからもエアシリンダの機種選定は、摩擦係数の増加を十分考慮し、4.3節で示した 選定基準に従って行う必要があることが分かる。また、上下動式シャッター開閉機構のように、 駆動対象物の重量が重く摺動摩擦力に作用する垂直抗力(押し付け力)が大きい機器の場合は、 同素材金属部品の摺動を避けるべきである。

5. 結 論

真空中において、固体潤滑剤を使用しないシャッター開閉機構を設置・運用するにあたり、 回転式および上下動式シャッター試験機による動作試験を行って、以下の結論を得た。

回転式シャッター(シャッター板の重量 0.5 kg)は、試験機が無メンテナンスで真空中での 4,000 回開閉動作に耐え、また、動作後の摺動部の摩耗状態も良好であった。このことから、 現開閉機構の設計は妥当であると判断する。軸受は、素材に強磁性体を使用していることが 問題にならない場合はベアリングを、高導電性が問題にならない場合は無酸素銅や銅合金の ブッシングを使用できる。

上下動式シャッターは、開閉機構で駆動するシャッター板の重量が3kgと重いこと、また、 摺動の繰返しによって摩擦係数が大きく増加したことから、エアシリンダの推力が不足し耐 久試験を行うことができなかった。この事象を解決するには、ガイドの素材をワイヤーロー プと凝着しにくい異種金属にして摩擦係数の増加を抑制するか、構造を軸棒とベアリングを 組合わせたプーリ方式に変更して摺動部を無くすことが望ましい。

実機シャッターの摺動部および開閉機構は、プラズマからの放射を避ける配置とするか、 保護(遮熱)カバー等で囲うことを考えている。このため、本試験は常温(20℃前後)の環境下に おいて行ったが、摺動部および開閉機構が高温になることが想定される場合は、別途、昇温 した状態での試験を行うことが必要である。

謝 辞

本試験の遂行と報告書を纏めるにあたり、ご助力頂きました先進プラズマ実験グループの皆様に深く感謝いたします。また、本試験にあたり、ご指導と激励を頂いた、鎌田 裕 先進プラズマ研究部部長、久保 博孝 先進プラズマ実験グループリーダー、伊丹 潔 ITER 計測開発グル ープリーダーに深く感謝いたします。

参考文献

- Y.Kamada et al. : "Plasma regimes and research goals of JT-60SA towards ITER and DEMO", Nuclear Fusion, <u>51</u>, 073011 (2011).
- 2) 鈴木 峰男,小原 新吾,野木 高: "宇宙トライボロジーの現状と課題",表面技術,<u>57</u>, (2006), pp.630-635.
- 広中 清一郎: "図解入門 よくわかる最新 摩擦と摩耗の基本と仕組み", 秀和システム, (2010), pp.85-90.
- 加藤 治: "技術解説 金属材料の焼付き現象", FUJICO Technical Report, <u>3</u>, (1995), pp.34-38.
- 5) 横山 良彦, 渡辺 孝一: "摩擦·摩耗", NACHI-BUSINESS news Vol.9D2(2005), available from http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/tec/pdf/09d2.pdf (accessed 2013-11-07).



図 1(a) ポートプラグの構造 (トムソン散乱計測装置,荷電交換分光計測装置共用タイプ)



図 1(b) ポートプラグの主要寸法

(トムソン散乱計測装置,荷電交換分光計測装置共用タイプ)



図 2(a) 回転式シャッター開閉機構の概念



シャッター「閉」状態



図 2(b) 回転式シャッター開閉状態



図 3(a) 上下動式シャッター開閉機構の概念



図 3(b) 上下動式シャッターの開閉状態







図4(a) 回転式シャッター試験機の構造



図 4(b) 回転式シャッター試験機の主要寸法

シャッター	-板重量[kg]	0.59		
	シャッター板	Ra0.2/1.6 各1製作		
摺動部	軸 棒	<u>↑</u>		
表面粗さ	脱落防止板	<u>↑</u>		
	ガイド	Ra0.2/1.6 各2製作		
		SUS304(軸棒と同素材)		
		*はめあい公差H9/e9		
軸 受		黄銅製ブッシング		
		ベアリング		
		(Koyo製 SE626ZZSTM3C4 YS)		
	メーカー	SINYO		
	型番	SC-105 KS ^β ンシφ5.2- [±] -νφ5.2		
ワイヤー	素材	SUS304		
ロープ	線 径[mm]	1.05		
	素線数[本]	7×19=133		
	破断荷重[kg]	101		
	メーカー	CKD		
TP	型番	SSD-LF-25-21		
シリンダ	チューブ径[mm]	25		
~ / ~ /	推力 押/引[N]	338 / 260		
	*圧空=0.69[MPa]	556/ 200		

表1 回転式シャッター試験機の主な仕様

表2 各試験パターンの機械要素部品の組合せ

		試験パターン1	試験パターン2	試験パターン3
試験のねらい		・摺動性→劣 ・摺動性が使用に十分であるか	・摺動性→優 ・ベアリングの耐久性	 ・摺動性→中 ・良好な摺動性と構造の簡素化の 両立
	軸 受	SUS304(Ra1.6) *軸棒と同素材	6) ベアリング 材 (koyo製 SE626ZZSTM3C4 YS) 黄銅製ブッシング(Ra0.2	
	軸棒	Ral.6		Ra0.2
1771-151 -1411	シャッター板	\uparrow	Ra1.6	↑ (
習動部の表面知さ	脱落防止板A	↑ (*シャッター板に固定	↑ (
衣面祖で	脱落防止板B	↑	Ra1.6	↑ (
	ガイド	↑	*試験パターン1と2を通して使用	↑ (

(回転式シャッター)





図 5(a) 上下動式シャッター試験機の構造



単位:mm

図 5(b) 上下動式シャッター試験機の主要寸法

錘の重量[k	[g]	3		
ガイド摺動	前の表面粗さ	Ra0.2/1.6 各4製作		
	メーカー	SINYO		
	型 番	SC-105 KSβンシφ5.2-エイトロックφ1.0		
ワイヤー	素材	SUS304		
ロープ	線 径[mm]	1.05		
	素線数[本]	7×19=133		
	破断荷重[kg]	101		
	メーカー	CKD		
エア	型番	SSD-LF-25-50		
シリンダ	チューブ径[mm]	25		
	推力 押/引[N] *圧空=0.69[MPa]	338/260		

表3 上下動式シャッター試験機の主な仕様



図6 錘の吊上げ駆動に要する力の測定方法



図 7(a) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 軸受(Ral.6)



図 7(b) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 軸棒(Ra1.6)



図 7(c) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 シャッター板と脱落防止板 A(Ral.6)



図 7(d) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 シャッター板と脱落防止板 B(Ra1.6)



図 7(e) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 ガイド(Ra1.6)



図 7(f) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 軸受(Ra0.2)*黄銅製

JAEA-Technology 2015-041



図 7(g) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 軸棒(Ra0.2)



図 7(h) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 シャッター板と脱落防止板 A(Ra0.2)



図 7(i) 前段 4,000 回開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 シャッター板と脱落防止板 B(Ra0.2)



図 8(a) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 軸受(Ral.6)



図 8(b) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 1 軸棒(Ral.6)



図 8(c) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 シャッター板と脱落防止板 A(Ra1.6)

JAEA-Technology 2015-041



図 8(d) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 シャッター板と脱落防止板 B(Ra1.6)



図 8(e) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン1 ガイド(Ral.6)



図 8(f) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 2 ベアリング



図 8(g) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン2 軸棒



図 8(h) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン2 シャッター板と脱落防止板 B(Ra1.6)



図 8(i) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 2 ガイド(Ral.6) *試験パターン 1 と 2 を通して同一の物を使用 JAEA-Technology 2015-041



図 8(j) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 軸受(Ra0.2)*黄銅製



図 8(k) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 軸棒(Ra0.2)



図 8(1) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン3 シャッター板と脱落防止板 A (Ra0.2)



図 8(m) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査果 試験パターン3 シャッター板と脱落防止板 B(Ra0.2)



図 8(n) 追加 4,000 回(計 8,000 回)開閉動作後の目視調査結果 試験パターン 3 ガイド(Ra0.2)



図9 ワイヤーロープの素線切れの例

No	設定压力 (Dal 測定回数		錘が動き出す瞬間の測定値[N]				(曲 - 本
INO.	成疋江 / [Pa]	侧正凹数	低值	高値	平均值	標準偏差	加有
1	6×10 ⁻⁵	120	<u>134.6</u>	192.7	175.3	15.4	ガイド、ワイヤーロープ新品
2	8×10 ⁻⁵	20	201.8	<u>227.7</u>	215.4	8.4	
3	2×10 ⁻²	10	216.6	227.0	222.2	3.1	
4	1×10 ⁵ (N2)	20	64.9	90.8	72.0	6.2	N2封入
5	1×10 ⁵ (Air)	10	46.9	62.1	53.6	5.6	大気開放
6	↑	50	52.9	79.2	71.0	6.4	ワイヤーロープのみを新品に交換
7	3×10 ⁻⁴	50	134.7	162.2	149.2	9.5	
8	6×10 ⁻⁵	150	135.1	190.9	165.0	14.9	
9	5×10 ⁻⁵	50	171.5	198.0	185.9	5.2	
10	1×10 ⁵ (Air)	50	57.3	<u>103.6</u>	82.6	16.9	大気開放
11	↑	50	<u>40.6</u>	73.2	63.0	6.7	ガイド、ワイヤーロープを新品と交換

表4 錘の吊上げ駆動に要した力の測定結果

大気圧状態での測定

表5 摺動摩擦力と摩擦係数

		最小値	最大値
古中中部	摺動摩擦力 F1[N]	39.2	132.3
具空扒態	摩擦係数 μ	1.3	4.5
大気圧状態	摺動摩擦力 F1[N]	11.2	74.2
	摩擦係数 μ	0.4	2.5

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
盔半里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2.基本単位を用いて表されるSI組立単位の例					
_{知立} SI 組立単位	1.				
和立里 名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立方メートル	m ³				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 毎メートル	m ⁻¹				
密度, 質量密度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³				
面 積 密 度 キログラム毎平方メート	ν kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キログラ	ム m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メート	\mathcal{N} A/m ²				
磁 界 の 強 さアンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方メート	ν cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野	では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
		10.0	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gy	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	2 ((g)	Su	I/lrg	2 -2
方向性線量当量,個人線量当量		30	o/kg	III S
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、1、組定差で建度問題を表す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^2 K^1$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^2 s A$
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	•	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称	記号	SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg		
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da		
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」			

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
	4	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$