

JAERI-M
87-143

JT-60用その場コーティング装置原型機
の開発試験

1987年9月

小原建治郎・阿部 哲也・村上 義夫

JAERI-M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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

J T-60用その場コーティング装置原型機の開発試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

小原 建治郎・阿部 哲也・村上 義夫

(1987年8月21日受理)

J T-60の真空容器内に組み込まれた炭化チタン被覆第一壁を補修することを目的としたその場コーティング装置を製作するに先立ち、特に高温、高真空雰囲気で使用する駆動機構と機械要素の健全性を確認するための原型機を製作し、その試験を行った。

その結果、装置の中心となるマニプレータの駆動部の軸受にはインコネル625と自己潤滑性合金との組み合わせが、歯車表面に塗布する固体潤滑剤には焼結型の二硫化モリブデンが最適であることがわかった。また、高温部の焼き付き防止には炭化チタンを被覆したボルト、ナットが有効であることが認められた。

補修作業の前後に必要な真空容器内部の観察装置としてマニプレータの駆動に追従可能なファイバースコープを採用し、高温、高真空中での使用を可能にした。

原型機を使用してチタン蒸発源の通電試験や炭化チタン膜の作製を行い、各種のデータを取得した。これらの結果はすべて1987年2月に据付完了したJ T-60用その場コーティング装置の設計、製作に反映された。

Fabrication and Performance Tests
of a Prototype In-Situ Coating Machine for JT-60

Kenjiro OBARA, Tetsuya ABE and Yoshio MURAKAMI

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

(Received August 21, 1987)

Prior to the design and construction of the JT-60's in-situ coating device, a prototype machine was fabricated and tested to confirm the applicability of proposed driving methods and mechanical elements to the device which would be operated in very severe conditions including high ambient temperature and high vacuum. The machine basically consists of an in-vessel manipulator, a fiberscope and an ohmically heated titanium evaporator.

From the test results, we recommended to use the combination of Inconel 625 and a self-lubricating alloy for the solid-lubricated bearings and MoS₂-coated Inconel 625 for the solid-lubricated gears. It was also found that TiC coating showed a effect for the prevention of welding between bolts and nuts.

In order to optimize the operating parameters of the machine, many wall inspection tests and titanium evaporation tests were carried out in a large vacuum vessel by simulating the JT-60 conditions.

Keywords: JT-60, In-situ Coating, Prototype Machine, High Temperature, High Vacuum, In-vessel Manipulator, Fiberscope, Titanium Evaporator, Molybdenum Disulfide, Self-lubricating Alloy, Inconel 625, Titanium Carbide

目 次

1. 序 論	1
1.1 目 的	1
1.2 開発経緯	1
1.3 装置の概要	1
1.4 使用環境条件と開発の目標	2
1.4.1 使用環境条件	2
1.4.2 開発の目標	2
2. 試作機の構成	8
2.1 基本構成	8
2.2 設計条件と各部仕様	9
2.2.1 設計条件	9
2.2.2 各部仕様	9
3. 試験の結果と考察	30
3.1 A軸くり返し駆動試験	30
3.1.1 試験方法	30
3.1.2 インコネル625上にMoS ₂ / ニードルベアリングの組み合わせ	31
3.1.3 インコネル625 / S L合金の組み合わせ	33
3.1.4 インコネル625 / ローラに銀をイオンプレATINGしたローラベア リングの組み合わせ	34
3.2 θ 軸くり返し駆動試験	34
3.2.1 試験方法	34
3.2.2 分解点検	35
3.3 高温部の焼き付き	37
3.4 観察装置の試験	37
3.4.1 分解能試験	37
3.4.2 試料観察	38
3.4.3 駆動追従性試験	38
3.4.4 真空シールの健全性試験	39
3.5 チタンフィラメント通電試験	39
3.6 炭化チタン膜の作製	41
4. ま と め	64
謝 辞	65
参考文献	66

Contents

1. Introduction	1
1.1 Purpose of the development	1
1.2 Development program	1
1.3 Outline of the prototype machine	1
1.4 Environmental conditions and the goal of the development	2
1.4.1 Environmental conditions	2
1.4.2 Goal of the development	2
2. Design of the prototype machine	8
2.1 Basic elements	8
2.2 Design conditions and specifications of major components	9
2.2.1 Design conditions	9
2.2.2 Specifications of major components	9
3. Experimental results and discussions	30
3.1 Repetitive motion experiments on A-axis	30
3.1.1 Experimental methods	30
3.1.2 Combination of the MoS ₂ -coated Inconel 625 shafts and the self-lubricating alloy bearings	31
3.1.3 Combination of the Inconel 625 shafts and the self- lubricating alloy bearings	33
3.1.4 Combination of the Inconel 625 shafts and the Ag-coated roller bearings	34
3.2 Repetitive motion experiment on θ axis	34
3.2.1 Experimental methods	34
3.2.2 Observation results of the major moving parts	35
3.3 Welding of the bolts and nuts after heating experiment	37
3.4 Experiments on the observation system	37
3.4.1 Resolving power	37
3.4.2 Observation	38
3.4.3 Flexibility power	38
3.4.4 Vacuum seals of the fiber scope	39
3.5 Heating experiments on the titanium filaments	39
3.6 TiC coating	41
4. Conclusions	64
Acknowledgments	65
References	66

1. 序 論

1.1 目 的

臨界プラズマ試験装置 J T - 60 (以下 J T - 60 とする) の真空容器内面には、プラズマ中への不純物混入による放射損失を低減する目的から、膜厚 20 μm の炭化チタンを被覆 (コーティング) した約 1 万枚の第一壁 (ライナ, リミタ他) が取り付けられている。¹⁾

第一壁上にコーティングされた炭化チタン膜は、プラズマとの相互作用により漸次損耗し、試算によれば 2 年間でほぼその全膜厚を失なうことになる。^{2),3)} また、プラズマディスラプションなどにより局部的に大きな熱が集中した場合には、瞬時に損傷、失なわれることもある。⁴⁾

“その場コーティング装置 (以下 “その場装置” とする)” は、この損耗した第一壁上の炭化チタン膜を、その場、すなわち J T - 60 の真空容器内で再コーティングし、補修することを目的とした装置である。⁵⁾

本稿で述べる “その場装置原型機 (以下試作機とする)” は、“その場装置” の製作に先立ち、高温、高真空中で使用される “その場装置” の基本的な駆動機構と機械要素の健全性の確証を主な目的として設計、製作、試験に供されたもので、昭和 58, 59 年度に実施された。“その場装置” 開発の全体計画を Fig. 1.1 に示す。

Fig. 1.2 は J T - 60 に取り付けられた実機 “その場装置” の概観図である。

1.2 開発経緯

昭和 57 年度に設計、製作された小型機は、マニプレーションの概念を把握するためのもので、スチールワイヤによる駆動を基本としたものである。⁶⁾ この結果、ワイヤ駆動による機構、性能の限界が把握された。58 年度には、構造強度上ならびに動作の信頼性をより高めることを主眼に、ロッド駆動方式による試作機を製作、大気中での試験を実施した。59 年度には、58 年度の試作品を真空仕様⁷⁾ に改造し、既設真空試験装置 J V X - II での試験を行えるようにした。これにより試作機を用いて、実機 “その場装置” とほぼ同等の環境 (高温、高真空) において各種の試験が実施できた。これらの結果は 60 年度から実施された実機の “その場装置” の設計、製作に全面的に反映された。

1.3 装置の概要

Fig. 1.3 に “その場装置” が設置される J T - 60 の真空容器を示す。生成されるプラズマの大半径は約 3 m、小半径は約 1 m で、プラズマを閉じ込める真空容器の断面は長径が約 3 m、短径が約 2 m の卵型をしている。

Table 1.1 に真空容器の主要諸元を示す。

“その場装置”は、この真空容器に垂直に取り付けてある内径約19cm，高さ約5mの上部ポートに取り付けられる。

炭化チタン膜の作製には，JT-60真空容器内で抵抗加熱によって蒸発されるチタン原子とアセチレンガスを第一壁上で反応させる（ $2\text{Ti} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{TiC} + \text{H}_2$ ）反応性蒸着法を採用する^{8),9)}。従って“その場装置”は，長くて狭隘なポートから挿入した後，真空容器内でチタン蒸発源を任意の位置に移動させることができる装置本体（マニプレータ本体）と，真空容器内観察装置，アセチレンガス注入装置，これらを遠隔で操作制御するための計算機システム等から構成される。

試作機は，その目的から，マニプレータ本体，チタン蒸発源と，これらを手動で操作するための制御盤から構成した。また，観察装置（試作機の仕様外）についてはマニプレータの3次元動作に追従させるためのセンサーとしてファイバースコープを採用することとし，別途その可能性を検証することにした。

1.4 使用環境条件と開発の目標

1.4.1 使用環境条件

試作機および実機装置のマニプレータが使用される環境条件はおおよそ次の通りである。

1) 圧力条件

大気圧から 10^{-6} Pa程度

（アセチレンガス雰囲気： $0.1 \sim 10^{-3}$ Pa）

2) 温度条件

室温から300℃程度

熱源：チタン蒸発源（ ~ 1600 ℃）

第一壁（ ~ 300 ℃）

3) アクセス条件

真空容器内プラズマ中心から約5m垂直に立ち上った内径19cmの円筒（ポート）から挿入すること（実機仕様）。

1.4.2 開発の目標

1) 駆動機構と機械要素の健全性

試作機の開発目的は，1.1項で述べたように，高温，高真空中での駆動機構および機械要素の健全性の確証であり，それはこれら駆動部の潤滑性能に大きく依存する。すなわち，一般に室温，大気中で使用される油潤滑剤も，前項で述べたような環境下では急激な蒸発とそれによる真空環境の汚染という点からかならずしも使用できるとは限らず，一般的にはむずかしい。

これにかわる潤滑剤としては種々の固体潤滑剤が考えられるが高温，真空中において絶対的に信頼のおける潤滑剤となるとそれぞれに長所，短所があり，現在のところ決定的なものは見当たらない。

例えば、黒鉛や六方晶窒化ほう素（BN）、窒化珪素（ Si_3N_4 ）などは耐熱性はあるものの機械的な衝撃に弱く、また真空中で摩擦係数が増大する。

四弗化エチレン（PTFE）などの有機高分子材料は、加工性が良く比較的手軽に使用できるが、耐熱性に乏しい。

無機質のバインダーとともに使用される二硫化モリブデン（ MoS_2 ）や二硫化タングステン（ WS_2 ）は大気中より真空中での摩擦係数が小さく、比較的耐熱性もあり多用されている。しかし、通常は基材表面に数ミクロンの薄膜として使用されるため基材との密着性に起因する膜の耐久性に問題がある。

金、銀、鉛などの軟質金属被膜は清浄な真空環境を要求されるような場合に用いられる。これら軟質金属による被膜は一般に基材に対する付着力が弱く、 MoS_2 などの固体潤滑剤に比較すると摩擦係数、耐荷重性能、寿命などの点では劣性をまめがれない¹⁰⁾。

このように、固体潤滑剤はその使用環境によってその特性が種々変化するが、高温、真空中での潤滑性能が、室温、大気中の場合に比べ悪くなる原因については次のように考えられている。

- (1) 真空中では互いに接する2物体間の真実接触部が大きく成長するため摩擦係数が増大する。
- (2) 金属については、摩擦係数の温度依存性が大きく、高温部で増大する傾向にある。これは結晶構造あるいは合金元素配列の規則性に変化が生じるためである¹⁰⁾。
- (3) 大気中の潤滑において摩擦係数を軽減させるに重要な役割を担っている酸素が、高温、真空中では急速に失なわれてしまう¹¹⁾。

以上の観点から、試作機では、高温、高真空中に晒らされるこれら駆動部の機構、材質及び潤滑方法を検討することが重要な課題であった。

2) チタン蒸発源の開発

マニプレータの先端に取り付けられる“その場装置”のチタン蒸発源は、狭隘な空間を通過して真空容器内に導入され、高温、高真空中を3次元駆動される。このため、チタン蒸発源（以下蒸発源とする）の設計にはチタンの蒸発方式も含め、高度の信頼性が要求される。主な開発要素を次に示す。

- (1) コーティングモードに応じて、蒸発チタン量とその方向性の制御を容易にすること。
- (2) 蒸発源の支持構造物間に、高温、高真空中での使用に原因する焼き付きを生じさせないこと。
- (3) 蒸発チタンのまわり込みによって電氣的な絶縁が破壊されない構造とすること。
- (4) マニプレータに与える負荷を軽減するため極力軽量化を図ること。

3) 真空容器内観察装置の開発

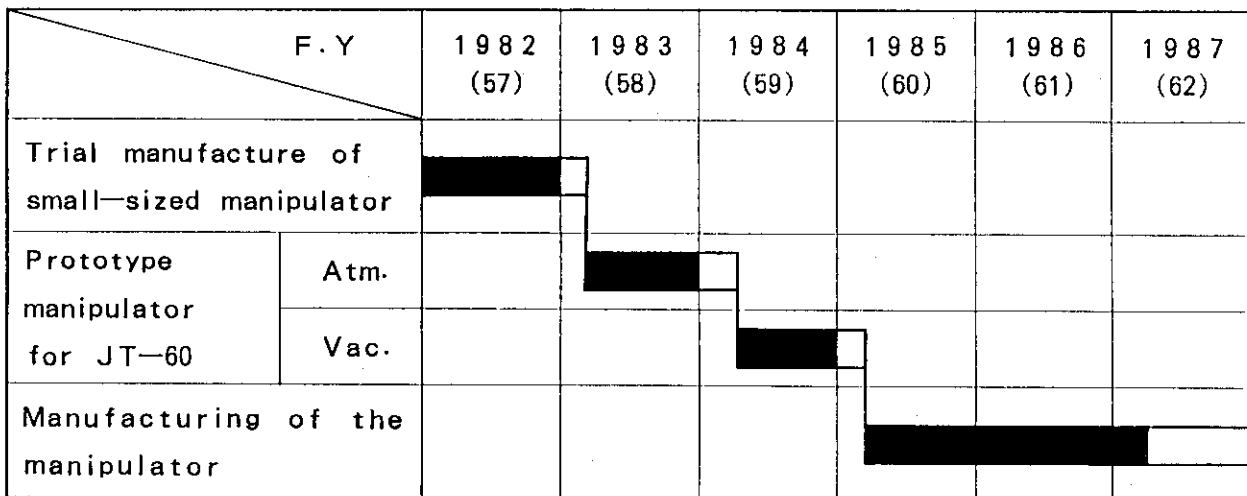
炭化チタンのコーティング前後に真空容器内の第一壁を観察することは、被コーティング箇所を特定したり、コーティング状態を把握するために必要である。

従来、この種の観察装置には多数の光学レンズによって構成される、いわゆるボアスコープが汎用されている。しかし、ボアスコープではそれ自体が独立した装置となってしまうこと、対象物への接近が不可能なことから“その場装置”への適用はむずかしい。すな

わち上述の観察装置では共通のマニプレータにその時々作業目的に応じてチタン蒸発源と観察装置を交互に装荷するという“その場装置”の基本設計思想と相容れない要素がある。従って“その場装置”の観察装置としては、マニプレータへの着脱が比較的簡単で、その3次元動作に追従可能なものをあらたに開発する必要がある、この機能を可能とするものとしてファイバースコープ採用の観察装置の開発を行った。

Table 1.1 Major specifications of the JT-60 vacuum vessel.

Items	Specifications
Material	Inconel 625 alloy
Structure	The Vacuum Vessel consists of 8 sectorial rigid sectors and 8 belows sectors
Shape	Egg-shaped cross section (2m x 2.86m)
Capacity	100 m ³
Ultimate pressure	Less than 1.3×10^{-6} (Pa)
Helium leak rate	Less than 6.5×10^{-6} (Pa·m ³ /s)
Maximum bakeout temperature	500(°C)
Ports	Plasma diagnostics ports, Torus vacuum pumping ports, Additional heating ports, Preionization ports, Gas injection ports, Fast movable limiter ports, Adjustable limiter ports, Electromagnetic diagnostics ports



■ : Design and fabrication
□ : Experiment

Fig. 1.1 Development program for the JT-60 in-situ coating manipulator.

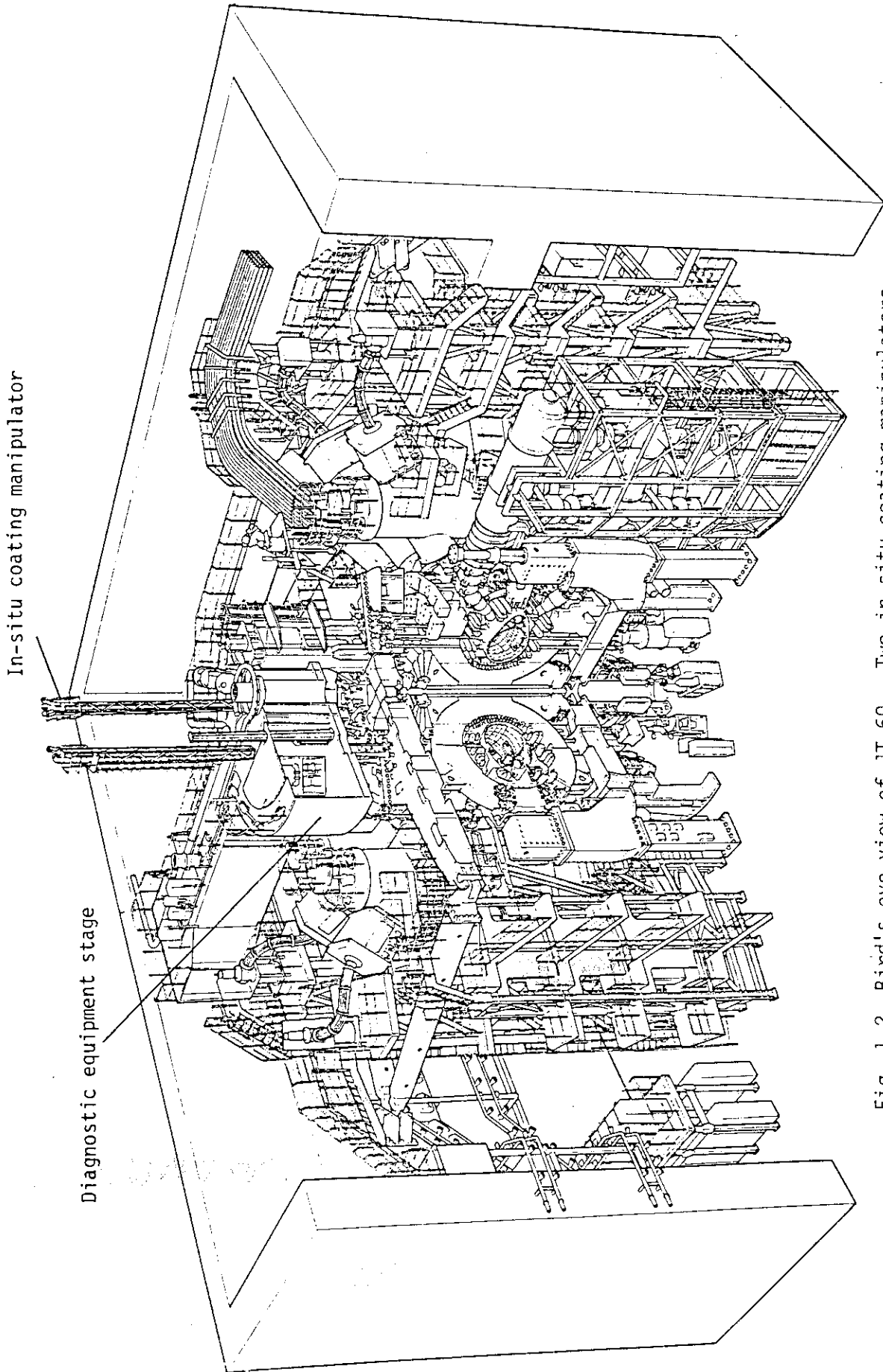


Fig. 1.2 Bird's-eye view of JT-60. Two in-situ coating manipulators were mounted on the diagnostic equipment stage in February 1987.

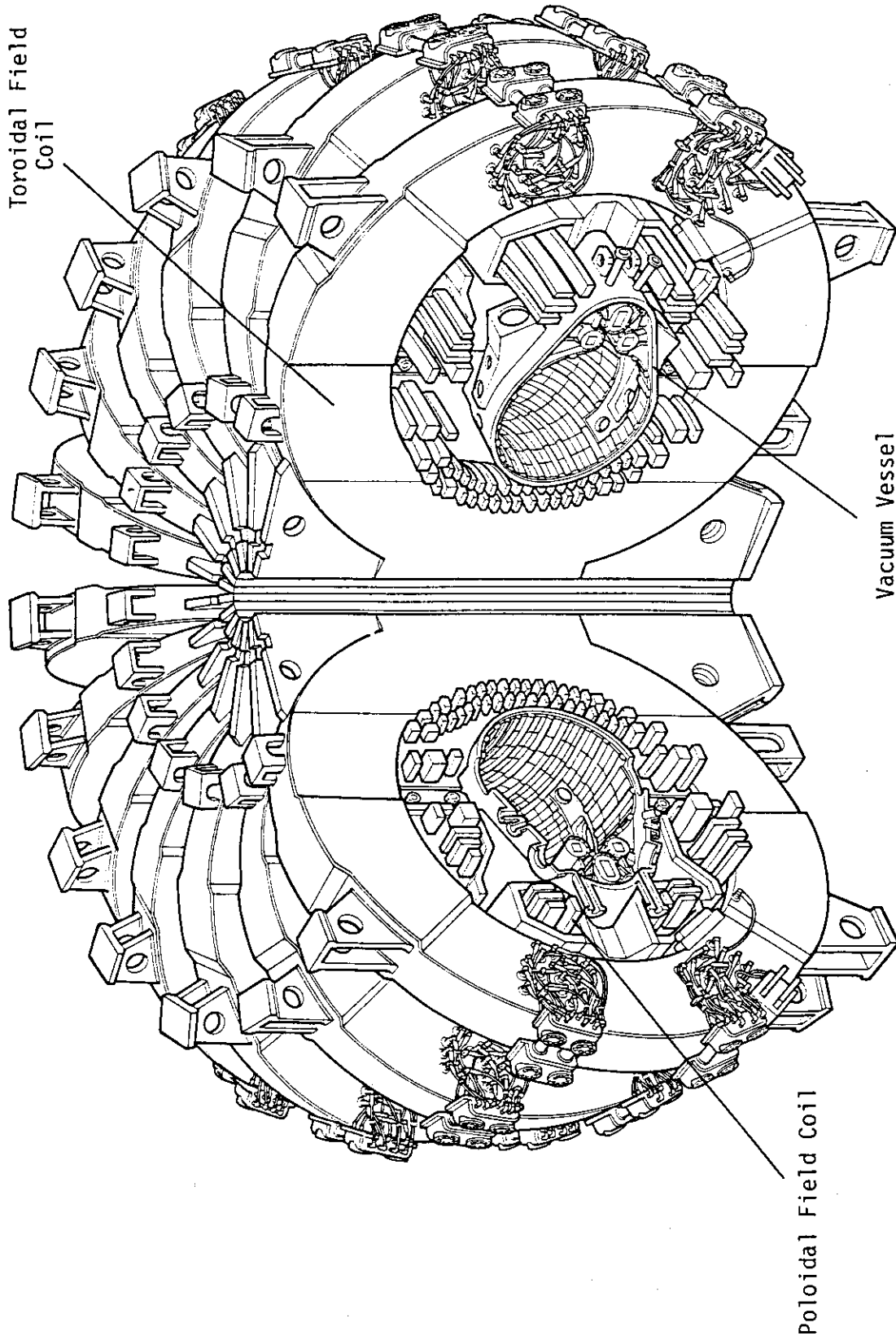


Fig. 1.3 JT-60 vacuum vessel surrounded by many poloidal and toroidal field coils.

2. 試作機の構成

2.1 基本構成

Fig.2.1 に J V X - II に設置された試作機を, Fig.2.2 にその写真を示す。また Fig.2.3, 4 には試作機がマンipレータ本体として機能するために必要な4駆動軸の動作方向とマンipレータ本体の概略について示す。“その場装置”は全高約15mとなるが, 基本的な構造は試作機にすべて含まれている。

試作機は大別して次の7つの部分から構成される。

- ① マニプレータ本体
- ② 導体アッセンブリ
- ③ 蒸発源
- ④ 観察装置
- ⑤ 長尺ベローズ
- ⑥ 昇降架台
- ⑦ 支持架台

マンipレータ本体は, アーム部(駆動軸), アーム回転部, 中継支持部および駆動ヘッド部から構成される。4駆動軸のうち3軸(A, θ , ϕ 軸)は駆動ヘッド部に収納された動力源と直結し, 磁性流体シール式の回転導入機を介して大気側から真空中に動力が伝達される。アーム回転部は動力源からの回転運動を所定の動作に変換する部分で, 多数の歯車, 軸受などから構成され, マニプレータ本体の重要な部分である。また, アーム回転部は, 蒸着時に蒸発源と加熱された真空容器から大きな熱の影響を受ける。

導体アッセンブリは, マニプレータの先端に装着された蒸発源に電力を供給するためのもので, 銅線やクリート, ブラシとスライドトロリから構成される。定常的な通電電流は約150Aとなるため, マニプレータとの電氣的絶縁および蒸発チタンの付着による絶縁破壊には十分な配慮が求められる。また, ブラシとトロリを組み合わせることにより, 通電状態でもA軸のスライドが可能となっている。Fig.2.5に導体アッセンブリのうち, スライドトロリの概略を示す。

チタンの蒸発はチタンフィラメント(以下フィラメントとする)への直接通電加熱による方式を採用している。これは電子ビーム加熱やスパッタリングによる他の蒸発方式に比べ, 構造が簡単で信頼性が高く, 真空空間を三次元駆動される“その場装置”の蒸発源としては最適と考えられたからである。蒸発時にフィラメント表面温度は千数百度の高温となるため, 蒸発源を構成する各部品に焼き付きなどの不具合を生じない設計にすることが望まれる。

観察装置は必要に応じて, 蒸発源を取りはずした後にマンipレータ本体に取り付けられる。このため Fig.2.4 には特に図示されていない。

溶接ベローズで構成された長尺ベローズは, マニプレータ本体の真空容器への挿入, 引出しに伴う上下方向運動(Z軸)に追従するとともに真空境界を決める機能を持つ。

昇降架台は、マニプレータ本体およびベローズを支持するとともに、ボールネジ方式によるZ軸の動力源を備える。

2.2 設計条件と各部仕様

2.2.1 設計条件

“その場装置”は、既に製作を完了したJT-60真空容器の構造に適合する形で設計しなければならない、その条件は次の通りである。装置の高さ方向の寸法以外は、試作機についても同様の条件が課せられる。

- 1) 高温（フィラメント温度：約1600℃，フィラメント支持部の温度：約800℃），高重量（数kg～10kg程度）の蒸発源を保持，移動できること。
- 2) フィラメントへの150A通電を可能とすること。
- 3) 真空容器内観察のため，マニプレータ本体の三次元動作に追従可能な観察装置を設けること。
- 4) 直立した（高さ約6m），狭隘（内径19cm）な管路からのアクセスを可能とすること。
- 5) 最低限4自由度を有すること。
- 6) 動作速度については特に高速性は必要としない。
- 7) 構造は可能な限り単純化すること。
- 8) 高温，真空中での動作を可能とすること。

次項では，以上の条件を反映した各構成部のうち，特に駆動系，蒸発源および観察装置についてその詳細を述べる。

2.2.2 各部仕様

1) 駆動系

試作機，マニプレータの駆動系の機構図をFig.2.6に，各部仕様をTable 2.1に示す。

(1) 駆動方式

動力源からのトルク伝達には，ロッドおよびボールネジ駆動方式を採用した。これは，大気中に置かれる動力源からのトルクを約10m先（実機仕様）のアーム回転部まで安全，確実に伝達することの他に，アーム先端にかかる負荷モーメントを支持するに必要な剛性を得るためにとられた方式である。試作機の製作前に全軸ワイヤ⁶⁾駆動による方式も試みたが，ワイヤの伸び，絡み，負荷モーメントに対する剛性の点で問題があり，採用を見合わせた。

一方，ロッド方式の最大の欠点は，長尺ロッドの真直度の規定にある。長尺なるが故に回転するロッドの数カ所を支持する必要があるが，真直度の精度によっては偏心を生じ，支持箇所との必要以上の接触により，トルクロスや支持部とロッド相方に損傷を引き起こす要因となる。

(2) 動作範囲

各軸の動作範囲の設定は，JT-60真空容器の形状，寸法，目的を達成するに必要と

する最小限の動作，構造物としての強度などの面から検討された。

(3) 動作速度

速い動作速度は作業効率を高める上からも望ましいことではあるが，反面，回転速度の上昇により軸受への摩擦トルクを大きくする要因となる。また，制御側からみた場合，機械的な接触センサを持たない，持たせることのむずかしい試作機のような場合は，各軸からの位置情報を適切に処理するためにも一定の時間を必要とする。従って速い動作は一時的に軸位置を見失うことにもなりかねず，その結果真空容器内壁との接触，衝突を引き起こすことになる。

(4) 駆動モータ，主要部の材質と潤滑

各軸モータの定格は，試作機の場合まずはA軸の寸法と重量，そしてその先端に取り付けられる蒸発源の重量によって決定された。

Fig.2.7およびTable 2.2に4軸のうち負荷的に厳しいと考えられる θ 軸についてトルク伝達の模式図と，軸先端のモーメントを最終のモータで受けるまでの各歯車にかかる力(f_{θ})および駆動トルク(τ)について示してある。Table 2.3は軸受材の機械的性質について示してある。

摩擦トルクは軸受の形式，寸法，荷重，回転速度，そして潤滑特性に大きく左右される。たとえば荷重が小さく，高速回転の場合は潤滑剤に，荷重が大きく低速回転の場合は特に荷重による影響が大きいと云われている¹²⁾。従って軸受の摩擦トルクは種々の要素によって決定されるが，ここでは便宜上次式によって計算を行った。

$$\tau_f = \mu \cdot f \cdot \frac{d}{2} \quad (1)$$

τ_f : 摩擦トルク N · m

μ : 軸受部の摩擦係数

f : ラジアル方向の荷重 N

d : 軸受内径(軸外径) m

(1)式をもとに各歯車に加えられる力(f_{θ})は，次式によって求められた。

$$f_{\theta 1} \cdot \frac{D_{150}}{2} = T_L + f_{\theta 0} \cdot \mu \cdot \frac{d_{15}}{2}$$

$f_{\theta 1} \doteq f_{\theta 0}$ として

$$f_{\theta 1} = \frac{2 T_L}{D_{150} - \mu \cdot d_{15}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

ここに

T_L [N · m] : 駆動軸の負荷モーメント

D_{150} [m] : 歯車のピッチ円直径

d_{15} [m] : 歯車軸の外径

次に

$$f_{\theta 2} \cdot \frac{D_{81}}{2} = f_{\theta 1} \cdot \frac{D_{20}}{2} \cdot \frac{1}{\eta} + (f_{\theta 1} + f_{\theta 2}) \cdot \mu \cdot \frac{d_{10}}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (3)$$

D_{81}, D_{20} [m] : 歯車のピッチ円直径

d_{10} [m] : 歯車軸の外径

η : 平歯車の伝達効率

また,

$$f_{\theta 3} \cdot \frac{D_{50}}{2} = f_{\theta 2} \cdot \frac{D_{15}}{2} \cdot \frac{1}{\eta} + (f_{\theta 2} + f_{\theta 3}) \cdot \mu \cdot \frac{d_8}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

D_{50}, D_{15} [m] : 歯車のピッチ円直径

d_8 [m] : 歯車軸の外径

駆動トルク (τ_{θ}) は次式により求めた。

$$\tau_{\theta} = f_{\theta 3} \cdot \frac{D_{25}}{2} \cdot \frac{1}{\eta'} + f_{\theta 3} \cdot \mu \cdot \frac{d_6}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (5)$$

D_{25} [m] : 歯車のピッチ円直径

d_6 [m] : 歯車軸の直径

η' : かさ歯車の伝達効率

なお、本計算では平歯車、かさ歯車の伝達効率はともに1とした。また τ_m' はモータの軸にかかる駆動トルクである。

外部的な制約条件により、歯車の大きさや軸受の寸法が決まれば、摩擦トルクは軸受の潤滑特性、すなわち摩擦係数によって決まる。この結果、高温、高真空中で使用される歯車、駆動軸、ラックなどの各機械部品には耐熱性の優れているニッケルベースのインコネル625を用い、表面に焼結型の二硫化モリブデンをコーティングした。

我々の経験では焼結型二硫化モリブデンの潤滑特性については比較的良い結果を得ているが、使用に伴うコーティング膜の損耗による摩耗粉の発生は避けがたい。また、歯車の噛み合い部の面圧強度については厳しい管理が必要である。面圧が 70 kg f / cm^2 を超えるような状況では即時に剥離する¹³⁾という報告もある。

また、試作機の軸受のほとんどはすべり軸受であり、部材には自己潤滑性合金¹⁴⁾を加工して使用した。自己潤滑性合金は二硫化モリブデン、二硫化タングステンを銅やタンタルなどの金属結合剤で焼結したもので、その組成比によって型式がある。試作機ではその中で最も機械的強度の高いものを採用した。

自己潤滑性合金の使用に先立ち、窒化珪素系のセラミックスを試みたが、衝撃に弱く、駆動中に欠けてしまうという現象を生じた。これは駆動軸の偏心による偏荷重によるものと推定された。

セラミックスは他の潤滑剤に比べ摩擦係数は大きくなるが、耐熱性の点では魅力ある素材である。しかしながら実際の使用においては、他の素材に比べ加工性及び組立精度については厳密な管理が必要と思われる。

Fig.2.8 にアーム回転部の外形を Fig.2.9 に外形写真を示す。

(5) 過負荷保護

高温、真空中での駆動は極論すれば常に故障誘発の要因を抱えているといえる。その原因の多くは高温、真空中に晒される駆動部の焼付きによると考えられる。焼付きによる駆動モータへの過負荷は、駆動軸の途中に設けられたトルクリミッタにより一定以上のトルクが加わった場合、駆動軸とモータの接合が解放される仕組みとなっている。トルクリミッタの動作によってモータ、軸受、歯車等への保護はとられても、動作軸は一定の位置に静止した状態となる。

故障時の対応として人間が簡単にアクセス可能な場合は特に問題ないが、一般に遠隔操作機器はアクセスが困難である。このような場合を想定して装置自体にフェールセーフ機構を具備しなければならない。実機仕様では、このための装置としてアーム回転部での θ 軸歯車の噛み合いを外力によって強制的にはずし、A 軸を重力方向に引き落すことによって一本の棒状とし、狭隘な管路から引き抜く方法を講じている。

(6) 駆動軸の真空シール

大気中から真空中へのトルク伝達には、一般的にはベローズシール方式、あるいは磁気結合型シール方式による回転導入機が使用される。しかしながらこれらの方式は伝達可能なトルクが小さく、高速回転には適さない。また磁気結合シールの場合は、大気部と真空部との結合が充分でないためスリップを生じ、動作の信頼性が低い。

試作機では伝達可能なトルクが大きくとれ、バックラッシュの少ない磁性流体シール方式の回転導入機を採用した。磁性流体シールはオイルなどのベース溶液中に磁性体の微粒子をコロイド状に分散させ、これに磁場をかけることによって駆動軸の周囲にループ状のシールを形成するものである^{15),16)}。欠点としては、流体を使用するために耐熱性が低く、ベース溶液の蒸発による真空環境への汚染が考えられること、外部磁場の影響による磁場配位の乱れなどがある。これらの欠点は、強制冷却や磁気シールドなどの措置を講じることによって補なわれる。また、ベース溶液の蒸気圧については、もともと使用されるベース溶液量が少ないことから、使用する真空系のパラメータ（内容積、真空ポンプの排気速度、到達圧力、真空の質など）との関連から考慮すべき問題と思われる。

試作機および実機の設計では、磁性流体シールに許容される温度、耐磁場強度以上の場所への取り付けを避け、ベース溶液からの汚染の懸念に対しては作動排気により対掘している。

2) 蒸発源

Fig.2.10 に蒸発源の外形を Table 2.4 に各部仕様を示す。

(1) セグメント

蒸発源一台分の構成単位をあらわす。Fig.2.10は3セグメントから構成されている。分割方式にすることによってコーティングモードに応じた蒸発チタン量とその方向性制御を容易にしている。セグメントの形状，寸法はフィラメントの長さでマンニプレータが挿入されるポートの内径から決められた。

高温に晒られるセグメントの構造材料としては、高温においても疲労強度の優れているインコネルなどの耐熱合金の使用が望ましいが、蒸発チタンのセグメントへの付着により、使用頻度の増加に伴って交換の必要が生じてくること、すなわち製作コストと加工性の点から総合的に判断してSUSに比べ劣ることから使用しなかった。

1セグメントあたり装荷されるフィラメント数は1～4本の間で選択可能である。フィラメントの電気的な接続としては並列接続の方が他のフィラメントに及ぼす影響が少ないが、幹線への通電電流が大きくなること、セグメントの構造が複雑になることから直列接続とした。この場合、1本のフィラメントの断線により他のすべてのフィラメントへの通電が不能となるが、別に実施されたフィラメント通電試験の結果から、その信頼性が充分保証されたため、本方式を採用することとした。

(2) フィラメント

フィラメントには電気的な信頼性と高い蒸発効率が望まれる。このためあらたに開発されたフィラメント⁴⁾では、芯線にタングステンを使用し、それをとりまく形で3本のチタン線と1本のモリブデン線が螺旋形に巻かれている。それぞれの抵抗率はチタンが約 $165 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、タングステンとモリブデンはほぼ等しく約 $25 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ であり、定格通電電圧、電流はフィラメント1本あたり5V、150Aである。また蒸発速度は $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ であり、蒸発効率を70%として約2gのチタンを蒸発させることができる。

(3) その他の主要部品の材質

フィラメントとフィラメントホルダ間の凝着防止にはカーボンスリーブが有効である。ただし、カーボンは温度上昇によって抵抗が減少する、いわゆる負の温度係数を持っているため、フィラメントへの急激な通電は一時的に急激な抵抗減少を示し、これによる過電流のためフィラメントの溶断を引き起す原因ともなる。

高温部に使用するボルト、ナット類には同じく凝着を防止する上から、炭化チタンをコーティングしたステンレス製のものを採用している。

3) 観察装置

“その場装置”の観察装置として必要とされる基本的な性能を次に示す。

① 分解能

JT-60真空容器内において、センサ先端から1mの距離にある第一壁の欠陥(最小 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$)が判別できること。

② 使用時の温度

常温から200℃程度とする。ただし、真空境界を形成する一部については150℃とする。

③ 真空に関するもの

許容リーク量 : $1.3 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} (\text{He})$ 以下

許容放出ガス量 : $1.3 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \cdot \text{m}^2$ 以下 (目標値)

④ 駆動追従性

"その場装置" マニプレータ本体の駆動範囲^{*}に追従できること。

* 実機使用値

Z 軸 (直線方向) : $\pm 7500 \text{ mm}$

ϕ 軸 (回転方向) : $\pm 360^\circ$

θ 軸 (傾斜) : $\pm 135^\circ$

A 軸 (直線方向) : $\pm 1100 \text{ mm}$

マニプレータの三次元駆動に追従可能な視覚センサとしては、ファイバースコープの他、固体撮影管 (CCD) の使用も考えられるが、放出ガス量が少なく、比較的耐熱性のあるセンサとしてファイバースコープを検討した。Fig.2.11, 12, 13に観察装置のうちファイバースコープの詳細を、Table 2.5には各部仕様を示す。

(1) ファイバースコープの能力を決める要素

駆動追従性を高めるためにはファイバースコープの許容屈曲半径を200mm程度までにする必要があり、このためには、画像を促えるコア数 (以下イメージガイドとする) と、イメージガイドをとりまく様に構成されている被写体照明用のコア数 (以下ライトガイドとする) との総数を少なくしなければならない。一方、画像分解能を高めるためにはコア数を多くする必要がある。

また、一度に促え得る観察視野を大きくするためには、スコープの焦点深度すなわち先端に取り付ける対物レンズ径を大きくしなければならず、これは先のイメージガイドの外径増加につながり、駆動追従性を阻害する要因となる。最終的にはTable 2.5に示すようにイメージガイドとしては12000本、ライトガイドは600本とした。

① 許容屈曲半径

許容屈曲半径は、マニプレータ本体の駆動シュミレーションの結果から200mm程度必要であることがわかった。これを可能とする総コア数については先に示した通りであるが、これは、ファイバーの持つ潜在的な欠陥、曲りによる放射損失の外、安全係数を考慮して決められた値である。

② 観察視野

観察視野 (H) は次式で示される。

$$H = 2 \times \tan \frac{\theta}{2} \times \ell \quad (1)$$

画素数 (N) が12000の場合、先端の対物レンズ径は約2mm、画角 (θ) は 20° となる。従ってレンズから観察対象物までの距離 (ℓ) を1mとしたときのHは約352mm ϕ となる。

③ 分解能

ファイバーの点分解能 (R_1)、点検知能 (R_2) と画素数との関係は次式で示される。¹⁸⁾

$$R_1 = K_1 \frac{H}{\sqrt{N}} \quad K_1 : 2.044 \quad (2)$$

$$R_2 = K_2 \frac{H}{\sqrt{N}} \quad K_2 : 0.463 \quad (3)$$

(2), (3)式に(1)の結果を代入すると, $R_1 = 6.6 \text{ mm}$, $R_2 = 1.5 \text{ mm}$ となり, 基本仕様に示されてある20mmの欠陥の判別は一応可能ということになる。

④ 被写体照度

カラーによるテレビカメラ観察の場合, 2000 l_{ux} 以上の照度が必要とされる。500 Wのキセノンランプを光源にし, 600本のライトガイドで22mの伝送距離(実機仕様)をとった場合(伝送損失率23%), レンズから観察対象物までの距離(l)と照度の関係はおおよそ次のようになる。

l (mm)	照度 (l_{ux})
700	2000
800	1500
1000	1200

すなわち先のシステムにおいては, $l = 700 \text{ mm}$ の場合, 一応完全な画像が観察できることになる。また側視ミラーによる観察では, 反射損により50%程度の光量減となるため観察距離限界は500mm程度になる。

(2) 真空に関する仕様

許容リーク量はJT-60本体および周辺に付設される機器と同等の値である。ファイバースコープの場合特に問題となるシール箇所は, 先端におけるコアとクラッドを保護するジャケット間の間隙である。外径約0.9mmのジャケットを12000本たばねている部分のシールには, Fig.2.12に示すように周辺にOリングミズを切り, メタル中空Oリングをはめ込んだ後にサファイア板をかぶせ締めつけてある。初期の段階ではガスケットにエラストマ系のカルレッツを使用したが, サファイア板が白濁したため, その後メタル中空Oリングに交換した。

貫通部の詳細をFig.2.13に示す。通常ファイバーの最外郭は自在性を持たせるために, エラストマ系のシースで保護されている。本ファイバースコープの場合は, 放出ガス低減と耐熱性の観点から焼鈍したステンレスの可撓管を使用している。これにより貫通部の真空シールは溶接によって行うことができた。

Table 2.1 Major specifications of the driving mechanism of the prototype manipulator arm.

Items	A axis	θ axis	ϕ axis	Z axis
1) Transportation of torque	Rod	Rod	Rod	Ball-screw
2) Range of motion	0 \leftrightarrow 1000 mm	0 \leftrightarrow 135°	CW 360° CCW 360°	0 \leftrightarrow 1100 mm
3) Velocity of motion	98.3 mm/min	34.2°/min	68.6°/min	1267 mm/min
4) Specifications of power	3 ϕ Induction motor AC 200V/40W Torque 3000 g \cdot cm	Same A axis	1 ϕ Induction motor AC 100V/6W Torque 500 g \cdot cm	3 ϕ Induction motor AC 200 V/ 0.75 kW
5) Mechanical protection of over load	Torque limiter	Torque limiter	Torque limiter	Torque limiter
6) Vacuum seal	Magnetic fluid seal	Magnetic fluid seal	Magnetic fluid seal	Bellows
7) Detector of positioning	Potentiometer	Potentiometer	Potentiometer	Potentiometer
8) Exposed materials in vacuum	Parts of high temp. : Inconel 625 Parts of low temp. : SUS 304			
9) Lubricants	Gears : Dry lubricant (MoS ₂) on Inconel 625 Bearings : SL alloy Washers : Ag Bolts and nuts : TiC coated on SUS 304			

Table 2.2 Weights and torques estimated for the bearings of different materials.

Items	SiN $\mu = 0.5$	Ag $\mu = 0.3$	SL* alloy $\mu = 0.2$
$f\theta 1$ (N)	2283.5	2236.5	2213.6
$f\theta 2$ (N)	751.2	659.4	616.4
$f\theta 3$ (N)	310.3	241.1	211.4
$\tau\theta$ (N \cdot m)	4.34	3.23	2.77
$\tau\omega$ (N \cdot m)	0.58	0.43	0.37
τm (N \cdot m)	0.52	0.39	0.33
$\tau m'$ (N \cdot m)	0.17	0.13	0.11
τM	0.56	0.42	0.36

Loading torque (τ_L): 162.7 N \cdot m
 Efficiency of overall (η): 0.15
 Rate torque of motor (τ_R): 3000 g \cdot cm
 τM : Loading rate of motor
 μ : Coefficient of friction
 * Self Lubrication

Table 2.3 Mechanical characteristics of candidate bearing materials.

Items	Materials	SL Alloy (MoS ₂ + WS ₂)	Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	Silver (Ag)	Molybdenum disulfide (MoS ₂)
Tensile strength kgf/mm ²		—	—	12 15	—
Bending strength kgf/mm ²		14 ~ 20	60 ~ 70	—	—
Compressive strength kgf/mm ²		35 ~ 50	170 ~ 190	—	—
Young's modulus kgf/mm ²		8900 ~ 11500	29000 ~ 31000	7700 ~ 8439	—
Coefficient of friction μ		0.1 ~ 0.16 (vac.)	0.6 (atm.)	0.3 (atm.)	0.02 ~ 0.1 (vac.)
Poisson's ratio ν		—	0.24 ~ 0.25	0.367	—
Hardness		95 H _{RB}	1400 ~ 1550 Hv	25 ~ 27 H _B	—
Max. allowable temp. (in vacuum)		850	1000	—	1100

Table 2.4 Major specifications of the titanium evaporator.

Items	Specifications
1) Segment Dimensions Major material Weight Number of attachable filament Electric connecting method of filaments	170 mm outer dia. ~ 155 mm length SUS 304 ~ 2.5 kgf 1 ~ 4 / segment Series
2) Filament Materials Dimensions Power	Ti / W, Mo ~ 3.5 mm outer dia. ~ 150 mm length 5 V, 150 A / filament
3) Materials of other component Filament holder Filament sleeve Bolt and nut Insulator	SUS 304 Carbon TiC coated on SUS 304 Al ₂ O ₃
4) Evaporating performance Amount of titanium Velocity of evaporation	2 g / filament 2 ~ 3 mg / sec

Table 2.5 Major specifications of the observation system.

Items	Specifications
1) Fiber scope Number of image core Number of light core Allowable vending radial Depth of focus Viewing directions Viewing angle Allowable temp. Leak rate Outgassing rate Observation performance	12,000 600 ≥ 200 mm 50 mm ~ ∞ Straight / Side 20° ≤ 200°C ≤ 1 × 10 ⁻⁹ Torr·ℓ/s (He) ≤ ~ 10 ⁻¹¹ Torr·ℓ/s·cm ² The distance (ℓ) which is possible to distinguish a defect size of 20 mm × 20 mm. Straight view : ℓ ≤ 700 mm Side view : ℓ ≤ 500 mm
2) Light source Lamp Power	Xe lamp 500 W
3) TV camera Camera tube Number of scanning line Resolution Requirement illuminance	2/3 inch, Single tube 525 Horizontal : 270, Vertical : 300 ≥ 10 lux

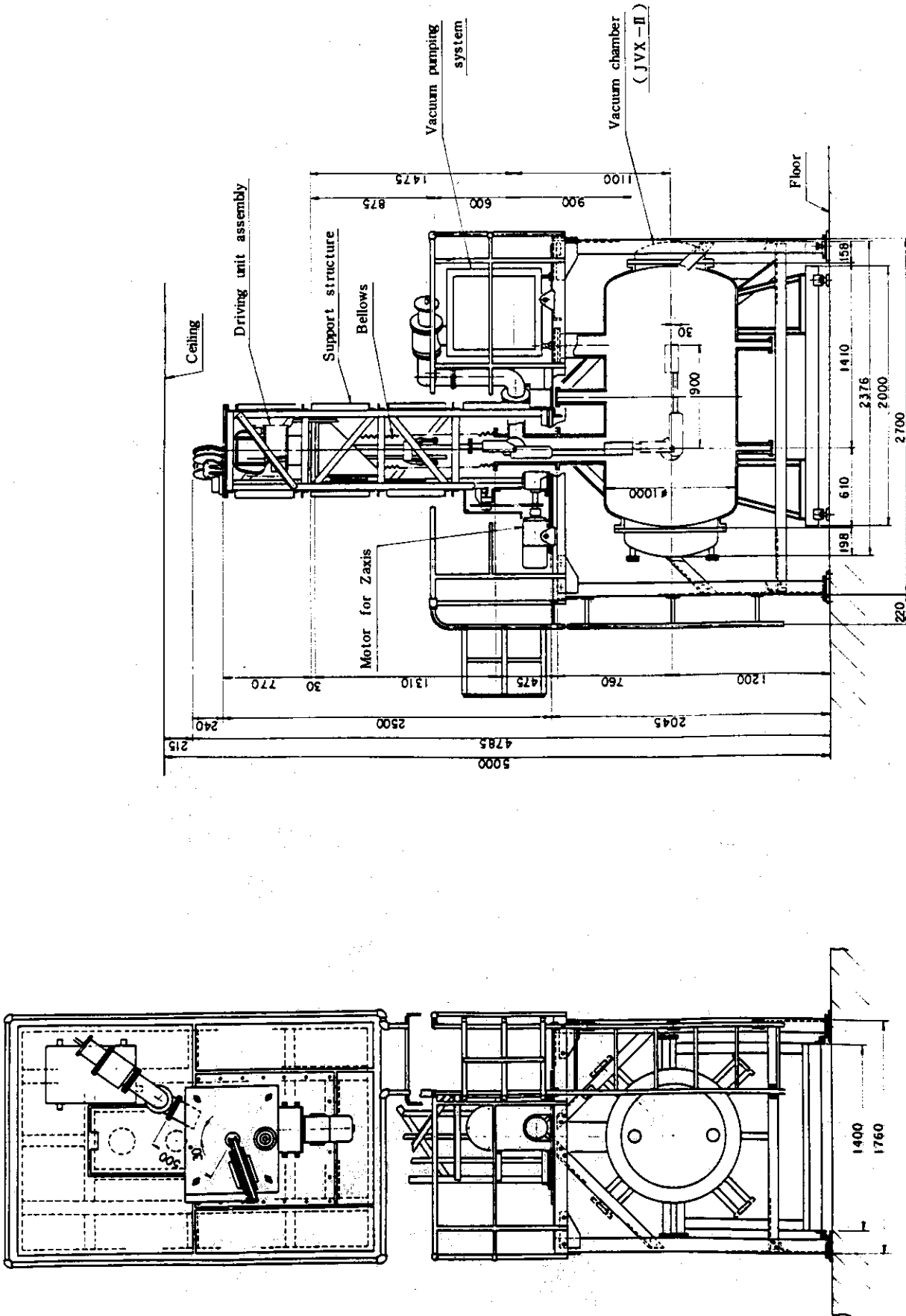


Fig. 2.1 Prototype manipulator installed in the JVX-II vacuum vessel.

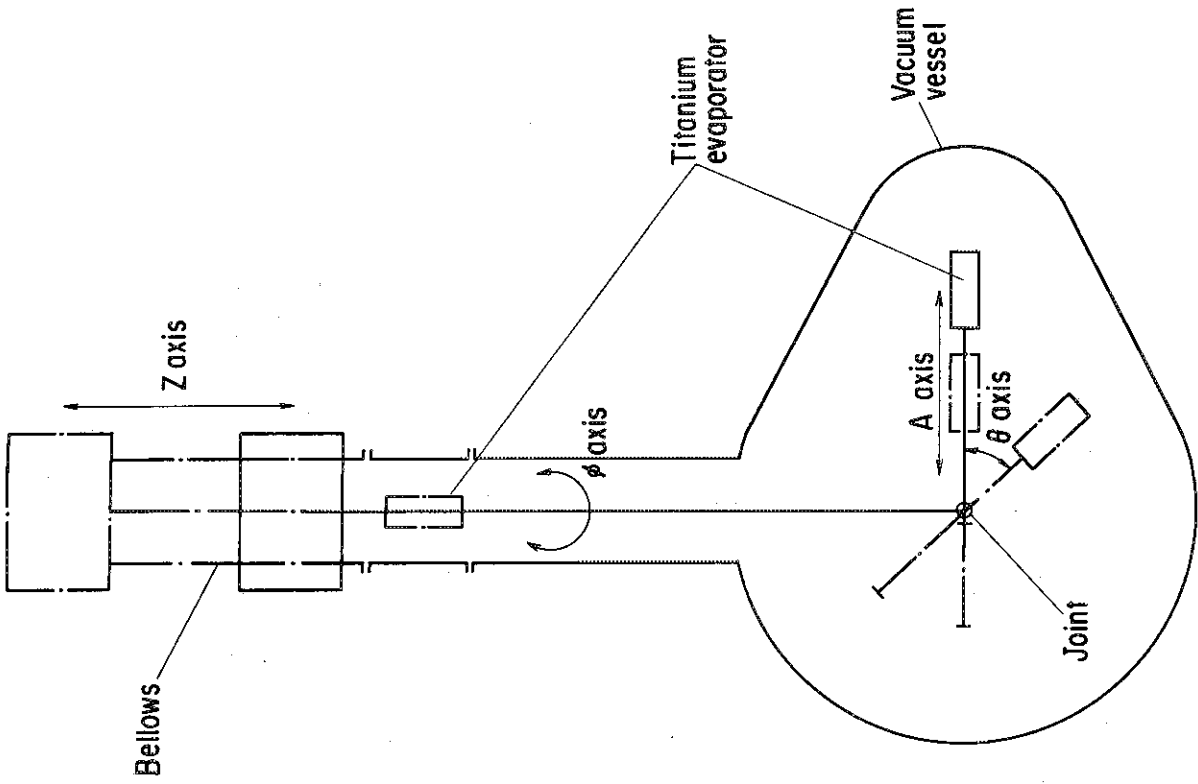


Fig. 2.3 Basic motions of the manipulator.

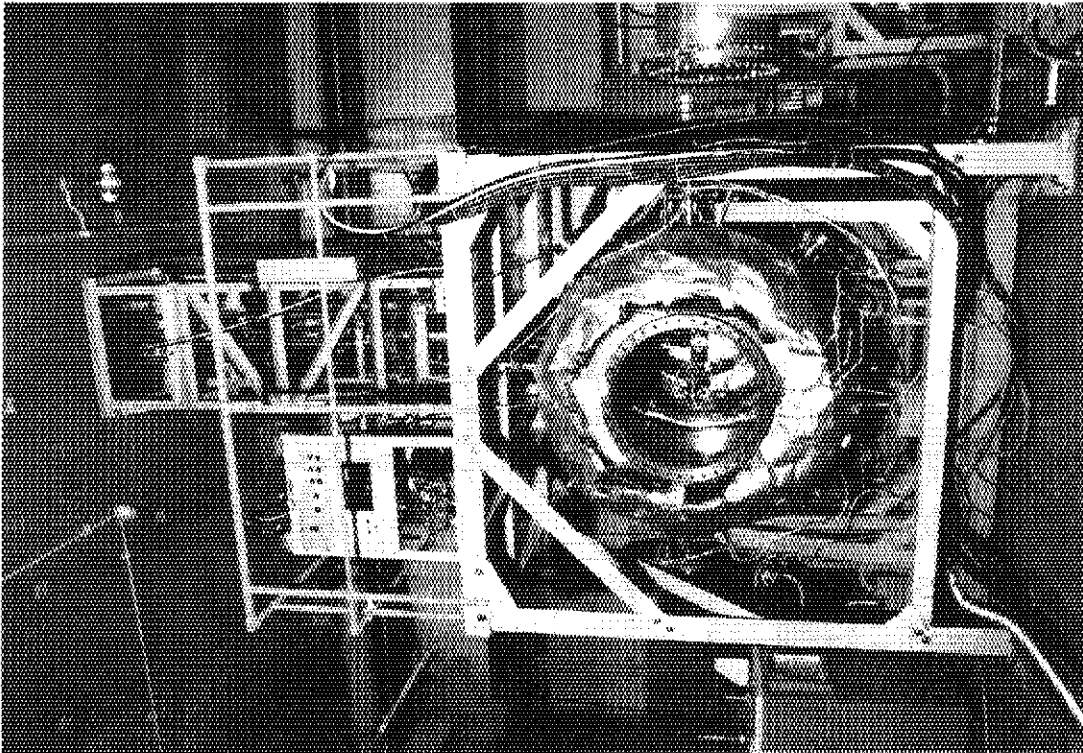


Fig. 2.2 A photograph of the prototype manipulator being installed in the JVX-II vacuum vessel.

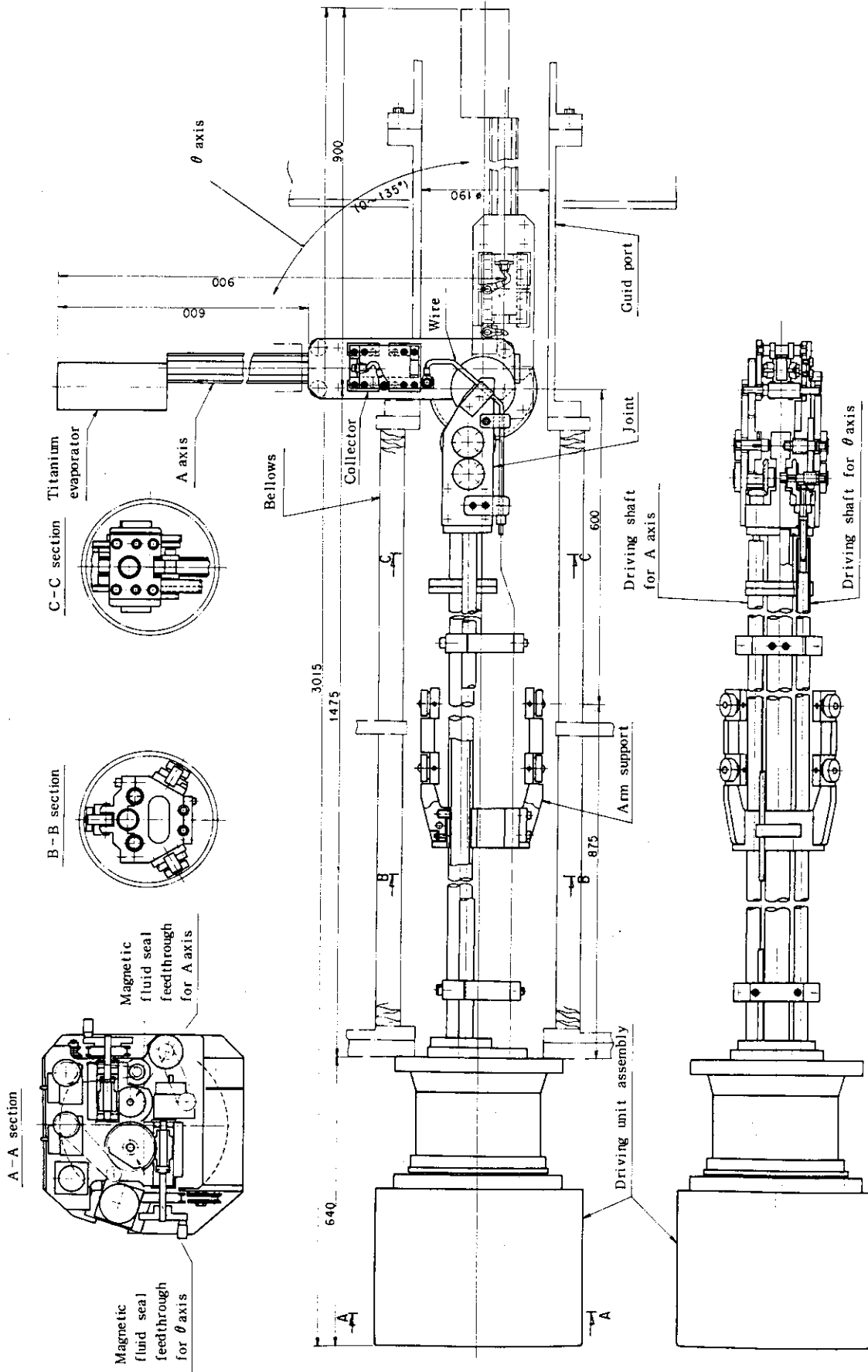


Fig. 2.4 Full design of the prototype manipulator.

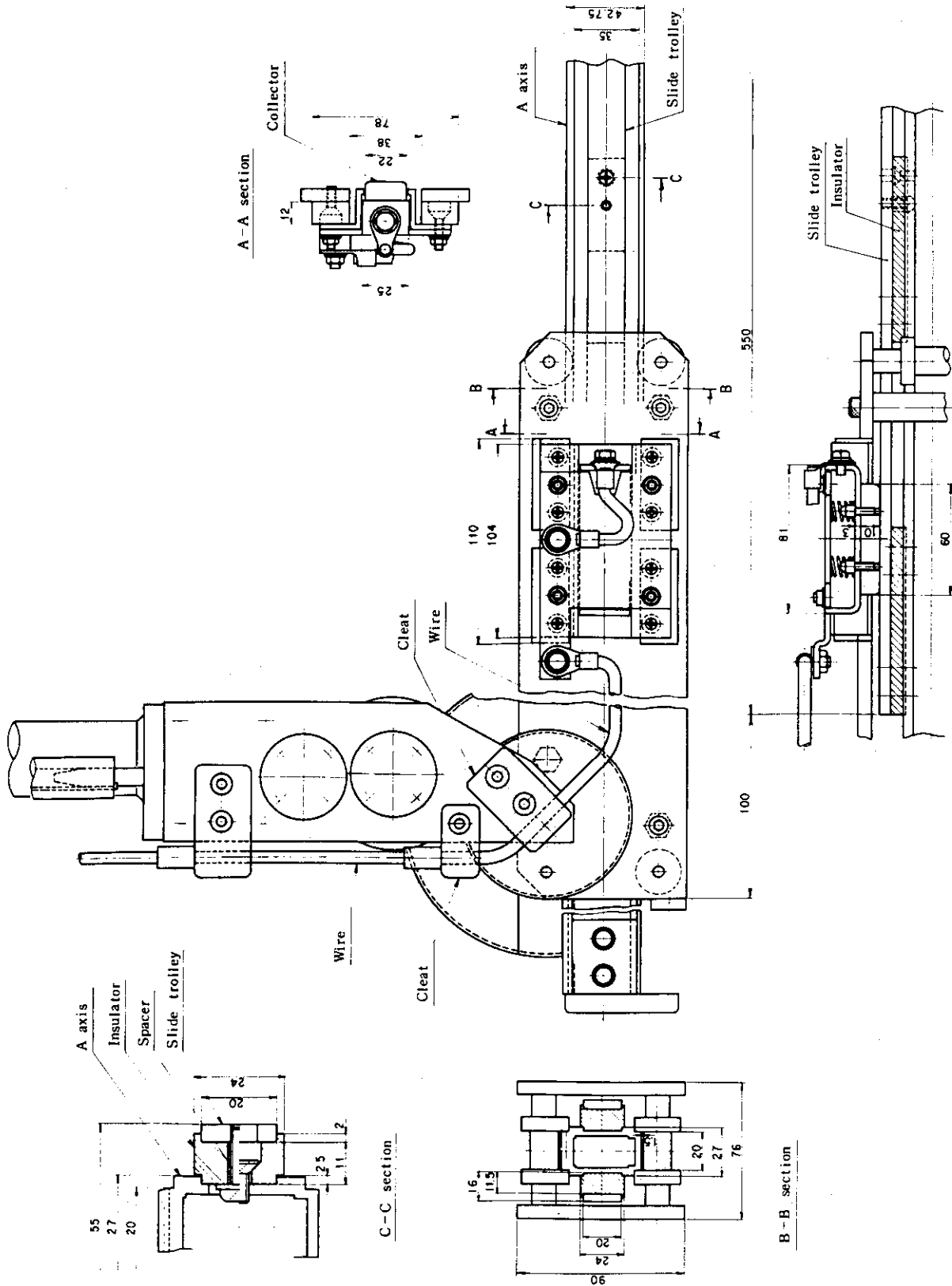


Fig. 2.5 Detailed design of the current collector and slide trolley.

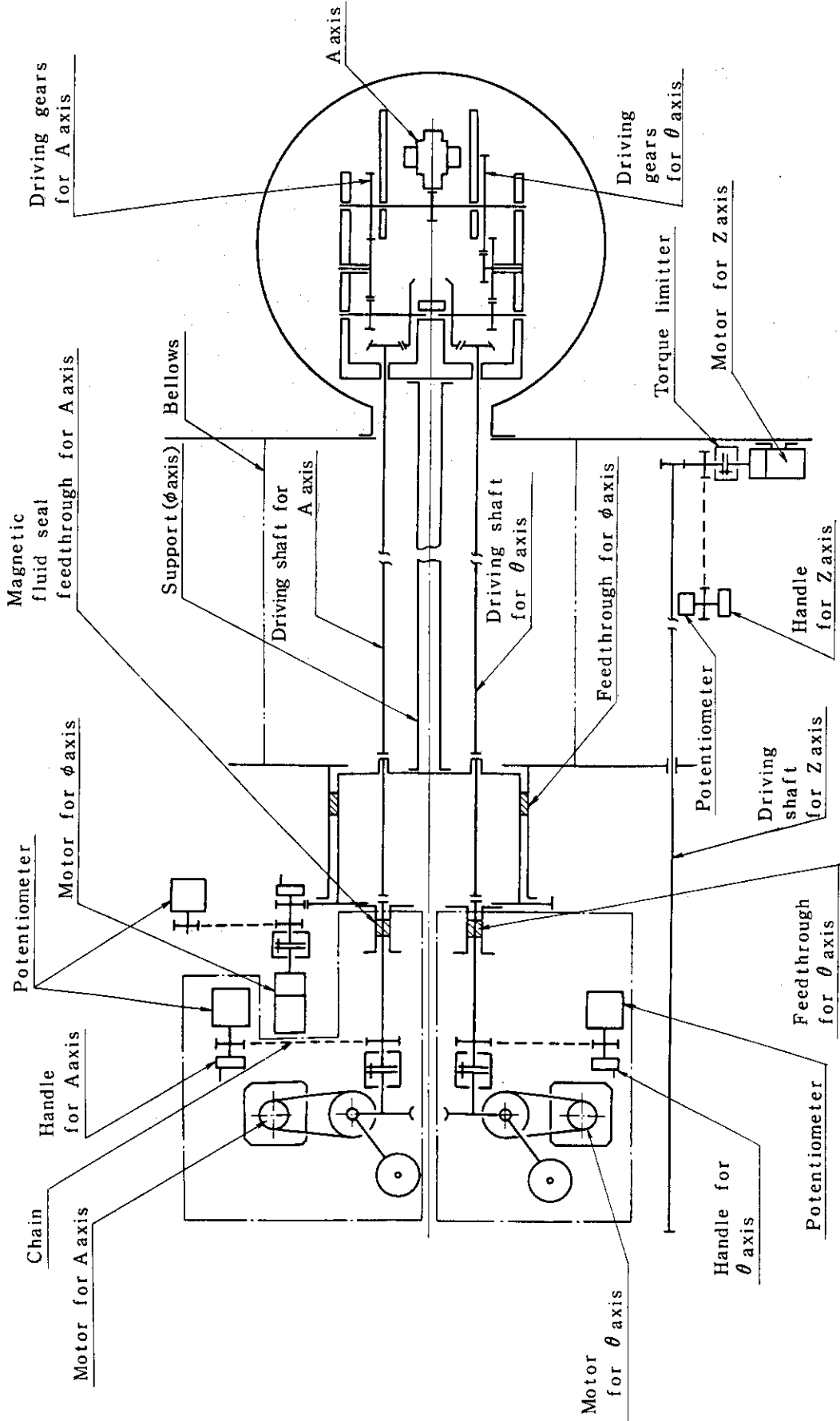


Fig. 2.6 Driving mechanism of the prototype manipulator arm.

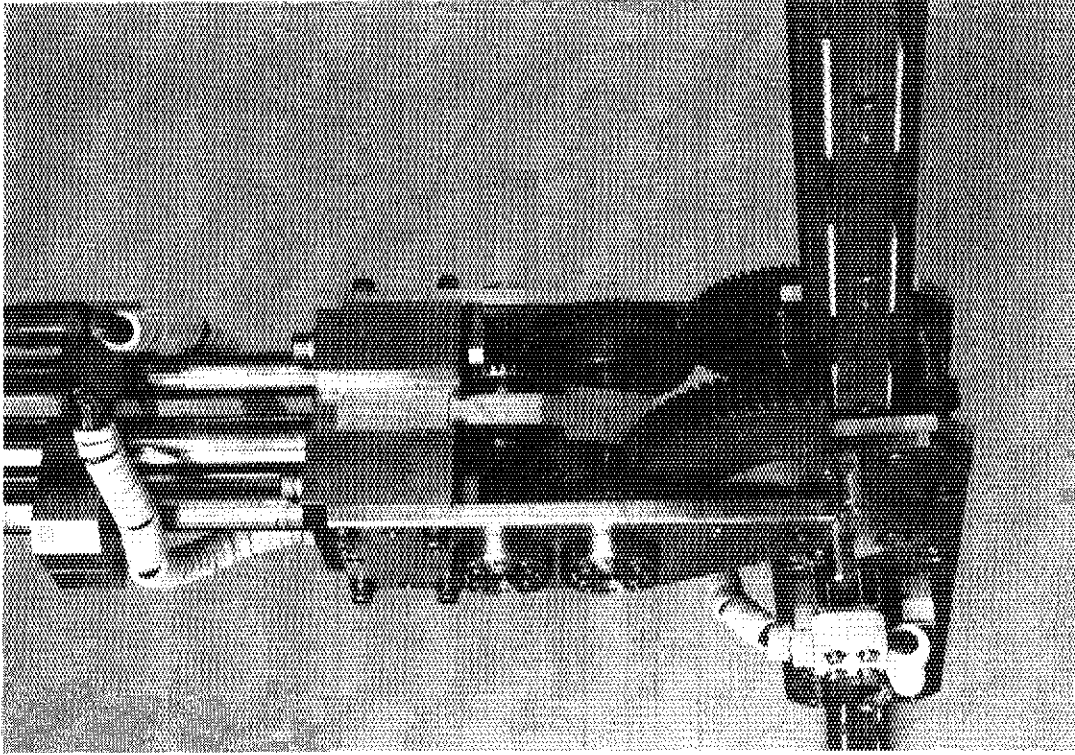


Fig. 2.9 A photograph of the prototype manipulator joint.

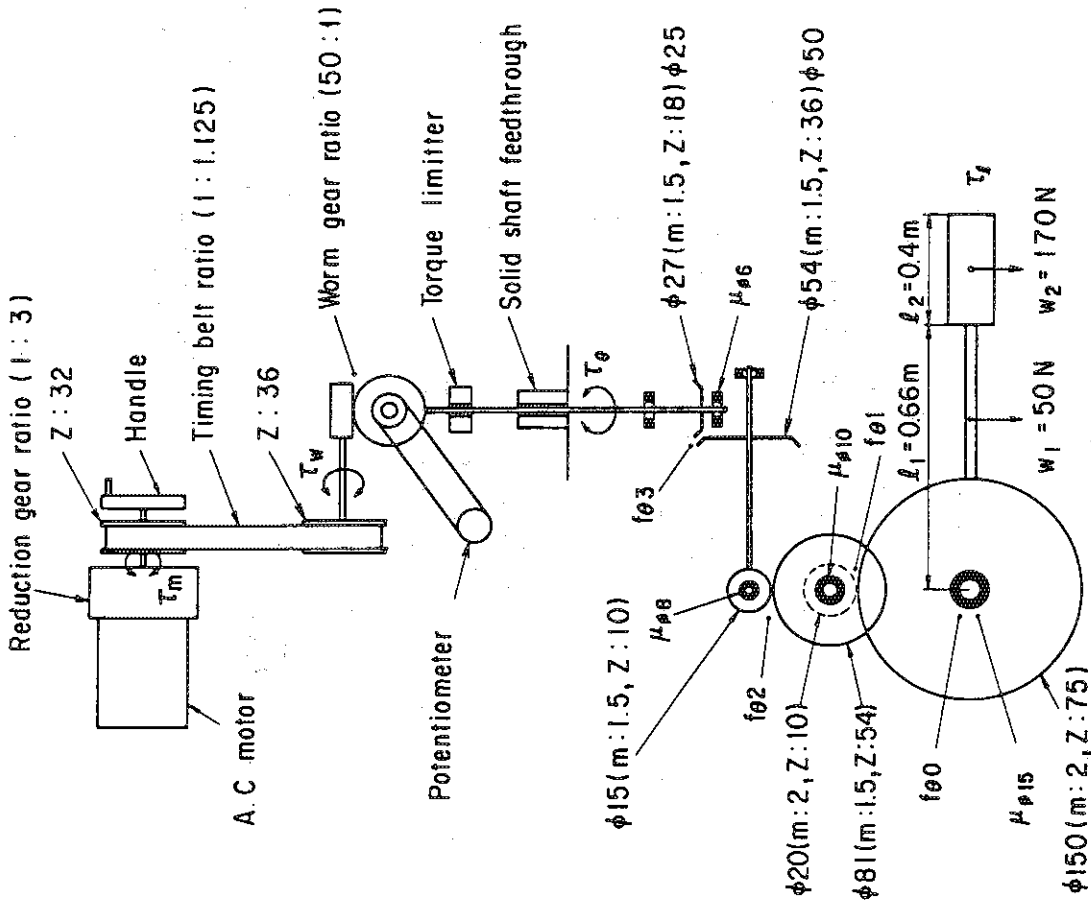


Fig. 2.7 Schematic diagram illustrating the driving mechanism of θ axis.

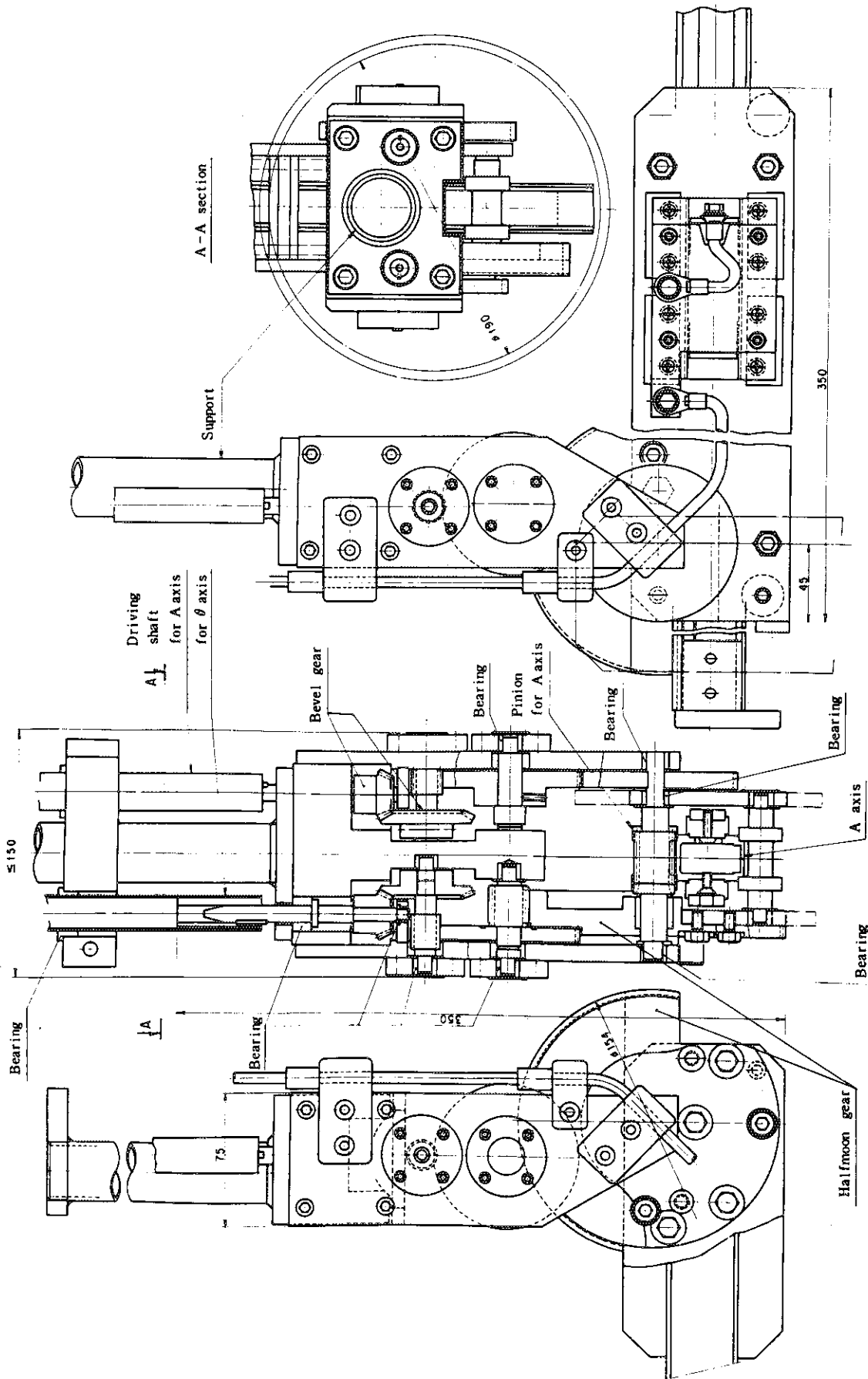


Fig. 2.8 Detailed design of the prototype manipulator joint.

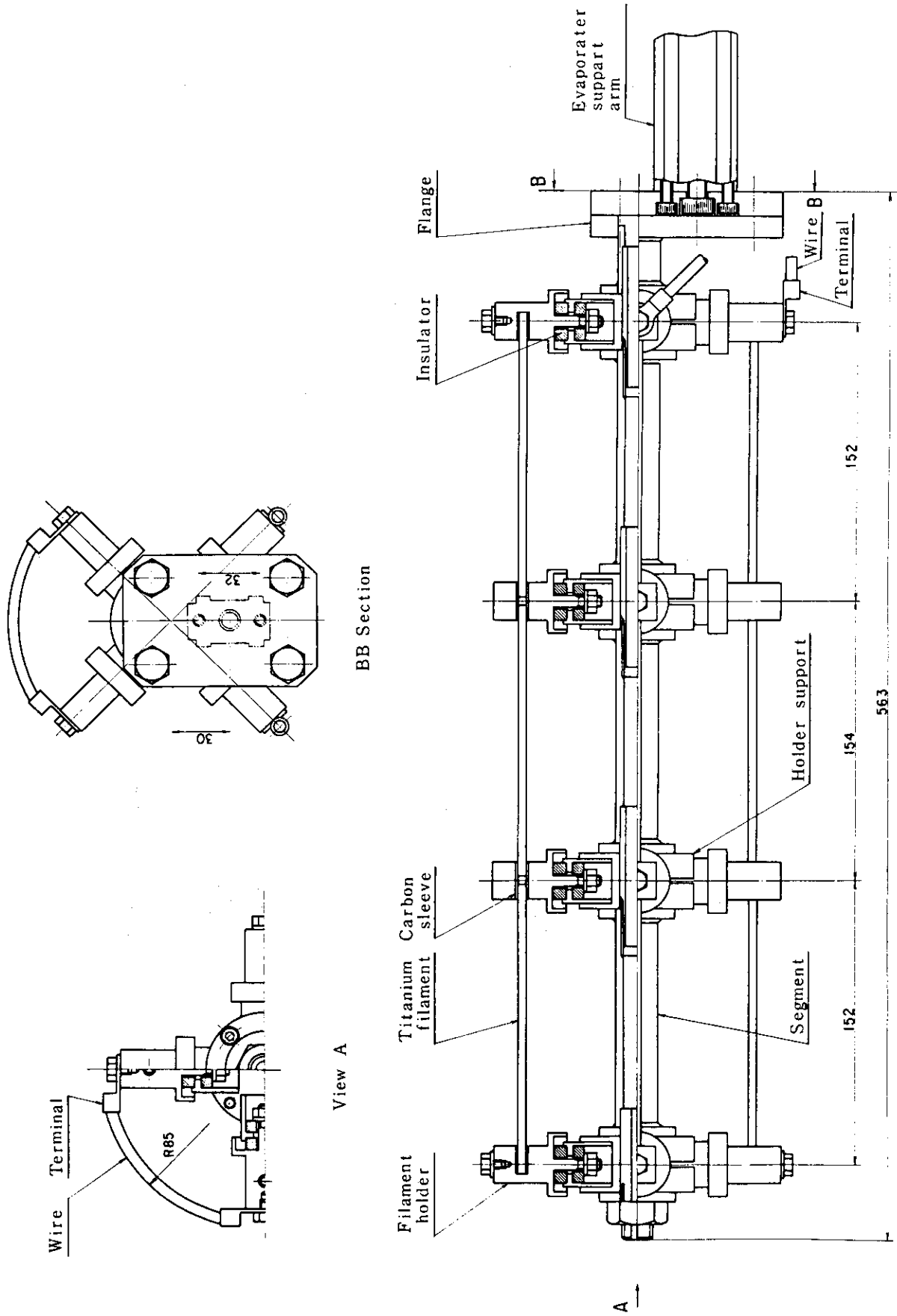


Fig. 2.10 Detailed design of the titanium evaporator, which is composed of three segments.

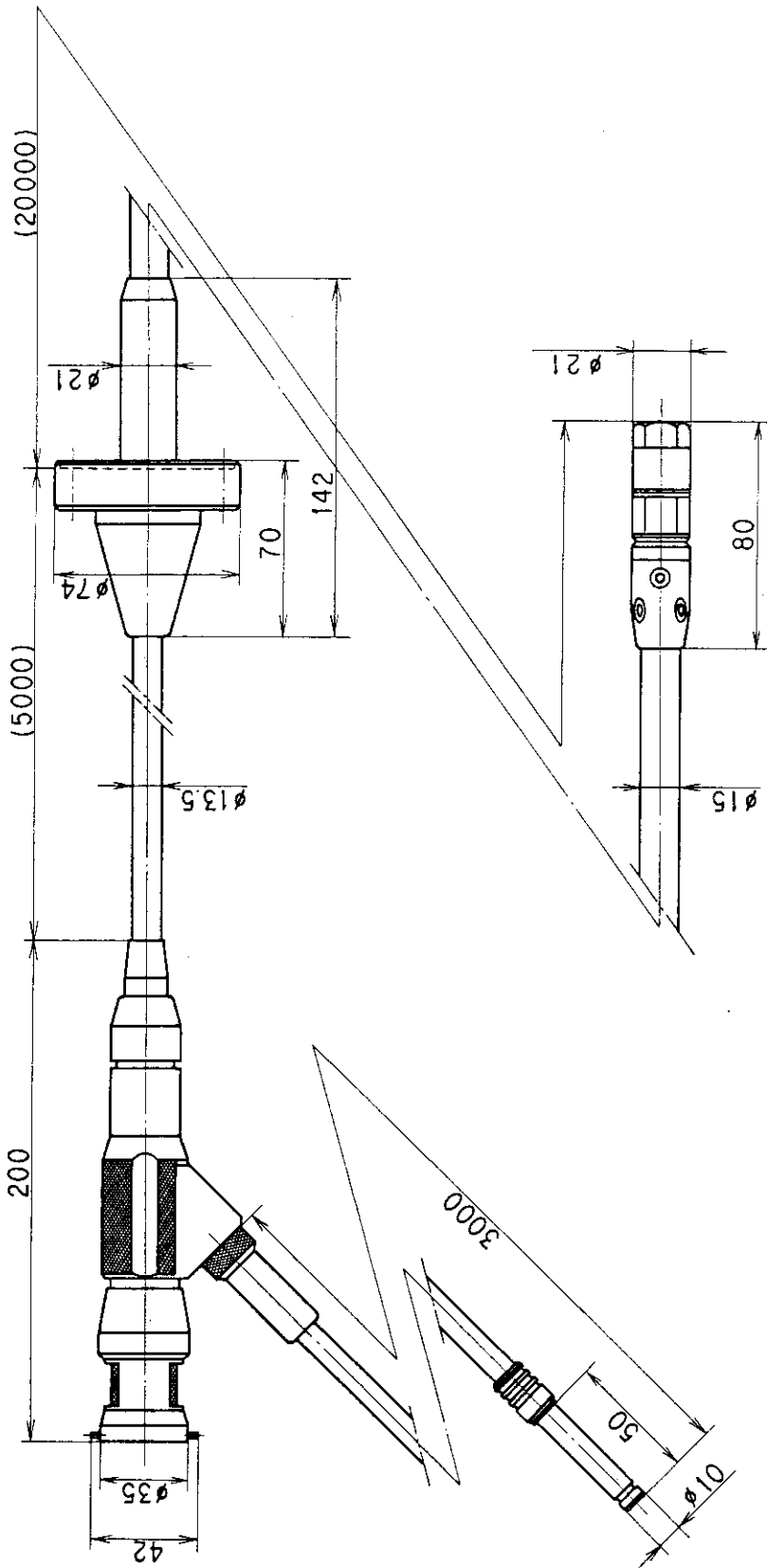


Fig. 2.11 Detailed design of the fiberoptic.

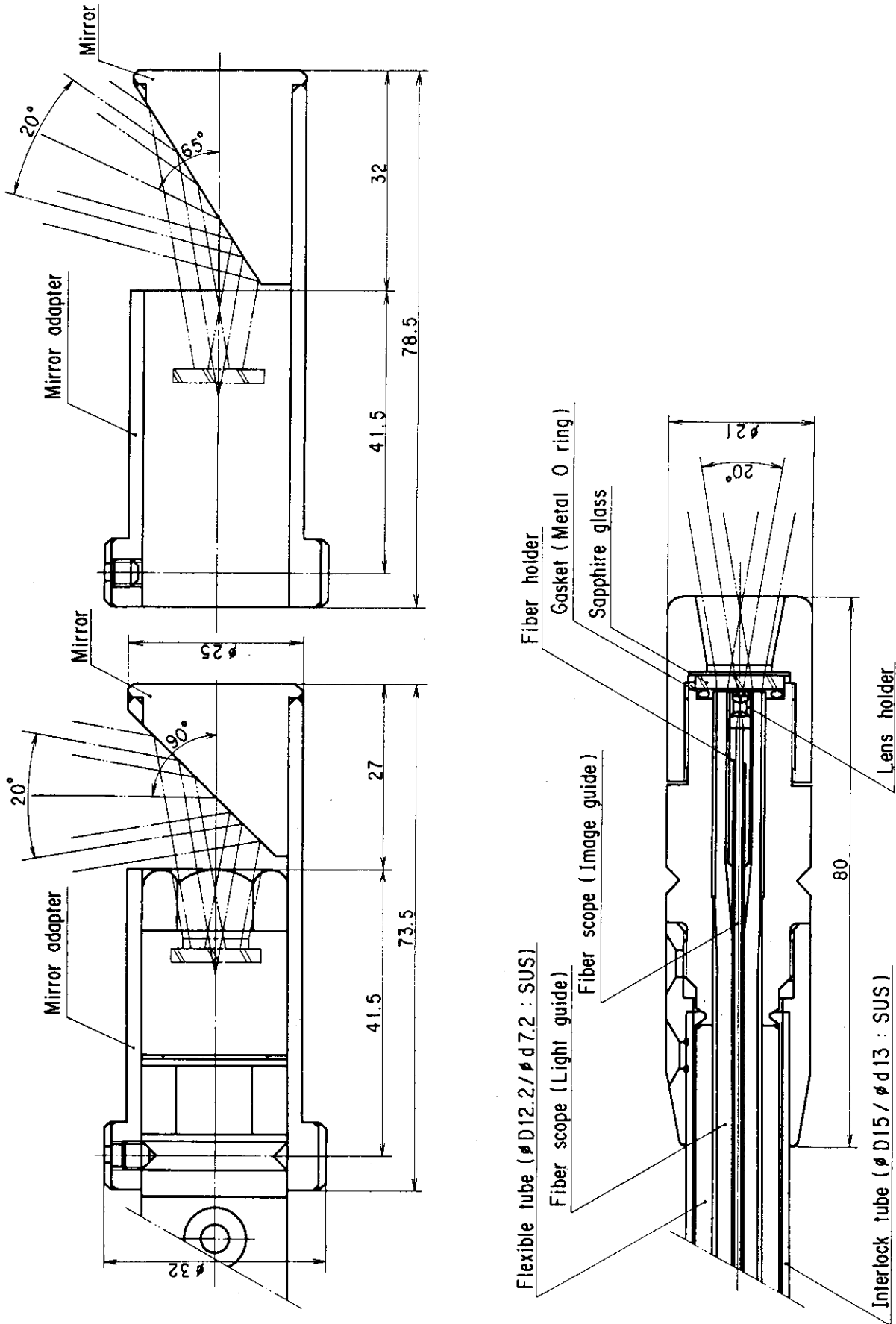


Fig. 2.12 Sectional view of the fiberscope tip.

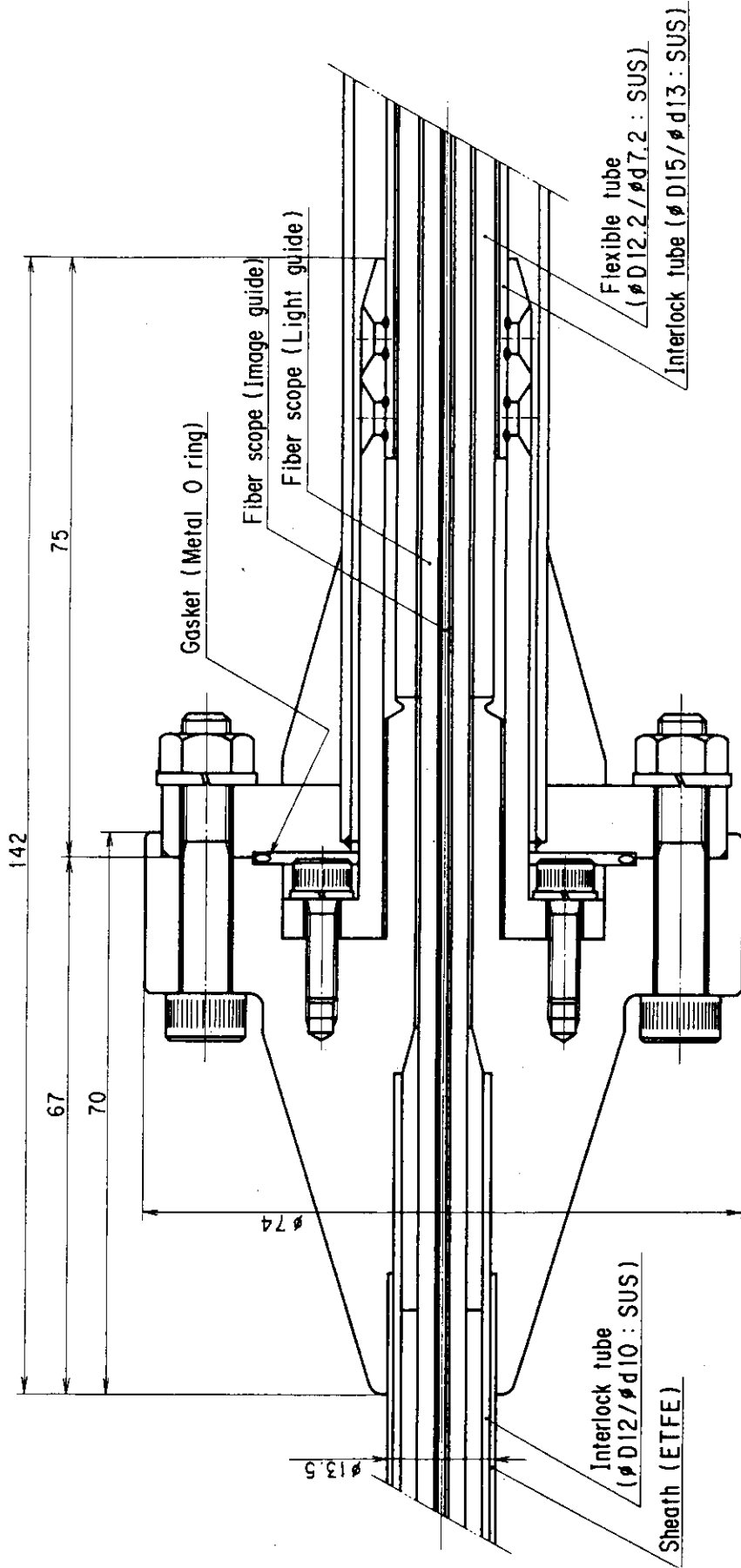


Fig. 2.13 Sectional view of the fiberscope at the vacuum barrier.

3. 試験の結果と考察

3.1 A軸くり返し駆動試験

高温，高真空中に晒られる軸受部について3種類の軸受と軸の組み合わせを選定し，A軸を使用して高温，高真空中でのくり返し駆動試験を行なった。

3.1.1 試験方法

1) 軸受部の組み合わせ

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
軸	インコネル625上に MOS ₂	インコネル625	インコネル625
軸受	内輪つき ローラベアリング (標準仕様) タイプ A タイプ B	SL合金	ローラに銀をイオンプレ ーティングした内輪 つきローラベアリング タイプ A タイプ B

ケース1に使用した軸受は，高温，高真空中での使用を考慮したものではなく，標準品を購入し，潤滑油を除去して使用した。また，ケース3の軸受については，今回の試験のためにあらたに製作したもので，ローラに銀をイオンプレーティングし，真空中での潤滑に配慮を示したものである。同様の処理を施した玉掛軸受けは真空仕様として既に市販されているが，試作機に適用可能な寸法のものなかったため採用は見合わせた。タイプA，Bは嵌合される軸寸法の違いによる軸受の寸法の違いをあらわす。

2) 試験条件

A軸の先端に17kgfの模擬負荷（実機仕様を想定した値）を取り付け，θ軸を90°（水平）に保持した状態で，A軸の前後進くり返し運転を行なった。

A軸ストローク	: 前進 240 mm 後進 240 mm
負荷モーメント	: 162.7 N·m
軸受使用条件	: 237 kgf (タイプA)
(ラジアル荷重)	: 180 kgf (タイプB)
雰囲気圧力	: $\sim 10^{-4}$ Pa
雰囲気温度	: ~ 300 °C

Fig.3.1に模擬負荷を取り付けた試験時のマニプレータを示す。

3.1.2 インコネル625上にMoS₂/ニードルベアリングの組み合わせ

1) 概要

Fig.3.2 に試験結果を示す。くり返し動作は試験用真空容器の表面温度が300℃に到達した時点で開始した。

真空容器の昇温に伴ない圧力は上昇するが、これはそのほとんどが真空容器内壁からの放出ガスによるものである。

軸受部の温度は220℃近くで平衡状態となり、その昇温速度の傾向からみて容器壁からの熱輻射によるものと判断される。

トルク変動の目安となるモータ電流については、くり返し動作を開始してからトルクが大きくなって停止するまで480 mAとほぼ一定値を示している。また動作範囲についても特に変動はなく、設定された範囲を駆動していることを示している。従ってトルク過大の原因は急激に発生したと考えられたが、試験後の分解点検の結果からは、ローラベアリング以外にトルクが異常に増大する原因は見当らず、ベアリング内の摩耗が時間とともに増大し、破損に到ったものと推定された。

2) 分解点検結果

試験に使用されたベアリングは2種類(タイプA, B), 個数3個(タイプA: 1個, タイプB: 2個)である。

(1) 外観検査

① タイプA

外 輪

◦軌道面のほぼ全面に摩耗がみられる。

ロ ー ラ

◦すべてのローラの円筒面に摩耗が見られ、部分的に梨地状になっている。また円周方向に顕著なすり傷が発生している。

◦約半数のローラ円筒面に顕著な軸方向の傷がみられる。

リテーナ

◦4本のステーはローラが乗り上げたために圧延された状態になっている。また、他のステーにも変形などの損傷がみられる。

◦内径面に内輪との接触痕が見られる。

◦サイドステーの一部に顕著な圧痕が見られる。

内 輪

◦軌道面ローラ転送部に摩耗, 変色および顕著な圧痕がみられる。ローラピッチで顕著な軸方向の傷がある。

② タイプB-1

外 輪

◦軌道面のほぼ全面が摩耗している。ローラ転送部を中心とする約半周に圧痕およびすり傷が見られる。

ローラ

○すべてのローラの円筒面両端部にすり傷が見られる。

リテーナ

○特に異常は見られない。

内 輪

○軌道面のローラ転送部全周に顕著な変色および圧痕が見られる。

③ タイプB-2

外 輪

○軌道面の約1/4周に顕著な摩耗および圧痕が見られ、ローラ転送部全周に変色が見られる。

ローラ

○すべてのローラの円筒全周に顕著な圧痕が見られる。

○すべてのローラの一方向の端面が摩耗している。

リテーナ

○一方向の端窓部にローラ端面との接触痕が見られる。

内 輪

○軌道面のローラ転送部に摩耗がみられる。

(2) 寸法検査

基準値に対する増減値を示す。単位は μm 。

測定箇所と基準値 (mm)	タイプA	タイプB-1	タイプB-2
内接円径			
タイプA			
$\phi 18$ +0.006	+ 65		
+0.024			
タイプB			
$\phi 12$ +0.006		+ 50	+ 50
+0.024			
ローラ径			
タイプA			
$\phi 2.5$ 0	- 2.0 + 0.7		
-0.003			
タイプB			
$\phi 1.5$ 0		- 1.6 - 1.2	- 1.5 - 1.7
-0.003			
内輪軌道径			
タイプA			
$\phi 18$ -0.006	+ 3.0 + 5.0		
-0.014			
タイプB			
$\phi 12$ -0.006		- 6.5 - 4.5	- 11.5 - 13.5
-0.017			

(3) 表面硬さ

測定箇所	タイプA	タイプB-1	タイプB-2
外輪端面 653~865*	590	602	598
ローラ円筒面	705	598	622
	715	626	620
780~930*	715	652	661
内輪 58~64**	57	56.5	62

* 単位H_V** 軌道面中央部をH_Vで測定し，H_{RC}に換算

3) 考察

外観検査において見られた軸受各部の摩耗や圧痕は，明らかに無潤滑に原因する接触，転動部の摩耗の増大によるものと考えられる。ベアリングの損傷に到るまでの経緯としては，まず最初にローラと外輪軌道面同士が摩耗を起し，次にリテーナ内径と内輪が接触したものと推定される。ローラおよび内輪軌道面上に見つけられた軸方向の傷は取り外した時に発生したものである。

表面硬さの結果では，全体に硬度の低下がみられるが，これは試験時のベアリング周辺の温度が220℃という高温に晒らされていたことに起因すると考えられる。

故障の発生を覚悟の上で標準仕様の軸受を，しかも無潤滑で高温，高真空中で使用したが，結果的には連続運転時間約30時間，総回転数7200回と，当初の予想を上回る耐久性を示した。これは，使用条件を限定することによって標準仕様の軸受でも高温，真空中での使用がある程度は可能であることを示唆しているといえよう。ただ，間欠的な運転を行なうような場合は，休止時に原因する凝着が大きく影響することも予想される。

3.1.3 インコネル625/S L合金の組み合わせ

1) 概要

Fig.3.3 に試験結果を示す。試験条件，手順は3.1.2の場合とまったく同様である。

この組み合わせは最も信頼性あるものとして当初から予想していたが，結果的には無故障で連続運転約60時間，1500回のくり返し駆動（降温時も継続してくり返し駆動を行ない，最終的には78時間，2000回の動作回数となった）に耐えることができた。この駆動回数は，“その場装置”のA軸のフルストローク（1000mm）に換算して，約2年間の使用回数に相当する。

この組み合わせの試験後の分解，点検などの結果については後述するθ軸のくり返し試験の項で述べることにする。

3.1.4 インコネル 625/ローラに銀をイオンプレーティングしたローラベアリングの組み合わせ

1) 概要

Fig.3.4 に試験結果を示す。試験条件、手順は 3.1.2 と同様である。

ベーキングに伴う圧力上昇が先のケースに比べ少なくなっているのは、これまでの 2 ケースの試験の都度ベーキングを行っていることによると考えられる。

モータ電流、動作範囲（ポテンシオメータの出力）についてもこれまでと同様、トルク過大による停止直前まで特に変化はみられない。連続駆動回数は、ある程度予想されたものの、これまでのものに比べ極めて少なく、471回である。この原因はイオンプレーティングされたローラからの銀の剥離によるものである。玉軸受に比べ、ローラベアリングの場合は面接触となる箇所が多く、特にローラ端面の銀のコーティング膜についてはその耐久性に当初から懸念を抱いていた。今回の結果はまさにそれを証明したといえる。真空仕様様のローラベアリングが市販されていない理由でもある。

2) 分解点検結果

Fig.3.5 は内輪をはずした試験後のローラベアリングである。本図ではその様相が定かではないが、ローラがリテーナと外輪に凝着している。Fig.3.6 はピニオン軸と嵌合された内輪の軌道面である。周方向に 3 箇所の摩耗痕がみられる。Fig.3.7 はマニプレータのアーム回転部のケーシングの一部で、軸受が挿入されていた箇所である。剥離した銀の小片が無数に付着している。

寸法検査については特に実施しなかった。

3) 考察

標準品のローラベアリングのローラ材質が通常の軸受鋼（S U J - 9）であるのに対し、本試験に供したベアリングのローラ材質には耐熱鋼（S K H - 9）を使用した。

標準品が約 1000 回のくり返し駆動耐久性を示したのに対し、真空仕様としての潤滑処理を施したベアリングが、その半分の耐久性にも満たないというのは予想外であった。これは多分に剥離した銀の小片が、ベアリングの円滑な駆動に必要とされるクリアランス（すき間）を埋めた結果と推定される。

3.2 θ 軸くり返し駆動試験

θ 軸のくり返し試験では、軸受部に S L 合金とインコネル 625 の組み合わせを採用した。

3.2.1 試験方法

A 軸の先端に蒸発源の替りに 17 kgf の模擬負荷を取り付け、 θ 軸の運動として、A 軸が水平になった時の位置を 0° とし、上下方向にそれぞれ 13° ずつ（試験用真空容器の空間上の制限から設定）の往復運動を一回とする連続 1000 回の試験を実施した。その他の条件を次に示す。

負荷モーメント : 162.7 N·m

雰囲気圧力 : $\sim 10^{-4}$ Pa

雰囲気温度 : ~ 300℃

3.2.2 分解点検

1) 駆動トルク

Fig.3.8 に試験結果を示す。連続駆動中のモータの負荷電流およびモータケーシング温度の変化は駆動部のトルク変動の目安となる。トルク変動の正確な測定にはトルクメータの使用が望ましいが、今回の場合取り付け方法などの問題から上記の方法で代用した。

駆動開始直後からモータのケーシング温度が上昇しはじめたが、これはモータに付属の電磁ブレーキの故障によるもので、軸受他の故障とは無関係である。とりあえずの応急処置として強制冷却によって対処した。

負荷電流については、後半多少の変動はみられるものの、0.4 A とほぼ一定値を示している。Fig.3.9 に負荷電流の波形を示す。上向き方向の駆動、すなわち模擬負荷を持ち上げる方向では下向きの場合に比べ、電流値は約 1.3 倍、また駆動に要する時間は上向きで 49 秒、下向きで 45 秒程度となっており、重力に逆らう方向の駆動では負荷が大きくなることを示している。この傾向は開始直後と終了直前の比較でも特に違いはなく、駆動部にトラブルの生じていないことを示している。負荷電流の波形上に生じるリップルについては、模擬負荷の揺れ、あるいは軸受の形式がすべり軸受であり特に摩擦力の大きい部分の軸受が低速であることに起因するのではないかと考えられる。

2) 軸 受

Table 3.1 に各軸受の負荷条件を示す。常温、大気中での一般的な使用条件に比べかなり緩やかである。特に回転数については連続 10 数時間にわたるくり返し試験後でも、大きいもので合計約 6000 回転である。この程度の条件下では軸受、歯車への影響も少ないものと予想された。

次に試験後の解体検査の結果について述べる。検査項目は、外観検査、寸法測定、摩耗状態について行った。

Table 3.2 に結果を示す。

一部の軸受については、使用前黒灰色であったものが試験後赤銅色に変色していた。変色の原因と変色後の自己潤滑性合金の摩擦摩耗特性他について調査した結果を次に述べる。調査項目は実体顕微鏡、金属顕微鏡、SEM による表面観察と組織観察、EPMA、X線蛍光分析による組成分析、そして摩擦試験である。

(1) 表面観察および組成分析

Fig.3.10 に SEM による表面の観察写真を示す。変色したサンプルの表面にみられる被膜は、EPMA による定性分析の結果、銅の滲出によるものと判定された。変色なしのサンプルは加工面のままであった。

(2) 組織観察

Fig.3.11 に結果を示す。両サンプルともに、二硫化タングステン、二硫化モリブデンの粒径、巣孔の状態は類似しているが、変色したサンプルでは白色で示される銅の滲出がみられ、モリブデン、タンタル、銅の硫化物が少ない。これは変色したサンプルでは

製造時の焼結が不十分であったためと推定される。

(3) 摩擦面観察

Fig.3.12にSEMの結果を示す。変色あり，なし，いずれのサンプルにも摩耗はみられない。

(4) 摩擦試験

両サンプルについてそれぞれの表面と内部の摩擦係数を測定した。面圧 $53\text{kg}/\text{cm}^2$ の結果については次の通りであり，変色したサンプルの摩擦係数は変色なしのものに比べ，表面，内面ともに若干高目である。

表 面		内 面	
変色あり	変色なし	変色あり	変色なし
0.15	0.12	0.16	0.10

以上の結果から，変色の原因は銅の滲出によるものであることがわかった。これは変色したロットについては，製造時のホットプレス温度が低かったため，合金中に未反応の銅単体が残留したためと推定された¹⁹⁾。しかしながら摩擦摩耗特性については変色のないものとの比較では特に大きな変化はみられず，駆動に関するトラブルは生じなかった。ただ，このような状態が生じた場合の長期間の使用において生じる問題については今後の検討が必要である。

3) 歯 車

歯車についての試験後観察では，下地が露出するような固体潤滑剤の剥離はみられなかった。

歯車の耐久性や表面にコーティングされた固体潤滑剤の健全性は，噛み合う歯車の歯面強度（ヘルツ応力： σ_H ）によって評価される。 θ 軸のそれぞれの歯車について計算した結果を次に示す（Fig.2.7参照）。

歯 車	σ_H (kgf/mm^2)
$z : 75, z : 10, m : 2$	104
$z : 54, z : 10, m : 1.5$	125

ヘルツ応力の疲労限界値（ σ_{H0} ）は， $\sigma_{H0} = 0.25 H_B$ で示される。試作機の歯車の材料はインコネル625であり， 500°C での硬さ（ H_B ）を200と推定すると，いずれの歯車においても $\sigma_H > \sigma_{H0}$ の結果となる。耐久性の点で不安は残るが，回転数が約 $0.1 \sim 4\text{rpm}$ ときわめて低いことと，使用時の温度が 300°C 程度であることが幸いしている。Fig.3.13に θ 軸歯車の歯面についての試験後の観察写真を示すが，顕著な変化はみられない。今後の駆動回数の積算による経過観察が重要である。

3.3 高温部の焼き付き

Fig.3.14にフィラメント通電時のフィラメントホルダ各部温度とアーム回転部温度について、Fig.3.15に加熱されたフィラメントの様子を示す。真空容器内圧力は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Paの範囲である。フィラメントの接続本数には関係なくホルダ部の最高温度は約800℃である。フィラメントは穴あきのステンレス製のブロックにカーボンスリーブをはめ込み、炭化チタンをコーティングしたステンレス製のボルトで固定されている。これまでの数回の実験結果でみる限り焼き付きは生じていない。

アーム回転部の温度は時間とともに上昇するが、2時間後には約300℃で飽和する傾向を示す。これは真空容器をベーキングしていない時の値であるが、試作機を使用しての炭化チタン膜作製時の300℃ベーキング時でも350℃程度の温度上昇である。これらの温度、圧力条件下での試験後のアーム回転部の駆動においても軸受、歯車などに焼き付きによる故障はなく、円滑な動作特性を示した。

Fig.3.16にJ V X - II 真空容器内に装荷された蒸発源とアーム回転部を示す。

3.4 観察装置の試験

試験はマニプレータに取り付けたファイバースコープについて、分解能試験、試料観察試験、駆動追従性試験、真空シール健全性試験の4項目について行った。Fig.3.17にマニプレータに取り付けられたファイバースコープを示す。

3.4.1 分解能試験

1) 被写体

Fig.3.18にサンプルチャートを示す。サンプルチャート上の線巾(w) 1, 2, 3, 4, 5 mmの4種について実施した。

2) 試験システムの構成

Fig.3.19に示すシステムを試作機のマニプレータに取り付けた。

3) 試験時の環境と観察方向

常温, 大気中/直視

4) 方法

ファイバースコープの先端とサンプルチャートとの距離(ℓ)を変え、テレビモニタにて画像を目視観察する。 ℓ については試作機マニプレータの動作上の制限から最大690mmとした。

5) 試験結果

Table 3.3に結果を示す。

3.4.2 試料観察

1) 被写体

40mm角のモリブデンブロック上に炭化チタンをコーティングし、その一部をエレクトロンビームでエロージョンしたものの。Fig.3.20参照。

2) 試験システムの構成

3.4.1, 2)項に同じ。

3) 試験時の環境と観察方向

(1) 常温, 大気中/直視

(2) 常温, 大気中/側視

(3) 高温 (200℃), 真空中 ($\sim 1 \times 10^{-5}$ Torr)/側視

4) 方法

3.4.1, 4)項に同じ。

5) 試験結果

(1) 直視の場合は $l = 690$ mmにおいても被写体上の正常部と損傷部の判別が可能である。

(2) 側視では直視画像に比べ、側視用ミラーの反射光を直接拾う結果となるため見にくくなっている。 $l = 800$ mmでは判別は困難である。多少の安全率を見込んで側視の場合は $l = 500$ mmあたりが適当と思われる。Fig.3.21~24に $l = 50, 300, 500, 800$ mmのときの観察写真を示す。これらの写真はビデオテープに収録したものを再度CRT上に再現、写真撮影したものである。Table 3.4に側視観察における l とアーム位置それに被写体との関係について示す。

(3) 高温, 真空中で観察された画像は大気中のそれに比べ画質の劣化は特に認められない。

(4) なお, 参考試験として, JT-60に使用され, その一部がプラズマとの相互作用により浸食されたポロイダルリミタ (Fig.3.25参照) を被写体としたときの観察写真 (Fig.3.26, 27) を示す。先の試料の損傷部が平面的であったのに対し, 本試料は厚みを持っているためその分画像が鮮明である。

3.4.3 駆動追従性試験

1) 試験方法

マニプレータの4駆動軸のうち, A, θ 軸の2軸をそれぞれ次の範囲で駆動させた時のマニプレータへの影響, クリート部との接触の有無, ファイバースコープの追従性について検証した。

A軸: 0 ~ 260 mm

θ 軸: 0 ~ 135°の範囲

2) 試験結果

(1) マニプレータ本体への影響は特に認められなかった。

(2) クリート部との接触については動作条件によっては接触することが確かめられたがクリートを損傷する程のものではない。Fig.3.28に θ 軸の動作位置とクリートとの接触状況について示す。

この結果を踏まえ，“その場装置”においてはクリートとの接触はありうるとの判断に立ち、安全策を講じることにした。具体的にはクリート用ネジ類の高さを低目のものにするか、埋め込み型にし、クリートカバーを設けることが考えられる。

- (3) マニプレータに対するファイバーの追従性については、全体に緩やかな曲げで追従するため座屈などに関しては特に配慮する必要のないことがわかった。たとえば、A軸と θ 軸の位置をそれぞれ -260mm 、 135° （上向き上限値）として、ファイバーに最も厳しい曲げ条件を与えた場合でも、曲率半径は 150mm で最小許容範囲（ $100\sim 130\text{mm}$ ）をクリアしている（Fig.3.29を参照）。

3.4.4 真空シールの健全性試験

1) 試験方法

高温、高真空中においてファイバースコープに曲げとねじりを与えた時の、被写体の像のゆがみ等を調べた。

曲げ条件 : A軸（ $0\sim 260\text{mm}$ ）
 : θ 軸（ $0\sim 135^\circ$ ）
 ねじり条件 : ϕ 軸（ $+180^\circ\sim -150^\circ$ ）

2) 試験結果

高温中での使用による画像の焦点異常はファイバー先端に取り付けてある対物レンズの移動に原因する。これは対物レンズを固定してある接着剤の耐熱性に左右されるが、今回の試験結果では画像に異常は認められなかった。

3.5 チタンフィラメント通電試験

使用したフィラメントのフィラメント単体の各種試験については既に実施されており、その報告もある⁴⁾。本試験では試作機の蒸発源に実際にフィラメントを取り付け、主に試作機でのチタンの蒸発特性について検証を行った。

また、通電時の温度上昇に伴う蒸発源各部への影響については、3.3で述べてあるのでここでは特にふれない。

1) 試験方法

- (1) 蒸発源のセグメント構成とフィラメント装荷本数について示す。

	セグメント数	フィラメント装荷本数
ケース 1	1	4
ケース 2	3	12

(2) 通電時間

ケース 1 : 約 1 時間
 ケース 2 : 約 2 時間

(3) 環境条件

常温，真空（ $\sim 10^{-7}$ Torr）

2) 試験結果

Fig.3.30にケース1，2それぞれについて通電時の電圧と電流値を示す。

ケース1については電圧に対する電流の追従性が比較的順調である。通電開始3分後に190A程度の急激な電流の立ち上りがみられるが，これはチタンの溶融に伴ない，カーボンスリーブとフィラメント間の接触抵抗が減少したこと（フィラメントは螺旋状に巻かれているため，その外径とスリーブ内径にはスキ間がある）と，カーボンの持つ負の温度係数によるものと推定される。その後通電停止までは電圧，電流とも約45V，160Aと一定である。

ケース2については，通電開始約8分後に過電流（200A以上）により自動停止している。再起動には電圧制御曲線にもみられるように，かなりの時間をかけて段階状に通電している。Fig.3.31に通電加熱後のフィラメントを示す。

Fig.3.32に通電時のJ V X - II真空容器内圧力変化について示す。

ケース2については，通電開始約8分後に急激な圧力上昇を示しているが，これは過電流によって自動停止した時刻と一致している。その後の圧力変化も電圧，電流の変化に追従した形となっている。

ケース1はケース2の場合に比べ，圧力上昇はそれほど大きくはない。セグメントとフィラメント数が少ないこと，通電前に若干の予備通電を実施したこと，それに試験前までの真空容器の大気曝露時間が少なかったことなどによるものと考えられる。

3) 考 察

フィラメント単体試験の結果からは，チタンが蒸発を開始するのに必要な電圧，電流値はフィラメント1本あたり約5V，150Aである。

これを，ケース1，2の場合でみると，150～160A通電時の電圧は前者で約23V，後者で50～60Vと比較的良好一致を示している。しかしながら実機においては，フィラメントまでの電気配線が格段に長くなることからそれによる電圧降下分を補う必要があると考えられる。

Table 3.5に蒸発後のフィラメントの重量減少について，Fig.3.33に新しいフィラメントと蒸発後フィラメントの外観を示す。フィラメント1本あたりの重量減少はケース1の場合で0.425g，ケース2の場合で0.708gである。これを単位時間あたりの蒸発量で見ると，ケース1では $0.14 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ ，ケース2では $0.12 \text{ mg} \cdot \text{sec}^{-1}$ と概算される。重量測定は有効読み取りケタ数10mgの直示天秤により行った。ケース2はケース1に比べ約1.9倍の通電時間であるが，蒸発量は1.7倍程度である。

フィラメント単体試験の結果⁴⁾では，蒸発速度は毎秒1.7～3.4mgと示されているが，今回の2ケースの実験の結果では1ケタ小さな値となっている。この原因は不明であるが，フィラメント温度が単体試験時の一本の場合より低かったのではないと思われる。

フィラメントの取り付け位置の違いによる蒸発量の変化についてはそれほど大きな違いはみられない。なお，Table 3.5において，フィラメント位置3-④の重量減少値につい

ては計算から除外してある。

3.6 炭化チタン膜の作製

試作機の総合試験として、J V X - II の真空容器内で炭化チタン膜の作製を行った。

1) 試験方法

内径 1000 mm, 長さ約 1500 mm の J V X - II 真空容器内の中心に, 先端に蒸発源を取り付けた試作機マニプレータを設置し, 真空排気の後 400℃までのベーキングを実施, 真空容器を含む装置の加熱脱ガスを行った。

基板としてモリブデンの小板を蒸発源中心から半径方向に 500mm の位置に置いた。加熱脱ガスの後, ベーキング温度を 300℃まで降温, 保持し, 温度の安定を見計らった後にフィラメントへの通電を開始し, 規定電流に達した後に, 真空容器側面の既設ポートから可変リークバルブを通してアセチレンガスを導入した。真空容器内のアセチレンガス圧力は, 蒸発チタンの平均自由行程と蒸発源から基板までの距離 (50cm) との関係から約 1×10^{-4} Torr に一定に制御した。

コーティングは電離真空計による全圧の測定と質量分析計によるアセチレンガスの分圧を監視しながら50分間行った。

基 板	: モリブデン板 (20mm × 30mm × 0.3 t)
フィラメント数	: 12本 / 3 セグメント
アセチレンガス圧	: 約 1.5×10^{-4} Torr
基板温度	: 300℃
コーティング時間	: 約50分間

2) 試験結果と考察

Fig.3.34に真空容器のベーキング曲線を示す。コーティング時の温度 300℃は真空容器外壁の温度であるが, 基板下に挿入した熱電対も同様に 300℃を示した。

コーティング時間については, 電流値が 150 A に到達した時点からの積算である。通電は 50 A 毎に段階的に上昇させ, 各段階で 10分程度保持, 予備加熱することによってフィラメントおよび蒸発源周辺からの脱ガスを行った。

Fig.3.35にコーティング時の真空容器内全圧とアセチレンガスの分圧の変化について示す。コーティング開始後全圧は次第に減少してきているものの, アセチレンガスの相対的な分圧は特に変化していない。これは多分に, 蒸発源の高温化に伴い, 蒸発源および周辺から放出されていたガスが, その最大値を乗り越えてきた結果と推定される。また, 20分経過後の全圧の上昇については, 蒸発源からの輻射熱により, 真空容器内壁が局部的に加熱され, それによる放出ガスが時間遅れをもって出現してきたものと考えられる。

Fig.3.36に基板上にコーティングされた炭化チタン膜を示す。右はコーティングされたもの, 左側は右の基板と同一箇所においてコーティングされた基板の裏面の写真である。コーティングされた基板の表面は炭化チタンに特有の黒灰色を呈している。Fig.3.37はコーティングされた基板のオージェ電子分光計 (AES) による表面組成分析の結果である。典型的な炭化チタンのシグナルを示している。

Table 3.1 Loading conditions of the bearings for use in θ axis.

Bearings	Rotation frequency (rpm)	Force of friction (N)	Torque of friction (N·m)	Total rotation frequency
$\mu\phi 15$	0.095	443 (44.3 kg)	3.3 (33 kg·cm)	73
$\mu\phi 10$	0.71	566 (56.6 kg)	2.8 (28 kg·cm)	545
$\mu\phi 8$	3.85	166 (16.6 kg)	0.66 (6.6 kg·cm)	2945
$\mu\phi 6$	7.70	42 (4.2 kg)	0.13 (1.3 kg·cm)	5891

Table 3.2 Observation results of the major moving parts after the repetitive motion experiment for θ axis.

Parts	Materials	Visual check	Size check	Abrasion
Shafts	Inconel 625 or MoS ₂ on Inconel 625	MoS ₂ flaked off	changed	no
Bearings	SL alloy	changed color	changed	no
Thrust washers	Ag	produced abrasion cracks	not changed	yes
Gears	MoS ₂ on Inconel 625	MoS ₂ flaked off	changed	no

Table 3.3 Results of the resolving power experiment of the observation system.

$W \backslash \ell$ (mm)	100	200	300	400	500	600	690
1 mm	○	○	△	×	×	×	×
2 mm	○	○	○	○	○	△	×
3 mm	○	○	○	○	○	○	○
5 mm	○	○	○	○	○	○	○

l : The distance from the tip of the fiber to the TiC coated sample.

W : The width of a line in the chart.

Circle : Very good, Triangle : Good, Cross : No good

Table 3.4 Summary of the experiment of the observation system.

ℓ (mm)	Arm position			Tilt* (deg)	Results
	Z axis (m)	A axis (m)	θ axis (deg)		
50	1.09	0.76	- 32	36.9	○
100	1.09	0.77	- 28	36.9	○
200	1.09	0.76	- 20	27.1	○
300	1.09	0.73	- 12	18.2	○
400	1.09	0.68	- 4	11.5	○
500	1.03	0.64	0	0	○
600	0.93	0.64	0	0	○
700	0.82	0.64	0	0	×
800	0.73	0.64	0	0	×

l : The distance from the tip of the fiber to the TiC coated sample.

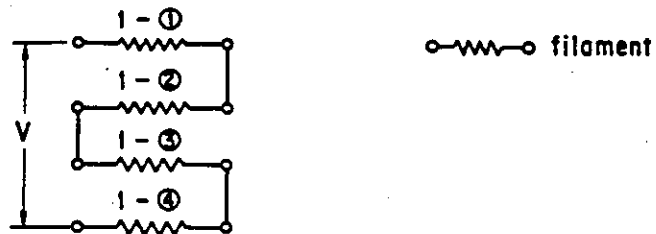
* : The tilt between the tip of the fiber and the TiC coated sample (calculated value).

Circle : Good, Cross : No good

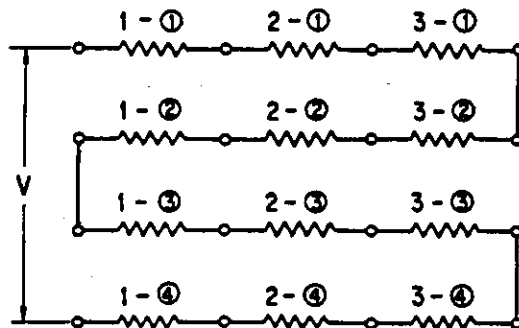
Table 3.5 Weight losses after the filament heating experiment.

Filament numbers	Position of filament ^{1),2)}	Weight of filament (g)		
		Before flashing	After flashing	Weight loss
4 ¹⁾	1 - ①	13.700	13.223	0.5
	1 - ②	13.730	13.323	0.4
	1 - ③	13.730	13.307	0.4
	1 - ④	13.730	13.291	0.4
12 ²⁾	1 - ①	13.555	13.000	0.6
	1 - ②	13.629	12.765	0.8
	1 - ③	13.771	13.070	0.7
	1 - ④	13.849	12.940	0.8
	2 - ①	13.815	13.333	0.5
	2 - ②	13.666	13.025	0.7
	2 - ③	13.430	11.789	1.6
	2 - ④	13.688	12.837	0.9
	3 - ①	13.342	12.620	0.7
	3 - ②	13.846	13.042	0.9
	3 - ③	13.532	13.025	0.5
	3 - ④	13.783	11.273	2.2

1)



2)



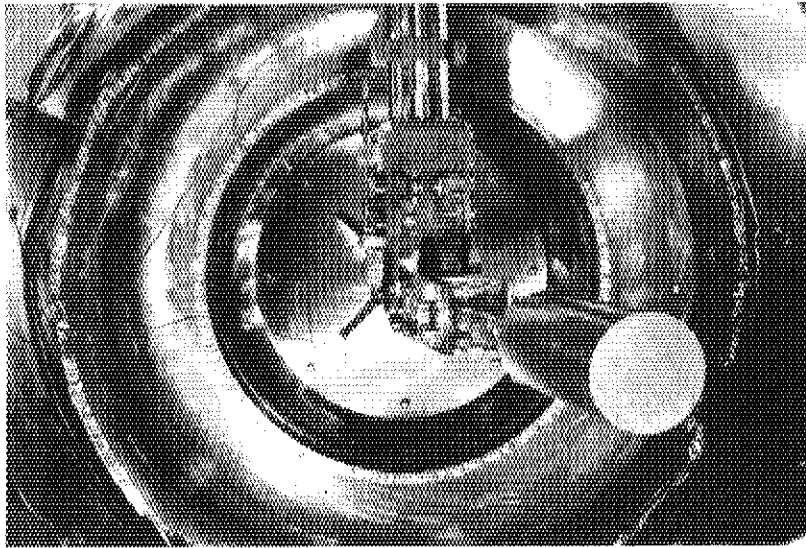


Fig. 3.1 A photograph showing the manipulator with a dummy load (17. kgf).

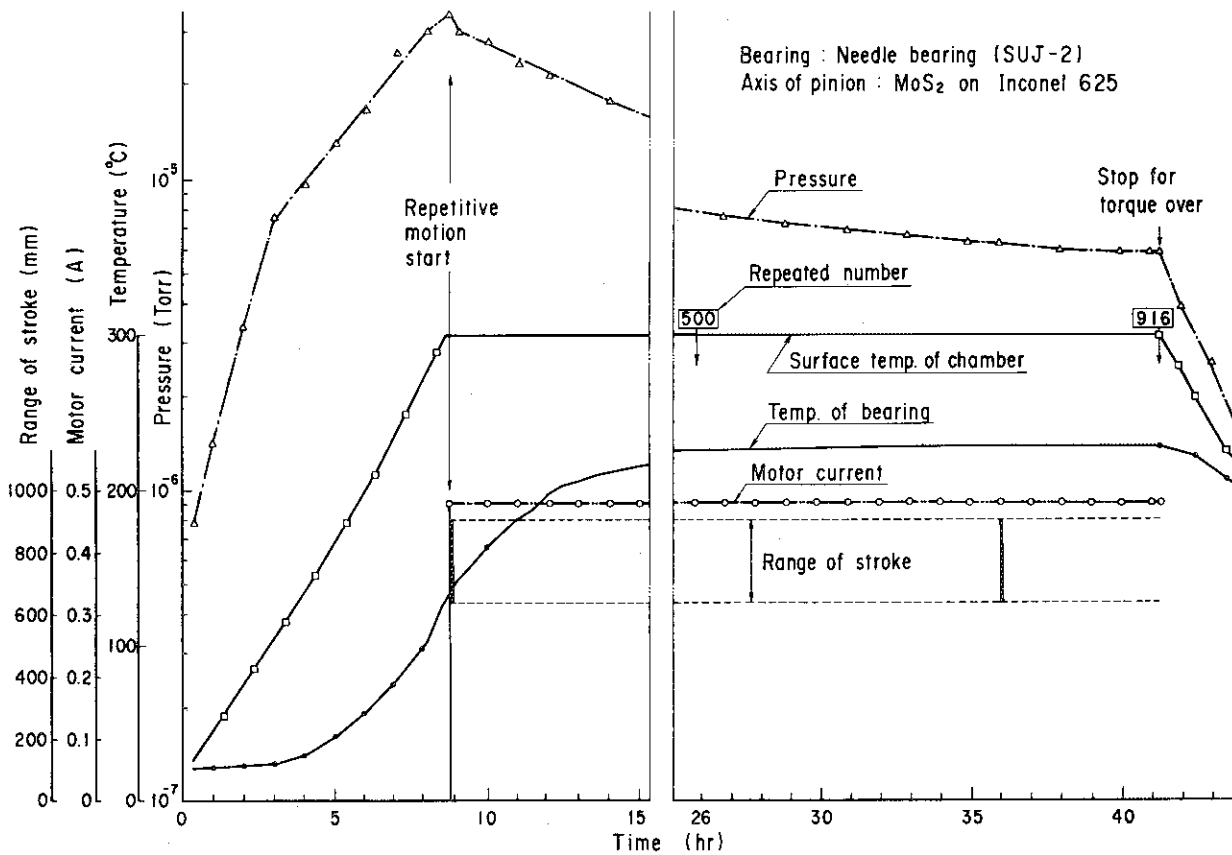


Fig. 3.2 A result of the repetitive motion experiment for A axis.

Bearings: Conventional roller bearings,
 Shaft : MoS₂-coated Inconel 625

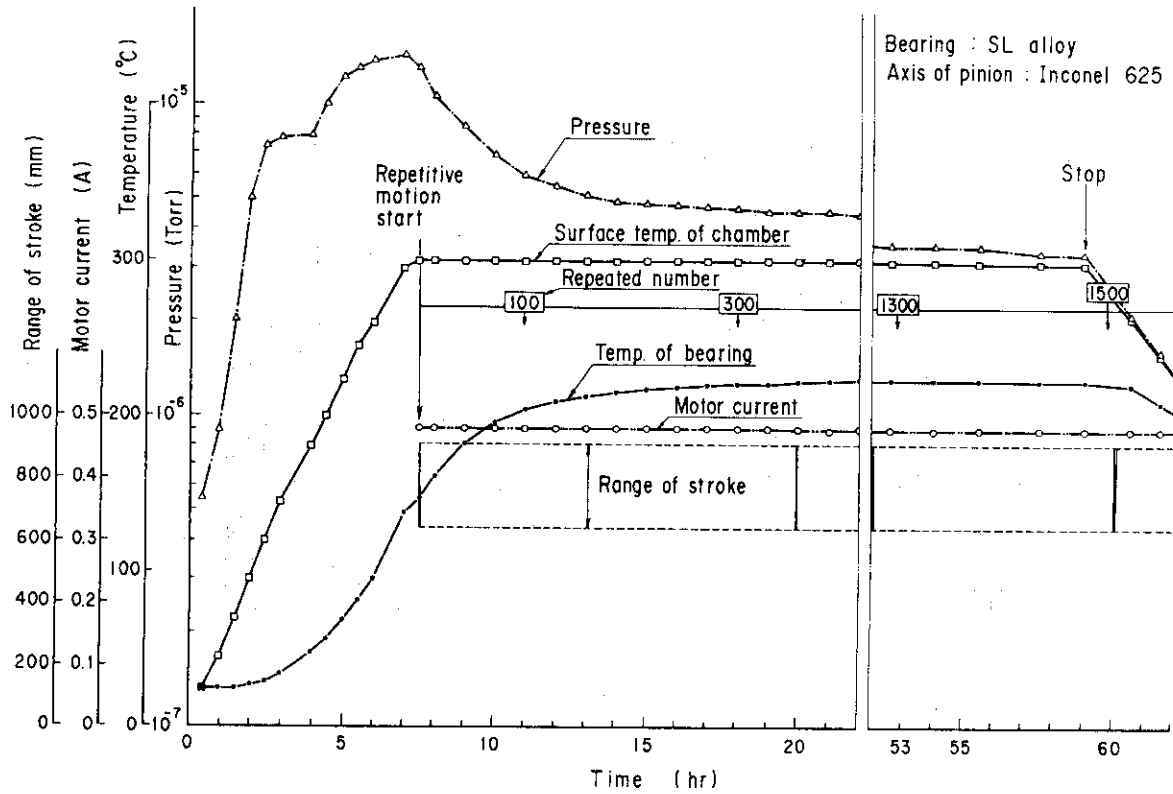


Fig. 3.3 A result of the repetitive motion experiment for A axis.
Bearings: SL alloy,
Shaft : Inconel 625

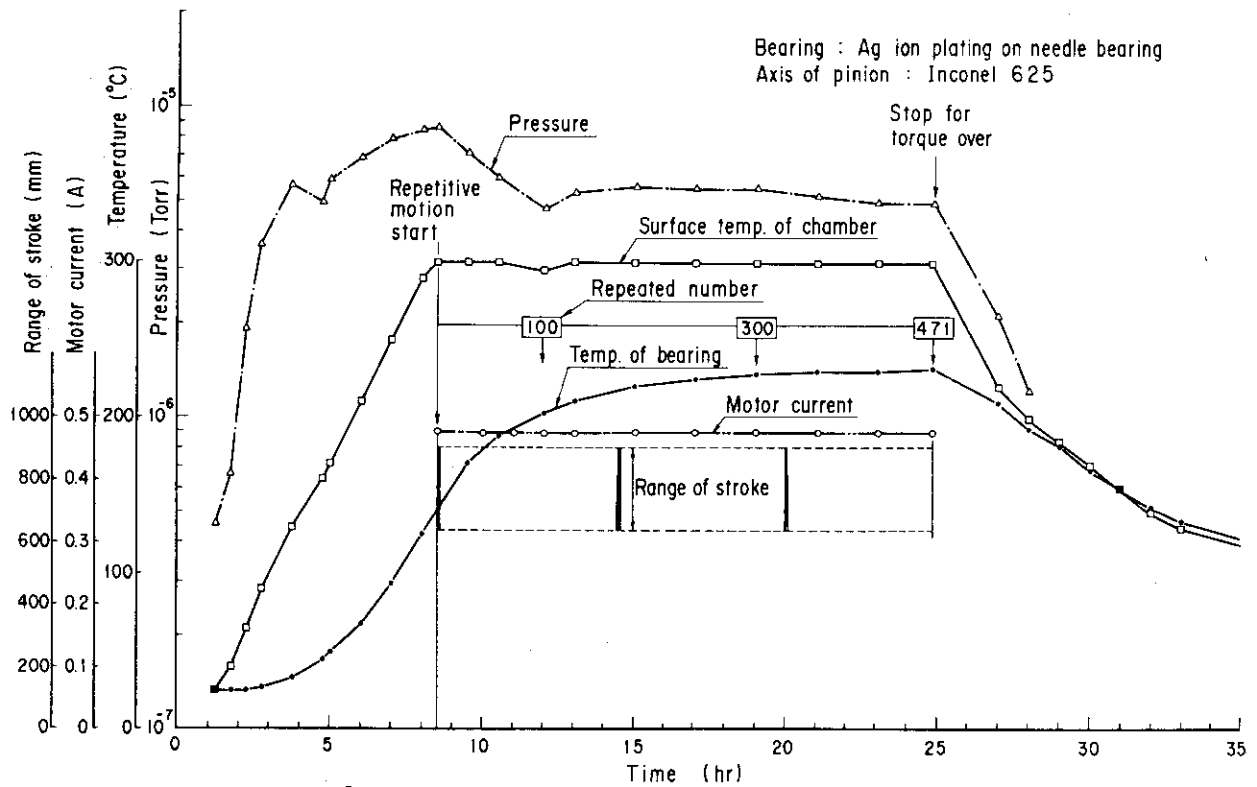


Fig. 3.4 A result of the repetitive motion experiment for A axis.
Bearings: Ag-coated roller bearing,
Shaft : Inconel 625

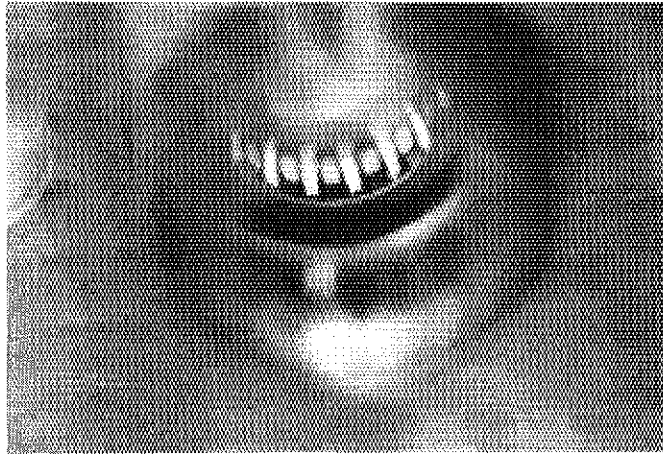


Fig. 3.5 A photograph of the Ag-coated roller bearings taken after the repetitive motion experiment.

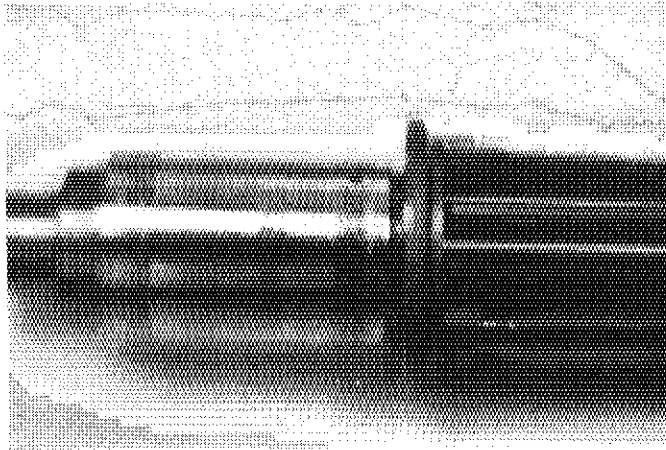


Fig. 3.6 A photograph of the inner ring of the Ag-coated roller bearings taken after the repetitive motion experiment.



Fig. 3.7 A photograph of the holder of the Ag-coated roller bearings taken after the repetitive motion experiment.

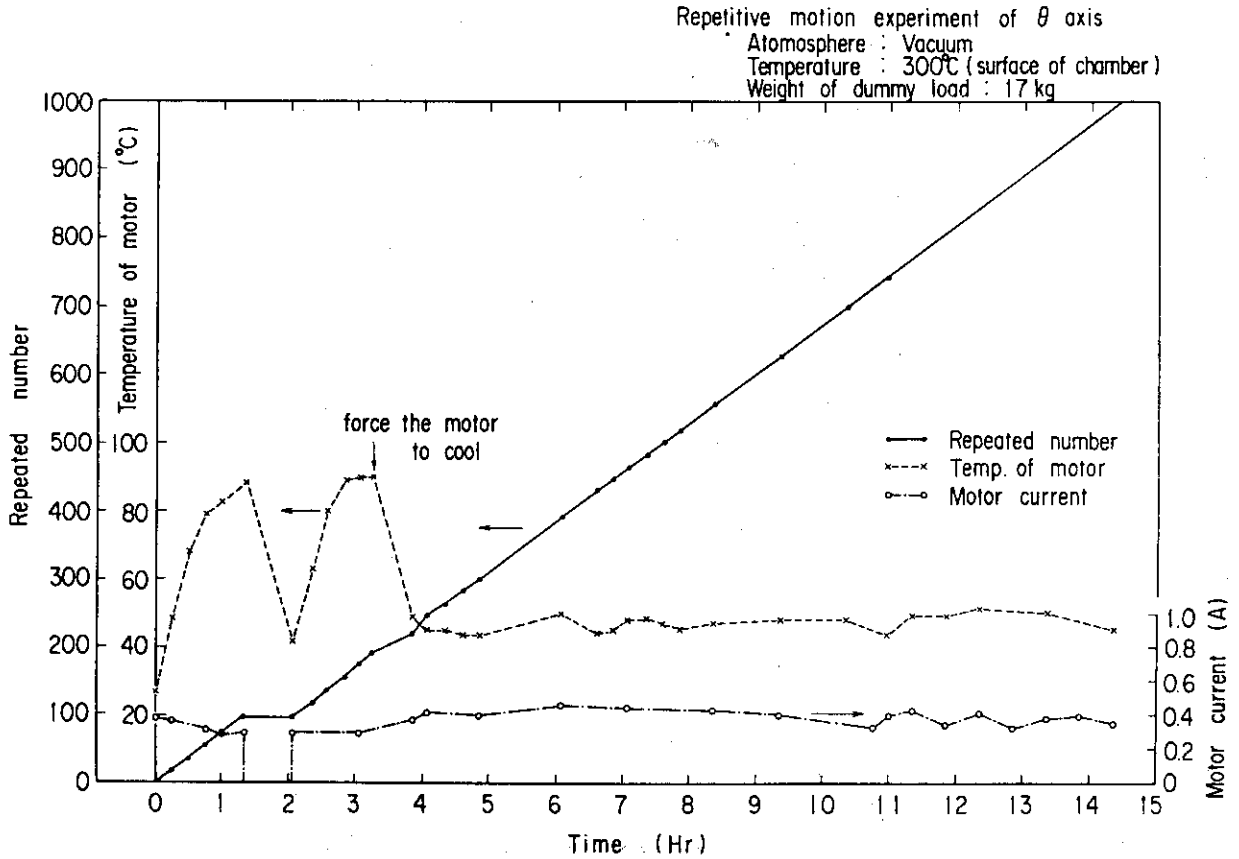


Fig. 3.8 A result of the repetitive motion experiment for θ axis.

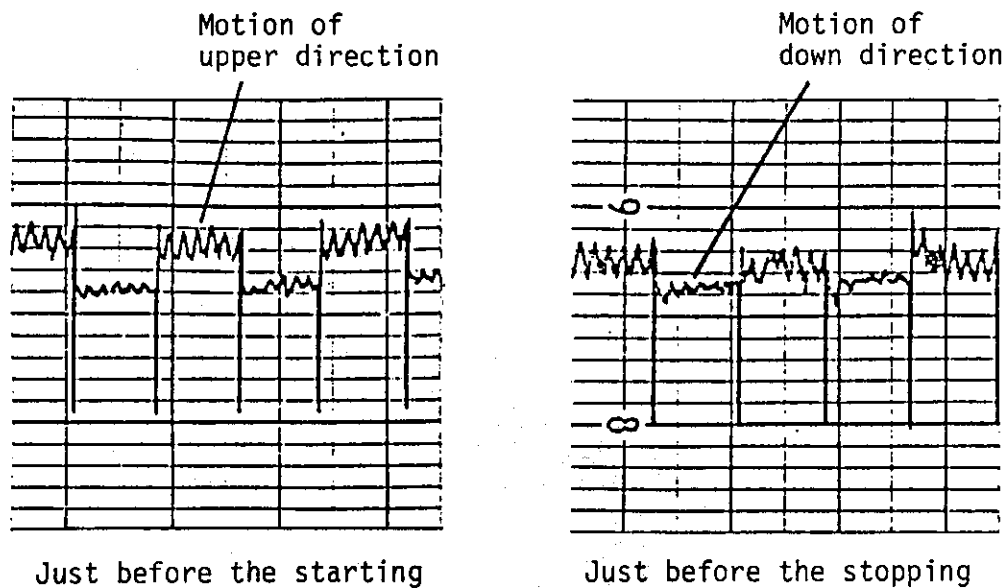


Fig. 3.9 Two motor current waves of θ axis.

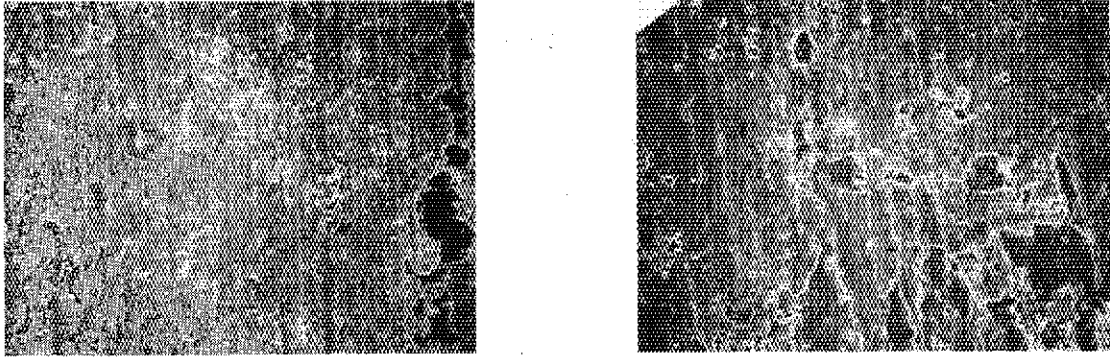


Fig. 3.10 Scanning Electron Micrographs of the SL alloy surface after the θ axis repetitive motion experiment, (x 75).

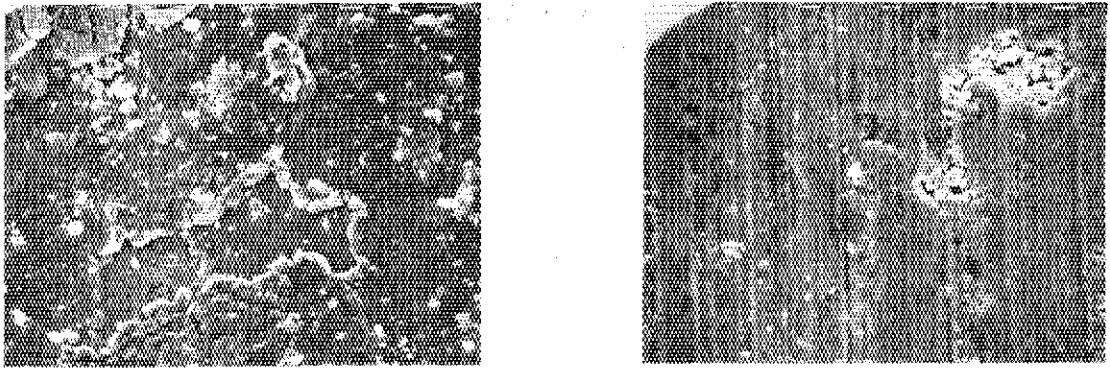


Fig. 3.11 Scanning Electron Micrographs of the SL alloy surface after the θ axis repetitive motion experiment, (x 1500).

Right : undiscolored part.

Left : discolored part.

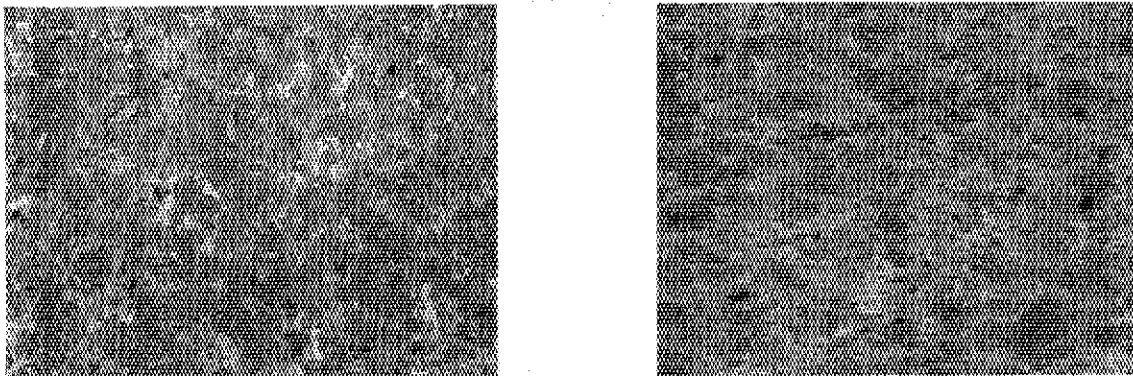


Fig. 3.12 Optical micrographs of the SL alloy surface after the θ axis repetitive motion experiment, (x 150).

Right : undiscolored part.

Left : discolored part.

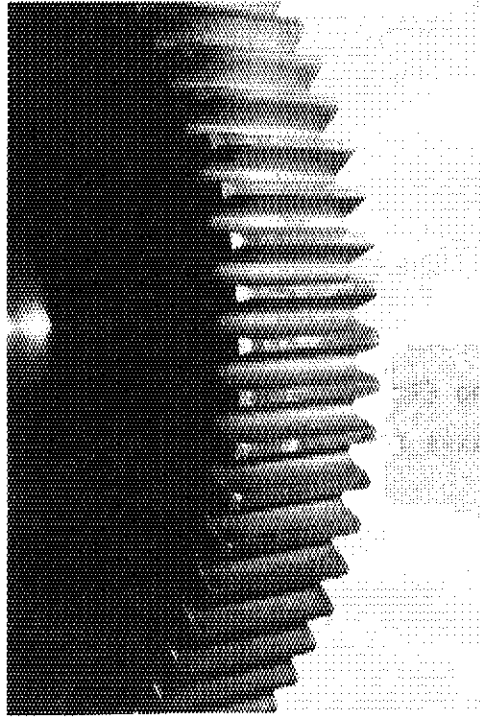


Fig. 3.13 A photograph of the surface of the gear which was used as a part of the θ axis.

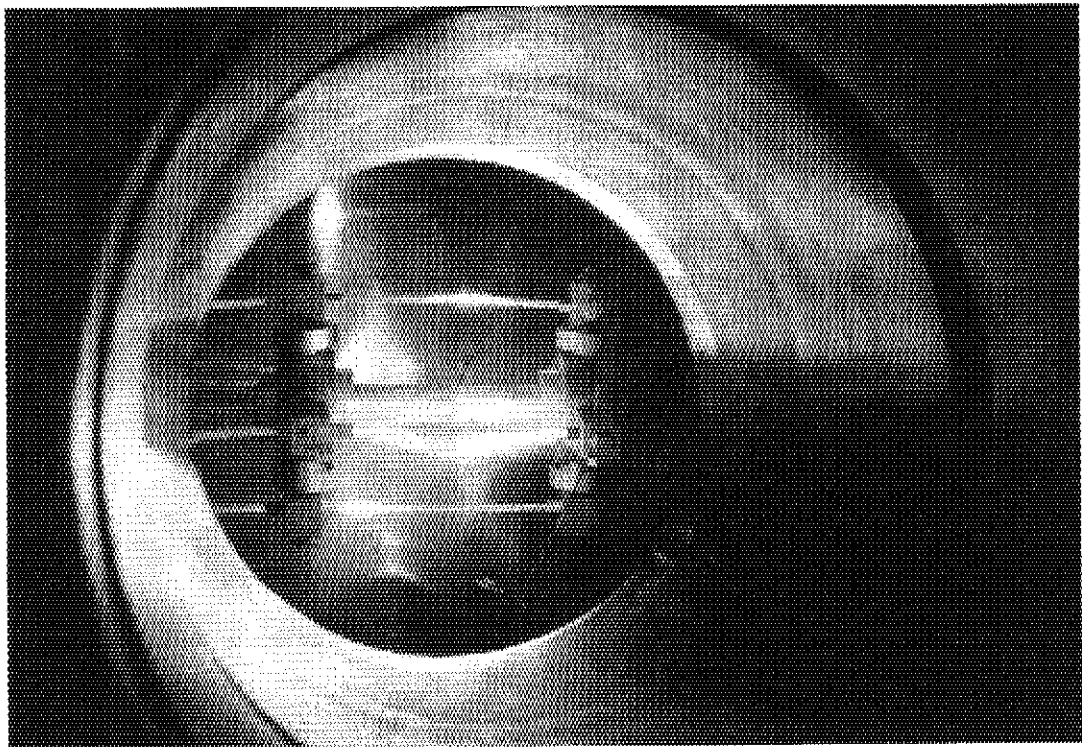


Fig. 3.15 A photograph of heated filaments taken through a viewing port of the JVX-II vacuum chamber.

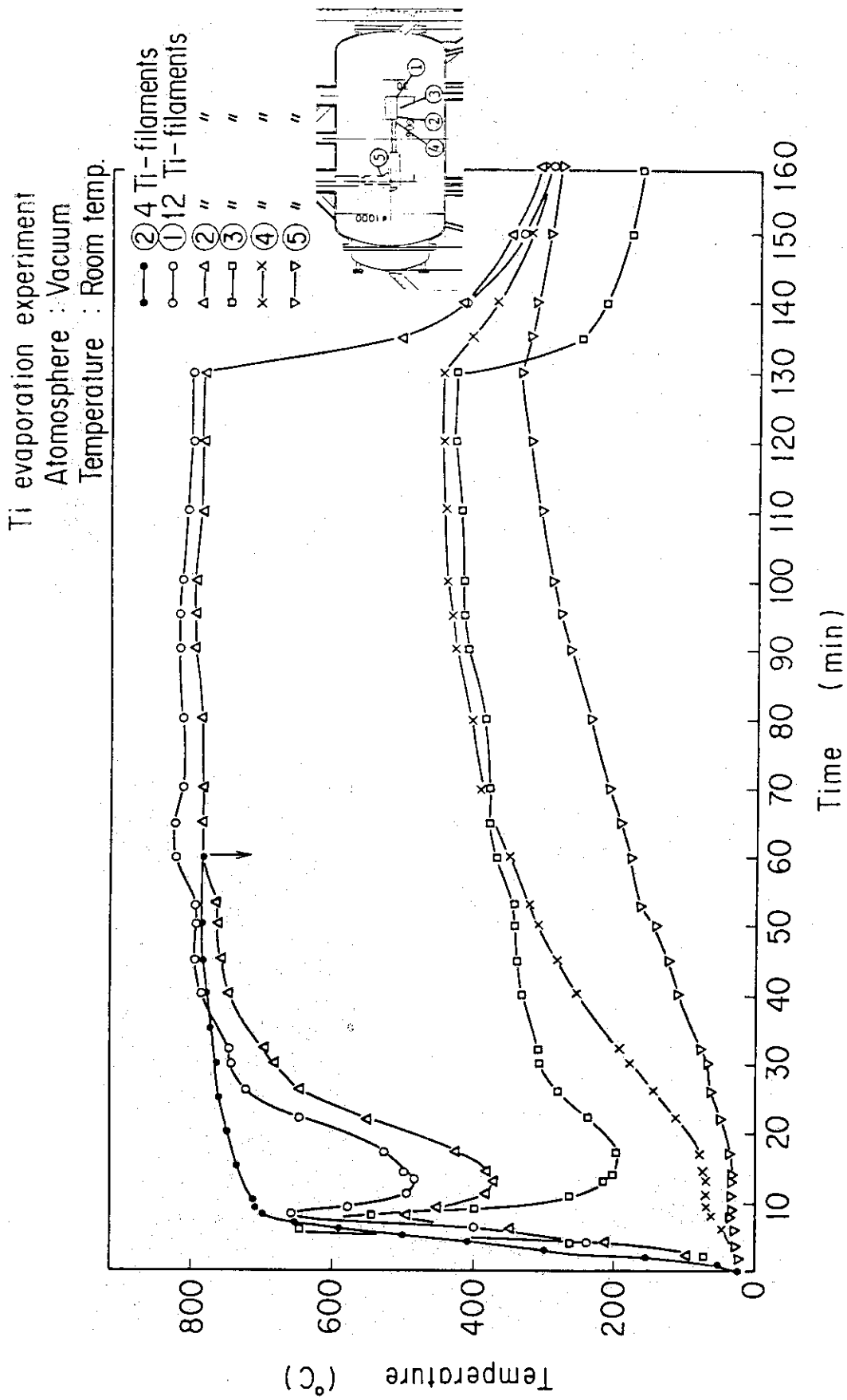


Fig. 3.14 Temperature change of the parts around the evaporator.

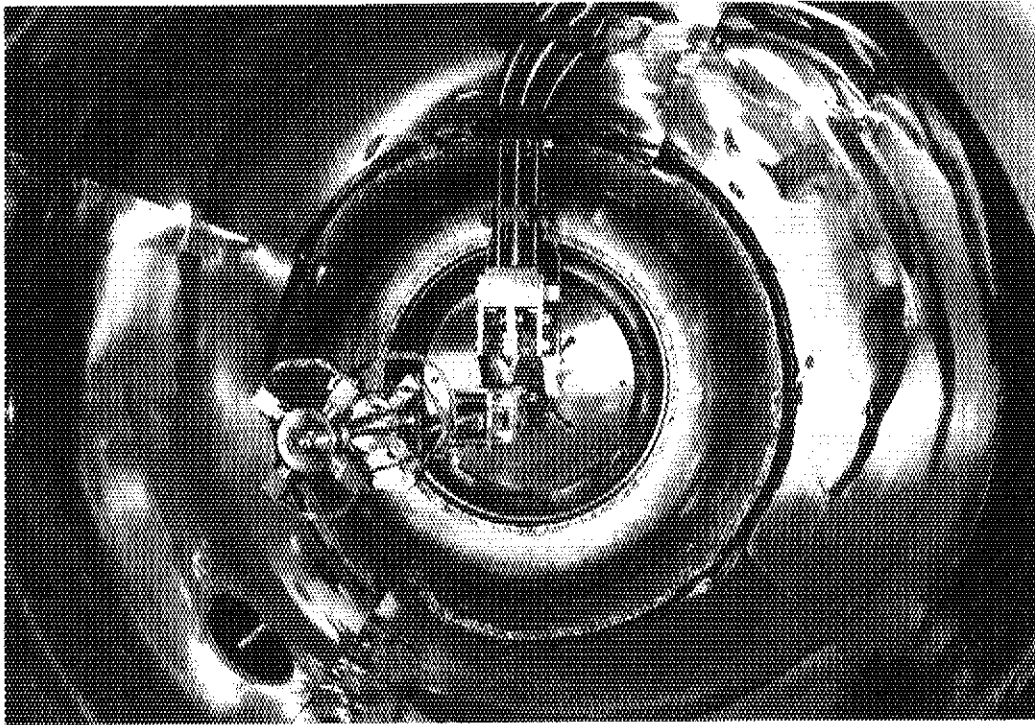


Fig. 3.16 A photograph of the evaporator and the joint installed in the JVX-II vacuum chamber.

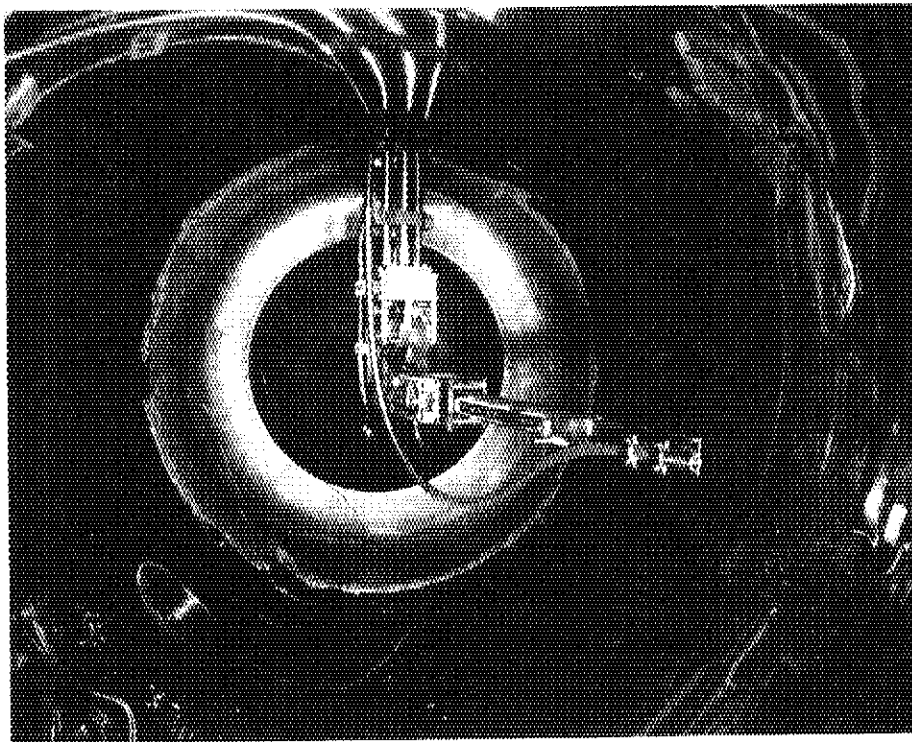


Fig. 3.17 A photograph of the fiber-scope mounted on the manipulator arms.

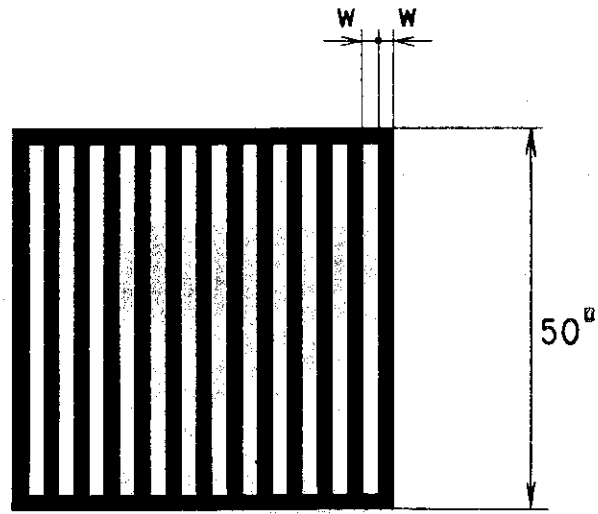
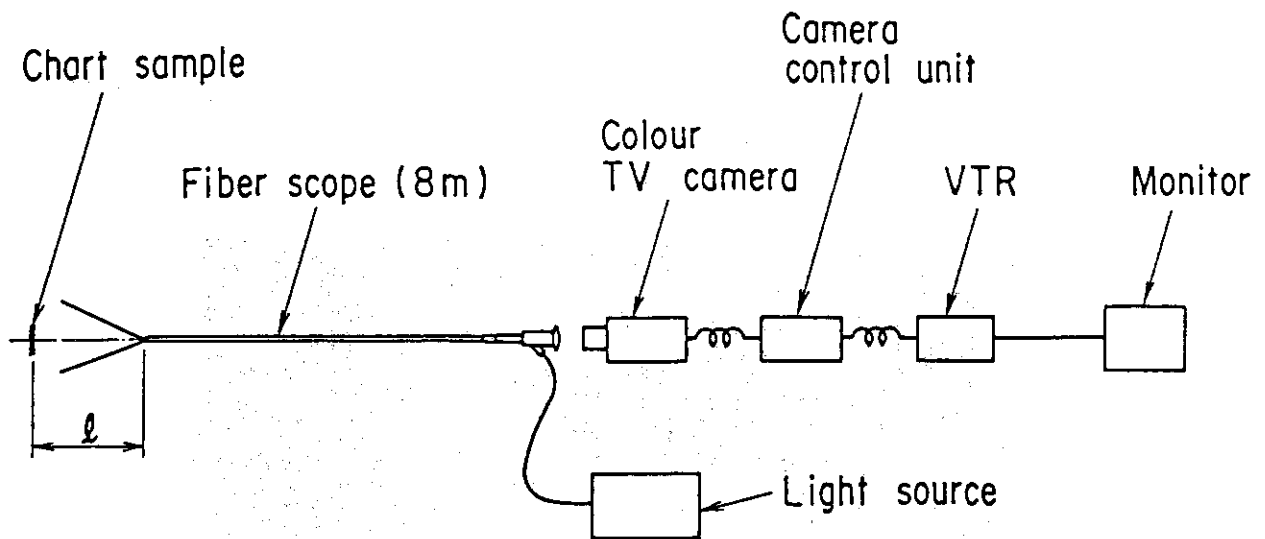


Chart sample

Fig. 3.18 Chart sample for the resolving power experiment of the observation system.



Components	Specifications	
Fiber scope	S-012-MT-L	Dainichi-Nihon-Densen Co.
Light source	LS-300	Dainichi-Nihon-Densen Co.
TV camera (CCU)	CH-C70	VICTOR
VTR	VHS Type	VICTOR
Monitor	CX-101M	VICTOR

Fig. 3.19 Schematic diagram of the observation system

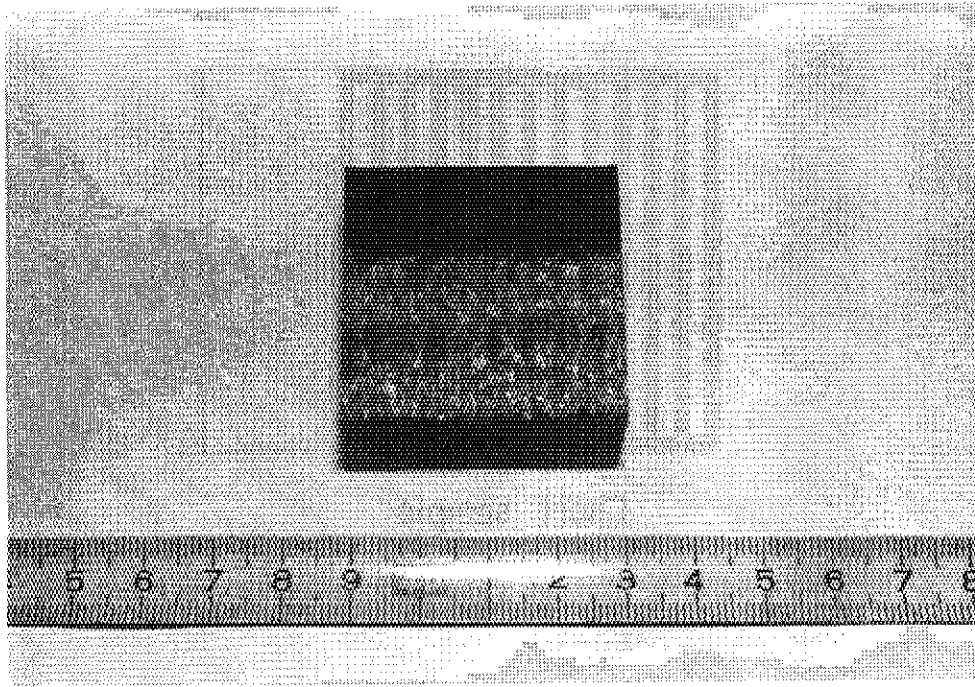


Fig. 3.20 A photograph of the TiC-coated sample for the observation experiment. The sample was made of molybdenum and the half of the surface was eroded by electron beam.

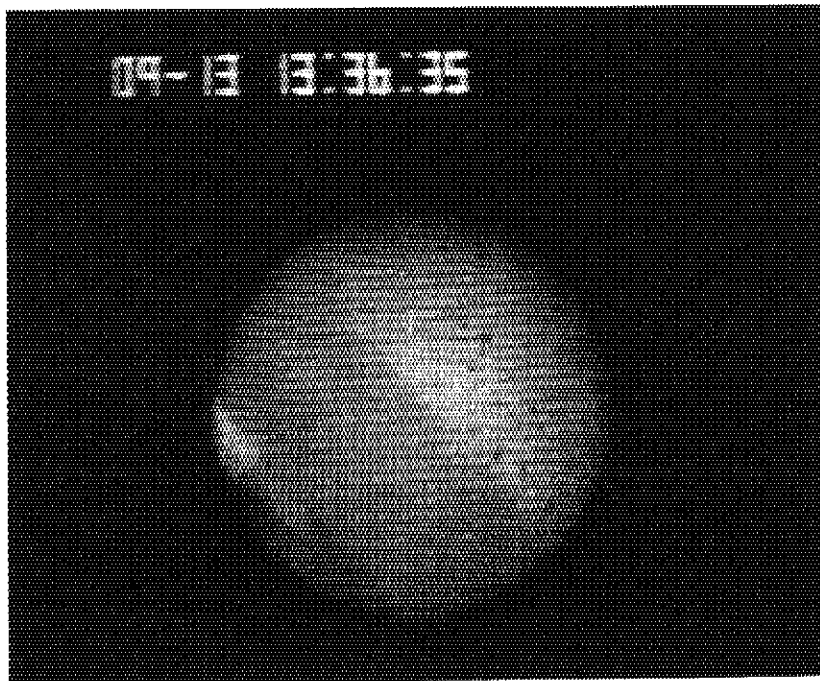


Fig. 3.21 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object : 50 mm

Atmosphere : Vacuum (10^{-5} Pa)

Temperature: 200°C

Object : TiC-coated molybdenum block (see Fig. 3.20)



Fig. 3.22 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object : 300 mm

Atmosphere : Vacuum (10^{-5} Pa)

Temperature: 200°C

Object : TiC-coated molybdenum block (see Fig. 3.20)

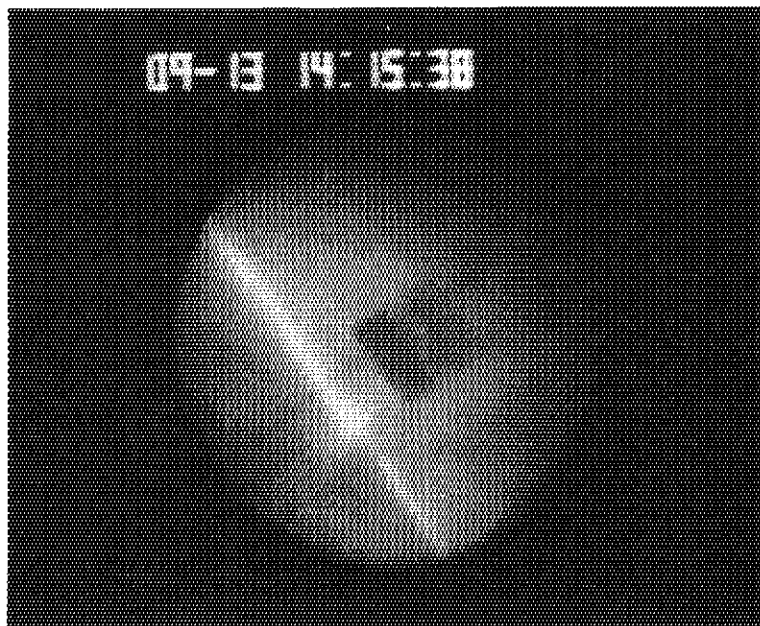


Fig. 3.23 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object : 500 mm

Atmosphere : Vacuum (10^{-5} Pa)

Temperature: 200°C

Object : TiC-coated molybdenum block (see Fig. 3.20)

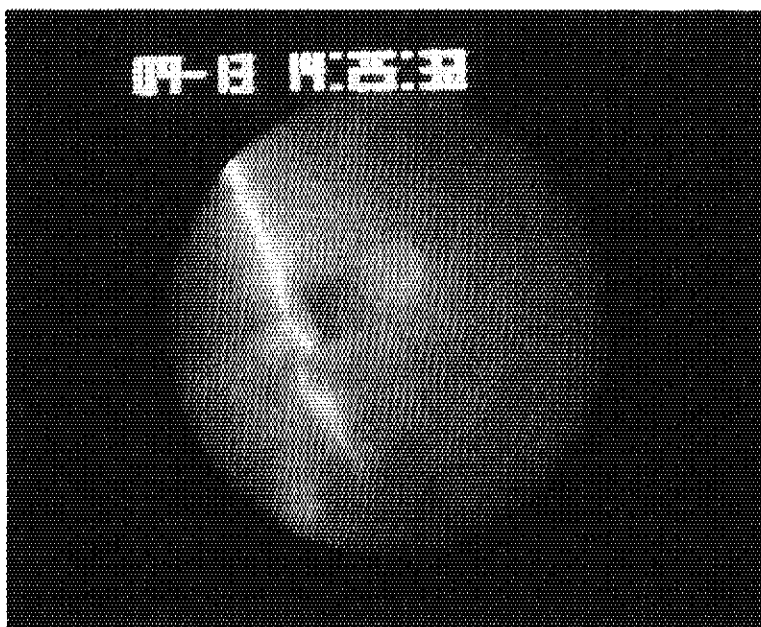


Fig. 3.24 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object : 800 mm

Atmosphere : vacuum (10^{-5} Pa)

Temperature: 200°C

Object : TiC-coated molybdenum block (see Fig. 3.20)



Fig. 3.25 Eroded poloidal limiter used for the experiment.



Fig. 3.26 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object: 50 mm

Atmosphere : air.

Temperature: R.T.

Object : eroded poloidal limiter (see Fig. 3.25)



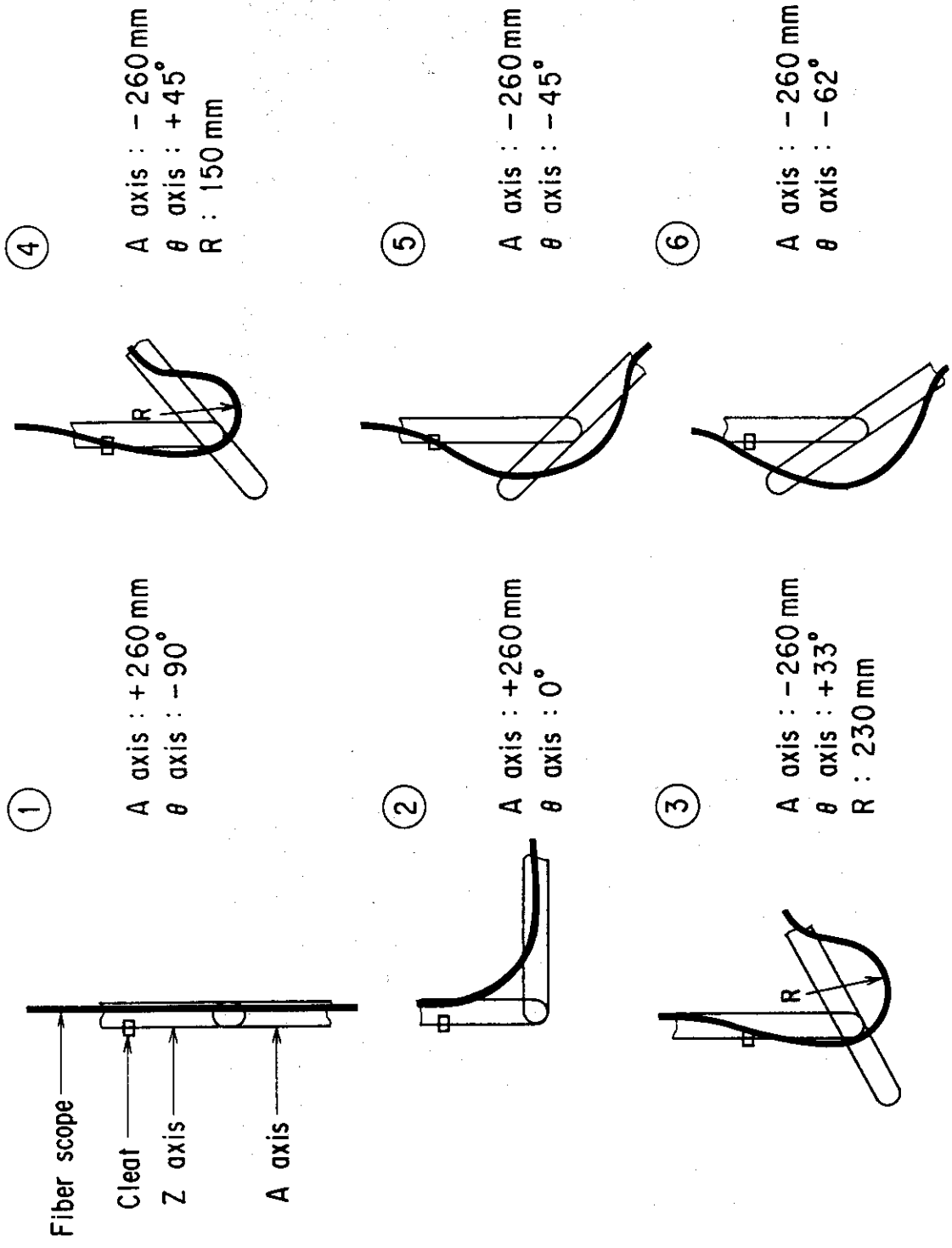
Fig. 3.27 A result of the observation experiment.

Distance from the fiber-scope tip to the object : 300 mm

Atmosphere : air.

Temperature: R.T.

Object : eroded poloidal limiter (see Fig. 3.25)



R : Vending radial

Fig. 3.28 Result of the flexibility power experiment for the fiber-scope.

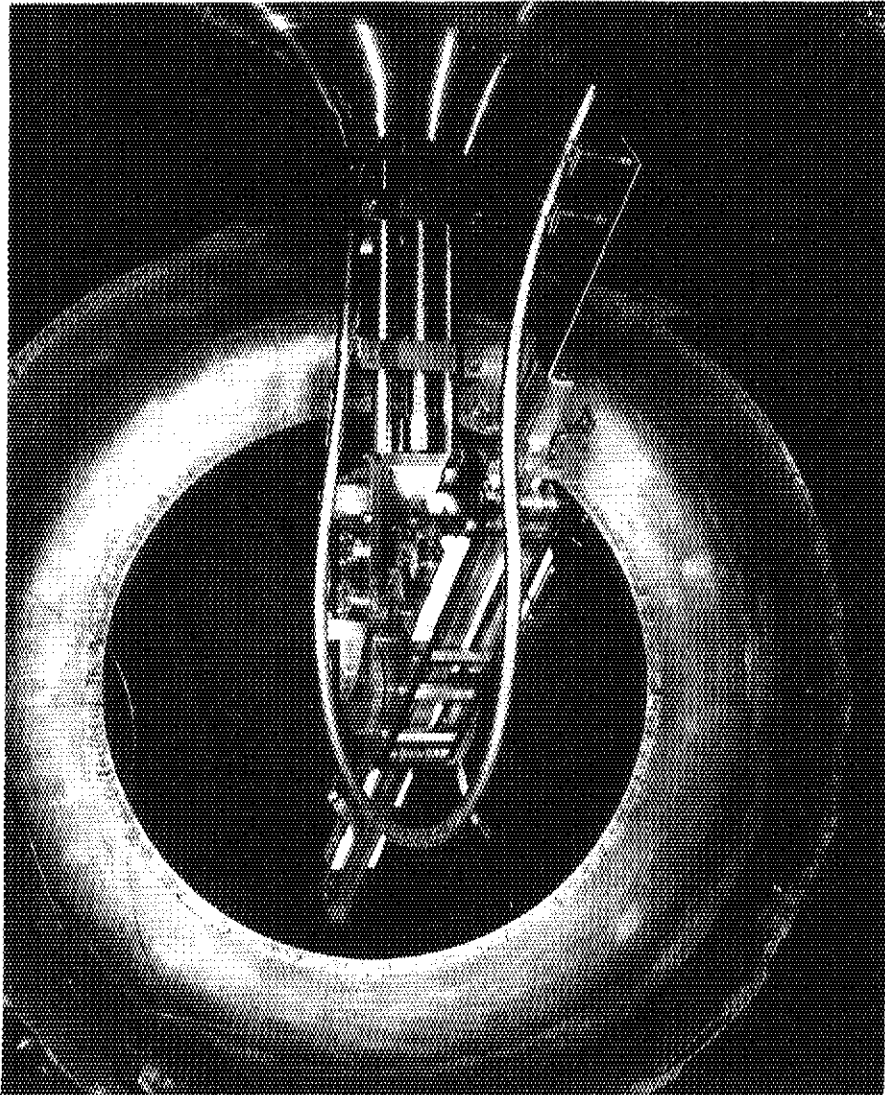


Fig. 3.29 A photograph of the fiber-scope at a limiting position.
 θ axis : 135° , A axis : 260 mm.

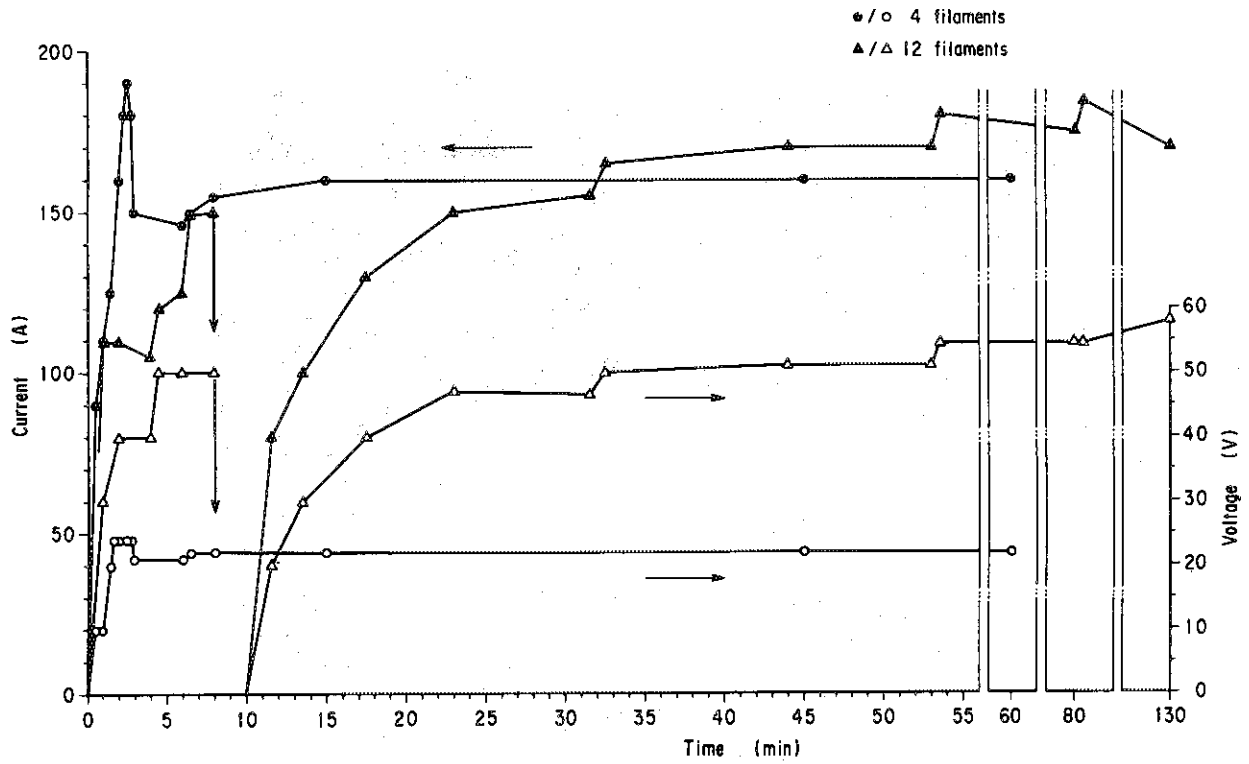


Fig. 3.30 Time vs. voltage and current curves for the cases of 4 and 12 filaments.

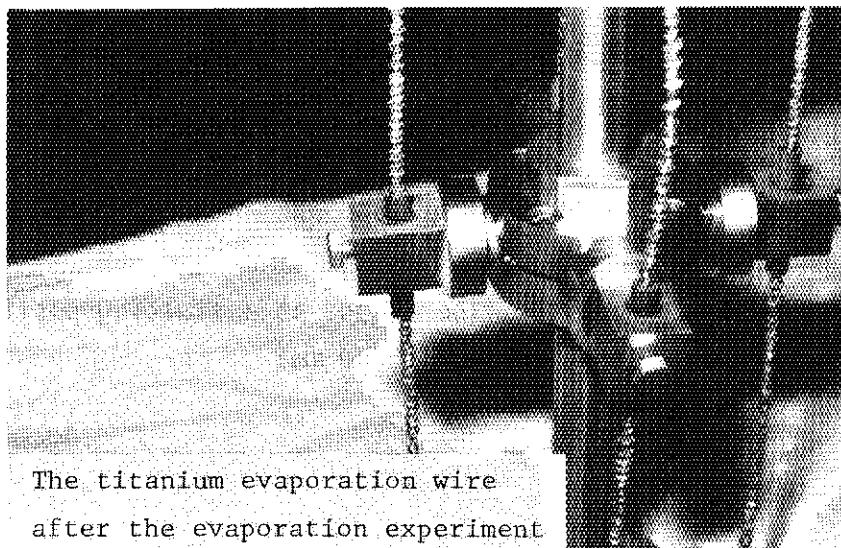


Fig. 3.31 Titanium evaporators after the filament heating experiment.

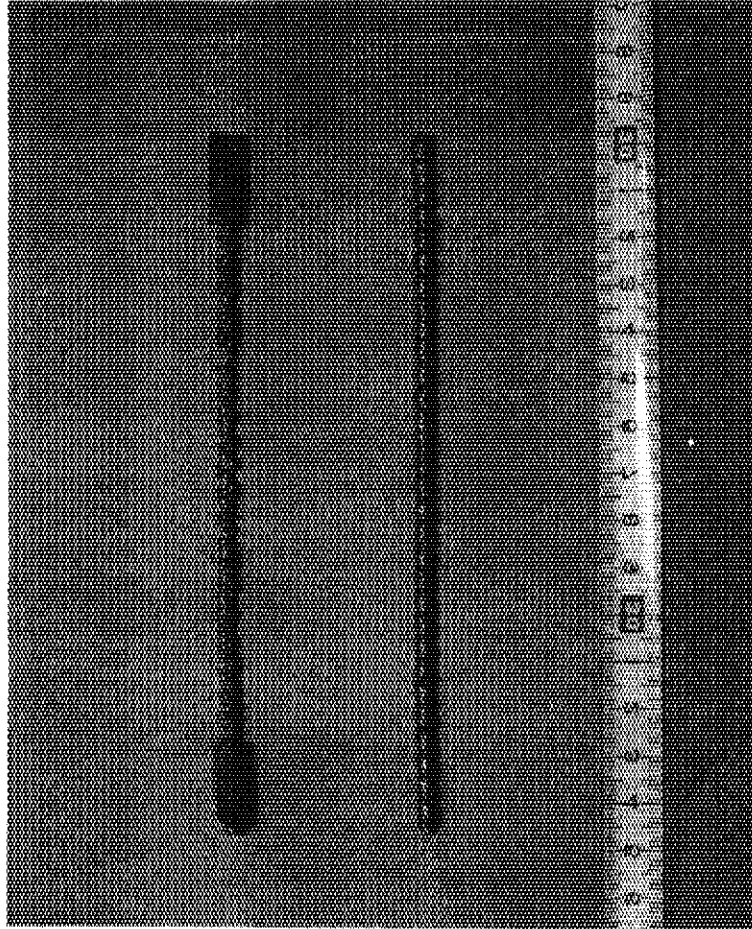


Fig. 3.33 A photograph of a new filament and a used filament.

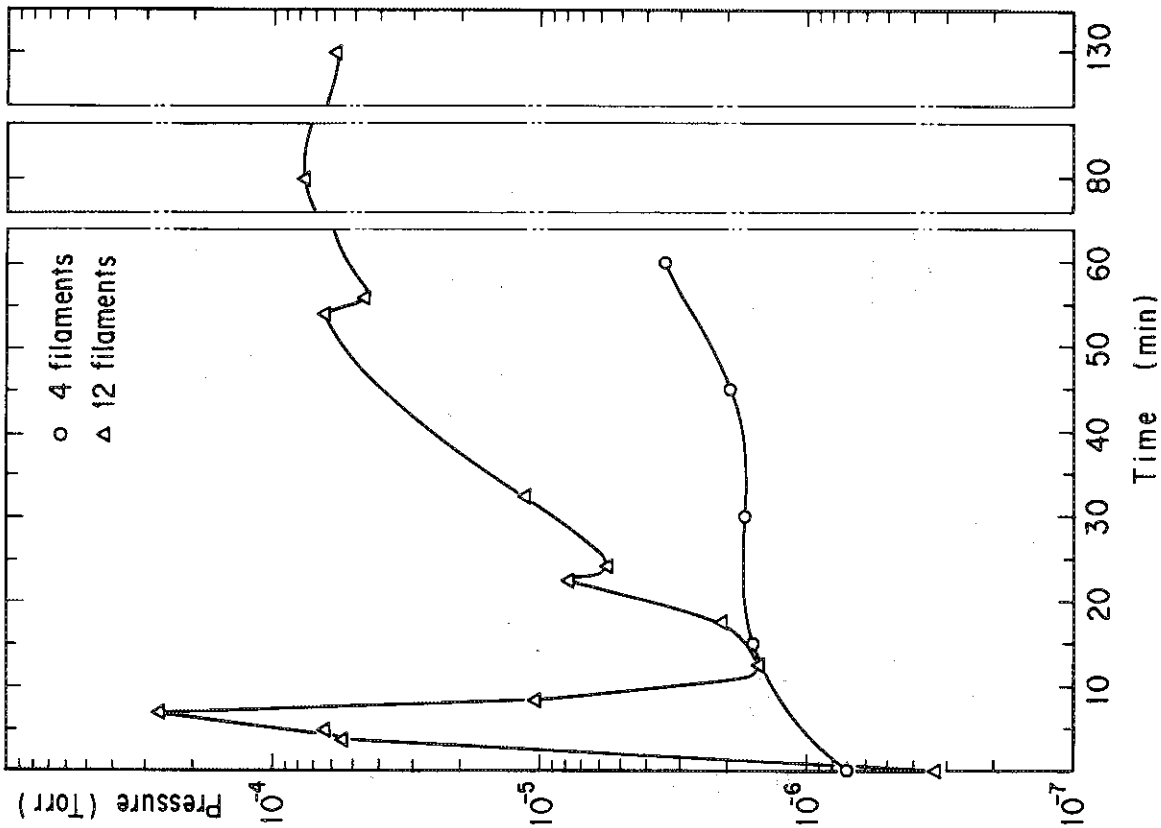


Fig. 3.32 Pressure change in the JVX-II vacuum chamber during the filament heating.

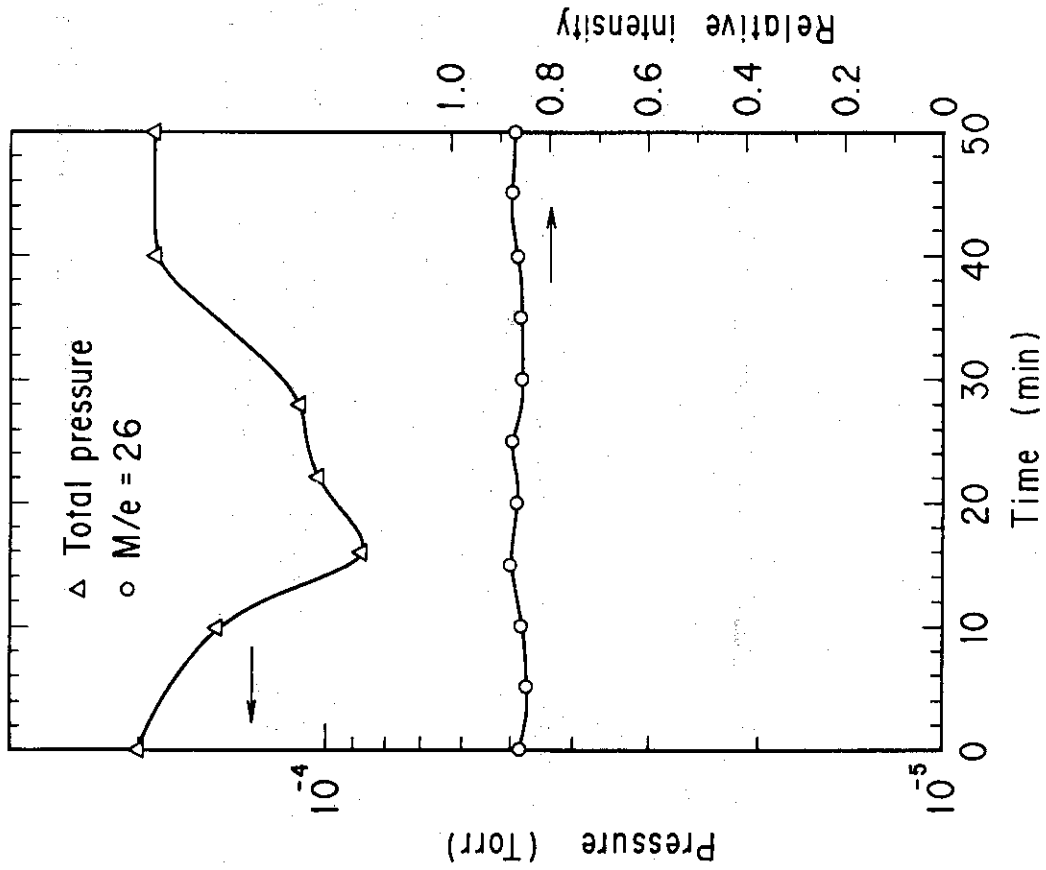


Fig. 3.35 Total and C₂H₂ pressure changes in the JVX-II vacuum chamber.

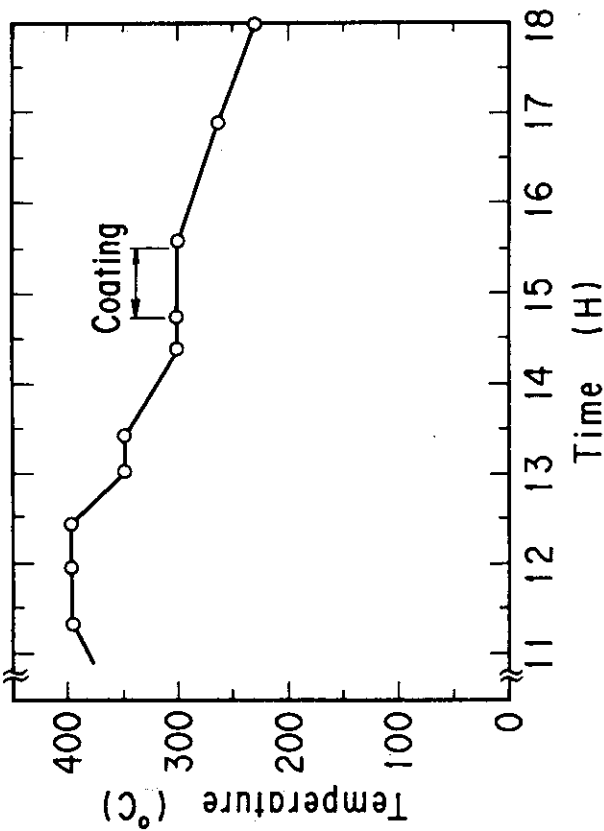


Fig. 3.34 A change of the surface temperature of the JVX-II vacuum chamber before, during and after TiC coating.

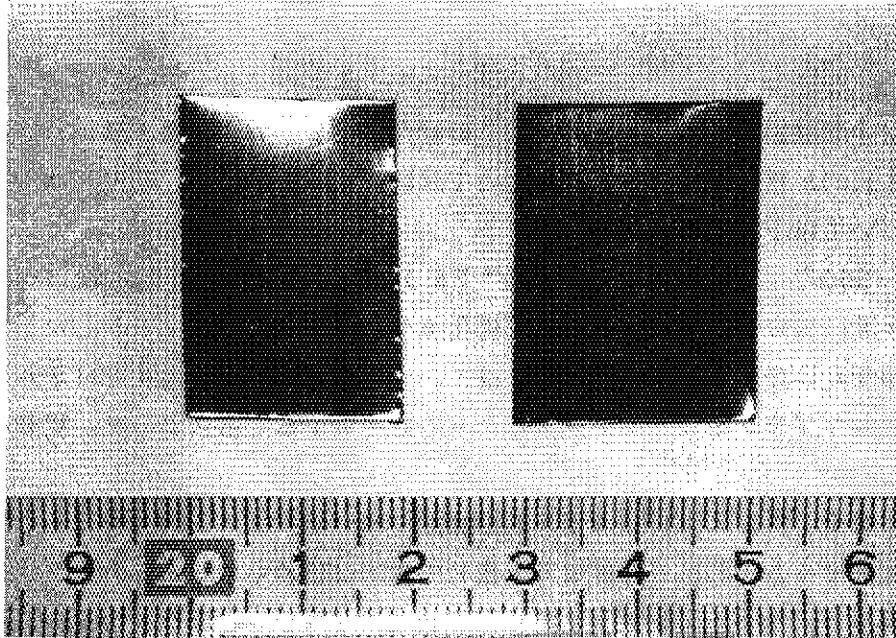


Fig. 3.36 TiC film formed on molybdenum substrate with the prototype in-situ coating device.

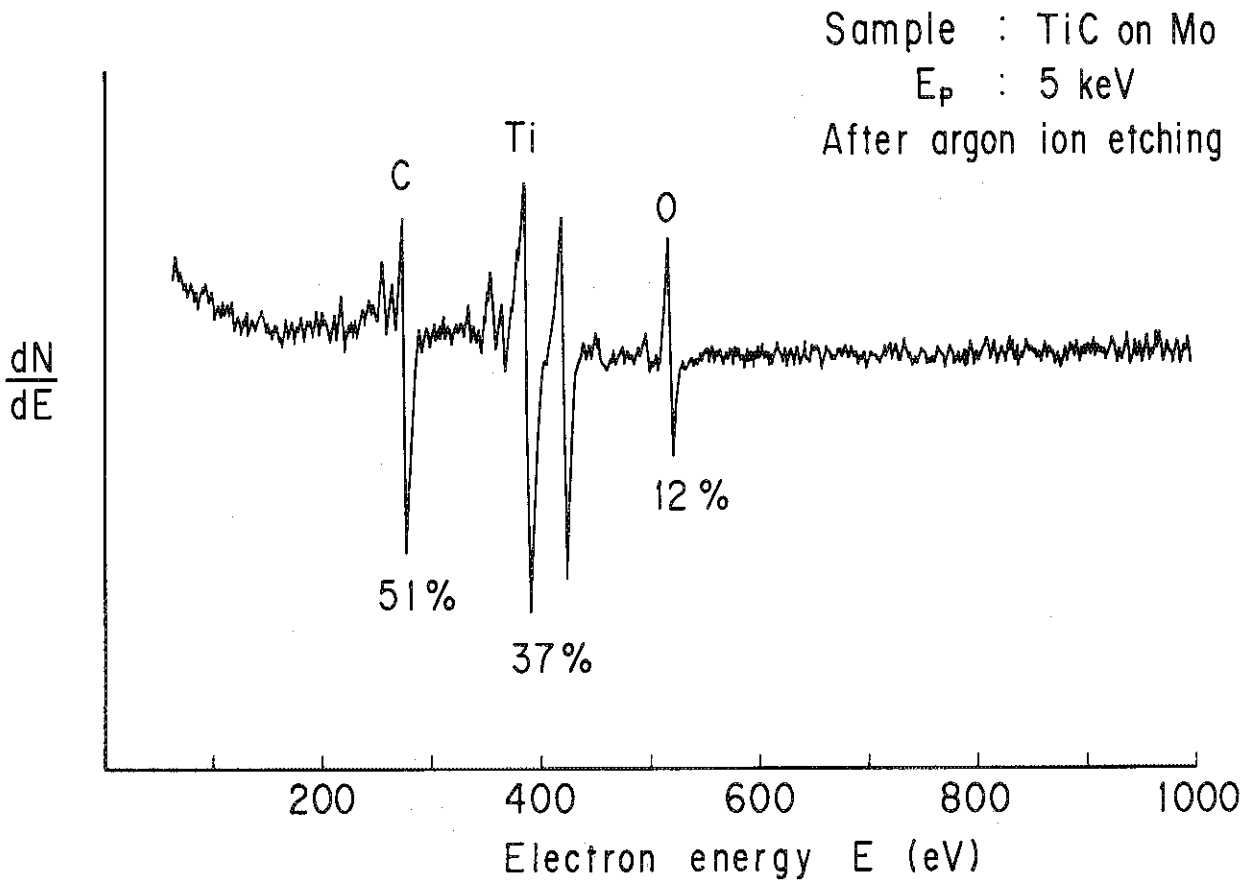


Fig. 3.37 Auger spectrum of the TiC coated sample.

4. ま と め

高温、高真空中で駆動される“その場装置”の試作機について、概要と試験結果を述べた。試作機製作の主目的が駆動系の検証にあったので試験の結果とともに、高温、高真空中での駆動の問題点について以下にまとめた。

- 1) 高温（～350℃）、高真空（ $10^{-5} \sim 10^{-1}$ Pa）中に晒らされる駆動機構の構成として、インコネル625製の歯車表面に焼結型二硫化モリブデンをコーティングしたものを使用した。また軸受には自己潤滑合金を、軸にはインコネル625、またはインコネル625上に焼結型二硫化モリブデンをコーティングしたものを使用することによって、駆動の健全性を確認できた。
- 2) 四重極型質量分析計による放出ガス成分測定（M/e：1～100）では、これらの固体潤滑剤に起因すると思われる特殊なガス成分の放出は認められなかった。
- 3) 歯車の表面等にコーティングした焼結型二硫化モリブデンの摩耗粉の発生は避けることができなかった。
- 4) ヘルツ応力が100 kgf/mm²以上となる場合にも焼結型二硫化モリブデンが短時間で剥離するようなことはなかった。
- 5) 自己潤滑性合金に変色が見られたが、今回の試験条件下ではその摩擦摩耗特性に特に変化はなかった。しかし、長期にわたる駆動の結果については今後の検討課題となる。
- 6) 試作機の負荷条件からみて、真空用玉軸受²⁰⁾（銀イオンプレーティング²¹⁾、セラミックス²²⁾の使用も考えられたが、これらは規格が定まっているため形状、寸法に大きな制約を受ける試作機への適用は困難であった。その点からも任意の形状、寸法に加工可能な自己潤滑性合金を採用した。
- 7) グリースを除去した標準仕様のローラ軸受の高温、高真空中での試験結果から、標準仕様の製品でも低荷重のときには多少の改造により使用できる場合もあると考えられる。
- 8) 特に高温になる部分（フィラメントホルダ）に使用した炭化チタン被覆ボルトは、焼き付き防止に有効であった。
- 9) 装置の目的、使用環境を十分に把握し、軸受部や歯車への負荷条件（荷重、回転速度等）を可能な限り緩和するとともに、過度の安全係数を求めない配慮が必要であると考えられる。

限界設計にならざるを得ない場合も想定されるが、これらの不安要素に対しては予防保全の考えを積極的に取り入れて解決をはかることが望ましい。

次に二硫化モリブデンのような大気中より真空中の方が摩擦係数が小さくなる潤滑剤を使用した装置の試験について考えてみたい。ここでは、真空仕様で製作した装置を大気中で試験しなければならないことから生じる問題がある。

本試作機のように、大型で複雑な要素を持ち合せ、かつアクセス困難な場所で使用される機器の場合、実際の使用に先立って制御系からの操作と実動作との対応についての調整が不可欠である。この作業のほとんどは大気中で実施され、長期にわたる。その間、潤滑剤にとって好ましくない環境で長期の駆動となるため、本番に移行する前に装置の健全性が低下してしまう懸念がある。

従って、このような作業が予想される場合の適格な指針が望まれるが、とりあえずは温湿度、塵埃などの管理には充分留意するとともに、作業の合理化を図る必要がある。

今回の試験で高温、高真空中で使用する観察装置にファイバースコープが適用できることがわかった。ただ、一度に観察できる視野範囲が限定されることは、作業効率上好ましいことではないが、反面ボアスコープなどに比べ対象物へ接近させることができるという利点がある。

試作機でのチタンフィラメント蒸発特性を調べた結果、蒸発速度についてはフィラメント単体試験の結果に比べ低い値となった。通電パターンの検討の他、今後の試験データの積み重ねが必要であると考えられる。

これらの開発試験結果は、試作機の延長線上にある“その場装置”の設計、製作に全面的に反映された。“その場装置”の設計、製作に関する内容については、別に出版予定の報告書²³⁾を参照されたい。

謝 辞

本開発試験は昭和58、59年度の2年間にわたって行なわれた。報告書を早期に発行すべきであったが、開発試験終了後直ちに実機の設計、製作に移行し、筆者がその業務にたずさわったため執筆する時間がとれず遅れてしまった。

開発試験の期間、終始ご激励を戴いた核融合研究部、田中正俊部長ならびに、JT-60試験部、飯島勉部長に深く感謝の意を表わす。また、コーティング試料のAES分析に協力戴いた炉心工学研究室、広木成治研究員をはじめ、同研究室の方々および、炭化チタン膜作製実験に協力戴いたJT-60第2試験室、川崎幸三、三代康彦両氏にも感謝の意を表す。さらに、試作機の製作にあたられ、一部実験にもご協力戴いた三菱電気(株)の武田淳氏をはじめとする担当者の方々にも感謝の意を表す。

本試作機のように、大型で複雑な要素を持ち合せ、かつアクセス困難な場所で使用される機器の場合、実際の使用に先立って制御系からの操作と実動作との対応についての調整が不可欠である。この作業のほとんどは大気中で実施され、長期にわたる。その間、潤滑剤にとって好ましくない環境で長期の駆動となるため、本番に移行する前に装置の健全性が低下してしまう懸念がある。

従って、このような作業が予想される場合の適格な指針が望まれるが、とりあえずは温湿度、塵埃などの管理には充分留意するとともに、作業の合理化を図る必要がある。

今回の試験で高温、高真空中で使用する観察装置にファイバースコープが適用できることがわかった。ただ、一度に観察できる視野範囲が限定されることは、作業効率上好ましいことではないが、反面ポアスコープなどに比べ対象物へ接近させることができるという利点がある。

試作機でのチタンフィラメント蒸発特性を調べた結果、蒸発速度についてはフィラメント単体試験の結果に比べ低い値となった。通電パターンの検討の他、今後の試験データの積み重ねが必要であると考えられる。

これらの開発試験結果は、試作機の延長線上にある“その場装置”の設計、製作に全面的に反映された。“その場装置”の設計、製作に関する内容については、別に出版予定の報告書²³⁾を参照されたい。

謝 辞

本開発試験は昭和58、59年度の2年間にわたって行なわれた。報告書を早期に発行すべきであったが、開発試験終了後直ちに実機の設計、製作に移行し、筆者がその業務にたずさわったため執筆する時間がとれず遅れてしまった。

開発試験の期間、終始ご激励を戴いた核融合研究部、田中正俊部長ならびに、JT-60試験部、飯島勉部長に深く感謝の意を表わす。また、コーティング試料のAES分析に協力戴いた炉心工学研究室、広木成治研究員をはじめ、同研究室の方々および、炭化チタン膜作製実験に協力戴いたJT-60第2試験室、川崎幸三、三代康彦両氏にも感謝の意を表す。さらに、試作機の製作にあたられ、一部実験にもご協力戴いた三菱電気(株)の武田淳氏をはじめとする担当者の方々にも感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状（1986）。
- 2) 阿部哲也，村上義夫，小原建治郎，広木成治，中村和幸，伊藤裕，溝口忠憲，梶浦宗次，佐川準基：真空 27（1984）394。
- 3) T. Abe, Y. Murakami, K. Obara, S. Hiroki, K. Nakamura, T. Mizoguchi, A. Doi, K. Inagawa : Journal of Nucl. Mater. 133 & 134 (1985) 754.
- 4) 稲川幸之助，阿部哲也，広木成治，小原建治郎，村上義夫：JAERI-M 84-105（1984）。
- 5) 阿部哲也，稲川幸之助，小原建治郎，広木成治，村上義夫：真空 26（1983）488。
- 6) 広木成治，阿部哲也，稲川幸之助，小原建治郎，中村和幸，村上義夫：真空 27（1984）386。
- 7) 小原建治郎，阿部哲也，村上義夫：真空 25（1982）338。
- 8) 稲川幸之助，阿部哲也，小原建治郎，広木成治，村上義夫：真空 26（1983）494。
- 9) T. Abe, K. Inagawa, K. Obara, Y. Murakami : Proc. of 12th Symposium on the Fusion Technology 1982 ed., Pergamon, vol. 1 (1982) 221.
- 10) 松永正久，津谷裕子：固体潤滑ハンドブック（幸書房，1978）。
- 11) D. H. Buckley : NASE SP-277 (1971)。
- 12) I K O (日本トムソン株式会社) のベアリング関連のカタログ
- 13) H. J. Tayler : Proc. of 26th Conference on Remote Systems Technology (1978) 90。
- 14) 高津宗吉，上原一仁：真空 22（1979）279。
- 15) 三宅正二郎：真空 28（1985）483。
- 16) 佐藤公男：機械設計 vol. 30, No. 7 (1986) 43。
- 17) R. C. Weast : CRC Handbook of Chemistry and Physics (CRC Press Inc., USA, 1982) 63rd ed.
- 18) 内海厚，黒岩孝雄，速水広之，大瀬誓六，伊藤晃，鈴木光一：大日本電線技報 68（1982）1。
- 19) 小林正樹：私信。
- 20) 西村充：真空 28（1985）622。
- 21) 角本賢一，大西政良，小林隆：真空 28（1985）59。
- 22) 竹林博明，小松通泰：機械設計 vol. 29, No. 9 (1985) 85。
- 23) 小原建治郎：to be published in JAERI-M, (1982)。