

JAERI-Tech  
99-029



JP9950175



遠隔着脱対応ボールベアリング付き耐放射線性  
電気コネクタの開発 (Ⅱ)

1999年3月

伊藤 彰 ・ 小原建治郎 ・ 多田栄介  
森田洋右 ・ 八木敏明 ・ 佐藤 大

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。  
入手の問い合わせは、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（〒319-1195 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.**

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

遠隔着脱対応ボールベアリング付き耐放射線性電気コネクタの開発 (II)

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

伊藤 彰<sup>\*</sup>・小原建治郎・多田 栄介

森田 洋右<sup>+</sup>・八木 敏明<sup>+</sup>・佐藤 大<sup>\*</sup>

(1999年2月15日受理)

核融合実験炉 (ITER) の炉内遠隔保守装置に使用される電気コネクタには、10KGy/hのガンマ線環境下で、積算線量100MGy以上の耐放射線性が要求される。また、遠隔保守装置の保守時には遠隔操作による着脱性も併せて要求される。

そのため、本コネクタは耐放射線性を向上させるために、絶縁材にセラミックスを使用する等の対策を講じ、またプラグ (オス側) にはボールベアリングを取り付け、ロボットによるレセプタクル (メス側) への着脱が容易となるよう、遠隔着脱性にも配慮した。

汎用ロボット及び6軸力センサを組み合わせた着脱装置を使用した着脱試験の結果、円滑な着脱性が確認でき、本コネクタの機能が確認された。

また、ガンマ線照射による絶縁抵抗の劣化の原因は、ガンマ線照射済み試料の表面洗浄後における絶縁抵抗測定結果及びElectron Probe Micro Analysis (EPMA) 法による表面元素定性分析の結果から、①セラミックス中の不純物、メタライズ材料及び銀ろう材料の拡散、②セラミックス中の不純物、メタライズ材料及び銀ろう材料の価数変化、③セラミックス表面での炭素の付着のいずれかと推定された。

---

本報告は、ITER工学R&Dの一環として実施したものであり、報告内容はR&Dタスク番号T252の一機器・部品である「遠隔着脱対応ボールベアリング付き耐放射線性電気コネクタ」の開発状況について整理したものである。

那珂研究所(東海駐在)：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 高崎研究所材料開発部

\* 外来研究員：石川島播磨重工業株式会社

\* 日立原町電子工業株式会社

Development of Radiation-Hard Electric Connector with Ball Bearing  
for In-Vessel Remote Maintenance Equipment of ITER( II )

Akira ITO<sup>\*</sup>, Kenjiro OBARA, Eisuke TADA, Yousuke MORITA<sup>+</sup>  
Toshiaki YAGI<sup>+</sup> and Masaru SATO<sup>\*</sup>

Department of Fusion Engineering Research  
(Tokai-Site)

Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 15, 1999)

Radiation-hard electric connector with ball bearing has been developed for in-vessel remote maintenance equipment of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). Since the in-vessel remote maintenance equipment is operated under the gamma ray dose rate of 10KGy/h, the electric connector is required to be tolerable up to an accumulation dose of 100MGy. In addition, the simple attachment/removal mechanism is essential for the remote operation. Based on these requirements, the alumina ( $Al_2O_3$ ) ceramics and a ball bearing were adopted as an electric insulator and as a mechanism with remote handling compatibility of connector, respectively.

The handling tests on attachment/removal of the connector were conducted by using a general purpose robot with six axes force sensor. As the results of the tests, the validity of the attachment/removal mechanism of the connector was verified.

In the gamma ray irradiation tests, the insulation resistance was deteriorated in proportion to the accumulation dose. From the results of the insulation resistance measurement after cleaning of insulator surface and the Electron Probe Micro Analysis

---

This activity is credited as an ITER Technology R&D and this report describes test results and interim status of the development of radiation hard electric connector with ball bearing in the ITER R&D Task (T252).

<sup>+</sup> Department of Material Development, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

<sup>\*</sup> On leave from Ishikawajima Harima Heavy Industries Co.

<sup>\*</sup> Hitachi Haramachi Denshi Kogyo Co.

(EPMA), the cause of deterioration are estimated as follows: a) sticking of carbon on the insulator surface, b) impurities diffusion into the insulator or c) valence change of impurities.

**Keywords :** ITER, In-vessel Remote Maintenance Equipment, Electric Connector, Ball Bearing, Gamma Ray Irradiation, Radiation Hardness, Attachment/Removal Mechanism, EPMA

This is a blank page.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 第5ステップコネクタの構造と着脱試験 .....	1
2.1 コネクタの構造 .....	1
2.2 着脱試験 .....	3
2.2.1 基礎試験 .....	3
2.2.2 許容ズレ試験 .....	4
2.2.3 実機想定着脱試験 .....	5
2.3 まとめ .....	6
3. ガンマ線照射試験 .....	8
3.1 大気中ガンマ線照射試験 .....	8
3.1.1 再現性確認及び絶縁抵抗試験 .....	8
3.1.2 絶縁抵抗劣化原因の推測 .....	9
3.2 まとめ .....	9
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	10

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Constitution and Attachment/Removal Handling Test of Fifth Step Electric Connector .....	1
2.1 Constitution of Electric Connector .....	1
2.2 Attachment/removal Tests .....	3
2.2.1 Basic Test .....	3
2.2.2 Offset/gap Test .....	4
2.2.3 Handling Test Using Robot Hand and Handling Tool .....	5
2.3 Summary .....	6
3. Gamma Ray Irradiation Test .....	8
3.1 Gamma Ray Irradiation Tests in Air .....	8
3.1.1 Insulation Resistance Tests .....	8
3.1.2 Study of Insulation Resistance Deterioration .....	9
3.2 Summary .....	9
Acknowledgment .....	10
Reference .....	10

This is a blank page.



## 1 はじめに

核融合実験炉(ITER) [1]の真空容器内部に設置されるブランケットモジュール及びダイバータカセット等の炉内機器は運転中に発生する中性子によって放射化され、ガンマ線源となる。したがって、炉内遠隔保守装置[2]とそこに使用される電力及び信号用電気コネクタには、10 KGy/hのガンマ線環境下で積算線量 100MGyの耐放射線性が要求される。また、保守装置の保守時には電力、信号ケーブルを取り外すため、使用されるコネクタには遠隔着脱性も併せて要求される。本コネクタの使用環境条件を以下に示す。

- (1) 雰囲気 : 不活性ガス
- (2) 温度 : 50℃
- (3) 線量率 : 平均10KGy/h (ガンマ線)
- (4) 積算線量 : 100MGy (10000時間) 以上

以上の観点から、ITERの炉内遠隔保守装置への適用を目的に、耐放射線性及び遠隔着脱性を有する電気コネクタ(以下、コネクタとする)の開発を実施しており、これまでに第1世代から第4世代(以下、ステップ)までのコネクタを製作し、着脱試験及びガンマ線照射試験を実施してきた[3]。今回、第5ステップでは更に小型化、軽量化を図ったコネクタを製作し、一般産業用ロボットと6軸力センサを組み合わせた着脱装置を使用した着脱試験結果を実施した。

本報では、第5ステップのコネクタの構造と着脱試験結果及びこれまでのガンマ線照射試験で問題となっている絶縁抵抗の劣化について、その後の調査結果を報告する。

## 2 第5ステップコネクタの構造と着脱試験

### 2.1 コネクタの構造

第5ステップのコネクタは第4ステップコネクタ[3]を更に小型、軽量化することを目的に製作した。その外観及び構造を Fig. 2.1、2.2 に示す。本コネクタのプラグは、内部のコンタクトソケットと絶縁材を保持したハウジング、ハウジングと本体間に取り付けられたボールベアリング及びプラグ本体から構成され、ハウジングがレセプタクルに吻合された後も外側のプラグ本体だけを回転できる構造となっている。また、プラグ外周にはベアリングのガイドが取り付けられている。

一方、レセプタクルにはプラグをガイドするためのガイド溝が設けられ、挿入完了及び固定確認用マーカが取り付けられている。

以下にコネクタの主な仕様を示す。

#### (1) プラグ形状

第4ステップコネクタの着脱試験結果を基に、第5ステップコネクタのプラグ先端部には挿入性向上を目的としたテーパを設け、かつレセプタクルとプラグ間のかじりを防止するためにテーパ後端部径を細くした。胴部を細くすることで、下図 Fig. 2.3(a)のように同じ挿入

角度でもかじりにくくなり、また万一かじった場合には下図 Fig. 2.3(b)のように、かじりを解除するために必要な力がより小さくて済むという利点がある。

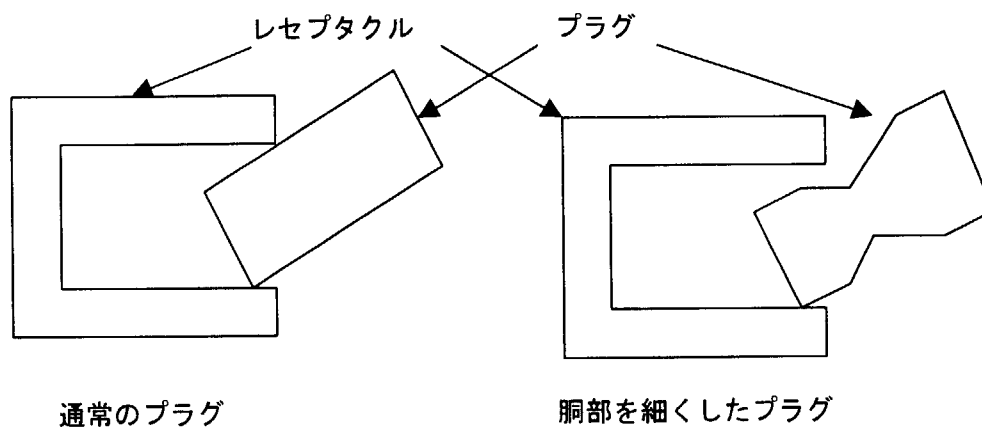
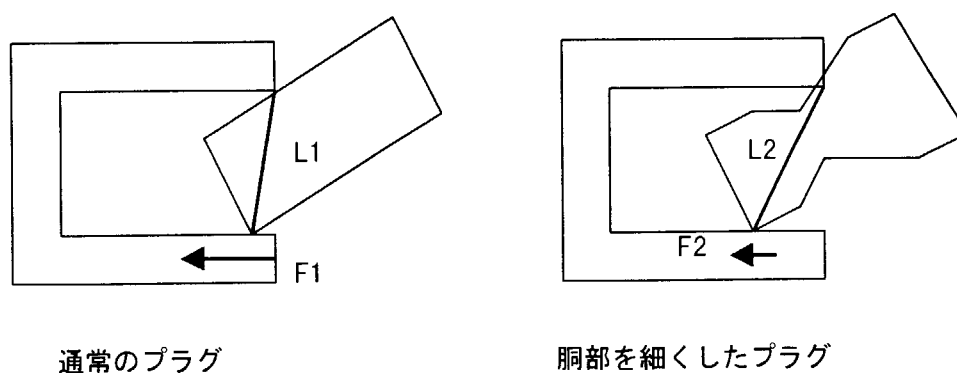


Fig. 2.3(a)



$L1 < L2$  (L:レセプタクルと接触したかじり位置間距離)  
 かじり状態から復旧させるために必要なモーメントをMとすると、  
 $M = F1 * L1 = F2 * L2$   
 よって、 $F1$  (必要な力)  $>$   $F2$  (必要な力)

Fig. 2.3(b)

(2) コネクタ寸法

- プラグ長さ : 93 mm
- プラグ外径 : 56 mm
- レセプタクル長さ : 77 mm
- レセプタクル外径 : 68.6 mm

(3) プラグ重量 : 800 g

(4) レセプタクル重量 : 1000 g

- (5) コンタクトピン数 : 10本 ( $\phi 1.5\text{mm}$ )
- (6) コンタクトピン定格電流 : 3A/本 ( $\phi 1.5\text{mm}$ )
- (7) コンタクトピン材質 : Fe+Niに $5\mu\text{m}$ のNiコーティング
- (8) コンタクトピンコーティング :  $10\mu\text{mAu}$ コーティング
- (9) ピン・ソケット挿抜力 : 挿入時0.4kg  
抜去時0.6kg
- (10) 絶縁材 :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  92.38%  
 $\text{SiO}_2$  3.22%  
 $\text{MnO}_2$  3.9%  
 $\text{MgO}$  0.41%
- (11) 絶縁材とハウジングの接合 : 銀ろう付け (Ag—8 ; Ag+Cu)
- (12) プラグ材質 : アルミ合金
- (13) レセプタクルボディ材質 : ステンレス鋼  
プラグとのかじりを防止するために、プラグとレセプタクルで硬度の異なる材質を採用した。
- (14) 確認用マーカの採用 : レセプタクルにプラグの着脱及び回転の完了を確認するためのマーカを取り付けた。

Fig. 2.4 にプラグの着脱手順を示す。①マニプレータ等でプラグを把持し、レセプタクル前部に位置決めする。②マニプレータで挿入完了確認用マーカが起きあがるまでプラグを押し込む。③プラグを着脱（回転）用治具もしくはマニプレータ手首部で右回転させる。④回転完了確認用マーカの起き上がりを確認する。⑤プラグの固定完了。プラグの抜去は挿入の逆手順で実施する。なお、マニプレータによるプラグの把持はマニプレータのエンドエフェクタ（ハンドもしくは専用の着脱治具）で行なうものとする。

## 2.2 着脱試験

CCDカメラからの視覚情報に基づいて行なった第4ステップコネクタの着脱試験結果、その構造の妥当性は確認できた。第5ステップコネクタでは、一般産業用ロボットとその先端部に6軸センサを取り付けて、着脱性能について試験を行なった。

### 2.2.1 基礎試験（ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+プラグ）

一般産業用ロボットには川崎重工製JS-10を使用し、その手首部に6軸力センサ及びロボットとレセプタクル間の相対位置の若干のズレを吸収できるロボットハンドリング用ツール、RCC(Remote Center Compliance)デバイスを取付けた。プラグはRCCデバイスにボルトで直接固定した。ボルトで直接プラグを固定した理由は、治具及びマニプレータのハンドでプラグを把持した場合、それらとプラグ間のギャップがガタとして評価に影響を及ぼすことが

懸念されたためである。また、6軸力センサはロボットの手首部にかかる直行座標系3方向の力及びモーメントを測定するセンサであり、アナログ電圧出力でフルスケール荷重±100%時に各々±10Vで出力される。3方向における定格荷重と定格モーメントはそれぞれ  $F_x:44\text{kgf}$ 、 $F_y:44\text{kgf}$ 、 $F_z:88\text{kgf}$ 、 $M_x:340\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 、 $M_y:340\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 、 $M_z:340\text{kgf}\cdot\text{cm}$  である。Fig. 2.5 に試験装置の全体構成図を示す。

試験は教示再生によるロボットによるプラグの位置決め、手動操作によるプラグの挿入・右回転・固定（以上、着動作）、手動操作による左回転・抜去（以上、脱動作）という手順で実施した。試験状況を Fig. 2.6 に示す。また、着脱は力センサからの力情報を基に行なった。試験時のセンサからの出力データを Fig. 2.7, 2.8 に示す。

得られたデータから、挿入完了時はプラグの押し付け方向の力  $F_z$  はさほど変化せず、モーメント  $M_x$ 、 $M_y$  が同時に急激に変化し、右回転完了時には  $M_z$  が急激に変化することが明らかになった。挿入完了時にプラグの押し付け方向の力  $F_z$  が変化しないのは、挿入前の教示再生によるプラグ位置決め時において、プラグの押し付け方向 ( $F_z$  方向) とレセプタクルの中心軸方向がずれていたためと考えられる。

一方、脱時においては、左回転完了時に  $M_z$  の出力が急激に変化し、抜去完了時には各出力値が0（ゼロ）、つまり挿入前のセンサからの出力値に戻ることがわかった。

以上から、プラグの着脱動作の確認は3方向の力 ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) ではなく、モーメント ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) の監視で行なえることが予想される。

## 2.2.2 許容ズレ試験（ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+プラグ）

続いて、プラグとレセプタクルの芯ズレ（水平方向）及び角度ズレ（ねじり方向）の許容値に関する試験を行った。試験方法は基礎試験と同様に、プラグをボルトでRCCデバイスに固定し、力センサからの出力値をモニターした。その結果、芯ズレは10mm、角度ズレは20度まで許容できることが確認できた。これは、位置決め精度が1/100mmであるJS-10のようなロボットでの教示再生による着脱は十分可能であることが示している。なお、RCCデバイス自身の誤差修正量は以下の通りであり、許容ズレ量と比較してかなり小さい。このことから、JS-10はプラグ着時には大きく歪んでいると考えられる。

水平方向 : ±2.5mm

ねじり方向 : ±8度

傾き方向 : ±0.5度

次に、本試験で得られた力センサからの出力データのうち、芯ズレ量5mm（挿入可能時）と12.5mm（挿入不可能時）の場合のプラグ着時におけるデータを Fig. 2.9、2.10 に示す。また、軸毎の出力値の変化傾向を比較するために、プラグ着時における  $M_x$ 、 $M_y$  のデータを Fig. 2.11、2.12 に示す。これらから、プラグをレセプタクルに挿入する場合は、挿入の可否にかかわらず、モーメント ( $M_x$ ,  $M_y$ ) が急激に変化することが明らかになった。このことは、力センサからのモーメントの情報だけでは挿入完了の判断は難しく、プラグ着

脱はロボットのエンコーダからの位置情報と力センサからの力（モーメント）情報を組み合わせて、各作業完了の確認及び現在位置、状態の把握を行う必要があることを示している。

以上から、プラグ着脱時のロボット制御方法は次の通りとなる。

- ①プラグを把持したロボットをレセプタクル前に位置決めする。
- ②ロボットアームを一定距離前進させる（プラグ挿入開始）。
- ③エンコーダからの位置情報及び力センサからの出力値をモニターする（挿入中）。
- ④出力値  $M_x$ ,  $M_y$  が同時に急激に変化した時点で、ロボットアーム動作停止させる。  
ある一定値以上の力( $M_x$ ,  $M_y$ )がセンサに働くとロボットが停止するシーケンスを組んでおく。
- ⑤エンコーダからの位置情報を基にプラグ挿入可否の判断を行なう。
- ⑥プラグ右回転させる。
- ⑦出力値  $M_z$  が同時に急激に変化した時点で、プラグ回転完了  
ある一定値以上の力( $M_z$ )がセンサに働くとロボットが停止するシーケンスを組んでおく。

プラグ脱は逆手順で行なう。

### 2.2.3 実機想定着脱試験

実機を想定し、プラグの把持と回転にエンドエフェクタ（ロボットハンド及び着脱用治具）を使用した着脱試験を実施した。

#### (1) ロボットハンドを使用した試験

（ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+ロボットハンド+プラグ）

Fig. 2.13 のようにRCCデバイスの先端にハンドを取付け、プラグはロボットハンドで把持し、着脱試験を実施した。プラグの回転はロボット手首部の回転で行なうこととした。プラグ把持部とハンド幅との関係を Fig. 2.14 に示す。ハンドでプラグを容易に把持するためにプラグ把持部の幅をハンド幅よりも8mm（プラグ把持部幅：30mm、ハンド幅：22mm）大きくしている。その結果、把持後にプラグがハンド内で Fig. 2.15 のように傾いてしまった。そのため、プラグの挿入は可能であるが、挿入後にプラグの中心軸と手首の中心軸がずれてしまい、プラグ回転動作時に、手首部にねじりによる過負荷がかかることが明らかになった。また同様に、プラグ脱時の抜去もスムーズに行うことができなかった。そのため、左回転後に一度プラグをハンドから離して、再度プラグ把持し直し、抜去する必要があることが分かった。

Fig. 2.16 にプラグ挿入時の力センサからの出力データを示す。挿入が完了すると、 $M_x$ 、 $M_y$  は変化するが、プラグとハンド間のガタのために力がセンサにまで上手く伝わらず、その変化量はわずかにとどまっている。そのため、基礎試験（Fig. 2.7）と比較して、挿入動作完了の判断が力センサからの出力値だけでは難しいことが明らかになった。また、プラグ回転完了もガタにより力センサで力を検知できず、過度の回転によりロボットが過負荷で停

止ることが分かった。

以上から、今後はハンドとプラグのギャップを現在の8 mmから更に小さくすることでプラグの傾きおよびハンド間のガタを抑えて、力の伝達をスムーズにし、着脱の各作業完了判断及び現在位置把握はカセンサからの力情報とエンコーダからの位置情報で行なえるように改良を実施する。

また、補足試験として、ハンドに取り付けたCCDカメラからの視覚情報のみに基づく着脱試験を実施した。その結果、着脱は十分に可能であり、特に Fig. 2.17 に示すプラグ仮置き台は仮置き台を使用しない場合と比較して、視認情報のみによるプラグの位置決め性に非常に優れており、視覚情報に基づく着脱については、プラグ仮置き台は有効であることが前回試験[3]と同様に確認された。

## (2) 着脱用治具を使用した試験

(ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+着脱用治具+プラグ)

プラグを把持、回転させる着脱用治具をRCCデバイスに取り付け、着脱試験を実施した。治具によるプラグの把持方法を第4ステップコネクタの着脱試験結果[3]を基に、治具先端をプラグ後部に差込み、ソレノイドで固定する方法に変更した。Fig. 2.18, 2.19 に着脱治具を示す。また、RCCデバイスとロボット間の力センサからの出力データを Fig. 2.20, 21 に示す。挿入完了時にはプラグを直接固定した場合と同様に  $M_x$ ,  $M_y$  が同時に立ち上がることで判断できるが、ロボットハンドを使用した時と同様に治具とプラグ間のガタにより力が吸収され、プラグを直接固定した場合よりも立ち上がり幅が小さいことが分かった。また、回転完了時にはプラグを回転させる治具のギヤが滑り、出力値がある一定幅で変化すること、及び脱時の抜去完了後には挿入前の出力値に戻ることが明らかになった。しかし、プラグ挿入が過度に行われると、ガタによりプラグと着脱治具の中心軸間に大きなずれが生じ、プラグをスムーズに治具で回転できないといった問題点も明らかになった。

## 2.3 まとめ

(1) 一般産業用ロボットと6軸力センサを組み合わせ、次の3通りのプラグ着脱試験を行なった。

### ①基礎試験、許容ズレ試験

ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+プラグ (ボルト固定)

### ②実機想定試験 (ロボットハンドを使用した試験)

ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+ロボットハンド+プラグ

### ③実機想定試験 (着脱用治具を使用した試験)

ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+着脱用治具+プラグ

(2) 基礎試験及び許容ずれ試験

(ロボット+6軸力センサ+RCCデバイス+プラグ (ボルト固定) の場合)

その着脱の各動作完了時にはそれぞれの軸方向のモーメントが大きく変化すること

が明らかになった。

a) プラグ着時

挿入時 : X, Y 軸方向のモーメント ( $M_x, M_y$ ) の急激な変化

右回転時 : Z 軸方向のモーメント ( $M_z$ ) の急激な変化

b) プラグ脱時

左回転時 : Z 軸方向のモーメント ( $M_z$ ) の急激な変化

抜去時 : 各軸モーメント値が 0 (ゼロ) になる。

また、ズレ許容値は次の通りであることが明らかになった。

a) 芯ズレ (水平方向) : 10mm

b) 角度ズレ (ねじり方向) : 20 度

(3) ロボットハンドを使用した試験 (実機想定試験)

(ロボット+6 軸力センサ+RCC デバイス+ロボットハンド+プラグの場合)

モーメントの出力がプラグを RCC デバイスに直接固定した場合よりも小さいことが明らかになった。そのため、今後は、ロボットハンド幅とプラグ把持部の幅を極小小さくし、ハンドとプラグ間のガタを小さくする必要がある。

また、その上で、再度着脱試験を実施する。

(4) 着脱用治具を使用した試験 (実機想定試験)

(ロボット+6 軸力センサ+RCC デバイス+着脱用治具+プラグの場合)

力センサからの出力値変化はプラグを RCC デバイスに直接固定した場合とほぼ同じであるが、変化幅は小さいことが明らかになった。また、プラグを過剰に挿入した場合は治具とプラグの中心がずれ、回転がスムーズにできないという問題点が明らかになった。今後、対応策の検討が必要である。

(6) 各試験結果から、ロボットハンドや着脱用治具には更に改良が必要であるものの、

プラグ着脱時のロボット制御方法は、いずれの方式においても次の通りになる。

- ① プラグを把持したロボットをレセプタクル前に位置決めする。
- ② ロボットアームを一定距離前進させる (プラグ挿入)。
- ③ エンコーダからの位置情報及び力センサからの出力値をモニターする (挿入中)。
- ④ 出力値  $M_x, M_y$  が同時に急激に変化した時点で、ロボットアーム動作停止させる。  
ある一定値以上の力 ( $M_x, M_y$ ) がセンサに働くとロボットが停止するシーケンスを組んでおく。
- ⑤ エンコーダからの位置情報を基にプラグ挿入可否の判断を行なう。
- ⑥ プラグの回転
- ⑦ 出力値  $M_z$  が同時に急激に変化した時点で、プラグ回転完了  
ある一定値以上の力 ( $M_z$ ) がセンサに働くとロボットが停止するシーケンスを組んでおく。

プラグ脱はこの逆手順で行なう。

- (5) 試験後にプラグを観察したところ、プラグ前部と後部をつなぐアルミ製の六角柱状体が大きく変形していた。これは回転時の負荷によるものと考えられ、今後は強度をあげる改良が必要なことが明らかになった。

### 3. ガンマ線照射試験

#### 3.1 大気中ガンマ線照射試験

第4ステップまでのコネクタを使用して行ったガンマ線照射試験の結果[3]、耐電圧は100MGy照射後も良好であるが、絶縁抵抗並びにピン、コンタクト間の接触抵抗はそれぞれに劣化が観察された。その原因は、絶縁抵抗低下についてはピン表面に生成した腐食物のセラミックス表面への落下による表面電流、もしくは照射環境中の水分であり、また接触抵抗の増加についてはピン表面の腐食によるものと推測した。そして、これら原因に対して、接触抵抗の劣化については、ピン表面の金メッキ厚を10ミクロン程度とすることで対応可能であることが既に明らかになっている[3]。

そこで今回、課題として残っている絶縁抵抗劣化の再現性確認とその劣化の原因及び対策を明らかにすることを目的に、これまでに行ってきた試験と同一試料を使って、ガンマ線照射後の絶縁抵抗測定を実施した。

##### 3.1.1 再現性確認及び絶縁抵抗試験

第1ステップコネクタから第4ステップコネクタの構成材料を使用し、コネクタピンとセラミックス絶縁近傍を模擬した小型試料を製作、原研高崎研究所γ線照射施設（コバルト1棟）第2セルにて平均線量率10KGy/h（大気、室温）という条件下で照射試験を実施した。試料一覧をTable 3.1, Fig. 3.1に示す。

25MGy照射後の試験結果をFig. 3.2～3.4に示す。セラミックス単体試料を除く全ての試料の絶縁抵抗が照射開始直後から低下しはじめ、セラミックス単体試料も25MGy照射後で抵抗値が低下しはじめた。また、Fig. 3.5に示すように、25MGy照射後の試料表面をヘリウムによる吹付け及びエタノールによる拭取り洗浄したが、若干の抵抗値の回復しか観察されなかった。

以上の試験結果から、次の点が確認された。

- ①絶縁抵抗劣化には再現性が認められる。
- ②低下の原因はセラミックス自身の絶縁性劣化にある。
- ③セラミックス表面に付着した遊離性の油脂、ピン表面に生成した腐食物の落下によるものではないと推測される。
- ④照射場環境中の水分の影響は今回の試験では不明。

続いて、Electron Probe Micro Analysis (EPMA；電子プローブマイクロアナリシス)で各試料表面上の元素の定性分析を行なった。その結果、照射前後の各試料表面でそれぞれ次の元



素が同様に確認された。

①セラミックス単体試料表面：アルミニウム、酸素

②メタライズ加工済試料表面：ニッケル

③銀ろう済試料表面：銀、銅

アルミニウム、酸素はセラミックスの構成材料であり、ニッケルはメタライズ部の表面コーティング材料及び銀と銅は銀ろう材料である。ニッケル、銀及び銅は導電性であるため、セラミックスの絶縁抵抗に大きく影響していると考えられるが、ガンマ線照射前の試料はこれら元素の付着にも係わらず、絶縁抵抗値が $10^5 M\Omega$ 以上であったため、これら導電性の元素は絶縁抵抗に、ガンマ線照射前は何等影響を及ぼしていないことが明らかになった。

### 3.1.2 絶縁抵抗劣化原因の推測

以上の試験結果を基に、絶縁抵抗劣化の原因を推測した

#### (1) 照射誘起絶縁劣化 (RIED: Radiation Induced Electrical Degradation)

現在までにガンマ線照射後のセラミックス自体の絶縁抵抗低下は照射誘起絶縁劣化 (RIED: Radiation Induced Electrical Degradation) という現象が報告されている[4]。しかし、今回の試験条件は RIED の発生条件と明らかに異なるため、絶縁抵抗の低下は RIED によるものではないと考えられる。

#### (3) セラミックス中、表面の不純物

絶縁材料として使用しているセラミックスは良好な銀ろう付けを得るために、不純物 (MnO<sub>2</sub>; 4%、MgO; 0.4%) を多く含んでいる。また、EPMA の結果からセラミックス表面にも不純物が存在していることが明らかになった。そのため、セラミックス結晶中に欠陥 (粒界) が多数存在し、ガンマ線照射によりこれら不純物が粒界に析出、拡散し、結果として絶縁抵抗が劣化した可能性が考えられる。加えて、不純物として遷移元素の Mn、Ag、Cu 等があるために、ガンマ線による電子のはじき出しで価数変化を起し、セラミックス中に生成した自由電子が絶縁抵抗劣化の一因になっている可能性もある。

#### (3) 炭素のセラミックス表面への付着[5]

ガンマ線照射は大気中で行ったため、大気中の炭素の一部はガンマ線により陽イオン化しているものと考えられる。一方、セラミックスは、周囲の金属からコンプトン効果等ではじき出されて、セラミックス内部に入り込んだ電子によってマイナス化している可能性がある。そのため、両者がセラミックス表面で電氣的に結合し、炭素を介して電流が流れたことも原因として考えられる。

### 3.2 まとめ

絶縁抵抗劣化の再現性確認及びその原因調査の試験を実施した。その結果、絶縁抵抗の劣化はセラミックス自身の抵抗の劣化に起因していることが明らかになった。また、その原因として、

- ①セラミックス中不純物、メタライズ材料及び銀ろう材料の拡散
- ②セラミックス中不純物、メタライズ材料及び銀ろう材料の価数変化
- ③セラミックス表面への炭素の付着

が考えられる。

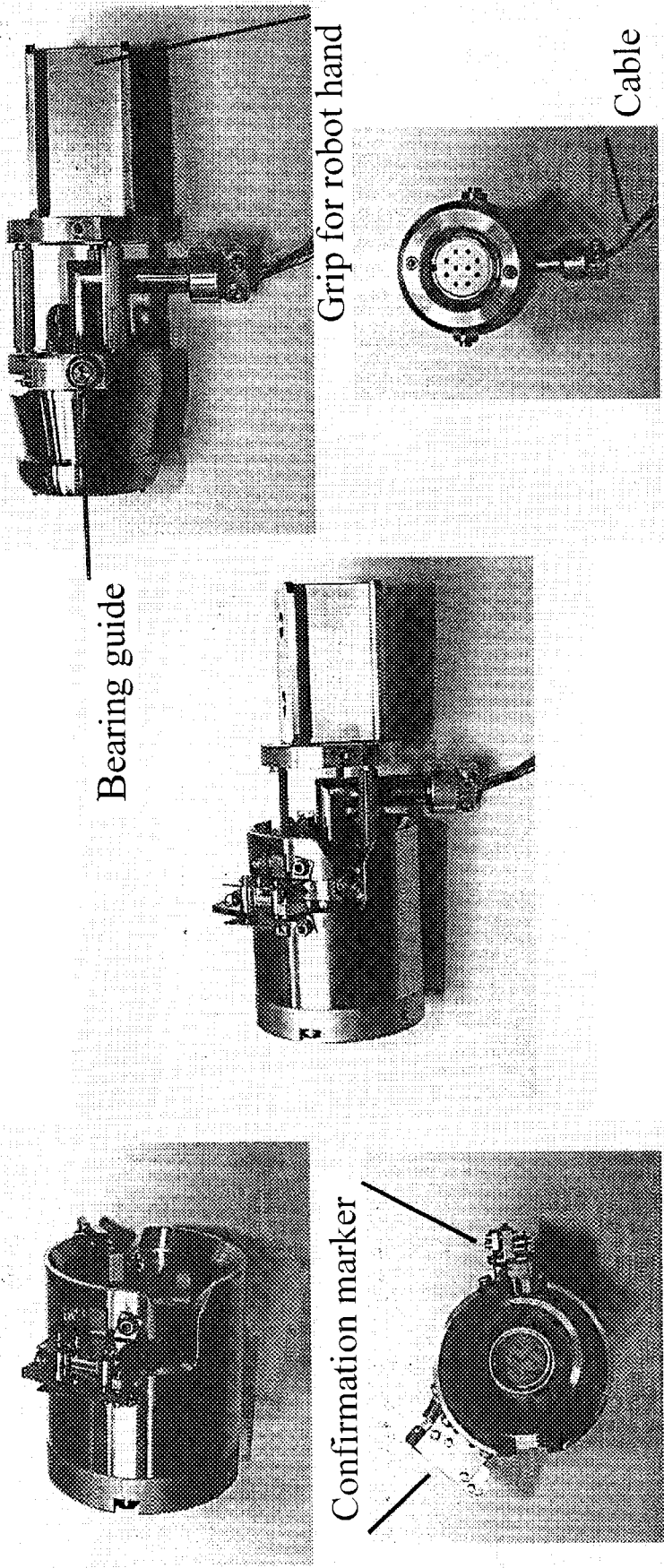
今後これら推測した原因の是非を明らかにするために、再度照射試験を実施し、SEM(走査電子顕微鏡)等でセラミックス中の原子の挙動を調査する計画である。また、接触抵抗についても、金メッキ厚を極力薄くするために、無電解金メッキを施したピン、コンタクトの $\gamma$ 線照射試験を実施する計画である。

#### 謝辞

本コネクタの試験にあたり、那珂研究所核融合工学部松田部長、高崎研究所材料開発部瀬口部長には、終始ご激励をいただいた。また、高崎研究所照射施設管理課の方々には多大なご支援をいただいた。ここに深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1]ITER 設計報告 プラズマ核融合学会誌 Vol.73 Supplement (1997)
- [2]多田 他:小特集「核融合炉用遠隔保守技術の開発」 プラズマ核融合学会誌 Vol.73 No.1 pp.19-82 (1997)
- [3]伊藤 他:「遠隔着脱対応ボールベアリング付き耐放射線性電気コネクタの開発」 JAERI-Tech 97-065 (1997年12月)
- [4]ITER 設計報告 プラズマ核融合学会誌 Vol.73 Supplement pp.275-276 (1997)
- [5]東北大学 金属材料研究所附属材料試験炉利用施設 四竈樹男 助教授 私信



Plug with robot hand grip

Receptacle

Fig. 2.1 Overview of the 5th step connector

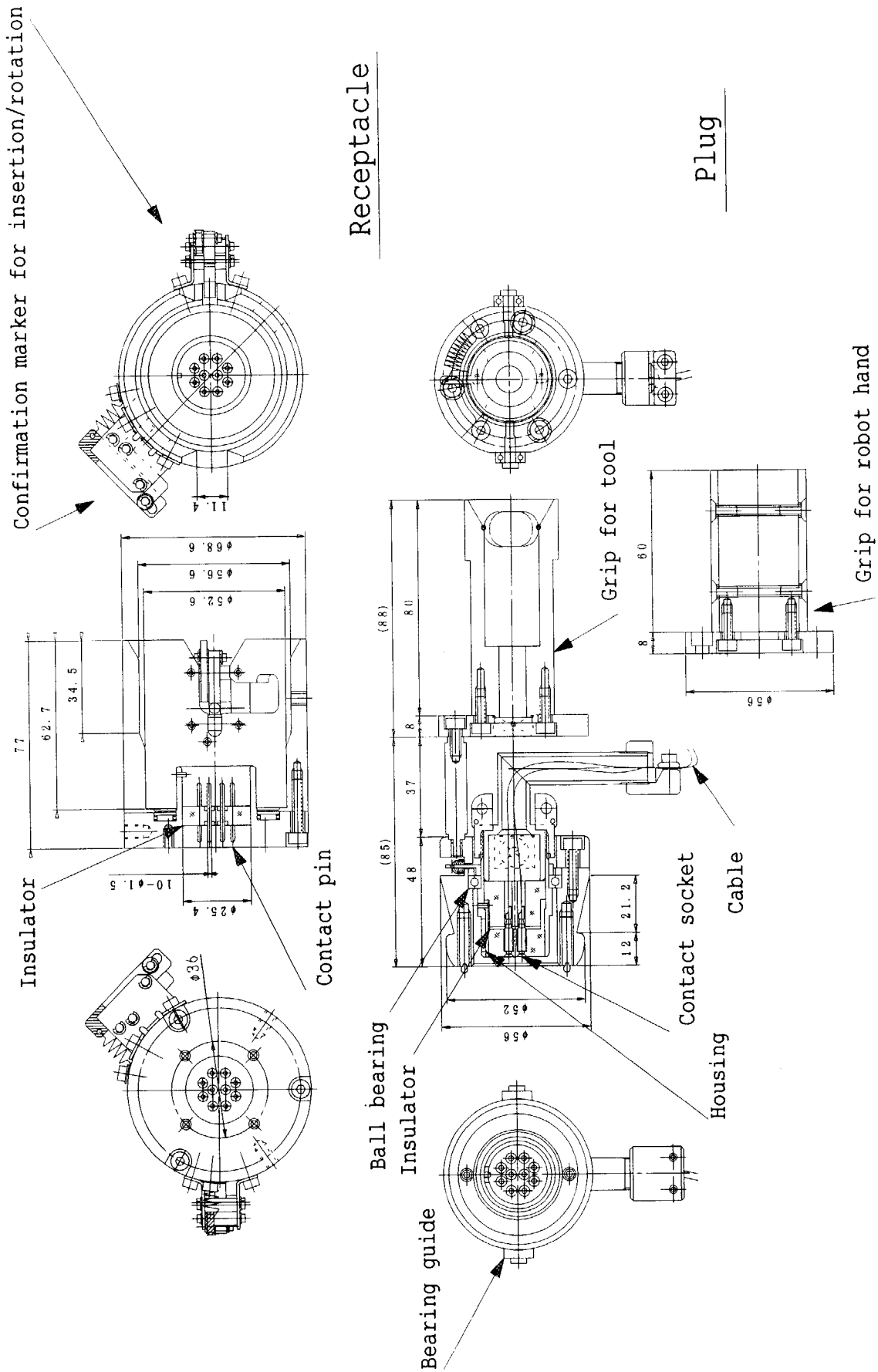
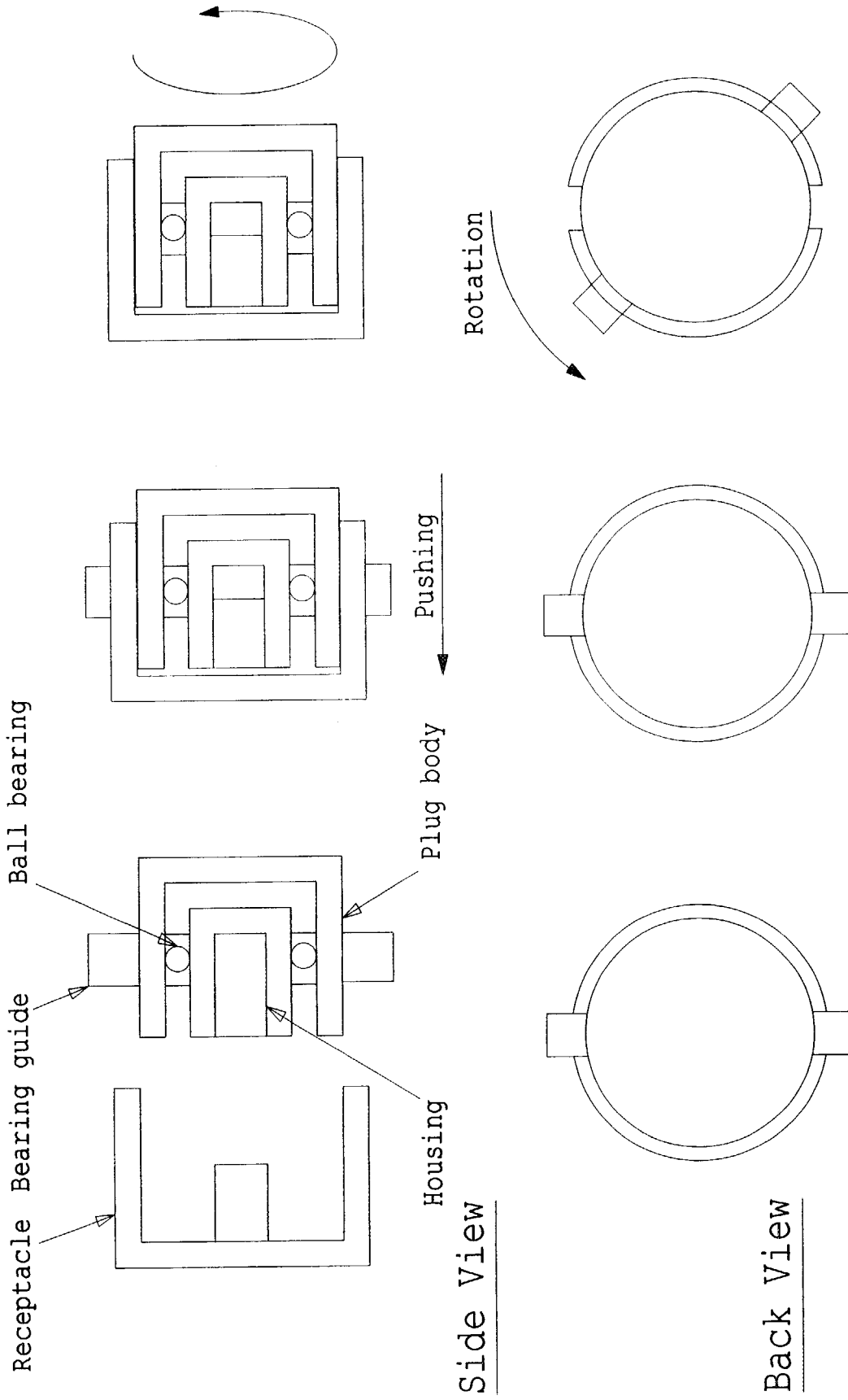


Fig. 2.2 Constitution of 5th step connector



1st:Align the center of plug  
2nd:Push the plug  
3rd:Rotate the plug for locking

Fig. 2.4 Plug attachment procedure

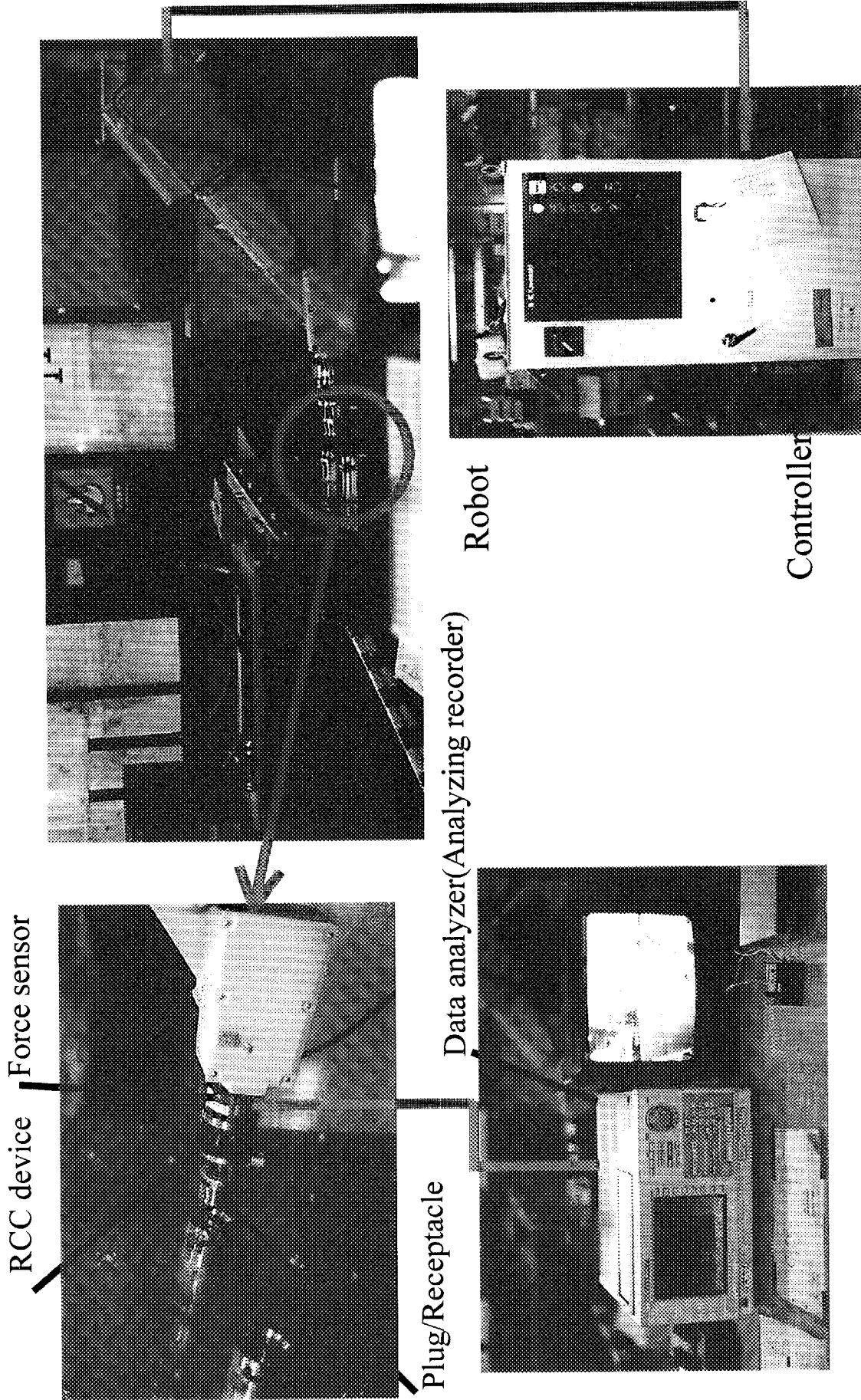


Fig. 2.5 System for plug attachment/removal test

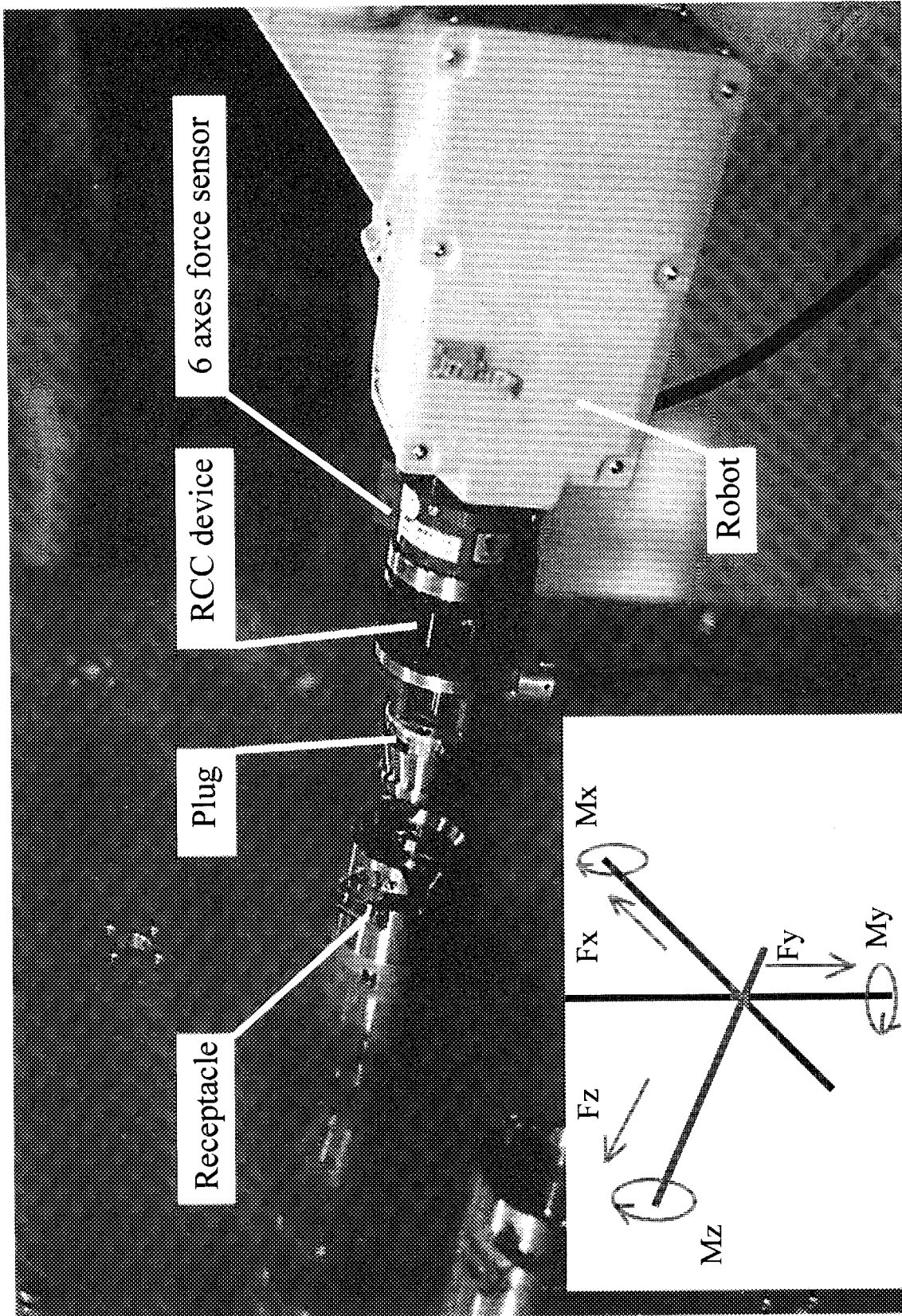
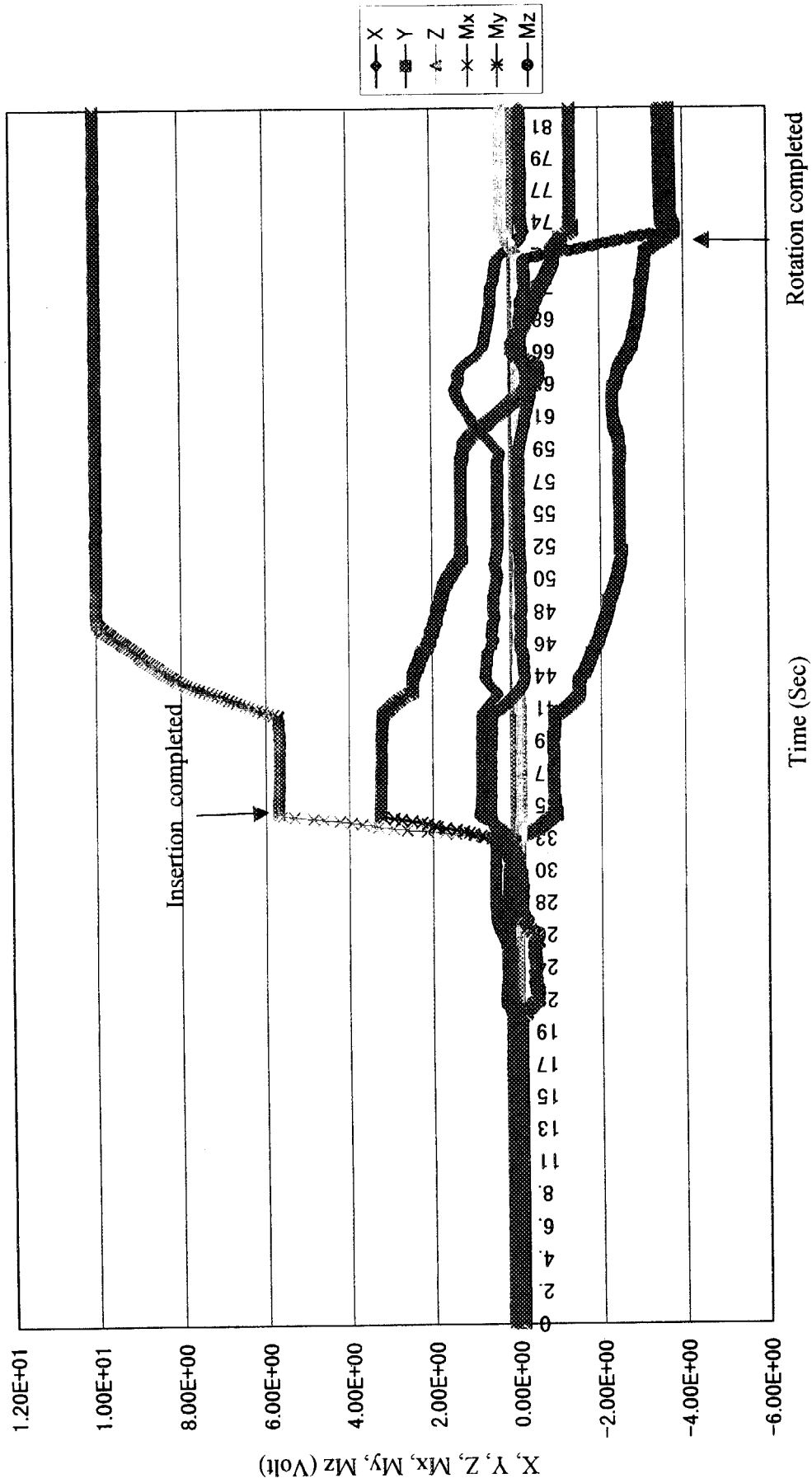


Fig. 2.6 View of plug attachment/removal test



**Fig. 2.7 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of 0 mm Offset Plug Attachment Test**



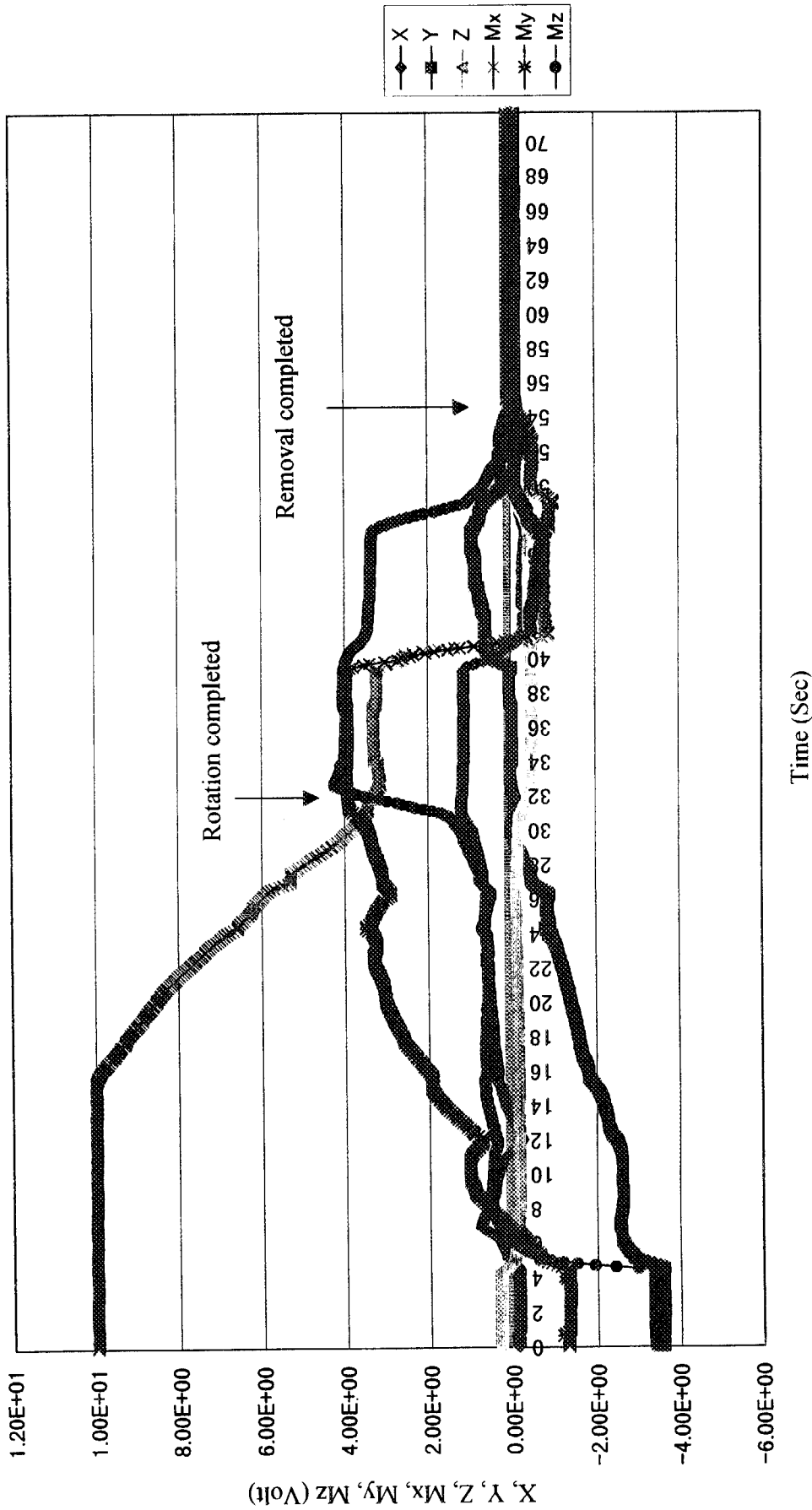


Fig. 2.8 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of 0 mm Offset Plug Removal Test

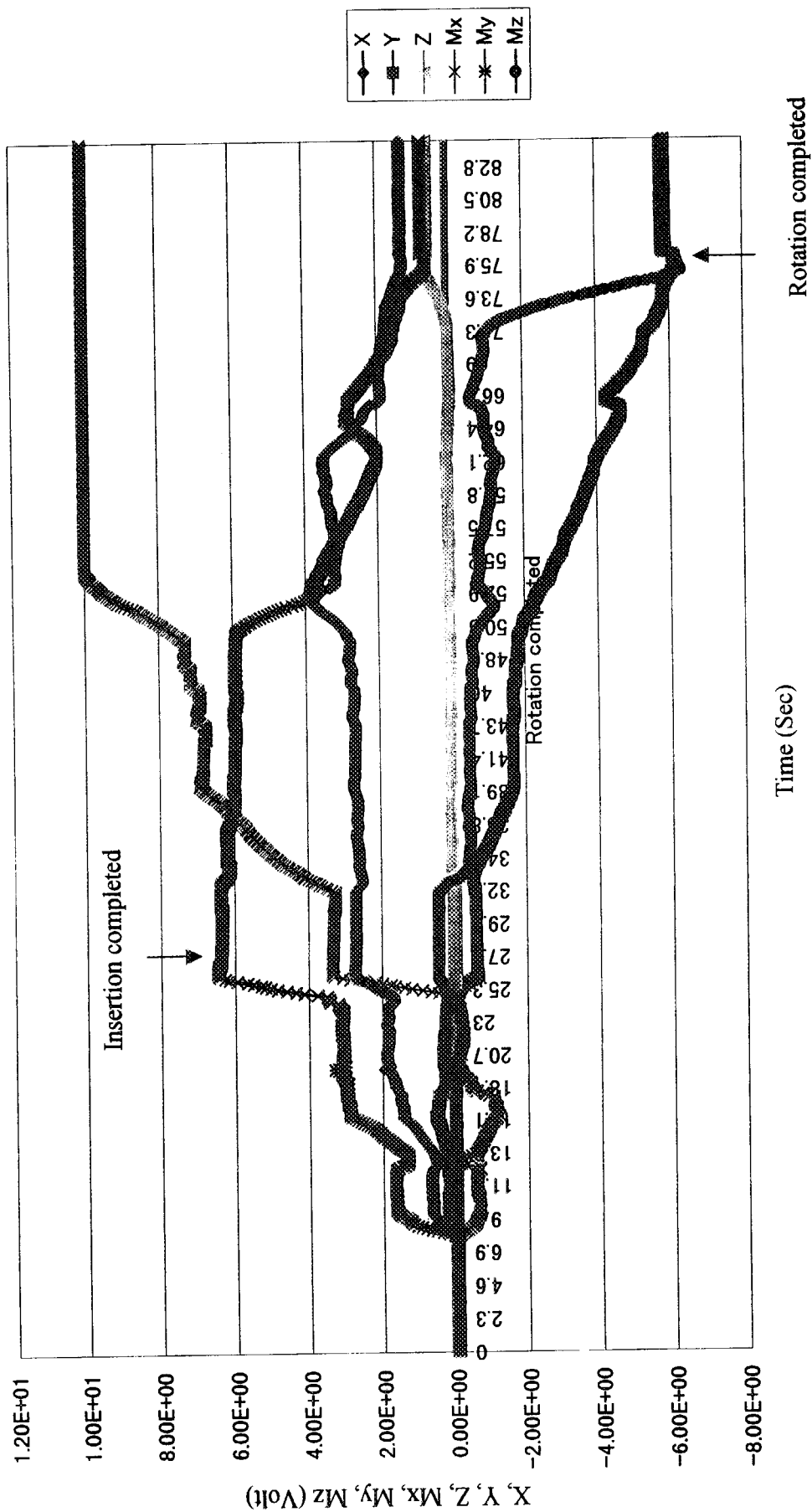


Fig. 2.9 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of 5 mm Offset Plug Attachment Test

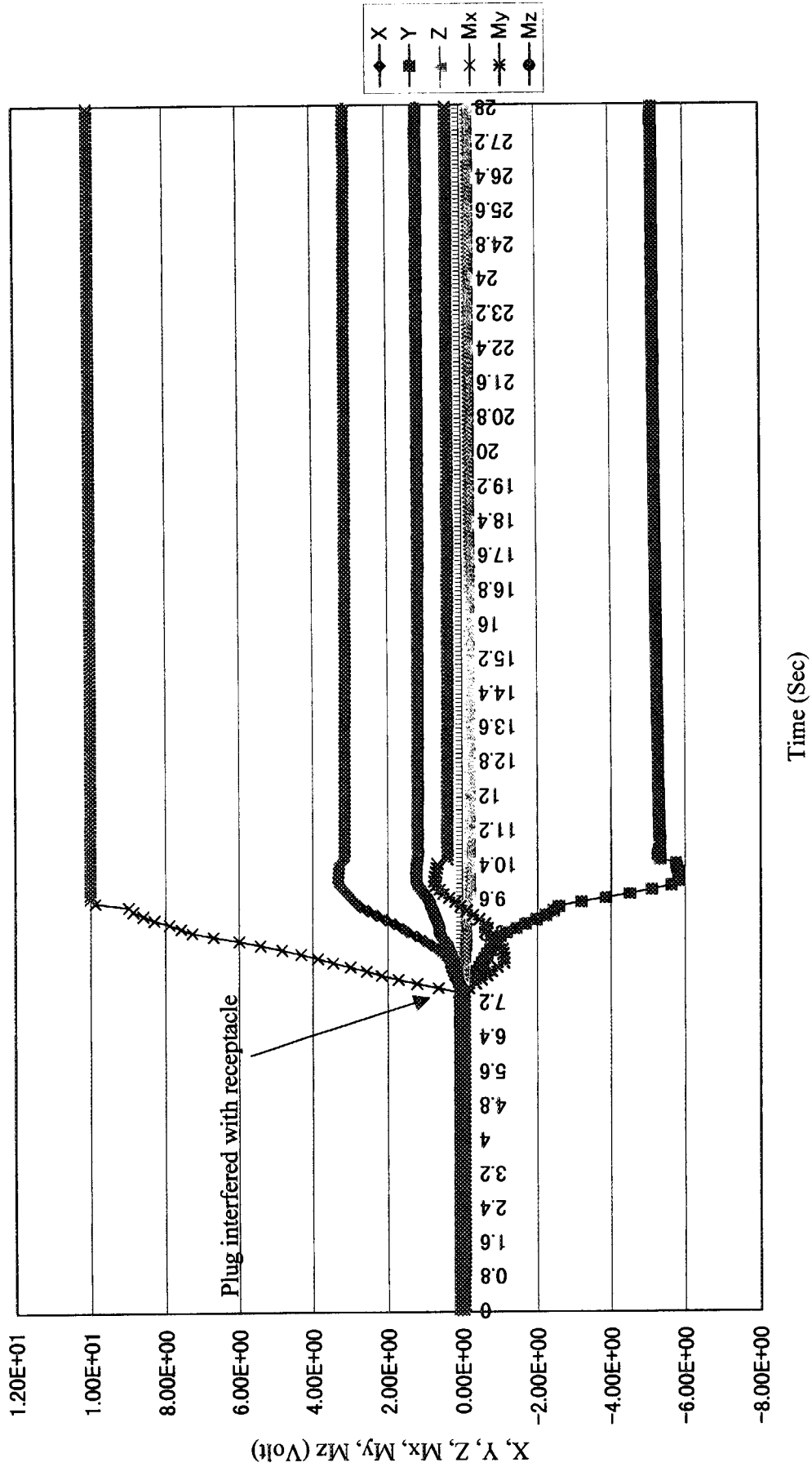


Fig. 2.10 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of 12.5 mm Offset Plug Attachment Test

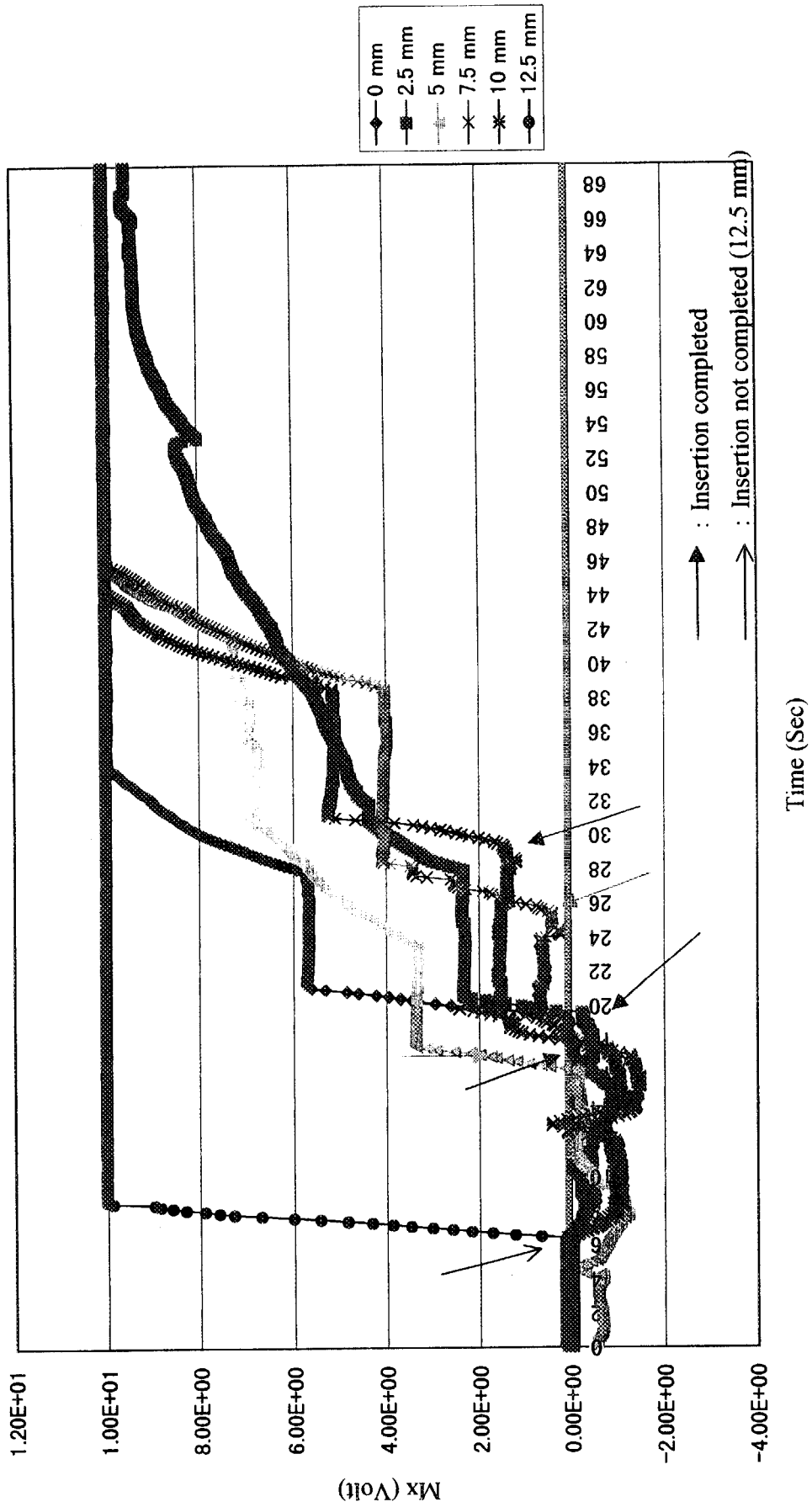


Fig. 2.11 Mx Transition Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of Offset Attachment Test

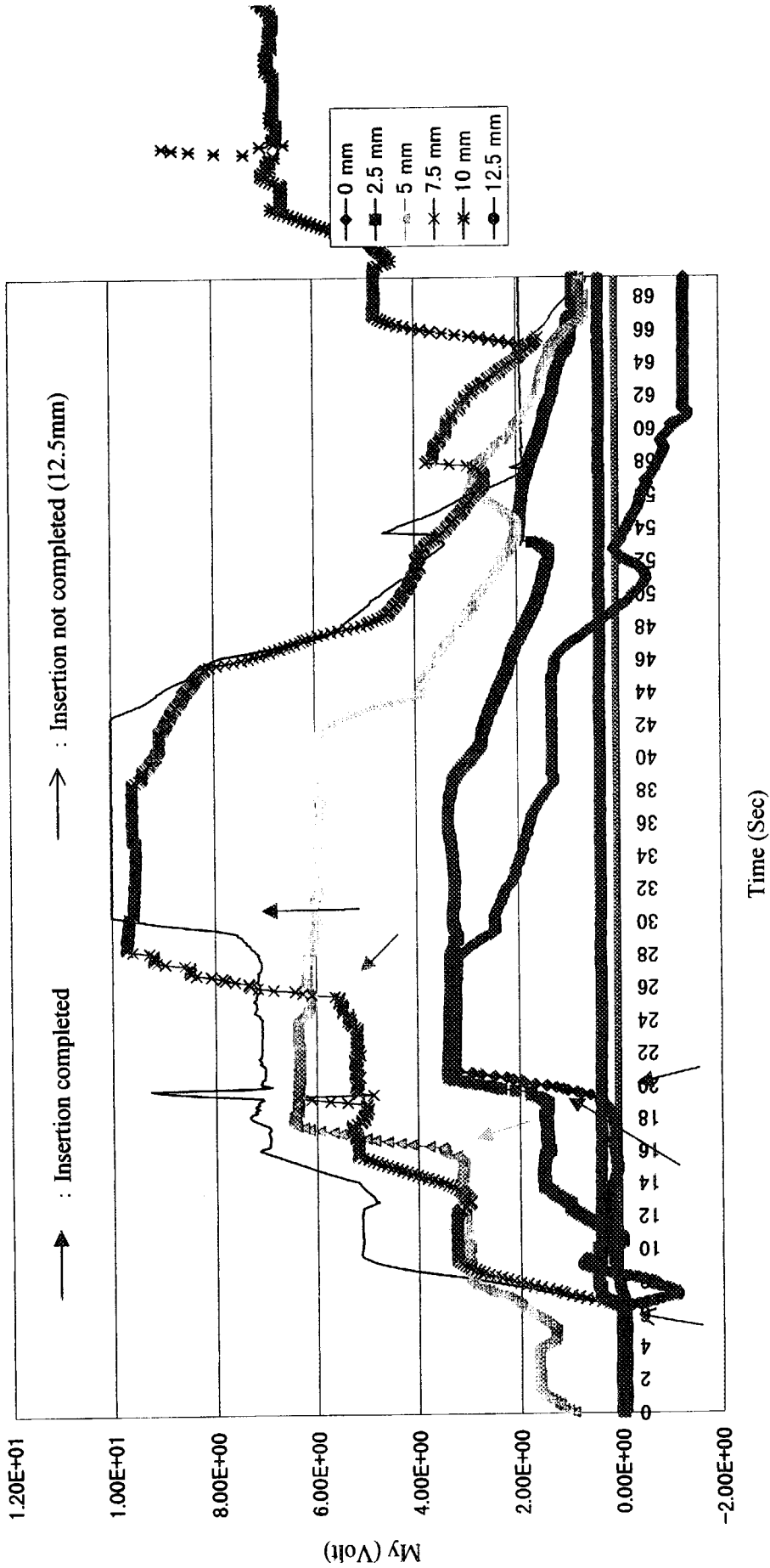


Fig. 2.12 My Transition Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of Offset Attachment Test

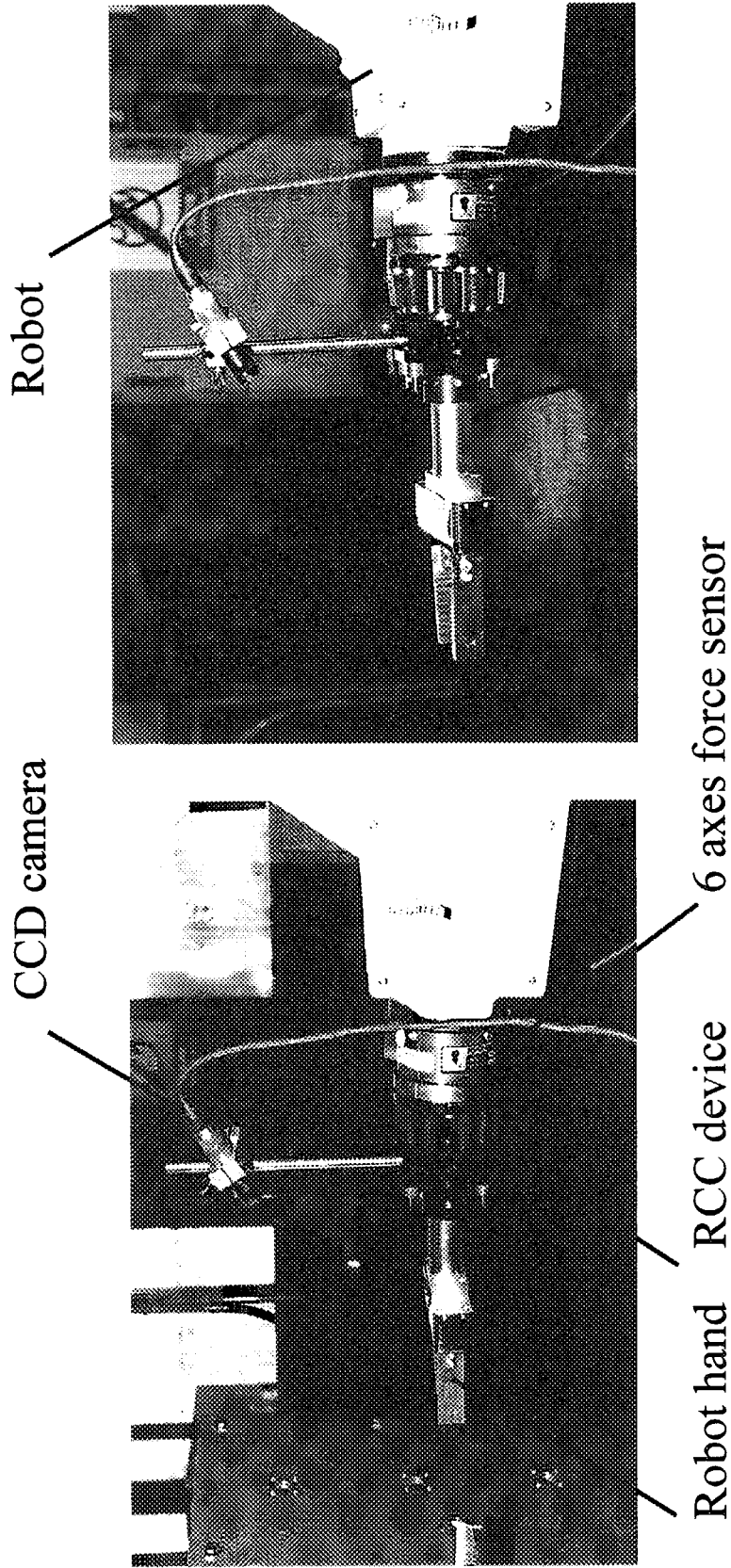


Fig. 2.13 Robot with robot hand for plug gripping

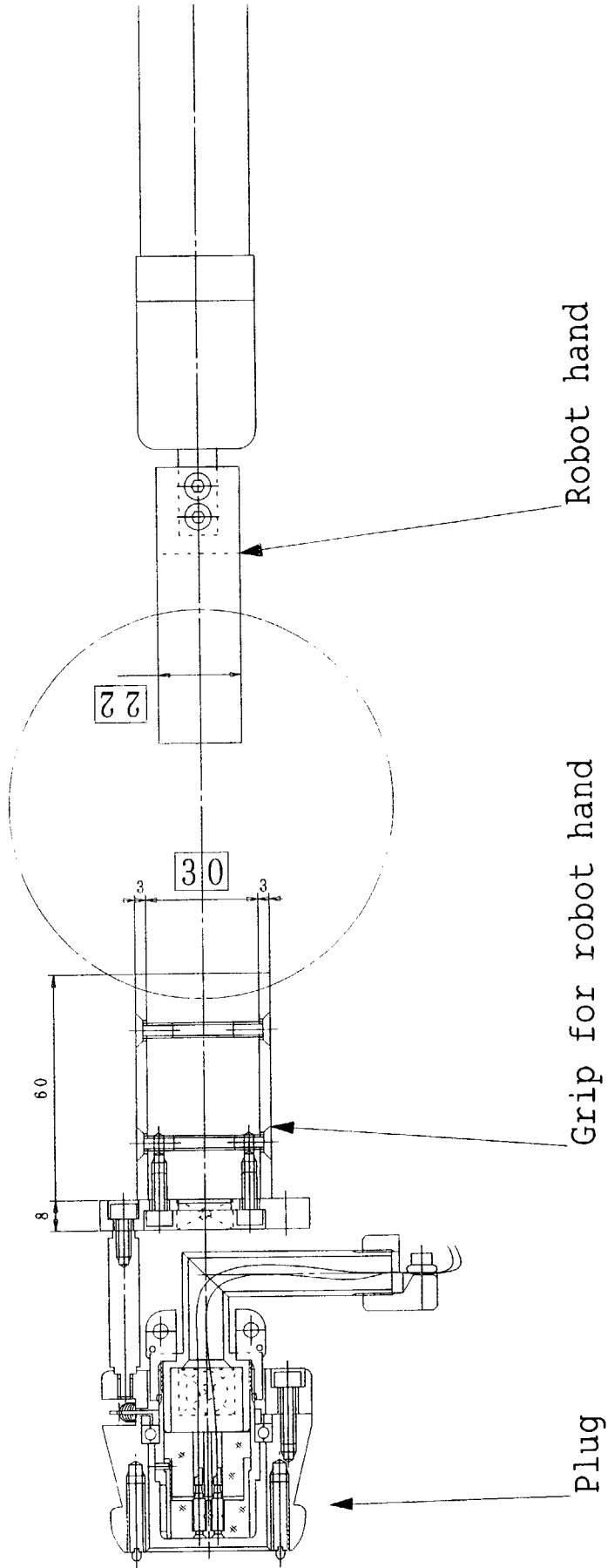


Fig 2.14 Size relation between the robot hand and the grip for robot hand

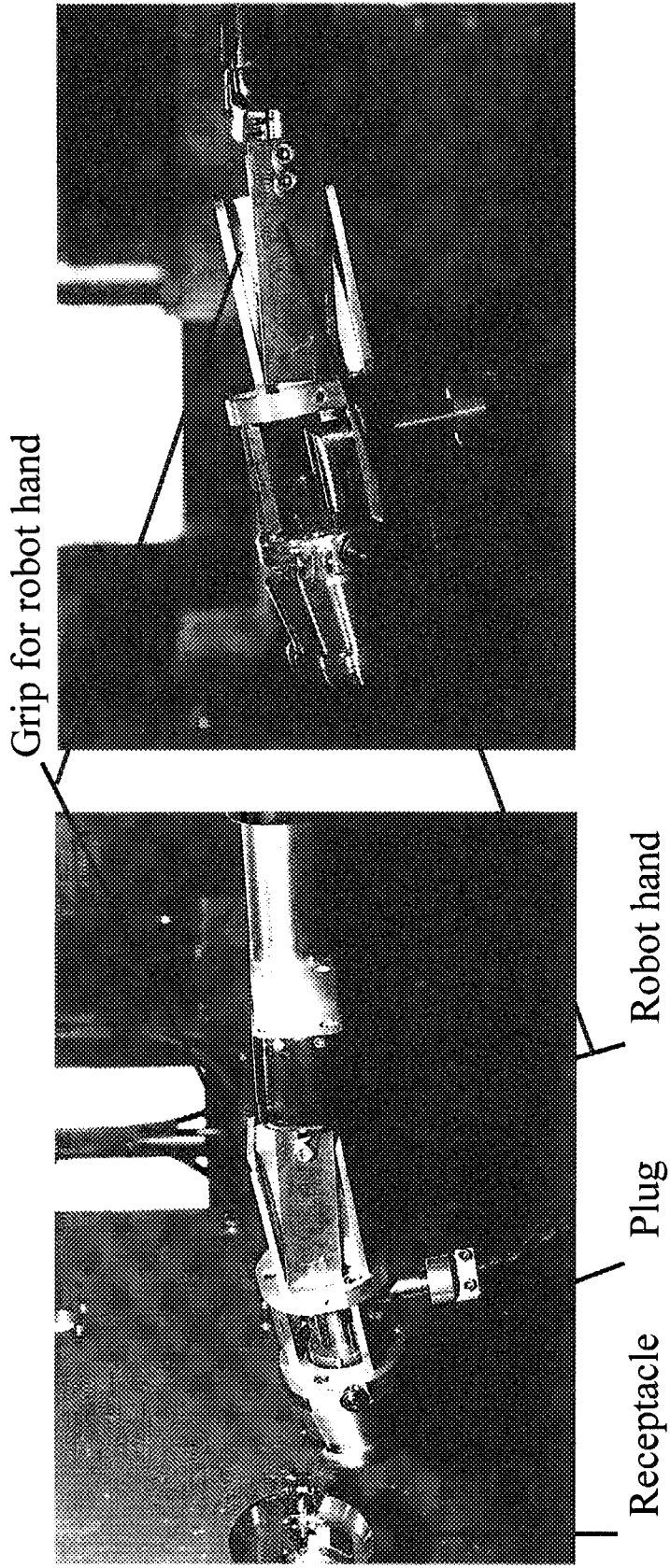


Fig. 2.15 View of plug inclination caused by clearance between the robot hand and the grip for robot hand



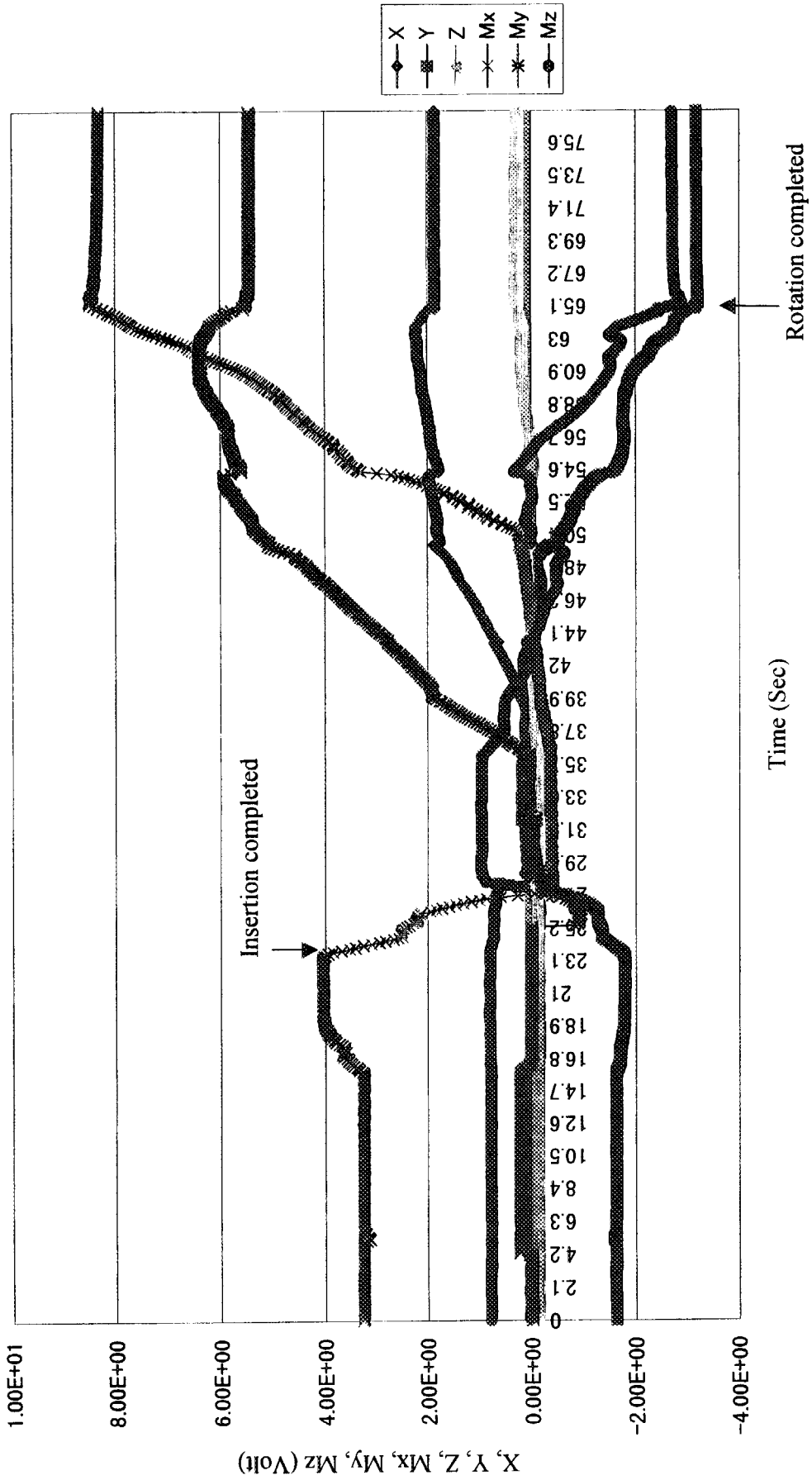
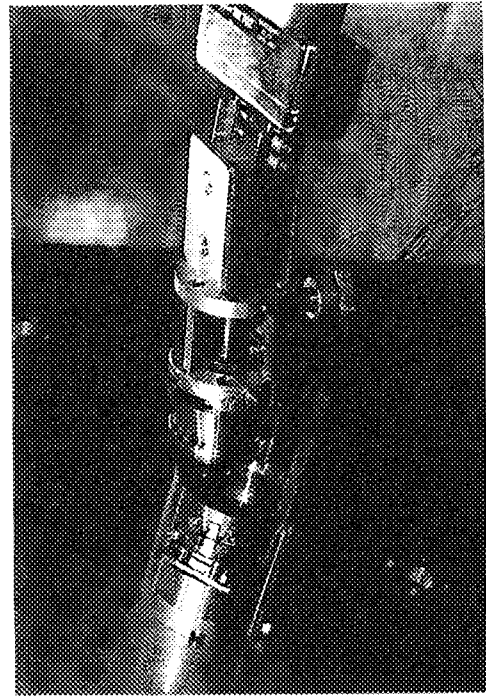
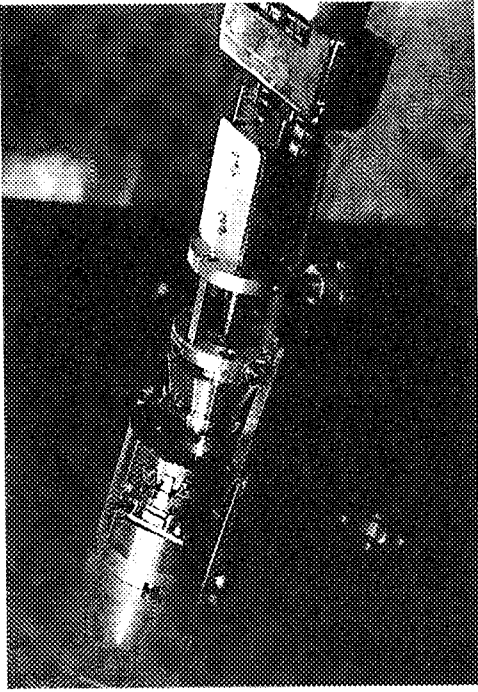


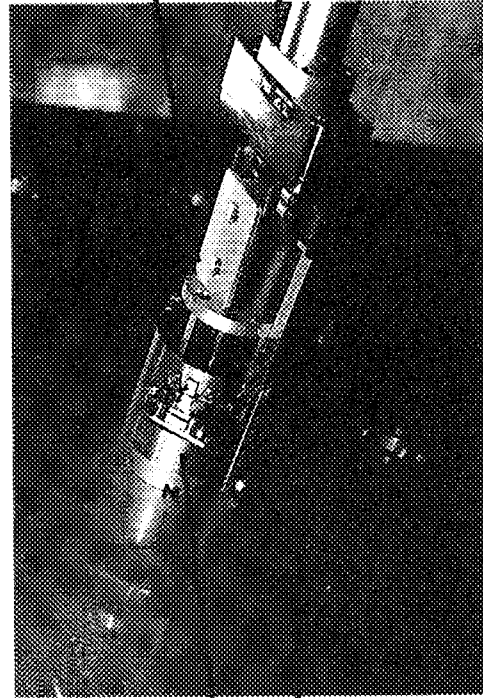
Fig. 2.16 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of Plug Attachment Test using Robot Hand



(a) Plug positioning by CCD camera



(b) Plug installation on plug stand



(c) Plug insertion

Fig. 2.17 Procedures of plug attachment using plug stand



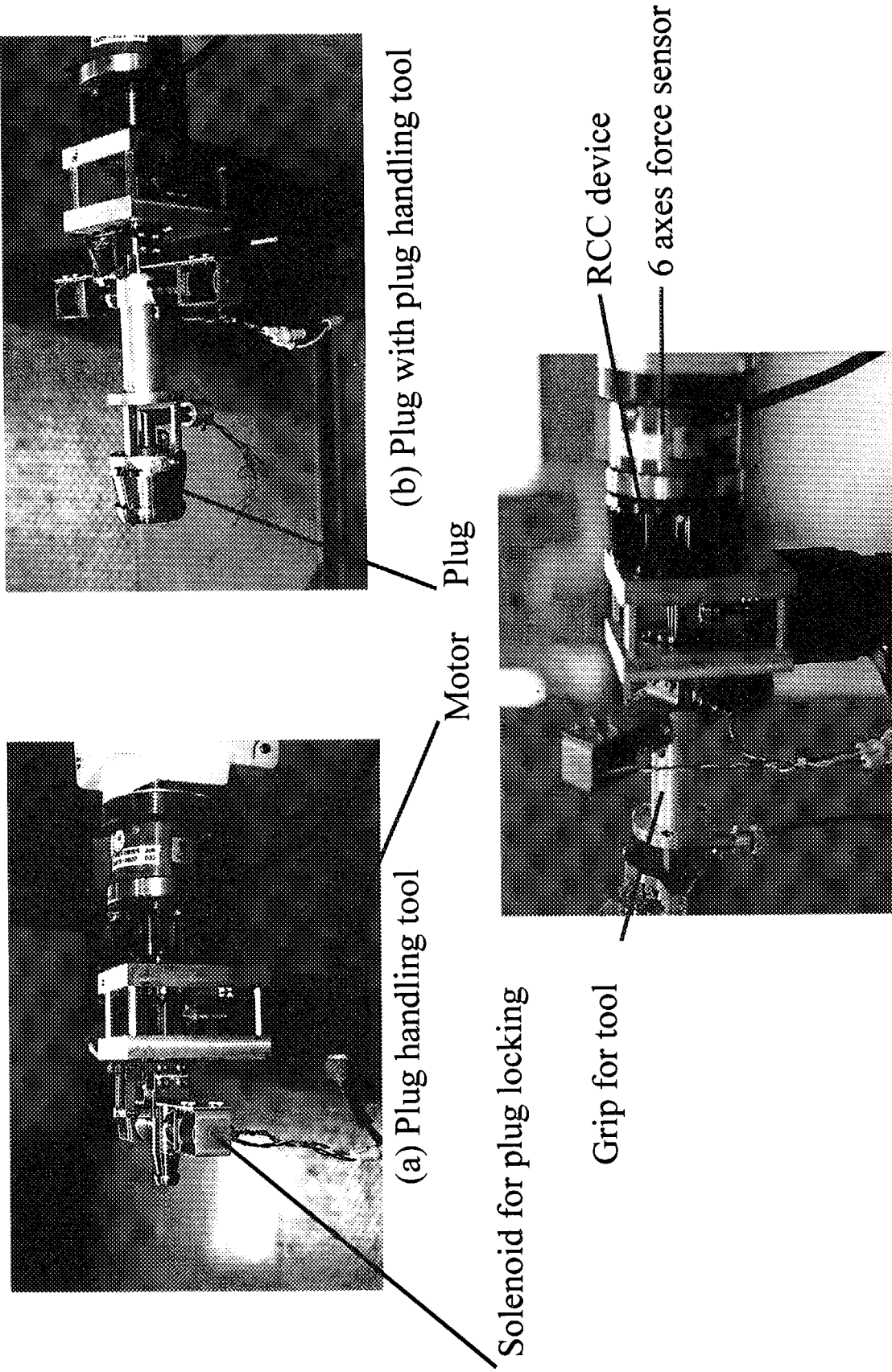


Fig. 2.19 Overview of plug handling tool

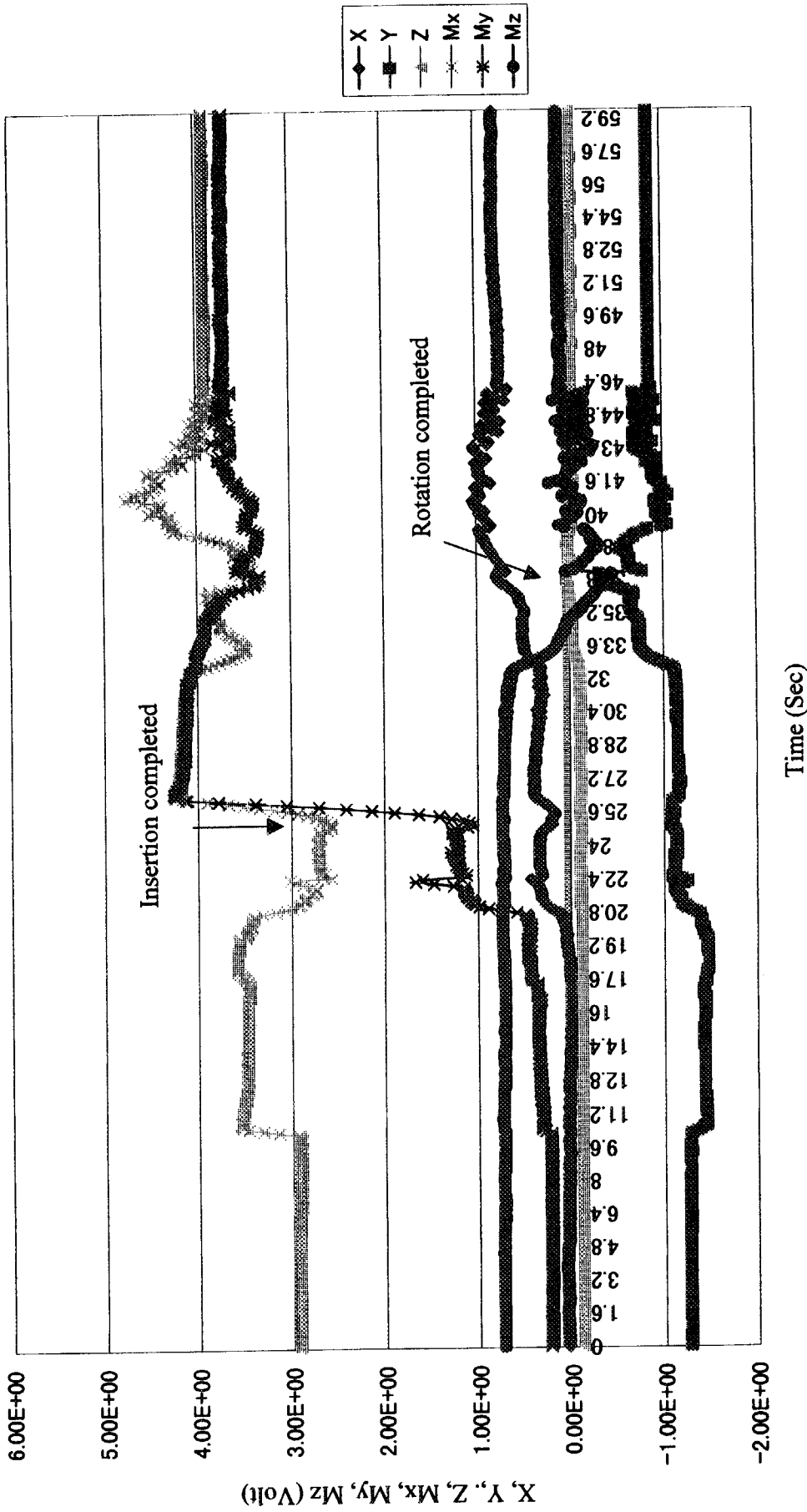


Fig. 2.20 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of Plug Attachment Test using Plug Handling Tool

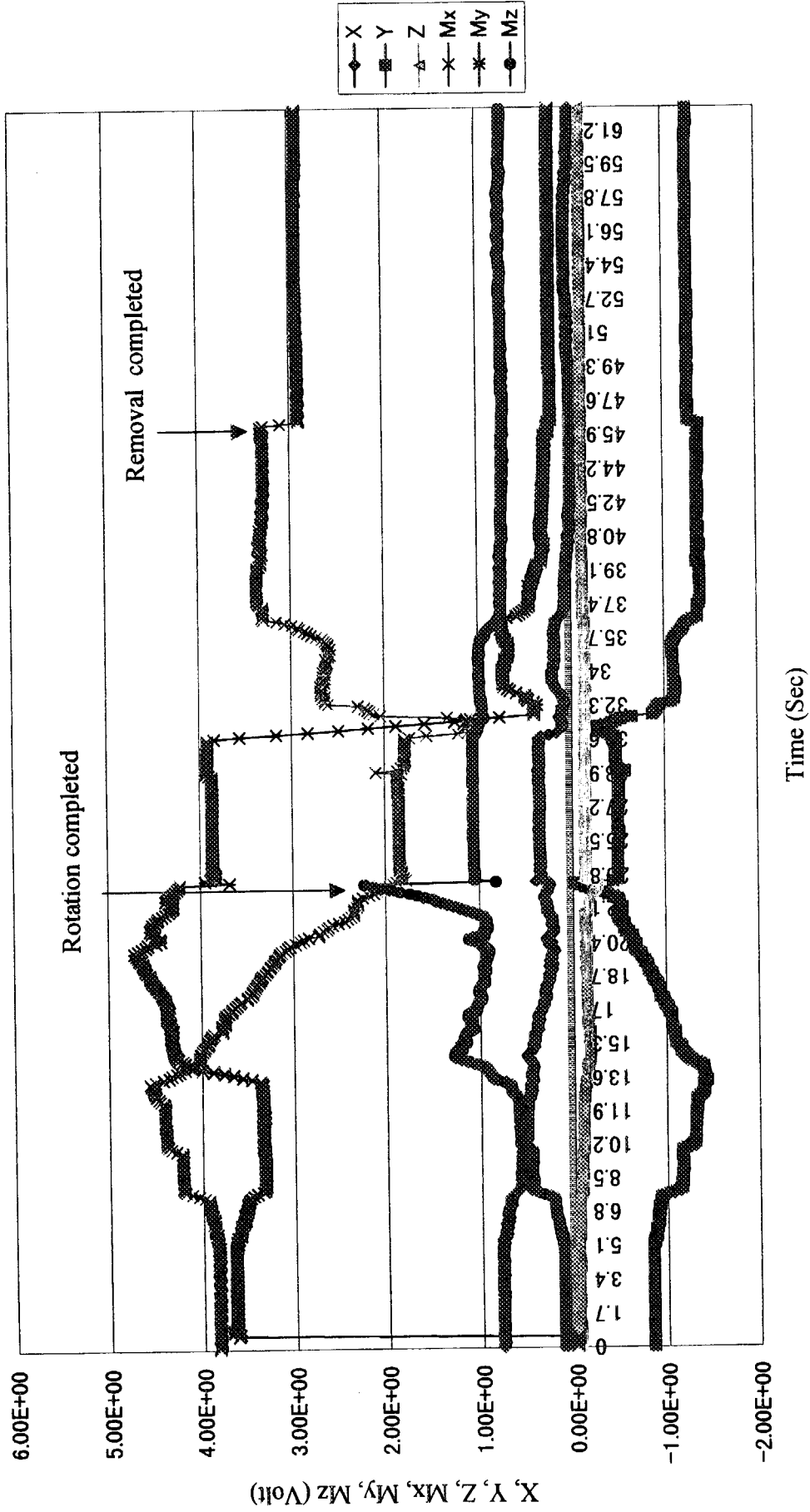
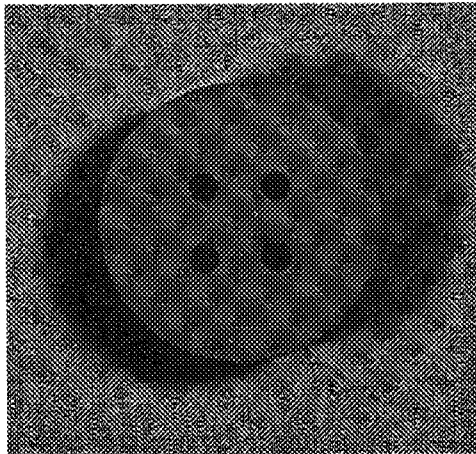


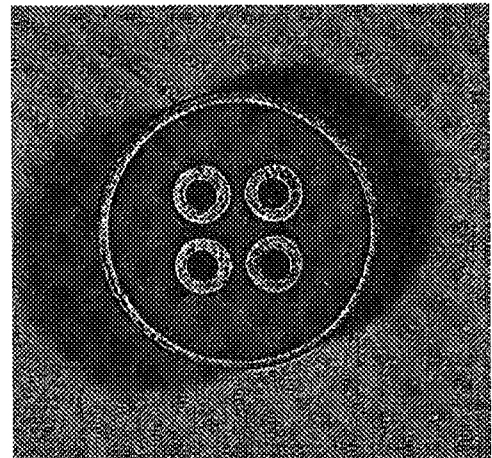
Fig. 2.21 Data obtained from 6 Axes Force Sensor in the Case of Plug Removal Test using Plug Handling Tool

**Table 3.1 List of test pieces for insulation resistance test**

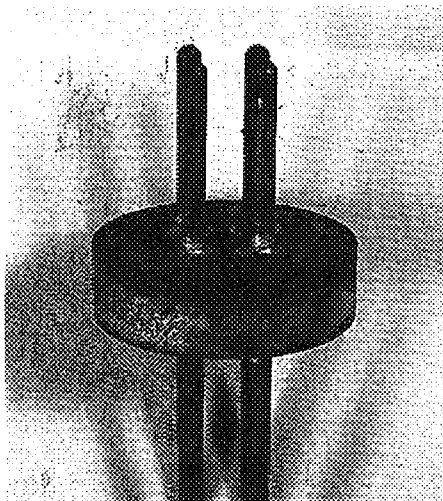
Test pieces	Number	Material
Ceramics	3 (Fig. 3.1 (a))	92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO
Metalized ceramics	3 (Fig. 3.1 (b))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo + Ni coating
Ag brazed ceramics With 4 pins	3 (Fig. 3.1 (c))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo + Ni coating Brazing metal : Ag, Cu Pin : Fe-Ni + Ni coating
Test pieces similar to 1 <sup>st</sup> step connector (Ag brazed ceramics with housing)	9 (3 by 3 kind of pins) (Fig. 3.1 (d))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo Brazing metal : Ag, Cu + Ni coating Pin : Fe-Ni + Ni coating and 2 kind of pins for thermocouple Housing : Ni (inner) + SUS (outer)
Test pieces similar to 2 <sup>nd</sup> step connector (Ag brazed ceramics with housing)	3 (Fig. 3.1 (d))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo + Ni coating Brazing metal : Ag, Cu Pin : Fe-Ni + Ni coating Housing : Ni (inner) + Al alloy (outer)
Test pieces similar to 3 <sup>rd</sup> step connector (Ag brazed ceramics with housing)	3 (Fig. 3.1 (d))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo + Ni coating Brazing metal : Ag, Cu Pin : Fe-Ni + Ni coating + Au coating Housing : Ni (inner) + Al alloy (outer)
Test pieces similar to 4 <sup>th</sup> step connector (Ag brazed ceramics with housing)	3 (Fig. 3.1 (d))	Ceramics : 92.38%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、 4%MnO <sub>2</sub> 、 0.4%MgO Metalization metal : Mn, W, Mo + Ni coating Brazing metal : Ag, Cu Pin : Fe-Ni + Ni coating + Au coating Housing : Ni (inner) + Al alloy (outer)



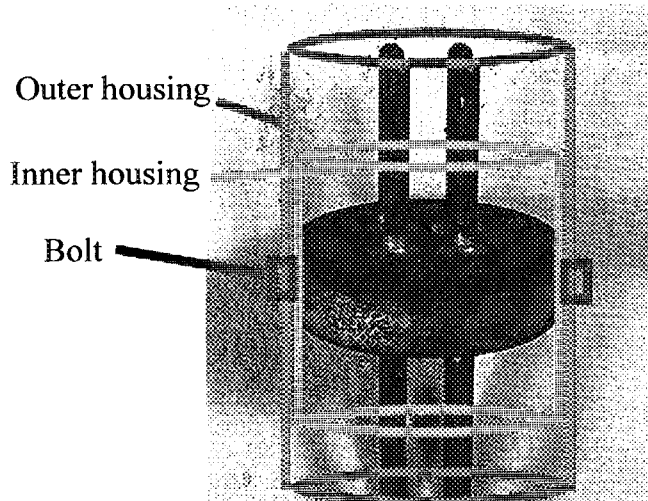
a) Ceramics (before irradiation)  
Ceramics material:  $92.38\% \text{Al}_2\text{O}_3$



(b) Metalized ceramics  
(before irradiation)  
Ceramics material:  $92.38\% \text{Al}_2\text{O}_3$   
Metalization material: Mn, W ,  
Mo + Ni coating



(c) Ag brazed ceramics with 4 pins  
(irradiated up to 25MGy)  
Brazing material: Ag, Cu



(d) Test pieces similar to 1st, 2nd  
,3rd and 4th step connector  
(irradiated up to 25MGy)

Fig. 3.1 Test pieces for insulation resistance test



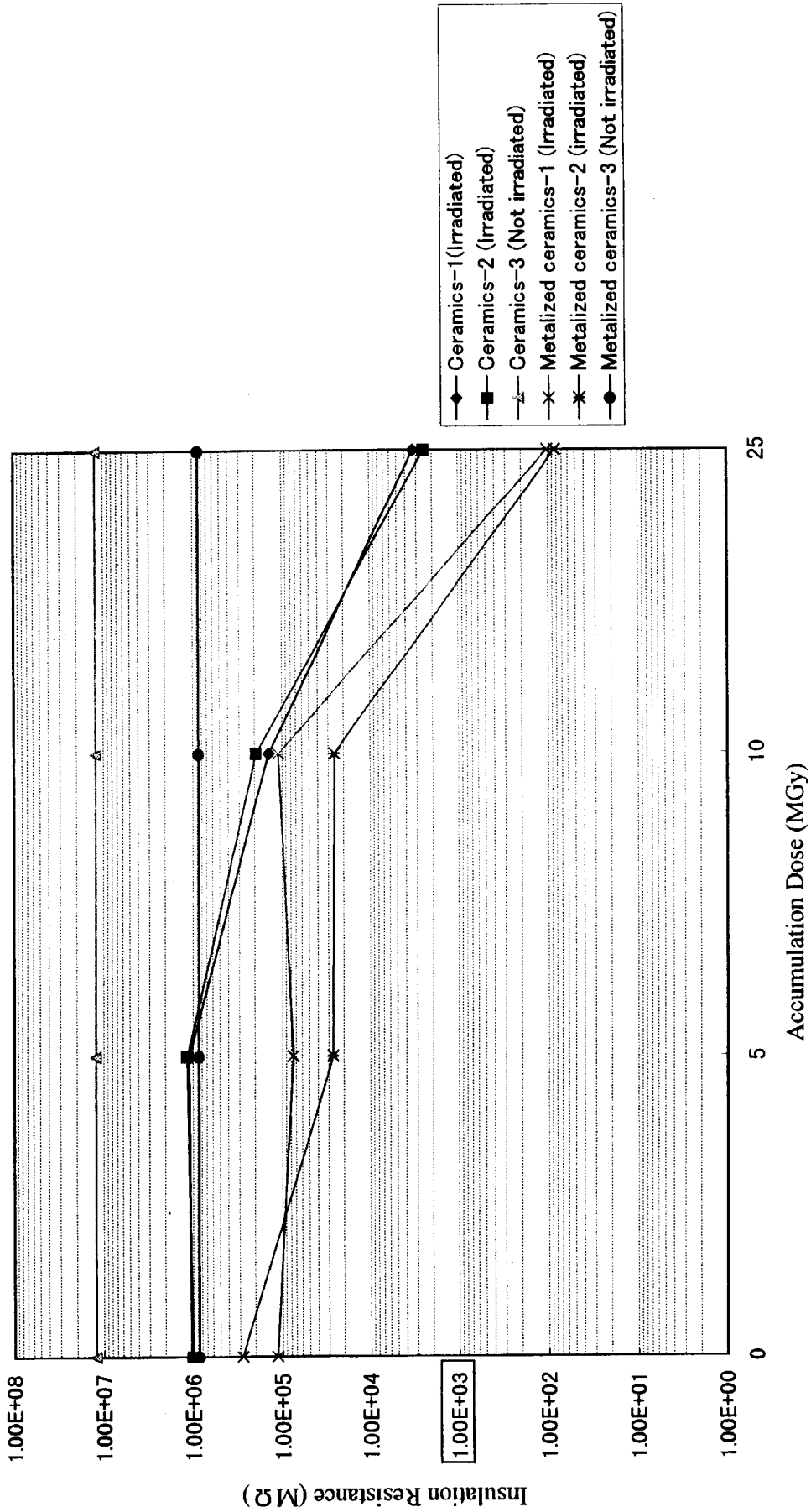
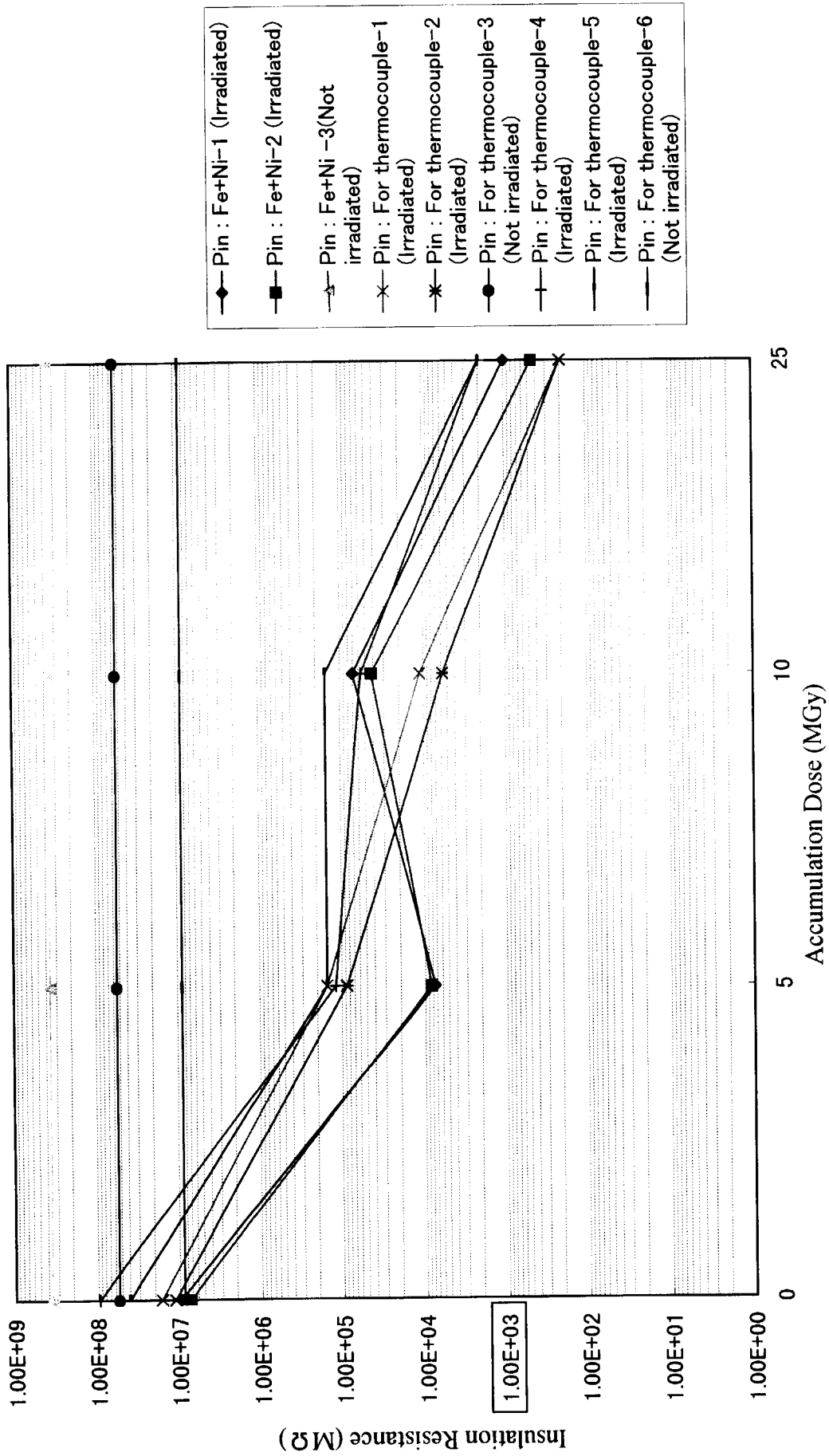


Fig. 3.2 Measured Insulation Resistance of Ceramics and Metalized Ceramics as a Parameter of Accumulation Dose



**Fig. 3.3 Measured Insulation Resistance of Test Pieces similar to First Step Connector**

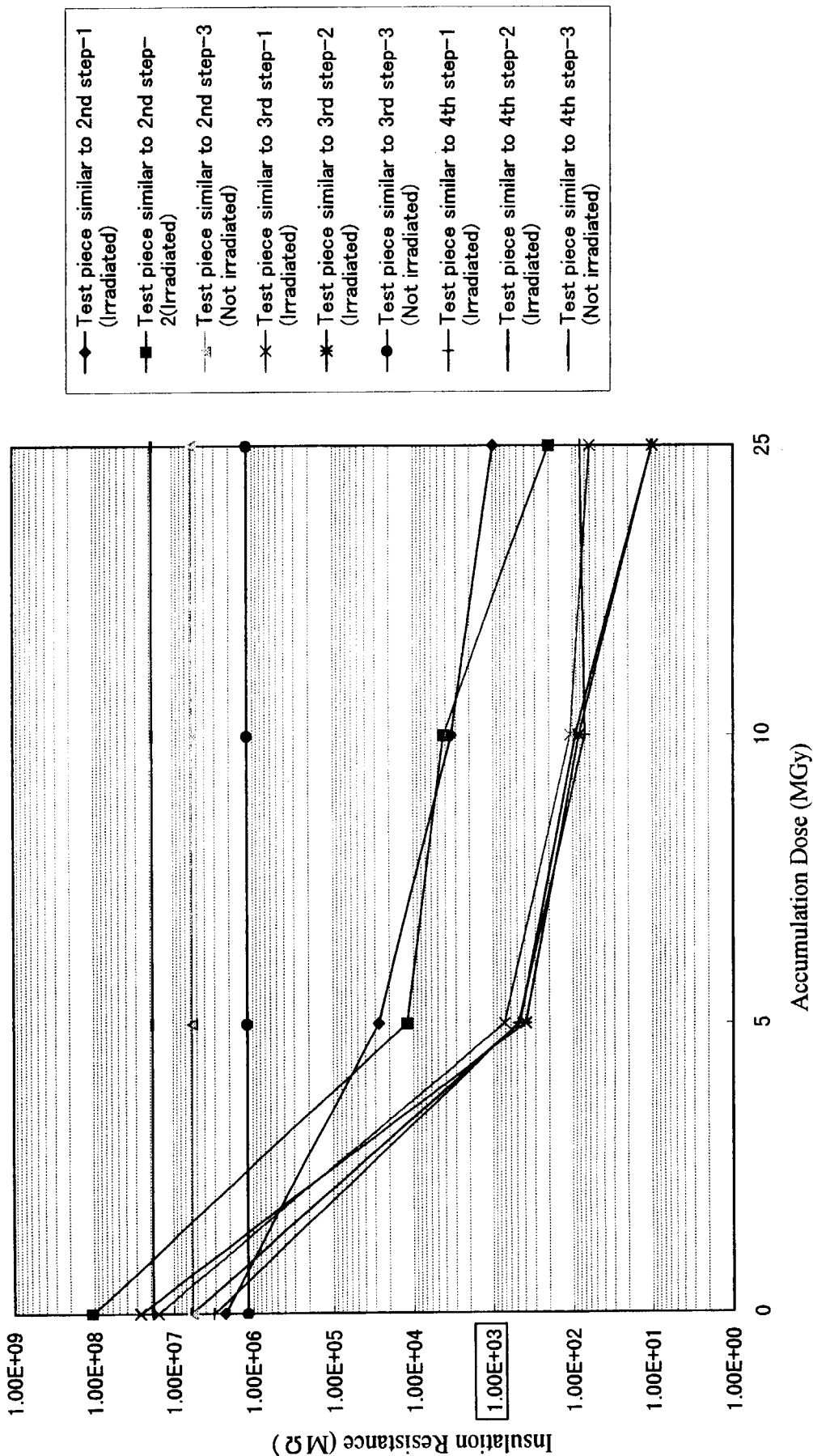
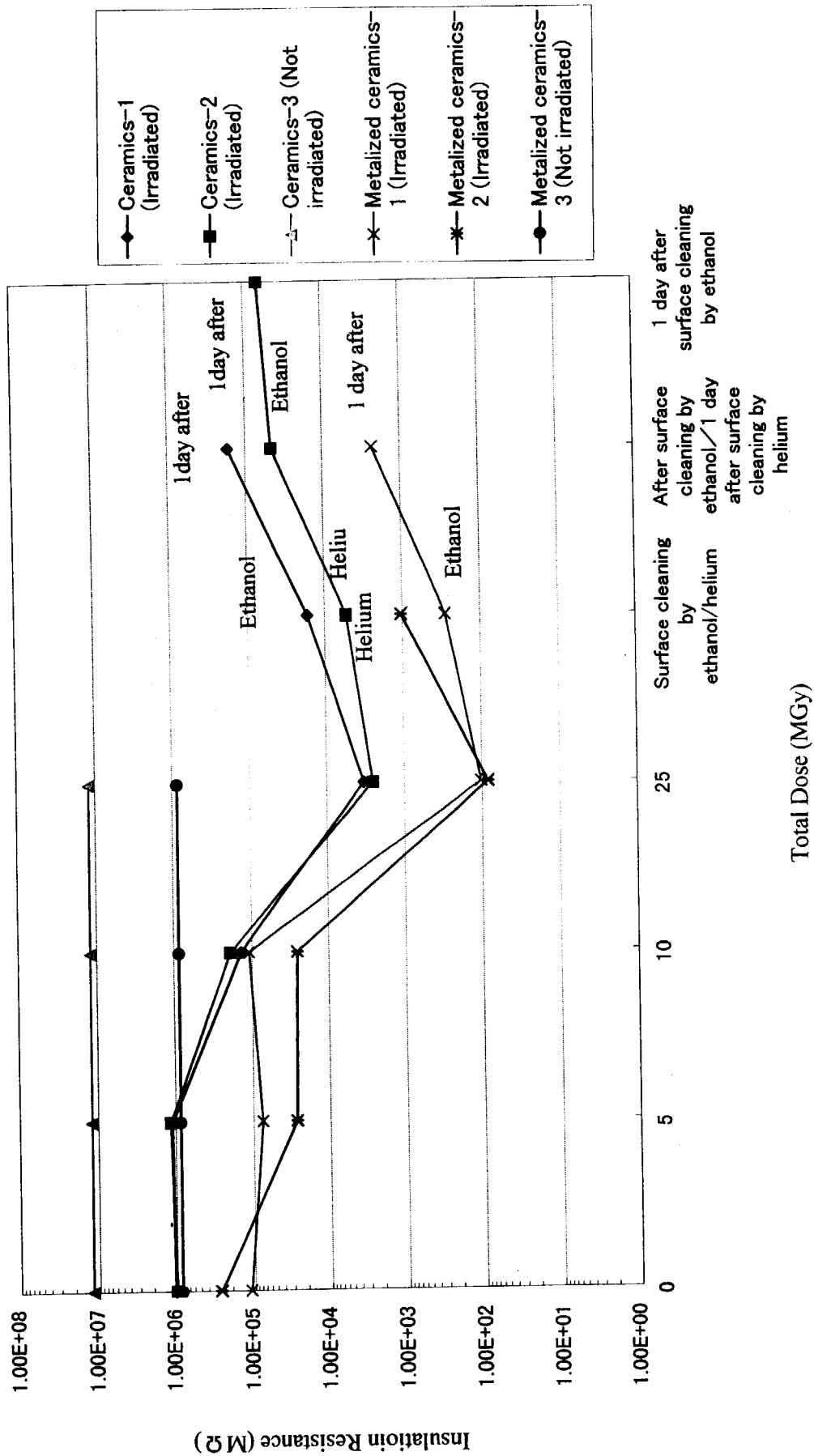


Fig. 3.4 Measured Insulation Resistance of Test Pieces similar to Second, Third and Fourth Step Connector



**Fig. 3.5 Insulation Resistance Transition of Ceramics and Metalized Ceramics after Surface Cleaning**

# 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

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

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

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

(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, 1 eV および 1 u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は省略した。
- 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のカテゴリに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>8</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

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)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

遠隔着脱対応ホールベアリング付き耐放射線性電気コネクタの開発(Ⅱ)