

JAERI-Tech
97-065



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

1997年12月

伊藤 彰^{*}・小原建治郎・多田栄介
森田洋右⁺・八木敏明・飯田和久^{*}・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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 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公済会資料センター（〒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。

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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

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

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

伊藤 彰^{*}・小原建治郎・多田 栄介・森田 洋右⁺

八木 敏明⁺・飯田 和久^{*}・佐藤 大^{*}

(1997年11月13日受理)

核融合実験炉 (ITER) の炉内機器遠隔保守装置に使用される電気コネクタには、 10^6R/h のガンマ線環境下で、積算線量 10^{10}R 以上の耐放射線性が要求される。また、保守装置の保守時には遠隔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ブタクル (メス側) へのプラグの着脱が容易となるよう、遠隔着脱性にも配慮した。

マスタースレーブマニプレータと着脱治具を使用した汎用ロボットによる遠隔着脱試験の結果、本コネクタの遠隔操作による着脱性が確認でき、構造の妥当性が検証できた。

また、現在継続中の積算線量 10^{10}R までのガンマ線照射試験の結果、耐電圧 (1000V、1分間印加) については照射前後でほとんど変化せず、問題ないことが認められたものの、絶縁抵抗値並びに接触抵抗値には変化が認められた。接触抵抗値の増加はコンタクトピンの金コーティング厚及びコーティング方法を最適化することで、対応可能と予想されるが、絶縁抵抗値の低下についてはその対応策を検討中である。

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：〒311-01茨城県那珂郡那珂町向山801-1

⁺ 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

Akira ITO^{*}, Kenjiro OBARA, Eisuke TADA, Yousuke MORITA⁺,
Toshiaki YAGI⁺, Kazuhisa IIDA^{*} and Masaru SATO^{*}

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

(Received November 13, 1997)

Development of radiation-hard electric connector with ball bearing for in-vessel remote maintenance equipment of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) has been conducted. Since the in-vessel remote maintenance equipment is operated under the condition of 10^6R/h gamma ray dose rate, the electric connector has to be radiation hard for an accumulation dose of 10^{10}R . In addition, the simple attachment/removal mechanism is essential for remote operation. For this, the alumina (Al_2O_3) ceramics and a ball bearing were adopted to electric insulator and plug (male) of connector, respectively.

The handling tests on attachment/removal of the connector were conducted by using master slave manipulator and general purpose robot with handling tool, and as a result, the validity of the attachment/removal mechanism was verified.

In the gamma ray irradiation tests, which are under way, no degradation in break down voltage ($1000\text{V} \cdot 1 \text{ min.}$) up to 10^{10}R was confirmed. However insulation resistance and contact resistance between contact pin and contact socket were deteriorated in proportion to the accumulation dose. Increase of contact resistance is considered due to an erosion of contact pin.

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).

⁺ Department of Material Development, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

^{*} On leave from Ishikawajima Harima Heavy Industries Co.

^{*} Hitachi Haramachi Denshi Kogyo Co.

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

目 次

1. 概 要	
1.1 概 要	1
1.2 使用環境条件	1
2. 第4ステップコネクタの製作と遠隔着脱試験	1
2.1 遠隔着脱対応型電気コネクタの製作	1
2.1.1 コネクタの構造	1
2.1.2 着脱治具	3
2.2 遠隔着脱試験	4
2.3 ま と め	5
3. 第1、2、3ステップコネクタの製作とガンマ線照射試験	16
3.1 遠隔着脱対応型コネクタの製作	16
3.1.1 第1ステップコネクタ	16
3.1.2 第2ステップコネクタ	16
3.1.3 第3ステップコネクタ	17
3.2 大気中ガンマ線照射試験	18
3.2.1 第1ステップコネクタ	18
3.2.2 第2ステップコネクタ	18
3.2.3 第3ステップコネクタ	19
3.3 窒素中ガンマ線照射試験	24
謝 辞	62
参考文献	62

Contents

1. Introduction	
1.1 Introduction	1
1.2 Conditions	1
2. Fabrication and Attachment / Removal Handling Test of the Fourth Step Connector	1
2.1 Fabrication of 4 th Step Connector	1
2.1.1 Constitution of Connector	1
2.1.2 Handling Tool	3
2.2 Remote Handling Test	4
2.3 Summary	5
3. Fabrication and Gamma Irradiation Test of the First, Second and Third Step Connector	16
3.1 Fabrication of 1 st , 2 nd and 3 rd Step Connector	16
3.1.1 1 st Step Connector	16
3.1.2 2 nd Step Connector	16
3.1.3 3 rd Step Connector	17
3.2 Gamma Irradiation Test in Air	18
3.2.1 1 st Step Connector	18
3.2.2 2 nd Step Connector	18
3.2.3 3 rd Step Connector	19
3.3 Gamma Irradiation Test in Nitrogen Gas	24
Acknowledgment	62
Reference	62

1. 概要

1.1 概要

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、 10^6 R/hのガンマ線環境下で、積算線量 10^{10} R以上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、そこに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。

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、現在までの数年間にわたり耐放射線性及び遠隔着脱性を有するコネクタ(以下、コネクタとする)の開発を実施しており、具体的には第1世代から第4世代(以下、ステップ)までのコネクタの製作を行い、遠隔着脱試験及びガンマ線照射試験を実施してきた。

遠隔着脱性については最新型の第4ステップコネクタを使用した着脱試験結果から、構造の成立性が確認でき、満足行く成果を得ることができた。耐放射線性に関しては、第1ステップコネクタから第3ステップコネクタまでを使用した照射試験[3]において、絶縁抵抗及び接触抵抗の変化が認められ、その対策が今後の開発の主要課題である。

第2章にて、遠隔着脱性が確認された第4ステップコネクタの構造及びその遠隔着脱試験結果について報告する。また、現在までの開発経緯及び継続中のガンマ線照射試験結果については第3章にて詳述する。

1.2 使用環境条件

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°C |
| (3) 線量率 | : 平均 10^6 R/h (ガンマ線) |
| (4) 積算線量 | : 10^{10} R (10000時間) 以上 |

2. 第4ステップコネクタの製作と遠隔着脱試験

2.1 遠隔着脱対応型電気コネクタの製作

2.1.1 コネクタの構造

本遠隔着脱対応型電気コネクタは、「プラグ(オス側)の着脱に際しては、マニプレータ等のロボットの動作は押し込み及び引き離しの1動作のみとし、レセプタクル(メス側)への固定は、プラグの突起をレセプタクルの溝に勘合させることで行い、そのためのプラグの

1. 概要

1.1 概要

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、 10^6 R/hのガンマ線環境下で、積算線量 10^{10} R以上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、そこに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。

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、現在までの数年間にわたり耐放射線性及び遠隔着脱性を有するコネクタ(以下、コネクタとする)の開発を実施しており、具体的には第1世代から第4世代(以下、ステップ)までのコネクタの製作を行い、遠隔着脱試験及びガンマ線照射試験を実施してきた。

遠隔着脱性については最新型の第4ステップコネクタを使用した着脱試験結果から、構造の成立性が確認でき、満足行く成果を得ることができた。耐放射線性に関しては、第1ステップコネクタから第3ステップコネクタまでを使用した照射試験[3]において、絶縁抵抗及び接触抵抗の変化が認められ、その対策が今後の開発の主要課題である。

第2章にて、遠隔着脱性が確認された第4ステップコネクタの構造及びその遠隔着脱試験結果について報告する。また、現在までの開発経緯及び継続中のガンマ線照射試験結果については第3章にて詳述する。

1.2 使用環境条件

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°C |
| (3) 線量率 | : 平均 10^6 R/h (ガンマ線) |
| (4) 積算線量 | : 10^{10} R (10000時間) 以上 |

2. 第4ステップコネクタの製作と遠隔着脱試験

2.1 遠隔着脱対応型電気コネクタの製作

2.1.1 コネクタの構造

本遠隔着脱対応型電気コネクタは、「プラグ(オス側)の着脱に際しては、マニプレータ等のロボットの動作は押し込み及び引き離しの1動作のみとし、レセプタクル(メス側)への固定は、プラグの突起をレセプタクルの溝に吻合させることで行い、そのためのプラグの

回転はロボットのエンドエフェクタである専用の治具で行う。」というコンセプトを基に開発を実施してきた。プラグにはコンタクトソケットと絶縁材を保持したハウジングとプラグ本体（ボディ）間にボールベアリングを配し、Fig. 2.1 に示すようにプラグをレセプタクルに押し込み、その後、外側のプラグボディだけを回転させ、レセプタクルにプラグを固定させる構造としている。

本コネクタ（第4ステップコネクタ）の製作に際しては、第1ステップコネクタから第3ステップコネクタの手動着脱試験の結果、明らかとなった以下の問題点の改良に配慮した。

- ①プラグとレセプタクル間にかじりが発生し、挿抜力が大きい
- ②コンタクトピンとコンタクトソケット間の挿抜力が大きい
- ③プラグ先端径とレセプタクル先端径がほぼ同じなため、プラグの位置決めが困難である

具体的には、3種類のプラグ先端形状（タイプ1、2、3）を製作し、遠隔着脱試験により形状の最適化を図ることにした。製作したコネクタの構造及び外観を Fig. 2.2、2.3 に示す。また、以下にコネクタの主な仕様を示す。

- (1) プラグ形状
 - ①タイプ1；先端部の角取りを行わないタイプ。
 - ②タイプ2；先端部にテーパを設けたタイプ。
 - ③タイプ3；先端部にテーパを設け、かつ胴部におけるかじりを防止するためにテーパ後端部径を細くしたタイプ。
- (2) コネクタ寸法
 - プラグ長さ：119mm
 - プラグ外径：56mm
 - レセプタクル長さ：97mm
 - レセプタクル外径：68.8mm
- (3) プラグ重量
 - ①タイプ1；711g
 - ②タイプ2；705g
 - ③タイプ3；710g
- (4) レセプタクル重量：1300g
- (5) コンタクトピン数：6（ ϕ 1.5mm 及び 2.5mm）並びに10本（ ϕ 1.5mm）
- (6) コンタクトピン定格電流：3A（ ϕ 1.5mm）
- (7) コンタクトピン材質：Fe + Ni に 5 μ m の Ni コーティング
- (8) コンタクトピンコーティング：5 μ m Au コーティング
- (9) コンタクトソケット
 - ：コンタクトピン・ソケット間の挿抜力を低くするために、MIL規格に準じていない、ハイパトロニクス社製（米）のコンタクトソケットを採用した。

- (10) ピン・ソケット挿抜力 : ①平均0.080kg (ϕ 1.5mm ピン)
 ②平均0.17kg (ϕ 2.5mm ピン)
- (11) 絶縁材 : アルミナセラミックス(積算線量10°Rまでの照射実績あり)
- (12) プラグボディ材質 : アルミ合金
- (13) 絶縁材とハウジングの接合 : 銀ろう付け
- (14) 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。
- (15) プラグ仮置台 : 本コネクタの製作に際しては、「専用の着脱治具を使用せずに、マニプレータ等のロボット単体でも着脱できる」という概念を新たに取り入れ、プラグ挿入時にレセプタクルとの相対位置が容易に判断出来るよう、レセプタクルに取付け可能なプラグ仮置台 (Fig. 2.4 参照) を採用した。
 プラグ仮置台はプラグ挿入時にプラグを一時仮置くことが可能であり、仮置台を使用しない場合よりもマニプレータに対して全方向に高精度の位置決め性を要求しないものを目指した。Fig. 2.4 に取付け手順を示す。
- (16) 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。

2.1.2 着脱治具

「レセプタクルへのプラグの固定は専用の治具で行う」というコンセプトを基に、着脱治具の開発を電気コネクタの開発と併せて実施した。治具はプラグ把持部とプラグを回転させるモータを有した回転部から構成され、プラグの回転はプラグ後端に取り付けた歯車とプラグ把持部に取り付けた歯車を噛み合わせた後、モータにて行うこととした。治具を使用した着脱手順、外形及び外観を Fig. 2.5、2.6、2.7 に示す。また、以下に着脱治具の主な仕様を示す。

- (1) 治具寸法
- | | |
|----|-----------|
| 全長 | : 215.5mm |
| 高さ | : 140mm |
| 幅 | : 149mm |
- (2) 治具重量 : 3900g
- (3) プラグ回転用モータ : ステッピングモータ
- (4) 電磁ソレノイド : プラグを常に回転伝達軸中心上に保持するために、電磁ソレノイドを取り付けた。
- (5) 透明プレート : プラグと着脱用治具との接続時におけるマニプレー

タ等のロボットからの視認性を考慮して、治具前部に透明プレートを取り付けた。

2.2 遠隔着脱試験

マスタースレーブマニプレータ及び一般産業用ロボットを使用した遠隔操作による着脱試験を実施した。

(1) マスタースレーブマニプレータを使用した着脱試験

試験はマスタースレーブマニプレータ（以下、M/S）でプラグを直接把持し、プラグ仮置台を使用しない場合と使用する場合の両ケースについて実施した。Fig. 2.8, 2.9 に着脱試験状況を示す。プラグ仮置台を使用しない場合は、プラグとレセプタクルの相対位置の把握が困難であったが、タイプ3プラグはテーパ後部のくびれ部分がレセプタクルとの干渉を防止するため、他の2タイプのプラグと比較してスムーズに着脱することができた。一方、プラグ仮置台を使用した場合は、プラグを仮置台に置くことで、レセプタクルとの相対位置を容易に把握することができるので、仮置台を使用しない場合よりも全てのプラグについて、よりスムーズに着脱することができた。

また、勘合確認用マーカは、取付け位置の微調整が必要なものの、着脱に際して、非常に有効であることが確認できた。

(2) 一般産業用ロボットを使用した着脱試験

一般産業用ロボットの川崎重工製JS-10に位置決め修正用デバイス（RCCデバイス）とその先に着脱治具を取付け、試験を実施した。RCCデバイスはロボットとレセプタクルとの相対位置の若干のズレを吸収できるロボット用ツールである。試験状況を Fig. 2.10 に示す。また、試験は2台のCCDカメラをロボットの先端及び肩口近傍に配置し、カメラからの映像観察によって実施した。

試験は着脱治具にプラグを取り付け、CCDカメラで監視しながらプラグの位置決めを行い、レセプタクルに一度勘合した後、治具からプラグを取り外すという手順で実施した。その結果、治具からプラグを取り外す際、レセプタクル（及びプラグ）の中心と治具の中心が若干でもズれていると、プラグの平歯車と治具の歯車がかじり、治具からプラグを外せないことが判明した。また、プラグとレセプタクルが勘合した状態で、治具でプラグを把持しようとした場合は、視認向上のために取り付けた透明プレートが有効に機能することが確認できたが、把持部とプラグの歯車間のクリアランスが少ないため、そこでかじりが発生し、完全にプラグを把持できないことが判明した。

一方、着脱治具を使用せず、ロボットにて直接プラグをレセプタクルに勘合させた場合は、M/Sを使用した試験同様、プラグ仮置台を使用した場合の方がスムーズにプラグの位置決めを行うことができた。

2.3 まとめ

- (1) タイプ3のプラグが着脱性に優れていることが確認できた。理由として、タイプ3のテーパー後部がくびれているため、レセプタクルとプラグ胴部の干渉（かじり）が少なく、視認による着脱でも比較的容易に位置決めできるということが考えられる。
- (2) ロボットのプラグ直接把持による着脱では、レセプタクルに相対位置決め用のプラグ仮置台の取り付けが有効である。
- (3) ロボットと着脱治具を組み合わせた着脱では、治具先端部の改良を行い、治具とプラグのかじり防止を図る必要があることがわかった。
- (4) 勘合確認用マーカは遠隔着脱時には非常に有効である。

今後は本コネクタのタイプ3プラグとレセプタクルの組み合わせを基本に遠隔着脱に有利な構造の小型・軽量化を図ると共に、耐放射線性向上を開発の中心に据え、高線量率下で使用可能な遠隔着脱対応型電気コネクタを製作する計画である。

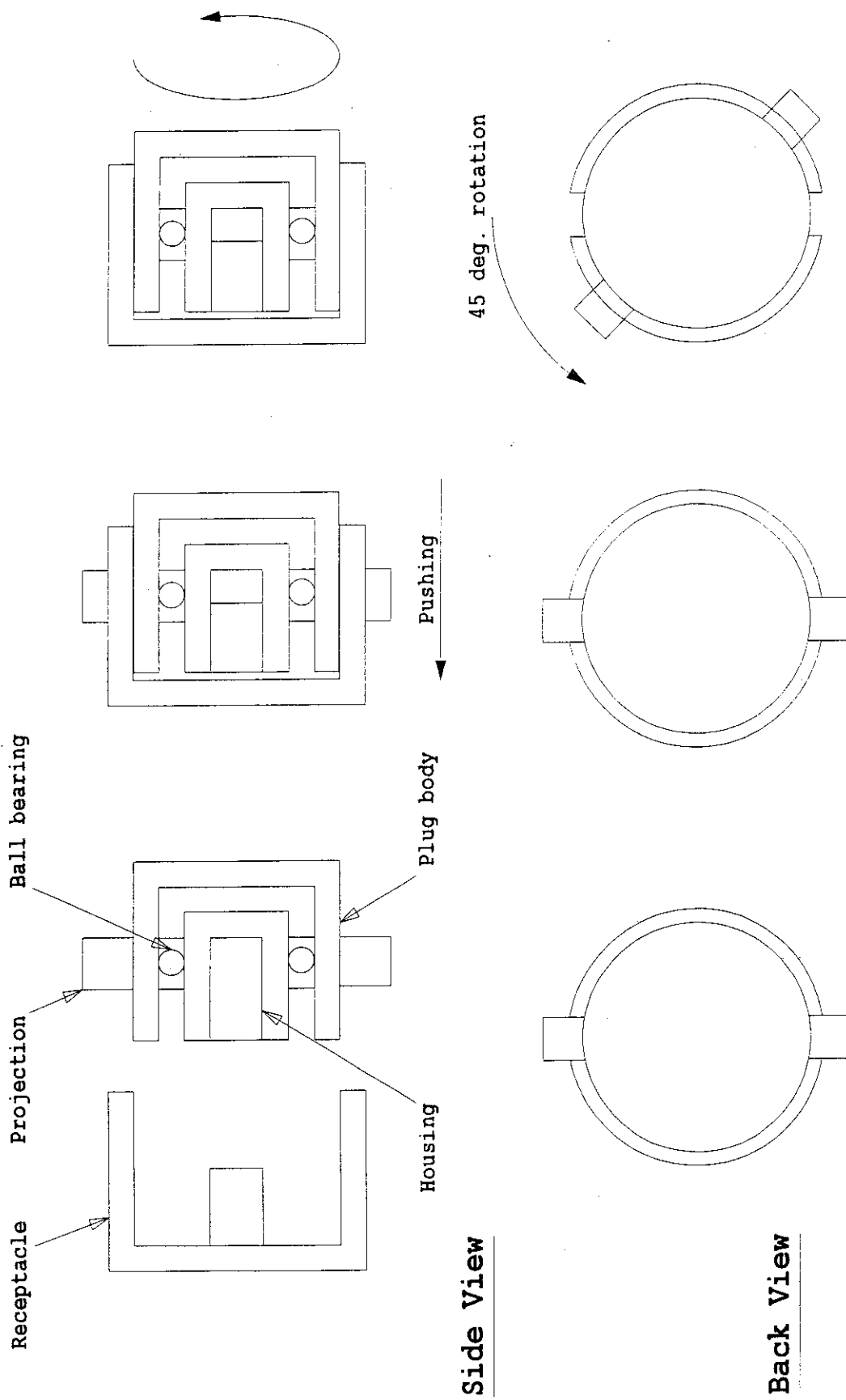


Fig. 2.1 Plug attachment procedure

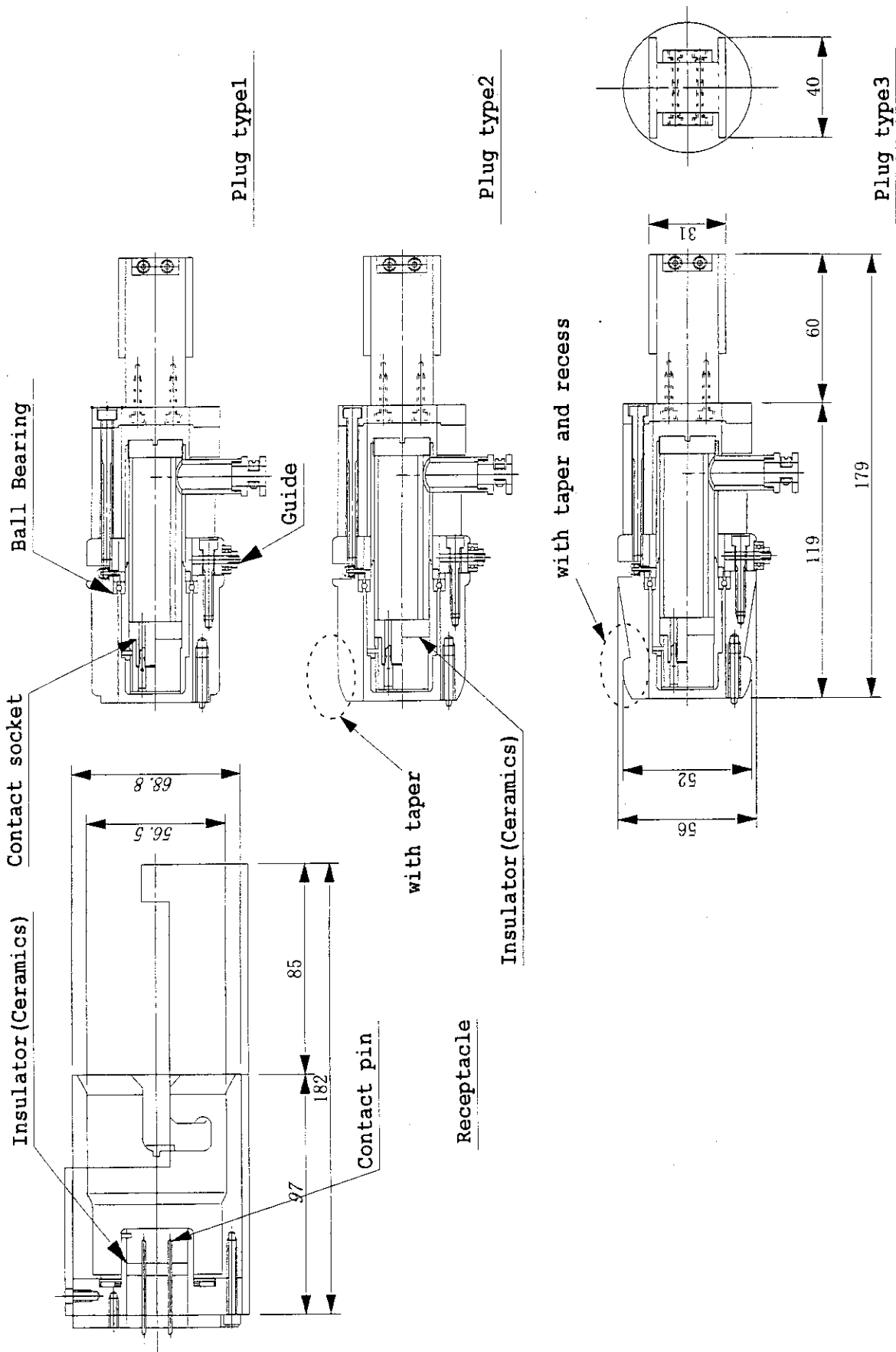
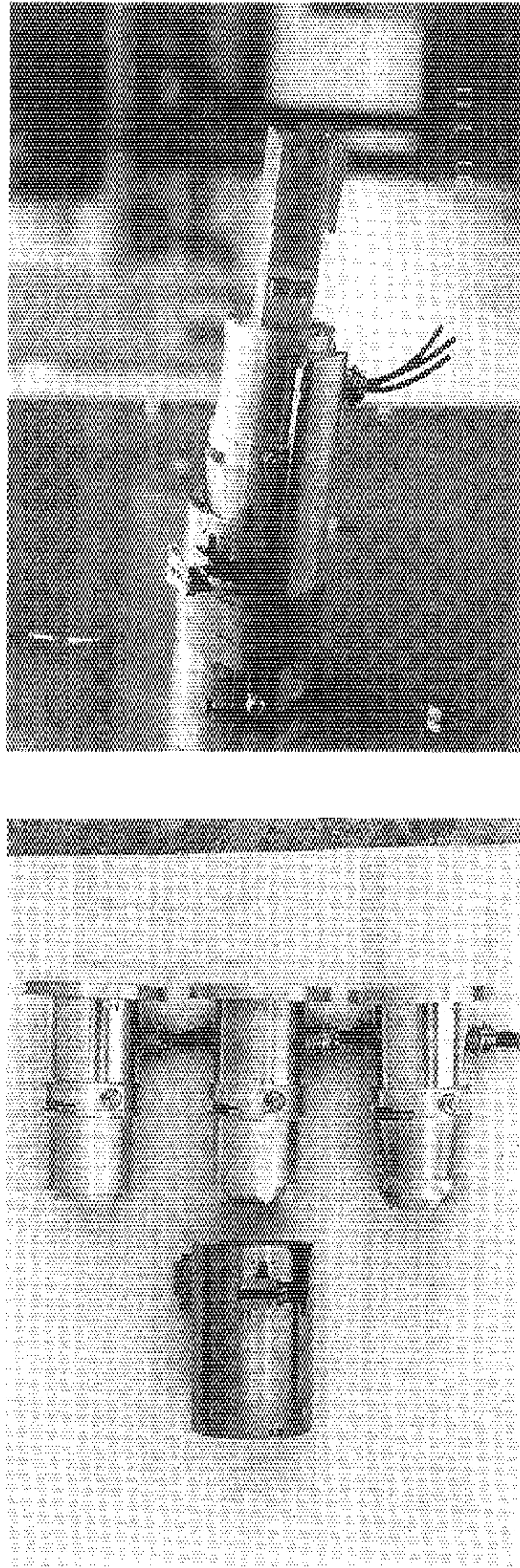
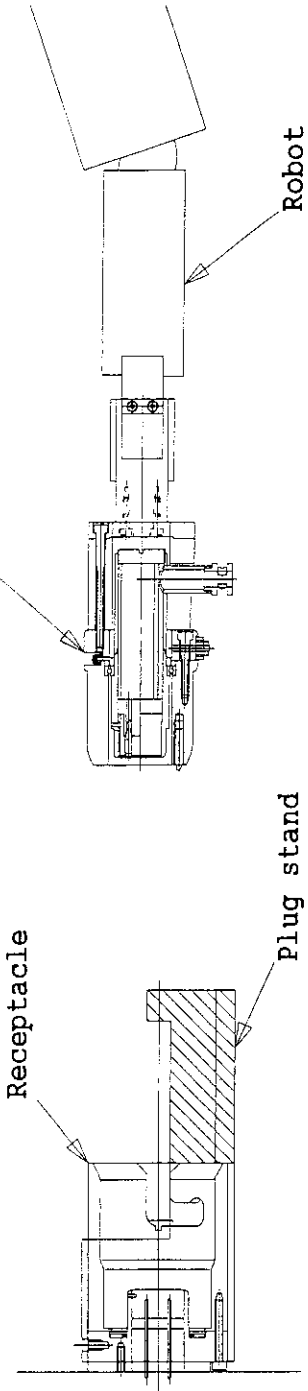


Fig. 2.2 4th Step Electric Connector

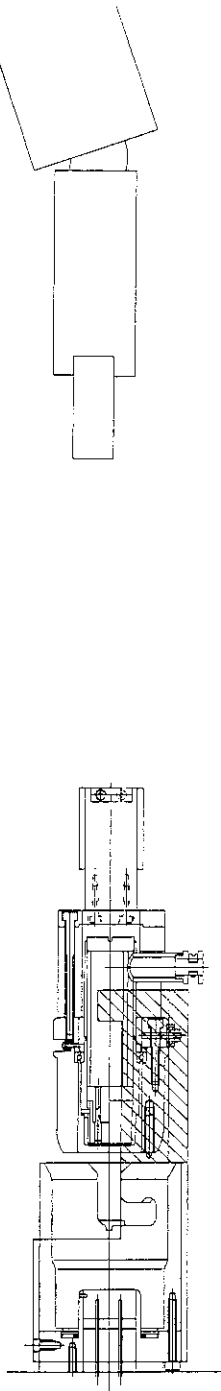


**Fig. 2.3 Fabricated receptacle and three types of plugs
of 4th step electric connector**

1st:Align the center of plug



2nd:Push a plug



3rd:Rotate a plug for locking

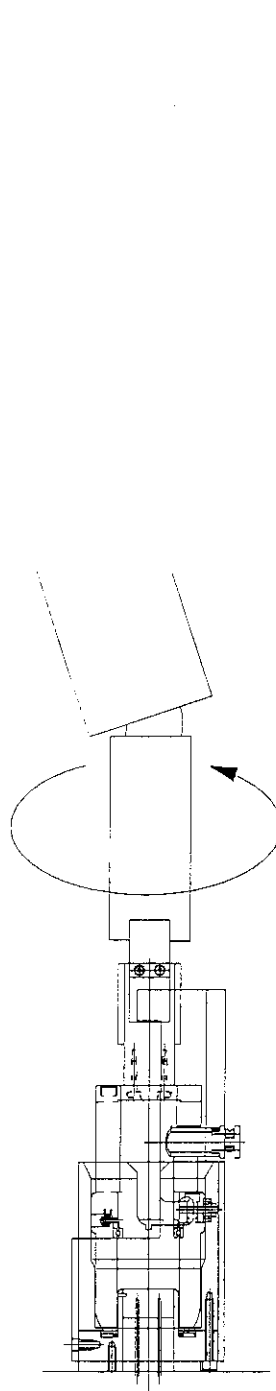
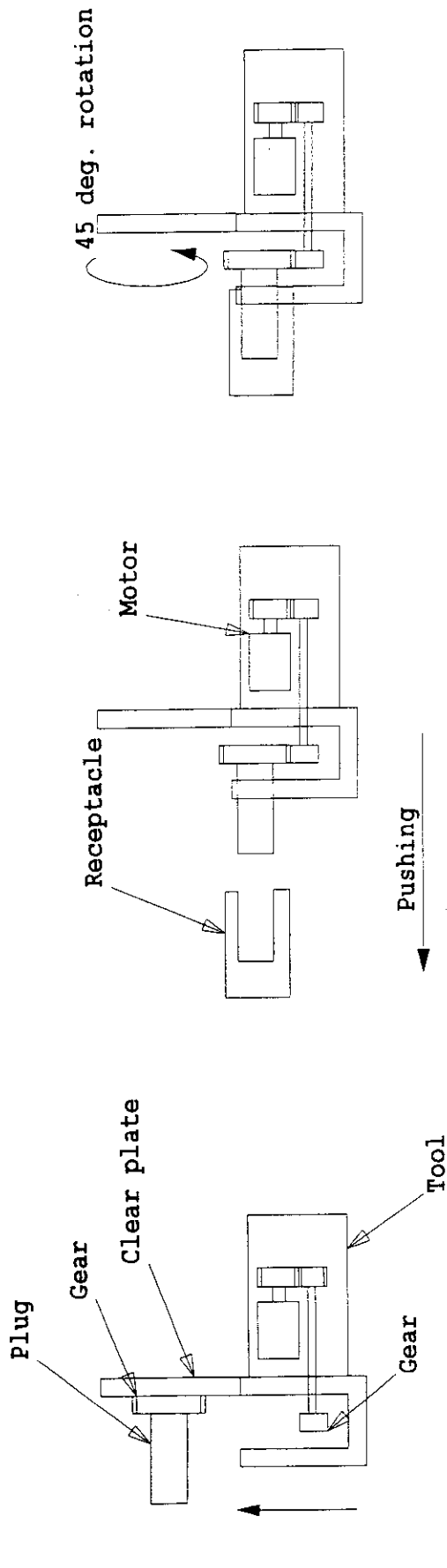


Fig. 2.4 Plug attachment procedure using plug stand with receptacle



1st: Holding a plug by tool 2nd: Push a plug toward the receptacle by robot 3rd: Rotate a plug by motor on tool

Fig. 2.5 Plug attachment procedure by handling tool

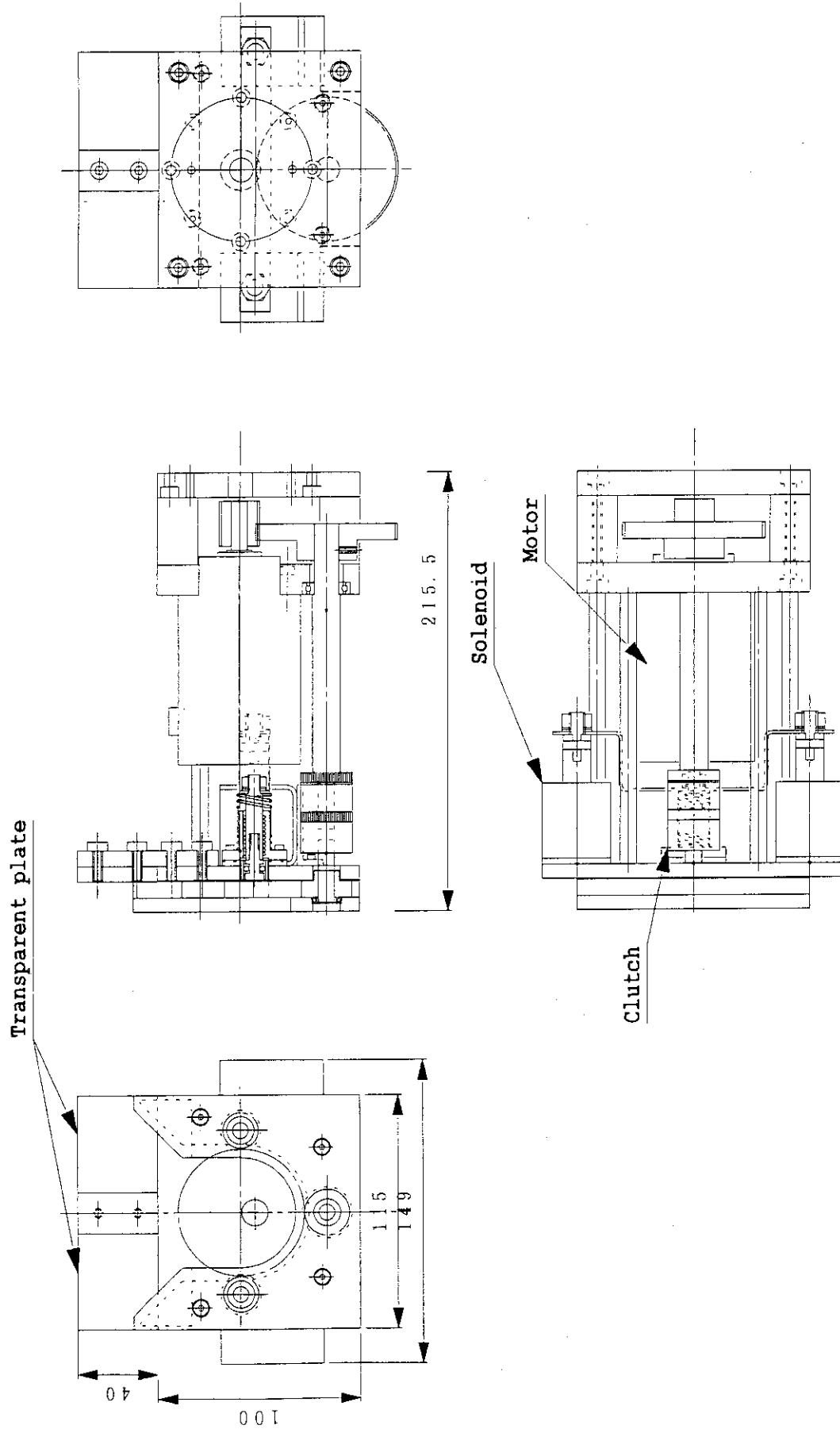


Fig. 2.6 Handling tool for 4th step connector

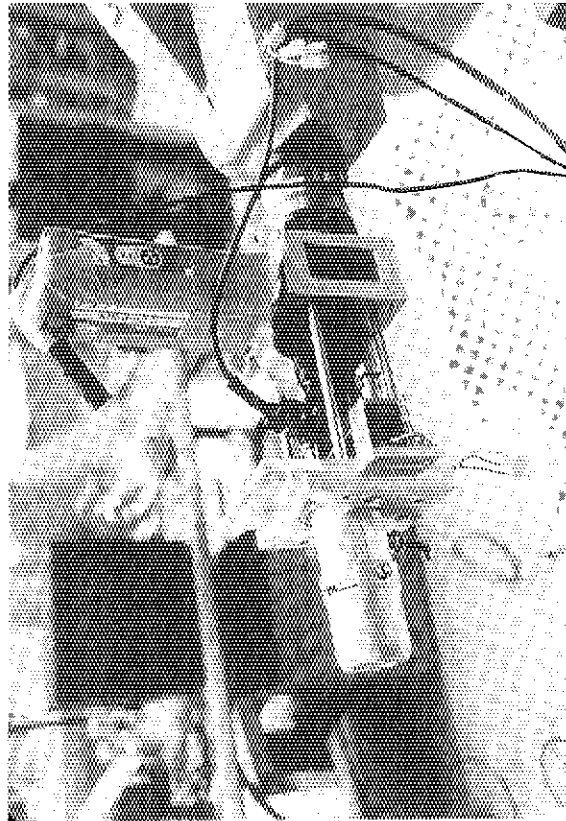
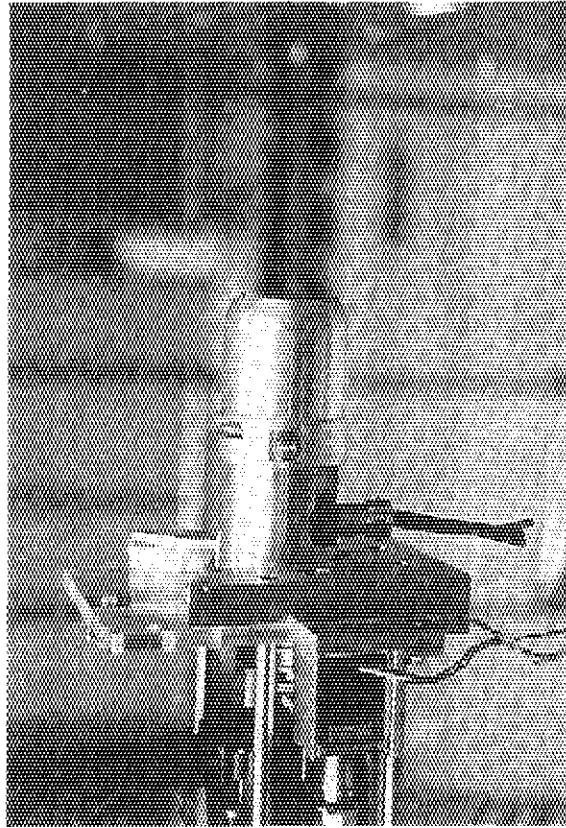
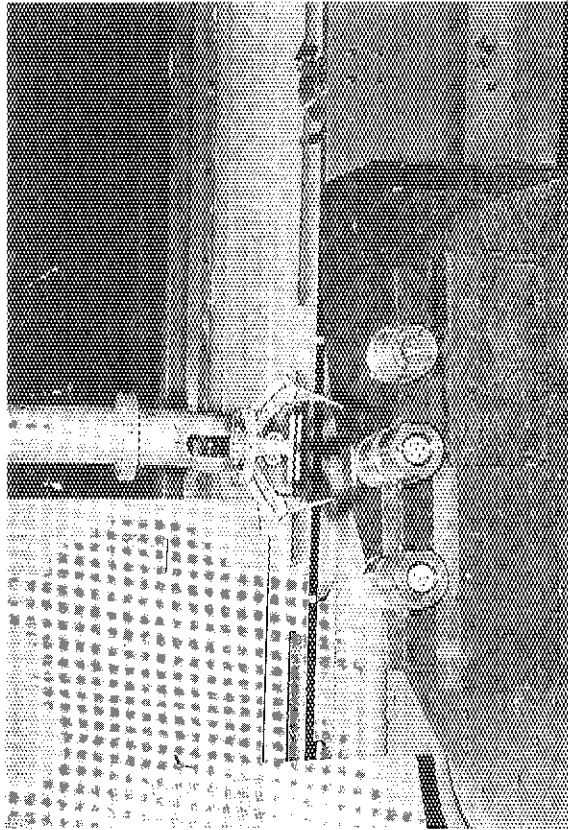
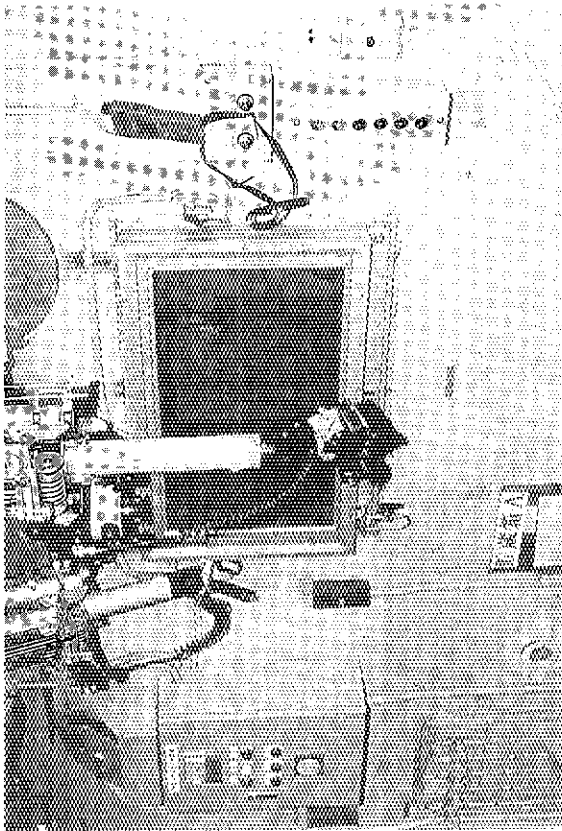


Fig. 2.7 Fabricated handling tool

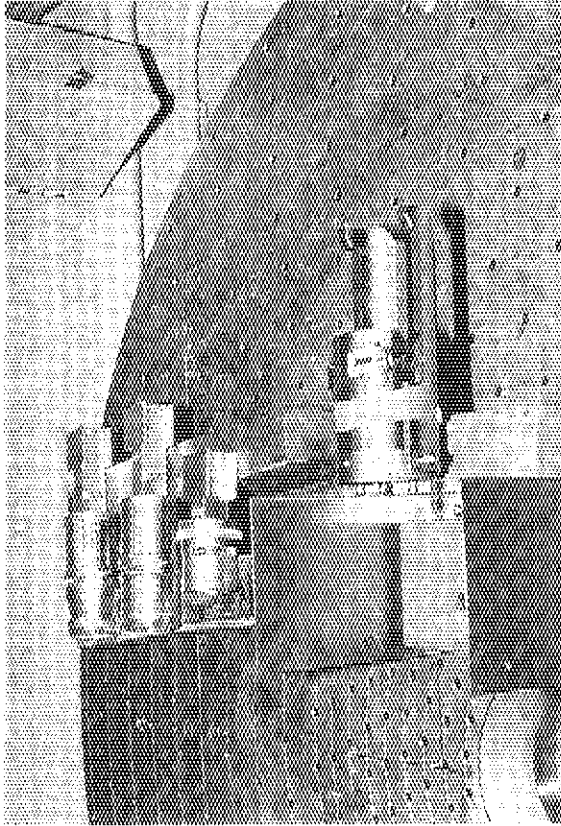


Tongue of M/S

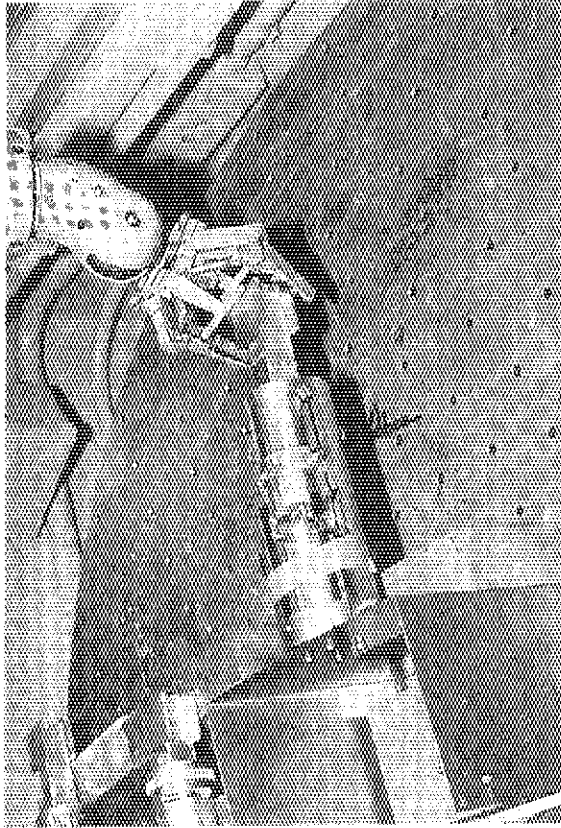


Master Slave Manipulator (M/S)

Fig. 2.8 Electric connector handling test using master slave manipulator in the gamma irradiation cell

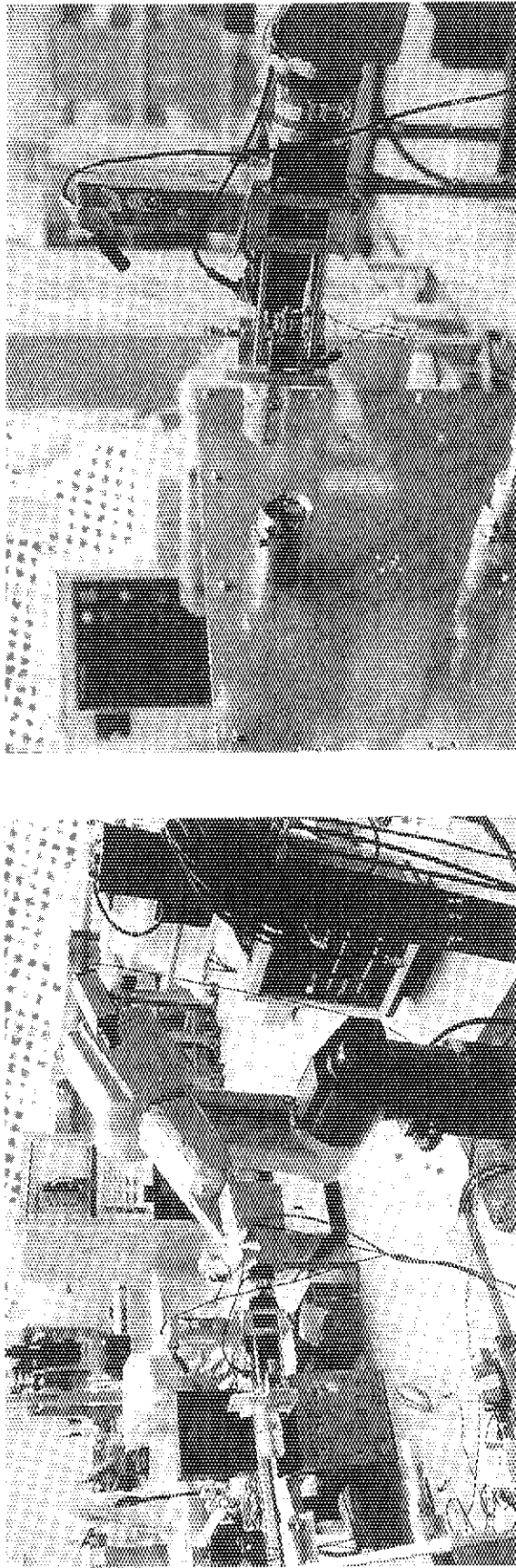


Plug and Receptacle



Plug Handled by M/S

Fig. 2.9 Receptacle and three types of plugs in the cell



**Fig. 2.10 Electric connector handling test
using a general purpose robot (JS-10)**

3. 第1、2、3ステップコネクタの製作とガンマ線照射試験

3.1 遠隔着脱対応型コネクタの製作

3.1.1 第1ステップコネクタ

「プラグ（オス側）の着脱に際しては、マニプレータ等のロボットの動作は押し込み及び引き離しの1動作のみとし、レセプタクル（メス側）への固定は、プラグの突起をレセプタクルの溝に吻合させることで行い、そのためのプラグの回転はロボットのエンドエフェクタである専用の治具で行う。」というコンセプトを基に、コネクタの製作を実施した。コネクタの構造及び外観を Fig. 3.1.1、3.1.2 に示す。また、以下に主な仕様を示す。

(1) コネクタ寸法

プラグ長さ	: 43 mm
プラグ外径	: 86.5 mm
レセプタクル長さ	: 87 mm
レセプタクル外径	: 100 mm

(2) 絶縁材 : アルミナセラミックス (積算線量 10^9 R までの照射実績あり)

(3) コネクタボディ材質 : ステンレス

(4) 絶縁材とハウジングの接合 : 銀ろう付け

(5) コンタクトピン数 : 4本 ($\phi 1.6$ mm)

(6) コンタクトピン材質 : ① Fe-Ni に Ni コーティング ($5 \mu\text{m}$) $\times 2$ 本
② 熱電対用のクロメル・アルメル \times 各1本

(7) コンタクトソケット : 日立原町電子 (株) オリジナルソケット

(8) ピン・ソケット挿抜力 : 0.11 kg \sim 1.36 kg (MIL規格に準ずる)

3.1.2 第2ステップコネクタ

第1ステップコネクタの小型化を図るとともに、プラグ後端部には平歯車を取付け、併せて製作した着脱治具で吻合できるようにした。製作したコネクタ構造及び外観を Fig. 3.1.3、3.1.4 に示す。以下に主な仕様と第1ステップコネクタからの変更点を示す。

(1) コネクタ寸法

以下の通り寸法を変更し、小型化を実施した。

プラグ長さ	: 43 mm から 62 mm
プラグ外径	: 86.5 mm から 66 mm
レセプタクル長さ	: 87 mm から 45 mm
レセプタクル外径	: 100 mm から 70 mm

(2) 絶縁材 : アルミナセラミックス (積算線量 10^9 R までの照射実績あり)

(3) コネクタボディ材質 : 軽量化を目的に、アルミ合金を採用した。

(4) 絶縁材とハウジングの接合 : 銀ろう付け

- (5) コンタクトピン数 : 10本 ($\phi 1.6\text{mm}$)
- (6) コンタクトピン材質 : Fe-Ni+5 μm Niコーティング
- (7) コンタクトソケット : 日本航空電子製コンタクトソケット
- (8) ピン・ソケット挿抜力 : 0.11kg~1.36kg (MIL規格に準ずる)

第2ステップコネクタの着脱治具を製作した。製作した治具の構造及びその外観を Fig. 3.1.5、3.1.6 に示す。治具はプラグ把持部とプラグを回転させる回転部から構成され、マニプレータ等のロボットの押し込み動作によって、ドライバ軸が回転し、その回転力がプラグ把持部の歯車からプラグの歯車に伝達される。コネクタの着脱手順を Fig. 3.1.7 に示す。

3.1.3 第3ステップコネクタ

第2ステップコネクタから更なる小型化を実施した。製作したコネクタの構造及び外観を Fig. 3.1.8、3.1.9 に示す。以下にその主な仕様と第2ステップコネクタからの変更点を示す。

(1) コネクタ寸法の変更

以下の通り寸法を変更し、小型化を実施した。

- プラグ長さ : 62mmから52mm
- プラグ外径 : 66mmから57.5mm
- レセプタクル長さ : 45mmから41mm
- レセプタクル外径 : 70mmから58mm

(2) 絶縁材 : アルミナセラミックス (積算線量 10^9R までの照射実績あり)

(3) コネクタボディ材質 : アルミ合金

(4) 絶縁材とハウジングの接合 : 銀ろう付け

(5) コンタクトピン数 : 2 ($\phi 2.4\text{mm}$)、6 ($\phi 1.6\text{mm}$)、14 ($\phi 1.0\text{mm}$) 及び22 ($\phi 1.0\text{mm}$) 本の4種類

(6) コンタクトピン材質 : Fe-Ni+5 μm Niコーティング

(7) コンタクトピンコーティング : 3 μm Auコーティング

ガンマ線照射の結果、第1、2世代コネクタのFe-Niコンタクトピン表面に腐食物の生成が認められた。そのため、耐腐食性向上を目的に、Auコーティングを施した。

(8) コンタクトソケット : スイスMC社製コンタクトソケット

(9) ピン・ソケット挿抜力 : ①0.23kg~3.27kg (2ピン)
 ②0.11kg~1.36kg (6及び14ピン)
 ③0.21kg~0.51kg (22ピン)
 (以上、MIL規格に準ずる)

第2ステップコネクタ用着脱治具の試験結果を基に、モータ駆動方式による第3ステップコネクタ用着脱治具を製作、着脱性を試験した。製作した専用治具の構造及び外観を Fig. 3.1.10、3.1.11 に示す。

3.2 大気中ガンマ線照射試験

製作した電気コネクタのガンマ線照射試験を実施し、その耐放射線性を試験した。全てのコネクタのガンマ線照射は原研高崎研究所ガンマ線照射施設(コバルト1棟)第2セルにて、平均線量率 10°R/h (大気、室温)、積算線量 10^{10}R という条件下で実施した。

3.2.1 第1ステップコネクタ

大気、室温下で耐放射線量 100MGy まで照射し、照射後の耐電圧、絶縁抵抗及び接触抵抗を測定した。測定結果を Fig. 3.2.1、3.2.2、3.2.3 に示す。

(1) 耐電圧

- ①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間にDC 1000V を1分間印加
- ②合格基準 : DC 1000V 以上であること。
- ③試験結果 : 積算線量 10^{10}R のガンマ線照射後で変化は認められず、結果は極めて良好であった。

(2) 絶縁抵抗

- ①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間にDC 500V を1分間印加
- ②合格基準 : $1000\text{M}\Omega$ 以上であること。
- ③試験結果 : 積算線量 10^{10}R のガンマ線照射後で変化は認められず、結果は極めて良好であった。

(3) 接触抵抗

- ①試験方法 : ピン・ソケット間に測定電流DC 1A を負荷
- ②合格基準 : $10\text{m}\Omega$ 以下であること。
- ③試験結果 : 若干の変化が認められたが、合格基準値の $10\text{m}\Omega$ 未満は満足していた。

(4) まとめ

コンタクトピン表面に腐食(酸化)が認められるものの、 10^{10}R まで使用は可能と判断される。

3.2.2 第2ステップコネクタ

100MGy まで照射し、照射後の耐電圧、絶縁抵抗及び接触抵抗を測定した。測定結果を Fig. 3.2.4、3.2.5、3.2.6 に示す。

(1) 耐電圧

- ①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間にDC 1000V を1分間印加
- ②合格基準 : DC 1000V 以上であること。

- ③試験結果 : 積算線量 10^{10} R のガンマ線照射後で変化は認められず、第1ステップコネクタと同様、結果は極めて良好であった。

(2) 絶縁抵抗

- ①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間に DC 500 V を 1 分間印加
 ②合格基準 : 1000 M Ω 以上であること。
 ③試験結果 : 積算線量 7.5×10^9 R 程度から、急激な低下が認められた。今後詳細な調査が必要であるが、コネクタボディにアルミ合金を使用したことが第1ステップコネクタとの相違点であるため、絶縁抵抗値の低下はアルミ合金が何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられる。しかし、最終的な判断は今後の追試験で説明することとする。

(3) 接触抵抗

- ①試験方法 : ピン・ソケット間に測定電流 DC 1 A を負荷
 ②合格基準 : 10 m Ω 以下であること。
 ③試験結果 : 10^{10} R 照射後に接触抵抗値が3倍以上上昇した。考えられる原因として、腐食がコンタクトピン表面に発生し、それがコンタクトピンとソケットの接触を阻害していることが挙げられる。
 なお、第1ステップコネクタでも同様のコンタクトピンの腐食が認められたが、接触抵抗に変化が現れなかったのは、共に MIL 規格に準じながらも、使用したコンタクトソケットの挿抜力が第2ステップコネクタで使用したコンタクトソケットよりも大きく、勤合時には常にコンタクトピンの表面の腐食物をソケットが削り取るようにして、接触していたためと予想される。

(4) まとめ

第1ステップコネクタと比較して、絶縁抵抗の低下及び接触抵抗の上昇が認められ、明らかに耐放射線性能が低下した。そのため、今後は平行して照射試験を実施している第3ステップコネクタの電気的特性の変化を観察しながら、その原因を究明する。

3.2.3 第3ステップコネクタ

照射試験は現在継続中であるが、 5×10^9 R 照射後の耐電圧、絶縁抵抗及び接触抵抗の測定結果を Fig. 3.2.7、3.2.8、3.2.9 に示す。

(1) 耐電圧

- ①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間に、DC 500 V (14 及び 22 ピン) 並びに 1000 V (2 及び 6 ピン) を 1 分間印加
 ②合格基準 : DC 500 V 以上 (14 及び 22 ピン) 並びに 1000 V 以上 (2 及び 6 ピン) であること。

③試験結果 : ガンマ線照射による影響は認められず、結果は極めて良好であった。

(2) 絶縁抵抗

①試験方法 : ピン間及びピン・コネクタボディ間にDC500Vを1分間印加

②合格基準 : 1000M Ω 以上であること。

③試験結果 : 10⁹R程度から抵抗値が小さくなる傾向が認められ、絶縁抵抗値測定室中の湿度により絶縁抵抗値が大幅に変化することが観察された。そこで、2.5 \times 10⁹R照射後に、本現象への抵抗値測定室中雰囲気の水分子の影響を調査するために、コネクタの加熱による除湿後の絶縁抵抗値測定を実施した。

コネクタ除湿後の抵抗値の挙動を把握するために、加熱による除湿を3サイクル(1サイクル:150度で24時間保持)実施し、1サイクル毎に抵抗値を測定した。結果をTable 3.2.1に示す。結果から、絶縁抵抗値は明らかに測定雰囲気中の水分の影響を受けていると考えられるが、このような現象が起きる直接の原因解明には別途詳細な調査が必要である。

Table 3.2.1 Changes of Insulation Resistance at Various Heat Cycles

unit: M Ω

No of Heat Cycle	24hr under 150 °C.	24hr under R.T.	24hr under H.H.	24hr under R.T.
1 st cycle	over 1000	500 to 800	100 to 400	300 to 500
2 nd cycle	over 1000	800 to 1000	200 to 600	over 800
3 rd cycle	over 1000	over 1000	200 to 600	over 900

R.T.: Room Temperature, H.H.: High Humidity (70%)

(3) 接触抵抗

①試験方法 : ピン・ソケット間に測定電流DC1Aを負荷

②合格基準 : 10m Ω 以下であること。

③試験結果 : コンタクトピン数22ピンのコネクタが5 \times 10⁹R、第2ステップコネクタ同様、急激に上昇した。5 \times 10⁹R照射後のコンタクトピンの外観をFig. 3.2.10に示す。ただし、6ピンのコネクタは合格基準値を満足していた。

(4) コンタクトピン表面観察

コンタクトピン表面にAuコーティングを施したにも関わらず、2.5 \times 10⁹R照射後、目視による表面の腐食が観察された。光学顕微鏡での表面観察の結果、ピン表面に凹凸が認められた。その拡大写真をFig. 3.2.11に示す。また、同様にコンタクトソケットの接点部分にもかなりの摩耗が認められ、一部Auコーティングの剥がれも発生していた。ただし、数十回以上挿抜を繰り返した未照射のコンタクトソケットに

は極端な摩耗は認められなかった。

これらの原因を調査するために、ピン表面のX線回析を実施したところ、Fig. 3.2.12、3.2.13に示すように、コーティング金属のAu、ピン地金のFeとNi及びピンには含まれないはずのOが確認できた。この結果から、ピン表面の凹凸は、Auコーティングのピンホール部もしくはコーティング剥離部分でFeとNiが酸化し、その酸化物がAuコーティングを破って生じたものと考えられる。

以上の結果から、下地金属の析出防止とコーティング膜厚の最適化を目的に、Ni及びAuコーティング層の厚さをパラメータとした小型試料を使用し、照射試験を実施した。試料の詳細をTable 3.2.2に示す。なお、本試験は現在照射継続中である。

Table 3.2.2 Parameters of Coating Film Thickness on Contact Pin for Contact Resistance Test

unit: μ m

Piece No.	Thickness of Ni coating	Thickness of Au coating
No.1	3	-
No.2	5	-
No.3	10	-
No.4	20	-
No.5	5	1.27
No.6	5	3
No.7	5	5
No.8	5	10
No.9	5	20

10、30MGyまで照射したコンタクトピン表面の拡大写真をFig. 3.2.14、3.2.15、3.2.16、3.2.17、3.2.18、3.2.19に示す。Niコーティングのみを施したコンタクトピンはコーティング膜厚に関係なく、その表面に腐食物が生成していることが確認できる。また、Auコーティングを施したコンタクトピンのうちコーティング膜厚5 μ m以上のものは 3×10^9 R照射後でも腐食物の生成は認められない。これはAuコーティング膜厚が厚くなるほど、コーティングのピンホールの存在率が小さくなり、下地金属が酸化しにくくなっているためと考えられる。なお、本試料を使用して、 3×10^9 R照射後の絶縁抵抗値及び接触抵抗値の測定を実施した。ただし、使用したコンタクトソケットは未照射品のスイスMC社製である。その結果をTable 3.2.3に示す。結果から、接触抵抗値の増加はコンタクトピンの表面腐食によるものであり、Auコーティングのピンホール部（コーティング不完全部分）で下地金属のNiが酸化し、Auコーティングを破って、析出したためと判断される。そのため、

前章(3)で述べた抵抗値の増加もコンタクトソケットのばね力の比較的小さい22ピンの接触性が低下したためと考えられる。なお、絶縁抵抗値の低下はコンタクトピン表面の腐食とは関係がないことも判明した。

以上、試験結果から、コンタクトピン表面の腐食及び接触抵抗値の増加を防止するためには以下の方法が考えられる。

- ①Auコーティングをコンタクトピン表面に施し、かつそのコーティング膜厚は5 μm 以上とする。
- ②ピンホールのできにくいAuコーティング方法を採用する。
- ③ばね力の大きいコンタクトソケットを使用する

(5) まとめ

ガンマ線照射試験は現在も継続中であるが、第2ステップコネクタ同様、絶縁抵抗値の低下並びに接触抵抗値の増加が認められている。

絶縁抵抗値の低下は抵抗値測定室内の雰囲気中の水分が何らかの影響を与えていることが判明した。今後は絶縁材に使用しているセラミックス単体の耐放射線性の再確認並びに第1ステップコネクタと、第2、3ステップコネクタとの使用材料及び構造上の違いによる影響を調査する必要があると考えられる。

また、コンタクトピン表面のX線回析の結果、腐食防止用のAuコーティング上で酸化が発生し、その酸化が接触抵抗値の増加に大きく影響していることが、今までの試験でほぼ確認できた。表面の腐食はAuコーティング内に存在するピンホール部で発生していると予想されるため、今後はピンホール数を低減するコーティング膜厚及びコーティング方法の最適化を図り、併せてコンタクトソケットの挿抜力の最適化も実施する。

**Table 3.2.3 Insulation Resistance & Contact Resistance Changes at $3 \times 10^6 R$
as a Parameter of Coating Film Thickness on Contact Pin**

unit Insulation resistance : M Ω

Contact resistance : m Ω

Ni coating	Au coating	Insulation resistance (Ave.)	Contact resistance (Ave.)
3 μ m	-	over 1000	38.6
5 μ m	-	over 1000	55.0
10 μ m	-	over 1000	72.0
20 μ m	-	over 1000	140.7
5 μ m	1.27 μ m	over 1000	3.4
5 μ m	3 μ m	over 1000	0.8
5 μ m	5 μ m	over 1000	0.6
5 μ m	10 μ m	over 1000	0.5
5 μ m	20 μ m	over 1000	0.5
3 μ m	-	over 1000	91.1
5 μ m	-	over 1000	47.3
10 μ m	-	over 1000	42.3
20 μ m	-	over 1000	43.4
5 μ m	1.27 μ m	over 1000	8.9
5 μ m	3 μ m	over 1000	1.7
5 μ m	5 μ m	over 1000	0.6
5 μ m	10 μ m	over 1000	0.5
5 μ m	20 μ m	over 1000	0.3
Not Irradiated pin			
3 μ m	-	over 1000	0.5
5 μ m	-	over 1000	0.6
10 μ m	-	over 1000	0.3
20 μ m	-	over 1000	0.8
5 μ m	1.27 μ m	over 1000	0.3
5 μ m	3 μ m	over 1000	0.2
5 μ m	5 μ m	over 1000	0.1
5 μ m	10 μ m	over 1000	0.1
5 μ m	20 μ m	over 1000	0.1

3.3 窒素中ガンマ線照射試験

(1) 照射試験

炉内遠隔保守装置の不活性ガス（窒素ガス等）雰囲気下での使用を考慮し、コネクタの主要部品であるコンタクトピンについて、窒素ガス雰囲気下でのガンマ線照射試験を実施した。

Fig. 3.3.1 に積算線量 3.98×10^8 R 照射後の照射試料を示す。試料全体に褐色及び青銅色の化合物が付着しているのが観察でき、特に青銅色の化合物には潮解性が認められた。そこで付着物の組成を X 線回析で調査したところ、これらの化合物は硝酸ニッケル六水和物 ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 及び 3 価のニッケル酸化物 (NiOOH) であることが判明した。

また、追試験として、コンタクトピンに $5 \mu\text{m}$ の Ni コーティング及び $5 \mu\text{m}$ の Ni コーティング + $3 \mu\text{m}$ の Au コーティング処理した 2 種類の小型試料を使用し、 2.6×10^8 R までの照射試験を実施した。Au コーティングを施した試料は、積算線量が低いため、第 3 ステップコネクタのように Au コーティングのピンホール部での腐食は発生しておらず、照射前と比べて外観上の変化は認められなかったが、Ni コーティングのみ施した試料は既に表面に若干の黒色及び灰色の付着物が一部認められた。X 線回析による付着物の組成調査の結果、ニッケル酸化物あるいは硝酸ニッケルの類 ($\text{NiCO}_3 \cdot 2(\text{N}_2\text{H}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}_2(\text{NO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ 及び $\text{C}_4\text{H}_{12}\text{C}_{12}\text{NiO}_2$) であることがわかった。

以上の試験結果から、付着物自体の再現性は、本試験では認められなかったものの、発生メカニズムとしては、照射に際して、窒素ガスチャンバの雰囲気は窒素ガスに置換されるが、その作業は完全に行われないため、水蒸気、酸素及び二酸化炭素等のガスは一定量チャンバ内に残ってしまう。これらのガスはガンマ線照射により励起、イオン化し、コンタクトピンのコーティング金属と化学反応を起こし、結果として表面全体に反応生成物が付着する。

(2) まとめ

原因究明のために、窒素ガスチャンバ内のガス分析調査等を実施する必要があるが、大気中でも同様な酸化反応が母材金属表面で起こっているため、腐食しやすい金属の使用は高線量率環境下では避け、耐腐食性の高いステンレス鋼の使用及びコンタクトピン母材金属表面への Au コーティング等の対策が必要である。

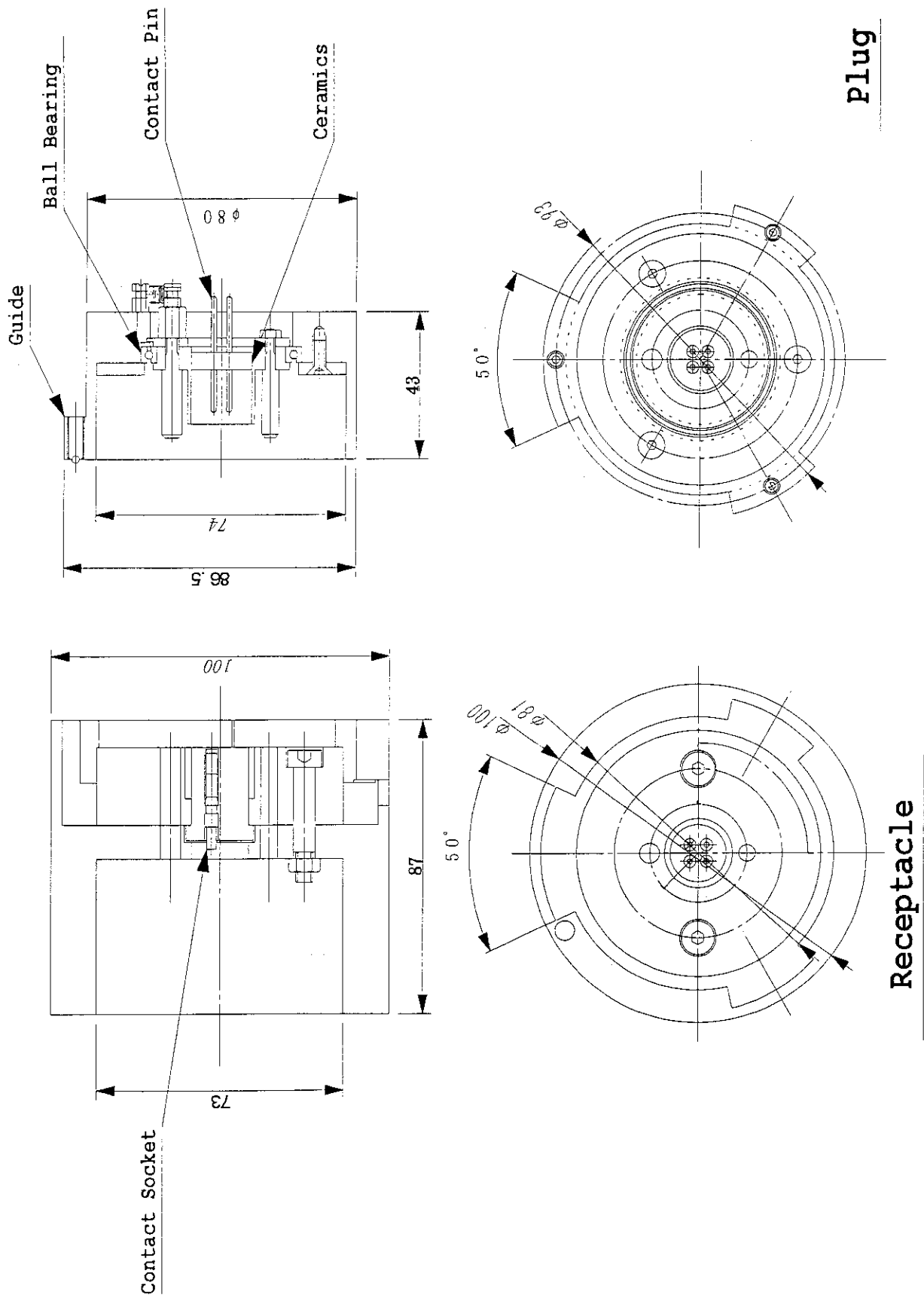


Fig. 3.1.1.1 1st step electric connector

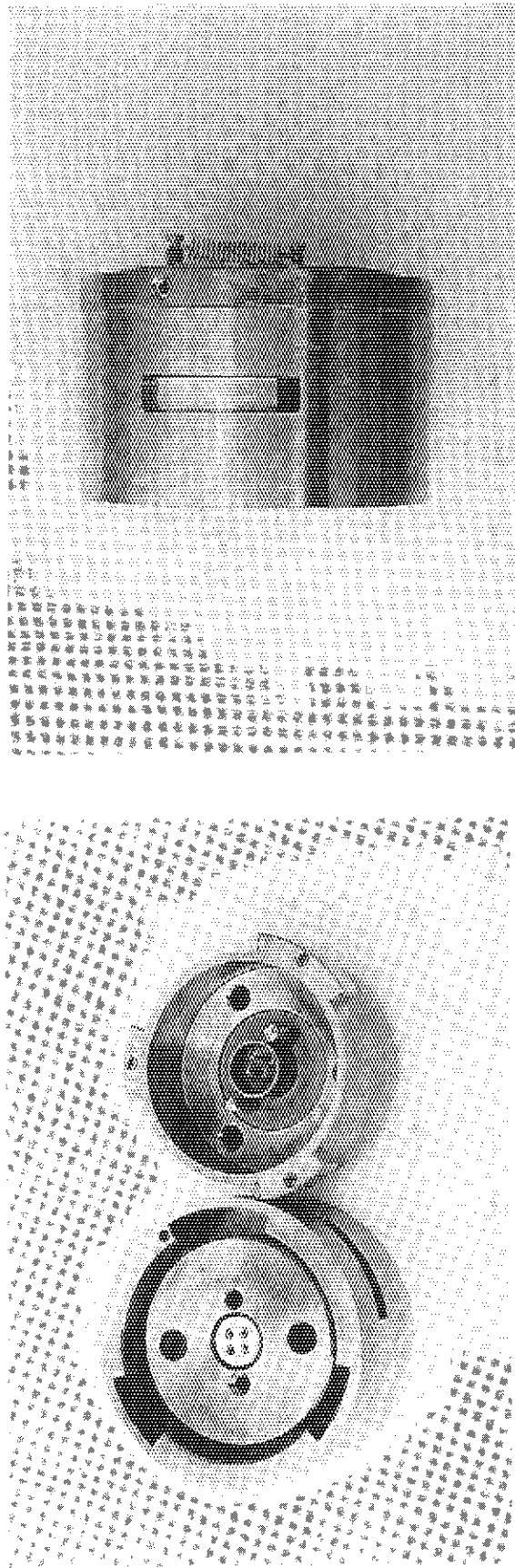


Fig. 3.1.2 Fabricated receptacle and plug of 1st step connector

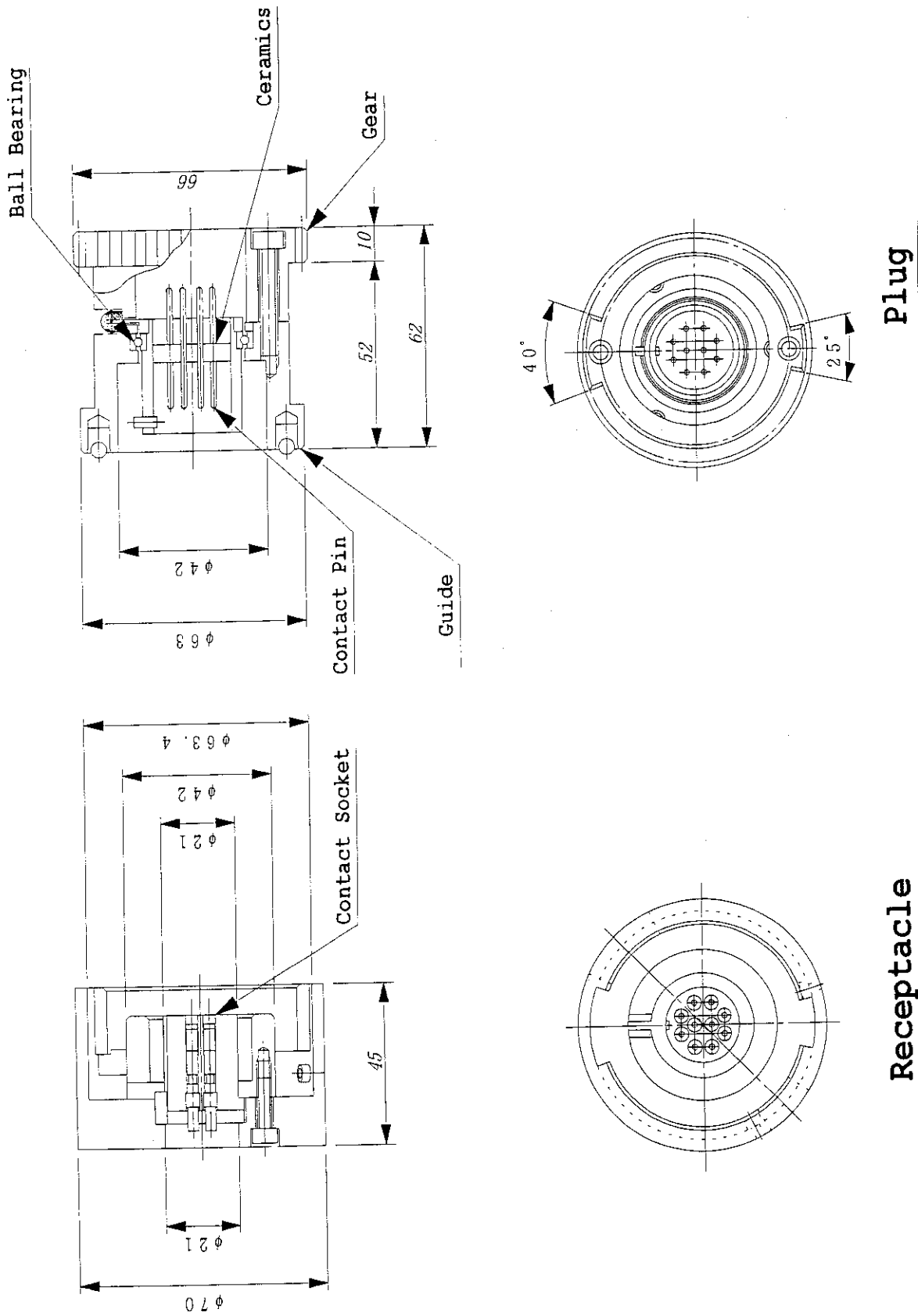


Fig. 3.1.3 2nd step electric connector

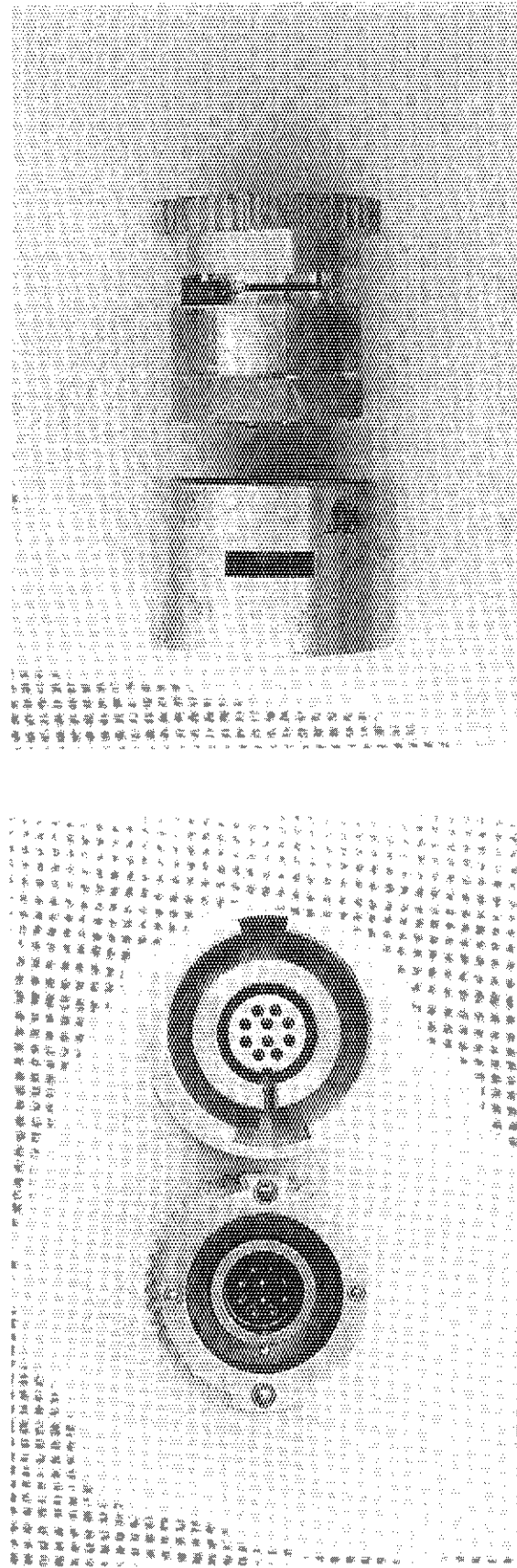


Fig. 3.1.4 Fabricated receptacle and plug of 2nd step connector

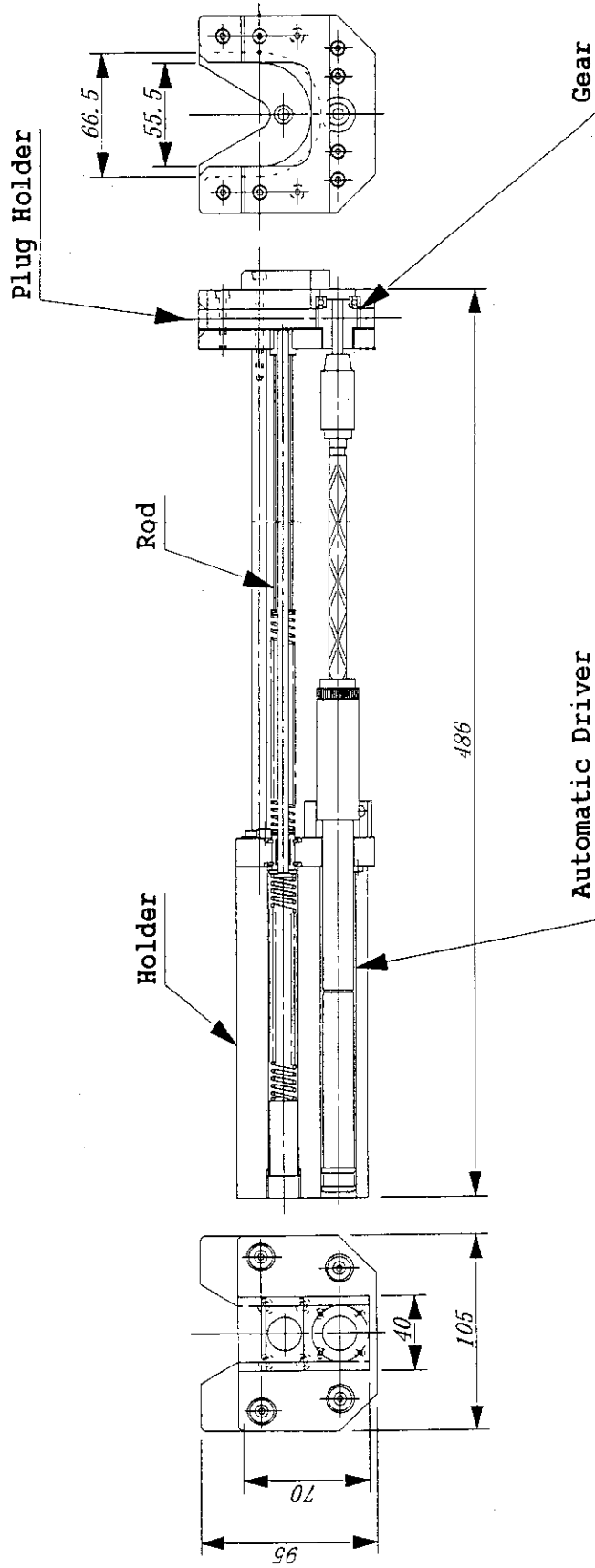


Fig. 3.1.5 Handling tool for 2nd step connector

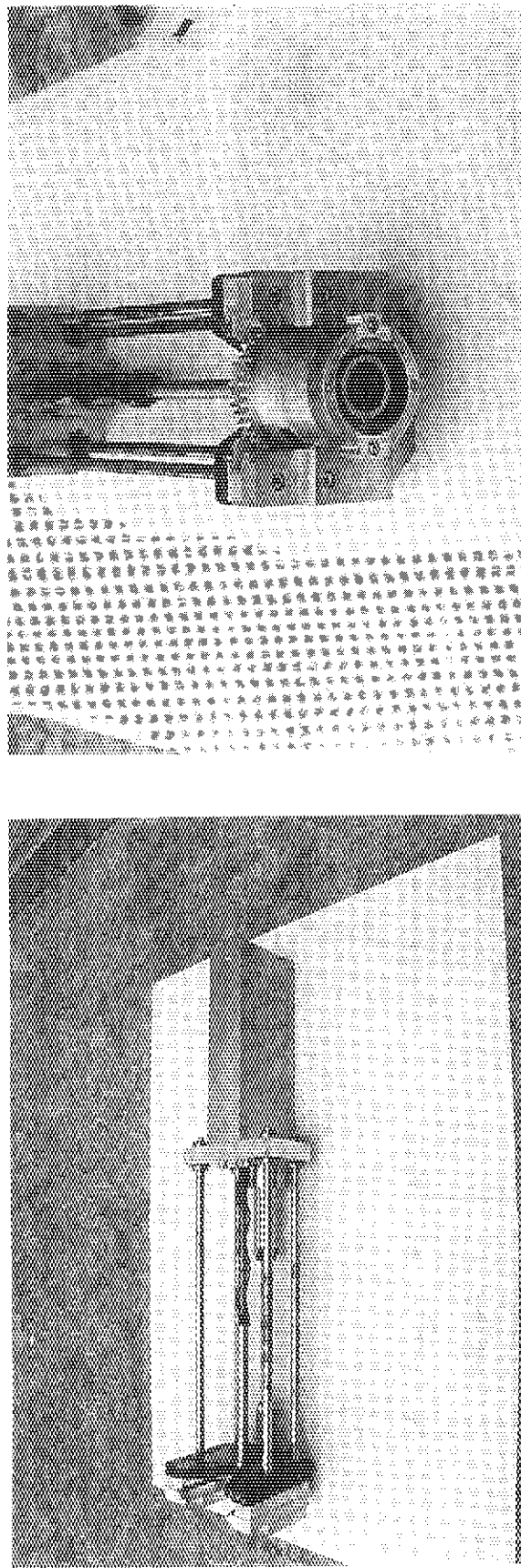
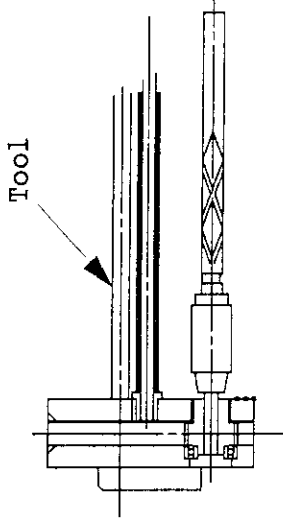
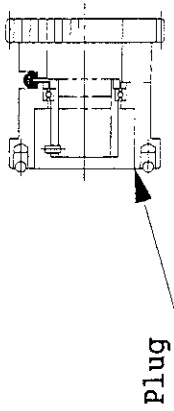
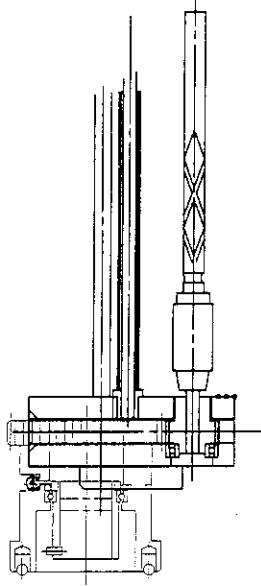
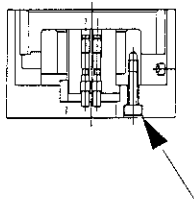


Fig. 3.1.6 Fabricated handling tool for 2nd step connector

1st: Hold a plug by tool



2nd: Align the center of plug



3rd: Push and rotate a plug

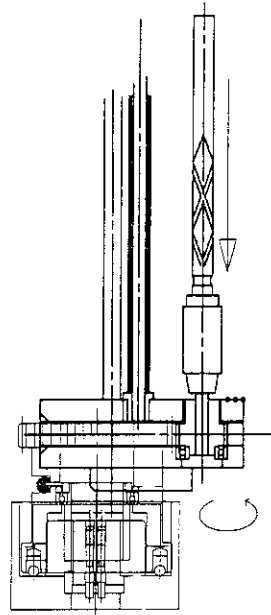


Fig. 3.1.7 Procedure by handling tool for 2nd step connector

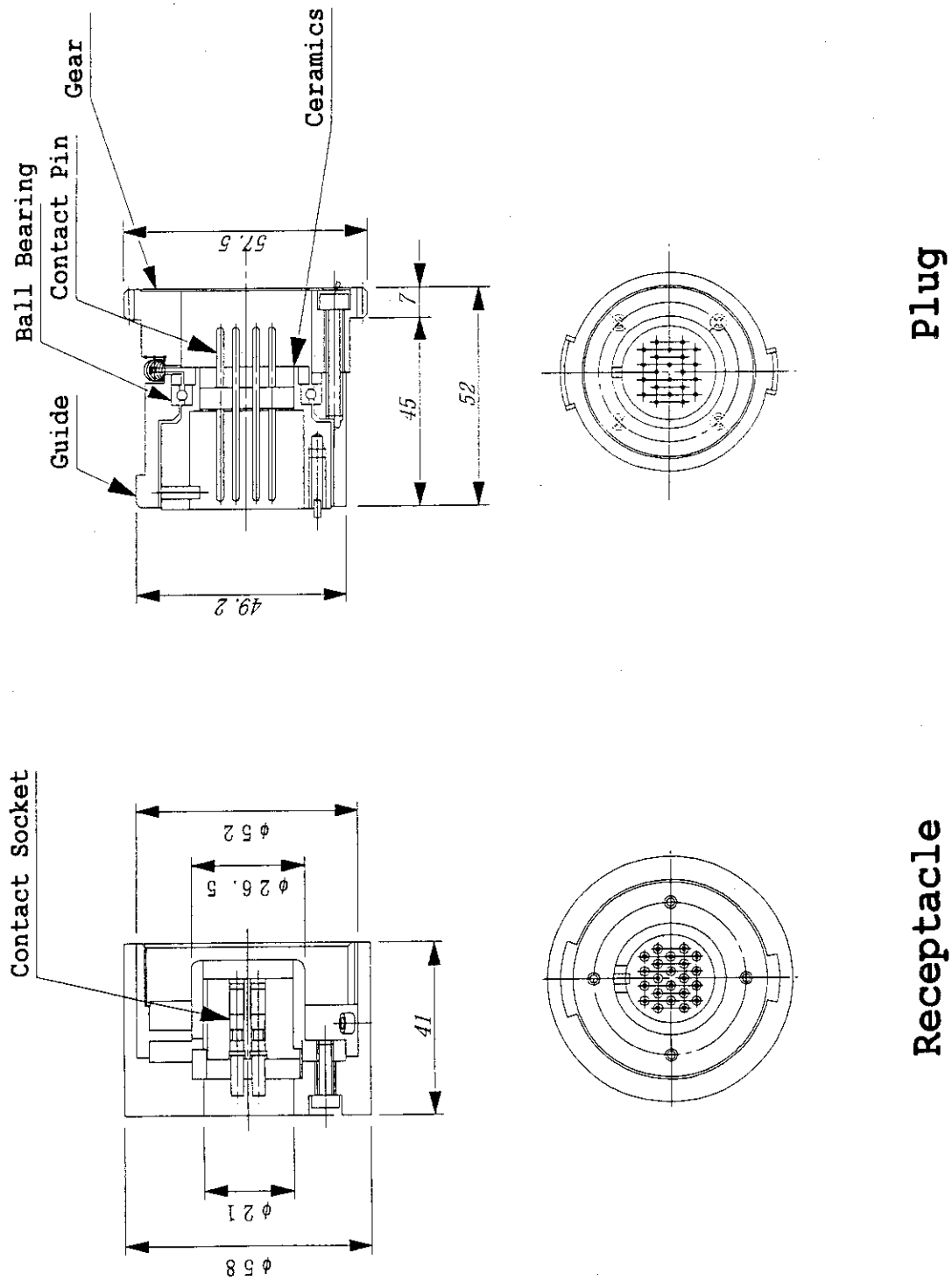


Fig. 3.1.8 3rd step electric connector

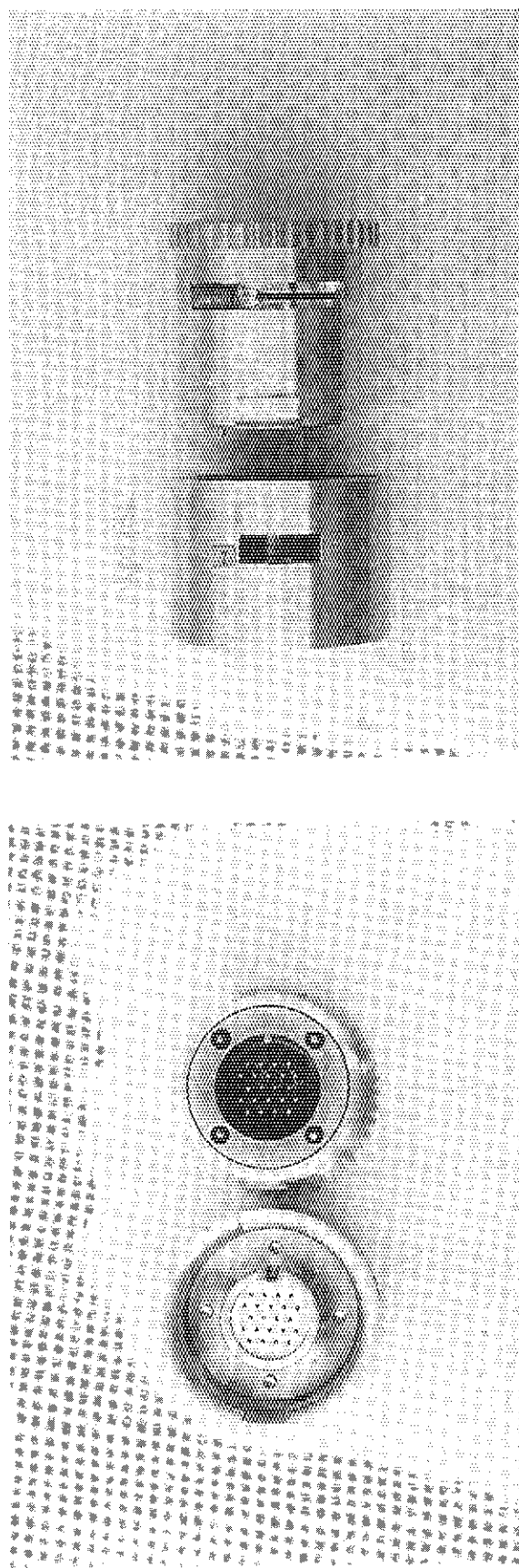


Fig. 3.1.9 Fabricated receptacle and plug of 3rd step connector

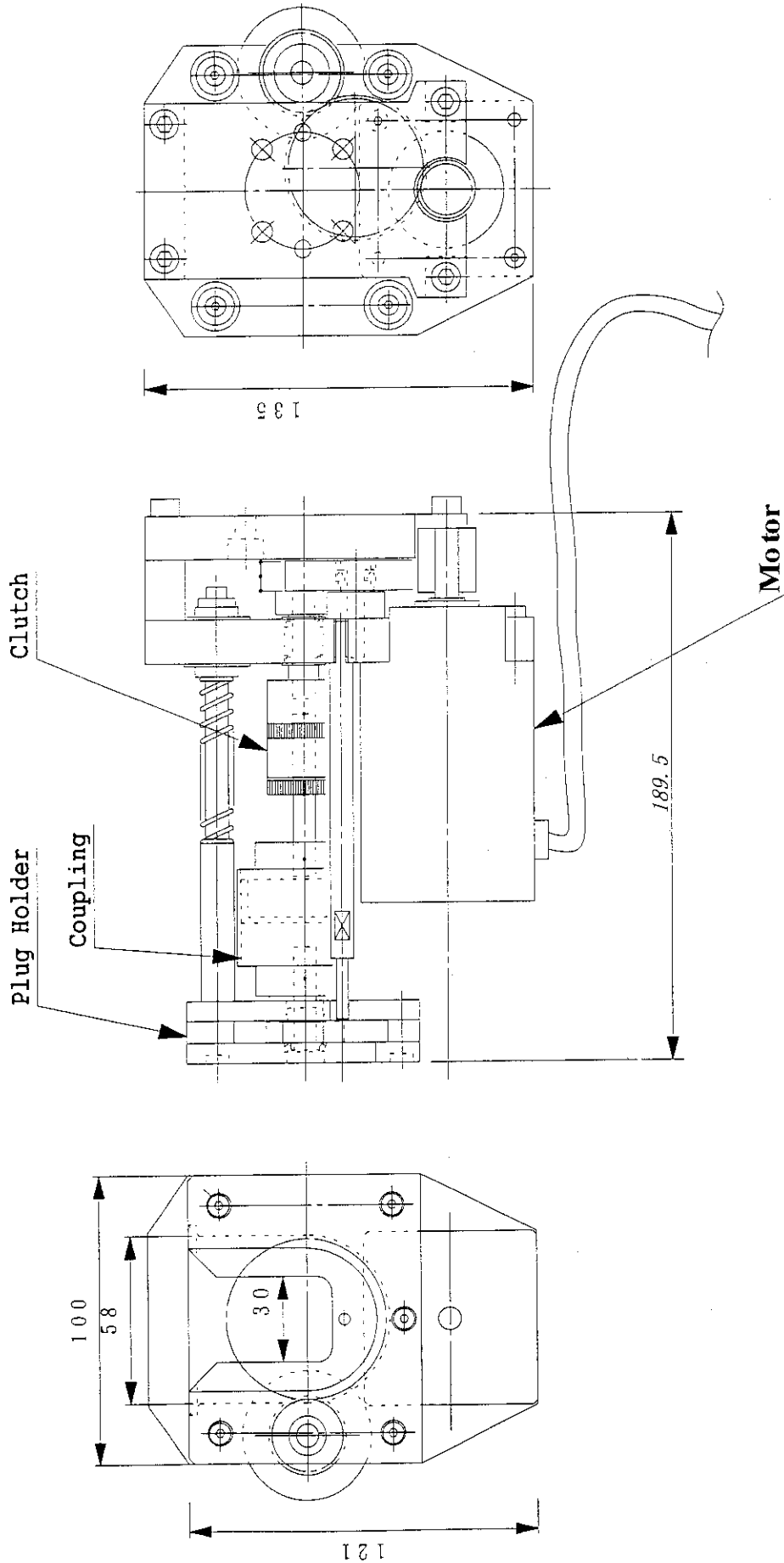


Fig. 3.1.10 Handling tool for 3rd step connector

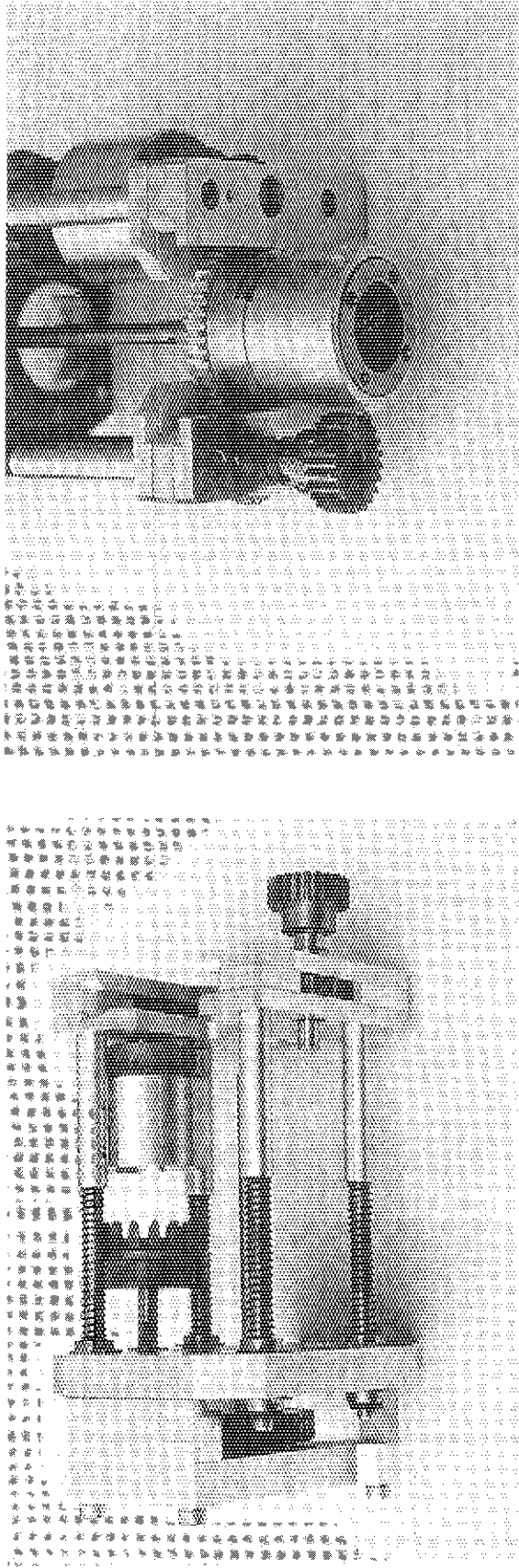
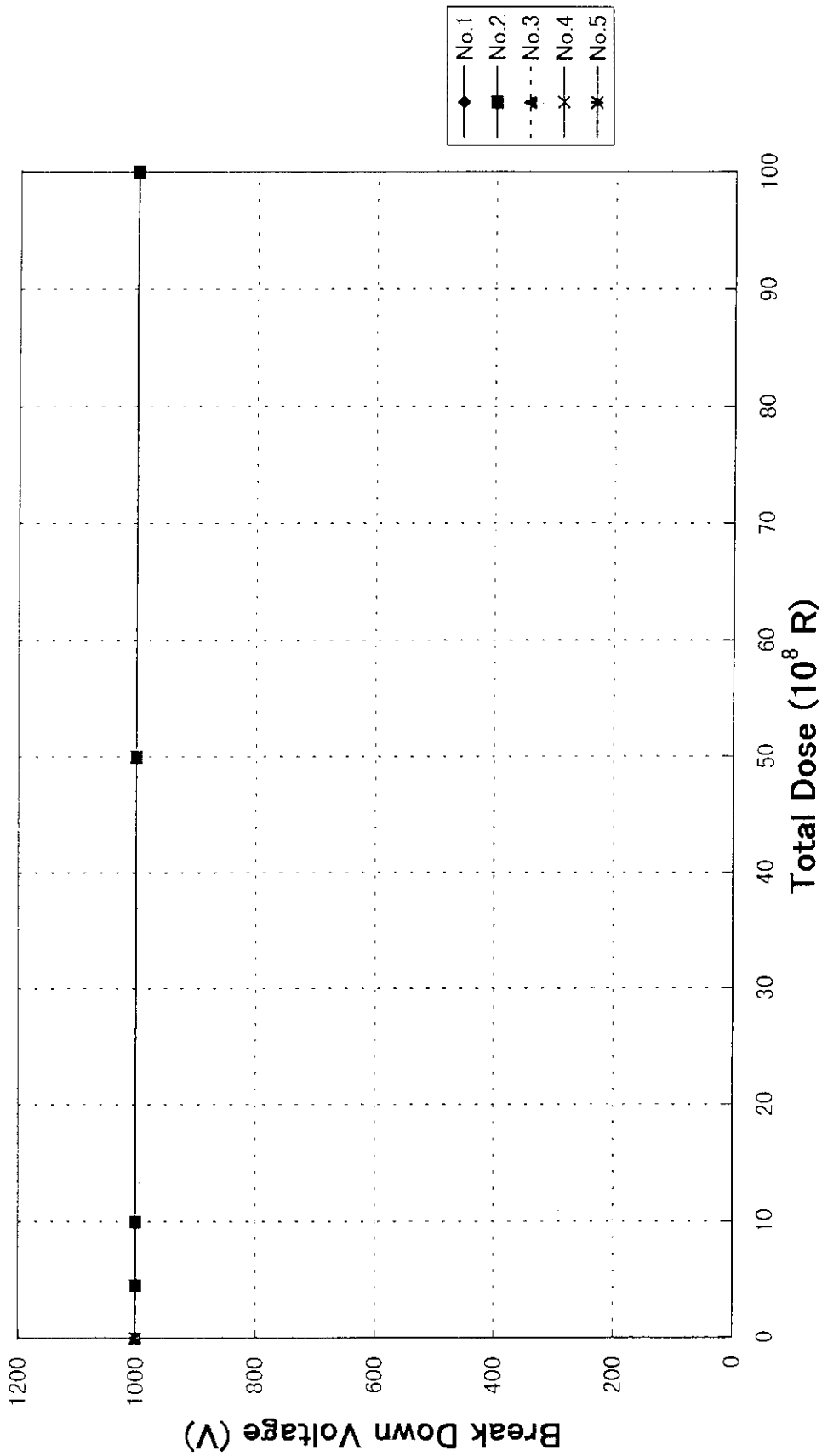
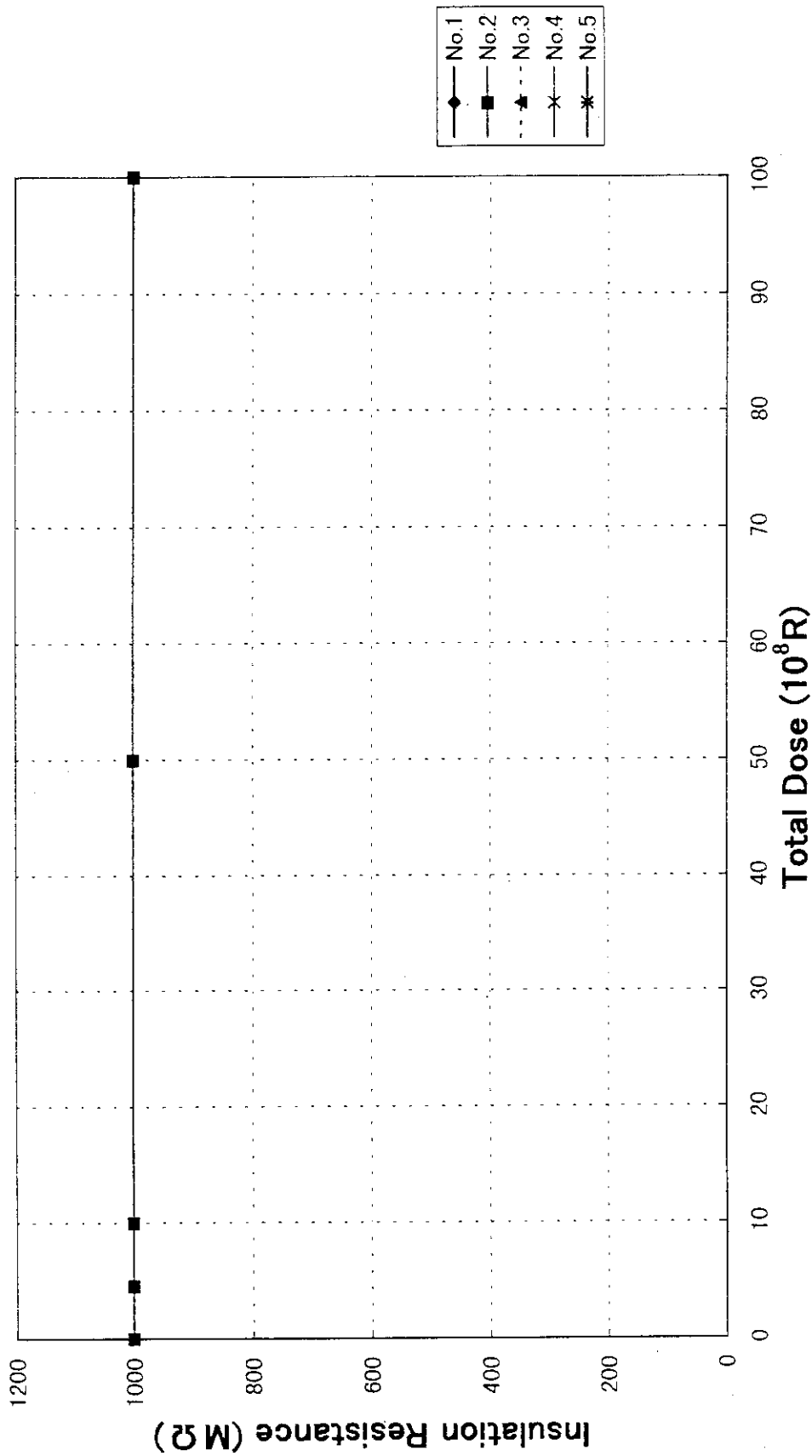


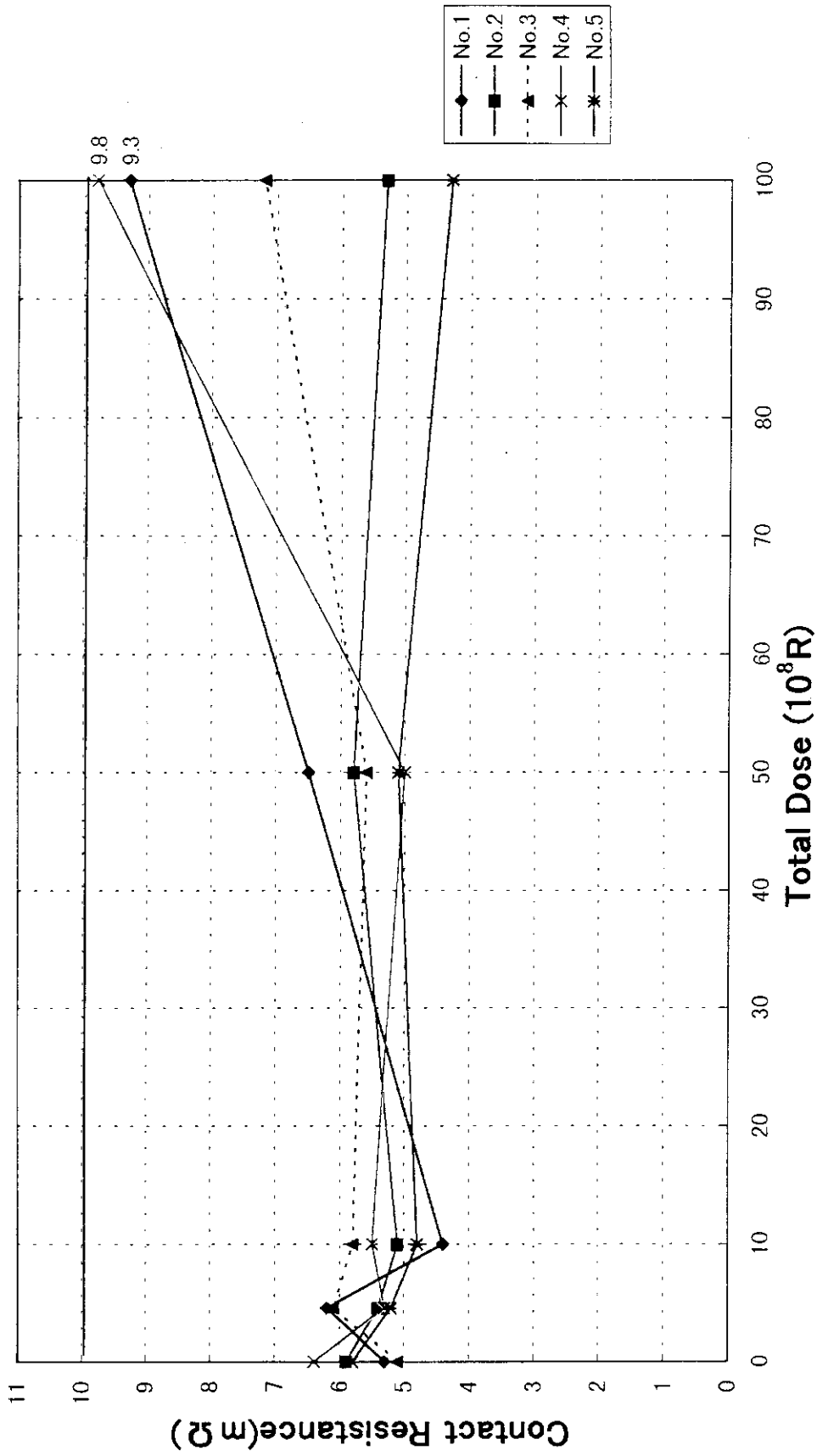
Fig. 3.1.1.1 Fabricated handling tool for 3rd step connector



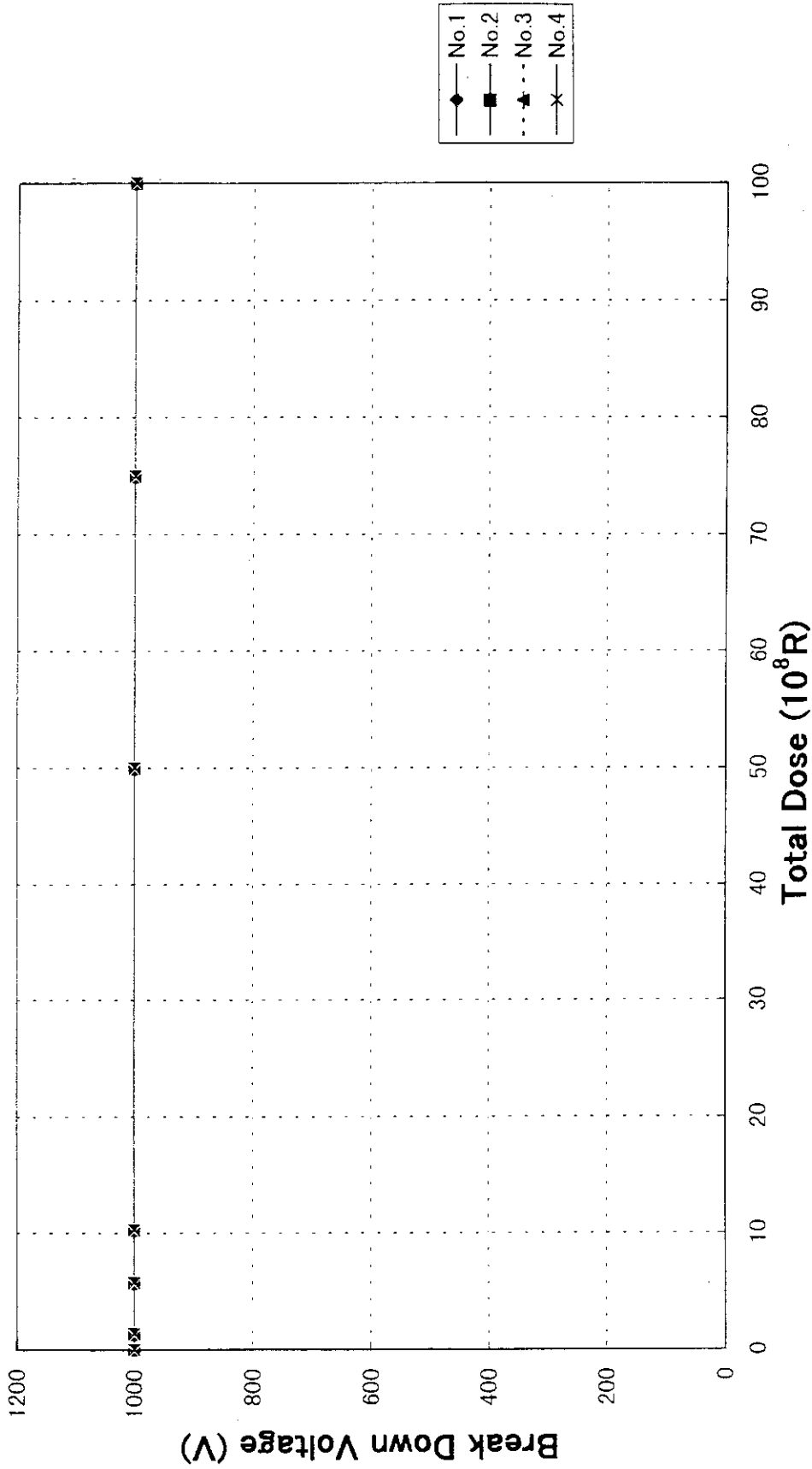
**Fig. 3.2.1 First Step Connector
Measured Break Down Voltage as a Parameter of Accumulation Dose
(DC1000V*1min, Allowable voltage:over 1000V)**



**Fig. 3.2.2 First Step Connector
Measured Insulation Resistance as a Parameter of
Accumulation Dose
(DC500V, Allowable resistance:over 1000MΩ)**



**Fig. 3.2.3 First Step Connector
Measured Contact Resistance as a Parameter of
Accumulation Dose
(DC1A, Allowable resistance: below 10mΩ)**



**Fig. 3.2.4 Second Step Connector
Measured Break Down Voltage as a Parameter of
Accumulation Dose
(DC1000V*1min, Allowable voltage:over 1000V)**

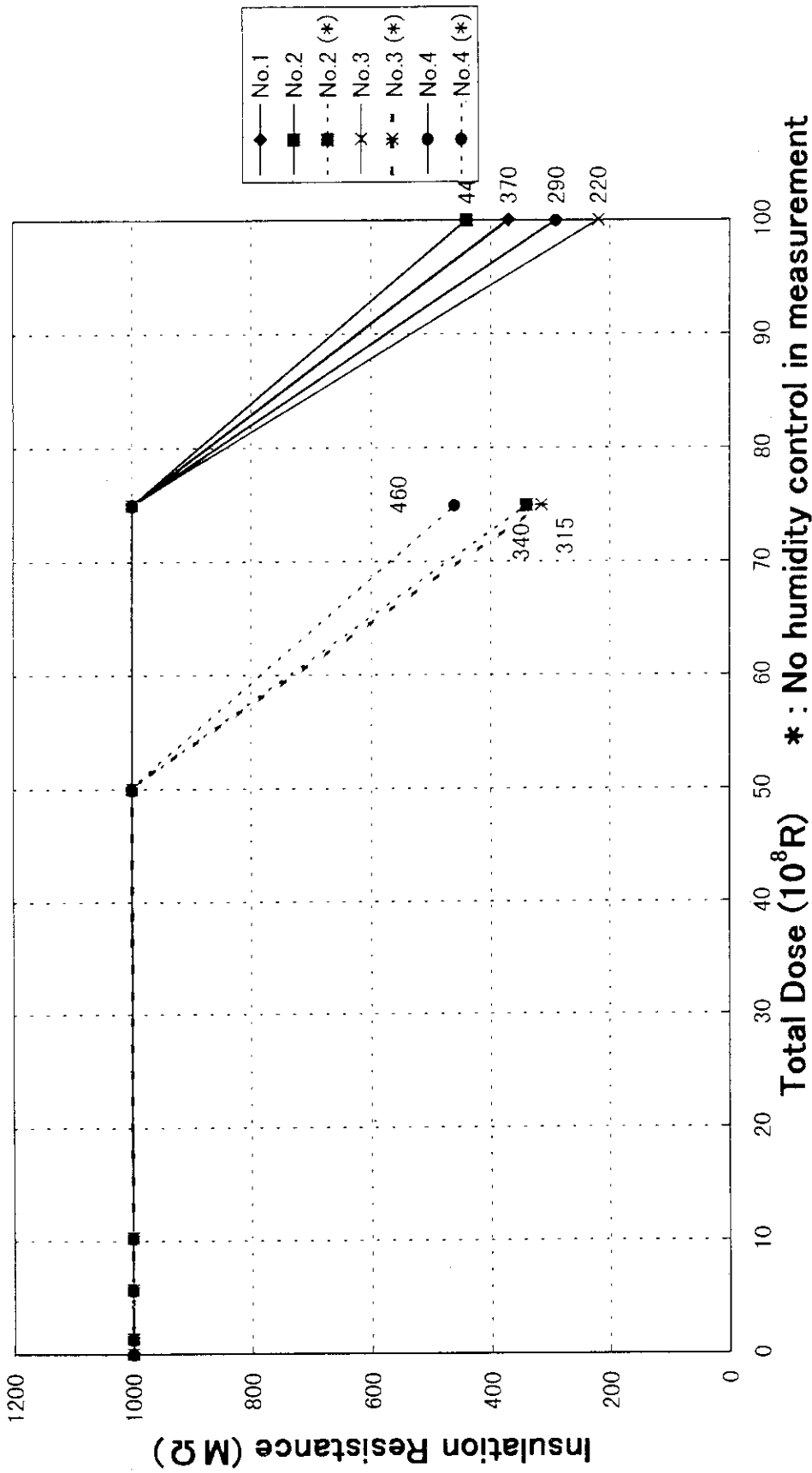


Fig. 3.2.5 Second Step Connector
 Measured Insulation Resistance as a Parameter of
 Accumulation Dose
 (DC500V, Allowable resistance: over 1000MΩ)

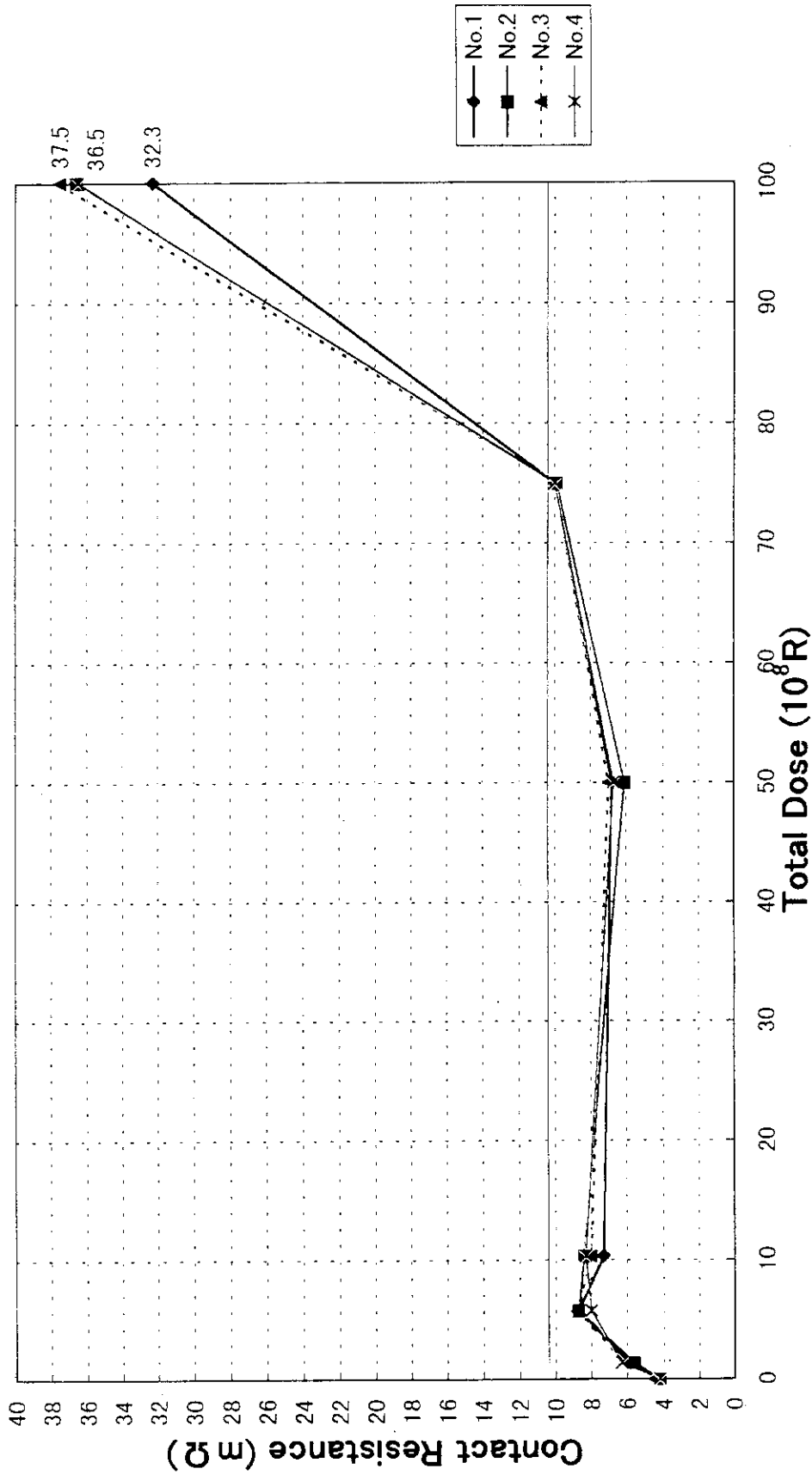
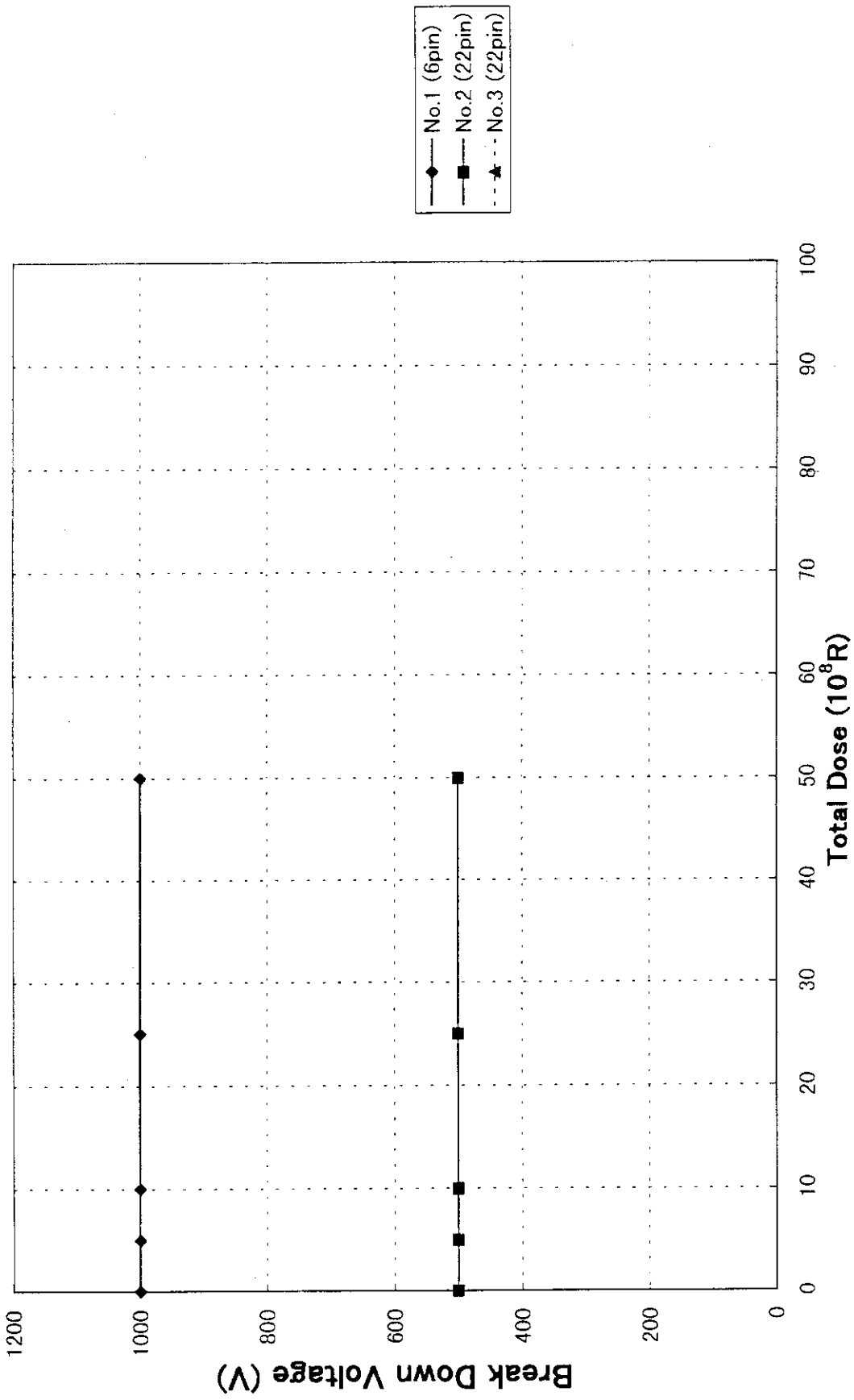


Fig. 3.2.6 Second Step Connector
 Measured Contact Resistance as a Parameter of
 Accumulation Dose
 (DC1A, Allowable resistance: 10mΩ)



**Fig. 3.2.7 Third Step Connector
Measured Break Down Voltage (DC1000V&500V*1min)**

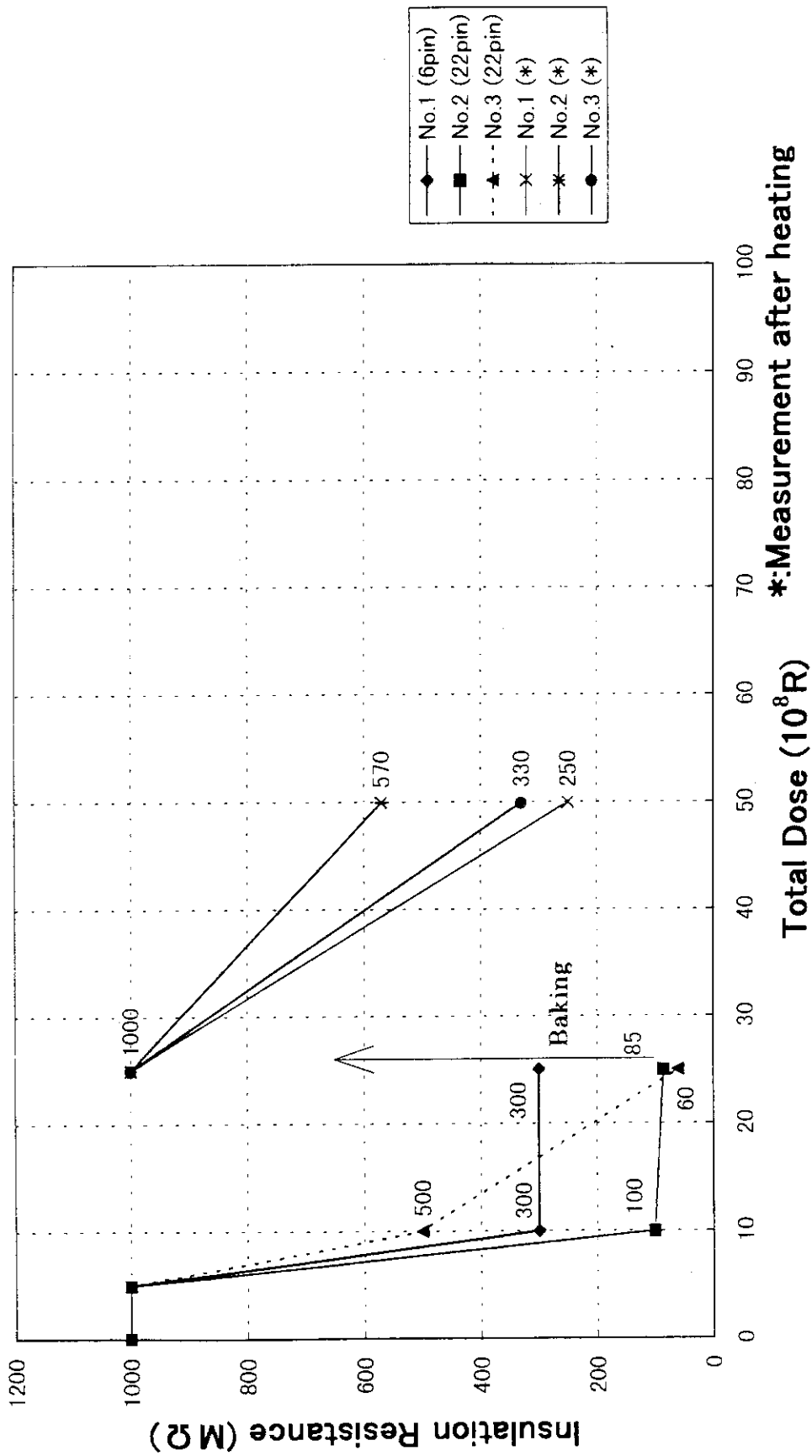
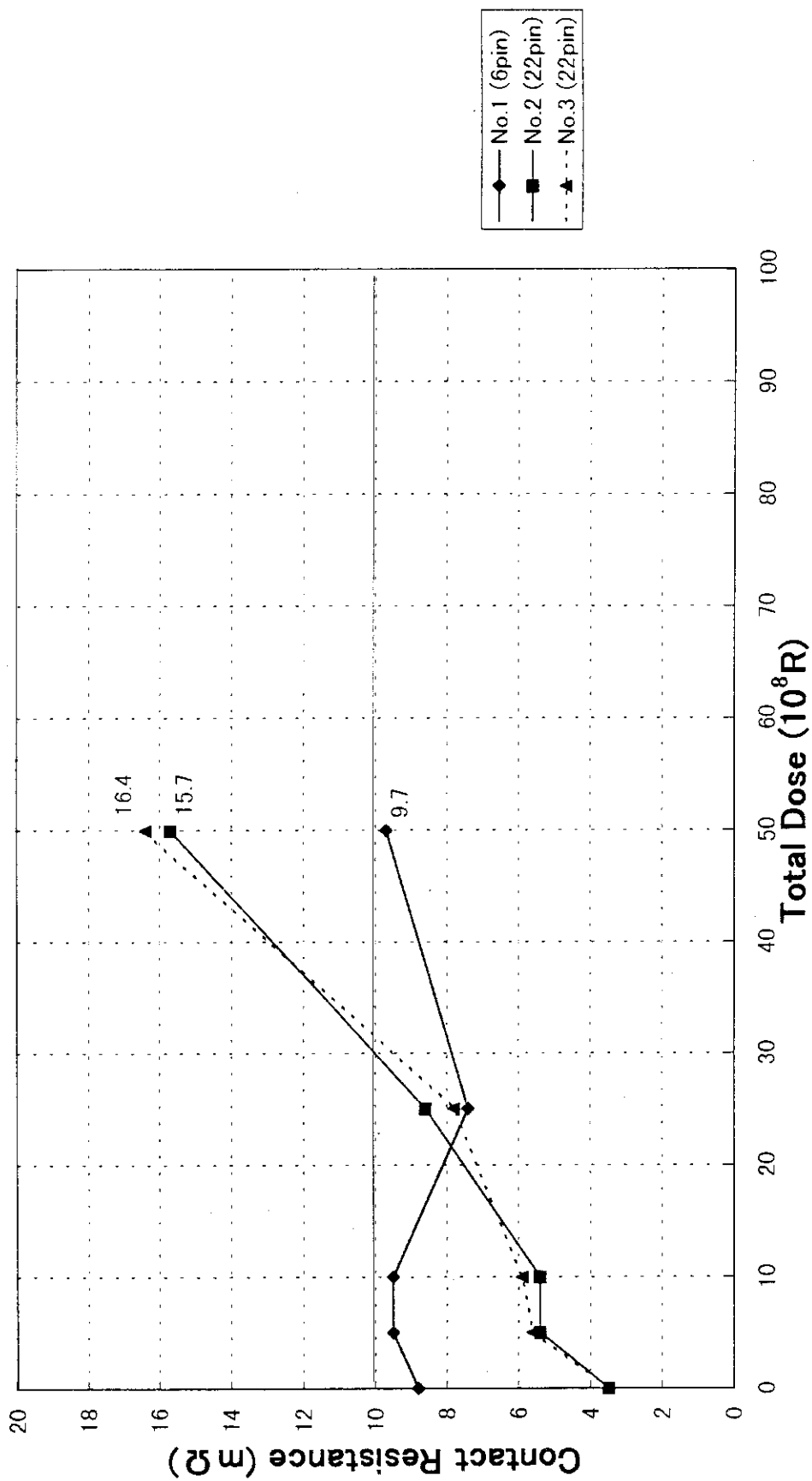
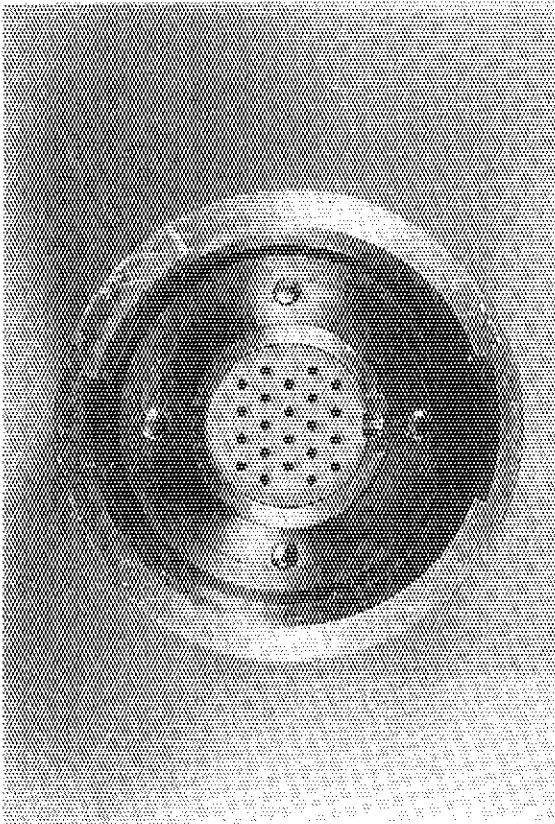


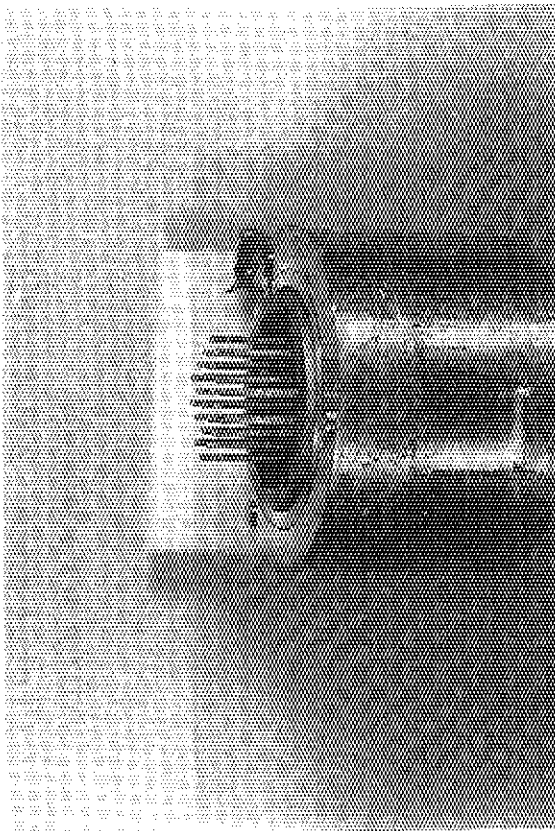
Fig. 3.2.8 Third Step Connector
 Measured Insulation Resistance as a Parameter of Accumulation Dose
 (DC500V, Allowable resistance: 1000MΩ)



**Fig. 3.2.9 Third Step Connector
Measured Contact Resistance as a Parameter of
Accumulation Dose
(DC1A, Allowable resistance: 10mΩ)**

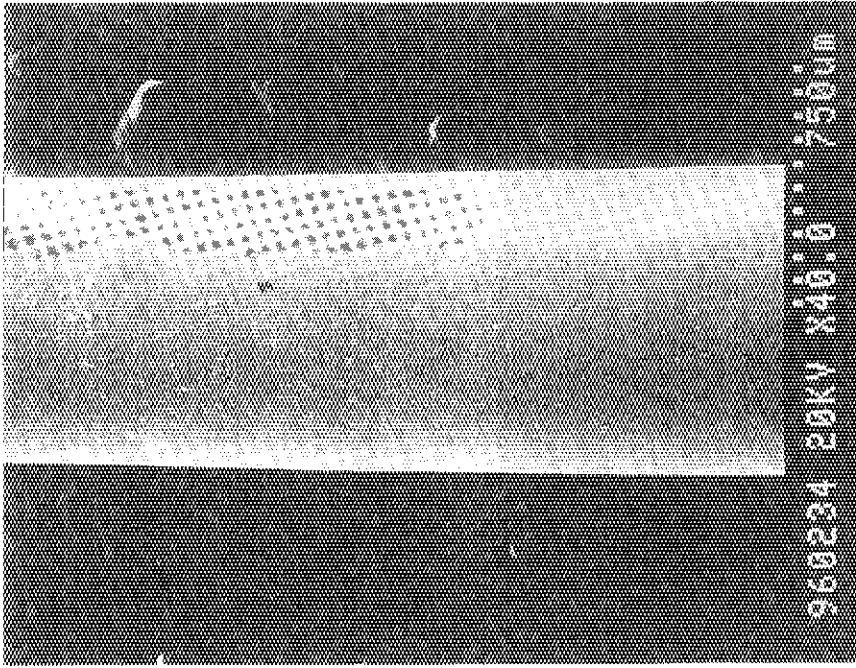


Receptacle

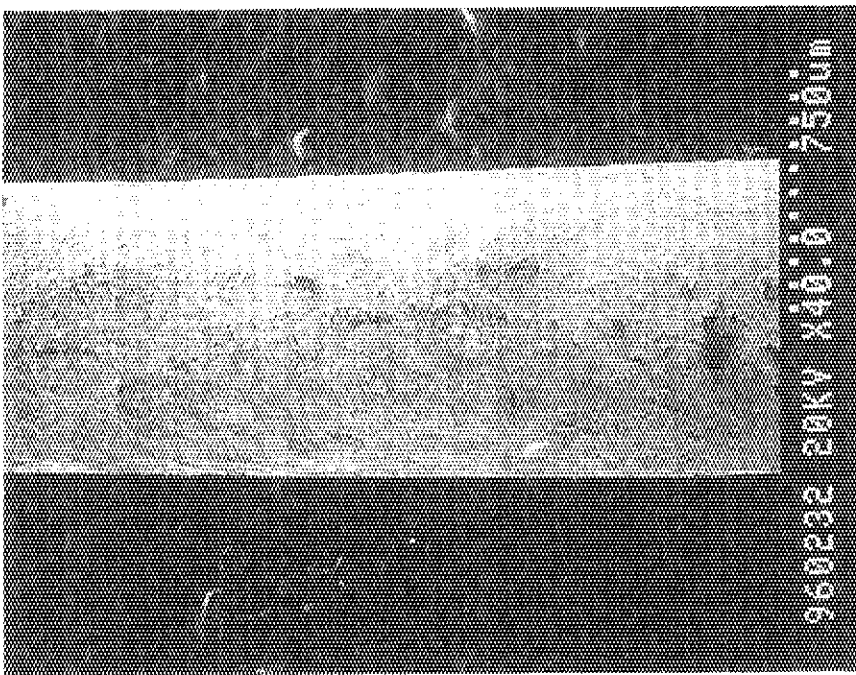


Plug

Fig. 3.2.10 Surface of 3rd step connector at dose of 5×10^9 R



Before irradiation



After irradiation
(Total dose : 2.5×10^{19} R)

Fig. 3.2.11 Micrograph of contact pin surface before and after irradiation

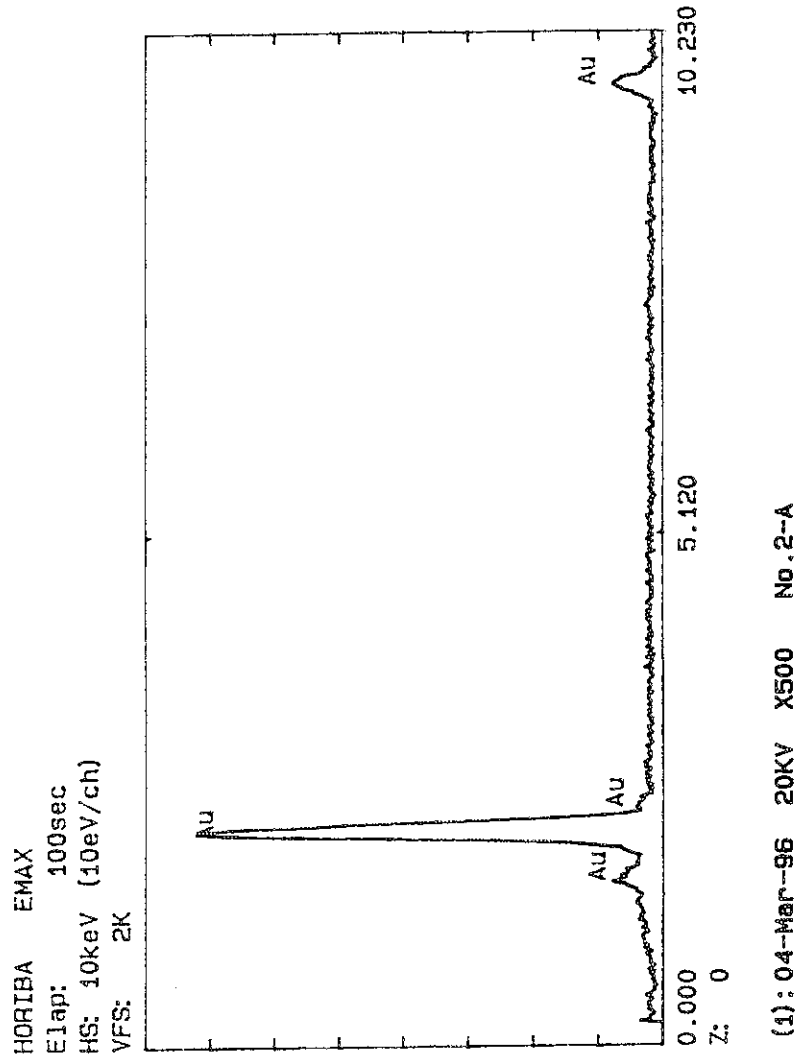
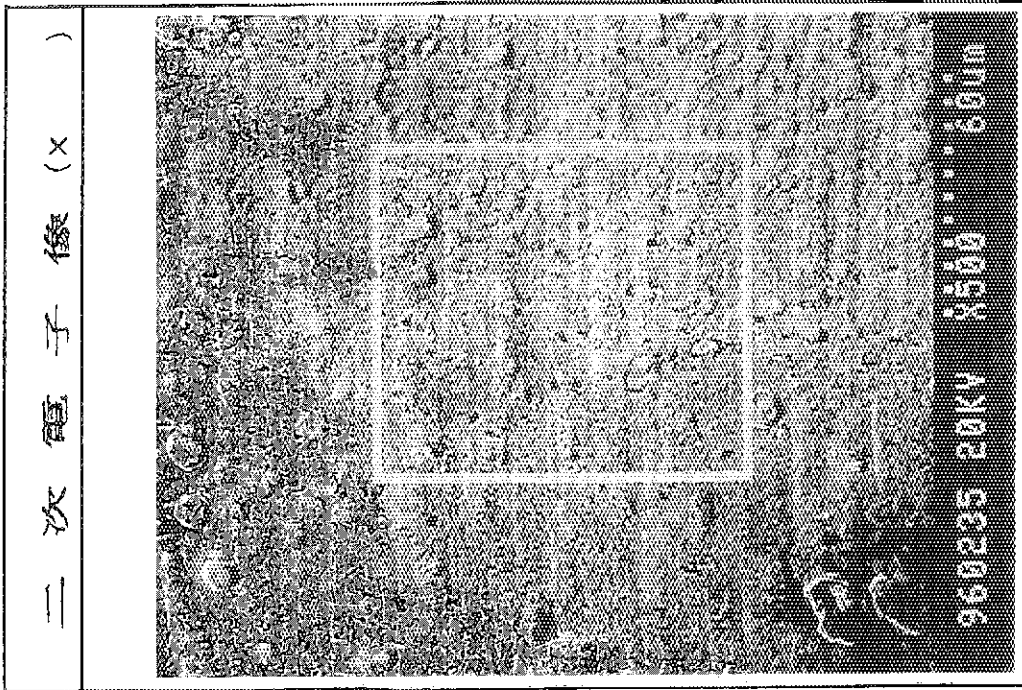


Fig. 3.2.12 X-ray diffraction result of un-irradiated contact pin surface

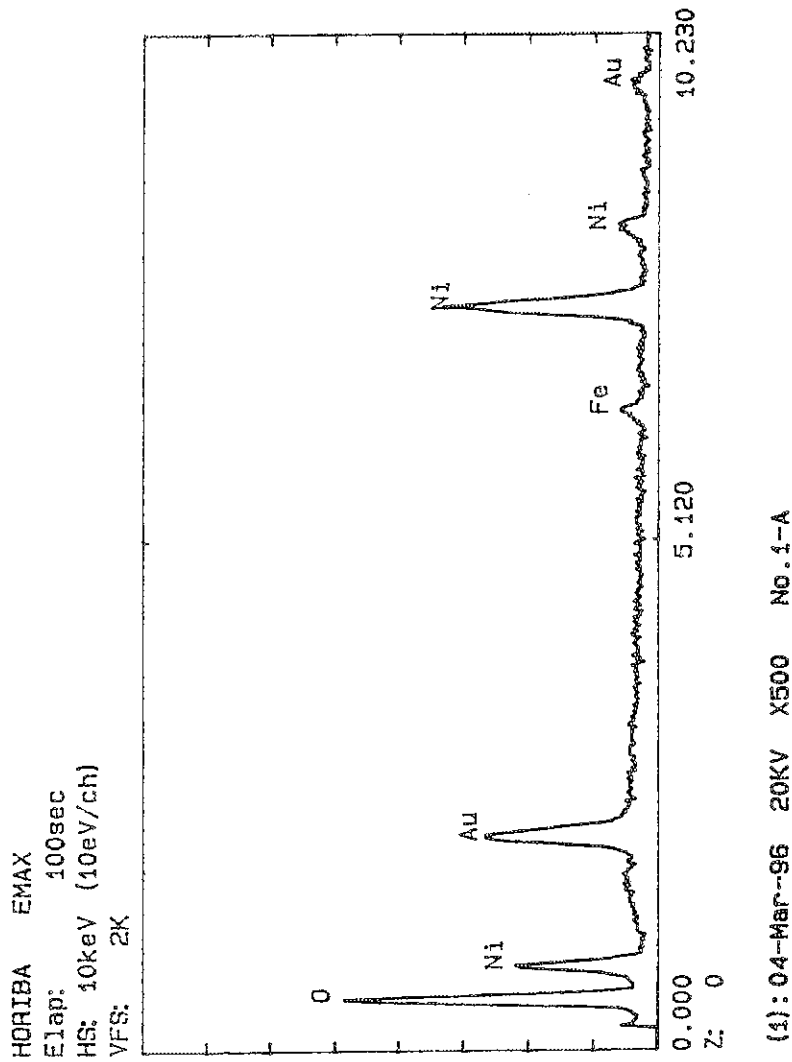
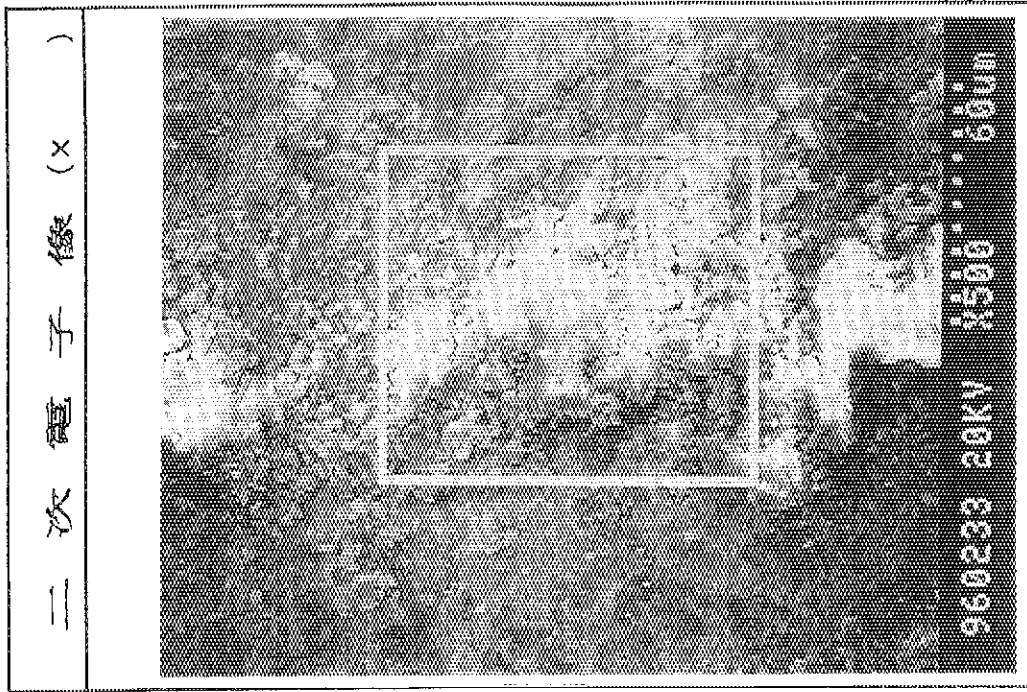


Fig. 3.2.13 X-ray diffraction result of irradiated contact pin surface

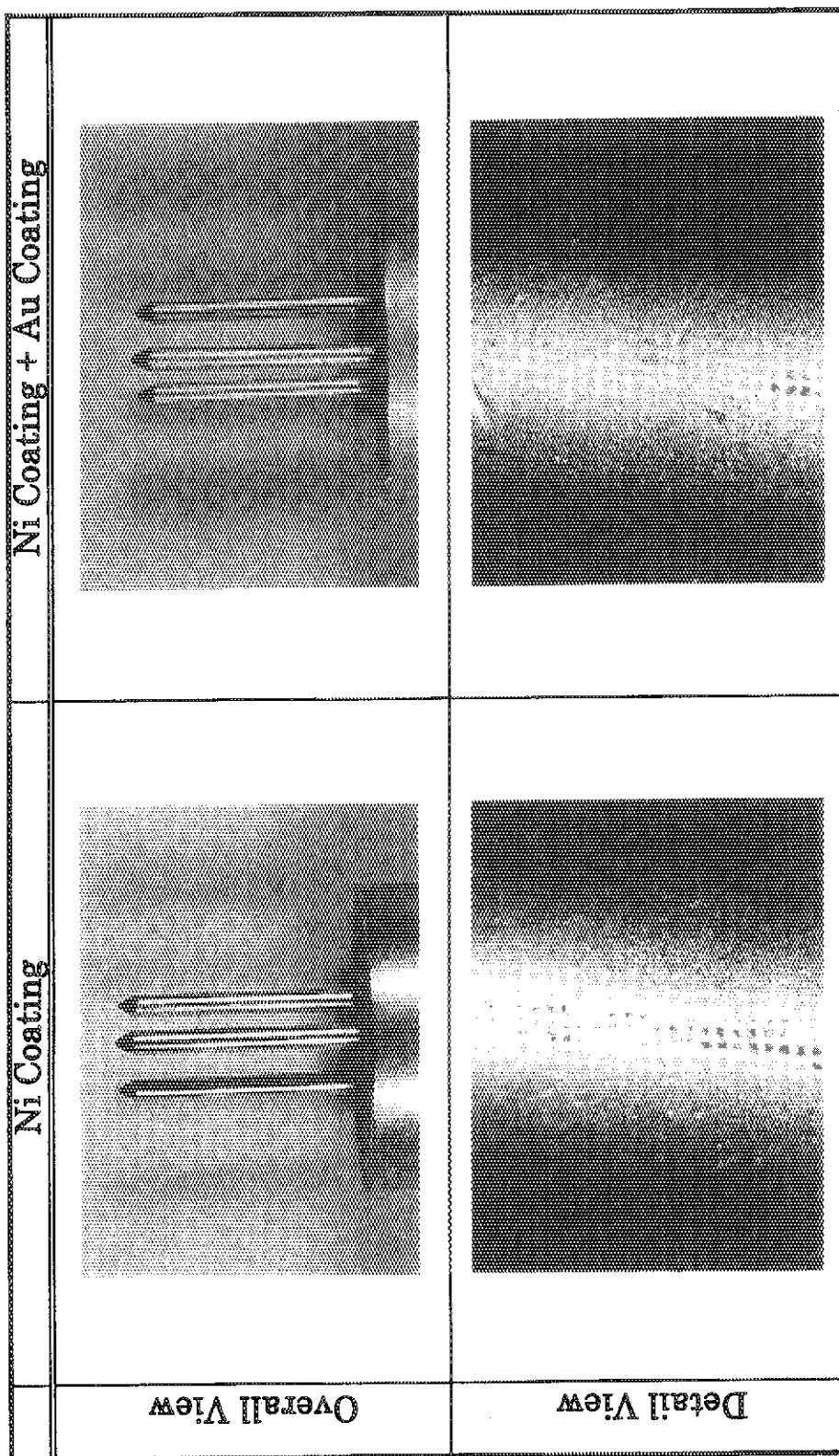


Fig. 3.2.14 Surface view of un-irradiated contact pin

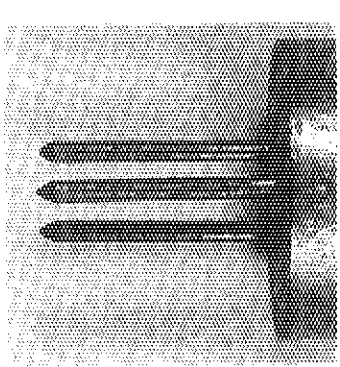
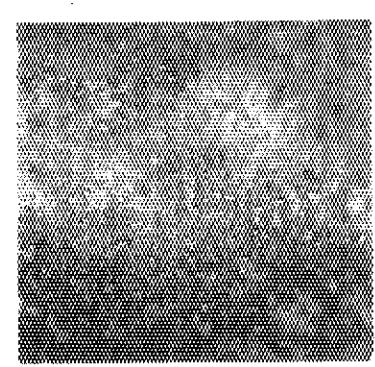
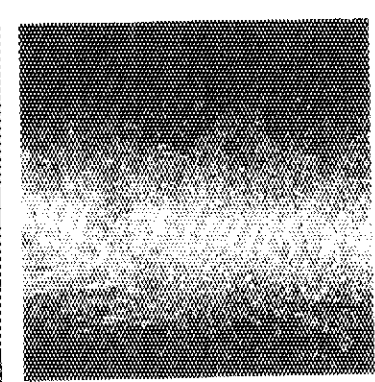
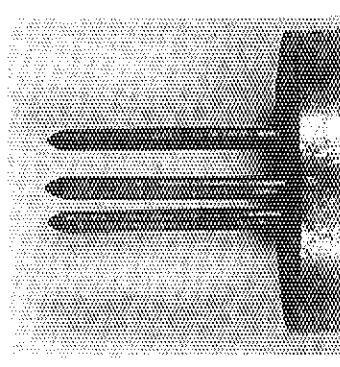
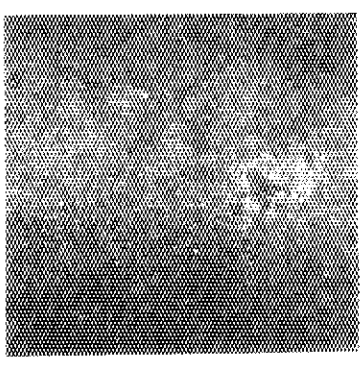
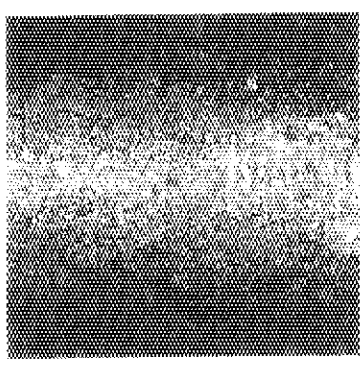
Coating Thickness (10^{-6} m)		Total dose (10^8 R)					
		10	30	50	75	100	
Ni Coating	3	Overall View					
		Detail View					
Au Coating	5	Overall View					
		Detail View					

Fig. 3.2.15 Surface view of contact pin irradiated in air

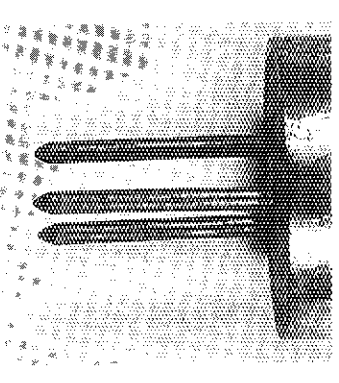
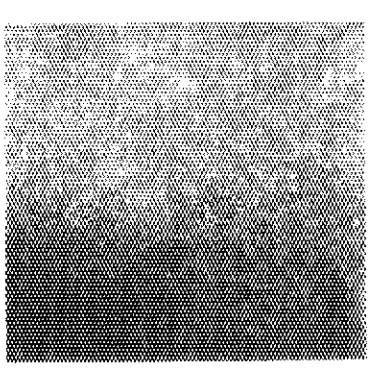
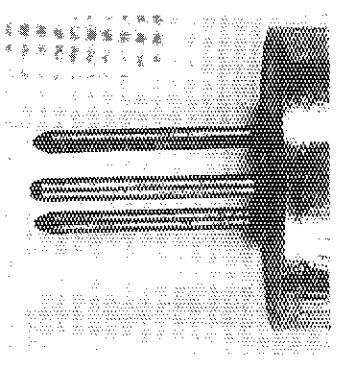
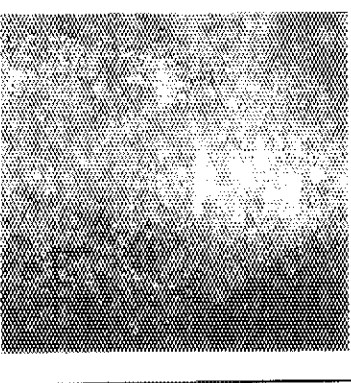
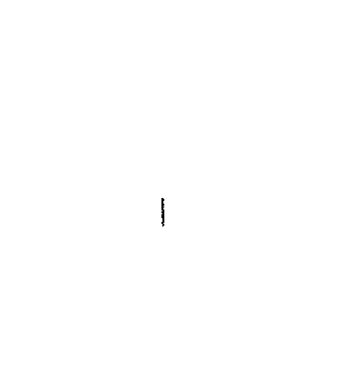
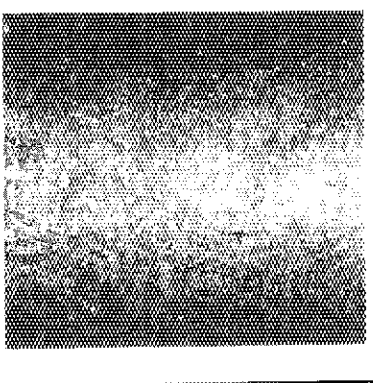
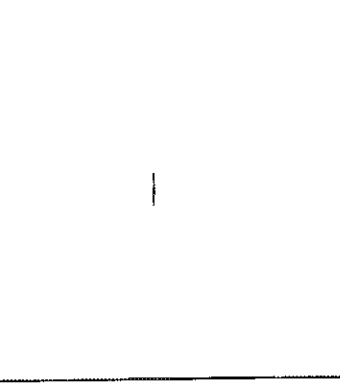
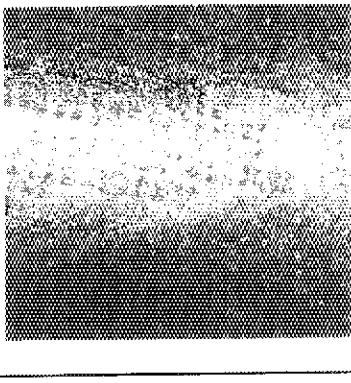
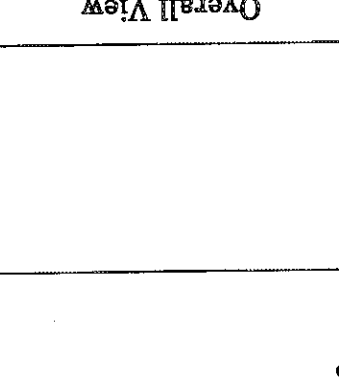
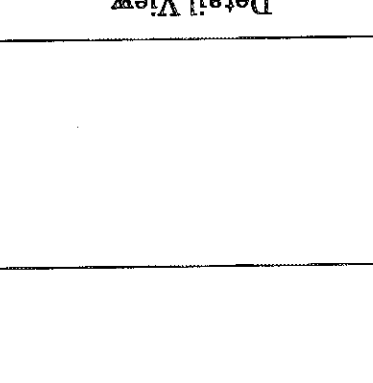
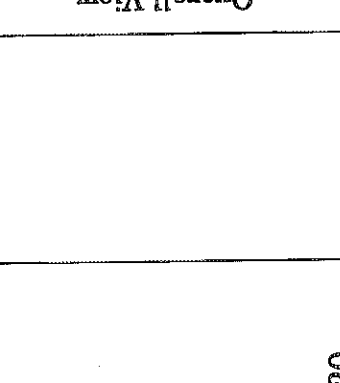
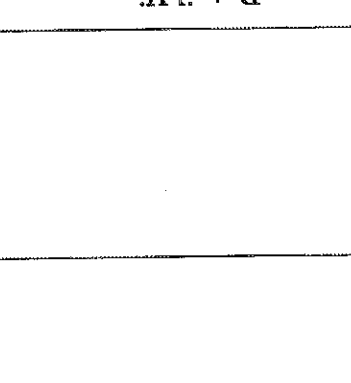
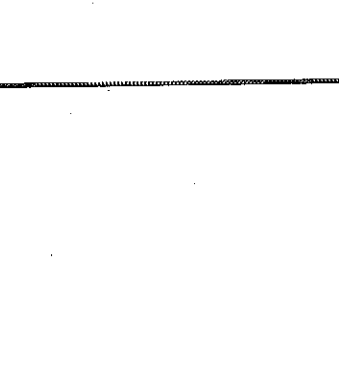
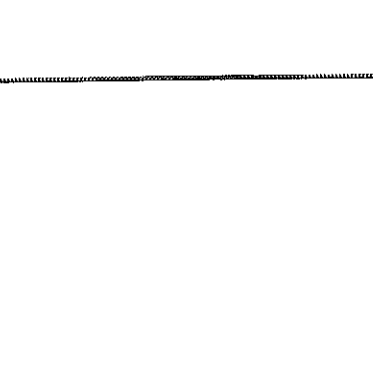
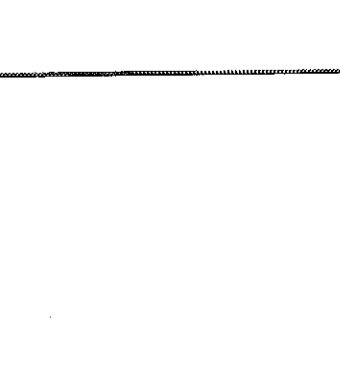
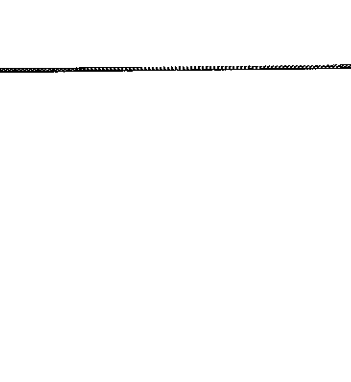
Coating Thickness (10^{-6} m)		Total dose (10^8 R)					
		10	30	50	75	100	
Ni Coating	Au Coating	10	Overall View				
			Detail View				
Ni Coating	Au Coating	20	Overall View				
			Detail View				

Fig. 3.2.16 Surface view of contact pin irradiated in air

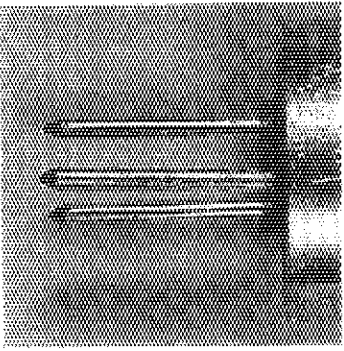
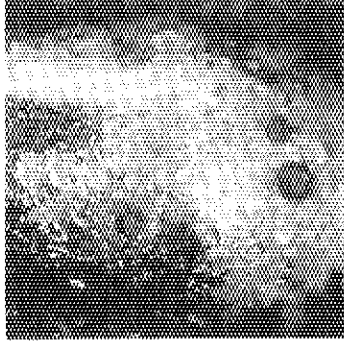
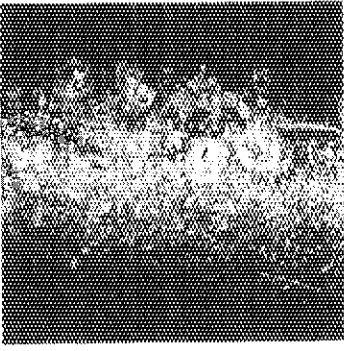
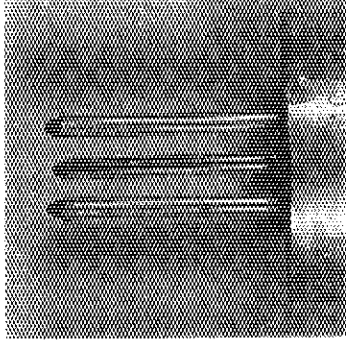

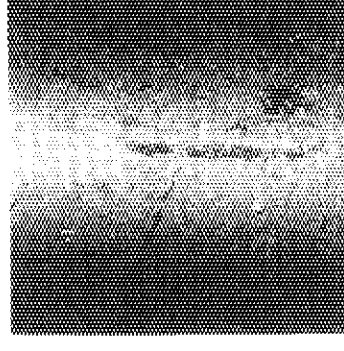
Coating Thickness (10^6 m)		Total dose (10^8 R)					
		10	30	50	75	100	
5	1.27	Overall View					
		Detail View					
5	3	Overall View					
		Detail View					

Fig. 3.2.17 Surface view of contact pin irradiated in air

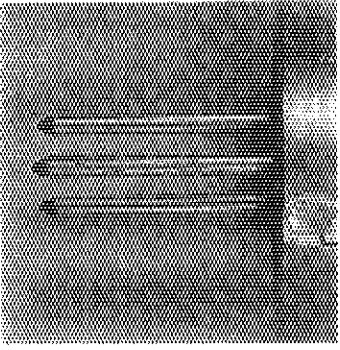

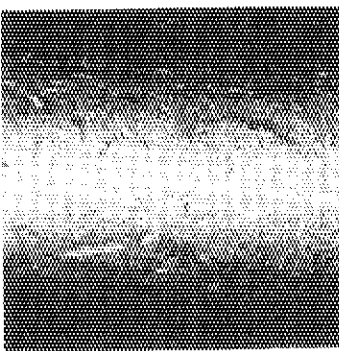
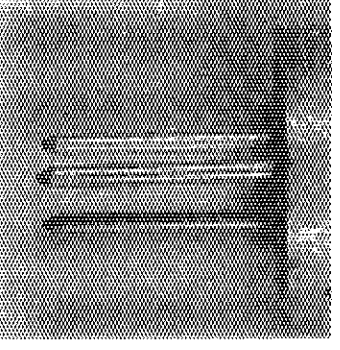

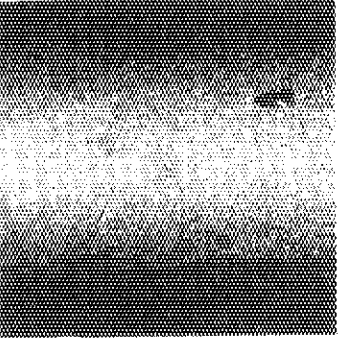
Coating Thickness (10^{-6} m)		Total dose (10^8 R)					
Ni Coating	Au Coating	10	30	50	75	100	
5	5	Overall View					
		Detail View					
5	10	Overall View					
		Detail View					

Fig. 3.2.18 Surface view of contact pin irradiated in air

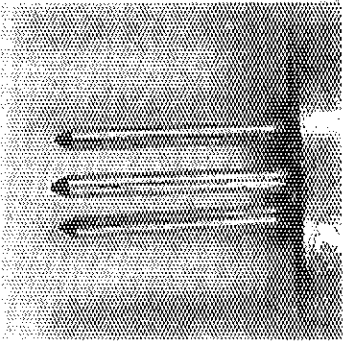




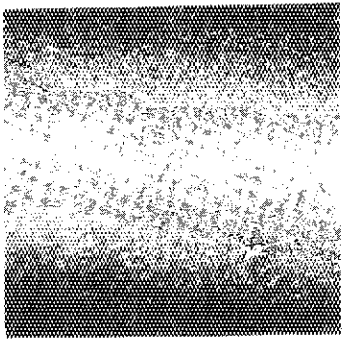
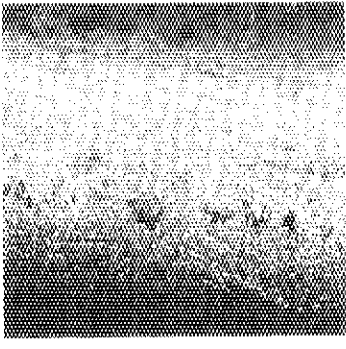



Coating Thickness (10^{-6} m)		Total dose (10^8 R)					
Ni Coating	Au Coating	10	30	50	75	100	
5	20	Overall View					
		Detail View					

Fig. 3.2.19 Surface view of contact pin irradiated in air

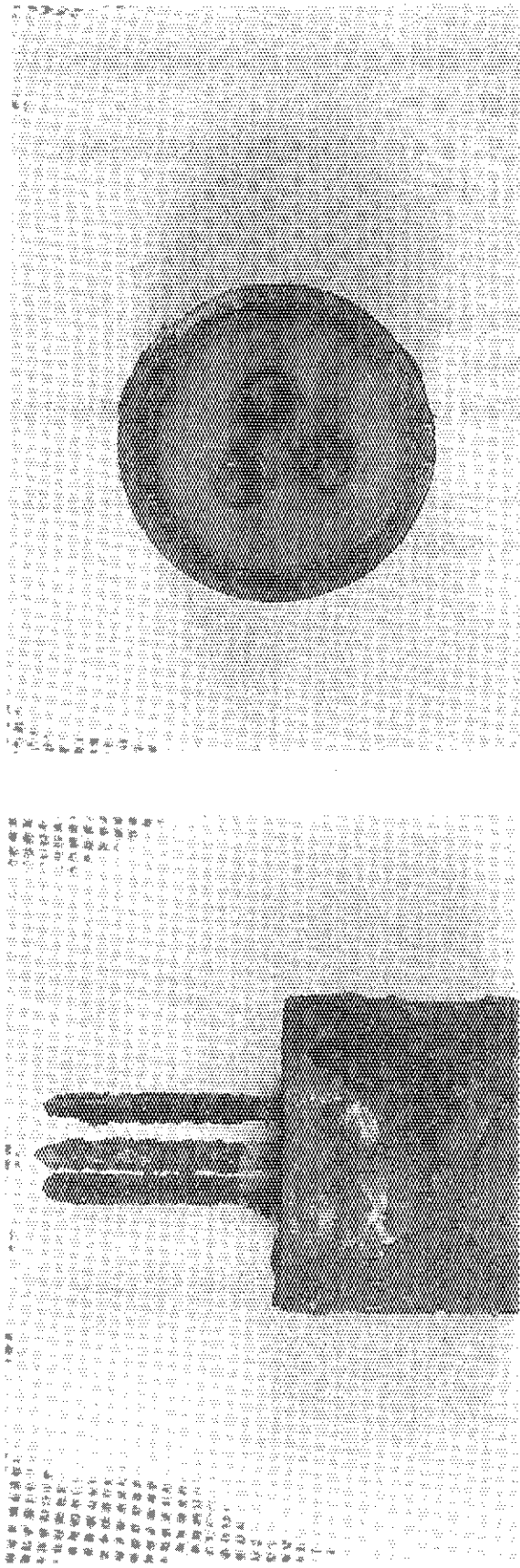


Fig. 3.3.1 Test piece irradiated in nitrogen gas

謝辞

本コネクタの試験にあたり、試験設備を借用させていただいた高崎研極限材料研究室及び東海研照射施設管理課の方々に深く感謝します。

また、本製作・試験を進めるにあたり、多くのご支援を頂いた太田充核融合工学部長、永島孝核融合工学部次長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] K. Obara, et. al.: Irradiation tests of critical components for remote handling system in gamma radiation environment, JAERI-Tech96-011, (1996)

謝辞

本コネクタの試験にあたり、試験設備を借用させていただいた高崎研極限材料研究室及び東海研照射施設管理課の方々に深く感謝します。

また、本製作・試験を進めるにあたり、多くのご支援を頂いた太田充核融合工学部長、永島孝核融合工学部次長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] K. Obara, et. al.: Irradiation tests of critical components for remote handling system in gamma radiation environment, JAERI-Tech96-011, (1996)