

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

01.11.30 [技術情報室]

ポンプ静圧軸受ハードフェイシング材の ナトリウム中連続摺動試験

1985年4月

株式会社 東 芝

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、核燃料サイクル開発機構の技術協力課より提供されたものであり、その複製、転載、引用等には事業団の承認が必要と見做されています。この資料の複製、転載、引用等には事業団の承認が必要と見做されています。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

配布限定

PNC-J201 85-12

1985年4月30日



ポンプ静圧軸受ハードフェイシング材の
ナトリウム中連続摺動試験*

小橋 一之**	紺谷健一郎***
富田 利芳**	田口 淳三***
石井 新一**	中崎 正好***
小川 新造**	松沢 秀貢***
猪鹿倉尋明**	

要 旨

本研究は、高速原型炉「もんじゅ」主冷却系循環ポンプに使用される静圧軸受の地震時の機能健全性を確認するため、ナトリウム中で静圧軸受ハードフェイシング材の摺動特性試験を行ったものである。

摺動試験は摺動表面に静圧軸受のハードフェイシング材であるコルモノイ #5 と #6 を肉盛した円板状の供試体をナトリウム中で摺動させ、ナトリウム温度、摺動部面圧、摺動速度をパラメータとした摺動特性評価を行った。

試験の結果、コルモノイの摺動特性は摩擦係数が 0.08～0.24 と良好であり、静圧軸受のハードフェイシング材としてコルモノイ #5、#6 の組合せは、地震時に想定される摺動条件でも十分に使用可能なことが確認された。

* 本報告書は、株式会社 東芝 が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

** 株式会社 東芝 原子力技術研究所

*** 株式会社 東芝 動力炉開発部

NOT FOR PUBLICATION

PNC-~~S~~J201 85-12

April 30, 1985



WEAR TEST OF HARDFACING MATERIAL FOR
HYDROSTATIC BEARING IN SODIUM *

Kazuyuki Kohashi** Kenichiro Kontani***
Toshiyoshi Tomita** Junzo Taguchi***
Shinichi Ishii** Masayoshi Nakazaki***
Shinzo Ogawa** Hidetugu Matuzawa***
Hiroaki Igakura**

ABSTRACT

This study is a part of the tests to prove the integrity of the Hydrostatic Bearing, which is used in the sodium pump for the Prototype Fast Breeder Reactor "Monju", under the simulated seismic condition.

We performed the wear test to investigate wear damage of hardfacing materials (Colmonoy #5 and #6) under the high sliding speed (2 ~ 22m/sec) and high contact pressure (4kg/mm²) in the high temperature sodium environment (400 and 500 °C).

The disk type test specimens which the hardfacing material was welded on were used. A pair of disks was mounted the wear testing machine and rubbing took place by rotating of the one

of the disks. After testing, macro and micro-scopic inspections were carried out.

The results were summarized as follows:

- (1) Friction coefficient of Colmonoy #5 and #6 is about 0.08 ~ 0.24.
- (2) Colmonoy #5 and #6 showed a stable wear throughout the sliding time.
- (3) Colmonoy #5 and #6 were available to be used as the hardfacing materials for Hydrostatic Bearing under the seismic condition.

* This report is result of the study that performed under the contract from the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

** Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation.

*** Advanced Reactor Engineering Dept., Toshiba Corporation.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要	2
2.1 試験装置本体	2
2.2 ナトリウムループの構成	3
3. 試験供試体	7
4. 試験の概要	11
4.1 試験条件	11
4.2 試験方法	15
5. 試験結果	18
5.1 外観観察	18
5.2 摺動トルクおよび試験体温度	18
5.3 試験後の材料検査	19
6. 考 察	101
6.1 高摺動速度下の摩擦係数	101
6.2 摺動面の摩耗状況	102
6.3 摺動面の温度上昇	103
6.4 摺動部材の亀裂発生原因	104
6.5 焼付き特性	105
7. 結 言	107
8. 謝 辞	117
9. 参 考 文 献	118

List of Figures (1)

Fig. 2. 1	Schematic of Wear Test Apparatus	5
Fig. 2. 2	Flow Sheet of Wear Test Loop	6
Fig. 3. 1	Rotor Side Specimen	8
Fig. 3. 2	Stator Side Specimen	9
Fig. 3. 3	Location of Thermocouple	10
Fig. 5. 1	Appearance of Specimen (400°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	24
Fig. 5. 2	Appearance of Specimen (400°C, 2m/s, 3.8kg/mm ² , 120s)	25
Fig. 5. 3	Appearance of Specimen (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	26
Fig. 5. 4	Appearance of Specimen (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm ² , 60s)	27
Fig. 5. 5	Appearance of Specimen (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 120s)	28
Fig. 5. 6	Appearance of Specimen (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	29
Fig. 5. 7	Appearance of Specimen (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	30
Fig. 5. 8	Appearance of Specimen (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm ² , 120s)	31

List of Figures (2)

Fig. 5. 9	Appearance of Specimen (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	32
Fig. 5.10	Appearance of Specimen (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	33
Fig. 5.11	Appearance of Specimen (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	34
Fig. 5.12	Appearance of Specimen (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	35
Fig. 5.13	Appearance of Specimen (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	36
Fig. 5.14	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	37
Fig. 5.15	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	38
Fig. 5.16	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	39
Fig. 5.17	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	40

List of Figures (3)

Fig. 5.18	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	41
Fig. 5.19	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	42
Fig. 5.20	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	43
Fig. 5.21	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	44
Fig. 5.22	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 2m/s, 3.8kg/mm ² , 120s)	45
Fig. 5.23	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm ² , 60s)	46
Fig. 5.24	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 120s)	47
Fig. 5.25	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	48

List of Figures (4)

Fig. 5.26	Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm ² , 120s)	49
Fig. 5.27	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	50
Fig. 5.28	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	51
Fig. 5.29	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	52
Fig. 5.30	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	53
Fig. 5.31	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	54
Fig. 5.32	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	55
Fig. 5.33	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	56

List of Figures (5)

Fig. 5.34	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	57
Fig. 5.35	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	58
Fig. 5.36	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	59
Fig. 5.37	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm ² , 120s)	60
Fig. 5.38	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm ² , 120s)	61
Fig. 5.39	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	62
Fig. 5.40	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	63
Fig. 5.41	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (500°C, 10m/4.1kg/mm ² , 240s)	64

List of Figures (6)

Fig. 5.42	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	65
Fig. 5.43	Cross Sectional Microstructure of Stator Side (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	66
Fig. 5.44	Cross Sectional Microstructure of Rotor Side (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	67
Fig. 5.45	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	68
Fig. 5.46	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 2m/s, 3.8kg/mm ² , 120s)	69
Fig. 5.47	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	70
Fig. 5.48	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side (400°C, 2m/s)	71
Fig. 5.49	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Staor Side (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm ² , 60s)	72

List of Figures (7)

Fig. 5.50	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 120s)	73
Fig. 5.51	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	74
Fig. 5.52	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side (400°C, 10m/s)	75
Fig. 5.53	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	76
Fig. 5.54	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm ² , 120s)	77
Fig. 5.55	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	78
Fig. 5.56	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side (400°C, 22m/s)	79
Fig. 5.57	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	80

List of Figures (8)

Fig. 5.58	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	81
Fig. 5.59	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	82
Fig. 5.60	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	83
Fig. 5.61	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	84
Fig. 5.62	Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side (500°C, 240s)	85
Fig. 5.63	Roughness of Sliding Surface (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	86
Fig. 5.64	Roughness of Sliding Surface (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	87
Fig. 5.65	Roughness of Sliding Surface (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	88
Fig. 5.66	Roughness of Sliding Surface (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	89

List of Figures (9)

Fig. 5.67	Roughness of Sliding Surface (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	90
Fig. 5.68	Roughness of Sliding Surface (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	91
Fig. 5.69	Roughness of Sliding Surface (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	92
Fig. 5.70	Microhardness of Stator and Rotor Side (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm ² , 240s)	93
Fig. 5.71	Microhardness of Stator and Rotor Side (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	94
Fig. 5.72	Microhardness of Stator and Rotor Side (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	95
Fig. 5.73	Microhardness of Stator and Rotor Side (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm ² , 240s)	96
Fig. 5.74	Microhardness of Stator and Rotor Side (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	97
Fig. 5.75	Microhardness of Stator and Rotor Side (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	98

List of Figures (10)

Fig. 5.76	Microhardness of Stator and Rotor Side (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	99
Fig. 5.77	Microhardness of Stator Side (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 240s)	100
Fig. 6. 1	Friction Coefficient versus Sliding Speed	108
Fig. 6. 2	Friction Coefficient of Colmonoy Alloys in Sodium	109
Fig. 6. 3	Sliding Speed Dependency of Wear	109
Fig. 6. 4	Friction Coefficient versus Specimen Temperature	110
Fig. 6. 5	Cross Sectional Microstructure	111
Fig. 6. 6	Cross Sectional Microstructure (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm ² , 60s)	112
Fig. 6. 7	Cross Sectional Microstructure (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm ² , 60s)	113
Fig. 6. 8	Scanning Electromicrograph of Fracture Surface (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	114
Fig. 6. 9	Appearance of Specimen (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm ² , 60s)	115

List of Figures (11)

Fig. 6.10 Scanning Electromicrograph of
Sliding Surface
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s) 116

1. 緒 言

高速原型炉「もんじゅ」の主循環ポンプはナトリウム中軸受に静圧軸受を使用している。静圧軸受は通常運転時に負荷される荷重に対しては十分な負荷容量を持っているが、高速原型炉で想定されている最大地震（ S_2 ）に対しては、静圧軸受の静圧力による反発力を越え、回転軸と軸受部の金属接触を生ずることが予想される。

しかし、最大地震時においても主循環ポンプの機能維持が要求されるため、金属接触が生じても機能喪失とならないことを確認する必要がある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

地震時の金属接触による軸受損傷モードとして、衝撃荷重による破損、および摩擦熱による焼付きなどが考えられる。

本試験は、主循環ポンプの静圧軸受ハードフェイシング材であるコルモノイ # 5, # 6 の組合せについてナトリウム中での摺動特性の評価を目的とし、摺動表面にコルモノイ # 5, # 6 を肉盛りした円板状の試験体を用いて、ナトリウム温度、摺動面圧、摺動速度をパラメータとした摺動特性試験を実施した。

2. 試験装置の概要

2.1 試験装置本体

(1) 試験装置本体の構成

本装置は、ナトリウム中にてハードフェイシングした試験供試体を高速回転撓動させることができる構造とした。Fig. 2.1に試験装置本体構造図を示す。

試験装置本体は、構造全体を試験容器の上部フランジ上に支持する台板、台板下側に固定されたバッフルカバーおよび固定側試験体を取り付けるボトムカバー、台板を貫通し下端の回転側試験体を取付けた主軸、および主軸を支持する3個の軸受等から構成される。

主軸はサイリスタ制御の駆動電動機によってタイミングベルトを介して回転される。

装置本体の主軸頂部は、トルクメータを設置し、回転撓動時のトルクおよび回転数を計測できる構造とした。

また、中間部軸受は、軸方向に滑動できる構造とし、油圧シリンダーで主軸を押し上げることにより、試験供試体に荷重を負荷できる構造となっている。

油圧シリンダー上部には、ロードセルを設置し、油圧シリンダーの反力を利用することによって試験供試体の撓動時の荷重を常時測定できるようにした。

Specification of Test Apparatus

Revolution	300 ~ 3000 rpm
Power	100 kw
Torque	32.4 kgf-m
Load	40 (Dead Load) ~ 3000 kgf
Design Temp.	5000 °C
Design Pressure	2 kgf/cm ² G
Material	SUS 304

2.2 ナトリウムループの構成

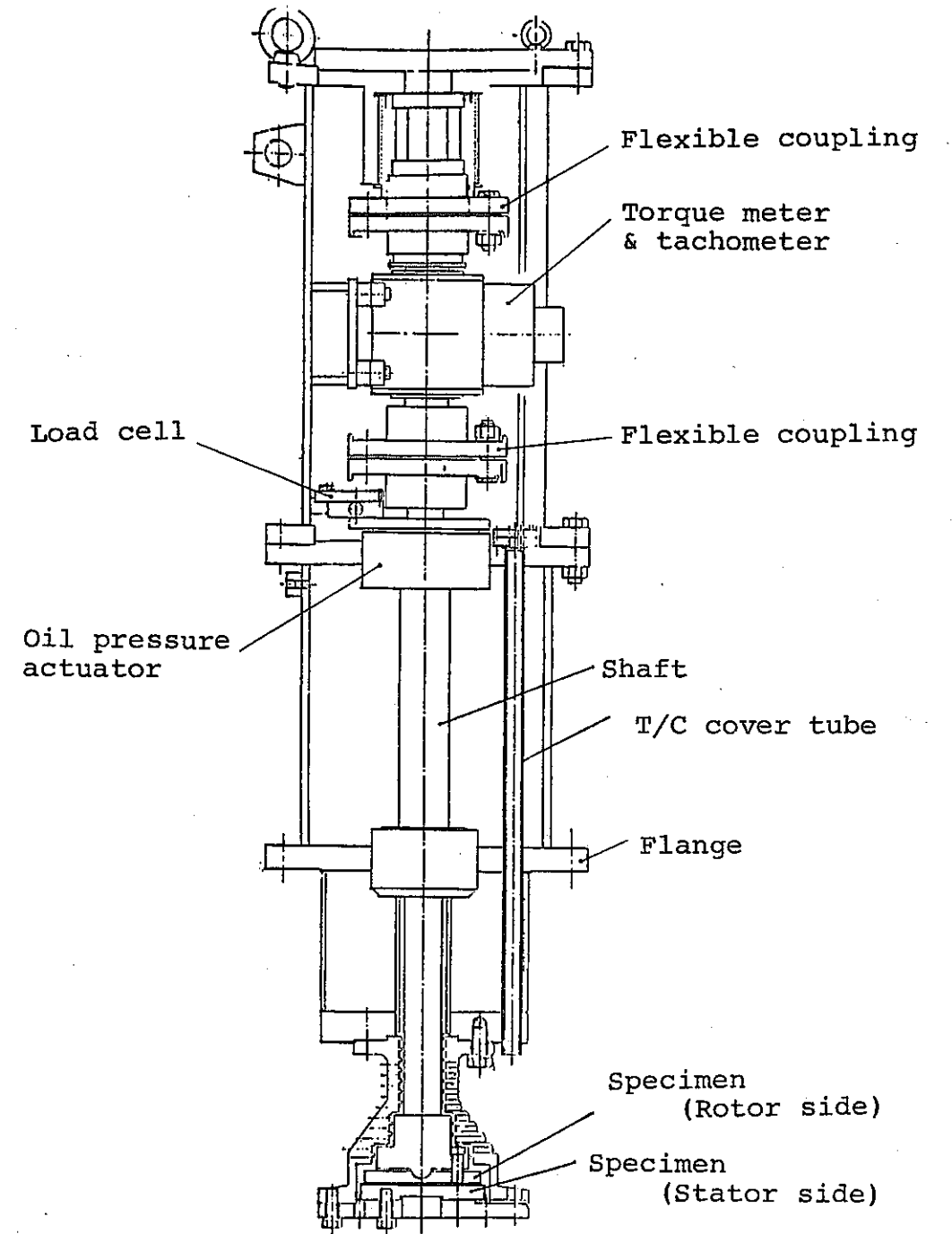
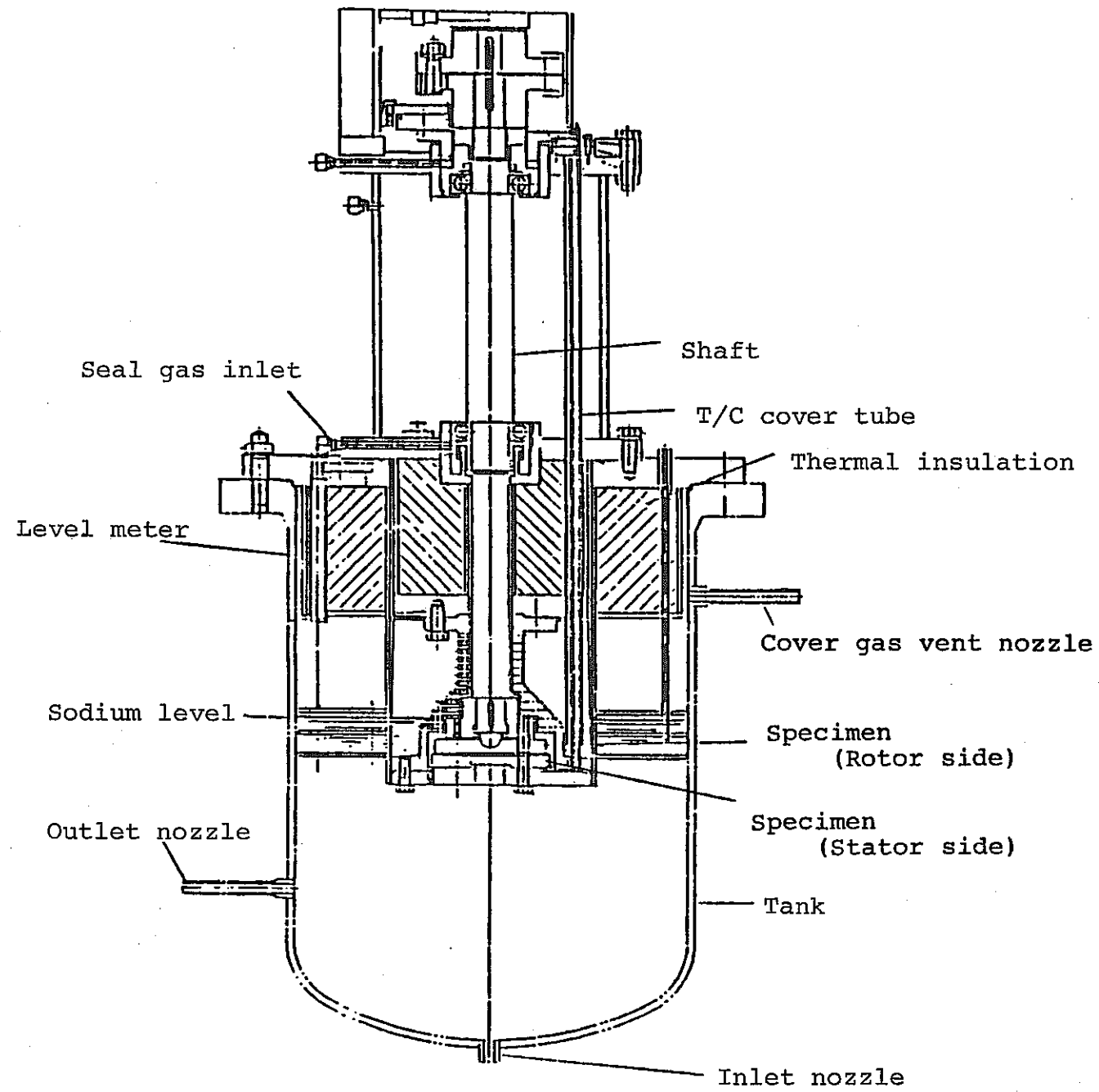
試験用ナトリウムループのフローシートを Fig. 2.2に示す。

ナトリウムループは，2.1項で述べた装置を設置する試験タンク，ナトリウムの純度管理を行うコールドトラップ，強制循環用電磁ポンプ，電磁流量計，ベーパートラップ，弁等から構成されている。

主要機器設備の基本仕様を Table 2.1に示す。

Table 2.1 Wear Test Loop Specification

Note	Component	Type of Component	Number of Component	Dimension	Design Condition		Specification
					Temp.	Press.	
TT	Test Tank	Flange Type	1	624 ϕ ×850 ℓ ×12t	600°C	2.5kg/cm ²	Na : ~130 ℓ Material : SUS304
EMP	Electromagnetic Pump	Helical Induction	1	8.91 ϕ ×811 ℓ ×3t	550°C	7.0kg/cm ²	Flow Rate : 50 ℓ min Head : 2.5kg/cm ²
EFM	Electromagnetic Flow Meter	Permanent Magnetic	1	1/2 B	-	-	Measuring Range : 0 ~ 2 ℓ min
CT	Cold Trap	Forcedly Air Cooled	1	216.3 ϕ ×600 ℓ ×6.5t	500°C	5.0kg/cm ²	Min. Temp. : 120°C Material : SUS304
HX	Heat Exchanger	Double Pipe	1	34 ϕ ×1200 ℓ ×3.4t	550°C	10kg/cm ²	Inlet Temp. : 200 ~ 450°C Outlet Temp. : $\Delta T \leq 50^\circ\text{C}$
VT	Vapor Trap	Naturally Air Cooled	1	89.1 ϕ ×675 ℓ ×4t	100°C	2.5kg/cm ²	
V	Sodium Valve	Y Type Groove	4	1/2 B, 1B	600°C	15kg/cm ²	



Detail of Wear Test Apparatus

Fig. 2.1 Schematic of Wear Test Apparatus

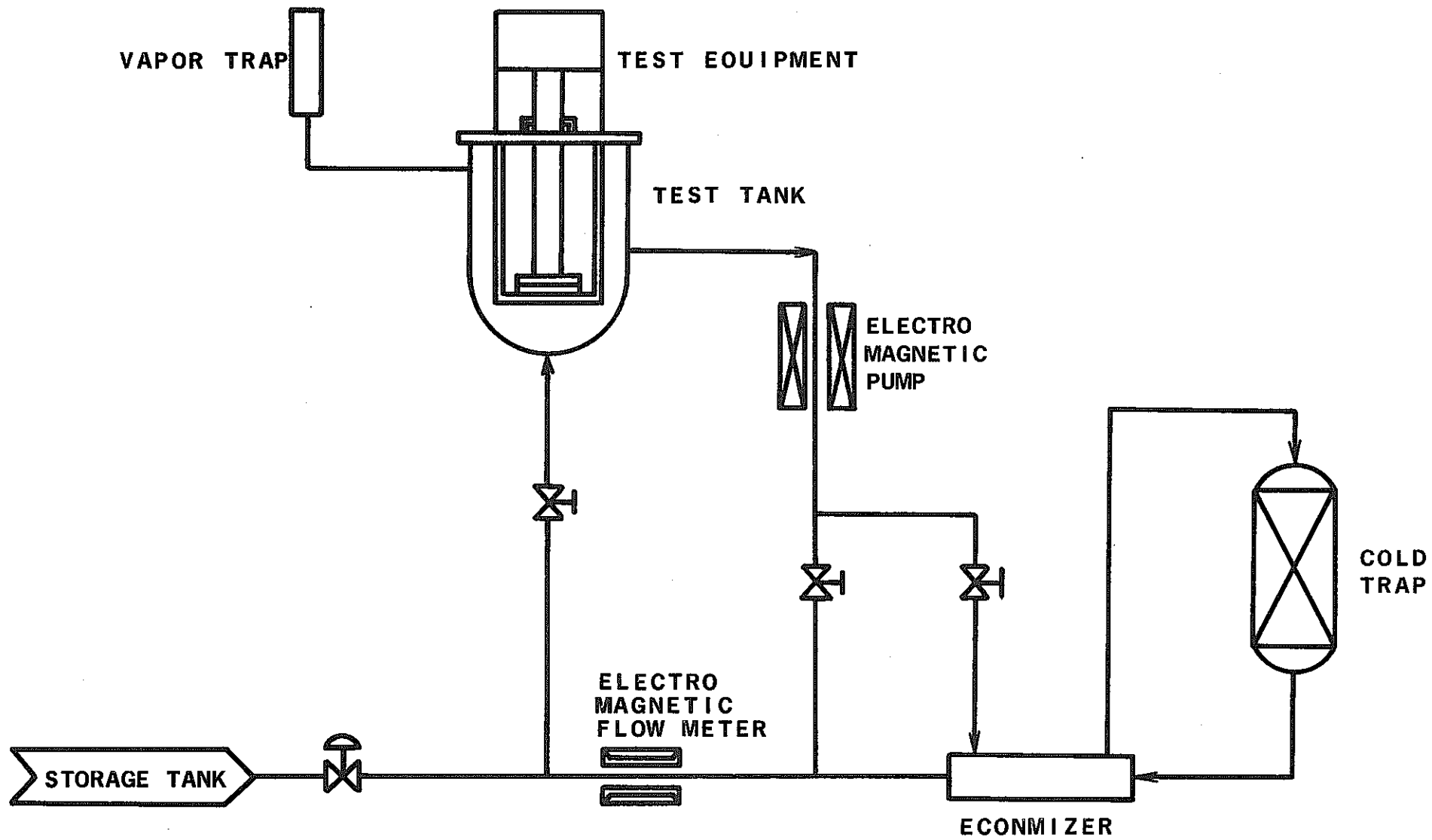
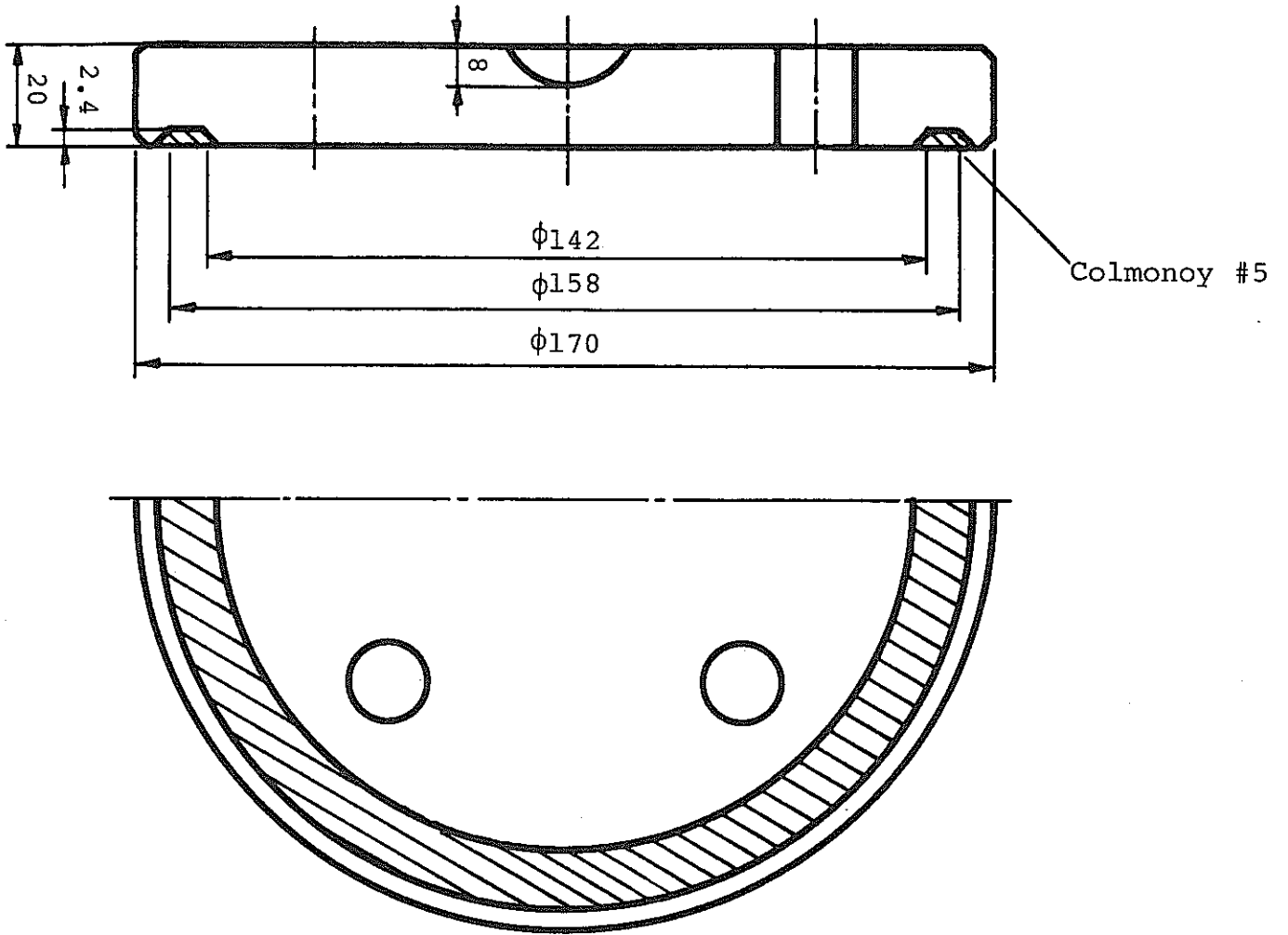


Fig. 2.2 Flow Sheet of Wear Test Loop

3. 試験供試体

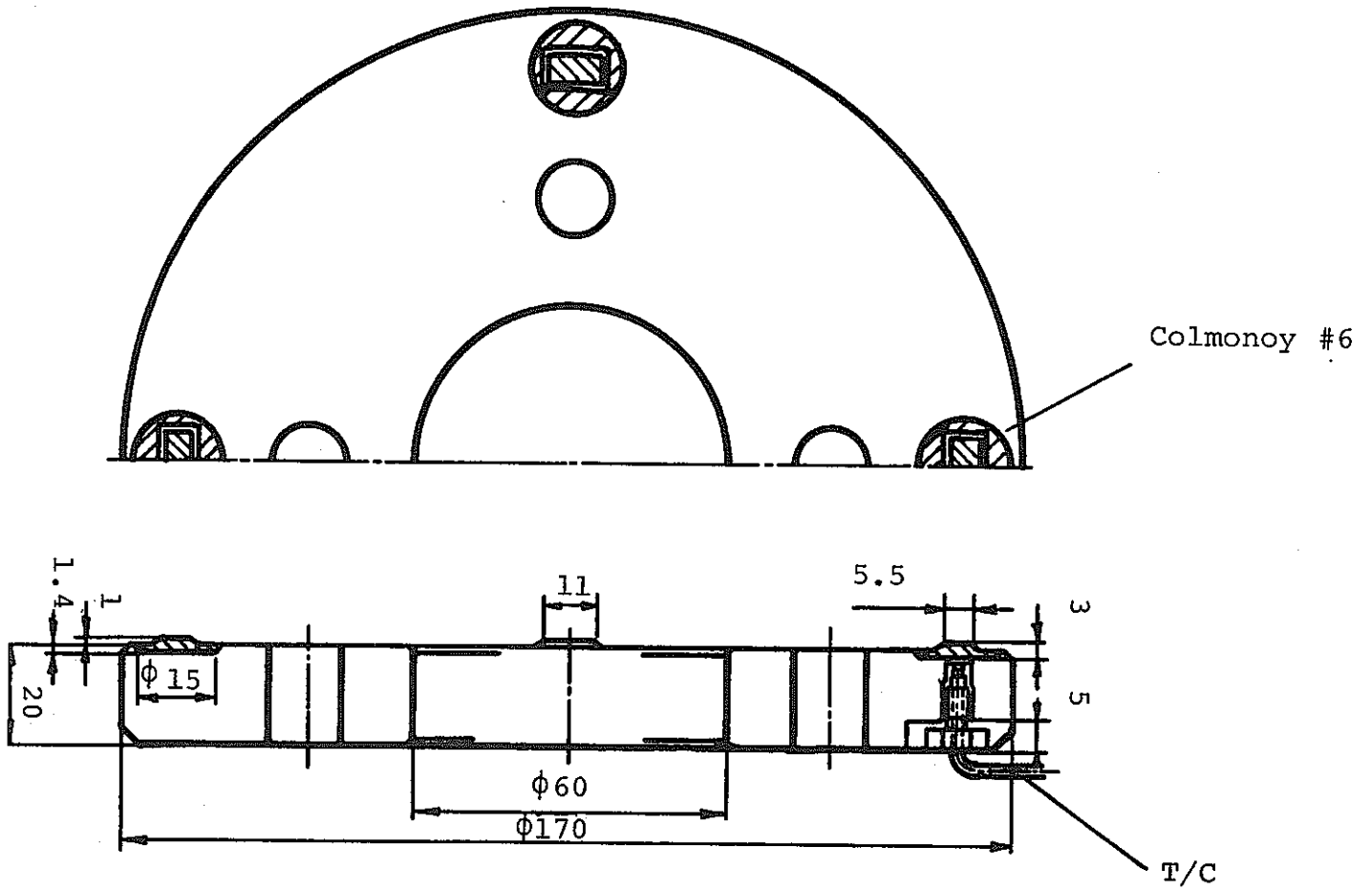
本試験は、ポンプの静圧軸受部ハードフェイシング材であるコルモノイ # 5, およびコルモノイ # 6 の組合せについてナトリウム中における摺動特性の基礎データを収集することが目的であり、試験体は下記項目を考慮して製作した。

- (1) 試験体は、Fig. 3.1, 3.2に示すように円板状の固定側および回転側供試体より構成される。
- (2) 摺動速度は、地震時実機ポンプで想定される最大周速度 (23.5 m/sec) で試験できるように摺動部平均直径 150 mm とする。
- (3) 摺動面圧は、地震時実機ポンプで想定される最大面圧 (4 kg/mm^2) を、2項に示す試験装置本体と組合せて負荷することができるよう、固定側試験体の摺動部の総接触面積を 250 mm^2 とする。
- (4) 実機と同様、回転側試験体には、コルモノイ # 5, 固定側試験体にはコルモノイ # 6 を肉盛りする。
なお、肉盛り部表面あらさは、実機ポンプの設計値を満足する仕上げとし、3S仕上げとする。
- (5) 固定側試験体の摺動部近傍には、摺動時の温度上昇を計測する目的で熱電対 (3本 / 1体) を着装する。熱電対取付構造を Fig. 3.3に示す。



Material: SUS 304 + COLMONOY #5

Fig. 3.1 Rotor Side Specimen



Material: SUS 304 + COLMONOY #6

Fig. 3.2 Stator Side Specimen

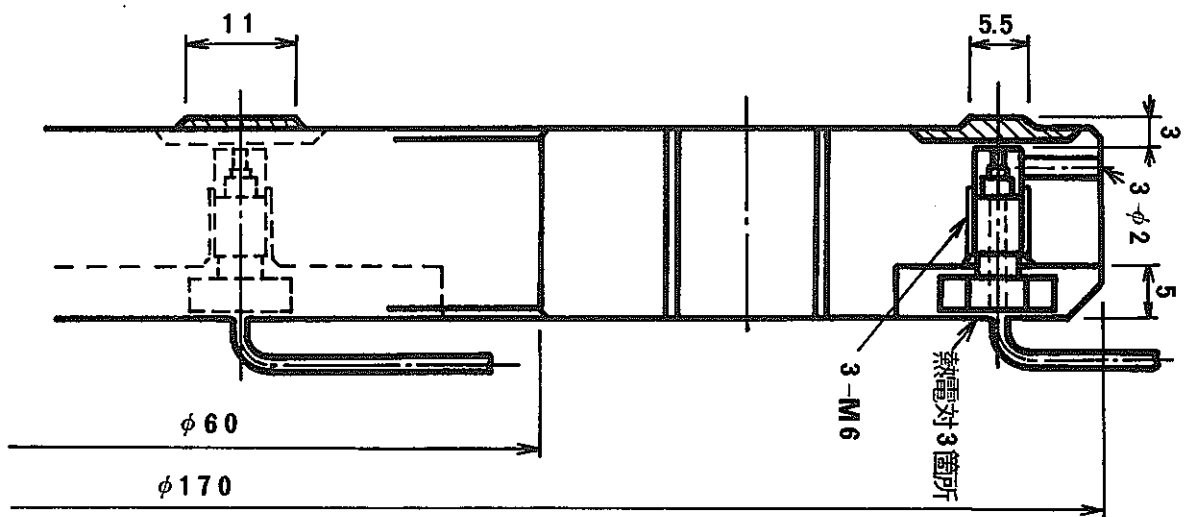
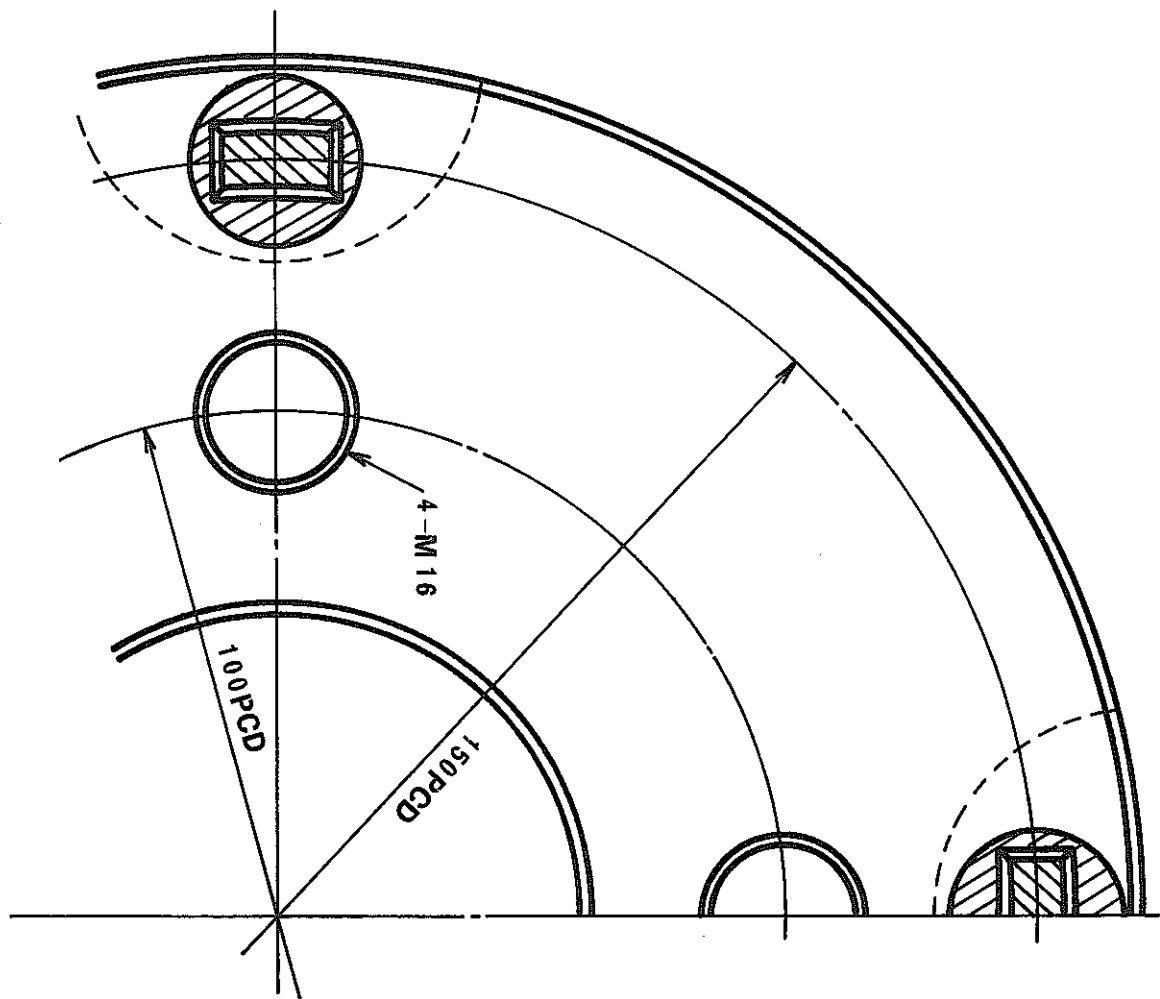


Fig. 3.3 Location of Thermocouple

4. 試験の概要

4.1 試験条件

(1) 試験条件の設定方針

試験条件を設定するに当たっては、下記事項に着目して決めた。

イ) 摺動速度および面圧は、実機の耐震解析をベースとして、実機ポンプ軸で想定される最大面圧、摺動速度を包絡するよう設定する。

ロ) 実機ポンプでの摺動条件は、地震応答による軸受の衝突摺動であり、極めて短時間間隔の摺動であるが、本試験では最も苛酷な摺動条件を地震継続時間加える試験とする。

ハ) ナトリウムの雰囲気温度条件は1次ポンプおよび2次ポンプの運転温度以上とする。

ニ) ナトリウム中の不純物濃度条件を合わせるため、コールドトラップ出口温度条件を140℃に設定する。

(2) 耐震解析結果からの軸受衝突荷重条件

地震時の静圧軸受部での衝突挙動に関し、軸受を非線形（区分的線形）バネモデルで解析した結果を以下に示す⁽³⁾。

	Pump Revolution (%)	Sliding Speed V(m/sec)	Maximum Impact Load *2) (Fmax) Base		
			Maximum Impact Load Fmax (ton)	Maximum Contact Pressure *3) Pmax at Fmax (kg/mm ²)	Mean Contact Pressure *3) Pmean at Fmax (kg/mm ²)
Primary Pump *1)	100	21.9	35.3	3.60	2.83
	80	17.5	29.9	3.31	2.60
	40	8.8	25.4	3.05	2.40
	10	2.2	27.3	3.16	2.48
Secondary Pump	100	23.3	-	-	-
	70	16.3	-	-	-
	60	14.0	0.468	0.605	0.48
	40	9.4	2.01	1.25	0.98
	26.7	6.3	3.79	1.72	1.35
	13.6	3.2	4.46	1.87	1.47

* 1) 一次主循環ポンプ 静圧軸受 Na 中耐震試験用供試体形状寸法決定根拠

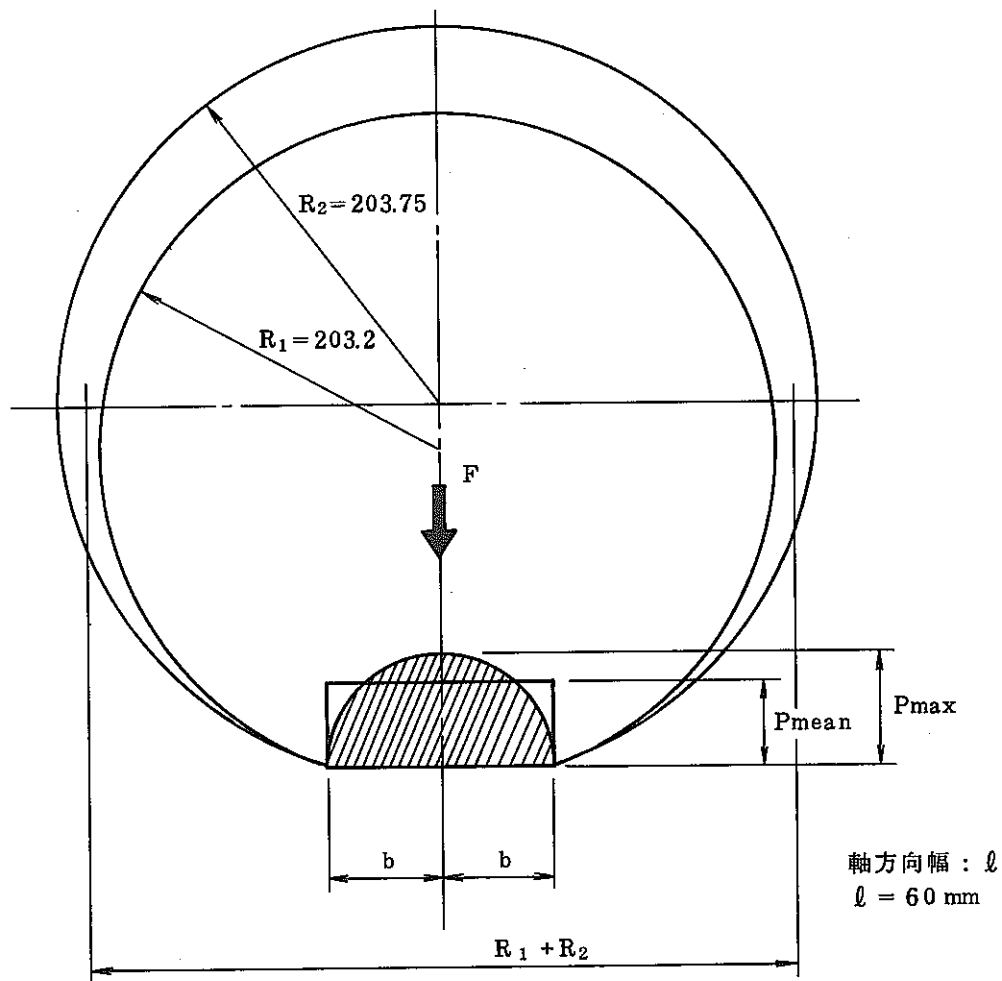
説明書 (S57-10-14 於 PNC 殿打合せ資料)

* 2) 地震時, ポンプ軸受部での最大衝突荷重を示す。

* 3) 最大接触圧力および平均接触圧力は下記の通りとする。

$$\nu_1 = \nu_2 = 0.3$$

$$E_1 = E_2 = 2.02 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$$



弾性接触における接触圧力, 面積は Hertz の式より算定する。
半径 R_1, R_2 , 軸方向長さ l の内外円筒が垂直荷重 F を受ける場合,
接触幅 b は,

$$b = \sqrt{\frac{4(R_1 + R_2) \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1} \cdot \frac{F}{l}}$$

ここで2つの円筒のヤング率を E_1, E_2 , poisson 比を ν_1, ν_2 とすると

$$k = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad k = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad \text{で表される。}$$

接触圧力分布は, P_{\max} を最大とする半楕円分布となり下記の通りとなる。

$$P_{\max} = \frac{2F}{\pi b \ell} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \sqrt{\frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2}} \cdot \sqrt{\frac{F}{\ell}}$$

また, 平均接触圧力 P_{mean} は次式で表わされる。

$$P_{\text{mean}} = \frac{\pi}{4} P_{\max} = \frac{1}{4\sqrt{R_1 + R_2}} \sqrt{\frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2}} \cdot \sqrt{\frac{F}{\ell}}$$

(8) 試験条件

試験条件は(2)項の耐震解析の結果，1次ポンプが2次ポンプに比べ苛酷な条件となるため，1次ポンプの解析結果をベースに決定した。摺動速度は最大および最小周速に対応する22,2 m/sとその中間の10 m/sとし，面圧は最大接触圧力より，わずかに大きい4 kg/mm²とした。摺動時間は，解析ではS₂地震継続時間を55秒としているが，安全裕度を考慮し，最大240秒とした。

また，試験温度については1次および2次ポンプの運転温度は，それぞれ397℃，325℃であるが，より厳しい試験とするため，400および500℃とした。

試験条件を下記に示す。

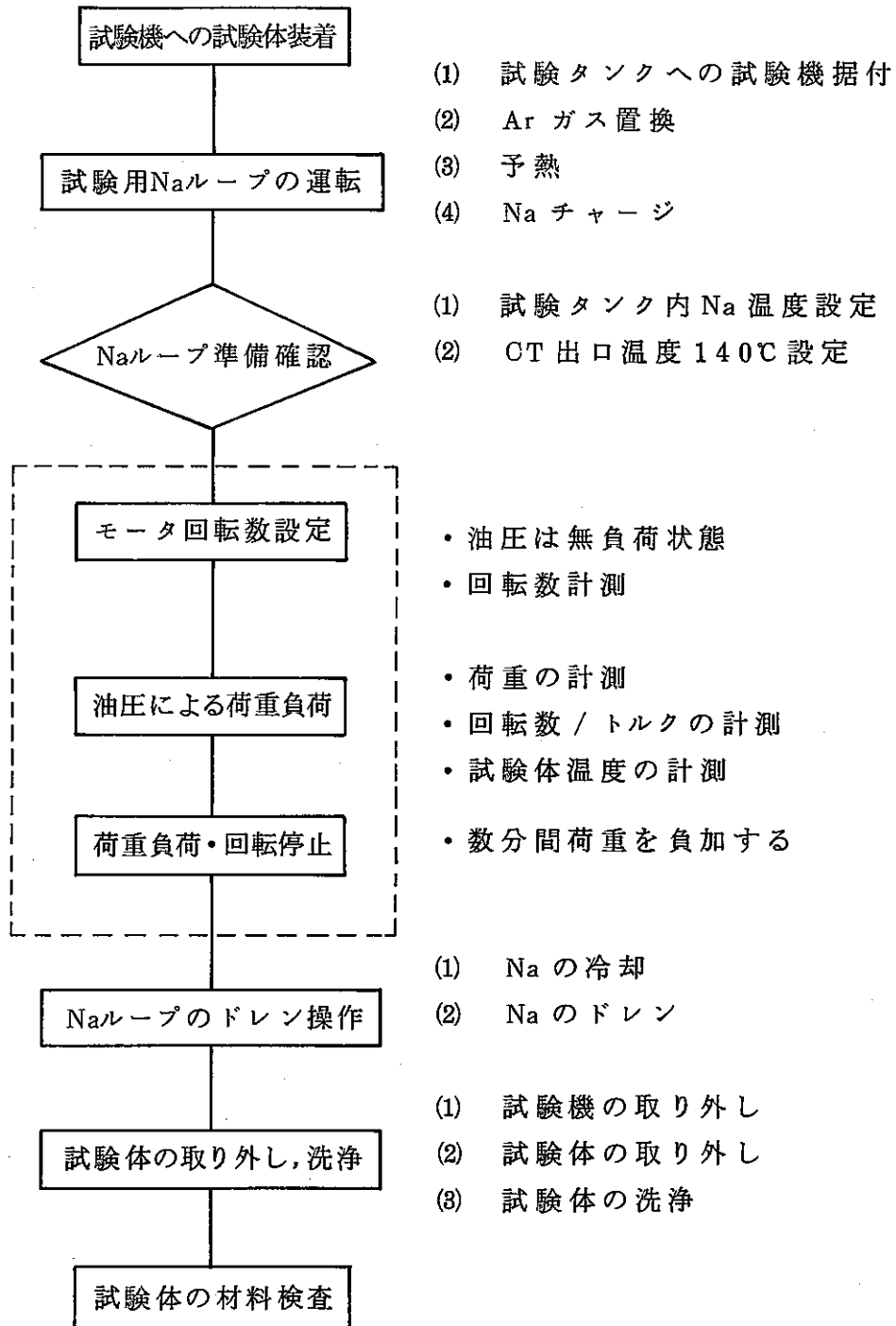
Test Case	Na Temp. *1) (°C)	Sliding Speed V(m/sec)	Load P (kg/mm ²)	Sliding Time (sec)
I-1	400	2	4	60
I-2			4	120
I-3			4	240
II-1	400	10	4	60
II-2			4	120
II-3			4	240
III-1	400	22	4	60
III-2			4	120
III-3			4	240
IV-1	500	2	4	240
IV-2		10	4	240
IV-3		22	4	240
V-1	400	22	1	240

*1) Temperature measurement of specimen

4.2 試験方法

(1) 試験要領

試験要領の概要をフローチャートダイアグラムで下記に示す。



(2) 計測項目

試験計測項目を以下に示す。

	計測項目	計測方法	計測点数	記録の有無	備考
Na ル イ ブ	試験タンク内 Na 温度	タンク内挿 T / C による	1	○	
	試験タンク内 Na 液位	タンク内挿 液面計による	3	—	
	CT 出口温度	CT 出口 T / C による	1	○	
試 験 機 供 試 体	試験機回転数	回 転 計	1	○	デジタル 表示もあり
	摺動トルク	トルク計	1	○	デジタル 表示もあり
	荷 重	荷 重 計	1	○	
	油 圧 圧 力	圧 力 計	1	—	
	試験体 摺動部温度	固定側試験体に設置 した T / C による	3	○	

(3) 試験体の材料検査

試験後，試験体を洗浄し，下記に示す材料検査を行い，摺動面の損傷等を調査する。

No.	検査項目	検査要領	備考
1	外観検査	試験体の表面を目視（写真撮影）検査を行い，損傷状況を調査する。	試験前後の比較
2	金相試験	光学顕微鏡により肉盛部断面を×100，×400の組織観察を行う。観察箇所は，摺動面中心部の表面近傍と肉盛部中心とする。	
3	走査型電子顕微鏡による表面観察	摺動面の摺動状況を×500で観察する。観察箇所は，摺動面中心および両端部とする。	
4	マイクロビッカース硬さ測定	肉盛部断面について，断面中心を表面より，0.05mm，0.1mm，0.15mm，0.2mm以下0.1mm毎に深さ1mmまで，硬さ測定を行う。	
5	表面あらさ測定	摺動面の表面あらさ状況を測定する。測定箇所は1カ所 / 1体で，摺動方向に対し，直角方向へ測定する。	

5. 試験結果

5.1 外観観察

Fig. 5.1～5.10に試験温度400℃， Fig. 5.11～5.13に試験温度500℃の試験前および試験後の試験体を示す。

試験温度400および500℃のいずれの温度においても各試験体の摺動面には摩耗痕や微小な亀裂は認められるが，焼付きを示すような痕跡は認められない。Fig. 5.1～5.3に示す試験温度400℃，摺動速度2 m/sにおいては摩耗は非常に軽微であるが他の試験条件においては，摩耗は激しく，摩耗粉の付着も認められる。摩耗粉の付着は実摺動距離の長い高摺動速度の方が，また試験温度の高い方が多くなっている。

試験温度や面圧に関しても同様であり，試験温度や面圧の大きい方が摩耗は激しくなっている。

Fig. 5.4～5.10，5.12，5.13に示すように摺動速度10および22 m/sにおいては固定側試験体に微小な亀裂が認められる。しかし，2 m/sでは400および500℃のいずれの温度においても亀裂は認められない。亀裂の有無をTable 5.1に示す。

この亀裂は回転側試験体には認められない。

5.2 摺動トルクおよび試験体温度

Fig. 5.14～5.20に試験温度400および500℃，摺動時間240秒の摺動トルク，回転数，荷重および試験体温度の時間的推移を示す。

摺動トルクの時間的推移は徐々に減少するもの，ほぼ一定な値を示すものあるいは漸増するものなど種々の傾向がみられる。しかし，焼付きの開始を示すような急激なトルク上昇は認められない。Fig. 5.14～5.16に示す試験温度400℃の摺動トルクは低摺動速度の2 m/sのとき，変動のない滑らかな曲線になっているのに対し，高速の10および22 m/sでは小刻な変動が生じている。小刻なトルク変動は摩耗粉の破断や再移着に対応していると考えられ，文献⁽⁵⁾等でも報告されている。

Fig. 5.15, 5.16, 5.19, 5.20に示す試験温度400および500℃の摺動トルクはA点を境にして摺動の前半と後半でわずかに異なっている。

22 m/sでは400および500℃のいずれの温度においても変動幅は後半の方が小さくなっており、10 m/sでは変動幅は変わっていないが、変動周期が大きくなっている。摩耗状態は摺動時間とともに変わること示している。摺動初期では摺動面のなじみが悪く、摺動が進むに従ってなじみがよくなり、安定した摩耗に移行するものと思われる。

Fig. 5.18に示す試験温度500℃、摺動速度2 m/sの摺動トルクは他の試験条件に比べ大きく、変動幅も大きくなっており、摩耗の激しいことが予想される。

面圧についてみると、摺動トルクは試験温度400℃の Fig. 5.16の面圧4.1kg/mm²と Fig. 5.17の1.1kg/mm²とは異なっており、面圧の低い方が変動幅は小さく摩耗が軽微であることを示している。

また、試験体温度の時間的推移の状況は摺動トルクの時間的推移と対応しており、摩耗粉の破断や再移着による小刻な温度変動が現われている。

Fig. 5.21～5.26に試験温度400℃、摺動時間60および120秒の摺動トルク、回転数および試験体温度の時間的推移を示す。

摺動トルクおよび試験体温度の変化は摺動時間240秒における60および120秒後の時間経過とほぼ同じ傾向を示している。

5.3 試験後の材料検査

(1) 摺動断面観察

Fig. 5.27～5.38に試験温度400℃、Fig. 5.39～5.44に500℃の試験後の固定側および回転側試験体の断面組織を示す。観察位置は摺動中央の表面近傍と肉盛部中央である。

組織的には固定側も回転側も溶着金属に特有なデンドライト組織であり⁽⁶⁾、わずかに介在物が認められた。介在物はX線分析の結果、母相と同様Ni, Fe, Cr, Siより成っているが、CrおよびSiがより多く検

出された。

Fig. 5.31, 5.35に示す試験温度400℃, 摺動速度22 m/sの固定側試験体の摺動面には厚さ10~15 μ の摩耗粉が付着していると思われる層が認められ, また, Fig. 5.29, 5.30の試験温度400℃, 摺動速度10 m/s, Fig. 5.31, 5.34, 5.35, 5.37の試験温度400℃, 摺動速度22 m/s, Fig. 5.41の試験温度500℃, 摺動速度10 m/s, Fig. 5.43の試験温度500℃, 摺動速度22 m/sの固定側および回転側試験体には厚いところで25 μ 程度の摩擦熱や塑性流動の影響を受けたと思われる層が認められる。

Fig. 5.31, 5.35, 5.37は試験温度400℃, 摺動速度22 m/sで摺動時間がそれぞれ60, 120, 240秒と異なる固定側試験体であるが, いずれも摺動時間に対する定性的な傾向は認められない。

回転側試験体には摩耗粉の付着は認められない。

Fig. 5.31, 5.33, 5.37の400℃, 22 m/sの固定側および Fig. 5.30の400℃, 10 m/s, Fig. 5.32, 5.34の400℃, 22 m/s, Fig. 5.40の500℃, 2 m/s, Fig. 5.42の500℃, 10 m/sの回転側試験体に微小な亀裂が認められる。回転側の亀裂は外観観察では認められていない。固定側で生じた亀裂は肉盛部を貫通しているものもあるが, 回転側試験では表面近傍で停止し, 深さは高々100 μ 程度である。

亀裂が固定側試験体に多く発生しているが, これは素材に起因するものではなく, 試験体の構造(固定側試験体は不連続)によるものと思われる。

(2) 摺動面の走査型電子顕微鏡(SEM)の観察

Fig. 5.45~5.58の試験温度400℃, Fig. 5.59~5.62に500℃の固定側および回転側試験体の摺動表面のSEM写真を示す。観察位置は中央および両端部である。

Fig. 5.45~5.55に示す400℃の試験においては摺動時間240秒の方が, 60および120秒に比べ滑らかな摺動面となっており, 摺動トルクの時間的推移と対応している。Fig. 5.45~5.47の2 m/sと Fig. 5.49~5.51, 5.53~5.55の10および22 m/sとでは摺動面が多少異なっている。2 m/s

の方が乾燥摩耗面に近く、激しい摩耗となっている。

Fig. 5.55に示す400℃、22 m/s、4.1 kg/mmと Fig. 5.57に示す400℃、22 m/s、1.1 kg/mmとでは、面圧の低い Fig. 5.57の方が摩耗は軽微なように思われる。Fig. 5.59～5.61の500℃の試験では2および22 m/sの方が10 m/sに比べ摺動面は著しく荒れており、乾燥摩耗面の様相を呈している。

また、500℃試験における2および22 m/sの摺動面は400℃の試験と比較すると顕著な違いが見られる。500℃の試験ではひっかき状の摩耗痕が認められるのに対し、400℃の試験では摺動により、表面がつぶされ、平滑になっている。

Fig. 5.49、5.50、5.53、5.54に示す400℃、10および22 m/sの固定側試験体には摩耗粉と思われる付着物が認められる。

一方、Fig. 5.52、5.56、5.58に示す400℃、10および22 m/sの回転側試験体にも摩耗粉と思われる付着が見られる。しかし、付着物は固定側試験体に比べ、極めて少ない。

また、外観検査では認められなかった亀裂がSEM観察ではすべての回転側試験体に認められる。

(3) 摺動面の表面粗さ

Fig. 5.63～5.69に試験温度400℃および500℃の固定側および回転側試験体の表面粗さを示す。測定は摺動方向と直角に行った。

表面粗さはJIS B 0601にしたがい最大高さが $6.3 \mu\text{m} > R_{\text{max}} > 0.8 \mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}} \leq 0.8 \mu\text{m}$ に対する基準長さをそれぞれ0.8および0.25 mmとして求めた。その結果、試験前後でほとんど変わらず、固定側、回転側ともに試験前と同様に3 s以下であった。

摺動表面はマクロ的には凹凸な面となっており凹凸の程度は摺動速度が大きくなるほど大きく、400℃、22 m/sのとき7～8 μであり、500℃、22 m/sでは25 μ程度になっている。

(4) 摺動断面の硬さ

Fig. 5.70～5.77に試験温度400および500℃の固定側および回転側試

験体のビッカース硬さを示す。□は固定側試験体，■は回転側試験体を表わしている。硬さは摺動面中央の表面より内部へ測定した。全体にバラツキが大きい。溶着金属は熱的に安定化されていないのでこのようなバラツキが生じている。回転側のコルモノイ # 5 および固定側のコルモノイ # 6 の硬さはそれぞれ $H_v = 500 \sim 600$ および $H_v = 700 \sim 900$ である。いずれの試験体も表面付近と内部とで硬さの変化はほとんどない。

Fig. 5.77は500℃，22 m/s，240秒の固定側試験体の両端部の硬さを示している。■は摩耗粉付着側，□はその反対側である。摩耗粉の付着側では表面付近は硬さが急激に減少しているが，これはこの位置が摩耗粉層に当るためである。摩耗粉層の硬さは $H_v = 300$ 程度である。

Table 5.1 SLIDING TEST RESULTS

Test Condition					Measured			
Test Case	T1 (°C)	V (m/s)	P1 (kg/mm ²)	t (s)	P2 (kg/mm ²)	T2 (°C)	f (μ)	
I-1	400	2	4	60	4.1	418	0.08 ~ 0.10	
I-2				120	3.8	432	0.08 ~ 0.12	
II-3				240	4.0	430	0.09 ~ 0.12	
II-1	400	10	4	60	3.7	430	0.06 ~ 0.10	*
II-2				120	4.1	439	0.06 ~ 0.10	*
II-3				240	4.1	447	0.07 ~ 0.10	*
III-1	400	22	4	60	4.1	440	0.06 ~ 0.08	*
III-2				120	4.0	445	0.06 ~ 0.08	
III-3				240	4.1	448	0.06 ~ 0.09	*
IV-1	500	2	4	240	4.1	549	0.23 ~ 0.24	
IV-2		10			4.1	553	0.09 ~ 0.11	*
IV-3		22			4.1	559	0.07 ~ 0.09	*
V-1	400	22	1	240	1.1	422	0.09 ~ 0.12	
VI-1	500	2	4	240	4.2	549	0.12 ~ 0.24	

T1:Na Temp., V:Sliding Speed, P1:Load
t:Sliding Time, P2: Load, T2: Specimen Temp.
f: Friction Coefficient, *: Crack Obserbed

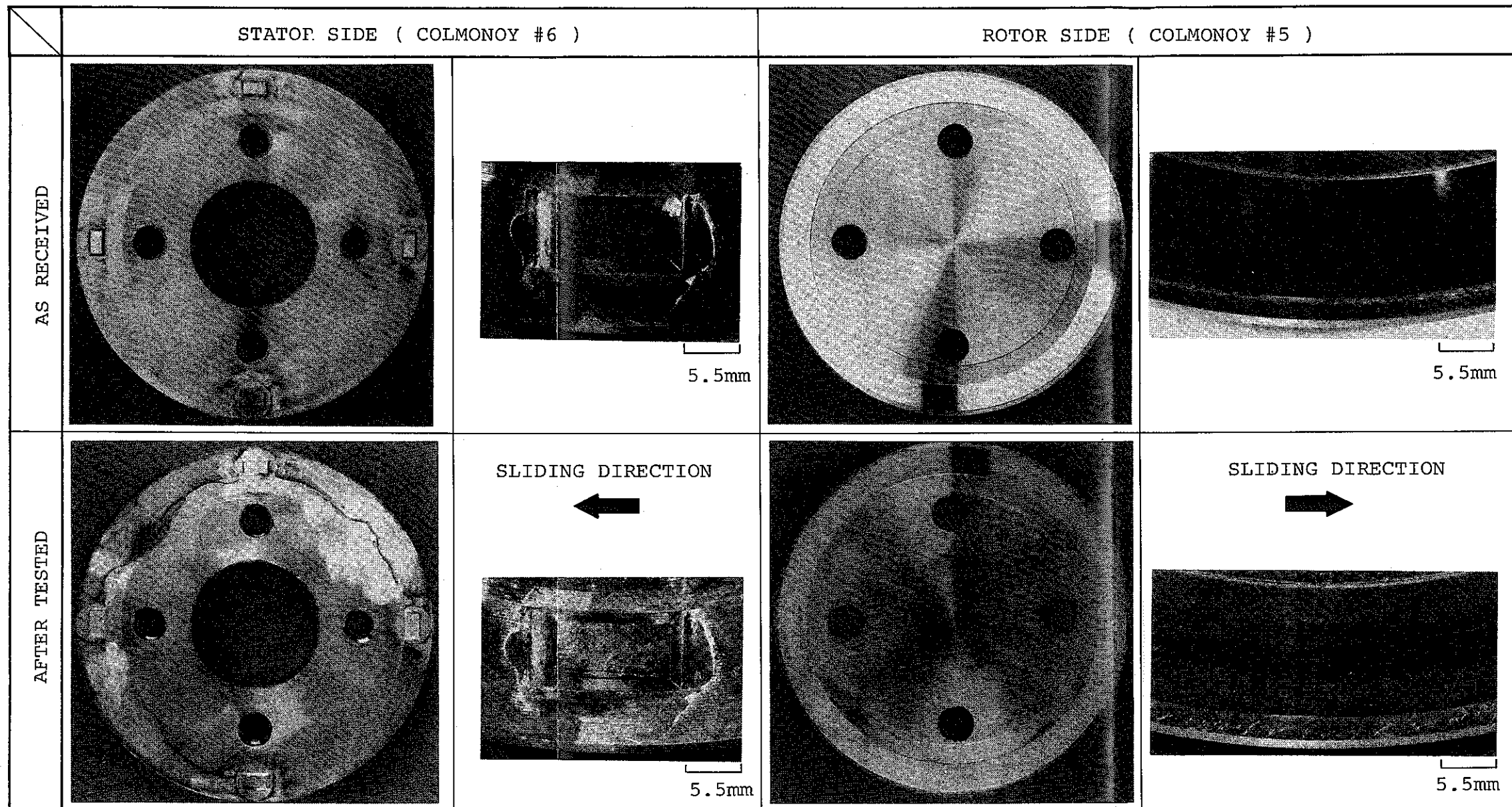


Fig. 5.1 Appearance of Specimen
(400°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 60s)

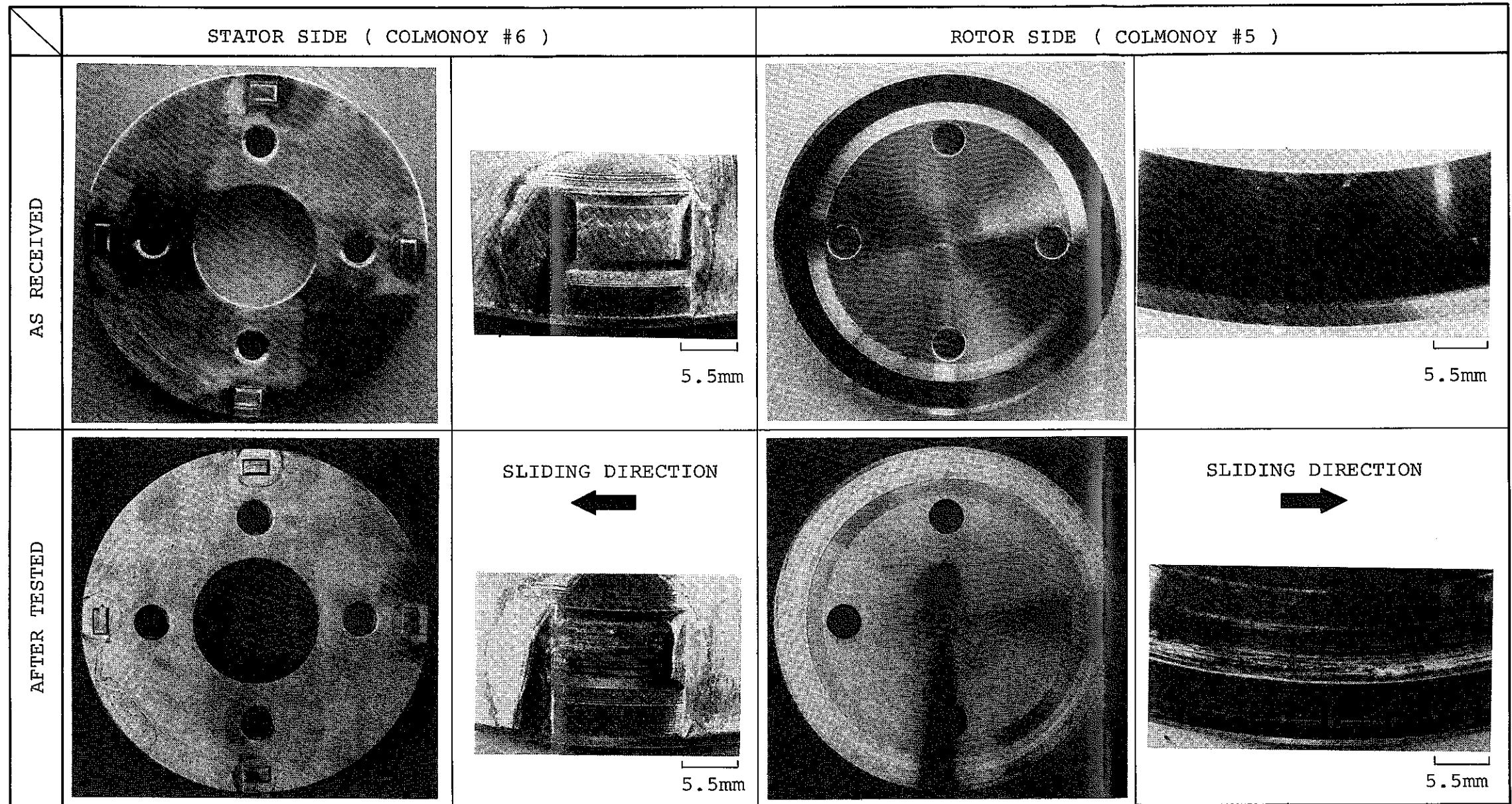


Fig. 5.4 Appearance of Specimen
(400°C, 10m/s, 3.7kg/mm², 60s)

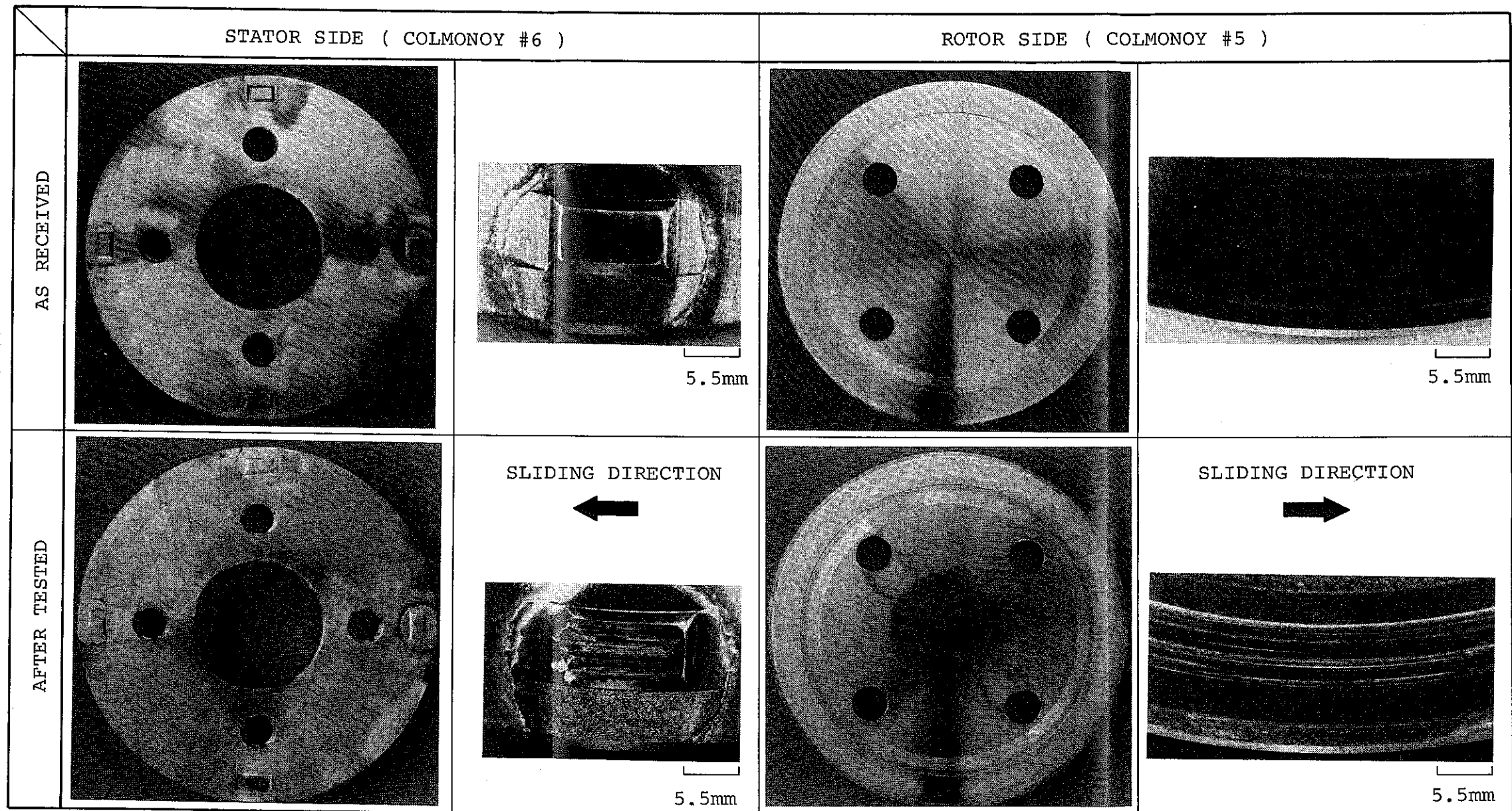


Fig. 5.5 Appearance of Specimen
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 120s)

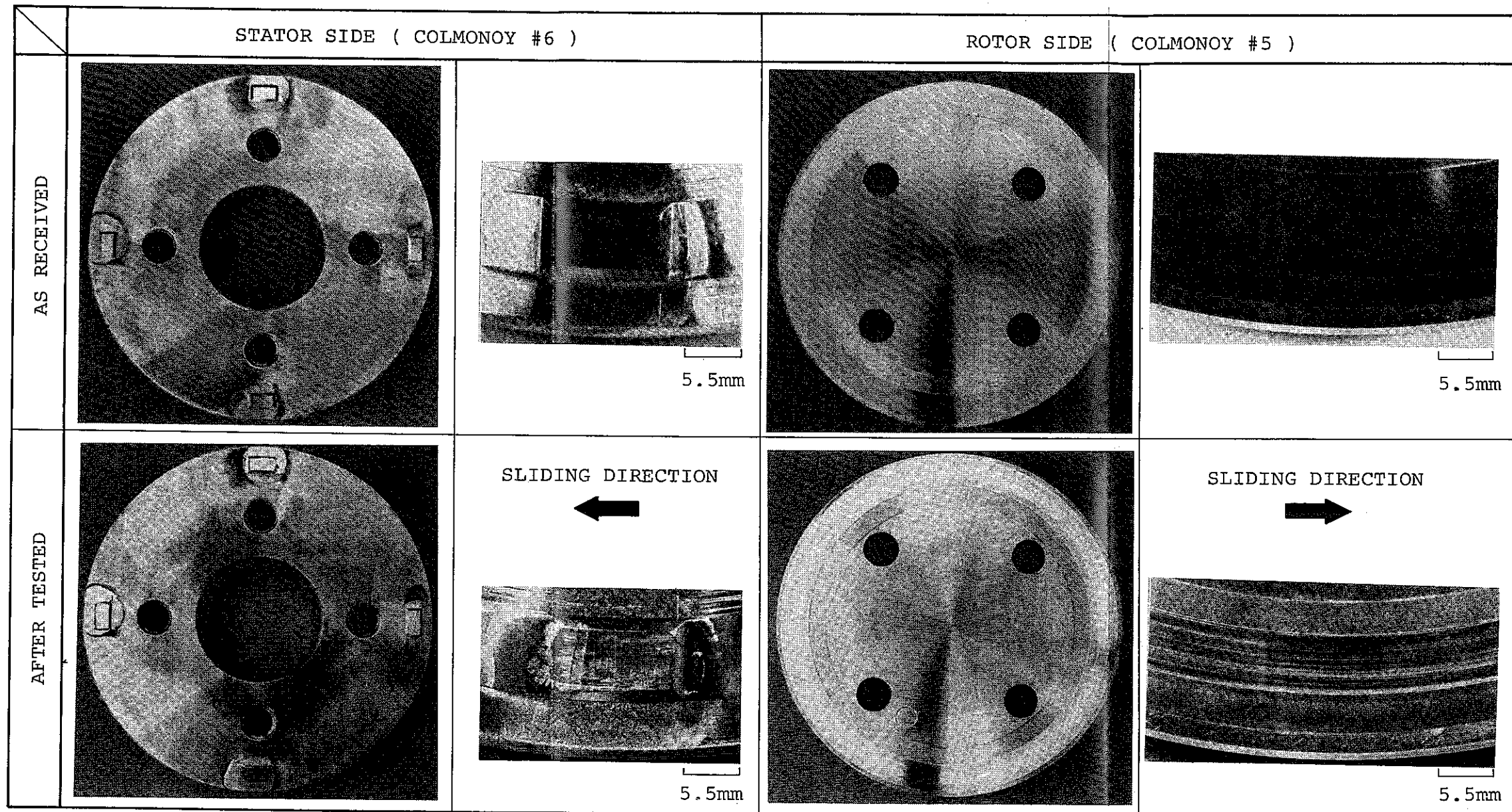


Fig. 5.6 Appearance of Specimen
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

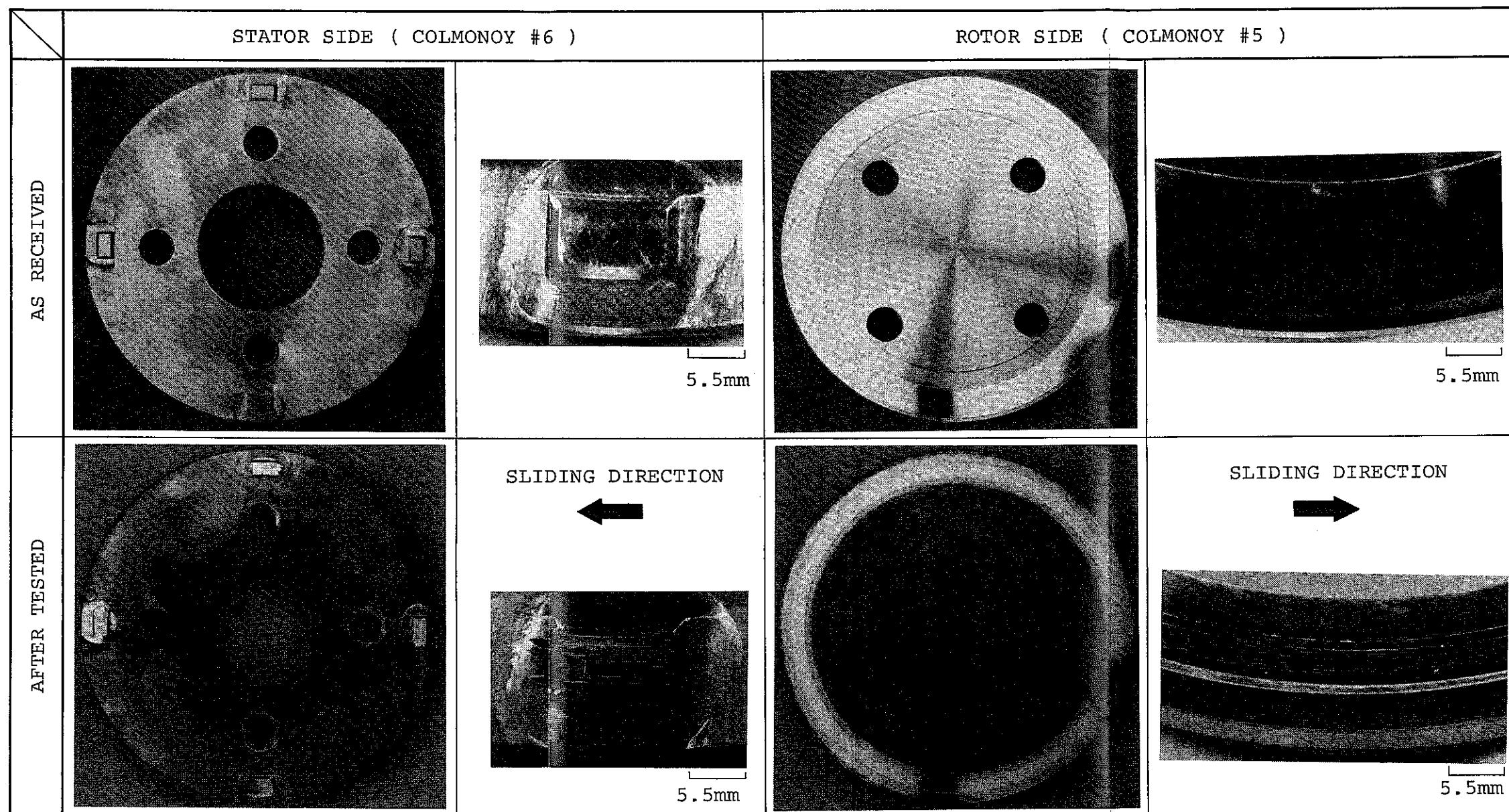


Fig. 5.7 Appearance of Specimen
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

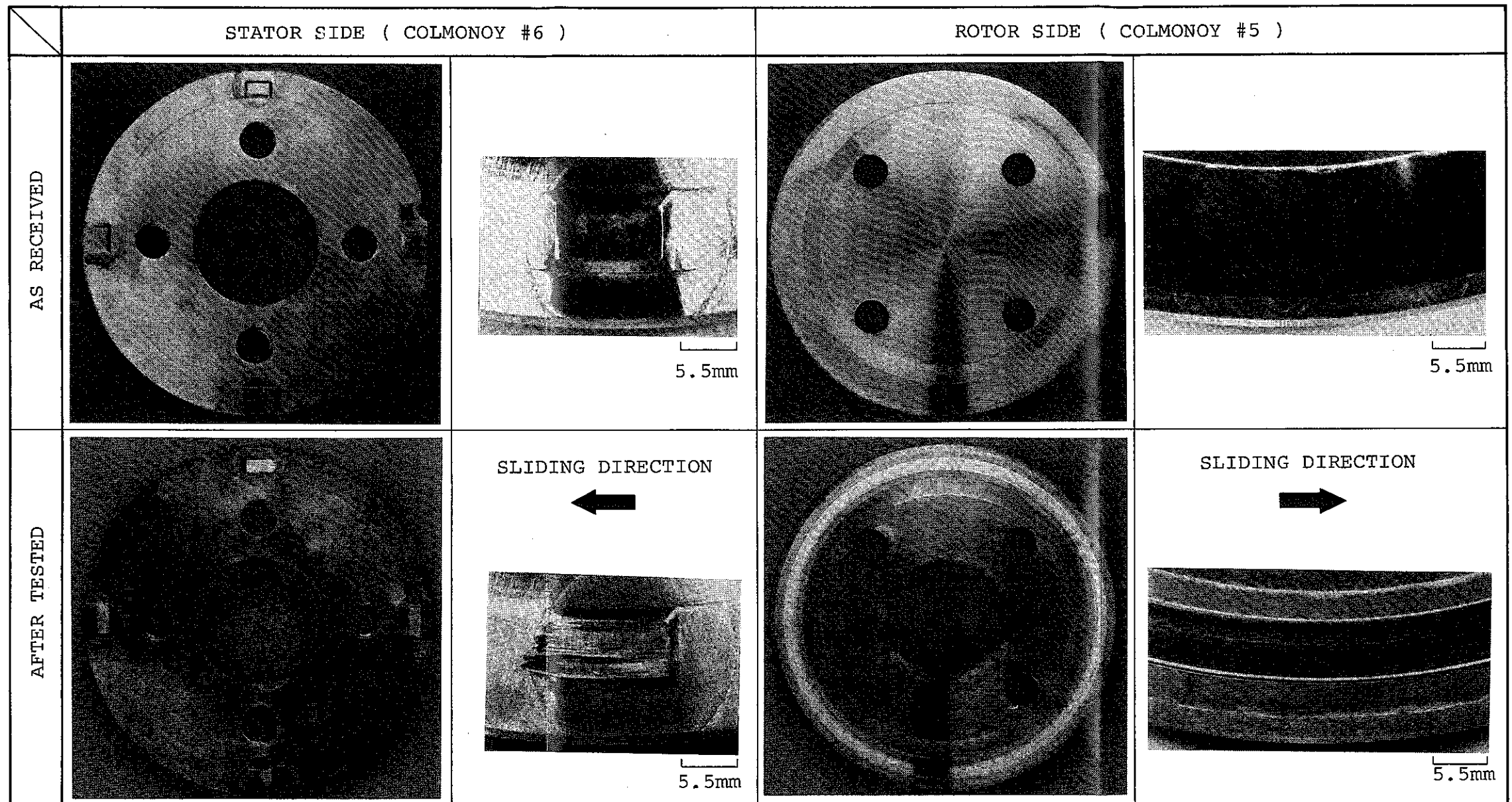


Fig. 5.8 Appearance of Specimen
(400°C, 22m/s, 4.0kg/mm², 120s)

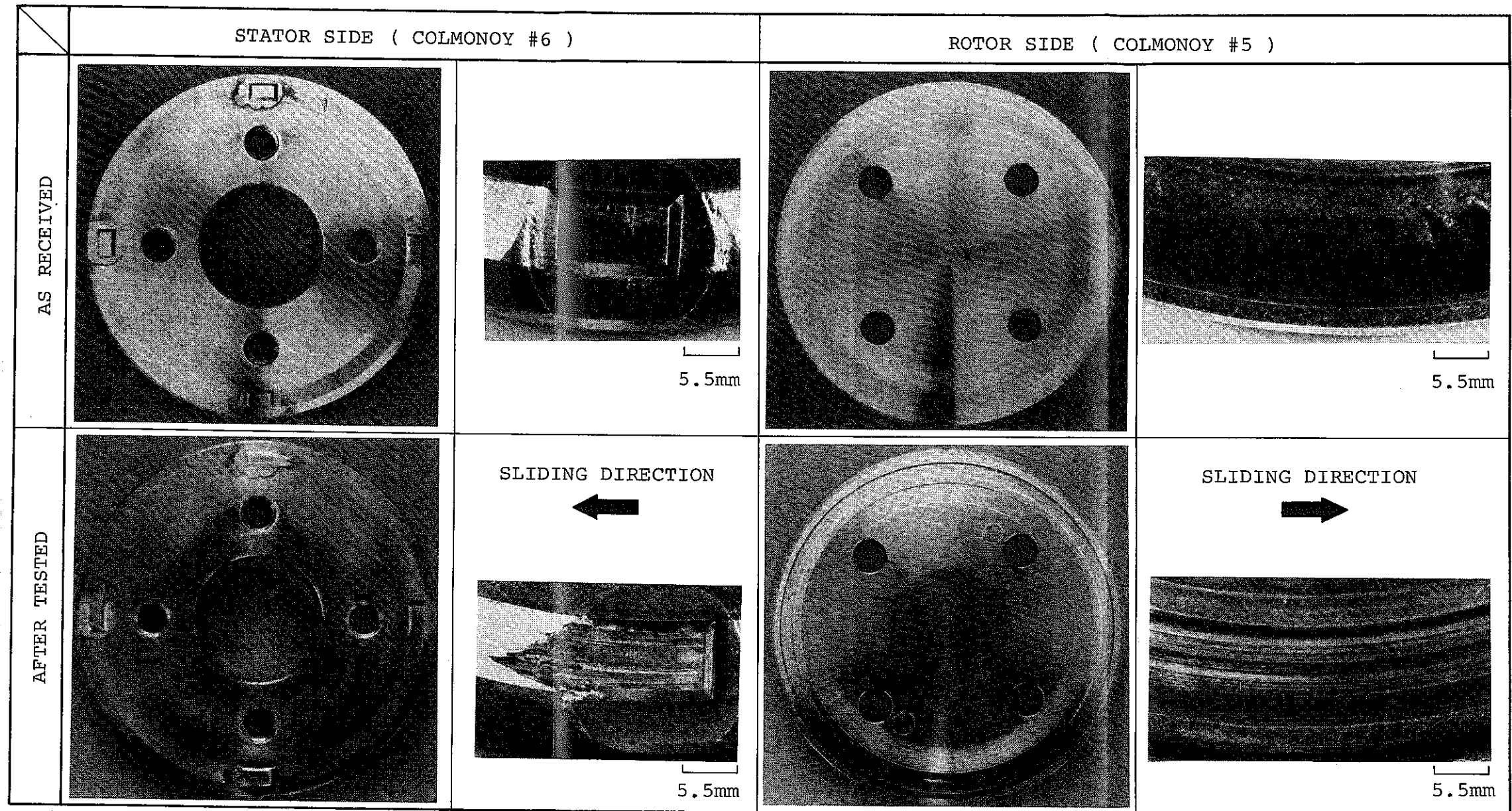


Fig. 5.9 Appearance of Specimen
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

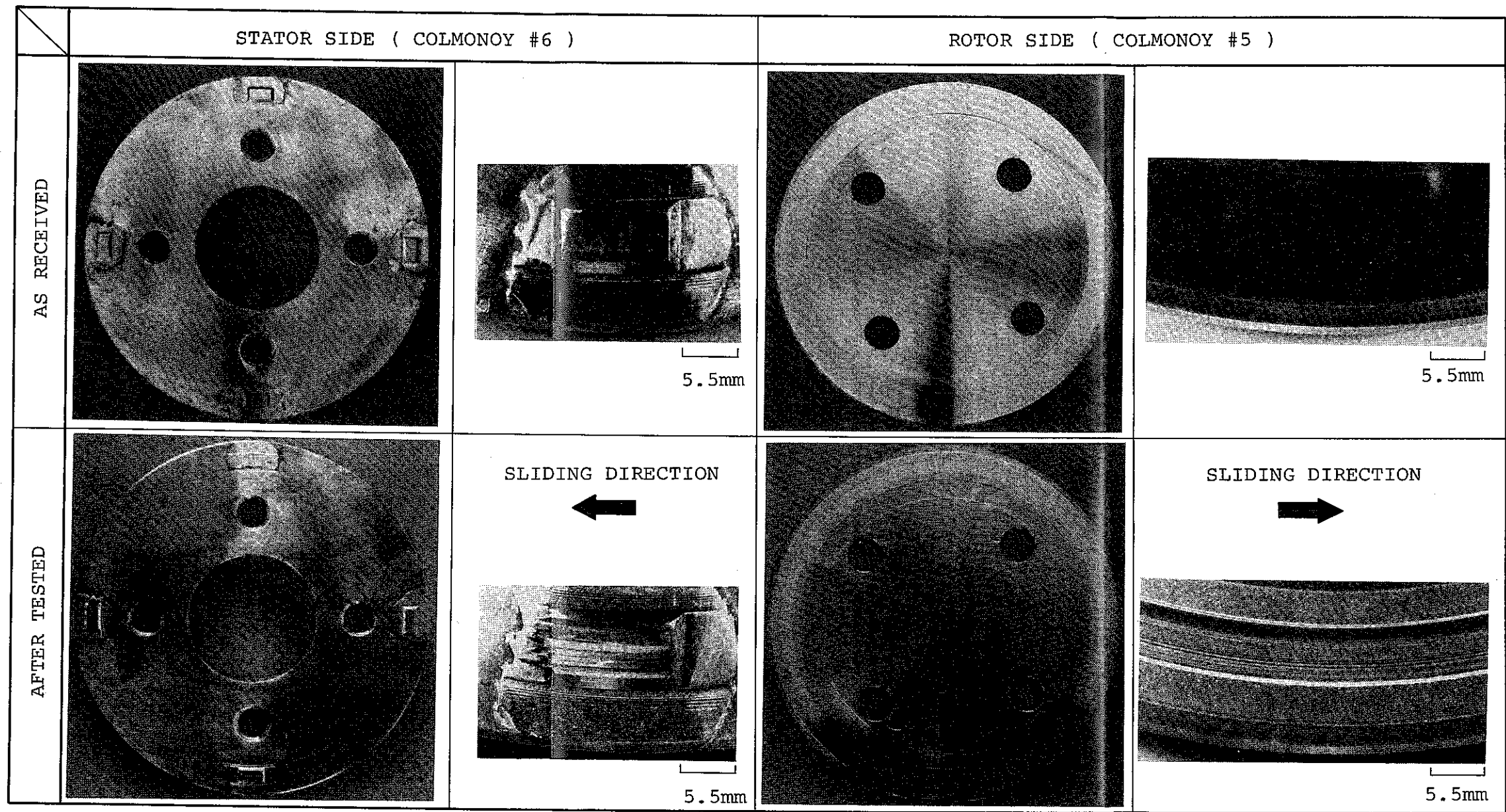


Fig. 5.10 Appearance of Specimen
 (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

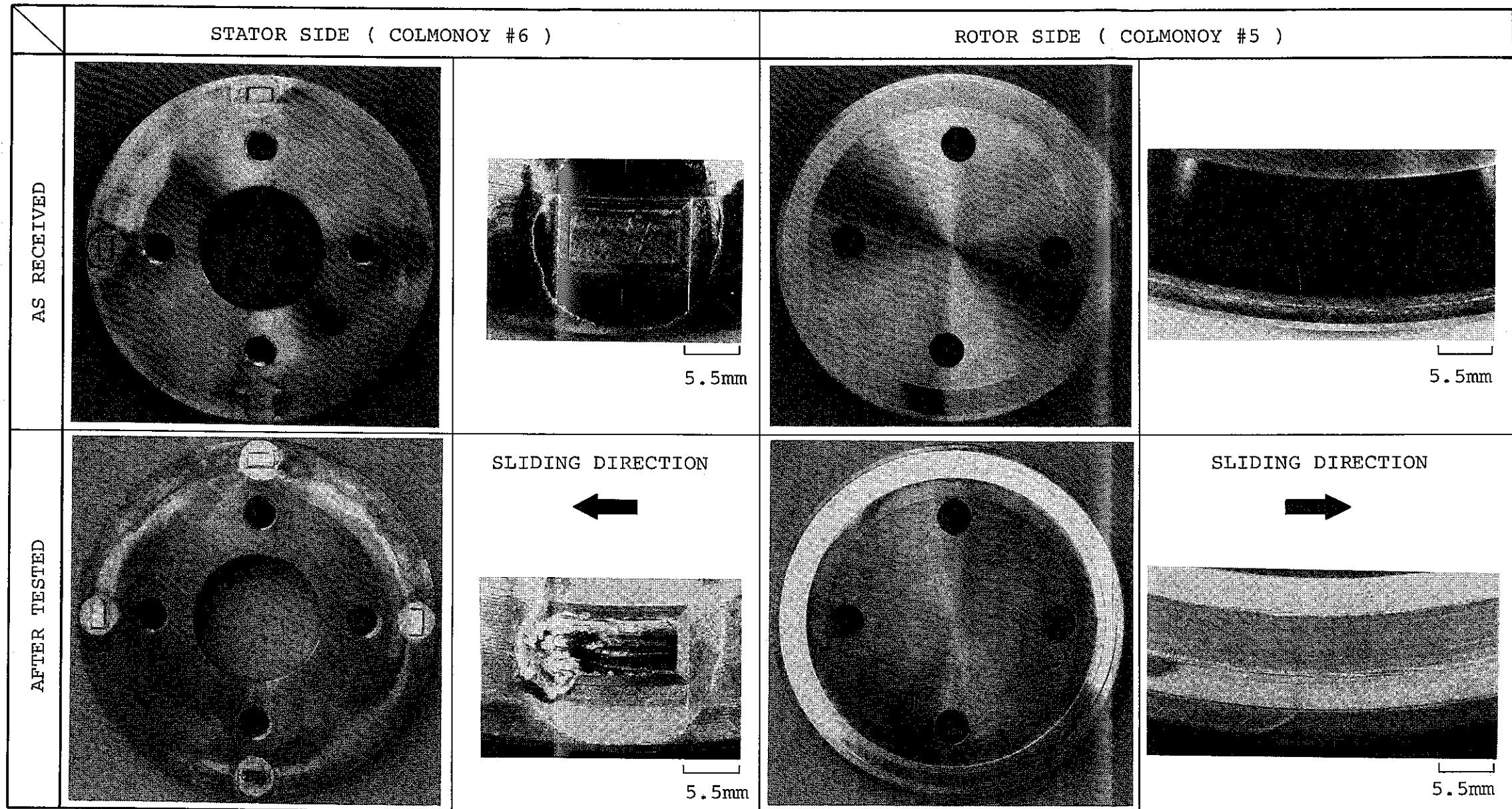


Fig. 5.11 Appearance of Specimen
(500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

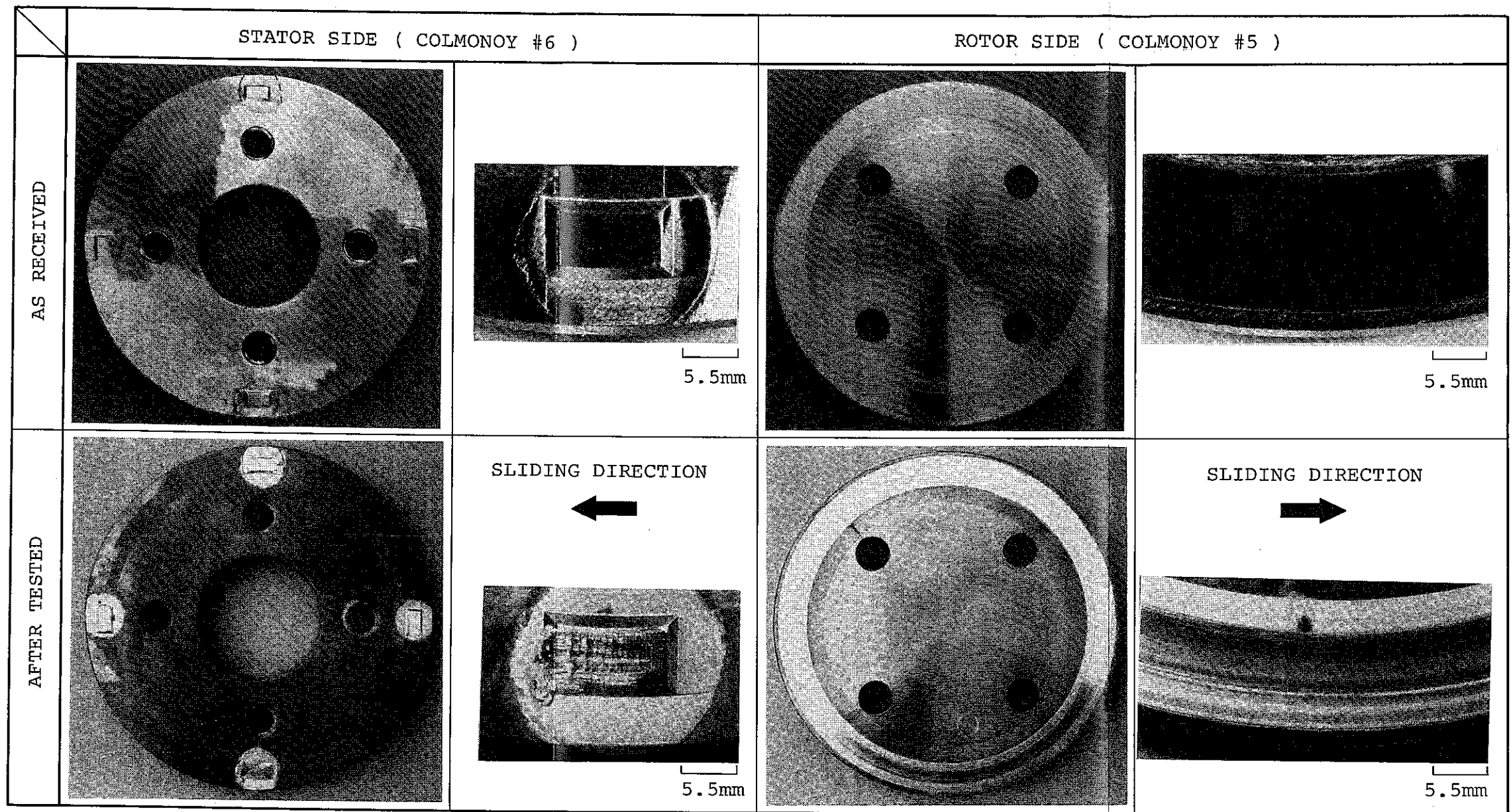


Fig. 5.12 Appearance of Specimen
(500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

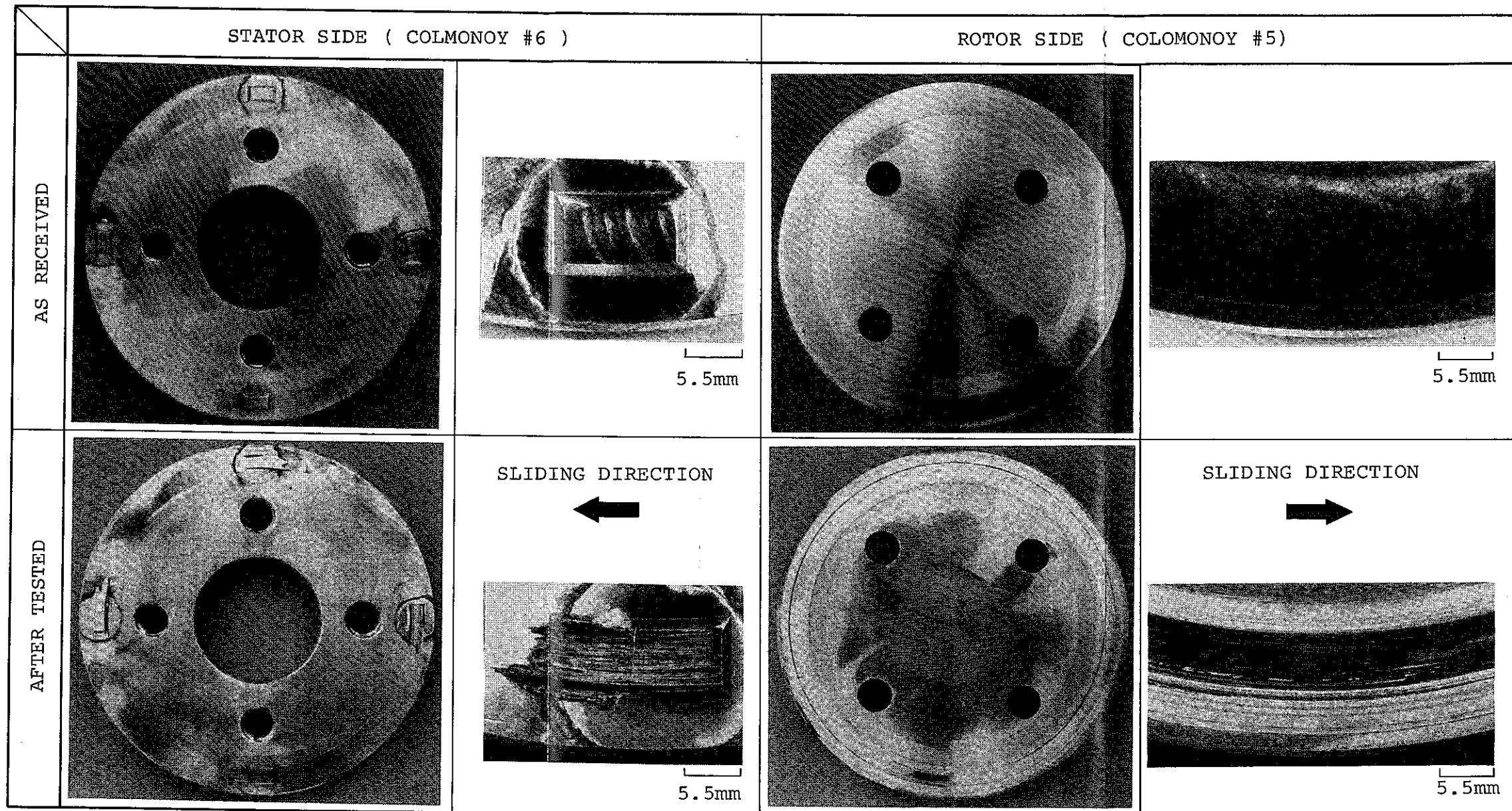


Fig. 5.13 Appearance of Specimen
(500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

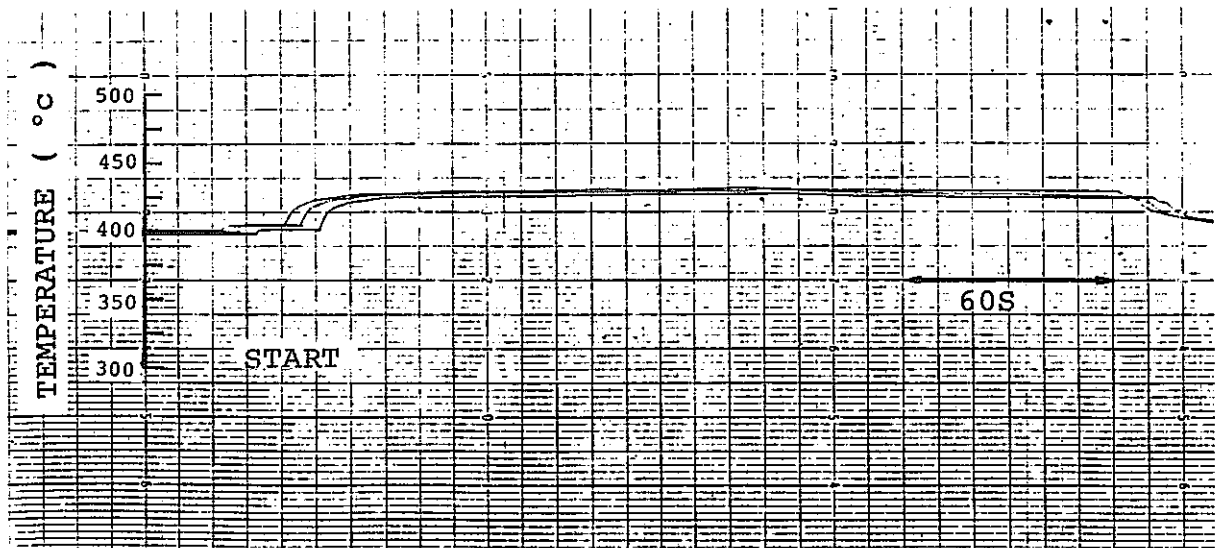
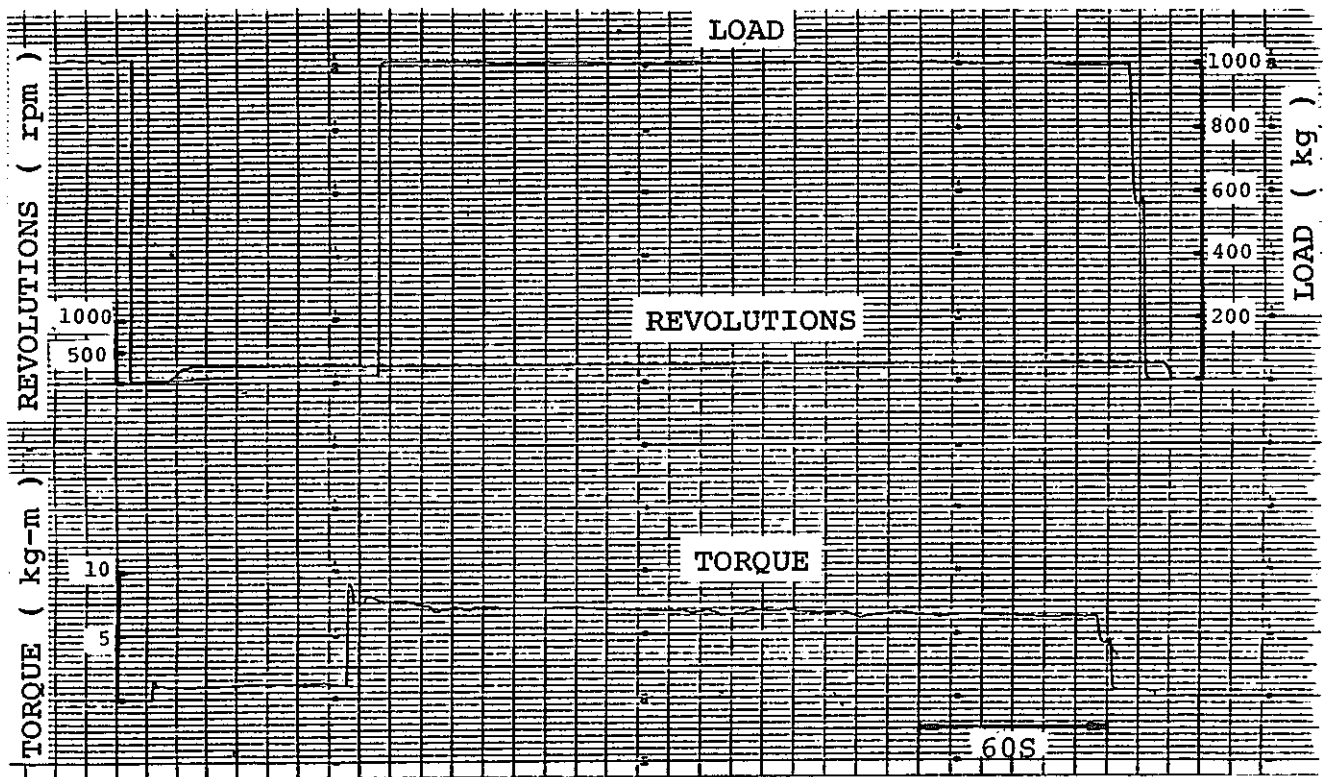


Fig. 5.14 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

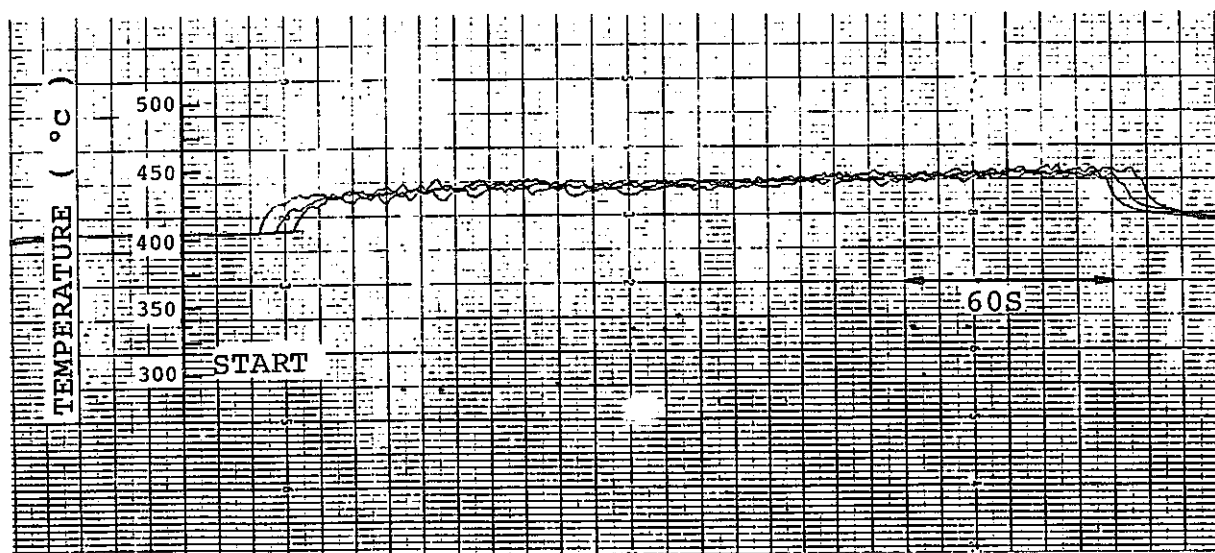
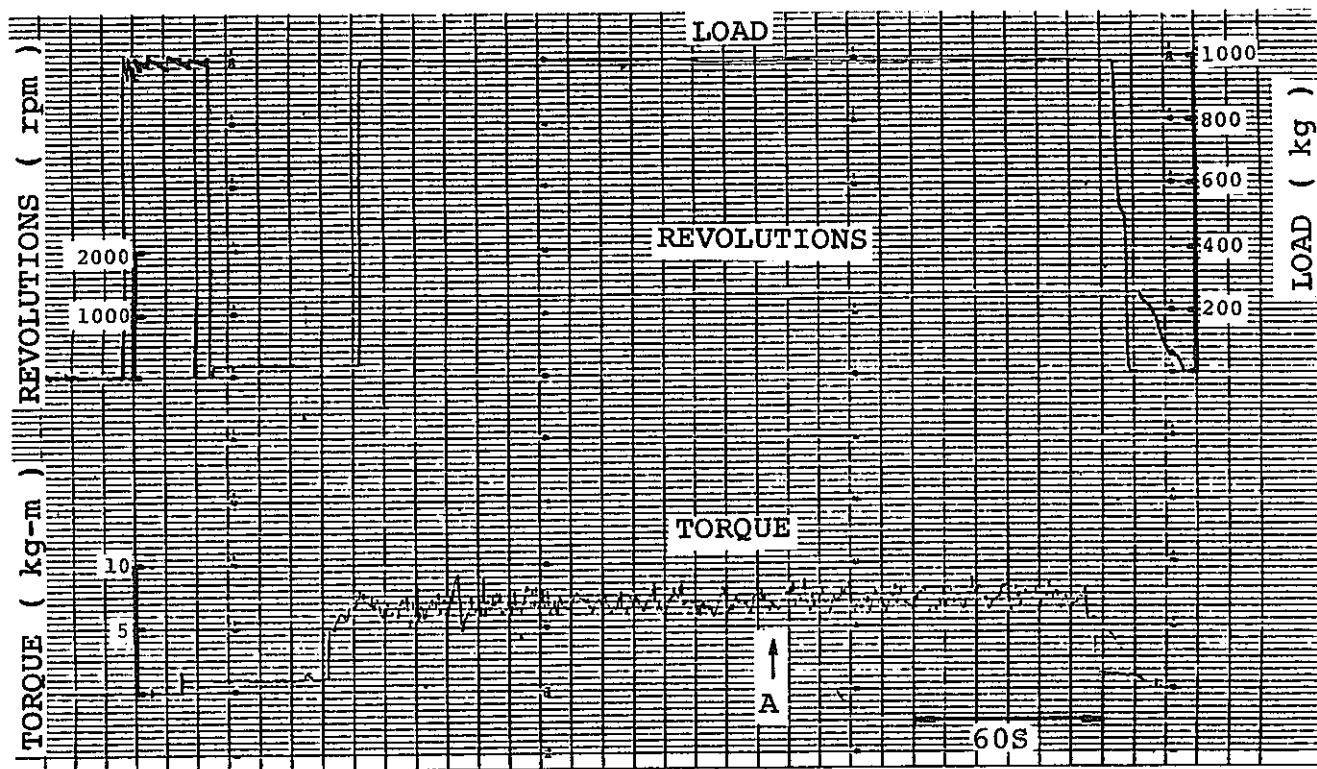


Fig. 5.15 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

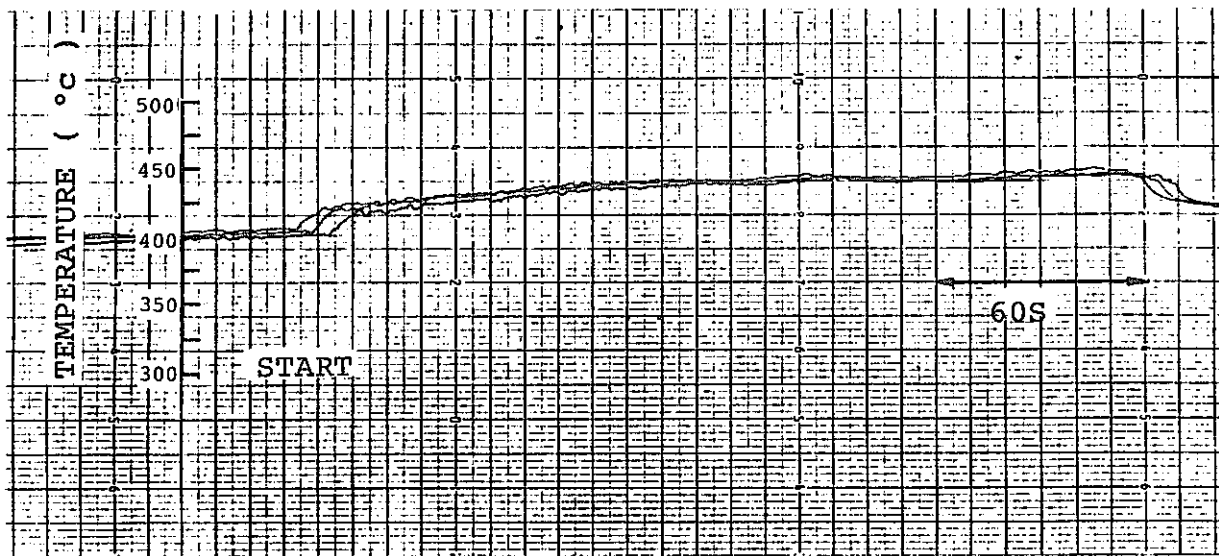
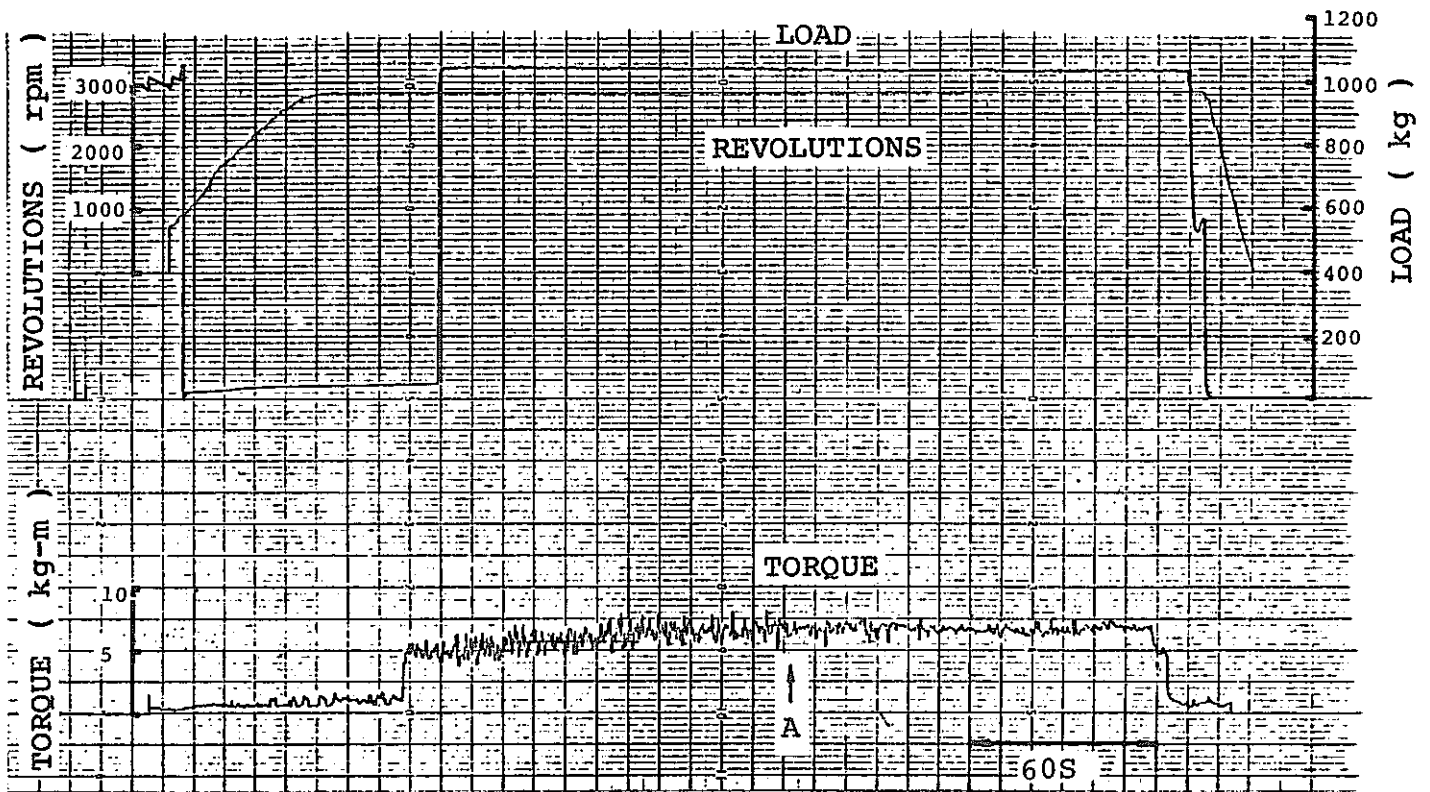


Fig. 5.16 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

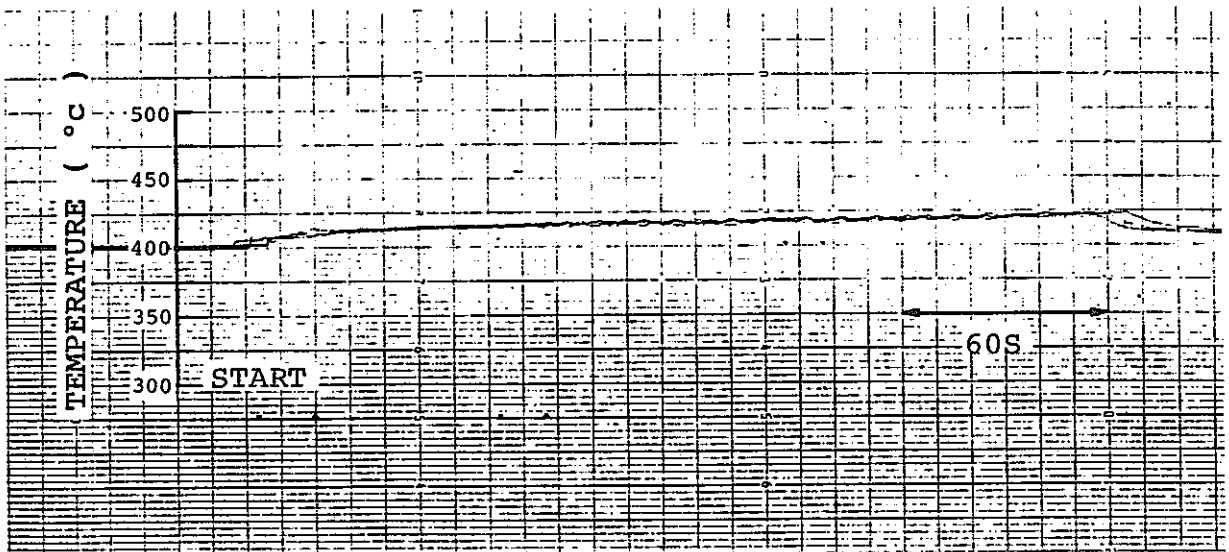
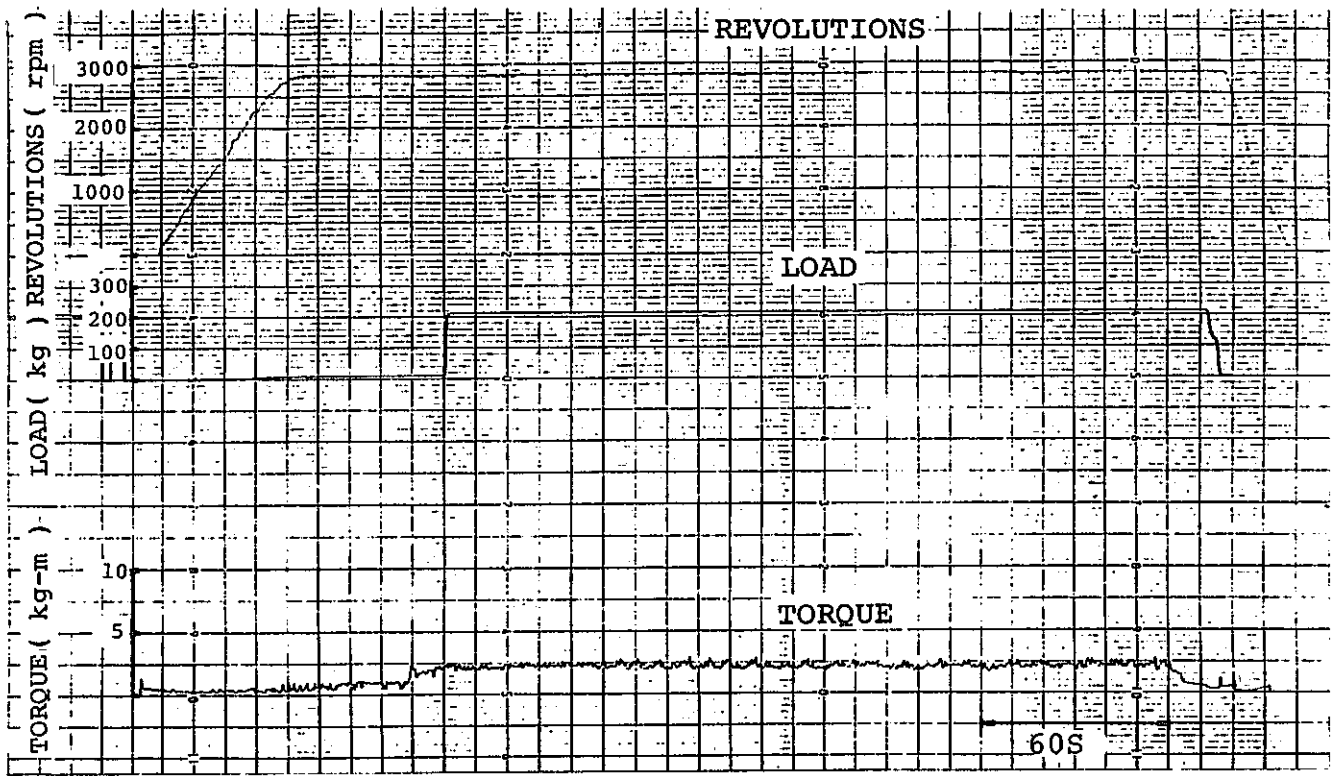


Fig. 5.17 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

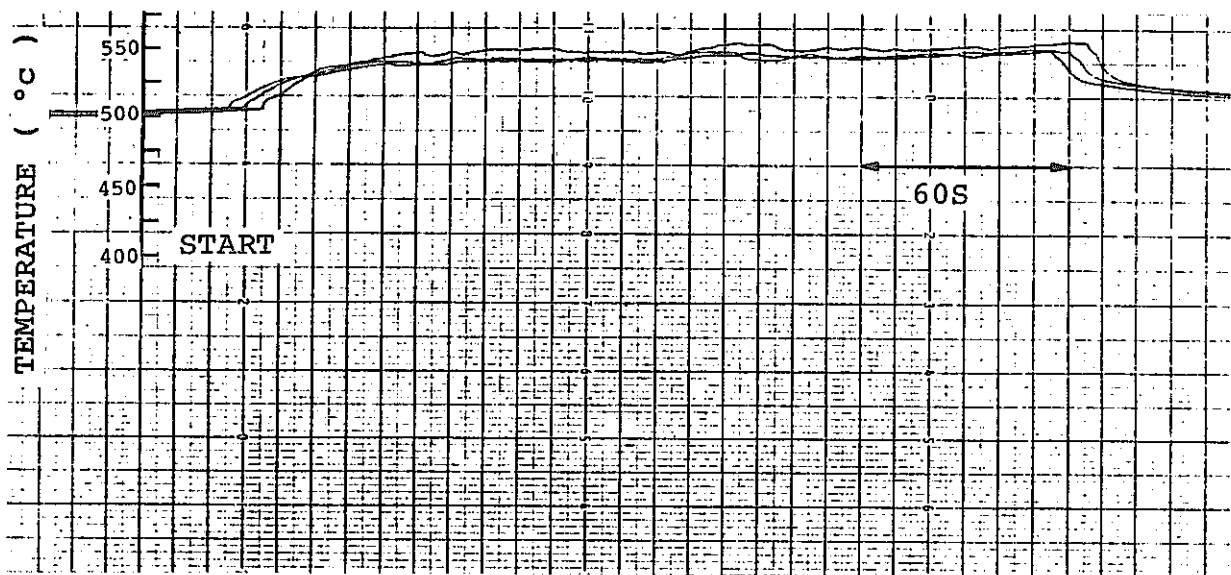
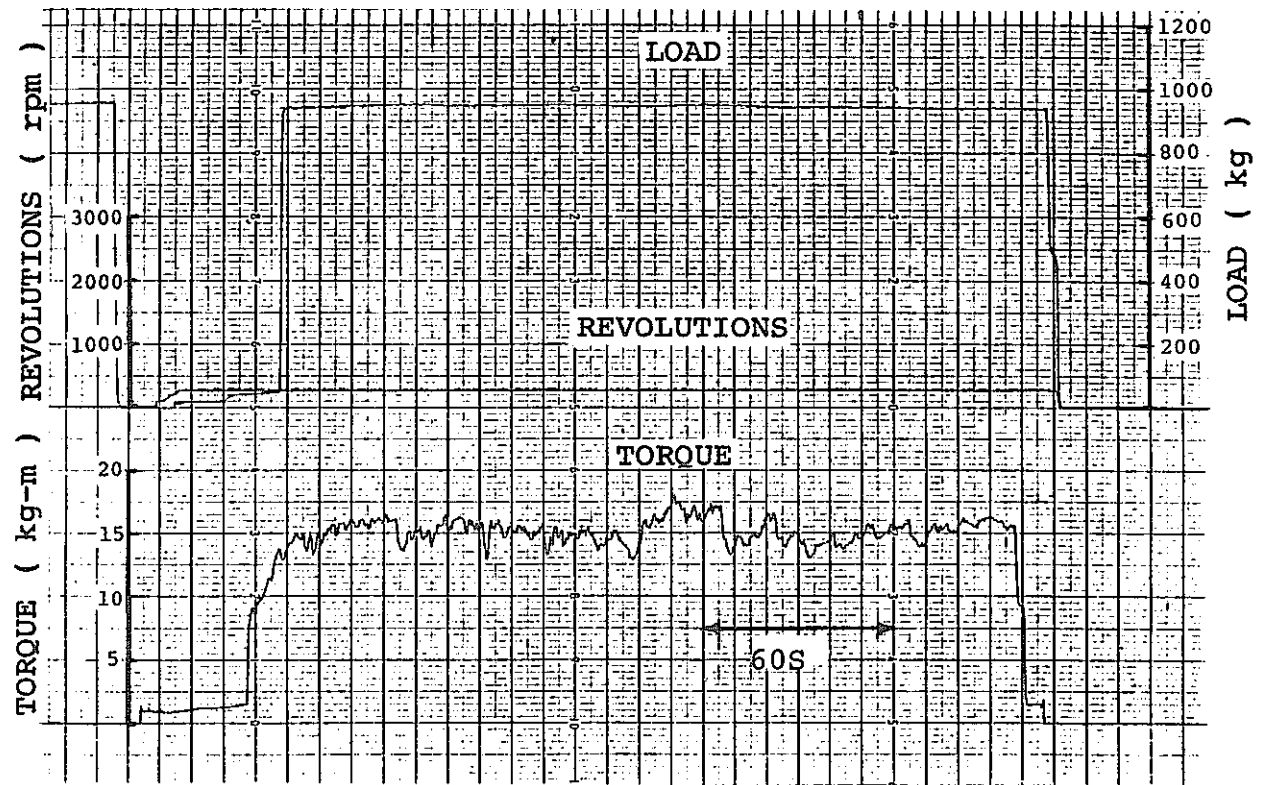


Fig. 5.18 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

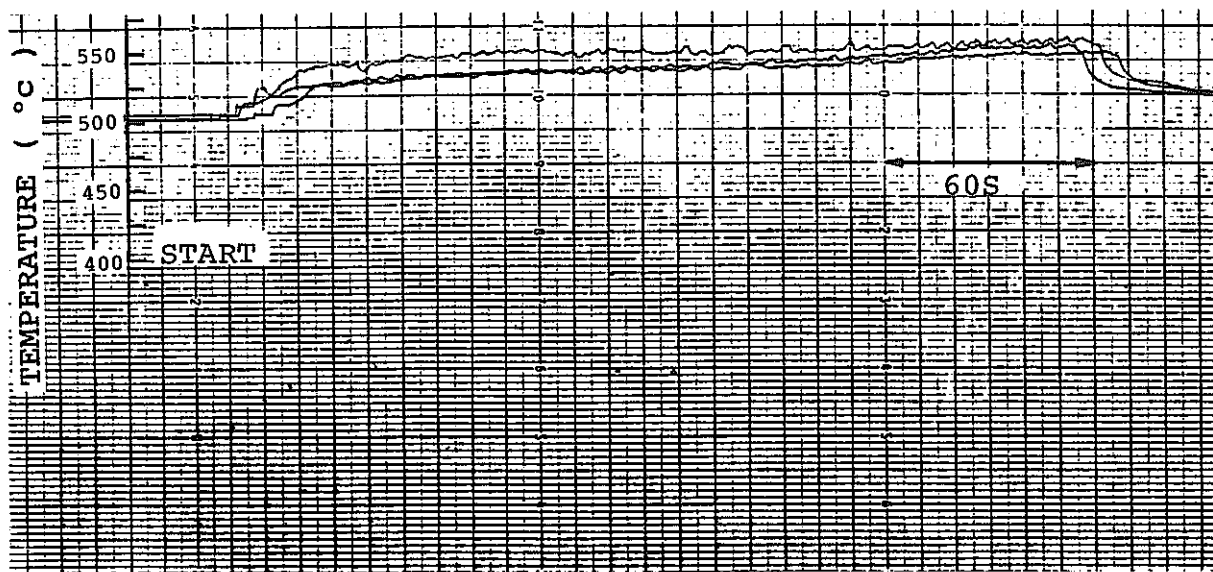
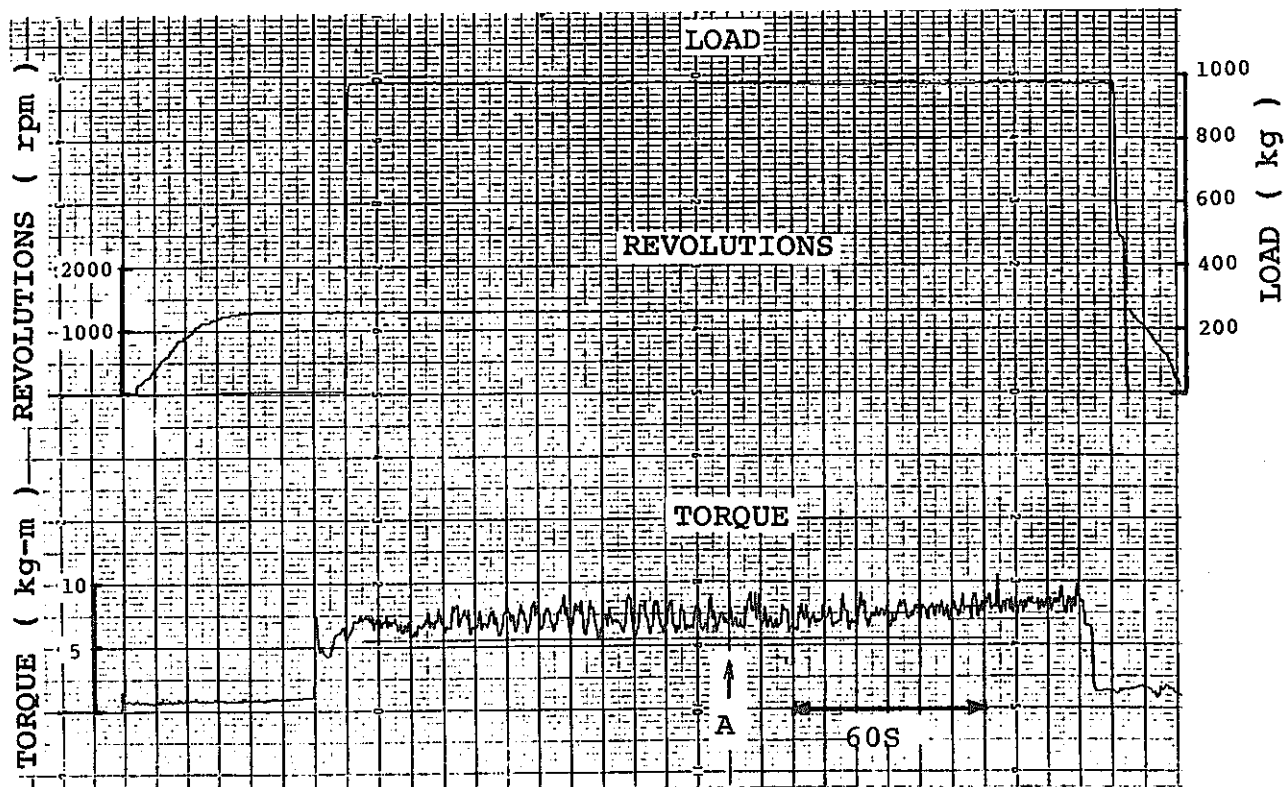


Fig. 5.19 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

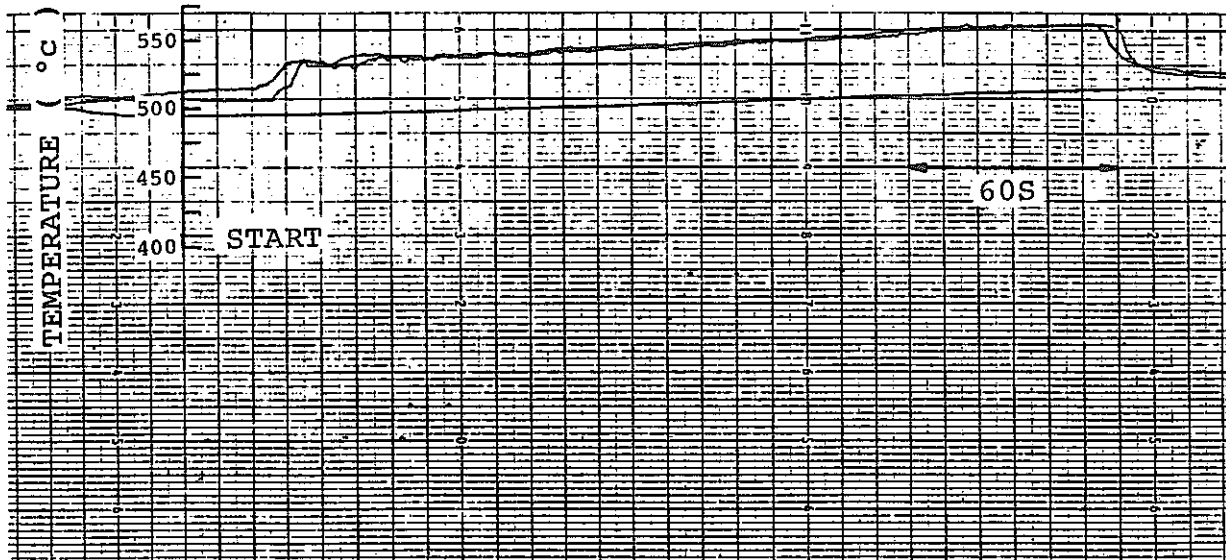
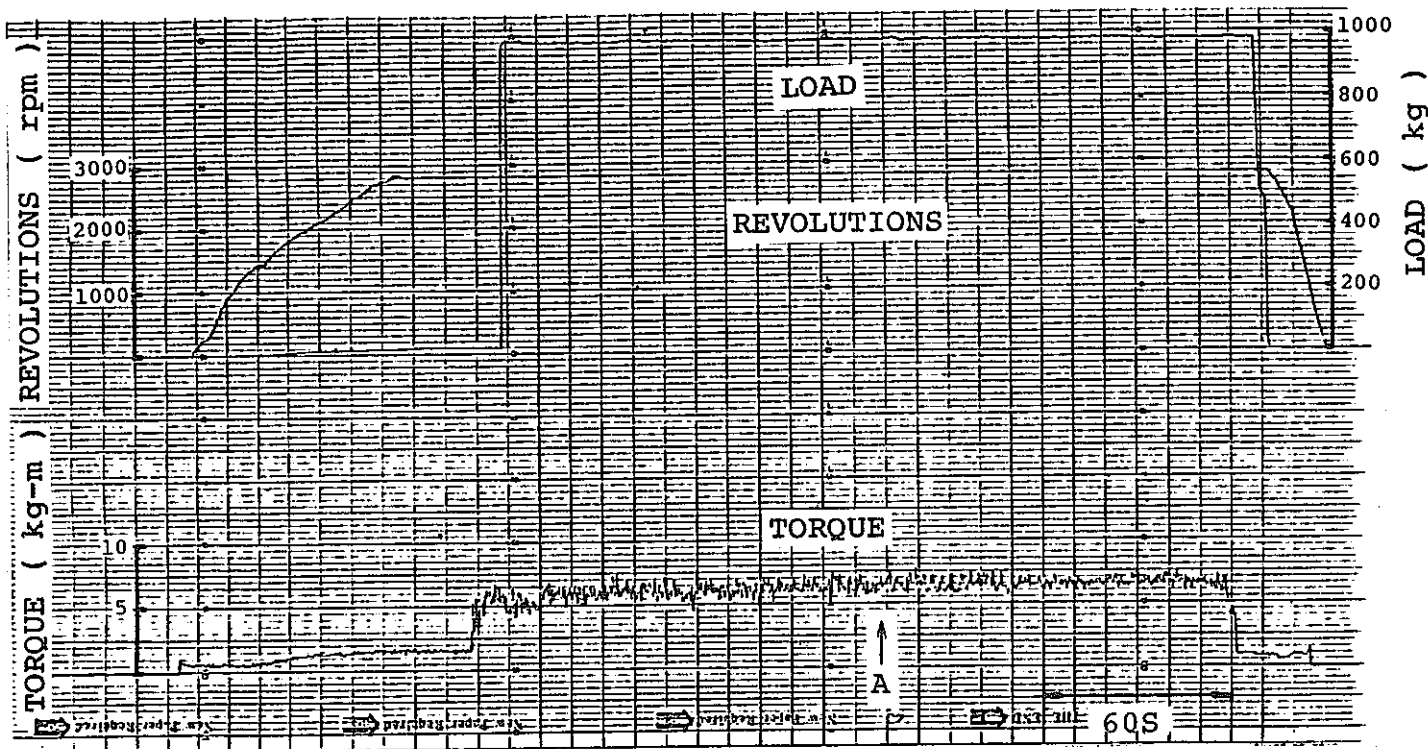


Fig. 5.20 Sliding Torque, Load, Revolutions and Specimen Temperature
 (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

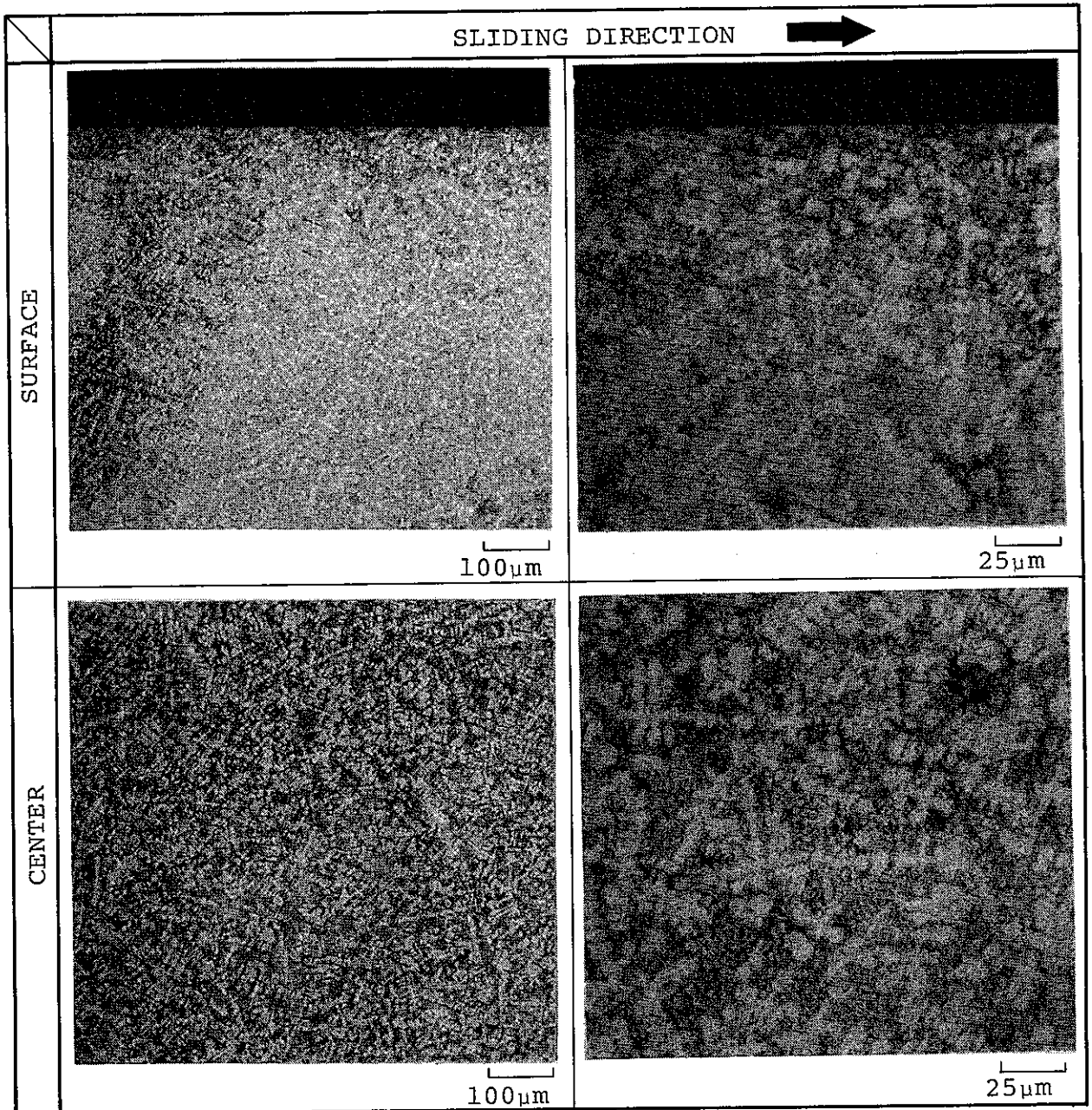
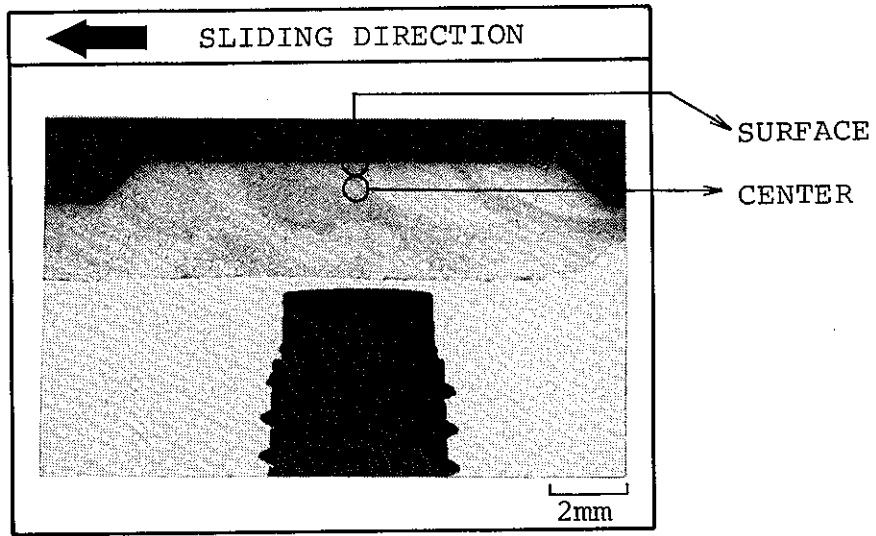


Fig. 5.27 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

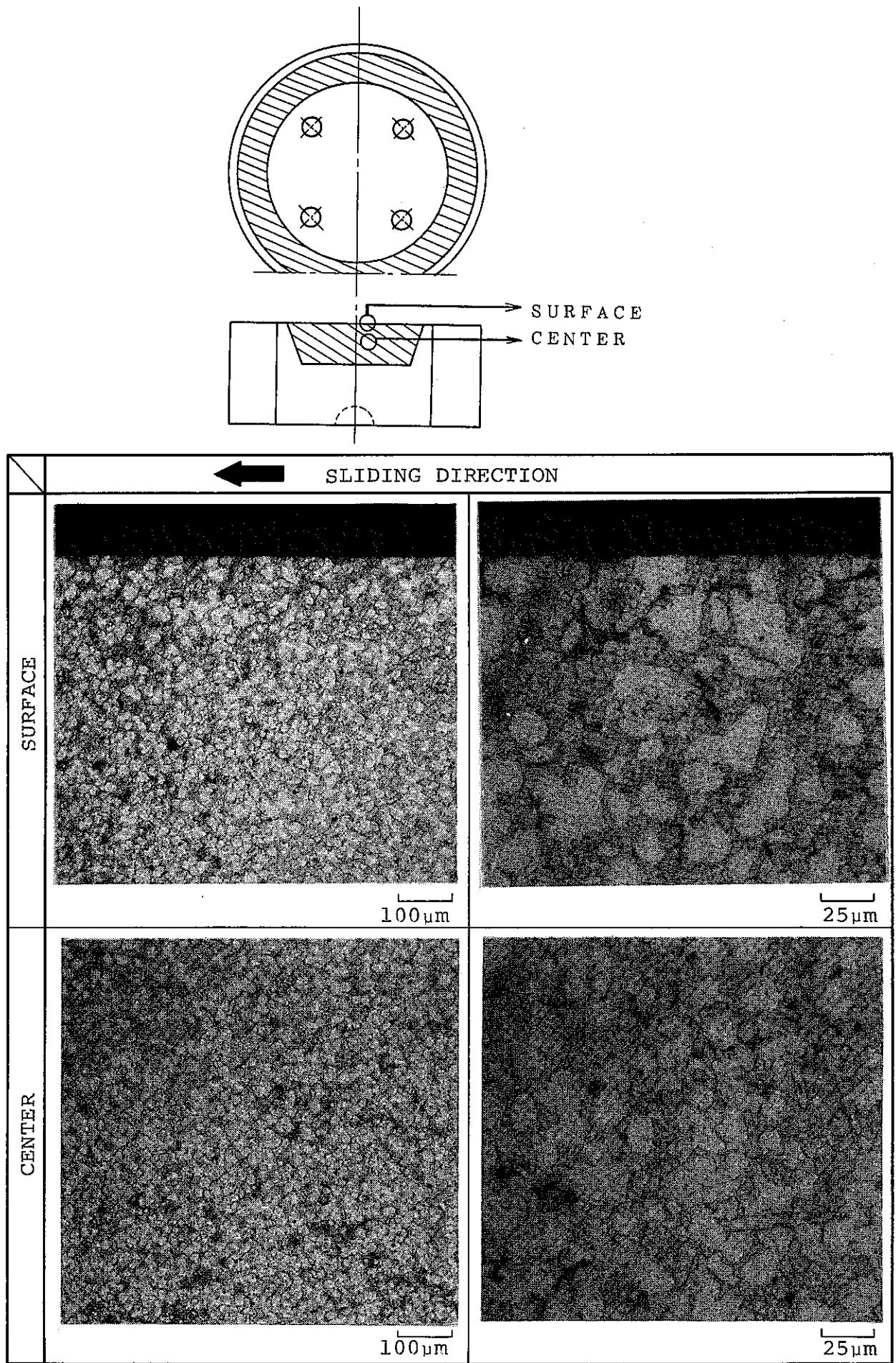


Fig. 5.28 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

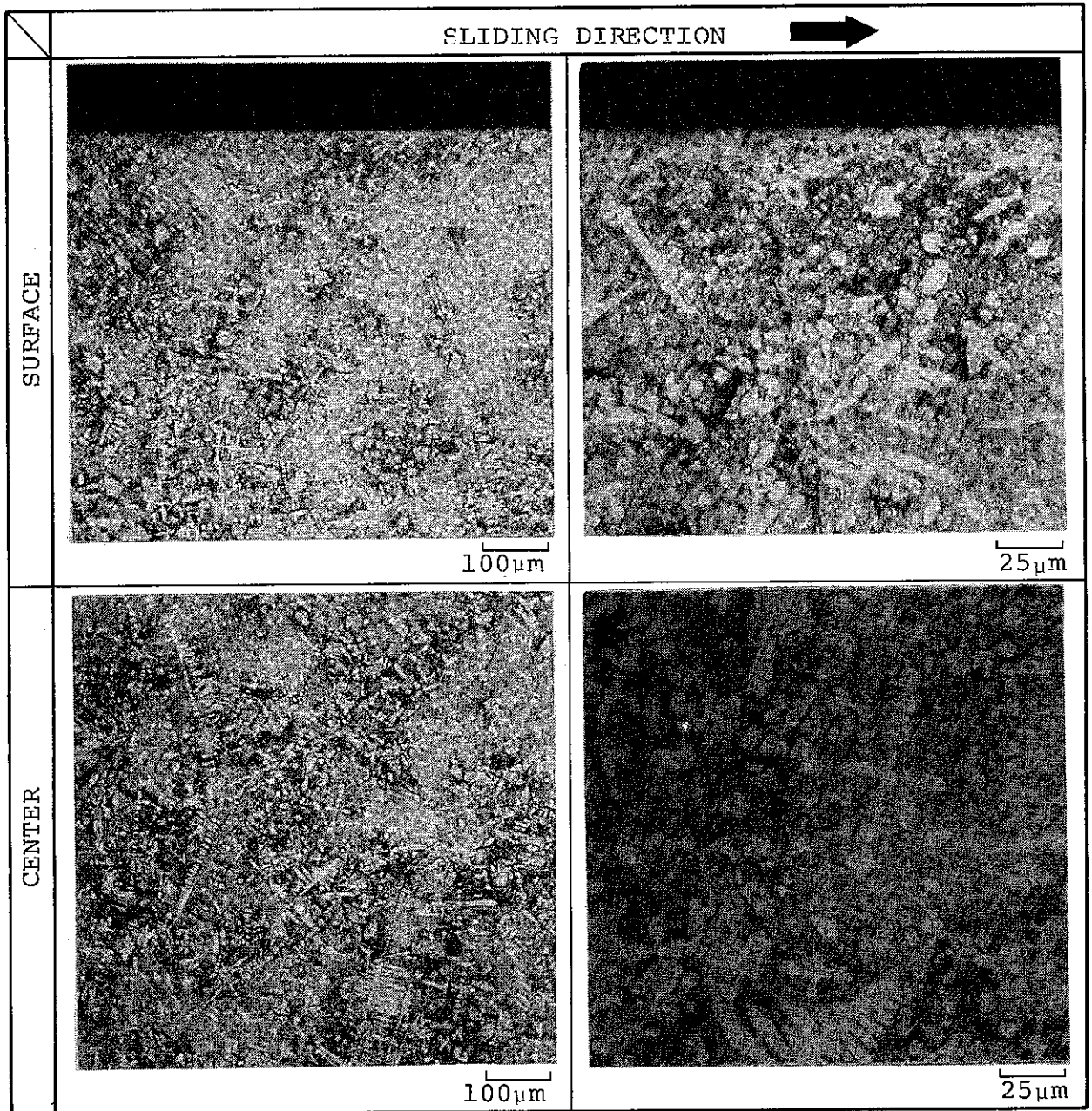
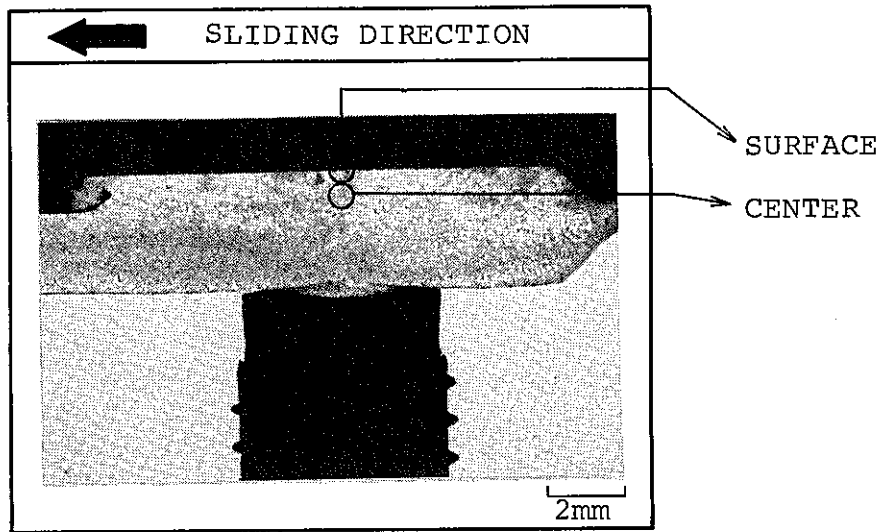


Fig. 5.29 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

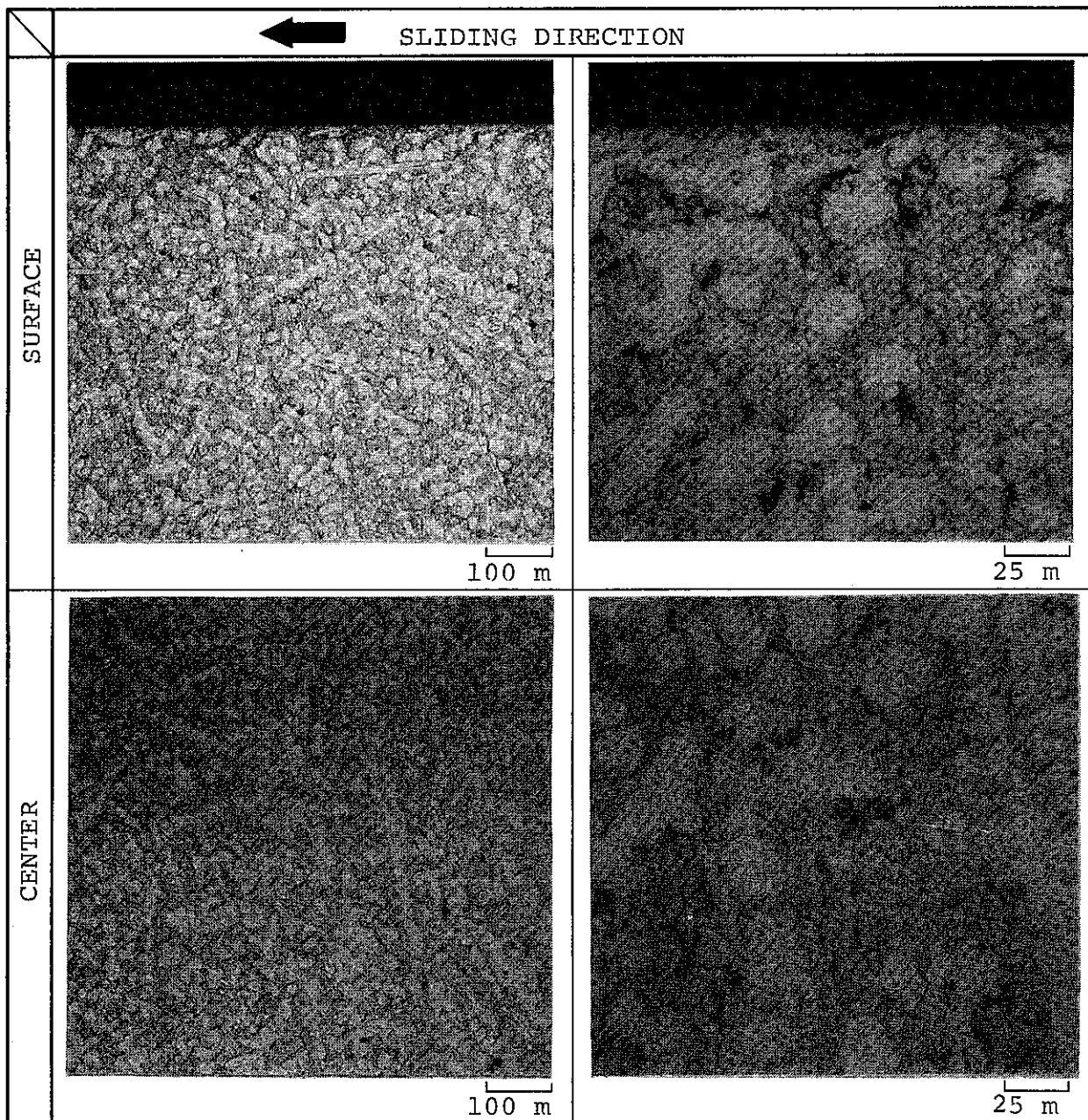
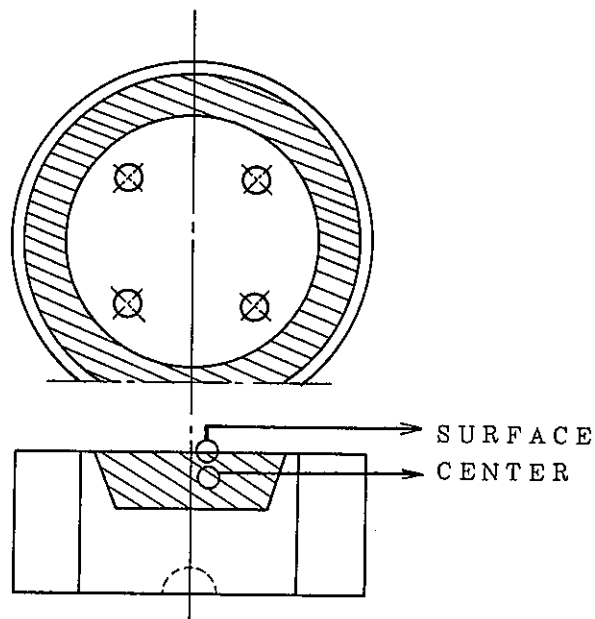


Fig. 5.30 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

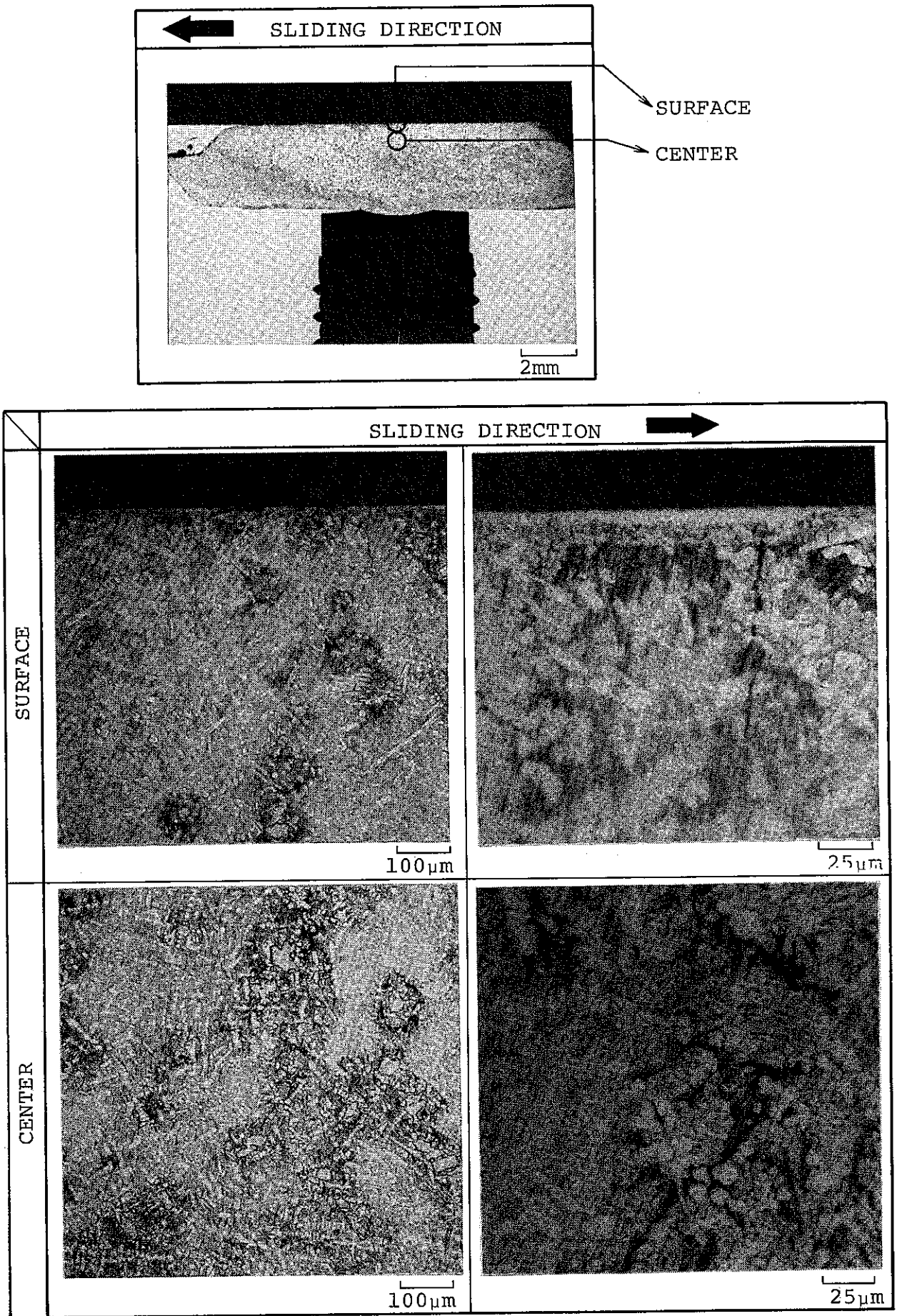


Fig. 5.31 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

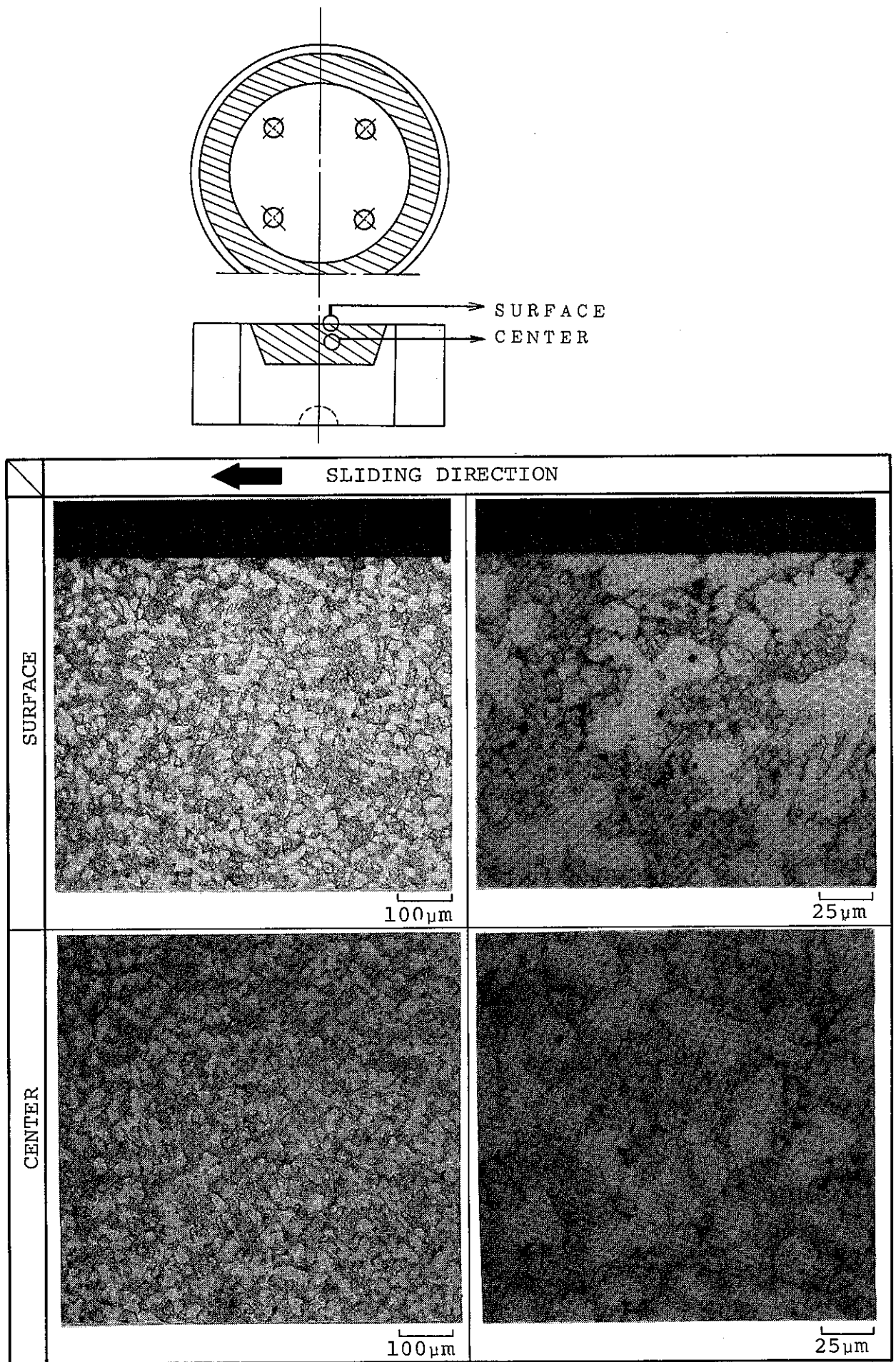


Fig. 5.32 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

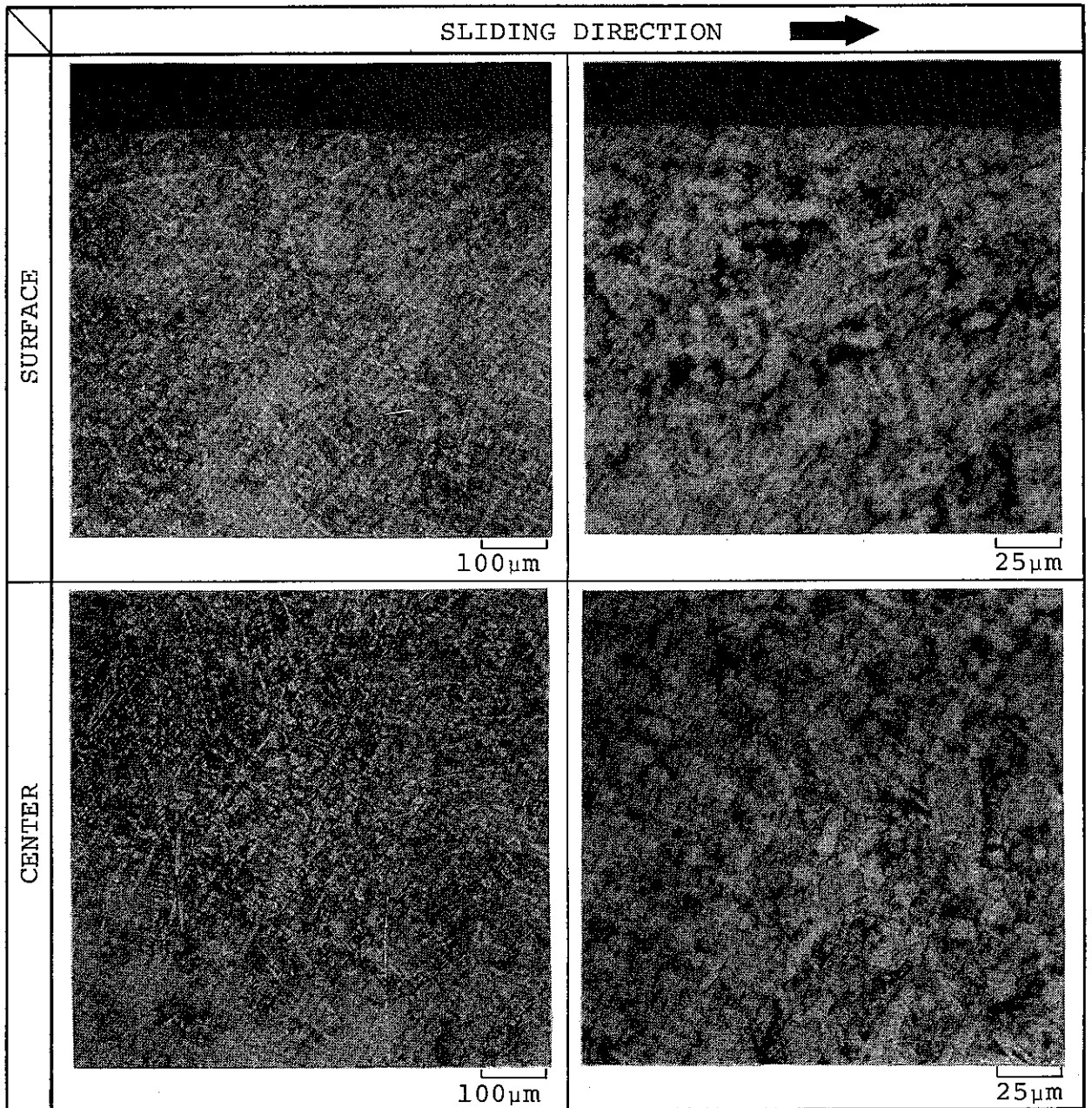
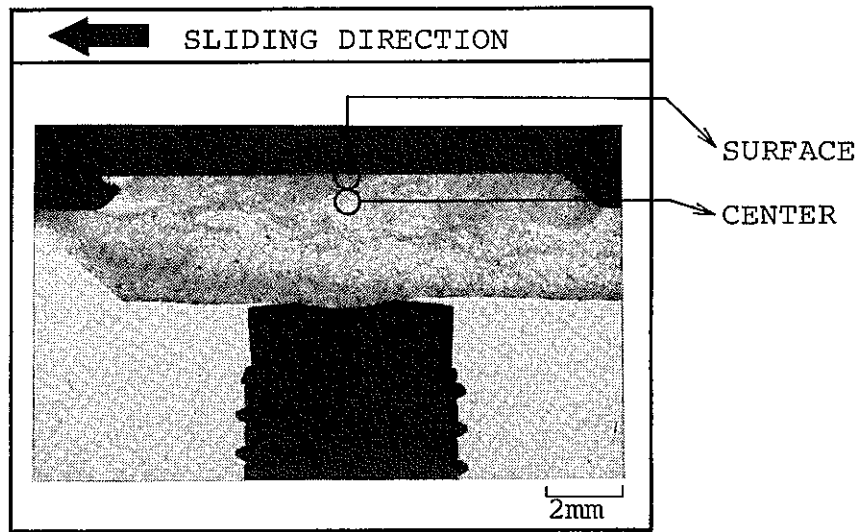


Fig. 5.33 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

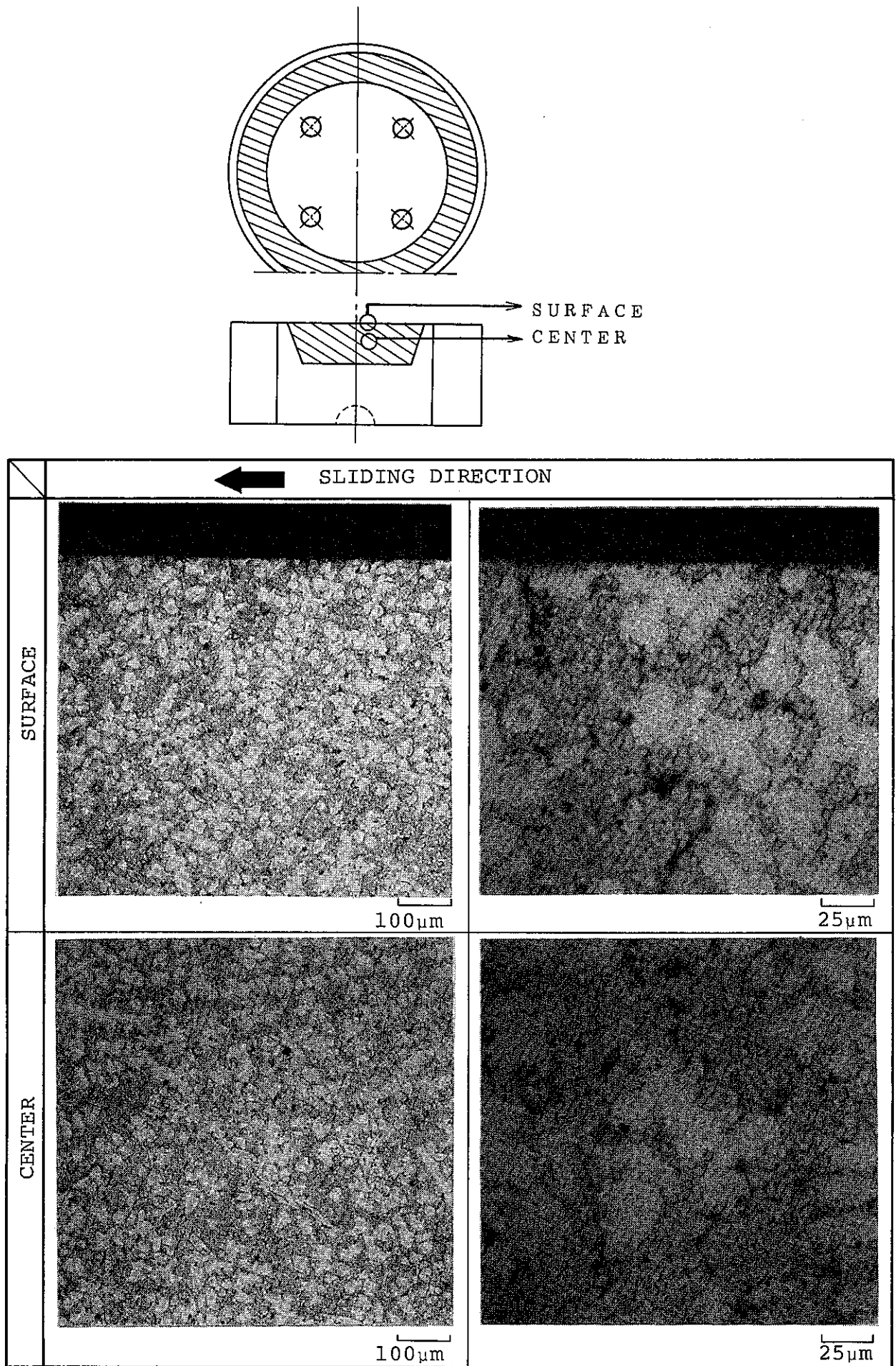


Fig. 5.34 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

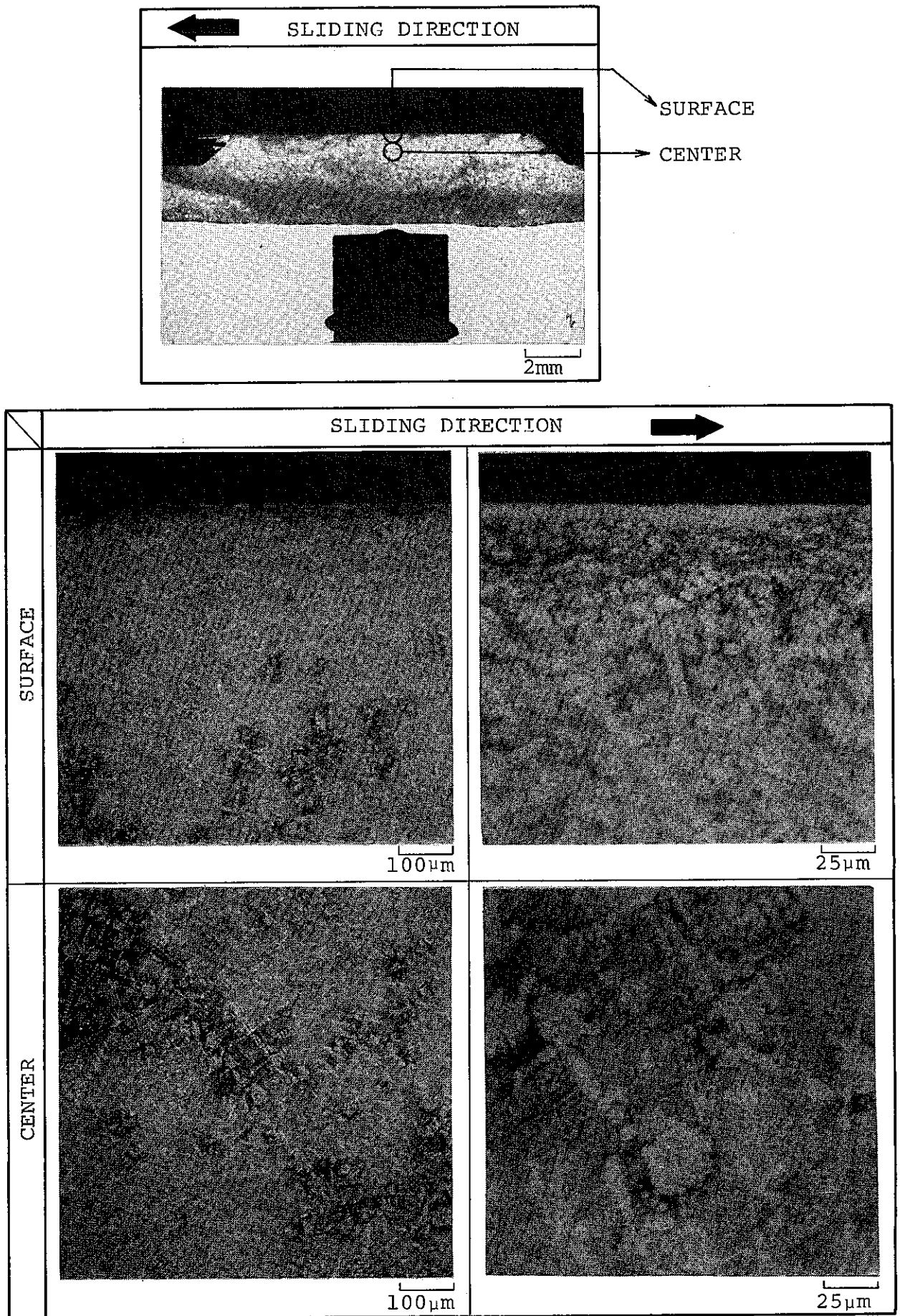


Fig. 5.35 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

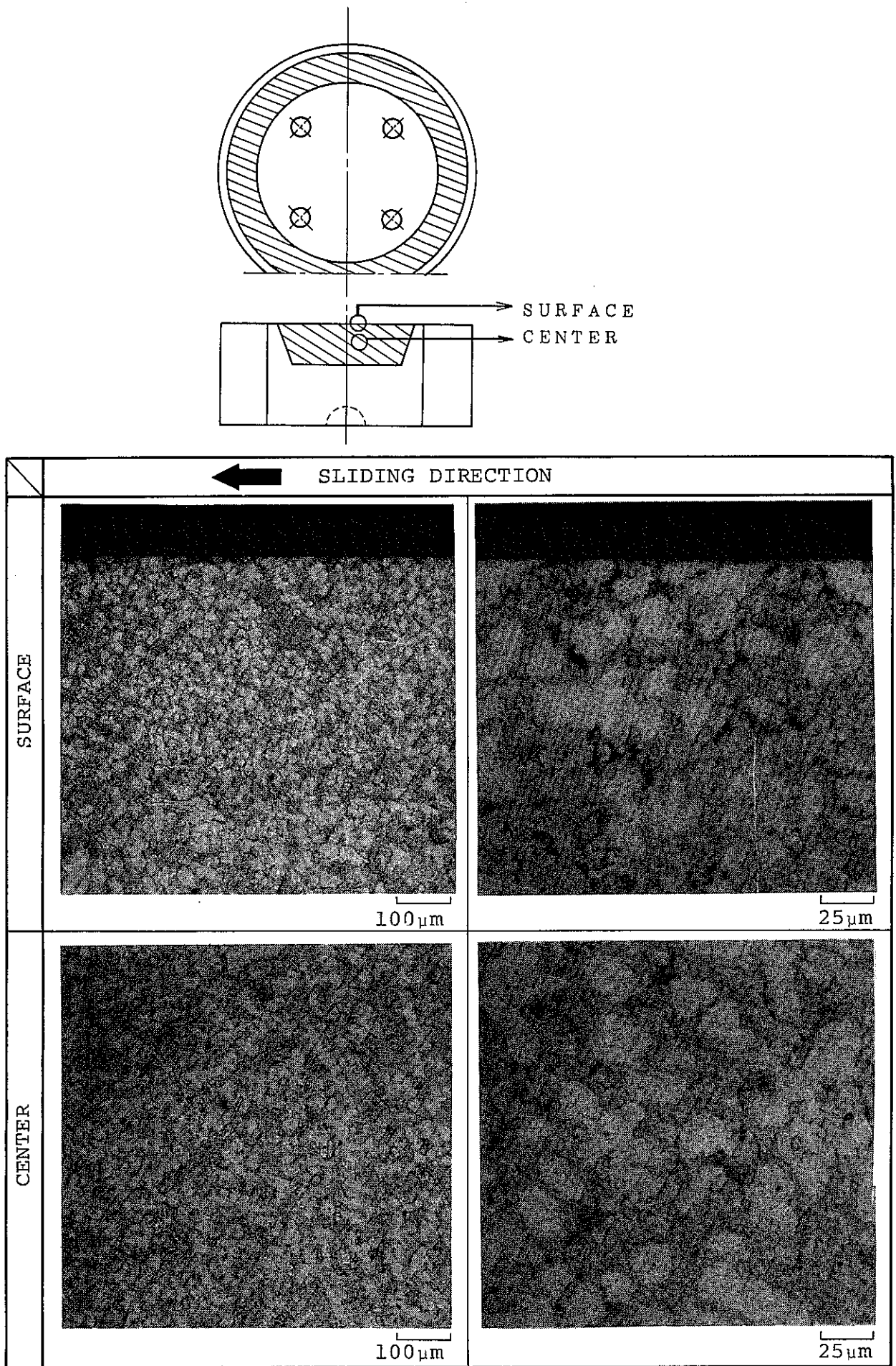


Fig. 5.36 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

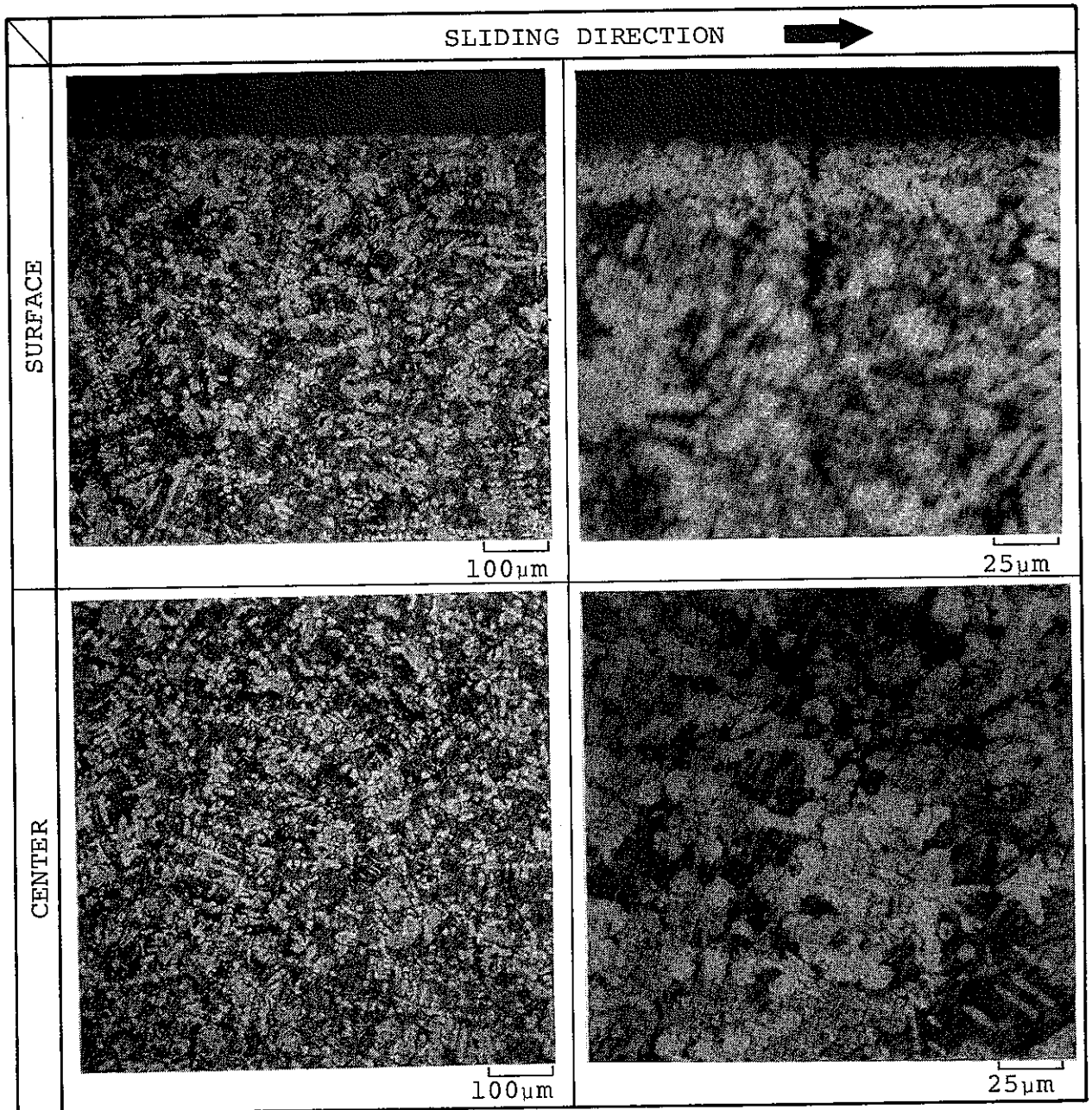
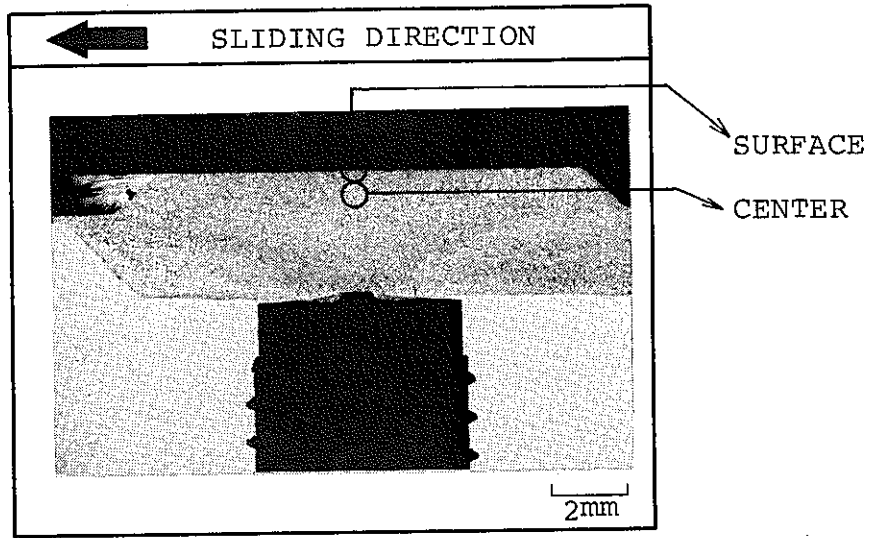


Fig. 5.37 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm², 120s)

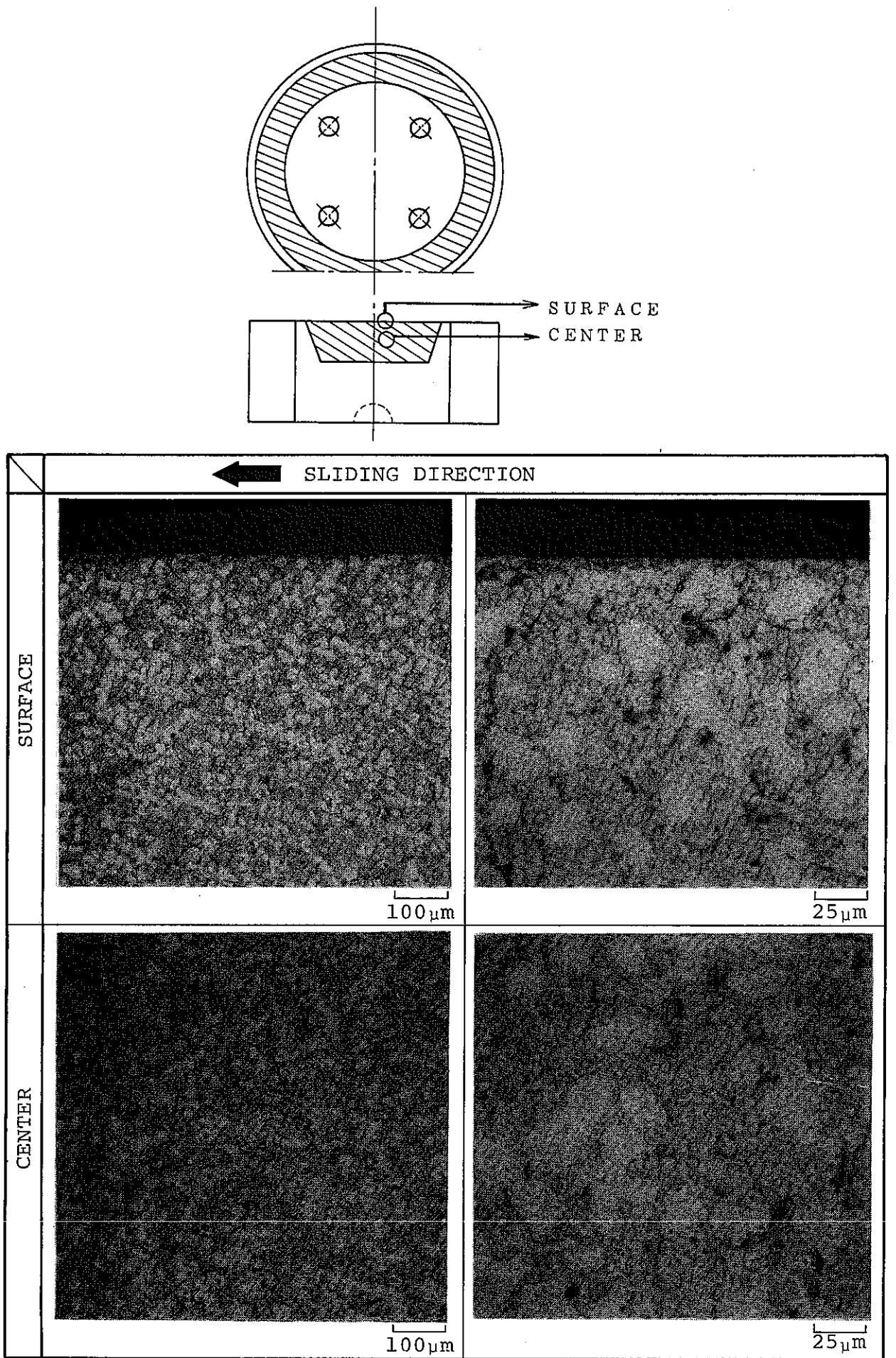


Fig. 5.38 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (400°C, 22m/s, 4.0kg/mm², 120s)

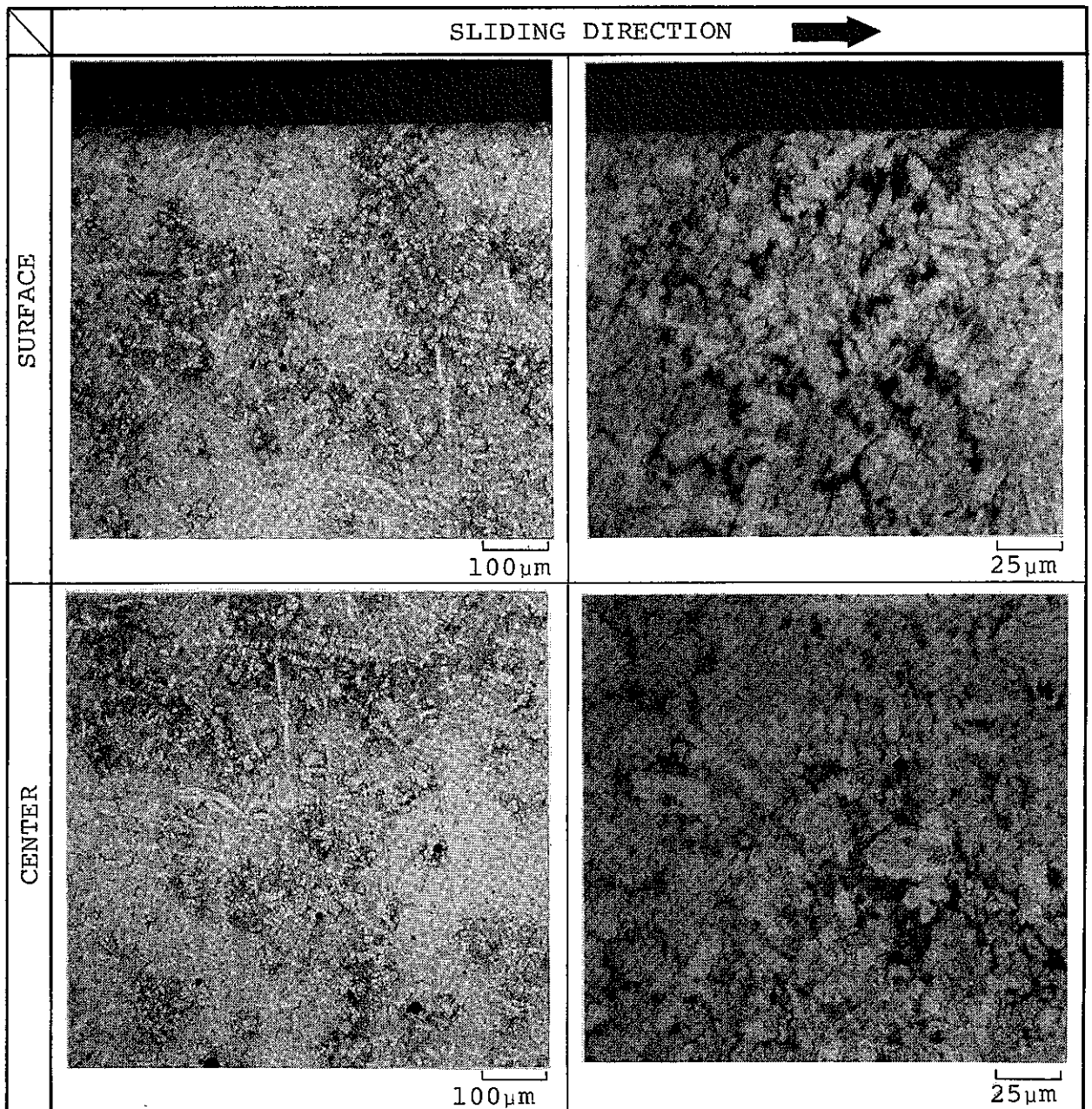
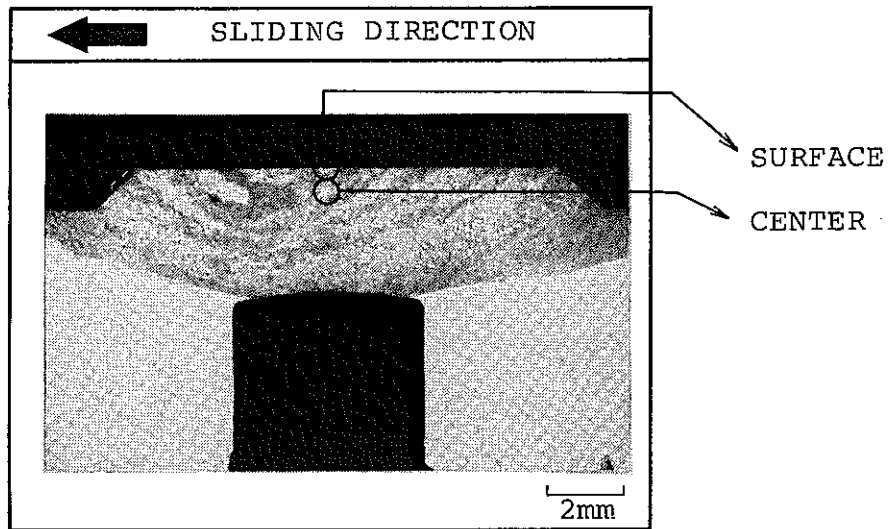


Fig. 5.39 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

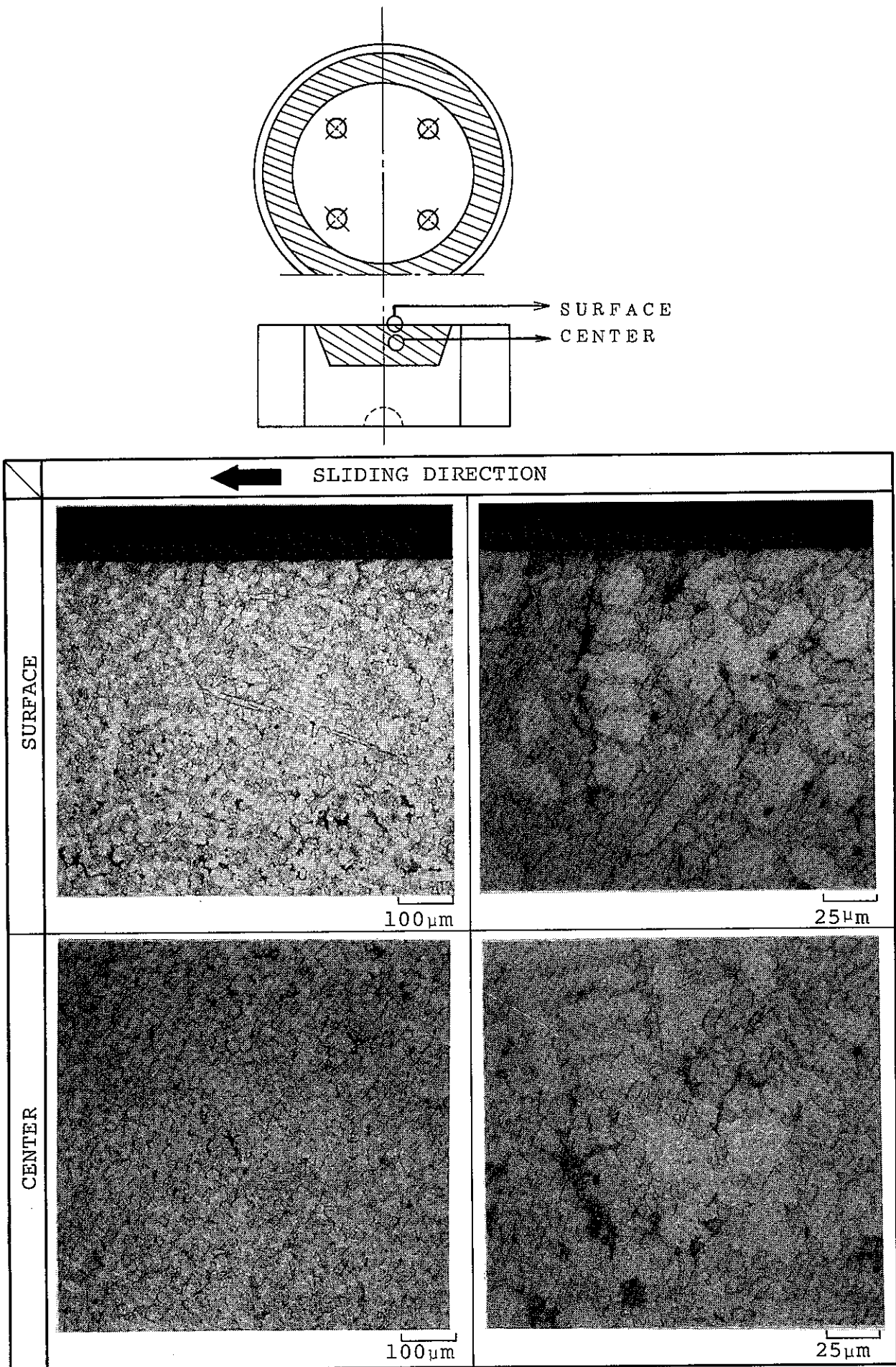


Fig. 5.40 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

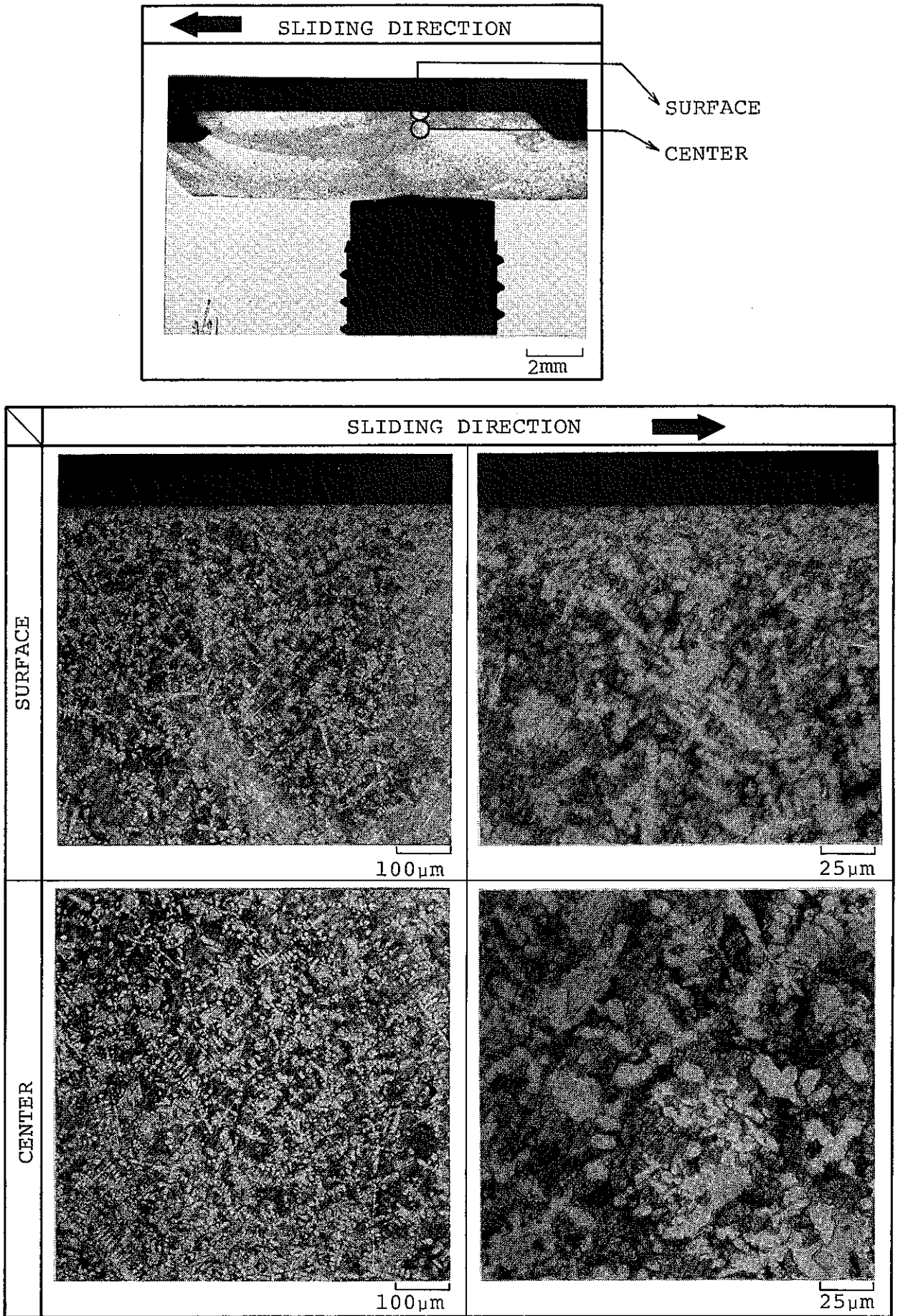


Fig. 5.41 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
 (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

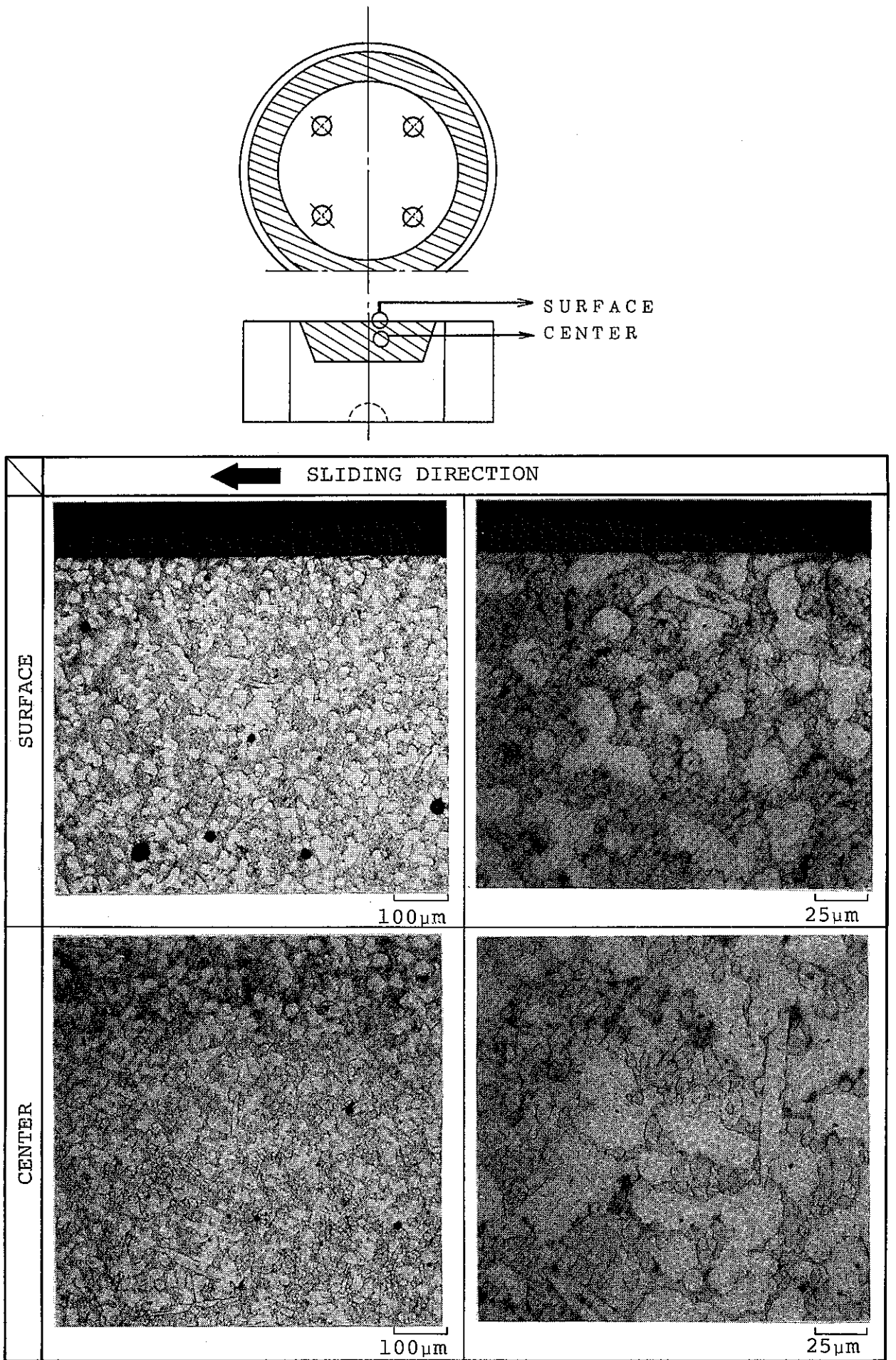


Fig. 5.42 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

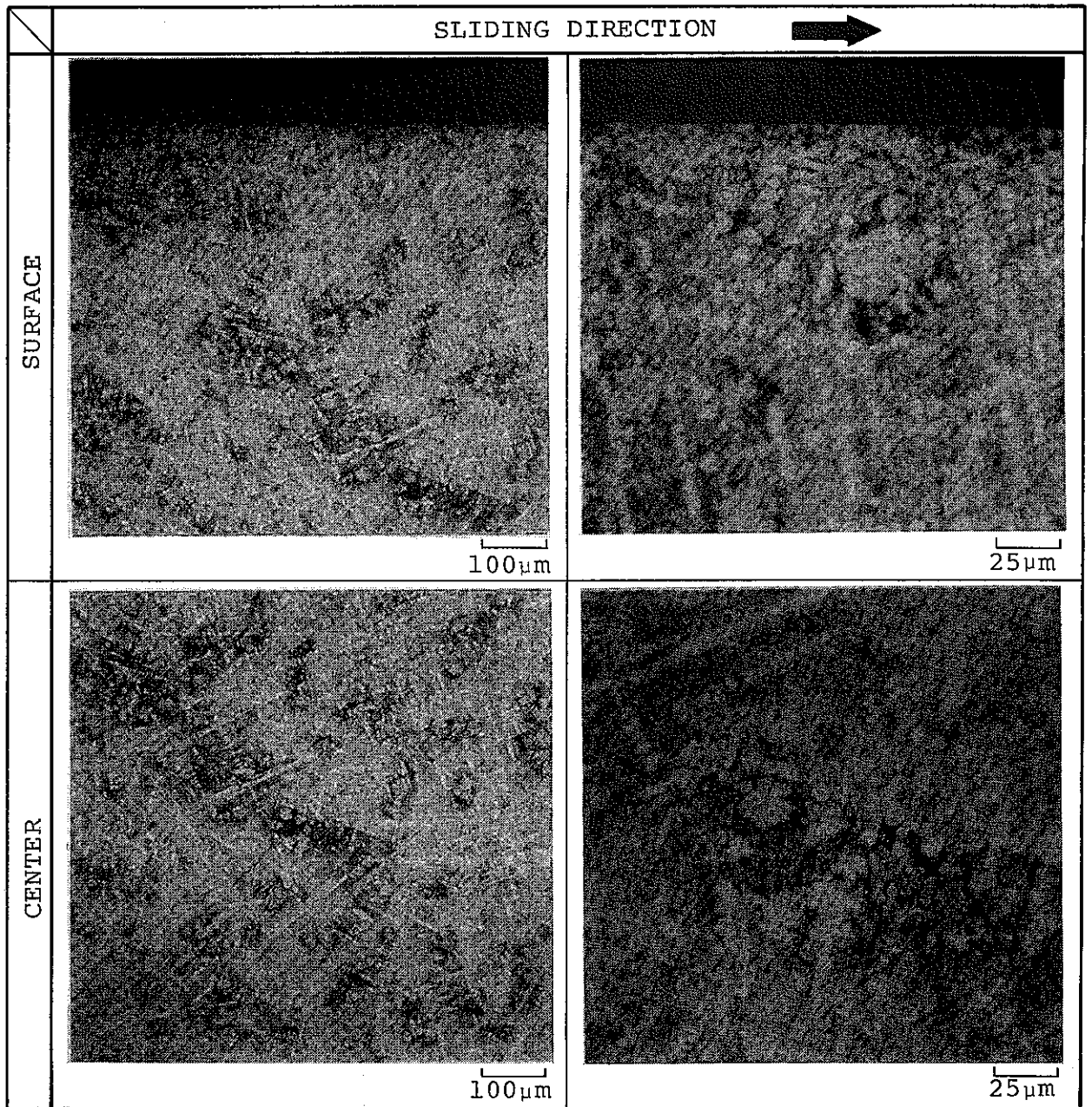
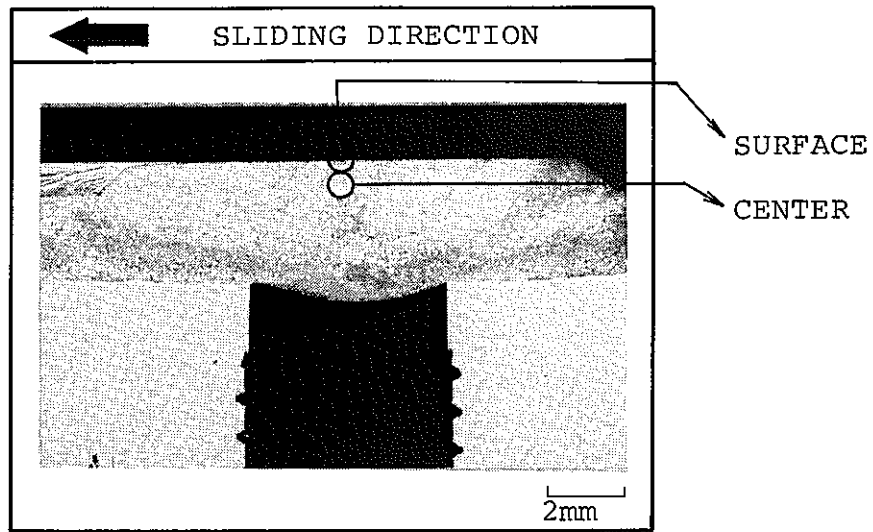


Fig. 5.43 Cross Sectional Microstructure of Stator Side
(500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

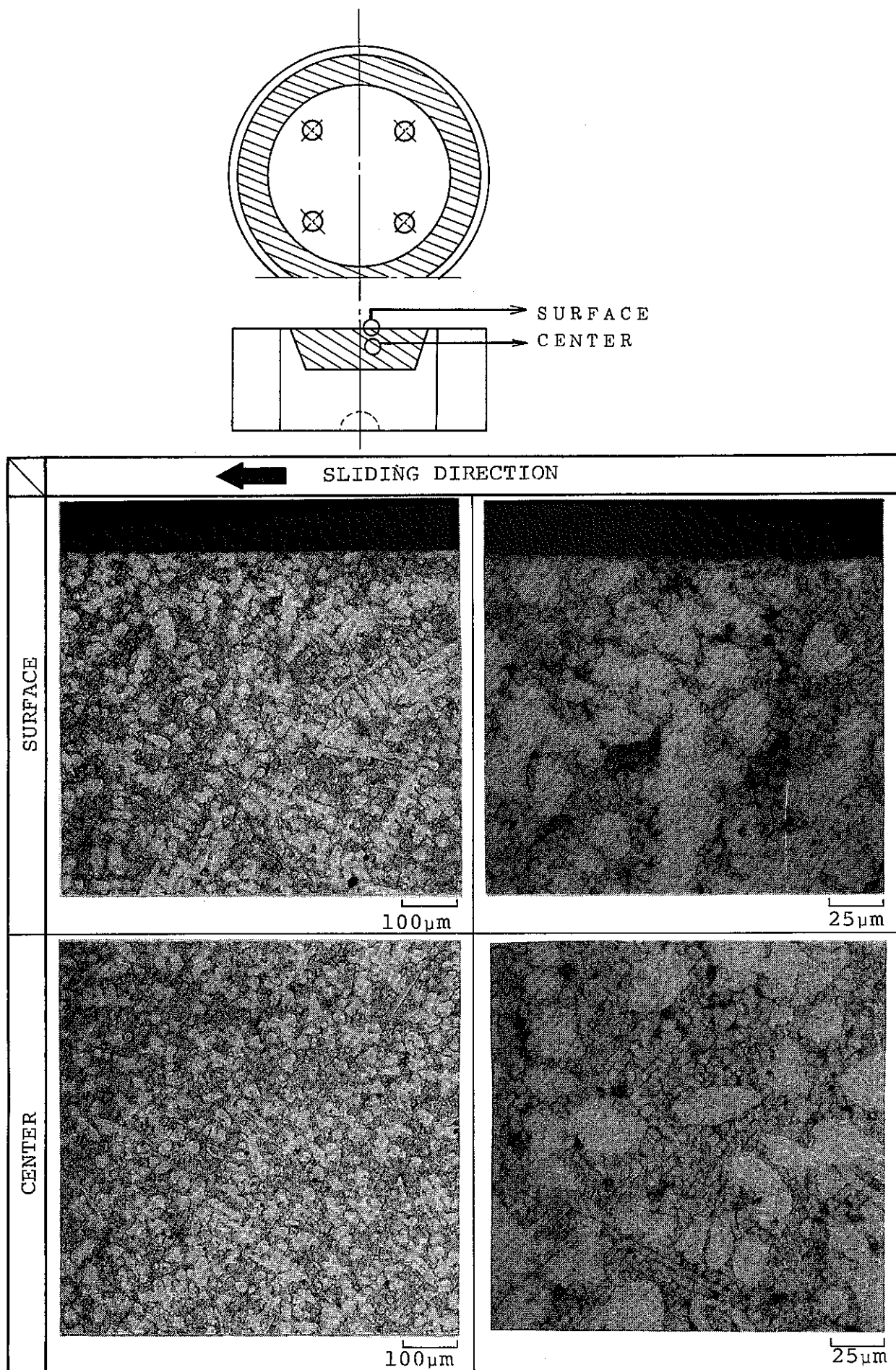
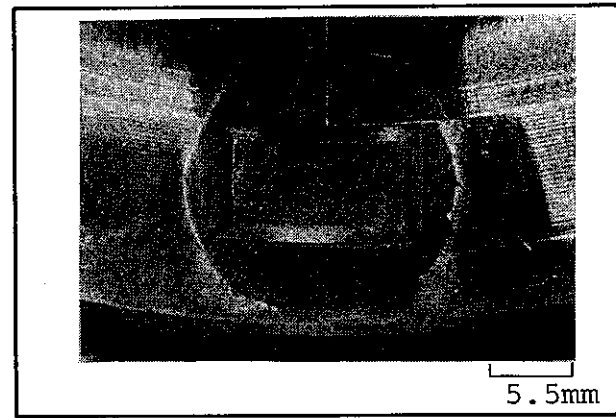


Fig. 5.44 Cross Sectional Microstructure of Rotor Side
 (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)



← SLIDING DIRECTION

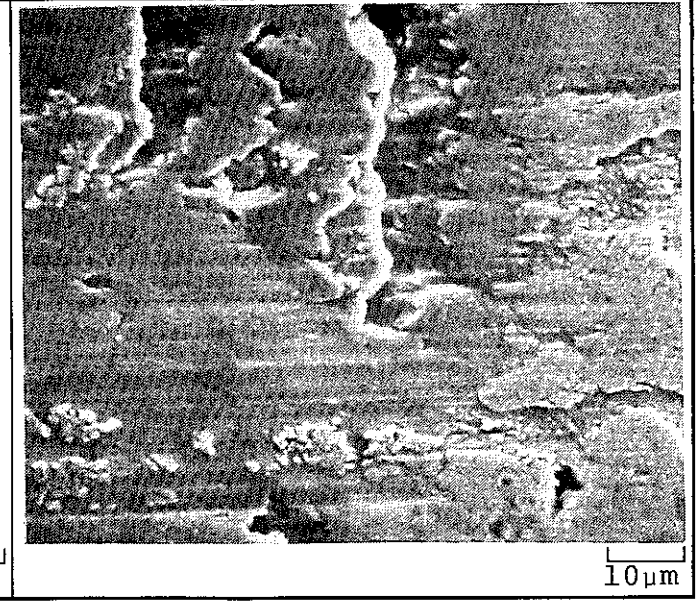
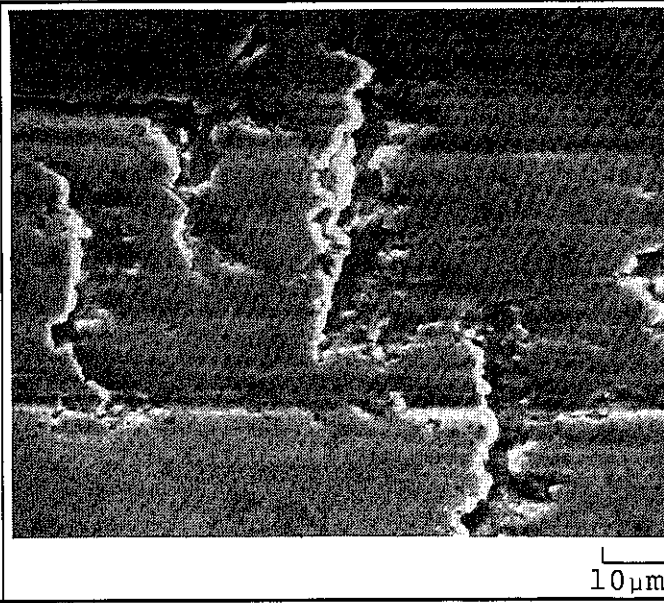
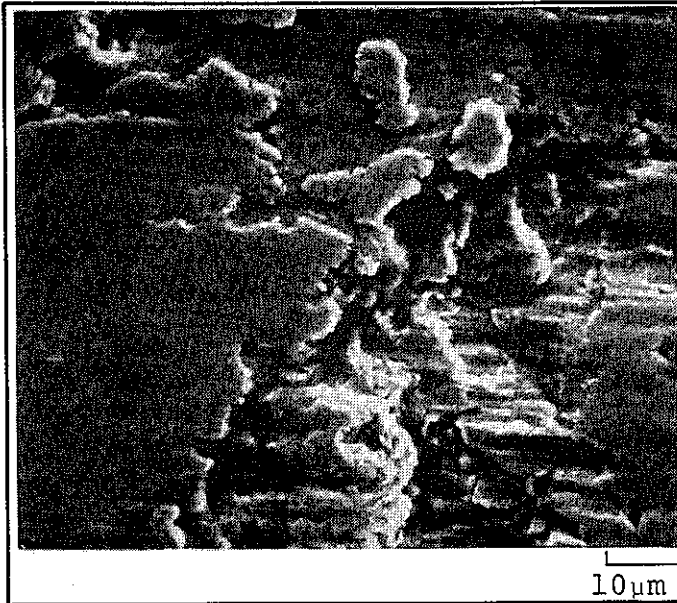
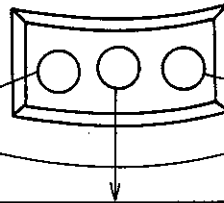
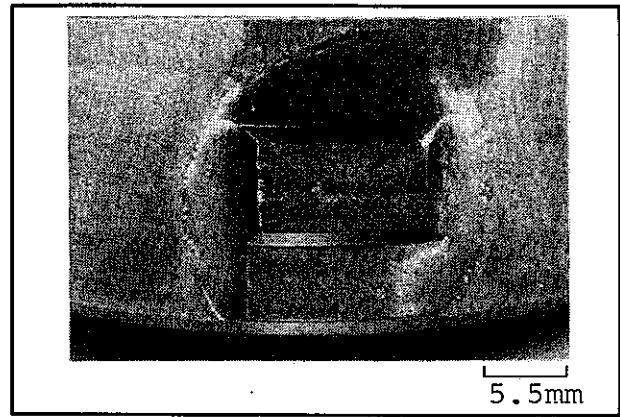


Fig. 5.45 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 60s)



← SLIDING DIRECTION

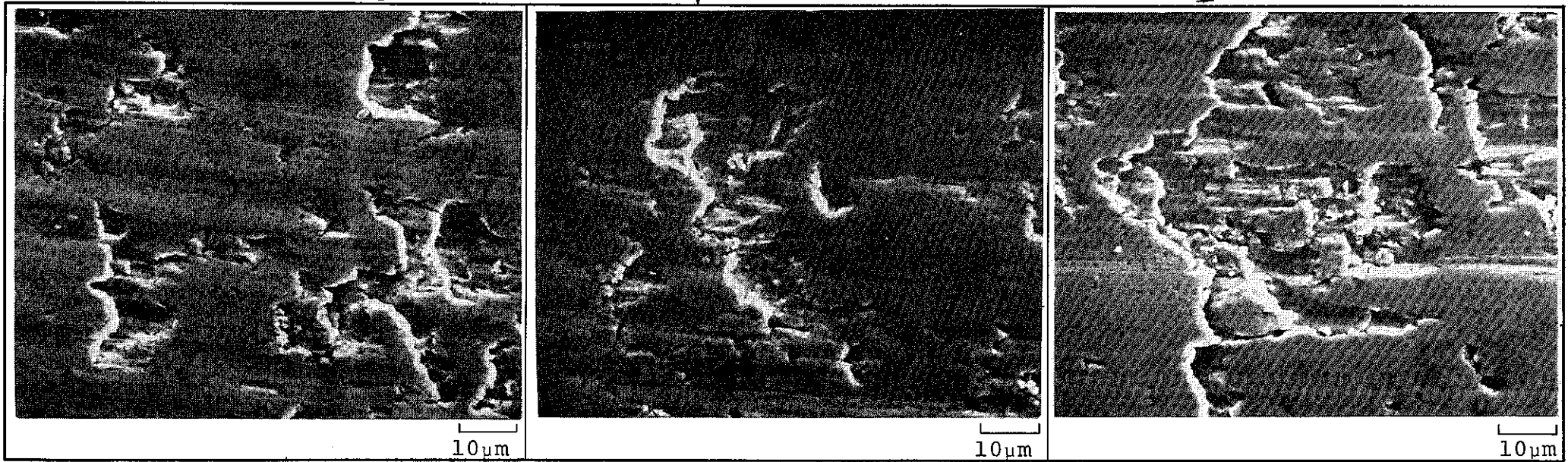
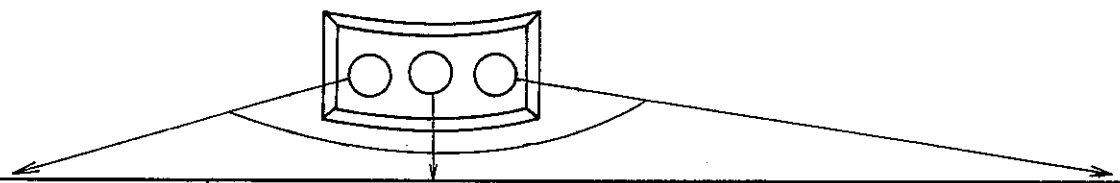
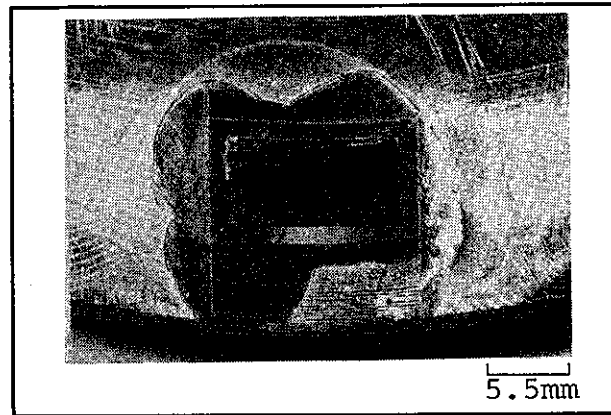


Fig. 5.46 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 2m/s, 3.8kg/mm², 120s)



← SLIDING DIRECTION

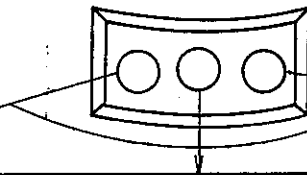


Fig. 5.47 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

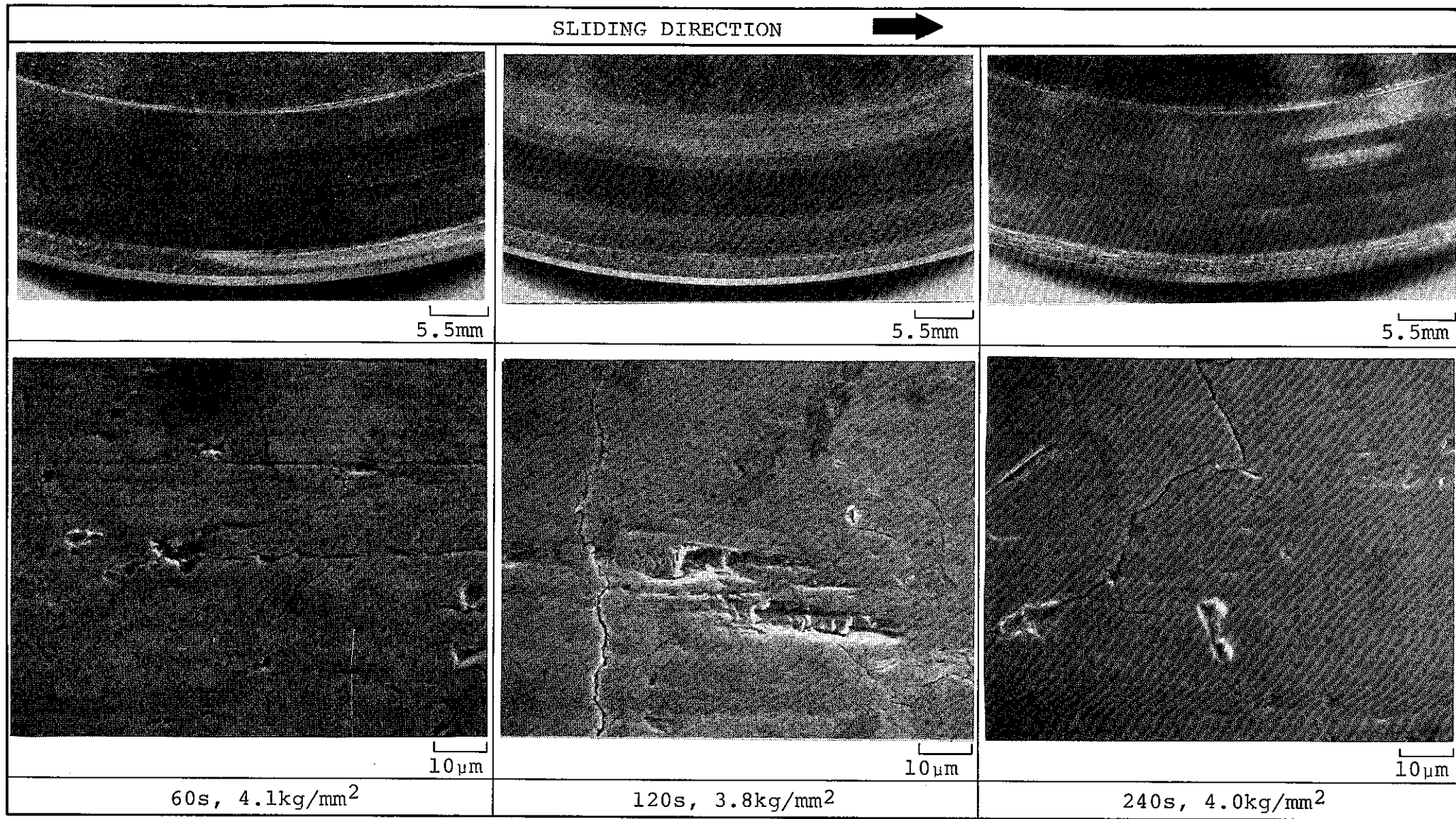
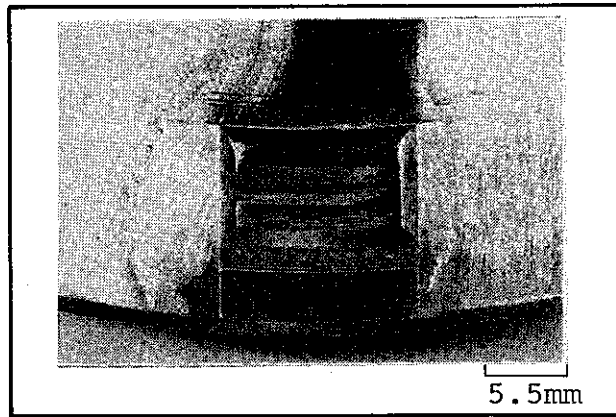


Fig. 5.48 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side
(400°C, 2m/s)



← SLIDING DIRECTION

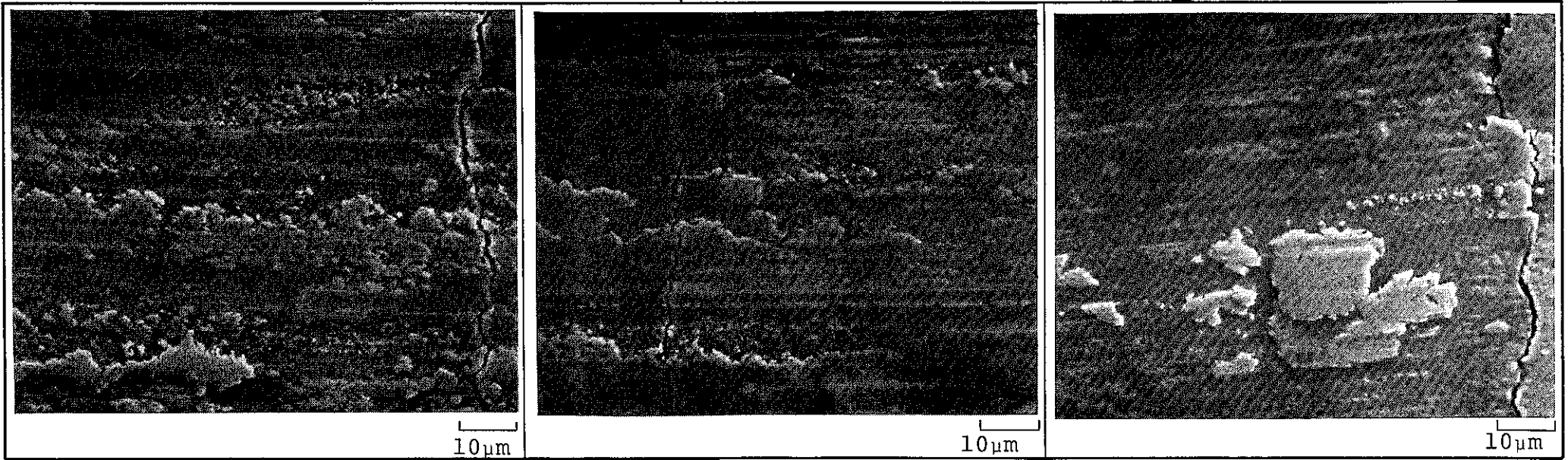
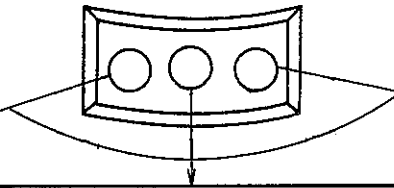
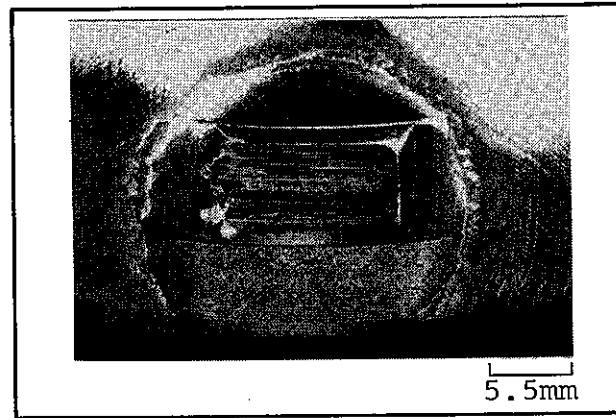


Fig. 5.49 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 10m/s, 3.7kg/mm², 60s)



← SLIDING DIRECTION

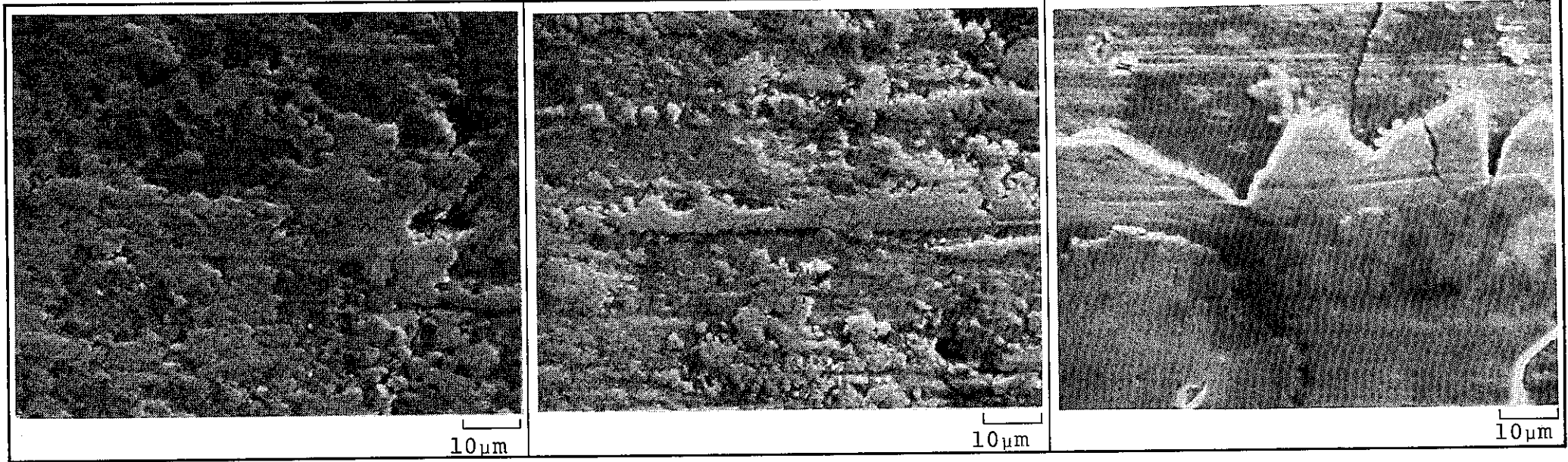
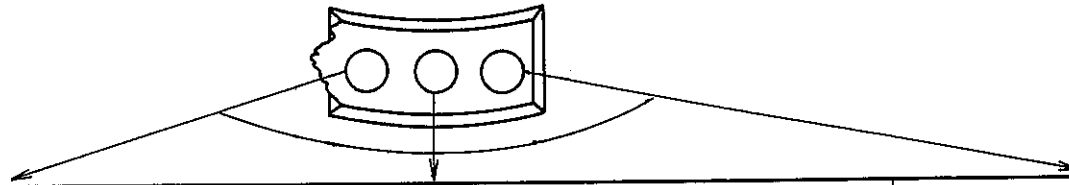
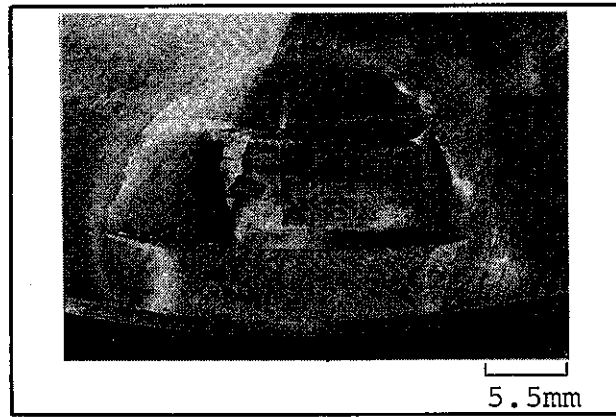


Fig. 5.50 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 120s)



← SLIDING DIRECTION

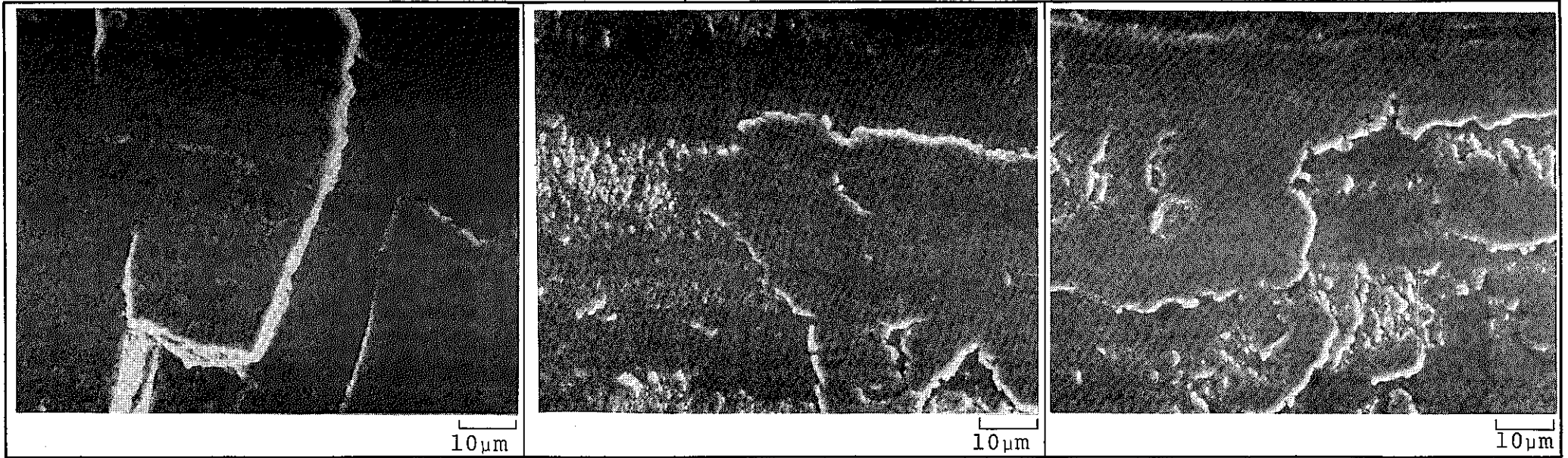
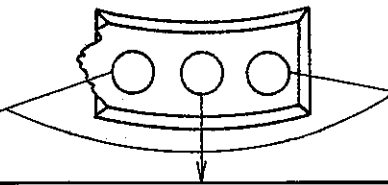


Fig. 5.51 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

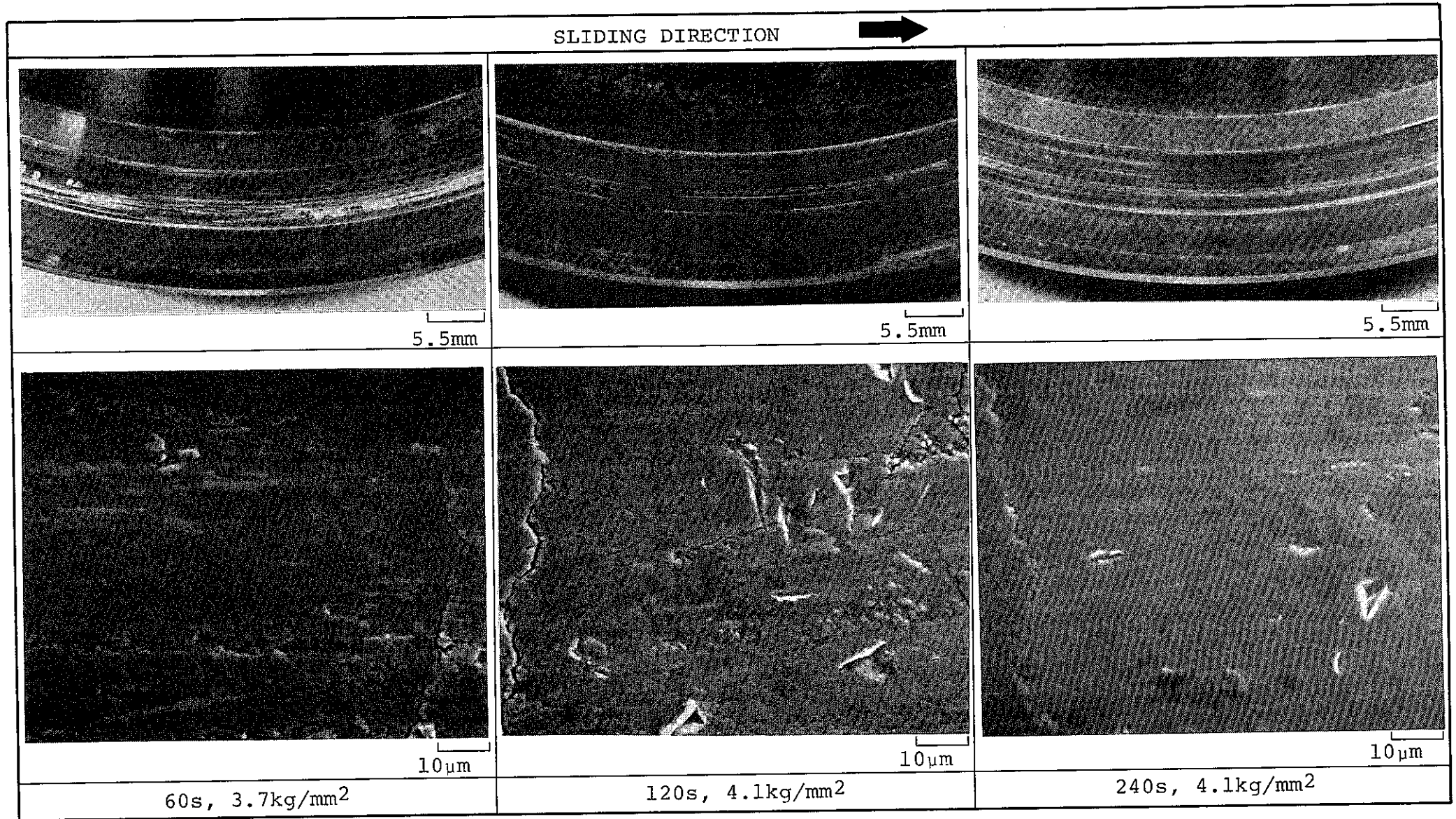


Fig. 5.52 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side
(400°C, 10m/s)

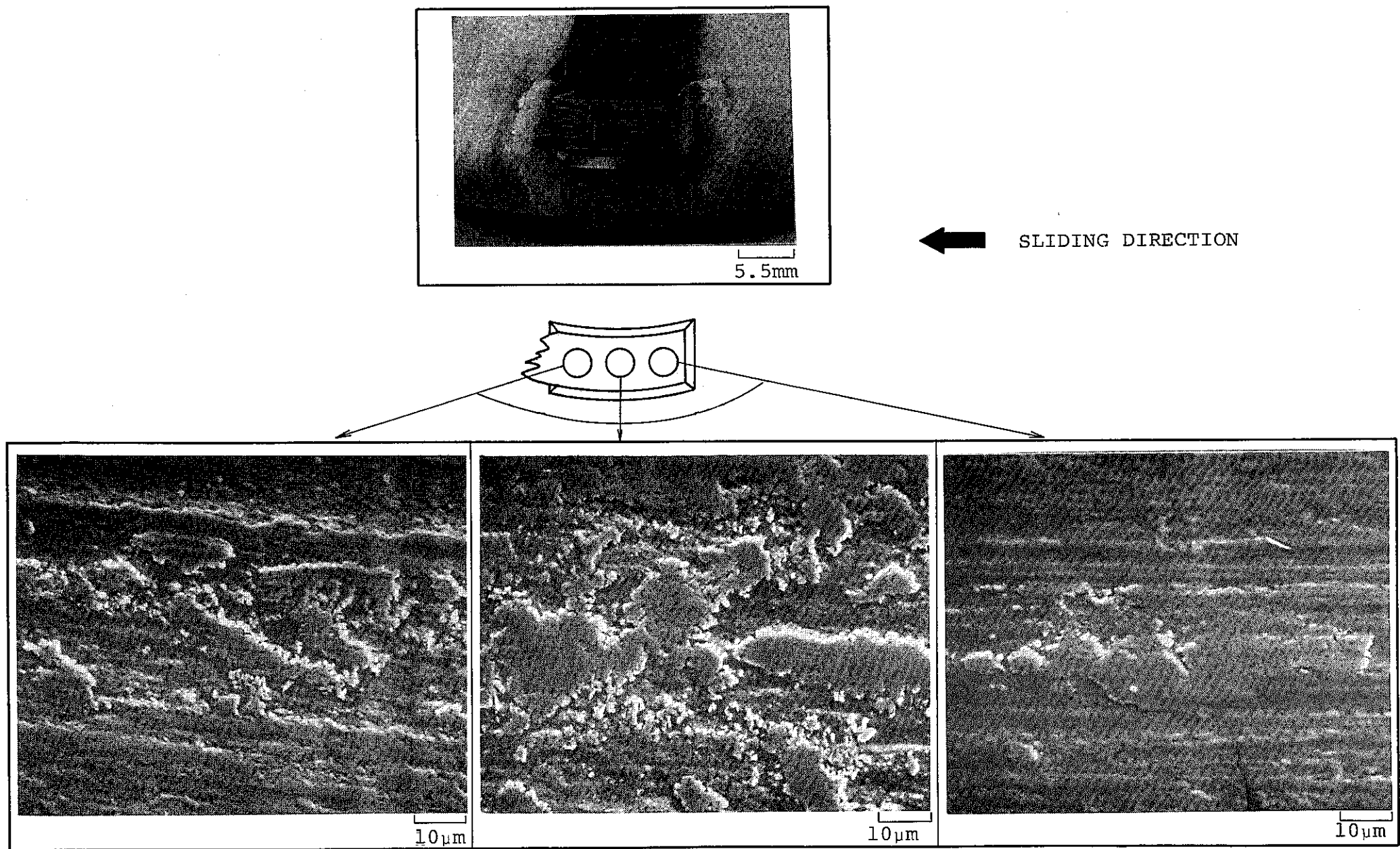
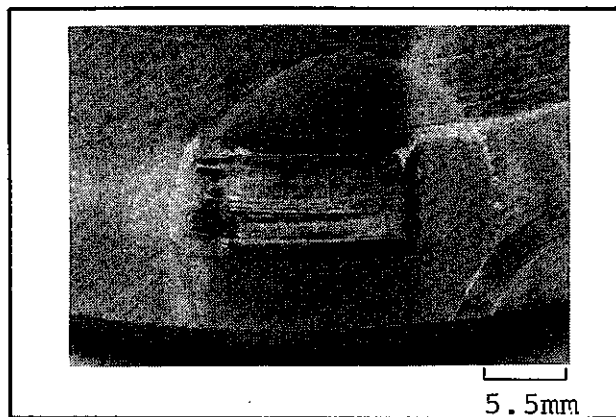


Fig. 5.53 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)



← SLIDING DIRECTION

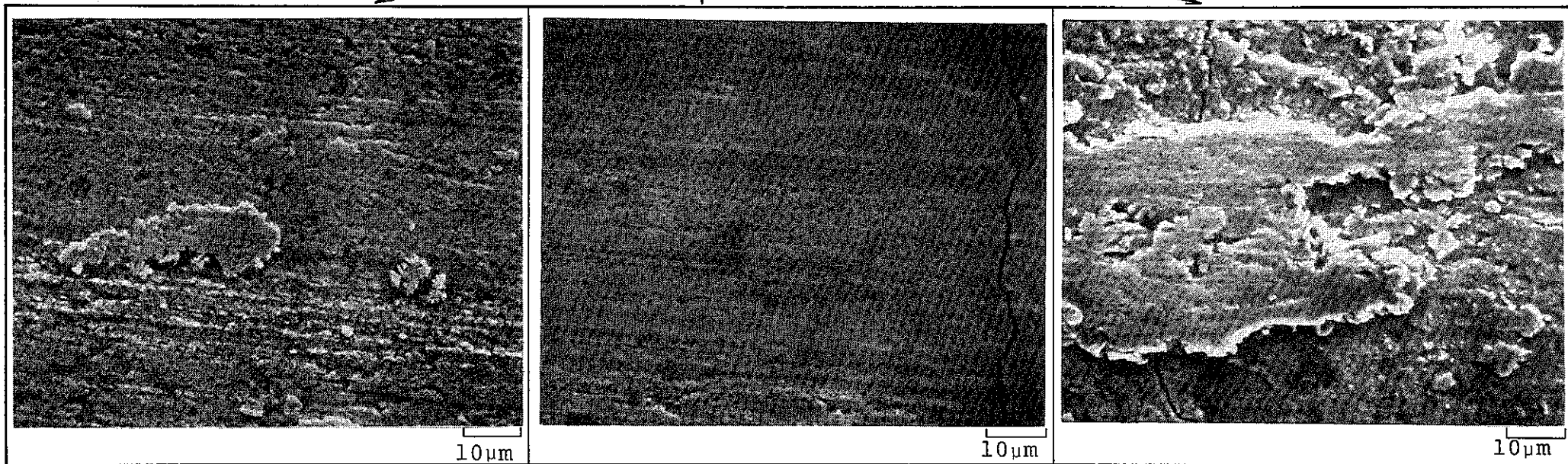
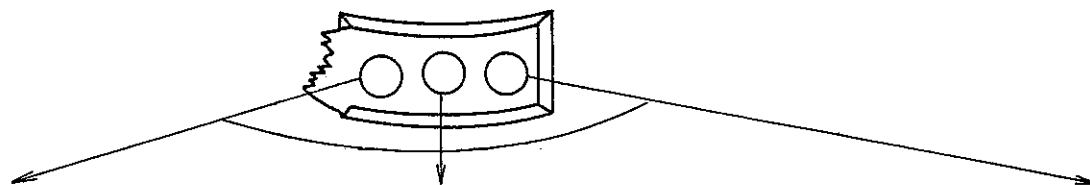
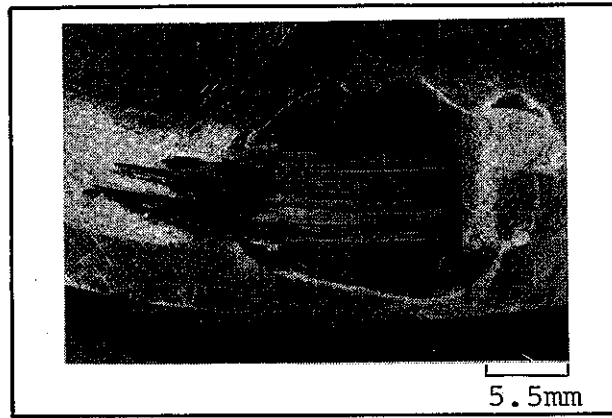


Fig. 5.54 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 22m/s, 4.0kg/mm², 120s)



← SLIDING DIRECTION

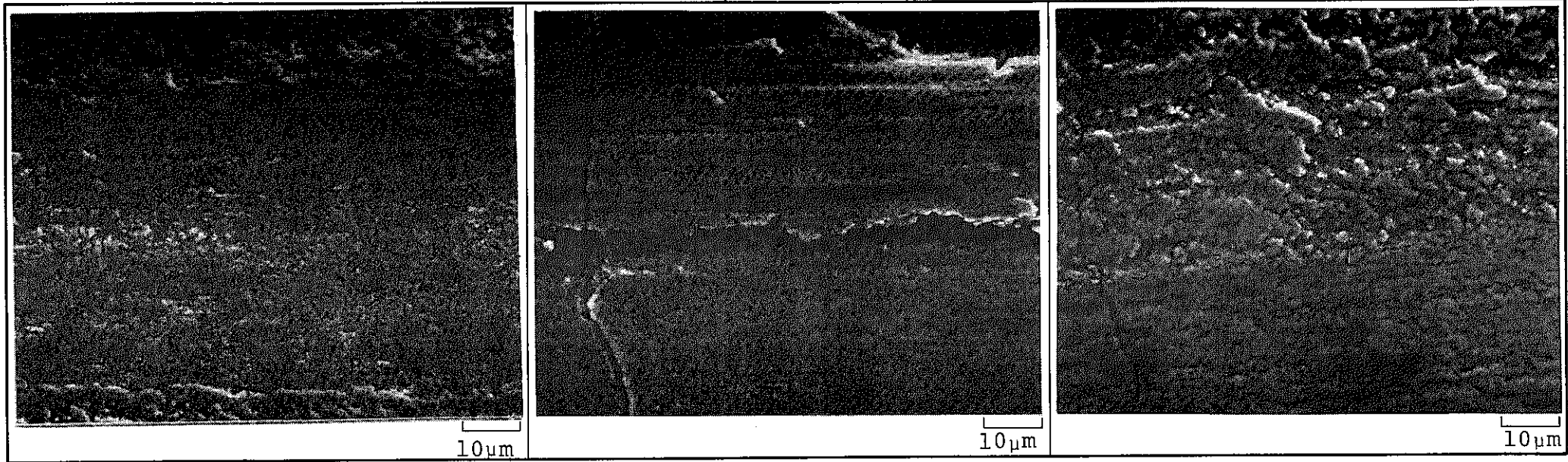
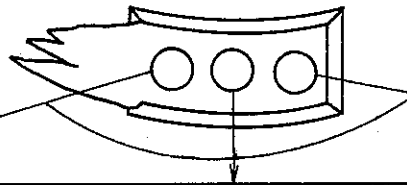


Fig. 5.55 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

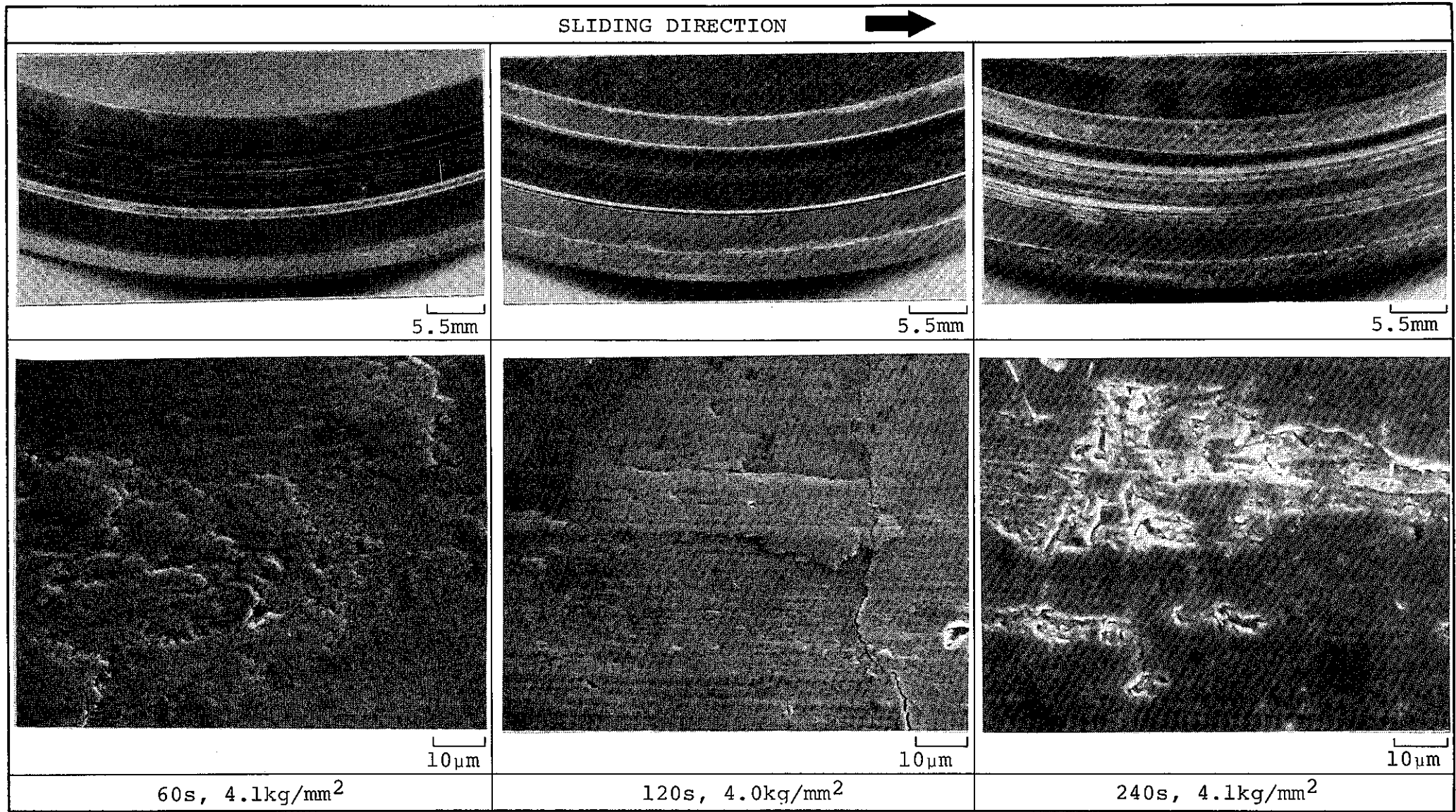
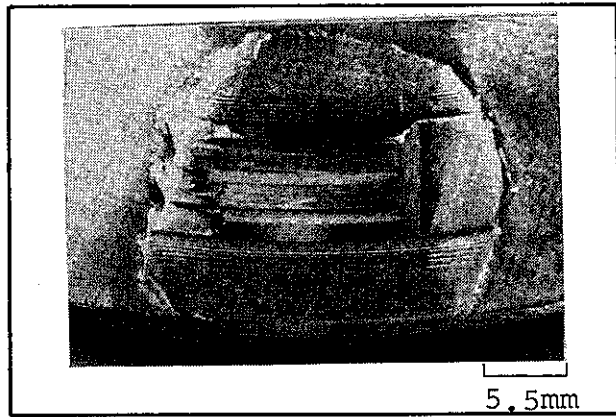


Fig. 5.56 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side
(400°C, 22m/s)



SLIDING DIRECTION

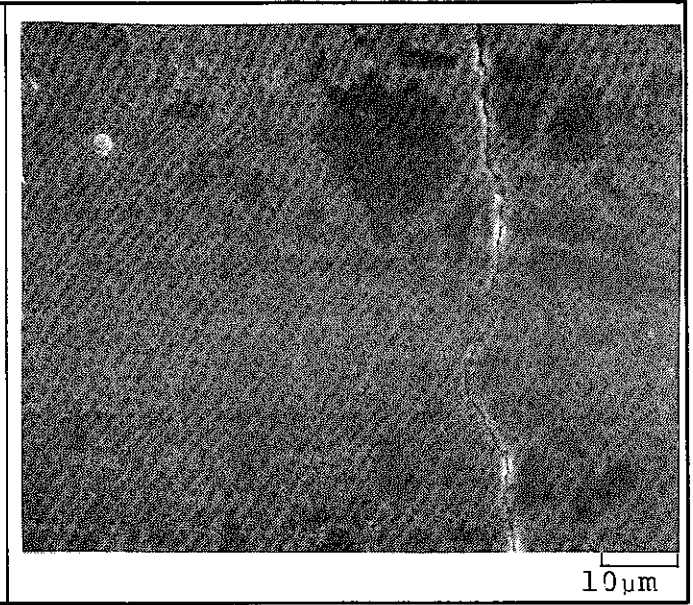
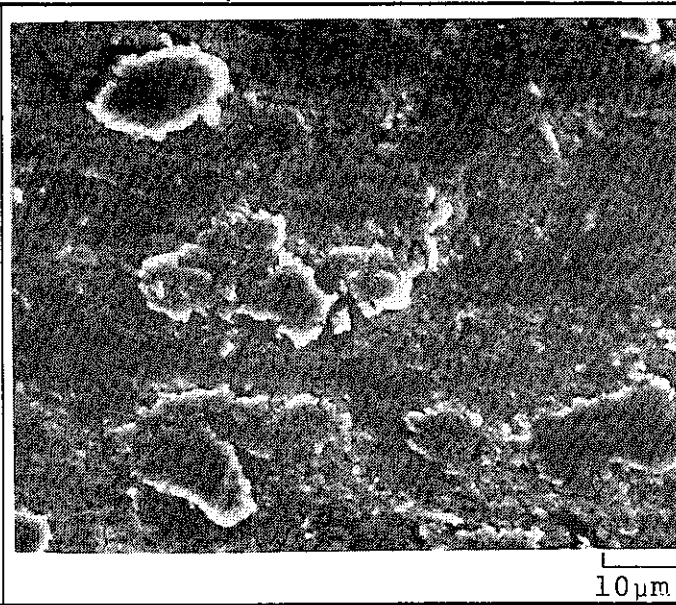
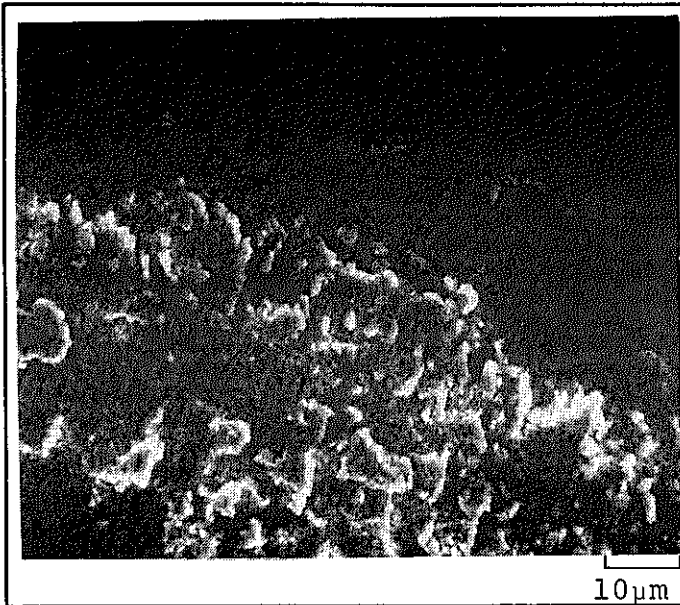
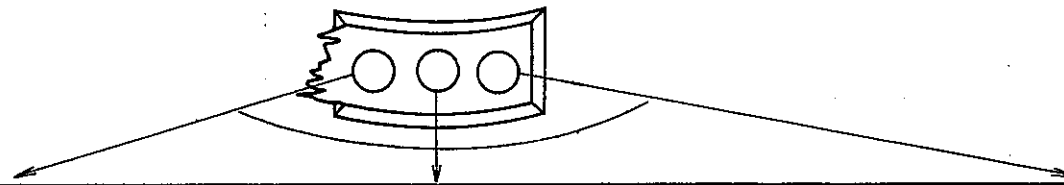


Fig. 5.57 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

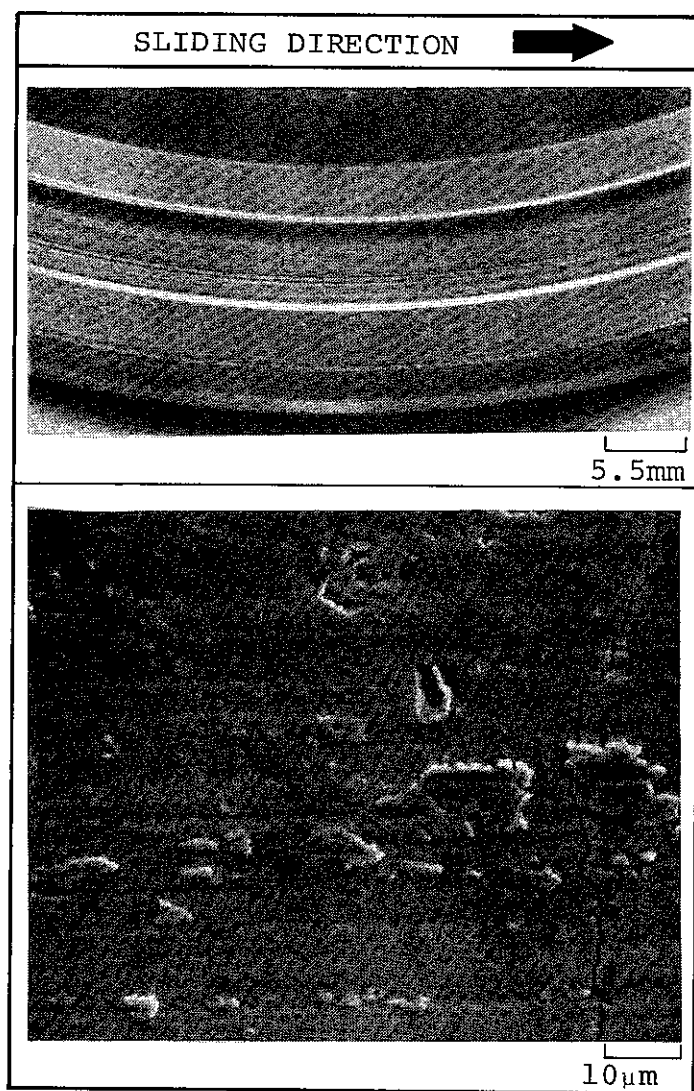
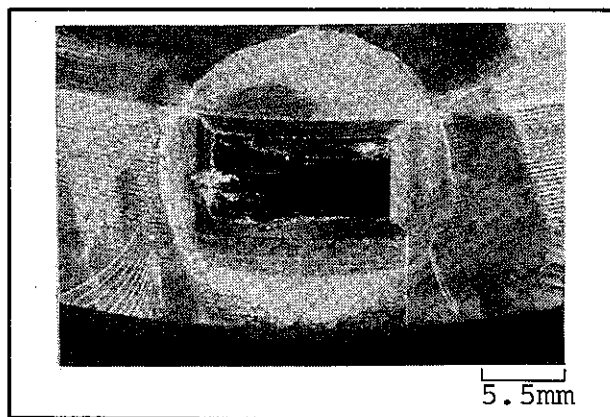


Fig. 5.58 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface
of Rotor Side
(400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)



SLIDING DIRECTION

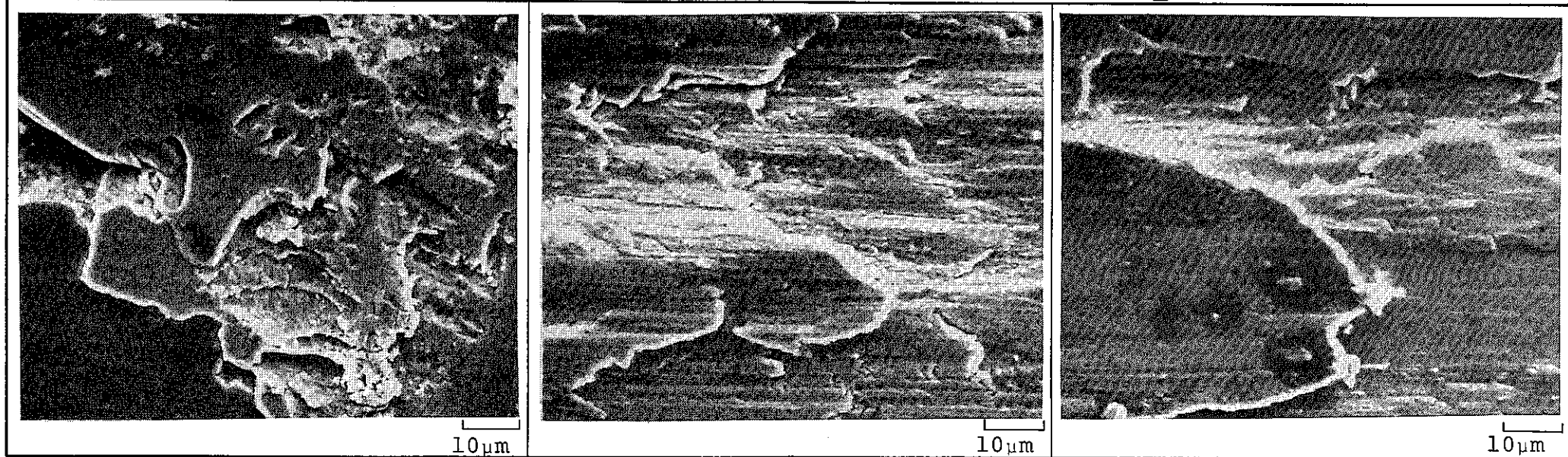
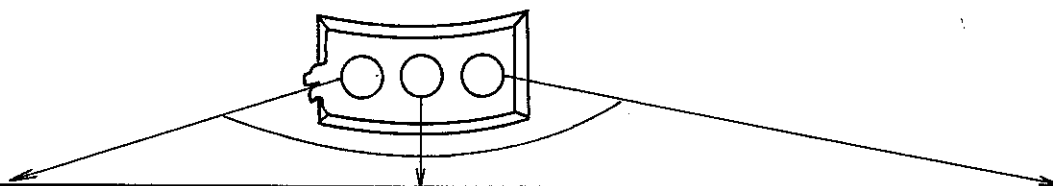
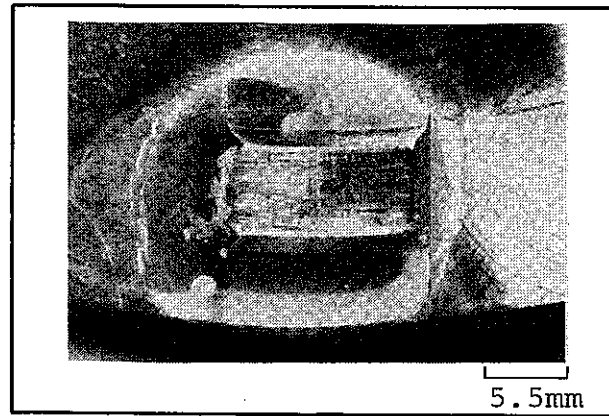


Fig. 5.59 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)



← SLIDING DIRECTION

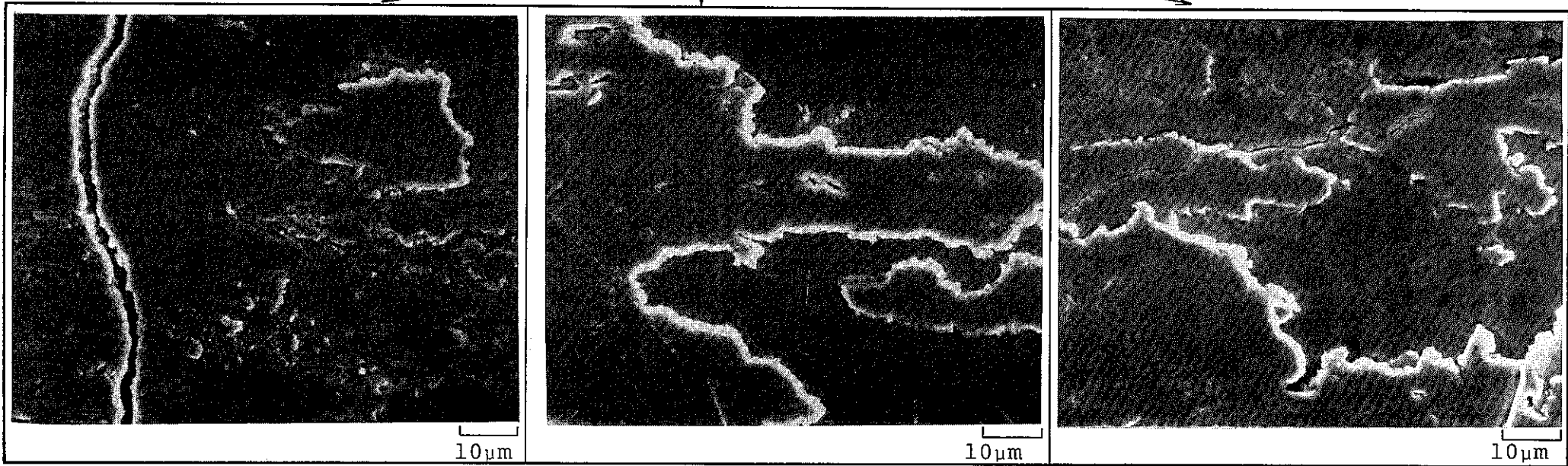
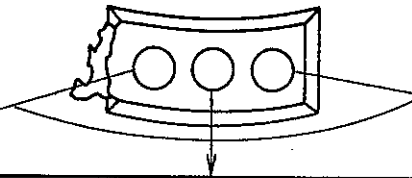
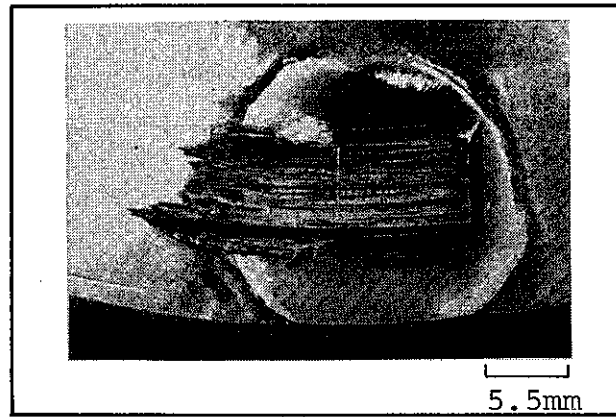


Fig. 5.60 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)



← SLIDING DIRECTION

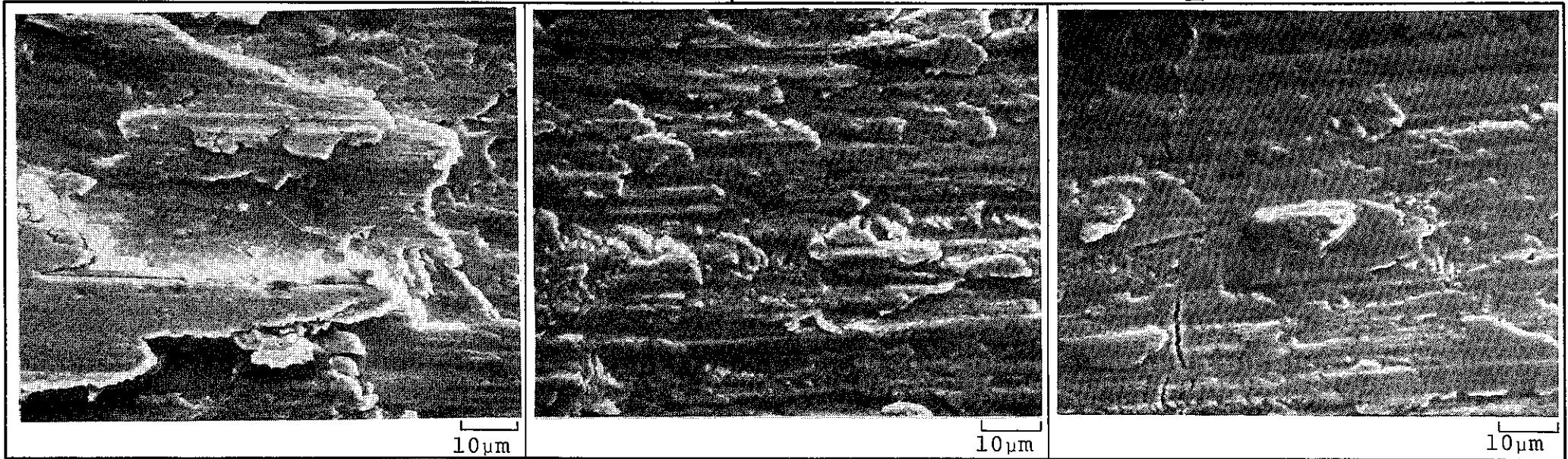
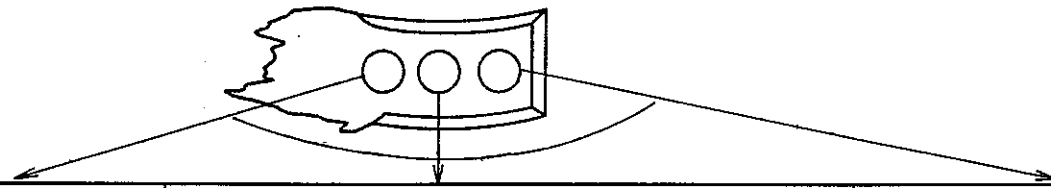


Fig. 5.61 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Stator Side
(500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

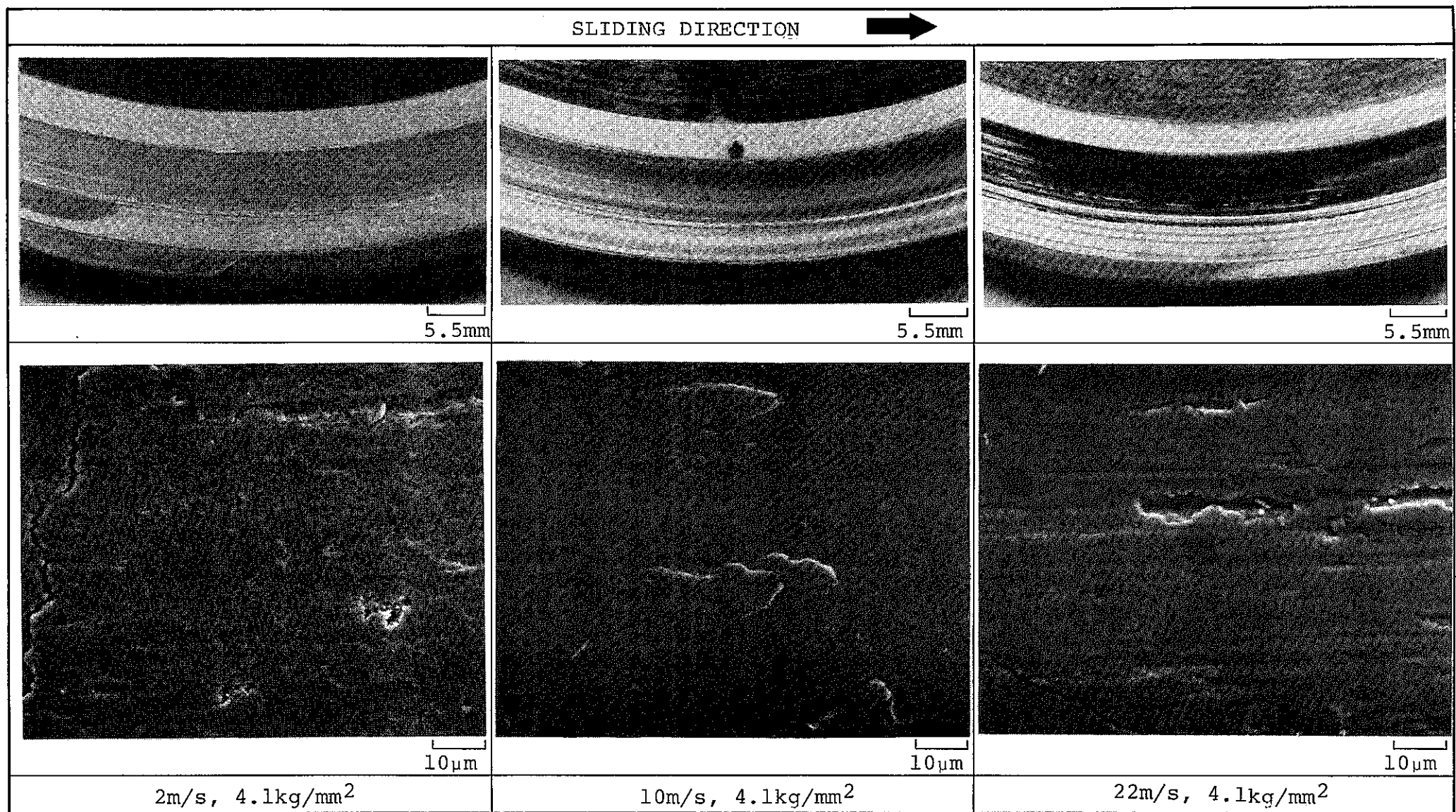
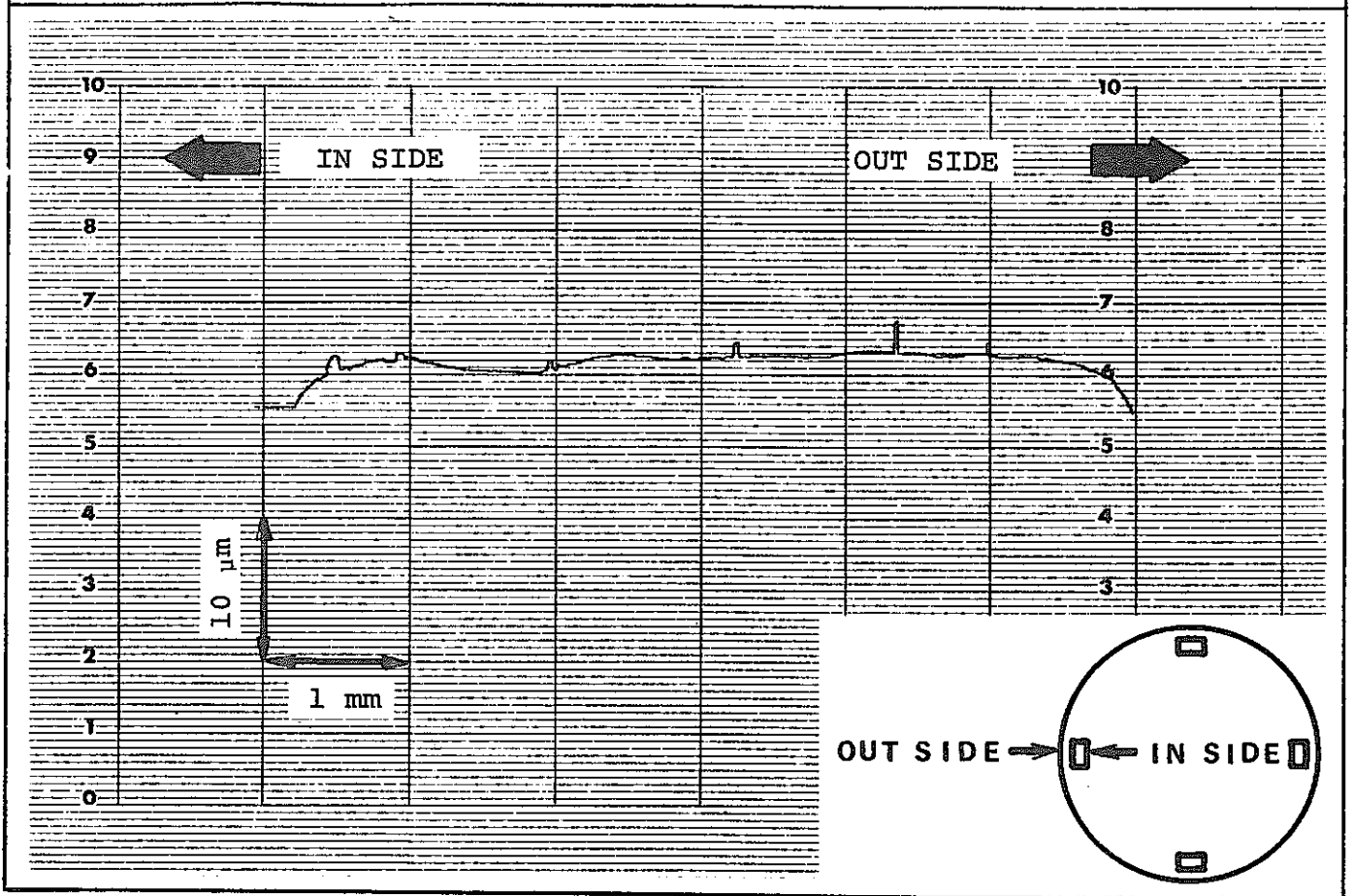


Fig. 5.62 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface of Rotor Side
(500°C, 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

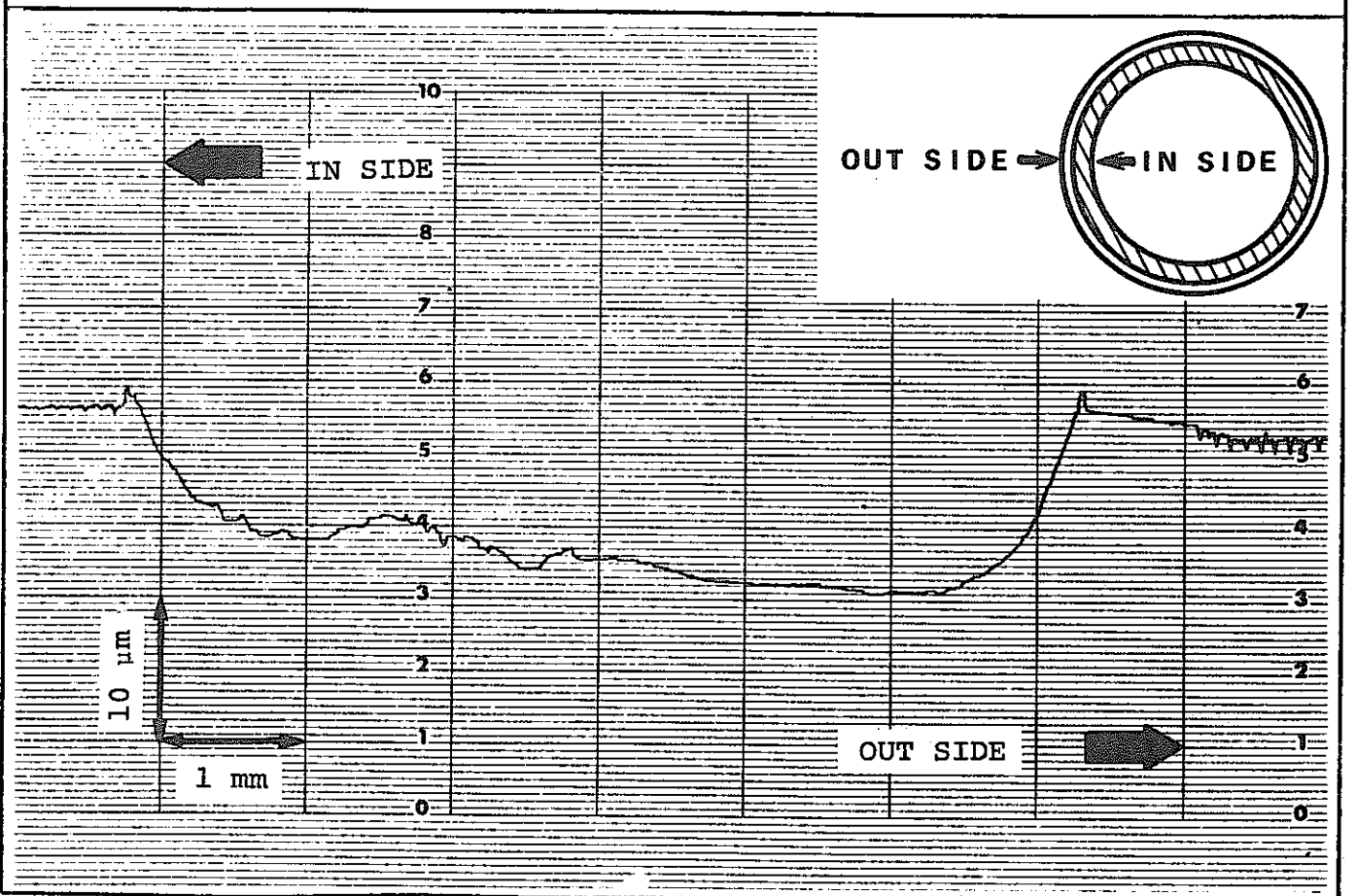
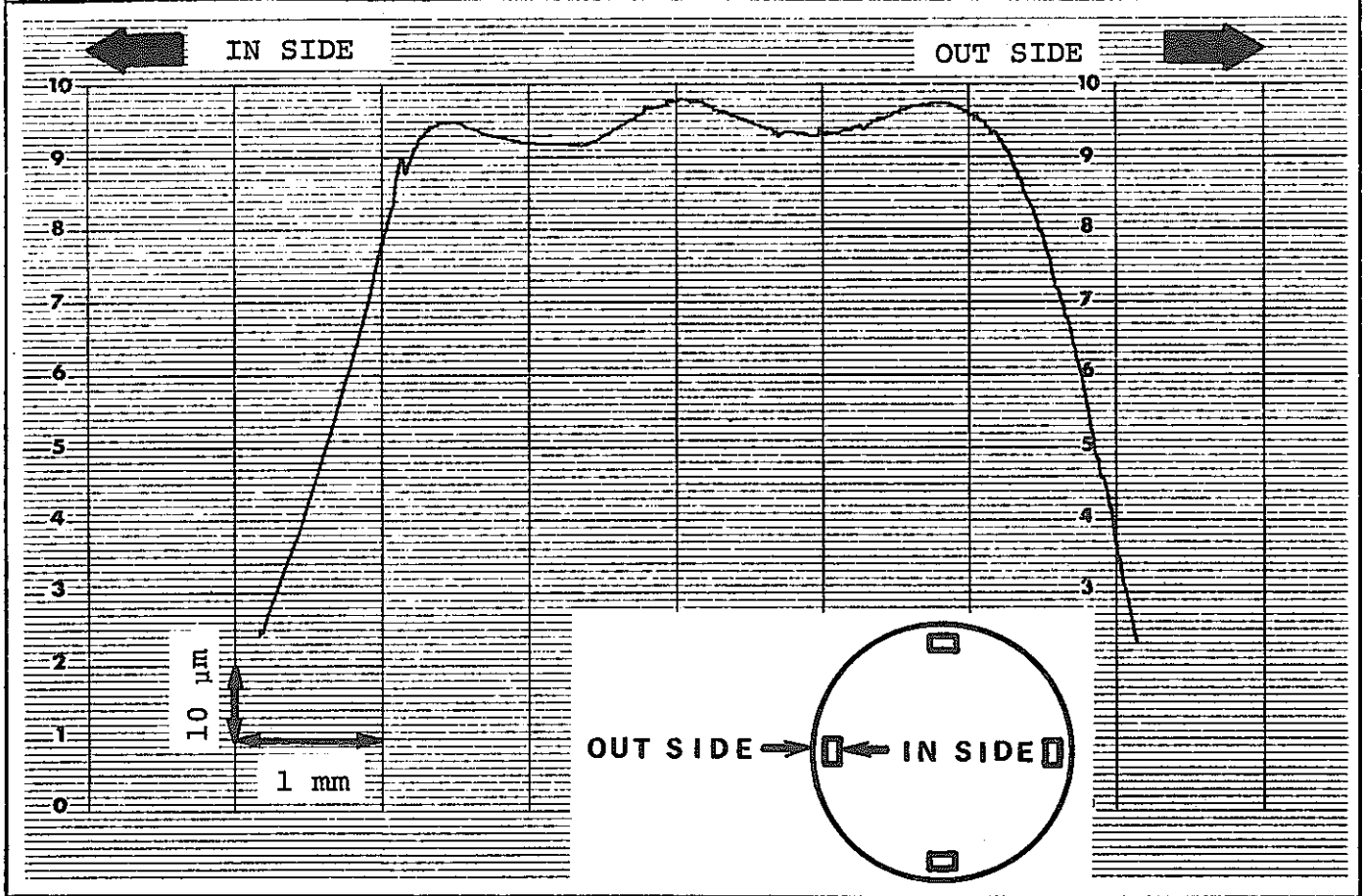


Fig. 5.64 Roughness of Sliding Surface
 (400°C , 10m/s , 4.1kg/mm^2 , 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

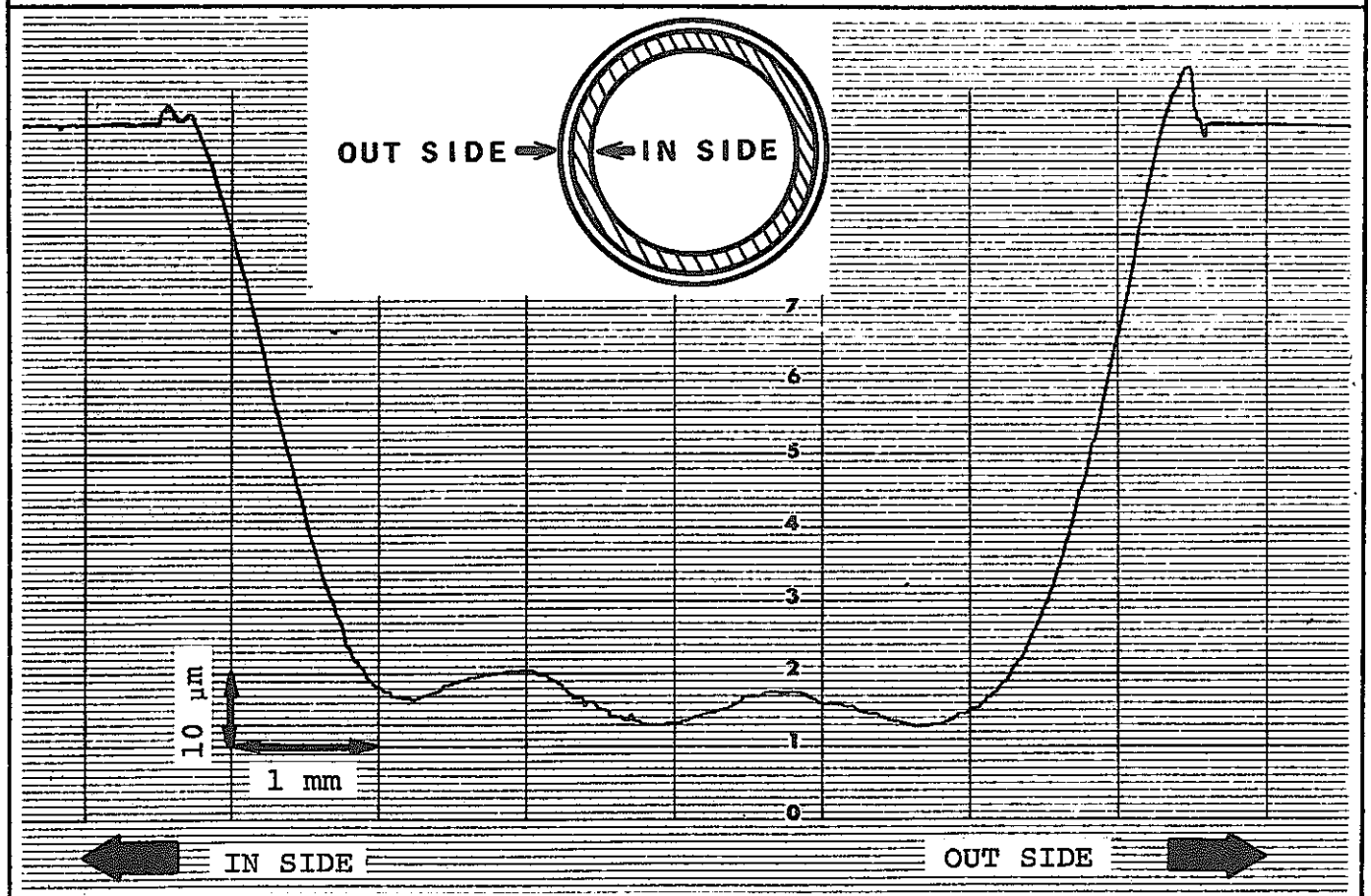
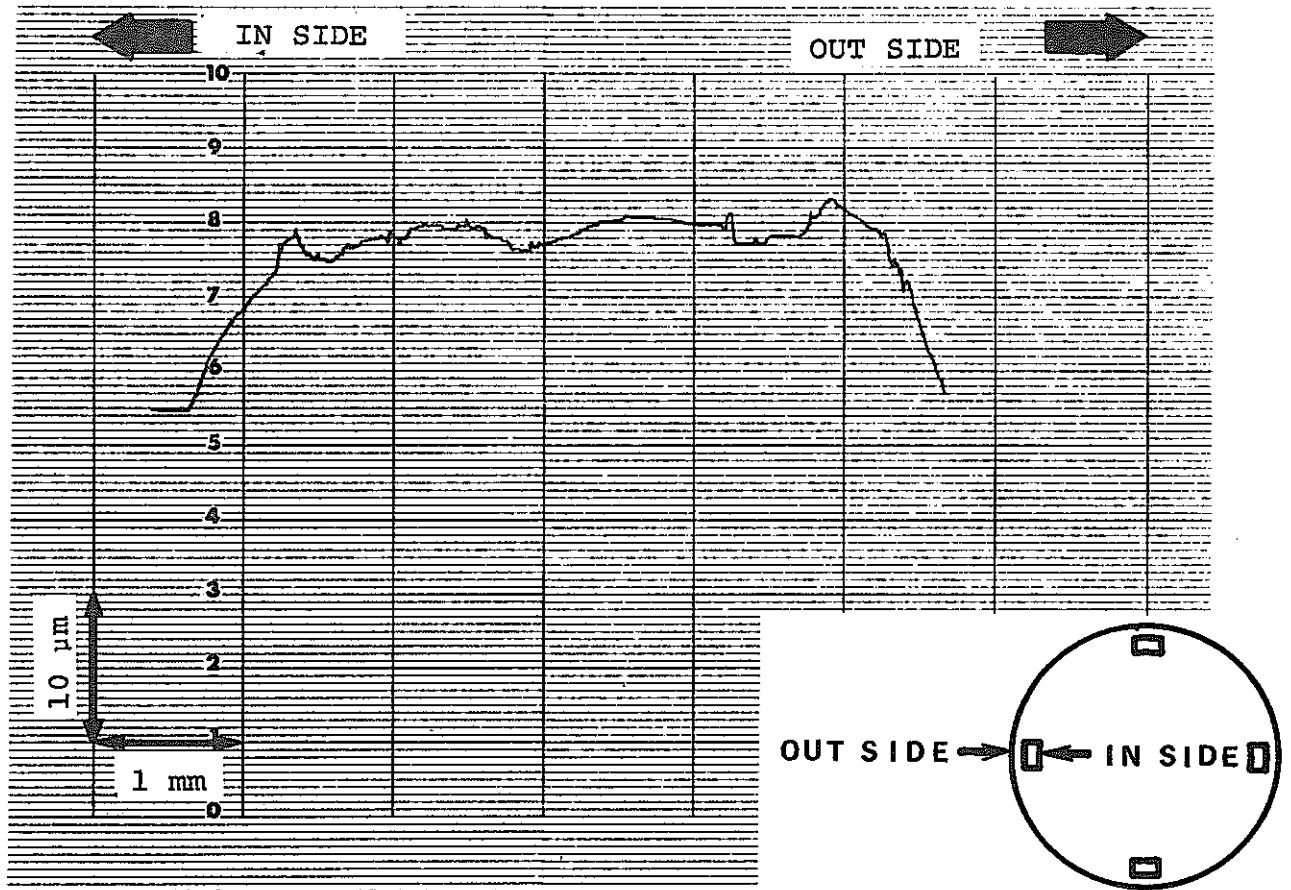


Fig. 5.65 Roughness of Sliding Surface
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

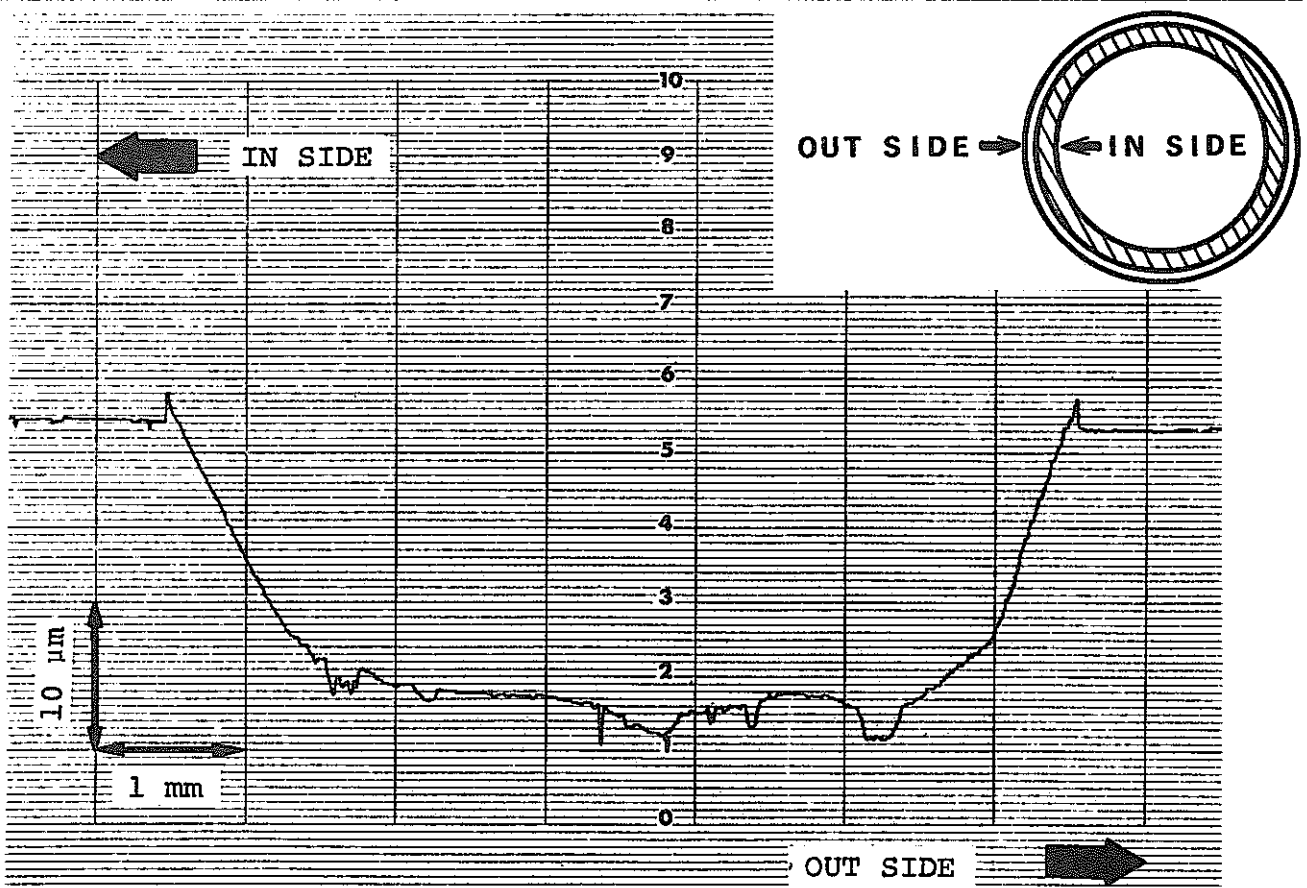
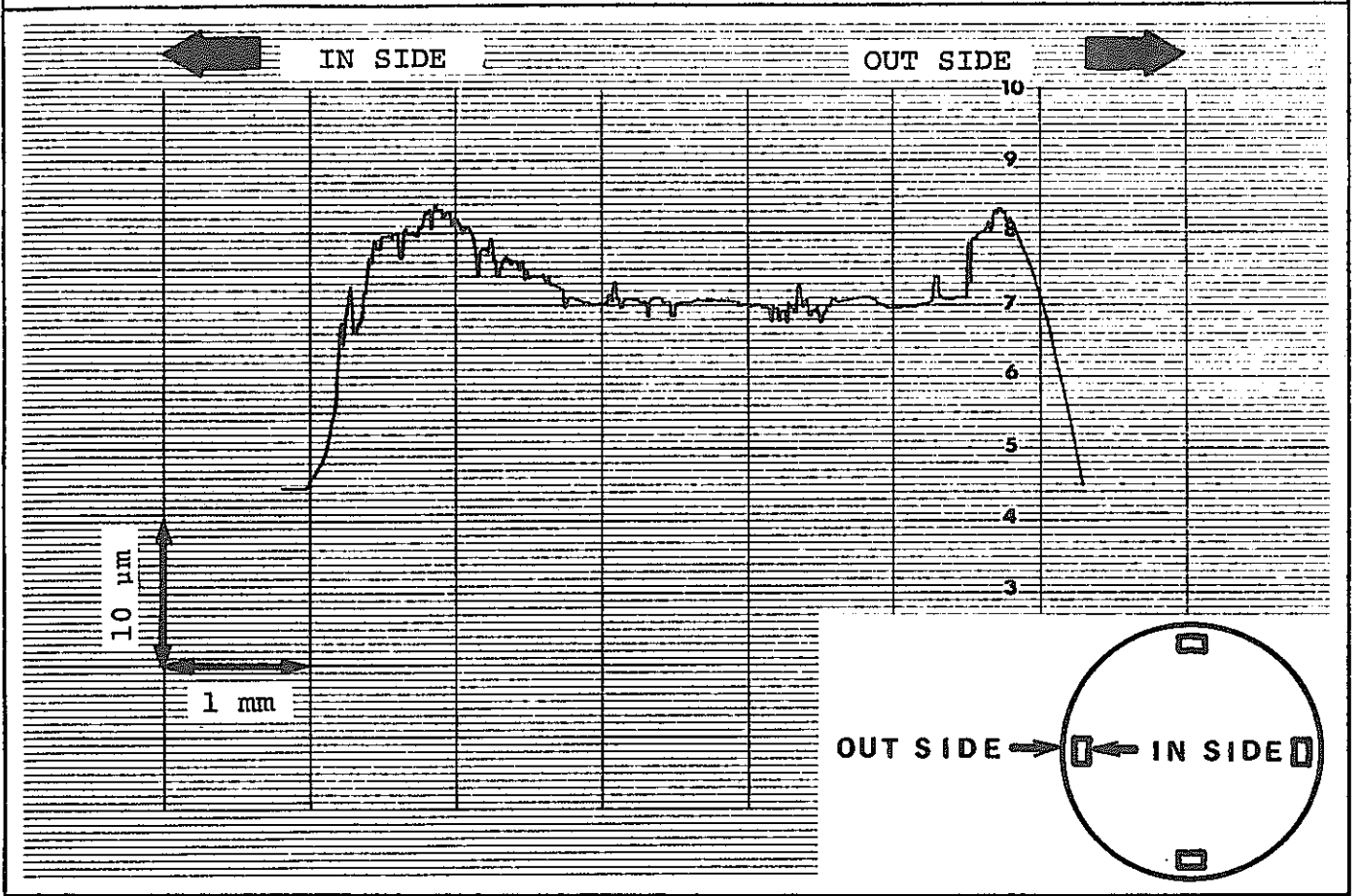


Fig. 5.66 Roughness of Sliding Surface
(400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

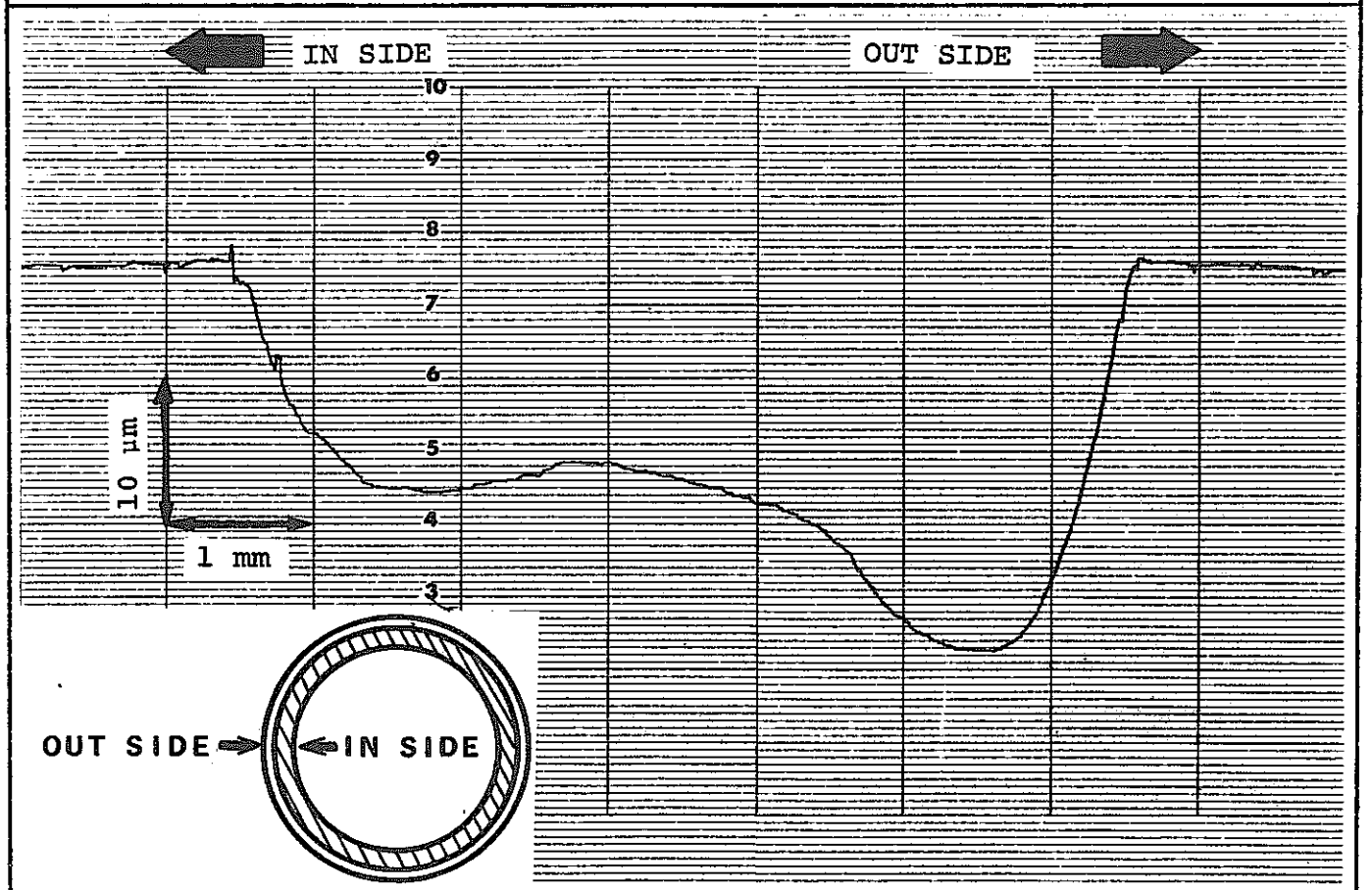
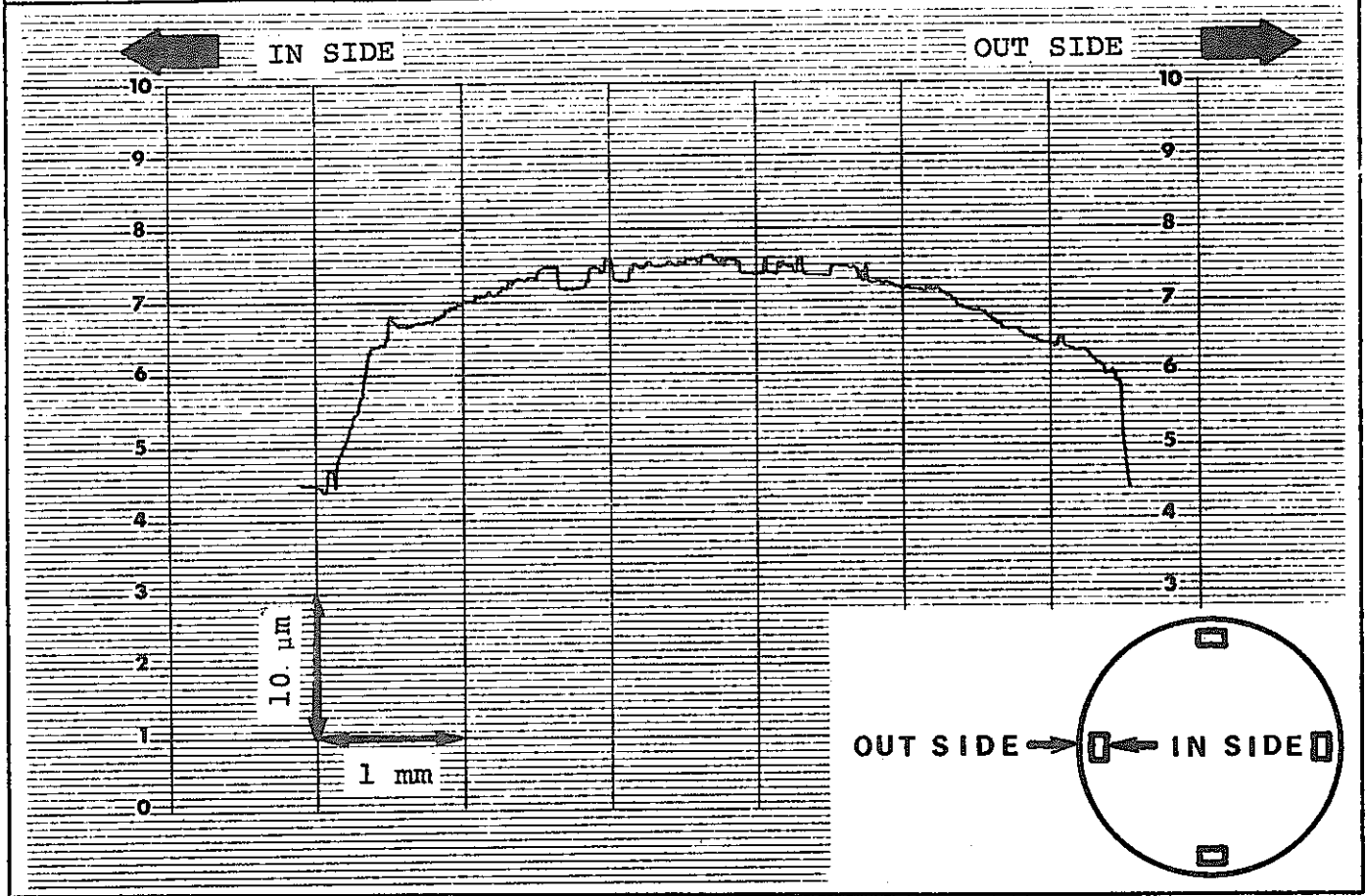


Fig. 5.67 Roughness of Sliding Surface
(500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

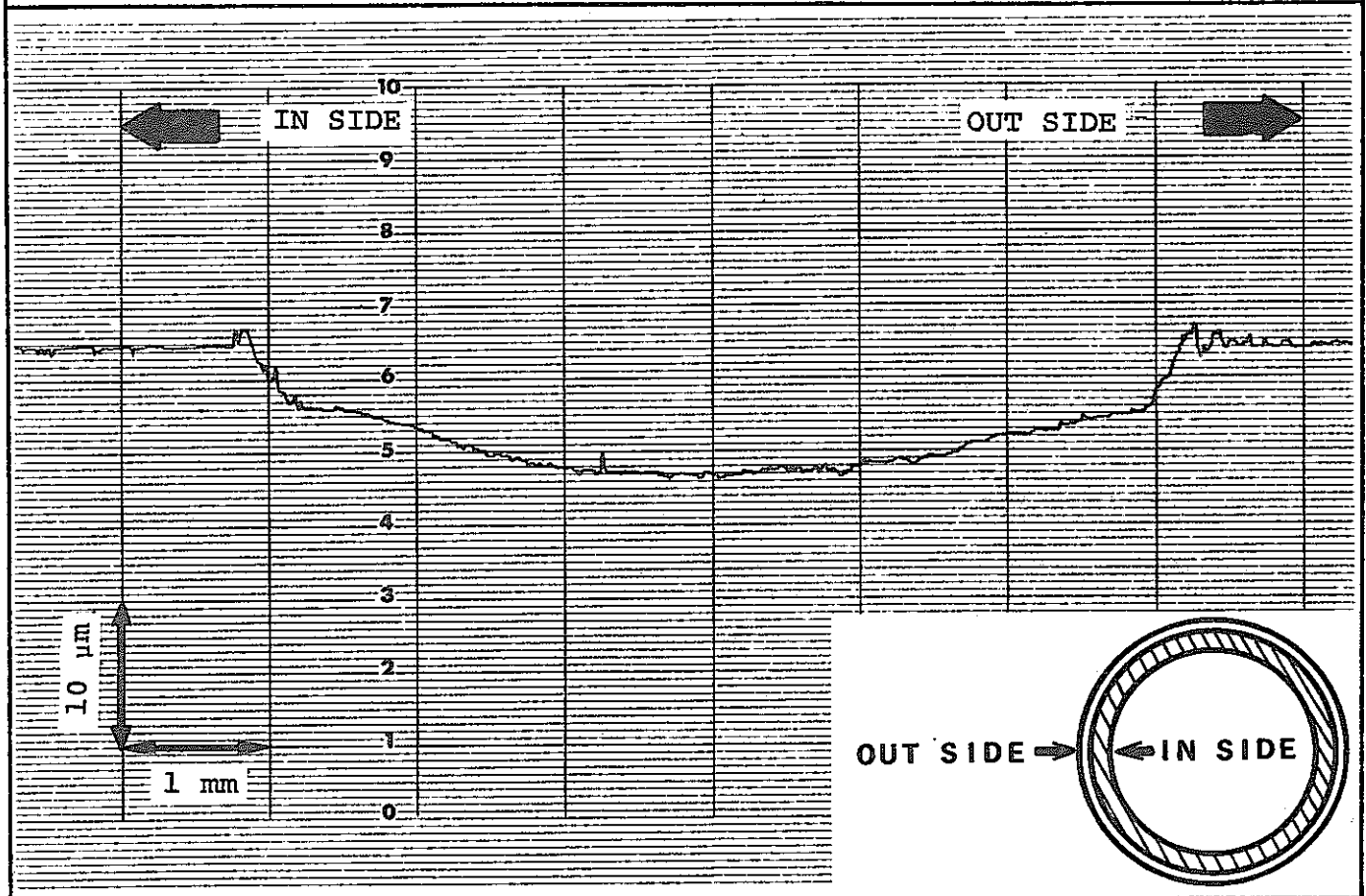
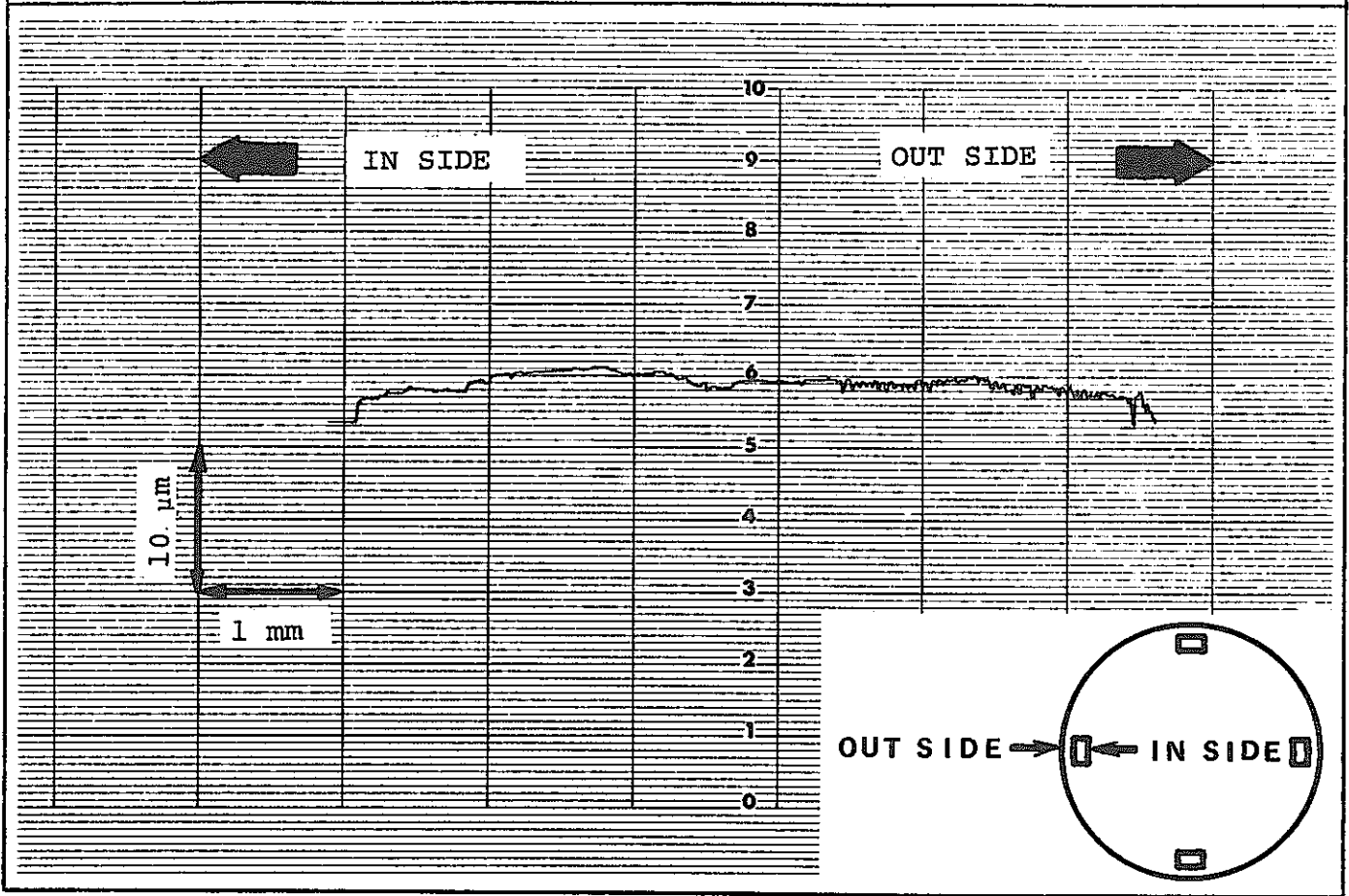


Fig. 5.68 Roughness of Sliding Surface
(500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

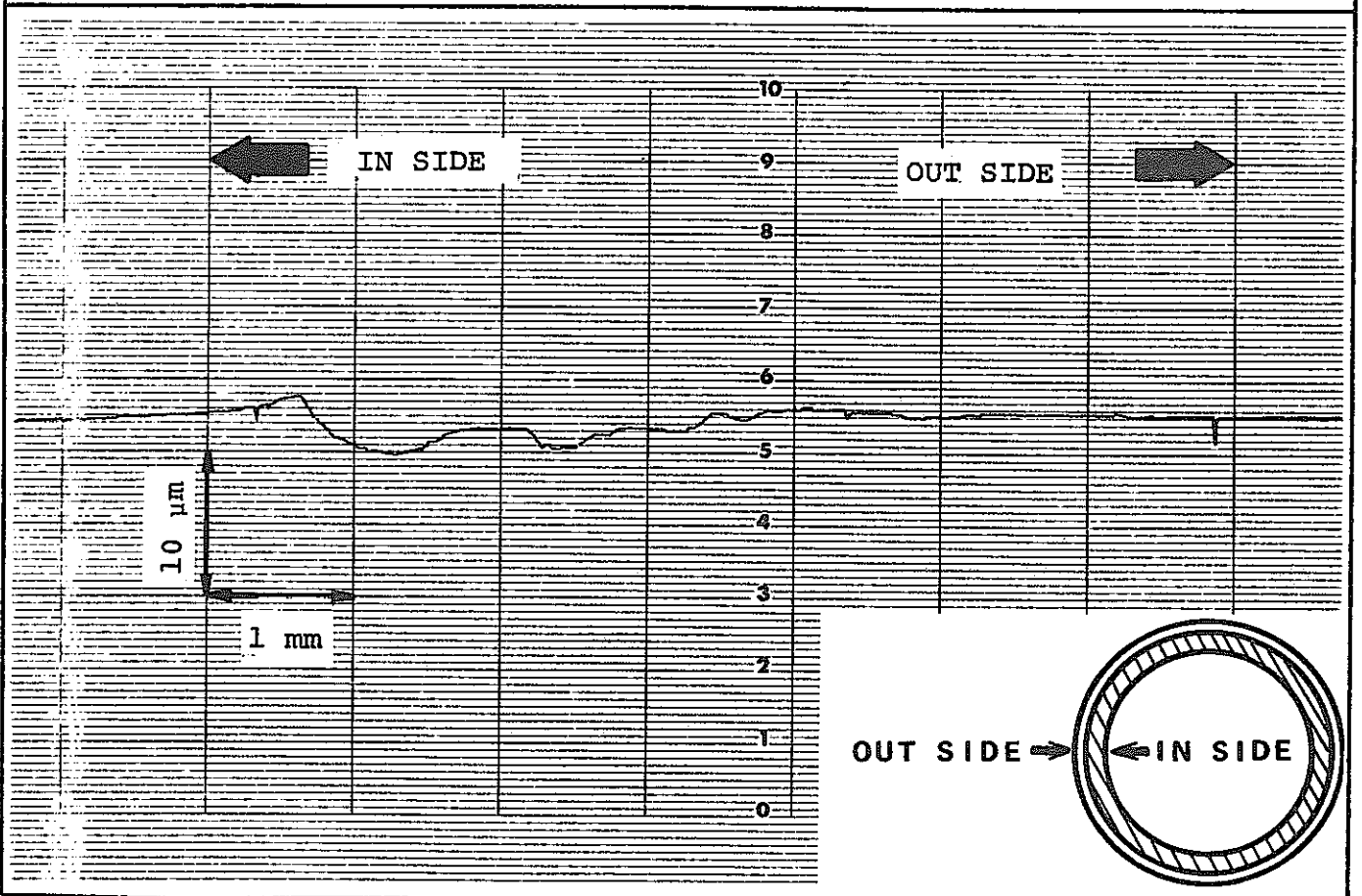
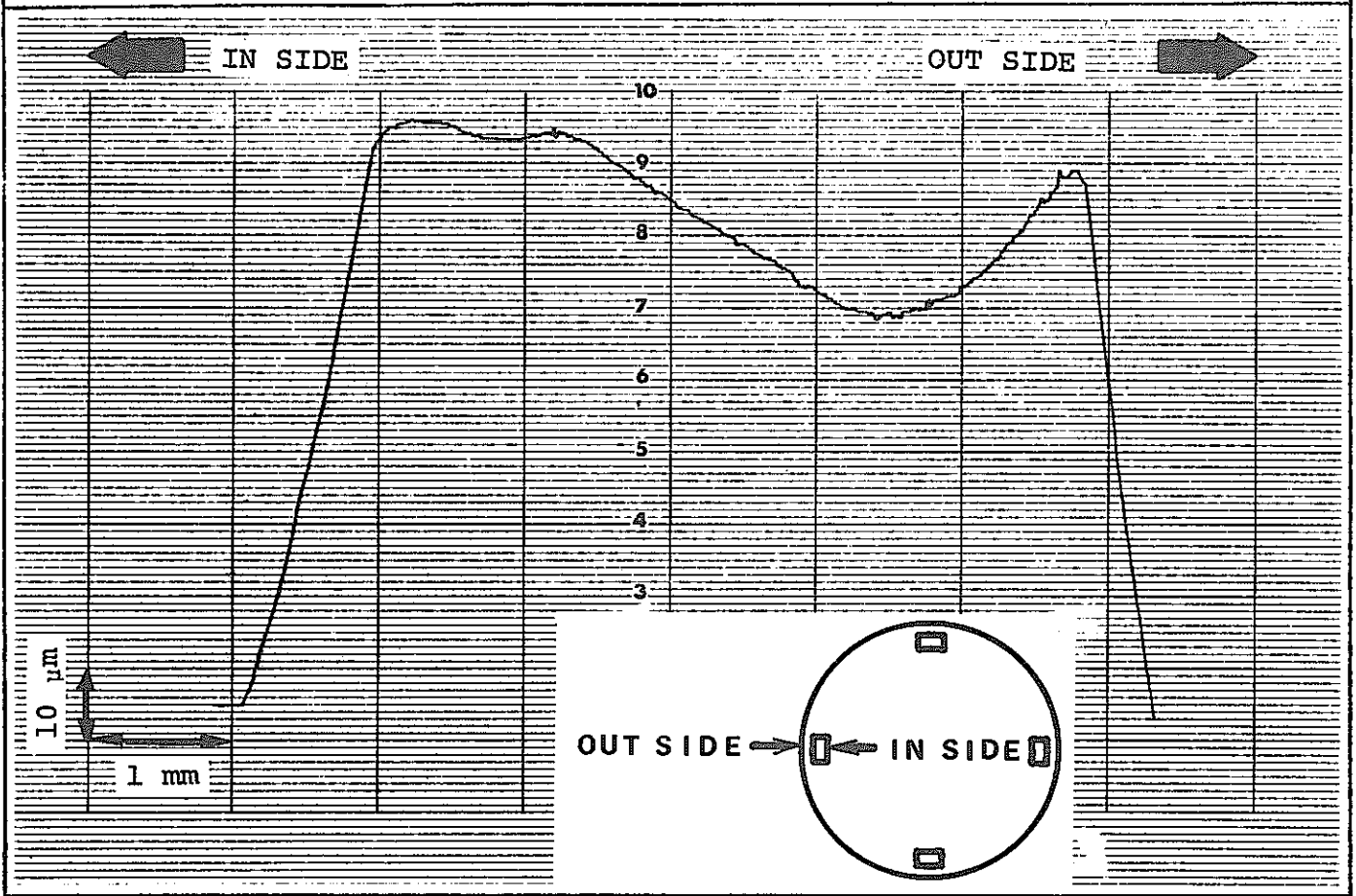


Fig. 5.63 Roughness of Sliding Surface
 (400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

STATOR SIDE (COLMONOY #6)



ROTOR SIDE (COLMONOY #5)

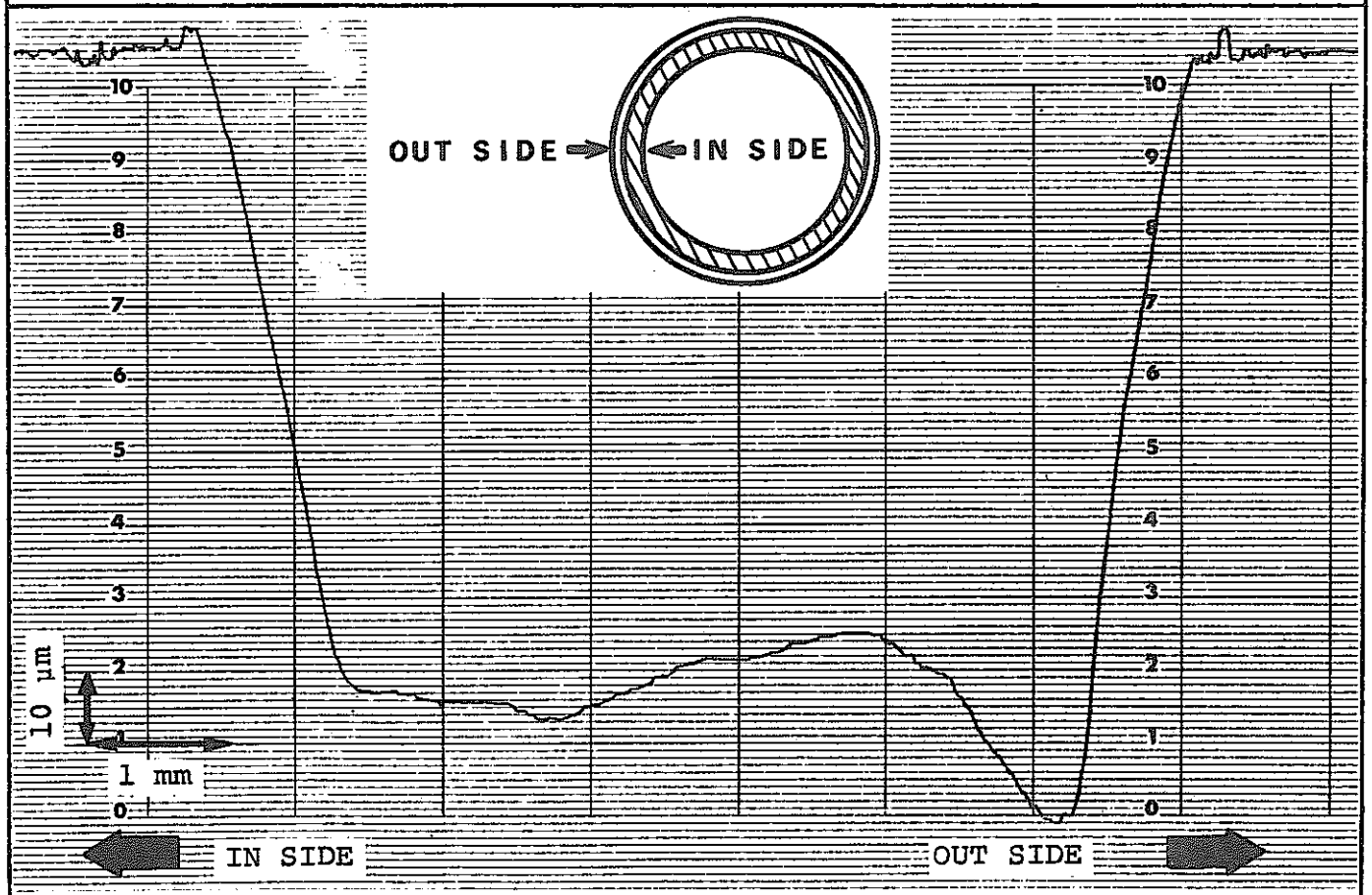


Fig. 5.69 Roughness of Sliding Surface
 (500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

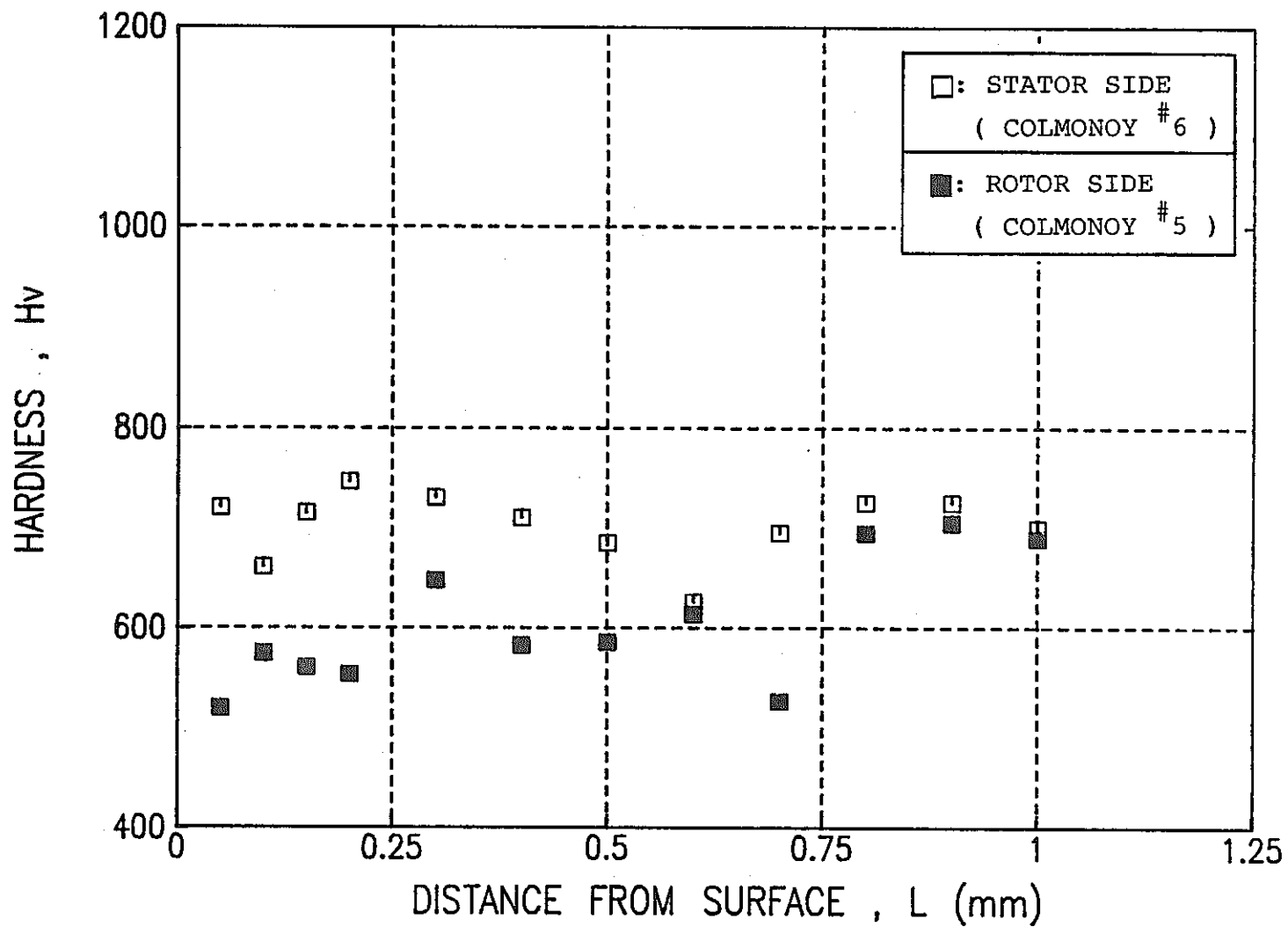


Fig. 5.70 Microhardness of Stator and Rotor Side
(400°C, 2m/s, 4.0kg/mm², 240s)

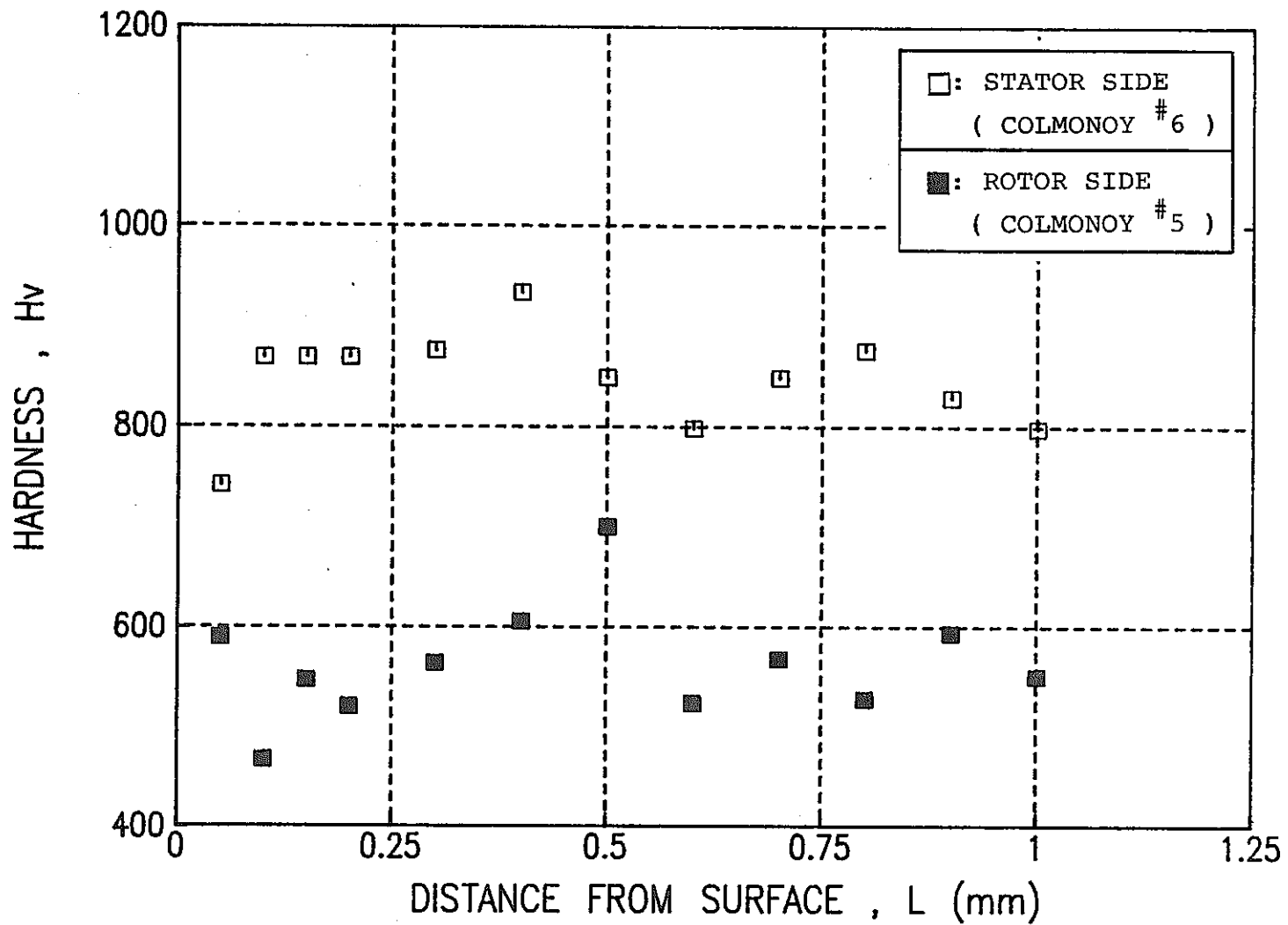


Fig. 5.71 Microhardness of Stator and Rotor Side
(400°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

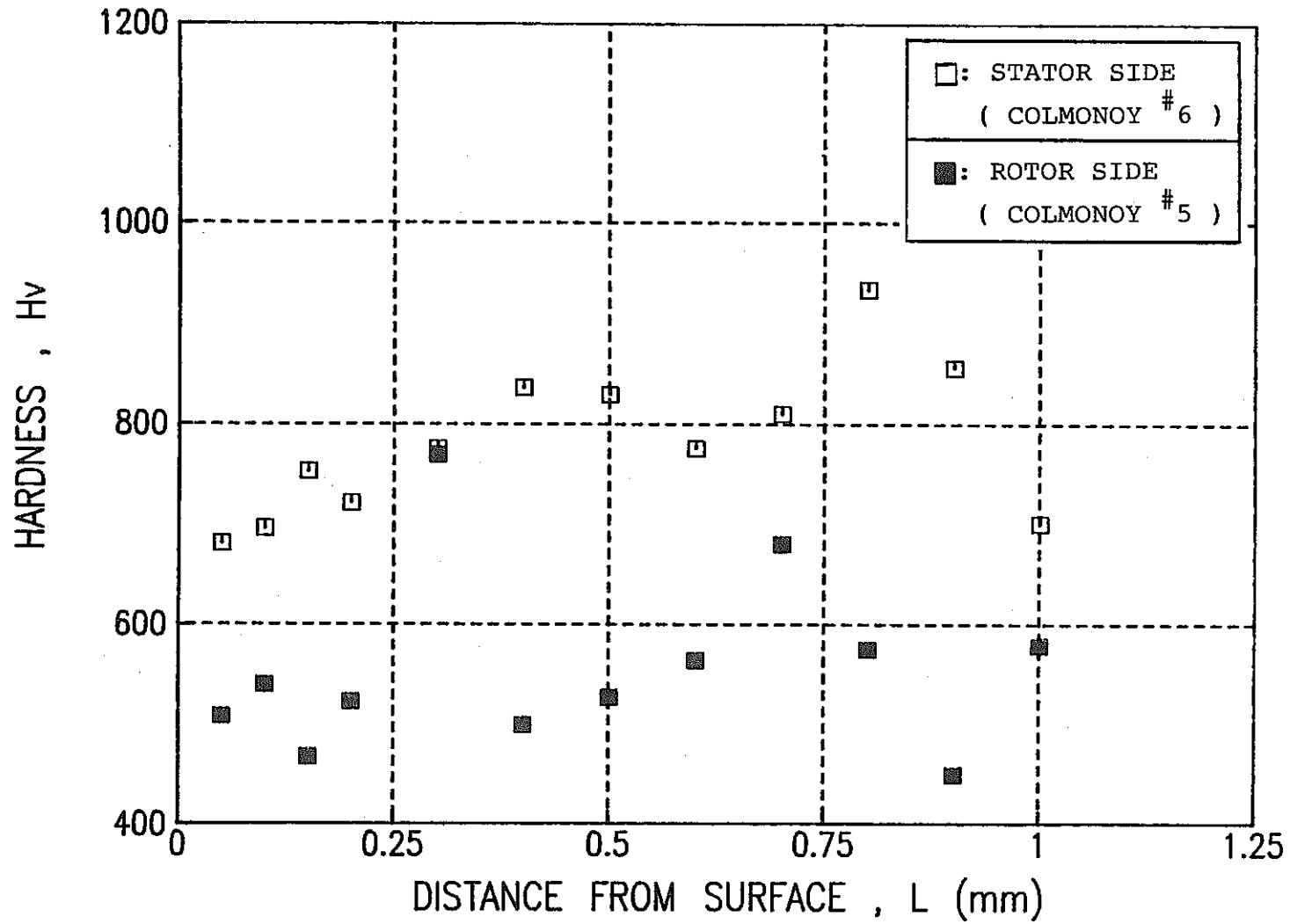


Fig. 5.72 Microhardness of Stator and Rotor Side
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

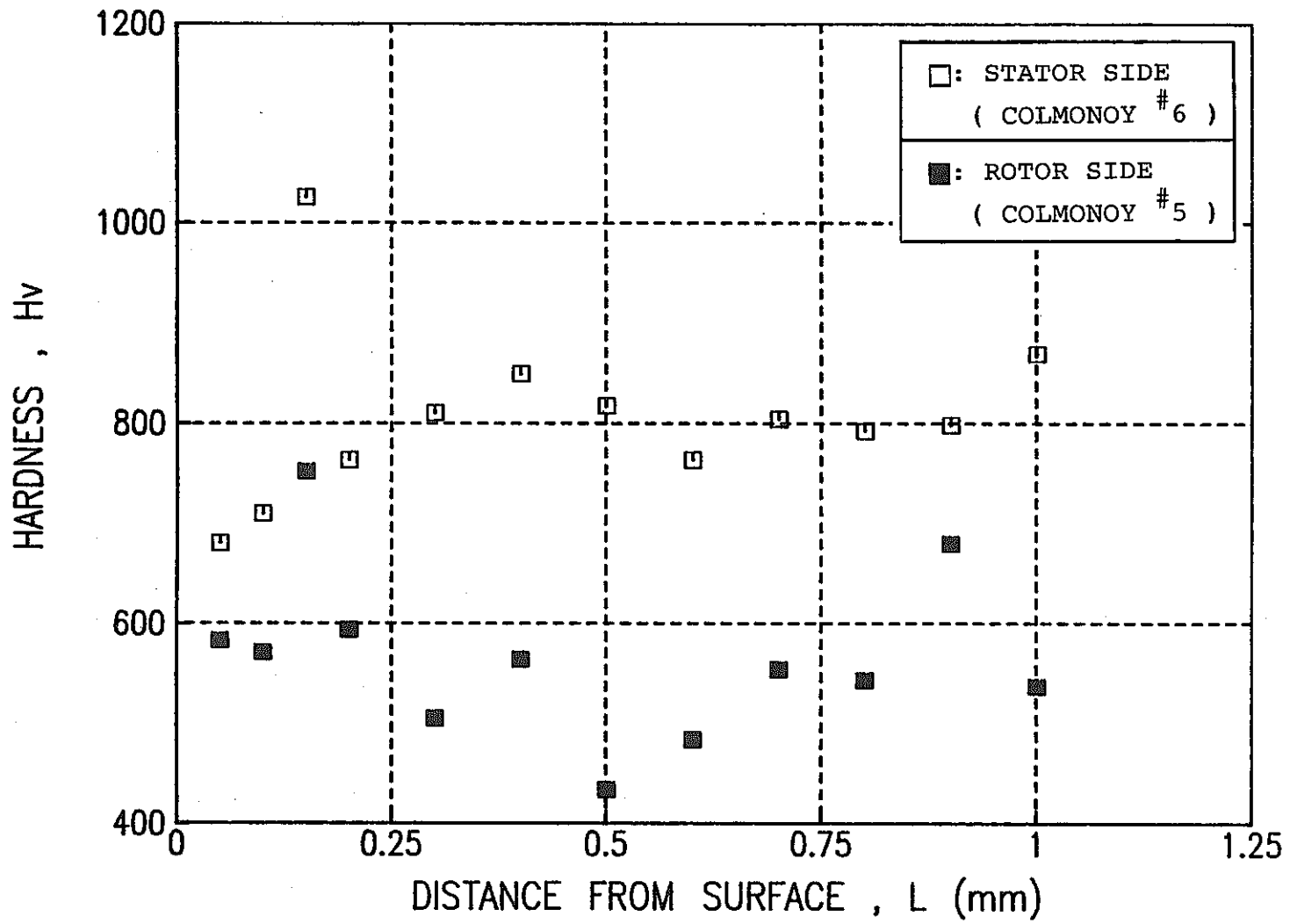


Fig. 5.73 Microhardness of Stator and Rotor Side
(400°C, 22m/s, 1.1kg/mm², 240s)

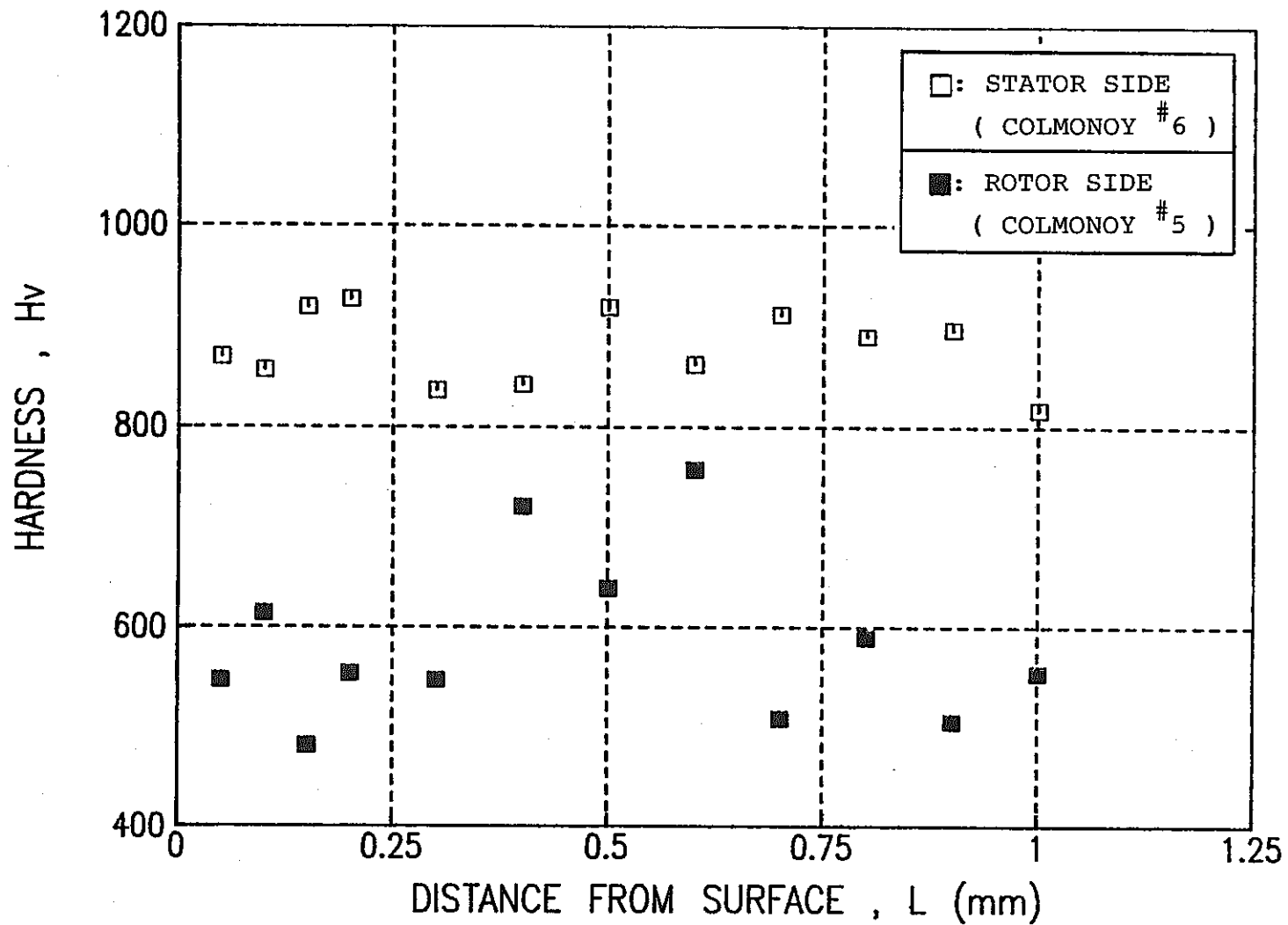


Fig. 5.74 Microhardness of Stator and Rotor Side
(500°C, 2m/s, 4.1kg/mm², 240s)

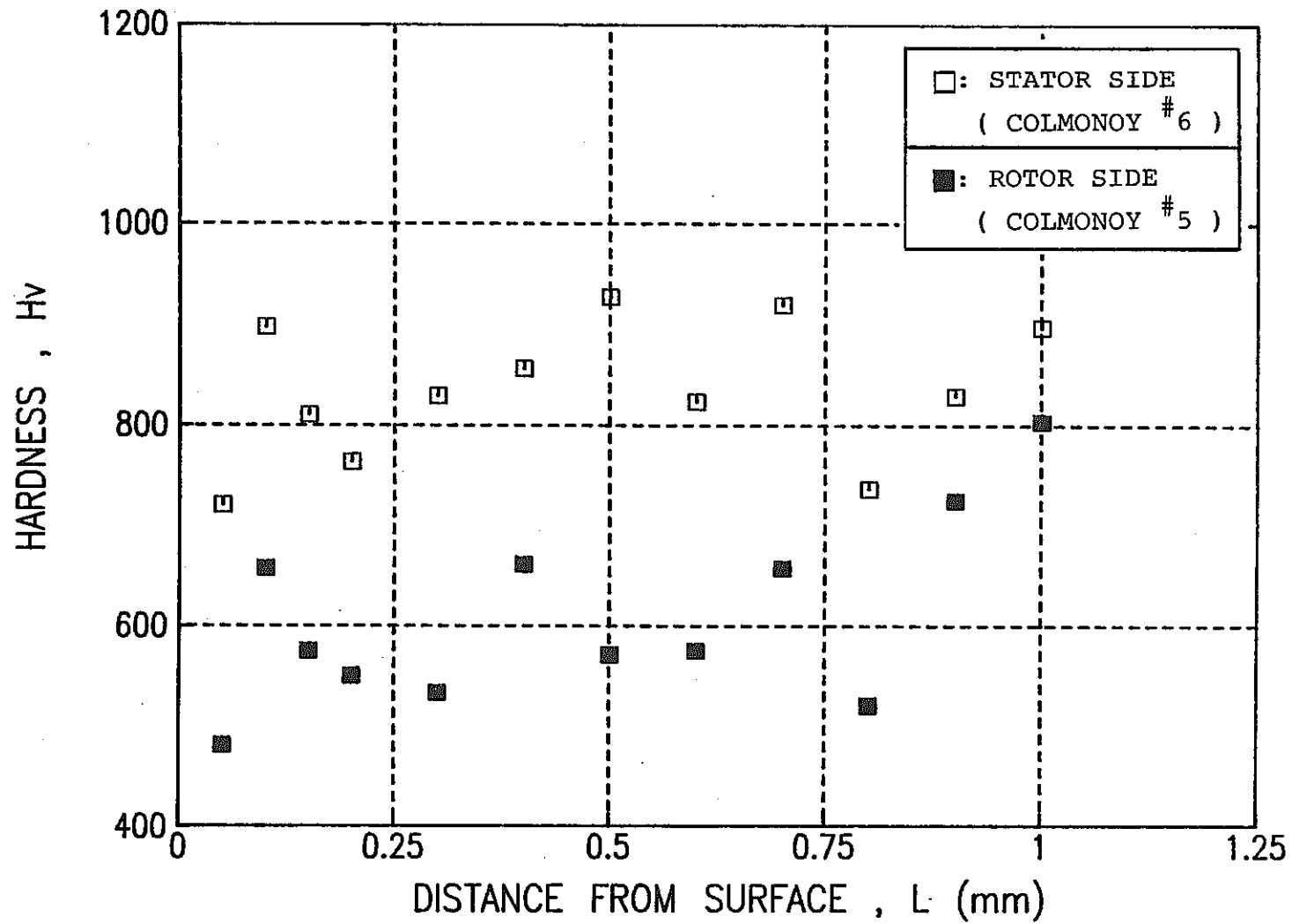


Fig. 5.75 Microhardness of Stator and Rotor Side
(500°C, 10m/s, 4.1kg/mm², 240s)

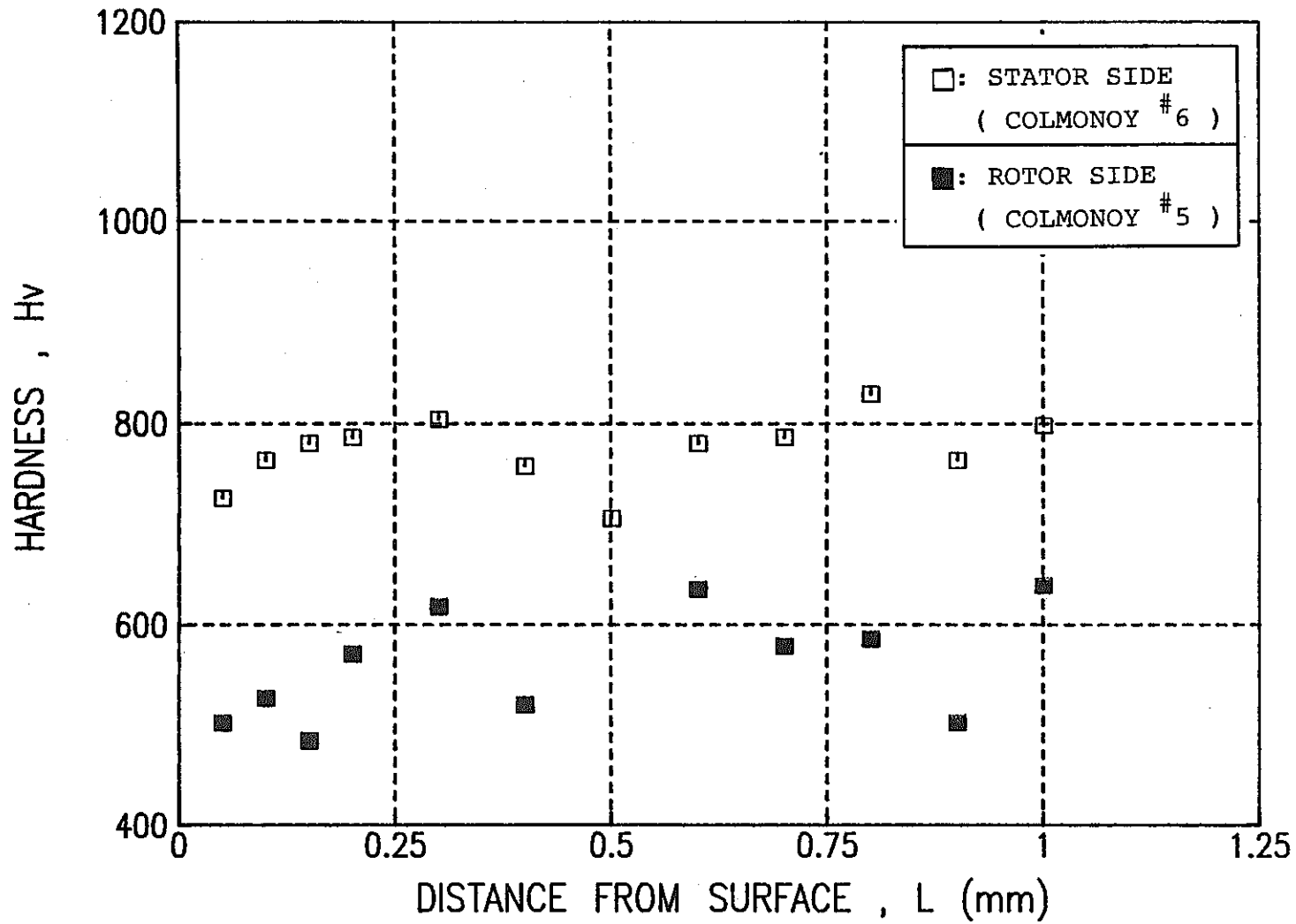


Fig. 5.76 Microhardness of Stator and Rotor Side
(500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

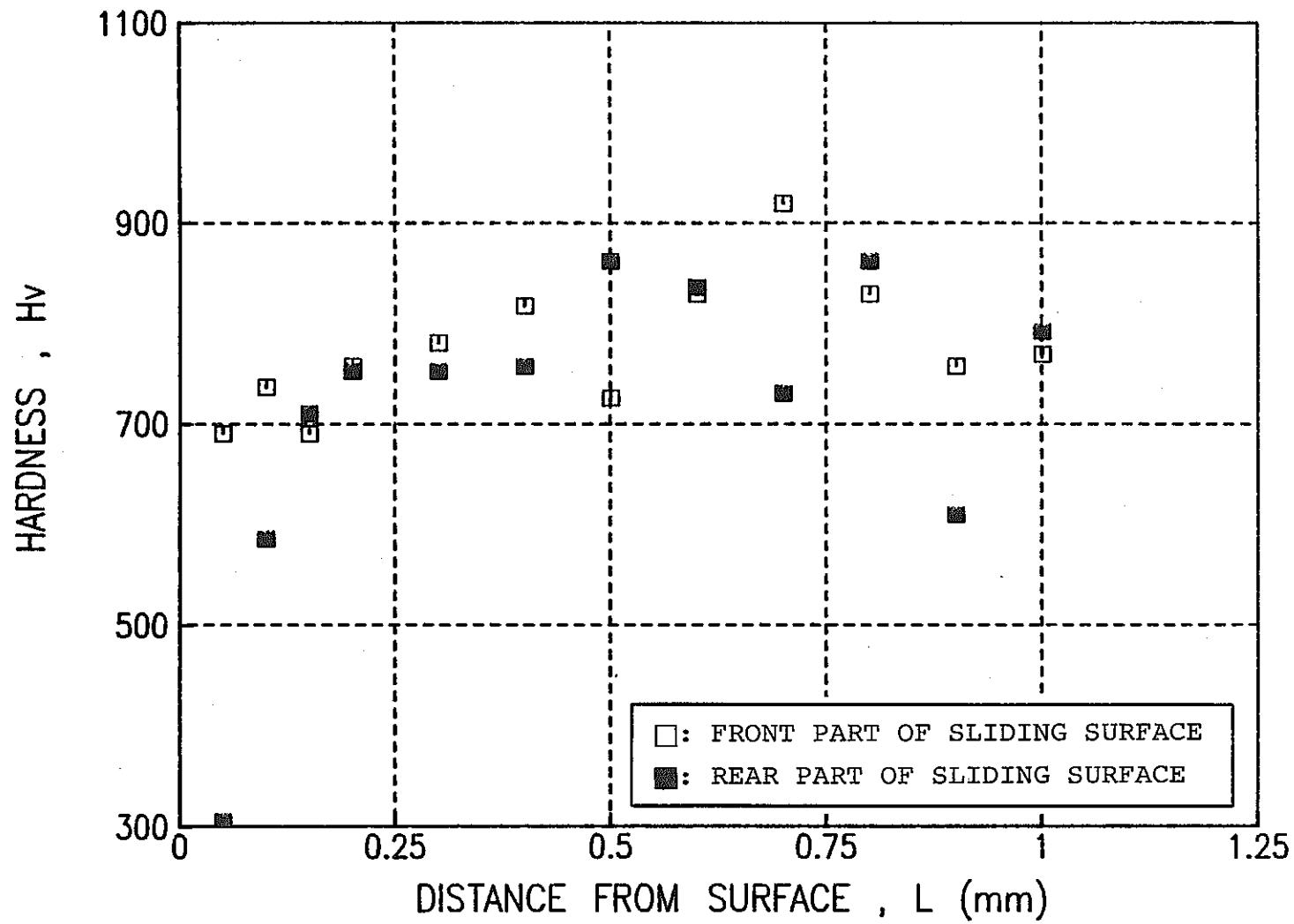


Fig. 5.77 Microhardness of Stator Side
(500°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 240s)

6. 考 察

6.1 高摺動速度下の摩擦係数

Table 5.1に本試験で得られた摩擦係数を示す。

摩擦係数 μ は次式により求めた。

$$\mu = \frac{T}{F \cdot R}$$

T = 摺動トルク
F = 荷重
R = 摺動面までの平均半径

摺動トルクは変動幅の平均値とし，変動の最大および最小の2個所を選び，最大と最小の摩擦係数を求めた。Table 5.1に示す試験体温度は固定側試験体の温度であり，摺動面下3 mmの位置の温度である。

(1) 摩擦係数の速度特性

摩擦係数の速度特性を Fig. 6.1に示す。2, 10, 22 m/sの各摺動速度における摩擦係数は試験温度400℃で0.12, 0.1, 0.08, 500℃で0.24, 0.11, 0.09と摺動速度の増大とともに減少している。400および500℃における2 m/sと22 m/sの摩擦係数を比べると，2 m/sの方がそれぞれ1.5および2.2倍ほど大きくなっており，顕著ではないが摺動速度に対する依存性が認められる。

Fig. 6.2はPNCで得られた280および500℃のナトリウム中におけるコルモノイ合金の摩擦係数を示したものである。⁽⁷⁾ 摺動速度は0.25 cm/sと非常に遅いが，500℃の摩擦係数は0.4と本試験結果の0.09より約4倍大きく速度依存性を示している。

一般に摩擦係数の摺動速度依存性は大気中の油潤滑摺動においても認められている。Fig. 6.3は無添加鉍油潤滑下の摩耗の速度依存性を示したものである。⁽⁸⁾

無添加鉍油潤滑下では，摺動速度5 m/sec付近に摩擦係数のピークを生じているが，速度の増大に伴ない，全体的には減少の傾向を示している。このような摩擦係数の減少は潤滑油の酸化効果や流体潤滑膜効果に起因するといわれている。⁽⁸⁾

今回の試験の場合、ナトリウム中の酸素量は数 ppm と少なく、真空中や不活性ガス中と同様な条件にも拘らず、その摺動面は真空中や不活性ガス中に比べて滑らかであり、摩耗の程度は軽微である。これは鉱油中と同様に雰囲気流体であるナトリウムの流体潤滑膜効果およびナトリウムの複合酸化物（特に Na Cr O_2 ）の潤滑材効果によってこのような速度依性が生じていると思われる。

(2) 摩擦係数の温度特性

摩擦係数の温度特性を Fig. 6.4 に示す。温度は試験温度ではなく、試験体計測温度を示している。

10 および 22 m/s の高摺動速度では温度特性は認められないが、低速の 2 m/s では認められる。2 m/s の摩擦係数は試験温度 500℃ で 0.24 と 400℃ の約 4 倍大きい。高摺動速度下で現われないのは高速下では流体潤滑膜効果が勝るためと思われる。

コルモノイ合金の反復摺動試験結果⁽⁷⁾を示した Fig. 6.2 においても面圧 0.23 kg/mm² において顕著ではないが、温度の高い方が摩擦係数は大きく、温度依存性が認められる。

しかし、いずれの結果においても温度特性は速度特性に比べ顕著ではない。

6.2 摺動面の摩耗状況

固定側摺動面後端部には Fig. 5.1～5.13, 6.5 にみられるように摩耗粉が層状に付着している。その量は試験温度や摺動距離に依存しており、高温でしかも摺動距離の長い高摺動速度下において多くなっている。

一般に、摩耗は摩耗粉が破断と移着を繰返し、摺動面から脱落して生じると云われている。⁽⁸⁾しかし、本試験では断面や SEM 観察から明らかのように摺動面には摩耗粉の付着は多く、脱落しにくい傾向を示している。真空中や不活性ガス中でも摩耗粉の付着は生じるが、摺動面後端に層状の付着は生じていない。ナトリウム中では、真空中や不活性ガス中では期待できないナトリウムの複合酸化物（特に Na Cr O_2 ）の潤滑

剤効果やナトリウムの流体潤滑膜効果があるため、それらの効果によって付着した摩耗粉は押し延ばされ、そして後方へ押し出されて層状の摩耗粉の塊を形成したと考えられる。

このような潤滑剤の効果や流体潤滑膜効果は摺動面の SEM 観察で認められる滑らかな摺動面からも予想される。

しかし、実機ポンプにおいては地震時の断続的な繰り返し衝突摺動現象であることから本試験でみられるような摩耗粉の付着は生じにくいと想定される。

6.3 摺動面の温度上昇

摩擦による摺動面の温度上昇は JEAGER によって解析的に求められている。それによると 2 つの半無限固体の摺動面の温度上昇は高摺動速度の場合

$$\theta = \frac{q \ell}{1.33 K_1 \sqrt{L_1} + 1.06 K_2}$$

$$L_1 = \frac{V \ell}{2 \kappa}$$

$$q = \frac{\mu P V}{S J}$$

V : 摺動速度
 ℓ : 摺動面の一辺の長さ
 K : 熱伝導率
 κ : 熱拡散係数
 ρ : 密度
 c : 比熱
 q : 発熱量
 θ : 平均摺動面温度上昇

で与えられる。

コルモノイ合金の物性値は示されていないのでコルモノイ合金の母元素である Ni の物性値を用いて計算すると平均摺動面温度上昇は 78.4℃ となり、予想外に低い。

本試験においても Table 5.1 に示すように試験体の計測温度上昇は高々 59℃ 程度であり、Zn と Cu の摺動においても摺動面の温度上昇は高々 48℃ であったと報告されている。⁽⁹⁾ いずれにしても金属が熔融するに

はほど遠い温度であり，またそのような温度には至らないだろうと云われている。⁽⁹⁾

一方，本試験の断面観察では摺動表面下に摩擦熱や塑性流動による組織変化が認められている。しかし，純数理解析および実測では短時間に組織変化が生じるほどの高温に至らず現実と矛盾している。

このような矛盾はせん断応力場で融点が降下することから，極めて大きなせん断応力場となる摺動面でも変態温度の降下が生じて組織変化すると説明されている。⁽⁹⁾

6.4 摺動部材の亀裂発生原因

(1) 亀裂部の観察

外観観察で明らかのように固定側試験体には微小な亀裂が発生している。

Fig. 6.6, 6.7は試験温度400℃，摺動速度10 m/s，試験時間60秒の試験で発生した亀裂部の断面を組織を示す。組織はデンドライト組織をしており，特に異常は認められない。亀裂には摺動面から内部に向かって伝播しコルモノイ#6の肉盛部を貫通してステンレス鋼との境界層で停止しているものや表面部で停止しているものが認めらる。貫通亀裂は表面から45°方向に伝播し，その後垂直方向に伝播している。このような亀裂伝播は疲労亀裂に類似している。

Fig. 6.8は亀裂破面のSEM写真である。破面は粒内破面であり，摺動表面から内部に向かってわずかに変化している。内部の方がやや粗くなっており，亀裂は瞬時的に生じたものではないと思われる。

Fig. 6.9, 6.10に摺動表面のマクロおよびSEM写真を示す。摺動表面には多数の微小亀裂が生じており，表面は摺動面特有な粗れた肌をしている。

(2) 亀裂発生原因の検討

一般に材料の破損は外力，材料および環境が複合的に作用しあって生じる。本試験においても同様である。外力としてはフレッチング疲労，

熱サイクル，熱衝撃および機械的衝撃が挙げられる。フレッチング疲労や熱サイクルは試験体の構造上生じることが予想されるが，ナトリウムチャージ時の熱衝撃や油圧負荷時の機械的衝撃は小さいので，亀裂発生の支配的因子とは思われない。

本試験機はナトリウム中に軸受を設けることはできないためカバーガス中に設けている。従って，試験体と軸受の距離は長くなっている。そのため，回転軸先端に微小な振れが生じ，その摺動痕が摺動面に認められる。このような微小な繰返しの振動はフレッチング疲労発生の一因になることが予想される。一方，熱サイクルについては固定側と回転側の試験体は全面接触する構造となっていないため，加熱・冷却が繰返され，熱サイクル疲労の発生も予想される。しかし，摺動速度が大きいので冷却効果は非常に小さく熱サイクル疲労の可能性は少ないと考えられる。

以上のように断面観察では表面部に疲労亀裂を予想させる45°方向の亀裂が認められたことおよび試験機は構造上回転軸先端で微小な振動の発生が予想されることから，この亀裂はフレッチング疲労によるものと思われる。

6.5 焼付き特性

一般に焼付きは真空中や不活性ガス中で生じやすい。ナトリウム中も不純物（特に酸素）は微量であるため真空中や不活性ガス中と同様な摺動特性を示すと考えられている。しかし，ナトリウムには真空や不活性ガスのような気体にはないナトリウムの複合酸化物（特に Na Cr O_2 ）による潤滑剤の効果やナトリウムの流体潤滑膜効果があるため摺動特性は気体中とは異なっている。真空中および不活性ガス中では摩擦係数は0.8⁽⁷⁾と大きいのに対しナトリウム中では0.1～0.4と小さい。特に高摺動速度下では小さくなる。このようにナトリウムの潤滑効果によって摺動特性はよくなっている。

本試験では想定される地震時間の4倍の試験時間，使用温度より100℃高い500℃，想定される最大面圧4 kg/mm²下で実機ポンプ運転時の速

度 2 ~ 22 m/s の範囲で連続摺動試験を実施した。その結果、摺動トルク、外観観察、SEM 観察等の結果には焼付きを示すような摺動トルクの急激な上昇や摺動面の異常な荒れなどは認められず、実機ポンプにおいても焼付きの生ずる可能性は非常に小さいと思われる。

7. 結 言

400および500℃のナトリウム中でポンプ静圧軸受ハードフェイシング材であるコルモノイ#5および#6の組合せにて摺動面圧，摺動速度をパラメータとして摺動特性試験を行った結果，以下の結論を得た。

- (1) 2, 10, 22 m/sの各摺動速度における摩擦係数は試験温度400℃で0.12, 0.1, 0.08, 500℃で0.24, 0.11, 0.09であった。
- (2) 摩擦係数は低摺動速度下(0.25 cm/s)で得られた摩耗係数より小さく速度依存性が認められたが温度および摺動距離の依存性は認められなかった。
- (3) 本試験の範囲では焼付き現象は認められず，摺動時間の短い実機においては焼付きの発生の可能性は極めて小さいと予想される。
- (4) コルモノイ#6と#5の組合せは，ナトリウム中での摺動特性が良好であり，地震時に想定される摺動条件に対しても十分使用に耐える材料である。

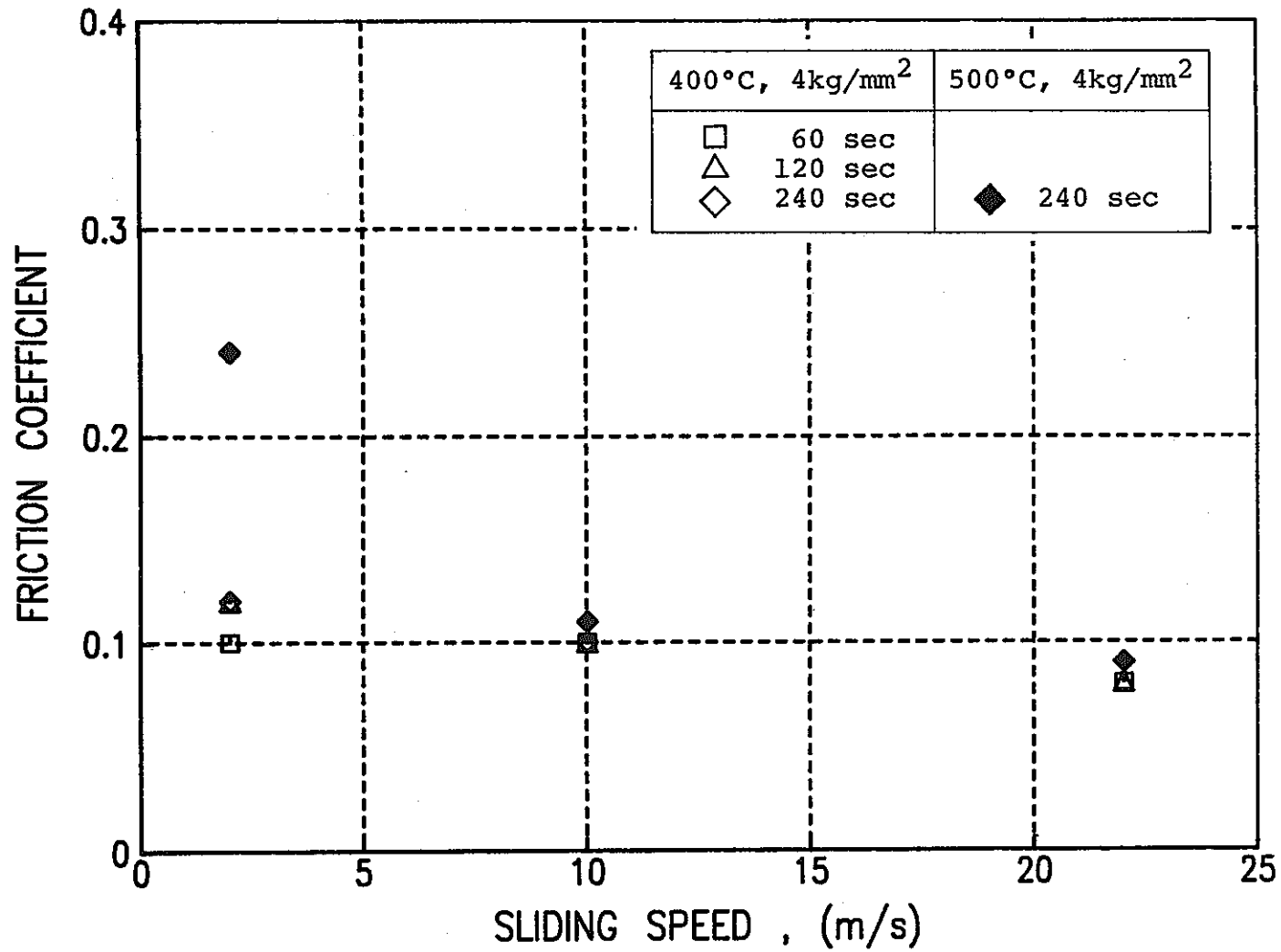


Fig. 6.1. Friction Coefficient versus Sliding Speed

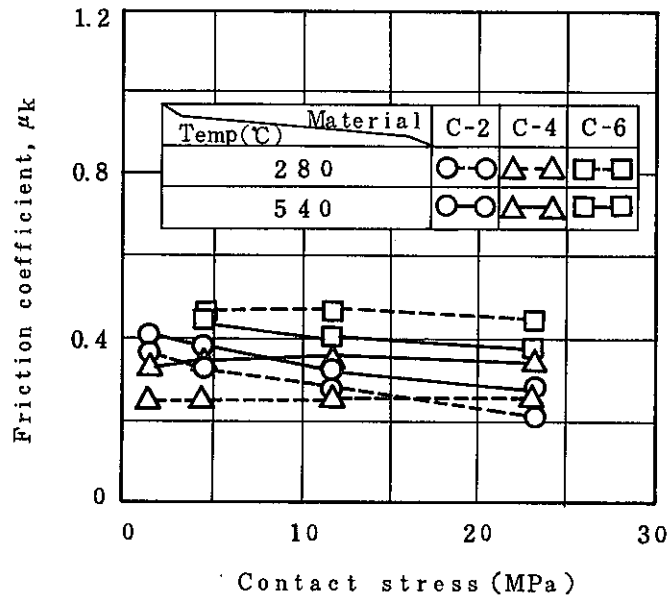
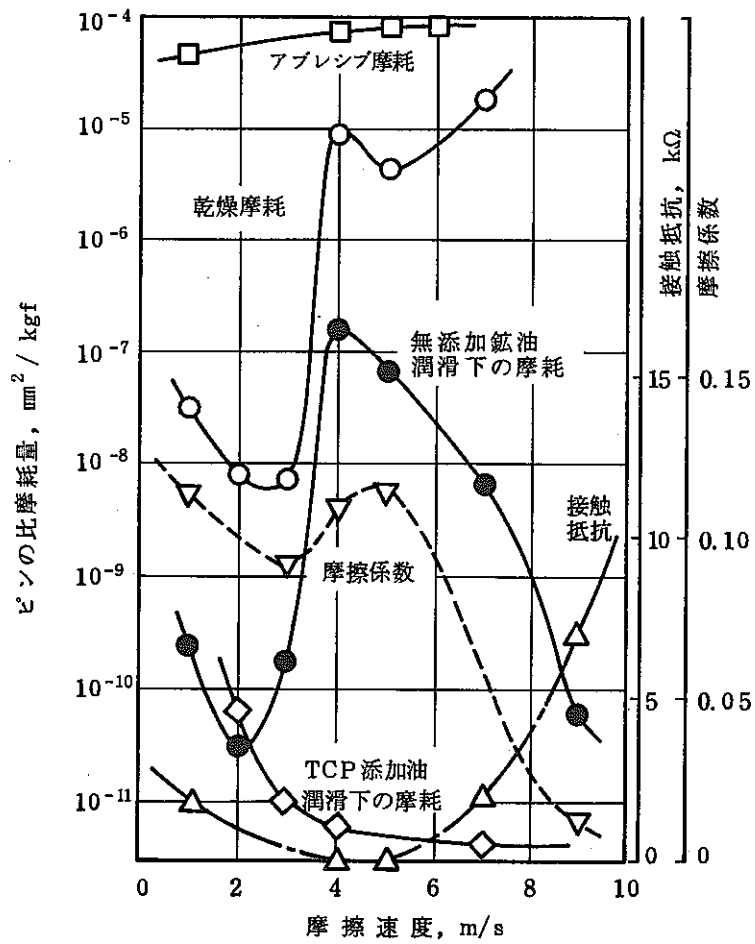


Fig. 6.2 Friction Coefficient of Colmonoy Alloys in Sodium



摩耗の速度特性
 焼入鋼 Hv544 同士, P = 7.5 kgf

Fig. 6.3 Sliding Speed Dependency of Wear

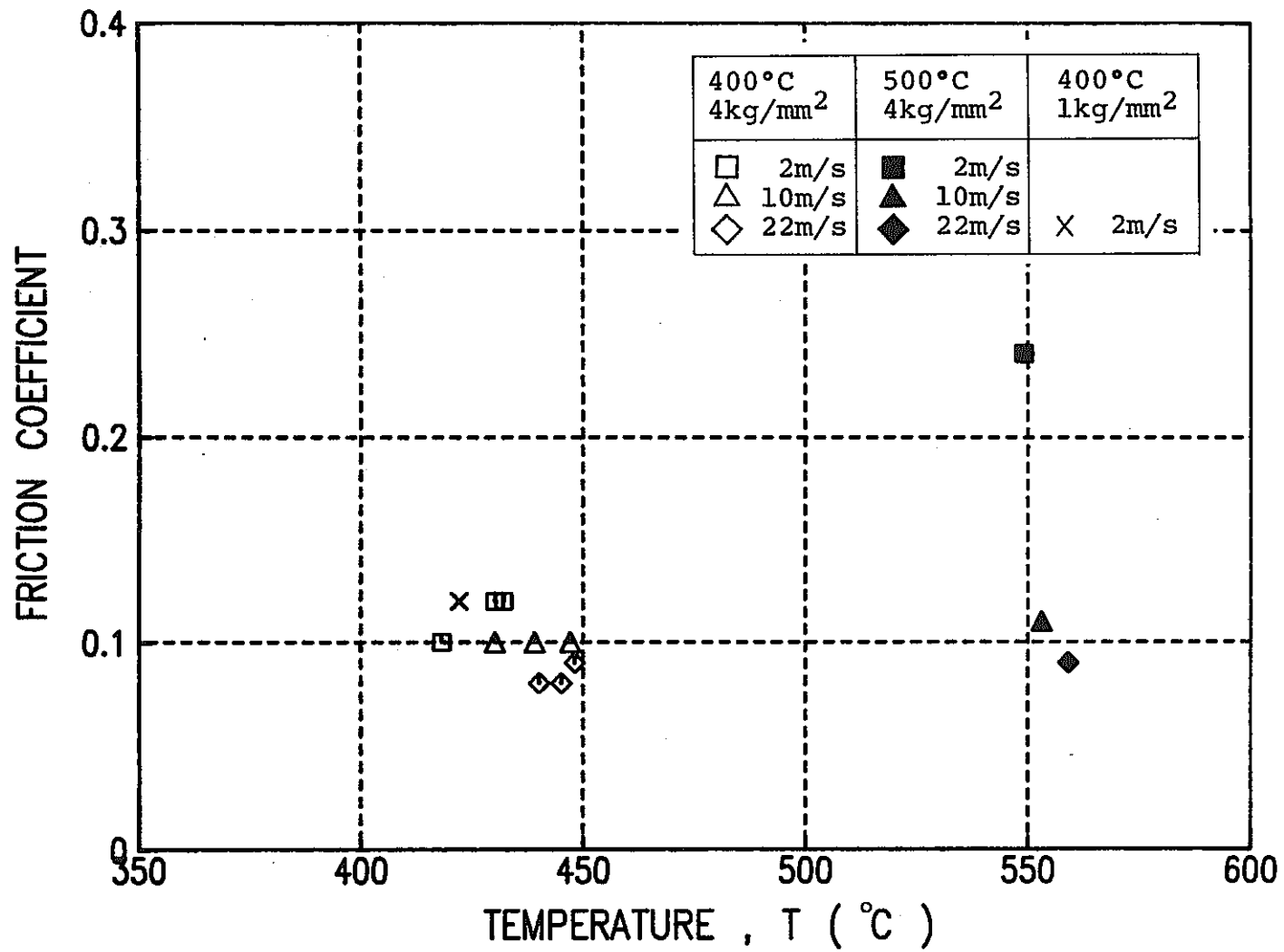


Fig. 6.4 Friction Coefficient versus Specimen Temperature

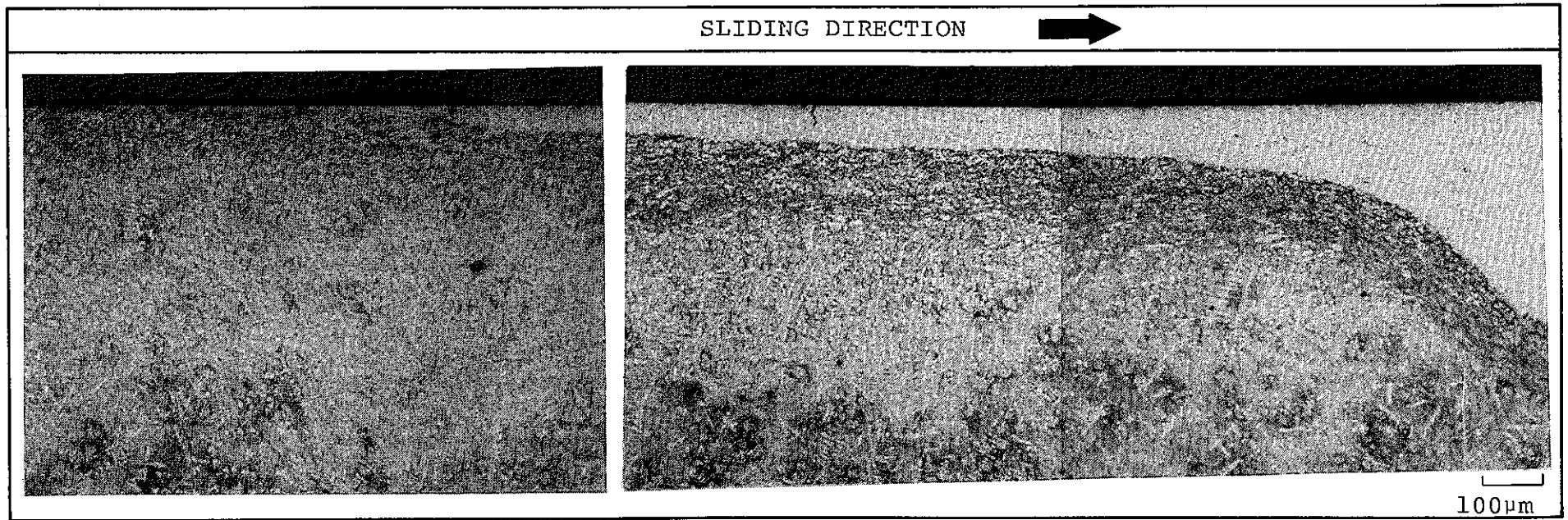
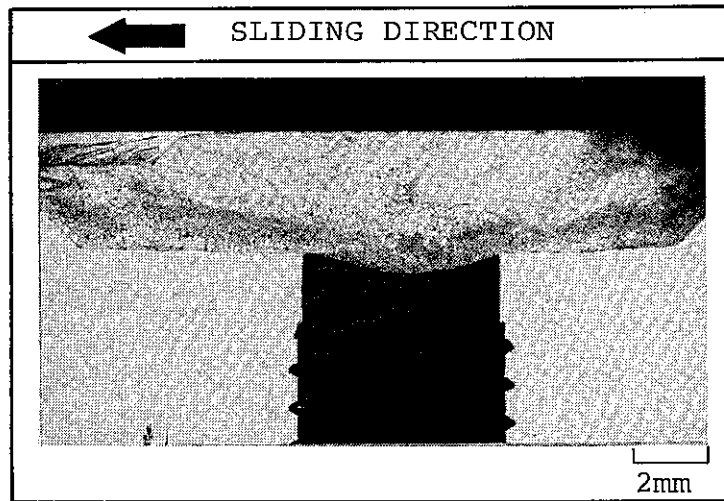


Fig. 6.5 Cross Sectional Microstructure

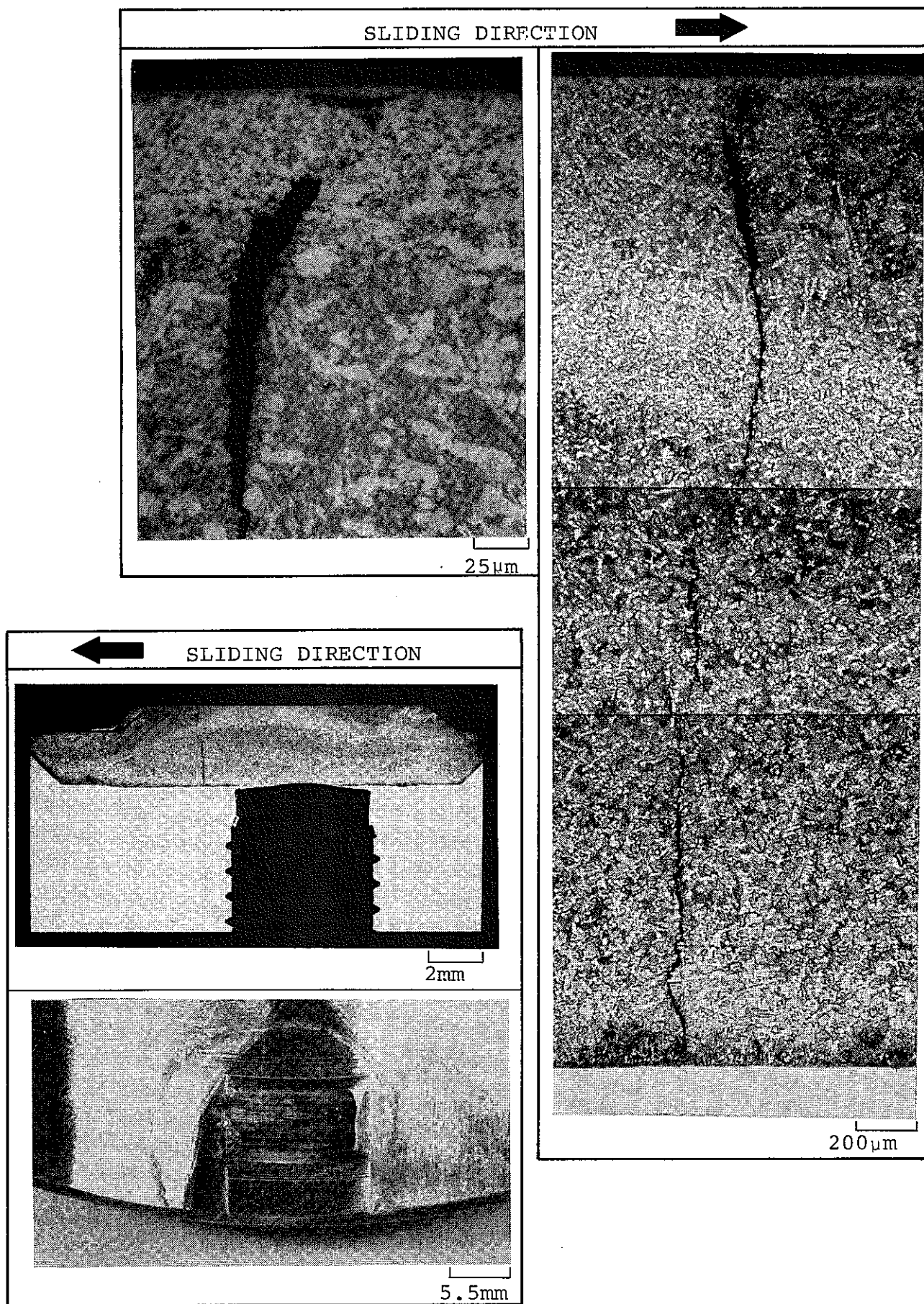


Fig. 6.6 Cross Sectional Microstructure
 (400°C, 10m/s, 3.7kg/mm², 60s)

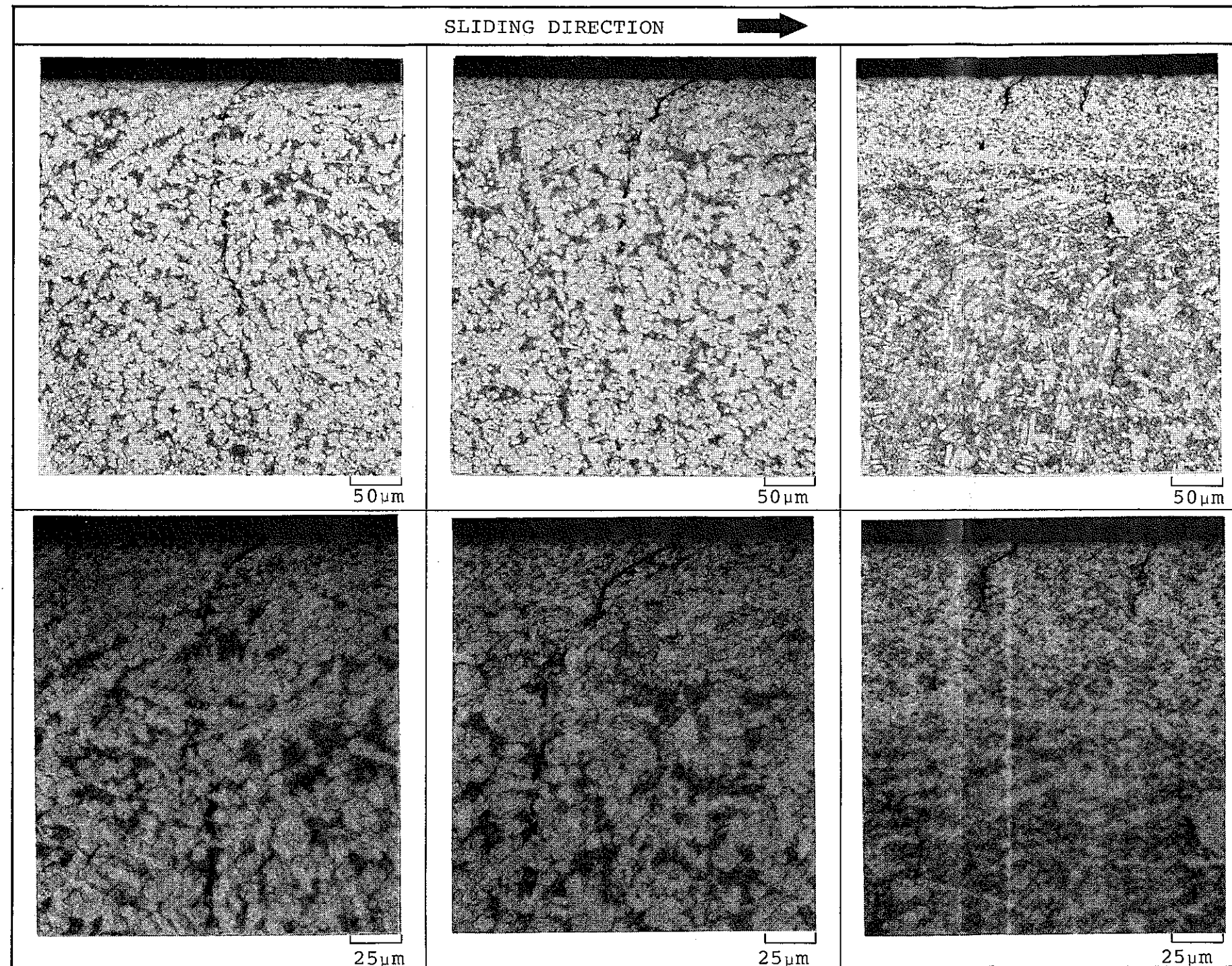


Fig. 6.7 Cross Sectional Microstructure
(400°C, 10m/s, 3.7kg/mm², 60s)

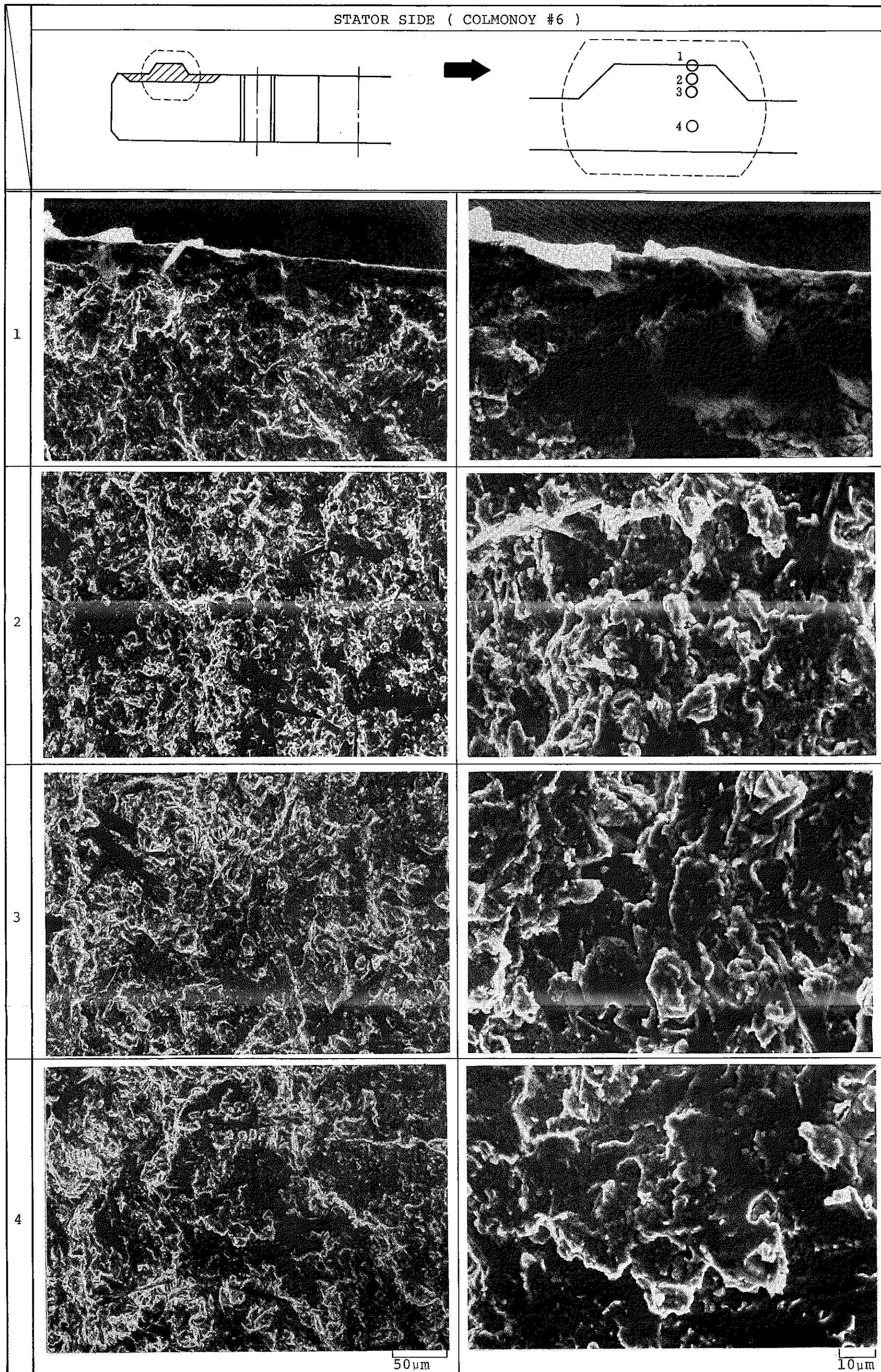


Fig. 6.8 Scanning Electromicrograph of Fracture Surface (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

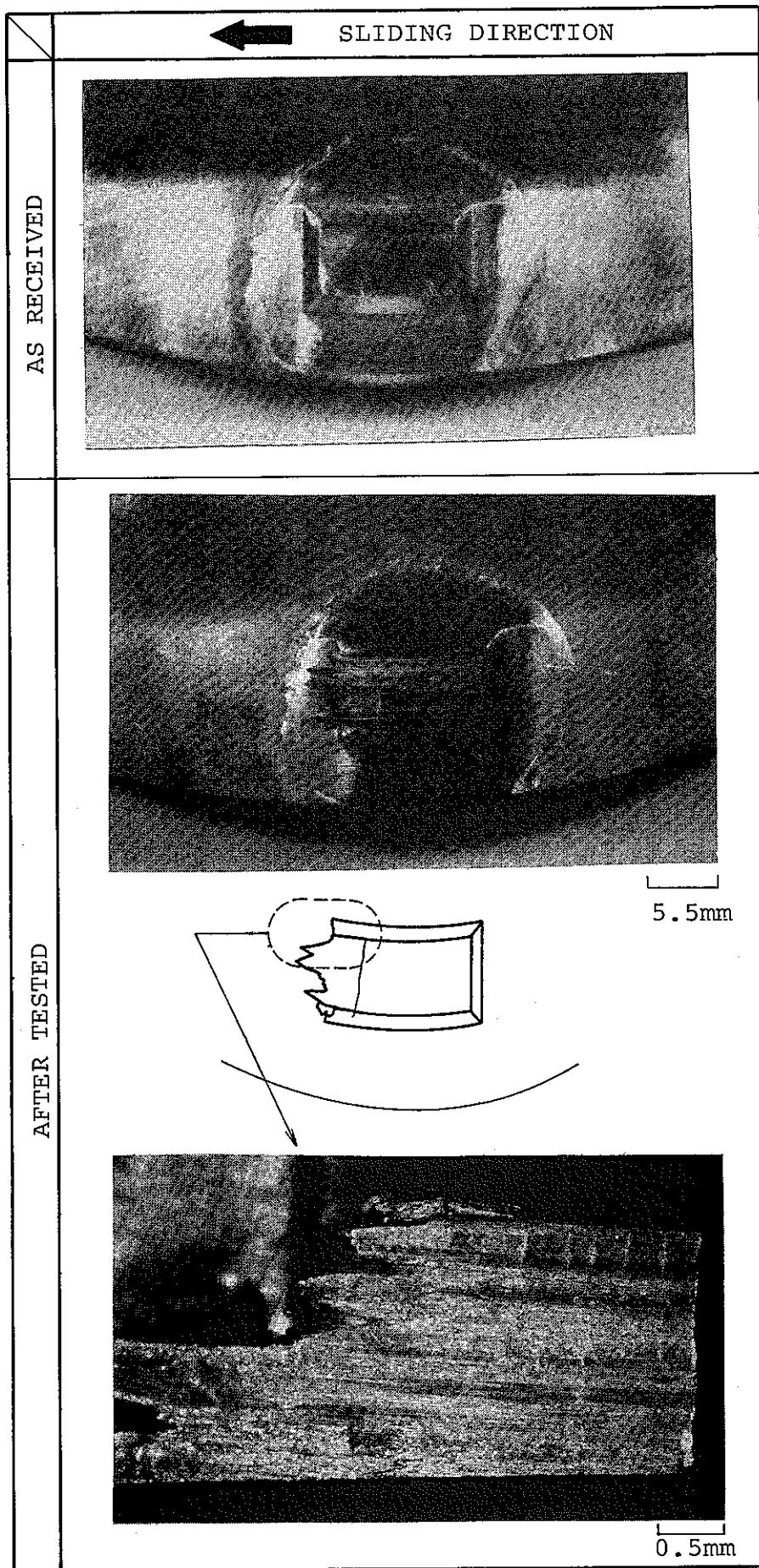


Fig. 6.9 Appearance of Specimen
 (400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

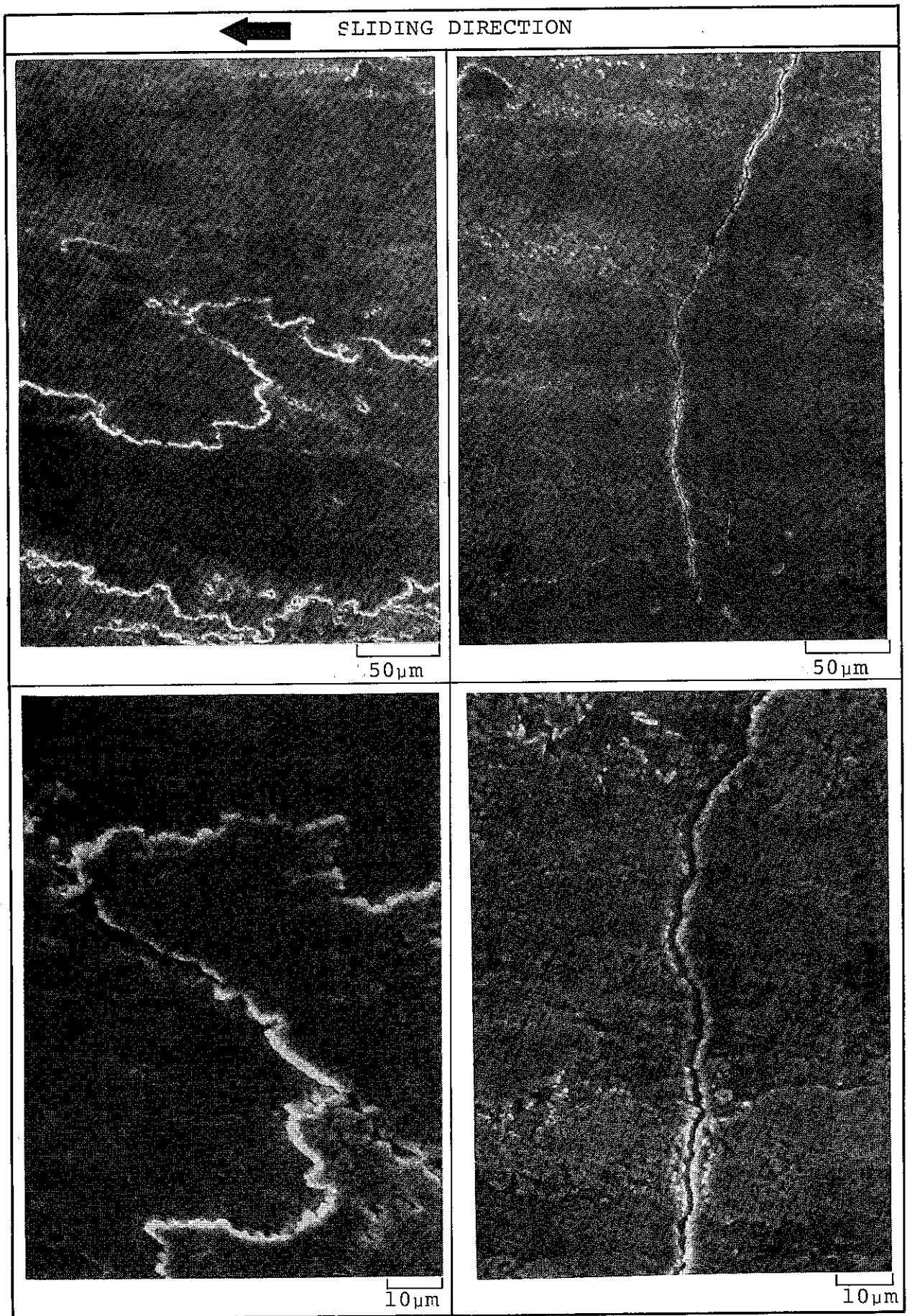


Fig. 6.10 Scanning Electromicrograph of Sliding Surface
(400°C, 22m/s, 4.1kg/mm², 60s)

8. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，動力炉・核燃料開発事業団，動力炉研究開発本部プラント技術開発グループ，天田健一殿に御指導をいただいたので，ここに厚く御礼申し上げます。

9. 参 考 文 献

- (1) ポンプ軸受耐震試験 (Ⅱ) PNC SJ 202 82-09 (1982)
- (2) ポンプ軸受耐震試験 (Ⅲ) PNC SJ 202 81-14 (1981)
- (3) ポンプ軸受耐震試験 (Ⅳ) PNC SJ 201 83-25 (1983)
- (4) ポンプ軸受耐震試験 (Ⅴ) PNC SJ 201 83-26 (1983)
- (5) 笹田 直 : 機械の研究, 23 10 (1971) 65
- (6) 金属工学便覧
- (7) 溝口庄太郎, 他 : 日本金属学会誌, 41, 1 (1980) 76
- (8) 野呂瀬 進 : 機械の研究, 34, 1 (1982) 94
- (9) 笹田 直 : 機械の研究, 34, 1 (1982) 56