

燃料集合体パッド部材の選定試験(Ⅰ)

高温ナトリウム中における摩擦係数

1975年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

燃料集合体パッド部材の選定試験(I)

高温ナトリウム中における摩擦係数

報告者	溝淵 庄太郎
	富永 康夫
	小塙 享
	加納 茂機
	厚母 栄夫

要旨

従来から、高速炉内の接触、摺動部材の選定試験を行っているが今回、6種類の燃料集合体パッド部候補材について、模擬した条件で試験を行った。これによって、以下の事がわかった。

- 1) SUS316材は摩擦係数が高く(0.8), 悪い摩擦挙動を示した。又、硬質クロム・メッキ材も摩擦挙動が悪く、540°Cナトリウム試験後、硬度の低下が大きかった。
- 2) クロム・カーバイト材は表面状態の粗い「B.F」仕上げのものが、研磨した「G.F」より、安定な摩擦挙動を示し、摩擦係数値は0.5前後であった。又温度によって、この値は変化しなかった。
- 3) コルモノイNo6は、今回試験した材料のうち最も低い摩擦係数値を示した(0.34)。又ステライトNo6材は280°Cナトリウム中でも、やや悪い摩擦挙動を示した。
- 4) 540°Cのナトリウム中で一定時間、加圧して保持した場合、すべての材料で摩擦係数の増加が認められた。

これらの事から、この試験条件下では、コルモノイNo6とクロム・カーバイト材の「B.F」のものがパッド部材として有望である事がわかった。

Screening Test for Duct Pad Materials of Fuel Assembly (I)

Frictional coefficient in a sodium environment

Syotaro MIZOBUCHI

Yasuo TOMINAGA

Tohru KOAKUTSU

Shigeki KANOH

Hideo ATSUMO

Abstract

We have been conducted experiments to select for the contacting and sliding material use in F.B.R.. In present study, we tested in simulated condition for 6 kind of the candidated materials as duct pad of fuel assembly. The following results were obtained,

- 1) SUS316 showed a bad frictional behaivor as the high frictional coefficient of 0.8, and hard chrome plating, also, have been unstable frictional behavior and become to the lower hardness after tested in 540°C sodium.
- 2) The brush-finished chrome carbide showed the more stable frictional behaivor than the grinder-finished material, and frictional coefficient showed approximately 0.5. This coefficient was independent on the temperature in this test.
- 3) Colmonoy No.6 indicated the lowest frictional coefficient of 0.34 in materials of present studys. But, stellite No.6 showed a little unstable friction behavior even if tested in 280 °C sodium.
- 4) Each of tested materials were observed increasing frictional coefficient, after tested dwell-ing in 540°C sodium.

It was recognized that colmonoy No.6 and the brush-finished chrome carbide seem to be the promising as duct pad materials.

目 次

1. まえがき	1
2. 試験方法	2
2. 1 試験装置	2
2. 2 試験条件	2
2. 3 試験片の形状および供試材	4
2. 4 試験後の解析	5
3. 試験結果および考察	6
3. 1 試験後の試験片の外観状況	6
3. 2 各材料の摩擦係数	6
3. 3 各材料の融着性の評価	7
3. 4 硬度変化	8
4. まとめ	10
5. 参考文献	12

List of Tables

- Table 1 Conditions of Test
Table 2 Chemical Composition of Specimen
Table 3 Manufacturing Methods of Specimen
Table 4 Hardness Changes before and after Tested

List of Figures

- Figure 1 Low-purity Material Test Loop Flow Sheet
Figure 2 A Sketch of Friction Test Device
Figure 3 External Appearance of Friction Test Device
Figure 4 General View of the Device at Friction Test
Figure 5 External Appearance of Specimen after Tested in
540°C Sodium
Figure 6 Dimentions of Stator Specimen
Figure 7 Dimentions of Sliding Specimen
Figure 8 Results of Friction Test of the LC-1C(B.F) after
Dwell Time during 1000min.
Figure 9 External Appearances and Roughness Changes on the
Surface of LC-1C(B.F) Specimen
Figure 10 External Appearances and Roughness Changes on the
Surface of LO-1C(G.F) Specimen
Figure 11 External Appearances and Roughness Changes on the
Surface of Stellite No6 Specimen
Figure 12 External Appearances and Roughness Changes on the
Surface of Colmonoy No6 Specimen
Figure 13 External Appearances and Roughness Changes on the
Surface of Hard Chrome Plating Specimen

- Figure14 External Appearances and Roughness Changes on the Surface of Inconel 718 Specimen
- Figure15 External Appearances and Roughness Changes on the Surface of SUS316 Specimen
- Figure16 Typical Diagram at Friction Test of Stellite No6 Specimen
- Figure17 Typical Diagram at Friction Test of Colmonoy No6 Specimen
- Figure18 Typical Diagram at Friction Test of LC-1C(B. F) Specimen
- Figure19 Typical Diagram at Friction Test of LC-1C(G. F) Specimen
- Figure20 Typical Diagram at Friction Test of Hard chrome plating specimen
- Figure21 Typical Diagram at Friction Test of Inconel 718 Specimen
- Figure22 Friction Coefficient of the Various Material in a Sodium Environment
- Figure23 Relations of Friction Coefficient and Dwell Time on the Various Materials under 200Kg Load in 540°C Sodium
- Figure24 Relations of Friction Coefficient and Dwell Time on Colmonoy or Stellite No6 under 200Kg Load in 540°C Sodium

1. まえがき

炉心拘束によって、燃料集合体同士をクランピングした場合、高温ナトリウム中のために、パッド部間で自己融着を起し、燃料交換時、摩擦係数の急上昇があり、交換に支障をきたすことが予想される。このため、パッド部材としては、耐自己融着性にすぐれ、摩擦係数値の底い材料を選択し、使用しなければならない。我々は従来から、各種装置を用いて、これらの耐摩耗、耐摩擦材の(選定試験)を行ってきたが、^(1~8) 今回は燃料集合体のパッド部条件を模擬して、6種類の候補材について、高温ナトリウム中で試験を行った。そして、これらの評価をしたので、これらについて、報告する。

2. 試験方法

2.1 試験装置

Na技術開発室内に設置されている低純度材料試験ループ(ループのフロー・シートをFig. 1に示す)のF-2ポットを利用し、このナトリウム・ポット中で試験を行った。

本試験装置ではパッド部を模擬した固定側試験片と、板状の試験片を摺動させ、このときの摺動力から摩擦係数を算出することができる。Fig. 2に装置の概略図を、又、Fig. 3に試験片を取り付けた後の装置の外観図を示した。Fig. 4にはF-2ポットに付設したときの様相を示した。この場合、試験片はポット中に位置しており、荷重は手動ハンドルで左・右対称に負荷される。

又、このときの荷重変化を常時、ロード・セルで読み取り記録した。Fig. 5にナトリウム中試験後の試験片状況を示す。中央の摺動側試験片の上・下の駆動は、試験によって電動又は手動で行えるようにクラッチを電動モータと偏芯カムの中間に設けた。摺動距離は偏芯カムによって調整することができるほか、 $\pm 5\text{ mm}$ までの範囲内で試験が可能である。又、左・右の模擬パッド試験片(固定側試験片)と、負荷伝達アームとの取合は、片当たりを少なくするため、ポール・ジョイント受方式を採用した。

今回の装置の特長は、直接摩擦力から摩擦係数を算出することができるもので、ドイツ⁽⁹⁾でも、この方式でパッド部材の選定試験を行っている。なお従来から行っているSW-1,
2^(4~8)の装置による摩擦試験は摺動トルク値から摩擦係数を得ている。

2.2 試験条件

試験条件をTable-1に示す。

Table 1 Conditions of Test

Sodium Temp. (°C)	280 , 540
Sodium Flow Rate (l/min)	0.3
Cold Trap Temp. (°C)	190
Sliding Stroke (mm)	± 4.5
Testing Load (kg)	100 , 200
Contacting Area (mm ²)	314
Dwell Time (min)	1 ~ 1500
Sliding Cycle (RPM.)	1.2

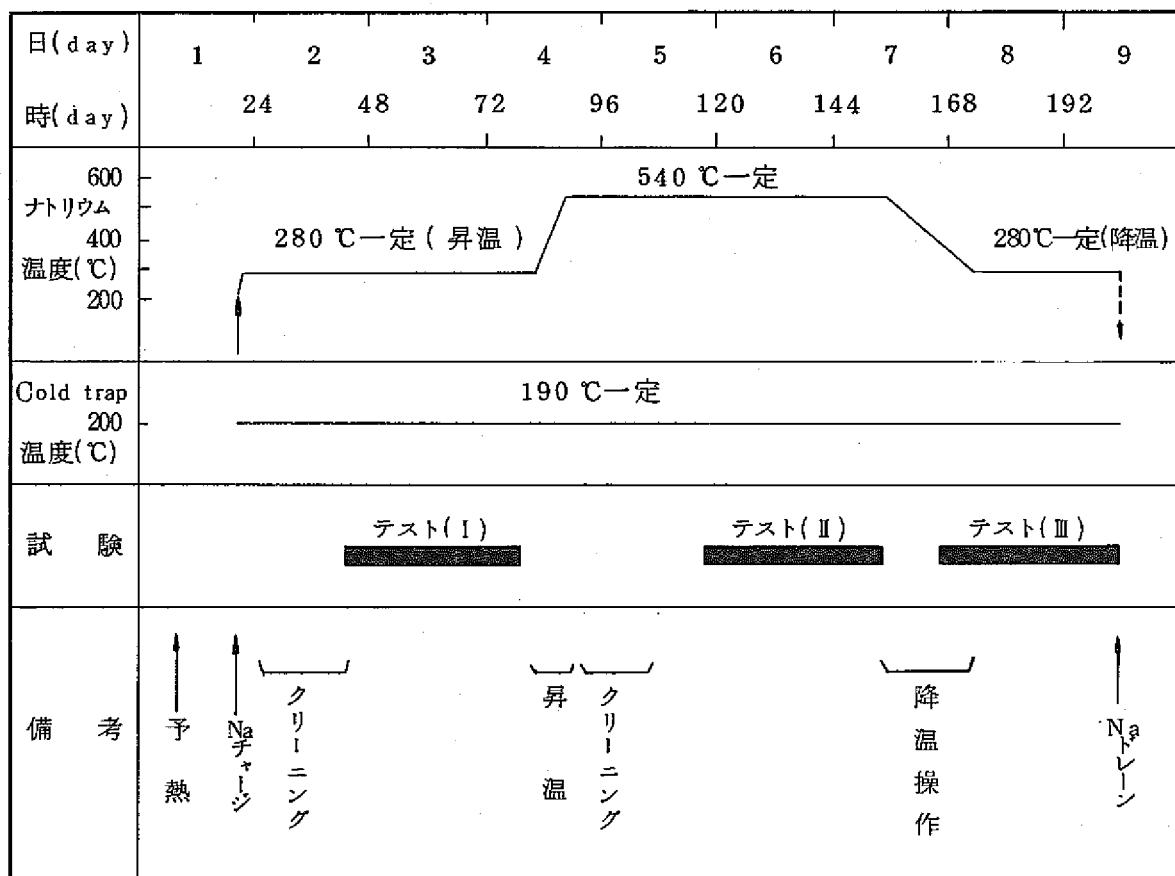
ここで、540 °Cの温度は燃料集合体のパッド部の主要温度であり、280 °Cは燃料交換時のナトリウム温度である。

又、荷重はクランピング力が設計値で1,200 Kgと考えられ、1つのパッド部荷重は200 Kgかかると予想されている。摺速は平均22 mm/minで行い、最大の摺速は200 mm/minで試験し、燃料交換時の速度を模擬した。

下記に、今回試験した運転時のプロフィールを示した。

又、自己融着性を評価するため、ある一定時間保持(Dwell Time)して、摩擦試験を行った。

静摩擦試験運転プロフィール



テスト(I) : 100 Kg, 200 Kg摩擦試験とDwell Time(~1500分)後の静摩擦試験
(Na温度280 °C……昇温時)

テスト(II) : Na温度540 °Cにおける試験、試験項目はテスト(I)と同一パターンである。

テスト(III) : 降温時(280 °C)における100 Kg, 200 Kgの摩擦試験

2.3 試験片の形状および供試材

試験材の寸法を Fig. 6 および 7 に示した。固定側の試験片は、パッド部の形状を模擬したもので、この場合「常陽」集合体を参考にした。(なお、「もんじゅ」の設計では円又は角型あるいは球面状を採用するかは、まだ決定していない。これらの形状は自己融着を防ぐためには重要な因子でもある。)

供試材は今までの我々の試験^(1~8)および外国の試験結果^(9, 10)から有力と思われる候補材を 6 種類選び、これらについて行った。供試材の成分、および製作方法を Table 2 および 3 に示した。ここで硬質 Cr メッキは「常陽」集合体で採用されているものであり、LC-1C 材は FFTF のパッド部に使われることが決定されている。又ステライト、コルモノイ材は従来から耐摩擦材として、広く使用されているもので、インコネル 718 材は、核特性の悪い Co、および B 元素をほとんど含まない Ni ベースの耐熱材として、一部に使用されているものである。

Table 2 Chemical Compositions of Specimen

(wt%)

Material	C	Si	Ni	Cr	Fe	Co	Mn	B	W	Mo	P	S	Ti	Al	other
SUS 316	0.06	0.6	10.23	16.55	Bal		1.34		2.28	0.027	0.02				
Stellite No6	1.04	1.17		28.65	0.27	Bal			4.2						
Colmonoy No6	0.75	4.25	Bal	13.5	4.75			3.0							
Inconel 718	0.07	0.15	53.81	18.45	Bal	0.07	0.16	0.002	3.14	0.004	0.004	0.85	0.71	Cb+Ta 5.12	
Hard Cr Plating				100											
LC - 1 C	85 % Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni - Cr														

Table 3 Manufacturing Methods of Specimen

Material	Coating Method	Coating Thickness (mm)
Stellite No6	Oxy-Acetylene Gas Weld	2
Colmonoy No6	Oxy-Acetylene Gas Weld	2
LC-1C (B. F.)	D-gun, Brush Finish (10 s)	0.2
LC-1C (G. F.)	D-gun, Grinder Finish (1 s)	0.2
Hard Cr Plating	Electroplating, as Plated	0.02
Inconel 718	Solution Treated and Aged. (※1)	
SUS 316	Solution Treatment. (※2)	

※1) Solution Treatment : 954°C × 1 Hr O.C

Aged : 719°C × 8 Hr - 621°C × 8 Hr/A.C

※2) Solution Treatment : 1100°C W.C

なお、供試材の詳細な製作方法は別の報告書⁽²⁾を参照されたい。

2.4 試験後の解析

試験中は左・右の負荷ロードと、上・下ストロークおよび摩擦負荷を1つのレコーダーに記録させ、on-lineで摩擦力を測定した。Fig. 8に得られたデータの一部を示す。

試験荷重は上・下の駆動によって多少(±2%)変化し、これにともなって摩擦力にも影響してくる。これは装置からのものでFig. 2に示す如く、摩擦面と支点との間でモーメントが働き、これによるものである。

又、試験中、一定時間加圧して保持した後の摩擦力は、増加し、自己融着性の傾向が認められた。

これらの事から今回の摩擦係数は次の様にして求めた。

なお、Fig. 8にもこれらの状況を図式化した。

ここで F_1 は上方向に摺動する時の摩擦力 (Kg)

F_2 は下方向に摺動する時の摩擦力 (Kg)

T : 試験荷重 (Kg)

μ : 摩擦係数

$$F_1 + F_2 = 2F \quad (F_1 > F_2)$$

$$\mu = \frac{F}{2T}$$

又、自己融着性を評価するため次式から摩擦係数の増加量を求めた。

$\triangle F$: 一定時間保持後の第1回摩擦サイクル時における摩擦力の増加量

$\triangle F_0$: 一定時間保持後の第2回摩擦サイクル時における摩擦力の増加量

$\triangle \mu$: 自己融着性の評価係数

$$\triangle \mu = \frac{\triangle F - \triangle F_0}{2T} \quad (\triangle F > \triangle F_0)$$

このほか試験後の試験片の外観、表面アラサ変化、および表面硬度等の測定を行い、材料評価を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 試験後の試験片の外観状況

Fig. 9～15 に各材料の試験後の摩擦面の外観と、この面におけるアラサ変化を示した。

SUS 316, 硬質 Cr メッキ材が最も表面が粗れしており、これに反してステライト No. 6 や、コルモノイ No. 6, およびクロム・カーバイト材ではほとんど表面アラサに変化は認められない。しかし、いずれも固定側試験片が接触していた部分と、常時ナトリウムが流動している部分では、表面状況が明らかに異っているのが認められる。すなわち、これはナトリウム側の条件によっても変化するが、材料の表面上を問題とする摩擦挙動には大きな影響を与えることが予想される。この事は今後ナトリウムのフラッシング（一定時間試験片間を分離しておきその後、摩擦試験を行う）効果について試験する必要がある。又、硬質 Cr メッキは、試験後メッキ層の肉盛（ 20μ ）以上にもなっており、微細なクラックの発生（前報に詳しく記述した⁽¹⁾のでこれを参照のこと）と、相重って、「もんじゅ」の如く、加圧保持されて、摺動が起る様なパッド部材としては不適当であると思われる。

3.2 各材料の摩擦係数

各材料とも、各々異った摩擦挙動を示している。又、今回の試験は装置の制約から、上・下の摩擦ストロークは偏芯カム伝達によって行ったので摺速は正弦波状となっており、駆動の変換点（上方向から下へ、下方向から上へ）附近では極端に速度が遅くなる。このため、材料の摩擦挙動にも微妙に変化が生じている。

Fig. 16～21 にそれぞれの温度、荷重の下での典型的なデータを示した。

クロム・カーバイト材で $10 \mu\text{m}$ もの粗さを示す「B.F」仕上げ面では、試験温度によって摩擦波型が異なり、温度が高くなると摩擦挙動の変化が生じてくるのが認められた。

この傾向はコルモノイ No. 6 材、インコネル 718、および硬質 Cr メッキ材でも観察された。Fig. 18 には 200 Kg の荷重で 1,000 分保持した時の摩擦波型も示した。自己融着性の強い材料では、保持後の最初の駆動時に大きな摩擦力が生じ、この様なピークを示す。又、Fig. 19 は Fig. 18 の材料と同じものであるが表面仕上げを $1 \mu\text{m}$ 以下に研磨した面での試験結果である。この場合、 280°C の温度でも、摩擦力の変動幅が大きい。このことは他の報告書⁽⁵⁾にも詳しく考察したが、「B.F」仕上げの場合は、多少なりともナトリウムの潤滑効果があることと、もう一つ、大きな事は、ナトリウムと化学反応を起して潤滑材となり得るフィルムを生成出来るために（あるいは、又、もとから存在している）安定な挙動を示すと思われ

る。

ステライト No. 6 はコルモノイ No. 6 と比べて不安定である。又、インコネル 718 材は 540 °C ナトリウム中では、摩擦サイクルの増加とともに摩擦挙動も悪くなる傾向が認められた。燃料集合体のパッド部材として、これらの摩擦波型から選択する条件としては、次の点が挙げられる。

- 1 摩擦力が安定であること（例 Fig. 17 の上段図）
- 2 試験荷重に対する摩擦力が小さいこと。（摩擦係数の小）
- 3 摩擦サイクルによって波型が変化しないこと（耐久性）
- 4 摩擦挙動が安定であること（再現性）
- 5 一定時間保持後の摩擦力が増加しないこと。（耐自己融着性）

以上の 5 点を満足する材料がパッド部として摩擦波型から選定出来る基準であろう。

以上の摩擦波型から各々の材料における摩擦係数を算出してまとめたものを Fig. 22 に示した。

SUS 316 が最も高い摩擦係数を呈し (0.8), コルモノイ No. 6 は 280 °C ナトリウム中で、0.2 以下の非常に低い摩擦係数値であった。このヒスト・グラフで斜線部は変動幅を示し、これが少ない材料および低い値を示すものが、パッド部材として有力候補材である。ここではコルモノイ No. 6 と LC-1C (B. F) 材が有望である。

3.3 各材料の融着性の評価

今まで各種方法^(1~5)で、材料の融着性を評価してきたが、ここでは、高温ナトリウム中で一定時間保持した後の摩擦係数の増加によって調べた。（Fig. 18 を参照のこと）

実際の燃料集合体パッド部はクランピング中に加圧され (540 °C) 炉休止中で温度の下がった時点 (280 °C) で燃料交換される時の摩擦力が問題となる。

この場合、540 °C で加圧されるため、この時点における自己融着性の評価と、280 °C の摩擦係数値の測定とが必要であるが、今回は 540 °C の保持後の摩擦係数値から評価した。Fig. 23, 24 に保持時間と摩擦係数の変化を示した。荷重はすべて 200 Kg である。

今回試験した材料では、ほとんど全部この保持によって、摩擦係数も増加した。

この図で示した (●—▲—■) 印が各材料における摩擦係数の増加分 ($\Delta \mu$) であり、(○—△—□) 印は、そのものの全体の摩擦係数を示している。

コルモノイ No. 6、および LC-1C 材は増加量が大きいが、全体の係数値から評価すると、値は 0.5 前後で、まだ、硬質 Cr メッキ材やステライト No. 6 材と比べて小さい。

しかし、長時間の保持の影響とか、ナトリウム温度の上昇等によってこれらの摩擦係数値は著しく変化する可能性があり、今後、これらの試験研究が必要であると考える。又、今回280°Cの低温ナトリウム中でも加圧保持して、自己融着性を調べたが、この程度の温度では摩擦係数の増加は認められなかった。

今までの報告で、280°Cのナトリウム温度中のデータは、すべて、昇温時の280°Cのデータであるが、一旦、540°Cに昇温試験した後再び280°Cに降温して、この時の摩擦挙動も調べた（運転プロフィール参照のこと）。この場合、温度履歴の影響と、摩擦サイクルの効果が考えられ、各々の材料によって、それぞれ異なる。すなわち、試験後、表面のアラサ変化が少ない材料ほど、摩擦サイクルの効果も小であった。

3.4 硬度変化

各材料の硬度は、一般的条件のもとでは、摩耗量と反比例的な関係を有しており、⁽¹¹⁾これに対しては非常に影響を与える因子の1つであることが予想されている。しかし、摩擦力については試験片の表面状態とか、ナトリウムとの共存性との影響因子が大であり、硬度との一定の関係を見つけることは難しい。しかし、摩擦サイクル等によって2次的なファクターとなりうることが予想できる。

今回試験前後の硬度測定を行った。又、試験後の測定では、固定試験片が常時接触していた部分（Fig. 13の外観から判断できる様に、ここでは摺動キズの無い部分）と流動ナトリウムに浸漬しただけの部分について測定し、比較した。その測定結果はTable 4に示した。SUS 316は試験前後でほとんど硬度変化がなく接触部も、ほとんど他と比べて差がなかつたが、実際の摺動を生じて「キズ」が発生している域では、加工硬化が起って、最大、2.5倍もの硬度を示すことが、今までの試験から、確認されている⁽⁴⁾。

Table 4 Micro Vickers Hardness Changes before and after Tested

Material	before	after	
		Contact	Non-Contact
Stellite No6	782	745	803
Colmonoy No6	1168*	1187*	803*
Inconel 718	503	493	485
LC-1 C (G. F.)	1246	907	1132
Hard Cr Plating	740	433	420
SUS 316	261	259	273

* 1部炭化物の硬さ

又、インコネル 718 材は、時効硬化処理材であったが、この程度のナトリウム温度では硬度の低下は認められなかった。しかし、硬質 Cr メッキの場合は試験前の硬度に比べて試験後では 60%まで硬度の低下が認められた。これは今までの報告書でも指摘した事⁽¹⁾であるが、例えば一定時期高いナトリウム温度に浸漬された場合 (540°C), 280°C の低い温度で摩擦が起る様な条件でも、硬度から判定すれば悪い結果が起ることとなる。これは硬質 Cr メッキの硬化現象が吸蔵水素によるものであり、短時間で硬度低下が起るためである。しかしインコネル 718 材では 719°C と 621°C の 2 段の長時間時効がされており、これ以上の温度では過時効現象が起り、硬度低下があるが、これ以下の温度では問題がない。

又、コルモノイ、ステライトもマトリックス自体の硬度が高いのでこの程度の温度履歴では問題ないと予想される。この Ni ベースのコルモノイ材と Co ベースのステライト材とでは、炉心で使う場合、Ni ベースの方が有力の様であるが、この 2 つを高温硬度から比較すると約 570°C 附近で逆転し、これ以上の温度ではステライト No.6 の方が硬度的に高く、しかも、安定となる。

今回の試験は 540°C のナトリウム温度で、又、低速であることから摩擦熱による効果も考えられないで、コルモノイ No.6 材の方が高い評価を得た。このナトリウム温度が 600°C になると、評価も変化すると思われる。今後、他の試験装置でこれらの温度の影響について行っているので、これらを参考にして、パッド部材として、より優秀な材料を選定する資料をえてゆきたい。

4. ま と め

今回の試験で明らかになったことを下記に列記する。

- 1) S U S 316 材は摩擦係数が高く(0.8), 悪い摩擦挙動を示した。又, 硬質クロム・メッキ材も摩擦挙動が悪く, 540°Cナトリウム試験後, 硬度の低下が大きかった。
 - 2) クロム・カーバイト材は, 表面状態の粗い「B.F」仕上げのものが研磨した「G.F」より, 安定な摩擦挙動を示した。しかし, 摩擦係数値はどちらも0.5前後であり, 又, ナトリウム温度によっても摩擦係数は変化しなかった。
 - 3) コルモノイ No.6 は, 今回試験した材料のうち, 最も低い摩擦係数値を示した。これに対してステライト No.6 は 280°C のナトリウム中でも, やや悪い摩擦挙動を示す。
 - 4) 540°C のナトリウム中で一定時間保持した場合, すべての材料で摩擦係数は増加した。
- 以上, 今回の試験から各材料ごとの評価を判定基準にそって, 優先順位をつけ, 一覧表にまとめたものを次表に示す。

各 材 料 の 評 価 一 覧 表

判定基準 材料	摩 擦 係 数	自 己 融 着 性	表 面 状 況	結果のバラツキ
ステライト No.6	3	1	3	5
コルモノイ No.6	1	4	1	3
LC-1C(B.F)	2	5	1	3
LC-1C(G.F)	2	5	2	5
硬質 Cr メッキ	4	2	5	5
インコネル 718	4	3	4	2
S U S 316	5	5	5	1

(※) 結果のバラツキ: 今後の試験によって, 評価が変わることを示す。

(特にナトリウム側の環境効果)

なお, 表中の「1」は秀れているものを示し, 「5」は劣っていることを示す。しかし, この一覧表は, 今回試験した7組の材料を各基準項目にそって, 順位をつけただけのものであり, 総合的な評価は, どの判定基準にウェートがおかれるかも考慮して, 決定すべきである。

今後は自己融着性に重点を置き、自己融着試験機（SW-2）による長時間保持した後の材料評価とパッド部表面を長時間流動ナトリウムに曝した後の融着評価を腐食融着試験装置（SW-3）を使い、51年度から行う予定である。

終りに臨み、この試験は多くの人々の協力によって、遂行されたものであり、特に本部「もんじゅ」設計グループ向坊隆一氏の協力によるところが大きい、ここに厚く御礼申し上げる。

5. 参考文献

1. 溝淵, 加納他“高温ナトリウム中における自己融着試験(Ⅰ)”。
SN 941-73-32
2. 溝淵, 加納他“高温ナトリウム中における自己融着試験(Ⅱ)”。
N 941-74-18
3. 溝淵, 加納他“高温ナトリウム中における自己融着試験(Ⅲ)”。
SN 941-75-12
4. 溝淵, 加納他“高温ナトリウム中における自己融着試験(Ⅳ)”。
SN 941-75-13
5. 溝淵, 加納他“高温ナトリウム中における自己融着試験(Ⅴ)”。
SN 941-75-49
6. 加納, 溝淵他“高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(Ⅰ)”。
SN 941-73-17
7. 加納, 溝淵他“高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(Ⅱ)”。
SN 941-74-12
8. 加納, 溝淵他“高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(Ⅲ)”。
SN 941-74-80
9. W. Dietz, E. Wild, et al “Friction Behavior of Inconel 718 and
stellite No6 as Fuel Assembly Duct pad
Material IAEA/SM-173/VII-18(1973)
10. R. N. Johnson et al “Wear Resistant Coatings for Reactor Components
in Liquid Sodium Environments”
J. Vacuum Science & Tech. Vol. 11 No4, Aug. 1974
11. 溝淵, 加納他“諸外国における摩擦, 摩耗, 自己融着試験の開発状況(Ⅰ)”。
調査報告 ZN 942-74-08

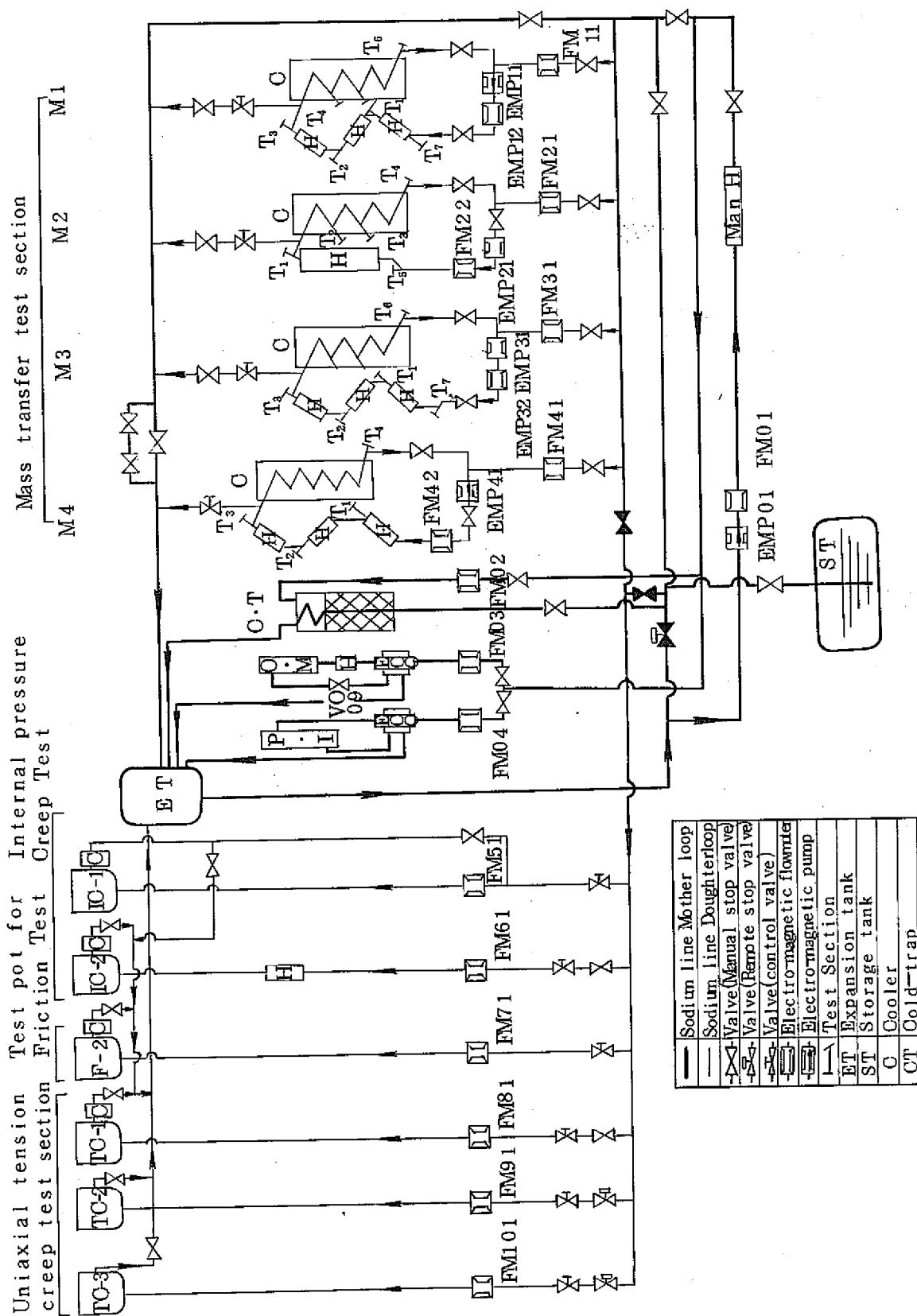


Fig. 1 Low-purity material test loop flow sheet.

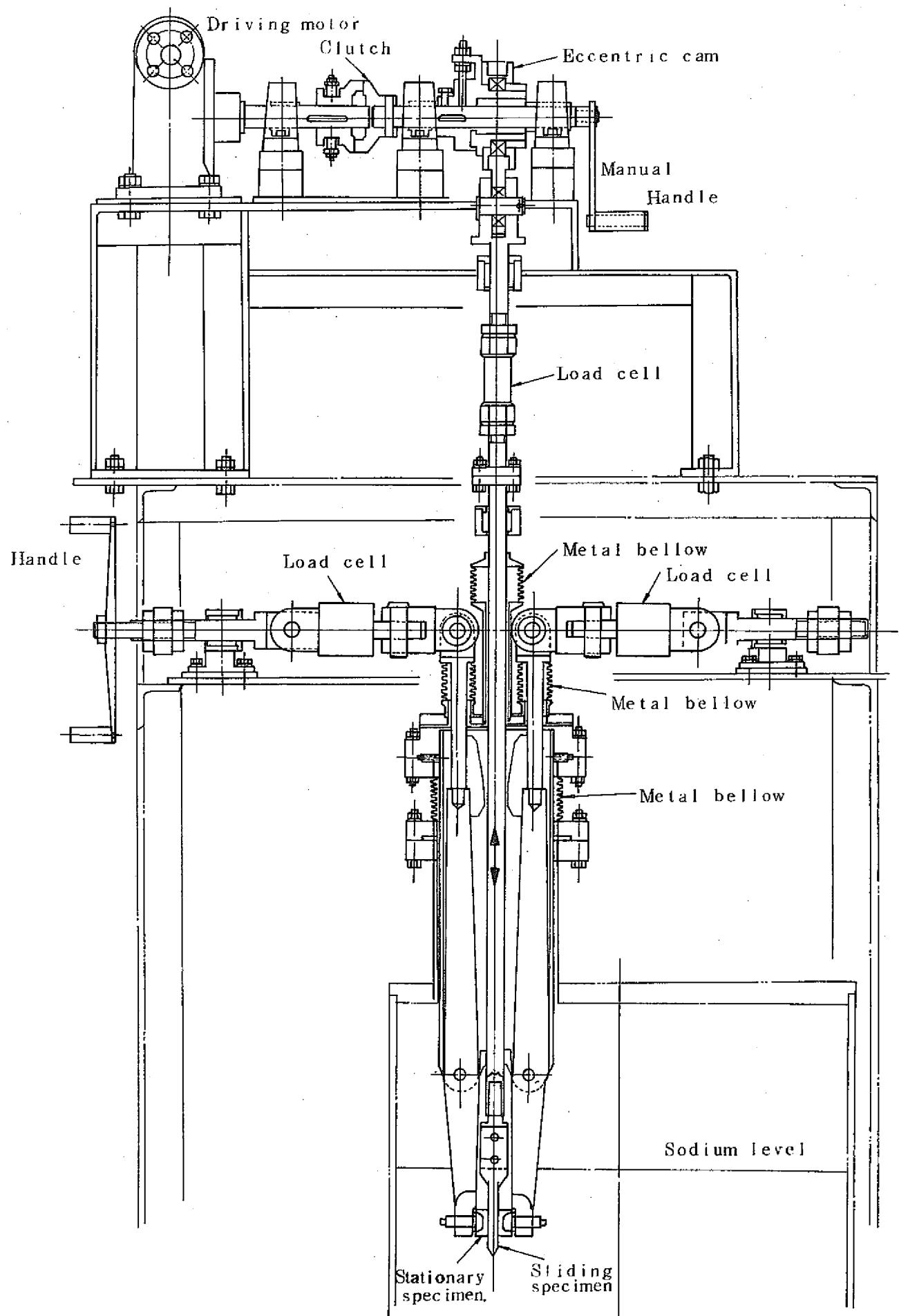


Fig. 2 Friction Test Device

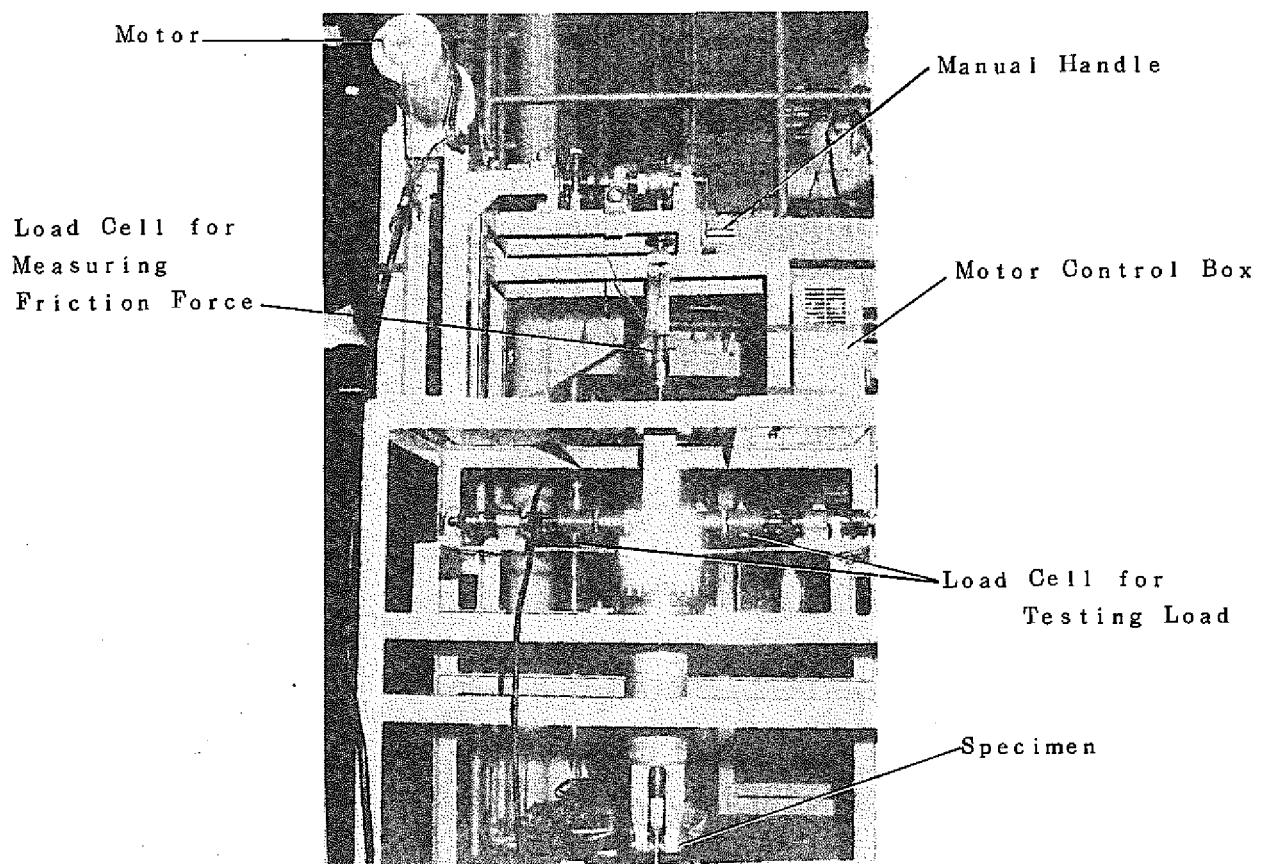


Fig. 3 External Appearance of Friction Test Device

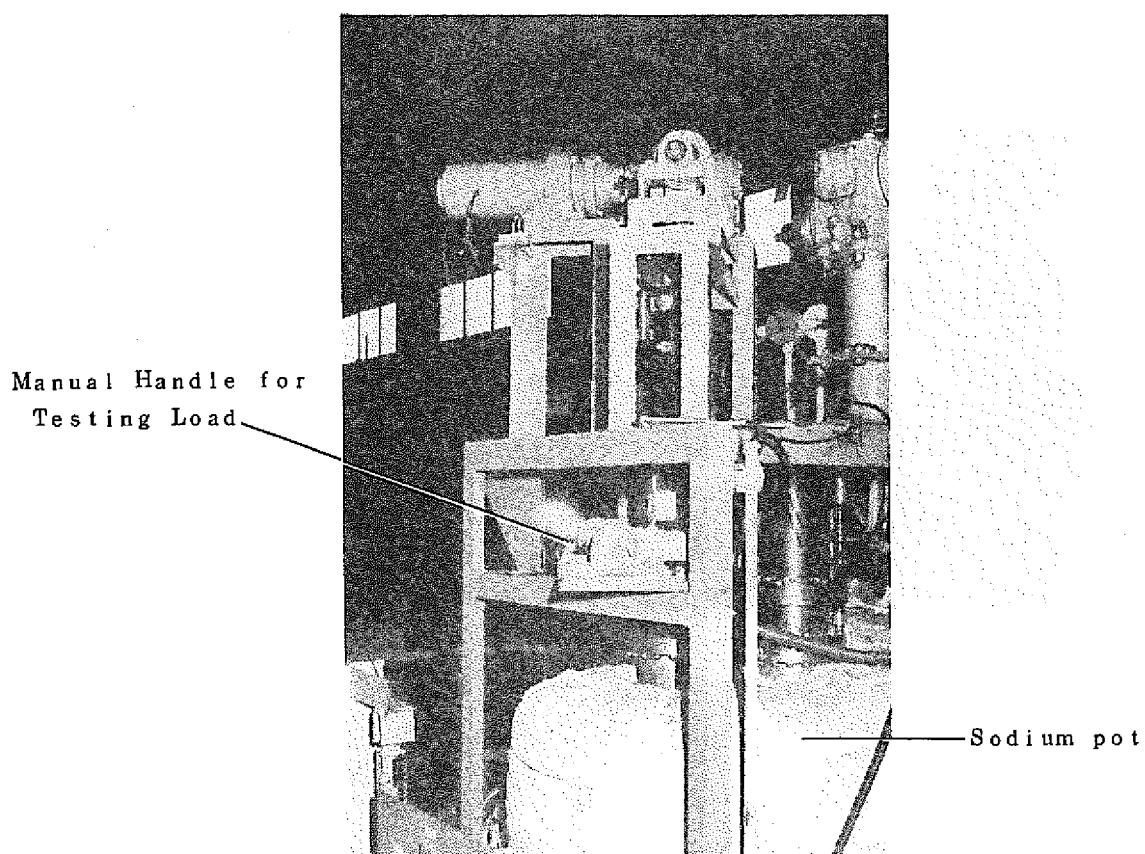
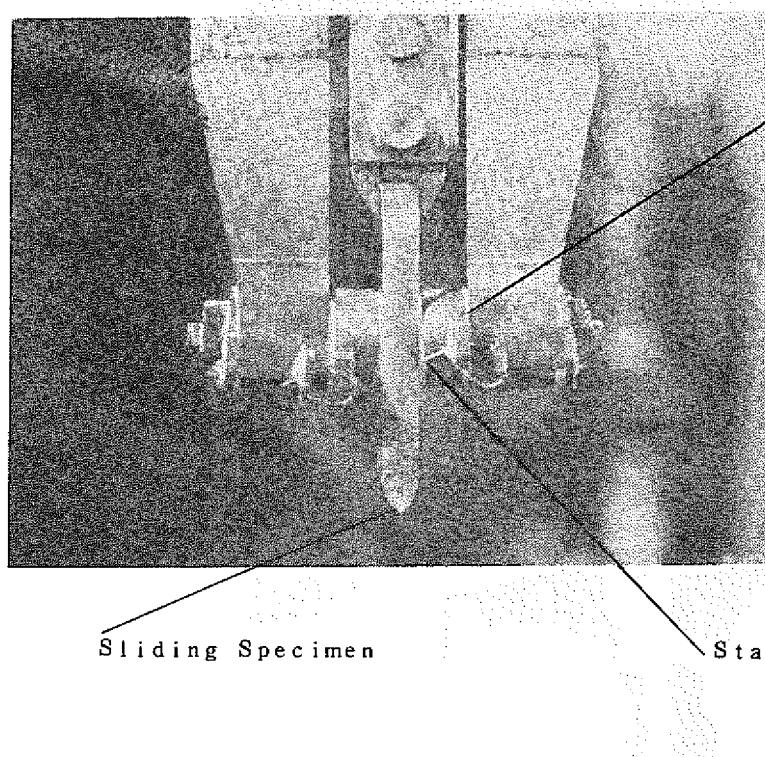


Fig. 4 General View of the Device at Friction Test



Sodium Vapor

Sodium Level



Ball Joint

Sliding Specimen

Stator Specimen

Fig. 5 External Appearances of Specimen after
Tested in 540°C Sodium

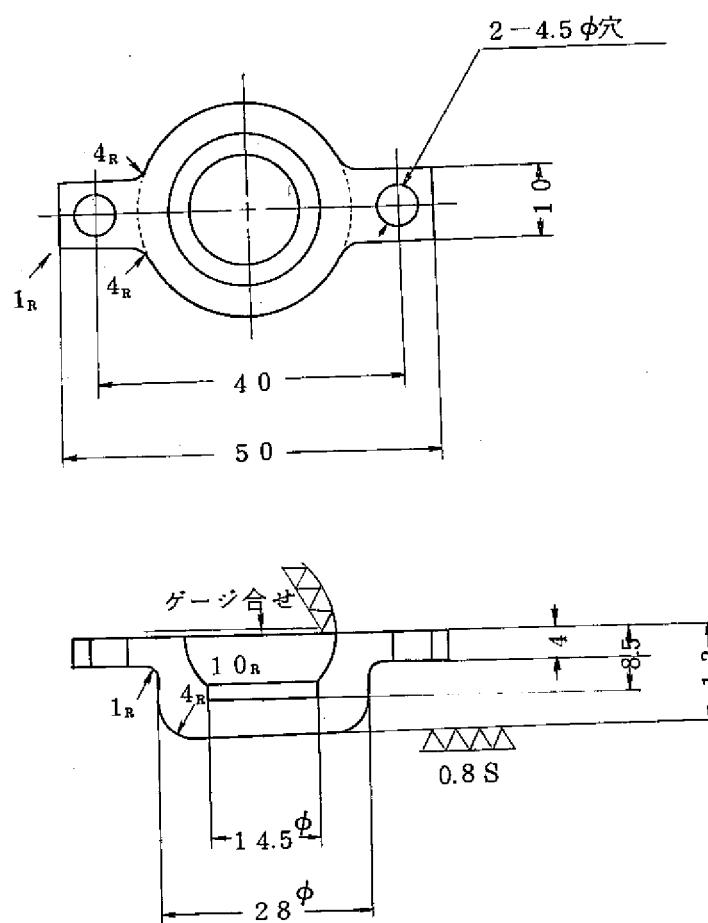


Fig. 6 Dimensions of Stator Specimen

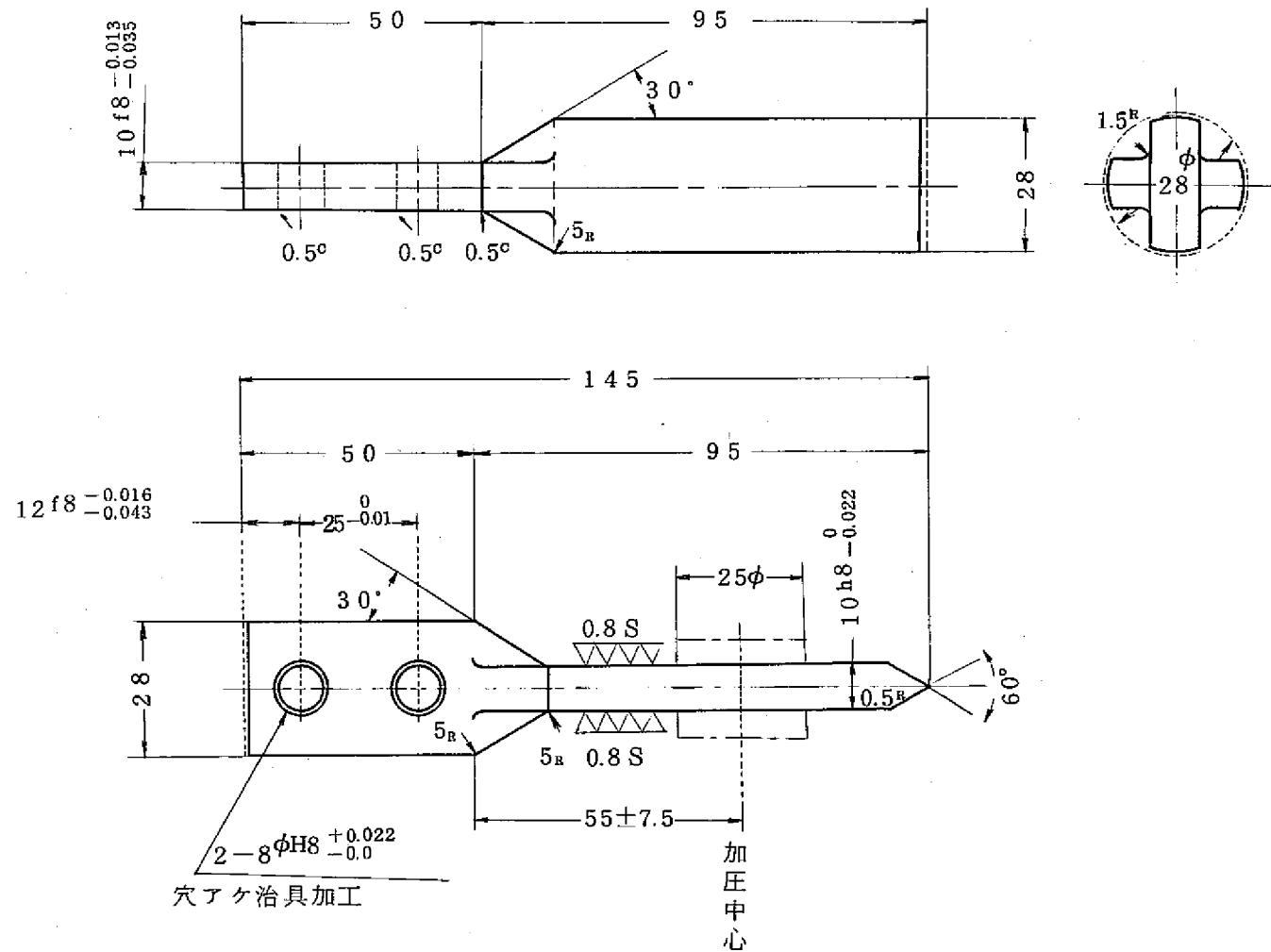


Fig. 7 Dimensions of Sliding Specimen

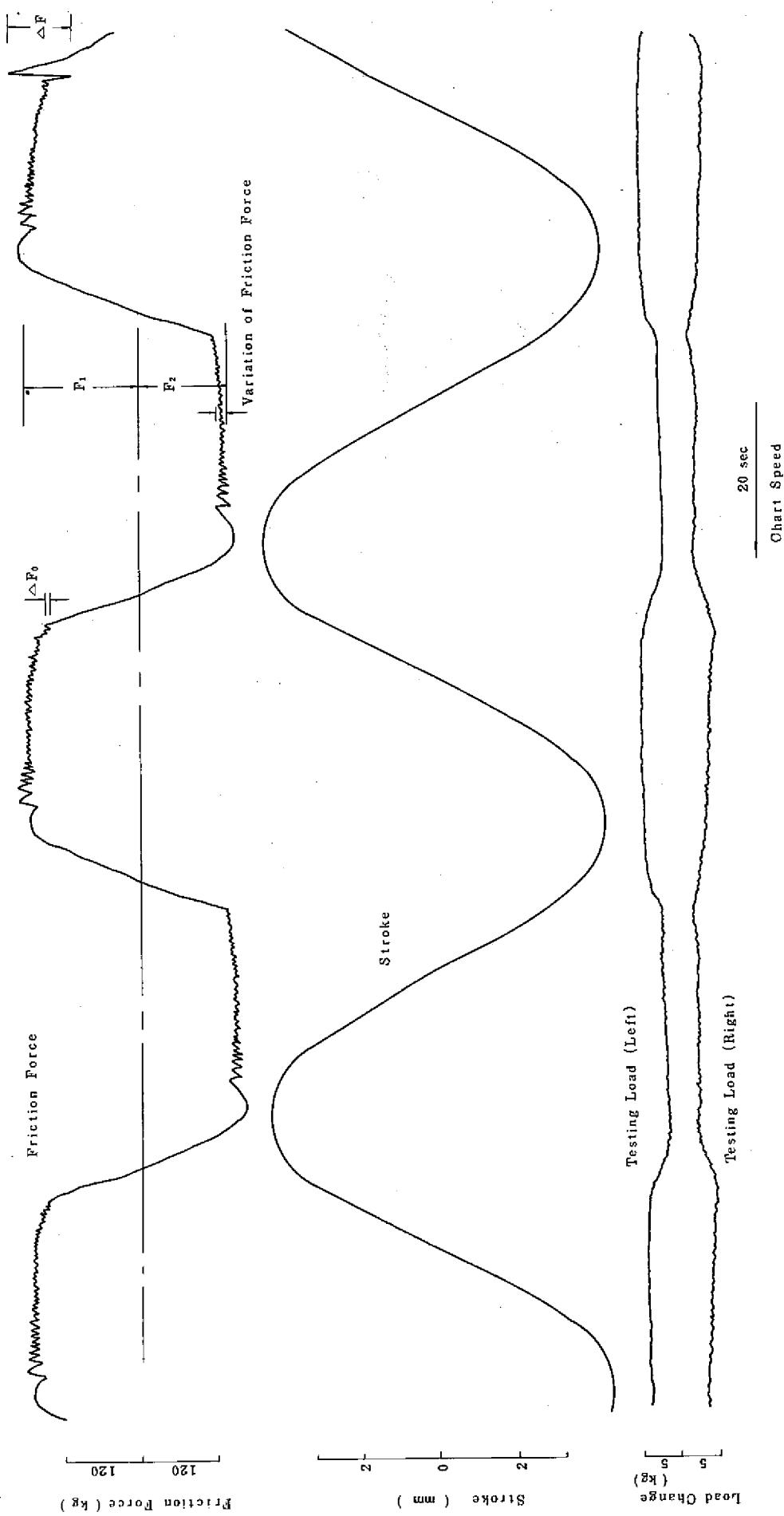


Fig. 8 Results of Friction Test of the LO-1C(B, F)
after Dwell Time during 1000 min.

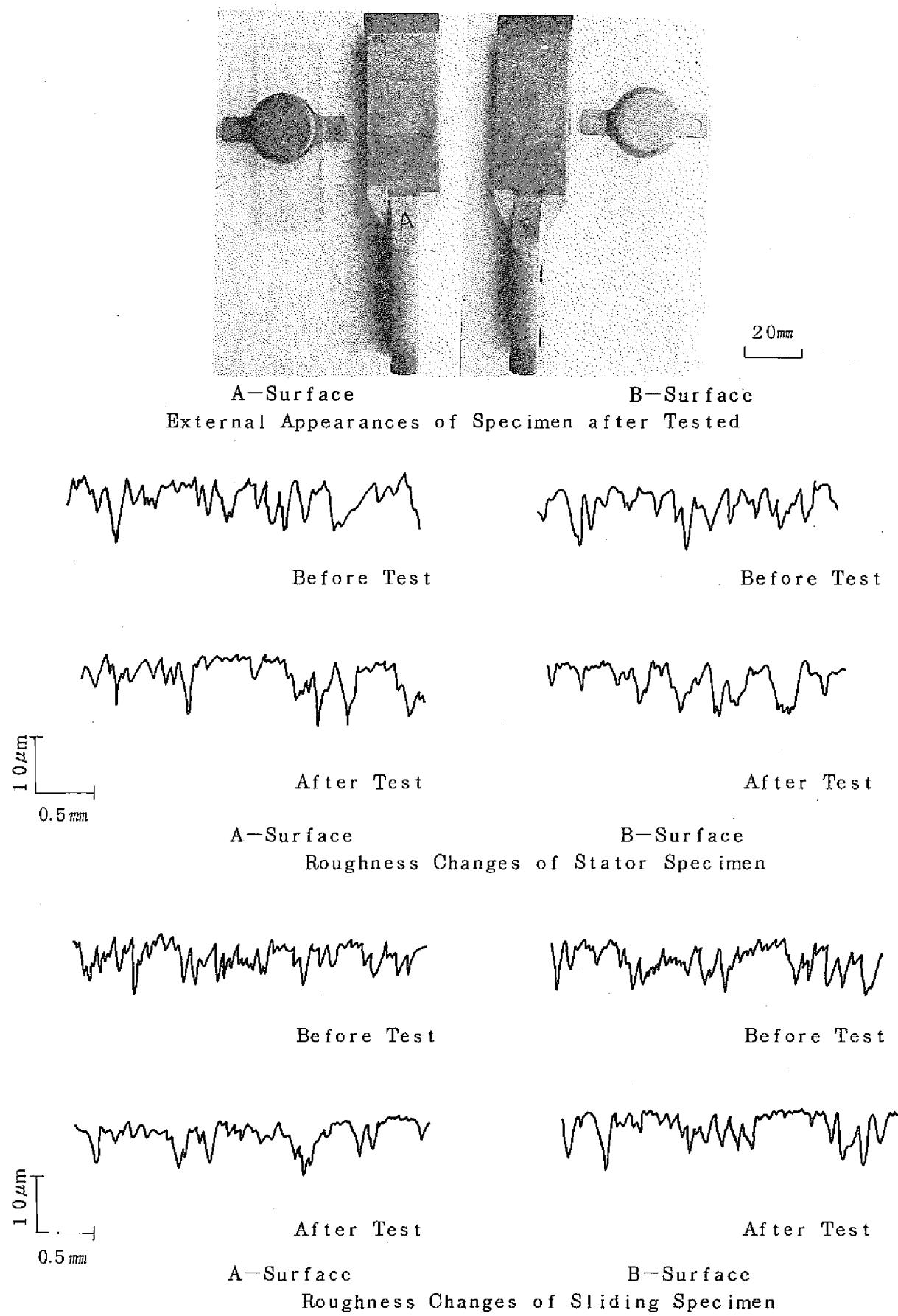


Fig.9 External Appearances and Roughness Changes on the Surface of LO-1C(B, F) Specimen

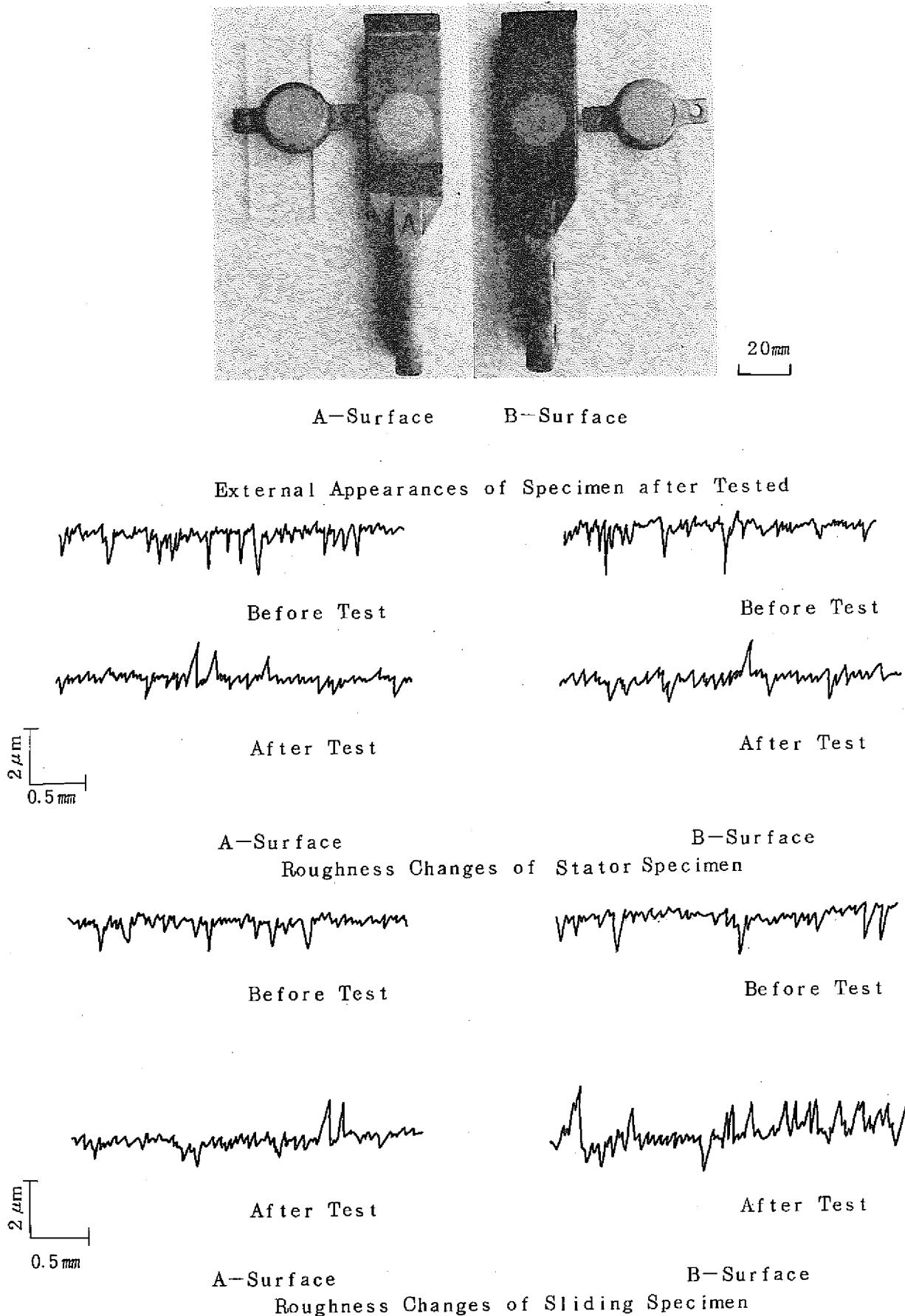
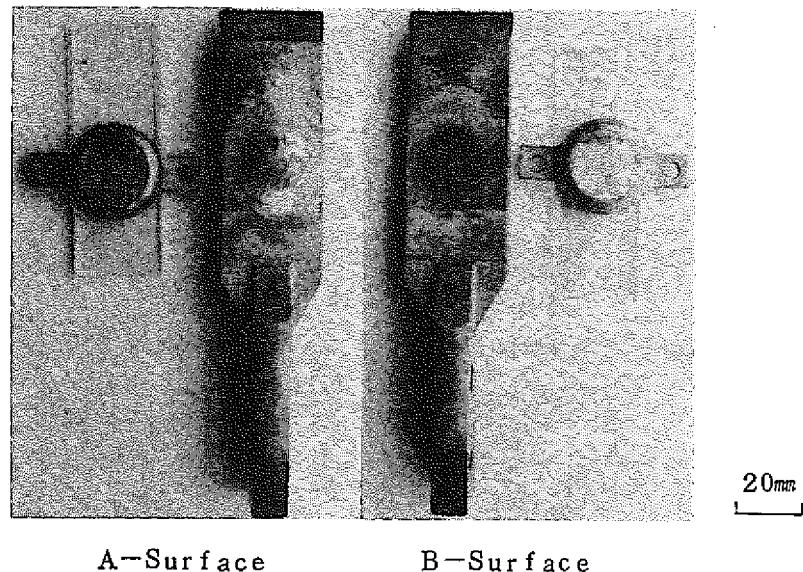


Fig.10 External Appearances and Roughness Changes on the Surface of LC-1C(G, F) Specimen



External Appearances of Specimen after Tested

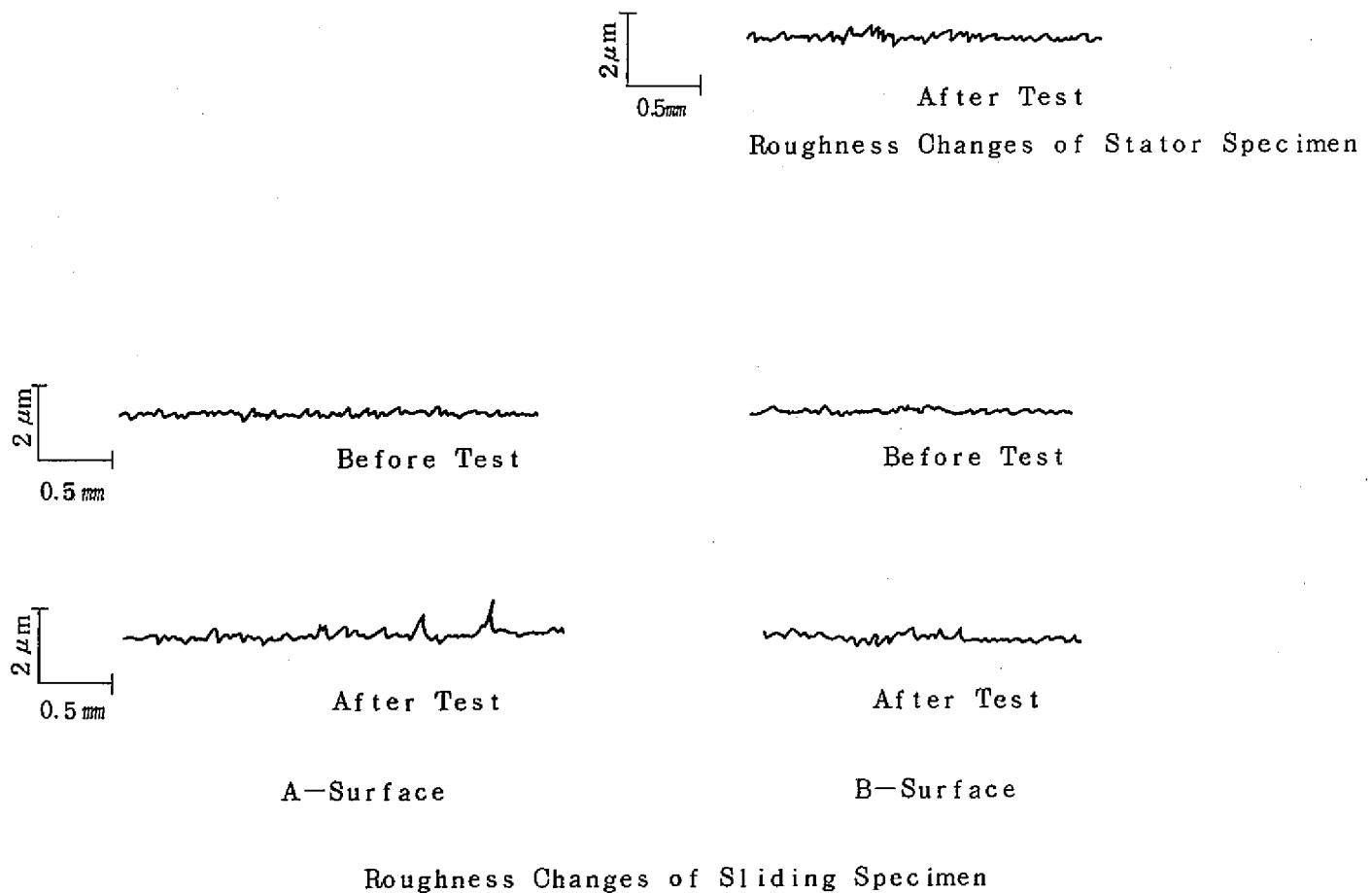
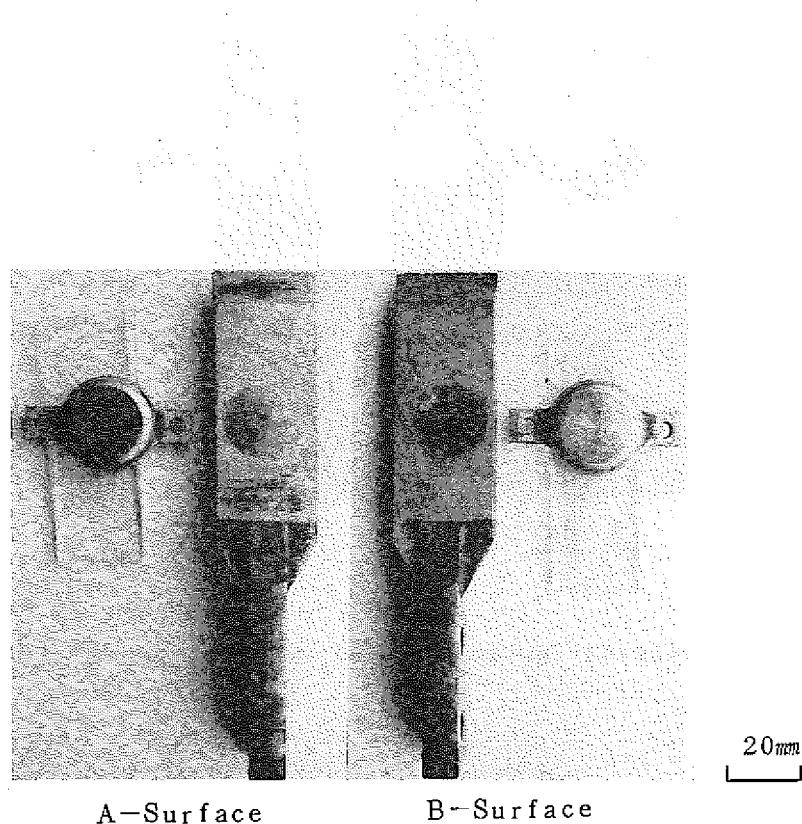
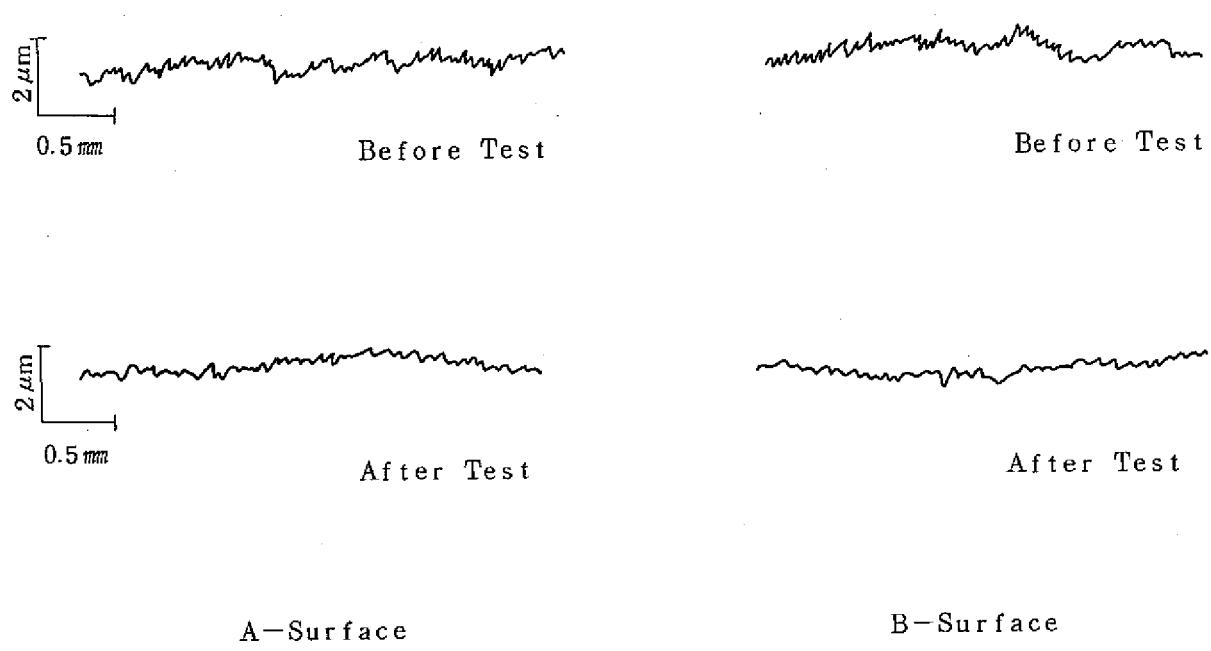


Fig. 11 External Appearances and Roughness Changes
on the Surface of Stellite No 6

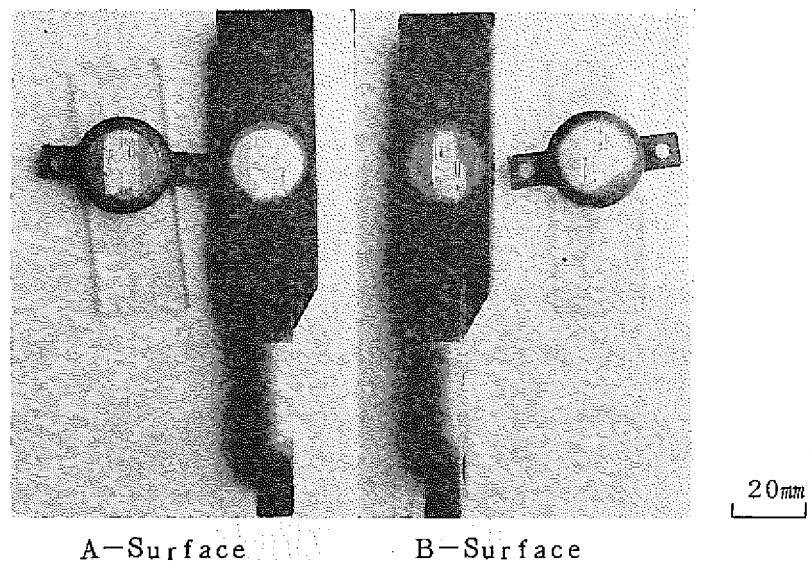


External Appearances of Specimen after Tested

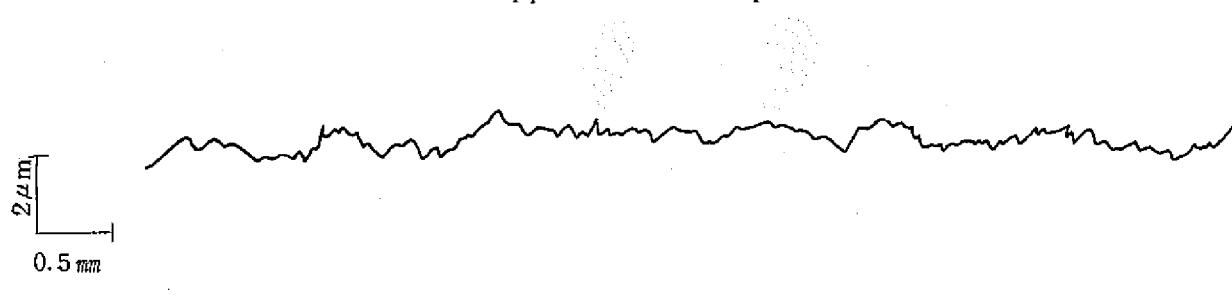


Roughness Changes of Sliding Specimen

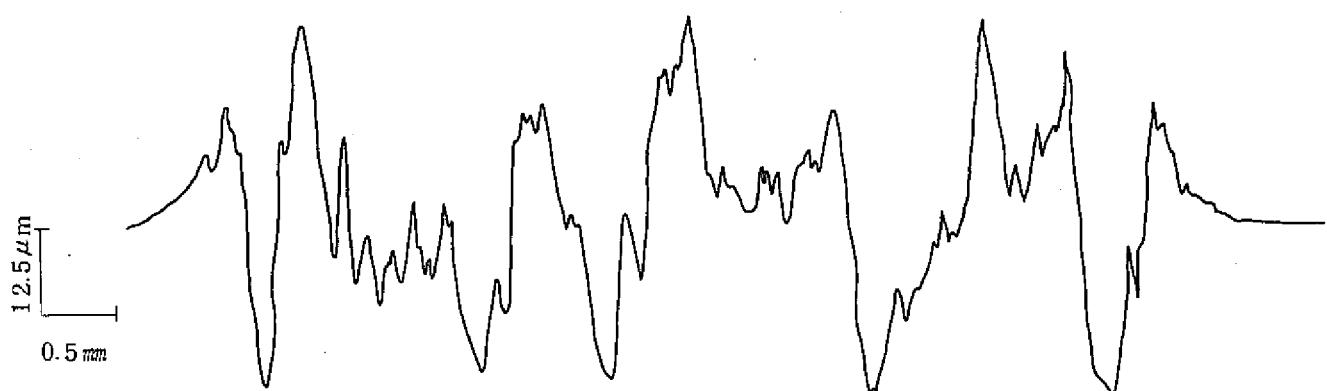
Fig. 12 External Appearances and Roughness Changes
on the Surface of Colmonoy NO6 Specimen



External Appearance of Specimen after Tested

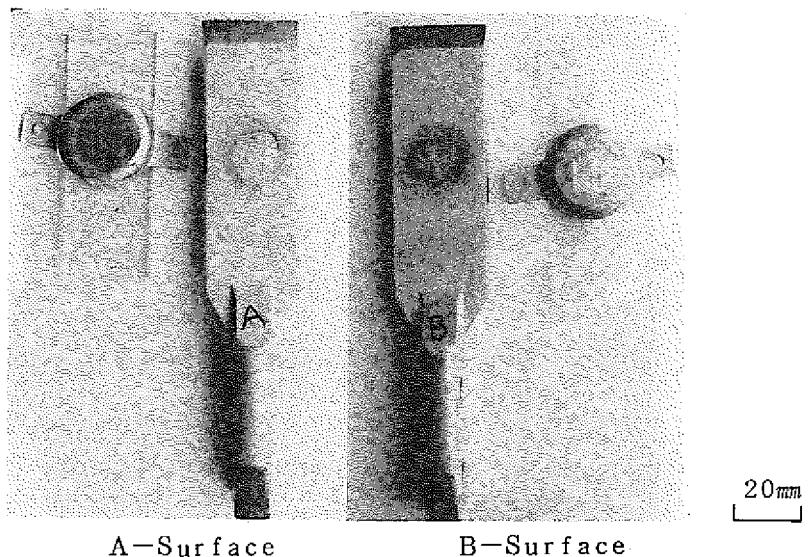


Roughness Changes of Sliding Specimen before Test

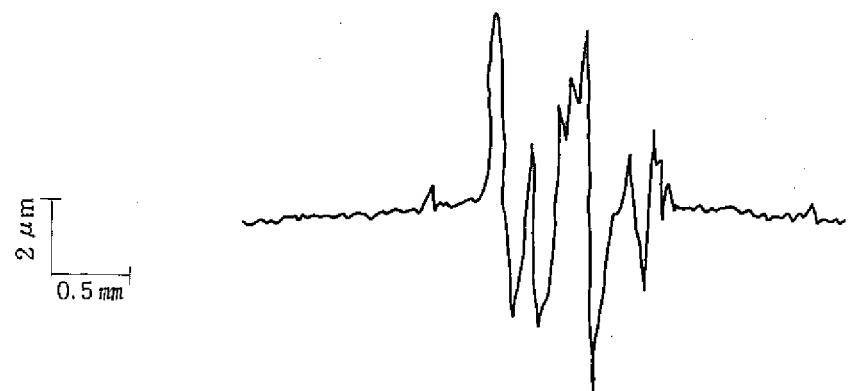


Roughness Changes of Sliding Specimen after Tested

Fig. 13 External Appearances and Roughness Changes on the Surface of Hard Chrome Plating Specimen



External Appearances of Specimen after Tested



Roughness Changes of Stator Specimen after Tested

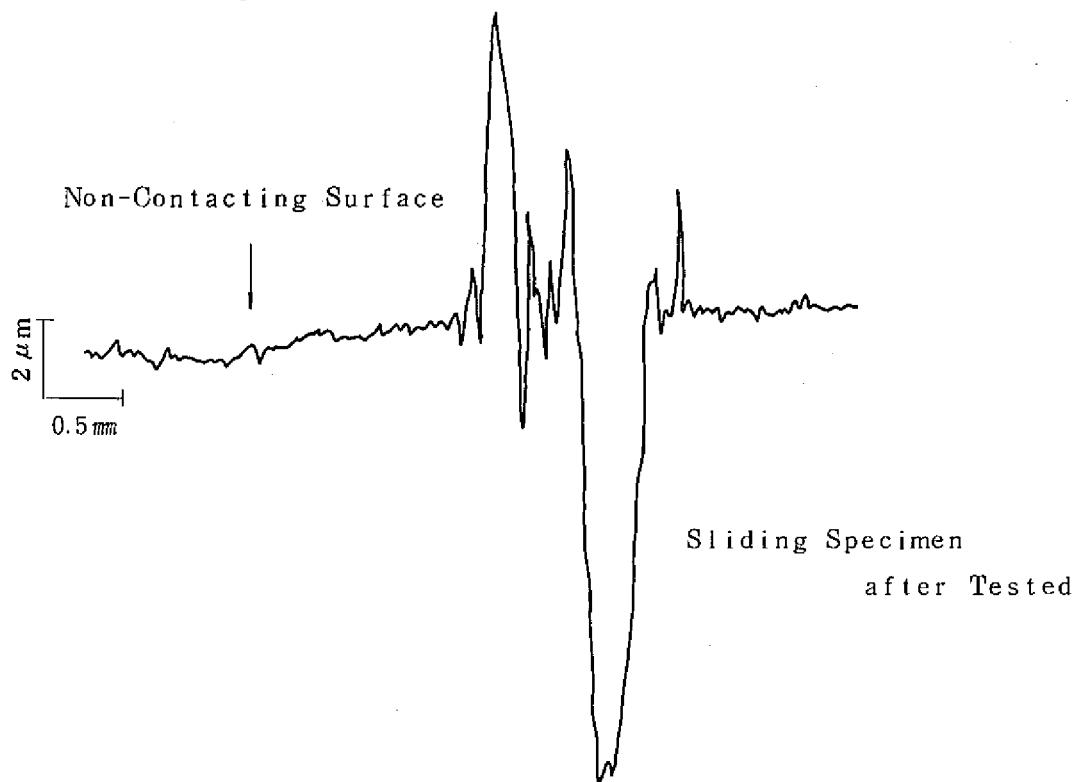
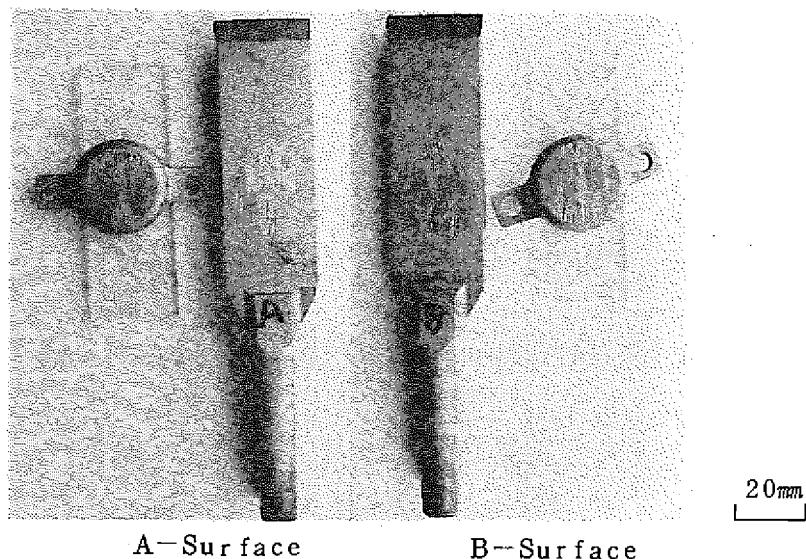


Fig. 14 External Appearances and Roughness Changes
on the Surface of Inconel 718 Specimen



External Appearances of Specimen after Tested



Roughness Changes of Sliding Specimen

Fig. 15 External Appearances and Roughness Changes
on the Surface of SUS 316 Specimen

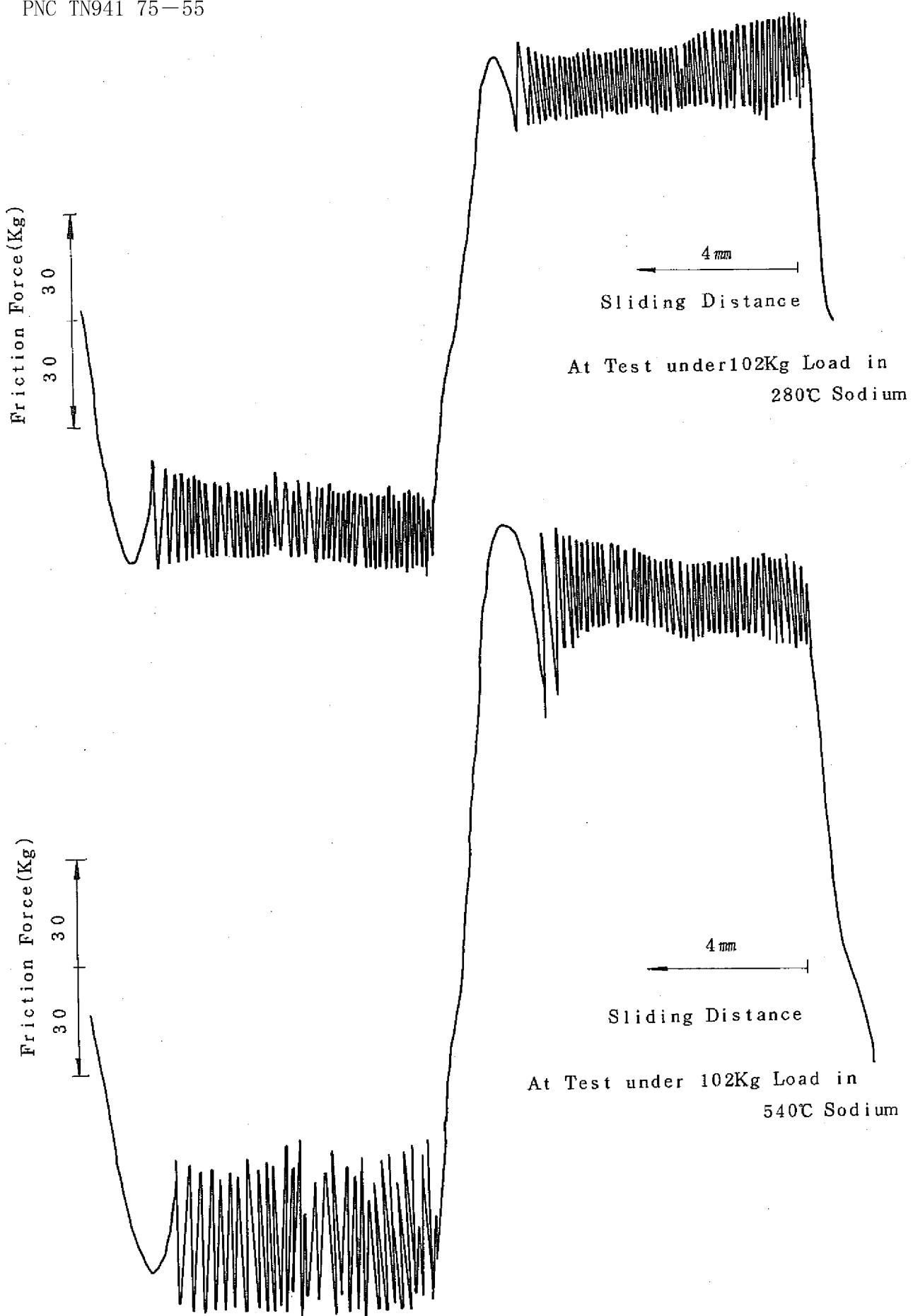
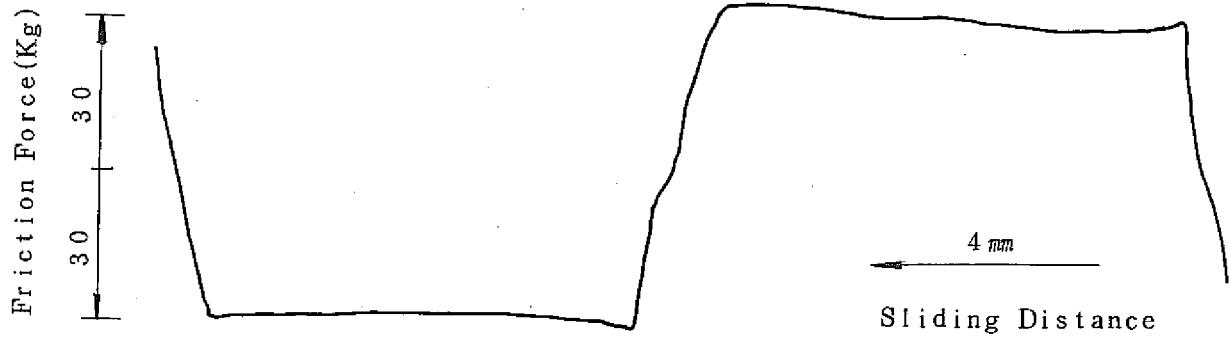
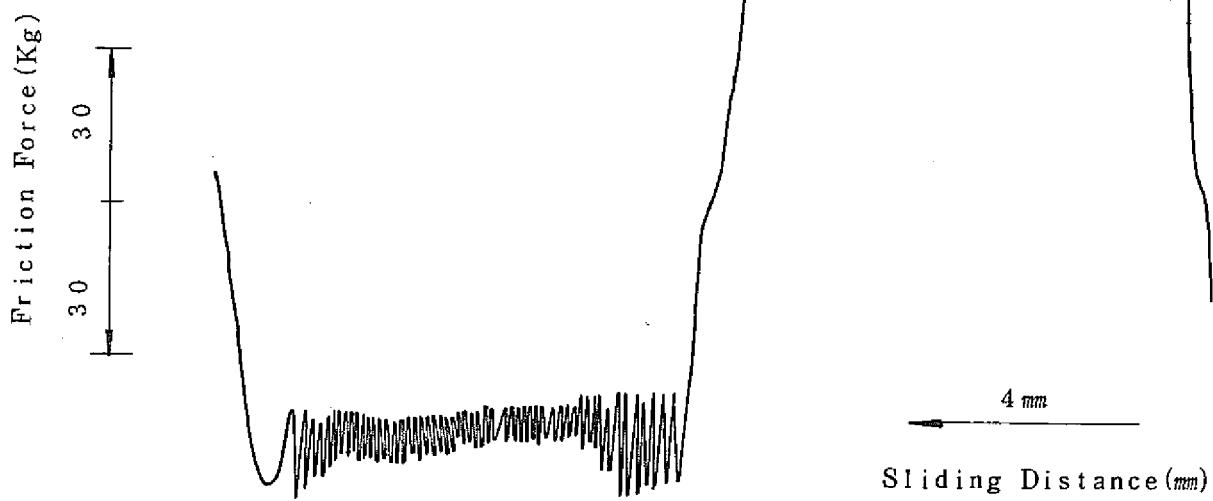


Fig. 16 Typical Diagram at Friction Test of
Stellite No 6 Specimen

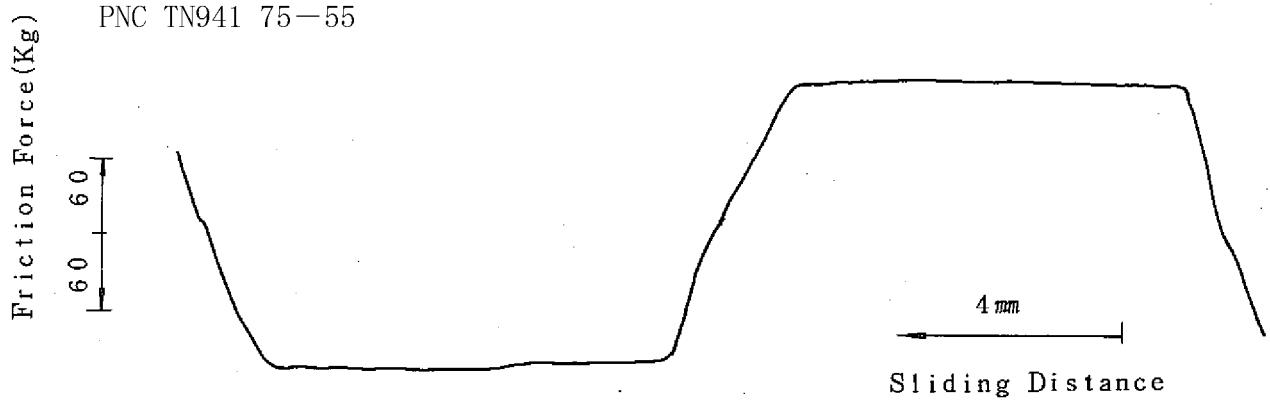


Friction Diagram at Test under 100Kg Load in 280°C Sodium

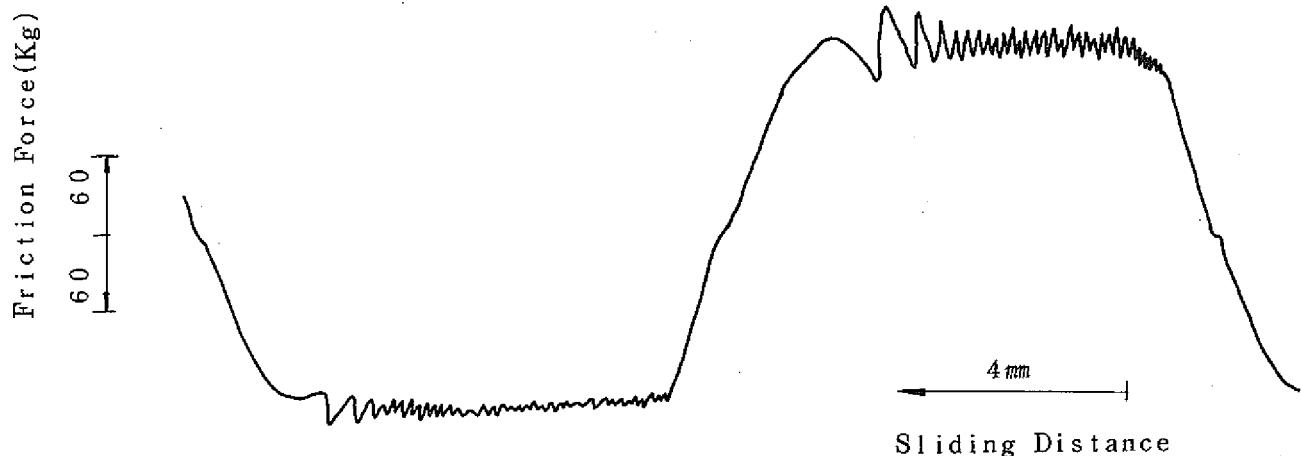


Friction Diagram at Test under 100Kg Load in 540°C Sodium

Fig. 17 Typical Diagram at Friction
Test of Colmonoy No 6 Specimen



Friction Diagram at Test under 200Kg Load in 280°C Sodium



Friction Diagram at Test under 200Kg Load in 540°C Sodium

Static Friction



Friction Diagram at Test under 200Kg Load after Dwell Time (1000mm)
in 540°C Sodium

Fig. 18 Typical Diagram at Friction Test of
LC-1C(B, F) Specimen.

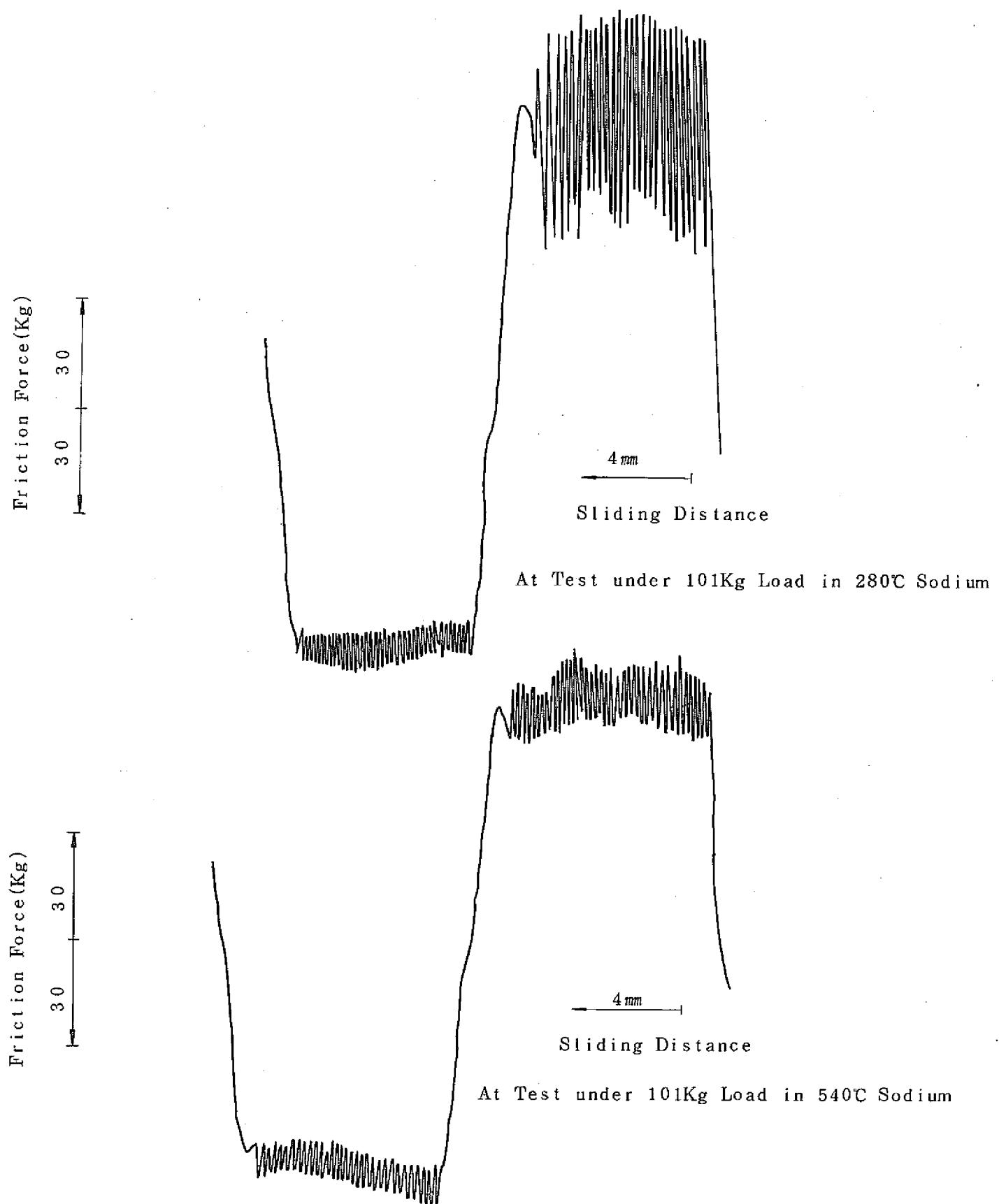


Fig. 19 Typical Diagram at Friction Test of
LO-1C (G, F) Specimen

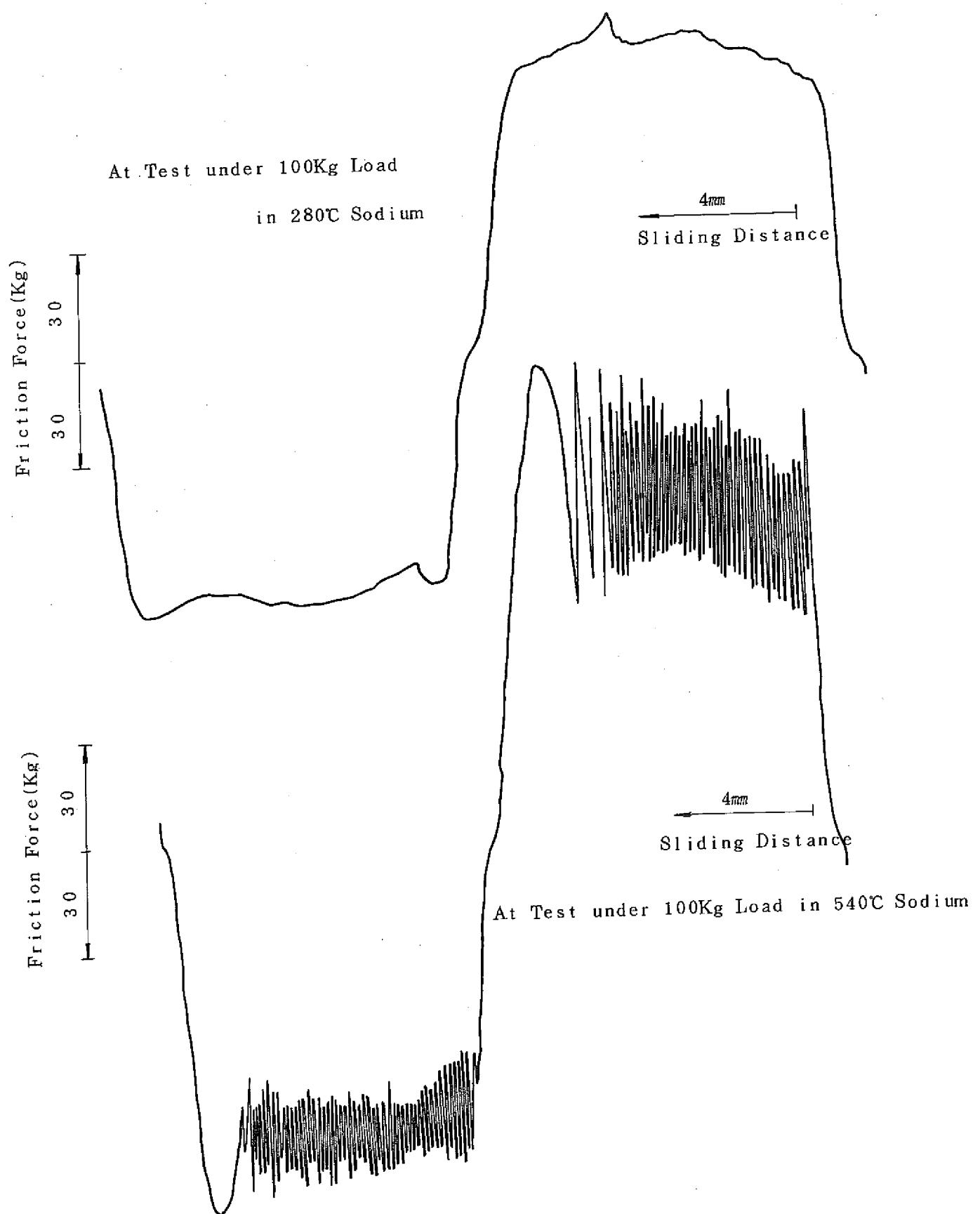


Fig. 20 Typical Diagram at Friction Test of Hard Chrome Plating Specimen

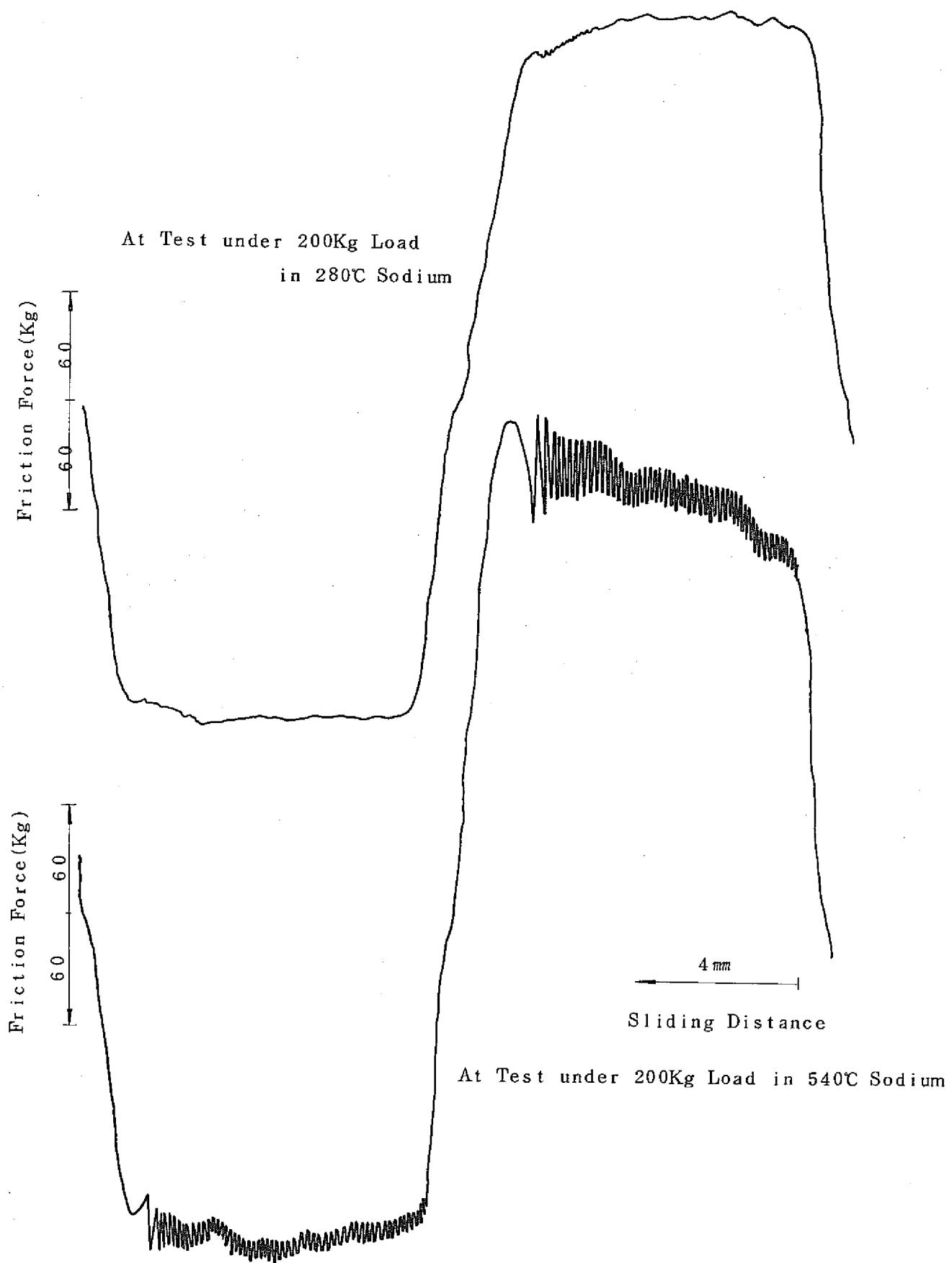


Fig. 21 Typical Diagram at Friction Test of Inconel 718 Specimen

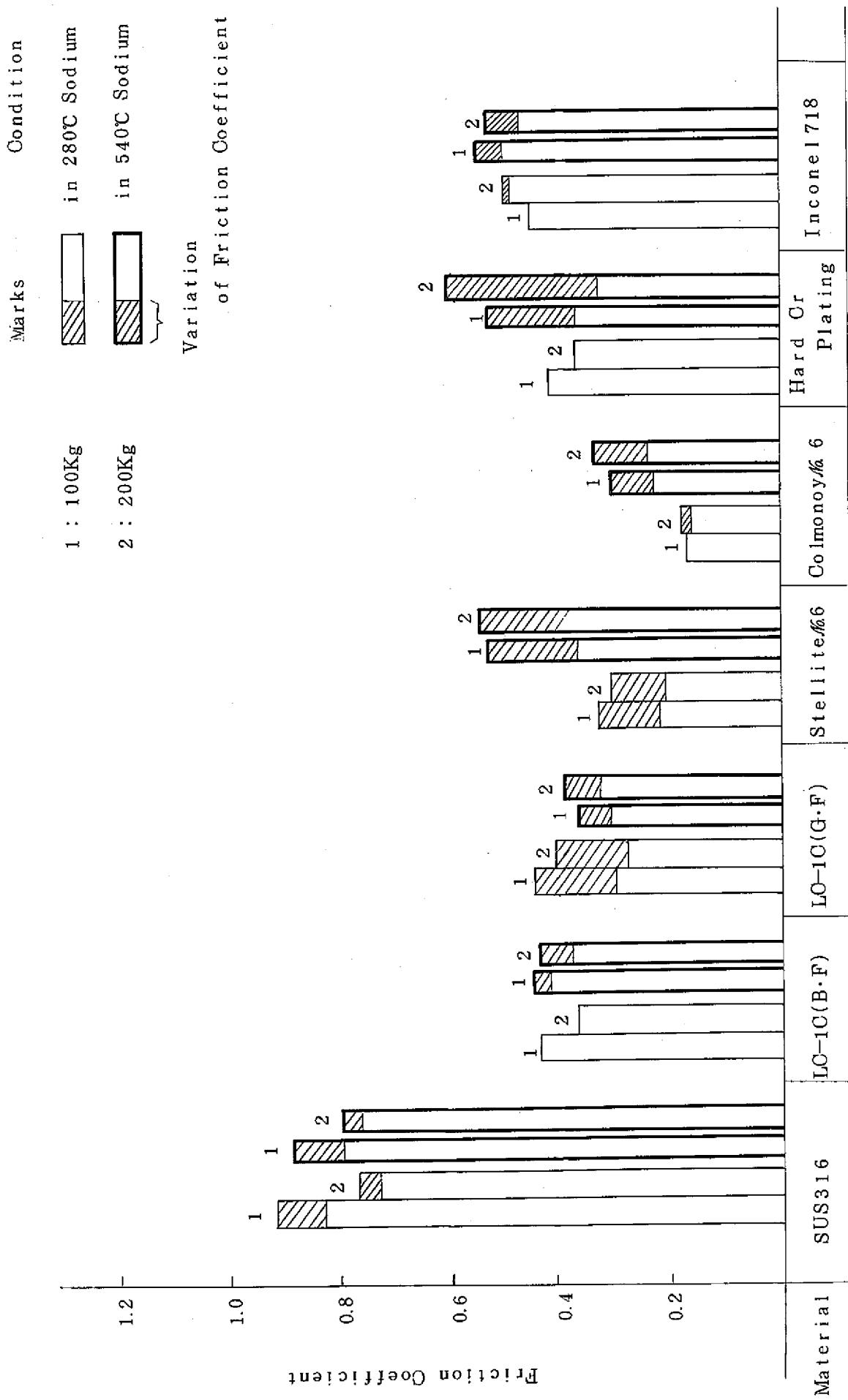


Fig.22 Friction Coefficient of the Various Materials in a Sodium Environment

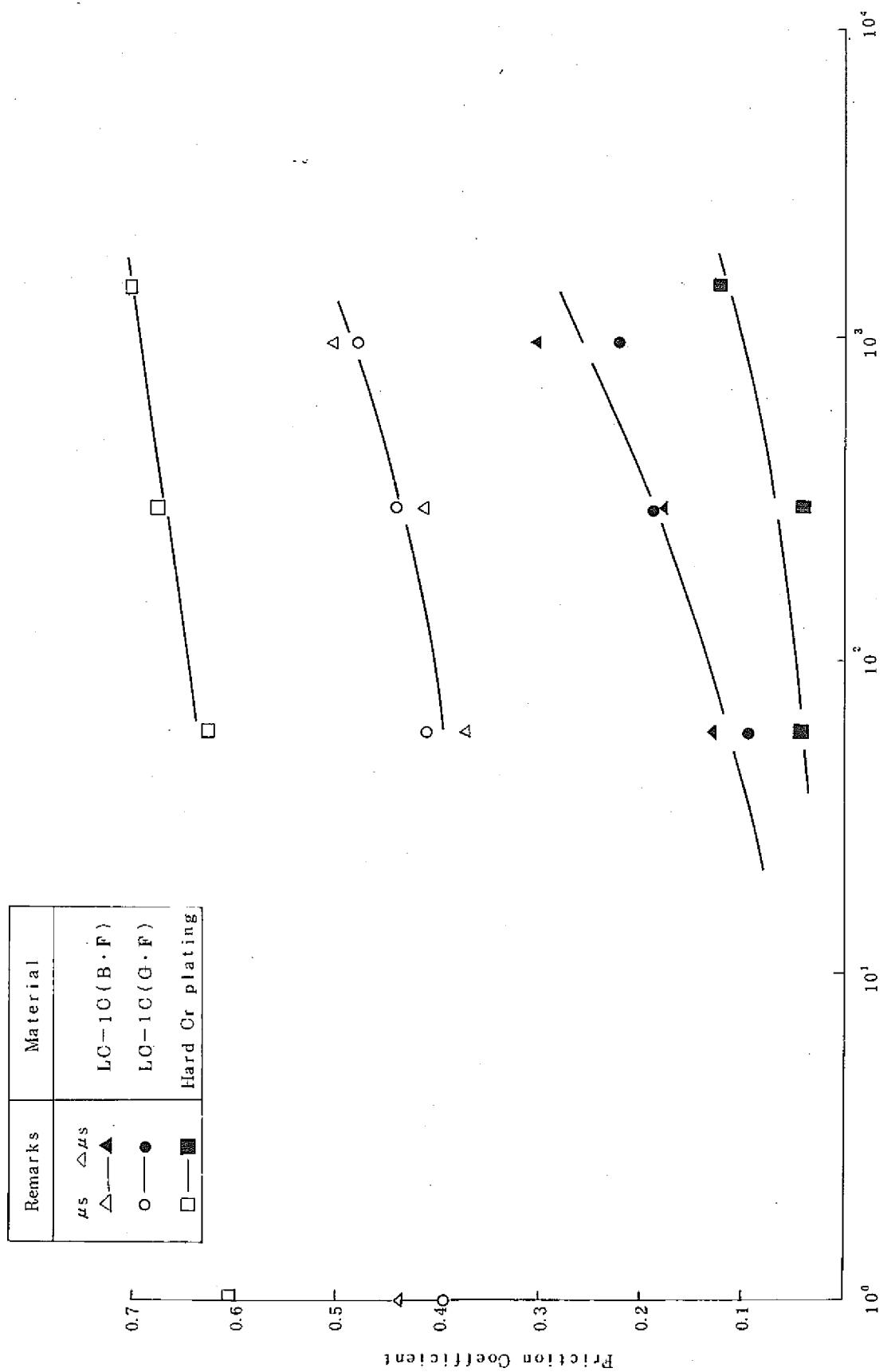


Fig. 23 Relations of Friction Coefficient and Dwell Time on the Various Materials under 200kg Loading in 540°C Sodium

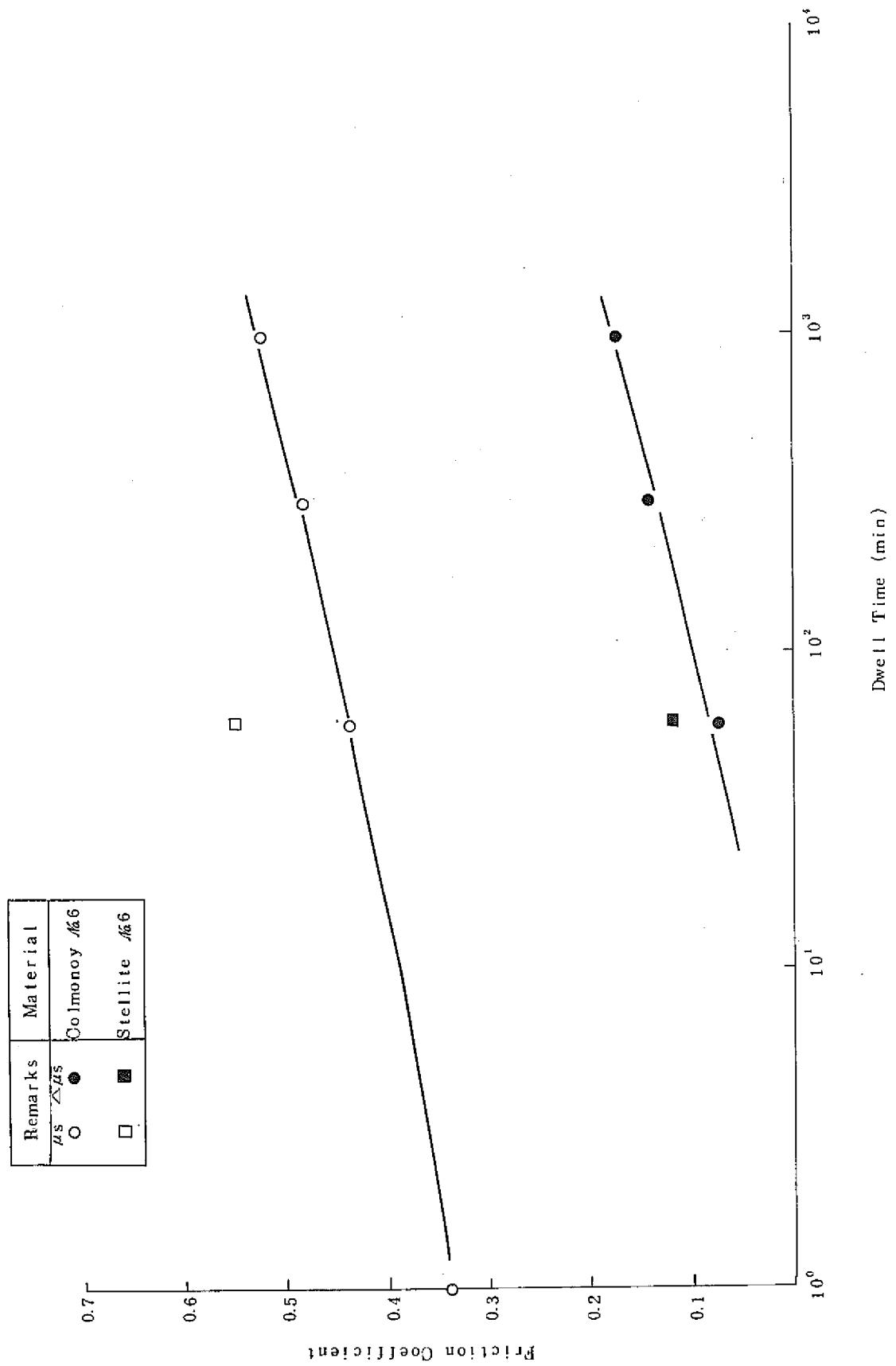


Fig. 24 Relations of Friction Coefficient and Dwell Time on Columoy NO6,
Stellite NO6 under 200kg Load in 540°C Sodium.