

PNC TN941 74-12

高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(II)

硬質合金・カーバイトの摩擦・摩耗

1974年3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)

1974年3月28日

高速炉材料のナトリウム中摩耗試験 (II)

硬質合金・カーバイトの摩耗・摩擦

報告者 加納 茂機*
溝淵 庄太郎*
滑川 優*
大和田 哲郎*
厚母 栄夫*

期 間 1973年8月23日～1973年12月21日

目 的 原子炉機器摺動部用耐摩耗材の選定

要 旨

ナトリウム高速冷却増殖炉用機器摺動部には使用限界および耐久性の見地から耐摩擦・摩耗材が必要となり、これらの高温ナトリウム中における摩擦・摩耗データを得ることが要請されている。本試験ではステライト No. 6, コルモノイ No. 6, メテコ 16 C, デロステライト SF-60M, SUS304 および3種のカーバイト系材料の各種組合せについて行なった結果次のようなことがわかった。

- (1) 同じ材料組合せの摩擦挙動と摩耗挙動に違いが認められた。
- (2) デロステライト SF-60M vs. コルモノイ No. 6 の組合せが最も低い動摩擦係数および比摩耗量を示した。
- (3) LC-10 vs. LC-10 の組合せが最も低い静摩擦係数を示した。
- (4) LW-IN-40 vs. LW-IN-40 の組合せは挙動が不安定であった。
- (5) SUS304 は最も著しい融着性を示した。
- (6) LW-5 は試験中に挫屈した。
- (7) 摺動速度が大きい程比摩耗量は高く、動摩擦係数は低くなる。
- (8) 表面処理法の異なる2種の LC-10 では、摩擦および摩耗挙動に違いがみられた。

PNC TN941 74-12
28, Mar., 1974

Wear Tests of Materials for FBR in Sodium Environment (II)

Friction and Wear of Hard Metals and Carbides

SHIGEKI KANO*
SYOTARO NIZOBUCHI*
MASARU NAMEKAWA*
TETSURO OWADA*
HIDEO ATSUMO*

Abstract

In view of the limitation of use and the durability, it is necessary to use friction and wear resistant materials for sliding components of sodium cooled reactor. Therefore, it is required that we obtain friction and wear data about these materials in high temperature sodium.

We tested about various combinations of Stellite No. 6, Colmonoy No. 6, Metco 16C, Deloro Stellite SF-60M, SUS304, LC-1C, LW-IN-40 and LW-5.

The tests yielded the following results:

- (1) A certain material combination was different in behavior between friction and wear.
- (2) The combination of Derolo Stellite SF-60M vs. Colmonoy No. 6 showed the lowest kinetic friction coefficient and specific wear rate of all combinations tested.
- (3) The combination of LC-1C vs. LC-1C showed the lowest static friction coefficient of all combinations tested.
- (4) The combination of LW-IN-40 vs. LW-IN-40 was unstable in behavior.
- (5) SUS 304 had the strongest self-weldability of all materials tested.
- (6) LW-5 was buckled during the test.

* Sodium Technology Section, Sodium Technology Division,
Oarai Engineering Center.

(7) The greater the sliding velocity was, the higher the specific wear rate but the lower the kinetic friction coefficient.

(8) Two kinds of LC-1C, which were different in surface finish, showed different behaviors between friction and wear.

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 方 法	2
2.3. 解 析 方 法	3
2.4. 試 験 片 の 組 合 せ, 化 学 成 分, 肉 盛 方 法 お よ び か た さ	4
3. 試 験 結 果 お よ び 考 察	6
3.1. 摩 擦 係 数 に つ い て	6
3.2. 摩 耗 量 に つ い て	9
3.3. 試 験 片 外 観 に つ い て	10
3.4. 表 面 あ ら さ に つ い て	10
4. 結 論	12
5. あ と が き	13
6. 文 献	15

Figure List

Fig. 1	Flow Sheet of Test Loop	24
Fig. 2	Test Equipment	25
Fig. 3	Size of Test Piece	26
Fig. 4	Typical Diagram of Static Friction Force	27
Fig. 5	μ_s vs. Load in Cold Trap Temperature 200 °C	28
Fig. 6	μ_k vs. Load in Cold Trap Temperature 120 °C	29
Fig. 7	μ vs. Material Combination in Contact Pressure 100 kg/cm ²	30
Fig. 8	μ_s vs. Dwell Time	31
Fig. 9	μ_k vs. Load	32
Fig. 10	Relation between μ_k , Load and Sliding Velocity	33
Fig. 11	Typical Waviness of SUS304	34
Fig. 12	Total Wear Depth vs. Load	35
Fig. 13	Typical Roughness of LO-IC (G/F)	36

Table List

Table 1	Condition of Friction Test	16
Table 2	Condition of Wear Test	16
Table 3	Load, Contact Pressure and \bar{x} Pi at Each Step	17
Table 4	Material Combination	18
Table 5	Chemical Composition	19
Table 6	Coating Method	20
Table 7	Microhardness	21
Table 8	Wear Rate	22
Table 9	Roughness	23

Photo List

Photo. 1	Filter	37
Photo. 2	Optical Microstructure and Microhardness of Test Piece before Test	38
Photo. 3	External Appearance of Test Piece before Remove Ni	39
Photo. 4	External Appearance of Test Piece after Tested	40

1. ま え が き

原子炉機器用耐摩耗材および耐摩耗材について一連の選定試験を行っているが、今回は48年度に試験したカーバイト系材料(3種)、ステライトNo.6、コルモノイNo.6、デロロステライト SF-60 M、Aテコ160 および SUS304のうちの各種組合せについて報告する。本試験では各種組合せについて、試験中の摺動面のトルク値より計算した動摩係数および動摩係数と試験後の摺動面の表面あらさ測定、外觀、および摩耗量について比較検討を行った。

2. 試験方法

2.1. 試験装置

図1に試験ループのフロートを示す。新たに磨耗粉除去のためのフィルターを取付けた。写真1にフィルターの外面を示す。また、図2に試験部の概略、図3に試験片形状を示す。
〔詳細については前報参照〕

2.2. 試験方法

本試験のうち1部の材料組合せについて、磨耗試験に先立ち磨耗試験を行なった。47年度では試験ポットに付設されている3式の試験部に同時に3組の同一材料組合せを取付け、同一条件で試験したが試験部ごとのデータの変動が殆んどないことがわかったので、48年度以後は1試験サイクルにつき3対の異種材料組合せを試験することとした。

2.2.1. 磨耗試験

試験ループが定格条件に到達後、磨耗試験前に行なった。25 kg あるいは 45 kg ずつ段階的に荷重を増加し、荷重負荷後 30 秒経過後手動で回転側試験片を約 60 度ずつ 3 回回転し、これらの初トルクの算術平均値より各荷重での静摩擦係数 μ_s を計算した。試験条件は表 1 に示す。

2.2.2. 摩擦試験

試験ループが定格条件に到達した後（一部の試験では磨耗試験後）磨耗試験を行なった。駆動モードにより回転側試験片を連続回転させながら 25 kg あるいは 45 kg ずつ段階的に荷重を増加し、各荷重における摺動トルクを 15 分間ずつ記録し動摩擦係数 μ_k を計算した。摺動速度は 47 年度においてはすべて 35.6 cm/sec であったがナトリウム中の摩擦および摩擦に関する調査 (2), (3), (4), (5) によると原子炉摺動部での速度はもっと低い方にあるので本試験では 3.6 cm/sec で行ない一部比較のため 0.7 cm/sec, 10.7 cm/sec または 35.6 cm/sec で行なった。試験条件は表 2 に示す。

また両試験中の各荷重増段階での合計荷重を表 3 に示す。試験片当りの荷重は負荷表値 7mm の支点両側の長さ比より重量の 2.5 倍とした。

2.3. 解析方法

2.3.1. 摩擦係数測定

試験片摺動用シャフトに連結した KYOWA 社製のひずみ式トルク変換器 TP-10 KMO とトルク指示計 TM-313A および YEW 社製の 2 ペンレコーダ TYPE 3047 により試験中の初トルクあるいは摺動トルクを記録し、次式により各静摩擦係数 μ_s あるいは動摩擦係数 μ_k を求めた。

$$\text{摩擦係数 } \mu_{k,s} \text{ あるいは } \mu_k = \frac{T}{F \times r}$$

ここで T: トルク (kg·m)

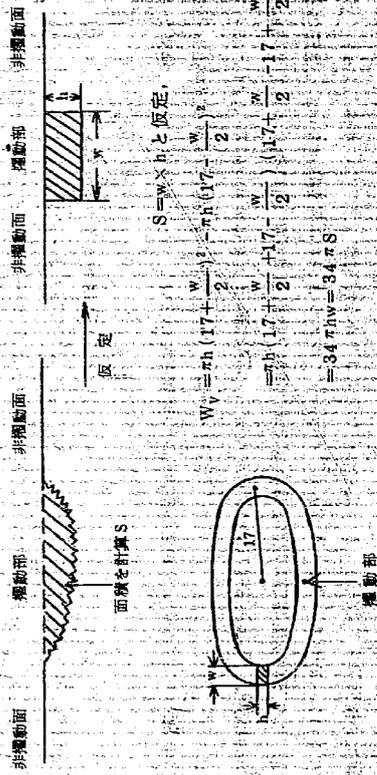
F: 荷重 (kg)

r: 試験片摺動部平均半径 (= 17 × 10⁻³ m)

2.3.2. 磨耗量測定

磨耗深さ W_0 は磨耗試験中に負荷装置アーム先端に取付けた差動トランスの変位より求めた。使用計器は SHINKO ELECTRIC 社製の LINEAR-FORMER TYPE 1503, SHINKO DENSHI 社製の DISPLACEMENT METER TYPE IOMD および YEW 社製の 2 ペンレコーダ TYPE 3047 で出力は 10 mV/10 mm であった。なお変位はアームにより 25 倍にされている。また MITUTOYO 社製の触針式顕微鏡検査機 TYPE AB-2 による試験後の摺動部の半径方向のうねり測定からも磨耗深さ W_0 を求めた。

磨耗体積 W_v は、同じ触針式顕微鏡により試験後の摺動部の半径方向のうねり測定を行ない、摺動部両側の非摺動面よりへこんだ断面の面積から次式により求めた。



比摩耗量 W_s は試験中の荷重が一定でないので $W_s = W_v / t \times v \times P (t : \text{試験時間}, v : \text{摺動速度}, P : \text{荷重})$ のうち、 $t \times P$ を $\Sigma t_i \cdot P_i (i : \text{段階での荷重 } P_i \text{ での試験時間})$ として計算した。表 3 に各荷重段階における ΣP_i を示した。本試験では各段階での試験時間を 15 分一定としたので

上式は

$$W_s = W_v / 900 \times v \times \Sigma P_i \text{ となる。}$$

2.3.3 摺動速度測定

試験片摺動用シャフトに連結した YEW 社製 TACHOMETER GENERATOR TYPE 2612 および FUTU ELECTRIC 社製 CONTINUOUS INTEGRATOR TYPE PJA により回転数 (rpm, 倍率 1/60) をデジタル標示した。ただし 1007rpm (178 cm/sec) 以下の場合には計器が動作しないので目視により求めた。

2.3.4 表面あらさ測定

試験前後の表面あらさを MITUTOYO 社の触針式超あらさ検査機 TYPE AB-2 で求めた。摺動部のあらさ測定は摺動方向と直角に軸針をトレースさせる方法で行なった。

2.3.5 かたさ測定 (常温)

AKASHI 社製マイクロビッカースかたさ計 MODEL-MVK TYPE-D を使用した。

2.4 試験片の組合せ, 化学成分, 肉盛方法およびかたさ

試験片の組合せを表 4 に示す。表中には試験前の表面あらさと、試験した摺動速度および最大荷重も示す。LC-IC については 2 種の表面あらさの異なるものを試験し、グラインダ研摩したもの (11 μ m) を G/F, パフ研摩したもの (0.4 μ m) を B/F と記した。

表 5 に供試材の化学成分を示す。表中のステライト No.6 は神戸製鋼製 (HF-6R), コルモノイ No.6 は住友金属鉱山製 (R-6), デロステライト SF-60M は英国デロステライト社製, メテコ 16C は米国メテコ社製, および LC-IC, LW-5, LW-IN-40 は米国エニオンカンパニー社製のものを使用した。

表 6 に肉盛方法を示す。

また試験片のかたさを表 7 に、これらの肉盛断面の光学組織を写真 2 に示す。この組織中にビッカースかたさ測定のための圧痕とかたさ数値を示した。

メテコ 16C とデロステライトの組織で、圧痕以外の黒い点は粉末溶射後、再溶解時に消失出来なかった気孔部である。肉盛層と母材との境界の接着状況は拡散層を形成して、完全に融着している。組織上では従来のコルモノイ合金, ステライト合金と似かよっているが、デンドライトが無いことと、組織がややこまかくなっている。D-Gun による肉盛層は母材を冷間のみで施工し、これらの処理方法としては最も母材との接着性があり、今後、耐摩

擦、耐摩耗材として有望とみなされる方法の一つである。組織上でも、カーバイトが微細に分散し、特に LW-IN-40 材では母材との密着性、および皮膜を形成する微粒子間の接着性に関して、母材を加熱し、焼結処理による肉盛方法と比較しても遜色ない様な光学顕微鏡組織を示している。

3. 試験結果および考察

原子炉槽動部には系統的に揺動する部分と断続的に揺動する部分がある。燃料集合体のダクトヘッドおよび制御棒駆動機構等は後者に属し、このような場合には揺動開始時の初トルクが設計の一つの重要なパラメータとなりうるので、本試験では動摩擦係数の他静摩擦係数の測定も行った。

3.1 摩擦係数について

槽動部の駆動力は摩擦係数に正比例する。即ち摩擦係数が0.5の揺動部駆動力は0.1の場合の5倍必要となる。また、その値が高い程、材料の損傷が起り易い。

3.1.1 静摩擦係数 μ_s について

測定した静摩擦力の一例を図4にあげ、初トルク値の読みとり法を示す。コールトラップ200°Cにおいて、各種材料組合せについて得られた荷重と μ_s の関係を図5に示す。LO-ICについては、パフ研摩(0.4 μm)とグラインダ研摩(11 μm)の2種を試験し図中には各々E/FおよびG/Fと記した。

荷重約50kg以下では μ_s が著しく変動しているが、これは試験部の最大荷重が440kgで設計されており低荷重領域の荷重伝達がうまくいかないことが原因しているものと思われる。

LW-IN-40 vs. LW-IN-40の組合せでは、低荷重域で μ_s が高く、高荷重域でその値が下がる傾向があった。このことはLW-IN-40が不安定な要素を多く持っていると思われる。

このようなより高荷重で摩擦係数が低下する例は、米國でナトリウム中試験されたインコネル718の例⁽⁷⁾およびナトリウム深屈曲以外の環境で摩擦熱により揺動面の温度が上がり酸化膜が生成された例^{(8),(9)}等がある。

ナトリウム中の摩擦および摩擦耗に関する調査報告によるとほとんどの原子炉揺動部の推定面圧は0~140kg/cm²でありこの間にある面圧100kg/cm²における μ_s の順は次のようになった。

$$\begin{aligned} & \text{LO-IC(B/F)} \text{ vs. } \text{LO-IC(B/F)} \langle \text{LW-IN-40 vs. LW-IN-40} \\ & \langle \text{LO-IC(G/F)} \text{ vs. } \text{SUS304} \langle \begin{array}{l} \text{LW-IN-40 vs. SUS304} \\ \text{ステライトNo.6 vs. SUS304} \\ \text{デプロステライトSF-60M vs. SUS304} \end{array} \\ & \langle \text{チコ160 vs. SUS304} \langle \text{LO-IC(B/F)} \text{ vs. } \text{SUS304} \langle \\ & \text{LW-5 vs. SUS304} \langle \text{SUS304 vs. SUS304} \end{aligned}$$

LO-IC同志が最も低い μ_s (=0.1)を、SUS304同志が最も高い μ_s (=0.6)を、また、硬質材料同志よりも硬質材料 vs. SUS304の組合せの方が高い μ_s を示した。このことは、SUS304の自己融着傾向が他材料より低いことを示す。LO-IC vs. SUS304ではLO-ICの表面のあらさが大きい方が μ_s が低かった。この原因につき考えてみる。真実接触面積(A)が、2面のうちやわらかい方の塑性流動圧力(押込みかたさ)をPm、接触荷重をWとすれば $A = W/P_m$ と与えられ初期の表面あらさに依存しないので、これはグラインダ研摩とパフ研摩による表面の物理化学的性質(表面エネルギー等)の違いおよびそれによる表面の酸化膜の生成状態の違いが原因していると考えられる。

金属表面上に生成する酸化膜(主にCr₂O₃)は潤滑剤となり摩擦抵抗を減少させるがナトリウム中ではその酸化膜は複合酸化物Na_xO_yCr_zO_wとなりその存在はナトリウム中の酸素量およびナトリウム温度に依存するという報告がある。

本試験では酸素量の影響をみるためコールトラップ120°Cでの各種材料組合せについての μ_s も求め、結果を図6に示す。

面圧100kg/cm²での μ_s の順は次のとおりであった。

$$\begin{aligned} & \text{LO-IC(B/F)} \text{ vs. } \text{LO-IC(B/F)} \langle \text{LW-IN-40 vs. LW-IN-40} \\ & \langle \text{LO-IC(G/F)} \text{ vs. } \text{SUS304} \langle \text{LO-IC(B/F)} \text{ vs. } \text{SUS304} \\ & \langle \text{LW-IN-40 vs. } \text{SUS304} \langle \text{ステライトSF-60M vs. } \text{SUS304} \\ & \langle \text{LW-IN-40 vs. } \text{SUS304} \langle \text{SUS304 vs. } \text{SUS304} \langle \\ & \text{ステライトNo.6 vs. } \text{SUS304} \langle \text{チコ160 vs. } \text{SUS304} \langle \text{LW-5 vs. } \text{SUS304} \end{aligned}$$

各材料組合せごとのコールトラップ温度の影響をみるため面圧100kg/cm²、コールトラップ120°Cおよび200°Cにおける各材料組合せの μ_s 値を図7に示す。酸素量が少ない程またナトリウム温度が高い程Na_xO_yCr_zO_wは不安定となり揺動面で直接金属接触が起り摩擦抵抗が増大するといわれているが本試験ではこのような一定の傾向がみられなかった。これは本試験の450°Cというナトリウム温度が、上記の傾向を示すには低すぎるためであろう。

図8に試験片に荷重をかけてから揺動開始までの保持時間と μ_s の関係を示す。保持時間が長い程、真実接触面での融着傾向が増大し、 μ_s が高くなるのが予想され、図よりほとんどの組合せがこのような傾向にあることがわかる。SUS304同志とか、デプロステライトSF-60MおよびLW-IN-40と組合せたSUS304では約500分の保持時間でこの増加傾向はなくなり μ_s が一定に近づく。又、 μ_s が小さい値を示す組合せ(例 LO-IC vs. LO-IC, LO-IC vs. SUS304, ステライトNo.6 vs. SUS304,)では、500分の保持後でも μ_s が上昇している。これらの組合せについては、今後、長時間の自己融着試験を行う必要がある。

3.1.2 動摩擦係数 μ_k について

各種材料組合せについて得られた掃速 3.6 cm/sec における荷重と μ_k の関係を図 9 に示す。LO-IC についてはバフ研摩 ($0.4 \mu\text{m}$) とグラインダ研摩 ($11 \mu\text{m}$) の 2 種を試験し、図中には各々 B/F および G/F と記した。

荷重約 100 kg をさかいにした μ_k 変動の理由は前項の μ_s 測定の場合と同じと考えられる。

LW-5 vs. SUS304 の組合せでは、荷重 250 kg 付近で μ_s が急激に変動しているが、これは試験後の試験片の外観検査から判明した LW-5 コーティング部の隆起が起つたためと思われる。 μ_s の場合と同様に面圧 100 kg/cm^2 での μ_k の順は次のとおりであった。(ただし LW-5 vs. SUS304 の組合せを除く)

デロステライト SP-60M vs. コルモノイ No.6 (LO-IC(G/F) vs. SUS304 (LO-IC(B/F) vs. SUS304 (ステライト No.6 vs. SUS304 (ステライト No.6 vs. SUS304 (ステライト No.6 vs. ステライト No.6 (SUS304 vs. SUS304 (ステライト No.6 vs. SUS304 (LO-IC(B/F) vs. LO-IC(B/F) (デロステライト SP-60M vs. SUS304 (LO-IC(G/F) vs. LO-IC(G/F) (LW-IN-40 vs. SUS304 (LO-IC(G/F) vs. LO-IC(G/F) (Meico 16C vs. SUS304 (LW-IN-40 vs. LW-IN-40

デロステライト SP-60M vs. コルモノイ No.6 の組合せが最も低い $\mu_k (=0.32)$ を、LW-IN-40 同志が最も高い $\mu_k (=0.93)$ を示した。LW-IN-40 同志および LW-IN-40 vs. SUS304 の組合せは他の組合せとくらべ荷重とともに μ_k が著しく上昇した。カーバイト材料同志よりも、カーバイト材料 vs. SUS304 の組合せの方が低い μ_k を示したがこの傾向は μ_s 測定の場合と全く逆の傾向である。また、LO-IC vs. SUS304 の組合せでは μ_s の場合と同様に LO-IC の表面のあらさが大きい方が μ_k が低くなったが、LO-IC vs. LO-IC の組合せでは表面のあらさが大きい程 μ_k が高くなった。これらの原因を考えると μ_s と μ_k とでは逆のような違いがあることを考慮する必要がある。 μ_s に影響を与える重要因子としては、表面の突起部の一部が形成する真実接触面(微着ジャンクション)での剪断力(表面に生成する化学的皮膜に影響を受ける)であるが、 μ_k の場合は連続撹動によって生成する摩擦粉、撹動による表面皮膜の破壊、SUS304 の塑性流動および摩擦熱等の影響も考慮せねばならない。すなわち、SUS304 は試験後の外観検査から明らかに他材料より塑性流動しやすく、これが摩擦抵抗を低くしている。LO-IC 同志は後述の表 8 より明らかに摩擦粉が多く、多量に発生したこの硬い摩擦粉が撹動抵抗を増加させ μ_k を高くしていると考えられる。実際 SUS304 同志が意外と低い $\mu_k (=0.45)$ を示した。またデロステライト SP-60M vs. コルモノイ No.6 の組合せは摩擦が全くみられず、 μ_k が最も少なかった。

面圧 100 kg/cm^2 での材料組合せごとの μ_k と μ_s を図 7 に示す。

殆どどの組合せで μ_k の方が μ_s より大きいことがわかる。これは連続撹動による表面の化学的皮膜の破壊と、それに基づく摩擦抵抗の増大、摩擦粉生成による摩擦抵抗の増大、表面のあれによる摩擦抵抗の増大、摩擦熱による表面金属の融着傾向の増大等のためと考えられる。

図 10 に 2 つの撹動速度における荷重と μ_k の関係を示す。3 種類の硬質材料の組合せすべてが撹動速度の増加により、 μ_k が低下した。また μ_k は、前報の硬質材料 vs. SUS304 の組合せにおけるように急上昇せず安定した。

最後に、 μ_k は連続撹動状況下の材料間の撹動抵抗の指標であるので長時間の耐久性も問題となり、単に μ_k が低いから耐摩擦性があるとは言えず、摩擦量をも考慮した上で耐摩擦性を論ずるべきである。

3.2 摩擦量について

各種材料組合せについて得られた摩擦深さ W_D 、摩擦体積 W_V および比摩擦量 W_S を表 8 に示す。表中には撹動速度および最終荷重を示す。また表 3 に比摩擦量計算式中の ΣP_i の最終荷重に対する値を示した。図 11 には SUS304 のうねりの一例を示す。図には W_D および塑性流動によりありあつた部分も示す。図 12 には試験中差動トランスにより求めた荷重に対する全摩擦深さと撹動速度の関係を示す。

以下に表 8 について記述する。うねりから求めた摩擦深さと差動トランスによるものでは値が異なっているが、この原因は、うねりからのものは固定側試験片だけ求め、一方差動トランスでは固定側と回転側の両方の変位を求めたことによる違い、摩擦試験中の撹動が与える差動トランスの著しい変動から生ずる誤差、および摩擦深さが均一でなくうねり測定が最適位置でなかったこと等であろう。しかし摩擦深さと材料組合せ間の傾向はうねりからのものと差動トランスのものでは、ほぼ同じであった。

摩擦量の順は次のとおりであった。

コルモノイ No.6 vs. デロステライト SP-60M (LW-IN-40 vs. LW-IN-40 (ステライト No.6 vs. ステライト No.6 (SUS304 vs. SUS304 (SUS304 vs. LO-IC(B/F) (SUS304 vs. LO-IC(G/F) (LO-IC(B/F) vs. LO-IC(B/F) (.....

コルモノイ No.6 vs. デロステライト SP-60M の組合せが掃速 3.6 cm/sec および 35.6 cm/sec とともに摩擦量が最も少なかった。

LO-IC vs. LO-IC の組合せでは表面のあらさが大きい程、摩擦量が大きかったが LO-

LO vs. SUS304ではこの逆の傾向であった。かたき値の低い、SUS304同志では LO-IO同志および SUS304 vs. 硬質合金の組合せより摩耗量が少なかったが、これは SUS304の摩擦傾向が強いため摩耗粉の再凝着が著しく起ったためであろう。試験後のこの表面は著しくあれていた。また、指速が大きい程 W_b が大きくなることがわかった。図 12 からわかるとおり、特に指速 35.6 cm/sec で他の組合せに比べ LO-IO(B/F)同志の組合せは最終荷重が低いのに著しい摩耗を示した。これは爆發磨射した LO-IO 粒子間の接着力が小さく摺動により破壊し摩耗粉として除去されたこと、および指速増大により真実接触部が温度上昇(摩擦熱の増大)し軟化したためであろう。

W_v 値より計算した W_s 値は、米国の試験結果(一定荷重下での W_s 値を求めている)と同じ材料組合せについて同じ桁数内 ($10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$) であった。この結果、漸増荷重下における本試験の W_s 計算方法は、一定荷重のものとの比較が桁の範囲でできることがわかった。

各種材料についての室温・大気中における無潤滑試験では W_s 値が $10^{-9} \sim 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 、450 °C 不活性ガス中での無潤滑試験では $\sim 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 、650 °C ナトリウム蒸気 + アルゴン雰囲気中試験では $\sim 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 、室温 油潤滑試験では $10^{-13} \sim 10^{-11} \text{ mm}^2/\text{kg}$ である。これよりナトリウム中試験の方が無潤滑試験より W_s が低く、ナトリウムが潤滑剤としての役割(油にくらべ著しく劣る)をしているのがわかる。

3.3 試験片外觀について

試験後試験片を装置より取出したところの状況を写真 3 に示す。固定側試験片上にできた摩耗痕が金属光沢を呈しているのがわかる。取出した後、ただちにアルコールによりナトリウム処理した。ナトリウム処理した後の試験片外觀を写真 4 に示す。各組合せについて試験した指速および最終荷重も示す。

各組合せについて右側の写真が固定側試験片、左側の写真が回転側試験片である。摩耗痕の観察より両試験片は片当りなくまぐ摺動したことがわかる。カーバイト系材料は 0.75 秒あるいは 0.8 秒の気孔率がありこの空孔中に入った Na が超音波洗浄によってもうまぐ処理できず長時間大気中に放置しておくことと表面ににじみでてくるのが認められた。LW-5 vs. SUS304 の組合せは摩耗試験中に LW-5 が挫屈したが、写真より LW-5 摺動部の幅が広がっていること、およびこれにより SUS304 表面が全面的に摺動をうけていることがわかる。

3.4 表面あらさについて

試験前の試験片肉盛表面および試験後の摩耗痕表面のあらさを表 9 に示す。

試験中の指速および最終荷重(荷重漸増割合はすべて同じで、各荷重にて 15 分間ずつ試験したので、最終荷重が異なる)と全摺動時間が異なることによる)により表面のあらさは影響をうける可能性がある(表 9 に最終荷重と指速を示した)しかし、これらの明白な影響は本試験ではみられなかった。SUS304 は他材料とくらべ試験後の表面あらさが著しく大きくなったが、これはかたき値が低く相手材の硬質材料による研削効果および摩耗粉の再凝着のためと思われる。また SUS304 vs. LO-IO の組合せでは LO-IO の表面あらさが大きい方が相手材の SUS304 の表面あらさが大きかったが、これはかたい LO-IO による研削効果の影響である。

ほとんどの試験片の表面あらさは、試験後増大したが LO-IO (G/F) vs. LO-IO (G/F) の組合せでは低下した。図 13 に示すこの組合せの表面アラサチャートを見れば、試験片の大きなあらさ(11 μm) の凹部に摩耗粉が付着し、また、凸部の途中で摺動による剪断破壊が起った状況がわかる。

SUS304 vs. LW-5 の組合せで SUS304 の表面あらさが 73 μm と著しく大きくなったが、これは相手材の LW-5 が試験中挫屈したことにより、その表面あらさが増大し、SUS304 表面がかたい LW-5 によって研削効果をうけたからである。

4. 結 論

以上に行なったナトリウム中摩擦および摩耗試験の結果(前回報告のものを含む)次のことがわかった。

- (1) 本試験によりナトリウム中摩擦・摩耗試験法を確立できた。
- (2) 同じ材料組合せの摩擦挙動と摩耗挙動に違いが認められた。これはこれらの支配因子が同じものばかりでなく全く異なるものがあるからであろう。
- (3) デロステタイト SF-60M vs. コルモノイ No. 6 の組合せは試験した組合せのうち、最も低い W_g および $\mu K (=0.3)$ を示した。したがって、この組合せが最も耐摩耗性に優れ、連続摺動部材の1つとして推しよることができる。
- (4) LO-IO(B/F) vs. LO-IO(B/F) の組合せは試験した組合せのうち、最も低い $\mu S (=0.1)$ を示した。よってこの組合せが最も耐摩耗性に優れ燃料集合体のダクトパット材の1つとして推しよることができる。
- (5) LW-IN-40 vs. LW-IN-40 の組合せは試験した組合せのうちで低い W_g を示すもの一つであるが荷重とともに μK が著しく増加(max. 0.9)し耐摩耗性が劣る。また、 μS (~ 0.2) が低い不安定である。
- (6) SUS304 は他材料より磨着性が著しい。
- (7) LW-5 は摩耗試験中に破損した。
- (8) 摺動速度が大きい程 W_g が高くなり、一方 μK は低くなる。
- (9) LO-IO は表面処理法の違う二種類を試験した結果、 μS , μK および W_g に違いがみられた。

5. あ と が き

一般の耐摩擦・耐摩耗性を有する材料および SUS304 のうち、各種組合せについて荷面圧(最大 239 kg/cm^2)まで短時間試験を行ない一応の成果を得た。しかし、原子炉摺動部材としての最適材料を選定するまでには今後さらに検討を加えなければならない。

今後の問題とみなされる点は次のとおりである。

- (1) 今後の試験
 - 4.8 年度中に試験できなかつた材料について短時間試験を行なう。さらに耐摩耗性を対象にする試験では長時間試験を行ない摩耗挙動の経時変化(初期摩耗と定常摩耗の違い)を明らかにする。短時間試験は 450°C で行なっているが原子炉摺動部には 540°C になる箇所があるので将来より高温でのデータを求める。また、摩擦係数に影響するナトリウム中酸素濃度をパラメータとしたデータも求める必要がある。さらに、原子炉内では中性子による照射熱応力、熱サイクル等複雑な影響を受けるので耐摩擦、耐摩耗材として選定した材料についてこれらの効果について追跡試験が必要である。
- (2) 摺動モード

原子炉摺動部では摺動モードが種々雑多である。機械式ナトリウムポンプベアリングは逆統一方向高速回転であり、耐摩耗性が問題となる。燃料集合体ダクトパットは摺動距離 数 cm、摺動速度数 cm/sec といずれも小さく摩耗よりも長時間の拘束(炉心のクラッシュ)にもとづく磨着性が問題となる。制御棒およびその駆動機構では定常運転時低速(数 cm/min)の反ぶく運動であり、一部の摺動部はアルゴンガス中(ナトリウム蒸気を含む)にある。また、スクラム時には数 m/sec の摺速となる。このような各種摺動モードに適用できるような試験データを求めていかねばいけない。
- (3) 設計指針

原子炉摺動部を設計する場合、各摺動モードに適合した材料組合せを選択しなければならぬ。摩擦係数および比摩耗量は、低い方が寿命がのび、各種トラブルの可能性が低く、また、駆動部が小型化するのであるが、設計上(経済性、設計上の安全率、駆動部馬力、構造材の形状寸法、および強度等)のこれら2つの数値の許容値(各摺動部ごとの)をいくつにするかで選択する材料がかわってくる。また、摩擦・摩耗試験データを求める上で、各摺動部における面圧、摺速、温度等諸条件をより正確に知る必要がある。

(4) 外国の情况

原子炉振動部材の試験は諸外国、特に米國および西独で精力的に行なわれている。米國のFFTF⁽²⁾に関する情報では、各振動部の諸条件、設計指針および修補材が示されており、参考資料となる。ナトリウム中試験は時間、労力がかかるのでこれらのデータをうまく利用していく必要がある。

終りに盛み、御指導賜った斎藤部長（Na技術部）に感謝の意を表す。Naループの運転保守は当Na技術開発室員の協力の賜物であり併せて感謝する。

6. 文 献

- (1) 加納茂雄、他、「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(I)硬質合金の摩耗」、SN 941 73-17,
- (2) W. A. Glaeser, "Survey and Analysis of Materials, Wear and Friction in Sodium", BMI-1907, June, 1971,
- (3) M.A.P.I., 「内部炉心拘束機構単体試験」, ST 206 73-14,
- (4) 大野正剛、他、東芝、「高速実験炉制御棒・安全棒駆動機構の基礎研究」, ST 201 70-12,
- (5) 佐々木正祥、他、日立、「制御棒駆動機構モックアップナトリウム中試験」, ST 202 73-23,
- (6) E. Wild, et al, "Friction Behavior of Inconel 718 and Stellite 6 as Fuel Assembly Duct Pad Material", IAEA/SM-173/VII-18
- (7) E. N. Thomson, "FFTF Friction and Wear Programs", 1972年4月 日米高速炉会議資料,
- (8) 佐藤健児, 「金属の摩耗とその対策」, 養賢堂, P. 30
- (9) 金属表面技術協会, 「金属表面化学II」, 朝倉書店,
- (10) W. A. Glaeser, "Wear and Friction Characteristics of Structural materials in Liquid Sodium", Reactor Technology, Vol. 15, No. 1, 1972,
- (11) J. J. Drober, "Materials Compatibility in Sodium", LMEC-71-7,
- (12) LMEC Semiannual Technical Progress Report,
- (13) K. Mattes, "Adherence and Self-Welding Properties of Materials under Sodium-Results in the Course of 1972", 1973年5月日独高速炉会議資料, L693 73-07 6-1
- (14) N. T. Hoffman, et al, "Friction and Wear Screening Tests of Materials in Sodium", LMEC-70-10
- (15) 笹田 直, 「耐摩耗設計と摩耗対策」, 機械の研究, Vol. 24, No. 4, ~No. 6, 1972,
- (16) K. Natesan, et al, "Effect of Sodium on Mechanical Properties and Friction-Wear Behavior of LMFBR Materials, Reactor Technology, Vol. 15, No. 4, 1972-1973,
- (17) 笹田 直, 「耐摩耗設計と摩耗対策」, 機械の研究, Vol. 24, No. 11, 1972,
- (18) W. P. Sheely, "Materials Considerations in the Fast Flux Test Reactor", HEDL-SA-546, March, 1973.

Table 1 Condition of Friction Test

Na Temperature (°C)	450
Cold Trap. Temperature (°C)	120 and 200
Apparent Contact Area of Test Piece (cm ²)	2.2
Load	Incremental Load
Factor Determined	Initial Torque

Table 3 Load, Contact Pressure and ΣP_1 at Each Step

Step	Load (kg)	Contact Pressure (kg/cm ²)	ΣP_1 (kg)
1	25	11.4	25
2	50	22.7	75
3	75	34.1	150
4	120	54.5	270
5	165	75.0	435
6	210	95.5	645
7	255	115.9	900
8	300	136.4	1200
9	345	156.8	1545
10	390	177.3	1935
11	435	197.7	2370
12	480	218.2	2850
13	525	238.6	3375

Tested for 15 Minutes at Each Step.

Table 2 Condition of Wear Test

Na Temperature (°C)	450
Cold Trap Temperature (°C)	200
Apparent Contact Area of Test Piece (cm ²)	2.2
Sliding Velocity (cm/sec)	0.7, 3.6, 10.7 or 35.6
Load	Incremental Load
Factor Determined	Sliding Torque

Table 4 Material Combination

Material Combination		Roughness (μm) as Received		Sliding Velocity (cm/sec)	Final Load (kg)
Stator	Rotor	Stator	Rotor		
Stellite No.6	Stellite No.6	1	1	3.6	390
"	"	1	1	10.7	435
SUS 304	"	0.4	1	3.6	390
Colmonoy No.6	Deloro Stellite SF-60M	1	0.6	3.6	345
"	"	1	0.6	35.6	390
SUS 304	"	0.4	0.6	3.6	390
Colmonoy No.6	Metco 16C	1	0.3	35.6	525
SUS 304	"	0.6	0.3	3.6	345
LC-1C (B/F)	LC-1C (B/F)	0.4	0.4	3.6	390
"	"	0.4	0.4	35.6	120
SUS 304	"	0.4	0.4	3.6	390
LC-1C (G/F)	LC-1C (G/F)	11	11	0.7	390
"	"	11	11	3.6	390
SUS 304	"	0.4	11	3.6	390
LW-1N-40	LW-1N-40	0.4	0.4	3.6	300
SUS 304	"	0.4	0.4	3.6	300
SUS 304	LW-5	0.4	0.1	3.6	435
SUS 304	SUS 304	0.4	0.4	3.6	390

Table 5 Chemical Composition (w/o)

C	Si	Ni	Cr	Fe	Co	Mn	B	W	Cu	Mo
SUS 304	0.06	0.59	8.63	18.64	Bal	1.54				
Colmonoy No.6	0.75	4.25	73.75	13.5	4.75					
Stellite No.6	1.04	1.17		28.65	0.27	Bal				4.2
Deloro Stellite SF-60M	4.5	70	15.0	4.5						
Metco 16C	0.5	4.0	Bal	16.0	2.5					3.0 3.0
LC-1C	85% Cr ₃ C ₂ + 15% NiCr									0.8%
LW-5	25% WC + 5% Ni + W - Cr Carbide									0.8%
LW-1N-40	85% WC + 15% Co									0.75%

Table 6 Coating Method (Base Alloy, SUS304)

Coating Material	Coating Method	Coating Thickness (mm)
Stellite No. 6	Oxi-Acetylene Gas Weld	2
Colmonoy No. 6	Oxi-Acetylene Gas Weld	2
DeIoro Stellite SF-60M (150~250 Mesh)	Sprayed Coating	2
Metco 16C (120~325 Mesh)	Sprayed Coating	2
LC-1C	D-Gun Coating	0.2
LW-5	D-Gun Coating	0.2
LW-1N-40	D-Gun Coating	0.2

Table 7 Microhardness (Hv) As Received

	Load (g)	Hv	
		Matrix	Carbide
Stellite No. 6	100	478	
Colmonoy No. 6	100	519	1561
DeIoro Stellite SF-60M	100	585	
Metco 16C	100	599	
LC-1C	300		1187
LW-5	300		1150
LW-1N-40	300		1378

Table 8 Wear Rate

Material Combination	Rotor	Wear Depth, Wp (µm)	Wear Volume, Wv (mm ³)	Wear Rate, Wv (mm ³)	Wear Rate, Ws = $\frac{Wv \times \sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{R}$ (mm ² /kg)	Specific Wear Rate, $\frac{Wv}{W}$ (mm ² /kg)
Stellite No.6	Stellite No.6	4	0.18	6.27 x 10 ⁷	2.97 x 10 ⁹	2.97 x 10 ⁹
"	"	34	0.31	6.27 x 10 ⁷	4.94 x 10 ⁻⁹	4.94 x 10 ⁻⁹
SUS 304	Deloro Stellite SF-60M	8	0.31	6.27 x 10 ⁷	1.94 x 10 ⁻⁹	1.94 x 10 ⁻⁹
SUS 304	Colmonoy No.6	0	0	5.01 x 10 ⁷	0	0
SUS 304	"	6	1.28	6.20 x 10 ⁸	2.06 x 10 ⁻⁹	2.06 x 10 ⁻⁹
SUS 304	Metco 16C	17	2.35	6.27 x 10 ⁷	3.75 x 10 ⁻⁸	3.75 x 10 ⁻⁸
SUS 304	Colmonoy No.6	17	2.78	5.01 x 10 ⁷	5.55 x 10 ⁻⁸	5.55 x 10 ⁻⁸
SUS 304	LC-1C (B/F)	11	1.68	6.27 x 10 ⁷	2.68 x 10 ⁻⁸	2.68 x 10 ⁻⁸
SUS 304	"	86	32.56	8.65 x 10 ⁷	3.76 x 10 ⁻⁷	3.76 x 10 ⁻⁷
SUS 304	LC-1C (G/F)	3	0.54	6.27 x 10 ⁷	8.61 x 10 ⁻⁹	8.61 x 10 ⁻⁹
SUS 304	"	17	3.04	1.27 x 10 ⁷	3.76 x 10 ⁻⁸	3.76 x 10 ⁻⁸
SUS 304	"	10	0.99	6.27 x 10 ⁷	1.58 x 10 ⁻⁸	1.58 x 10 ⁻⁸
SUS 304	LW-1N-40	6	0.13	3.89 x 10 ⁷	3.34 x 10 ⁻⁹	3.34 x 10 ⁻⁹
SUS 304	"	35	2.74	3.89 x 10 ⁷	7.04 x 10 ⁻⁸	7.04 x 10 ⁻⁸
SUS 304	SUS 304	5	0.37	6.27 x 10 ⁷	5.90 x 10 ⁻⁹	5.90 x 10 ⁻⁹

Tested for 15 minutes at each load step

Table 9 Roughness

Material Combination		Roughness (µm)				Sliding Velocity (cm/sec)	Final Load (kg)
Stator	Rotor	As Received	After tested	Ator	Rotor		
Stellite No.6	Stellite No.6	1	1.5	1	3.2	3.6	390
"	"	1	17	1	1	10.7	435
SUS 304	"	0.4	3	1	0.6	3.6	390
Colmonoy No.6	Deloro Stellite SF-60M	1	2	0.6	0.9	3.6	345
"	"	1	1.5	0.6	25	35.6	390
SUS 304	"	0.4	7	0.6	1	3.6	390
SUS 304	Metco 16C	0.6	3	0.3	3	3.6	345
LC-1C (B/F)	LC-1C(B/F)	0.4	4	0.4	6	3.6	390
"	"	0.4	8.5	0.4	2	35.6	120
SUS 304	"	0.4	6	0.4	5	3.6	390
LC-1C (G/F)	LC-1C (G/F)	11	7	11	3	0.7	390
"	"	11	5	11	8	3.6	390
SUS 304	"	0.4	10	11	9	3.6	390
LW-1N-40	LW-1N-40	0.4	1	0.4	0.2	3.6	300
SUS 304	"	0.4	8	0.4	0.6	3.6	300
SUS 304	LW-5	0.4	73	0.1	6	3.6	435
SUS 304	SUS 304	0.4	2.4	0.4	9	3.6	390

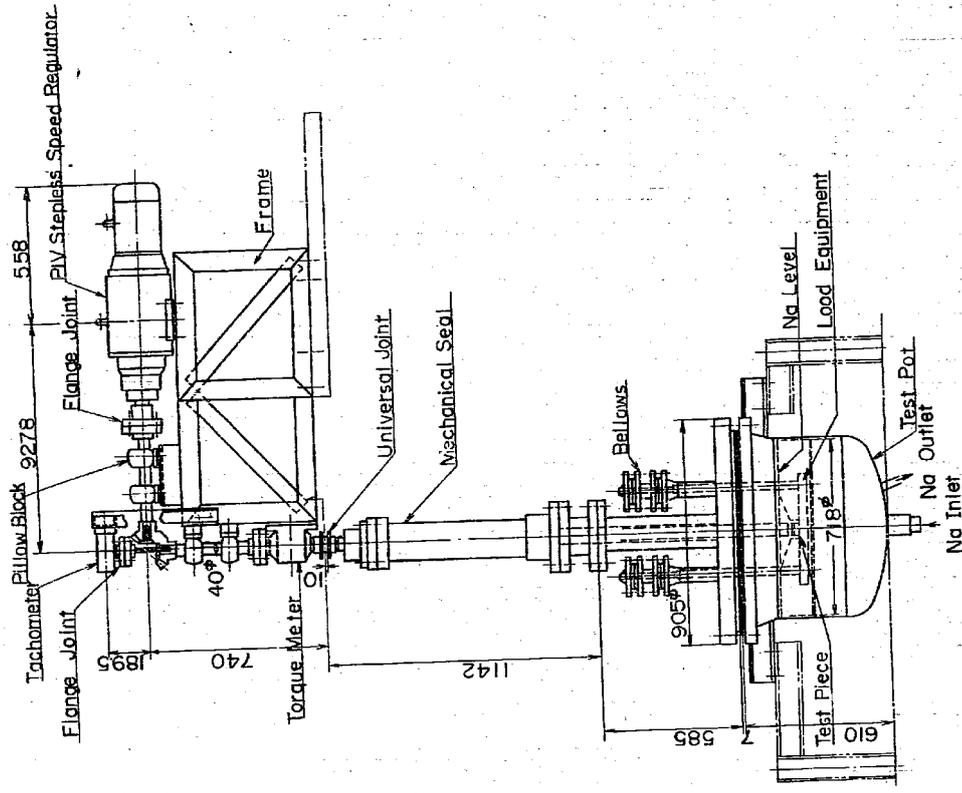
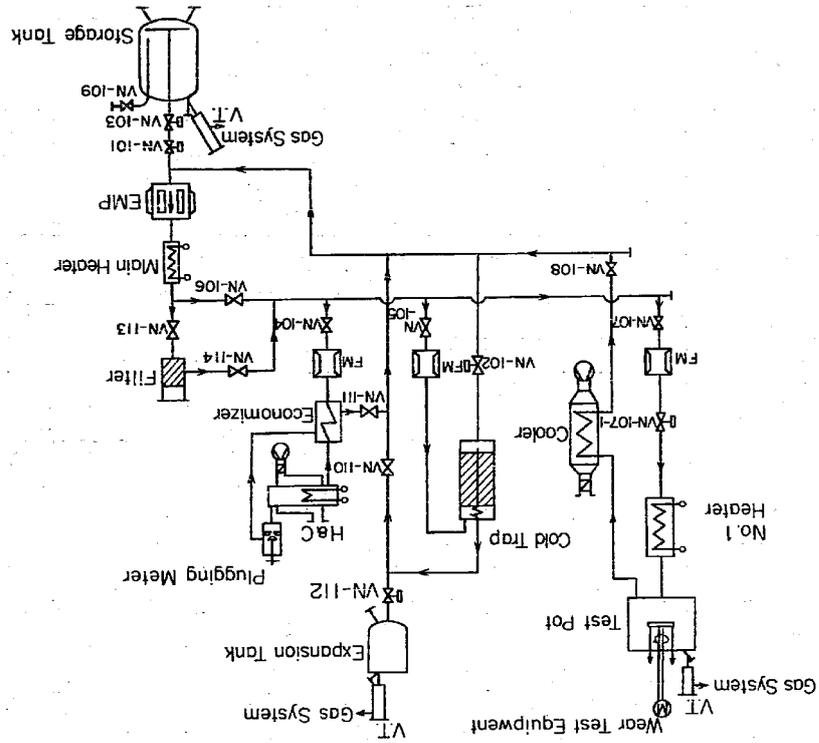


Fig. 2 Test Equipment

Fig. 1 Flow Sheet of Test Loop



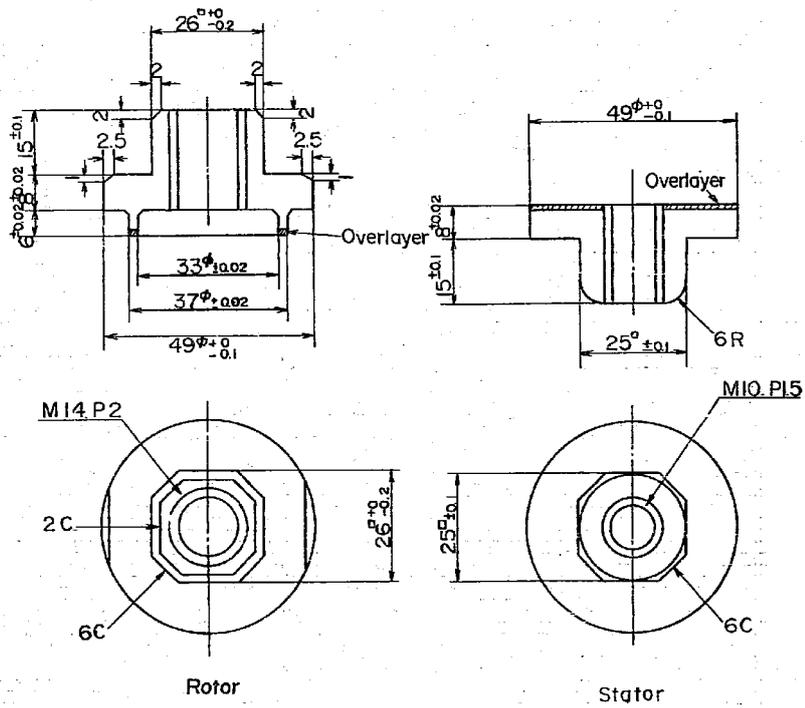


Fig. 3 Size of Test Piece

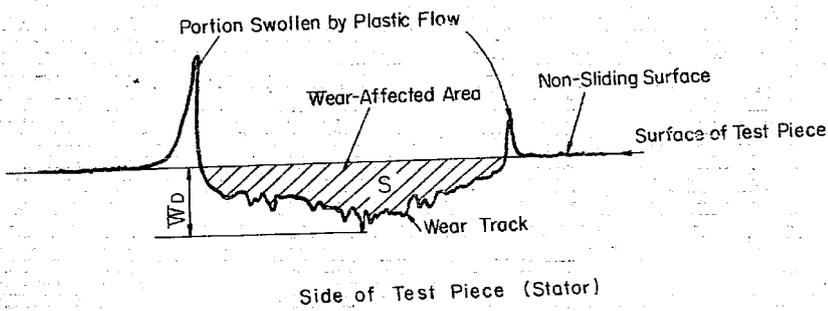


Fig. 11 Typical Waviness of SUS 304

- LC-1C(B/F) vs. SUS304
- LC-1C(B/F) vs. LC-1C(B/F)
- ▲ LW-IN-40 vs. SUS304
- ◆ Deloro Stellite SF-60M vs. SUS 304
- ◆ Metco 16C vs. SUS304
- SUS 304 vs. SUS304
- ▼ Stellite No.6 vs. SUS304
- ◆ LW-5 vs. SUS304
- _B LC-1C(B/F) vs. LC-1C(B/F)
- △ LW-IN-40 vs. LW-IN-40

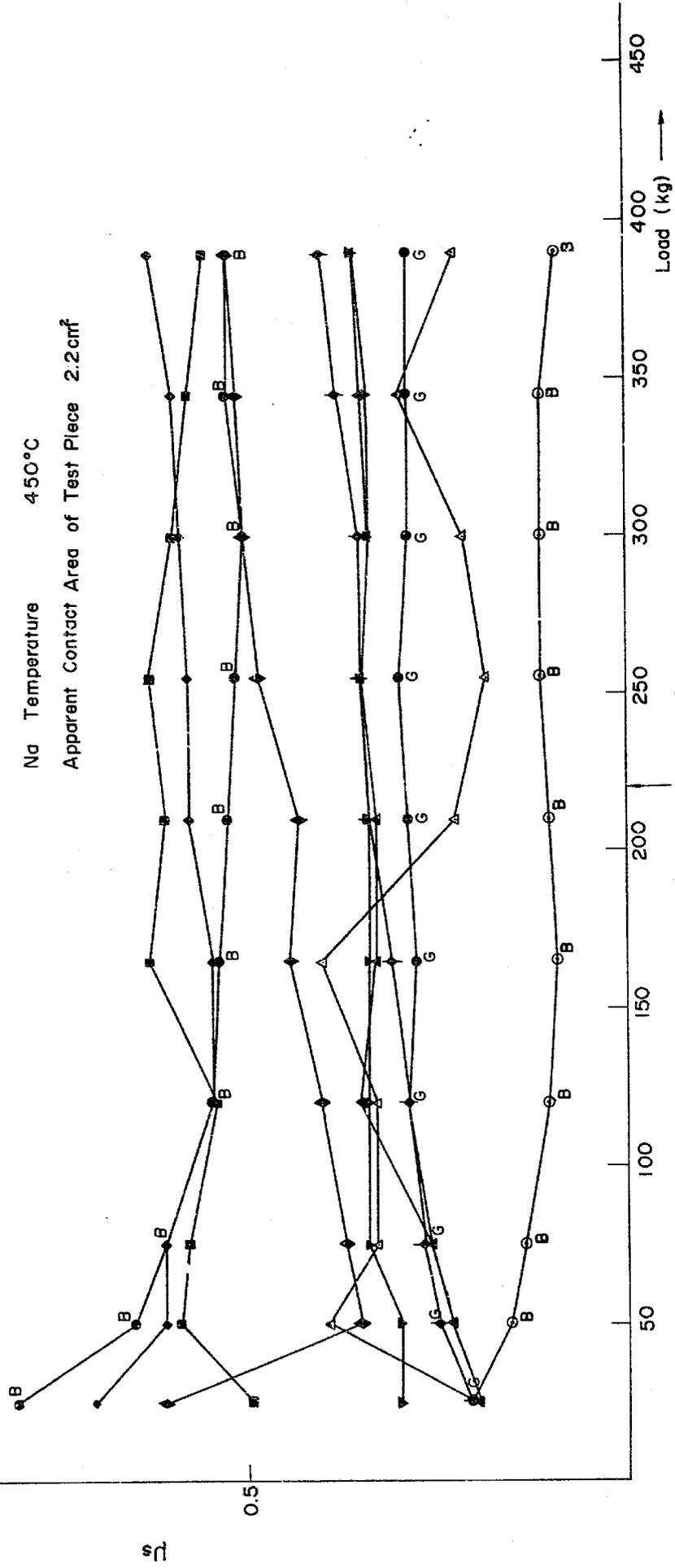


Fig. 5 μ_s vs. Load in Cold Trap Temperature 200°C

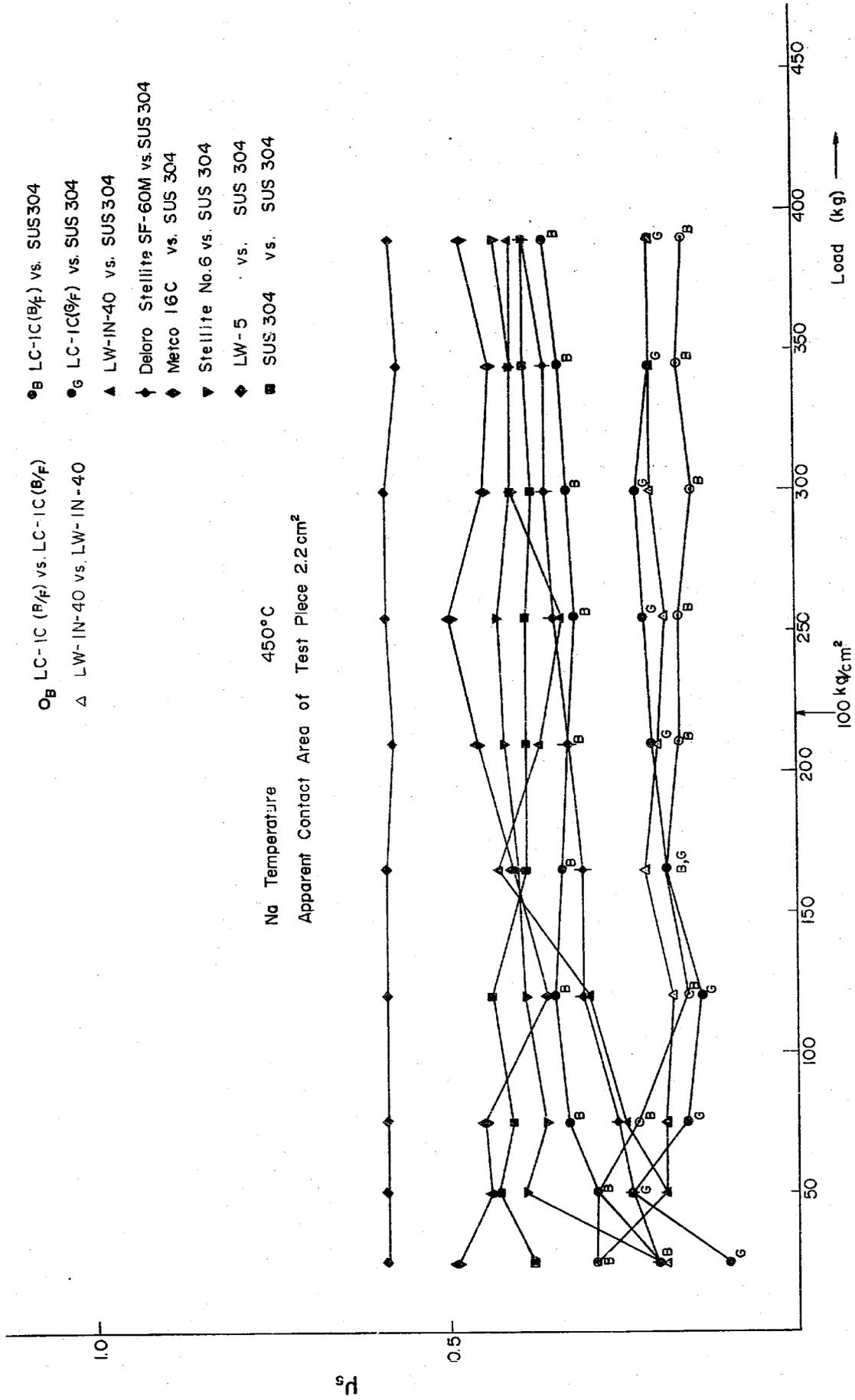


Fig.6 μ_s vs. Load in Cold Trap Temperature 120°C

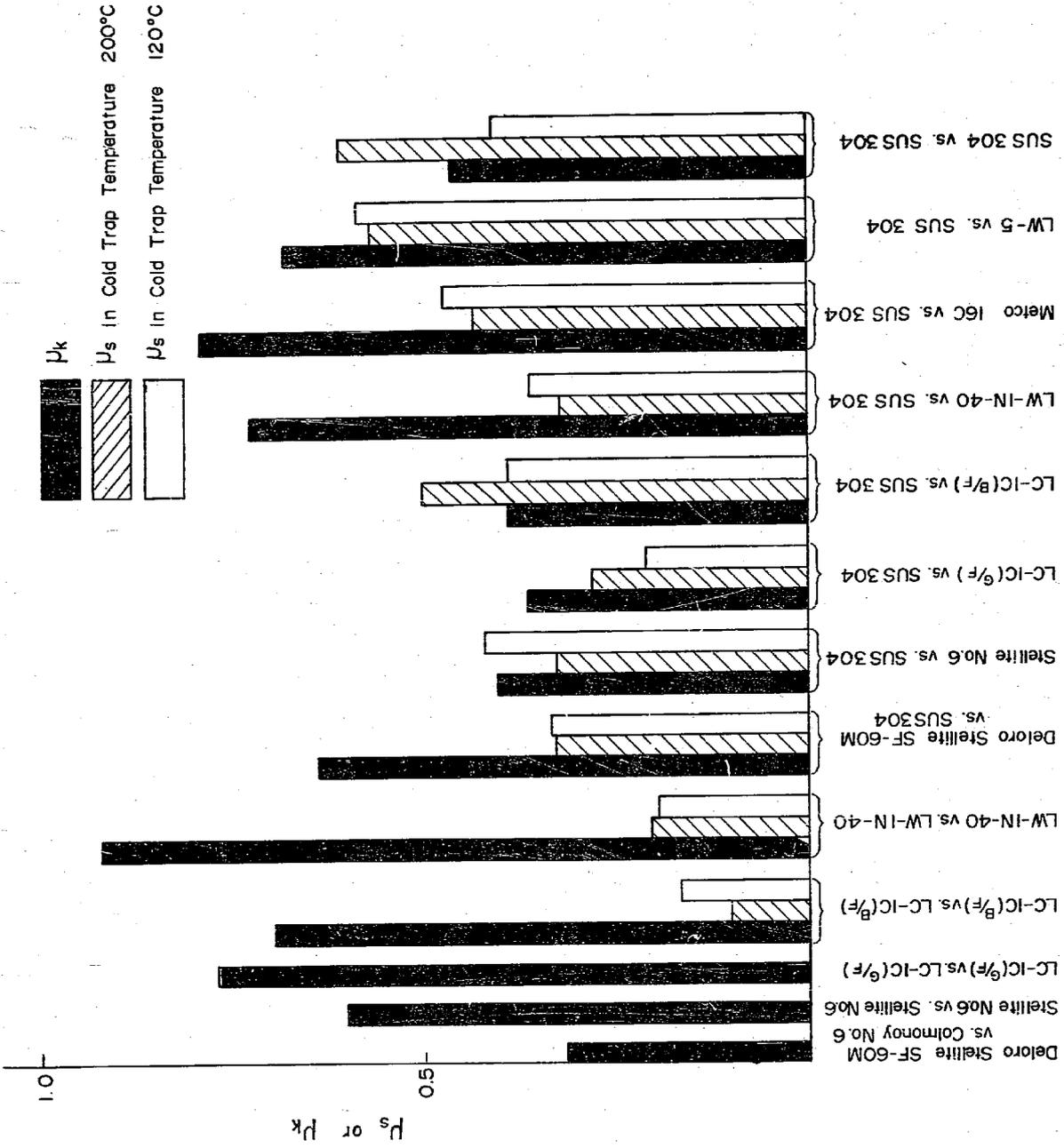


Fig. 7 μ vs. Material Combination in Contact Pressure 100 kg/cm²

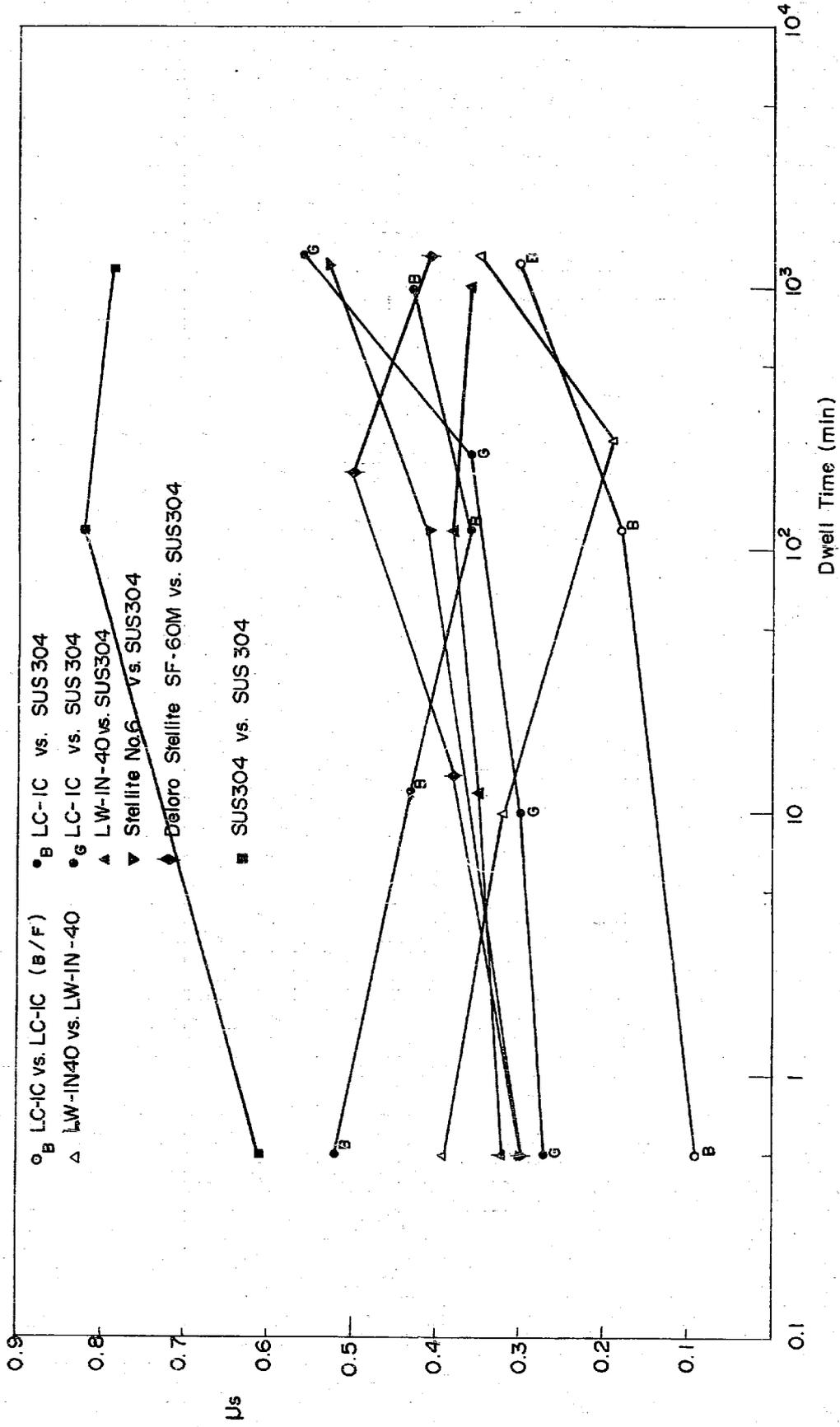


Fig.8 μs vs. Dwell Time

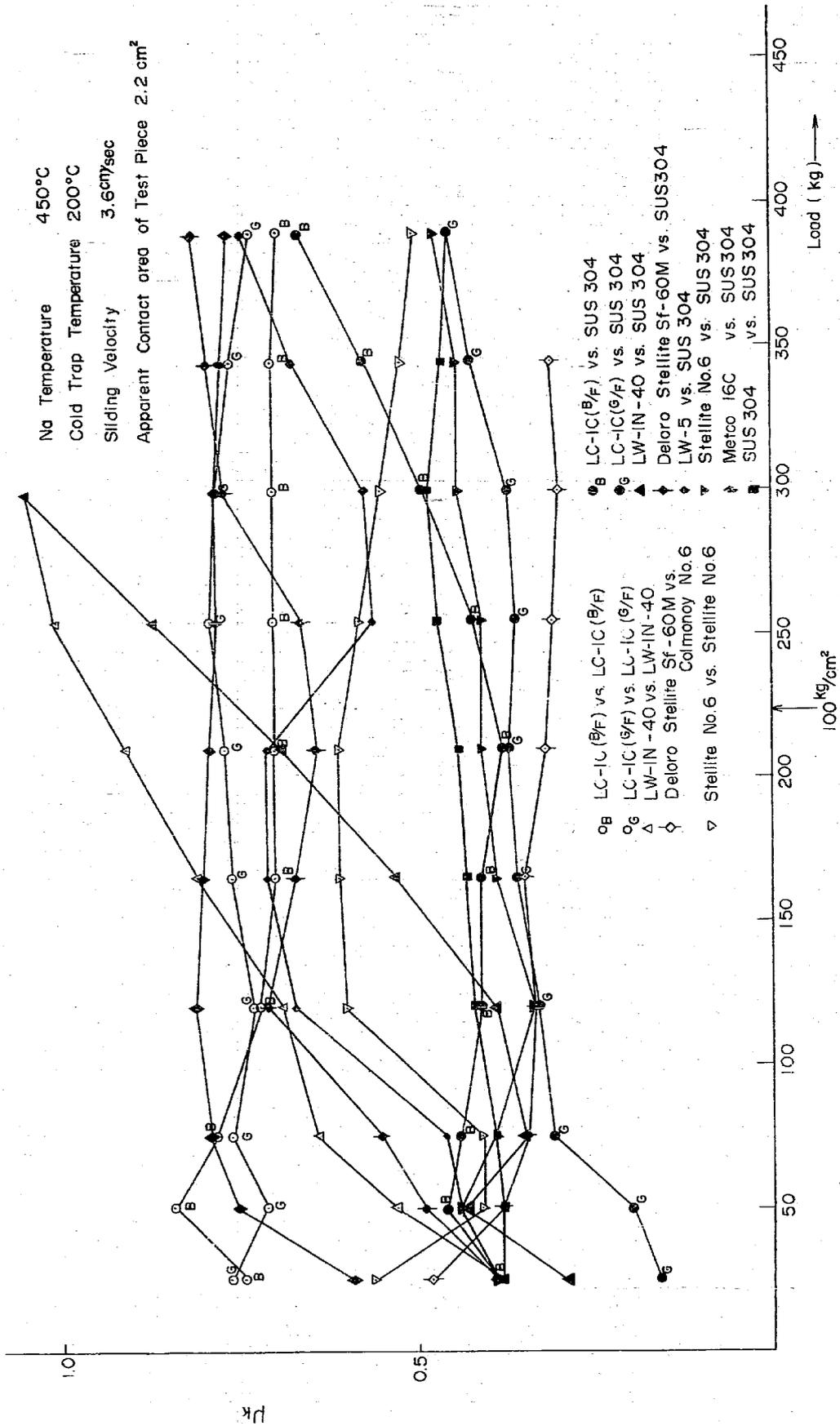


Fig. 9 μk vs. Load

Na Temperature 450°C
 Cold Trap Temperature 200°C

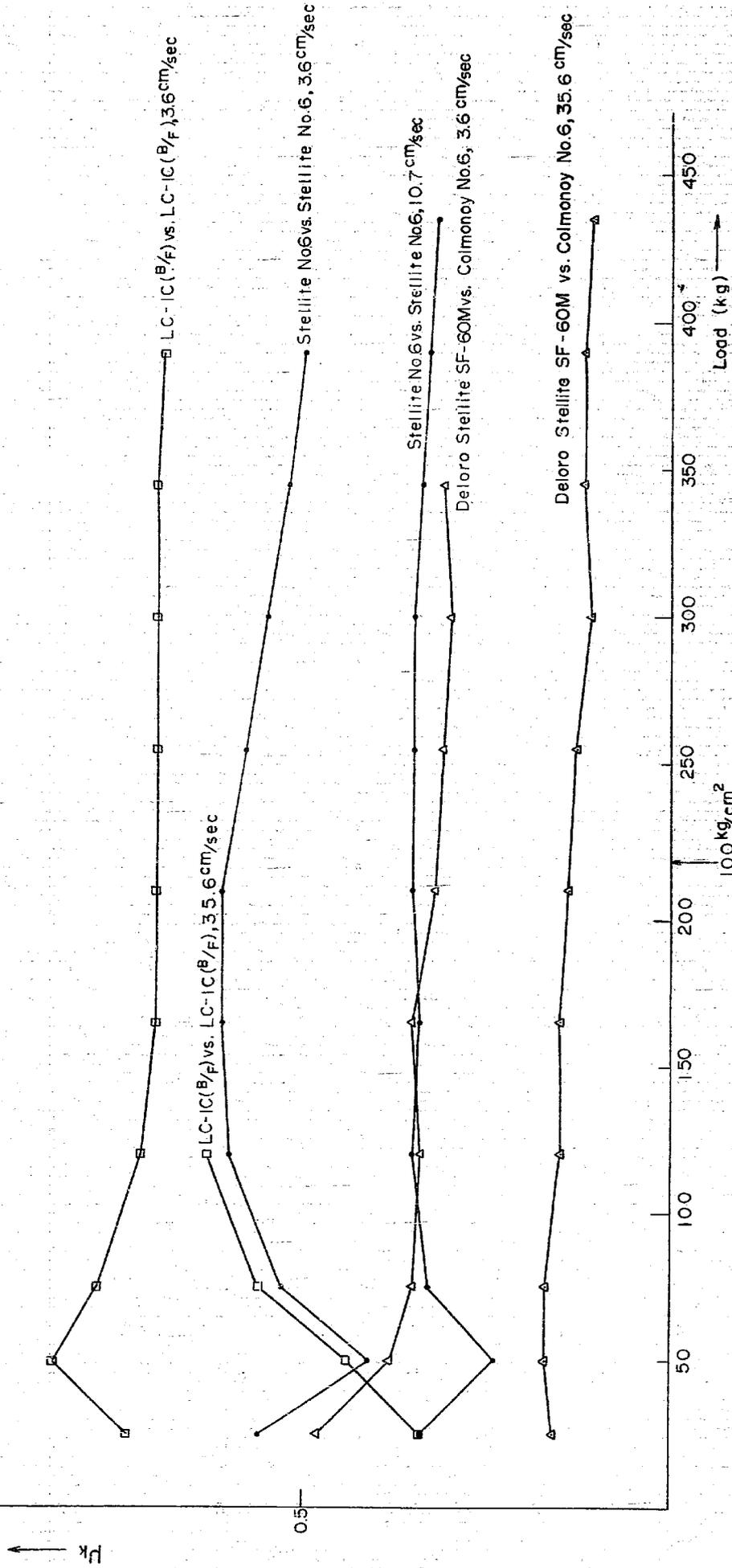


Fig. 10 Relation between μ_k , Load and Sliding Velocity

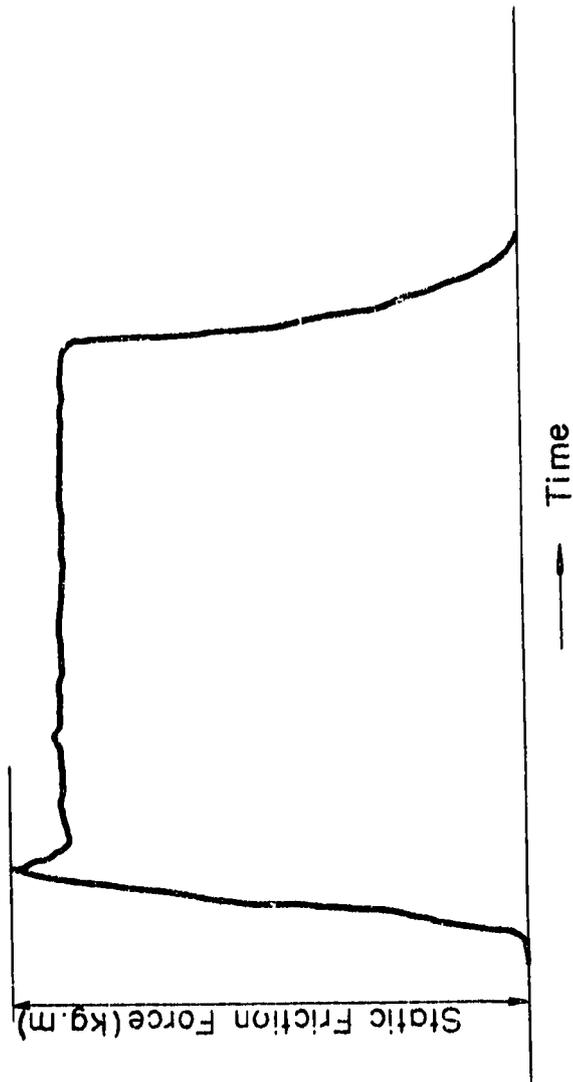


Fig. 4 Typical Diagram of Static Friction Force

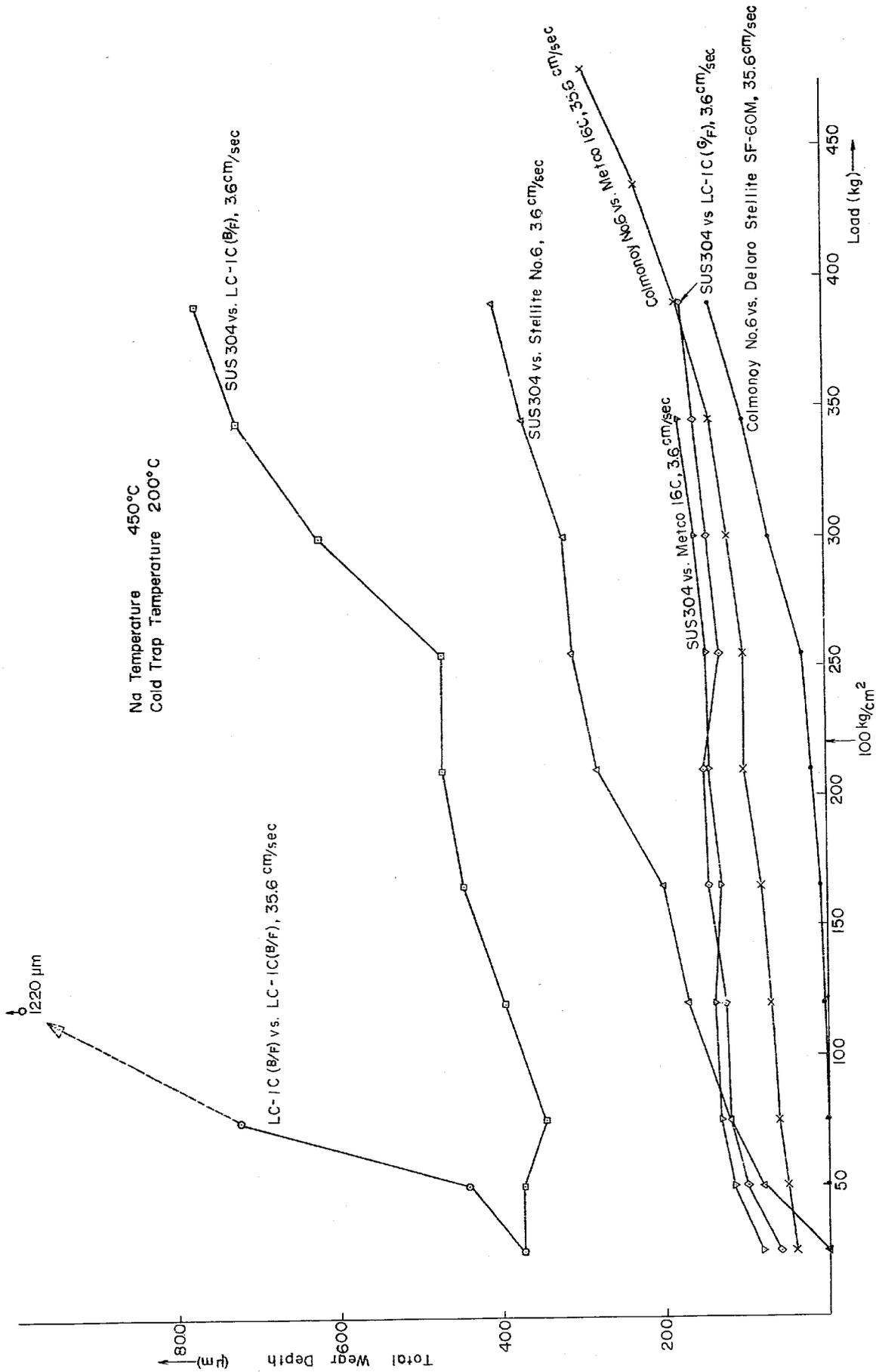


Fig. 12 Total Wear Depth vs. Load

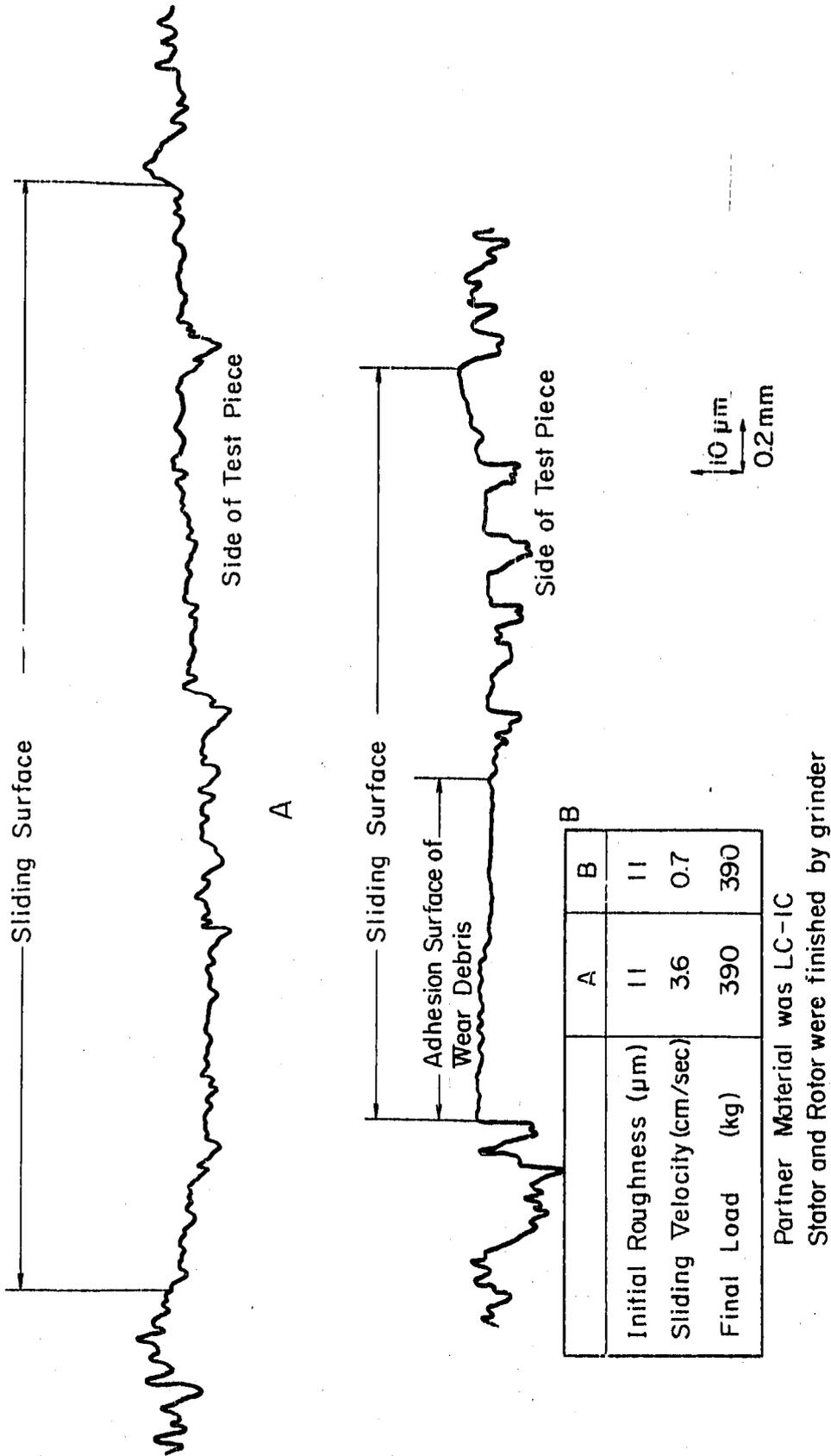
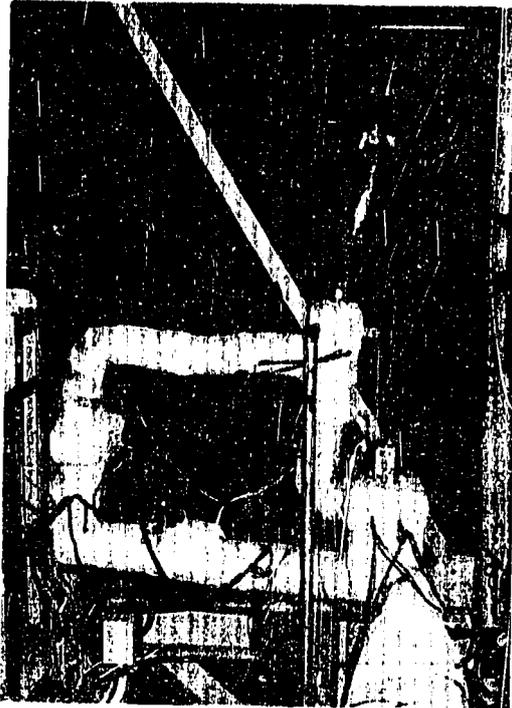


Fig. 13 Typical Roughness of LC-1C (G/F)



↑
Main Heater

Filter Line



Filter

Filter Took out

from Sodium Test Loop

Photo. 1 Filter

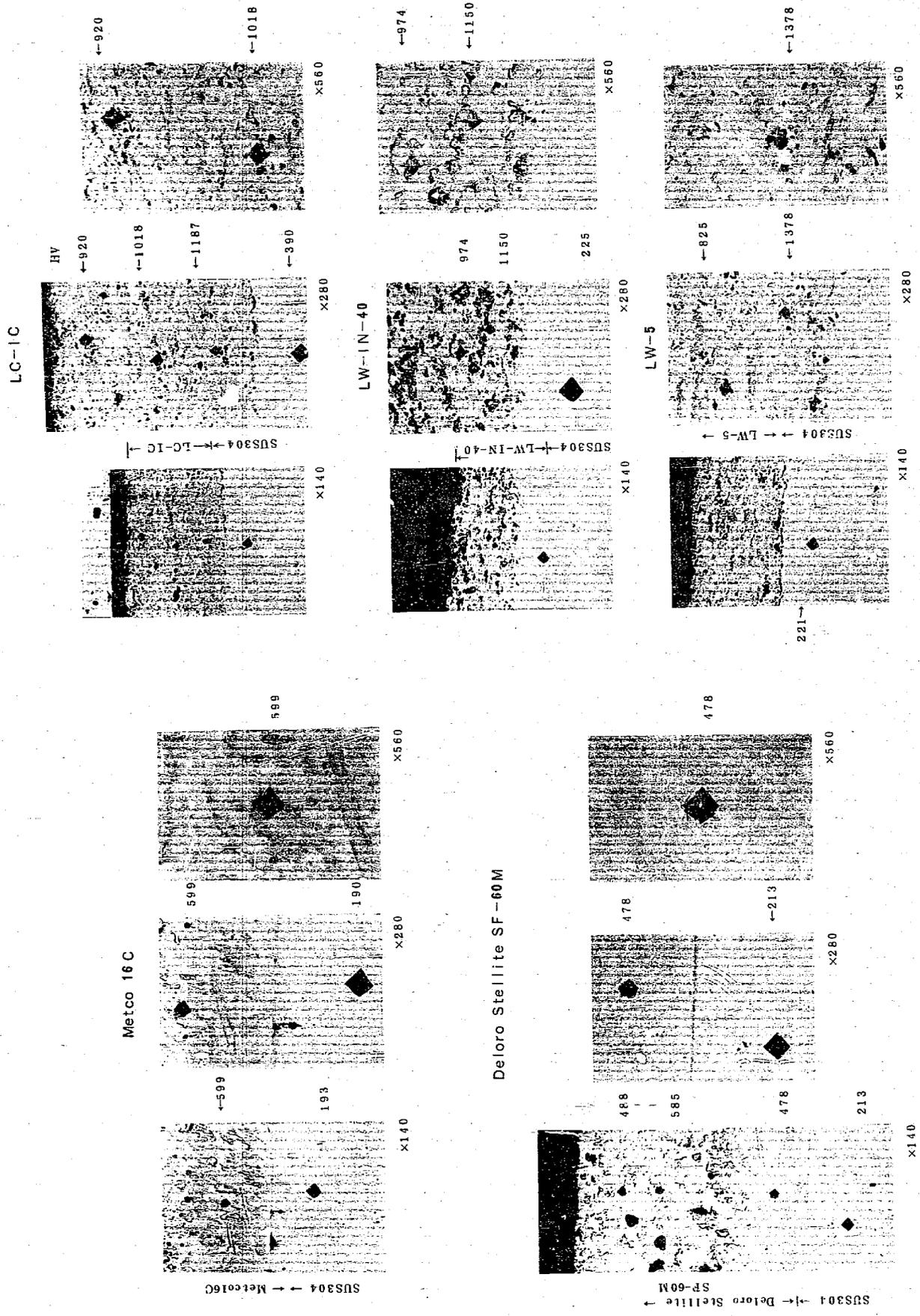


Photo. 2 Optical Microstructure and Microhardness of Test Piece before Test

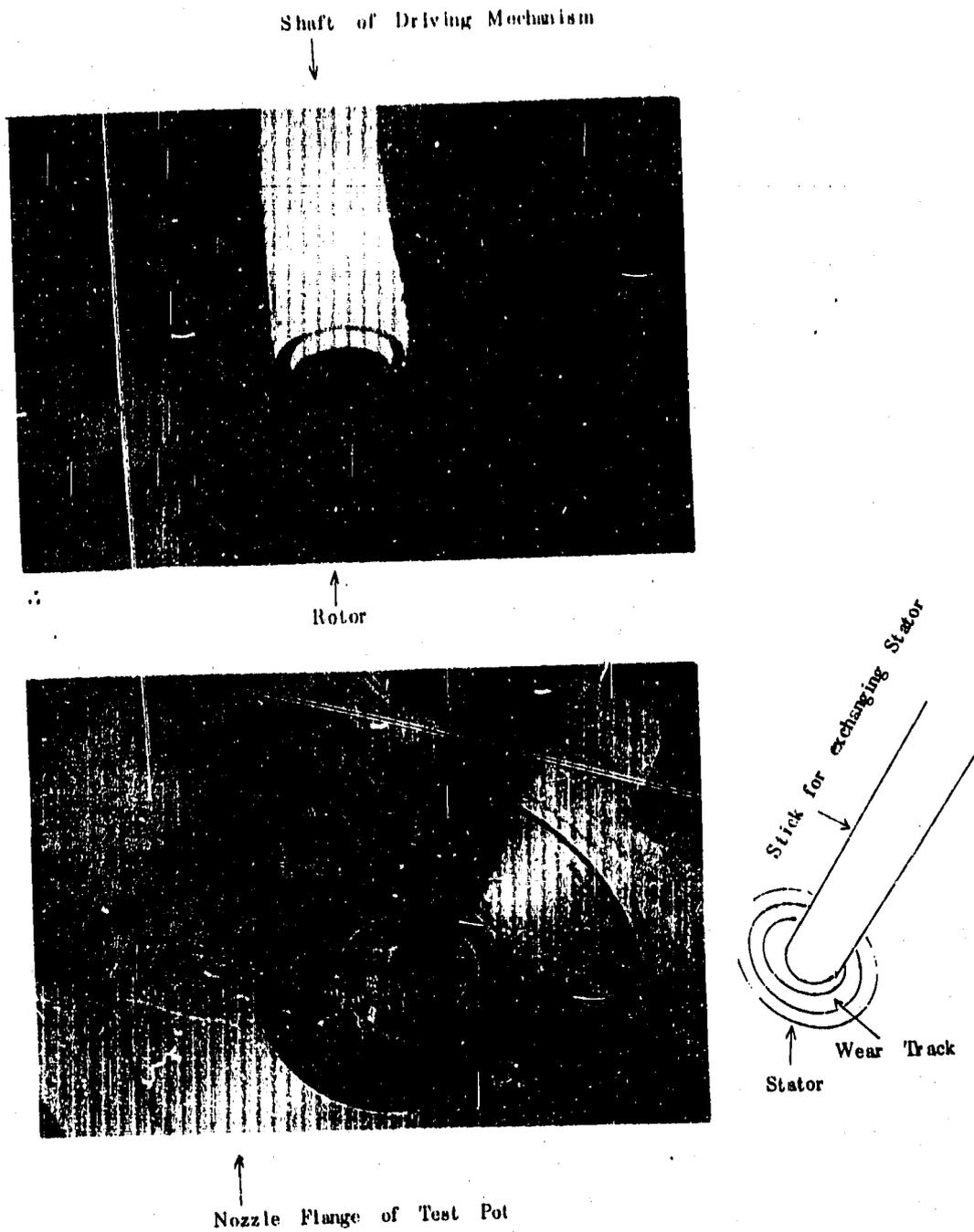


Photo. 3 External Appearance of Test Piece before Remove Na



Photo. 4 External Appearance of Test Pieces after Tested