

高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(Ⅲ)

硬質合金・カーバイトの金相試験

1974年10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)

高速炉材料のナトリウム中摩耗試験 (Ⅲ)

硬質合金・カーバイトの金相試験

報告者 加納 茂 機※
 溝 淵 庄太郎※
 滑 川 優※
 中 山 絃 一※
 大和田 哲 郎※
 厚 母 栄 夫※

期 間 1974年6月～1974年9月

目 的 原子炉機器摺動部用耐摩耗材の選定

要 旨 材料の耐摩耗性は摩擦係数および摩耗量ばかりでなく、摺動面の金相試験データからも評価するのが好ましい。本試験では主に前報⁽²⁾にて報告した材料についての金相試験結果を報告する。また49年度前半に摩耗試験した材料組合せについての摩擦係数、摩耗量および金相試験結果も報告する。得られた結果は次のとおりである。

(1) LC-1C同志および LW-1 N40同志の組合せは最も高い μ_k (0.6以上)を示したが LW-1N40(G/F)同志を除き摺動面近傍に変形および組織変化等が見られなかった。LW-1N40(G/F)はコーティング後の表面研磨により割れが生じこのため μ_s および μ_k の変動が大きくなった。

(2) ステライトNo.6同志、コルモノイNo.5 vs. No.6およびデロロステライト SF-60Mvs. コルモノイNo.6の組合せは最も低い μ_k (=0.3)および W_s (~0)を示し、また摺動面近傍の組織変化等が全く見られず安定していた。

(3) SUS304は μ_s を高くする傾向があり SUS304同志が最も高い μ_s (=0.6)を示した。また塑性変形しやすく摺動面が著しくあれていた。

(4) インコネルX750および LW-5は摩耗試験中に塑性変形し、摺動面近傍に著しい組織変化が見られた。またインコネルX750同志は最も高い W_s を示した。

Wear Tests of Materials for FBR in Sodium Environment(III)
Metallographic Tests of Hard Metals and Carbides

Shigeki KANO*,
Syotaro MIZUBUCHI*,
Masaru NANEKAWA*,
Koichi NAKAYAMA*,
Tetsuro OWADA* and
Hideo ATSUMO*

Abstract

It is desirable for the wear-resistance of material to be evaluated from the metallographic data of sliding surface as well as the friction coefficient μ and the specific wear rate W_s .

We mainly showed the results of metallographic analysis of materials described in the preceding report(2). Also, we showed the friction coefficients, the wear rates and the results of metallographic analysis of material combinations tested in the first half of 1974.

The tests yielded the following results:

- (1) The combinations of LC-1C vs. LC-1C and LW-1N40 vs. LW-1N40 showed the highest kinetic friction coefficient μ_k (≈ 0.6) of all combinations tested, but did not show any deformation and structural change except for LW-1N40(G/F) vs. LW-1N40(G/F). LW-1N40(G/F) cracked under the grinder finish of coating surface and then the fluctuation of friction coefficient became greater.
- (2) The combinations of Stellite No. 6 vs. Stellite No. 6, Colmonoy No. 5 vs. Colmonoy No. 6, and Deloro Stellite SF-60M vs. Colmonoy No. 6 showed the lowest μ_k (≈ 0.3) and W_s (≈ 0) of all combinations tested. Moreover, these sliding surface layers were stable without any structural change.
- (3) SUS304 tended to make the static friction coefficient μ_s higher and the combination of SUS304 vs. SUS304 showed the highest μ_s (≈ 0.6) of all combinations tested. Also, this easily raised the plastic deformation and this sliding surface was considerably rough.
- (4) Inconel X750 and LW-5 considerably showed the plastic deformation and the structural change on these sliding surface layers. The combination of Inconel X750 vs. Inconel X750 showed the highest W_s of all the combinations tested.

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

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	5
2.2.1 摩擦試験	5
2.2.2 摩擦試験	5
2.3 解析方法	8
2.3.1 摩擦係数測定	8
2.3.2 摩擦量測定	8
2.3.3 摺動速度測定	9
2.3.4 表面あらし測定	9
2.3.5 かたさ測定	9
2.3.6 実体顕微鏡観察	9
2.3.7 断面の組織観察(光学顕微鏡)	9
2.3.8 XMAによる組成変化	9
2.3.9 SEMによる観察	9
2.4 試験片の組合せ, 化学成分, 肉盛方法およびかたさ	10
3. 試験結果および考察	15
3.1 摩擦係数について	15
3.1.1 静摩擦係数 μ_s について	15
3.1.2 動摩擦係数 μ_k について	16
3.2 摩擦量について	22
3.3 金相試験結果	24
3.3.1 SUS304 同志について	26
3.3.2 デローステライト SF-60M vs. コルモノイ No. 6 について	30
3.3.3 コルモノイ No. 5 vs. コルモノイ No. 6 について	40
3.3.4 ステライト No. 6 同志について	45
3.3.5 インコネル X750 同志について	52
3.3.6 LC-1C 同志について	56

3. 3. 7 LW-1N40 同志について 70

3. 3. 8 LW-5 vs. SUS304 について 78

4. 結 論 81

5. あとがき 82

6. 文 献 83

1 ま え が き

47年度より原子炉槽動部用耐摩耗材および耐腐蝕材について一連の選定試験を行なっている。48年度までに試験したものはすでに報告書^{(1),(2)}にまとめられており、各種材料組合せについて摩耗係数および摩耗量が明らかになった。さらに、本報では金属組織上の安定性を検討するため前報にまとめられた材料の槽動部について組織および組成変化、塑性変形等の金相試験結果および49年度前半に試験したインコネルX750 同志、LW-1N40 (B/F) 同志、ステライトNo.6同志およびコルモノイNo.5とNo.6等の組合せについて報告する。

2 試験方法

2.1 試験装置

図1に試験ループのフローシートを示す。ロールドラップにより精製されたナトリウムが試験ポットに供給(2~4ℓ/min)される。試験ポットには3基の摩擦試験部(図2参照)が付設されており、各々図3に示す1対の試験片を取付ける。回転側試験片はチェーン式無段変速の駆動モータに連結されたシャフト先端に固定され、固定側試験片は、負荷ロッドに支持された受板に固定される。摩擦速度は駆動モータの回転数調節によりまた面圧は毎によりアームおよび負荷ロッドを介して試験片接触面に与えられる。

試験片間の片当りをなくすため、固定側試験片と受板の間自在受を取付けた。摩擦面の摩擦抵抗は回転シャフトに連結したトルクメータにより連続的に記録させた。

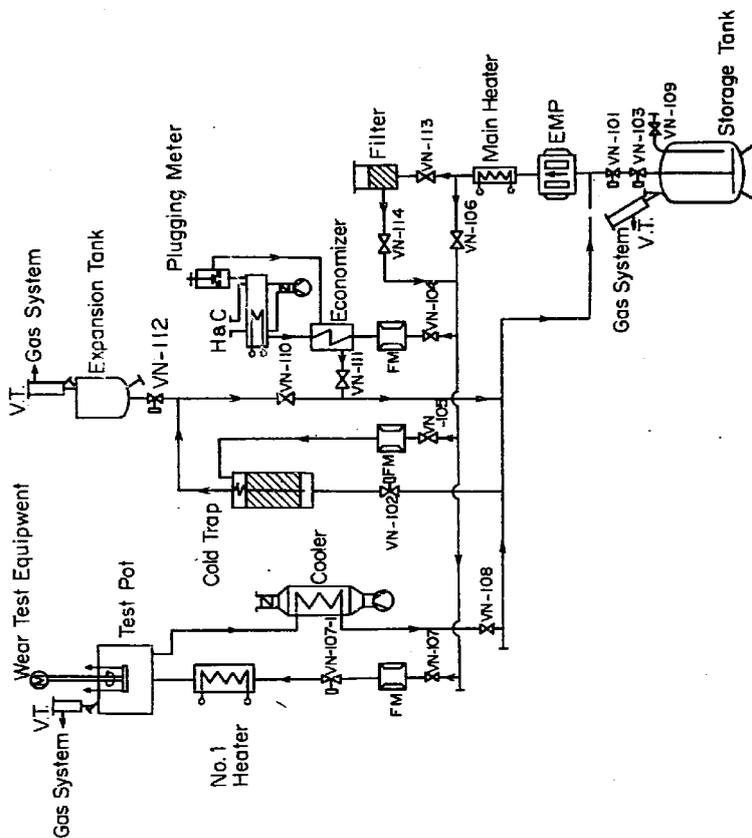


Fig. 1 Flow Sheet of Test Loop

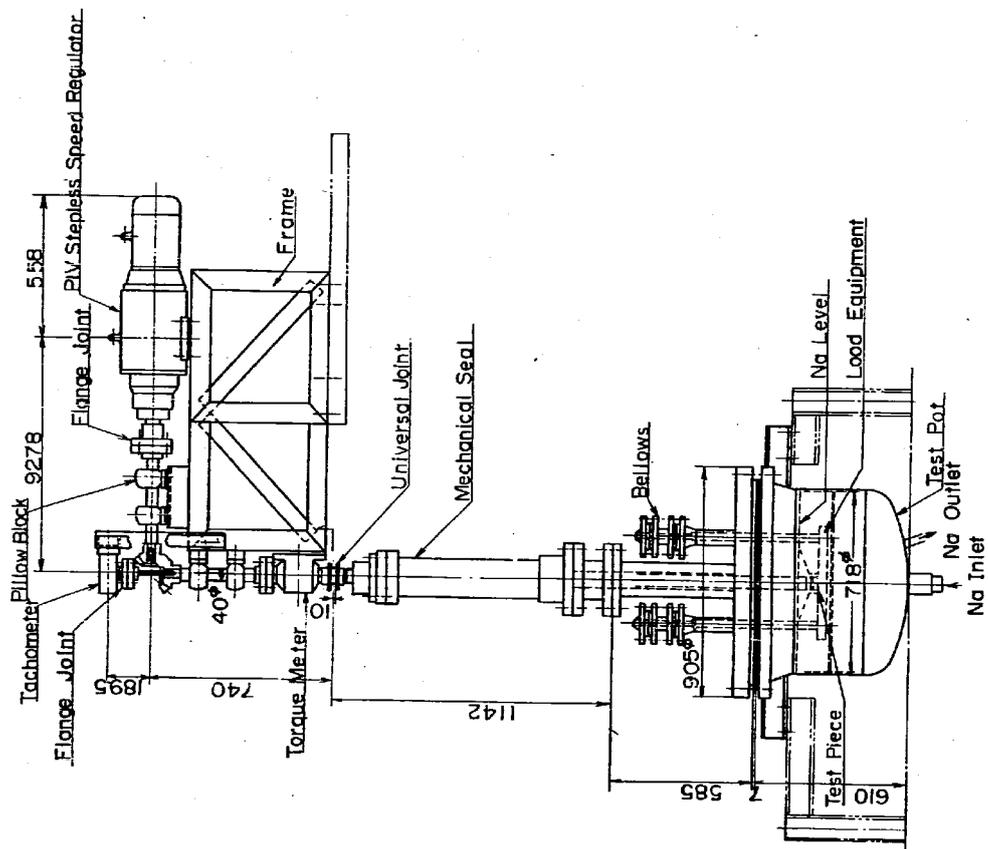


Fig. 2 Test Equipment

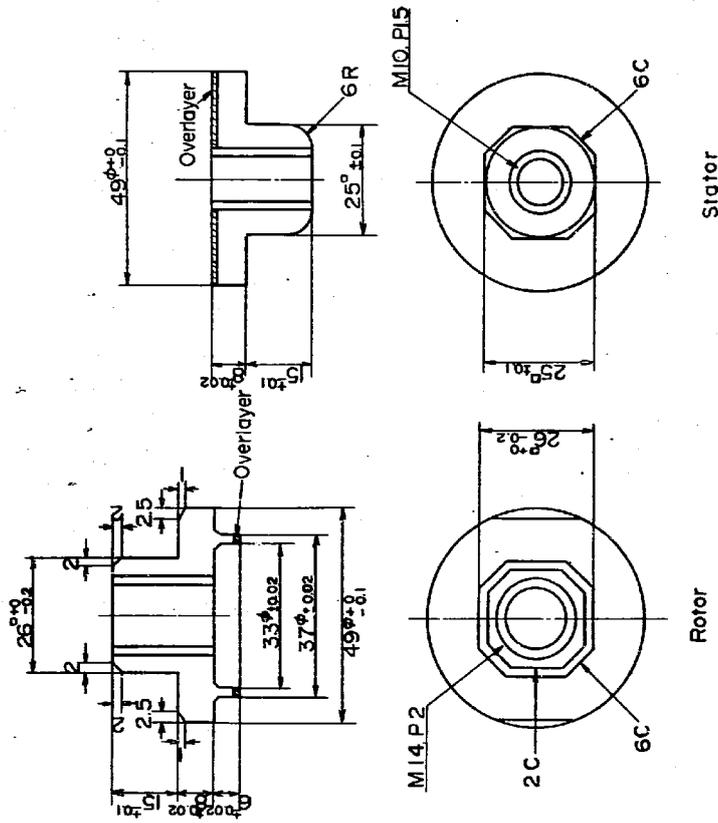


Fig. 3 Size of Test Piece

2.2 試験方法

2.2.1 摩擦試験

試験ループが定格条件に到達後、摩擦試験前に行なった。2.5 kgあるいは4.5 kgずつ段階的に荷重を増加し、荷重負荷後3.0秒経過後手動で回転試験片を約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

摩擦試験後に摩擦試験を行なった。電動モータにより回転試験片を連続回転させながら2.5 kgあるいは4.5 kgずつ段階的に荷重を増加し、各荷重における滑動トルクを1.5分間ずつ記録し動摩擦係数 μ_k を計算した。滑動速度はナトリウム中の摩擦および摩擦に関する調査をもとに (3) (4), (5), (6) 3.6cm/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漸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装置アームの支点距離の長さ比より重量の2.5倍とした。

Table 1 Condition of Friction Test

Na Temperature (C)	450
Cold Trap Temperature (C)	200
Apparent Contact Area of Test Piece (cm ²)	2.2
Load	Incremental Load
Quantity to be Determined	Initial Torque

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)	3.6
Load	Incremental Load
Quantity to be Determined	Sliding Torque Wear Rate

Table 3 Load, Contact Pressure and ΣP_i at Each Step

Step	Load (kg)	Contact Pressure (kg/cm ²)	ΣP_i (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.

2.3 解析方法

2.3.1 摩擦係数測定

試験片摺動用チャフに連結したKYOWA社製のひずみ式トルク変換器TP-10KMCと動ひずみアンプCA-50GおよびRIKADENKI社製の6ベンレンコーダKA-61に1り試験中の初トルクあるいは摺動トルクを記録し、次式により各々静摩擦係数 μ_s あるいは動摩擦係数 μ_k を求めた。

$$\text{摩擦係数 } \mu_s \text{ あるいは } \mu_k = \frac{T}{F \times r}$$

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 摩擦量測定

MITUTOYO社製の触針式超あらさ検査機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摩擦深さ W_0 を求めた。

摩擦体積 W_v は、同じ触針式超あらさ検査機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。

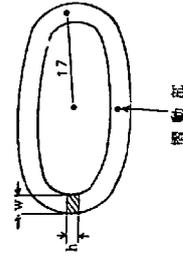


$$S = w \times h \text{ と仮定}$$

$$W_v = \pi h \left(17 + \frac{w}{2} \right)^2 - \pi h \left(17 - \frac{w}{2} \right)^2$$

$$= \pi h \left(17 + \frac{w}{2} + 17 - \frac{w}{2} \right) \left(17 + \frac{w}{2} - 17 + \frac{w}{2} \right)$$

$$= 3.4 \pi h w = 3.4 \pi S$$



比摩擦量 W_s は試験中の荷重が一定でないので $W_s = W_0 / (i \times v \times P)$ (i: 試験時間, v: 摺動速度, P: 荷重) のうち、 $i \times P$ を $\Sigma i \cdot P_i$ (i: i 段階での荷重 P_i 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

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

2.3.3 振動速度測定

振動シャフトの回転数を目標で求めたチェーモン式無段変速ギヤの回転数を調節し 3.6cm/sec の振動速度 (試験片当り) になるようにした。

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。振動部のあらさ測定は振動方向と直角に触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スかたさ計 MODEL-MVK TYPE-D を使用した。

2.3.6 実体顕微鏡観察

OLYMPUS 社の三筒式実体顕微鏡 TYPE X-T₁ により摩耗痕の外観写真をとった。

2.3.7 断面の組織観察 (光学顕微鏡)

HEIWA 社の FINE CUT TYPE 100 により切断後 "だれ" 防止のため摩耗面側に平板を取りつけた状態で樹脂にうめこみ、エメリー紙、ハンによる研削 (最終 0.05μm) 後、土水、メリカ液、または 10% 修酸電解を使用してエッチングを行ない OLYMPUS 社の PME 光学顕微鏡により観察した。

2.3.8 XMA による組成変化

摩耗点面および摩耗断面における構成元素の組成および硬度変化を調べるため XMA 線分析および面分析を求めた。使用した XMA は HITACHI 社の TYPE-5B で同時に元素まで分析できる。

2.3.9 SEM による観察

摩耗表面状態を走査型電子顕微鏡により観察した。装置は HITACHI 社の HSM-2 型である。

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、試験した振動速度および最大荷重も示す。LC-1C および LW-1N40 については 2 種の表面あらさの異なるものを試験し、グラインダ研削したものを G/F、ブラシ研削したものを B/F (注) と記した。

表 5 に供試材の化学成分を示す。表中のステラライト No.6 は神戸製鋼製 (HF-6R), コルモノイ No.6 は住友金属山梨製 (R-6), コルモノイ No.5 は福田金属製 (フクダロイ No.5) デプロステラライト SF-60M は英国デプロステラライト社製, インコネル X750 は三菱金属製, および LC-1C, LW-5, LW-1N-40 は米国ユニオンカーバイド社製のものをを使用した。表 6 に肉盛方法とカーバイド材の肉盛に使用した Dガンの断面図を示す。SUS304 とインコネル X750 以外の材料はすべて SUS304 上に肉盛処理した。

また試験片のかたさを表 7 に示す。これらの肉盛断面の光学組織を写真 1 に示す。

デプロステラライトの組織で、黒い点は粉末溶射後、再溶射時に消滅出来なかつた気孔部である。組織上では従来のコルモノイ合金, ステラ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点異なる。

コルモノイでは No.5 より No.6 の方が炭素量が多いため炭化物が多く析出しかたくなっている。ステライトでは No.6 より No.1 の方が炭素量が多いため炭化物が多く析出しかたくなっている。

D-Gun による肉盛層は母材を冷間のまままで施工し、これらの処理方法としては最も母材の接着性があり、今後、耐摩耗、耐摩耗材として有望とみなされる方法の一つである。

インコネル X750 の組織にあらわれている黒点は金属間化合物 $Ni_3(Ti, Al)$ であり、これが高温強度を増加させている。

(注) 前報⁽²⁾では LC-1C について G/F をグラインダ研削 (表面あらさ 11.4μm), B/F をブラシ研削 (表面あらさ 0.4μm) と記したが誤りである。表面あらさ 11.4μm のものはブラシ研削されたもの、そして 0.4μm のものはグラインダ研削されたものであり各々表示法を B/F と G/F に訂正する。ブラシ研削は SiC を含浸させたナイロンブラシにより、またグラインダ研削はダイヤモンドホイールにより行なった。

Table 4 Material Combination

PNC TN941 74-80

Material Combination		Roughness (μm) as Received		Sliding Velocity, (cm/sec)	Final Load, (Kg)
Stator	Rotor	Stator	Rotor		
Colmonoy M6	Deloro Stellite SF-60M	1	0.6	3.6 (35.6)	345 (390)
Colmonoy M5	Colmonoy M6	1	1	3.6	390
Stellite M6	Stellite M6	1	1	3.6	390
Inconel X750	Inconel X750	1	1	3.6	390
LC-1C (G/F)	LC-1C (G/F)	0.4	0.4	3.6 (35.6)	390 (120)
LC-1C (B/F)	LC-1C (B/F)	11	11	3.6 (0.7)	390 (390)
LW-1N40 (G/F)	LW-1N40 (G/F)	0.4	0.4	3.6	300
LW-1N40 (B/F)	LW-1N40 (B/F)	14	14	3.6	390
SUS304	SUS304	0.4	0.4	3.6	390
SUS304	Deloro Stellite SF-60M	0.4	0.6	3.6	390
SUS304	Colmonoy M6	0.4	1	3.6	390
SUS304	Stellite M6	0.4	1	3.6	390
SUS304	Inconel X750	0.4	1	3.6	390
SUS304	LC-1C (G/F)	0.4	0.4	3.6	390
SUS304	LC-1C (B/F)	0.4	11	3.6	390
SUS304	LW-1N40 (G/F)	0.4	0.4	3.6	300
SUS304	LW-5 (G/F)	0.4	0.1	3.6	435

(G/F): Grinder Finish
(B/F): Brush Finish

-10-

Table 5 Chemical Compositions (w/o)

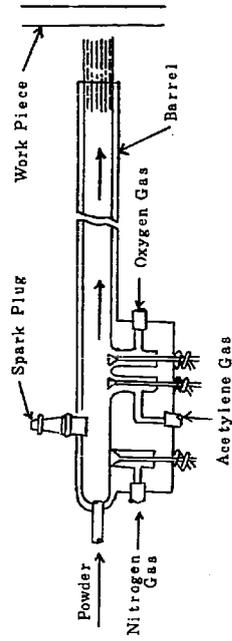
PNC TN941 74-80

	C	Si	Ni	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	B	W	Ti	Al	Cu	S	Cb+Ta
SUS304	0.06	0.59	8.63		18.64	Bal	1.54								
Stellite M 1	2.58	1.16		Bal	31.33	0.28				12.49					
Stellite M 6	1.04	1.17		Bal	28.65	0.27				4.20					
Colmonoy M 5	0.54	3.47	Bal		11.5	3.47			2.05						
Colmonoy M 6	0.75	4.25	73.75		13.5	4.75			3.00						
Deloro Stellite SF-60M		4.5	70		15	4.5			3						
Inconel X750	0.023	0.05	73.07		15.14	2.15	tr				2.56	0.76	tr	<0.005	1.01
LC-1C	85% Cr_2C_3 + 15% NiCr														
LW-1N40	85% WC + 15% Co														
LW-5	25% WC + 5% Ni + W-Cr Carbide														

-11-

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, No 5	Oxi-Acetylene Gas Weld	2
Deloro Stellite SF-60M (150-250 Mesh)	Sprayed Coating	2
LC-1C (-325 Mesh)	D-Gun Coating	0.2
IW-5 (")	D-Gun Coating	0.2
IW-1N-40 (")	D-Gun Coating	0.2



Sketch of Detonation Gun

Table 7 Microhardness (Hv) as Received

Material	Load (g)	Microhardness	
		Matrix	Carbide
SUS304	100	180	
Stellite No 1	100	681	1533
Stellite No 6	100	475	
Colmonoy No 5	100	366	
Colmonoy No 6	100	519	1561
Deloro Stellite SF-60M	100	581	
Inconel X750	100	359	
LC-1C	300		1187
LW-1N40	300		1150
LW-5	300		1378



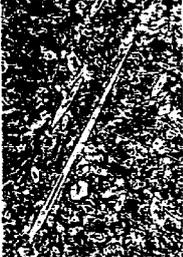
Deloro Stellite SP-60M
x200



Colmonoy No. 5
x100



Colmonoy No. 6
x100



Stellite No. 1
x100



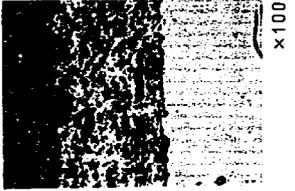
Inconel X750
x100



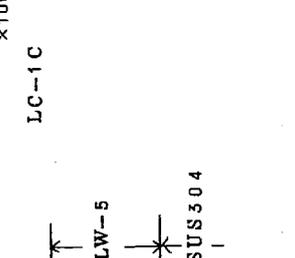
LC-1C
x100



LW-1N40
x100



LW-5
x100



SUS304
x100

3 試験結果および考察

3.1 摩擦係数について

49年度前半に Na 中試験した材料組合せ即ち、インコネルX750同志、コルモノイNo.5とNo.6の組合せ、LW-1N40(B/F)同志およびそれら硬質合金とSUS304の組合せについての摩擦係数を比較検討する。また前報⁽²⁾で摩擦係数について報告済みであるが、本報にて金相試験結果を報告する材料組合せについての摩擦係数値も比較のためのせた。

3.1.1 静摩擦係数 μ_s について

負荷後試験片を揺動させるまでの時間が長い程材料間の融着性が μ_s に影響⁽⁷⁾を与えるのでこの影響を少なくするため負荷後30秒(一定)で μ_s を求めた。(長時間保持後のものは破断摩擦係数⁽⁸⁾という。)

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4および図5に示す。図4には硬い材料同志の μ_s を、図5には硬い材料 vs. SUS304の組合せの μ_s を示す。両図には比較のためSUS304同志の μ_s も示す。図4に同じ材料と同じように面圧100kg/cm²における μ_s を比較すると次のような順となった。

- LW-1N40(G/F)同志
- LC-1C(G/F) < LW-1N40(B/F)同志 < コルモノイNo.5 vs. No.6 < ($\mu_s = 0.1$) インコネルX750 ($\mu_s \approx 0.25$)
- ステラライトNo.6同志 ($\mu_s \approx 0.2$)
- LC-1C(B/F)同志 < SUS304同志
- テロステラライトSP-60M vs. コルモノイNo.6 ($\mu_s = 0.6$) ($\mu_s \approx 0.4$)

49年度前半に試験したもののうちLW-1N40(B/F)同志とインコネルX750同志の μ_s は約0.2と低くLC-1C(G/F)同志について優れた耐摩擦性を示した。

LW-1N40の研摩法による影響は見られず、グラインダ研摩のものと同ブライジ研摩のもの(試験前の表面あさは各々0.4 μ mおよび1.4 μ m)の μ_s はほぼ等しかったがグラインダ研摩した方が μ_s の変動が大きかった。この原因は金相試験の項で述べる。

次に、コルモノイNo.5 vs No.6の組合せも μ_s が低く約0.25であった。上述の組合せ以外のものでは μ_s が0.4以上と高くなり、SUS304同志が最も高く0.6に達した。

組合せのうち一方の試験片がSUS304の場合は(図5参照)、硬い材料同志の組合せ(異種材との組合せを含む)に比べて、いずれも0.1以上 μ_s が高くなった。ただ1つの例外はステラライトNo.6の場合で、ステライトNo.6同志の方がステライトNo.6 vs SUS304

Photo.1 Cross-Sectional Micrographs of Test Pieces as Received

より μ_s が高くなった。その差は小さくデータのバラツキが原因しているかもしれないがこの差に有意差があるかどうかをしらべる必要がある。(注)

全般的にみてある一種の硬い材料に着目すると μ_s の傾向には

硬い材料同志 < 硬い材料 vs. SUS304 < SUS304 同志

のような関係がみられ、組合せに SUS304 が含まれると μ_s が高くなる。これは SUS304 が軟かいためと考えられる。すなわち摩擦の摩擦係数は次のような関係⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾にある。

$$\mu = \frac{A\tau}{W} = \frac{W}{P_m} \times \frac{\tau}{W} = \frac{\tau}{P_m}$$

A : 実接触面積

W : 荷重

τ : 軟かい方の材料のバルクのせん断強さ

P_m : 軟かい方の材料の塑性流動圧力(押込かたさ)
 摩擦係数はせん断強さとかたさの逆数に比例し、荷重、見かけの接触面積および速度に依存しない。図4および5からも μ_s が荷重に依存しないことがわかる。

しかし上式を用いて μ を計算すると τ は約 $\frac{1}{2} P_m$ であるから μ は約 0.5 となる。実際には SUS304 同志では 0.6、ステライト No.6 同志が 0.4、そして LC-1C(G/F) では 0.1 と著しく低くなる。この原因として τ と P_m の他に雰囲気および材料の表面状態にも μ が依存することが考えられる。材料表面に酸化膜等の被膜が形成され材料間の実接触面で潤滑が起らない場合上式の分子は τ より小さくなると考えられる。雰囲気に影響については前報⁽¹⁾で Na 中とアルゴンガス中を比較したがより詳細な試験について後日報告する予定である。

LC-1C のブラシ研摩したものはグラインダ研摩したものより μ_s が 0.5 も大きかった。

米國 HEDL の R.N. Johnson の報告⁽¹¹⁾によるとブラシ研摩した LC-1C が最も低い摩擦係数を示しており我々の試験との違いがどこから生じたのか明らかでない。これについては今後装置および試験条件等から検討を加え、どのパラメータからきたものであるか明らかにする。

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荷重と μ_k の関係を図6および図7に示す。図6には硬い材料同志の μ_k を、図7には硬い材料 vs. SUS304 の組合せの μ_k を示す。

図6に前報⁽²⁾と同じように面圧 100 kg/cm²における μ_k を比較すると次のような傾向をとった。

(注) 同試験でのステライト No.6 試験片の表面研削法が異なる。ステライト No.6 同志の場合は G C 研削砥石により研摩し、今回は固定式エメリ紙により、これ以上は G C 研削砥石により研摩した。

デロステライト SF-60M vs. コルモノイ No.6

コルモノイ No.5 vs. No.6

ステライト No.6 同志 ($\mu_k = 0.3$) < SUS304 同志

インコネル X750 同志 ($\mu_k = 0.45$)

< LC-1C(G/F)同志 < LC-1C(B/F)同志
 LW-1N40(B/F)同志 ($\mu_k = 0.7$)

< LW-1N40(G/F)

($\mu_k \approx 0.9$)

μ_s が最も低かった LC-1C(G/F)同志を含め、カーバイト系材料の組合せがそれ以外の組合せより高い μ_k を示しているのがわかる。

49年度前半に試験したもののうちインコネル X750 同志と LW-1N40(B/F)同志は 0.6 と比較的高い μ_k を示し、一方コルモノイ No.5 vs. No.6 の組合せはデロステライト SF-60M vs. コルモノイ No.6 とステライト No.6 同志の組合せと同様に試験した組合せのうち最も低い 0.3 という μ_k を示した。

LW-1N40(B/F)同志は LW-1N40(G/F)同志と違い μ_k が荷重に全く影響されず一定値を示した。LW-1N40(G/F)同志で荷重の増加に従って μ_k が増加した原因については、金相試験の項で述べる。

組合せのうち一方の試験片が SUS304 の場合(図7参照)と硬い材料同志の組合せとの間には次のような関係が見られる。

カーバイド(G/F)同志 > カーバイド(G/F) vs. SUS304

カーバイド以外の硬質合金同志 < カーバイド以外の硬質合金 vs. SUS304

LW-1N40(G/F) vs. SUS304 の組合せは、LW-1N40(G/F)同志と同様に荷重の増加とともに μ_k が増加したがこの理由は金相試験の項で述べる。

LC-1C(G/F) vs. SUS304 の組合せでも荷重の増加とともに μ_k が増加した。一方コルモノイ No.6 vs. SUS304 とインコネル X750 vs. SUS304 の組合せでは荷重の増加とともに μ_k が減少している。

摩擦の摩擦係数に上ると μ は荷重の影響をうけないはずである。この矛盾を説明する理由としては連続潤滑下での荷重の増加により生ずる摩擦進行に伴なり摩擦粉の増加と表面のあれおよび摩擦熱増加に伴なり材料表面の変質等二次的要因が考えられる。

(注) 前報⁽²⁾ではステライト No.6 同志の μ_k が約 0.6 であった。この場合は G C 研削砥石により研摩し、今回は固定式試験片のみ 60 エメリ紙により研摩した。双方の摩擦係数には明白な差はみられなかった。

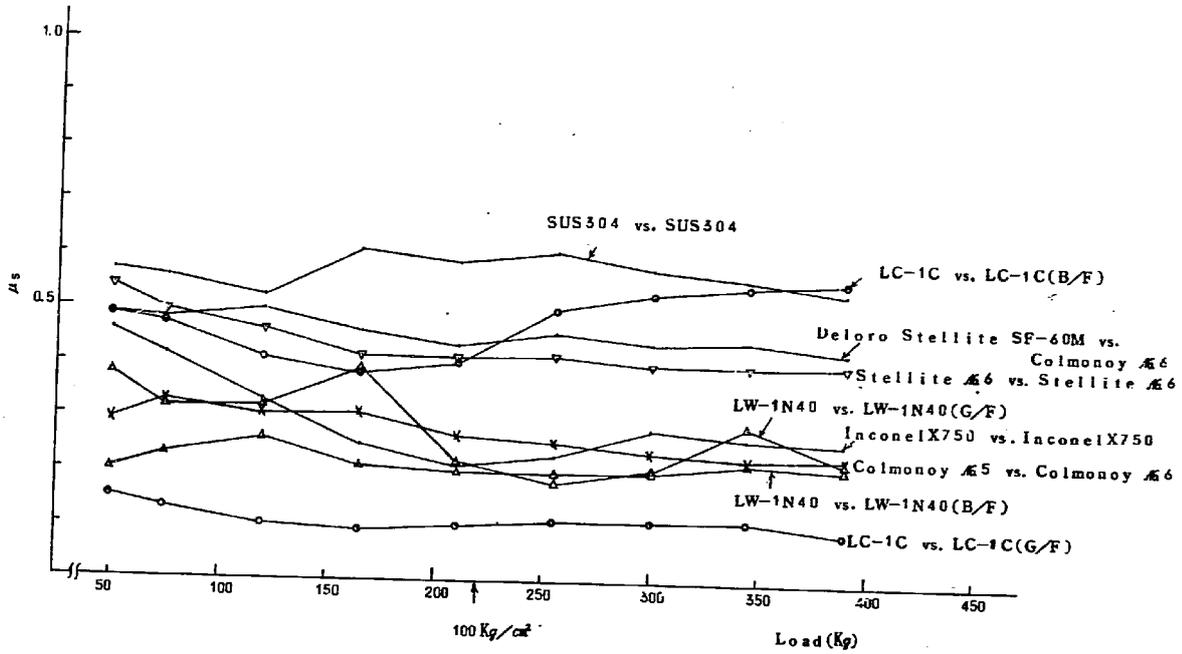


Fig. 4 μ_s vs. Load

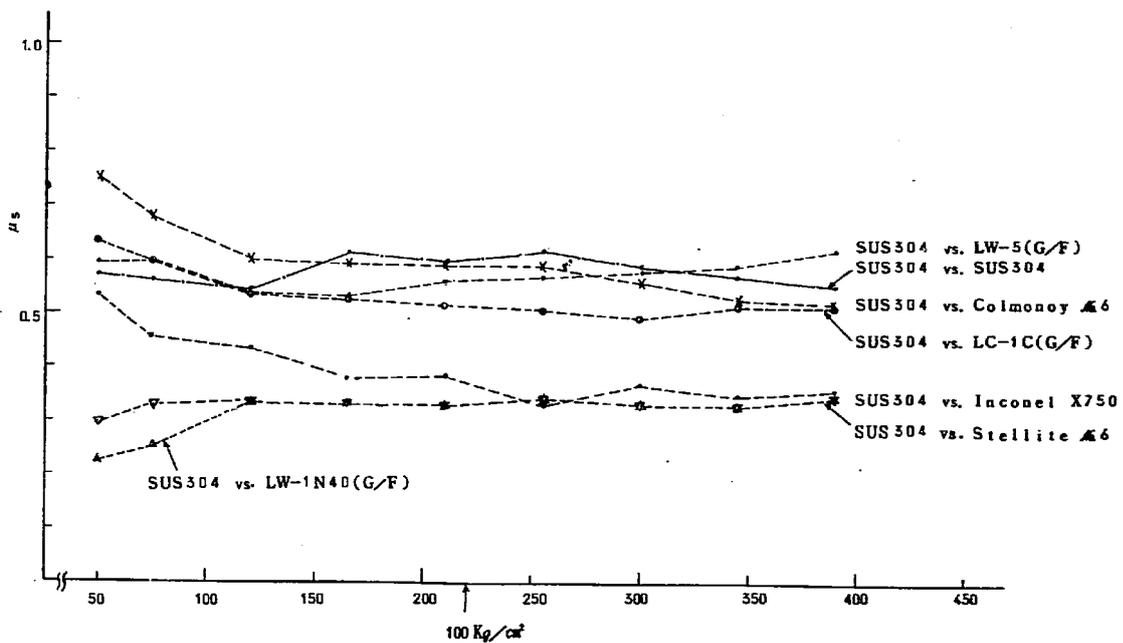


Fig. 5 μ_s vs. Load (A Pair Coupled with SUS304)

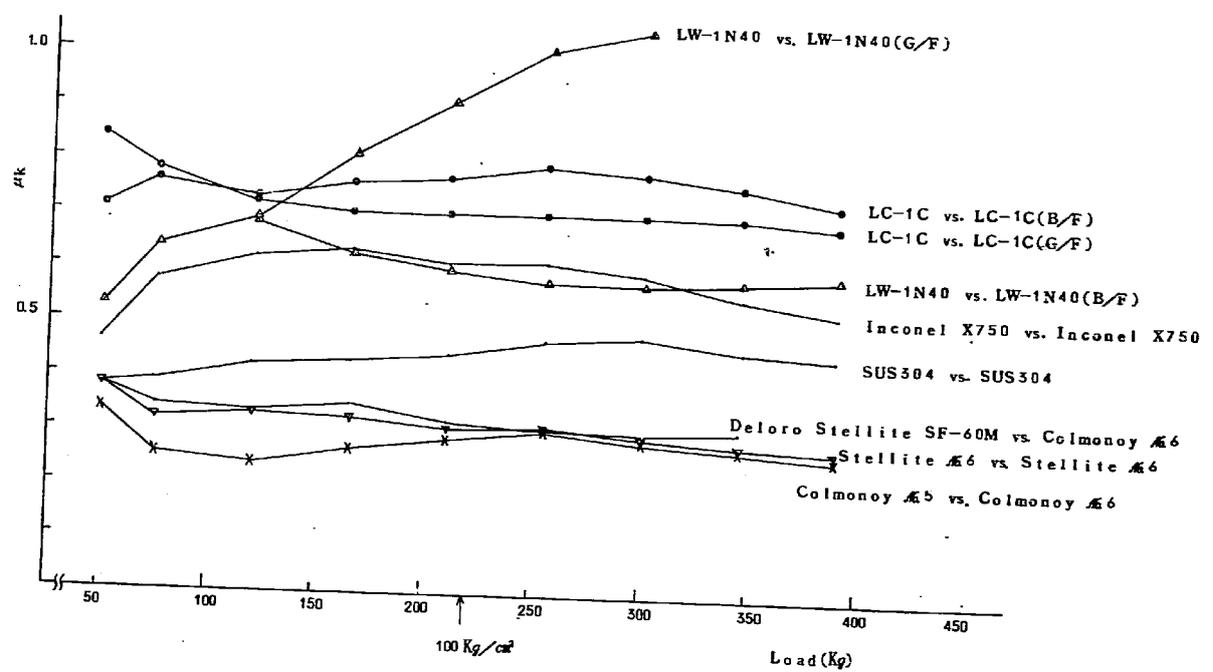


Fig. 6 μ_k vs. Load

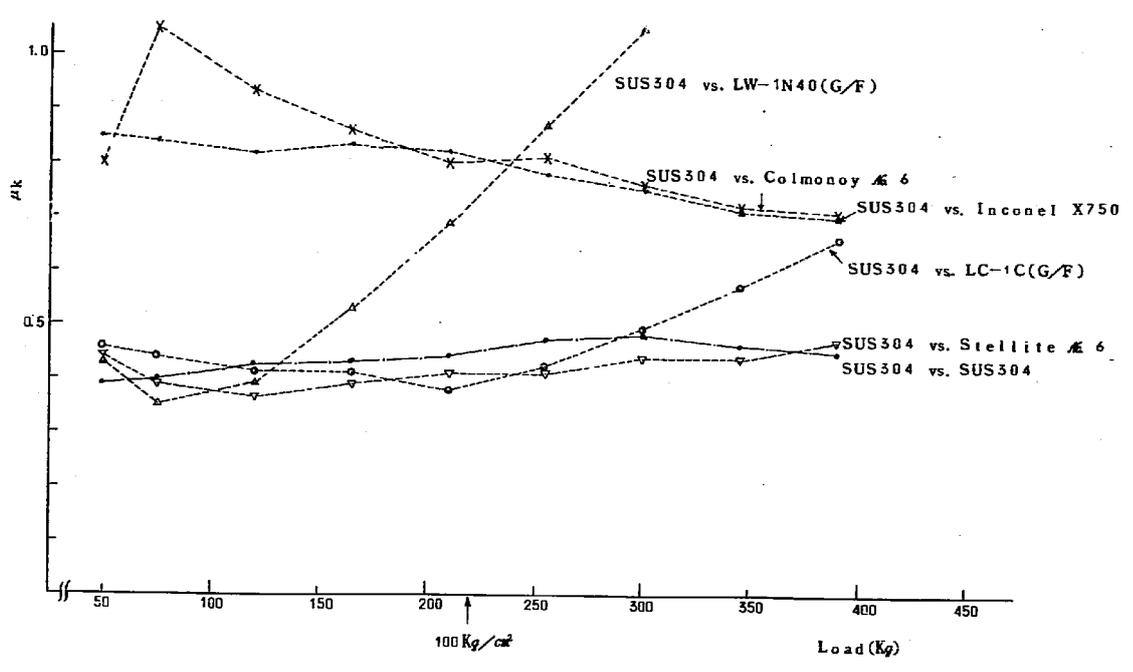


Fig. 7 μ_k vs. Load (A Pair Coupled with SUS304)

3.2 摩耗量について

各種材料組合せの固定制試験片について得られた摩耗深さ W_0 、摩耗体積 W_v および比摩耗量 W_s を表 8 に示す。摩耗量について前報⁽²⁾で報告すみの材料組合せのうち本報で金相試験結果を報告するものについての摩耗量も示した。また各組合せについての摺速と最終荷重も示した。

49年度前半に試験した組合せのうちコルモノイニル 5 vs. No. 6 と LW-1N40 (B/F) 同士の組合せでは摩耗量は測定感度以下であり表には「~0」と表示した。コルモノイニル 5 vs. No. 6 は μk も 0.5 と低く優れた耐摩耗性を有しているが LW-1N40 (B/F) 同士の μk が 0.6 と高くこの点が問題となる。インコネル X750 同士の試験は試験した材料組合せのうち最も高い W_0 ($4.87 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{Kg}$) を示し、また μk も 0.6 と高いので耐摩耗性に著しく劣ると言える。

W_a の最大測定感度は $3.4 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/\text{Kg}$ (摺速 3.6 cm/sec , 最終荷重 390 Kg の時) であった。

Table 8 Wear Rate

Material Combination	Rotor	Sliding Velocity (cm/sec)	Final Load (Kg)	ΔP (kg)	Wear Depth (mm)	Wear Volume (mm ³)	Specific Wear Rate, $W_s = W_v / (v \times \Delta P)$ (mm ² /Kg)	Stator (Stator)	
								W_0 (mm)	W_v (mm ³)
Colmonoy #6 / Deloro Stellite SF-60M	Colmonoy #6	3.6 (3.6)	345 (390)	1545 (1935)	~0 (6)	~0 (128)	~0 (206x10 ⁻⁹)	~0	~0
Colmonoy #5 / Colmonoy #6	Colmonoy #6	3.6	390	1935	~0	0.18	2.87x10 ⁻⁸	~0	~0
Stellite #6 / Inconel X750	Stellite #6	3.6	390	1935	4	30.53	4.87x10 ⁻⁷	4.87x10 ⁻⁷	4.87x10 ⁻⁷
LC-1C(G/F) / Inconel X750	LC-1C(G/F)	3.6 (3.6)	390 (120)	1935 (270)	11 (86)	1.68 (32.5)	2.68x10 ⁻⁶ (37.6x10 ⁻⁷)	2.68x10 ⁻⁶	2.68x10 ⁻⁶
LC-1C(B/F) / LC-1C(G/F)	LC-1C(B/F)	3.6 (0.7)	590 (390)	1935 (1935)	17 (3)	3.04 (0.41)	4.85x10 ⁻⁶ (3.36x10 ⁻⁶)	4.85x10 ⁻⁶	4.85x10 ⁻⁶
LW-1N40(G/F) / LW-1N40(B/F)	LW-1N40(G/F)	3.6	500	1200	6	0.13	3.34x10 ⁻⁸	3.34x10 ⁻⁸	3.34x10 ⁻⁸
LW-1N40(B/F) / LW-1N40(G/F)	LW-1N40(B/F)	3.6	590	1935	~0	~0	~0	~0	~0
SUS304 / SUS304	SUS304	3.6	590	1935	5	0.37	5.90x10 ⁻⁸	5.90x10 ⁻⁸	5.90x10 ⁻⁸
Deloro Stellite SF-60M / SUS304	Deloro Stellite SF-60M	3.6	390	1935	17	2.35	3.75x10 ⁻⁸	3.75x10 ⁻⁸	3.75x10 ⁻⁸
SUS304 / Colmonoy #6	Colmonoy #6	3.6	390	1935	23	6.36	1.01x10 ⁻⁷	1.01x10 ⁻⁷	1.01x10 ⁻⁷
SUS304 / Stellite #6	Stellite #6	3.6	390	1935	8	0.31	4.94x10 ⁻⁸	4.94x10 ⁻⁸	4.94x10 ⁻⁸
SUS304 / Inconel X750	Inconel X750	3.6	390	1935	20	1.73	2.76x10 ⁻⁸	2.76x10 ⁻⁸	2.76x10 ⁻⁸
SUS304 / LC-1C(G/F)	LC-1C(G/F)	3.6	390	1935	13	0.54	8.61x10 ⁻⁸	8.61x10 ⁻⁸	8.61x10 ⁻⁸
SUS304 / LC-1C(B/F)	LC-1C(B/F)	3.6	390	1935	10	0.99	1.58x10 ⁻⁸	1.58x10 ⁻⁸	1.58x10 ⁻⁸
SUS304 / LW-1N40(G/F)	LW-1N40(G/F)	3.6	500	1200	3.5	0.274	7.04x10 ⁻⁹	7.04x10 ⁻⁹	7.04x10 ⁻⁹

Tested for 15 minutes at each load step

0
1
2
3

PNC TN941 74-80

3.6 金相試験結果

前報⁽²⁾では主に摩擦係数と摩耗量について報告し、金相試験は時間を要するので省いたが、摺動面の状況、材料の変質、形状変化および成分変化および摩擦係数および摩耗量の大小と直接関係し、これらは材料の耐摩耗性、耐摩耗性を評価するため重要な因子であるので報告する。

金相試験では次のような観察・測定を行なった。即ち摺動表面の状況観察のため実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡観察、摺動面近傍の組織変化をしらべらるため光学顕微鏡観察、摺動面近傍の成分変化をしらべらるためのXMA面および線分析、そしてその他にかたき測定と表面あらさ測定である。

試験前後の表面あらさ変化を表9に示す。摺動部の表面あらさは大きな変動を示し、表の値は全体を代表するものではない。軟かい程表面あらさが大きくなくSUS304の表面あらさ変化が最も著しく、次にインコネルX750であった。LC-1C(B/F)とLW-1N40(B/F)は試験後表面あらさが低下した。

Table 9 Roughness

Material Combination		Roughness (μm)				Sliding Velocity (cm/sec)	Final Load (kg)
Stator	Rotor	As Received		After tested			
		Stator	Rotor	Stator	Rotor		
Stellite #6	Stellite #6	1	1	1.5	3.2	3.6	390
"	"	1	1	17	1	10.7	435
SUS 304	"	0.4	1	3	0.6	3.6	390
Colmonoy #6	DeJoro Stellite SF-60M	1	0.6	2	0.9	3.6	345
"	"	1	0.6	1.5	2.5	35.6	390
SUS 304	"	0.4	0.6	7	1	3.6	390
Colmonoy #6	Colmonoy #6	1	1	1.4	1.5	3.6	390
Inconel X750	Inconel X750	0.7	0.7	12	4	3.6	390
SUS 304	Inconel X750	0.4	0.7	6	3.5	3.6	390
LC-1C (G/F)	LC-1C(G/F)	0.4	0.4	4	6	3.6	390
"	"	0.4	0.4	8.5	2	35.6	120
SUS 304	"	0.4	0.4	6	5	3.6	390
LC-1C (B/F)	LC-1C(B/F)	11	11	7	3	0.7	390
"	"	11	11	5	8	3.6	390
SUS 304	"	0.4	11	10	9	3.6	390
LW-1N40 (G/F)	LW-1N40(G/F)	0.4	0.4	1	0.2	3.6	300
SUS 304	"	0.4	0.4	8	0.6	3.6	300
LW-1N40 (B/F)	LW-1N40(B/F)	14	14	10	9	3.6	390
SUS 304	LW-5	0.4	0.1	7.3	6	3.6	435
SUS 304	SUS 304	0.4	0.4	2.4	9	3.6	390

3.3.1 SUS304 同志について

原子炉構造材はそのほとんどがSUS304で構成されており特別な処理（特殊材の内盛等）をしないかぎり摺動部ではSUS304同志の組合せが問題となるので試験した。

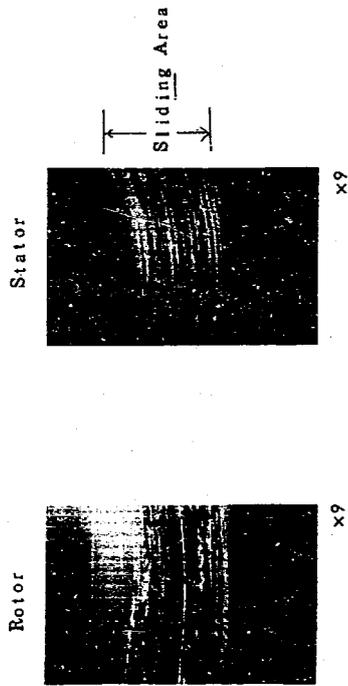
写真2に実体顕微鏡による試験片の外観写真を示す。固定側および回転側とも試験片摺動部の状況は非常に類似しており摺動方向に層状の模様が見られるが、これはSUS304が軟かいため塑性変形したため生じたと思われる。

写真3に試験前後の固定側試験片摺動面の走査型顕微鏡写真を示す。試験前後の表面が大きく異なるのがわかるが特に試験後の表面に摺動方向に層状模様が見られる。固定側試験片上に回転側試験片が摺動により凝着し移行した様子がわかる。SUS304同志の静摩擦係数 ($\mu_s = 0.6$) が試験した組合せのりち最も高く、また軟かい材料であるのに摩擦係数が予想外に少ない ($5.90 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$) 理由としてはSUS304の自己融着性が著しいことおよび摩擦粉として母材から破断した粉が再凝着しやすいことが考えられる。

一方、試験した組合せのうちでSUS304同志の動摩擦係数 ($\mu_k = 0.45$) が低いのはSUS304が軟かいため写真2および3に見られるように容易に塑性変形を生じ摩擦抵抗を減ずるからと思われる。

動摩擦係数が低く摩擦量が少ないことは耐摩耗性の見地よりSUS304同志の組合せがすぐれていることを示すのであるが写真2よりあきらかに、摺動により表面が著しくあれるのが問題である。また運動が断続する場合には起動時の動摩擦係数が高いことが問題となる。

LMECの報告⁽²⁾によると、負荷2Kg、摺速4cm/sec、Na温度316℃において μ_k は0.22~0.44、 W_s は約 $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$ である。我々の試験より温度が低いいため μ_k が低くなつたと考えられる。

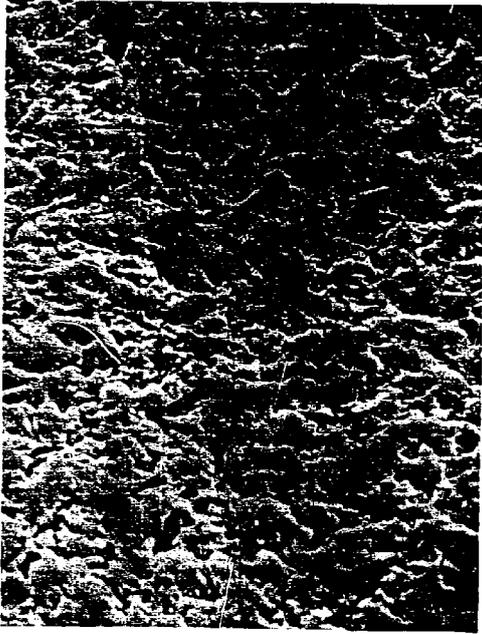


3.6cm/sec
max. 390Kg

Photo.2 Stereographs of SUS304 (vs. SUS304)

PNC TN941 74-80

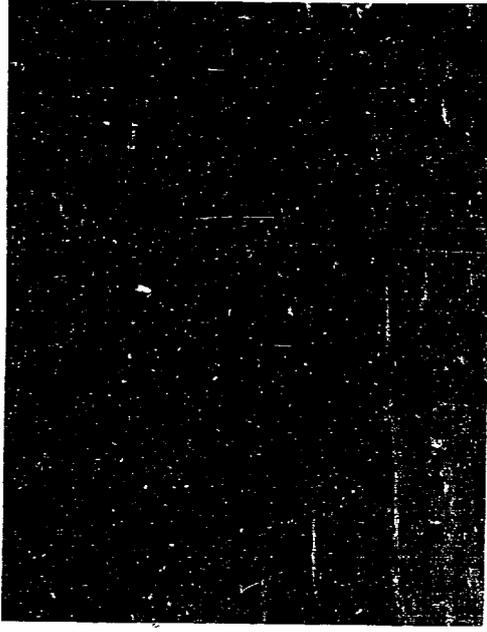
As Received



x1000

PNC TN941 74-80

Stator 3.6cm/sec max. 3.90kg



x1000



x5000



x5000

Photo.3 Scanning Electron Probe Microscopy of SUS304 (vs. SUS304)

3.3.2 デプロステラライト SF-60M vs. コルモノイニル 6 について

耐摩耗性および耐摩耗性は材料のかたさに依存するといわれており、一般に硬質合金の内蔵あるいは浸炭硬化等の表面処理を施し表面のかたさを増している。

デプロステラライト SF-60M および コルモノイニル 6 はビッカースかたさ (荷重 50 Kg) が約 700 であり SUS304 とくらべ約 3 倍である。これは、Ni の基地中にクロムカーバイドおよび鉄・クロムカーバイド結晶を析出させてかたさを増しているためである。(XMA 線分析を行なった結果 コルモノイニル 6 では Fe と Cr のピークが一致し、デプロステラライトでは Fe と Cr のピークが逆転していた。) (注) 公称ロッキングは 60 である。

写真 4 (A) および 5 (A) は各々デプロステラライト SF-60M と コルモノイニル 6 の試験前の光学顕微鏡組織であり、カーバイド結晶が析出しているのがわかる。

写真 6 および 7 に各々デプロステラライト SF-60M と コルモノイニル 6 の走査型電顕写真を示す。写真 6 (A) はデプロステラライト SF-60M の試験前の走査型電顕写真であり、粒状物はカーバイドであり、また写真 7 (A) は コルモノイニル 6 の試験前の走査型電顕写真を示すが、りつすらと右上から下部中央にかけ層状物が認められる。これは槽速 3.6 cm/sec でデプロステラライト SF-60M と組合せ試験した後の写真 7 (B) に一層はつきりと認められるが、試験によりカーバイドが残留し、まわりの軟い基地が摩耗したため、表面上に浮き上がったのである。こりして表面上のかたいカーバイドが摩耗の進行を阻止する役目は果たさずものと思われる。

写真 6 (B) と (C) および 7 (B) と (C) に組合せ試験されたデプロステラライト SF-60M および コルモノイニル 6 の試験後の走査型電顕写真を示す。槽速 3.6 cm/sec の場合は双方とも表面が著しくおれており、特に写真 7 (C) には割れがみられる。この割れは内部まで進行せず、摩耗により表面近傍内で破断され、薄片 (摩耗粉) が生成するためと思われ。写真 7 (C) × 1000 の左上の粒子は摩耗粉が再凝着したものである。

槽速 3.6 cm/sec の場合は摩耗表面はなめらかであり槽速 5.6 cm/sec の場合と著しく異なる。この時の動摩係数 μ_k (≈ 0.3) および静摩係数 (≈ 0.45) は試験した材料組合せのり最も低いもの 1 つであった。また静摩係数 $\mu_s \approx 0.45$ であった。

槽速 3.6 cm/sec の時は μ_k (≈ 0.15) は低くなったが摩耗量は 2×10^{-9} mm³/Kg となった。この増加は摺動面のあれからともわかる。

比較のためデプロステラライト SF-60M と SUS304 の組合せについても試験した。試験後のデプロステラライト SF-60M の走査型電顕写真を写真 6 (B) に、SUS304 のものを写真 8 に示した。また実体顕微鏡写真を写真 9 に示す。SUS304 が軟い (かたさ 1/3 弱) ため摺動方向に塑性流動しているのがわかる。デプロステラライト SF-60M 摺動面上

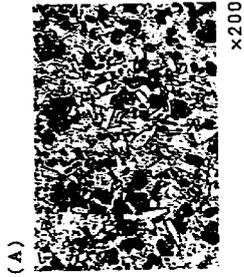
(注) 数値は英国デプロステラライト社発行資料より引用した。

のぬれ模様は相手材の SUS304 が凝着したためと思われる。この時の動摩係数 $\mu_k \approx 0.65$ 、静摩係数 $\mu_s \approx 0.3$ であり、また摩耗量は 3.8×10^{-9} mm³/Kg と大きかった。

写真 6 (D) には試験中に回転側試験片摺動面のエッジがかけて生じた破断面を示す。写真中央に孔があるがこれは SUS304 母材上にデプロステラライト SF-60M 粉末をアセチレンガス溶射した時内部にとり込まれた気孔である。破面は摺動による衝撃によりぜい性破壊したものと考えられる。これは回転側試験片摺動部両側のエッジだけに認められ、形状効果が大きく影響している。

写真 4 および 5 に摺動断面の光顕写真を示す。摺動による材料内部の組織変化は全くみられないので組織は非常に安定で強固なものであるのがわかる。写真 4 の黒点は気孔である。

この組合せを試験した例は外国にみられないので比較できないがデプロステラライト SF-60M の組織は コルモノイニル 5 とよく似ているので我々が行った コルモノイニル 5 と NL 6 の組合せの試験結果と比較すると、いずれも μ_k が 0.3、 μ_s が ≈ 0 でありよく似た耐摩耗性を示した。しかし μ_s は コルモノイニル 5 vs. NL 6 の組合せが 0.25 であり少し低くなっている。



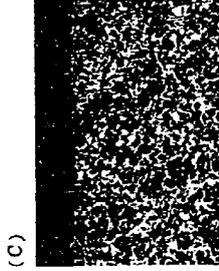
x200

As Received



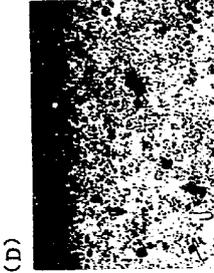
x100

3.6cm/sec
max. 3.90Kg vs. Colmonoy No. 6



x200

3.6cm/sec
max. 3.45Kg vs. Colmonoy No. 6

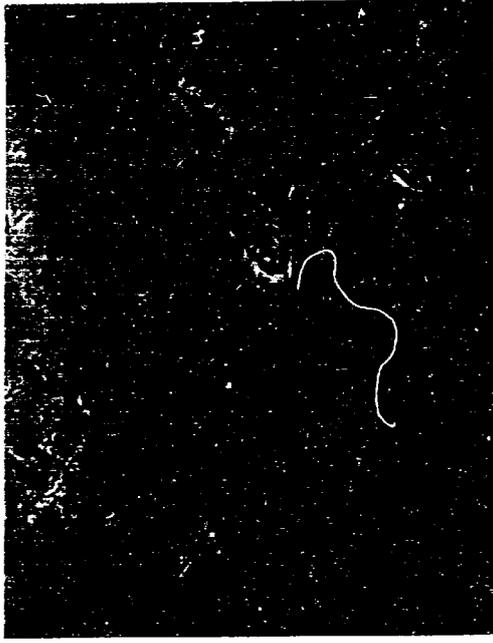


x100

3.6cm/sec
max. 3.90Kg vs. SUS 304

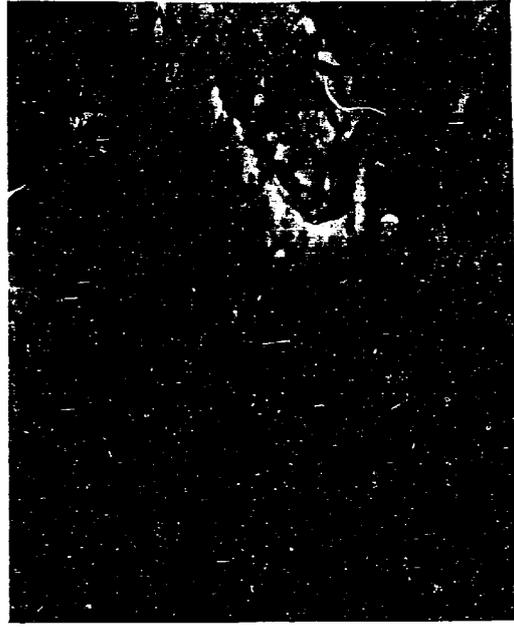
Photo. 4 Cross-Sectional Micrographs of Deloro Stellite SF-60M

(A)



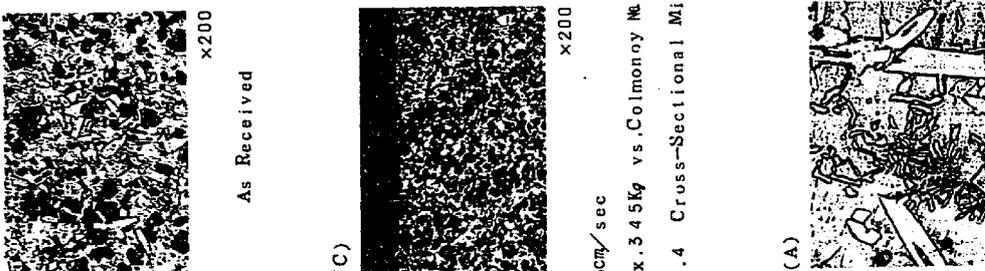
x1000

as Received



x5000

(A)



x400

As Received



x200

3.6cm/sec
max. 3.45Kg
vs. Deloro Stellite SF-60M

Photo. 5 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No. 6

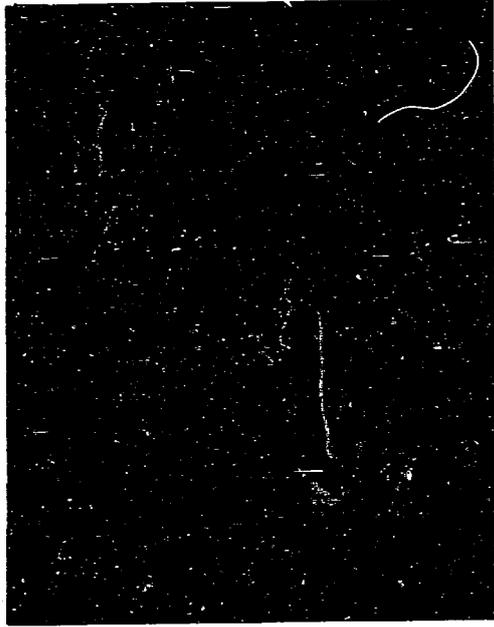
(B)



x1000

3.6cm/sec
 max. 3.45kg
 vs. Colmonoy No. 6

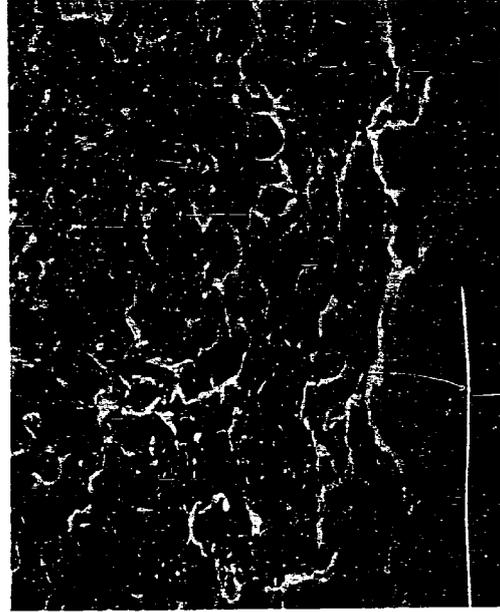
(C)



x1000

3.6cm/sec
 max. 3.45kg
 vs. Colmonoy No. 6

(D)

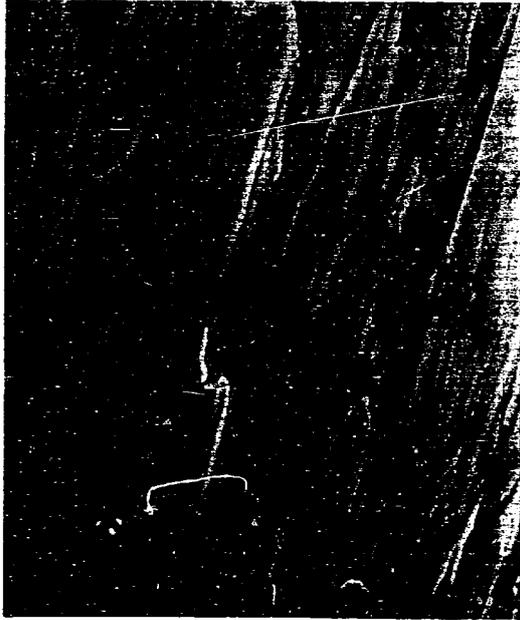


x1000

Fracture Surface
 Sliding Surface

PNC TN941 74-80

(E)



x1000

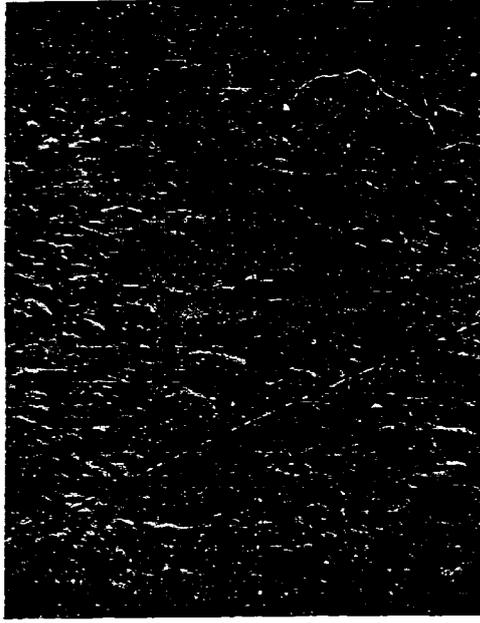


x3000

Photo. 6 Scanning Electron Probe Micrographs of Deloro Stellite
SF-60M

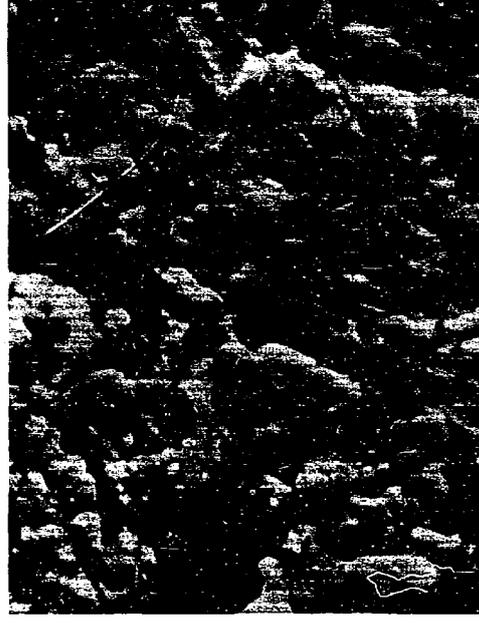
PNC TN941 74-80

(A)



x1000

as Received



x5000

PNC TN941 74-80

(B)



x1000

3.6cm/sec
max. 3.45Kv
vs. Deloro Stellite
SF-60M

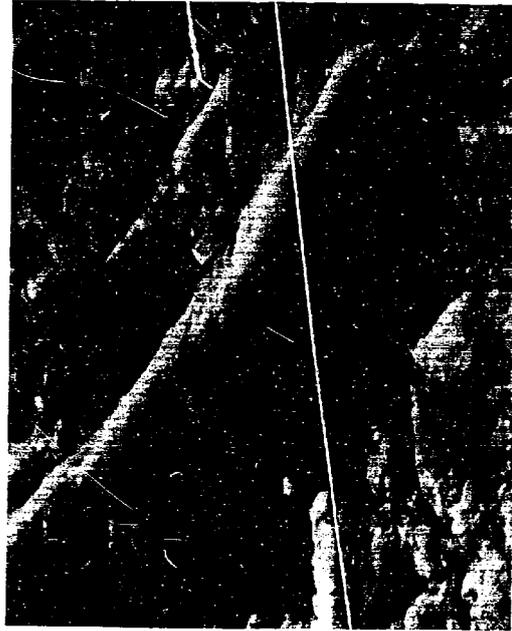
PNC TN941 74-80

(C)



x1000

3.5cm/sec
max. 3.90Kv
vs. Deloro Stellite
SF-60M

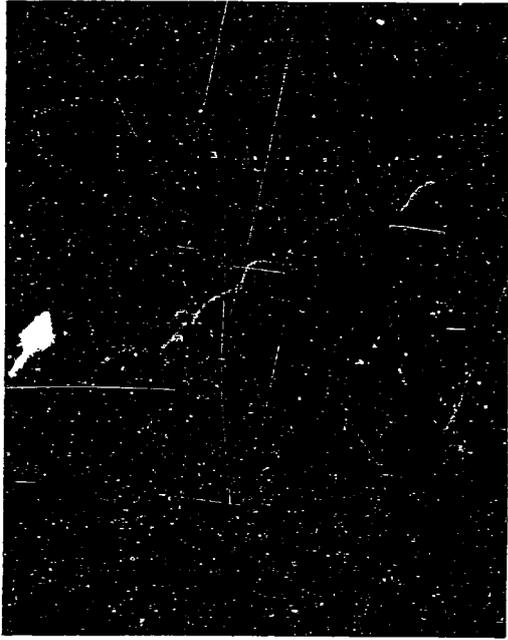


x5000



x5000

Photo.7 Scanning Electron Probe Micrographs of Deloro
Stellite SF-60M



x1000

3.6cm/sec
max. 3.9 0Kg
vs. Deloro Stellite
SF-60M



x5000

Photo.8 Scanning Electron Probe Micrographs of SUS304



(A)

Stator
Colmonoy No. 6
vs. Deloro Stellite SF-60M
3.6cm/sec, max. 3.4 5Kg

x7.5



(B)

Rotor
Deloro Stellite
SF-60M
vs. SUS304
3.6cm/sec
max. 3.9 0Kg

x7.5



x7.5

Stator
SUS304
vs. Deloro Stellite
SF-60M
3.6cm/sec
max. 3.9 0Kg

Photo.9 Stereographs of Colmonoy No. 6, Deloro Stellite SF-60M and SUS304

3.3.3 コルモノイニル5 vs. コルモノイニル6について

コルモノイニル5およびニル6は自溶性合金でNi-Cr基にB, Siが添加されている。このB, Siは加熱処理中に酸化されて B_2O_3 , SiO_2 となり他の合金酸化物をホウケイ酸ガラスとして溶融浮上させ、肉盛層中の酸化物を消失させ、無気孔な層をつくる効果がある。さらに自溶性合金は台金と相互拡散して境界域に合金層を形成して密着性が強化される。(前述のデプロスチライトSF-60Mも自溶性合金である。)

写真10(A)および(B)に各々コルモノイニル5およびニル6の光学顕微鏡組織を示す。コルモノイニル5にはNi-Crの固溶体樹脂状結晶が多く出ており、コルモノイニル6ではXMA線分析によるとFeとCrのピークが一致しておりFeとCrの複合カーバイドの共晶が多くなっている。ポックウェルCかたさはコルモノイニル5が45~50、コルモノイニル6は56~61である。

写真10(C)および(D)は組合せ試験したコルモノイニル5とニル6の揺動断面組織であるが、揺動断面傍の組織は全く変化しておらず安定である。写真上部は研磨によるエッジのだれを防止するための板材である。

この時の μk は0.3, μs は0.25といずれも低く安定していた。写真11に示すようにコルモノイニル表面は全く塑性流動がみられず(写真9(A)とよく似ている)摩耗量も殆んど0であり、耐摩耗、耐摩耗性に優れていると言える。

一方、コルモノイニル6とSUS304の組合せでは μk が0.8, μs が0.6といずれも高くまた比摩耗量も $1.01 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$ と著しく高かった。

LMEC⁰³の報告によると、コルモノイニル4とコルモノイニル5の組合せは、Na₂温度650℃、負荷2kg、摺速5cm/secにおいて μk が0.37~0.63, Ws が $2.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{kg}$ である。温度が高いことによる強度低下(かたさ値の低下)のため我々のデータより値が高くなったと考えられる。

(A)



x100

Colmonoy No. 5
As Received



x400

(B)



x100

Colmonoy No. 6
As Received

(C)



x100

Colmonoy No. 5
3.6cm/sec
vs. Colmonoy No. 6
max. 5.90Kg



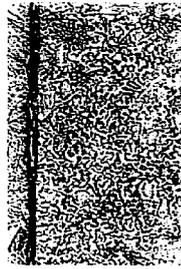
x200

(D)



x100

Colmonoy No. 6
3.6cm/sec
max. 5.90Kg
vs. Colmonoy No. 5



x200

Photo.10 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No. 5 and No. 6



Stator 3.6cm/sec
max. 3.90kg vs. Colmonoy No. 6

Photo. 11 Stereograph of Colmonoy No. 5

3.3.4 ステライト№6同志について

ステライトはCo, Cr, Wを主成分としたCo基合金で、かたさ値が高く、すぐれた耐摩耗性を示すので従来、バルブシート、ポンプのシールリング、カッター刃先摩耗部分等に使用されており原子力関係でも、ナトリウムバルブシート、機械式ポンプベアリングおよび制御棒駆動機構の摺動部品等のステレンス鋼上に肉盛処理されている。

写真12(A)および(B)に試験前のステライト№6および№1の光学顕微鏡組織を示す。ステライト№6ではCo-Cr-Wの固溶体樹晶状結晶が多く出ており、C量が多いステライト№1では共晶が多くついている。公称引張強さ^(注)はステライト№1が3.3Kg/mm²、ステライト№6が7.4Kg/mm²であり公称ロックウェルCかたさ^(注)は各々54と44である。

写真12(C)に試験後のステライト№6摺動断面の光顕組織を示すが、摺動による組織変化は全くみられず安定した材料であることがわかる。

写真13に試験後のステライト№6の実体顕微鏡写真を示す。ローターの中央にある穴はSUS304上にステライト№6を肉盛処理した時生じた気孔と思われる。

ステライト№6同志のμsおよびμkは各々0.4および0.3であり荷重変化に対する変動がみられず非常に安定していたが、写真13のステライト№6の摺動面が非常にきれいでほとんどみられないことと一致している。

IAEAの報告^(B)は、面圧130Kg/cm²、周速約0.3cm/sec、ナトリウム温度873°Kにおいてステライト№6同志のμkが0.4~0.5であるとして報告しており我々の効果よりμkが高いのであるが一般に認められる摺速が低い程μkが高くなる傾向を考えたれば同一結果とみなせる。摩耗率は2.87×10⁻⁹ mm³/kgであり、試験した組合せのうち最も低いものの1つであった。

以上のことからステライト№6同志はすぐれた耐摩耗性、耐摩耗性を有すると言える。しかし、ステライト合金については、次の点の問題であると言える。

Na中の固形物を補集するフィルターは放射能増加による交換作業不能により、原子炉に設置されないで摩耗によりNa相に移行した摩耗粉は炉心を通過する際放射化される。ステライト№6は60%以上のCoを含有しており、放射化により生ずる⁶⁰Coは長半減期でかつ高エネルギーのγ線を放出するので全誘導放射能に対する摩耗に起因する⁶⁰Coの評価をしなければならぬ。

ステライト№6とSUS304の組合せはμsが0.33、μkが0.4であった。またWsは5.0×10⁻⁹ mm³/kgと低かった。LMECの報告^(D)によると650°C、2kg、8cm/secにおいてμkは0.49~0.55であり我々の結果より高い。これはナトリウム温度の違いが大

(注) 数値は三菱金属工業(株)発行資料より引用した。

きな原因であると思われる。

写真14(A)と(B)にステライト№6 vs. SUS304 組合せの試験後表面の走査型顕微鏡写真を示す。摺動面はいずれも塑性流動を呈しており、ステライト№6 表面上にSUS304 が付着している。

これは写真15に示すXMA面分析より明かである。ステライト№6表面でFe, Ni が偏在し、かつ濃度分布が一致し、ステライト№6のベース元素であるCo 濃度がFe, Ni の多い個所で減少していることは相手材のSUS304 が付着したことを示す。

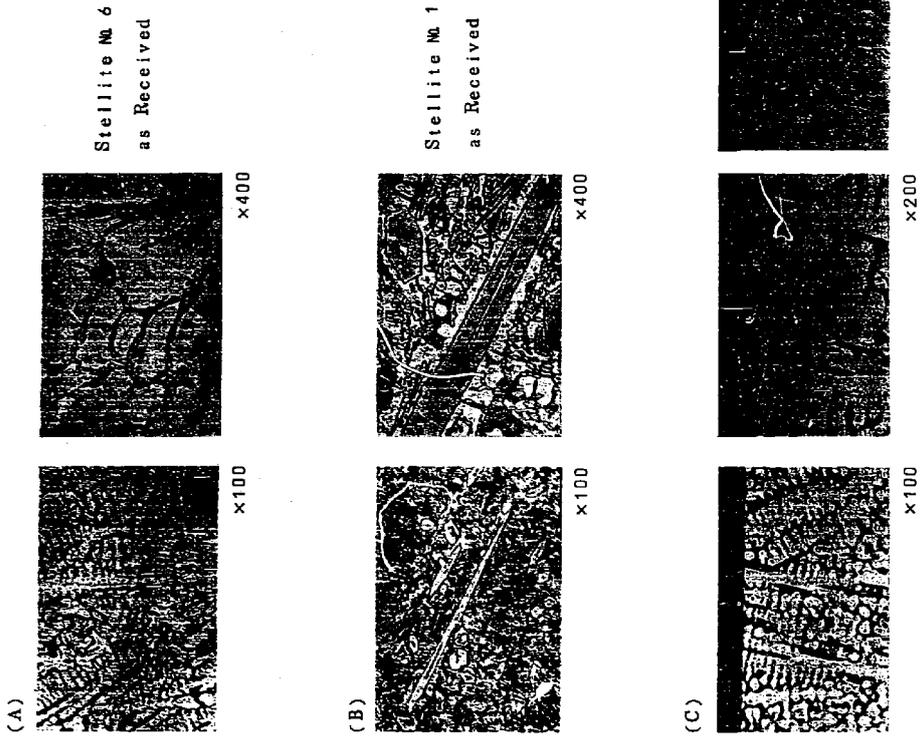
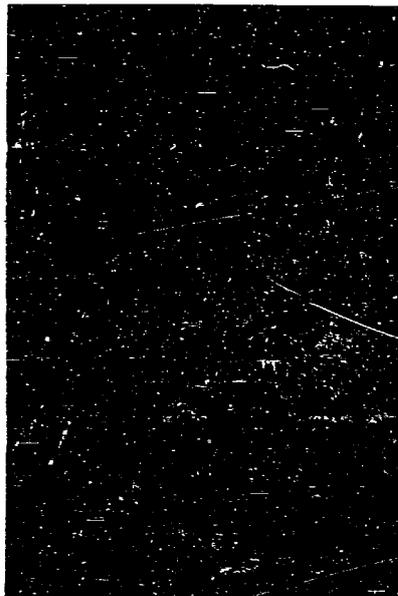


Photo.12 Cross-Sectional Micrographs of Stellite



Rotor
 3.6cm/sec
 max. 390kg

x57

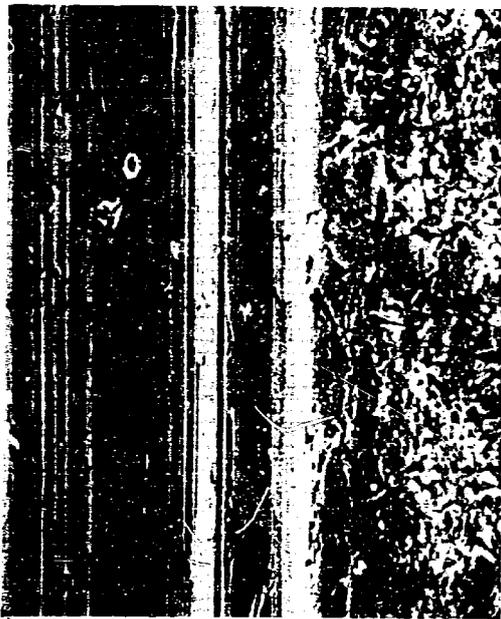


Stator

x57

Photo. 13 Stereographs of Stellite No. 6

(A)



Sliding Surface

Rotor
 Stellite No. 6
 vs. SUS304
 3.6cm/sec
 max. 390kg

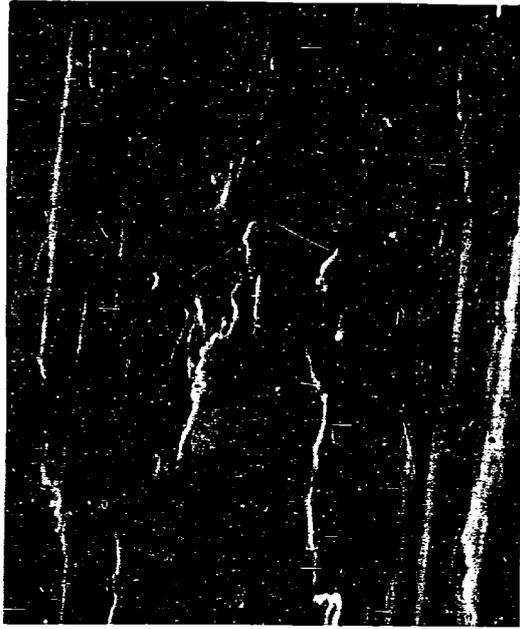
x1000



x3000

PNC TN941 74-80

(B)



x1000

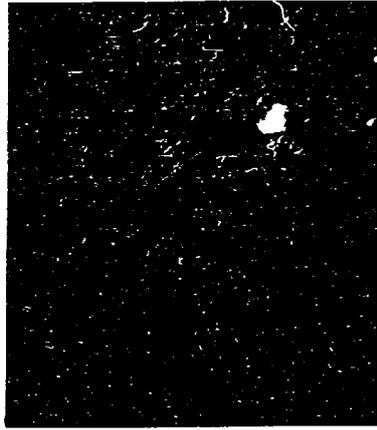
Stator
 SUS304
 vs. Stellite No. 6
 3.6cm/sec
 max. 3.9 DN/g



x5000

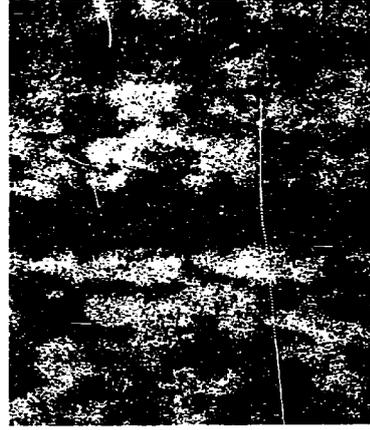
Photo.14 Scanning Electron Probe Micrographs of Stellite No. 6
 and SUS304

PNC TN941 74-80

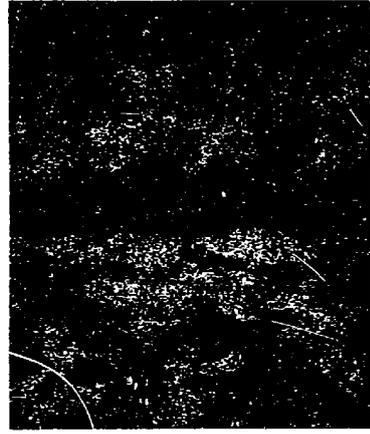


Surface to be analyzed

150µm



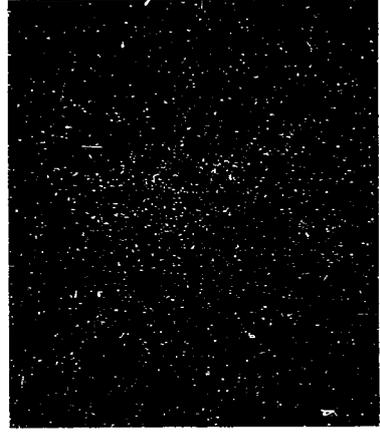
Fe



Ni



Co



C

Photo.15 Electron Probe Microanalysis of Stellite No. 6

3.3.5 インコネルX750同志

Ni 基にTi, Al を添加し時効処理により金属間化合物Ni₃(Ti, Al) を析出させ高強度を増している。公称引張強さ(注)は室温で114.6kg/mm²、649℃で91.4kg/mm²(SUS304 約3.4kg/mm²)、760℃で66.1kg/mm²(SUS304 約2.0kg/mm²)そして816℃で46.4kg/mm²(SUS304 1.4kg/mm²)である。また、公称1000時間クリープラプチャー強度(注)は649℃で47.8kg/mm²(SUS304 12.6kg/mm²)とステンレス鋼にくらべ強く強化されており、従来高温バネ材として使用されている。

写真16(A)と(B)に試験前の走査型顕微鏡写真および光学顕微鏡組織を示す。Ni₃(Ti, Al)と思われる黒点が粒内に分散しているのがわかる。写真16(C)は試験後のインコネルX750の摺動断面組織であるが表面に変質層がみられる。この変質層は摩耗後の両端にみられ、摺動面にて生成した摩耗粉がこの部分に凝着したものがまたは塑性流動によるものであると思われる。変質層厚さは10~40μm、この部分のHVは607であり試験前よりかたいた。写真17に摺動面の実体顕微鏡写真を示す。インコネルX750同志の場合は表面に著しい色むらが見られたがこれが変質層と一致すると考えられる。またインコネルX750同志での回転側試験片は試験により塑性変形し摺動面の幅が2mmから3mmに増加した。(写真17(A)参照) これはインコネルX750のマイクロピッカースかたさが359であり、ステライトあるいはコルモノイにくらべ軟かいためであろう。

相手材がSUS304の場合は色むらが見られなく、またSUS304表面は著しくあれいた。(写真17(C)参照)
インコネルX750同志ではμs が0.25、μk が0.6であり、比摩耗量は 4.87×10^{-7} mm²/kgと最も多かった。したがって耐摩耗性に分ると言える。

LMECレポート^(注)によると荷重3kg、摺速約4cm/sec、Na 温度650℃の時、μk が0.3~0.4、比摩耗量が 2.5×10^{-7} mm²/kgであり、我々の試験結果より低い値を呈しているが、これは荷重およびNa 温度が著しく異なる事とLMECの試験では試験片がピン列ディスク形状で我々のものと異なるため比較するのは難しい。

インコネルX750とSUS304の組合せではμs が0.35であり、μk は荷重とともに低下する傾向があり、面圧100kg/cm²では0.8であった。この荷重の増加とともにμk が下がる傾向はハンフォードでのインコネル718同志の報告^(注)でも確認されている。即ち、14kg/cm²でμk が1.5以上であるが、140kg/cm²で0.5以下がっている。

(注) インコネルX750同志の数値は日立金属(株)発行資料より、またSUS304およびSUS316 についての数値はASME規格曲線より引用した。

(A)

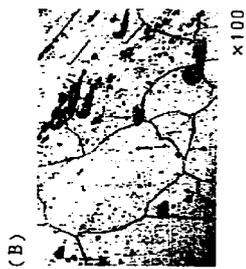


×1000

as Received



×5000



as Received

(B)



Stator
3.6cm/sec
max. 390Kg
vs. Inconel X750

x200

Photo.16 Scanning Electron Probe Micrographs and Cross-Sectional micrographs of Inconel x750

(A)



Rotor
3.6cm/sec
390Kg
vs. Inconel X750

x9

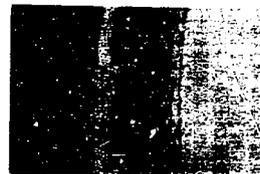
(B)



Stator
3.6cm/sec
390Kg
vs. Inconel X750

x4

(C)



Rotor
3.6cm/sec
390Kg
vs. SUS304

x9

(D)



Stator, SUS304
3.6cm/sec
390Kg
vs. Inconel X750

x9

Photo.17 Stereographs of Inconel X750

3.3.6 LC-1C同志について

カーバイド粉末の表面被覆法の一つとしてD-Gunと称する特殊な装置を使用するフレムブレティンク法⁽¹⁰⁾が最近注目されている。325メッシュのカーバイド粉末とバインダーはD-Gunの焼成により台金に約760m/secの速度で扁平状に密着させ、従来約150m/secであるのとくらべ2.5倍以上の運動エネルギーを有するので台金とより強く固く接着し、また粒子同志が原子接着する面積が増加して接着強度がすぐれ気孔率が1%以下(従来法は5~6%)になる。この気孔中にNaが侵入しやすく、アルコール中での超音波洗浄を長時間行なってもNaがしみだしてくる。

写真18にLC-1C(Cr₃C₂+15%NiCr)の光学顕微鏡組織を示す。LC-1C層は積層状の密な組織でCr₃C₂の結晶粒子は均一に分布しており従来法によるCr₃C₂結晶の粗大化および散在(偏析)がみられない。またLC-1Cが台金に広くい込み強固な接着を示している。有孔率0.8%, マイクロピッカースかたさ920~1187であった。写真のB/Fは表面をブラシ研磨したものを、G/Fは表面をグラインダ研磨したものを表わす。LC-1C同志の試験後の断面の光顕写真を写真18(B)~(D)に示す。速度3.6cm/secの時、最終荷重が120kgと他の約 $\frac{1}{2}$ (試験時間が $\frac{2}{3}$)であるにもかかわらずLC-1C層の半分が摩擦除去されており長時間の使用に耐えないことがわかる。この時の摩擦耗量は3.8x10⁻⁷mm²/kgで、速度3.6cm/secの時は約5x10⁻⁷mm²/kg(同じ速度で試験した他の材料組合せにくらべやや高い)であるから1桁速度が高くなると1桁比摩擦耗量が増大することになる。また、写真18(B)では摺動面近傍に割れがみられるが、他の写真にはみられない。他とくらべ最終荷重が $\frac{1}{3}$ であるにもかかわらず割れが発生したのは高い速度による衝撃のためであり、この割れが摩擦耗量増大の一因と考えられる。

速度3.6cm/secの時、G/F、B/Fとも動摩擦係数 μ_k は約0.75で米国のデータ⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾より高くなった。静摩擦係数 μ_s はG/Fのも(試験前の表面あらかさ0.4 μ m)が試験したすべての組合せのうち最も低く0.1であった。したがってLC-1Cは耐摩擦性に優れ、耐摩擦性に劣ると言える。 μ_s が低いのもかわらぬ μ_k が高い原因の1として考えられるのは、上述したようにLC-1C同志の組合せは摩擦耗量が多く(カーバイド粒子の接着力が相対する摺動界面の剪断力より弱い部分が多い)、生成したかたい摩擦粉が摺動面で摩擦抵抗を増加させる働きをするということである。

写真18(B)には比較のためSUS304と組合せ試験したLC-1C(G/F)の光顕写真を示す。摺動部ではLC-1C同志の写真とくらべて違いはみられない。 μ_s はG/Fのもものが0.5に上昇し、 μ_k はG/F、B/Fとも0.4に減少した。これはSUS304が自己融着性が

(注) 数値はユニオンカーバイド社発行資料より引用した。

強く、また摩擦により塑性流動しやすいためである。

XMA分析によるとLC-1C表面にFeのピークが認められ、Crと逆転していた。Feは相手材のSUS304の焼成のためであり、Feが少ない箇所ではLC-1C内部にNaが侵入しやすいため所々Naピークがあらわれた。

写真19に試験後のLC-1C摺動面の実体顕微鏡写真を示す。(A)および(B)はグラインダ研磨したLC-1C同志(表面あらかさ0.4 μ m)の写真であるが試験後非常に表面が荒れているのがわかる。特に(A)では摺動面の端の方に割れた形跡がみられる。(C)はブラシ研磨したLC-1C同志(表面あらかさ1.1 μ m)の写真であるがこの場合は摺動により突起部が破断され表面あらかさが低くなった。

(D)および(E)は相手材がSUS304の写真を示す。SUS304が軟かいため、LC-1C表面は試験前と同様同じ状態で摩擦してはいない。一方相手側のSUS304表面は写真20に示すように硬いLC-1Cのため塑性流動し表面が荒れているのがわかる。

写真21に走査型顕微鏡写真を示す。(A)および(B)は各々試験前のブラシ研磨とグラインダ研磨のLC-1C表面を示す。ブラシ研磨したものはコーティングしたままの表面に近い様相を示し、グラインダ研磨したものは表面がなめらかになっているのがわかる。(C)~(E)は試験後摺動面の写真である。LC-1C(B/F)同志の組合せでは摺動面は試験前とよく似ているがLC-1C(B/F) vs. SUS304の組合せではLC-1C表面にSUS304が付着しており、またSUS304表面が著しく荒れているのがわかる。写真(D)下部の縮状のものは洗浄後LC-1Cの気孔中に残留したNaの反応物であろう。

組合せ試験したLC-1C(B/F)とSUS304の摺動表面におけるFe、Ni、CrおよびCの濃度分布をXMA面分析により求め写真22と23に結果を示す。SUS304摺動面ではFe、Ni、およびCr濃度におよびCr濃度におよびFeとNiの傾向は全く一致しておりCrはこれらと逆転している。Crの多い部分は相手材のLC-1C(85%Cr₃C₂+15%NiCr)が付着したものである。LC-1C摺動面ではFeが広範囲にわたって強くあらわれ、相手材のSUS304が著しく付着しているのがわかる。CrとNiはFeと逆転し摺動面の一部ではLC-1Cが表面にあらわれているのがわかる。Cは濃度が低く、有意差は認められなかった。

ハンフォードの報告⁽¹²⁾(1972年日米高速炉会議資料)によるとLC-1C同志は700~900°Fでは μ_k が0.35~0.55、 μ_s (破断係数)が0.4~0.6であり、1000~1160°Fでは μ_k が0.4~0.75、 μ_s が0.8~3.06である。この場合酸素濃度は5ppm以下であるが摺動負荷、試験時間については記載されていない。いずれの温度でも表面あらかさが小さい程度 μ_k および μ_s は高くなる傾向が示されている。

我々の実験では μ_k は約0.7で表面あらかさの違いは明確でないが μ_s は0.1~0.4で表面

あらさが高い程 μs は高い傾向がある。この差について今後検討の必要がある。
 最近入手したHEDLのR.N.Johnsonの報告⁽¹⁾によると、米国ではHEDLを中心としてA.I., LMEECおよびWARDにおいて、クロムカーバイドベース材について摩耗、摩耗試験のみならず、 N_2 中腐食試験、熱サイクル試験および高速中性子照射試験を行ない総合的評価を下している。それによるとクロムカーバイド+15vol% NiCrのD-ガンコ-テイングが集合体のパット部材として最もすぐれたコーティング材料であるとしている。

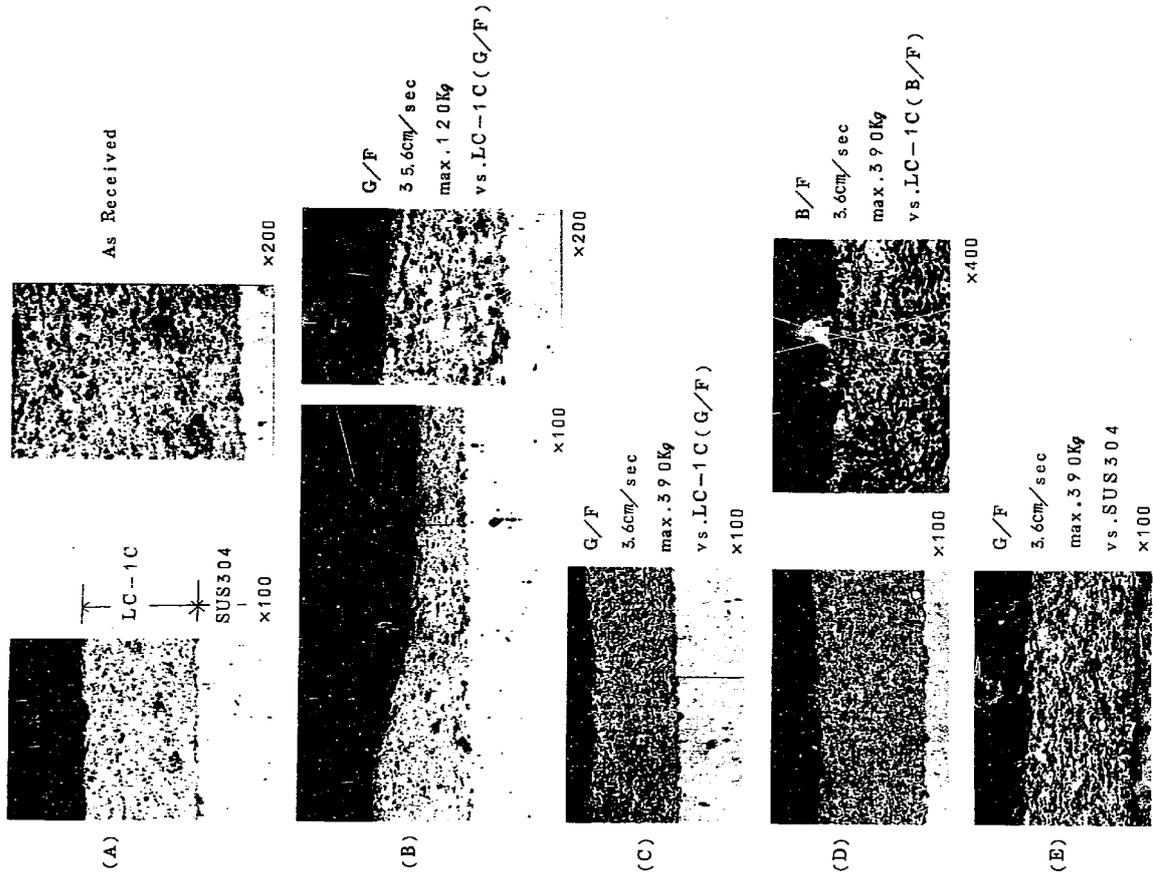


Photo.18 Cross-Sectional Micrographs of LC-1C

PNC TN941 74-80

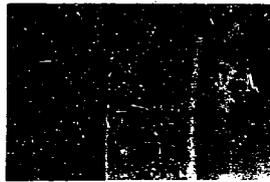
(A)



x22

G/F, Rotor
3.6cm/sec
max. 3.90kg
vs. LC-1C (G/F)

(B)



x9

G/F, Rotor
3.6cm/sec
max. 3.90kg
vs. LC-1C (G/F)

(C)



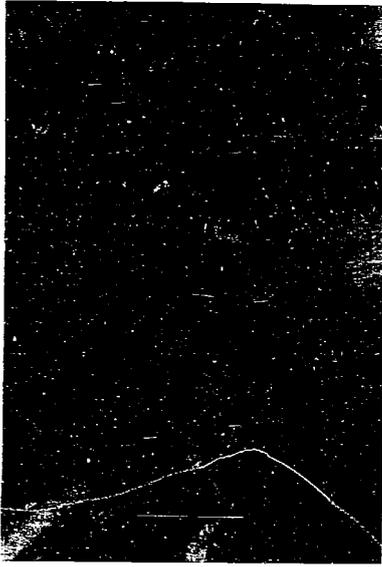
x9

B/F, Stator
3.6cm/sec
max. 3.90kg
vs. LC-1C (B/F)

-60-

PNC TN941 74-80

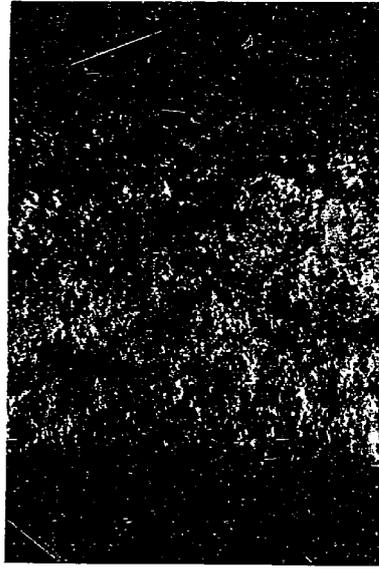
(D)



x25

G/F, Rotor
3.6cm/sec
max. 3.90kg
vs. SUS304

(E)



x30

B/F, Rotor
3.6cm/sec
max. 3.90kg
vs. SUS304

Photo. 19 Stereographs of LC-1C

-61-

PNC TN941 74-80



Stator
3.6cm/sec
max. 390Kg
vs. LC-1C (G/F)

x20

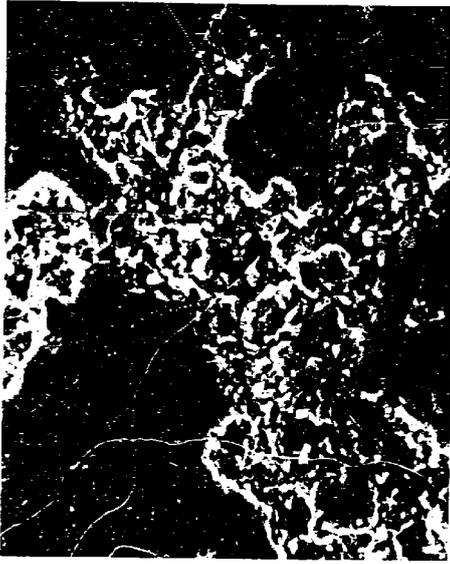


x50

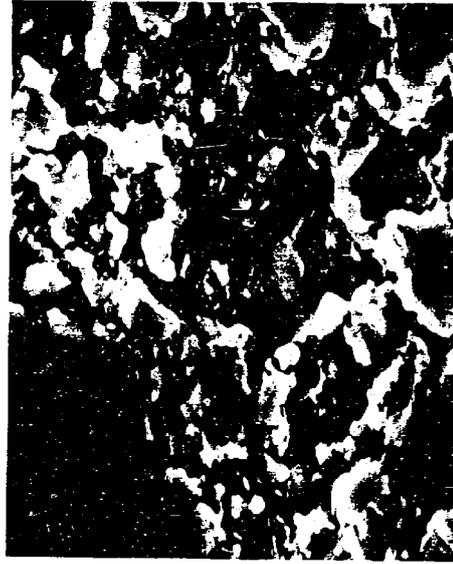
Photo.20 Stereographs of SUS304

PNC TN941 74-80

(A) LC-1C (B/F), as Received

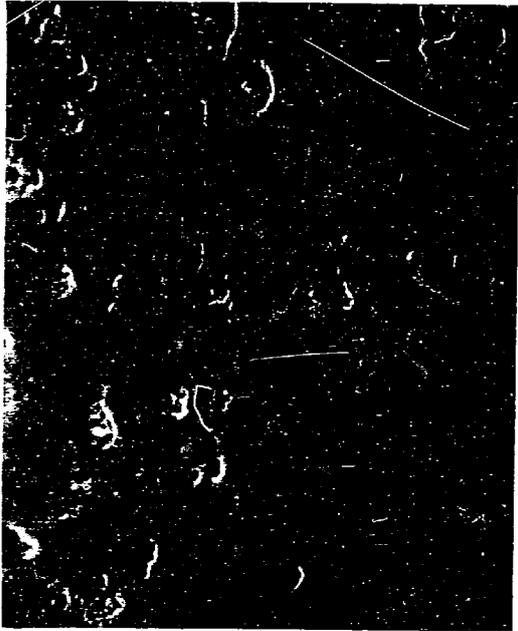


x1000



x5000

(B) LC-1C (G/F), as Received



x1000



x5000

LC-1C (B/F)
vs. LC-1C (B/F)
3.6cm/sec
max. 3.90Kv

(C)



x1000



x5000

PNC TN941 74-80

(D)



x1000

LC-1C(B/F)
 vs. SUS304
 3.6cm/sec
 max. 3.90kV



x5000

PNC TN941 74-80

(E)



x1000

SUS304
 vs. LC-1C(B/F)
 3.6cm/sec
 max. 3.90kV



x5000

Photo. 21 Scanning Electron Probe Micrographs of LC-1C and SUS304

PNC TN941 74-80

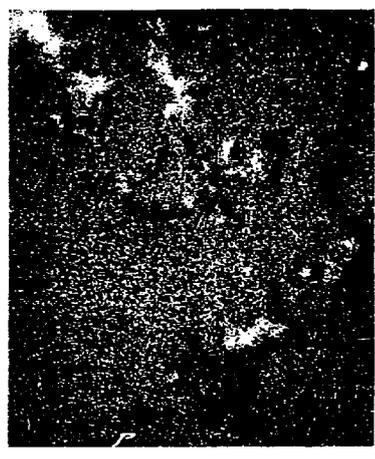


150µm

Surface to be Analyzed



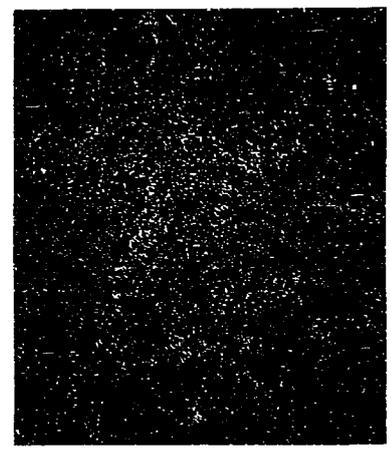
Fe



Ni



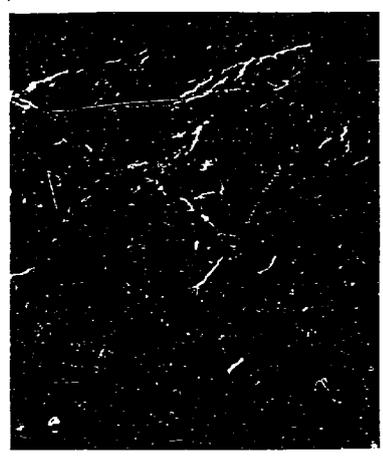
Cr



C

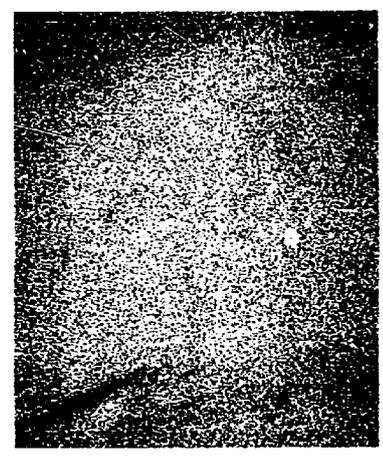
Photo.23 Electron Probe Microanalysis of LC-1C(B/F) (vs.SUS304)

PNC TN941 74-80

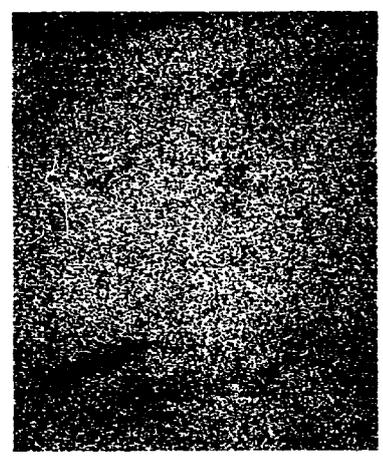


150µm

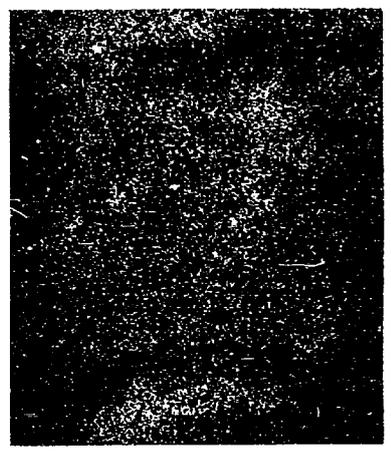
Surface to be Analyzed



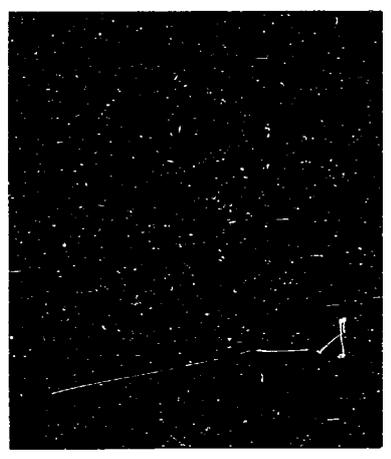
Fe



Ni



Cr



C

Photo.22 Electron Probe Microanalysis of SUS304 (vs.LC-1C(B/F))

3.3.7 LW-1N40 同志について

D-Gun により 3.25 ミリシスの WC 粉末を SUS304 上に播射した。肉盛部の厚み約 200 μm 、成分 85%WC+15%Co、マイクロピッカースかたさ 974~1150 として有孔率 0.75% である。また、公称引張強さ^(注) 70.3 kg/mm²、台金との公称接着力^(注) 17.5 kg/mm²、そして公称弾性率^(注) $2.2 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ である。

写真 2.4 (A) に試験前の肉盛部断面の光学顕微鏡写真を示す。台金との接着力が大きいといわれているのがわかるが表面近傍に割れが見られる。(グラインダー研摩時に割れが発生したものを) 写真 2.4 (B)~(D) に試験後の摺動断面の光顕写真を示す。グラインダー研摩の LW-1N40 は相手材が LW-1N40 の場合のみならず SUS304 の場合も摺動面近傍に割れがみられる。

LW-1N40 (G/F) 同志の μ_k は荷重の増加とともに増加する傾向を示し、面圧 100 kg/cm² の時 μ_k は 0.9 であった。相手材が SUS304 の場合も同様な傾向があり面圧 100 kg/cm² の時 μ_k は 0.7 であった。これは荷重の増加とともに割れが進行し、それに伴い摺動面があらためたと考えられる。 W_s は各々 $3 \times 10^9 \text{ mm}^2/\text{kg}$ および $7 \times 10^9 \text{ mm}^2/\text{kg}$ であった。また LW-1N40 (G/F) 同志の μ_s は 0.2~0.4 の間を変動し相手材が SUS304 の場合は 0.5 であった。

一方、ブラシ研摩した LW-1N40 同志では写真 2.4 (E) に示すように全く割れが見られない。 μ_k は 0.6 でありグラインダー研摩材の場合のよりな荷重増加による μ_k の上昇は全くなく安定していた。 W_s は検出器の感度以下で「~0」であった。 μ_s も同様に安定しており値は 0.2 と低かった。

研摩法により著しく μ_k および μ_s が異なる原因としては、グラインダー研摩による衝撃により表面近傍に割れが生じ(写真 2.2 (A), $\times 200$ 参照)、これが摺動により成長して μ_k および μ_s が不安定となる、一方ブラシ研摩とその後の摺動では割れが全く生じないので μ_k および μ_s が安定しているということが考えられる。

写真 2.5 に LW-1N40 (B/F) 同志の実体顕微鏡写真を示す。粗い表面の突起部(表面あざ 1.4 μm) だけが摺動しており谷部まで摩耗していないのがわかる。このことは W_s が「~0」であることを証明する。

写真 2.6 (A) と (B) に試験前の LW-1N40 の走査型電顕写真を示す。(A) は D-Gun によるコーティング後ブラッシングしただけの表面で非常にきれいである、一方 (B) はグラインダー研摩した表面でどこか粗さが少なくなっている。(A) の表面上の粒子は素材粒子であると考えられる。(C) に試験後の LW-1N40 (G/F) 摺動面上に割れのため顕微鏡した状況がみられる。

(注) 数値はユニオンカーバイド社発行資料より引用した。

SUS304 と組合せ試験した LW-1N40 (G/F) 表面の Fe, Ni, Co, W および C 濃度分布を XMA 面分析により求め結果を写真 2.7 に示す。Fe と Ni の分布が一致しており、Co と W の分布がそれらとは逆転しているのがわかる。Fe と Ni の存在は相手材の SUS304 が LW-1N40 上に移行したことを示す。C は測定感度が低く有意差は認められなかった。また線分析によると所々 Na のピークがあらわれたがこれは LW-1N40 の気孔内に残留した Na である。

LMEC の報告^(注) によれば、K-95 (91%WC~9%Co) 同志の組合せは、Na 温度 650°C、播速約 10cm/sec、負荷約 2.5 kg において μ_k が 0.25~0.46 と変動し W_s は約 $2 \times 10^9 \text{ mm}^2/\text{kg}$ と低い。LW-1N40 同志の場合とは W_s がほぼ等しいが μ_k が異なっている。これは K-95 材が焼結材であり LW-1N40 とは製造方法が違ふ事も 1 つの原因となっていると考えられる。

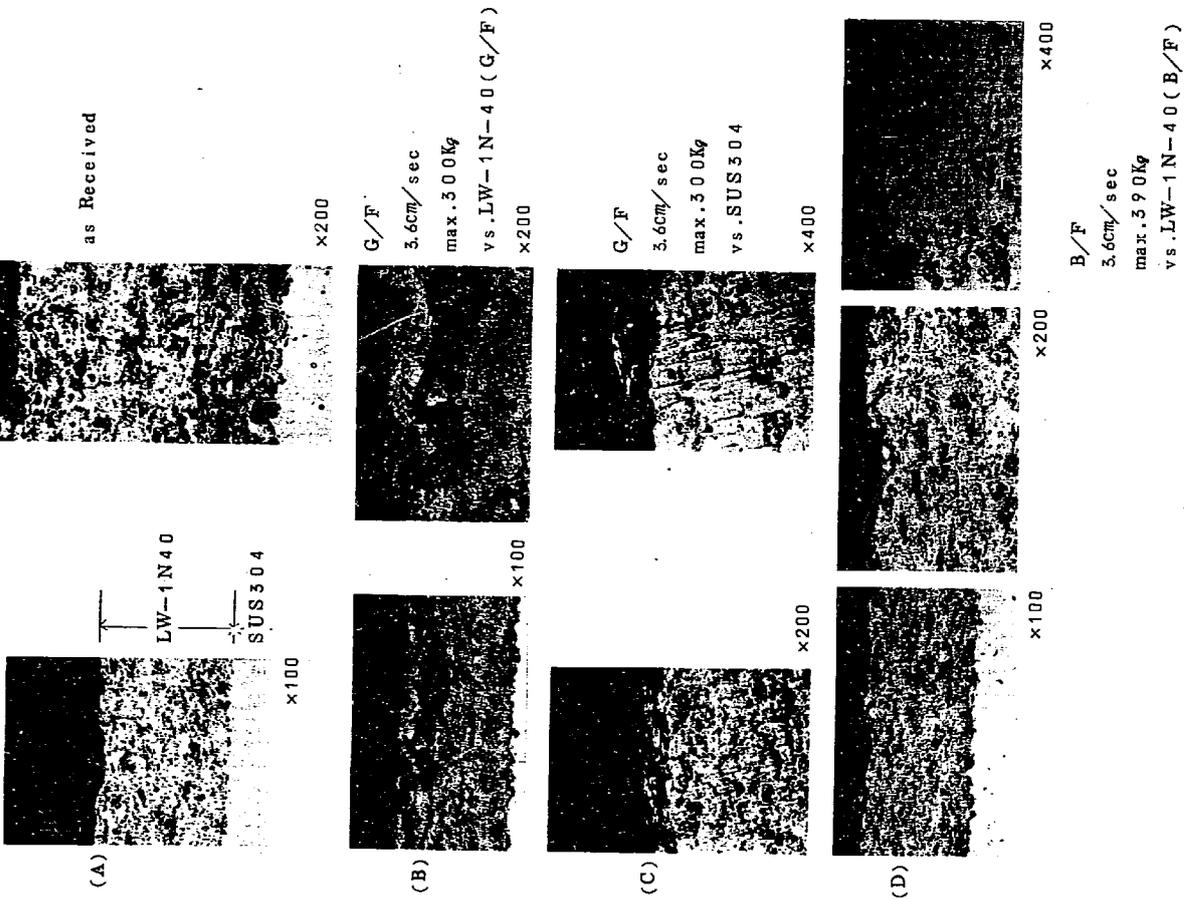
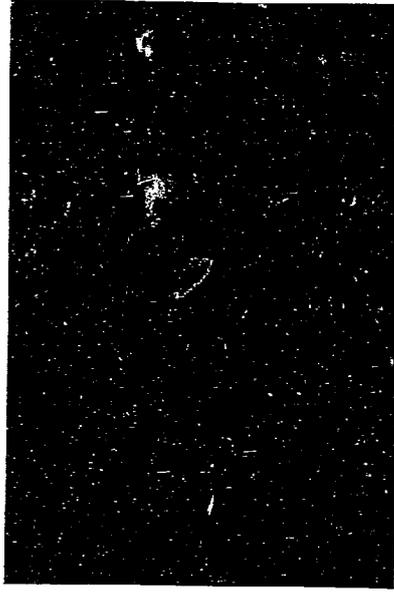


Photo.24 Cross-Sectional Micrographs of LW-1N-40



3.6cm/sec
max. 3.90Kg

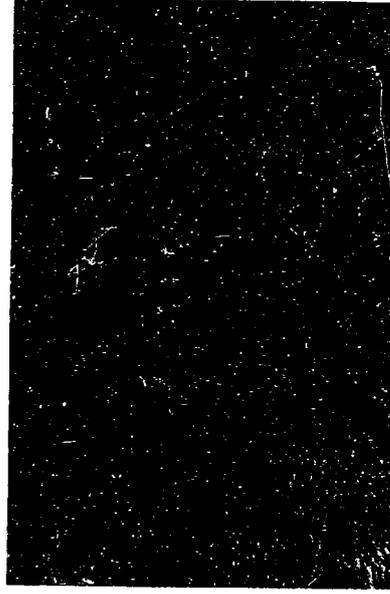
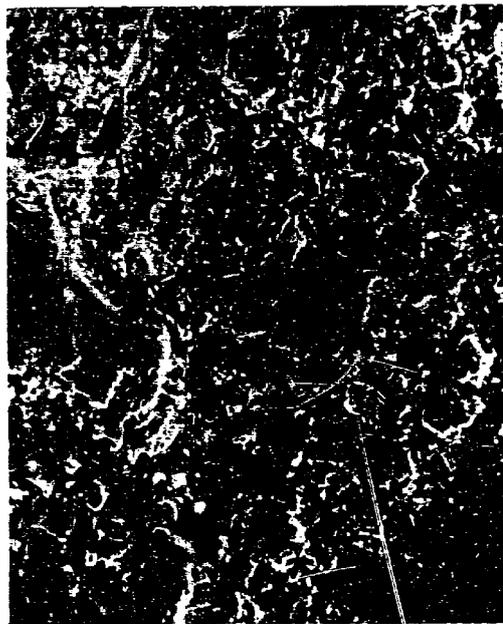


Photo.25 Stereographs of LW-1N40 (B/F) (vs. LW-1N40 (B/F))

PNC TN941 74-80

(A) B/F, as Received



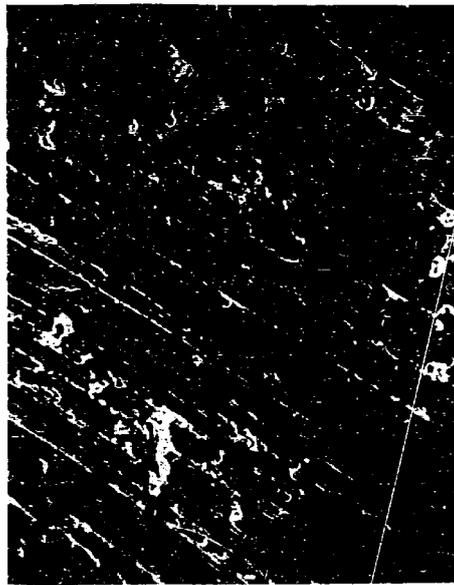
x1000



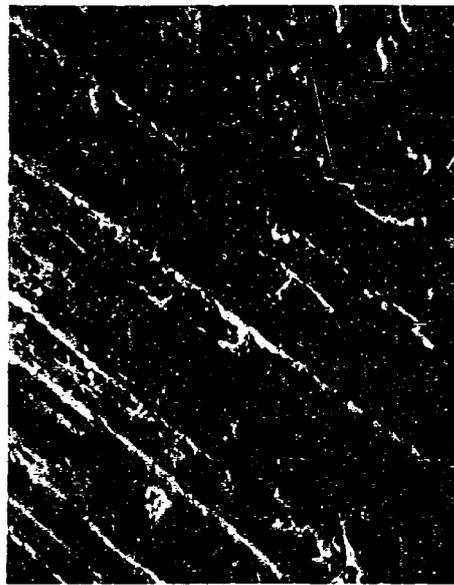
x5000

PNC TN941 74-80

(B) G/F, as Received



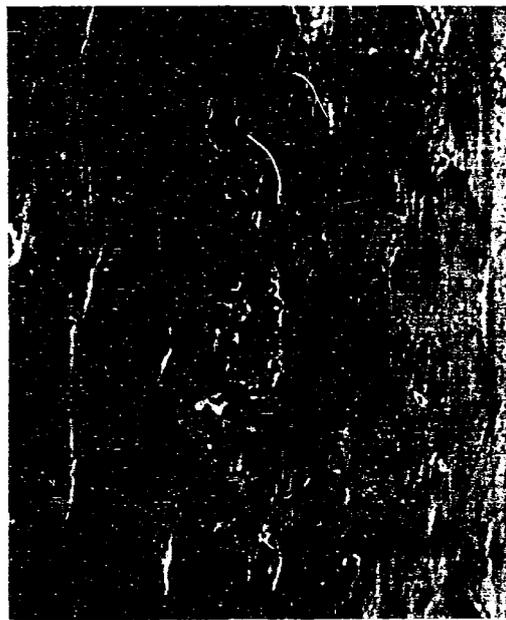
x1000



x5000

PNC TN941 74-80

(C)



x1000

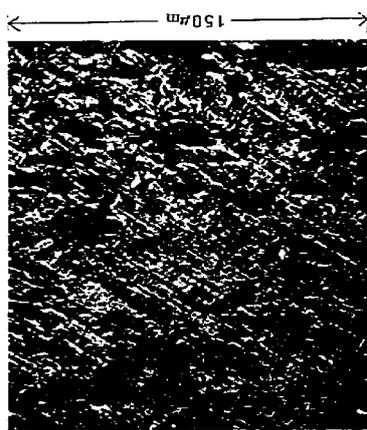
G/F, Rotor
3.6cm/sec
max. 5.0 Okg
vs. SUS304



x3000

Photo.26 Scanning Electron Probe Micrographs of LW-1N40

PNC TN941 74-80



150µm

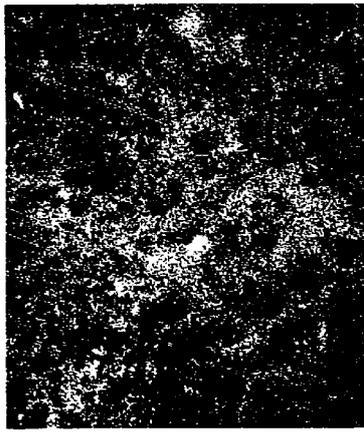
Surface to be Analyzed



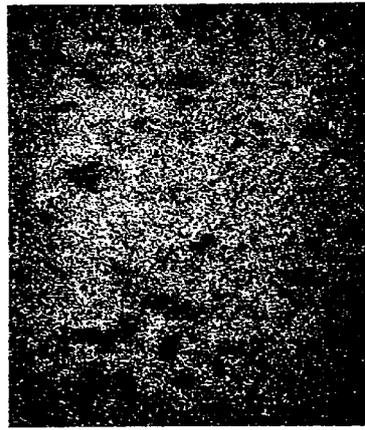
Fe



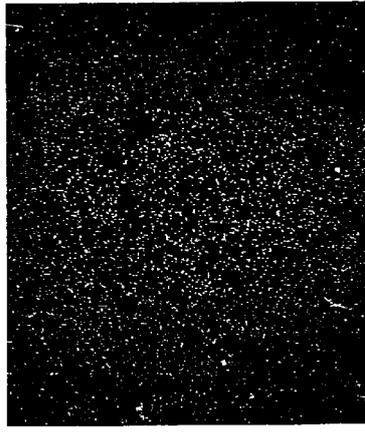
Ni



Co



W



C

Photo.27 Electron Probe Microanalysis of LW-1N40(G/F) (vs. SUS304)

3.3.8 LW-5 について

D-Gun により SUS304 上に 3.25 メッシュのカーバイド粉末を 200 μm 厚に密射したもので成分は 2.5%WC+5%Ni+W-Cr カーバイドからなっている。

写真 2.8(A) に試験前の LW-5 肉盛部断面の光学顕微鏡写真を示す。台金と LW-5 との公称接着力 (σ) 1.4 Kg/mm²、LW-5 の公称引張強さ (σ_B) 28.1 Kg/mm²、有孔度 0.8%、そしてマイクログピッカースかたさ 825~1378 である。

写真 2.8(B) は SUS304 と組合せ試験した摺動面近傍の断面光学写真である。LW-5 表面に変質層がみられるがこれは試験中に肉盛層全体におよぶ変形が起つたためである。動摩擦係数 μ_k が面圧 100 Kg/cm² (荷重 220 Kg) あたりで 0.7 から 0.55 まで急に変化して、そこで変形が起つたと考えられる。

写真 2.9 に試験後の LW-5 および SUS304 表面の実体顕微鏡写真を示す。LW-5 の摺動面の傾が変形により 2.5 mm に増加しているのがわかる。また相手材の SUS304 の表面あらかさが 7.5 μm (試験前は 0.4 μm) に増加した。これは変形によりあらかなくなつたかたいた LW-5 表面により軟かい SUS304 が研削されたためである。

肉盛層全体におよぶ変形は荷重による圧縮と摺動による剪断および衝撃が組合さつて起つたと考えられる。LW-5 の圧縮強さおよび剪断強さが未知であるのではつきりしたことは言えないが公称引張強さ (σ_B) が 28.1 Kg/mm² (SUS304 50 Kg/mm²、LW-1N40 70.3 Kg/mm²)、公称弾性率が 1.2×10^5 Kg/mm² (SUS304 および LW-1N40 2.2×10^5 Kg/mm²) と他の材料とくらべて非常に低いことが一因と考えられる。

SUS304 が融着しやすいため μ_s (=0.58) が高くなつており、LW-5 同志では他のカーバイド同志のよりに値が低くなることを予想されるが、かたいもの同志では一層上述のよりに変形しやすくなると考え試験しなかつた。

(注) 数値はユニオンカーバイド社発行資料より引用した。

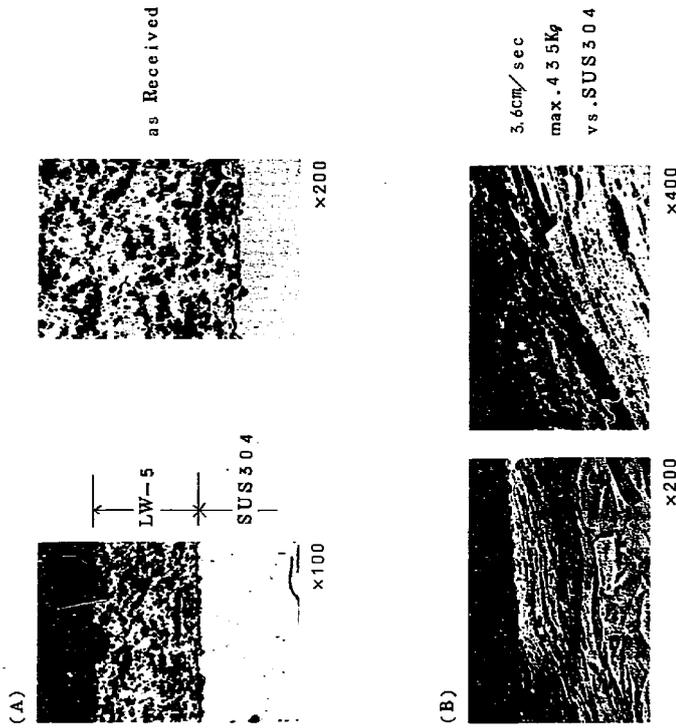


Photo. 28 Cross-Sectional Micrographs of LW-5

4 結 論

Rotor, LW-5
3.6cm/sec
max. 4.55kg
vs. SUS304



x12

Stator, SUS304
3.6cm/sec
max. 4.55kg
vs. LW-5



x30

Photo.29 Stereographs of LW-5 and SUS304

以上行なったナトリウム中摩擦・摩耗試験（前報にて報告済みのものを含む）および摺動面の金相試験の結果、次のことがわかった。

- (1) LC-1C同志およびLW-1N40同志の組合せは最も高い μk (0.6以上)を示したがLW-1N40 (G/F)同志を除き摺動面近傍に尖形および組織変化等が見られなかった。LW-1N40 (G/F)はコーティング後の表面研摩により割れが生じたため μs および μk の変動が大きくなった。
- (2) ステライトNo.6同志、コルモノイNo.5 vs. No.6およびテロロステライトSF-60M vs. コルモノイNo.6の組合せは最も低い μk (≈ 0.3) および W_s (~ 0)を示し、また摺動面近傍の組織変化等が全く見られず安定していた。
- (3) SUS304は μs を高くする傾向がありSUS304同志が最も高い μs ($= 0.6$)を示した。また塑性変形しやすく摺動面が著しくあれていた。
- (4) インコネルX750およびLW-5は摩耗試験中に塑性変形し、摺動面近傍に著しい組織変化が見られた。またインコネルX750同志は最も高い W_s を示した。

5 あとがき

前報⁽²⁾にて摩擦係数および摩耗量について報告した試験片の金相試験結果と49年度前半に
 摩耗試験した材料組合せについての摩擦係数、摩耗量および金相試験結果について報告した。
 450℃Na中におけるこれら一連の短時間材料選定試験によると、材料組合せにより耐摩耗性
 および耐摩耗性が大きく変化することがわかった。

原子炉機器摺動部材(特に炉心材)が備えていなければならない条件として次のもの⁽³⁾が考
 えられる。

- (1) より高温 Na 中で長時間優れた摩擦・摩耗特性を示すこと。
 (米國 F F T F 設計基準では $2.30 \text{ }^\circ\text{C}$ で $\mu \leq 0.4$, $6.25 \text{ }^\circ\text{C}$ で $\mu < 0.9$)
 - (2) 著しい Na 腐食をうけないこと。
 (米國 F F T F 設計基準ではコーティング厚さの $1/2$ 以下)
 - (3) 合金との強固な接着性があること
 - (4) 原子炉スクラムによる熱サイクル(1分間に最大200℃の温度差)により割れ等を生じ
 ないこと
 - (5) 高速中性子による割れ等の照射損傷をうけないこと。
 (特に炉心材)
 - (6) 好ましくない放射性物質(⁶⁰Co等)が生成されないこと。
 - (7) 要求される寸法公差内で肉盛できること。
 - (8) 肉盛により合金の性質が損なわれないこと。
- したがって今後さらに長時間の摩耗試験(時間, Na 純度, 温度, 荷重等がパラメータ)を
 行なう必要がある。さらに Na 共存性試験, 熱サイクル試験, 照射試験, 接着力試験および金
 相試験等について総合的に評価し各摺動モードに適合した摺動部材を選定する必要がある。

6 文 献

- (1) 加納茂機, 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」, SN941
 73-17, 英訳済
- (2) 加納茂機, 他, 「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・
 摩耗」, SN941 74-12, 英訳済
- (3) W.A.Glaeser, "Survey and Analysis of Materials, Wear and Friction
 in Sodium", BMI-1907, June, 1971.
- (4) M.A.P.I., 「内部炉心拘束機構単体試験」, SJ206 73-14
- (5) 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」, SJ201 70-12
- (6) 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」, SJ202
 73-23
- (7) 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
- (8) E.Wild, et al., "Friction behavior of Inconel 718 and Stellite 6 as
 Fuel Assembly Duct Pad Material", IAEA/SM-173/W-18
- (9) W.A.Glaeser, "Wear and Friction Characteristics of Structural Materials
 in Liquid Sodium", Reactor Technology, Vol.15, No.1, 1972.
- (10) K.Natesan, et al., "Effect of Sodium on Mechanical Properties and
 Friction-Wear Behavior of LMFBFR Materials", Reactor Technology, Vol.
 15, No.4, 1972-1973.
- (11) R.N.Johnson, et al., "Wear Resistant Coatings for Reactor Components
 in Liquid Sodium Environments", J.Vac.Sci.Technol., Vol.11, No.4, 1974
- (12) N.J.Hoffman, et al., "Friction and Wear Screening Tests of Materials
 in Sodium", LMEC-70-10.
- (13) R.N.Johnson, "FFTF Friction and Wear Programs".
 1972年4月 日米高速炉会議資料, HEDL-6.