

# 高速炉材料のナトリウム中摺耗試験(VI)

## 長時間摺動試験結果

1978年6月

動力炉・核燃料開発事業団

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 (VI)

### 長時間摺動試験結果

長谷川 成生 \*  
加納 茂機 \*  
中山 紘一 \*  
小坪 亨 \*  
袖原 俊一 \*  
中筋 孝 \*

### 要旨

ナトリウム冷却高速増殖炉機器摺動部材の研究開発として一連のナトリウム中あるいはアルゴン中の摩擦、摩耗試験が行なわれ、各種材料のそれらの特性が明らかにされている。<sup>1)~5)</sup>その結果、摩擦、摩耗特性の優れた材料として数種類の材料を選定した。

本試験では、これらの中から(1)ステライト 166 同志、(2)コルモノイ 165 同志、(3)インコネル 718 同志、(4)ステライト 166 vs SUS 304 の材料組合せについてナトリウム温度 360°C と 400°C における長時間摺動 (150 時間) 試験を行ない、従来の短時間摺動 (1.5 分) 試験と比較検討した。

その結果次のことがわかつた。

- (1) ステライト 166 同志、コルモノイ 165 同志の動摩擦係数 ( $\mu_K$ ) は従来の短時間摺動試験と同程度で、長時間になつても低い値を維持した。 $(\mu_K = 0.2 \sim 0.4)$
- (2) インコネル 718 同志の  $\mu_K$  は摺動初期で上昇し、高い値 (約 0.4 から 0.6 ~ 0.7) となつたが、その後の変動は少なかつた。
- (3) ステライト 166 vs SUS 304 の組合せの  $\mu_K$  は摺動初期に変動がみられたが (0.4 ~ 0.8)，時間とともに安定化傾向 (0.6 ~ 0.7) を示した。
- (4) ステライト 166 同志、コルモノイ 165 同志の摩耗深さは摺動時間に伴なう增加量は少なかつた。
- (5) インコネル 718 同志の摩耗深さはステライト 166 同志、コルモノイ 165 同志の 2 ~ 3 倍である。
- (6) ステライト 166 vs SUS 304 の組合せの場合、摩耗深さが最も大きい。

\* 大洗工学センター ナトリウム技術部 ナトリウム技術開発室

June, 1978.

Wear Tests of Materials for FBR in Sodium Environment (VI)  
Long Term Sliding Test Results

Naruo Hasegawa\*, Shigeki Kanoh\*,  
Koichi Nakayama\*, Tohru Koakutu\*,  
Shunichi Ubara\*, and  
Takashi Nakasui\*

## Abstract

A series of experiments in sodium and argon environments have been carried out to develop and screen the friction and wear resistant materials used for sliding components of the sodium cooled reactor. As results of these test, we selected out several materials for candidated alloys.

The present study was carried out about combination of Stellite No.6/Self, Colmonoy No.5/Self, Inconel 718/Self and Stellite No.6/SUS304 and long term sliding test (150 hrs.). The results obtained were compared with those of short term sliding test (15 min.) of preceding studies.

The results obtained are as follows,

- (1) Kinetic friction coefficients ( $\mu_k$ ) of Stellite No.6/Self and Colmonoy No.5/Self were in approximate agreement with short term test of preceding studies ( $\mu_k$ : 0.2~0.4)
- (2)  $\mu_k$  of Inconel 718/Self showed a stable behavior with the sliding time although it raised at the beginning of the test.
- (3)  $\mu_k$  of Stellite No.6/SUS 304 indicated a variable behavior at the beginning of the test, but after 40 hours sliding, it showed a stable behavior with the lapse of time and  $\mu_k$  was about 0.6~0.7.
- (4) The Wear depth of Stellite No.6/Self and Colmonoy No.5/Self did not shift for the sliding time.

\* Sodium Technology Section, Sodium Engineering Division,  
O-arai Engineering Center, PNC.

- (5) Wear depth of Inconel 718 was 2 to 3 times greater than that of Stellite No.6 and Colmonoy No.5.
- (6) Stellite No.6/SUS304 combination showed the greatest wear depth of all material combinations tested.

## 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
2.2.1 摩擦試験 .....	2
2.2.2 摩耗試験 .....	2
2.2.3 試験片の組合せ .....	2
2.2.4 試験片の化学成分, 機械的性質, 物理的性質 .....	3
2.2.5 試験片製作法 .....	3
2.3 解析方法 .....	3
2.3.1 摩擦係数測定 .....	3
2.3.2 摩耗量測定(摩耗深さ) .....	3
2.3.3 かたさ測定 .....	4
2.3.4 断面組織観察 .....	4
2.3.5 走査型電顕観察 .....	4
3. 試験結果および考察 .....	5
3.1 動摩擦係数について .....	5
3.2 摩耗量(摩耗深さ) .....	7
3.3 かたさ測定 .....	7
3.4 断面組織観察 .....	8
3.5 走査型電顕観察 .....	9
4. 結論 .....	11
5. あとがき .....	13
6. 文獻 .....	14

## Figure List

Fig. 1 Self-Welding and Wearing Test Loop Flow Sheet.	1
Fig. 2 Test Equipment	2
Fig. 3 Size of Test Piece	2
Fig. 4 Relation between $\mu_k$ and Sliding Time in Sodium at 360 °C.	2
Fig. 5 Relation between $\mu_k$ and Sliding Time in Sodium at 400 °C	2
Fig. 6 Friction Torque Profile of Inconel 718/self	2
Fig. 7 Relation between Wear Depth and Sliding Time in Sodium at 360 °C	3
Fig. 8 Relation between Wear Depth and Sliding Time in Sodium at 400 °C	3
Fig. 9 Microhardness of Materials before and after Test in Sodium	3
Table 1 Test Condition	7
Table 2 Material Combination	7
Table 3 Chemical Composition	8
Table 4 Mechanical and Physical Properties	9
Table 5 Coating Method and Heat Treatment	11
Table 6 Relation between Kinetic Friction Coefficient $\mu_k$ and Sliding Time	13

## Photograph List

- Photo. 1 External Appearance of Stellite No.6 after Tested  
(vs SUS 304)
- Photo. 2 External Appearance of Inconel 718 after Tested  
(vs Inconel 718)
- Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.6/self  
in Sodium at 360 °C
- Photo. 4 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.6/self  
in sodium at 400 °C
- Photo. 5 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5/self  
in Sodium at 360 °C
- Photo. 6 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5/self  
in Sodium at 400 °C
- Photo. 7 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5/SUS  
304 in Sodium at 360 °C
- Photo. 8 Cross-Sectional Micrographs of Inconel 718/self  
in Sodium at 400 °C
- Photo. 9 Ion Image of Stellite No.6 Surface after Tested  
(vs SUS 304)
- Photo.10 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Stellite No.6/self)
- Photo.11 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Colmonoy No.5/self)
- Photo.12 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Inconel 718/self)
- Photo.13 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Stellite No.6)

## 1. まえがき

47年度より原子炉機器滑動部用耐摩耗材、耐摩耗材について各種材料のナトリウム中あるいはアルゴン中での滑動試験によりスクリーニングテストを行なってきた。このスクリーニングテストでは短時間滑動による各種材料の摩擦係数の測定、摩耗量の測定、かたさ測定および金相試験等により耐摩耗、耐摩耗特性の優れた材料を選定した。その結果、次の各材料を候補材として選び今後更に試験を継続することにした。

- (1) ステライト板6(コバルト基合金)
- (2) コルモノイド5又は板6(ニッケル基合金)
- (3) インコネル718(ニッケル基合金)
- (4) LC-IC(クロムカーバイト系)
- (5) 比較材としてのSUS 316とSUS 304

本試験では以上の材料の中からステライト板6回志、コルモノイド板5回志、インコネル718回志、ステライト板6 vs SUS 304の組合せにおける滑動試験を行なった。これらとの組合せについては従来も試験は行われてきたが短時間滑動(15分滑動)の評価であったので、今回は長時間滑動(150時間滑動)試験により摩擦係数、摩耗深さ、かたさ等の測定および金相試験を行ない比較検討を行なった。

法 方 驗 試

SUS 304 SUS 316 6

試驗結果

Fig. 1 次に試験ループのフローシートを示す。前回の試験に使用したフローシートと異なり、新たに腐食懸着試験部（SW-3）が取付けられている。本試験は摩耗・摩耗試験部（SW-1）で行ない、試験中はコールドトラップにより精製されたナトリウムが試験部に供給される。但しSW-1とSW-3を同時運転し、SW-3を精製する間はナトリウム弁VN107、208とVN301、302およびVN304の適宜切換をより純度管理されたナトリウムをSW-1試験部に閉じ込め、予熱ヒータにより温度を維持した状態で試験した。試験ボットには3基の摩耗試験機（Fig. 2 参照）が付設されており、各々Fig. 3 に示す1対の試験片を取付ける。その他については、す

SUS 304 不锈钢上盖

ステライト6回志

2.2.4 試験片の化学成分、機械的性質、物理的性質  
試験片のミルシートによる化学成分を Table 3 (c, nominal) の機械的性質  
および物理的性質を Table 4 に示す。  
スチライト (6) は C<sub>0</sub> 基合金でコルモノイド (5) とインコネル (7, 18) は Ni 基合金  
である。

卷之五

卷二十一

試験はコールドトラップ温度を一定(140°C)とし、試験温度(360および400°C)に到達後負荷(220kg)をかけ、駆動モーターを回転させ摺動した。試験片接触面積は $2.2\text{cm}^2$ 、駆速 $3.6\text{cm/sec}$ である。又摺動試験時間は150時間であるが、これは

摩擦試験で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れたトルク値より動摩擦係数 $\mu_K$ を算出した。

2.2 實驗試驗

試験時に負荷装置アーム先端に取付けられた差動トランクにより、滑動試験中の摩擦係数の変化を記録した。

23 試験片の組合せ

今回の試験に供した試験片の組合せはTable 2に示す組合せのものである。各試験温度における試験片組合せは次の通りである。

ここで  $T$  : ツルク (kg・m)

此卷無及

試験  
60°C

卷之三

試驗片指

SET T : 上化乡 (kg·m)

## 摩擦力測定（摩耗探査）

位より求めた。使用計器は SHINKO DENSII 社製の DISPLACEMENT METER ICP TYPE MF-6 T および RIKADENKI 社製の 6 ペンレコーダ KA-61 により記録測定した。

### 2.3.3 かたさ測定

ナトリウム中の摺動試験前後の試験片のマイクロビッカースかたさを AKA-SHI 製微小かたさ計 MVK-C 型により測定した。

### 2.3.4 断面組織観察

ライヘルト金属顕微鏡写真装置 MEF 型により試験後の試験片断面組織を観察した。倍率は 100 倍および 400 倍で観察し、ツチング処理は 10% 修復電解により行なつた。

### 2.3.5 走査型電子顕微鏡

ナトリウム中摺動試験後の表面状態の観察を次の条件で行なつた。 HITACHI 製 HSM-2 型を使用し、加速電圧 20 kV、傾斜角度水平、露光時間 100 秒、倍率 1000 倍および 5000 倍で観察した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 摆擦係数について

摆摩擦係数 ( $\mu_K$ ) は 1 日当たり 3 ~ 10 時間断続運動させ、その摆動トルクをチャートに記録し、日々の平均摆動トルクを読み取り、(1)式より  $\mu_K$  を算出した。又全摆動時間は 150 時間とし、従来の短時間試験 (15 分摆動) (2)~(5) と比較した。

150 時間摆動による摩擦係数測定結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 はナトリウム温度 360°C におけるステライト #6 (以下 "S6" と略称) 同志、コルノイ #65 (以下 "C5" と略称) 同志、S6 vs SUS 304 の組合せの  $\mu_K$  と摆動時間との関係をプロットしたものである。

この結果によると、S6 vs SUS 304 の組合せを除き S6 同志、C5 同志の摆動時間による  $\mu_K$  は大きな変動もなく比較的安定した値を示している。このなかでも C5 同志が最小の  $\mu_K$  を示し (0.2 ~ 0.3), つづいて S6 同志 (0.3 ~ 0.4), S6 vs SUS 304 (0.4 ~ 0.8) の順であつた。次に Fig. 5 にナトリウム温度 400°C における S6 同志、C5 同志およびインコネル 718 同志 (以下 "I718" と略称) の 150 時間摆動と摆動摩擦係数測定結果の関係を示す。

この結果でもナトリウム温度 360°C における結果と同様摆動時間に対する  $\mu_K$  の変化には顕著な差は認められなかつた。こゝでも C5 同志が最小の  $\mu_K$  (0.2 ~ 0.3) を示し、つづいて S6 同志 (0.2 ~ 0.3), I718 同志 (0.6 ~ 0.7) の順であつた。以上の結果より S6 vs SUS 304 の組合せ以外の S6 同志、C5 同志、I718 同志の組合せについては今回の試験目的である長時間摆動による  $\mu_K$  の摆動時間に対する顕著な変動は認められず安定した  $\mu_K$  値を示し、時間依存性はほとんどないといえる。

S6 vs SUS 304 の組合せによるナトリウム温度 360°C の試験においては Fig. 4 に示すように試験初期の段階で急激な  $\mu_K$  の上昇が見られ、その後徐々に  $\mu_K$  が低下し約 0.6 の附近で安定した。この材料の組合せにおけるロータ側試験片の S6 を試験後観察した結果、パリが出ており (Photo. 1), しかも後述の断面組織観察 (Photo. 7) で部分的に S6 上に SUS 材が接着しているのが観察され、又イオンマイクロアナライザによるイオン像 (Photo. 9) の結果からもロータ側試験片の S6 上に

SUS材が数  $\mu\text{m}$  の厚みで接着していることが判明した。従つて前述の摩擦挙動は慣動初期に S 6 への SUS 材凝着とそれに伴なう SUS 材の剪断によると思われる高い  $\mu_K$  を示した後、SUS材同志の摩擦挙動を呈したものと思われる。

(1)～(5)

以上の今回の長時間摺動試験結果と既報の短時間摺動試験結果との比較を Table 6 に示す。

但し今回の試験と従来の試験条件では試験条件は異なる。既報の場合、例えはナトリウム温度 450°C, コールドトランプ温度 200°C, 負荷荷重が段階的に増加される試験である。しかし Table 6 中には単なる  $\mu_K$  の比較としてこれらの条件差を無視し、負荷荷重条件を今回の試験条件と同じ 220kg の点での  $\mu_K$  を図中より読み取ったものである。

Table 6 より各材料とも試験条件の違いにより影響な差は認められなかつた。

S 6 同志の  $\mu_K$  は試験条件の違いはあつても、その  $\mu_K$  は 0.2～0.4 の範囲であり、C 5 同志の場合は 0.15～0.3 の範囲にある。この両材料ともナトリウム温度 360°C～450°Cにおいては 150 時間摺動（摺動距離：19.440 m）と 15 分間摺動（摺動距離：3.24 m）との、摺動時間の依存性はほとんどないと云える。

I 718 同志の摺動試験の  $\mu_K$  は今回の試験では 0.6～0.7 で、既報の試験結果では 0.3～0.4 で若干変動がみられる。しかし今回の I 718 同志の摩擦トルクの初期の変化を Fig. 6 に示すが、摺動初期の 30 分位から摩擦トルクが増大しており、その後は一定のトルク値を示した。この摺動初期約 30 分のトルク値から  $\mu_K$  を前述の(1)式より算出すると 0.37 となり、Table 6 中の I 718 の従来の試験結果とほど一一致となる。I 718 の摩擦挙動は外国における試験結果でもかなり複雑な挙動を示しており、摺動距離の増加とともに  $\mu_K$  の増加を示す関係も見出されている。これは摺動面の酸化膜あるいは摩擦粉等表面潤滑条件によるものであると考えられる。

I 718 の場合は短時間試験による評価は好ましくないといえる。  
S 6 vs SUS 304との場合は前述のようにロータ側試験片（S 6）摺動面にステータ側の SUS 304 が凝着するような複雑な挙動を示しているために、必ずしも従来の短時間試験と比較できないであろう。

以上の比較結果からもある摺動時間以上になると動摩擦係数に対する摺動時間の影響はあまりないようである。

### 3.2 摩耗深さ

摩耗深さの測定は試験機の負荷装置アーム先端に取付けられた差動トランスにより、ロータ側試験片とステータ側試験片のトータル摩耗深さとして測定した。その結果を

Fig. 7, 8 に示す。

Fig. 7 はナトリウム温度 360°C における S 6 同志、C 5 同志、S 6 vs SUS 304 の組合せにおける摩耗深さと摺動時間との関係を示したものである。

摩耗深さは金属同志が接触して摺動しているかぎり時間とともに増加するのは確かである。耐摩耗性の評価はある条件下（温度、荷重、摺動時間等）における各材料間での摩耗量の大小で評価すべきであろう。

以上の観点より Fig. 7 の傾向をみると S 6 同志、C 5 同志は摺動時間に対して摩耗深さは大きな変動もなく安定した傾向を示している。又今回の試験条件下では耐摩耗性は S 6 が C 5 に比べ若干優れているが大きな差ではない。

S 6 vs SUS 304 の組合せにおける摩耗深さは摺動時間が 50 時間を過ぎたころから勾配が大きくなり、その勾配も時間とともに急になる傾向にある。この材料組合せの試験は摩耗深さが大きくなるため約 110 時間で試験を中止した。又この摩耗深さはほとんどがステータ側の SUS 304 の損耗であることが解析時にわかつた。

Fig. 8 はナトリウム温度 400°C における S 6 同志、C 5 同志、I 718 同志の摩耗深さと摺動時間との関係を示す。

S 6 同志、C 5 同志の摩耗深さはナトリウム温度 360°C における結果と全く同じ傾向であり、摺動時間に対して安定した摩耗傾向を示している。又耐摩耗性も S 6 と C 5 に比べ若干優れた結果であるが大きな差ではない。

I 718 同志の場合は前述の 2 材料に比し大きな摩耗深さを示した。その比は S 6 と C 5 の約 2～3 倍の摩耗深さである。試験後に試験片を観察したところ Photo. 2 では明確でないがロータ側の試験片が大きなバリ状になつており、このため摩耗深さの増大を来たしたことが判つた。

### 3.3 かたさ測定

摩擦、摩耗試験前のマイクロピッカースによるかたさ測定結果を Fig. 9 に示す。測定位置は受入材は表面、試験材は断面において摺動面から 0.03 mm と 0.2 mm の深さの位置とした。

一般的には溶射表面処理層のかたさは、金属組織が一様でないことからバラツキも

大きく、真值を測定することは難かしく見掛けである。今回の測定結果も Fig. 9 に示すようにバラツキが大きい。

この結果 S 6 同志の摺動後の硬さは摺動面から 0.03 mm の位置では受入材の Hv 430 ～ 500 に比し Hv 600 ～ 690 と高くなっている。これは摺動の影響により表面層が硬化したものと思われる。摺動面から 0.2 mm の深さでは受入材と同じ Hv 420 ～ 500 となり、もはや摺動の影響は及んでいない。

C 5 同志の摺動試験片のかたさ分布は最も大きなバラツキがあるが、試験前後のかたさ値の変化はほとんどなかった。これは後述の断面組織観察においても摺動面近傍では特に変化はみられず、本試験の範囲内では摩擦、摩耗の安定性を示唆している。

I 718 同志の摺動後には受入材の Hv 430 ～ 490 に比し摺動面から 0.03 mm の深さ位置では Hv 450 ～ 580 とかたさが高くなっている。これはやはり摺動による硬化のためである。後述の Photo. 8 に示す摺動部の断面組織観察でも摺動面近傍に塑性变形部がみられ、かたさの高くなることを裏付けている。しかし摺動面から 0.2 mm の深さで測定した結果はほどど受入材に近い Hv 420 ～ 490 で摺動の影響はなくなる。

ナトリウム温度 360°C で試験した S 6 vs SUS 304 の摺動前のかたさは摺動面近傍で差異を生じた。特に SUS 材が顕著な変化を示した。S 6 材は摺動面から 0.03 mm の深さでは受入材のかたさ Hv 430 ～ 500 に比し Hv 620 ～ 650 と高くなつており、後述の Photo. 5 に示す断面組織観察でも若干摺動による塑性变形域がみられ、かたさが高くなつていている。しかし測定位置が 0.2 mm の位置になると受入材とほどど同一の値を示し、摺動の影響はない。一方相手材の SUS 304 は受入材のかたさ Hv 190 ～ 220 に比し摺動後には 0.03 mm の位置で Hv 540 ～ 580, 0.2 mm の位置でも Hv 290 ～ 310 と高く、摺動の影響の強いことを示している。これは後述の Photo. 5 に示す摺動部の断面組織観察でも明らかのように約 200 μm の塑性变形域がみられ、SUS 材は摺動の影響を受けやすいことを示している。

### 3.4 断面組織観察

Photo. 3 ～ 8 に試験後の各材料の断面組織写真を示す。

Photo. 3 と 4 にナトリウム温度 360°C と 400°C における S 6 同志の摺動試験後の断面組織を示す。いずれも大きな変化はないが、ステータ側の摺動面近傍で摺動によると思われる塑性变形層が若干みられる。しかしロータ側では 360°C の結果で若干の塑性変形のみられる部分もあるが、摺動面と内部で大きな差は認められない。

Photo. 5 と 6 にナトリウム温度 360°C と 400°C における C 5 同志の摺動試験後の断面組織を示す。摺動面近傍の組織は全く変化しておらず安定である。これは摩擦係数、摩耗深さが小さく安定していることとも一致するものである。

Photo. 7 に S 6 vs SUS 304 の組合せによるナトリウム温度 360°C における試験後の断面組織を示す。

写真から明らかなようにロータ側の S 6 に SUS 材が～7 μm の厚みで付着している。この SUS 材の付着は Photo. 9 に示すロータ側の S 6 摆動面上のイオンマイクロアライザによるイオンイメージ像によつても明白である。Photo. 9 に示すイメージ像はコバルトと鉄のイオン像であるが、S 6 のベース元素であるコバルト濃度が広い範囲で極端に減少しており、かつ鉄の含有量の少ない S 6 で鉄濃度が高いことは相手材の SUS 304 が付着したことを見ている。又 S 6 自体も摺動により約 100 μ の深さに及ぶ塑性変形層を生じている。

Photo. 7 の SUS 材は摺動による塑性変形を呈しておりその深さは 200 μm 以上にも達している。しかも最表面層ではおそらく摩擦粉のまちいによる堆積層が観察され、摩耗量の多いことを示している。

尚 SUS 材の非摺動部は全く変化なく正常な組織であった。

Photo. 8 にはナトリウム温度 400°C における I 718 の試験後の断面組織を示す。組織上大きな変化はみられないが摺動面でいくらくらか塑性変形がみられる。しかし摩耗さが大きかった割には SUS 材に比べ塑性変形層が少ないので、これはもともとの材料強度（かたさ、引張強さ、伸び）の差によるものと思われる。

### 3.5 走査型電顕 (SEM) 觀察

Photo. 10 ～ 13 に各材料組合せにおける摺動試験後の走査電顕による表面観察結果を示す。

Photo. 10 はナトリウム温度 400°C における S 6 同志の摺動表面の SEM 写真である。この結果塑性流動は明白にはみられず比較的の平滑な面を示している。これは前述の安定した摩擦係数および耐摩耗性とも一致した現象である。

Photo. 11 には C 5 同志のナトリウム温度 400°C における摺動試験後の摆動面の SEM 写真を示す。この写真では凸部が摆動によりつぶされ面が平滑になっている。しかし摆動面が荒れた様子はなく比較的安定した摆動面を示しており、このことが前述の安定した摩擦係数を示したものと考えられる。

Photo. 12 には 1718 同志のナトリウム温度 400°C における摺動試験後の摺動面を示す。写真でも明らかのように摺動面の全面にわたって塑性流動がみられ、それが層状に重複しているのがみられる。これが摩耗深さを増大させた原因と考えられる。しかし摺動面が著しく荒れた様相ではなく比較的平滑な面を示していることは前述の摩擦係数が摺動時間に対して安定した傾向を示した原因と思われる。

次に Photo. 13 に S 6 と SUS 304 の組合せによるナトリウム温度 360°C における摺動試験後の SEM 写真を示す。Photo. 13 はローテ側の S 6 の摺動面であり、塑性流動しているのがわかるが、これは前述の S 6 上に付着した SUS 304 の流れ模様である。一方ステーク側の SUS 304 の摺動面も同様な傾向を呈した塑性流動がみられた。この現象としては S 6 と SUS 304 の接触点で高温強度の弱い SUS 材がせん断され、その摩耗粉が S 6 の摺動面に纏着し、それが堆積して加工硬化した付着層となることによりひつき現象も加わって更に摩耗を助長しているものと考えられる。従って Photo. 13 に示す S 6 上には SUS 材が付着、塑性流動を生じ結果的に SUS 材同志の摩擦、摩耗現象を呈していると考えられる。

#### 4. 結論

以上のナトリウム温度 360°C および 400°C における 150 時間摺動試験結果から次のことがわかった。

##### 動摩擦係数 ( $\mu_k$ ) :

- (1) ステライト #6 同志、コルモノイ #65 同志の動摩擦係数 ( $\mu_k$ ) は従来の短時間摺動（15 分摺動）試験と同程度で特に時間依存性はみられなかつた。
- (2) インコネル 718 同志の動摩擦係数は摺動初期で約 0.4 から 0.6～0.7 に上昇し、その後は安定した傾向を示した。
- (3) ステライト #6 vs SUS 304 の組合せの動摩擦係数は摺動初期で変動がみられたが時間とともに安定化傾向を示した。
- (4) 150 時間摺動における  $\mu_k$  は次の通りであった。
 

ステライト #6 vs ステライト #6 : 0.2～0.3
コルモノイ #65 vs コルモノイ #65 : 0.15～0.3
インコネル 718 vs インコネル 718 : 0.6～0.7
（但し摺動開始後約 30 分迄 : 0.3～0.4）
ステライト #6 vs SUS 304 : 0.4～0.8
- (5) ステライト #6 同志、コルモノイ #65 同志の摩耗量は摺動時間に対して大きさを変動はなく安定していた。
- (6) インコネル 718 同志の摺動に対する摩耗量はステライト #6, コルモノイ #65 の 2～3 倍である。
- (7) ステライト #6 vs SUS 304 の組合せの摩耗量が最も大きく、時間とともに急激にふえる傾向にある。
- (8) ステライト #6 は試験後摺動面近傍でかたさが高くなるが組織的には顯著な変化はみられない。
- (9) コルモノイ #65 は試験前後でかたさ、断面組織とも顯著な変化はみられなかつた。
- (10) インコネル 718, SUS 304 は摺動面近傍でかたさの増大が生じ、組織的にも塑性変形域がみられた。

(II) ステライト 6 vs SUS 304 組合せの場合、ステライト 6 上に SUS 304 の犠牲粉が接着し、SUS 304 の摺削面付近は著しい塑性変形を受ける。

## 5. あとがき

從来行なわれてきた短時間(15分)の摩擦、摩耗試験により選定された材料について長時間(150時間)の摺削試験を行ない、ナトリウム中における各材料の摩擦、摩耗特性が明らかとなつた。

- (1) S 6 同志、C 5 同志については短時間試験で測定した  $\mu_K$  の妥当性が認められた。
  - (2) I 718 同志については短時間試験と長時間試験で測定した  $\mu_K$  が異なることが判つた。
  - (3) S 6 vs SUS 304 と I 718 同志については摩耗量が時間とともに増加しつづけ、その量も大きいことが判つた。
  - (4) 金相試験によつて、各材料間の摩擦、摩耗特性がかなり裏付けられた。
- 以上のように長時間の摩擦、摩耗試験の成果が得られた。さらに、一般に言われる質量移行等によるナトリウム環境効果を評価するため、摩耗、摩擦、自己融着等のさらに長時間の試験、あるいはナトリウム中で摩擦、自己融着に影響を及ぼすと云われる酸素濃度についても、ループ運転時にコールドラップで制御した試験が必要である。引焼き計画している試験には次のものがある。
- (1) 腐食試験(2000時間、4000時間試験)
  - (2) 自己融着試験(200、1000、4000時間試験)
  - (3) 摩擦試験(1000、2000時間試験)
- 終りに臨み、本計画遂行にあたり御指導賜つた三本部長(Na技術部)、FBR本部山本研Naグループリーダー、永瀬紀生副主任研究员および当室の吉利厚室長代理に感謝の意を表します。又前ナトリウム技術部長の齊藤良平氏、前同室長の厚母栄夫氏(現FBR本部構造材料グループリーダー)にも多大の御指導を賜つたことを深謝します。
- 最後にループ運転、試験解析に協力していた室員および常陽産業の方々にも併せて感謝します。

## 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(V) コルモノイとステライトの比較」，SN941-76-8-1
- 2) 加納茂機，他，「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(W) ステライトK1, コルモノイK6, インコネル718, ハスティロイおよび2%Cr-1Mo鋼の摩擦・摩耗」，SN941-75-7-3
- 3) 加納茂機，他，「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」，SN941-74-8-0
- 4) 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・カーバイトの摩擦・摩耗」，SN941-74-1-2
- 5) 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」，SN941-73-1-4
- 6) E.Wild, et.al., "Friction behavior of Inconel 718 and Stellite 6 as Fuel Assembly Duct Pad Material," IAEA-SM-173/73
- 7) E.Wild, et.al., "Tribology in the Core of a Sodium-Cooled Fast Breeder Reactor" Wear, 34 (1975) p.331-340
- 8) 潤澤庄太郎, 他, 「ナトリウム中ににおける摩擦・摩耗および自己融着現象に関する諸外国の試験研究(I)」ZN942-74-08
- 9) 金属表面技術協会編, 「金属表面技術便覧」 S51.11.30

Table 1 Test Condition

Sodium Temperature (°C)	360, 400
Cold Trap Temperature (°C)	140
Apparant Contact Area of Test Piece (cm <sup>2</sup> )	2.2
Sliding Velocity (cm/sec)	3.6
Load (kgf)	220
Sliding Time (hr)	150

Table 2 Material Combination

Stator	Rotor
Stellite No. 6	Stellite No. 6
Colmonoy No. 5	Colmonoy No. 5
Inconel 718	Inconel 718
SUS 304	Stellite No. 6

Table 5 Coating Method and Heat Treatment

Material	Coating Method and Heat Treatment
Stellite No.6	Oxy-Acetylene Gas Weld
Colmonoy No.5	Oxy-Acetylene Gas Weld
Inconel 718	Solution Treatment 954°C × 1H, O.C. Tempering 718°C × 8H, 621°C × 8H, A.C.
SUS 304	Solution Treated (1100°C × 30min → W.Q.)

\* Substratum : SUS 316

Material	0.2% Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Coef. of Expansion	Melting Point	Melting Gravity	Specific Gravity
SUS 304	32	57	64	71	HRC 76	17.3	1399~1454	8.03
Inconel 718	152	191.8	27.6	45.2	HRC 45~50	12.8	1204~1343	8.19
Colmonoy No.5	—	40~57	—	—	HRC 46	13.4	1290	8.38
Stellite No.6	72	91	—	—	HRC 46	—	—	—

Table 4 Mechanical and Physical Properties

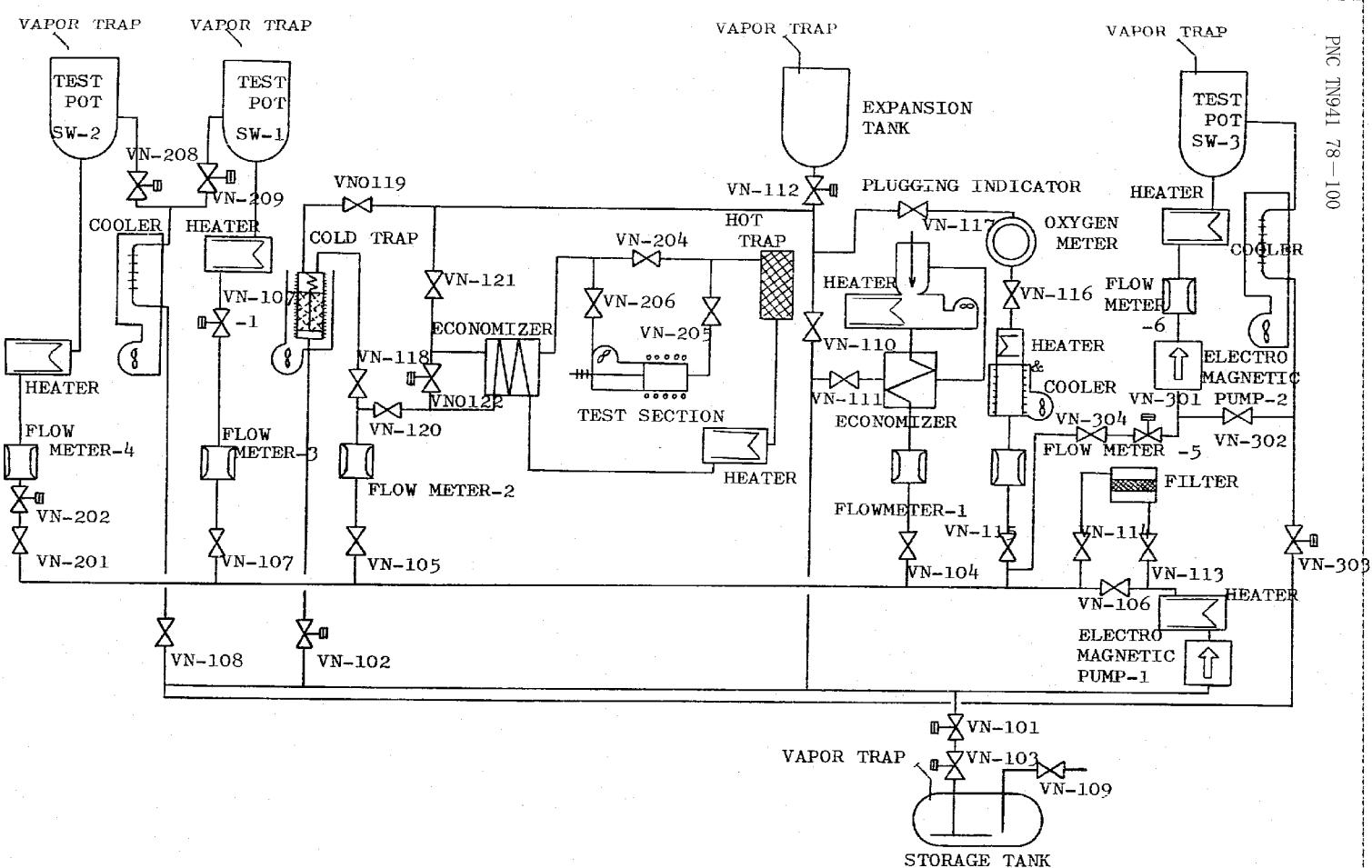
Material	C	Si	B	Fe	Cr	Ni	Co	W	Mo	Mn	Cu	Nb	Al	Ti	P	S
SUS 304	0.05	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.030 0.024
Inconel 718	0.07	0.15	0.002	BaI.	18.35	53.95	0.07	3.11	0.16	0.02	5.17	0.69	0.86	0.004	0.004	
Colmonoy No.5	0.55	3.75	2.50	4.25	11.50	77.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Stellite No.6	1.00	—	3.00	28.00	—	64.00	4.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table 3 Chemical Composition (%)

Table 6 Relation between Kinetic Friction Coefficient  $\mu_k$  and Sliding Time

Test Condition Material Combination	Kinetic Friction Coefficient		
	360 °C	400 °C	450 °C
	140 °C	140 °C	200 °C
	150 hrs.	150 hrs.	15 min.
Stellite No.6 vs Stellite No.6	0.25 ~ 0.4	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4
Colmonoy No.5 vs Colmonoy No.5	0.2 ~ 0.3	0.15~0.3	0.15~0.2
Inconel 718 vs Inconel 718	—	0.6 ~ 0.7	0.3 ~ 0.4
Stellite No.6 vs SUS 304	0.4 ~ 0.8	—	0.4 ~ 0.5
SUS 304 vs SUS 304	—	—	0.4 ~ 0.5

-18-



PNC TN941 78-100

Fig. 1 Self-Welding and Wearing Test Loop Flow Sheet

-19-

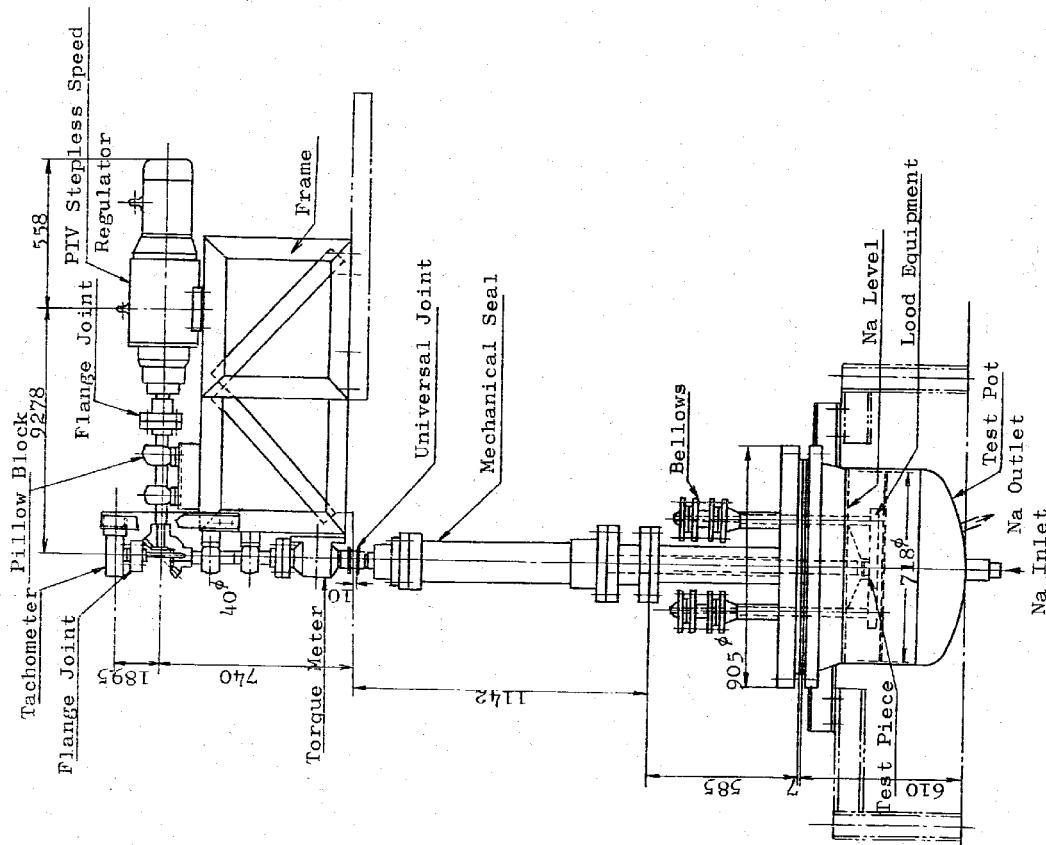


Fig. 2 Test Equipment

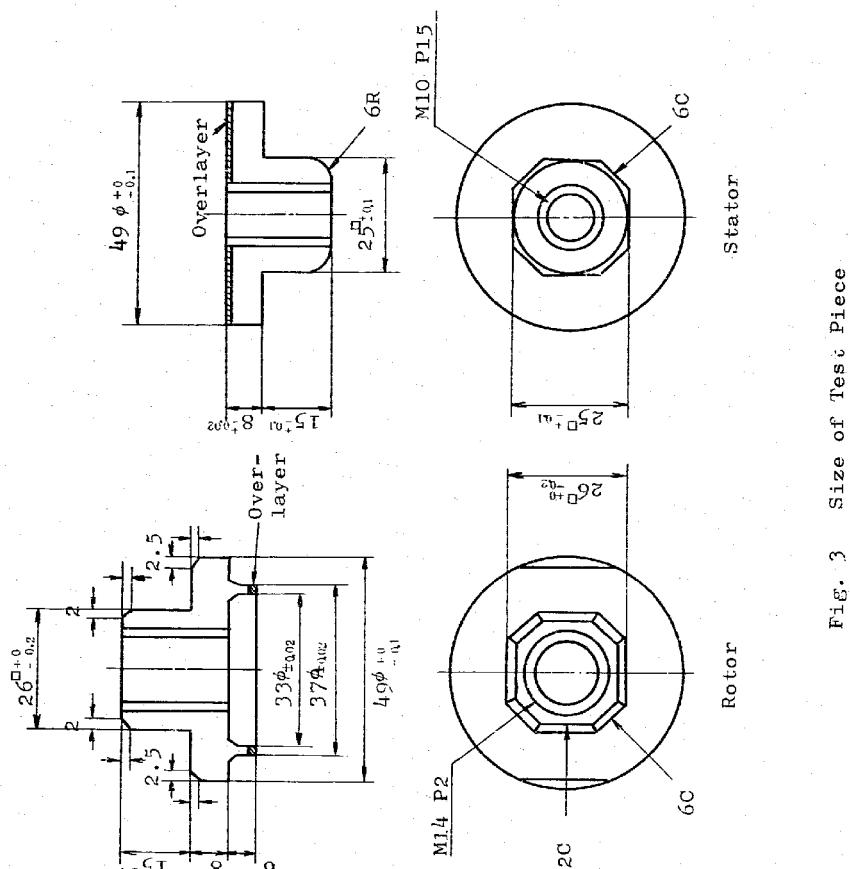
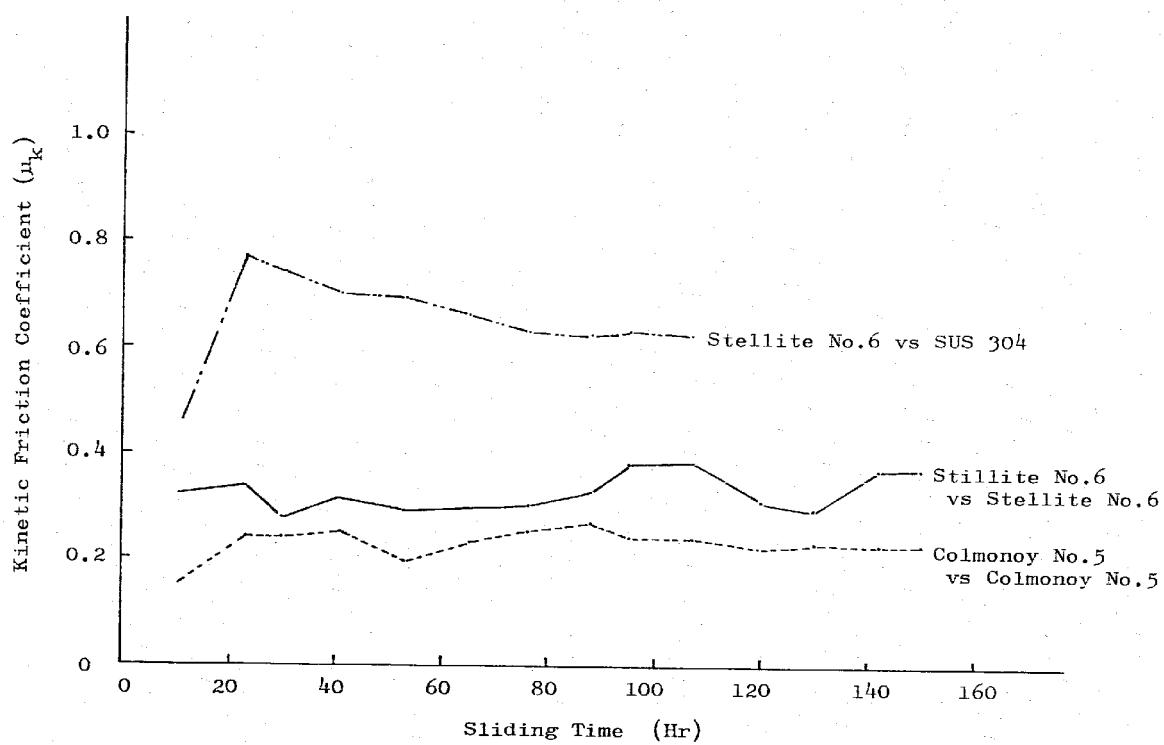
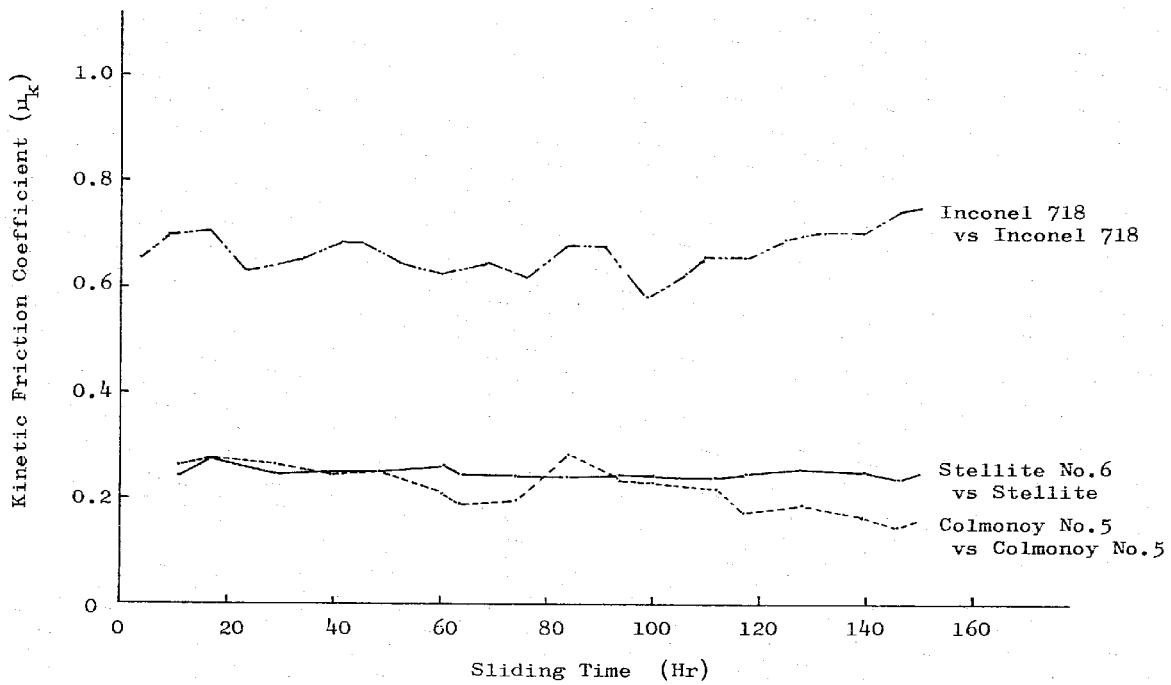


Fig. 3 Size of Test Piece

Fig. 4 Relation between  $\mu_k$  and Sliding Time in Sodium at 360 °CFig. 5 Relation between  $\mu_k$  and Sliding Time in Sodium at 400 °C

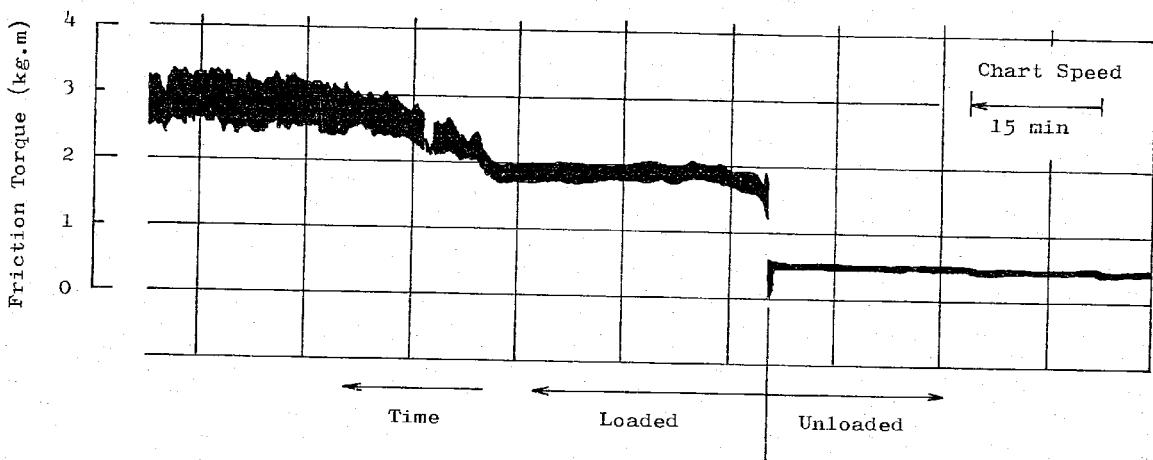


Fig. 6 Friction Torque Profile of Inconel 718/self

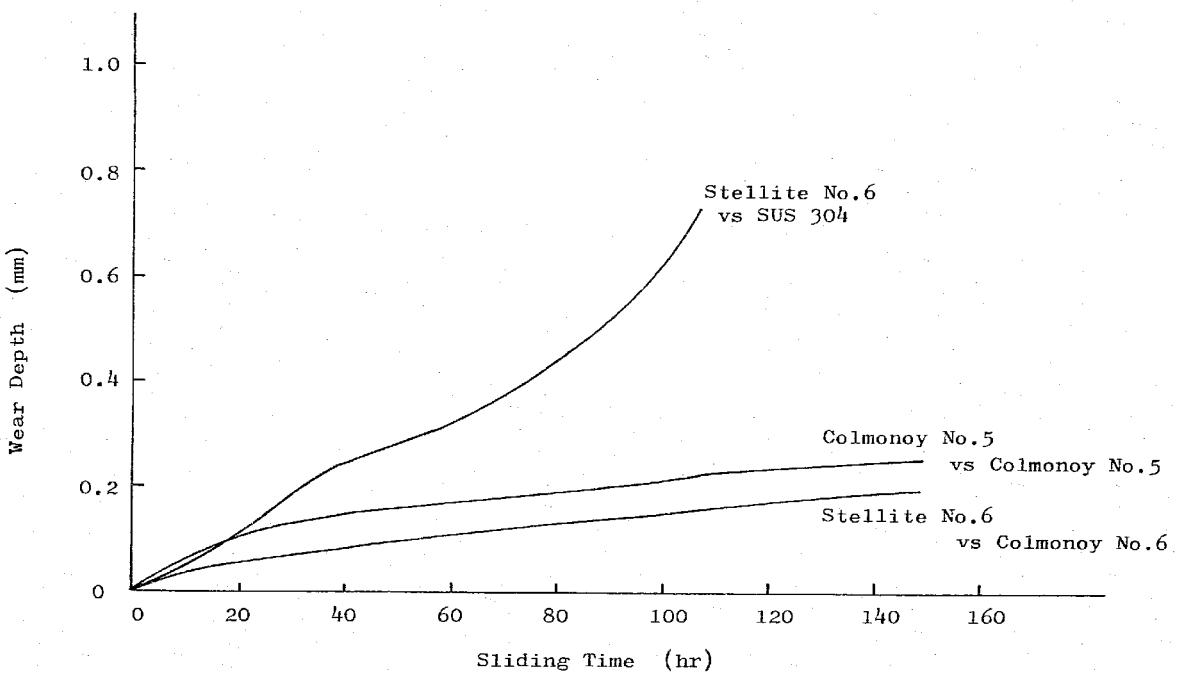


Fig. 7 Relation between Wear Depth and Sliding Time in Sodium at 360 °C

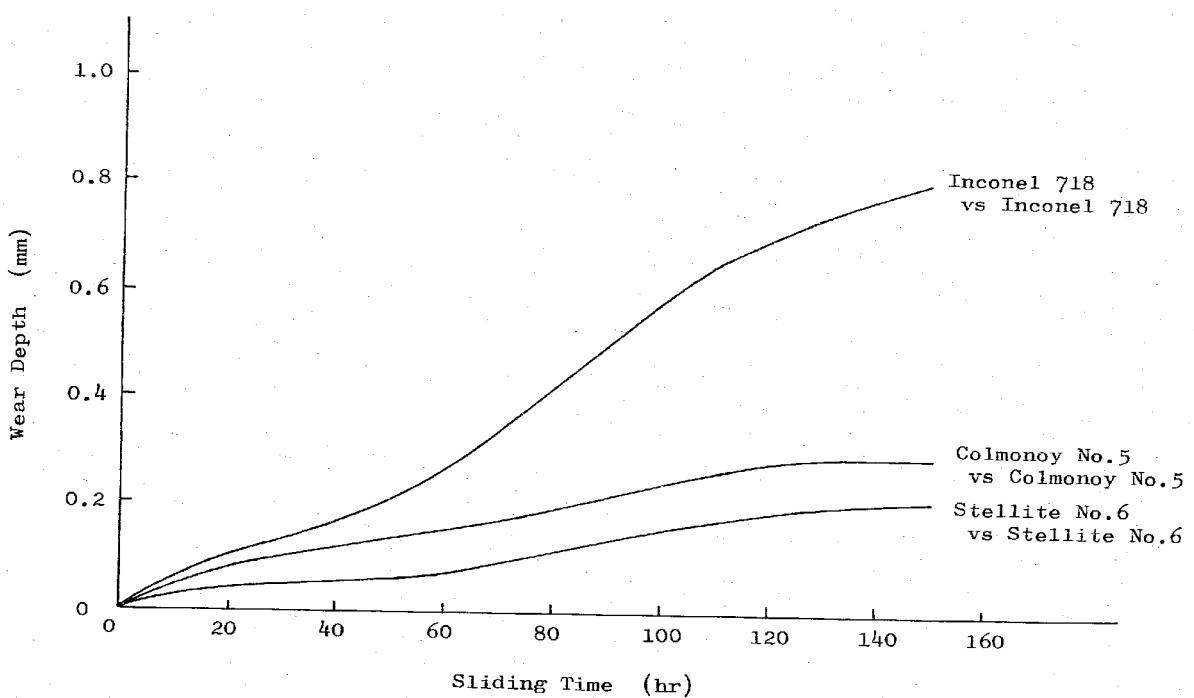


Fig. 8 Relation between Wear Depth and Sliding Time in Sodium at 400 °C

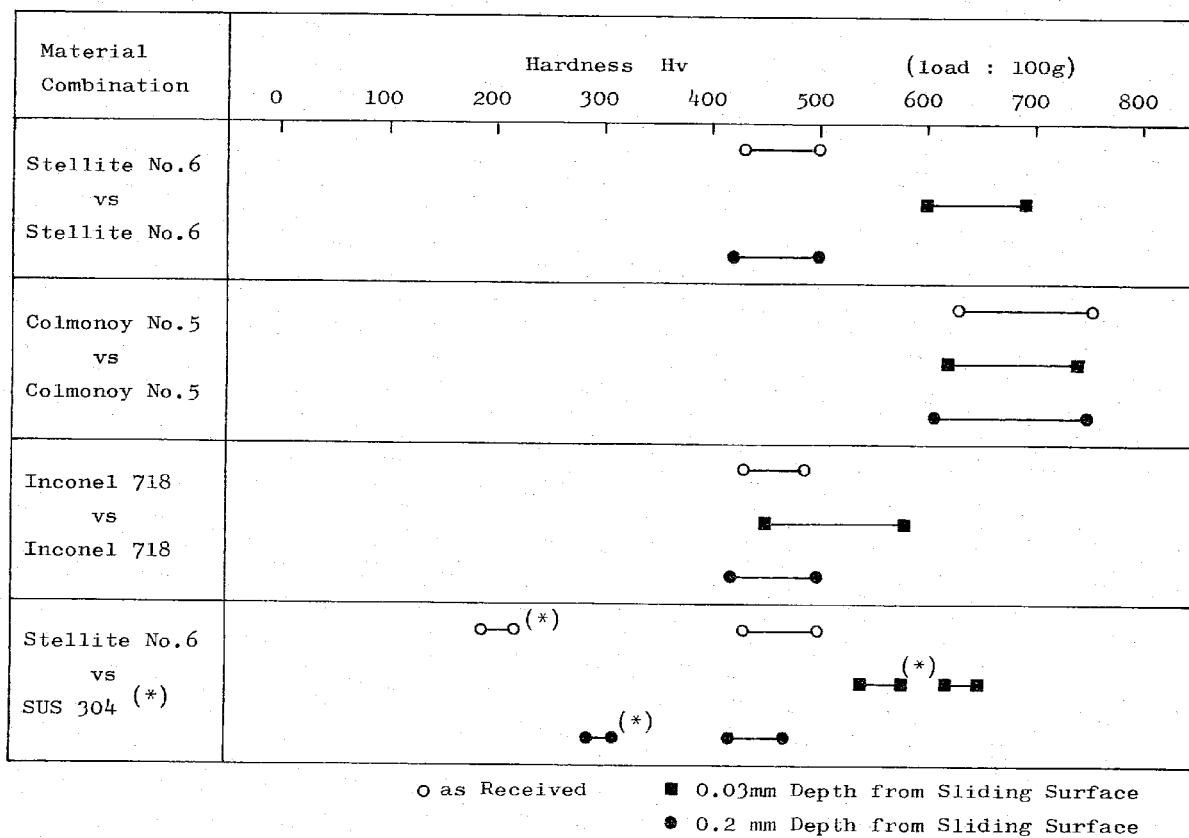


Fig. 9 Microhardness of Material before and after Test in Sodium



Photo. 1 External Appearance of Stellite No. 6  
after Tested (vs SUS 304)  
 $\times 5$

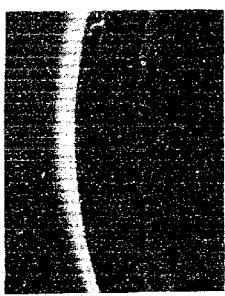


Photo. 2 External Appearance of Inconel 718  
after Tested (vs Inconel 718)  
 $\times 5$

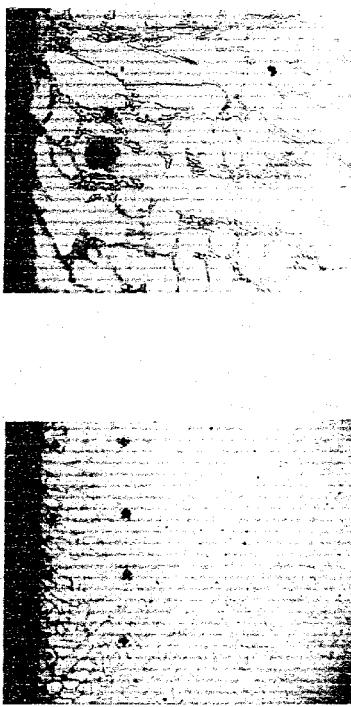


Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No. 6/self  
in Sodium at 360  $^{\circ}$ C  
Rotor Side  
 $\times 400$

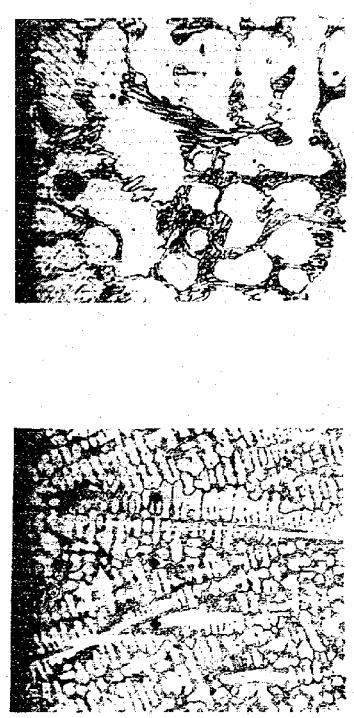


Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No. 6/self  
in Sodium at 360  $^{\circ}$ C  
Non Sliding Part  
 $\times 100$

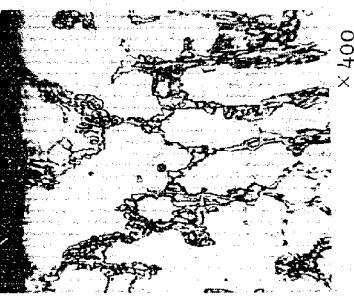


Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No. 6/self  
in Sodium at 360  $^{\circ}$ C  
Stator Side  
 $\times 400$

PNC TN941 78-100

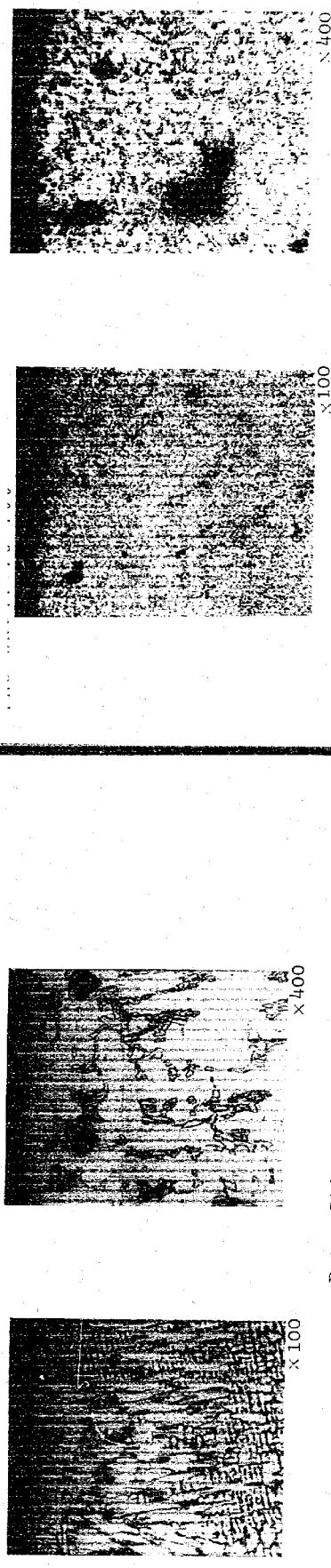
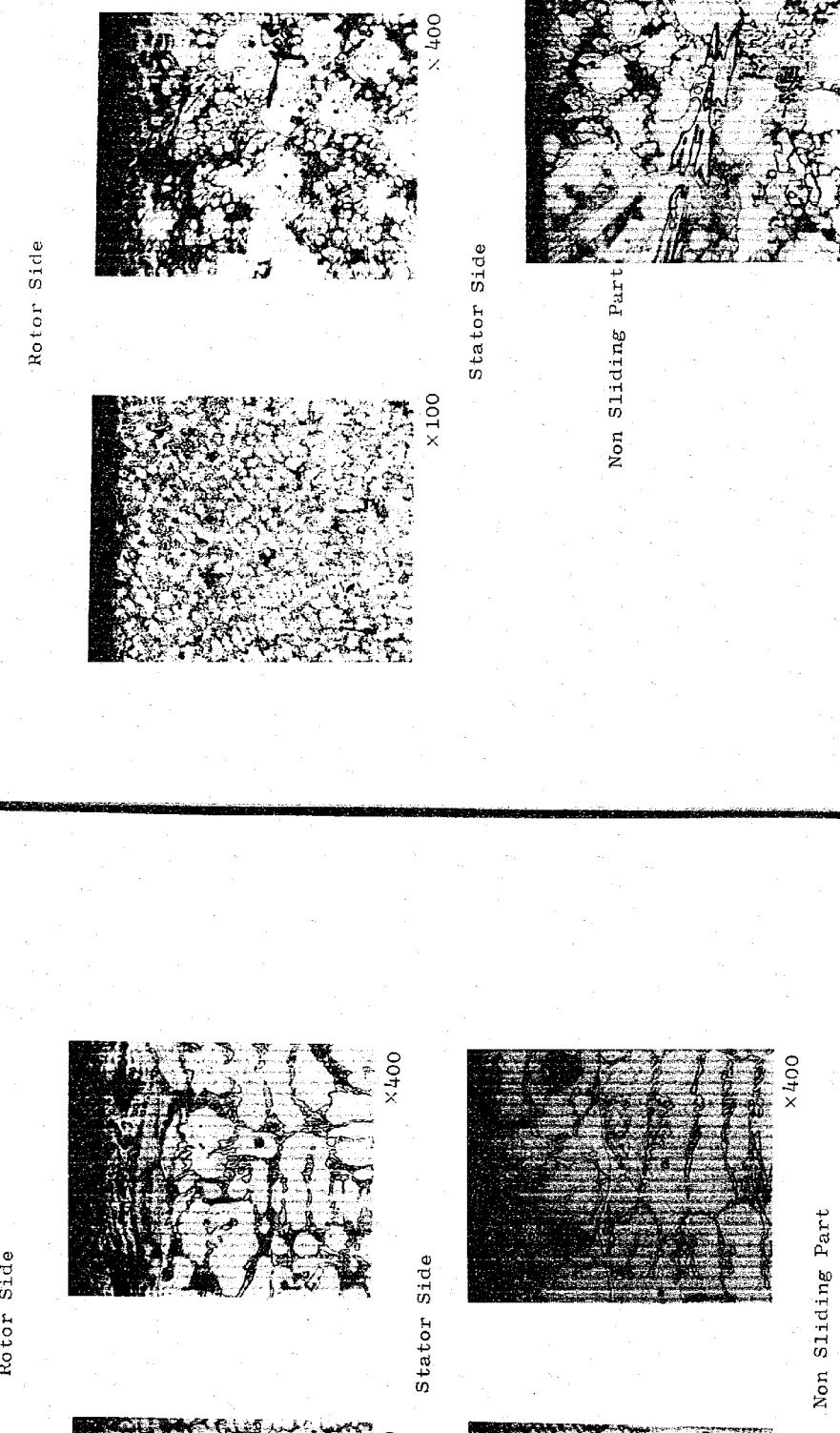
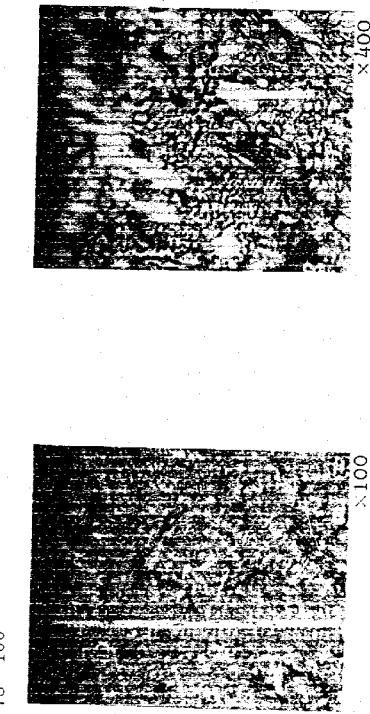


Photo. 4 Cross-Sectional Micrographs of Satellite No.6/self in Sodium at  $400^{\circ}\text{C}$

Photo. 5 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5/self in Sodium  $360^{\circ}\text{C}$



PNC TN941 78-100



PNC TN941 78-100



Photo. 6 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5/self  
in Sodium at 400 °C

Photo. 7 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.6/SUS 304  
in Sodium at 360 °C

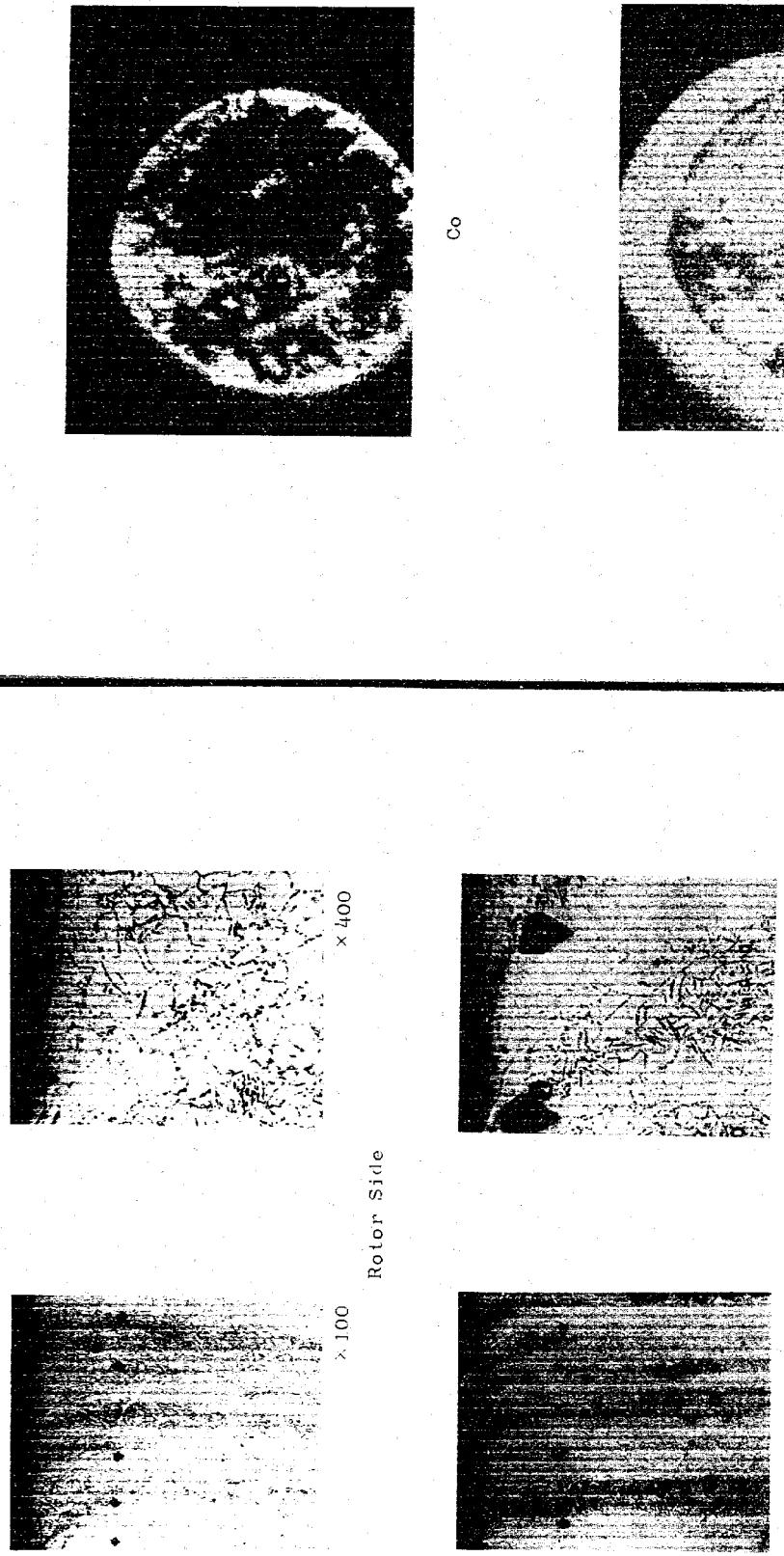


Photo. 8 Gross-Sectional Micrographs of Inconel 718/steel  
in Sodium at 400 °C

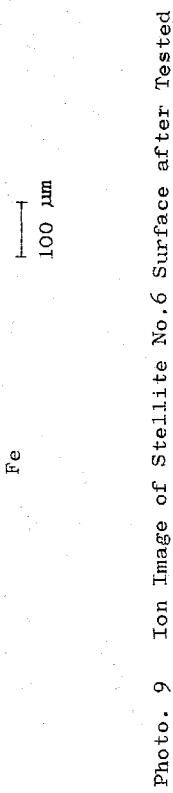


Photo. 9 Ion Image of Stellite No.6 Surface after Tested

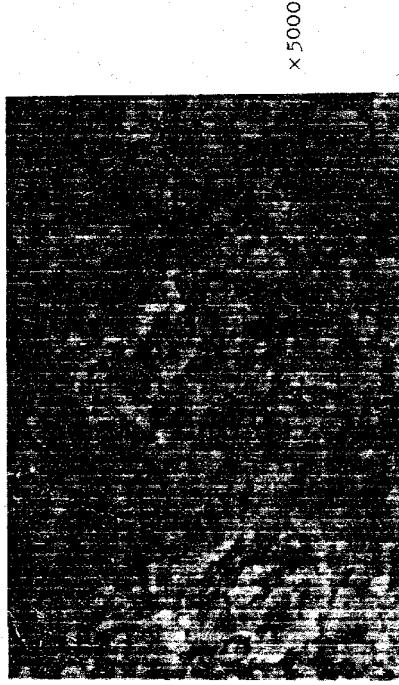
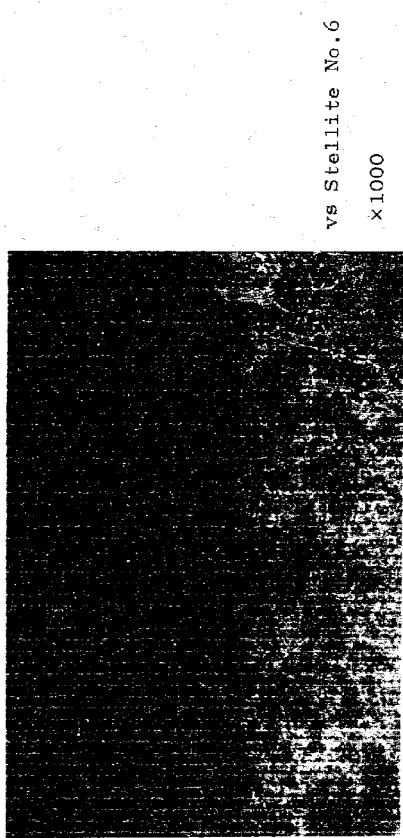


Photo. 10 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Stellite No.6/self)



Photo. 11 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of CoImonoy No.5/self)



vs Inconel 718  
x1000



vs SUS 304  
x1000



x5000

Photo. 12 Secondary Electron Image of MES  
(Sliding Surface of Inconel 718/self)



x5000

Photo. 13 Secondary Electron Image of SEM  
(Sliding Surface of Stellite No. 6)