

表面硬化材のナトリウム中試験(Ⅳ)

摩擦係数に対するナトリウム浸漬時間の影響

1979年7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)

表面硬化材のナトリウム中試験(IV)

摩擦係数に対するナトリウム浸漬時間の影響

小 坪 亨* 加納茂機* 長谷川成生*
中山 紘一* 柚原 毅一* 中 筋 孝*

要 旨

「おんじゅ」のナトリウム機器滑動部には耐自己融着、低摩擦の観点より表面硬化材の使用が考えられているが、これら材料の自己融着・摩擦現象は、高温ナトリウム中での長時間の使用により腐食の影響をうけると考えられる。本報では流動ナトリウム中浸漬時間が摩擦係数に及ぼす影響をしらべるため、試験温度 600 °C、コーロドトラップ温度 140 °C、浸漬時間 2000 時間、ナトリウム流速 0.7m/sec、負荷応力 0.3kg/mm²、滑動ストローク ±5 mm、滑動速度 0~0.63 mm/sec の条件においてステライト No.6、コルモノイ No.5、インコネル 718、LC-1C および SUS 316 の動摩擦係数 (μ_k) を求めた。得られた結果は次のとおりである。

(1) 本試験時間ではコルモノイ No.5 を除き μ_k のナトリウム浸漬時間依存性はなく、ナトリウム腐食による材料表面変質の影響はみとめられなかった。

(2) コルモノイ No.5 は表面に明白な腐食皮質層を生成する。

(3) LC-1C (コーティング厚: 0.2mm) はコーティング端部で剥離を生じたのでコーティング法の改善が必要である。

(4) μ_k は次のとおりであった。

ステライト No.6/self	0.15~0.36
コルモノイ No.5/self	0.15~1.5
インコネル 718/self	0.65~1.15
LC-1C/self	0.35~0.55
SUS 316/self	1.0 ~1.2

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の概要	2
3. ナトリウム中試験	4
3.1 供試材および試験片形状	4
3.2 試験条件および試験方法	4
4. 試験結果および考察	6
4.1 動摩擦係数の浸漬時間依存性および滑動速度依存性	6
4.2 動摩擦係数とナトリウム純度との関係	6
4.3 摺動面の観察	7
5. 問題点と対策	8
5.1 本試験により判明した問題点と対策	8
5.2 「もんじゅ」設計条件との対応上生じた問題点と対策	9
6. 結 論	10
7. あとがき	11
8. 文 献	12

Sep., 1979

In - Sodium Tests of Hard Facing Materials (IV)

Effect of Exposure Time in Sodium on Friction Coefficient

Toru Koakutsu*, Shigeaki Kano*,
Naruo Hasegawa*, Kōichi Nakayama*,
Shun-ichi Yuhara* and Takashi Nakasujii*

Abstract

In view of anti-self-welding and low friction, hard facing materials are applied to the sliding parts of "MONJU" components. But it is thought that the self-welding and friction behavior of these materials is affected by sodium corrosion during long-term application at high temperature. At present report, a friction test was conducted in sodium to investigate the effect of the exposure time in flowing sodium on friction coefficient. This report describes the friction test results for Stellite No. 6, Colmonoy No. 5, Inconel 718, LC-1C (chromium carbide/nichrome binder) and SUS 316 under the following test conditions: the test temperature of 600°C, the cold trap temperature of 140°C, the test duration of 2000 hrs., the sodium velocity of 0.7 m/sec, the contact stress of 0.3 kg/mm², the sliding stroke of ±5 mm and the sliding velocity of 0 ~ 0.63 mm/sec.

The results obtained are as follows.

- (1) All of test materials except for Colmonoy No. 5 did not show the exposure time dependency of kinetic friction coefficient (μ_k).
- (2) Degraded layer was apparently observed on the surface of Colmonoy No. 5.

- (3) The coating method must be improved for LC-1C, because the LC-1C of 0.2 mm thick showed edge chipping.

- (4) The μ_k values were as follows.

Stellite No. 6/self	0.15 ~ 0.35
Colmonoy No. 5/self	0.15 ~ 1.5
Inconel 718/self	0.65 ~ 1.15
LC-1C/self	0.35 ~ 0.55
SUS 316/self	1.0 ~ 1.2

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

List of Figures

- Fig. 1 Self-welding and wearing test loop flow sheet
- Fig. 2 Cross-section of heater
- Fig. 3 Heater element
- Fig. 4 Relation between heater capacity and sodium inventory at different surface heat density
- Fig. 5 Holder of test specimen
- Fig. 6 Configuration of test specimen
- Fig. 7 Loading and driving apparatus
- Fig. 8 Curves of friction force and stroke
- Fig. 9 Distribution of sliding velocity
- Fig. 10 Relation between μ_k and exposure time for Stellite No. 6/self at cold trap temperature of 140°C
- Fig. 11 Relation between μ_k and exposure time for Colmonoy No. 5/self at cold trap temperature of 140°C
- Fig. 12 Relation between μ_k and exposure time for Inconel 718/self at cold trap temperature of 140°C
- Fig. 13 Relation between μ_k and exposure time for LC-1C/self at cold trap temperature of 140°C
- Fig. 14 Relation between μ_k and exposure time for SUS 316/self at cold trap temperature of 140°C
- Fig. 15 μ_k of various materials
- Fig. 16 Relation between μ_k and exposure time for Stellite No. 6/self at cold trap temperature of 120°C
- Fig. 17 Relation between μ_k and exposure time for LC-1C/self at cold trap temperature of 120°C
- Fig. 18 Curves of friction force and stroke

List of Tables

- Table. 1 Design items of SW-3 test loop
- Table. 2 Design items of test apparatus
- Table. 3 Chemical composition
- Table. 4 Manufacturing method of test specimen
- Table. 5 Test Conditions.

List of Photographs

- Photo. 1 Exposed test specimen
- Photo. 2 Cross-sectional micrograph of sliding surface
- Photo. 3 Stereograph and scanning electron microscopy of sliding surface on plate specimen.
- Photo. 4 Scanning electron microscopy of exposed surface of Colmonoy No. 5 without sliding.
- Photo. 5 LC-IC test specimen

1. 緒 言

「もんじゅ」のナトリウム機器摺動部には耐自己融着・低摩擦の観点より表面硬化材の使用が考えられているが、これら材料の自己融着・摩擦現象は、高温ナトリウム中での長時間使用により腐食の影響をうけると考えられる。本報では流動ナトリウム中での表面硬化材の摩擦挙動の浸漬時間依存性を試験するため、自己融着・摩耗試験ループの腐食融着試験装置 (SW-3) を用い、試験温度 600 °C、コーロドトラップ温度 140 °C、浸漬時間 2000 時間、ナトリウム流速 0.7 m/sec、負荷応力 0.3 kg/mm²、摺動ストローク ±5 mm、摺動速度 0 ~ 0.63 mm/sec の条件におけるステライト No 6、コルモノイ No 5、インコネル 718、LC-IC および SUS 316 の動摩擦係数 (μ_k) を求めたのでここに報告する。

2. 試験装置の概要

Fig. 1 に SUS316 製自己融着・解融試験ループのプローションを示す。このうち、流動ナトリウム中での溶解および自己融着特性の試験は、新設された SW-3 試験ライン（使用ナトリウム批：108kg）で行なった。その設計仕様を Table. 1 に示す。

本ラインには、コントロールラップで純度管理したナトリウムが一定量供給されるようになっている。また、純度管理したのち、他のラインと切りはなし単独で循環運転ができるように電磁ポンプが設けられている。SW-3 試験ラインに供給されるナトリウムは、加熱器で昇温し試験ポットに入る。試験ポット内の試験片と接触した後ナトリウムは冷却器にいたり降温される。

電磁ポンプは MAPI 製 PTS-10H 型 1 台、電磁流量計は MAPI 製 FM $\frac{3}{4}$ B-10 型 1 台が使用された。ナトリウム弁は Cachot 製 Y 型 $\frac{3}{4}$ B ベローズ弁 4 個が使用された。その内 2 個が空気作動遠隔操作弁、1 個が手動止弁、1 個が手動流調弁である。ナトリウム配管径はすべて $\frac{3}{4}$ B、ガス配管径は主に 2B である。ガス系のヘッダー、ポンペ用マニホールド等は既設のものを共用している。安全対策は、他の装置と同じ方式を採用し、受皿、ナトリウム漏洩検知器、ナトリウム液位計、安全標示、電熱インタロック回路等がもうけられている。

Fig. 2 に加熱器の断面図を、Fig. 3 にヒータエレメントを示す。Fig. 2 に示す加熱器容器には、ヒータエレメント用スリーブ 8 個が設けられ、これにヒータエレメントを差込む構造になっている。また、最上部的スリーブ外表面に熱電対をとりつけ表面温度を監視し、ヒータが過熱した時電源がしゃ断できる安全対策がほどこされている。Fig. 3 に示すヒータエレメント内にはスパイラル状に加工したフィリップス社製 1NCI 30 型サーモアックスヒータ $3\phi \times 1m$ がおさめられ、マグネシヤによりヒータエレメントシースとは絶縁が保たれている。サーモアックスヒータ内では発熱用芯線もマグネシヤで絶縁が保たれているので、インコネル製ヒータエレメントシースと芯線との間には、マグネシヤが 2 層にもうけられていることになる。ヒータエレメント 1 本当りの発熱容量は最高 6KW、有効発熱部長さは 700mm であり、最高熱出力密度は 15W/cm 2 である。従来ナトリウム投開室に設けられている加熱器と比較すると、Fig. 4 に示すように熱出力密度は著しく高くなっており、ナトリウムインベントリは逆に小さくなっていくのがわかる。（図中の□印 H-4）

Fig. 5 に試験ポット内入口ノズルと試験片取付状態を、Table. 2 に試験機の設計仕様を示す。Fig. 5 に示すように試験ポットに流入する全ナトリウムはベローズおよびガイドにより試験片表面上を流れるような構造となっている。したがって、試験片表面は流速をもったナトリウムにより腐食されることになる。試験片の取りはずしができるように入口ノズルのベローズフランジは片側がねじ止め、他の側はベローズのスプリング力により入り口ノズルに押し付けられ、この部

分からのナトリウムの漏れをおさええている。

Fig. 7 に負荷装置および駆動装置を示す。試験片への負荷は左右の重錘、てこ、ロードセルを介し、かつ試験ポット内のレバー先端に取付けたピン試験片を介してプレート試験片にかかる。左右の試験荷重はロードセルにより連続的に測定される。試験片の上下摺動は無段変速モータ、偏心装置、ロードセル、駆動シャフトを介し、駆動シャフト先端に取付けたプレート試験片による摺動により行なう。摺動ストロークは偏心装置に取付けたカム調整により、摺動サイクルは無段変速モータ回転数の調整により行なう。摺動ストロークおよびプレート試験片とピン試験片間の摩擦力の測定はそれぞれ駆動シャフトに取付けた差動トランスおよびロードセルで連続的に測定される。

3. ナトリウム中試験

3.1 供試材および試験片形状

Table. 3 に供試材のミルシートによる化学成分を、Fig. 6 に試験片の最終寸法を、Table. 4 に試験片の製作方法を示す。試験片補助部はプレートの両側からピンを押し付けるピン&プレート形状となっている。コルモノイ No. 5、ステライト No. 6 および LC-1C は SUS 316 母材上に Table. 4 に示すコーティング法により施工製作した。即ちコルモノイ No. 5、ステライト No. 6 は酸素-アセチレンガスによる肉離、LC-1C はアトネーションガンによる溶射、SUS 316 およびイコネール 718 の試験片は圧延材および鍛造材を機械加工することにより製作した。

3.2 試験条件および試験方法

Table. 5 に試験条件を示す。試験片は 600 °C、流束 5 L/min のナトリウム中に最長 2200 時間を浸し、途中試験片間の摩擦力を求めた。試験面のナトリウム流速は 0.7 m/sec である。ナトリウムはコールドドラフトを 140 °C に制御し、かつブライグ温度を測定することにより純度管理し、試験中はコールドドラフトにより精製されたナトリウムが試験ラインに供給される。但し Fig. 1 に示した SW-3 と SW-1 あるいは SW-2 ラインを同時運転し、SW-1 あるいは SW-2 ラインを精製する時はナトリウムを VN-301、302 および VN-303 と VN-107、209 あるいは VN-201、208 の適宜切り替えにより純度管理されたナトリウムを SW-3 ラインに閉じ込めて同ラインの車庫循環運転方法で試験した。試験片は無負荷状態で流動ナトリウム中に浸漬し、摩擦力の測定時には、まず無負荷状態でプレート試験片を 1.5 mm のストロークで 3 往復させ摩擦力 F₀ を測定する。次にこれを介して左右のピン試験片に各々 6 kg の荷重を負荷することによりプレート試験片との接触面に同荷重を負荷し、同様に 3 往復移動させ摩擦力 F を測定する。この操作をある一定時間毎に行ない、浸漬時間と摩擦係数の関係を求めた。

Fig. 8 にストローク、F、F₀ の記録例を示す。

摩擦係数 μ_k (平均値) の計算は(1)式により求めた。

$$\mu_k = \frac{(F - F_0) / 2}{L} \quad (1)$$

- μ_k : 動摩擦係数
- F : 負荷時の上下運動による摩擦力の合計 (kg)
- F₀ : 無負荷時の上下運動による摩擦力の合計 (kg)
- L : 負荷 (kg)

F₀ は無負荷時の駆動機構掃動部の摩擦力およびプレート試験片上部のシール用ベローブの

スプリング力の合計をあらわす。

Fig. 9 にプレート試験片の速度分布を示す。モードによる回転運動が偏心カムにより上下運動に変換されるため試験片は単振動と同じ速度分布を有する。本試験では滑動速度が 0 ~ 0.63 mm/sec の範囲における μ_k の平均値が求められた。

ナトリウム浸漬開始時間は次のように決めた。SW-8 試験ラインにナトリウム充填後 400 °C に昇温しブライグ温度が定格値に安定するまでコールドドラフト 140 °C でナトリウム循環する。次に試験ラインを 600 °C に昇温すると材料表面より、ナトリウム中に酸素が移行するためブライグ温度が上昇するので、ひきつづきブライグ温度を監視し、定格値に到達した時刻を浸漬 0 時間とした。他の試験ラインの試験との兼ね合いより、600 °C 昇温後ブライグ温度が安定するまでの期間は 4 ~ 7 日と異なった。

上記のように定格条件に到達後 0 時間の摩擦力を測定し、その後は順次所定の浸漬時間毎 (例えば 24 時間後、48 時間後等) に測定を行なった。

動に及ぼす純度の影響を知るため、現在コーロドトラップ温度を140℃から120℃に変更し試験を行なっている。Fig. 16 および17に現在までに得られた結果を示すが、おののFig. 10 および18と比較するとステラライトNo.6およびLC-ICの摩擦挙動はコーロドトラップ温度に依存しないのがわかる。またコーロドトラップによる純度管理を試験中継続する場合はナトリウム中酸素量は一定に保持されるが、試験中に停止する場合はアルゴンガスからの酸素の汚染がないと仮定すると材料の焼成進行に伴ないナトリウム中酸素量が低下することが考えられる。しかし本試験では、Fig. 10～14に示すようにコーロドトラップを切離しても μ_k に明白な変化はみられなかった。コルモノイNo.5の μ_k が変動しているがコーロドトラップとの関係は明らかでない。

これらの事からコーロドトラップ温度120～140℃に相当するナトリウム中酸素量の変化(Eicherbergerのナトリウム中酸素の溶解度式⁽¹⁾によると1～2 p.p.mに相当)は摩擦係数に明白な影響を与えないことが予測される。これは摩擦係数に明らかな影響を示すには酸素量変化が小さすぎると思われる。Wilson⁽⁹⁾はインコネル718について摩擦係数への酸素量の影響をしらべ、232℃において酸素10 p.p.mにおける摩擦係数が酸素0.1～2.0 p.p.mにおける値よりわずかに10%低くなるだけであることを明らかにしている。このことは酸素1 p.p.mと2 p.p.mでの摩擦係数に差がないことを示し本試験結果と一致している。

4.3 摺動面の観察

Photo. 1に試験後の試験片の外觀の一例を示す。中央がプレート試験片、左右がピン試験片である。摺動試験片中央の黒色部は摺動痕である。

Photo. 2は摺動部の断面組織である。コルモノイNo.5表面に炭質層がみられる。これは2000時間、600℃ナトリウム腐食試験⁽³⁾でみとめられた腐食による変質層と同じものである。SUS316表面には摺動による塑性加工層がみられる。その他の材料では表面に特に変化はみとめられない。

Photo. 3に摺動面の状況を示す。コルモノイNo.5、インコネル718およびSUS316では明白に塑性流動が生じており、炭質層形態を示す。ステライトNo.6ではこれがわずかである。LC-ICではほとんど塑性流動が生じていない。

Photo. 4には浸漬後のコルモノイNo.5非摺動面を示す。表面形態は600℃、2000時間腐食試験の場合と全く同様で、特に純度が腐食しているのがわかる。

Photo. 5に600℃、600時間ナトリウム中試験したLC-ICプレート試験片の外觀を示すが、試験片角部のコーチンゲング端部でLC-ICが剥離しているのがわかる。このような剥離は平面上にコーチンゲングしたLC-ICの端部でも観察されており、応力集中以外の原因も考えられコーチンゲング法を改善する必要がある。この対策については、5問題点と対策の項に示した。

4. 試験結果および考察

4.1 動摩擦係数 μ_k の浸漬時間依存性および摺動速度依存性

Fig. 10～14に各種材料について求めた浸漬時間と μ_k の関係を示す。図には第1サイクル中の平均 μ_k と第2サイクルおよび第3サイクル中の平均 μ_k とを別々に示した。このように区別して示したのはナトリウム腐食による摩擦係数への影響が第1サイクルの摺動時に最も顕著にあらわれると考えたためである。他の試験ラインとの関係上、SW-3試験ラインとコーロドトラップとを連結できない期間が生ずるので、これも図中に示した。

各種材料の μ_k は次のとおりであった。

ステライトNo.6	: 0.15 ~ 0.35	(915 時間まで)
コルモノイNo.5	: 0.15 ~ 1.5	(926 時間まで)
インコネル718	: 0.65 ~ 1.15	(1148 時間まで)
LC-IC	: 0.35 ~ 0.55	(2168 時間まで)
SUS316	: 1.0 ~ 1.2	(2137 時間まで)

ただし、これらの値には100時間までの値は含まれていない。50時間あるいは100時間までの μ_k に、変動がみられるが、これは試験片摺動面間の初期なじみの影響であろう。本試験条件においてはLC-ICとステライトNo.6の μ_k が最も安定し、かつ低い値を示している。一方、SUS316とコルモノイNo.5の μ_k は他とくらべて高い値を示している。特にコルモノイNo.5の μ_k の変動は他の材料にくらべて著しい。

Fig. 15は全浸漬時間中に求められた第1サイクルの μ_k と第2および第3サイクルの μ_k の最大値と最小値と別々に棒グラフに示したものである。コルモノイNo.5は第1サイクルの μ_k より第2および第3サイクルの μ_k の方が低くなっているが、他の材料は第1サイクルと第2および第3サイクルの μ_k の差はほとんどない。

Fig. 9に示したようにプレート試験片の上下移動速度は0～0.63 mm/secと変化するが、Fig. 8に示すように各速度における負荷時の抵抗力F(試験片摺動面以外での抵抗力も含め)と無負荷時の抵抗力 F_0 (試験片摺動面以外の試験ゼット上部のシール部および駆動機構での抵抗力)との差(μ_k に対応)は変化せず明白な摺動速度依存性を示さなかった。

4.2 動摩擦係数 μ_k とナトリウム純度との関係

金属材料がナトリウム中に浸漬されると、腐食変質層および複合酸化物(NaCrO₂等)が生ずる。これらの生成量はナトリウム純度(特に酸素量)に依存するといわれており、摩擦挙

が接触し、Fig. 18 に示すように無負荷時の抵抗値がストロークとともに変化した。対策としてベローズ内径を大きくすることが考えられる。またストロークを大きくした場合ベローズ反力の増加によりストロークとともに抵抗値変化が大きくなることが考えられる。しかし負荷時のストロークと抵抗値変化の関係は無負荷の場合と同じであるから μ_k の計算はでき

る。

5. 問題点と対策

本試験により判明した問題点、「もんじゅ」設計条件との対応上生じた問題およびその対策を以下に示す。

5.1 本試験により判明した問題点と対策

5.1.1 LC-IC コーティング端部の剥離

LC-IC の剥離については筆者の一人が米留学中に調査した結果、米國でも観察されていることがわかった。この対策として次のことが考えられる。^{(4),(6)}

- (1) 剥離の上な原因として、コーティング前の母材のグリットプラスチックにA₂O₃粉末が母材上に残留することが考えられるので、LC-1H材コーティングに適用されている丸形状のA₂O₃粉末を使用し、残留量を少なくする。
- (2) バインダーであるNiCr粉末の径が小さいものを使用し組織を均一化する。
- (3) グリッドプラスチックをコーティング領域より広く施す。
- (4) コーティング厚を薄くする。本試験片のコーティング厚は0.2mmであったが、FFTF燃料集合体パッド部は0.05~0.1mmである。
- (5) コーティング端面にテーパをつける。
- (6) (1)および(2)の対策がとり入れられているLC-1Hについて、試験片を製作しナトリウム中試験を行なって、その効果を確認する。

なお、1978年4月の日米専門家会議の合意により米國製LC-1Hを入手することが決まっており、これについて試験が実施される予定である。またこれは國産のLC-1Hを製作する場合参考資料となる。

5.1.2 コルモノイNo.5 腐食変質層の元素分析

コルモノイNo.5のナトリウム蒸液面に生成した腐食変質層の元素分析をXMAで観および面分析で行なったが、充分な変質層の厚みがなく元素量変化はみとめられなかった。このような変質層は2000時間⁽⁷⁾および4000時間⁽⁸⁾腐食試験、「もんじゅ」燃料集合体用ラップ管パッド材ナトリウム中浸漬試験でもとめられているが、B、Si、Crが減少し変質層を生成したものと推測される。今後の詳細な解析によりこの点を明らかにしていきたい。

5.1.3 シール部の抵抗

試験片に試験荷重をかけない場合においても、試験機の構造上シール用ベローズおよび駆動機構から生ずる抵抗はさげられないので、この分は負荷時の摩擦抵抗より差し引き動摩擦係数 μ_k を計算した。しかし、試験片の取付具合により、シール用ベローズと駆動シャフト

5.2 「もんじゅ」設計条件との対応上生じた問題点と対策

5.2.1 ナトリウム中放射線量の影響

本試験は「もんじゅ」で計画されている一次系のコールドドラフトラップ運転温度140℃にて行なった。しかし放射線腐食生成物の生成およびその冷却系への分散を少なくするため、一次系のコールドドラフトラップ運転温度を120℃に下げることが指向されている。従って、本報告書に関する腐食試験についてもコールドドラフトラップ温度を120℃に変更し試験を開始した。

5.2.2 静摩擦係数 μ_s および破断摩擦係数 μ_B の測定

「もんじゅ」設計では摺動が断続的に行なわれ、かつ長時間停止後摺動する機器部材が考えられるので、 μ_s および μ_B も測定評価する必要がある。従って現在行なっているコールドドラップ120℃における試験では動摩擦係数 μ_k だけでなく μ_s および μ_B の測定も行う予定である。また μ_B は自己融着性を評価する一方法でもあるので、材料間の自己融着性の比較がこれによりできることになる。

6. 結 論

本試験の結果次のことがわかった。

- (1) SW-3 試験装置による長時間摩耗試験方法を確立できた。
 (2) 本試験時間ではコルモイ No. 5 を除き動摩擦係数 μ_k のナトリウム浸漬時間依存性はなく、ナトリウム腐食による材料表面変質の影響は無視できる。

- (3) コルモイ No. 5 は表面に明白な腐食変質層を生成するのでナトリウム中での使用は好ましくない。

- (4) 材料ごとの μ_k 値は次のとおりであった。

ステライト No. 6 / self	0.15 ~ 0.35
コルモイ No. 5 / self	0.15 ~ 1.5
インコネル 718 / self	0.65 ~ 1.15
LC-1C / self	0.85 ~ 0.55
SUS 316 / self	1.0 ~ 1.2

- コルモイ No. 5 の μ_k は試験時間中著しく変化した。以上の結果、燃料集合体の緊密な配列上必要とされる理論値 ($\mu_k < 0.57$)⁽⁶⁾ を適用するとすれば、コルモイ No. 5 およびインコネル 718 は燃料集合体パッドへの適用から除外される。

- (5) D-Gun 社で施工したコーティング厚 0.2 mm の LC-1C はコーティング端部で剥離を生じたのでコーティング法の改善が必要である。

7. あ と が き

これまで装置の概要およびコーールドラフトラップ温度 140 °C におけるナトリウム中摩耗試験結果について述べた。その結果 600 °C ではコルモイ No. 5 を除き動摩擦係数に対するナトリウム腐食の影響はほとんど認められなかった。現在はコーールドラフトラップ 120 °C での摩耗試験を行っており、酸蒸気の影響を明らかにしていきたい。この場合にも、今まで得られた結果ではナトリウム腐食の影響はないと考えられるので浸漬時間を短くし、ストローク、荷重および負荷保持時間の影響をさらへる予定である。

最後に、本試験の推進を図っていただいたナトリウム技術部長三本保秀氏、FBR 本部山本研、永新紀生両氏に感謝します。装置の運転保守をしていただいた常勤産業職員の方々に感謝します。

8. 文 献

- (1) R. L. Eicherberger, "The Solubility of Oxygen in Liquid Sodium : A Recommended Expression", AI-AEC-12685 (1968)
- (2) W. L. Wilson, et al., "The Tribological Behavior of Inconel 718 in Sodium Cooled Reactor Environments", International Conference on Mechanical Behavior of Materials (1976)
- (3) 加納, 他, 「表面硬化材のナトリウム中試験(I), 2000時間腐食試験」 SN941 77-111.
- (4) 加納, 「米國原子報告, General Electric社(San Jose)におけるSG材開発の現況」 SN960 78-08.
- (5) WARD-NA-3045-28, "Friction, Wear and Self-Welding Quarterly Progress Report".
- (6) 山本, 他, 「海外出張報告, ナトリウムおよびカバ-ガス中の材料挙動に関する日米専門家会議」 SN260 78-12.
- (7) 中山, 他, 「表面硬化材のナトリウム中試験(V), 4000時間腐食試験」 SN941 79-106.
- (8) 長谷川, 他, 「表面硬化材のナトリウム中試験(III): 「もんじゅ」燃料集合体用ラップ管パッド材のナトリウム中浸漬試験」 SN941 79-26.

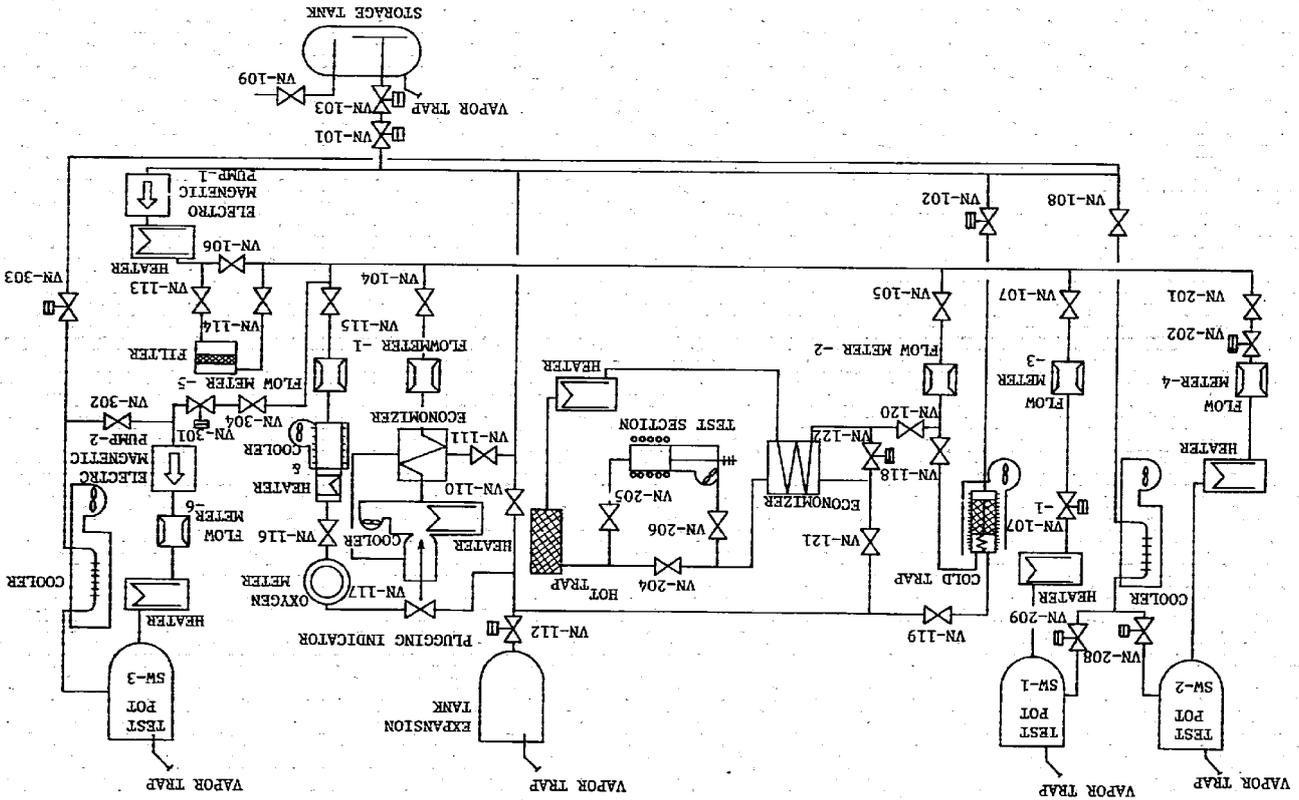


Fig. 1 Self-welding and wearing test loop flow sheet

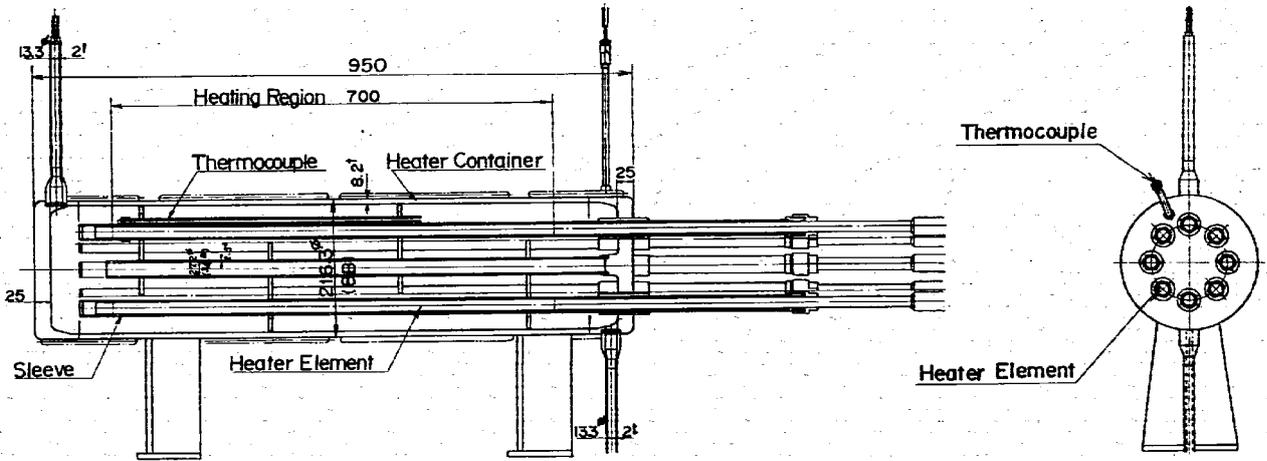


Fig. 2 Cross - section of heater

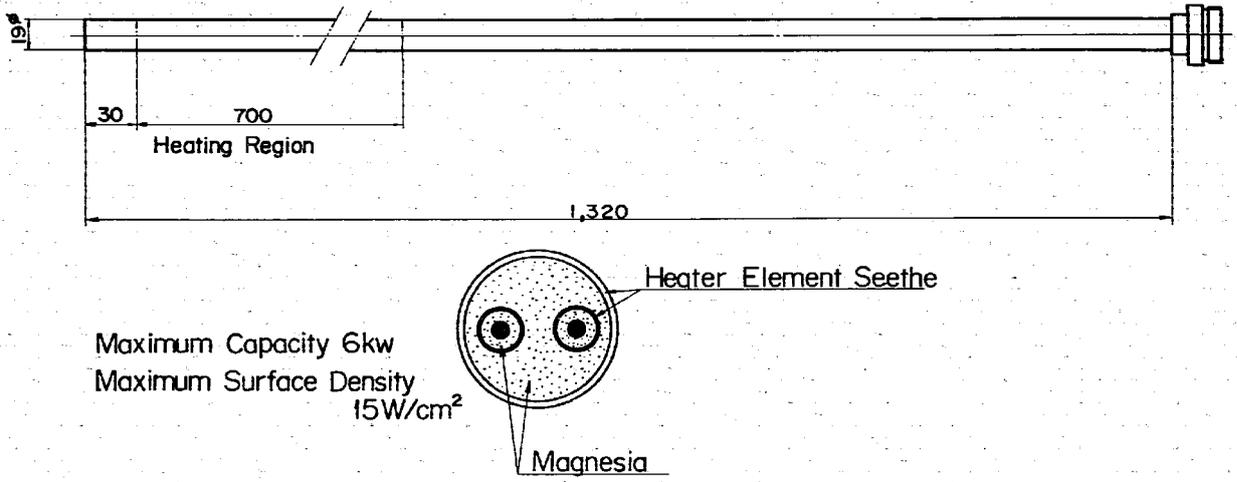


Fig. 3 Heater element

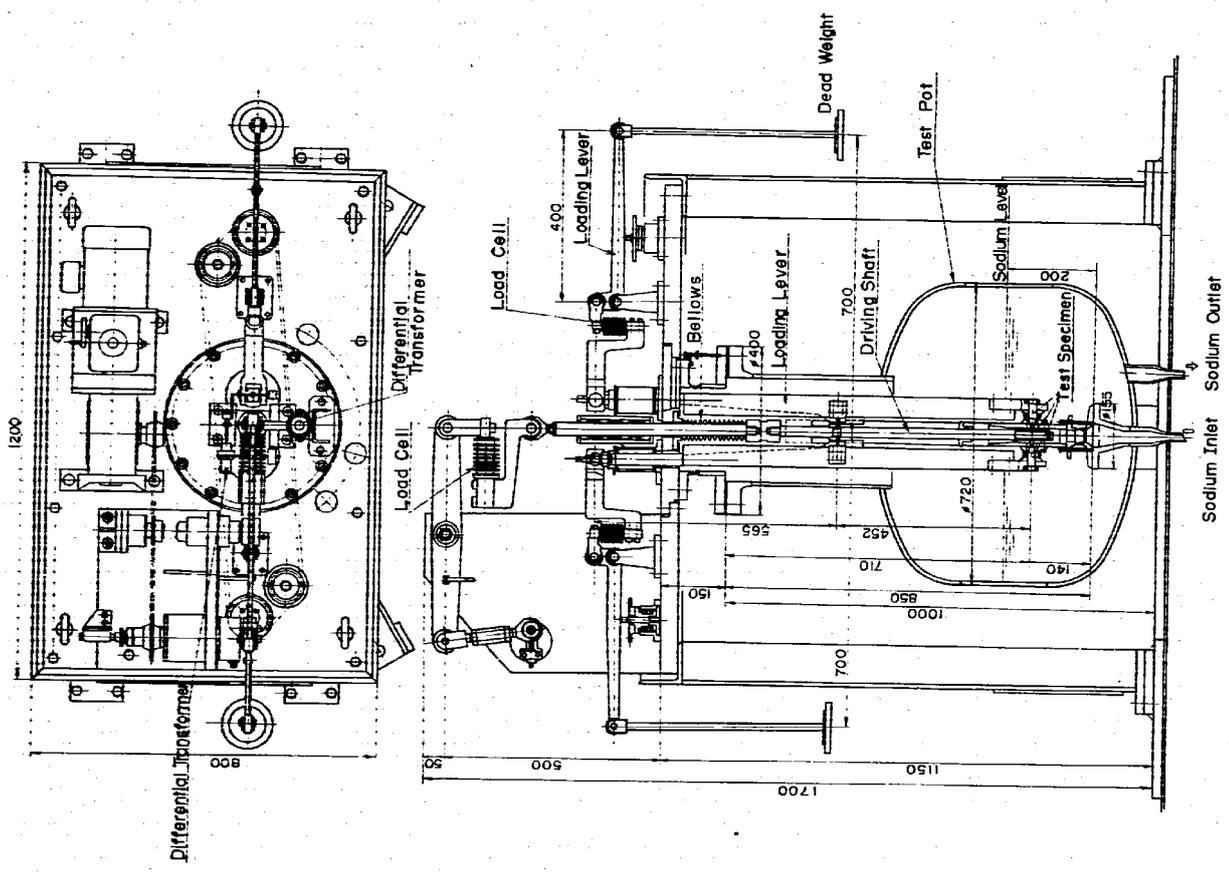


Fig. 7 Loading and driving apparatus

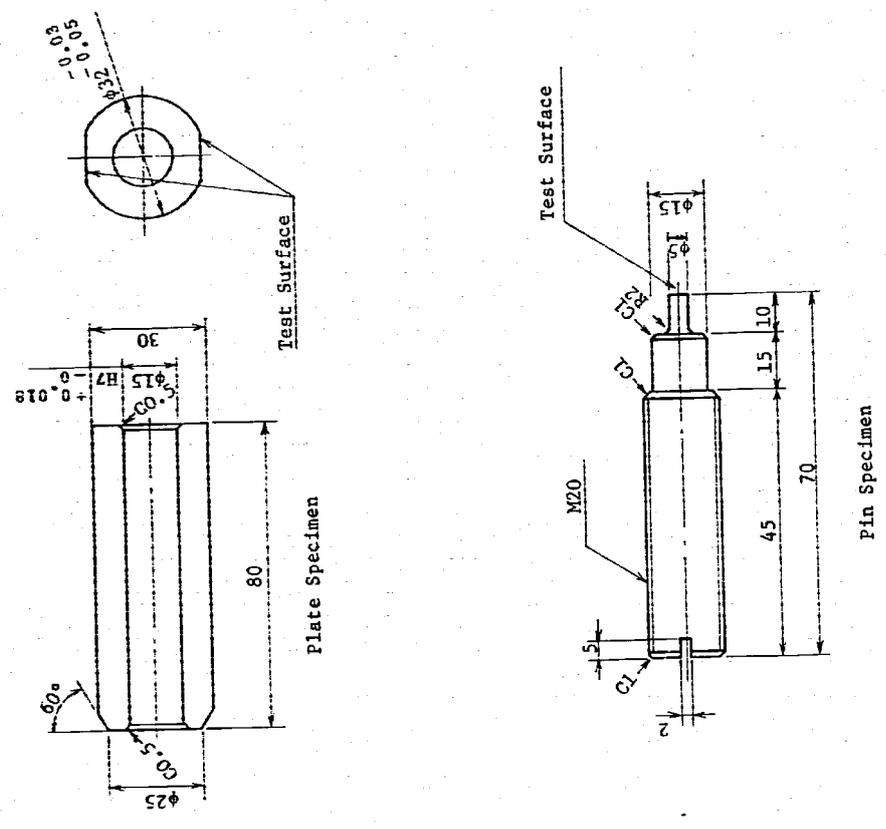


Fig. 6 Configuration of test specimen

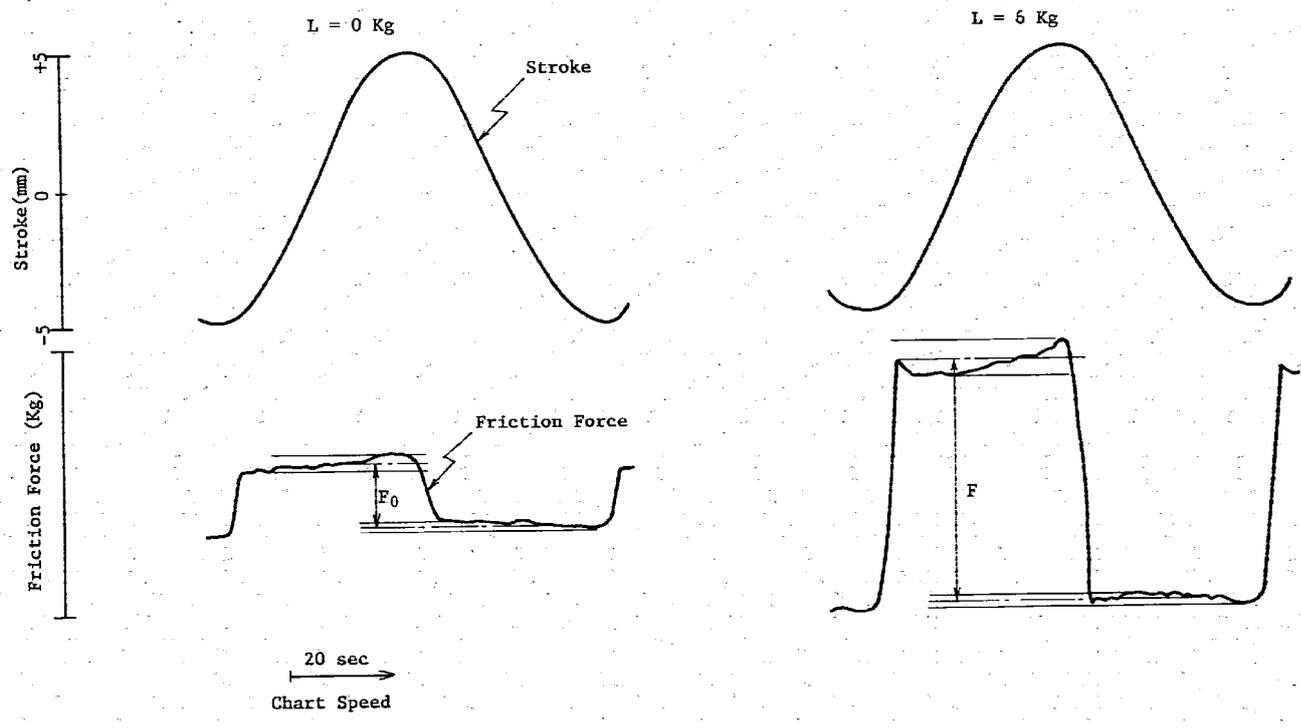


Fig. 8 Curves of friction force and stroke

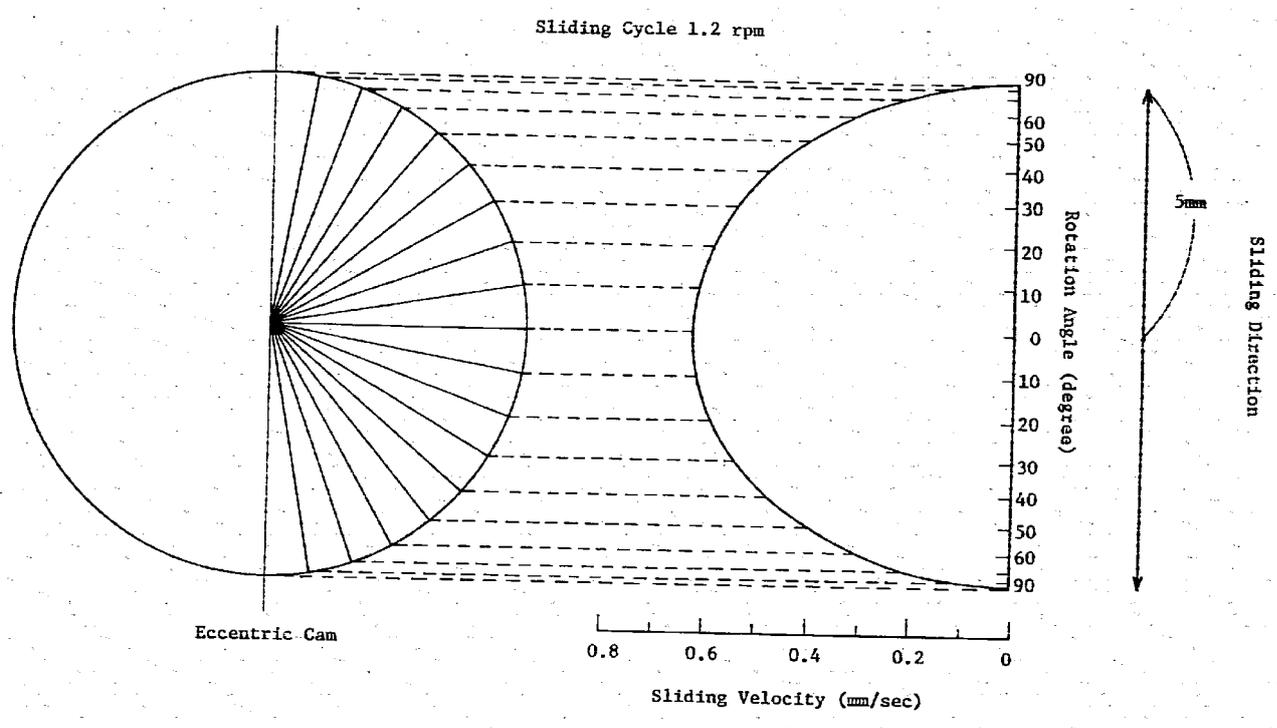


Fig. 9 Distribution of sliding velocity

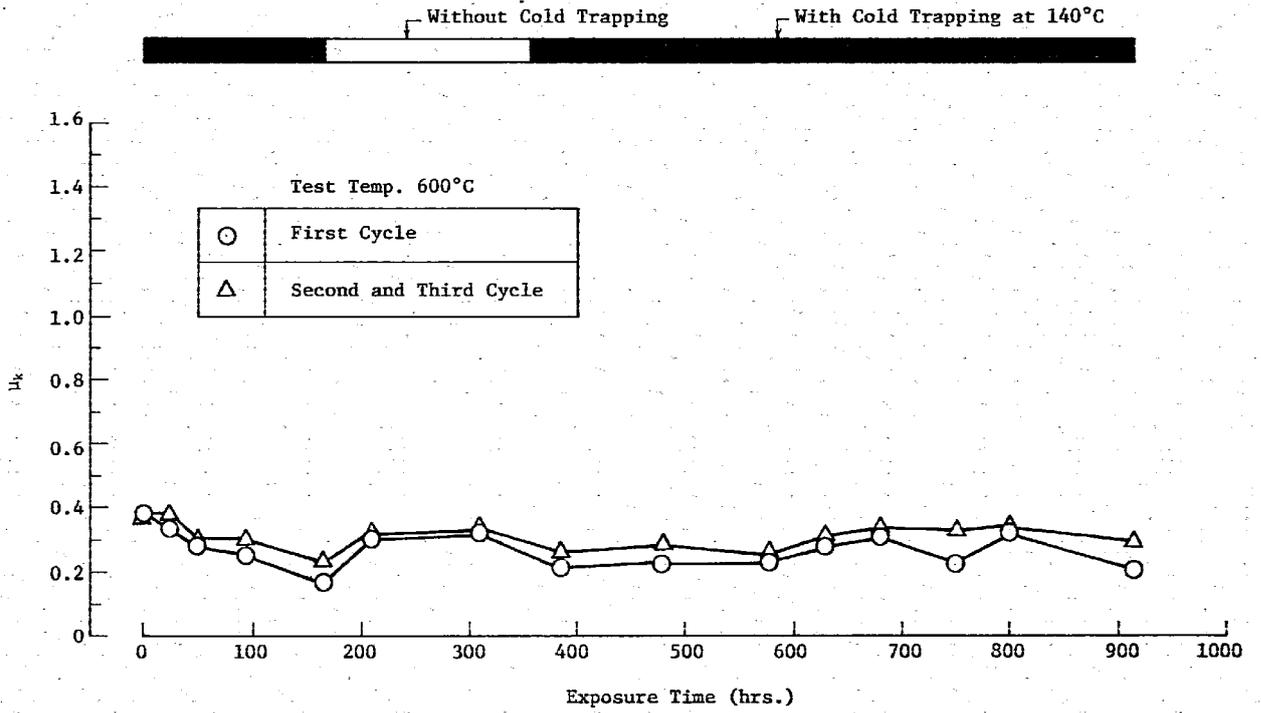


Fig. 10 Relation between μ_k and exposure time for Stellite NO.6/self at cold trap temperature at 140°C

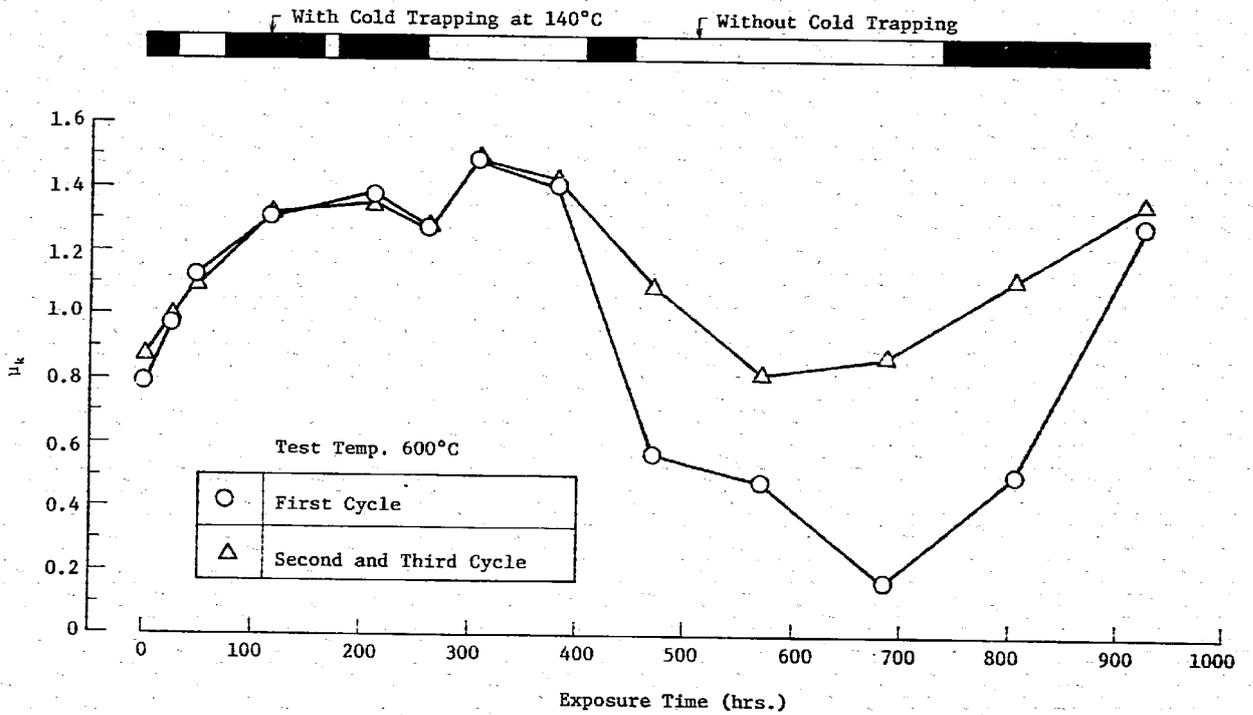


Fig. 11 Relation between μ_k and exposure time for Colmonoy NO.5/self at cold trap temperature of 140°C

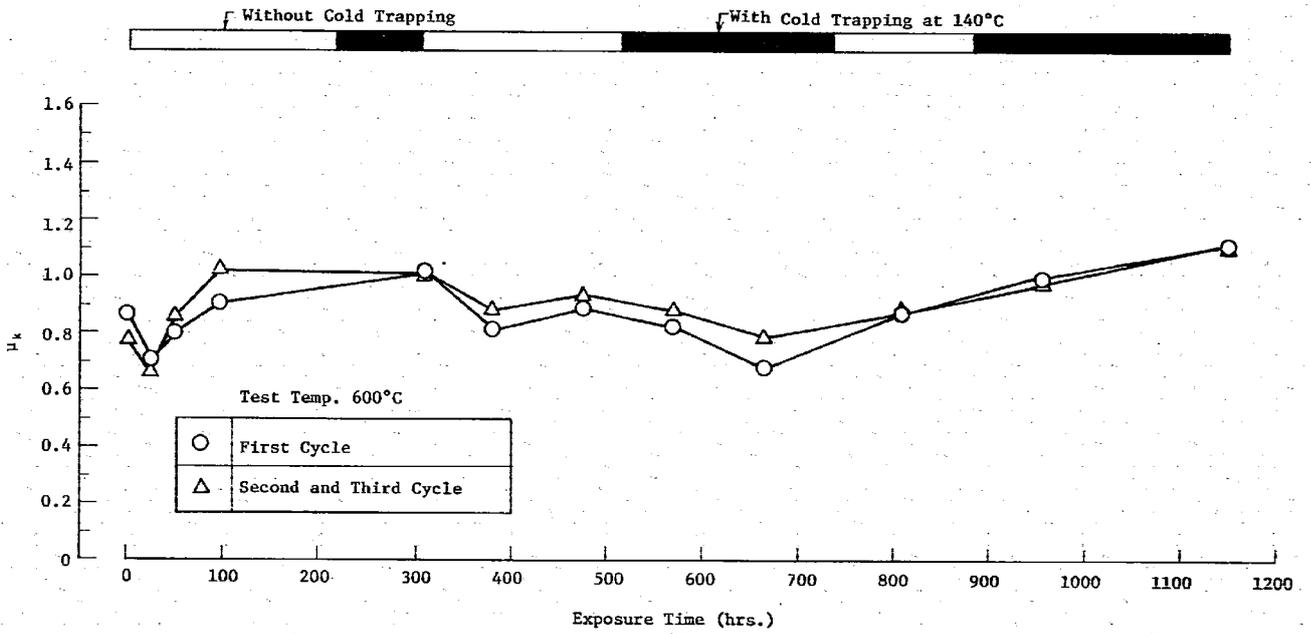


Fig. 12 Relation between μ_k and exposure time for Inconel 718/self at cold trap temperature of 140°C

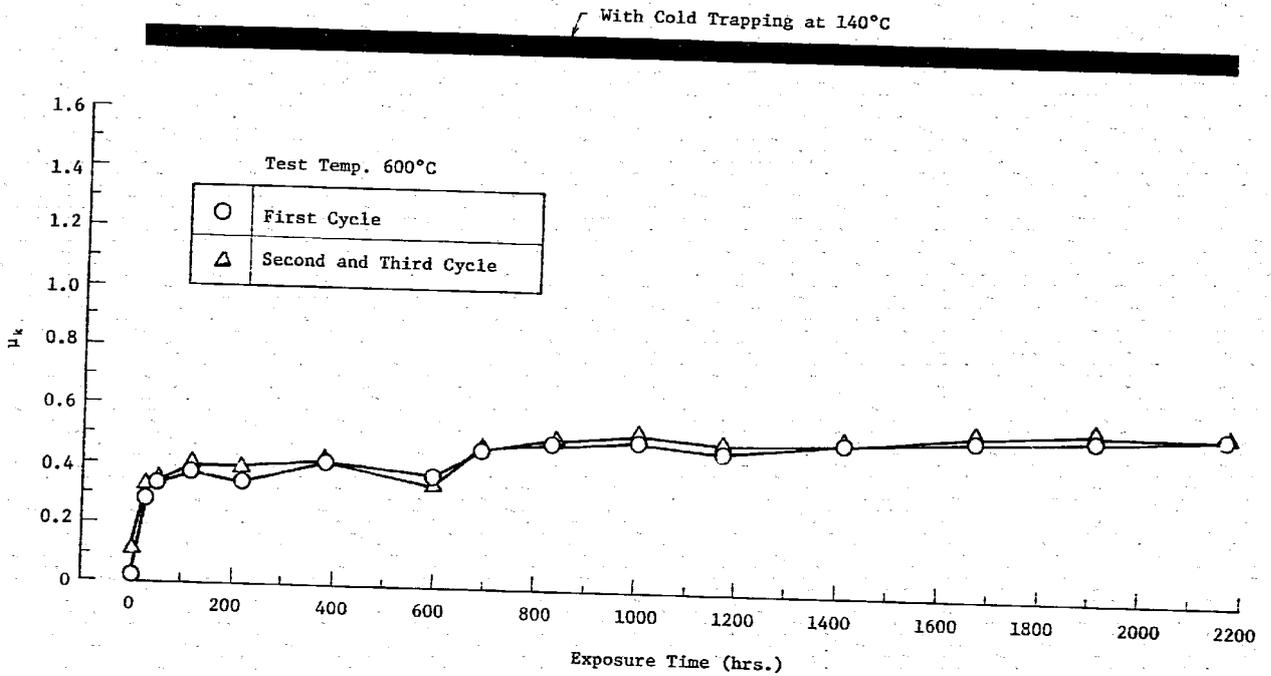


Fig. 13 Relation between μ_k and exposure time for LC-1C/self at cold trap temperature of 140°C

- 26 -

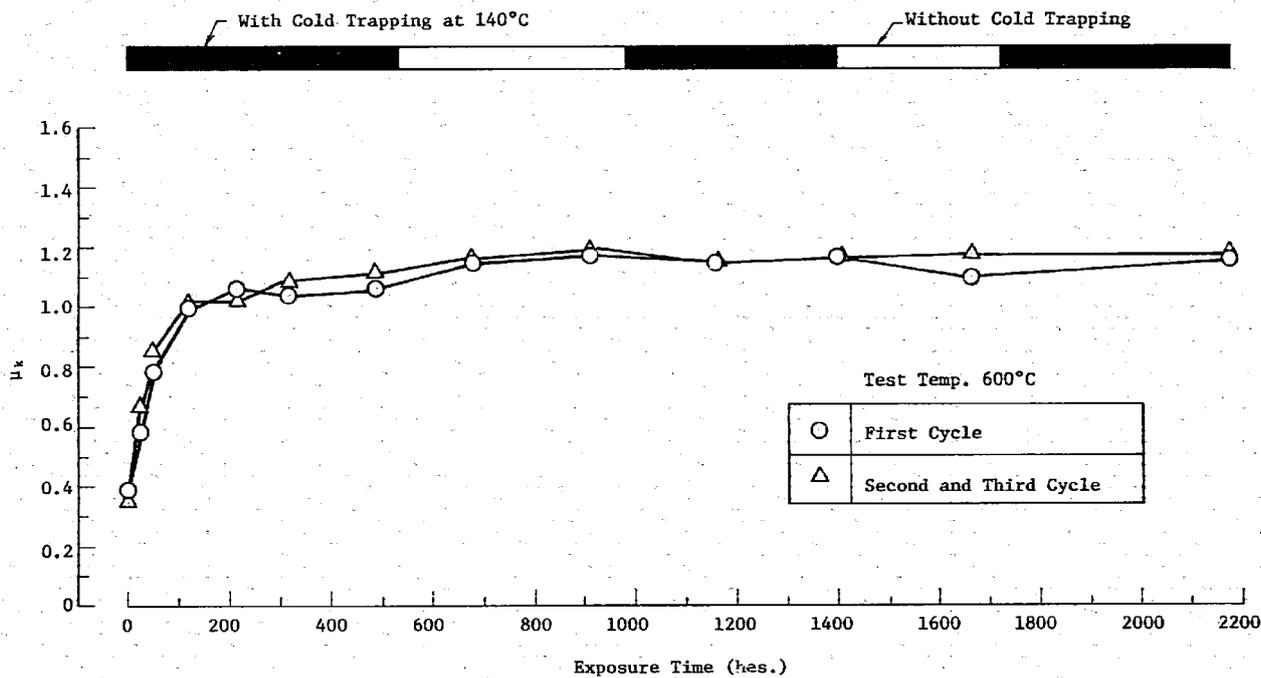


Fig. 14 Relation between μ_k and exposure time for SUS 316/self at cold trap temperature of 140°C

- 27 -

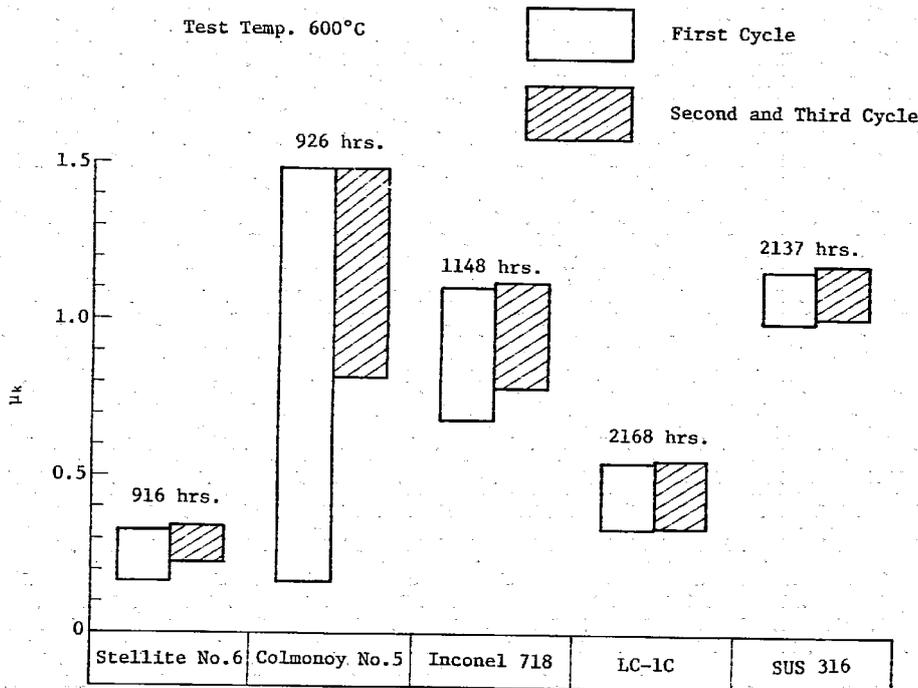


Fig. 15 μ_k of various materials

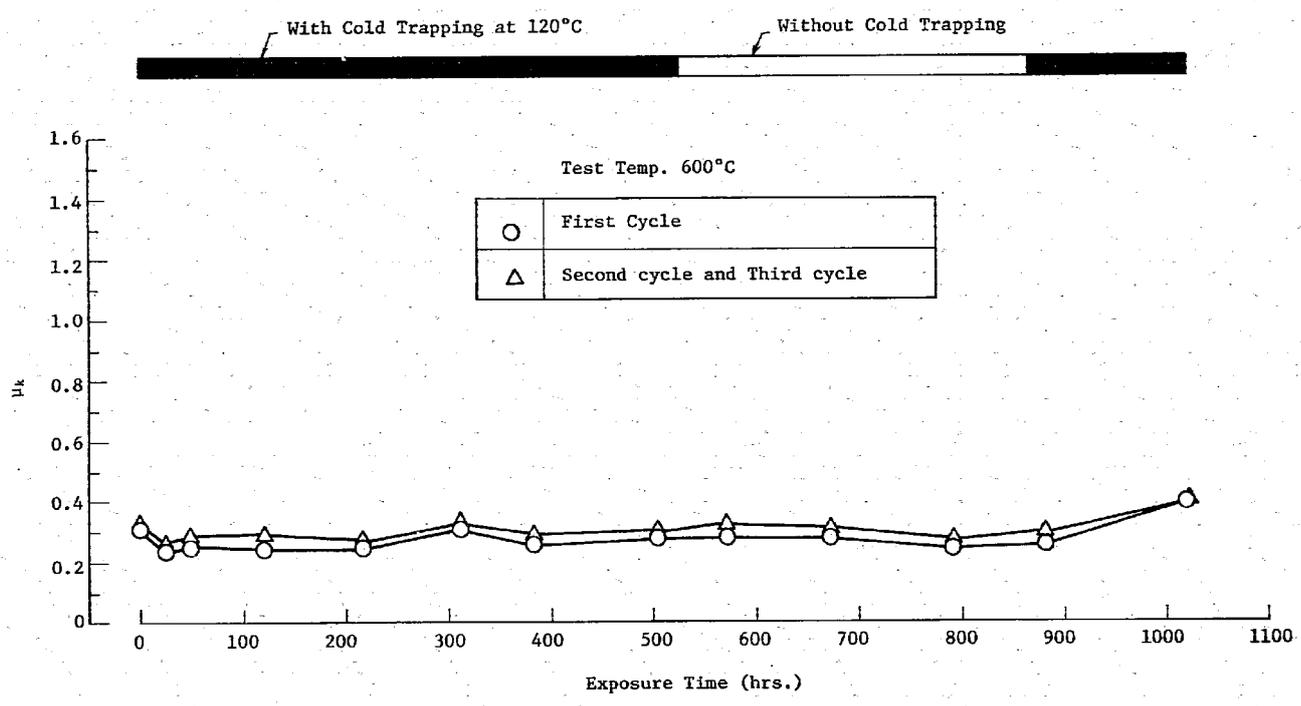


Fig. 16 Relation between μ_k and exposure time for Stellite NO. 6/self at cold trap temperature of 120°C

- 28 -

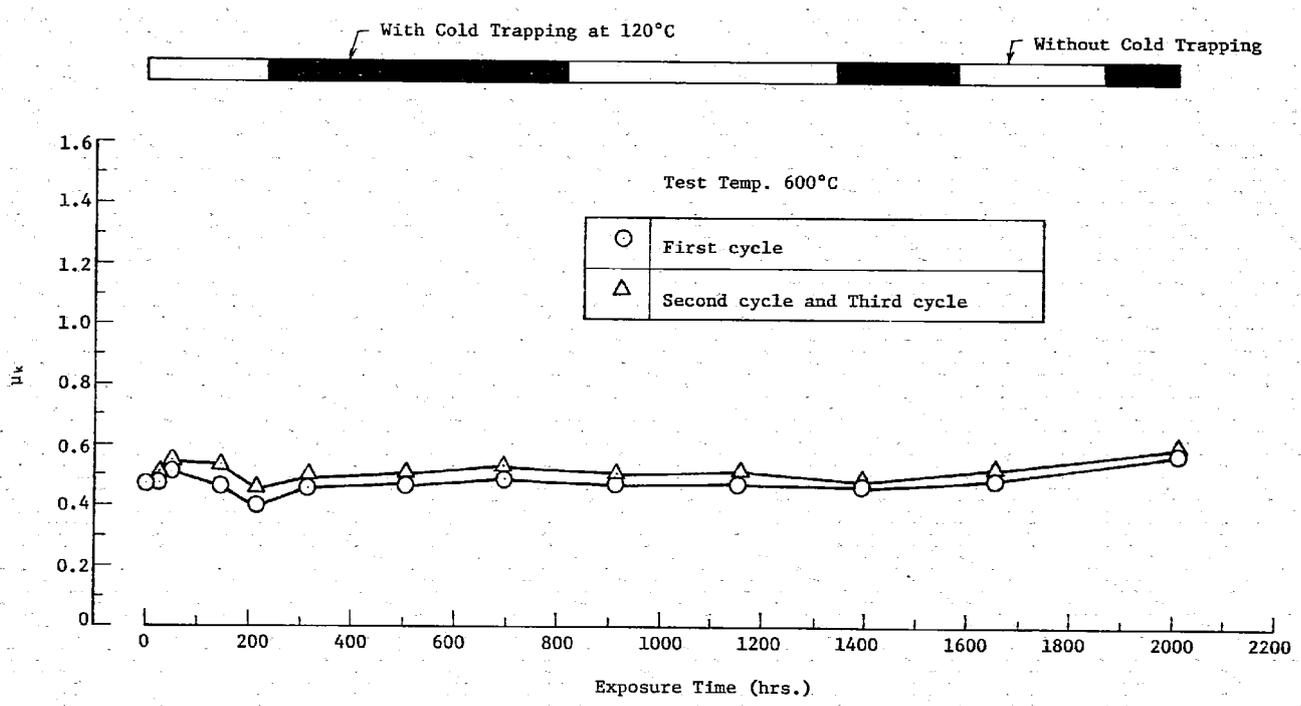


Fig. 17 Relation between μ_k and exposure time for LC-1C/self at cold trap temperature of 120°C

- 29 -

Table. 1 Design items of SW-3 test loop

Maximum Test Temperature	(°C)	700
Sodium Flow Rate	(l/min)	5
Sodium Velocity	(m/sec)	0 ~ 1
Pressure	(kg/cm ²)	-1 ~ 5
Material		SUS 316

Table. 2 Design items of test apparatus

Friction Force	(Kg)	0 ~ 200
Sliding Stroke	(mm)	0 ~ ±50
Sliding Cycle	(r.p.m)	0 ~ 12
Load	(Kg)	0 ~ 100
Lever Ratio		1 : 10

Fig. 18 Curves of friction force and stroke

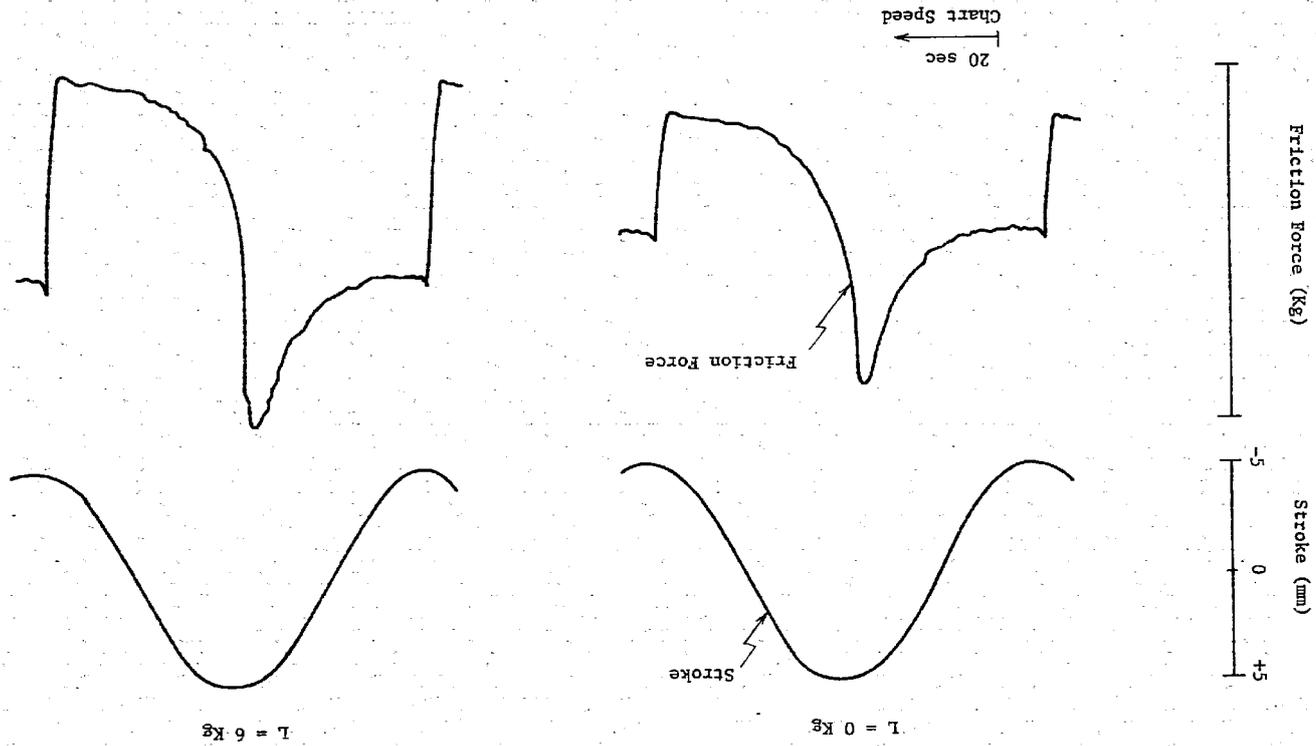


Table. 4 Manufacturing method of test specimen

Material	Coating Method	Coating Thickness
Colmonoy No. 5	Oxy-Acetylene Gas Weld	2 mm
Stellite No. 6	Oxy-Acetylene Gas Weld	2 mm
LC-1C	D-Gun, Brush Finish	0.2 mm

Table. 5 Test Conditions

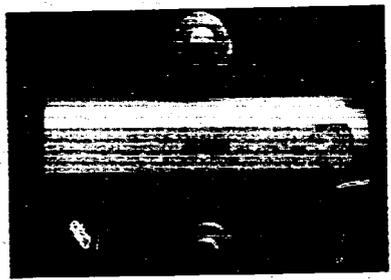
Sodium Temperature	(°C)	600
Cold Trap Temperature	(°C)	140
Sodium Flow Rate	(l/min)	5
Sodium Velocity	(m/sec)	0.7
Sliding Stroke	(mm)	±5
Sliding Cycle	(r.p.m)	1.2
Load	(kg)	6
Contact Stress	(kg/mm ²)	0.3
Contact Area of Test Specimen	(mm ²)	19.6
Test Duration	(hrs.)	0 ~ 2200
Sliding Velocity	(mm/sec)	0 ~ 0.63

(w/o)

Table. 3 Chemical composition (w/o sheet value)

Material	C	Si	B	Fe	Cr	Ni	Co	W	Mo	Mn	Cu	Nb	Al	Ti	P	S
SUS 316	0.06	0.47	Bal.	16.58	10.76			2.15	1.00						0.035	0.006
Colmonoy No. 5	0.54	3.47	2.05	3.47	11.5	Bal.										
Stellite No. 6	1.04	1.17	0.27	28.65	Bal.	4.20										
Inconel 718	0.06	0.09	0.003	Bal.	18.74	52.77	0.03	3.05	0.14	0.03	4.84	0.65	1.00	0.01	0.003	
LC-1C																

Plate Specimen

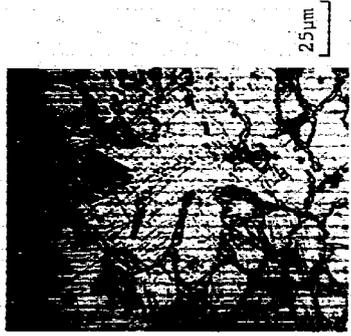


Pin Specimen

Pin Specimen

10mm

Colmonoy No.5



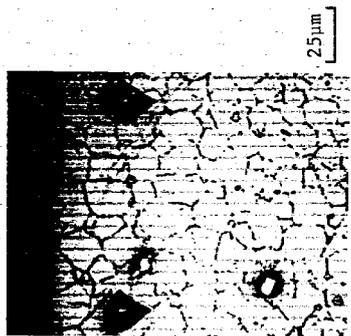
Stellite No. 6

25µm



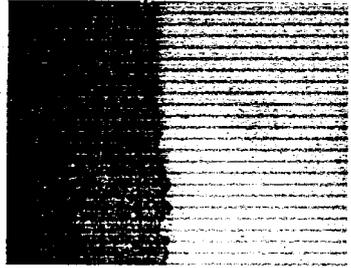
Colmonoy No. 5

25µm



Inconel 718

25µm

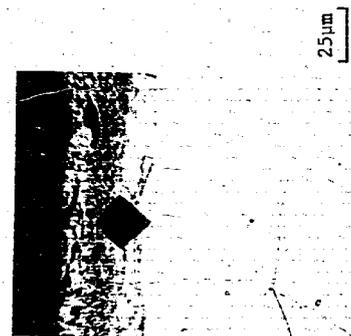


LC-1C

SUS316

25µm

LC-1C



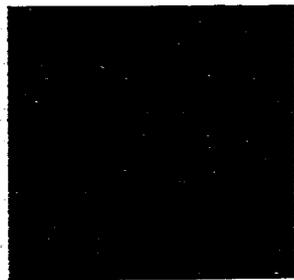
SUS 316

25µm

Photo. 1 Exposed test specimen

Photo. 2 Cross-sectional micrograph of sliding surface

Stellite No. 6

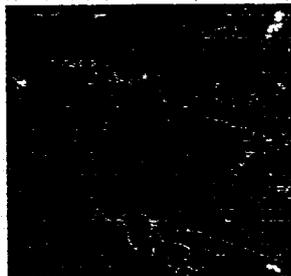


2mm

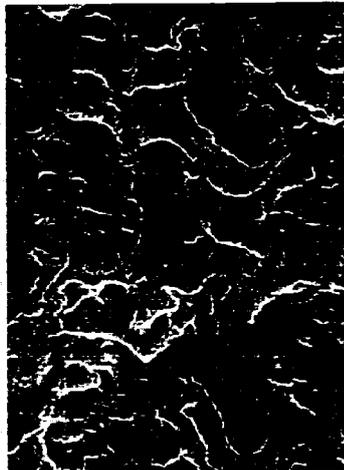


1µm

Colmonoy No. 5



2mm



1µm

Inconel 718

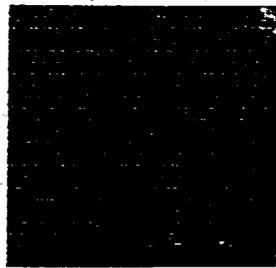


2mm

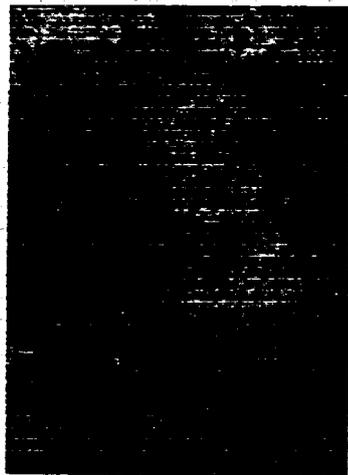


1µm

LC-1C



2mm

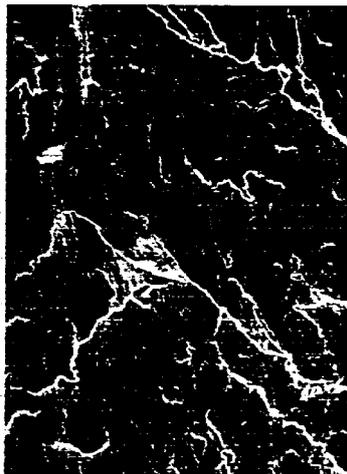


1µm

SUS 316



2mm



1µm

Photo. 3 Stereograph and scanning electron microscopy of sliding surface on plate specimen.

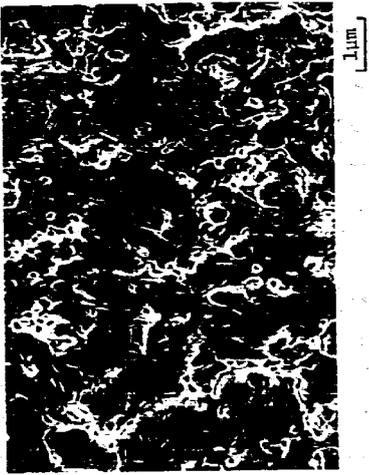


Photo. 4 Scanning electron microscopy of exposed surface of Colmonoy No. 5 without sliding

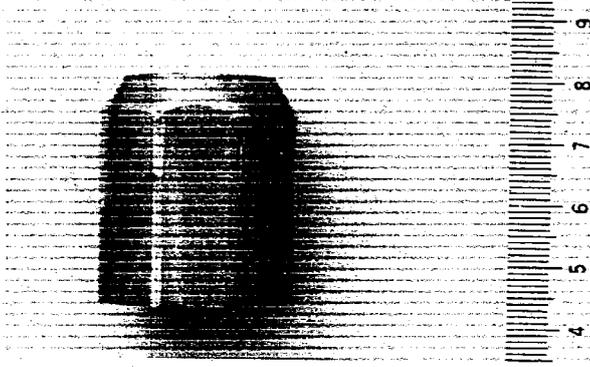


Photo. 5 LC-1C test specimen