

表面硬化材のナトリウム中試験(II)

常温アルゴン中試験

1977年8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)

1977年8月

表面硬化材のナトリウム中試験(II)

—常温アルゴン中試験—

加納 茂機* 中山 紘一* 長谷川成生*
小坪 亨* 滑川 優* 中筋 孝*
厚母 栄夫**

ナトリウム冷却高速炉機器の摺動部材の開発研究として一連のナトリウム中試験が行なわれ、各種材料の短時間の摩擦、摩耗特性が明かにされている。^{(1)～(5)} 本研究ではナトリウム中試験に供されてきた材料組合せを、一部の摺動部が位置するアルゴン雰囲気中で試験し、室温アルゴン中の摩擦、摩耗挙動を明かにするとともに450°Cナトリウム中データと比較した。その結果次のことが明かとなった。

- (1) 静摩擦係数(μ_s)はアルゴン中においてほとんどの材料組合せが0.2以下であり、ナトリウム中より小さい。
- (2) 動摩擦係数(μ_k)はアルゴン中において荷重とともに変動する。又、アルゴン中とナトリウム中の μ_k の大小は材料組合せに依存する。
- (3) 摩耗量はアルゴン中において著しく、ナトリウム中で摩耗しないステライトおよびコルモナイもアルゴン中では摩耗する。
- (4) 摺動面はアルゴン中において塑性変形しやすく表面が粗くなり、摺動面のかたさはアルゴン中の方が小さくなる傾向がある。
- (5) アルゴン中とナトリウム中の摩擦、摩耗特性には著しい差があり、アルゴン中データでナトリウム中挙動を推定することは困難である。
- (6) 高温アルゴン中の摩耗特性は常温アルゴン中のものより劣り、ナトリウム中との差がさらに大きくなると考えられる。

* 大洗工学センター、ナトリウム技術開発室

** FBR 開発本部

PNC TN941 77-179

Aug., 1977

In-Sodium Tests of Hard Facing Materials (II)

Test Result in Room Temperature Argon

Shigeki KANOH*,
Kohichi NAKAYAMA*,
Naruo HASEGAWA*,
Tohru KOAKUTSU*,
Masaru NAMEKAWA*,
Takashi NAKASUJI* and
Hideo ATSUMO**

A series of experiments have been carried out to develop and screen friction and wear resistant materials used for sliding components of a sodium cooled reactor. Preceding studies⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾ clarified the short-term friction and wear characteristics of various materials in 450°C sodium.

A present study relates to clarify friction and wear behavior in argon environment, where a part of sliding components are located, and compare test data in room temperature argon with those in 450°C sodium. The results obtained are as follows:

- (1) Static friction coefficients (μ_s) in argon were almost lower than 0.2. They were apt to be lower than those in sodium.
- (2) Kinetic friction coefficients (μ_k) in argon varied with load. The difference of μ_k in argon and sodium depended on material combination.
- (3) Wear rates were remarkably high in argon. Wear rates of Colmonoy and Stellite were not detected in sodium, but were detected in argon.
- (4) Sliding surface was more roughened in argon, and hardness of sliding surface was almost lower in argon than in sodium.
- (5) There is the significant difference between friction and wear characteristics argon and those in sodium. Then, it is difficult that in-sodium behavior is estimated with in-argon data.
- (6) The above-mentioned difference in room temperature argon and 450°C sodium will be greater when the test is carried out in higher temperature argon.

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

** FBR Project

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
3. 試験結果	3
3.1 摩擦係数について	3
3.2 摩耗量について	3
3.3 金相試験結果	4
3.3.1 表面あらさ	4
3.3.2 かたさ	4
3.3.3 顕微鏡組織	4
4. 考 察	5
5. 結 論	7
6. 文 献	9

1. まえがき

高速炉機器摺動部は液体ナトリウム中または、カバーガスアルゴン中に存在する。摺動部材のナトリウム中摩擦・摩耗挙動についてはすでに報告され、(1)～(5)各種材料組合せについて短時間の摩擦・摩耗特性の違いが明かにされている。一方アルゴン中試験は諸外国では行なわれておらず、ナトリウム中試験と同様にアルゴン中試験を実施し設計の基礎データを得る必要がある。

本報ではナトリウム中試験を行なった材料組合せについてナトリウム中試験と同じ条件で室温アルゴン中で試験し、各種材料組合せの摩擦・摩耗挙動を明かにした。また、室温アルゴン中データと450℃ナトリウム中データを比較することにより、これら実機零圧気における摩擦・摩耗特性の違いおよび摩擦・摩耗に対するナトリウムの効果を明かにした。

2. 試験方法

2.1 試験装置

ナトリウム中試験を行なった自己融着摩耗試験ループのSW-1試験ポットに常温アルゴンガスを充填してアルゴン中試験を行なった。装置はナトリウム中試験に使用したものと同じもので、詳細については前報⁽³⁾⁽⁴⁾を参照されたい。

2.2 試験方法

Table. 1 に摩擦試験条件を、Table. 2 に摩耗試験条件を示す。比較のためナトリウム中試験条件も示したが、試験片形状、摺速、荷重漸増法はナトリウム中試験条件⁽³⁾⁽⁴⁾と全く同じである。

Table. 3 に試験片の化学成分を、Table. 4 に試験片の組合せを、そして Table. 5 には試験片の肉盛方法を示す。アルゴン中試験片はナトリウム中試験片と同一肉盛方法および同時期に製作したもの用いた。

なお後述の図中の材料名は Table. 3 に示すシンボルにより表示した。

3. 試験結果

3.1 摩擦係数について

Fig. 1に各種材料組合せの室温アルゴン中における荷重と静摩擦係数 μ_s との関係を実線で示す。インコネルX同志、コルモノイNo.5 vs. コルモノイNo.6 およびステライトNo.1同志を除くすべての組合せの μ_s が0.2以下である。図の破線は450°Cナトリウム中データを示す。450°Cナトリウム中よりも室温アルゴン中の方が μ_s が低くなる傾向があり、かつ μ_s の荷重依存性は小さい。

Fig. 2に各種材料組合せの室温アルゴン中における荷重と動摩擦係数 μ_k との関係を実線で示す。 μ_k に荷重依存性があるのがわかる。図中の破線は450°Cナトリウム中データを示す。ナトリウム中の μ_k の方が荷重依存性が小さいのがわかる。 μ_s の場合と違い、アルゴン中の μ_k とナトリウム中の μ_k の大小は材料組合せに依存している。インコネルX、ステライトNo.1、LC-1C およびLW-1N40の μ_k はナトリウム中のものが一段と高い値を示しており、逆にコルモノイNo.6同志、コルモノイNo.6 vs. デロロステライトSF-60M、およびコルモノイNo.6 vs. ステライトNo.1の μ_k はアルゴン中のものより高くなっている。

Fig. 3-1と3-2はおのおのFig. 1およびFig. 2における荷重220kg (面圧1kg/mm²)での摩擦係数をヒストグラフで表わしたものである。

3.2 摩耗量について

摺速3.6cm/secで15分おきに荷重を漸増していく、各荷重までの摩耗深さ（ロータとステータの合計）の積算値 ΣW_D より各種材料組合せの摩耗特性を比較する。本法における摩耗深さの最大測定感度は約4μmであった。

Fig. 4は室温アルゴン中における荷重と ΣW_D の関係を表わす。Fig. 5に示した450°Cナトリウム中データと比べると、アルゴン中ではすべての材料組合せの摩耗量が多くなっている。ナトリウム中の摩耗量が検出感度以下であったステライト合金およびコルモノイ合金は約100μm以上の摩耗深さを示している。LC-1C およびLW-1N40の摩耗深さ曲線は高荷重域で再上昇しているが、これは約200μm厚のカーバイト材コーティング層が摩滅して台金のSUS304が表面に露出したことにより、カーバイト材同志の摺動からSUS304とカーバイト材またはSUS304同志の摺動に変ったためと考えられる。室温アルゴン中および450°Cナトリウム中試験を通じて、各種試験材のうちコルモノイNo.5とステライトNo.6が優れた耐摩耗性を有するのがわかる。

Table. 6は、室温アルゴン中および450°Cナトリウム中摩耗試験後にステータに生じた摩耗痕を、表面あらさ計を用いて半径方向に走査して求めた摩耗深さ W_D 、摩耗体積 W_V および比摩耗

量 W_s を表わす。摩耗量はすべての材料組合において、アルゴン中の方がナトリウム中より大きくなっている。

3.3 金相試験結果

3.3.1 表面あらさ

Table. 7 は室温アルゴン中および 450 °C ナトリウム試験前後の摺動部の表面あらさである。ナトリウム中とくらべ、アルゴン中ではすべての材料の表面が著しく粗くなっている。またナトリウム中で表面あらさ変化が小さいステライト合金およびコルモノイ合金も、アルゴン中では大きな表面あらさを示している。

3.3.2 かたさ

Table. 8 は室温アルゴン中および 450 °C ナトリウム中試験前後の摺動部のかたさである。摺動による塑性変形のため、試験後かたさが大きくなる傾向がある。アルゴン中とナトリウム中のかたさをくらべると、アルゴン中の方が小さくなる傾向がある。ただしコルモノイ合金とデロロステライト SF-60M はナトリウム中でのかたさの方が小さい。

3.3.3 顕微鏡組織

Photo. 1～Photo. 13 に室温アルゴン中および 450 °C ナトリウム中試験後の各種材料の摺動部断面組織を示す。ただし Photo. 3 および 4 に示すコルモノイ No. 4 および No. 5 のナトリウム中の組織写真は 540 °C ナトリウム中で荷重 220kg (面圧 1kg/mm²)、摺速 3.6cm/sec で 10 時間連続摺動したもので組織内部まで塑性変形をうけている。

アルゴン中とナトリウム中を比較すると、アルゴン中の方が塑性変形が起りやすく、またその程度が大きくなっている。特にカーバイト材はアルゴン中でコーティング層が消失している部分がある。

4. 考察

4.1 アルゴン中の摩擦・摩耗

Fig. 1をみると室温での μ_s は、ほとんどの材料が0.2以下の低い値となっているが、試験前の材料表面上に大気中で生成した酸化膜の残留が原因の一つと考えられる。

Fig. 2をみると一方向連続摺動中の μ_k は荷重依存性があり、Fig. 4, Table. 7およびPhoto. 1～13より明かにナトリウム中と異なって摺動部は塑性変形を生じ、それによって摺動面が一層粗くなり、かつ摩耗量も多くなる。これは一方向連続摺動によって材料表面の酸化膜が破壊され材料素地同志が接触するため、および摩擦による温度上昇により材料強度が低下して変形しやすくなるためと考えられる。

高温アルゴン中の試験は自己融着試験機⁽⁶⁾ (SW-2) により行ない、 μ_k が報告されている。⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾
試験温度は280℃および540℃、摺動モードは反復回転で本試験のものと異なるが、高温であるほどステライトNo. 6、コルモノイNo. 6およびCrメッキの μ_k は大きくなる。

Fig. 6にSW-2試験機で求めた各種雰囲気におけるステライト材およびコルモノイ材の μ_k と荷重の関係を示す。

4.2 アルゴン中とナトリウム中の比較

室温アルゴン中と450℃ナトリウム中の試験結果を比較すると次のようである。

- ① μ_s はいずれの雰囲気とも荷重依存性が小さい。またアルゴン中の μ_s の方がナトリウム中のものより小さくなる傾向がある。
- ② μ_k の雰囲気依存性は試験片材質によって異なる。またアルゴン中の μ_k には荷重依存性がある。
- ③ 摺動面の組織、表面あらさおよびかたさの変化はナトリウム中よりアルゴン中の方が大きい。
- ④ W_D はアルゴン中の方がナトリウム中より大きい。

μ_s 測定は低摺動速度、短摺動距離で行なわれ、摺動面の変形または変質がほとんど起こらない状態であったために荷重依存性が小さいと考えられる。またアルゴンが室温であることおよび大気中で生成する材料表面上の酸化膜がナトリウム中よりアルゴン中で残留しやすいため、アルゴン中の μ_s がナトリウム中のものより低くなったものと思われる。

μ_k 測定での一方向連続摺動（各荷重で15分間ずつ摺動）により酸化膜が破壊されると材料表面は活性化して材料同志の融着が起り易くなり、 μ_k および W_D が増大する。

Table. 9に示したアルゴンとナトリウムの物性値を比べると、アルゴンは熱伝導率が3桁小

さく、また比熱が約1/3であり、冷却性能がナトリウムより著しく悪い。このためアルゴン中ではナトリウム中にくらべて摺動面温度が高くなり酸化膜が破壊されやすく、また材料強度が低下し変形しやすくなる。一方、ナトリウムは酸素との親和力が強く不働態皮膜を破壊するが、Fig. 7に示すようにナトリウム中では $\text{Na}_x\text{Cr}_y\text{O}_z$ が材料表面に生成する可能性がある。著者が行なった文献調査によると複合酸化物は NaCrO_2 の可能性が強く、これは耐摩擦・摩耗性を向上させる。^{10) (11)} 上述のようにアルゴン中での不働態酸化膜の破壊のため、アルゴン中の方が金属組織、表面あらさ、およびかたさの変化が大きく、また摩耗量が多くなると考えられる。高温アルゴン中ではこれらの差はさらに大きくなると考えられる。

このようにアルゴン中とナトリウム中では摩擦・摩耗挙動に大きな違いがある。Fig. 8-1および8-2に荷重220kgでの各種材料のナトリウム中とアルゴン中の摩擦係数の比を示す。 μ_s の比は、ほとんどの材料組合せにおいて1以上であり、ナトリウム中 μ_s がアルゴン中 μ_s より大きいことがわかる。一方、 μ_k は材料組合せにより雰囲気依存性が異なっている。

5. 結論

室温アルゴン中での摩擦・摩耗試験を行なった結果次のことが明かとなった。

- (1) μ_s は室温アルゴン中ではほとんどの材料組合せが 0.2 以下であり、450 °C ナトリウム中より小さい。
- (2) μ_k は室温アルゴン中において荷重とともに変動する。又、室温アルゴン中と 450 °C ナトリウム中の μ_k の大小は材料組合せに依存する。
- (3) 摩耗量は室温アルゴン中において著しく、ナトリウム中では摩耗しないユルモノイおよびステライトもアルゴン中では摩耗する。
- (4) 摺動面は室温アルゴン中において塑性変形しやすく表面が粗くなり、摺動面のかたさは 450 °C ナトリウム中の方が室温アルゴン中より大きい。
- (5) アルゴン中とナトリウム中の摩擦・摩耗特性には著しい差があり、アルゴン中データでナトリウム中挙動を推定することは困難である。
- (6) 上述の室温アルゴン中と 450 °C ナトリウム中の差は高温アルゴン中で試験した場合さらに大きくなると考えられる。

上述のようなアルゴン中とナトリウム中の違いは次のような原因から生ずると考えられる。

- (1) 室温でかつ摺動距離が短い場合、アルゴン中では大気中で材料表面に生成する酸化膜が残留すると思われる。
- (2) 連続摺動の場合、アルゴンの熱伝導率がナトリウムより 3 衡小さく、比熱が約 1/3 あるため、摩擦熱の除去能力が低い。このため摺動面の温度が上昇しやすく材料強度が低下し、酸化膜の破壊をきたす。
- (3) ナトリウム中では大気中で材料表面に生成した酸化膜は破壊されるが、新たに $Na_xCr_yO_z$ が生成し、これが潤滑剤の役目をする。

以上、室温アルゴン中試験結果およびこれと 450 °C ナトリウム中データとの違いについて述べた。

原子炉機器摺動部のうち、炉心上部に位置する燃料交換機、制御棒駆動機構および燃料出入機にはアルゴン雰囲気中に摺動・接触部が位置する。低温でかつナトリウム蒸気が存在しない部分には固体潤滑剤などを使用することにより耐摩擦・摩耗性を確保できるが、潤滑剤が使用できない複雑な形状部分、高温部または高摺速部の材料選定などの設計には慎重を期する必要がある。

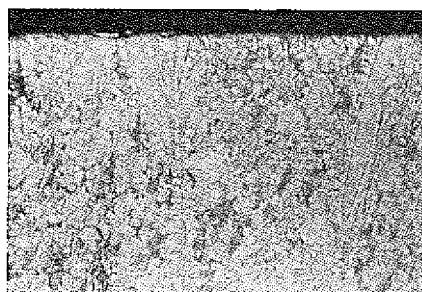
終りに臨み、計画の当初より御指導賜った斎藤良平ナトリウム技術部長、推進を図っていただ

いたFBR本部望月恵一、山本研両主任研究員に感謝します。前室員で現在(株)庄原製作所中央研究所の溝淵庄太郎氏には種々御検討いただいたことをここに改めて謝意を表する。また、ループ運転、試験解析に協力していただいた室員の方々にも併せて感謝します。

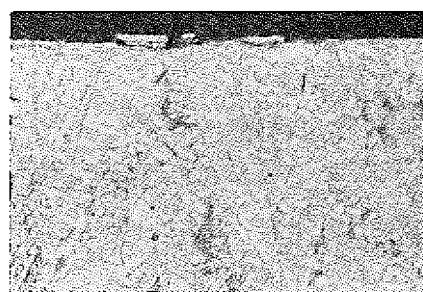
6. 文 献

- (1) 加納茂機, 他「高速炉材料のナトリウム中摩耗試験(I) 硬質合金の摩耗」 SN 941 73-17
- (2) 同 上, 他「同 上(II) 硬質合金・カーバイトの摩擦・摩耗」 SN 941 74-12
- (3) 同 上, 他「同 上(III) 硬質合金・カーバイトの摩擦・摩耗」 SN 941 74-80
- (4) 同 上, 他「同 上(IV) ステライトNo.1, コルモノイNo.6, インコネル718, ハステロイC および 2 1/4 Cr - 1 Mo 鋼の摩擦・摩耗」 SN 941 75-73
- (5) 同 上, 他「同 上(V) コルモノイとステライトの比較」 SN 941 76-81
- (6) 溝淵庄太郎, 他「高温ナトリウム中における自己融着試験(IV) 新型自己融着試験機の試作及び機能試験」 SN 941 75-13
- (7) 同 上, 他「同 上(V) パッド部候補材の各種環境下における摩擦挙動」 SN 941 75-49
- (8) 同 上, 他「同 上(VI) 各種ステライト, コルモノイ材の摩擦, 自己融着性」 SN 941 76-32
- (9) S. Kanoh, et al., "Friction and Wear Behavior of Colmonoy and Stellite Alloys in Sodium Environment", Proceedings of International Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production, Champion, May (1976)
- (10) 溝淵庄太郎, 他「ナトリウム中における摩擦・摩耗および自己融着現象に関する諸外国の試験研究(1)」 ZN 942 74-08
- (11) 加納茂機, 他「高速炉燃料被覆管 (AISI Type 316 SS) の高温ナトリウム中での腐食挙動(II) 材質および温度勾配の影響」 SN 941 76-17
- (12) "Tables of Thermodynamic and Transport Properties of Air, Argon, Carbon, Dioxide, Carbon Monoxide, Hydrogen, Nitrogen, Oxygen and Steam", Pergamon Press (1960)
- (13) 伝熱工学資料 (改訂第3版) 日本機械学会 (1975)

(A) In-Sodium Test

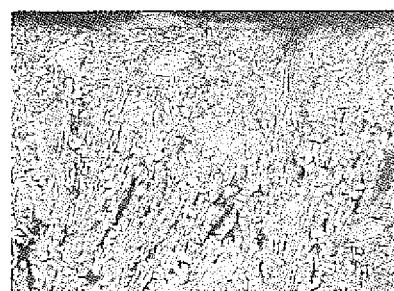


x100

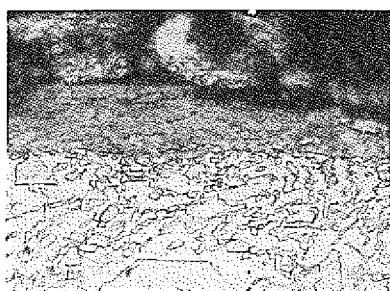


x200

(B) In-Argon Test



x100

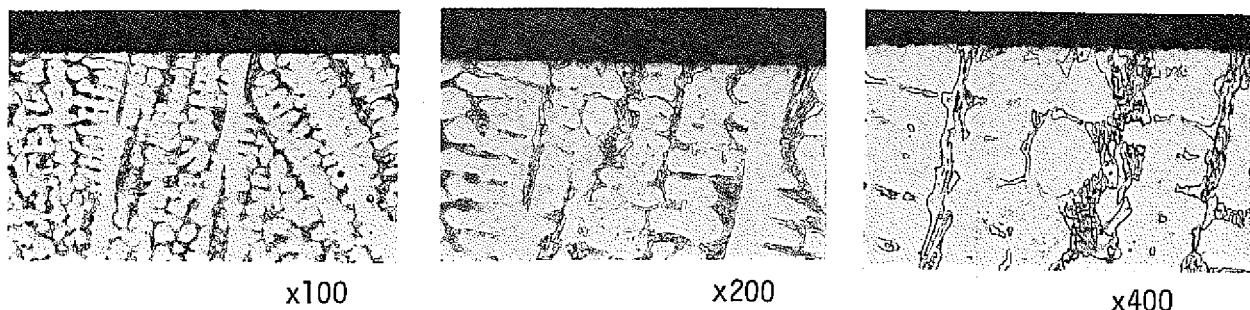


x400

Photo. 1 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.1
(vs. Stellite No.1)

PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test



(B) In-Argon Test

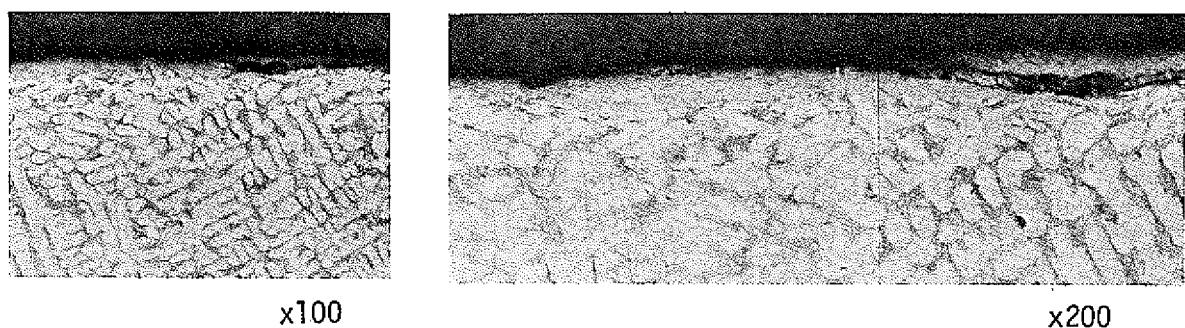
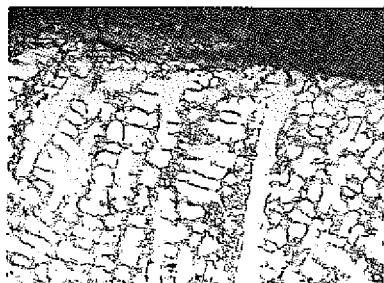
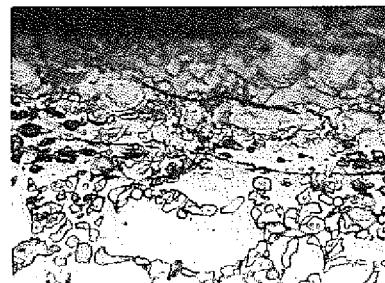


Photo. 2 Cross-Sectional Micrographs of Stellite No.6
(vs. Stellite No.6)

(A) In-Sodium Test

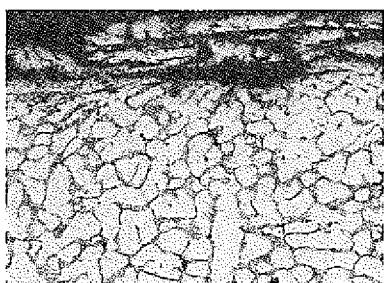


x100

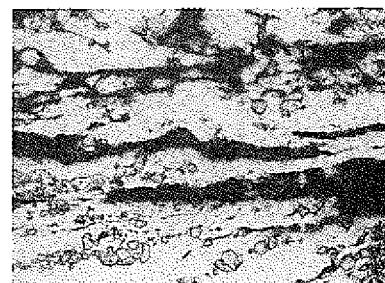


x400

(B) In-Argon Test



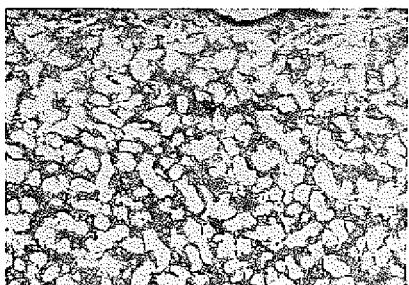
x100



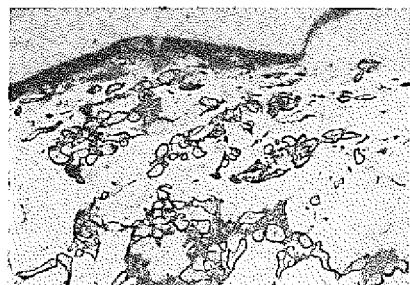
x400

Photo. 3 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.4
(vs. Colmonoy No.4)

(A) In-Sodium Test

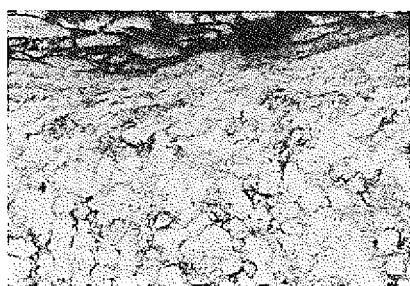


x100



x400

(B) In-Argon Test



x100

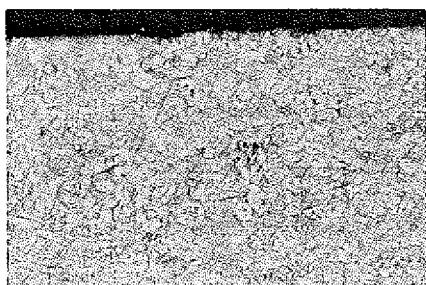


x400

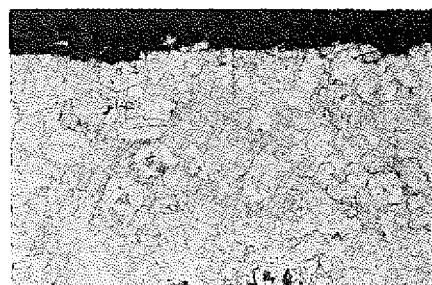
Photo. 4 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.5
(vs. Colmonoy No.5)

PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test

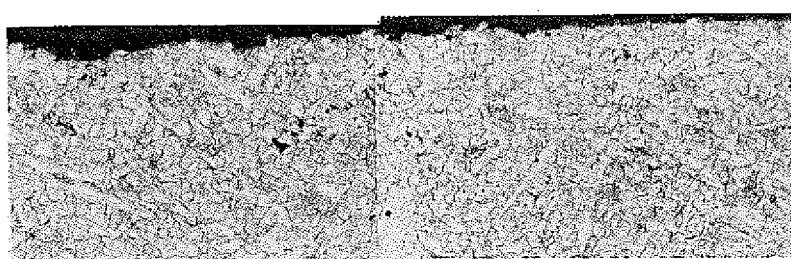


x100

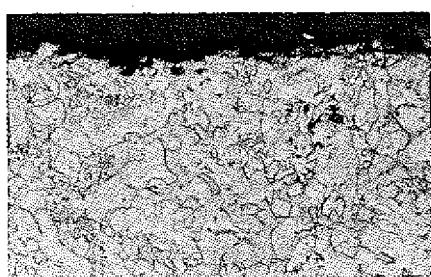


x200

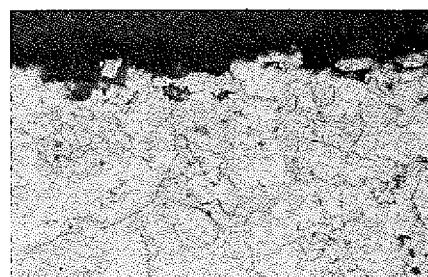
(B) In-Argon Test



x100



x200

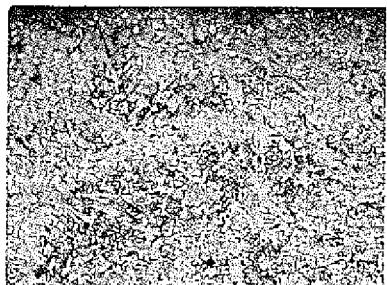


x400

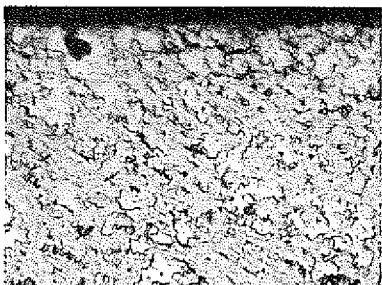
Photo. 5 Cross-Sectional Micrographs of Colmonoy No.6
(vs. Colmonoy No.6)

PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test

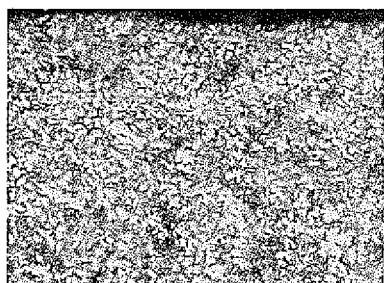


x100

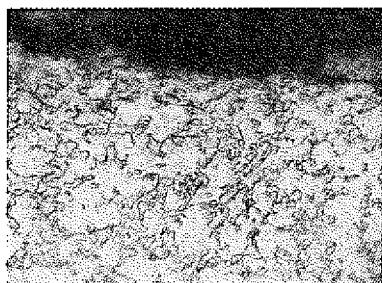


x400

(B) In-Argon Test



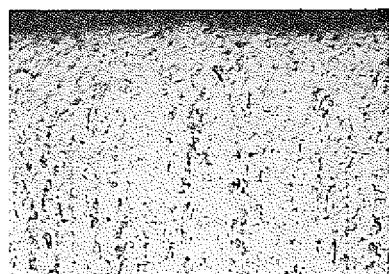
x100



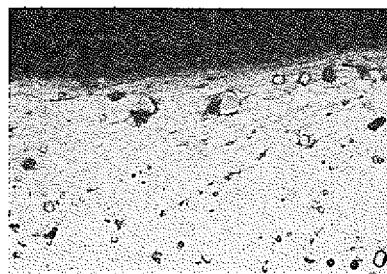
x400

Photo. 6 Cross-Sectional Micrographs of Deloro Stellite SF-60M (vs. Deloro Stellite SF-60M)

(A) In-Sodium Test

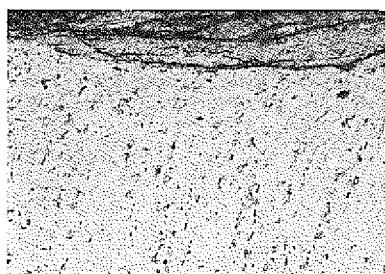


X100

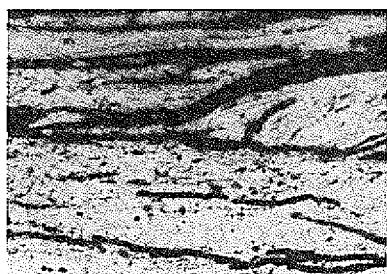


X400

(B) In-Argon Test



X100

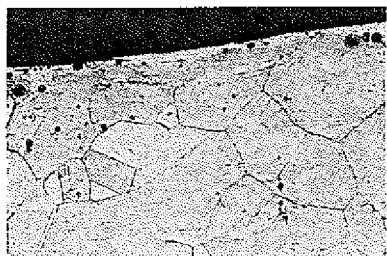


X400

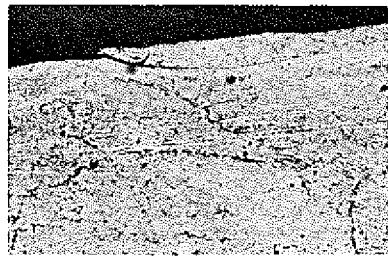
Photo. 7 Cross-Sectional Micrographs of Hastelloy C
(vs. Hastelloy C)

PNC TN941 77-179

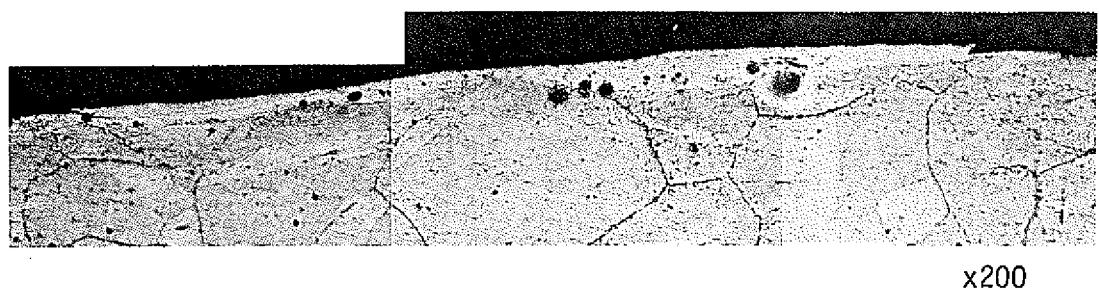
(A) In-Sodium Test



x100



x400

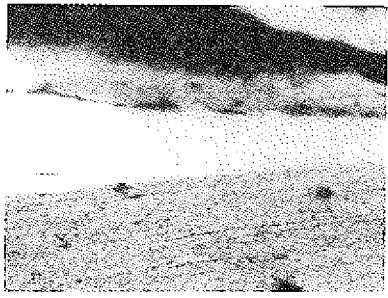


x200

(B) In-Argon Test



x100

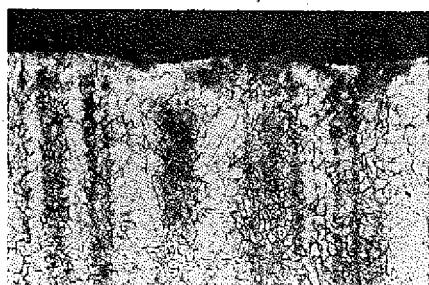


x400

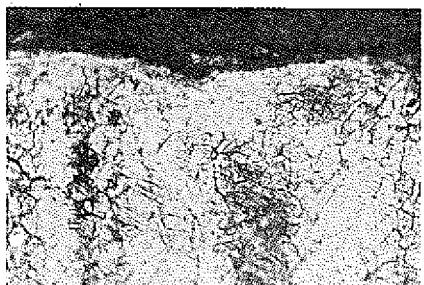
Photo. 8 Cross-Sectional Micrographs of Inconel X
(vs. Inconel X)

PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test

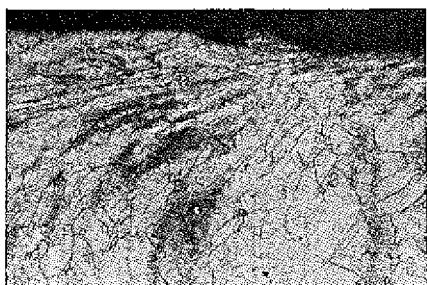


x100

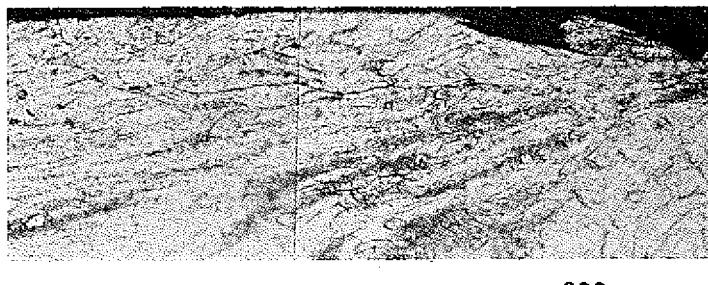


x200

(B) In-Argon Test



x100

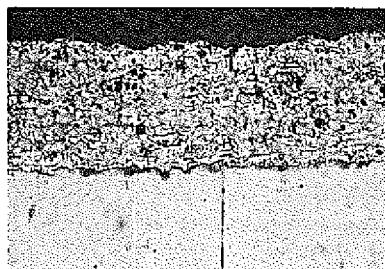


x200

Photo. 9 Cross-Sectional Micrographs of Inconel 718
(vs. Inconel 718)

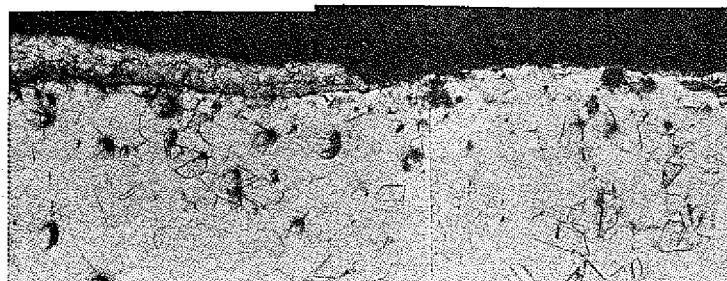
PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test

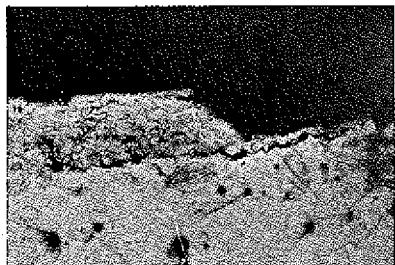


x100

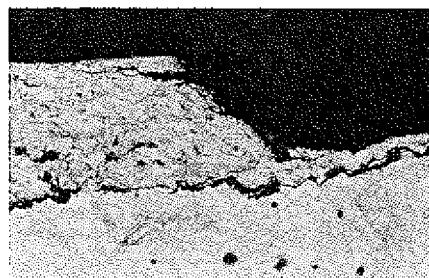
(B) In-Argon Test



x50



x100

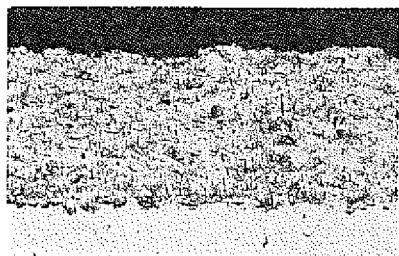


x200

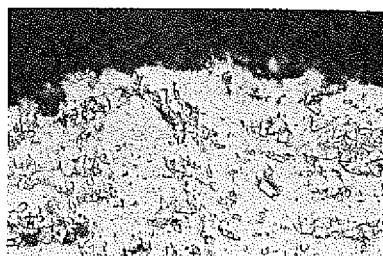
Photo. 10 Cross-Sectional Micrographs of LC-1C
(vs. LC-1C)

PNC TN941 77-179

(A) In-Sodium Test

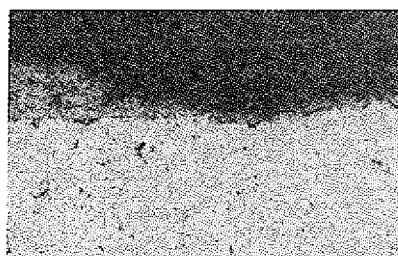


x100

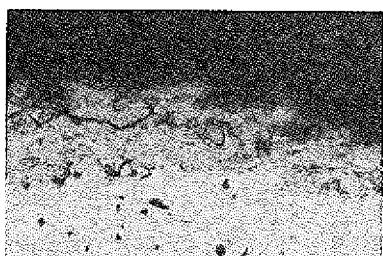


x400

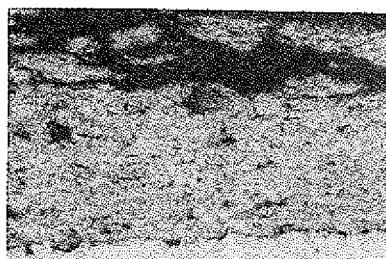
(B) In-Argon Test



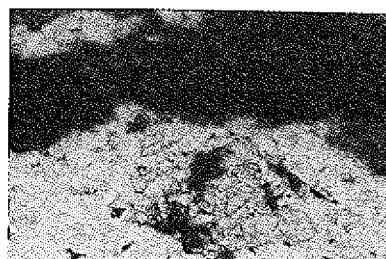
x100



x400



x100



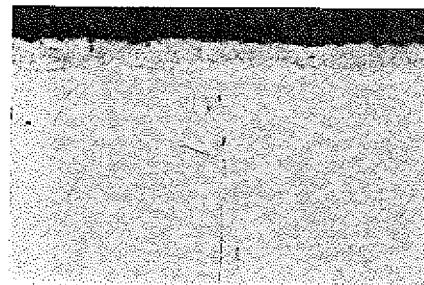
x400

Photo. 11 Cross-Sectional Micrographs of LW-1N40
(vs. LW-1N40)

(A) In-Sodium Test



x100



x200

(B) In-Argon Test



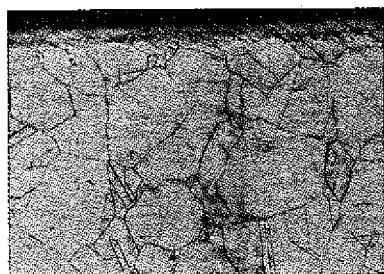
x100



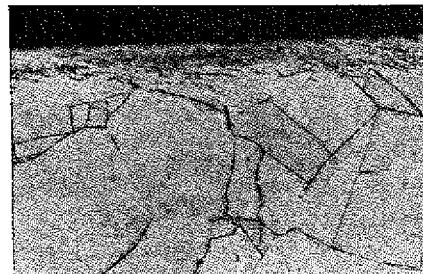
x400

Photo. 12 - Cross-Sectional Micrographs of SUS304
(vs. SUS304)

(A) In-Sodium Test

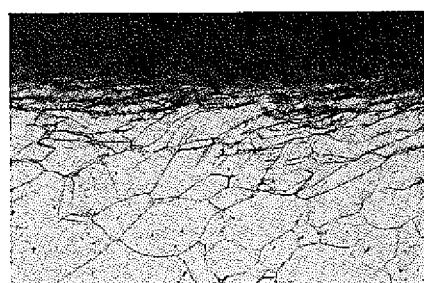


x100

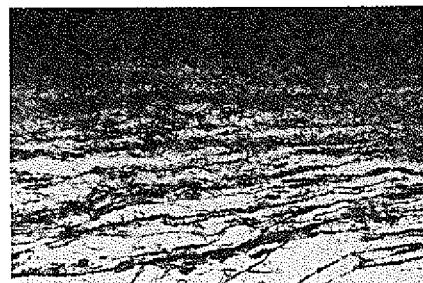


x200

(B) In-Argon Test



x100



x400

Photo. 13 Cross-Sectional Micrographs of SUS304
(vs. Stellite No.6)

Table 1 Condition of Friction Test

	In - Argon Test	In - Sodium Test
Test Temperature (°C)	Room Temperature	280 and/or 450
Cold Trap Temperature (°C)	—	200
Configuration of Test Piece	Ring and Disc	Similar to In - Argon Test
Apparent Contact Area of Test Piece (cm ²)	2.2	"
Load	Incremental Load	"
Sliding Velocity (cm/sec)	~ 0.3	"
Quantity to be Determined	Initial Torque	"

Table 2 Condition of Wear Test

	In - Argon Test	In - Sodium Test
Test Temperature (°C)	Room Temperature	450
Cold Trap Temperature(°C)	—	200
Configuration of Test Piece	Ring and Disc	Similar to In - Argon Test
Apparent Contact Area of Test Piece (cm ²)	2.2	"
Load	Incremental Load	"
Sliding Velocity (cm/sec)	3.6	"
Total Sliding Time (hrs)	2.5	"
Quantity to be Determined	Sliding Torque, Wear Rate	

Final Load 390 kg

Table 3 Chemical Composition (w/o)

Table 4 Material Combination

Stator	Rotor
S6	S6
304	S6
S1	S1
304	S1
S1	C6
C6	DS
C5	C6
DS	DS
C4	C4
C5	C5
C6	C6
IX	IX
I718	I718
HC	HC
LC-1C	LC-1C
LW-1N40	LW-1N40
304	304

Table 5 Coating Method

Coated on SUS 304			
Material	Coating Method		Coating Thickness (mm)
Stellite No. 1 , No. 6 and No.12 Colmonoy No. 4, No. 5 and No. 6	Oxy-Acetylene Gas Weld "		~ 2 ~ 2
Deloro Stellite SF-60M(150~250 Mesh) LC-1C (-325 Mesh) LW - 1N40 (-325 Mesh)	Sprayed Coating Detonation-Gun Coating "		~ 2 ~ 0.2 ~ 0.2

Test pieces of Type 304 SS, Hastelloy C, Inconel X750, and Inconel 718 were prepared by mechanical fabrication

Table 6 Wear Rate

Material Combination	Stator	Rotor	After Tested In Sodium			Wear after Tested in Argon	Rate of Stator
			W _D	W _V	W _S (mm ³)		
S6	S6	S6	4	0.18	2.87 x 10 ⁻⁹	14.5	2.72
304	S6	S6	8	0.31	4.94 x 10 ⁻⁹	82	34.18
S1	S1	S1	~0	~0	~0	38	6.79
304	S1	S1	~0	~0	~0	25	410.49
S1	C6	C6	0.7	0.037	5.88 x 10 ⁻¹⁰	27	6.20
C6	DS	DS	~0	~0	~0	35	3.30
C5	C6	C6	~0	~0	~0	72	9.46
DS	DS	DS	~0	~0	~0	13	0.86
C5	C5	C5	~0	~0	~0	49	9.27
C6	C6	C6	2.5	0.11	1.81 x 10 ⁻⁹	12	0.80
IX	IX	IX	96	30.53	4.87 x 10 ⁻⁷	117	45.20
I718	I718	I718	13.1	1.20	1.92 x 10 ⁻⁸	52	23.66
HC	HC	HC	5.1	0.73	1.16 x 10 ⁻⁸	108	48.92
LC-1C	LC-1C	LC-1C	11	1.68	2.68 x 10 ⁻⁸	170	89.75
LW-1N40	LW-1N40	LW-1N40	~0	~0	~0	162	61.24
304	304	304	5	0.37	5.90 x 10 ⁻⁹	83	33.22
Sliding Velocity : 3.6 cm/sec	Final Load : 390 kg						

Table 7 Roughness

Material	Combination	Roughness (μm)				H _{max} after Tested in Argon, Stator
		Rotor	Stator	as Received	after Tested in Sodium	
S6	S6	1	1	1.5	3.2	5
	S6	0.4	1	3	0.6	21
304	S1	0.4	0.4	0.4	0.6	14
	S1	0.4	0.4	0.4	10	10
S1	C6	0.4	1	0.7	1	7
	DS	1	0.6	2	0.9	13
C6	C6	1	1	1.4	1.5	12
	DS	0.6	0.6			8
C5	C5	1	1			19
	C6	1	1	1	2	13
C6	IX	0.7	0.7	12	4	20
	HC	2	2	2	3	22
LC-1C	LC-1C	0.4	0.4	4	6	23
	LW-1N40	14	14	10	9	22
LW-1N40	304	0.4	0.4	2.4	9	34
	304					

Table 8 Microhardness 100g

Material Combination		Microhardness (HV)					
Stator	Rotor	as Received	Received Rotor	Stator	after Tested in Sodium	after Tested in Argon	Rotor
S6	S6	585	585	907	752	722	
304	S6	298	585	669	606	592	
S1	S1	870(1650)		914	907		
304	S1	298	870	457	813	473	767
S1	C6	870	824	1035	835	882	988
C6	DS	824(1854)	762	752	894	813	907
C5	C6	464	824	657	592	782	772
DS	DS	762		715		792	
C5	C5	464		634		894	
C6	C6	824		615		837	
IX	IX	459		592		572	
I718	I718	503		583		592	
HC	HC	429		714		627	
LC-1C	LC-1C	782		1033		847	
LW-1N40	LW-1N40	1267		1427		1168	
304	304	298		639		525	

The number in parenthesis shows the hardness of carbide precipitated in matrix.

Table 9 Physical properties of Argon⁽¹²⁾ and Sodium⁽¹³⁾
under the pressure of 1 kg/cm²

	Temp. (°C)	Density (kg/m ³)	Specific heat (kcal/kg·°C)	Viscosity (kg·sec/m ²)	Thermal conductivity (kcal/m·h·°C)
Argon	0	1.785	0.1247	2.166×10^{-6}	1.406×10^2
	100	1.305	0.1245	2.774 "	1.815 "
	200	1.029	0.1245	3.307 "	2.180 "
	300	0.8494	0.1244	3.789 "	2.512 "
	400	0.7231	"	4.234 "	2.812 "
	500	0.6296	"	4.654 "	3.094 "
	600	0.5579	"	5.052 "	3.358 "
Sodium	0	—	—	—	—
	100	927	0.333	6.94×10^{-5}	74.7
	200	904	0.326	4.61 "	70.5
	300	880	0.321	3.52 "	66.3
	400	856	0.316	2.90 "	62.1
	500	832	0.312	2.51 "	57.9
	600	808	0.309	2.12 "	53.7

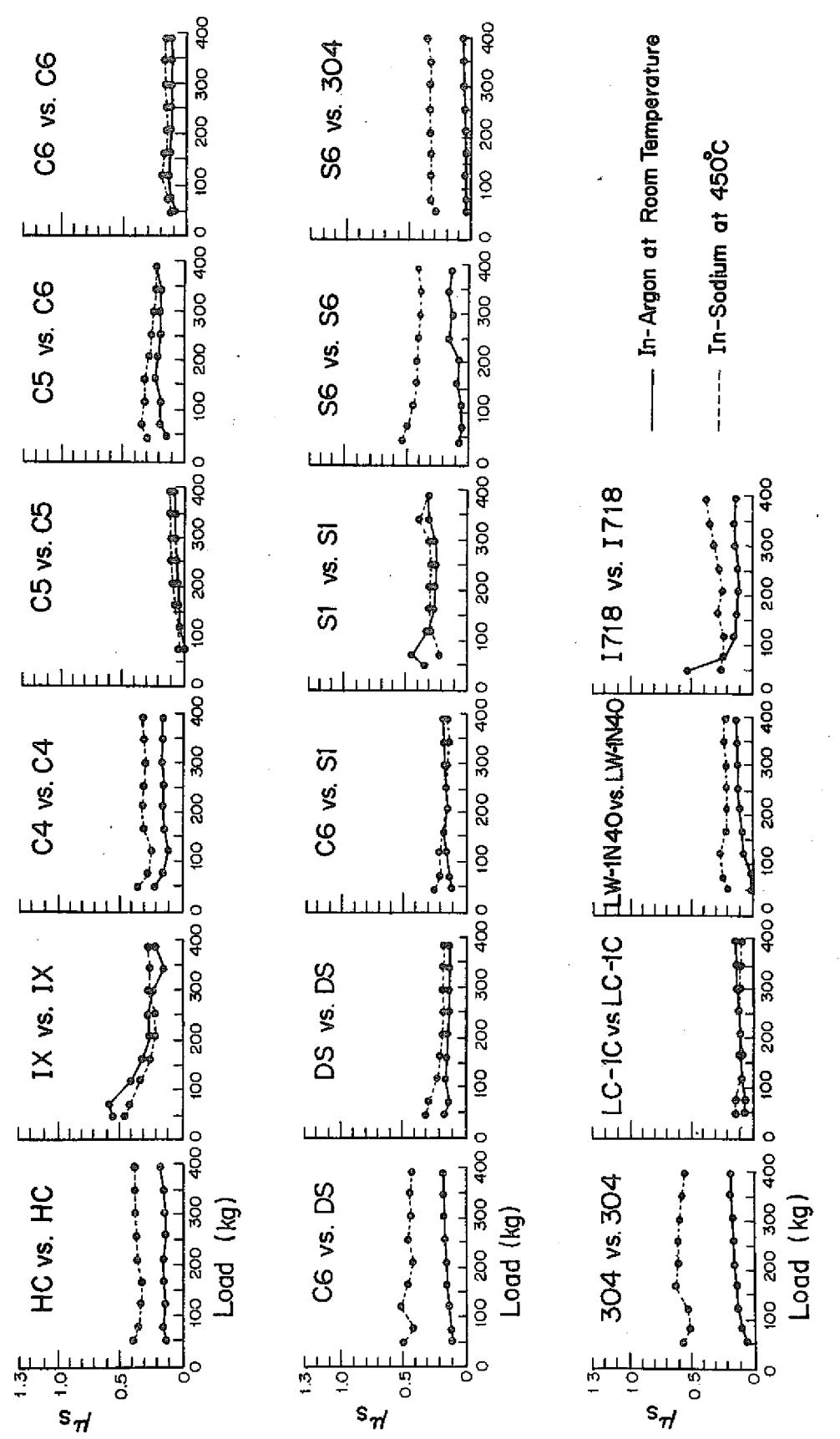


Fig. 1 μ_S vs. Load

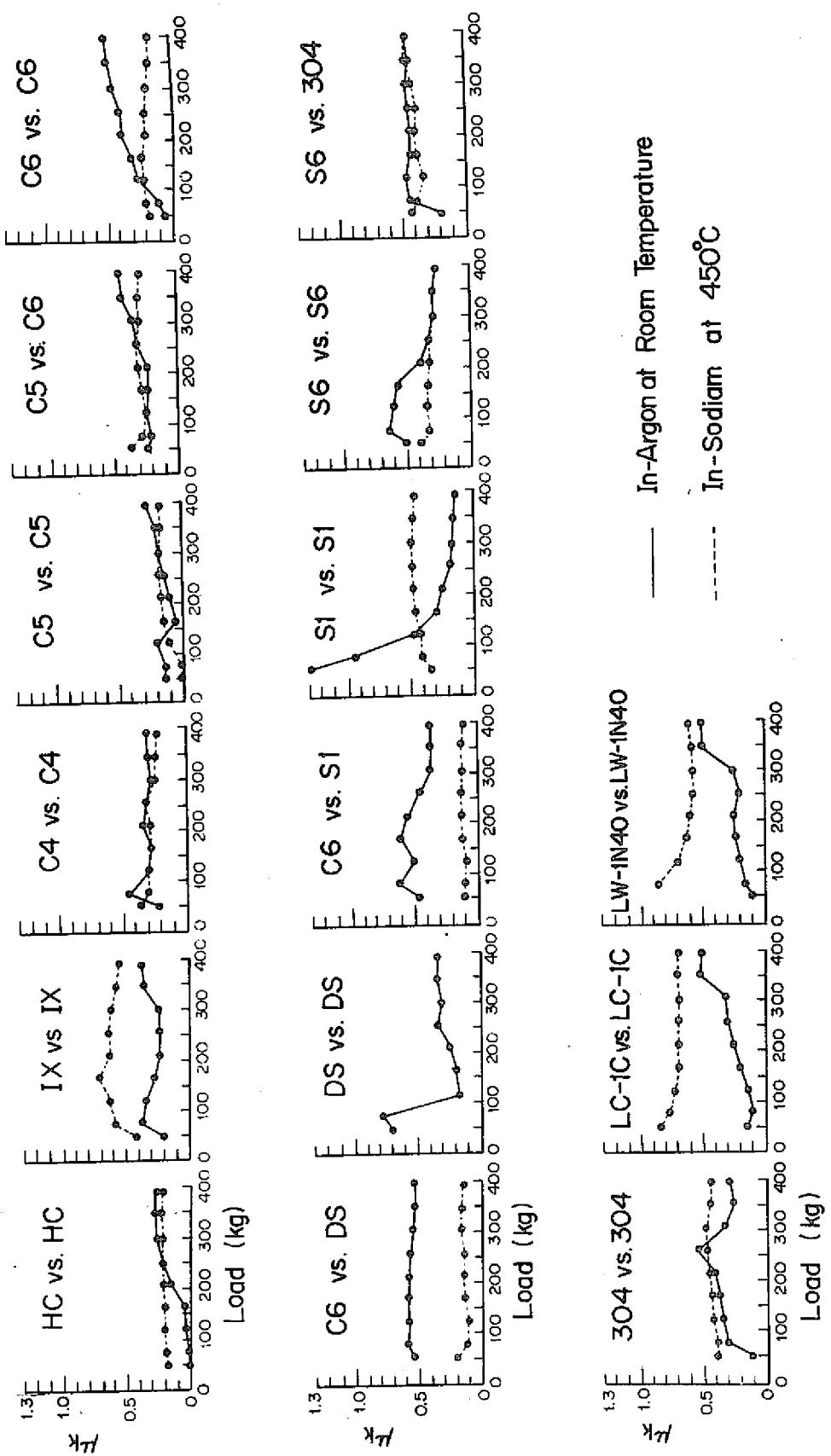
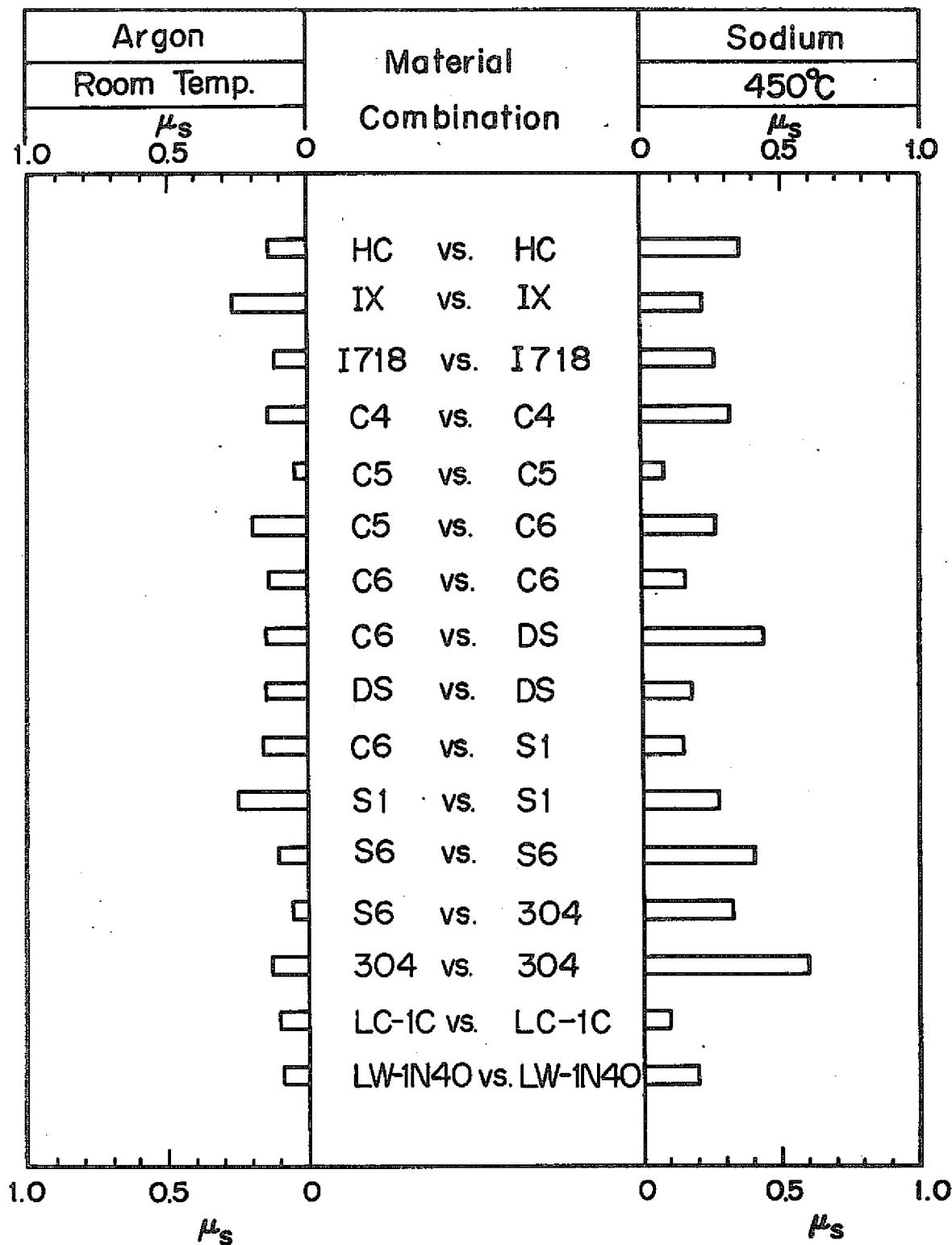
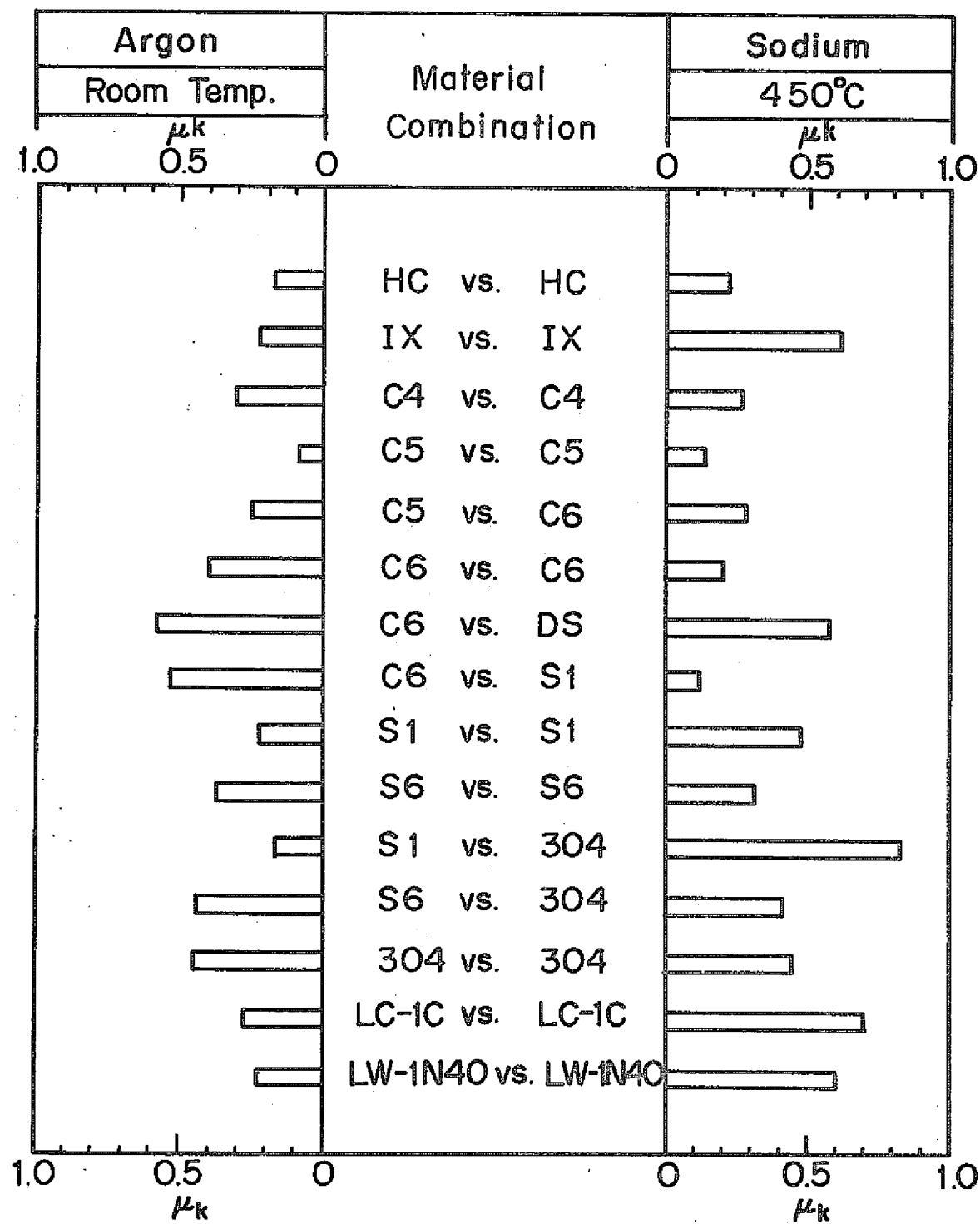


Fig. 2 μ_K vs. Load

Fig. 3-1 Static Friction Coefficient μ_s under the Load of 220 kg

Fig. 3-2 Kinetic Friction Coefficient μ_k under the Load of 220 kg

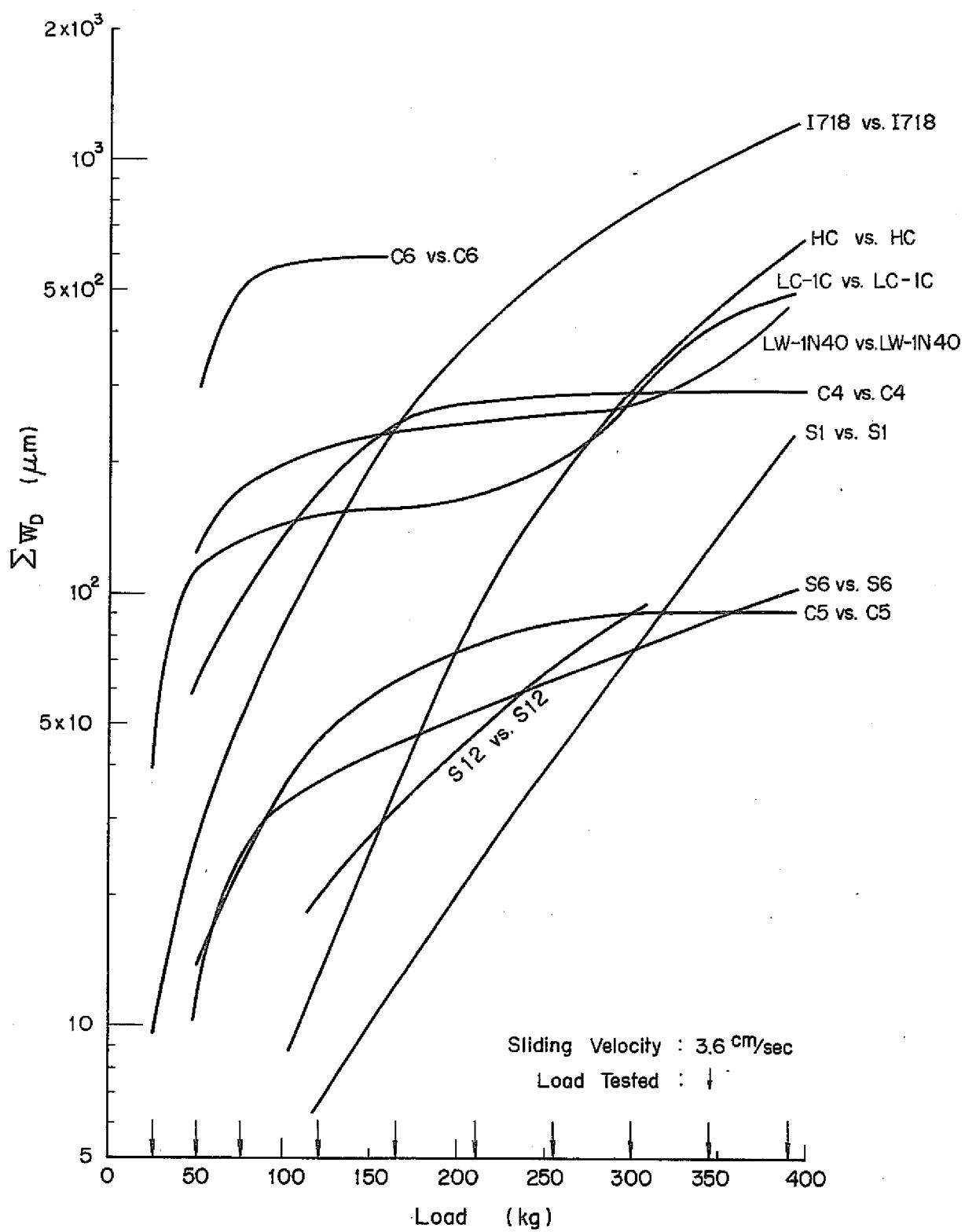


Fig. 4 Wear Depth vs. Load in Argon at Room Temperature

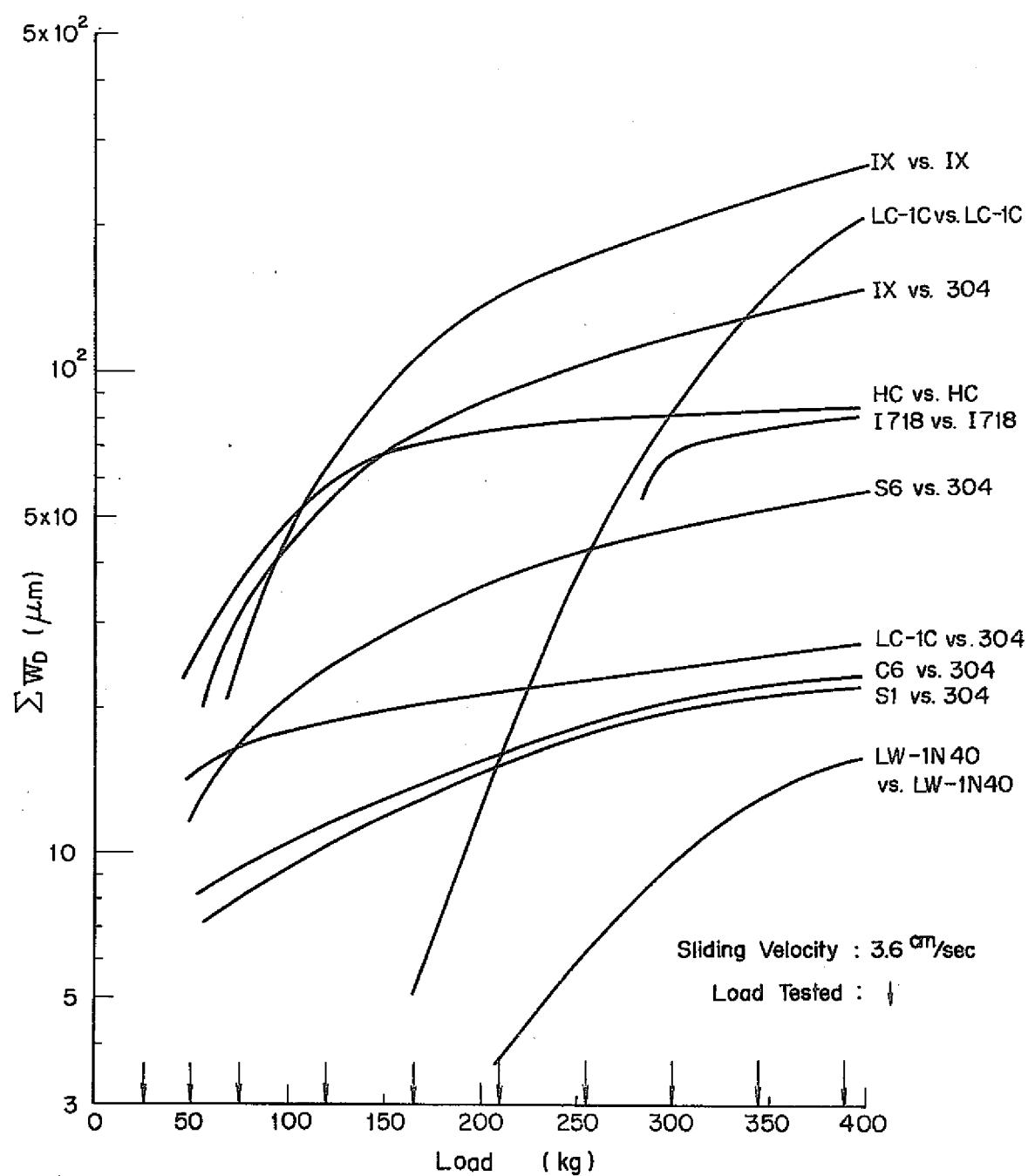


Fig. 5 Wear Depth vs. Load in Sodium at 450°C

C5 vs. C5
 C5 vs. C6
 C6 vs. C6
 C6 vs. DS
 C6 vs. S1
 S1 vs. S1
 S6 vs. S6

Not Detectable

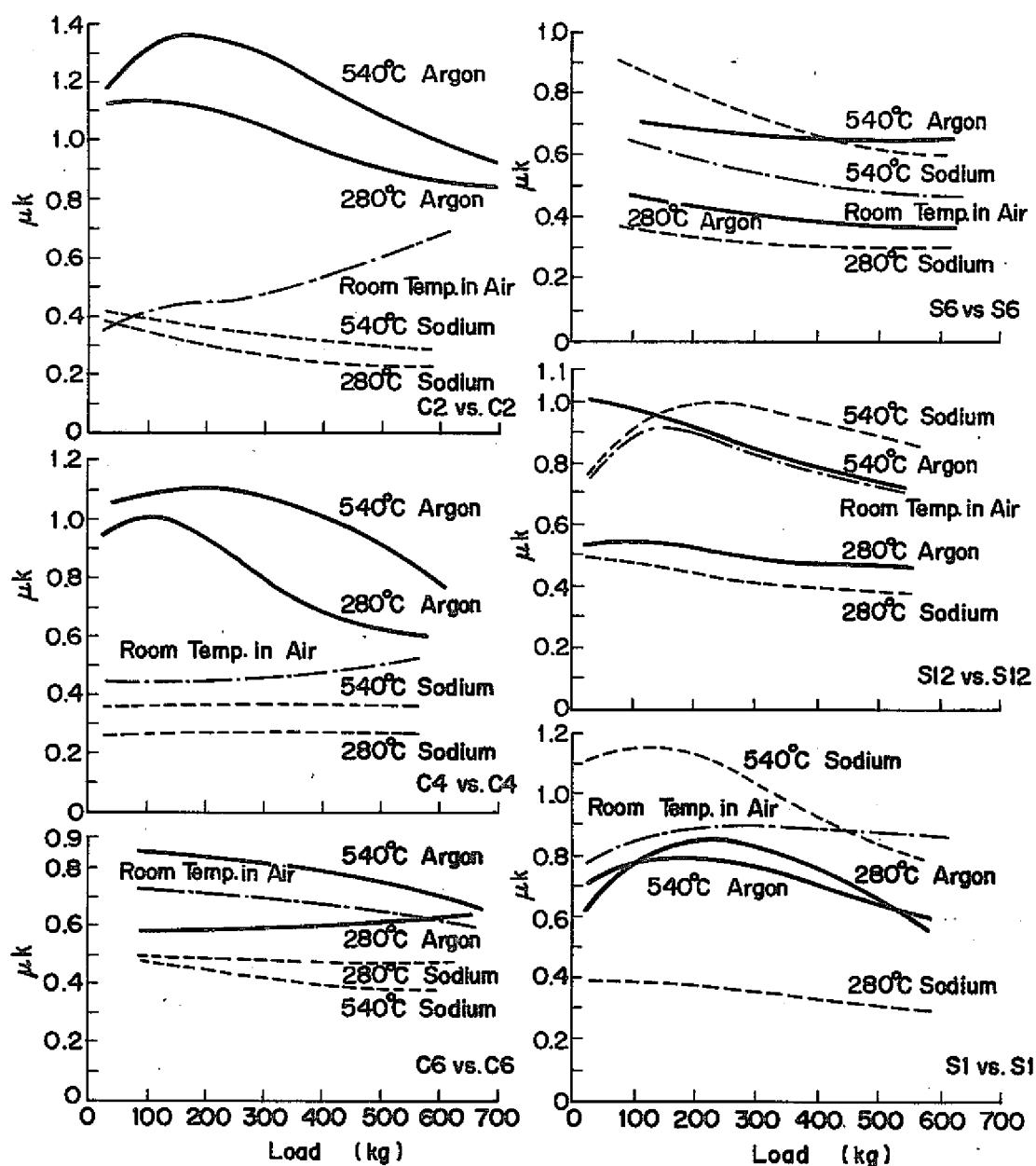


Fig. 6 Relation between μ_k and Load in different environments (SW-2)

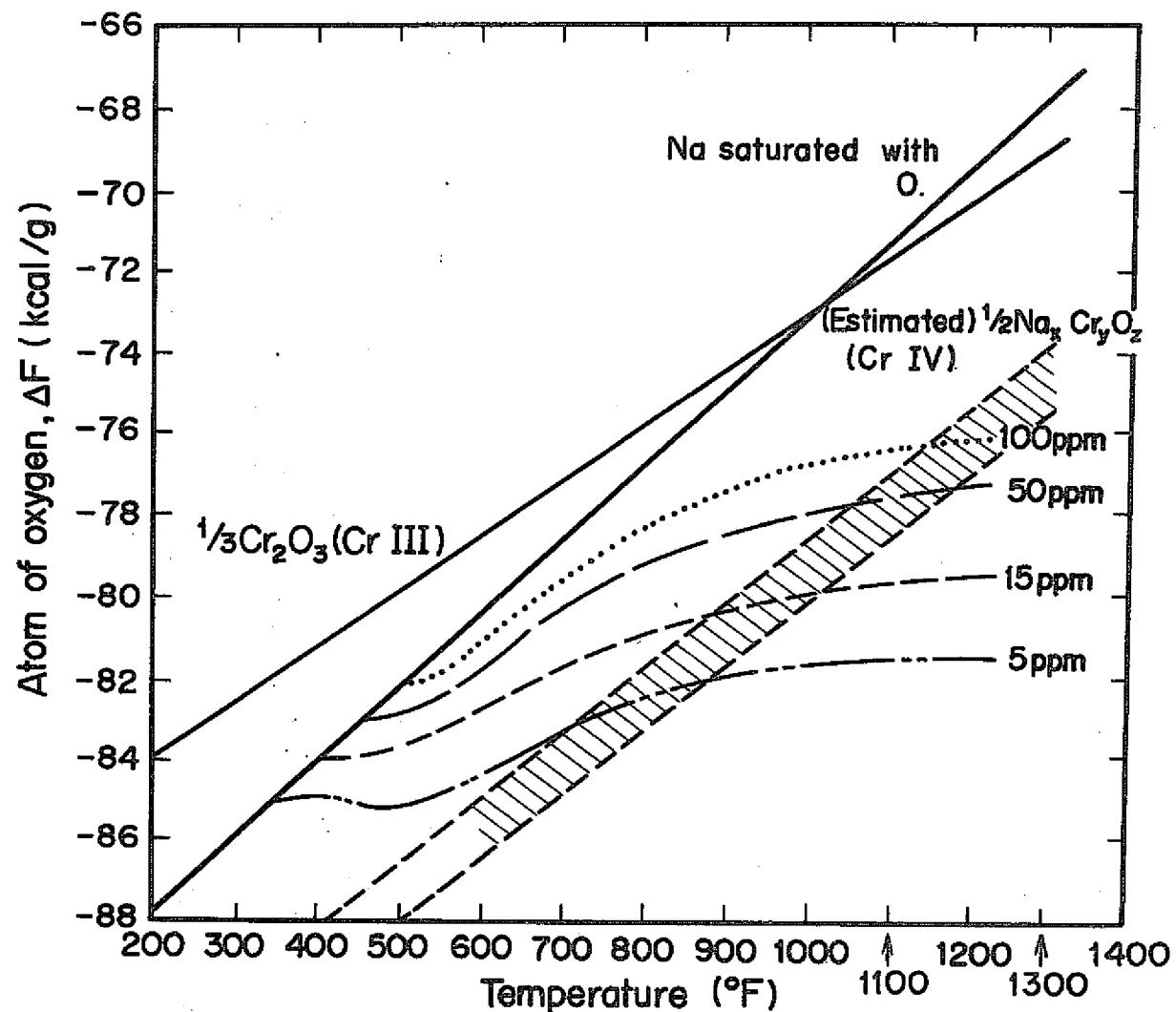


Fig. 7 Free Energies of Interest in Sodium-Oxygen-Chromium

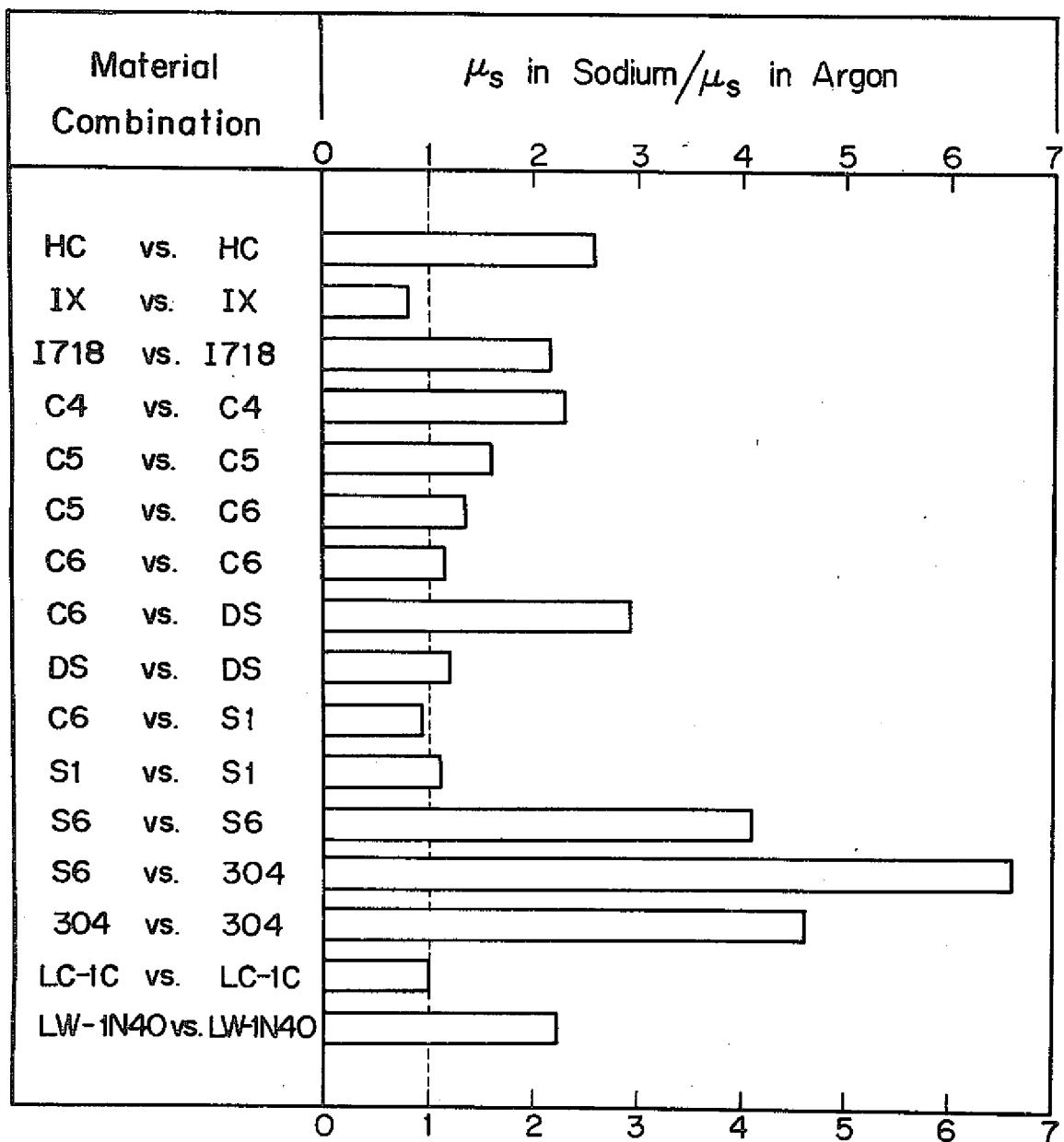


Fig. 8-1 Ratio of Static Friction Coefficients in Sodium and Argon under the Load of 220 kg.

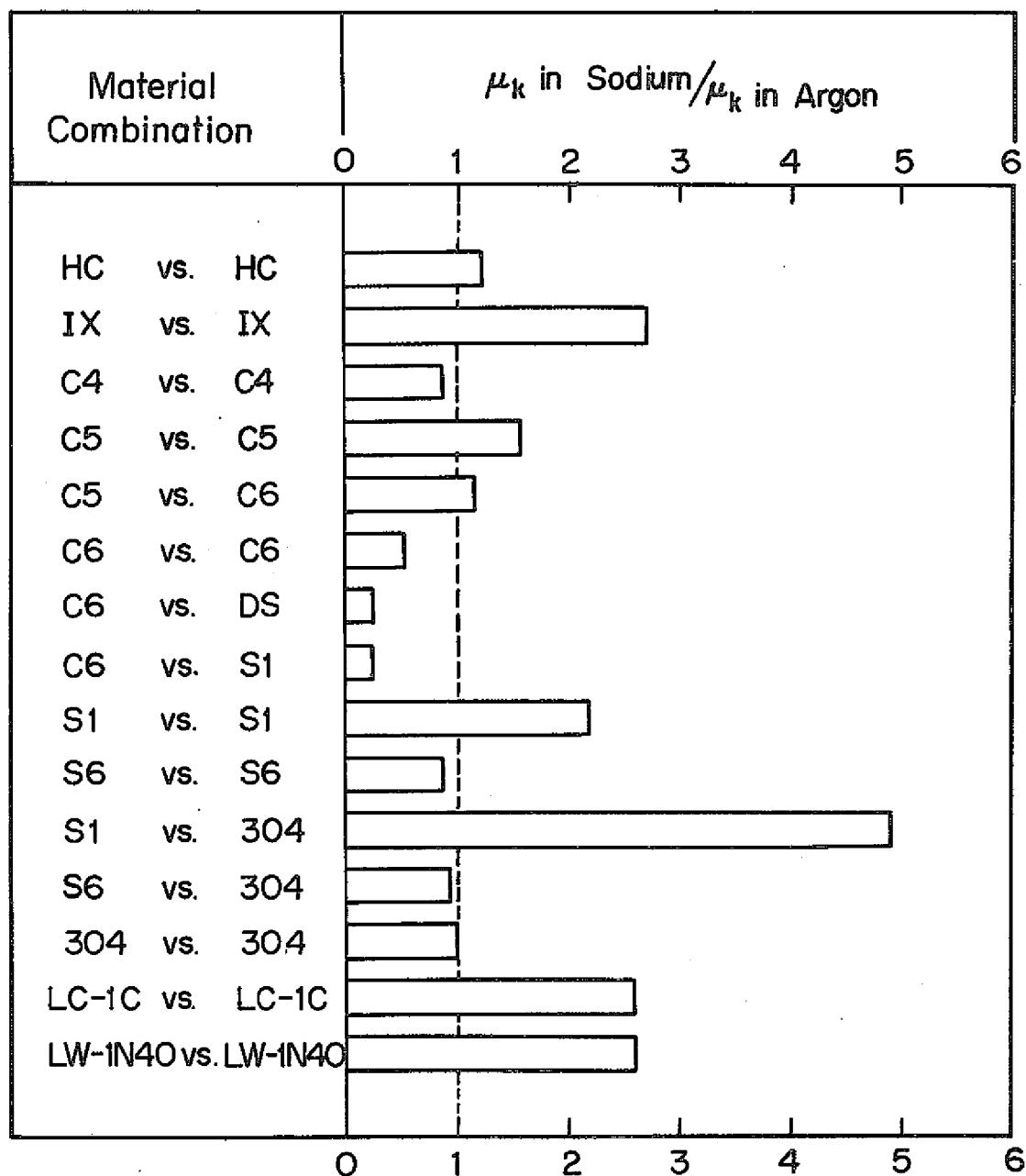


Fig. 8-2 Ratio of Kinetic Friction Coefficients in Sodium and Argon under the Load of 220 kg