

# 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

1974年12月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)

1974年12月

## 高温ナトリウム中における自己融着試験(IV)

報告者 溝淵 庄太郎\* 大和田 哲郎\*

加納 茂機\* 厚母 栄夫\*

中山 紘一\*

滑川 優\*

期間 1973年9月1日 ~ 1974年11月30日

目的 自己融着・摩耗試験ループに、今回、自己融着関係の試験装置を増設した。このうち、自己融着試験機の構造とその機能試験結果について報告する。

要旨 自己融着・摩耗試験ループのうち、摩耗試験部(SW-1)が昭和47年3月末に完成し、今まで多くの試験を行い成果をあげることが出来た。

今回、新しく自己融着試験部(SW-2)とこれらに関連した設備が完成し、試験機の機能テストの1部として、高温不活性ガス中における試験を行った。自己融着試験機はこれまでに基準化されたもののがなく、材料の判定も不充分であった。そこで、今回我々は新しい機能を含む試験機を開発した。この試験機の特長は次の通りである。

- I) 高温ナトリウム中で加圧、融着させ、引張りおよび捩り試験からの材料の自己融着性判定が出来る。
- II) 捣り回転、引張りおよび圧縮荷重とも、油圧方式を採用し、試験機の操作、構造が簡単となり、又小型となつた。
- III) 試験機を180°反転することによって、他の雰囲気(例えば不活性ガス中)中で試験することが容易となつた。
- IV) 低荷重(100kg以下)から高荷重(最大4000kg)までの摩擦試験が可能であり、高温不活性ガス中試験からも、十分満足出来る試験機であることが認められた。

Dec, 1974

Self-Welding Behavior of Various Materials  
in a Sodium Environment

(IV) Development of Self-Welding Equipment  
and Its Preliminary Test

Syotaro MIZOBUCHI\*,  
Shigeki KANOH\*,  
Kohichi NAKAYAMA\*,  
Masaru NAMEKAWA\*,  
Tetsuro OWADA\* and  
Hideo ATSUMO\*

We developed and installed the self-welding equipment (SW-2) in Self-Welding Wearing Test Loop at the end of March, 1974, while had installed the wearing equipment at the end of March, 1972 and have continued to test in sodium and argon since then.

SW-2 has the functions to simulate to the sliding and contact modes of LMFBR's components closer than conventional equipments in foreign countries.

The characteristics of SW-2 are as follow:

- (1) To be able to compress and self-weld materials in high temperature sodium and then to estimated self-weldability with the results of in-sodium tensile or in-sodium torsion tests of self-welded materials.
- (2) All of torsional, tensile and compressive loads can be gained by oil pressure units, and then the operation and structure of equipment became simple.
- (3) To be easily able to test in other environments (ex. in inert gas) by rolling the equipment of 180 degrees.
- (4) To be able to test under the normal load from less than 100kg to 4,000kg. Also, we conducted a part of the function test in high temperature argon and ascertained the performance of equipment to be satisfactory.

---

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

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	自己融着試験の現状と試験機製作の背景	2
3.	自己融着試験機の製作とこの試験機による予備試験	4
3-1	試験機の製作スケジュール	4
3-2	自己融着試験機	5
3-2-(1)	試験機の概要	5
3-2-(2)	試験機の構造	6
3-3	試験機の機能試験	8
3-3-(1)	無負荷時の試験機摺動トルク	8
3-3-(2)	回転摺動速度によるトルク値の変化	9
3-4	各種材料の摩擦・自己融着試験	10
3-4-(1)	概要	10
3-4-(2)	試験方法	10
3-4-(2)-1	試験装置	10
3-4-(2)-2	試験片の形状および試験片組合せ	10
3-4-(2)-3	試験条件および解析方法	10
3-4-(3)	試験結果	11
(3)-1	試験後の外観状況	11
(3)-2	各種材料の摩擦特性	12
(3)-2-(1)	SUS316材同志の摩擦特性	12
(3)-2-(2)	SUS316材と炭化物系材料の組合せにおける摩擦特性	14
(3)-2-(3)	SUS316材と硬質Crメッキ、インコネル718材の摩擦特性	14
(3)-2-(4)	インコネル系同志の摩擦特性	16
(3)-3	結論	
4.	あとがき	19
5.	文献	21

## List of Figures

Fig- 1	Systematic Diagram of Self-Welding Equipment .....	23-24
Fig- 2	Rotary Acutuator and Specimen Holder.....	25-26
Fig- 3	Loading unit of self-Welding Test Equipment.....	27-28
Fig- 4	Exchanging unit of Specimen .....	29-30
Fig- 5	Systemetic Diagram of Oil Pressure Unit .....	31-32
Fig- 6	External Appearance of the Equipment for Self-Welding Test .....	33
Fig- 7	Accessory Device for Self-Welding apparatus (Oil Unit and Control Box).....	34
Fig- 8	Dimension of Hot Trap Equipment.....	35-36
Fig- 9	Hot Trap .....	37-38
Fig-10	External Appearance of Hot-trap.....	39
Fig-11	Dimensions of Test piece Insert Section .....	41-42
Fig-12	External Appearance of Test piece Section .....	43
Fig-13	Detailed Diagram of Test pot.....	45-46
Fig-14	Flow Sheet of Self-Welding Test Loop.....	47-48
Fig-15	General View of Self-Welding Test Loop.....	49-50
Fig-16	Dimensions of Specimen.....	51
Fig-17	Jig for Self-Welding Test .....	53-54
Fig-18	Variations of Frictional Torque versus Rotational angle on the Non-Load Test .....	55
Fig-19	Variation of Frictional Torque and Normal Load on the TFEE under 500kg.....	55
Fig-20	Self-Welding Equipment and Electric Furnace for High Temp. Test in Argon.....	56
Fig-21	Appearances of Specimens after Tested (SUS316 vs. SUS316) .....	57
Fig-22	External Appearances of the Specimens after Tested on SUS316 vs. Carbide Materials.....	58
Fig-23	External Appearances of the Specimens after Tested (SUS316 vs. Inconel 718 and Hard Cr Plating) .....	59
Fig-24	External Appearances of the Specimens after Tested.....	60
Fig-25	Results of Friction Test of SUS316 under 1000kg load.....	61-62
Fig-26	Relations of Frictional Coefficient between Rotational Angle on SUS316 vs. SUS316 .....	63

Fig-27	Variations of Frictional Coefficient on the Friction Test of SUS316 under Various Testing load.....	64
Fig-28	Pre-Load effect on Friction Test of SUS316 vs. SUS316.....	65
Fig-29	Result of Friction Test on SUS316 vs. SUS316 at 720°C in Ar.....	66
Fig-30	Relations of Frictional Coefficient between Testing Temp. on SUS316 under 250kg Load.....	67
Fig-31	Tensile-Rupture Curve of SUS316 after Welded.....	68
Fig-32	Results of Fiction Test of SUS316 versus LC-1C (GF) under 1000kg Load at 450°C in Ar.....	69
Fig-33	Results of Friction Test of SUS316 versus LC-1C (BF) under 1000kg Load at room Temp.....	70
Fig-34	Results of Friction Test of SUS316 versus Hard Cr Plate under 1000kg Load at 450°C in Ar .....	71
Fig-35	Results of Friction Test of SUS316 Versus Inconel 718 under 1000kg Load at 450°C in Ar.....	73-74
Fig-36	Relations of Frictional Coefficient between Nominal Load on Friction Test of Various Materials versus SUS316 .....	75
Fig-37	Results of Friction Test on SUS316 vs. Inconel 718 at 450°C in Ar.....	76
Fig-38	Results of Friction Test on Inconel 718 vs. Inconel 718 at Room Temp. in Air .....	77
Fig-39	Results of Friction Test on Inconel X VS. Inconel X at Room Temp. in Air .....	78
Fig-40	Results of Friction Test on NAS40-2 VS. NAS40-2 at 450°C in Ar.....	79
Fig-41	Results of Friction Test on the same kind of materials (Refractory metal).....	80
Fig-42	Results of Friction Test of Various Materials (SUS316).....	81
Fig-43	Results of Friction Test of Various Materials (Inconel).....	82
Fig-44	Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside (SUS316).....	83
Fig-45	Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside (SUS316 vs. carbide).....	84
Fig-46	Changes of Hardness from Surface of Roter Specimen to Inside (SUS316 vs. Inconel).....	85
Fig-47	Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside (Inconel).....	86
Fig-48	Changes of Hardness of Various Materials after Tested .....	87

List of Tables

Table-1	The principal Capacity of Self-Welding Test Equipment.	
Table-2	Combination of Specimens. ....	88
Table-3	Chemical Compositions of Materials. ....	88
Table-4	Change of Microhardness of Various Materials after Friction Test. ....	89

## 1. はじめに

ナトリウムは活性な金属であり、材料表面を清浄にすることから、高温のナトリウム中で接触摺動している部分で生じる自己融着 摩擦、摩耗現象が注目されている。この現象に関し、諸外国では 10 数年前からクローズアップし成果の公表が目につくようになってきているが、各国ともそれぞれ、独自の装置を開発し研究が進められている。<sup>(1,2)</sup>しかし試験装置からくる結果の「バラツキ」が大きく、どの値を設計値に反映すべきか問題となっている。特に最近はナトリウム中の酸素濃度によっても、材料間の摩擦係数とか、自己融着性が微妙に影響することがわかつってきた。これらの効果を解明するためにも、試験機からくる「バラツキ」因子を出来るだけ除いた材料のより正確な判定が可能となる試験機の開発が望まれている。

又、<sup>\*</sup>高速増殖炉用機器に対する接触、摺動のモードも非常に多種類になっており、これらの条件を考慮した材料の選定が要請されてきた。これとともに、試験機自体もその形状および試験条件は出来るだけ実機を模擬したものが必要となってきた。このために我々は、諸外国での研究開発状況を調べ、<sup>(4)</sup>各々の装置の不備な点を補った新型試験機の開発を 1972 年から進めてきた。今回、この試験機が完成し一連の予備試験を終えたので、これらについて報告する。

---

\* 以下 FBR と略記する

## 2. 自己融着試験の現状と試験機製作の背景

諸外国における試験の開発状況については調査報告書にまとめてあるので、こゝでは各々の装置の詳細な解説をはぶき概要にとどめる。<sup>4)</sup>

諸外国の自己融着試験を融着性の判断から2つに分類出来る。

(i) ナトリウム中で試験片を加圧保持し、融着を生じさせ。その後引張り試験を行い、この時の破断力によって、材料の融着性を判定する方法

(ii) ナトリウム中で試験片を加圧保持し、その後加圧の状態のままで、剪断・摺動させ、この摺動を起させる時の力から静摩擦係数を計算し、これを判定の基準とする。

(i)はドイツが主に行われている方法で、今までPNCで行ってきた装置もこれに属する。(ii)はアメリカで主として行われており、LMEC, APDA等で試験されているものである。<sup>(1)(2)(5)(6)</sup>

材料の融着性を判断する上でどちらの方法が良いかは、FBR用対象機器によって、決めなければならない。(i)の引張り強さから望まれるものに、ナトリウム弁のディスクとシート、集合体の受板と入口ノズル、可動パッド材等があり、又(ii)から判定すべき材料として、集合体の固定パッド、制御棒のクリッパー、ローラー等がある。

今回、我々が開発した自己融着試験機は、この両者を試験することが可能であり、特に、材料の融着性の判定として、1つの新しい方法で解析することが出来る。すなわち、材料を加圧、保持し、融着後、引張破断させ、(一般に、融着性を示す材料は表面の粗さがおおきくなる)その後、再び接触させ摺動することによって、摩擦係数の変化を測定できる。この様な摺動モードは実機でも観察されるもので、この項目からの研究が今後必要となる。

又、最近の自己融着性試験の傾向として、材料の表面変化(例えば、合金元素の選択的溶出とか、相変態)によって融着性がどの様に変わるか特に、ナトリウムのフラッシング効果に关心が集っている。<sup>(3,5)</sup>この様な背景から、我々は試験機の製作に当って、次の項目に留意し開発を進めてきた。

- ① 融着性の判断を、引張り破断力および断からの静摩擦係数の測定のいずれによても試験することが可能である試験機を開発すること。又、引張破断させた後、引続き摺動させ、1つの新しい融着性の判断が得られる試験機を製作すること。
- ② 融着させようとする試験片間を分離し、お互いの材料表面をナトリウムにさらさせて、変化させ(ナトリウムのフラッシング効果、又は予浸漬の影響)、ある一定時間後に加圧させ試験の出来る試験機を製作すること。
- ③ 融着試験は700°Cまでのナトリウム中で出来る構造とし、又、融着させた後の試験もこの高温ナトリウム中で行える機構とすること(FBRの炉心部コンポーネントの集合体パッド部では約600°Cで加圧され、その後交換のために摩擦係数が問題となる時は約280°Cである)

- ④ 試験データ（引張・破断力、圧縮力、捩りトルク力、周速等）は出来るだけ単純に測定が出来、又、試験機自体の影響因子がほとんどない様な構造とすること。すなわち材料の変化がなければ、何度試験しても同一データが得られる様にすること。（再現性）
  - ⑤ 試験片の取り換えは極力簡単に出来、又試験片の形状は変更することが可能な治具を持つ様にすること。そして、試験片の接触は片当たりのない様、全面で接触することが可能な様に、受け治具を開発すること。
  - ⑥ 試験部（特にナトリウム液面下）はナトリウムの溜りがない様な形状とし、アルコール処理が簡単に出来る様に注意すること。又、ナトリウム蒸着を避けたい部分には、熱しゃへい板を取りつけ、トラブルを起さない構造とすること。
  - ⑦ 試験部の各部は融着性および「カジリ」がない様に、今までの予備的試験結果を考慮の上、<sup>(5)</sup> 材料を選定すること。
  - ⑧ ナトリウム・ポットへの試験部の取り付けを容易にし、作業者によって、セットが異なる様な目印をつける。又、ナトリウム・ポットにはほとんど、負荷がかからない構造とする。
  - ⑨ 室温の変化、熱衝撃等によって、拘束される部分が出来ない様にすること。
  - ⑩ ナトリウム中に異物（特に油類）が絶対に、混入しない構造とすること。
  - ⑪ 将来、摺動および加圧の条件を自動化し、1つのプログラムにそって、試験が出来る様に、装置を考慮しておくこと。
  - ⑫ 加圧、保持中の試験片のクリープ速度が測定出来る機器を有すること。
  - ⑬ ナトリウム中の酸素濃度が自己融着性に、どの様に変化を与えるかを試験するため、コード・トラップとホット・トラップ領域のどちらでも、試験が出来る様に、ホット・トラップ・ラインと酸素測定系ラインを、既設のループに設けること。
  - ⑭ 同一試験機を利用し、他の雰囲気（例えは、アルゴン、ヘリウム中、真空中、大気中等）で簡単に試験が出来る様に、構造を考えること。これによって、ナトリウム中の加速性、および位置付けを明確化することが出来る。
  - ⑮ 試験機は低荷重（100 kg 以下）から高荷重（1000 kg 以上）まで、精度良く試験が出来る構造とすること。
- 以上の点を考慮して、仕様を決めた。

### 3. 自己融着試験機の製作とこの試験機による予備試験

#### 3-1 試験機の製作スケジュール

製作上の問題から試験機とナトリウム系のドーターループを別々に仕様を作成した。以下、製作までの工程を示す。

工 程 表

名 称	自己融着試験機およびナトリウム系ドータ・ループ									
	年月日		48年		49年				50年	
項目	9	11	1	3	5	7	9	11	1	
自己融着試験機										
	▲ 契約(東京衡機)									
		▲ 設計								
			▲ 機械加工・組立(含, 電気配線工事)							
				▲ 立合試験(工場), PNC搬入完						
					▲ 検収立合試験					
						▲ 大気中, アルゴン中機能試験				
ナトリウム系 ドータ・ループ										
	▲ 契約完(中島製作所)									
		▲ 設計								
			▲ 機械加工, 組立(含ヒータ関係)							
				▲ 立合検査(工場), PNC搬入						
					▲ r線, 耐圧, He検査, 保温工事					
						▲ 電気工事(含制御盤)				
							▲ 検収立合試験			
								▲ ナトリウム中総合試験		

以上の如く、自己融着試験機とナトリウム系ドーターループは別々に契約され、試験機の方が約半年早く完成した。この試験機にて各種材料の室温、および高温における摩擦、自己融着試験を大気中およびアルゴン中で行った。なお、試験機とドーターループ（特に試験ボット）との取合いで注意し、据付けおよび機能試験がうまくできるように調整をはかった。

### 3-2 自己融着試験機

#### 3-2-(1) 試験機の概要

試験機の主な運動は次の通りである。(i)融着に要する任意の荷重が試験片に伝達させられること、(ii)融着後そのままの状態で引張破断させるために荷重が連続的に加えられること、(iii)再び試験片に任意の荷重をかけ、接触加工させたままの状態で一方の試験片に回転摺動運動を与えることが出来る機構を有し、このときの捩り摺動トルクを測定する。又この時の回転運動は出来るだけスムーズに力が加えられなければならないこと。(iv)回転運動時の各々の試験片間ににおける周速が測定出来る。又、試験片を接触・加圧時のクリープ速度が測定出来る機能を有すること。(v)ナトリウム・フラッシング試験時に各試験片が互いに接触せずに保持が可能な機能を有すること。

以上の機能を持った試験機を製作した。試験機の主要目を表-1に示す。

表-1 試験機の主要目

① 加圧荷重	0 ~ 4000 kg
② 引張荷重	0 ~ 2000 kg
③ 捣りトルク	± 20 kg · m
④ 回転角度	120°
⑤ 運動の様式	反復回転運動
⑥ 上、下の摺動ストローク	0 ~ 10 mm
⑦ 試験片の形状	40φ 以内のリング又はピン（接触面積は約 200 mm <sup>2</sup> ）
⑧ ナトリウム温度	700 °C (max)

加圧用荷重、および引張用の荷重とも切換えレンジ(1/1, 1/2, 1/4, 1/5)を有し、低い荷重まで精度よく試験が可能な様にした。検収試験の結果、すべてのレンジで±1%以内であることが確認された。又、荷重の容量は見掛け上の接触面積間で塑性変形を起しうる値(kg)を採用した。捩りトルク値については、摺動時の荷重が1000 kgでこのときの材料間の摩擦係数を0.5とし、この値を最大のトルク値とした。（注、材料によって摩擦係数がこの値より大きくなったときは、荷重を低くして試験する必要がある。しかし、FBR用の各機器における荷重は集合体と受板で約200 kg、又、パッド部でもクランピング方式を採用したとしても、

最大 500 kg の荷重が予想されている。)

回転角度およびこの時の運動様式については、試験機の機構上から 120° 反復回転運動を採用した。既設の摩耗試験部 (SW-1) が回転シール部にメカニカル・シール方式を採用し、運動は同一回転運動であり、(注 FBR 用の機器では同一回転運動のものと、反復運動の両方の運動様式を有する...) 又、この様式の相異からも、材料間の摩擦挙動は変化すると予想される、又摩擦係数を正確に測定する必要性から反復運動にした。上、下摺動ストロークはナトリウムのフラッシング効果の試験時と引張試験時、クリープ速度の測定時に、必要となるもので、最大 10 mm (± 5 mm の変位) を可能にする機構をとり、又、荷重と同様にレンジを切換えて (1/1, 1/2, 1/4, 1/5) 非常に微小な変位でも検出出来る様な構造とした。

試験片の形状は 40 φ 以内の寸法ならばリング状でもピン状でも試験できる様にした。同一材料でも形状によって摩擦係数が変化することが予想されるので、材料の摩擦挙動の比較には、出来るだけ同一形状とすることが必要である。実機の運転温度は最高 600 °C であるが、加速試験の必要上 700 °C のナトリウム温度まで耐えられる様に計画した。

### 3-2-(2) 試験機の構造

試験機本体部の系統図を図-1 に示す。又、据り負荷装置部、加圧引張負荷装置部、および試験部の昇降装置、油圧配管図を図-2 ~ 5 に示した。製作、据付け後の自己融着試験機の外観は図-6 と図-7 に油圧ユニット、および計測盤を示した。又、自己融着試験はナトリウム中の酸素濃度に影響されるので、今回、あらたにナトリウム中の酸素トラップとして、ホット・トラップを設けた。このホット・トラップの組立図および詳細図を図-8, 9 に示す。なおホット・トラップのゲッター材料は純ジルコニアを使用し、ナトリウムとの接触表面積を多くとるために、図-9 に示す如く、波型加工をした。なお、今回挿入したジルコニア板の成分は下記の通りのものである。

ジルコニアの化学成分 (ppm)

Al	Ni	Pb	V	Si	Co	Fe	Mg	Hf	O
4.8	<10	<10	<15	<30	<5	8.11	<10	84	1047

ホット・トラップはジルコニア材を取換え可能な構造とした。すなわち、ナトリウムのシールはフリーズ・シール構造と金属バッキンの 2 重の安全策を採用了。

このため、フリーズ・シール部には取換え時ナトリウムを溶解させるための専用の予熱ヒータを設けた。又、ジルコニア板は表面積を大にするため、複雑な成型加工を施した(しかし、ナトリウムが完全にドレーン出来る様配慮をしている)ので、取換え時は表面に付着したナトリウムが空気と接触すると燃えるので、図-8 に示すカバー・ケース中を Ar ガスで置換し、ここに一旦保持しジルコニア材を取り出す方法を採用了。又、このケースは容易に脱着出来る様工夫してある。

図-10にホット・トラップの据付状況を示す。図-11はナトリウム中の酸素濃度測定用として、バナジウム線が挿入出来る装置で、この挿入部の本体は耐熱性をもたせるためハスティロイC材で製作し、又ナトリウム弁およびステンレス配管に熱的な無理を生じさせないために、ハスティロイC材の部分だけを加熱することが出来る外部電気炉方式を採用した。図-12にこの状況を示した。又出口には強制冷却を可能にするためのブロワーが設けられている。この挿入部には将来炭化物系材料とか、硬質合金（ステライト、コルモノイ）の腐食試験も可能な様に工夫してある。又ナトリウム・ボットは3基の試験機が据付けられる様にした、このボットの製作図は図-13に示した。

以上が試験機、およびナトリウム系ループの概要である。ループにはこのほかに酸素系ハウジング、加熱・冷却器、その他ナトリウム系一般の機器が備えつけられており、これらに関しては、ここでは省略する。なお、試験部の増設にともなって新設した機器等を含んだフローシートおよび組立図を図14、15に示す。これらの試験機ループは製作前に留意した項目をすべて満足された。すなわち次の様な具体的な機器の開発、工夫をすることによって解決した。

（以下の文章頭の数字は、章2の留意すべき項目①、②・・・に対応する。）

- ① 引張、および圧縮は油圧により各々の油圧空間部をもうけ、ここにバルブ操作で油を送り、試験片に直接伝達させる構造にした。又捩り回転は油圧トリコロールにより運動を与え、この時の引張、圧縮力は試験片と油圧室の間にスラスト・ペアリングを介しここで受けた。これによつて出来るだけ捩りによる垂直方向の荷重変化がない様にした。又、捩り運動時の周速は油圧バルブの絞りによって自由に選択することができる。捩り駆動はギヤ伝達とし、ギヤ間にはある程度自由になる様なギャップをもうけてある。
- ② 試験片の垂直方向の運動は油圧により行い、長時間試験片間を分離するときはバルブを閉じることにより、一定の間隔を保つことが可能である。又運動の速さはスピード・コントロール・バルブによって可変が出来、試験片間を任意の隙間で保つことができる。  
なお、圧縮、引張時の荷重は長時間一定保持するためにV.D.C型コントロール・バルブが備えつけられている。
- ③ シールは出来るだけ簡単なOリングを使用した（これはこの部分での摩擦抵抗を少なくするため）、このため、この部分の軸内、外を油循環して、強制冷却する方法を採用した。
- ④ 実験データは再現性を重視し材料自身の変化がなければ、同一結果が出る様、又解析計算も簡単にできる様に計測関係を統一した。

この場合、同一チャート上に回転角度に対する垂直荷重変化（注、試験片の表面状態の変化・・・粗さがおおきくなる・・・によって、荷重が変わる）と、摺動トルク値の変化を示すものである。融着性の1つの判断としての静摩擦係数の測定は、回転を任意の角度で一旦停止させ、加圧保持させて一定時間後再び回転することによって測定することができる。

なお、加圧保持時は記録計に時間に対する変位(ストローク)と荷重をチャートさせる。

(5) ⑦試験片の形状は図-16に示すごとく、従来から試験して来た摩耗試験部の形状と似かよつたものである。回転側の試験片は油圧によって直接に加圧、引張り荷重が伝達している軸に固定される。この場合軸、ネジ部試験片とともに、ナトリウム付着後のアルコール処理がスムーズに終了させるための孔がもうけてある。固定側試験片で低部が球面になっているのは、接触時片当りがないためで、ユニバーサル治具受となっている。図-17に治具受の寸法図を示した。又、ここでも融着、カジリおよびナトリウム処理がスムーズに出来る様に負荷又は、回転が生ずる部分には耐融着材料を使用し、ネジ部は出来るだけ避けてストレートのピンを使用した。

そのほか製作前に留意すべき項目(2章参照)のうち⑥、⑩に対しては熱しゃへい板を設け、⑧、⑨に対しては中間に金属ベローペー部を取り付け、又試験部が必ず試験部ボットに垂直にセット出来る様セット・ボルトをつけた。⑪に関してはすべての機能に対して油圧バルブを別々に設け、将来の自動化に対処した。⑫に対しては差動トランスにより変位測定器をとり付けた。又、⑭についてはこの自己融着試験機を $180^{\circ}$ 回転させ、この位置で電気炉等を利用する実験を可能にした。⑮では低荷重をDead Weightで負荷し、又高荷重は油圧方式によって試験出来る様な構造とした。これはロード・セルとスラスト・ペアリング部を分離可能な機器をつけることで解決した。

### 3-3 試験機の機能試験

#### 3-3-(1) 無負荷時の試験機の摺動トルク

試験機は、摺動する軸と固定部の間で、数箇所テフロン・Oリングでシールされている構造になっている。このOリングによって多少の摩擦抵抗が生ずることが予想できる。この値は実際の試験片間で発生する抵抗ではないから、これを試験結果から差引く必要がある。

図-18に無負荷時における回転摺動トルク変化を示した。横軸が回転角度で、一方の軸はトルク値の変化を示す。トルク値は±0.02 kg·m程度でほとんど無視しえることがわかった。図-18には又、回転摺動速度の違いによるトルク値の変化をも示したが、これについては次の項目で検討する。なお、無負荷時の試験から摺動の初めと終りの約 $10^{\circ}$ の回転角度におけるトルク値の変動が大きい。これは回転摺動を与えるトリコロールの機構上からくるもので、トルク値が大きな値になると、この変化は少なくなる。又、この変化は $10^{\circ}$ から $110^{\circ}$ までの範囲でほとんど観察されないことから、微少な自己融着性の判断のためにはこの範囲の角度で静摩擦係数を測定する必要がある。

次に、融着後引張り試験する時に問題となる軸方向の駆動時に生ずる(Oリングから来るもの)力を検討した結果約30kgであった。この値は試験時に荷重計測用計器をあらかじめ較正し

ておかなければならぬ。又、試験部の昇温(720°C)テストの結果でも、Oリングには何の変化もないことが認められている。

### 3-3-(2) 回転摺動速度によるトルク値の変化

材料同志では摺動速度が変われば、ほとんどの材料でトルク値に変動を与える。この場合、材料の表面状態の変化から生じたトルク値の変動であれば、試験データとなりうるが、試験機自身のすなわち、この試験機は油圧トリコロールを使って120°回転駆動させていいるので、これからくるトルク変化であれば、材料の評価に重大な誤りをもたらすことになる。又、この試験機で、どの程度までの回転摺動速度が得られるか、そしてこの方式でどの摺動速度が摩擦試験に対して適当であるかを調べるために、無負荷および500kg負荷時の各々の摺動速度におけるトルク値の測定を行った。500kg負荷試験では材料間で摩擦変動があれば検定することが出来ないので、材料のなかでも特に乾燥状態で低い摩擦係数を呈するといわれているテフロンを使用した。図-18, 19にこれらの結果を示した。どちらの結果からも、120°回転するまでの時間が長いとトルク値のセレーション(微少な変動)が観察された。この原因は回転させる伝達部がギヤーによるものであり、ここから生じたものと予想される。これは、将来低速で試験する必要性が生じたとき、ギヤー部にゴム等の軟い伝達機構を考慮すれば試験が出来よう。しかし、120°回転を15秒で摺動した場合、これらの変化もなく均一なトルク値を示した。又、500kg負荷したときのトルク値は120°回転を3秒で行っても変動が認められなかった。図-19に回転角度による荷重の変化を示した。この試験機は自己融着させるために、長時間一定保持用の油圧・バルブが設けられてあるが、摩擦試験時に急激な変位の変動が起るとこれに追従出来なくなり、又、捩りトルク(曲げ荷重)がロード・セルに加わることから、垂直荷重の変化が生じることがある。テフロン材では表面状況がほとんど変化しないことから荷重も±1.0%以内の変化であった。(注、後の項目で記述するが、材料によっては20%近くの荷重変化も認められ、安定な材料ほど変動は少ない...) このことから試験中の荷重変化も1つの材料評価のバラメータとなりうる)

この図-18の結果からテフロン材の摩擦係数は次式にて算出できる。

$$\mu = \frac{T - T'}{R \cdot F}$$

$\mu$  : 摩擦係数  
 $R$  : 試験片の平均半径(m)  
 $F$  : 垂直荷重(kg)  
 $T$  : 摺動トルク(kg·m)  
 $T'$  : 無負荷時の摺動トルク(0.02kg·m)

これからテフロン材は0.03以下の低い摩擦係数を示していることが認められた。

### 3-4 各種材料の摩擦、自己融着試験

#### 3-4-(1) 概 要

この試験機を使い、各種材料の大気中および不活性ガス雰囲気中の摩擦、自己融着試験を行った。これらの結果と引き続き行われるナトリウム中の試験結果と比較することによって、材料間の摩擦挙動をより正確に解析することができる。すなわち、ナトリウムがこれらの現象をどの程度加速するかを確認する必要がある。

#### 3-4-(2) 試験方法

##### (2)-1 試験装置

室温試験は大気中の状態で行ったが、高温試験はこの試験片部をステンレスの管中に挿入し、アルゴン・ガス（純ガス99.999%）で置換して、このステンレス管の外をカンタル線電気炉で加熱し、一定時間保持後試験した。又試験片近辺の温度を正確に測定するために、試験片に熱電対を直接埋め込んだ。高温不活性ガス中試験の状況を図-20に示した。

##### (2)-2 試験片の形状および試験片組合せ

試験片は図-16に示したもの用いた。各々の試験片間の接触面積は $220\text{ mm}^2$ であり、従来から使用している摩耗試験用および静的な自己融着用に使ったものと同一接触面積を有している。又、今回の試験でも特に片当たりの無い様注意した。試験片の組合せについては表-2に示し、又これら材料の化学成分を表-3に示した。SUS316、インコネル750、インコネル718 NAS40-2材の試験片の表面状態は、すべて#600エメリー紙仕上げを行った。又、硬質Crメッキは $20\mu\text{m}$ のメッキ仕放し状態であり、LC-1C、LW-1N-40については表面のアラサを0.8および $10\mu\text{m}$ に調整した試験紙を用いた。この材料の肉盛りはDetonation gunで行ったもので、製造方法の詳細については、別の報告書<sup>(5)</sup>を参照されたい。

##### (2)-3 試験条件および解析方法

試験条件を下記に示す。

1. 試験温度、室温  $450^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ ,  $720^\circ\text{C}$
2. 試験雰囲気 大気中（室温）、アルゴン中（高温）
3. 摆り速度  $120^\circ/15\text{ sec}$  ( $150\text{ mm/min}$ )
4. 荷重  $100\text{ kg} \sim 1,000\text{ kg}$

なお荷重は材料間の摺動トルク（試験機の能力が $20\text{ kg}\cdot\text{m}$ である）以内の範囲で行った。又、摩擦試験は回転側試験片を $120^\circ$ 回転後再び $120^\circ$ もどし、このサイクルを各々3回行って、摩擦挙動を観察した。

これら試験中の回転角度に対するトルク値の変動、およびこの時の荷重を記録紙にオンラインで記録させて、各々の摩擦係数をこれから算出した。又、自己融着試験は加圧保持後、

引張破断力によって行った。試験後のテスト・ピースは外観の状況観察の後、表面および断面の微小硬度分布を測定し、加工硬化度が摩擦挙動にどのように影響しているかを調べた。

### 3-4-(3) 試験結果

#### (3)-1 試験後の外観状況

試験後の外観写真および実体顕微鏡組織写真を図-21～23に示す。図-21はSUS316材同志の各々の温度条件における外観状況を示すが、このうち最下段のものは自己融着させた後の引張破面である（すなわち、他のものはすべて120°の繰り返し回転運動を行ったのに対し、これはほとんど回転摺動せずに加圧保持後引張り試験した。）

SUS316同志では、固定側、回転側とも非常に粗れているのが観察される。又、温度の上昇によって特に120°の試験後の状況は、室温のものと比べて延性を呈しているのがわかる。図-22に回転側をSUS316で相手材が硬質材（炭化物系材料）の時の試験後の状況を示す。この場合硬質材の表面アラサが粗くても滑らかであっても、軟い材料（SUS316）の表面状況は同じ様相を呈している。（注、今回の試験では形状効果のある回転側試験片にSUS316を使用したが、この組合せが反対であった場合は軟い材料の表面は同じ状況は示さないと予想される。）

又、450°C高温におけるSUS316とLC-1C材の組合せではSUS316の表面状況は室温で行ったものと同様な様相であるが、LC-1C側表面では相手材のSUS316が凝着移行しているのが観察された。

図-23にSUS316材とインコネル材および硬質Crメッキ材の摩擦試験後の表面状況を示した。インコネル718と組合せられたSUS316では、多少粗れた表面状況を呈し、一部に「ムシリ」とられた部分も認められる。しかし、硬質Crメッキと組合せられたSUS316の表面状況は滑めらかで、無数の摺動方向の「キズ」を有したものとなっている。

（注、SUS316同志では摺動表面で多数の「ムシレ」形態を呈する）しかし450°Cになると硬質Crメッキ表面に「クラック」が認められた。

図-23に耐熱材料（インコネルX、インコネル718、NAS40-2）同志の試験後の状況を示した。図-20、21に示した軟い材料（SUS316）と硬い材料の硬度差のある組合せ時に示した滑らかな表面状況ではなく、むしろSUS316材同志の表面と似ている。この図-24の状況ではインコネルX750同志の組合せが最も表面の粗れが目立ち、NAS40-2材の450°C試験後の表面状況では「ムシレ」の状態が少ない。

以上、試験後の表面状況について調べたが、この表面状況（特に表面のアラサおよび「ムシリ」とられた摩耗粉の粒径）は使用される機器の材料選定を行うとき十分に配慮しなければならない。（後で記述する摩擦係数より重大な影響を及ぼす場合もある）すなわち、拘束された機器（例えは、ノックピン、ペアリング等）と拘束のない機器（例えはスプリングやフ

レキシブルな フィンに押えられた接触部や自重のみの接触)に選定する材料で、前者に SUS316 同志の如く表面状況の粗れやすい材料同志の組合わせを使った場合、重大なトラブルを招くことになる。(試験機で得られたこれらの材料の評価が実機では極端に悪い結果となり、材料によっては試験機で多少良い評価があったものでも、実機では逆になる場合もある。) 次に、各々の材料の摩擦係数から評価を行う。

### (3)-2 各種材料の摩擦特性

#### (3)-2-(1) SUS316材同志の摩擦特性

SUS316ステンレス同志の摺動は「カジリ」やすいということから非常に悪いとされている。特に高温で、しかもナトリウム中ではこの傾向が大きく、ほとんど使用出来ないと極論する人もいる。<sup>(3)</sup>しかし、FBR用機器ではこの様に悪いといわれながらも、多くの機器でステンレス同志が摺動する様な設計が採用されている。ここで「カジリ」はどこから来るものなのか、又使用限界はどこまでであるか、そして形状による効果はどうなのが等、速やかに解決しなければならない問題が山積している。今回、室温および450°C、720°Cにおける摩擦試験を行った。荷重は1000kgまでを目標にしたが、高温では摩擦トルクが試験機の許容値以上にもなるので、例えば720°Cでの試験では250kgまではしか負荷出来なかった。図-25に室温で1000kg負荷時における摩擦試験結果を示す。この図は試験中オン・ラインで得られたもので、トルク値の変動が非常に大きい、この変動時に「ムシレ」が生じているものと予想される。このトルク値から摩擦係数を算出した。試験はすべての荷重において、120°右左回転を3回行った。この場合SUS316材同志では回数にしたがって、摩擦挙動が悪くなり、最後の3回目が最も悪くなっている。これは、SUS316同志では「カジリ」やすく、又試験機の回転運動が反復であるため、これによる「ムシレ」が増幅するものと思われる。(同一方向の回転試験では多少異なる挙動を示すだろう)又、第1回目だけの摩擦試験でも初期の回転における値と、60°位まで摺動させた後の摩擦トルク値は異なる。図-25に第1回目および第3回目の回転サイクル時の回転角度毎の摩擦係数を示した。第1回目の20°回転運動を与えた時の値は0.35と低いが、これが第3回目の摩擦係数は0.9にも上昇している。この様な変化は250kg、や500kgの低い荷重の試験でも観察された。特に250kgでは最低摩擦係数が0.07の値を示し、又、500kgでも0.16という低い値を示した。これらの値で各々のサイクルにおける摩擦係数の平均値を各荷重毎にまとめたものを図-26に示した。

荷重の増加にともなって、摩擦係数も上昇し、サイクルによる変化量も少ない、これに反して500kgの荷重では第1回のサイクル時の平均摩擦係数の値が0.2~0.3の低いものが、第3回目のサイクル時では0.7にも上昇した。

この様に低い荷重では走行の距離により、摩擦係数が変化する。(すなわち、まだ表面キ

メの生成の余裕があるか又は、加工硬化性の可能があることを示す。) 高い荷重で値にあまり変動が無いことは、SUS316同志の組合わせでこの形態の運動に対して、摩擦係数の限界値が0.9位の値を示すものと思われる。次に荷重条件として、同一試験片に荷重のサイクルが加わった場合、すなわち前の荷重にどの程度摩擦挙動が影響されるかを観察するため試験した。実際のFBR用機器でも、初期の頃500kg程度の荷重が加わり、摺動が生じ、次に、ある期間(炉の運転休止時)後この条件(荷重)が低下したときに、前の500kgがどの程度摩擦挙動に影響を与えるかは問題である。(注、なお自己融着試験機では、高い荷重負荷で自己融着させ、引張破断させた後の摩擦特性を調べることも目的の一つである。)

今回、SUS316同志で次の様な荷重履歴を与えて比較した。

- i) 250kgで摺動後100kgで摩擦試験(記号250→100で示す)
- ii) 250→100→500kgで試験
- iii) 250→100→500→100kgで試験
- iv) 250→100→500→100→750kgで試験
- v) 250→100→500→100→750→100kgで試験

(以下、前の荷重履歴を総称してpre-loadと記述する)

図-28にこのpre-loadの影響を調べた結果を示した。pre-loadが試験荷重より高い場合、すべてこれに影響され、摩擦係数は非常に高い値を示した。特に、500kgから100kgに下げた時では、この値が2.27にも達した。又、pre-loadより高い荷重で試験した時は、ほとんど影響されないことがわかった。今回の最高荷重である750kgでは、単一に750kgを負荷して試験した結果( $\mu = 0.76 \dots$ 図-26)と比較して、相当低い値を示している。この事はpre-loadによってSUS316材の加工硬化特性および表面アラサが変化し、これが摩擦挙動に影響を及ぼすことが予想される。

次に、SUS316材同志で高温不活性ガス中で試験を行った。SUS316材は予想された様に、高温中では融着傾向が大きく、720°C、100kgの荷重で最高2.84の摩擦係数値を示した。

図-29はこれらの結果である。又図-30に250kg負荷したときの温度に対する摩擦係数変化を示したものである。450°C試験で1回だけ極端に大きな数値が示されたが、このSUS316材同志の試験では温度の上昇とともに、摩擦係数も大きな値になる。

SUS316材同志が高温不活性ガス中で、この程度自己融着するかに関して、次の様な試験を行った。(注、ナトリウム中では試験片間を加圧するのみで、自己融着を起し650°C Na中で融着した試験片は破断させるのに800kg<sup>(5)</sup>もの引張力が必要であった。)

① 試験片を650°Cに保持し(回転側および固定側の試験片に直接、熱電対を埋め込み

(5)  
測温した。)

(2) 試験片間に 500 kg の負荷により加圧したこの状態で 2 時間保持し、この後引張り試験を行った。

しかし、この条件のもとでは融着性を示さなかった。

ナトリウム中と比較して、加圧の保持時間が極端に短かった事もあるが、不活性ガス中では材料表面に生成したフィルムを除去する能力がなく（厳密には酸化物の生成の Free Energy に関係してくるので、ここではナトリウム中と比較して）このフィルムを通じて、材料間の相互拡散を生ずることは難しかったものと思う。そこで、このフィルムを高温で機械的に除去して、裸の材料表面を露出してやれば融着の可能性は増大することが予想される。又、機械的に表面のフィルムを取り除けば、ナトリウム中での保持時間より、より短時間に融着する可能性がある。（注、ナトリウム中でのフィルムの除去は化学反応によるものと予想されよう。）ここで、この 650 °C に保持した試験片間を 500 kg 負荷した状態で 5°（摺動の走行距離で約 1.5 mm）左右回転の 1 サイクルの運動を与え、材料表面の生成フィルムを破壊した。この後、荷重を 750 kg に増加し、40 分間保持した。このあと引張破断試験を行った。このときの引張荷重と変位変化を図-3-1 に示す。最終の引張破断力は 400 kg であった。（なお、引張荷重を手動で行ったため、ある特定の荷重で保持しながら増加させた）引張破断後の外観状況は図-2-0 に示してある。融着したと思われる部分は金属光沢を呈している。（ここでも全面積で融着が生じているのではなく、非常に少ない地域でのみ起っていることがわかる。）この様に、運動（微少なものでも）をともなう、自己融着現象は、加速され厳しいものになることが予想できる。

以上、SUS316 材同志の摩擦、自己融着挙動について調べたが、SUS316 同志でも使用によっては、摩擦係数も非常に低い値（0.07～0.16）を示すが、一度「カシリ」が起ると急激に高い値を示し加速される。そして、又、pre-load によっても影響されることがわかった。自己融着性に関しても、材料表面に生成したフィルムを強制的に除去することによって、短時間で融着することがわかった。（一般に加圧のみで、不活性ガス、および真空中でステンレス同志を融着させるのに要する最低温度は 700 °C といわれている。この場合、試験片間を摺動させ、熱を発生させて加圧すれば、雰囲気温度が室温でも接着することが可能である。）

### 3-2-(2) SUS316 材と炭化物系材料の組合せにおける摩擦特性

炭化物系材料で特にクロム・カーバイト材がナトリウム中で低い摩擦係数を呈するという事から<sup>(7)</sup>最近注目されている材料の一つである。今回炭化物系材料のうち LC-1C 材 (85% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>・15% Ni-Cr) と WC の入った LW-1N-40 材について試験した。各々の材料とも表面アラサがブラッシュ仕上げ (B.F) のものと、グラインダー仕上げ (G.F) のもので、B.F で

は表面が粗化されたままであり（平均表面アラサ  $10 \mu\text{m}$ ），G.Fは研磨加工（平均表面アラサ  $0.8 \mu\text{m}$ ）されているものである。図-32に $450^{\circ}\text{C}$ における $1000 \text{ kg}$ 負荷時のLC-1C材（G.F）とSUS316材組合わせの摩擦試験結果を示した。SUS316同志の組合わせのものと比較して、非常に摩擦挙動が安定している（サイクル毎の結果もほとんど同一結果を得たことから、試験機にも信頼性があることが確認できた）しかも、このデータから算出した摩擦係数は0.56という値であった。又、別の試験から室温では0.18という非常に低い値であった。すなわち、温度の上昇とともに摩擦係数も増加したが、SUS316同志の様に大きな値は示さなかった。しかし、図-21に示される外観状況から高温になるとSUS316材がLC-1C材の方へ一部移行していたのがみられ、この点で摩擦係数が上昇したと思う。図-32に相手材がLC-1C(B.F)材で表面の粗い状態と組合わせた時の摩擦試験結果である。又、このときの平均の摩擦係数は0.5である。

軟い材料と硬い材料の室温試験では硬い材料の表面粗さが大きい程摩擦抵抗は増し、摩擦係数も高くなる。この場合、摩擦試験が潤滑なしで行われたため、形状効果からくるものが大きい。又 $450^{\circ}\text{C}$ でも、まだこの傾向は変わらないと予想されるが、ナトリウム中では一概にどちらが良い摩擦挙動を示すか断定は出来ない。又、タンクステン・カーバイト入りの炭化物系材料（LW-1N-40）についても、LC-1C材と同様な摩擦挙動を示したが、多少LC-1C材と比べて高い摩擦係数値を示した。これら一連の組合わせではSUS316材同志でみられた「ムシレ」状況はほとんど認められず、しかもSUS316材側でも表面がバフ研磨された如く鏡面を呈していた。

### 3-2-(3) SUS316材と硬質Crメッキ、インコネル718材の摩擦特性

硬質Crメッキおよびインコネル718材はともにFBR用材料として従来から使用されてきたものである。しかし、これらの材料に対する摩擦特性の評価は一貫せず、ある場合では優秀であったが、実際の機器で「カジリ」ついてしまったという報告もある。これらの事から、今回ナトリウム試験に先がけて、室温および $450^{\circ}\text{C}$ Ar中で試験した。図-34にSUS316材と硬質Crメッキ、図-35にSUS316とインコネル718材の試験結果を示す。又図-36に回転角度に対する摩擦係数の変化を各荷重毎に示した。

相手材が硬質Crメッキ材の時は、室温でも $450^{\circ}\text{C}$ の高温でも同様な安定な挙動を示し、又、インコネル718の場合では、高温の方がより安定な摩擦特性を示した。

図-34、35の平均摩擦係数は各々0.57、0.59である。又、これらの組合わせにおける荷重に対する摩擦係数変化を図-37に示す。相手材がインコネル718の時 $750 \text{ kg}$ で0.4という非常に低い値を呈し、一般に高温では荷重の増加とともに摩擦係数が低い値となつた。

（インコネル718材の場合、アメリカでも荷重が増すにしたがって、摩擦係数が下がるという報告もある。<sup>(8)</sup>）

このことは相手材が硬質Crメッキ材でもLC10材でも認められる。これに反して室温では、荷重の増加とともに上昇の傾向がある。

以上の軟いSUS316材と相手材が硬い材料の組合せでは、高温(450°C Ar中)まで安定した摩擦特性が得られ、このなかでも室温では相手材がLC-10材のとき最も低い摩擦係数を呈し(0.18)、450°CのAr中ではインコネル718材と組合せられたものが良好であった。

一般にこの組合せでは、SUS316側は試験とともに表面の加工硬化が起り、又、相手材も表面のアラサがあまり変化しないことから、荷重が大になるにしたがい、摩擦係数も低くなる事が予想される。

### 3-2-(4) インコネル系同志の摩擦特性

従来から、同一材料間で摺動させると「カジリ」つき易いといわれてきた。今回の試験でも、SUS316ステンレス同志では、非常に悪い摩擦挙動を示すことが認められた。しかし機器によつては、同種の組合せしか採用出来ない部分もあり、これらの使用限界、および摩擦挙動を調べる必要がある。

今回、インコネル718、インコネルX750およびNAS40-2(N155相当品)材で試験した。図-38、39にてインコネル718材およびインコネルX750材同志の摩擦試験結果を示す。インコネルX750に比べてインコネル718は摩擦係数が低く、しかも安定した摩擦挙動が得られている。インコネルX750材はSUS316材より、ある特定条件では、悪い挙動を示している。又、インコネルX750材の高温中では、摩擦挙動が大きく、かつ、高い値を示した。図-40にてNAS40-2材の450°Cにおける各荷重毎の摩擦係数変化を示した。この図から、この材料ではインコネルX750材とは反対に荷重が増加するにしたがって摩擦挙動が安定し、又、摩擦係数値も低くなつた。特に、200kg程度の低い荷重で非常に大きな摺動トルクが生じ、この現象は他の材料組合せでも認められた(図-37参照)。しかし、室温ではほとんどの材料組合せで、この現象は認められない。

図-41にて、荷重に対する平均摩擦係数を示した。この図からもインコネルX750材とNAS40-2材の挙動は異なつたものを示すことがわかる。この原因は成分、高温強さ等の違いからきたものと予想されるが、一概には断定出来ない。これら耐熱材料同志の摩擦挙動は、一般的に悪い結果となつたが、一部の材料(例えば、NAS40-2同志の450°C Ar中試験...図-22の試験後の外観状況でも「ムシレ」現象がほとんどなく、摩擦挙動も良好と予想された)では、高温重荷重で良いものが得られた。

\* 平均摩擦係数: 各荷重毎の40°, 60°, 80°, 100°回転角度における摩擦係数の算術平均

図-38のインコネル718材同志の結果から、摺動するに従い摩擦係数は高くなり、又、1サイクルの中でも最初の120°回転時の方が高い値を示している。この事は、この試験機の特徴である反復回転運動の影響があったものと思われる。

以上、各種材料の摩擦試験結果について記述したが、今回の試験の目的が、試作した自己融着試験機の校正、機能試験およびナトリウム中試験データとの比較検討を行なうことにあった。この事からこの報告書では、結果だけの報告にとどめ、詳細な考察については改めてまとめる予定である。なお、図-42、43に今まで行った材料の組合せにおける摩擦係数をまとめた。この値は平均値を表わし、微妙な摩擦挙動はわからないが、材料間の簡単な比較の目安にはなろう。このなかで最も低い値を示したのは室温時におけるSUS316とLC-1C(GF)の組合せで得られたが、このものは450°Cの高温では、室温時の3倍の値にも上昇した。次に摩擦挙動は材料の表面上の真実の接触点で起る「カジリ」が抵抗となる。この事は加工硬化しやすい材料は、摩擦の過程で加工硬化し、との母材とは変質した状態となる。又、加工硬化度が材料間の摩擦抵抗（いわゆる仕事量）に比例することが予想される。

そこで、試験後の断面硬度分布を測定し、この加工硬化特性を調べた。硬度測定は、全面が摺動面となっている回転側試験片を利用した。

図-44にSUS316同志の試験後の硬度分布を示す。室温の場合荷重が大きいと加工硬化も深くなる（注、摩擦試験中は室温でも材料表面は熱せられるが、再結晶温度以上にはならないことが予想される。）しかし、720°C Ar中試験後は、表面のかたさも低く又、硬化深さも少ない。（注、表層部のかたさは摩擦表面を直接測定し、その他のかたさは切断面を測った。なお、表面のかたさはバラツキもあり、3点の平均値である。最も高いSUS316材のかたさは677であった。）図-45、46は相手材が硬い材料で異種材の組合せ試験後の結果である。図-45は室温、図-46は450°C Ar中試験後のものである。かたさの測定に供したものは、いずれも回転側試験片でSUS316材側である。摩擦表面のかたさは、どの組合せにおいてもHv500前後の値を示している。しかし、硬化の深さは、各々の材料の摩擦係数と相応した変化が見られる。この場合、材料間の最終の試験荷重にも影響されるが、SUS316材の硬化深さが大きい程、摩擦係数値も高い傾向がある。図-47に耐熱材料同志の場合における試験後の硬度分布を示した。

これらをまとめて表-4、図-48に示す。ここで加工硬化度(H)は次式で算出した値である。

$$H = \frac{\text{摩擦表面のかたさ}}{\text{母材のかたさ}}$$

又、硬化深さ( $t_H$ )は摩擦表面から、母材のかたさの1.5倍まで加工硬化した部分までの肉厚を示すものである。

自己融着試験機を試作し、これを用いて室温および高温不活性ガス中で、自己融着摩擦試験を行った。各々の材料の摩擦挙動に関して、次の事が判明した。

- ① SUS316材同志は非常に「カジリ」易く、一度「カジリ」つき始めると、加工硬化特性と重なって加速される。
- ② またSUS316材同志では荷重履歴(pre-load)に影響し、摩擦係数が2以上にもなることがある。
- ③ SUS316材同志は融着傾向も強いが、垂直方向だけの加圧保持では融着しなかった。しかし1.5mmの回転によって、材料表面のフィルムを破壊した場合、完全な接着が起り融着破断力も400kgに達した。
- ④ SUS316材は相手材に硬質材料を使用したとき、摩擦特性は一般に良くなつた。特にLW-1N-40(WC), LC-1C(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)材とでは、高温(450°C Ar)中でもほとんど摩擦係数値が0.6以下で安定していた。
- ⑤ 耐熱材料同志の摩擦特性は、一般にSUS316材同志と同様に、悪い傾向を示したが、一部の組合せで高温で、しかも重荷重になればなるほど摩擦係数が低下し、かつ安定な挙動を示した。
- ⑥ 摩擦試験後、SUS316材の表面は加工硬化し、最高Hv600以上にも達したが、室温試験では相手材がどの材料であっても、SUS316材表面のかたさは一定値に近づいた。
- ⑦ 一般にSUS316材は高温摩擦になるほど、摩擦係数値も高くなって摩擦挙動も不安定になつた。

## 4. あとがき

1972年以来、新しい方式による自己融着試験機の開発を進めてきた。今回、一連の試験を終え、この試験機が仕様をほぼ満すことが認められた。しかし、今後材料間の微妙な評価をするためには、いくつかの改造が必要である。以下に、試験機およびループに関するものについて記述する。

- i) 将来、反復運動のサイクル数のパラメータの試験が必要となろう。このためのパッキンを考慮すること。（現在のパッキンがどの程度まで耐えられるか不明である。）
- ii) 上記試験のため、反復運動の自動化が必要となる。（油圧バルブの切換えで可能）
- iii) 荷重が最大4000kgまでの仕様にしたため、油圧ポンプの始動圧力によって、最低の荷重が100kg程度になってしまふ。このため、100kg以下は、Dead Weightによって負荷する型式で試験しなければならない。現在下試験片にかかる自重が28kgであり、レバーモードによって、10kg, 20kgの試験が出来る様にする。
- iv) 試験中、材料によっては、表面に摩耗を生じ、このため垂直荷重と曲げ荷重が重なり、接触部の荷重が変化する。将来、一定荷重試験の必要性がある場合改造を要する。（これは、ロード・セルの信号によって、油圧を変化させる構造とする。）
- v) 計測・変換器を1号機、2号機とそれぞれ別個に設けること。
- vi) 将来、実験が進んで、材料表面に生成したフィルムによる摩擦挙動の試験を行うには、現在手動のV.D.O型コントロール・バルブにより、荷重を増加させていくが、これを自動化して、漸増荷重によって、生成フィルムの破壊荷重を調べる必要がある。
- vii) ループ側では、SW-2の長時間試験が出来る様にSW-1と切離して運転する単独ドレン・ラインおよび冷却器を設ける。
- viii) ホット・トラップ、および試験片挿入部の前に電磁流量計を設置し、各々のラインの流量を測定しておく必要がある。

又、今後実験を進めるにしたがい、材料によっては、新しい現象が観察され、これとともに実験方法も変更しなければならないことが予想される。（すなわち、試験機の改造も新に必要となろう。）

摩擦係数の測定は、他の影響因子がはいり込みやすく、難しい試験の1つである。特に、ナトリウム中では高温であり、かつ、ナトリウムの化学特性の点からも、多くの因子が予想されている。しかし、高温で使用される機器の接触、摺動部材を設計、製作するためには最小限材料間の摩擦係数だけでも、知っておかなければならぬ。（勿論この摩擦係数のみで、材料の総合的な判定は出来ないが・・・。）高速炉の設計に際し、今まで多数の人が高温の強度方面ばかりに目を向けていた傾向があった。しかし、FFTF等では3~4社の企業体でプロジェクト・チームを

作り、これらの摩擦・摩耗現象に対処している。我が国でも、設計が進むにしたがい、各種材料（注FFFの機器では多くの対象材料が考えられている。）間の摩擦係数の測定が要望されつつある。又、諸外国でも従来の試験データはナトリウムの純度管理の点からも見直す必要があるとして、あらたに試験を始めている。これらの事を考慮して今後開発試験を進めなければならない。これから試験計画は50年3月末までにナトリウム中における「もんじゅ」集合体のパッド部候補材（ステライトM6、コルモノイM6、インコネル718、硬質Crメッキ、クロム・カーバイト等）の摩擦測定試験を行い、選定資料を得る。つづいて50年4月からは融着を起させ、この引張破断力からこれら材料の判定試験を行う。又、不活性ガス中でも試験を行い、ナトリウム中における摩擦現象をより明らかにする予定である。

終りに、予算から建設まで終始一貫して御指導、御支援を賜わったFBR本部のナトリウム・グループの方々、斎藤ナトリウム技術部長ならびに試験機、ドータ・ループの設計製作を担当された東京衡機、中島製作所の関係者各位に心から感謝の意を表する。

## 5. 文 献

1. K.Bendorf 「Experimental Investigations of Self-Welding of Structural Materials under Sodium」  
Nuclear Engineering and Design 14 (1970)
2. N.J. Hoffman et al 「Friction and Wear Screening Tests of Materials in Sodium」 LMEC-70-10 (1970)
3. W.A. Glasser 「Survey and Analysis of Materials Wear and Friction in Sodium」 BMI-1907 (1971)
4. 溝淵, 加納他 「諸外国における摩擦, 摩耗, 自己融着試験の開発状況」  
ZN942 74-08
5. 溝淵, 加納他 「高温ナトリウム中における自己融着試験(I)」  
SN941 73-13  
溝淵, 加納他 「高温ナトリウム中における自己融着試験(II)」  
N941 74-18
6. R.C. Williams 「Evaluation of Material Wear and Self-Welding in Sodium-Cooled Reactor Systems」 APDA-126 (1958)
7. R.N. Johnson, et al 「Wear Resistant Coatings for Reactor Components in Liquid Sodium Environments」 J. Vacuum Science & Tech, (1974)
8. R.N. Johnson, 「FFTF Friction and Wear Programs」  
HEDL-6 (1972) 日米交換会議入手資料

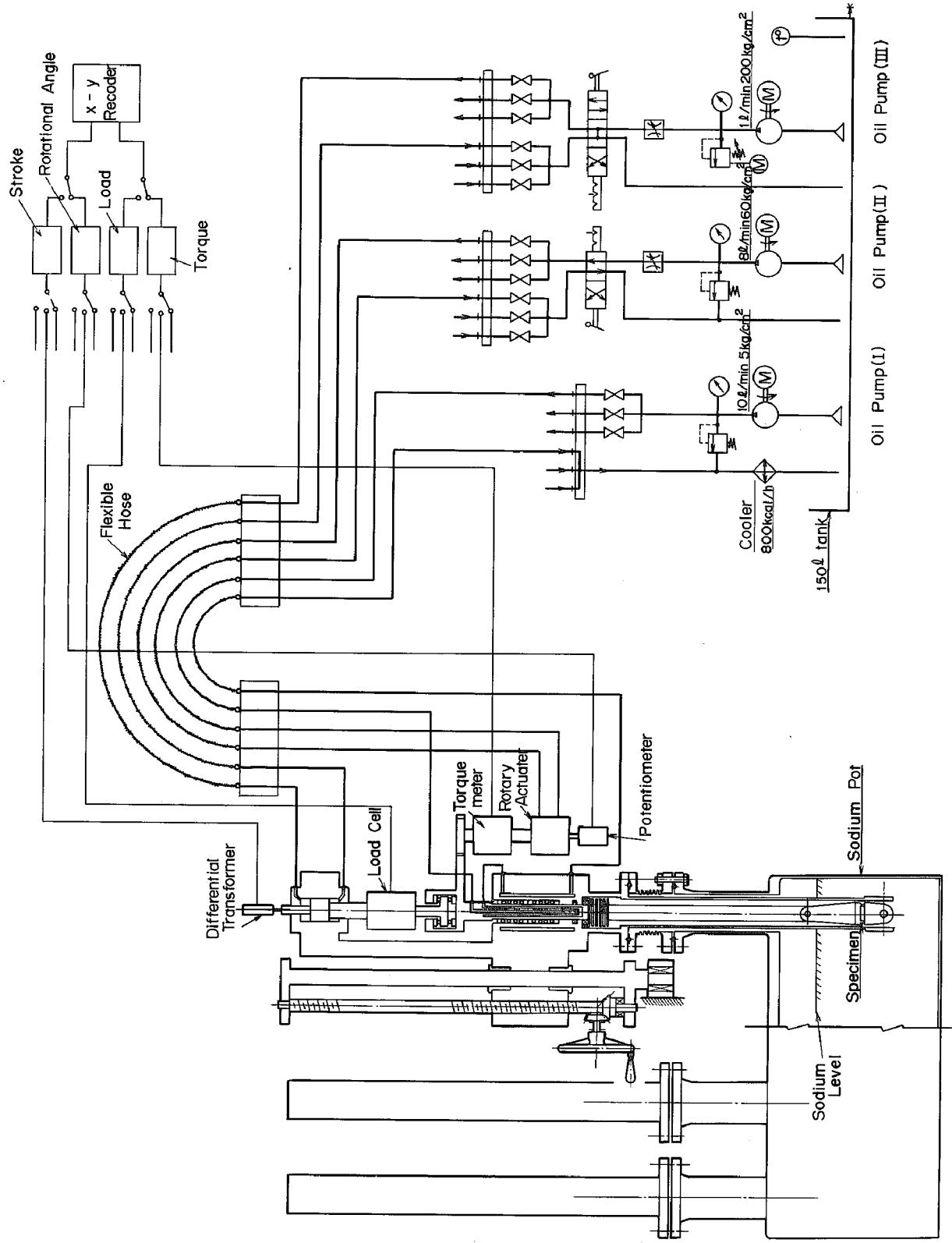
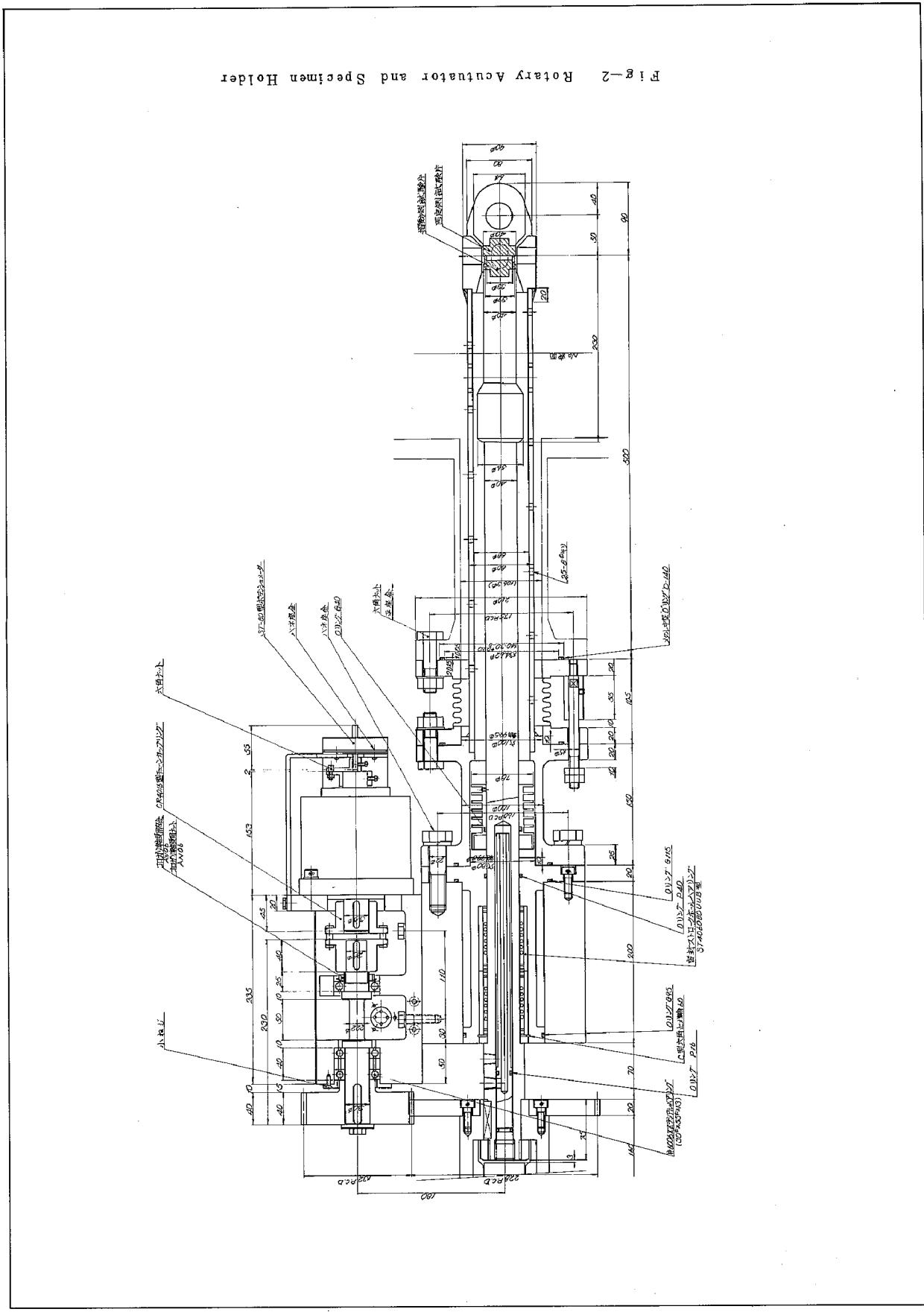
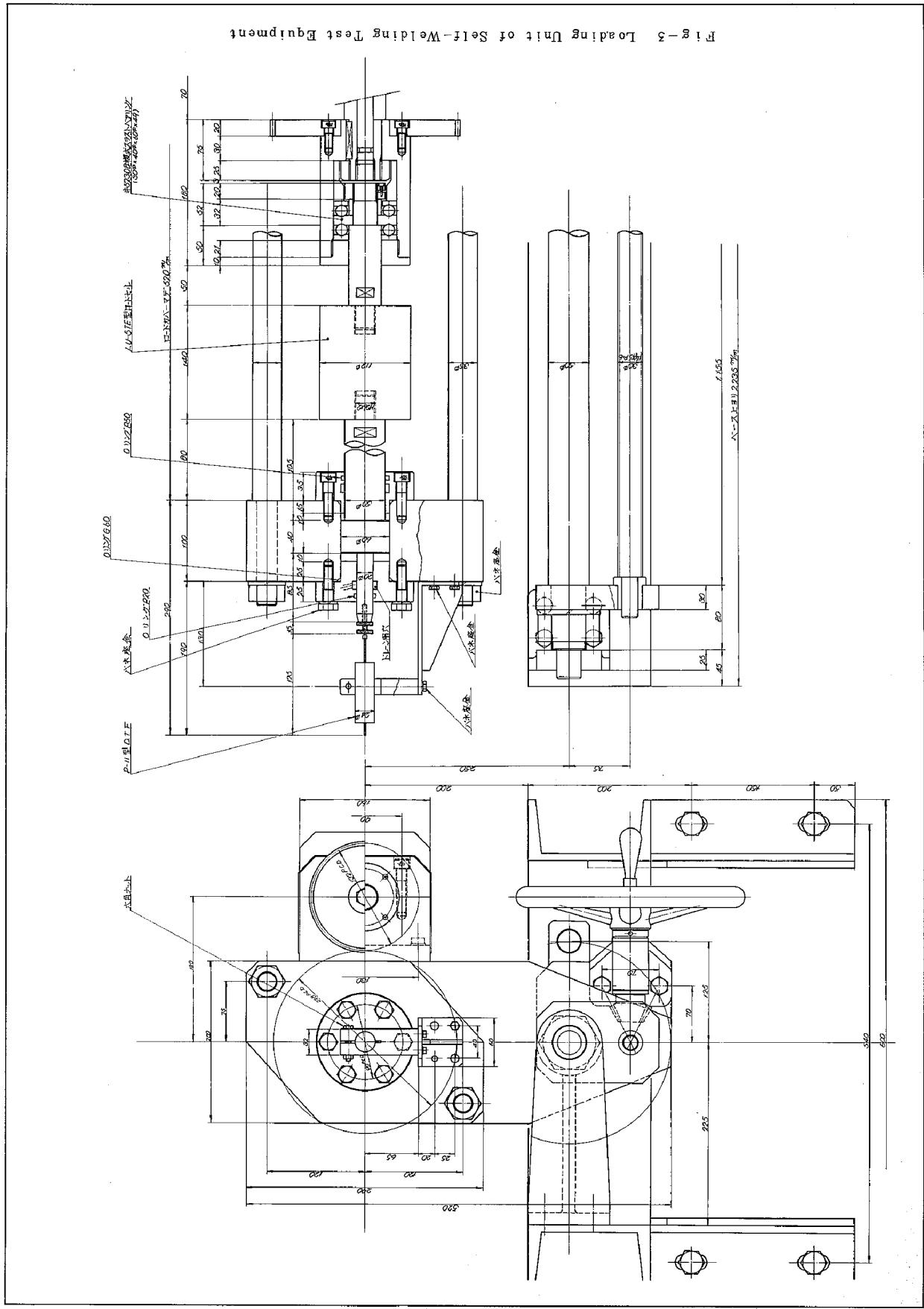


Fig-1 Systematic Diagram of Self-Welding Test Equipment





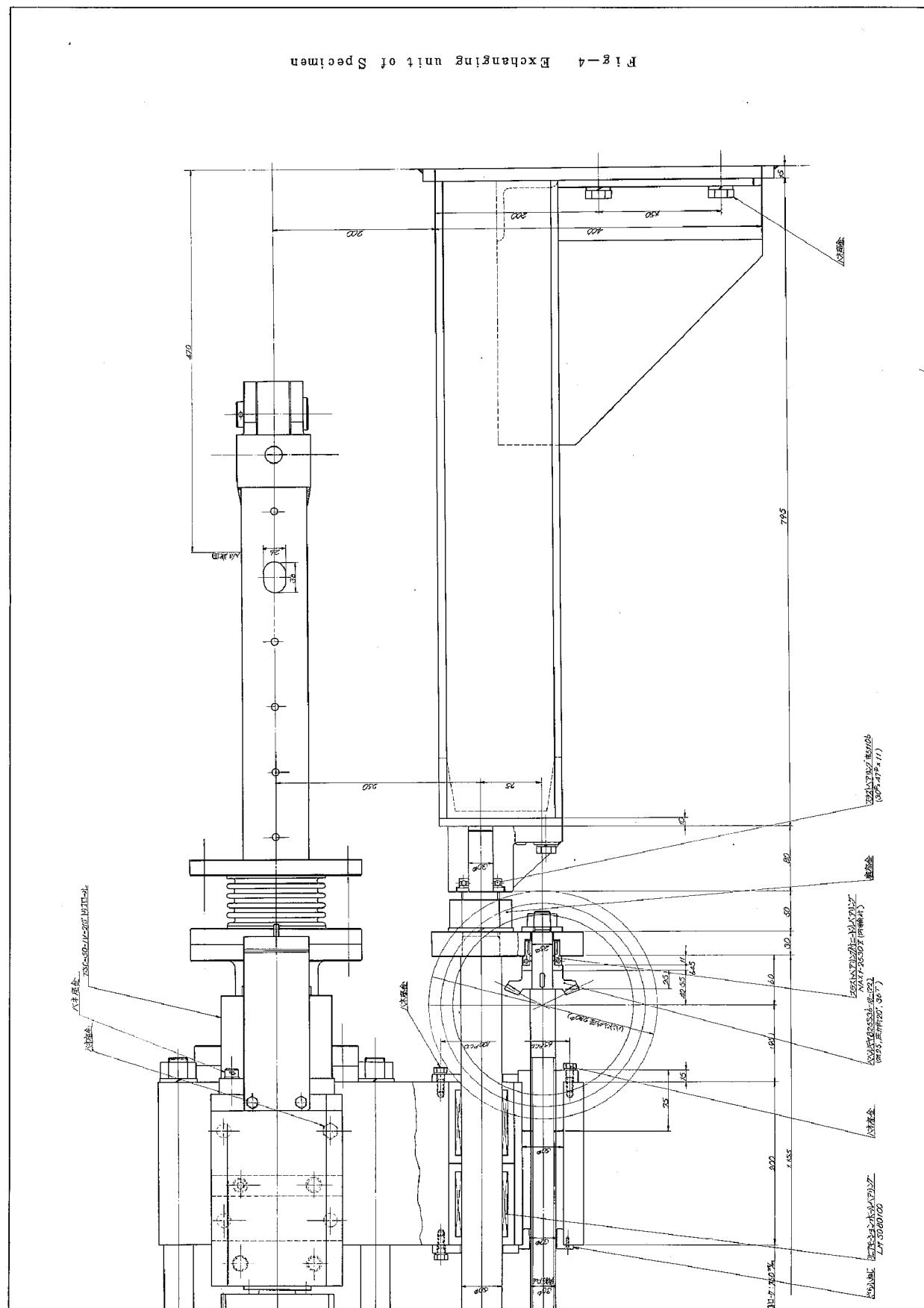
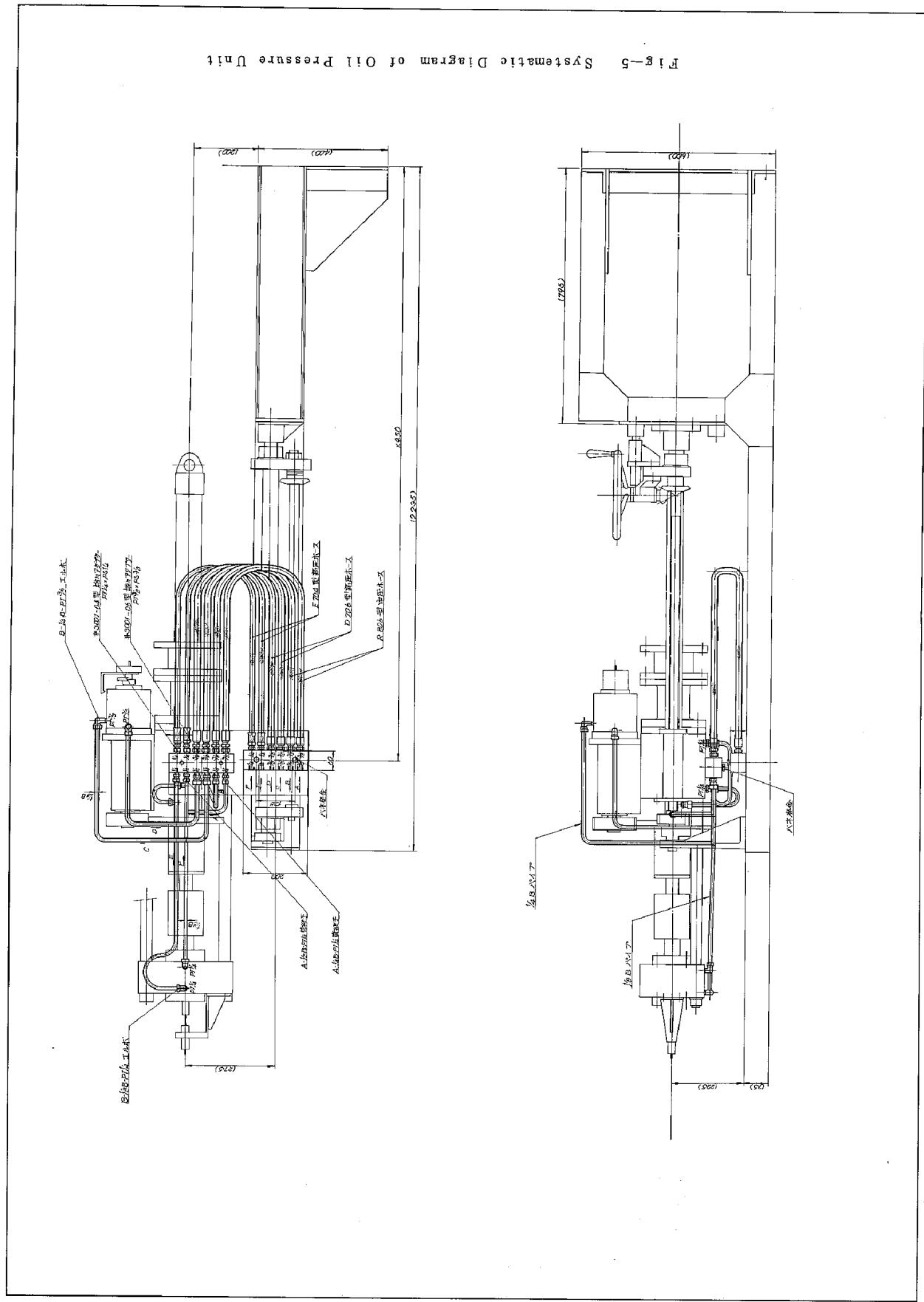


Fig. 5 Systematic Diagram of Oil Pressure Unit



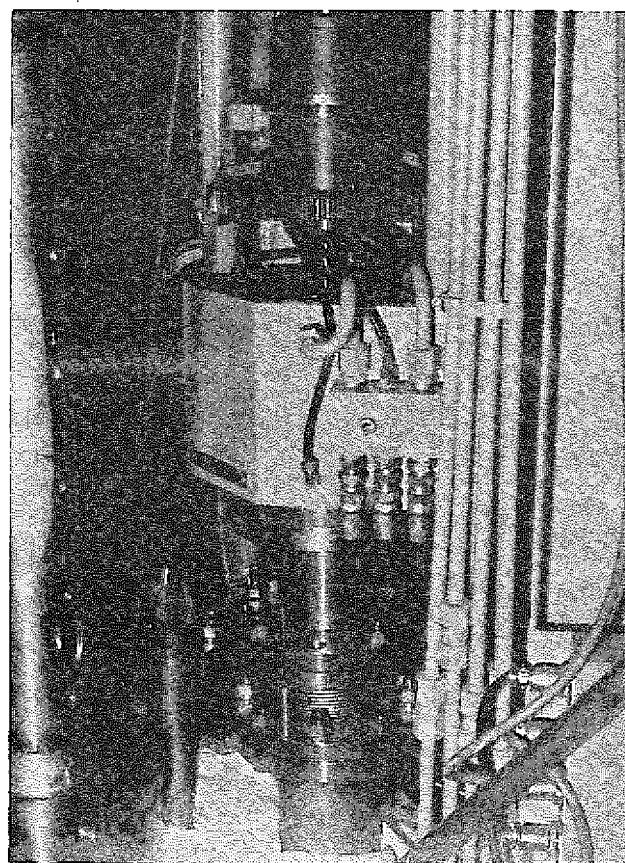
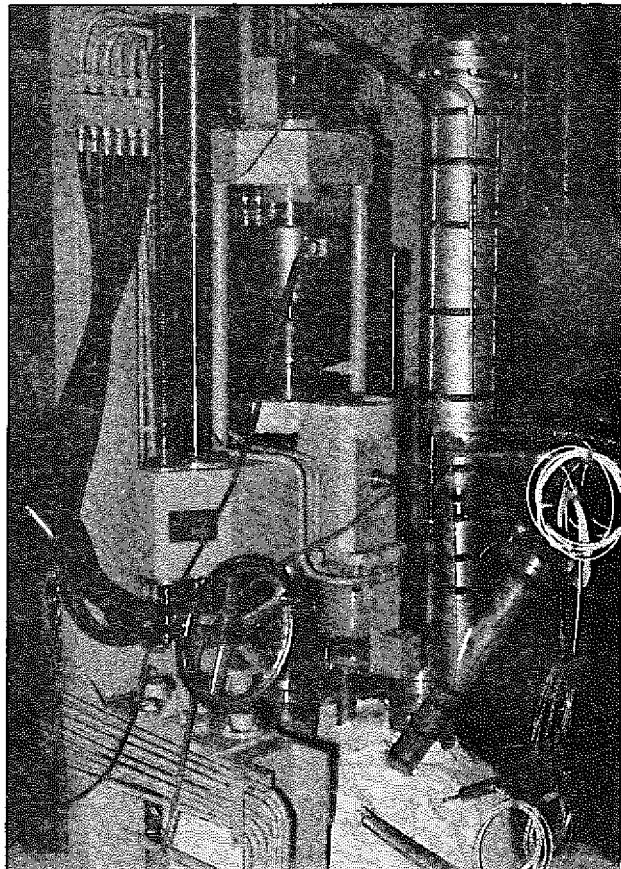
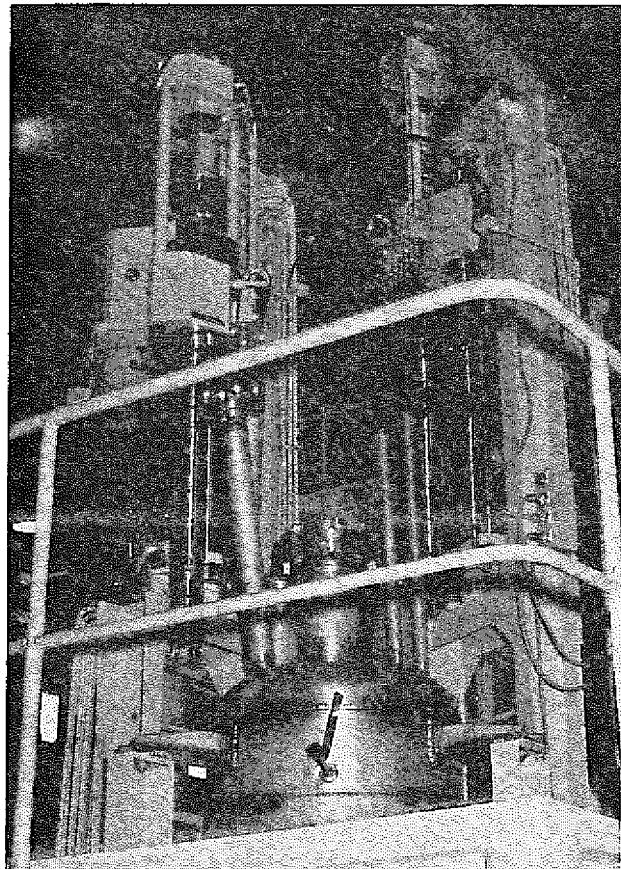
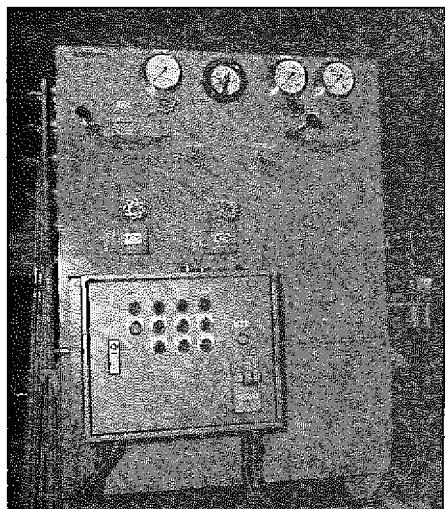
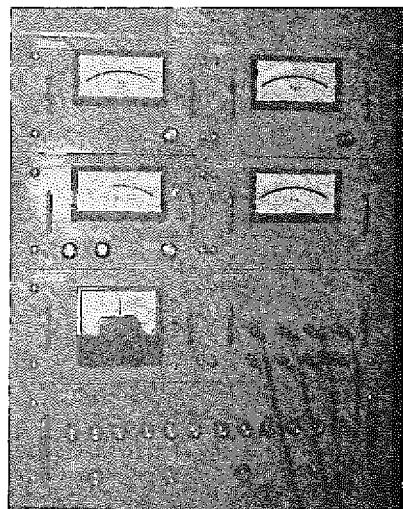


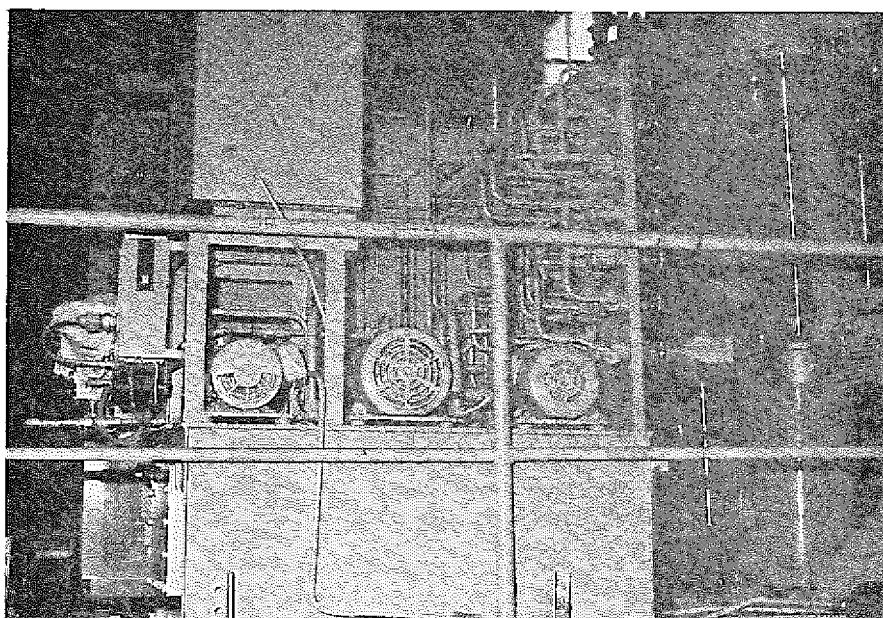
Fig-6 External Appearance of the  
Equipment for Self-Welding  
Test



Control Box for  
Oil Unit

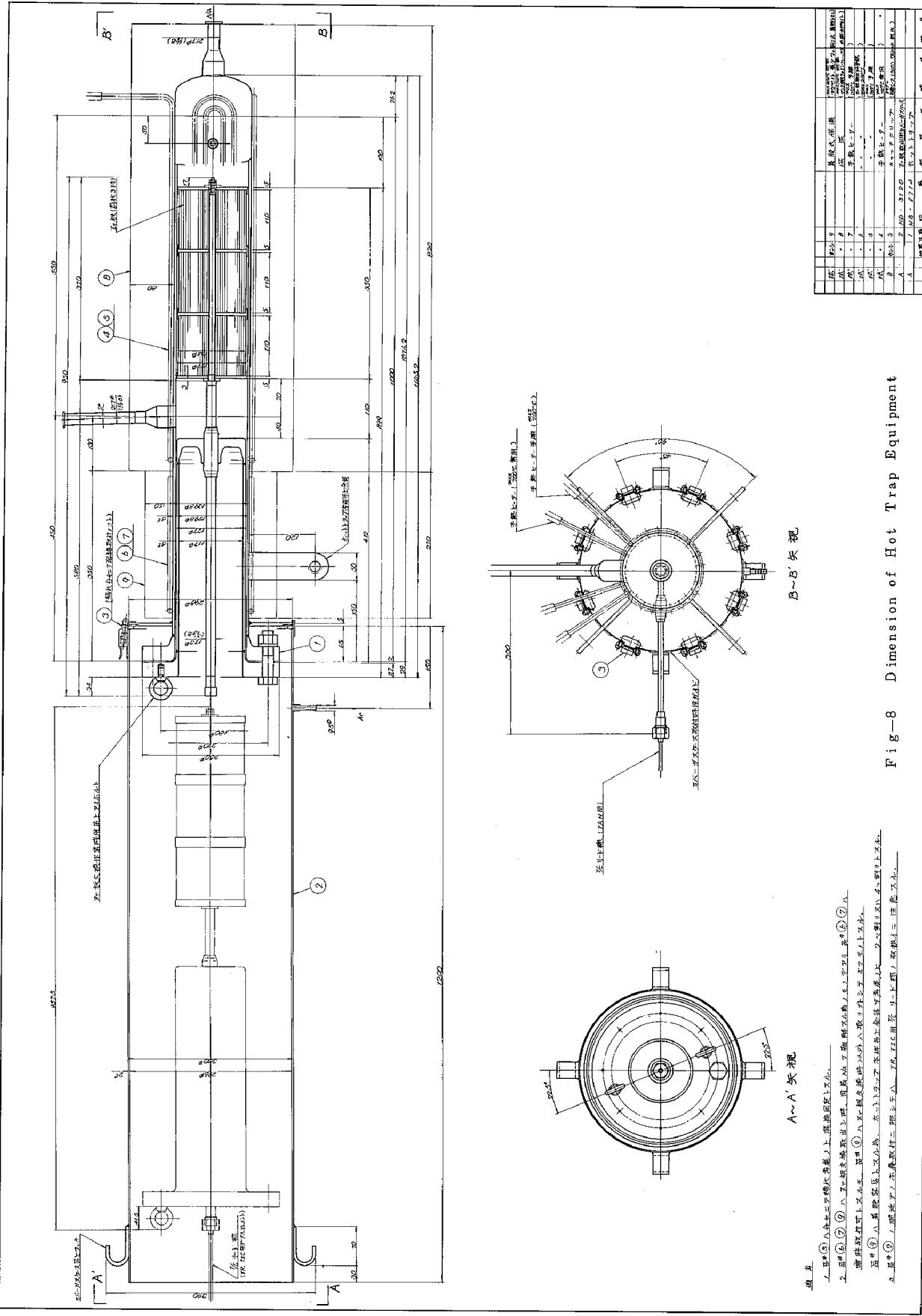


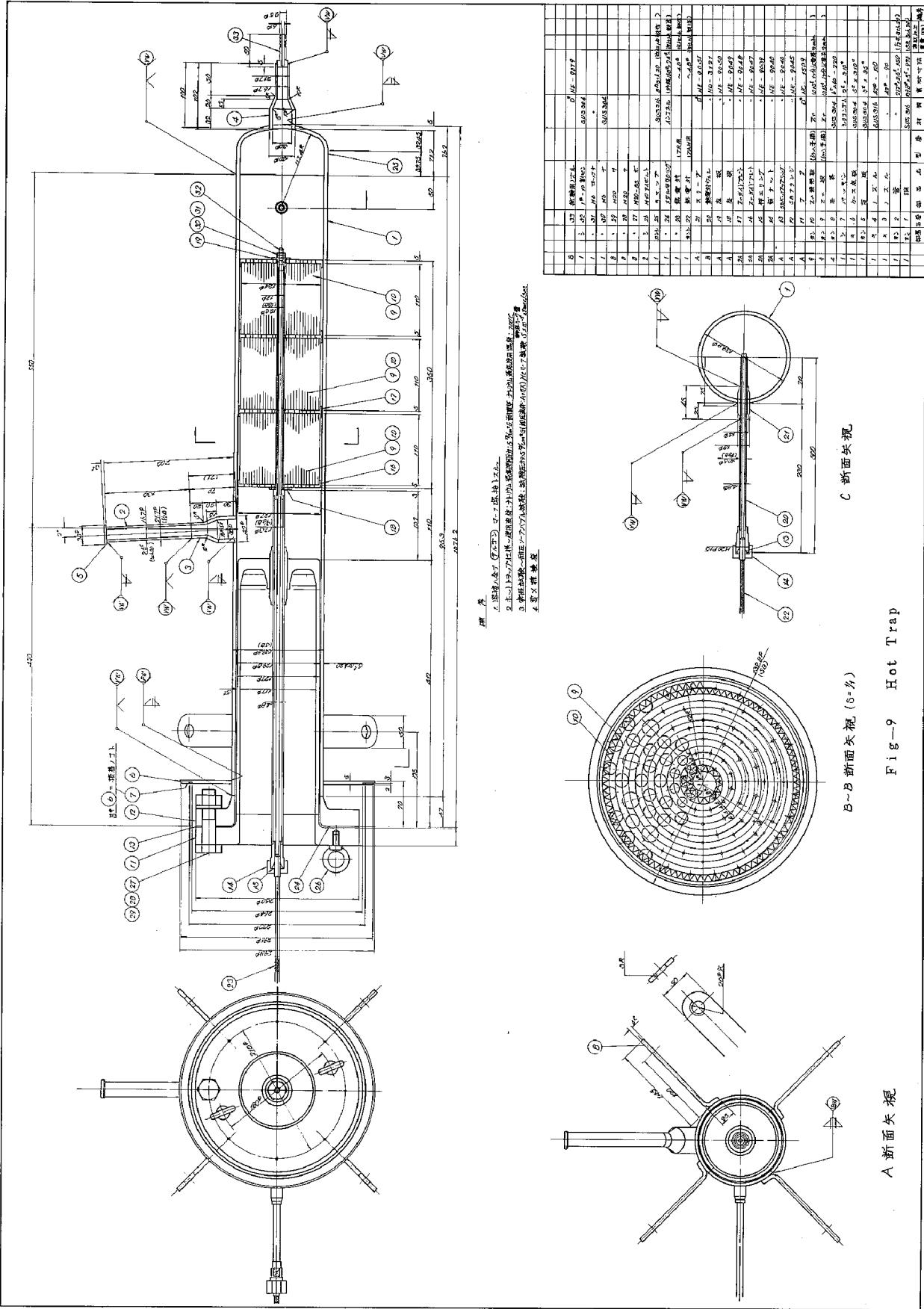
Control Box for Measurement  
of Load and torque

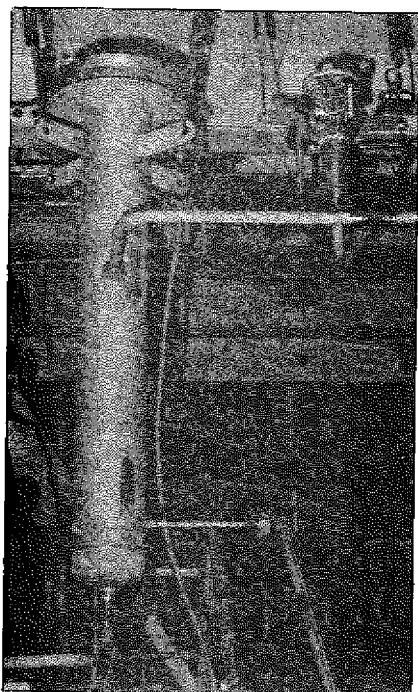


Appearance of Oil Unit

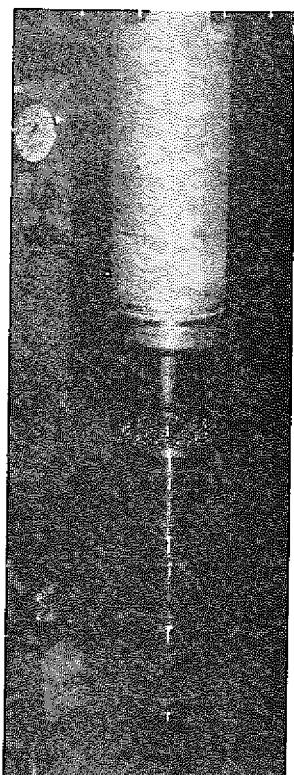
Fig - 7 Accessory Device for Self-Welding apparatus  
( Oil Unit and Control Box )







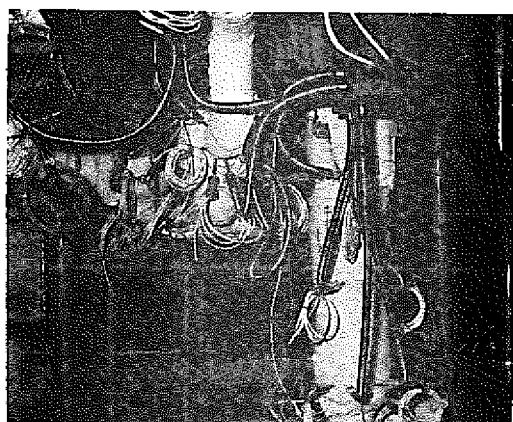
Hot-trap Vessel



Zirconium Wheel for  
gettering material

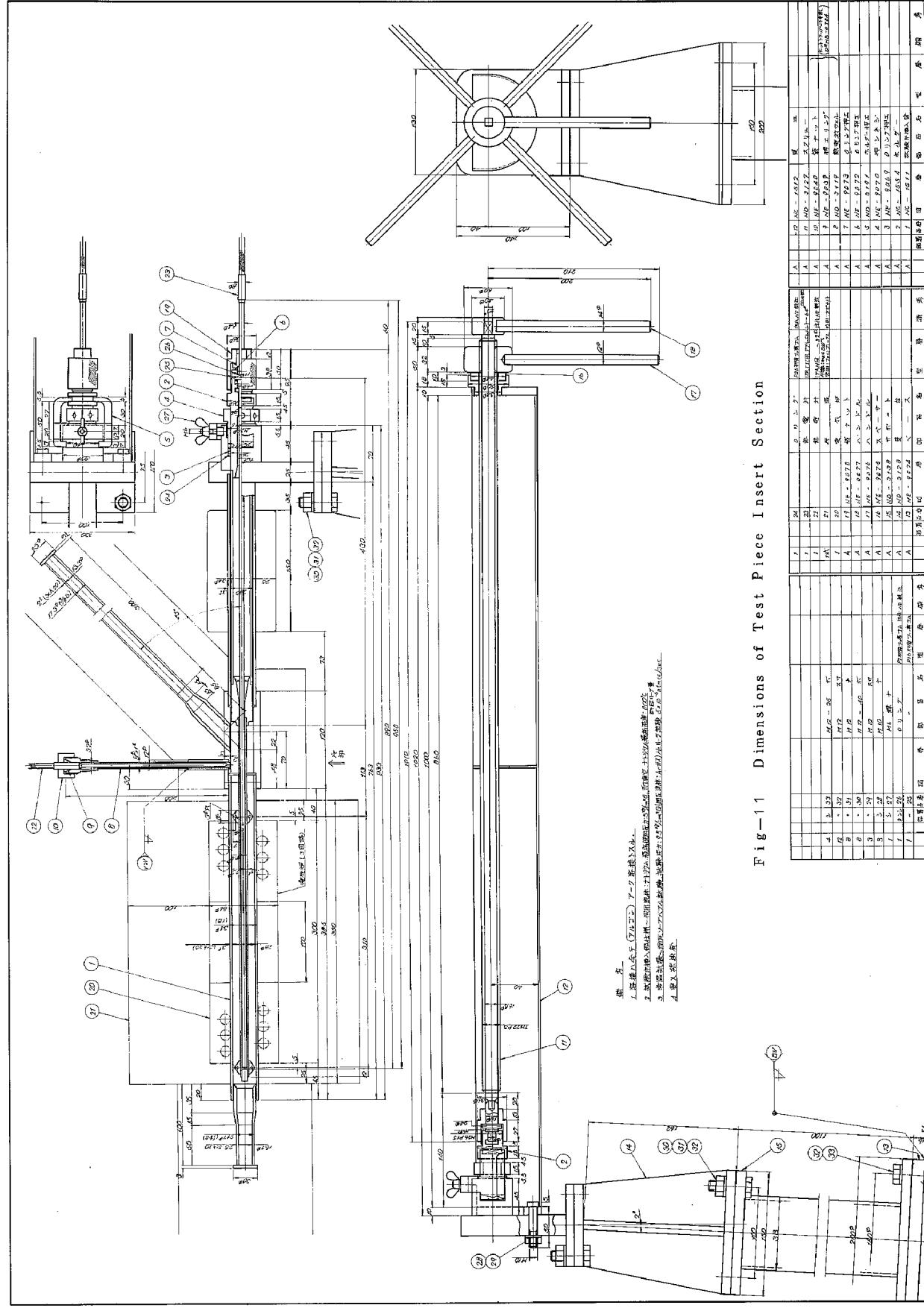


Hot-trap Heater



Hot-trap

Fig-10 External Appearance of Hot-trap



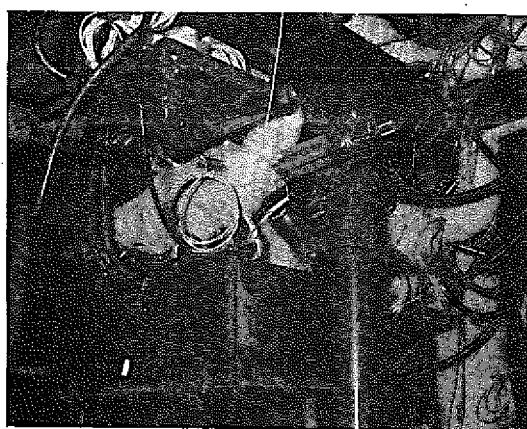
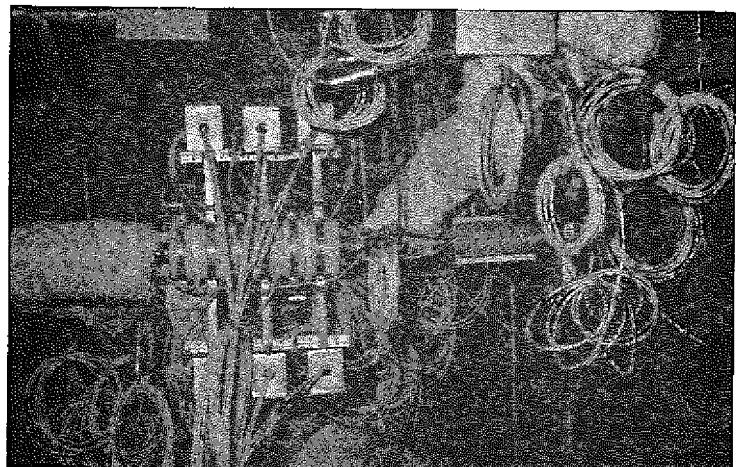
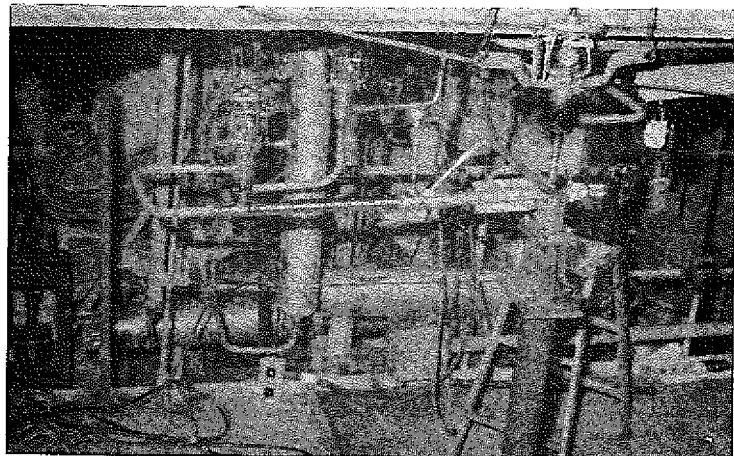
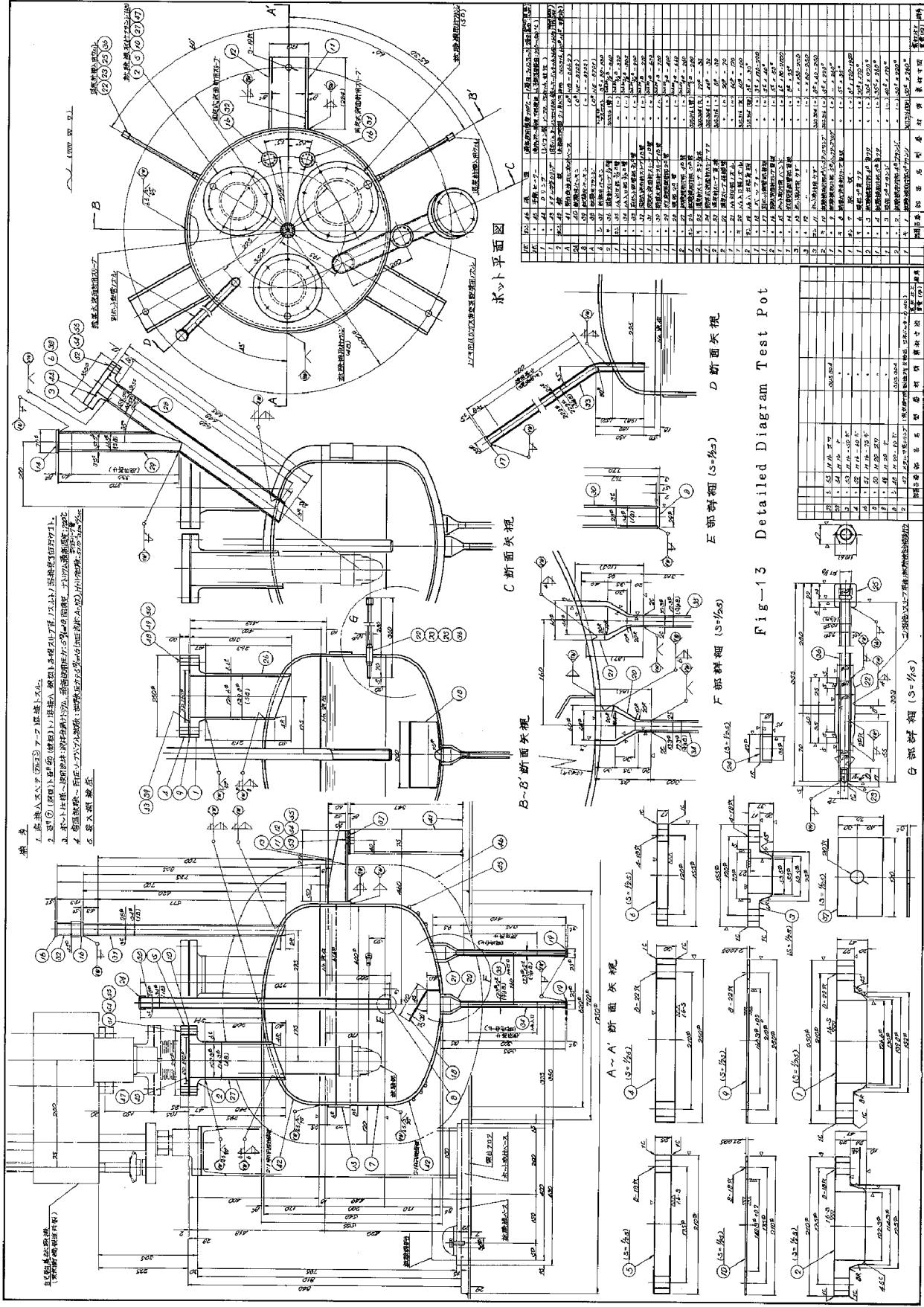


Fig-12 External Appearance of Test Piece Section.



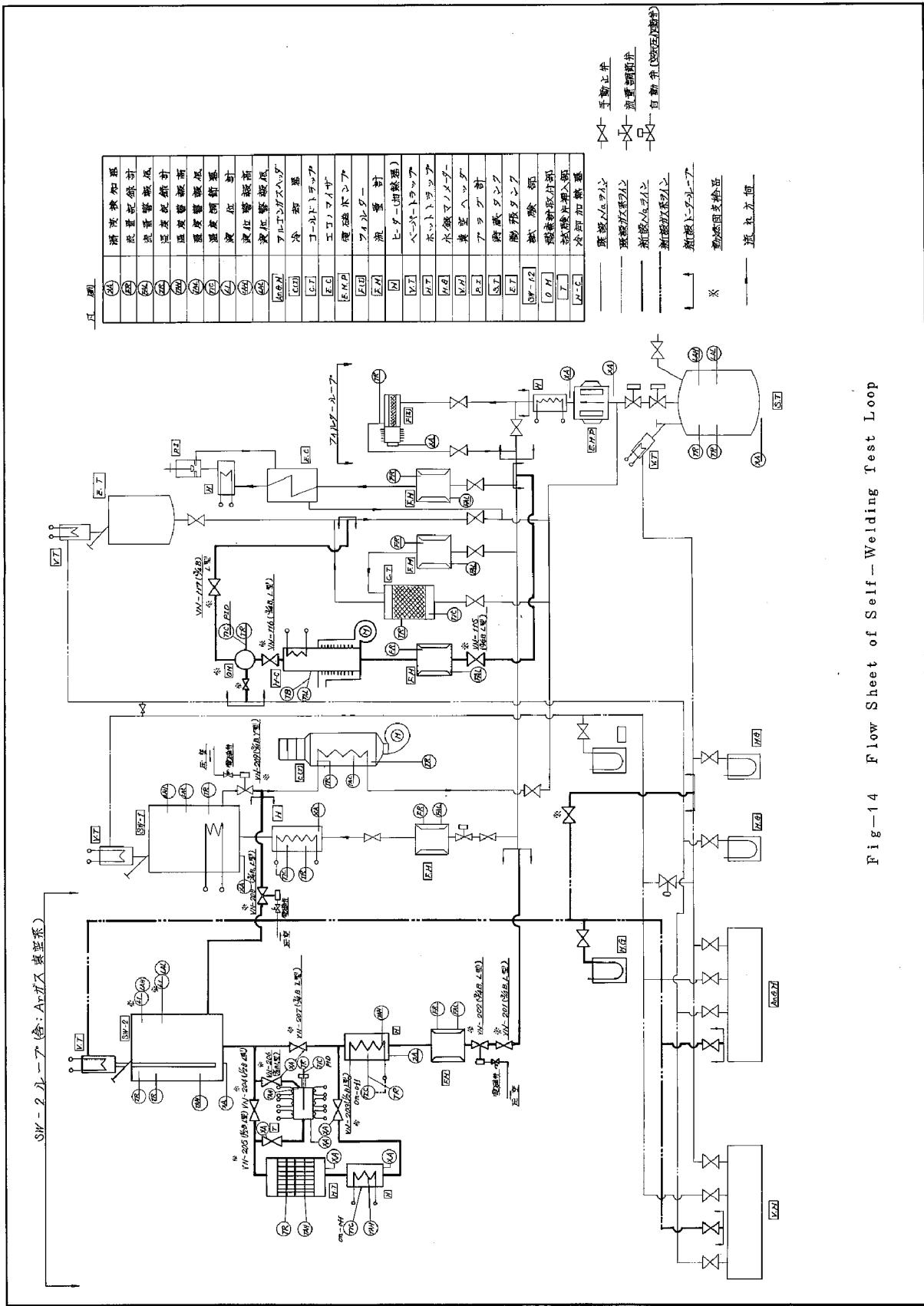
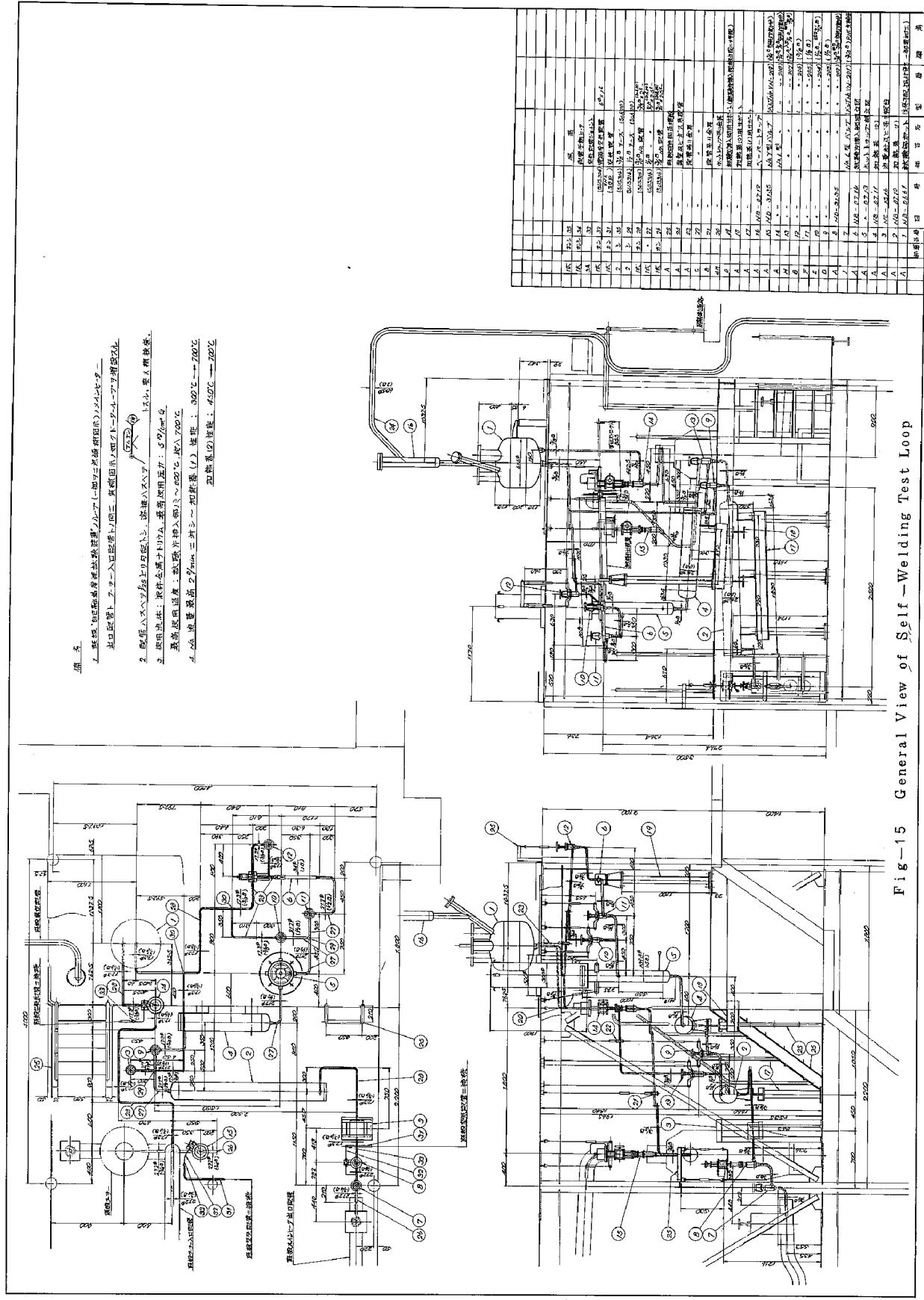


Fig. 1-4 Flow Sheet of Self-Welding Test Loop



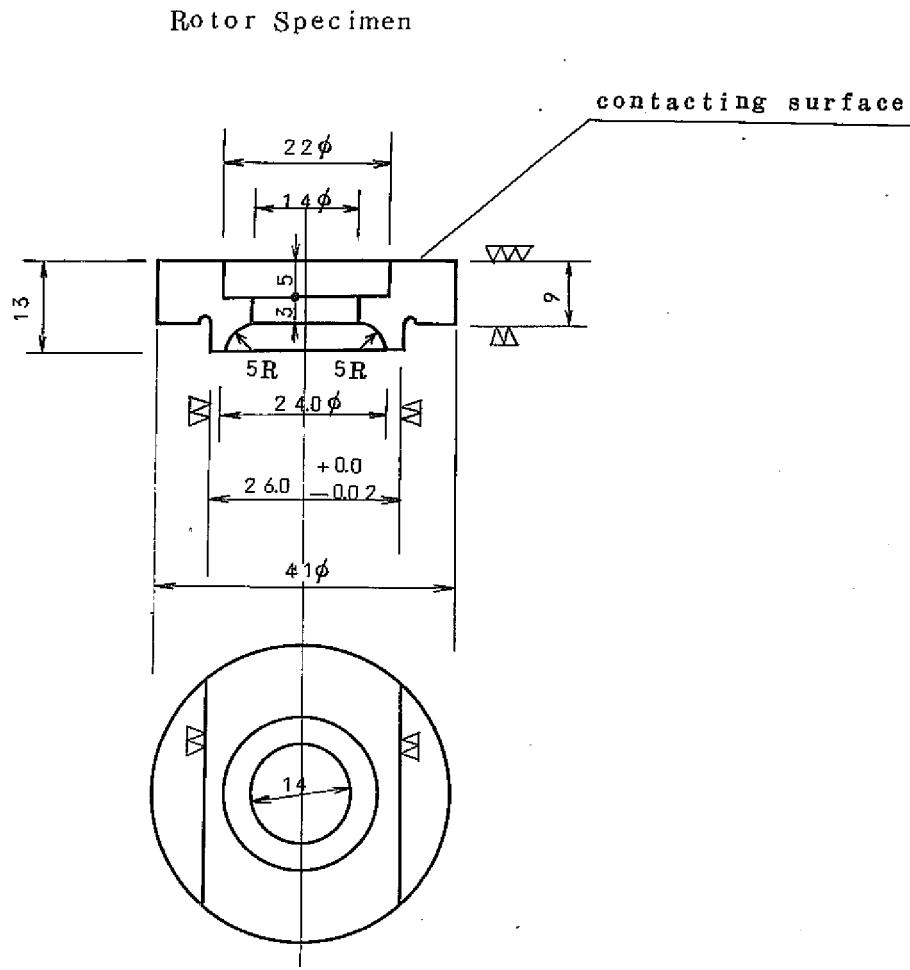
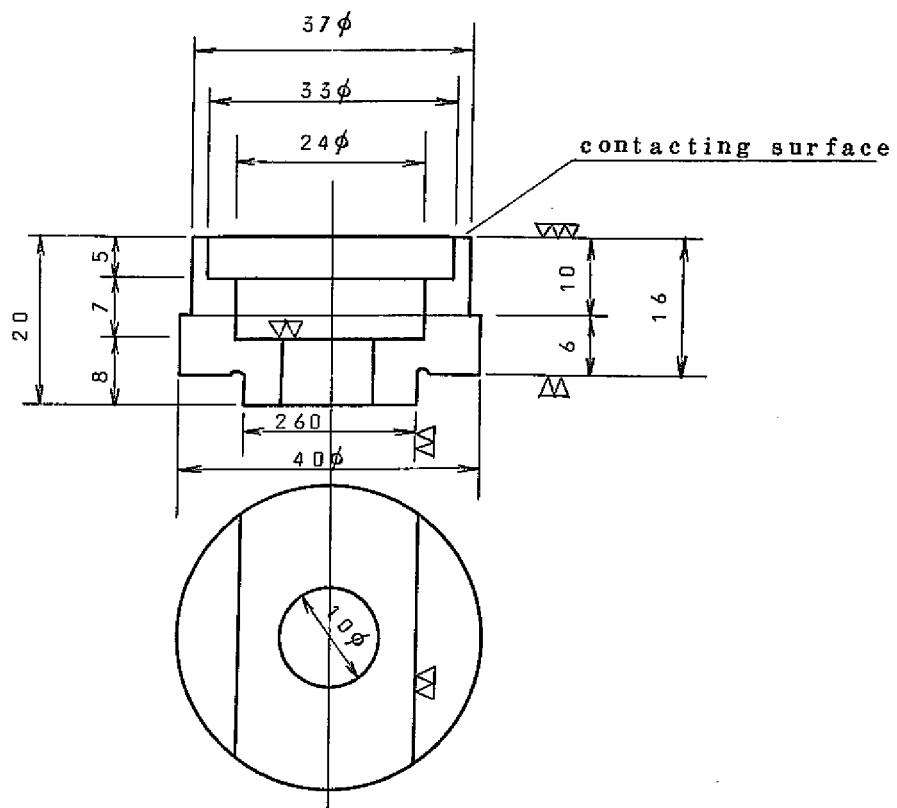


Fig-16 Dimensions of Specimen

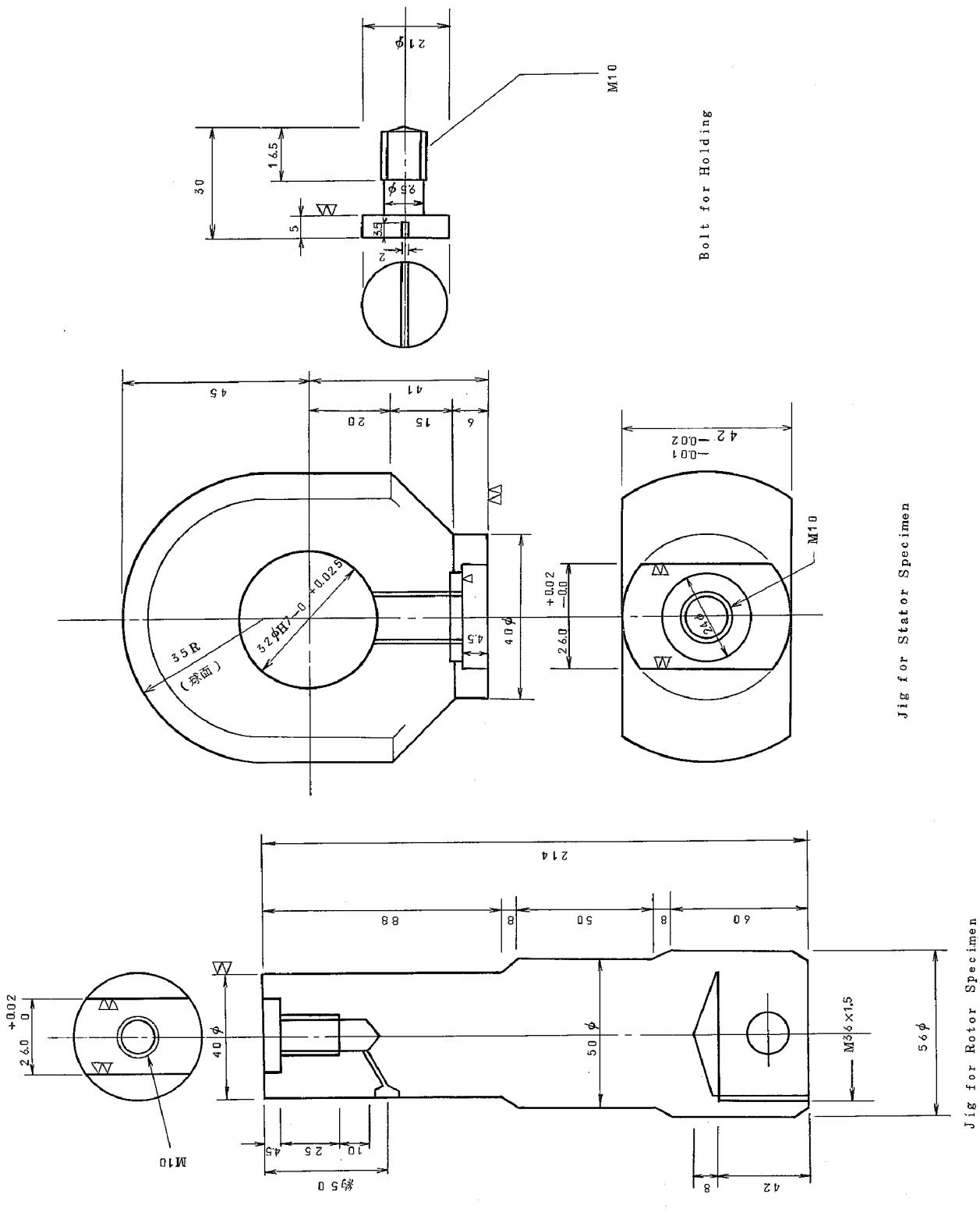


Fig-17 Jig for Stator Specimen

Jig for Rotor Specimen

Bolt for Holding

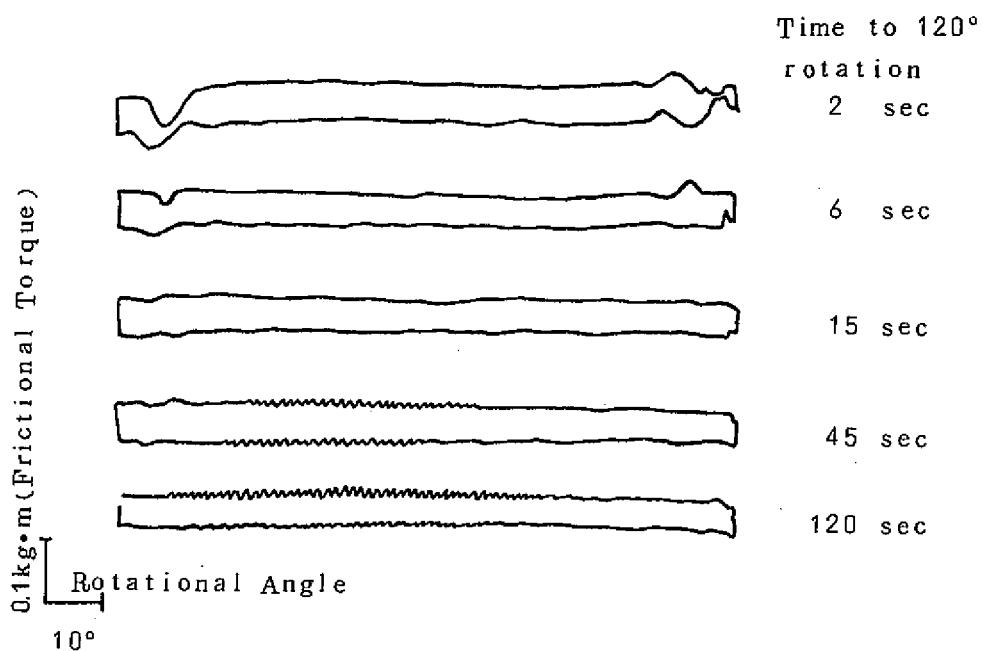


Fig-18 Variations of Frictional Torque versus Rotational angle on the Non-Load Test

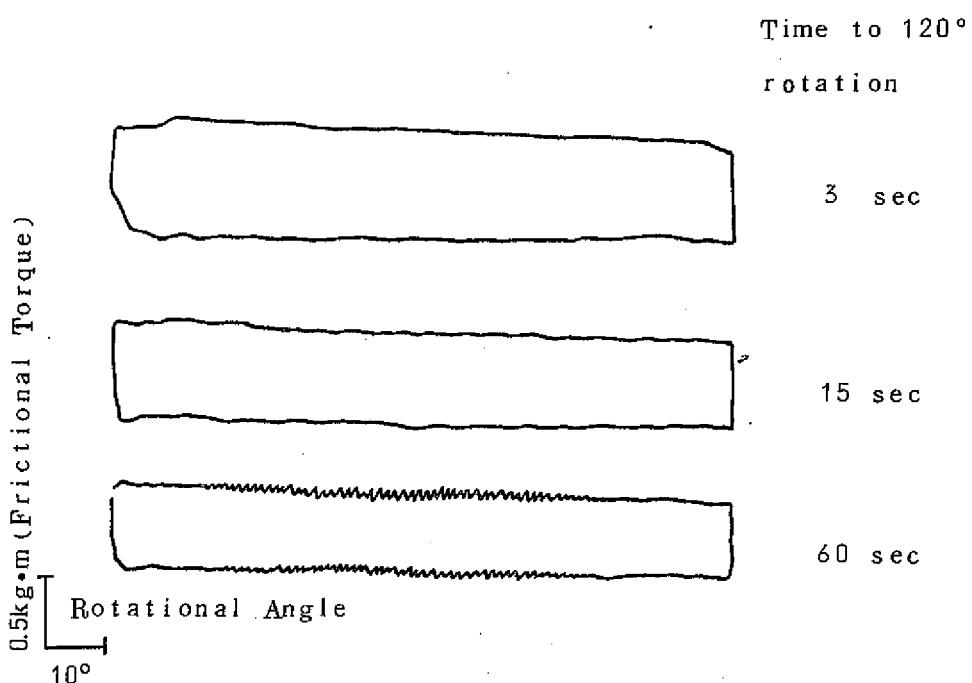


Fig-19 Variation of Frictional Torque and Normal Load on the TFE under 500 kg

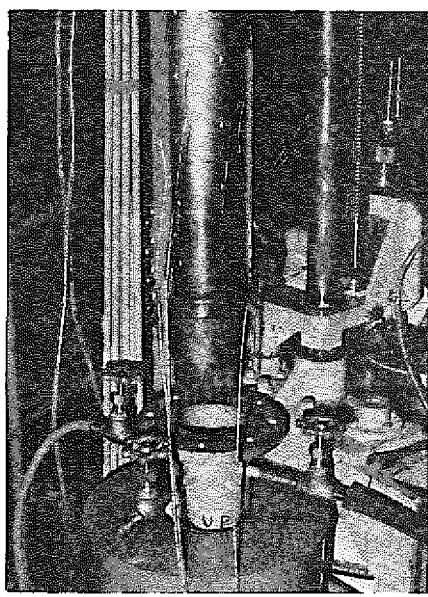
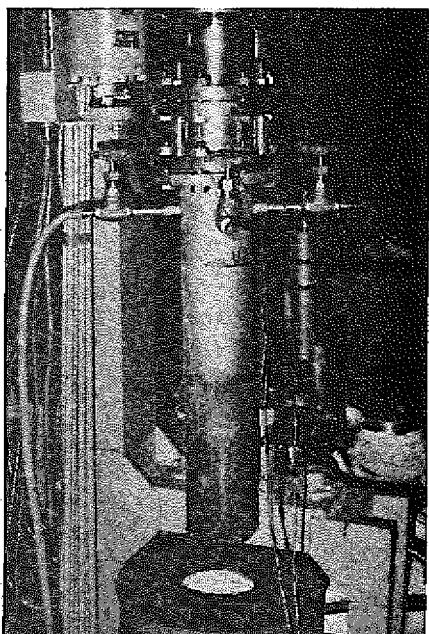
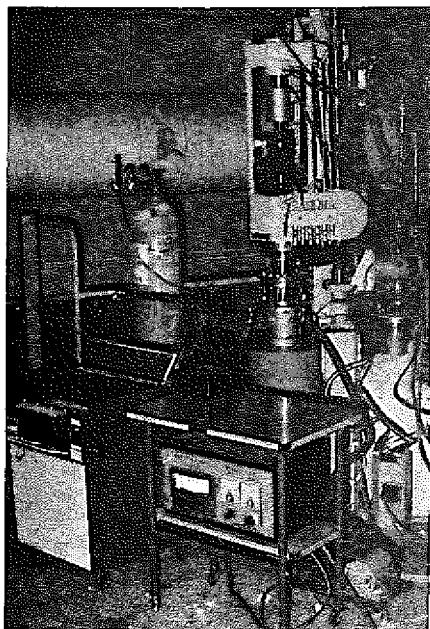
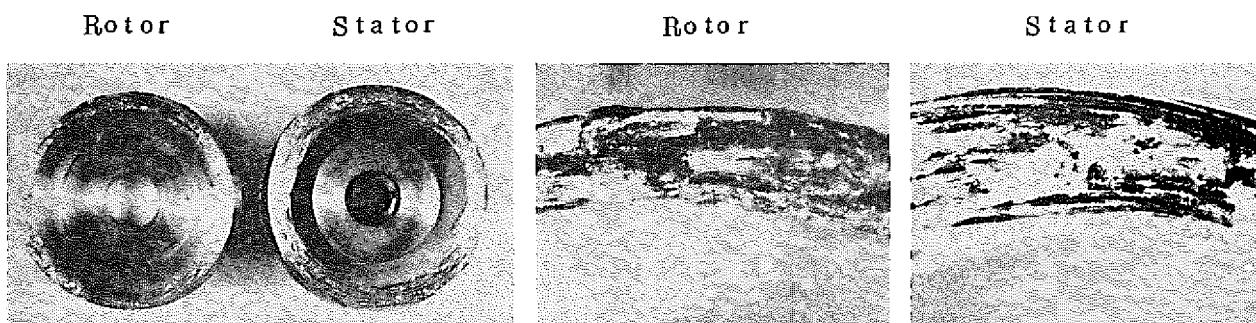
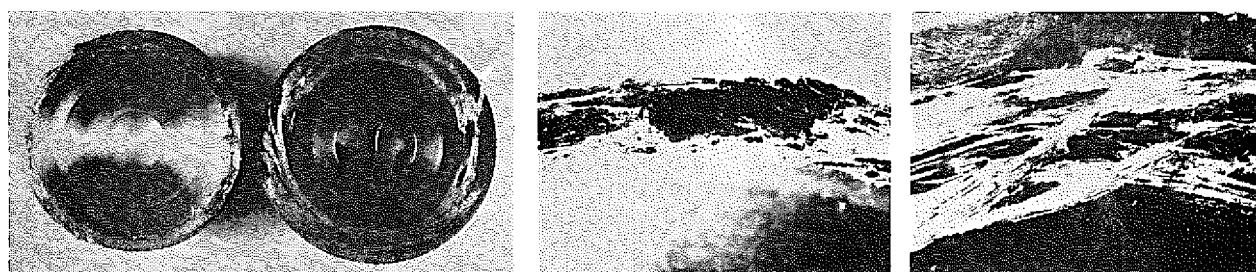


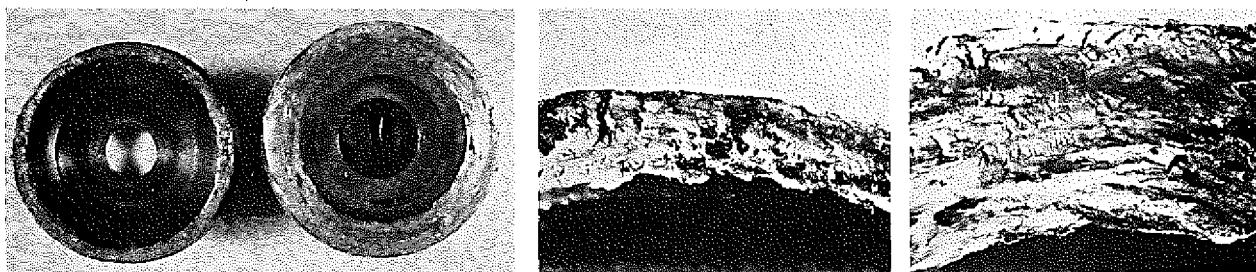
Fig-20 Self-Welding Equipment and Electric Furnace for High Temp Test in Argon



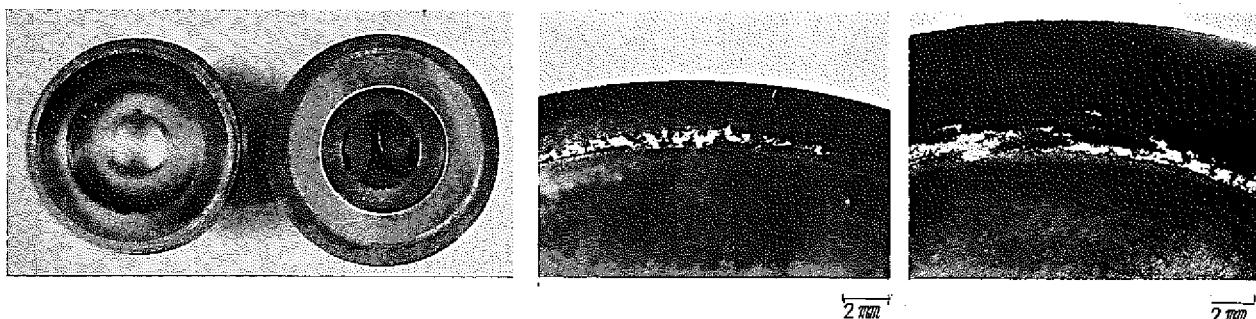
Specimen #1 After Tested under 750 kg at Room Temp.



Specimen #2 After Tested under 750 kg at 450°C



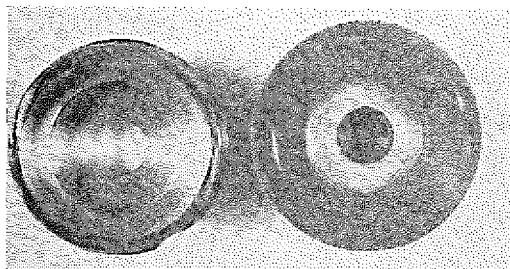
Specimen #3 After Tested under 250 kg at 720°C



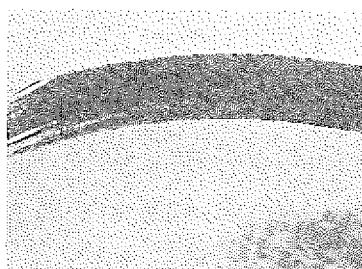
Specimen #18 After Self-Welding Test under 750 kg at 650°C

Fig-21 Appearances of Specimens after Tested (SUS 316 vs SUS 316)

Rotor



Stator

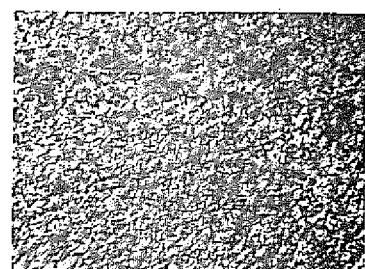
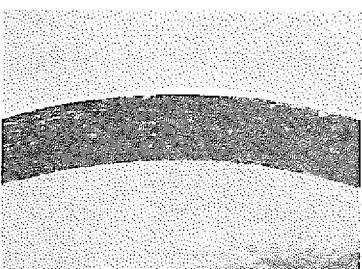
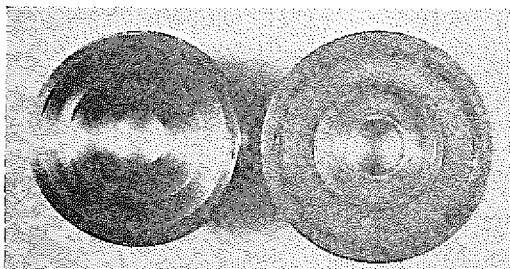


Rotor

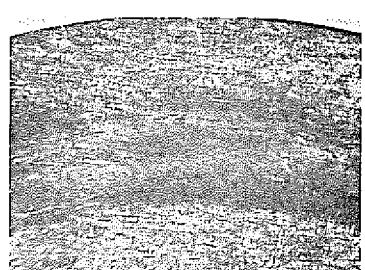
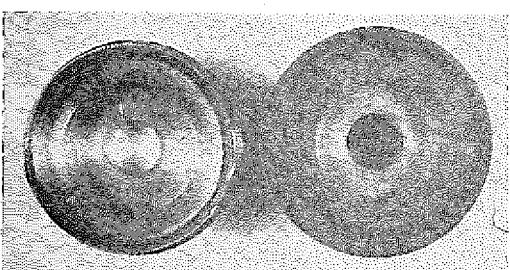


Stator

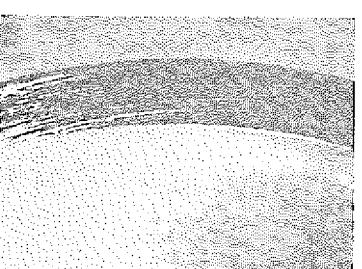
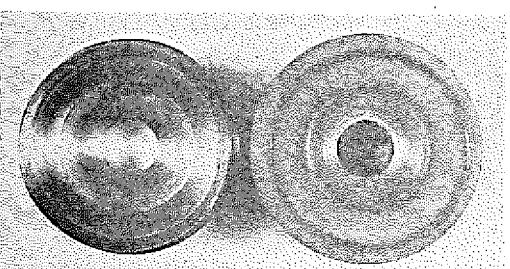
Specimen № 13 SUS 316 and LW-IN40 (G·F) after 1000 kg at Room Temp.



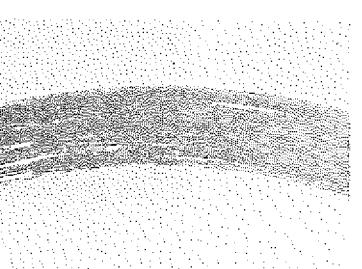
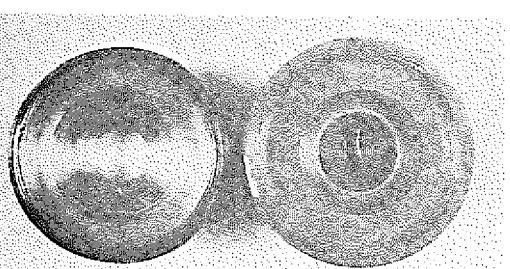
Specimen № 14 SUS 316 and LW-IN40 (B·F) after Tested under 1000 kg at Room Temp.



Specimen № 15 SUS 316 and LC-IC (G·F) after Tested under 1000 kg at Room Temp.

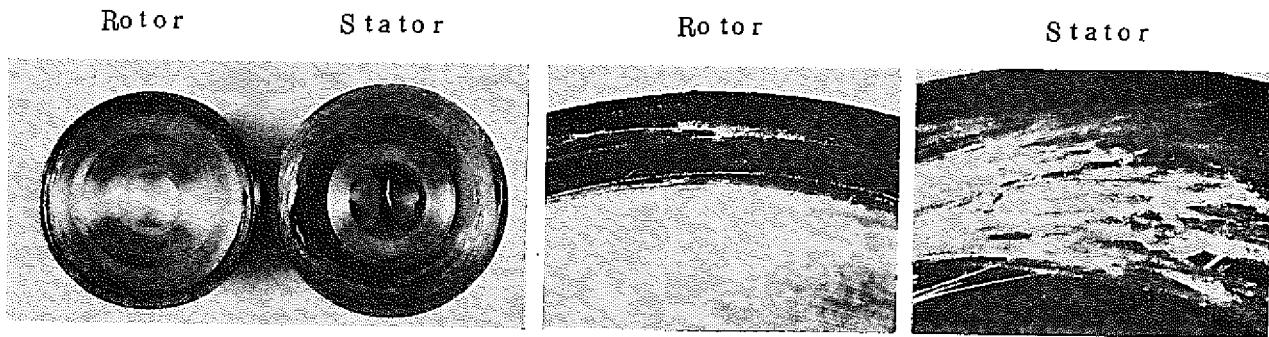


Specimen № 16 SUS 316 and LC-IC (B·F) after Tested under 1000 kg at Room Temp.

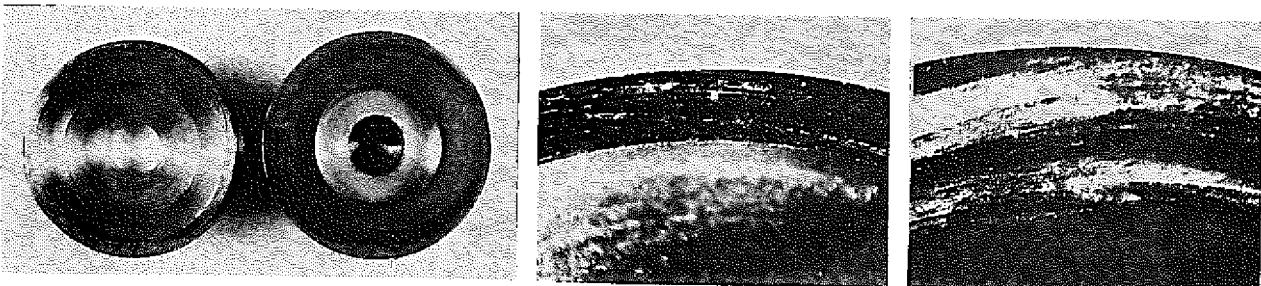


Specimen № 17 SUS 316 and LC-IC (G·F) after Tested under 1000 kg at 45°C

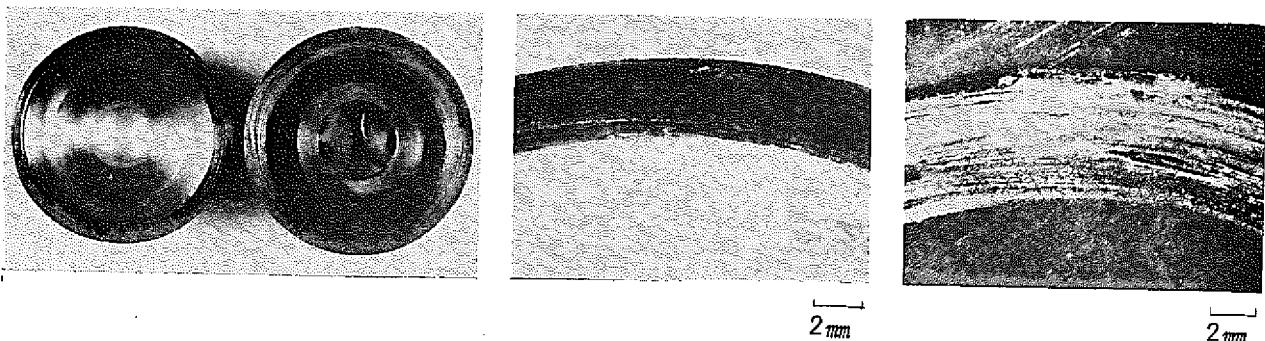
Fig-22 External Appearances of the Specimens after Tested on SUS 316 vs. Carbide Materials



Specimen No. 7 SUS316 and Inconel 718 after Tested under 1000kg  
at 450°C

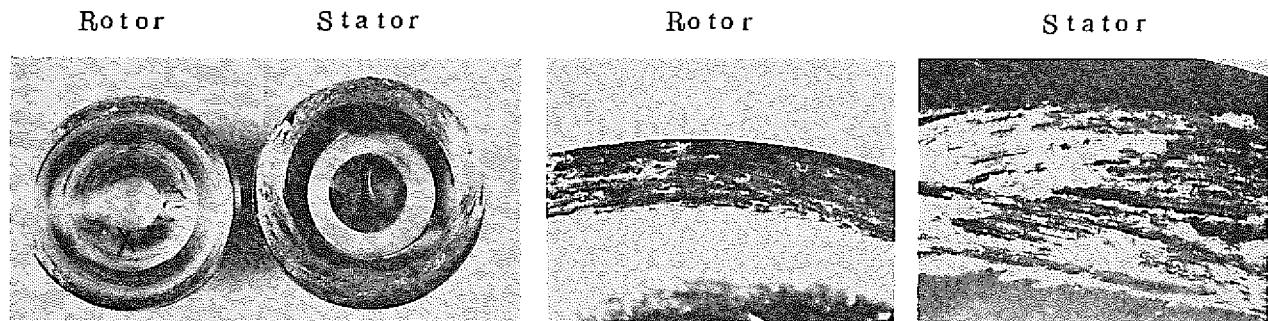


Specimen No. 11 SUS316 and Hard Cr Plating after Tested under 1000kg  
at Room Temp.



Specimen No. 12 SUS316 and Hard Cr Plating after Tested under 1000kg  
at 450°C

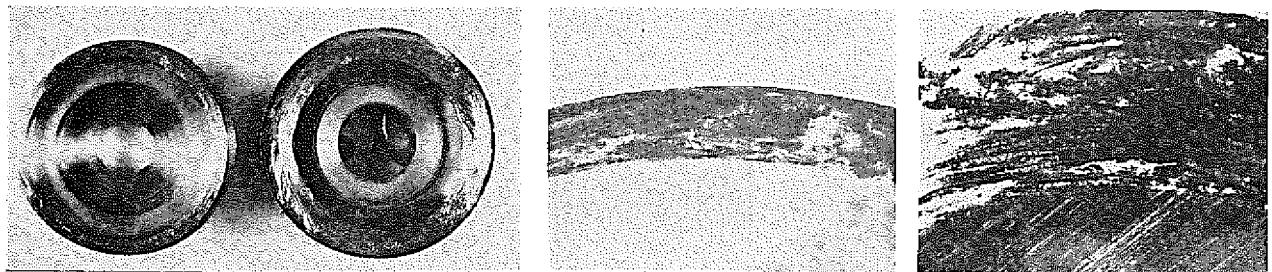
Fig-23 External Appearances of the Specimens after Tested  
(SUS316 vs. Inconel 718 and Hard Cr plating)



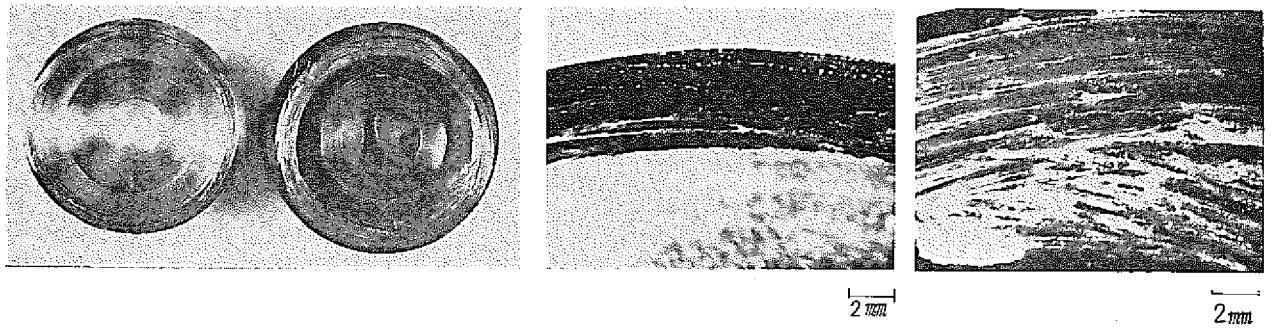
Specimen № 4 Inconel X 750 after Tested under 500kg at Room Temp.



Specimen № 5 Inconel X 750 after Tested under 500kg at 450°C



Specimen № 8 Inconel 718 after Tested under 1000kg at Room Temp.



Specimen № 10 NAS 40-2 after Tested under 1000kg at 450°C

Fig-24 External Appearances of the Specimens after Tested

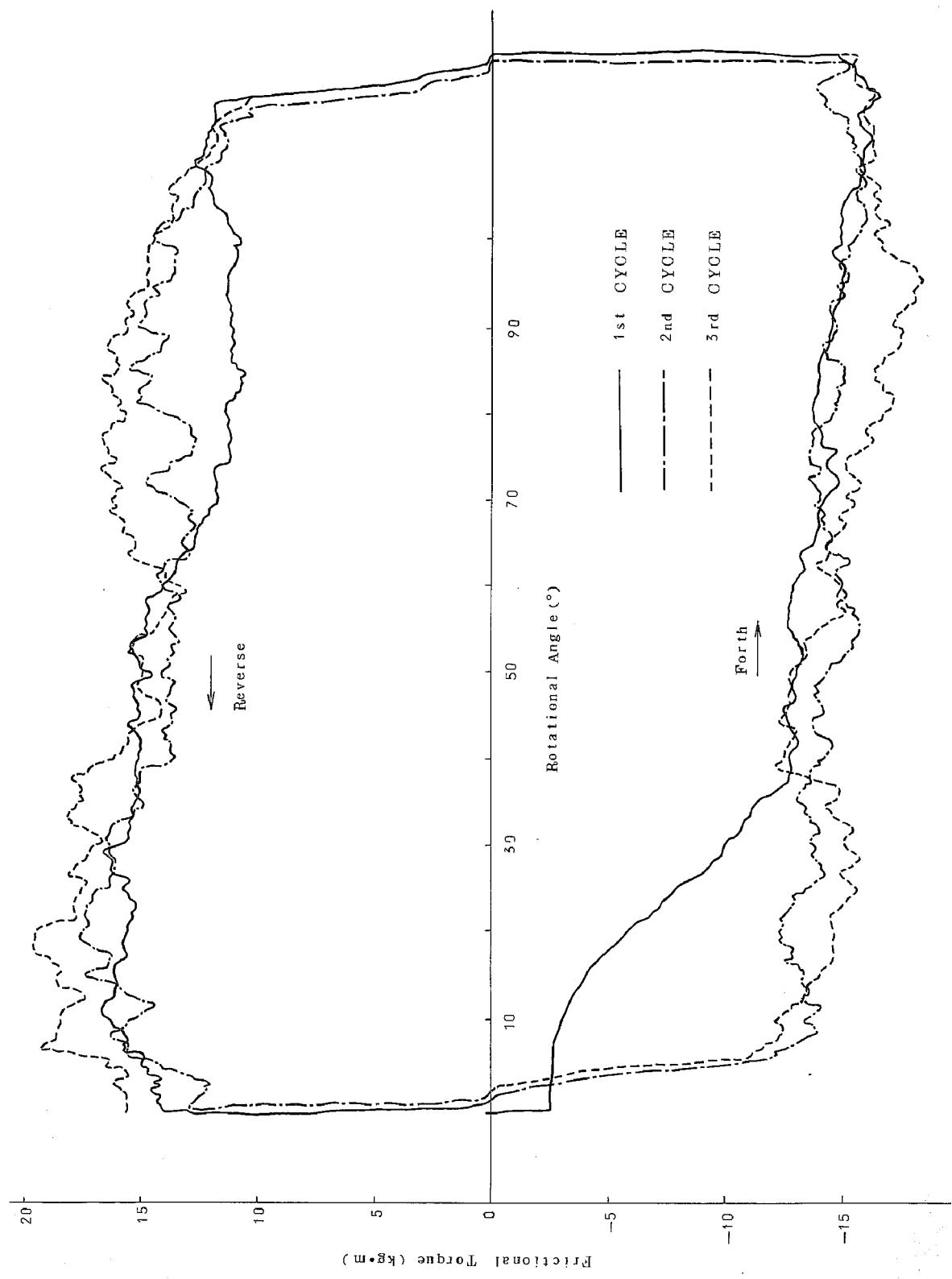


Fig-25 Results of Friction Test of SUS316 under 1000kg load

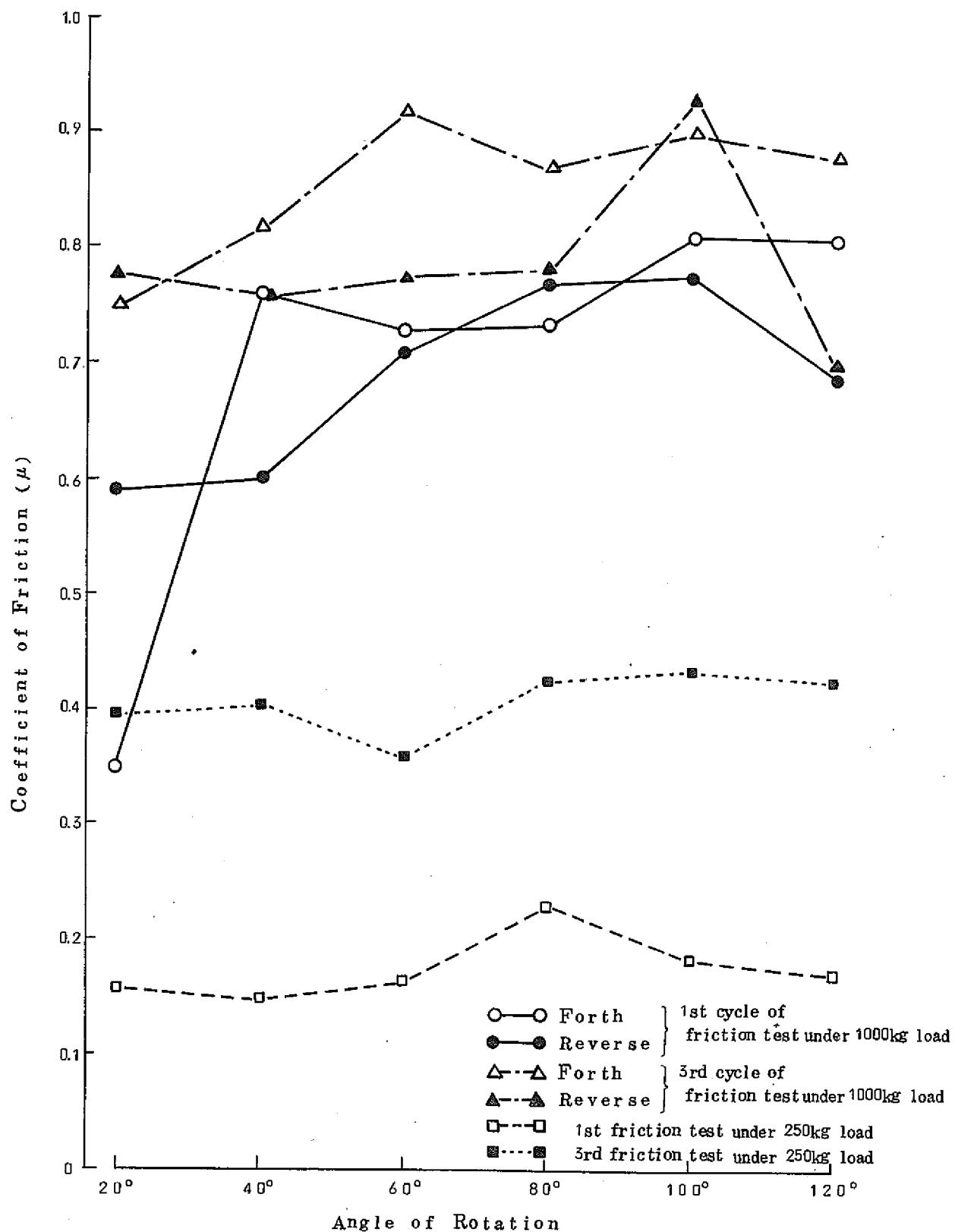


Fig-26 Relations of Frictional Coefficient between  
Rotational Angle on SUS 316 vs. SUS 316

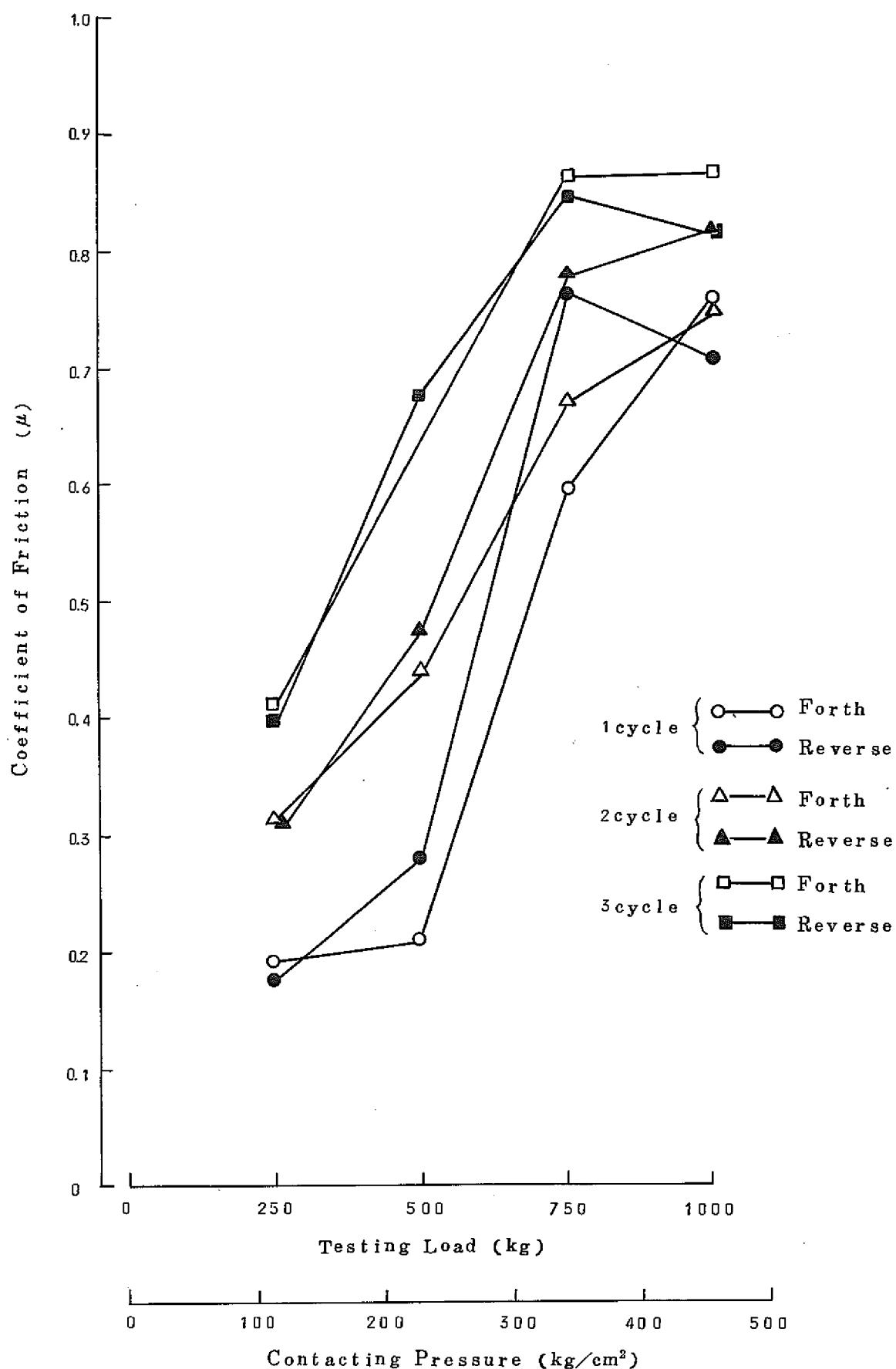


Fig-27 Variations of Frictional Coefficient on SUS316 vs.  
SUS316 Friction Test under Various Testing Load

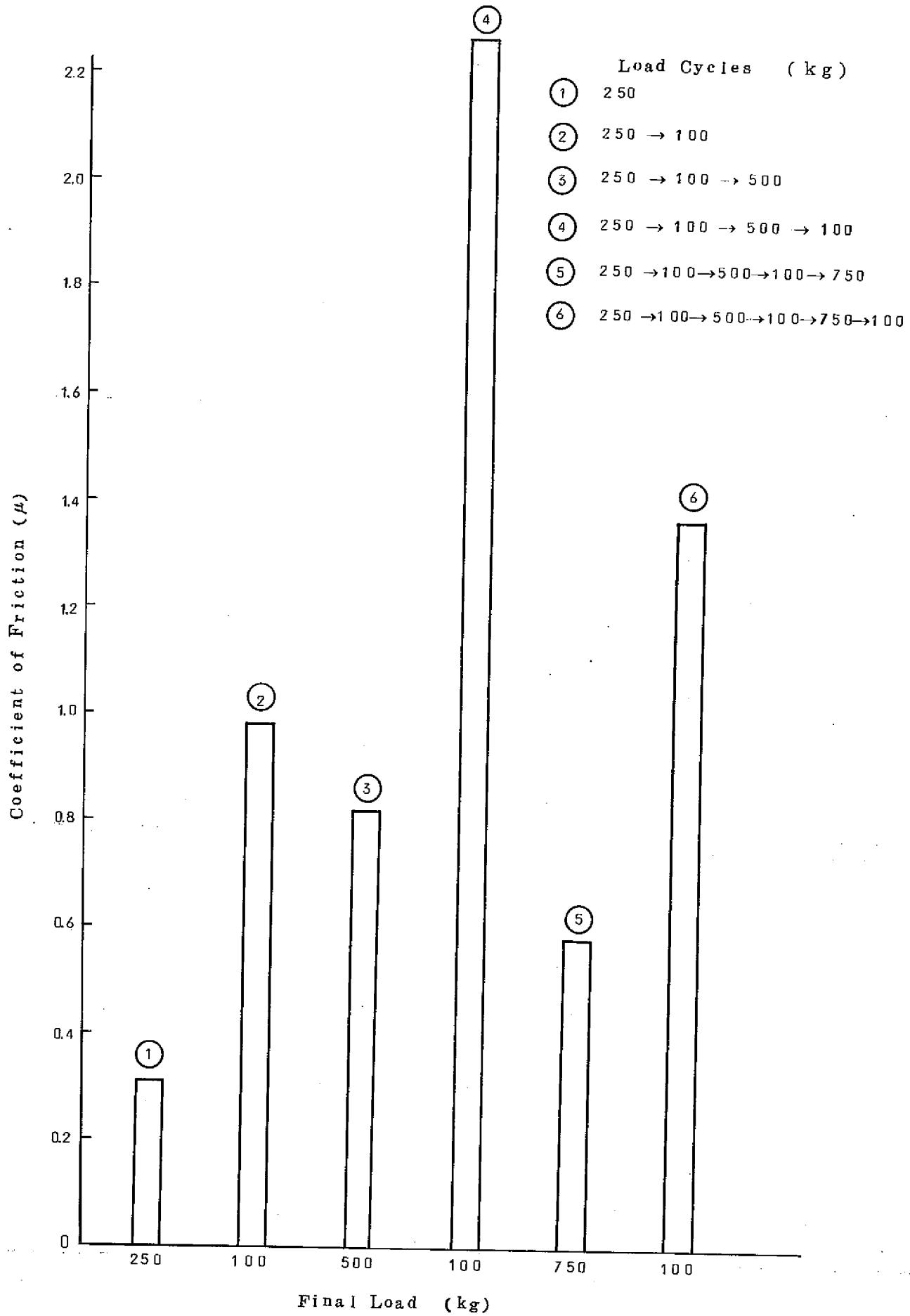


Fig-28 Pre-Load effect on Friction Test of SUS316 vs. SUS316

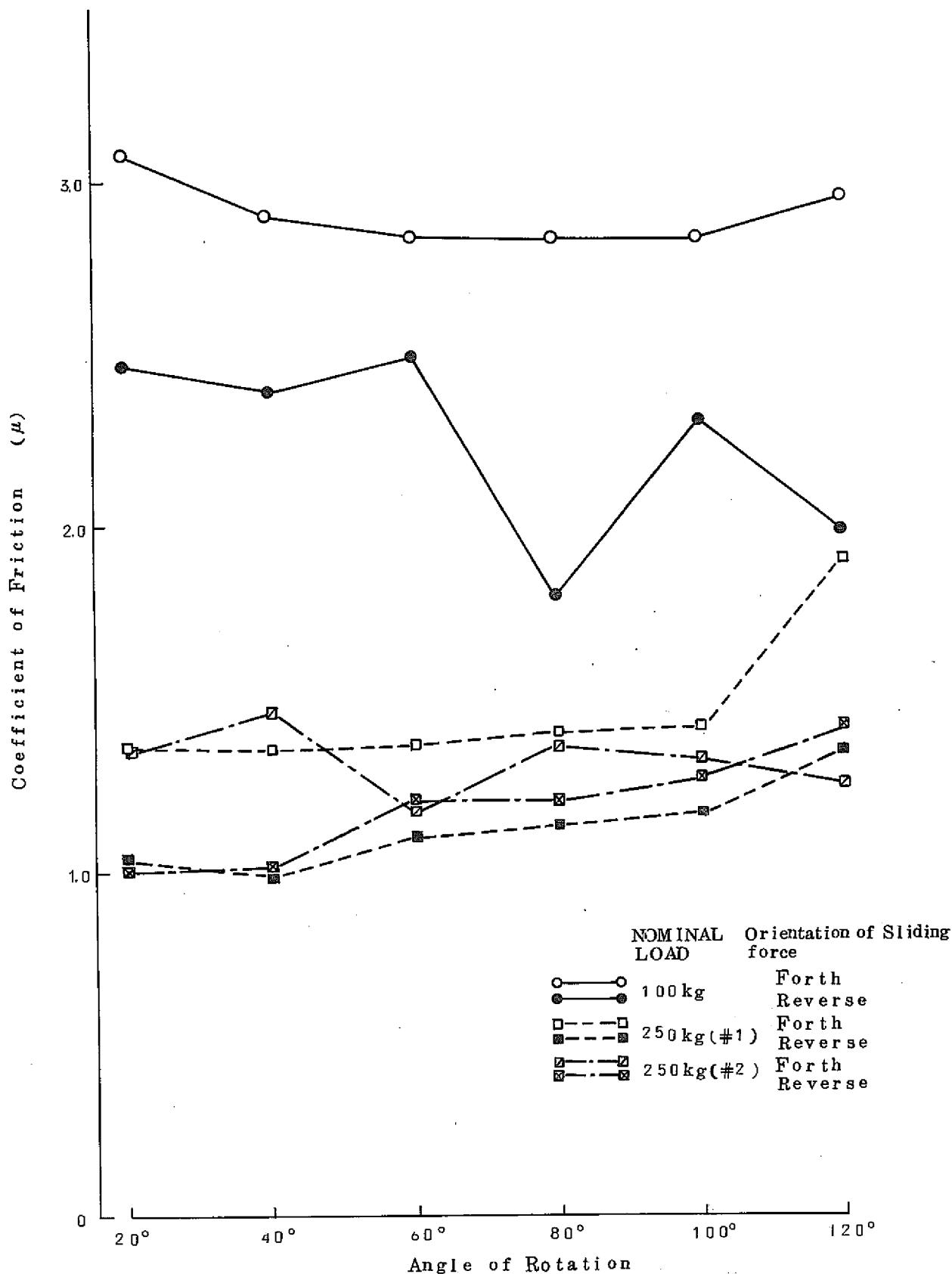


Fig-29 Result of Friction Test on SUS316 v.s. SUS316 at 720°C in Ar ,

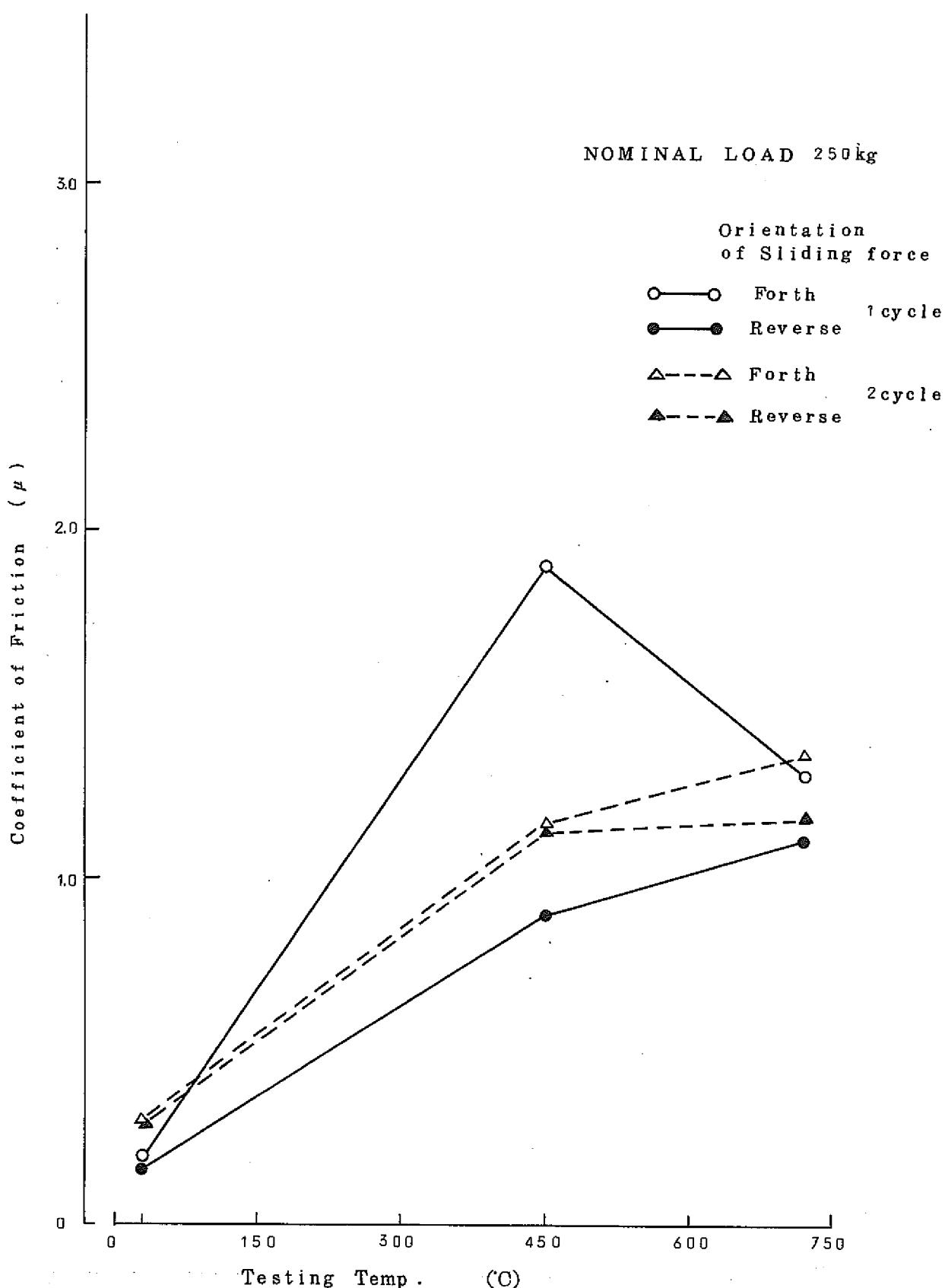


Fig-30 Relations of Frictional Coefficient between Testing Temp. on SUS316 VS. SUS316 under 250kg Load

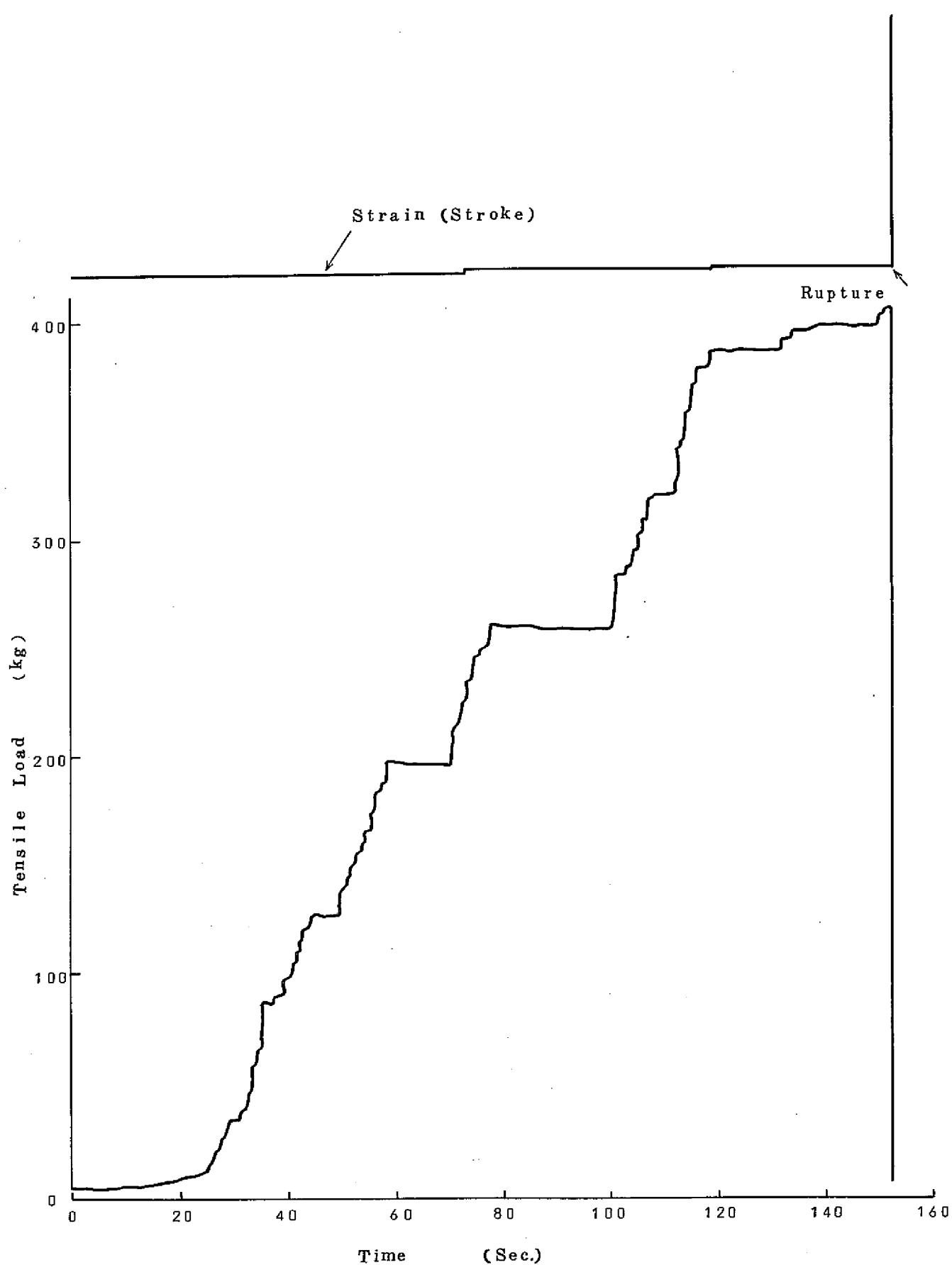


Fig-31 Tensile-Rupture Curve of SUS316 after welded

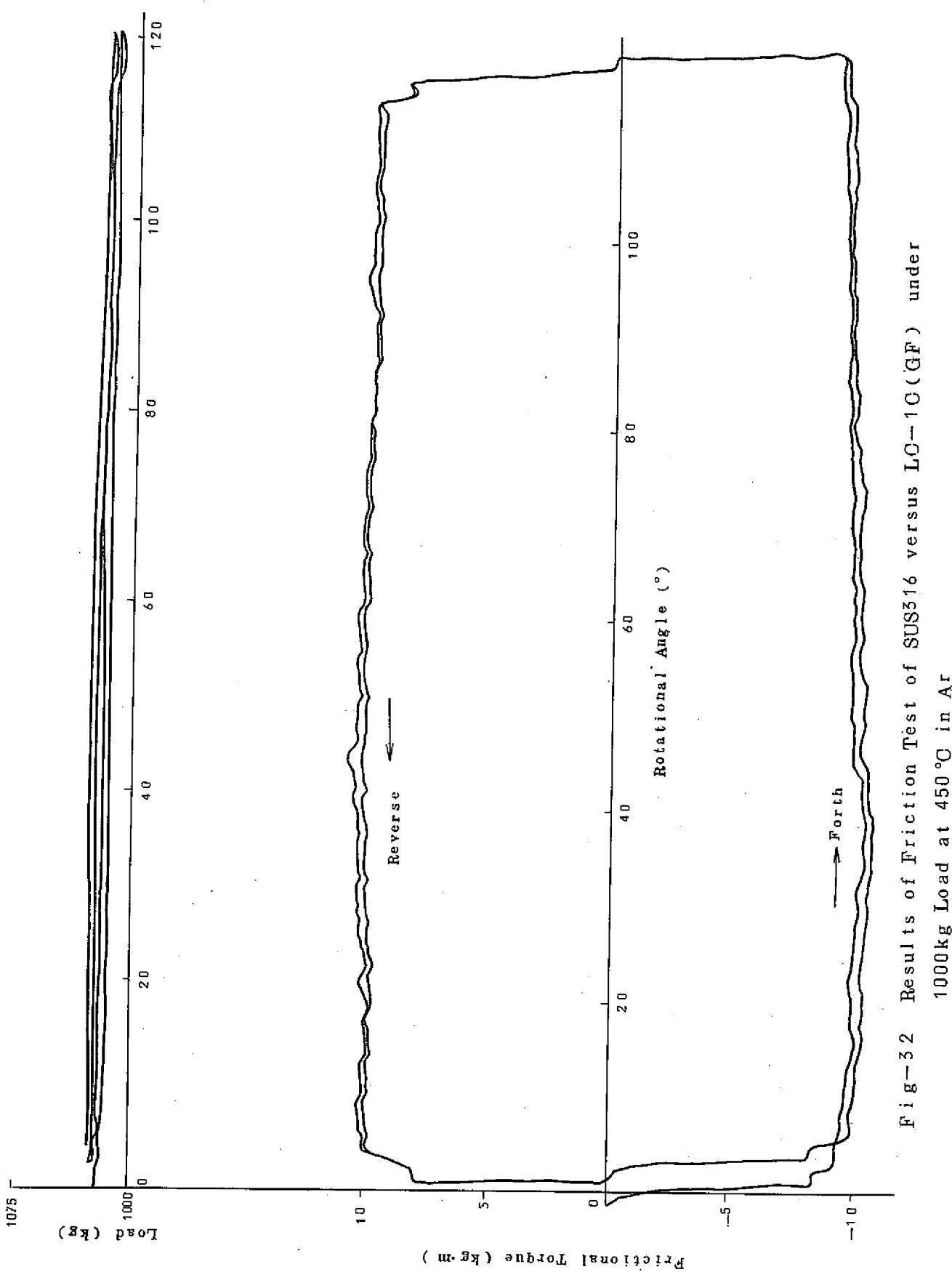


Fig-32 Results of Friction Test of SUS316 versus LO-10 (GF) under 1000kg Load at 450°C in Ar

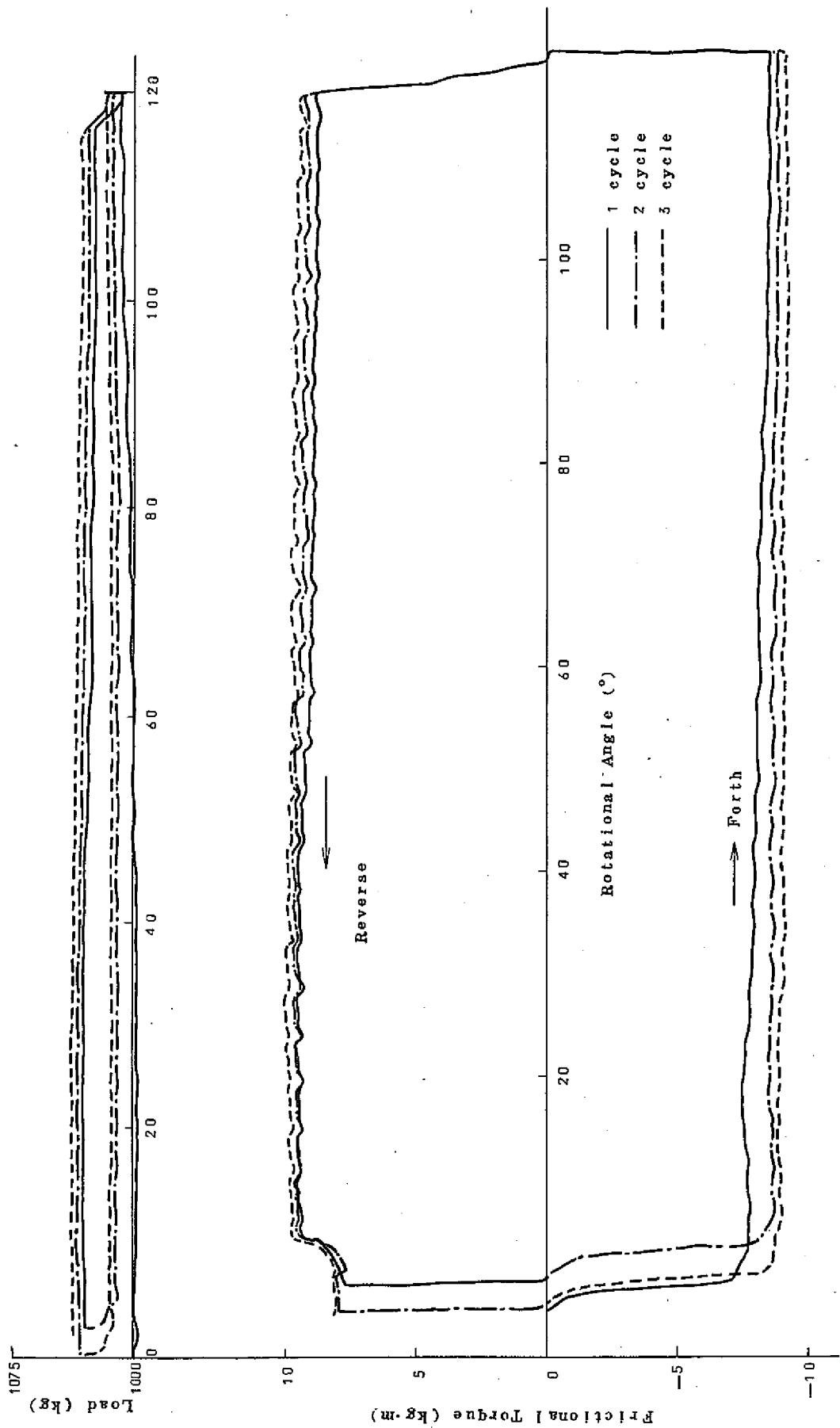


Fig-33 Results of Friction Test of SUS 316 versus LC-10 (BF)  
under 1000 kg Load at room Temp

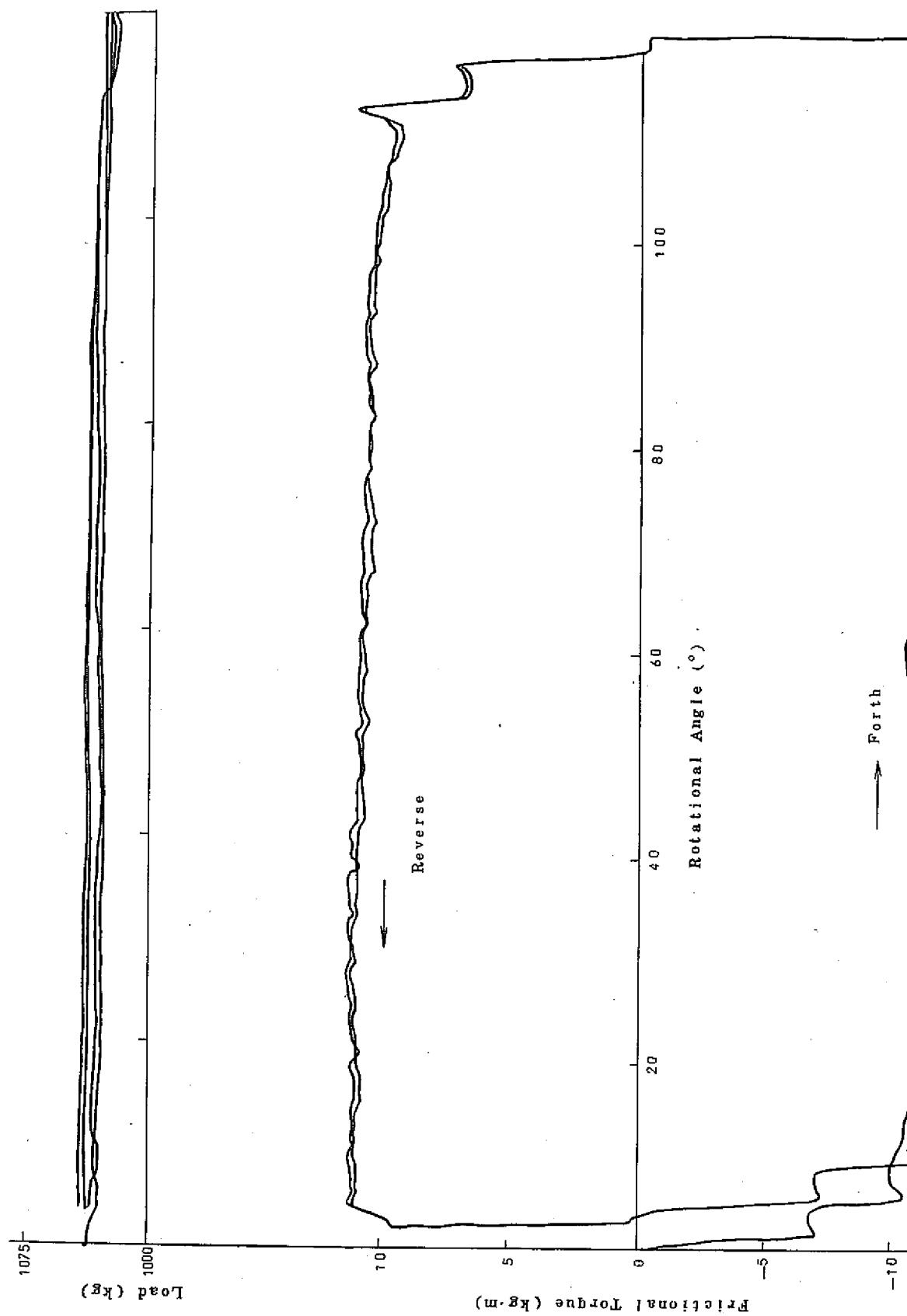


Fig-34 Results of Friction Test of SUSS316 versus Hard Or Plate under 1000 kg Load at 450°C in Ar

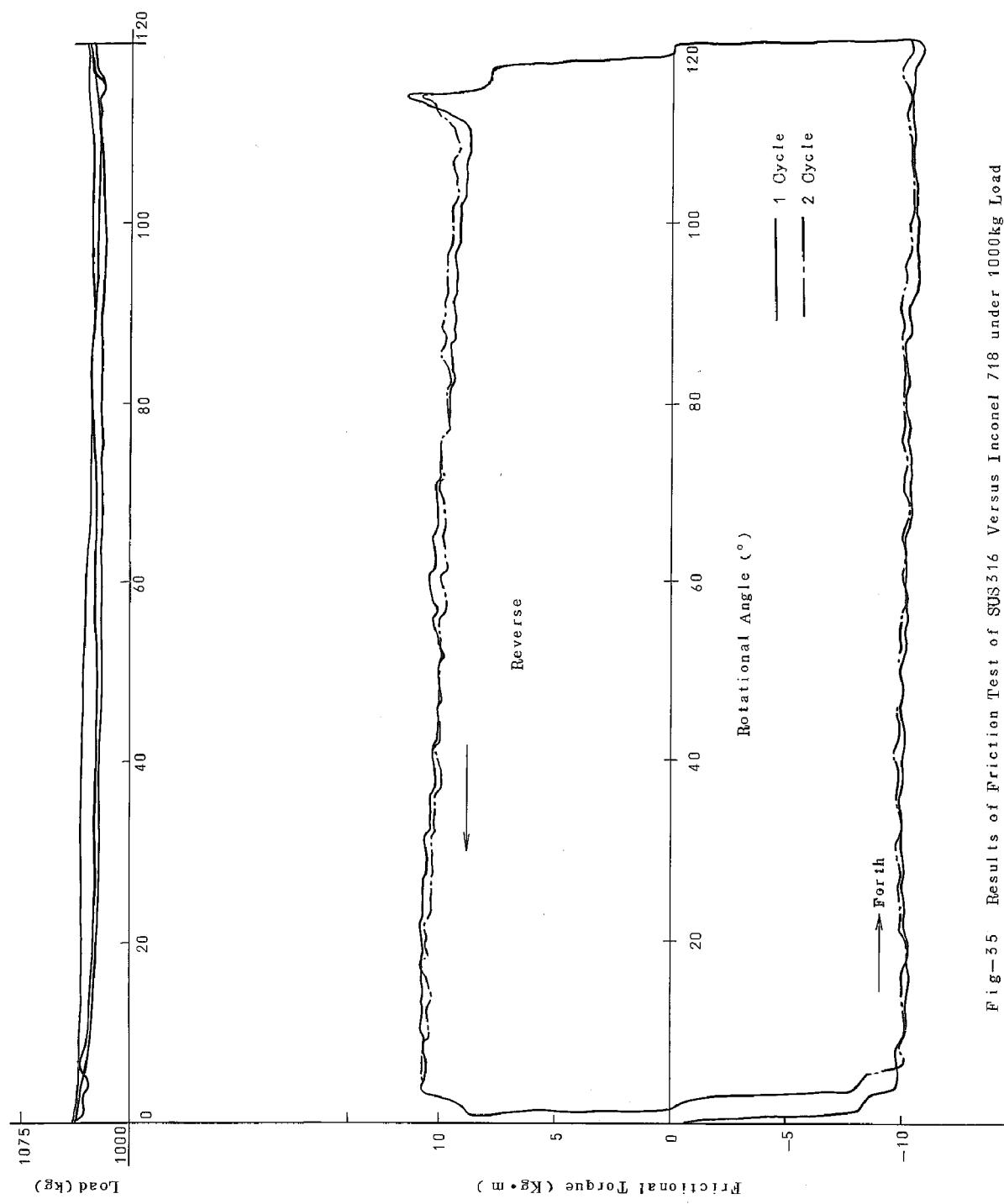


Fig-35 Results of Friction Test of SUS316 Versus Inconel 718 under 1000kg Load at 450°C in Ar.

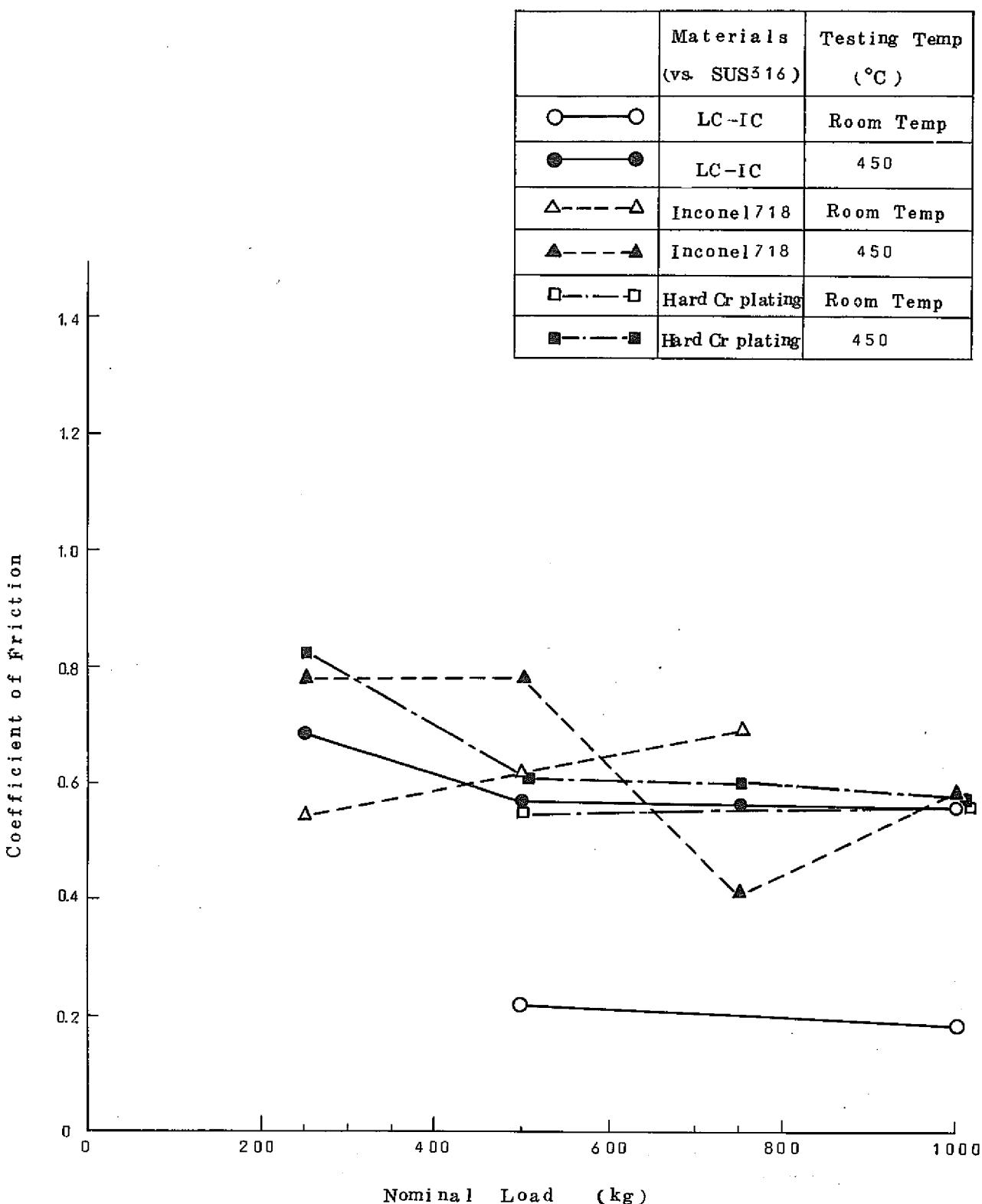


Fig-36 Relations of Frictional Coefficient between Nominal Load on Friction Test of Various Materials versus SUS316

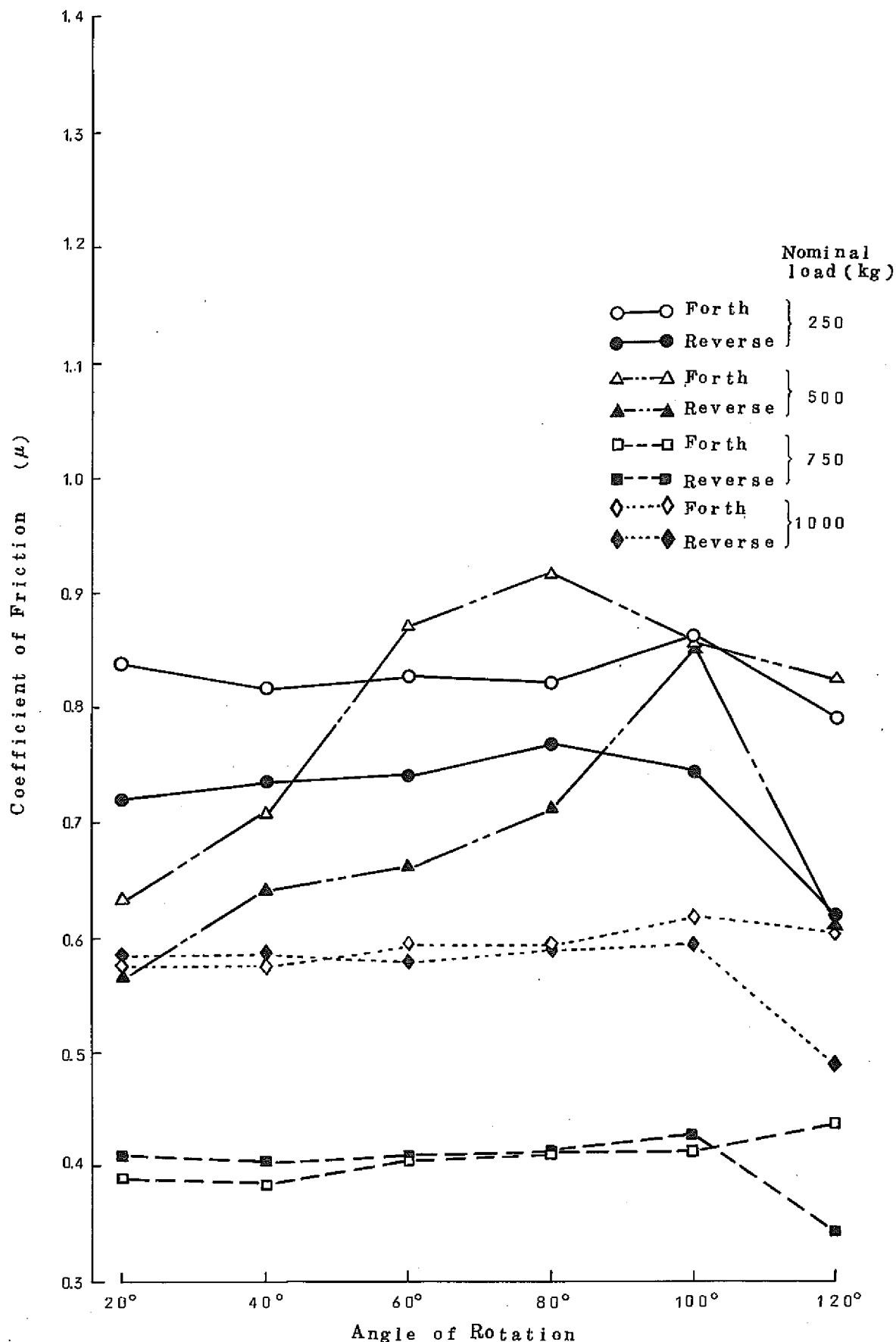


Fig-37 Results of Friction Test on SUS316 vs. Inconel 718  
at 450°C in Ar.

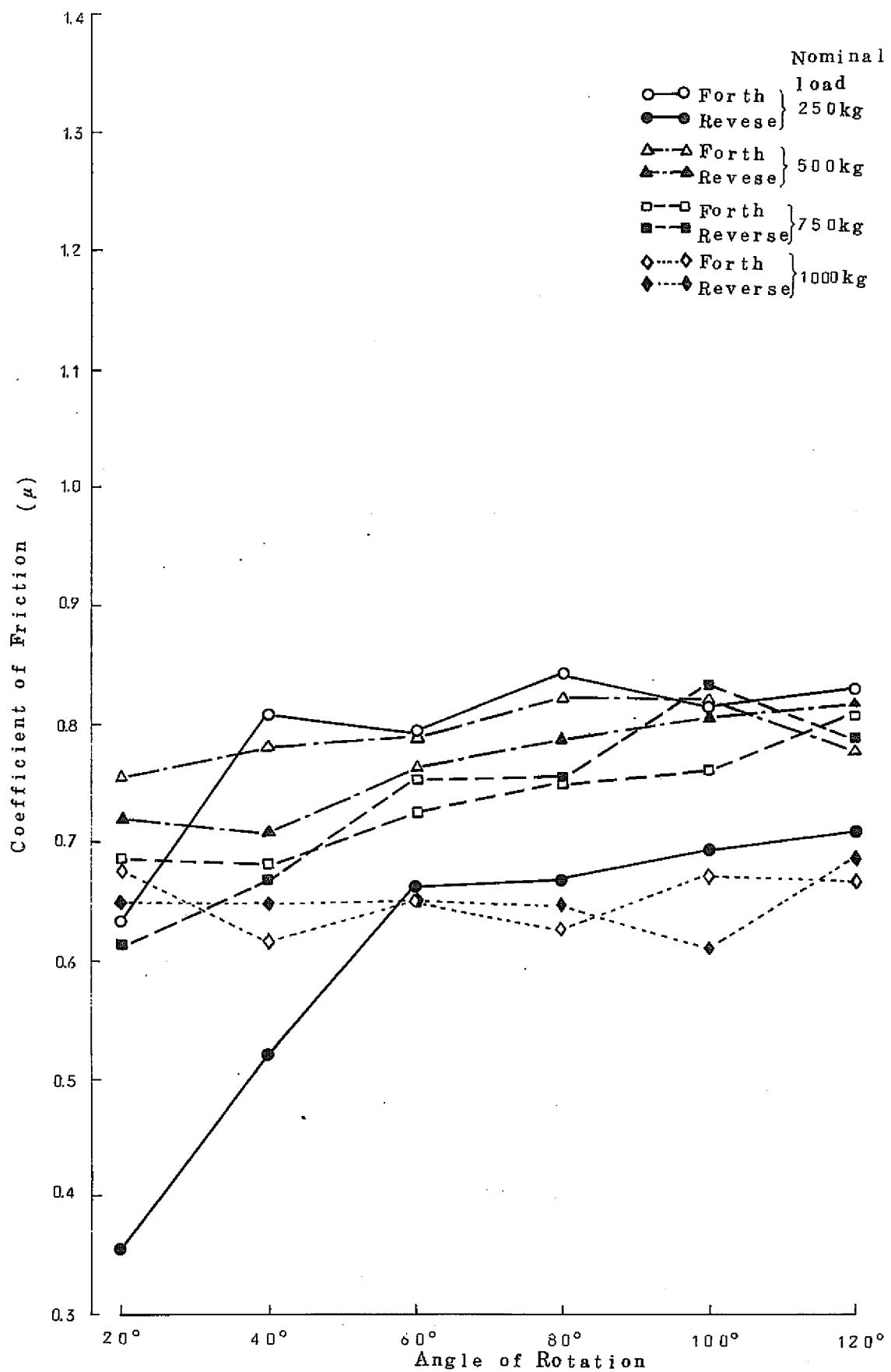


Fig-38 Results of Friction Test on Inconel 718 VS. Inconel 718  
at Room Temp. in Air

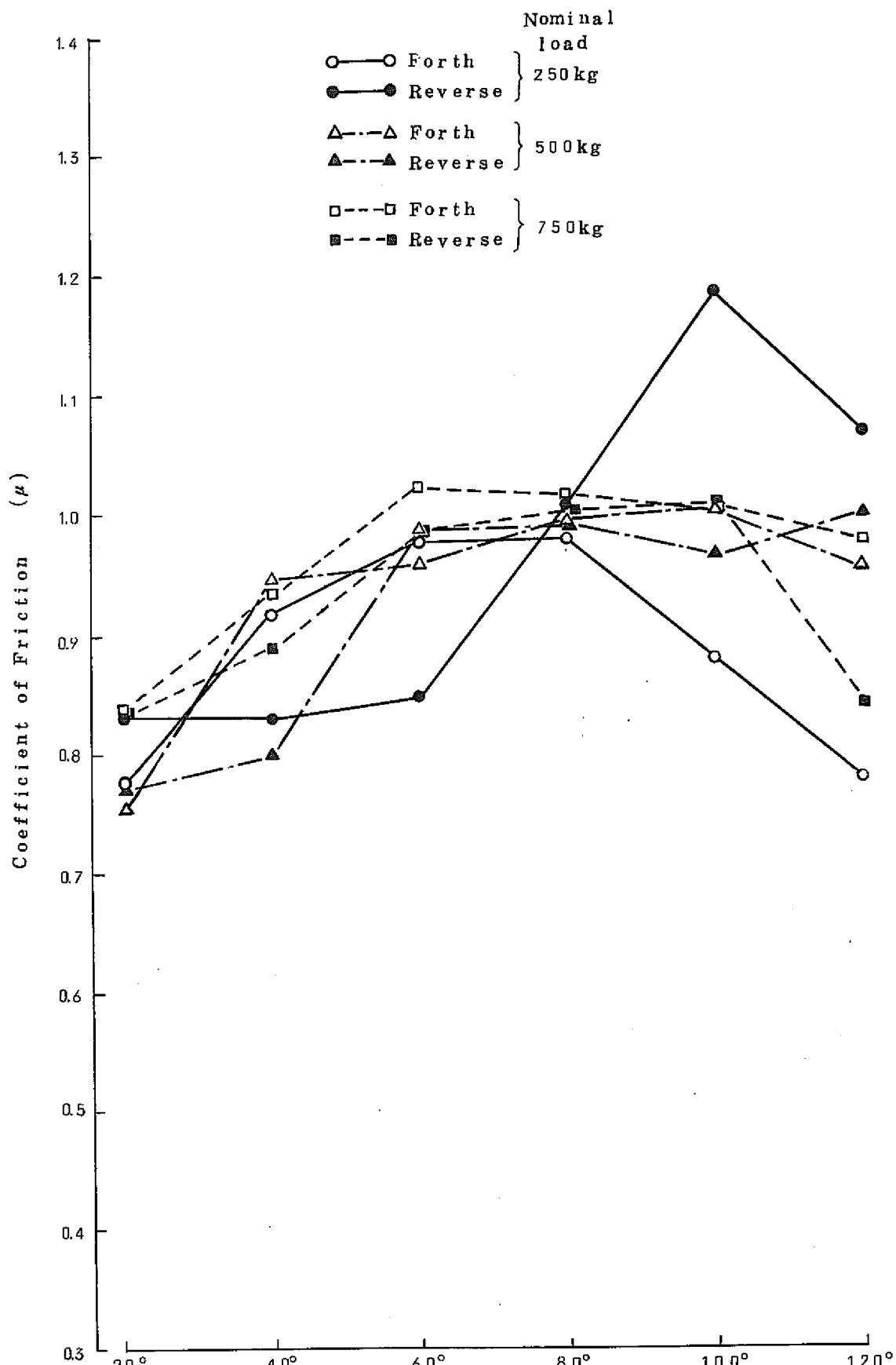


Fig-39 Results of Friction Test on Inconel X VS. Inconel X  
at Room Temp. in Air

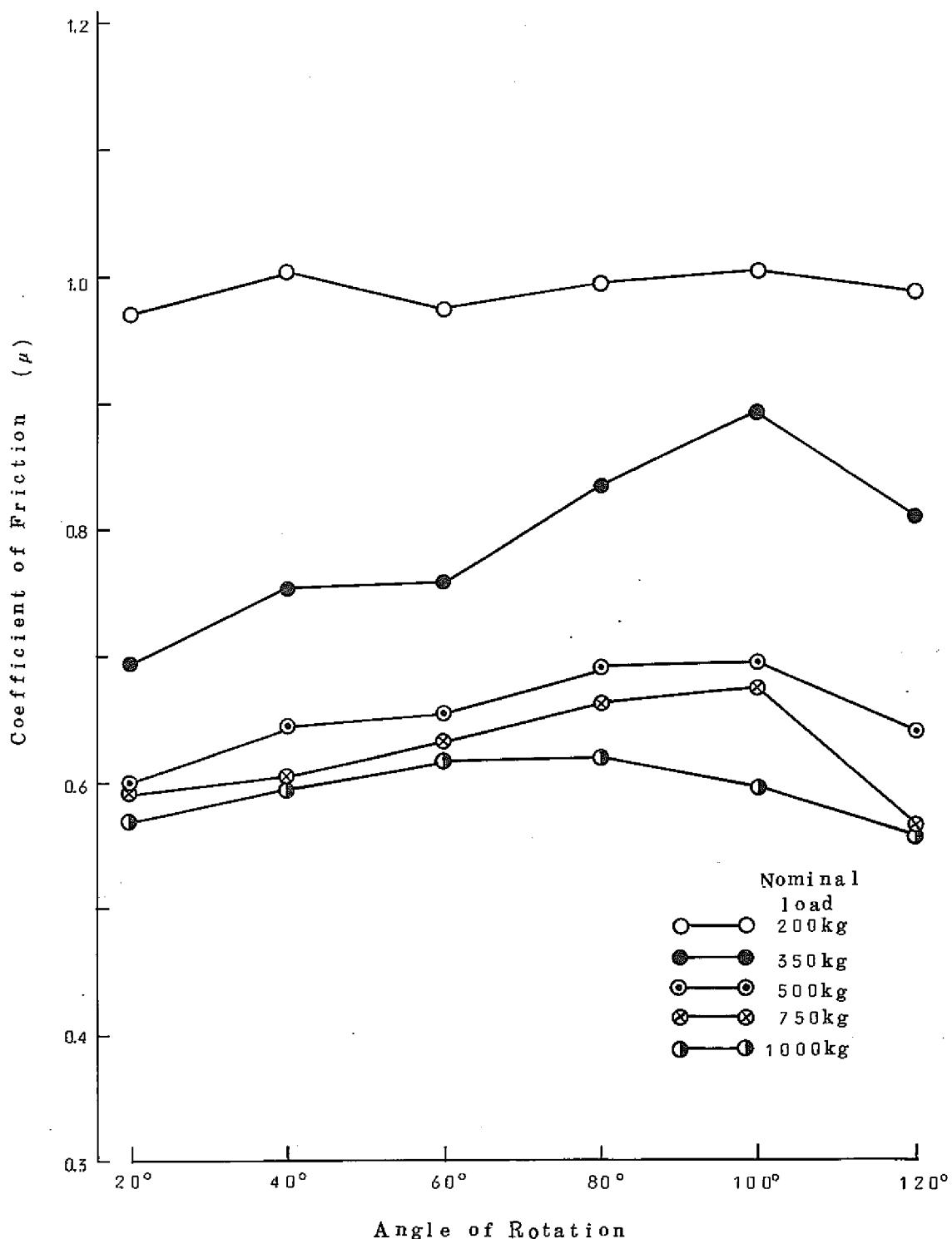


Fig-40 Results of Friction Test on NAS 40-2 VS. NAS 40-2  
at 450°C in Ar.

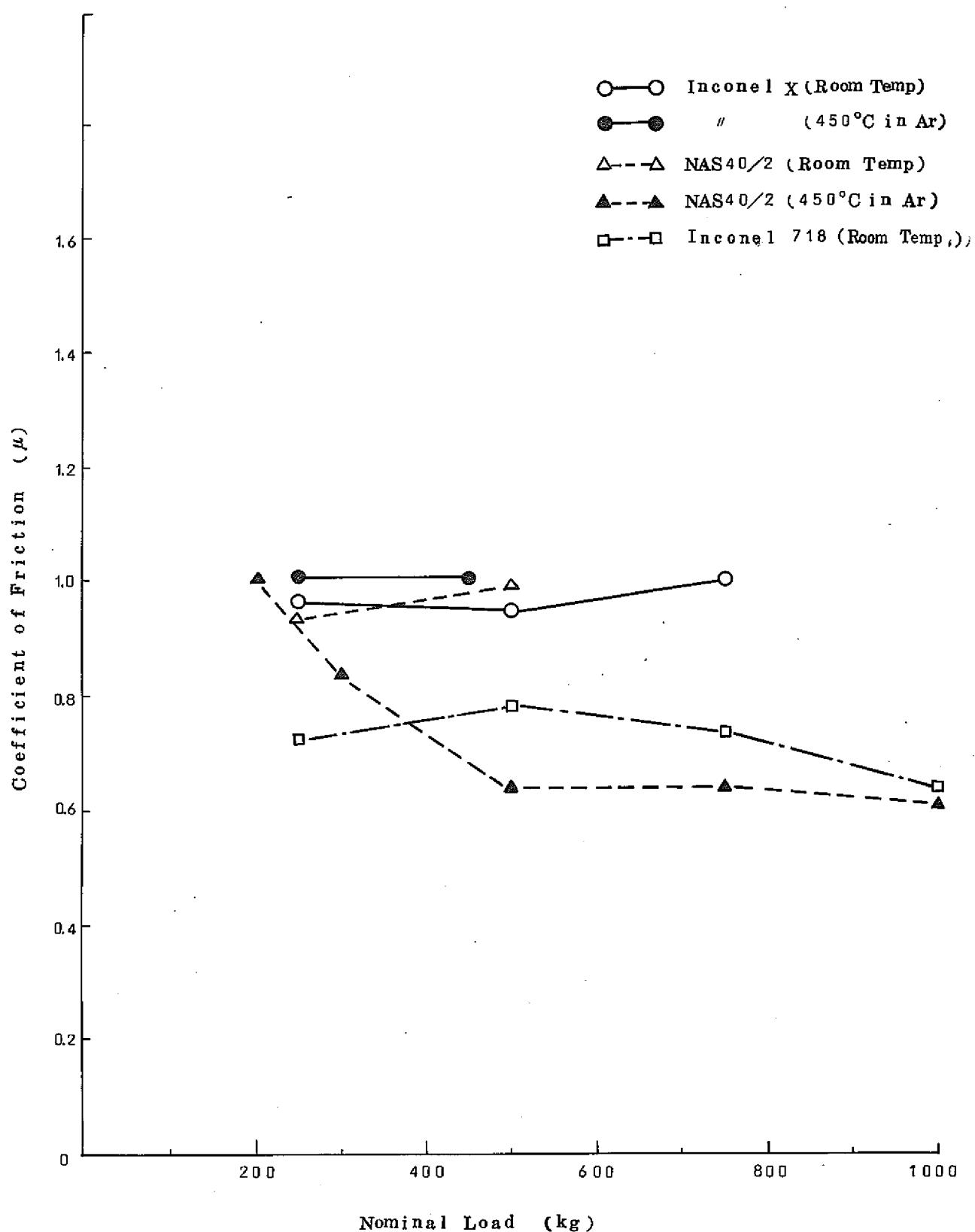


Fig-41 Results of Friction Test on the same kind of Materials  
(Refractory metal)

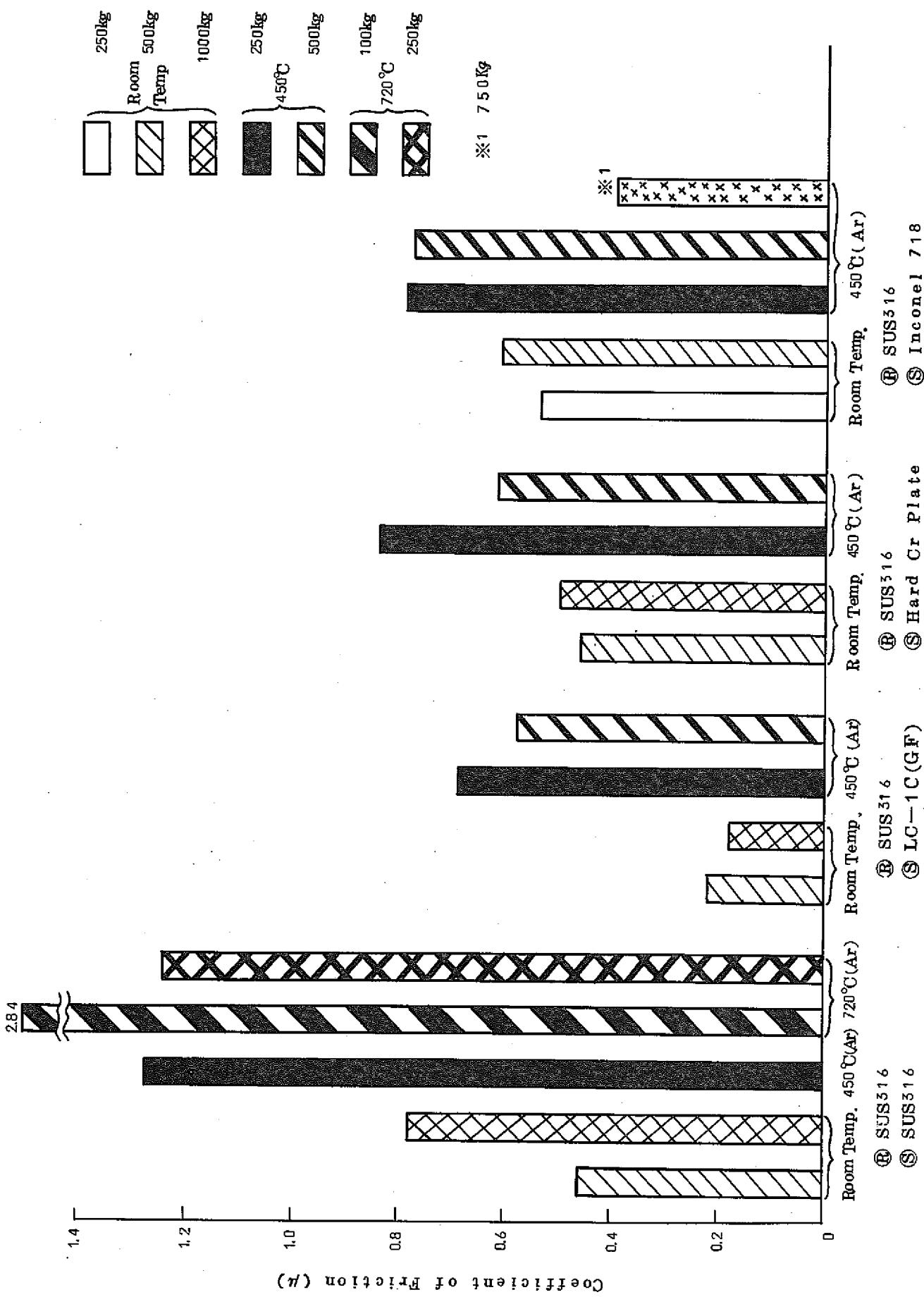


Fig-4-2 Results of Friction Test of Various Materials.

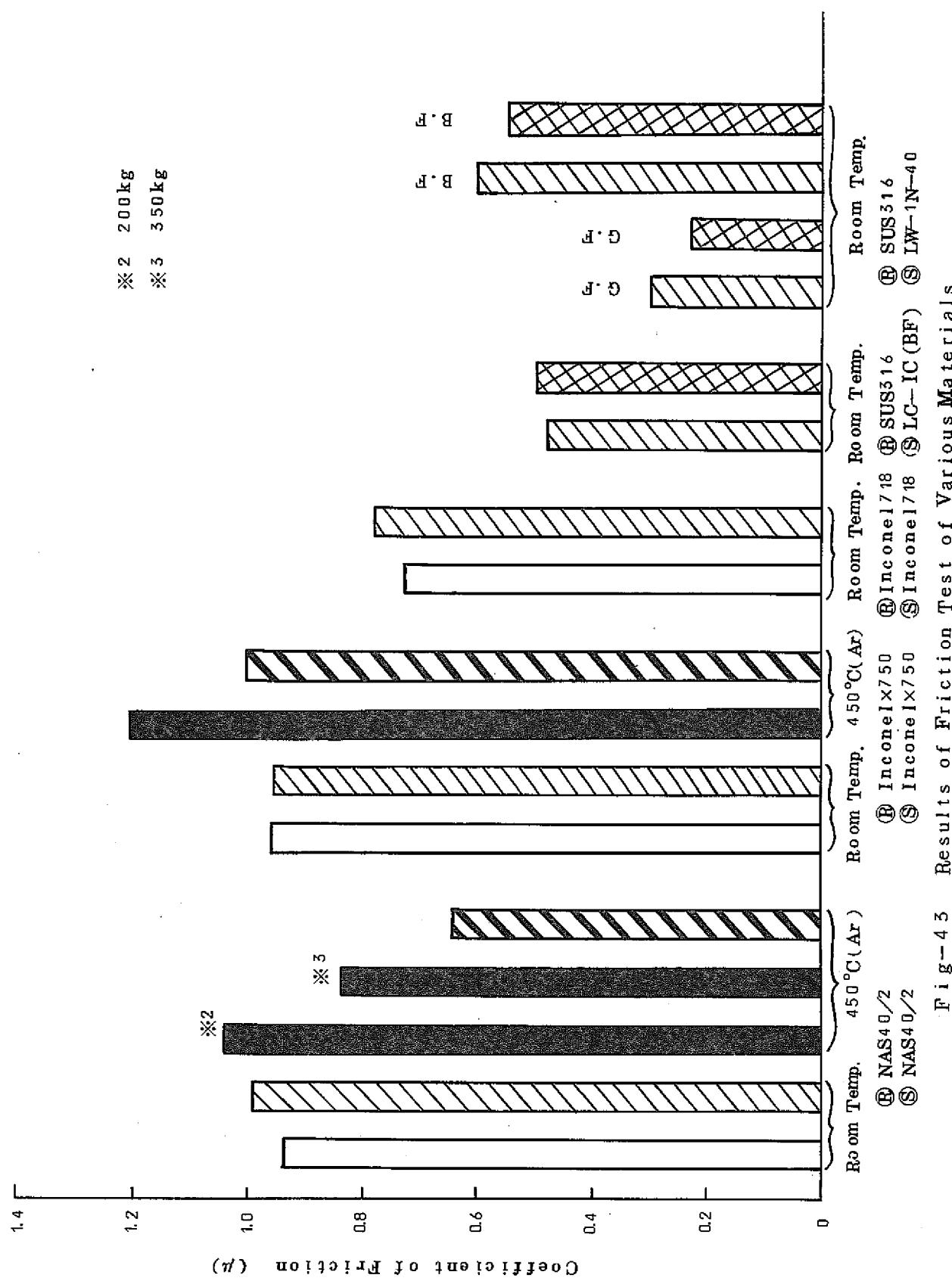


Fig-43 Results of Friction Test of Various Materials.

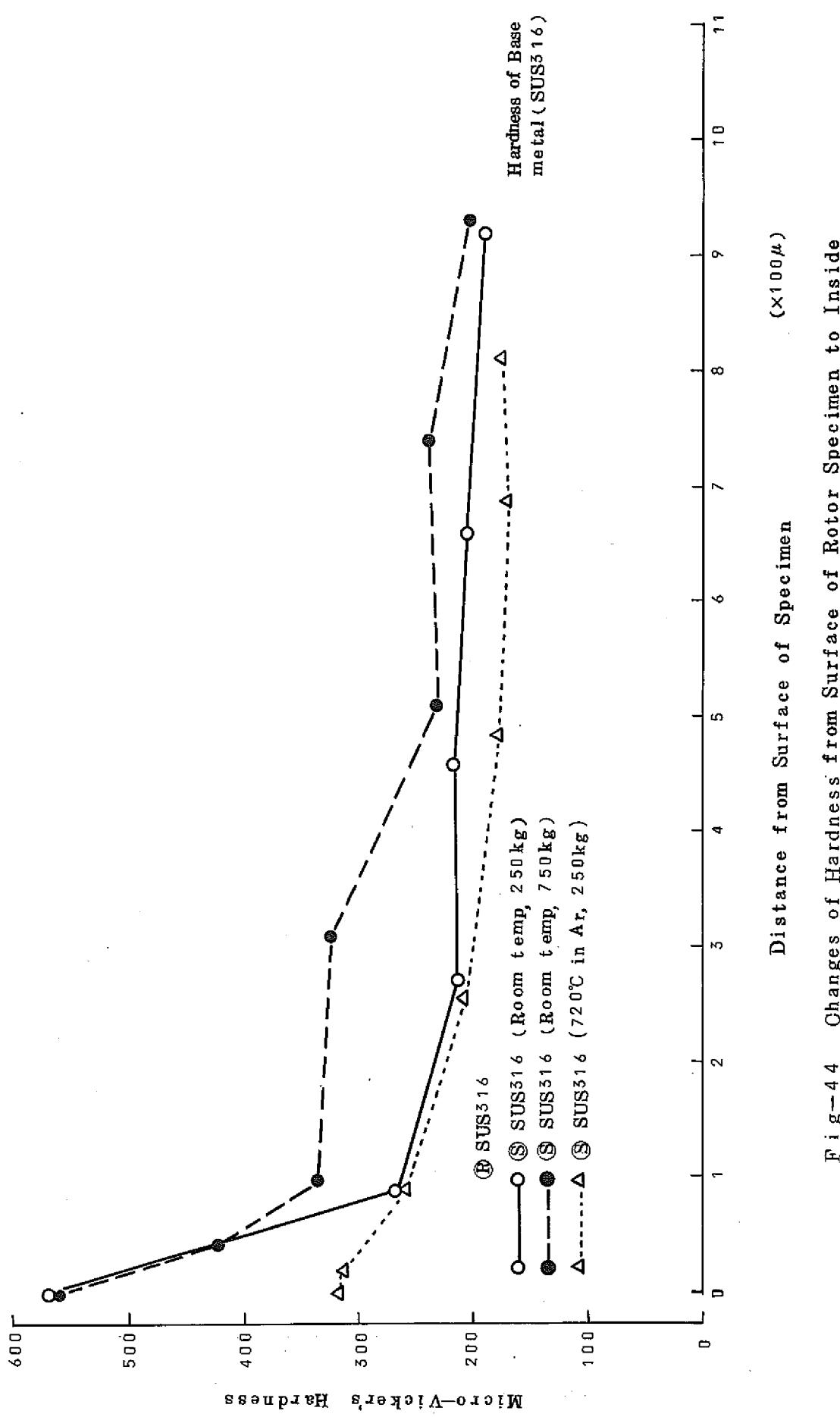


Fig-44 Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside

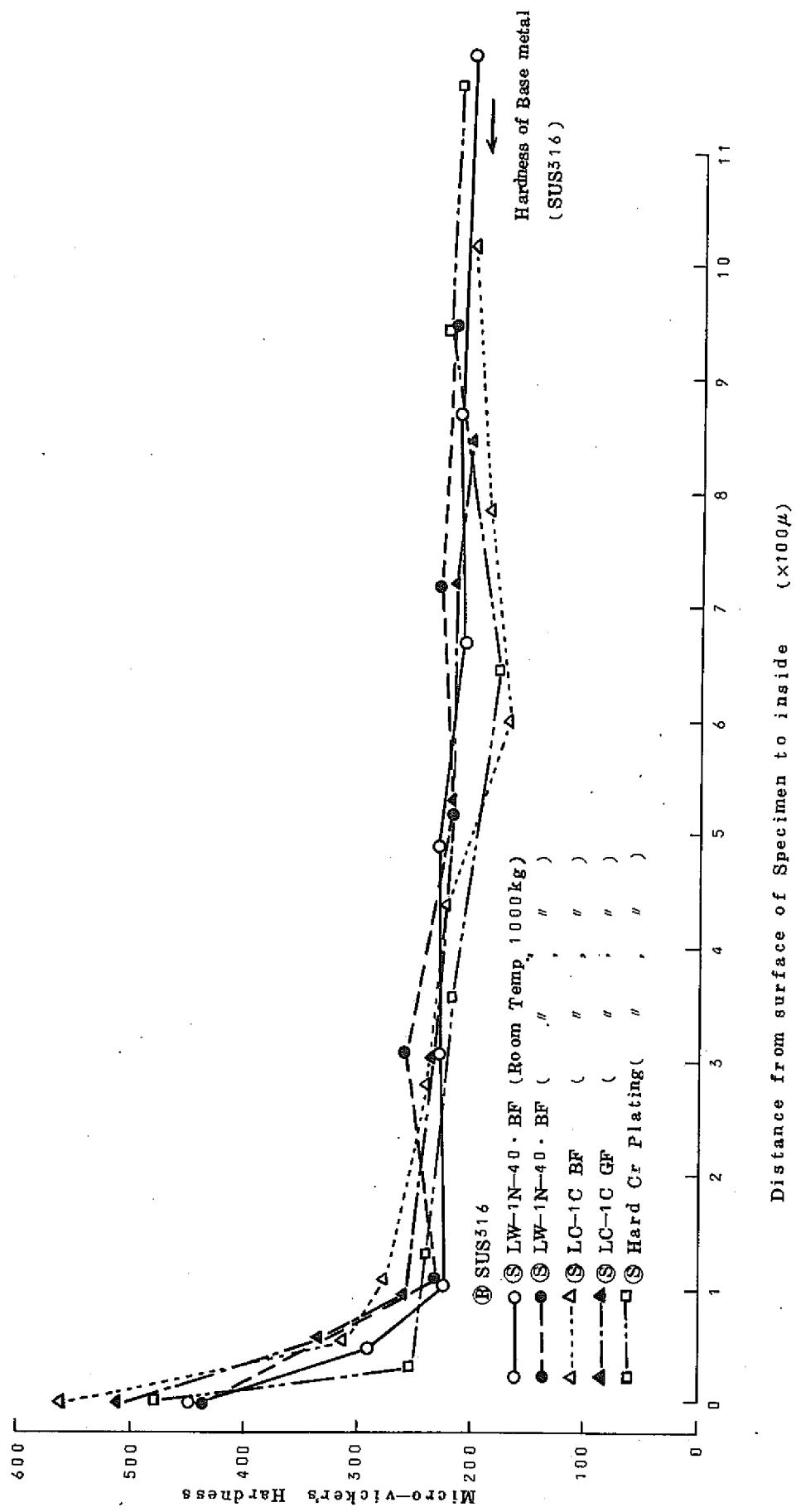


Fig-45 Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside ( $\times 100 \mu$ )

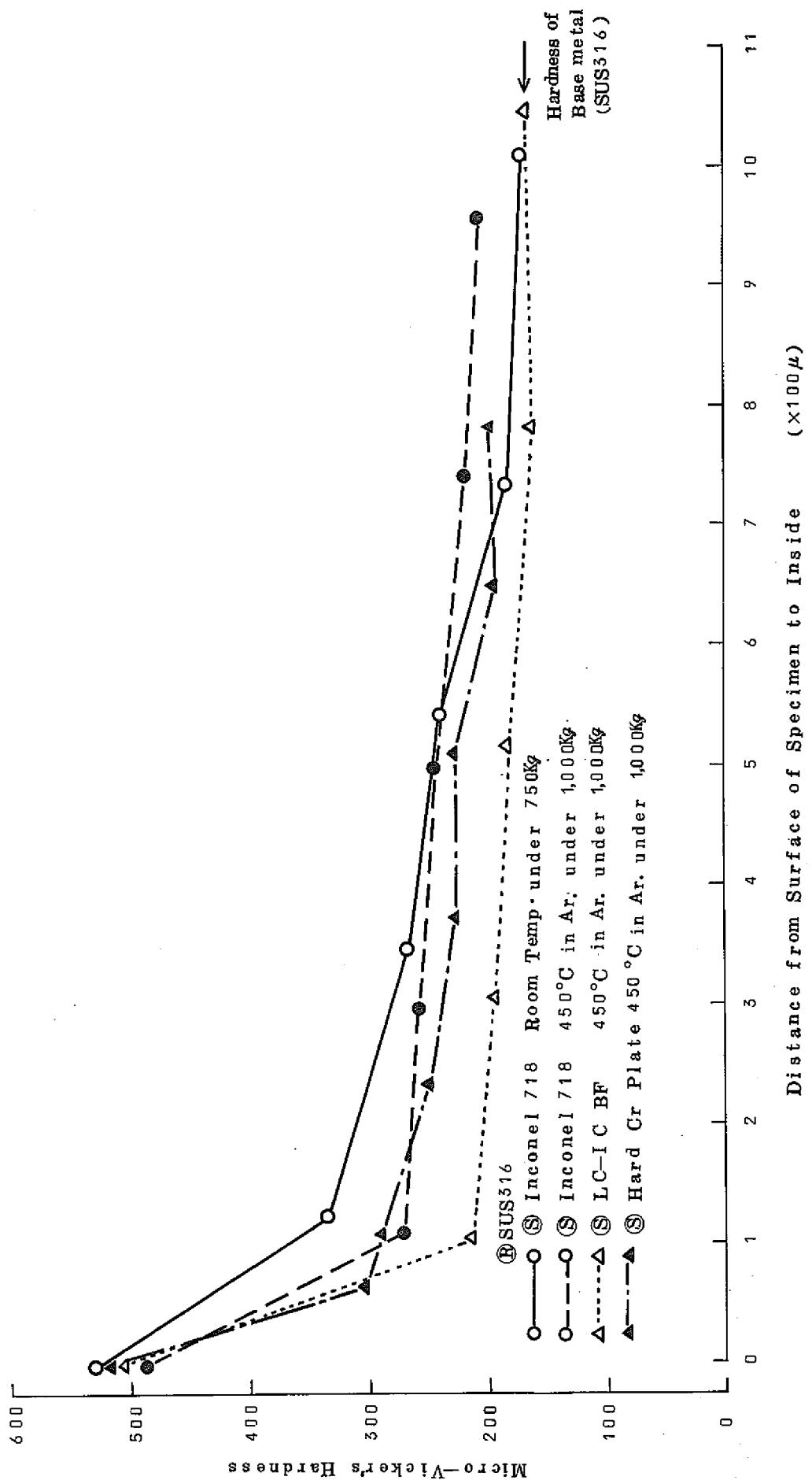


Fig.-46 Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside

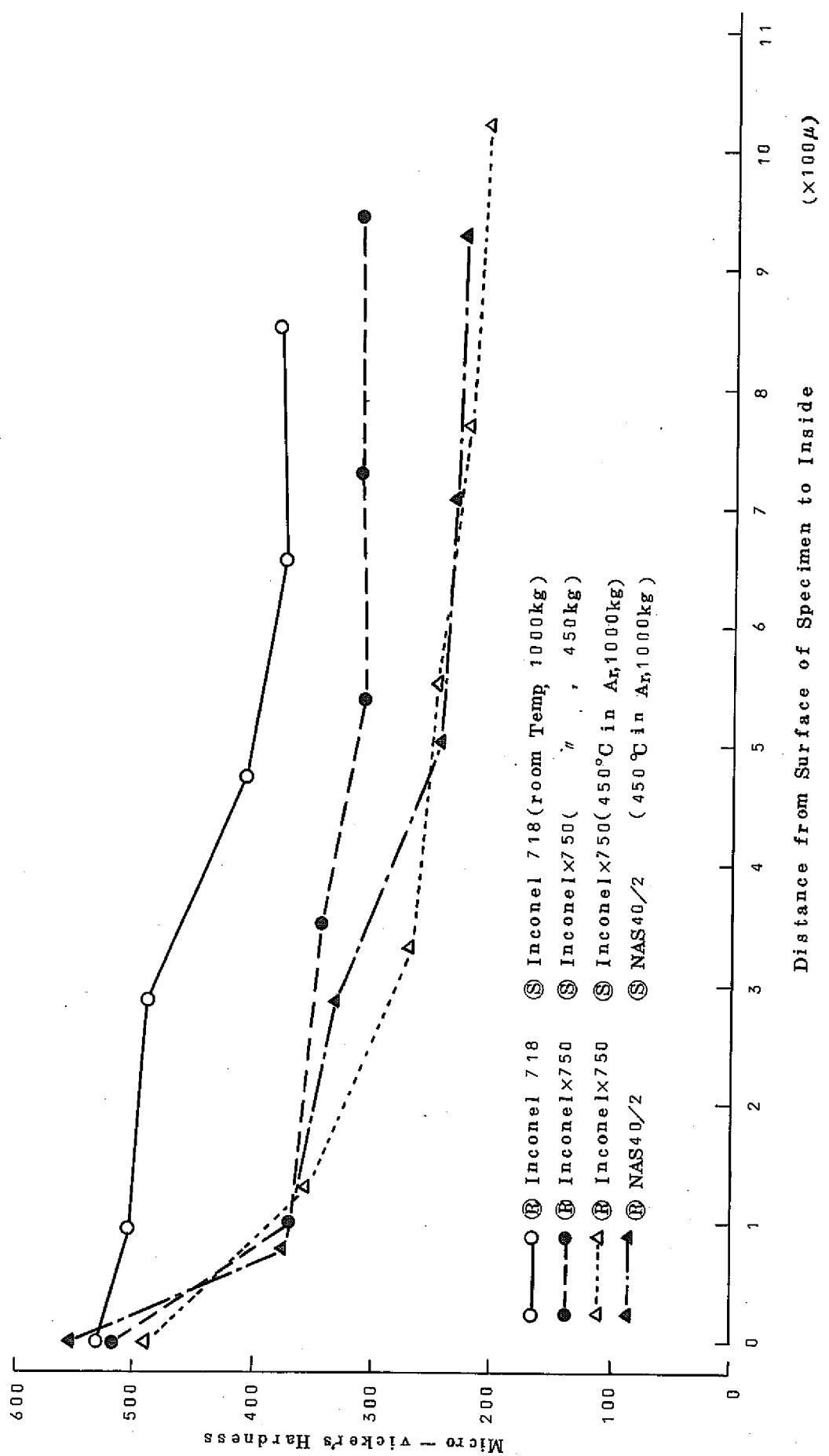


Fig-47 Changes of Hardness from Surface of Rotor Specimen to Inside

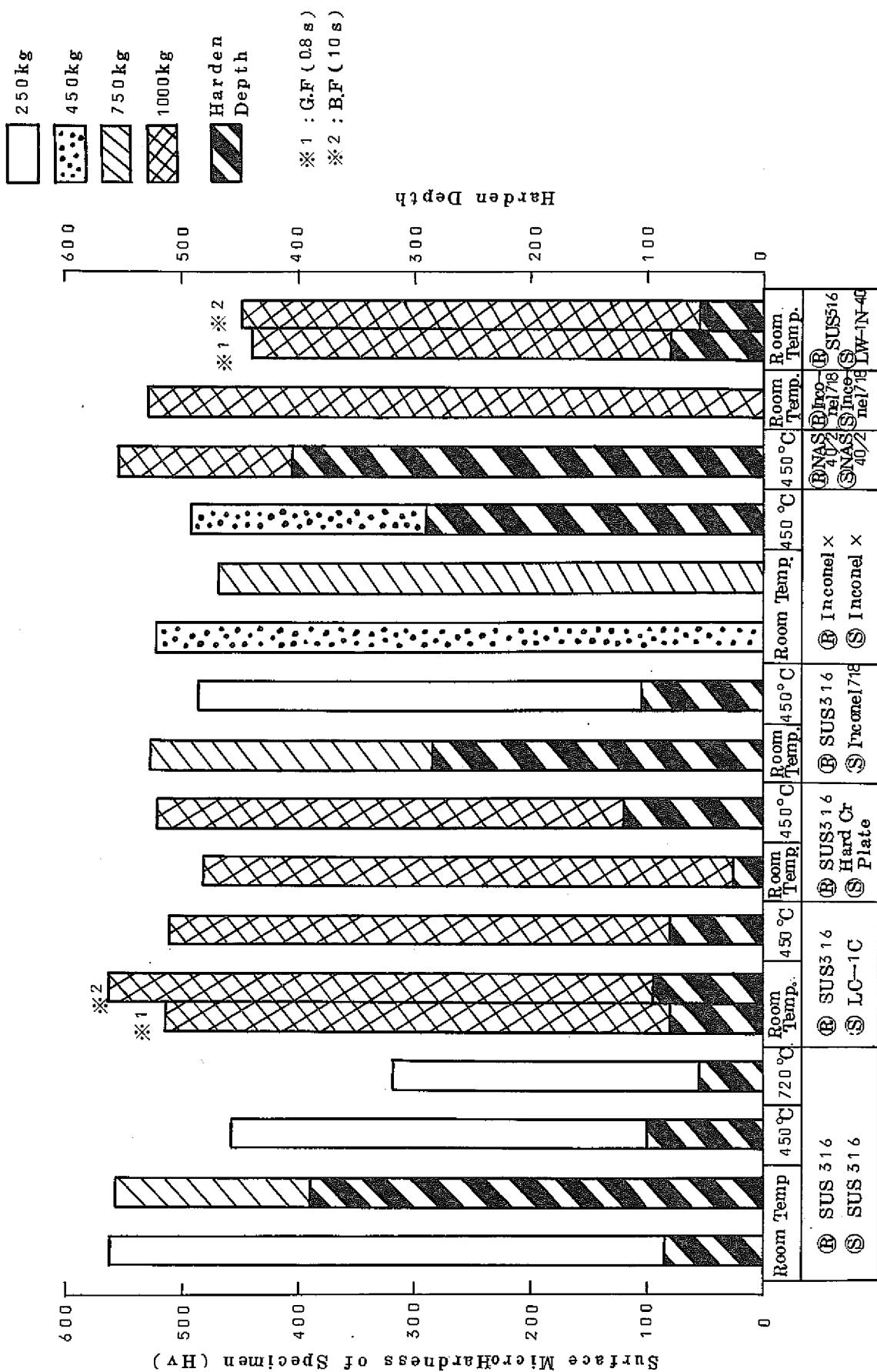


Fig-48 Changes of Hardness of Various Materials after Tested

Table-2 Combination of Specimens

Specimen No.	Rotor	vs. stator	Testing Temp(°C)
1	SUS316	vs. SUS316	Room Temp,
2	SUS316	vs. SUS316	450
3	SUS316	vs. SUS316	720
4	Inconel x750	vs. Inconel x750	Room Temp,
5	Inconel x750	vs. Inconel x750	450
6	SUS316	vs. Inconel 718	Room Temp,
7	SUS316	vs. Inconel 718	450
8	Inconel 718	vs. Inconel 718	Room Temp,
9	NAS40-2	vs. NAS40-2	Room Temp,
10	NAS40-2	vs. NAS40-2	450
11	SUS316	vs. Hard Chrome plating	Room Temp,
12	SUS316	vs. Hard Chrome plating	450
13	SUS316	vs. LW-1N-40 (G·F)	Room Temp,
14	SUS316	vs. LW-1N-40 (B·F)	"
15	SUS316	vs. LC-1C (G·F)	"
16	SUS316	vs. LC-1C (B·F)	"
17	SUS316	vs. LC-1C (G·F)	450
18	SUS316	vs. SUS316	650

※ G·F=0.8s, B·F=10s

Table-3 Chemical Compositions of Materials

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Cb+Ta	Ti	Al	W	Fe
SUS316	0.06	0.6	1.34	0.027	0.002	10.25	16.55	2.28						
Inconel x750	0.025	0.05	tr	—	<0.005	BAL	15.14	—	—	1.01	2.56	0.76	7.15	
Inconel 718	0.06	0.09	0.14	0.010	0.003	52.77	18.74	3.05	0.03	4.84	1.00	0.65		
NAS40-2*	0.14	0.46	1.43	0.012	0.009	20.26	20.87	2.91	10.25	1.03			2.26	
Hard Cr plating	Hard chrome plating on SUS316 stainless													
LW-1N-40	Material coated by Detonation Gun on SUS316 stainless (85%WC + 15%Co)													
LC-1C	Material (85%Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 15%Ni-Cr) Coated by Detonation Gun on SUS316 stainless													

※ correspond to N155

Table - 4 Changes of Microhardness of Various Materials  
after Friction Test

Combination of Specimen	Temp.	Nominal Load of final Testing	Surface Hardness of Specimen	Hardness of Base metal	Harden Rate by Friction Test	Harden Depth(μ)
⑧ SUS316	Room Temp.	250kg	573	190	3.01	85
		750kg	564	190	2.96	390
⑨ SUS316	450°C	250kg	462	151	3.05	100
	720°C	250kg	318.6	168.5	1.89	55
⑧ SUS316	Room Temp.	(BF)1000kg	514	190	2.70	80
		(GF)1000kg	564.4	190	2.97	95
⑨ LC-1C	450°C	(GF) 1000kg	510	179	2.84	80
⑧ SUS316	Room Temp.	1000kg	482	190	2.53	27
		450°C	1000kg	521.6	168	3.10
⑧ SUS316	Room Temp.	750kg	528.4	190	2.78	285
		450°C	1000kg	486.6	178	2.73
⑧ Inconel×750	Room Temp.	450kg	522.6	298.5	1.75	—
		750kg	469	296	1.58	—
⑨ Inconel×750	450°C	450kg	491	219	2.24	290
⑧ NAS40-2	450°C	1000kg	555	223.5	2.48	405
⑨ NAS40-2	450°C	1000kg	530	393	1.34	—
⑧ Inconel×718	Room Temp.	1000kg	530	393	1.34	—
⑨ Inconel×718	450°C	450kg	491	219	2.24	290
⑧ SUS316	Room Temp.	(GF)1000kg	442	190	2.32	80
⑨ LW-1N-40	Room Temp.	(BF)1000kg	449.5	190	2.36	55