

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. - 6

[技術情報室]

# UO<sub>2</sub> とジルカロイ-2 被覆管材との間の摩擦係数の測定

Friction Coefficient Between UO<sub>2</sub> And Zircaloy-2

1977年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

に配布する

です。

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001



# UO<sub>2</sub>とジルカロイ-2被覆管材との間の 摩擦係数の測定

## Friction Coefficient Between UO<sub>2</sub> and Zircaloy-2

実施責任者 本 田 裕 (プルトニウム燃料部開発課)  
報 告 者 立 花 利 道 (           "           )  
          成 田 大 祐 (           "           )  
          金 子 洋 光 (           "           )

期 間 1977年3月 ~ 1977年7月

目 的 新型転換炉および軽水炉の燃料棒の照射中における燃料ペレットとジルカロイ-2被覆管との機械的相互作用を評価するための重要な因子である摩擦係数(UO<sub>2</sub>ペレット/ジルカロイ-2被覆管材)を精確に測定することが目的である。

なお、本報告にはグラファイトコーティングを施したジルカロイ-2とUO<sub>2</sub>との間の摩擦係数の測定結果も併せて示す。

要 旨 UO<sub>2</sub>/ジルカロイ-2の静摩擦係数( $\mu_s$ )は室温で $\mu_s = 0.33 \pm 0.08$ であり、測定温度を400°Cと高くすると、静摩擦係数は $\mu_s = 0.48 \pm 0.05$ となり温度と共に若干増加した。

また、グラファイトコーティングしたジルカロイ-2とUO<sub>2</sub>ペレットとの間の静摩擦係数( $\mu_s$ )は室温から400°Cの温度範囲で $\mu_s = 0.14 \pm 0.06$ であり、試験温度に対する有意差はなかった。

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 試験試料および測定方法 .....	2
3. 測定結果 .....	4
4. 考 察 .....	6
5. 結 論 .....	8
謝 辞 .....	9
参考文献 .....	10

## 1. 序 言

1965年頃ノルウェー，ハルデン炉（HBWR）での燃料棒の照射試験によって，燃料ペレットと被覆管（ジルカロイ）とが力学的な相互作用により，燃料棒の破損が見いだされた。その後商業発電炉でも同様な破損例の報告が示されている<sup>(1)</sup>。

炉内における燃料棒の照射寿命は，燃料ペレットと被覆管との機械的な相互作用（以下PCMIと略す）に大きく影響されるといわれるに至った<sup>例えば(1)~(4)</sup>。

炉内において，燃料ペレットが熱膨張，クラックの発生あるいはスエリングによってふくれることにより，燃料ペレットと被覆管とが力学的な相互作用が生じ，被覆管に局部的なひずみ集中が発生し，被覆管が破損するといわれている<sup>(4)(5)</sup>。

PCMIによって燃料棒の破損機構を解明するため，J.H.GITTUS<sup>(4)(6)</sup>は1970年にPCMIの力学的モデルを報告している。また，R.A.RAND等<sup>(5)</sup>は有限要素法を使用してPCMI解析を行った。これらの力学的モデル<sup>(4)(6)</sup>および有限要素法によるPCMI解析結果<sup>(5)</sup>によると，PCMIによって発生する被覆管のひずみ集中率は燃料ペレットと被覆管材との間の摩擦係数によって大きく変化するとされている。

現在のところ，燃料ペレットと被覆管との間の摩擦係数の測定結果は，W.A.MARTIN（ORNL）による $UO_2$ /ステンレス被覆管の摩擦係数の測定報告<sup>(7)</sup>と和田（東芝）による $UO_2$ /ジルカロイ被覆管の摩擦係数の測定報告<sup>(8)</sup>の各一件のみである。

しかし，これらの測定方法はいずれも傾斜法であるため， $UO_2$ ペレットと被覆管材との接触圧が非常に小さい（ペレットの自重による接触）。

そこで本報では，実際にPCMIによって被覆管が損傷する程度の接触圧のもとで $UO_2$ ペレットとジルカロイ-2被覆管との間の摩擦係数を測定した。

なお，この測定試験はATRプルトニウム燃料の技術開発業務に従って行ったものであるが，ATR本部の依頼（業連51（ATR）132）により，グラファイトコーティングをしたジルカロイ-2と $UO_2$ との間の摩擦係数測定結果も併せて報告する。

## 2. 試験試料および試験方法

### 2-1 試験試料

#### 2.1.1 燃料試料

燃料試料は天然UOペレットであり、直径13.6φで高さは20.0mmである。

このペレットは原子燃料工業株式会社で作成されたもので、UO<sub>2</sub>粉末をボールミルで混合したあとプレスし水素-チッ素ガス(H<sub>2</sub>75%-N25%)中で1500°C、約4時間焼結したものである。試料ペレットのO/Uは2.01±0.01、密度は94±1%であり、平均結晶粒径は約17μである。

また、ペレットの表面粗さは2~3Sである。UO<sub>2</sub>ペレット中の不純物の分析値は表1に示す。

#### 2.1.2 被覆管機試料

##### 1) ジルカロイ-2被覆管試料

ジルカロイ-2被覆管は住友金属工業から購入したものであり、平均寸法は、16.46<sup>OD</sup>×14.70<sup>ID</sup>である。被覆管の仕上げ加工度は54.1%で、ひずみ取り焼鈍度は480°C×4Hである。被覆管の特性および不純物分析結果はそれぞれ表2および表3に示す。なお、被覆管表面の粗さは3S以下である。

##### 2) グラファイトコーティングしたジルカロイ-2試料

この試料はジルカロイ-2を矩形に加工したものにグラファイトをコーティングしたものである。この試料は株式会社日立製作所で作成したものである。

本試料の形状寸法は図2に示す。

### 2-2 試験方法

摩擦係数の定義により、燃料ペレットと被覆管材との接触力を $F_N$ とし、燃料ペレットと被覆管材とが互にすべりずれるに必要な力を $F_T$ とすると、摩擦係数( $\mu$ )は $\mu = F_T / F_N$ となる。本試験では一定の力 $F_N$ でUO<sub>2</sub>ペレットと被覆管材とを接触させておき、UO<sub>2</sub>ペレットと被覆管材とを互にすべりずらせた。

このときのすべりずらせるに必要な力 $F_T$ を検出記録し、 $F_T / F_N$ から摩擦係数がえられた。

測定装置は、インストロン型圧縮試験装置を真空炉にたて方向( $F_N$ 力)およびよこ方向( $F_T$ 力)に組み合せたものである。UO<sub>2</sub>ペレットと被覆管材との接触力( $F_N$ )は、摩擦試験中に常に一定値を保つように制御される。

また、UO<sub>2</sub>ペレットと被覆管材とが接触したまま、互いにすべりずれることができるよう

に、たて方向の圧縮試験装置には油圧によるフローティング装置がある。

測定装置の概要および写真をそれぞれ図2、写真1に示す。また摩擦測定のための、 $UO_2$ ペレットと被覆管材との試料設置方法を図3、測定原理図を図4に示す。

本実験は①摩擦係数におよぼす温度の影響、②ジルカロイ-2の内表面の酸化膜の影響、③ $UO_2$ と被覆管材との同一接触面でのくりかえし摩擦による摩擦痕による摩擦係数の変化および④ $UO_2$ と被覆管との間の接触圧の差異による摩擦係数の変化を調べるため下記の条件で摩擦測定を行った。

- ① 試験温度 R.T, 100, 200, 300, 400°C

(温度制御は±10°以内であった)

- ② 一度400°Cに加熱したジルカロイ-2被覆管材を室温で測定する。

- ③ 接触荷重( $F_N$ )

$F_N = 10 \text{ Kg}$ ( $UO_2$ とジルカロイ-2 との接触圧として	約 2 $\text{Kg/mm}^2$ ) *
30 $\text{Kg}$ (	6 " ) *
50 $\text{Kg}$ (	10 " ) *
100 $\text{Kg}$ (	20 " ) *

- ④  $UO_2$  とジルカロイ-2 との接触面の同一摩擦痕上のくり返し回数は約10日または約20回である。

なお、摩擦測定する際の昇温速度は約10°C/minであり、試料温度が所定の温度に到達してから約30分保持してから摩擦試験を行った。

また、試験ふんい気は高純度ヘリウムガス(ヘリウムガス中の酸素濃度1.4ppm以下)である。

また、 $UO_2$ ペレットと被覆管材とを互にすべりずらせる速度は摩擦測定の一般的な値<sup>(9)10</sup>である0.1mm/secを採用した。

---

\*  $UO_2$ ペレットと被覆管材との接触圧は、摩擦試験後、被覆管材試料に残された摩擦痕の面積を測定し、この面積で接触力を除した値である。

従って、実際は試験試料により接触圧の多少の差はある。

### 3. 測定結果

#### 3-1 摩擦係数の温度による影響

UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロイ-2被覆管材およびUO<sub>2</sub>ペレットとグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との間の摩擦係数実測値と試験温度との関係を図5に示す。

図5によると、R.T~400°Cで、UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロイ-2被覆管との間の静摩擦係数( $\mu_s^z$ )は、 $\mu_s^z = 0.40 \pm 0.15$ であり、UO<sub>2</sub>ペレットとグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との間の静摩擦係数( $\mu_s^z$ )は $\mu_s^z = 0.15 \pm 0.06$ である。

UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロイ-2被覆管との間の $\mu_s^z$ は試験温度と共にわずかに増加すると思われる。また、UO<sub>2</sub>とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との間の $\mu_s^z$ は図5の結果より、試験温度による有異差は見つけられない。

#### 3-2 ジルカロイ-2被覆管内面の酸化膜の摩擦係数への影響

ジルコニウムは酸素との親和力が非常に強い金属であるため、ジルカロイ-2被覆管での摩擦係数測定する際、試験温度が高くなるにつれて被覆管内面に酸化膜が生じた。摩擦試験温度の上昇にともなうジルカロイ-2の機械的強度(弾性係数、降伏強さおよび抗張力)の低下と表面層の変化が摩擦係数に影響する<sup>(1)</sup>と思われる。

このため、昇温によるジルカロイ-2の機械的強度の低下による摩擦抵抗への効果とは別にジルカロイ-2の表面の酸化膜による摩擦係数への影響を調べるため、一度400°Cに加熱したジルカロイ-2被覆管を室温で摩擦測定試験を行った。

この結果、400°Cに加熱されたことにより表面に酸化膜層が生成したジルカロイ-2被覆管とUO<sub>2</sub>ペレットとの間の $\mu_s^z$ は0.23および0.37である。

この結果により加熱によって生ずる酸化膜の $\mu_s^z$ による影響はないと考えられる。

#### 3-3 同一接触面でのくりかえしすべりによる摩擦痕の効果

UO<sub>2</sub>ペレットと被覆管材とを接触させすべらせたあと同一の接触面上に再び接触させることによりくりかえし摩擦測定を行い、摩擦痕による摩擦係数への影響を試験した。この結果を図6に示す。UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロイ-2被覆管との間の接触力を約60Kg(接触圧力約10kg/mm<sup>2</sup>)にして、くりかえし測定した結果、図6に示されるようにくりかえし回数による静摩擦係数の変化は殆んどないと考えられる。

また、グラファイトコーティングしたジルカロイ-2とUO<sub>2</sub>との間の静摩擦係数( $\mu_s^g$ )は接触力約30Kg(接触圧力約6kg/mm<sup>2</sup>)でくりかえし測定したところ、図6に見られるように室温での測定結果以外は、 $\mu_s^g$ はくりかえし回数によって変化はないように考



えられる。

### 3-4 $\text{UO}_2$ と被覆管材との間の接触圧の差による摩擦係数への効果

$\text{UO}_2$  とジルカロイ-2 被覆管との接触力は 10 Kg から 100 Kg (接触圧力としては 約 2 Kg/mm<sup>2</sup> から 約 20 Kg/mm<sup>2</sup>) ,  $\text{UO}_2$  とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2 との接触力は 20 Kg から 150 Kg (接触圧力としては 約 4 Kg/mm<sup>2</sup> から 約 30 Kg/mm<sup>2</sup>) の範囲で、室温と 400°C の温度で摩擦係数を測定した。

この結果は図 7 に示す。

図 7 で示されるように、 $\text{UO}_2$  とジルカロイ-2 被覆管、および  $\text{UO}_2$  とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2 との摩擦係数に対する接触圧の効果は見いだせなかった。

## 4. 考 察

### 4-1 接触力 ( $F_N$ ) とすべりずれ抵抗力 ( $F_T$ )

本実験装置を使用したの  $F_N$  と  $F_T$  の検出は、鉄鋼と鉄鋼等で見られるような典型的な摩擦すべり<sup>(9)(10)</sup>の様子がえられた。

代表例として  $UO_2$  とジルカロイ-2 被覆管および  $UO_2$  とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2 の  $F_N$  と  $F_T$  の摩擦すべりに伴う変化を図 8 に示す。

図 8 で明らかなように  $UO_2$  とジルカロイ-2 被覆管とが接触したまますべりずれる過程で  $F_T$  の変動がみられた。これは、今回の測定として接触圧が数  $Kg/mm^2$  と高いため、すべりずれる過程で被覆管機のせん断変形を伴つことにより  $F_T$  の変動が生じたものと思われる。この  $F_T$  の変動は鉄鋼と鉄鋼の摩擦等で観測されているスティックスリップ現象<sup>(9)</sup>と同じと思われる。つまり  $UO_2$  とジルカロイ-2 とが接触しすべる場合、 $UO_2$  の方がジルカロイ-2 よりも剛性が高いため、ジルカロイ-2 の接触表面層が  $UO_2$  によって掘りおこされることにより、すべり摩擦抵抗力 ( $F_T$ ) の変動が生ずると考えられる。

実際にすべり摩擦試験後ジルカロイ-2 表面の摩擦痕を観察すると、大きな塑性流動の痕跡が観測された。代表例として写真 2 に示す。

一方、グラファイトコーティングしたジルカロイ-2 と  $UO_2$  のすべり摩擦の場合、図 8 でも明らかなようにスティックスリップはなく円滑にすべっており、 $F_T$  の変動も極く少ない。これは、試料がすべる際にグラファイトが試料表面の凹凸に埋まり、かつ接触面が平滑になるための、ジルカロイ-2 が  $UO_2$  の凹凸によつての掘りおこし効果が少くなるためにスティックスリップが生じないと考えられる。グラファイトをコーティングしたジルカロイ-2 の摩擦試験によりすべった後の痕跡面は鏡面状態であった。(写真 3)

### 4-2 摩擦係数と試験温度との関係

$UO_2$  とジルカロイ-2 被覆管との間の静摩擦係数は試験温度と共にわずかな増加がみられた。これは、試験温度の上昇に従つてジルカロイ-2 の降伏強さが低下するため、 $UO_2$  とジルカロイ-2 被覆管との実質接触面積が増加するため、すべり低抗力が大きくなるためと考えられる。しかしながら、試験温度の上昇にともない、実質接触面積の増大とともに、ジルカロイ-2 のせん断変形抵抗力が低下し、塑性状態でのすべり抵抗は減少すると考えられる。

今回の測定結果からみると、ジルカロイ-2 のせん断変形抵抗力の試験温度の上昇による低下効果よりも実質接触面積の増大によるすべり抵抗の効果が大きいと考えられる。グラファイトコーティングしたジルカロイ-2 の場合、その摩擦係数 ( $\mu_0^\circ$ ) は温度によ

る影響がなかったのは  $\text{UO}_2$  とジルカロイ-2 との間にグラファイトが介在することにより実質接触面積の温度による変化がなかったためと思われる。

また、加熱によって生ずるジルカロイ-2 表面の酸化膜層による摩擦係数への影響はないと考えられるが、今回の測定は接触圧が比較的高い範囲で行ったため、 $\mu_s^z$  が表面酸化膜の厚みによる差異が見つけられなかったと思われる。 $\text{UO}_2$  とジルカロイ-2 との接触圧が低い場合の  $\mu_s^z$  はジルカロイ-2 表面の酸化膜の厚みの差異によって影響されるだろう。

## 5. 結 論

UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロイ-2被覆管およびUO<sub>2</sub>ペレットとグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との摩擦係数をヘリウムふんい気中で室温から400°Cの温度範囲で測定した結果、以下の通り要約される。

- (1) UO<sub>2</sub>とジルカロイ-2被覆管との間の静摩擦係数は、接触圧約4 Kg/mm<sup>2</sup>から20 Kg/mm<sup>2</sup>の範囲で、室温では $\mu_s^z = 0.33 \pm 0.08$ であり、400°Cでは $\mu_s^z = 0.48 \pm 0.05$ である。  
この場合、 $\mu_s^z$ は試験温度と共にわずかに増加すると考えられる。
- (2) UO<sub>2</sub>とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との間の静摩擦係数は、接触圧約4 Kg/mm<sup>2</sup>から20 Kg/mm<sup>2</sup>の範囲で $\mu_s^g = 0.14 \pm 0.06$ であり、室温から400°Cの温度範囲での温度依存性はないと考えられる。
- (3) UO<sub>2</sub>とジルカロイ-2との間の静摩擦係数は接触圧が約4 Kg/mm<sup>2</sup>から20 Kg/mm<sup>2</sup>の範囲で接触圧による有意差が見られなかった。  
また、UO<sub>2</sub>とグラファイトコーティングしたジルカロイ-2との間の静摩擦係数も同様に接触圧による有意差が見られなかった。

## 謝 辞

本実験を行うに当り，燃料／被覆管摩擦係数測定装置の検討，設置に際し有益な御助言を示され，また実際の実験に対する御援助をなされた小泉益通氏（動燃プルトニウム燃料部 部長代理）および古屋広高氏（動燃プルトニウム燃料部開発課長代理，現在九州大学工学部助教授）に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 市川 達生；日本原子力学会誌，18(1976)6，P.331
- (2) 高田 義彦；燃料安全専門委員会成果報告会，(1967)講-2
- (3) 市川 達生；日本原子力学会誌，19(1977)6，P.305
- (4) J.H. GITTUS, D.A.HOWL, and H. HUGHES；Nucl. Appl. Tech. 9(1970)
- (5) R.H. RAND, et al；3rd SMRT, c2/3, (1975)
- (6) J.H. GITTUS；Nucl, Eng, Design, 18(1972) P.69
- (7) W.A. MARTIN；ORNL-3514(1965)
- (8) 和田 豊司；日本原子力学会，昭和51年年会G-30
- (9) 築添 正也；潤滑 19 (1974) P.912
- (10) 築添 正也；潤滑 20 (1975) P.159
- (11) F.P. BOWDEN, et al (曾田範宗 訳)；固体の摩擦と潤滑，丸善(1969)

表 1 UO<sub>2</sub>試験試料の分析値

不 純 物	不純物含有量(重量)
Al	1.3 ppm
B	< 0.1
Ca	1.5
Cr	< 8
Fe	3.5
Mg	< 2
N	< 1.0
Ni	< 1.0

表 2 ジルカロイ - 2 被覆管の特性

抜取検査結果 ( 抜取率 : 特記なき限り 1 ロットにつき 2 本 )

項 目		試 験 条 件	規 格 値	成 績		備 考
引 張 試 験	抗 張 力 (Kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	≥ 49	66.6	67.8	仕 上 げ 加 工 度 54.1 % 歪 取 り 焼 鈍 温 度 460°C × 4H
	耐 力 (Kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 42	53.0	52.1	
	伸 び ( % )		≥ 20	26.8	26.0	
	抗 張 力 (Kg/mm <sup>2</sup> )	343°C	≥ 29	39.9	41.4	
	耐 力 (Kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 23	32.3	33.4	
	伸 び ( % )		≥ 20	29.2	28.4	
内 圧 破 裂 試 験	破 裂 圧 力 (Kg/cm <sup>2</sup> )	Open	≥ 510	740	750	
	周 伸 び ( % )		≥ 20	45.8	48.1	
	破 裂 圧 力 (Kg/cm <sup>2</sup> )	Close	≥ 510	1030	1040	
	周 伸 び ( % )		≥ 5	15.9	17.1	
押 払 げ 試 験		常 温	≥ 15 %	規格に適合	規格に適合	
扁 平 試 験		常 温		-	-	
硬 さ 試 験		常 温		-	-	
金 相 試 験	組 織 お よ び 介 在 物		有害な介在物 なきこと	正 常	正 常	
	結 晶 粒 度	横 断 面	ASTM No. 9 より細粒	No. 12.5	No. 12.5	
		長 手 断 面	ASTM No. 9 より細粒	No. 12.0	No. 12.0	
	水 素 化 物 方 位		Fn(40°) ≤ 0.35	(外) 0 (中) 0.04 (内) 0	(外) 0.04 (中) 0.02 (内) 0	
腐 食 試 験	腐 食 増 量 (Kg/dm <sup>2</sup> )		≤ 22	15.1	18.6	
	表 面 状 況		黒色光沢	良 好	良 好	
製 品 分 析	O (ppm)		900 - 1500	1120	1130	
	H (ppm)		≤ 25	13	14	
	N (ppm)		≤ 80	20	20	
使 用 管 番 号				CW121A	CW233A	



表 3 ジルカロイ - 2 被覆管の寸法および分析値

## 製品全数検査結果

項 目		規 格	成 績	備 考
寸 法	外 径 $mm$	16.46 (+0, -0.08)	規格に適合	
	内 径 $mm$	14.70 ( $\pm 0.05$ )		
	肉 厚 $mm$	$\geq 0.80$		
	長 さ $mm$	4150 (+5, -0)		
超 音 波 探 傷		深さ 80 $\mu$ , 長さ 0.86 $mm$ , 巾 50 $\mu$ の標準試験片からの欠陥信号をこえる欠陥信号のないこと。	規格に適合	
真 直 度		1/1200 以下局部捩れのないこと	規格に適合	
表 面	外 観	詳細仕様書参照	規格に適合	
	粗 さ	JIS 3S 以下	規格に適合	
真 円 度		$\leq 0.10 mm$	規格に適合	

## 化学成分分析値 (使用鋳塊の頭部 (T) 中央部 (M) 底部 (B) についての分析値)

項 目	規格値	成 績			備 考	
		T	M	B		
合 金 元 素 (%)	Sn	1.20-1.70	1.49	1.45	1.43	鋳塊番号 1220 (CW)
	Fe	0.07-0.20	0.15	0.15	0.15	
	Cr	0.05-0.15	0.10	0.10	0.09	
	Ni	0.03-0.08	0.07	0.06	0.06	
	Fe+Cr+Ni	0.18-0.38	0.32	0.31	0.30	
不 純 物 元 素 (ppm)	Al	$\leq 75$	50	48	47	
	B	$\leq 0.5$	0.2	0.2	0.2	
	Cd	$\leq 0.5$	$< 0.2$	$< 0.2$	$< 0.2$	
	C	$\leq 270$	80	70	70	
	Co	$\leq 20$	$< 5$	$< 5$	$< 5$	
	Cu	$\leq 50$	10	10	10	
	Hf	$\leq 100$	72	75	72	
	Mn	$\leq 50$	$< 10$	$< 10$	$< 10$	
	Si	$\leq 120$	30	30	30	
	Ti	$\leq 50$	10	10	10	
	W	$\leq 100$	$< 10$	$< 10$	$< 10$	
	U	$\leq 3.5$	$< 1$	$< 1$	$< 1$	
	Pb	$\leq 130$	5	5	5	
	Cl	$\leq 20$	$< 10$	$< 10$	$< 10$	
Ca	$\leq 30$	$< 10$	$< 10$	$< 10$		
Mg	$\leq 20$	1	1	1		

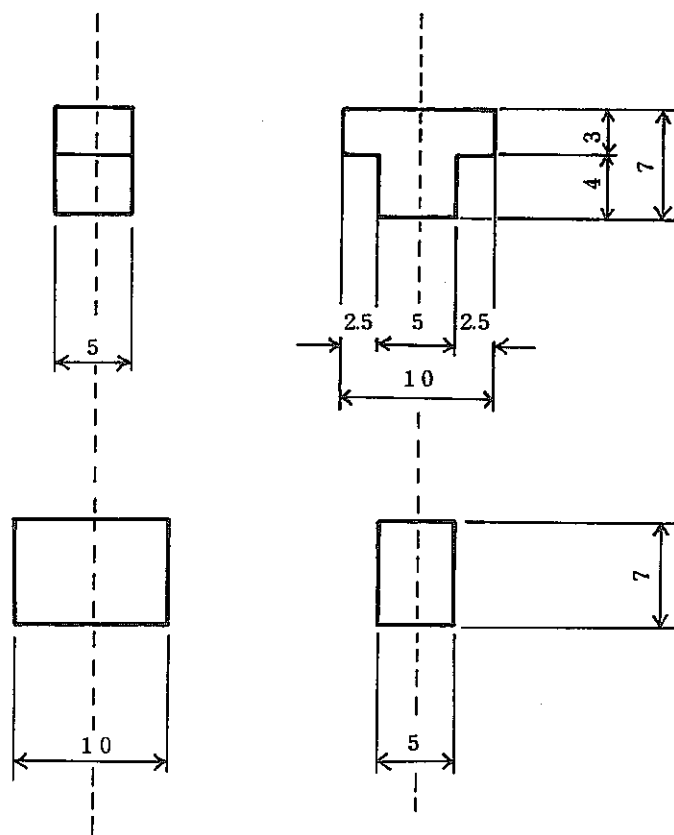


図1 ジルカロイ-2 矩形試料

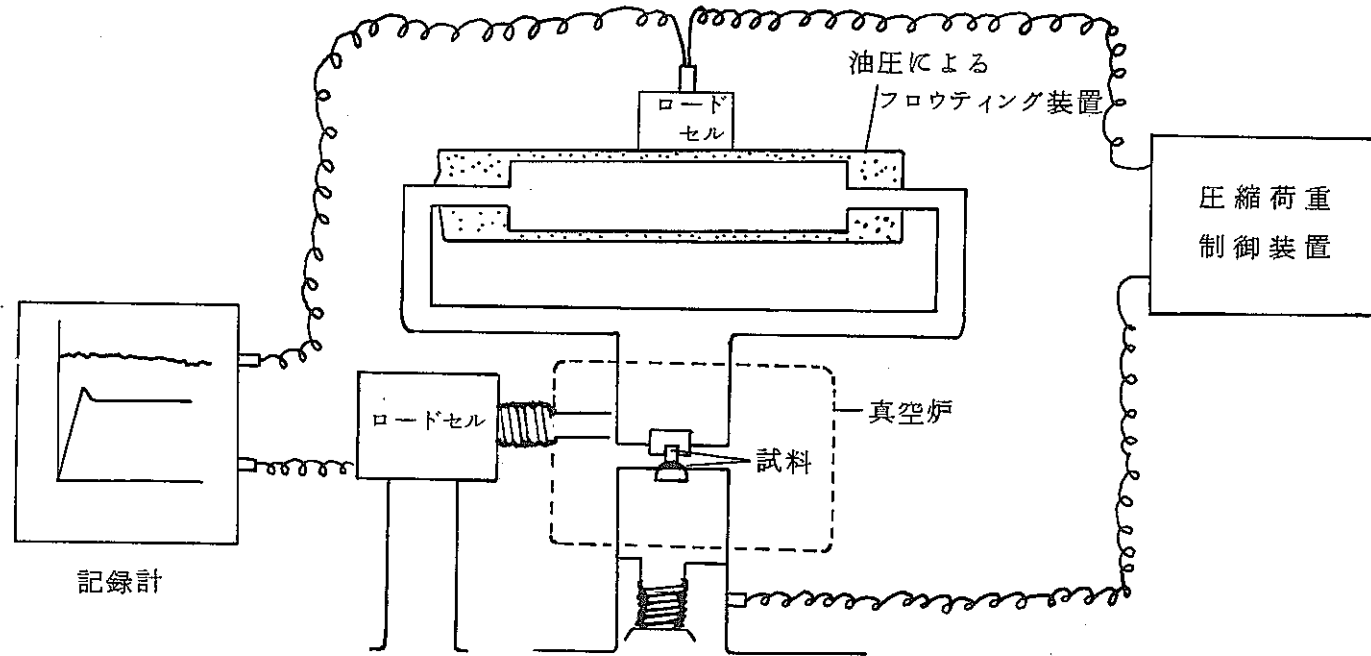


図2 摩擦測定装置概要図

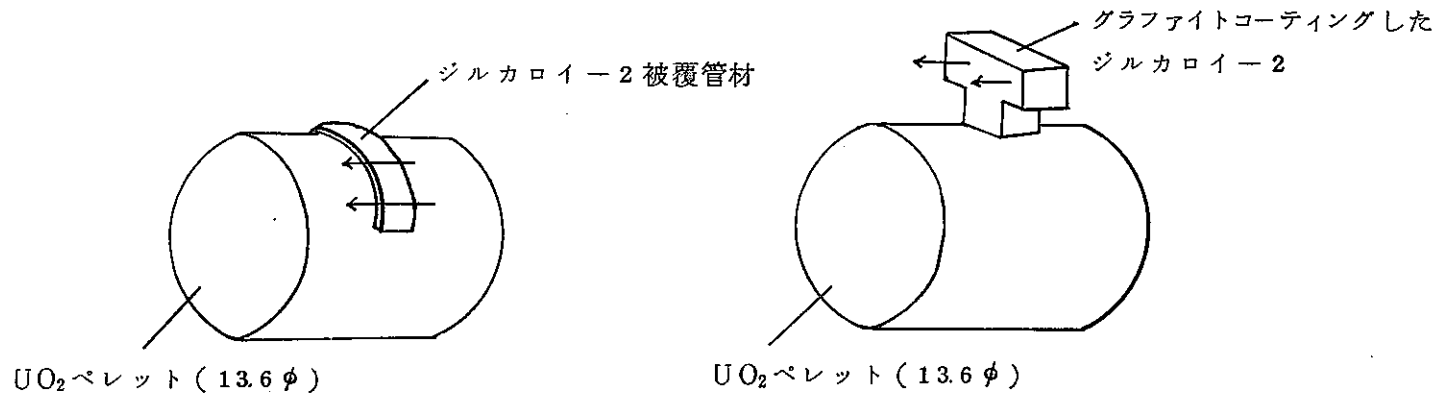


図 3 摩擦係数測定試料

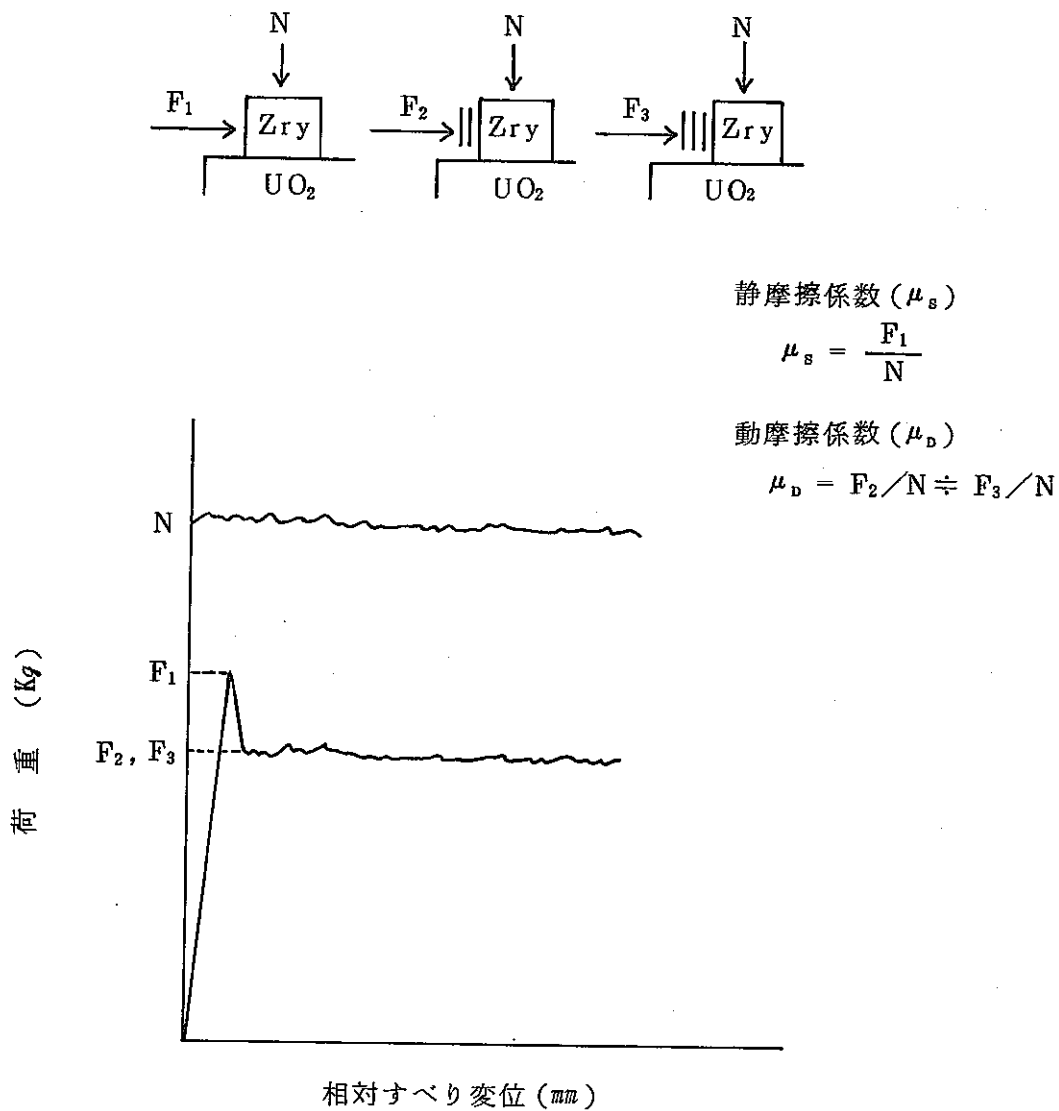


図 4 摩擦係数測定原理図

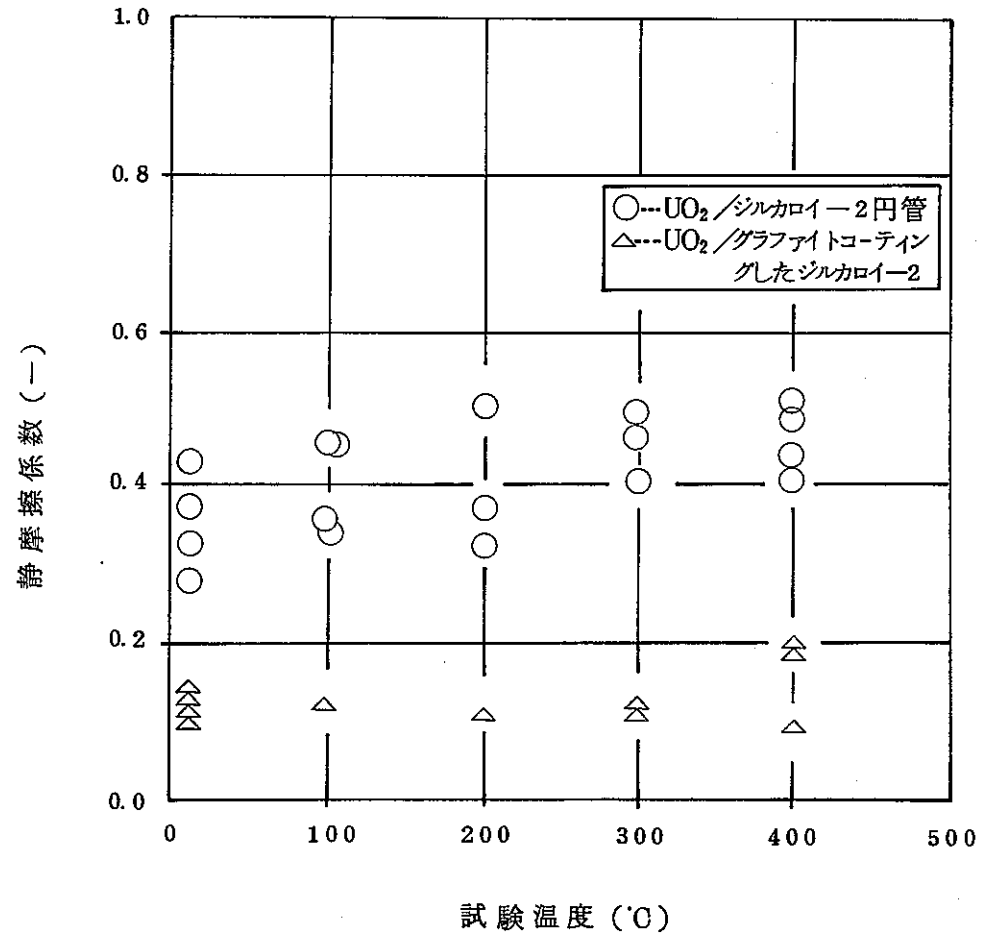


図5 UO<sub>2</sub>ペレットとジルカロー-2との間の摩擦係数の温度による変化

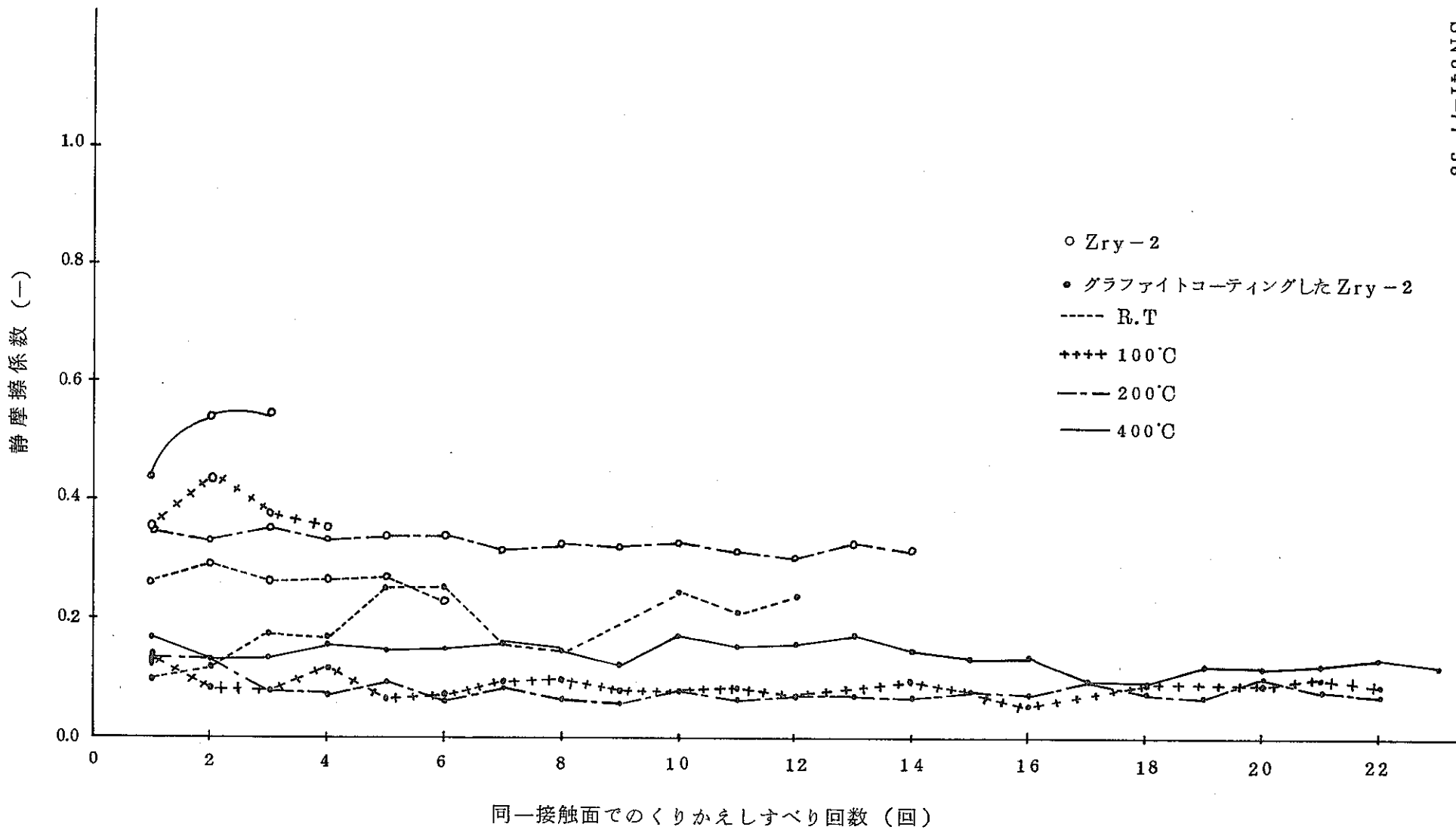


図6 摩擦係数と同一接触面でのくりかえしすべり回数との関係

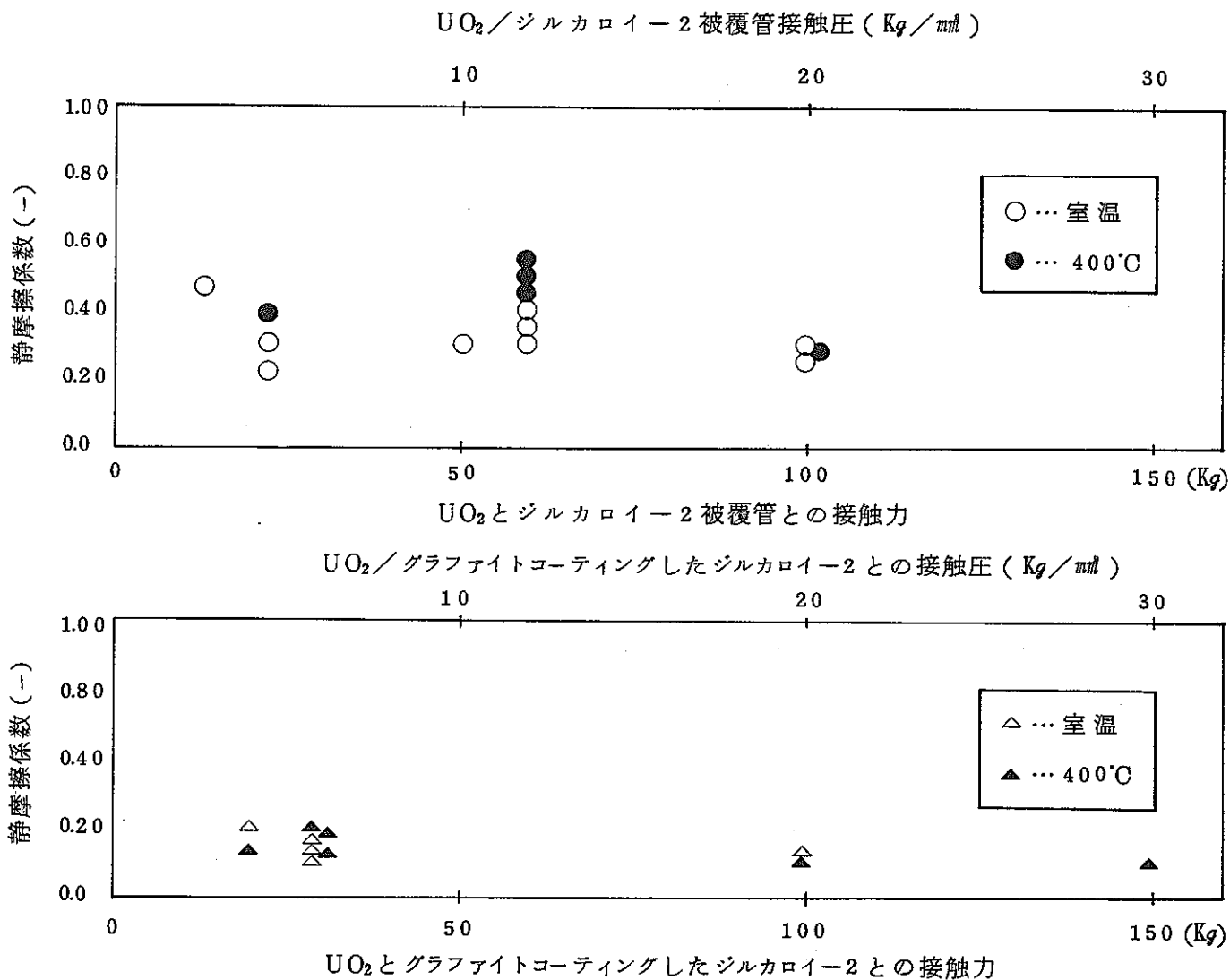


図7 UO<sub>2</sub>とジルカロイ被覆管機との間の接触圧と摩擦係数



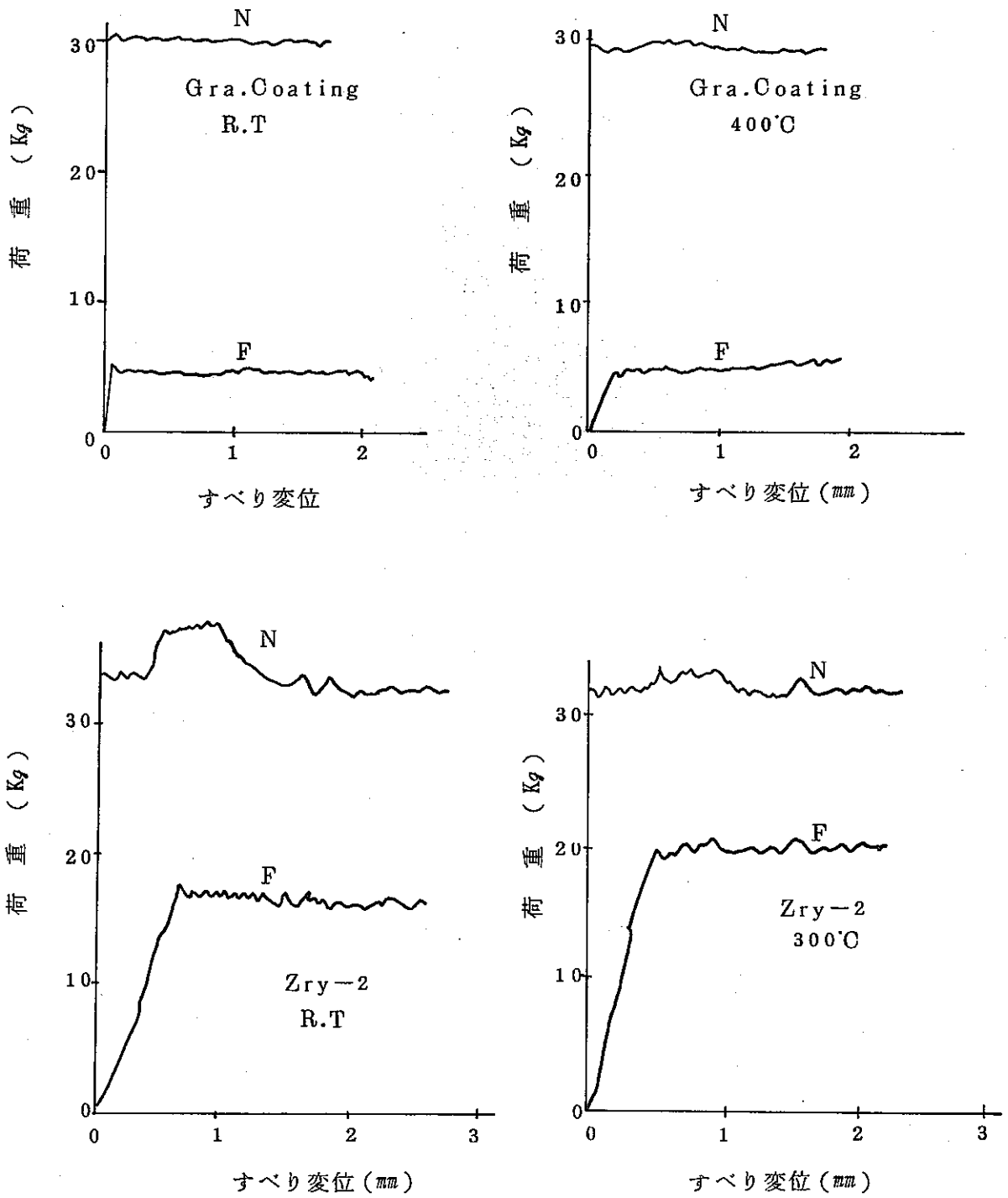


図8 Zry-2/UO<sub>2</sub> 摩擦係数測定データ (修正後)

(典型的なデータ例)

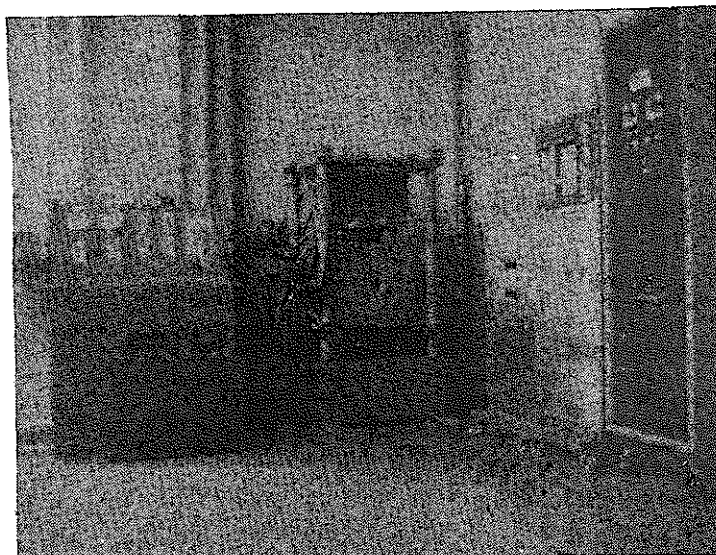
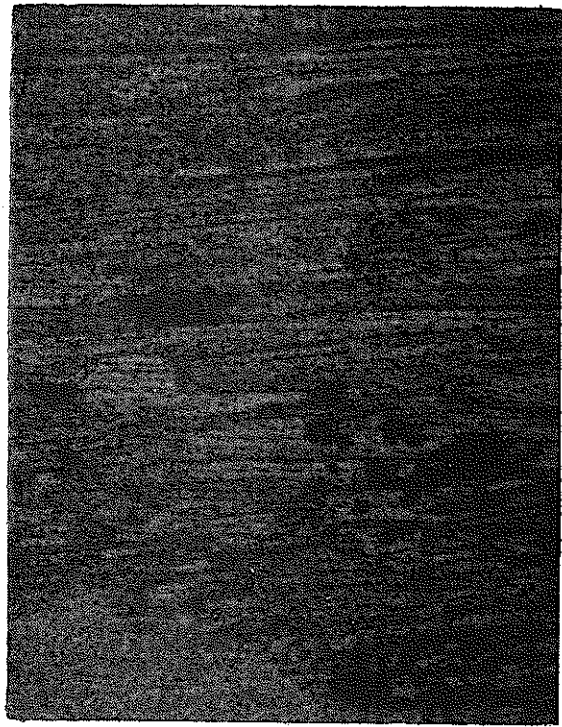
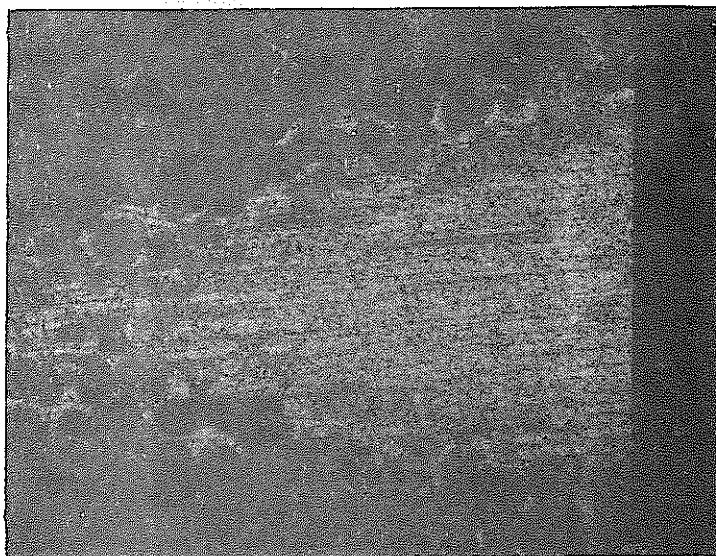


写真1 摩擦係数測定装置



X100

写真2 Zry - 2 円管 /  $UO_2$  ペレット  
200°C で摩擦試験後の Zry - 2  
円管の摩擦痕



×100

写真3 UO<sub>2</sub>/グラファイトコーティング  
したZry-2, 400°Cで摩擦試験後  
のグラファイトコーティングした  
Zry-2の摩擦痕