

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>ペレット燃料のクリープ挙動

Compressive Creep of UO<sub>2</sub> Pellet Fuels

1972年6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

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

<技術レポート>

UO<sub>2</sub>ペレット燃料のクリープ挙動



|       |       |                  |
|-------|-------|------------------|
| 実施責任者 | 小泉 益通 | プルトニウム<br>燃料部開発課 |
| 報告者   | 立花 利道 | 〃                |
|       | 山田 一夫 | 〃                |
|       | 小松 純治 | 〃                |

期 間 1971年4月～1972年3月

目 的 UO<sub>2</sub>ペレット燃料の圧縮クリープを測定し、燃料挙動解析コードに組み込む燃料  
クリープモデルの確立

要 旨 燃料の変形を解析する場合、高温においては弾性論では取り扱いきれなくなり  
塑性論で処理しなければならない。( Fig.1, 2 参照 )

燃料挙動解析に使用する塑性変形モデルとしてクリープモデルが使用されている  
のが大勢を占めている。この方法は原子炉の運転の中で過渡状態の場合の使用に  
やや難点があるが解析コードへの組み込みが容易であるため各国の計算コードは  
この方法を採用している。

クリープモデルは最近いろいろのモデルが提案されるようになってきたがデー  
ターとして一貫性がなく、また実験方法も多種である。したがって独自の実験によ  
ってクリープモデルを確立する必要があるため本実験が行なわれた。

この結果、UO<sub>2</sub>についてのクリープ実験を行ない、定常状態におけるクリープモデ  
ルを確立したので報告する。

また混合酸化物燃料 ( PuO<sub>2</sub> - UO<sub>2</sub> ) のPu含有量の変化の項があるクリープモ  
デルは現在各国のどのコードにもないのでこのモデルの確立についても試みた。

UO<sub>2</sub>ペレット燃料のクリープ挙動

目 次

|              |   |
|--------------|---|
| 1. 序         | 1 |
| 2. クリープモデル   | 2 |
| 3. 測定装置と測定方法 | 2 |
| 4. 測定結果      | 3 |
| 5. 考 察       | 4 |
| 6. 結 言       | 4 |
| 7. あとがき      | 5 |
| 8. 参考文献      | 6 |

1. 序

原子炉内での燃料の変形速度(クリープ速度)は下記の因子に作用されるといわれている<sup>1), 2)</sup>。

( Fig. 2 参照 )

- (1) 応力 : 燃料ピン内のガス圧, 被覆材などによって生ずる応力によってクリープ速度は速くなる。
- (2) 温度 : 燃料の温度上昇とともにクリープ速度は高まる。
- (3) 密度 : 燃料のクリープ速度は燃料密度の増加とともに低下する。
- (4) O/M 比 : O/M 比が 2.00 に近づくと燃料のクリープの活性化エネルギーが増加してクリープ速度が低下する。<sup>14)</sup>
- (5) 結晶粒径 : 結晶粒径が大きくなるとクリープ速度は低下する。
- (6) 中性子束 : 中性子によって燃料のクリープ速度は大きくなる。
- (7) Pu 濃度 : UO<sub>2</sub> 中への Pu 濃度の増加はクリープ速度を高める。

燃料のクリープ変形速度は一般に次式で示される。<sup>1), 2), 3), 4)</sup>

$$\dot{\epsilon}_T = \dot{\epsilon}_H + \dot{\epsilon}_L + \dot{\epsilon}_N \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{\epsilon}_H = A_0 \sigma^n \cdot 1 / (D - D_0) \cdot \exp(-Q_0 / RT) \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{\epsilon}_L = A_1 \sigma^m \cdot 1 / d^2 (D - D_1) \cdot \exp(-Q / RT) \dots\dots\dots(3)$$

$$\dot{\epsilon}_N = B \phi \sigma^m \dots\dots\dots(4)$$

$\sigma$  : 燃料に作用する応力 ( psi )

T : 燃料の温度 ( °K )

D : 燃料の密度 ( % T·D )

Q : 燃料クリープの活性化エネルギー ( cal/mole )

R : 1.986 ( cal/mole/°K )

$\phi$  : 中性子束 ( N/sec/(cm)<sup>2</sup> )

d : 燃料の結晶粒径 (  $\mu$  )

m, n, A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, D<sub>0</sub>, D<sub>1</sub>, B は定数

$\dot{\epsilon}_H$  : 高応力クリープ速度 (  $\Delta l / l / hr$  ) 但し l はペレット長さ

$\dot{\epsilon}_L$  : 低応力クリープ速度 ( " )

$\dot{\epsilon}_N$  : 中性子によるクリープ速度 ( " )

燃料のクリープ変形速度の合計  $\dot{\epsilon}_T$  ( 単位時間当りの変形量 ) は  $\dot{\epsilon}_H$ ,  $\dot{\epsilon}_L$  と  $\dot{\epsilon}_N$  との和で示される。 <sup>10) 12)</sup>

今回は炉外での試験のため  $\dot{\epsilon}_H$ ,  $\dot{\epsilon}_L$  についての測定を行なった。

その結果(2), (3)の  $A_0, A_1, m, n, Q_0, Q_1$  を求め(2), (3)式を完成した。

クリープ速度に対して

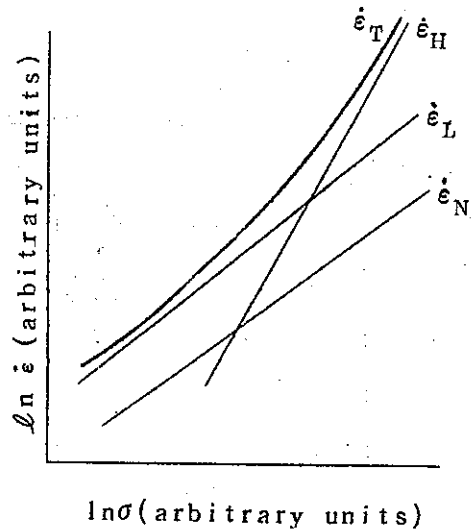
$$\dot{\epsilon}_L \propto \sigma^m \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{\epsilon}_H \propto \sigma^n \dots\dots\dots (6)$$

$m, n$  の値は酸化物燃料についてそれぞれ 1 および 4~5 といわれている。4) 5)

今回は,  $m, n$  の値はクリープ速度を測定することによって求めた。

同時に試料の密度, 結晶粒径および製造条件が同一のものを使用してクリープ速度を測定し,  $Q_0, Q_1$  を測定した。



## 2. クリープモデル

燃料クリープ速度  $\dot{\epsilon}$  は  $\sigma, T, O/M, d, \phi$  のうち  $d, \phi$  は一定にして  $\sigma, T$  を加えクリープ試験によって測定した。従ってクリープモデルを作成するにあたり, クリープ速度の  $O/M$  比, 密度, 結晶粒による依存性は他の報告者のデータを使用した。1), 7) 本実験では  $m, n, Q_0$  および  $Q_1$  を測定した。 $O/M$  比のクリープ速度におよぼす影響については Bohaboy and Evans のデータを使用した。このデータを  $Q$  と  $O/M$  との関係に計算しなおし Fig. 3 に示した。

Fig. 3 より次式がえられた。

$$Q_0 = -150620 \times (O/M) + 218340 \text{ (cal/moel)} \dots (7)$$

$$Q_1 = 443020 \times (O/M) - 949000 \text{ (cal/moel)} \dots (8) \text{ 但し } O/M \leq 2.00$$

また密度の影響については Fig. 4 のデータ (Bohaboy and Evans)<sup>10)</sup> および ANL-LIFE-1 コードのデータを使用した。

## 3. 測定装置と測定方法

クリープ試験には試料として天然ウラン酸化物を使用した。

試料は円柱状焼結ペレットであり 5.5 mm  $\phi$  10.0 mm H である。

試料の化学組成および製造条件をそれぞれ Table 1, 2 に表す。試験は圧縮クリープ法を使用した。

クリープ試験機の概略図を Fig. 5 に示す。

試料をタングステン押し棒にのせ, 約  $10^{-5}$  torr まで炉内を真空にし, タンタル発熱体によって試料の温度を所定の温度にした。

昇温速度は約 100 °C/min であった。炉内が所定の温度に到達してから試料の温度、熱膨張が一定にさせるため約 50 分間保持しその後試料に所定の一定荷重をかけ時間と試料の変形状態を差動トランスによって測定記録した。

炉内の試料の温度は熱電対 (PR 20-40) を試料の近傍に置きこれによって測温した。( Fig. 5 参照 ), 炉内温度は P I D 制御によって ± 5 °C の精度で保持した。

クリーブ試験は 1000 ~ 1700 °C の温度範囲で応力 1,000 ~ 25,000 psi で行った。

クリーブの活性化エネルギー (  $Q_0, Q_1$  ) および応力指数 (  $m, n$  ) は (2) 式および (3) 式を使用して定常クリーブ速度  $\tan \alpha, \tan \beta$  ( Fig. 6 参照 ) から求めた。

#### 4. 測定結果

温度、応力一定にして測定した歪一時間の関係を Fig. 7 ~ 9 に示す。

Fig. 7 ~ 9 の歪一時間図から定常のクリーブ速度 (  $cm/cm/hr$  ) を測定した。これを応力および温度とともにそれぞれ Fig. 10, 11 に示す。

Fig. 16, は高応力クリーブであり Fig. 17, は低応力クリーブの測定結果である。

応力とクリーブ速度の関係は同一曲線上に載った。これを 1300 °C の例として Fig. 12 に示す。

また、定常クリーブ速度はアレニウムプロットすると Fig. 13, 14 に示す通り直線に載った。

応力因子  $m, n$  の値は (2), (3) 式を使用して Fig. 10, 11, 12 のデータから求めた。

使用した式は次の通りである ( Fig. 6-1 参照 )

$$m, n = \frac{\ln(\tan \beta_2 / \tan \beta_1)}{\ln(\sigma_1 / \sigma_2)} \dots \dots \dots (9)$$

但し  $\tan \beta_1, \beta_2$  は  $\dot{\epsilon}$  に相当する。

同様に活性化エネルギー  $Q_0, Q_1$  は (2), (3) 式を使用して求めた。( Fig. 6-2 参照 )

$$Q_0, Q_1 = (R T_1 T_2 / T_1 - T_2) \ln(\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2) \dots \dots (10)$$

$Q_0, Q_1$  の測定、計算結果は Fig. 15, 16 に示した。

また  $UO_2$  ペレットのクリーブ試験後の電顕写真および光学顕微鏡写真を示す。

( photo 1, 2 )

photo 1, 2 に見られるようにクリーブ試験によって結晶粒界の上りおよび結晶粒分離が生じた。これは  $UO_2$  のクリーブがナバローヘリングクリーブにもとづくものと考えられる。

photo 1 にみられるようにクリーブの変形は主に粒界のすべりおよび結晶粒の分離によつ

て生じている。結晶粒内にもり線が観察されるが粒界近傍に多く見られることからナバローヘリングクリープ（空孔の流れによる変形論）が生じたと思われる。

## 5. 考 察

本実験で得られたクリープモデルは  $UO_2$  についてのみであるが、このモデルを使用して  $PuO_2-UO_2$  のクリープモデルを類推してみた。

ところで混合酸化物 ( $PuO_2-UO_2$ ) のクリープモデルを確立するためには次のクリープ実験が必要である。Pu 含有量、O/M 比、密度、結晶粒径を変化させた試料を使ってクリープ実験を行なわなければならない。

Pu 含有量を変化させて行ったクリープ試験結果の  $dQ/dW$  を本実験結果<sup>8)</sup> に使用して Pu の含有量変化のクリープ速度におよぼす影響を推定した。但し Q はクリープの活性化エネルギーで W はプルトニウム重量百分率である。

また O/M 比についても同様に  $dQ/dS$  のデータ<sup>10)</sup> を実験にとり入れた。（但し S は O/M 比である）また密度の影響については LIFE-1 などで使用している定数を使用した。これらの結果次の関係式をえることができた。

応力クリープ範囲では

$$Q_0 = 264.0 \times (PuW/o) - 150020 \times (O/M \text{比}) + 218340.0 \dots (11)$$

低応力クリープ範囲では

$$Q_1 = 165.7 \times (PuW/o) + 443020 \times (O/M \text{比}) - 949000.0 \dots (12)$$

（単位 cal/mole） 但し  $O/M \leq 2.00$

また電顕写真で明らかにしたように  $UO_2$  のクリープはナバローヘリングクリープ（空孔の流れによる変形論）にもとづくものとして結晶粒径の影響は次の関係式とすることができ

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{1}{d^2} \dots (13)$$

## 6. 結 言

$UO_2$  ペレットを  $1000 \sim 1700^\circ C$ 、 $1,000 \sim 25,000 \text{ Pis}$  の範囲で炉外クリープ実験を行った結果以下のとおり要約される。

- (1) 定常クリープ速度の応力指数は高応力クリープ範囲で  $n = 4.0$ 、低応力範囲で  $n = 1.1$  であった。
- (2) 定常クリープ速度でのクリープの活性化エネルギーは  
高応力クリープで  $Q_0 = 83200 \pm 10000 \text{ cal/mole}$  で  
低応力クリープで  $Q_1 = 58530 \pm 10000 \text{ cal/mole}$  であった。



- (3) 照射中に燃料の組織変化に逐次対応して自動的に計算できるように本実験でえられた  $Q_0$ ,  $Q_1$  を使用して  $Pu$  濃度変化および  $O/M$  変化によるクリープ依存性が推定された (11), (12) 式参照
- (4) クリープ試験後の試料を電顕および光学顕微鏡で観察した結果, 結晶粒のすべりおよび結晶粒分離がみられナローヘリングクリープ機構にもとづくことがわかった。
- (5) 緒言(1)~(4)をもとにして次に示すクリープモデルが確立した。

定常クリープ変形速度

$$\dot{\epsilon}_H = A_0 \sigma^n / (D - D_0) \cdot \exp(-Q_0/RT)$$

$$\dot{\epsilon}_L = A_1 \sigma^m / d^3 (D - D_1) \cdot \exp(-Q_1/RT)$$

$$A_0 = 5.77 \times 10^{-6}$$

$$A_1 = 3.74 \times 10^4$$

$$n = 4.0$$

$$m = 1.1$$

$$D_0 = 85.71$$

$$D_1 = 87.70$$

$$Q_0 = 264.0 \times (PuW/o) - 150020 \times (O/M) + 218340.0$$

$$Q_1 = 165.7 \times (PuW/o) + 443020 \times (O/M) - 949000.0$$

このクリープモデルを使用して, 種々の炉の運転条件下での定常クリープ速度を計算した結果を Table 3 に示した。

## 7. あとがき

燃料挙動解析に塑性変形として定常クリープモデルを使用するが炉が定常状態の場合に充分生かされると考えられる。

しかし炉の非定常の場合とくに応力が急上昇するとき定常クリープ速度による燃料変形計算の見積はこの精度が悪くなると思われる。

これに対処するための一次クリープモデル(あるいは Stress-strain 関係でもよい)を導入する必要がある。これについては各国では未だ着手されていないのが現状である。

この場合, 炉内における Stress-strain<sup>6)</sup> の関係のデータが必要となってくるがこのデータは全くない。炉内でのこの種の測定は現在の技術では不可能に近い。しかし炉内でのクリープデータ(この場合は Strain-time のデータ)と炉外での Stress-strain のデータとの組み合わせ計算によって非定常解析が可能であると考えられる。

今後  $PuO_2-UO_2$  の高温(約 2000°C)のクリープデータを測定してゆくと共に Stress-strain 関係のデータを測定して非定常の燃料挙動解析に組み込める塑性変形モデルを組み上げるつもりである。

また燃料ペレット中のO/Mの変化とプルトニウム移動に対応できるクリープモデルを結言で提示したが現在のところこの種を取り扱った他のモデルは全くないので本提示のモデルの評価はできない。しかし今後プルトニウム含有量およびO/Mを変化させた実験を行ってゆき十分信頼できるモデルにしてゆくつもりである。

## 8. 参考文献

- 1) V.Z.Jankus and R.W.Weeks, ANL-7736(1970)
- 2) O.M.Cox and F.J.Homan, Nucl. Appl. & Tech. 9 (1970) 317-325
- 3) L.R.Keliman and F.A.Rough, Report of Meeting on Methods and Models used to Design Fuel Pin Predict In-Pile Performance. April 8~9, (1970) Germantown
- 4) E.Duncombe, O.M.Friedrich and J.K.Fisher, WAPD-TM-961(1970)
- 5) M.S.Seltzer and A.J.Markworth etc. BMI-1912(1971)
- 6) R.F.Conon, J.T.A.Robert and R.J.Beals, J.of Nucl.Mat. 54(1971) 2
- 7) M.S.Seltzer, A.H.Olauer and B.A.Wilcox, SIXTH US-JAPAN INFORMATION EXCHANGE MEETING ON CERAMIC NUCLEAR FUELS (1970) oct, 12-15
- 8) M.S.Seltzer, J.S.Perrin, A.H.Olauer and B.A.Wilcox, BMI-1906(1971)
- 9) J.S.Perrin and R.D.Wilson, Topical Report BMI-1899(1971)
- 10) P.E.Bohaboy, R.R.Asamoto and A.E.Coti, GEAP-10054(1969)
- 11) W.M.Armstrong, W.R.Irvine and R.H.Martinson, J.of Nucl.Mat. 7 (1962) 2
- 12) O.D.Slagle, Quarterly Progress Report BNL-1279, Feb.1970
- 13) T.G.Langdom, J.of Nucl.Mat. 38(1971) 88-92
- 14) P.E.Bohaboy and S.K.Evans, SIXTH US-JAPAN INFORMATION EXCHANGE MEETING ON CERAMIC NUCLEAR FUELS (1970) Oct. 12-15

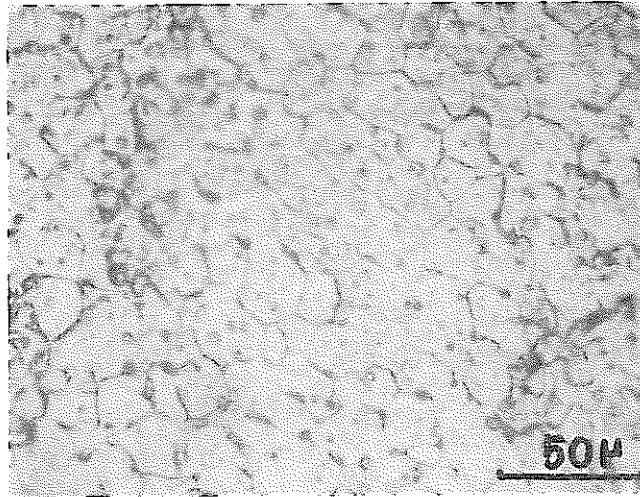


Photo 1. Photomicrograph showing grain separation in sample. Tested at 1600°C under a stress of 5000 psi.



Photo 2. Electron micrograph showing grain separation(↑) and slip line(↑) in sample. Tested at 1300°C under a stress of 12,000 psi.

Table 1. Impurity content of fabricated  $\text{UO}_2$  creep specimens

| Impurity  | Impurity content (ppm by weight) |
|-----------|----------------------------------|
| Aluminium | 13                               |
| Boron     | < 0.1                            |
| Calcium   | 1.5                              |
| Chromium  | < 8                              |
| Iron      | 35                               |
| Magnesium | < 2                              |
| Nitride   | < 10                             |
| Nickel    | < 10                             |

Table 2. Physical characteristics of  $\text{UO}_2$  creep specimen

| Sintering conditions   | Shape of specimen                                  | O/M, Grain size  | Density   |
|--|--|------------------|-----------|
| 1500°C × 4 hr<br>Atmosphere $\text{H}_2$ 75%<br>$\text{H}_2$ 25% | Cylindrical pellet<br>5.5 mm dia.<br>10.0 mm high. | 2.0 10, 17 $\mu$ | 94.4% T.D |

Table 3. MIXED OXIDE FUEL PELLET STEADY STATE CREEP RATE CALCULATION

| TEMP(C) | DENSITY(%TD) | STRESS(PST) | O/M RATIO | PLUTONIUM(W%) | GRAIN DIA | HENKEI SOKUDO(IN/IN/H) |
|---------|--------------|-------------|-----------|---------------|-----------|------------------------|
| 20000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.647E-01              |
| 19000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.306E-01              |
| 18000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.135E-01              |
| 17000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.548E-02              |
| 16000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.202E-02              |
| 15000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.666E-03              |
| 14000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.192E-03              |
| 13000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.476E-04              |
| 12000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.974E-05              |
| 11000   | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.159E-05              |
| 20000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.929E 00              |
| 19000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.437E 00              |
| 18000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.192E 00              |
| 17000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.772E-01              |
| 16000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.282E-01              |
| 15000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.921E-02              |
| 14000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.263E-02              |
| 13000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.641E-03              |
| 12000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.129E-03              |
| 11000   | 93.5         | 20000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.206E-04              |
| 20000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.357E 02              |
| 19000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.168E 02              |
| 18000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.735E 01              |
| 17000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.296E 01              |
| 16000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.108E 01              |
| 15000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.352E 00              |
| 14000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.100E 00              |
| 13000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.244E-01              |
| 12000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.489E-02              |
| 11000   | 93.5         | 50000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.776E-03              |
| 20000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.739E 02              |
| 19000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.348E 02              |
| 18000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.152E 02              |
| 17000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.613E 01              |
| 16000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.224E 01              |
| 15000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.729E 00              |
| 14000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.208E 00              |
| 13000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.505E-01              |
| 12000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.101E-01              |
| 11000   | 93.5         | 60000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.161E-02              |
| 20000   | 88.0         | 10000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.101E 00              |
| 20000   | 88.0         | 20000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.160E 01              |
| 20000   | 88.0         | 30000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.809E 01              |
| 20000   | 88.0         | 40000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.255E 02              |
| 20000   | 88.0         | 50000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.624E 02              |
| 20000   | 88.0         | 60000       | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.129E 03              |
| 20000   | 88.0         | 100000      | 2.0000    | 18.00         | 50.00     | 0.998E 03              |
| 6000    | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.406E-12              |
| 6500    | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.328E-11              |
| 7000    | 93.5         | 10000       | 1.9800    | 18.00         | 20.0      | 0.287E-10              |
| 18000   | 94.4         | 10000       | 1.9000    | 0.00          | 20.0      | 0.612E-01              |
| 18000   | 94.4         | 10000       | 1.9000    | 10.00         | 20.0      | 0.116E 00              |
| 18000   | 94.4         | 10000       | 1.9000    | 20.00         | 20.0      | 0.221E 00              |
| 18000   | 94.4         | 10000       | 1.9000    | 30.00         | 20.0      | 0.419E 00              |
| 18000   | 94.4         | 10000       | 1.9000    | 40.00         | 20.0      | 0.796E 00              |

Fuel Deformation Model

Fuel total strain :  $\epsilon^T$

$$\epsilon_{ij}^T = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^t + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^s \quad \text{---- ( 1 )}$$

All total plastic strain  $\epsilon_{rez}^{Tp} = 0 \quad \text{---- ( 2 )}$

combined with equation (2) gives  
All total strain

$$\epsilon_{rez,j}^T = \epsilon_{rez,j}^{Te} + \epsilon_{rez,j}^{Tt} + \epsilon_{rez,j}^{Ts} \quad \text{--- (3)}$$

Equation (3) gives Hydrostatic stress  $\bar{\sigma}_j = 1/3(\sigma_r + \sigma_e + \sigma_z)$

Using the von Mises Yield criterion, equation (3) gives

Generalized stress :  $\sigma_g \left( \sigma_g = 1/\sqrt{2} \cdot \sqrt{(\sigma_r - \sigma_e)^2 + (\sigma_e - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \right)$

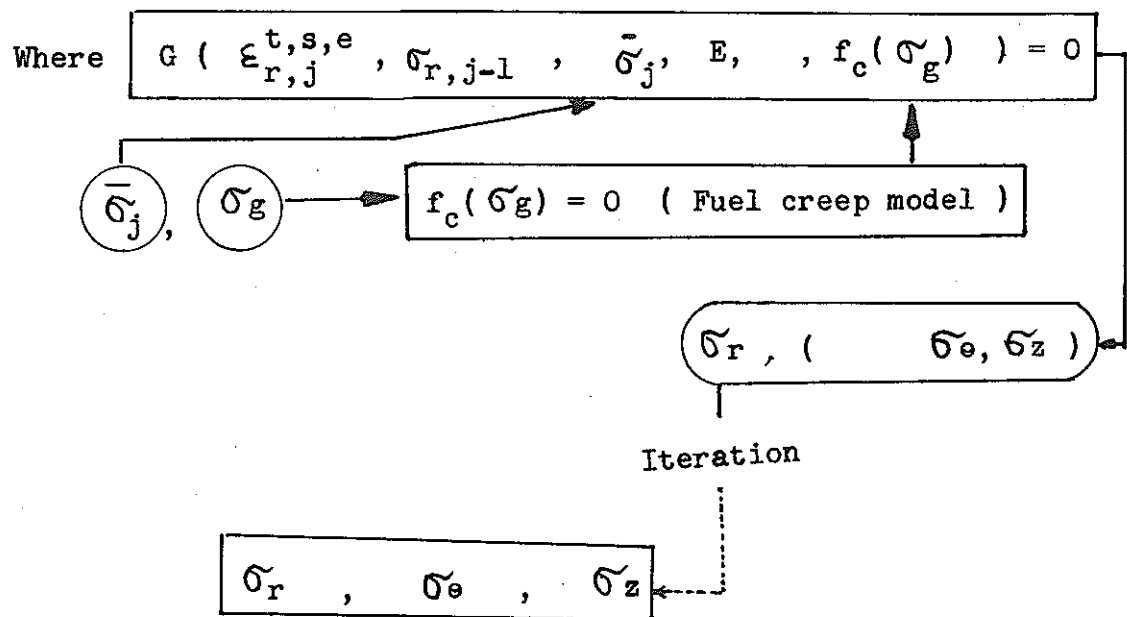


Fig. 1 Fuel Deformation Model.

Total Plastic Creep Strain  $\epsilon = (\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3) \cdot t$

$\dot{\epsilon} = f ( A, \sigma, T, Q, D, d )$

$Q = g ( T, S, C )$

$\dot{\epsilon}$  : Steady State Creep Rate (1/hr )

$\sigma$  : Stress (psi )

T : Temperature ( $^{\circ}$ k)

D : Density ( % t.d )

d : Grain Size ( $\mu$ )

Q : Activation Energy ( cal/mol )

$\phi$  : Neutron Fluence ( f / (cm<sup>2</sup>)(sec) )

C : Plutonium Content (w/o)

S : O/M ratio

A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, E, F, G : Constants

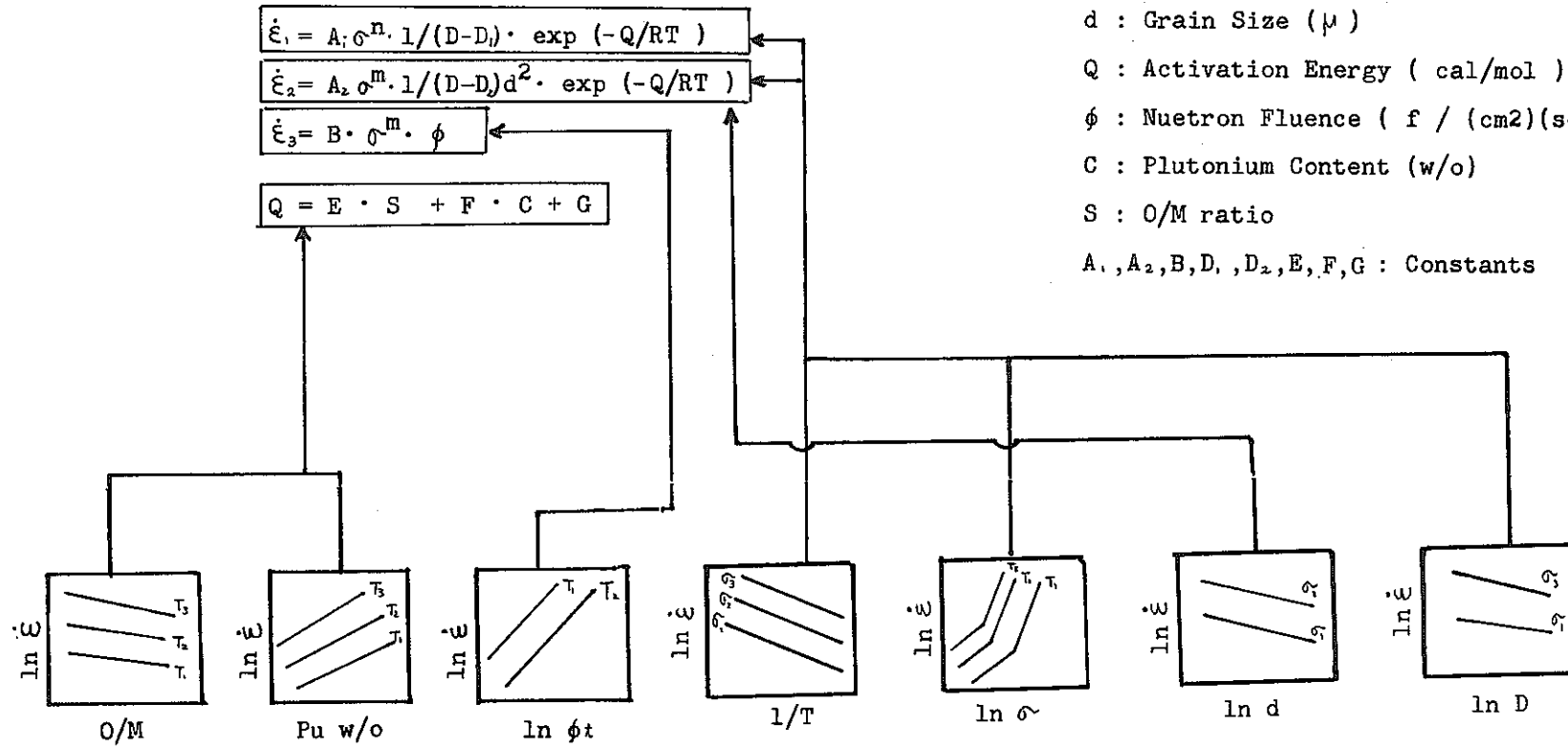


Fig. 2 Fuel Creep Model.

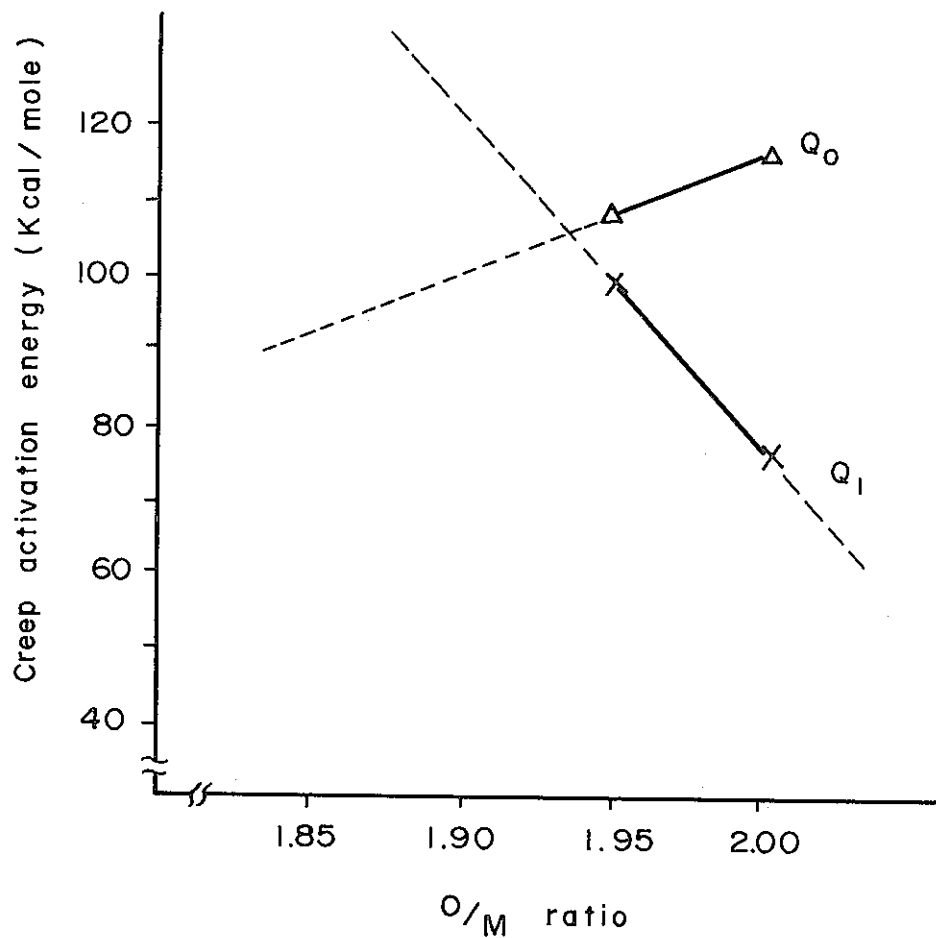


Fig. 3 Activation energy as a function of O/M ratio for  $(Pu_{0.2} U_{0.8})_{1.95}$  and  $(Pu_{0.2} U_{0.8})_{2.00}$  from BOHABOY and EVANS.

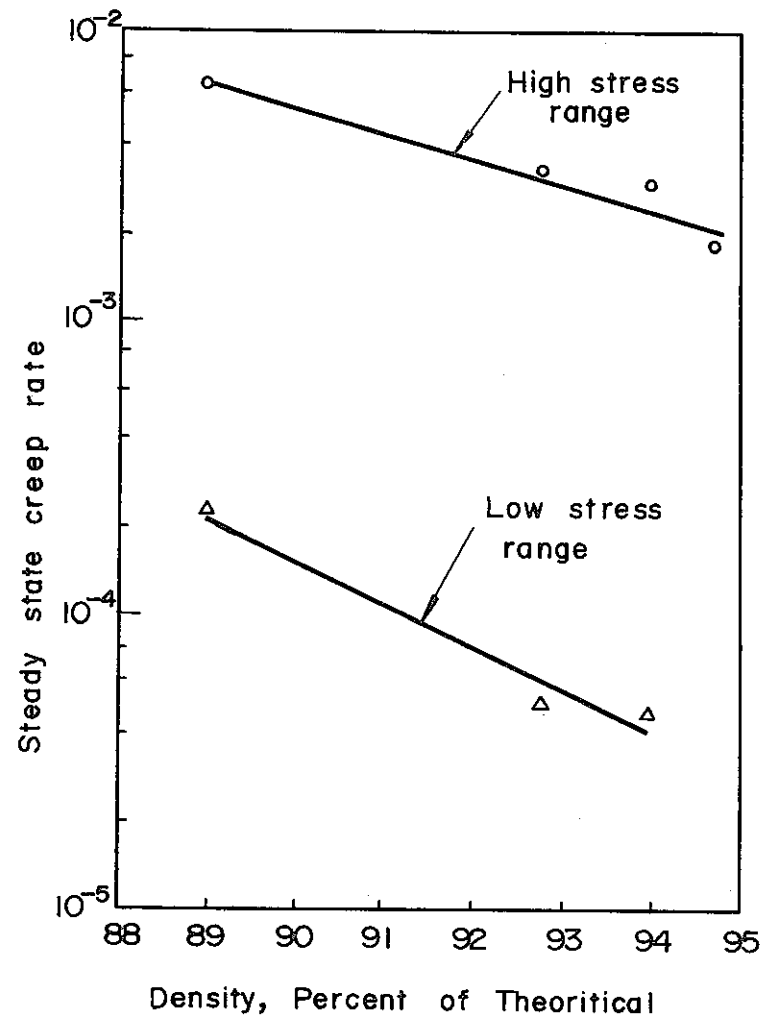


Fig. 4 Steady-state creep rate as a function of Density for  $(Pu_{0.2} U_{0.8})_{1.95}$  Tested in compression from BOHABOY and EVANS.



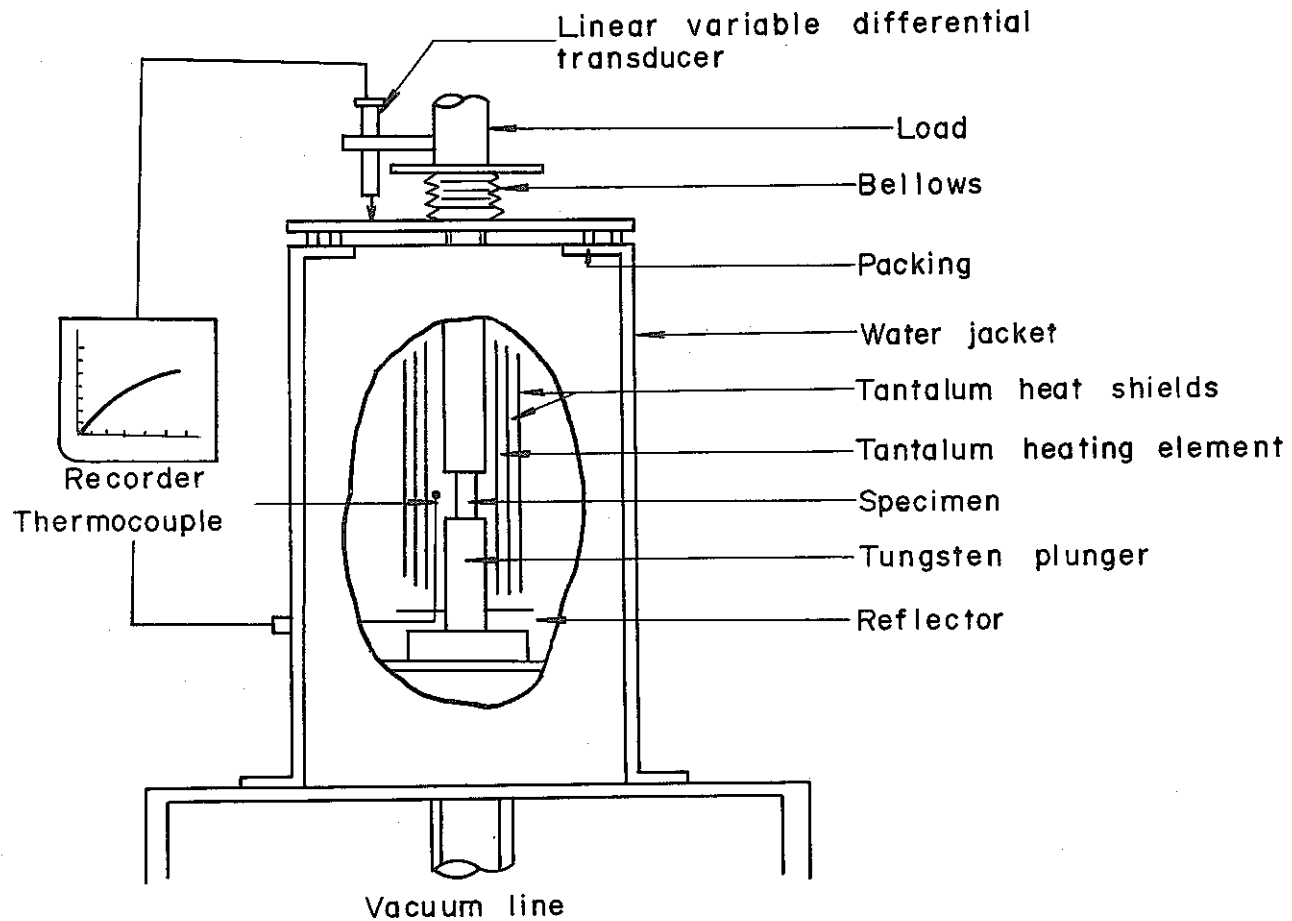


Fig. 5 SCHEMATIC OF THE CREEP TEST APPARATUS.

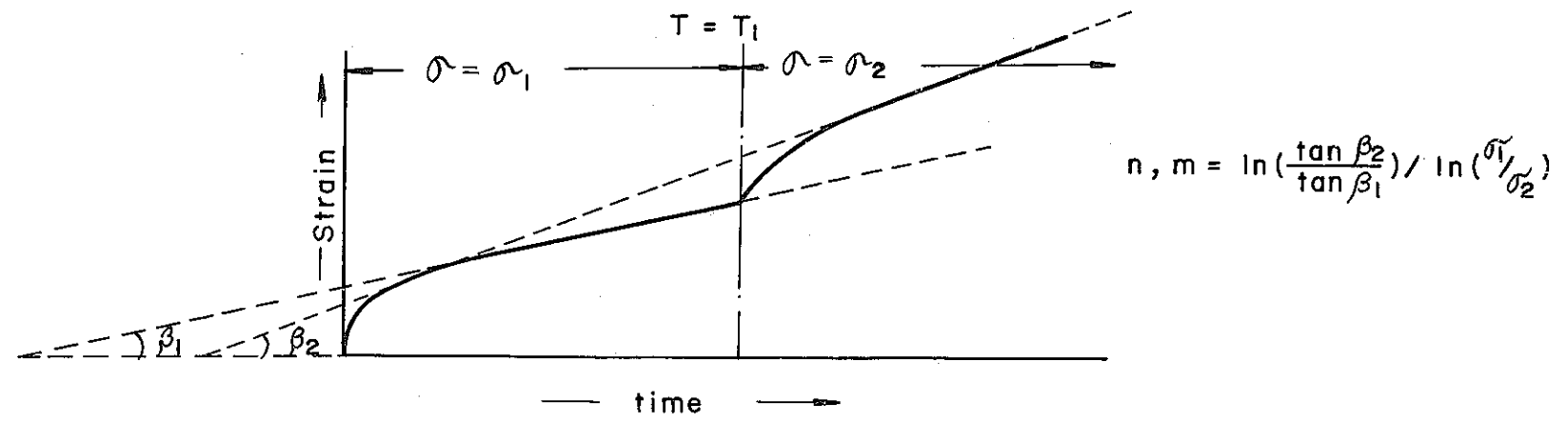
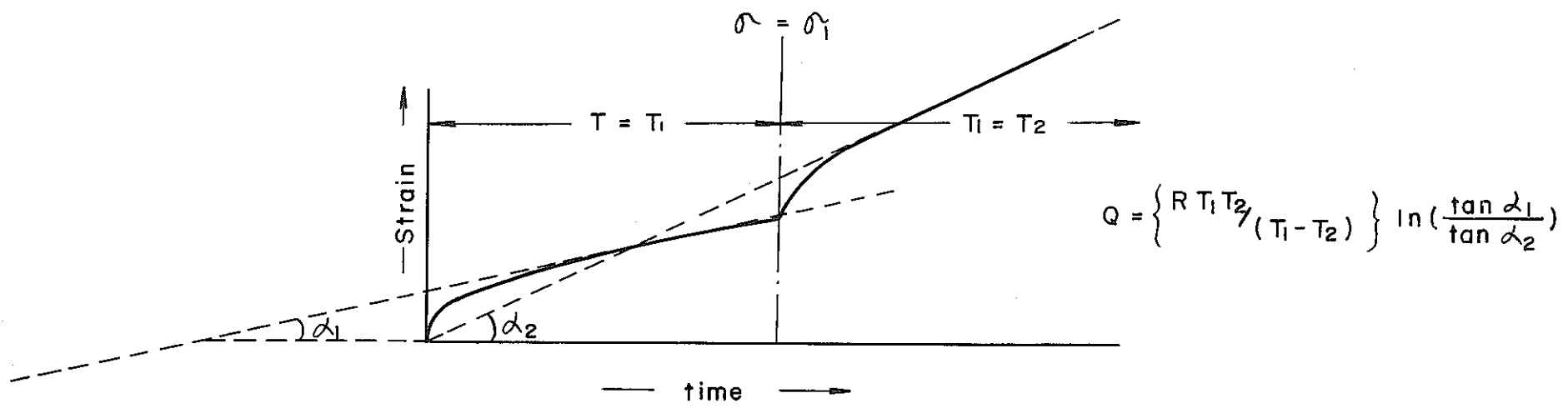


Fig. 6 Creep as a function of time.

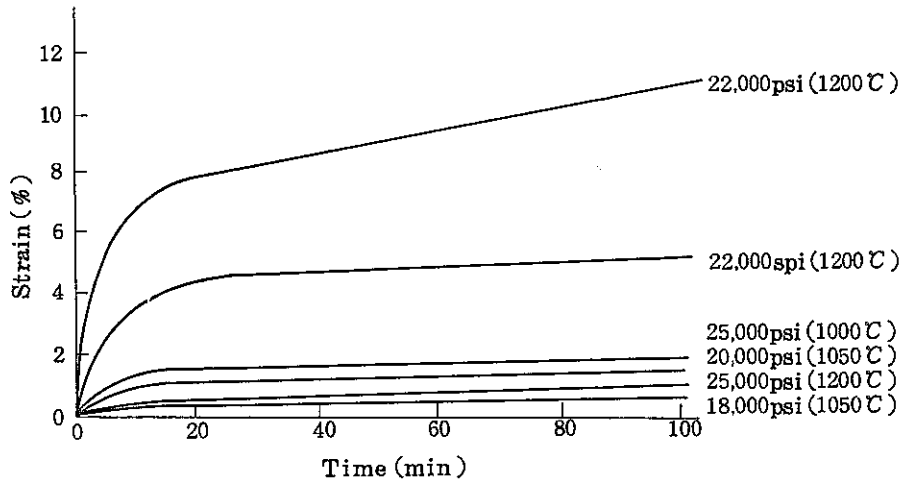


Fig. 7 STRAIN AS A FUNCTION FOR  $UO_2$  PELLETS  
1050~1300°C under 15000 , 18000 , 20000 , 22000 AND 25000psi

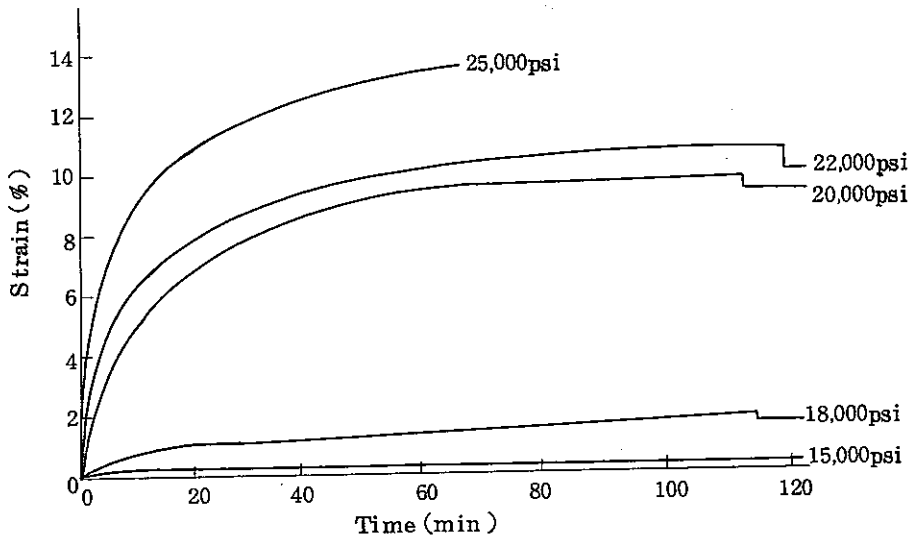


Fig. 8 Strain as a function for  $UO_2$  pellets tested at 1100°C  
under 15000 , 18000 , 20000 , 22000 and 25000psi .

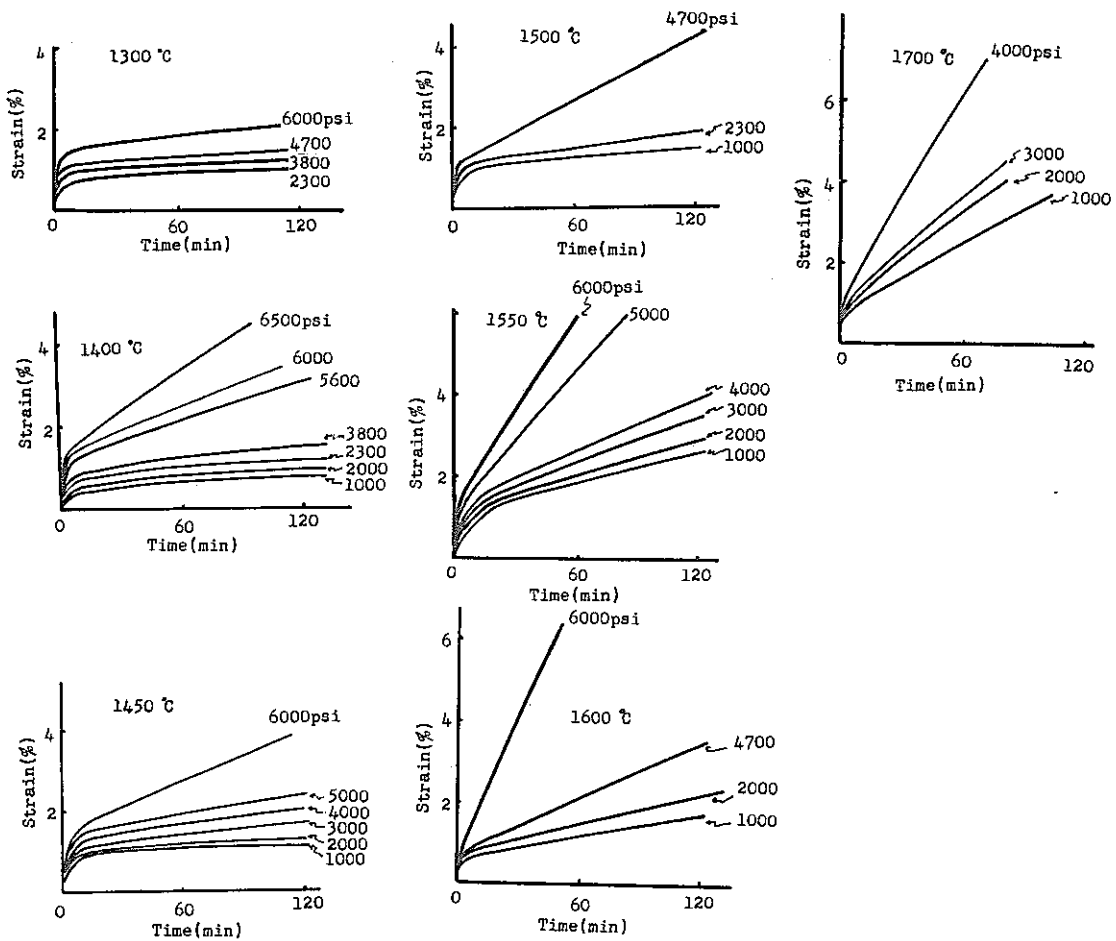


Fig. 9 STRAIN AS A FUNCTION FOR  $UO_{2.1}$  PELLETS TESTED AT 1300~1700 °C UNDER 1000~6000 psi

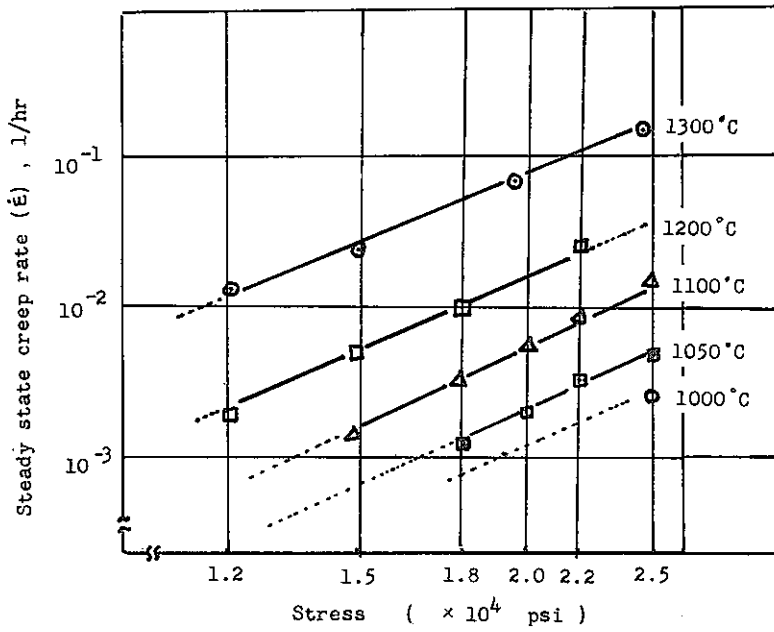


Fig. 10 CREEP RATE AS A FUNCTION OF APPLIED STRESS FOR  $UO_{2.01}$  PELLETS TESTED AT 1000, 1050, 1100, 1200, AND 1300°C.

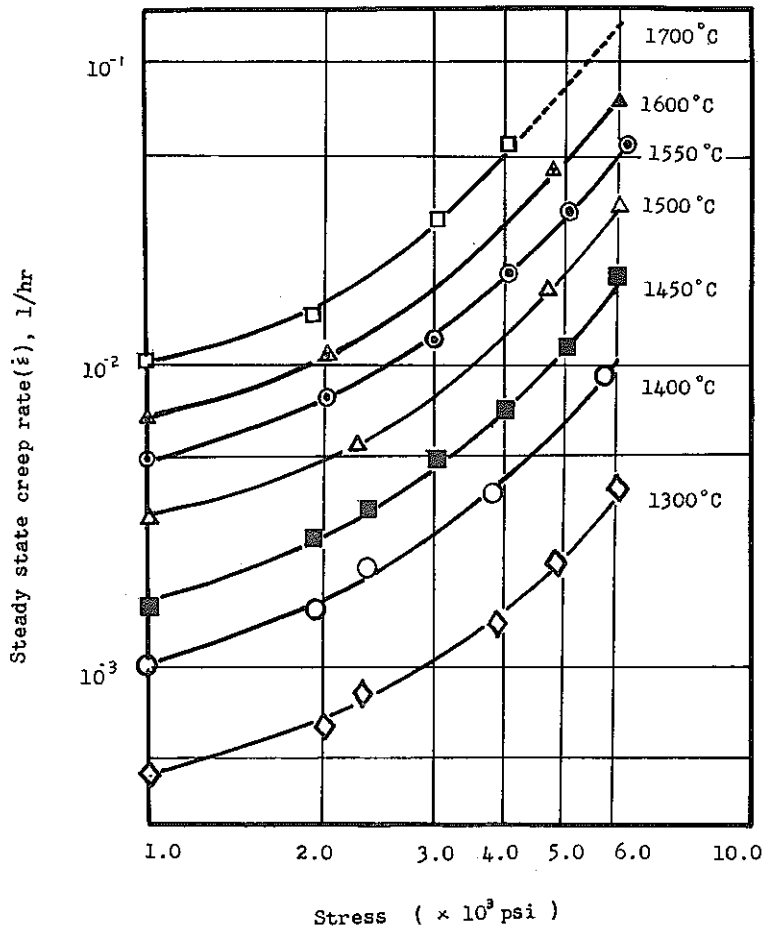


Fig. 11 CREEP RATE AS A FUNCTION OF APPLIED STRESS FOR  $UO_{2.01}$  PELLETS TESTED AT 1300, 1400, 1450, 1500, 1550, 1600 AND 1700°C.

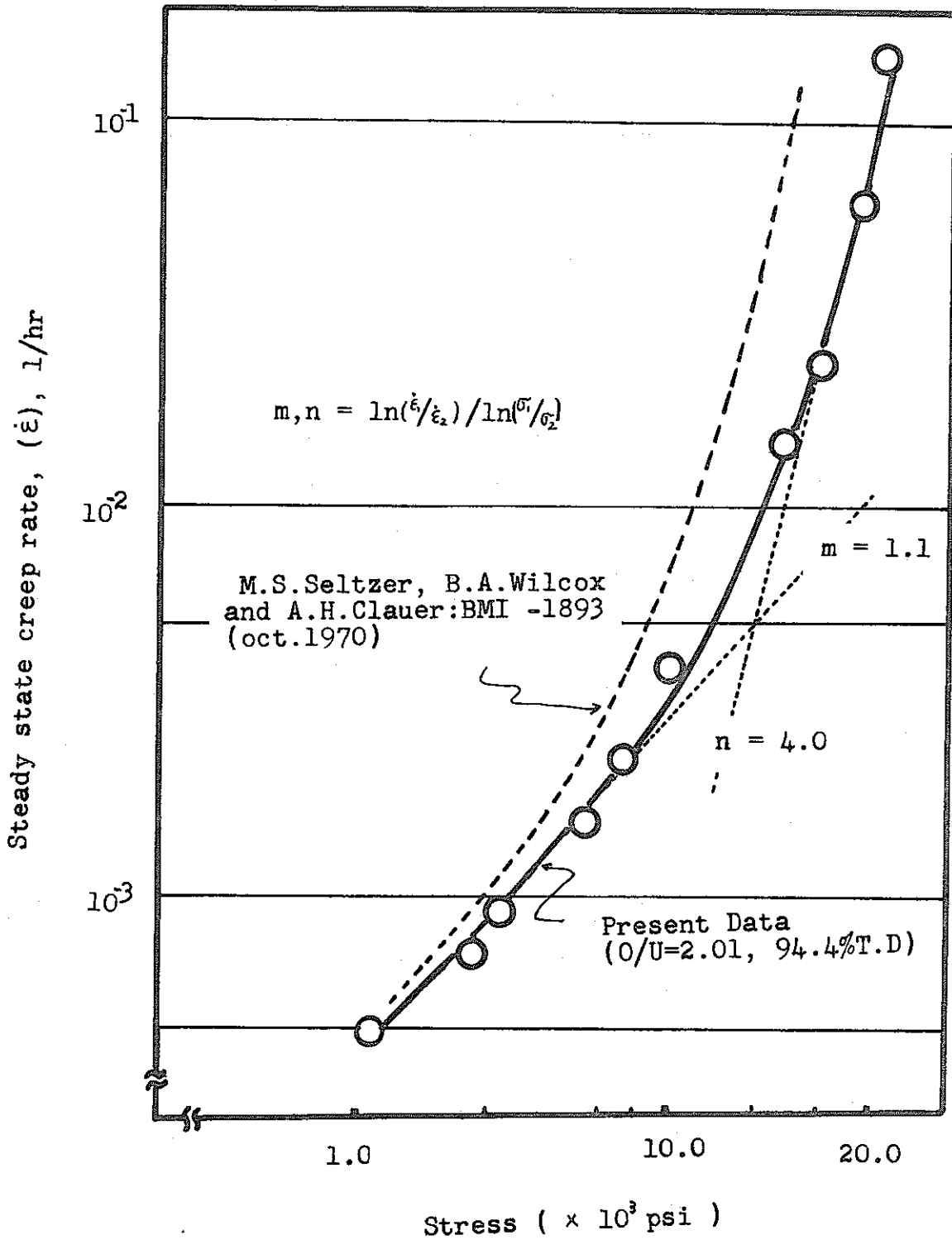


Fig. 12 CREEP RATE AS A FUNCTION OF APPLIED STRESS FOR  $UO_{2.1}$  PELLETS AT 1300°C. (LOW STRESS AND HIGH STRESS).

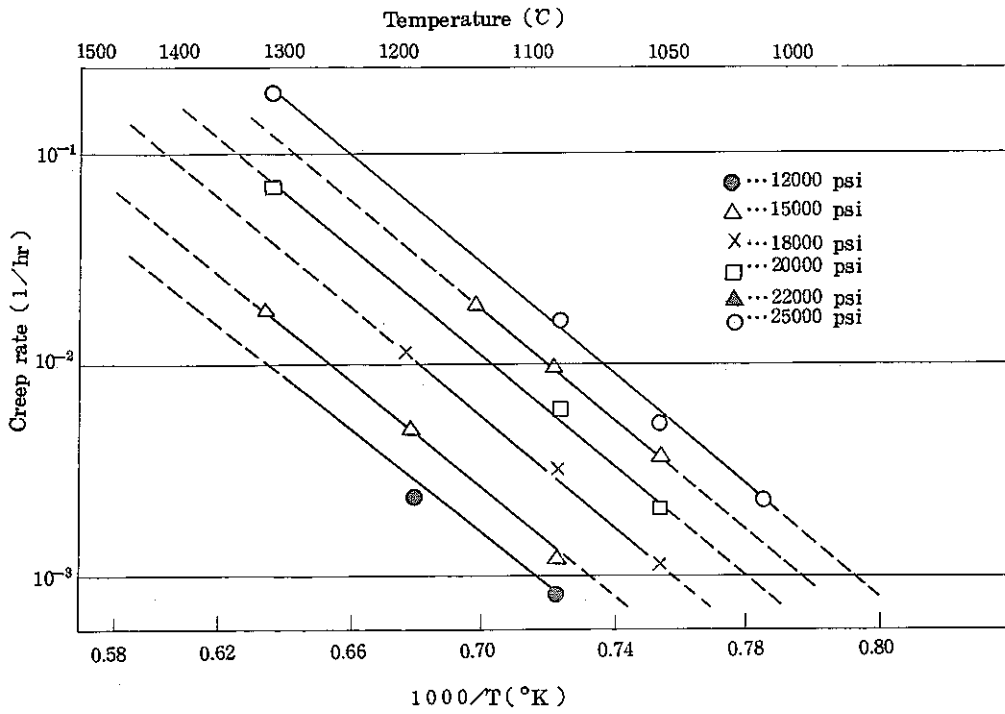


Fig. 13 CREEP RATE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE FOR UO PELLETS TESTED AT 1000~1300°C.

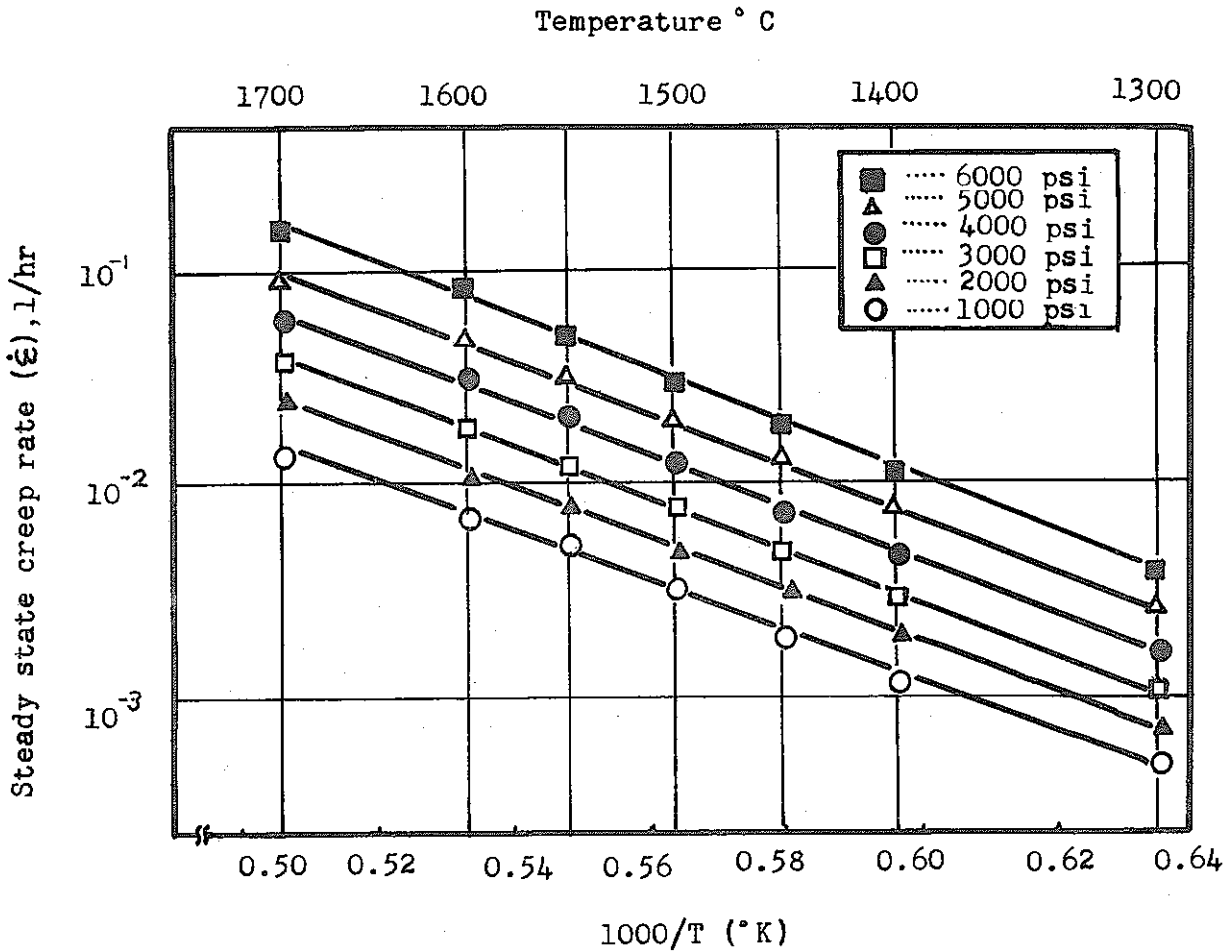


Fig. 14 CREEP RATE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE FOR  $UO_{2.1}$  PELLETS TESTED AT 1300~1700°C.

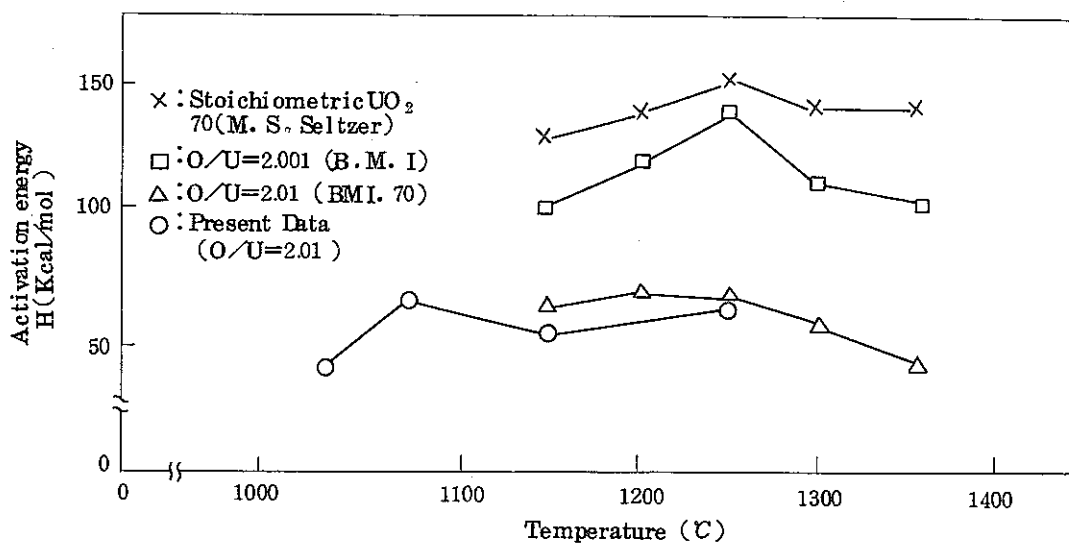


Fig. 15 VARIATION OF APPARENT ACTIVATION ENERGY FOR CREEP WITH TEMPERATURE FOR URANIUM DIOXIDE.

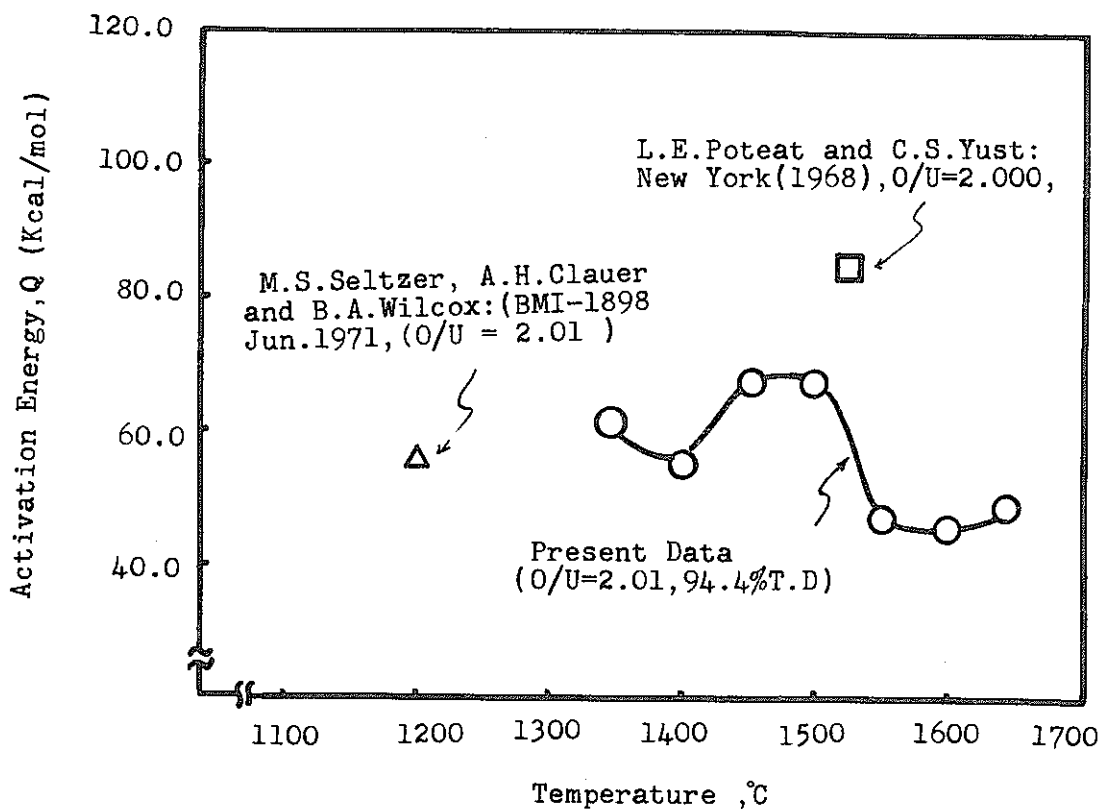


Fig. 16 VARIATION OF APPARENT ACTIVATION ENERGY FOR CREEP WITH TEMPERATURE FOR URANIUM DIOXIDE.