

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]

# 混合酸化物燃料のクリープの評価

1974年8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



## 混合酸化物燃料のクリープの評価

実施責任者 小 泉 益 通 ( プルトニウム燃料部開発課 )  
立 花 利 道 ( " )  
古 屋 広 高 ( " )

### 要 旨

混合酸化物のクリープについては、1970年にG・EのS・K・EVANS等によって整理された炉外のクリープ速度と1973年にANLのA・A・SOLOMONによって報告された照射によるクリープ速度との和が混合酸化物 ( $UO_2 - 20 \sim 30 \text{ w/o } PuO_2$ ) 燃料のクリープ速度として、現在のところ、最も信頼される。これを以下に示す。

$$\dot{\xi} = A\sigma \exp(-100,000/RT) + B\sigma^{4.5} \exp(-140,000/RT) + C\dot{F}\sigma$$

但し、

$\dot{\xi}$  = 定常クリープひずみ速度 ( $h^{-1}$ )

$$A = 3.1 \times 10^7 \exp[333(1-D)] \exp(3.56X) / G^3$$

$$B = 4.37 \times 10^{-4} \exp[10.3(1-D)] \exp(3.56X), \quad C = 1.28 \times 10^{-23}$$

$\sigma$  = 応力 psi (1,000~10,000)

T = 温度 K,  $R = 1.987 \text{ cal/mole } K$

D = 密度割合 (0.88~0.95)

G = 初期平均結晶粒径,  $\mu$  (4~35)

X = プルトニウム含有量 (Pu/Pu+U), 0.2~0.3

$\dot{F}$  = 核分裂束, ( $\text{fission/cm}^3 \cdot \text{S}$ )

## 混合酸化物燃料のクリープの評価

### 目 次

1. 要 約	1
2. 序 言	2
3. 方法の評価	3
4. 選定根拠	4
5. 結 論	5
6. 参考文献	6

## 1 要 約

混合酸化燃料のクリープについては、1971年にS. K. EVANS等によって整理された炉外のクリープ速度<sup>1)</sup>と1973年にA. A. SOLOMONによって報告された照射によるクリープ速度<sup>2)</sup>との和が混合酸化物 ( $UO_2 - 20 \sim 30 w/o PuO_2$ ) 燃料のクリープ速度として、現在のところ、最も信頼される。

これを以下に示す。

$$\dot{\epsilon} = A\sigma \exp(-100,000/RT) + B\sigma^{4.5} \exp(-140,000/RT) + C\dot{F}\sigma$$

但し

$\dot{\epsilon}$  = 定常クリープひずみ速度 ( $h^{-1}$ )

$A = 3.1 \times 10^7 \exp\{33.3(1-D)\} \exp(3.56X) / G^3$

$B = 4.37 \times 10^{-4} \exp\{10.3(1-D)\} \exp(3.56X)$

$C = 1.28 \times 10^{-23}$

$\sigma$  = 応力, psi (1,000~10,000)

$R = 1.987 \text{ cal/mole } ^\circ K$

$T$  = 温度  $^\circ K$

$D$  = 密度割合 (0.88~0.95)

$G$  = 初期平均結晶粒径,  $\mu$  (4~35)

$X$  = プルトニウム含有量 ( $Pu/Pu+U$ ), (0.2~0.3)

$\dot{F}$  = 核分裂束, ( $Fission/cm^2 - s$ )

## 2 序 言

混合酸化物は小さな応力によっても徐々に変形し、やがて一定な速度で変形していく。これがクリープ速度といわれ、ひずみを時間で除した値である。<sup>3)</sup>

炉内に燃料要素としてのペレットが、ある程度のクリープ速度を有していると、燃料ピンの応力緩和に役立つので燃料のクリープ速度は重要である。<sup>2)</sup>

クリープ変形の様子は作用している応力が小さい場合と大きい場合では異なる。

クリープ変形の機構が応力の大きさによって、二種類に分けられることが実験によって確認された。<sup>5)</sup>

混合酸化物のクリープの実測は、1969年にO. D. SLAGLE<sup>6)</sup>(BMI)によって炉外でなされたのが最初である。<sup>7)</sup>

その後、1970年にJ. A. C. MARPLES [AERE (Harwell)]等は、プルトニウムはその混合酸化物のクリープ変形を高めることを実験によって示した。<sup>7)</sup> 同時に、O/Mが200より小さくなるにつれてクリープ変形は小さくなることを示している。

同年に、M. D. HOUSTON等(BMI)は、 $UO_2-22w/o PuO_2$ のクリープ速度は密度の2乗に反比例することを実験によって示した。<sup>8)</sup>

一方、P. E. BOHABOY等(GE)も、プルトニウムはクリープを助長することを示し、クリープ速度とプルトニウム含有量との関係を実験によって定量的に示した。<sup>9)</sup>

その後、1971年にM. S. SELTZER等(BMI)は、 $UO_2-20w/o PuO_2$ のクリープを測定した結果、P. E. BOHABOY等(GE)が測定したクリープの活性化エネルギーとほぼ同じ値を実験によって示している。<sup>10)</sup>

同年に、S. K. EVANS等(GE)は、 $UO_2-PuO_2$ のクリープについて、プルトニウム含有量、密度および結晶粒を考慮して実験式を報告している。<sup>1)</sup> これらはそれぞれ図1, 2, 3に示す。またO/M依存性を図4に示す。

つづいてA. A. SOLOMON等(ANL)も $UO_2-PuO_2$ のクリープについて、密度と結晶粒との依存性を実験式にまとめている。<sup>11)</sup>

一方、燃料のクリープについて、照射の影響もあり、1970年にW.F. SHEELY(BMI)は混合酸化物( $PuO_2-UO_2$ )燃料のクリープを炉内で測定を試みたが、試験中に燃料に微小クラックが発生したため失敗している。<sup>12)</sup> 同年に、J.S. PERRIN等(BMI)は $UO_2$ のキャプセル照射したところ、 $UO_2$ のクリープ速度は照射によって一桁高まることを報告している。<sup>13)</sup>

また、V. Z. JANKS等は燃料のクリープ速度は中性子束に比例するとしてLIFE-1燃料挙動計算コードに使用している。<sup>14)</sup>

その後、1971年にJ.S. PERRIN等(BMI)はクリープの照射の影響を詳しく調べるため、照射

量および応力を種々に変えた実験を報告している。<sup>15)</sup>

同年に、A. A. SOLOMON等 (ANL)は $UO_2$ の炉内クリープの追加実験を行ったところ、クリープに対する照射の影響は温度範囲によって2種類の機構に分けられることを示している。<sup>11)</sup>

このことを詳しく調べるため、1973年にA. A. SOLOMONはスプリング状の $UO_2$ 試料を使って炉内実験を行った。<sup>4)</sup>

一方、1972年にD. BRUCKLACHER等(Karlsruhe)は $UO_2$ の照射クリープを測定した結果、A. A. SOLOMON等 (ANL)と同様にクリープ速度は照射量に比例することを報告している。<sup>16)</sup>

### 3 方法の評価

#### 1) クリープ試験法<sup>4)</sup> (表1.2参照)

試料に荷重を併用させる方法としては圧縮法<sup>7,17)</sup>とまげ法<sup>8,10,18)</sup>が主である。

荷重を応力値に換算する場合、圧縮法は、荷重面の断面積で荷重を除せば応力が求まるので最も単純で正確である。

一方まげ法は、試料のたわみ量を測定することになるので相対的な変化量しか求められず、クリープ速度は測定できないので一般的なデータとしては不適である。なお、圧縮法およびまげ法ともに荷重は重錘を使用している。炉内の場合はHeガス圧を使用している方法<sup>15,16)</sup>もある。

その他の方法として、スプリング状試料によって炉内で測定する方法<sup>4,19)</sup>もある。これは試料の製造は容易でないがクリープひずみに換算できる。

#### 2) 試験 雰囲気

$UO_2$ - $PuO_2$ 混合酸化物のO/M比は、そのクリープ測定値に大きく影響するので試験雰囲気は重要である。

試料が $UO_2$ の場合のクリープ試験雰囲気は $CO/CO_2$ <sup>5)</sup>、 $H_2$ 、 $H_2/H_2O$ および真空<sup>8)</sup>である。

$UO_2$ - $PuO_2$ 試料の場合の雰囲気は真空、 $N_2-6\%H_2+H_2O$ <sup>9)</sup>、 $Ar-H_2-H_2O$ <sup>20)</sup>および $Ar-$

12% $H_2$ <sup>7)</sup>などが使用されている。

雰囲気が $H_2/H_2O=10/1$ であると $O/M=2.00$ で、 $H_2/H_2O=100/1$ であると $O/M=1.995$ になるといわれている。<sup>20)</sup>

高温クリープ試験は水蒸気の添加による雰囲気制御が必要である。

一方、炉内試験雰囲気として $NaK$ <sup>16,19)</sup>あるいは $He$ <sup>15)</sup>などが使用されているが試験温度が低い場合あまり問題にはならない。

#### 4 選定根拠

$PuO_2-UO_2$ の初めてのクリープ測定値は $O. D. SLAGLE$ <sup>6)</sup>によって1969年に報告されたが、これは、試料の $O/M$ 比が不明確であることとまげ法で試験したため、一般的なクリープ式として表示できない。

1970年に報告された $J. A. C. MARPLE$ 等の測定は試験中の雰囲気制御がとりはかられなかった圧縮法で測定したため信頼性は高いと思われる。<sup>7)</sup>

$S. K. EVANS$ 等が整理した炉外のクリープ実験式は試験雰囲気が制御された測定値をもとにしており信頼性が高い。<sup>1)</sup><sup>9)</sup>

ところで $J. A. C. MARPLE$ 等の測定のプルトニウム含有量を多種類にわたり測定しているが応力範囲は最大で約2000 psiと小さかった。

ところで $M. S. SELTZER$ 等は、クリープの機構が変化する応力範囲は結晶粒が大きい場合、約8000 psiまで広がるということから $J. A. C. MARPLE$ 等の試験応力2000 psiは、高応力クリープを測定するには低かったと思われる。<sup>17)</sup>

一方、 $S. K. EVANS$ 等の測定は、最大応力8000 psiまで測定しており、十分に高応力クリープまで含まれており、 $J. A. C. MARPLE$ 等の測定結果よりさらに信頼性が高いと思われる。この他の炉外実験は雰囲気<sup>8)</sup>が真空であるため、クリープの測定値の信頼性は高いとはいえない。

なお、 $J. A. C. MARPLE$ 等(AERE)の測定値と $S. K. EVANS$ 等(GE)の測定だけが互いに一致している。<sup>11)</sup>一方、混合酸化物燃料( $UO_2-PuO_2$ )のクリープの照射による効果の測定値は殆んどない。しかし、 $UO_2$ のクリープが照射によって高められる割合は $UO_2-PuO_2$ も同じ程度であろうとして、 $UO_2$ の照射クリープを $UO_2-PuO_2$ のクリープとして代用している<sup>11, 14)</sup>のが現状である。<sup>13)</sup>1970年に報告した $J. S. PERRIN$ 等の $UO_2$ の照射クリープの測定は試験範囲がせまく、定量的に示すことはできない。



V. Z. JANKS 等は  $UO_2$  の照射クリープを数式化して LIFE-1 計算コードに使用しているが、出所が不明であり信頼性が薄い。<sup>14)</sup>

1971年に J. S. PERBIN 等がその後の追加実験を行って報告しているが照射クリープの定量的な実験式は表示していない。

1971年に A. A. SOLOMON 等は 400~1400°C の炉内データをまとめて燃料クリープを実験式化して新しく LIFE-1 に取り入れている。

しかし 1973年に スプリング状試料を使ってさらに詳しく実験し実験式を示したがこれはスプリング状試料のため応力およびクリープひずみも明確であることと D. BRUCKLACHER 等の圧縮法による結果と全く一致しているため、現時点で最も信頼されると考えられる。<sup>21)</sup>

従って、混合酸化物の照射によるクリープ速度は 1973年に A. A. SOLOMON が表示した  $UO_2$  の実験式を現在推選する。これを図 5 に示す。<sup>4)</sup>

なお混合酸化物燃料 ( $UO_2 - 2.2w/o PuO_2$ ) の炉内での実験が R. A. ROBINSON, S. J. BASHAM and J. S. PERBIN (Battelle Columbus Lab. USA) によって行なわれたが測定点が少なく評価できないが今後の詳しい報告が期待される。<sup>22)</sup>

## 5 結 論

混合酸化物 ( $UO_2 - PuO_2$ ) のクリープは熱的クリープ速度 ( $\dot{\epsilon}_T$ ) と照射によるクリープ速度 ( $\dot{\epsilon}_I$ ) との和で示される。

1971年に S. K. EVANS 等によって整理された炉外のクリープ速度 ( $\dot{\epsilon}_T$ ) と 1973年に A. A. SOLOMON によって報告された照射クリープ ( $\dot{\epsilon}_I$ ) が現在、最も信頼される。(実測との差はともに約 ±40% である)。

これを以下に示す。また他のデータとの比較を図 6 に示す。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_T + \dot{\epsilon}_I \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{\epsilon}_T = A \sigma \exp(-100,000/RT) + B \sigma^{4.5} \exp(-140,000/RT) \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{\epsilon}_I = C \dot{F} \sigma \dots\dots\dots(3)$$

なお参考のため A. A. SOLOMON が提示した  $UO_2$  のクリープの実験式の定数を以下に示す。

$$A = (9.73 \times 10^{-6} + 3.24 \times 10^{-6} \dot{F}) / G^2 / (D - 0.877)$$

$$B = (1.38 \times 10^{-4} + 4.6 \times 10^{-7} \dot{F}) / (D - 0.905) / 10^3$$

$$Q_1 = -90,000 \text{ cal/mole}$$

$$Q_2 = -132,000 \text{ cal/mole}$$

但し

$\dot{\epsilon}$  =  $\text{UO}_2$  - 20~30w/o  $\text{PuO}_2$  のクリープひずみ速度 ( $\text{h}^{-1}$ )

$A = 3.1 \times 10^7 \exp[33.3(1-D)] \exp(3.56X) / G^3$

$B = 4.37 \times 10^{-4} \exp[10.3(1-D)] \exp(3.56X)$

$C = 1.28 \times 10^{-23}$

$\sigma$  = 応力, psi, (1,000~10,000)

$R = 1.987 \text{ cal/mole, } \text{K}$

$T$  = 温度 ( $^{\circ}\text{K}$ ) (1250~1625C)

$D$  = 密度割合 (0.88~0.95)

$G$  = 平均結晶粒径,  $\mu$ , (4~35)

$X$  = プルトニウム含有量 ( $\text{Pu}/\text{Pu}+\text{U}$ ), (0.2~0.3)

$F$  = 核分裂束, ( $\text{Fission}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ ) ( $0 \sim 1.4 \times 10^{13} \text{ fission}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$ )

#### 参 考 文 献

- 1) S. K. EVANS, P. E. BOHABOY and R. A. LASKIEWICZ; Compressive creep of Uranium-Plutonium fuels, GEAP-13732, Aug. (1971)
- 2) A. A. SOLOMON; Radiation-Induced Creep of  $\text{UO}_2$ , J. Nucl. Mat. 56 (1973) 164-171.
- 3) P. E. BOHABOY, B. R. ASAMOTO and A. E. CONTI; Compressive Creep Characteristics of Stoichiometric Uranium Dioxide, GEAP-10054, 1969
- 4) M. S. SELTZER, A. J. MARKWORTH, A. H. CLAUER, B. A. WILCOX and J. S. PERRIN; High Temperature Creep of Uranium Dioxide, BMI-1912, 1971
- 5) M. S. SELTZER, A. H. CLAUER and B. A. WILCOX; Mechanism of Creep in  $\text{UO}_2$  and  $\text{UO}_2$ - $\text{PuO}_2$ , SIXTH UNITED STATES-JAPAN INFORMATION EXCHANGE MEETING ON CERAMIC NUCLEAR FUELS, 1970, SEC. 11
- 6) O. D. SLAGLE; High Temperature Creep Properties of Fast-Reactor Oxides, BNWL-971, 1969

- 7) J. A. C. MAPPLES and A. HOUGH; Preliminary Measurements of The Creep of  $UO_2$  and  $(U, Pu)O_2$ , AERE-R-6421, 1970
- 8) M. D. HOUSTON, O. L. KRUGER and W. M. PARDUE; Thermal Creep of Polycrystalline  $UO_2 - PuO_2$ , Nucl. Meta. 17, PLUTONIUM 1970 AND OTHER ACTINIDES, Proceedings of the 4th international Conference on Plutonium and Other Actinides, 1970, 488-496
- 9) P. E. BOHABOY and S. K. EVANS; Compressive Creep Properties of  $UO_2 - PuO_2$  Compounds, Nucl. Meta. 17, PLUTONIUM 1970 AND OTHER ACTINIDES, Proceedings of the 4th international Conference on Plutonium and Other Actinides, 1970, 488-496
- 10) M. S. SELTZER, J. S. PERRIN and A. H. CLAUER; Review of Out-of-Pile and In-Pile of Ceramic Nuclear Fuels, BMI-1906, 1971
- 11) A. A. SOLOMON, J. L. BOUTBORT and J. C. VOGLEWEDE; Fission-Induced creep of  $UO_2$  and Its Significance To Fuel-Element Performance, ANL-7857, 1971
- 12) W. F. SHEELY; In-Reactor Creep of Mixed Oxide Fuels, BNWL-1349-1, 1970
- 13) J. S. PERRIN, R. A. ROBINSON and S. J. BASHAM; In-Pile Creep Experiments, SIXTH UNITED STATES-JAPAN INFORMATION EXCHANGE MEETING ON CERAMIC NUCLEAR FUELS, 1970, SEC.11
- 14) V. Z. JANKS and R. W. WEEKS; LIFE-I, a FORTRAN-IV Computer Code for the Prediction of Fast-Reactor Fuel-element Behavior, ANL-7736, 1970
- 15) J. S. PERRIN and W. R. D. WILSON; Effect of Irradiation on The Creep of Uranium Dioxide, BMI-1899, 1971
- 16) D. BRUCKLACHER and W. DIENST; Creep Behavior of Ceramic Nuclear Fuels Under Neutron Irradiation, J. Nucl. Mat., 42 (1972) 285-296
- 17) M. S. SELTZER, A. H. CLAUER and B. A. WILCOX; The Stress Dependence for High Temperature Creep of Polycrystalline Uranium Dioxide, J. Nucl. Mat., 34 (1970) 351-353
- 18) W. M. ARMSTRONG and W. R. IRVINE; Creep of Urania Base Solid Solution, J. Nucl. Mat., 12 (1964) 261

- 19) A. A. SOLOMON and R. H. GEBNER; Instrumented Capsule For Measuring Fission-Induced Creep of Oxide Fuels, Nucl. Tech., 13 (1972) 177-184
- 20) J. A. C. MARPLES and A. HOUGH; The Creep of  $UO_2$  and  $(U, Pu)O_2$ , Nucl. Meta. 17, PLUTONIUM 1970 AND OTHER ACTINIDES Proceeding of the 4th international Conference on Plutonium and Other Actinides, 1970, 488-496
- 21) D. BRUCKLACHER and W. DIENST; Kontinuierliche Messung Des Kriechens Von  $UO_2$  Unter Bestrahlung, J. Nucl. Mat., 36 (1970) 244-247
- 22) R. A. ROBINSON, S. J. BASHAM and J. S. PERBIN; Instrumented Capsule for In-Reactor Fuel Creep Studies at High Fission Rates, Nuclear Engineering and Design, 24 (1973) 242-249

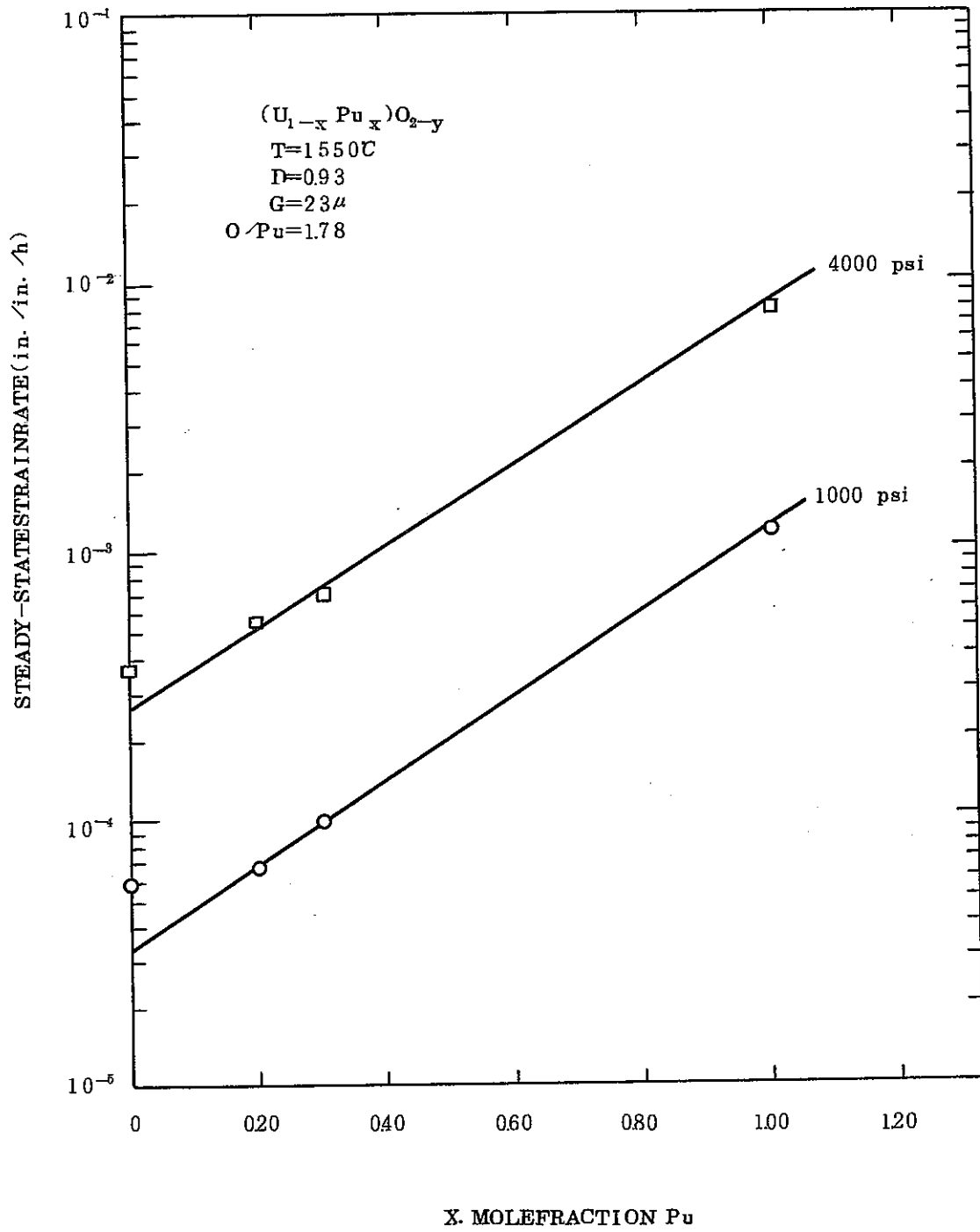


Figure 1. Effect of Plutonium Content on Creep of  $(U_{1-x}Pu_x)O_{2-y}$

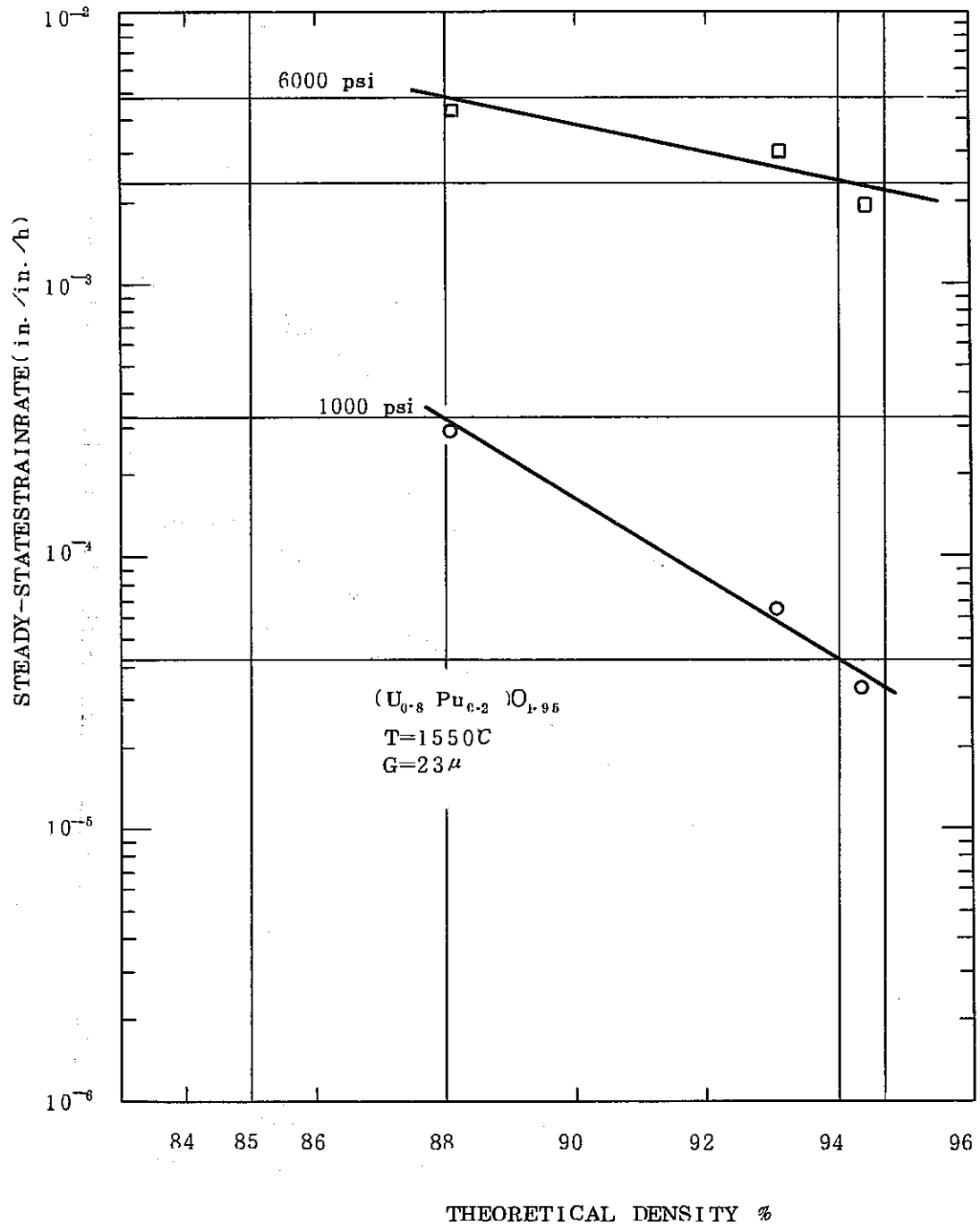


Figure 2. Effect of Density on Creep of (U<sub>0.8</sub>Pu<sub>0.2</sub>)O<sub>1.95</sub>

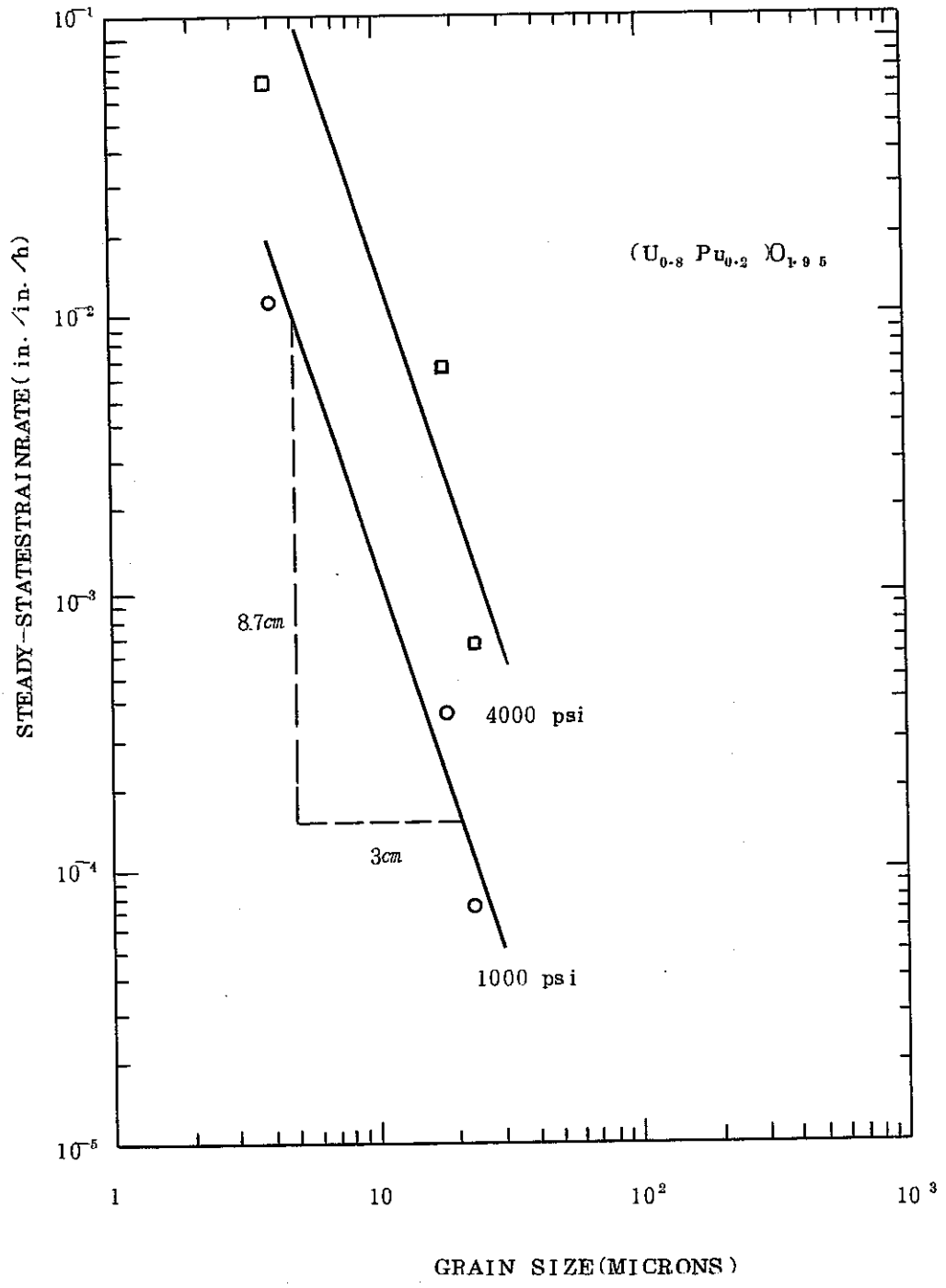


Figure 3. Effect Grain Size on the Creep of  $(U_{0.8}Pu_{0.2})O_{1.95}$

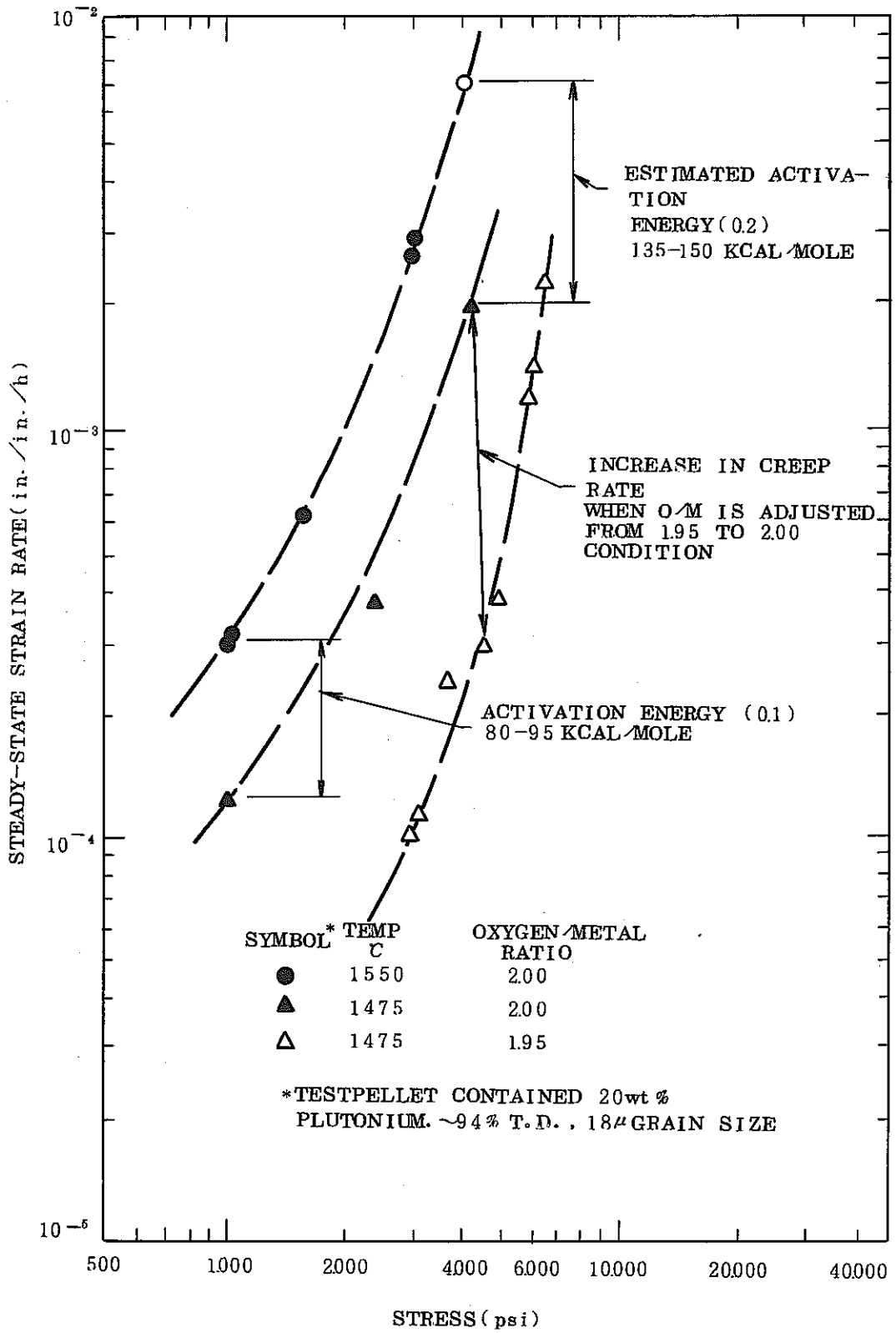


Figure 4. Variation in Steady-State Creep of  $(U_{0.8}Pu_{0.2})O_{2-x}$  with Stoichiometry



F. 5 の説明

スプリング状の試料に一定荷重を作用させスプリングの収縮量を測定しクリープ変形量に換算する。

スプリングせん断応力  $L = \frac{16PR}{\pi d^3}$     P : スプリングへの圧縮荷重  
 R : バネ半径 (=12.0mm)  
 $r = \frac{\delta d}{n 4 \pi R^2}$     d : スプリング線径 (=1.75mm)  
 δ : スプリング収縮量  
 n : スプリング試料まき数 (8巻)

$\sigma = \sqrt{3}L$      $\sigma = \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}$  ここで  $\sigma_3 = 0$   
 $\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} r$      $L = \sigma_1 = -\sigma_2$  より  $\sigma = 3L$

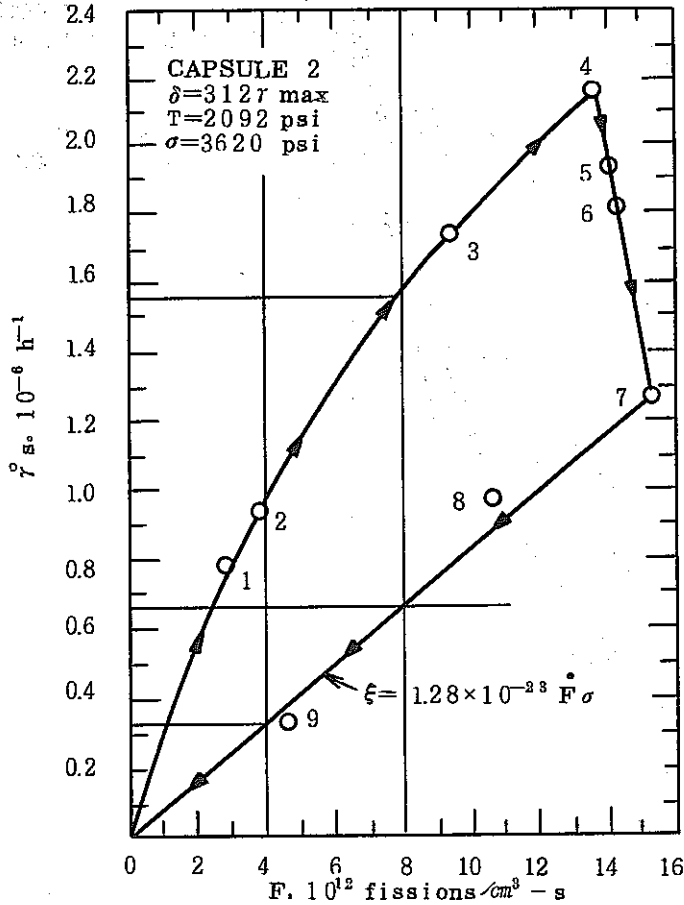


Figure. 5 Dependence of radiation-induced creep rates on structural evolution.

Step 1 から直線関係を保たないのは燃焼が進むにつれて燃料の微少組織構造が変化してゆくためである。特に燃焼度が高い4 から7 ステップでは燃焼による燃料の微少組織構造変化のためスプリング試料は荷重と反対方向に膨張した。しかしStep 7 から構造が一定のままになるため(核分裂束が減少の方向にして試験を行ったため)核分裂束と変形速度は直線関係がえられた。

この直線 (Step 7 → Step 9) が試料の構造一定での照射によるクリープ速度の依存性として評価できる。

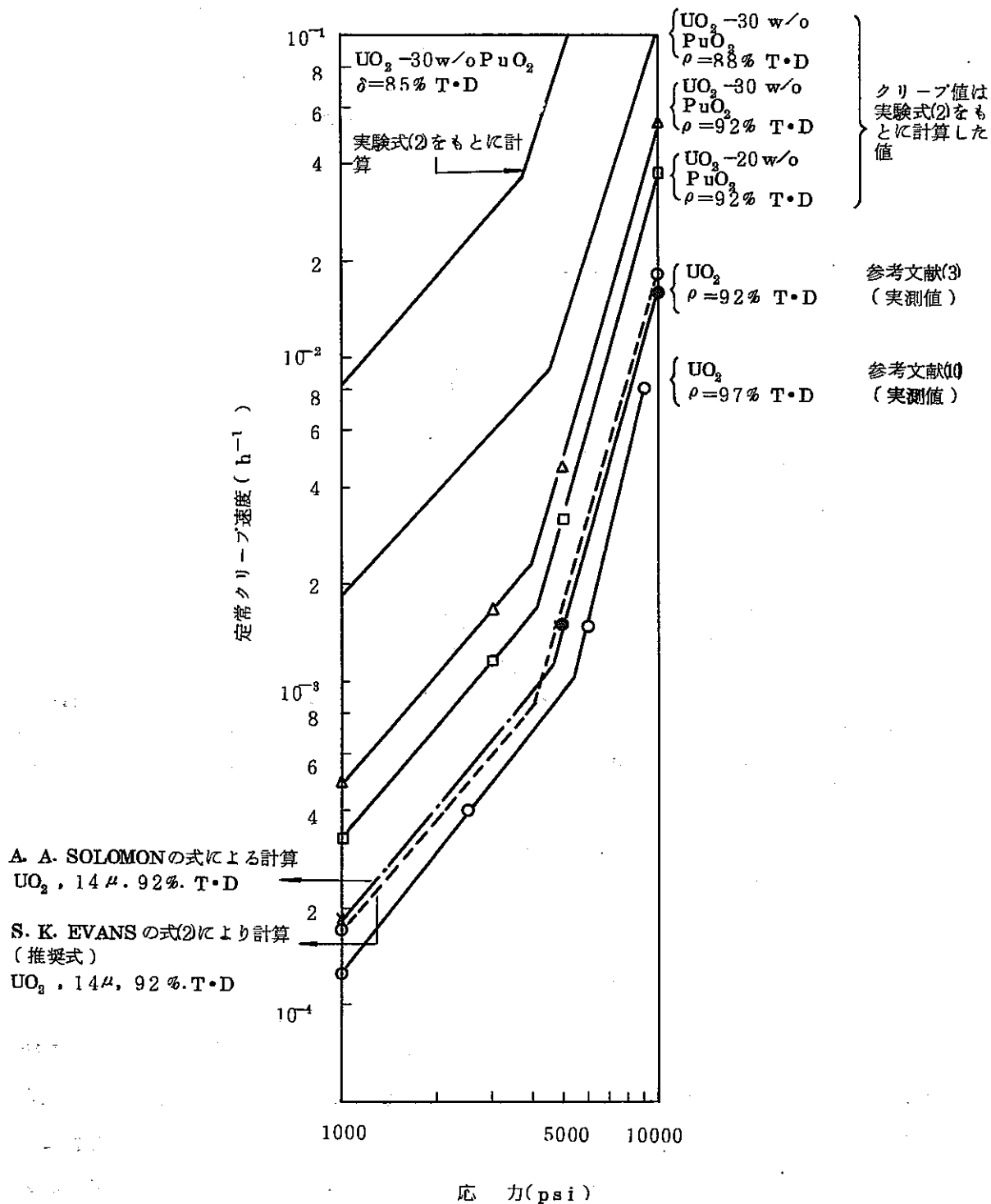


図6  $UO_{2.00}$ および $UO_2-PuO_2$ の1550°Cにおける  
 クリープ速度(結晶粒14 $\mu$ )

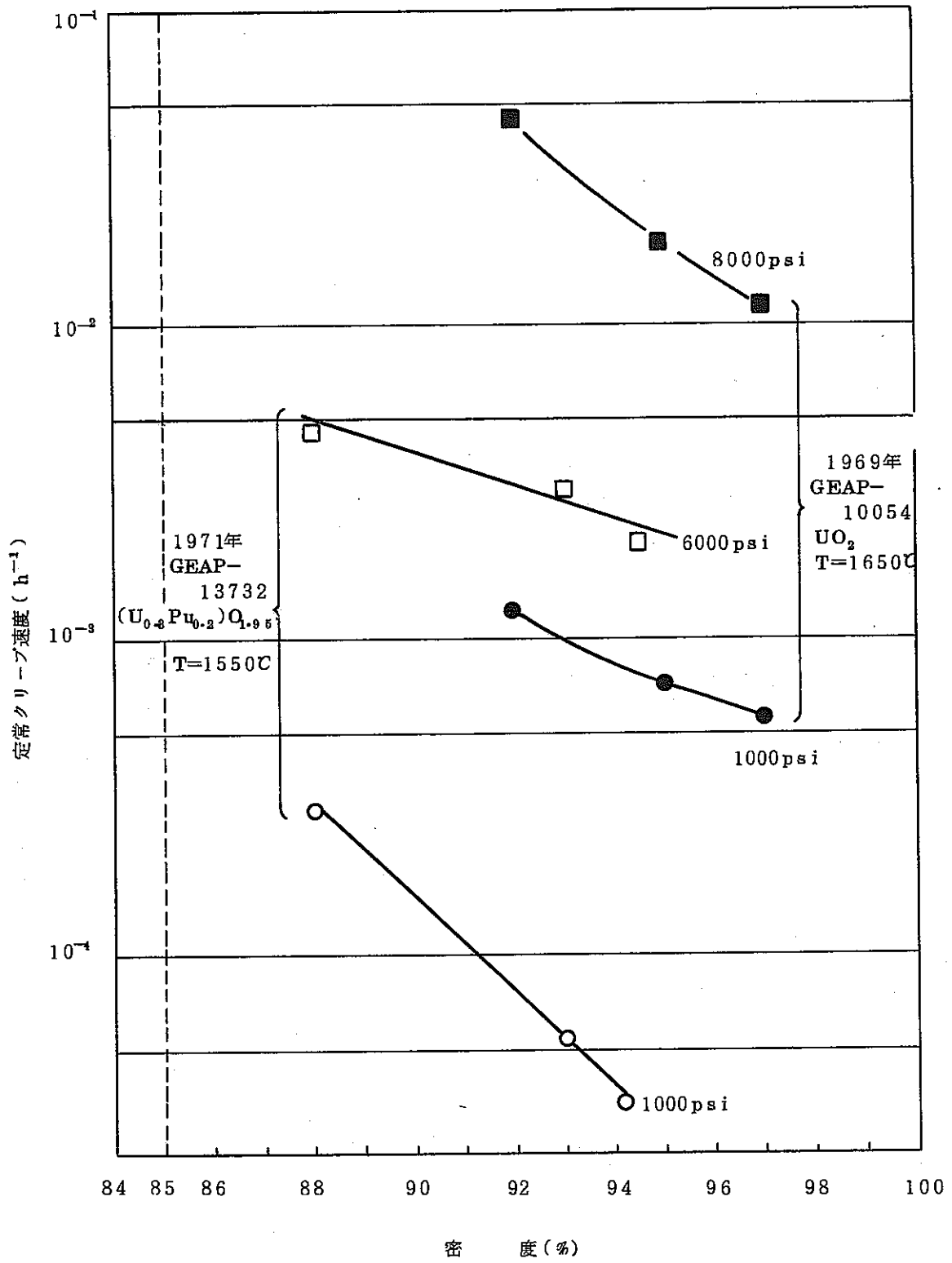


図7 クリープ速度の密度依存性

TAKE1 ACTIVATION ENERGY AND STRESS DEPENDENCE OF STEADY-STATE CREEP IN URANIUM OXIDE AND MIXED UO<sub>2</sub>-BASE OXIDES

Composition	Reference	Density	Grain Size( $\mu$ )	Deformation Mode	Atmosphere	Qc Kcal per mole	Stress (PSi)	Ronge (°C)	Stress Exponent	Temperature (°C)	Stress Ronge (PSi)
UO <sub>2,00</sub>	Armstrong et al	96.1	6	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	91±8	10000	1250-1400	1.3	1300, 1400	700-10000
									4	1400	10000-16000
		94.5-96.0	13-40	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>				1	1400	4000- 8000
UO <sub>2,02-2,08</sub>	Armstrong and Irvine	96.0	6	3 point bend	Ar+O <sub>2</sub>	54±5	5000	976-1350	4	1400	8000-13000
									1	1300	1000- 7000
UO <sub>2,16</sub>	Armstrong and Irvine	96.0	4	3 point bend	Ar+O <sub>2</sub>	63±5	5000	976-1350			
									1	1300	1000- 7000
UO <sub>2,00</sub>	Scott et al	95	2-10	3 point bend	H <sub>2</sub>	>95	5000	1000-1650			
UO <sub>2,06</sub>	Scott et al	95	2-10	3 point bend	Ar	72	5000	850-1000			
UO <sub>2,16</sub>	Scott et al	95	2-10	3 point bend	Ar	65	5000	800-1000			
									1	975	500- 6500
UO <sub>2,00</sub>	Armstrong and Irvine	97.7	24	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	96±7	10000	1220-1400			
									2	1400	2000- 6000
									6	1400	6000-10000
UO <sub>2,00</sub> -0.5ZrO <sub>2</sub>	Armstrong and Irvine	97.2	26	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	121±8	10000	1325-1440			
									1	1400	6000-12000
UO <sub>2,00</sub> -1.0ZrO <sub>2</sub>	Armstrong and Irvine	97	31	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>				1	1400	6000-14000
UO <sub>2,00</sub> -0.5Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Armstrong and Irvine	96	19	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	127±12	10000	1325-1400			
UO <sub>2,00</sub> -0.5CSO	Armstrong and Irvine	97.3	25	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	130±11	10000	1300-1425			
									1	1400	6000-10000
UO <sub>2,00</sub> -1.0SiO <sub>2</sub>	Armstrong and Irvine	99	10	3 point bend	Dry H <sub>2</sub>	105±10	10000	1200-1400			
UO <sub>2,00</sub>	Armstrong and Irvine	>98	Single crystal	4 point bend	Dry H <sub>2</sub>	117±10	3000-8000	1340-1685			3600- 5000
									3.3±0.1	1400	3600- 5000
UO <sub>2,00</sub>	Wolfe and Kaufman	98.5	55	Compression	?	71	3000	1600-2000			
									4.5		
		97.5	18	Compression	?				1		1000- 3000
									4.5	1600	300- 5000

UO <sub>2,00</sub>	Poteat and Yust	97.5	10	Compression	?	84	3000	1430-1666			
						90	10000	1430-1666			
									1-11	1430-1666	2000- 5500
									4.8	1430-1666	5500-11000
UO <sub>2,0001</sub>	Seltzer et. al	100	Single	Compression	Hydrogen	134	10000	1100-1300	7	1100	16000-24000
						129	3000	1250-1400	1	1300	
UO <sub>2,001</sub>	Seltzer et. al	100	Single	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	115	10000	1100-1400	13	1100	12000-18000
UO <sub>2,003</sub>	Seltzer et. al	100	Single	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	80.5	10000	1100-1400	17	1100	12000-14000
UO <sub>2,01</sub>	Seltzer et. al	100	Single	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	63.5	10000	1100-1300	17	1100	7000-12000
						131	3000	1250-1400	1	1400	3000- 5000
UO <sub>2,002</sub>	Seltzer et. al	100	Single	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	57.5	10000	1100-1300	17	1100	5000-10000
UO <sub>2,001</sub>	Seltzer et. al	97.8	27	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	117	8000	1100-1300	7	1100-1300	7000-10000
UO <sub>2,01</sub>	Seltzer et. al	97.8	27	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	75	6000	1100-1300	7	1100-1300	6000- 9000
						95	7	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	55	2000
UO <sub>2,05</sub>	Seltzer et. al	95	7	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	45	2000	1100-1300	1	1100-1300	200- 5000
UO <sub>2,10</sub>	Seltzer et. al	97.8	27	Compression	CO/CO <sub>2</sub>	54	4000	1100-1300	7	1100-1300	2000- 5000
UO <sub>2,001</sub>	Bohaboy et. al	92-98	4-35	Compression	Hydrogen	132	7000-15000	1440-1760	4.5	1440-1760	7000-15000
						90	1000- 4000	1400-1760	1	1400-1760	1000- 4000
UO <sub>2,000</sub>	Marple and Hough	94-99	10-80	Compression	H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	93-127	2000-5000	1150-1500	1.5-2.3	1150-1500	2000- 5000
									5-7	1250	5000- 7000
UO <sub>2,00</sub>	Kummerer et. al	92-95	10	Compression	10 <sup>-5</sup> mm Hg Vacuum	106	8640	1200-1500	2	1500	1440- 5760
UO <sub>2,00</sub>	Solomon et. al			Torston	10 <sup>-5</sup> mm Hg Vacuum	80-200	2870- 5380	1000-1350			

TABLE 2. CREEP PROPERTIES OF  $UO_2$ - $PuO_2$  (文献10)

Reference	Method of Preparation	Grain Size, $\mu$	Density percent of theoretical	O/M Ratio	Plutonium Content, w/o	Atmosphere	Type of Test	Temperature, C	Stress, psi	n	Qc.kcal per mole
Bohaby & Evans	Coprecipitation	20-28	89-95	195-200	20, 30, 100	$N_2$ -6% $H_2$ + $H_2O$	Compression	1475-1625	900-8000	1 45	110 140
Houston, et al.	Mechanical blending	3-5 and 10-15	94 and 90	199	22	$5 \times 10^{-6}$ torr vacuum	Compression	1100-1330	1100-3200	14	77
Marples & Hough	Coprecipitation and mechanical blending	3-80	94-99	1995- 200	2, 5, 10, 15 20, 30, 40	Ar-12% $H_2$ + $H_2O$	Compression	1150-1500	1200-2000	1 45	103 133
Kummerer & Vollath	Mechanical blending	5-30	92-95		195	$10^{-5}$ torr vacuum	Compression	1200-1700	425-3560		98
Slagle	Coprecipitation	20	96	198	20	Ar-8% $H_2$	Bend	1475-1560	2500-9000	1.08- 1.75	110