

JAERI-M
7158

UO₂ペレット密度測定法の相関関係

1977年7月

柳澤 和章

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

UO₂ ベレット密度測定法の相関関係

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳 澤 和 章

(1 9 7 7 年 6 月 2 0 日受理)

UO₂ ベレットの密度を 3 種の測定法, すなわち形状法, 水液浸法, メタキシレン液浸法を用いて測定した。測定には仕様の同じ 6 種の UO₂ ベレットを用い結果を統計的に処理して測定法間の相関関係を求めた。

95% 理論密度以上のベレットでは用いた測定法の間に 1 : 1 対応する直線的な相関が見い出されたが, それ以下のものではベレット中の開および閉気孔との相互作用のため相関が見い出せなかつた。

JAERI - M 7158

Correlations Between Different Methods of
 UO_2 Pellet Density Measurement

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research
Establishment, JAERI

(Received June 20, 1977)

Density of UO_2 pellets was measured by three different methods, i.e., geometrical, water-immersed and meta-xylene immersed and treated statistically, to find out the correlations between UO_2 pellets are of six kinds but with same specifications.

The correlations are linear 1:1 for pellets of 95% theoretical densities and above, but such do not exist below the level and variated statistically due to interaction between open and close pores.

Keywords : UO_2 Pellet, Density, Geometrical Density, Water-Immersed Density, Meta-Xylene Density, Open Pore, Close Pore, Statistical Treatment, Correlations, Comparative Evaluation.

目 次

1. まえがき	1
2. 実 験	1
2.1 形状密度	1
2.2 液浸密度	2
2.3 実 験	3
3. 結 果	4
4. 討 論	4
5. 結 言	5
謝 辞	5
文 献	5
付 錄	7

1. まえがき

UO_2 ペレットの密度測定は形状密度 (geometrical density) によるものと液浸密度 (immersed density) によるものとの二つが一般に用いられる。前者はペレットの寸法と重量から密度を求め、後者は置換液を用い真空置換をおこなって密度を測定する。液浸密度は用いる置換液の種類により水液浸密度 (水中重量法—真空置換法)，メタキシレン液浸密度 (メタキシレン液浸—真空置換法)，水銀液浸密度 (水銀中重量—真空置換法) 等にわけられる。

実際の測定ではそれぞれの方法に特有の注意事項がありそれを守って測定が行われる。報告書によって採用する測定法がいろいろあるとデータを比較するさいに不便が生じることは明らかでありデータ値を比較するさいにも面倒が多い。そこで本実験では Table 1 のような仕様の UO_2 ペレットに対して

- (1) 形状密度
- (2) 水液浸密度
- (3) メタキシレン液浸密度

の 3通りの測定を行って測定法の相互関係を定量かつ定性化した。以下にその結果を報告する。

2. 実験

密度を測定するさいに参考となる密度測定法に関しては参考文献の数が多い。^{1)~3)} また UO_2 ペレットの密度測定についても標準的な測定法の確立化に努力が成されている。⁴⁾ 特に UO_2 ペレットの炉内照射による焼きしまり量を照射前後の密度変化で評価する場合の密度測定は重要である。内田ら⁵⁾ は焼きしまりの評価に密度変化を用いており、測定にはメタキシレン液浸法を照射前後に共通して用いている。一方 M. D. Freshley ら⁶⁾ は同様な評価に照射前の密度測定に水液浸（—真空置換法），照射後のそれに水銀液浸を用いている。D. A. Banks⁷⁾ は照射前後の密度評価に水銀液浸を用いている。

本実験では以下に述べるような方法によって測定データを得た。測定方法および手順は原子燃料公社検査専門委員会の第三次報告書⁴⁾ [燃料要素およびその構成部材の標準試験法について] (以下簡単に標準試験法という)に基づいて行った。

2.1 形状密度 (geometrical density)

UO_2 ペレットの密度を寸法測定値と重量測定値を用いて計算から求める方法である。ペレットは充分清浄な状態にあるとする。ペレットが円柱状であればその直径 d (cm; 0.01 mm の位まで)，高さ h (cm; 0.01 mm の位まで) およびペレット重量 W (g; 0.01 g の位まで)

1. まえがき

UO_2 ベレットの密度測定は形状密度 (geometrical density) によるものと液浸密度 (immersed density) によるものとの二つが一般に用いられる。前者はベレットの寸法と重量から密度を求め、後者は置換液を用い真空置換をおこなって密度を測定する。液浸密度は用いる置換液の種類により水液浸密度 (水中重量法—真空置換法)，メタキシレン液浸密度 (メタキシレン液浸—真空置換法)，水銀液浸密度 (水銀中重量—真空置換法) 等にわけられる。

実際の測定ではそれぞれの方法に特有の注意事項がありそれを守って測定が行われる。報告書によって採用する測定法がいろいろあるとデータを比較するさいに不便が生じることは明らかでありデータ値を比較するさいにも面倒が多い。そこで本実験では Table 1 のような仕様の UO_2 ベレットに対して

- (1) 形状密度
- (2) 水液浸密度
- (3) メタキシレン液浸密度

の 3 通りの測定を行って測定法の相互関係を定量かつ定性化した。以下にその結果を報告する。

2. 実験

密度を測定するさいに参考となる密度測定法に関しては参考文献の数が多い。^{1)~3)} また UO_2 ベレットの密度測定についても標準的な測定法の確立化に努力が成されている。⁴⁾ 特に UO_2 ベレットの炉内照射による焼きしまり量を照射前後の密度変化で評価する場合の密度測定は重要である。内田ら⁵⁾ は焼きしまりの評価に密度変化を用いており、測定にはメタキシレン液浸法を照射前後に共通して用いている。一方 M. D. Freshley ら⁶⁾ は同様な評価に照射前の密度測定に水液浸（—真空置換法），照射後のそれに水銀液浸を用いている。D. A. Banks⁷⁾ は照射前後の密度評価に水銀液浸を用いている。

本実験では以下に述べるような方法によって測定データを得た。測定方法および手順は原子燃料公社検査専門委員会の第三次報告書⁴⁾ [燃料要素およびその構成部材の標準試験法について] (以下簡単に標準試験法といふ)に基づいて行った。

2.1 形状密度 (geometrical density)

UO_2 ベレットの密度を寸法測定値と重量測定値を用いて計算から求める方法である。ベレットは充分清浄な状態にあるとする。ベレットが円柱状であればその直径 d (cm; 0.01 mm の位まで)，高さ h (cm; 0.01 mm の位まで) およびベレット重量 W (g; 0.01 g の位まで)

をダイヤル・ゲージ、マイクロメーター、ノギス、天秤等を用いて測定する。このとき形状密度は次式であらわすことができる。

$$D = W / \frac{\pi}{4} d^2 h \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1)$$

UO_2 ペレットの理論密度は 10.96 g/cm^3 として計算により求めた密度値 D (g/cm^3) を理論密度値 % TD に換算する。

$$\% \text{ TD} = \frac{D}{10.96} \times 100 \quad (2)$$

2.2 液浸密度 (immersed density)

UO_2 ペレットの密度、気孔率は真空置換法による液中重量法であり液には水、メタキシレン、水銀、テトラリン等を用いることができる。供試の状態では UO_2 ペレットは脱脂後乾燥して清浄な状態にしておく。使用する装置、器具および試薬には天秤、温度計、試料をつるす細線（0.3 mm 程度の白金線またはニッケル線、本実験ではニッケル線使用）、ビーカー、置換液、ろ紙、油回転真空ポンプ、真空デシケータ等がある。測定はつぎのような手順で行う。

Fig. 1 に示すとおり UO_2 ペレットの空中重量を天秤で測定する。このとき力のつり合いから次式が成立する。

$$W + \rho_{\text{air}} V_u g - m_u g = 0 \quad (3)$$

ただし

W : UO_2 ペレットの重量にそれをつるした細線の重量を加えたもの

W_1 : 置換液中の UO_2 ペレット重量と細線重量の和

W_2 : 細線の重量

V_u : UO_2 ペレットの体積

V_w : 細線の体積

m_u : UO_2 ペレットの質量

m_w : 細線の質量

ρ : 測定に用いた置換液の密度

ρ_{air} : 空気の密度

g : 重力加速度

とする。

つぎに UO_2 ペレットを真空デシケータに入れ油回転真空ポンプに接続して真空にしたのち置換液中に液漬し、2時間程度真空中に保持する。続いて UO_2 ペレットを真空デシケータより取り出して細線でつるし、液中での重量 $W_1(g)$ を測定する。このさいの注意事項は実際に浸漬が完了したかどうかをチェックすることで、その目安は液中重量が1分程度経過しても変化がないことをたしかめると良い。このときの力のつりあいを(4)式ならびに Fig. 2 に示す。

$$W_1 + \rho (V_u + V_w) g - (m_u + m_w) g = 0 \quad (4)$$

この場合に液の密度 [ρ (g/cm^3)]を求めるために液温を温度計で測定する。Table 2 に水およびメタキシレンの密度(温度に対して変化する)を示す。⁴⁾

水中に細線のみをつるした場合の重量 W_2 (g) を測定する。このとき(5)式が成立する(Fig. 3)。

$$W_2 + \rho V_w g - m_w g = 0 \quad (5)$$

(3)～(5)式を用いて密度 D (g/cm^3) を計算する。

$$\text{Density} = \text{Mass}/\text{Volume}$$

$$= m_u/V_u$$

$$= \frac{W + \{ W - (W_1 - W_2) \} \cdot \rho_{\text{air}} / (\rho - \rho_{\text{air}})}{\{ W - (W_1 - W_2) \} / (\rho - \rho_{\text{air}})} \quad (6)$$

一般に密度 ρ_{air} は常温付近で 0.0012 (g/cm^3) の程度であり水の密度(20°C) 0.9982 (g/cm^3)、メタキシレンの密度(20°C) 0.8628 (g/cm^3) とオーダーが異なるので無視し得る。

(6)式で $\rho_{\text{air}} \rightarrow 0$ として

$$\text{Density} = \frac{W}{W - (W_1 - W_2)} \cdot \rho (\text{temp}) \quad (7)$$

(7)式を得る。ただし液体の密度 ρ は使用した液体の種類と温度とともにかわる。(7)式を使って計算で求めた密度値を理論密度値(%TD)に換算して(8)式を得る。

$$\% \text{TD} = \frac{W}{W - (W_1 - W_2)} \cdot \frac{\rho}{1.096} \times 100 \quad (8)$$

UO_2 ベレットはセラミック材料でありその中には気孔(pore)が存在する。気孔の中には完全に閉じてしまっているもの(閉気孔)もあれば表面にまでつながっているもの(開気孔)もある。液浸密度測定(液中重量法-真空置換)で同一条件にして測定した場合それぞれの液体のもつ表面張力の相違から開気孔に対する浸透具合は Fig. 4 のようになっていると思われる。したがってベレット中にある開気孔の量と液体の表面張力は密度値に大きく影響する。本実験の目的はこの二者の相異を明らかにすることにある。

2.3 実験

実験は A～F の 6 種類の UO_2 ベレットを用いた。各試料の仕様を Table 3 に示す。A～F のそれぞれ 35 個の試料につき形状密度(以下 GD と略記)および水液浸密度(真空置換、以下 WID と略記)を測定した。WID 測定時の水温は 22.5°C であった。メタキシレン液浸密度(以下 MID と略記)の試料個数は各試料につき 6 個で測定に先立つメタキシレン中への浸漬時間は 2 時間とし測定中に重量の時間変化がないことを確かめた。測定時のメタキシレン液温

は 18.8°C であった。

液浸密度測定に用いた細線は 0.3 mm φ の Ni 線で先端にかごをつけて UO₂ ベレットの破片がうまく入るようにした。データは G D, W I D が小数点以下 3 桁, M I D は小数点以下 5 桁目を四捨五入して 4 位まで求めた。最終的には計算して得た値に対して 99 % 信頼度による母集団分布 N (m, σ²) の推定を行った*。

3. 結 果

A～F 試料に対して G D および W I D の測定値（標本データ）を Table 4～Table 9 に示す。データ表は左から順番に試料番号, 直径 (mm), 高さ (mm), 重量 (g), G D 値 (% TD), W I D 値 (% TD) となっている。M I D のデータを Table 10 に示す。これらに統計的な処理をおこなったのちその結果をグラフ上にプロットした。これを Fig. 5 に示す。Fig. 5 は G D を基準としてそれに対する W I D, M I D の値を縦軸にとった。

図から理論密度が 95 % TD 以上の UO₂ ベレットに対してはその用いた測定法に関係なく、1 : 1 の対応を示し、直線的な相関関係が見い出されたが 95 % TD 以下では必ずしも直線的な関係は得られなかつた。95 % TD 以上のものは次の実験式で表すことが出来る。

$$\underline{(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80}$$

ただし (WID), (MID), (GD) の値には % TD を使用する。

4. 討 論

ボアの形態の密度におよぼす影響について考えてみたい。Fig. 5 で明らかなように 95 % TD 以上の密度をもつ UO₂ ベレットではその測定密度値が用いた手法に関係なくほぼ同一の値におちつく。J. Belle^{8), 9)}によれば UO₂ ベレットの密度が 75～95 % TD の密度域では閉気孔 (Closed Porosity 以下 C P) が比較的一定の値にあるのに対して開気孔 (Open Porosity 以下 O P) が 5 倍以上も存在する。一方、密度が 94～95 % TD を越えると O P は急速に減少してゆき、C P は急激に増加する (Fig. 6⁷⁾ 参照)。本実験での結果によれば 95 % TD 以上の高い密度をもつた C～F 試料が Fig. 5 でみると同一直線上にならぶのに対し 95 % 以下の密度をもつた A および B 試料がこの直線からはずれている。この現象は 95 % 付近を境に O P が急激に減少し C P が増加するという J. Belle の結果と一致している。Fig. 7 は実験に供した

* 付録参照

は 18.8°C であった。

液浸密度測定に用いた細線は 0.3 mm φ の Ni 線で先端にかごをつけて UO₂ ベレットの破片がうまく入るようにした。データは G D, W I D が小数点以下 3 桁, M I D は小数点以下 5 桁目を四捨五入して 4 位まで求めた。最終的には計算して得た値に対して 99 % 信頼度による母集団分布 N (m, σ²) の推定を行った*。

3. 結 果

A～F 試料に対して G D および W I D の測定値（標本データ）を Table 4～Table 9 に示す。データ表は左から順番に試料番号、直徑 (mm)、高さ (mm)、重量(g)、G D 値 (% TD)、W I D 値 (% TD) となっている。M I D のデータを Table 10 に示す。これらに統計的な処理をおこなったのちその結果をグラフ上にプロットした。これを Fig. 5 に示す。Fig. 5 は G D を基準としてそれに対する W I D, M I D の値を縦軸にとった。

図から理論密度が 95 % TD 以上の UO₂ ベレットに対してはその用いた測定法に関係なく、1 : 1 の対応を示し、直線的な相関関係が見い出されたが 95 % TD 以下では必ずしも直線的な関係は得られなかつた。95 % TD 以上のものは次の実験式で表すことが出来る。

$$\underline{(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80}$$

ただし (WID), (MID), (GD) の値には % TD を使用する。

4. 討 論

ボアの形態の密度におよぼす影響について考えてみたい。Fig. 5 で明らかなように 95 % TD 以上の密度をもつ UO₂ ベレットではその測定密度値が用いた手法に関係なくほぼ同一の値におちつく。J. Belle^{8), 9)}によれば UO₂ ベレットの密度が 75～95 % TD の密度域では閉気孔 (Closed Porosity 以下 C P) が比較的一定の値にあるのに対して開気孔 (Open Porosity 以下 O P) が 5 倍以上も存在する。一方、密度が 94～95 % TD を越えると O P は急速に減少してゆき、C P は急激に増加する (Fig. 6⁷⁾ 参照)。本実験での結果によれば 95 % TD 以上の高い密度をもつた C～F 試料が Fig. 5 でみるよう同一直線上にならぶのに対して 95 % 以下の密度をもつた A および B 試料がこの直線からはずれている。この現象は 95 % 付近を境に O P が急激に減少し C P が増加するという J. Belle の結果と一致している。Fig. 7 は実験に供した

* 付録参照

は 18.8°C であった。

液浸密度測定に用いた細線は 0.3 mm φ の Ni 線で先端にかごをつけて UO₂ ベレットの破片がうまく入るようにした。データは G D, W I D が小数点以下 3 桁, M I D は小数点以下 5 桁目を四捨五入して 4 位まで求めた。最終的には計算して得た値に対して 99 % 信頼度による母集団分布 N (m, σ²) の推定を行った*。

3. 結 果

A～F 試料に対して G D および W I D の測定値（標本データ）を Table 4～Table 9 に示す。データ表は左から順番に試料番号, 直径 (mm), 高さ (mm), 重量 (g), G D 値 (% TD), W I D 値 (% TD) となっている。M I D のデータを Table 10 に示す。これらに統計的な処理をおこなったのちその結果をグラフ上にプロットした。これを Fig. 5 に示す。Fig. 5 は G D を基準としてそれに対する W I D, M I D の値を縦軸にとった。

図から理論密度が 95 % TD 以上の UO₂ ベレットに対してはその用いた測定法に関係なく、1 : 1 の対応を示し、直線的な相関関係が見い出されたが 95 % TD 以下では必ずしも直線的な関係は得られなかつた。95 % TD 以上のものは次の実験式で表すことが出来る。

$$\underline{(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80}$$

ただし (WID), (MID), (GD) の値には % TD を使用する。

4. 討 論

ボアの形態の密度におよぼす影響について考えてみたい。Fig. 5 で明らかなように 95 % TD 以上の密度をもつ UO₂ ベレットではその測定密度値が用いた手法に関係なくほぼ同一の値におちつく。J. Belle^{8), 9)}によれば UO₂ ベレットの密度が 75～95 % TD の密度域では閉気孔 (Closed Porosity 以下 C P) が比較的一定の値にあるのに対して開気孔 (Open Porosity 以下 O P) が 5 倍以上も存在する。一方、密度が 94～95 % TD を越えると O P は急速に減少してゆき、C P は急激に増加する (Fig. 6⁽⁷⁾ 参照)。本実験での結果によれば 95 % TD 以上の高い密度をもつた C～F 試料が Fig. 5 でみると同一直線上にならぶのに対して 95 % 以下の密度をもつた A および B 試料がこの直線からはずれている。この現象は 95 % 付近を境に O P が急激に減少し C P が増加するという J. Belle の結果と一致している。Fig. 7 は実験に供した

* 付録参照

試料A～Fの金相写真である、AおよびB試料は理論密度が95%以下であり残りのものは95%以上である。BおよびCには気孔を人工的に大きくする添加物（ナフタリン）を入れたため大きい気孔が微細な気孔と混在している。

Fig.5から95%TD以上の理論密度をもつUO₂ペレットの(WID), (MID)の値は大体0.2%TD程度(GD)より高くなっていることがわかる。

5. 結 言

照射前のUO₂ペレットの密度測定を行い、形状密度(GD)、水液浸密度(真空置換、WID)、およびメタキシレン液浸密度(MID)の各データ間の相關関係を求めた。その結果理論密度が95%以上のものに対しては測定法間に次式で表わせるような1:1対応する直線的な相關関係が見い出されたが理論密度が95%以下のものには相關が見られなかつた。

$$(WID) \text{ or } (MID) = 1.10 (GD) - 7.80$$

ただし上式で密度は[%TD]であらわすこととする。

謝 辞

形状密度および水液浸密度の測定結果の計算解析は同室の泉文男氏、メタキシレン液浸密度の測定およびデータ整理は藤田操氏の協力によつた。また同室の市川達生氏には有益な討論をたまわつた。ここに厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) W. Watson et al, 久保田ら訳編;基礎実験物理学 1, オーム社(1960)79
- 2) 工業技術院計量研究所;改訂 計量ハンドブック, コロナ社(1976)970
- 3) National Bureau of Standards Handbook 77, II (1961)
"Precision Measurement and Calibration—Density of Solids and Liquids",
NBS C 487 (1950) 660
- 4) 原子燃料公社検査専門委員会; "燃料要素"
- 5) 内田, 柳沢, 市川; JAERI-M 6904 "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets (I)" (1977)
- 6) M. D. Freshley, et al; J. Nucl. Mat., 62 (1976) 138
- 7) D. A. Banks; J. Nucl. Mat., 54 (1974) 97

試料A～Fの金相写真である、AおよびB試料は理論密度が95%以下であり残りのものは95%以上である。BおよびCには気孔を人工的に大きくする添加物（ナフタリン）を入れたため大きい気孔が微細な気孔と混在している。

Fig.5から95%TD以上の理論密度をもつUO₂ペレットの(WID), (MID)の値は大体0.2%TD程度(GD)より高くなっていることがわかる。

5. 結 言

照射前のUO₂ペレットの密度測定を行い、形状密度(GD)、水液浸密度(真空置換、WID)、およびメタキシレン液浸密度(MID)の各データ間の相関関係を求めた。その結果理論密度が95%以上のものに対しては測定法間に次式で表わせるような1:1対応する直線的な相関関係が見い出されたが理論密度が95%以下のものには相関が見られなかつた。

$$\underline{(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80}$$

ただし上式で密度は[%TD]であらわすこととする。

謝 辞

形状密度および水液浸密度の測定結果の計算解析は同室の泉文男氏、メタキシレン液浸密度の測定およびデータ整理は藤田操氏の協力によつた。また同室の市川達生氏には有益な討論をたまわつた。ここに厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) W. Watson et al, 久保田ら訳編：基礎実験物理学 1, オーム社(1960)79
- 2) 工業技術院計量研究所：改訂 計量ハンドブック，コロナ社(1976)970
- 3) National Bureau of Standards Handbook 77, II (1961)
"Precision Measurement and Calibration—Density of Solids and Liquids",
NBS C 487 (1950) 660
- 4) 原子燃料公社検査専門委員会：“燃料要素”
- 5) 内田, 柳沢, 市川; JAERI-M 6904 "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets (I)" (1977)
- 6) M. D. Freshley, et al; J. Nucl. Mat., 62 (1976) 138
- 7) D. A. Banks; J. Nucl. Mat., 54 (1974) 97

試料A～Fの金相写真である、AおよびB試料は理論密度が95%以下であり残りのものは95%以上である。BおよびCには気孔を人工的に大きくする添加物(ナフタリン)を入れたため大きい気孔が微細な気孔と混在している。

Fig.5から95%TD以上の理論密度をもつUO₂ペレットの(WID), (MID)の値は大体0.2%TD程度(GD)より高くなっていることがわかる。

5. 結 言

照射前のUO₂ペレットの密度測定を行い、形状密度(GD)、水液浸密度(真空置換、WID)、およびメタキシレン液浸密度(MID)の各データ間の相關関係を求めた。その結果理論密度が95%以上のものに対しては測定法間に次式で表わせるような1:1対応する直線的な相關関係が見い出されたが理論密度が95%以下のものには相關が見られなかつた。

$$(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80$$

ただし上式で密度は[%TD]であらわすこととする。

謝 辞

形状密度および水液浸密度の測定結果の計算解析は同室の泉文男氏、メタキシレン液浸密度の測定およびデータ整理は藤田操氏の協力によつた。また同室の市川達生氏には有益な討論をたまわつた。ここに厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) W. Watson et al, 久保田ら訳編：基礎実験物理学 1, オーム社(1960)79
- 2) 工業技術院計量研究所：改訂 計量ハンドブック，コロナ社(1976)970
- 3) National Bureau of Standards Handbook 77, II(1961)
"Precision Measurement and Calibration—Density of Solids and Liquids",
NBS C 487(1950)660
- 4) 原子燃料公社検査専門委員会：“燃料要素”
- 5) 内田, 柳沢, 市川：JAERI-M 6904 “Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets (I)”(1977)
- 6) M. D. Freshley, et al : J. Nucl. Mat., 62(1976)138
- 7) D. A. Banks : J. Nucl. Mat., 54(1974)97

試料A～Fの金相写真である、AおよびB試料は理論密度が95%以下であり残りのものは95%以上である。BおよびCには気孔を人工的に大きくする添加物（ナフタリン）を入れたため大きい気孔が微細な気孔と混在している。

Fig.5から95% TD以上の理論密度をもつUO₂ペレットの(WID), (MID)の値は大体0.2% TD程度(GD)より高くなっていることがわかる。

5. 結 言

照射前のUO₂ペレットの密度測定を行い、形状密度(GD)、水液浸密度(真空置換、WID)、およびメタキシレン液浸密度(MID)の各データ間の相關関係を求めた。その結果理論密度が95%以上のものに対しては測定法間に次式で表わせるような1:1対応する直線的な相關関係が見い出されたが理論密度が95%以下のものには相關が見られなかつた。

$$\underline{(WID) \text{ or } (MID) = 1.10(GD) - 7.80}$$

ただし上式で密度は[% TD]であらわすこととする。

謝 辞

形状密度および水液浸密度の測定結果の計算解析は同室の泉文男氏、メタキシレン液浸密度の測定およびデータ整理は藤田操氏の協力によつた。また同室の市川達生氏には有益な討論をたまわつた。ここに厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) W. Watson et al, 久保田ら訳編：基礎実験物理学 1, オーム社(1960)79
- 2) 工業技術院計量研究所；改訂 計量ハンドブック，コロナ社(1976)970
- 3) National Bureau of Standards Handbook 77, II (1961)
"Precision Measurement and Calibration—Density of Solids and Liquids",
NBS C 487 (1950) 660
- 4) 原子燃料公社検査専門委員会：“燃料要素”
- 5) 内田, 柳沢, 市川; JAERI-M 6904 "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellets (I)" (1977)
- 6) M. D. Freshley, et al; J. Nucl. Mat., 62 (1976) 138
- 7) D. A. Banks; J. Nucl. Mat., 54 (1974) 97

- 8) J. Belle, et al : "Uranium Dioxide, Properties and Nuclear Applications"
USAEC, Washington D. C. (1961) 93
- 9) J. BeUe and B. Lustman : "Properties of Uranium Dioxide" in "Fuel
Elements Conference, Paris" TID-7546, Book 2 (1958) 442

付 錄

使用した統計的処理 (statistical treatment)について、

実験の結果得たデータの処理は目的を簡単化した命題で書くと「標本平均（すなわち得た UO_2 ペレットの密度データの平均値）とその分散が知れているとき母集団（すなわち測定対象となっているA～Fの各試料そのもの）の密度の平均値を推定せよ」ということになる。

実験データは正規分布であった。そこで今の場合母集団は平均値 m 、分散 σ^2 の正規分布 $N(m, \sigma^2)$ にしたがっていると考えてよい。一般に標本値（測定データ値） X_i が $N(m, \sigma^2)$ にしたがうとき

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (\text{標本平均})$$

に対して次式の Y は自由度 $n - 1$ のt分布にしたがう。

$$\begin{aligned} Y &= \frac{\bar{X} - m}{(SD / \sqrt{n-1})} \\ &= \frac{\sqrt{n-1}(\bar{X} - m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n}} \end{aligned}$$

ただし

$$SD^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

は分散である。いま Y がある値 λ の外に出る確率（つまり危険率）を α とすれば次式がいえる。

$$P(|Y| \geq \lambda) = \alpha$$

つまり

$$P\left(\left|\frac{\bar{X} - m}{SD / \sqrt{n-1}}\right| \geq \lambda\right) = \alpha$$

変形して

$$P\left(\left|\frac{\bar{X} - m}{\sqrt{n-1}}\right| \geq \lambda \left|\frac{SD}{\sqrt{n-1}}\right|\right) = \alpha$$

となる。右辺の α に対する λ の値を t 分布表より求めれば $1 - \alpha$ の信頼度 (confidence coefficient) で次式が成立する。

$$\left| \frac{\bar{X} - m}{S D / \sqrt{n-1}} \right| < \lambda$$

この \bar{X} の実現値である標本平均 \bar{x} を上式に代入して母集団の推定平均値を求めることができる。
計算に必要な t 分布表を A. Table 1 に示す。

以下に実際の具体例で使いかたを示す。

例題

A 試料につきメタキシレン液浸密度測定を行い、データ（標本）の平均値 \bar{x} と標準偏差 $S D$ として次の値を得た。

$$\bar{x} = 94.3336 (\% TD)$$

$$SD = 0.1558 (\% TD)$$

99% の信頼度で母集団の平均密度 m を推定せよ。ただしデータ（標本）数は $n = 6$ とする。

〔解答〕

$$\text{標本平均 } \bar{x} = 94.3336 (\% TD)$$

$$\text{標本標準偏差 } SD = 0.1558 (\% TD)$$

より

$$\text{分散 } SD^2 = 0.0243$$

またデータ個数 $n = 6$ より 平均値の規格誤差は

$$\frac{SD}{\sqrt{n-1}} = \frac{0.1558}{\sqrt{6-1}}$$

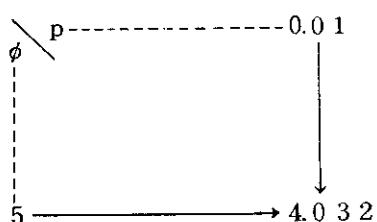
$$= 0.0697$$

$$\text{自由度 } \phi \text{ は } \phi = n - 1$$

$$= 6 - 1$$

$$= 5$$

t 分布表 (A. Table 1) から λ はつきのように求められる。



ここで p は危険率 α のことであり今の場合

$$\alpha = 1 - \text{信頼度 (\%)} / 100$$

$$= 1 - 0.99$$

$$= 0.01$$

よって母集団平均 m は次式で求められる。

$$m = \bar{x} \pm \lambda \frac{sD}{\sqrt{n-1}}$$

$$= 94.3336 \pm 4.032 \times \frac{0.1558}{\sqrt{6-1}}$$

$$= 94.3336 \pm 4.032 \times 0.0697$$

$$\therefore m \cong 94.33 \pm 0.28$$

Table 1 Specification of Fuel Pellet

Material : Uranium Dioxide (UO_2)

Enrichment : 1.8 w/o

End Form : Dished at both ends with chamfer

Dimensions : 14.40 mm diameter

18.0 mm height

Density : Three kinds of specimens

(92.5, 95, 97 % TD)

Table 2 Density as a function of temperature

(a) meta-xylene, (b) water

(a) 温 度	10 °C	20 °C (g/cm³)
0 °C	—	0.8628
1	—	0.8619
2	—	0.8611
3	—	0.8602
4	—	0.8594
5	0.8673	0.8585
6	0.8664	0.8577
7	0.8655	0.8568
8	0.8646	0.8559
9	0.8637	—

(b) (g/cm³)

	0 °C	10 °C	20 °C
0 °C	0.99987	0.99973	0.99823
1	0.99993	0.99963	0.99802
2	0.99997	0.99952	0.99780
3	0.99999	0.99940	0.99756
4	0.00000	0.99927	0.99732
5	0.99999	0.99913	0.99707
6	0.99997	0.99897	0.99681
7	0.99993	0.99880	0.99654
8	0.99988	0.99862	0.99626
9	0.99981	0.99843	0.99597

Table 3 Normalization of UO₂ pellet used.

Type	A	B	C	D	E	F
Normalization: geometrical density	92.5 ^{+1.0} _{-1.5}	92.5 ^{+1.0} _{-1.5}	95. ^{+1.5} _{-1.0}	95. ^{+1.5} _{-1.0}	95. ^{+1.5} _{-1.0}	97. ^{+1.5} _{-1.0}
grain size	small	large	small	large	large	large
pore size	small	large	small	small	large	small
pore formers	-	-	naphthalene	-	-	napthalene

Table 4 Sample data of the GD and WID (1)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(%/O GEOMETRY)	T.D. IMMERSION
A 5	14.410	17.790	29.183	92.980	94.420
A 6	14.400	17.820	29.180	92.940	94.300
A 7	14.410	17.810	29.200	92.930	94.250
A 8	14.410	17.800	29.167	92.870	94.320
A 9	14.420	17.780	29.202	92.960	94.390
A10	14.410	17.770	29.137	92.940	94.370
A11	14.410	17.800	29.161	92.850	94.100
A12	14.410	17.810	29.159	92.790	94.130
A13	14.410	17.790	29.132	92.810	94.300
A14	14.400	17.800	29.176	93.030	94.130
A15	14.410	17.790	29.154	92.880	94.170
A16	14.400	17.810	29.194	93.040	94.290
A17	14.410	17.770	29.185	93.090	94.380
A18	14.400	17.790	29.170	93.070	94.270
A19	14.410	17.790	29.192	93.010	94.370
A20	14.410	17.780	29.109	92.790	94.300
A21	14.420	17.790	29.157	92.760	94.340
A22	14.410	17.830	29.210	92.850	94.190
A23	14.400	17.770	29.133	93.050	94.240
A24	14.400	17.760	29.154	93.170	94.270
A25	14.410	17.800	29.197	92.970	94.330
A26	14.410	17.800	29.228	93.070	94.270
A27	14.410	17.790	29.164	92.920	94.120
A28	14.400	17.790	29.157	93.020	94.260
A29	14.410	17.800	29.188	92.940	94.350
A31	14.410	17.800	29.189	92.940	94.120
A32	14.400	17.830	29.188	92.910	94.120
A33	14.410	17.800	29.186	92.930	94.130
A34	14.410	17.800	29.145	92.800	94.130
A35	14.410	17.780	29.131	92.860	94.300
A36	14.410	17.800	29.161	92.850	94.110
A37	14.410	17.830	29.194	92.800	94.130
A40	14.410	17.870	29.043	93.170	93.920
A42	14.410	17.790	29.184	92.980	94.120
A51	14.400	17.910	29.305	92.860	94.160

Table 5 Continued (2)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(%) T.D. (GEOMETRY) IMMERSION
8 2	14.400	18.090	29.655	92.950 93.180
8 3	14.410	18.040	29.588	92.870 93.090
8 8	14.380	17.950	29.384	93.040 93.390
811	14.410	18.030	29.602	92.970 93.200
812	14.380	17.930	29.365	93.090 93.480
813	14.380	17.920	29.335	93.040 93.460
814	14.420	18.050	29.626	92.810 93.220
815	14.420	18.050	29.583	92.680 92.990
816	14.360	17.950	29.330	93.130 93.500
817	14.410	18.060	29.637	92.920 93.290
821	14.410	18.100	29.676	92.840 93.130
822	14.400	18.040	29.677	93.080 93.180
823	14.380	17.930	29.387	93.160 93.460
824	14.390	17.930	29.379	93.000 93.460
825	14.390	17.950	29.426	93.040 93.480
827	14.390	17.960	29.426	93.000 93.470
830	14.380	17.970	29.433	93.090 93.450
832	14.380	17.930	29.400	93.200 93.490
833	14.370	17.940	29.296	92.950 93.450
834	14.420	17.950	29.524	93.010 93.200
839	14.400	18.060	29.641	93.070 93.180
841	14.410	18.030	29.569	92.870 93.100
842	14.380	17.950	29.372	93.000 93.450
843	14.420	18.010	29.571	92.650 93.170
845	14.380	17.920	29.363	93.130 93.470
847	14.410	18.050	29.616	92.920 93.180
849	14.380	17.950	29.398	93.090 93.160
851	14.370	17.960	29.345	93.000 93.410
852	14.370	17.930	29.291	92.980 93.500
853	14.370	17.960	29.366	93.060 93.450
854	14.380	17.940	29.403	93.150 93.460
856	14.390	17.960	29.379	92.840 93.490
818	14.390	18.060	29.645	93.160 93.330
826	14.420	18.050	29.582	92.670 93.110
846	14.410	18.060	29.640	92.930 93.150

Table 6 Continued (3)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(%) T.D.) (GEOMETRY) IMMERSION
C 5	14.410	17.860	30.049	95.290 95.380
C 6	14.410	17.840	30.032	95.340 95.460
C 7	14.420	17.860	30.045	95.140 95.430
C 9	14.420	17.840	30.020	95.170 95.460
C10	14.420	17.840	30.065	95.310 95.420
C11	14.420	17.850	30.073	95.280 95.430
C12	14.410	17.890	30.109	95.310 95.450
C13	14.420	17.860	30.468	94.430 95.160
C14	14.420	17.890	30.105	95.170 95.400
C15	14.410	17.890	30.040	95.100 95.490
C17	14.410	17.860	30.041	95.260 95.580
C18	14.410	17.900	30.096	95.220 95.370
C19	14.410	17.880	30.059	95.210 95.330
C20	14.410	17.900	30.117	95.290 95.430
C21	14.410	17.890	30.099	95.280 95.370
C22	14.410	17.850	30.057	95.370 95.460
C23	14.410	17.860	30.037	95.250 95.380
C24	14.410	17.780	29.905	95.260 95.360
C25	14.410	17.850	30.053	95.350 95.470
C26	14.410	17.850	30.052	95.350 95.440
C27	14.420	17.830	30.055	95.270 95.460
C28	14.410	17.870	30.105	95.410 95.450
C29	14.410	17.850	30.071	95.410 95.490
C30	14.410	17.850	30.041	95.310 95.510
C31	14.420	17.850	30.046	95.200 95.500
C32	14.420	17.850	30.034	95.160 95.410
C33	14.410	17.850	30.062	95.380 95.410
C34	14.410	17.840	30.024	95.310 95.370
C35	14.410	17.840	30.019	95.300 95.420
C36	14.410	17.850	30.039	95.310 95.450
C37	14.410	17.830	30.009	95.320 95.440
C38	14.410	17.870	30.060	95.270 95.440
C40	14.400	17.850	30.019	95.380 95.480
C41	14.410	17.850	30.084	95.450 95.500
C42	14.410	17.890	30.115	95.550 95.480

Table 7 Continued (4)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(0/0 T.D.) (GEOMETRY)	IMMERSION
D 5	14.370	17.670	29.947	95.540	95.720
D 6	14.360	17.900	30.017	95.470	95.790
D 7	14.370	17.840	29.830	95.490	95.740
D 8	14.370	17.900	29.987	95.510	95.720
D 9	14.370	17.840	29.884	95.500	95.690
D12	14.370	17.680	29.992	95.630	95.720
D13	14.360	17.930	29.997	95.510	95.690
D14	14.370	17.590	30.094	95.360	95.710
D16	14.370	17.940	30.043	95.470	95.710
D18	14.370	17.930	30.030	95.480	95.710
D19	14.370	17.880	29.959	95.530	95.690
D20	14.370	17.920	30.033	95.540	95.690
D21	14.370	17.630	29.873	95.520	95.690
D22	14.370	17.670	29.935	95.500	95.680
D23	14.370	17.870	29.939	95.520	95.730
D24	14.370	17.910	29.972	95.400	95.660
D26	14.370	17.640	29.956	95.730	95.820
D27	14.370	17.660	29.922	95.520	95.700
D29	14.370	17.660	29.916	95.500	95.680
D30	14.370	17.890	29.976	95.530	95.710
D31	14.400	17.640	29.979	95.400	95.690
D32	14.370	17.940	30.047	95.480	95.670
D33	14.370	17.830	29.851	95.450	95.640
D34	14.390	17.640	29.984	95.550	95.670
D35	14.370	17.880	29.977	95.580	95.790
D36	14.370	17.690	29.946	95.430	95.670
D37	14.370	17.680	29.910	95.370	95.670
D38	14.370	17.900	29.964	95.500	95.690
D39	14.370	17.690	29.993	95.580	95.700
D40	14.370	17.660	29.902	95.450	95.710
D41	14.370	17.830	29.887	95.570	95.780
D42	14.370	17.670	29.911	95.430	95.730
D43	14.370	17.940	30.071	95.560	95.740
D46	14.370	17.860	29.916	95.500	95.670
D50	14.370	17.910	29.981	95.430	95.670
AVERAGE	14.371	17.683	29.963	95.501	95.707
MAXIMUM	14.400	17.990	30.094	95.730	95.820
MINIMUM	14.360	17.630	29.851	95.360	95.640
SIGMA	0.006	0.058	0.058	0.071	0.039

Table 8 Continued (5)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(%) T.D.) (GEOMETRY) IMMERSION
E 1	14.410	17.910	30.241	95.700 96.000
E 2	14.400	17.900	30.231	95.650 96.000
E 3	14.410	17.870	30.178	95.710 95.830
E 5	14.420	17.870	30.207	95.670 95.870
E 9	14.400	17.900	30.243	95.690 96.010
E10	14.400	17.890	30.206	95.640 96.000
E11	14.400	17.900	30.233	95.660 96.000
E12	14.400	17.890	30.220	95.670 95.980
E13	14.400	17.920	30.282	95.910 95.970
E14	14.400	17.910	30.230	95.800 95.950
E15	14.400	17.920	30.238	95.770 95.950
E16	14.410	17.910	30.260	95.760 96.010
E17	14.410	17.900	30.235	95.730 96.000
E18	14.410	17.890	30.230	95.770 96.000
E19	14.420	17.910	30.267	95.650 95.970
E20	14.410	17.920	30.257	95.690 95.980
E21	14.430	17.960	30.344	95.480 95.900
E22	14.400	17.900	30.326	96.160 95.990
E23	14.410	17.930	30.289	95.740 95.840
E25	14.410	17.920	30.297	95.820 95.930
E26	14.410	17.920	30.292	95.800 95.900
E27	14.430	17.950	30.356	95.580 95.860
E28	14.420	17.930	30.265	95.530 95.850
E29	14.430	17.940	30.340	95.580 95.880
E30	14.400	17.930	30.245	95.740 95.990
E31	14.400	17.880	30.231	95.960 95.980
E34	14.420	17.960	30.347	95.630 95.880
E35	14.430	17.940	30.317	95.510 95.860
E37	14.400	17.760	30.006	95.900 95.930
E38	14.410	17.920	30.283	95.780 96.020
E41	14.410	17.920	30.282	95.770 96.040
E43	14.410	17.920	30.268	95.730 95.980
E44	14.410	17.900	30.259	95.610 96.060
E45	14.400	17.860	30.190	95.940 96.020
E46	14.400	17.900	30.200	95.760 95.900

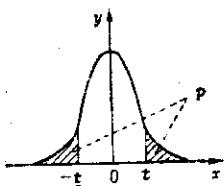
Table 9 Continued (6)

PELLET NUMBER	DIAMETER (MM)	HEIGHT (MM)	WEIGHT (GR)	DENSITY(%) T.D.) (GEOMETRY)	IMMERSION
F 5	14.420	17.920	30.828	97.310	97.660
F 6	14.410	17.940	30.856	97.420	97.580
F 7	14.420	17.910	30.806	97.290	97.590
F 8	14.410	17.910	30.790	97.380	97.590
F 9	14.420	17.910	30.795	97.270	97.610
F10	14.420	17.920	30.832	97.320	97.640
F11	14.420	17.910	30.826	97.360	97.610
F12	14.420	17.920	30.836	97.330	97.680
F14	14.410	17.940	30.877	97.490	97.690
F15	14.410	17.950	30.863	97.390	97.660
F16	14.420	17.950	30.877	97.300	97.680
F17	14.420	17.980	30.942	97.340	97.620
F18	14.410	18.000	30.980	97.490	97.610
F19	14.420	17.930	30.855	97.340	97.630
F20	14.420	17.920	30.854	97.390	97.660
F21	14.420	17.890	30.768	97.280	97.640
F22	14.410	17.860	30.710	97.400	97.580
F23	14.420	18.030	31.057	97.430	97.700
F24	14.410	17.890	30.771	97.430	97.600
F25	14.410	17.890	30.771	97.430	97.600
F26	14.420	17.990	30.990	97.430	97.610
F27	14.420	17.920	30.838	97.340	97.570
F28	14.410	17.960	30.913	97.490	97.590
F29	14.420	17.910	30.817	97.330	97.610
F30	14.420	17.910	30.813	97.320	97.620
F31	14.420	17.910	30.815	97.320	97.620
F32	14.420	17.950	30.915	97.420	97.620
F33	14.420	17.900	30.822	97.400	97.660
F34	14.420	17.910	30.847	97.420	97.750
F35	14.410	17.950	30.890	97.480	97.580
F36	14.420	17.990	30.947	97.300	97.540
F37	14.410	18.050	31.040	97.400	97.650
F38	14.414	17.920	30.806	97.320	97.600
F40	14.420	17.890	30.781	97.330	97.620
F41	14.410	17.910	30.767	97.370	97.620

TABLE 10 Sample data of MID

Type	Data					
A	94.2479	94.2271	94.3580	94.1640	94.4116	94.5930
B	92.2781	93.1669	93.2629	92.6267	93.3849	93.6914
C	95.3402	95.1252	95.0255	95.2553	95.3628	
D	95.6162	95.8410	95.6688	95.8794	95.3945	95.2220
E	95.8039	95.7418	95.5506	96.7497	95.3504	95.8939
F	97.0817	97.5885	97.5380	97.6590	97.3940	97.7204

A. Table 1 t distribution table



$\phi \backslash p$	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.593
3	0.756	0.978	1.250	1.638	2.853	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.713	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.953
7	0.711	0.896	1.119	1.416	1.895	2.365	2.998	3.499	5.403
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.105	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.035	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.963
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

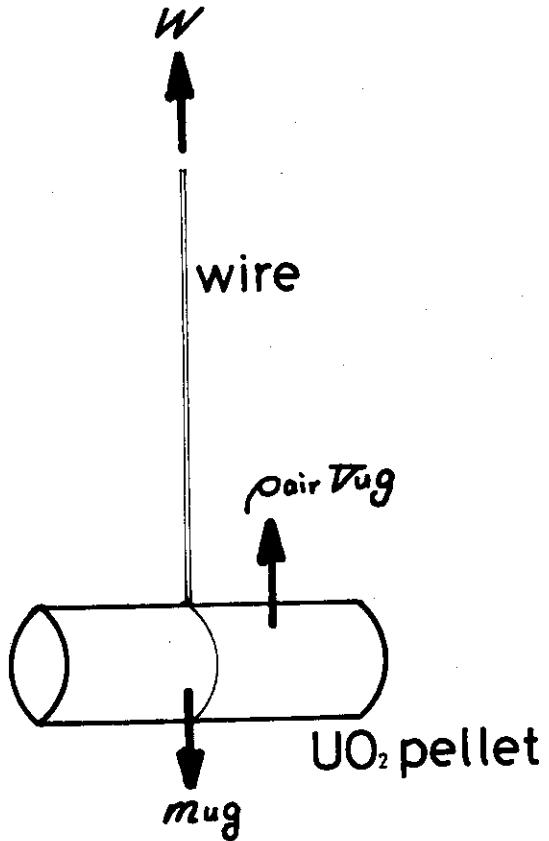


Fig. 1 Equilibrium state of Pellet in air.

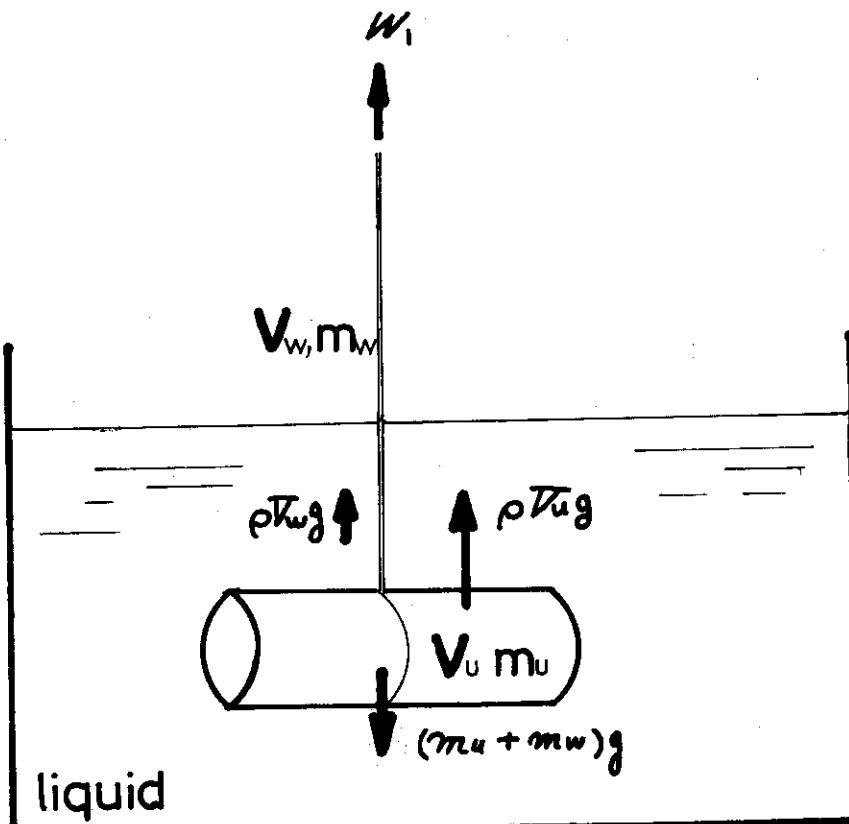


Fig. 2 Equilibrium state of the pellet immersed
in the meta-xylene.

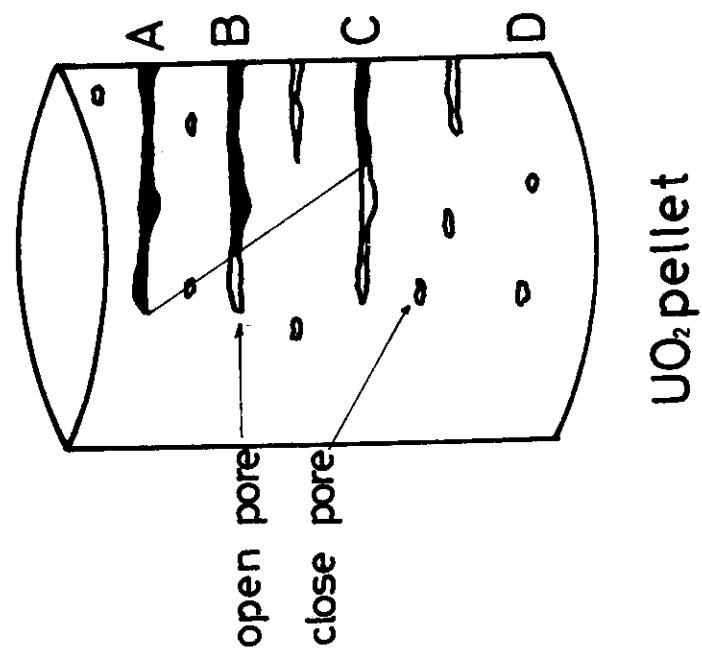


Fig. 4 Schematic comparison of immersion methods utilizing various fluid.

- (A) vacuum impregnated water-immersion
- (B) " meta-xylene immersion"
- (C) " mercury immersion"
- (D) geometric density

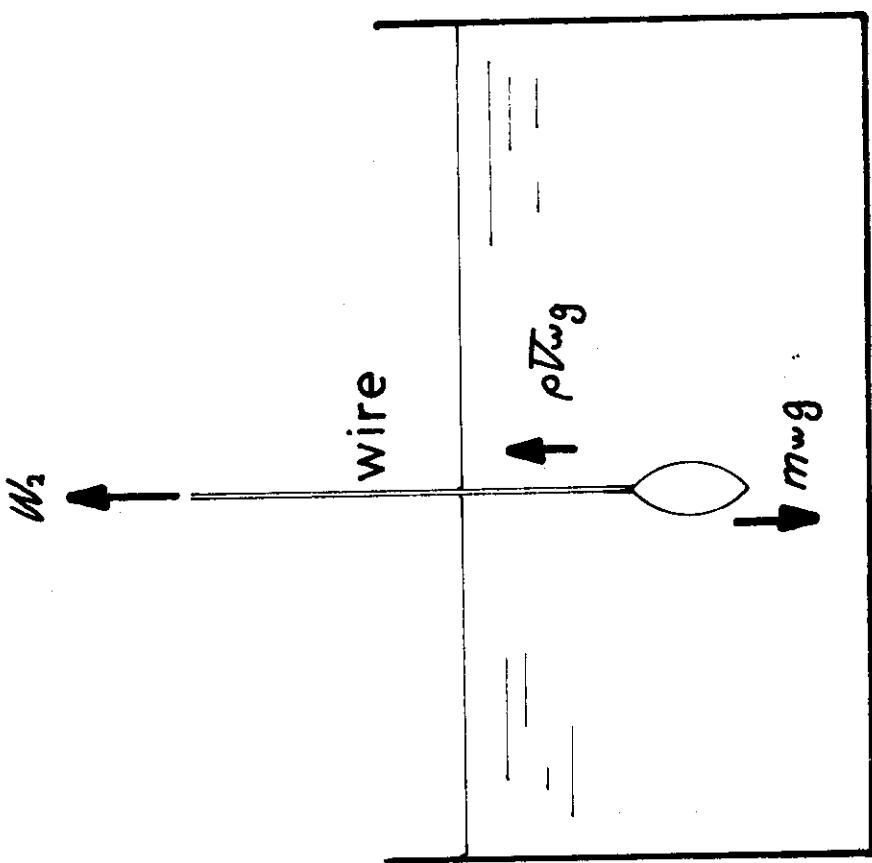


Fig. 3 Equilibrium state of the wire immersed in the meta-xylene.

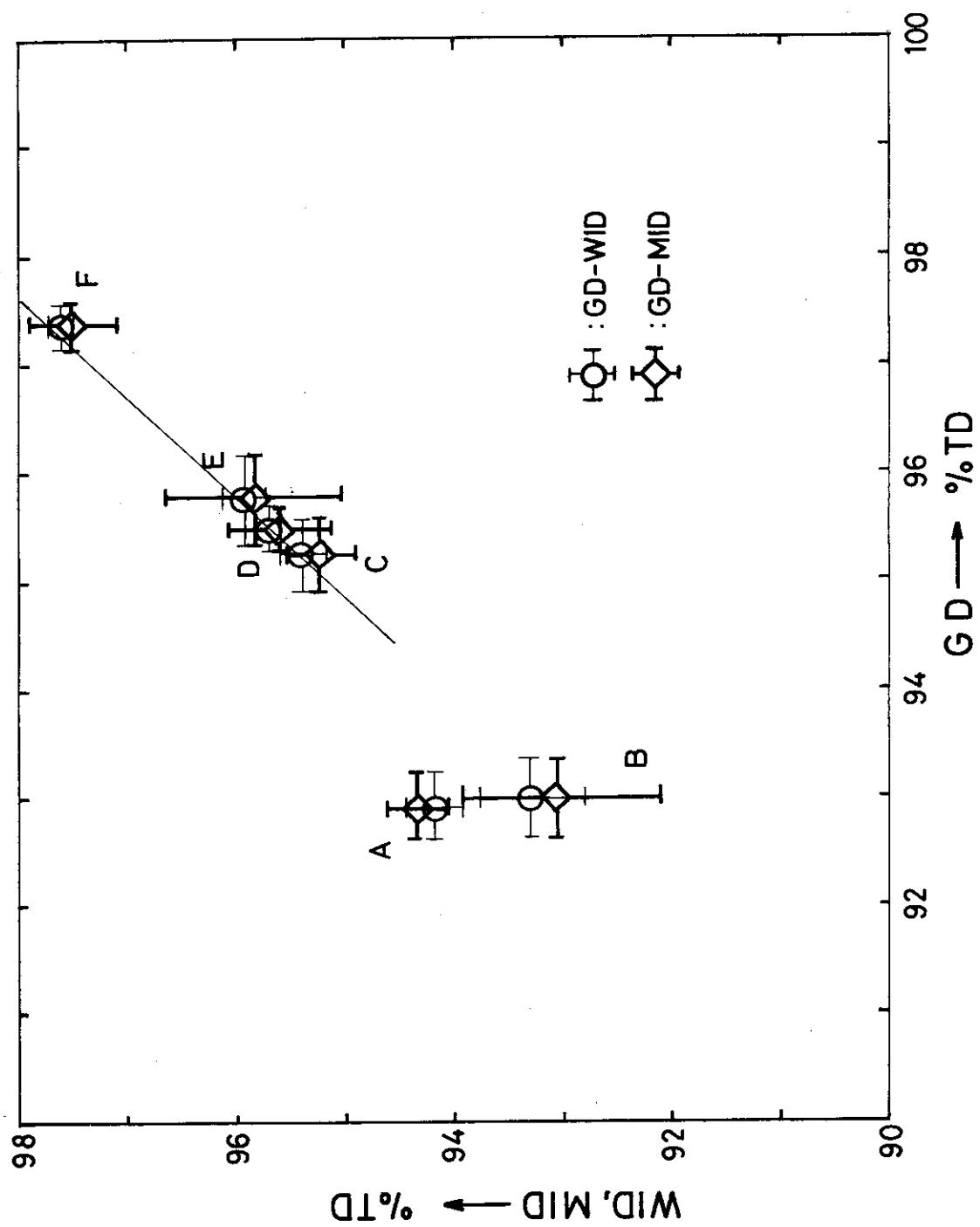


Fig. 5 Relation between GD and other WID, MID method
 (Above 95% TD from C to F_1 type have no
 depending upon the measuring method)

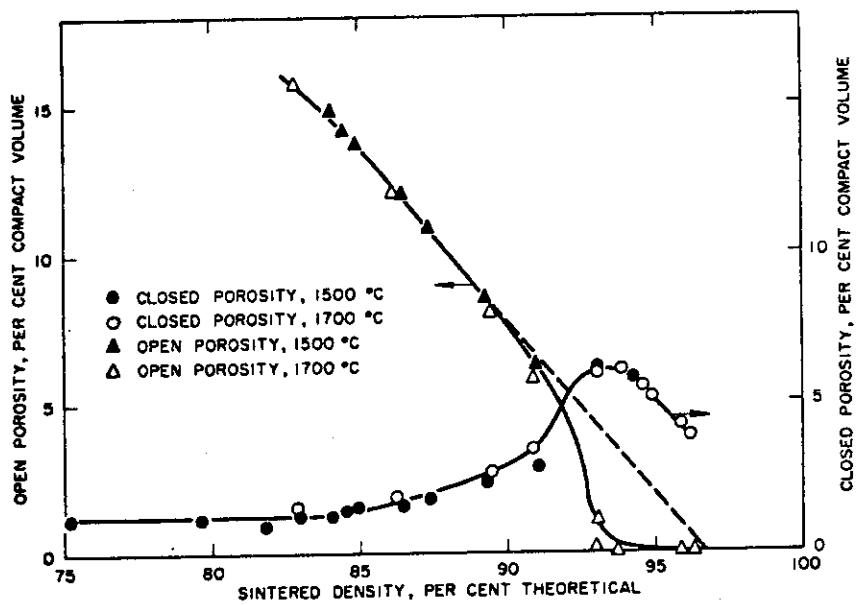


FIGURE 6 Porosity as a Function of Density: ADU Oxide Pressed to 65 Percent of Theoretical Density and Sintered in Hydrogen (H_2)

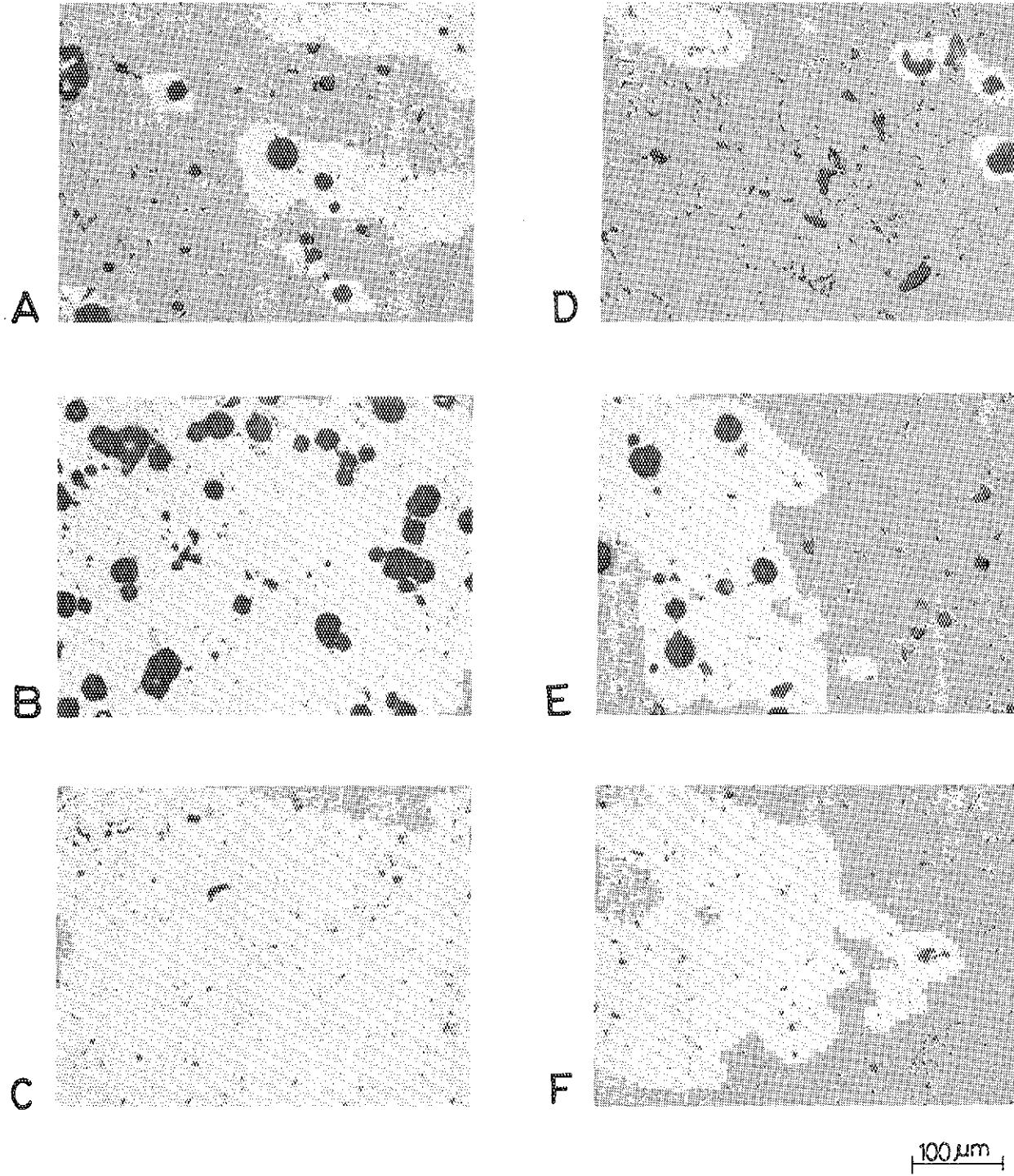


Fig. 7 Photomicrographs of the polished Surfaces of UO_2 pellets Theoretical density of both A and B Samples are less than 95% TD but the others are larger than 95% TD. Unetched