

JAERI-M
84-196

被覆燃料粒子の自動寸法検査

1984年10月

鹿志村 悟・井川 勝市

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山出軽印刷所

被覆燃料粒子の自動寸法検査

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

鹿志村 悟・井川 勝市

(1984年10月8日受理)

被覆燃料粒子の直径を自動で測定するために、自動粒径測定装置 (PSA : Particle Size Analyzer) を導入した。この装置を用いて、燃料核および被覆粒子の直径、真球度および密度を測定し、従来法 (手作業) で得られた値と比較した。いずれもよい一致を示した。さらに、被覆層の厚さと密度について従来法との比較を試みたところ、前者はよい一致を示したが、後者は必ずしも満足とはいえず、実用は第1層のみに留めるのが望ましいと判断した。

Automatic Size Analysis of Coated Fuel Particles

Satoru KASHIMURA, Katsuichi IKAWA

Department of Fuels and Materials Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 8, 1984)

For the purpose of measuring the diameter of coated fuel particles automatically PSA (Particle Size Analyzer) was installed. This machine was used to measure the diameter, sphericity and density of fuel kernels and coated fuel particles and the data were compared with those obtained manually by conventional methods. Both data showed a good agreement. Comparison was also made on the thickness and density of the coating layers. Agreement of the thickness was good, whereas the density did not always show satisfactory agreement, so that it should be recommended to limit the use to the first layer.

Keywords: Dimension, Sphericity, Density, Coated Fuel Particle, Quality Inspection, Automatic Size Analysis, Accuracy

目 次

1. はじめに	1
2. サンプル	2
3. 従来法検査	2
3.1 直径と真球度	2
3.2 被覆厚さ	2
3.3 粒子密度	2
3.4 被覆密度	3
4. P S A法検査	4
4.1 直径と真球度	4
4.2 被覆厚さ	4
4.3 粒子密度	5
4.4 被覆密度	5
5. 結論	6
謝 辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Sample	2
3. Conventional method	2
3.1 Diameter and sphericity	2
3.2 Coating thickness	2
3.3 Particle density	2
3.4 Coating density	3
4. PSA method	4
4.1 Diameter and sphericity	4
4.2 Coating thickness	4
4.3 Particle density	5
4.4 Coating density	5
5. Conclusion	6
Acknowledgement	6
Reference	6

1. はじめに

いかなる炉型の燃料であれ、寸法、密度検査は、数多くの検査項目の中で特に重要な位置を占める。高温ガス炉に使用する被覆燃料粒子は、寸法が小さいことと数が多いことのために、特殊な技術が必要である。

高温ガス炉燃料は直径 0.2 - 0.8 mm の球形の UO_2 、 UC_2 、 UCO などの焼結体を炭素で被覆したものである。最近では、炭素の間にサンドイッチ状に炭化ケイ素を挿入する構造が主流である。原研における実験炉燃料の設計では、この TRISO 型粒子の使用が決まっている。Fig. 1 に TRISO の構成を示す。Table 1 は各構成要素の原研設計寸法および密度である。原子炉に装荷する場合には、粒子と黒鉛粉末を混合して成形する。これをコンパクトという。コンパクトはさらにスリーブと呼ばれる黒鉛のさやに入れる。これで燃料棒ができる。

高温ガス炉燃料の検査は他の炉型の燃料の検査に比較してその項目数が多い。たとえば、現在、照射試験用燃料棒について実施している検査の項目数は、燃料核 9、被覆層 14、被覆粒子 14、コンパクト 28、黒鉛素材 24、スリーブ等黒鉛加工品 22、燃料棒完成品 9 の合計 120 項目⁽¹⁾である。燃料体を対象にするとさらに項目数が増える。しかしながら、これらの多くは、軽水炉燃料用に開発された UO_2 検査技術、炭酸ガス冷却炉用に開発された黒鉛検査技術などの従来技術が、そのまま、または若干の工夫によって利用できる。したがって、高温ガス炉燃料のために開発された検査技術は必ずしも多いとはいえない。被覆粒子については、寸法、密度、炭素結晶配向、破損率、破壊強度の 5 項目⁽²⁾である。

本報主題の寸法については、粒子直径であれ、被覆厚さであれ、対象が小さいことと数が非常に多いことのために、特殊な方法が考えられた。高温ガス炉開発の初期には、この目的のためにもっぱら X線マイクロラジオグラフが利用された。その後ドラゴン計画の中で半自動の寸法測定装置⁽⁴⁾が開発された。これも基本はラジオグラフであるが、乾板の画像解析とデータ処理を自動で行うもので、第 1 層と第 2 層の厚さを別々に測定できないという欠点がある。本報に述べる PSA⁽⁵⁾ (Particle Size Analyzer, 自動粒径測定装置) はさらにあとになってオーストリアで開発された。

PSA による粒子直径測定の原理を Fig. 2 に示す。スリットを通過した光束に直角に粒子を落下させる。粒子が大きいほど、粒子が光束を切る際の光量の減少量が大きい。最大光量減少量をもって直径とする。光量測定はフォトダイオードによる。処理速度は通常毎秒 20 粒、直径の測定精度は $\pm 2 \mu m$ である。データはミニコン処理され、平均値、標準偏差、信頼限界、直径分布などがプリンター、プロッター等に出力される。Fig. 3 に PSA 本体のブロックダイアグラムを示す。PSA には真球度測定のための機構が付属している。これによって、同一粒子の直径をランダム方向から 50 回測定する。ミニコンで最大直径と最小直径が選び出され、その比が計算される。これが真球度である。

2. サンプル

サンプルにはもっぱら原研設計の被覆燃料粒子を用いた。実験の性質上、4L(第4層まで被覆した完成TRISO粒子)ばかりでなく、3L(第3層まで被覆した中間製品)、2L(第2層まで被覆した中間製品)、1L(第1層まで被覆した中間製品)およびBK(被覆なし燃料核)も使用した。たとえば、第2層の厚さをPSAで測定するには1Lと2Lが必要であるが、これらは、当然のことながら、同一バッチから採取した。サンプルはすべて通常の被覆燃料粒子の製造法⁽⁶⁾によって製造したものである。サンプリングはランダムになるよう工夫した。すなわち、円周上に多数の受器を並べた円板を回転しながら、これらの受器に粒子を落した。実験にはこれらの受器のひとつに入った粒子を使用した。ランダムサンプリング装置の概念図をFig. 4に示す。

3. 従来法検査

3.1 直径と真球度

直径と真球度(最大直径と最小直径の比)をX線マイクロラジオグラフィ⁽³⁾で測定した。X線管のターゲットをタングステン、電圧を25kV、電流を25mAとした。乾板はコダックのハイレゾリューションプレートを用いた。露出時間を5分とした。

ラジオグラフの一例をFig. 5に示す。真球度のための最大直径と最小直径の位置は目視で選んだ。直径、真球度ともに測定は100粒について行った。測定結果の例をFig. 6に示す。これだけの測定に、熟練者が約8時間を要した。

3.2 被覆厚さ

被覆厚さの測定も直径と同様X線マイクロラジオグラフであるが、第1層と第2層に対しては2Lを使用する。その理由は、第3層以上を被覆すると、第1層と第2層の境界が識別困難になるからである。第1層と第2層の境界をより鮮明にするために、X線ビームのパスを粗い真空状態にすることによりX線の空気による散乱を防ぐ方法が有効であることがわかった。また、露出条件も上記直径測定の場合とは異なり、第1層、第2層に対しては、電圧15kV、電流25mA、露出時間120分を選んだ。厚さ測定は直角に交わる直径方向の4箇所について行った。

3.3 粒子密度

粒子密度の測定は燃料核と完成TRISO粒子について行った。方法は、燃料核については水

2. サンプル

サンプルにはもっぱら原研設計の被覆燃料粒子を用いた。実験の性質上、4L(第4層まで被覆した完成TRISO粒子)ばかりでなく、3L(第3層まで被覆した中間製品)、2L(第2層まで被覆した中間製品)、1L(第1層まで被覆した中間製品)およびBK(被覆なし燃料核)も使用した。たとえば、第2層の厚さをPSAで測定するには1Lと2Lが必要であるが、これらは、当然のことながら、同一バッチから採取した。サンプルはすべて通常の被覆燃料粒子の製造法⁽⁶⁾によって製造したものである。サンプリングはランダムになるよう工夫した。すなわち、円周上に多数の受器を並べた円板を回転しながら、これらの受器に粒子を落した。実験にはこれらの受器のひとつに入った粒子を使用した。ランダムサンプリング装置の概念図をFig. 4に示す。

3. 従来法検査

3.1 直径と真球度

直径と真球度(最大直径と最小直径の比)をX線マイクロラジオグラフィ⁽³⁾で測定した。X線管のターゲットをタングステン、電圧を25kV、電流を25mAとした。乾板はコダックのハイレゾリューションプレートを用いた。露出時間を5分とした。

ラジオグラフの一例をFig. 5に示す。真球度のための最大直径と最小直径の位置は目視で選んだ。直径、真球度ともに測定は100粒について行った。測定結果の例をFig. 6に示す。これだけの測定に、熟練者が約8時間を要した。

3.2 被覆厚さ

被覆厚さの測定も直径と同様X線マイクロラジオグラフであるが、第1層と第2層に対しては2Lを使用する。その理由は、第3層以上を被覆すると、第1層と第2層の境界が識別困難になるからである。第1層と第2層の境界をより鮮明にするために、X線ビームのパスを粗い真空状態にすることによりX線の空気による散乱を防ぐ方法が有効であることがわかった。また、露出条件も上記直径測定の場合とは異なり、第1層、第2層に対しては、電圧15kV、電流25mA、露出時間120分を選んだ。厚さ測定は直角に交わる直径方向の4箇所について行った。

3.3 粒子密度

粒子密度の測定は燃料核と完成TRISO粒子について行った。方法は、燃料核については水

銀置換法⁽²⁾、TRISO粒子については有機液体置換法⁽⁷⁾である。水銀置換法にはFig.7に示す道具を用いた。内側容器の腹部(体積5cc)に試料(20g)を入れ、細管が水銀面に触れない位置まで傾けたのち、全体を真空にする。次に位置を垂直に戻して細管を水銀中に入れ、外側容器に空気を入れる。水銀は細管を上昇して腹部を満たす。入った水銀量から試料体積を求める。燃料核密度はメタキシレン、n-ブタノール等の通常の有機液体置換法により容易に測定することができる。しかし、次の理由により水銀置換法を用いた：第1層密度を求めるために必要な1L粒子の体積測定は、第1層の気孔が大部分開気孔であるために、表面張力の大きな液体、すなわち水銀、を用いなければならない。第1層体積は1LとBKの差として求めるので、何らかの系統誤差を懸念して、BKの体積測定にも同じ方法を用いた。BK密度のみを目的とする場合は、かかる懸念は不要である。

有機液体置換法にはFig.8に示すピクノメーターを使用した。容器(体積3cc)に液を満たし、キャップを閉じると、液がキャップの毛細管を満たす。液量測定は秤量による。粒子(10g)を入れた場合との液量の差が粒子体積である。液の比重は純水との比較による。液体として、今回はn-ブタノールを用いたが、メタキシレンでもよい。水は炭素を濡らさないので使えない。

3.4 被覆密度

第1層密度 d_1 は次の式で求める。ここで W_1 は試料粒子(1L)の重量、 W_0 は試料を焼いて生

$$d_1 = (W_1 - W_0) / (V_1 - V_0)$$

じた U_3O_8 の重量を UO_2 に換算した値、 V_1 は試料の体積、 V_0 は W_0 と同重量のBKの体積である。 V_1 と V_0 は上述の理由で水銀置換法で測定した。

第2層はテトラブromエタン-四塩化炭素の混合重液(可変比重範囲1.6-2.4)による浮遊沈降法で測定した。試料採取法は特殊である。2Lを樹脂に埋込み、研磨によって大部分削りとり、凸レンズ状の小試片をジメチルホルムアミドにより樹脂から分離する。その様子をFig.9に示す。

第3層密度も浮遊沈降法であるが、この場合の重液はヨウ化メチレン-ベンゼン系(可変比重範囲0.8-3.3)である。また、試片採取は第2層の場合より容易で、3Lまたは4L粒子を機械的に破壊したのち空气中で焼けばよい。 U_3O_8 を硝酸で溶かせばSiC片が残る。焼く条件は $700^\circ\text{C} \times 2$ 時間⁽⁷⁾である。重液の密度測定にはFig.8のピクノメーターを用いた。この点は第2層用重液についても同様である。

第4層密度 d_4 は次の式で求める。ここで W_4 は試料粒子(4L)の重量、 W_3 は試料を空气中

$$d_4 = (W_4 - W_3) / (V_4 - V_3)$$

で焼いて生じた3Lの重量、 V_4 は試料の体積、 V_3 は上記3Lの体積である。 V_4 と V_3 はFig.8のピクノメーターにより、n-ブタノール置換法で測定した。

4. P S A 法 検 査

4.1 直径と真球度

前述のように、測定は自動であるから、ただ粒子をチャージするだけである。直径の出力例を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。Fig. 10, Fig. 11 とも 4 L の例である。Fig. 11 の最下行に密度が出ているが、これは、チャージした粒子の重量を入力した場合である。

1 回の測定に必要な粒子数を知るために、粒子数と直径標準偏差との相関を調べた。結果を Fig. 12 に示す。この図によれば、粒子数 25 個では、標準偏差のばらつきが大きい。100 個以上では大差ない。また 25 個での標準偏差が 100 個より小さい場合も出ているが、これはサンプリング誤差である。すなわち、25 個では母集団より標準偏差の小さな試料集団をサンプリングする確率が無視できないことがわかる。

次に必要なデータは従来法との比較である。この目的には、PSA で 1 回 1000 個を試料とし、その平均値を用いた。従来法では、1 回 100 個を試料とし、各粒子の最大直径と最小直径（目視選択）の平均をその粒子の直径として 100 個の平均を求めた。試料粒子には BK, 4 L ばかりでなく中間製品も用いた。比較の結果を Fig. 13 に示す。両者は十分良く一致している。また、系統誤差は認められない。

真球度の出力例を Fig. 14 と Fig. 15 に示す。また、PSA 法と従来法の相関を Fig. 16 に示す。いずれも平均値である。真球度の場合 PSA 試料数も 1 回 100 個である。Fig. 16 から明らかなように、PSA 真球度は従来法真球度より大きい。その理由は、従来法が平面的（ラジオグラフ撮影）でかつ最大、最小直径を目視選択しているのに対して、PSA 法では立体的でかつ十分多数の直径（通常 50 回測定）から最大、最小を選択しているからである。粒子が碁石状の場合は、平面測定と立体測定との差は大きい。以上のようなことから、PSA 法と従来法とどちらの真球度がより真の値に近いかは自明である。

4.2 被覆厚さ

PSA は直径を測定する装置であるが、被覆前後の直径の差から被覆厚さを求めることができる。得られた結果を従来法による値と比較した例を Table 2 に示す。良く一致していることがわかる。

厚さは 2 直径の差から求めるために、両直径の誤差が加算されること、および第 1 層を除いて厚さは直径の 10% にも満たないため相対誤差が大きくなることの 2 つの問題がある。Fig. 13 に示したように、直径測定がかなり正確であることにより、この誤差の問題は致命的でない。

4.3 粒子密度

粒子密度は粒子1個の平均重量と平均体積の比として計算される。平均重量は、1回50粒を吸引する計数器で実際に粒子数を計算し、それら全粒子の総重量を天秤で秤量して求めた。PSAによる計数では、装置内で生じた破片も計数するために、1000粒に対し2～3粒の誤差を生じることがある。平均体積は、粒子を真球と仮定して、PSA付属のミニコンで計算して出力される。粒子密度はBKと4Lについて従来法と比較した。結果をTable 3とTable 4に示す。BKについては良い一致を示すが、4Lについては、1つの例外(Table 4の最下段)を除いて、PSA密度の方が小さい。PSAでは、真球として直径から体積を計算するので、密度が若干小さく出るが、BK(Table 3)の場合には両者よく一致している。これは、今回の比較に用いたBKの場合、かなり真球に近いものであったことを示す。ただし、4Lの密度差(Table 4)も、充填率計算等、通常の目的には十分許容できる。

4.4 被覆密度

第3層被覆密度は仕様が非常に厳しいために、若干精度を犠牲にしても迅速測定を、という考え方は成立たない。すなわち、PSA利用は不可能である。したがって、その他の被覆層について従来法との比較を行った。PSAによる被覆密度の測定は、第1層と第4層については3.4節で示した従来法の式に従う。体積測定を液体置換法の代りにPSAで行うだけである。第2層については次の式に従う。ここで W_2 は2L 1個の平均重量、 W_1 は1L 1個の平均重量、 V_2 、

$$d_2 = (W_2 - W_1) / (V_2 - V_1)$$

V_1 は2L、1L 1個の平均体積である。第1層、第2層についての比較をTable 5に、第4層についての比較をFig. 17に示す。

第1層密度および第4層密度は例外なくPSA法の方が小さい。その原因が真球仮定によるものであるかどうかを知るために、第4層密度について、従来法とPSA法の密度差の真球度依存性を調べた。結果をFig. 18に示す。これによると、真球度が悪い場合に密度差が大きくなる傾向は認められる。第2層については、誤差が系統的でないため、その原因の追究が困難であるが、誤差が無視できないので、PSA利用は望ましくない。従来法の第2層試料は非常に小さく(厚さ方向全体を代表しない、かつ重液の対流が影響)、かつ特殊の採取法(閉気孔が開気孔になる)であるので、従来法側にも誤差原因の一部はあると考えられるが、従来法の誤差もPSA法の誤差もともに除くにはX線透過法^(8,9)によらねばならない。

第1層および第4層の誤差は系統的である上に、原因が一応明らかになっているので、補正をすればPSA利用が可能であろう。しかし、第4層の従来法測定法は他の層に比べ比較的迅速でかつ精度も高い。したがって、PSA利用の検討は第1層に限って考えればよい。第1層については、①従来法で保健上避けることが望ましい水銀を用いること、②密度の許容範囲が広いこと、③厚さと粒径の比が大きいためにPSA法採用に有利であること、の3つの理由により、さらに実験を追加して、量産時にはPSA利用に切替えるのが得策であると考えられる。

5. 結 論

燃料核および被覆粒子の直径，真球度および密度については，PSA法と従来法はよく一致する。しかし，被覆層については，厚さはよく一致するが，密度は必ずしも満足とはいえず，実用は第1層に留めるのが望ましい。

謝 辞

本研究は岩本多実燃料工学部長の支援により進められたことをここに明記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 井川他，未公開資料（1980）
- (2) 岩本他，J. Nucl. Sci. Technol.， 12（1975）60
- (3) 鹿志村他，JAERI-M 4749（1972）
- (4) J. Holliday 他，D. P. Report 846（1973）
- (5) K. Wallisch 他，Nucl. Technol.， 35（1977）279
- (6) 安野他，日本原子力学会誌， 24（1982）429
- (7) 井川他，JAERI-M 5674（1974）
- (8) H. Huschka 他，SGAE Ber. No. 2845 ME-116/77（1977）
- (9) K. Wallish，OEFZS Ber. No. A 0187 ME-195/80（1980）
- (10) 鹿志村他，原子燃料工業（株）との共同研究報告書（1984）
- (11) Operating Manual for PSA, PDA, V6, p28 OFZS（オーストリア，ザイベルスドルフ研究所）

5. 結 論

燃料核および被覆粒子の直径，真球度および密度については，PSA法と従来法はよく一致する。しかし，被覆層については，厚さはよく一致するが，密度は必ずしも満足とはいえず，実用は第1層に留めるのが望ましい。

謝 辞

本研究は岩本多実燃料工学部長の支援により進められたことをここに明記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 井川他，未公開資料（1980）
- (2) 岩本他，J. Nucl. Sci. Technol.， 12（1975）60
- (3) 鹿志村他，JAERI-M 4749（1972）
- (4) J. Holliday 他，D. P. Report 846（1973）
- (5) K. Wallisch 他，Nucl. Technol.， 35（1977）279
- (6) 安野他，日本原子力学会誌， 24（1982）429
- (7) 井川他，JAERI-M 5674（1974）
- (8) H. Huschka 他，SGAE Ber. No. 2845 ME-116/77（1977）
- (9) K. Wallish，OEFZS Ber. No. A 0187 ME-195/80（1980）
- (10) 鹿志村他，原子燃料工業（株）との共同研究報告書（1984）
- (11) Operating Manual for PSA, PDA, V6, p28 OFZS（オーストリア，ザイベルスドルフ研究所）

5. 結 論

燃料核および被覆粒子の直径，真球度および密度については，PSA法と従来法はよく一致する。しかし，被覆層については，厚さはよく一致するが，密度は必ずしも満足とはいえず，実用は第1層に留めるのが望ましい。

謝 辞

本研究は岩本多実燃料工学部長の支援により進められたことをここに明記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 井川他，未公開資料（1980）
- (2) 岩本他，J. Nucl. Sci. Technol.， 12（1975）60
- (3) 鹿志村他，JAERI-M 4749（1972）
- (4) J. Holliday 他，D. P. Report 846（1973）
- (5) K. Wallisch 他，Nucl. Technol.， 35（1977）279
- (6) 安野他，日本原子力学会誌， 24（1982）429
- (7) 井川他，JAERI-M 5674（1974）
- (8) H. Huschka 他，SGAE Ber. No. 2845 ME-116/77（1977）
- (9) K. Wallish，OEFZS Ber. No. A 0187 ME-195/80（1980）
- (10) 鹿志村他，原子燃料工業（株）との共同研究報告書（1984）
- (11) Operating Manual for PSA, PDA, V6, p28 OFZS（オーストリア，ザイベルスドルフ研究所）

Table 1 JAERI design dimensions and densities of components of TRISO coated fuel particle

構成	材質 ^{*1}	寸法 ^{*2} (μm)	真球度	密度 (g/cm^3)
燃料核	UO_2	600	<1.2が> 95%	96.0 (%TD)
被覆層	第1層	LD PyC	—	1.10
	第2層	HD PyC	—	1.85
	第3層	SiC	—	> 3.20
	第4層	HD PyC	45	1.85
被覆粒子	—	920	<1.2が> 95%	~ 4.3 ^{*3}

*1 LD : 低密度 HD : 高密度

*2 燃料核, 被覆粒子 : 直径 被覆層 : 厚さ

*3 参考値

Table 2 Comparison of coating thicknesses between the PSA and the conventional method

被覆層	PSA法 (μm)	従来法 (μm)
第1層	66	64
第2層	26	28
第3層	23	26
第4層	43	42

Table 3 Comparison of kernel densities between the PSA and the conventional method

試料番号	PSA法 (%TD)	従来法 (%TD)
1	97.5	97.5
2	96.7	95.7
3	95.5	95.8

Table 4 Comparison of whole particle densities between the PSA and the conventional method

試料番号	PSA法 (g/cm ³)	従来法 (g/cm ³)
1	4.32	4.45
2	4.47	4.57
3	4.32	4.45
4	4.49	4.57
5	4.39	4.45
6	4.26	4.30
7	4.22	4.28
8	4.34	4.40
9	4.24	4.23

Table 5 Comparison of 1st and 2nd layer densities between the PSA and the conventional method

試料番号	第 1 層		第 2 層	
	PSA 法 (g / cm ³)	従来法	PSA 法 (g / cm ³)	従来法
共 1 ^N	1.03 ~ 1.04	1.11 ~ 1.16	1.90	1.85
共 2 ^N	0.99	1.15 ~ 1.17	1.91	1.87
1	1.07 ~ 1.10	1.14 ~ 1.15		
2	1.06 ~ 1.08	1.12 ~ 1.18	1.89 ~ 1.93	1.85
3	1.07 ~ 1.09	1.00 ~ 1.15	1.85 ~ 1.88	1.85 , 1.85
4	0.97	1.12 ~ 1.14	1.94	1.85 ~ 1.87
5			1.76	1.84 ~ 1.85
6			1.79 ~ 1.81	1.84 ~ 1.85

N 文献 (10)

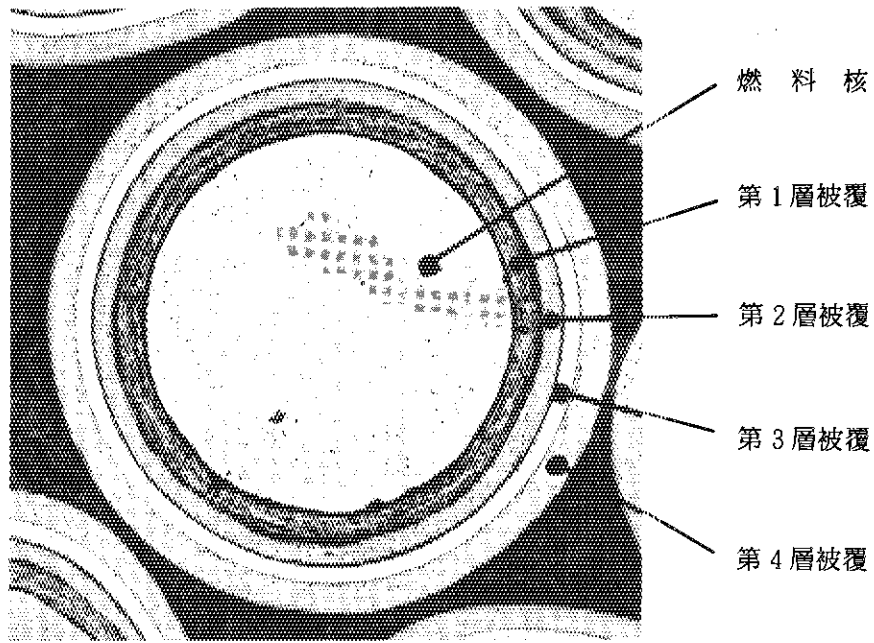
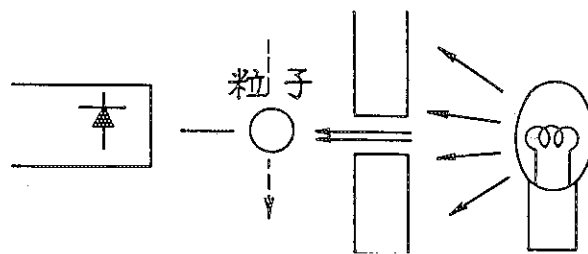


Fig. 1 Structure of TRISO coated fuel particles

直径測定の原理



真球度測定の原理

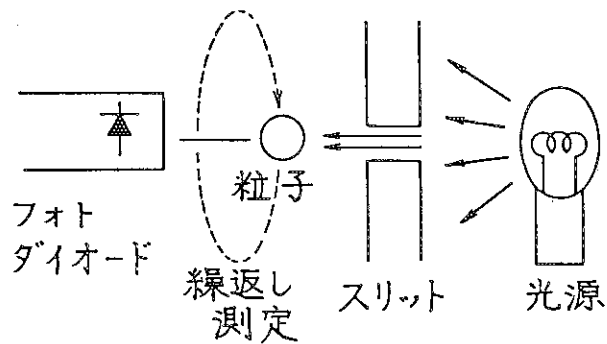


Fig. 2 Principle of measurement of particle diameter

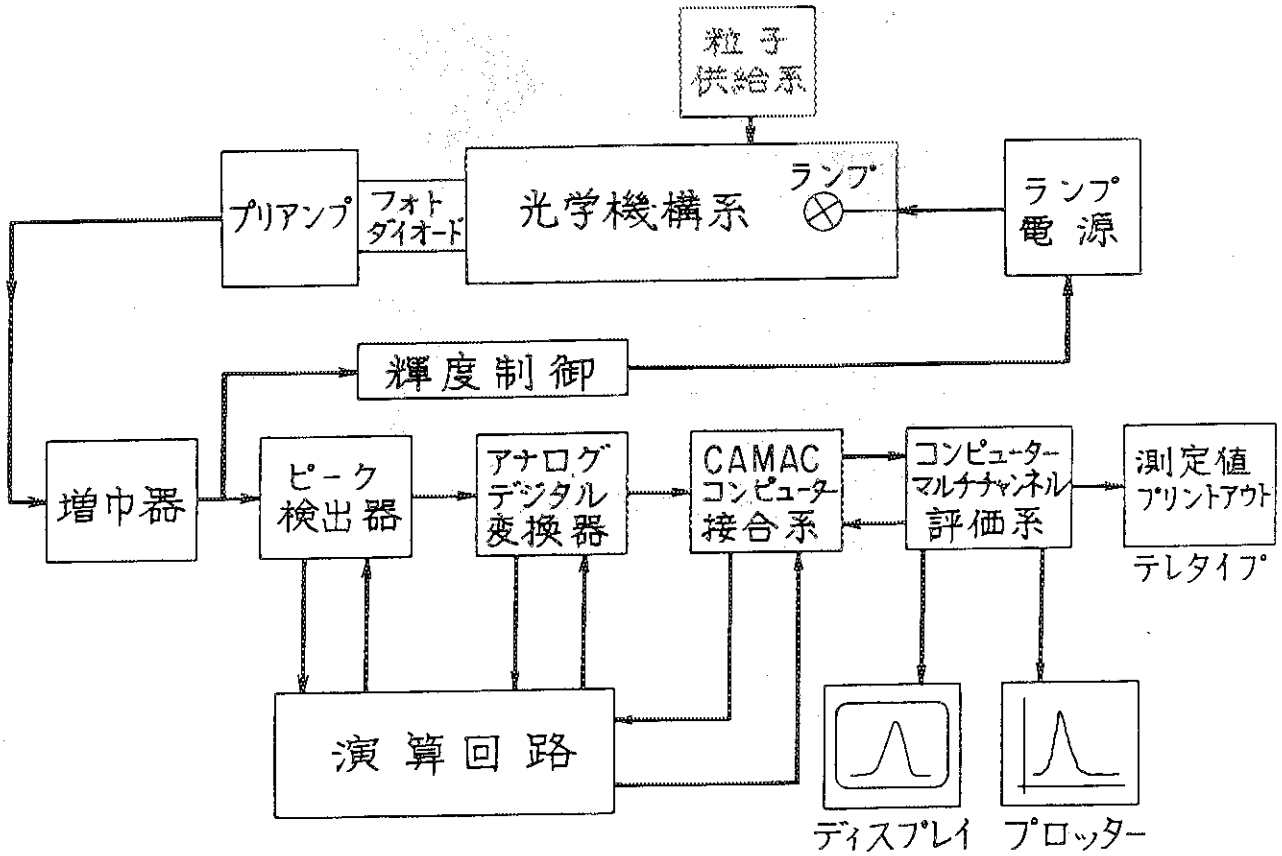


Fig. 3 Block diagram of PSA

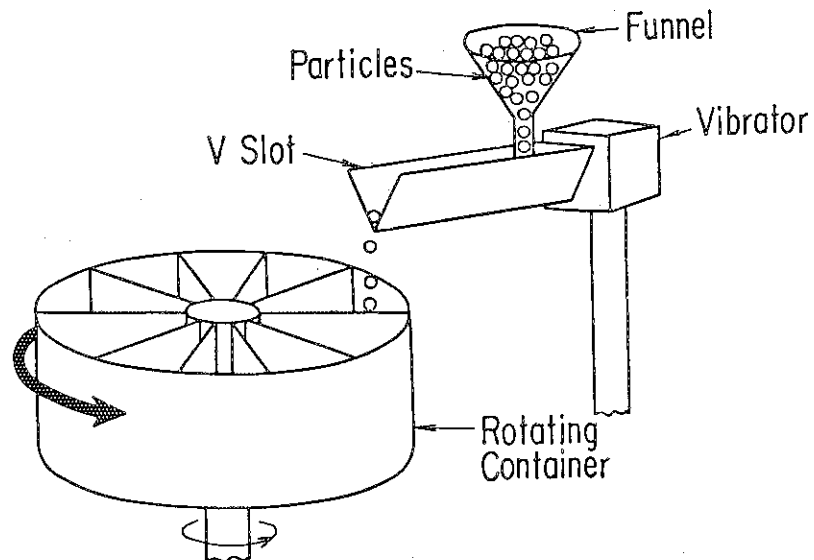


Fig. 4 Apparatus for random sampling

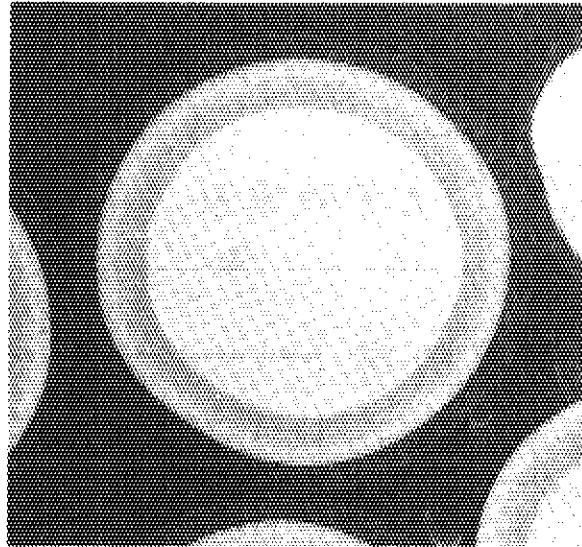


Fig. 5 Xray radiograph of TRISO coated fuel particles

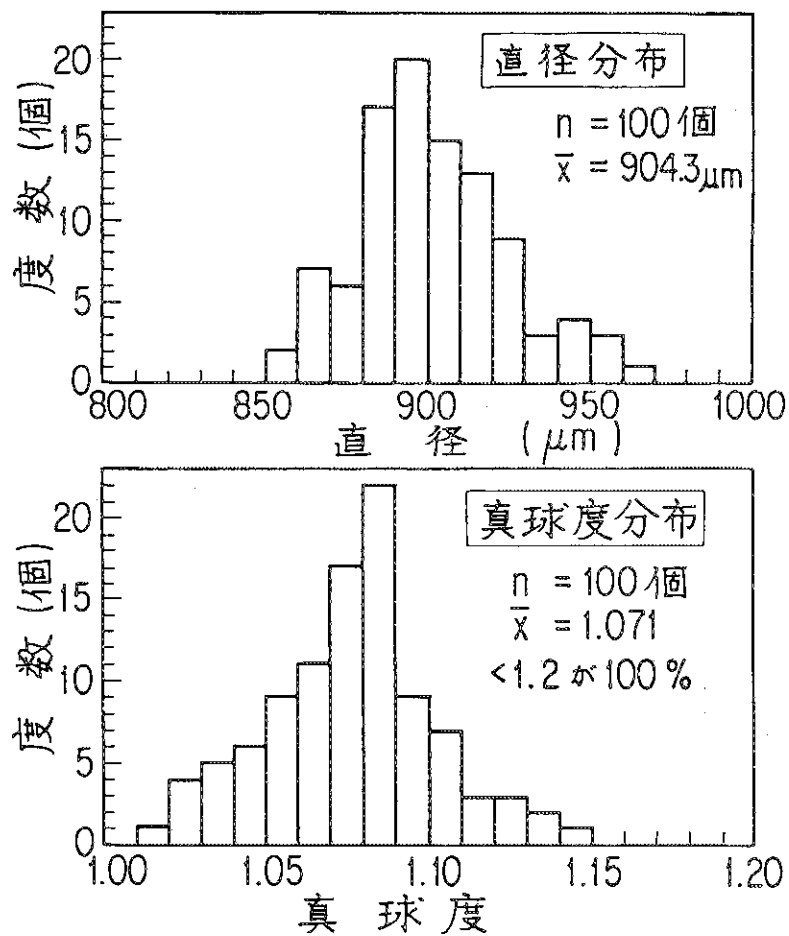


Fig. 6 Examples of diameter distribution and shape factor distribution measurement by conventional methods

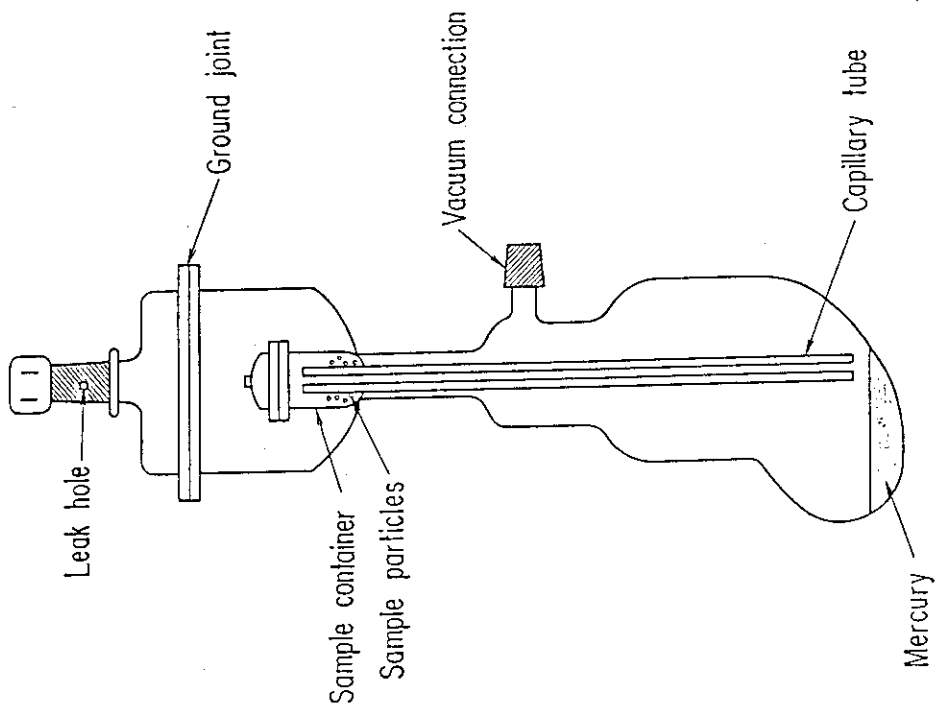


Fig. 7 Mercury pycnometer

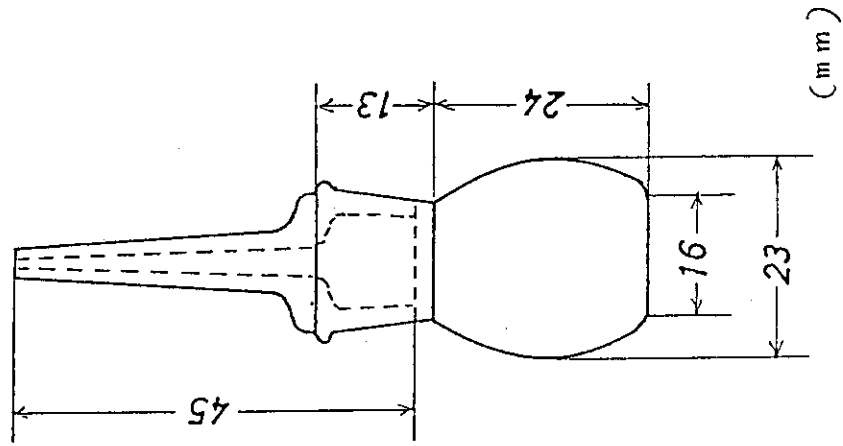


Fig. 8 Organic liquid pycnometer

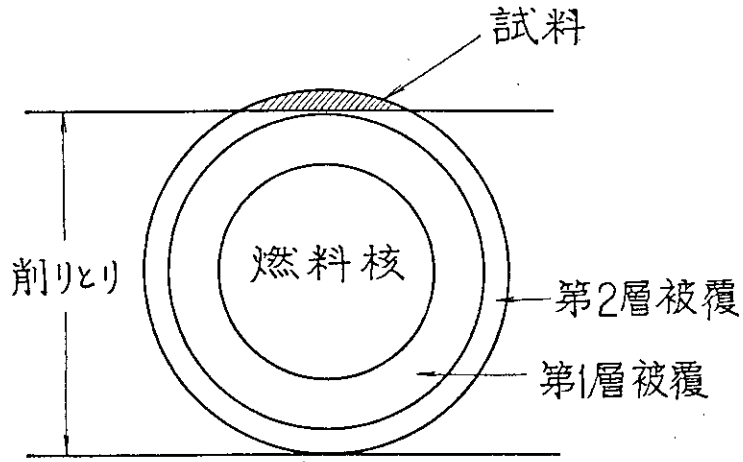


Fig. 9 Method of sampling outer PyC layer

```

0000001001      15-JUN-1981
DM  929          NP   4175          QV 0.418950E 000
SD  20.3         ER  299 1203       CV 0.174911E 004
VF  2.1          95  887  969       QS 0.270634E 001
                   99  973  983       CS 0.112990E 005
    
```

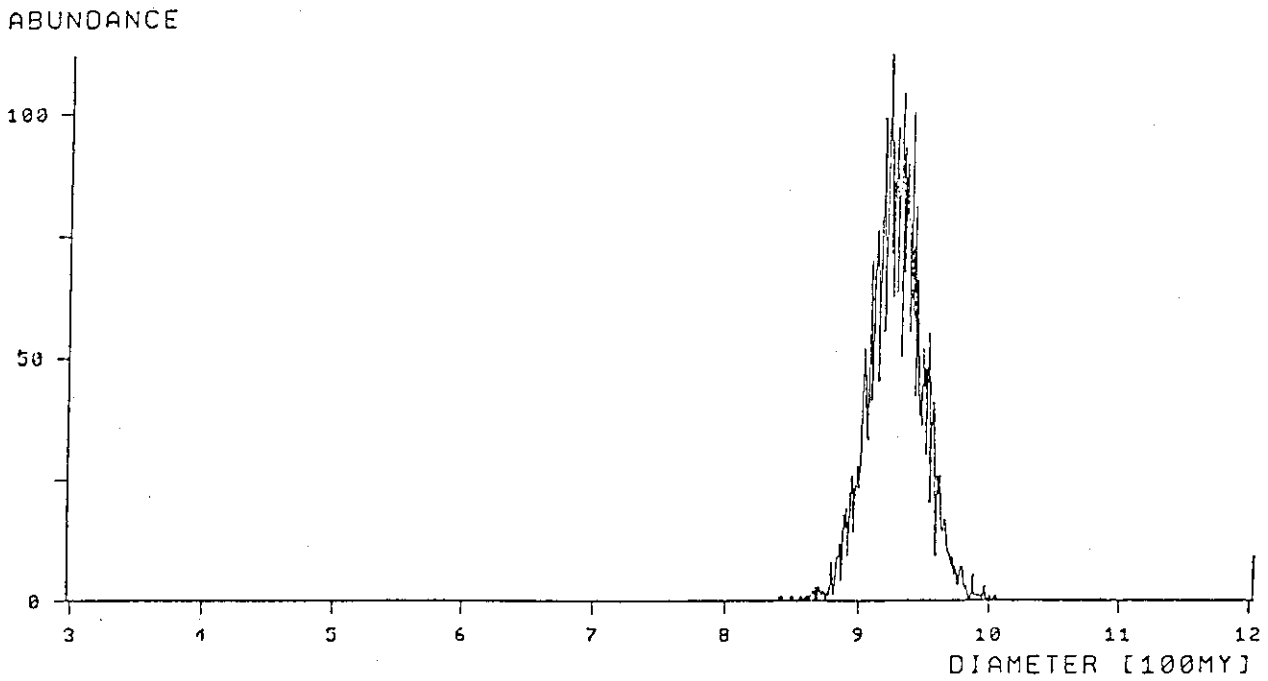


Fig. 10 An example of a diameter distribution

PARTICLE SIZE ANALYSIS PSA V8

EXAMPL NO: 0000001001 15-JUN-1981

NUMBER OF PARTICLES 4175 RANGE: 298 - 1203 MY

DIAMETER MEANVL 928 MY (平均粒径)

STANDARD DEVIATION 20.3 (標準偏差)

VARIATION 2.2 % (変動係数)

DIAMETER LIMITING VALUES 95% 887 969 MY (95%信頼限界)

99% 873 983 MY (99%信頼限界)

VOLUME MEANVL 0.418950E 000 MM3 (粒子1個の体積)

COMMON 0.174911E 004 MM3 (試料全体の体積)

SURFACE MEANVL 0.270634E 001 MM2 (粒子1個の表面積)

COMMON 0.112990E 005 MM2 (試料全体の表面積)

COMMON WEIGHT 7419.7000 (総重量入力データ)

DENSITY 4.2420 (粒子密度)

Fig. 11 An example of printout of a particle size analysis

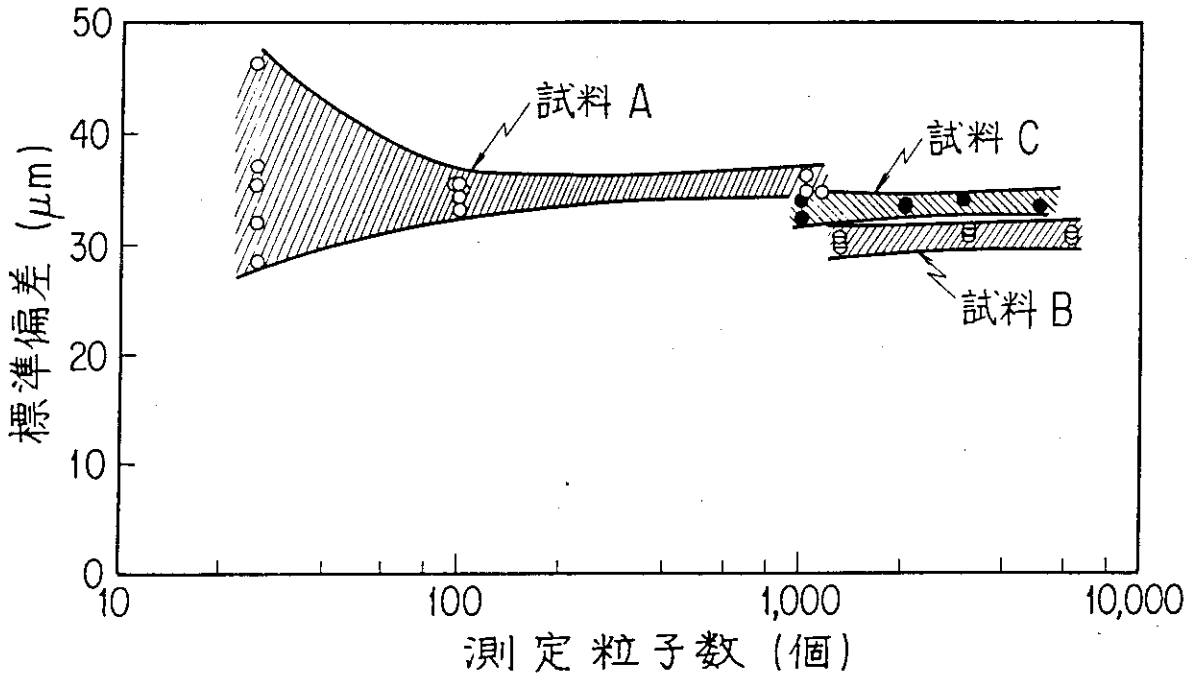


Fig. 12 Dependence of standard deviation fluctuation, on the number of sample particles
(A, B, C, indicate different coating batches)

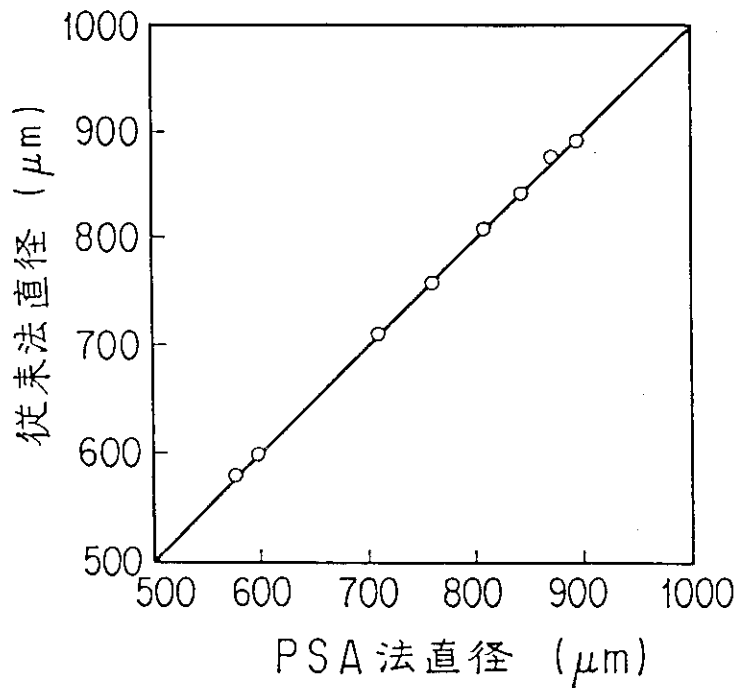


Fig. 13 Correlation of diameters between the PSA and the conventional method

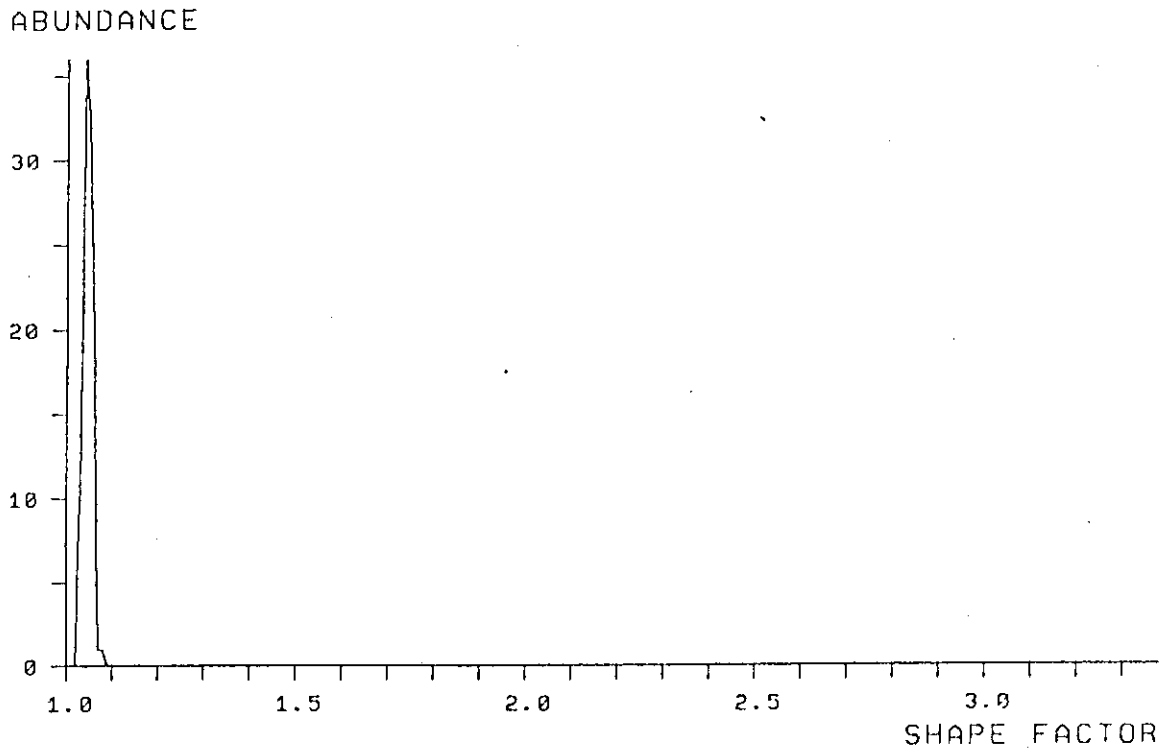


Fig. 14 An example of a shape factor distribution

SHAPE ANALYSIS FDA V06

EXAMPL NO: 0000001002 15-JUN-1981

SAMPLING-CONTROL PARAMETERS:

OF PARTICLES 100 RANGE 98 - 1003 MY
 # OF CYCLES NORMAL 50 (真球度決定のための直径測定回数)
 # OF CYCLES EXCEPT 662 (真球度が悪い場合の直径測定回数)

LOGARITHMIC SHAPE FACTORS: (文献(11)参照)

LOG SHAPEFACT MEANVALUE 0.661 (対数真球度の荷重平均)
 ANTILOG SHAPE MEANVALUE 1.046 (真球度の平均)
 LOG STANDARD DEVIATION 0.094 (真球度の標準偏差)

LOGARITHMIC ONEWAY UPPER TOLERANCE LIMITS: (直径測定回数判断基準)

KT	FOR	LOG	ANTILOG
KT 1 = 3.000		0.943	1.088

LINEAR SHAPE FACTOR DISTRIBUTION: (真球度の度数分布)

SHFACT	F ABS	F [%]	FS ABS	FS [%]
1.00	0	0.00	0	0.00
1.01	0	0.00	0	0.00
1.02	0	0.00	0	0.00
1.03	10	10.00	10	10.00
1.04	36	36.00	46	46.00
1.05	32	32.00	78	78.00
1.06	20	20.00	98	98.00
1.07	1	1.00	99	99.00
1.08	1	1.00	100	100.00
1.09	0	0.00	100	100.00

RUNTIME EVENTS:

EXCEPTIONS 0
 TOO SLOW'S 0
 TOO FAST'S 6

Fig. 15 An example of a printout of a shape analysis
 (ref 11)

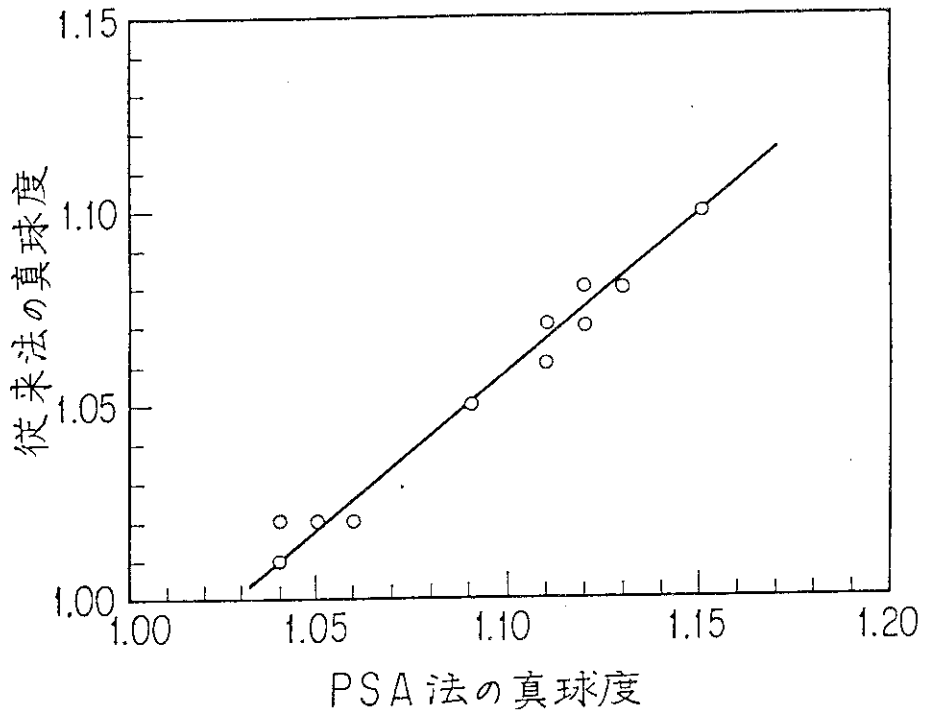


Fig. 16 Correlation of shape factors between the PSA and the conventional method

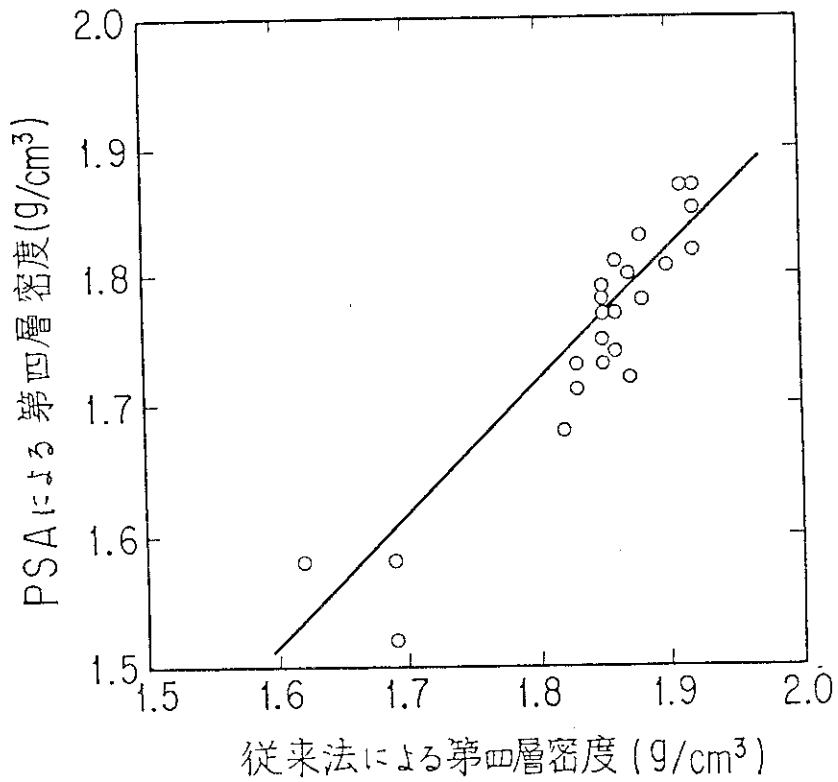


Fig. 17 Comparison of 4th layer densities between the PSA and the conventional method

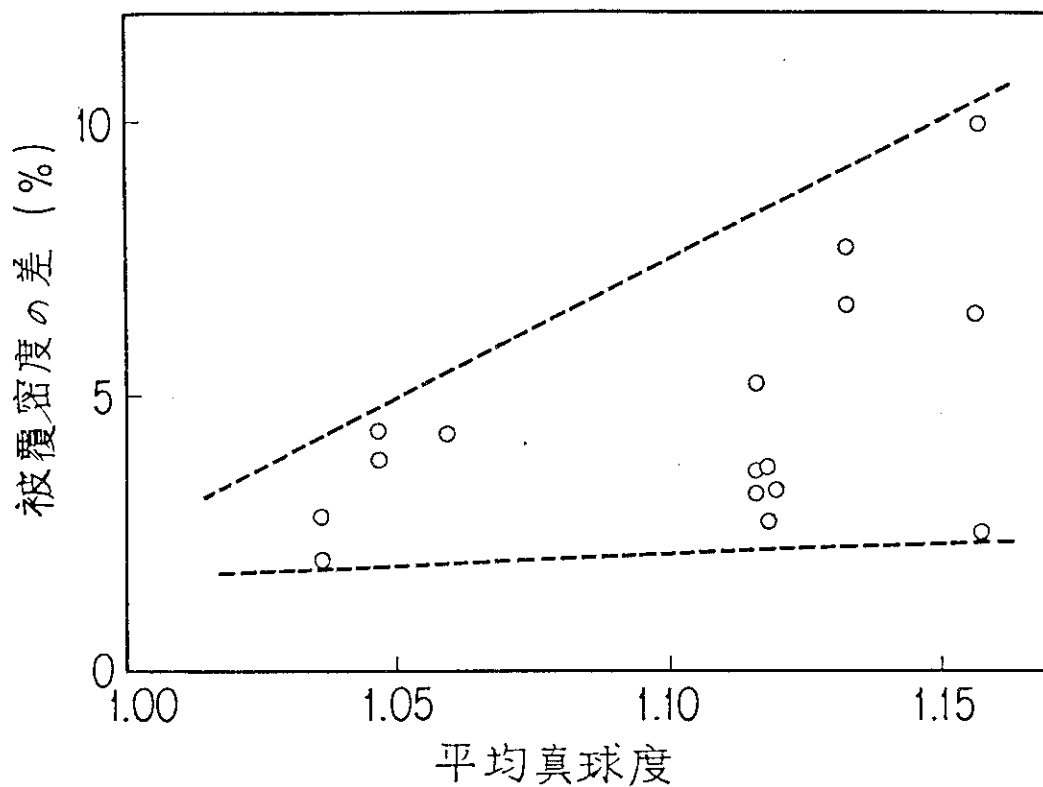


Fig. 18 Sphericity dependence of the difference of density between the PSA and the conventional method