

JAERI-M

5912

被覆燃料粒子の圧縮による高密度PyC層の
ヤング率測定

1974年12月

小川清行・岩本多実

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、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

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.

被覆燃料粒子の圧縮による高密度 PyC 層のヤング率測定

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

小川清行, 岩本多実

(1974年11月12日受理)

BISO型被覆燃料粒子5種類とTRISO型被覆燃料粒子2種類につき最外層PyCのヤング率を、等方性の弾性体の球の圧縮から導いたH. Hertzの式により推定を行なった。このため2個の差動トランスと変位計を組合せた被覆粒子強度試験機により粒子の圧縮試験を実施した。BISO型粒子ではヤング率はかなり良好な推定が可能となったが、粒子の種類によっては別に実施した三点曲げ法試験値よりかなり低い値を示す粒子が見られた。この場合には、Hertz式の適用にも修正を要するとみられる。TRISO型粒子では理論式へのSiC層の影響の組込みが不十分とみられ、大きな値が得られた。結論として被覆粒子の圧縮試験でHertz式によるPyC層のヤング率推定には若干の問題の伴うことが判明した。

Measurement of Young's modulus of the high-density
pyrolytic carbon layer by compressing the coated
fuel particle

Kiyoyuki Ogawa and Kazumi Iwamoto
Division of Nuclear Fuel Research, Tokai, JAERI

(Received November 12, 1974)

Young's modulus of the outmost pyrolytic carbon layer has been estimated for five kinds of BISO and two of TRISO fuel particles, with the H. Hertz's formula derived by the analysis of compression on two isotropic elastic spheres. For the estimation, compressive tests of the coated particles were performed with a strength testing machine having two differential transformers and a displacement meter. The results of Young's moduli made good for the BISO particles, except some particles which showed much smaller than those by the three-point bending of PyC plate specimens. For the latter case, therefore, modification of the Hertz's formula may be necessary. The values for the TRISO particles were larger than expected, possibly because of underestimation of the contribution by a SiC layer.

目 次 な し

1 はじめに

高温ガス炉に使用される被覆燃料粒子の被覆層はF、P、ガスやCO ガスに対する圧力容器としての機能を有しており、その機械的性質—破壊強度とヤング率—は被覆燃料粒子を含む燃料コンパクトの製造上や燃料粒子の寿命を予測する上で重要な因子とみなされている。このため高密度熱分解炭素(PyC)である被覆層の機械的性質の試験が海外でも精力的になされ、被覆試験片のみならず、最近では被覆燃料粒子自体の被覆層に対するデータを獲得する努力が行なわれている。それ等の実験例を挙げると、(1)平板曲げ試験⁽¹⁾、⁽²⁾、⁽³⁾；流動層中で粒子に被覆を行なう場合、粒子と同様な流動挙動を示し、かつ小型平面を有する黒鉛片を入れておき、これにPyC 被覆を行なったものから被覆層のみを切り出したものを試料とする。PyC 試片では三点曲げ、SiC 試片では三点曲げ又は四点曲げ試験法により荷重とたわみ量の関係を測定してヤング率を計算し、さらに破壊応力を求める。(4)円環曲げ試験⁽⁴⁾：被覆燃料粒子を研磨して核を抜きとり、被覆層巾が50 μ mの円環に残るようにしたものを試料とする。このリングの両側から押してたわませ、荷重と変位量の関係を測定してヤング率を計算する。(5)半球殻曲げ試験⁽⁵⁾：被覆燃料粒子を研磨し、核を抜きとり、着目した被覆層のみの半球殻をつくり試料とする。これを円環状の支持台に置き試料内に球を入れ、この球に荷重を加えるか、または試料を平板上におき、試料内に円柱を入れて円柱に荷重を加える。光弾性を応用して応力の分布を知り、変位量を測定して強度を計算する。著者らはK. F. ユーリッヒでの実験⁽⁶⁾に於いて、被覆燃料粒子を試料として炭素鋼の二平面間で圧縮し、高密度PyC 層のヤング率を推定する実験を行うと共にPyC 平板試料での三点曲げ試験を実施した。本報告ではこれらの実験で得られた結果を詳しく述べると共にその測定に伴う問題点を明らかにする。

2 実験方法

図1に示されたように、等方性の弾性体の球を剛体二平面間で圧縮する場合、H. Hertzの理論式⁽⁷⁾により球のうける変位 h と荷重 F の間には接触面間に磨擦力が作用しないことなどを条件とすれば次式の関係が成立する：

$$h = F^{2/3} \cdot \left\{ \frac{3(1-\nu^2)}{4E} \right\}^{2/3} \cdot R^{-1/3} \quad (1)$$

変形して

$$E = \frac{3(1-\nu^2)}{4} \cdot \frac{F}{\sqrt{h^3 R}} \quad (2)$$

ここで ν はポアソン比、 E はヤング率、 R は球の半径である。被覆燃料粒子は完全な等方性弾性体の球ではないが、変位量が最外層被覆の高密度PyC 層の厚さにくらべて小さく、かつ等方性PyC で被覆されている場合には近似的に(1)式が成立すると見なすことができ、 h と F との

の関係を実験で求め、Rとνを知ればBISO型被覆燃料粒子のPyC層のヤング率を推定することができる。高密度PyC試料のポアソン比の測定値がないので、黒鉛での値、ν=1/3を使用した。最初実験に使用した被覆燃料粒子は表1の上欄に示す試料記号71GC1, 71GC3, 70NC4, 71FC6および72FC16の5種類であり、いずれも低密度PyC層(緩衝層)一高密度PyC層被覆をしたBISO型被覆燃料粒子である。前者3種類については一部加熱熱処理を施した試料を試験した。これらの粒子のX線ラジオグラフ(露出条件:照射口から試料面までの距離30cmの場合15KV, 23mAで4分, 50cmの場合19KV, 23mAで16分)からその半径と真球度(二最大直径/最小直径)を求めておく。次に図1に示すように被覆燃料粒子を二枚の鋼板(ロックウェルC硬度60以上)の間に置き増加荷重と減少荷重で圧縮試験を行なった。粒子に加えた荷重の検出には荷重リング(変位-荷重校正表付き)に取り付けた差動トランスAC-5(直線範囲±5mm, 感度3KHzで100mV/mm/V)で、また変位は被覆粒子圧縮用の変位検出用治具に取り付けた差動トランスAC-3(直線範囲±3mm, 感度3KHzで120mV/mm/V)により、変位計を経てXY記録計に変位-荷重曲線を記録させた。なお装置本体による弾性的たわみは直径1.6mmのルビー球であらかじめ測定しておき、被覆粒子に対する前記変位量に補正を行なった。求めるPyC層のヤング率の推定には140, 290, 430, 580および720gでの各荷重での変位量から(2)式によるヤング率計算値の平均またはhとFを両対数グラフ上にプロットして得られる直線の勾配が(1)式のそれに一致する場合には簡便法として直線の切片の値から算出できる値をその粒子のヤング率として採用した。圧縮荷重はモータまたは手動により一定速度で増加または減少させて行き、また手動法により同一粒子で圧縮位置を変えず繰返し測定等を行いデータの再現性の試験も行なった。

TRISO型被覆燃料粒子の最外層PyCのヤング率の推定には以下に述べる式⁽⁸⁾を適用した。Z₁, Z₂, ……を被覆燃料粒子表面から被覆各層の境界までの距離とし、各層のヤング率をそれぞれE₁, E₂, ……、また(2)式からのEをE₀とおくと、この式をもとにフックの法則等から拡張し、1, 2の仮定下で次式が得られる:

$$E_1 = \frac{E_0 \{1 - V(Z_1)\}}{1 - \frac{E_0}{E_2} \{V(Z_1) - V(Z_2)\} \dots \dots \dots - \frac{E_0}{E_N} \cdot V(Z_{N-1})} \quad (3)$$

なお

$$V(Z_K) = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(1 + \frac{Z_K^2}{hR}\right) \tan^{-1} \frac{\sqrt{hR}}{Z_K} - \frac{Z_K}{\sqrt{hR}} \right\}, K=1, 2, \dots, N$$

ここでTRISO型被覆粒子の制限条件からK ≥ 4のときV(Z_K)=0とおき、(3)式でSiCのヤング率はPyCの値より約10倍大きいことから、(2)式で分母の第二項を省略し、さらにE₃=E₁と近似させ

$$E_1 = E_0 \{1 - V(Z_1) + V(Z_2)\} \quad (4)$$

が得られる。この(4)式により表1の下欄に示すTRISO型被覆燃料粒子71GC3および71GC4の二種類につき最外層PyCのヤング率の推定を行なった。

上記実験と併用してこれら測定値との比較を行うため、別にグラファイト小試片上に同じような条件の流動床中で蒸着させ作らせたPyC平板試料をはがし取り研磨して試料となし、三点曲げ(単純支持梁)試験法により平板試験片でのヤング率の測定を行なった。三点曲げ法のための測定治具はナイフエッジのスペンが3.65mmで、摩擦軽減のためステンレス製エッジと押し棒にテフロン被覆のものを使った。試験片の目標寸法は $5 \times 1 \times 0.1$ (mm)である。装置は容量500Kgのインストロン万能試験機で、クロスヘッドと記録計チャート・スピードを夫々0.1mm/分、10mm/分にとりたわみ-荷重曲線を求めた。荷重は試料押し棒に取り付けるストレンゲージに抵抗線動ひずみ測定器を組合せ、ストレンゲージのひずみ量($\times 10^6$)と荷重の直線性から算出した。試料は記号72FC3(物性値: $J_c = 31 \text{ \AA}$, $\rho = 1.86 \text{ g/cm}^3$, BAF=1.86)のPyC試験片で、第四層の被覆条件と同じ別バッチで被覆したもので、72FC16被覆粒子の場合に近いと推定された。試験片のヤング率の計算は次のように行なった。測定試料が比較的薄く($\sim 100 \mu$)、三点曲げ法による破断までの歪みが大きいとみられるので、単純支持梁の場合よりナイフエッジでの摩擦効果とたわみが大きくなる効果が現われるとされている⁽⁹⁾。このため荷重-たわみ曲線の非直線性と通常の単純支持梁の場合の計算値より曲げモーメントと最大繊維応力で約10%増加すると文献の報告があるので、ヤング率を求める際この点を考慮したConwayの方法⁽¹⁰⁾によった。併し彼の方法では第一種と第二種の完全、不完全楕円積分を含み計算が複雑である。幸いたわみの大きい効果と摩擦効果のそれぞれで最大たわみ(実測値)と単純支持梁でのたわみ比が $WI^2(1-\nu^2)/8EI$ (W:荷重, L:スペン, I:断面二次モーメント)に対しグラフになっているのでこれを計算に使用する。記録紙から実測されるたわみから、上記計算により単純支持梁のたわみに直し、改めて次の一般式に代入する順序をふんだ:

$$E = \frac{WI^3(1-\nu^2)}{48\nu'_{\max} \cdot I} \quad (5)$$

ただし ν'_{\max} は単純支持梁の場合に換算した最大たわみである。なお摩擦効果と大きなたわみ効果のうち大きい方の影響をとり上げ、一方を無視した。摩擦係数としては0.3を採用。なお実測された荷重-たわみ曲線の非直線性は極めて僅かであった。

3 実験結果

(I) 同一粒子での実験

同一粒子での圧縮を週期的に行なった: 図2に示すように一つの粒子を最初増加荷重で圧縮し、次で荷重を減少させながら変位-荷重曲線をそのつど測定した。圧縮位置を同じ状態にして最大荷重まで四段階に分けて上記のやり方で行い、荷重範囲の小さい方から第一回を点線、第二回を一点鎖線、第三回を実線と第四回目を破線で示して得られた曲線群を同一座標上に重ねてプロットした。さらにこの方法を同一粒子で圧縮位置を順次変え四乃至五回行い、圧縮の順序にしたがい得られた各曲線群の上に数字で示した。試験は71GC3(真球度, $S=1.033$)

と72FC16 ($S=1.028$ と 1.103)の三被覆粒子につき行なった。同一粒子で圧縮位置を変えず最大荷重0.85乃至1.12Kgまで四段階に分け繰返し実験した結果では1から4乃至5までの曲線群が示すように各曲線は何れも同じカーブ上にのることがわかり測定値の再現性は良いことがわかる。圧縮位置をかえ得られた1から4乃至5までの曲線相互間にはそれぞれの真球度でわずかのちがひがある。それぞれの曲線群に若干のヒステリシスがあるため、1から5までの各曲線群を代表して平均値で示したカーブを同一座標上にそれぞれの粒子別にプロットし直したものを圧縮の順序を附記して図3に示した。それぞれの曲線の形は71GC3と72FC16 ($S=1.028$)の粒子では殆んど同じであるが、72FC16 ($S=1.103$)の粒子では荷重の増加と共に相対的に変位は低下した。

これらデータの評価方法として、次のような平均誤差を算出した：それぞれの粒子で得られた図3の曲線群のうち外側と内側の曲線につき各荷重の変位から(2)式で計算すればそれぞれの荷重で最大と最小のヤング率が推定され、これをヤング率-荷重グラフで図4の両側の曲線で示した。真中の曲線はその平均値を示した。平均誤差としては上記ヤング率の平均値に対し、ヤング率の最大と最小値の差の $1/2$ を百分率で示し、これを各荷重で平均したものである。これは同一粒子で圧縮位置を変えて得られる被覆層PyCのヤング率のバラ付き巾と考えられる。その値を真球度に対して示すと、 1.028 で約6.5%、 1.033 で約8.5%と 1.103 では約12.5%であることがこの例でわかった。粒子の真球度が大きいとヤング率の変動巾は大きくなった。図4をみると荷重によりヤング率が大きく異なり、とくに真球度 1.103 の72FC16粒子では荷重により2倍以上に変動している。これは真球度が悪いいため弾性体の球圧縮のHertz式の適用に無理があることと装置本体の系統誤差も無視できないと思われる。

上記とは別の実験で71GC3 ($S=1.04$)と72FC16 ($S=1.06$)の二粒子につき同一位置で一回だけ繰返し測定し、四回圧縮位置をかえた実験結果のうち三回までのデータを図5に荷重-変位両対数グラフで示した。これらの粒子で荷重の増減に伴い得られる変位-荷重の二個の曲線からヤング率を推定し、これをさらに圧縮位置を四回変え、得られた値とその平均値と共に表2に示した。図5で直線群の巾はほぼ前記の平均誤差に相当するが、この場合には前記のように真球度に必ずしも比例していない。図からわかることは71GC3粒子ではHertz式との対応性はかなり良いが、72FC16粒子では幾分両対数プロットで理論勾配からのズレが認められた。表2の二粒子で往復荷重でのヤング率計算値は必ずしも一致せず差異がある。これが一因には測定装置の誤差がかなり大きいと推定される。この場合圧縮位置を変えて得られた四回測定の結果はかなり良好であるが、多数例の測定では後述するようになりかなり推定ヤング率に差がみられた。

(III) 異種粒子での実験

同一粒子での変位-荷重曲線の荷重の増減に伴うヒステリシスが小さいところから、高温加熱処理を含めたBISO型被覆粒子5種類とTRISO型被覆粒子71GC4と71GC3の多数粒子で、増加荷重のみで得られる変位-荷重曲線からヤング率の計算を行った。得られた各種被覆粒子でのヤング率の結果を表3に示した。この中には若干同一粒子で圧縮位置を変えて得たヤング率の結果が含まれる。BISO粒子に対する多数の測定結果によると71GC1と71GC3では

別種板状PyC試料での三点曲げ試験結果に近いが、70NC4とくに71FC6と72FC16では幾分低い値を示した。熱処理による高密度PyC層のヤング率への影響では70NC4を除き71GC1と71GC3被覆粒子では明らかに低下している。また71GC4と71FC3のTRISO被覆燃料粒子の最外層の高密度PyCのヤング率はBISO粒子の値に比しかなり高く、約2200 Kg/mm²の値が推定された。なお参考のためBISO型被覆粒子5種類につき変位-荷重曲線から(2)式を適用し算出した荷重に対するヤング率曲線を試験粒子の真球度を附記して図6に示した。

次に被覆粒子の真球度の値とヤング率の関係を4種類の被覆粒子で多数例プロットして図7に示した。同一粒子でも方向を変えて測定するとヤング率は必ずしも同一とはならず、2回測定の違いが5.0Kg/mm²程度のもので、3回測定で差が300Kg/mm²になるものがあり、明らかに被覆燃料粒子の真球度が結果にかなり影響のあることがわかった。なお統計処理によりこの場合の被覆燃料粒子の真球度とPyC層のヤング率の間の相関係数を求め検定⁽¹⁾、⁽²⁾を行った。得られた相関係数 r は71GC1粒子では $r=0.155$ 、71GC3粒子で $r=0.037$ 、72FC16粒子で $r=0.216$ および71FC6で $r=-0.157$ であった。負相関の場合は一方の値が大きくなれば他方の値は直線的に小さくなることである。次に母相関係数 ρ がゼロであるかどうかということである。単相関係数の場合には自由度はデータの対の数より2小さくこの場合 $\phi=14.10$ と6になる。 r 表の上記自由度の値と比較して検定した。表には自由度6の値がないけれども、前記二つの値より大きいことから明らかである。

$$r(14, 0.05) = 0.4973$$

$$r(10, 0.05) = 0.5760$$

この場合には、試料相関係数はいずれも相関する上の値より小さく、5%有意水準で有意ではない。すなわち $\rho=0$ の仮設がすてられぬ。いゝかえると71GC1、71GC3、72FC16および71FC6被覆粒子でのPyC層のヤング率と真球度の間には相関関係はみられない。また上記4種類の全部の被覆粒子48個についてPyC層のヤング率と真球度の間を相関を調べた結果相関係数は-0.093と同様にその間には相関関係はみられぬことがわかった。

(iii) 板状PyC試料での実験

上記データの信頼性を判定するため実施した72FC3板状PyC試料での三点曲げ法によるヤング率測定結果を表4に示した。72FC3試料11個のヤング率の平均は1882±224Kg/mm²になる。これと対応するとみられる被覆粒子72FC16での測定例の値からもわかるようにかなり高い値で、前者の下限と後者の上限がそろって一致する程度である。

4 考 察

同一粒子で最大荷重まで四段階に分けて、過期的に繰返し測定した実験でみるに実験誤差を考慮に入ればヒステリシスはきわめて小さく、得られたそれぞれの変位-荷重曲線は同一曲線上にのること、また圧縮位置を変え測定した例から判定しても、実験に使用した被覆燃料粒

子の高密度PyC層を等方性の弾性体とみなして計算するのは妥当性があるかと推定される。同一粒子で圧縮位置を変えた測定例からすれば真球度の良いものの方が得られるPyC層のヤング率の変動巾は小さいとみなしてよいであろう。これはHertz式への適応性にも関連があるとみられるが、はっきりした結論は出なかった。またBISO粒子の多数測定例でも真球度に対しかなりバラつくし、被覆粒子の種類によっては必ずしも真球度だけでヤング率推定の規準を示さなかった。なお真球度測定では、顕微鏡でのぞいたときの粒子は安定位置の場合が多いので二回測定でも値にそれ程変化はなく、一回測定でも十分と思われる。図6のヤング率-荷重曲線からもわかるようにヤング率 E は荷重 F に対しHertz式に合う場合には一定となる筈であるが、多くの場合必ずしもそうではない。分類するとヤング率は荷重増加で単調に減少する場合、単調に増加する場合と一定する三つの場合があり、それぞれの粒子の特長と関連するものと思われる。これには装置或は公式の適用に系統的誤差も考慮されるが、同じ種類の被覆粒子でも下降と上昇曲線があるので一応省いた。このことに関連してPyC層のヤング率は層の厚さ方向で異なる可能性があると云われる。すなわち文献⁽¹³⁾による微小硬度のPyC層の半径方向の勾配が約10%あるので、同じような勾配はヤング率でも十分考えられる。また完全な等方性PyCでなければ異なる半径方向と接線方向の値をもつことができよう。たゞ上記に対する反論としては半径方向の異方性の変化測定の例⁽¹⁴⁾で80 μ mのHDIの厚さ方向でのBAFの変化が1.0乃至1.1であるので、これにともなって物性値の変化はなく、均一な値をもつとした方が正しいであろう。一般的に云って71GC3と71GC1試料のデータのHertz式への適用性は良いけれども、70NC4とくに71FC6と72FC16試料では変位-荷重曲線の低荷重側での立ち上がりが大きく理論式からはずれるケースが大部分であり、その実験例を参考までに71GC3と72FC16粒子数個につき荷重-変位両対数プロットで図8に示した。図中実線と点線で分類したのは理論勾配に合う粒子とそうでない粒子を示した。71GC1と71GC3被覆粒子では粒径が小さく粒がそろっているのが特長である。71FC6と72FC16被覆粒子では高密度PyC層の厚さは上記二種類の粒子と大差はないが、粒径が700 μ mとかなり大であるため70NC4粒子とは違った意味で粒径がそろいにくい上に、不揃いであることなどが計算値が低荷重で小さい原因とみられる。実験の客観的判断には粒子の真球度の良いことが判断の基準になり、とくに前二者でその値の良い粒子では(1)式への適合性の良いものが多いのも事実であった。70NC4被覆粒子はPyC層が1900°C、メタン1%で蒸着しBAFが1.5に近い方向性のある粒子であることを追記しておく。Hertz式からはずれる場合でも負荷荷重の初期に被覆粒子自体がそのままの状態に止まらず安定する方向にずれみかけの変位がそれだけ増加するとみなして、みかけの変位の増加量である1乃至1.5 μ mを各荷重に対する粒子変位から一様に差引いた値を両対数グラフにプロットすると理論式の勾配に一致し、このように変位のかさ上げ方式を行えば、かなり板状試料の値に接近するが、しかしこの操作をとるに当ってはなお判断の余地がある。

加熱処理後の71GC1と71GC3被覆粒子ではヤング率の値は低く、逆に70NC4被覆粒子では高い値がそれぞれ推定された。蒸着温度が熱処理温度より高いところから値の変化はないものとされたが予期に反した。これは高密度PyC層のマイクロ組織の変化と共に70NC4粒子では断面が六角形に近いものが多いので熱処理で影響され球圧縮とちがった形状効果が出たの

ではないかと思われる。測定したBISO5種類の被覆粒子PyC層の蒸着条件など不明な点が多いので、求められたヤング率の値を文献値と比較することがむずかしい。一例であるがKa ae⁽¹⁵⁾によると40%プロパンで蒸着温度を1550℃から1200℃の間にとると平板試料で試験して1200乃至2800Kg/mm²のヤング率の値の変化がみられ、一方密度1.5g/cm³でRAF<1.1の試料では結晶子の大きさL_cが50乃至30Åの間で1130乃至1900Kg/mm²の値の報告がある。以上の値を参考にし、上記72FC3平板試料での実験で得た値からするも計算で求めたBISO被覆粒子高密度PyC層の値は71GC1と71GC3試料をのぞき71FC6と72FC16試料では値は小さく、補正する必要があるかも知れない。測定値のバラ付きは測定方法自体に伴う誤差と粒径、真球度、被覆層の厚さ等の不揃いならびに被覆層内の欠陥等のため致し方ないと思われる。また三点曲げ法によるヤング率の値のバラツキは試料寸法の不揃いと押し棒の試片中点からのずれなどに起因しているがその差は小さかった。

TRISO被覆粒子の最外層PyCは第四層目の被覆であり、一方、BISO被覆粒子は第三層目被覆という蒸着条件の差がある。計算されたヤング率は上記BISO粒子の値よりかなり高く、また板試験片での実験値より大であった。TRISO粒子もBISO粒子もその被覆層はほぼ同じような物性値すなわち強度を示すと考えられるから、TRISO被覆粒子最外層PyC層のヤング率の推定式では第三層目SiCの影響が充分組みこまれていなかったように思われる。(3)式でSiC層の厚さを実際の試料での厚さは20乃至30μmであるが、これをかりに60μmに選ぶと推定される値は単純に1個の弾性体の球として計算した(1)式よりの推定値の8割程度になり板状試片での値に近づくことは確かである。したがって求めた値は参考程度の実験値と考えられた。

5 結 論

加熱処理試料を含めたBISO型被覆燃料粒子五種類とTRISO型被覆燃料粒子二種類多数につき最外層PyCのヤング率を弾性体の球圧縮に関するH・Hertzの理論式により推定した。これを目標にして二個の差動トランス、変位計およびXY記録レコーダの一連の装置を組合せ被覆粒子強度試験機により種々の被覆燃料粒子を圧縮試験すると共に、あわせて板状PyC試験片で三点曲げ法実験を実施し、下記のような結果が得られた。

これをまとめると：

- (1) BISO型被覆燃料粒子では71GC1および71GC3各粒子群、次いで70NC4粒子さらにさがつて71FC6および72FC16粒子の一群という大小の順でヤング率が推定された。これらの値は多くの場合板状PyC試片の実験値より低い値であった。
- (2) 同一被覆粒子で押す方向(圧縮位置をかえる)と真球度の間には或る程度の関連性がみられるが、各種被覆粒子PyC層のヤング率と真球度との間には相関関係はみられなかった。
- (3) 方法の適用性に関しては71FC6および72FC16等の被覆燃料粒子では修正が必要と思われた。
- (4) TRISO型被覆燃料粒子では最外層PyCのヤング率推定に使用される理論式への第三層

層被覆 SiC の影響の組こみが不十分とみなされた。

最後にこの実験を実施するに当りご鞭撻いただいた前燃料工学部長石原健彦氏，現燃料工学部長野村末雄氏，変位治具作成に助力いただいた燃料安全第一研究室長森島淳好氏，三点曲げ試験実施で教示いただいた黒鉛材料研究室奥達雄氏ならびに種々協力いただいた当燃料照射研究室飛田勉氏と鹿志村悟氏その他の方々に紙上をかりて心から感謝する次第である。

参考文献

- (1) J. C. Bokros, R. Price, Carbon 3, 503 (1966)
- (2) P. Fransworth, R. Cobble, J. Am. Cer. Soc. 49, 264 (1966)
- (3) R. J. Price, Cer. Bull. 48, 859 (1969)
- (4) K. Bongartz, E. Gyamatic, H. Nickel, H. Schuster and W. Winter, J. Nucl. Mat. 45, 261 (1973)
- (5) A. G. Evans, G. Padgett and R. W. Davidge, J. Am. Cer. Soc. 56, 36 (1973)
- (6) W. Delle, K. Drittler, G. Haag and H. Schiffers, JÜI-562-RW (1968)
- (7) S. Timoshenko and J. Goodier, "Theory of Elasticity" 3rd. Ed. (Mc Graw-Hill Book Co.) 409 (1970)
- (8) K. Drittler, JÜI-605-RW (1969)
- (9) J. L. Kaae, J. Nucl. Mat. 46, 121 (1973)
- (10) H. D. Conway, Phil. Mag. 38, 905 (1947)
- (11) 淡中忠郎, 統計学の理論と応用, 103 (1959)

養覧堂

- (12) 石川, 藤森利美, 久米均, 統計的方法, 208 (1968) 東京化学同人
- (13) H. A. Schulze-KFA, JÜlich; J. Nucl. Mat. 45, 261 (1973)に引用
- (14) JAERI-memo 4945, 20 (1972)
- (15) J. L. Kaae, J. Nucl. Mat. 38, 42 (1971)

Table I Properties of the coated fuel particles tested

Biso particle

Specimen		71GC1	71GC3	71FC6	72FC16	70NC4
Kernel	Chemical form	ThC ₂	(U/Th)C ₂	UO ₂	UO ₂	UC ₂
	Diameter (μm)	~366	~311	~544	~502	~460
Thickness of coating layer(μm)	First layer (A)	~54	~53	~34	~36	~14
	Second layer (B)	~29	~27	~36	~26	~203
	Ratio: B					
	Radius of Particle	~0.11	~0.11	~0.10	~0.08	~0.45

Triso particle

Specimen	Kernel		Thickness of coating layer(μm)				Diameter of coated particle (μm)
	Chemical form	Diameter (μm)	First layer	Second layer	Third layer(SiC)	Fourth layer	
71FC3	UO ₂	~495	~40	~30	~28	~45	~780
71GC4	(U/Th)C ₂	~314	~56	~27	~20	~39	~598

Table 2 Results of reproducibility tests of the identical coated particles

Specimen	Load	Young's modulus (Kg/mm ²)				
		First	Second	Third	Fourth	Average
71GC3	Increased	1503 ± 16	1558 ± 60	1182 ± 93	1449 ±124	1423 ±167
	Decreased	1296 ± 58	1255 ±107	1134 ± 96	1527 ±126	1303 ±164
72FC16	Increased	789 ±31	810 ±9.0	897 ±6.2	1281 ±127	944 ±229
	Decreased	735 ±80	950 ±128	827 ±119	910 ±157	856 ±95

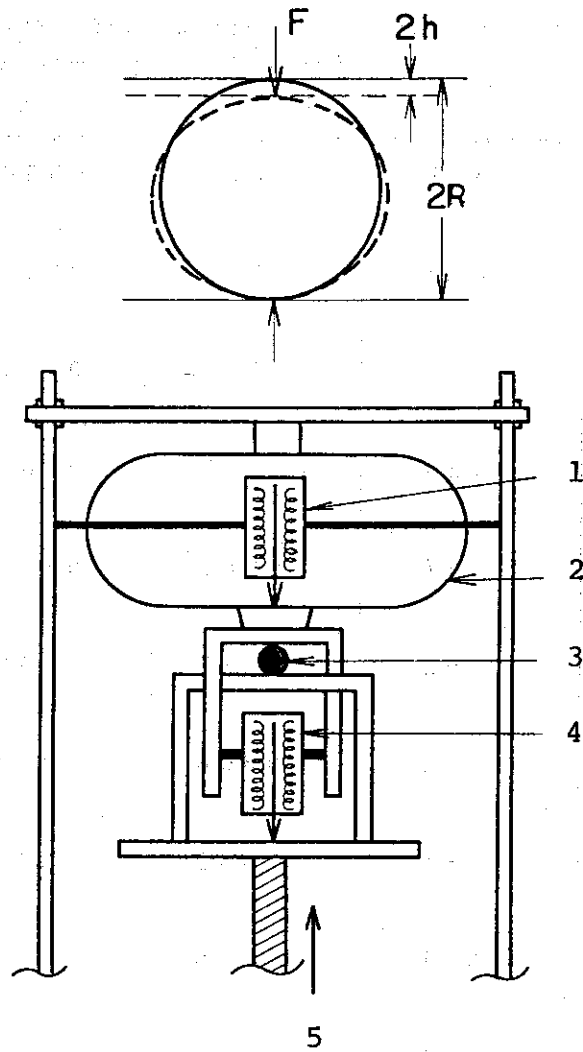
71GC3 : S=1.04 , 72FC16 : S=1.06

Table 3 Results of Young's moduli obtained for the coated particles tested

Specimen	No. of coated fuel particle	Young's modulus		Remarks
		Mean (Kg/mm ²)	St. dev. (Kg/mm ²)	
71GC1	40	1762	399	BISO particle
71GC3	35	1697	393	
70NC4	12	1523	350	
71FC6	12	1288	412	
72FC16	40	1265	328	
71CC1	12	1468	264	1400°C×500h
71GC3	11	1323	352	1400°C×520h
70NC4	11	1726	445	1600°C× 34h
71GC4	8	2217	372	TRISO particle
71FC3	8	2291	410	

Table 4 Results of Young's moduli obtained in
three-point bending

Sample No.	Load to fracture (g)	Maximum deflection (actual) (mm)	Maximum deflection (simple theor.) (mm)	Young's modulus (Kg/mm ²)
1	59.1	0.392	0.356	1,941
2	87.4	0.326	0.3165	1,952
3	37.8	0.368	0.357	1,820
4	42.3	0.267	0.261	1,723
5	34.7	0.382	0.3504	1,527
6	49.2	0.437	0.355	2,303
7	40.6	0.368	0.344	2,187
8	58.4	0.350	0.340	1,841
9	52.7	0.378	0.353	1,630
10	93.1	0.393	0.357	1,873
11	38.3	0.318	0.311	1,909



- 1. Differential transformer (for detecting load)
- 2. Load ring 3. Coated fuel particle
- 4. Differential transformer (for detecting displacement)
- 5. Direction of load applied

Fig.1 Compression of elastic sphere by two flat plates and the experimental apparatus.

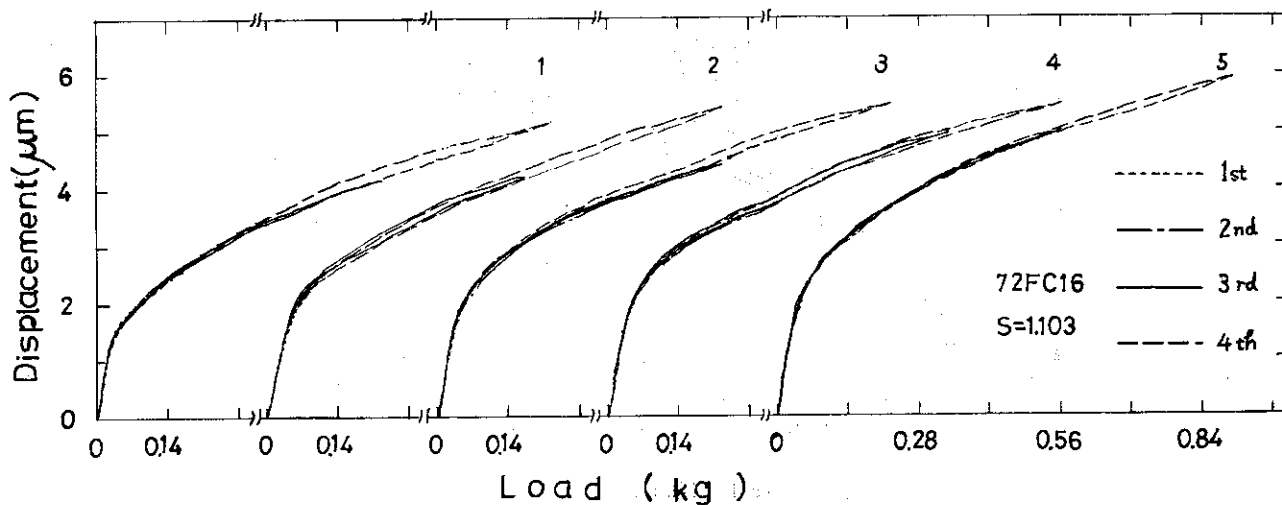
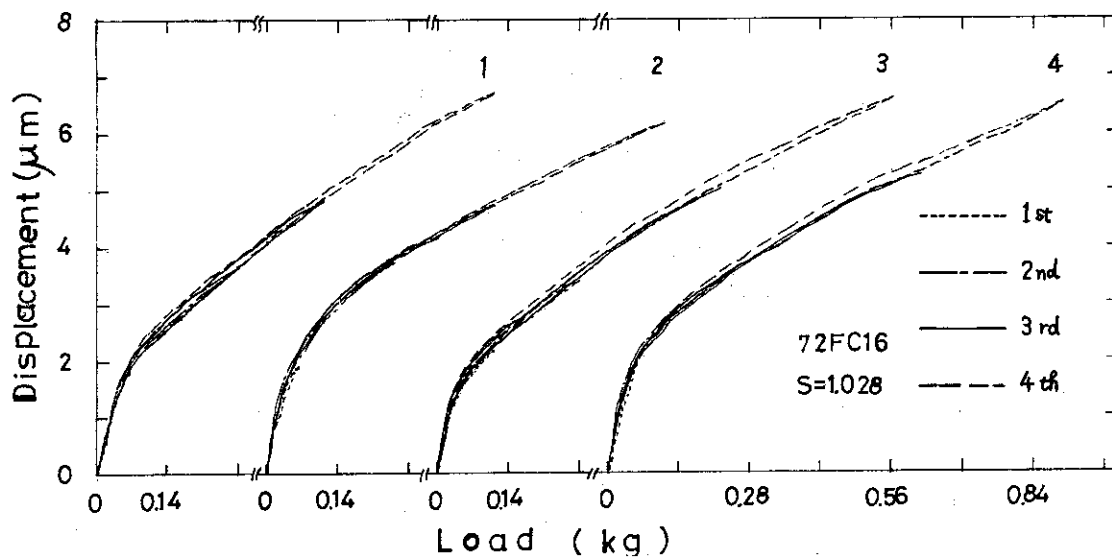
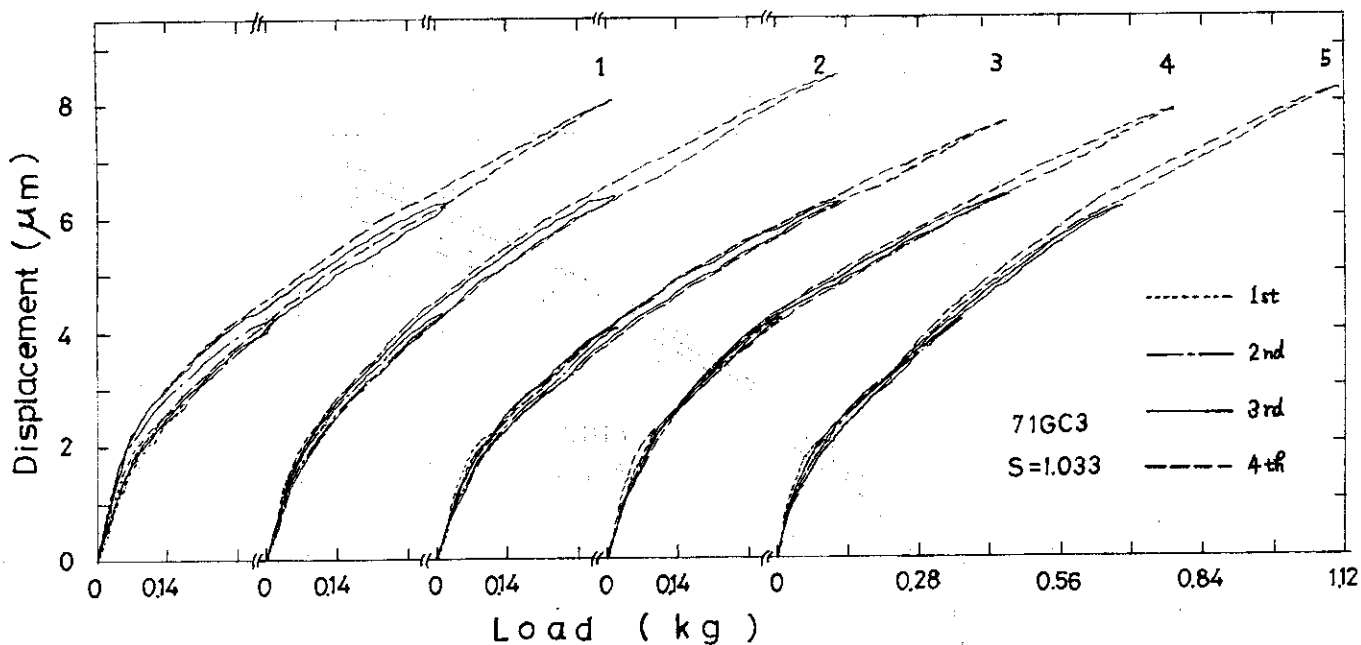


Fig. 2 Reproducibility tests of displacement - load curves for obtaining Young's modulus of the coating layer.

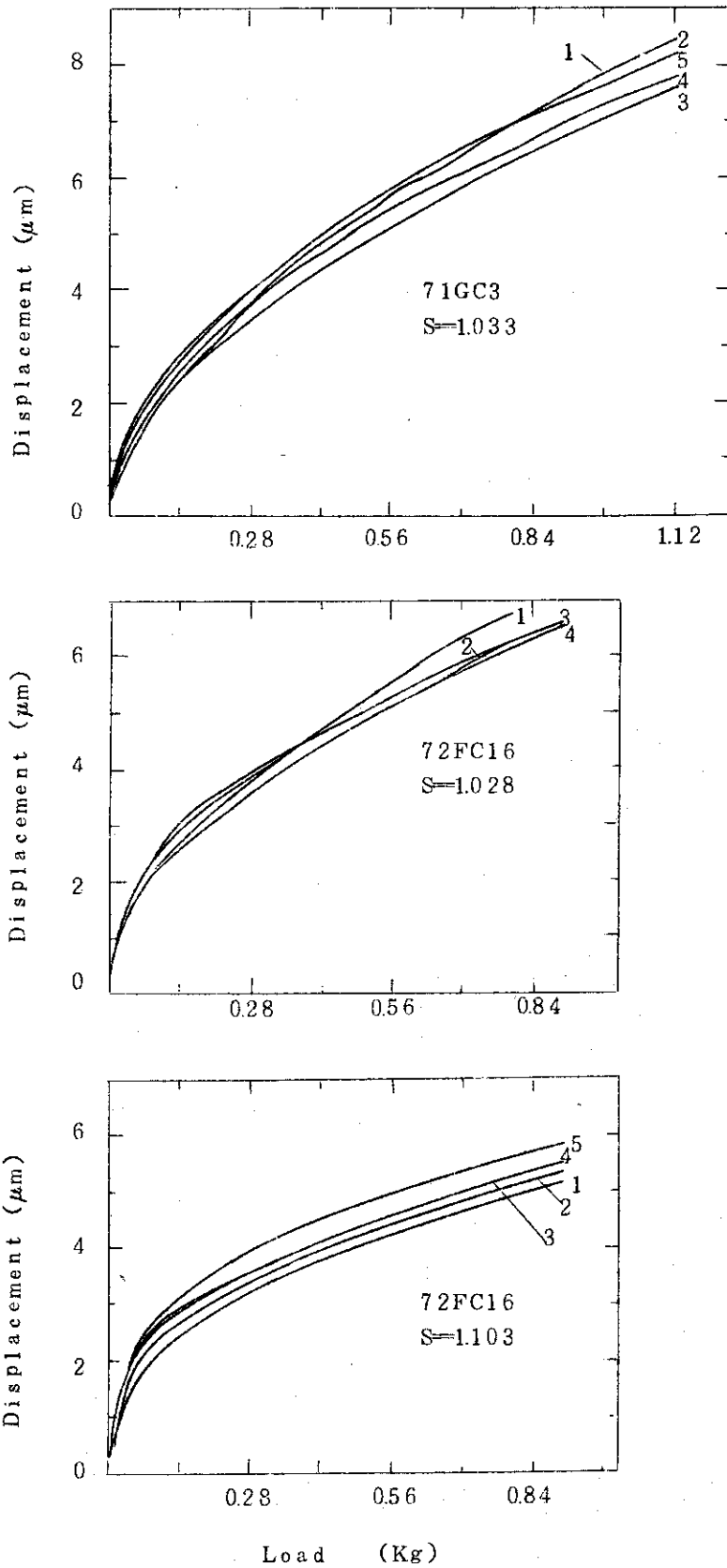


Fig. 3 Plots of the displacement vs load of the identical coated particle

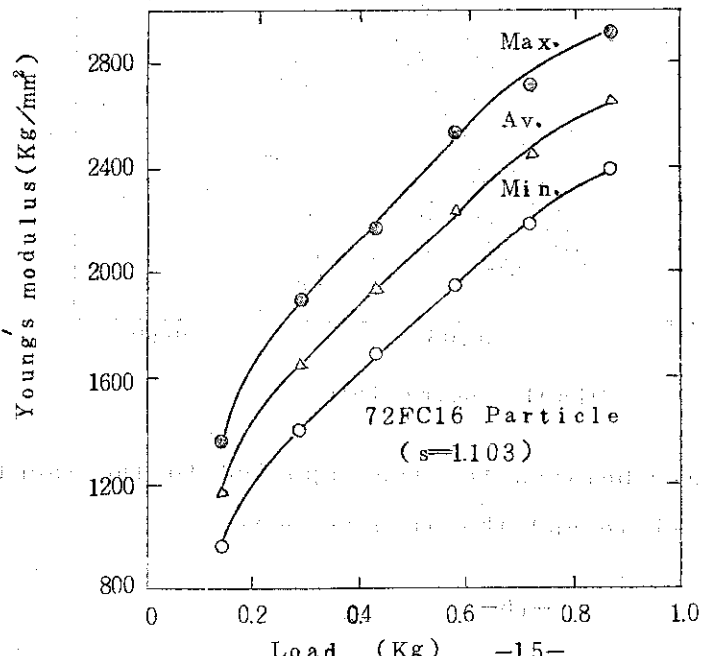
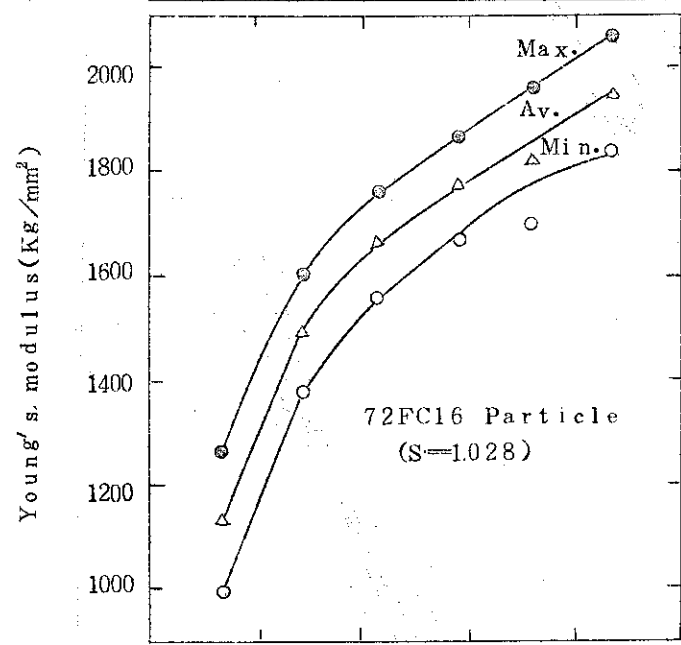
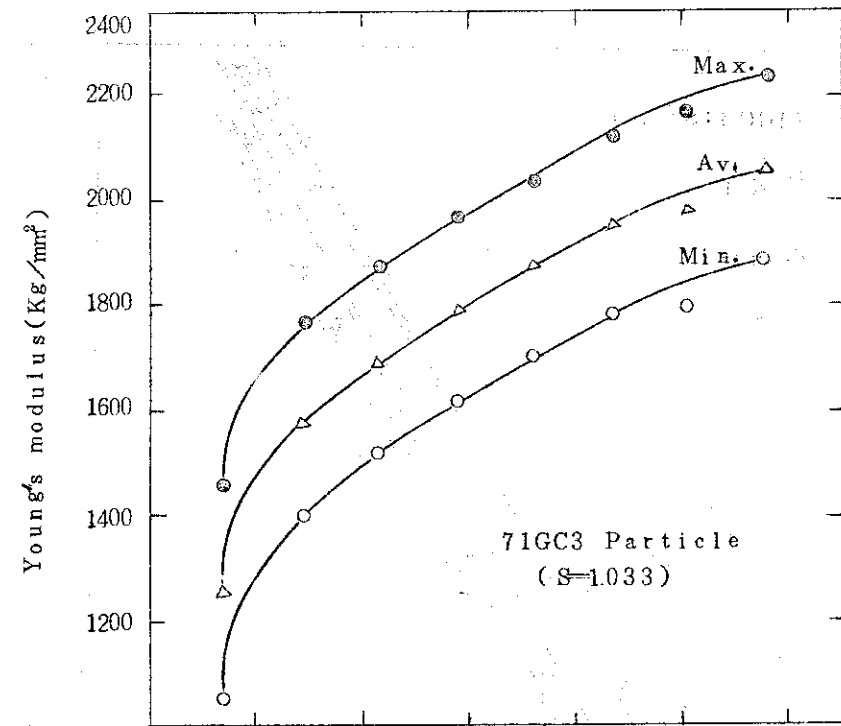


Fig. 4 Variation of max. min. and average Young's modulus with the load applied to the identical coated particle

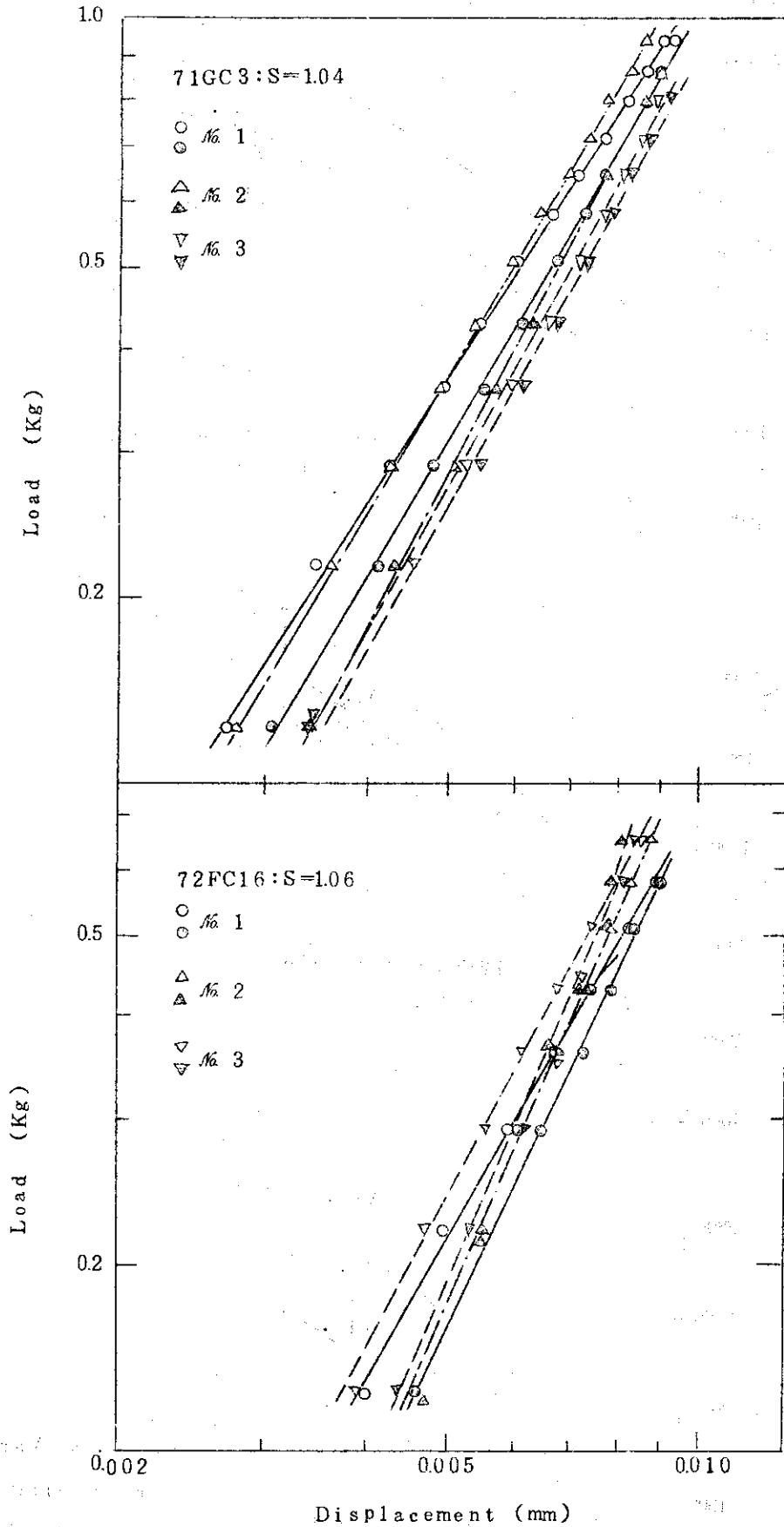


Fig. 5 Relationship between the load applied to the identical coated particle and the displacement

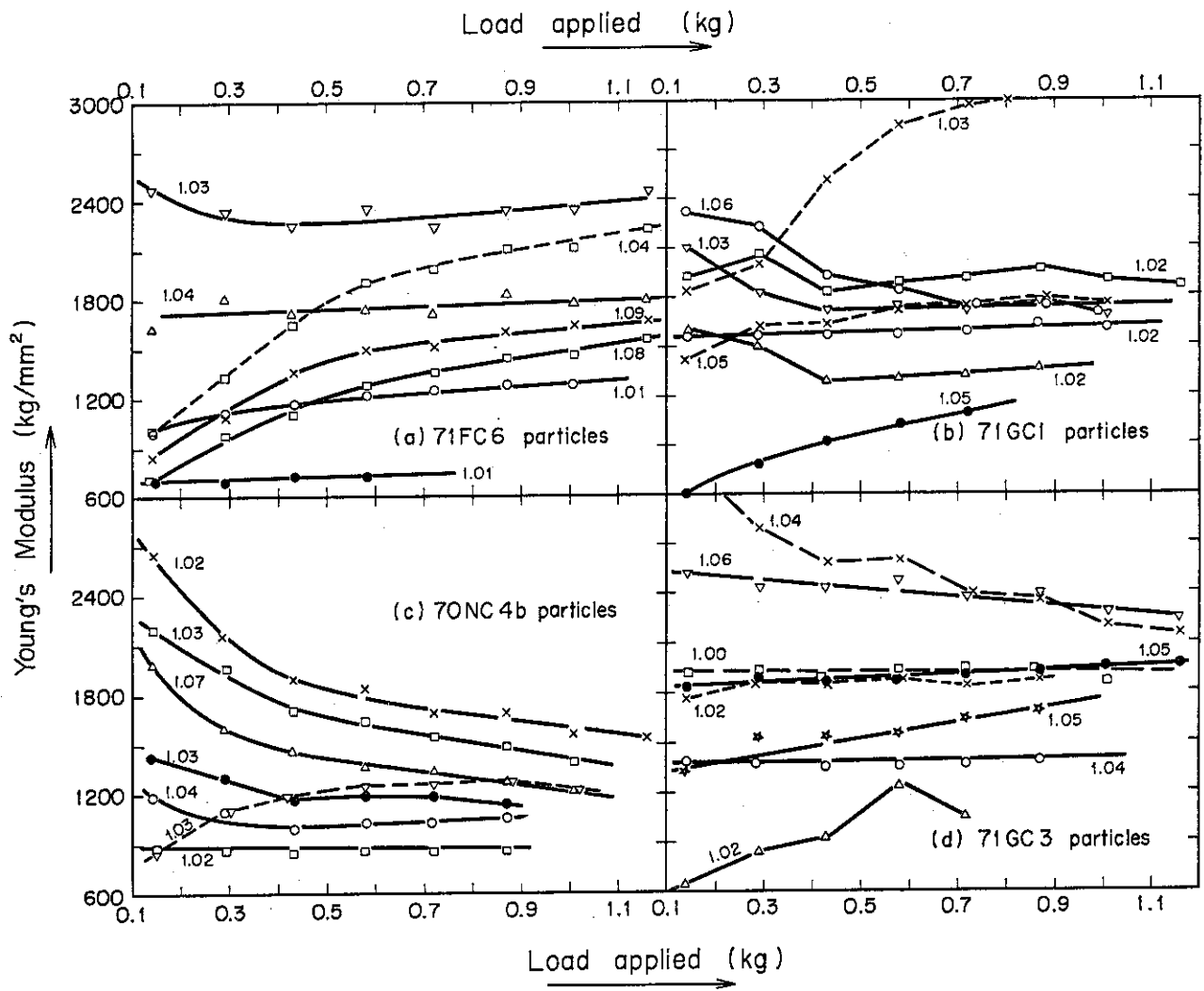


Fig. 6 (A) Variation of Young's modulus with the load applied to the 71 GC1, 71GC3, 70 NC4 and 71 FC6 particles. Numeral of the curve indicates sphericity of the particle.

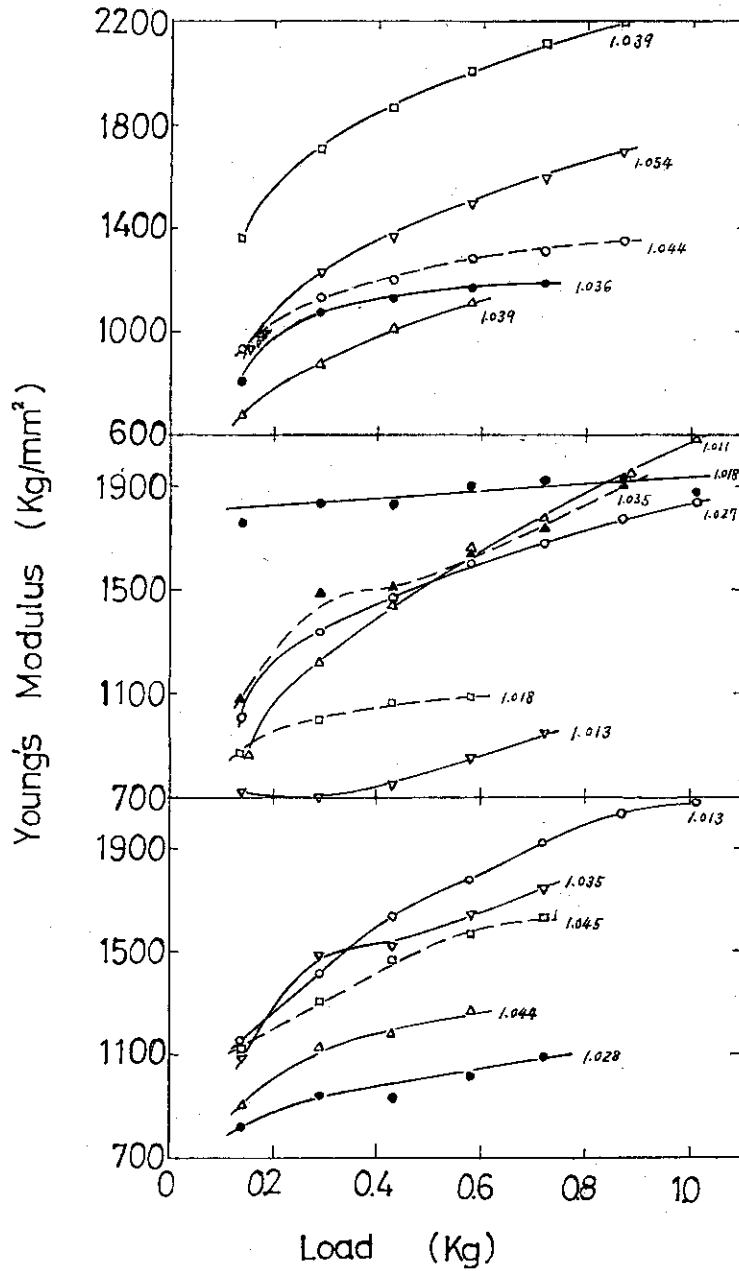


Fig. 6 (B) Variation of Young's modulus with the load applied to the 72 FC16 particles. Numerical of the curve indicates sphericity of the particle.

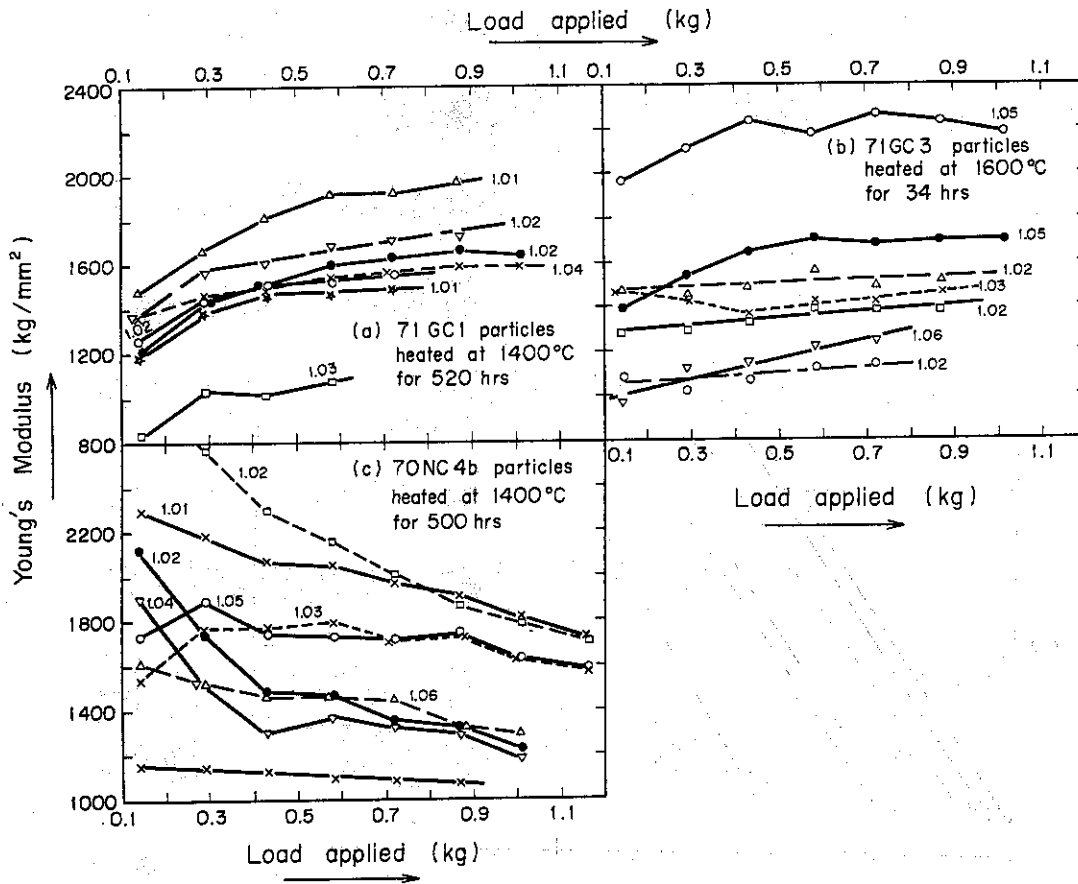


Fig. 6 (C) Variation of Young's modulus with the load applied to the heat treated 71 GC1, 71 GC 3 and 70 NC4B particles. Numeral of the curve indicates sphericity of the particle.

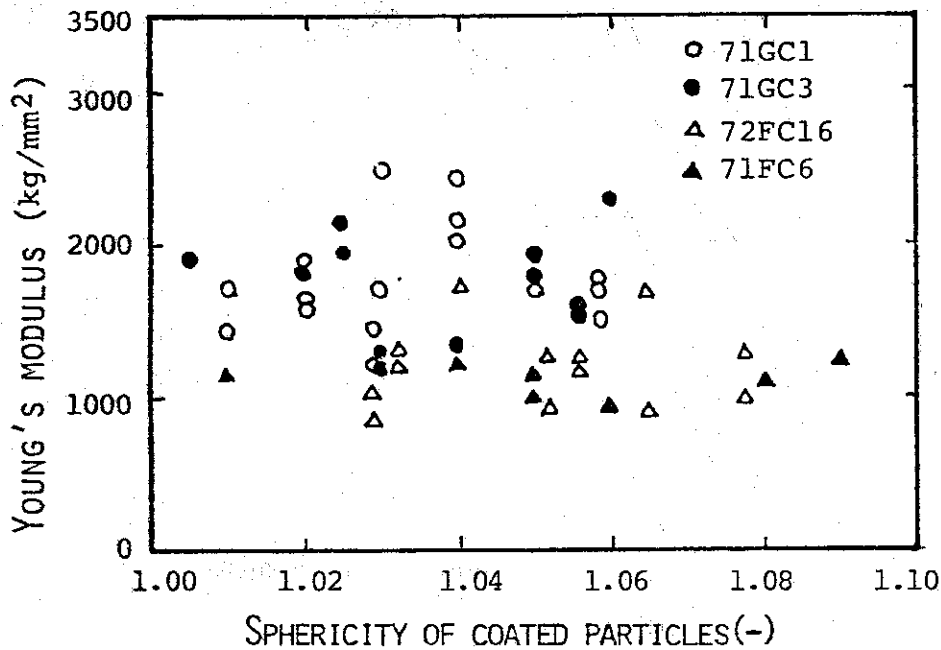


Fig. 7 Relation between Young's modulus of PyC layer and sphericity.

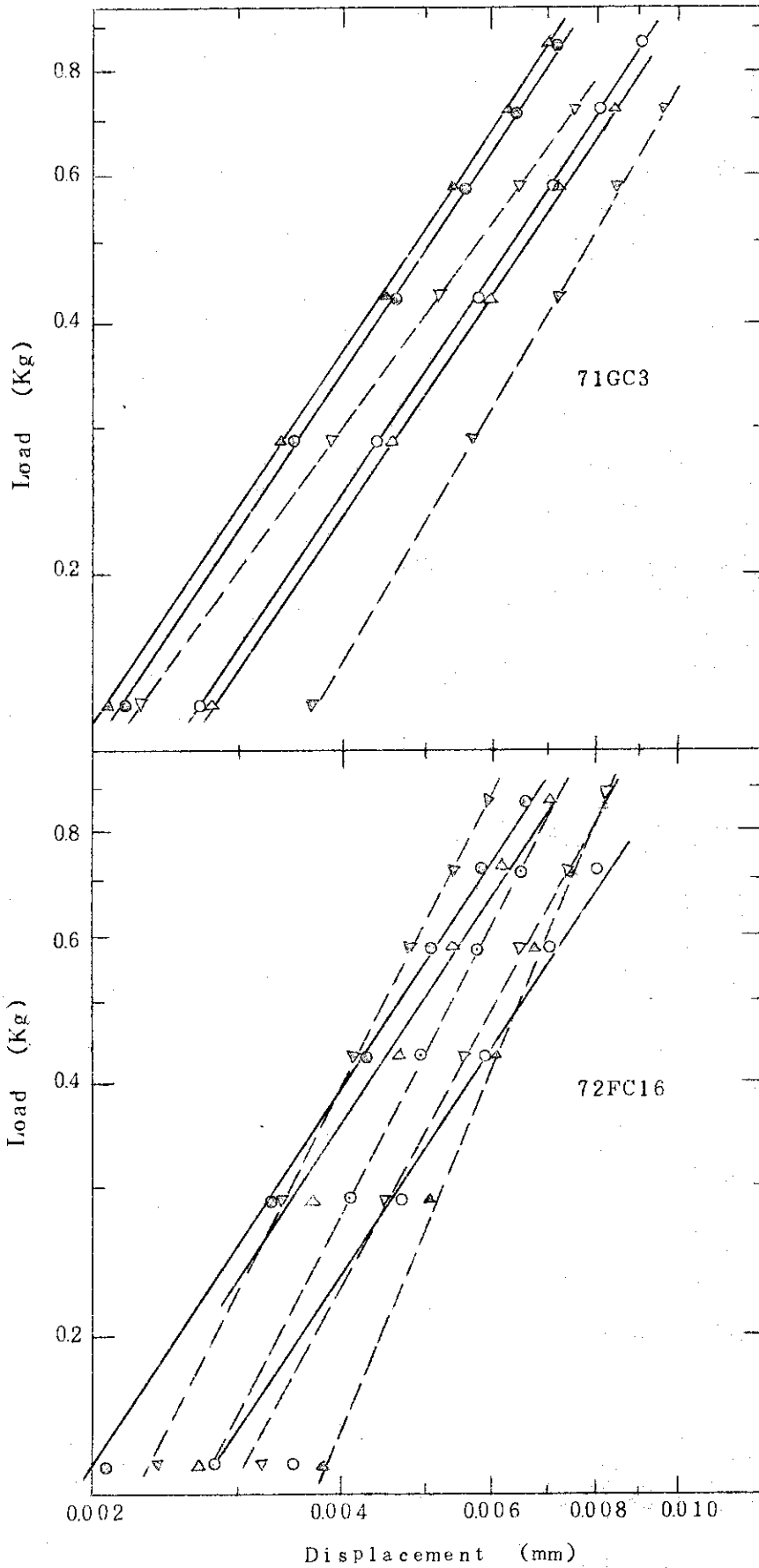


Fig. 8 Relationship between the load applied to the coated particle and the displacement. The figures show several results obtained from different particles of the sample.