しい。U-0.5~1.0%Cr合金に関する限り以上の注意を払えば研磨中の変態の進行を考慮する必要がない。

以上、恒温変態組織の観察による M_s 点測定方法の要点を述べたが、この方法はまたN.G.型とM型のTTT曲線がFig. 12(a)のような関係にあり、したがって、実際に測定されるTTT曲線がFig. 12(b)のようになると、これから M_s 点を正確に決定しにくい場合にも都合よく用いられる。このような例は、後に報告される各種2元系合金において認められた。

Ⅱ. 総 括

以上U-Cr系合金のM型 $\beta \rightarrow \alpha$ 変態の kinetics について検討したが、結果を要約すればつぎのとおりである。

- (1) U-0.5, 0.75%Cr合金のM型 $\beta \rightarrow \alpha$ 変態のTTT曲線を測定し、変態の進行について検討を加えた。すなわち、M型変態は温度によって3種の異なる速度式をとるといわれているが、この点を確認し、また M_s 点からある程度過冷された温度領域では $\beta \rightarrow \alpha$ がJohnson-Mehlの速度式に従ってほぼ100%進行することを明らかにした。
- (2) $730^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ から水冷されたU-0.25~1.5%Cr合金の過冷 β 相をM型変態領域において恒温的に焼戻し、その進行を明らかにした。すなわち、U-0.25~0.75%Cr合金のM型 $\beta \rightarrow \alpha$ 変態は比較的容

易に100%進行するが、U-1.0~1.5%Cr合金では困難で、とくにU-1.5%Cr合金はほとんどM型変態をおこさない。しかし、U-1.0%Cr合金は約150°C付近において変態が最も容易に進行するが、その量は約70%ぐらいである。

- (3) 水冷試料の $\beta \rightarrow \alpha$ 焼戻し変態(M型変態)は恒温変態に比較して進行しやすいことを明らかにした。この原因は水冷の際発生する歪がいちじるしいため、核発生を容易にすることによると考えられる。
- (4) M_s 点の測定方法について検討し、とくに恒温変態組織の観察による測定法の意義とその要点を述べた。

以上の研究を行なうにあたり、ご懇切なご指導を賜った東京大学教授 橋口隆吉先生に深甚なる謝意を表するとともに、ご指導ご鞭撻を賜った日立研究所 小野健二博士ならびに小川浩三氏に感謝する。

(1962年 9月20日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) 添野 浩：本 誌，4, No.11, 787~796 (1962).
- (2) D. W. WHITE: *Trans. AIME*, **203**, 1221 (1955).
- (3) M. AVRAMI: *J. Chem. Phys.*, **7**, 1103 (1939); **8**, 212 (1940); **9**, 176 (1941).

研究論文

277. 二酸化ウラン燃料の振動充填法に関する研究

高 橋 修 一 郎*, 浅 見 直 人*

An Approach to Vibration Compaction of Uranium Dioxide

By Shuichiro TAKAHASHI* and Naoto ASAMI*

Particle packing by mechanical vibration was experimentally studied with spherical metal shot and uranium dioxide powder particles for an idealized and actual cases, respectively. The effect of water content on efficiency of packing was studied.

Particles of one, binary and ternary size components in a cylindrical glass container were packed by controlled sinusoidal vibration (10 c~10 kc).

With metal shot, densities of 64.0, 86.1 and 92.4% of theoretical were attained from one, binary and ternary components, respectively. With uranium dioxide maximum attained densities were 60.5, 78.9 and 85.0%, respectively.

* 三菱原子力工業(株)研究所 (Engng. Res. Lab., Mitsubishi Atomic Power Ind., Inc.)

An economic mixing of two kinds of uranium dioxide, i.e. coarse fused particles (—3 ~ +10 mesh) and high fired (Mitsubishi Swageable —50 mesh) UO_2 showed a density of 83.5%, nearly as high as that attained in ternary packings mentioned above.

By adding slight amount of water, packing density decreased abruptly and this effect was more remarkable with packings of finer particles.

I. 緒 言

燃料要素の加工の経済化と能率化は、発電用原子炉の燃料要素においては非常に重要な問題であり、この意味で現在最も標準的なペレット状燃料要素にとってかわるべき製法として、振動充填法、スウェージ法等が開発されつつある現状である。スウェージ法においてはその前段階としての粉末充填法として、振動充填を施す方が有利である。また、振動充填法においては、最終充填密度がそのまま燃料要素として使用するには不十分な状態であり、外国においても振動充填後数回のスウェーディング工程を入れて、密度を上げているのが現状のようである。

もちろん、振動充填法のみで実用十分な密度に達することが理想であるが、振動充填に使用される粉末は particle density も高く、適当な particle distribution を持たせること等で粉末の価格が高価となる点に問題があり、結局最終的には、振動充填→スウェージ加工（または引抜き等）といった工程を最も有利な割合で使うことが、最も有効な方法と考えられる。

ここではまず、振動充填をある程度理想化した条件下で行ない、それと対応させながら UO_2 粉末についての充填試験を行なったことについて報告する。

II. 振 動 充 填

ある粒子、あるいは粉末をある容器に充填させる際に、容器の径が粒子の径に比して充分大きい時、さらに粒子の大きさの分布が充填中に変わらない時には、限界の充填密度は充填以前から定まったものである。充填は各粒子の再配列によってなされるが、1つの粒子が再配列を行なうのは、まわりの粒子によってでき上がっている一種の障壁を越すことによって行なわれる。そうした障壁は粒子の寸法によるものと粒子の表面の摩擦によるものとの重畳したものと考えることができる。粒子の表面の摩擦として考えられるものは、粒子を作っている物質、形状、表面の形状、湿気、温度、気圧等に依存すると考えられる複雑な要因である。

ここでは、上記障壁と考えられる摩擦の項が無視できるような場合として、まず、ある程度理想化した例

として、球状粒子の充填を考え、粒子が再配列に必要な energy を与えるのに、正弦的な軸方向振動（振動数範囲 10 c~10 kc）を与えた。振動には各粒子の大きさ、物質の物理的性質により optimum な振動数、振幅があると考えられ、経験的に得られた最適と思われる条件下で充填を行なった。

粒子の充填は、燃料要素の製作といった真新しい目的以外に、古くからコンクリート工業、各種セラミック工業等工業的な面への応用もあって、1930年頃から種々^{(1)~(5)}それに関した文献もあり、最近のものでは McGeary⁽⁶⁾ による球状粒子の充填に関するかなり詳しい報告がなされている。ここで行なう球状粒子の充填試験の方法は、部分的にそれら著者の実験方法に近いものである。

III. 球 状 粒 子 の 充 填

1. 1 種類の粒径の球状粒子の充填

球状粒子として 20~300 mesh の球状砲金（密度は 8.79 g/cc）および 12 mmφ の鋼球（密度 7.87 g/cc）を使用した充填は、容器に粒子を入れて正弦的振動を与えて行なった。その結果は Table 1 に示すように、容器の径 (D) と粒子の径 d との比 D/d が充分大きいところで は充填密度は一定であり、粒子径にはよらず平均値が

Table 1 Packing density of one component spherical particles

Particle diameter d (mm)	Container diameter D (mm)	Mesh	For reference mesh No.	% [†] of theo. density (%)	$\frac{D}{d}$
0.69	15	— 20+ 30	Gun bronze shot 25	64.3	21.7
0.42	15	— 30+ 50	40	63.7	35.7
0.22	15	— 50+100	75	64.0	68.2
0.127	15	—100+150	125	63.8	118
0.061	15	—200+300	250	64.4	246
12.0	3.10	Steel shot 1.5 mesh		51.5	2.6
	3.64			58.4	3.0
	85.0			60.5	7.1

($\frac{\text{Observed density}}{\text{Theoretical density}} \times 100\%$)

64%であるが、小さいところでは密度は落ちている。すなわち、充填密度への容器径の影響は $D/d < 10$ ではかなり大きく、 $10 < D/d < 20$ 程度では少なく、 $D/d > 20$ ではほとんど影響がない。

↑ 容器内に球状粒子が規則正しく配列する場合、つぎの4つのタイプに区別される。すなわち、結晶学的用語を用いると、(1) Simple cubic (2) Orthorhombic (3) Tetragonal spheroidal (4) Rhombohedral (f.c.c, h.c.p) であり、理想的に詰まれば充填密度はそれぞれ、53.36 60.46, 69.81, 74.05% となる*。球体が容器の中に詰まる実際の形は(1)は不安定であり、(4)は容器の形状等からして起りにくいので、(2), (3)ならびに(2), (3)の中間的な状態と考えられ、上記実験値が約64%であることは妥当と考えられる。

2. 2種類の径の球状粒子の充填

接した3つの大きい球の間に入り得る最大の球径は

Fig. 1の幾何学的図形より容易にわかるように、大きい球の直径(d_c)と小さい球の直径(d_f)との比は約6.5である。大きな球の隙に入る小さな球の径(d_f)が $d_c/6.5$ より大きい場合は、小さい球は大きい球を持ち上げて入るため大きな球の間の空隙が多くなり、充填密度は下がってくると予想される。

Geometrical figure of sphere arrangement
Fig. 1

2種類の粒径の粒子の充填試験を球状砲金および鋼

Table 2 Combination of binary Packings

No.	Coarse particle		Fine particle		$\frac{d_c}{d_f}$	$\frac{d_o}{d_c}$
	Mesh	Average diam. d_c (mm)	Mesh	Average diam. d_f (mm)		
1	Gun bronze shot 25	0.69	250	0.061	11.3	21.7†
2	" 40	0.42	250	0.061	6.9	35.7†
3	" 25	0.69	125	0.31	5.3	21.7†
4	" 40	0.42	125	0.31	3.2	35.7†
5	" 25	0.69	75	0.22	3.1	21.7†
6	Steel shot 1.5	12.0	250	0.061	197	3.0
7	" "	"	125	0.13	92	"
8	" "	"	75	0.22	55	"
9	" "	"	40	0.42	29	"
10	" "	"	25	0.69	17	"

† D_o : Container Diameter (15mm)

球を使って行なった。Table 2 は2種類の径の砲金粒子の組合せと鋼球と砲金粒子との組合せを示したものである。

充填試験はまず粗い粒子をその状態での飽和充填密度まで振動充填し、その後細かい粒子を上から振動充填した。砲金粒子の場合、No. 1, 2 の場合は細かい粒子は粗い粒子の間に吸い込まれるように分散して行なった。しかし、No. 3, 4, 5 の場合はその順に分散し難い。すなわち、上に予想したように、No. 1, 2 の場合は d_c/d_f が6.5より大きくて充填性よく、No. 3, 4, 5 では d_c/d_f が6.5より小さいので充填性は悪い。Fig. 2 は粗い粒子の量を変えて振動充填を行なった結果を示したものであり、最高充填密度はNo. 1 の場合の粗い粒子 (25 mesh) が約70%の時、砂金の理論比重の83%に達した。Table 3 は Table 2 の各No. の最大充填

Fig. 2 Binary packing of coarse gun bronze shot with some other sizes

Table 3 Maximum packing density of binary packings

No.	Max. % of theo. density (%)	Difference between one component packing density of 64% (%)
1	83.1	19.1
2	80.1	16.5
3	77.8	13.8
4	70.0	6.0
5	70.1	6.1
6	86.1	22.1
7	85.5	21.5
8	85.0	21.0
9	84.2	20.2
10	83.7	19.3

* 文献(5), (6)参照。

密度を示す。1種類の粒子を充填した場合の最高充填密度は Table 2 に示したように約64%であり、空間は36%であって、この空間の何%を細かい粒子で占められたかをも Table 3 に示した。

鋼球と砲金粒子の組合せの場合、No. 6~10 の充填は粒径比 d_e/d_f が6.5よりも非常に大きいので、細かい粒子は分散しやすかった。充填密度は No. 1, 2 より高く、その値は Table 3, Fig. 3に示すように d_e/d_f の大きさの順であった。鋼球を充填した場合の容器内径と鋼球径との比は約3であって、高密度充填条件として要求されるその径の比20以上より小さい。そのため広径の容器を使えば、Table 2 または Fig. 3 の充填密度よりわずかながら高い値が得られるはずである。

Fig. 3で最高充填密度のピークが 25 mesh と 250 mesh の砲金粒子の場合のピークより粗い粒子の混合比率の低い方に移っているのは、鋼球のみの充填密度が58.4%と低いためそれだけ多く細かい粒子の入り得るすき間をもっていることを示し、それは容器内径対鋼球径の比がより小さいことに起因する。

Fig. 3 Binary packing of coarse steel shot with fine gun bronze shot

粒径の異なった砲金粒子および鋼球と砲金粒子の各組合せで得られた最大の充填密度と粗い粒子径 (d_e) 対細かい粒子径 (d_f) の比をグラフに示したのが Fig. 4 である。有限の容器へ充填された2種類の径の粒子の最高充填密度は87%が限度と思われる。これはつぎの考察からわかる。

1種類の径の球の最高充填密度は Table 2 のように64%であり、残りの空間の36%を小さい径の球でさらに64%詰めることが可能であれば、2種類の径の球の最高充填密度は87%に達することになる。上記の実験値が86.1%であることは、この考察とよい一致を示している。

Fig. 4 Maximum observed packing of binary mechanical mixtures of spheres

3. 3種類の径の球状粒子の充填

粗い粒, 中間の粒, 細かい粒の径をそれぞれ, d_e , d_m ,

Table 4 Ternary packing of spherical particles

No.	Mixed particle size	$d_e:d_m:d_f$	$\dagger D_0/d_e$	Max. packing density (%)
1	Steel shot (1.5 mesh), Gun bronze shot (40 mesh) and gun bronze shot (250 mesh)	197:6.9:1	3.0	90.8
2	Steel shot (1.5 mesh), Gun bronze shot (25 mesh) and gun bronze shot (250 mesh)	197:11:1	3.0	92.4

$\dagger D_0$ (container diameter 36.4mm)/ d_e (coarse particle diameter)

Fig. 5 Ternary packing of spherical particles

d_f とする。3種類の粒径比を6.5以上にするため、Table 2の2種類の組合せNo.の中9(鋼球と40 mesh 砲金粒子)と10(鋼球と25 mesh 砲金粒子)を選び、それぞれFig. 3の最高充填密度の組成に250 meshの砲金粒子を加えて振動充填試験した。その充填密度をTable 4およびFig. 5に示す。Fig. 5で細かい粒子の配合量が約12~13%のところで充填密度は最大になる。2種類の径の粒子の場合と同様な考察とFig. 4の結果とから、3種類の径の粒子の充填密度限界は約94%と考えられる。

4. 充填密度への湿気の影響

いまだ粒子間の表面における摩擦力が無視できるような場合について充填を行なってきた。この節では、湿気によって粒子の表面の間に働く摩擦が充填密

度にどのような影響を与えるかを、いまだ使用してきた球状粒子を使用して観察してみた。

実際、燃料要素として使用する UO_2 は日本のように湿気の高い国において空气中に放置した場合、かなりの程度の水分を吸着していると考えられる。これは充填密度を落すのみならず、炉中における燃料被覆管の内圧を増す原因になるとも考えられ、被覆管に UO_2 等の粉末を充填する型の燃料要素にとっては、考慮すべき問題であろう。

球状粒子に対し非常に僅かな湿気を与えることは甚だむずかしく、本実験では約0.1~2%の水分を入れた試料について充填した結果を、1種の径を持った球状粒子系の充填についてFig. 6(a)に、1種の径を持った球状粒子系の充填についてFig. 6(b)に示す。

Fig. 6 Effect of water content to packing density (Constant vibration acceleration 10 G)

水分の悪影響はある maximum を示し、それ以上の水分は粒子間の摩擦力を減少させる方向に働くことがわかる。Fig. 6 から明らかなように、湿気の小さなところで急激に充填密度が下がっていることがわかる。また Fig. 6(a)からわかるように、細かい粒子ほどその影響は顕著である。2種類の系をもった粒子系の充填においては、0.4%前後において約10%もの充填密度の減少を示している。

なお、この際各振動数範囲に対して一定の加速度10 G (G : 重力加速度)で振動充填を行なった。粒子の充填状態を詳しく見ると、bridgeを組んだ個所が多く見られ、各粒子間の摩擦によってそうした bridge は容易には崩れにくく、この bridge の幾分かは強い衝撃的力を与えることによって崩れた。

IV. UO_2 粉末の振動充填

1. 1つのピークを持った粒度分布の充填

前述の球状粒子の充填密度試験結果を基として、 UO_2 粉末について充填試験を行なった。 UO_2 粉末粒

子は形状も不規則であり、細かい粉末粒子はかなり摩擦に富んでいるので、その充填密度は理想充填密度よりかなり低いと思われるが、径で約7倍以上の差を持った2または3種類の UO_2 粉末粒子を組み合わせれば、 UO_2 粉末として高い充填密度に達すると考えられる。

ここで使用した UO_2 粉末は、Fused UO_2 -3 mesh, Spherical UO_2 および三菱金属製 Swageable UO_2 の50 meshの3種の UO_2 を使用した。なお、三菱 Swageable UO_2 は ADU process を用いた一種の High fired UO_2 で、とくにスウェーデン法燃料棒製造研究に使用しているものである。Fused UO_2 はきれいな破面をもつものは particle density は100%に近いが、大きな粒であっても細かい粒の凝集体からなっているものは気孔も多く、particle density はかなり低いものもあり、形状は不定形である。三菱 Swageable UO_2 は particle density としてはほとんど100%に近い UO_2 であるが、形状は球形ではなく不定形をなしている。Spherical UO_2 は球状に近いものであるが、かなりの

Table 5 One component packing of UO_2 powders

No.	No.	Mesh size (mesh)	Average size (mm)	Packing density (wet)	Water content (%)	Packing density (dry)	D_0/d
1	F 7	Fused UO_2 -3+10	2.36	57.0	0.03	57.3	6.4
2	F 15	" -10+20	1.24	56.4	0.04	56.4	12.1
3	F 25	" -20+30	0.69	55.8	0.06	55.6	21.7
4	F 40	" -30+50	0.42	55.0	0.05	55.3	35.7
5	F-200	" -200	<0.08	58.1	0.07	59.3	>19.0
6	M75	Swageable UO_2 -50+100	0.22	59.0	0.06	60.1	68.2
7	M200	" -150+250	0.08	59.6	0.04	60.5	181
8	M-300	" -300	<0.05	54.5	0.08	57.5	>313
9	S 80	Spherical UO_2 -60+100	0.20	58.2	0.04	58.5	75.0
10	M-50†	Swageable UO_2 -50	<0.29	73.8	0.07	75.0	>51.7

† M-50: Commercial Mitsubishi Swageable UO_2 (-50 mesh) has already two peaks in its particle size distribution.

気孔を内包しており、particle density はやや低い。

上記 UO_2 を篩分けして各区分について振動充填を試みた。また、湿気の影響を見るために、60°C 真空中で約18時間乾燥した試料についても振動充填を行なった。その結果を Table 5 に示す。

Fused UO_2 (Table 5 の No. 1~4) の場合に充填密度が低いのは、かなり粗い粒であるため平均の particle density が低いと、形状がかならずしも凸多面形ではなく凹多面形の部分もかなりあるためではないかと思われる。また、No. 1~4 においては湿気の影響は少ない。それは粒度が大きいので表面摩擦がきいていないためと考えられる。Table 5 の No. 5 の充填密度が No. 1~4 に比して高いのは、粒度が小さく、particle density そのものは100%に近いとみられる。なお、粒度が小さいために(比表面積が大きい)水分をかなり多く含んでいるようで、乾燥後の充填密度も上がっている。三菱 Swageable UO_2 の場合 (No. 6, 7) は充填密度は高くなっているが、これは particle density が高いと思われる。なお、No. 8 は -300 mesh という微粉のため水分も多くつきやすく、粉末の重量に対して表面摩擦力が大きい場合であるので、1度組んだ bridge はなかなか崩せないようである。Special UO_2 の場合、1つ1つの粒は球状に近い形状をなしているが、particle density が低いとみられるため充填密度が上がっていないと思われる。

2. 2つのピークを持った粒度分布の粉末の充填

充填は Fused UO_2 のいくつかの組合せで行ない、結果を Fig. 7 に、その時得られた最大の充填密度を Table 6 に示す。Fig. 7 は乾燥前のものであり、乾燥後の充填密度は乾燥前に最大の充填密度を得た割合で振動充填を行なった時に得られた値である。な

お、Table 6 の最後に、篩分けしない三菱 Swageable UO_2 の充填密度を示す。Table 5 の欄外注にあるように2つの分布のピークを持つようなものである。Figs. 2 と 7 とを比較してみるとわかるとおり、最大充填密度を得るための粗い粒子と細かい粒子との割合が UO_2 の場合では球状粒子の場合より少しピークが左方へずれているが、これは1つの分布のピークを持ったものの充填密度が UO_2 の場合、球状粒子に比して低いためである。

Fig. 7 Binary packing of fused UO_2 Table 6 Binary packing of UO_2 powders

UO_2 powder	Packing density (wet) (%)	Packing density (dry) (%)	Optimum composition coarse, fine	d_c/d_f
F 7, F-200	78.4	78.9	68 : 32	30
F 15, F-200	77.4	78.0	68 : 32	16
F 15, F 175	75.1	76.3	69 : 31	14
F 25, F-200	73.8	74.3	68 : 32	9
F 25, F 175	72.0	72.7	71 : 29	8
F 40, F-200	69.4	70.5	63 : 37	5
M-50	73.8	75.0	-	-

3. 3つのピークを持った粒度分布の粉末の充填

④Fused UO_2 (-30~+10 mesh), ⑤三菱 Swageable UO_2 (-50~+100 mesh) と ③三菱 Swageable UO_2 (-300 mesh) との組合せで行なった結果を Fig. 8 に破線で示す。この際得られた最大充填密度は $85 \pm 0.5\%$ で、その時の粒度分布と混合割合は④(-3~+10 mesh)61%, ⑤(-50+100 mesh)22%, ③(-300 mesh)17%であった。さて、こうした篩分けした粉末を混合し振動充填した場合、粉末の価格は篩分け分だけ高くなると思われる。幸い三菱 Swageable UO_2 は -50 mesh で2つのピークを持った粉末であるので、これに Fused UO_2 の粗い粉末を混合した場合には、他の場合に比して有利であると考えられる。そこで Fig. 8 と Table 7 にその結果を示す。

Fig. 8 Ternary packing of UO_2 coarse, medium and fine powders

Table 7 Ternary packing of UO_2 powders

Optimum composition(%)	Max. packing density (%)
F (7 mesh)with M(-50 mesh) 50 : 50	83.5
F (15 mesh)with M(-50 mesh) 45 : 55	80.9
F (25 mesh)with M(-50 mesh) 36 : 64	77.0
F (7 mesh)with M(75 mesh), 61 : 22 : M(-300 mesh) 17	85.0

充填密度が増すにつれてピークがずれているのは、球状粒子のことを考えると当然ではあるが面白い。得られた最大充填密度は 83.5% で三菱 Swageable UO_2 (-50 mesh)48%, Fused UO_2 (-3~+10 mesh)52% の時であった。これはもちろんこのままで fuel element として使用するには密度は低すぎ、なんらかの

加工工程、例えば数回のスウェーピング工程を入れる必要があるが、スウェーピング法の立場から見ると、数回の工程であるから、被覆管の欠陥発生はないと考えられる⁽⁶⁾。

振動充填法で充填密度をさらに上げるためには粉末および粒度分布の選択、さらに充填装置の改良が必要であろう。 UO_2 等においては粉末粒相互間に働く表面の摩擦力が大きく、粒が再配列を行なおうとする時、粒度が小さくなると粉末自身の mass に比して表面での凝集力はその割に小さくならないため、外から与えられる振動の energy によって再配列を行なう確率はそれだけ小さくなるのである。そこで正弦的な振動のみで高い加速度を得るのは不利であり、なんらかの方法で衝撃力を与え、瞬間的に非常に高い加速度を得る方法が開発されるべきであり、さらに正弦的な振動をこれに加える方法がより有効な方法であると考えられる。

V. 結 語

振動充填法の1つの approach として球状粒子の振動充填を試み、それに対応して UO_2 の振動充填を行なった。それらの結果の要点を再び抜き出してみるとつぎのとおりである。

1. 球状粒子の結果

(1) 粒子の大きさある程度揃えて振動充填をした結果、約64%の充填密度を得た。ただし、容器の径と平均の粒の径との比が20より小さなところでは、小さくなるに従って容器の影響が出て来ることがわかった。

(2) 2種以上の粒径をもった粒子系の充填では、粗い粒子ででき上がった3次元的な網の目を細かい粒子が分散していった。しかし、粗い粒子の径と細かい粒子の径との比が7より大きなところでは、大きくなるに従ってその分散速度は速やかに、小さなところでは小さくなるに従って分散しにくくなった。

(3) 2種の粒径をもった粒子系の充填密度は最大87%、3種の場合は94%がその最大の値であるようである。実際得られた最大充填密度は2種の時86.1%、3種の時92.4%であった。

(4) 充填密度に対する水分の影響は、水分が少ない時は粒子間の摩擦力を強めて凝集力を大きくするため、密度は水分が多くなるに従って落ちてくるが、ある程度以上になると摩擦力が減るため密度は上がってくる傾向にある。

2. UO_2 粉末の結果

- (1) UO_2 粉末の場合には、当然のことながら球状粒子の充填密度より低い値が出た。球状粒子と同様ある程度粒径をそろえて充填を行なったが、乾燥等を行なったり、振動数、振幅等を変えてみたりして種々細かい点に気をつけて得られた最大の密度は60.5%であった。
- (2) 2つ以上の粒度分布のピークをもつ UO_2 粉末の充填では、粒子間摩擦の少ない球状粒子の時に比して、細かい粒子の分散は非常に悪く、同じ粒径比(粗い粒子の径/細かい粒子の径)をもつものでも、粉末が細かくなるに従ってその傾向は強くなり、とくに乾燥前の粉末においていちじるしい。
- (3) 2つの分布のピークをもつ UO_2 粉末で得られた最大充填密度は78.9%、3つのピークの場合においては85%の最大充填密度が得られた。

充填密度をより上げるには、2つの道があろう。1つはあくまで振動充填のみで90%程度に密度を上げることであり、他は振動充填密度はある程度低くてもよいから、他の工程、例えばスウェージ法をそれに加える方法である。前者においては充填性のよい粉末をより安価に作ることで、振動充填装置の開発等今後にもつ問題が多い。後者においては、スウェージ法の技術的な面に関しては当研究所で照射試験等も成功に終り一応の解決をみた現在^{*)}、振動充填法とスウェージ法との組合せを経済、能率の両面からいかに行なうかについて、optimum な条件をつかみ出すことに問題が残っているといえよう。

終わりに当り、終始ご協力をいただいた三菱原子力工業(株)研究所、物理第二研究室の本田 裕氏、藤永昭三氏、久保田 正氏に深く感謝します。

本報告の発表を許可して下さった当研究所長大井上博博士ならびに多大の関心と便宜を与えて下さった当研究所副長杉本一六氏に深く感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は昭和33年度^{**)}および36年度^{**)}原子力平和利用研究費補助金の補助によるものである。

(1962年 10月26日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) A. E. R. WESTMAN, H. R. HUGILL: 'Packing of Particles', *J. Am. Ceram. Soc.*, **13**, 10, 767~779 (1930).
- (2) C. C. FURNAS: 'Grading Aggregates(I)', *Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density*, *Ind. Engng. Chem.*, **23**, 9, 1052~1058 (1931); *Ceram. Abstr.*, **1**, 4, 278 (1932).
- (3) H. E. WHITE, S. F. WALTON: 'Particle Packing and Particle Shape', *J. Am. Ceram. Soc.*, **20**, 5, 155~166 (1937).
- (4) D. R. HUDSON: 'Density and Packing in an Aggregate of Mixed Spheres', *J. Appl. Phys.*, **20**, 154~162 (1949).
- (5) L. C. GRATON, H. J. FRASER: 'Systematic Packing of Spheres, with Particular Relations to Porosity and Permeability, (I)-(II)', *J. Geol.*, **43**, 8, Part 1, 785~909 (1935); *Ceram. Abstr.*, **15**, 7, 221 (1936).
- (6) R. K. MCGEARY: 'Mechanical Packing of Spherical Particles', *J. Am. Ceram. Soc.*, **44**, 10, 513~522 (1961).
- (7) H. DOI, A. TAKASHIMA, Y. SUEHIRO, T. ITO: 'On Ceramic and Swageable UO_2 ', *Powder Metallurgy in the Nuclear Age*, 4th Plasee Seminar (June 20~24, 1961), Beutte/Tyrol.
- (8) M. YOKOSUKA, S. TAKAHASHI, Y. HONDA, Y. SEKI: 'On the Sheath Defects of Swaged UO_2 Fuel Elements of Rod and Hollow Types', *Fuel Element Fabrication with Special Emphasis on Cladding Materials*, (Proc. of a Symposium Held in Vienna, May 10~13, 1960), Vol. 22, 55 (1961), Academic Press for Intern. Atomic Agency.
- (9) E. A. EVANS, et al: 'Novel Ceramic Fuel Fabrication Process', *Fuel Element Fabrication with Special Emphasis on Cladding Materials*, *ibid.*, Vol. 2, 335 (1961).
- (10) 高橋修一郎、他: 'スウェージ UO_2 燃料の照射試験', 第3回原子力研究総合発表会要旨集, C68~72, 225~229 (1962).

* 昭和35年度原子力平和利用研究費補助金研究「スウェーjing法で成形加工した二酸化ウラン燃料体の放射線照射に関する研究」

** 昭和33年度原子力平和利用研究費補助金研究「スウェーjing等による UO_2 核燃料体の製造研究」

** 昭和36年度原子力平和利用研究費補助金研究「中空型二酸化ウラン燃料要素の製造に関する試験研究」