

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

分置

「ふげん」燃料安全性評価試験

— 落下試験および衝撃試験の抜粋 —

1989年3月

動力炉・核燃料開発事業団
動力炉建設運転本部

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)

る
開
使

用しないよう特に注意して下さい。

なお、開示制限が解除になった場合はその旨通知しますが、それ以前に関連業務が終了した場合は、直ちに返却して下さい。

本資料についてのご問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部 技術情報室



「ふげん」燃料安全性評価試験
— 落下試験および衝撃試験の抜粋 —

朝 日 和 美*

梶 山 登 司*

要 旨

「ふげん」新燃料集合体の落下事故を想定し、核燃料物質の粉末飛散量を評価するためUO₂ペレットを使用した短尺燃料集合体、短尺および実尺燃料要素の落下試験、UO₂ペレットの衝撃試験を実施した。

これらの試験結果を参考にして、新燃料集合体落下時のプルトニウムを含む燃料ペレット粉末の飛散量を推定した結果、安全審査用に設けた制限値（集合体当り1%）より十分低い値であることを確認した。

* 動力炉建設運転本部業務課

目 次

1. まえがき	1
2. 試験方法概要	2
2.1 落下試験	2
2.2 衝撃試験	2
3. 燃料要素落下試験	3
3.1 試験試料	3
3.2 試験方法	5
3.3 試験結果	5
4. 燃料集合体落下試験	2 2
4.1 試験試料	2 2
4.2 試験方法	2 2
4.3 試験結果	2 4
5. ペレットの衝撃試験	2 5
5.1 試験試料	2 5
5.2 試験方法	2 5
5.3 試験結果	2 5
5.4 UO_2 ペレットと $(U, Pu)O_2$ ペレットの破壊の様子の理論的解析	2 6
5.5 $(U, Pu)O_2$ と UO_2 との室温における機械的性質の比較	3 0
6. 考 察	3 1
6.1 新燃料集合体落下時に破損・飛散する核物質質量について	3 1
6.2 飛散したペレットについて	3 4

1. まえがき

本報告書は、動燃事業団と電源開発株式会社との間の『新型転換実証炉開発に関する相互協力基本協定』に基づき、電源開発株式会社から新型転換炉実証炉の安全審査の中で新燃料集合体落下事故時の安全評価に必要となるデータの提示依頼があったので、既報告書の中から提示依頼された項目を抜粋し、まとめたものである。

2. 試験方法概要

2.1 落下試験

A T R燃料集合体及び燃料要素の落下試験をつぎの2種類の方法で行なう。

- (1) 垂直落下……A T R燃料集合体がクレーンにより垂直につり下げられた状態で、平らなコンクリート床面に落下することを想定する。垂直落下試験は、燃料要素を垂直につり下げ、平らなコンクリート床面に敷いた鉄板上に落下させる方法とした。
- (2) 水平落下……A T R燃料集合体がクレーンにより垂直につり下げられた状態で、クレーン起動時及び停止時に横方向に加速度が加わり、集合体が斜めになった状態で落下し、床面にある90°の角部をもつ物体に衝突することを想定する。水平落下試験は、燃料要素及び燃料集合体を水平につり下げ、床面に設置した90°の角部をもつ標的上に落下させる方法とした。

(1)の垂直落下は通常のクレーン操作で生じる条件下での落下である。(2)の水平落下はいくつかの悪い条件が重なるかなり苛酷な条件下での落下である。

落下高さはA T R炉サイトの燃料取扱施設の最高10mであること、及び燃料集合体全長が4mであることから、事故による落下高さは集合体の下端から最低6mの高さになる。本試験では、燃料集合体及び燃料要素(UO₂ペレット入り)を使用して、最低6mから最高12mの落下試験を行なった。

2.2 衝撃試験

落下試験では全てUO₂ペレット入り燃料要素又は燃料集合体を使用している。実機燃料では(U, Pu)O₂ペレット入り燃料要素も使用しているので、UO₂ペレット及び(U, Pu)O₂ペレット相互の破壊程度を評価するための衝撃試験を行なった。この試験を行なうに際して、UO₂ペレット入り燃料要素の落下試験後におけるペレットの破碎状況を調べ、その破碎モードを再現できる簡単な衝撃装置をつくり、この装置をプルトニウム燃料部のグローブボックス内に設置して(U, Pu)O₂ペレット及びUO₂ペレットの衝撃試験を実施した。

3. 燃料要素落下試験

3.1 試験試料

試験に用いた燃料要素は「ふげん」燃料型の短尺及び実尺のもので、Zry-2被覆管、UO₂ペレット、上・下部プレナムスプリング、上・下部端栓からなっている（図3-1）。燃料要素は、端栓形状が3種類、長さが500mm～4000mm、重さが330g～7600gの4種類で、全体としては5種類、12本を使用した（表3-1）。UO₂ペレットは、ATR4次及び5次試作のもので、4次試作ペレットは寸法が14.39mmφ×20mmHで、形状はディッシュ型、密度は95.0%T.D.、O/Uは2.00である。5次試作ペレットは、寸法は4次試作と同じで、形状はディッシュ付チャンファ型、密度は96.8%T.D.、O/Uは2.00である。それぞれの成分を表3-2に示す。プレナムスプリングは材質がインコネルXで、バネ定数は下部が30kg/mm、上部が0.2kg/mmである。

表3-1 試験試料

No.	長さ (m)	重量 (g)	バネ定数		ペレット	形状 ^{*)}
			下部 (kg/mm)	上部 (kg/mm)		
No. 1	0.5	593.1	28.3	0.20	4次試作	E
No. 2	0.5	595.6	34.7	0.21	"	E
No. 5	0.5	596.0			"	E
No. 3	1	1560.5	34.4	0.19	"	D
No. 4	1	1566.2	34.1	0.20	"	D
No. 6	1	1557.4			"	D
712-1	2	3455.3	29.0		5次試作	C
707-1	2	3451.0	31.0		"	C
707-2	2	3454.0	28.5		"	C
712-2	2	3452.0	28.5		"	C
S4U-31	4	7595.3			4次試作	B
S4U-32	4	7598.0			"	A

*) 図3-1参照

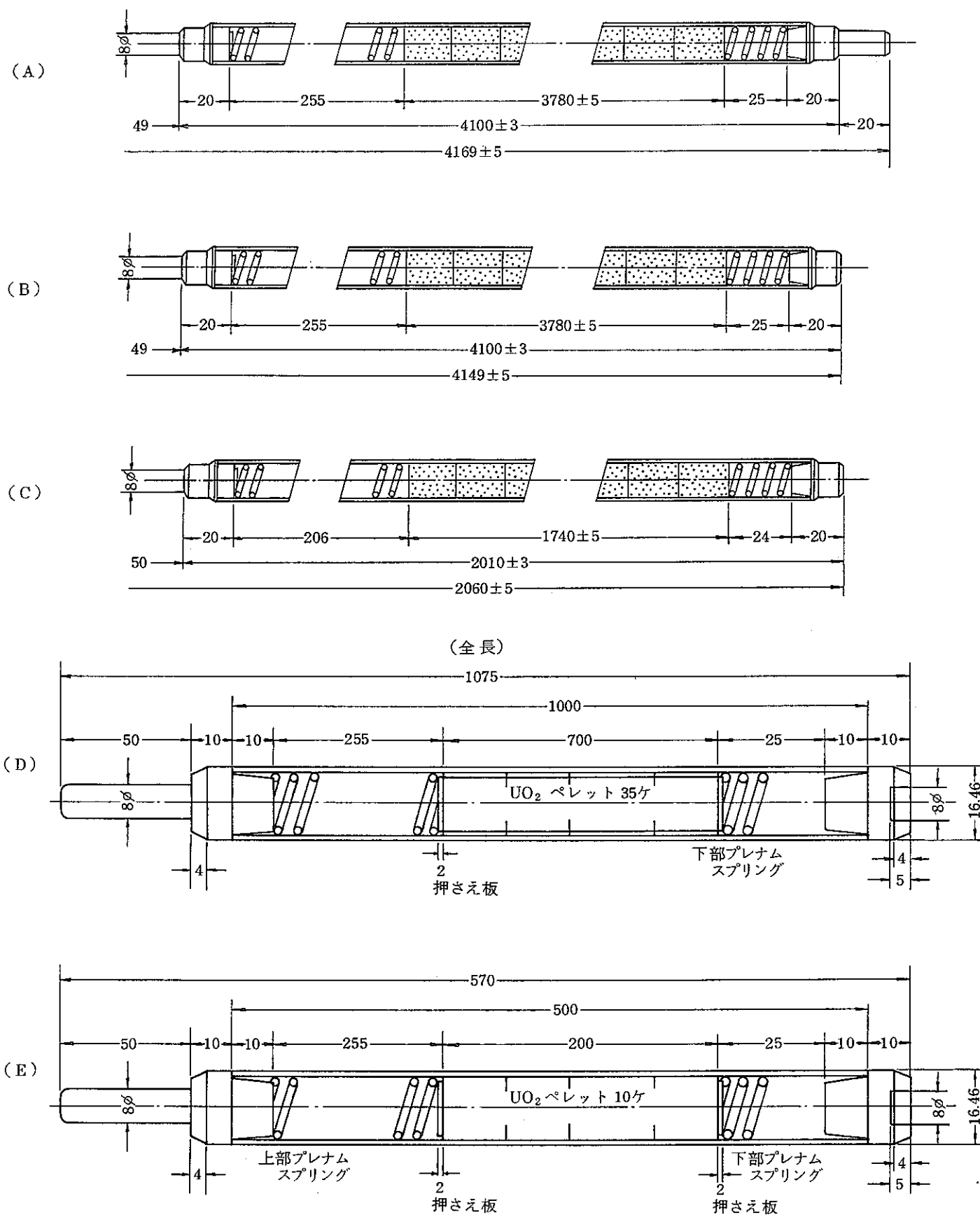


図 3-1 燃料要素構成図

表 3 - 2 UO₂ ペレット中の不純物

元素	4次	5次	元素	4次	5次
A l	21 ppm	6 ppm	M g	12 ppm	12 ppm
A g	0.2	0.4	M o	3	2
B	0.3	0.3	S i	29	12
C a	9	18	S n	4	5
C d	0.1	0.1	P o	0.5	0.4
C	22	14	S	11	
C l	2	15	S m		0.05
C r	27	4	E u		0.05
C u	1.1	1	G d		0.05
F	3	2	D y		0.05
F e	254	69	H ₂ O		3.2 μl/g
N	20	11	g a s		7 μl/g
N i	24	3	O/U	2.00	2.00

3.2 試験方法

燃料要素の落下は、燃料要素の上部端栓（垂直落下の場合）又は上・下部端栓（水平落下の場合）をひもで結び専用治具（2 mの燃料要素）又はクレーン（4 mの燃料要素）を使って8.5m~12mの高さにつり上げ、ひもを離すことにより行なった。ターゲットとしては、垂直落下の場合には、コンクリートの上に敷いた25mm×1200mm×2000mmの鉄板を使用し、水平落下の場合には、高さが約60cmで90°のエッジを上に向けた鉄製のアングルを使用した。

破壊前検査には、外観検査、外径及び曲り測定、X線構造写真撮影、端栓溶接部のX線透過試験、Heリーク試験、スミヤ試験を行ない、破壊後には、外観検査、バネ定数測定、金相試験、粉末粒度分布測定を行なった。

3.3 試験結果

3.3.1 解体前検査

解体前検査としてスミヤ試験、Heリーク試験及び垂直落下した燃料要素下部溶接部のX

線透過検査を行ない、ウランが漏出するような損傷のないことを確認した。引続き外観・寸法検査及び垂直落下した燃料要素のX線透過による構造写真を取り、燃料要素の変形等を調べた。表3-3に検査結果の概要を示す。

3.3.2 解体後検査

落下試験を行なった燃料要素の一部は、ペレットを傷つけないように注意しながら長さ方向に被覆管を切断し解体した。ペレットはほとんど破碎され、一部被覆管内面に圧着され食い込んでいた。

表3-3 落下後検査結果

No.	落下方法		X線, スリ Heリーク	曲り (mm)	外 径	衝撃面 外 観	UO ₂ ペレット粉末(125メッシュ)	
	方法	高さ(m)					重量(g)	割合(%)
No. 1	垂直	8.5m	異常なし	変化なし	変化なし	圧痕・折傷	3.3	1.0
No. 2	"	"	"	"	"	"	3.3	1.0
No. 5	"	"	"	"	"	"		
No. 3	"	9	"	0.7	下部ふくらみ* Max 0.1mm	"	7.0	0.6
No. 4	"	"	"	0.5	"	"	26.8	2.3
No. 6	"	"	"	0.5	"	"	14.4	1.3
712-1	"	12	"	0.4	下部ふくらみ* Max 0.2mm	"		
707-1	"	"	"	5.4	下部ふくらみ* Max 0.1mm	"		
707-2	水平	10	"	340	変化なし	凹み		
712-2	"	"	"	330	"	"	7.7	0.3
S4U-31	垂直	9	"	30	下部ふくらみ* Max 0.1mm	圧痕・折傷		
S4U-32	"	"	"	45	"	先端曲り	56.1	0.9

*燃料要素下部にペレット長に対応する間隔でふくらみが発生していた。

- (1) ペレット破碎状況：写真3-1に代表的なペレットの破碎状況を示す。ペレットの破碎程度は下部の方はほぼ完全に粉碎され、上部の1~2個のみがほぼペレットの原型を保持していた。中間に位置するペレットの割れは場所による違いが余りなく、大部分ペレット中心部を残して割れていた。被覆管内面には、衝撃点に近い領域に周方向の傷(10~20μm位)が認められた。

- (2) スプリング：表3-4に試験前後のバネ定数及び自由長の変化を示す。垂直落下の場合、下部のスプリングについては、バネ定数が試験前の値に比べて試験後約半分に減少した。自由長については、落下後約6mm短くなっていた。上部スプリングについては、自由長が約10mm短くなっていたが、バネ定数に変化は認められなかった。水平落下の場合、上・下スプリングのバネ定数及び自由長の変化は、垂直落下の場合より少なかった。
- (3) 下部溶接部の金相試験：衝撃点に近い下部溶接部の健全性を調べるため、端栓部を縦割りにして金相試験を行なった。その結果、いずれも異状は認められなかった。
- (4) 粒度分布試験：破碎したペレットを325mesh(44 μ m)の標準ふるいでふるい、そのふるいを通った粉末を走査型電子顕微鏡で撮影し、写真から二酸化ウラン粉末の粒度分布を調べた(表3-3)。325mesh(44 μ m)以下の粉末は0.3%~2.3%の間に入っている。この内、2.3%のものは、ペレットの取り出し方法が悪く、棒で被覆管内部を突いたため微粉末が増したものであり、0.6%のものは、破碎したペレットの一部を床にこぼしたため微粉末が少なくなったものである。水平落下の場合、上記粉末は0.3%で、垂直落下の場合より少ない。以上のことを考慮すると、垂直落下の場合、44 μ m以下の粉末の割合は、燃料要素の長短に関係なく1%弱であるとみなせる。さらに、燃料要素No.3, 4, 6の粉末の一部を採取し、走査型電子顕微鏡でこの3試料について各10視野任意に選び撮影した。

粉末の粒度分布としては、上記の写真1枚中100個の粒子を任意に選び、その平均粒径の割合を棒グラフで整理した。重量分布としては、平均粒径を3乗した値の割合を棒グラフで整理した。図3-2~3-7に10枚の写真の粉末の平均粒径及び重量の分布を平均したものを示す。粒径分布では10~20 μ mの粒径が大きな割合をしめているが、重量分布では30 μ m以上に主に分布している。これらの粉末は325mesh(44 μ m)のふるいを通したものであるが、50 μ m以上の粒径がかなり見られた。このことは、細長い形状の粉末を含んでいるためである。なお図3-8~3-10に各々1枚の写真内の粒径分布を示す。補足として表3-5に図3-2~3-4から抜取った各粒径に対する重量分布及びその平均値を示す。

表3-4 バネの変化

No.	バネ定数 (kg/mm)		自由長 (mm)	
	落下前	落下後	落下前	落下後
No. 1	28.3	14.6	25.8	19.0
No. 2	34.7	15.9	25.9	18.6
No. 5				
No. 3	34.4	14.7	25.6	19.0
No. 4	34.1	14.8	25.6	19.3
No. 6				
712-1	29.0		25.0	
707-1	31.0		25.0	
707-2	28.5		25.0	
711-2	28.5	27	25.0	23.1
S4U-31				
S4U-32		14		18.5

表3-5 粒径毎の重量割合

燃料要素 No. 粒径	No. 3	No. 4	No. 6	平均
10 μ m以下	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
20 μ m以下	4.9%	10.1%	4.7%	6.6%
30 μ m以下	15.9%	29.7%	14.7%	20.1%

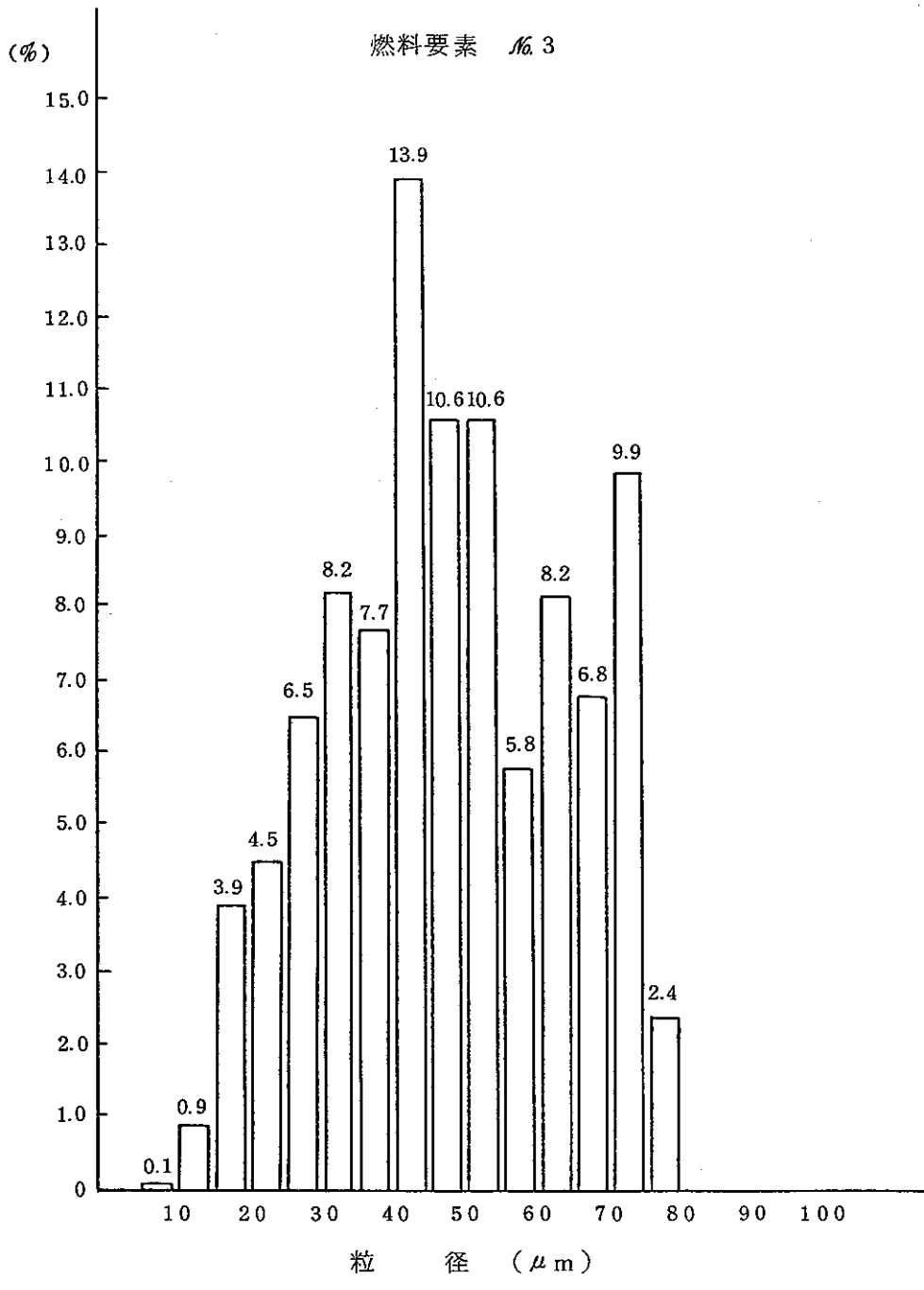


図3-2 粒径の重量分率

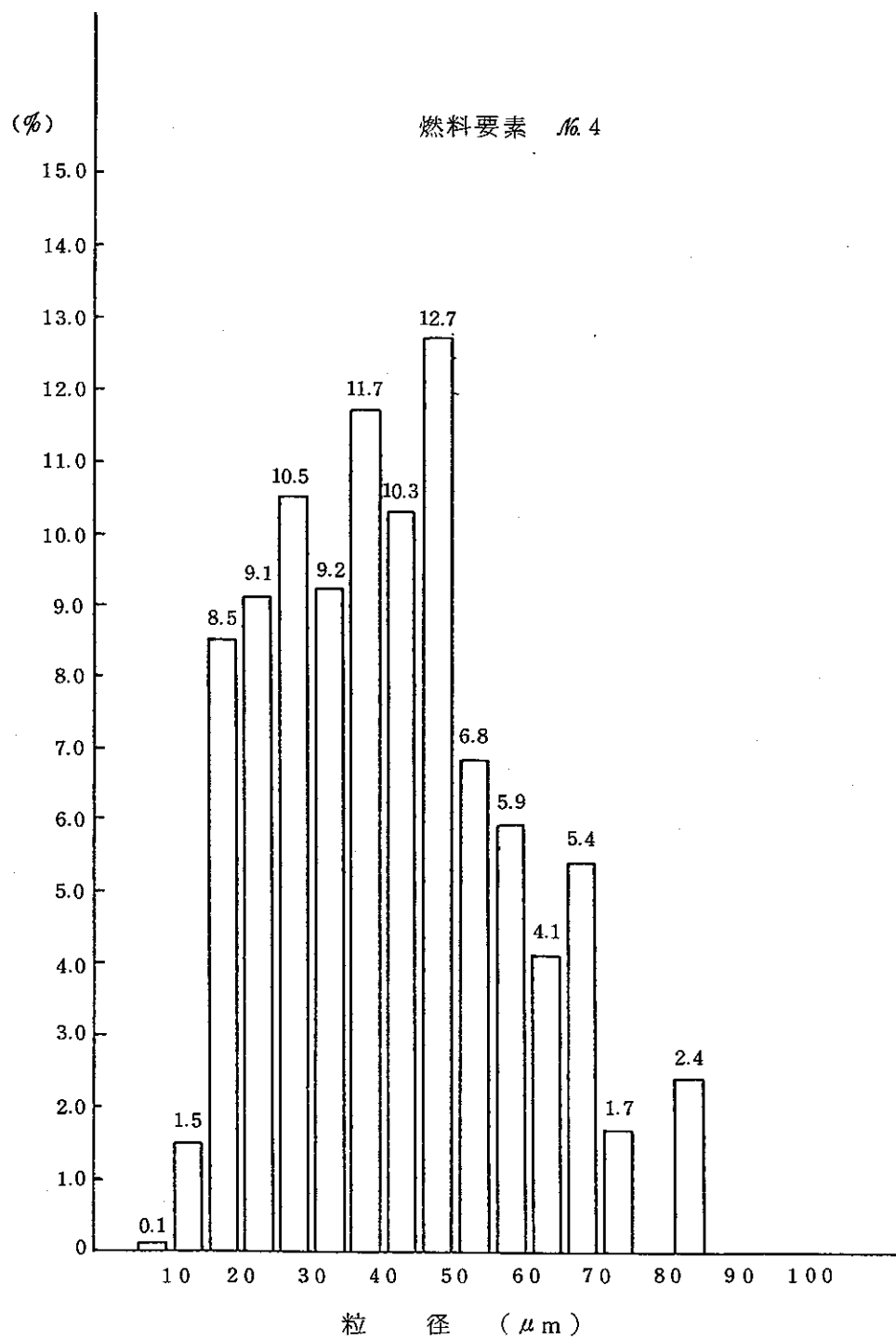


図 3 - 3 粒径の重量分率

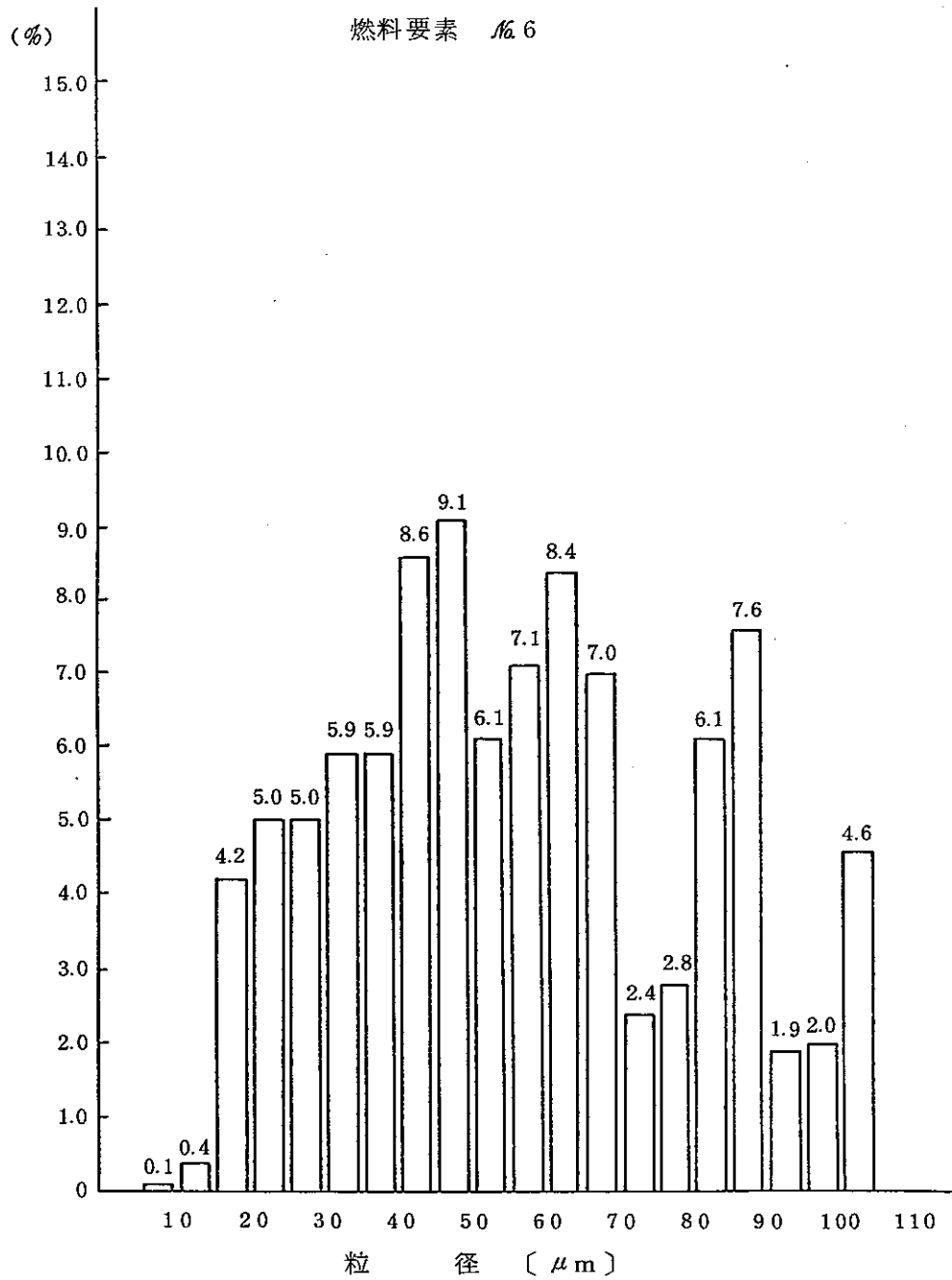


図 3 - 4 粒径の重量分率

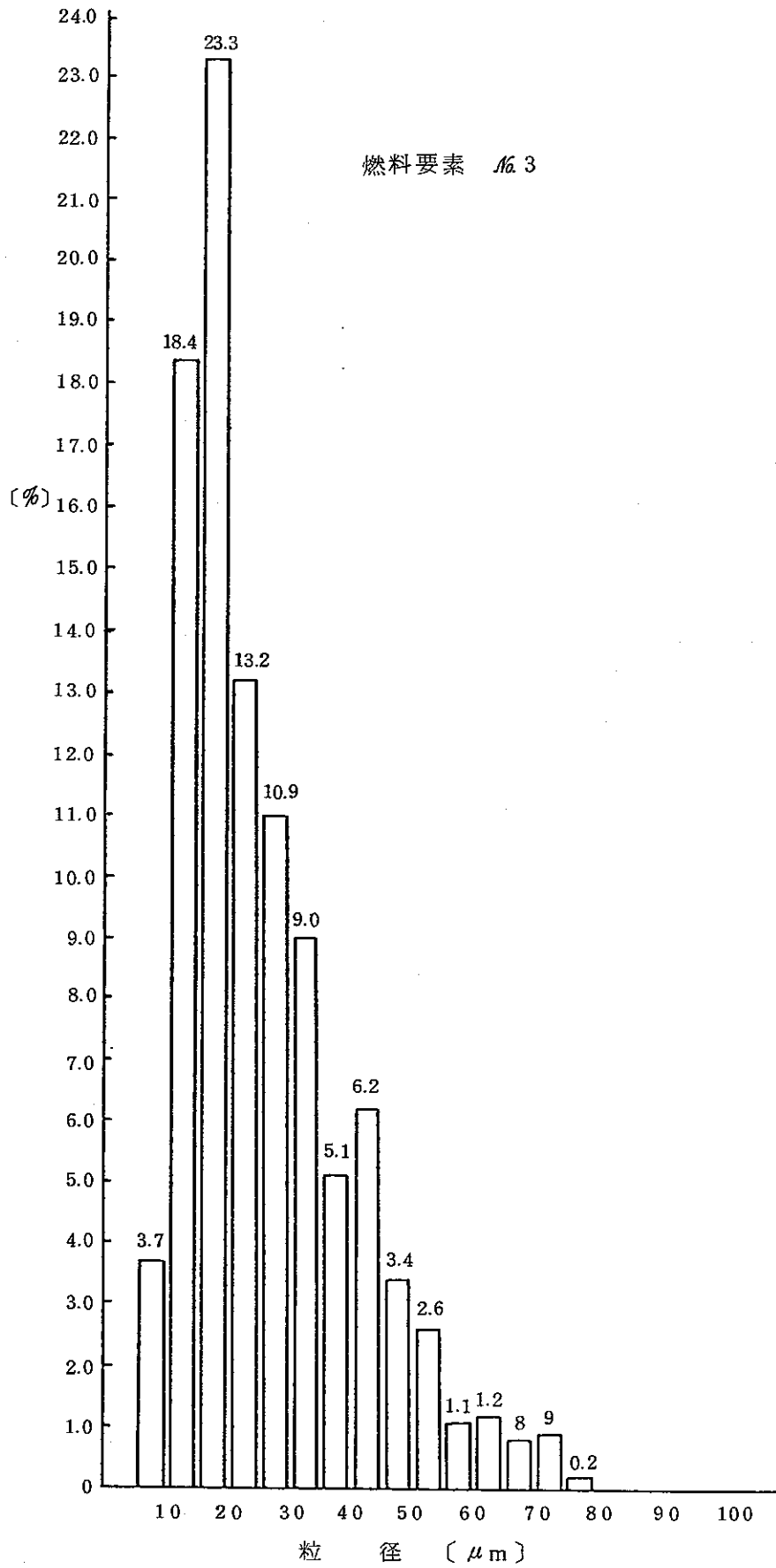


图 3-5 UO₂ 粉末粒径分布

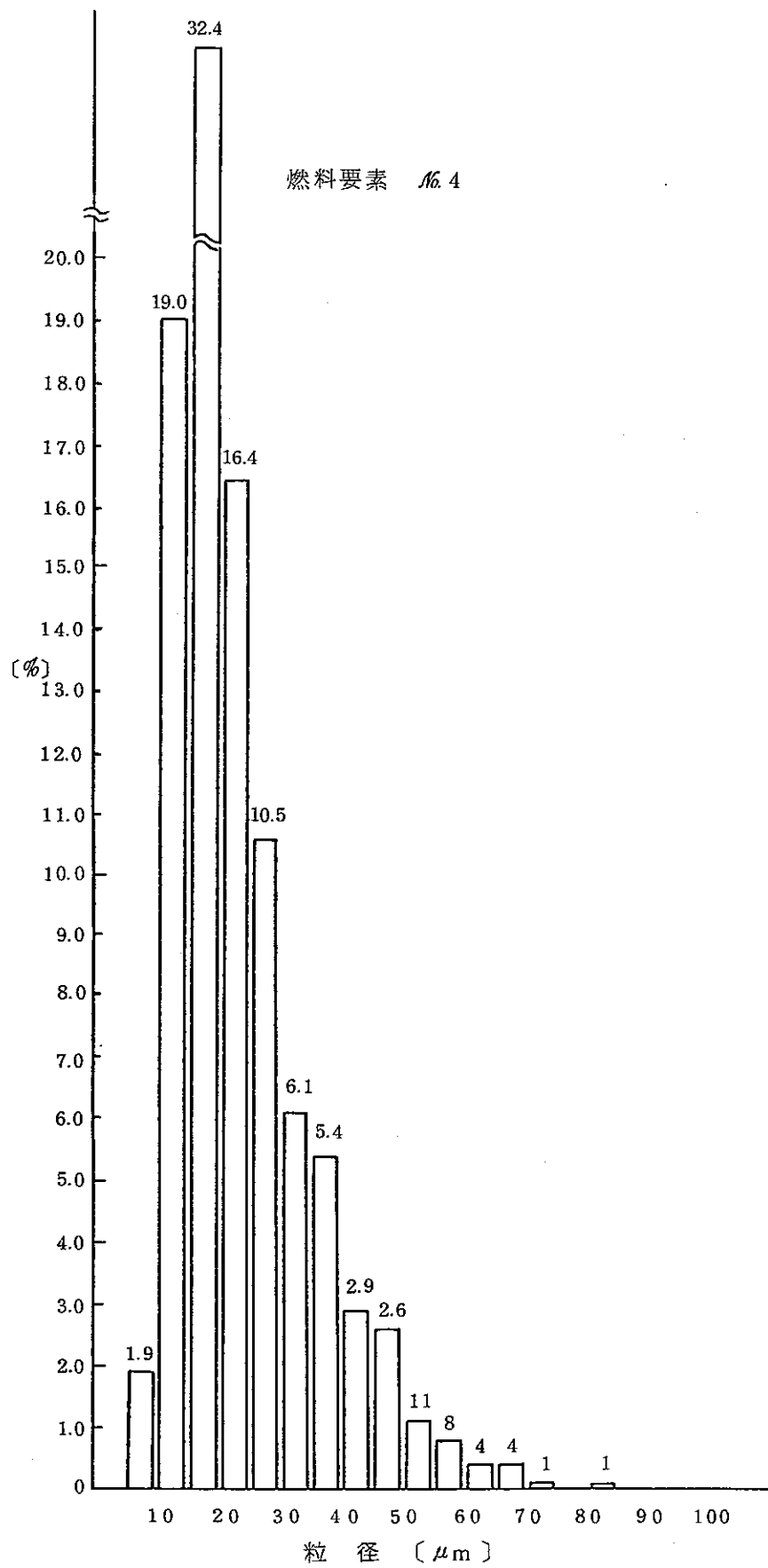


图 3-6 UO₂ 粉末粒径分布

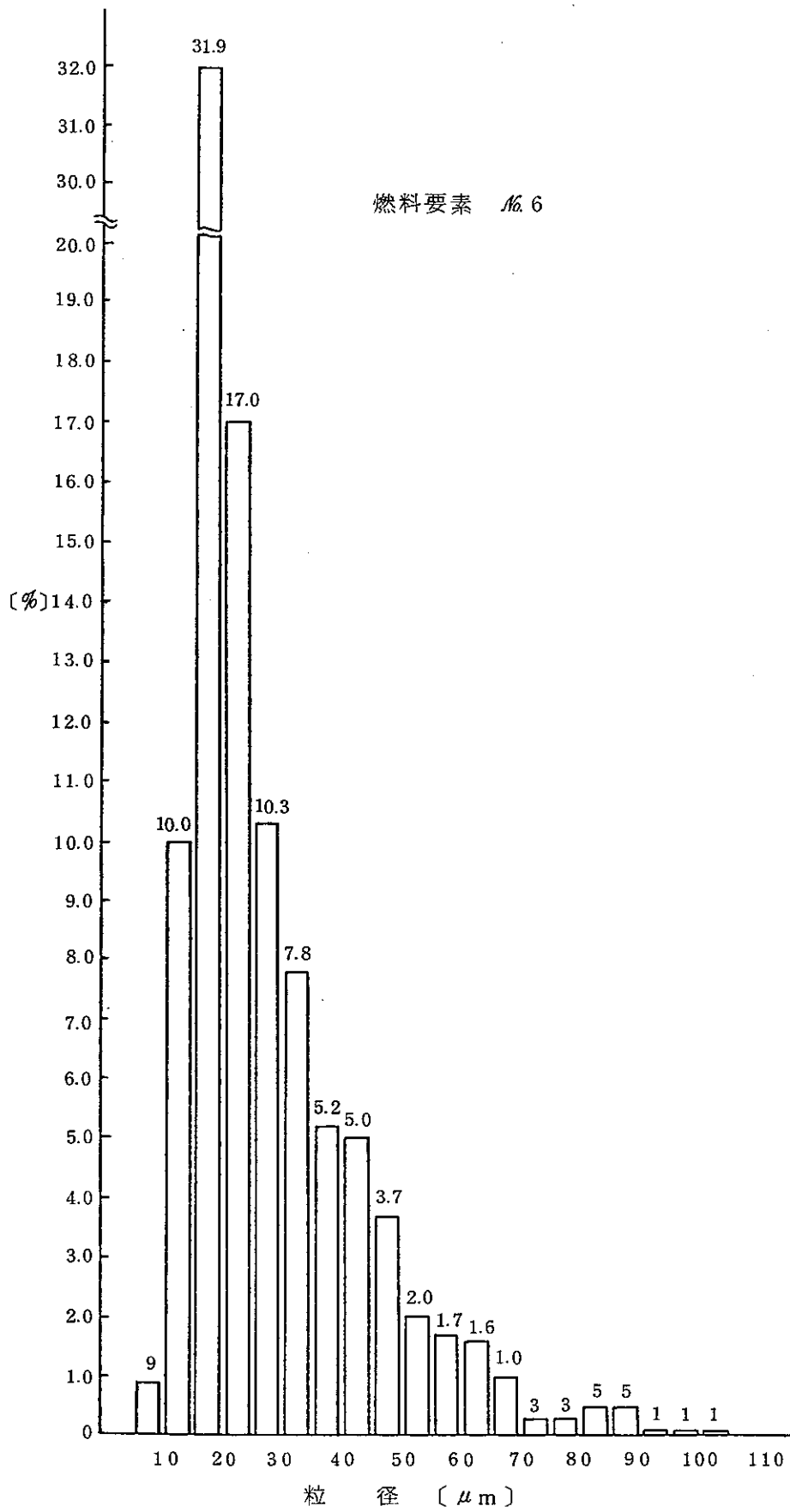


图 3 - 7 UO_2 粉末粒径分布

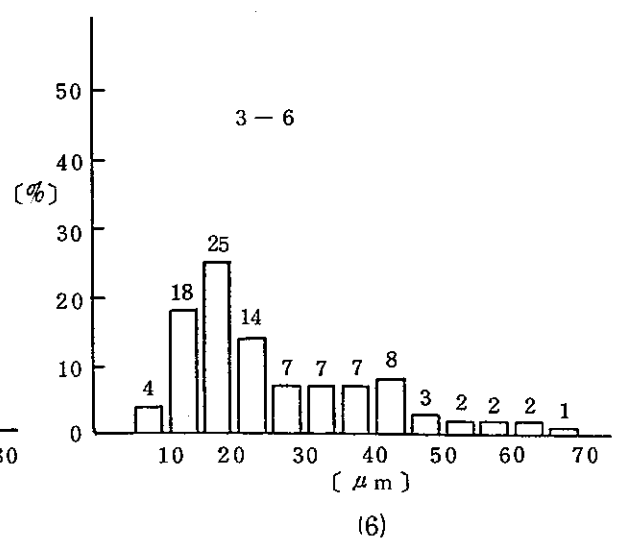
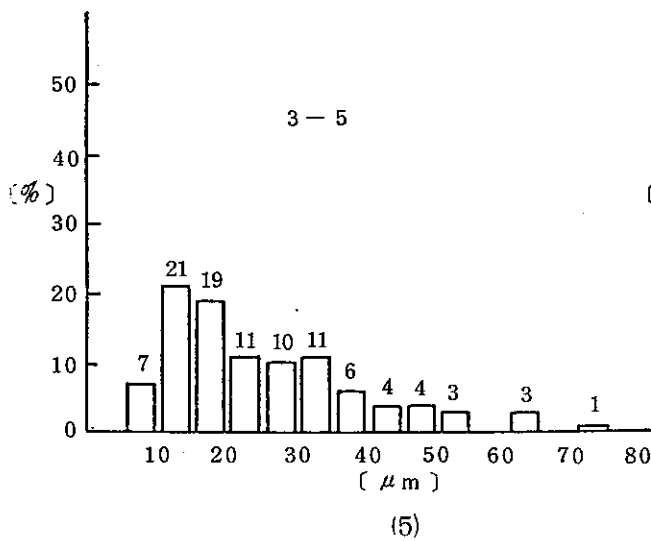
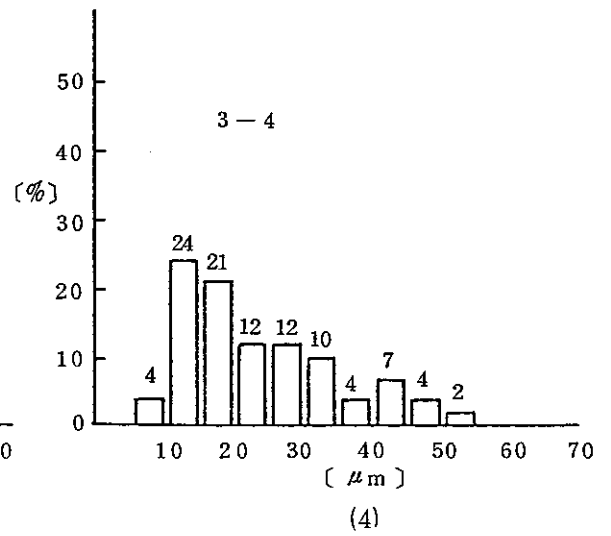
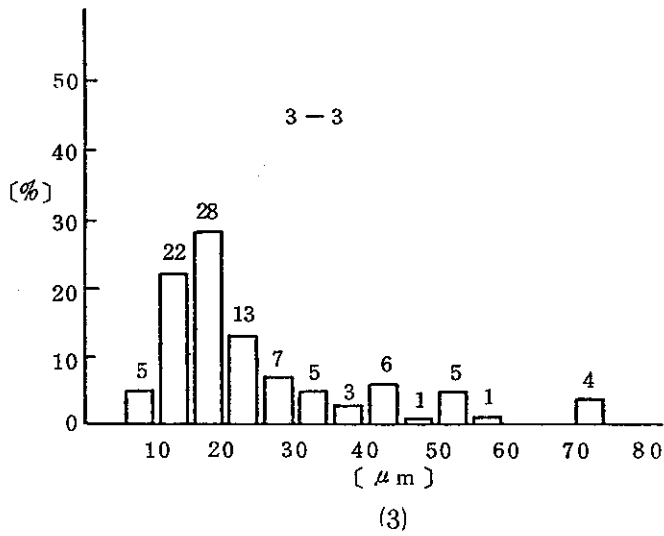
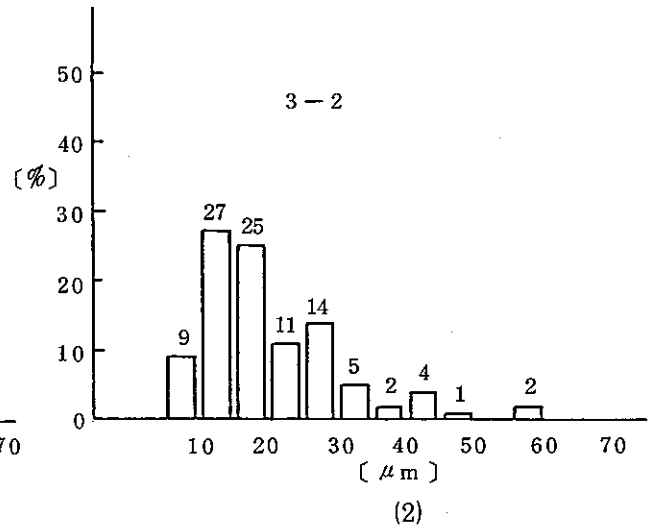
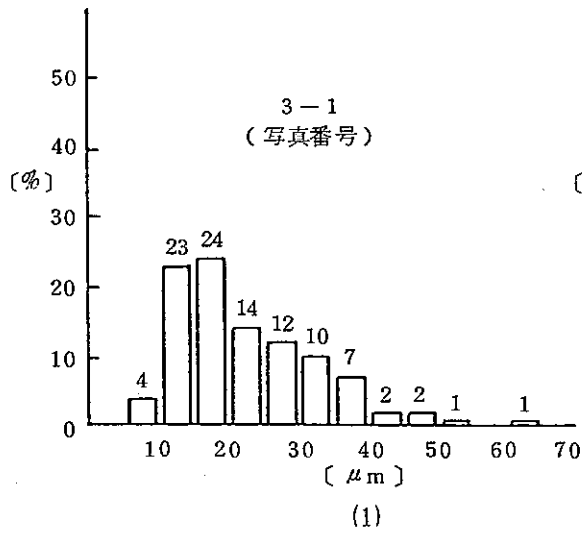


図 3-8 UO₂ 粉末の粒径分布 (燃料要素 4/3)

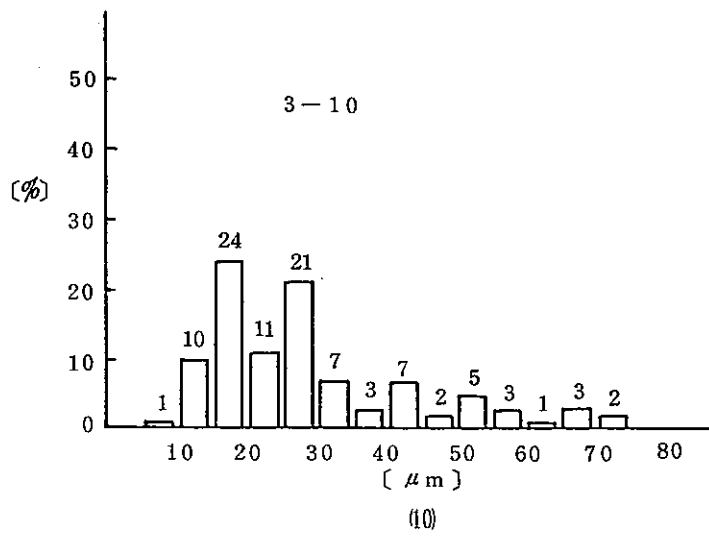
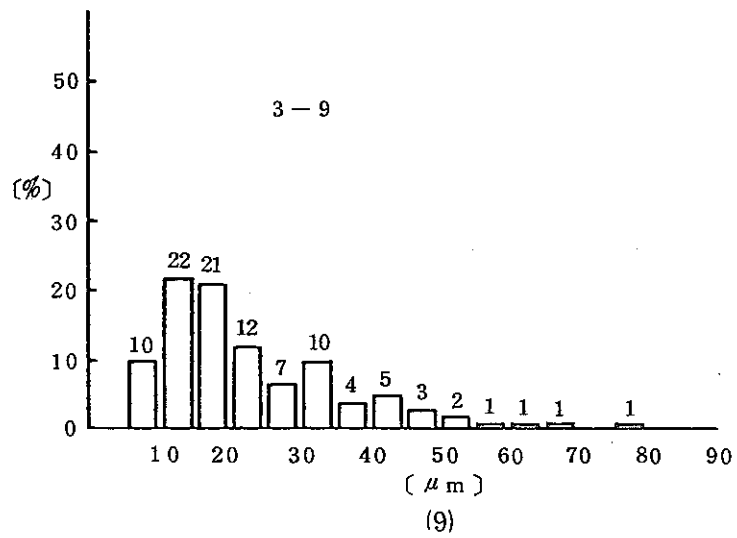
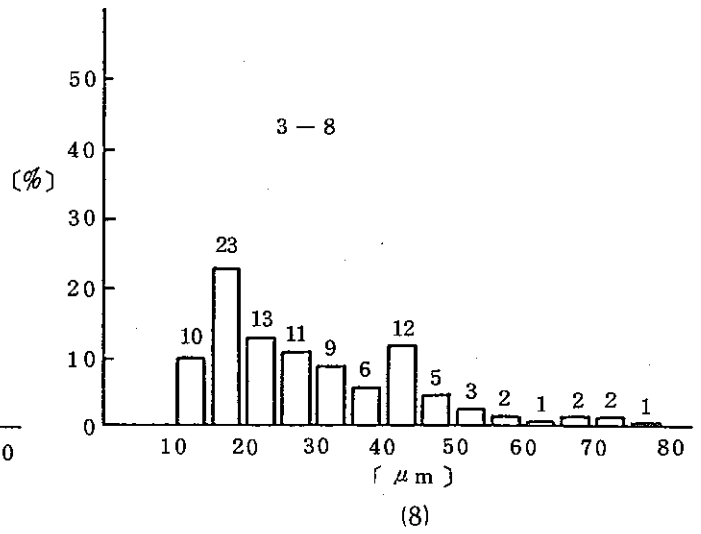
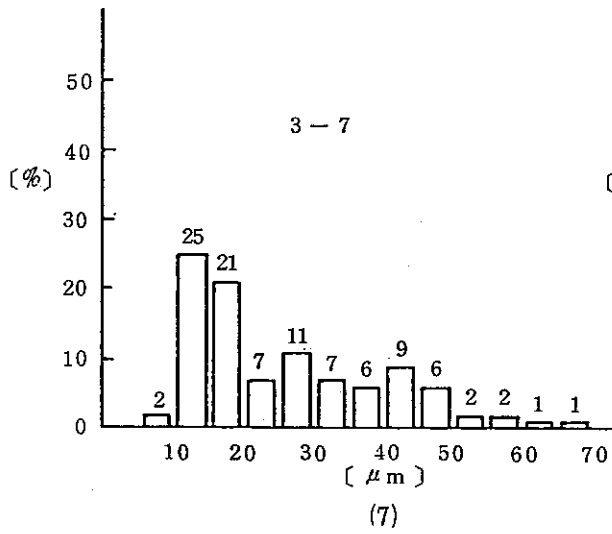


図 3 - 8 続 き

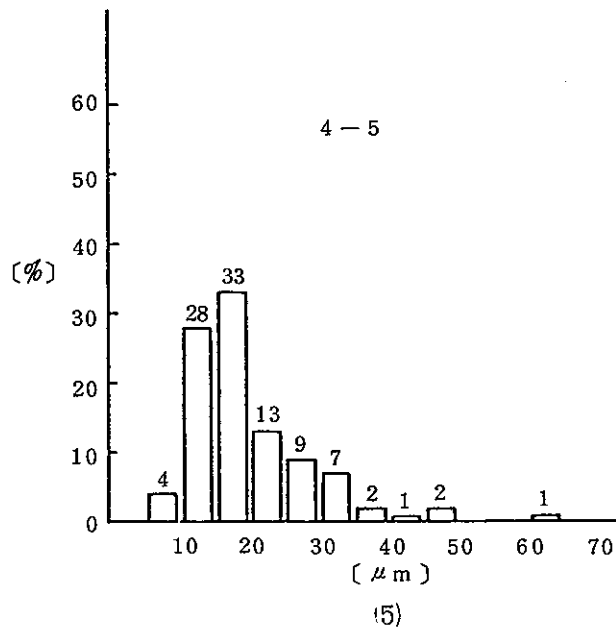
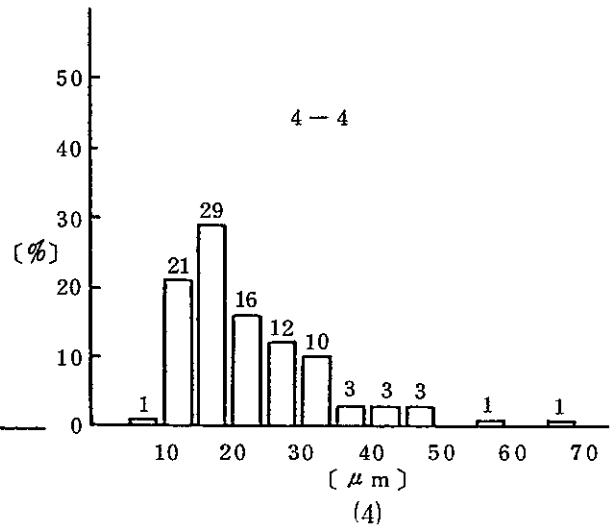
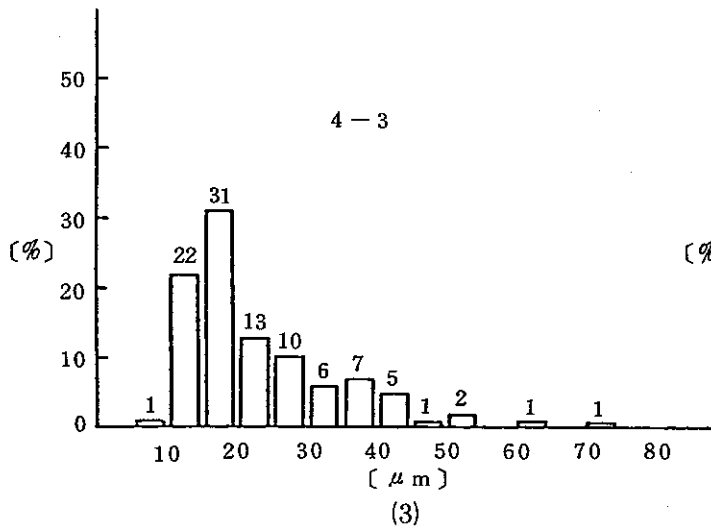
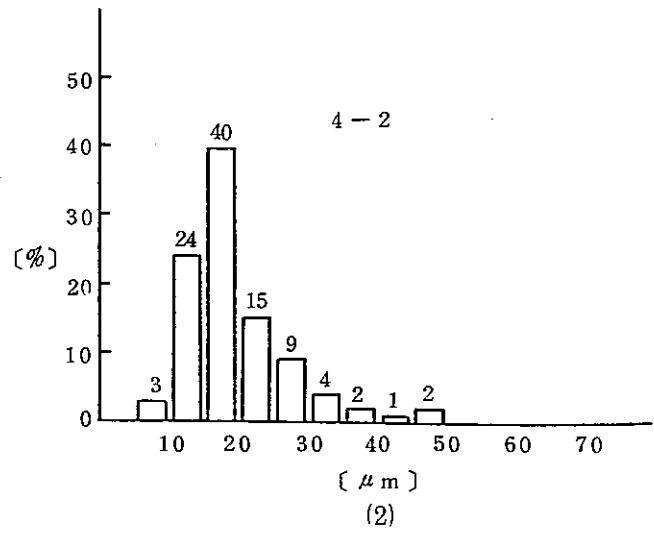
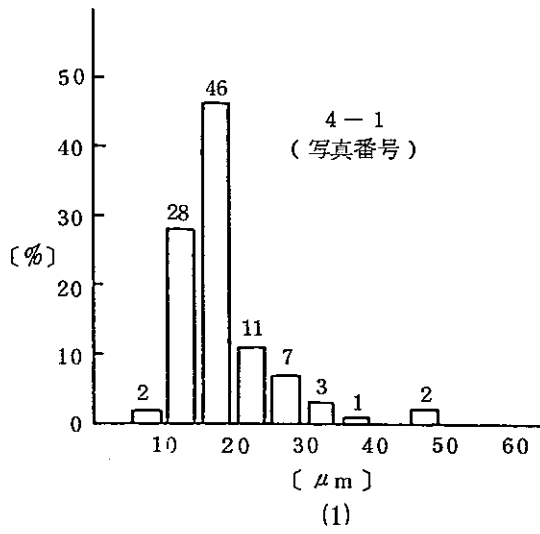
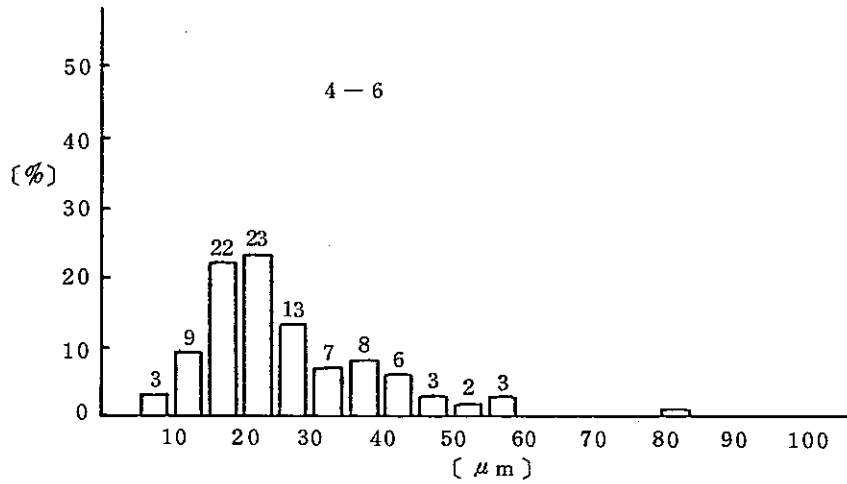
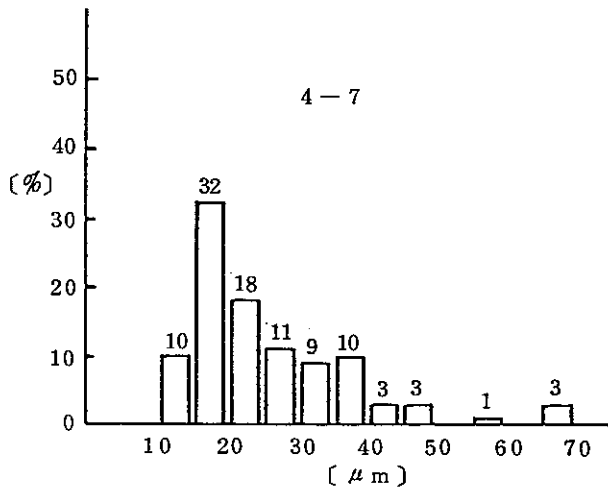


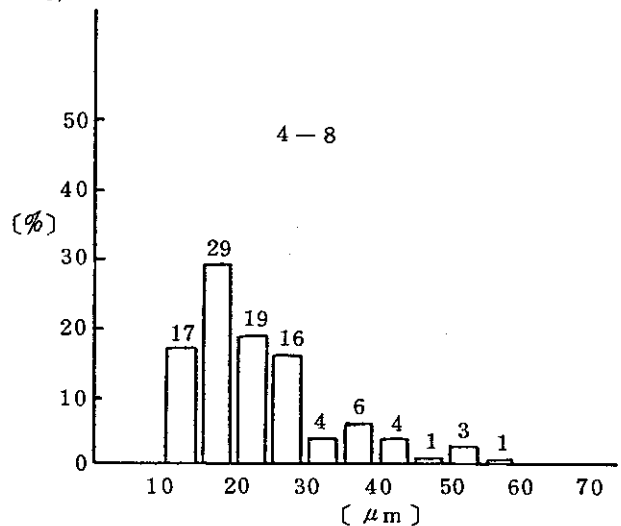
図3-9 UO₂粉末の粒径分布 (燃料要素 №4)



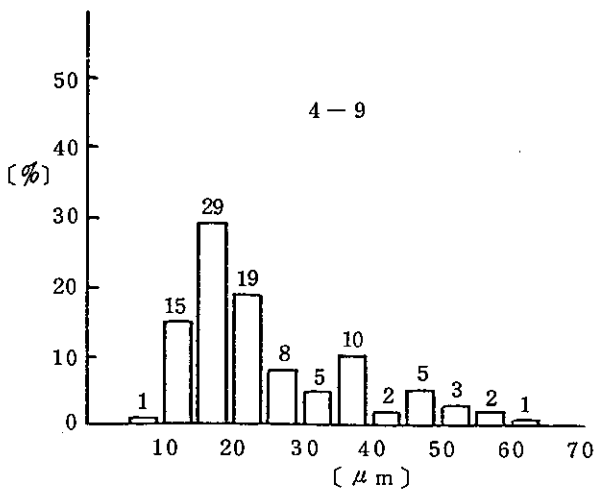
(6)



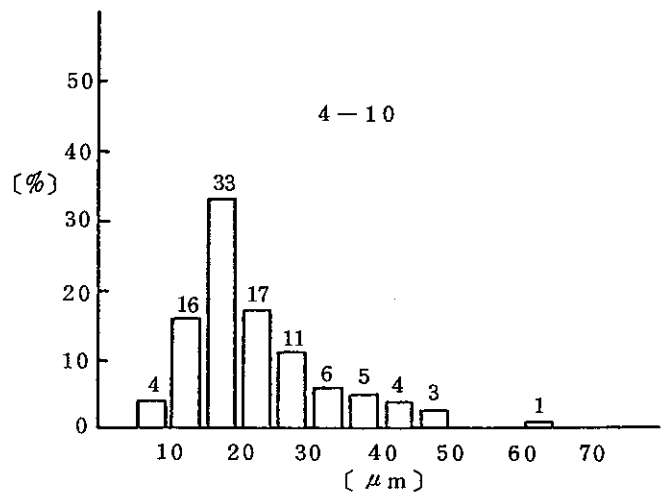
(7)



(8)



(9)



(10)

図 3 - 9 続 き

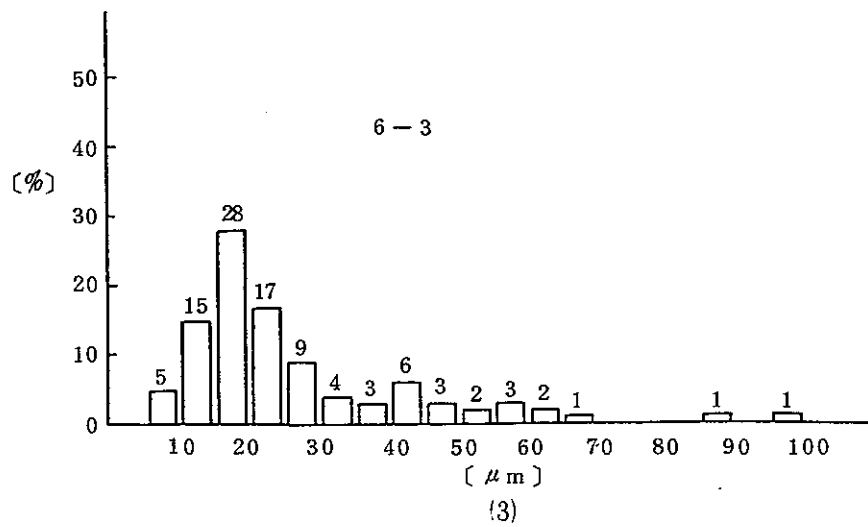
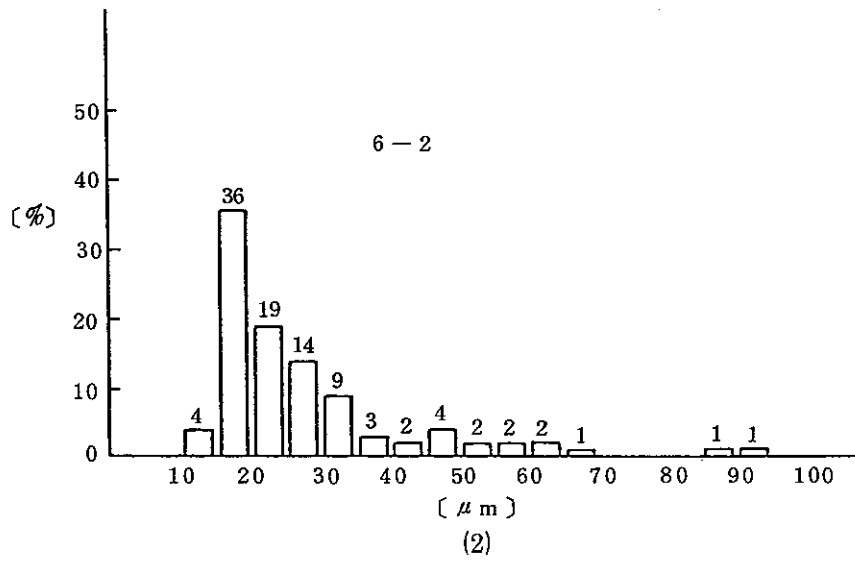
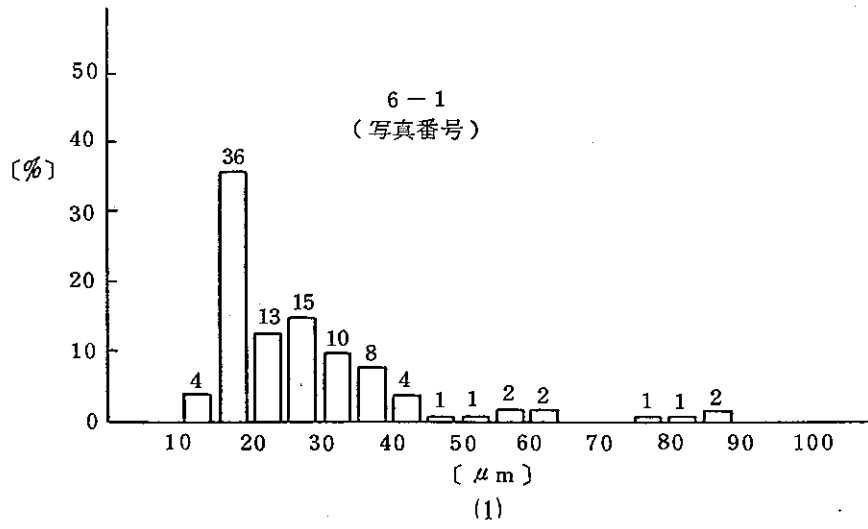


図 3-10 UO₂ 粉末の粒径分布 (燃料要素 №5)

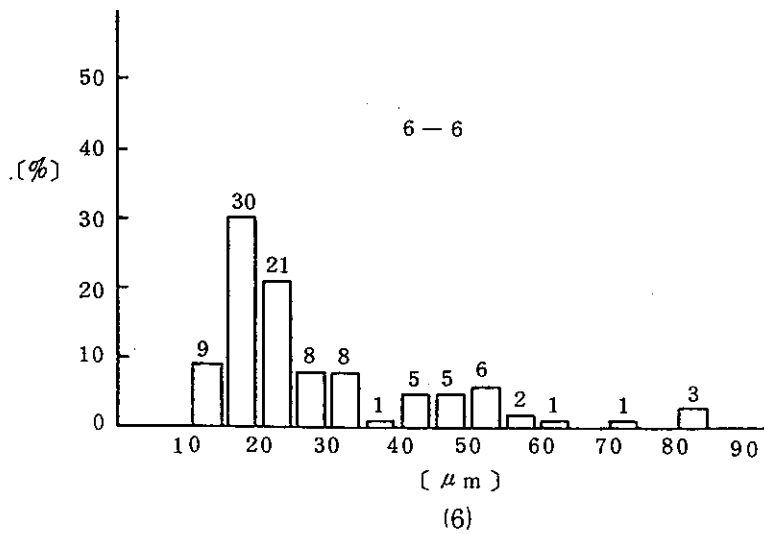
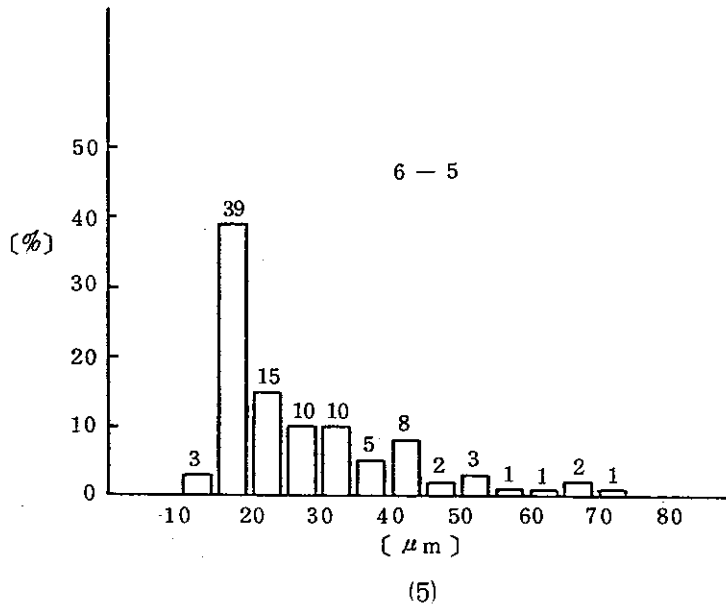
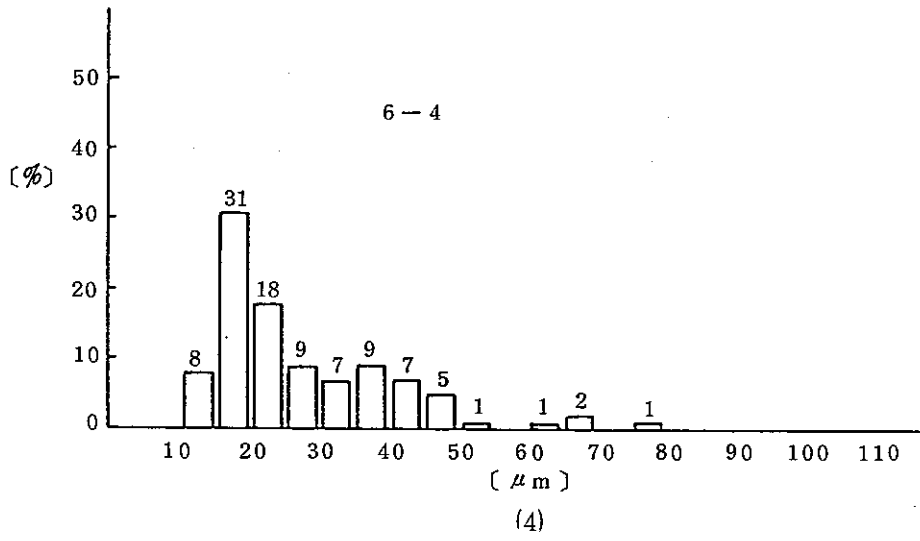
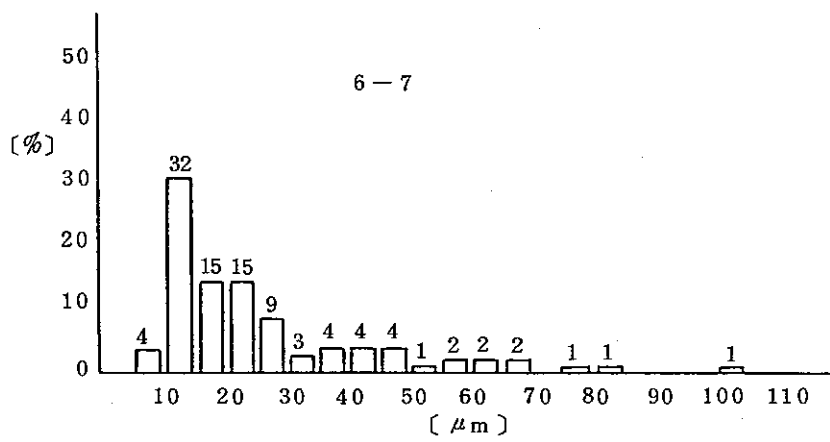
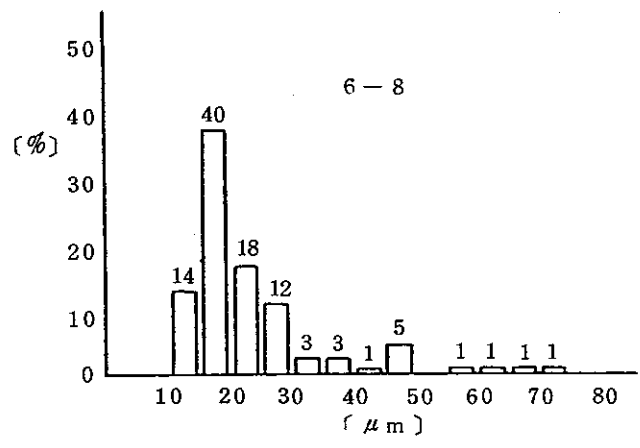


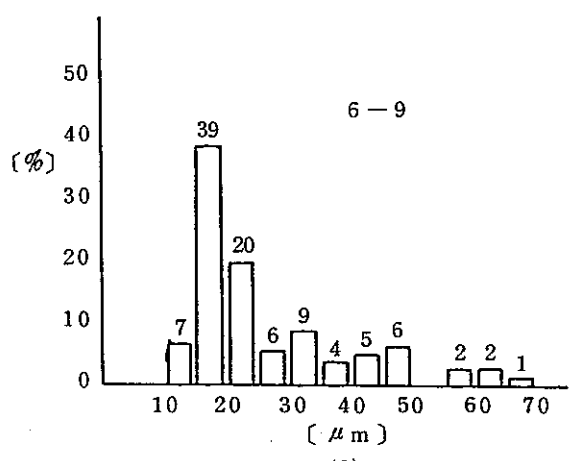
図 3 - 10 続 き



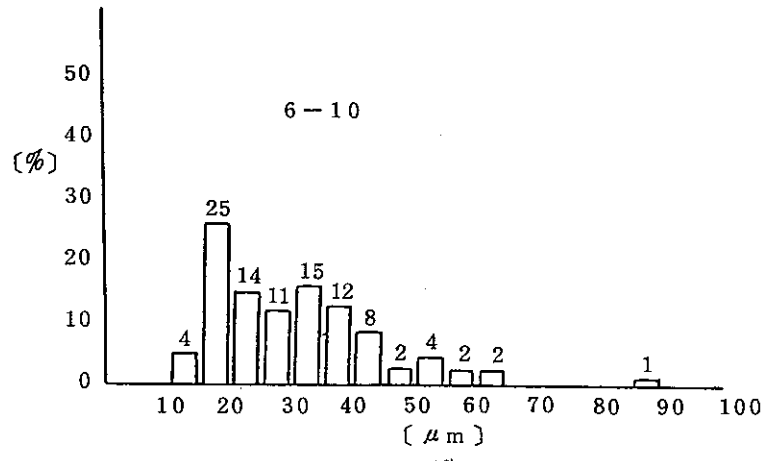
(7)



(8)



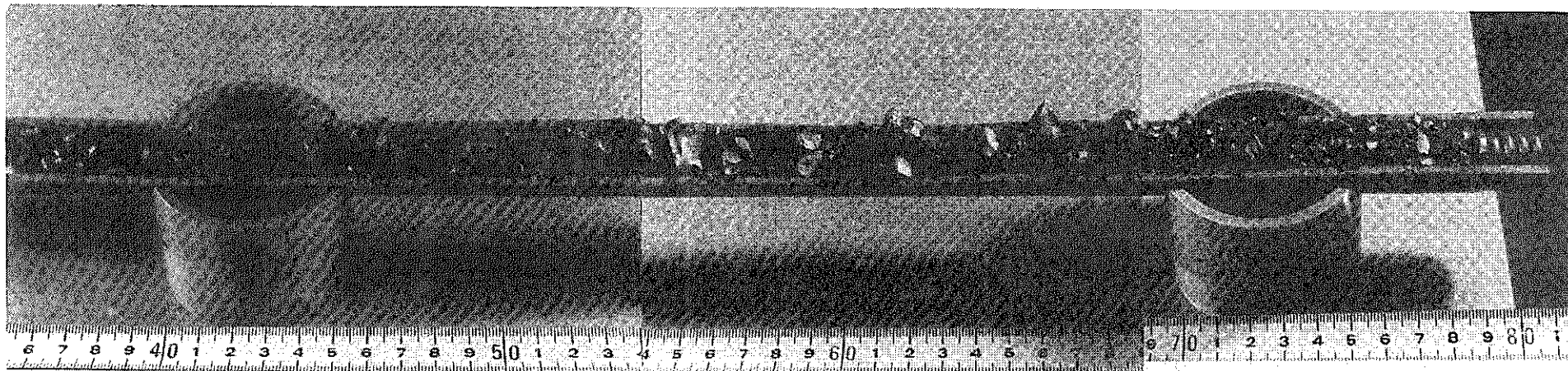
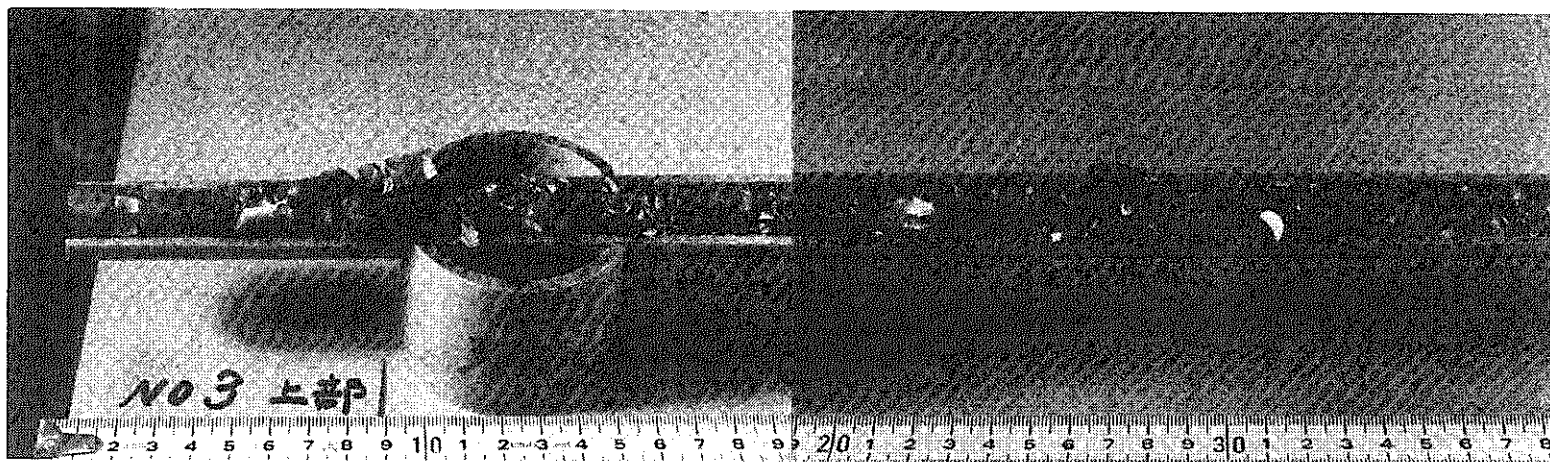
(9)



(10)

図 3 - 10 続 き

← 上部



下部 →

写真 3 - 1 落下後ペレット外観 (燃料要素 No. 3)

4. 燃料集合体落下試験

4.1 試験試料

試験に用いた燃料集合体の主要仕様等を表4-1及び図4-1に示す。

表4-1

項 目	内 容
<ul style="list-style-type: none"> ・燃料要素 被覆管 バネ (上, 下) ペレット 端 栓 	フリーロッド 20本, タイロッド 8本 Zry-2 ボルバリン製 (ミルシート有り) ATR 5次試作
<ul style="list-style-type: none"> ・スパーサ ・タイプレート (上, 下) 	ATR 5次試作 4ヶ使用 ATR 5次試作
燃料集合体	全長 2281mm, 重量 105kg 曲り Max0.75mm

4.2 試験方法

試験は、東海事業所検査課管理区域ピット内で図4-2に示す如く電磁リフマにより集合体を水平につり上げ、ピット内の90°の角度をもつ鉄製ターゲットへ落下させる方法とした。

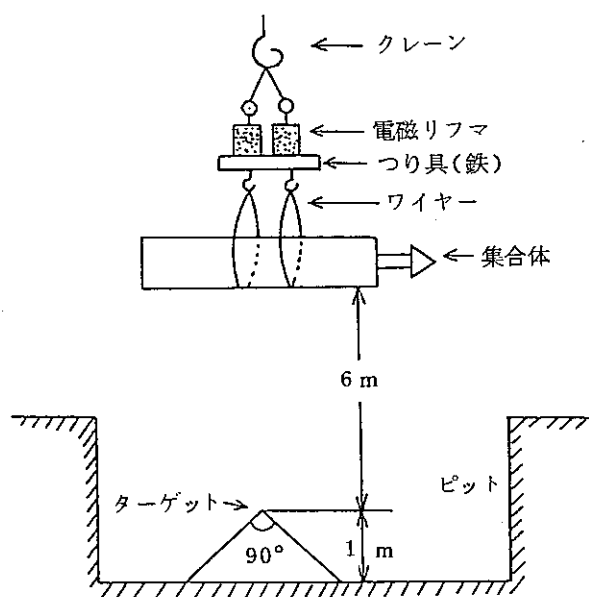


図4-2

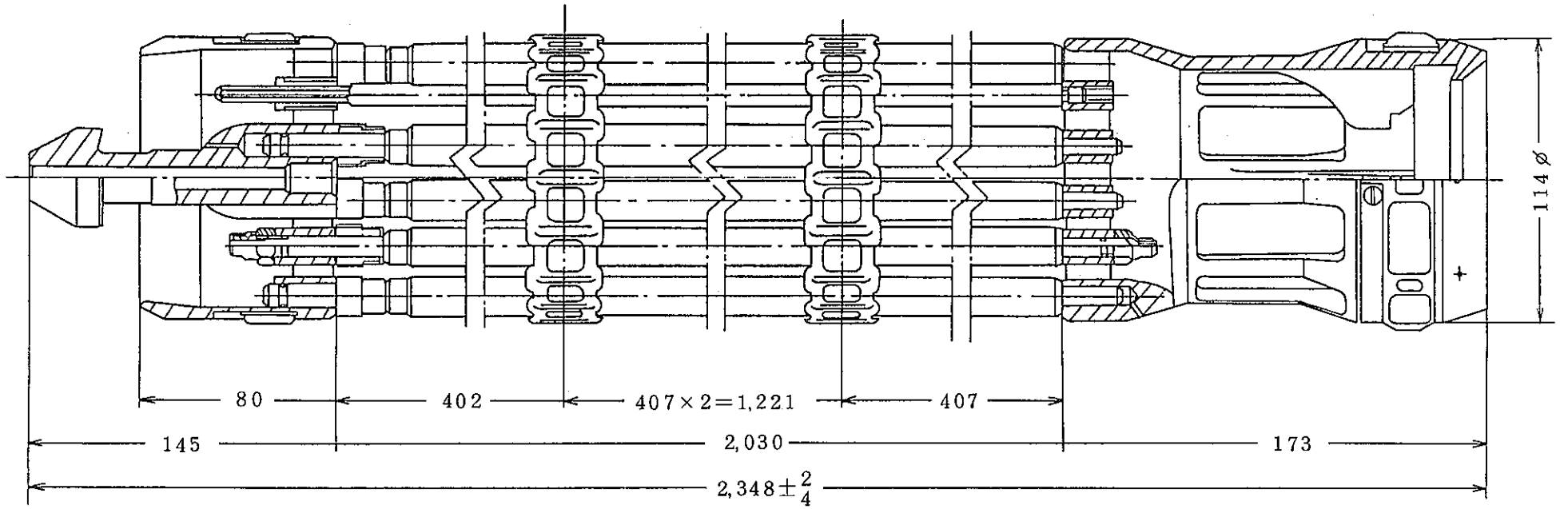


图 4-1 ATR 短尺燃料集合体组立图

4.3 試験結果

集合体は90°のエッジをもつターゲットに対してほぼ水平に落下し、エッジ部にコンタクトしてから0.03秒後衝撃部付近で局所的な曲りが生じ、0.2秒後ターゲットにそって90°近く曲がった。0.5～1秒後少し斜めにジャンプし（ジャンプ高さは約10～20cm）、再び集合体下部に2回目のコンタクトがあり、ついに集合体頭部から床面へ落下した。

図4-3に落下後の燃料要素破損部付近のへこみ量を示す。

燃料要素破損部の開口部は若干内側に曲り、いびつになっているがほぼ円形であった。放出されたペレットは破損部の1/2ペレット（重さ約15g）以下で、2～4mmの破片となって、集合体燃料要素ギャップにはさまるか又周辺部に散在していた。燃料要素破損の原因として、集合体が90°のエッジをもつターゲットにコンタクトした瞬間（高速度カメラによると0～0.03秒）1本の燃料要素に衝撃力が集中したこと、及び、破損部の手前（5mm位）にAl製16mm角の加速度計を取付けてあったため、この燃料要素に集中的に衝撃力が持続し、折損したものと考えられる。

図4-4に落下後の集合体形状の概略を示す。集合体全長はくの字型(157°)に曲り、外径は衝撃箇所が最も扁平化し、楕円状になっていた。その両端にいくに従いほぼ円形になっている。

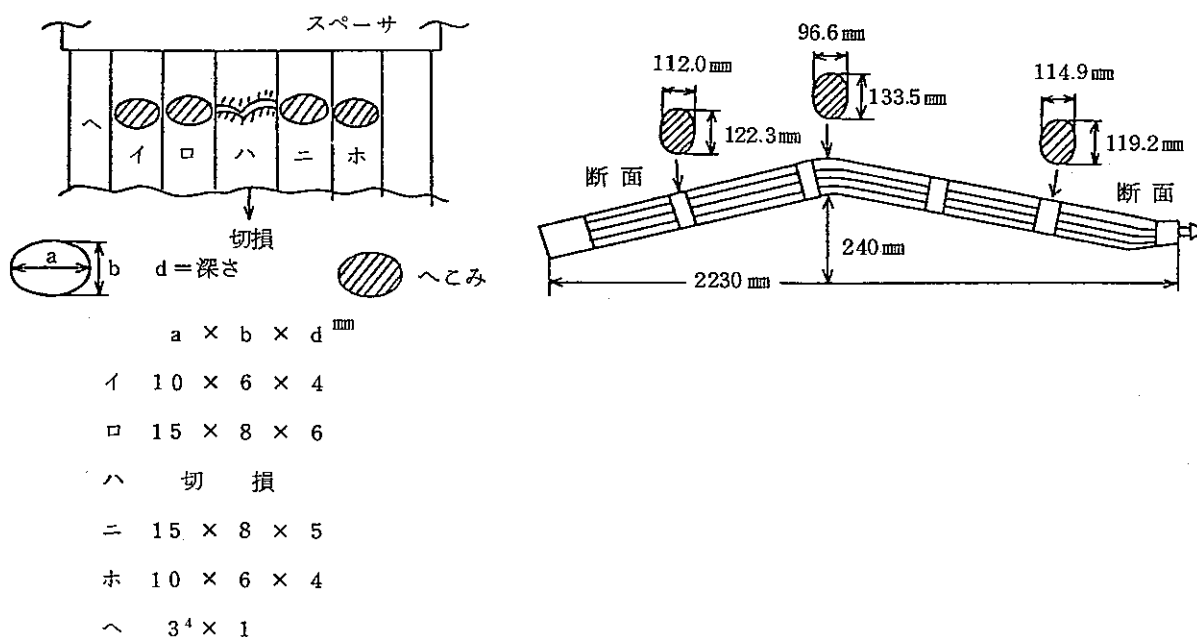


図4-3 落下後の燃料要素破損部付近のへこみ

5. ペレットの衝撃試験

燃料要素の落下試験は UO_2 ペレットを用いて行なったが、問題としているのは(U, Pu) O_2 ペレットを使用した燃料要素である。しかし(U, Pu) O_2 ペレットを使った試験は非常に危険なために UO_2 ペレットを使用した燃料要素の試験から推定しなければならない。そのために、ここでは、これらのペレットの強度の対応をつけるために衝撃試験を行なった。

5.1 試験試料

試験にはATR 5次試作 UO_2 ペレット及び $UO_2 - 0.54wt\%PuO_2$ ペレットを使用した。これらのペレットの静的強度(弾性係数, 破壊応力)は、それぞれ、 UO_2 ペレットで $1.89 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 及び 8.4 kg/mm^2 、(U, Pu) O_2 ペレットで $1.86 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 及び 5.5 kg/mm^2 である。なお、(U, Pu) O_2 ペレットの密度は98%T.D.である。

5.2 試験方法

衝撃試験装置は、 $150\text{mm}\phi \times 100\text{mmH}$ のステンレスのターゲットの中心に約 $17\text{mm}\phi \times 50\text{mm}$ 深さの穴をあけ、その中に長さ100mmの「ふげん」標準燃料サイズの被覆管を挿入し、その中にペレットを3コ入れ、その上に落下重量物を落下させ衝撃を与えるものである。衝撃エネルギーは0.95~11.6kgmで、各試験後には325メッシュのふるいを用いて粒径 $44\mu\text{m}$ 以下の重量割合を求め、さらに電頭法により $44\mu\text{m}$ 以下の粉末の粒度分布を調べた。なお本試験装置はPu燃グローブボックス内に入れる前に、検査課にて UO_2 ペレットの衝撃試験を6.5kgm及び11.6kgmのエネルギーで行なっている。

5.3 試験結果

検査課で行なった衝撃試験では、 UO_2 ペレット3個に衝撃エネルギー6.5kgm及び11.6kgmを加えた。ペレットは、中心部を残して粉砕された。被覆管には節状のふくらみが発生し、内面に浅い傷がついた。このふくらみ状況を図5-2に示す。以上のことから、この衝撃試験の方法は、燃料要素の垂直落下によるペレットの破碎状況及び被覆管のふくらみ等と同じであることから、適切な方法であると考えられる。

同装置をプルトニウム燃料部のグローブボックス内に入れ、 UO_2 ペレット及び(U, Pu) O_2 ペレットの衝撃試験を行なった。グローブボックス内であるため、保安上大きな衝撃エ

エネルギーは与えられず、全て0.95kgmで行なった。ペレットは全てUO₂。ペレットの破碎状況と同様であった。被覆管のふくらみは衝撃エネルギーが低いため認められなかった。

破碎したペレットは 325mesh (44 μm) の標準ふるいにかけられた。ふるい分けはふるい手で約5分間振動させることにより行なった。これらの結果を表5-1に示す。この表から衝撃エネルギーが0.95kgmの場合、325meshのふるいを通った量はUO₂粉末で平均0.07%、(U, Pu)O₂粉末で平均0.09%であり、測定誤差を考えると両者に大きな差異は認められない。次に、これらの粉末の一部を走査型電子顕微鏡により250倍で写真を撮った。代表例を写真5-1及び写真5-2に示す。

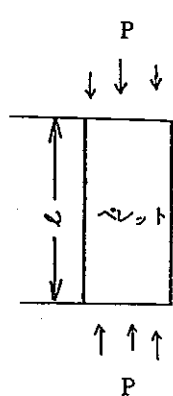
ペレットの破碎形状(電顕写真)及び粒度分布を比較しても、UO₂ペレットと(U, Pu)O₂ペレットの衝撃破壊による差異は認められなかった。

5.4 UO₂ペレットと(U, Pu)O₂ペレットの破壊の様子 of 理論的解析

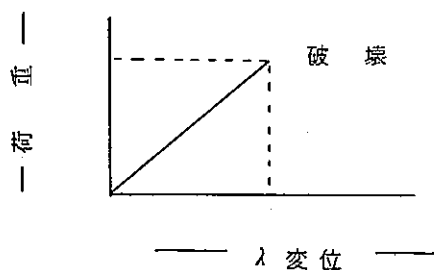
ペレットに荷重が加わりペレットが破壊しその破片の飛散は破壊直前まで蓄積されたエネルギーの大小によって決定されると考える。

またペレット(UO₂, (U, Pu)O₂)が室温で荷重を受けて破壊する場合、弾性限内で破壊するから破壊まで蓄積された弾性エネルギーを見積ればよいことになる。

弾性エネルギーの求め方



ペレットがPという荷重で圧縮されて破壊したとすれば、弾性破壊であるからPとλ(変位)は次の図のようになる。



エネルギーUは

$$U = \int_0^{\lambda} P d\lambda = \frac{\sigma^2}{2E}$$

$$\sigma = \frac{P}{S}$$

S: 断面積

$$\epsilon = \frac{\lambda}{\ell}$$

表5-1のデータを使用して弾性破壊エネルギーを求めたところ次のようになった。

物質	弾性係数 E (kg/mm ²)	破壊応力値 σ_r (kg/mm ²)	破壊までに蓄積された エネルギー U (kg・mm/mm ³)
UO ₂	1.89×10^4	8.4	18.6×10^{-4}
(U, Pu) O ₂	1.86×10^4	5.5	8.1×10^{-4}

この結果からみると、UO₂より(U, Pu)O₂の方が破壊までに蓄積されるエネルギーは少ない。したがって、破壊したときの飛散は(U, Pu)O₂の方がわずかに少ないと考えられる。

U (エネルギー) $\propto \sigma_r^2$ の関係にあり σ_r のバラツキにかなり依存する。

現在のところ σ_r の諸外国のデータはかなりバラツキがあり、UO₂の σ_r と(U, Pu)O₂の σ_r の有意差は見られない。従って、 $U_{UO_2} \sim U_{(U, Pu)O_2}$ と考えた方が妥当である。

5.5 (U, Pu) O₂ とUO₂ との室温における機械的性質の比較

(1) 弾性定数 (E)

	UO ₂	(U, Pu) O ₂
	$E = 1.89 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$	$E = 1.86 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$
<参考> 密度	93.5%T.D	94.9%T.D
測定温度	25°C	25°C
報告書	A.PADEL	(J. Nucl. Mat. 33 (1969) 40)
	CH. DE. NOVION	

(2) 破壊応力 (σ_r)

	UO ₂	(U, Pu) O ₂
	$\sigma_r = 8.4 \pm 0.6 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_r = 5.5 \pm 0.5 \text{ kg/mm}^2$
<参考> 密度	98%T.D	88~96%T.D
測定温度	25°C	25°C
結晶粒径	31 μm	2~30 μm

報告書 R. F. CANON

J. T. A. ROBERTS

J. T. A. ROBERTS

B. J. WRONA

R. J. BREALS

レポート J. Am. Ceram. Soc.

ANL-7945

43 (1960) 12

(1972)

表 5-1 ペレット衝撃試験結果 (1~6 はプル燃データ, U-1, U-2 は検査課データ)

	No.	重量 (3個)	衝撃曲り 重量	重り落下 距離	衝撃エネルギー	425メッシュ 割合	
UO ₂ ペレット	1	97.60 g	2.366kg	0.4m	0.95kgm	0.103%	} 平均 0.07%
	2	94.60	"	"	"	0.106	
	3	97.50	"	"	"	0.031	
	4	97.50	"	"	"	0.051	
	U-1	97.60	6.50	1.0	6.5	0.2	
	U-2	97.60	11.60	"	11.6	0.9	
(U. Pu)O ₂ ペレット	5	97.80	2.366	0.4	0.95	0.112%	} 平均 0.09%
	6	97.80	"	"	"	0.072	

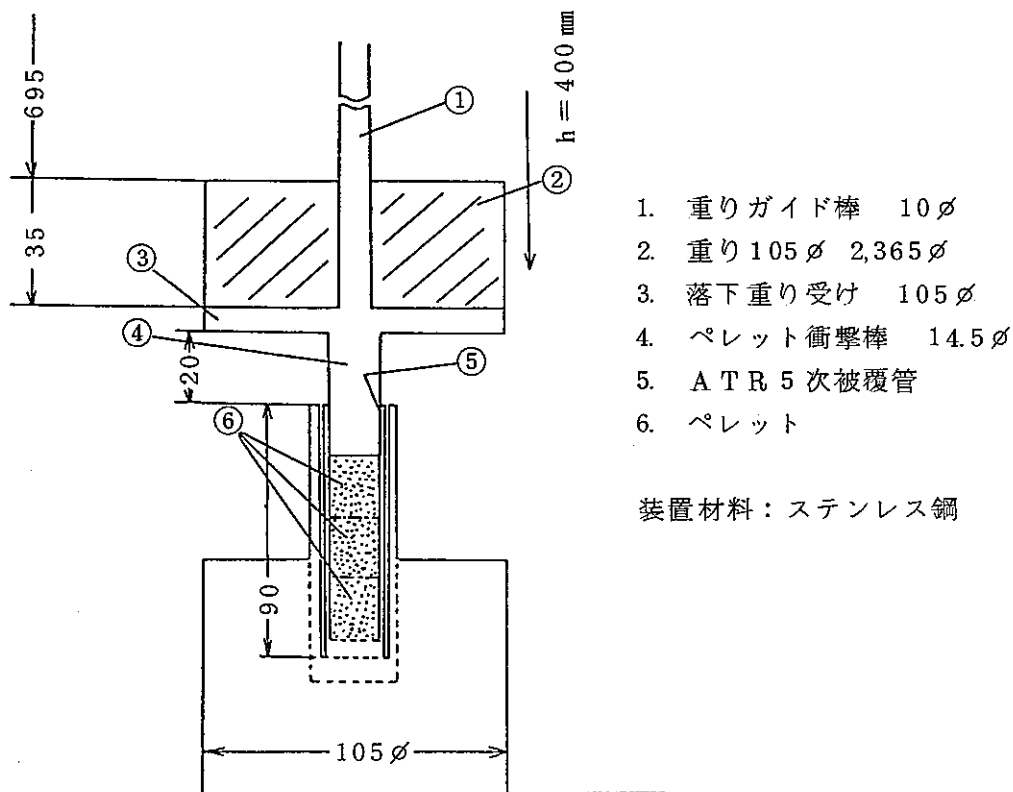


図 5-1 衝撃試験装置

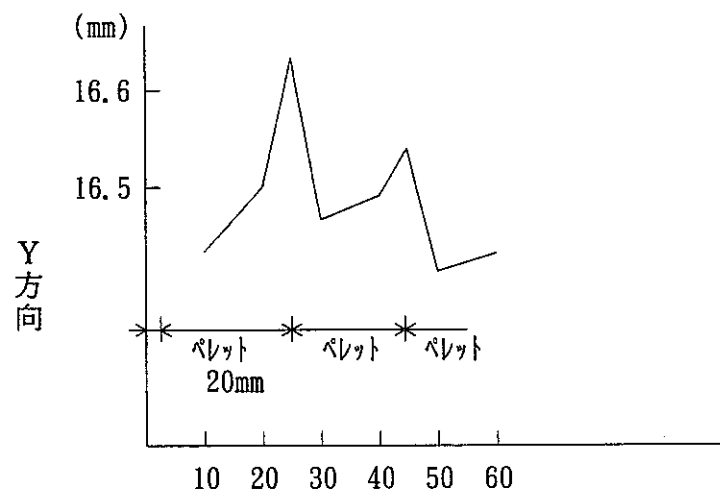
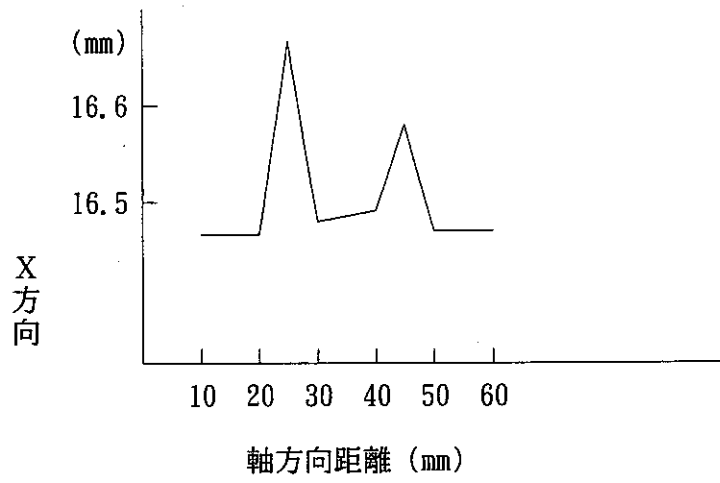


図5-2 被覆管のふくらみ (No.2)



×250

40 μm

(1)



×250

(2)

写真5-1 UO₂-0.5wt%PuO₂ペレットの温室における破砕片(325メッシュ以下)



×250

40 μm

(1)



×250

(2)

写真5-2 UO₂ペレットの室温における破砕片(325メッシュ以下)


6. 考 察

6.1 新燃料集合体落下時に破損・飛散する核物質質量について

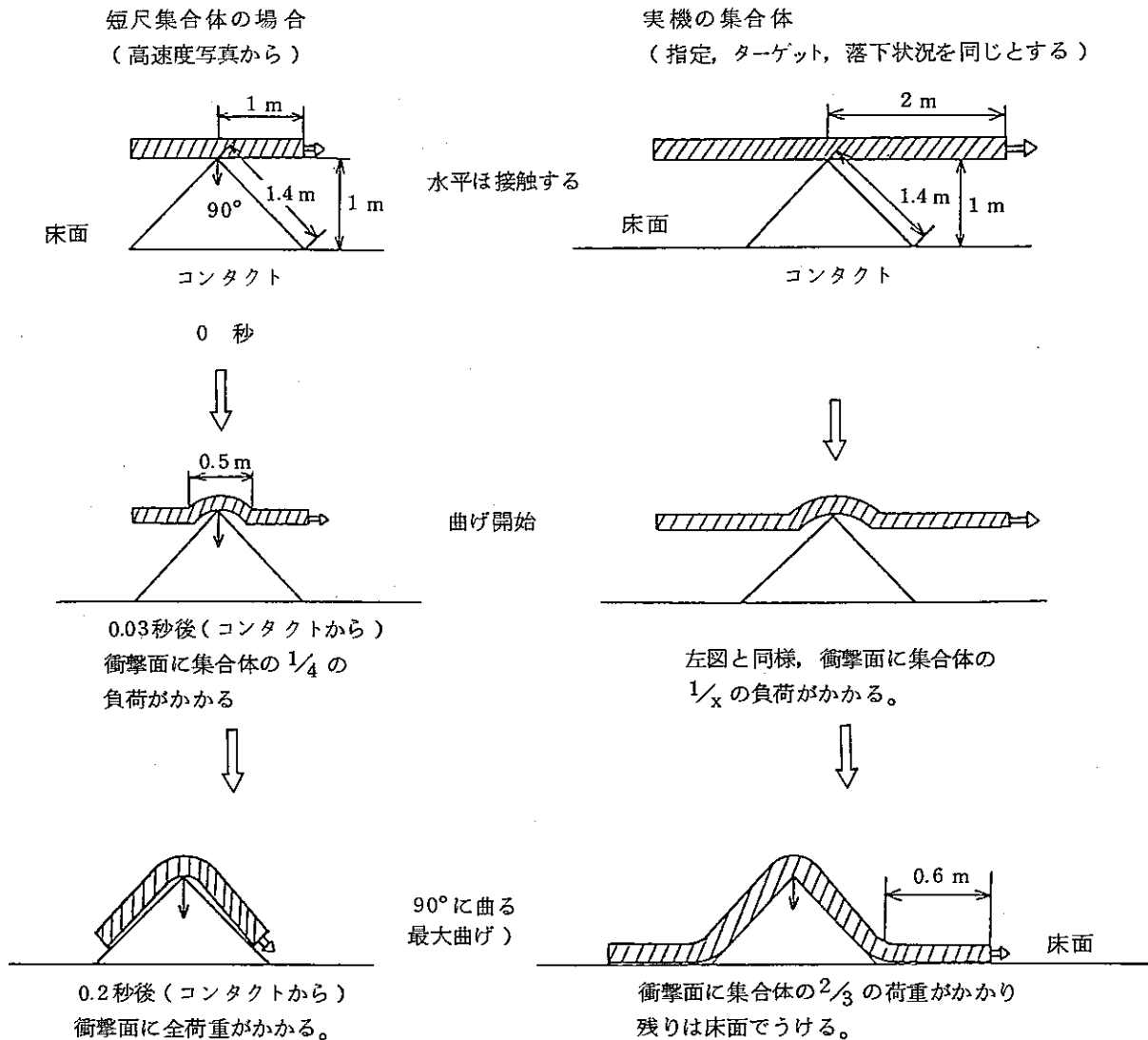
短尺燃料要素（長さ 0.5m, 1 m, 2 m）及び実寸大燃料要素（長さ 4 m）の垂直・水平落下試験を行なった。その結果燃料要素曲り、ふくらみ、衝撃面のへこみ等の変形が生じただけで、被覆管が破れ UO_2 ペレットが漏洩するような損傷を生じなかった。落下方法による燃料要素変形程度は、垂直落下の場合曲りは最高 5.4mm（4 mの長さをもつ燃料要素）、衝撃部に近い下部被覆管のふくらみは最高 0.2mm(1.3%)で被覆管の破損につながる変形はないようである。しかし水平落下の場合曲りは最高 340mm, 衝撃面のへこみは最高 4 mmでかなり大きなものである。この変形は 90° のエッジをもつ標的に燃料要素を水平に落下衝突させたため生じたもので、燃料要素 1 本の場合この程度の変形ですんだが、燃料集合体の水平落下を想定すると、重量が増す分だけ衝撃力も大きくなり、それだけ曲り、衝撃面の変形も大きくなり、燃料要素の破損が考えられる。このため短尺（2 m）燃料集合体の水平落下試験を行ない燃料要素の破損状況を調べた。短尺燃料集合体の水平落下試験の結果、燃料要素 1 本が折損し、約 $\frac{1}{2}$ 個のペレット（約15 g）が飛散した。この破損の原因の1つとして、衝撃力測定用ピックアップ（加速度計、16mm角、Al製）取付か所が 90° のエッジをもつ標的に衝突したため、その燃料要素の局所的な集中応力が持続し破損したものと考えられる。破損口はペレットがあるためつぶれず楕円形を呈しているが、被覆管の破損面が若干内側に曲っているのでペレットの飛散程度は破損口のペレットの一部に限られていた。飛散した UO_2 ペレットの量は集合体の全量に対して 0.2%であった。

以上の試験結果から実機燃料集合体の落下時における挙動を推定評価する。まず落下試験を行なった短尺燃料集合体と実機燃料集合体の落下衝撃力に影響する主要な因子を表 6 - 1 にあげ比較検討してみる。

表6-1 衝撃力に関する因子

落下衝撃力に及ぼす因子	短尺集合体 (落下試験の因子)	実機集合体	検討内容
重さ	105kg	200kg	重さが約2倍になっているため衝撃力も2倍になる。
長さ	2 m	4 m	長さが2倍になっている。落下時の曲げの影響が大きくなる。
落下高さ (方法)	6 m (水平)	A T R 炉サイトの施設で、集合体下端から最高6 m (垂直)	落下高さは同じ、落下方法は今回行なった試験の方が苛酷。
標的	90°のエッジをもつ鉄箱、高さ1 m 	輸送容器、机等の角部に当る、高さは1 m以下と考えてよい。	今回行なった試験の標的が苛酷な条件になる。

実機燃料集合体の場合、落下高さと同様に標的はより苛酷な条件を考えるとほぼ同じと考えてよいが、長さと同様に重さは今回行なった集合体の約2倍になっている。一般的に重さが2倍になると落下衝撃エネルギーは2倍になるが、今回の場合、長さも2倍になっているため曲げの影響がどの程度衝撃力を吸収していくか調べる必要がある。それ故短尺集合体の高速度写真から落下衝撃時の挙動を調べ、実機の集合体について推定してみる。



上図の如く短尺集合体の場合、90°に曲がり、衝撃面に全負荷がかかる。実機の集合体の場合も同様に曲るとすると衝撃面にうける負荷は、集合体の重さの $\frac{2}{3}$ になる。短尺集合体の衝撃力を1とした場合、重さが2倍で、曲げの効果で $\frac{2}{3}$ に減じるため、 $\frac{2}{3} \times 2 \approx 1.3$ 倍になる。

今回行なった短尺集合体の燃料要素破損の原因は、前に述べた如く破損か所に取付けていたピックアップによると考えられるため、実機の集合体が1.3倍の割合で破損するとは考えられない。しかしより安全側に考えて、落下衝撃時に最大負荷がかかると考えられる90°の角をもつ標的にそって曲った時、標的のエッジ部に接触すると考えられる燃料要素5本が破損すると推定する。そしてペレットの飛散量を今回行なった試験結果(0.02%集合体)と同じとする。実機燃料集合体のペレットの飛散量は $0.02\% \times 5 \text{本} = 0.1\%$ となる。この値は、

「1. まえがき」の項で述べた飛散する核燃料物質質量（1%）よりも十分小さい。追加として「5. 衝撃試験」の項で述べたように、 UO_2 ペレットと $(U, Pu)O_2$ ペレットの衝撃破壊挙動の差異はないので、今まで述べた考察内容はそのまま $(U, Pu)O_2$ ペレット入り燃料に適用できる。

6.2 飛散したペレットについて

6.1の考察は、ATR燃料落下事故により被覆管が破れ、燃料ペレットの一部が室内に飛散する状況を考察し、その飛散量を算出したものである。ここでは、飛散物質の状態を調べ、床面に沈降せずエアゾルとなって空气中に浮遊する粉末量を求め、かつその物質が排気系を通過して室外へ出る量を求める。本報告の諸データから、エアゾルになる粉末を推定試算してみると次のようになる。落下試験を行なった燃料要素を解体し破碎したペレットを取出し、標準ふるいで $44\mu m$ 以下の粉末（1%燃料要素）を集め、さらにその一部を電顕写真法により細かい粒度分布を調べた。その結果エアゾルとなるような $10\mu m$ 以下の粉末は0.1%、燃料要素1本(6.4kg)に対しては $1/100 \times 0.1\% = 0.001\%$ と非常に少ない量である。次に実機燃料集合体1体の落下事故の場合、エアゾルになる粒子を $10\mu m$ 、 $20\mu m$ 、 $30\mu m$ 以下と3通り仮定し、粉末が排気系を通過して外へ出る量を推定試算する。下記に必要なデータを示す。

イ. ATR燃料集合体1体のPuの量 1.1kgとする。

ロ. 落下時の飛散量は、7.1の考察により、1集合体につき0.1%とする。

ハ. 電顕写真法で求めた粒度分布から粉末粒径に対する重量割合の平均値を用いる。

$10\mu m$ 以下は0.1%、 $20\mu m$ 以下6.6%、 $30\mu m$ 以下は20.1%となる。但しこれらの重量割合は、325meshのふるいを通った粉末量（約1%）に対するものであるから、さらにこれらの値に1/100を乗ずる必要がある。

ニ. 排気系の効率を99.7%と仮定する。

計算結果を下表に示す。

エアゾルになる 粒 径	エアゾルになる 量 (Pu)	フィルターを通過して 外へ出る量
$10\mu m$ 以下	$1.1 \times 10^{-5} g$	$3.3 \times 10^{-8} g$
$20\mu m$ 以下	$7.2 \times 10^{-5} g$	$2.16 \times 10^{-7} g$
$30\mu m$ 以下	$2.3 \times 10^{-4} g$	$6.9 \times 10^{-7} g$