

JAERI - M

82-141

反応度事故条件下における高発熱量
照射時の燃料微粒子化の形態
—微粒化燃料の粒度分布測定および
粒子の観察—

1982年10月

床井 博見*・岩田 耕司・星 蔦雄

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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute. 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

反応度事故条件下における高発熱量照射時の燃料微粒子化の形態
— 微粒化燃料の粒度分布測定および粒子の観察 —

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

床井博見*・岩田耕司・星 蔦雄

(1982年9月20日受理)

反応度事故条件において、燃料が溶融する程度の高発熱量で照射されると、破損燃料は微粒子化し、破壊エネルギーを発生する。燃料の微粒子化機構や破壊エネルギー発生機構を究明するには、燃料破損の状況や微粒子化の程度を把握することが重要である。ここでは微粒子化した燃料の篩分と詳細な外観観察をして、破損燃料の粒度分布と、破損燃料の形状の特徴を明らかにした。

燃料の微粒子化は発熱量が高い程促進される。さらに発熱量ばかりでなく燃料の微粒子化の程度は冷却水のサブクール度や冷却材-燃料比にも左右される。

微粒子化した燃料の形状は、①球形状粒子、②岩砕状粒子、③多孔質な粒子、④殻状粒子に大別できる。球形状粒子は中空であり、その空隙率は60~80%で、多くは表面に気孔が存在する。岩砕状粒子の一部には表面に縦横のクラックがみられる。多孔質な粒子は表面に多数の気孔が存在する。一方殻状粒子は表面に光沢がなく湾曲している。

* 日立製作所エネルギー研究所

Particle Shape and Size Distribution of Fragmented Fuel
in High Energy Deposition Conditions under an RIA
(Measurement of the Particle Size Distribution and
Observation of fragmented Fuel Appearance in the NSRR Tests)

Hiromi TOKOI*, Koji IWATA and Tsutao HOSHI

Division of Nuclear Safety Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Recieved September 20, 1982)

Fuels irradiated by a high energy deposition under an RIA condition fragment into fine particles due to melting of fuel pellets following mechanical energy generation by the interaction between the fragmented fuels and coolant.

In order to clarify the mechanism of fuel fragmentation and mechanical energy generation, detailed observation of fragmented fuels and particle size distribution measurement were carried out for the fuels used in the NSRR test.

It was verified that the particles of fragmented fuels become fine as increasing deposited energy, subcooling temperature and fuel/ coolant volume ratio.

Appearance of the fragmented fuels is characterized as follows;

- (1) spherical particles,
- (2) rubble type particles,
- (3) porous particles, and
- (4) shell type particles.

The spherical particle has a large hollow inside the particle with 60 to 80 % in void ratio. Most of the rubble type particle has longitudinal transverse cracks on the surface. The porous particle has many porosities on the surface. The shell type particle is a curved thin-plate type particle with rusterless surface.

Keywords: RIA, Fuel Failure, Destructive Energy, Mechanical Energy, Fuel Melt, Fragmented Fuel, Fuel Particle, Size Distribution, Deposited Energy

* Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験方法と装置	2
2.1 NSRR 実験の概要	2
2.1.1 NSRR 炉の概要	2
2.1.2 試験燃料	2
2.1.3 照射条件	2
2.2 粒度分布測定方法	3
2.3 外観観察	3
3. 実験結果と考察	13
3.1 燃料微粒子化の概要	13
3.2 粒度分布	13
3.3 外観観察	14
4. まとめ	73
謝 辞	74
参考文献	74

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental method and equipments	2
2.1 Outline of NSRR experiments	2
2.1.1 Outline of NSRR facility	2
2.1.2 Test fuels	2
2.1.3 Test conditions	2
2.2 Measuring method on the particle size distribution of fragmented fuels	3
2.3 Observation of the appearance of fragmented fuels	3
3. Experimental results and discussion	13
3.1 Outline of fuel fragmentation	13
3.2 Particle size distribution of fragmented fuels	13
3.3 Appearance of the fragmented fuels	14
4. Summary	73
Acknowledgements	74
References	74

1. はじめに

原子炉における反応度事故において、印加される反応度が大きい場合には、SL-1 事故¹⁾にみられるように、原子炉を破壊するような機械的エネルギー（破壊エネルギー）が発生する。従って、破壊エネルギーの大きさ、その発生機構、構造物に与える影響等を究明することは、原子炉安全性の評価の上で重要な研究課題となる。これまでの実験（NSRR^{2,3,4)}と SPERT⁵⁾から、破壊エネルギーの発生した場合には、燃料棒が破損して、UO₂ ペレットや被覆管の一部が微細な破片となっていることが確認されている。

破壊エネルギーは、燃料破損に伴う内圧の解放及び冷却水中に放出された高温の燃料と冷却水との相互作用により発生すると考えられている。このうち燃料と冷却水との相互作用による破壊エネルギーの発生は、微粒子化した燃料による冷却水の急速な加熱、蒸発に起因するので、破壊エネルギーの評価においては燃料の微粒子化の程度、状況の把握が重要となる。

これまで NSRR 実験では、破壊エネルギー解明のための実験として、高発熱量実験シリーズを実施した。本実験シリーズでは、試験燃料の発熱量の他に、冷却水のサブクール度、冷却材-燃料比ならびに冷却水膨脹に対する拘束条件等を変えて実験を実施した。

本実験の結果、照射後燃料の微粒子化の程度は試験条件によって大きく異なることが判明し、破壊エネルギーの大きさ、すなわち燃料に与えられた熱エネルギーから機械エネルギーへの転換率は、燃料の微粒子化の程度に関係することが明らかになった。

本報告においては、燃料の微粒子化の機構解明の一環として実施した微粒子化燃料の粒度分布の測定結果並びに粒子の観察結果について述べる。

2. 実験方法と装置

2.1 NSRR 実験の概要

2.1.1 NSRR 炉の概要

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は米国 GA 社によって開発された大型パルス炉 TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) を改良したものである。NSRR は Fig. 2.1 に示すように水深 9m のスイミングプール型の熱中性子パルス炉で、炉心はプール底部に位置し、炉心燃料の冷却はプール水の自然循環によって行う。炉心中央には内径 22 cm の中空実験孔を有し、実験物は垂直装填管またはオフセット装填管より出し入れする。

炉心は Fig. 2.2 に示すように中央の実験孔を取り囲む 149 本の燃料要素と 8 本の燃料フォロアー型制御棒と安全棒および 3 本のトランジェント棒とから構成される。炉心の直径は約 63 cm, 有効長さは約 38 cm の円筒形状である。炉心燃料棒は直径約 3.6 cm, 有効長さ約 38 cm の 20% 濃縮ウラン-水素化ジルコニウム ($U-ZrH_{1.6}$) をステンレス鋼で被覆したものである。

パルス出力の発生はトランジェント棒の急速引き抜きによって行い、3 本のトランジェント棒の組合せで最大 4.7 ドルまでの任意の反応度を投入することができる。パルス出力は NSRR のもつ自己制御性、すなわち燃料体に含まれる減速材 (ZrH) の昇温に伴う大きな負の温度係数によるフィードバック効果により抑制される。Fig. 2.3 に投入反応度量 4.67 ドルに対するパルス出力と積分出力の時間変化を示す。ピーク出力は約 21.000 MW, 積分出力は 117 MW・s であり、最短炉周期は 1.12 ms, パルス半値幅は 4.4 ms である。NSRR の特性を Table 2.1 に示す。

2.1.2 試験燃料

実験に用いた試験燃料の形状を Fig. 2.4 に示し、その主な仕様を Table 2.2 に示す。試験燃料はスタック長 135 mm, 濃縮度を 10% あるいは 20% に高め、初期内圧を大気圧とした点を除き、PWR 型の燃料棒と同一仕様とした。

2.1.3 照射条件

試験燃料を Fig. 2.5 に示す標準大気圧水カプセル内に装着しパルス照射した。カプセルは内径 12 cm のステンレス鋼製で内部には、上部に空気層部の長さ 23 cm を残し純水を充填した。燃料の微粒子化および破壊力の大きさは燃料棒内で発生する熱エネルギーの大きさおよび燃料棒をとり囲む冷却材の条件によって影響されることが考えられることから、次の 4 つのパラメータ実験を実施した。

- ① 発熱量パラメータ実験
- ② サブクール度パラメータ実験
- ③ 冷却材-燃料比パラメータ実験
- ④ 拘束力パラメータ実験

発約量パラメータ実験では、試験燃料の発熱量は機械的エネルギーの発生するしきい値である 380 cal/g UO_2 から NSRR 炉での最大発熱条件である 530 cal/g $\cdot\text{UO}_2$ の範囲とした。

サブクール度パラメータ実験では、冷却水温を室温から最高 90 °C まで上昇させた。カプセル内は大気圧であるので、サブクール度 10 °C から 80 °C の範囲である。冷却水の加熱には 1.5 KW のシース型ヒータを用いた。

冷却材—燃料比パラメータ実験では、 H_2O — UO_2 体積比にして 1.6 (PWR 条件), 9.1, 40.4 および 165.5 (NSRR 標準カプセル条件) で実施した。冷却材—燃料比は試験燃料を収納するカプセルの径を変えて設定した。また、本実験は単一燃料棒についてばかりでなく、4 本バンドルの体系についても実施した。

拘束力パラメータ実験では、カプセル内の水面に接してピストンを設け、ピストン上部にスプリングを取付けて水面の動きを拘束した。使用したスプリングの強さは機械エネルギーをスプリングの収縮で吸収できる強さとし、バネ定数は $4.8 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$ である。なお実験開始時はスプリングの縮みを 0 とし、水面は大気圧力とした。

実験計装の概略を Fig. 2.5 に、詳細な実験条件を Table 2.3 に示す。また試験燃料の実際の組立・計装の外観は Fig. 2.6 ~ 2.8 に示した。

2.2 粒度分布測定方法

カプセル内の水中に分散した微粒子化燃料を回収し、乾燥後篩分して粒度分布を求めた。すなわち、カプセル内の水中に飛散した燃料は、カプセル内に設けたステンレス鋼製の金網で回収し、さらに回収しきれない微細な粒子については、カプセル水を吸引ろ過して回収した。これらの粒子を赤外線ランプで充分乾燥後、メッシュサイズ 74 μm から 4,000 μm までの 7 種類の篩いを用いて篩分した。

2.3 外観観察

破損した燃料の外観を目視により観測すると共に、さらに微細な粒子についての情報を得るためほぼ 4 倍と 10 倍の拡大写真を撮影して、外観を観測した。

Table 2.1 Characteristics of NSRR

(1) <u>Reactor Type</u> ;	Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
(2) <u>Reactor Vessel</u> ;	3.6 ^m (wide) x 4.5 ^m (long) x 9 ^m (deep) open pool
(3) <u>Fuel</u> ;	
Fuel type	12 wt% U-ZrH fuel
Fuel enrichment	20 wt% U-235
Clad material	Stainless steel
Fuel diameter	3.56cm
Clad diameter	3.76cm O.D.
Length of fuel section	38cm
Number of fuel rods	157 (including 8 fuel-followed control rods)
Equivalent core diameter	62cm
(4) <u>Control Rods</u> ;	
Number	8 (including 2 safety rods)
Type	Fuel followed type
Poison material	Natural B ₄ C
Rod drive	Rack and pinion drive
(5) <u>Transient Rods</u> ;	
Number	2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod
Type	Air followed type
Poison material	92% enriched B ₄ C
Rod drive	Fast : Pneumatic Adjustable : Rack and pinion & Pneumatic
(6) <u>Core Performance</u> ;	
a) Steady state operation	
Steady state power	300KW
b) Pulse operation	
Max. peak power	21,100MW
Max. burst energy	117MW-sec
Max. reactivity insertion	3.4% Δk (\$4.67)
Min. period	1.17 msec
Pulse width	4.4 msec (1/2 peak power)
Neutron life time	30 μsec
(7) <u>Experiment Tube</u> ;	
Inside diameter	22cm

Table 2.2 Test fuel design summary

UO ₂ Pellet	Diameter	9.29 mm
	Length	10 mm
	Density	95%TD
	Enrichment	10%, 20%
	Shape	Chamfered
Cladding	Material	Zircaloy-4
	Outer Dia.	10.72 mm
	Wall Thickness	0.62 mm
Pellet-Cladding Gap		0.095 mm
Element	Overall Length	265 mm, 279 mm
	Fuelled Length	135 mm
	Weight of Fuel Pellets	95.5 g
	Number of Pellets	14 mm
	Plenum Gas	Helium 1 atm

Table 2.3 High energy deposition test conditions

	Test No.	Energy deposition (cal/g·UO ₂)	Fuel enrichment (%)	Coolant sub-cooling (°C)	H ₂ O/UO ₂ volume ratio (Capsule diameter)	Stiffness constant (kg/S ²)	Remarks	
Energy deposition	111-20B	388	20	80	165.5 (120 mm ϕ)	Without spring		
	111-21	441	"	80	"	"		
	111-18	483	"	73	"	"		
	111-19	526	"	74	"	"		
	111-31	527	"	79	"	"		
	111-30	522	"	80	"	"	Without end flux peak	
Coolant subcooling	111-26	528	"	40	"	"		
	111-27	529	"	25	"	"		
	111-25	518	"	15	"	"		
	111-28	527	"	10	"	"		
	111-39	432	10	15	"	"		
H ₂ O/UO ₂ volumetric ratio	Single rod	111-24	468	"	82	40.4 (60 mm ϕ)	"	
		111-33	433	"	73	"	"	
		111-37	432	"	78	9.1 (30 mm ϕ)	"	
		111-32	436	"	74	"	"	
		111-35	428	"	77	1.6 (16 mm ϕ)	"	
	Bundle	111-36	414	20	77	40.4 (120 mm ϕ)	"	Fuel center pitch : 40mm
		111-40	395	"	81	6.5 (46 mm ϕ)	"	Fuel center pitch : 23mm
Constraint	111-34	430	10	75	165.5 (120 mm ϕ)	4.8 \times 10 ⁴		
	111-29	424	"	81	"	9.8 \times 10 ⁴		
	111-38	424	"	80	"	2.5 \times 10 ⁵		

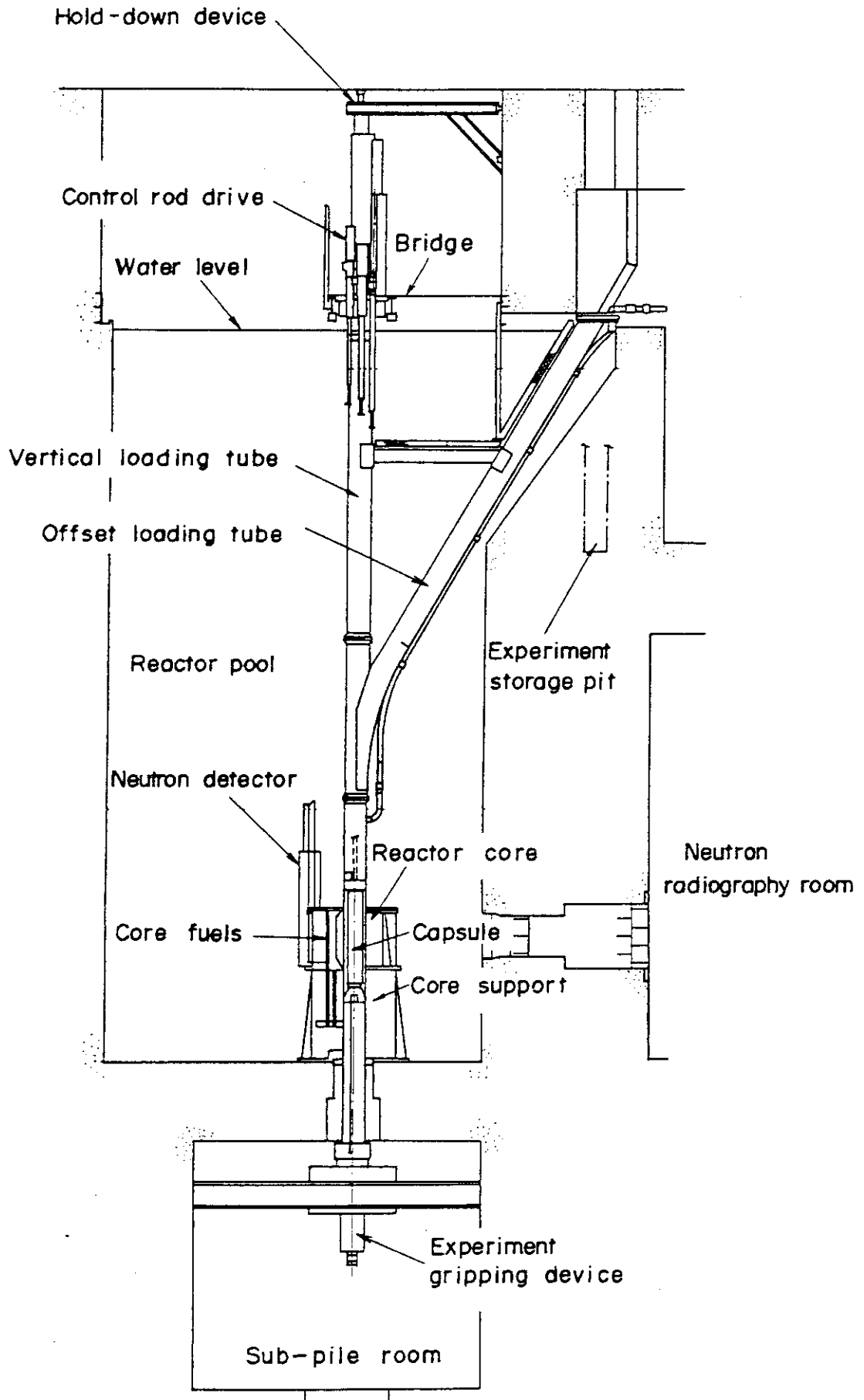


Fig. 2.1 General Arrangement of NSRR

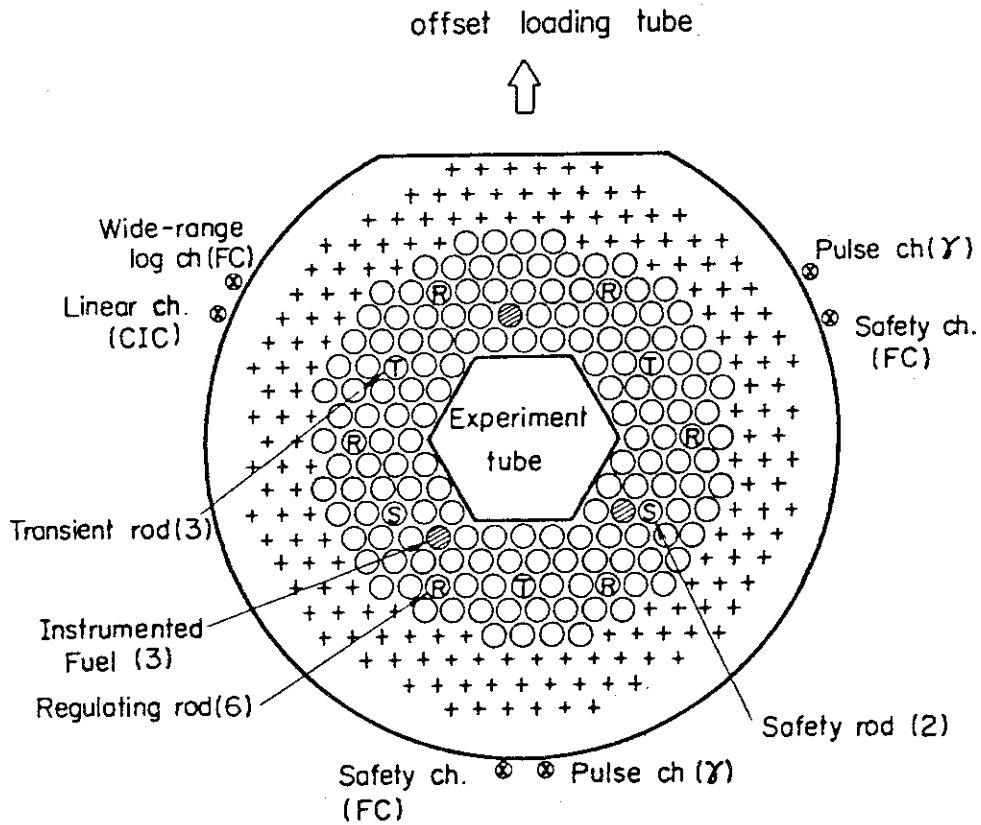


Fig. 2.2 Standard operating core configuration

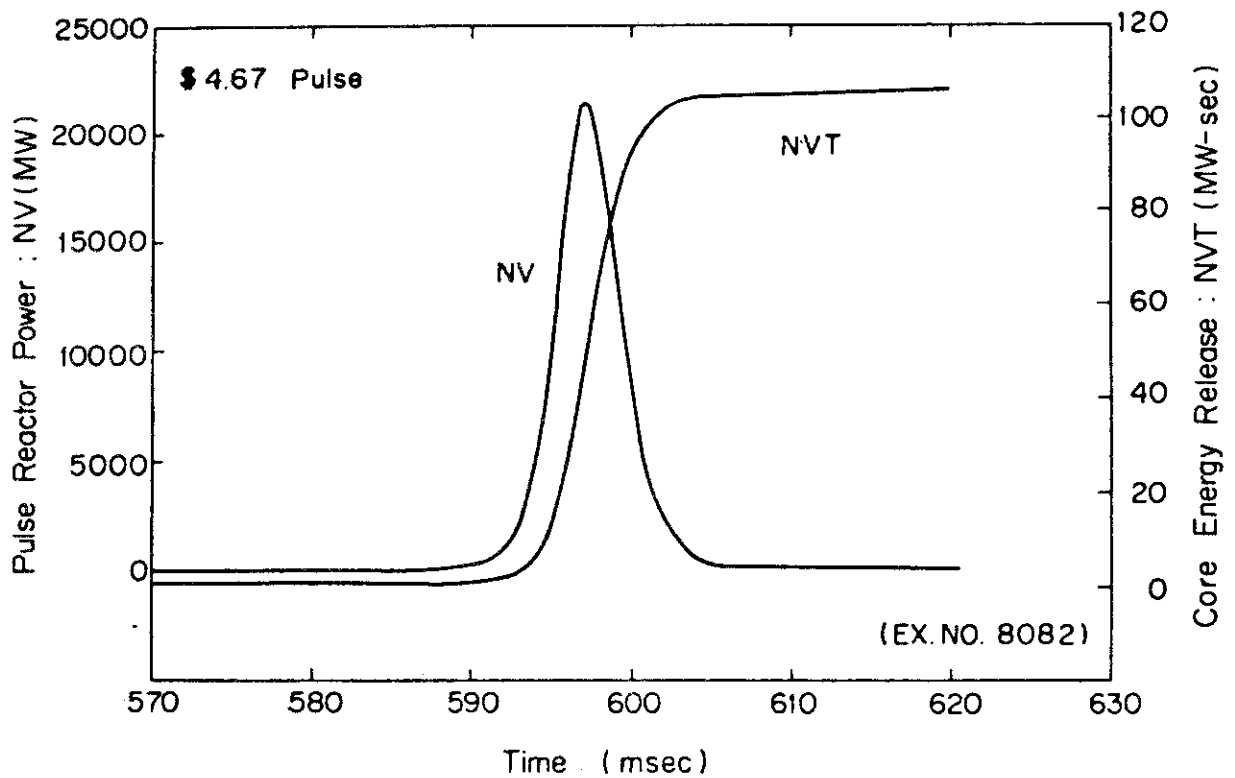


Fig. 2.3 Pulse reactor power and core energy release for 4.67 \$ pulse

unit : mm

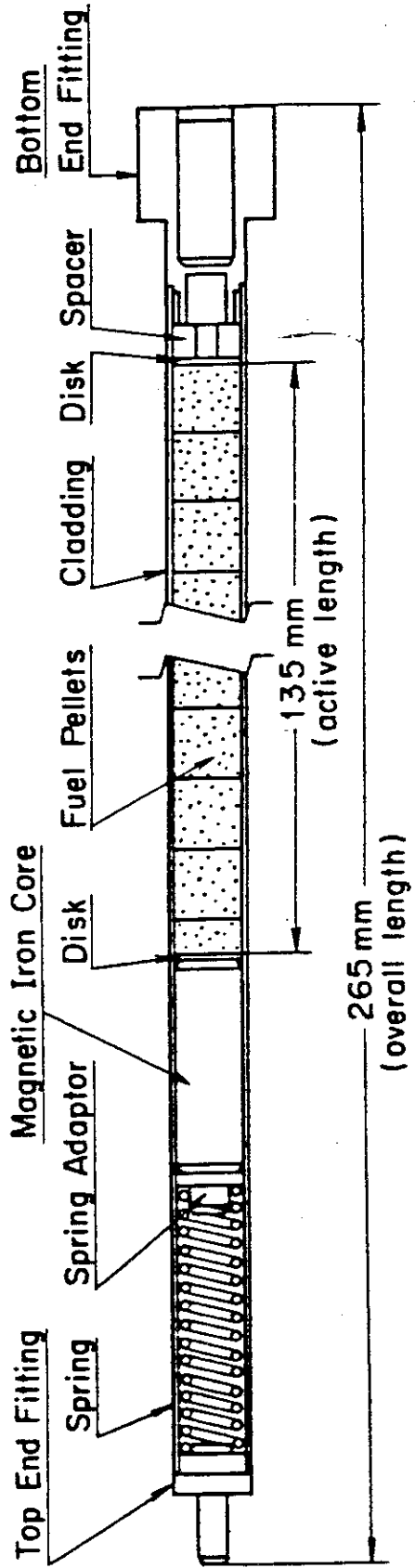
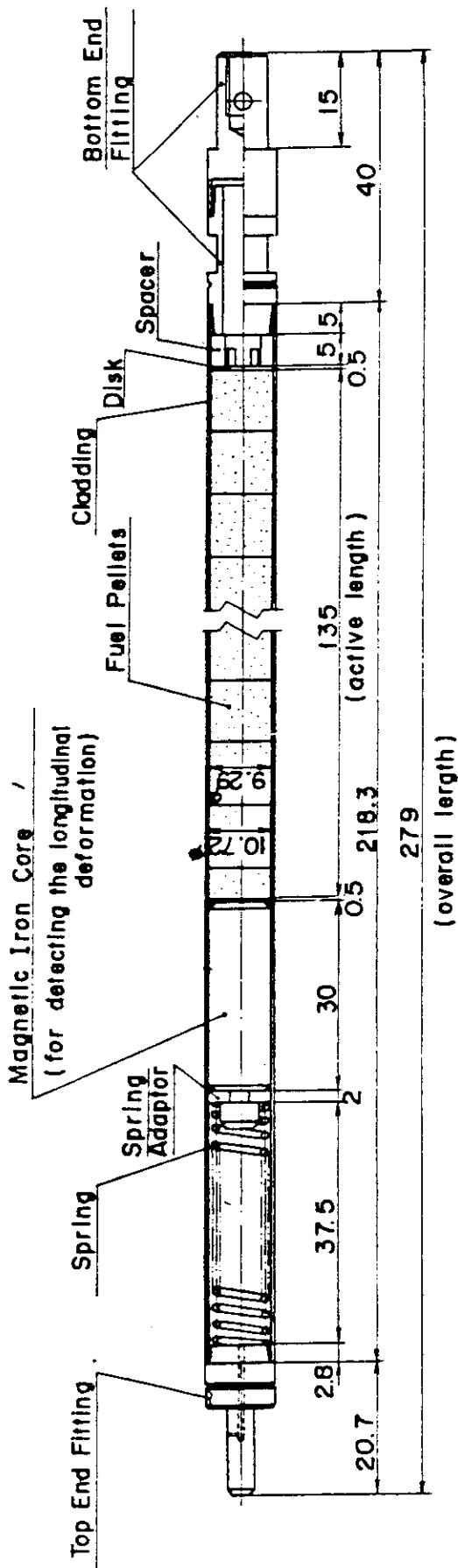


Fig. 2.4 Standard Type Test Fuel

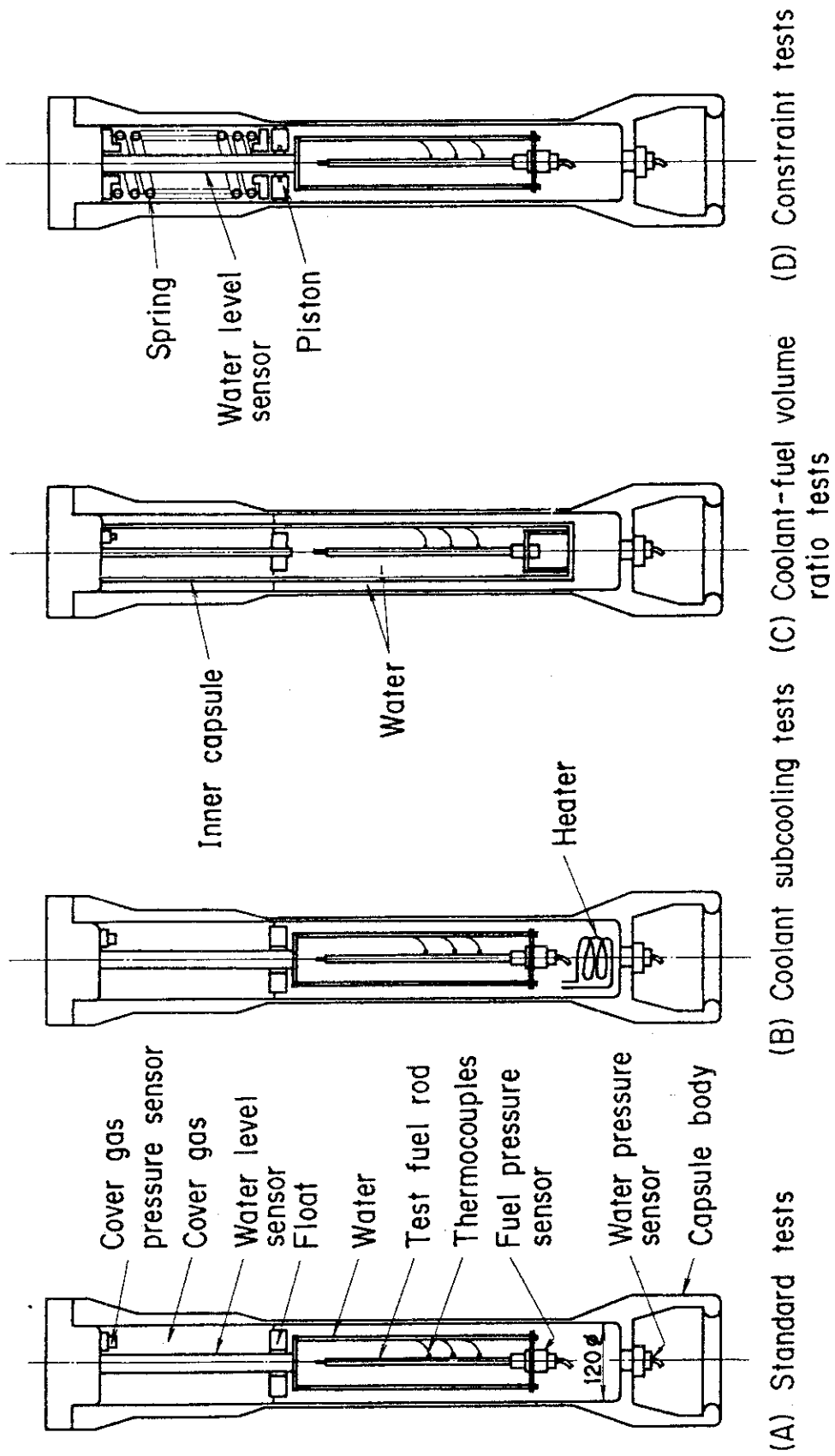


Fig. 2.5 Experimental capsule and measuring instruments

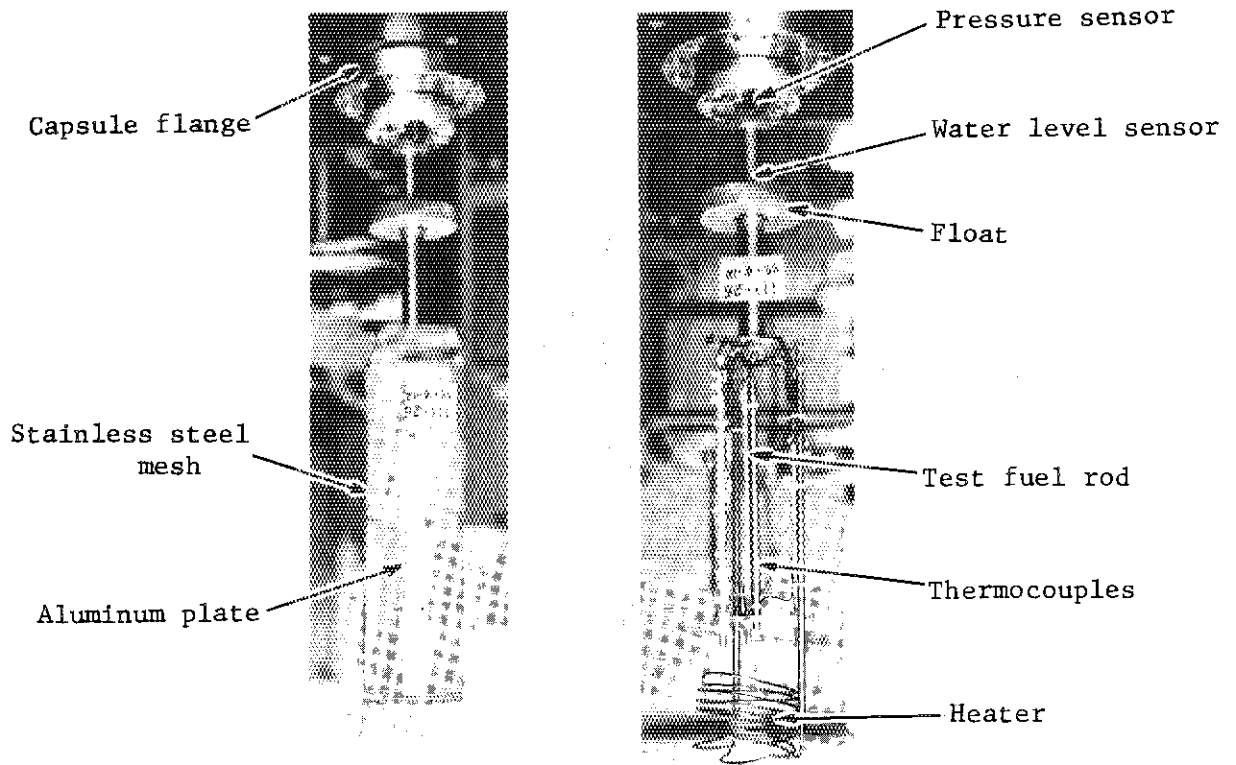


Fig. 2.6 Test fuel and measuring instruments in coolant subcooling test

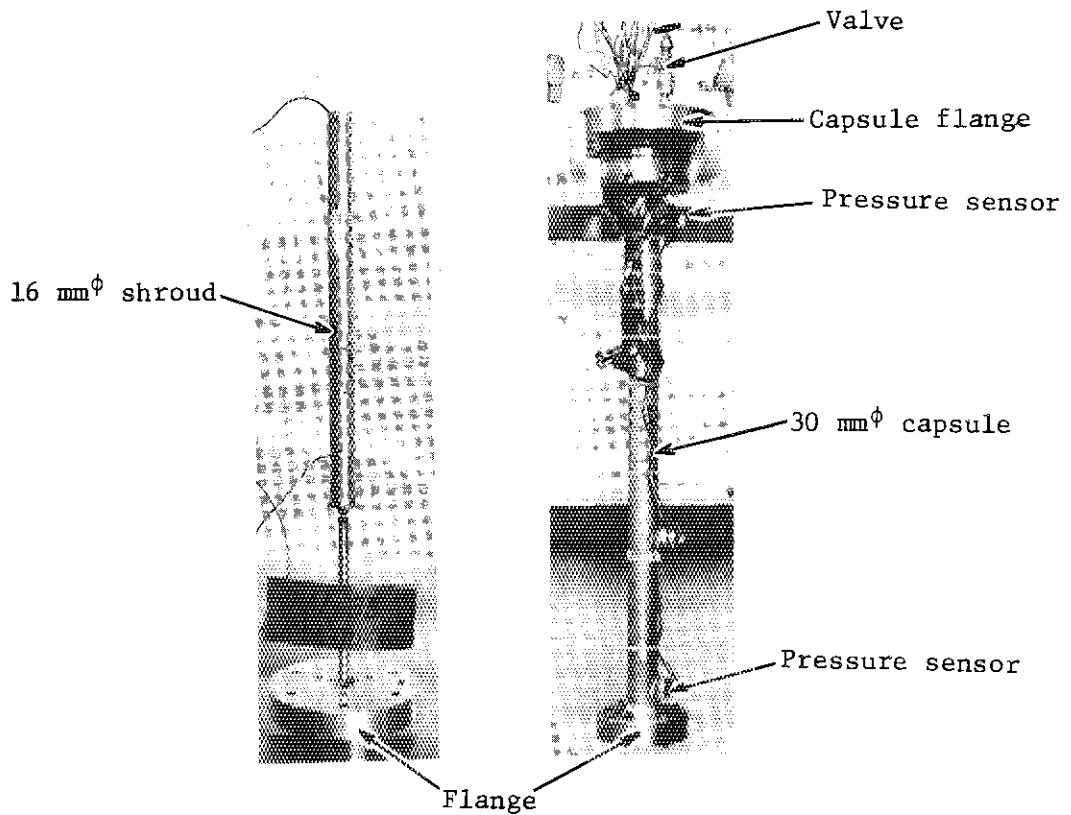


Fig. 2.7 Test fuel with shroud and measuring instruments in coolant-fuel volume ratio test

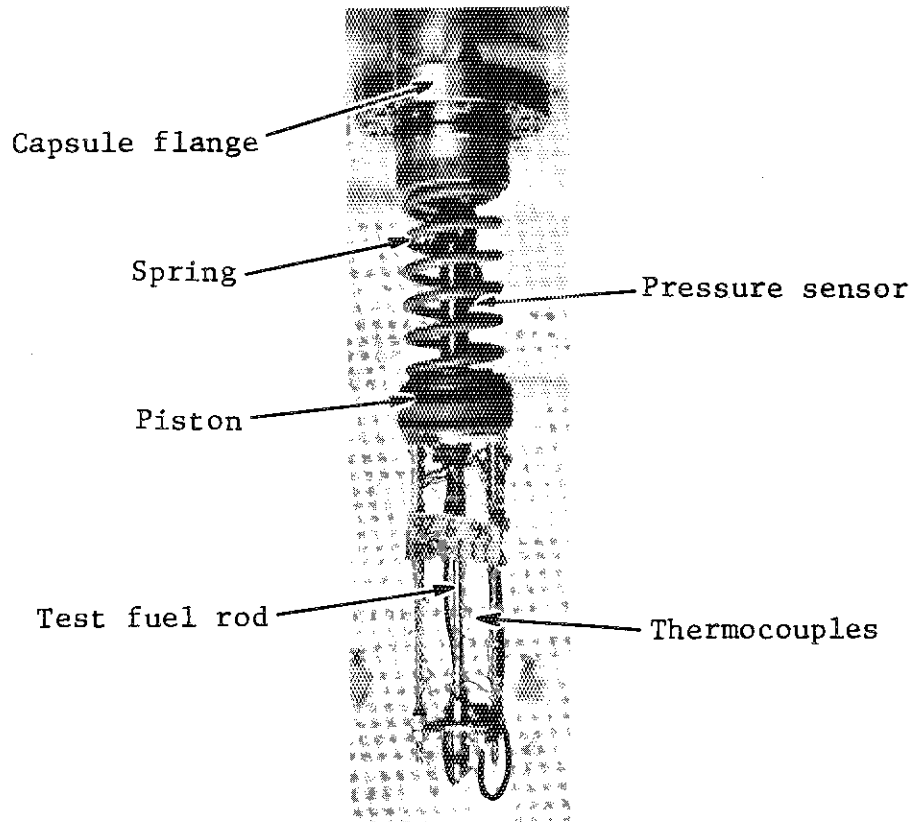


Fig. 2.8 Test fuel rod and measuring instruments with spring in constraint test

3. 実験結果と考察

3.1 燃料微粒子化状況の概要

高発熱量照射時の燃料破損の典型例をFig. 3.1に示す。図は発熱量パラメータ実験の一例であり、発熱量は $527 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ である。燃料は上下端栓の一部を除き、ジルカロイ-4被覆も内部の UO_2 ペレットもすべて微粒子化し、カプセル内の水中に飛散していた。微粒子化をまねがれた上下端栓や被覆管も黒色に酸化し、各所に熔融の痕跡がみられた。また、破損燃料回収を目的に燃料外周に設けたアルミニウム製容器（下部はステンレス鋼製）も一部熔融していた。

微粒子化した燃料の大きさは、ペレット径に近い1 cm 弱の大きなものから数 $10 \mu\text{m}$ の小さなものまで、広い範囲に分布している。微粒子化した燃料の粒径ごとの外観をFig. 3.2に示す。

破損燃料回収容器の破損状況の一例をFig. 3.3に示す。容器は、カプセル内周（直径120 mm）に沿って設置したものである。燃料外周部に位置する胴部のアルミニウム板上には一部黒色をした UO_2 あるいは酸化したジルカロイと考えられる付着物がみられる。しかしアルミニウム板の破損の程度は軽微である。これに比べ試験燃料下部に設けたステンレス鋼製の円板は、焼け焦げて貫通孔ができ前者に比べて激しい破損状況を示した。

3.2 粒度分布

微粒子化燃料の粒度分布をFig. 3.4～3.8に示す。

(1) 発熱量パラメータ実験

発熱量をパラメータとした実験で計測された微粒子化燃料の粒度分布をFig. 3.4 a と 3.4 b に示す。Fig. 3.4 a は内径120 mmのカプセル（ $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比165.5）を用いた場合である。この図において粒度分布の傾向をみると発熱量の低い $388 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ では重量百分率の最頻値が $4,000 \mu\text{m}$ 以上の大きな粒子径にあるが、発熱量が増加すると最頻値は $500 \mu\text{m}$ から $250 \mu\text{m}$ の小さな粒径へと移行する。また最小粒径である $74 \mu\text{m}$ 以下の重量百分率は発熱量の増加に伴い増大する。これらの傾向はFig. 3.4 b に示すようにカプセル径を60 mm（ $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比 = 40.4）とした場合にもみられる。従って、燃料の微粒子化は発熱量の増加と共に促進されると言える。

(2) サブクール度パラメータ実験

サブクール度をパラメータとした実験での微粒子化燃料の粒度分布をFig. 3.5 a と 3.5 b に示す。Fig. 3.5 a に示した図は発熱量が約 $520 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の場合である。この図をみると、サブクール度の大きい 79°C での重量百分率の最頻値は粒径 $500 \sim 1,000 \mu\text{m}$ の粒子にあるのに比べ、サブクール度が小さくなると粒径 $1,000 \sim 2,000 \mu\text{m}$ の大きな粒子へと移行する。また最小粒径である $74 \mu\text{m}$ 以下の粒子についてみると、サブクール度の低下と共に重量百分率が減少する。

また発熱量を $430 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ と低くした場合についても Fig. 3.5b に示すように同様の傾向がみられる。従って燃料の微粒子化はサブクール度の低下に伴って抑制されると言える。

(3) 冷却材-燃料比パラメータ実験

単一燃料棒を用いて、冷却材-燃料比をパラメータとした実験で得られた微粒子化燃料の粒度分布を Fig. 3.6a と 3.6b に示す。Fig. 3.6a は発熱量 $430 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の場合で、この結果をみると、 $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比の大きな 165.5 では、重量百分率の最頻値が $500 \sim 1,000 \mu\text{m}$ の粒子にあるのに比べ、 $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が 40.4 と小さくなると最頻値は $4,000 \mu\text{m}$ 以上の粒径の粒子へと移行する。さらに $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が小さくなると粒径 $4,000 \mu\text{m}$ 以上の粒子が占める重量百分率が極端に増大し、 $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が 1.6 では 67% にも達する。このような傾向は、Fig. 3.6b に示すように発熱量を $475 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ に高めた場合にも同様観測された。従って燃料の微粒子化は冷却材-燃料比の低下と共に抑制されると言える。

次に 4 本バンドル体系での微粒子化燃料の粒度分布を Fig. 3.7 に示す。図中には $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比のほぼ等しい単一燃料棒実験の結果も示した。バンドル体系での粒径分布は、粒径が大きくなるに従って重量百分率が単調に増加するという点で単一燃料棒実験の結果とほぼ対応している。しかし、個々の粒径での重量百分率の絶対値を比較すると、バンドル体系の方が幾分微粒子化が促進されている。

これらの結果をまとめると、燃料の微粒子化は冷却材-燃料比の低下と共に抑制され、この傾向はバンドル体系になると幾分緩和されると言える。

(4) 拘束力パラメータ実験

カプセル内の水面の拘束力をパラメータとした実験における微粒子化した燃料の粒度分布を Fig. 3.8 に示す。バネ定数が $9.8 \times 10^4 \text{ kg/s}^2$ のとき微粒子化が顕著に抑制されたが、それ以外の条件では、 $4,000 \mu\text{m}$ 以上の粒径の粒子が幾分増えたほかはスプリングなしの実験結果と大きな相違はない結果が得られた。

3.3 外観観察

燃料棒の破損状況を Fig. 3.9 ~ 3.13 に示し、微粒子化した燃料の篩分後の拡大写真を Fig. 3.14 ~ 3.35 に示す。

(1) 微粒子化燃料の外観からみた類型

各パラメータ実験で得られた微粒子化した燃料粒子を外観の特長から分類すると、次の 4 つに大別できる。

- ① 球形状粒子
- ② 岩砕状の粒子
- ③ 多孔質の粒子
- ④ 殻状粒子

Fig. 3.14 に各粒子の代表的な形態を示し、各類型の特徴を以下に述べる。

①の球形状粒子は、Fig. 3.14(a) にみられるように、粒子表面はなめらかで光沢があり気孔が存在し、粒子の内部は中空である。この類型には、球形粒子ばかりでなく、楕円形や鈴形あるいは

2個以上の球形粒子が結合したような形も存在する。

②の岩砕状粒子はFig. 3. 14 (b)にみられるように、角礫状の岩石に類似した形状で、表面に縦横にクラックが入っており、4,000 μm 以上の粒子に多くみられる粒子である。

③の多孔質の粒子は、Fig. 3. 14 (c)にみられるように、粒子表面にはコークスのように多くの気孔が存在する粒子である。

④の殻状粒子はFig. 3. 14 (d)に示されるように粒子は湾曲し、表面は光沢がなく、礫瓦と類似している。殻状粒子の中には、厚さや曲率が被覆管に近いものが認められる。

以下各パラメータ実験（発熱量、サブクール度、冷却材-燃料比と拘束力の各パラメータ実験）について上記の4つの分類に従い、破損粒子の特長を検討する。各パラメータ実験について、粒子径ごとの粒子の特徴をTable 3. 1～3. 4に示す。各粒子径には数種類の粒子が含まれるが表中には、個数が最も多い粒子で代表して記載した。

(2) 発熱量パラメータ実験

燃料棒の破損状況をFig. 3. 9に示す。燃料棒は上部端栓と下部端栓部分を残し、 UO_2 ペレットの入った有効発熱部はほとんど微粒子化した。なお発熱量の低い実験では破損の程度がおだやかで被覆管の一部が微粒子化せず残った。

微粒子化した燃料の拡大写真をFig. 3. 15～3. 20に示す。微粒子化した燃料には、球形状、岩砕状、多孔質、殻状の4つの種類の粒子がみられる。これらの粒子形状は4,000 μm 以上から74 μm 以下の粒子径にわたりほぼ共通である。発熱量についてみると最も発熱量が低い388 cal/g $\cdot\text{UO}_2$ ではFig. 3. 15に示すように岩砕状の粒子が多く、球形状粒子は散見される程度であるが、発熱量の増加と共に球形状粒子が増加し、発熱量527 cal/g $\cdot\text{UO}_2$ ではFig. 3. 19に示すようにほとんどが球形状粒子となった。球形状粒子の空隙率は60～80%とかなり大きい。その空隙のためと考えられるが粒子はかなりもろい。

(3) サブクール度パラメータ実験

燃料棒の破損状況をFig. 3. 10に示す。上部と下部の端栓を残し、 UO_2 ペレットの入った有効発熱部はすべて微粒子化した。上下端栓部の燃料棒の破損状況にサブクール度の影響は認められなかった。

微粒子化した燃料の拡大写真をFig. 3. 21～3. 25に示す。粒子の特徴は約525 cal/g $\cdot\text{UO}_2$ で照射した場合球形状粒子あるいはその破片とみられる粒子が圧倒的に多く、約430 cal/g $\cdot\text{UO}_2$ で照射した場合には岩砕状や殻状粒子が多いことである。しかしこの傾向は、発熱量パラメータ実験の同一発熱量の結果とはほぼ一致しており、微粒子化燃料の形状はサブクール度にほとんど影響されないといえる。

なおサブクール度を小さくした実験では4,000 μm 以上の大きな粒子にも球形状粒子がみられ、その薄肉部には100～300 μm の多数の気孔がみられた。

(4) 冷却材-燃料比パラメータ実験

単一燃料棒実験とバンドル実験の燃料棒破損状況をFig. 3. 11と3. 12に示す。単一燃料棒実験では冷却材-燃料比が小さくなるに従い微粒子化する燃料部分が少なくなる傾向にある。 $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が40.4と9.1では、被覆管はその形状を保ったものの、内部の UO_2 ペレットは放出され微粒子化した。 $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が最も小さい1.6の実験では、燃料の多くが被覆管内に保持された

ままであった。

4本バンドル体系の実験では、Fig. 3.12に示すごとく被覆管を含め有効発熱部全体が微粒子化している点が単一燃料棒実験と比べ顕著な相異であるが、 H_2O-UO_2 比が6.5 (Test No.111-40)と40.4 (Test No.111-36)実験の間には、燃料破損挙動に大きな差異はみられなかった。

微粒子化した燃料の拡大写真をFig. 3.26～3.32に示す。単一燃料棒実験では、 H_2O-UO_2 比が小さくなるに従い球形状粒子が少なくなり、岩砕状の粒子や多孔質、殻状の粒子の割合が増加する。多孔質の粒子は、特に H_2O-UO_2 比40.4の実験 (Fig. 3.26と3.27)に顕著にみられ、一部には薪炭の断面と類似する形状の粒子が認められる。殻状の粒子は、 H_2O-UO_2 比が9.1あるいはそれ以下の実験に多くみられる。殻状粒子の一部には表面にほぼ600 μm 以下の噴火口のような円形の穴があき、穴の周囲が盛り上っているものがみられる。この様子は一見マール型火山に似ている。

4本バンドル実験の結果は、Fig. 3.31と3.32に示したようにほぼ同等の H_2O-UO_2 比の単一燃料棒実験の結果と変わらない。

(5) 拘束力パラメータ実験

燃料の破損状況をFig. 3.13に示す。被覆管の一部は、微粒子化せずに残されているが、被覆管内の UO_2 ペレットはすべて微粒子化した。

微粒子化した燃料の拡大写真をFig. 3.33～3.35に示す。微粒子化燃料の形状は、スプリングなしの実験 (Fig. 3.16)と比べ大きな相違はない。

Table 3.1 Feature of fragmented particles in Energy deposition parameter tests

Energy deposition (cal/g·UO ₂)	Test No.	Particle size (μm)						
		4000	2000	1000	500	250	125	74
388	111-20B	B	B	B	B	D	D	D
441	111-21	B	D	D	D	D	D	D
483	111-18	B	D	D	A	A	A	A
527	111-31	B	A	A	A	A	A	A

A : Spherical particles

B : Rubble type particles

D : Shell type particles

Table 3.2 Feature of fragmented particles in coolant subcooling parameter tests

Coolant subcooling (°C)	Test No.	Particle size (μm)						
		4000	2000	1000	500	250	125	74
40	111-26	B	A	A	A	A	A	A
25	111-27	B	A	A	A	A	A	A
15	111-25	B	B	D	D	D	D	D
10	111-28	B	B	D	D	D	D	D

A : Spherical particles

B : Rubble type particles

C : Shell type particles

Table 3.3 Feature of fragmented particles in H₂O/UO₂ volumetric ratio parameter tests

	H ₂ O/UO ₂ volumetric ratio	Test No.	Particle size (μm)						
			4000	2000	1000	500	250	125	74
Single rod	40.4	111-33	B	B	C	C	D	D	D
	9.1	111-37	B	B	B	B	B	B	D
	1.6	111-35	D	D	D	D	B	B	B
Bundle	40.4	111-36	B	C	C	A	A	A	A
	6.5	111-40	B	B	B	B	B	D	D

- A : Spherical particles
 B : Rubble type particles
 C : Porous particles
 C : Shell type particles

Table 3.4 Feature of fragmented particles in constraint parameter tests

Stiffness const. (kg/S ²)	Test No.	Particle size (μm)						
		4000	2000	1000	500	250	125	74
4.8×10^4	111-34	B	B	D	D	D	A	A
9.8×10^4	111-29	B	A	A	A	A	A	A
2.5×10^5	111-38	B	D	D	D	D	D	D

- A : Spherical particles
 B : Rubble type particles
 D : Shell type particles

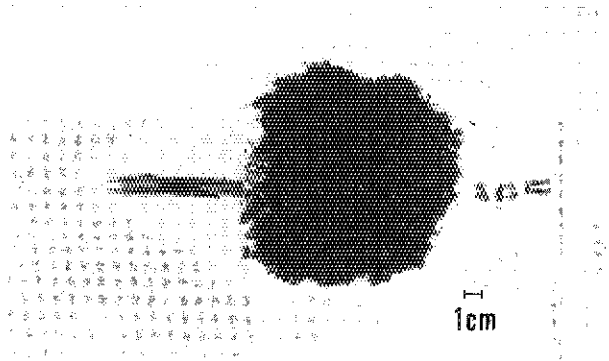


Fig. 3.1 Typical post-test appearance of the fuel rod irradiated at 527 cal/g·UO₂

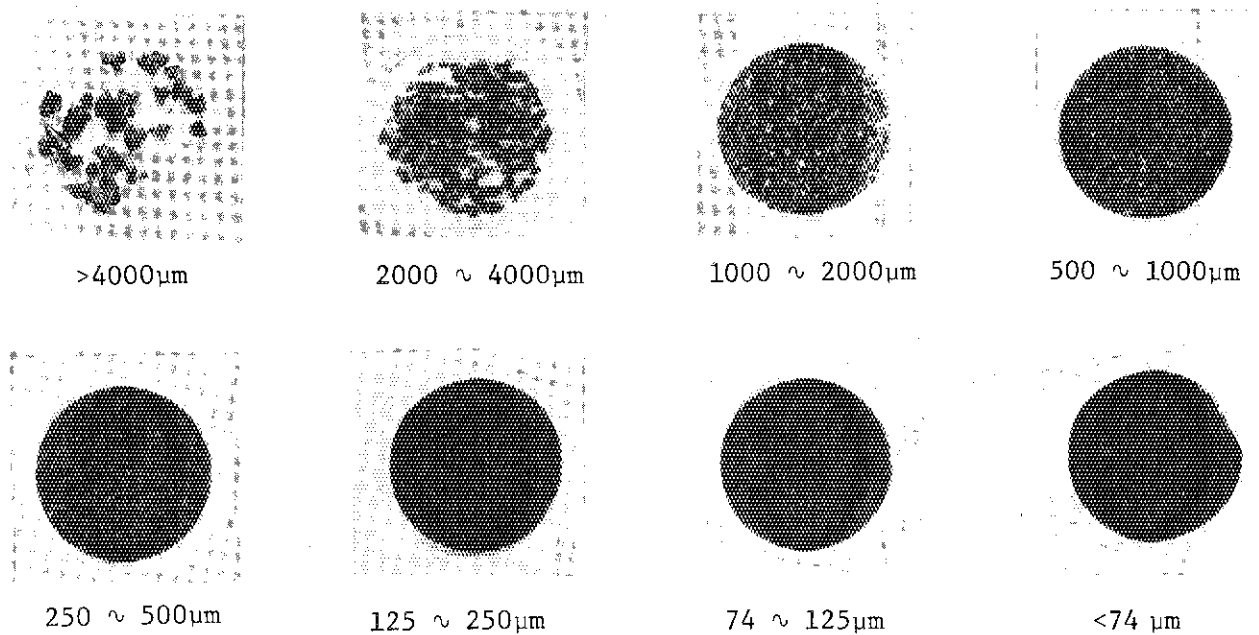


Fig. 3.2 Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 518 cal/g·UO₂ in Test No. 111-25

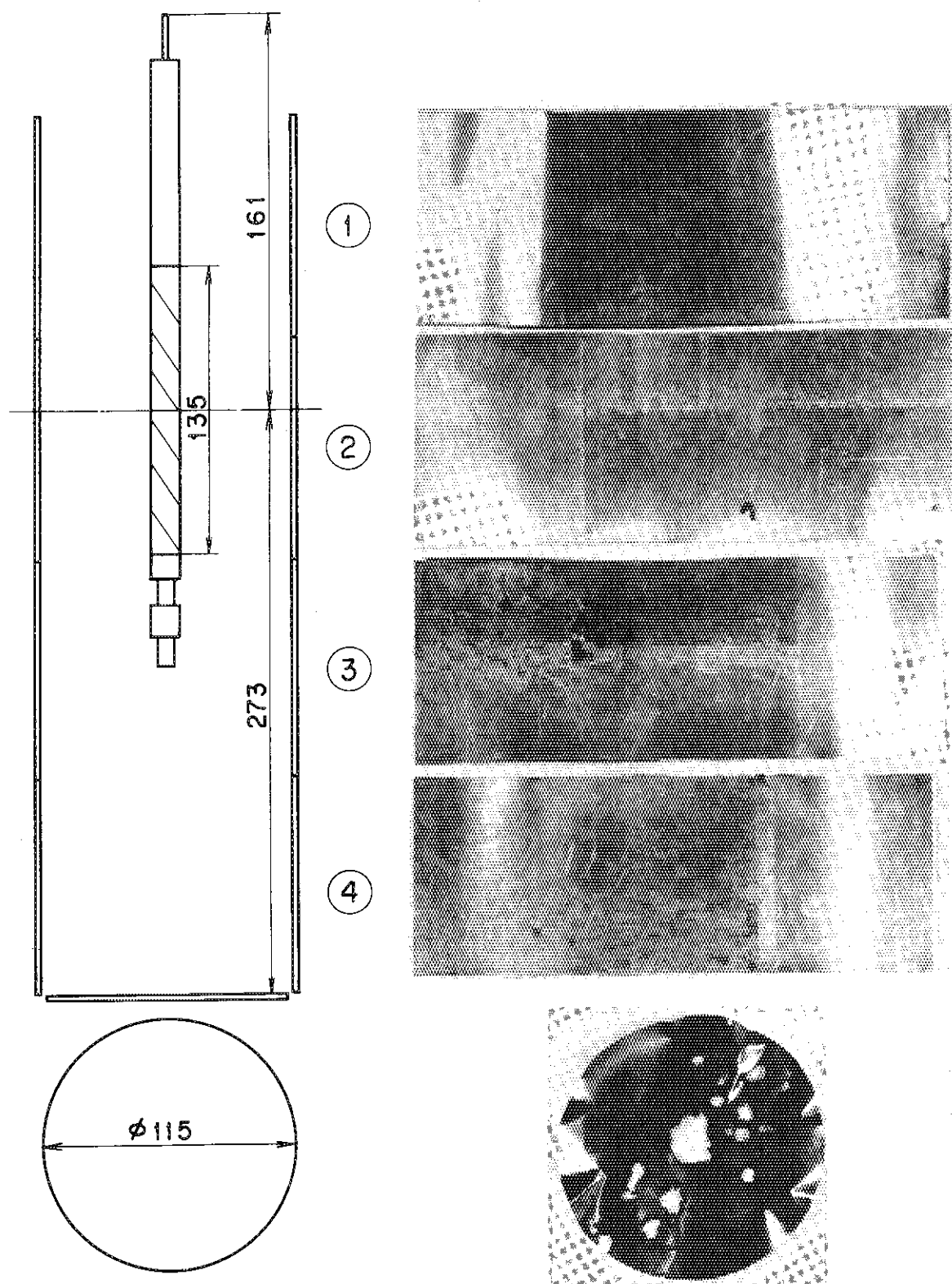


Fig. 3.3 Post-test appearance of the shroud rolled cylindrically around the test fuel irradiated under the energy deposition of 527 cal/gUO_2 (Test No.111-28)

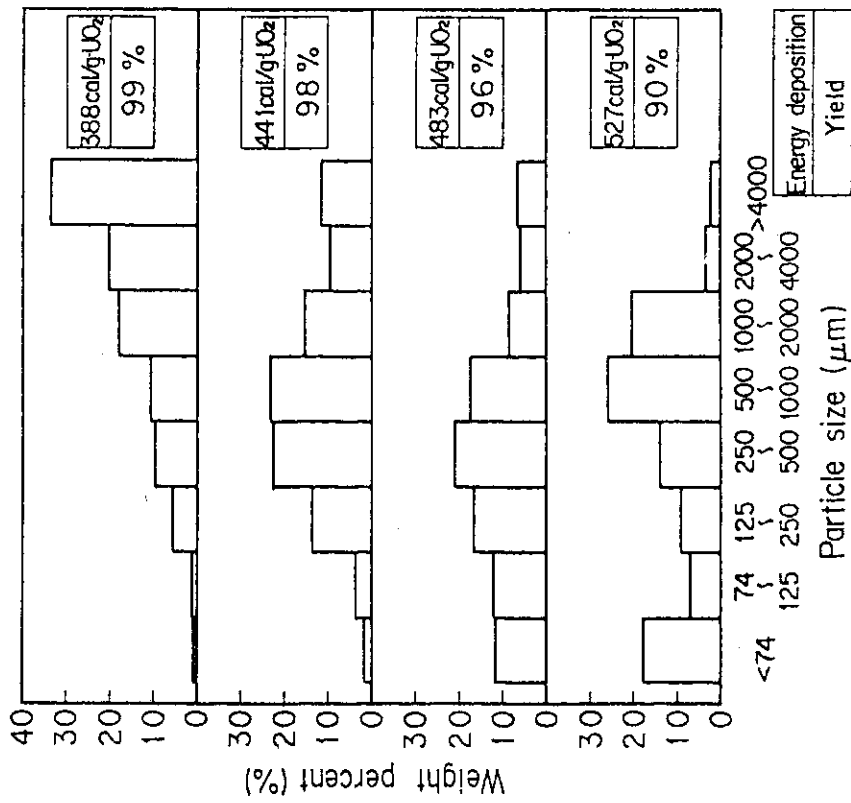


Fig. 3.4a Effect of energy deposition on particle size distribution from fuel rods fragmented during power burst tests in the NSRR experimental core

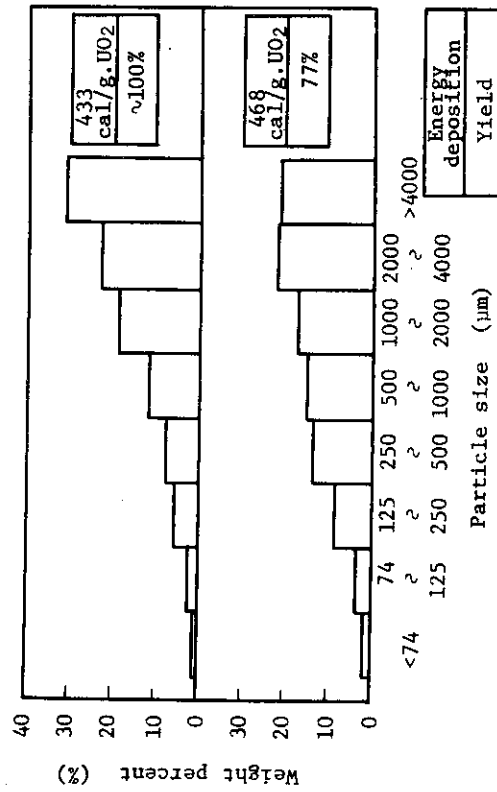


Fig. 3.4b Effect of energy deposition on particle size distribution of fuel fragments (H₂O-UO₂ volume ratio = 40.4).

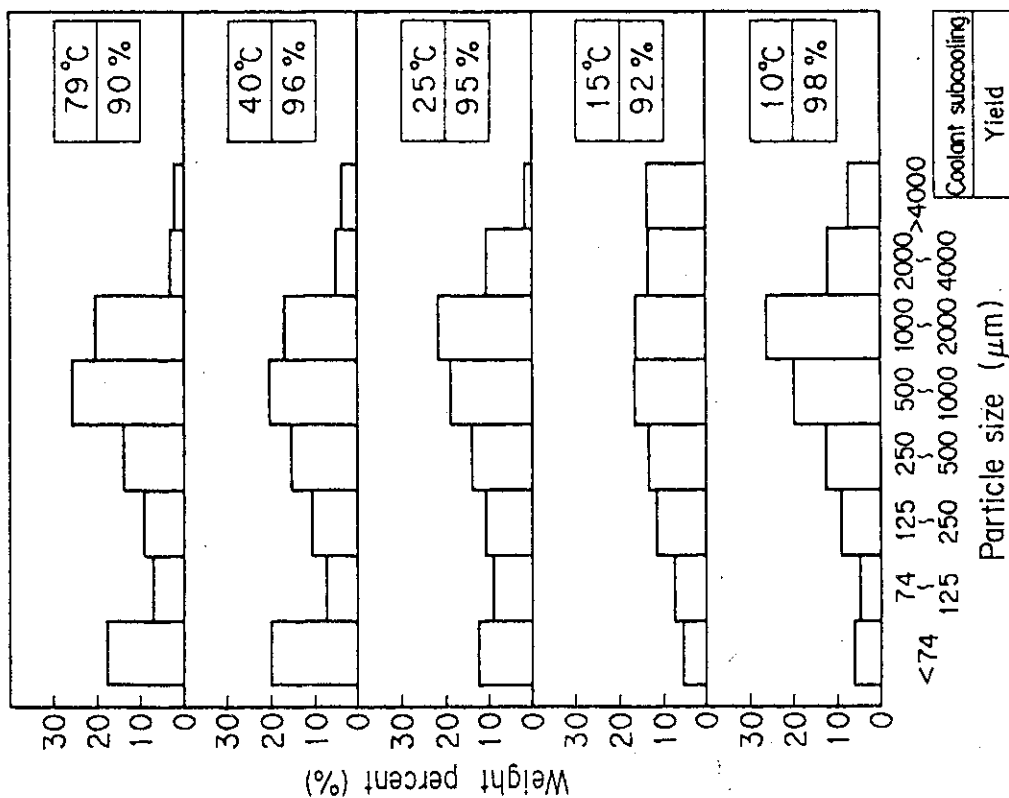


Fig. 3.5a Effect of coolant subcooling on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 525 cal/g-UO₂

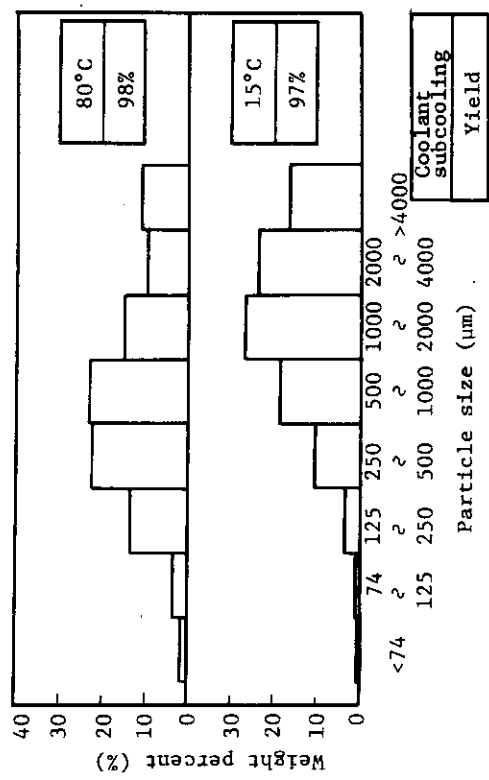


Fig. 3.5b Effect of coolant subcooling on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 430 cal/g-UO₂.

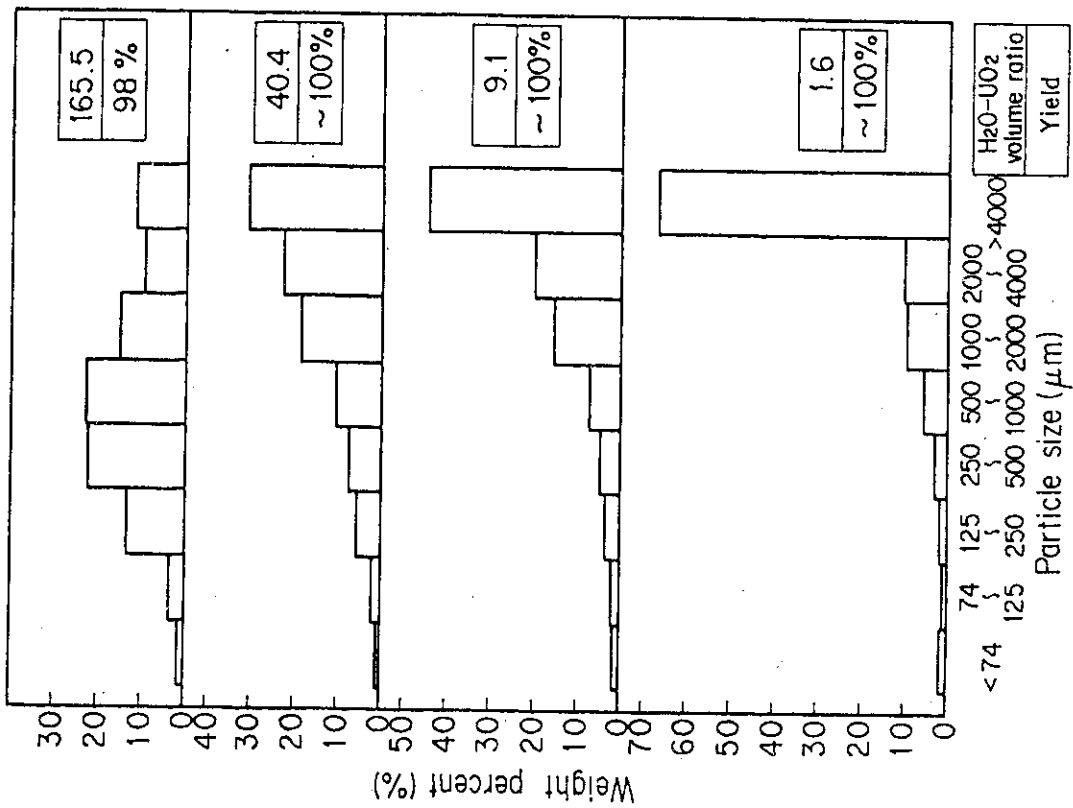


Fig. 3.6a Effect of H₂O/UO₂ volume ratio on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 430 cal/g·UO₂

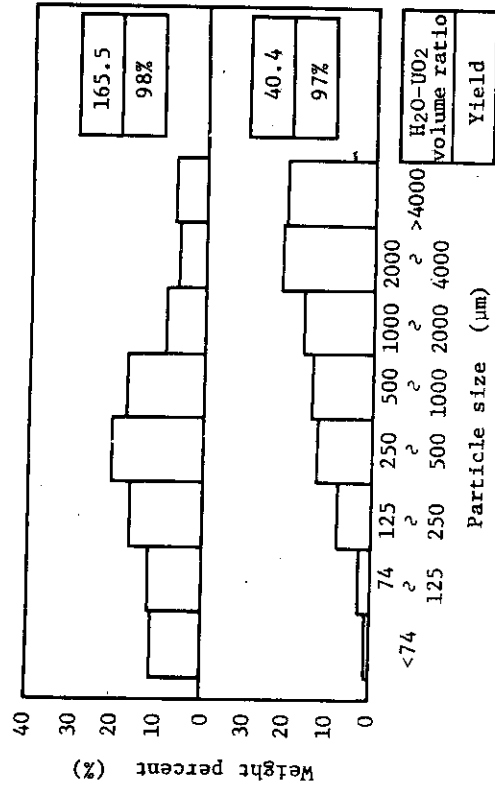


Fig. 3.6b Effect of H₂O-UO₂ volume ratio on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 475 cal/g·UO₂.

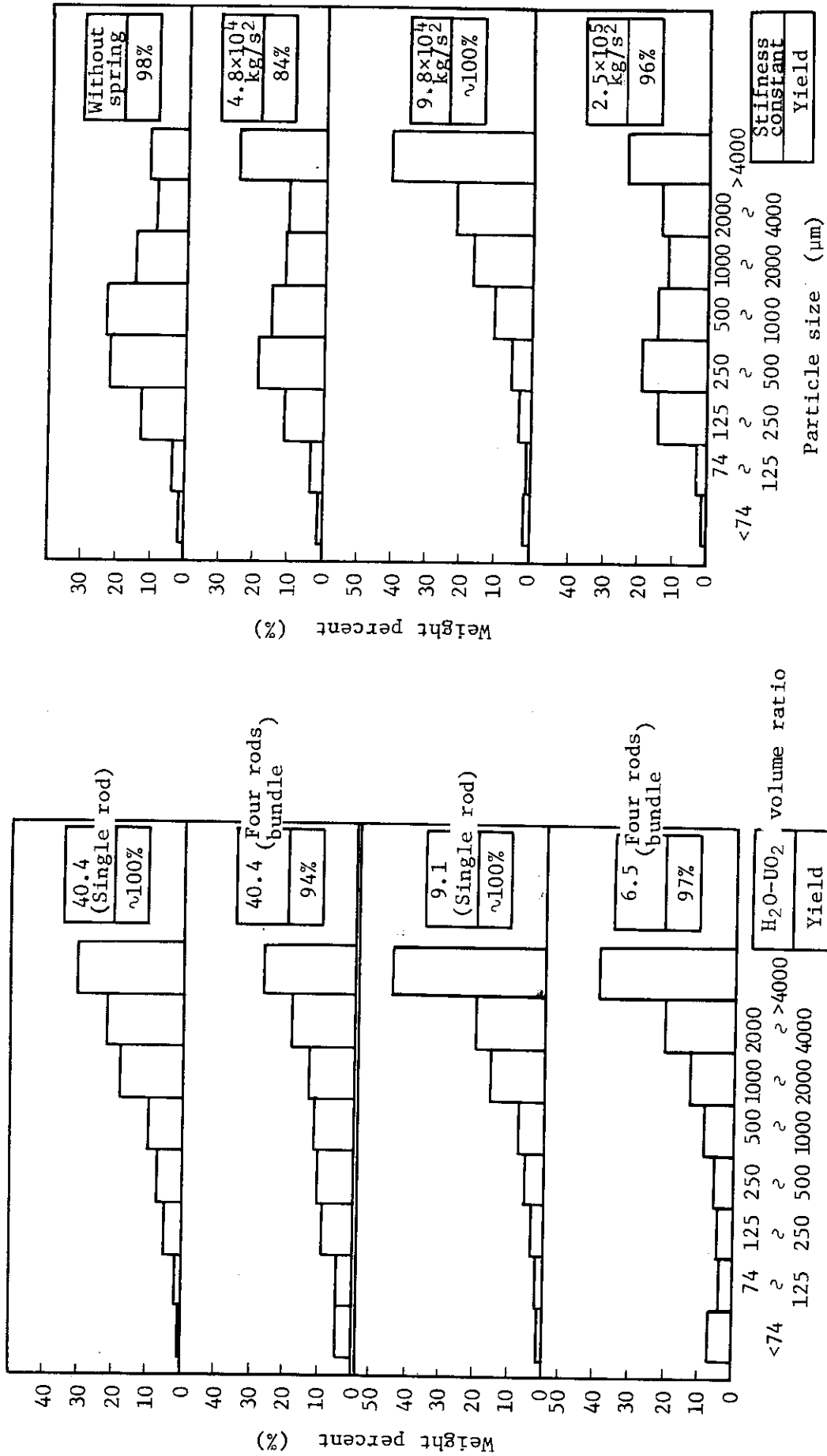


Fig. 3.8 Effect of constraint on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 430 cal/g.UO₂.

Fig. 3.7 Effect of rod bundle on particle size distribution of fuel fragments after irradiation at 390~430 cal/g.UO₂.

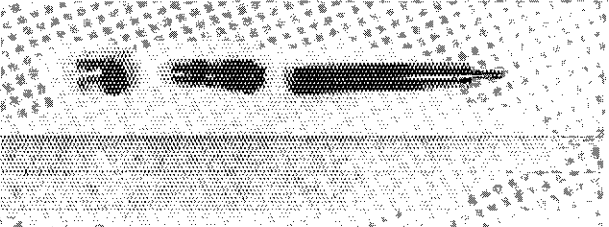
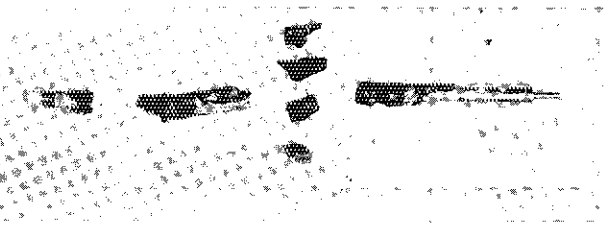
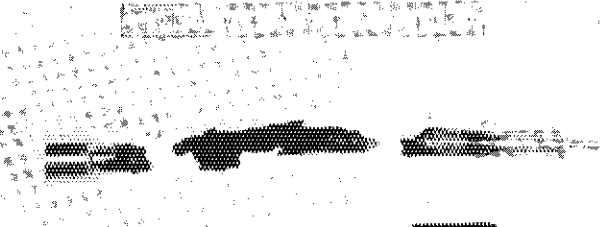
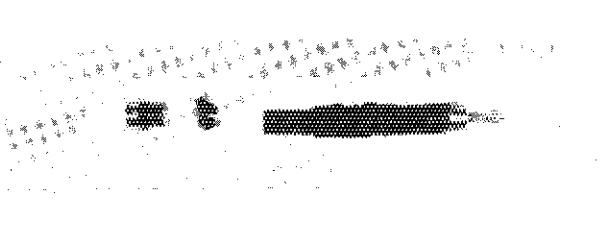
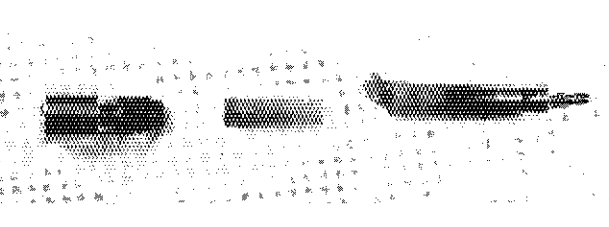
Energy deposition (cal/gUO ₂)	Fuel enrichment	Post irradiation fuel rods
388 (111-20B)	10 %	
441 (111-21)	10 %	
483 (111-18)	20 %	
527 (111-31)	20 %	
526 (111-19)	20 %	

Fig. 3.9 Post-test appearances of the fuel rods related with energy deposition

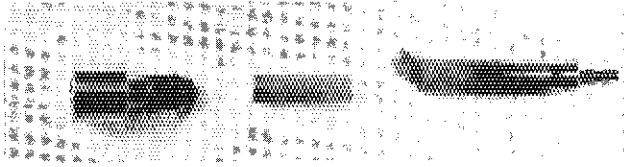

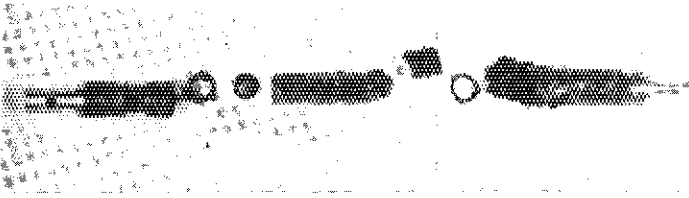
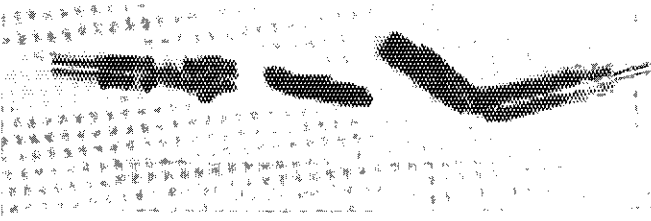
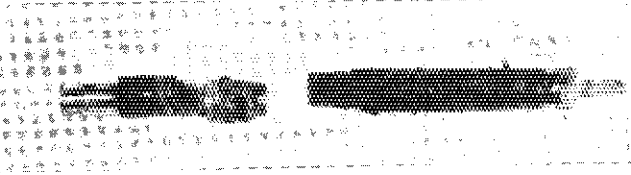
Coolant temperature (Test No.)	Energy deposition (cal/gUO ₂)	Post irradiation fuel rods
20°C (111-19)	526	
60°C (111-26)	528	
75°C (111-27)	529	
85°C (111-25)	518	
90°C (111-28)	527	

Fig. 3.10 Test fuel rods after irradiation in subcooling Tests

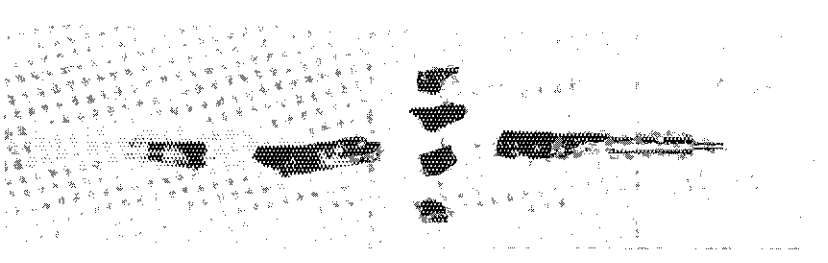
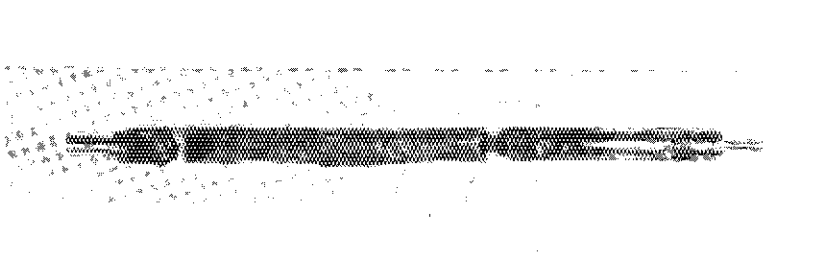
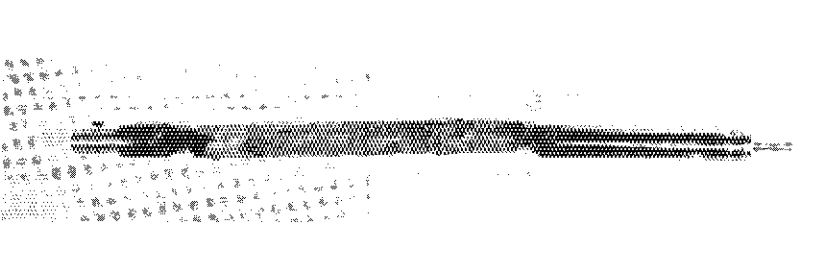
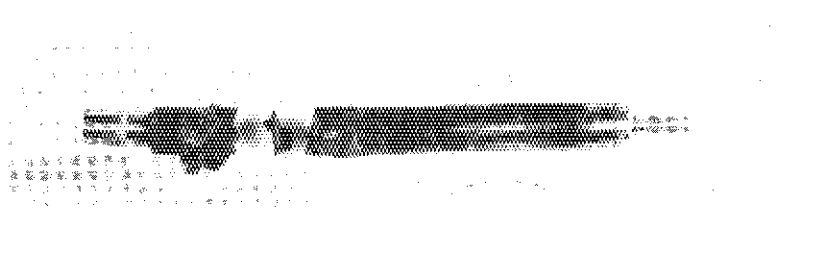
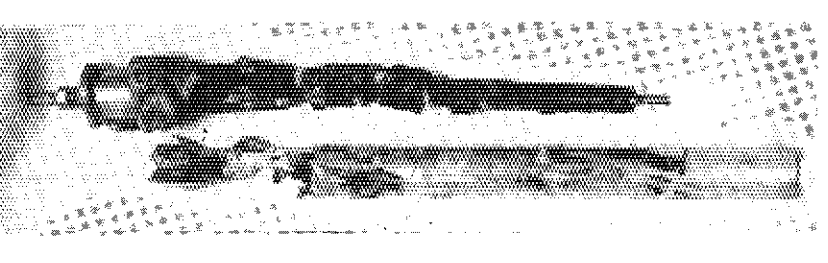
Capsule diameter (Test No.)	H_2O/UO_2 volume ratio	Post irradiation fuel rods
120 mm ϕ (111-21)	165.5	
60 mm ϕ (111-33)	40.4	
30 mm ϕ (111-37)	9.1	
30 mm ϕ (111-32)	"	
16 mm ϕ (111-35)	1.6 (PWR condition)	

Fig. 3.11 Post-test appearances of the fuel rods irradiated in various fuel/coolant ratio. (Energy deposition: 430 cal/g.UO₂)


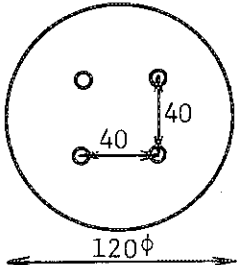
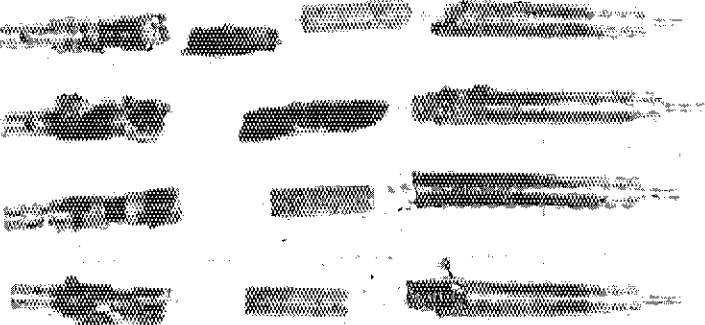

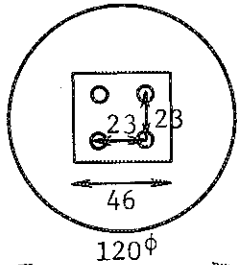
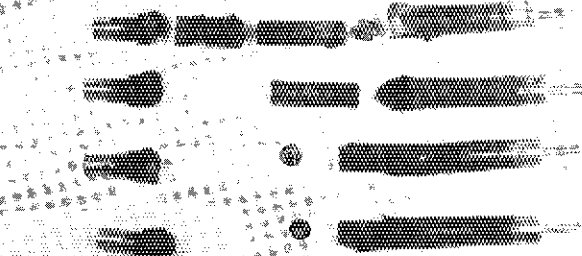
H_2O/UO_2 volume ratio (Test No.)	Test form	Post irradiation fuel rods
40.4 (111-33)	Single rod (60 mm ϕ) capsule	
40.4 (111-36)	4 rods bundle 	
9.1 (111-37)	Single rod (30 mm ϕ) capsule	
6.5 (111-40)	4 rods bundle 	

Fig. 3.12 Test fuel rods after irradiation in rod bundle tests (Energy deposition: 390 ~ 430 cal/g.UO₂).

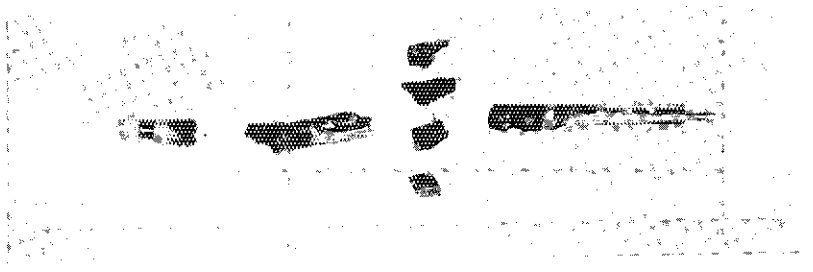
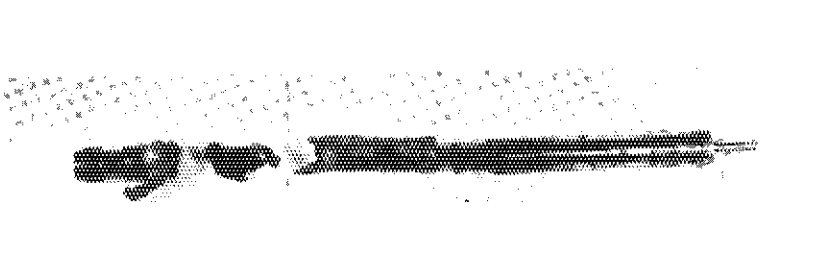
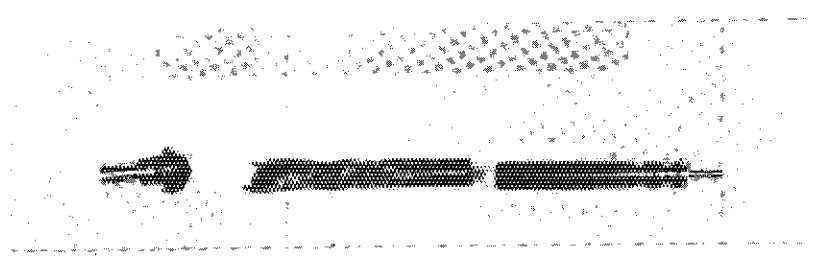
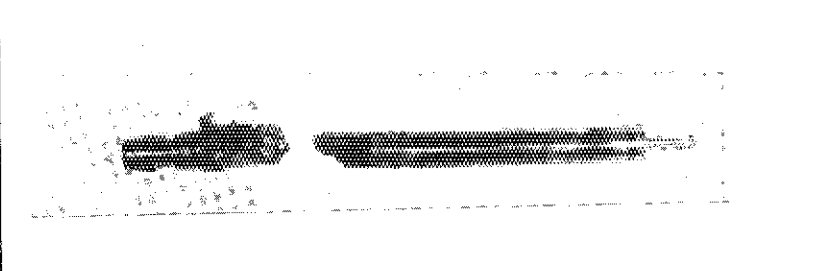
Stiffness constant [kg/s ²] (Test No.)	Energy deposition [cal/g.UO ₂]	Post irradiation fuel rods
Without spring (111-21)	441	
4.8 × 10 ⁴ (111-34)	430	
9.8 × 10 ⁴ (111-29)	424	
2.5 × 10 ⁵ (111-38)	424	

Fig. 3.13 Post-test appearances of the fuel rods irradiated with constraint.

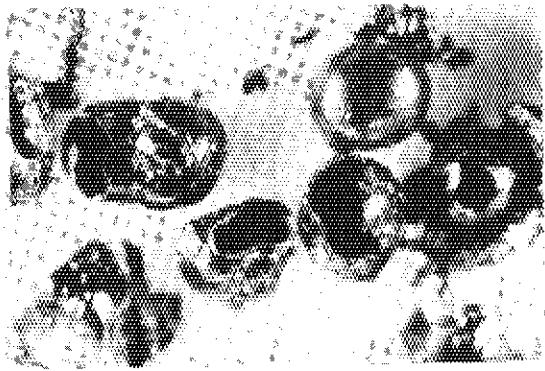
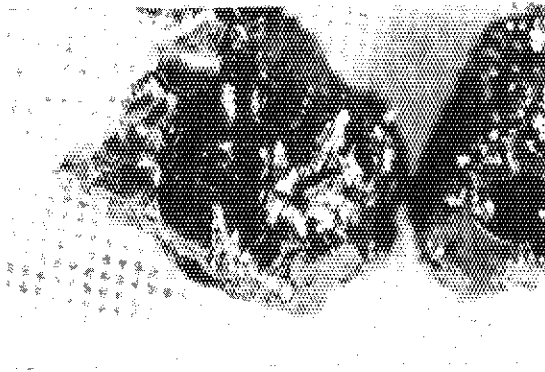

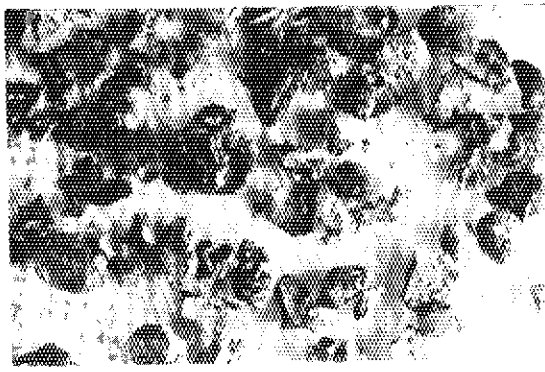
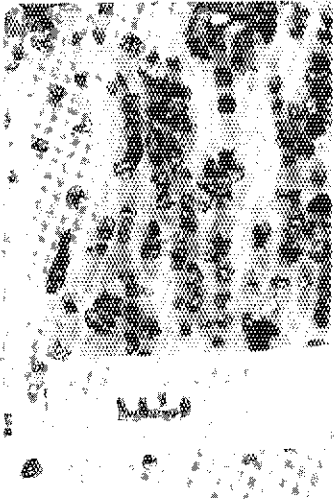
Particle name	Appearance of fuel fragments
(a) Spherical particles	
(b) Rubble type particles	
(c) Porous particles	
(d) Shell type particles	

Fig. 3.14 Typical appearance of fuel fragments in high energy deposition tests



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



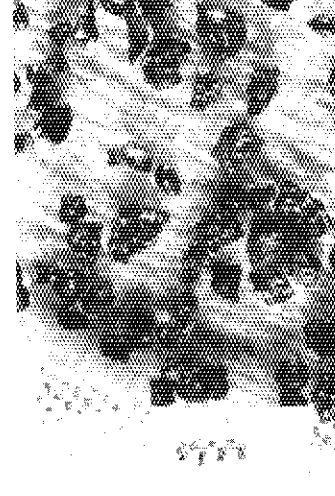
(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



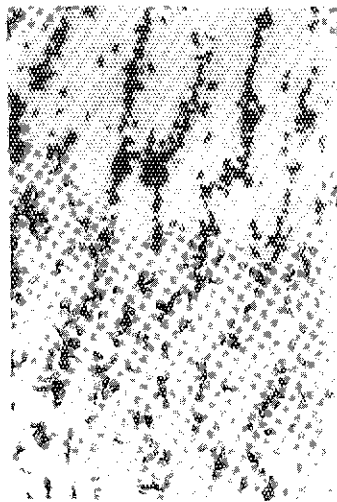
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.15a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 388 cal/g-UO₂ in Test No.111-29B



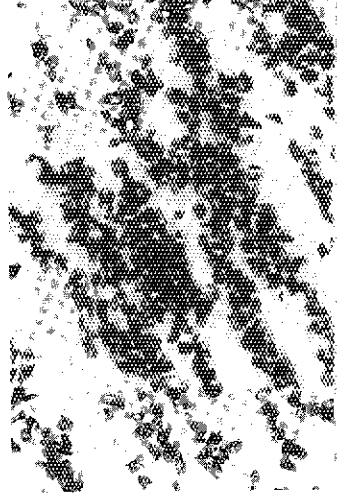
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



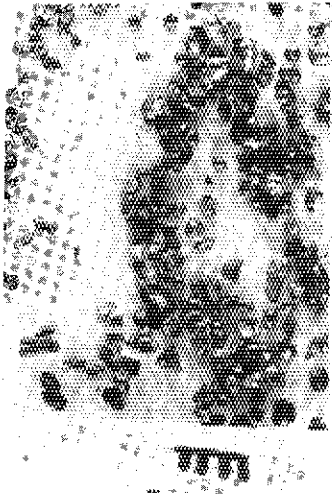
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

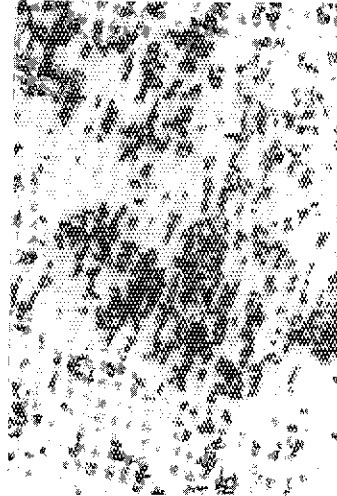
Fig. 3.15b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 388cal/g UO₂ in Test No.111-208



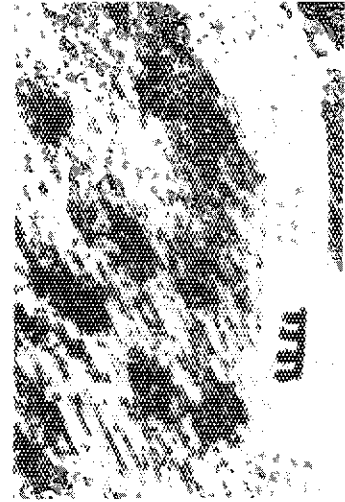
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



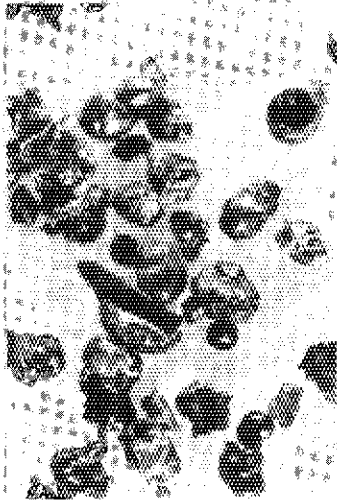
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

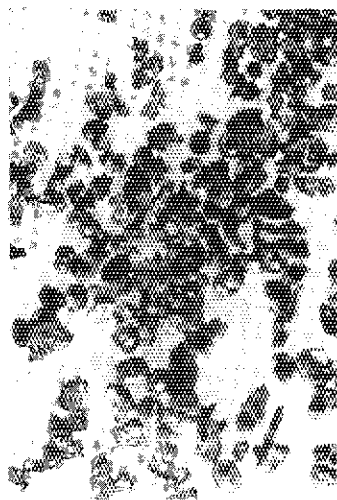
Fig. 3.16a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 441cal/g·UO₂ in Test No.111-21



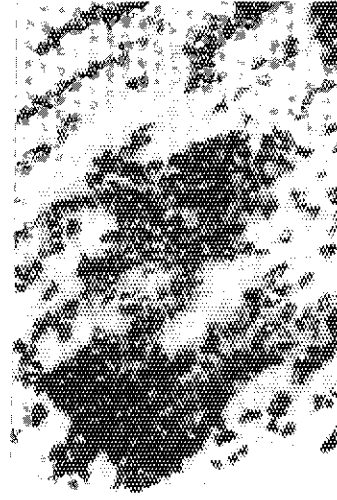
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

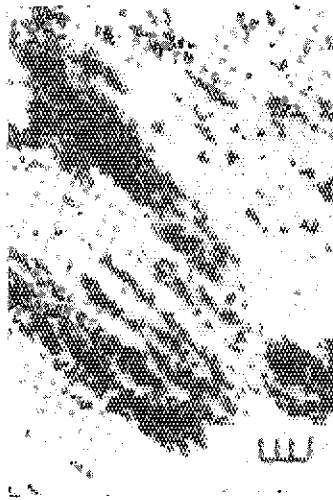
Fig. 3. 16b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 441cal/gr·UO₂ in Test No.111-21



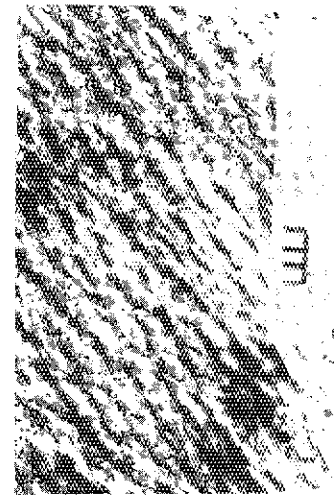
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



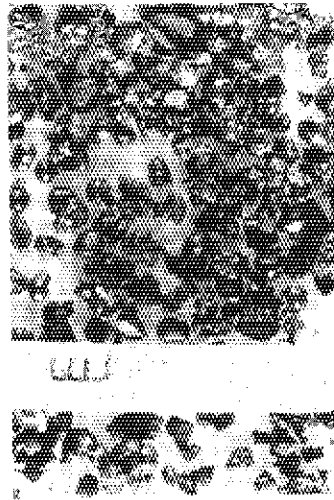
(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



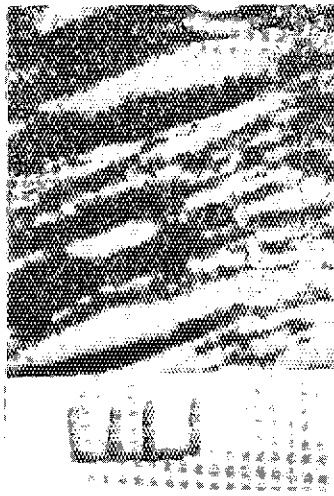
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	73°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

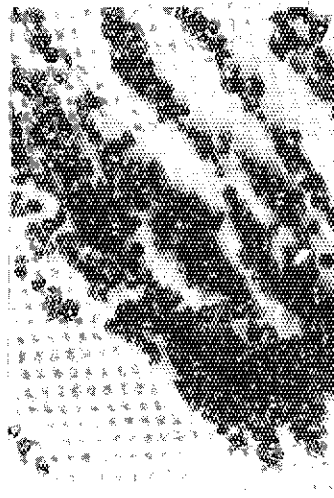
Fig. 3.17a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 483 cal/g·UO₂ in Test No. 111-18



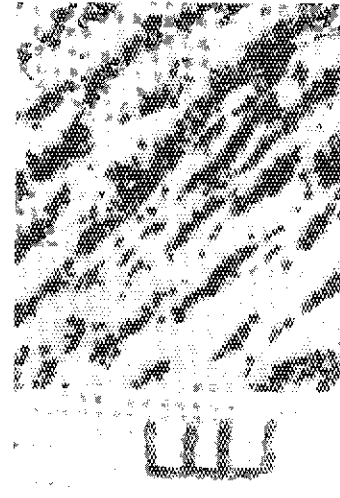
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



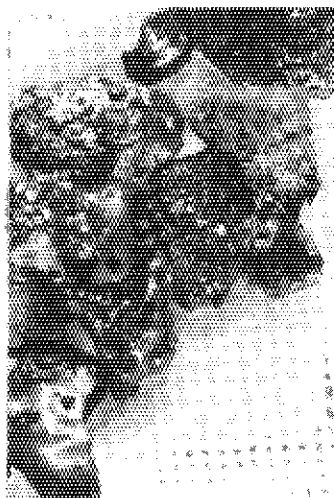
(5) 500 - 250 μm



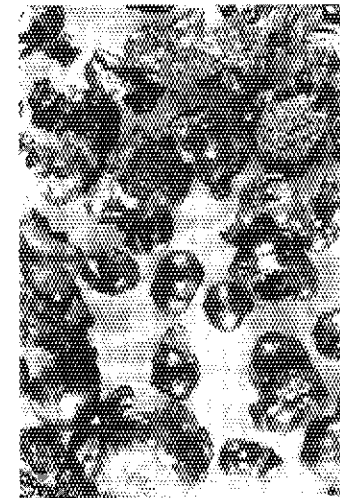
(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	73°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.17^b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 483 cal/g·UO₂ in Test No.111--18



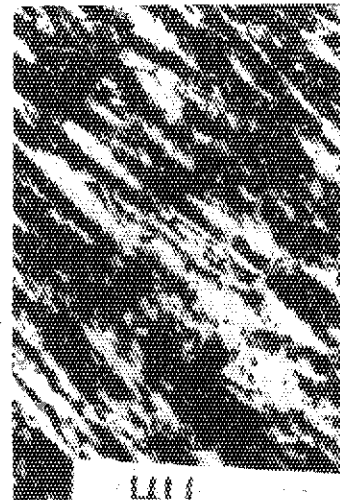
(7) 125 - 75 μm



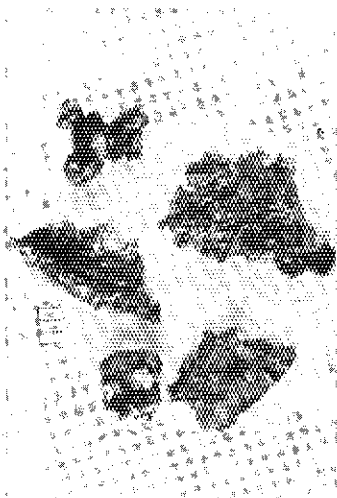
(4) 1000 - 500 μm



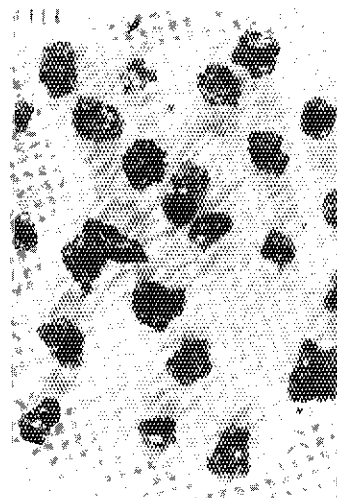
(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



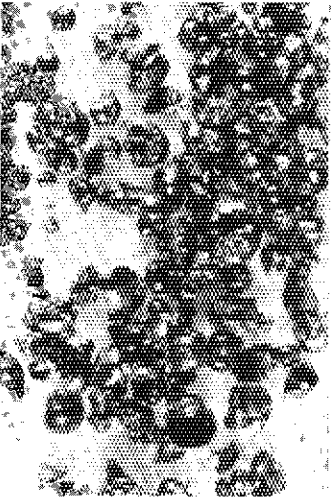
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	74°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.18a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 526 cal/g·UO₂ in Test No.111-19



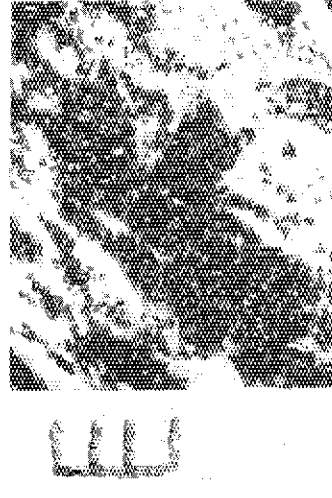
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



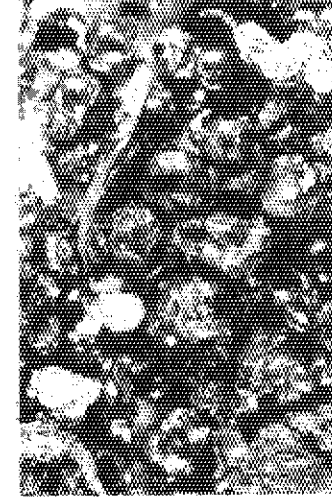
(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	74°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

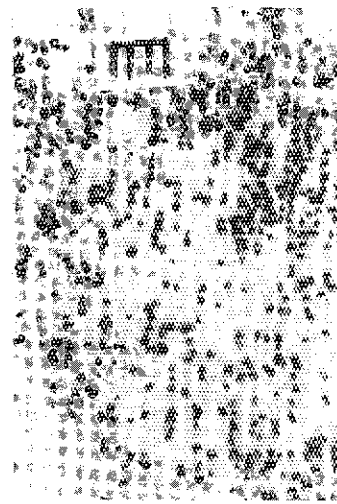
Fig. 3.18b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 526 cal/g·UO₂ in Test No.111-19



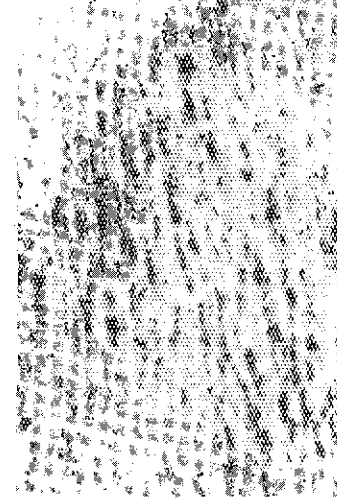
(7) 125 - 75 μm



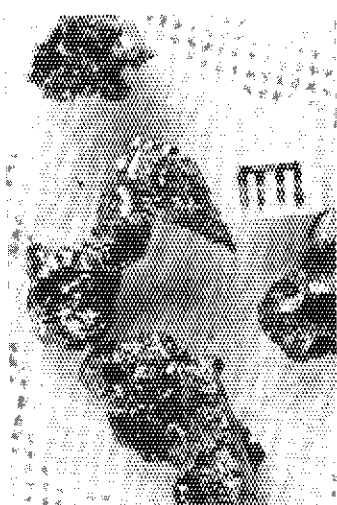
(4) 1000 - 500 μm



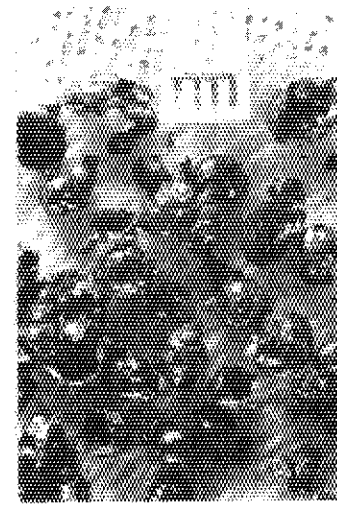
(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	79 °C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

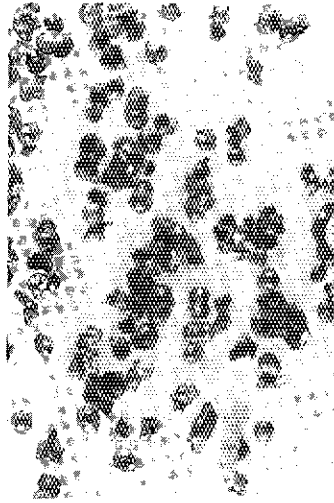
Fig. 3.19a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 527cal/g·UO₂ in Test No.111-31



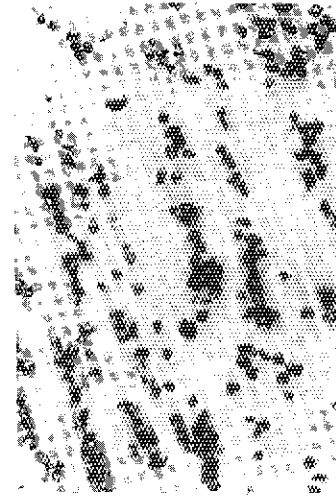
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



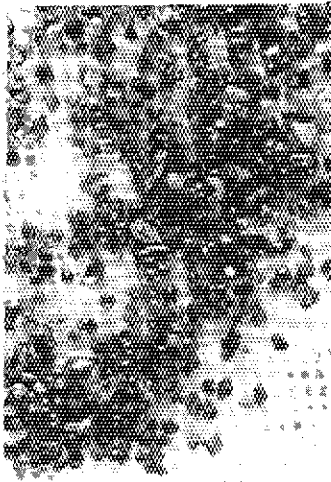
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	79 °C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.19b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 527 cal/g-UO₂ in Test No.111-31



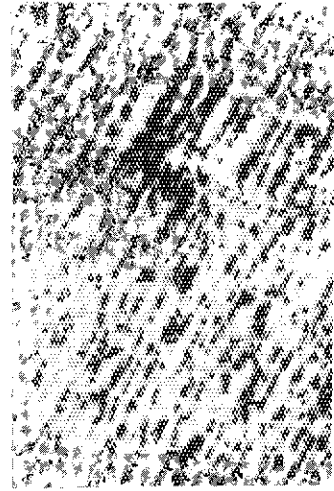
(7) 125 - 75 μm



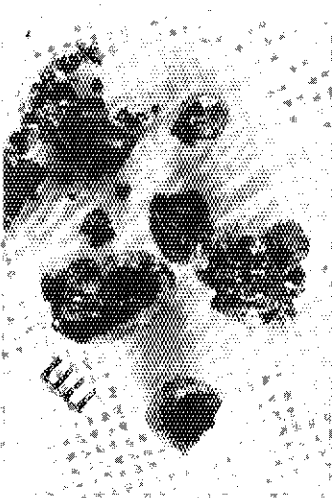
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



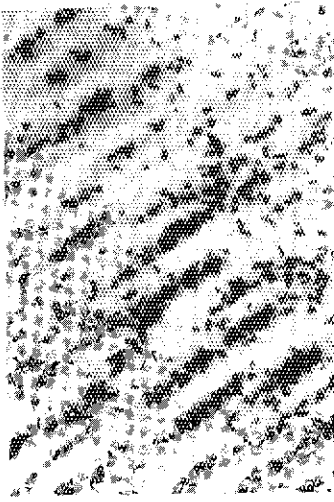
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.20a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 522cal/g·UO₂ in Test No.111-30



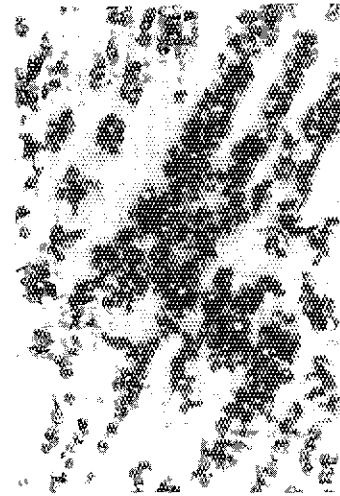
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



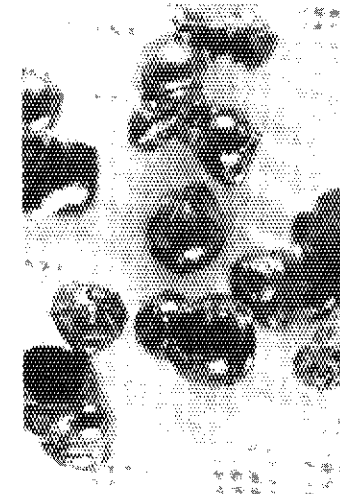
(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm 3000 μm



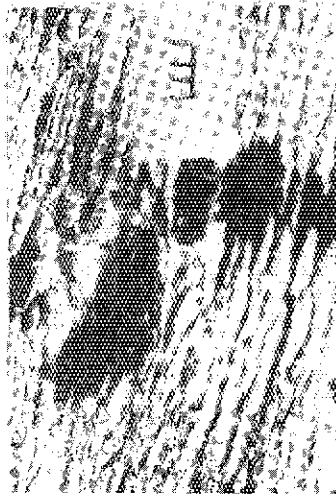
(2) 4000 - 2000 μm



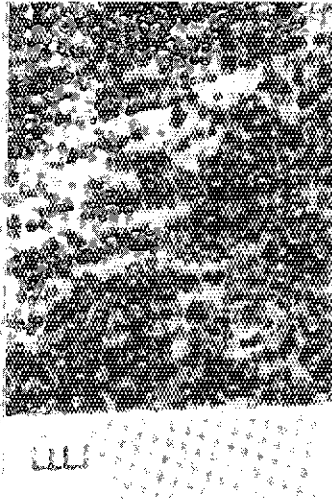
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

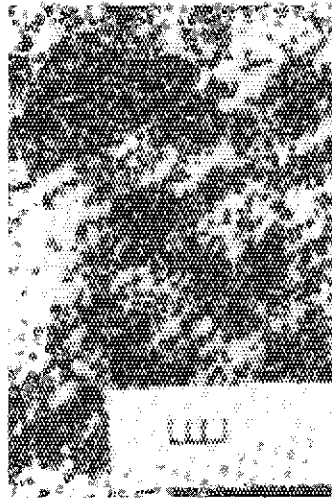
Fig. 3.20b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 522cal/g-UO₂ in Test No.111-30



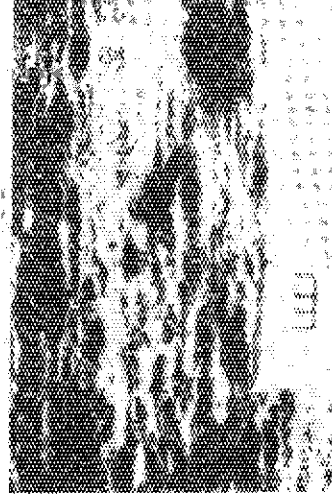
(7) 125 - 75 μm



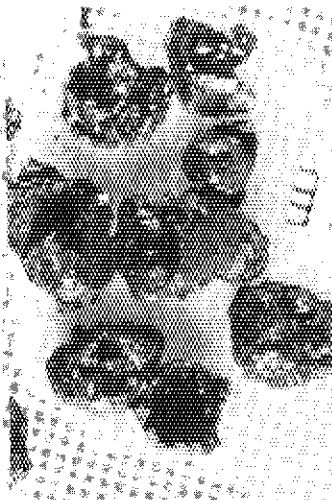
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	40°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	-----

Fig. 3.21a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 528 cal/g·UO₂ in Test No.111-26



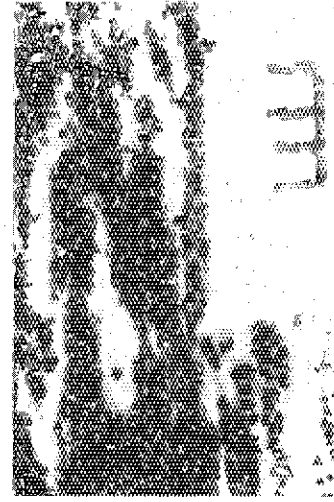
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



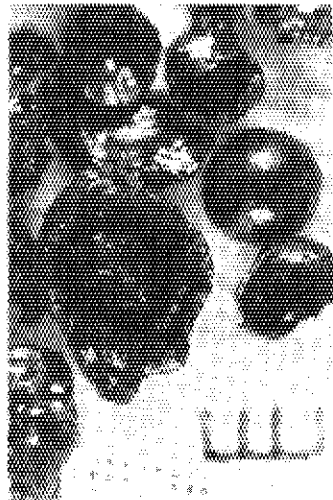
(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	40°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.21b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 528 cal/g-UO₂ in Test No.111-28



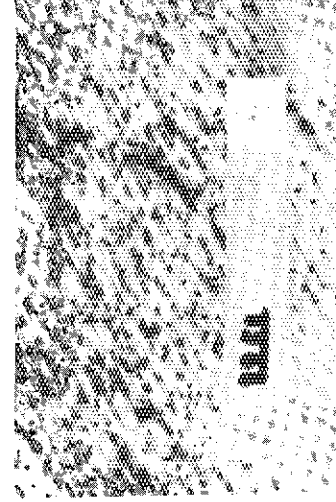
(7) 125 - 75 μm



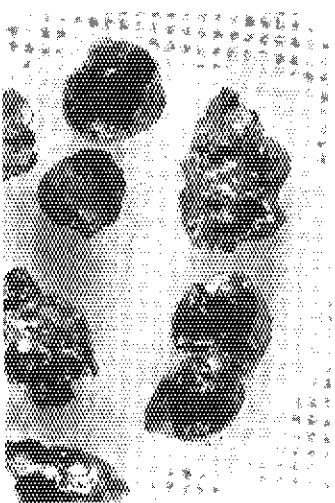
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



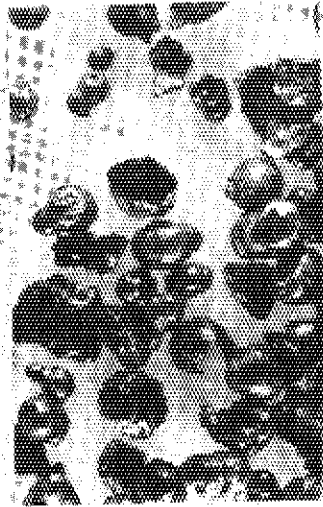
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	25°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

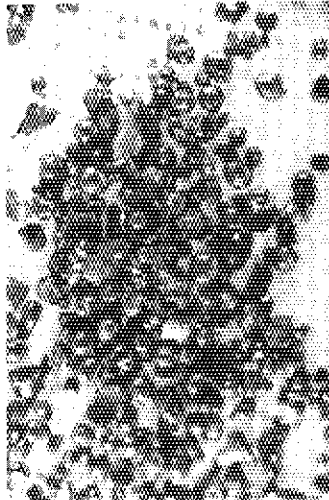
Fig. 3.22a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 529 cal/g·UO₂ in Test No.111-27



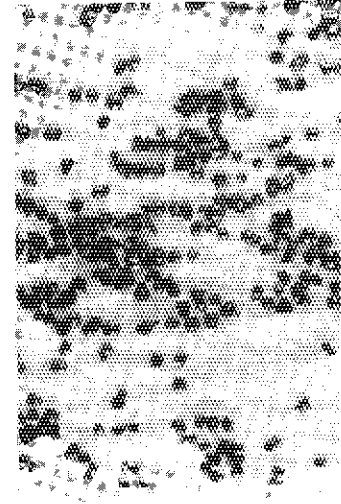
(7) 125 - 75 μm



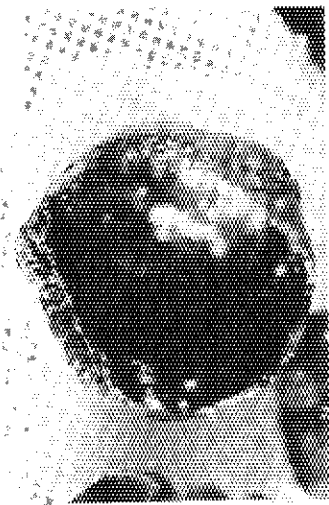
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



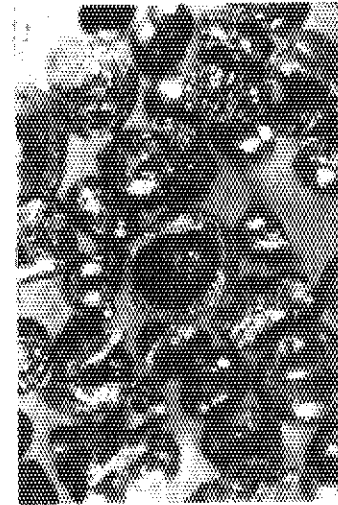
(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	25°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.22b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 529cal/g·UO₂ in Test No.111-27



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



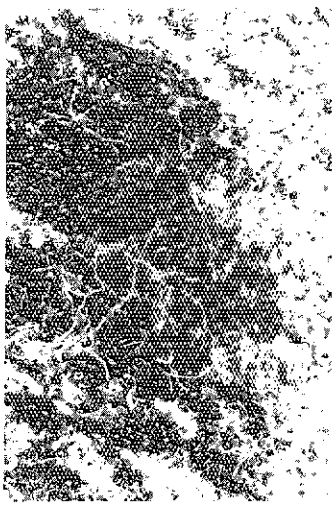
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	15°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

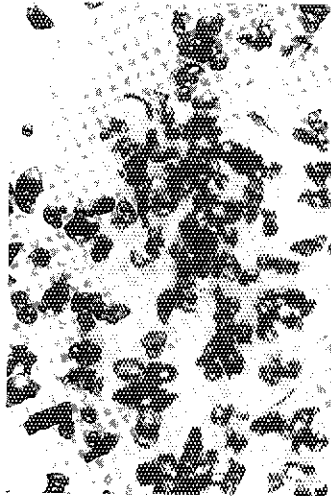
Fig. 3.23a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 518 cal/g·UO₂ in Test No.111-25



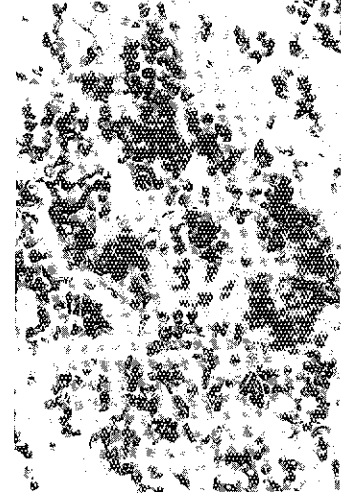
(7) 125 - 75 μm



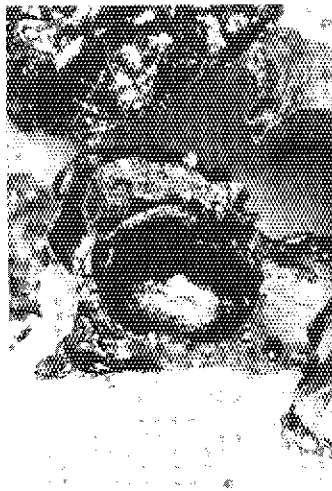
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm
3000 μm



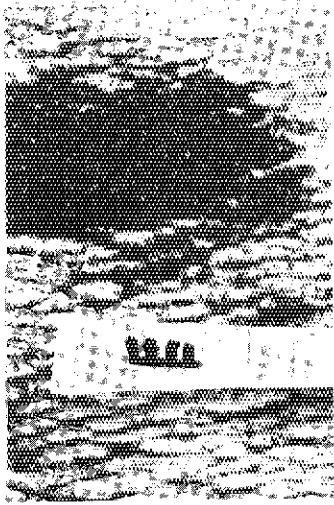
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	15°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.23b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 518 cal/g·UO₂ in Test No. 111-25



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



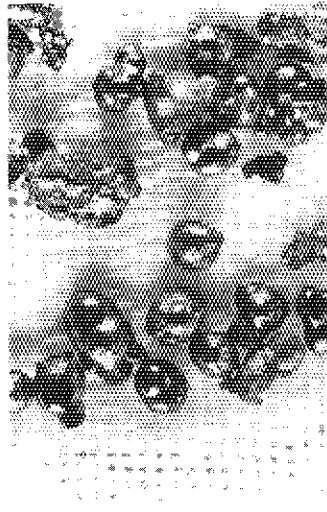
(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	10°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	_____

Fig. 3.24a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 527cal/g-UO₂ in Test No.111-28



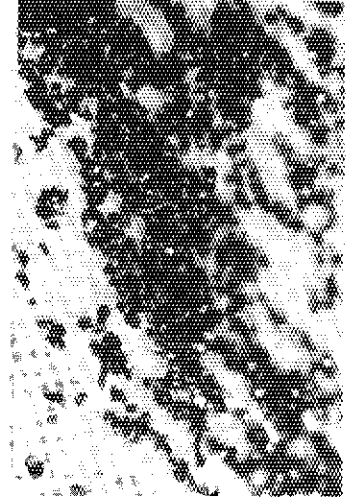
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



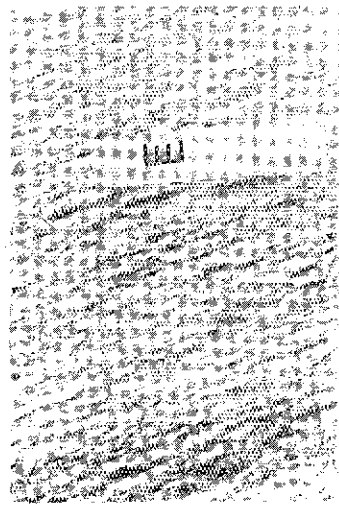
(2) 4000 - 2000 μm



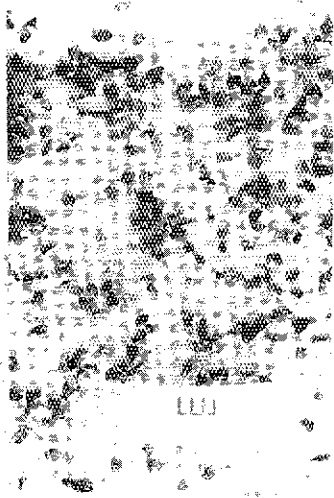
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	10°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.24b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 527cal/g-UO₂ in Test No.111-28



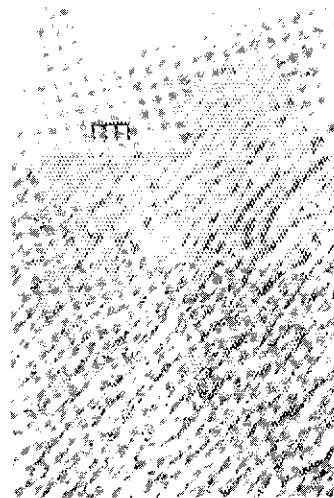
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	15°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.25a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 432 cal/g·UO₂ in Test No.111-39



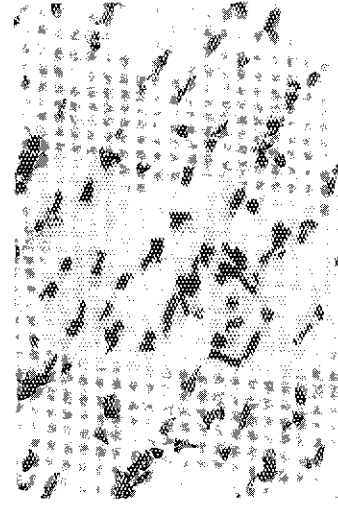
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	15°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	126 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.25b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 432 cal/g·UO₂ in Test No. 111-39

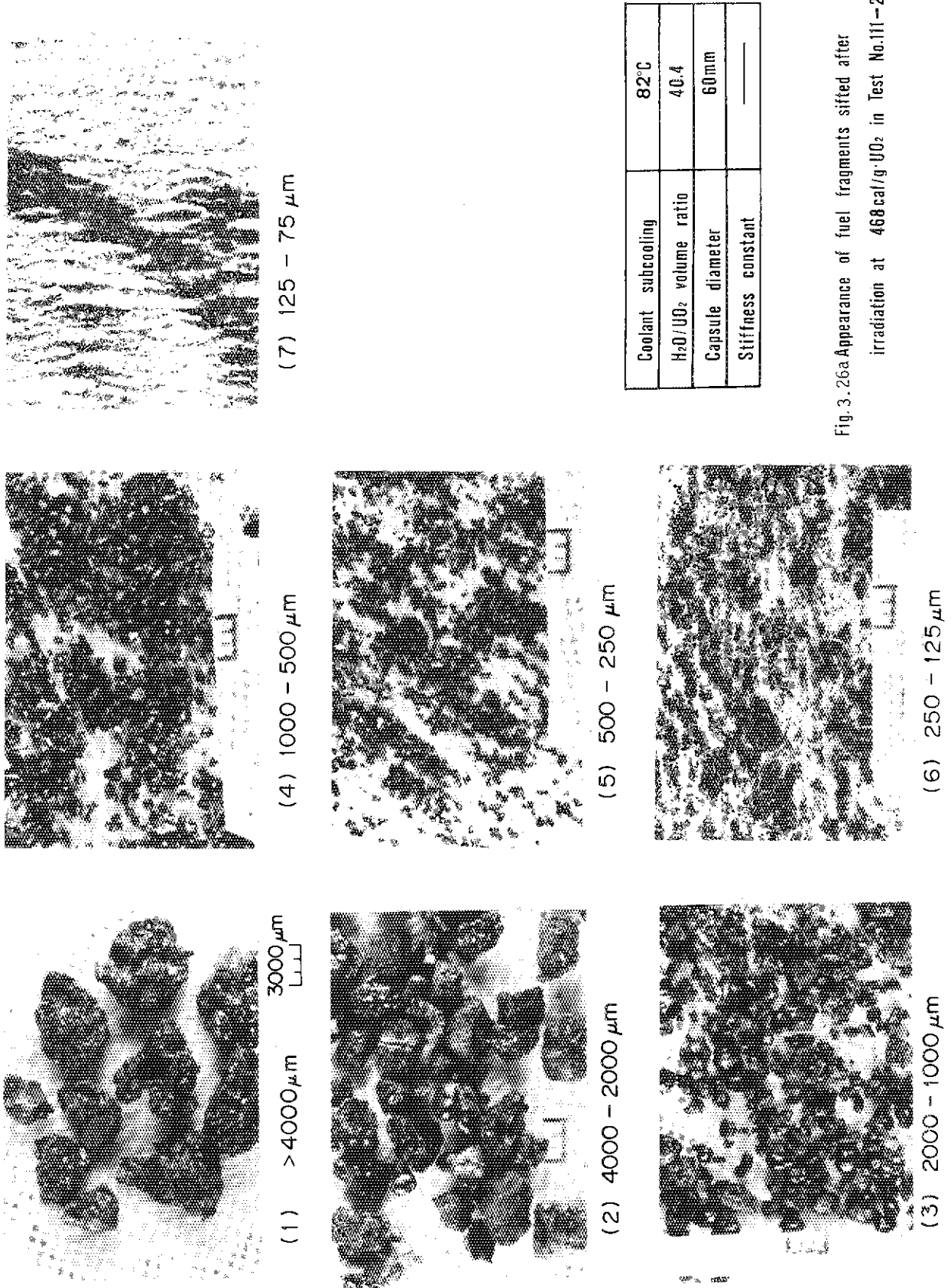
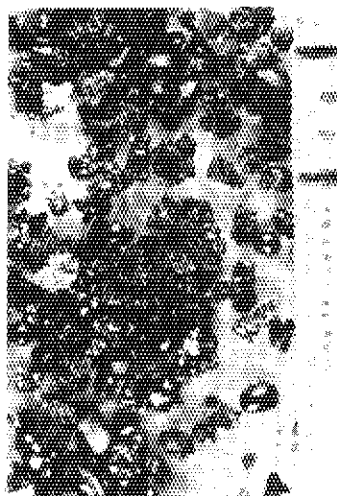


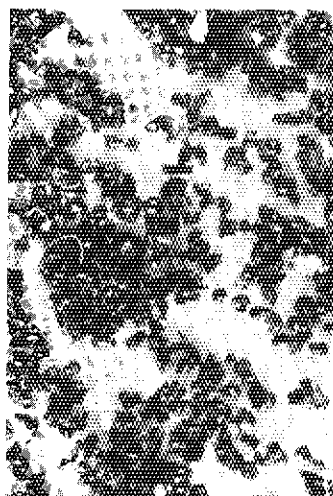
Fig. 3.26a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 468 cal/g-UO₂ in Test No.111-24



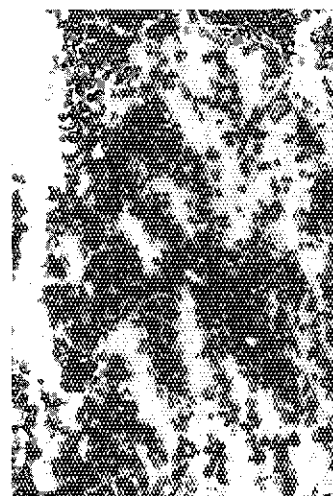
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	82°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	40.4
Capsule diameter	60mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.26b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 468 cal/g-UO₂ in Test No.111-24

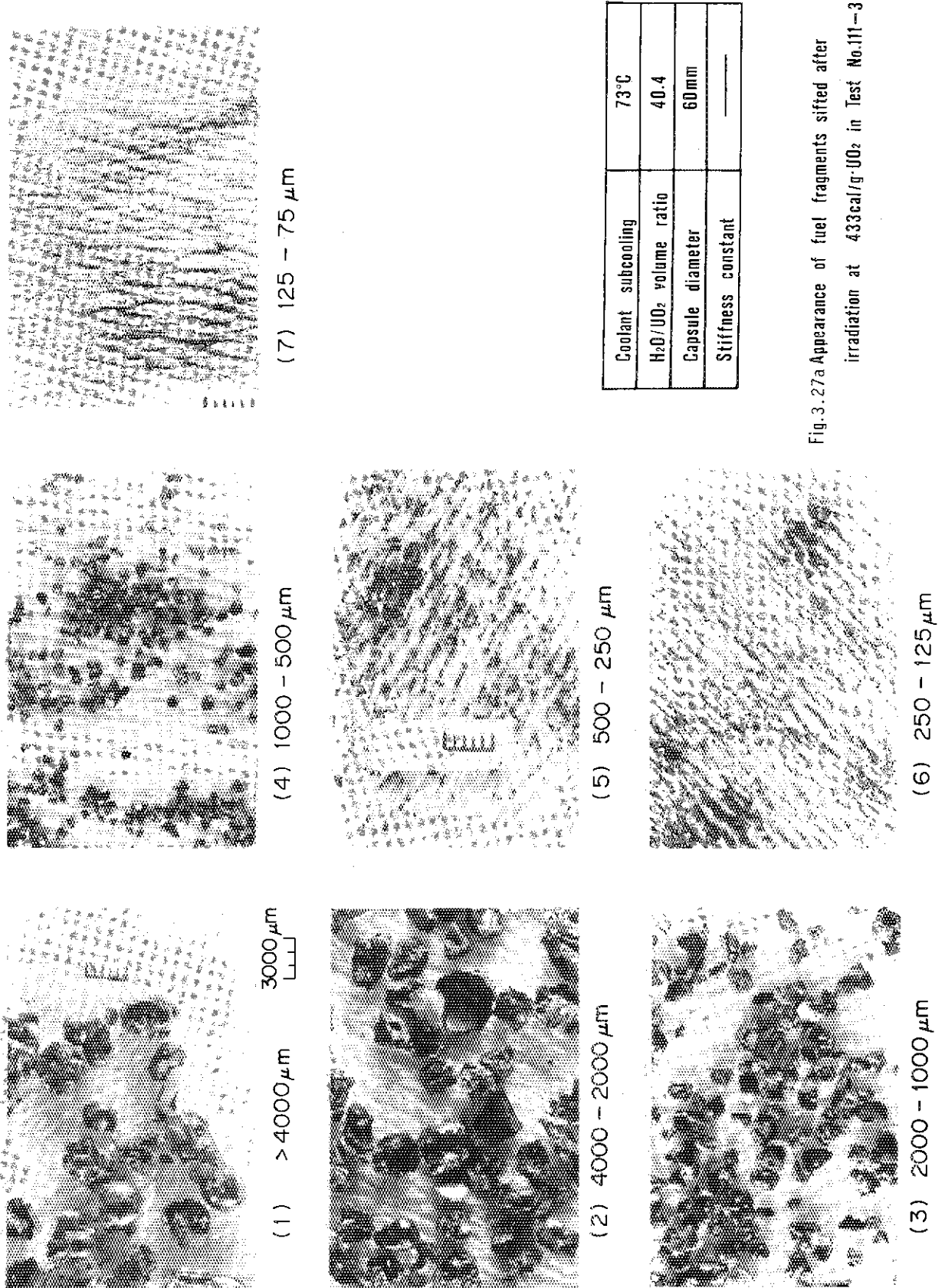
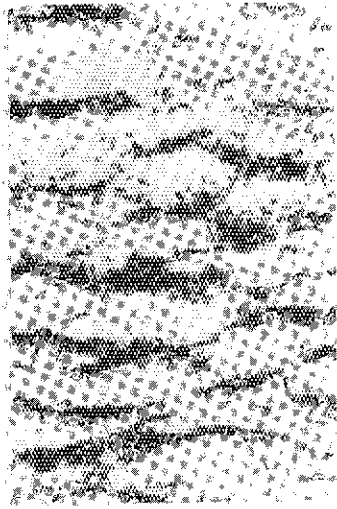


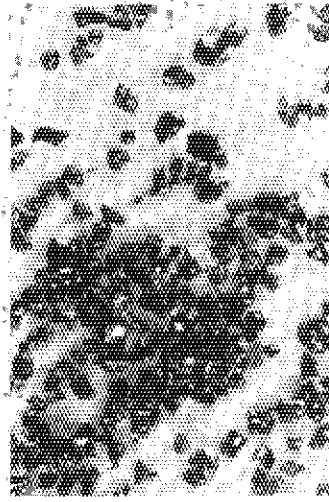
Fig. 3.27a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 433cal/g·UO₂ in Test No.111-33



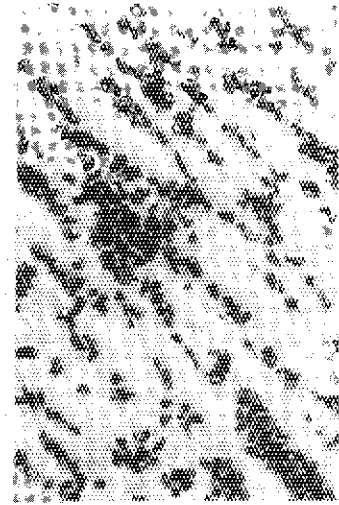
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



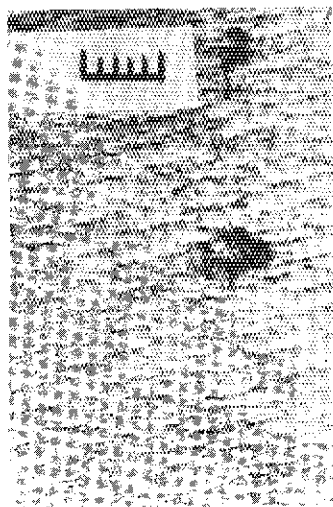
(2) 4000 - 2000 μm



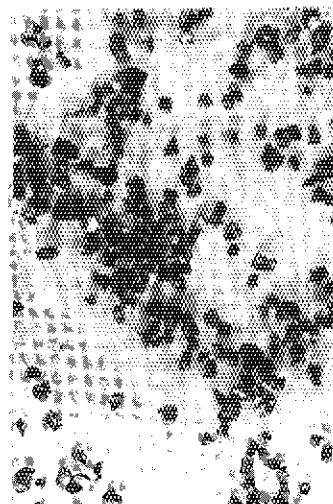
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	73°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	40.4
Capsule diameter	60mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.27b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 433cal/g-UO₂ in Test No.111-33



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm
3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	78°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	9.1
Capsule diameter	30mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.28a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 432 cal/g-UO₂ in Test No.111-37



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



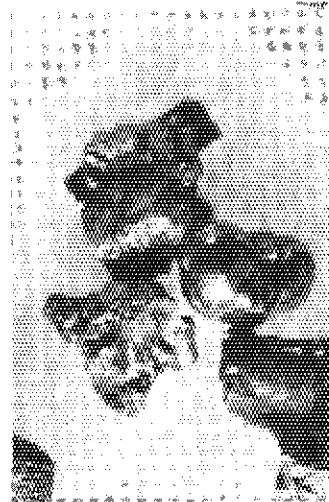
(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	78°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	9.1
Capsule diameter	30mm
Stiffness constant	—

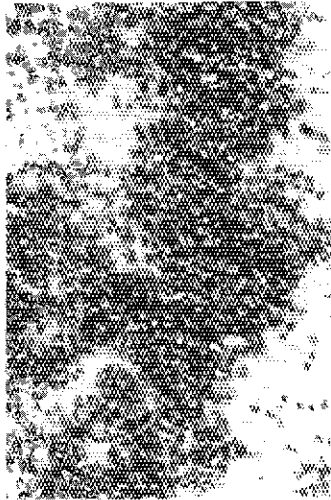
Fig. 3.28b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 432 cal/g·UO₂ in Test No.111—37



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm
3000 μm



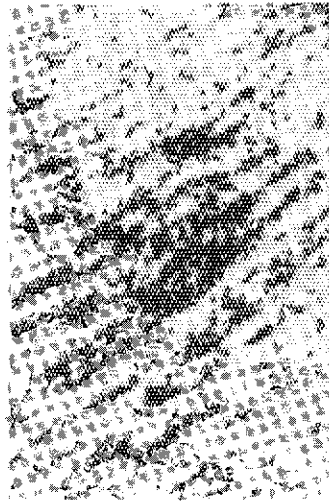
(2) 4000 - 2000 μm



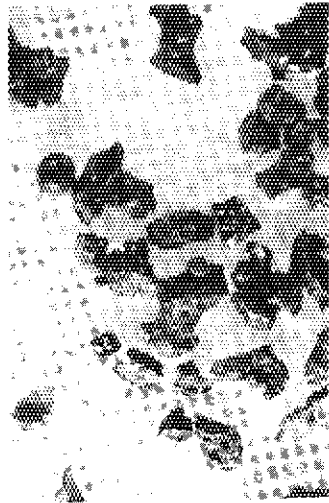
(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	74°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	9.1
Capsule diameter	30mm
Stiffness constant	—

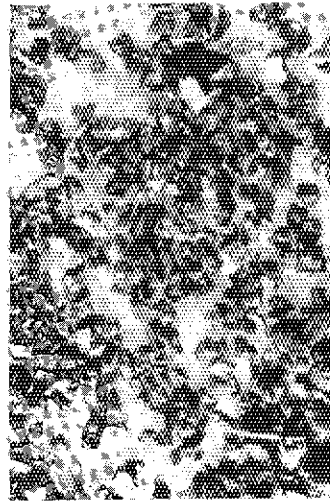
Fig. 3.29a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 436 cal/g-UO₂ in Test No.111-32



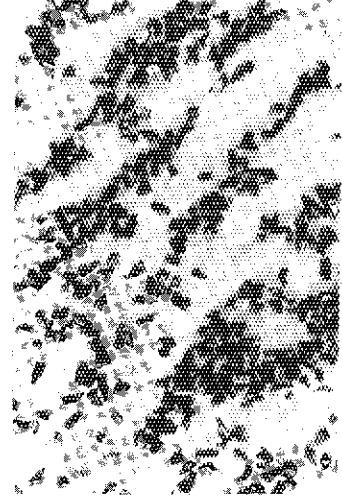
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



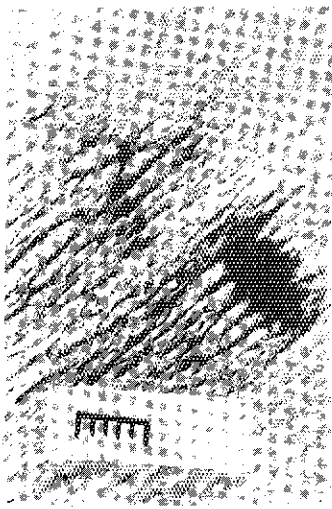
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	74°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	9.1
Capsule diameter	30mm
Stiffness constant	—

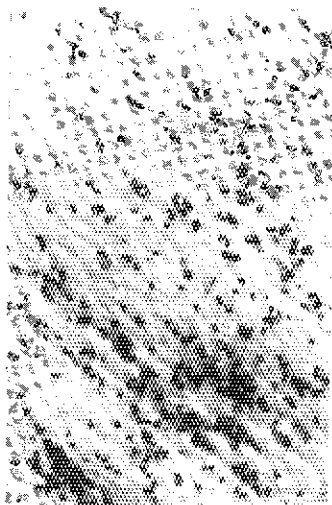
Fig.3.29b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 436 cal/g·UO₂ in Test No.111-32



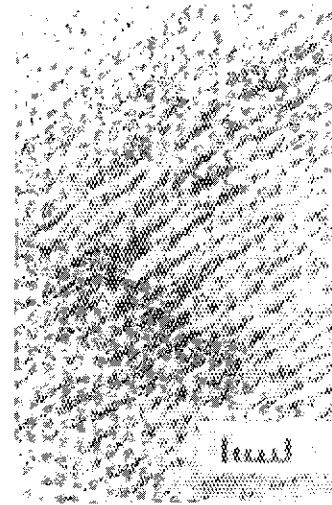
(7) 125 - 75 μm



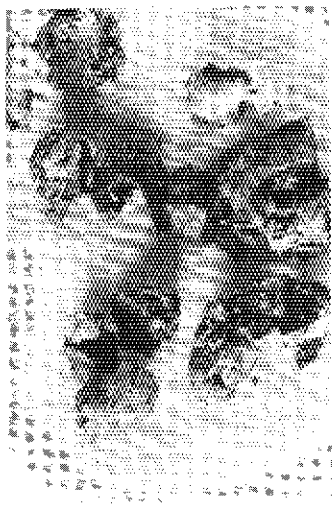
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



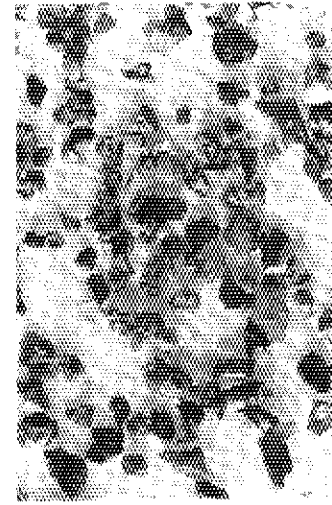
(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	77°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	1.6
Capsule diameter	16mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.30a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 428cal/g·UO₂ in Test No.111—35

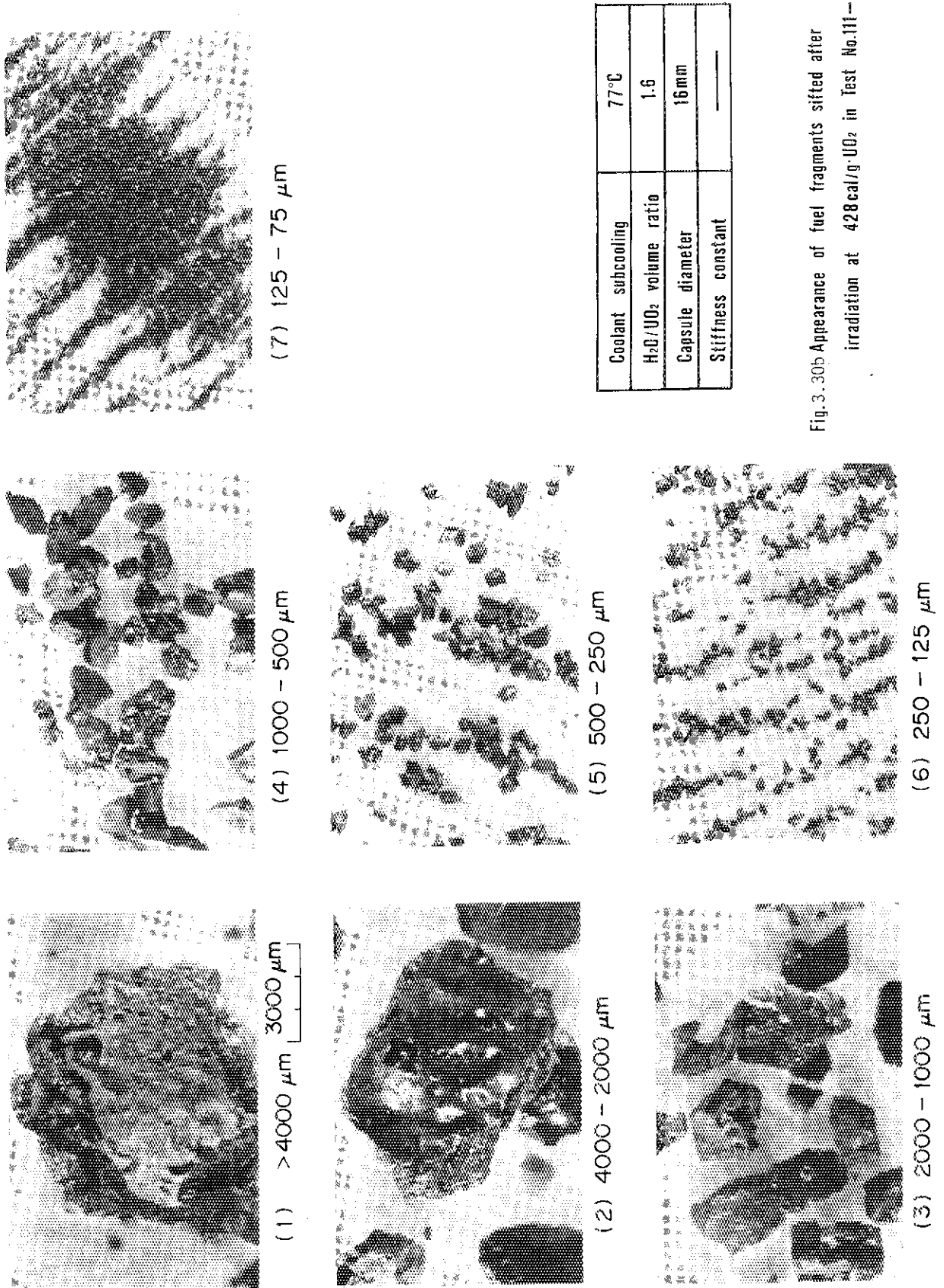


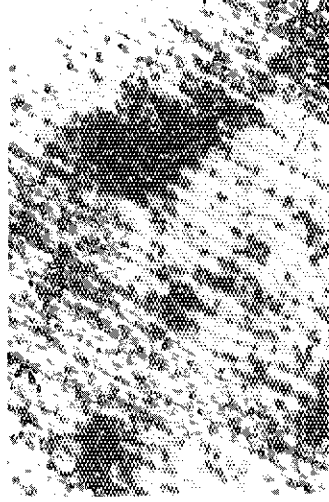
Fig. 3.30b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 428 cal/g·UO₂ in Test No.111-35



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	77°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	40.4 (4 fuel rods)
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	—

Fig. 3.31a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 414 cal/g·UO₂ in Test No.111-36

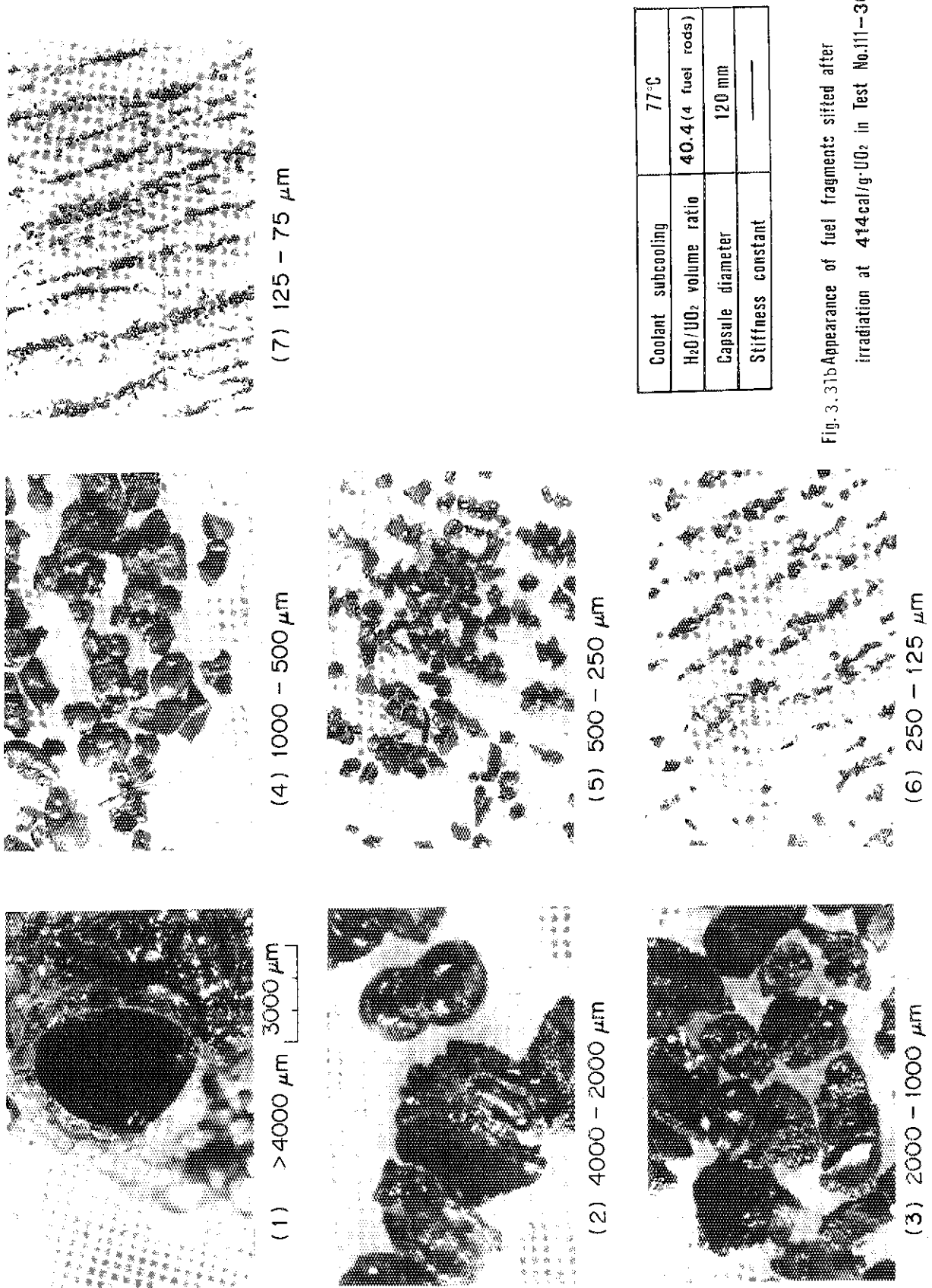
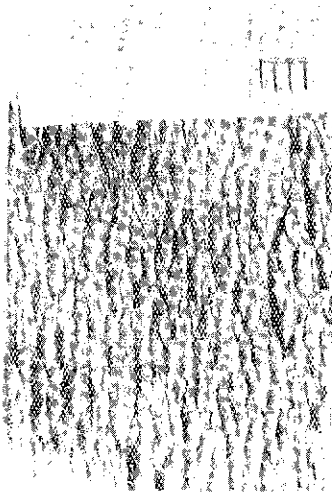
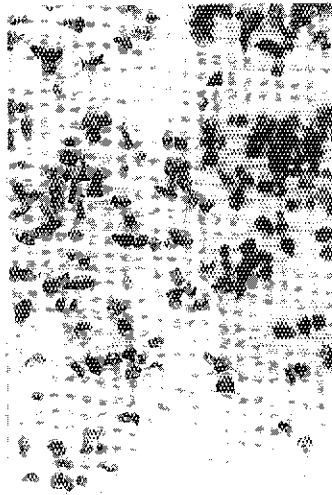


Fig. 3.31b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 414 cal/g·UO₂ in Test No.111-36



(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



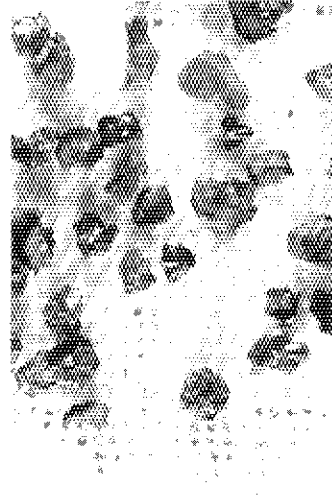
(5) 500 - 250 μm



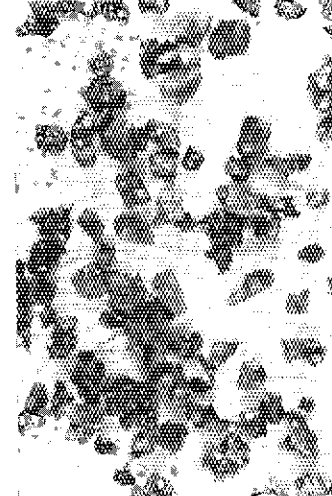
(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	81°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	6.5 (4 fuel rods)
Capsule diameter	120 mm (with 46mm ²)
Stiffness constant	_____

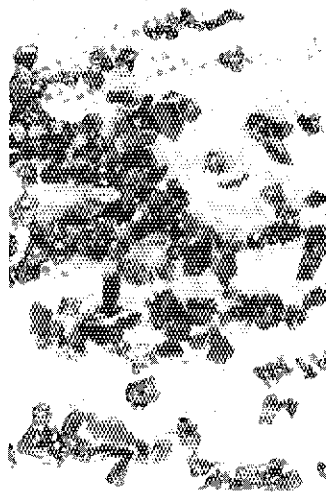
Fig.3.32a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 395cal/g-UO₂ in Test No.111-40



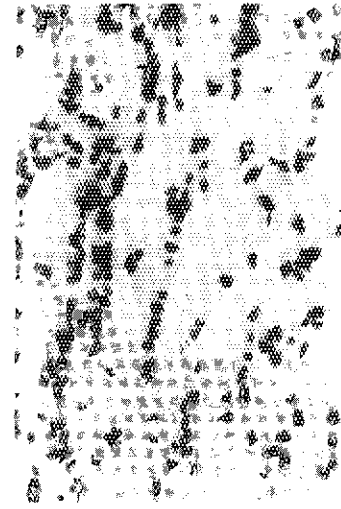
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	81°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	6.5 (4 fuel rods)
Capsule diameter	120 mm (with 46mm ^φ strud)
Stiffness constant	_____

Fig. 3.32b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 395 cal/g-UO₂ in Test No.111-40



(7) 125 - 75 μm



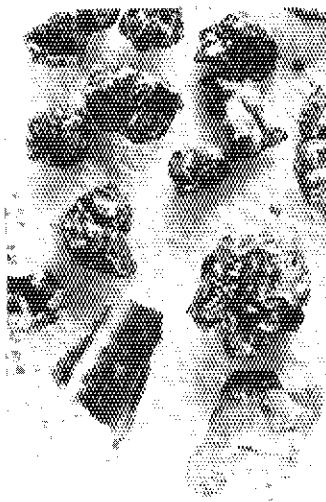
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) > 4000 μm



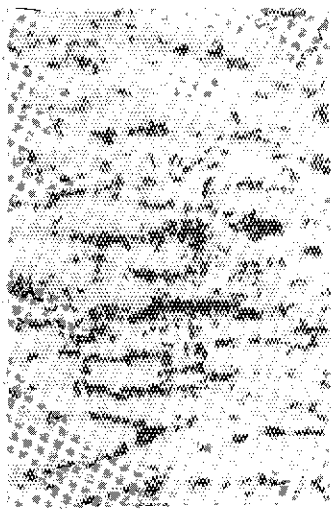
(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	75°C
HeO/UD ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	4.8×10^4 Kg/s ²

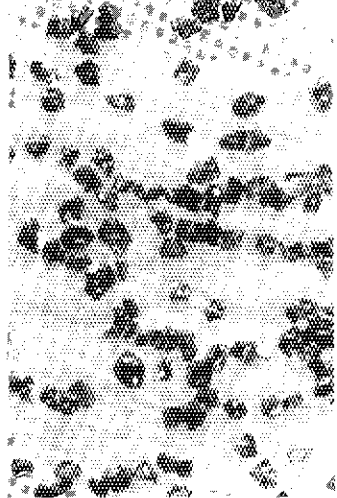
Fig. 3.33a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 430 cal/g·UD₂ in Test No.111—34



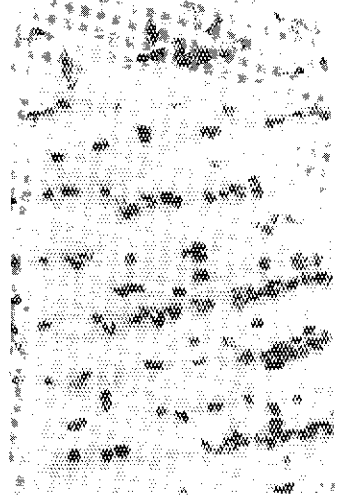
(7) 125 - 75 μm



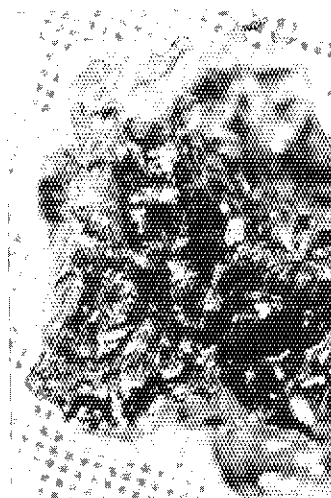
(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm
3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	75°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	4.8 × 10 ⁴ Kg/s ²

Fig. 3.33b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 430 cal/g-UO₂ in Test No.111-34

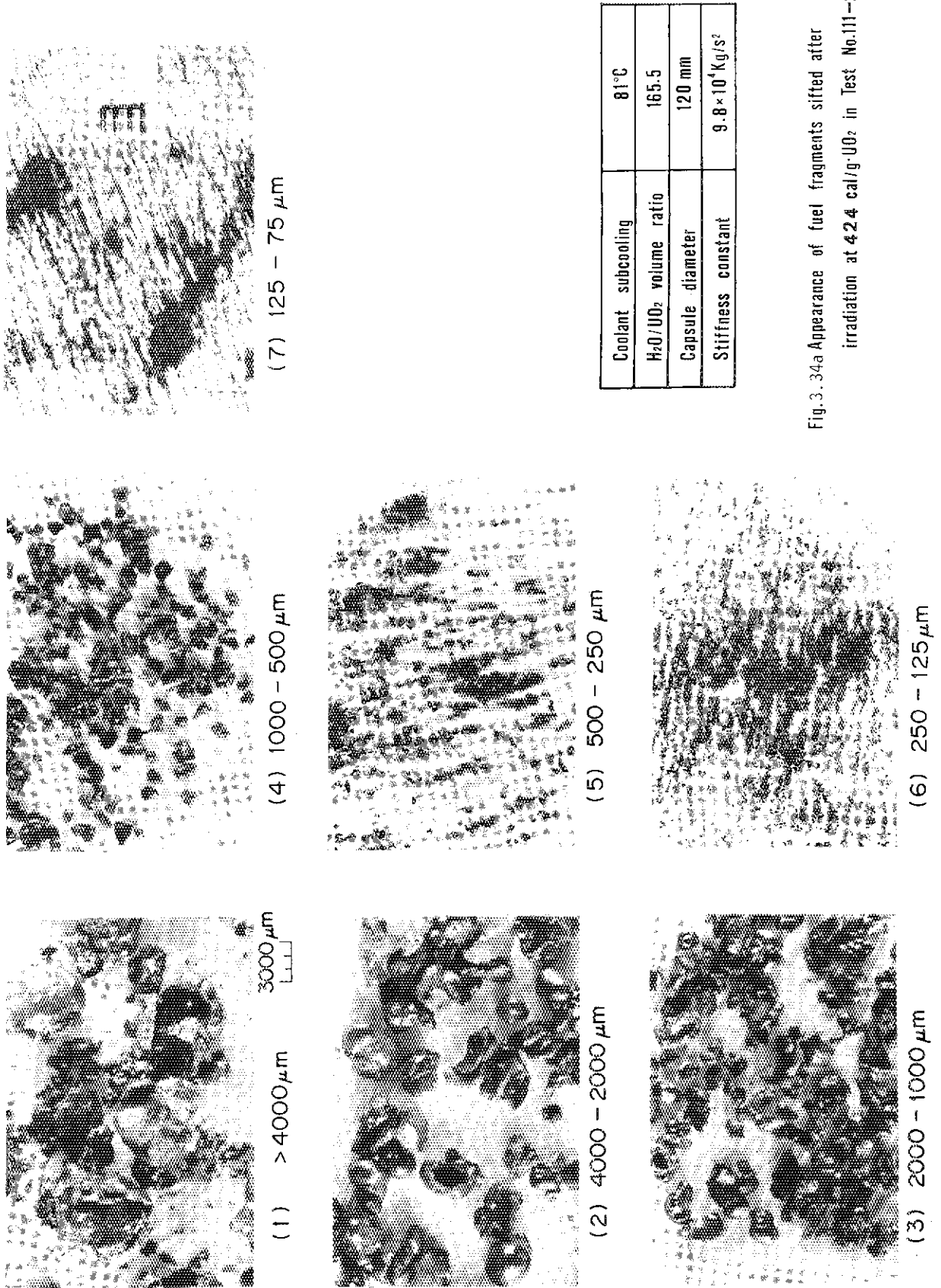


Fig.3.34a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 42.4 cal/g·UO₂ in Test No.111-29

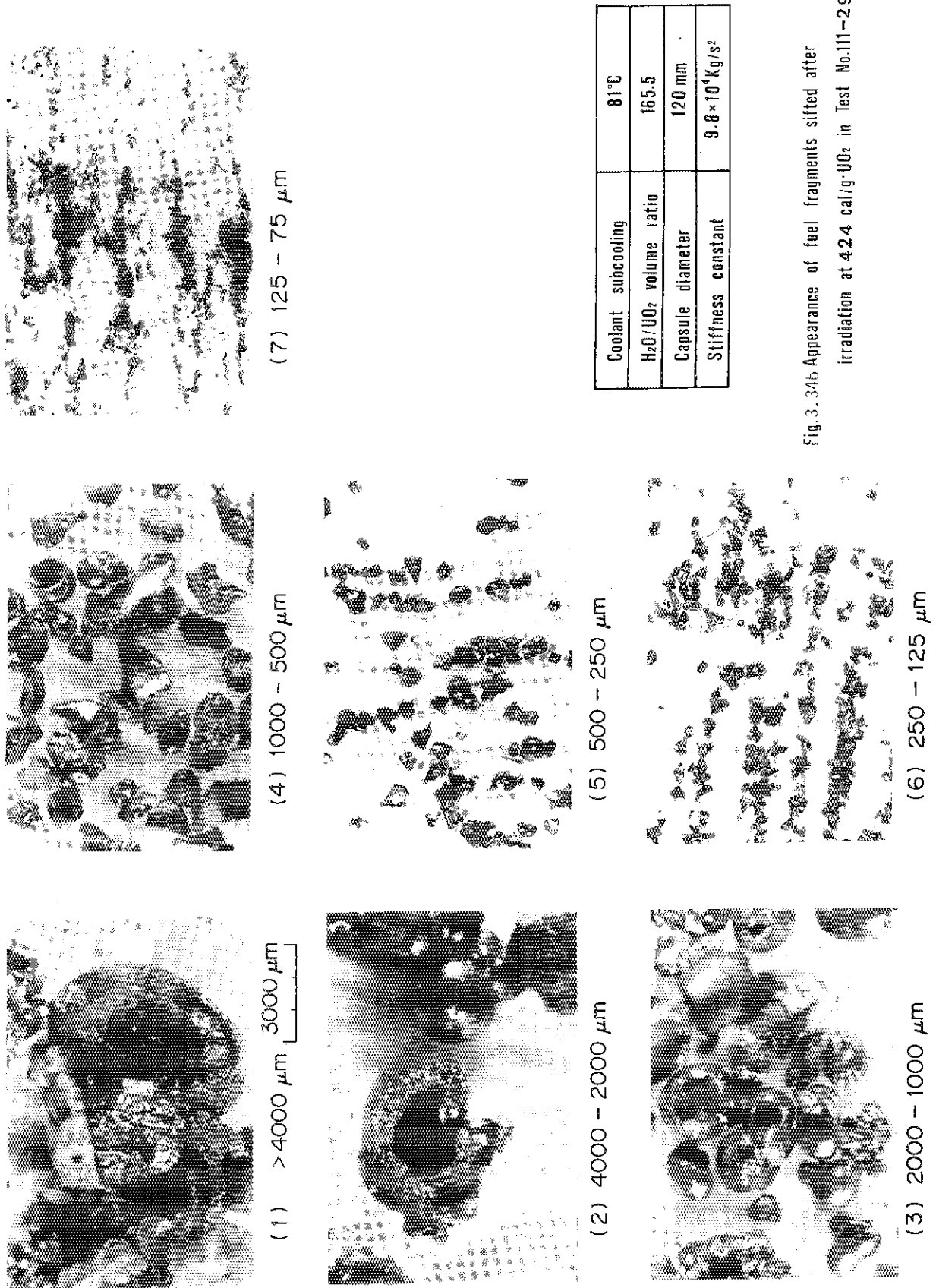


Fig. 3.34b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 4.24 cal/g·UO₂ in Test No.111-29

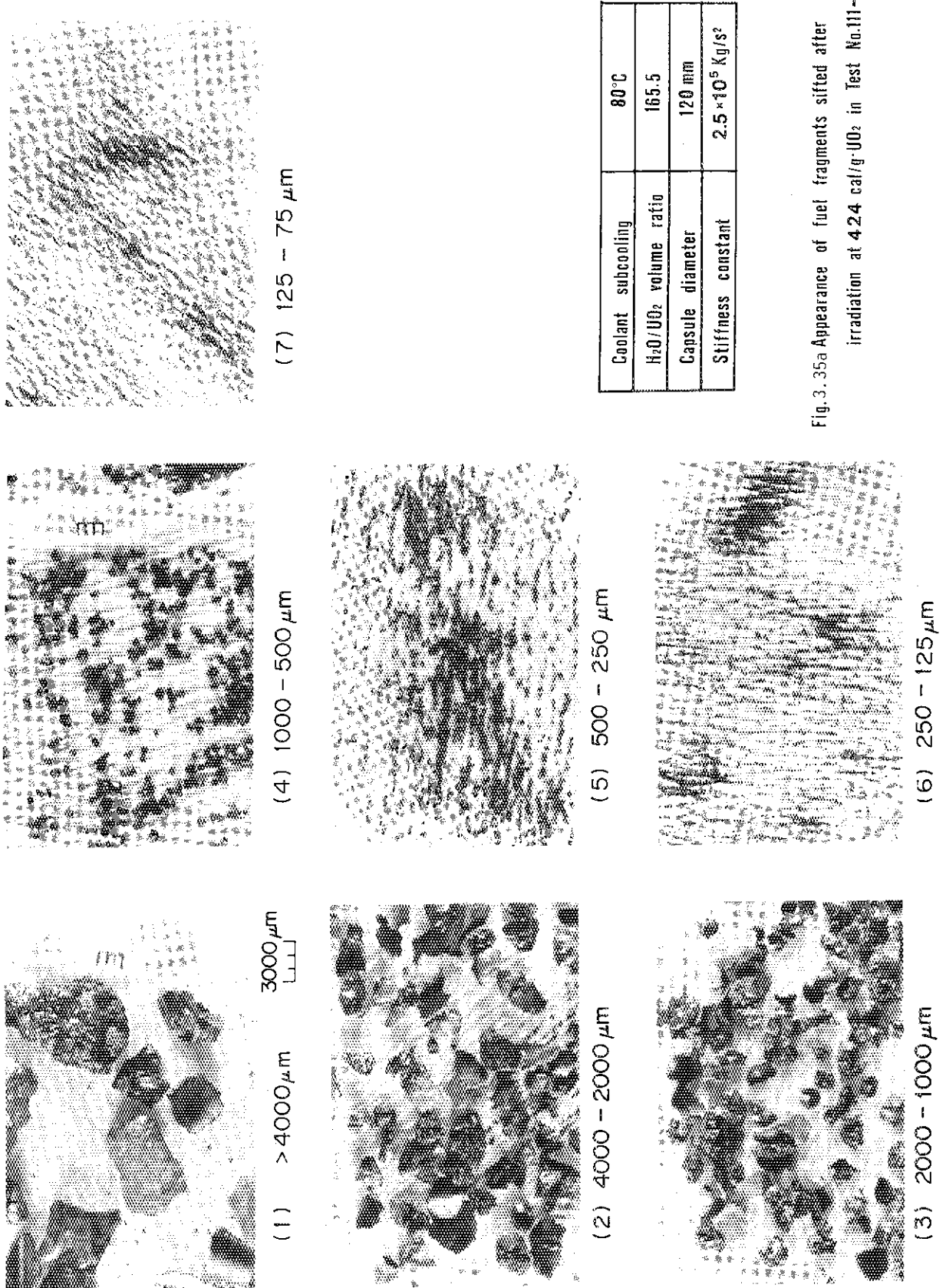


Fig. 3.35a Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 4.24 cal/g-UO₂ in Test No.111-38



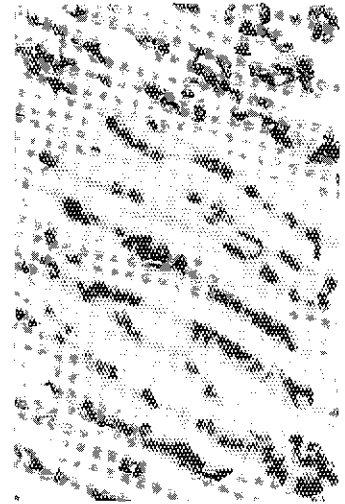
(7) 125 - 75 μm



(4) 1000 - 500 μm



(5) 500 - 250 μm



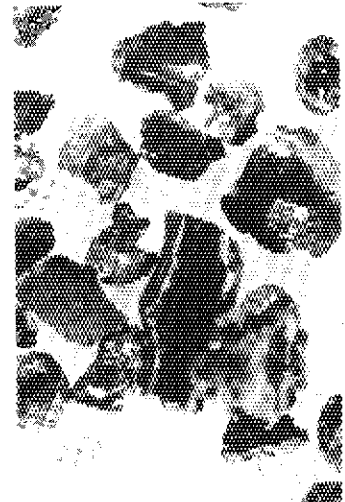
(6) 250 - 125 μm



(1) >4000 μm 3000 μm



(2) 4000 - 2000 μm



(3) 2000 - 1000 μm

Coolant subcooling	80°C
H ₂ O/UO ₂ volume ratio	165.5
Capsule diameter	120 mm
Stiffness constant	2.5 × 10 ⁵ Kg/s ²

Fig. 3.35b Appearance of fuel fragments sifted after irradiation at 4.24 cal/g-UO₂ in Test No.111-38

4. ま と め

反応度事故条件において、燃料が溶融する程度の高い発熱量（ $380 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 以上）で照射されると、燃料棒は上下端栓部を除き有効発熱部の UO_2 ペレットと被覆管が微細な破片となる。これら微粒子化した燃料の粒子径分布と形態の特徴をまとめて以下に示す。

(1) 粒子径分布

- (i) 粒子径は発熱量の高いほど小さくなり微粒子化が促進される。
- (ii) 冷却水のサブクール度が小さくなると微粒子化が抑制される。
- (iii) 冷却材-燃料比が小さくなると微粒子化が抑制される。

(2) 形 態

(i) 微粒子化燃料の形状は次の 4 つに大別できる。

- ① 球形状粒子
- ② 岩砕状粒子
- ③ 多孔質な粒子
- ④ 殻状の粒子

(ii) 球形状粒子は中空で、その空隙率は $60 \sim 80 \%$ であり、多くは表面に気孔をもつ。球形状粒子の占める割合は発熱量の増加ならびに冷却材-燃料比の増加と共に増大する。

(iii) 岩砕状粒子は、角礫に類似した形状で、一般に表面に縦横のクラックが存在する。岩砕状粒子の占める割合は発熱量の減少と共に増大する。

(iv) 多孔質な粒子は、表面に多数の気孔が存在するコークス状の粒子である。この粒子は $\text{H}_2\text{O}-\text{UO}_2$ 比が 40.4 の実験で顕著にみられる。

(v) 殻状粒子は湾曲し表面に光沢がない瓦礫状の粒子である。この粒子は低い発熱量の実験で顕著にみられる。

本報は、微粒子化した燃料の粒度分布と外観について測定ならびに観察したものであるが、本報に述べたような詳細な結果は、これまで米国で行なわれた SPERT-CDC 実験でも報告されていない。本報に記したように、今回実施した各種パラメータ実験およびその照射後試験によって、反応度事故条件下における燃料の微粒子化の形態が明らかにされ、今後の微粒子化機構解明のための基礎データが得られた。

謝 辞

本研究遂行にあたり御協力をいただいた反応度安全研究室室員ならびに NSRR 管理室の皆様
に感謝いたします。

参考文献

- (1) U. S. AEC; IDO - 19302, (1962).
- (2) 反応度安全研究室・NSRR 管理室 ; JAERI-M 7977, (1978).
- (3) 床井博見, 他 ; 日本原子力学会昭 56 年年会 A16
- (4) 床井博見, 他 ; 日本原子力学会昭 57 年年会 A34
- (5) J. A. Mc Clure; IN - 1428 (1970)

謝 辞

本研究遂行にあたり御協力をいただいた反応度安全研究室室員ならびに NSRR 管理室の皆様
に感謝いたします。

参考文献

- (1) U. S. AEC; IDO - 19302, (1962).
- (2) 反応度安全研究室・NSRR 管理室 ; JAERI-M 7977, (1978).
- (3) 床井博見, 他 ; 日本原子力学会昭 56 年年会 A16
- (4) 床井博見, 他 ; 日本原子力学会昭 57 年年会 A34
- (5) J. A. Mc Clure; IN - 1428 (1970)