

JAERI - M
94-036

84F-12A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料
キャプセルの照射及び照射後試験

1994年3月

岩井 孝・荒井 康夫・前多 厚・笹山 龍雄
関田 憲昭・野村 勇・鈴木 康文

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、お申しこください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

84F-12A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料キャプセルの照射及び照射後試験

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

岩井 孝 ・ 荒井 康夫 ・ 前多 厚 ・ 笹山 龍雄

関田 憲昭⁺ ・ 野村 勇⁺ ・ 鈴木 康文

(1994年2月1日受理)

炭素量の異なるウラン・プルトニウム混合炭化物燃料 (U, Pu) C_{1.0} 及び (U, Pu) C_{1.1} ペレットをそれぞれ充填した2本の燃料ピン (外径9.4mm, 長さ250mm) を, 1体のキャプセル (84F-12A) に組み込み, JMTRにおいてそれぞれ線出力60及び49kW/mの条件で4.5及び3.7% FIMAまで照射した。約5ヶ月間冷却したのち, 照射キャプセルを東海研の燃料試験施設へ搬入して, 非破壊及び破壊試験を実施した。

照射後試験において, ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料について最大 4.5% FIMAまでの照射健全性が実証された。個々の照射後試験により得られた主な結果は次のとおりである。燃料ピンのガンマ線スキャンニングでは, プレナム部へのセシウムの移行が確認された。ペレットの開気孔率の高い (U, Pu) C_{1.1} 燃料のFPガス放出率は, (U, Pu) C_{1.0} 燃料の約2倍であった。ペレット断面では, 中心部において製造時の小さな気孔が減少しており, (U, Pu) C_{1.0} 燃料ペレットでは結晶粒の成長が観察された。被覆管内面の浸炭現象はわずかであり, 燃料ピンの健全性に影響するものではなかった。

Post Irradiation Examination of 84F-12A Capsule
Containing Uranium-plutonium Mixed Carbide Fuels

Takashi IWAI, Yasuo ARAI, Atsushi MAEDA, Tatsuo SASAYAMA
Noriaki SEKITA⁺, Isamu NOMURA⁺ and Yasufumi SUZUKI

Department of Chemistry and Fuel Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1994)

Two fuel pins containing uranium-plutonium mixed carbide pellets having different carbon content, (U,Pu)C_{1.0} and (U,Pu)C_{1.1}, were encapsulated in 84F-12A and irradiated in JMTR up to 4.5 and 3.7%FIMA at a peak linear power of 60 and 49kW/m respectively. The capsule cooled for ~5 months was transported to Reactor Fuel Examination Facility and subjected to non-destructive and destructive post irradiation examinations.

It was proved from the post irradiation examination that the mixed carbide fuel performance irradiated up to 4.5%FIMA was satisfied. The gamma ray scanning of the fuel pins indicated the transfer of cesium to the plenum region. (U,Pu)C_{1.1} fuel pellets showed two times larger fission gas release ratio than (U,Pu)C_{1.0} fuel pellets because the former had relatively higher open porosity. At the central part of the fuel pellets, the number of the small pores decreased and the grain growth was stimulated in (U,Pu)C_{1.0} fuel pellets. Slight carburization observed near the inner surface of the cladding tube did not affect the fuel pin performance itself.

Keywords: Uranium-plutonium Mixed Carbide, JMTR, PIE, Gamma Ray Scanning, Cesium, Fission Gas Release, Porosity, Carburization, Cladding

⁺ Department of Hot Laboratories

目 次

1. まえがき	1
2. 燃料ピン及びキャプセルの設計・製作	2
2.1 燃料ピンの設計・製作	2
2.2 照射キャプセルの設計・製作	2
3. JMTRによる照射	8
4. 照射後試験	11
4.1 照射後試験の概要	11
4.2 照射後試験の方法, 結果並びに考察	11
5. まとめ	79
参考文献	81

Contents

I. Introduction	1
2. Design and Fabrication of Fuel Pins and Capsule	2
2.1 Design and Fabrication of Fuel Pins	2
2.2 Design and Fabrication of Capsule	2
3. Irradiation in JMTR	8
4. Post Irradiation Examination	11
4.1 Scheme of Post Irradiation Examination	11
4.2 Methods, Results and Discussion	11
5. Summary	79
References	81

1. ま え が き

高速炉用新型燃料の健全性評価を目的として、ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の照射試験を昭和58年から継続して実施している。JRR-2 及び JMTR を利用した計3体のキャプセル、計6本の燃料ピンの照射後試験について、既に報告した。^{1, 2, 3, 4)}

本報告書は、昭和61年12月から平成2年10月まで、JMTRで17サイクル、60及び49kW/mの線出力でそれぞれ4.5 及び3.7%FIMAまで照射した混合炭化物燃料ピンの照射後試験をまとめたものである。ただし、X線微小分析(XMA)の結果については、別に報告する予定である。

2. 燃料ピン及びキャプセルの設計・製作

2.1 燃料ピンの設計・製作

照射した2本の燃料ピンの形状は同一であり、その構成及び寸法等はFig. 2.1 に示すとおりである。熱伝導特性に優れた炭化物燃料の特徴を生かして、被覆管の外径は9.4mmの太径であり、燃料ピンの全長は250mmである。化学量論組成(U, Pu) $C_{1.0}$ 及び三二炭化物を第2相として含む超化学量論組成(U, Pu) $C_{1.1}$ の混合炭化物燃料ペレットを充填した燃料ピンを、それぞれ84F-12-1及び84F-12-2と称する。2本の燃料ピンの特性をTable 2.1に示す。燃料ペレットのC_{0.9}/(U+Pu)原子比はそれぞれ1.02及び1.10であり、Pu/(U+Pu)比はほぼ設計値0.2に等しい。燃料と被覆材との機械的相互作用(FCMI: Fuel Cladding Mechanical Interaction)の緩和を目的として、燃料ペレットの密度は82~83%T.D. (理論密度)と低くした。内径8.38mmの被覆管に直径8.23mmの燃料ペレットが充填されており、スミア密度は79~80%T.D.である。また、燃料ペレットの端面のエッジをおとしたチャンファ型を採用している。混合炭化物燃料のスタック長は2本の燃料ピンともに100mmであり、その上下に約8mmの高さのウラン炭化物(UC)燃料ペレットが断熱用として1個ずつ配置されている。スプリングはインコネル合金製である。

完成した燃料ピンは、ヘリウムリーク試験及びX線透過試験により、溶接部に欠陥のないことを確認したのちキャプセル(84F-12A)に組み込まれた。燃料ピンの構成材及び完成した燃料ピンの外観写真をPhoto. 2.1に、X線透過写真をPhoto. 2.2に示す。

なお当燃料ピンの特性については、既にその製作に関する報告書があるので参照されたい⁵⁾。

2.2 照射キャプセルの設計・製作

照射キャプセルの断面図をFig. 2.2に示す。JMTR第1回照射である84F-10A⁴⁾キャプセルと同一であり、燃料被覆管とキャプセル内筒の間には、熱媒体としてNaK合金が充填されている。内筒及び外筒はステンレス鋼製であり、その間の熱媒体にはアルミ合金が用いられている。

キャプセルの組立図をFig. 2.3に示す。2本の燃料ピンは下部端栓を突き合わせる形でキャプセルに組み込まれており、上部に84F-12-1燃料ピンが、下部に84F-12-2燃料ピンが配置されている。キャプセルにはそれぞれの燃料ピンの出力を評価に用いる照射中温度測定のために、合計8本の熱電対が挿入されており、そのうちの4本は各燃料ピンの混合炭化物燃料スタックの中心位置に対応するNaK中にそれぞれ2本ずつ、残りの4本はアルミ合金熱媒体中にそれぞれ2本ずつ配置されている。

Table 2.1 Characteristics of fuel pins in 84F-12A capsule

Pin number		84F-12-1	84F-12-2
Fuel pin			
Pin length	(mm)	249.4	249.4
Mixed carbide fuel length	(mm)	100.4	100.4
Outer diameter	(mm)	9.39	9.39
Weight	(g)	112.6	112.1
Fuel pellet			
Material		(U, Pu)C	(U, Pu)C
C./.(U+Pu) ratio		1.02	1.10
Pu/(U+Pu) ratio		0.202	0.198
Pellet diameter	(mm)	8.23	8.23
Pellet density	(%T. D.)	82.2	82.5
Smear density	(%T. D.)	79.3	79.6
Cladding tube			
Clad material		20%CW SUS316	20%CW SUS316
Clad thickness	(mm)	0.51	0.51
Pellet-clad diameter gap	(mm)	0.15	0.15
Bonding material		Helium	Helium

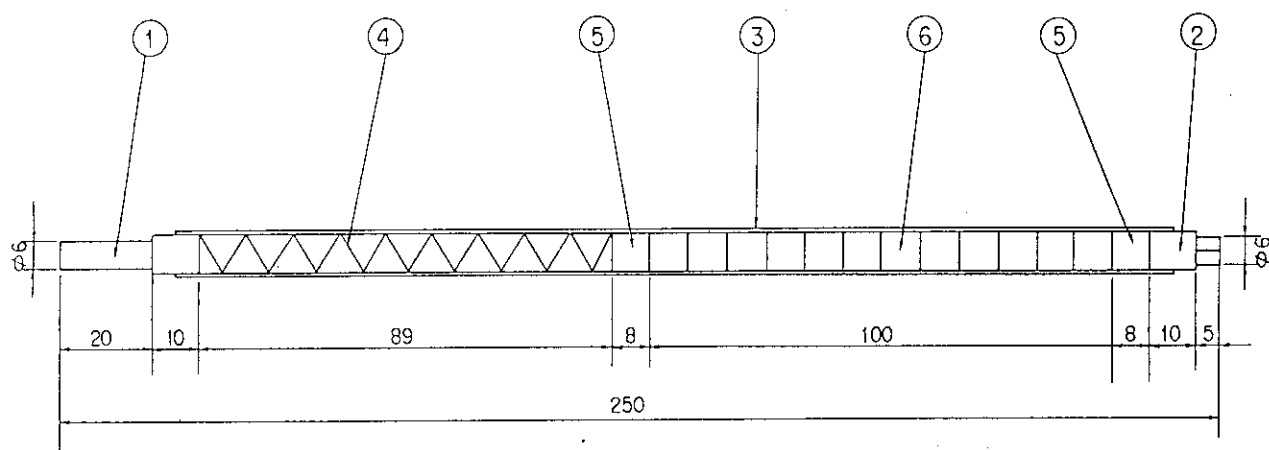


Fig. 2.1 Structure of mixed carbide fuel pin for irradiation test

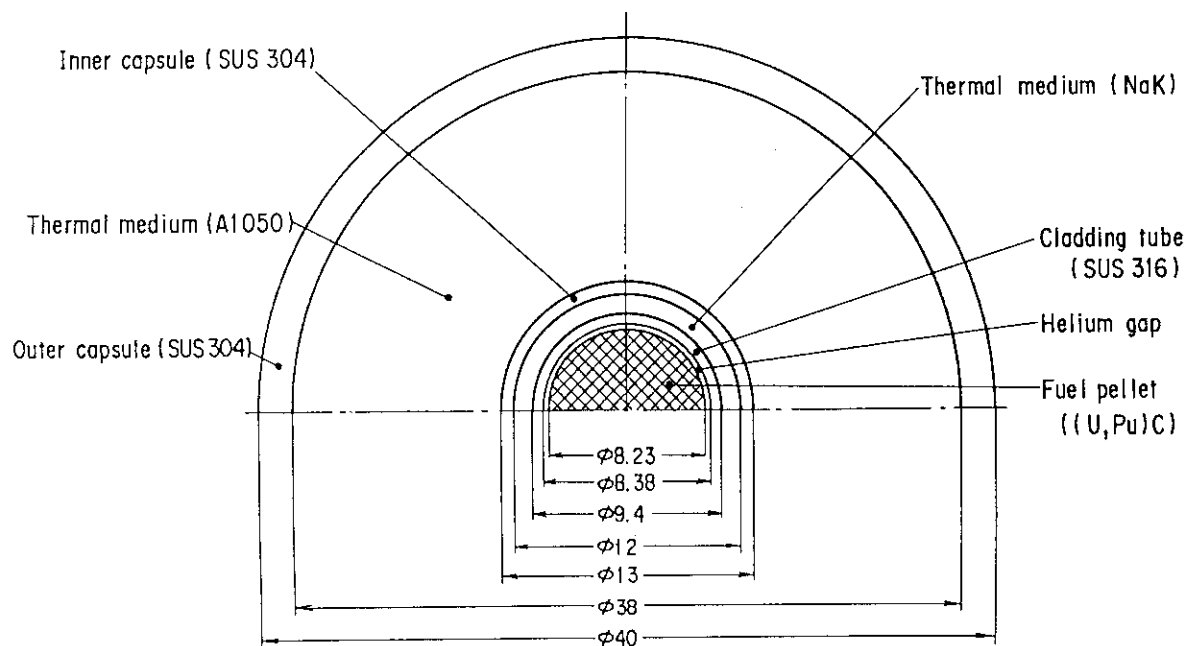


Fig. 2.2 Cross section of 84F-12A capsule

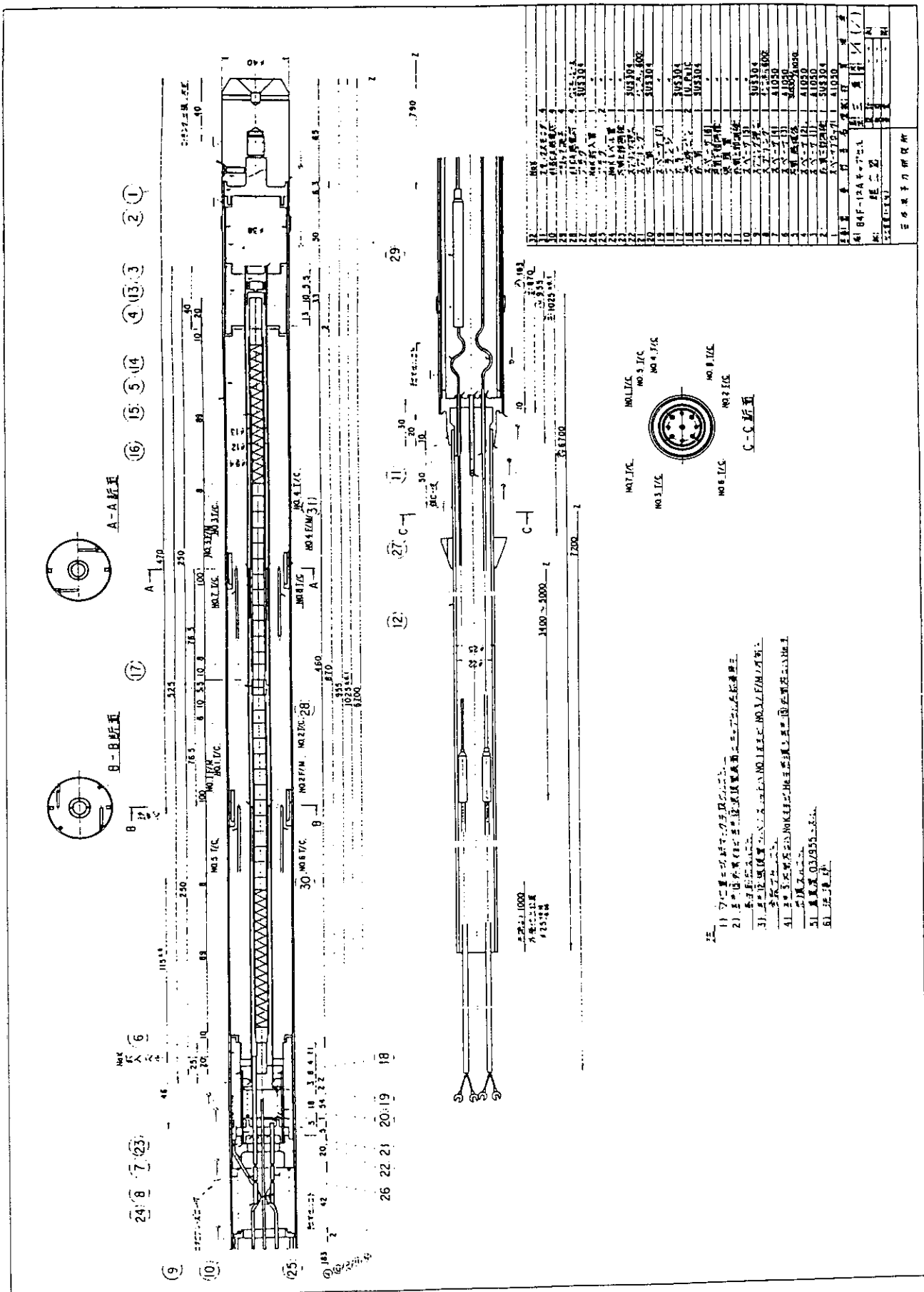
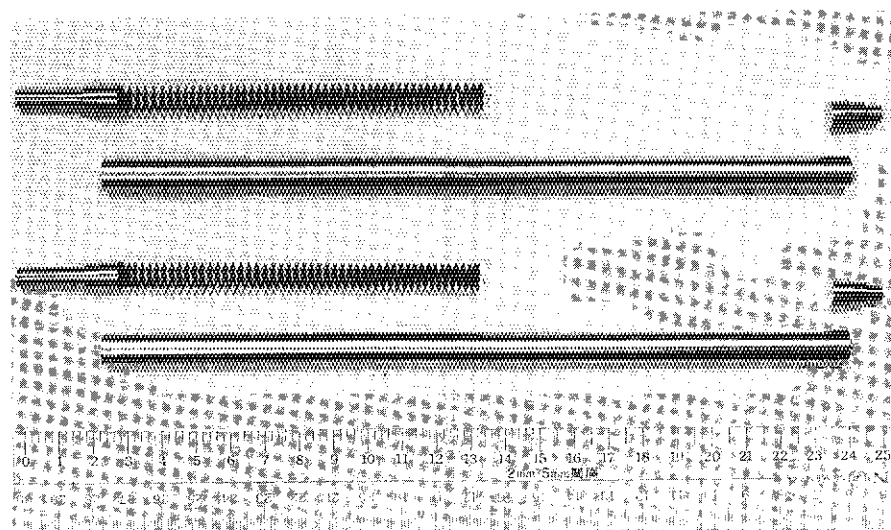
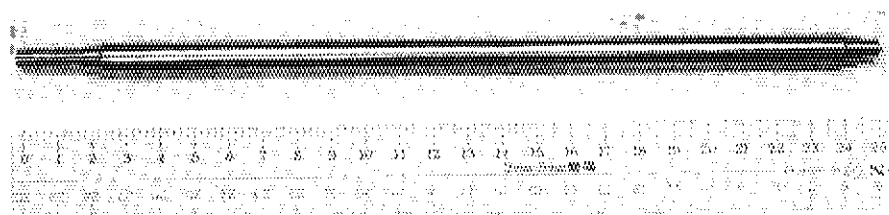


Fig. 2.3 Structure of 84F-12A capsule



(U, Pu)C_{1.0} fuel pin



(U, Pu)C_{1.1} fuel pin



Photo. 2.1 External view of mixed carbide fuel pins

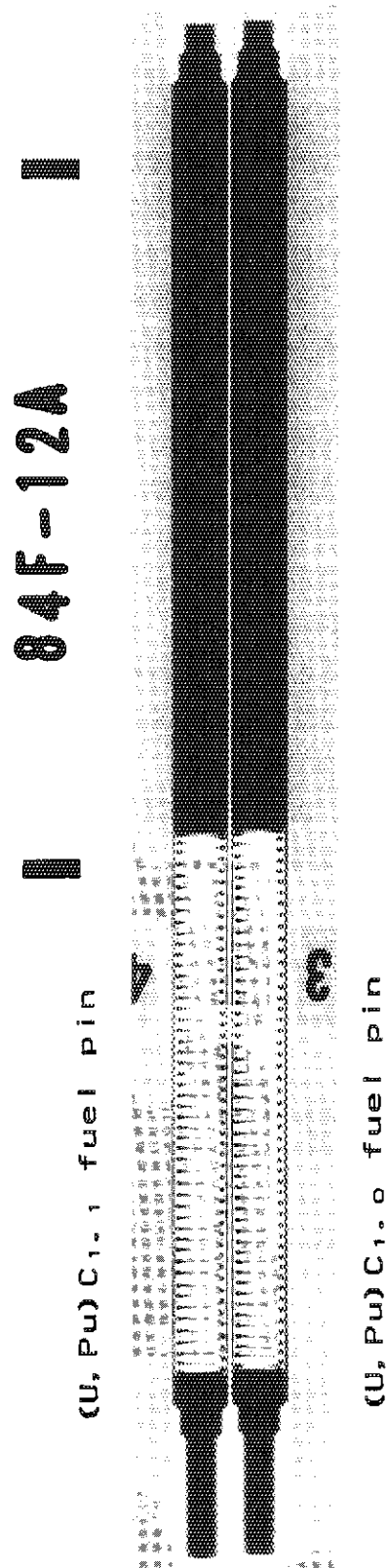


Photo. 2.2 X-ray radiograph of mixed carbide fuel pins

3. JMTRによる照射

84F-12A キャプセルは、昭和61年11月28日から平成2年10月30日まで、JMTR炉心外照射孔D-12で17サイクル(延べ8748時間)照射された。照射履歴をTable3.1に示す。

キャプセルに挿入されている8本の熱電対の出力を各サイクル毎にTable3.2に示す。それぞれの混合炭化物燃料スタック中央に対応するNaK中の熱電対の温度は、84F-12-1燃料ピンに対応するNo.1及びNo.2は最低約330～最高約420℃、84F-12-2燃料ピンに対応するNo.3及びNo.4は最低約310～最高約390℃であった。No.1とNo.2あるいはNo.3とNo.4の指示する温度の差は、主に原子炉の炉心方向との関係に起因すると考えられる。すなわち、燃料の炉心側は反対側に比べて入射する中性子束が高く、したがって核分裂密度も高く発熱量が多いからである。Fig.3.1にキャプセルの構造をもとにGENGTCコードで計算したキャプセル半径方向の温度分布を示す。さらに、Table3.3に熱電対の指示値をもとにGENGTCコードを用いて計算したそれぞれの燃料ピンのサイクル毎の線出力を示す。この線出力はスタック中央位置の値であり、それぞれの燃料ピンのピーク線出力位置は炉心とキャプセルとの関係から最下端であるので、両者に若干の差はある。スタック中央位置の線出力は平均線出力とほぼ等しいと推定される。全サイクルを平均した線出力は、84F-12-1燃料ピンで60kW/m、84F-12-2燃料ピンで49kW/mである。この値を用いて、Fig.3.1からBOL(Beginning of life)の燃料中心温度を推定すると、それぞれ約1260℃及び約1100℃である。

線出力の値を用いて、燃焼度は84F-12-1燃料ピンで4.5%(39000MWd/t)、84F-12-2燃料ピンで3.7%(32000MWd/t)に達したと推定される。

84F-12Aキャプセルは照射終了後JMTRの冷却カナルで約5ヶ月間冷却されたのち、JMHL-78Y15T型輸送キャスクを用いて東海研燃料試験施設まで輸送された。

Table 3.1 Irradiation history of 84F-12A capsule in JMTR

Irradiation cycle		Period	Irradiation time(hr)
76	cycle	1986. 11. 28～1986. 12. 23	526.9
77	cycle	1987. 1. 28～1987. 2. 22	529.3
78	cycle	3. 17～4. 11	528.4
79	cycle	6. 2～6. 27	484.3
80	cycle	1988. 2. 3～1988. 2. 28	525.5
81	cycle	3. 23～4. 17	527.0
82	cycle	6. 1～7. 2	443.4
83	cycle	10. 13～11. 8	457.0
84	cycle	11. 29～12. 24	527.5
85	cycle	1989. 2. 1～1989. 2. 26	522.1
86	cycle	3. 22～4. 16	530.5
87	cycle	6. 6～7. 1	513.2
88	cycle	11. 24～12. 19	529.5
89	cycle	1990. 1. 25～1990. 2. 11	520.8
90	cycle	3. 17～4. 11	530.4
91	cycle	5. 9～6. 3	526.5
92	cycle	10. 5～10. 30	525.7

Total irradiation time: 8748.0 hrs

Table 3.2 Temperature record of 84F-12A capsule under irradiation

Cycle	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
No. 1 T/C	max. (°C)	414	432	406	396	376	379	370	394	428	382	375	384	407	417	385	377	398
	min. (°C)	364	374	362	345	298	340	341	348	371	336	337	344	347	365	338	331	353
	ave. (°C)	380	391	377	363	330	349	351	361	389	349	348	358	368	383	355	348	365
No. 2 T/C	max. (°C)	435	461	429	418	398	398	387	420	456	398	399	414	431	445	416	405	427
	min. (°C)	393	405	383	367	321	357	356	368	395	352	359	373	373	391	365	357	383
	ave. (°C)	410	424	400	386	351	366	366	382	413	365	371	385	394	410	383	374	395
No. 3 T/C	max. (°C)	393	417	381	375	349	347	344	360	385	346	345	348	380	388	346	337	364
	min. (°C)	346	359	342	328	287	321	317	321	340	306	306	316	320	337	309	306	325
	ave. (°C)	358	371	356	345	315	331	330	335	359	320	319	329	339	353	327	322	338
No. 4 T/C	max. (°C)	409	438	394	381	355	349	347	373	406	354	352	355	384	394	348	337	361
	min. (°C)	370	376	352	334	297	325	320	334	355	313	315	322	326	341	315	309	327
	ave. (°C)	378	393	366	351	323	334	333	348	378	327	327	335	343	357	331	323	339
No. 5 T/C	max. (°C)	247	261	245	241	223	225	222	234	258	225	222	228	246	251	230	227	243
	min. (°C)	225	235	224	212	185	207	208	212	223	205	206	210	212	225	207	204	216
	ave. (°C)	233	243	232	221	201	211	213	219	236	210	212	216	225	235	216	213	223
No. 6 T/C	max. (°C)	222	234	223	220	210	210	207	219	228	210	208	213	222	225	216	212	222
	min. (°C)	205	213	205	199	175	194	195	198	207	192	193	196	199	204	195	192	204
	ave. (°C)	211	220	212	208	190	198	200	204	215	197	198	203	207	213	204	201	209
No. 7 T/C	max. (°C)	220	233	220	212	198	196	197	207	218	199	199	202	219	222	201	197	214
	min. (°C)	197	203	202	191	169	185	186	188	197	183	182	188	187	198	182	181	191
	ave. (°C)	203	210	208	199	182	189	191	195	207	188	188	194	199	206	191	189	198
No. 8 T/C	max. (°C)	214	228	206	202	192	190	191	202	219	193	193	197	210	214	195	191	204
	min. (°C)	193	199	188	182	164	180	180	184	194	178	179	182	184	190	182	179	188
	ave. (°C)	199	209	195	189	176	183	185	191	206	183	184	188	192	198	188	185	193

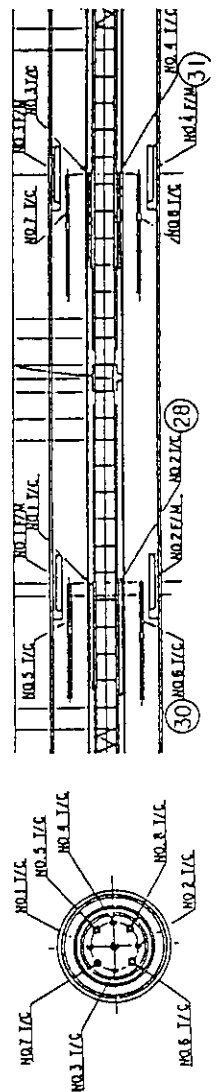


Table 3.3 Linear power rate of fuel pins

Cycle	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
No. 1 pin																		
T/C1&2 ave. (°C)	401	418	400	385	348	369	364	387	414	368	371	379	392	410	381	372	392	total ave. 597
Linear power rate (W/cm)	650	695	640	595	485	545	530	600	685	540	555	575	620	675	585	555	620	
No. 2 pin																		
T/C3&4 ave. (°C)	379	400	370	357	322	335	333	351	372	330	330	334	352	365	333	326	344	total ave. 492
Linear power rate (W/cm)	575	640	550	510	420	455	450	495	560	440	440	450	495	535	445	430	475	

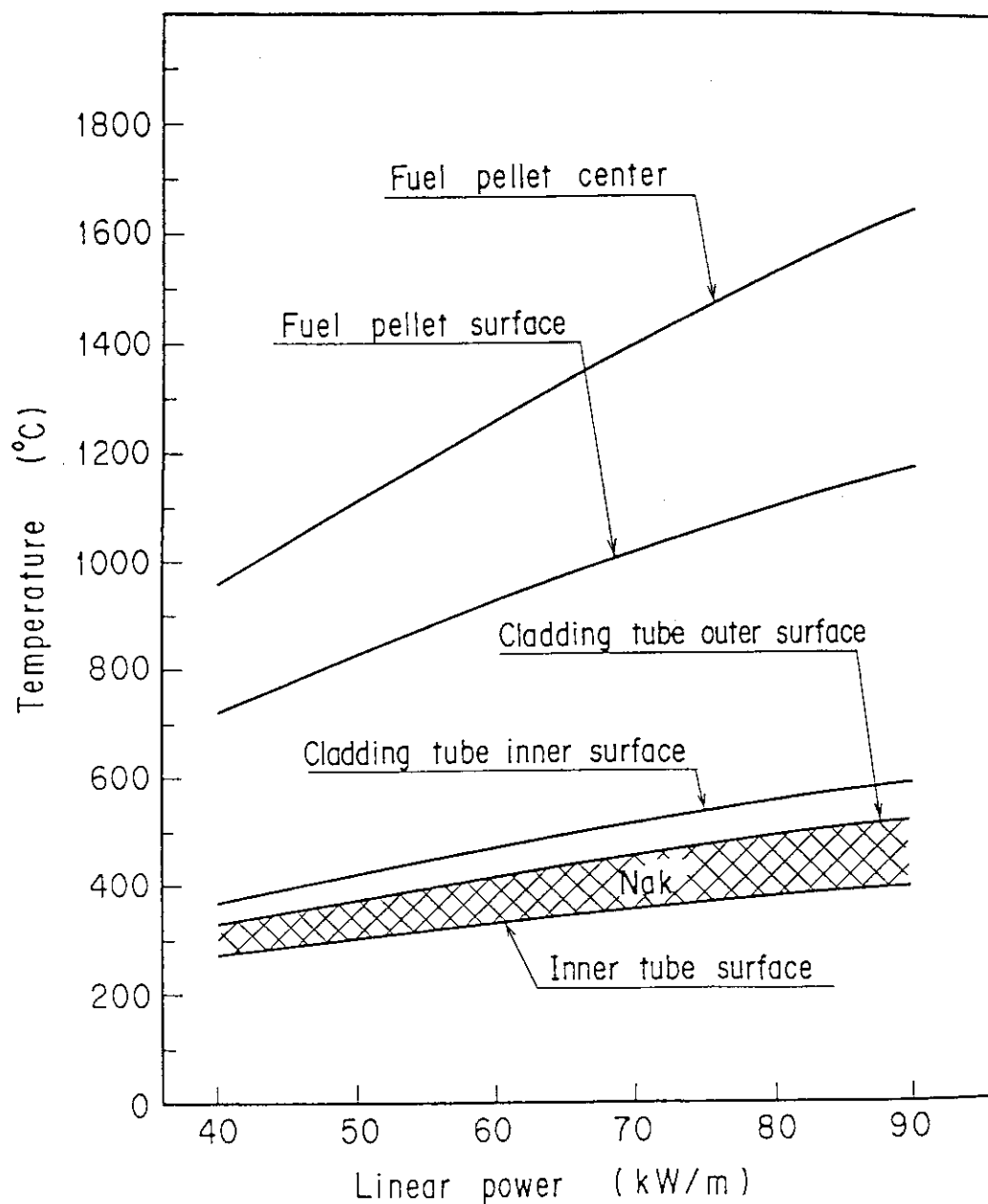


Fig. 3.1 Radial temperature distribution in 84F-12A capsule as a function of linear power

4. 照射後試験

照射後試験は、それまでの3体のキャプセル(ICF-37H、ICF-47H、84F-10A)と同様に東海研燃料試験施設において実施した。

4.1 照射後試験の概要

照射後試験の項目として、84F-10A キャプセル⁴⁾ とほぼ同様に全体で35項目を実施した。

試験項目、試料番号、試料数等を合わせて、照射後試験フローをFig. 4.1 に示す。作業番号13までは $\beta \cdot \gamma$ セルで行い、作業番号14~29は $\alpha \cdot \gamma$ セルで実施した。被覆管についての作業番号31~34は $\alpha \cdot \gamma$ セルまたは $\beta \cdot \gamma$ セルで行った。作業番号30の燃料ペレットのEPMA及び作業番号35の被覆管のEPMAはセル外に設置されているEPMAを用いて実施した。 $\alpha \cdot \gamma$ セルでの作業のうち作業番号14から22については、アルゴンガス雰囲気で行った。

4.2 照射後試験の方法、結果並びに考察

照射後試験の各作業項目について、その方法、結果並びに考察を以下に述べる。ただし、EPMAについては別に報告する。

4.2.1 キャプセルの搬入

JMTRで照射された84F-12A キャプセルは、約5ヶ月間冷却されたのち、平成3年3月26日に東海研燃料試験施設に搬入された。

4.2.2 キャプセルの外観検査

搬入したキャプセルの表面の変色、変形等について目視検査を実施し、キャプセル名称刻印側面を0°とし、0°及び180°の2側面について写真撮影を行った。外観写真をPhoto. 4.1 に示す。

キャプセル表面の一部はかなり黒色に変色しており、その位置は内部の燃料ピンの位置とほぼ一致していた。

4.2.3 外筒解体及び中性子束モニタの回収

作業手順は、84F-10A キャプセルの解体と同様である。外筒の上下をダイヤモンドカッターで切断し、内筒熱媒体を引き抜くとともに中性子束モニタを回収した。これらの作業は円滑に行うことができた。

4.2.4 中性子束モニタの搬出及び中性子照射量

84F-12A キャプセルの内筒外表面の燃料スタック中央位置に配置された中性子束モニタ4個を回収し、小型キャスクに収納してL型輸送容器として梱包してJMTRまで輸送し、材料試験炉部計

画課により放射線測定を行い、中性子照射量を算定した。

中性子束モニタの装荷位置はFig. 2.3 に示されている。熱中性子及び速中性子の積算照射量をJMTR炉心における位置とともにFig. 4.2 及びFig. 4.3 に示す。84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンのそれぞれの燃料スタック中央に対応する位置に各2組の中性子束モニタが配置された。算定された積算照射量は、前者では、熱中性子フルエンスが $1.45 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ (炉心側) 及び $9.6 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心外側)、速中性子フルエンスが $2.60 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心側) 及び $2.24 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心外側) であり、後者では熱中性子フルエンスが $1.35 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ (炉心側) 及び $9.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心外側)、速中性子フルエンスが $2.43 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心側) 及び $2.14 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (炉心外側) であった。2本の燃料ピンの中心位置の積算照射量がほぼ等しいことから、キャプセル内での配置及び炉心内上下位置は適切であったと判断される。照射孔は炉心外にあり、したがって炉心側と炉心外側では中性子束にかなり差があることが予想された。求められた積算照射量について、炉心側に対する外側の比は、熱中性子で0.66～0.67であり、速中性子で0.86～0.88であった。

4.2.5 内筒外観検査

内筒の表面を目視で検査した結果、変色、変形等の有害な欠陥は認められず、良好であった。外観写真をPhoto. 4.2 に示す。

4.2.6 内筒解体及びNaK 処理

次のようにして内筒解体及びNaK 処理を行った (Fig. 2.3参照)。

- 1) 内筒をNaK キャプセル開封処理装置にセットし、内筒上部端栓 (品番㉔) とスペーサ (品番㉕) の間を切断した。
- 2) スペーサが出てこないため、スペーサ部を再切断した。
- 3) 燃料ピンはスムーズに動いたが、カラー (品番㉖) がはずれないため、2本の燃料ピンは接続されたままであった。
- 4) このため、燃料ピンを内筒から抜き取ることができず、内筒とともに処理槽に移した。
- 5) 処理槽内で、燃料ピンの切り離しと内筒内の残留NaK の処理を行った。
- 6) 切断槽内の流出NaK をn-ブタノールを少量ずつ加えながら反応させ、処理した。
- 7) 処理槽より燃料ピンを取り出し、84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンの識別を行った。

4.2.7 燃料ピンの外観検査

2本の燃料ピン84F-12-1及び84F-12-2の外観観察を目視で行い、 0° 及び 180° の2方向について撮影した。外観写真をPhoto. 4.3 に示す。

燃料ピンの被覆部は全体に鈍い金属光沢を有しているが、燃料スタック位置に相当する一部では白っぽい変色が見られた。これは、その部分の発熱量が高く、したがって被覆管外表面の温度が高いためにNaK 中の不純物と若干の反応が生じたものと考えられる。ピンホール、腐食及び変形等の異状は観察されなかった。

4.2.8 燃料ピンの放射線測定

燃料を鉛直に保持し、燃料ピン上端より12cm下方向(燃料ピンのほぼ中央)において、燃料ピン表面から水平方向に25cm間隔で4ポイントの測定を行った。得られた結果を、Table 4.1 に示す。2本の燃料ピンの線量率はほぼ等しく、84F-10A⁴⁾ に比べると2割程度高かった。

4.2.9 燃料ピンのX線透過撮影

燃料ピン端栓のマークが刻印されている面を0°として、0°と90°の2方向のX線透過撮影を行った。X線透過写真をPhoto. 4.4 に示す。2本の燃料ピンとも、燃料ペレット間の境界が不明瞭であった。今回の燃料ペレットはチャンファ型であり、端面の「肩」が落ちた形状であるがそれははっきりと確認された。

4.2.10 燃料ピンの移送

β ・ γ コンクリートセルから、パデラックキャスクを用いて、 α ・ γ コンクリートセルへ燃料ピン2本を移送した。

4.2.11 燃料ピンの重量測定

燃料ピンの表面をエチルアルコールで拭き取り付着物を除去したのち、上皿電子天秤(スイス・メトラー社製PL1200型)を用いて重量を測定した。測定精度は $\pm 0.01\text{g}$ である。84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンの重量はそれぞれ112.60g及び112.13gであり、照射前のそれぞれの重量、112.6g及び112.1gとよく一致していた。

4.2.12 燃料ピンの γ 線スキャンニング

燃料ピンを γ 線スキャンニング装置にセットし、燃料ピンの軸方向について γ 線スキャンニングを行うとともに、いくつかの定点において γ 線スペクトル分析を行った。上部端栓位置をゼロとして、その点からコリメータスリット軸芯までの距離を上下位置とした。全 γ 線の測定では、軸方向に一定速度(25mm/min)で燃料ピンを移動させながらその強度分布を測定した。また、代表的FP元素である ^{106}Rh 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Pr 、 ^{95}Zr 及び ^{134}Cs について軸方向の γ 線スキャンニングを行った。この場合には、測定開始点から一定間隔(0.5mm)毎に一定時間測定する方法(ステップスキャン)で行った。さらに、各々3箇所の定点について γ 線スペクトル分析を実施した。

軸方向の全 γ 線スキャンニングの結果をFig. 4.4 及びFig. 4.5 に示す。84F-12-1および84F-12-2燃料ピンともに、上下のUC断熱ペレットと(U,Pu)C燃料ペレットの境界でピーキングを生じている。このピーク強度は(U,Pu)C燃料ペレット位置の平均的強度に比べて約2割高い値を示している。このようなピーキングは、軸方向からの中性子が両端の(U,Pu)C燃料ペレットに入射することにより生じたものである。84F-12-1および84F-12-2の γ 線強度は全体としてはほぼ一致しているが、84F-12-2燃料ピンでは下部側から上部に向かってゆるやかに減少している。2本の燃料ピンは下部端栓を突き合わせた形でキャプセルに挿入されており、84F-12-2燃料ピンは上下が逆立ちした形で照射された。従って、この燃料ピンの下部側が炉心の中心側となり、中性子束が中心をピークに弓形を取っていることを反映している。また、同燃料ピンの上部端栓部に γ 線のピークが見られる。さらに、両燃料ピンとも、プレナム部になだらかな傾斜を持つ線量率が観測され

ている。これらについては各元素の γ 線スキャンニング結果の中で触れる。

Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 に代表的なFP元素毎の γ 線スキャンニング結果を示す。 ^{95}Zr 、 ^{106}Rh 及び ^{144}Pr については、両燃料ピンともUC断熱ペレット及び(U, Pu)C 燃料ペレット上のみに存在しており、その分布は全 γ 線強度の測定結果と類似している。一方、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs については、一部がプレナム部まで移行しており、84F-12-2燃料ピンでは上部端栓部に沈着していることが確認された。この結果及び後述の定点における γ 線スペクトル分析の結果から、全 γ 線の測定で見られたプレナム部や上部端栓部の γ 線は、ほぼ全量がCsに起因するものと考えられる。プレナム部等へのCsの移行はこれまでの照射後試験^{2, 4)}でも観察されている。Csが半揮発性として振る舞い、燃料ペレットから放出されたのち、温度勾配にしたがって低温のプレナム部及び端栓部に移行したものと推定される。これまでも、(U, Pu)C_{1.0}燃料では端栓部への沈着が観察されており、(U, Pu)C_{1.0}燃料では観察されていない。しかし、Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 を比較して84F-12-2燃料ピンのプレナム部へのCsの移行量、すなわち燃料からの放出量の総量は、84F-12-1燃料ピンに比べて格段に多いとは言えず、84F-12-2燃料ピンのみで上部端栓部にCsの沈着が生じることの明確な説明はできない。2本の燃料ピンが下部端栓側でつながれている、すなわち84F-12-2燃料ピンは『逆立ち』しており、上部端栓が下側にあることに関係する可能性は否定できない。なお、プレナム部のCsの一部は、燃料ペレットから放出された核分裂ガスのXeの壊変または(n, γ) 反応を経て生成した可能性がある。

定点の γ 線スペクトル分析は次の位置で実施した。

燃料ピン	測定部位	上下位置(mm)
84F-12-1 (U, Pu)C _{1.0}	①プレナム部	57.0
	②ピン上部UC断熱ペレット部	105.0
	③(U, Pu)C スタック中央部	160.0
84F-12-2 (U, Pu)C _{1.1}	①特異部（上部端栓部）	13.0
	②プレナム部	57.0
	③ピン上部UC断熱ペレット部	105.0
	④(U, Pu)C スタック中央部	160.0

代表例として、2本の燃料ピンの(U, Pu)C スタック中央部の結果をFig. 4.8 及び Fig. 4.9 に、特異部として84F-12-2燃料ピンの上部端栓部の結果をFig. 4.10に示す。Fig. 4.8 及び Fig. 4.9 を比較すると、放射線強度及び存在確認核種にほとんど差異はなく、代表的なFP元素であるCs、Pr、Zr、Nb、Ru、Eu等の他、被覆材の放射化によるものと推定される ^{54}Mn 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co が検出されている。特異部の γ 線スペクトル分析で検出された元素は、被覆材の放射化によるものを除くと、Csのみであった。

4.2.13 燃料ピンの寸法及び曲がり測定

燃料ピンの長さ測定は、300mm 用のノギスを用いて実施し、その測定精度は $\pm 0.1\text{mm}$ である。測定結果をTable 4.2 に示す。照射前の全長は、84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンともに249.4mmであり、照射による寸法の大きな変化は認められていない。

燃料ピンの直径及び曲がりの測定はプロフィロメトリにより行い、その測定精度は、直径で $\pm 0.005\text{mm}$ 、曲がりで 0.05mm である。 0° 、 45° 、 90° 、 135° の4方向について測定したデータをFig. 4.11からFig. 4.18に、曲がりのデータをFig. 4.19からFig. 4.26に示す。

直径では、(U, Pu)C スタック部分で照射後の増加が観察され、その最大値は84F-12-1燃料ピンでは約 0.05mm 、84F-12-2燃料ピンでは約 0.03mm であった。これは、 $\Delta D/D$ としてそれぞれ約0.5%及び約0.3%に相当する。これらの図からは直径変化が各ペレットと対応している部分も見られ、FCMIに起因する可能性が高い。今回チャンファー型のペレットを採用した目的のひとつとして、FCMIによる被覆管のリッジングの緩和がある。チャンファー型でない84F-10A キャプセルの照射後試験結果⁴⁾と比較すると、84F-12A キャプセルの燃料ピンは84F-10A セアプセルの燃料ピンに比べて燃焼度が高いため直径増加の絶対値は大きいものの、ペレット端面に相当すると推定される箇所とそうでない箇所との直径変化の差が明らかに緩和されている。したがってチャンファー型にした効果が実証されたと判断される。

曲がりは、84F-12-1燃料ピンで最大約 0.07mm 、84F-12-2燃料ピンで最大約 0.11mm であった。最大の曲がりの位置は必ずしも(U, Pu)C スタックと一致しておらず、また、照射前の真直度が全長に対して約 0.05mm であったことを考慮すると、これらの曲がりは照射中に燃料ピンに発生した機械的応力に起因しており、しかもごくわずかの曲がりであり健全性に影響はないと考えられる。

4.2.14 パンクチャ試験

燃料ピンに穿孔しピン内のガスを捕集して、体積測定及び組成分析を行い、FPガスの放出率及びその組成を決定した。 $\alpha \cdot \gamma$ コンクリートセル内に設置されている穿孔機構部から配管を介してガス捕集部の容器内にガスは捕集される。それぞれの燃料ピンについて2本の捕集容器(内容積 150cc)を用い、1本目には穿孔後の配管内に平衡させた圧力で捕集し、2本目には系内の残ガスをテプラーポンプを用いて汲み上げ捕集した。燃料ピン内部空隙容積についての測定精度は、 $\pm 0.1\text{ cm}^3$ であり、燃料ピン内部圧力については $\pm 1 \times 10^2\text{ Pa}$ である。

パンクチャー試験で得られた結果をTable 4.3 に示す。燃料ピン内の全ガス量(製作時に封入されたヘリウム及び放出されたFPガス)は、84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンそれぞれに対して、 9.03 cm^3 及び 12.63 cm^3 であった。ガスの組成については次項で述べる。

4.2.15 FPガスの組成分析及び放出率

捕集されたガスの組成をガスクロマト質量分析計で測定した結果を、Table 4.4 に示す。系への空気の漏れ込みはほとんどなく、捕集されたガスは、ヘリウム、クリプトン、キセノンであった。

クリプトン及びキセノンの同位体組成及びキセノン/クリプトン比は、2本の燃料ピンでほぼ一致しており、ORIGENコードで計算した結果ともほぼ一致した。それぞれの燃料ピンの線出力が

ら計算したクリプトン及びキセノンの生成量をもとに放出率を求めると、84F-12-1燃料ピンで7.1%、84F-12-2燃料ピンで15.5%であった。前報で報告したとおり、ほぼ同じ線出力で照射した84F-10A キャプセルの放出率は6.1%及び13.7%であった。84F-10A キャプセルの燃料は約3.0%FIMAの燃焼度であり、84F-12-1燃料ピンは約4.5%FIMA、84F-12-2燃料ピンは約3.7%FIMAと燃焼度が進んでおり、いずれも84F-10A よりは若干高い放出率を示しているが、大差はない。この理由等については、放出率に関係が深いと考えられる密度、気孔率の項で議論する。

4.2.16 燃料ピンの粗切断

燃料ピンの粗切断はアルゴンガス雰囲気中で乾式法により実施した。切断位置及び試料番号をFig. 4.27及びFig. 4.28に示す。①～④の4箇所切断し、それぞれの燃料ピンを5分割した。各々の燃料ピンの切断位置は同一である。(a)、(b)、(c)の部分は、それぞれ121A、121B、121C及び122A、122B、122Cと呼称することとし、Fig. 4.1の照射後試験フローに示すように、121A、121C、122A及び122Cは脱ミートしペレットの密度、気孔率測定及び被覆管の金相試験等に使用した。121B及び122Bは樹脂注入を行ったのち細切断した。

4.2.17 樹脂注入

上記の121B及び122Bについて樹脂注入をおこなった。その方法及び条件は、ポリエステル樹脂を用いて最大加圧力6Kg/cm²、加圧時間5分であった。トップ側から樹脂を注入したがボトム側からの流出は見られなかった。これは、ペレットと被覆管のギャップが閉塞していたためと考えられる。

4.2.18 脱ミート

121A、121C、122A及び122Cについて脱ミートを行った。燃料ペレットと被覆管が固着しているため、84F-10Aと同様に背割り切断法を用いた。各試料をバイスに固定し、まずリユータ(レジン刃)で被覆管のみを切断し、続いてピンセットで半割りにしペレット片を容器に採取した。採取したペレット片から密度測定に供するものを選別し(121APで15個、121CPで12個、122APで12個、122CPで12個)、それらをm-キシレンで洗浄した。P型ペリスコープで撮影したそれぞれの外観写真をPhoto 4.5及びPhoto 4.6に示す。

4.2.19 燃料ペレットの密度測定

測定用のペレット片はm-キシレンで洗浄したのち、真空乾燥を3時間以上行った。測定はm-キシレンを用いた液体置換法であり、試料を置換液に浸したのち重量変化が5分間で1mg以下になったことを確認して重量を測定した。測定はそれぞれ7回実施し、最大と最小の値を除外した5回分のデータの平均値として求めた。測定精度は、試料密度で±0.0002g、試料密度で±0.01g/cm³である。この測定結果をまとめてTable 4.5に示す。84F-12-1燃料ピン((U,Pu)C_{1.0})のペレット(121AP及び121CP)の密度は約88～89%T.D.であり、84F-12-1燃料ピン((U,Pu)C_{1.1})のペレット(122AP及び122CP)の密度は約91～92%T.D.であった。この密度はTable 2.1に示した密度とは異なり、m-キシレンが開気孔に侵入するため、開気孔を含まず閉気孔のみを考慮した値である。

4.2.20 燃料ペレットの気孔率測定

前項の密度測定のと真空乾燥を3時間以上行い、水銀ピクノメータ法を用いて気孔率を測定した。ペレット片は重量測定後水銀ピクノメータの試料室に移され、試料室内を真空にしたのちプランジャで試料室内に水銀を満たした。加圧力は、 $1.333 \times 10^5 \text{ Pa}$ で行った。測定精度は、試料密度で $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 、気孔率で $\pm 0.5\%$ である。水銀ピクノメータ法による測定結果及び前項の液浸法による測定結果から計算した燃料ペレットの開気孔率及び閉気孔率を、Table 4.5 に示す。

水銀ピクノメータ法による84F-12-1燃料ピンのペレット(試料番号121AP 及び121CP)及び84F-12-2燃料ピンのペレット(試料番号122AP 及び122CP)の密度は、それぞれ平均78.9%T.D. 及び79.8%T.D. である。照射前の該当する燃料ペレットの密度(寸法重量法による測定で、水銀ピクノメータ法とほとんど等しい)は、それぞれ平均82.4%T.D. 及び82.5%T.D. であるので、照射によりそれぞれ3.5 %T.D. 及び2.7 %T.D. 減少している。これは、体積に換算すると見かけ上、それぞれ3.5%及び2.7%増加したことに相当する。これを燃焼度(%FIMA)あたりのスエリング率に換算すると、それぞれ約0.8%及び0.7%となる。この値は前回の照射(84F-10A)の結果とほぼ一致している。今回の84F-12A キャプセルの燃焼度は前回の84F-10A キャプセルより進んでいるが、ともに照射途中で燃料ペレットと被覆管のギャップが閉塞し、拘束された状態であったことにより、見かけのスエリング率がほぼ等しくなったものと考えられる。

密度測定の結果から求めた開気孔率(%) (液浸法による密度(%T.D.) - 水銀ピクノメータ法による密度(%T.D.))は、84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンのペレットで、それぞれ平均9.7%及び11.8%である。また、閉気孔率(%) ($100 - \text{液浸法による密度}(\%T.D.)$)は、それぞれ平均11.4% 及び8.5%である。したがって、84F-12-1燃料ピンのペレットは84F-12-2燃料ピンのペレットに比較して、開気孔率が低く、閉気孔率が高い結果となった。それぞれのペレットの照射前の密度はほとんど同じであり、照射後も1%の差に過ぎないので、FPガス放出率の測定で84F-12-2燃料ピンが84F-12-1燃料ピンに比べて約2倍の値を示したのは、開気孔率の差がひとつの要因となっていると推定される。

4.2.21 燃料ペレット等の金相試験前処理

細切断した試料は、ポリエステル樹脂に埋め込み、研磨後一部の試料については化学エッチングを実施した。金相試験等に供した試料番号をまとめてTable 4.6 に示す。エッチング条件は次のとおりである。

燃料ペレット:

エッチング液: $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_3\text{COOH}=2.5:1:2$ の混合溶液

エッチング時間: 30~50秒

被覆管:

エッチング液: $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}=1:3:4$ の混合溶液

エッチング時間: 25~40秒

燃料ペレットについては、84F-10A キャプセルの燃料に比べてエッチングされにくく、今回はエッチング時間を延長した。

4.2.22 燃料ペレットのマクロ写真撮影

燃料ピンの径方向及び軸方向の研磨断面を、倍率5倍のP型ペリスコープを用いて観察し、マクロ写真を撮影した。断面写真及び断面の状況については、あとのモザイク写真撮影の項で述べる。

4.2.23 燃料ペレットの気孔分布測定

燃料ペレット径方向断面を遠隔操作型万能顕微鏡を用いて観察し、ペレット中央部、中間部(2箇所)、外周部について倍率400倍のミクロ写真撮影を実施した。観察位置は、オートラジオグラフの結果から炉心方向を推定し、炉心側から「外周部」「中間部①」「中心部」「中間部②」の順となるようにした。各試料(それぞれの燃料ピンについて各2断面)についての写真をPhoto 4.7～Photo 4.10に示す。気孔分布は、各写真上に50mm×40mmの枠を設け、画像解析装置を用いてその枠の中に存在する気孔の面積を求めることにより実施した。画像解析装置の分解能は1024×1024画素である。試料121B1、121B5、122B1及び122B5の気孔分布測定結果をTable 4.7～Table 4.10及びFig. 4.29～Fig. 4.44に示す。

84F-12-1及び84F-12-2燃料ピンのペレットはともに、外周部に比較して中心部では小さな気孔が少ないが、その傾向は84F-12-1燃料ピンのペレット、すなわち(U,Pu)C_{1.0}で顕著である。また気孔の分布が中心部ではより大きい方向に移動していることが判る。平均の気孔面積で比較すると、たとえば試料121B1の外周部では4.6 μm^2 (直径換算で1.2 μm)であるのに対して、中心部では約28 μm^2 (直径換算で3.0 μm)とはっきりとした差がある。一方、中間部の気孔分布については必ずしも一致した傾向が見られているわけではない。

4.2.24 燃料ペレットの金相写真

燃料ペレット研磨面の化学エッチングを行い、外周部、中間部及び中心部について組織写真を撮影した。倍率は500倍を標準とし、一部は1000倍も合わせて撮影した。代表的な組織写真を、Photo 4.11～Photo 4.16に示す。これらの写真における撮影位置は、炉心側から「外周部」「中間部①」「中心部」「中間部②」の順である。

4.2.25 燃料ペレットの結晶粒度測定

前項の金相写真上に枠を設定し、画像解析装置を用いて結晶粒度を測定した。測定結果をまとめてTable 4.11に示す。

(U,Pu)C_{1.0}ペレットでは、外周部と比較して中心部の粒径が相当大きい。前回の結果⁴⁾から、外周部の粒成長はほとんど進行しないことが判明している。したがって、今回も照射中の温度が低い外周部は製造時の粒径を保持しており、中心部では、外周部より高温であること及び温度勾配が大きいことにより粒成長が進行したと考えられる。一方、(U,Pu)C_{1.1}ペレットではどの位置でも粒径はほぼ等しく、照射中の粒成長は生じなかったと推定される。

4.2.26 燃料ペレットのモザイク写真

それぞれの燃料ピンについて、径方向3断面、軸方向1断面を倍率100倍で撮影し、その局所写真から構成したモザイク写真を作成した。それをPhoto 4.17～Photo 4.20に示す。径方向断面

では、直径方向の大きなクラックとそこから枝分かれした小さなクラックが認められる。また、外周部の一部に周方向のクラックが生じている。軸方向断面では、大きなクラックが多数生じていた。また、製造時のチャンファ形状が維持されていることが確認された。

4.2.27 燃料ペレットのオートラジオグラフ

燃料ペレットの径方向断面試料(121B3及び122B3)について、 α 及び $\beta\gamma$ オートラジオグラフを実施した。 α オートラジオグラフは、KODAK 社製CN85 Type B 型のニトロセルロース膜をニッケル箔(厚さ7.5 μm)及びマイラ膜(厚さ4 μm)で包み、燃料ペレット研磨面を約1Kgの荷重で密着させ、1分30秒露出させて行った。 $\beta\gamma$ オートラジオグラフは、KODAK 社製HRP 型乾板をアルミニウム箔(厚さ15 μm)及びマイラ膜(厚さ4 μm)で包み、燃料ペレット研磨面を約1Kgの荷重で密着させ、30秒露出させて行った。結果をPhoto 4.21に示す。

α オートラジオグラフは、燃料ペレット中のTRU 元素(照射済み燃料では主として ^{242}Cm の寄与が支配的)の分布を反映しているが、外周部が濃いことがわかる。これは、 ^{242}Cm がU及びPuの中性子捕獲等で生じることから、外周部で高く中心部で低いというペレット内の中性子分布を反映していると考えられる。

$\beta\gamma$ オートラジオグラフは、燃料ペレット中のFP元素の分布を主に反映しており、外周部で濃度が高いのは、 α オートラジオグラフの結果で述べたことと同様にペレット内の中性子分布に起因している。

α 及び $\beta\gamma$ ともに、分布がペレット中心に対して対称ではなく、ずれている。これは、照射が炉心外照射孔で行われたため、4.2.4の中性子照射量の項で述べたように、中性子分布が炉心側で高く、反対側で低いことが原因である。これを利用して、オートラジオグラフの結果から、炉心方向を推定することができる。

4.2.31 燃料ペレットのマイクロ γ 線スキャンニング

上記のオートラジオグラフを行った試料について、マイクロ γ 線スキャンニングを実施した。分析は、まず定点における γ 線スペクトル分析を行い、つづいて全面マイクロ γ 線スキャンニングを行った。

定点分析はそれぞれのペレットの中心部とし、10000秒の測定時間であった。その測定結果をFig. 4.45及びFig. 4.46に示す。試料121B3及び122B3において同定された核種及びその γ 線強度はほとんど等しい。

全面マイクロ γ 線スキャンニングでは、定点の γ 線スペクトル分析で同定された核種のうち代表的と考える ^{95}Zr 、 ^{106}Rh 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 及び ^{144}Pr を選び、断面を0.5mmピッチで全面スキャンニングした。その測定結果を、Fig. 4.47及びFig. 4.48に示す。棒グラフは、 $Y=0$ (X軸)に沿った直径上の放射能強度を示している。ペレット中心部でくぼんでいること、及び炉心側(X軸のマイナス側)で強度が高く反対側は低いのは、ペレット内の中性子分布に対応している。Csについては、他のFP元素に比べて中心部の存在比率が低いことが観察されている。これはCsが半揮発性のFPとしてペレット内を外周部に移動したことを示唆している。プレナム部までCsが移行したこともこの推定を裏付けるものである。

4.2.32 被覆管の金相写真撮影

燃料ペレットと被覆管の化学的相互作用を調べるため、金相試験前処理を行った被覆管(試料番号121B1、121CC、122B1、122CC)の顕微鏡写真を撮影した。撮影倍率は、150倍及び400倍及び600倍とした。それぞれの写真をPhoto 4.22～Photo 4.25に示す。

4.2.33 被覆管の腐食厚さ

前項の金相写真から被覆管内面の腐食を評価した。(U,Pu)C_{1.0}燃料ピンでは、試料121B1及び121CCの被覆管内面にごくわずか(2μm程度の深さ)ではあるが、燃料ペレットとの反応の兆候がみられる。また、(U,Pu)C_{1.1}燃料ピンでも内面の近傍がエッチングに敏感になっており、若干の炭素が燃料から被覆管の粒界に移行したものと考えられる。いずれも燃料ピンの照射健全性に影響を及ぼすものではないと判断できる。

4.2.34 被覆管の結晶粒度測定

121CC及び122CC試料について撮影した400倍の写真を画像処理して、被覆管の結晶粒度を測定した。照射前と合わせてTable 4.12に示す。照射後の結果は2試料とも差はなく、内面と外面での差も見られない。照射前に比べると大きな値を示しているが、照射による影響と断定するには至らない。

4.2.35 被覆管の硬さ測定

試料番号121CC及び122CCについて、試験荷重100g、荷重保持時間15秒の条件でビッカース硬さを測定した。測定は1試料について方位マーク位置を0°として、0°、45°、90°、135°の4箇所、1箇所内面側から外面側に向けて9点を実施した。

代表的な圧痕跡をPhoto 4.26に示す。各位置における測定結果をTable 4.13に、4箇所の平均値を図示したものをFig. 4.49に示す。照射前の硬さはビッカースで290程度であるので、照射前後及びそれぞれの燃料ピンで変化は見られない。また内面側と外面側での差も認められない。

Table 4.1 Results of radiation rate measurement for fuel pins

84F-12-1 [(U,Pu)C _{1.0} fuel pin]			84F-12-2 [(U,Pu)C _{1.1} fuel pin]		
Distance (cm)		Dose rate (Sv/hr)	Distance (cm)		Dose rate (Sv/hr)
x	z		x	z	
25	12	2.974	25	12	2.898
50	12	0.832	50	12	0.756
75	12	0.378	75	12	0.353
100	12	0.176	100	12	0.176

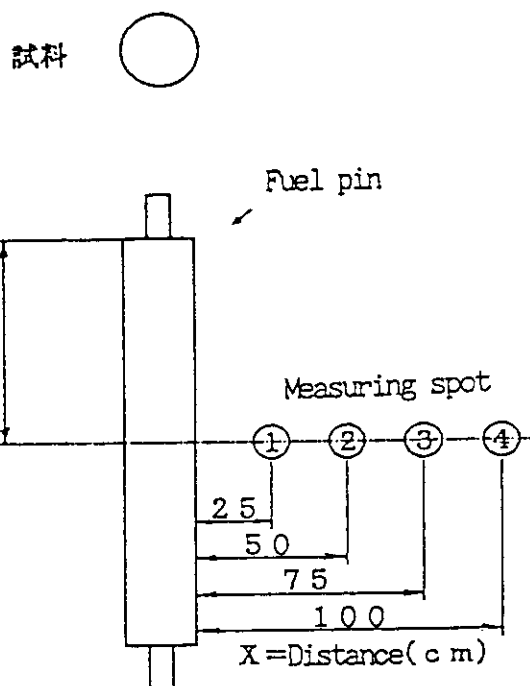
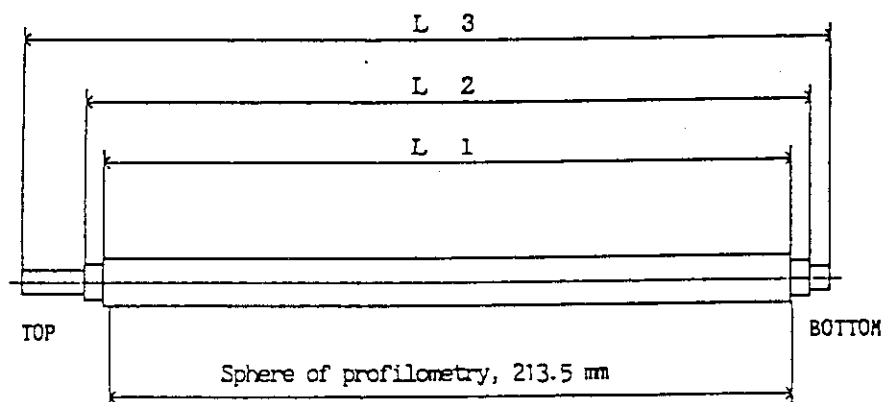
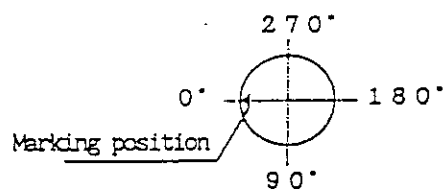
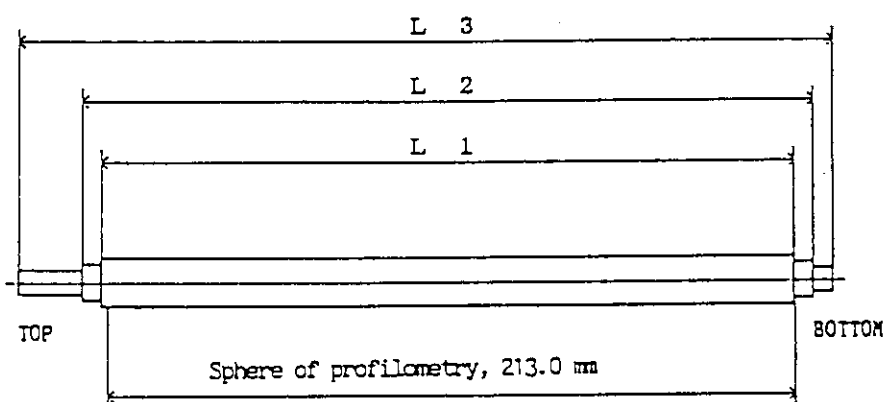


Table 4.2 Axial length of (U,Pu)C_{1.0} and (U,Pu)C_{1.1} fuel pins

Fuel pin	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)
(U,Pu)C _{1.0}	216.1	225.0	249.8
(U,Pu)C _{1.1}	216.1	224.8	249.7

(U,Pu)C_{1.0} fuel pin

Direction angle (looking from the upper endplug side)

(U,Pu)C_{1.1} fuel pin

Direction angle (looking from the upper endplug side)

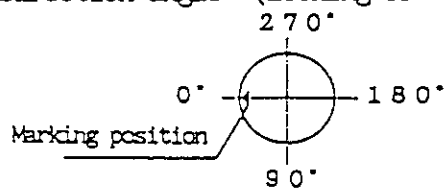


Table 4.3 Results of puncture tests

Fuel pins	84F-12-1 (U, Pu)C _{1.0} pin	84F-12-2 (U, Pu)C _{1.1} pin
Void volume before puncturing (cm ³)	73.15	73.14
Void volume after puncturing (cm ³)	78.11	78.22
Void volume in fuel pin (cm ³)	4.96	5.08
Vacuum pressure before puncturing (Pa)	8.26×10^{-3}	6.67×10^{-3}
Equilibrated gas pressure (Pa)	8.12×10^3	1.13×10^4
Pressure in fuel pin (Pa)	2.02×10^5	2.75×10^5
Temperature at puncturing (°C)	26.0	25.5
Total gas volume (STP, cm ³)	9.03	12.63

Table 4.4 Determination of the composition and volume of FP gas

Fuel pins		84F-12-1 (U, Pu)C _{1.0} pin	84F-12-2 (U, Pu)C _{1.1} pin	
Gas composition (vol.%)	He	Base	Base	
	N ₂	<0.1	<0.1	
	O ₂	<0.1	<0.1	
	Ar	<0.1	<0.1	
	Kr	2.69	3.4	
	Xe	45.9	57.7	
FP gas isotopic ratio (%)	Kr	83-Kr	15.4	16.1
		84-Kr	31.3	30.6
		85-Kr	6.5	6.1
		86-Kr	46.8	47.2
	Xe	131-Xe	10.1	12.1
		132-Xe	20.3	19.5
		134-Xe	28.0	27.0
		136-Xe	42.0	41.4
	Collected volume (Kr+Xe) (STP, cm ³)		4.39	7.72
	Produced volume* (Kr+Xe) (STP, cm ³)		61.74	49.76
FP gas release rate (%)		7.1	15.5	
Xe/Kr ratio observed		17.1	16.9	
Xe/Kr ratio produced*		15.8	15.8	

* Calculated by ORIGEN code

Table 4.5 Density and porosity of fuel pellets

Sample		84F-12-1		84F-12-2	
		121AP	121CP	122AP	122CP
Number of fragments		15	13	12	12
Total weight of sample (g)		4.9192	5.0423	5.2439	5.2548
Archimedes' method (m-xylene)	Period of dipping (min)	32	30	54	59
	Temp. of liquid (°C)	23.5	23.4	23.3	22.7
	Density of liquid(g/cm ³)	0.8594	0.8593	0.8594	0.8600
	Density of sample(g/cm ³)	12.105	12.000	12.452	12.277
	(%T.D.)	89.0	88.2	92.2	90.9
Picnometer method (mercury)	Density of sample(g/cm ³)	10.701	10.763	10.787	10.751
	(%T.D.)	78.7	79.1	79.9	79.6
Open porosity (%)		10.3	9.1	12.3	11.3
Closed porosity (%)		11.0	11.8	7.8	9.1
Density before irradiation (%T.D.)		82.5	82.2	82.5	82.5

Table 4.6 List of sample names for measurements

Test	84F-12-1		84F-12-2	
Density measurement	121AP	121CP	122AP	122CP
Open porosity measurement	121AP	121CP	122AP	122CP
Preparation for metallography	121B1	121B2	122B1	122B2
	121B3	121B4	122B3	122B4
	121B5		122B5	
Macroscopic photography (as polished)	121B1	121B2	122B1	122B2
	121B5		122B5	
Measurement of pore distribution	121B1		122B1	
	121B5		122B5	
Microscopic photography	121B1	121B2	122B1	122B2
	121B5		122B5	
Mosaic microscopic photography	121B5		122B5	
Measurement of grain size	121B1		122B1	
	121B5		122B5	
Micro γ -scanning	121B3		122B3	
Auto radiography	121B3		122B3	
Analysis by EPMA	121B4		122B4	

Table 4.7 Results of analysis of pore distribution
for (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (I)

Sample name : 121B1

Pore area (μm^2) (measured area 0.0125 mm ²)	Number of pores			
	Outer	Intermediate ①	Center	Intermediate ②
0.0 ~ 5.0	594	40	52	543
5.0 ~ 10.0	84	5	10	64
10.0 ~ 20.0	65	6	9	45
20.0 ~ 30.0	12	3	8	19
30.0 ~ 40.0	11	2	6	7
40.0 ~ 50.0	4	9	2	5
50.0 ~ 60.0	3	7	6	6
60.0 ~ 70.0	3	6	8	4
70.0 ~ 80.0	0	1	4	0
80.0 ~ 90.0	0	5	1	0
90.0 ~ 100.0	0	5	2	0
100.0 ~ 110.0	0	3	2	0
110.0 ~ 120.0	0	5	2	0
120.0 ~ 130.0	0	2	1	0
130.0 ~ 140.0	0	0	0	0
140.0 ~ 150.0	0	0	1	0
150.0 ~ 160.0	0	1	1	0
160.0 ~ 170.0	0	0	0	0
170.0 ~ 180.0	0	0	0	0
180.0 ~ 190.0	0	0	0	0
190.0 ~ 200.0	0	0	0	0
200.0 ~ 210.0	0	0	0	0
210.0 ~ 220.0	0	0	1	0
220.0 ~ 230.0	0	1	0	0
Total pore number	776	101	116	693
Ave. pore area (μm^2)	4.55	39.08	28.23	5.03
Porosity (%)	28.5	31.84	26.41	28.12

Table 4.8 Results of analysis of pore distribution
for (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (II)

Sample name : 121B5

Pore area(μm^2) (measured area 0.0125 mm ²)	Number of pores			
	Outer	Intermediate ①	Center	Intermediate ②
0.0 ~ 5.0	436	397	61	281
5.0 ~ 10.0	81	93	3	97
10.0 ~ 20.0	54	75	7	79
20.0 ~ 30.0	17	21	8	18
30.0 ~ 40.0	17	5	7	3
40.0 ~ 50.0	4	3	4	0
50.0 ~ 60.0	3	0	10	1
60.0 ~ 70.0	0	0	7	0
70.0 ~ 80.0	0	0	2	0
80.0 ~ 90.0	0	0	5	0
90.0 ~ 100.0	0	0	1	0
100.0 ~ 110.0	0	0	0	0
110.0 ~ 120.0	0	0	1	0
120.0 ~ 130.0	0	0	3	0
130.0 ~ 140.0	0	0	0	0
140.0 ~ 150.0	0	0	1	0
150.0 ~ 160.0	0	0	0	0
160.0 ~ 170.0	0	0	0	0
170.0 ~ 180.0	0	0	1	0
180.0 ~ 190.0	0	0	0	0
190.0 ~ 200.0	0	0	0	0
200.0 ~ 210.0	0	0	0	0
210.0 ~ 220.0	0	0	0	0
220.0 ~ 230.0	0	0	0	0
Total pore number	602	594	121	479
Ave. pore area (μm^2)	5.15	5.48	27.19	6.23
Porosity (%)	25.03	26.26	26.54	24.09

Table 4.9 Results of analysis of pore distribution
for (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (III)

Sample name : 122B1

Pore area(μm^2) (measured area 0.0125 mm ²)	Number of pores			
	Outer	Intermediate ①	Center	Intermediate ②
0.0 ~ 5.0	414	352	372	335
5.0 ~ 10.0	97	115	101	96
10.0 ~ 20.0	76	64	66	63
20.0 ~ 30.0	18	19	24	18
30.0 ~ 40.0	12	12	3	9
40.0 ~ 50.0	1	2	6	2
50.0 ~ 60.0	0	2	0	2
60.0 ~ 70.0	0	0	1	2
70.0 ~ 80.0	0	0	0	2
80.0 ~ 90.0	0	0	0	0
90.0 ~ 100.0	0	0	0	1
100.0 ~ 110.0	0	0	0	0
110.0 ~ 120.0	0	0	0	0
120.0 ~ 130.0	0	0	0	0
130.0 ~ 140.0	0	0	0	0
140.0 ~ 150.0	0	0	0	0
150.0 ~ 160.0	0	0	0	0
160.0 ~ 170.0	0	0	0	0
170.0 ~ 180.0	0	0	0	0
180.0 ~ 190.0	0	0	0	0
190.0 ~ 200.0	0	0	0	0
200.0 ~ 210.0	0	0	0	0
210.0 ~ 220.0	0	0	0	0
220.0 ~ 230.0	0	0	0	0
Total pore number	598	566	573	530
Ave. pore area (μm^2)	4.99	5.96	5.72	6.57
Porosity (%)	24.07	27.24	26.43	28.09

Table 4.10 Results of analysis of pore distribution
for (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (IV)

Sample name : 122B5

Pore area (μm^2) (measured area 0.0125 mm ²)	Number of pores			
	Outer	Intermediate ①	Center	Intermediate ②
0.0 ~ 5.0	645	286	245	398
5.0 ~ 10.0	98	88	100	83
10.0 ~ 20.0	55	75	71	71
20.0 ~ 30.0	17	18	17	27
30.0 ~ 40.0	4	13	9	8
40.0 ~ 50.0	4	2	1	7
50.0 ~ 60.0	0	0	1	0
60.0 ~ 70.0	0	0	0	1
70.0 ~ 80.0	1	0	1	1
80.0 ~ 90.0	0	0	0	0
90.0 ~ 100.0	0	0	0	0
100.0 ~ 110.0	0	0	0	0
110.0 ~ 120.0	0	0	0	0
120.0 ~ 130.0	0	0	0	0
130.0 ~ 140.0	0	0	0	0
140.0 ~ 150.0	0	0	0	0
150.0 ~ 160.0	0	0	0	0
160.0 ~ 170.0	0	0	0	0
170.0 ~ 180.0	0	0	0	0
180.0 ~ 190.0	0	0	0	0
190.0 ~ 200.0	0	0	0	0
200.0 ~ 210.0	0	0	0	0
210.0 ~ 220.0	0	0	0	0
220.0 ~ 230.0	0	0	0	0
Total pore number	820	482	445	596
Ave. pore area (μm^2)	3.67	6.57	6.77	5.92
Porosity (%)	24.27	25.56	24.31	28.45

Table 4.11 Results of grain size measurement for fuel pellet

Sample	Position	Average grain diameter(μm)
Fuel pellet	121B1	Outer
		Intermediate①
		Center
		Intermediate②
	121B5	Outer
		Intermediate①
		Center
		Intermediate②
	122B1	Outer
		Intermediate①
		Center
		Intermediate②
	122B5	Outer
		Intermediate①
		Center
		Intermediate②

Table 4.12 Results of grain size measurement for cladding tubes

Sample	Position	Average grain diameter(μm)
121CC	Outer	15.6
	Inner	17.1
122CC	Outer	17.5
	Inner	16.8
Unirradiated		10.68

Table 4.13 Results of micro vickers hardness of cladding tubes

Sample	Position	Micro vickers hardness (Hv)				
		0°	90°	180°	270°	Average value
121CC (U, Pu)C _{1.0} fuel pin	1 (inner)	309	289	292	294	296
	2	283	287	276	279	281
	3	268	274	297	268	277
	4	297	276	297	294	291
	5	289	270	272	274	276
	6	287	297	287	297	292
	7	287	285	302	299	293
	8	287	279	272	281	280
	9 (outer)	279	283	283	281	282
122CC (U, Pu)C _{1.1} fuel pin	1 (inner)	281	283	302	302	292
	2	274	279	306	285	286
	3	294	287	287	276	286
	4	285	294	276	276	283
	5	279	274	272	276	275
	6	268	276	289	306	285
	7	276	268	292	285	280
	8	281	270	289	287	282
	9 (outer)	287	268	294	281	283
Unirradiated						286

Working No.	Examination item	Number	Flow of examination
①	Irradiation capsule		
②	Transportation of the capsule into the cell	1	84F-12A Capsule
③	Inspection of the capsule appearance	1	
④	Disassembly of outer tube and recovery of neutron fluence monitors	1	
⑤	Determination of neutron irradiation dose	1	
⑥	Inspection of the inner tube appearance	1	
⑦	Disassembly of inner tube and treatment of NaK	1	
	Carbide fuel pins		
⑦	Inspection of fuel pins appearance	2	(U, Pu) C_{1,0} fuel pin (84F-12-1) (U, Pu) C_{1,1} fuel pin (84F-12-2)
⑧	Radiation rate measurement	2	
⑨	X-ray radiography	2	

Fig. 4.1 Flow sheet of post irradiation examination for uranium-plutonium mixed carbide fuel

Working No.	Examination item	Number	Flow of examination															
	Fuel pellets		121B1	121B2	121B3	121B4	121B5	121CC	122B1	122B2	122B3	122B4	122B5	122CC				
②4	Measurement of pore distribution	4	○				○		○				○					
②5	Optical inspection and microscopic photography	4		○			○			○			○					
②6	Mosaic microscopic photography	2					○						○					
②7	Measurement of grain size	4					○		○				○					
②8	Micro γ -scanning	2					○				○							
②9	Auto radiography	2					○				○							
③0	Analysis by EPMA	2										○						
	Cladding tubes		121B1	121B2	121B3	121B4	121B5	121CC	122B1	122B2	122B3	122B4	122B5	122CC				
③1	Measurement of hardness	2						○						○				
③2	Optical inspection and microscopic photography	4		○				○		○				○				
③3	Measurement of corrosion depth	2						○						○				
③4	Measurement of grain size	2						○						○				
③5	Analysis by EPMA	2													○			

Fig. 4.1 (continued)

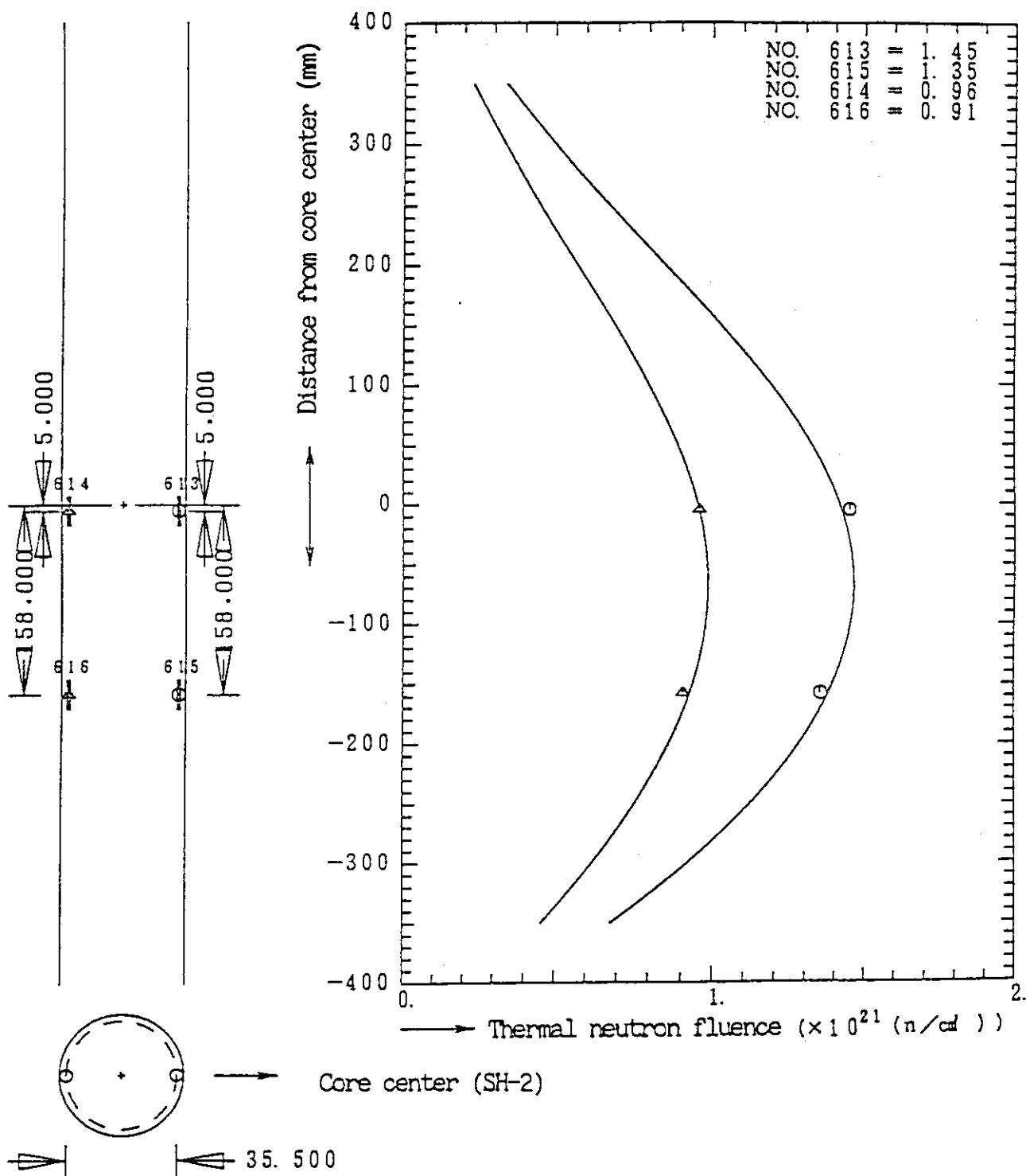


Fig. 4.2 Thermal neutron fluence of 84F-12A capsule

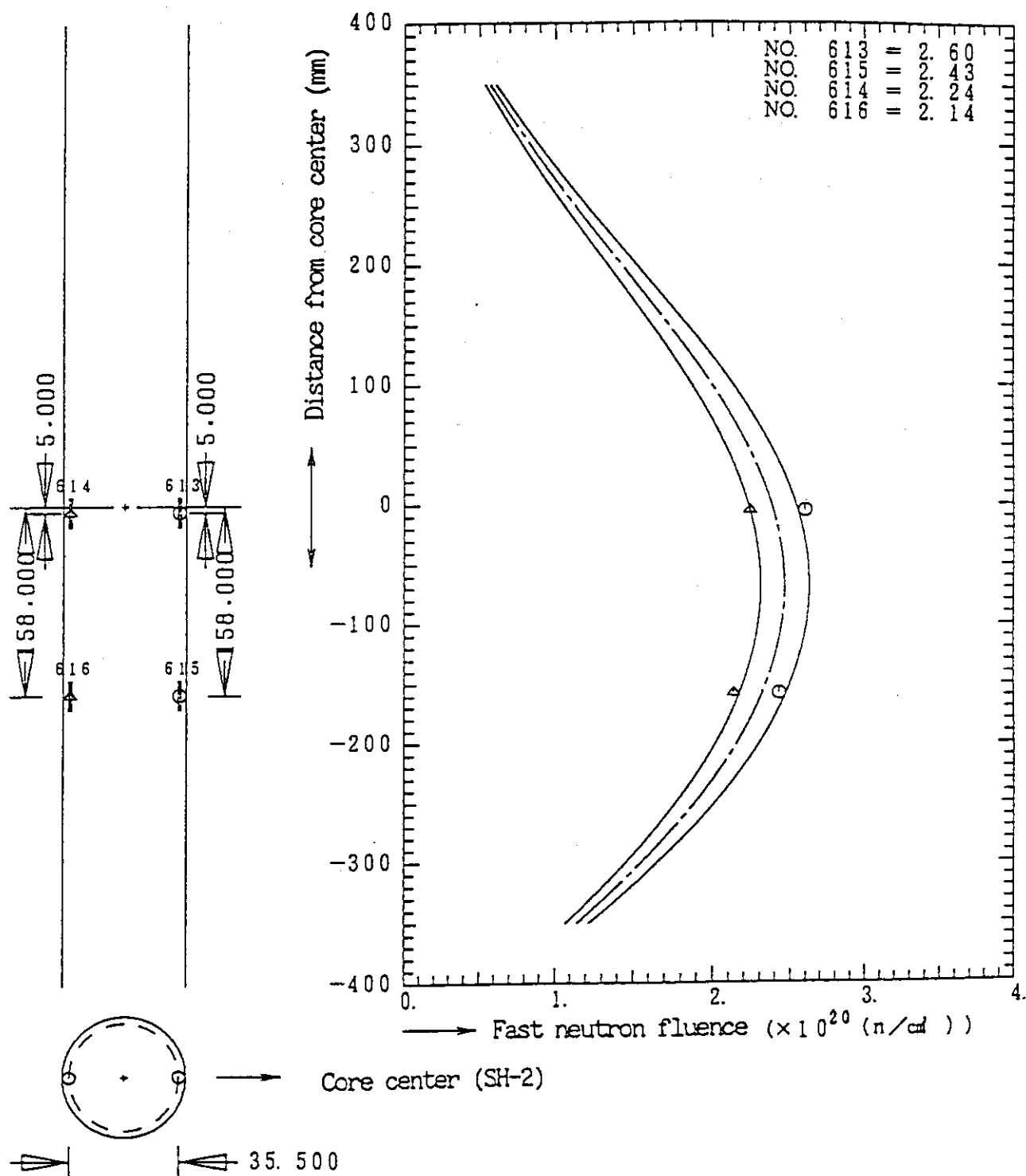


Fig. 4.3 Fast neutron fluence of 84F-12A capsule

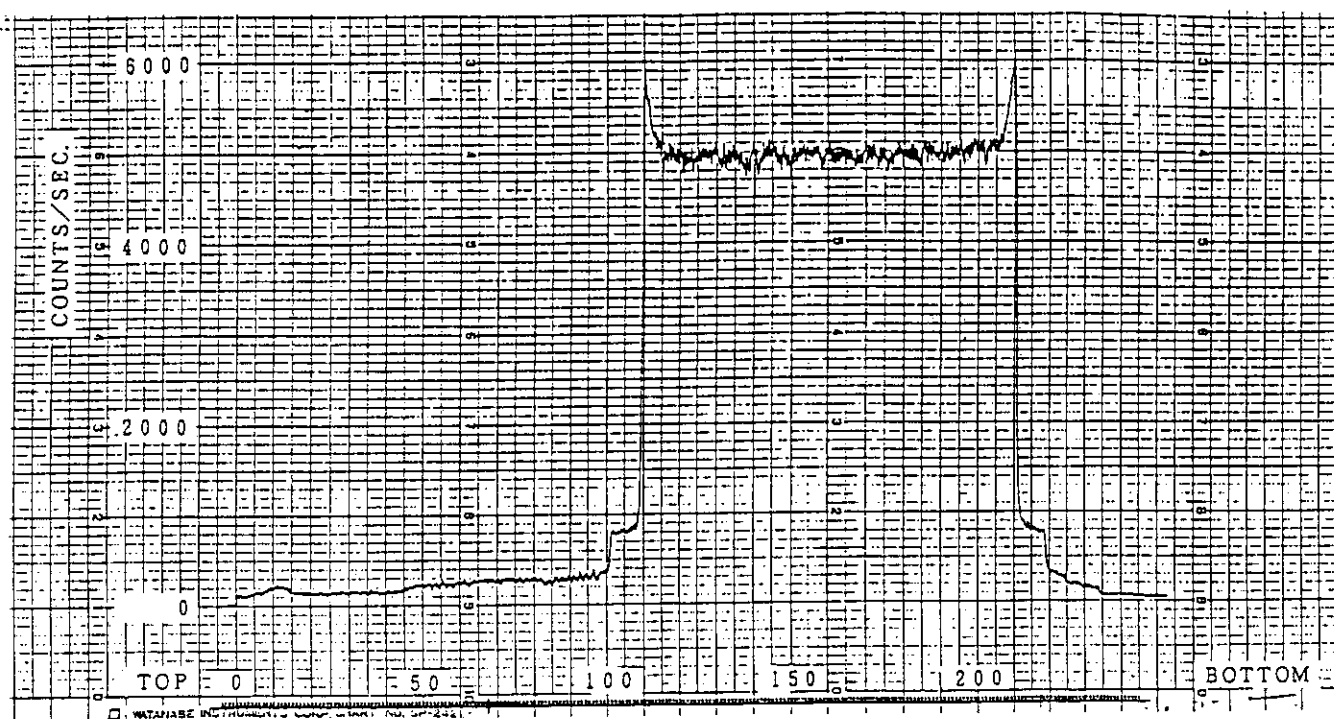


Fig. 4.4 Axial distribution of gross gamma ray in $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin

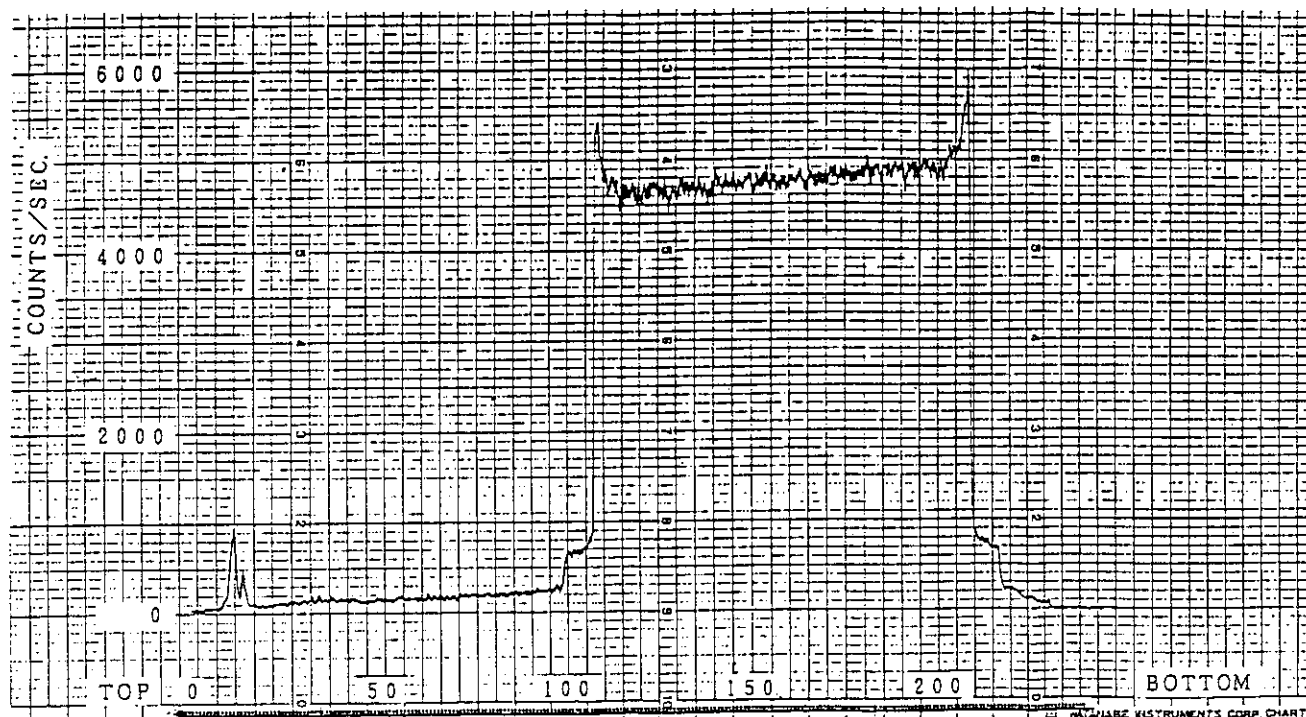


Fig. 4.5 Axial distribution of gross gamma ray in $(U,Pu)C_{1.1}$ fuel pin

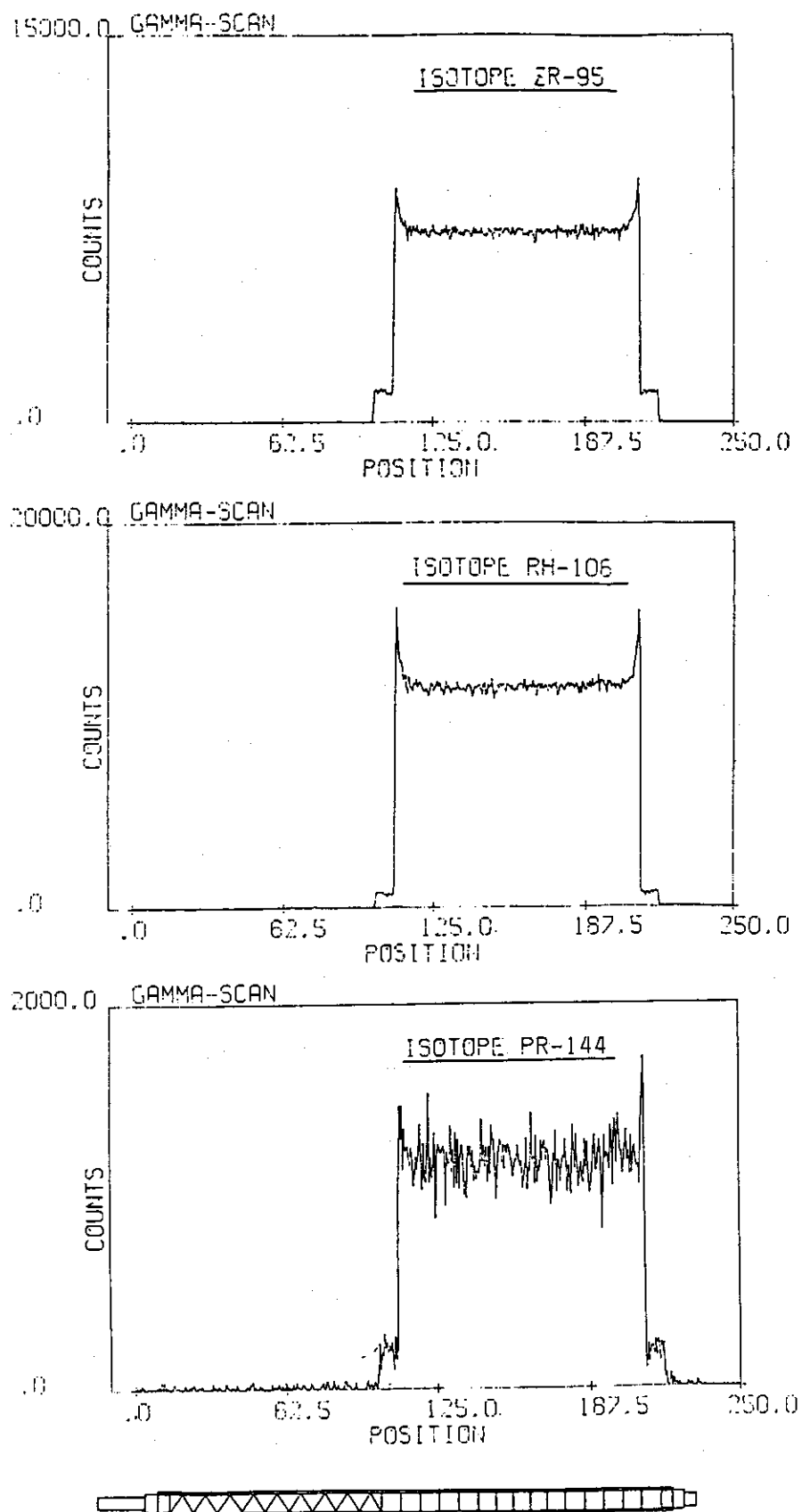


Fig. 4.6 Axial distribution of ^{95}Zr , ^{106}Rh , ^{144}Pr , ^{134}Cs and ^{137}Cs in $(\text{U,Pu})\text{C}_{1.0}$ fuel pin

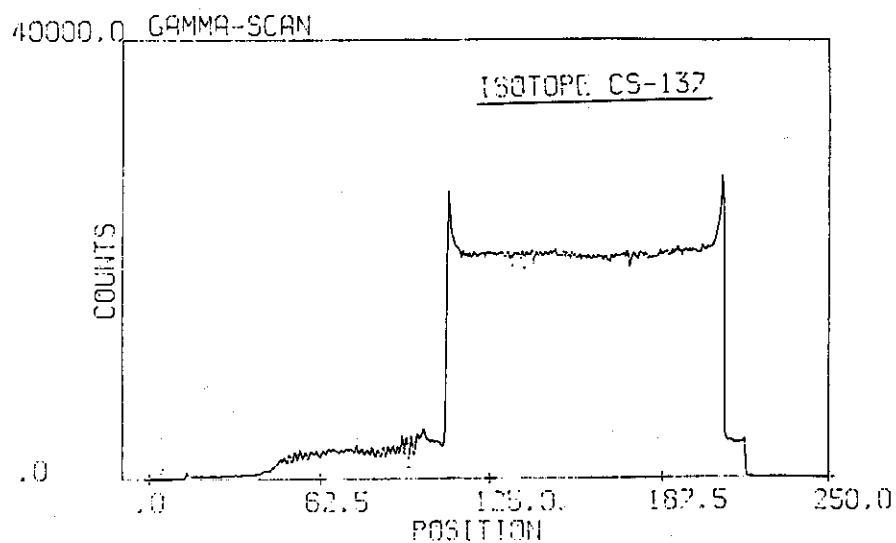
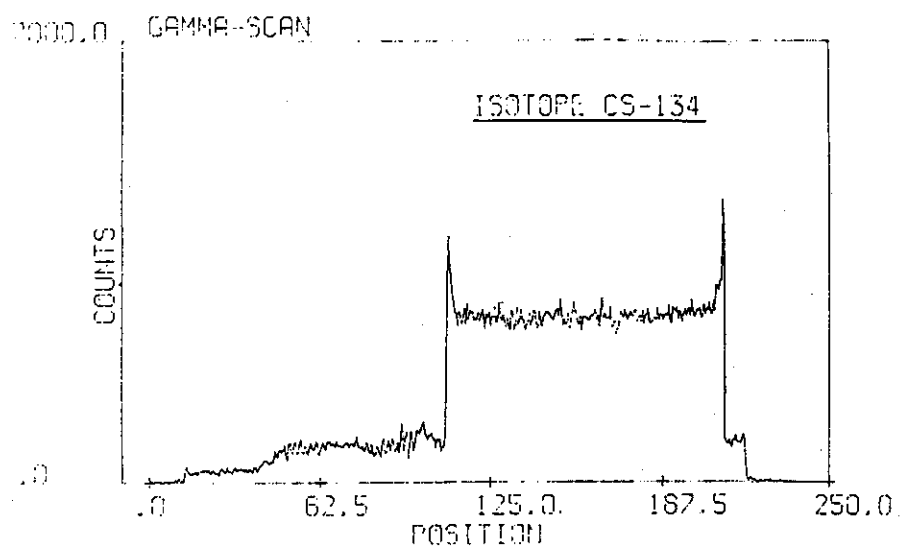


Fig. 4.6 (continued)

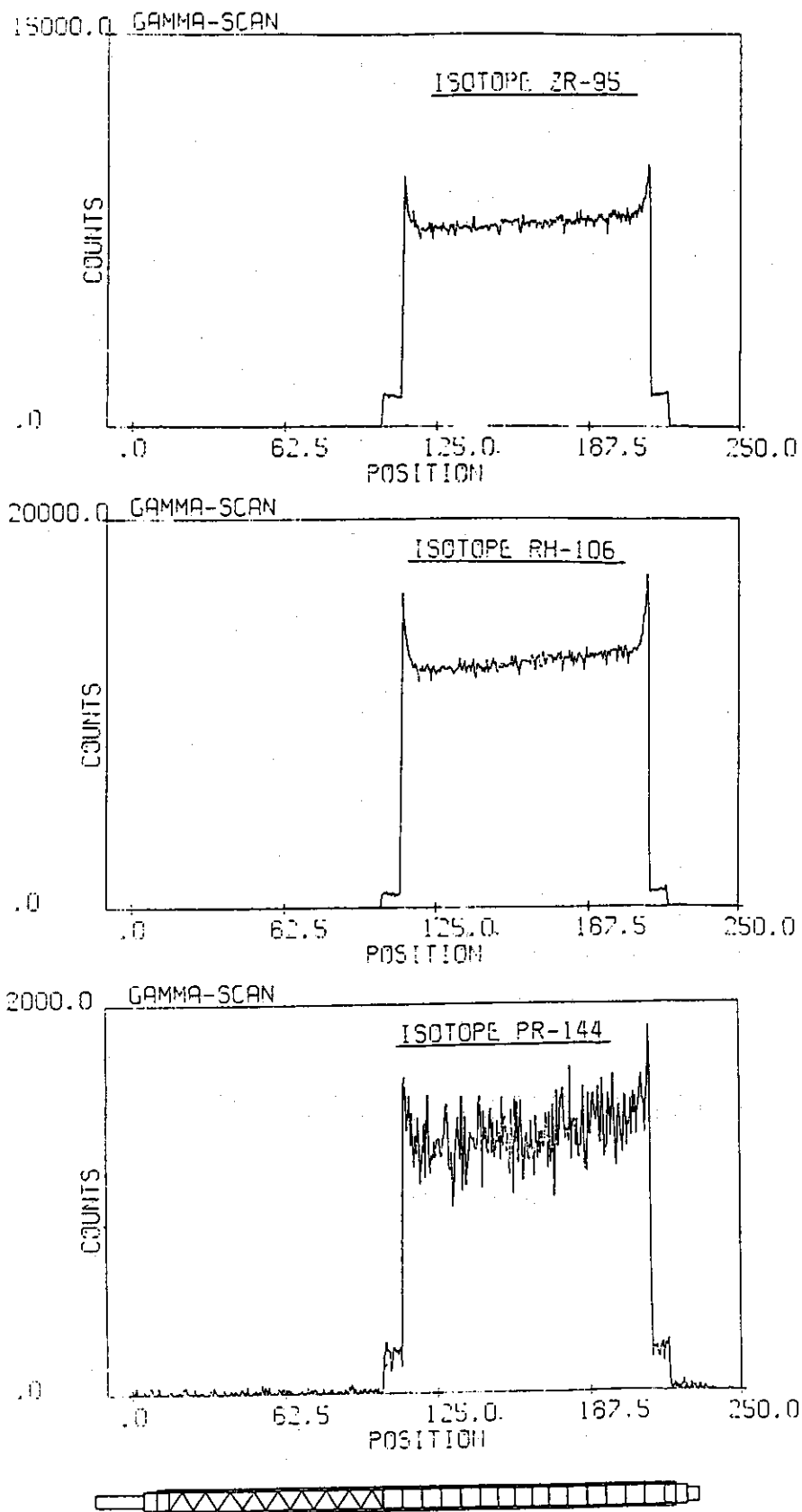


Fig. 4.7 Axial distribution of ^{95}Zr , ^{106}Rh , ^{144}Pr , ^{134}Cs and ^{137}Cs in $(\text{U,Pu})\text{C}_{1.1}$ fuel pin

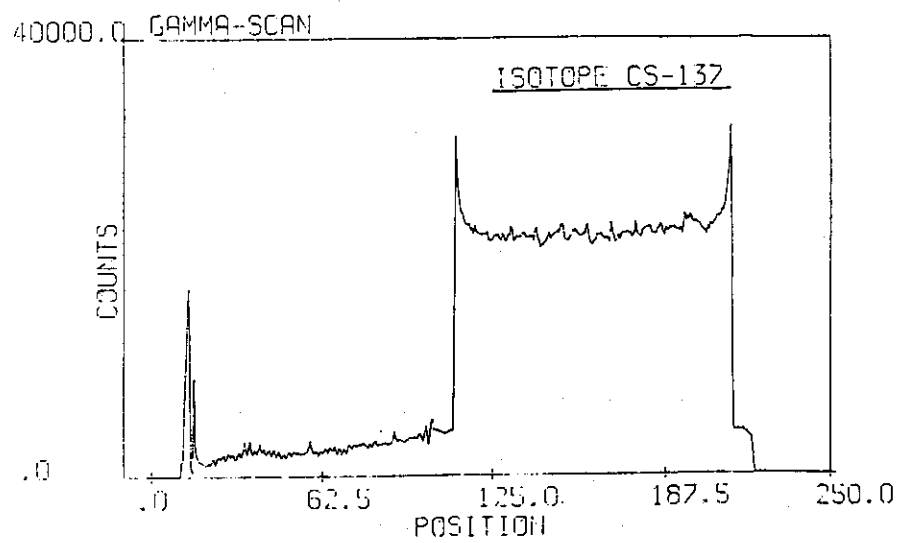
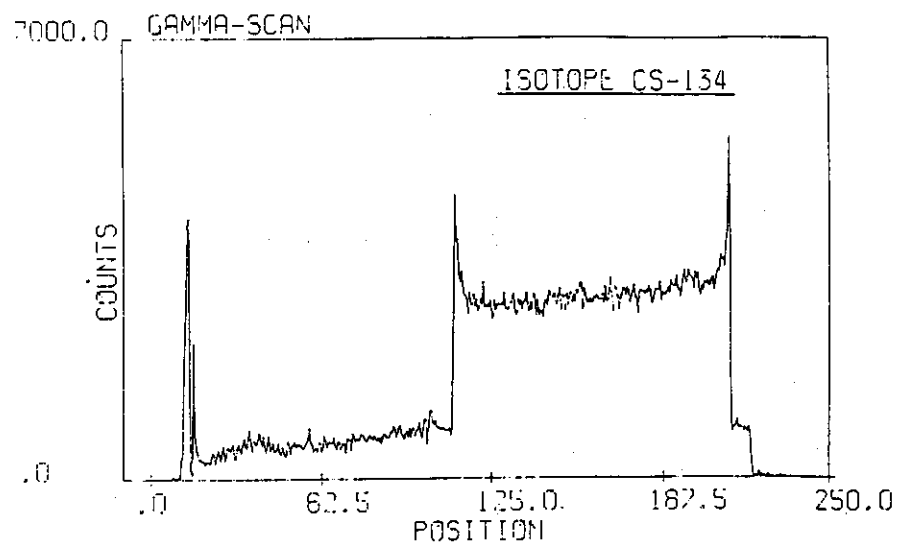
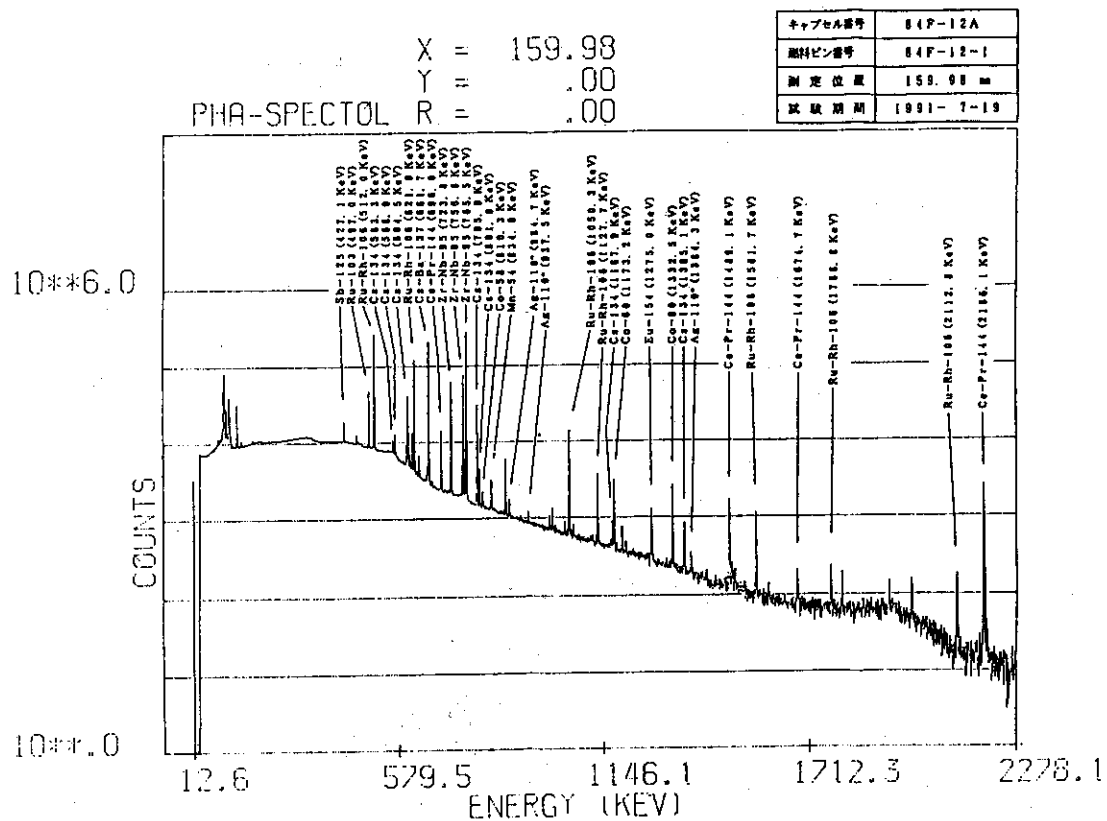
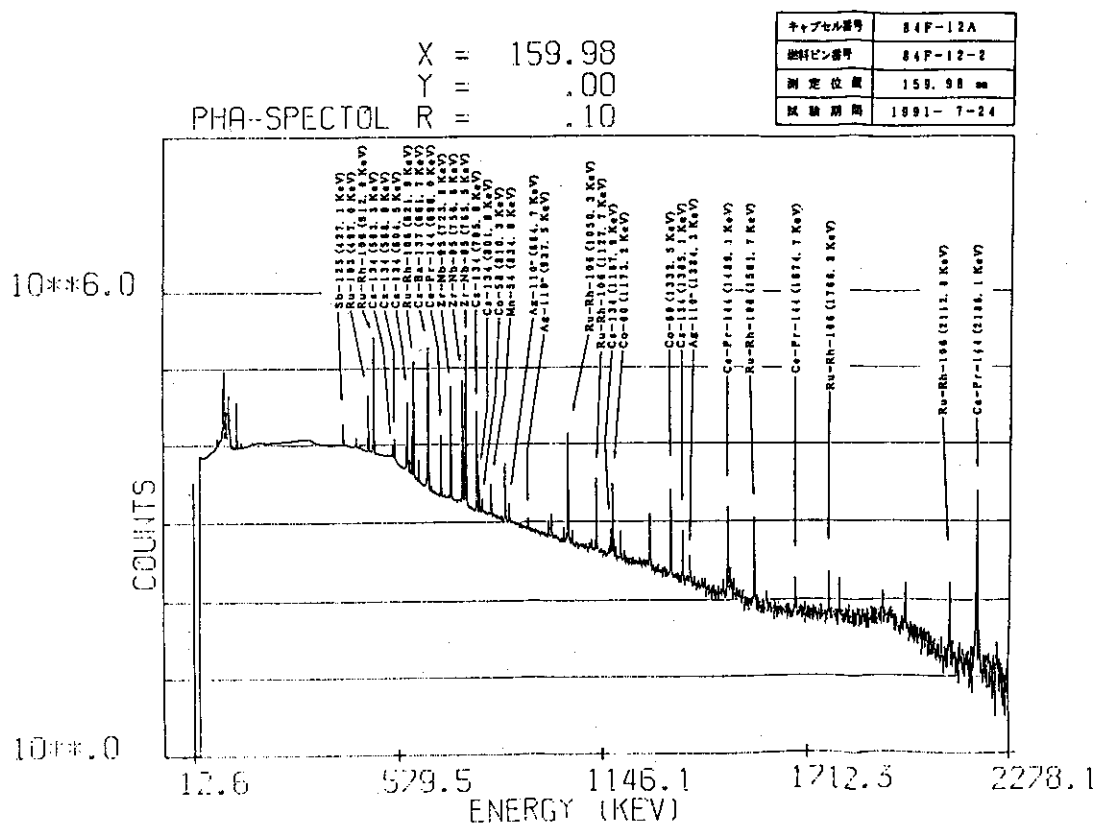
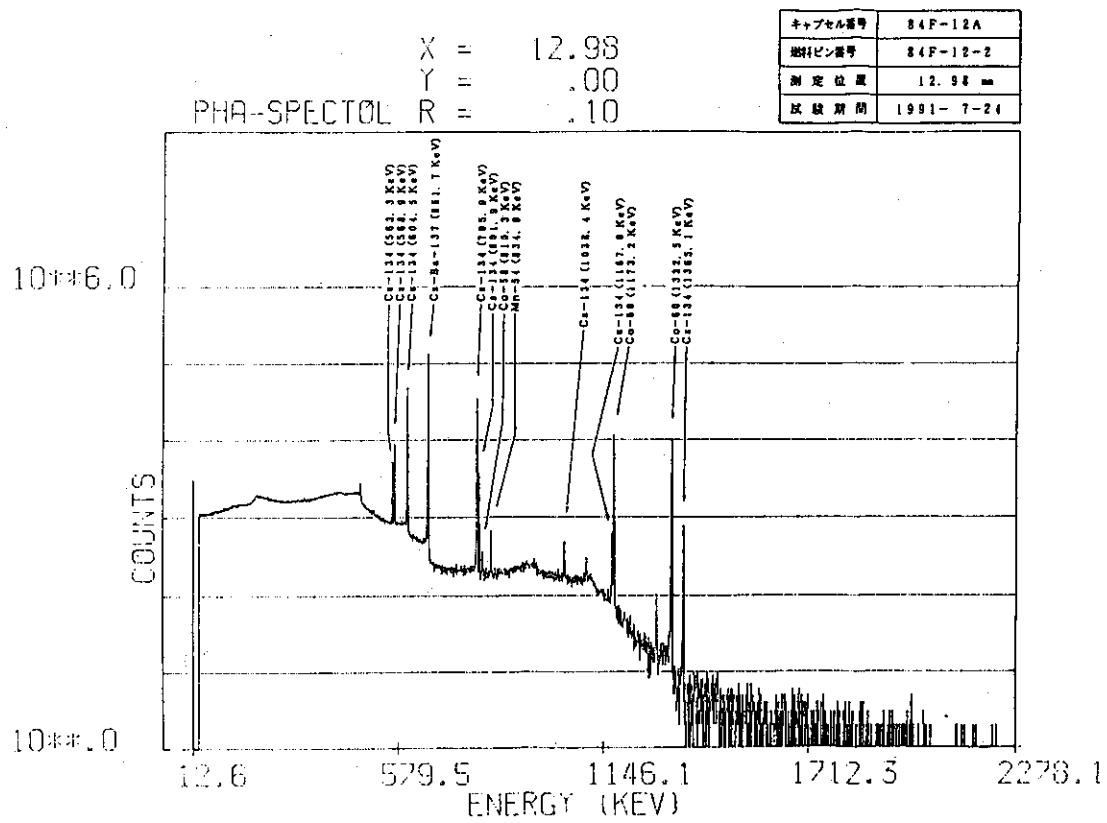


Fig. 4.7 (continued)

Fig. 4.8 Gamma ray spectrum on the center of fuel stack of (U,Pu) $C_{1.0}$ Fig. 4.9 Gamma ray spectrum on the center of fuel stack of (U,Pu) $C_{1.1}$

Fig. 4.10 Gamma ray spectrum on the upper endplug of (U,Pu)C_{1.1}

FILE NO. F-1-17

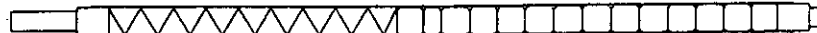
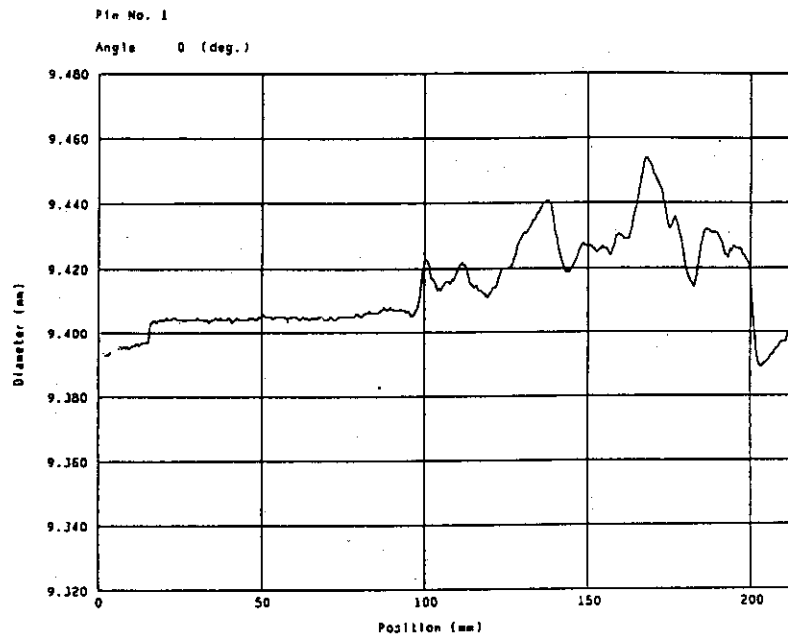


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.11 Results of diameter measurements
for (U,Pu) $C_{1.0}$ fuel pin at 0°

FILE NO. F-1-18

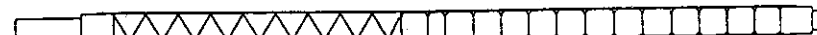
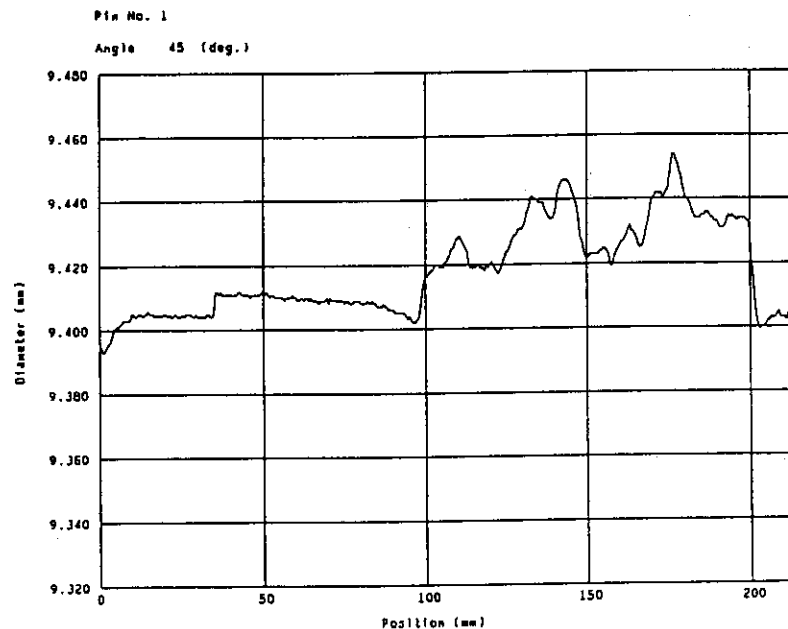


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.12 Results of diameter measurements
for (U,Pu) $C_{1.0}$ fuel pin at 45°

FILE NO. F-1-19

Pin No. 1

Angle 90 (deg.)

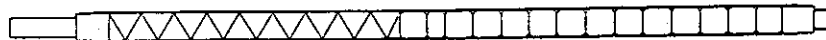
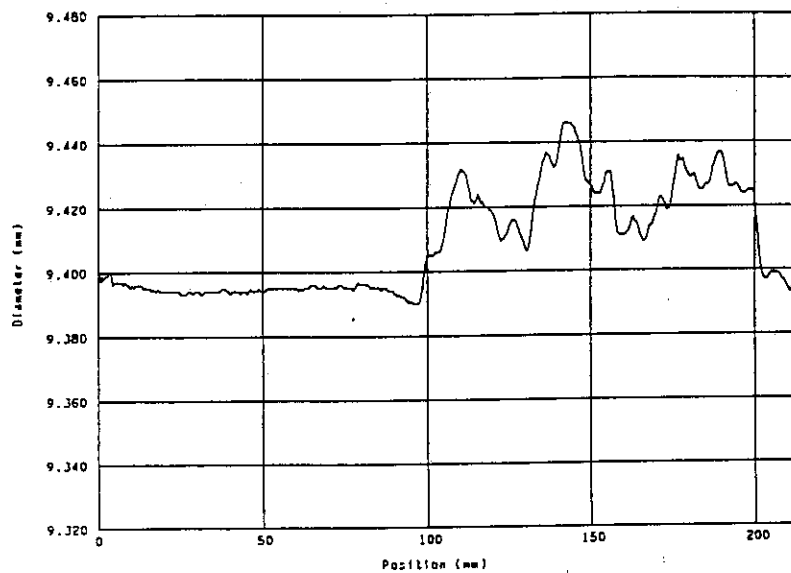


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.13 Results of diameter measurements
for (U,Pu) $C_{1.0}$ fuel pin at 90°

FILE NO. F-1-20

Pin No. 1

Angle 135 (deg.)

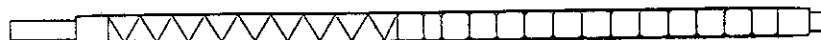
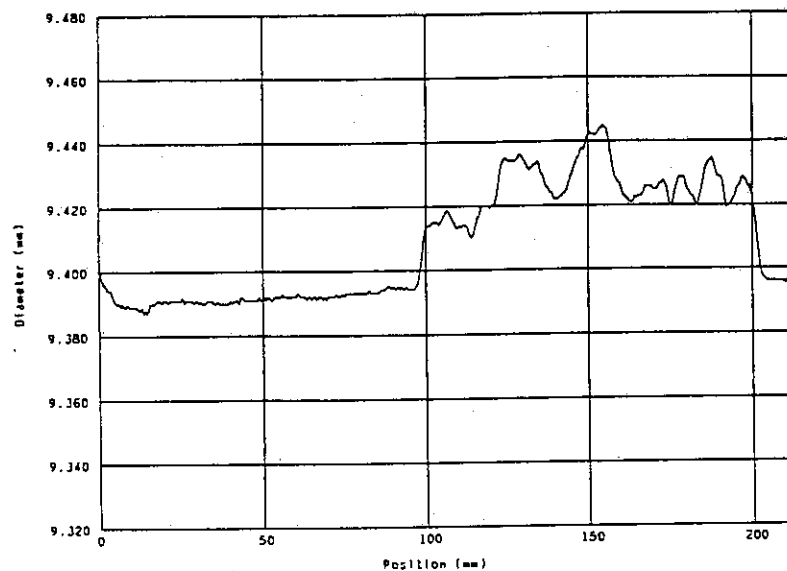


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.14 Results of diameter measurements
for (U,Pu) $C_{1.0}$ fuel pin at 135°

FILE NO. F-2-9

Pin No. 2

Angle 0 (deg.)

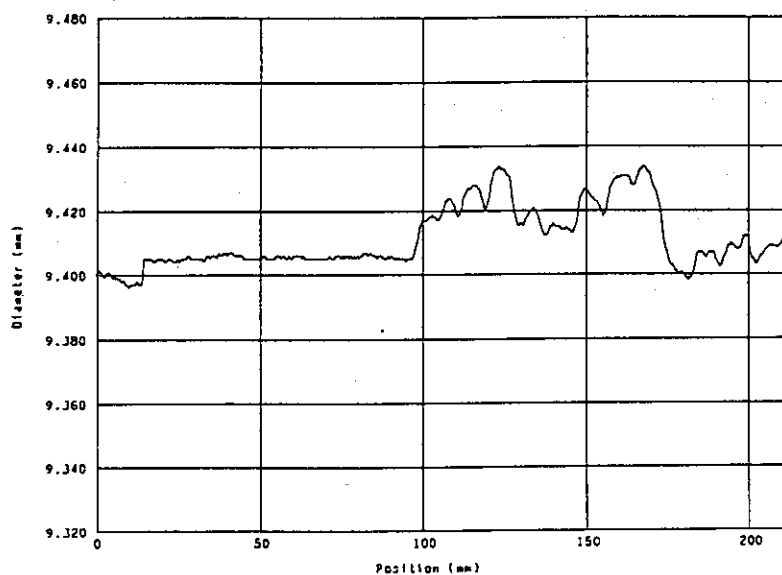


Fig. B4F-12A Profile Curve

Fig. 4.15 Results of diameter measurements for (U,Pu)C_{1.1} fuel pin at 0°

FILE NO. F-2-10

Pin No. 2

Angle 45 (deg.)

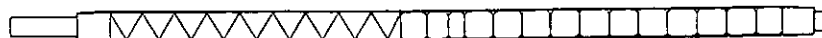
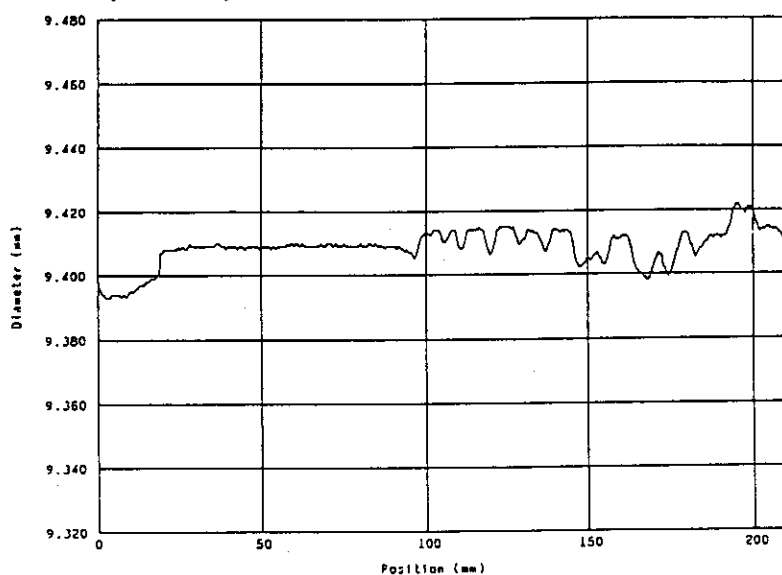


Fig. B4F-12A Profile Curve

Fig. 4.16 Results of diameter measurements for (U,Pu)C_{1.1} fuel pin at 45°

FILE NO. F-2-11

Pin No. 2

Angle 90 (deg.)

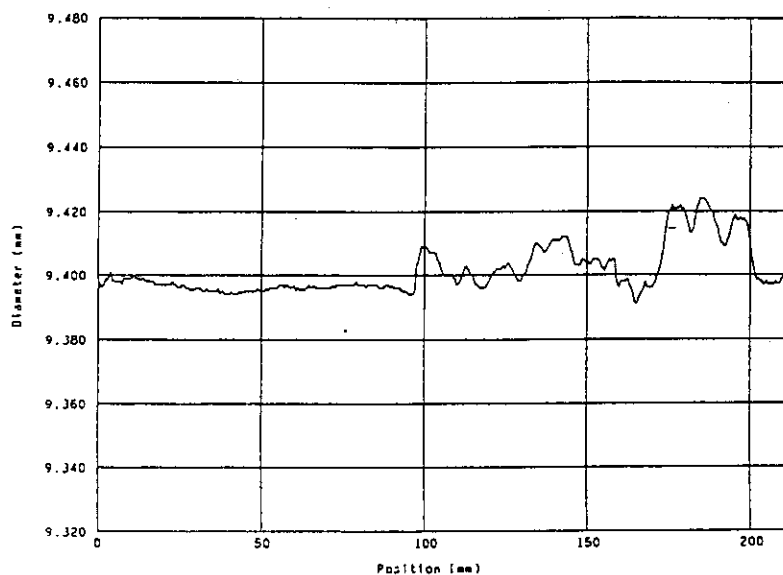


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.17 Results of diameter measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 90°

FILE NO. F-2-12

Pin No. 2

Angle 135 (deg.)

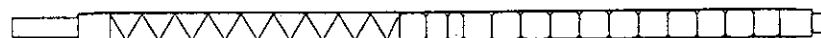
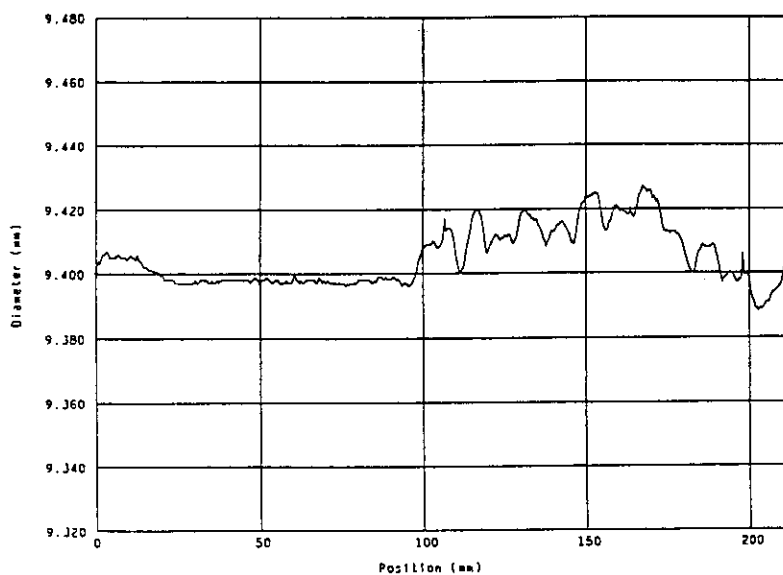


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.18 Results of diameter measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 135°

FILE NO. F-1-17

Pin No. 1

Angle 0 (deg.)

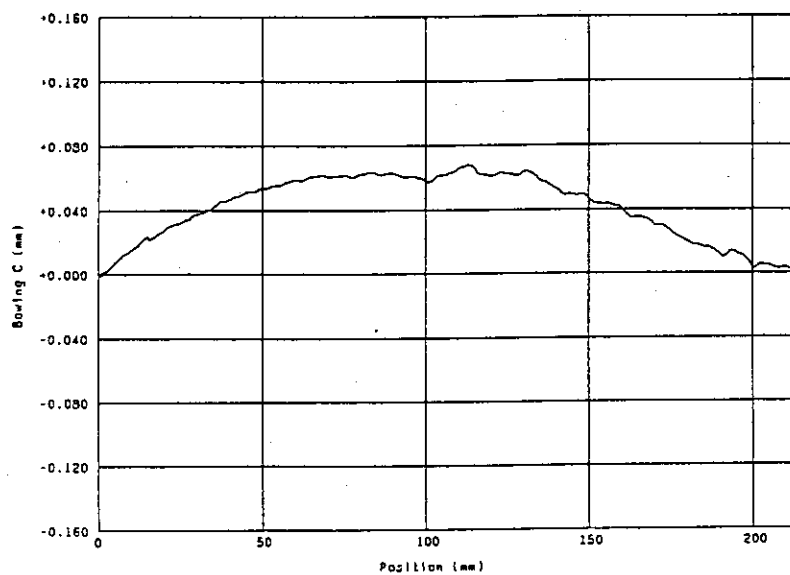


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.19 Results of bowing measurements for $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin at 0°

FILE NO. F-1-18

Pin No. 1

Angle 45 (deg.)

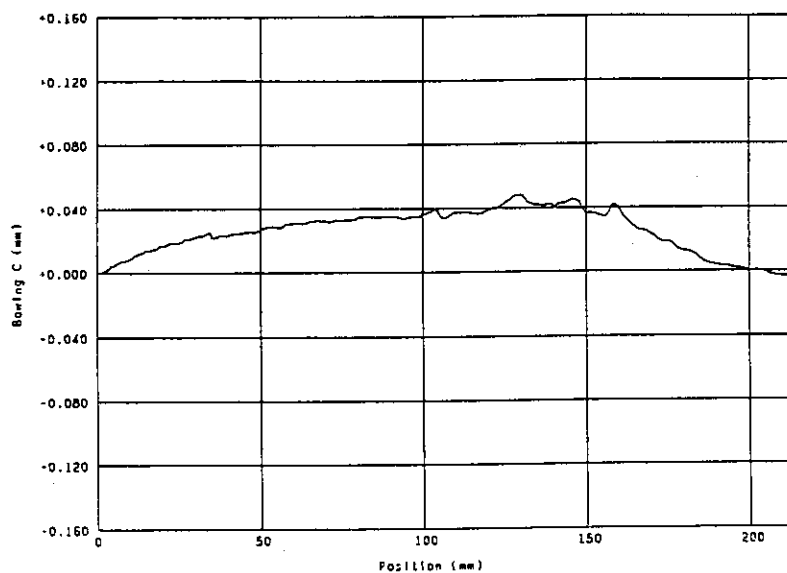


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.20 Results of bowing measurements for $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin at 45°

FILE NO. F-1-19

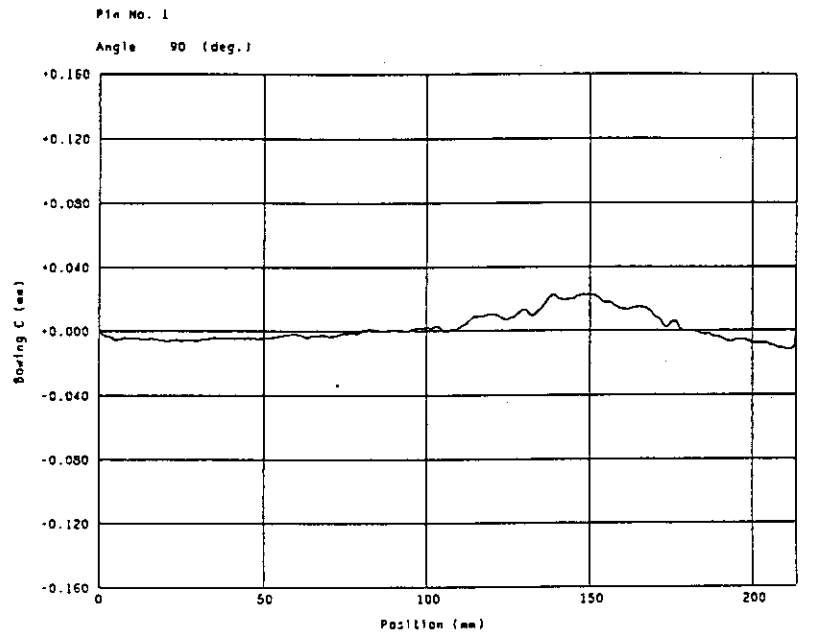


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.21 Results of bowing measurements for $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin at 90°

FILE NO. F-1-20

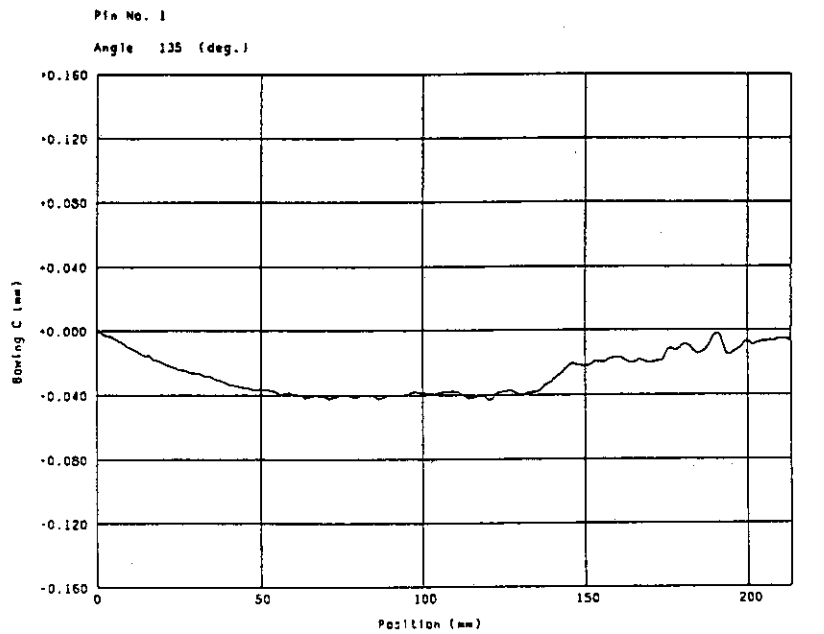


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.22 Results of bowing measurements for $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin at 135°

FILE NO. F-2-9

Pin No. 2

Angle 0 (deg.)

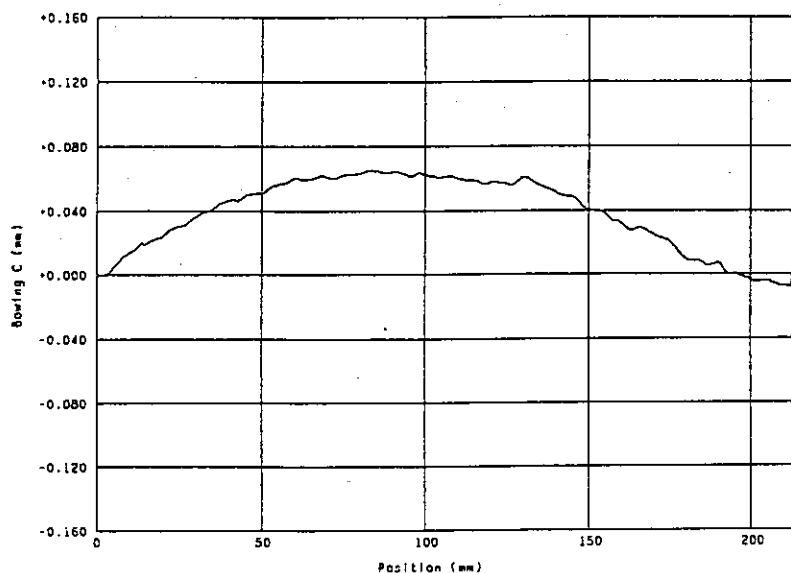


Fig. B4F-12A Profile Curve

Fig. 4.23 Results of bowing measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 0°

FILE NO. F-2-10

Pin No. 2

Angle 45 (deg.)

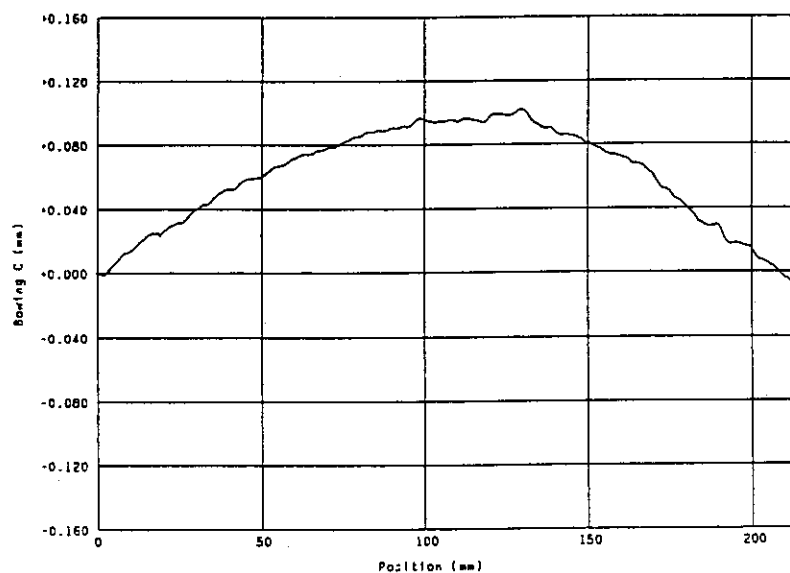


Fig. B4F-12A Profile Curve

Fig. 4.24 Results of bowing measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 45°

FILE NO. F-2-11

Pin No. 2

Angle 90 (deg.)

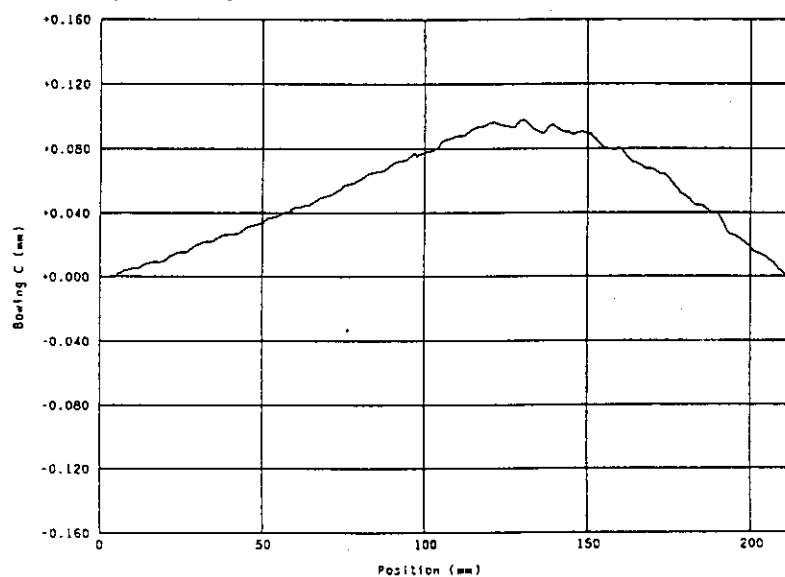


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.25 Results of bowing measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 90°

FILE NO. F-2-12

Pin No. 2

Angle 135 (deg.)

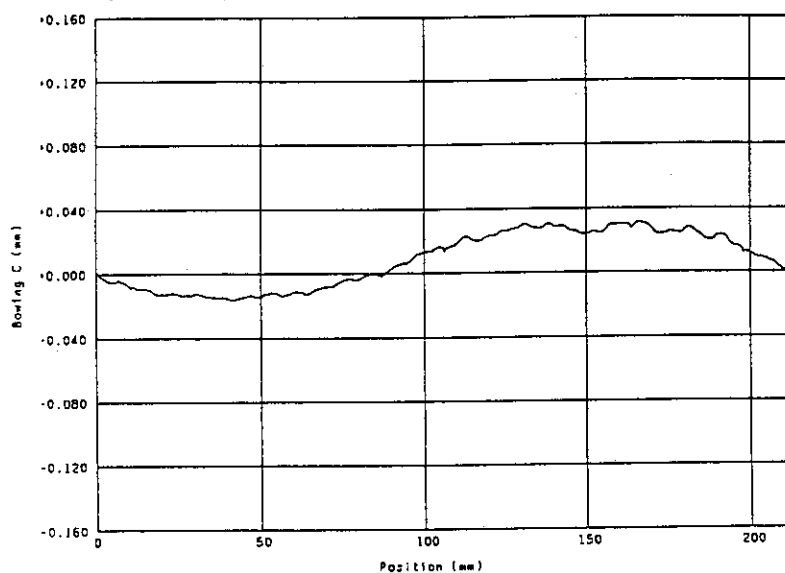
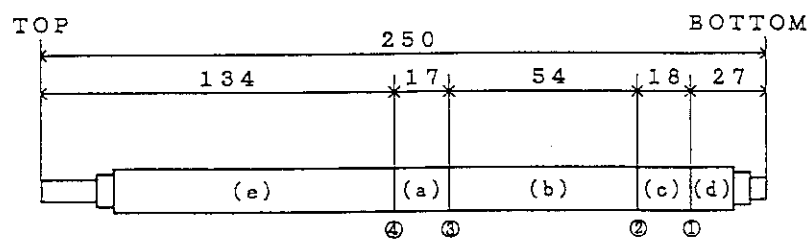
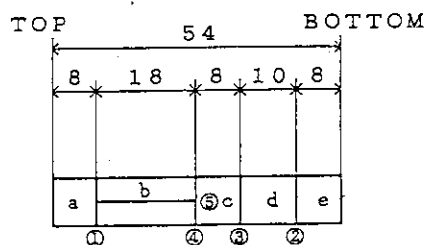


Fig. 84F-12A Profile Curve

Fig. 4.26 Results of bowing measurements for (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pin at 135°

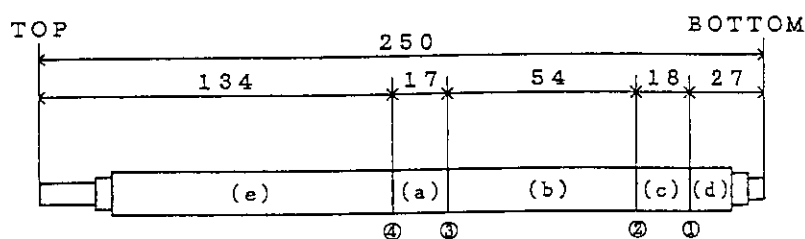


Sample name : (a)121A
(b)121B
(c)121C

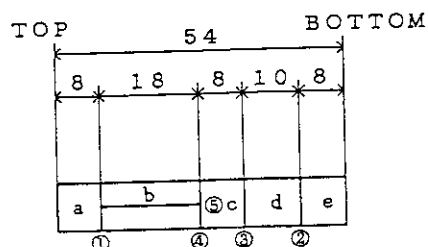


Sample name : (a)121B1
(b)121B2
(c)121B3
(d)121B4
(e)121B5

Fig. 4.27 Cutting and sectioning position for (U,Pu)C_{1.0} fuel pin



Sample name : (a)122A
(b)122B
(c)122C



Sample name : (a)122B1
(b)122B2
(c)122B3
(d)122B4
(e)122B5

Fig. 4.28 Cutting and sectioning position for (U,Pu)C_{1.1} fuel pin

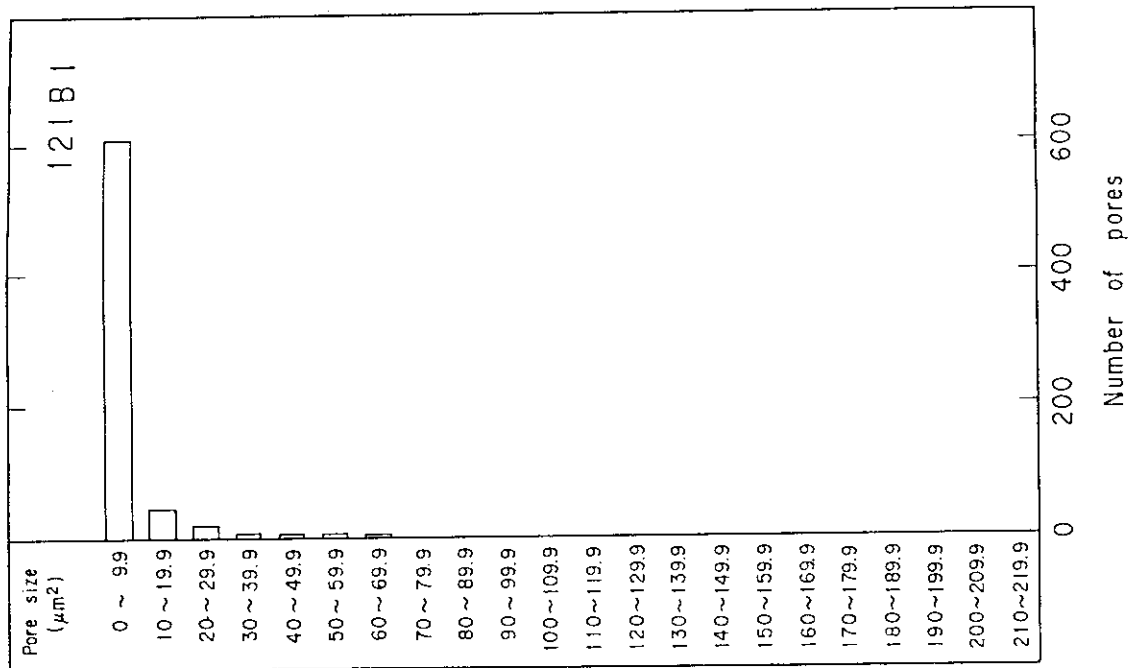


Fig. 4.29 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B1, OUTER)

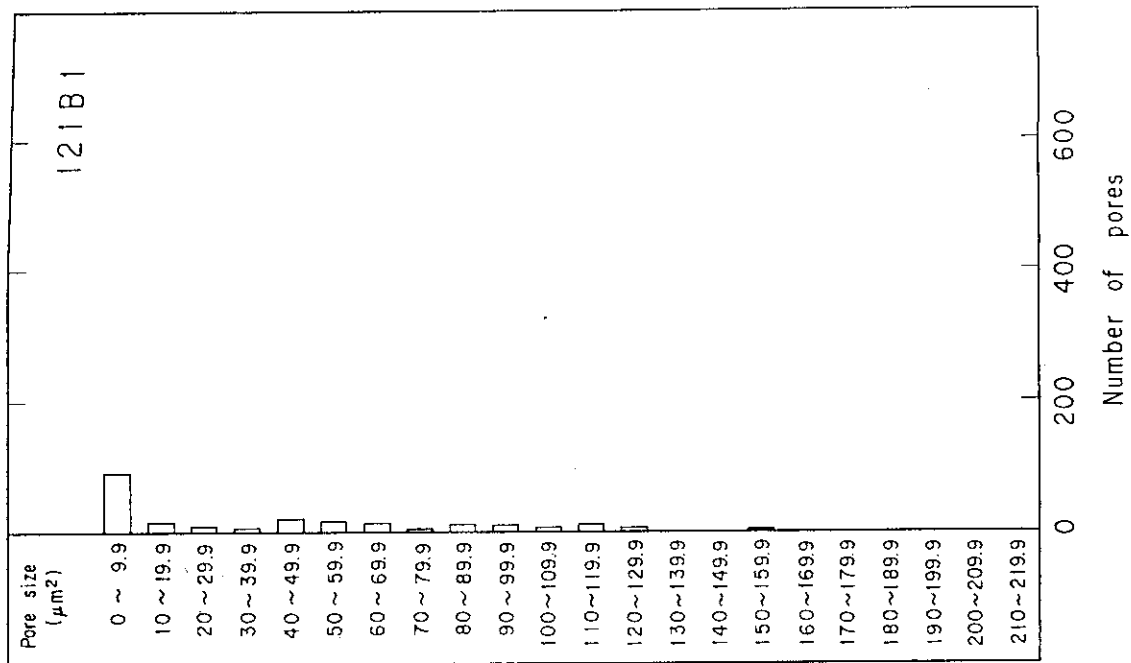


Fig. 4.30 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B1, INTERMEDIATE ①)

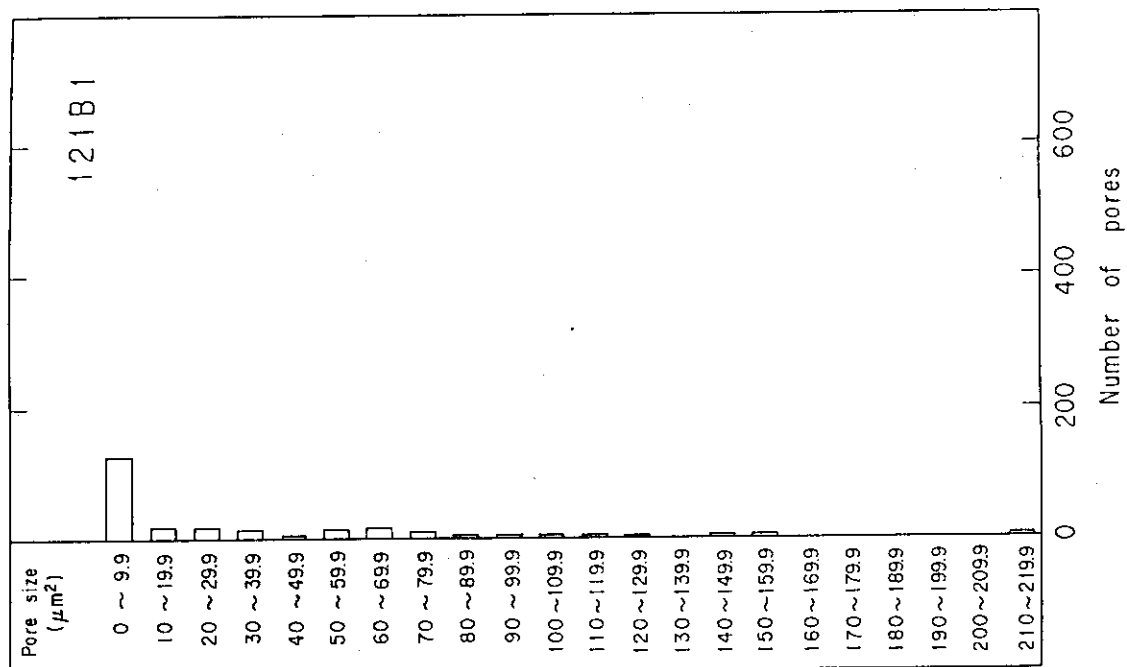


Fig. 4.32 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B1, CENTER)

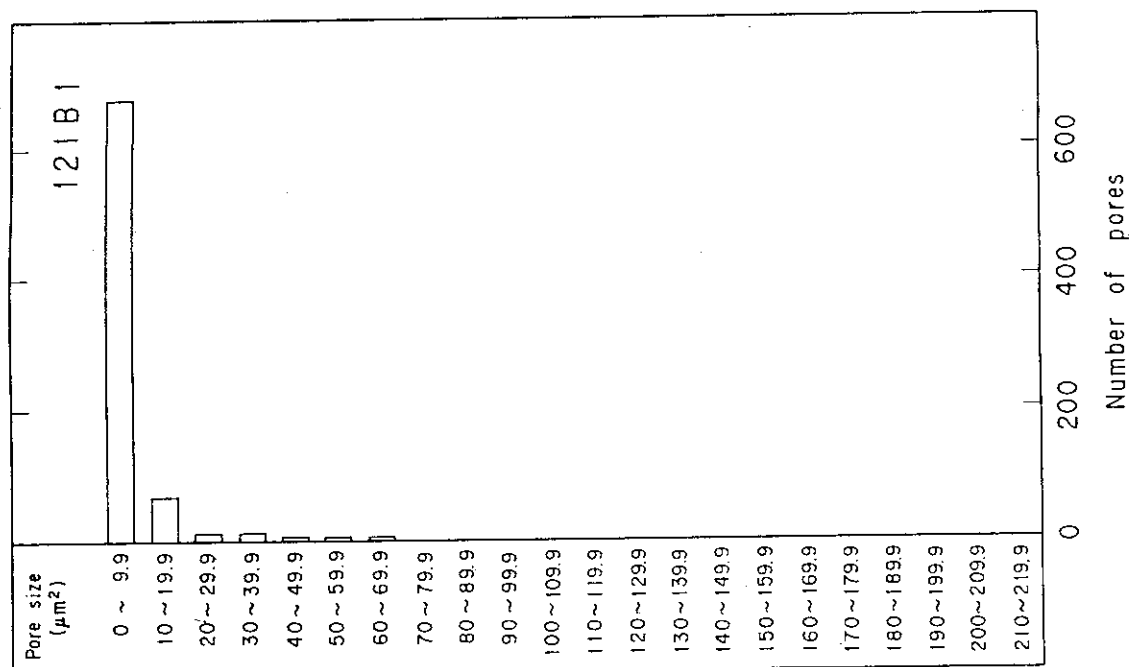


Fig. 4.31 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B1, INTERMEDIATE ②)

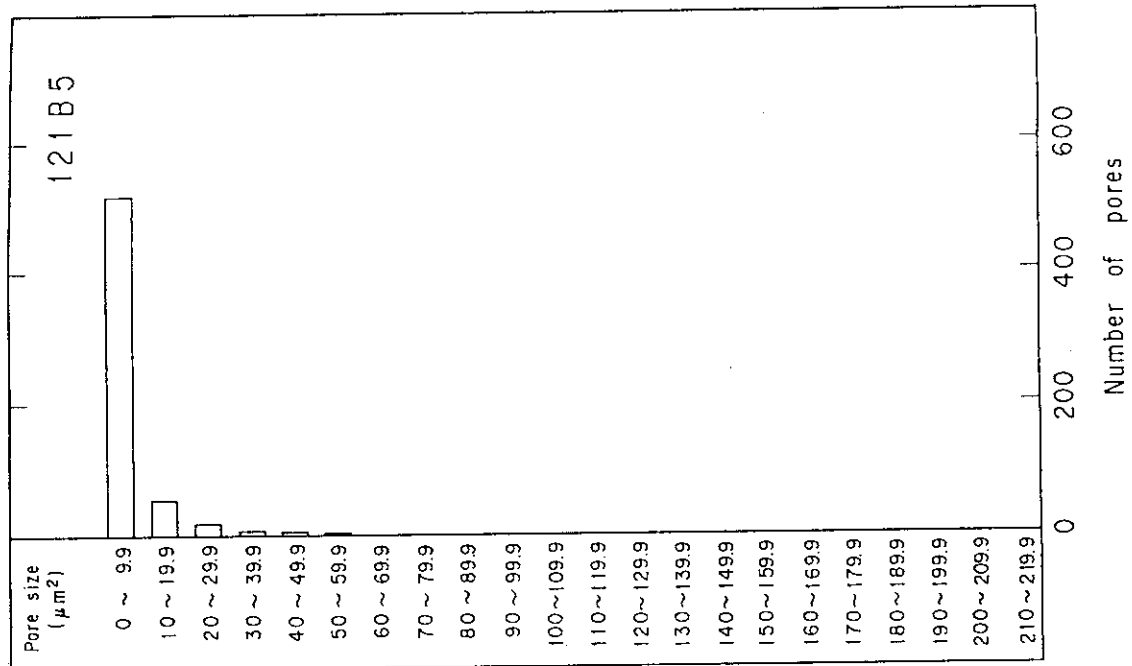


Fig. 4.33 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B5, OUTER)

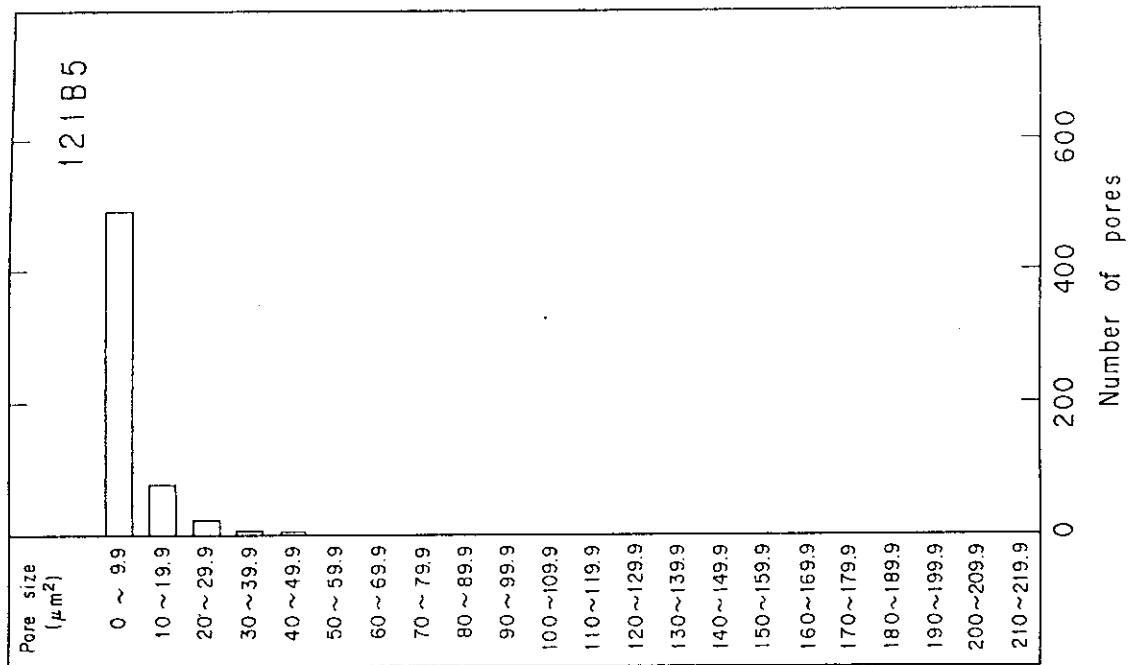


Fig. 4.34 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.0}$ fuel pellet (121B5, INTERMEDIATE ①)

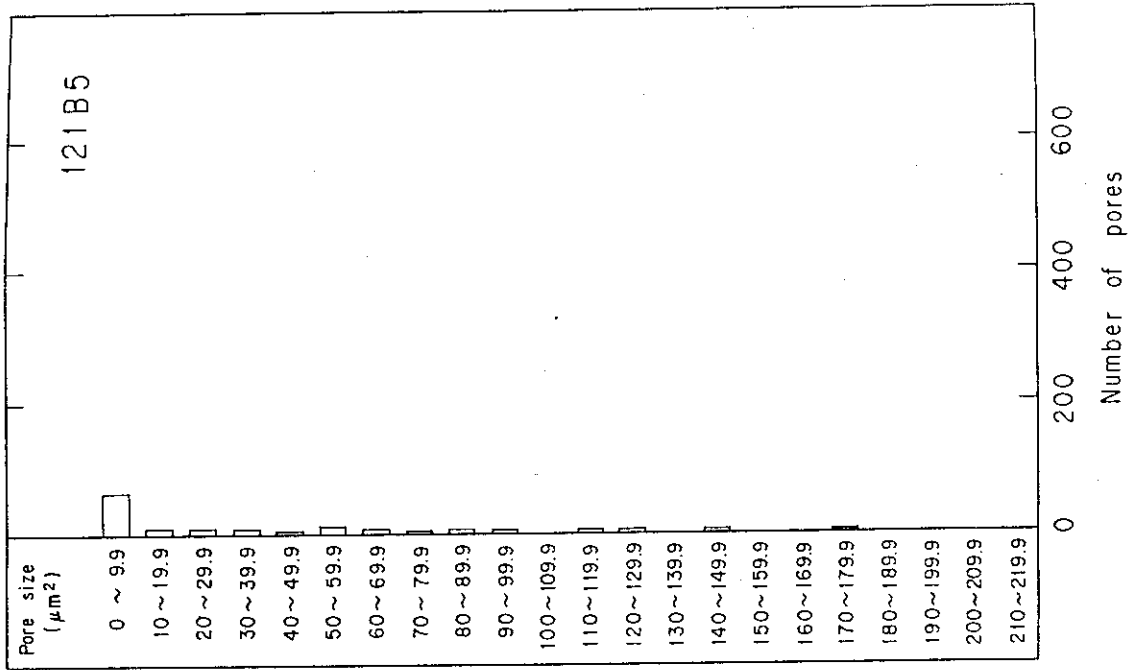


Fig. 4.36 Pore distribution of (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (121B5, CENTER)

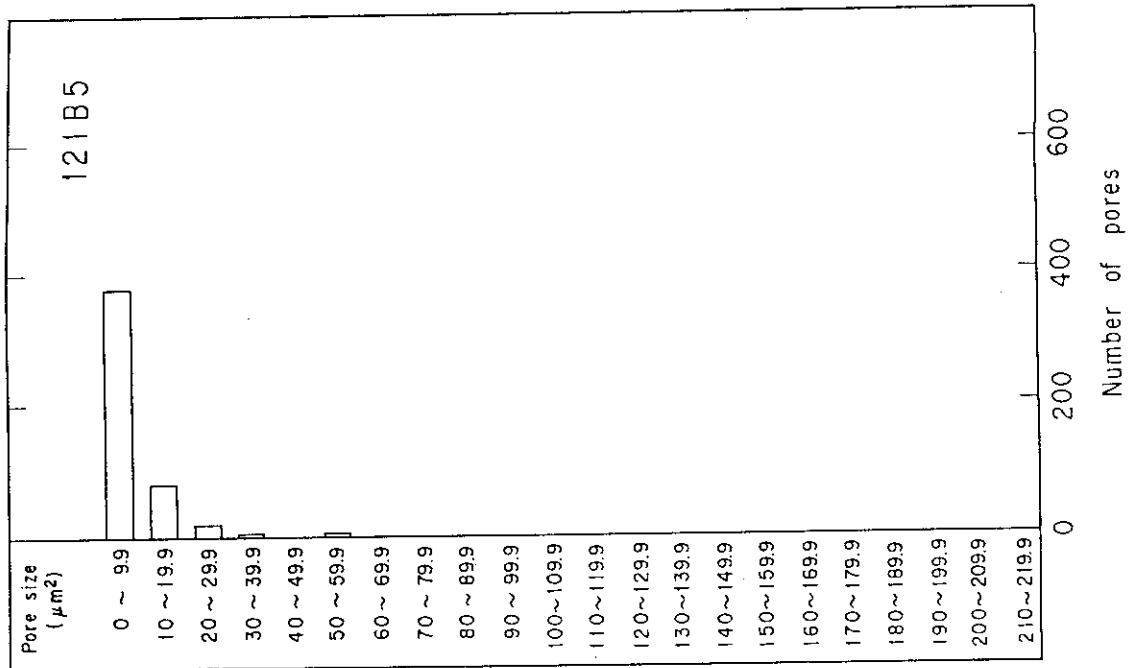


Fig. 4.35 Pore distribution of (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (121B5, INTERMEDIATE ②)

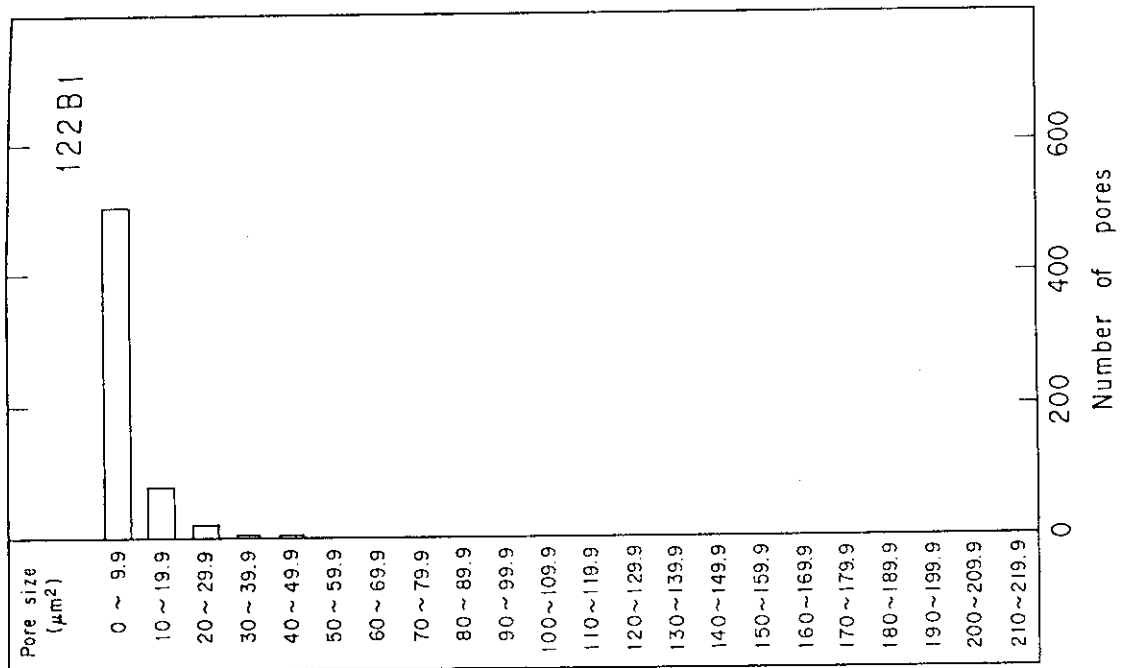


Fig. 4.37 Pore distribution of (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (122B1, OUTER)

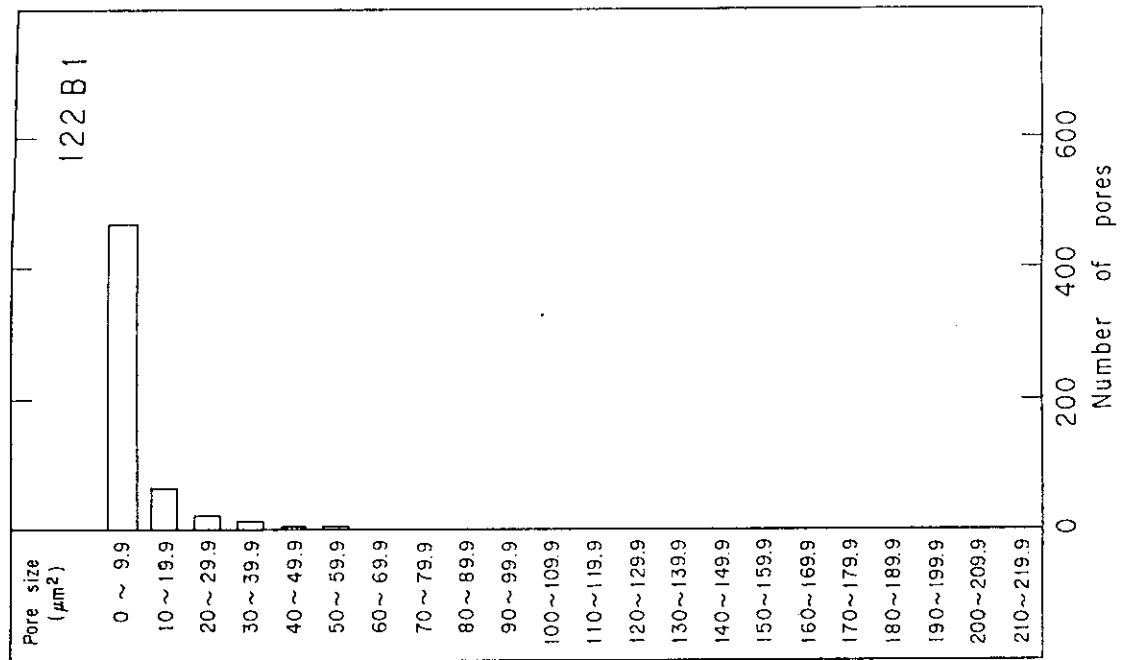


Fig. 4.38 Pore distribution of (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (122B1, INTERMEDIATE ①)

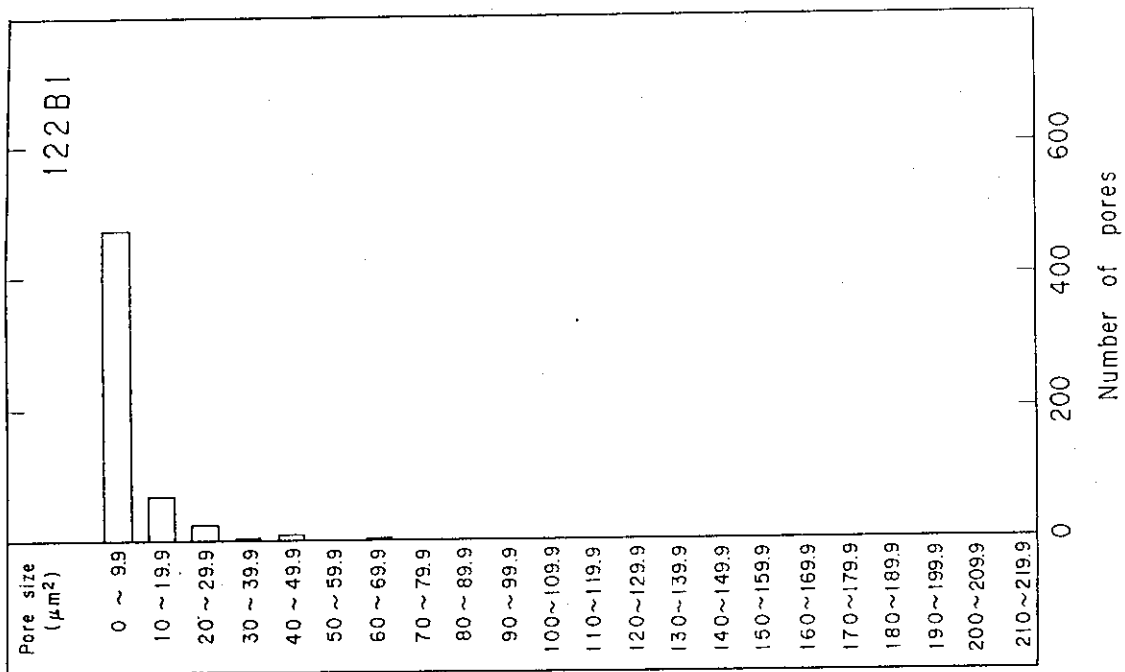


Fig. 4.40 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.1}$ fuel pellet (122B1, CENTER)

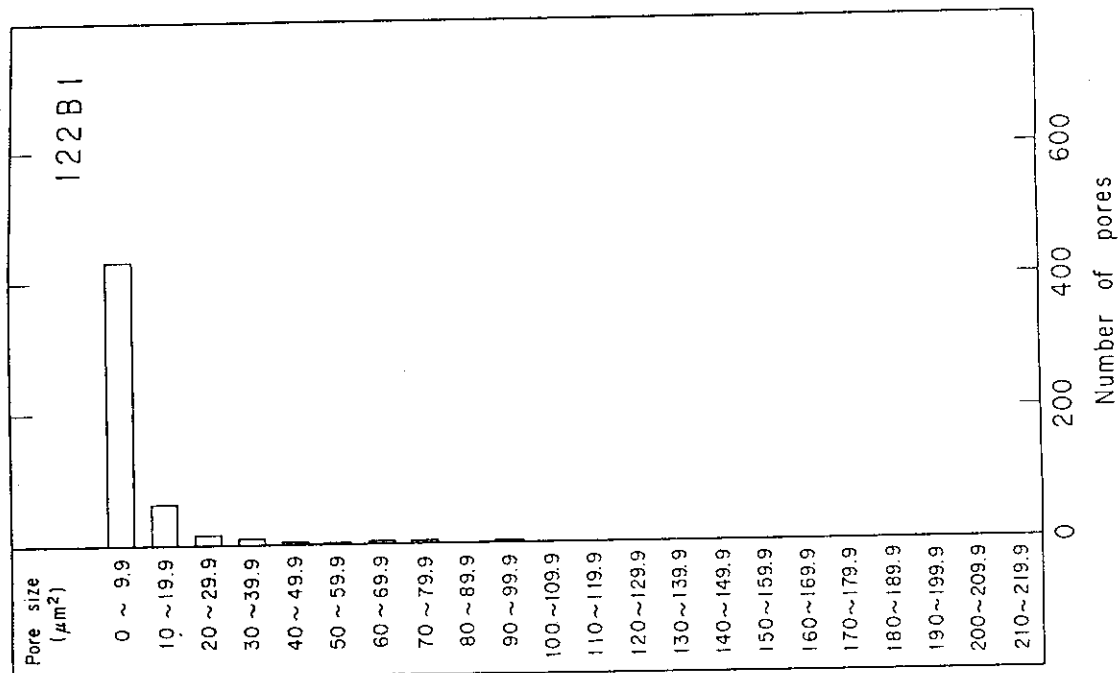


Fig. 4.39 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.1}$ fuel pellet (122B1, INTERMEDIATE (2))

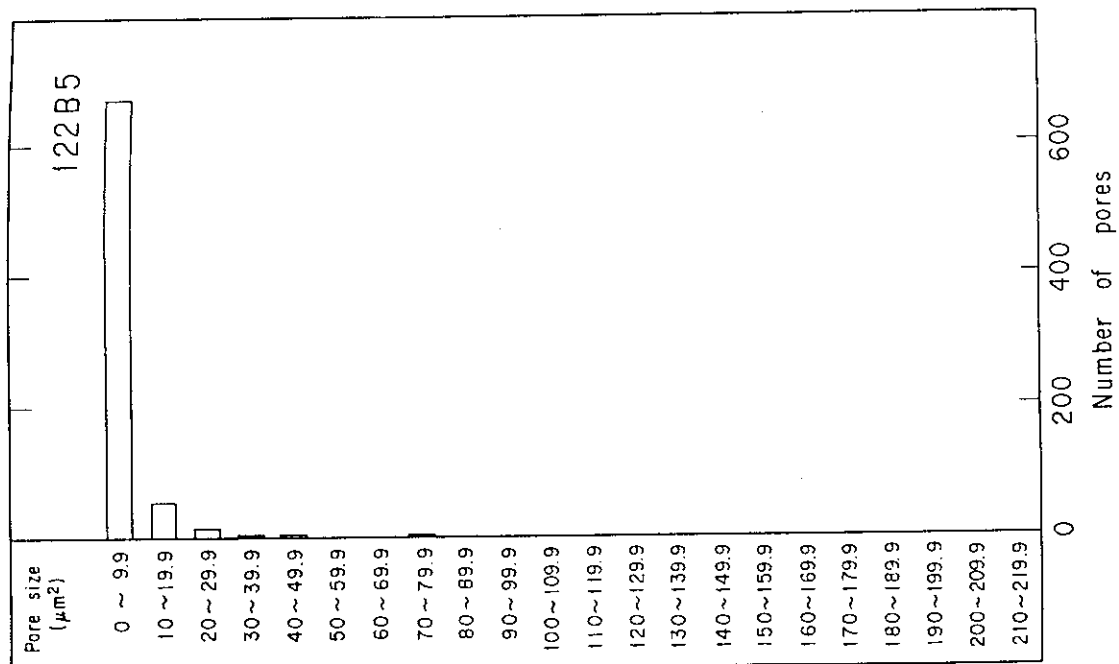


Fig. 4.41 Pore distribution of (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pellet (122B5, OUTER)

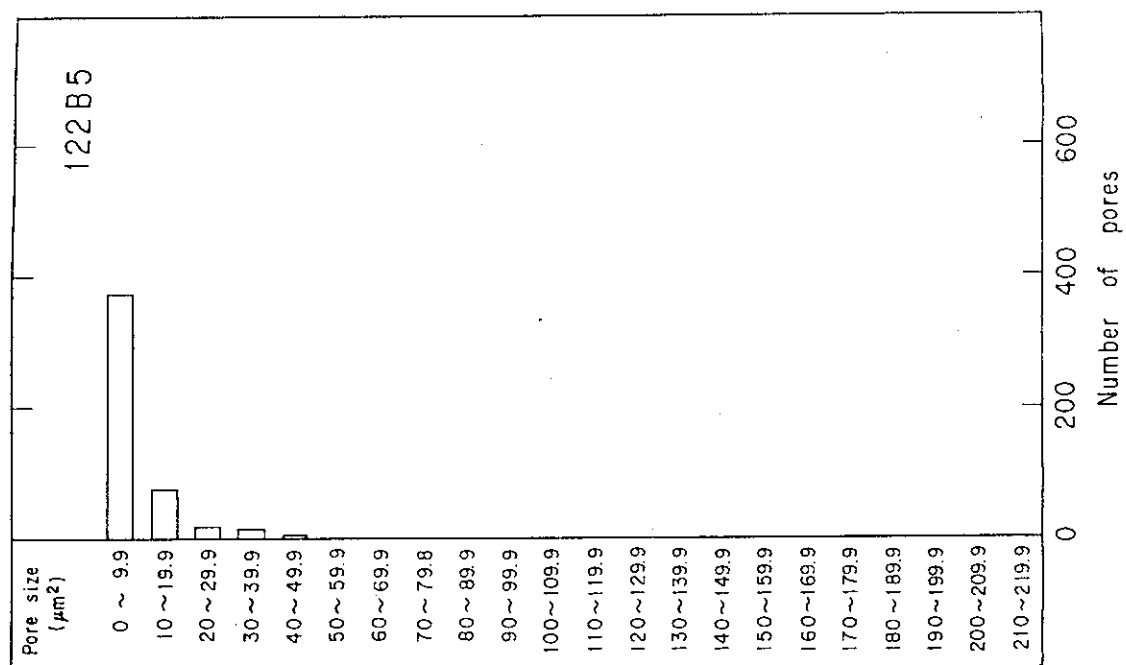


Fig. 4.42 Pore distribution of (U,Pu) $C_{1.1}$ fuel pellet (122B5, INTERMEDIATE①)

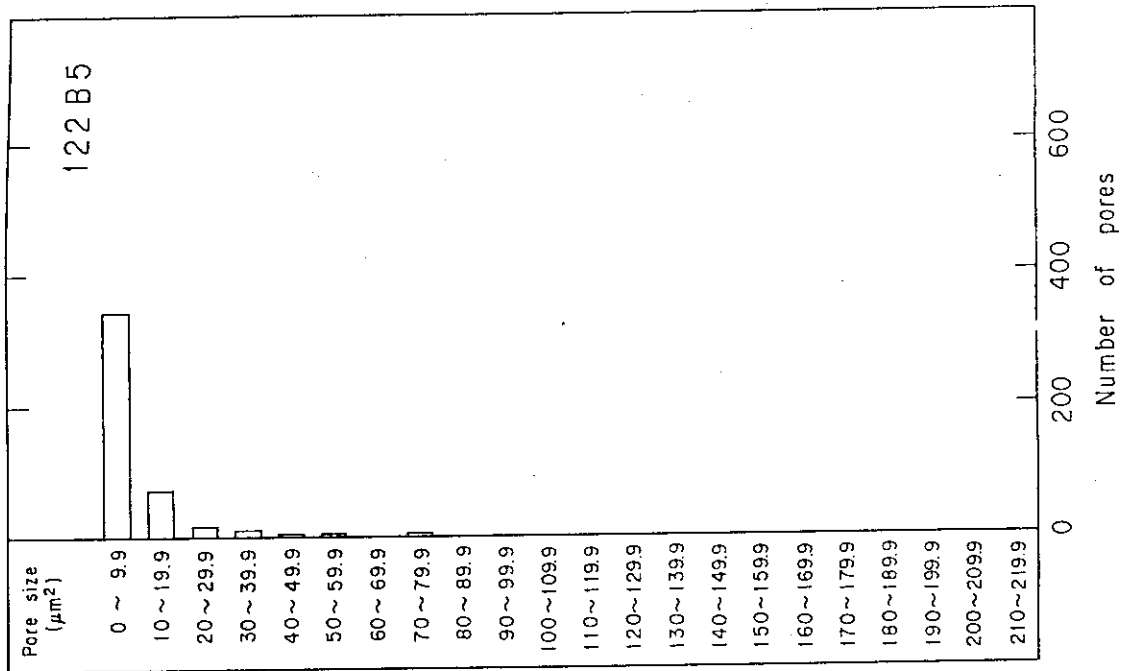


Fig. 4.44 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.1}$ fuel pellet (122B5, CENTER)

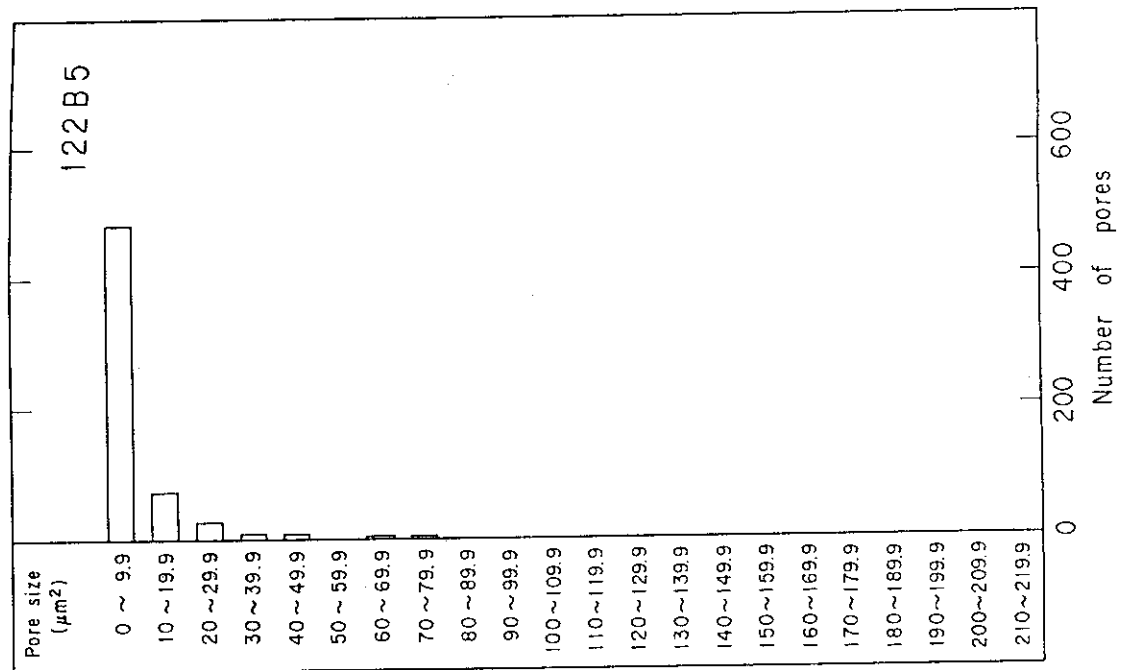
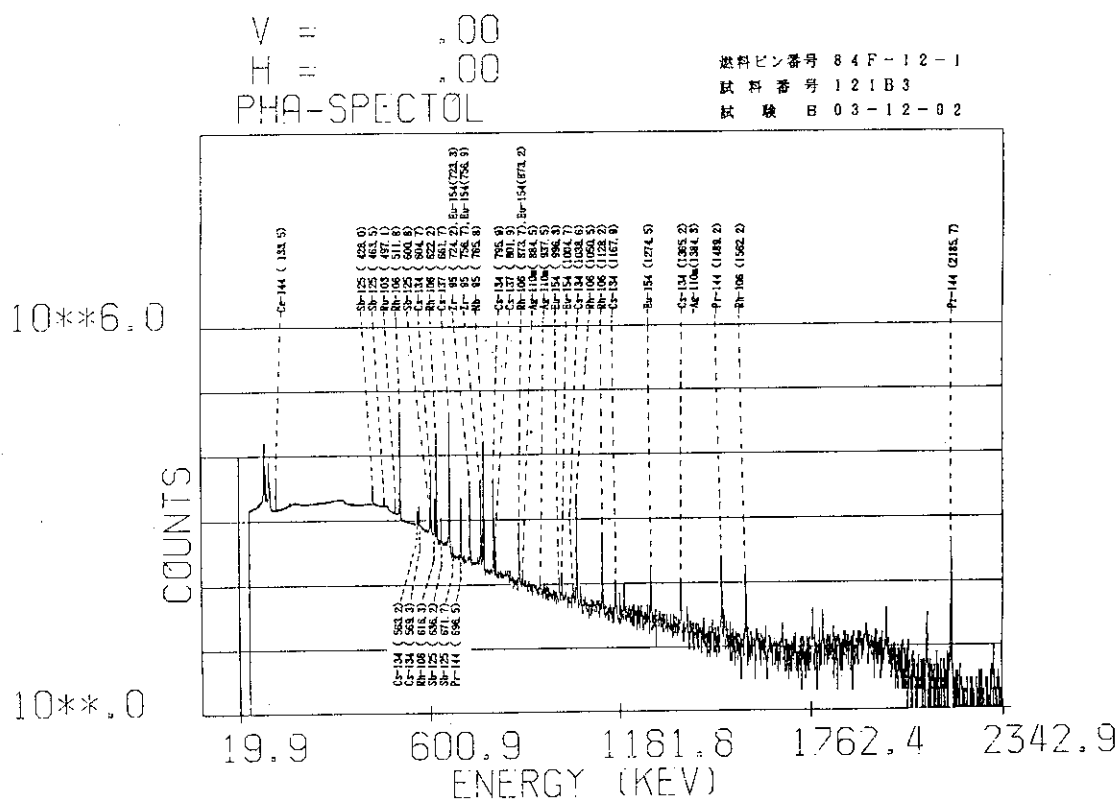


Fig. 4.43 Pore distribution of (U,Pu) $\text{C}_{1.1}$ fuel pellet (122B5, INTERMEDIATE (2))



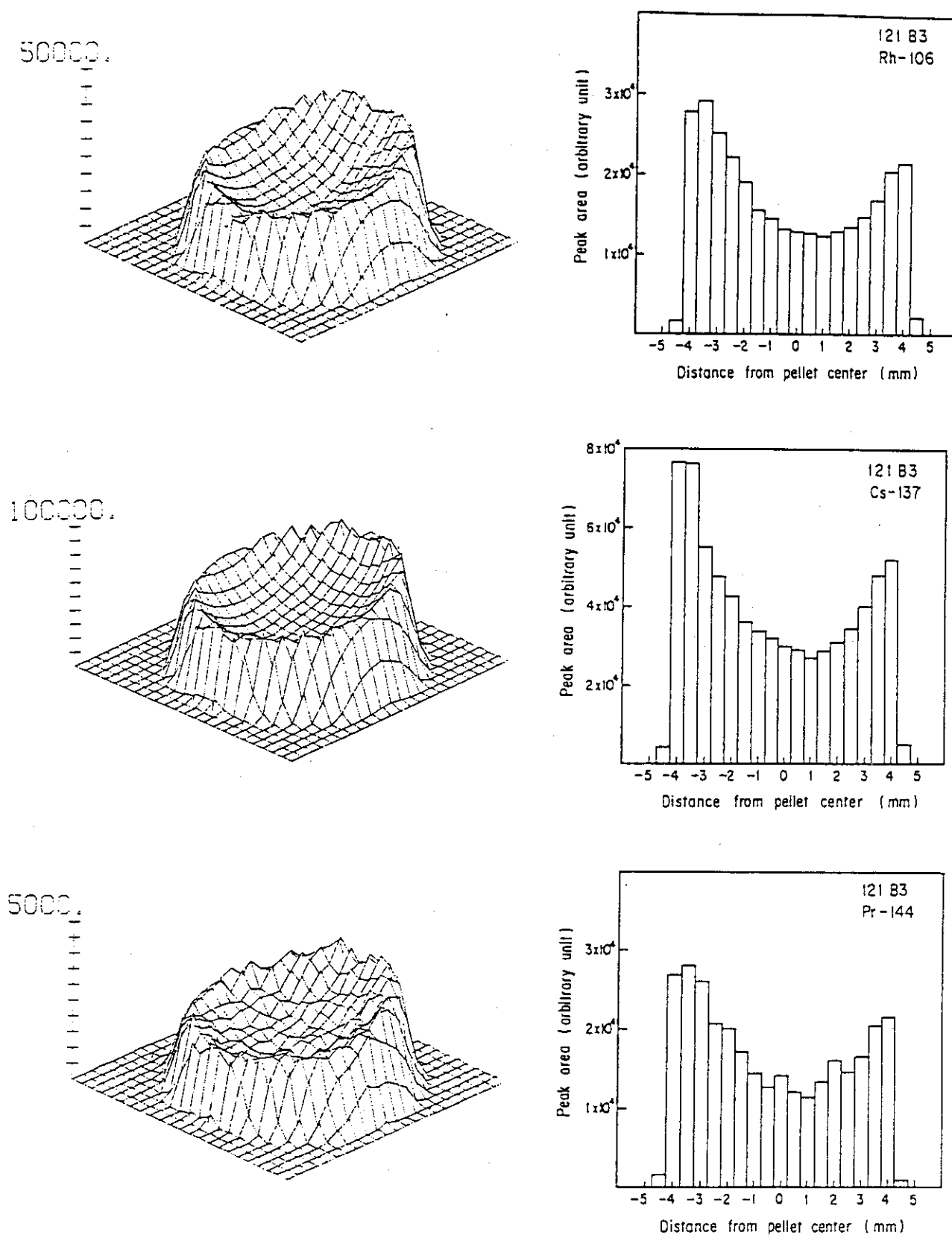
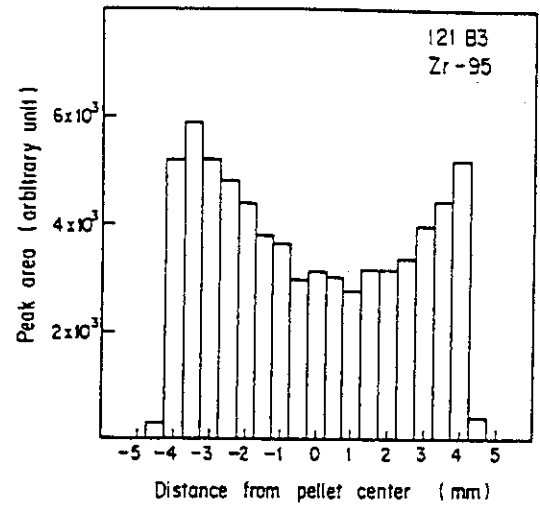
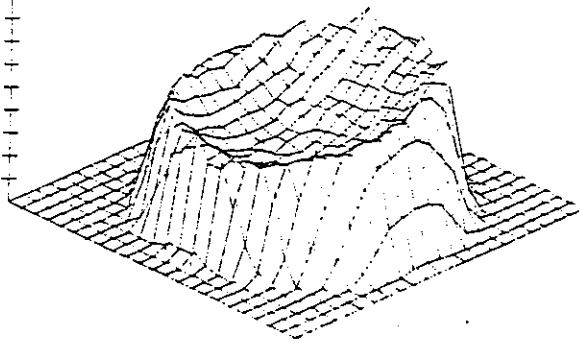
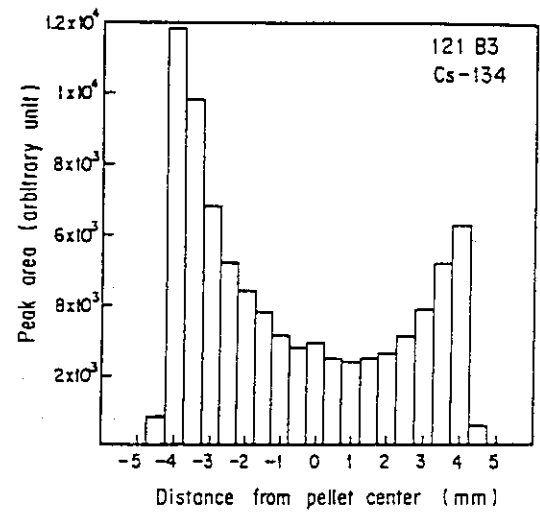
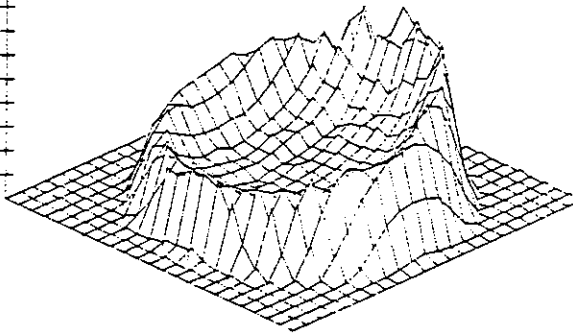


Fig. 4.47 Radial distribution of ^{95}Zr , ^{106}Rh , ^{144}Pr , ^{134}Cs and ^{137}Cs in $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pin

10000.



20000.



121B3

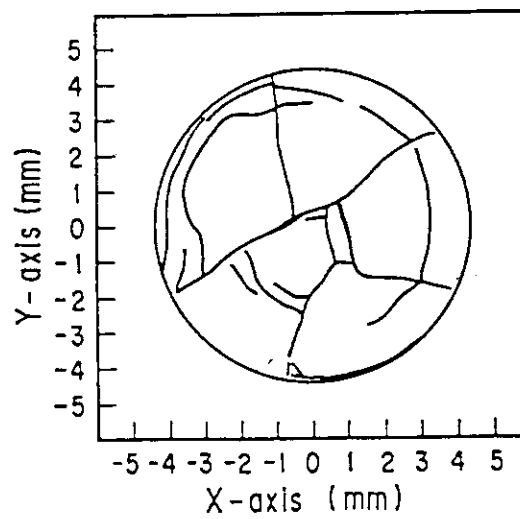


Fig. 4.47 (continued)

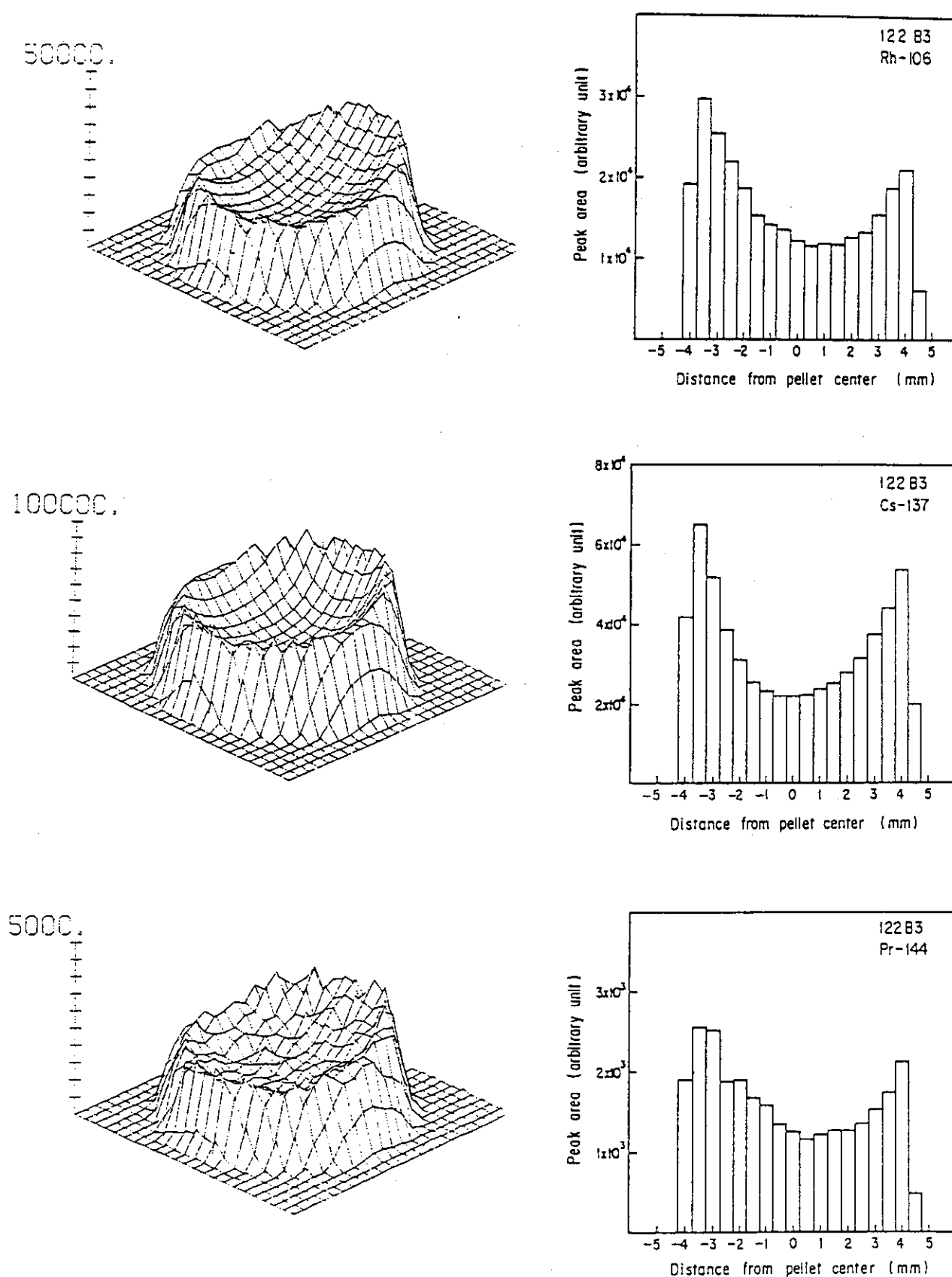
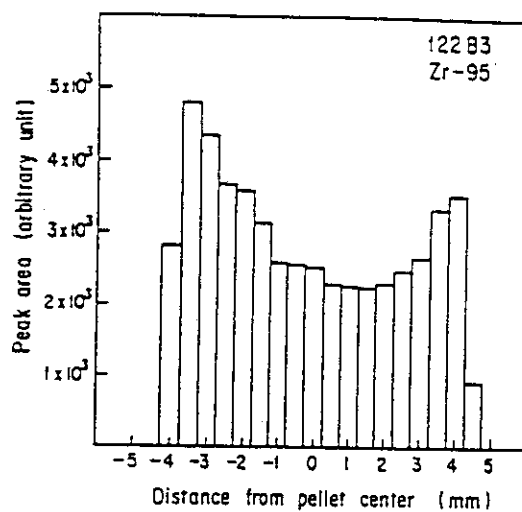
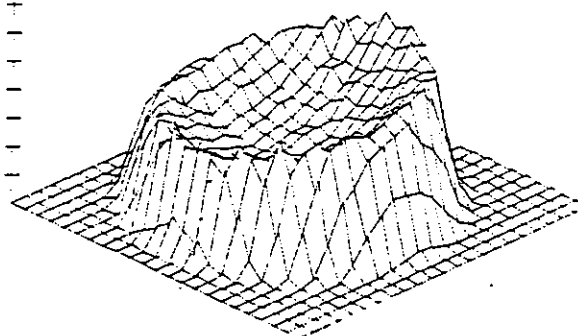
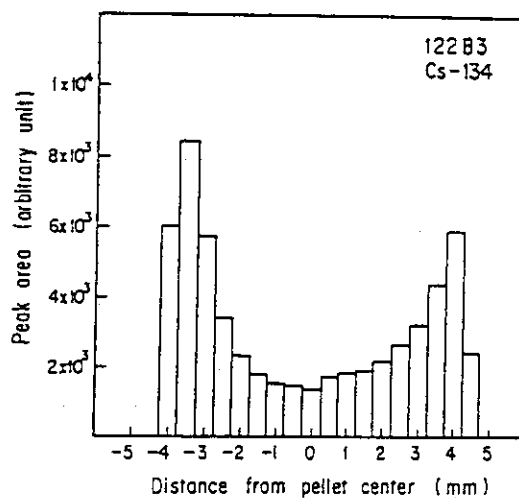
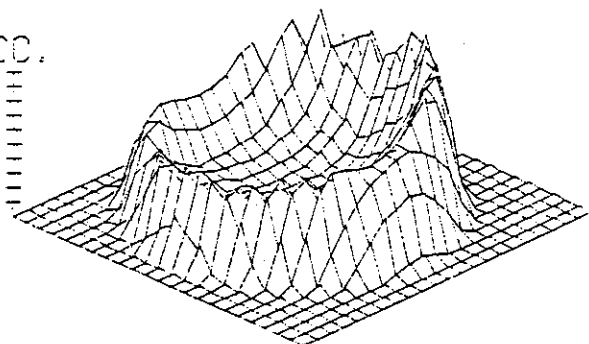


Fig. 4.48 Radial distribution of ^{95}Zr , ^{106}Rh , ^{144}Pr , ^{134}Cs and ^{137}Cs in $(U,Pu)C_{1.1}$ fuel pin

10000.



10000.



122B3

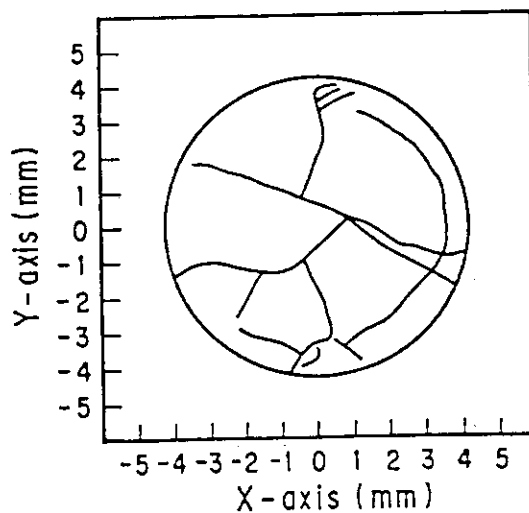


Fig. 4.48 (continued)

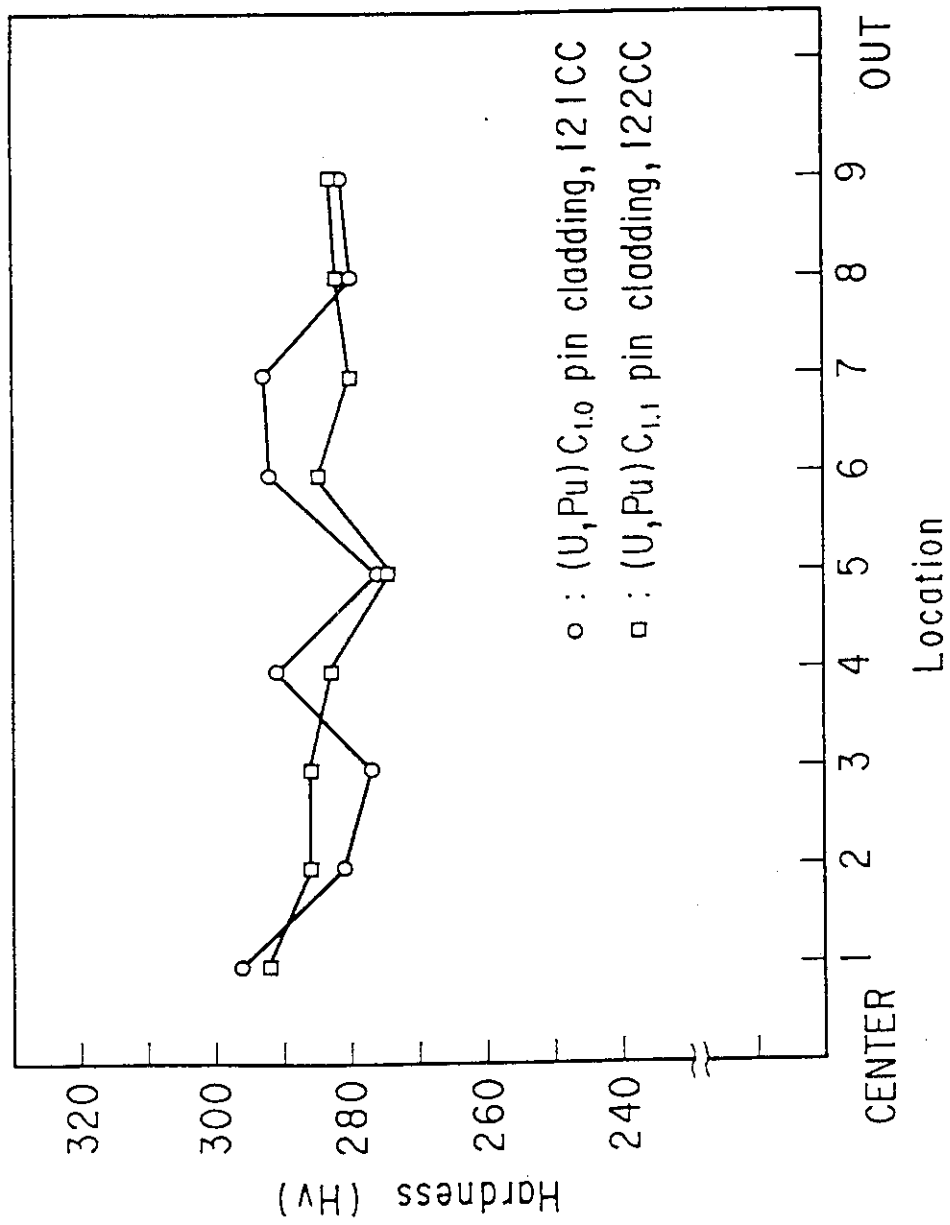


Fig. 4.49 Results of hardness measurements of cladding tubes

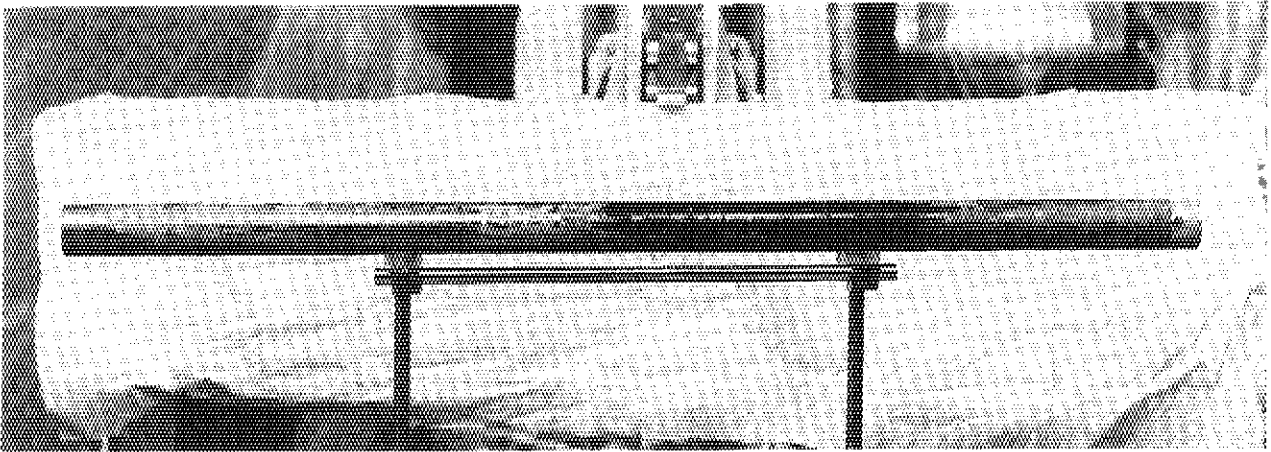


Photo. 4.1 Appearance of 84F-12A capsule after irradiation

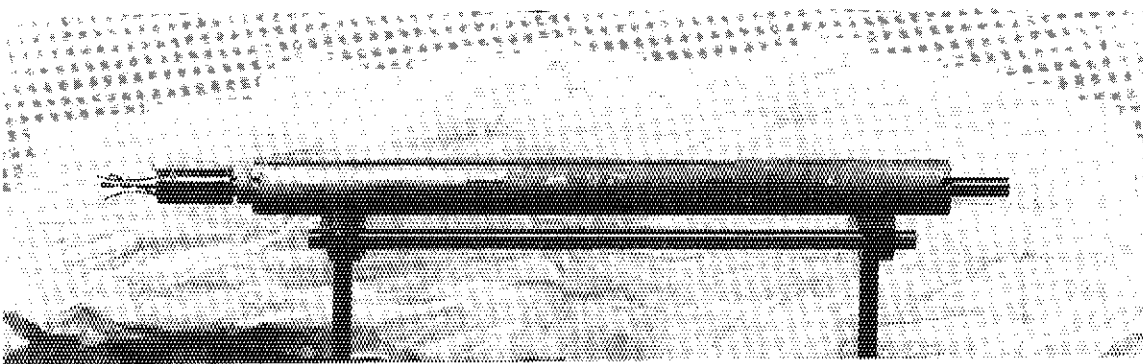


Photo. 4.2 Appearance of inner tube of 84F-12A capsule

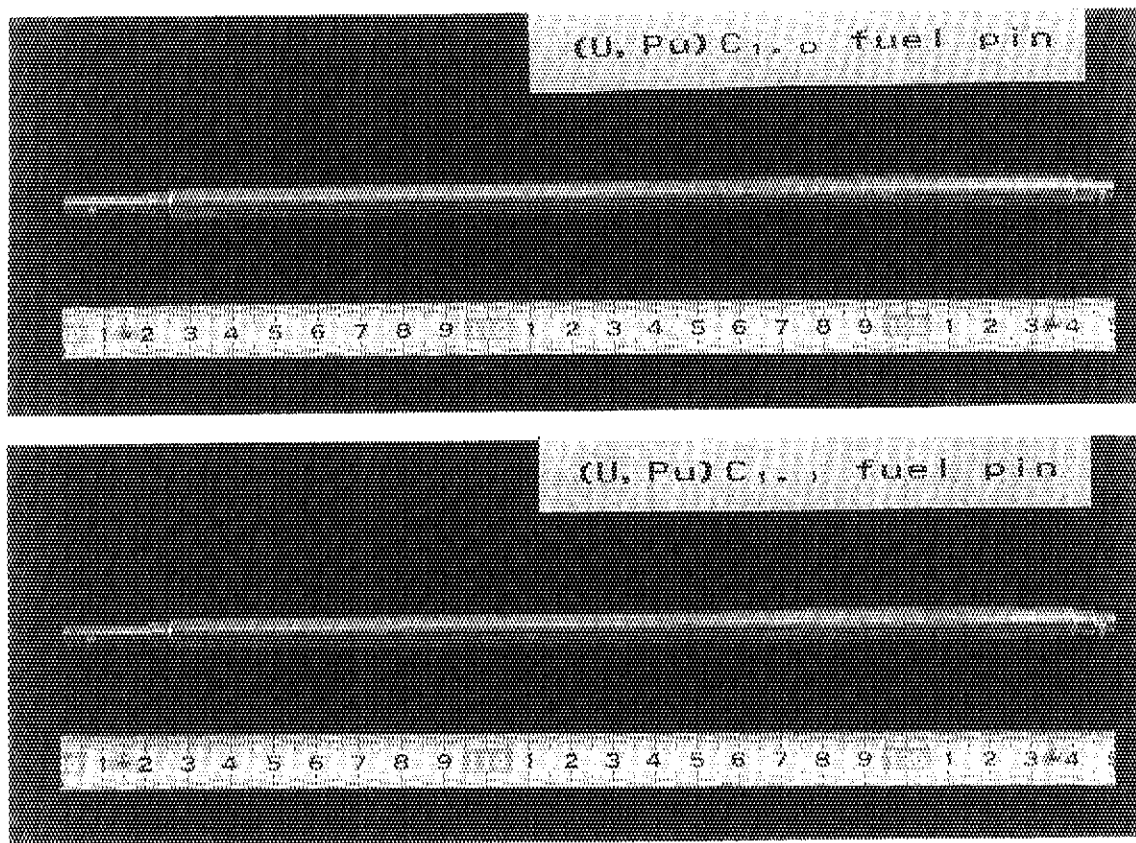


Photo. 4.3 Appearance of fuel pins

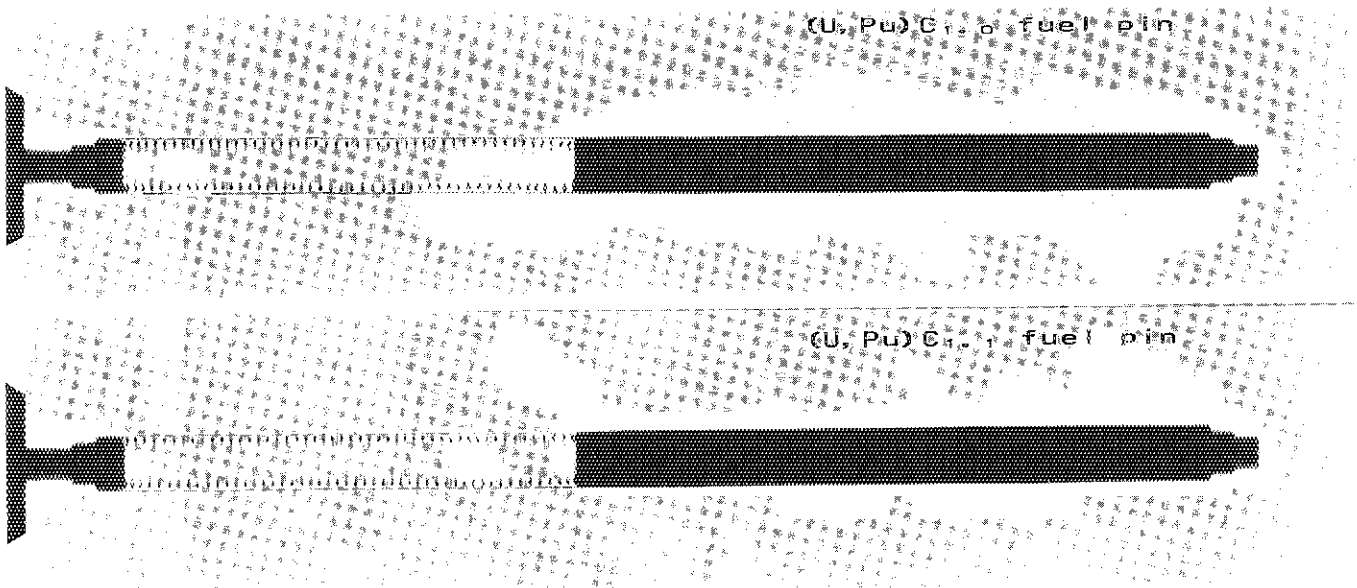


Photo. 4.4 X-ray radiograph of fuel pins

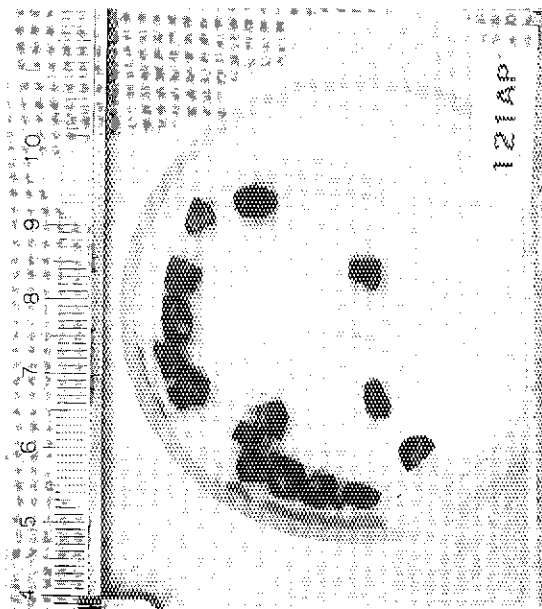


Photo. 4.5 Appearance of fragments of fuel pellets after removal from (U,Pu)C_{1.0} fuel pin

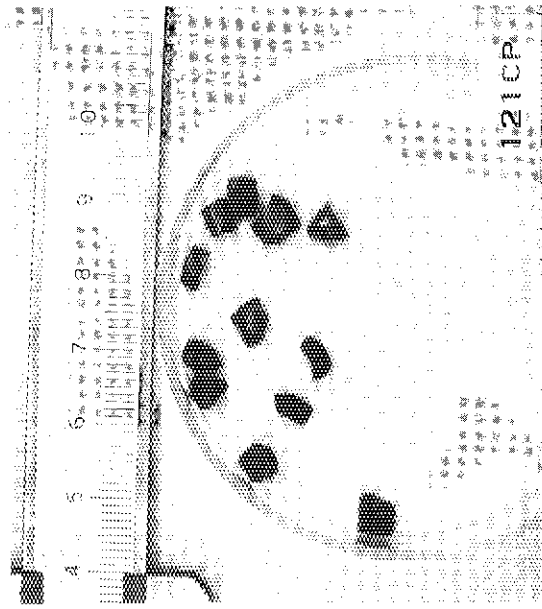
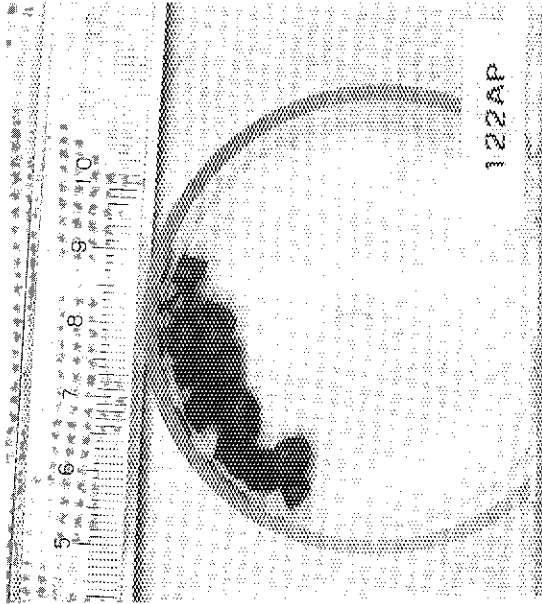


Photo. 4.6 Appearance of fragments of fuel pellets after removal from (U,Pu)C_{1.1} fuel pin



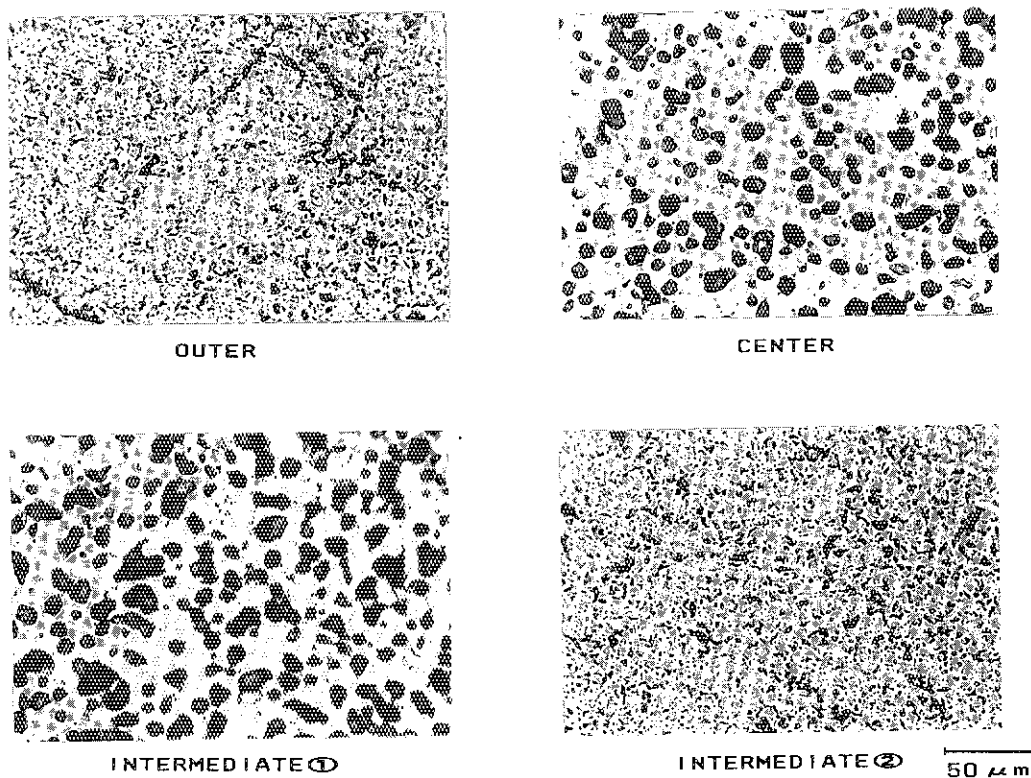


Photo. 4.7 Photograph of $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pellet for pore distribution analysis (121B1)

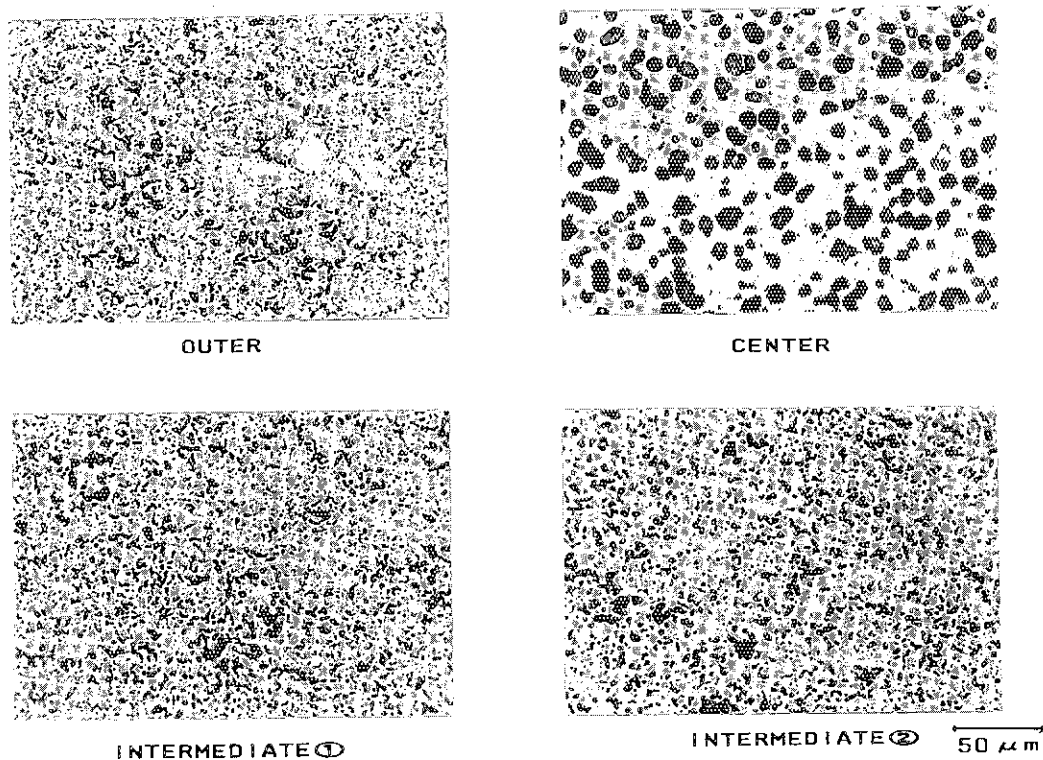


Photo. 4.8 Photograph of $(U,Pu)C_{1.0}$ fuel pellet for pore distribution analysis (121B5)

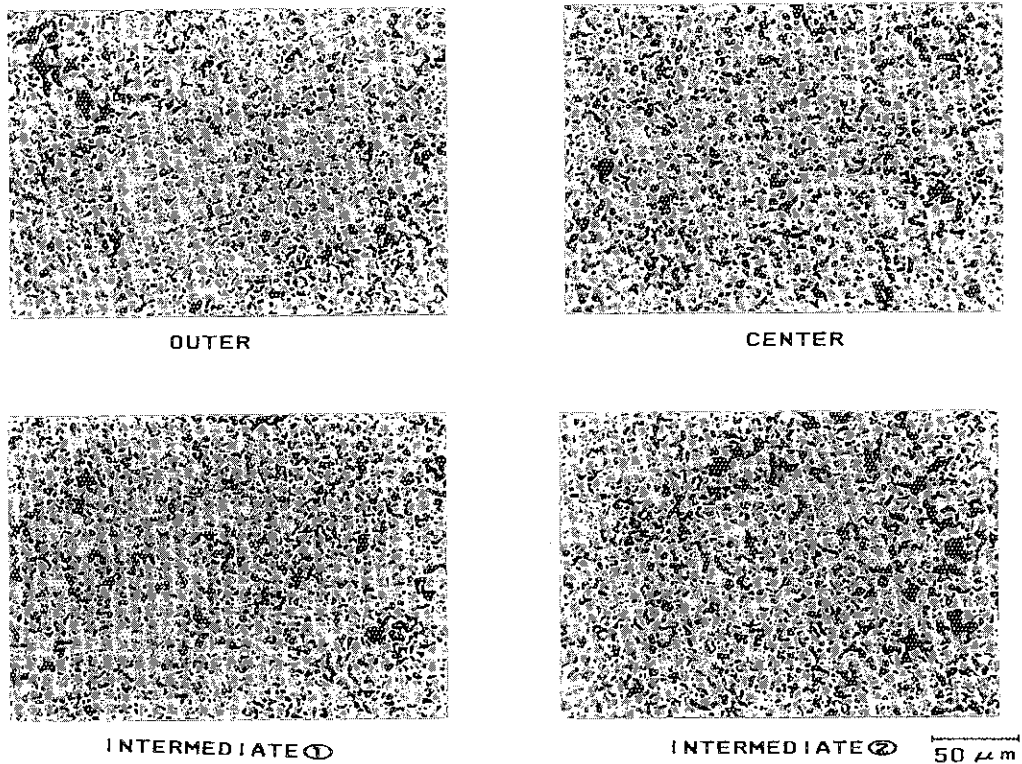


Photo. 4.9 Photograph of $(U,Pu)C_{1.1}$ fuel pellet for pore distribution analysis (122B1)

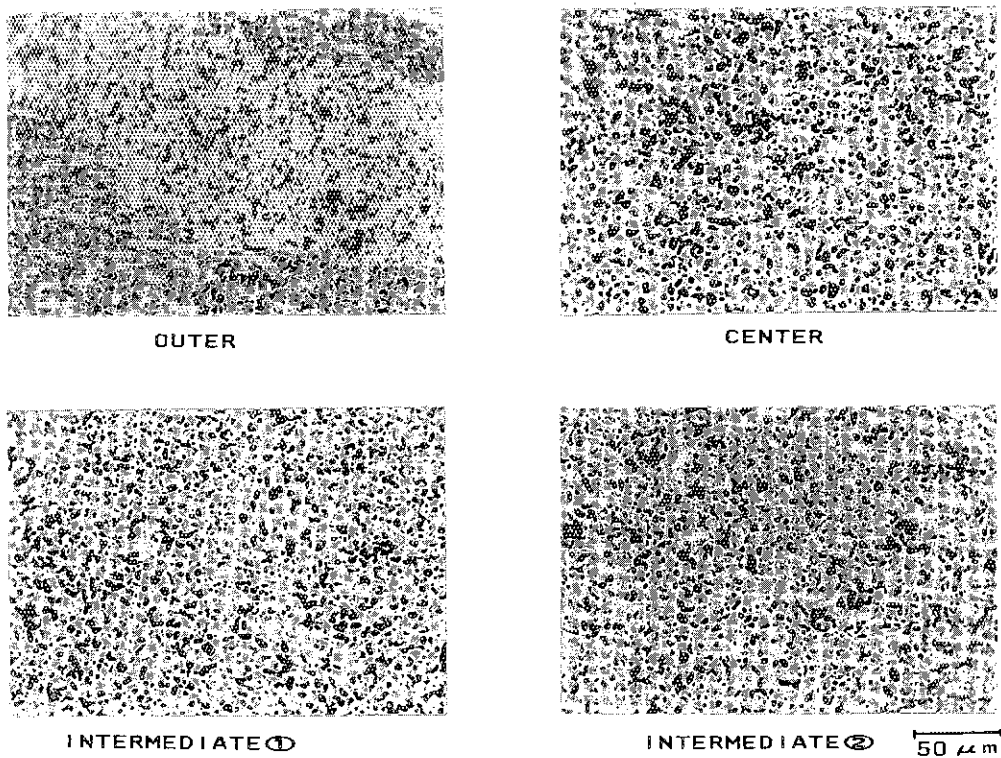


Photo. 4.10 Photograph of $(U,Pu)C_{1.1}$ fuel pellet for pore distribution analysis (122B5)

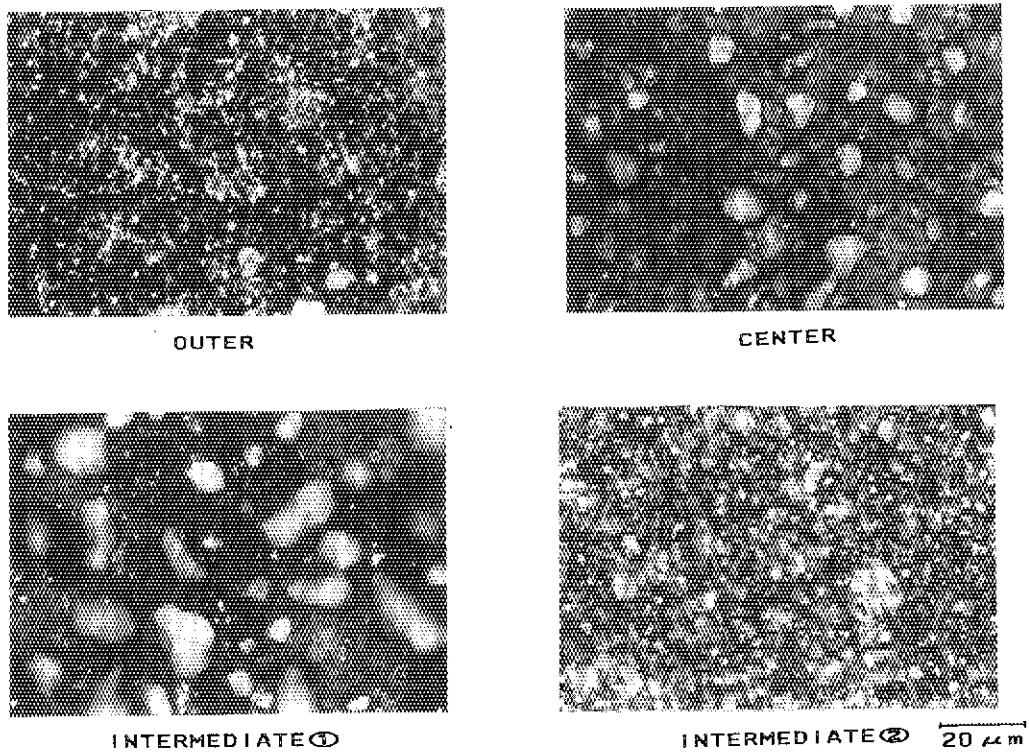


Photo. 4.11 Microstructure of (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (121B1)

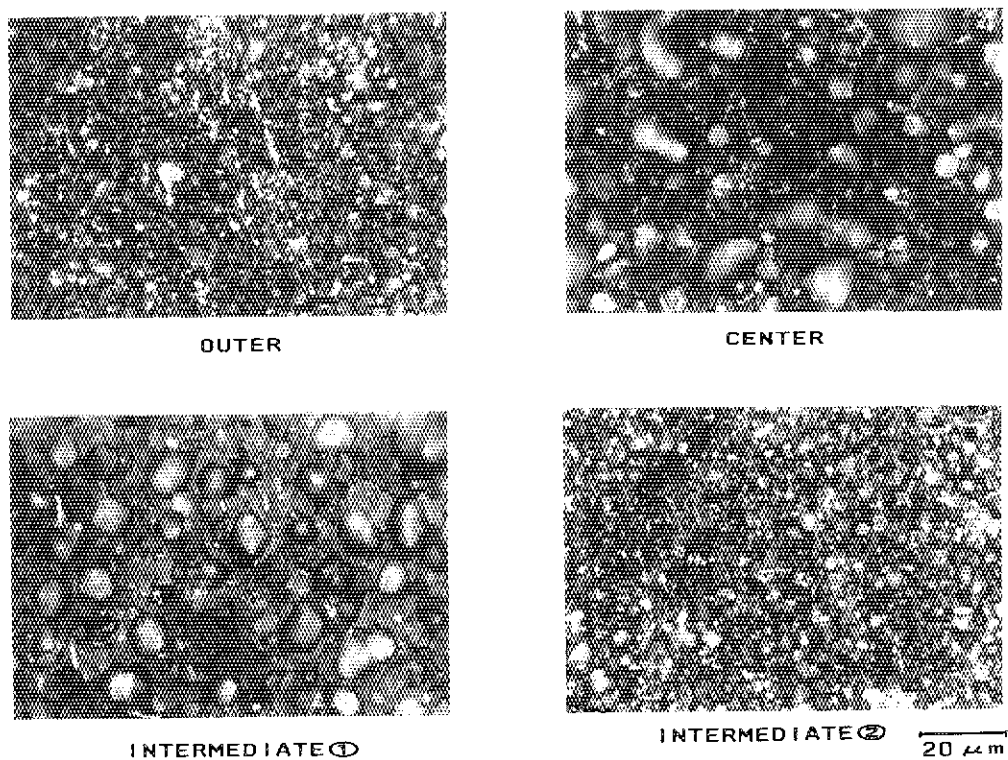


Photo. 4.12 Microstructure of (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (121B2)

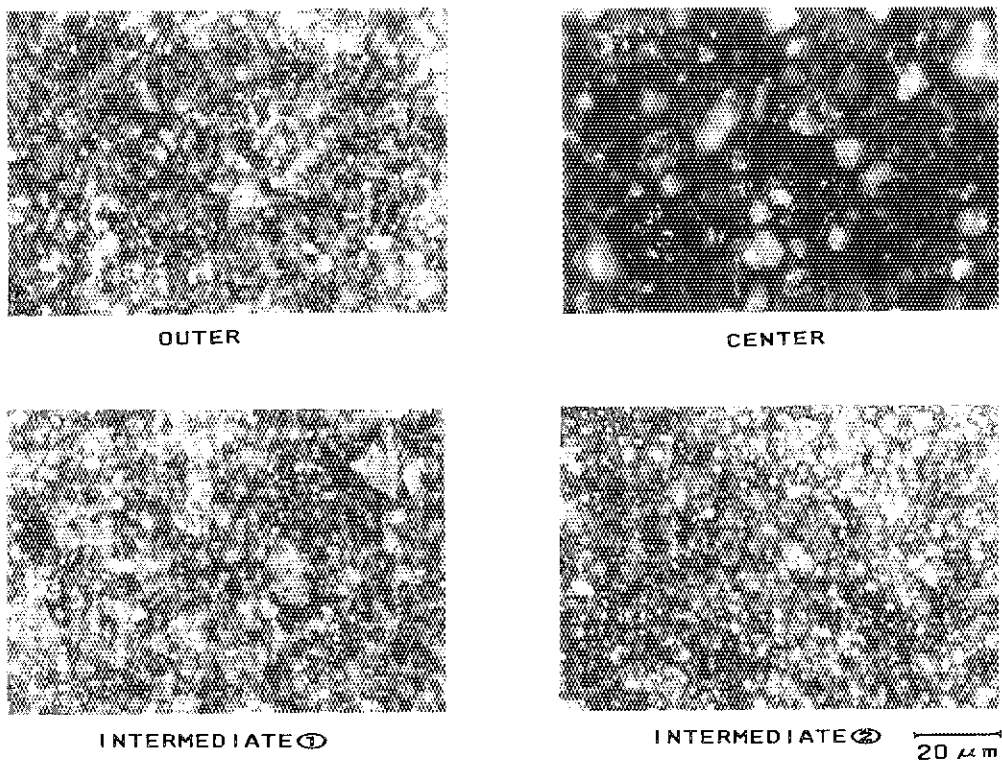


Photo. 4.13 Microstructure of (U,Pu)C_{1.0} fuel pellet (121B5)

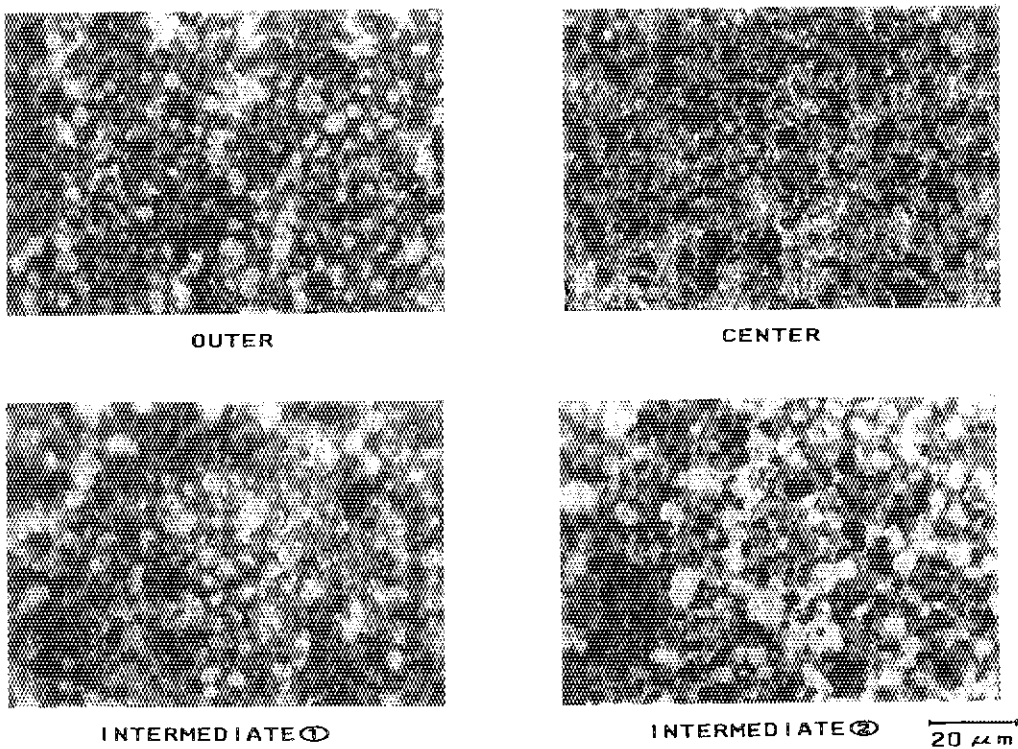


Photo. 4.14 Microstructure of (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (122B1)

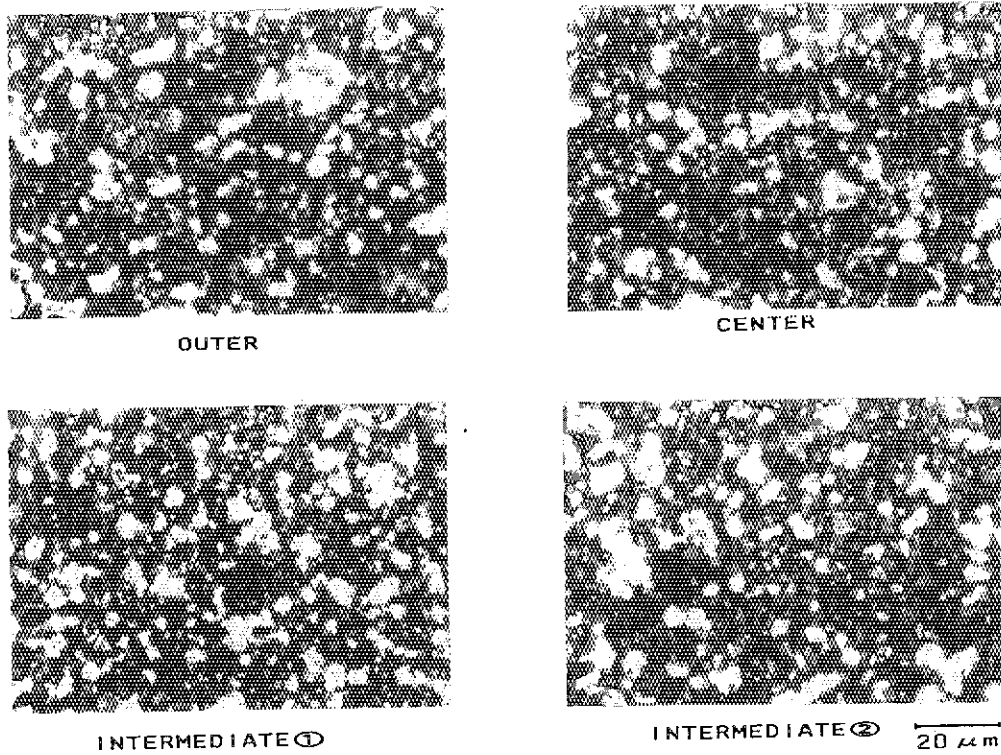


Photo. 4.15 Microstructure of (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (122B2)

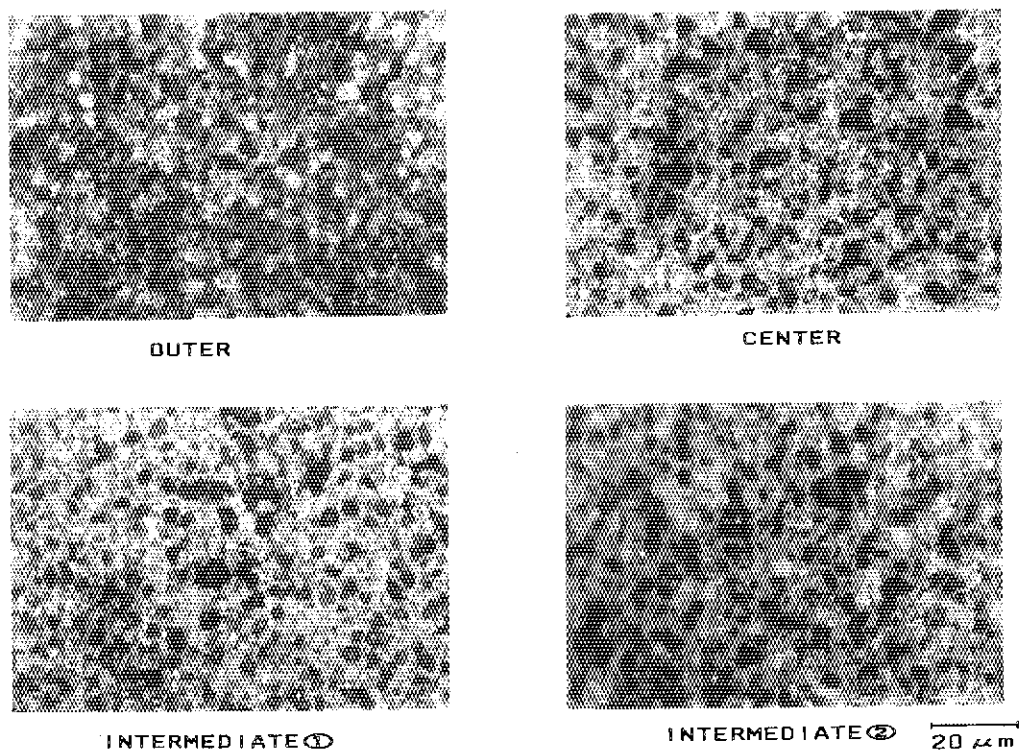


Photo. 4.16 Microstructure of (U,Pu)C_{1.1} fuel pellet (122B5)

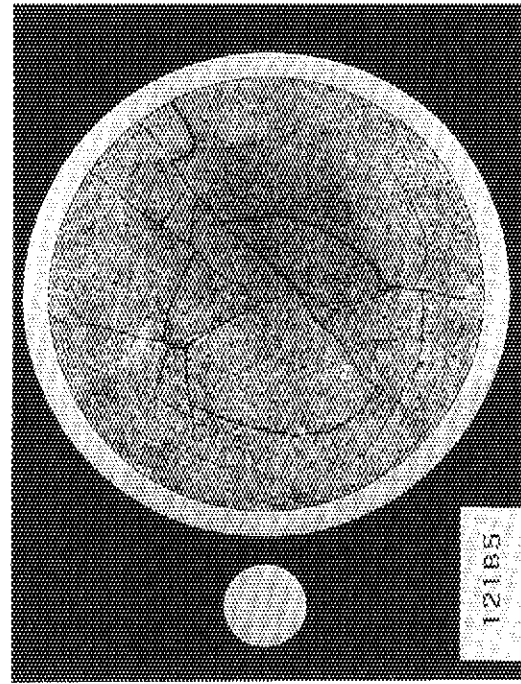
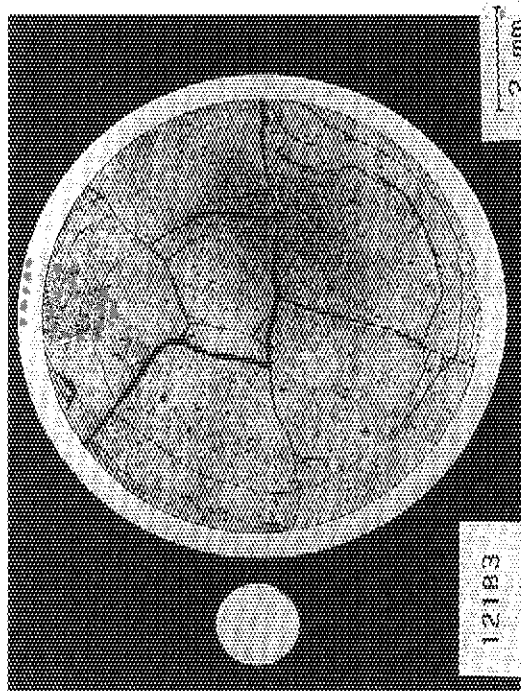


Photo. 4.18 Macroscopic photograph of
(U,Pu)C_{1.0} fuel pellet
(121B3, 121B5)

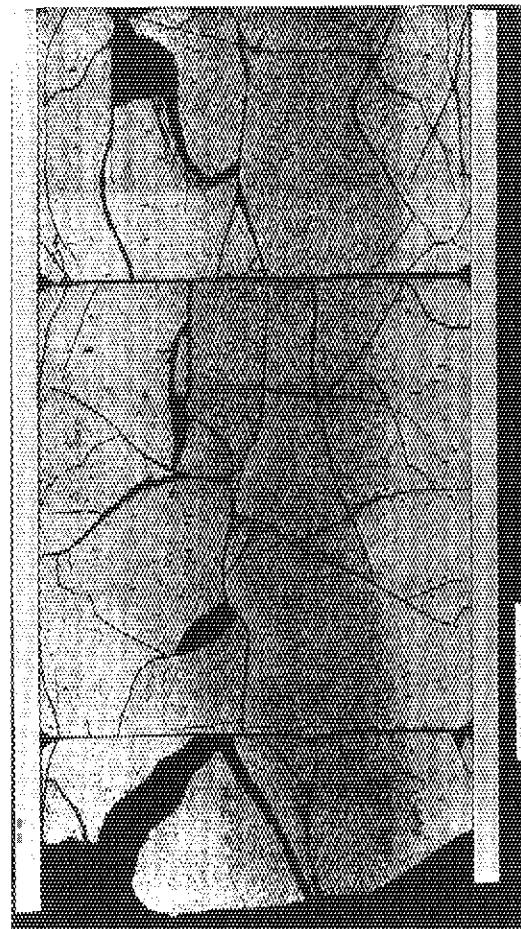
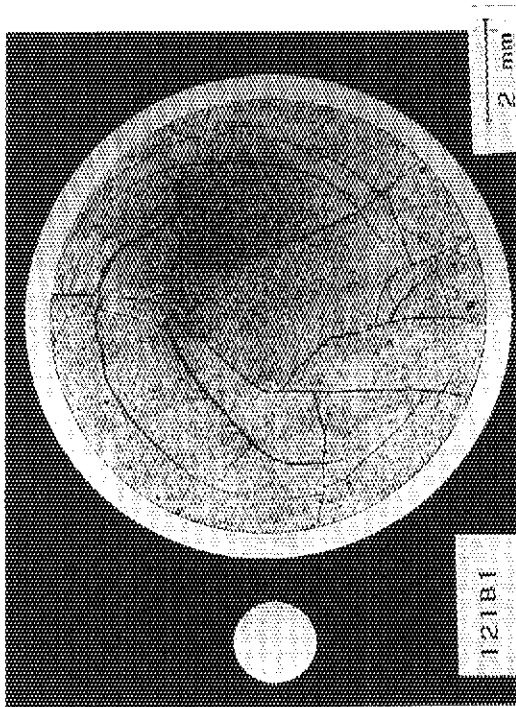


Photo. 4.17 Macroscopic photograph of
(U,Pu)C_{1.0} fuel pellet
(121B1, 121B2)

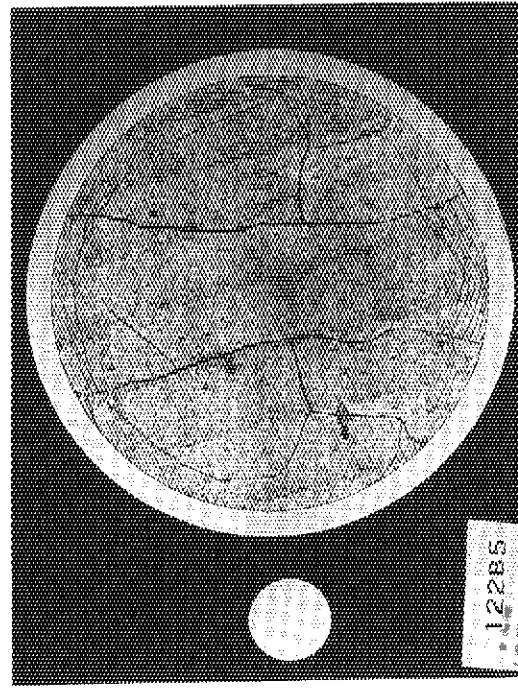
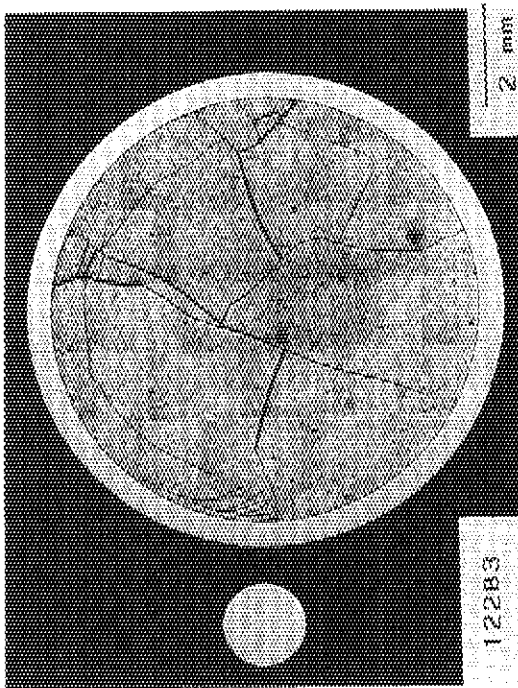


Photo. 4.20 Macroscopic photograph of
(U,Pu)C_{1.1} fuel pellet
(122B3, 122B5)

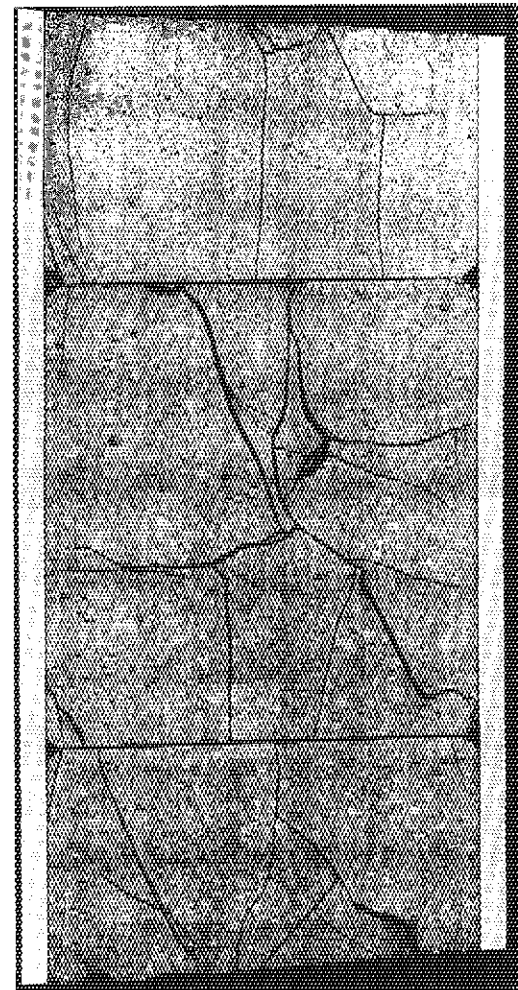
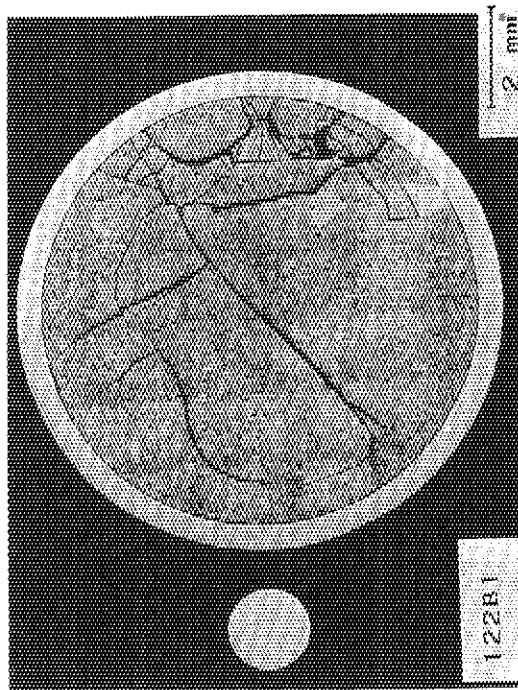


Photo. 4.19 Macroscopic photograph of
(U,Pu)C_{1.1} fuel pellet
(122B1, 122B2)

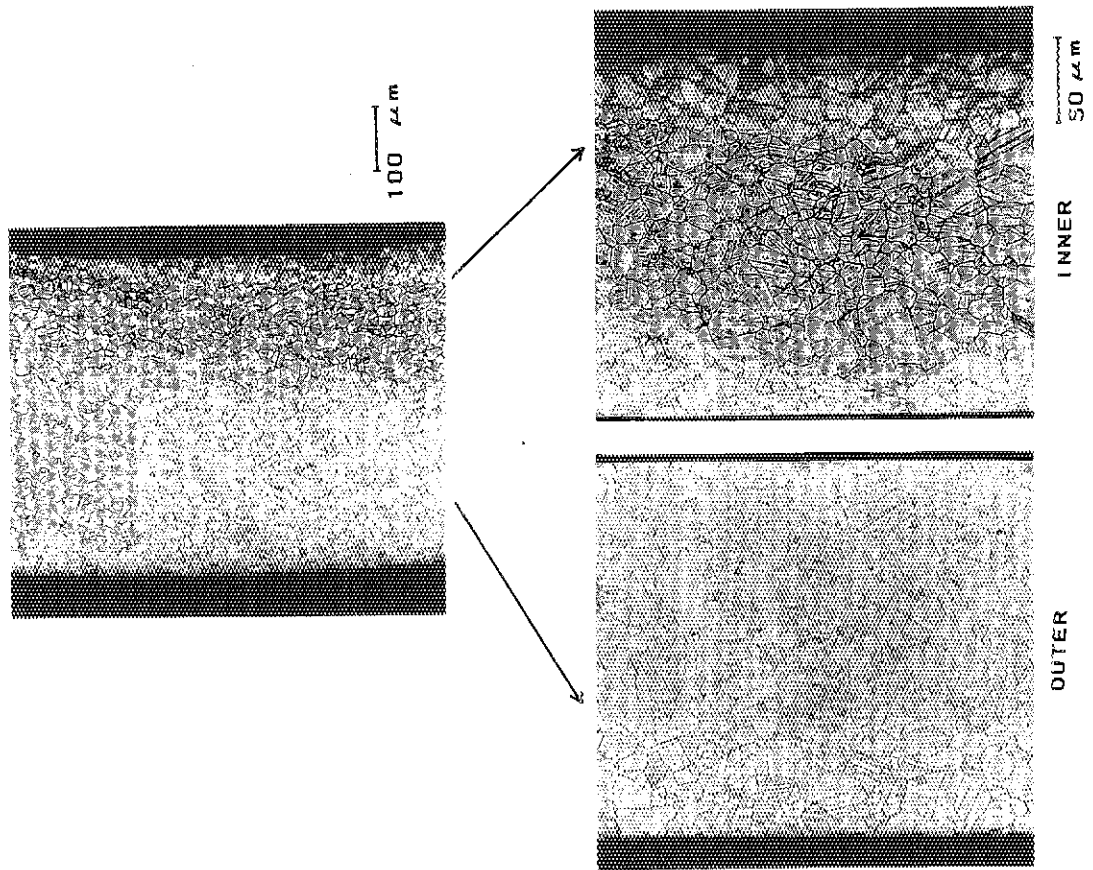


Photo. 4.22 Macro- and microstructures of cladding tube for (U,Pu)C_{1.0} fuel pin (121B1)

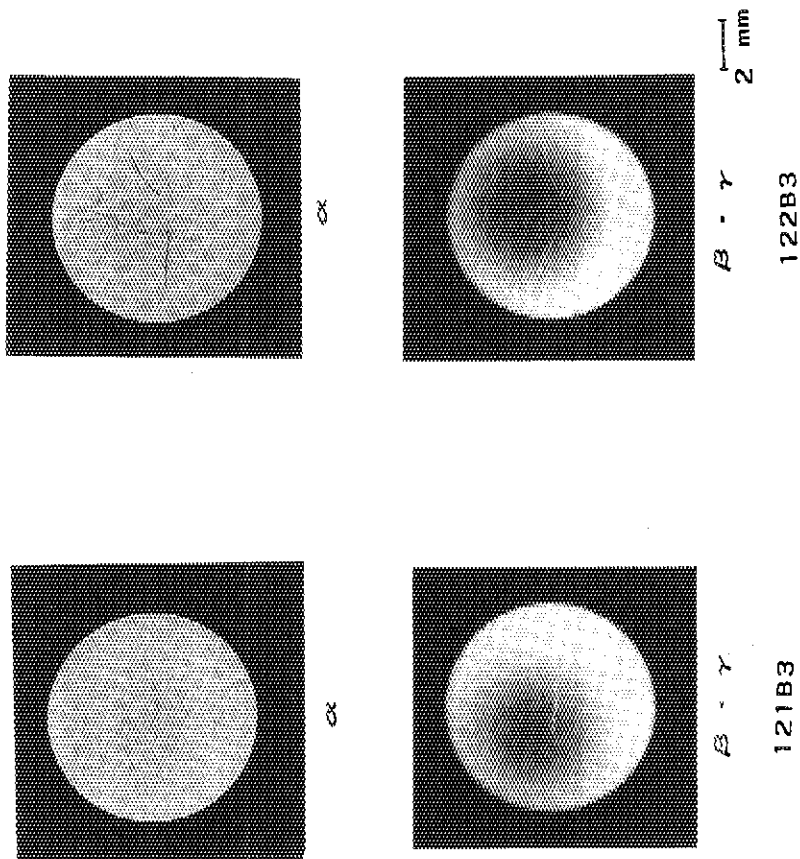


Photo. 4.21 Alpha and beta-gamma radiograph of fuel pellets (121B3, 122B3)

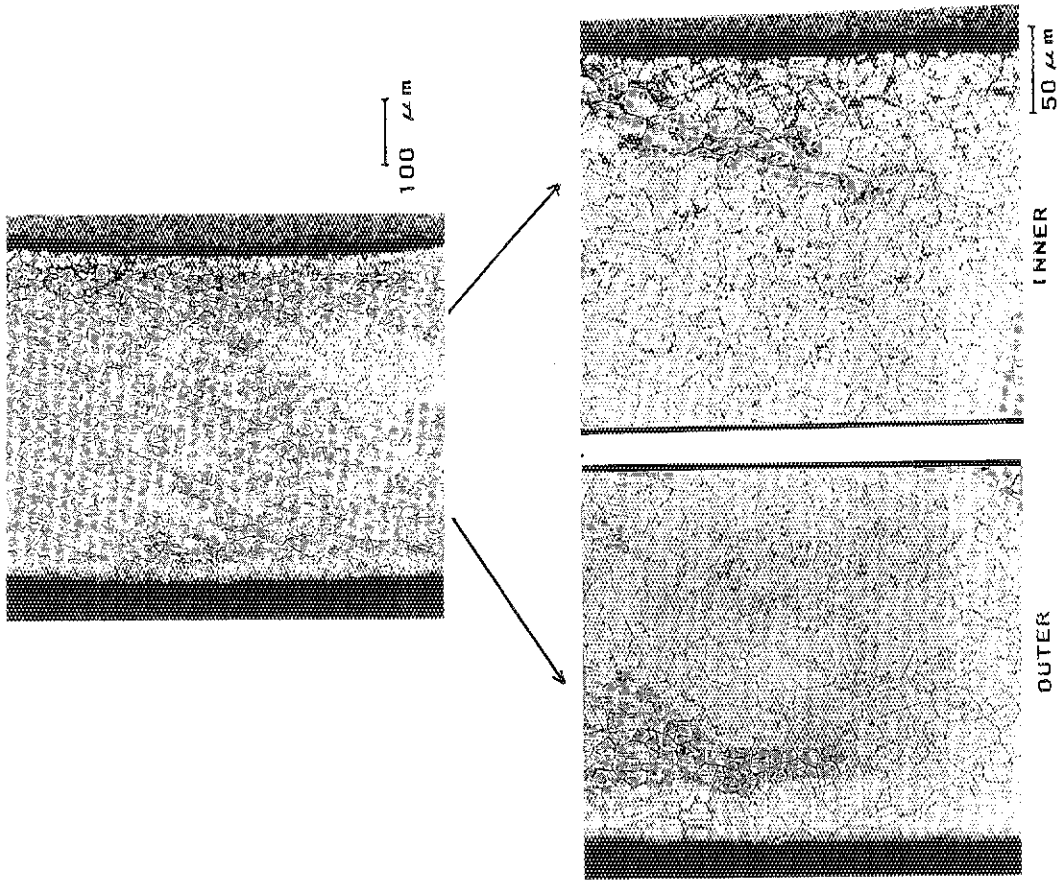


Photo. 4.24 Macro- and microstructures of cladding tube for (U,Pu)C_{1.1} fuel pin (122B1)

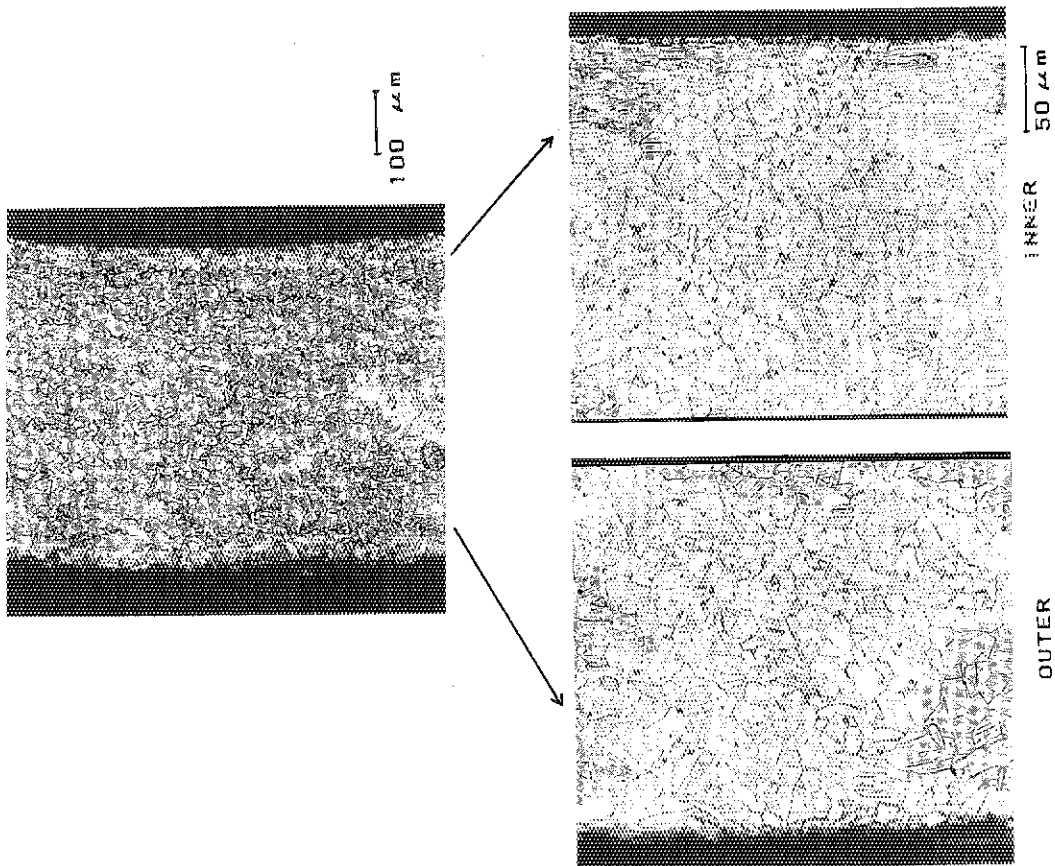


Photo. 4.23 Macro- and microstructures of cladding tube for (U,Pu)C_{1.0} fuel pin (121CC)

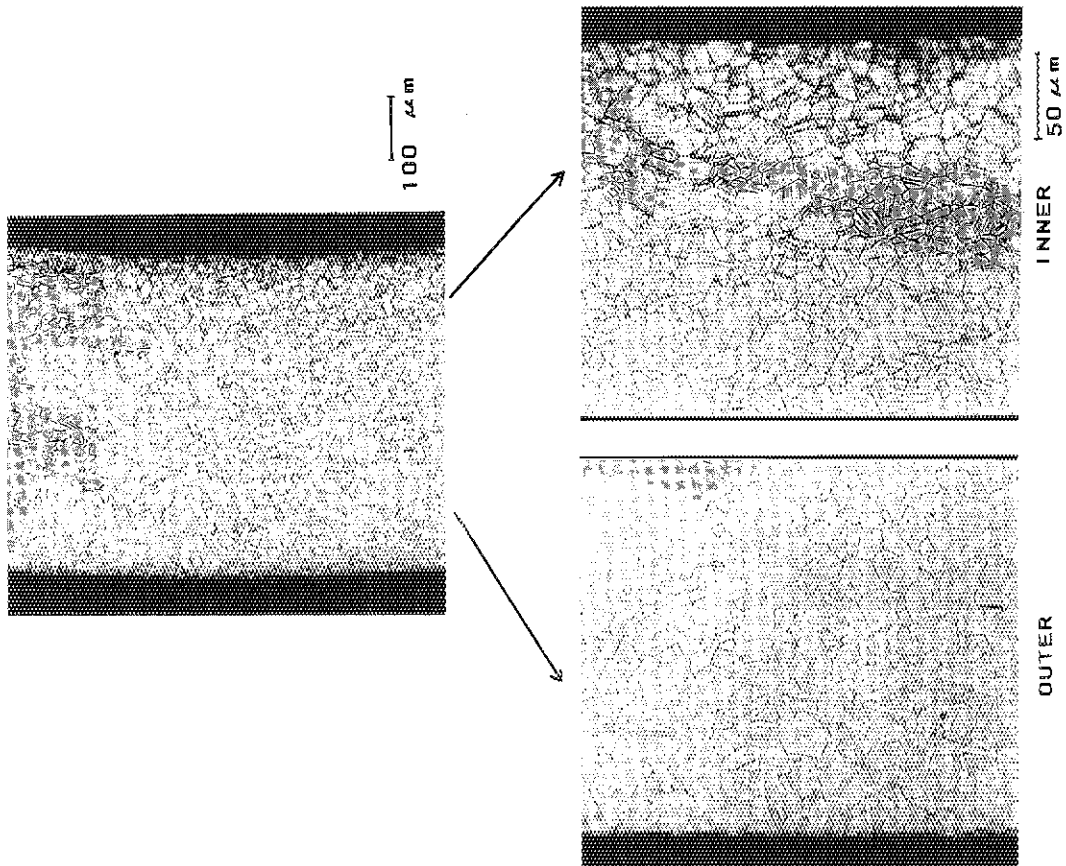


Photo. 4.25 Macro- and microstructures of cladding tube for (U,Pu)C_{1.1} fuel pin (1220C)

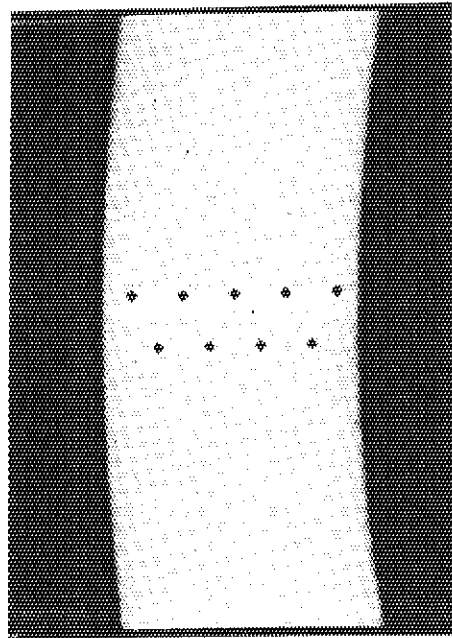


Photo. 4.26 Traces of vickers hardness measurement on cladding tube

5. ま と め

(1) 混合炭化物燃料ピン

化学量論組成及び超化学量論組成の混合炭化物ペレット($(U, Pu)C_{1.0}$ 及び $(U, Pu)C_{1.1}$) を316ステンレス鋼被覆管(外径9.40mm、肉厚0.51mm)に充填した短尺燃料ピン(燃料スタック長100mm、ピン全長250mm)2本を大洗研究所燃料研究棟で製作した。

(2) 照射キャプセル

上記の燃料ピンをJMTRに輸送し、2本の燃料ピンの下部端栓を突き合わせた形で照射キャプセル84F-12Aに組み込んだ。

(3) 照射

キャプセルは、JMTR炉心外照射孔D-12において、昭和61年11月から平成2年10月までの17サイクル(総照射時間8748時間)、ピーク線出力60及び49kW/cmの条件下で、4.5(39000)及び3.7%FI MA(32000MWd/t)まで照射された。

(4) 照射後試験

照射済みキャプセルは約5ヶ月の冷却ののち、東海研に輸送され燃料試験施設で照射後試験が実施された。非破壊試験は β ・ γ セルで、破壊試験は α ・ γ セルで行った。

(5) 照射後試験結果

燃料ピンの外観に異状は認められず、健全性を保っていた。以下に、主要な結果を示す。

(a) 燃料ピンのX線透過試験

燃料ペレットは形状が保たれており、端面のチャンファも確認された。

(b) 燃料ピンの γ 線スキャンニング

FP元素のうち、Csの一部が燃料ペレットからがプレナム部に移行していることが確認された。

(c) 燃料ピンの寸法変化

燃料スタック部における最大の直径増加は、約0.05mm($\Delta D/D$ で約0.5%)であった。チャンファ型ペレットの採用により、FCMIは緩和された。

(d) FPガス放出

FPガス放出率は、 $(U, Pu)C_{1.0}$ 燃料ピンで7.1%、 $(U, Pu)C_{1.1}$ 燃料ピンで15.5%であった。放出されたFPガスの成分(Xe及びKr)は両者の生成量の比とほぼ一致していた。

(e) 燃料ペレットの密度変化

照射により燃料ペレットの密度は、 $(U, Pu)C_{1.0}$ で3.5%T.D.、 $(U, Pu)C_{1.1}$ で2.7%T.D.減少した。これを燃焼度(%FIMA)当たりの見かけのスエリング率に換算すると、それぞれ約0.8%及び0.7%となる。

(f) 燃料ペレットの気孔率

照射後の燃料ペレットの気孔率は、 $(U, Pu)C_{1.0}$ 及び $(U, Pu)C_{1.1}$ ともに約20~21%であるが開気孔率は前者が約10%であるのにたいして後者は約12%であった。

(g) 燃料ペレット中の気孔分布

ペレット中心部で、微小な気孔の照射による減少が観察された。

(h) 燃料ペレットの結晶粒径

照射後の(U, Pu)C_{1.0}燃料ペレットでは、製造時の結晶粒径を保っている外周側似比べて、中心部では結晶粒径の増加が観察された。

(i) 燃料ペレットのモザイク写真

直径方向の大きなクラックとそこから枝のようなクラックが発生していた。さらに、外周部では周方向の細かなクラックが見られた。一部にはクラックのヒーリングも認められた。

(j) 燃料ペレットのオートラジオグラフ

燃料ペレット内の中性子分布(中心部に向かって減少)を反映して、外周部ほど²⁴²CmやFP元素の濃度が高いことが判明した。

(k) 燃料ペレットのマイクロ線スキャニング

いずれのFP元素も外周部ほど濃度が高いことがわかった。

(l) 被覆管内面の腐食

被覆管内面の腐食は認められなかったが、(U, Pu)C_{1.0}燃料ピンでは燃料ペレットと被覆管の反応の兆候が見られた。

(m) 被覆管の硬さ

照射による硬さの変化は見られなかった。

以上が主要な結果である。現在、燃料スタック長を200mmと長くした第5回照射の混合炭化物燃料の照射後試験が進行中であり、さらに平成6年度からは動燃事業団との共同研究により高速実験炉「常陽」を用いた照射が予定されている。これらの試験から、一層多くの知見が得られることが期待される。

おわりに、本試験の遂行に際して御指導、御助言をいただいた東海研立川圓造燃料研究部長、半田宗男同次長、石本清ホット試験室長、大洗研斎藤稔材料試験炉部長、宮川邦男管理部長に深く感謝いたします。また照射用燃料ピンの製作では大洗研燃料研究棟の皆様、キャプセル設計・製作では材料試験炉部照射1課並びに技術部工作課、照射では材料試験炉部計画課、照射後試験ではホット試験室の諸氏に御支援いただきました。心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 前多 厚、笹山 龍雄、岩井 孝、相沢 作衛、大和田 功他、" ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の低出力(第1回)照射及び照射後試験"、JAERI-M 88-219 (1988).
- 2) 岩井 孝、笹山 龍雄、前多 厚、相沢 作衛、川崎 公靖他、" ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の中出力(第2回)照射及び照射後試験"、JAERI-M 89-186 (1989).
- 3) 岩井 孝、鈴木 康文、前多 厚、笹山 龍雄、半田 宗男、" 低燃焼度ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の照射挙動" 原子力誌, 34[5], 77(1992).
- 4) 荒井 康夫、鈴木 康文、笹山 龍雄、岩井 孝、関田 憲昭他、" 84F-10A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の照射及び照射後試験" JAERI-M 91-191 (1991).
- 5) 荒井 康夫、岩井 孝、笹山 龍雄、前多 厚、塩沢 憲一他、" JMTR照射キャプセル(84F-10A, 84F-12A, 87F-2A)用混合炭化物燃料ピンの製作"、JAERI-M 89-060 (1989).