



JAEA-Research

2007-026



JP0750146

JMTR照射イナートマトリクス窒化物燃料の 照射後試験

Post-Irradiation Examinations of Inert Matrix Nitride Fuel
Irradiated in JMTR (01F-51A Capsule)

岩井 孝 中島 邦久 菊地 啓修 本田 順一
畠山 祐一 小野 勝人 松井 寛樹 荒井 康夫

Takashi IWAI, Kunihisa NAKAJIMA, Hironobu KIKUCHI, Junichi HONDA
Yuichi HATAKEYAMA, Katsuto ONO, Hiroki MATSUI and Yasuo ARAI

原子力基礎工学研究部門
超ウラン元素燃料高温化学研究グループ

Research Group for Transuranium Fuels Behavior and Properties
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

JMTR 照射イナートマトリクス窒化物燃料の照射後試験

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門燃料・材料工学ユニット

岩井 孝、中島 邦久、菊地 啓修、本田 順一⁺、
畠山 祐一⁺、小野 勝人⁺、松井 寛樹⁺、荒井 康夫

(2007年1月22日受理)

マイナーアクチノイドをプルトニウムで模擬し、ZrN 及び TiN を母材としたイナートマトリクス窒化物ペレットを燃料ピンに封入した上で、01F-51A キャップセルに組み込み、JMTR で照射した。 $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ 及び (TiN,PuN) ペレットの平均線出力及び燃焼度は、それぞれ、408W/cm、約 30000MW d / t ($\text{Zr}+\text{Pu}$) (約 132000MW d / t - Pu) 並びに 355W/cm、約 38000MW d / t ($\text{Ti}+\text{Pu}$) (約 153000MW d / t - Pu) に達した。照射キャップセルを燃料試験施設に搬入して、非破壊及び破壊試験を実施した。

照射後の燃料ピンに有害な欠陥はなく、健全性が確認された。FP ガス放出率は約 1.6% と極めて低い値であった。ステンレス鋼被覆管内面に有意な腐食は観察されなかった。

Post-Irradiation Examinations of Inert Matrix Nitride Fuel
Irradiated in JMTR (01F-51A Capsule)

Takashi IWAI, Kunihisa NAKAJIMA, Hironobu KIKUCHI, Junichi HONDA⁺,
Yuichi HATAKEYAMA⁺, Katsuto ONO⁺, Hiroki MATSUI⁺ and Yasuo ARAI

Division of Fuels and Materials Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 22, 2007)

A plutonium nitride fuel pin containing inert matrix such as ZrN and TiN was encapsulated in 01F-51A and irradiated in JMTR. Minor actinides are surrogated by plutonium. Average linear powers and burnups were 408W/cm, 30000MWd/t(Zr+Pu) [132000MWd/t - Pu] for (Zr,Pu)N and 355W/cm, 38000MWd/t(Ti+Pu) [153000MWd/t-Pu] for (TiN,PuN). The irradiated capsule was transported to Reactor Fuel Examination Facility and subjected to non-destructive and destructive post irradiation examinations.

Any failure was not observed in the irradiated fuel pin. Very low fission gas release rate of about 1.6% was measured. The inner surface of cladding tube did not show any signs of chemical interaction with fuel pellet.

Keywords: Inert Matrix, Nitride Fuel, TiN, ZrN, JMTR, Irradiation Test, Fission Gas Release Rate, Fuel and Clad Chemical Interaction

⁺ Department of Hot Laboratories and Facilities, Nuclear Science and Engineering Directorate

目 次

1. まえがき	1
2. 燃料ピン及びキャップセルの設計・製作	2
2.1 イナートマトリクス窒化物燃料ピンの製作	2
2.2 01F-51A キャップセルの製作	2
3. JMTR 照射	3
4. 照射後試験	4
4.1 照射後試験の概要	4
4.2 照射後試験の方法及び結果	4
5. まとめ	16
謝 辞	17
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Design and Fabrication of Fuel Pin and Capsule	2
2.1 Fabrication of Inert Matrix Nitride Fuel Pin	2
2.2 Fabrication of the Capsule	2
3. Irradiation in JMTR	3
4. Post Irradiation Examination	4
4.1 Scheme of Post Irradiation Examination	4
4.2 Examination Method and Results	4
5. Summary	16
Acknowledgement	17
References	18

This is a blank page.

1. まえがき

窒化物燃料は酸化物燃料と比べて、高熱伝導度、高重金属元素密度といった優れた熱特性や核特性を有しており、高速炉用新燃料の他、マイナーアクチノイド（MA）の核変換用燃料としても注目されている¹⁾。また、溶融塩電解を利用した乾式再処理と組み合わせた新しい核燃料サイクルも提案されている²⁾。原子力機構では、これまでに JMTR や常陽を用いて、(U,Pu) N 燃料の照射試験を行ってきた^{3) ~13)} ほか、MA 窒化物の調製、物性研究の他、燃料ペレットの製造技術の確立を行ってきた^{14,15)}。MA の効率的な核変換のためには、新たな MA の生成を抑制する目的でウランを用いないイナート（不活性）マトリクス窒化物燃料が注目されている。その中でも有力な候補として、ZrN 及び TiN を母材としたイナートマトリクス窒化物燃料が挙げられている。ZrN を母材とする場合には、MA 窒化物との相互固溶性が高く均一な燃料となることが期待される。一方、TiN は熱伝導性が高く、結果として燃料温度を低く抑えることが期待できるが、MA 窒化物とはほとんど固溶しないため 2 相混合試料となる。これまでイナートマトリクス窒化物燃料の照射試験の報告は皆無である。

今回は、マイナーアクチノイドをプルトニウムで模擬し、ZrN 及び TiN を母材としたイナートマトリクス窒化物燃料ピンを製作¹⁶⁾ し、JMTR で照射試験を実施した。本報告書では、燃料ピン及びキャップセルの設計・製作、照射試験及び照射後試験の結果をまとめて記述する。

2. 燃料ピン及びキャップセルの設計・製作

2.1 イナートマトリクス窒化物燃料ピンの製作

今回の試験で照射した窒化物燃料ピンの製作については、既に詳しい内容の報告書¹⁶⁾がある。製作した燃料ピンは2本であるが、本報告書では、このうち、イナートマトリクス窒化物燃料について述べる。燃料及び燃料ピンの概略仕様をTable 1に示す。また、燃料ピンの概略構造をFig.1に示す。

燃料には、互いに固溶しないTiNとPuNを混合して焼結した(TiN,PuN)ペレット及び全率固溶するZrNとPuNを混合して焼結した(Zr,Pu)Nペレットを1本の燃料ピンに封入した。本報告書では、(TiN,PuN)ペレットを「01F-2-1」、(Zr,Pu)Nペレットを「01F-2-2」と称する。プルトニウム富化度は、どちらの燃料ペレットとも全重量の20%とした。燃料ペレットの製造においては、ポアフォーマを使用して、高密度のマトリクスに大きな気孔を導入している(熱安定型ペレット)。燃料ペレットの密度は約87~90%TD(理論密度)であり、被覆管とのギャップを考慮したスマニア密度は約83~87%TDである。被覆管と燃料ペレットのギャップは直径で0.15mmで設計したが、実際には0.16~0.17mmとなった。ボンディング材には1気圧のヘリウムガスが充填されている。燃料ピンの被覆管には米国FETTFの第IV次炉心に採用されたSUS316相当のオーステナイト鋼を採用した。燃料ペレットスタックの中央及び両端には、熱遮蔽のためのウラン窒化物ペレットをそれぞれ1個ずつ配置している。

完成した燃料ピンについては、ヘリウムリーク試験及びX線透過試験により端栓溶接部に欠陥がないこと等を確認した後、JMTRに運搬され、キャップセル(01F-51A)に組み込まれた。完成後の燃料ピンの外観写真をPhoto.1に示す。

2.2 01F-51A キャップセルの製作

キャップセルの設計、製作は、材料試験炉部照射1課並びに技術部工作技術課によって行われた。製作した「01F-51A」キャップセルの断面概念図をFig.2に示す。

これまでに実施した(U,Pu)N燃料のJMTR照射キャップセルと異なり、熱媒体にNakを用いておらず、燃料ピンと外筒との間の熱媒体にアルミニウム合金(A1050)を用いている。また、キャップセル各部の温度測定用の熱電対を配置していない。キャップセル内筒外表面には、熱中性子及び高速中性子用の中性子束モニタ4対が装荷されている。本報告書で述べる燃料は、キャップセル下部側に上下逆立ちした状態で組み込まれている。

3. JMTR 照射

01F-51A キャプセルは、第 145 サイクル（2002 年 5 月）から第 155 サイクル（2004 年 11 月）まで、JMTR 反射体領域に位置する照射孔（第 145 及び 146 サイクルでは L-3、第 147 サイクル以降は G-3）において照射された。延べ照射時間は 5905 時間である。照射履歴を Table2 に示す。

照射中の線出力を核計算により求めた結果を Table3 に示す。全サイクルの平均線出力は、 (TiN, PuN) ペレット（01F-2-1）で 355W/cm 、 (Zr, Pu) N ペレット（01F-2-2）で 408W/cm である。

キャップセルに装荷されていたフランクスモニタの測定結果（4.2.2 項で詳述）及び Fig.2 に示したキャップセル構造を合わせて考慮すると、 (TiN, PuN) ペレットの位置の熱中性子束が (Zr, Pu) N ペレットの位置のそれより高いことが分かる。一方、ペレット 1cmあたりの Pu 含有量が、 (TiN, PuN) ペレットで 0.565g/cm 、 (Zr, Pu) N ペレットで 0.761 g/cm と熱中性子束とは逆の傾向にある。線出力は、熱中性子束と単位長さあたりの Pu 含有量を乗じた値に比例した結果として、上記の値となった。

Fig.2 に示すキャップセル構造と線出力等をもとに、燃料ペレットの中心及び表面の温度を GENGTC コードで計算した結果を、Fig.3 に示す。これをもとに上記の平均線出力のときのペレット中心温度は、 (TiN, PuN) ペレットでは約 810°C 、 (Zr, Pu) N ペレットでは約 1000°C と推定される。

照射終了後、01F-51A キャップセルは JMTR の冷却カナルで約 4 ヶ月冷却され、2005 年 3 月 15 日に JMHL-78Y15T 型輸送容器を用いて、燃料試験施設（当時：日本原子力研究所東海研究所）に輸送された。

4. 照射後試験

4.1 照射後試験の概要

照射後試験の項目は、全体で 27 項目である。照射後試験フローを Fig.4 に示す。

4.2 照射後試験の方法及び結果

4.2.1 外筒解体及び中性子束モニタの回収

外筒のキャップセル番号の刻印を確認した後、上部及び下部端栓部のカッティングマーク位置で外筒を切断した。切断した上部からスプリング、スペーサ、ホルダを取り出した。押し出し方式で内筒熱媒体の取り出しを試みたが、約 220mm 出たところで動かなくなり、最終的には外筒を背割り切断して内筒を取り出した。中性子束モニタ 4 対を回収した。

4.2.2 中性子束モニタ搬出

積算の中性子照射量を求めるためにキャップセル内筒外表面に組み込まれていた 4 対の中性子束モニタを回収し、小型ポリエチレン瓶に入れ、鉛コンテナに収納し、さらに L 型輸送容器に梱包して JMTR まで輸送した。放射能測定を行うことにより、中性子照射量を算出した。

中性子束モニタによって評価した熱中性子及び高速中性子積算照射量は、以下に示すとおりである。高速中性子照射量は $^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{p})^{54}\text{Mn}$ 反応により、また熱中性子照射量は $^{59}\text{Co}(\text{n},\gamma)^{60}\text{Co}$ 反応を利用して評価した。

中性子束モニタ 識別番号	中性子束モニタ 位置	熱中性子照射量 ($10^{24}\text{n}/\text{m}^2$)	高速中性子照射量 ($10^{24}\text{n}/\text{m}^2$)
11 (No.1)	上部燃料ピン・燃料スタッ ク中央 (炉心内側)	5.68	1.34
12 (No.2)	下部燃料ピン・燃料スタッ ク中央 (炉心内側)	5.52	1.03
13 (No.3)	上部燃料ピン・燃料スタッ ク中央 (炉心方向右側)	5.70	1.30
14 (No.4)	上部燃料ピン・燃料スタッ ク中央 (炉心外側)	5.01	1.25

Fig.5 及び Fig.6 には、この評価結果を核計算による推定（実線）と併せて示す。中性子束モニタの測定結果は、図中に△印及び○印で表示されている。△印は炉心側を、○印はその反対側及び側面を表している。熱中性子照射量は、核計算値と実測値が良い一致を示している。中性子束モニタの装荷位置については、Fig.2 に図示されている。上部燃料ピン・燃料スタック中央の値から、炉心内側に比べて外側では、熱中性子束は 0.88 倍に減少しているが、この値はこれまで

JMTR で照射した (U,Pu) N 燃料に比べると高いことがわかる。例えば、89F-3A キャプセルでは、0.67 倍であった⁹⁾。このことは、照射場の熱中性子分布が今回は、より均一であることを示している。

イナートマトリクス窒化物燃料スタック中央における熱中性子照射量は、炉心内側で $5.52 \times 10^{24} n/m^2$ と推定される。なお、照射時間から求めた平均熱中性子束は、 $2.60 \times 10^{17} n/m^2 \cdot sec$ である。

4.2.3 内筒外観検査

キャップセル内筒表面の外観検査を目視により実施した。外面は熱媒体と固着しており観察することはできなかった。内面は金属光沢があり、変色、変形等の異常は認められなかった。

4.2.4 内筒解体

以下の手順で、内筒を解体し、燃料ピンを取り出した。

- ①ホルダ 3 個を取り外し、内筒熱媒体を 2 個に分離した。
- ②内筒と熱媒体を分離することを試みたが、内筒と熱媒体が固着したまま径方向に分割した。
- ③燃料ピンの試料番号（下部端栓端面に番号刻印）を確認した。

4.2.5 燃料ピン外観検査及び写真撮影

燃料ピン全体にわたり、ピンホール、傷、腐食、変形、変色等の特異部の有無に着目して、目視、双眼鏡及び P 型ペリスコープにより外観検査を実施した。その結果、全体に僅かな擦り傷が観察されたが、異常と思われる変色、変形等は認められなかった。燃料ピンの下部端栓の方位マークを 0° として、 0° 及び 180° の 2 方向について燃料ピン全体の写真を撮影した。燃料ピンの外観写真を Photo.2 に示す。

4.2.6 燃料ピン X 線透過撮影

燃料ピンの X 線透過試験は、下部端栓の方位マークの刻印されている面 (0°) 及び 90° の 2 方向から行った。撮影条件は、X 線管電圧 380kV、X 線管電流 3.9mA、撮影速度 7 mm/min、径方向倍率 1.2 倍、軸方向倍率 1.0 倍である。撮影した燃料ピンの X 線透過像を Photo.3 に示す。その結果、端栓部等で特に異常は認められなかった。上部側から 2 個目と 3 個目のペレット間に約 0.5mm、3 個目と 4 個目のペレット間に約 1mm のギャップが見られた。この燃料ピンは、キャップセル内では倒立していたため、熱影響でスプリングの弾性が減少し、ペレット間にギャップを生じたものと考えられる。ペレット自体は大きな割れや欠け等は見られない。この X 線透過写真をもとに、切断位置を検討した。

4.2.7 燃料ピン γ 線スキャニング

燃料ピンを γ 線スキャニング装置に装着し、燃料ピン軸方向の γ 線スキャニング及び定点における γ 線スペクトル分析を実施した。上部端栓位置をゼロ点とし、そこからコリメートスリット軸心までの距離を上下位置とした。軸方向の全 γ 線測定では、燃料ピンを軸方向に一定速度(25mm/min)で移動させながら高純度ゲルマニウム検出器により γ 線強度分布を連続測定した。その結果を、Fig.7に示す。燃料ピンの軸方向については、さらに代表的なFP核種である ^{106}Rh (621.9keV)、 ^{137}Cs (661.7keV)、 ^{144}Pr (696.0keV)、 ^{95}Zr (756.6keV)及び ^{134}Cs (795.9keV)について γ 線スキャニングを行った。この場合には、0.5mm間隔にステップ状に燃料ピンを移動させながら、各ステップ毎に100秒間の測定を実施した。その結果を、Fig.8に示す。さらに、軸方向の40mm(プレナム部)、130mm((Zr,Pu)Nペレット部)及び170mm((TiN,PuN)ペレット部)において、 γ 線スペクトル分析を行った。測定時間はそれぞれ4000秒である。結果をFig.9からFig.11に示す。

軸方向における全 γ 線(Fig.7参照)及び核種毎の γ 線測定結果(Fig.8参照)から、それぞれの燃料スタックの両端で γ 線強度にピークが見られる。これは、これまでの窒化物燃料の照射試験でも認められており、燃料スタック端では径方向に加えて軸方向からの中性子が入射することによるものと考えられる。2種類の燃料スタックの範囲で γ 線量はほぼ平坦であり、軸方向の中性子束分布が比較的平坦であることを反映したものである。上部側の(Zr,Pu)Nペレット部の γ 線量が下部側の(TiN,PuN)ペレット部に比べて高いのは、Table4に示すように、(Zr,Pu)Nペレットの燃焼度が高いためである。この測定からはペレットの境界を認識でき、X線透過試験で見られた(Zr,Pu)Nペレット間のギャップは明確に確認できた。断熱ペレット部分でもウランの核分裂に起因する弱い γ 線が見られる。

軸方向の全 γ 線でプレナム部にわずかながら γ 線が計数されている。プレナム部の定点におけるスペクトル分析結果(Fig.9参照)から、被覆管及びスプリングの放射化による ^{58}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co の他、FPである ^{134}Cs 、 ^{137}Cs がわずかであるが観測された。軸方向の核種毎の γ 線計測結果(Fig.8参照)でも ^{134}Cs のプレナム部への移行がごくわずかに確認される。 ^{134}Cs は燃料中では主に ^{134}Xe の β 崩壊で生じ、 ^{137}Cs は核分裂で直接生じる。観察された ^{134}Cs は、プレナム部へは ^{134}Cs ではなく ^{134}Xe として移行した可能性もある。

4.2.8 燃料ピン寸法及び曲がり測定

燃料ピンの直径及び曲りに関する測定は、 β ・ γ コンクリートセル内の寸法測定装置を用いて行った。下部端栓に刻印した方位マークの位置を 0° として、 0° 、 45° 、 90° 、 135° の4方向について測定を実施した。測定精度は、直径で $\pm 0.01\text{mm}$ 、曲りで $\pm 0.01\text{mm}$ である。直径の測定結果をFig.12に、曲りの測定結果をFig.13に示す。

直径変化では、照射前は9.39mmであったが、照射後はプレナム部ではほとんど変化ないのに対し、(TiN,PuN)ペレットの燃料スタック部では明らかな直径増加が認められる。その増加は、直径で0.02~0.03mm程度であり、最大でも0.03mmである。 $\Delta D/D$ として0.3%であり、この値はこれまでの(U,Pu)N燃料の照射結果と大差なく、被覆管の健全性の点からは問題になる値ではない。(TiN,PuN)ペレットの端面の合わせ目で若干のリッジングが観察される。今回

の試験で見られた直径増加は、プレナム部での直径増加がないことから考えて、照射による被覆管のスエリングではなく、燃料のスエリングによる燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用(FCMI)によるものであると推定される。なお、リッジングは 0° 及び 45° 方向では明確であるが、 90° 及び 135° 方向では顕著ではない。また、後述する金相観察では、燃料ペレットと被覆管のギャップは閉じていないと判断されるので、このリッジングは燃料ペレット全体がスエリングして径方向全体で発生しているのではなく、ペレットの位置が被覆管内で偏芯し、被覆管と接触した部分でのみ発生したと考えられる。同じ条件で照射している(Zr,Pu)Nペレット部では被覆管の直径増加はわずかであり、リッジングはほとんど生じていない。このことから、さらに燃焼度を高めた場合には、(TiN,PuN)燃料におけるリッジングについて注目することが必要である。

燃料ピンの曲りは、最大でも 0.2mm であり、この値はこれまでの(U,Pu)N燃料の照射結果と大差ないものである。最大曲り位置は、(Zr,Pu)N燃料スタック付近である。燃料スタック部は照射中の発熱部であり、また、炉心側とその反対側では中性子束が異なるため燃料ピン内の発熱分布に不均一が生じ、この部分の被覆管に応力が発生することが予想される。しかし、燃料ピン2本を上下につなぎ合わせた形でキャプセル内に固定しているので、それによる外部からの応力も想定される。これらの総和としての曲りと考えられる。いずれにしても、燃料ピンの健全性を損なうような曲りではない。

4.2.9 燃料ピンガス捕集試験

燃料ピンのプレナム部に穿孔してピン内に滞留しているガスを捕集し、FPガスの放出量を評価した。ガス抜き装置は $\alpha \cdot \gamma$ コンクリートセル内に設置されており、燃料ピンをセットした後真空引きをする。系の容積(燃料ピン内の空隙を含めて)を測定し、穿孔後の平衡ガス圧からピン内のガスの体積を求めることができる。内容積 50cm^3 の捕集容器2本を用意し予め真空引きした後、1本目には平衡圧のままで放出されたガスを捕集し、2本目には残りのガスをテプラーポンプで汲み上げて捕集した。測定精度は、燃料ピン内空隙については $\pm 0.1\text{cm}^3$ 、燃料ピン内ガス圧力については $\pm 1 \times 10^2\text{Pa}$ である。

パンクチャ試験によって得られた結果をTable 5に示す。全ガス量は 5.7cm^3 であり、このガス量には、ピン製作時に充填したボンディング材であるヘリウムガス(充填圧1気圧)が含まれているので、実際のFPガス量としては、このヘリウムガスを差し引くことが必要である。

4.2.10 燃料ピンFPガス分析

パンクチャ試験によって捕集されたガスの組成をガスクロマトグラフ質量分析計で分析した結果をTable 6に示す。分析精度は $\pm 3\%$ である。確認されたガスは、燃料ピン製作時に封入されたヘリウムの他は、FPガスであるKrとXeであった。

KrとXeそれぞれの同位体組成は、ORIGENコードで計算した結果ともよく一致している。また、XeとKrの比は18.4であり、ORIGENコードで計算した値(16.3)より、多少高い値である。これは、KrとXeのプレナムへの移行比率が生成比と異なるということではなく、放出率が低く、絶対量が少ないための誤差に起因していると考えられる。

ガス全体の捕集量とガス組成から、捕集された Kr 及び Xe の量を求め、ORIGEN コードで計算した生成量と比較して放出率を算定すると、1.6% であった。この値は、これまでの窒化物燃料の放出率とほぼ同様であった。これは、ボアフォーマを使用して、全体としては低密度ながら開気孔が少なく、かつ燃料マトリクスは高密度である熱安定型ペレットを採用したこと及び燃料中心温度が 1000°C を超えないことが大きな要因と考えられる。

4.2.11 燃料ピン粗切断

破壊試験試料の作成のため、 $\alpha \cdot \gamma$ コンクリートセル内の低速精密切断機をアクリル製カバーで覆い、内部をアルゴンガスフローした雰囲気にして、燃料ピンの粗切断を行った。切断前に下部端栓方位マークをもとに周方向 0° 位置をマーキングした。切断位置は X 線透過試験等の非破壊検査結果等をもとに決定した。切断は乾式で行い、切断後は上下位置が分かるようにマーキングした。切断位置及び試料番号を、Fig.14 に示す。

4.2.12 燃料ピン樹脂注入

粗切断した試料のうち、金相試験等に用いる部分(試料番号 2-1B 及び 2-2D)について、ペレット及びスタック形状の保持並びにペレットと被覆管の相対的位置関係保持のため、エポキシ樹脂注入を行った。樹脂内の気泡を脱泡するため樹脂を専用容器に入れ、樹脂注入装置にて 10 分間の真空引きを行った。粗切断した試料をカゴに入れ、樹脂内に浸した。この際、試料内の気泡の抜けを考慮して試料が斜めになるようセットした。樹脂注入装置にて 10 分間真空引き (到達真空度 : 1.33 Pa ($1.0 \times 10^{-2} \text{ Torr}$)以上) を行い、試料内に樹脂を注入した。試料を樹脂より取り出し、被覆管表面の余分な樹脂を拭き取った。

4.2.13 燃料ピン細切断

樹脂注入した部分について、金相試験等のため、径方向及び軸方向の細切断を行った。樹脂注入した試料を低速精密切断機にセットし、アクリル製カバーで覆いカバー内にアルゴンガスをフローした雰囲気中で、不水溶性油を用い湿式切断した。切断位置は X 線透過試験等の非破壊検査結果をもとに決定した。切断後、試料をアルコールで洗浄した。切断後の試料長をスケールにより測定した。試料下部に上下識別マーキングを白マジックで行った。2-1B 及び 2-2D の 2 試料については、径方向切断後、軸方向 (0° - 180°) に湿式切断し、90° 側を金相試料とした。切断後の試料は、径方向切断時と同様にアルコールで洗浄した。切断位置及び試料番号を Fig.15 に示す。

4.2.14 脱ミート

燃料ペレット密度測定試料採取のため、2-1A 及び 2-2C 試料について、被覆管より燃料ペレットの脱ミートを行った。押し出し法で燃料ペレットの脱ミートを試みたが、燃料ペレットと被覆管の固着等により脱ミートが不可能であったため、最終的には背割り切断による脱ミート

を実施した。背割り切断は、試料をセットした背割り切断機をアクリル製カバーで覆いカバー内にアルゴンガスをフローした雰囲気中で 90° - 270° の 2 方向について、被覆管のみを乾式で切断した。専用治具を用い被覆管を取り外し、燃料ペレットを脱ミートした。採取した試料は m-キシレン液で洗浄した後、真空乾燥を 3 時間以上行った。P型ペリスコープで脱ミートした燃料ペレット片の外観写真撮影を行った。写真倍率は、3 倍とした。ペレットの外観写真を Photo.4 に示す。

写真に示すとおり、(TiN,PuN) ペレット 2 個は、割れることなく回収することができた。大 (Zr,Pu) N ペレットも 1 個は割れることなく回収することができ、他の 1 個は 5 個に割れていた。両燃料ともに照射中に形状的な健全性が高かったことを示している。端面に見られる傷は、被覆管からペレットを取り出すために実施した背割り切断の際、切断機の刃でついたものである。

4.2.15 燃料ペレット密度測定

脱ミートによって採取した燃料ペレットのうち、それぞれ丸ごと回収されたペレット 1 個ずつを使用して密度測定を行った。真空乾燥した後、寸法及び重量を測定し、続いて m-キシレンを置換液に用いた液浸法（アルキメデス法）で密度測定を実施した。それぞれの測定精度は、試料寸法で $\pm 0.005\text{mm}$ 、試料重量で $\pm 0.0001\text{g}$ 、試料密度で $\pm 0.01\text{g/cm}^3$ である。液浸法で得られる密度は、m-キシレンが開気孔に侵入するため、マトリクス及び閉気孔を合わせた値である。得られた結果を、Table 7 に示す。

照射前の燃料ペレットの密度（寸法と重量から算出）は、(TiN,PuN) で 86.6%T.D.、(Zr,Pu) N で 90.4%T.D. であった。照射後の密度（寸法と重量から算出）は、それぞれ 83.7% T.D. 及び 86.4% T.D. である。この密度変化を燃料ペレットのスエリングによるものと考えると、スエリング率はそれぞれ 2.6% 及び 3.6% である。

ペレットと被覆管の直径ギャップは照射前で $0.16\sim0.17\text{mm}$ である。被覆管自体の寸法変化を無視すると、ギャップが閉塞するまでの自由スエリング率は、3.9~4.2% である。実際の燃料ペレットのスエリング率は、その値以下であるので、ギャップは閉塞していなかったと推測できる。

4.2.16 燃料ペレット X 線回折

金相観察用に埋め込んだ試料（2-1B1、2-2D1）を用いて、その中心部に X 線が照射されるように調整して X 線回折を行った。

X 線回折の条件は、以下のとおりである。

ターゲット	C u
管電圧	4 0 k V
管電流	4 0 mA
走査範囲 (2θ)	2 0 ~ 1 3 0 °
走査速度	0. 2 5 ° / m i n
サンプリング間隔	0. 0 1 °
モノクロメータ	グラファイト平板結晶

得られた回折スペクトルを照射前のデータと合わせて Fig.16 及び Fig.17 に示す。

(TiN,PuN) (試料番号 : 2-1B1) の X 線回折結果では、照射前と照射後の回折ピークの位置はほぼ一致しており、照射による効果は明確ではない。それぞれのピークは照射後でブロードになっており、高角度側では K_α 1 と K_α 2 の分離がされていない。これは照射による効果であるが、照射前の測定は粉末試料であるのに対して、照射後はペレットのままであることも影響している。28° 付近に見られるピークは、酸化物の可能性が高いが、照射前にも観察されることから、照射によって生じたものではなく、照射試料の調製の段階で生成していたものであると考えられる。

(Zr,Pu) N (試料番号 : 2-2D1) の X 線回折結果でも、照射前と照射後の回折ピークの位置はほぼ一致しており、照射による効果は明確ではない。それぞれのピークは照射後でブロードになっており、高角度側では K_α 1 と K_α 2 の分離がされていない。

4.2.17 燃料ペレット等金相試験前処理

細切断した試料は、金相試験、マイクロγ線分析等の試験に供するため、エポキシ樹脂に埋め込み、研磨及びエッティングを行った。

金相観察用試料は、研磨後の状態を観察及び写真撮影した後、エッティングを行った。燃料ペレットのエッティング条件は以下のとおりである。

①(TiN,PuN) (試料番号 : 2-1B1、2-1B2)

エッティング液 : CH₃CH(OH)COOH : HNO₃ : HF = 30cm³ : 10 cm³ : 0.4 cm³

エッティング時間 : 25 分

② (Zr,Pu) N (試料番号 : 2-2D1、2-2D2)

エッティング液 : CH₃CH(OH)COOH : HNO₃ : HF = 30cm³ : 10 cm³ : 0.1 cm³

エッティング時間 : 10 から 14 分

4.2.18 燃料ペレット研磨面観察及びマクロ写真撮影

燃料ペレットの径方向断面及び軸方向断面における燃料組織の様子やクラックの発生状況を観察するとともに、50 倍でのモザイク写真撮影を行い、張り合わせた後に全体写真を撮影した。それぞれの燃料ピン毎の写真を Photo.5 及び Photo.6 に示す。

径方向断面では、両燃料とも、大きなクラックは発生しておらず、照射中の組織的安定性が高

いことが判明した。いずれの燃料でも燃料ペレットと被覆管の間にギャップが全周にわたって存在している。4.2.15 項で述べたように、(TiN,PuN)燃料の体積スエリング率が (Zr,Pu) N に比べて小さかったことを反映して、(TiN,PuN)燃料におけるギャップがより広い。

軸方向断面では、(TiN,PuN)燃料ペレットにおいてはペレット間のギャップは小さいが、(Zr,Pu) N 燃料ペレットでは、燃料ピンの X 線透過写真 (Photo.3) で確認されたように、右側とその隣のペレットの間に広いギャップが観察される。この燃料ピンは、照射中は倒立していたので、スプリングの弾性が低下して、ペレットが移動した可能性が高い。

燃料ペレットの断面全体に共通しているのは、白く島のように見える高密度部分がその外側の多孔質な低密度部分に囲まれていることである。この状況はこれまでの (U,Pu) N 燃料ペレットでも同様であった。ペレット成形時のポアフォーマの不均一と照射による焼きしまりが主な原因と考えられる。このような組織の顕著な変化が見られるにも関わらず、ペレットは製造時の形状を維持し、極めて低い FP ガス放出率を示した。このことから、多孔質な部分の密度も見かけほどは低くないと推定される。このような組織変化は、今回は燃料の照射健全性に悪い影響を及ぼしていないと判断できるが、高燃焼度対応及び品質管理上からは燃料製造方法について改善の余地がある。

4.2.19 燃料ペレット気孔分布測定

研磨した燃料ペレット試料（試料番号 2-1B1、2-2D1）を直径方向に横断する形で撮影した、外周部、中間部、中心部の 3ヶ所の 400 倍の金相写真を用いて、画像解析装置により気孔分布を測定した。画像解析装置の性能は、画素数が 1024×1024 画素である。写真上で 60mm 角（実寸で $150 \mu\text{m}$ 角）の範囲を測定した。気孔と気孔が連結している場合には、1 個と見なした。気孔分布は、気孔面積に応じて $0.1 \sim 10 \mu\text{m}^2$ の範囲は $0.5 \mu\text{m}^2$ ピッチで、 $10.1 \mu\text{m}^2$ からは $10 \mu\text{m}^2$ ピッチで区分した。測定結果を Table 8 及び Table 9 に示す。

(TiN,PuN)燃料試料 (2-1B1) では、どの場所においても $5 \mu\text{m}^2$ (球状を想定した気孔径で $1.3 \mu\text{m}$) 以下の気孔が約 7 割を占めている。平均気孔径は $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 程度であるが、外周部より中心部でより小さい気孔が多い傾向が見られる。

(Zr,Pu) N 燃料試料 (2-2D1) でも、小さな気孔が多いのは共通している。中心部に比べて外周部で平均気孔径が大きくなっている傾向が見られる。

4.2.20 燃料ペレット金相観察及び写真撮影

径方向及び軸方向断面（各燃料とも 2 試料）について、倍率 100 倍、400 倍及び 800 倍で写真撮影を行った。例として (TiN,PuN) 燃料試料 (2-1B1) 及び (Zr,Pu) N 燃料試料 (2-2D1) の外周部、中間部及び中心部について、エッティング後の 100 倍の写真を Photo.7 から Photo.10 に示す。高密度領域を多孔質の部分が取り囲んでいることが確認できる。

(TiN,PuN) 燃料試料 (2-1B1) 及び (Zr,Pu) N 燃料試料 (2-2D1) の外周部、中間部及び中心部について、800 倍の写真を Photo.11 及び Photo.12 に示す。800 倍の写真は高密度の領域を選んで撮影した。高密度の部分には微細な気孔が分散している。

4.2.21 燃料ペレット結晶粒度測定

エッチングした燃料ペレット（試料番号 2-1B1 及び 2-2D1）を直径方向に横断する形で撮影した、外周部、中間部及び中心部の 800 倍の金相写真を用いて、画像解析装置により結晶粒度を測定した。測定位置は高密度領域である。画像解析装置の性能は、画素数が 1024×1024 画素である。写真上で 60mm 角（実寸で $75 \mu\text{m}$ 角）の範囲を測定した。なお、 $1 \mu\text{m}$ ピッチで粒径分布を作成した。平均結晶粒径について Table 10 に示す。また、粒径分布の測定結果を Table 11 及び Table 12 に示す。

平均結晶粒径は、2 試料ともペレットのどの位置においても $1 \sim 2 \mu\text{m}$ で相違はなく、照射前の粒径とも変化がないことから、照射による粒成長は両試料ともほとんど生じなかつたことが確認された。粒径分布を見ると、(TiN,PuN) 燃料試料 (2-1B1) では、ペレット中心部に比べて外周部で $2 \mu\text{m}$ 以下の小さな粒径の数が多いように見える。一方で、(Zr,Pu) N 燃料試料 (2-2D1) では逆の傾向を示している。気孔分布と同様の傾向を示している結果であったが、相関関係は現段階でははつきりしていない。

4.2.22 燃料ペレットマイクロ γ 線スキャニング

燃料ペレット中に存在する放射性核種の同定と分布状況を調べるために、ペレット中心における γ 線スペクトル分析を行うとともに、代表的な 5 核種についてペレット断面の全面についてマイクロ γ 線スキャニングを実施した。用いた測定器は、ゲルマニウム検出器 (CABERR Model GC 2518) である。 γ 線スペクトル分析では定点で 5000 秒の測定を行い、マイクロ γ 線スキャニングでは 0.5mm ピッチで各点 2000 秒の測定を実施した。マイクロ γ 線スキャニングでは、ペレット中心を座標原点とし、方位マーク位置を Y 軸の十軸に一致させた。

γ 線スペクトル分析の結果を Fig.18 及び Fig.19 に示す。両者の分析結果は良く一致しており、 ^{144}Ce 、 ^{125}Sb 、 ^{106}Rh などが検出されている。

マイクロ γ 線スキャニングでは、燃料ピンの γ 線スキャニングと同じ 5 元素 (^{106}Rh 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Pr 、 ^{95}Zr 及び ^{134}Cs) について測定を実施した。その結果を Fig.20 及び Fig.21 に示す。Y+ 方向が炉心側である。すべての核種で γ 線強度は外周部で高く中心部で低く、炉心側が高く反対側が低いことは共通している。これはペレット内の熱中性子分布を反映したものである。準揮発物質である Cs の分布が他の核種と相違ないことから、ペレット内での移動はほとんど起きていないと結論できる。

4.2.23 燃料ペレットオートラジオグラフ

マイクロ γ 線スキャニングを実施した試料（試料番号 2-1B1 及び 2-2D1）を用いて、燃料ペレット断面について α オートラジオグラフ及び β ・ γ 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 社製のニトロセルロース膜 (CN-85) をニッケル箱 (厚み $7.5 \mu\text{m}$ 、燃料ペレット側に装着) と厚紙の間に挟み、全体をマイラー膜 (厚み $4 \mu\text{m}$) で養生したものを試料に密着させて行った。加重は 1kg で、50~100 秒間露出させた。露出後のニトロセルロース膜のエッチングは、 50°C の 6N NaOH で 30 分間行った。 β ・ γ オートラジオグラフは、コニカ社製の

乾板(HY2型)をアルミ箔(厚み $15\mu\text{m}$)で遮光した後マイラー膜で養生したものを試料に密着させて行った。加重は1kgで、5~12秒間露出させた。 α オートラジオグラフ及び $\beta\cdot\gamma$ オートラジオグラフの結果をPhoto.13及びPhoto.14に示す。

α オートラジオグラフは、主に ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Am 及び ^{242}Cm の α 核種の存在を示すものであるが、大部分は比放射能の高い ^{242}Cm の寄与である。 ^{242}Cm はPuからの熱中性子捕獲による生成によるものであるので、 α オートラジオグラフで強く露光している部分は熱中性子捕獲がより高い部分といえる。ペレット内の熱中性子束分布は、ペレット中心部に比べて外周部では高いことが分かっている。 α オートラジオグラフの結果で、外周部が強く露光しているのは、熱中性子束分布をほぼ反映したものということができる。

$\beta\cdot\gamma$ オートラジオグラフは、主にFP元素の分布を示している。今回の照射では、照射中の燃料温度が低く、温度勾配も小さいため、FP元素の移動はほとんど起きていない。このことはマイクロ γ 線スキャニングでも確認できた。したがって、 $\beta\cdot\gamma$ オートラジオグラフもほぼ熱中性子束分布を表しているといえる。今回の結果は、外周部で強い露光が観察されており、ペレット内の熱中性子束分布に対応している。

α オートラジオグラフ及び $\beta\cdot\gamma$ オートラジオグラフとともに、露光が円対象でないのは、照射が炉心外領域で行われたため、炉心側の中性子束がより高いことを反映したものである。

4.2.24 燃料ペレットX線微小分析

マイクロ γ 線スキャニングを実施した試料(試料番号2-1B1及び2-2D1)を用いて、燃料ペレットのX線微小分析を実施した。試料表面にはカーボン蒸着を行った。

熱中性子による照射のため、燃料ペレット断面の中でも燃焼度が相対的に高いと考えられる燃料ペレットの外周部を選んで、定点スペクトル分析を実施し、燃料中に存在する元素の同定を行った。その結果をFig.22及びFig.23に示す。燃料物質であるPuが認められているほか、Zr、Cs、Te、Xe等のFP元素の存在が確認できる。ORIGENコードによる存在量評価値(Table13及びTable14参照)から、線分析対象元素を以下のように選定した。なお、Table13におけるZrは、核分裂の結果生じた量であり、母材としてのZrは含まれていない。面分析においては、これらにTeを加えた。

(TiN,PuN) (2-1B1) : Pu,Ti,Nd,Zr,Xe,Pd,Mo,Cs

(Zr,Pu) N (2-2D1) : Pu,Nd,Zr,Xe,Pd,Mo,Cs

(TiN,PuN)ペレットの直径に沿い、炉心側から反対方向に向かって線分析した結果を、Fig.24及びFig.25に示す。この試料は、TiN粒子にPuN粒子が分散しているものであり、原子個数比では、Puに対してTiが約15倍である。Puの線分析では、TiNマトリクス中にPuNは点在しているので、ビームがPuNに当たるとカウントが跳ね上がっている。全体的には、ペレットの外周と中心でPu存在量に大きな変化はない。もともとウランが存在していないので中性子の吸収が起きにくく、ペレット内の中性子束が比較的フラットであることが理由と考えられる。これまでの(U,Pu)NのJMTR照射では、外周部から中心部に向けて中性子束が弓形に減少するので、外周部ほどPuの核分裂が進み、Puの分布は外周で少なく中心が高い「丘」型をしていた。今回の分布は「常陽」を用いて高速中性子で照射した結果に近い。Tiの線分析で、ところどころ

でカウントが大きく落ち込むのは、ポアフォーマで導入した気孔か、あるいはクラックにビームが当たったことによると考えられる。FP 元素の線分析では、核分裂がペレット全体に比較的フラットに生じているので、FP の分布もその傾向を示している。Zr のチャートで、右側の部分に「ピーク」が見られるが、同じ位置で、Pu のピークが見られることから、ちょうど PuN 粒子に測定用ビームが当たったためではないかと考えられる。他には、ピークと考えられるものは認められない。FP 元素のカウント（バックグラウンドからの正味カウント）がかなり小さいために、細かな点は議論しにくい。

(TiN,PuN) ペレットの面分析結果のうち、ポアフォーマで導入した気孔周辺の SE 像、Pu、Ti 及び Te の特性 X 線像を、Photo.15 に示す。PuN 粒子が分散しており、その PuN 粒子内に Te が留まっていることが確認できる。他の FP 元素はカウント数が小さく存在が明確ではないが、析出相は観察されなかった。

(Zr,Pu) N ペレットの直径に沿い、炉心側から反対方向に向かって線分析した結果を、Fig.26 及び Fig.27 に示す。この試料は、ZrN 中に PuN が固溶しており、各元素の線分析結果は、ほぼフラットである。ところどころでカウントが落ち込むのは、ポアフォーマで導入した気孔か、あるいはクラックにビームが当たったことによると考えられる。Cs の線分析結果で、ペレットの外周部で鋭いピークが観察され、析出相の存在が示唆される。

線分析で Cs のピークが観察された付近の面分析を実施した結果を、Photo.16 に示す。SE 像で、右半分が燃料ペレットであり、左側はギャップに充填された樹脂である。ペレットのくぼみの部分で Pu と Zr の濃度に濃淡が見られ、一部に Cs の存在が確認できた。他の元素との共存について調べたが、明確な結論は得られなかった。

4.2.25 被覆管金相観察及び写真撮影

照射による被覆管の変化、燃料と被覆管の化学的相互作用 (FCCI) を調べるために、各燃料について 1 試料ずつ (試料番号 2-1B1 及び 2-2D1) 被覆管の金相観察及び写真撮影を行った。被覆管は SUS316 であり、埋め込み試料を研磨した後、次のエッティング液でエッティングを実施した。

エッティング液 : HCl : HNO₃ : HF = 15ml : 5ml : 20ml

金相写真は 1 方向のみについて撮影した。その写真を Photo.17 から Photo.18 に示す。両方の燃料ピンの被覆管とともに粒界腐食の兆候などは見られず、照射による組織への影響は特に認められない。

4.2.26 被覆管腐食厚さ測定

被覆管の金相写真から内面の腐食状態を観察した。両燃料 (試料番号 2-1B1 及び 2-2D1) とも被覆管内側でエッティングに対して鋭敏化した部分が、狭い幅で観察されるが、FCCI の兆候は全く見られない。

4.2.27 被覆管結晶粒度測定

エッティングした被覆管 (試料番号 2-1B1 及び 2-2D1) を撮影した 400 倍の金相写真(被覆管内

周部及び外周部)を用いて、画像解析装置により結晶粒度を測定した。画像解析装置の性能は、画素数が 1024×1024 画素である。写真上で $60\text{mm} \times 60\text{mm}$ 角(実寸で $150\mu\text{m}$ 角)の範囲を測定した。なお、粒径で $0 \sim 30\mu\text{m}$ の範囲で $1\mu\text{m}$ ピッチで、また $30\mu\text{m}$ 以上はまとめて、粒径分布を作成した。平均結晶粒径の測定結果を Table15 に、結晶粒度分布を Table16 に示す。

(TiN,PuN)燃料の被覆管(試料番号 2-2B1)では、内周部及び外周部の平均粒径は $7 \sim 9\mu\text{m}$ であり、照射前の約 $11\mu\text{m}$ という値に比べて小さい値となっているが、この原因は明確ではない。結晶粒度分布についても、内外周で大きな相違はない。

(Zr,Pu) N 燃料の被覆管(試料番号 2-2D1)では、内周部及び外周部ともに平均粒径は $10 \sim 11\mu\text{m}$ であり、内外周で相違はなく、照射前の約 $11\mu\text{m}$ という値と同じである。結晶粒度分布についても、内外周で大きな相違はない。

5. まとめ

マイナーアクチノイドの核変換用燃料として注目されているイナートマトリクス窒化物燃料の照射挙動を把握するため、JMTR を用いて照射試験を実施した。今回は、マイナーアクチノイドをプルトニウムで模擬し、母材として、ZrN 及び TiN を選択した。JMTRにおいて 11 サイクルの照射を行い、燃焼度は 13~15 万 MWd/t-Pu に達した。冷却後、照射後試験を実施した。照射後試験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 照射後の燃料ピンに有害な変形等は生じておらず、13~15 万 MWd/t-Pu までの健全性が確認された。
- (2) 燃料ピンの X 線透過試験では、ペレット間に若干のギャップが認められたが、大きな割れや欠けはないことが確認できた。
- (3) 燃料ピンの γ 線スキャニングでは、プレナム部に Cs がわずかに検出され燃料ペレットから移行したものと思われるが、その他の FP 元素の移行は観察されなかった。
- (4) 燃料ピンの寸法測定では、(TiN,PuN) ペレット部の被覆管の外径変化は最大でも 0.03mm と小さいが、ペレットの端面に対応した位置でリッジングが観察されている。さらに高燃焼度が高くなった場合には、注目する必要がある。 $(Zr,Pu)_N$ ペレット部の被覆管の外径変化はわずかであった。
- (5) FP ガス捕集試験では、燃料ピンのプレナムに放出された FP ガスは、生成量の 1.6% であり、低い値であった。ポアフォーマを用いた熱安定型であること及び照射中の燃料ペレット中心温度が 1000°C 以下であることから FP ガスの拡散等が抑えられた結果である。
- (6) 燃料ペレットの密度測定では、丸ごと回収されたペレットを使用した。体積スエリング率は約 3% であり、燃料ペレットと被覆管のギャップは閉塞していなかったと推察される。
- (7) 燃料ペレットの X 線回折では、観察された回折ピークは照射前とほぼ変化はなく、新たなピークは認められなかった。
- (8) 燃料ペレットの金相観察では、大きなクラックは発生しておらず、照射に対する組織安定性が高いことが示された。また、析出物は見られなかった。
- (9) 燃料ペレットの結晶粒度測定では、照射前に比べて照射による結晶粒径の変化は見られず、ペレットの径方向においても差は認められなかった。
- (10) 燃料ペレットの α オートラジオグラフ、 $\beta \cdot \gamma$ オートラジオグラフ及びマイクロ γ 線スキャニングの結果から、燃料内で生成した FP 元素やアクチノイド元素は、ペレット内の熱中性子束分布に応じた分布をしており、径方向への移行はほとんど起きていないことが分かった。
- (12) 燃料ペレットの X 線微小分析では、ウランを含まないイナートマトリクス燃料の特徴である径方向に比較的平坦な核分裂が生じたことが確認された。
- (13) 被覆管に関する試験結果から、イナートマトリクス窒化物燃料とステンレス鋼との両立性が良好であることが示された。
- (14) 照射後試験全体を通じて、イナートマトリクスとして採用した ZrN 及び TiN が、窒化物燃料の照射挙動に悪影響を及ぼす結果は見られなかった。
- (15) 今回の照射試験では、燃料の最高温度が約 1000°C 以下と推定され、いわゆる "Cold Fuel"

Concept”が実現された可能性が高い。これは従来の(U,Pu)N燃料の照射試験に比較して線出力が低かったこと及び採用したイナートマトリクスに起因して燃料ペレットの熱伝導度が高かったことに起因すると考えられる。

謝辞

本試験の遂行にあたり、多くの方のご指導・ご協力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる。

参考文献

1. Y.Arai, Y.Suzuki, M.Handa : Proc. Int. Conf. on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems, GLOBAL '95, Versailles, France, Sep. 11-14, 1995, 1(1995)538.
2. Y.Arai, T.Iwai, K.Nakajima, Y.Suzuki: Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems, GLOBAL '97, Yokohama, Japan, Oct. 5-10, 1997, 1(1997)664.
3. 鈴木 康文、岩井 孝、荒井 康夫、笹山 龍雄、塩沢 憲一、大道 敏彦、半田 宗男: JAERI-M 90-116, “第1回 JMTR 照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(88F-5A)の製作”(1990).
4. 荒井 康夫、岩井 孝、笹山 龍雄、岡本 芳浩、中島 邦久、新見 素二、助川 友英、山原 武、鈴木 康文: JAERI-Research 95-008, “JMTR 照射ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射後試験(88F-5A キャプセル)”(1995).
5. 岩井 孝、中島 邦久、菊地 啓修、木村 康彦、金井塚 文雄、関田 憲昭、荒井 康夫、鈴木 康文: JAERI-Research 2000-009 “JMTR 照射混合窒化物燃料におけるアクチノイド及び核分裂生成物の挙動 (88F-5A キャプセル)” (2000).
6. Y.Arai, Y.suzuki, T.Iwai, A.Maeda, T.Sasayama, K.Shiozawa, T.Ohmichi: J. Nucl. Sci. Technol. 30(1993)624.
7. 鈴木 康文、岩井 孝、笹山 龍雄、前多 厚、荒井 康夫、塩沢 憲一、大道 敏彦: JAERI-M 91-078, “第2回 JMTR 照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(89F-3A)の製作”(1991).
8. 岩井 孝、笹山 龍雄、鈴木 康文: JAERI-M 91-077, “フェライト鋼の高速炉用新型燃料被覆材への適用”(1991).
9. 岩井 孝、中島 邦久、菊地 啓修、木村 康彦、長島久雄、関田憲昭、荒井康夫: JAERI-Research 2000-10 “JMTR 照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射後試験 (89F-3A キャプセル) ”(2000) .
10. 荒井 康夫、岩井 孝、笹山 龍雄、岡本 芳浩、塩沢 憲一、鈴木 康文: JAERI-Research 96-009 “「常陽」照射試験用ウラン・プルトニウム混合炭化物及び窒化物燃料ピンの製作(共同研究) ”(1996).
11. 勝山幸三、永峯剛、前田宏治、松本慎一郎 : JNC TN9410 2000 - 009 “高速炉用炭・窒化物燃料の照射後試験－燃料ピンの非破壊試験結果－ (技術報告) ” (2000) .
12. 田中康介、前田宏治、小山真一 : JNC TN9400 2002-001 “高速炉用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射後試験－窒化物燃料の破壊試験結果－ (研究報告) ” (2002) .
13. 岩井 孝、中島 邦久、菊地 啓修、長島久雄、木村 康彦、松井寛樹、荒井康夫: JAERI-Research 2002-038 “高速炉用炭・窒化物燃料の照射後試験－燃料ピンの破壊試験－ (共同研究) ”(2002).
14. K.Minato, M.Akabori, M.Takano, Y.Arai, K.Nakajima, A.Itoh, T.Ogawa: “Fabrication of nitride fuels for transmutation of minor actinides”, J.Nucl.Mater., 320, 18-24 (2003).
15. Y.Arai, K.Nakajima, “Preparation and characterization of PuN pellets containing ZrN and TiN”, J.Nucl.Mater., 281, 244-247 (2000).
16. 中島邦久、岩井孝、菊地啓修、芹澤弘幸、荒井康夫、“JMTR 照射用イナートマトリクス含有窒化物燃料ピンの製作”、JAERI-Research 2005-027 (2005).

Table 1 Characteristics of fuel pin irradiated in JMTR

Sample No.		01F-2-1	01F-2-2
Fuel pellet			
Material		(TiN,PuN)	(Zr,Pu)N
Stack length	(mm)	36.61	35.58
Pu/(MN+PuN) ratio	(wt.%)	20.0	20.0
N/(M+Pu) ratio		0.70	0.96
*N _{eq} /(M+Pu) ratio		0.76	1.01
Diameter	(mm)	8.21	8.22
Density	(g/cm ³)	5.15	7.19
Density	(%T.D.)	86.7	90.0
Smear density	(%T.D.)	83.3	86.5
Cladding tube			
Material		austenitic SS	
Outer diameter	(mm)	9.40	
Inside diameter	(mm)	8.38	
Thickness	(mm)	0.51	
Pellet-clad diameter gap	(mm)	0.17 - 0.16	
Bonding material		He	

*N_{eq}: N+14/16O+14/12C

Table 2 Irradiation history of 01F-5A capsule in JMTR

Irradiation cycle	Period	Irradiation time (hr)
145	2002.5.9 -5.14	113
146	7.3-7.19	378
147	11.17-12.10	541
148	2003.6.17-6.20	76
149	10.4-11.3	711
150-1	11.22-12.9	399
150-2	2.13-12.25	275
151	2004.1.31-2.29	697
152	3.8-4.4	634
153	5.9-6.7	689
154	6.15-7.14	689
155	10.22-11.21	702

Total irradiation time ::5905hrs

Irradiation hole: L-3 (145-146 cycle)

G-3 (147-155 cycle)

Table 3 Linear power rates evaluated

Cycle	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	Ave.
01F-2-1 (W/cm)	365	365	354	365	381	362	363	358	336	337	322	355
01F-2-2 (W/cm)	394	394	406	421	439	420	423	418	393	398	382	408

Table 4 Burnup of the fuels

	01F-2-1(TiN,PuN)	01F-2-2 [(Zr,Pu)N]
MWd/t (M+Pu)	38000	30000
MWd/t (Pu)	153000	132000
%FIMA(Pu)	17.0	14.7

Table 5 Results of puncture tests

	Fuel pin	01F-2
Void volume before puncturing	(cm ³)	89.0
Void volume after puncturing	(cm ³)	94.4
Void volume in fuel pin	(cm ³)	5.4
Equilibrated gas pressure	(Pa)	4.5×10^3
Pressure in fuel pin	(Pa)	1.2×10^5
Temperature at puncturing	(°C)	25.9
Total gas volume	(STP, cm ³)	5.7

Table 6 Composition and volume of FP gas collected by puncture test

Fuel pin	01F-2	Calculated value*	
		(TiN,PuN)	(Zr,Pu)N
Gas composition (vol.%)	He	base	
	N ₂	0.3	
	O ₂	< 0.1	
	H ₂	0.1	
	Ar	< 0.1	
	Kr	0.32	
	Xe	5.9	
Isotopic ratio of Kr and Xe collected (%)	Kr	83 84 85 86	17.9 31.1 6.1 45.0
		17.5 29.4 7.2 45.9	17.5 29.4 7.2 45.9
	Xe	131 132 134 136	13.7 19.1 26.7 40.6
		12.9 20.0 27.6 39.5	13.1 20.1 28.0 38.7
Collected volume (Kr+Xe)(STP,cm ³)		0.3	
Produced volume*(Kr+Xe)(STP,cm ³)		10.11	9.24
		Total 19.35	
FP gas release rate (%)		1.6	
Xe/Kr ratio		18.4	16.1 16.4
			Ave. 16.3

* Calculated by ORIGEN code

Table 7 Density and porosity of nitride fuel pellets

Sample		2 - 1 A (TiN,PuN)	2 - 2 C (Zr,Pu)N
Number of fragments	1	1	
Total weight of sample (g)	1.6195	2.3817	
Archimedes' method (m-xylene)	Density of sample (g/cm ³) (%T.D.)	5.55 93.43	7.24 90.50
Volume and weight method	Density of sample (g/cm ³) (%T.D.)	4.92 83.7	6.91 86.4
Open porosity (%)	9.6	4.1	
Closed porosity (%)	6.7	9.5	
Density before irradiation (%T.D.)	86.6	90.4	

Table 8 Results of pore distribution analysis of (TiN,PuN) (2-1B1)

Pore area ($\mu\text{ m}^2$)	Number of pores		
	Outer	Intermediate	Center
0.0 ~ 0.5	311	205	191
0.5 ~ 1.0	143	98	93
1.0 ~ 1.5	86	61	51
1.5 ~ 2.0	62	50	46
2.0 ~ 2.5	53	26	33
2.5 ~ 3.0	37	30	36
3.0 ~ 3.5	23	18	29
3.5 ~ 4.0	19	22	26
4.0 ~ 4.5	32	23	13
4.5 ~ 5.0	15	18	16
5.0 ~ 5.5	24	17	11
5.5 ~ 6.0	10	17	13
6.0 ~ 6.5	16	21	14
6.5 ~ 7.0	11	13	13
7.0 ~ 7.5	4	8	8
7.5 ~ 8.0	5	9	7
8.0 ~ 8.5	3	9	7
8.5 ~ 9.0	3	9	5
9.0 ~ 9.5	9	7	6
9.5 ~ 10	6	6	6
10 ~ 20	78	80	79
20 ~ 30	36	36	39
30 ~ 40	9	22	15
40 ~ 50	5	10	19
50 ~ 60	10	5	7
60 ~ 70	1	6	4
70 ~ 80	3	1	3
80 ~ 90	4	3	2
90 ~ 100	1	2	0
100.1~	3	2	2
Total number of pores	1022	834	794
Average area ($\mu\text{ m}^2$)	5.56	7.38	7.60
Maximum area ($\mu\text{ m}^2$)	105	116	126

Table 9 Results of pore distribution analysis of (Zr,Pu)N (2-2D1)

Pore area ($\mu\text{ m}^2$)	Number of pores		
	Outer	Intermediate	Center
6.0 ~ 0.5	206	420	343
0.6 ~ 1.0	92	147	118
7.0 ~ 1.5	60	87	71
1.6 ~ 2.0	47	58	53
8.0 ~ 2.5	39	50	38
2.6 ~ 3.0	39	30	35
9.0 ~ 3.5	28	35	17
3.6 ~ 4.0	20	22	26
10.0 ~ 4.5	18	17	22
4.6 ~ 5.0	9	19	12
11.0 ~ 5.5	12	15	11
5.5 ~ 6.0	12	11	18
6.0 ~ 6.5	10	20	7
6.5 ~ 7.0	8	13	13
7.0 ~ 7.5	7	11	8
7.5 ~ 8.0	13	12	15
8.0 ~ 8.5	6	10	9
8.5 ~ 9.0	3	15	10
9.0 ~ 9.5	8	6	6
9.5 ~ 10	5	3	4
10 ~ 20	82	99	81
20 ~ 30	36	34	41
30 ~ 40	16	22	8
40 ~ 50	9	5	11
50 ~ 60	13	4	5
60 ~ 70	4	0	7
70 ~ 80	4	1	4
80 ~ 90	4	3	2
91 ~ 100	1	0	1
100.1 ~	8	0	0
Total number of pores	819	1169	999
Average area ($\mu\text{ m}^2$)	8.87	4.68	6.24
Maximum area ($\mu\text{ m}^2$)	214	89	233

Table 10 Results of grain size measurement of fuel pellets

Sample	Position	Average grain diameters (μ m)
(TiN,PuN) 2-1B1	Outer	1.21
	Intermediate	1.24
	Center	1.36
(Zr,Pu)N 2-2D1	Outer	1.37
	Intermediate	1.17
	Center	1.18

Table 11 Distribution of grain size of fuel pellet (2-1B1)

Grain size (μ m)	Number of grains		
	Outer	Intermediate	Center
0.0 ~1.0	1023	757	675
1.0 ~ 2.0	840	480	549
2.0 ~ 3.0	200	183	201
3.0 ~ 4.0	53	58	71
4.0 ~ 5.0	1	11	15
5.0 ~ 6.0	1	1	2
6.0 ~ 7.0	0	0	0
7.0 ~ 8.0	0	0	0
8.0 ~ 9.0	0	0	0
9.0 ~10.0	0	0	0
Total numbers of grains	2118	1490	1513
Maximum grain size (μ m)	5.35	5.36	5.52

Table 12 Distribution of grain size of fuel pellet (2-2D1)

Grain size (μ m)	Number of grains		
	Outer	Intermediate	Center
0.0 ~1.0	790	1192	1145
1.0 ~ 2.0	786	769	835
2.0 ~ 3.0	228	204	191
3.0 ~ 4.0	81	59	55
4.0 ~ 5.0	22	9	12
5.0 ~ 6.0	3	1	1
6.0 ~ 7.0	0	1	0
7.0 ~ 8.0	2	0	0
8.0 ~ 9.0	0	0	0
9.0 ~10.0	0	0	0
Total numbers of grains	1912	2235	2239
Maximum grain size (μ m)	7.71	6.54	5.19

Table 13 Build up of fission products in (TiN,PuN) after irradiation

Elements	Concentration ($\times 10^4$ gram atoms)	
EOL	284 day cooling after discharge	
Kr	0.24	0.24
Rb	0.20	0.20
Sr	0.53	0.49
Y	0.27	0.25
Zr	2.80	2.74
Mo	3.21	3.35
Tc	0.87	0.89
Ru	3.05	2.79
Rh	0.86	0.96
Pd	1.95	2.10
Ag	0.20	0.20
Te	0.51	0.49
I	0.31	0.29
Xe	3.88	3.89
Cs	2.42	2.43
Ba	0.91	0.88
La	0.82	0.81
Ce	1.86	1.70
Pr	0.73	0.77
Nd	2.10	2.27
Pm	0.21	0.18
Sm	0.49	0.53

Table 14 Build up of fission products in (Zr,Pu)N after irradiation

Elements	Concentration ($\times 10^4$ gram atoms)	
EOL	284 day cooling after discharge	
Kr	0.26	0.26
Rb	0.22	0.22
Sr	0.59	0.54
Y	0.30	0.27
Zr	3.10	3.04
Mo	3.55	3.71
Tc	0.97	0.98
Ru	3.37	3.09
Rh	0.96	1.97
Pd	2.15	2.32
Ag	0.22	0.22
Te	0.56	0.54
I	0.34	0.32
Xe	4.24	4.25
Cs	2.73	2.75
Ba	1.01	0.98
La	0.91	0.90
Ce	2.06	1.88
Pr	0.81	0.85
Nd	2.32	2.51
Pm	0.23	0.20
Sm	0.54	0.59

Table 15 Results of grain size measurement of cladding tubes

Sample	Position	Grain size (μ m)
		Average value
(TiN,PuN) (2-2B1)	Outer	7.56
	Inner	9.27
(Zr,Pu)N (2-2D1)	Outer	10.67
	Inner	11.44

Table 16 Distribution of grain size of cladding

Grain size (μm)	Number of grains			
	2-2B1		2-2D1	
	Inner	Outer	Inner	Outer
0.0 ~ 1.0	0	0	0	0
1.0 ~ 2.0	1	9	1	2
2.0 ~ 3.0	10	31	6	4
3.0 ~ 4.0	13	18	7	8
4.0 ~ 5.0	11	18	2	8
5.0 ~ 6.0	12	10	5	7
6.0 ~ 7.0	15	14	9	12
7.0 ~ 8.0	12	13	10	8
8.0 ~ 9.0	14	10	5	6
9.0 ~ 10	18	4	6	4
10 ~ 11	8	11	5	9
11 ~ 12	10	2	12	4
12 ~ 13	9	8	4	5
13 ~ 14	5	4	4	2
14 ~ 15	5	3	3	5
15 ~ 16	7	5	4	6
16 ~ 17	6	5	4	1
17 ~ 18	5	2	3	4
18 ~ 19	3	0	3	3
19 ~ 20	3	1	1	2
20 ~ 21	0	2	2	0
21 ~ 22	3	0	1	3
22 ~ 23	0	0	2	1
23 ~ 24	0	1	1	0
24 ~ 25	0	1	3	0
25 ~ 26	0	0	1	1
26 ~ 27	0	1	1	1
27 ~ 28	0	1	1	1
28 ~ 29	0	0	0	2
29 ~	0	1	1	1
Total numbers of grains	170	175	107	110

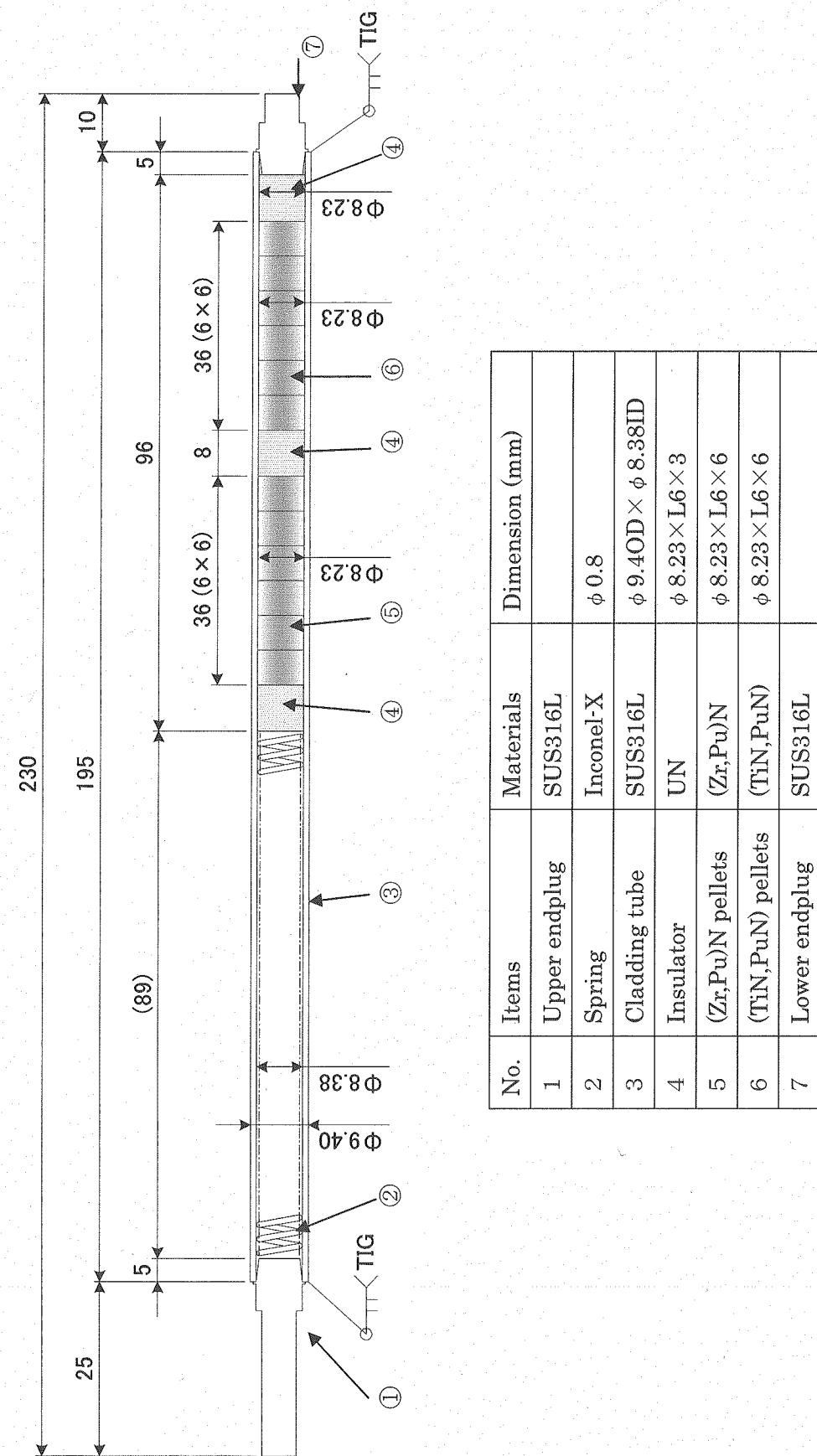


Fig. 1 Structure of inert matrix nitride fuel pin for irradiation test

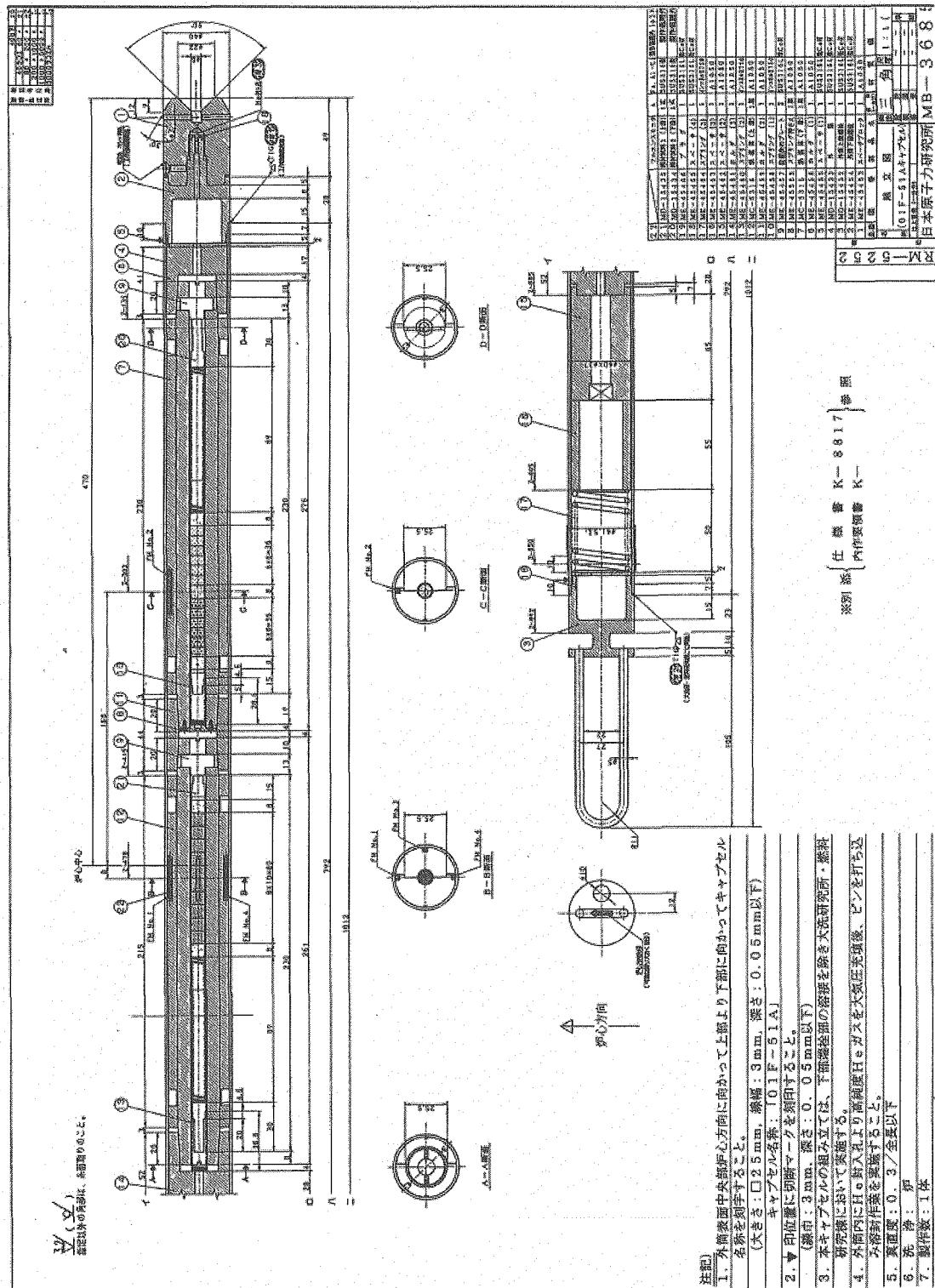


Fig.2 Structure of 01F-51A capsule

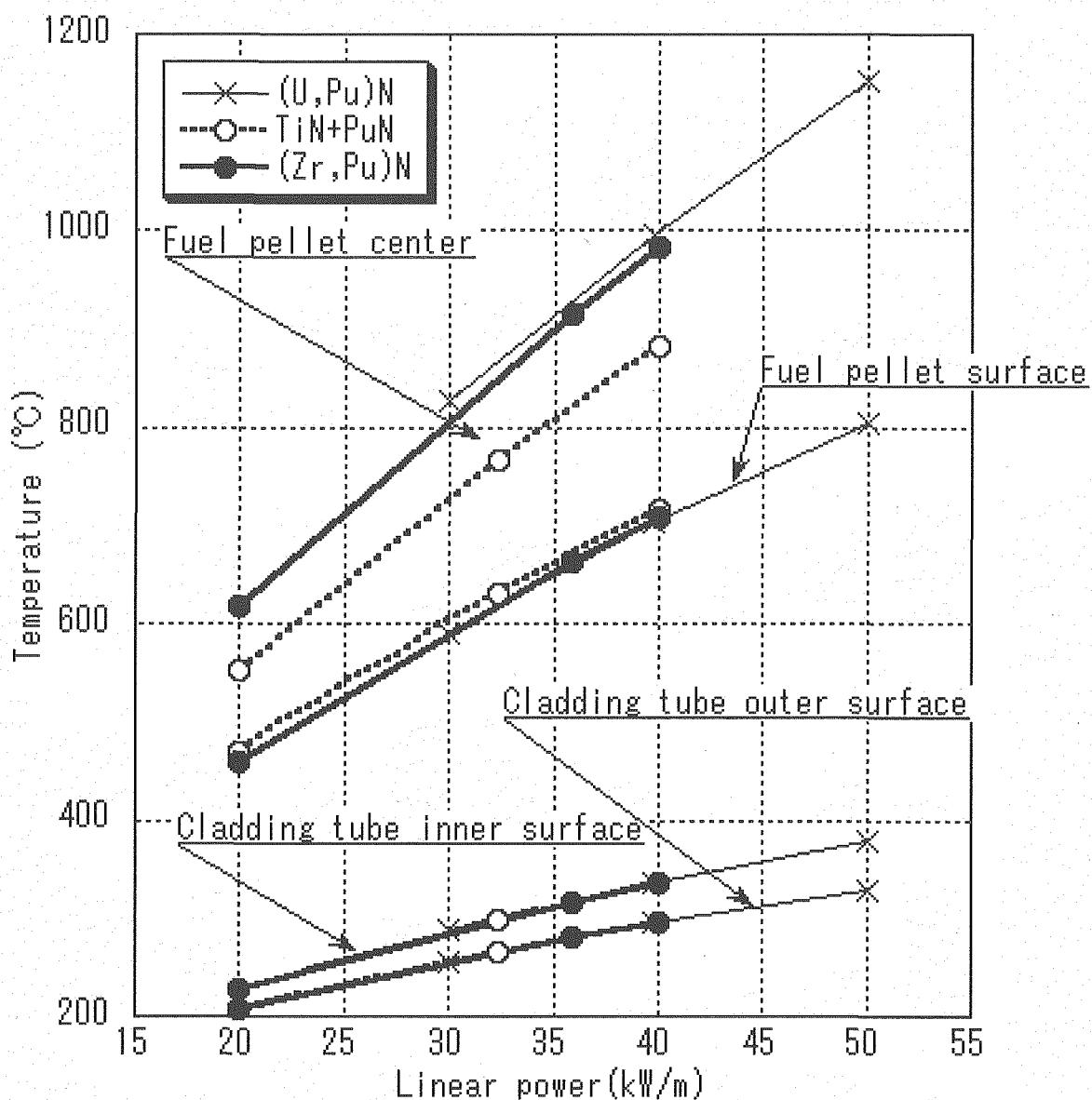


Fig.3 Radial temperature distribution in 01F-51A capsule

Specimen	Working No.	Examination item	Number	Flow of examination
Irradiation capsule	1	Disassembly of outer tube and recovery of neutron fluence monitors	1	Capsule 01F-51A
	2	Transportation of neutron fluence monitors	1	
	3	Inspection of inner tube appearance	1	
	4	Disassembly of inner tube	1	
Fuel pin	5	Inspection of fuel pin appearance and photography	1	
	6	X-ray radiography	1	
	7	γ ray scanning	1	
	8	Profilometry	1	
	9	Puncture test	1	
	10	Analysis of FP gas	1	
	11	Cutting of fuel pin	1	
	12	Filling of resin	1	01F-2-1
	13	Sectioning of fuel pin	1	2-2B
	14	Removal of fuel pellets	1	2-2C
				2-2D
				01F-2-2

Fig.4 Flow sheet of post irradiation examinations for inert matrix nitride fuels

Specimen	Working No.	Examination item	Number	Flow of examination
Fuel pellets	15	Density measurement	2	2-1B2
	16	Measurement of X-ray diffraction pattern	2	2-1B1
	17	Preparation for metallography	4	2-1B2
	18	Optical inspection and macroscopic photography	4	2-1D1
	19	Measurement of pore distribution	2	2-2D2
	20	Optical inspection and microscopic photography	4	2-2D1
	21	Measurement of grain size	2	
	22	Micro- γ ray scanning	2	
	23	Auto radiography	2	
	24	Analysis by EPMA	2	
Cladding tube	25	Optical inspection and microscopic photography	2	
	26	Measurement of corrosion depth	2	
	27	Measurement of grain size	2	

Fig.4 (continued)

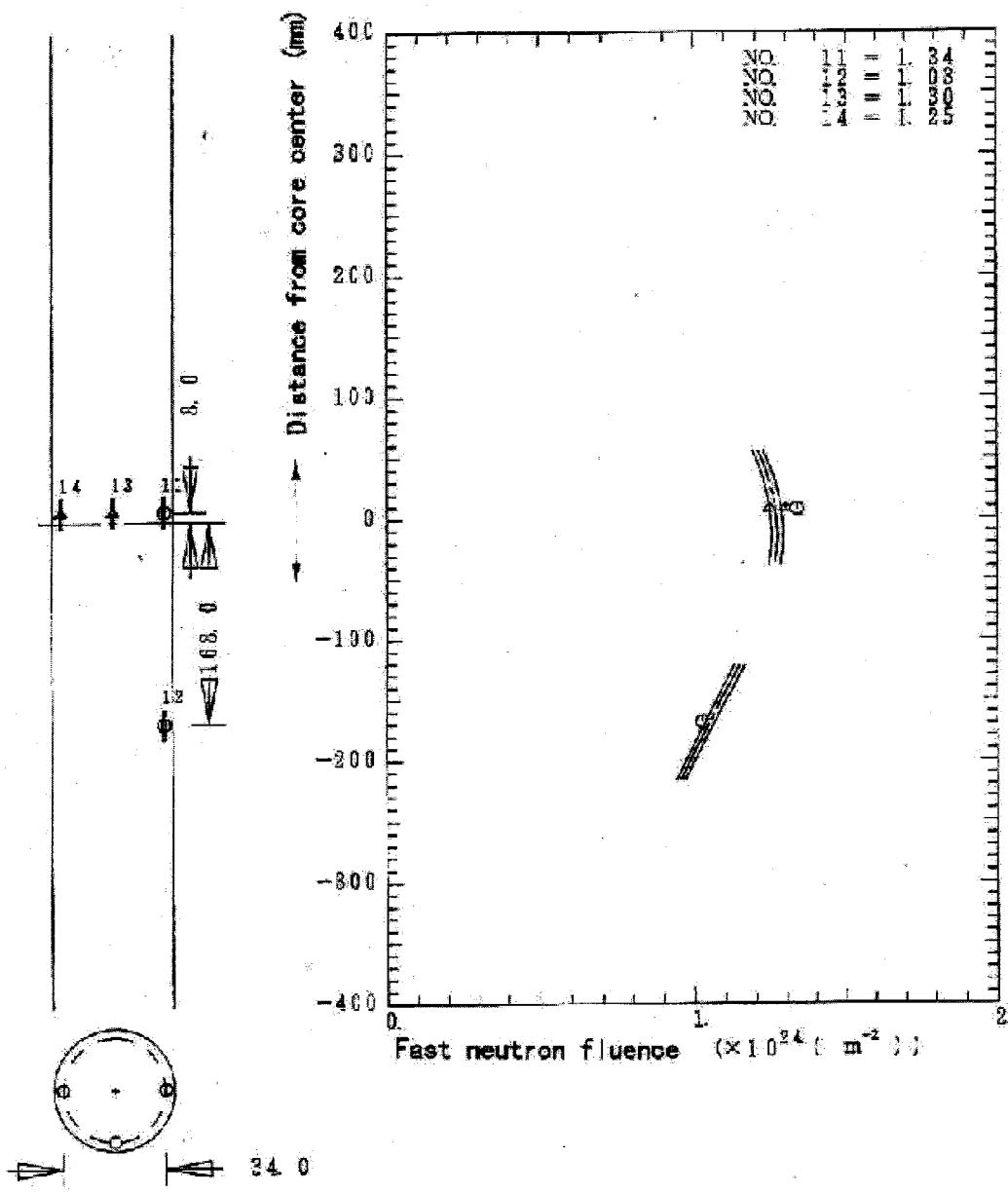


Fig.5 Fast neutron fluence at 01F-51A capsule

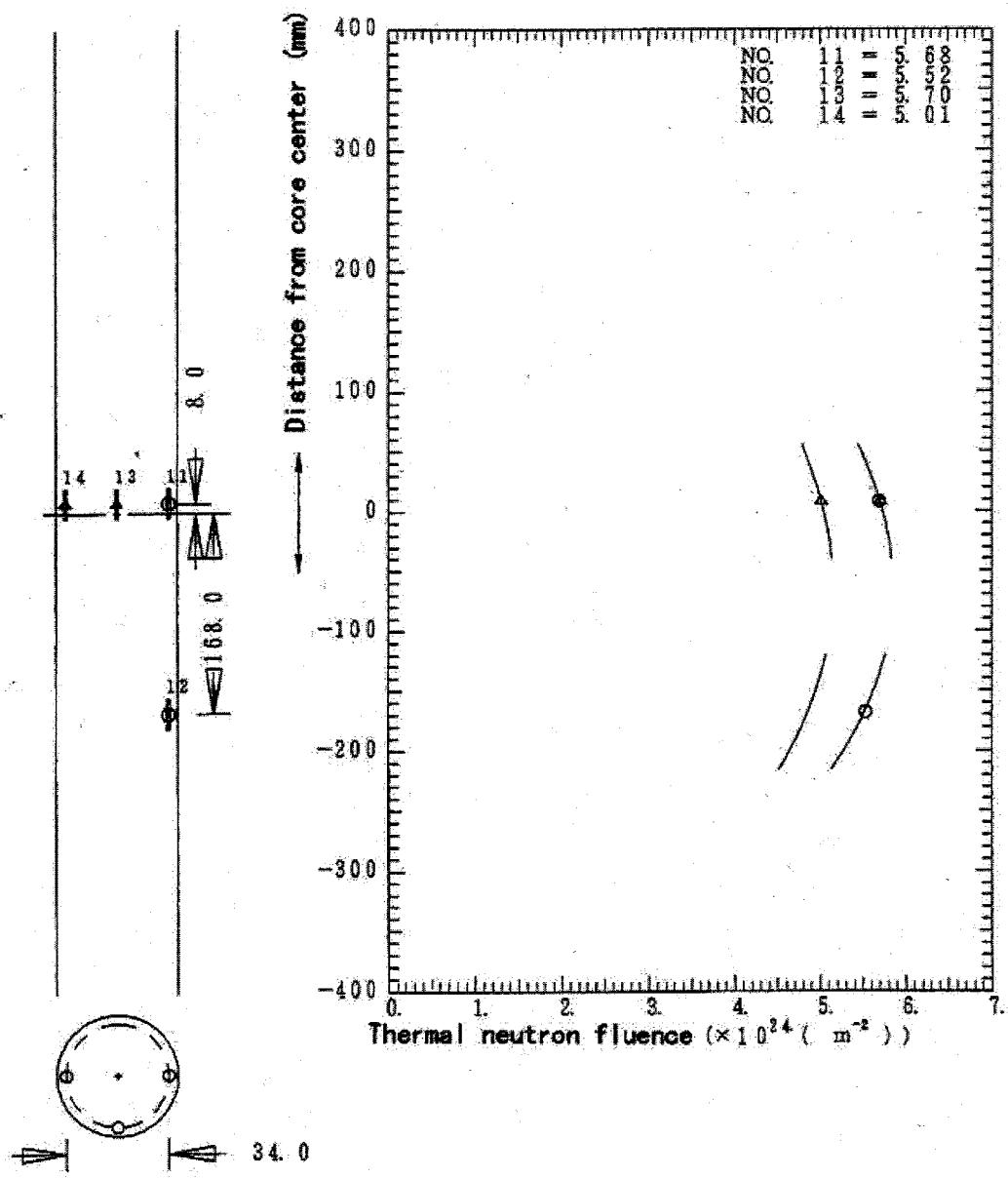


Fig.6 Thermal neutron fluence at 01F-51A capsule

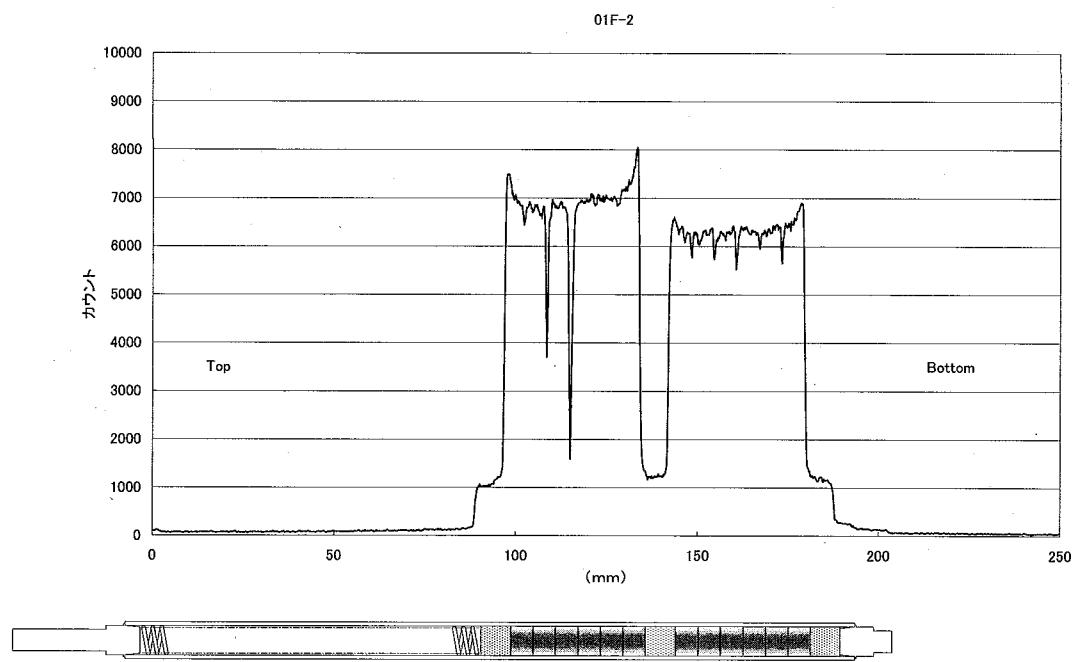


Fig.7 Axial distribution of gross γ -ray in fuel pin

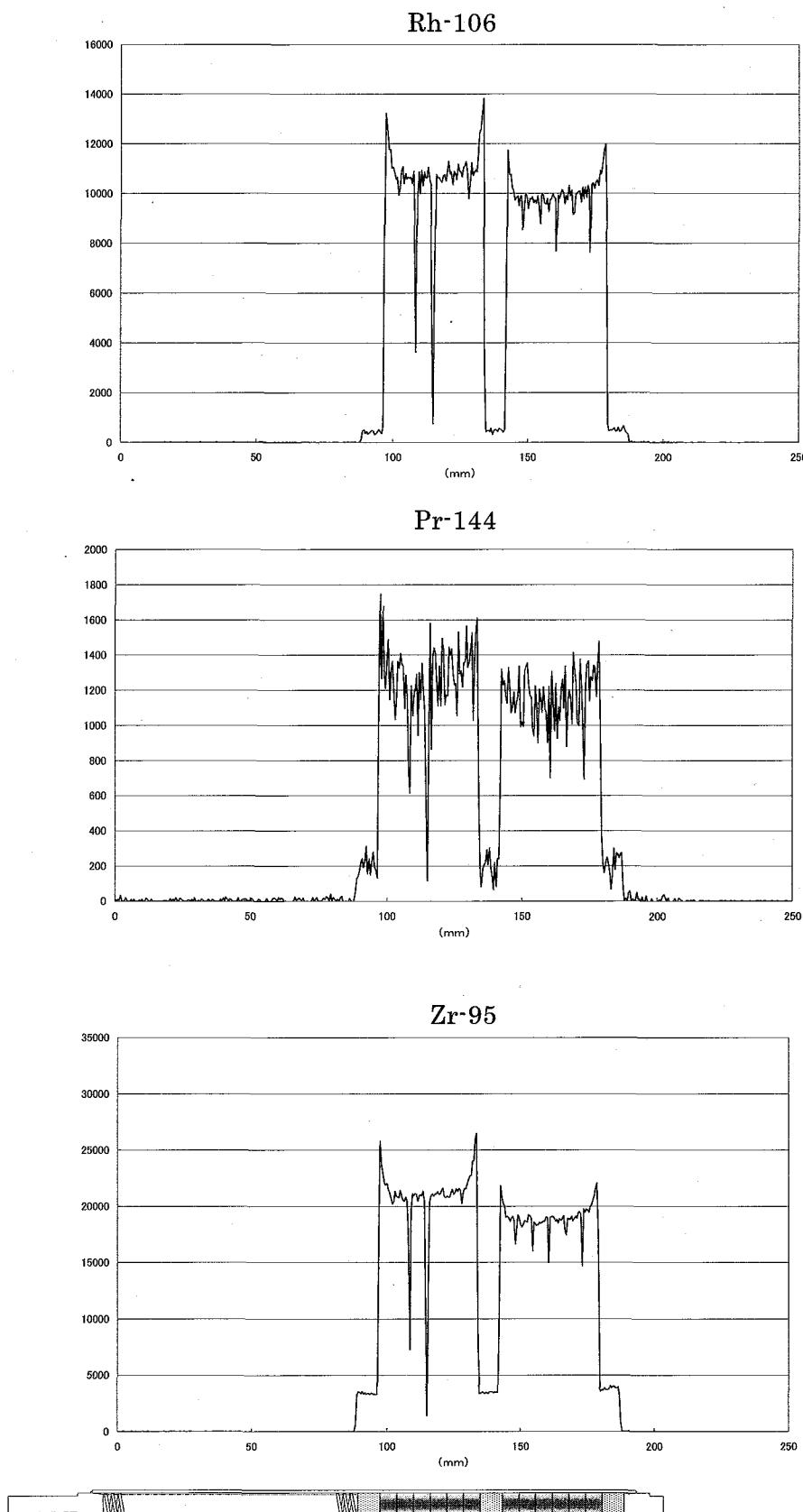


Fig.8 Axial distribution of ^{106}Rh , ^{144}Pr , ^{95}Zr , ^{137}Cs and ^{134}Cs in fuel pin

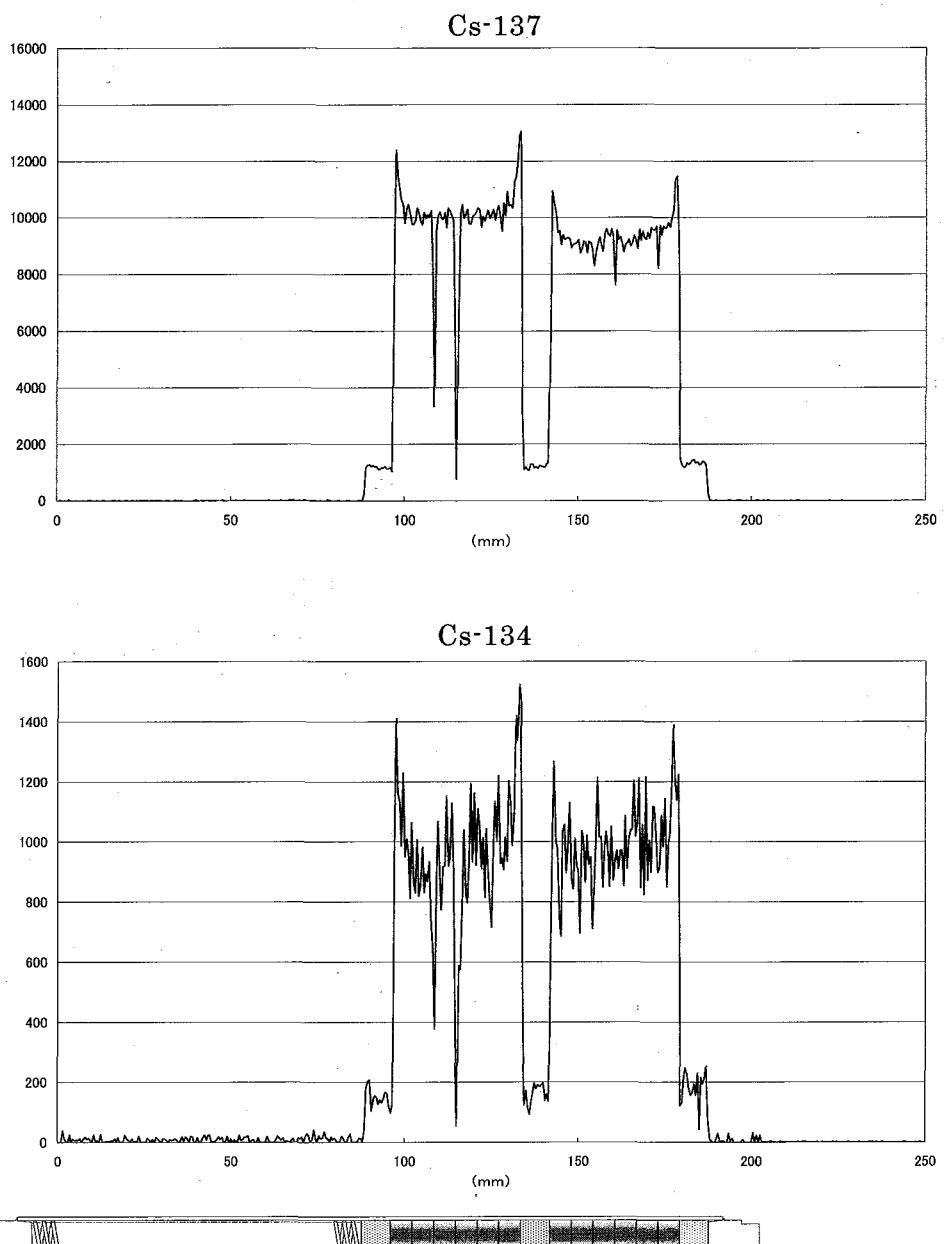


Fig.8 (continued)

Position: plenum

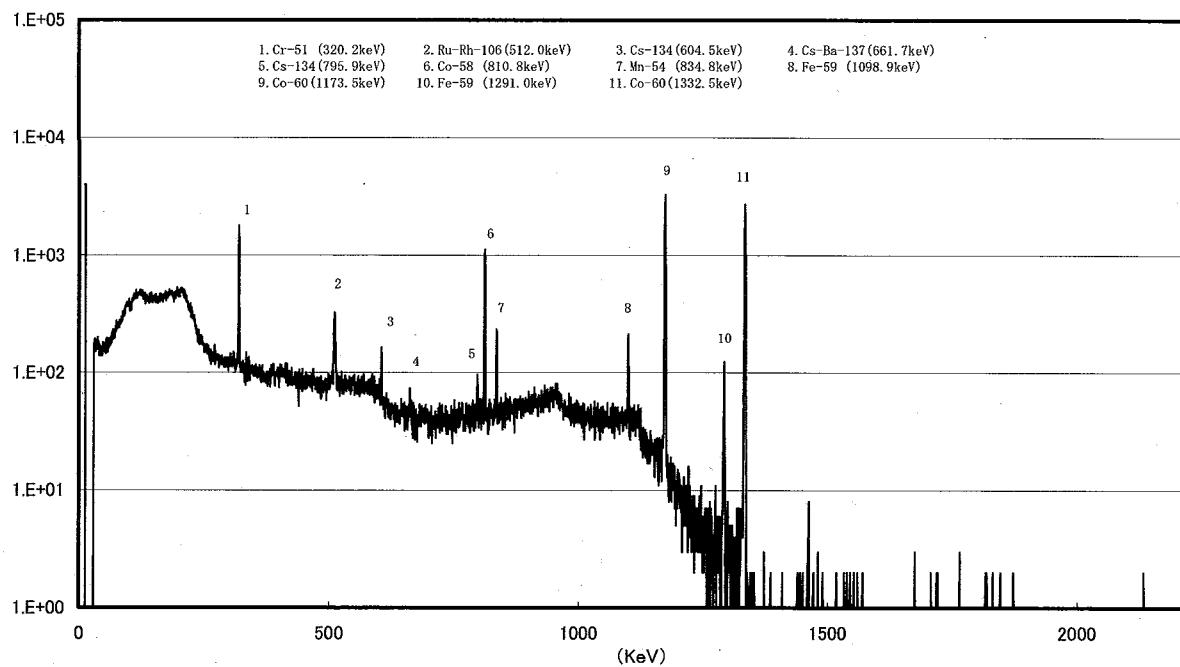


Fig.9 γ -ray spectrum on plenum of fuel pin

Position:(Zr,Pu)N pellet (130mm)

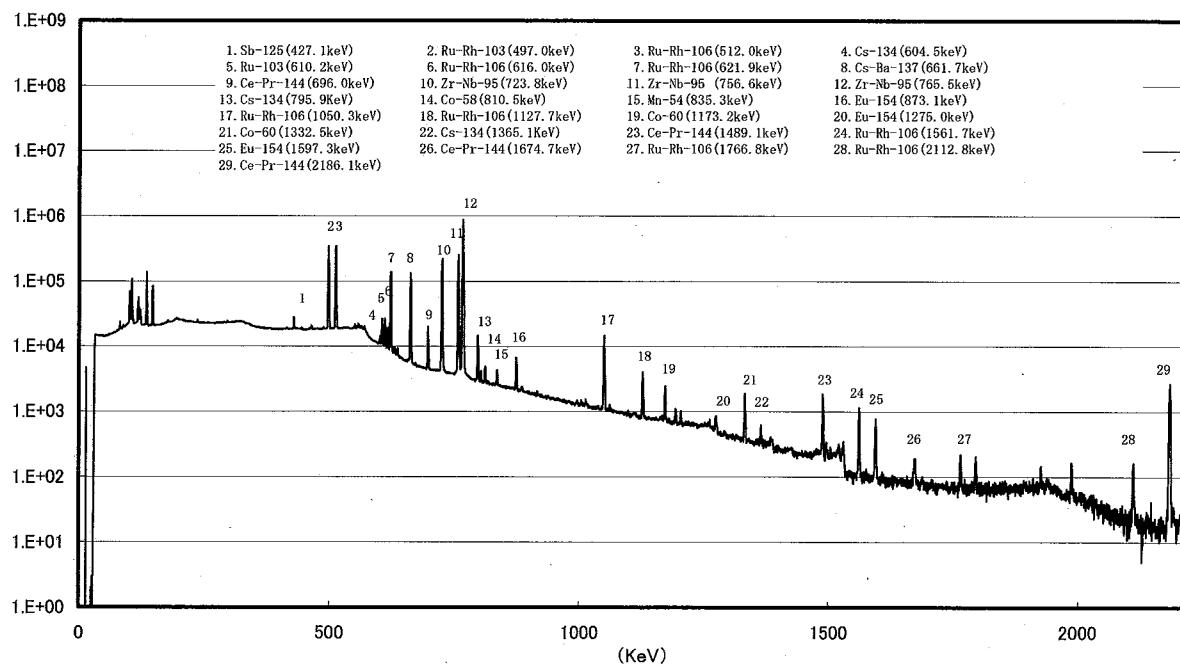
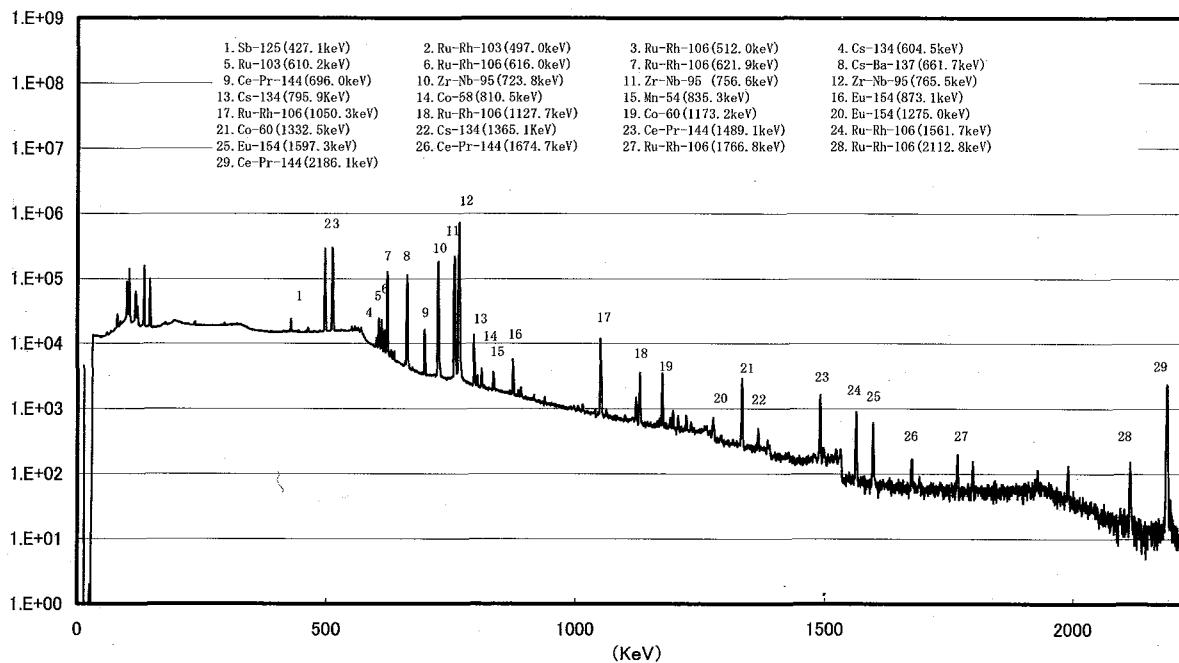


Fig.10 γ -ray spectrum on (Zr,Pu)N pellet

Position : (TiN,PuN) pellet (170mm)

Fig.11 γ -ray spectrum on (TiN,PuN) pellet

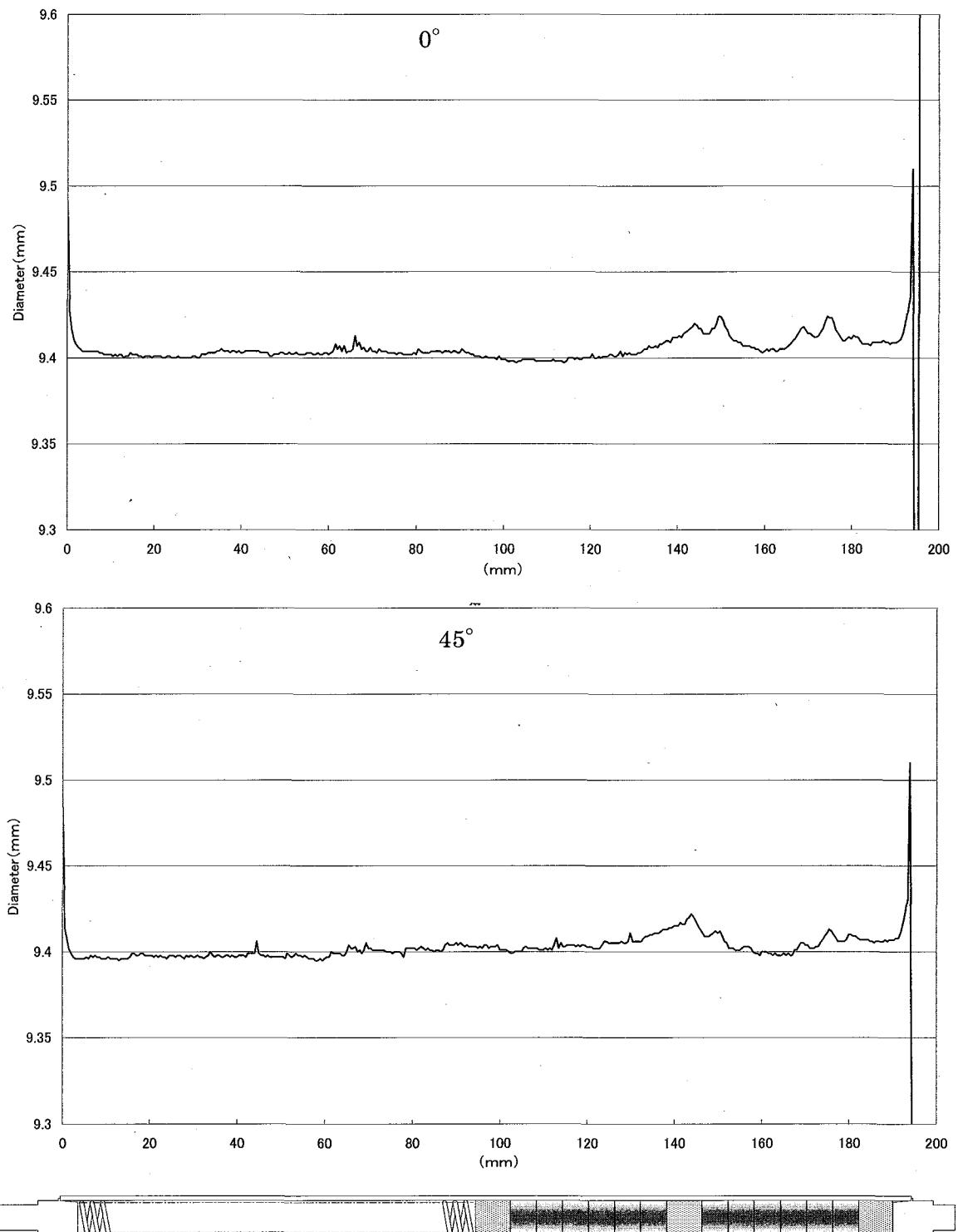


Fig.12 Results of diameter measurements for fuel pin

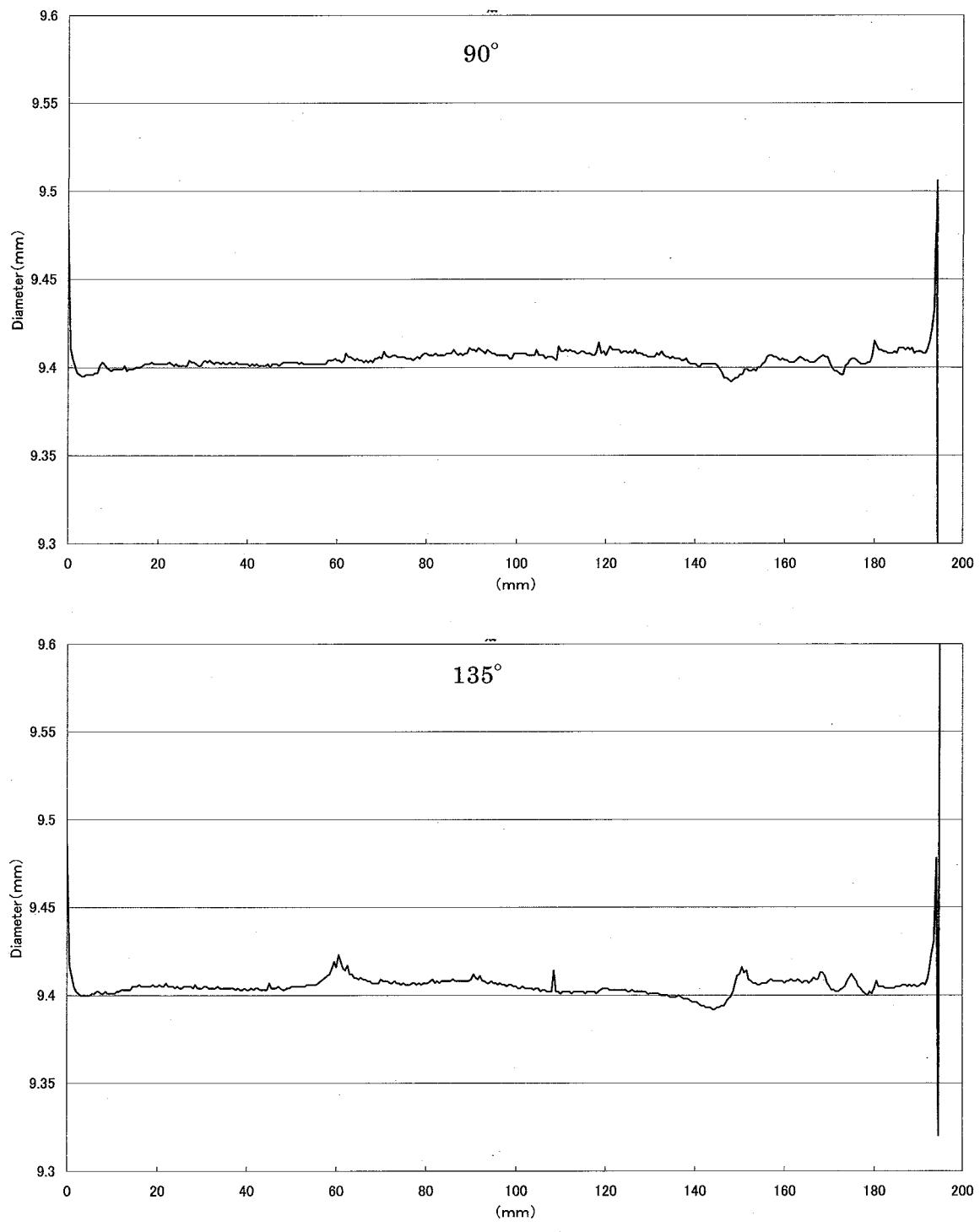


Fig.12 (continued)

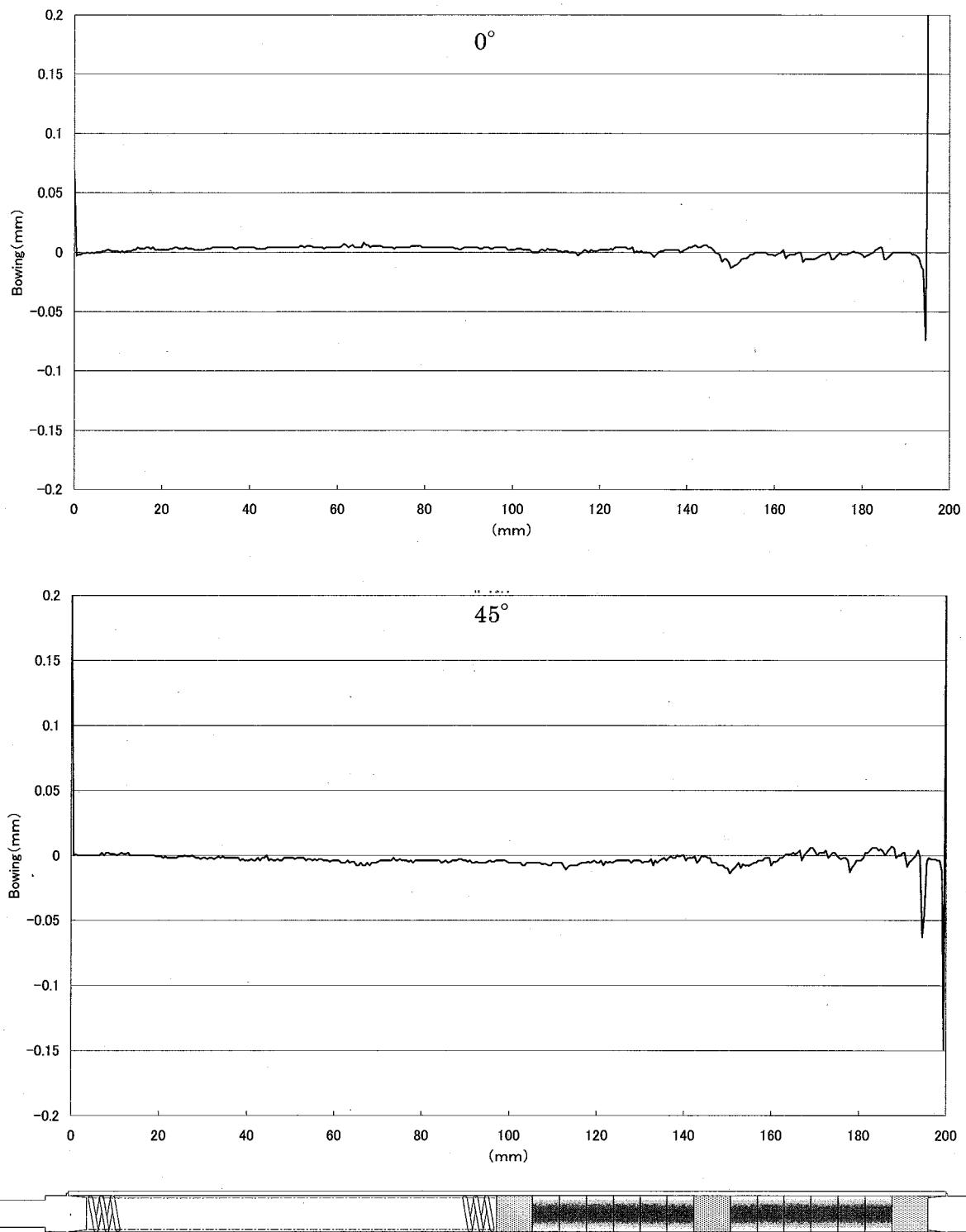


Fig.13 Results of bowing measurements for fuel pin

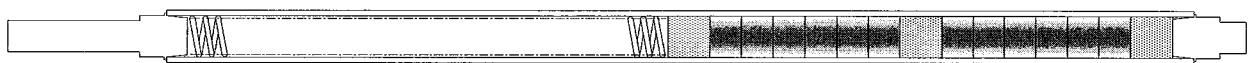
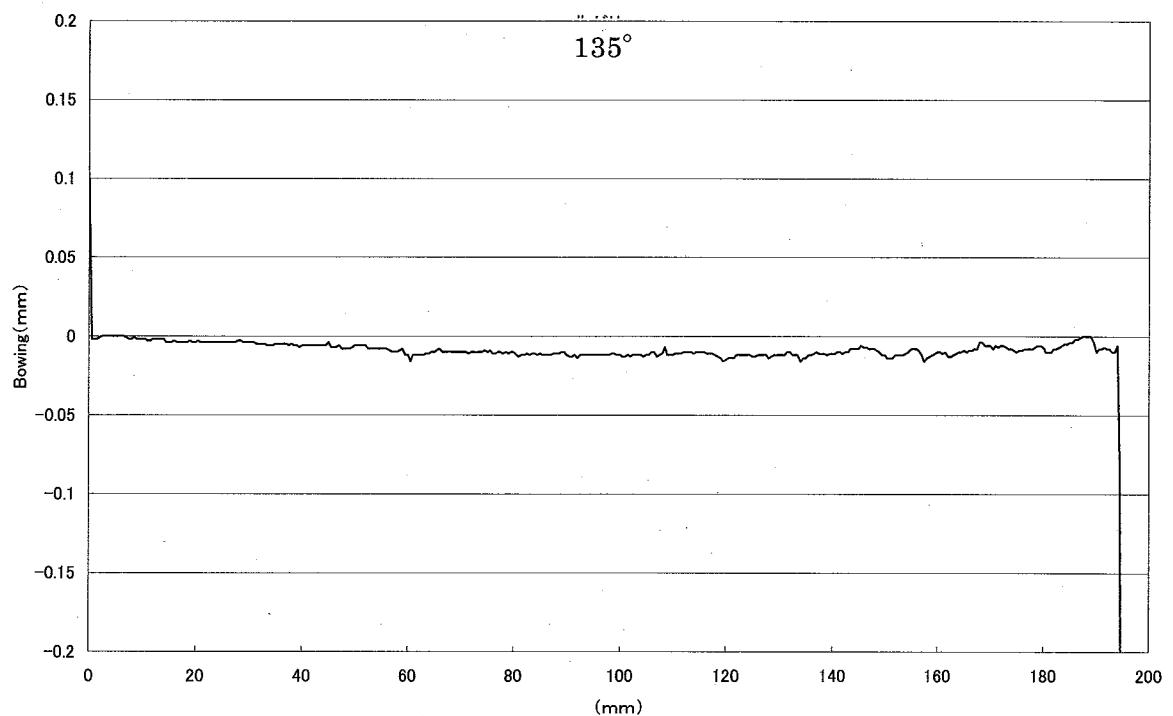
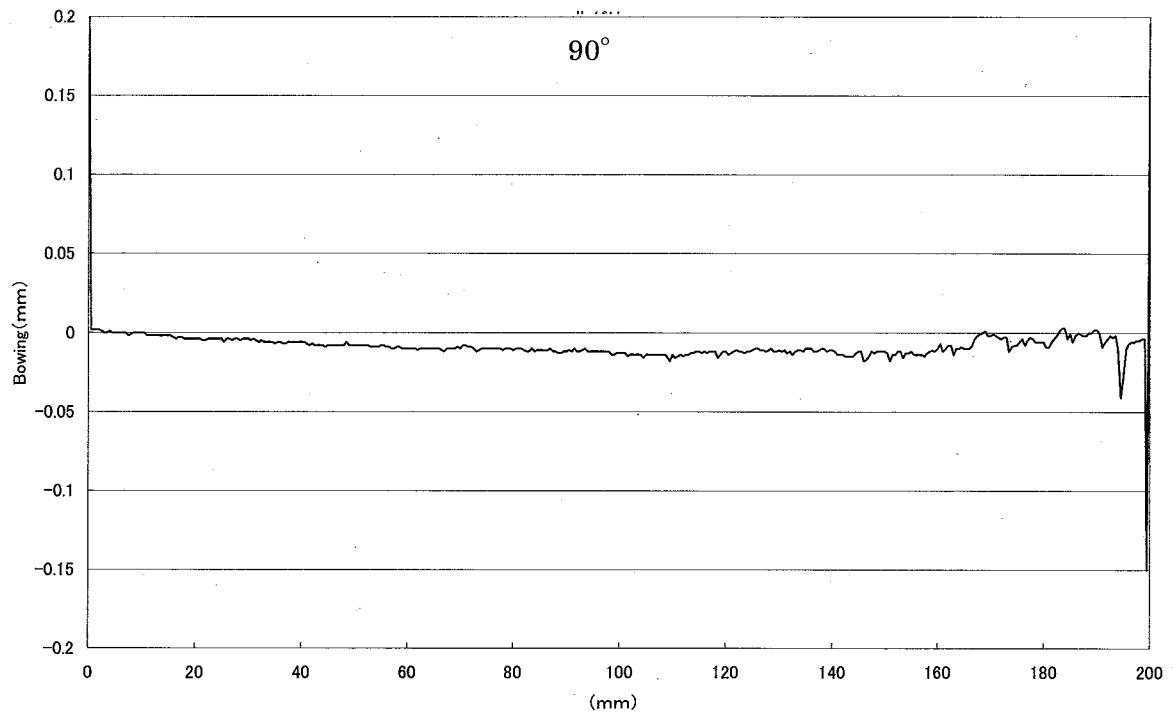


Fig.13 (continued)

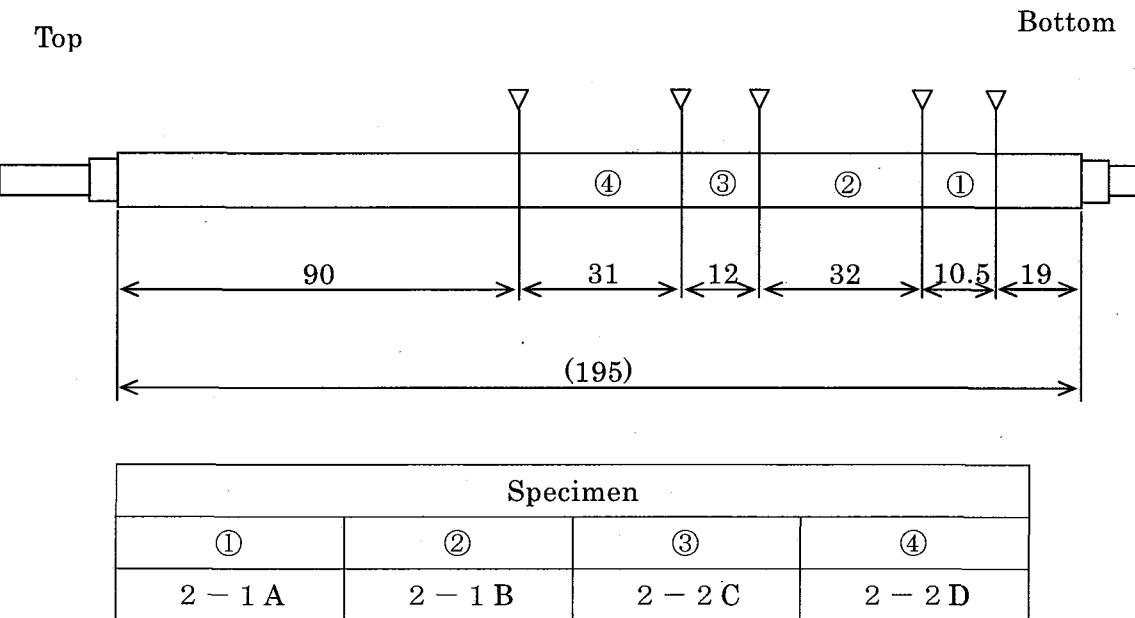
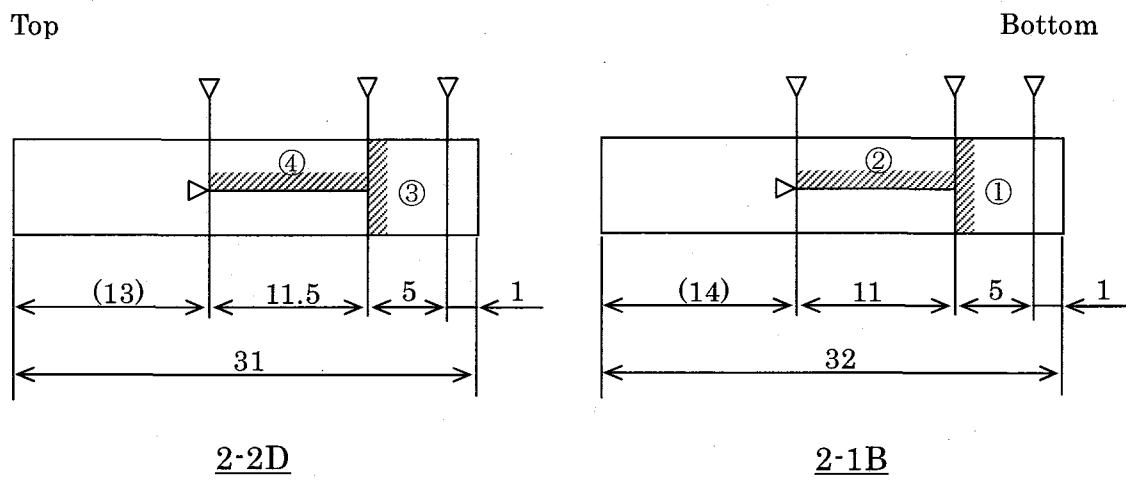


Fig.14 Cutting position of fuel pin



Specimen			
①	②	③	④
2 - 1 B 1	2 - 1 B 2	2 - 2 D 1	2 - 2 D 2

Fig.15 Sectioning position of fuel pin

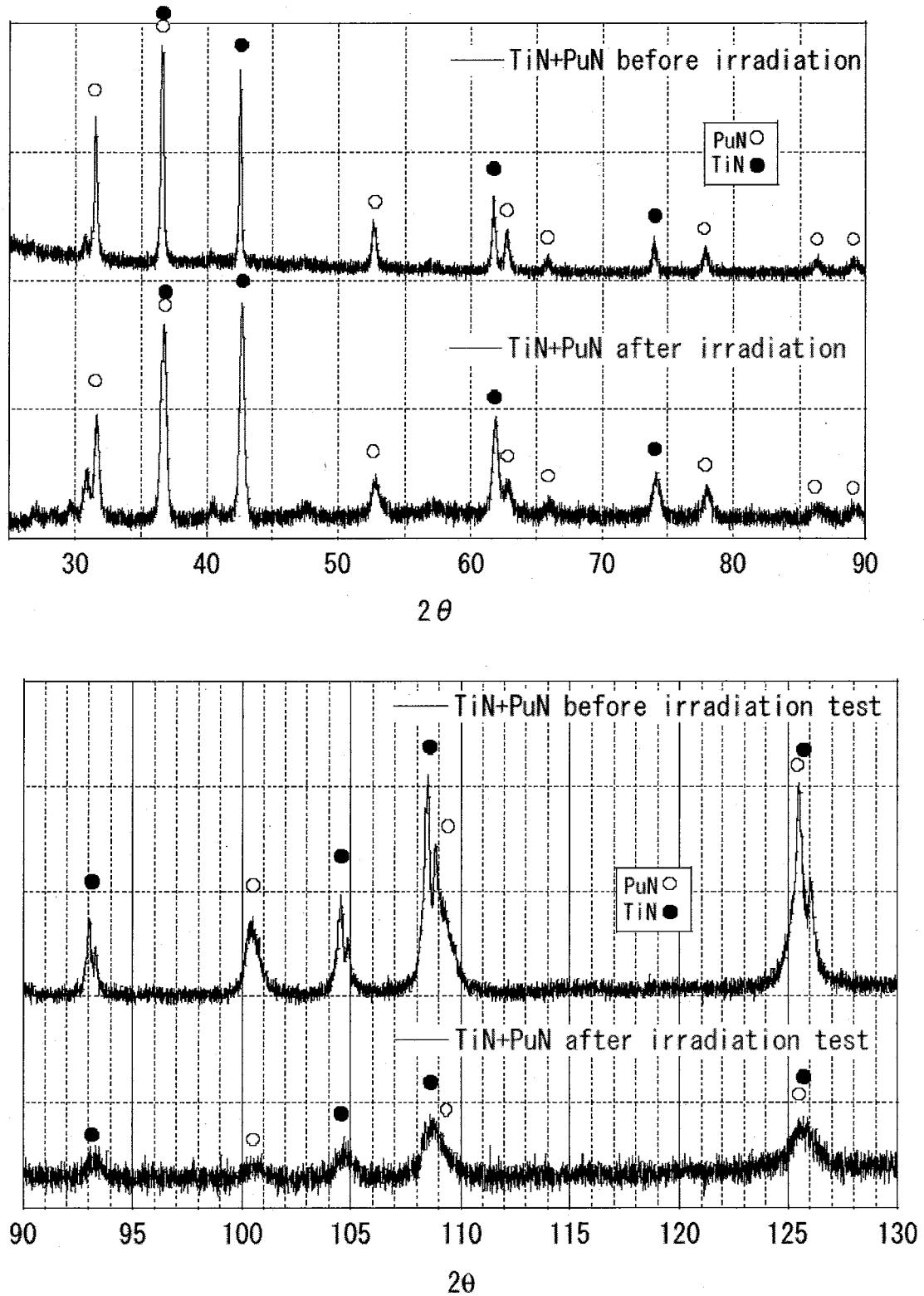


Fig.16 X-ray diffraction pattern of (TiN,PuN) pellet

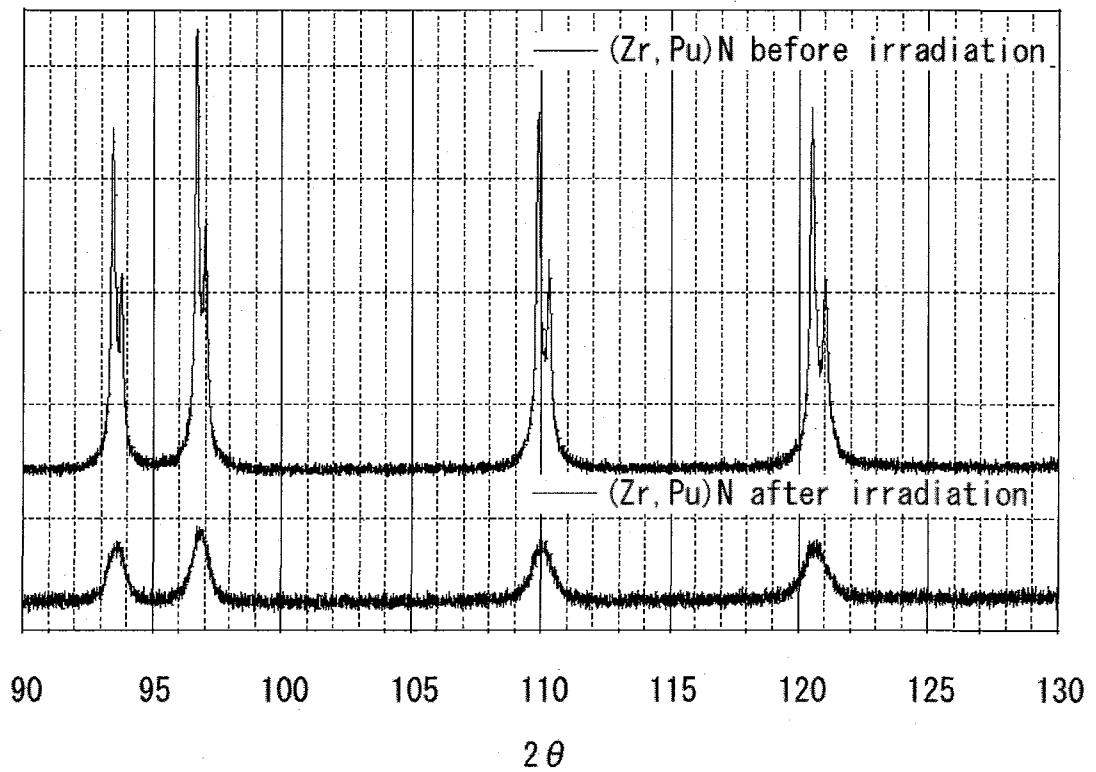
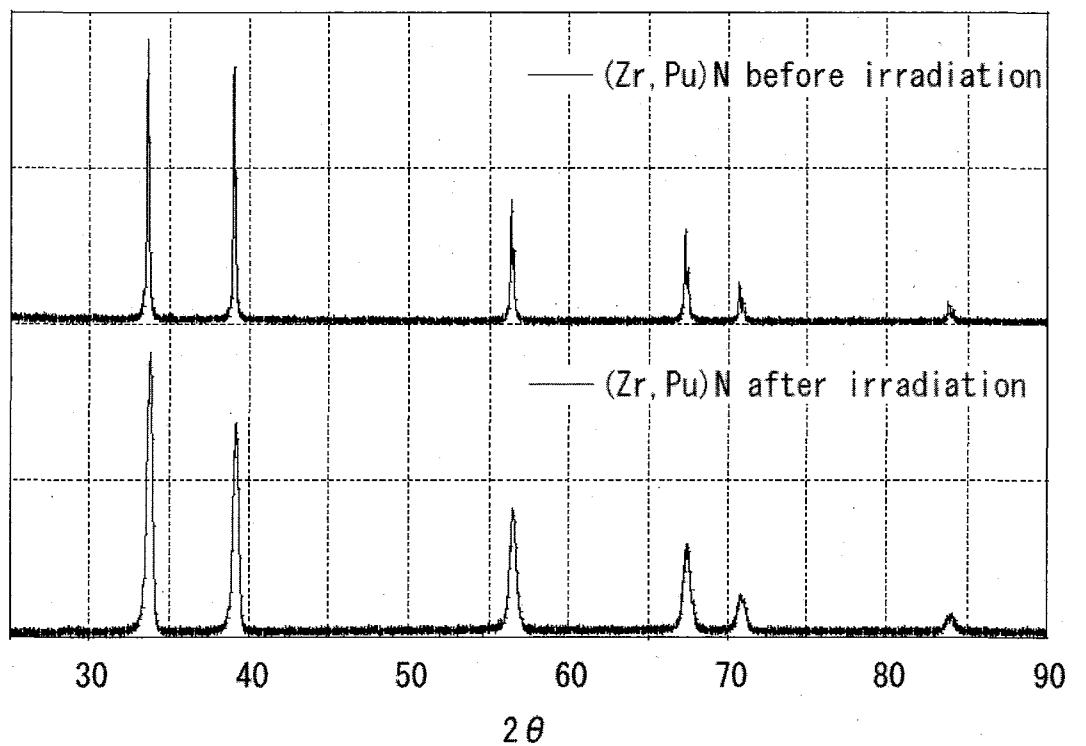
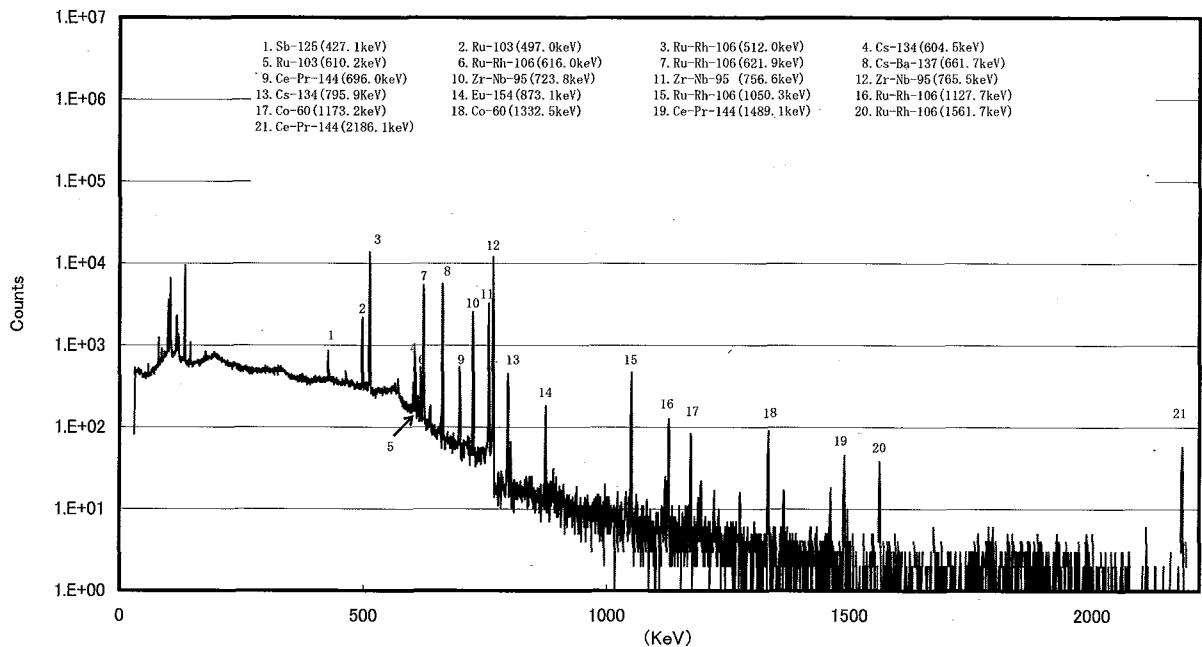
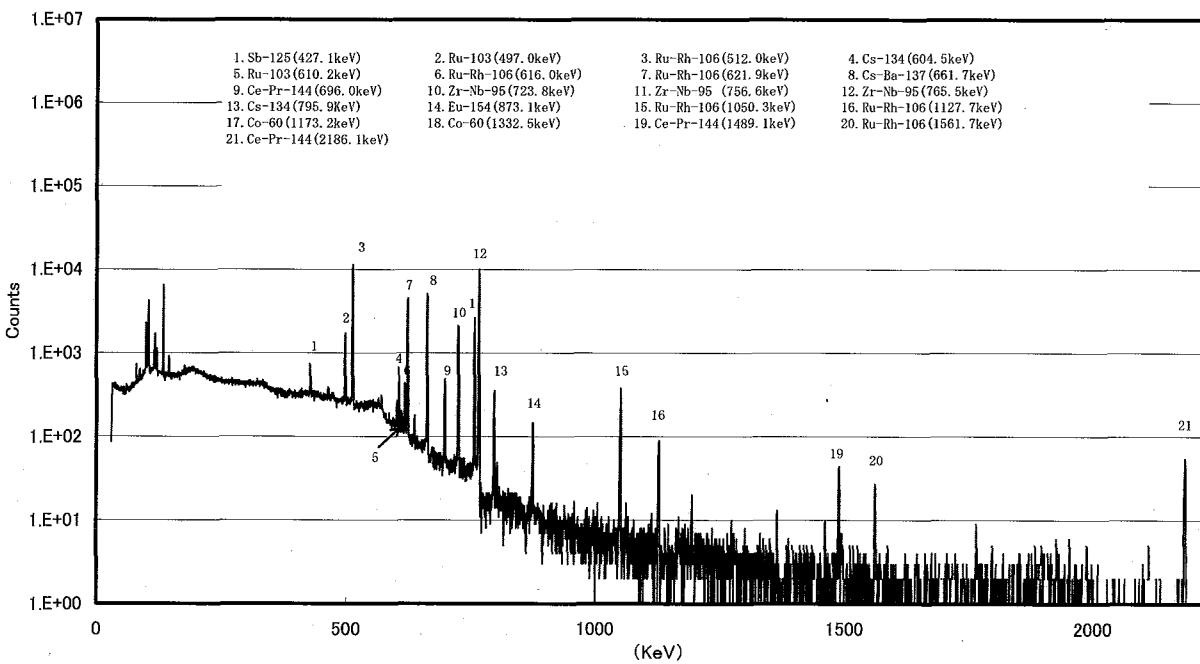


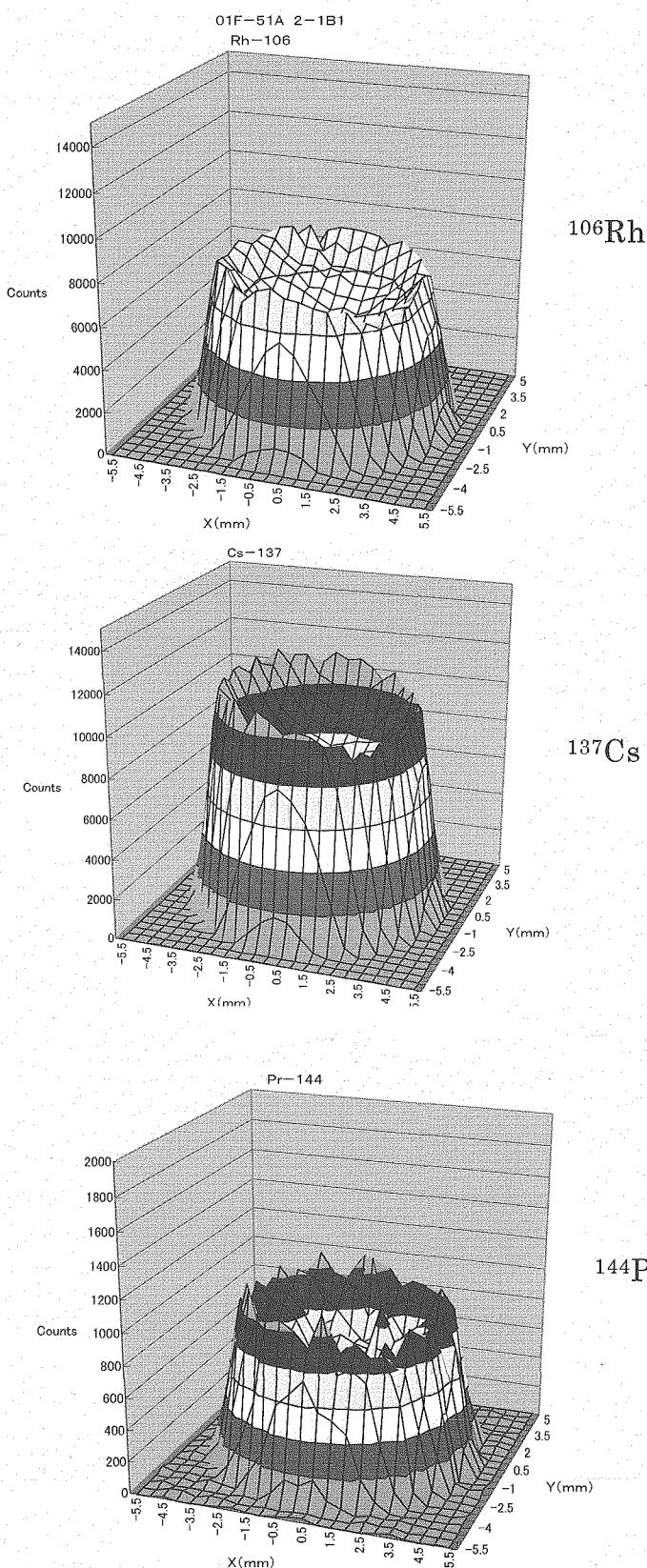
Fig.17 X-ray diffraction pattern of (Zr,Pu)N pellet

01F-51A 2-1B1

Fig.18 γ -ray spectrum at the center of (TiN,PuN) pellet (2-1B1)

01F-51A 2-2D1

Fig.19 γ -ray spectrum at the center of (Zr,Pu)N pellet (2-2D1)

Fig.20 Radial distribution of ^{106}Rh , ^{137}Cs , ^{144}Pr , ^{95}Zr and ^{134}Cs in 2-1B1

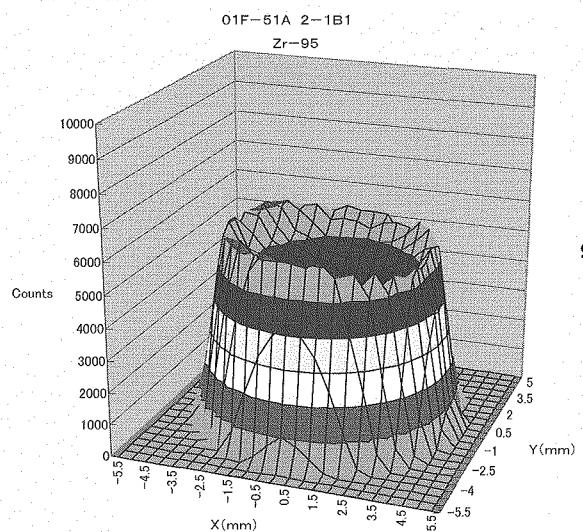
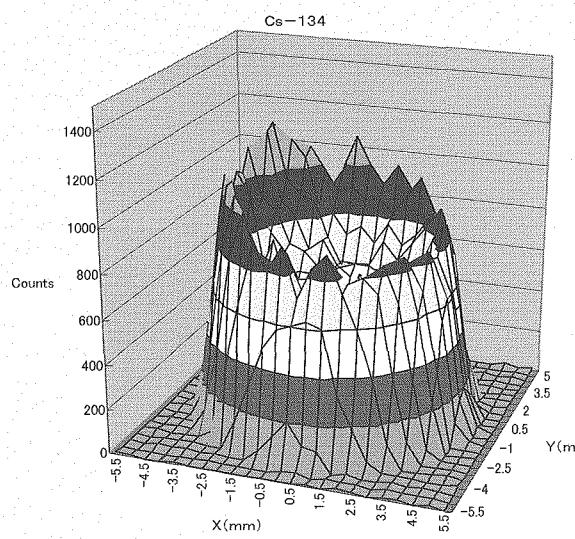
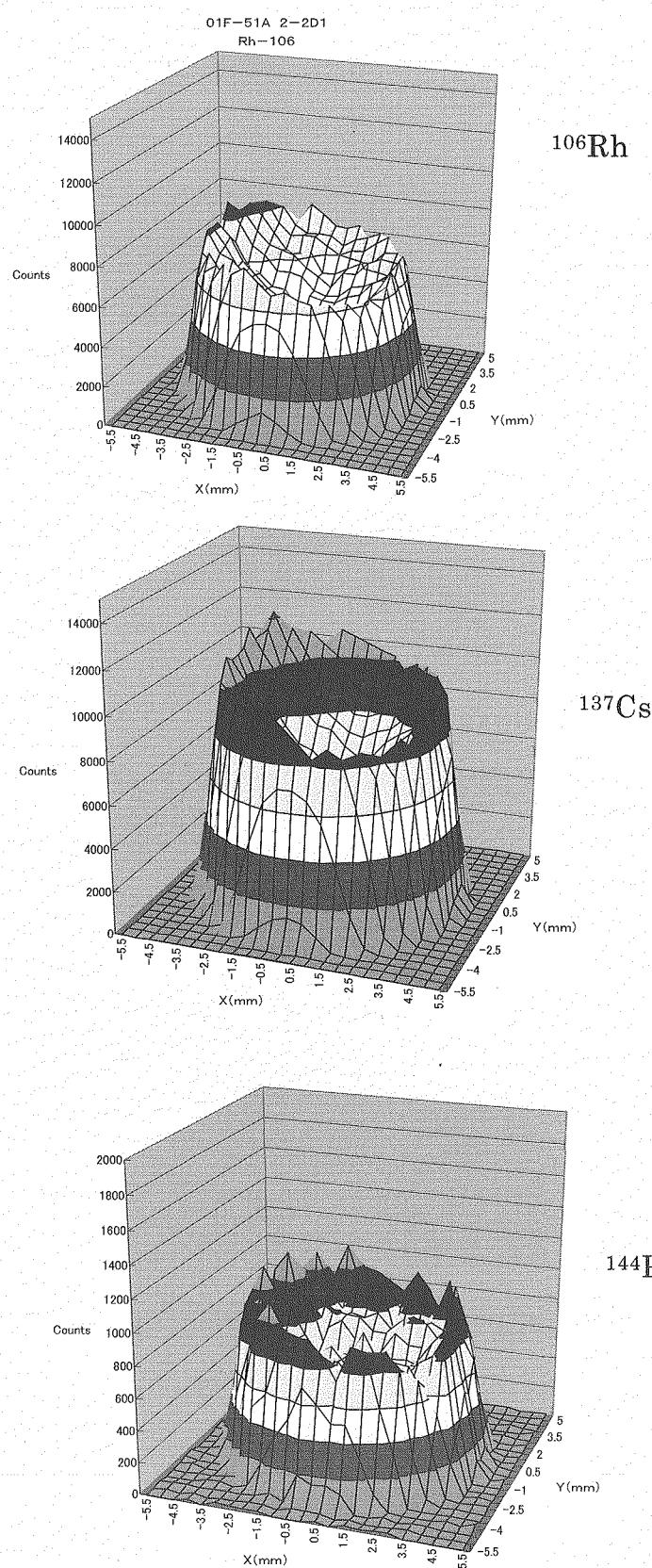
 ^{95}Zr  ^{134}Cs

Fig.20 (continued)

Fig.21 Radial distribution of ^{106}Rh , ^{137}Cs , ^{144}Pr , ^{95}Zr and ^{184}Cs in 2-2D1

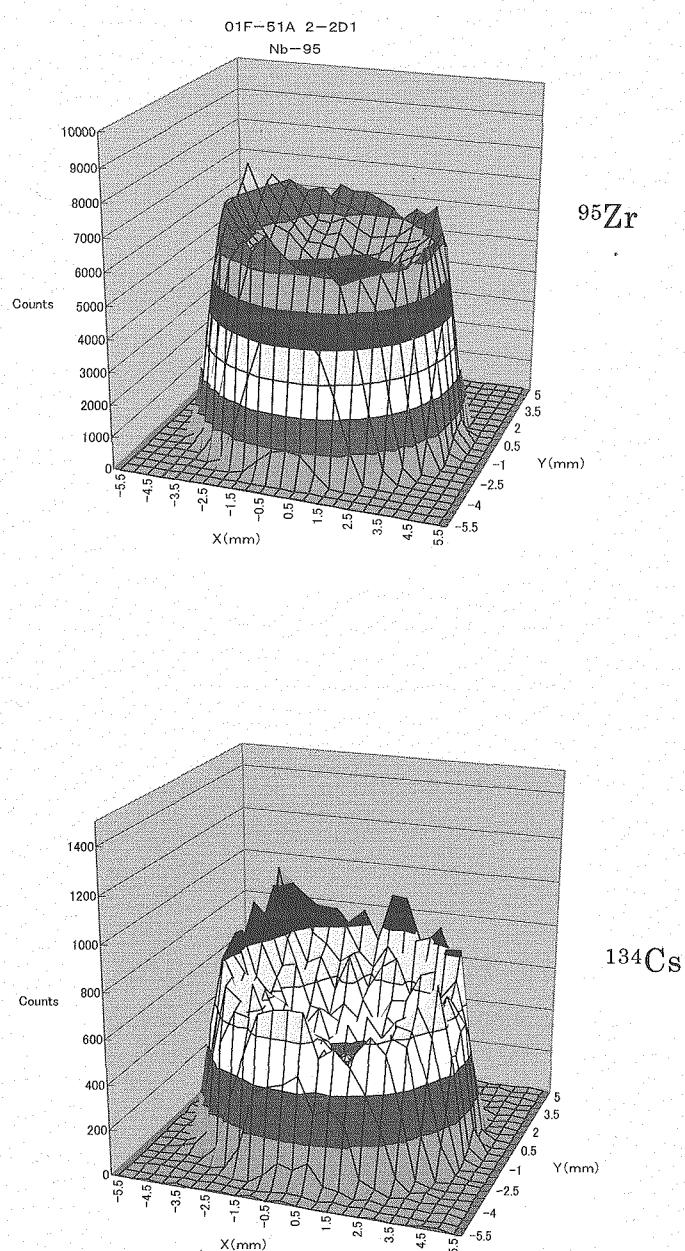


Fig.21 (continued)

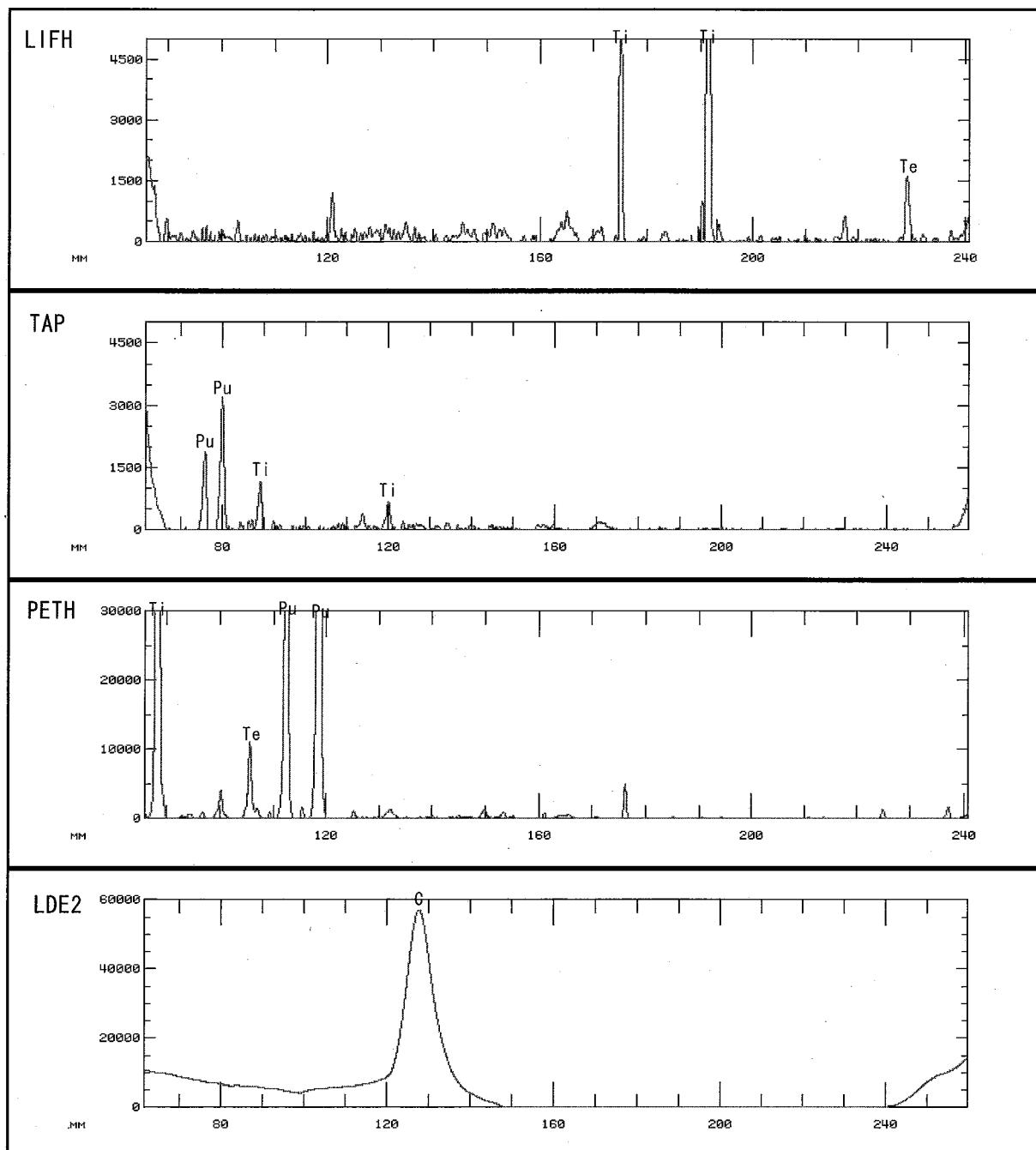


Fig.22 X-ray spectra measured at outer position of (TiN,PuN) (2-1B1)

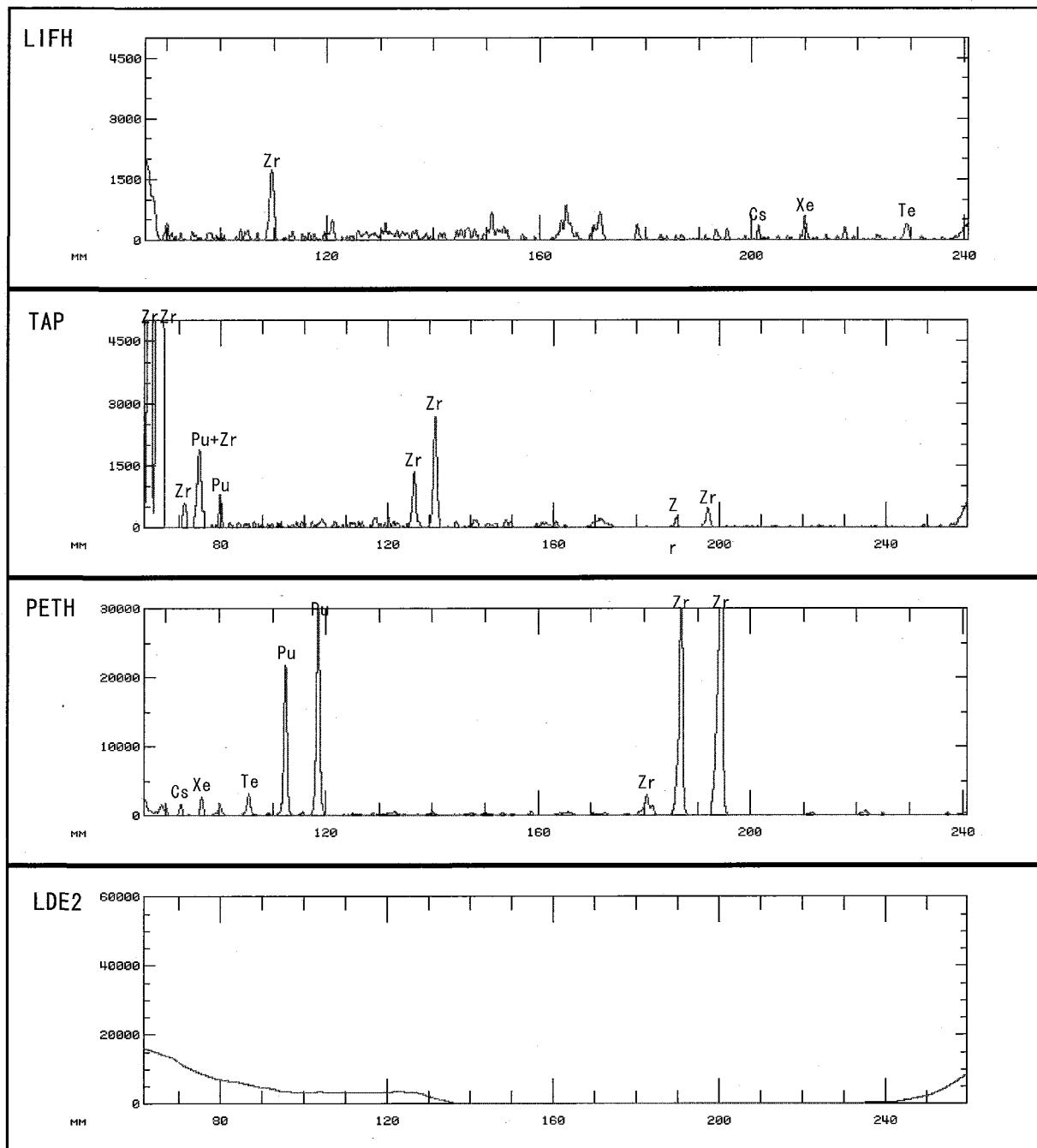


Fig.23 X-ray spectra measured at outer position of $(\text{Zr}, \text{Pu})\text{N}$ (2-2D1)

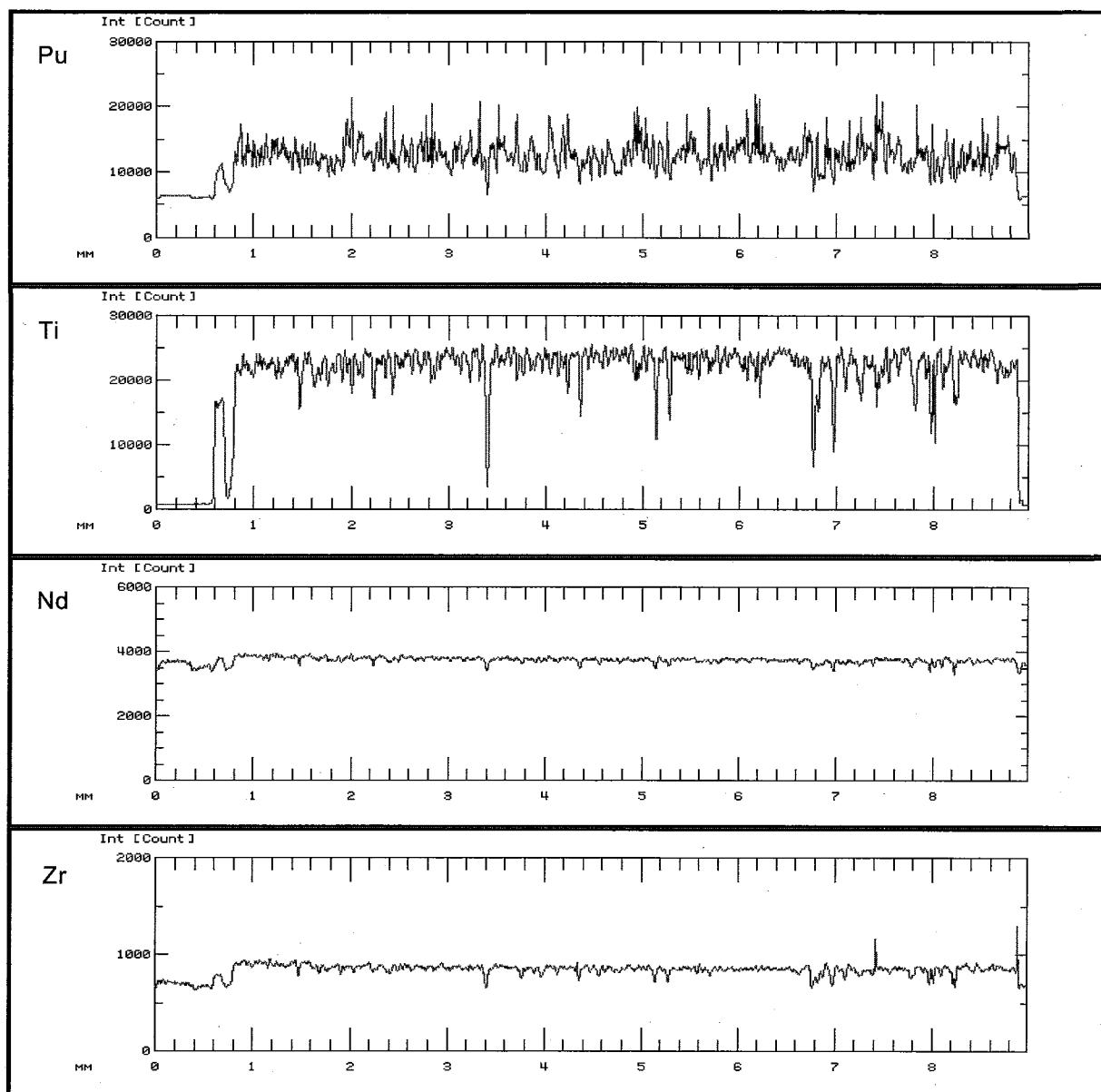


Fig.24 Radial profile of Pu, Ti, Nd, Zr in (TiN,PuN) (2-1B1)

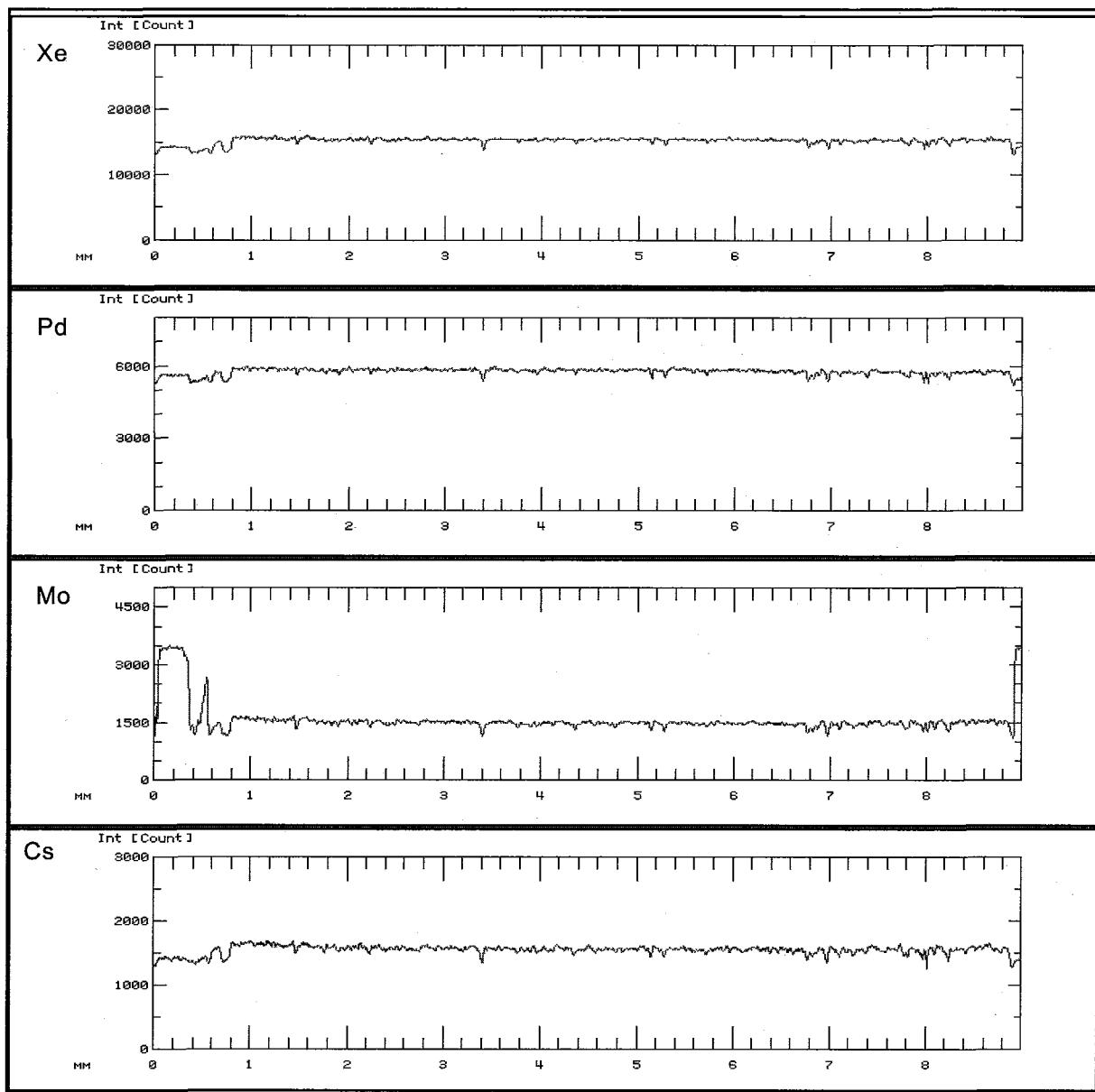


Fig.25 Radial profile of Xe, Pd, Mo, Cs in (TiN,PuN) (2-1B1)

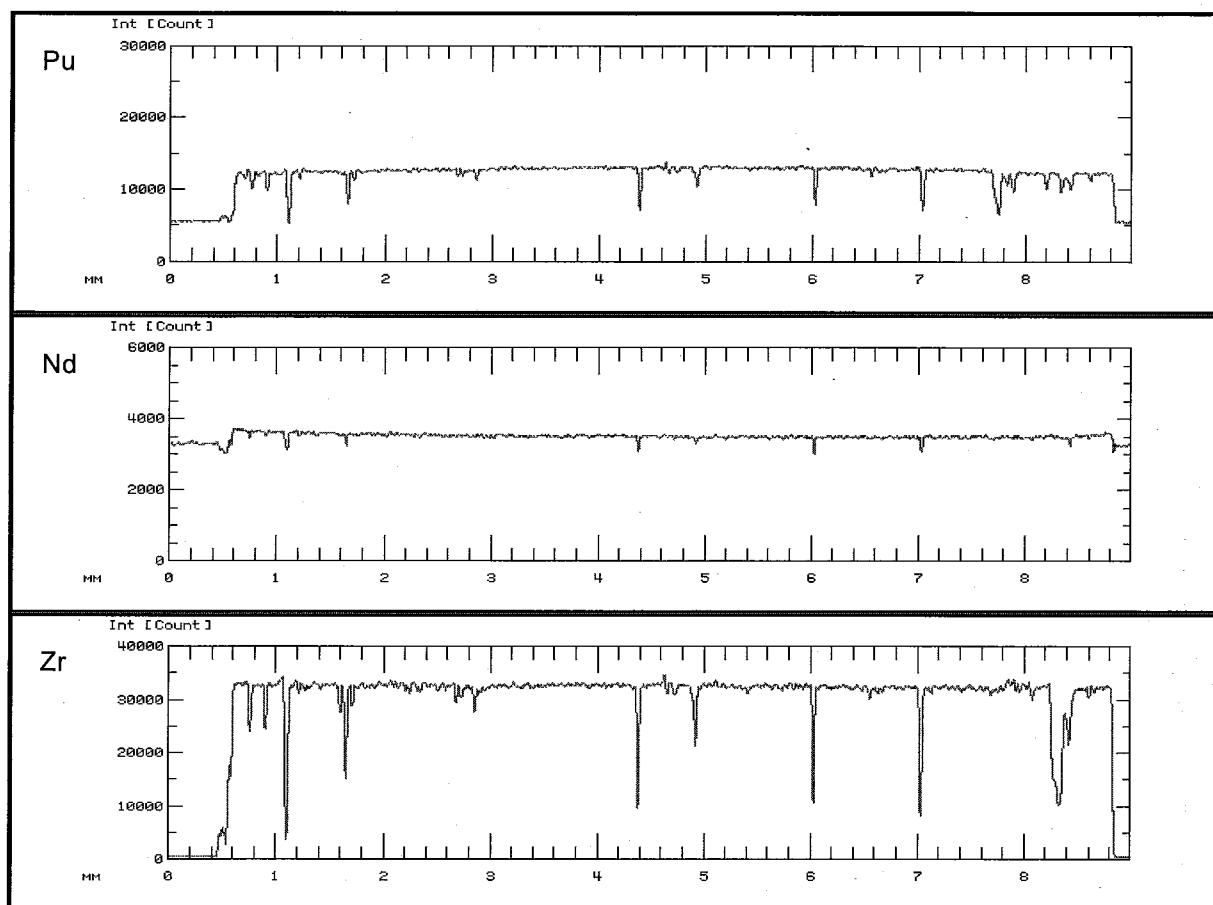


Fig.26 Radial profile of Pu, Nd, Zr in (Zr,Pu)N (2-2D1)

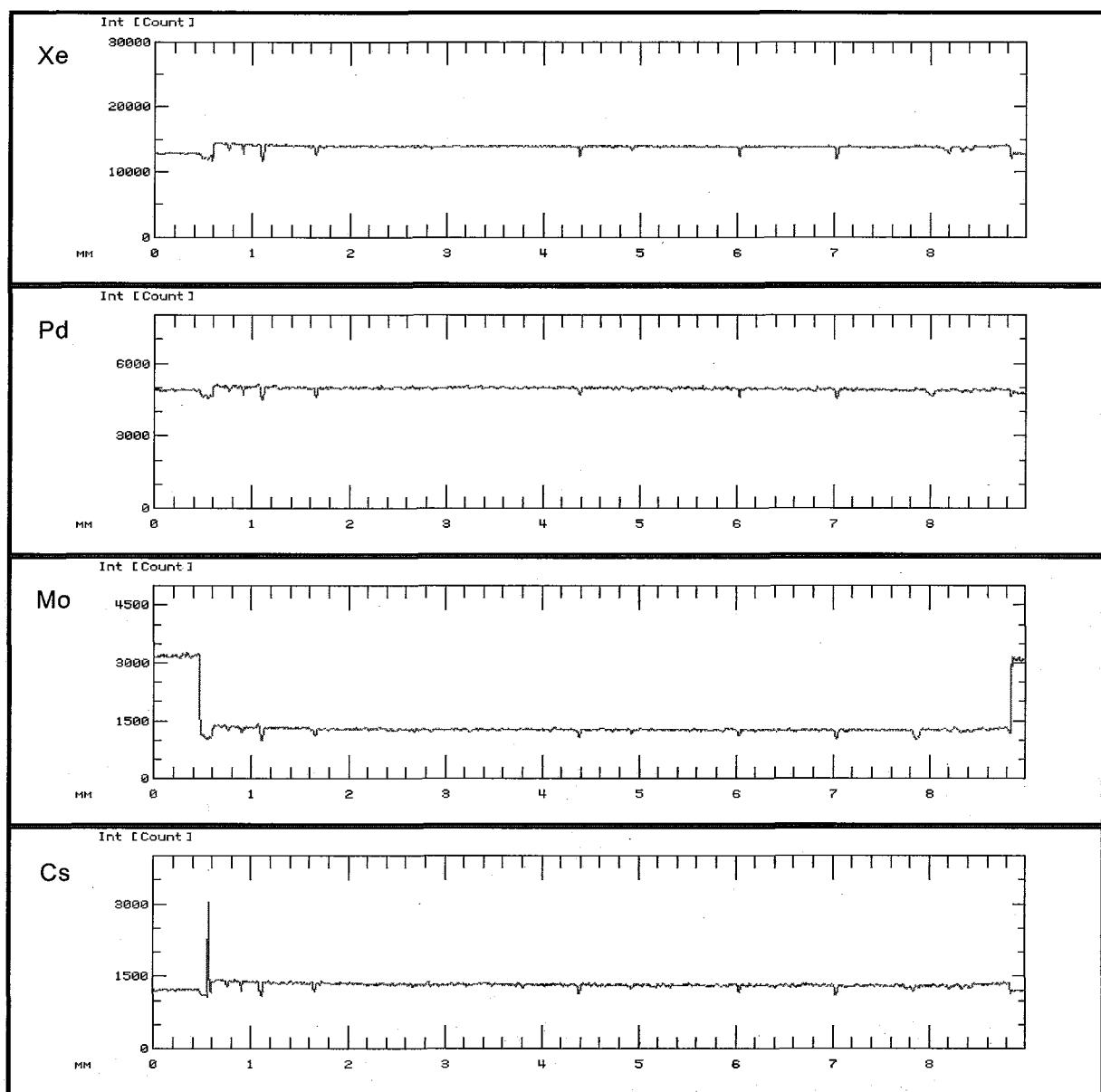


Fig.27 Radial profile of Xe, Pd, Mo, Cs in $(\text{Zr}, \text{Pu})\text{N}$ (2-2D1)

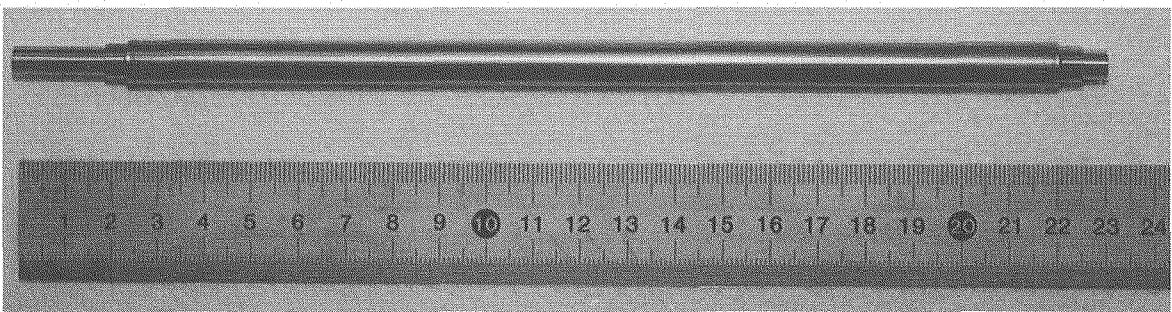


Photo.1 External appearance of fuel pin before irradiation

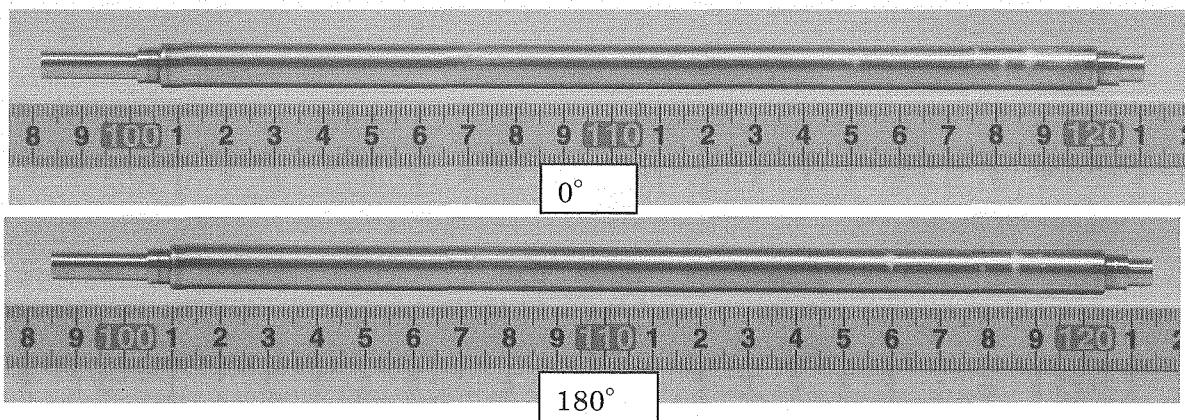


Photo.2 Appearance of the fuel pin

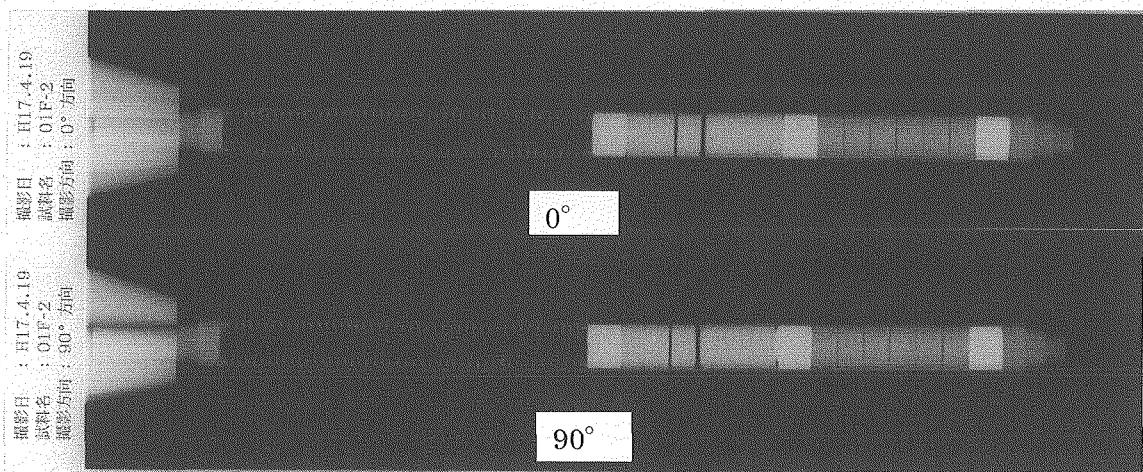
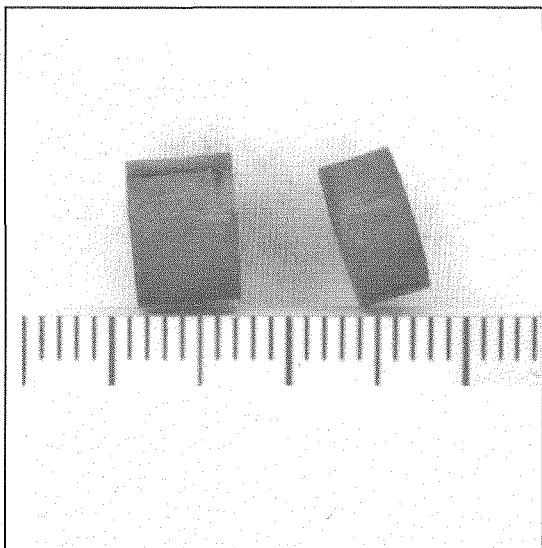
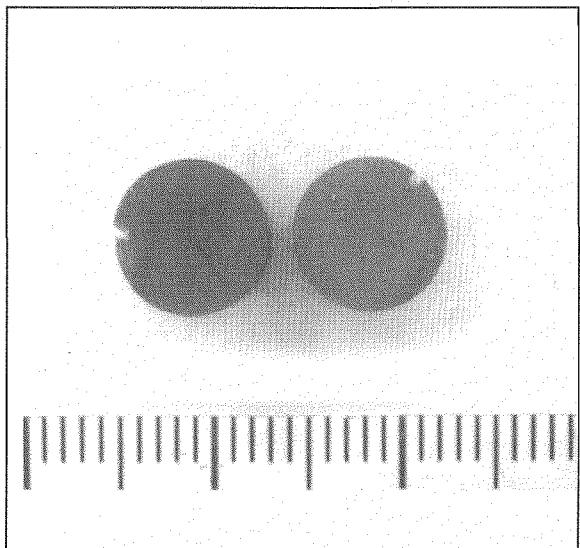
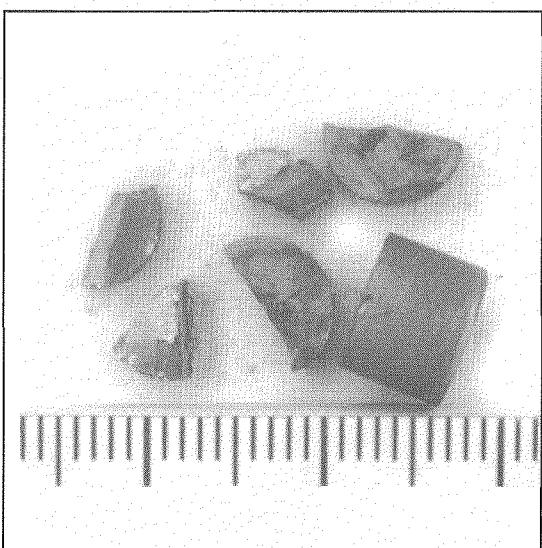


Photo.3 X-ray radiograph of the fuel pin



2 - 1 A (TiN,PuN)



2 - 2 C (Zr,Pu) N

Photo.4 Appearance of fuel pellets after removal from fuel pin

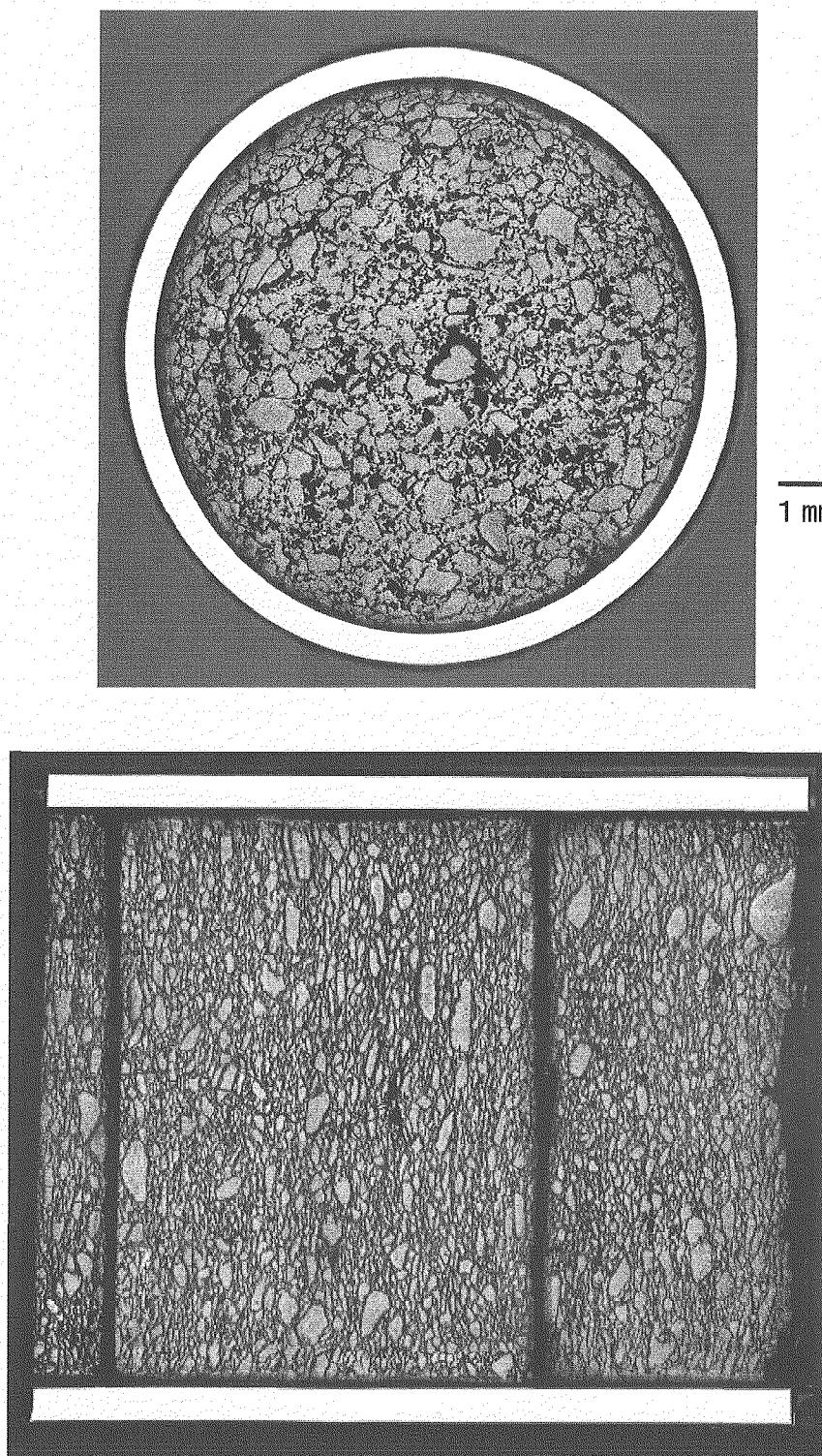


Photo.5 Macroscopic photograph of (TiN,PuN) fuel

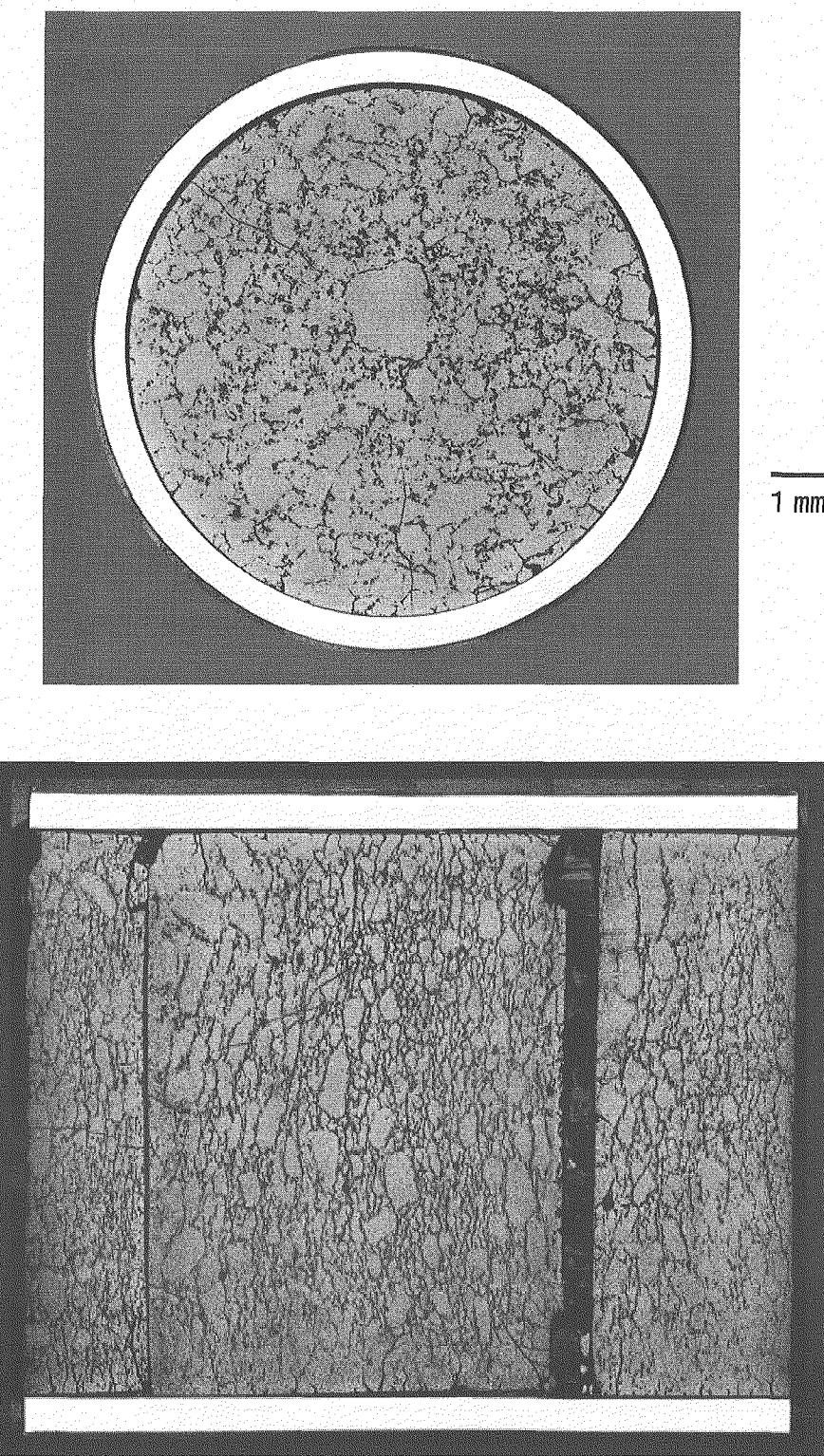


Photo.6 Macroscopic photograph of (Zr,Pu) N fuel

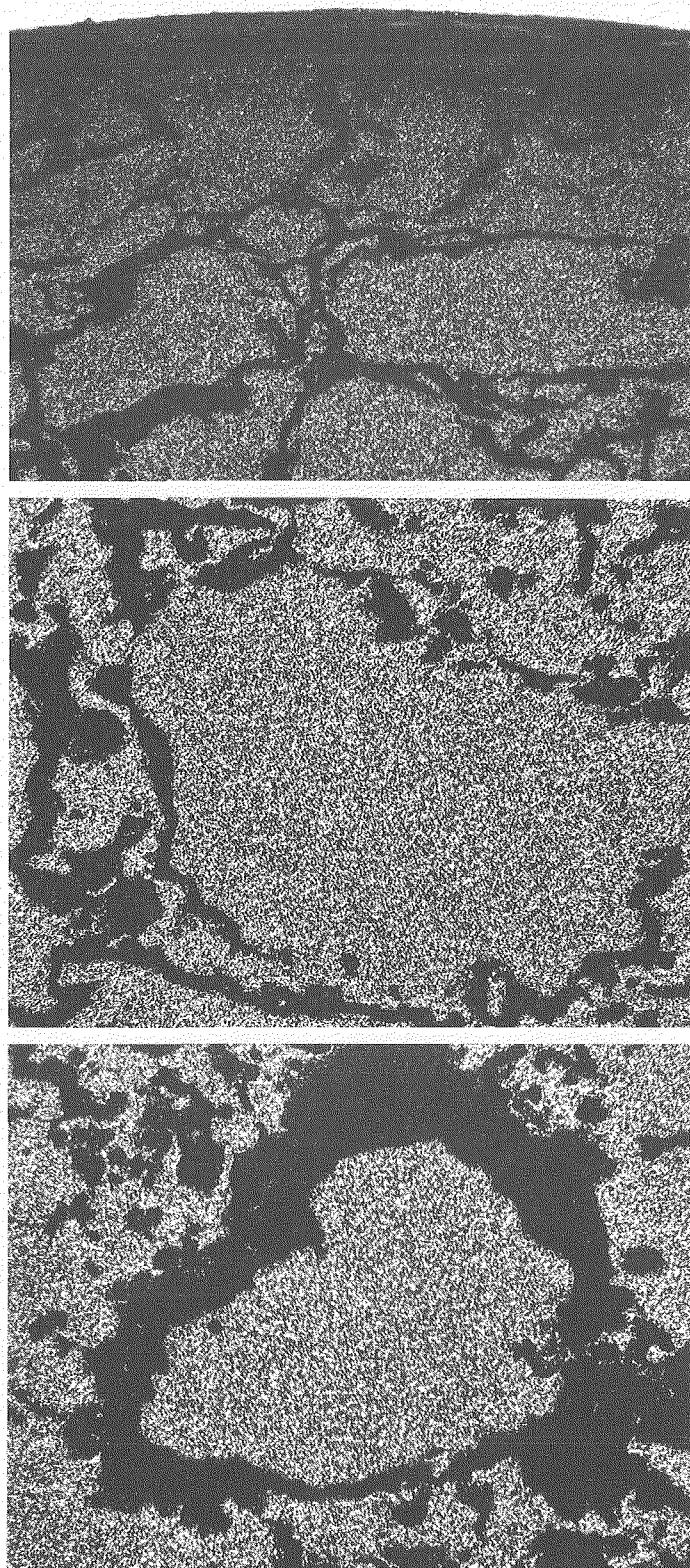


Photo.7 Microstructure of (TiN,PuN) (2-1B1)

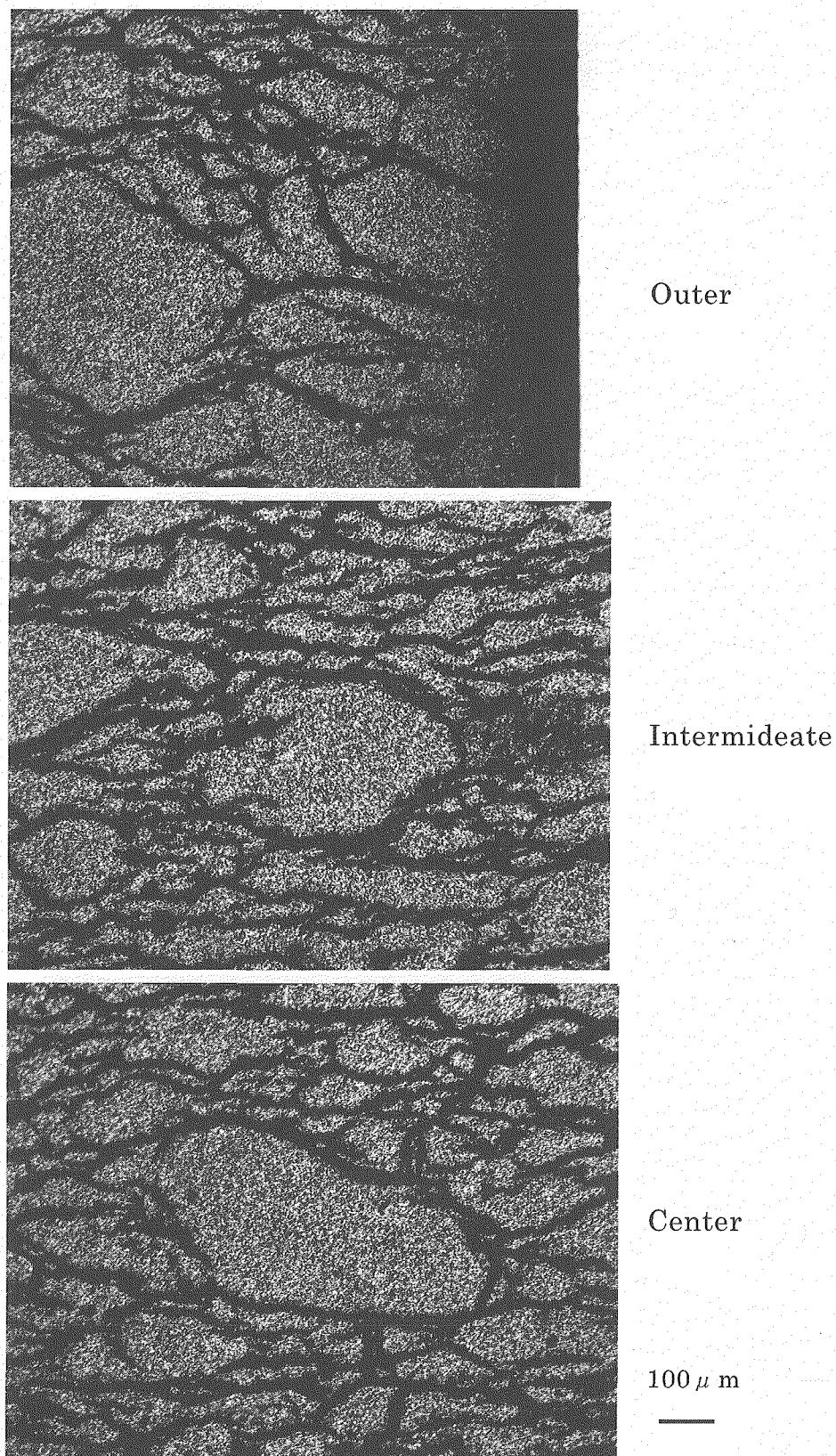


Photo.8 Microstructure of (TiN,PuN) (2-1B2)

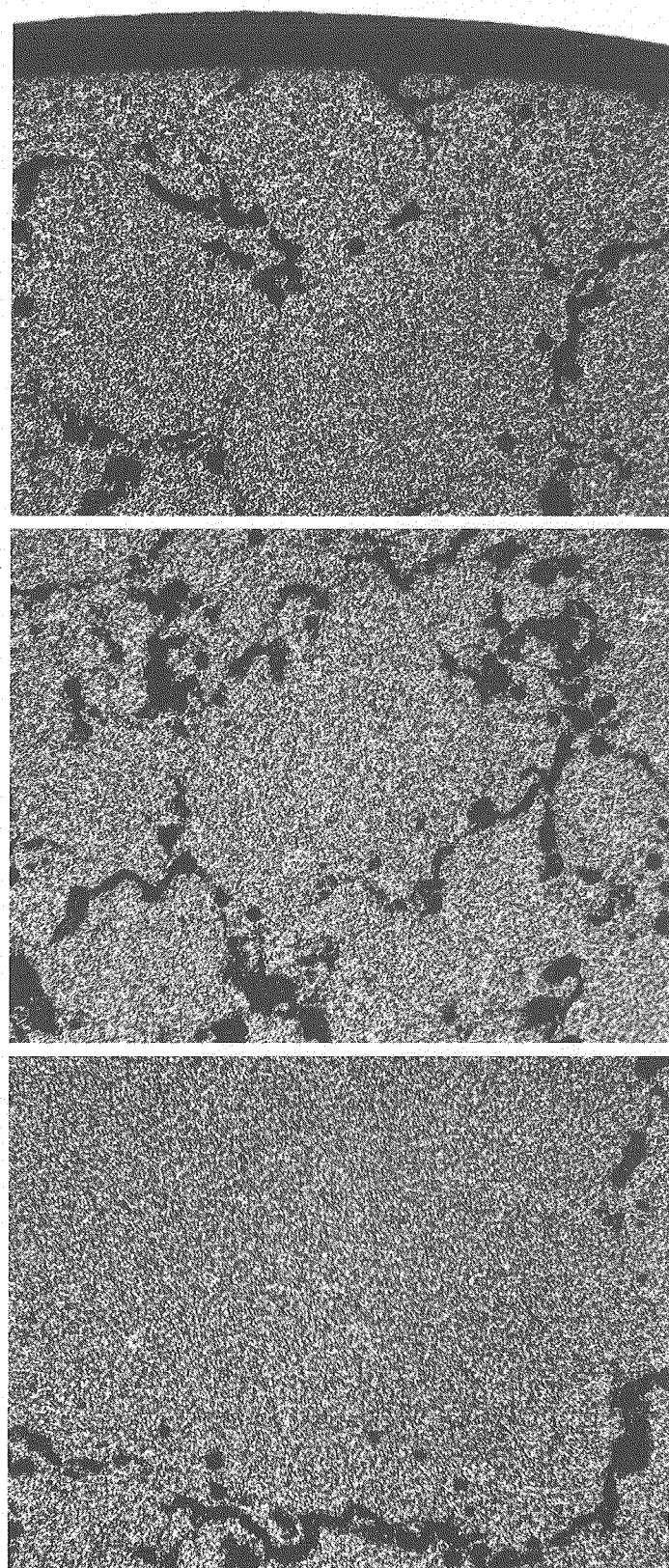


Photo.9 Microstructure of $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ (2-2D1)

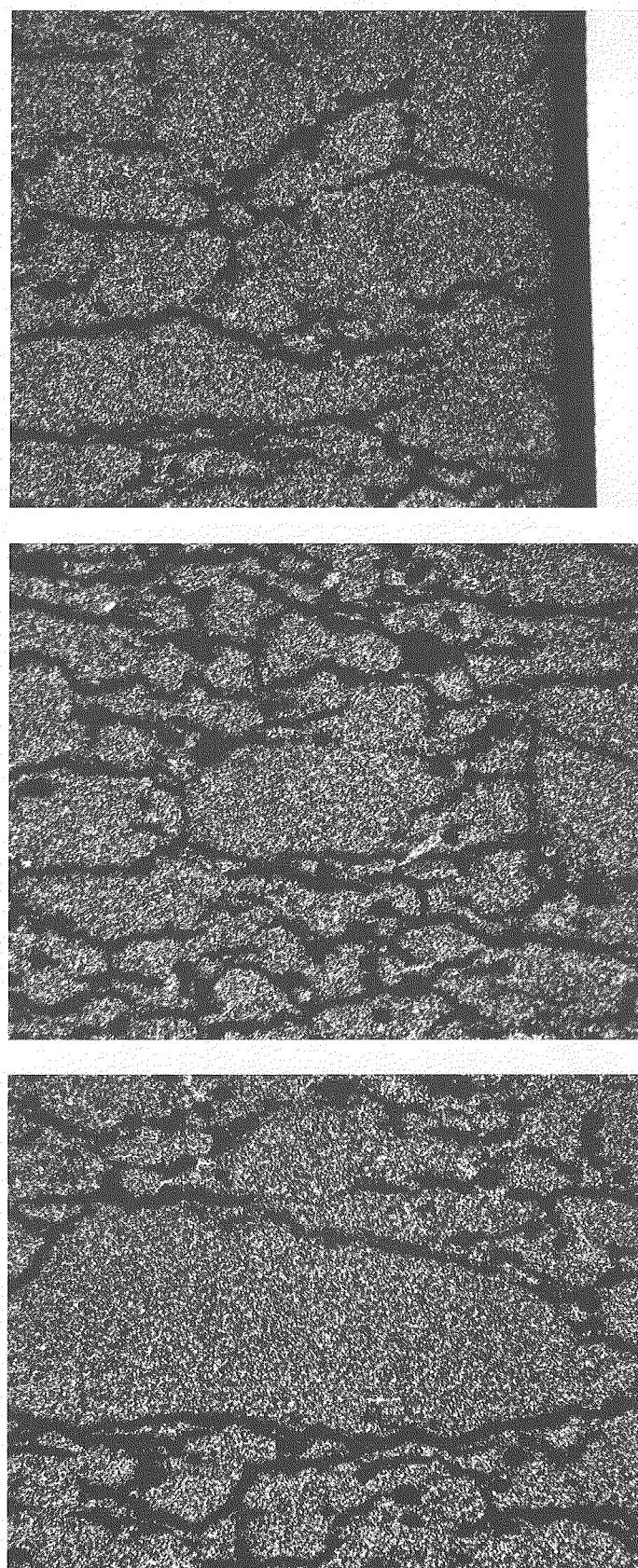


Photo.10 Microstructure of $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ (2-2D2)

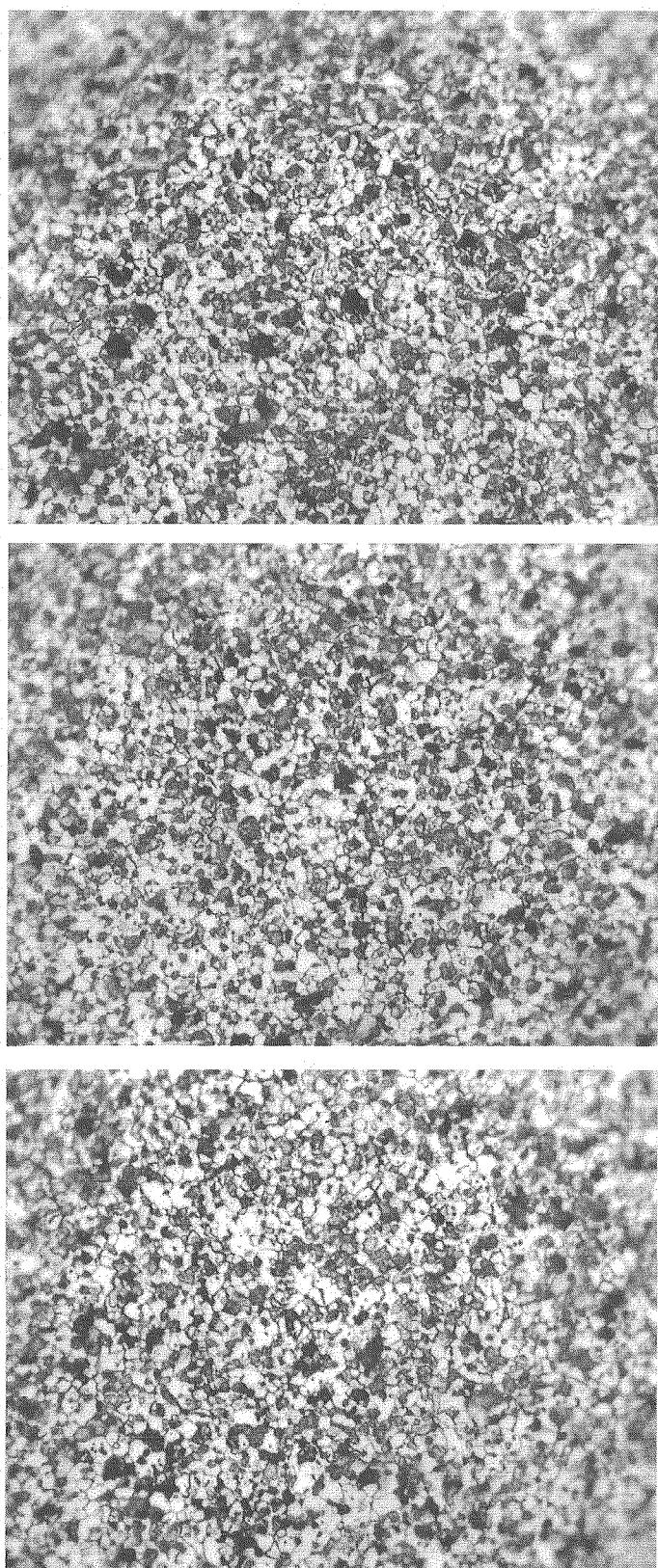


Photo.11 Microstructure of (TiN,PuN) (2-1B1)

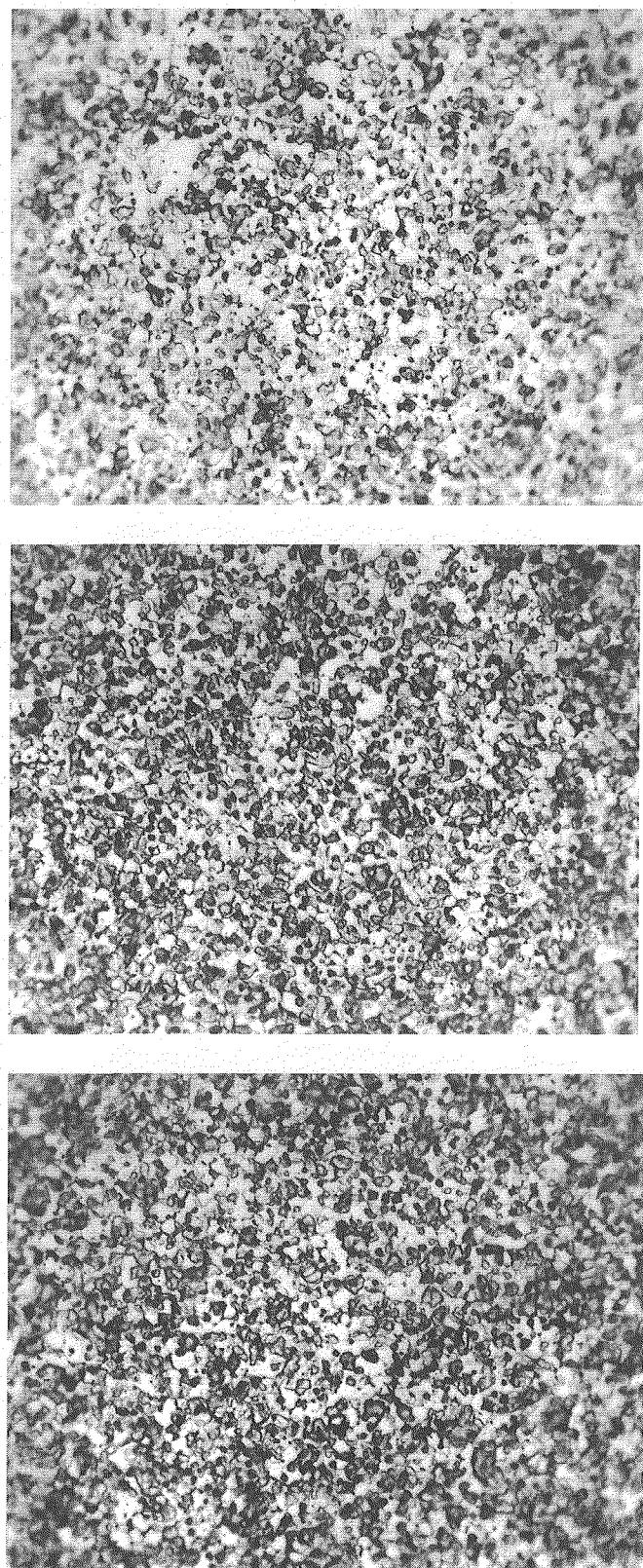


Photo.12 Microstructure of $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ (2-2D1)

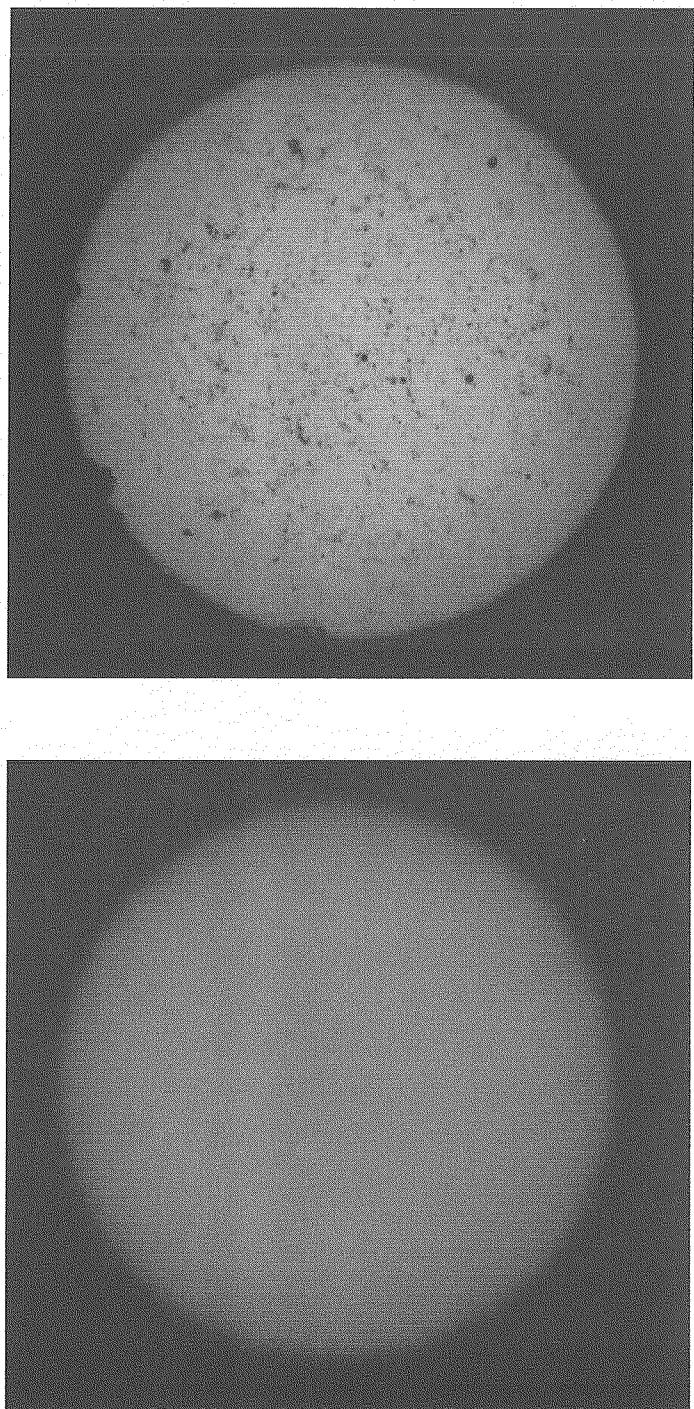
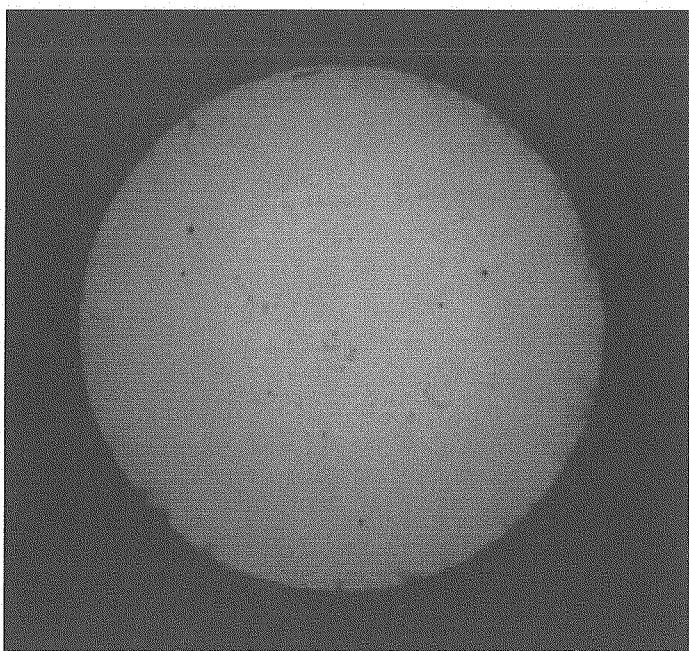
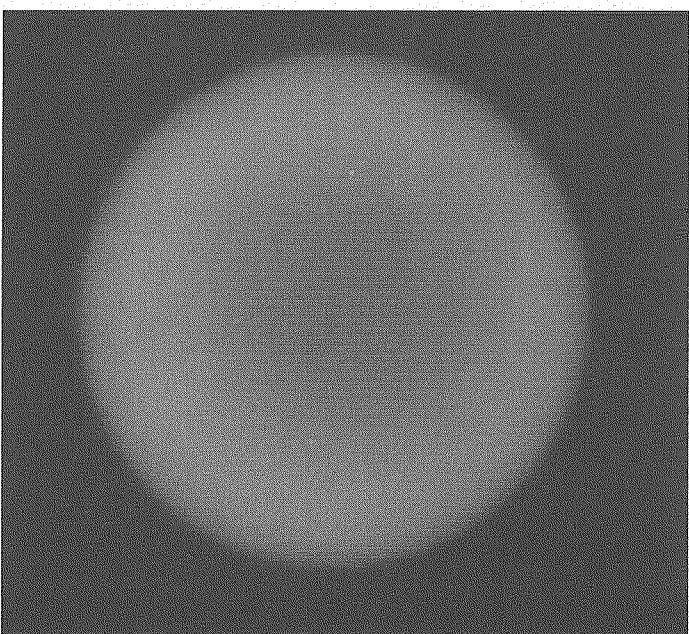


Photo.13 α and $\beta \cdot \gamma$ radiograph of (TiN,PuN) fuel pellet (2-1B1)



α



$\beta \cdot \gamma$

Photo.14 α and $\beta \cdot \gamma$ radiograph of $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ fuel pellet (2-2D1)

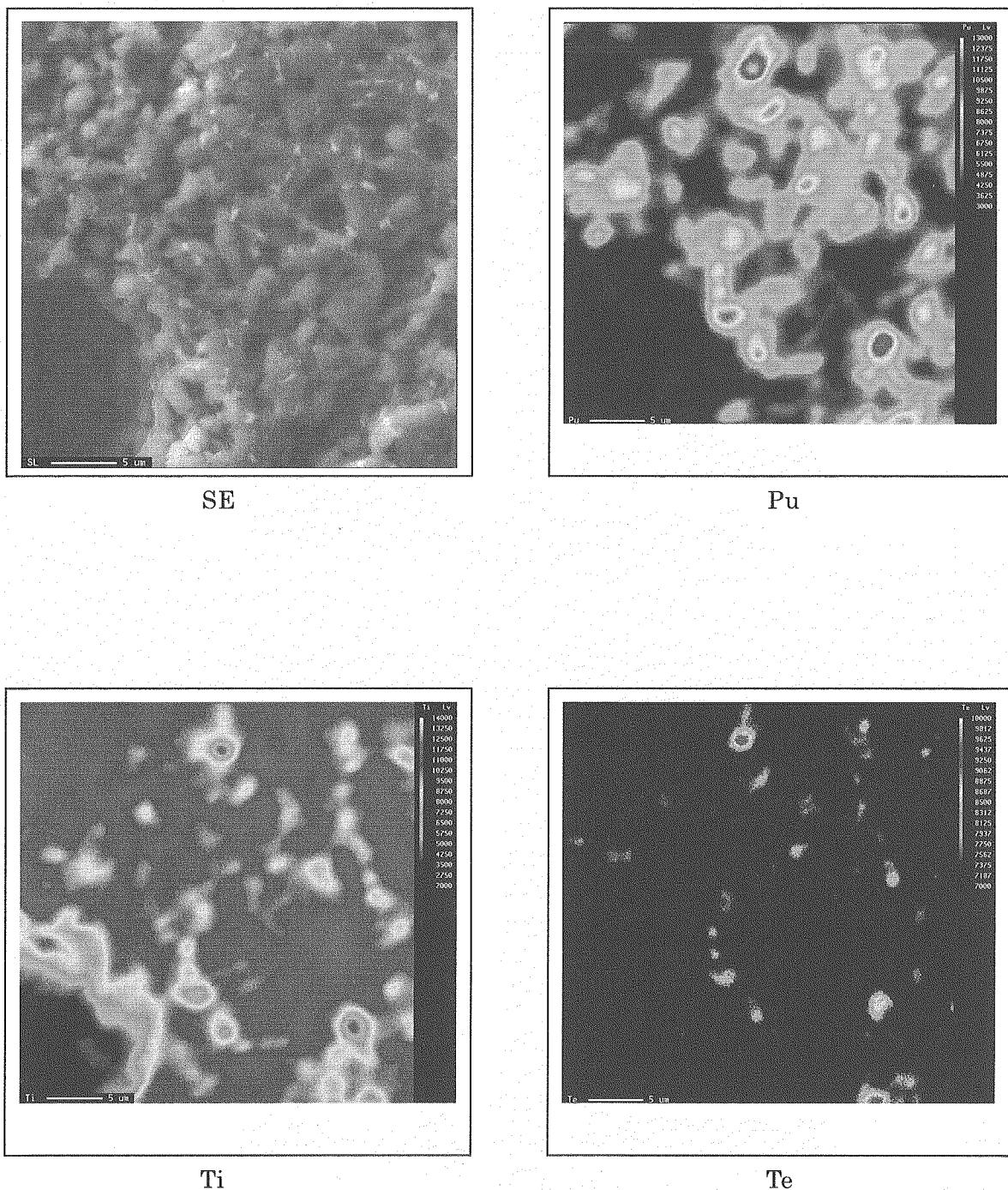


Photo.15 SE and X-ray images of (TiN,PuN) (2-1B1)

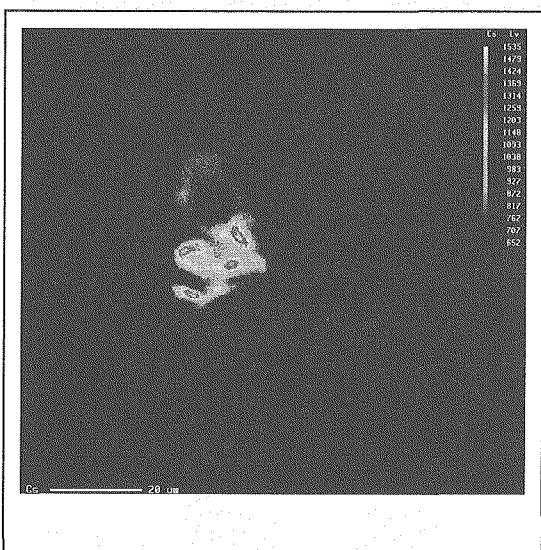
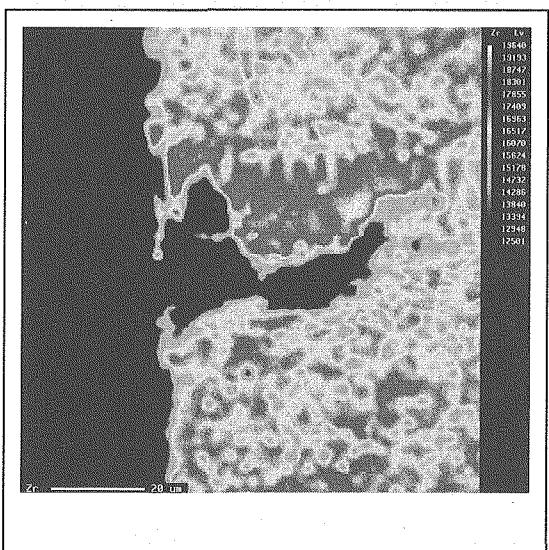
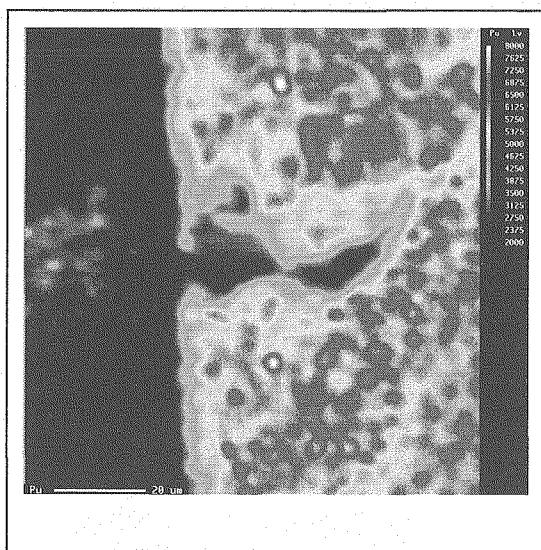
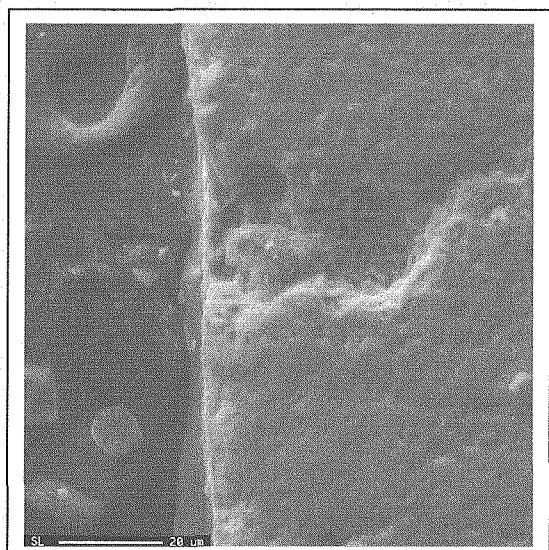
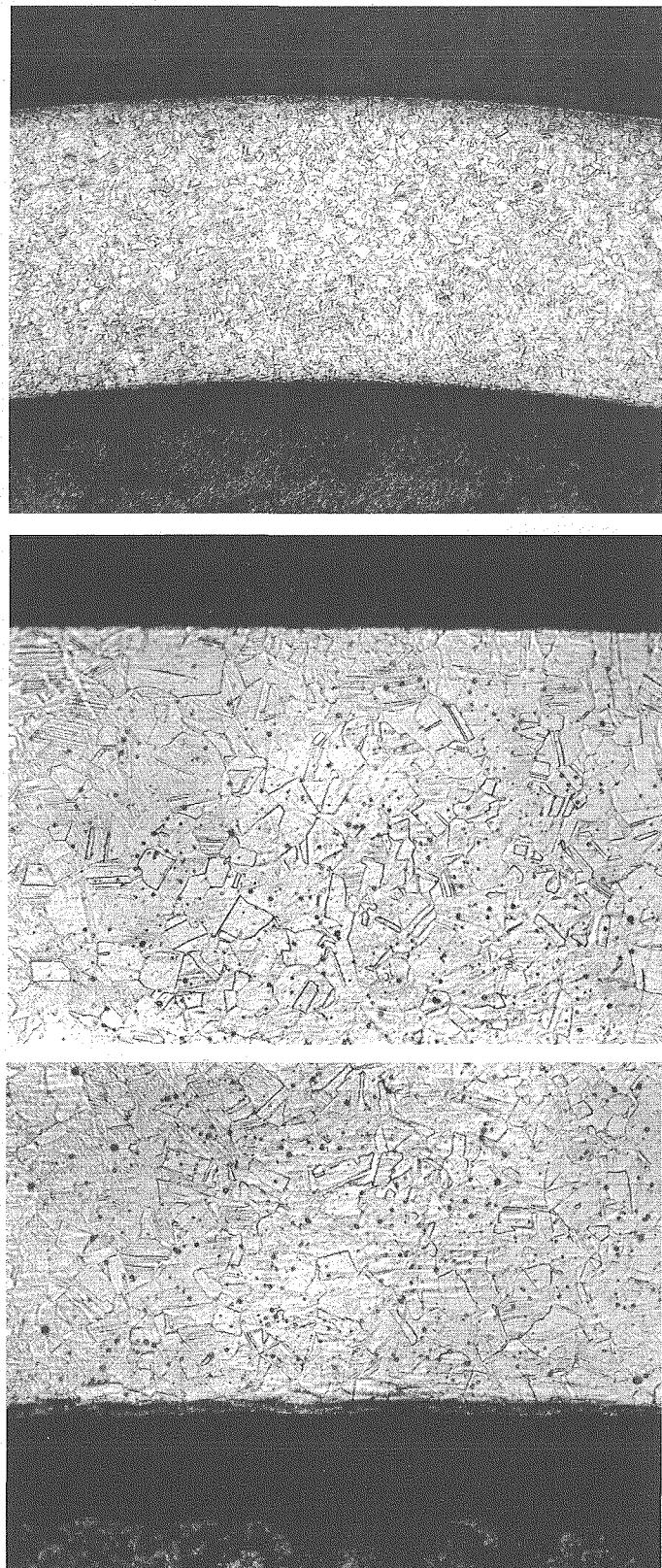


Photo.16 SE and X-ray images of (Zr,Pu) N (2-2D1)



Outer

25 μ m

Inner

Photo.17 Macro- and microstructures of cladding tube for (TiN,PuN) (2-2B1)

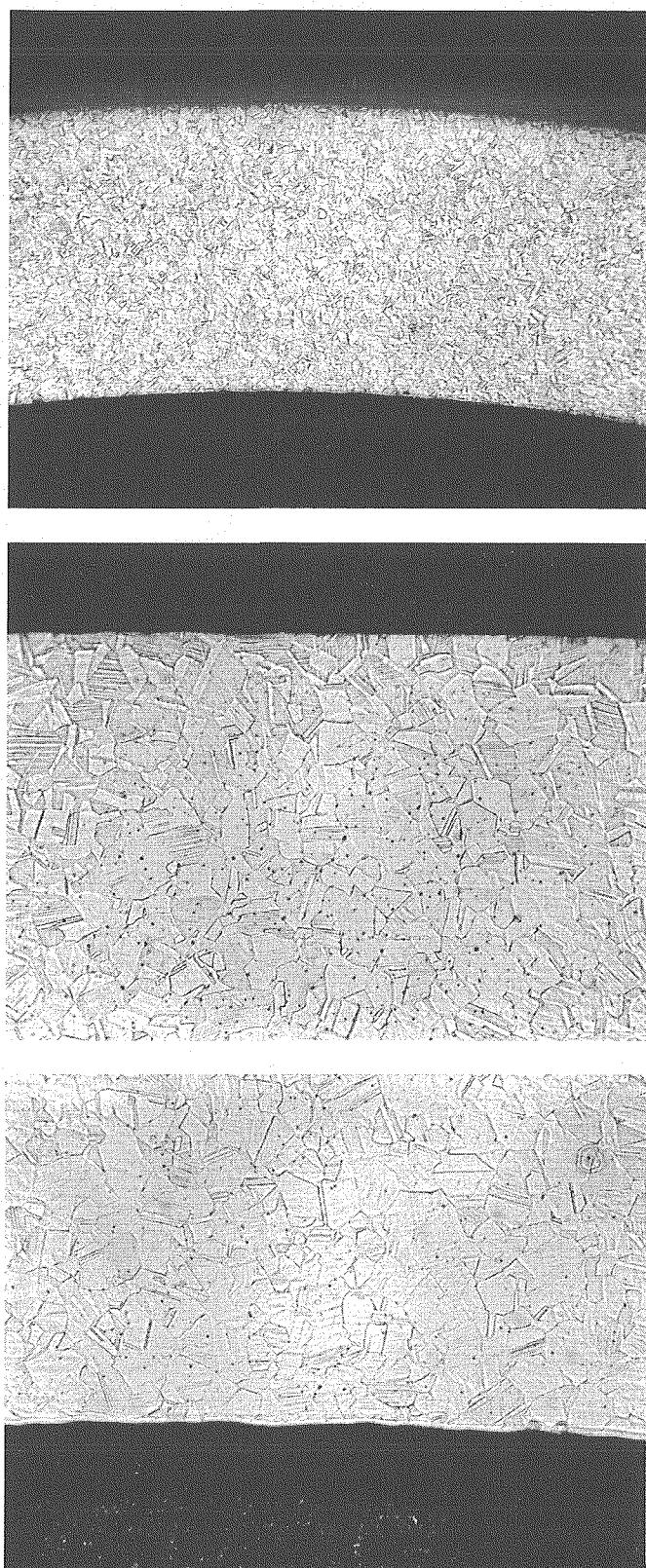


Photo.18 Macro- and microstructures of cladding tube for (Zr,Pu)N (2-2D1)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
立体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(数の)	1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	m ⁻¹ ^(b)	m ⁻¹
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	m ² ·m ⁻² =1 ^(b)	m ²
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg·s ⁻²	m·kg·s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N·m	m ² ·kg·s ⁻²
工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² ·kg·s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s·A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V		m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ⁻² ·kg·s ⁻³ ·A ²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ³ ·A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	V·s	m ² ·kg·s ⁻² ·A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/m ²	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K	m ² ·kg·s ⁻² ·A ⁻²
光束度	ルーメン	lm	cd·sr ^(c)	m ² ·m ⁻² ·cd=cd
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	1m/m ²	m ² ·m ⁻⁴ ·cd=m ⁻² ·cd
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m ² ·s ⁻²
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ·s ⁻²

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	m ⁻¹ ·kg·s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	m ² ·kg·s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg·s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ ·s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ⁻¹ ·s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	kg·s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	m ⁻¹ ·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ⁻¹ ·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ·s·A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ·s·A
誇電率	ファラード毎メートル	F/m	m ⁻³ ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ⁻¹ ·kg·s ⁻² ·A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ·kg·s ⁻² ·mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ·s·A
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	Gy/s	m ² ·s ⁻³
吸収線量	グレイ毎秒	W/sr	m ⁴ ·m ⁻² ·kg·s ⁻³ ·m ² ·kg·s ⁻³
放射強度	ワット每メートル	W/(m ² ·sr)	m ² ·m ⁻² ·kg·s ⁻³ ·kg·s ⁻³
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン		

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	'	1' =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	"	1" =(1/60)' =(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	mi	1海里=1852m
ノット	kn	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
ペニン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm ² =0.1Pa·s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホタル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻² C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W·m ⁻² ·Hz ⁻¹
フェルミ	fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=1J=10 ⁻⁴ kg·m ²
ミクロ	μ	1 μ=1um=10 ⁻⁶ m