

JAERI-M  
4749

X線マイクロラジオグラフィによる  
被覆燃料粒子の非破壊検査

1972年3月

鹿志村 悟, 林 梯二, 岩本多實

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

X線マイクロラジオグラフィによる  
被覆燃料粒子の非破壊検査

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

鹿志村 悟, 林 悅二, 岩本多實

( 1972年2月10日受理 )

多目的高温ガス冷却炉用燃料として使用される被覆燃料粒子の非破壊検査法の一つとして、X線回折装置の低エネルギーX線源を利用し、フィルムと被覆粒子とを密着させることによりX線ラジオグラフィを行なう方法を調べた。その結果、X線エネルギー、露出時間、フィルムの種類、X線源とフィルム間の距離などを適当に選べば、鮮明かつ分解能の高いラジオグラフが得られることが判明した。また、この方法により燃料核や被覆層の寸法測定、形状や燃料移動の観察などが非破壊的に実施でき、さらに、照射済み粒子に対してでも検査できることが判明した。さらに、粒子と粒子分散ペレットに対し中性子ラジオグラフィによる検査の実験的検討を行なったが、この方法は適当でないことが判明した。

JAERI - M 4749

Non-Destructive Inspection of the Coated Fuel Particles  
by Contact X-ray Microradiography

Satoru KASHIMURA, Teiji HAYASHI and Kazumi IWAMOTO

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai, JAERI

(Received 10 February 1972)

An X-ray microradiographic technique was investigated for non-destructive inspection of the coated fuel particles, using a low-energy X-ray beam in a commercial X-ray apparatus and several kinds of X-ray films placed in contact with the particles. Radiographic images with high contrast and resolution could be obtained by suitable selection of the X-ray energy, exposure time, kind of film and geometric factors. It was found to be applicable to non-destructive measurement of the sizes of kernel and coating layers and observation of the particle shape and a kernel movement, and even for the neutron-irradiated particles. A neutron radiographic technique for the particles and the fuel compact was also investigated; it was found to be unsuitable for this purpose.

# 目 次 な し

## 1はじめに

高温ガス冷却炉の燃料には、直径が数百μのU, Thの炭化物または酸化物の球形燃料粒子核のまわりに熱分解炭素（以下PyCと略す）や炭化ケイ素（以下SiCと略す）を多重層被覆した被覆燃料粒子が用いられる。これは従来の発電炉の燃料とは著しく形態が異なっており、その検査法も従来のそれとは異なる点が多い。たとえば、被覆粒子の寸法測定では、粒子の最大径を通る面まで研磨して金相写真をとる方法や、X線マイクロラジオグラフィによって測定する方法がとられている。このX線マイクロラジオグラフィ法は、X線を粒子に曝射しその影像をフィルムにとる方法であるが、良好な影像を得るには、X線の透過率すなわち粒子構成成分質の吸収係数と厚さを考慮して、X線のエネルギーを選択せねばならない。粒子の被覆層がPyCを含み、かつ微小な球状であることから、低エネルギーのX線であることが要求される。外国で今までに試みられた方法には、大別して二種類あり、その一つは、ダイレクトマイクロラジオグラフィまたは低電圧ラジオグラフィ<sup>1), 2)</sup>と称されるもので、Fig. 1に装置の既略を示す。これは、従来の工業用X線ラジオグラフィと異なり、低電圧（20KV以下）、大電流（20mA以上）によって発生させたX線を、空気による散乱や吸収ができるだけ小さくするため、Heガス層を通してフィルム上に直接置いた燃料粒子にあてて、燃料粒子とはほぼ同じ大きさの影像を得、これを透過型顕微鏡で拡大して観察する方法である。他の方法は、プロジェクションマイクロラジオグラフィ<sup>3), 4)</sup>と称され、Fig. 2に示すように、X線マイクロプローブと同様に、電子銃から発生した電子ビームを電子レンズで絞り、ターゲットにあてて点状焦点のX線を発生させ、ターゲットのすぐ上に置いた粒子を、ある程度離れた位置に置いたフィルム上に撮影する方法である。この方法では、拡大された像が得られ、管球方式の場合にみられるX線の不必要的吸収がなく、また粒子とフィルムの間隔が大きいため、照射後試料の検査に適しているとされている。

現在我が国においては、上に記した目的のため特別の非破壊検査用X線ラジオグラフィ装置は市販されていない。本報告では軟X線を発生できる手持ちのX線発生装置を利用し、被覆燃料粒子を非破壊的に検査する場合の方法を知るとともにX線ラジオグラフィの応用面を探るために実験を行ない、さらに中性子ラジオグラフィによる検査との比較についても併せて述べている。

## 2 実験結果および考察

### 2.1 X線源および装置

X線として、出力が電圧10～40KVの範囲で可変であり、最大電流が30mAまで得られるX線回折装置（GE製、XRD-5）のX線発生器を使用した。X線管球がたて型であるためFig. 3に示すように発生X線は水平方向に放射され、燃料粒子とフィルムを密着させて撮影する方法をとった。X線管球は厚さ0.25mmのベリウム窓をもち、タンクステンターゲ

ットの  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  の大きさの点焦点を有している。X線焦点と試料間の距離は最大  $230 \text{ mm}$  まで可変である。管球窓口には、鉛製の孔径が  $1 \text{ mm}$  の円形スリットを取り付け、不要なX線の散乱を防ぐと同時にX線ビームのコリメーションを行なった。燃料粒子およびフィルムは、ラウエカメラ台を利用しX線ビームに対し垂直に支持された。また、燃料粒子は Fig. 3 のように  $10 \text{ mm}$  の穴をあけた厚紙の中に一重に並べその両側を吸収率の小さなマイラーフィルムで固定した。

## 2.2 フィルム

被覆燃料粒子に対してX線ラジオグラフィを実施するにあたって、使用するフィルムの選択は重要な事柄である。本実験では、(a) 工業用X線フィルム(サクラRRTypE)，(b) フジオートラジオグラフプレート(ET-2Fコンタクト法)，(c) ポラロイドフィルム(55P/N)および(d) コダックハイレゾリューションプレートの4種類のフィルムを選んで性能を比較した。幾何学的条件を同一にして比較した結果の一例を Fig. 4に示しているが、これから(a)(b)(c)のフィルムは露出時間が短かく、(d)に比べると  $1/10$  以下であり、(c)は取扱上の簡便さにおいて優れているが、いずれも数百倍以上に拡大し観察する場合には乳剤粒子が粗いため、被覆粒子内の微細構造の検出に適当でないことがわかった。したがって、分解能が  $2,000 \text{ lines/mm}$  といわれている超微粒子の(d)コダックハイレゾリューションプレートを使用することにし、フィルムを厚さ  $0.01 \text{ mm}$  のままで全体を覆って使用に供した。フィルムの現像はレンドールを使って  $20^\circ\text{C}$  で5分間行なった。

## 2.3 不鮮鋭度

被覆粒子のような微小球のX線ラジオグラフィにおいては、不鮮鋭度(いわゆるボケ)は特に小さくしなければならない。この不鮮鋭度を生ずる原因としては、次のような因子が考えられる。

- (a) 幾何学的条件によるもの。
- (b) 散乱線などのカブリによるもの。(高放射性物質の検査においては、試料の放射線によるカブリも問題になる。)
- (c) フィルム乳剤の粒度によるもの。

幾何学的条件による不鮮鋭度は Fig. 5に示すような半影像ができることに対応して定まり、次の関係式が成立つ。

$$U = \frac{F}{L} \cdot r \quad (1)$$

ここに  $U$  は不鮮鋭度、  $F$  はX線管焦点の大きさ、  $L$  はX線管焦点と粒子試料間の距離、  $r$  は粒子試料中心とフィルム間の距離である。したがって、幾何学的不鮮鋭度を小さくするためには、焦点の小さなX線管を用い、X線管焦点と試料との距離をできるだけ大きくとることが望ましいが、この距離を大きくすることにより線量が減衰し露出時間が増加することを考慮しなければならない。実験に用いた装置は、前述したように  $F$  が  $1 \text{ mm}$  と固定され、  $L$  が最大  $230 \text{ mm}$

まで可変であるので、ここでは、 $U/r$ に対する $L$ と $r$ との関係を実験的に求め、(1)式による計算値と比較した。すなわち、粒子試料の代りに電子顕微鏡観察に用いるシートメッシュをFig. 3の試料の位置に置きFig. 6に示すような像からマイクロメーターでメッシュの寸法を測定し不鮮鋭度を求めた。Fig. 7にはシートメッシュを用い、 $r$ を0.5 mmとし、 $L$ を80～230 mmの間で変化させた場合の不鮮鋭度を計算値と比較している。Fig. 8には、 $L$ を230 mmとし、 $r$ を変化させた場合の不鮮鋭度を計算値と比較している。なお、この際の実測結果には、先に述べた不鮮鋭度の原因となる(b)(c)の因子も含まれているが、測定に際しては全試料に対しこれらの因子が一定となるようにした。これらの結果から、実測値は計算値とかなりよく一致しており、本実験においては、不鮮鋭度は主として幾何学的条件に基づくものであり、したがって計算によって推定できることがわかる。また、ダイレクトマイクロラジオグラフィの場合の不鮮鋭度は、X線管焦点と試料粒子間の距離の変化に対しては大きな変化を示さないが、試料粒子とフィルム間の距離のごく少量の変化に対しては大きく影響されることがわかる。また、Fig. 7およびFig. 8の実験と同じ条件の下で実際の被覆燃料粒子のラジオグラフをとったところ、Fig. 9に示す結果を得た。これから不鮮鋭度が5 μ以上の場合すなわち試料とフィルム間の距離が1 mm以上、X線管焦点と試料間のそれが130 mm以下の場合は、各被覆層間の境界が不鮮明になり正確な寸法測定は困難であることがわかった。したがって、本実験においては、X線管焦点と試料間の距離を230 mmとし、試料とフィルムを密着させる最も良い条件で行ない、試料粒子の直径を1 mmとすれば、不鮮鋭度は約2 μとなり、燃料粒子に対し精度の高い寸法測定が可能となることがわかる。

#### 2.4 被覆燃料粒子の検査

X線に対する吸収係数の異なる物質で構成されている被覆燃料粒子の検査に適用するには、X線の適正な曝射条件を求めておく必要がある。そこで被覆層構成の異なる4種類の試料を用いて種々の条件でX線ラジオグラフをとった。Table Iに示されたように試料は $UO_2$ 、 $(U/Th)O_2$ または $UC_2$ の燃料核のまわりに(a)低密度PyCと高密度PyCの二重層(BISO型)、(b)低密度PyCに高密度PyCの二重に被覆した三重層(TRIPLEX型)、(c)低密度PyCと高密度PyCとの間にSiCを含む三重層(TRISO型)、または、(d)低密度PyCと高密度PyCにさらにSiCと高密度PyCを被覆した四重層(TRISO-II型)などの4種類の被覆を行なったものであり、各層の厚さは30～50 μである。撮影にはX線装置の電流を30 mA一定として、電圧を10～20 KVの間で、露出時間を30秒～20分の間でそれぞれ変化させた。その中から燃料粒子について適正条件下で撮影されたと考えられるものをFig. 10～Fig. 13に示す。これからSiC層を含まないPyC層だけの燃料粒子では10～14 KVの電圧で、5～10分の露出が適しており、SiC層を含む燃料粒子では15～18 KVの電圧で2～5分の露出が適していることがわかる。いずれの粒子においても、SiC層や燃料核に対して鮮明な像が得られているが、Fig. 13に示すようにSiC層の内側に二層のPyC層を含む試料や、Fig. 10に示すように高密度PyC層の二層から成る試料においては、各々のPyC層の識別は不可能であった。また、SiCをPyCのX線に対する吸収がTable 2に示すように大きく異なるためSiC層の厚い燃料粒子では一回の撮影で同時に各層の識別を行なうことは難しく、し

たがって、その検査目的に合せて適正な条件を選ぶ必要がある。この例を Fig. 14 に示している。撮影後にフィルムを透過型顕微鏡により最高 400 倍までの倍率で被覆燃料粒子の内部観察を行ない、また、ピッカース硬さ計のマイクロメーターによって寸法測定、真球度測定などが可能になる。さらに高温で熱処理を施した被覆燃料粒子内での移動状況観察や、照射済み粒子に対する検査なども可能であるとみられるのでこれらのこととを確認するために以下の実験を行なった。熱処理試料の例として、1700°Cで100時間の等温加熱を施した TRISO 型燃料粒子に対してラジオグラフをとった結果を金相写真とともに Fig. 15 に示している。この試料粒子では両結果から明らかのように、SiC 層を始め各被覆が破損し、燃料核との反応が起っていることがみられる。さらに金相写真では観察されないが、燃料粒子表面の U 汚染が、白色のリング状としてラジオグラフからわかる。また、温度勾配下で加熱した被覆粒子に対する結果の例を Fig. 16 に示しているが、温度勾配に沿って燃料核が移動している様子が、金相写真では認めにくい微量の U の存在でもラジオグラフでは確認できることがわかる。照射済み試料の検査に適用し、照射による粒子の内部組織や寸法などの変化の測定を行なう場合には、試料からの放射線によるフィルムのカブリが問題となる。これはフィルムの特性、X 線発生装置の出力、試料とフィルム間の距離および露出時間を考慮することで解決できよう。しかし、本装置のようにダイレクトマイクロラジオグラフィの場合は、前述したように、試料とフィルム間の距離を 1 mm 以上に大きくすることはできない上に、露出時間も X 線源の出力により制約があるので、検査可能な照射済み試料の放射能に限度がある。試みに、JRR-2 で約 2.6 MW D/T の照射を行ない約 200 日冷却した燃料粒子を本装置によって検査したが 5 分間の曝射によるフィルムのカブリは全く認められなかった。1 例を Fig. 17 に示す。また、同試料をフィルムに密着させ約 5 時間放置したがフィルムのカブリは認められなかった。これらのことから、十分冷却した試料であれば燃焼度が少くとも数千 MW D/T 程度までの検査は本装置によって可能であることがわかる。本装置による実験結果をもとにさらに燃焼度の大きい照射済み被覆粒子を X 線ラジオグラフィで検査するために、現在日本原子力研究所東海研究所のホットラボの鉛ケープ内で装置の設置と整備が進められている。

## 2.5 中性子ラジオグラフィとの比較

被覆燃料粒子の非破壊検査法として X 線ラジオグラフィの他に、照射済み燃料粒子のため、中性子ラジオグラフィの応用を試みその可能性について検討した。中性子ラジオグラフィは近年、高放射性物質の非破壊検査法として注目されている検査法であり、次のような特長を有している。(1) 熱中性子の物質に対する吸収係数が Fig. 18 に示すように X 線のそれと異なり、X 線ラジオグラフィでは不可能な物質の検査が可能であること。(2) 影像の検出は、Fig. 19 に示すように、試料を透過した中性子によりデテクター、たとえばインジウム箔などを放射化し、それをフィルムに転写する方法をとる。したがって試料からの放射線によるフィルムのカブリはまったく考慮する必要はなく、燃焼度の高い照射済み燃料などの検査に適している。

中性子ラジオグラフィの被覆燃料粒子検査への適用の可能性については、熱中性子の各被覆層に対する透過率を計算することによりはじめ検討することができる。Table 3 には、被覆燃料粒子に使用される各構成物質について熱中性子の断面積を示しており、この値から燃料粒子

およびペレットについて次式により透過率を計算できる。

$$N/N_0 = e^{-\sum t X} \quad (2)$$

ここで、 $N/N_0$ は透過率、 $\sum t$ は熱中性子の巨視的全断面積（X線の場合は $\mu t$ で示されX線の吸収係数）、Xは物質の厚さである。計算結果は、以下に示すようにTable 2に示したX線の吸収係数の値を用いて計算したX線による吸収率とあわせて示し、両者を比較した。

Fig. 20は、燃料核は $400\mu$ の $UO_2$ 、被覆層は低密度 $PyC 50\mu$ 、 $SiC 30\mu$ 、高密度 $PyC 50\mu$ を有しているTRISO型被覆燃料粒子について、1～4の位置で幾何学的に定まる各物質の厚さに対して計算し透過率の差を示している。Fig. 21は、ペレット中の燃料粒子の分散度測定の可能性を調べたもので、 $10mm\phi$ の黒鉛ペレット中に $1mm\phi$ の燃料粒子と $1mm\phi$ の空孔が存在する場合について計算し、各々の位置での透過率の差を示している。図中の実線は中性子、点線はX線による透過率を示している。Fig. 20, Fig. 21から中性子による燃料粒子およびペレットにおける各部の透過率の差は、最高2%でX線と比較して非常に小さく、フィルム上での識別は困難であることを示している。前述の結果を実験的に確認するため中性子ラジオグラフィ装置によって、燃料粒子およびペレットの試験を行なった。装置は、照射後燃料キャップセルの非破壊検査のため、JRR-3, H-4実験孔に設置されたもので、熱中性子束は試料位置で約 $5 \times 10^7 n/cm^2 \cdot sec$ を有しデテクターとして $0.3mm$ 厚のインジウム箔を、転写用フィルムとしてX線フィルム（サクラRR Type）を使用した。試料として、TRISO型粒子、およびTRISO型粒子を含みさらに径方向に $1mm\phi$ の空孔をあけた $10mm\phi$ のペレットを用いた。照射は最高10分間行ない、直ちに転写をインジウムの3半減期すなわち約3時間行なった。その結果をFig. 22に示しているが、燃料粒子およびペレットとともに燃料粒子の粒形を識別することはできず、ペレットの空孔がわずかに識別できる程度で計算による吸収率の結果と一致している。以上のように中性子ラジオグラフィによる検査では良好な結果が得られなかつたが、これは、燃料核のU化合物と被覆層の $PyC$ や $SiC$ との熱中性子に対する巨視的断面積の値の差が、X線に対する吸収係数の値の差に比較して非常に小さいことによるものであり、中性子ラジオグラフィによる被覆燃料粒子の非破壊検査は不可能であることを示している。

### 3 結 語

高温ガス冷却炉用燃料として用いられる被覆燃料粒子の非破壊検査を目的に、X線回折装置の低エネルギーX線を利用してX線ラジオグラフィを行なう方法を実験的に調べた。その結果、使用するフィルムには超微粒子乳剤をもち分解能の良いことが好ましいこと、影像には幾何学的条件に寄因する不鮮鋭度が大きく作用することがわかりこの条件を小さくすることにより、本実験のような簡単な装置によっても精度の高い粒子の寸法測定が可能であること、また、X線に対する吸収係数の異なる材料で構成される被覆層は、各被覆層に合ったX線の曝射条件を適切に選択することにより各層の識別がより鮮明になること、さらに、燃料核の被覆層中の微

量な存在や、層内への移行の検出にも利用できること、さらに、燃焼度が数千MW D/T程度までの照射済み粒子に対してなら本実験の方法によっても検査できること、などが明らかにされた。さらに、中性子ラジオグラフィはこの種の試料には適用できないことも示された。

終りに、本研究実施にあたって、激励して下さった日本原子力研究所燃料工学部長石原健彦氏、関心をもたれた同動力炉開発管理室の各位へ謝意を表する。

## 参考文献

- 1) McClung, R.W., Bomar E.S., and Gray R.J.: "The Use of Microradiography Combined with Metallography for Evaluation of Coated Particles." ORNL-3577 (1964)
- 2) Rooney, J.: "The Contact Microradiographic Inspection of Coated Nuclear Fuel Particles," TRG-Report-2059(S), (1970)
- 3) Conde J.F.G.: "The Application of X-Ray Projection Micro-Scopy to the Quality Control and Inspection of Coated Particle Fuel for the Dragon Reactor Experiment." Ispra Symposium on Electron Microprobe Analysis. EUR-1819.e (1964) p. 105.
- 4) Holliday, J., Price, M.S.T.: "Non-Destructive Testing of Coated Particle Fuels," IAEA Panel on Non-Destructive Testing of Reactor Core Components and Pressure Vessels, Vienna, Nov. 29-Dec. 3, 1971

Table 1 Coated fuel particles tested.

	Sample	Kernel		Coating Layers	Particle Diameter ( $\mu$ )
		Material	Diameter ( $\mu$ )		
(a)	70NC4	UC <sub>2</sub>	315 ~ 420	PyC - PyC	500 ~ 605
(b)	70NC2	(U/Th)O <sub>2</sub>	350 ~ 420	PyC - PyC - PyC	511 ~ 581
	70NC5	UO <sub>2</sub>	315 ~ 420		493 ~ 598
(c)	70NC3	UC <sub>2</sub>	315 ~ 420	PyC - SiC - PyC	441 ~ 546
	70FC1	UC <sub>2</sub>	400		660
(d)	70NC1	(U/Th)O <sub>2</sub>	400 ~ 630	PyC - PyC - SiC - PyC	635 ~ 765
	70FC2	UC <sub>2</sub>	400		720

Table 2 Absorption coefficient of the materials for X-rays.

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	X-Ray Absorption Coefficient						
		10 (KeV) $\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$	15 (KeV) $\mu(\text{cm}^{-1})$	20 (KeV) $\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$	20 (KeV) $\mu(\text{cm}^{-1})$	20 (KeV) $\mu/\rho(\text{cm}^2/\text{g})$	20 (KeV) $\mu(\text{cm}^{-1})$	
C	Low Density PyC	1.1	2.01	2.21	0.702	0.772	0.398	0.438
	Pellet Matrix Graphite	1.6	2.01	3.22	0.702	1.12	0.398	0.637
	High Density PyC	1.9	2.01	3.82	0.702	1.33	0.398	0.756
	SiC	3.2	22.7	72.5	8.95	28.6	3.09	9.89
	UC <sub>2</sub>	10.2	—	—	—	69.7	710	

Table 3 Absorption coefficient of the materials for thermal neutron.

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thermal Neutron						
		Micro Cross Section(barn)		Macro Cross Section(barn)				
		$\sigma_a$	$\sigma_s$	$\sigma_t$	$\Sigma_a$	$\Sigma_s$	$\Sigma_t$	
C	Low Density PyC	1.1	0.003	4.8	4.8	$16.6 \times 10^{-5}$	0.265	0.265
	Pellet Matrix Graphite	1.6	0.003	4.8	4.8	$24 \times 10^{-5}$	0.385	0.385
	High Density PyC	1.9	0.003	4.8	4.8	$28.6 \times 10^{-5}$	0.458	0.458
	SiC	3.2	0.133	6.5	6.63	0.006	0.313	0.319
	UC <sub>2</sub>	10.2	7.61	17.9	25.5	0.179	0.421	0.599

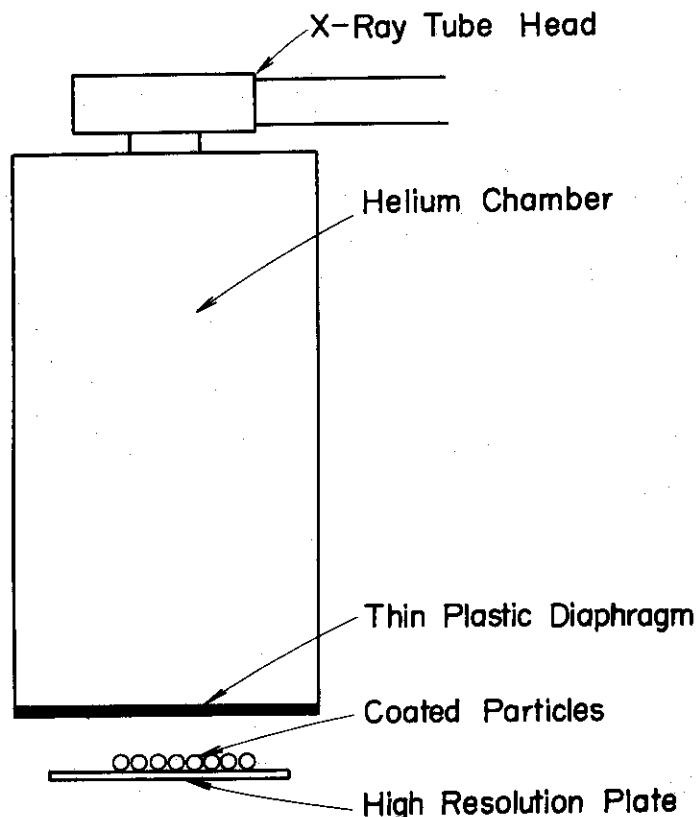


Fig. 1 Arrangement of equipment for direct microradiography.<sup>1)</sup>

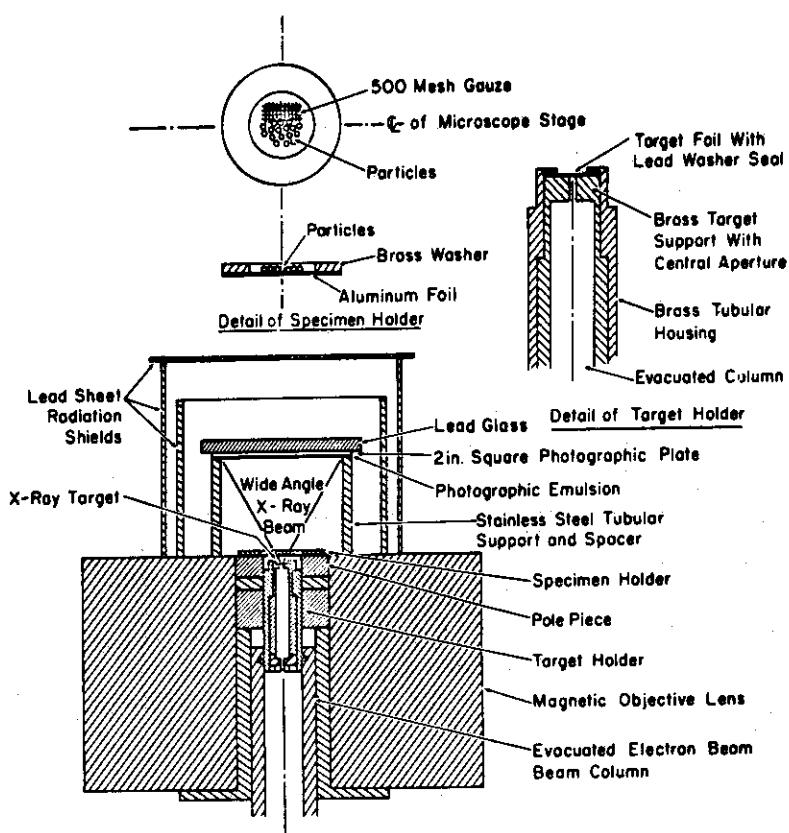


Fig. 2 Arrangement of equipment for projection microradiography.<sup>3)</sup>

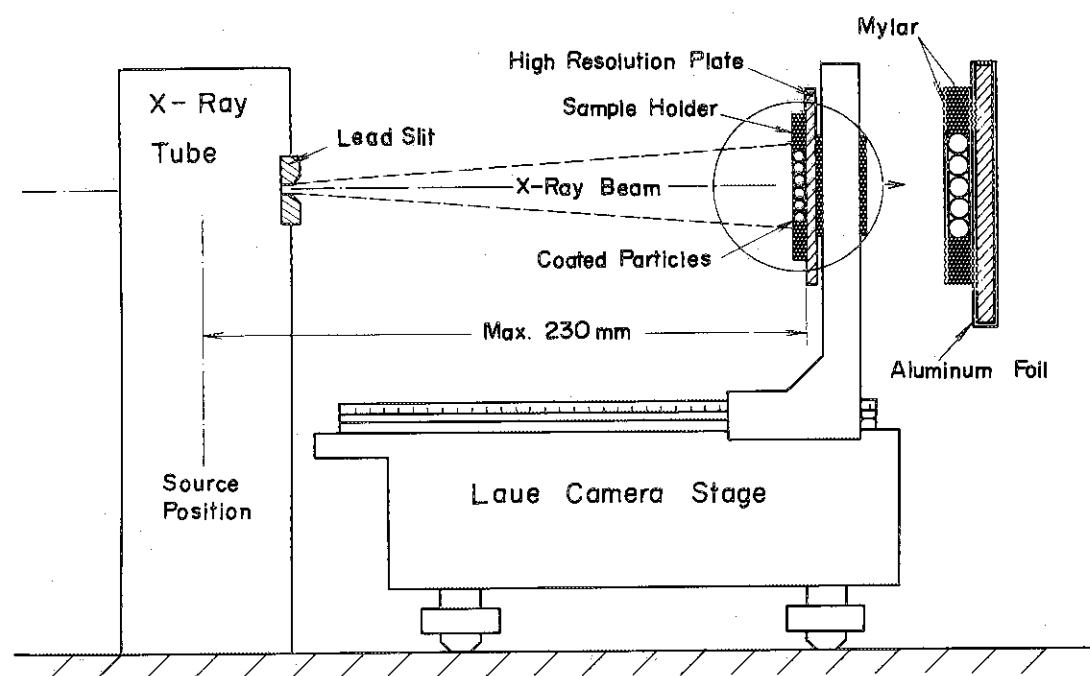


Fig. 3 Arrangement of present equipment for microradiography.

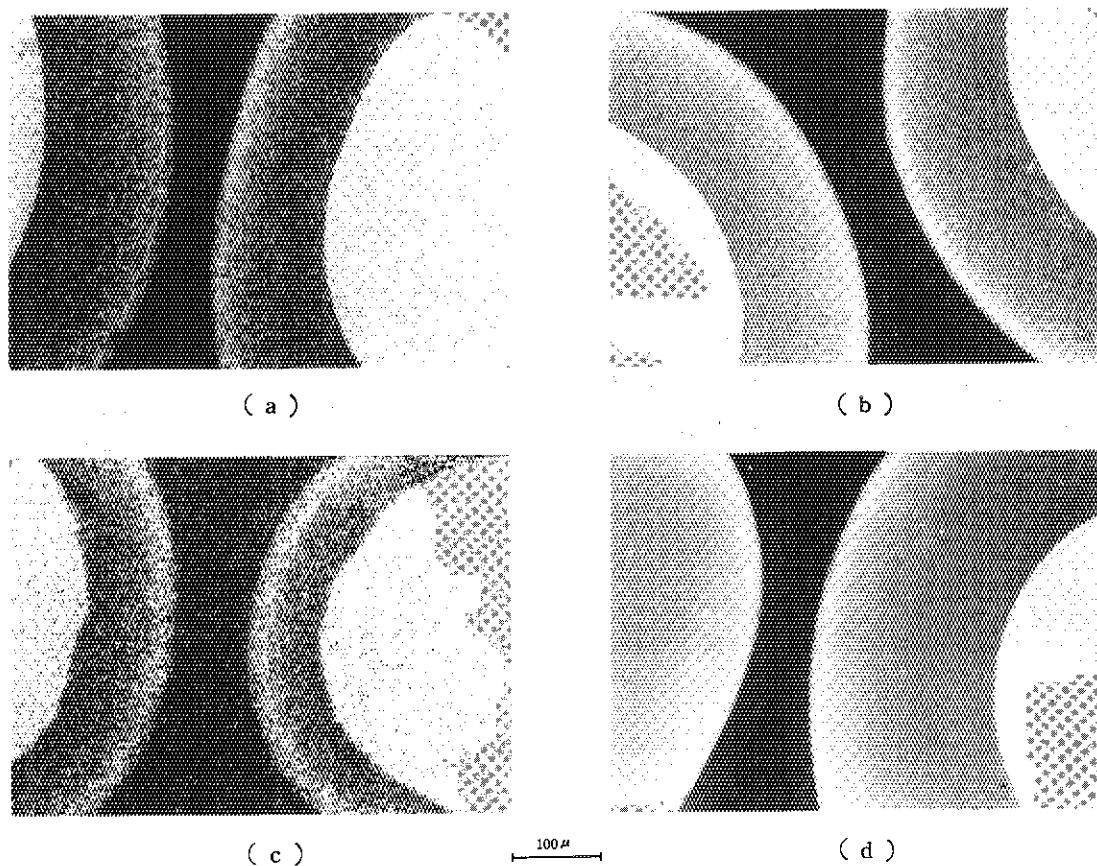


Fig. 4 Comparison of films for microradiography.  
 (a) Industrial X-ray film (Sakura RR Type)  
 (b) Fuji autoradiographic plate (ET-2F contact type)  
 (c) Polaroid Film (55 P/N)  
 (d) Kodak high resolution plate

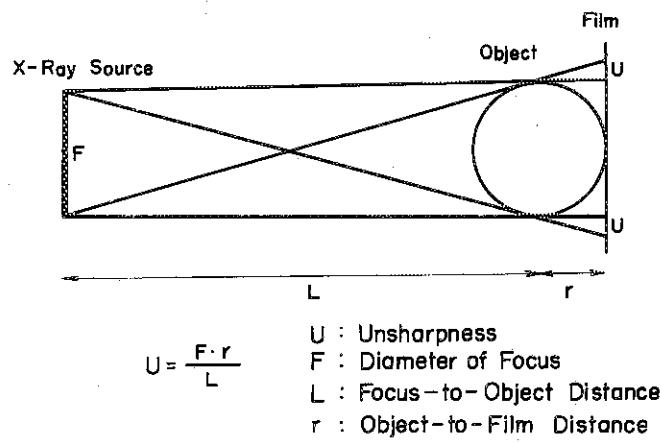


Fig. 5 Geometric unsharpness.

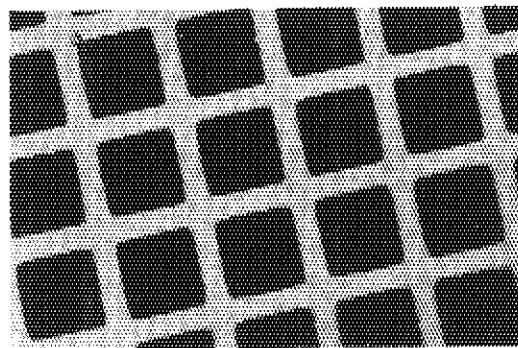


Fig. 6 Image of sheet mesh radiographed.

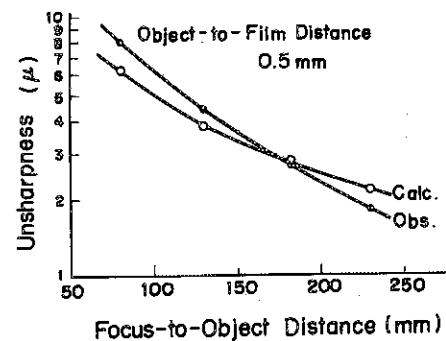


Fig. 7 Relation between unsharpness and focus-to-object distance, obtained from image of sheet mesh.

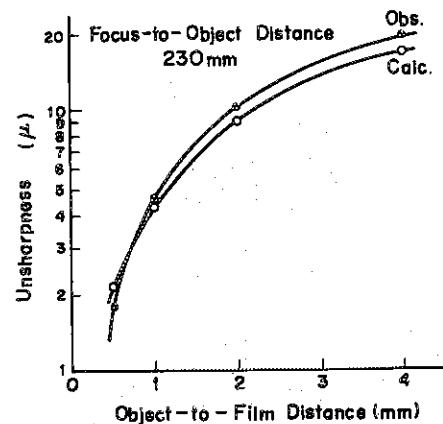


Fig. 8 Relation between unsharpness and object-to-film distance, obtained from image of sheet mesh

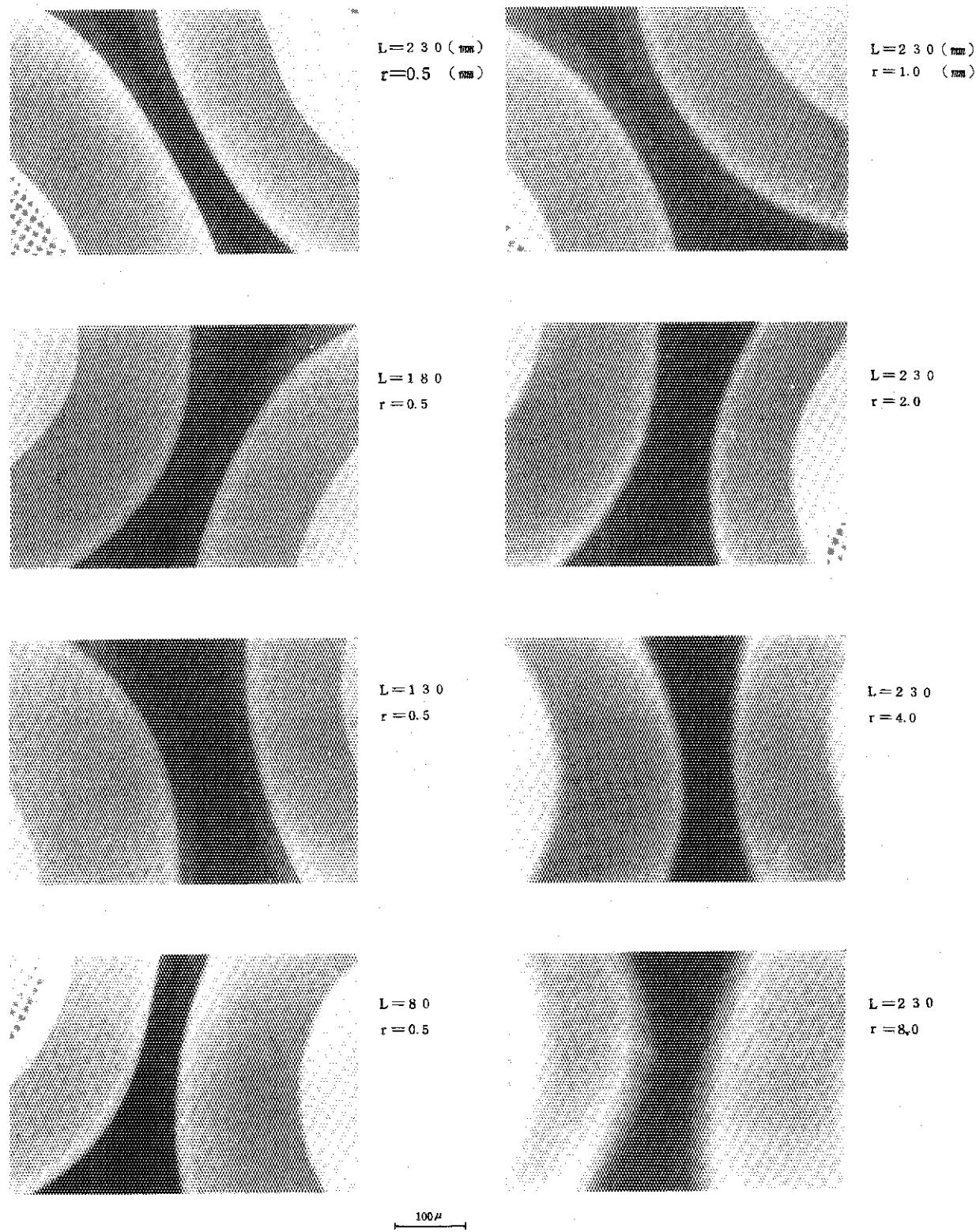


Fig. 9 Dependence of unsharpness for coated fuel particle upon geometric factors

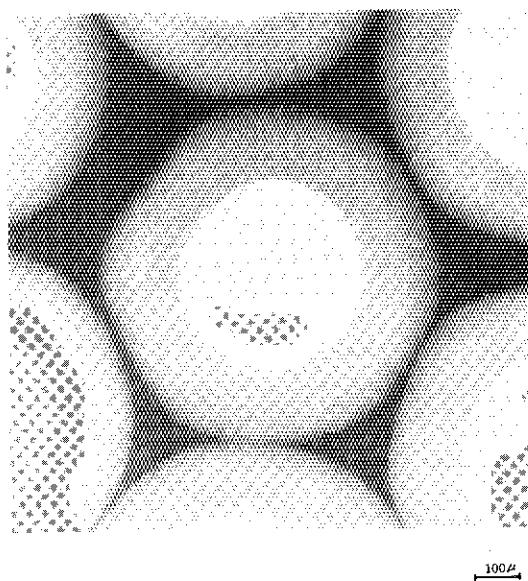


Fig.10 Microradiograph of BISO particle.

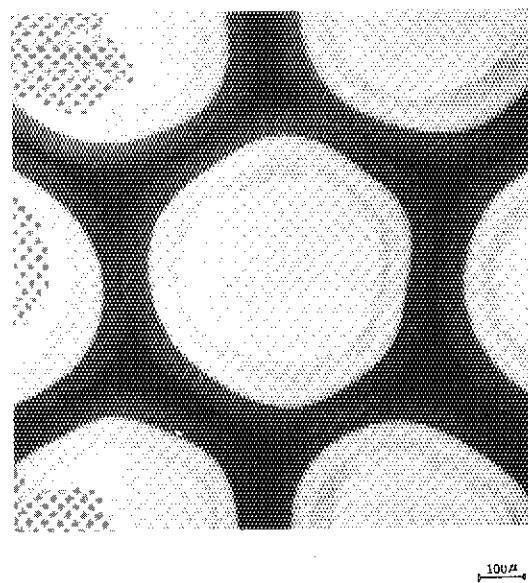
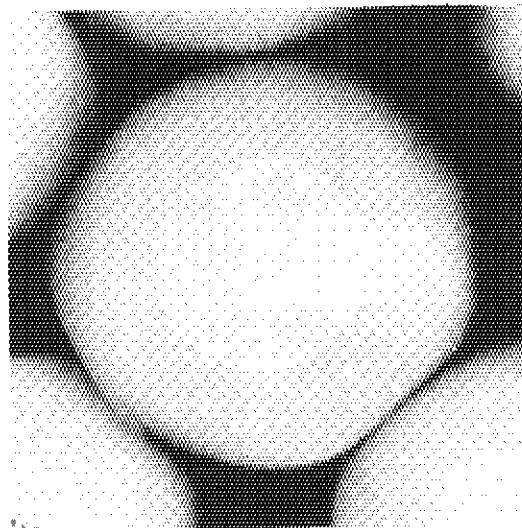
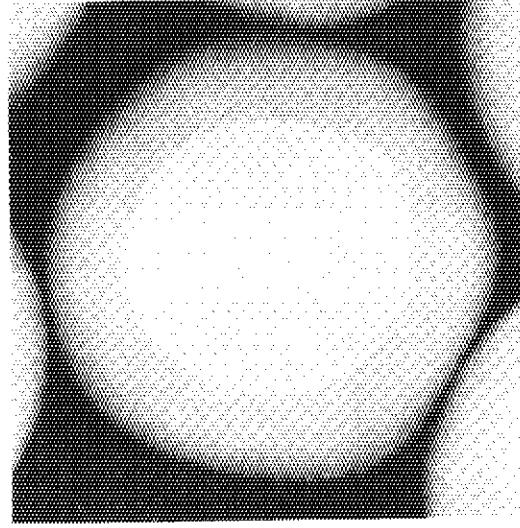


Fig.12 Microradiograph of TRISO particle.



( a )

100 $\mu$



( b )

Fig.11 Microradiograph of TRIPLEX particle.  
(a) 70NC2 (b) 70NC5

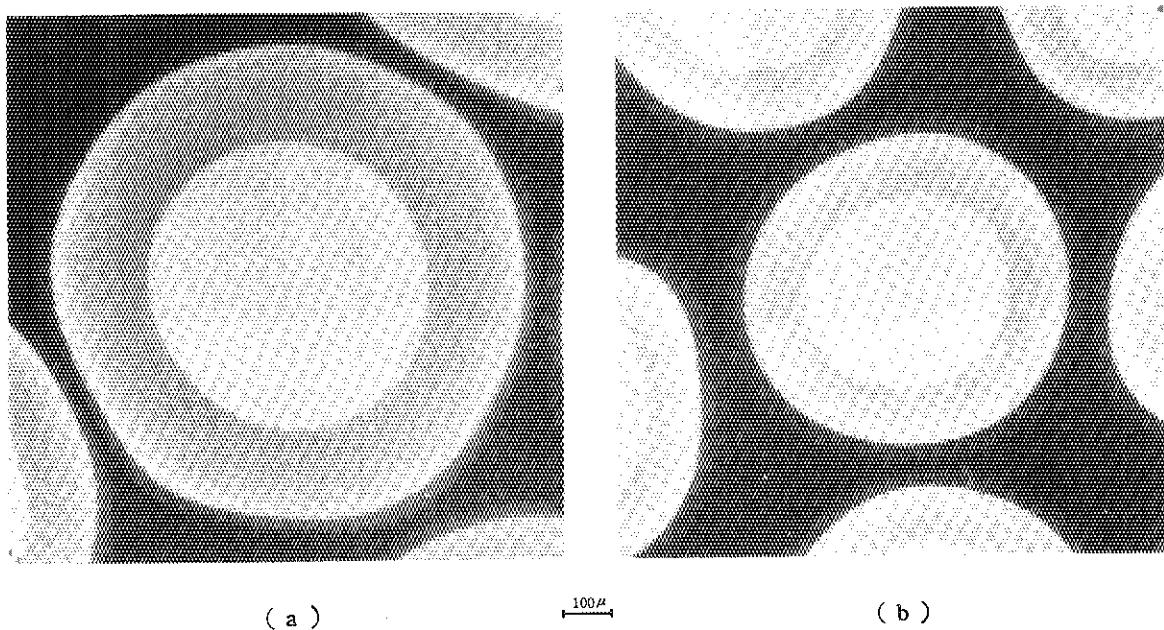


Fig.13 Microradiograph of TRISO-II particle.  
(a) 7ONCl      (b) 70FC2

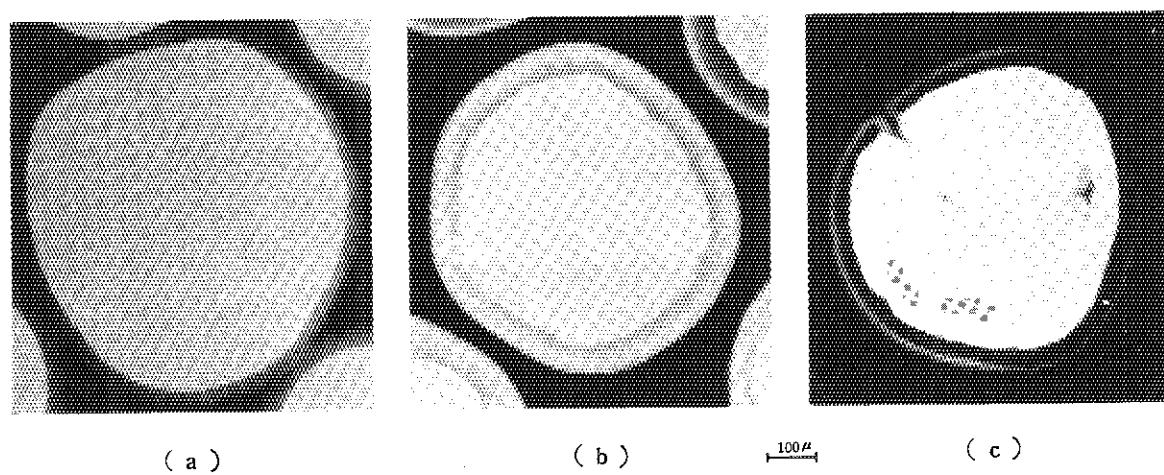


Fig.14 TRISO particles radiographed under different exposure conditions in order to discriminate between the kernel and layers. (a) Only an outer PyC layer is distinguished. (b) Kernel and SiC layers are discerned. (c) Only kernel is discerned.

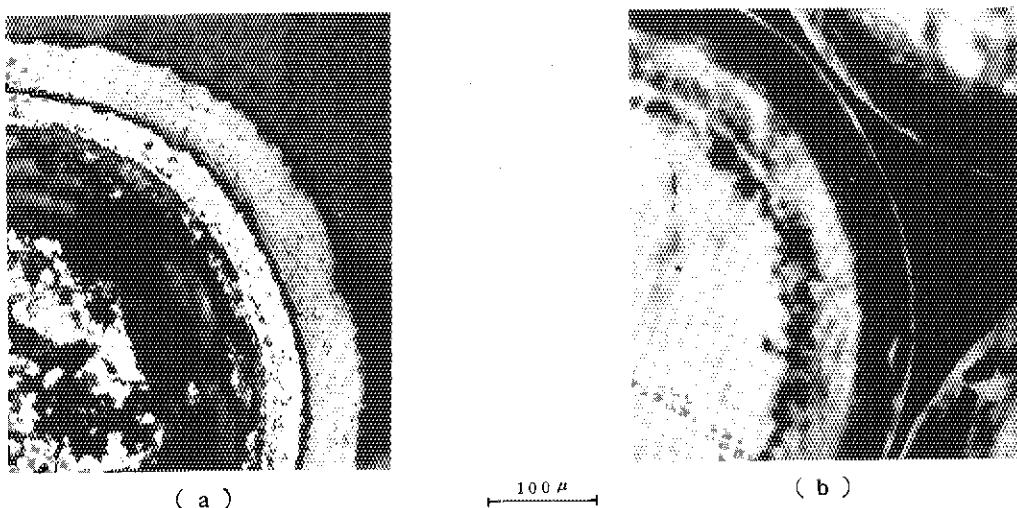


Fig.15 Metallograph and microradiograph of TRISO particle  
after isothermal heat treatment.  
(a) Metallograph                   (b) Microradiograph

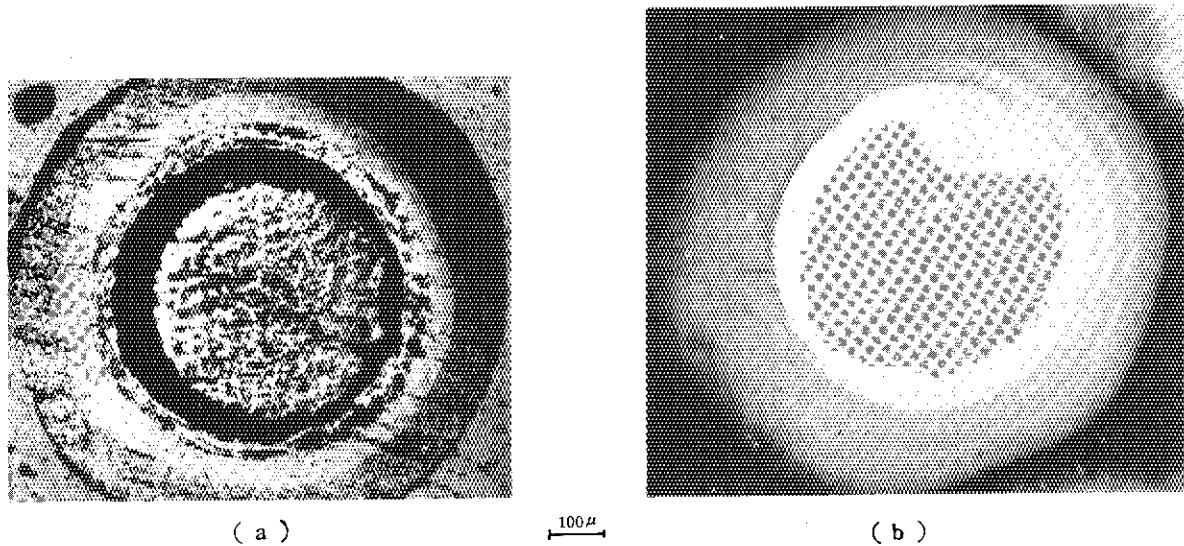


Fig.16 Metallograph and microradiograph of TRISO particle  
after temperature-gradient heating.  
(a) Mettallograph                   (b) Microradiograph

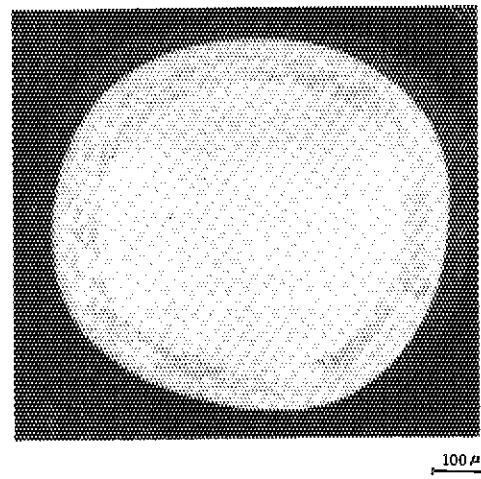


Fig.17 Microradiograph of TRISO particle irradiated up  
to 26 MWD/T.

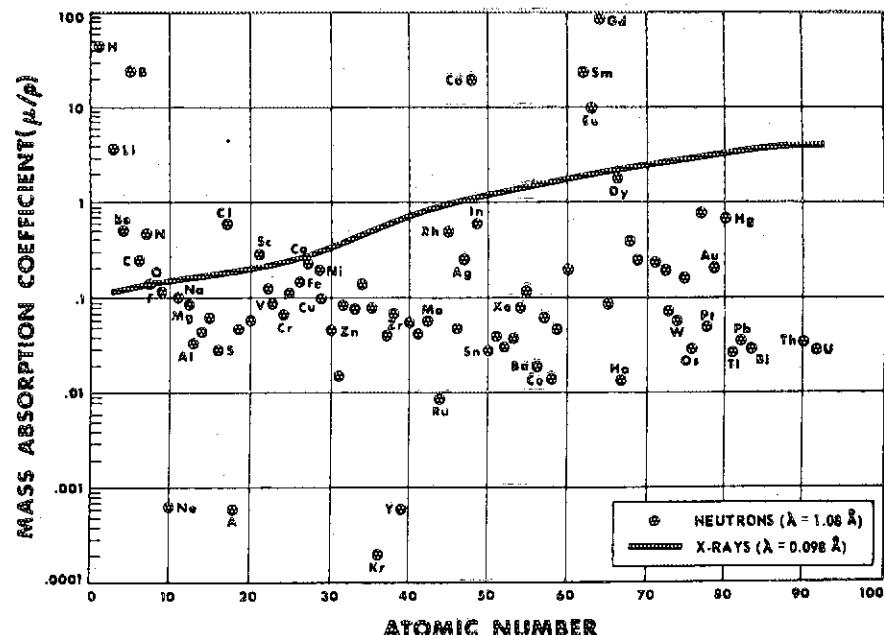
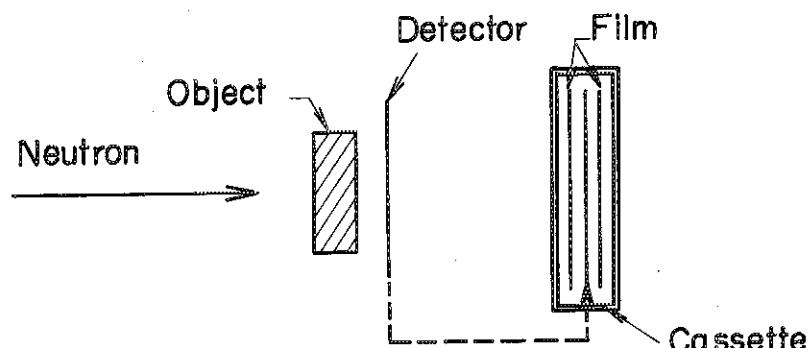


Fig.18 Comparison of mass absorption coefficients for the elements for X-rays and thermal neutrons.



#### Transfer Exposure Method

Fig.19 Transfer exposure method of neutron radiography.

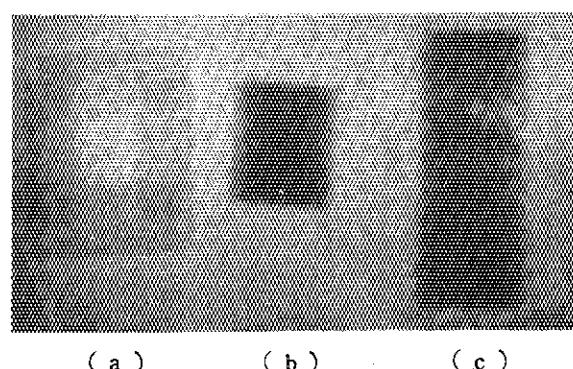


Fig.22 Neutron radiographs of TRISO particles and particle containing pellet.  
(a) Coated particle, (b) Graphite pellet containing particles, (c) Graphite pellet containing particles and vacant holes

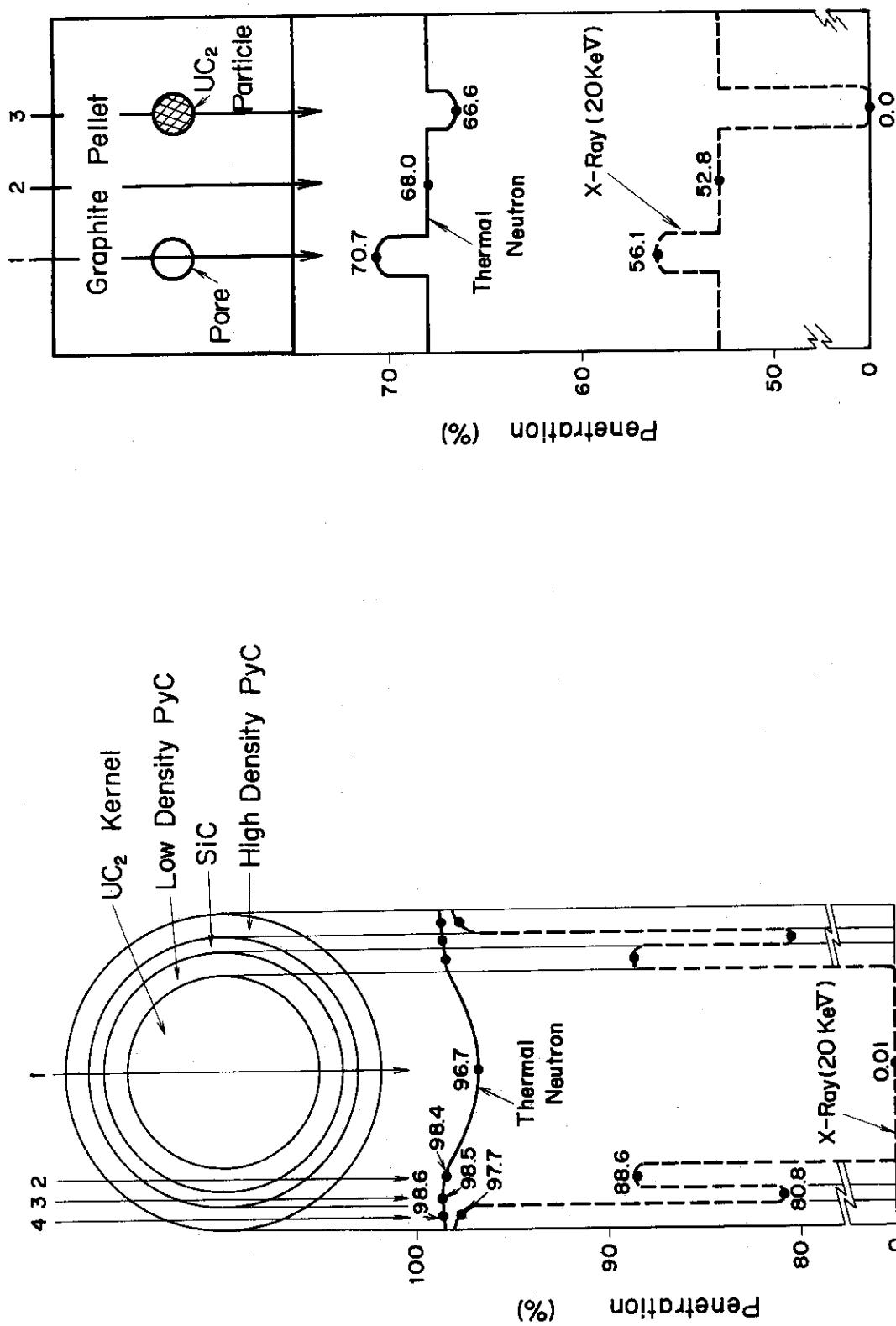


Fig.20 Percent penetration of thermal neutron and X-ray through TRISO particle.

Fig.21

Percent penetration of thermal neutron and X-ray through graphite pellet containing TRISO particle.