

JAERI-Research

JP0350022

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)

2003年1月

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

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

本レポートは、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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県
那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料
センター（〒319-1195 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
頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

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)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

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

(2002年11月16日 受理)

原研—サイクル機構共同研究として、ウラン・プルトニウム混合炭・窒化物燃料ピンを原研で作成し、高速実験炉「常陽」で照射試験を実施した。照射後試験のうちサイクル機構で実施した非破壊試験及び窒化物燃料ピンの破壊試験の結果については、既に報告されている。本報告書は、原研で実施した炭化物燃料及び窒化物燃料ピンの破壊試験の結果をまとめたものである。

Post Irradiation Examination of (U,Pu)C and (U,Pu)N Fuels for Fast Reactors
— Destructive Examination Result of the Fuel Pins —
(Joint Research)

Takashi IWAI, Kunihisa NAKAJIMA, Hironobu KIKUCHI,
Hisao NAGASHIMA⁺, Yasuhiko KIMURA⁺, Hiroki MATUI⁺ and Yasuo ARAI

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 16, 2002)

Uranium-plutonium mixed carbide and nitride fuel pins were fabricated in JAERI and irradiated at fast test reactor JOYO based on the JAERI-JNC joint research program. The results of non-destructive and destructive post irradiation examinations carried out at JNC were reported elsewhere. This report summarizes the results of destructive post irradiation examinations of (U,Pu)C and (U,Pu)N fuel pins carried out at JAERI.

Keywords: Carbide Fuel, Nitride Fuel, JOYO, Fast Reactor, PIE

+ Department of Hot Laboratories

目 次

1. はじめに	1
2. 試料	1
3. 照射後試験の概要	1
4. 照射後試験の方法及び結果	2
5. まとめ	9
謝辞	10
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Samples	1
3. Scheme of Post Irradiation Examination	1
4. Examination Method and Results	2
5. Summary	9
Acknowledgement	10
References	10

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所（以下 原研）と核燃料サイクル開発機構（以下 サイクル機構）の共同研究「高速炉用炭・窒化物燃料の基礎照射試験」として、高速炉（実験炉「常陽」）を用いたウラン・プルトニウム混合炭・窒化物燃料の照射試験を実施した。照射条件等を表1.1に示す。炭化物燃料1本、窒化物燃料はペレットの直径の異なる2本のピンを照射した。燃焼度は約40GWd/t（4.6～4.7%FIMA）に達した。

燃料ピンの製作及び照射後試験のうち非破壊試験の結果については、すでに報告されている^{1,2)}。破壊試験のうち、窒化物燃料については原研とサイクル機構の双方で、また炭化物燃料については原研で実施した。サイクル機構で実施した窒化物燃料の破壊試験結果については、既に報告している³⁾。

本報告は、破壊試験のうち原研で実施した炭化物燃料及び窒化物燃料の結果について報告するものである。

2. 試料

照射後の試料の粗切断はサイクル機構大洗工学センターで実施された。窒化物燃料は原研及びサイクル機構で照射後試験を実施するため、いくつかに分割されたのち、原研担当分を原研に搬入した。炭化物燃料についてはインシュレータペレット（UC）の外側で切断し、（U,Pu）Cミート部及びUCがすべて含まれる形で原研に搬入した。

窒化物燃料の切断図を図2.1に、炭化物燃料の切断図を図2.2に示す。ペレット直径の小さな窒化物燃料Ⅰには『A』を、ペレット直径の大きい窒化物燃料Ⅱには『B』を、炭化物燃料には『C』を頭にして、試料番号を付けた。窒化物燃料については、図2.1で「原研」と記された部分が原研に搬入された試料であるが、図中の試験項目は主な項目を示すものであり、ひとつの試料がいくつかの試験に供される場合がある。

試料の採取位置と照射条件の関係を、表2.1から表2.3に示す。線出力及び温度の評価は、サイクル機構で行われた評価（参考文献2）の表2.4）を参考にして推定した。

3. 照射後試験の概要

3.1 概要

原研における破壊試験は、東海研究所燃料試験施設の α ・ γ セルを中心に実施した。照射後試験の項目、方法などについては、予め、「常陽照射ウラン・プルトニウム混合炭・窒化物燃料照射後試験計画書」を作成し、それに従って照射後試験を行った。試料の切断、埋め込み等の作業は、セル内をアルゴンガス雰囲気にして行った。

3.2 試験項目

破壊試験は、「試料の細切断」から「被覆管結晶粒度測定」に至る20項目にわたっている。表3.1に破壊試験項目リストを示す。なお、これらに示す試験項目のうち試験番号⑯「燃焼率測定（マイクロサンプリング）」については、試験が未実施のため、その結果については本報告書に記載されていない。

4. 照射後試験の方法及び結果

4.1 燃料ピンの細切断

脱ミートする部分と樹脂注入する部分を分離するために切断した。切断は、アルゴン雰囲気における乾式で行った。

4.2 樹脂注入

金相試験等に供する試料については、ペレットと被覆管の空隙にポリエステル樹脂を注入し固化させて固定した。

4.3 細切断

樹脂注入した部分について、径方向及び軸方向の切断を実施した。

4.4 脱ミート

密度測定、X線回折及び被覆管の試験のため、被覆管から燃料ペレットを取り出した。燃料ペレットと被覆管が密着しており、押し出し法では脱ミートが出来なかつた。このため、密度測定用の試料については精密切断機を用いて被覆管の背割り切断を行い、ペレットを回収した。

なお、被覆管観察用の試料（CBC、A3BC、B3-2AC）については、被覆管の周方法全体を確保するため、燃料ピンを厚さ3mm程度に薄く切断し、ペレットを押し出して被覆管を回収した。

密度測定用に回収したペレット及び背割りした被覆管の内面について、写真撮影を実施した。

回収したペレットの写真を写真4.4.1に示す。おおむね、1個のペレットが数個に割れた状態で回収されたが、窒化物Ⅱのようにペレットが1個丸ごと回収された例もある。このことから、炭化物及び窒化物とともに照射により大きな組織変化が生じていないことが分かる。

被覆管の内面の写真を写真4.4.2に示す。ペレットの端面境界やクラックが転写された様子が見られ、その部分では幾つかの変形や何らかの付着物の可能性がある。窒化物Ⅰは窒化物Ⅱに比べてペレット直径が小さい、つまりペレットと被覆管の初期ギャップが広いにもかかわらず、被覆管内面の変色が強かった。これは、非破壊試験報告書²⁾で報告されているように、窒化物Ⅰのみで被覆管の歪な変形（オーバリティー）が観察されたことと併せて考慮すると、局所的にペレットと被覆管の強い接触を生じた結果である可能性が指摘できる。炭化物燃料ピンの被覆管の内面は概ね金属光沢を維持していた。

4.5 燃料ペレットの密度測定

回収されたペレット片を用いて密度測定を行った。測定方法は、水銀ピクノメータ法で実施した。

測定結果を表4.5.1に示す。照射前の密度は、寸法・重量法により求めた値である。どの試料においても、約5~6%T.D.の密度低下が見られる。体積スエリング率に換算すると約6~7%である。これを燃焼度当りのスエリング率に換算すると、1.3~1.6%/%FIMAとなる。この値は、これまでJMTR等を用いて行った照射試験結果^{4~8)}に比べて1.5~2倍高い。固体状FPによるスエリングは0.5~0.6%

/%FIMA と推定され^{9, 10)}、今回のスエリングはその2倍以上に達することから、それ以外の要因、照射によるクラック・リロケーションや FP ガスバブルの蓄積に起因するものが主であることが示唆される。

4.6 燃料ペレットの気孔率測定

気孔率を考慮する場合に、ペレット内を「マトリクス、閉気孔、開気孔」の3つに分ける。水銀ピクノメータ法による測定結果は、これらすべてを含む密度であり、寸法・重量法による一般的な密度に相当する。開気孔に侵入する置換液を用いた測定では「マトリクス、閉気孔」による密度が得られる。置換液にはm-キシレンを用いた。このふたつの結果から、ペレット内の開気孔率及び閉気孔率を求めた。その結果を表4.6.1に示す。どの燃料も照射後においても開気孔率が2~4%非常に低いことが判明した。これは照射前の燃料ペレットの性状に起因するものである。熱伝導性の良いことから燃料温度がそれほど高くないこと及び放出経路となる開気孔が少ないとから、FP ガス放出率が2~5%と低かったものと考えられる。

4.7 燃料ペレットのX線回折

相同定及び格子定数測定を目的に、燃料ペレットの X 線回折を実施した。燃料ペレットをアクリル管に埋め込み、表面を研磨して測定用試料を作成した。測定範囲は、相同定として 2θ (θ : ブラッグ角) $20\text{--}80^\circ$ を、格子定数測定として $80\text{--}130^\circ$ とした。

図4.7.1に $20\text{--}80^\circ$ の測定結果を示す。照射前の相状態(炭化物: マトリクス相は NaCl型+セスキカーバイト相、窒化物: NaCl型単相)が照射後も保たれており、それぞれの燃料で FP の析出等による相は認められなかった。これは、FP の存在量が少ないため、仮にマトリクス以外の相が析出していながら X 線回折では検出できないと考えられる。窒化物燃料については照射後の測定で酸化物のピークは確認できない。また、炭化物燃料では 28° 付近に酸化物と思われるピークが認められるが、このピークの高さは照射前と変化していない。窒化物燃料IIの回折パターンで見られる $2\theta 35^\circ$ 付近のピークの原因は不明である。

表4.7.1に、 $80\text{--}130^\circ$ の測定をもとに、格子定数を計算した結果を照射前の値と合わせて示す。窒化物燃料については、照射後は照射前に比べて、格子定数は 0.21% 及び 0.15% の増加を示し、炭化物燃料では 0.05% の減少となった。照射による格子定数の増減要因としては、以下のことが考えられる。

- (1) マトリクスへの固体 FP 核種の固溶
- (2) 照射中における照射損傷の蓄積
- (3) 冷却中あるいは保管中における自己照射損傷の蓄積

窒化物燃料の格子定数は、固溶する FP 元素により増減するが、全体として相互に打消し合い、大きな変化を示さないことが指摘されている^{8, 11~13)}。照射損傷については、X 線回折測定をした燃料中心付近では照射中は 1000°C を超えているので、欠陥は照射中に回復しているものと推察される。自己照射損傷による格子膨張については、PuN の α 線による自己照射損傷による測定結果が報告されており、室温における飽和状態で 0.25% の格子定数増加が認められている¹⁴⁾。今回窒化物燃料で観察され

た格子定数増加は 0.15 から 0.21% であり、これに対しては自己照射損傷による寄与が最も大きいと考えられる。照射後の自己照射損傷については、Pu や Am による寄与より、照射で生成した Cm からの α 線によるものが大きいと評価される。

一方、炭化物燃料では、FP 元素の固溶により格子定数は減少することが予想されている^{12, 13)}。今回は、自己照射損傷による格子定数の増加より FP 元素の固溶による減少が上回り、トータルとして減少したものと考えられる。

このような格子定数変化の原因を詳細に明らかにするためには、照射後試験での加熱焼却試験による照射損傷回復挙動を調べることが必要である。

4.8 金相前処理

細切断後の試料については、金相試験等の試験に供するため、エポキシ樹脂を用いた埋め込み、研磨、エッティング等を実施した。研磨は、面出し及び粗研磨については耐水研磨紙、仕上げ研磨ではバフ及びダイヤモンドペーストを用いて実施した。エッティングは、炭化物燃料については（硝酸+水+酢酸）、窒化物燃料については（乳酸+硝酸+フッ酸）、被覆管については（フッ酸+塩酸+硝酸）を用いて実施した。

4.9 モザイク写真撮影

研磨した試料について、写真撮影を実施し、モザイク写真とした。

炭化物燃料及び窒化物燃料の横断面及び縦断面のモザイク写真を、写真 4.9.1 から写真 4.9.3 に示す。

いずれの燃料ペレットにおいても、クラックの発生が認められる。これらの試料の照射中の中心温度は、表 2.1 から表 2.3 に示したように、最高で、炭化物燃料で 1490°C、窒化物燃料 I で 1800°C、窒化物燃料 II で 1570°C に達していたと推定された。いずれの縦断面写真においても、ペレットの端面境界がはっきりしている。窒化物燃料 I では、ペレットの端面境界の中心部に「隙間」が見られる。これは、他の燃料に比べてペレットと被覆管のギャップを広くしたことから不規則なクラック・リロケーションを起こした結果であると推定される。どの燃料においても中心部はエッティングが強くかかりやすく、何らかの組織変化が生じていることが予想される。炭化物燃料及び窒化物燃料 II では、「島状」の模様が見られるが、窒化物燃料 I では顕著ではない。この「島状」の模様はこれまでの JMTR 照射燃料でも見られており、燃料ペレット製造時にポアフォーマを添加した場合に共通している。照射による変化ではなく、ポアフォーマの混合に伴う製造上の状態が照射による焼きしまりで顕在化したと考えられる。

4.10 燃料ペレット気孔分布測定

研磨した試料を写真撮影し、径方向の気孔分布を測定した。それぞれの燃料について、各 2 試料ずつ測定した。代表的な写真を、写真 4.10.1 から写真 4.10.3 に示す。各試料について $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ の範囲を画像解析した結果を、表 4.10.1 に示す。

写真を見ると、炭化物燃料では外周部及び中間部は同様であり、中心部は気孔のサイズが多くなっていることが定性的にわかる。窒化物 II も同様である。一方、窒化物 I では、中間部すでに気孔のサイ

ズの拡大が見られる。窒化物燃料の中心部は、かなりポーラスになっており、画像解析を実施する上で一部困難を生じた。

表 4.10.1 から、上記の写真からの定性的な結果を定量的に見ることができる。炭化物燃料では、外周部と中間部はほぼ同様であるが、中心部では気孔の個数は減少するが、サイズは大きくなる。一方、窒化物燃料では、外周部に比べて中間部すでに気孔のサイズが大きくなる傾向を示している。中心部に関しては、個数が著しく減少する。平均気孔面積や気孔率が中心部で減少しているように見えるが、これは結果を処理する際、極端に大きな「気孔」を除外しているためであり、参考データ扱いとする。なお、サイクル機構で行われた試験結果では、全気孔率及び円相当径 $10 \mu\text{m}$ 以上の気孔を除外した気孔率とも、中心部において外周部、中間部に比較して有意に増加する傾向を示しており、上記の定性的な結果を裏付けるものである。

4.11 燃料ペレット金相観察

研磨した試料をエッチングし、組織変化を調べるために金相観察を行った。各燃料についてそれぞれ 3 試料ずつ観察した。それぞれの燃料で試料による差異は小さいので、代表的な例を写真 4.11.1 から写真 4.11.3 に示す。これらの試料の照射中の中心温度は、表 2.1 から表 2.3 に示したように、炭化物燃料で 1470°C から 1490°C 、窒化物燃料 I で 1670°C から 1800°C 、窒化物燃料 II で 1440°C から 1570°C に達していたと推定された。

写真 4.11.1 に示す炭化物燃料の外周部では、白く見える第二相（セスキカーバイド）が観察されている。中間部では第二相の割合が減少し、中心部では見られなくなる。これは、照射下における温度勾配により炭素が中心部から外周部に移行したことによる現象であると判断できる。

窒化物燃料の中心部はポーラスな組織であり、結晶粒界等が一部鮮明でない。

4.12 燃料ペレット結晶粒度測定

金相写真をもとに、画像解析により燃料ペレットの結晶粒度を測定した結果を、表 4.12.1 に示す。

どの燃料においても、平均粒径は外周部、中間部及び中心部で差異はないが、最大粒径は中心部で大きくなっている。これは、窒化物燃料の平均粒径が $3 - 4 \mu\text{m}$ で、平均粒径が外周部、中間部及び中心部で差がないとするサイクル機構の試験結果と一致するが、照射中の温度が高い中心部では結晶粒径の増大が一部で起きていると判断できる。

4.13 マイクロガンマ線スキャニング

燃料ペレットの横断面についてマイクロガンマ線スキャニングを行い、径方向燃焼度分布や FP 元素の挙動を調べた。測定に使用した試料のマクロ写真を、写真 4.13.1 に示す。

各試料の直径方向について 6 方向を測定した。測定核種は予め実施した中心近くのスペクトル分析から、Rh106、Cs137、Pr144、Zr95、Cs134 とした。6 方向の観察結果から、燃料ピンの方向依存性は認められず、全方向からほぼ均一な照射を受けたことが判明した。このため、各試料について、 $0 - 180^{\circ}$

方向の測定結果を代表例として、図 4.13.1 から図 4.13.6 に示す。

Pr144 及び Zr95 のデータはカウント数が少ないためばらついているが、Rh106 と合わせて、ペレット内の分布は比較的平坦である。それに比べて、Cs は明かに中心部でへこんでいる。これらの結果は、サイクル機構における X 線微小分析³⁾の観察結果と一致している。サイクル機構における非破壊試験²⁾の燃料ピン軸方向スキャニング結果でも窒化物燃料 II では明らかに Cs の軸方向移動が観察され、トモグラフィー像では中心部で存在が少ないと指摘されている。同様の現象は JMTR 照射試験結果においても観察されており、温度勾配を駆動力にして Cs の移行が生じているものと判断される。

4.14 オートラジオグラフ

燃料ペレットの横断面について、 α 及び $\beta\gamma$ オートラジオグラフを行い、燃料中のアクチニド及び FP 元素の挙動を観察した。結果を写真 4.14.1 に示す。

α オートラジオグラフでは、各試料とも全体的には平坦である。ここで観察されている α 核種として主な寄与は Cm242 によるものである。Cm242 は、主に U238、Pu239、Pu240、Pu241 等の中性子捕獲によって生成する核種であるので、その分布は U、Pu の分布を示していると見ることができる。どの試料もほぼ平坦な分布を示しているが、より詳細に α オートラジオグラフを観察すると、窒化物燃料 I では、外周部の一部で α の強い部分が見られる。これは、サイクル機構の破壊試験結果³⁾で報告されているように、燃料ペレットと被覆管のギャップに「プルトニウムの染み出し」のような現象が生じていることに起因する可能性がある。炭化物燃料及び窒化物燃料 II では、写真 4.9.1 及び写真 4.9.3 に見られるのと同様な島状の模様が観察される。

$\beta\gamma$ オートラジオグラフは、主に FP 元素の分布を表している。いずれの燃料においてもクラック部分の強度が高いが、これは深さ方向からの寄与が存在するからであり、クラック部に FP が集積していることにすべて起因すると見ることは妥当ではない。全体的に微小な濃淡の差が見られるが、試料全体で見ると大きな変化ではない。

4.15 X 線微小分析

燃料ペレット内におけるアクチニド及び FP 元素の挙動を調べるため、SEM 観察及び特性 X 線による元素分析を実施した。測定に使用した試料のマクロ写真を、写真 4.15.1 に示す。これらの試料の照射中の中心温度及び被覆管内周部温度は、表 2.1 から表 2.3 に示したように、最高で、炭化物燃料で 1480°C 及び 630°C、窒化物燃料 I で 1690°C 及び 480°C、窒化物燃料 II で 1450°C 及び 500°C に達していたと推定された。

炭化物燃料の観察結果のうち、燃料ペレット径方向元素分布を図 4.15.1 から図 4.15.3 に示す。選択した元素は、ウラン、プルトニウムのほか、ネオジウム、モリブデン、ルテニウム、ジルコニウム、テルル、セシウム及びキセノンである。プルトニウムは中心で若干減少しているように見えるのに対して、ウランは径方向全体に平坦である。プルトニウムの分布をペレット中の核分裂の割合に比例していると仮定すると、ほぼ同様の分布と言える。今回の「常陽」照射は高速中性子照射場であり、これらの結果は、これまでの熱中性子照射場である JMTR 照射^{15~17)}では熱中性子分布が中心部で大きくへこむこ

とに伴い、プルトニウムは外周部で少なく FP 元素は中心部で少ない状況とは異なっている。キセノンは明らかに中心部で存在量が少ない結果を示しているが、これは次のように考えることができる。金相試験や X 線微小分析の SEM 像（写真 4.15.2）に見られるように、中心部には照射により大きな気孔を含むポーラスな組織が形成された。この測定で観察されているキセノンは燃料マトリクスに残留している量（サイクル機構の評価では約 80%）であり、希ガスであるキセノンの一部は照射中に粒界の気孔に移行しているためである。径方向分布測定で、ネオジウム、ルテニウム、ジルコニウム、テルル、セシウムでは局所的なピークが見られる。これらのうち、存在箇所が特定できたネオジウム、ルテニウム、セシウムについて、SEM 像及び特性 X 線像を合わせて写真 4.15.3 に示す。析出物がわずか数ミクロンの大きさであり、他の元素との共存関係等については確認できなかった。炭化物燃料では、燃料の炭素が被覆管に移行し、浸炭や反応などの FCCI (Fuel Clad Chemical Interaction) の生じる可能性が指摘されているため、燃料と被覆管の境界を観察した。燃料ペレット外周の一部で、反応層と考えられる部分が見つかった。写真 4.15.4 に境界の SEM 像及び特性 X 線像を示す。反応層の幅は数ミクロンである。反応には主にウランとニッケルが関与し、鉄とプルトニウムも若干加わっている。しかし、反応は局所的で、幅も数ミクロンと狭いので、燃料ピンの健全性に何ら悪影響を与えるものではないと判断できる。

窒化物燃料 I の観察結果のうち、外周部、中間部及び中心部の SEM 像を写真 4.15.5 に示す。金相試験による観察結果と同様に、中心部では気孔が多数形成されている。この観察では析出物は認められない。図 4.15.4 から図 4.15.6 に示した径方向元素分布は炭化物燃料と大差はない。FP 元素のうちはつきりと析出を捕らえることのできたモリブデン、セシウム及びルテニウムについて、SEM 像と特性 X 線像を写真 4.15.6 に示す。モリブデンは窒化物燃料中では他の金属との化合物や窒化物を形成せず、テクネチウム等と共に金属状態で存在すると考えられている。PuN に対するモリブデンの固溶度は 0.1wt% 以下とわずかであり¹³⁾、今回のように析出していることは過去に報告されている。セシウムに関しては、見つけた析出はごく小さいものであった。セシウムは単独あるいはよう素やテルルと化合物を形成するとされているが¹⁸⁾、今回の観察では共存元素の確定はできなかった。ルテニウムは、パラジウムなどと同じ挙動を取り、アクチノイドと金属間化合物、(U,Pu)(Pd,Ru,Rh)₃ を形成すると考えられてきた¹⁸⁾。今回の析出もこのような形態のものであると考えられる。サイクル機構における破壊検査³⁾ 及び原研における α オートラジオグラフで、ペレットと被覆管のギャップに高プルトニウム部分が見られているが、当該試料ではそのような箇所は見られなかった。

窒化物燃料 II の観察結果のうち、外周部、中間部及び中心部の SEM 像を写真 4.15.7 に示す。図 4.15.7 から図 4.15.9 に示す径方向元素分布は、窒化物 I と大差はない。中心部で大きな気孔が多数形成されている。FP 元素のうち、析出部を確認できたルテニウムについて、SEM 像及び特性 X 線像を写真 4.15.8 に示す。ポアフォーマにより形成された孔のうちに存在しており、ウラン及びプルトニウムと共に存在していると考えられる。ペレットと被覆管のギャップの一部に反応層と思われる部分が観察された。その部分の SEM 像及び特性 X 線像を写真 4.15.9 に示す。幅 2~3 μm と狭いものであるが、主としてウランとニッケルからなる反応層である。JMTR におけるこれまでの窒化物燃料の照射結果¹¹⁾ でも、幅は狭いが反応層は見られており、熱力学的には反応の可能性はある。しかし、今回の結果は、わずかな幅で

円周の一部に限定されているので燃料ピンの健全性には問題がないと判断できる。

4.16 燃焼率測定（マイクロサンプリング）

燃料ペレットから微小試料を複数サンプリングし、局所的な燃焼度測定評価に役立てる。

4.17 被覆管金相観察

燃料と被覆管の化学的相互作用を評価するため、被覆管の金相観察を行った。参考のために、外周部、中間部及び内周部を合わせて、写真 4.17.1 から写真 4.17.4 に示す。

炭化物燃料については、浸炭の兆候は見られない。いずれの燃料においても、被覆管の内周部に数ミクロン程度の幅で、エッティングに鋭敏な部分が見られるが、これまでの JMTR 照射燃料でも見られた現象であり、燃料ピンの健全性の観点からは全く問題がないと判断できる。

4.18 被覆管硬さ測定

被覆管の浸炭、窒化等の情報を得るために、被覆管の硬さを測定した。硬さは、マイクロビックカース硬度計により測定した。測定は内周から外周に向けて 4 方向について実施し、試験荷重は 100 g、荷重保持時間は 15 秒である。

測定結果の代表例として、炭化物燃料の被覆管（試料番号 CBC）の結果を、表 4.18.1 に示す。測定点の番号は内周から外周に向けて 1、2・・・9 とした。測定後の圧痕を写真 4.18.1 に示す。測定されたビックカース硬度は、特定の位置あるいは方向で特異な値を示しておらず、この測定においては有意な差は見られなかった。窒化物燃料の被覆管においても同様に、場所による有意な差は認められなかった。

4.19 被覆管腐食厚さ測定

被覆管金相写真を用いて、腐食厚さを測定した。3 試料とも、腐食による減肉は認められない。

4.20 被覆管結晶粒度測定

照射による変化の有無を調べるため、被覆管の結晶粒度を測定した。測定結果を表 4.20.1 に示す。どの燃料ピンの被覆管とも、内周部と外周部で平均粒径及び最大粒径に有意な差異はない。

5. まとめ

高速実験炉「常陽」で燃焼度約 40GW d/t まで照射したウラン・プルトニウム混合炭化物燃料及び混合窒化物燃料について破壊試験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 燃料ペレットを被覆管から取り出しが、ペレット一個が数個のブロックに分かれた状態で回収され、窒化物燃料Ⅱでは丸ごと回収された。このことから、ポアフォーマを使用して製造した熱安定型ペレットの照射に伴う組織安定性が確認された。
- (2) 燃料ペレットの密度測定の結果、燃焼度当りのスエリング率は 1.3~1.6%/%FIMA であった。この値は固体状 FP によるスエリング率を大きく上回ることから、照射によるクラック・リロケーションや FP ガスバブルの蓄積に起因するものが主であることが示唆された。
- (3) 燃料ペレットの開気孔率は照射後においても 2~4% と低く、のことと熱伝導性が優れているため照射中の燃料温度が低いことから FP ガス放出率が 2~5% と低く抑えられたと考えられる。
- (4) 燃料ペレットの X 線回折を実施した結果、炭化物燃料では格子定数の低下が、窒化物燃料では上昇が見られた。炭化物燃料で見られた低下はマトリクスに FP 元素が固溶したことによる低下が自己照射損傷による増加を上回ったことによるものであり、窒化物燃料で見られた増加は主として自己照射損傷による増加に起因している。
- (5) 燃料ペレットの気孔分布は、中心部で気孔の成長が観測され、ポーラスな組織を形成していた。
- (6) 燃料ペレットの金相では、炭化物燃料中の第 2 相（セスキカーバイト）が中心部では消失していることが判明した。これは照射中の温度勾配により炭素が中心部から外周部に移行したことを示している。
- (7) 燃料ペレットの結晶粒度については、平均粒径はペレット全体で大差ないが、最大粒径は中心部で増大していた。温度の高い中心部の一部で結晶粒の成長が起きていることが示唆された。
- (8) 燃料ペレットのマイクロガンマスキャニングでは、FP 元素のうちセシウムが中心部で減少していた。これは温度勾配によりセシウムの移行が生じたことを示している。他の固体状 FP の径方向分布については、プルトニウムの分布に対応していた。
- (9) 燃料ペレットのオートラジオグラフでは、窒化物燃料Ⅰ の燃料と被覆管のギャップの一部に α 核種の染み出しが見られた。これはサイクル機構の試験で認められたプルトニウムの析出と関係するものと思われる。
- (10) 燃料ペレットの X 線微小分析では、FP 元素の析出が一部で観察された。炭化物燃料及び窒化物燃料とも、燃料と被覆管の化学的相互作用による反応層の一部で観察されたが、幅が狭く領域もごく一部に限定されているので、燃料ピンの健全性に影響を及ぼすものではないと判断できる。キセノンは中心部で存在量が減少する結果が得られたが、これは X 線微小分析で同定されるキセノンは燃料マトリクスに残留する部分に相当するためである。
- (11) 被覆管の試験では、金相、硬さ、結晶粒度とともに照射による影響と思われる変化は見られなかった。

謝辞

本試験の実施にあたり、ホット試験技術課及び実用燃料試験課の各位に多大なご協力をいただいた。また、浅賀健男氏、井上賢紀氏を始めとする核燃料サイクル開発機構大洗工学センターの各位には、多くのご尽力をいただきました。関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 荒井康夫、岩井 孝、笛山龍雄、岡本芳浩、塙沢憲一、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” (1996) .
- 2) 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 一燃料ピンの非破壊試験結果一” (2000) .
- 3) 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 一燃料ピンの破壊試験結果一” (2002) .
- 4) 荒井康夫、鈴木康文、笛山龍雄、岩井 孝、関田憲昭、大和田 功、新見素二、大道敏彦：JAERI-M91-191, “84F10A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料キャップセルの照射及び照射後試験” (1991) .
- 5) 岩井 孝、荒井康夫、前多厚、笛山龍雄、関田憲昭、野村 勇、鈴木康文：JAERI-M94-036 “ 84F-12A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料キャップセルの照射及び照射後試験” (1994) .
- 6) 荒井康夫、岩井 孝、笛山龍雄、中島邦久、野村 勇、吉田武司、鈴木康文：JAERI-Research 94-027 “87F-2A ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料キャップセルの照射及び照射後試験” (1994) .
- 7) 荒井康夫、岩井 孝、笛山龍雄、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 キャップセル)” (1995) .
- 8) 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 2000-010 “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 (89F-3A キャップセル)” (2000) .
- 9) 荒井康夫、岩井 孝、石川一哉、大道敏彦：JAERI-M 84-171 “ウラン炭化物燃料中の FP の化学形態” (1984) .
- 10) U. Benedict , G. Giacchetti , Hj. Matzke , K. Richter , C. Sari , H.E. Schmidt : Nucl. Technol., 35, 154 (1977).
- 11) 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：“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 キャップセル)” (2000) .
- 12) M.H. Bradbury, Hj. Matzke : J. Nucl. Mater. 91, 13 (1980).
- 13) U. Benedict : Proc. on Thermodynamics of Nuclear Materials 1979, Julich, Jan.29-Feb.2 (1979)453.
- 14) Y. Okamoto, A. Maeda, Y. Suzuki : J. Nucl. Mater. 206, 94 (1993).
- 15) 鈴木康文、前多 厚、岩井 孝、金沢浩之、三村英明、荒井康夫： JAERI-M 91-192 “照射炭化物

燃料中のプルトニウムおよび核分裂生成物の挙動” (1991).

- 16) 岩井 孝、荒井康夫、中島邦久、木村康彦、助川友英、鈴木康文： JAERI-Research 96-065 “JMTR 照射ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料中のプルトニウム及び核分裂生成物の挙動 (84F-12A キャプセル)” (1996).
- 17) 岩井 孝、荒井康夫、中島邦久、木村康彦、助川友英、鈴木康文： JAERI-Research 96-066 “JMTR 照射熱安定型混合炭化物燃料中のプルトニウム及び核分裂生成物の挙動” (1996).
- 18) Hj. Matzke “Science of Advanced LMFBR Fuels” North-Hollands, Amsterdam (1986).

表 1.1 燃料仕様及び照射条件

	炭化物燃料	窒化物燃料 I	窒化物燃料 II
被覆管外径 (mm)	8.5	8.5	8.5
ペレット直径 (mm)	7.42	7.28	7.43
直徑ギャップ (mm)	0.18	0.32	0.17
最大線出力 (W/cm)	734	742	781
最高燃焼度 (GWd/t)	40.9	39.5	39.4
(%FIMA)	4.66	4.63	4.62

表 2.1 炭化物燃料試料採取位置及び照射条件

試料番号	試料採取位置 * (mm)	線出力 (ピーク) (W/cm)	被覆管内周部温度 (°C)	燃料表面温度 (°C)	燃料中心温度 (°C)
CB	125	700	600	1200	1470
CA4	150	700	630	1210	1480
CA3	160	690	640	1210	1490
CA2	170	680	650	1220	1490
CA1	190	660	670	1240	1480

* 試料採取位置は、(U,Pu) C スタックの下部側からの距離で示す。

* 線出力は、照射初期の値である。

* 温度は、ピーク線出力時、ペレットのリロケーションを考慮しない評価による。

表 2.2 窒化物燃料 I 試料採取位置及び照射条件

試料番号	試料採取位置 * (mm)	線出力 (ピーク) (W/cm)	被覆管内周部温度 (°C)	燃料表面温度 (°C)	燃料中心温度 (°C)
A1A2	0	680	460	1370	1670
A1A1	10	690	480	1380	1690
A3B	130	710	610	1500	1800
A3A3	160	690	640	1500	1800
A3A2	170	680	650	1500	1800
A3A1	190	670	670	1500	1800

* 試料採取位置は、(U, Pu) N スタックの下部側からの距離で示す。

* 線出力は、照射初期の値である。

* 温度は、ピーク線出力時、ペレットのリロケーションを考慮しない評価による。

表 2.3 窒化物燃料 II 試料採取位置及び照射条件

試料番号	試料採取位置 * (mm)	線出力 (ピーク) (W/cm)	被覆管内周部温度 (°C)	燃料表面温度 (°C)	燃料中心温度 (°C)
B2A2	20	730	480	1080	1440
B2A1	30	740	500	1090	1450
B3-2AB	130	740	610	1200	1550
B3-2A2	150	730	630	1210	1570
B3-2A1	170	720	650	1220	1570

* 試料採取位置は、(U, Pu) N スタックの下部側からの距離で示す。

* 線出力は、照射初期にピークであった。

* 温度は、ピーク線出力時、ペレットのリロケーションを考慮しない評価による。

表 3.1 破壊試験項目リスト

試験番号及び項目	試料番号		
	炭化物燃料 B9C01	窒化物燃料Ⅰ B9N01	窒化物燃料Ⅱ B9N02
①細切断—1	C	A1, A3	B3-2
②樹脂注入	CA	A1A, A3A	B2, B3-2A
③細切断—2	CA	A1A, A3A	B2, B3-2A
④脱ミート	CB	A3B	B3-2B
⑤燃料ペレット密度測定	CBP	A3B	B3-2B
⑥燃料ペレット気孔率測定	CBP	A3B	B3-2B
⑦燃料ペレットX線回折	CBP	A3B	B3-2B
⑧金相試験前処理	CBC, CA1, CA2, CA3, CA4	A1A1, A1A2, A3A1, A3A2, A3A3, A3BC	B3-2A1, B3-2A2 B2A1, B2A2, B3-2AC
⑨モザイク写真撮影	CA1, CA2	A3A1, A3A2	B3-2A1, B3-2A2
⑩燃料ペレット気孔分布測定	CA1, CA4	A1A2, A3A1	B2A2, B3-2A1
⑪燃料ペレット金相観察	CA1, CA2, CA4	A1A2, A3A1, A3A2	B2A2, B3-2A1, B3-2A2
⑫燃料ペレット結晶粒度測定	CA1	A3A1	B3-2A1
⑬マイクロガンマ線スキャニング	CA3	A1A2	B2A2
⑭オートラジオグラフ	CA3	A1A2	B2A2
⑮X線微小分析	CA4	A1A1	B2A1
⑯燃焼率測定（マイクロサンプルリング）	CA3	A1A2	B2A2
⑰被覆管金相観察	CA3, CBC	A3BC	B3-2AC
⑱被覆管硬さ測定	CBC	A3BC	B3-2AC
⑲被覆管腐食厚さ測定	CBC	A3BC	B3-2AC
⑳被覆管結晶粒度測定	CBC	A3BC	B3-2AC

表 4.5.1 燃料ペレット密度測定結果

	炭化物燃料	窒化物燃料 I	窒化物燃料 II
照射前密度 (%T. D.)	85.0	84.8	86.0
照射後密度 (%T. D.)	80.2	79.0	80.6
体積エリング率 (%)	6.0	7.3	6.7
エリング率 (%/%FIMA)	1.3	1.6	1.5

表 4.6.1 燃料ペレット気孔率測定結果

	炭化物燃料	窒化物燃料 I	窒化物燃料 II
開気孔率 (%)	1.7	4.2	4.1
閉気孔率 (%)	18.1	16.8	15.3
FP ガス放出率 (%)	2.3	3.3	5.2

表 4.7.1 燃料ペレット格子定数

燃料ペレット	窒化物燃料 I A3BP	窒化物燃料 II B3-2AP	炭化物燃料 CBP
格子定数 (Å) 照射前	4.8910±0.0006	4.8927±0.0004	4.9654±0.0006
格子定数 (Å) 照射後	4.9011±0.0022	4.9002±0.0006	4.9627±0.0011

表 4.10.1 燃料ペレット気孔分布測定結果

試料		合計気孔数 (個)	平均気孔面積 (μm^2)	最大気孔面積 (μm^2)	気孔率 (%)
炭化物燃料 CA1	外周部	570	3.9	39.0	9.8
	中間部	571	4.9	60.9	12.5
	中心部	269	20.3	193.7	26.5
炭化物燃料 CA4	外周部	568	6.1	95.7	15.4
	中間部	463	7.5	88.8	15.3
	中心部	249	26.8	192.7	35.8
窒化物燃料 I A1A2					
	外周部	854	5.7	93.6	22.3
	中間部	566	11.8	199.6	32.5
	中心部	206	8.7	183.8	15.6*
窒化物燃料 I A3A1					
	外周部	850	5.2	93.7	19.8
	中間部	586	11.5	194.3	35.1
	中心部	241	10.2	186.9	19.7*
窒化物燃料 II B2A2					
	外周部	1027	6.5	82.5	30.2
	中間部	1221	4.4	80.7	23.9
	中心部	284	2.0	127.0	7.1*
窒化物燃料 II B3-2A1					
	外周部	1044	5.6	89.8	26.2
	中間部	915	6.7	90.4	27.5
	中心部	251	4.4	154.1	11.5*

* 窒化物燃料 I 及び II の中心部については、画像解析を行う上で困難な大きな気孔の存在のため、正確な測定ではない。参考値の扱いとする。

表 4.12.1 燃料ペレット結晶粒度測定結果

	炭化物燃料	窒化物燃料 I	窒化物燃料 II
外周部	平均粒径	2.9	3.8
	最大粒径	9.2	11.0
中間部	平均粒径	2.8	3.2
	最大粒径	13.2	11.5
中心部	平均粒径	3.8	3.6
	最大粒径	22.9	15.3

単位 : μm

表 4.18.1 被覆管硬さ測定結果

試料番号 CBC

測定位置 測定点	0°	90°	180°	270°
1 (内周近傍)	262	262	272	276
2	260	276	260	272
3	259	253	288	266
4	268	270	257	251
5	272	266	262	255
6	272	270	270	276
7	282	266	272	253
8	278	251	260	250
9 (外周近傍)	272	264	284	250
平均 (Hv)	269	264	269	261

表 4.20.1 被覆管結晶粒度測定結果

	炭化物燃料	窒化物燃料 I	窒化物燃料 II
外周部	平均粒径	10.8	11.6
	最大粒径	40.2	45.4
内周部	平均粒径	9.7	9.1
	最大粒径	36.2	40.8

单位 : μm

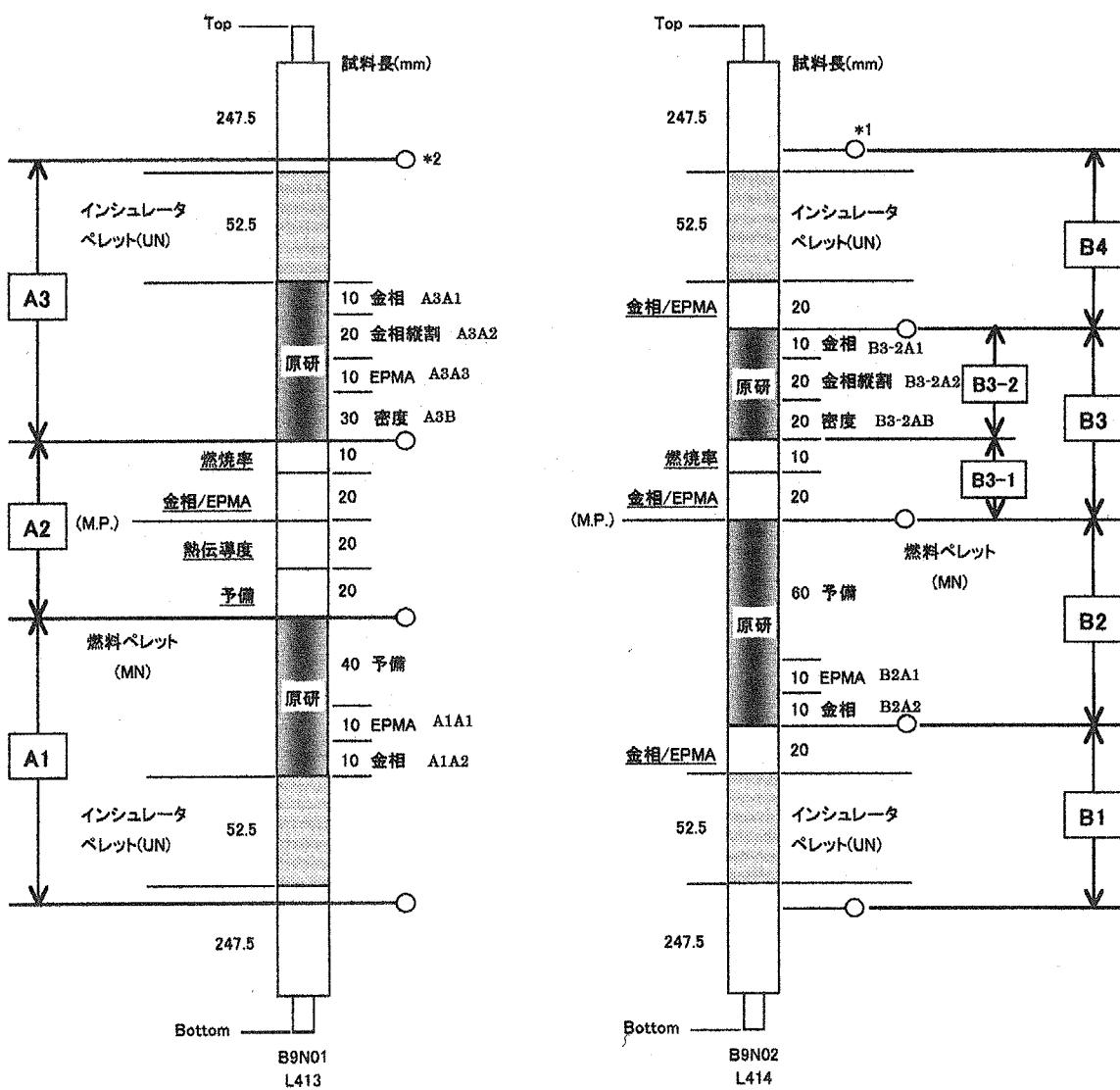


図 2.1 窒化物燃料切断図

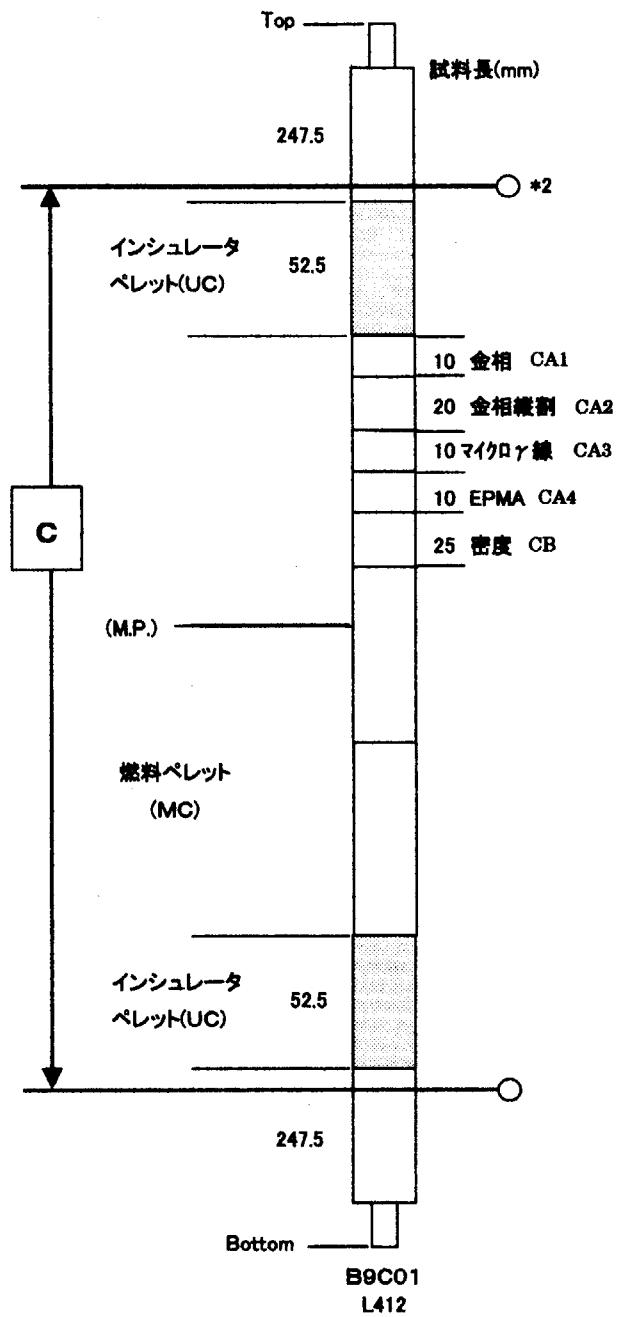


図 2.2 炭化物燃料切断図

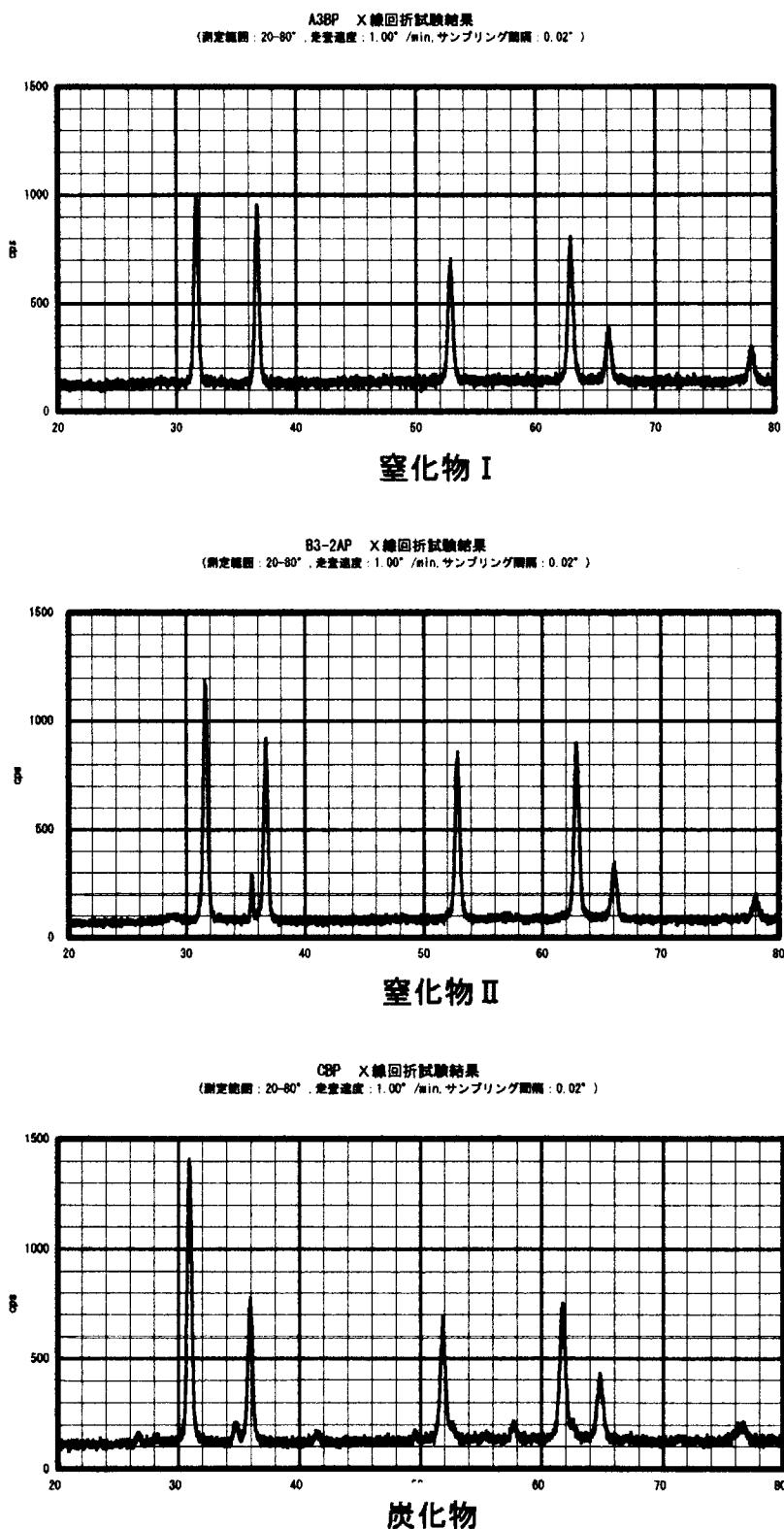


図 4.7.1 燃料ペレット X 線回折測定結果

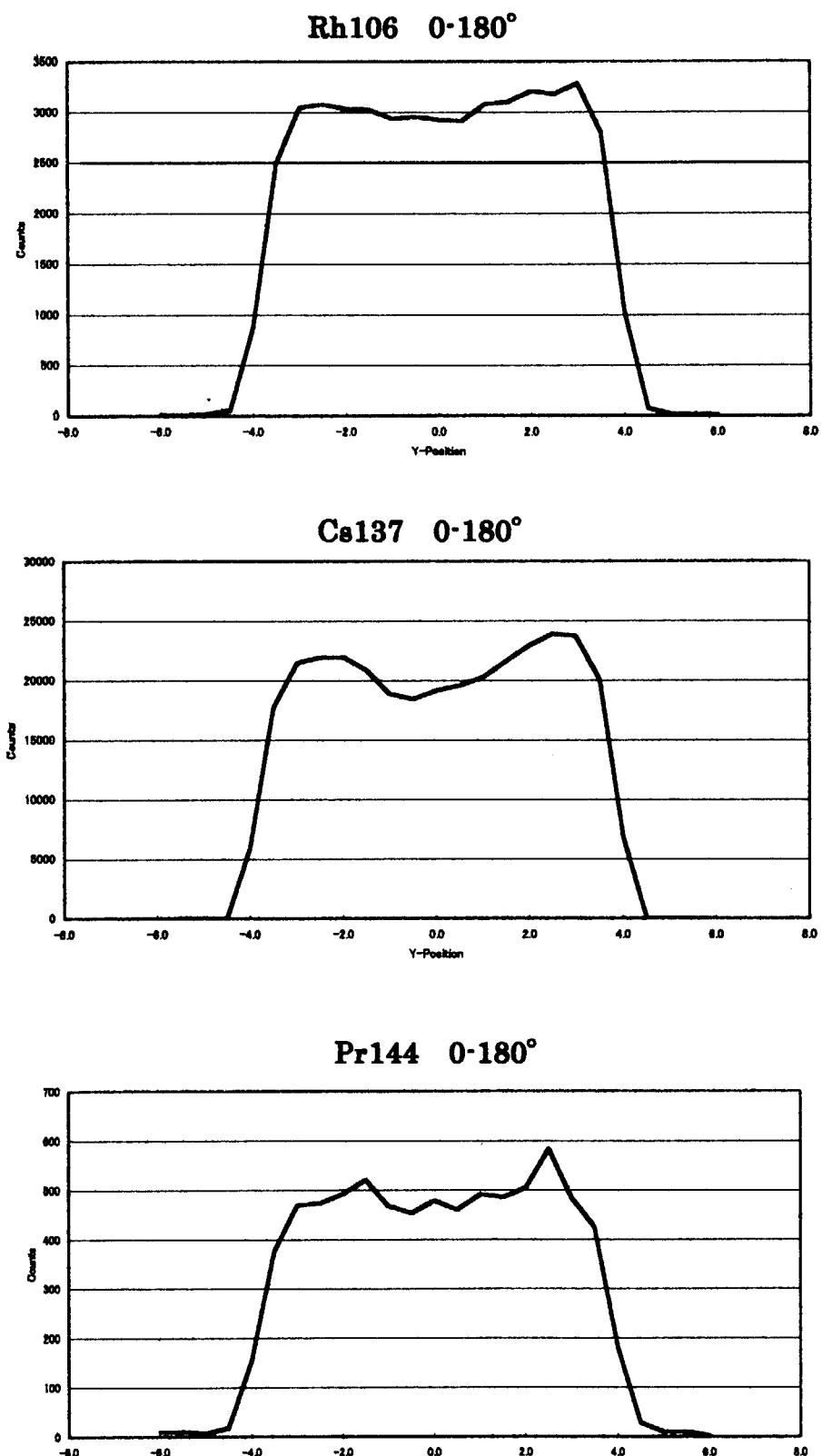
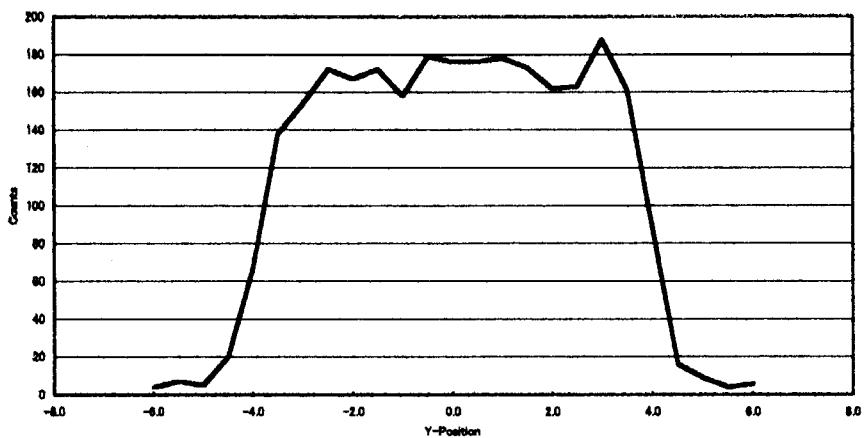


図 4.13.1 炭化物燃料 (CA3) マイクロガンマスキャン (Rh106、Cs137、Pr144)

Zr95 0-180°



Cs134 0-180°

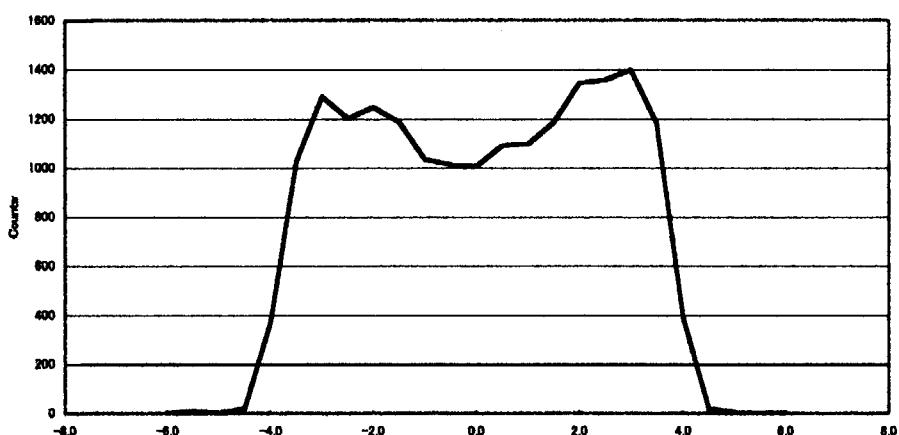
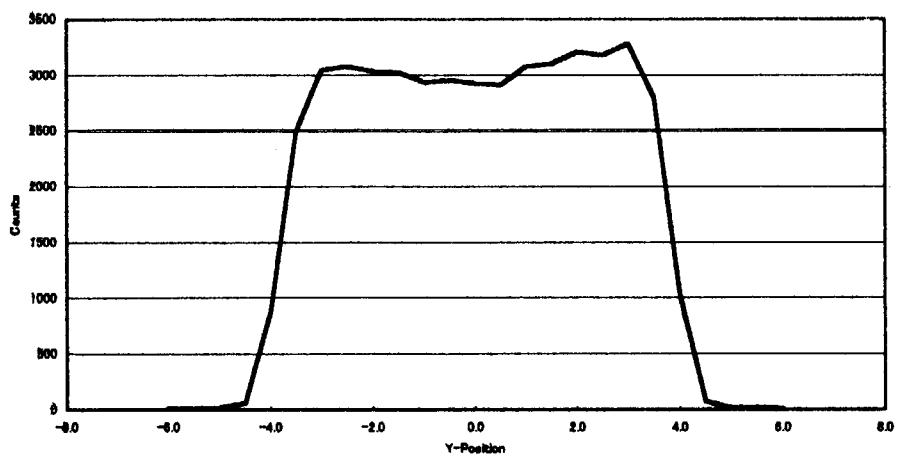
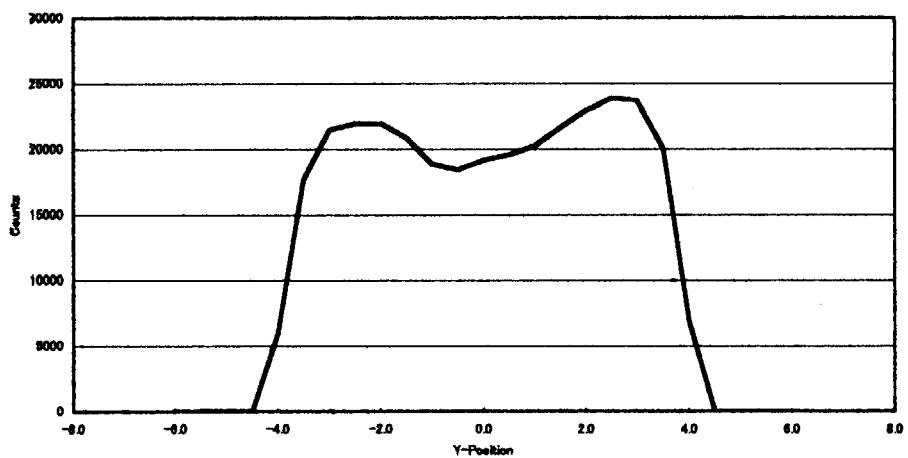


図4.13.2 炭化物燃料(CA3)マイクロガンマスキャン(Zr95、Cs134)

Rh106 0-180°



Cs137 0-180°



Pr144 0-180°

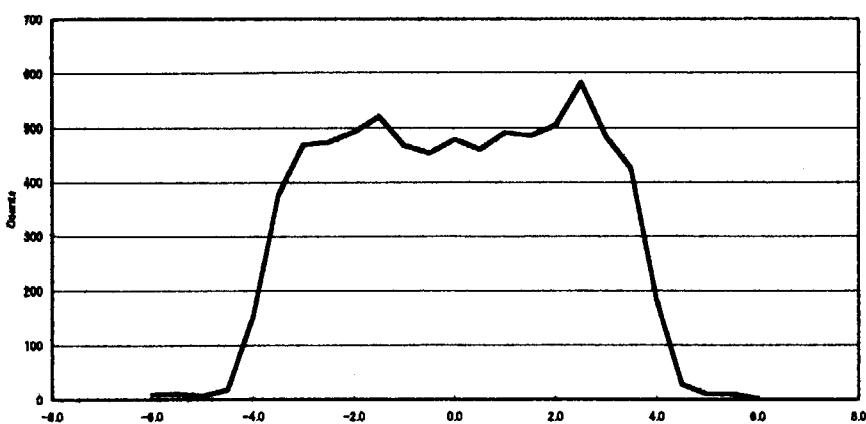
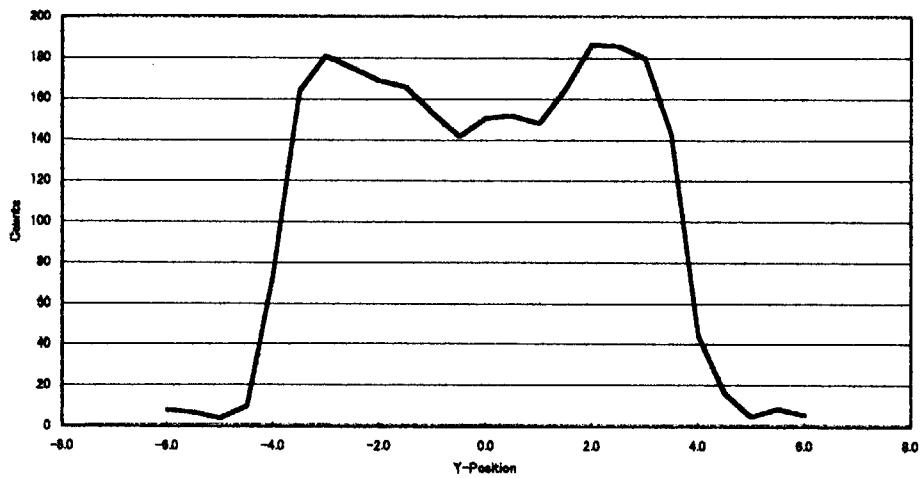


図4.13.3 窒化物燃料(A1A2)マイクロガンマスキャン(Rh106、Cs137、Pr144)

Zr95 0·180°



Cs134 0·180°

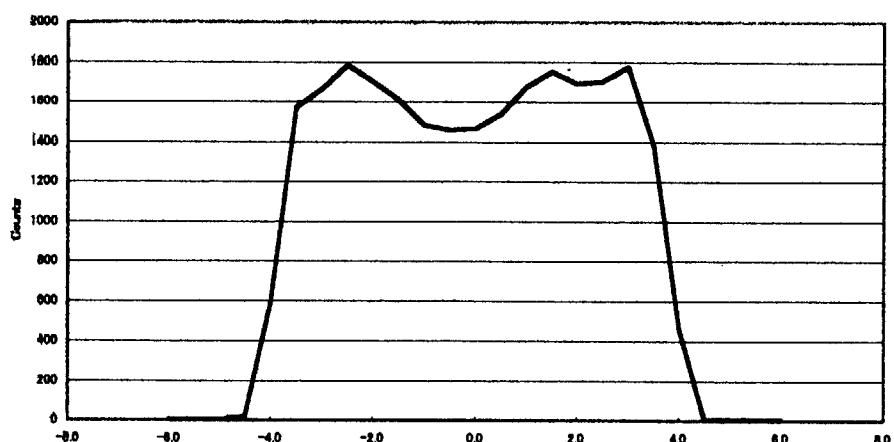


図 4.13.4 錫化物燃料 (A1A2) マイクロガンマスキャン (Zr95、Cs134)

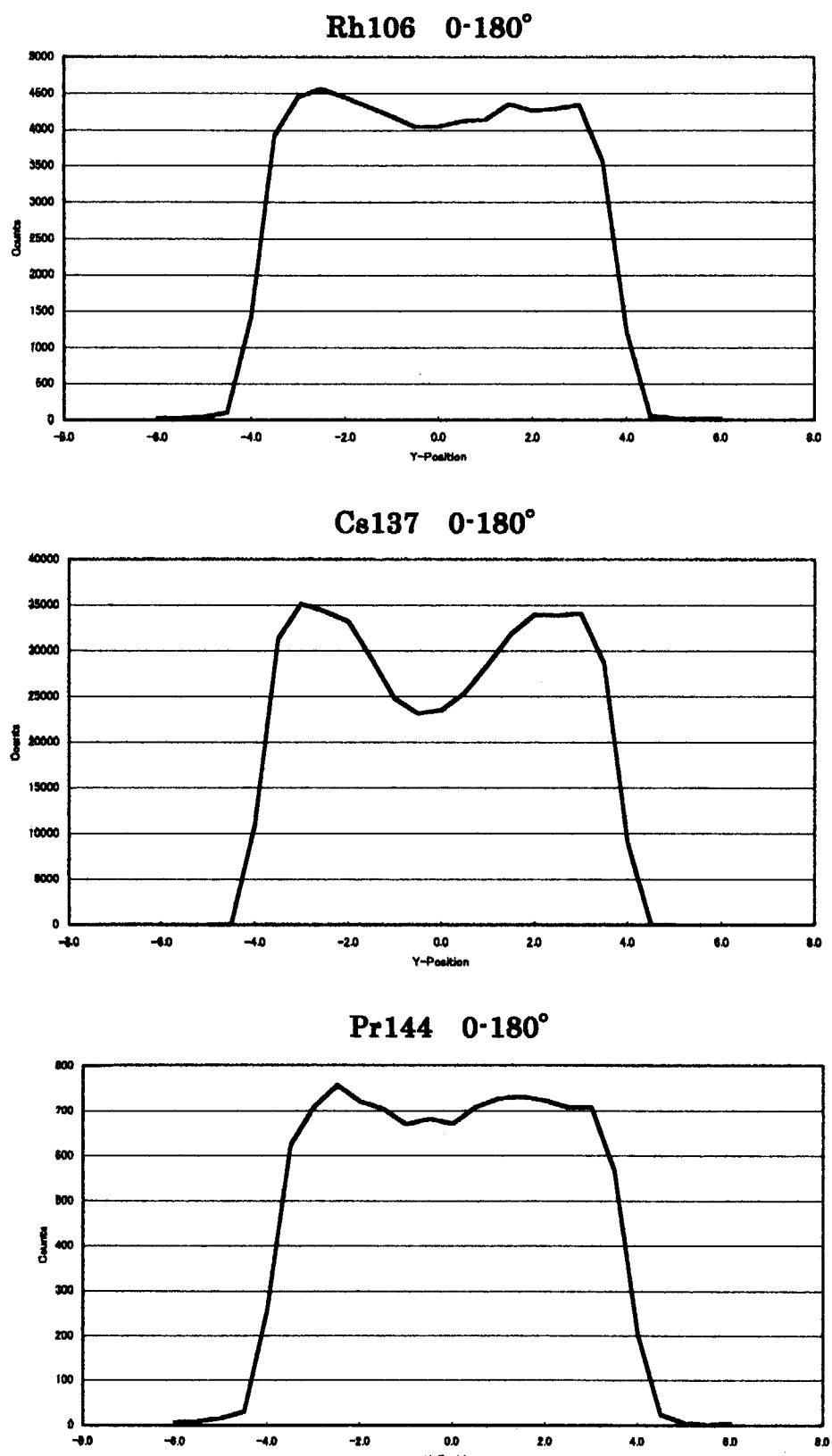
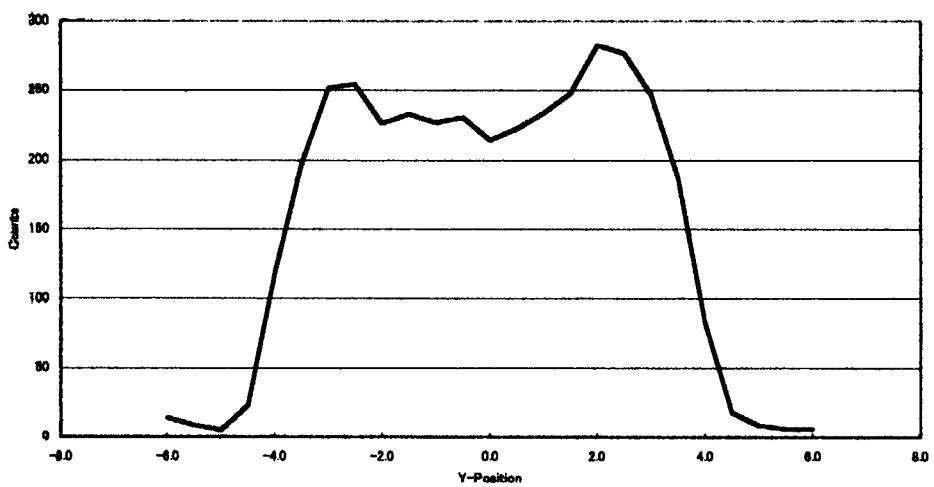


図 4.13.5 錫化物燃料(B2A2)マイクロガンマスキャン (Rh106、Cs137、Pr144)

Zr95 0-180°



Cs134 0-180°

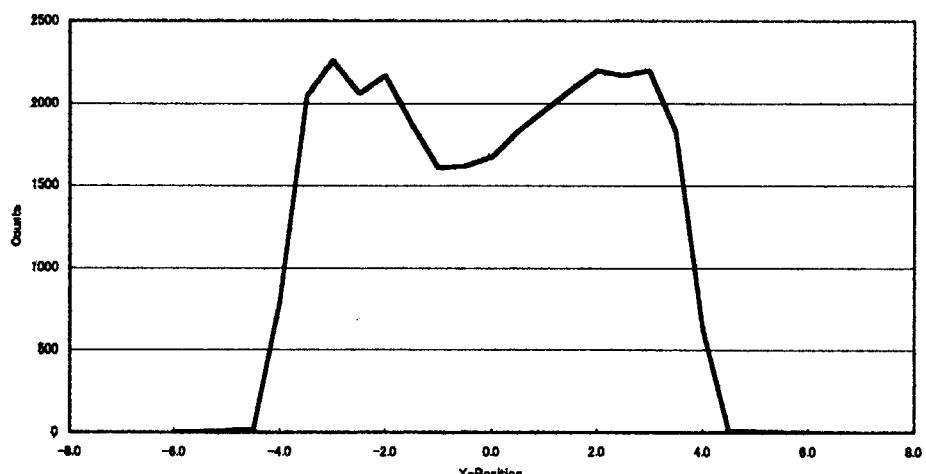


図 4.13.6 錫化物燃料(B2A2)マイクロガンマスキャン (Zr95、Cs134)

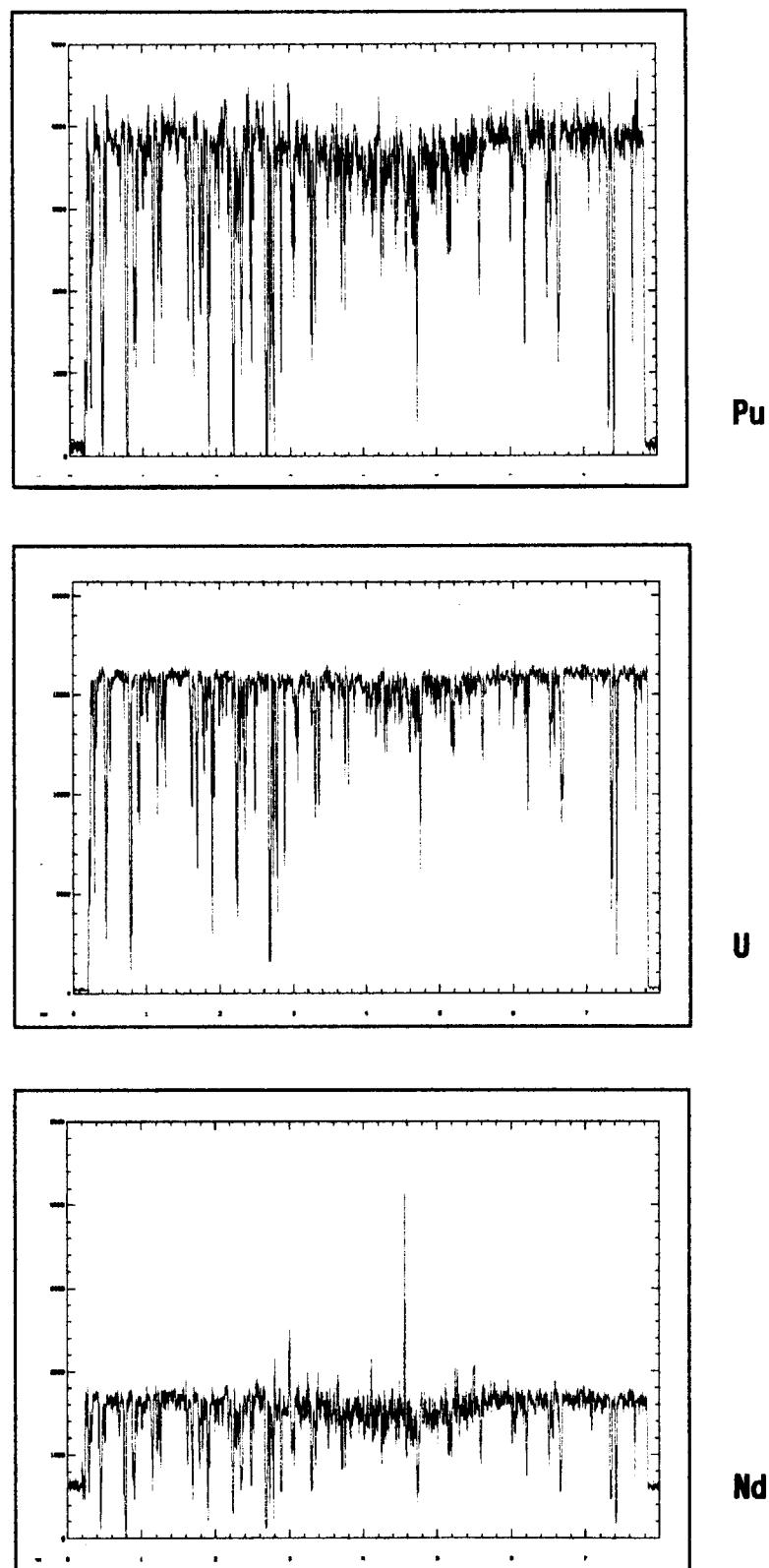
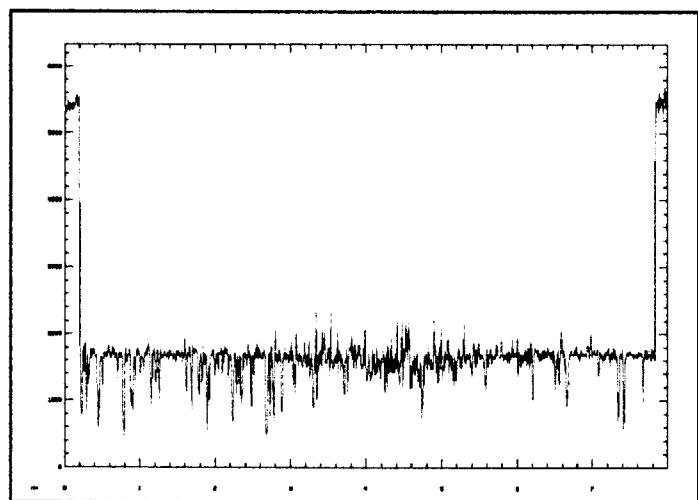
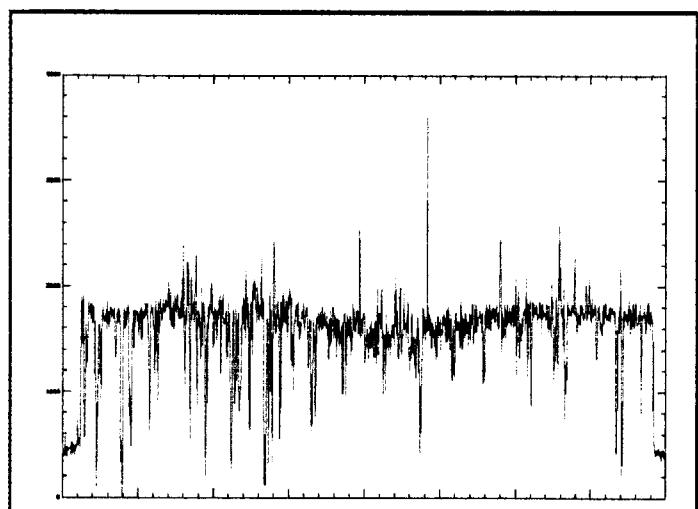


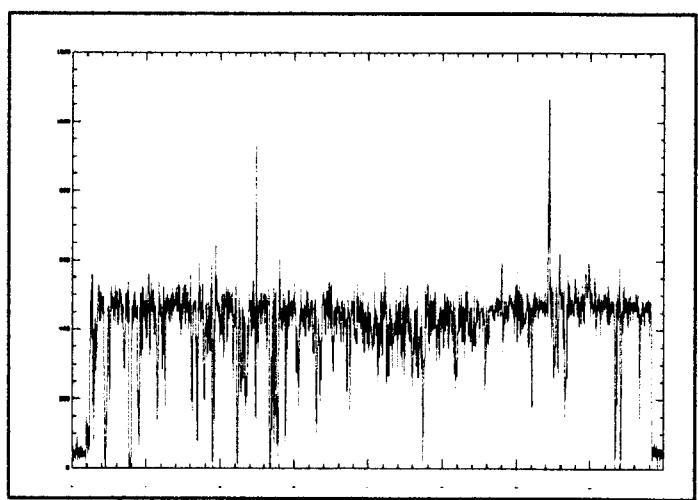
図 4.15.1 炭化物燃料径方向元素分布 (Pu, U, Nd)



Mo



Ru



Zr

図 4.15.2 炭化物燃料径方向元素分布 (Mo, Ru, Zr)

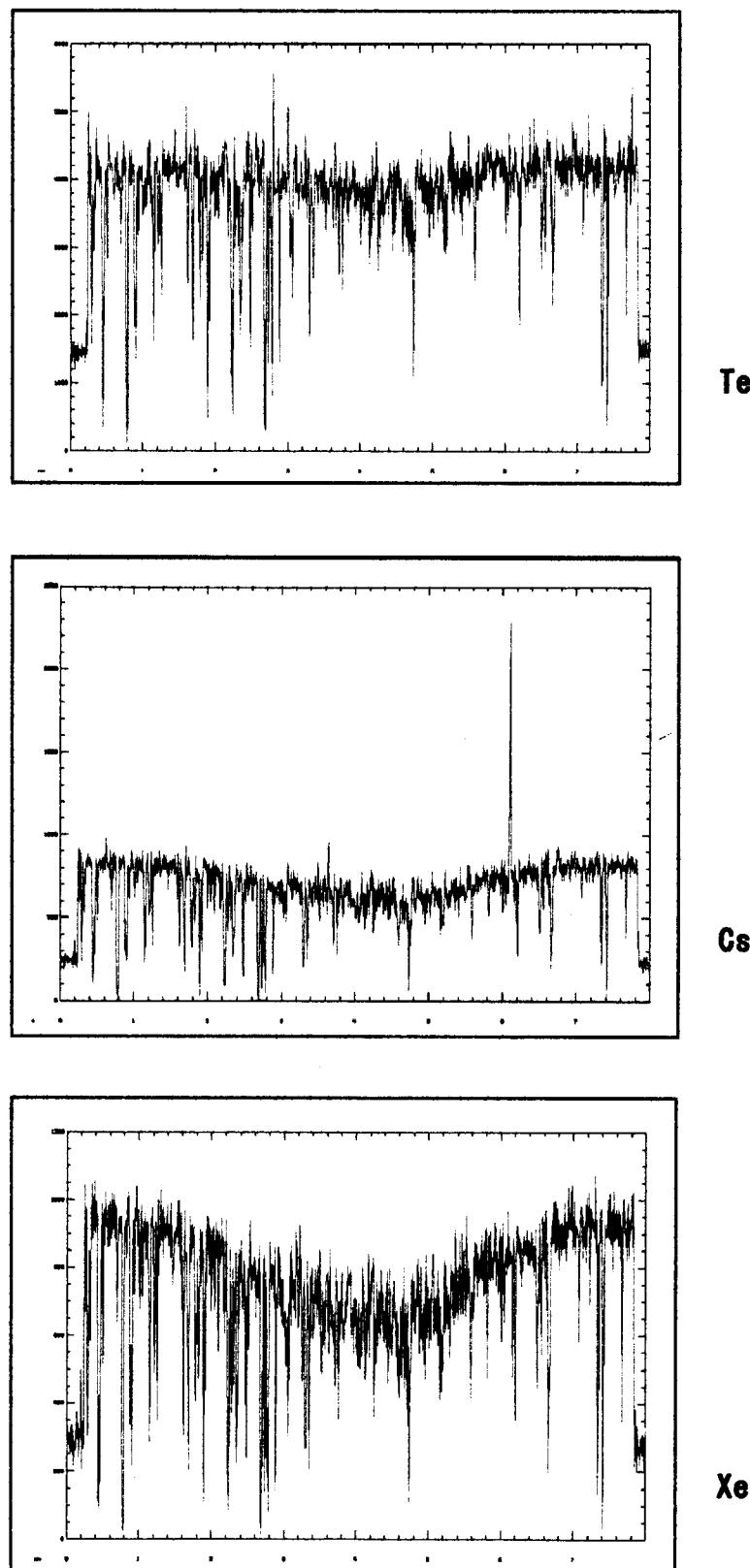


図 4.15.3 炭化物燃料径方向元素分布 (Te, Cs, Xe)

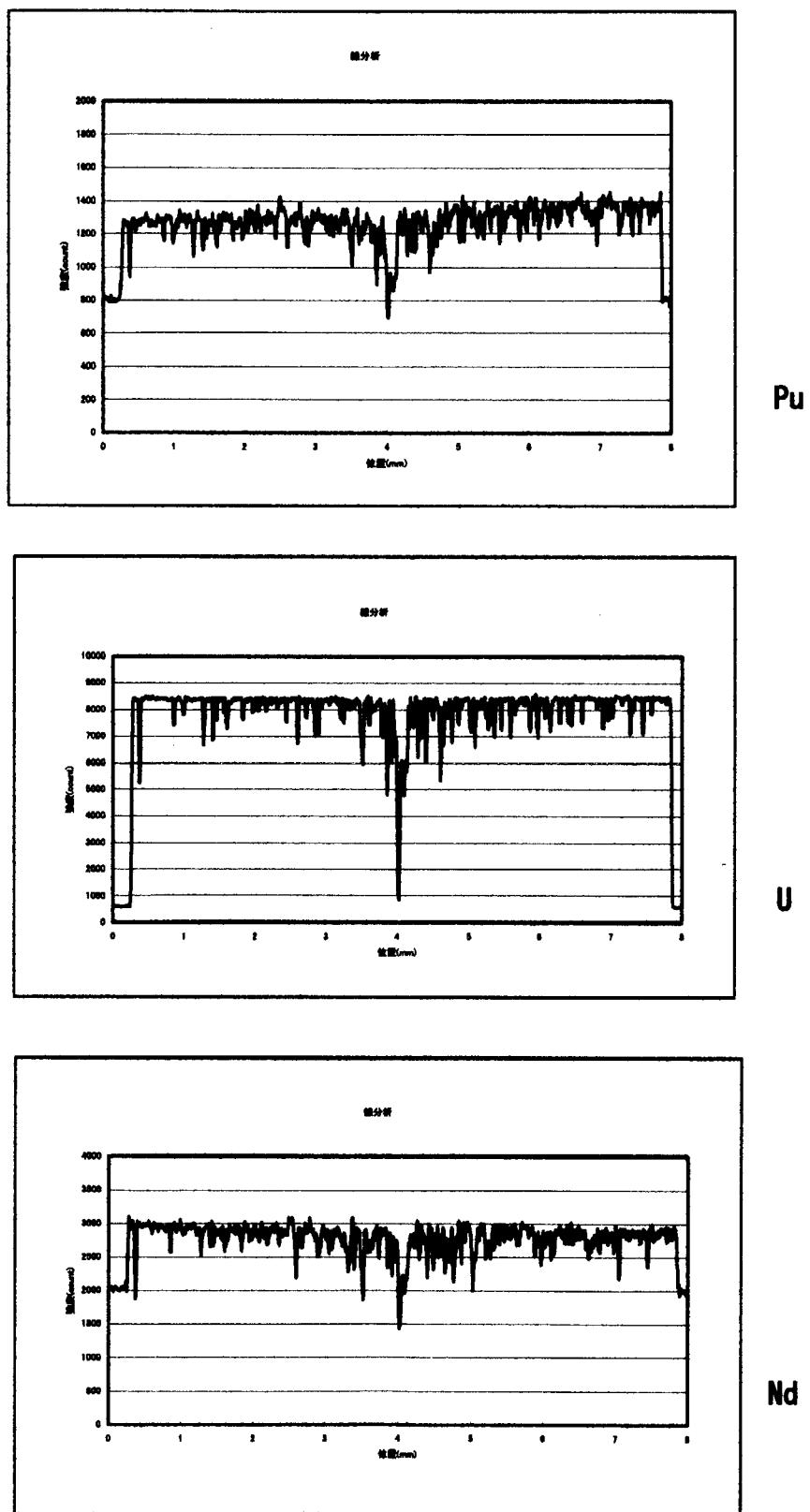


図 4.15.4 窒化物燃料 I 径方向元素分布 (Pu, U, Nd)

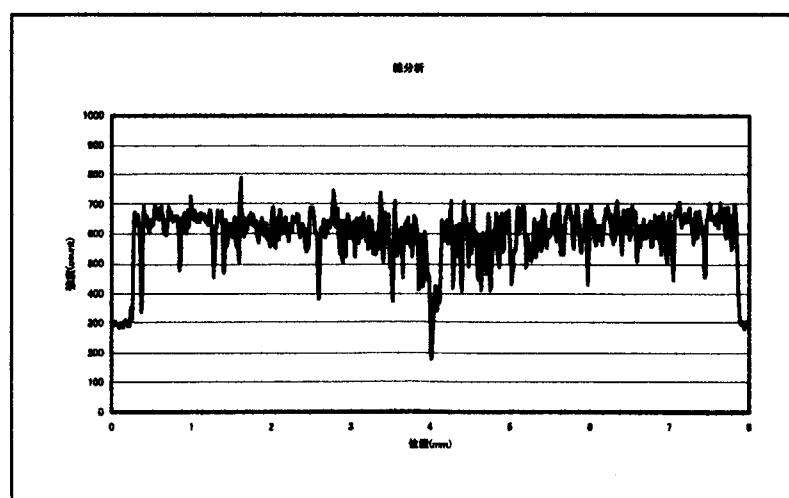
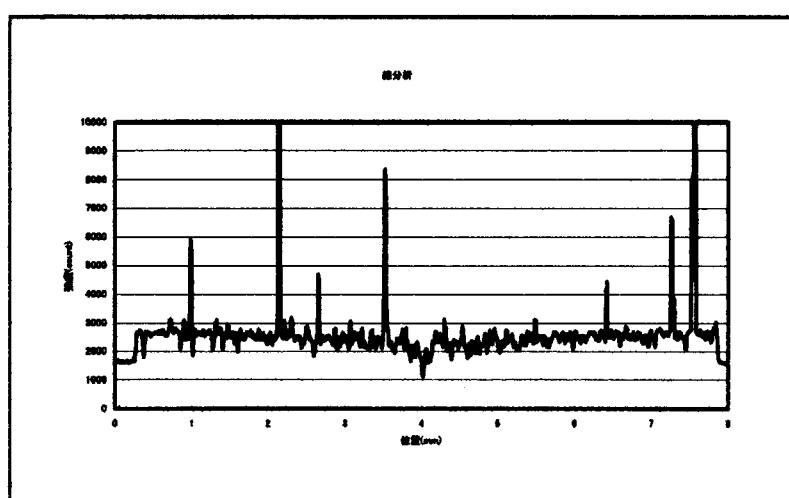
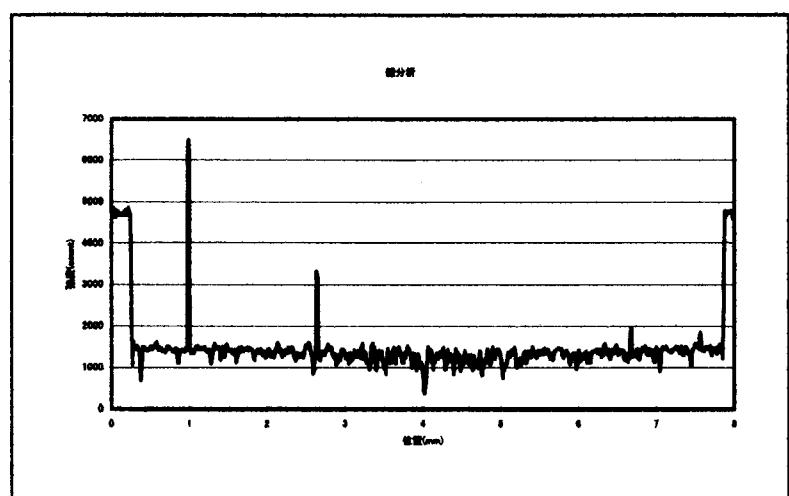


図 4.15.5 窒化物燃料 I 径方向元素分布 (Mo, Ru, Zr)

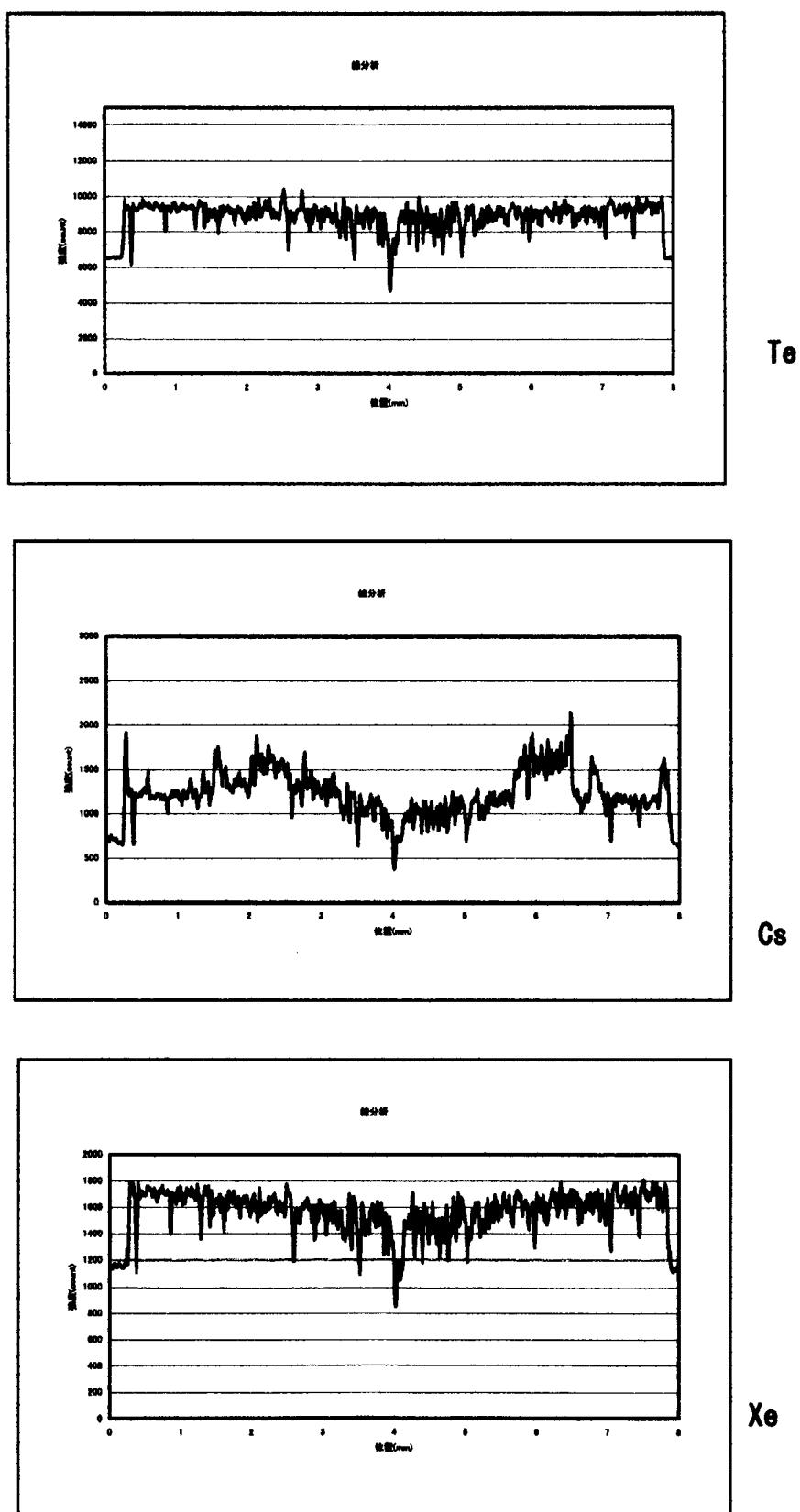
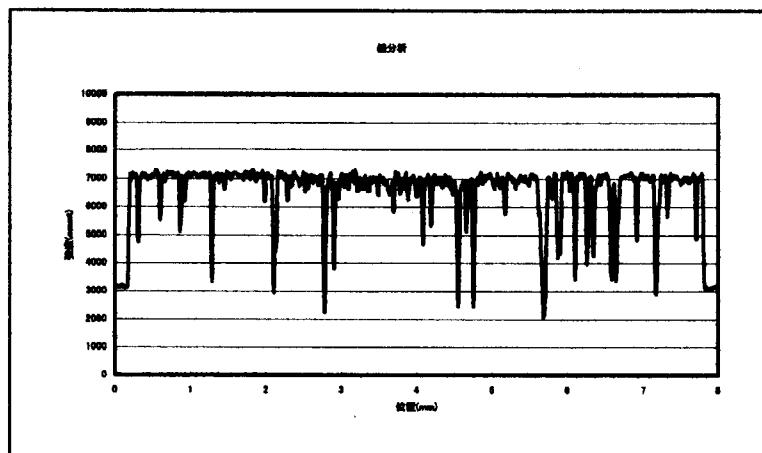
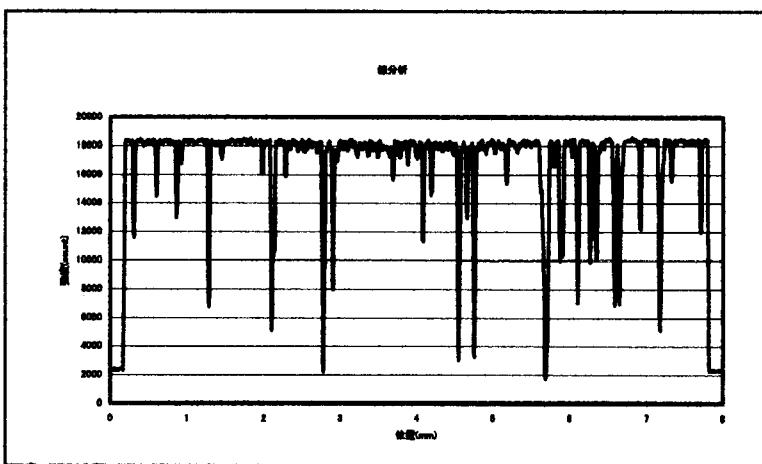


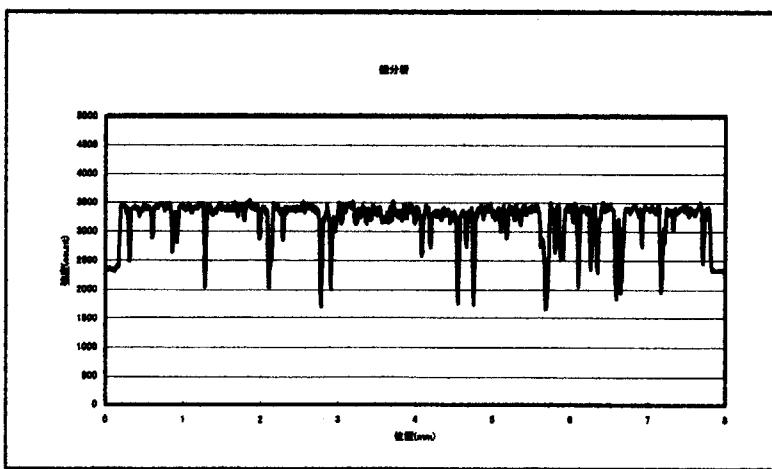
図 4.15.6 塗化物燃料 I 径方向元素分布 (Te, Cs, Xe)



Pu



U



Nd

図 4.15.7 窒化物燃料Ⅱ径方向元素分布 (Pu, U, Nd)

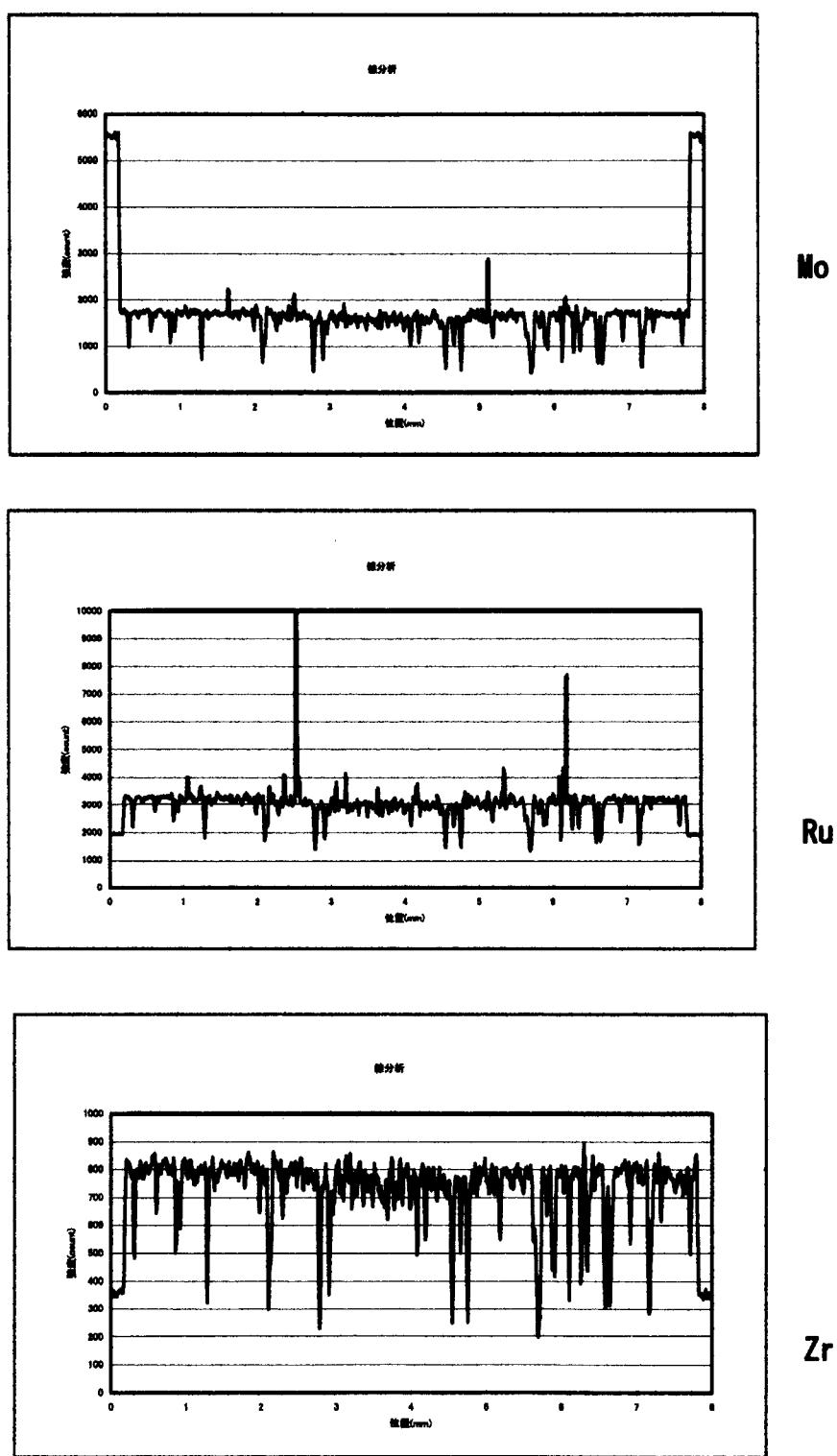


図 4.15.8 窒化物燃料Ⅱ径方向元素分布 (Mo, Ru, Zr)

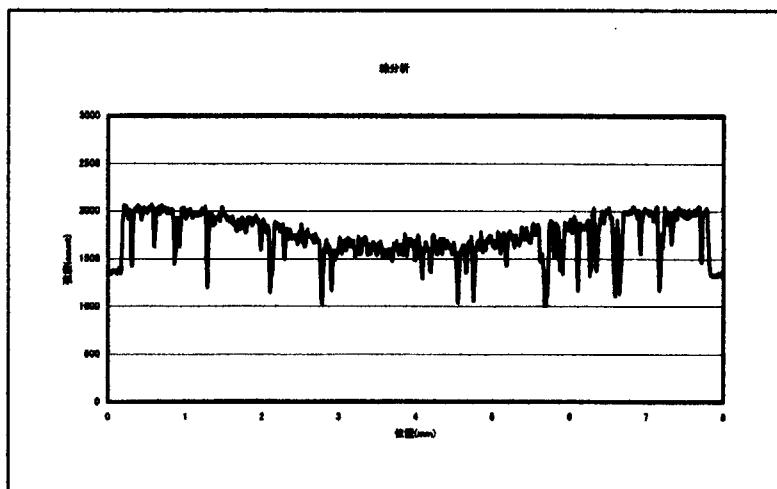
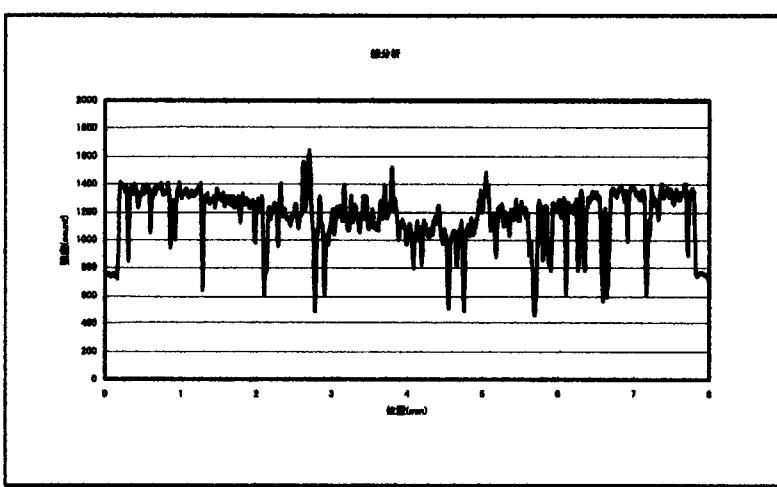
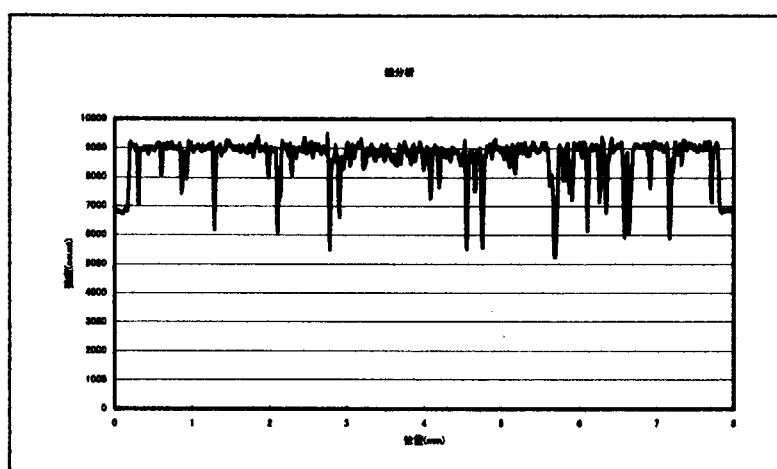
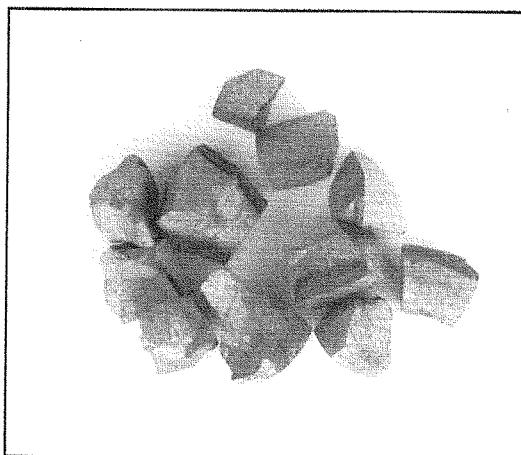
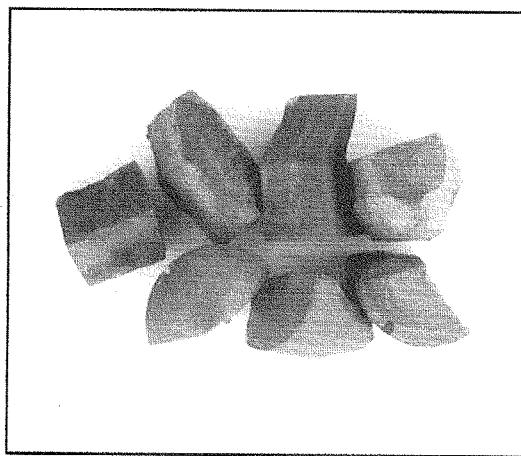


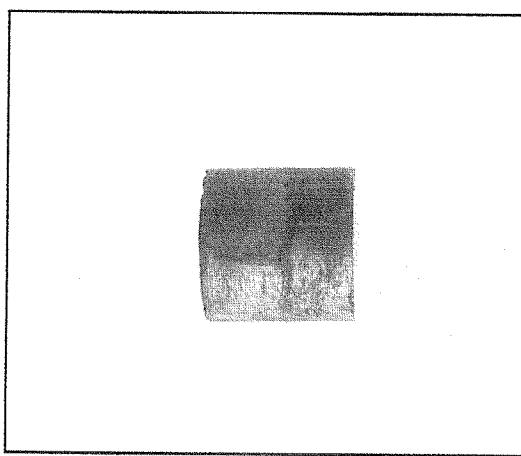
図 4.15.9 窒化物燃料Ⅱ径方向元素分布 (Te, Cs, Xe)



炭化物燃料



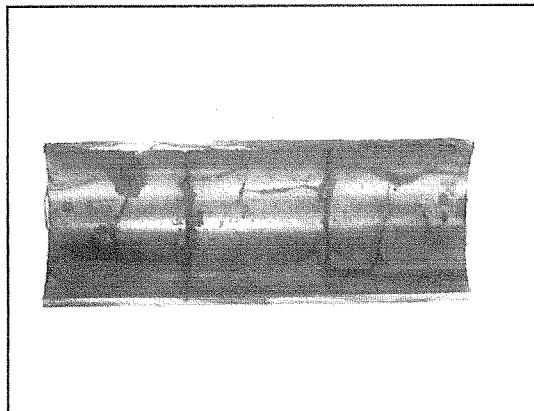
窒化物燃料 I



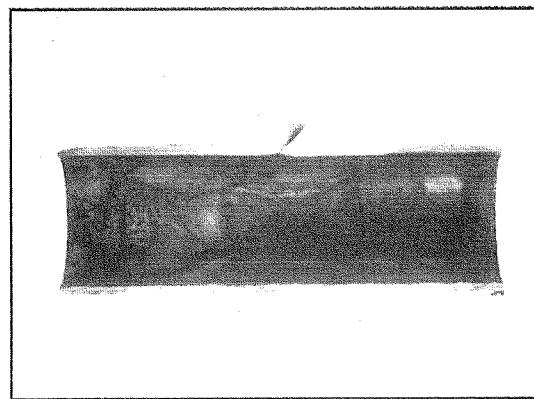
窒化物燃料 II

5mm

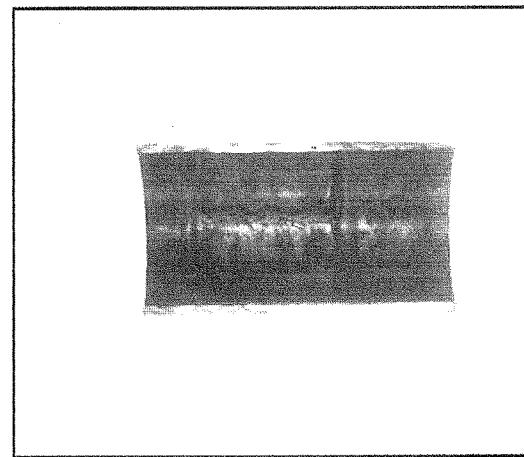
写真 4.4.1 ペレット外観



炭化物燃料



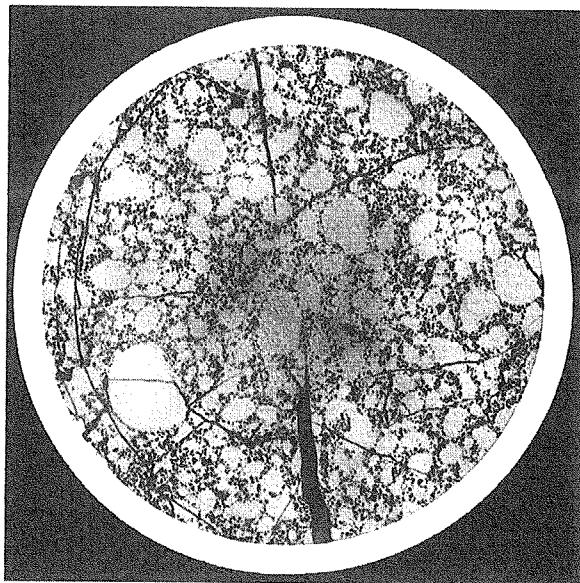
窒化物燃料 I



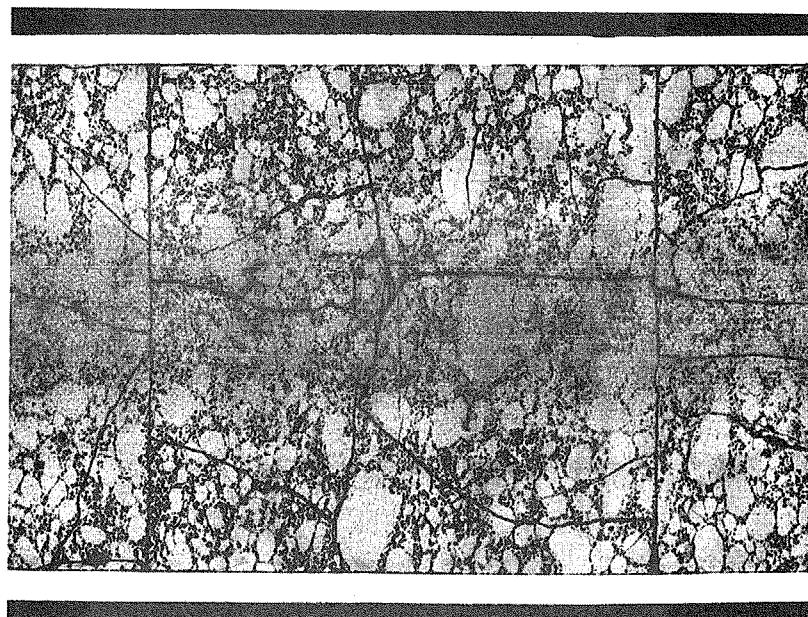
窒化物燃料 II

5mm

写真 4.4.2 被覆管内面外観



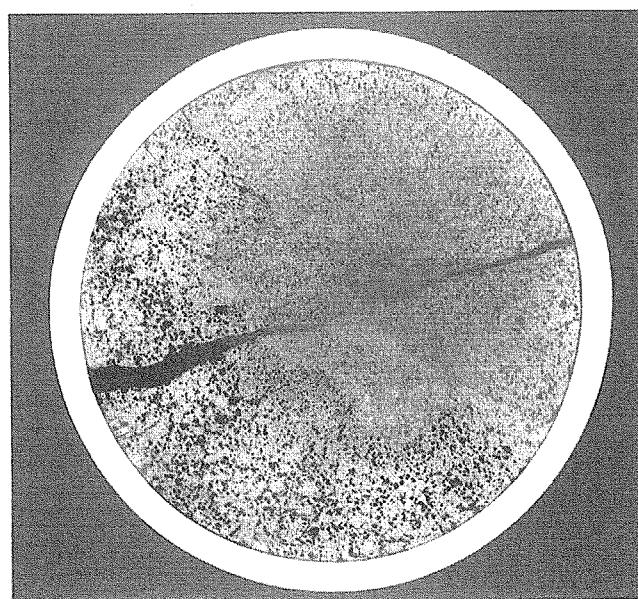
試料番号 CA1



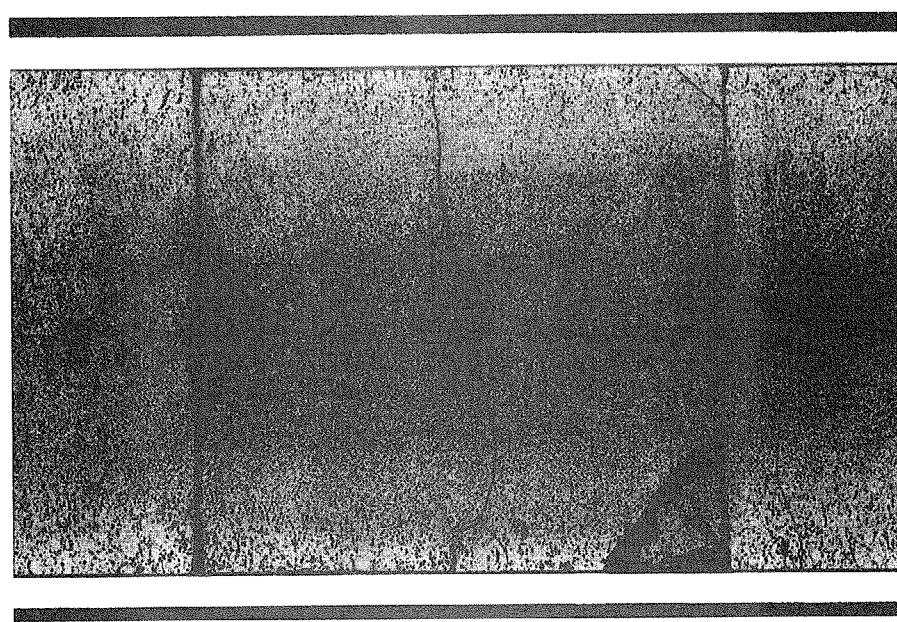
試料番号 CA2

2mm

写真 4.9.1 炭化物燃料モザイク写真



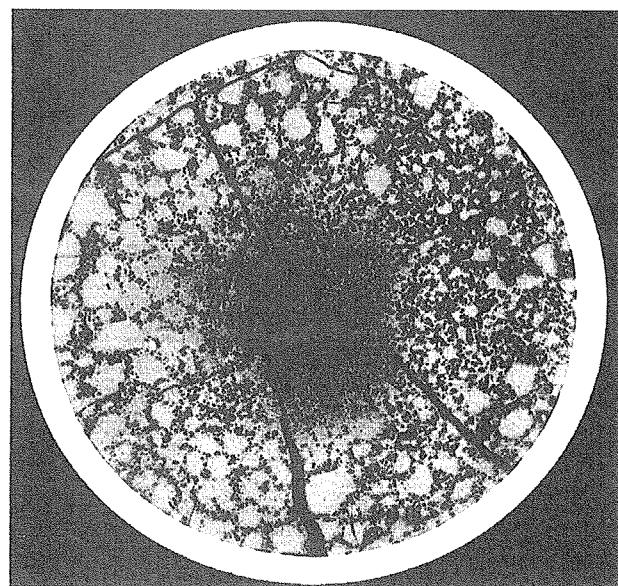
試料番号 A3A1



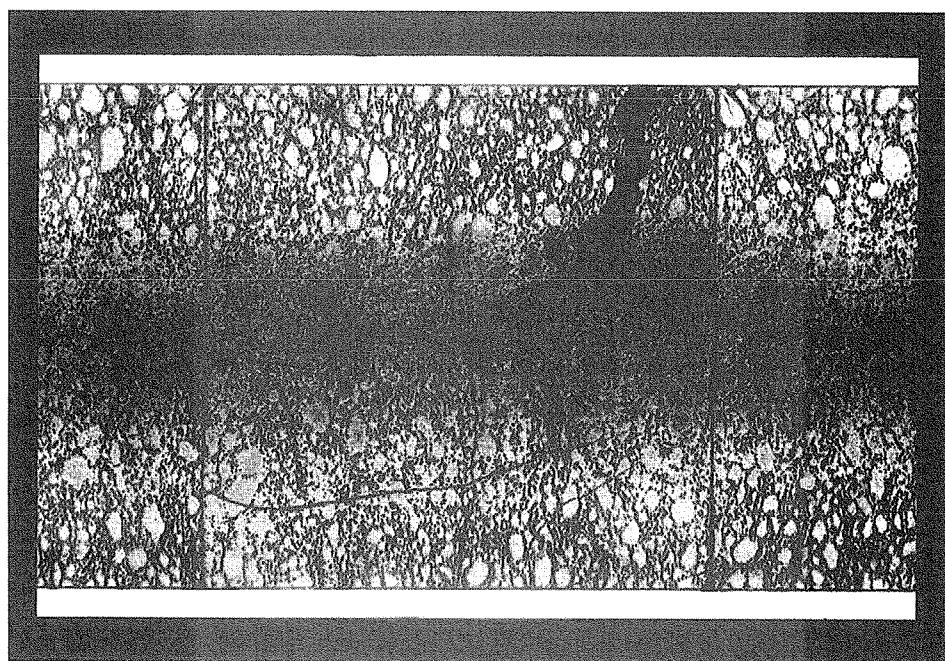
試料番号 A3A2

2mm

写真 4.9.2 壕化物燃料 I モザイク写真



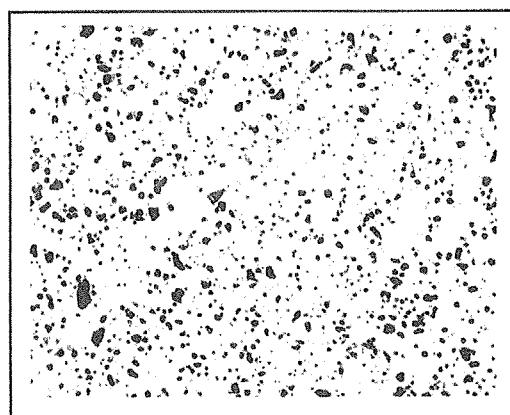
試料番号 B3-2A1



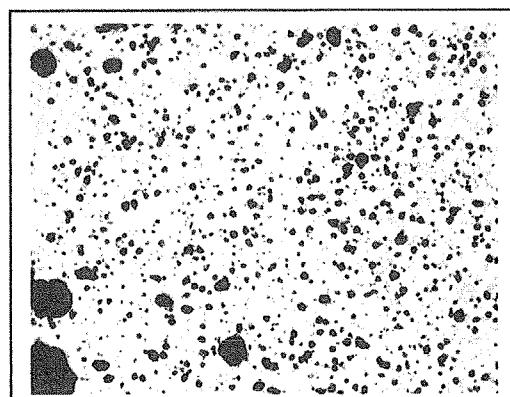
試料番号 B3-2A2

2mm

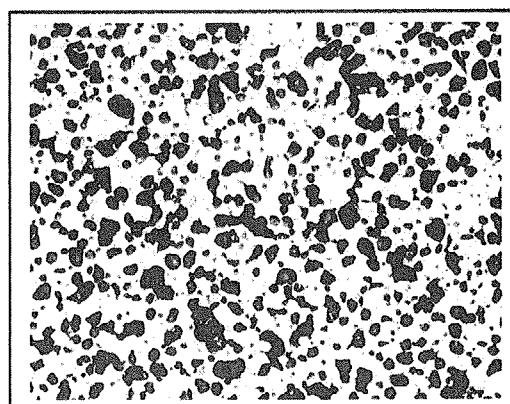
写真 4.9.3 窒化物燃料Ⅱモザイク写真



外周部



中間部

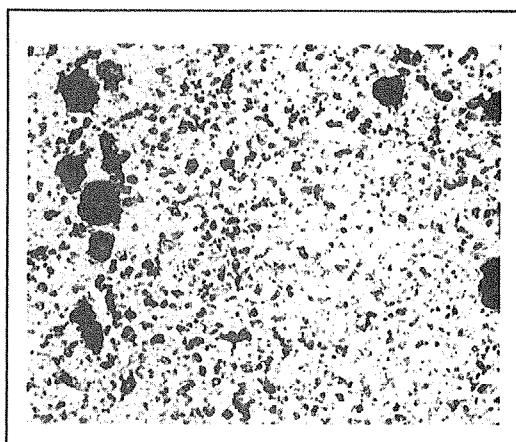


中心部

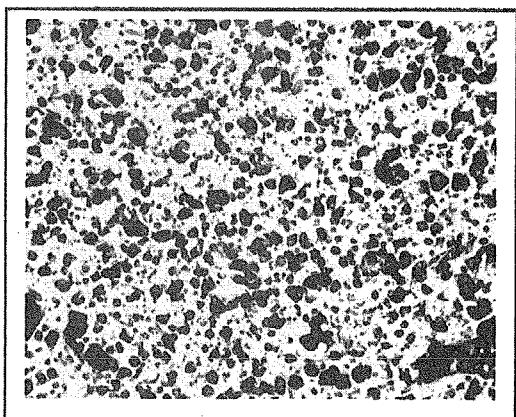
試料番号 CA1

40 μm

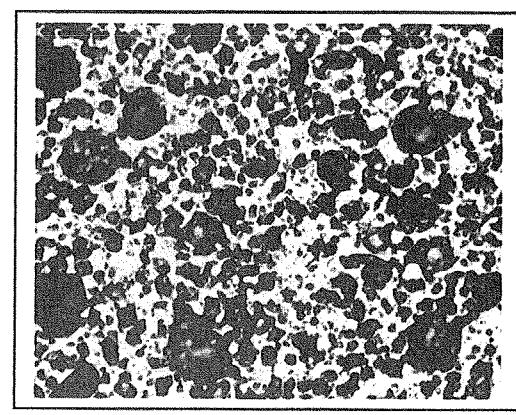
写真 4.10.1 炭化物燃料気孔分布測定用写真



外周部



中間部

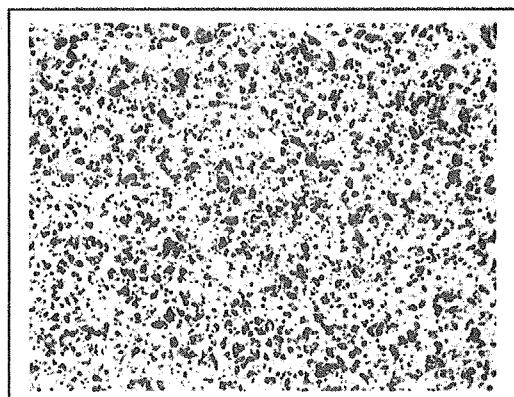


中心部

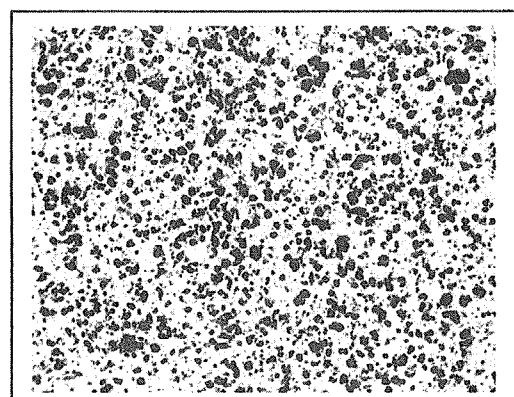
試料番号 A3A1

40 μm

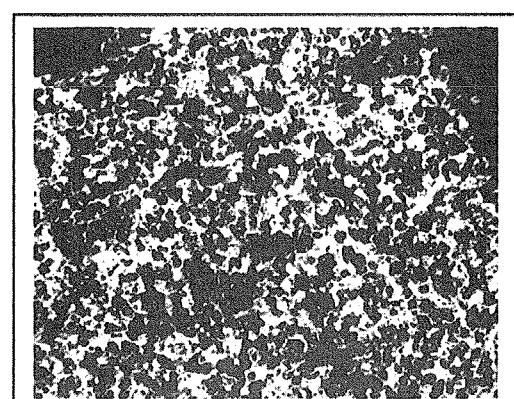
写真 4.10.2 窒化物燃料 I 気孔分布測定用写真



外周部



中間部



中心部

試料番号 B3-2A1

40 μm

写真 4.10.3 窒化物燃料Ⅱ気孔分布測定用写真

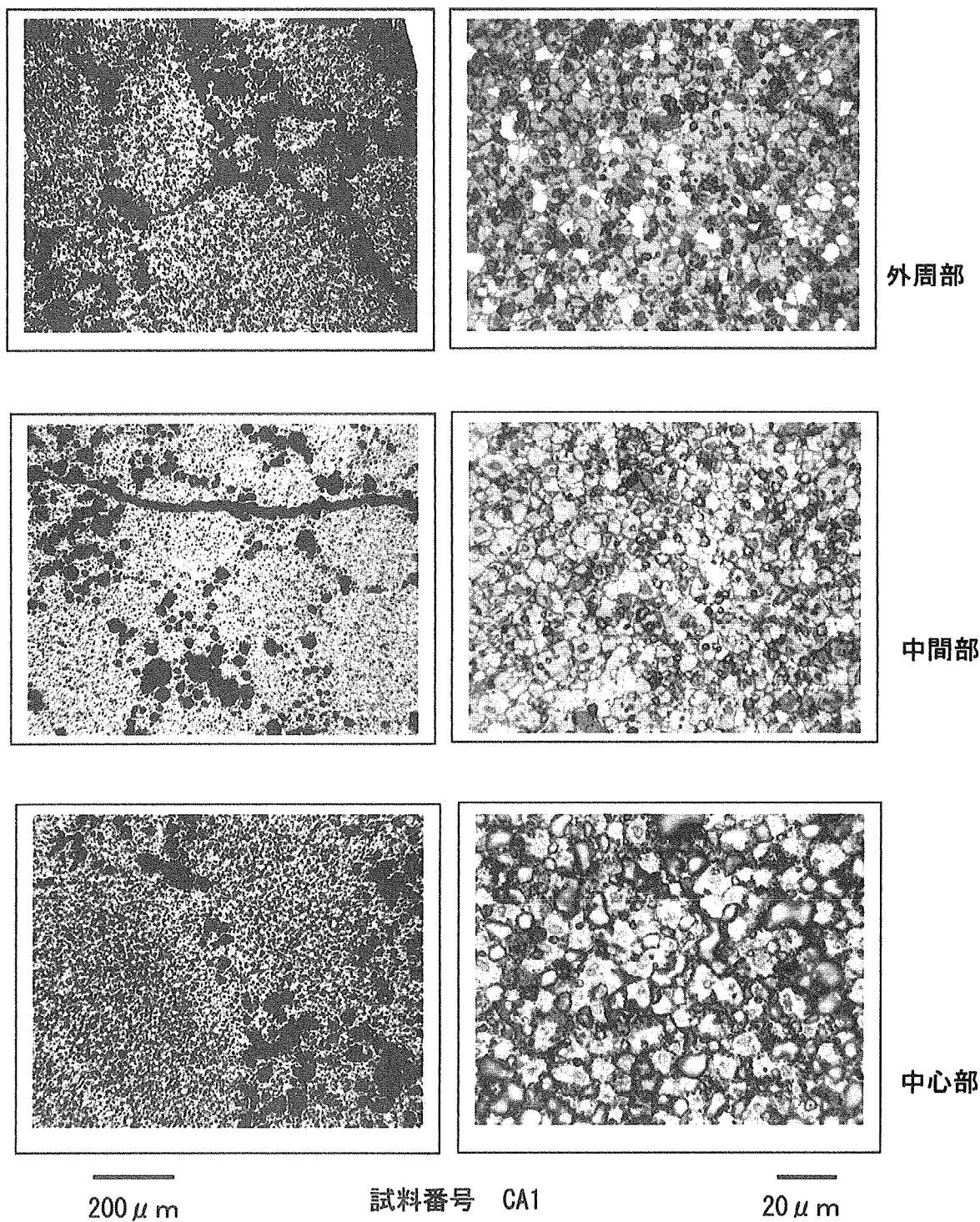
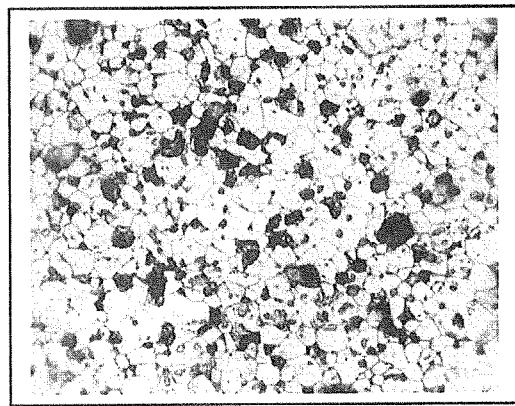
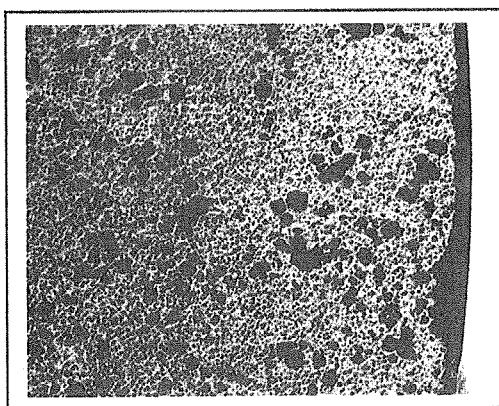
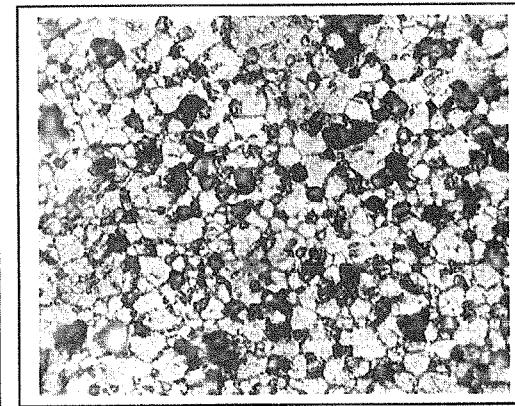
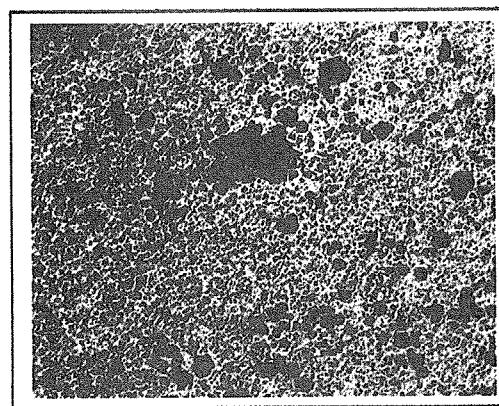


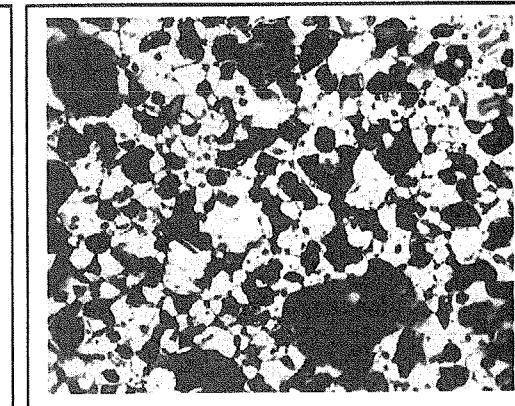
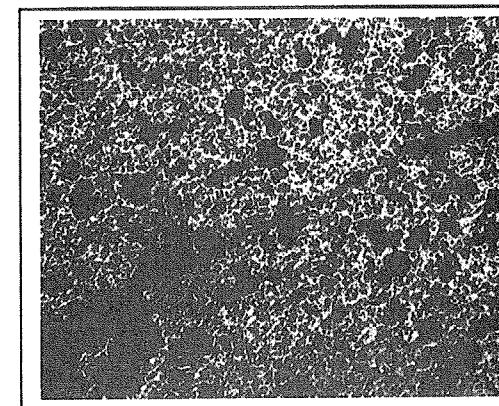
写真 4.11.1 炭化物燃料金相写真



外周部



中間部



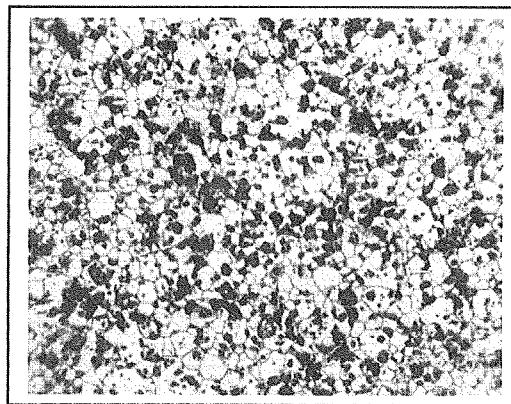
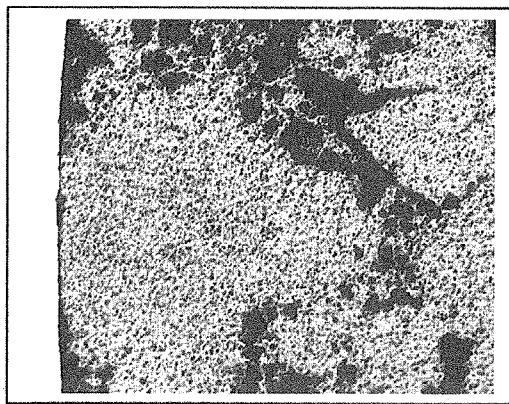
中心部

200 μm

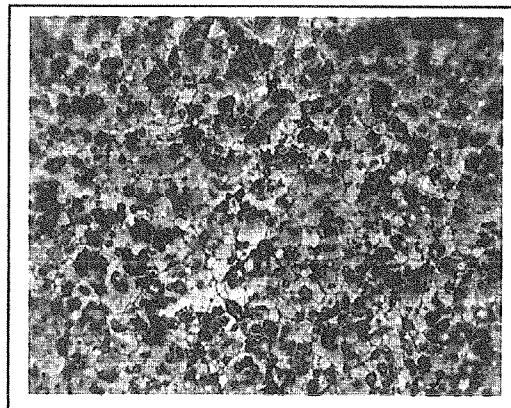
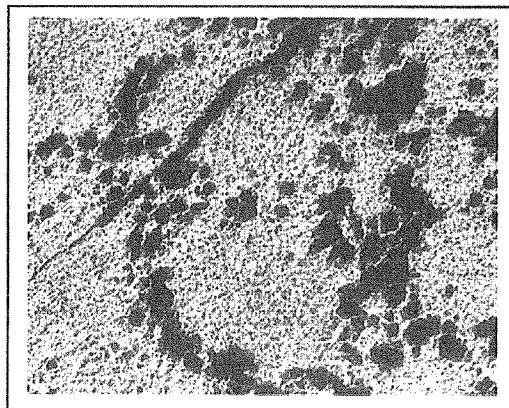
試料番号 A3A1

20 μm

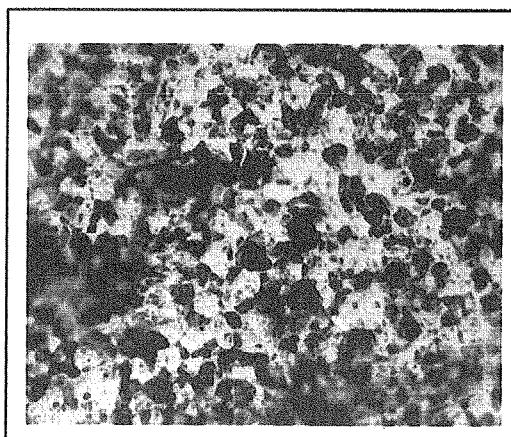
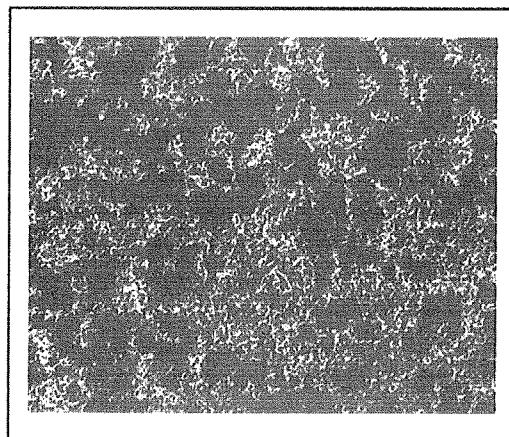
写真 4.11.2 窒化物燃料 I 金相写真



外周部



中間部



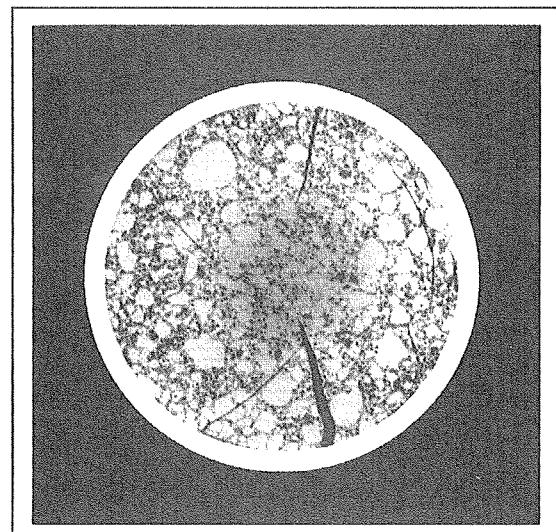
中心部

— 200 μm —

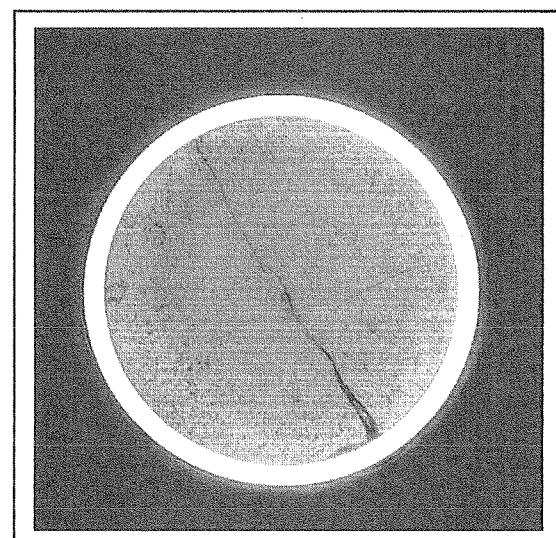
試料番号 B3-2A1

— 20 μm —

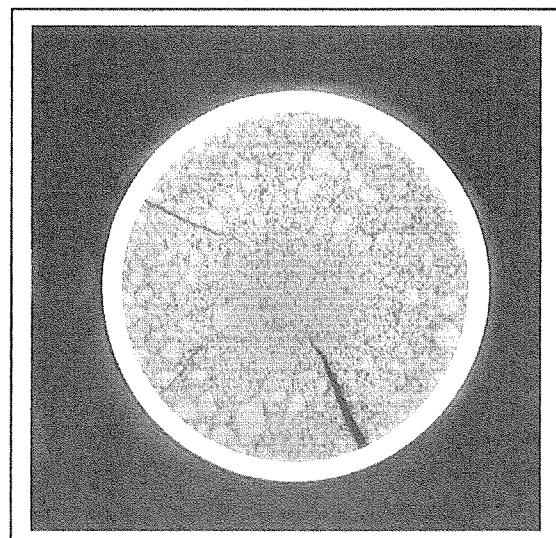
写真 4.11.3 壕化物燃料 II 金相写真



炭化物燃料
試料番号 CA3



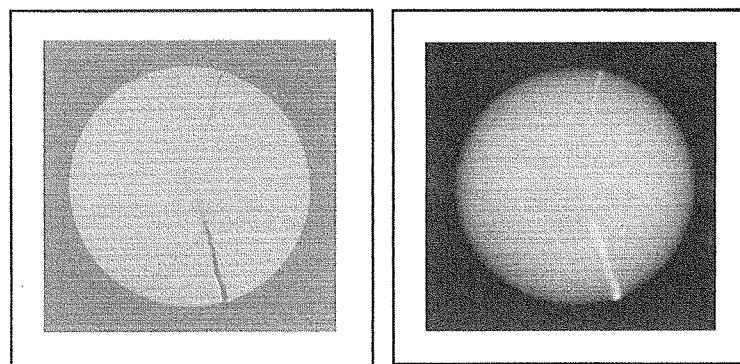
窒化物燃料 I
試料番号 A1A2



窒化物燃料 II
試料番号 B2A2

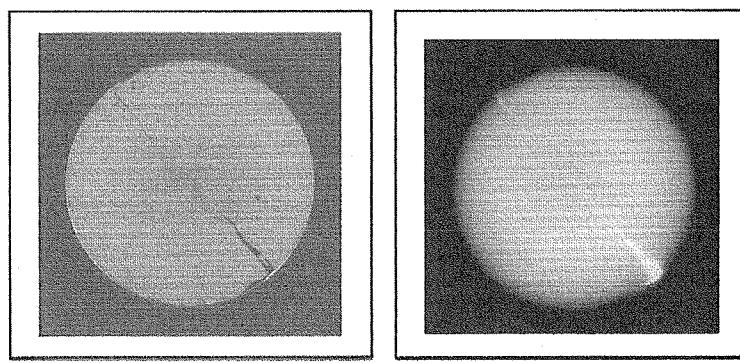
2mm

写真 4.13.1 マイクロガンマ線スキャニング用試料マクロ写真



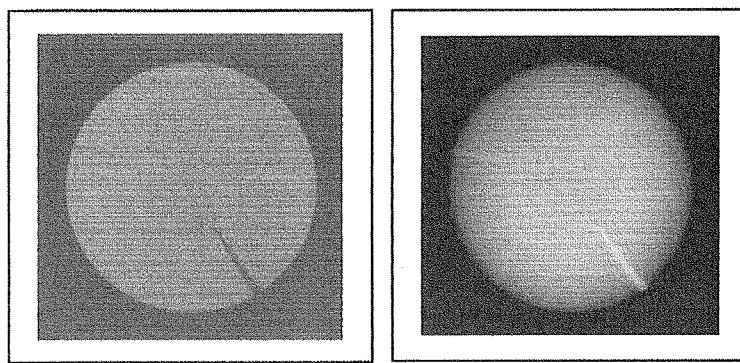
α $\beta\gamma$

炭化物燃料 CA3



α $\beta\gamma$

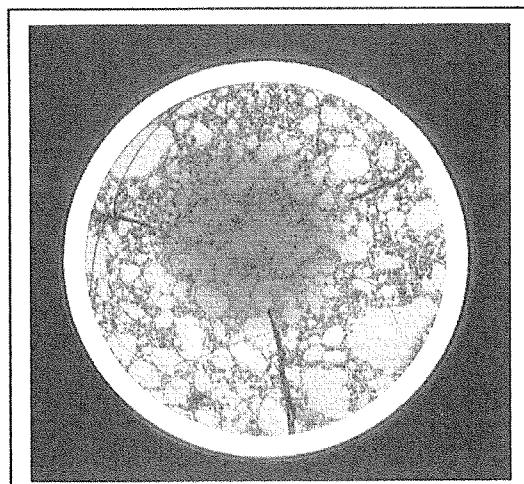
窒化物燃料 I A1A2



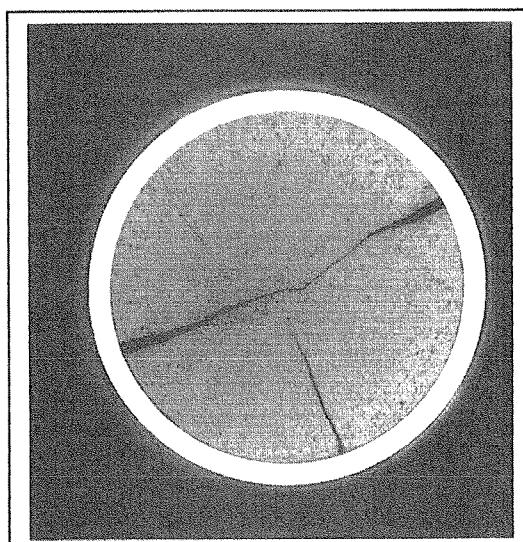
α $\beta\gamma$

窒化物燃料 II B2A2

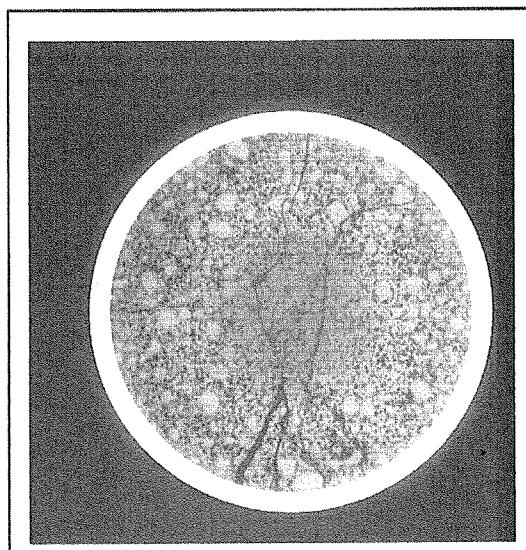
写真 4.14.1 燃料ペレットのオートラジオグラフ



炭化物燃料
試料番号 CA4



窒化物燃料 I
試料番号 A1A1



窒化物燃料 II
試料番号 B2A1

— 2mm —

写真 4.15.1 X 線微小分析用試料マクロ写真

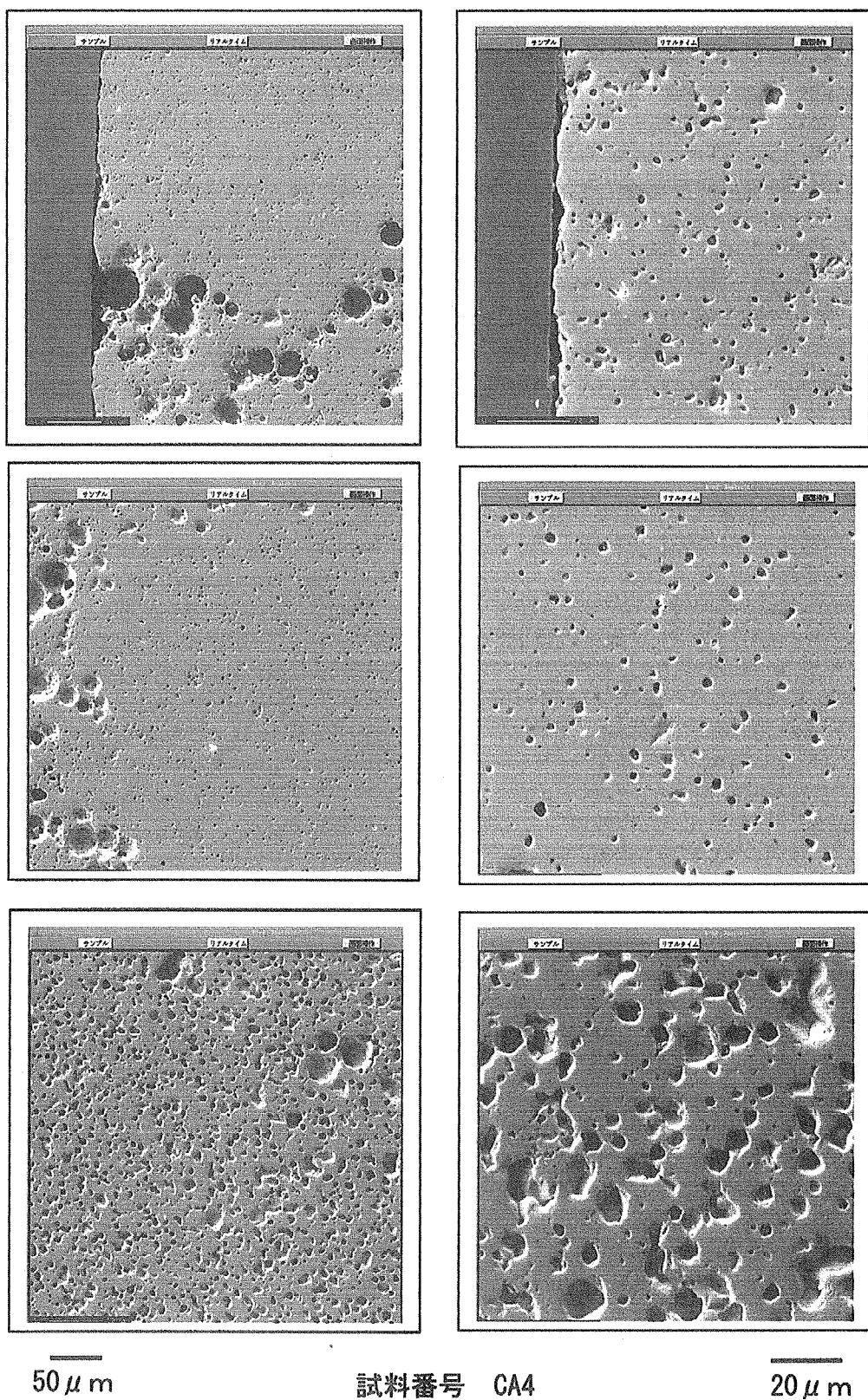


写真 4.15.2 炭化物燃料 SEM 写真



10 μ m Nd

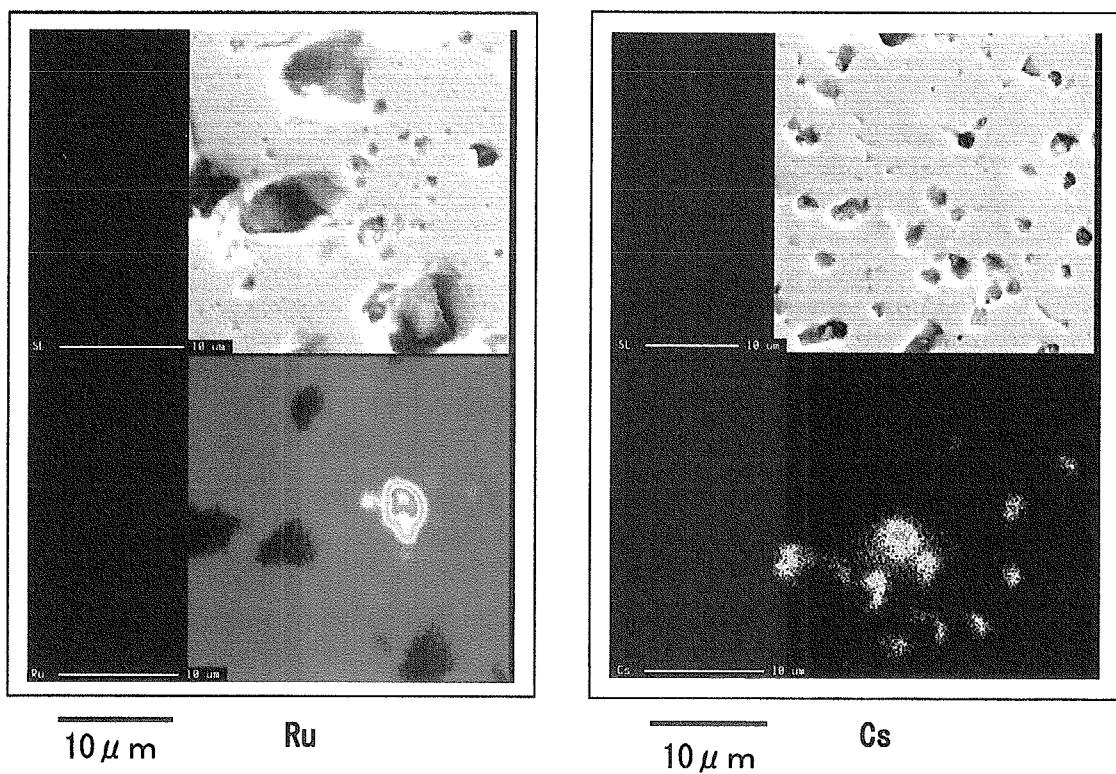


写真 4.15.3 炭化物燃料 FP 元素析出部

This is a blank page.

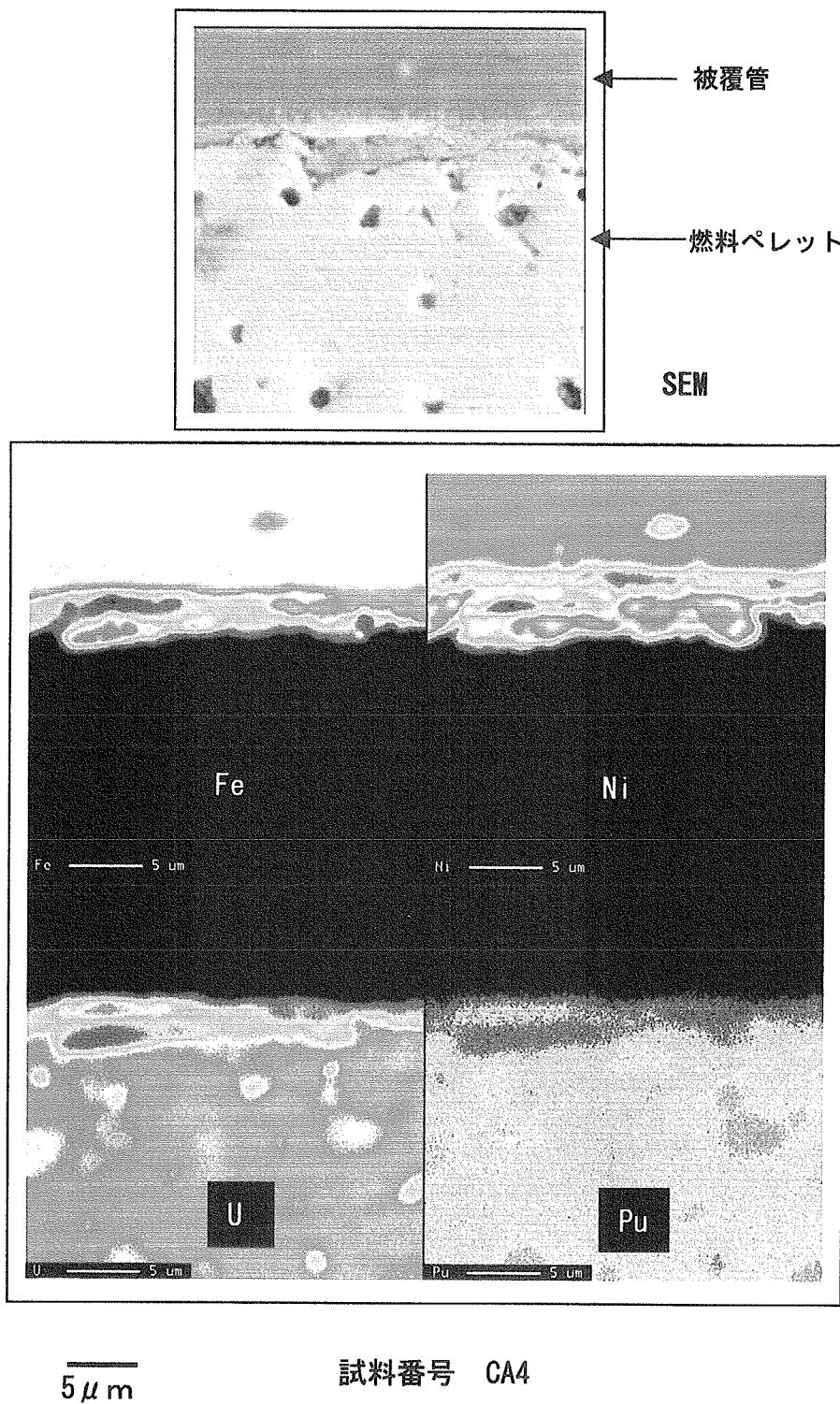
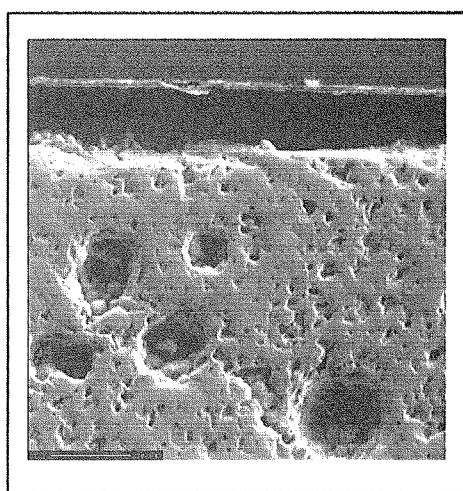
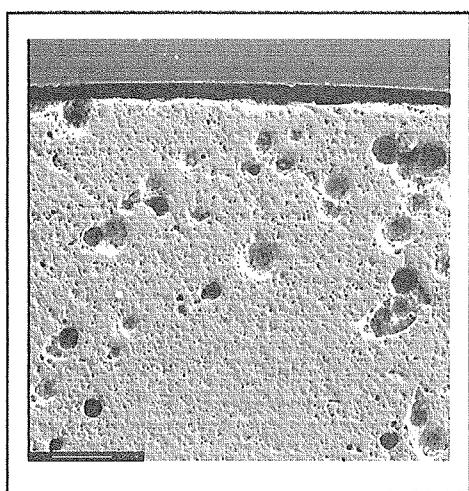
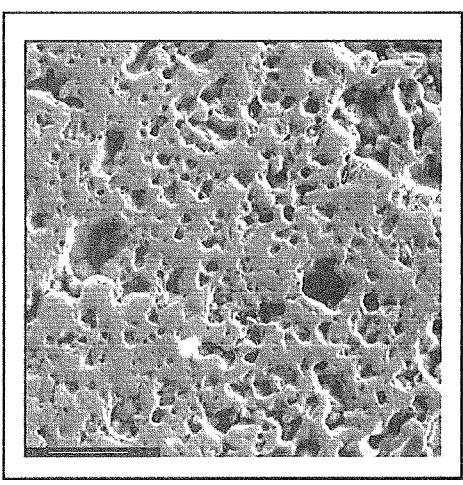
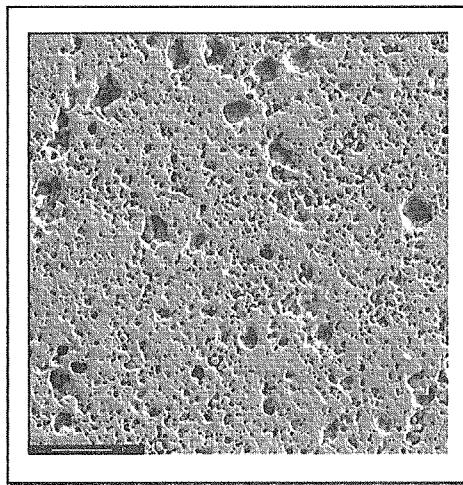


写真 4.15.4 炭化物燃料被覆管境界

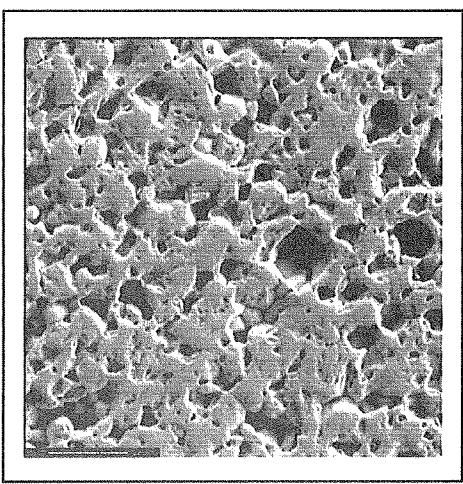
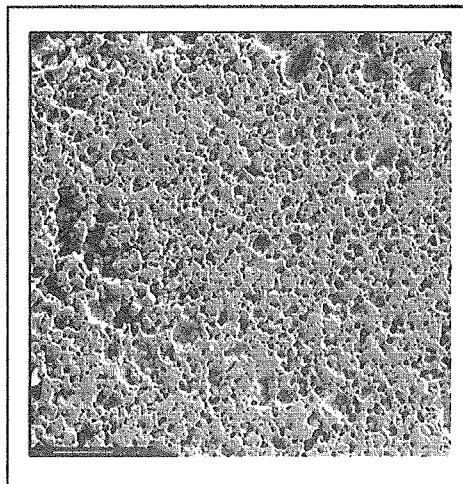
This is a blank page.



外周部



中間部



中心部

50 μ m

試料番号 A1A1

20 μ m

写真 4.15.5 窒化物燃料 I SEM 写真

This is a blank page.

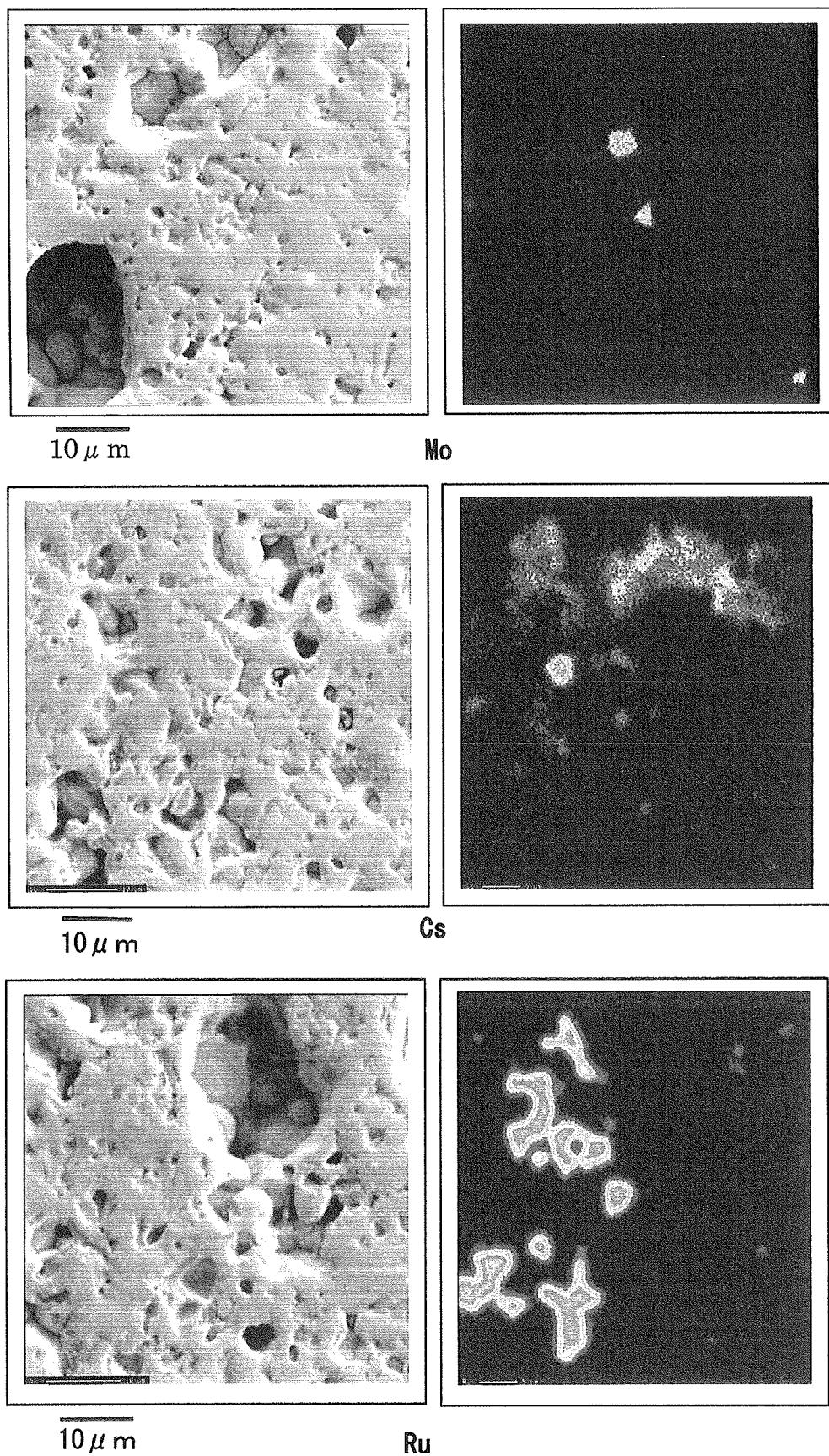


写真 4.15.6 塗化物燃料 IFP 元素析出部

This is a blank page.

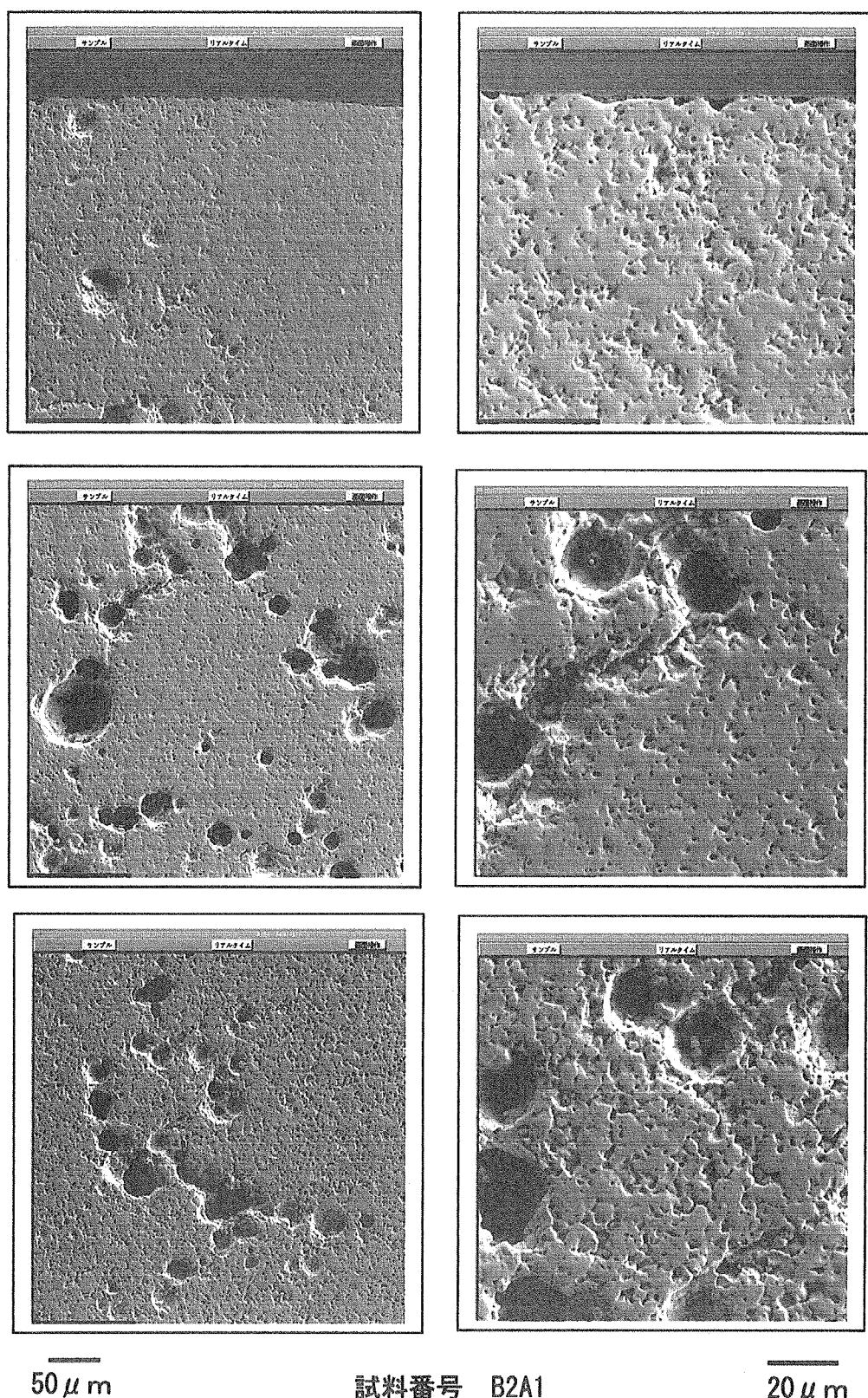
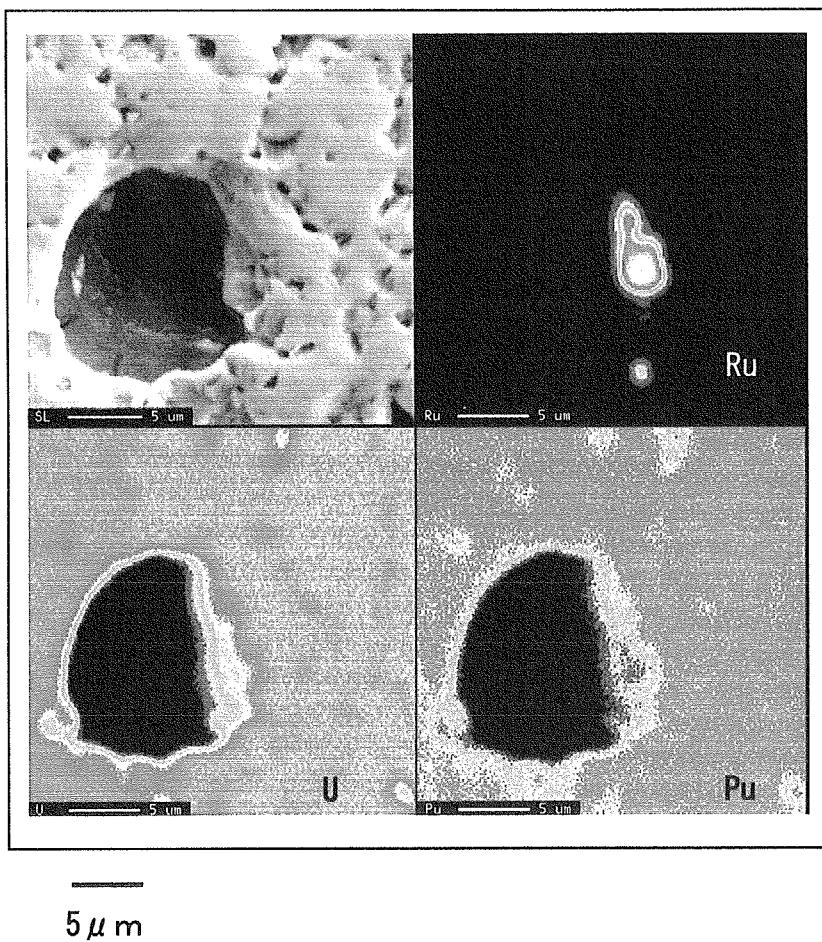


写真 4.15.7 窒化物燃料 II SEM 写真

This is a blank page.



5 μ m

写真 4.15.8 壕化物燃料 II FP 元素析出部

This is a blank page.

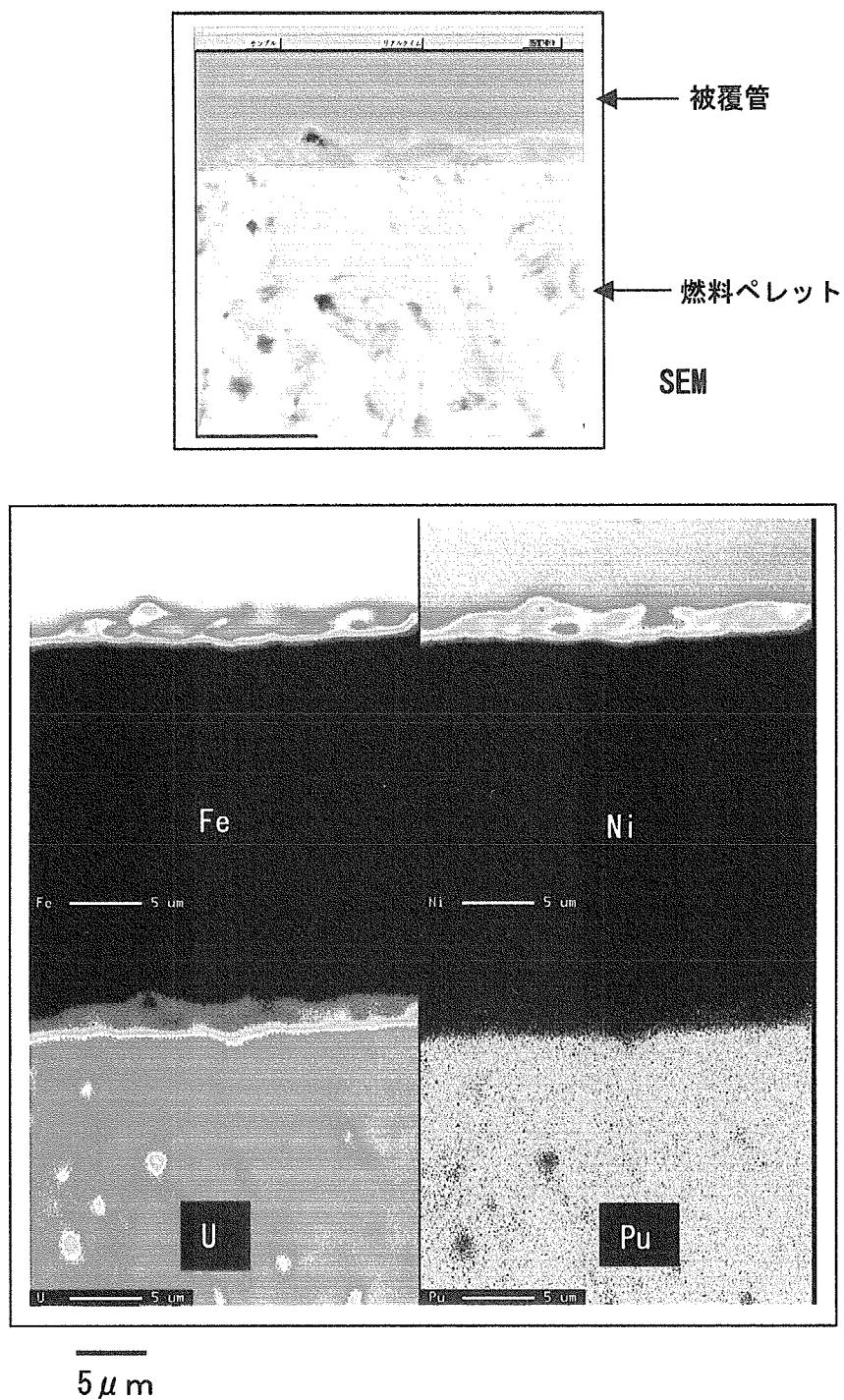
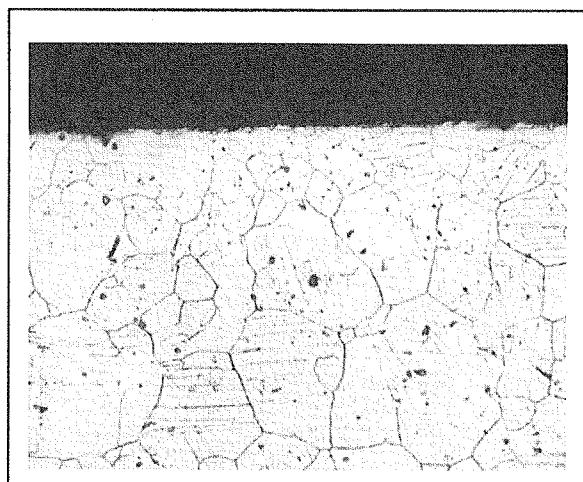
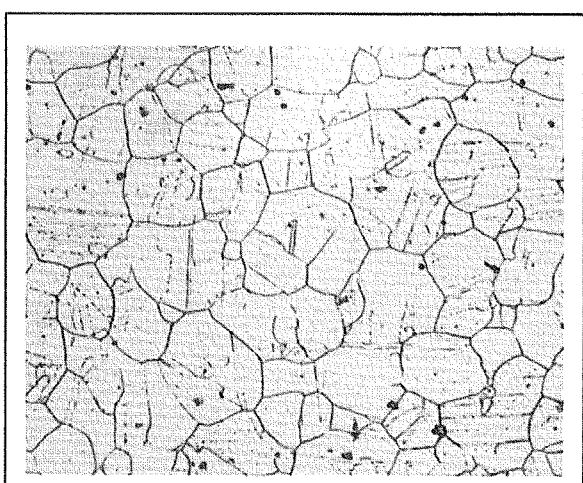


写真 4.15.9 窒化物燃料 II 被覆管境界

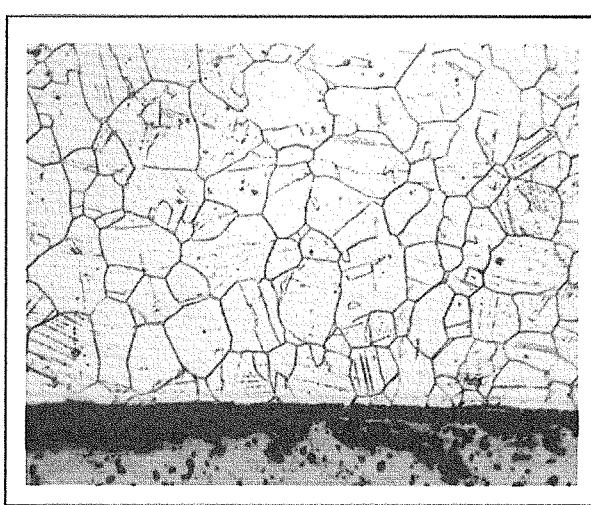
This is a blank page.



外周部



中間部

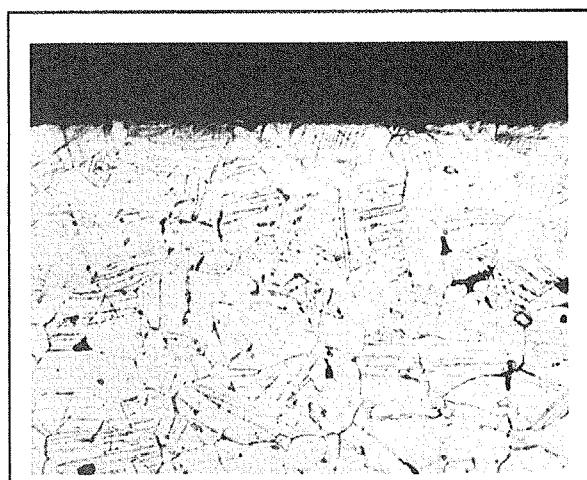


内周部

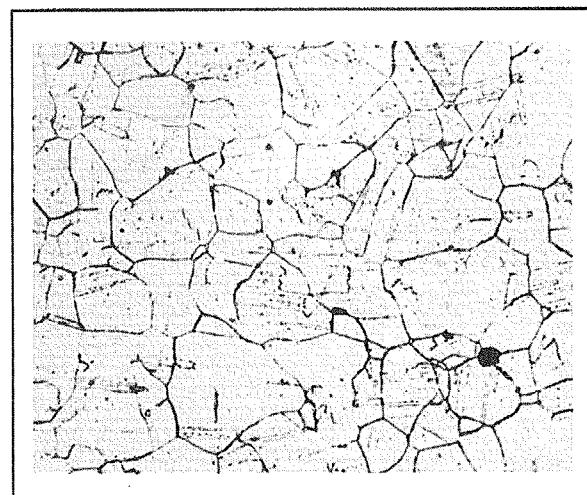
CA3

20 μm

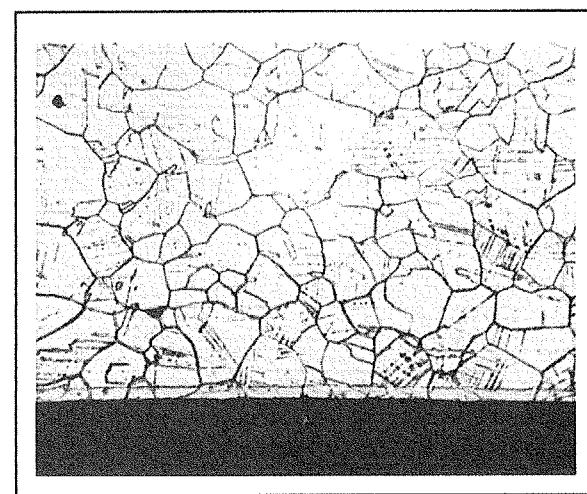
写真 4.17.1 炭化物燃料被覆管金相写真



外周部



中間部

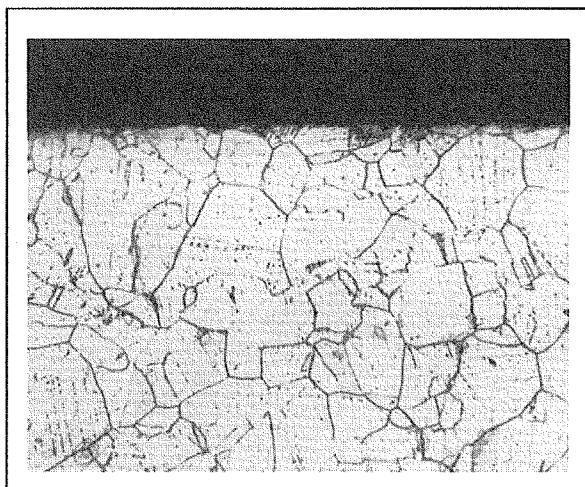


内周部

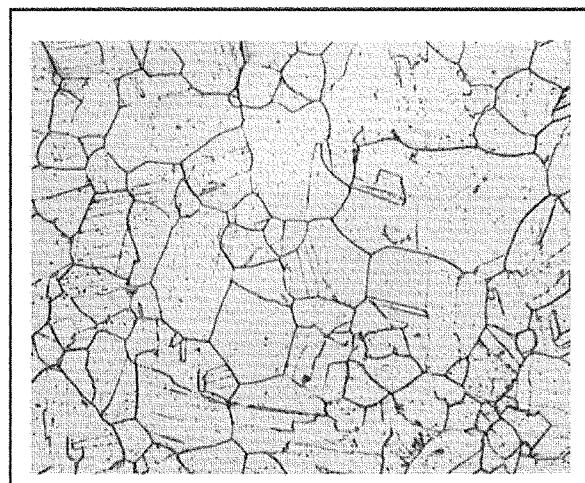
CBC

20 μ m

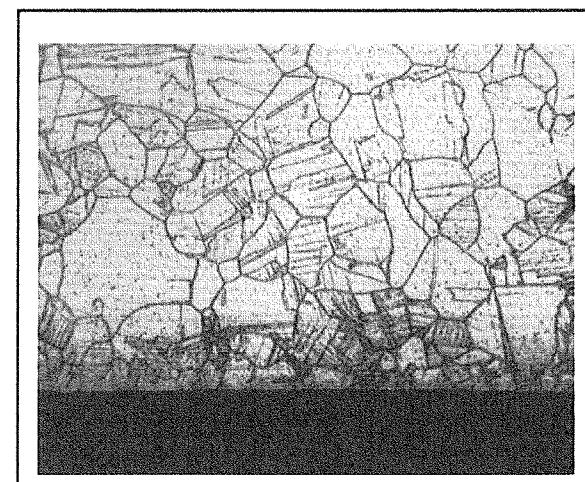
写真 4.17.2 炭化物燃料被覆管金相写真Ⅱ



外周部



中間部

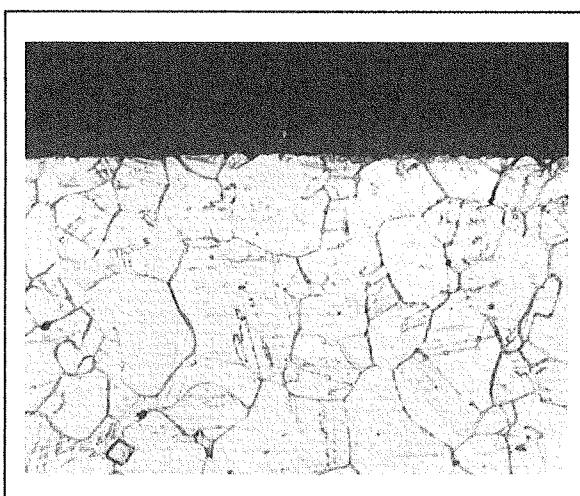


内周部

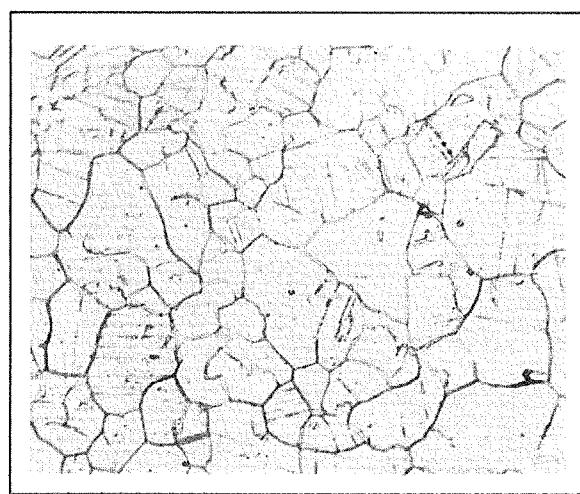
20 μ m

A3BC

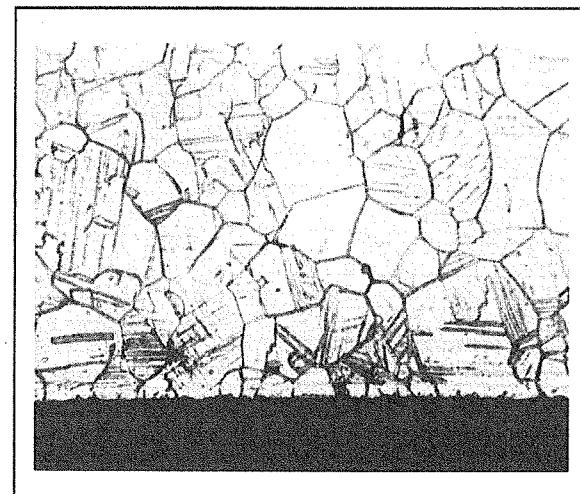
写真 4.17.3 窒化物燃料 I 被覆管金相写真



外周部



中間部



内周部

20 μ m

B3-2AC

写真 4.17.4 窒化物燃料Ⅱ被覆管金相写真

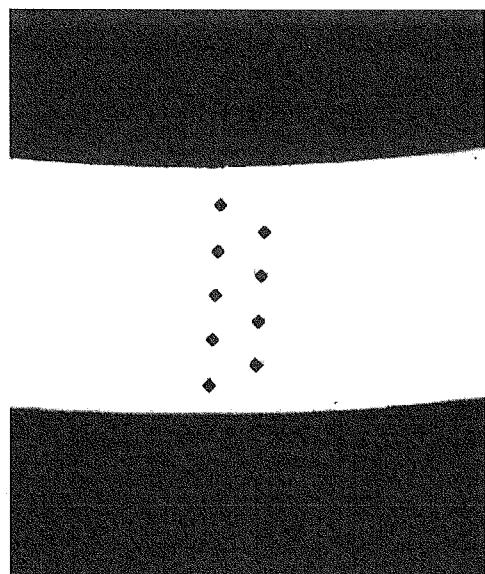


写真 4.18.1 被覆管硬さ測定圧痕写真 (CBC)

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	kg·m/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
力	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

粘度 $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P}(\text{ポアズ})(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}(\text{ストークス})(\text{cm}^2/\text{s})$

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7 \text{ erg}$)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{-18}	$= 4.184 \text{ J} \text{ (熱化学)}$
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{-19}	$= 4.1855 \text{ J} \text{ (15 }^\circ\text{C)}$
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J} \text{ (国際蒸気表)}$
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m/s}$
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-11}		1	100
	3.7×10^{10}	1	0.01	1	

照 射 線 量	C/kg	R	線 量 當 量	Sv	rem
	1	3876		1	100
	2.58×10^{-4}	1			

(86年12月26日現在)

高速炉用炭・窒化物燃料の照射後試験－燃料ポンの破壊試験－(共同研究)

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています