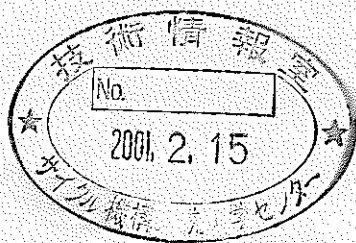


Am含有燃料照射試験 (B8-HAM) の
Am再分布挙動
(試験報告)

2000年6月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

Am含有燃料照射試験(B8-HAM)のAm再分布挙動 (試験報告)

久田 雅樹^{*}、小山 真一^{*}、山本 一也^{*}

要 旨

核燃料サイクル開発機構(サイクル機構)における先進的核燃料リサイクル技術開発の一環として、照射燃料試験室(AGS)では、マイナーアクチノイド(MA)の一つであるAmを添加したMOX燃料試料の作製試験技術開発を進めている。

この照射試験の実施に当たっては、Amの添加がMOX燃料の融点や熱伝導率などの熱物性に与える影響を把握することが、燃料設計や照射挙動評価の際に重要となる。また、製造時には均一であったMOXペレット中のAmが照射により濃度分布が生じ、これが熱物性に影響を与える可能性がある。

試験に供した燃料要素は、保管中の²⁴¹Puの壊変により約1wt% Amを含有するに至ったMOX燃料ペレットを充填し、高速実験炉「常陽」で最大燃焼度26.2GWd/tまで照射したものである。この照射済試料に対して、遮蔽型EPMA(SXMA)を用いて試料横断面の元素分布を測定し、Am濃度分布の変化挙動(再分布挙動)を調べた。

その結果、燃料カラム中央部から採取した試料では、ペレット中心部におけるAm濃度はペレット平均値に対して約20%上昇しており、Puの再分布によるPuの濃度上昇と比較すると低い傾向を示した。また、Am濃度の上昇は、線出力の高い燃料カラム中央部から採取した試料でのみ明確に観察されたことから、Amの再分布はPuと同様に、線出力に対する依存性が強いことが示唆された。

^{*} 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室

Americium Redistribution in Americium Containing MOX Fuel (B8-HAM)

Masaki HISADA*, Shin-ichi KOYAMA* and Kazuya YAMAMOTO*

Abstract

Fabrication tests and irradiation examinations of americium added MOX fuel is planned as a part of JNC reseach project for advanced nuclear fuel recycle system. It is neccessary that evaluation of the influence of adding americium for performances of MOX fuel.

Test MOX fuels (B8-HAM) containning about 1wt% americium that deriveds from decaying plutonium 241 were irradiated up to 26.2 GWd/t in the fast experimental reactor JOYO. Concentration profile of americium in the test fuels was measured by SXMA (shielded X-ray microprobe analyser) and the redistribution phenomena of americium was evaluated.

As the results, at the center of the fuel colmn, it is revealed that americium concentration in the center area of pellet was increased to about 20% relative to the pellet average, and this increase rate is smaller than one of plutonium.

And redistribution of americim was only obsevated clearly at the center of the fuel clomn, so that it is suggested that redistribution phenomena of americium depends on linear heat rate, like one of plutonium.

* Alpha-Gamma Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center

目次

	頁
1. 緒言	1
2. 試験対象試料	2
2.1 照射試料の製造経緯及び諸元、並びに照射条件	2
2.2 照射試料の元素組成の事前評価	2
2.3 試料採取・試料調製方法	3
2.4 未照射リファレンス試料	4
3. 試験方法	5
3.1 SXMA の主な仕様	5
3.2 測定対象元素の特性X線ピークの同定及び確認	5
3.3 径方向の元素分布分析	6
3.4 試料表面の元素面分布分析	7
4. 試験結果	8
4.1 金相試験結果	8
4.2 元素濃度の径方向線分布測定結果	8
4.3 元素濃度の面分布測定結果	9
5. 考察	10
5.1 Pu 壊変に対する補正	10
5.2 再分布係数の定義	12
5.3 照射条件、燃料組成に対する依存性	12
5.4 Am スポットの挙動	13
6. 結言	15
7. 謝辞	16
8. 参考文献	17

表リスト

	頁
表 1 B8-HAM 燃料要素諸元	1 8
表 2 PFB080 特殊燃料集合体照射条件	1 9
表 3 各試料片照射条件	1 9
表 4 各測定に対する Pu 及び Am の再分布係数	2 0
表 5 B8-HAM 及び SUPERFACT 試験の比較	2 0

図リスト

	頁
図 1 B8-HAM 燃料要素構造	2 1
図 2 PFB080 燃料集合体内への B8-HAM 燃料要素装荷位置	2 2
図 3 PFB080 燃料集合体炉内装荷位置 (第25サイクル)	2 3
図 4 「常陽」熱出力履歴	2 4
図 5 測定試料片採取位置	2 5
図 6 未照射試料片：YZ5133 の定性分析結果	2 6
図 7 照射後試料：H701351 の定性分析結果	2 7
図 8 - 1 試料 H701351 中の $UM\alpha$ 線検出結果	2 8
図 8 - 2 試料 H701351 中の $PuM\beta$ 線検出結果	2 8
図 8 - 3 試料 H701351 中の $AmM\alpha$ 線検出結果	2 9
図 9 試料 YZ5133 の特性 X 線相対強度の線分布測定結果	3 0
図 10 試料 H701231 の特性 X 線相対強度の線分布測定結果	3 1
図 11 試料 H701351 の特性 X 線相対強度の線分布測定結果	3 2
図 12 試料 H701481 の特性 X 線相対強度の線分布測定結果	3 3
図 13 試料 H701231 の特性 X 線相対強度 (平滑化済)	3 4
図 14 試料 H701351 の特性 X 線相対強度 (平滑化済)	3 5
図 15 試料 H701481 の特性 X 線相対強度 (平滑化済)	3 6
図 16 試料 H701351 の照射終了時の Am 濃度分布	3 7
図 17 Pu 濃度増加量の既得データとの比較	3 8
図 18 Am 再分布係数と照射条件との関係	3 9

写真リスト

		頁
写真 1	試料 H701231 の横断面金相写真	4 0
写真 2	試料 H701351 の横断面金相写真	4 1
写真 3	試料 H701481 の横断面金相写真	4 2
写真 4	試料 H701231 の径方向分析測定ライン設定位置	4 3
写真 5	試料 H701351 の径方向分析測定ライン設定位置	4 3
写真 6	試料 H701481 の径方向分析測定ライン設定位置	4 4
写真 7	試料 YZ5133 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像	4 5
写真 8 - 1	試料 H701231 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(1)	4 6
写真 8 - 2	試料 H701231 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(2)	4 7
写真 9 - 1	試料 H701351 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(1)	4 8
写真 9 - 2	試料 H701351 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(2)	4 9
写真 10 - 1	試料 H701481 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(1)	5 0
写真 10 - 2	試料 H701481 の Pu 及び Am の X 線像並びに 2 次電子像(2)	5 1

1. 緒言

核燃料サイクル開発機構（以下 サイクル機構）における先進的核燃料リサイクル技術開発の一環として、大洗工学センター 照射燃料試験室（以下 AGS）では、Am を添加した燃料試料（Am 添加率：最大 10wt% 程度）の作製、物性試験及び照射試験計画を進めている。この照射試験にあたって燃料設計や照射挙動評価を行う際は、Am の添加による融点、熱伝導率など、熱物性への影響を把握しておく必要がある。

通常の高速炉用 MOX ペレットにおいては、製造時には均一であった Pu や U の組成が照射によって変化し、特にペレット半径方向の Pu 濃度分布が変化する現象が知られており、この現象は「Pu 再分布」と呼ばれている¹⁾。これまでに「常陽」における照射試験で得た知見によれば、Pu 再分布は線出力 360W/cm 以上の照射条件において生じ、照射によって生じた中心空孔内表面近傍にて Pu 濃度の増加が見られる²⁾。Pu 濃度の増加は、融点の低下や熱伝導率の低下などをもたらすため、その挙動を把握することは、燃料設計や照射挙動評価を行う上で極めて重要である。再分布のメカニズムとしては、Pu と U との蒸気圧の差異、あるいは熱拡散係数の差異が関与しているものと考えられ、多くの研究者により再分布挙動のモデル化が試みられている^{3), 4), 5), 6)}。

Am 添加 MOX においても、蒸気圧や熱拡散係数の差異から、Pu と同様に Am の再分布が起こりうると考えられる。そのため、Am の再分布挙動を実験的に把握することは、Pu の再分布と同様に、熱物性への影響の挙動を理解する上で不可欠である。

しかしながら、これまでに Am の再分布について得られた知見は極めて少なく、現状では PHENIX で照射試験を実施した SUPERFACT 試験において、1 試料断面に対して Am 濃度の径方向分布を取得したものが唯一の報告例である。これによると、初期 Am 含有率 1.8at% (1.82wt%) (対重金属元素、以下同じ)、燃焼度 6.4%FIMA (60GWd/t に相当) の試料で、照射後のペレット中心部では Am 濃度は 1.6wt% であり、ペレット平均値 1.4wt% に対して Am 濃度が 14% 増加したと報告されている⁷⁾。

そこで本試験では、初期 Am 含有率約 1wt% の燃料ペレットを充填した B8-HAM 燃料要素を「常陽」において照射し、遮蔽型 X 線マイクロアナライザ（以下 SXMA）を用いて燃料ペレット横断面の元素分布を測定し、Am 再分布挙動の評価を試みた。

2. 試験対象試料

2.1 試料の製造経緯及び諸元、並びに照射条件

本試験に供した B8-HAM 燃料要素の仕様及び製造プロセスは以下のとおりである。

燃料ペレットは、特殊燃料集合体 PFA010 の予備燃料要素として大洗工学センター照射装置組立検査施設 (IRAF) に保管されていた燃料要素の1本 (A1M09燃料要素) を、東海事業所 プルトニウム開発室 (現プルトニウム燃料開発グループ) に輸送し、1991年5月に燃料要素解体を行い、再焼成及び検査を行ったものである。この燃料は、長期間の保管中に MOX ペレット中の ^{241}Pu が壊変、蓄積することにより、通常よりも高い Am 濃度 (約 1wt%) を有するため、高速炉による ^{241}Am の消滅特性評価を目的とした照射試験に適合するものとして選定されたものである。

本ペレットは PNC316鋼[®] (SUS316 相当鋼) 被覆管に再充填され、同年10月までに B8-HAM 燃料要素として製造を完了した。本燃料要素はB型特殊燃料集合体 PFB080 に装荷され、「常陽」第 25 ~ 27 サイクルで照射された。(ただし第 25' サイクルではラックへ退避し、炉心内には非装荷)。

B8-HAM 燃料要素の諸元を表1、構造を図1 に示す。燃料ペレット直径は 5.339mm、密度 (理論密度比) は 85.91%である (直径、密度ともロット平均)。元素組成については 2.2 項で述べる。燃料カラム長は 550mmで、カラム中の4箇所にも劣化 UO_2 製の熱遮蔽ペレットを挿入した軸方向非均質燃料要素である。

PFB080 試験燃料集合体内へのB8-HAM 燃料要素の装荷位置を図2 に示す。B8-HAM 燃料要素は PFB080 試験燃料集合体のコンパートメント I 内に装荷された。なお、同一コンパートメント内に装荷された4本の燃料要素は、Am 濃度が B8-HAM 燃料要素に比べて低いこと、また燃料ペレット密度仕様値が 93.5%であること以外は、B8-HAM 燃料要素とほぼ同様の仕様である。

PFB080 試験燃料集合体の第25サイクルにおける炉内での装荷位置を図3 に示す。PFB080 試験燃料集合体は全期間に渡り「常陽」の炉心位置 3F2 に装荷された。PFB080 に隣接する集合体は、制御棒集合体: CRT405 が全期間にわたり 3F3 に配置された以外は、いずれも Mk-II ドライバー燃料集合体だった。各サイクルにおける炉心構成の詳細については文献 9) を参照されたい。

PFB080 試験燃料集合体の照射条件を表2 に示す。コンパートメント出口温度及び冷却材流量については、B8-HAM 燃料要素の装荷されたコンパートメント I の値を示した。図4 に「常陽」第 25 ~ 27 サイクルの出力履歴を示す。第27サイクルの途中で1回プラント停止があった以外は、各サイクルとも原子炉熱出力はほぼ 100MW で一定に推移した。

2.2 試料の同位体組成の事前評価

試料中の元素組成、同位体組成は、照射や各核種の壊変によって時間と共に変動してゆく。特に Am 含有率については、今回の SXMA 分析にあたって既知濃度の Am 標準試料を入手できなかったため、化学分析による測定から SXMA 分析時点における測定試料の

Am 含有率を求め、校正用データとして評価した。以下に、SXMA 分析時における測定試料の同位体組成の評価方法及び結果を述べる。

本試料は「常陽」第 25～27 サイクルにて照射された。照射後、最大線出力位置付近より採取した試料に対して、質量分析装置による同位体希釈法及び α 線スペクトル測定により、Am 及び Pu の同位体組成を実測した。照射終了時から実測時までの崩壊を補正し、照射終了時の Am 及び Pu 含有率を以下のように得た¹⁰⁾。

a) 照射終了時(第27サイクル終了): 1993年3月26日 の組成

^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	Pu total	^{241}Am
0.21wt%	18.76wt%	6.46wt%	1.38wt%	0.90wt%	27.71wt%	1.10wt%

照射終了時の組成 a) に対して、照射終了時から今回の SXMA 分析時までの期間に対して崩壊計算を行うことにより、SXMA 分析時における同位体組成は、最大線出力位置において以下のように算出される。なお、SXMA 分析は 1999年8月5～20日の期間で実施したが、本計算では8月13日を中央値として採用した。

b) SXMA 分析時: 1999年8月5～20日 (中央値: 1999年8月13日) の組成

^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	Pu total	^{241}Am
0.20wt%	18.76wt%	6.46wt%	1.03wt%	0.90wt%	27.35wt%	1.44wt%

以下、b) を、SXMA 分析における Am の校正データとして使用した。なお化学分析による Am 含有率の相対誤差は、 $\pm 1\sigma$ で約8%と見積もられる¹⁰⁾。

2.3 試料採取・試料調製方法

照射を終了した B8-HAM 燃料要素から、燃料カラムの上端部、中央部(線出力最大位置付近)、下端部よりそれぞれ1試料ずつ試験試料片を採取した。

試料片の採取(切断)位置を図5に示す。また、各試料片の照射条件を表3に示す。局所燃焼度及び線出力(照射開始時)は燃料カラム中央部試料 H701351 が最大であり、下端部試料 H701231 がそれに次ぎ、上端部試料 H701481 が最も低い。被覆管内表面温度(照射開始時)は、燃料カラムの上部になるに従って高くなっている。

各試料片は切断後、エポキシ樹脂にてマウントに埋め込み、切断面(横断面)に対して鏡面研磨を施した。光学顕微鏡による金相観察を行った後、SXMA 分析を実施した。

2.4 未照射リファレンス試料

照射による効果を評価するためのリファレンス試料としては、B8-HAM 燃料要素に充填したペレットと同一ロットの未照射ペレット（試料番号:YZ5133）を測定に供した。試料調製方法は照射に供した試料と同様である。

3. 試験方法

3.1 SXMA の主な仕様

FMF 金相セル設置の仏国カメカ社製 SXMA を使用して、試料表面の元素分析を行った。使用したカメカ社製 SXMA (CAMEBAX-R) の主な仕様を以下に示す。

照射電流可変範囲	: $3 \times 10^{-6} \sim 10^{-12}$ A
加速電圧	: 2.5 ~ 50 kV (連続可変)
元素分析範囲	: B ~ Am
X線取出角	: 40°
ローランド円半径	: 160mm
分光角度範囲	: $\sin \theta = 0.30200 \sim 0.83000$

3.2 測定対象元素の特性X線ピークの同定及び確認

試料中の測定対象元素の特性X線ピークの同定は、既知濃度の標準試料の測定により得られたピークとの比較により行うべきである。しかし今回は、Am については適当な標準試料を入手することができなかつたため、未照射試料片に対して定性分析を行って得られた特性X線ピークに対して理論回折角との比較検討を行うことにより、Am の特性X線ピークの同定を行った。

未照射試料片 YZ5133 に対する定性分析結果を図6 及び下表に示す。Am $M\alpha$ 及び $M\beta$ 線については、特性X線ピークの理論回折角と同等の回折角にそれぞれ特性X線ピークを検出した。理論回折角に対する偏差は $\sin \theta$ 相当で、それぞれ -0.0039 、 -0.0007 であった (PET 分光結晶に対する数値。以下同じ)。両ピークの間には Pu $M\beta$ 及び U $M\gamma$ 線のピークもそれぞれの理論回折角の同等の回折角にて検出されていること、また $M\alpha$ 線の強度の方が $M\beta$ 線よりも大きいことから、ここで検出したピークは Am の特性X線によるものと判断できる。

特性X線	理論回折角 ($\sin \theta$)	実験値 ($\sin \theta$)	偏差 ($\sin \theta$)
Am $M\alpha$	0.41452	0.4106	-0.0039
$M\beta$	0.39054	0.3898	-0.0007
Pu $M\beta$	0.39847	0.4004	0.0019
U $M\gamma$	0.39714	0.3972	0.0001

しかし、照射済試料では FP等、様々な元素による特性X線による影響も検討する必要がある。Am M α 線と混同する可能性のあるピークは、以下の特性X線が挙げられる。

- 1) Np M β : $\sin \theta = 0.41012$
- 2) Sn L α : $\sin \theta = 0.41143$
- 3) U L β_1 (5次線) : $\sin \theta = 0.41142$
- 4) Tc K β_1 (6次線) : $\sin \theta = 0.41232$

本試験での測定対象試料のうち、最も局所燃焼度の高い照射済試料 H701351 に対して定性分析を行った結果を図7 に示す。測定条件は以下のとおりである(以下、特記の無い限りはこれに同じ)。

分光結晶 : PET
 ビーム加速電圧 : 20kV
 ビーム電流 : 80nA

1) については、Np M α 線が検出されていないことから、排除することができる。同様に 2) についても、Sn L β 線が検出されていないことから排除できる。3), 4) については、高次線であることから一般に回折強度が弱く、有意なピークが検出されることは考えにくいと排除できる。この結果から、本試験においては未照射試料片 YZ5133 での定性分析で検出された回折角度 : $\sin \theta = 0.4106$ で検出される特性X線ピークの強度を Am の相対濃度と見なし、良いことが示された。

また、今回の試験での測定対象元素 : U, Pu, Am について、照射済試料 H701351 に対して定性分析を行い、各元素の特性X線ピークを確認した。各ピークの検出結果を、図8-1~8-3 に示す。

3.3 径方向の元素分布分析

試料片 H701231, H701351, H701481 の横断面に対して燃料中心から被覆管内表面までの間をスキヤニングを行うことにより、測定対象元素の特性X線強度の径方向分布を測定した。特性X線の強度は対象元素の濃度に比例するため、対象元素の相対濃度分布と見なすことができる。

測定は、1試料あたり径方向3方位に対して測定ラインを設定し実施した。測定ラインの設定にあたっては、本試料の密度が 86%TD (理論密度) 程度であり比較的大きな製造時のポアが燃料内に存在するため、これを可能な限り避けて測定ラインを設定した。

測定する元素は U, Pu, Am を対象とした。元素分布の取得にあたり、試料 H701351 について定性分析を行い、U, Pu, Am の特性X線ピークを確認した (図8-1~8-3)。

また、照射による再分布挙動の評価の比較基準とするため、未照射試料片 YZ5133 に対しても同様の条件で X線強度線分布を取得した。測定間隔は 10 μ m ステップで行った。

3.4 試料表面の元素面分布分析

マトリックス中の U, Pu の濃度の偏りの有無の確認、また Pu や Am 濃度の高いスポット状の領域（以下、Pu または Am スポットと称する）の状態の観察を目的として、試料片 H701231, H701351, H701481 の横断面に対して、ペレット中心部及び外周部の任意の各1点について、200 μ m 四方の範囲をスキャンし U, Pu, Am の元素分布を画像として取得した。また、同一範囲に対する SEI 像（2次電子像）の撮影も実施した。また、未照射試料片 YZ5133 に対しても、任意の1点に対して同様の条件で U, Pu, Am の元素分布及び SEI 像を取得した。

4. 試験結果

4.1 金相試験結果

SXMA 分析に先立ち、照射済試料に対して光学顕微鏡による金相観察を行った。各試料の横断面の金相写真を、写真1～3 に示す。

燃料カラム中央部試料 H701351 では、燃料ペレット中心部に中心空孔が形成されており、それよりペレット外側に向かって、柱状晶領域、等軸晶領域、未変化領域の組織が明確に見られた。また、等軸晶領域と未変化領域との境界部には周方向クラックが形成されており、その周辺にはやや黒ずんだ領域（以下、本文ではダークリングゾーンと称する）が観察された。

燃料カラム下端部試料 H701231 では、燃料ペレット中心部に等軸晶領域が見られ、その外側の未変化領域との境界部にはダークリングゾーンが見られた。

燃料カラム上端部試料 H701481 では、燃料ペレット中心部に等軸晶領域が観察された。

4.2 元素濃度の径方向線分布測定結果

照射済試料に対して半径方向に各3方位に測定ラインを設定し、U, Pu, Am の特性X線相対強度の線分布を測定した。各試料に対して設定した測定ラインの位置を写真4～6 に示す。また未照射試料に対しては1ラインを設定し、照射済試料と同様に U, Pu, Am の特性 X線相対強度の線分布を取得した。

未照射試料 YZ5133 の特性X線相対強度の線分布測定結果を図9 に示す。相対強度の数値は、各元素に対して取得したプロファイルの最大値を 1.0 として規格化したものである（以下の特性X線相対強度測定においても同様）。U, Pu, Am とも、未照射試料の相対強度は径方向にわたりほぼ一様だったことから、照射済試料から得られる U, Pu, Am の分布の変化は、照射による効果に起因するものと見なすことができる。

照射済試料の特性X線相対強度の線分布測定結果を図10～12 に示す。特性X線相対強度プロファイルに影響を与える要因としては、以下の3つが考えられる。

- a) 燃料中のポロシティ（ポア、クラック等）の影響
- b) 偶然誤差による測定値のゆらぎ
- c) 再分布挙動による元素濃度変化

各元素の再分布挙動を評価するにあたっては、a) 及び b) の影響を除去することが必要である。a) については、測定点が燃料のポロシティ部（ポア、クラック等）に当たることによって生じ、特性X線強度が各元素とも著しく低下することによって特徴付けられる。よって、これに該当する測定点データはプロファイルから除外することとした。b) に対しては、10点移動平均（100 μm に相当）によってプロファイルの平滑化を行った。ポロシティ部の測定点データの除外及び移動平均による平滑化を施したプロファイルを図13～15 に示す。

燃料カラム下端部試料 H701231 については（図13）、特性X線相対強度はスキャン範囲にわたってほぼ一様だったが、ペレット中心部において Pu 及び Am 強度の増加が見られ

た(同図中の矢印)。

燃料カラム中央部試料 H701351 では(図14)、ペレット外表面より約1700 μm より内側の領域で、Pu 及び Am の特性X線相対強度はペレット中心に向かって増加していた。測定ライン1及び2では、ペレット外表面より約1200 μm の位置で X線相対強度が減少している部位が見られた(同図中の矢印)。Am の分布は Pu と比較して、プロフィール全体を通してやや平坦な傾向が見られた。

燃料カラム上端部試料 H701481 については(図15)、各元素とも特性X線相対強度はスキャン範囲にわたってほぼ一様であり、有意な分布は認められなかった。

4.3 元素濃度の面分布測定結果

測定試料の横断面に対して、Pu 及び Am の特性X線強度面分布画像(以下、X線像)を取得した結果を以下に述べる。

未照射試料 YZ5133 の Pu 及び Am の X線像を2次電子像(SEI)とともに写真7に示す。マトリックスの Pu、Am の特性X線強度(以下、この項においては「濃度」と記す)はほぼ一様で、濃度の偏りや傾斜は観察されなかったが、マトリックス中の数箇所で、ポア内表面を中心に Pu 及び Am 濃度が周囲に比べて高い領域が観察された。分析範囲右下部のポア内表面の Pu、Am 高濃度領域は、SEI では結晶粒が針状を成している部位に対応している。この高濃度領域は、帯状に長さ約 50 μm にわたり分布していた(写真7の矢印)。

カラム下端部試料 H701231 の X線像を写真8-1, 2 に示す。ペレット中心部、外周部とも、マトリックスの Pu、Am の濃度は分布はほぼ一様であり、濃度の偏りや傾斜は認められなかった。ペレット外周部(写真8-2)では、Pu スポットがマトリックス中の数箇所に観察された(写真8-2の矢印)。この Pu スポットのサイズはいずれも直径 10 μm 以下であった。

カラム中央部試料 H701351 の X線像を写真9-1, 2 に示す。ペレット中心部、外周部とも、マトリックスの Pu、Am の濃度はほぼ一様であり、濃度の偏りや傾斜は認められなかった。ペレット外周部(写真9-1)では、Pu スポットがマトリックス中の数箇所に観察されたが(同写真の矢印)、その数はカラム下端部試料 H701231 に比べて少なく、また明瞭でなかった。

カラム上端部試料 H701481 の X線像を写真10-1, 2 に示す。ペレット中心部、外周部とも、マトリックスの Pu、Am の分布はほぼ一様であり、濃度の偏りや傾斜は認められなかった。また、Pu スポットも観察されなかった。

5. 考察

5.1 Pu 壊変に対する補正

4.2 項で述べたとおり、Am 及び Pu の径方向濃度線分布を測定した結果、一部の試料に Am 及び Pu 濃度に径方向の分布の変化が生じていることが観察された。

しかし、試料中の Pu 及び Am の濃度は、 $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ 壊変によって時間と共に変動するため、Am の濃度分布は Pu の濃度分布の影響を受けている可能性がある。すなわち、単に照射済試料の Am の濃度分布を得ただけでは、Am の分布は Pu の照射後の壊変によって Pu 濃度分布の相似を成して生成されたという可能性を否定できず、直ちに Am 自身の再分布挙動を肯定するものにはならない。

よって、照射による Am の再分布挙動を適正に評価するためには、SXMA 分析により取得した Am 濃度分布から ^{241}Pu の壊変に由来する Am の影響を除く必要がある。以下に、 ^{241}Pu の壊変が試料中の Am 分布に与える影響について、照射前後の各段階ごとに考察する。

(1) 照射前

照射に供した試料と同一ロットの未照射試料 YZ5133 に対する SXMA 分析結果では、燃料中に Pu スポットが観察されたがマトリックスの Pu、Am 濃度はほぼ一様で、濃度の偏りは認められなかった (4.2 項及び 4.3 項、並びに図9 及び写真7 参照)。

このことから、照射済試料マトリックスの Pu、Am 分布も同様にほぼ一様だったものと見なすことができる。Pu、Am 濃度の初期分布が一様の場合、Pu 及び Am の濃度は ^{241}Pu の壊変に伴い変化するが分布は常に一様のまま推移する。

(2) 照射中

照射中に、Am の再分布挙動以外に燃料中の Am 濃度及びその分布を変化させる要因としては、以下のものが考えられる。

- a) ^{241}Pu の壊変による ^{241}Am の生成
- b) 中性子との反応 (捕獲、核分裂) による Am の生成及び消滅

が挙げられる。さらに、以下に挙げる Pu 濃度及び分布を変化させる要因は、上記 a) に対して影響を与える。

- c) Pu の再分布
- d) 中性子との反応 (捕獲、核分裂) による Pu の生成及び消滅

b)、d) については、高速炉条件では燃料ペレット中の中性子束、エネルギー分布はほぼ一様であることから、ペレット中のどの位置においても、燃料を構成する元素1原子あたりの b)、d) の反応率はほぼ一様である。よって、照射による中性子との反応自体がペレット中の元素濃度の相対的な空間分布の形状に有意な変化を与えることはない。

また c) 及びそれに伴う a) については、今回の照射試験では試料の初期 Pu 濃度、照射条件ともに通常の「常陽」ドライバー燃料とほぼ同様の条件だったことから、別段の特異

性があったとは考えられない。よって、照射挙動として Am 濃度変化を評価する観点からは、上記 a) ~ d) による効果と Am 自身の再分布挙動による効果とを特に区別する必要は無いと考えられる。

(3) 照射後

照射後には燃料ペレット内において Pu、Am の再分布を生じさせる要因は無いことから、その後の壊変により新たに生成する Am の分布は、照射終了時の Pu の分布に相似する。

上記 (1) (2) (3) より、照射による Am の再分布挙動を評価するためには、照射終了時の Am 分布を評価すれば十分である。SXMA 分析時の Am 及び Pu の分布から照射終了時の Am 分布を評価する方法は、以下のとおりとなる。

- ① Pu、Am それぞれの特性X線強度線分布に対して平均値を算出する（線分布の平均値を算出する方法は 5.2項 を参照のこと）
- ② ① で得た線平均強度を、SXMA 分析時における Pu 及び Am の含有率（化学分析値からの推定値）で較正することにより、SXMA 分析時における Pu、Am のそれぞれの絶対濃度の線分布を得る
- ③ ② の Pu 絶対濃度分布から崩壊計算により、照射終了時の Pu 絶対濃度分布を推定した上で、壊変による Am 生成量分布を得る
- ④ ② の Am 絶対濃度分布から ③ の Am 生成量分布を減ずることにより、照射終了時の Am 濃度分布を得る

以上のプロセスにより、燃料カラム中央部（最大線出力位置）試料 H701351 に対して、2.2 項 a)、b) の同位体組成を用いて Am 濃度絶対値の径方向分布を算出することが可能である。その結果を図16 に示す。図には壊変補正を行う前（SXMA 分析時）の Am 濃度分布を併記した。

壊変補正の前後の差分が、照射終了後からSXMA 分析時に至る期間の ^{241}Pu の壊変により生成された Am の増分に相当し、その量は 試料 H701351 では約 0.5wt% と評価された。また、Pu の再分布によりペレット中心部で Pu 濃度が増加していることを反映し、Am の壊変による増分は、ペレット中心部で多くなる傾向が見られた。

なお、Pu の壊変による Am 増加量の誤差の大きさは、照射終了時の Pu 含有率分析値の誤差が主要因となるが、これは相対値で約 1.2% と評価されている¹⁰⁾。このことから、Pu の壊変による Am の増加量：約 0.5wt% における誤差は $\pm 0.0006\text{wt}\%$ にすぎない。一方、SXMA による Am 定量測定の相対誤差は 5%前後 であったため、B8-HAM 試料の Am 濃度：1wt% における誤差は $\pm 0.05\text{wt}\%$ 程度 となるので、これと比較すると有意な値とはならない。

図16 において「照射終了時」とした壊変補正後の Am 濃度分布においても、明らかに Am の燃料中心への再分布が認められることから、Am の再分布挙動は Am 自身が照射時の温度勾配によって移動することにより生じるものと判断できる。

5.2 再分布係数の定義

ペレット内の径方向の再分布挙動を定量的に比較評価するために、以下に「再分布係数」を定義する。

$$\text{再分布係数} = \frac{\text{測定区間中の元素濃度の最大値 (a)}}{\text{測定試料の元素濃度の平均値 (b)}}$$

測定区間中の元素濃度の最大値 (a) の算出方法としては、偶然誤差の除去を図るため、10点移動平均値 (4.2 項参照) の最大値を用いた。

測定試料の元素濃度の平均値 (b) の算出方法としては、以下の方法を用いた。即ち、線分析で得られた各測定点の濃度値は、微小な測定スポット幅を有しペレット径方向位置を半径とする同心円環の微小面積における元素濃度を代表したものであることから、ペレット中心部に比べてペレット外周部の測定点の方がペレット全体の濃度に与える寄与が大きいことになる。よって、線分析で取得した各測定点のデータを単純に算術平均を取ることは適当でない。そこで、線分析で取得した各測定点での濃度値に対して、各測定点のペレット中心からの距離に対応する円周長さを乗じた上で径方向積分を行い、積分範囲に該当する面積で除したものを平均値 (b) として評価した。

上記の式の定義により、各照射済試料での Pu 及び Am 濃度測定結果より再分布係数を算出した結果を表4 に示す。誤差範囲は、(a) (b) それぞれの誤差範囲の二乗の和の平方根を取ることで合成して得たものであり、 $\pm 1\sigma$ に相当する。今回の測定では、Am 及び Pu 再分布係数の誤差範囲は 5% 前後と評価された。

Am 再分布係数は、燃料カラム中央部試料 H701351 で最も大きく 1.22 であった。当該試料については、5.1 (3) 項のプロセスにより Pu 壊変補正值も算出し、1.17 と得られた。上端部試料 H701481 では再分布係数は誤差範囲に対して有意な値ではなく、また下端部試料 H701231 についても、照射後の Pu 壊変による Am 生成の影響も考慮すると、直ちに有意な値であるとは言えない。

Pu 再分布係数は H701351 で最も大きく、1.33 であった。この値を Pu 濃度増加量に換算すると 9.14wt% に相当する。この結果は、これまでの照射試験で取得した再分布による Pu 濃度増加データ⁹⁾ (図17) に良く一致する。H701351 で Am 及び Pu の再分布係数を比較すると、Pu の方が有意に大きく、Am の再分布挙動は Pu に及ばないことが示唆される。

5.3 照射条件、燃料組成に対する依存性

Pu の再分布挙動についてはこれまでに様々な知見が得られており、照射条件に対する依存性としては、燃焼度より線出力が大きな効果を有することが指摘されている^{2), 3), 1), 5)}。Pu 再分布の機構には、固相輸送 (熱拡散) と気相輸送の両者が関与しているものと考えられているが、この両者とも、温度勾配下における元素間の蒸気圧や拡散係数の差異が元素濃度の

再分布をもたらすものと考えられていることから^{3), 4), 5)}、Am 再分布挙動についても Pu 再分布と同様の機構が関与し、同様の依存性を有する可能性が考えられる。

Am の再分布係数を照射条件（線出力（照射初期値(BOL)）及び局所燃焼度（GWd/t））に対して整理した結果を図18 に示す。5.2 項で述べたとおり、燃料カラム中央部試料 H701351（線出力：411 W/cm、局所燃焼度：27.3 GWd/t）以外では再分布係数は有意な値ではないが、下端部試料 H701231（線出力：304 W/cm、局所燃焼度：20.3 GWd/t）については、ペレット中心部での Am 濃度が増加が観察されていることから（4.2 項、図13）、Am の再分布は線出力または局所燃焼度に対して増加する傾向あると言えることができる。

本試験では1燃料要素に対して照射試験を行ったのみであるため、線出力及び局所燃焼度を区別して再分布係数に対する影響を評価することはできない。しかし、今回取得した Am の再分布挙動の傾向は、線出力の高い領域の燃料中心部で濃度が増加するという点で、Pu の傾向に良く類似していることから、両元素の再分布のメカニズムには共通した点が存在することが示唆される。よって Am についても、照射条件に対する依存性としては、線出力が燃焼度に対してより大きな効果を持つと類推することは妥当と考えられる。

また、Pu 再分布については、燃料組成、即ちPu 濃度、O/M 比と密接な関連があると考えられており、特に「常陽」での照射試験の経験からは、製造時の Pu 濃度が高いほど、また O/M 比が高いほど、再分布が顕著になる傾向が観察されている³⁾。これについては、Pu 濃度及び O/M 比と格子欠陥密度との間には密接な関連があり、また格子欠陥密度と拡散係数の間にも密接な関連があることが、燃料組成と Pu 再分布挙動の燃料組成に対する依存性をもたらしているものと考えられている^{3), 4), 5)}。本試験では Am の再分布挙動に対する燃料組成の影響について検討を行うことはできなかったが、Am についても Pu の類推から、燃料組成に対する依存性が存在する可能性が考えられる。

SUPERFACT 試験と今回の結果（燃料カラム中央部試料 H701351）との比較を表5 に示す。線出力がほぼ同等の照射条件において、同等の再分布係数が得られている。両試料では燃焼度は大きく異なるが、再分布係数はほぼ一致し、Pu の再分布からの類推により線出力が支配的パラメータと考える限りでは、この結果は妥当と思われる。しかし燃料仕様のうち、特に燃料組成である Am 含有率及び O/M 比の差異が大きいことから、Am の再分布挙動については種々の Am 含有率及び O/M 比の照射済試料に対して同様な試験を行い、Am 再分布挙動の燃料組成依存性を明らかにすることが重要と考えられる。

5.4 Am スポットの挙動

未照射試料では Am の濃度の高い領域は Pu のそれとほぼ同位置に観察されたことから（写真7）、照射中も、Pu スポットは燃料中において Am スポットとほぼ同様の位置に存在しているものと考えられる。

照射済試料については、線分析では Am の濃度プロファイルが明瞭に検出されたものの、面分析では Am スポットは観察されなかった。この理由としては、面分析では線分析に比べて元素濃度の差異に対する検出感度が低いためと考えられ、またスポット中の Am の

は Pu に比べて低いことから、Am の特性X線強度が面分析での画像取得の検出限界を下回ったことにより、スポットを検出できなかったものと考えられる。

Am スポットの挙動については、同一ロットの未照射試料では Am スポットが観察されたのに対して、照射済試料では局所燃焼度及び燃料温度ともに低い燃料カラム下端試料外周部においても Am スポットが検出されなかった結果から推測すると、Am 濃度は、照射の初期段階において面分析で濃度差が識別できる限界以下となったものと考えられる。ただし、ロット中でのスポット密度のばらつきによる影響も完全には否定できないので、今後の検討の必要を残している。

6. 結言

約1wt% Am を含有した MOX 燃料試料を「常陽」にて照射し、試料横断面に対して SXMA 分析にて元素濃度分布を取得した。この試験にて得られた知見を以下に示す。

- (1) Am を約1% 含有する MOX 燃料中において、試料中心部では Am の濃度が増加していた。線出力 411W/cm、燃焼度 27.3GWd/t の照射条件において、ペレット中の Am 濃度の増加量は、ペレット平均濃度に対して最大 約20% であった。これは、Pu の増加量 (約33%) と比較して有意に少ない量であった。
- (2) Am 再分布挙動の照射条件に対する依存性としては、線出力の増加に対して、ペレット中心空孔表面付近での Am 濃度の増加量は大きくなる傾向が見られ、Pu と同様の傾向が観察された。

7. 謝辞

本報告書の作成にあたっては、大洗工学センター システム部 燃料材料Gr. 石井 徹哉 副主任研究員には Pu 再分布挙動の知見等について数多くのご教唆を頂きました。大洗工学センター 実験炉部 技術課 関根 隆 研究員には「常陽」熱出力履歴の提供を頂きました。大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室 逢坂 正彦 研究員には B8-HAM 試料の化学分析データの提供を頂きました。

また、原子力技術株式会社の大里 行弘 氏には SXMA でのデータ取得及び金相写真撮影において多大なご協力を頂いたことを記し、ここに深くに感謝の意を申し上げます。

8. 参考文献

- 1) 日本原子力学会 編 : プルトニウム燃料工学, p. 234-235 (1998)
- 2) 丸山 忠司 他 : 「常陽」Mk-II 炉心燃料の挙動評価(1), PNC ZN9410 92-311, p. 5-6 (1992)
- 3) M. Bober and G. Schumacher : Material transport in the temperature gradient of fast reactor fuels, *Advances in Nucl. Sci. and Tech.*, vol. 7, p. 121-179 (1973)
- 4) HJ. Matzke : "Diffusion in nonstoichiometric oxides" in *Nonstoichiometric oxides*, chap. 4, Academic Press, New York, p. 155-232 (1981)
- 5) 石井 徹哉 他 : Pu 再分布挙動評価, PNC ZN9410 93-055 (1992)
- 6) 石井 徹哉 他 : 日本原子力学会「1993秋の学会」要旨集, K20 (1993)
- 7) C. T. Walker and G. Nicolaou : Transmutation of neptunium and americium in a fast neutron flux: EPMA results and KORIGEN predictions for superact fuels, *J. Nucl. Mater.*, vol. 218, p. 129-138 (1995)
- 8) 大洗工学センター燃料材料開発部 編 : 高速増殖炉(FBR)の研究開発 4. 燃料材料開発, 動燃技報 No. 73, p. 44-45 (1990)
- 9) 田渕 士郎 他 : 「常陽」MK-II 炉心特性データベース, JNC TN9410 99-003 (1998)
- 10) 小山 真一 他 : 高Am含有燃料ピン(B8-HAMピン)の ^{241}Am 分析及び燃焼度依存性評価, PNC TN9410 96-301 (1996)

表1 B8-HAM 燃料要素諸元

被覆管	
被覆管番号	SM6139
ロット番号	S597(60MK ミルシートNo.JS-MK-II-0027-3)
外径	6.5±0.03mm
肉厚	0.470±0.03mm
ペレット	
炉心燃料ペレット	
ロット番号	HAM-001
ペレット直径	平均値 5.339mm
ペレット高さ	平均値 8.042mm
ペレット密度	平均値 85.91%(理論密度比)
O/M 比	1.99
Pu富化度 (PuO ₂ / PuO ₂ +UO ₂)	28.7wt%
U濃縮度	21.5wt%
核分裂性物質含有率 (²³⁹ Pu+ ²⁴¹ Pu+ ²³⁵ U / Pu+U)	37.1wt%
ブランケットペレット	
ロット番号	HAM-IP1
ペレット直径	平均値 5.400mm
ペレット高さ	平均値 12.162mm
ペレット密度	平均値 93.68%(理論密度比)
U濃縮度	0.224wt%
O/U 比	2.01

表2 PFB080 特殊燃料集合体 照射条件

サイクル		25	26	27	計
運転期間		1992. 8. 14~ 1992. 10. 22	1992. 12. 21 ~1993. 2. 2	1993. 2. 20~ 1993. 3. 26	
最大熱出力 (MW)		100	100	100	
本サイクル運転時間 (H)		1648.88	1029.25	785.51	3463.64
100MW相当日数 (EFPD)		64.849	39.513	30.085	134.447
最大中性子束 (10×10^{15} n/cm ² /s)	Total	3.66	3.72	3.73	
	$E \geq 0.1$ MeV	2.45	2.49	2.49	
コンパートメント出口温度 (°C)	BOC	547	546	545	
	EOC	543	544	543	
コンパートメント冷却材流量 (kg/s)	BOC	0.29	0.29	0.29	
	EOC	0.29	0.29	0.29	

表3 試料片照射条件

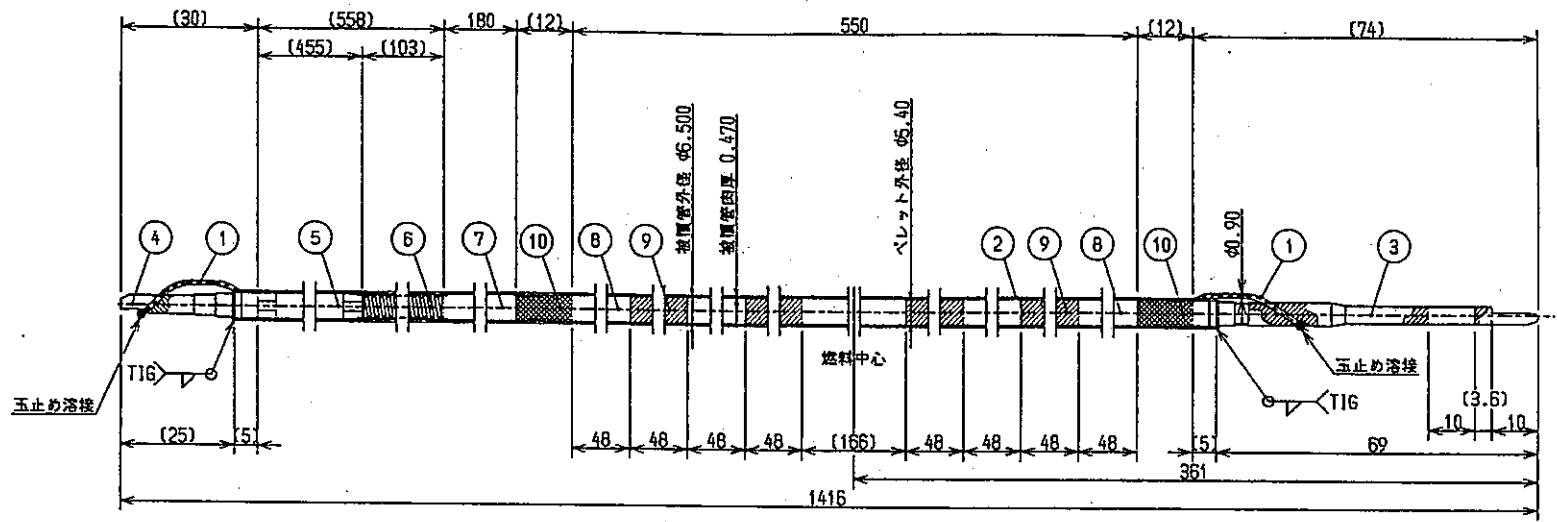
試料片		H701231(下端)	H701351(中央)	H701481(上端)
燃料要素軸方向位置	X/L	0.03	0.51	0.97
	DFCB(mm)	17.9	283.2	534.6
局所燃焼度 (GWd/t)		20.3	27.3	16.4
線出力 (W/cm)	BOL	304	411	242
	EOL	291	393	243
被覆管内表面温度(°C)	BOL	409	522	555
	EOL	407	517	552

表4 各測定に対するPu及びAmの再分布係数

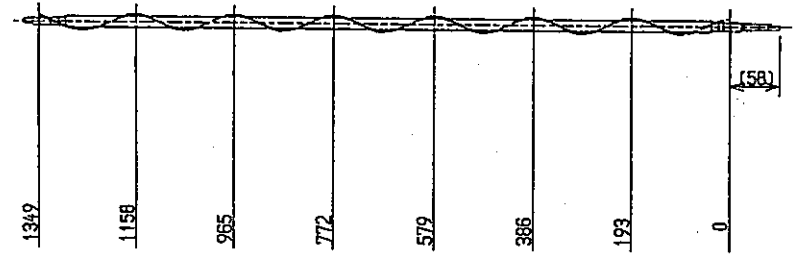
試料	測定ライン	Pu再分布係数		Am再分布係数		
			誤差範囲		Pu壊変補正值	誤差範囲
H701231(下)	測定ライン1	1.08	4.1%	1.08		4.3%
	測定ライン2	1.07	7.5%	1.09		6.1%
	測定ライン3	1.03	4.2%	1.04		3.6%
	平均	1.06	5.3%	1.07		4.7%
H701351(中央)	測定ライン1	1.31	5.8%	1.20	1.16	5.8%
	測定ライン2	1.38	3.2%	1.23	1.17	5.1%
	測定ライン3	1.30	4.2%	1.23	1.19	4.2%
	平均	1.33	4.4%	1.22	1.17	5.0%
H701481(上)	測定ライン1	1.04	5.3%	1.03		7.0%
	測定ライン2	1.05	4.6%	1.04		5.1%
	測定ライン3	1.04	10.4%	1.04		5.6%
	平均	1.04	6.8%	1.04		5.9%

表5 B8-HAM及びSUPERFACT試験の比較

照射試験		B8-HAM	SUPERFACT
再分布係数		1.17	1.14
照射条件	燃焼度(GWd/t)	27.3	60
	線出力(W/cm)	411	380
燃料仕様	ペレット直径(mm)	5.34	5.42
	ペレット・被覆管ギャップ (直径値、mm)	0.22	0.23
	密度(%TD)	85.9	96.3
	Am含有率(wt%)	0.98	1.82
	Pu含有率(wt%)	28.6	23.8
	O/M比	1.99	1.957



ピン番号
B8HAM



ラッピングワイヤー全体図

10	熱遮蔽ペレット(スタック外)(4)	劣化UO ₂		ペレットマーク付
9	熱遮蔽ペレット(スタック内)(4)	劣化UO ₂		ペレットマーク付
8	燃料ペレット(5)	PuO ₂ -UO ₂		
7	要素反射体(5)	SUS316相当鋼	1	20%W.
6	プレンナムスプリング(4)	SUS304WPB	1	
5	和え板付きプレンナムスリーブ(5)	SUS316	1	
4	上部端柱(5)	SUS316相当鋼	1	20%W.
3	下部端柱(5)	SUS316相当鋼	1	20%W.
2	被覆管(5)	SUS316相当鋼	1	20%W.
1	ラッピングワイヤ(6)	SUS316相当鋼	1	20%W.
品番	品名	材質	個数	備考

図1 B8-HAM 燃料要素構造

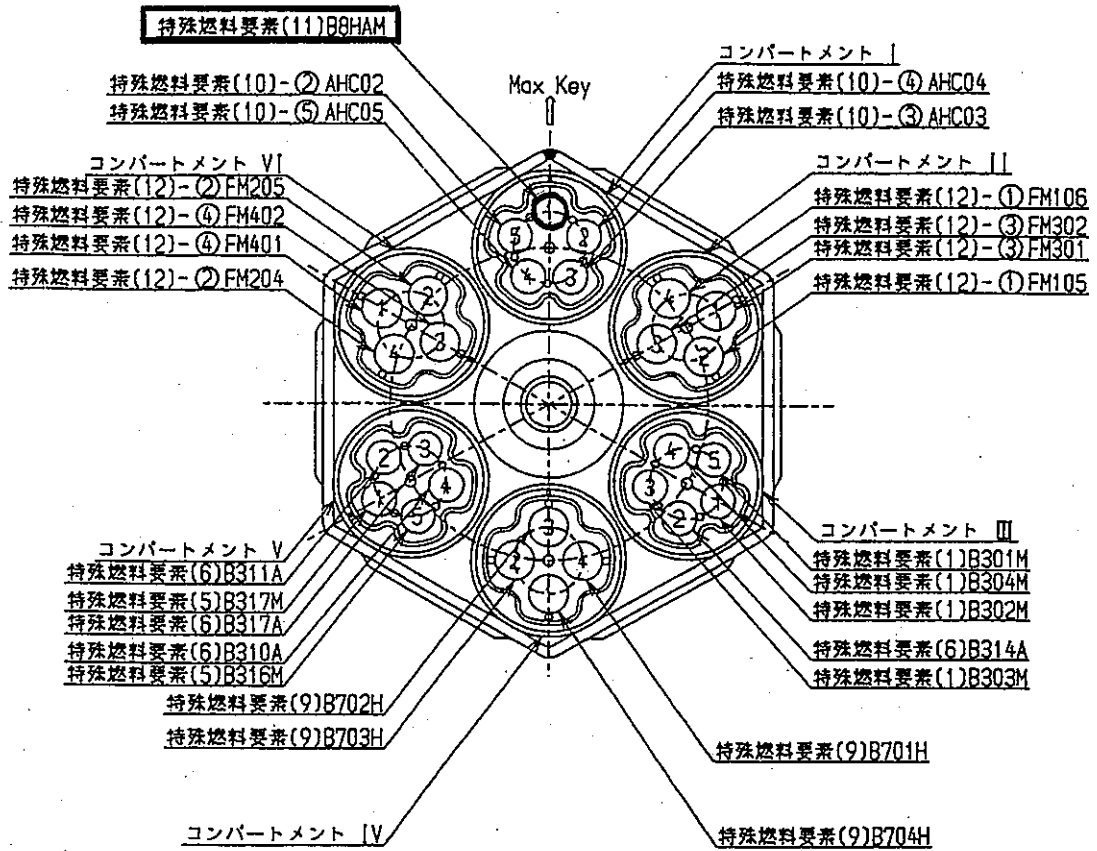


図2 PFB080燃料集合体内への B8-HAM燃料要素装荷位置

PFB080

*: NOT FUEL

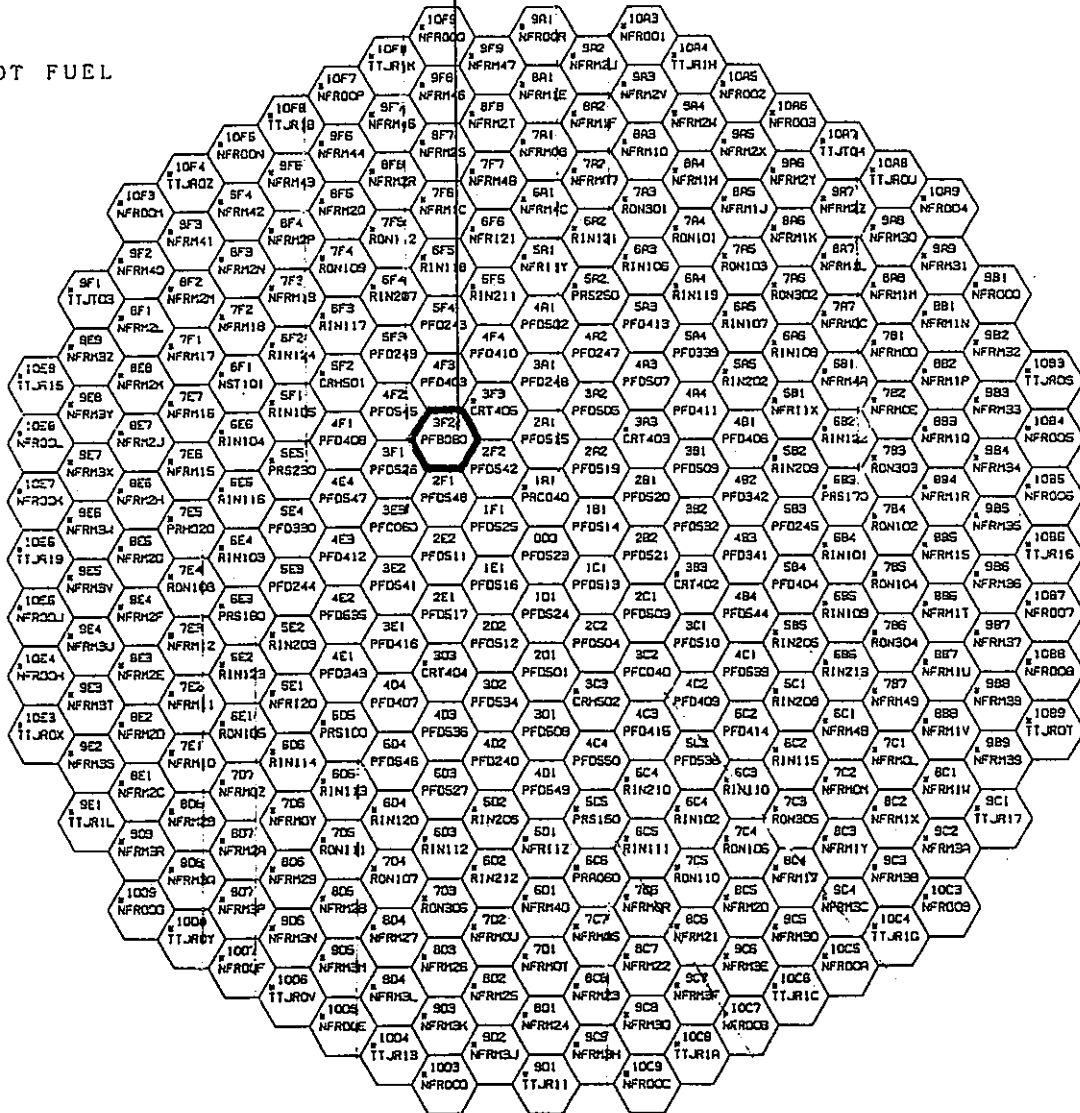


図3 PFB080燃料集合体 炉内装荷位置 (第25サイクル)

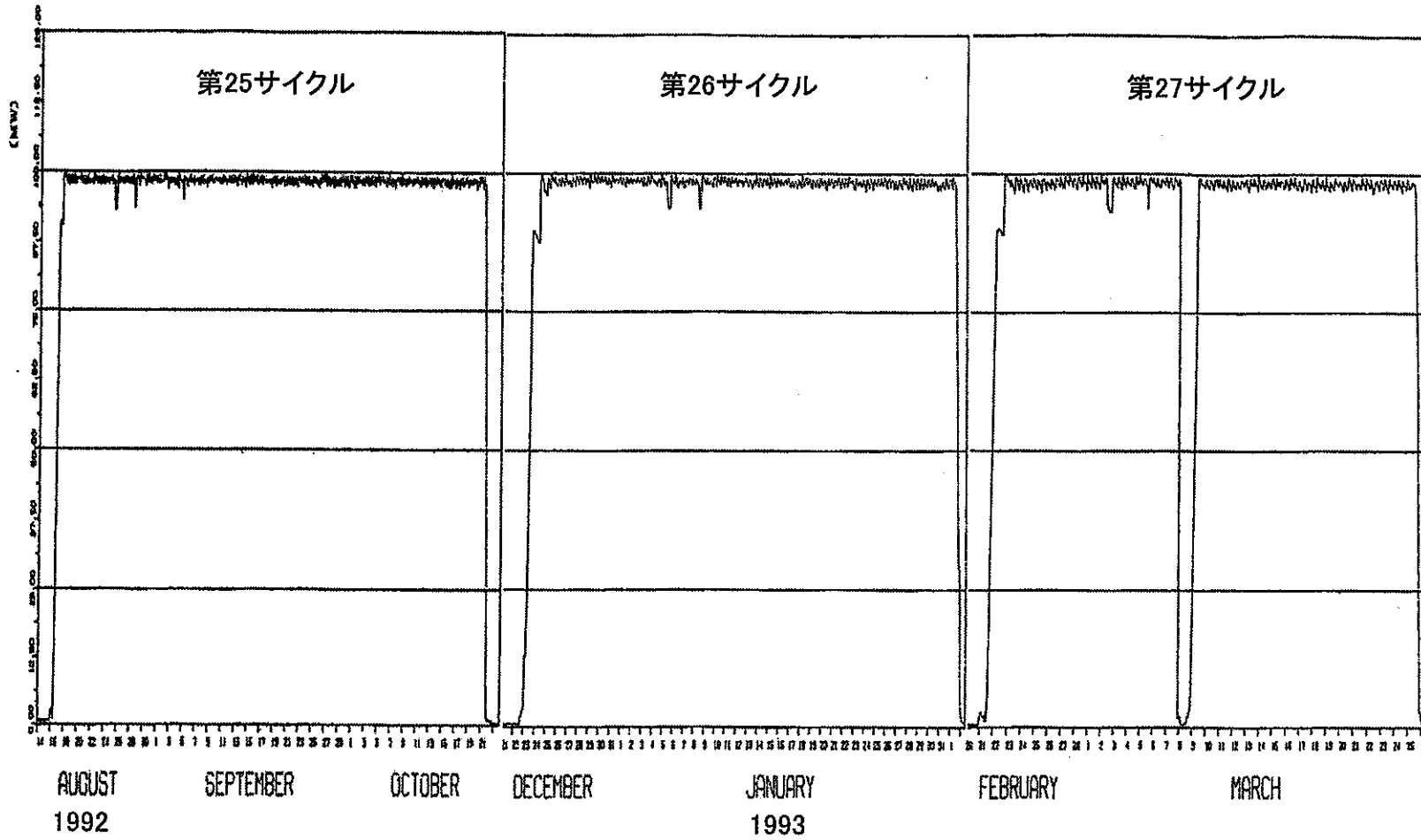


図4 「常陽」熱出力履歴

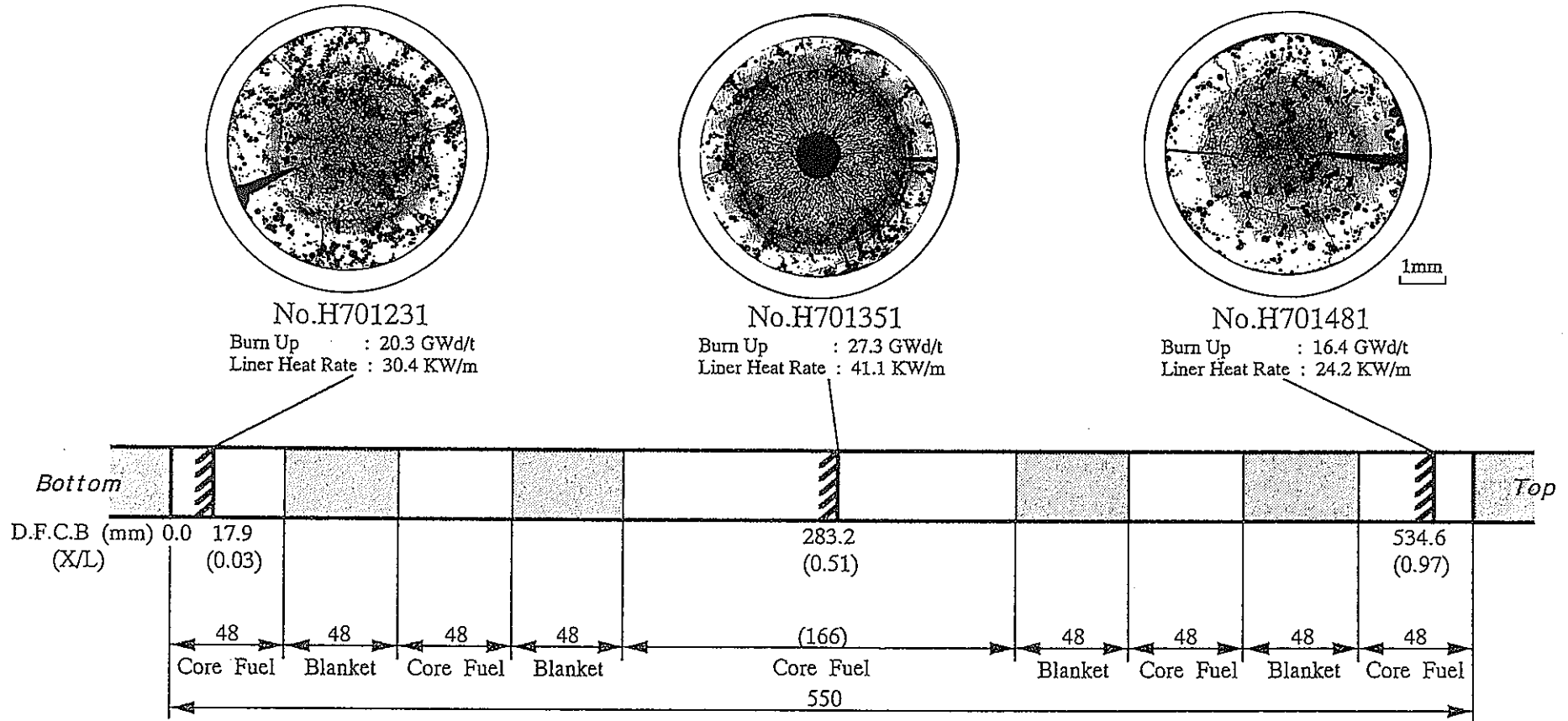


图5 測定試料片採取位置

X線強度(カウント数)

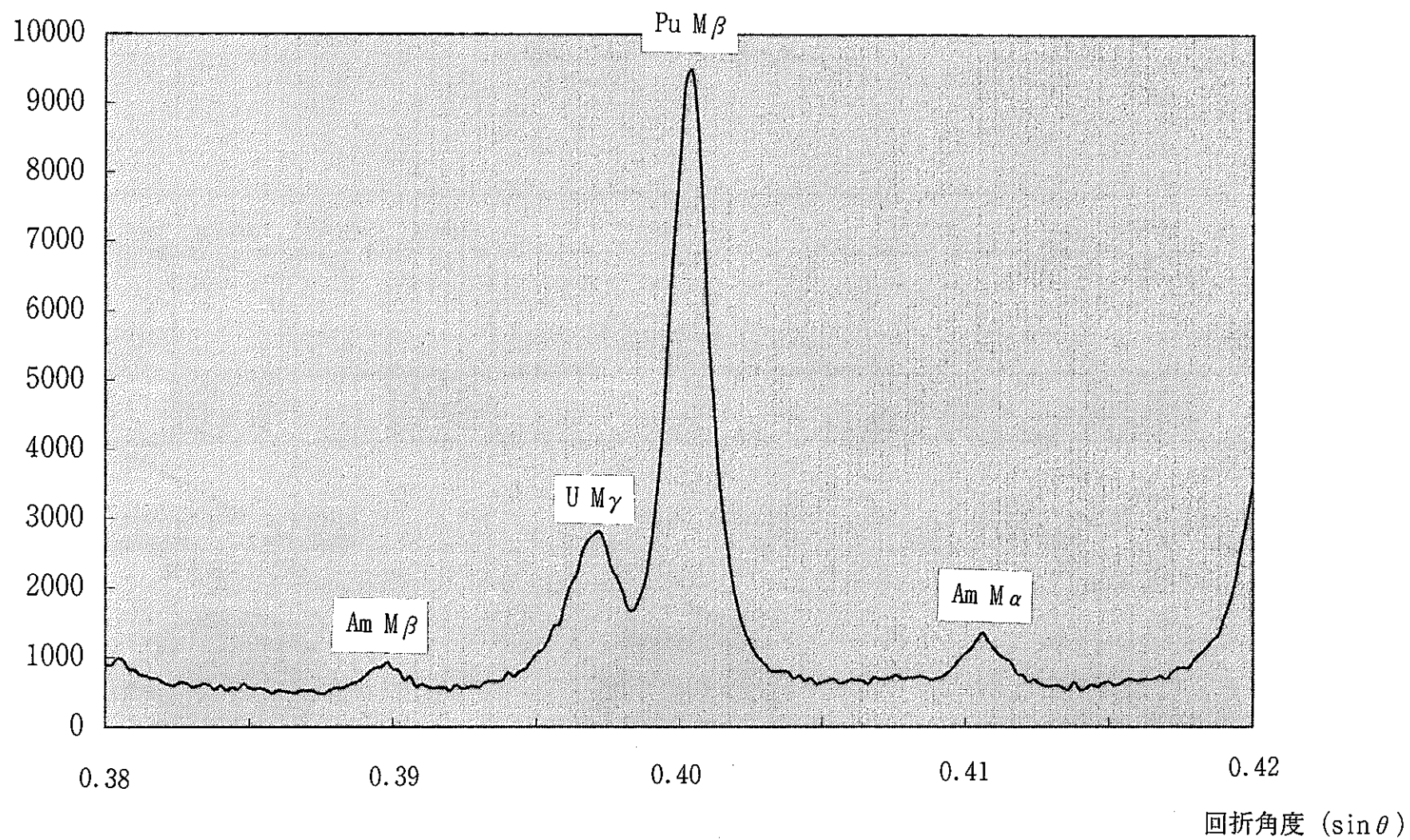
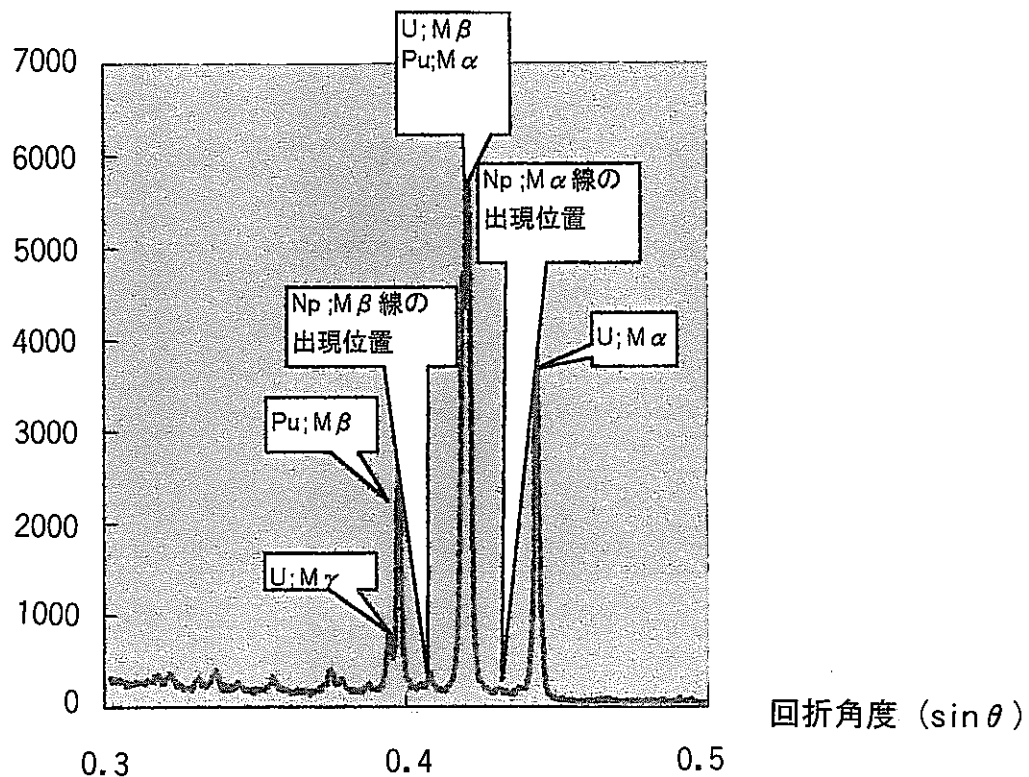


図6 未照射試料片：YZ5133 の定性分析結果

X線強度(カウント数)



NP;M α の理論値 ($\sin \Theta$): 0.43306
 NP;M β の理論値 ($\sin \Theta$): 0.41012

図7 照射後試料：H701351 の定性分析結果

X線強度(カウント数)

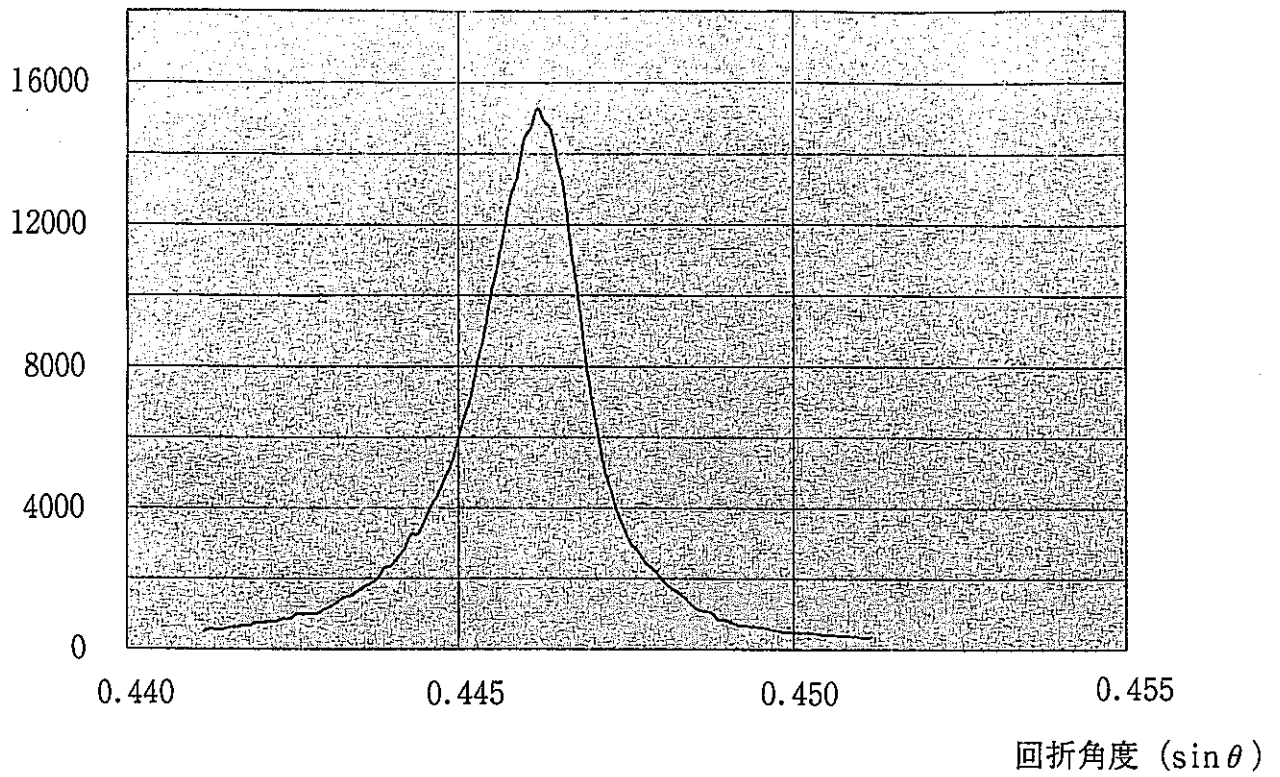


図 8 - 1 試料 H701351 中の U M α 線 検出結果

X線強度(カウント数)

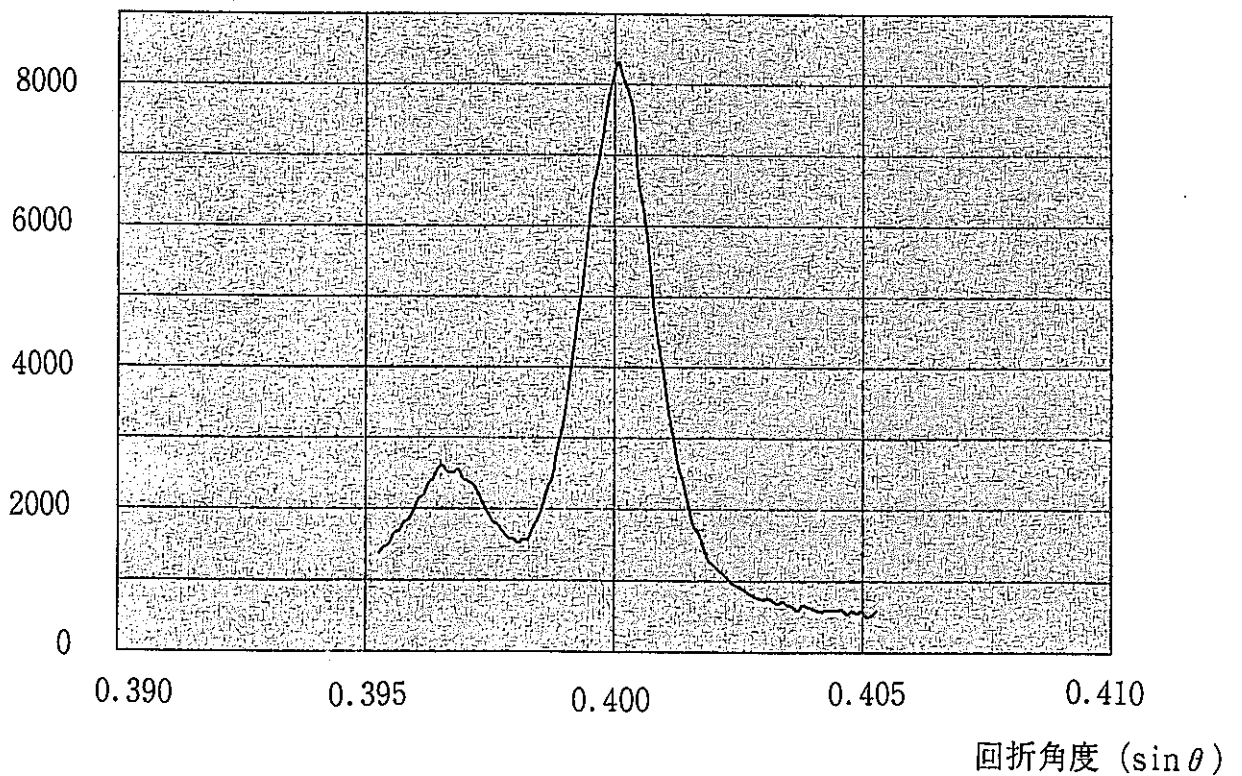
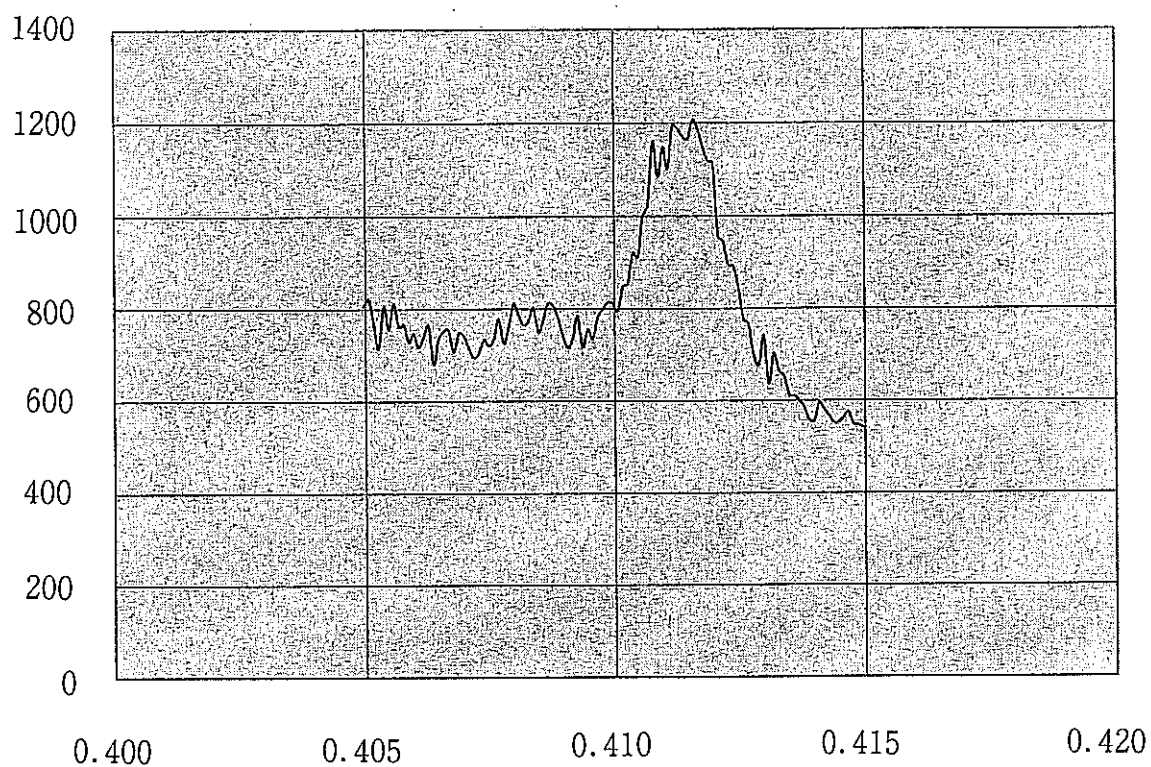


図 8 - 2 試料 H701351 中の Pu M β 線 検出結果

X線強度(カウント数)



回折角度 ($\sin \theta$)

図8-3 試料 H701351 中の Am M α 線 検出結果

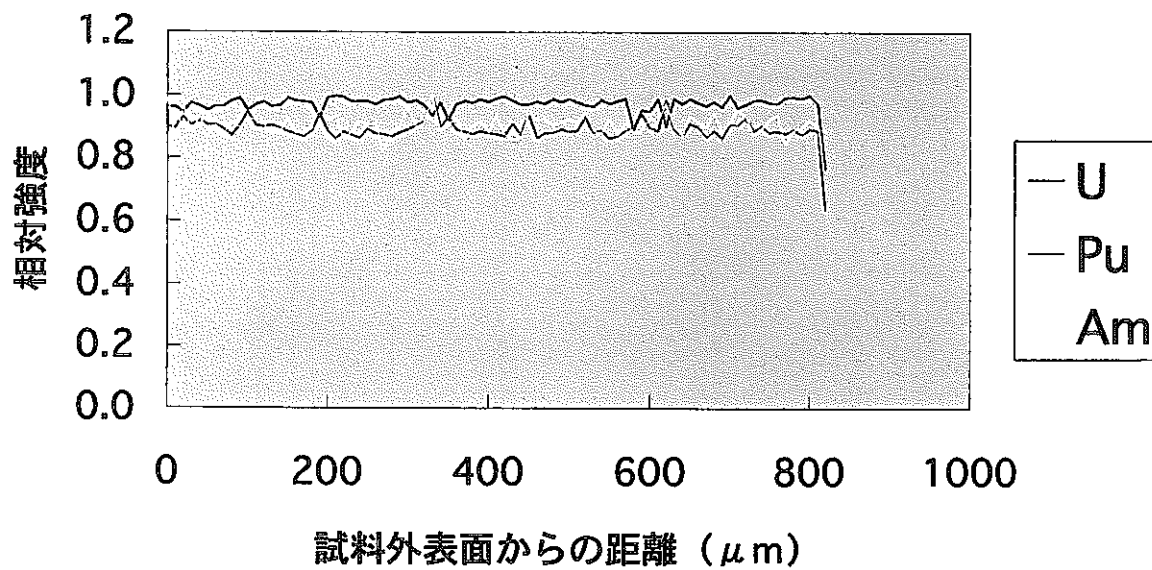


図9 試料 YZ5133 の特性X線相対強度の線分布測定結果

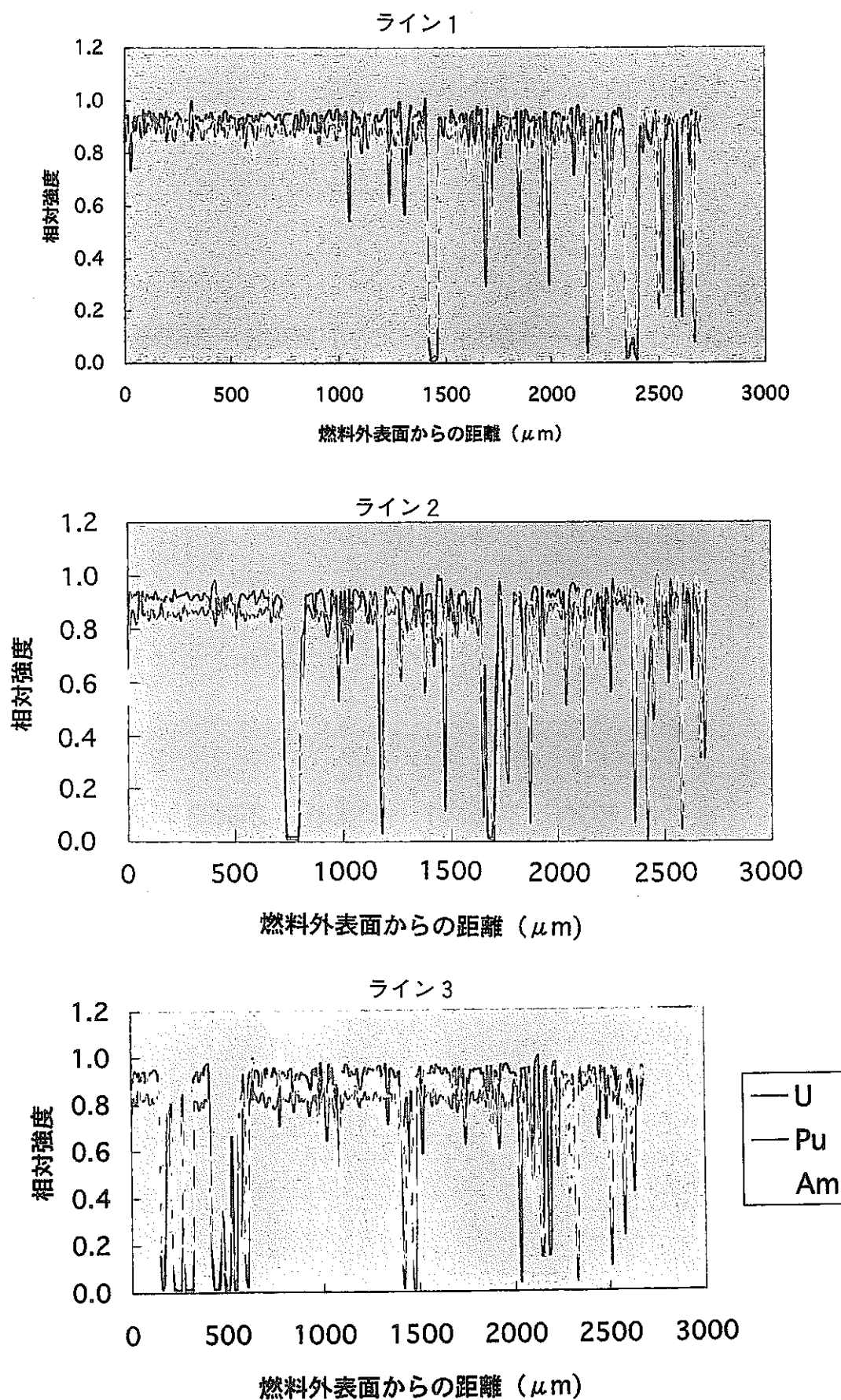


図10 試料 H701231 の特性X線相対強度の線分布測定結果

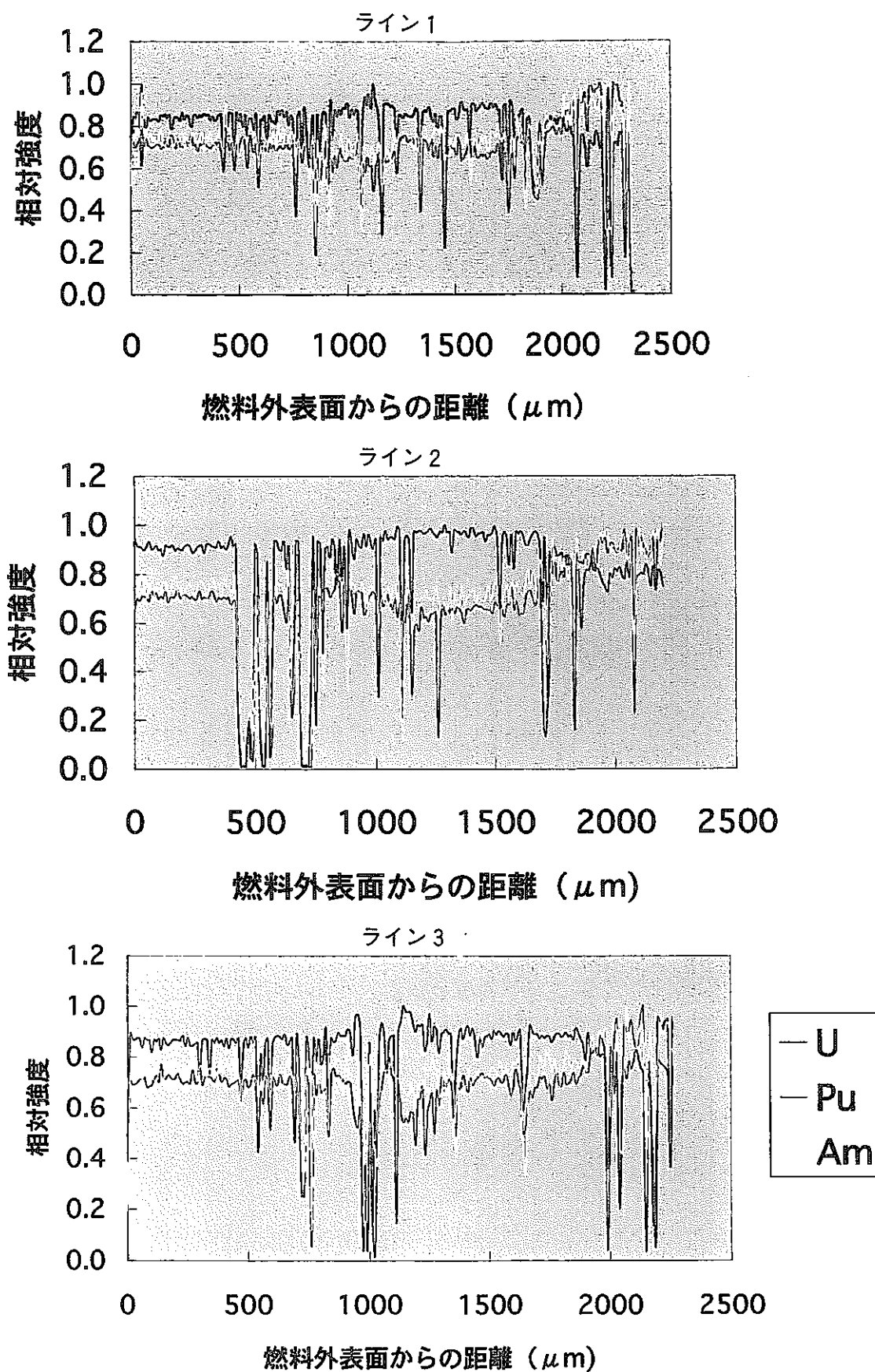


図11 試料 H701351 の特性X線相対強度の線分布測定結果

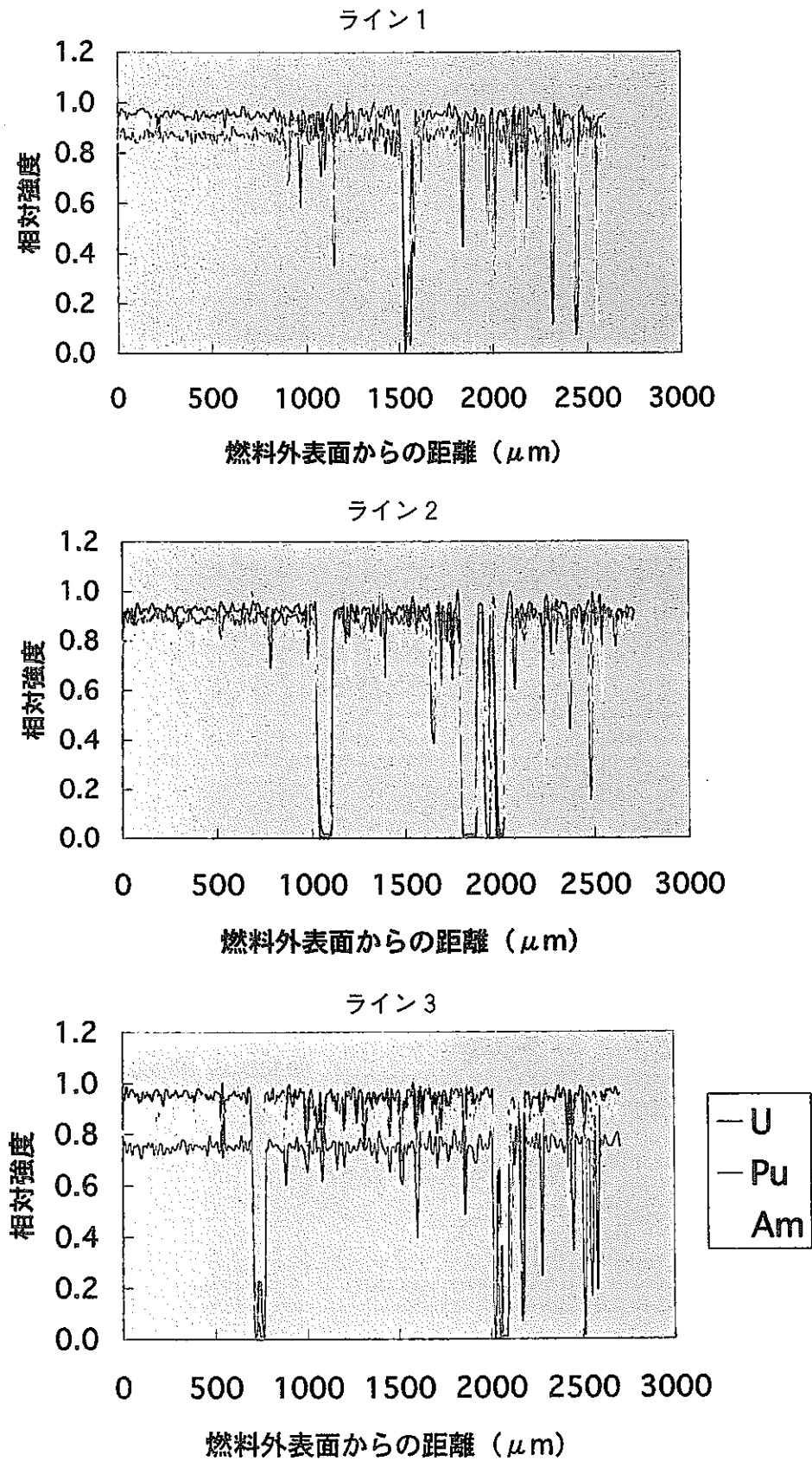


図12 試料 H701481 の特性X線相対強度の線分布測定結果

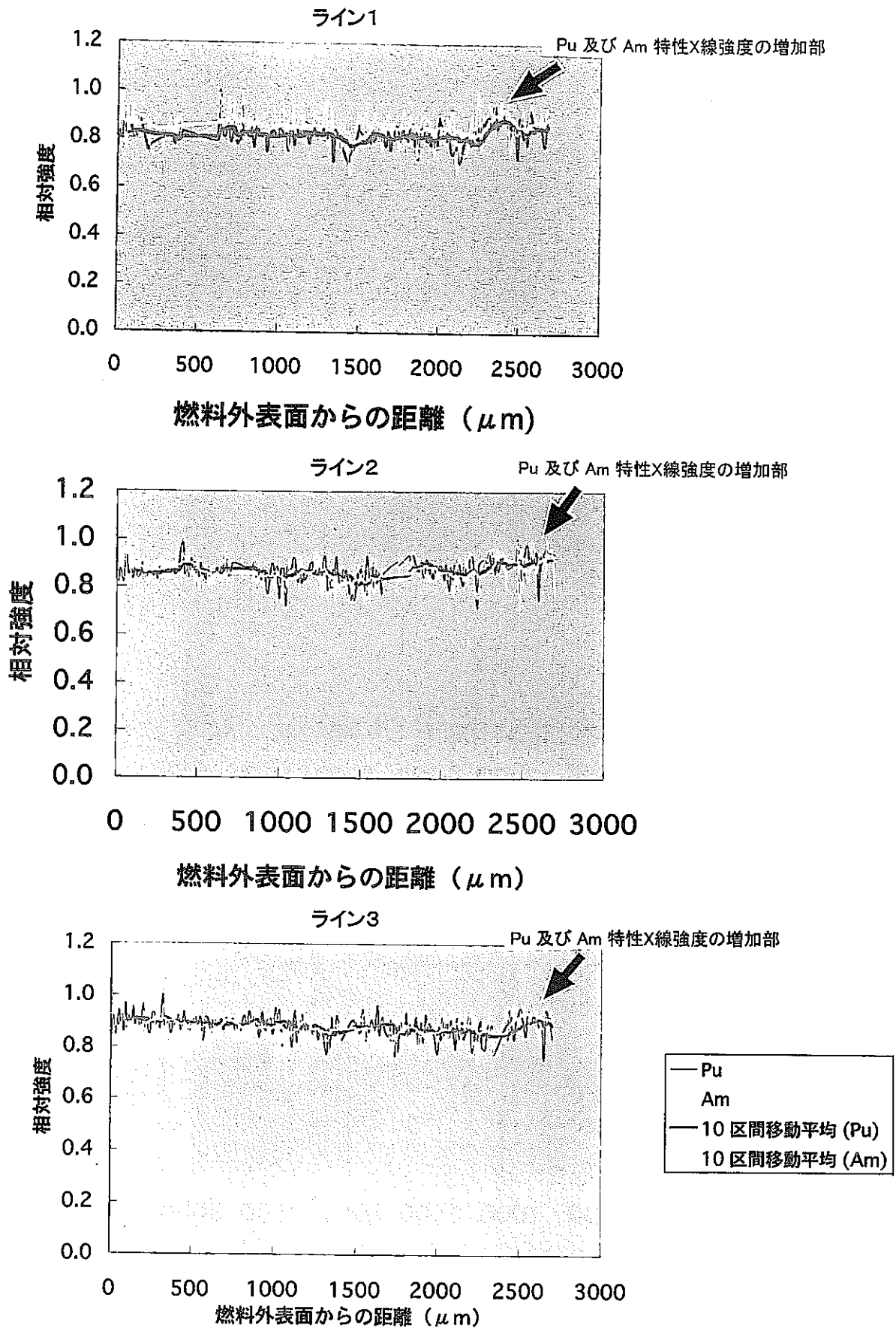


図13 試料 H701231 の特性 X 線相対強度 (平滑化済)

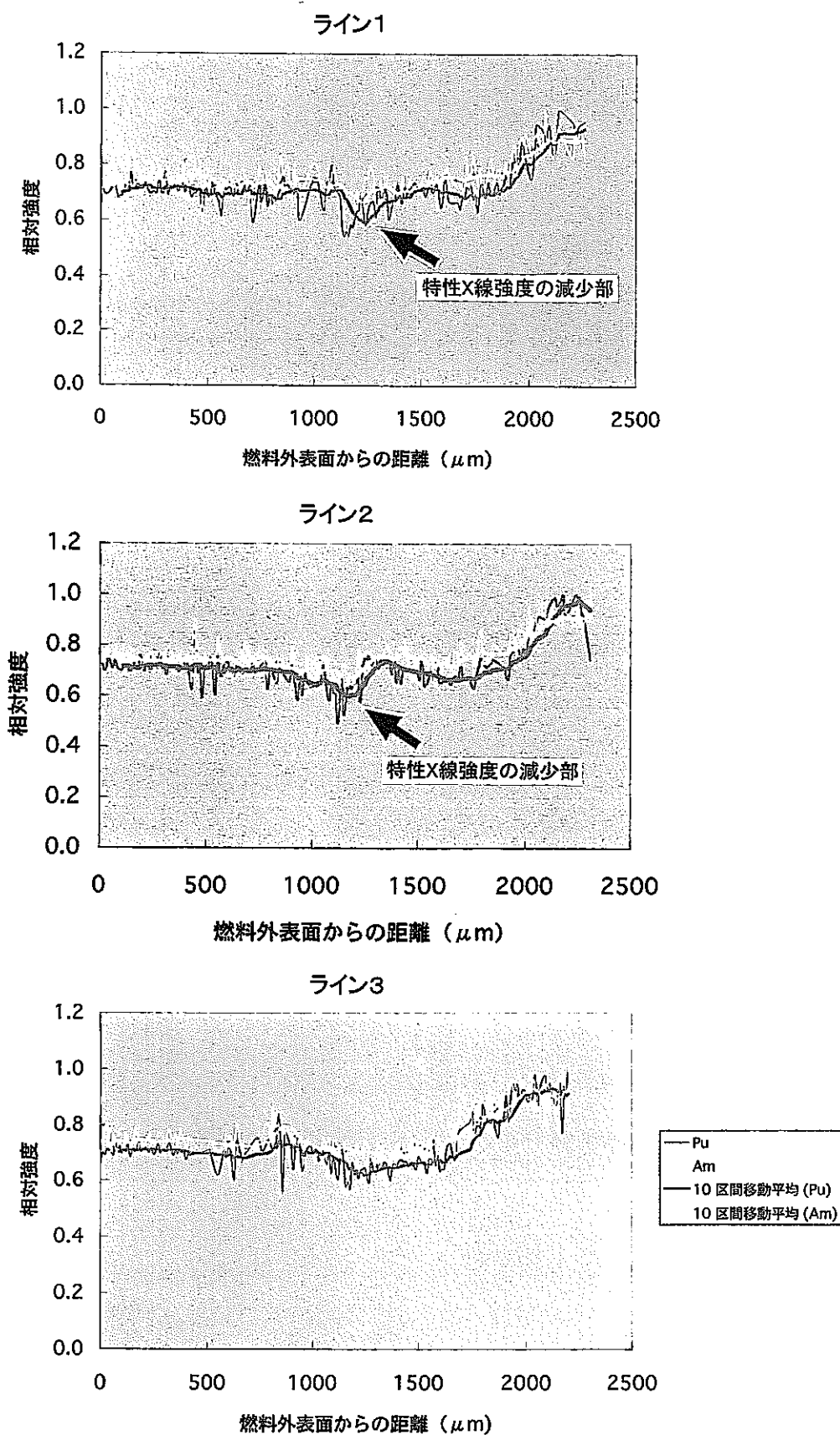


図14 試料 H701351 の特性X線相対強度 (平滑化済)

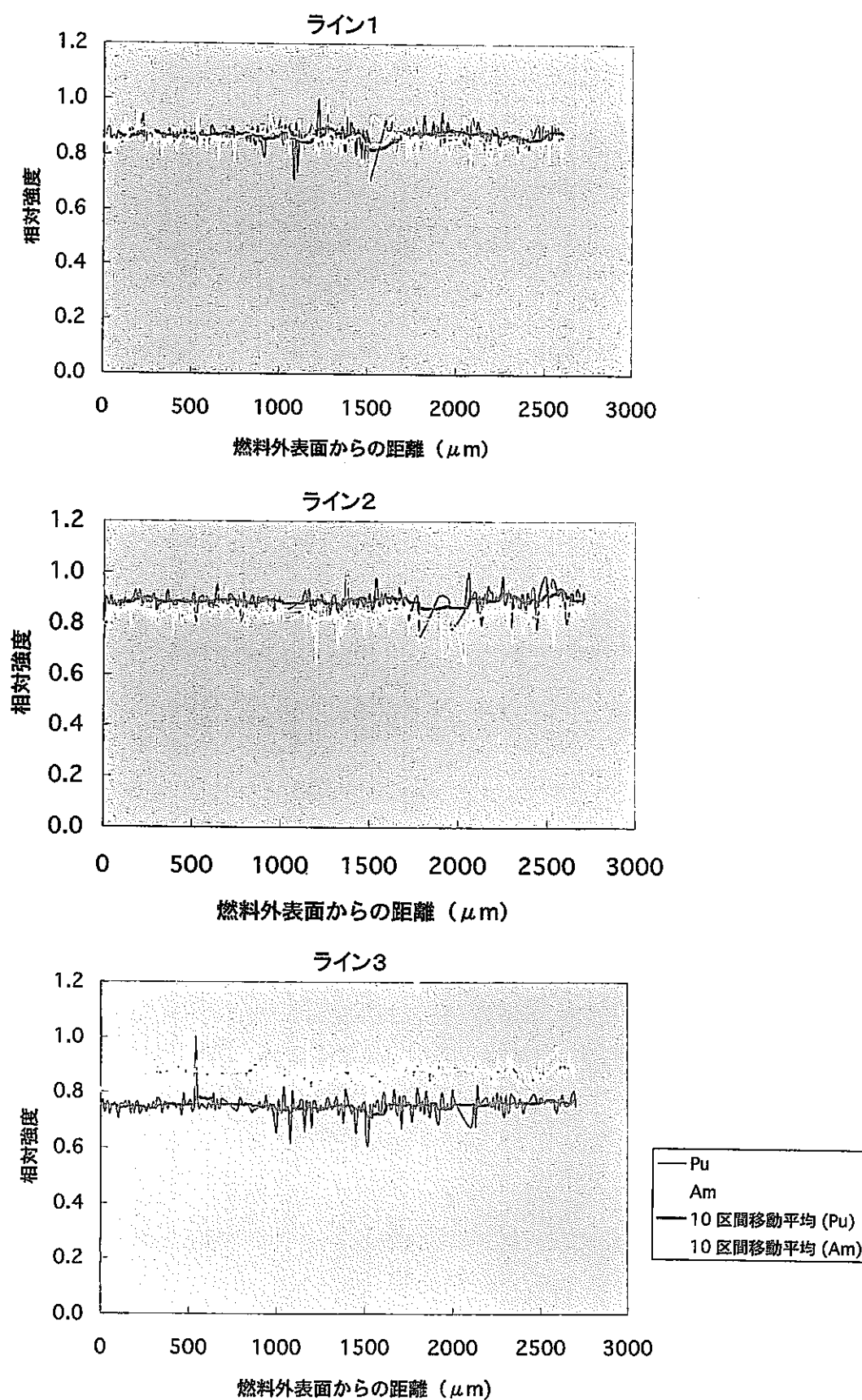


図15 試料 H701481 の特性X線相対強度 (平滑化済)

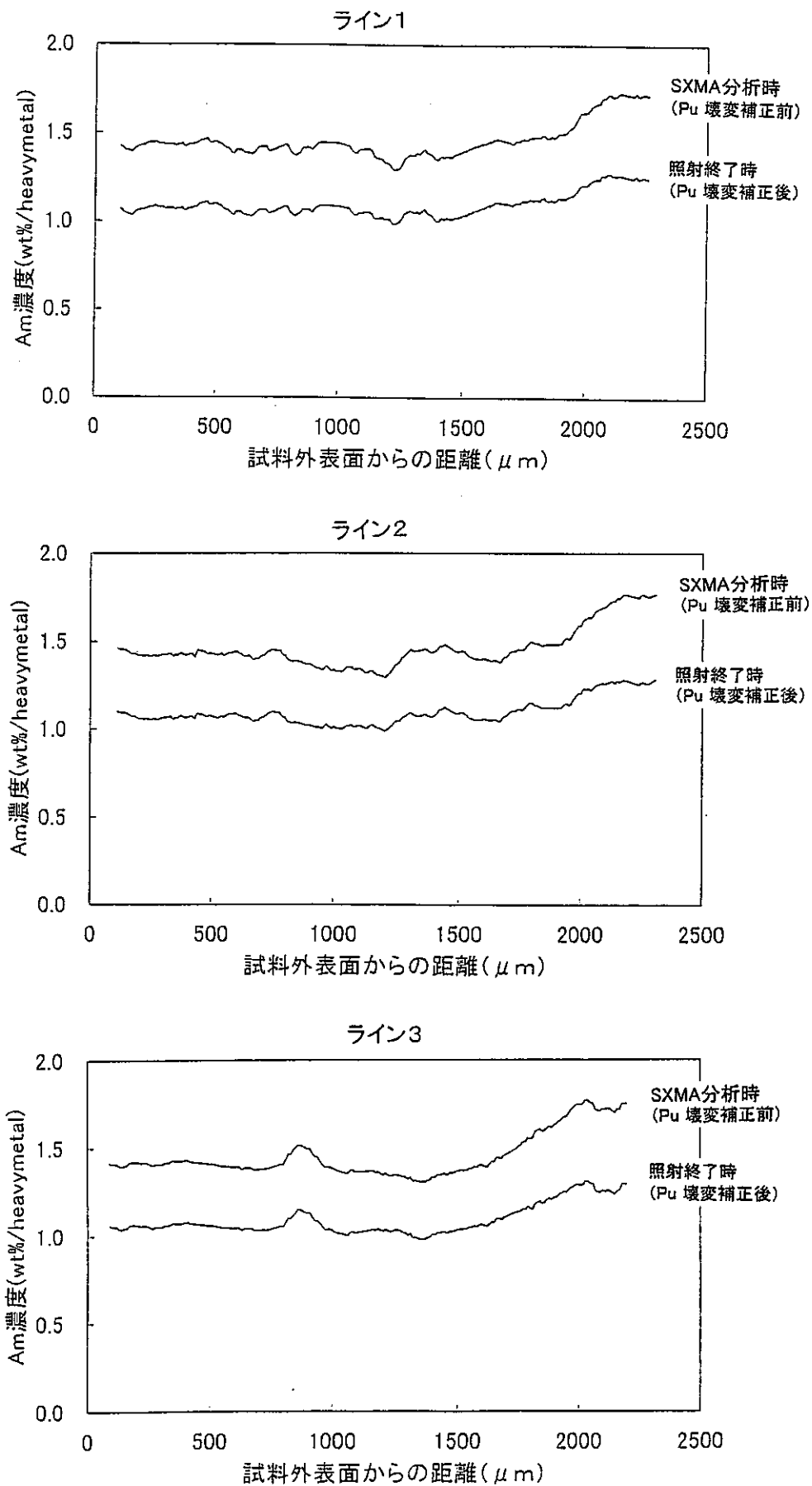


図16 試料 H701351 の照射終了時の Am 濃度分布

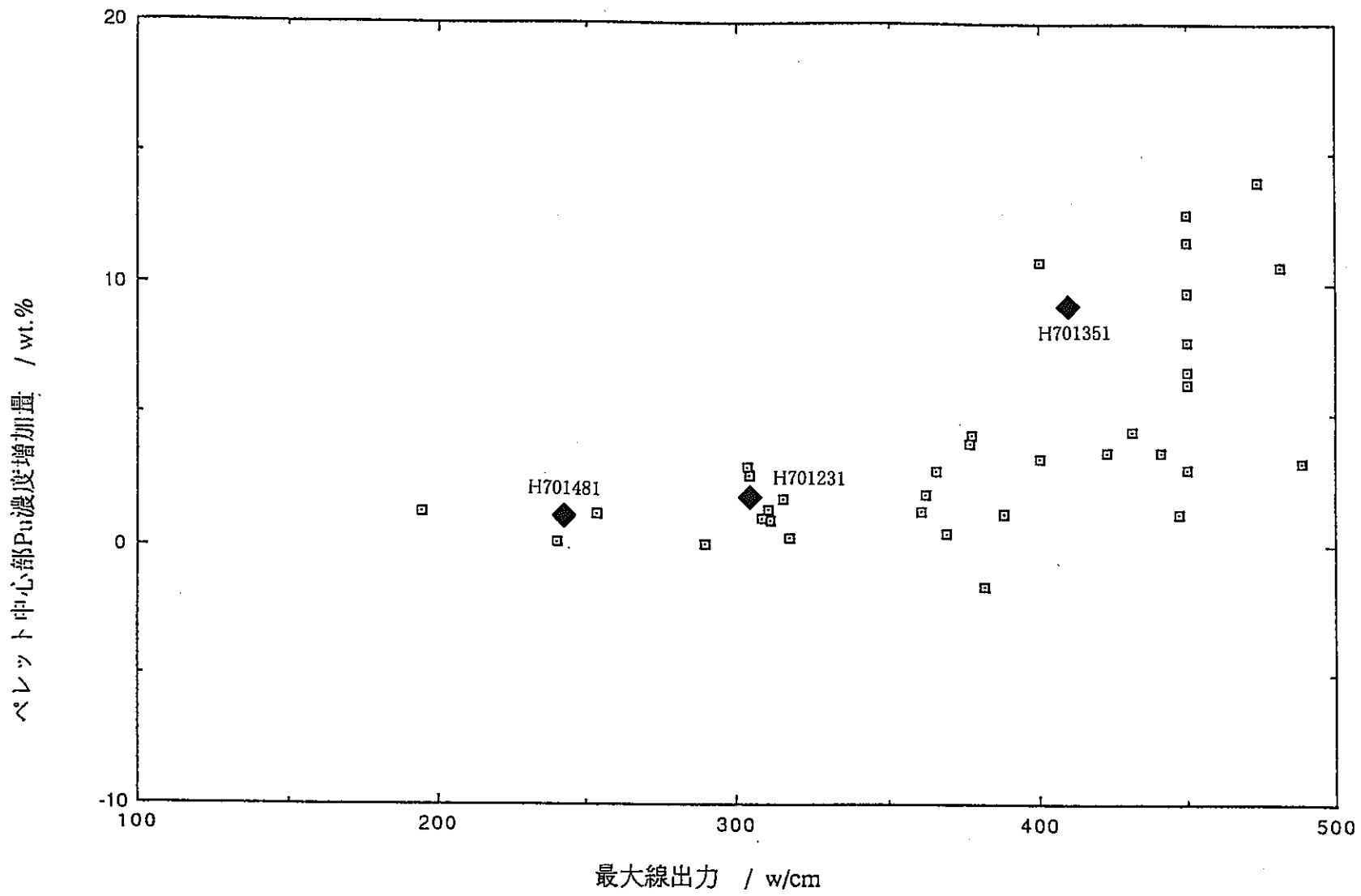


図17 Pu 濃度増加量の既得データとの比較⁵⁾

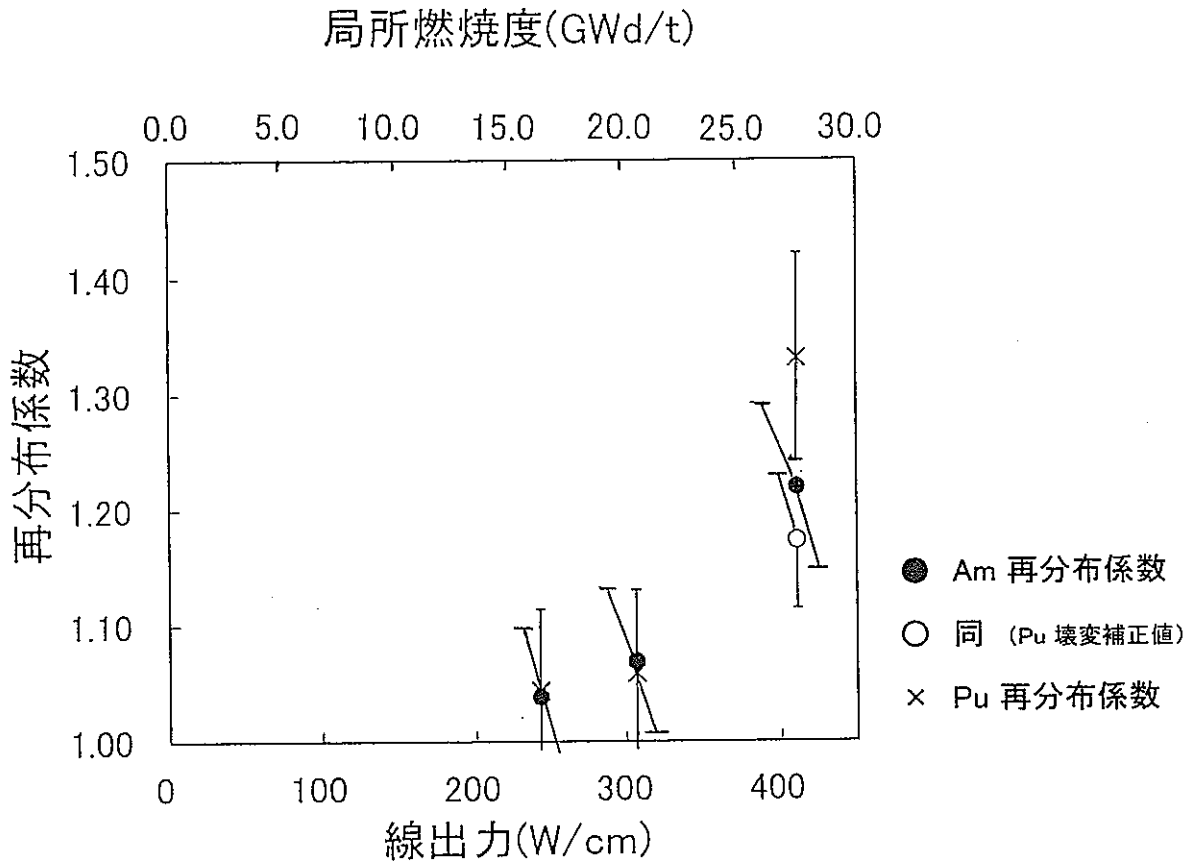
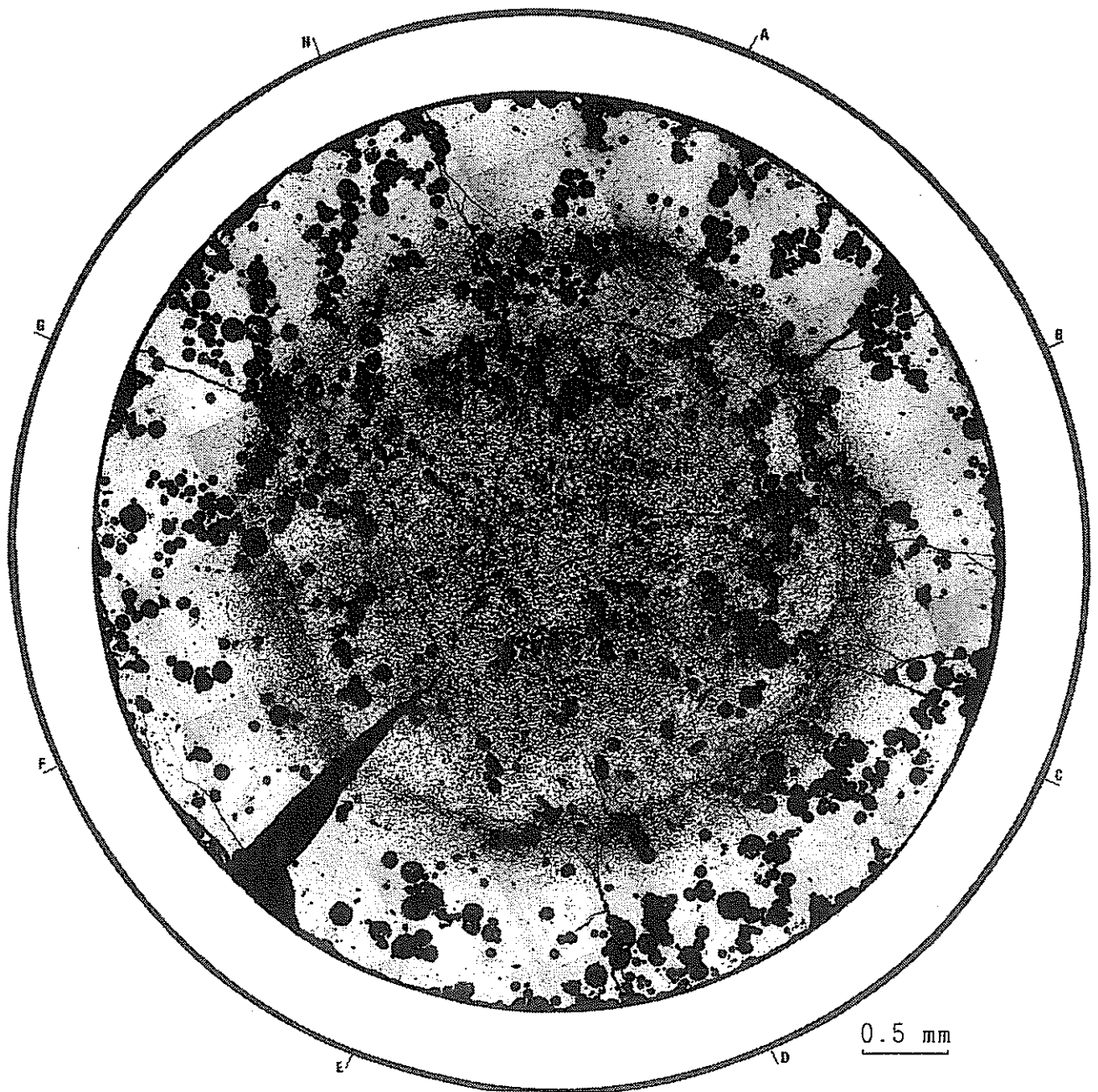
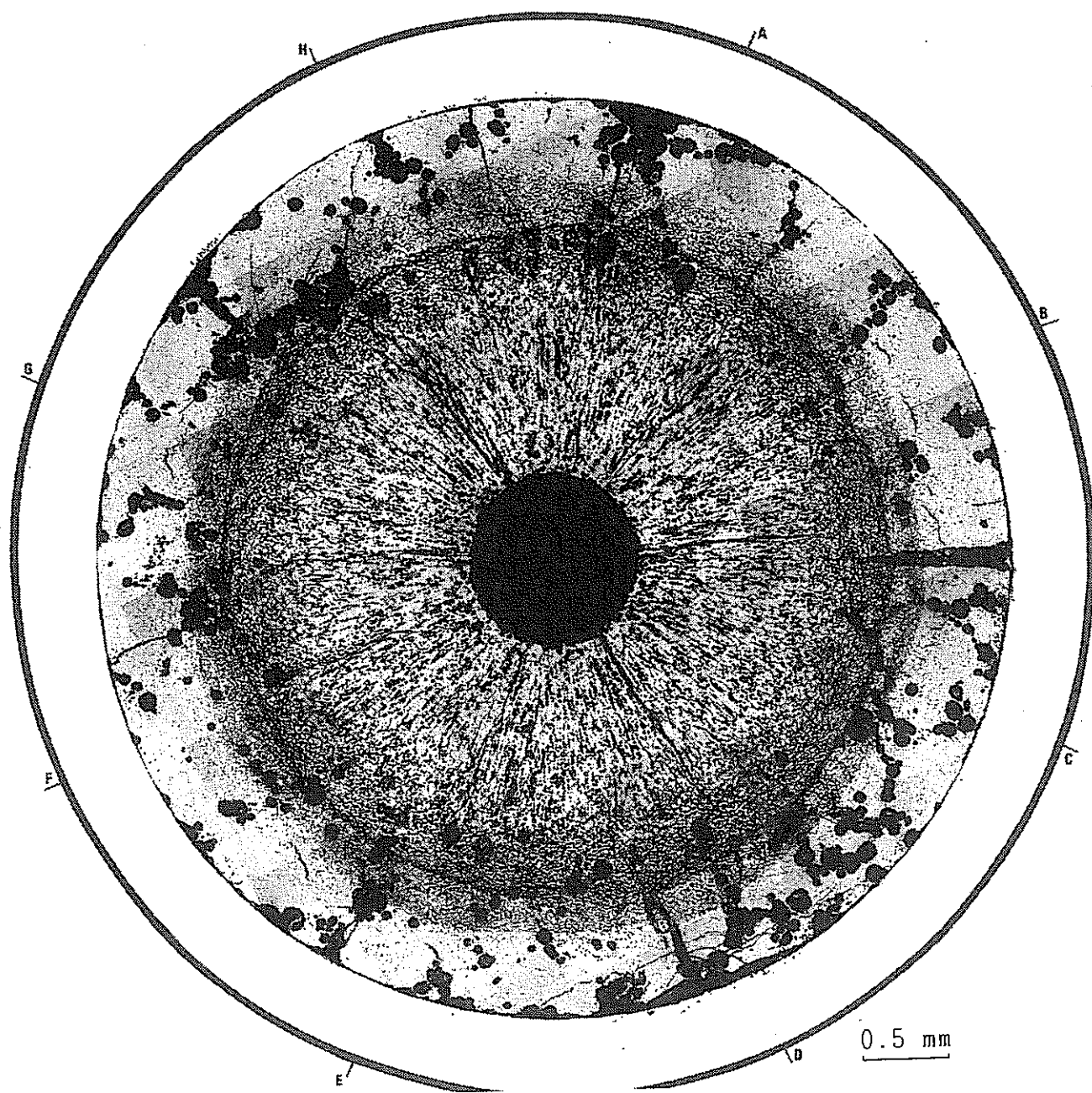


図18 Am 再分布係数と照射条件との関係



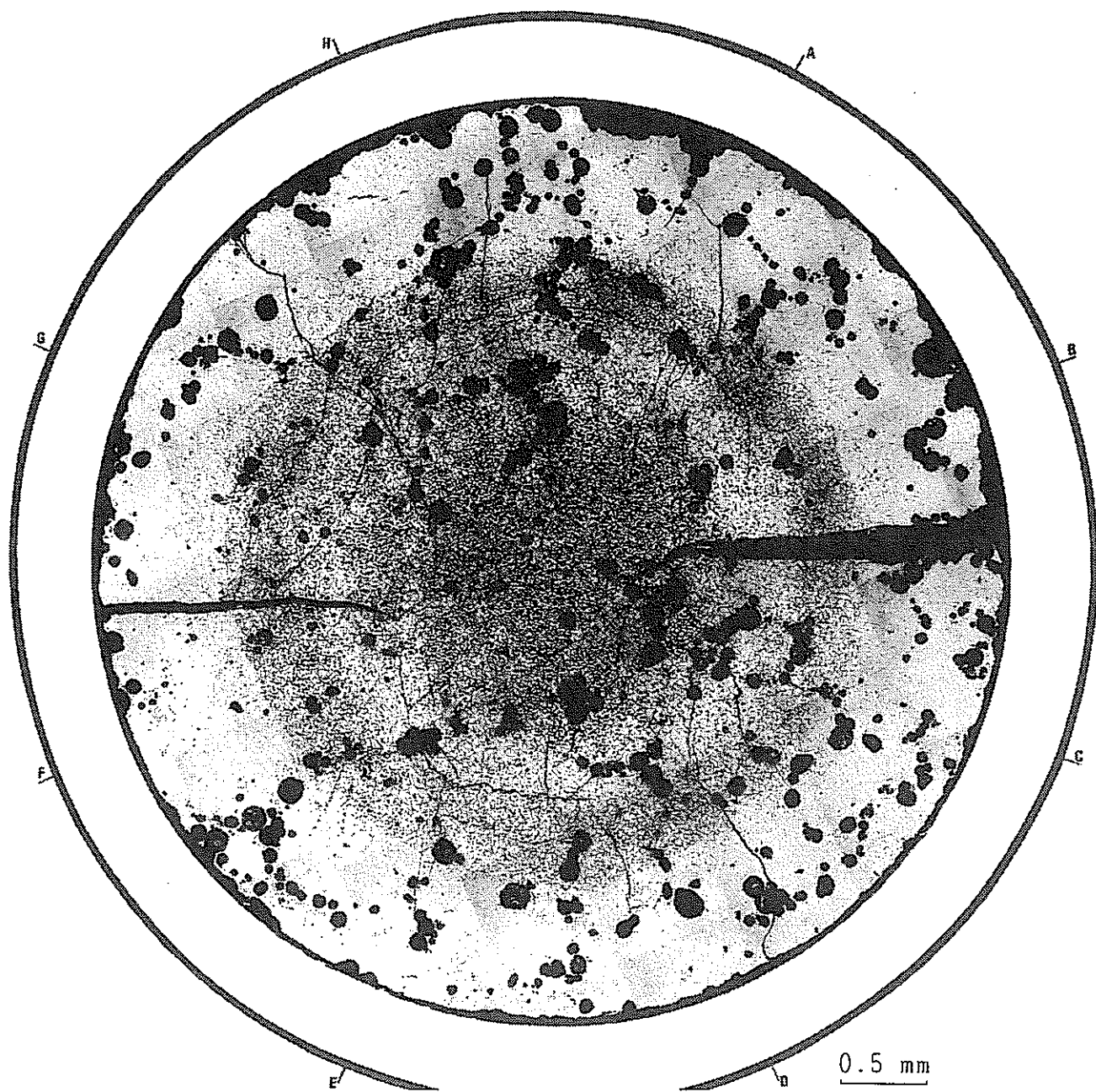
As-Polished

写真1 試料 H701231 の横断面金相写真



As-Polished

写真2 試料 H701351 の横断面金相写真



As-Polished

写真3 試料 H701481 の横断面金相写真

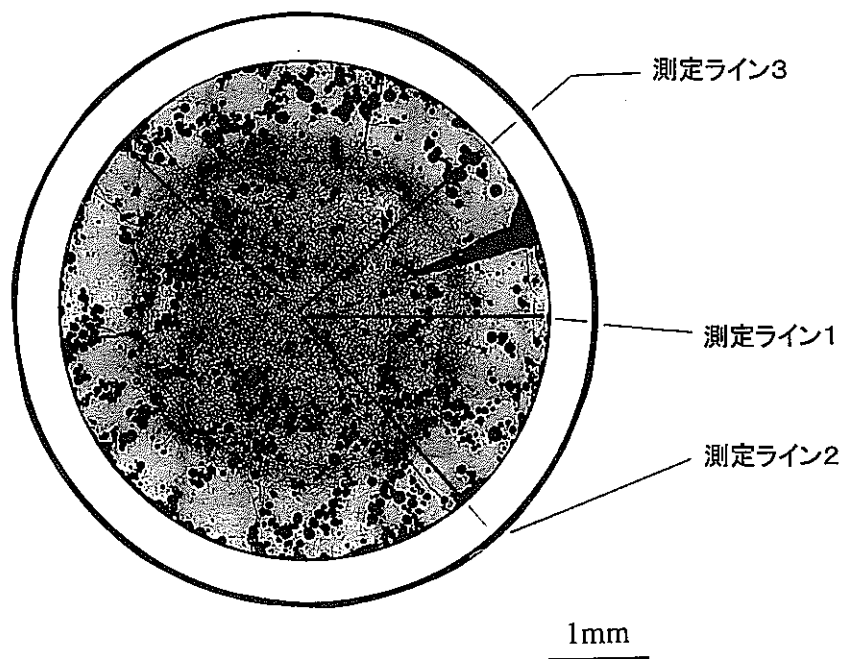


写真4 試料 H701231 の径方向線分析測定ライン設定位置

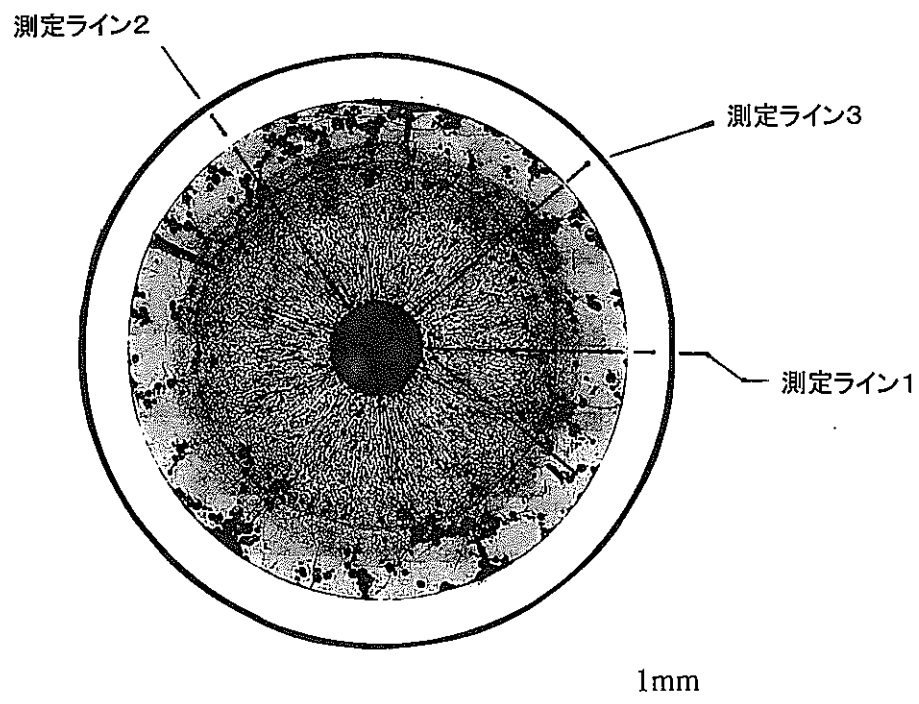


写真5 試料 H701351 の径方向線分析測定ライン設定位置

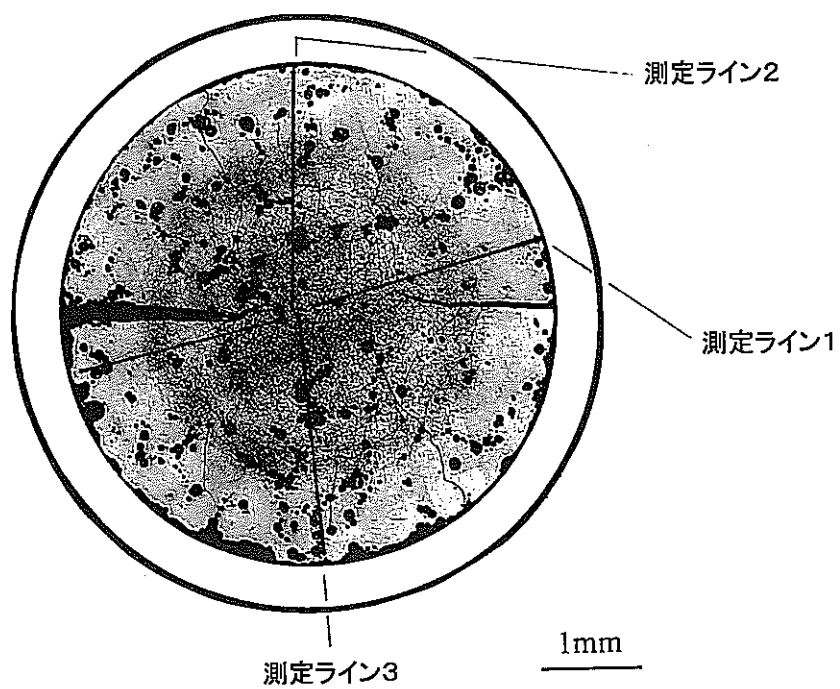
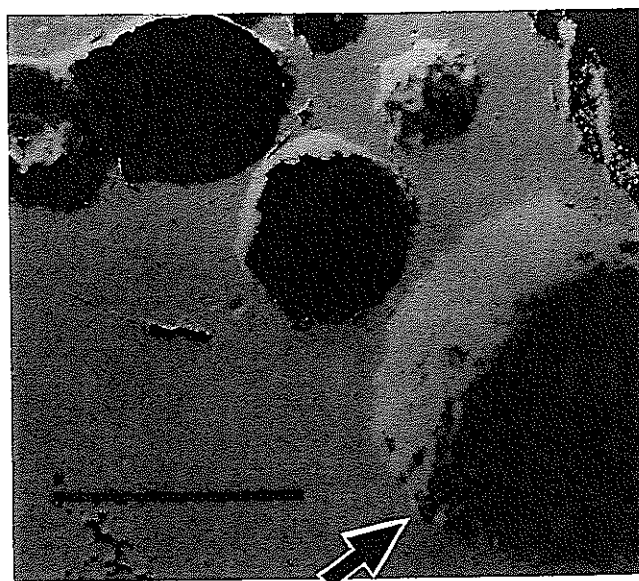
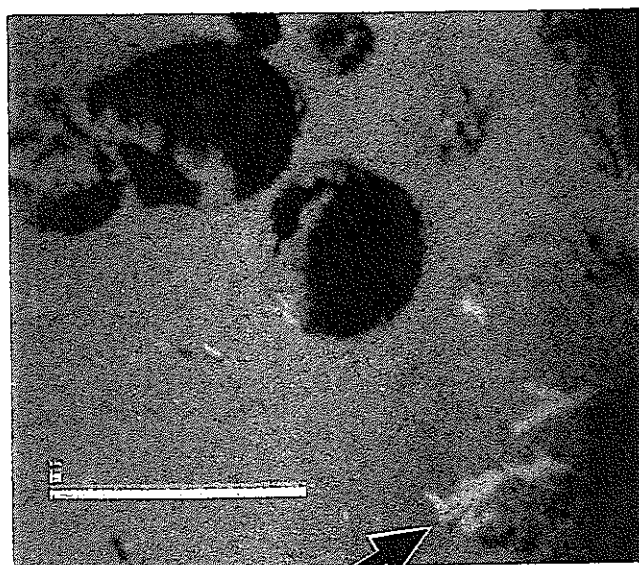


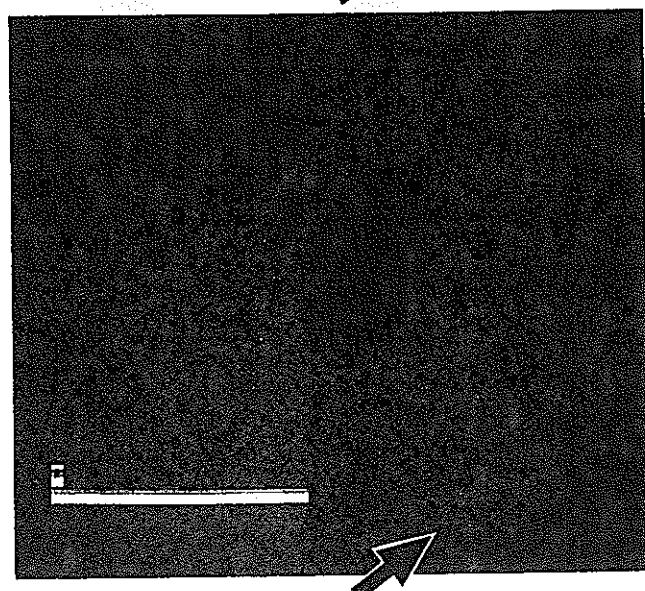
写真6 試料 H701481 の径方向線分析測定ライン設定位置



SEI



Pu



Am

矢印: Pu,Am の高濃度領域
(SEIでは針状組織に対応)

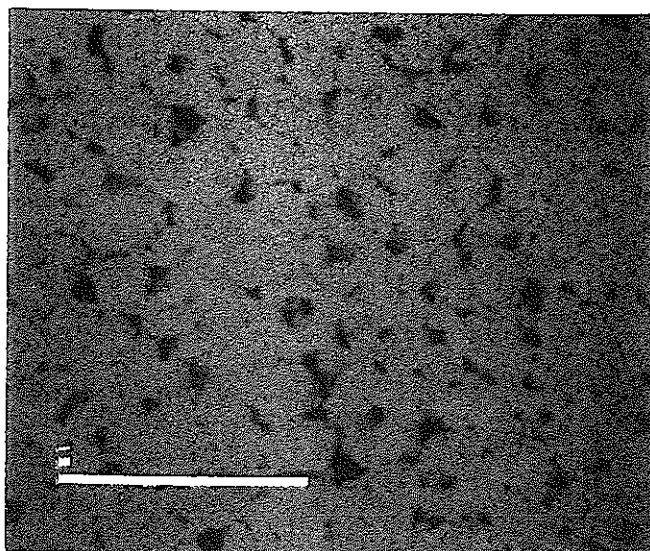
100 μ m

写真7 試料 YZ5133 の Pu 及び Am の X線像並びに 2 次電子像

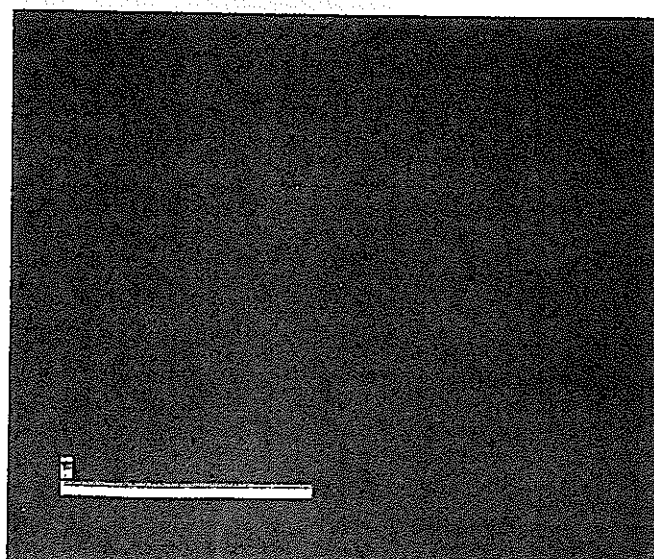
(ペレット中心部)



SEI



Pu

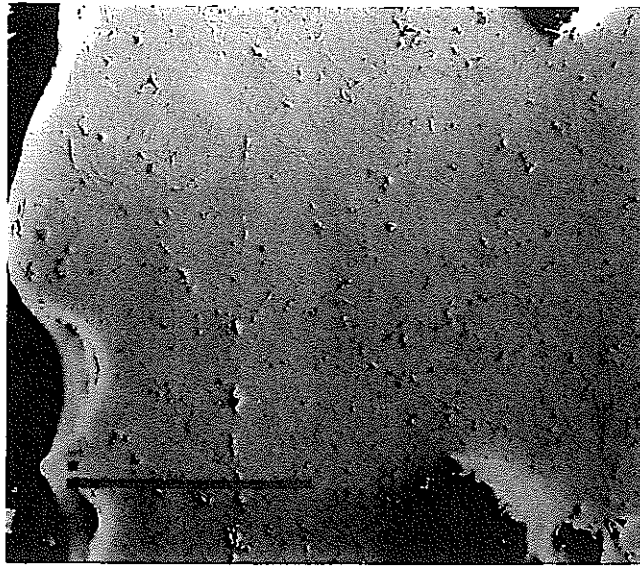


Am

100 μm

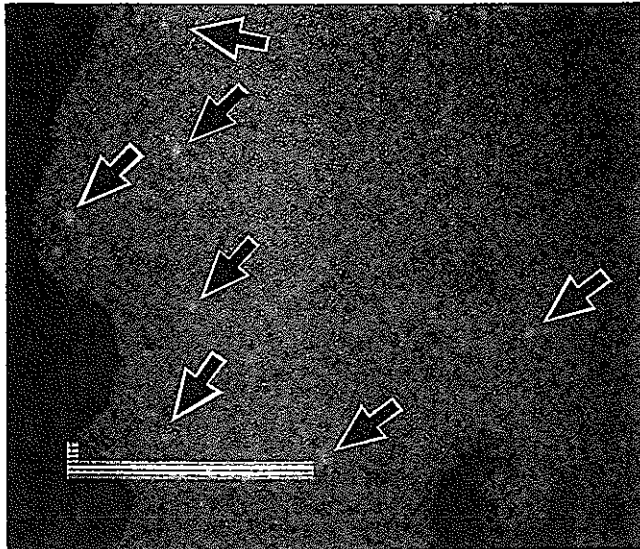
写真8-1 試料 H701231 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(1)

(ペレット外周部)



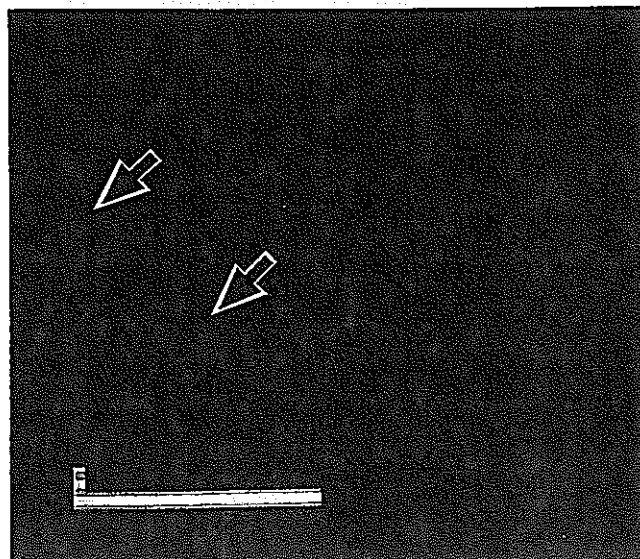
SEI

矢印: Pu スポット



Pu

矢印: Am スポット

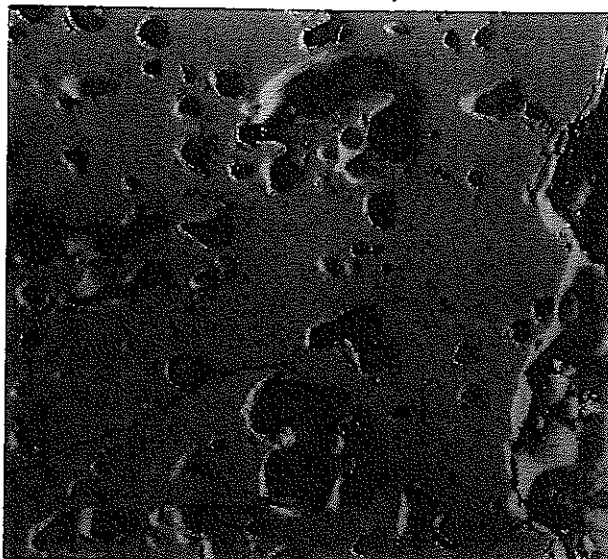


Am

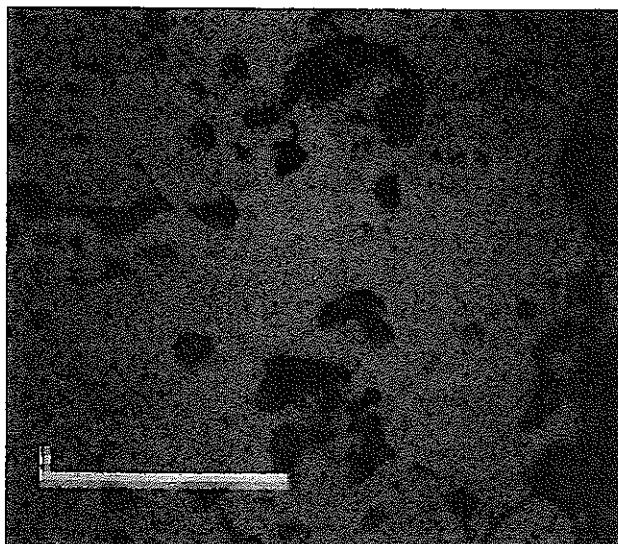
100 μm

写真8-2 試料 H701231 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(2)

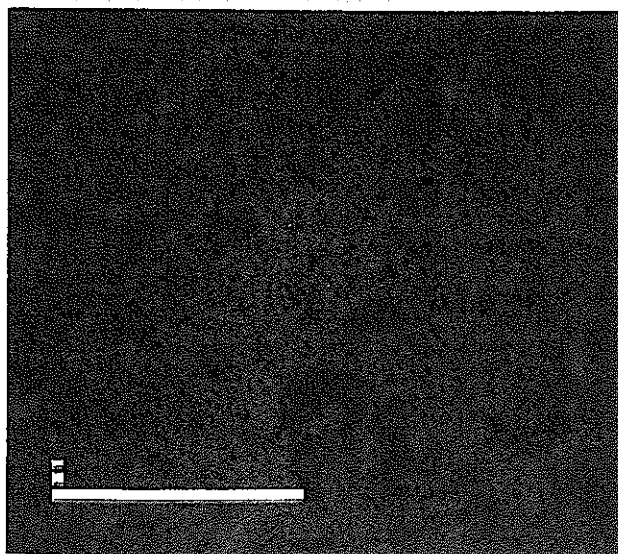
(ハレット中心部)



SEI



Pu

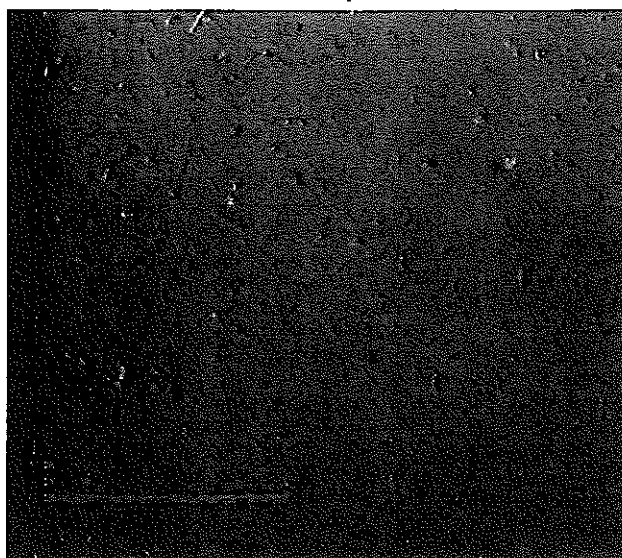


Am

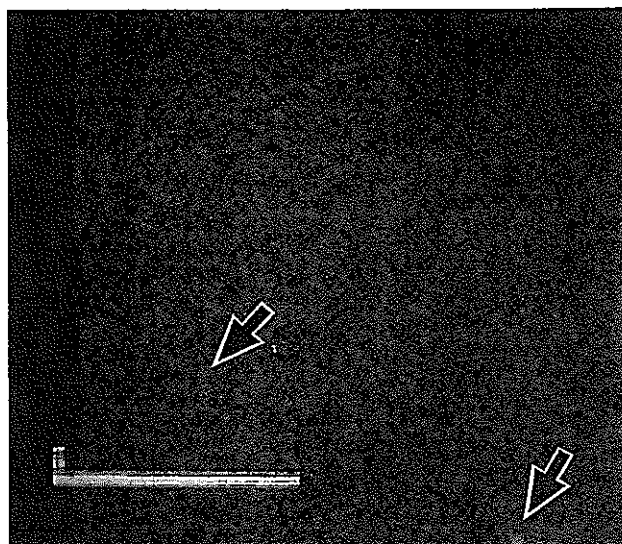
100 μ m

写真9-1 試料 H701351 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(1)

(ペレット外周部)

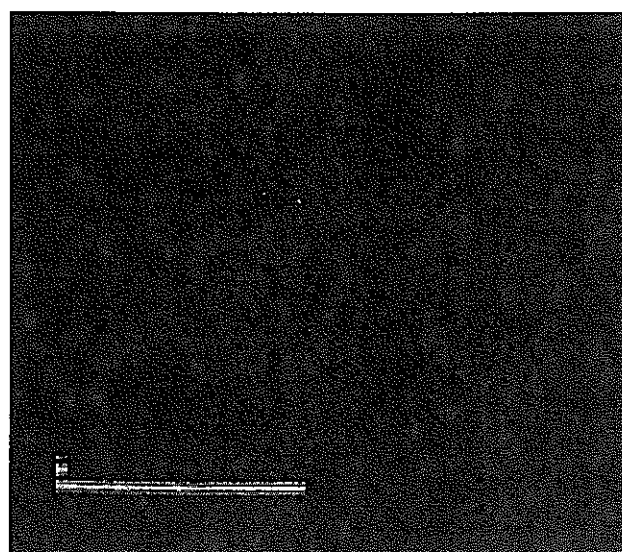


SEI



矢印: Pu スポット

Pu

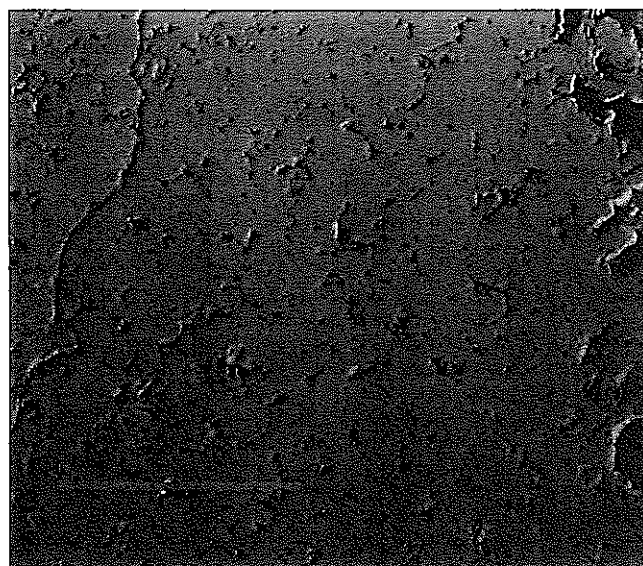


Am

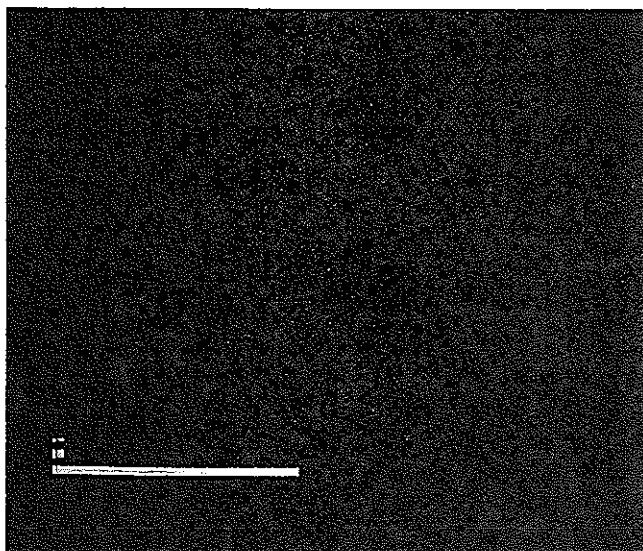
100 μm

写真9-2 試料 H701351 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(2)

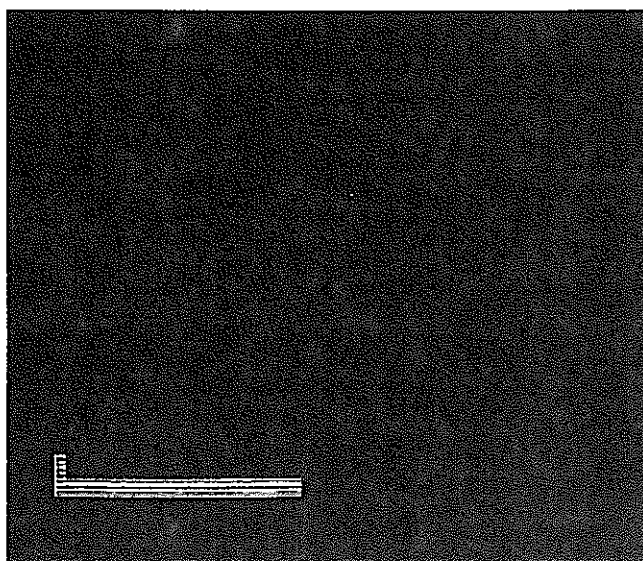
(ペレット中心部)



SEI



Pu

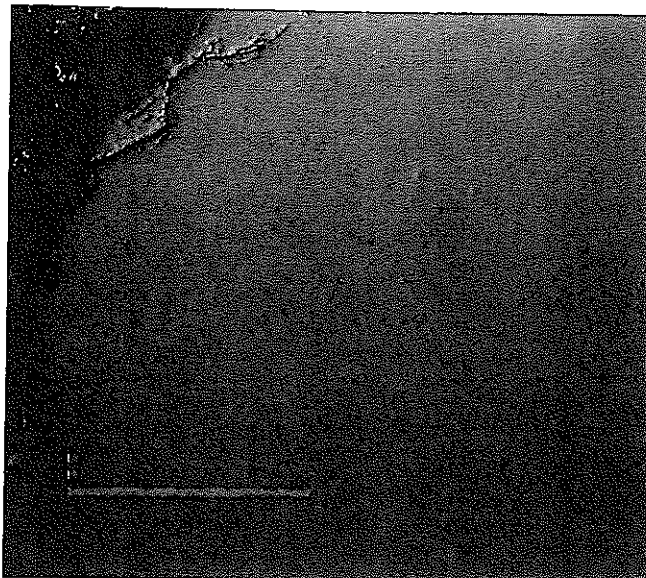


Am

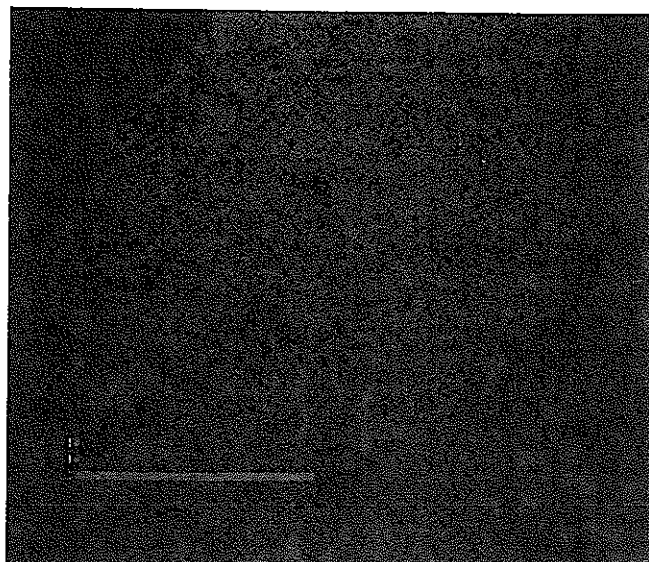
100 μ m

写真10-1 試料 H701481 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(1)

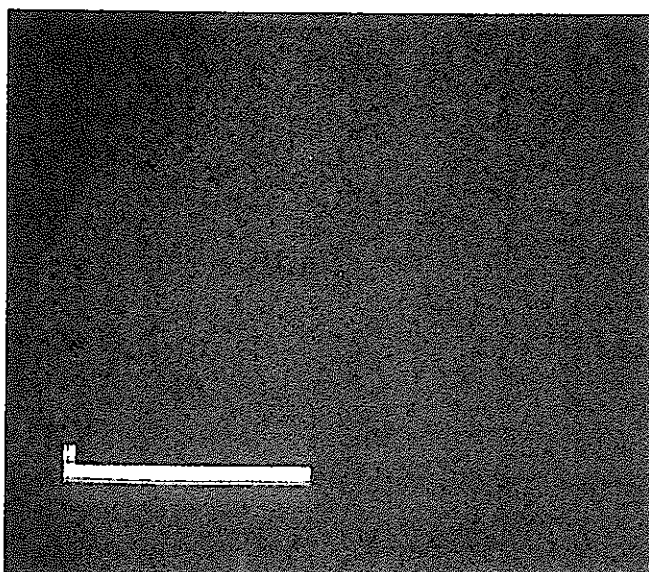
(ペレット外周部)



SEI



Pu



Am

100 μ m

写真10-2 試料 H701481 の Pu 及び Am の X線像並びに2次電子像(2)