

MA 含有 MOX 燃料の照射後試験結果

—燃料ピンの非破壊試験結果—

Post Irradiation Examination Results of MA Containing MOX Fuel

- Non-Destructive Examination Results of the Fuel Pins -

石見 明洋 勝山 幸三 阿部 和幸 永峯 剛 中村 保雄

Akihiro ISHIMI,Kozo KATSUYAMA,Kazuyuki ABE,Tsuyoshi NAGAMINE
and Yasuo NAKAMURA

大洗研究開発センター

燃料材料試験部

Fuels and Materials Department
Oarai Research and Development Center

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

MA 含有 MOX 燃料の照射後試験結果
—燃料ピンの非破壊試験結果—

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター 燃料材料試験部
石見 明洋、勝山 幸三、阿部 和幸、永峯 剛、中村 保雄⁺

(2009 年 1 月 5 日 受理)

原子力機構は、使用済燃料に含まれる長寿命のマイナーアクチニドを高速炉でウランやプルトニウムと共に照射し短寿命の放射性物質に変換することで、放射性廃棄物の処理・処分に係る負担軽減を目指している。その一環として高速実験炉「常陽」にてマイナーアクチニド含有 MOX 燃料の照射試験を実施した。本試験では、アメリシウムを 3% 及び 5% 含有した Am-MOX 燃料とアメリシウム及びネプツニウムを各 2% 含有した Np/Am-MOX 燃料を用いた。照射試験は高線出力での短期照射（10 分間及び 24 時間照射）を実施し、「常陽」において最大線出力約 430W/cm を達成した。

その後、照射燃料集合体試験施設において照射後試験を実施した。本報は、短期照射燃料ピンの照射後試験結果について報告する。

主な試験結果を以下に示す。

- (1) X 線 CT 検査の結果、10 分間照射では燃料中央付近に密度低下が予測され、24 時間照射では燃料中央に明確に中心空孔の形成が確認された。
- (2) 24 時間照射燃料のスタック長において最大 3mm 程度の伸びを確認した。これはペレット間ギャップが生じたことにより見かけ上燃料スタック長が伸びているものと考えられる。
- (3) 燃料ピンの最大曲がりは、Am-MOX 燃料ピン（24 時間照射）で 7.2mm、Np/Am-MOX 燃料ピン（24 時間照射）で 12.5mm であり、これまでの短期照射燃料ピン（PFB052 及び PFBF40）に比べ大きな曲がりが確認された。
- (4) 軸方向 γ スキャン測定の結果、10 分間照射燃料ピンでは軸方向にほぼ平坦な分布を示し、MA 含有 MOX 燃料部と MOX 燃料部において顕著な変化は確認されなかった。24 時間照射燃料ピンにおいては、Ru-103 の γ 線強度が増加し、逆に Zr-95 の γ 線強度が減少する変化が確認された。

Post Irradiation Examination Results of MA Containing MOX Fuel
—Non-Destructive Examination Results of the Fuel Pins—

Akihiro ISHIMI, Kozo KATSUYAMA, Kazuyuki ABE,
Tsuyoshi NAGAMINE and Yasuo NAKAMURA⁺

Fuels and Materials Department, Oarai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 2009)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) researchers have carried out irradiation experiments of minor actinide-containing mixed oxide fuel (MA-MOX) in the Fast Experimental Reactor “JOYO”. The MOX fuel that contained 3% or 5% americium, and the MOX fuel that contained 2% americium and 2% neptunium were used. The irradiation experiments were for 10min or 24h at the maximum high linear heat rate of about 430W/cm.

After the irradiations, the post irradiation examinations were done in JAEA’s Fuel Monitoring Facility. This report presents the results of the post irradiation examinations.

The main results are as follows.

- (1) The X ray CT examination showed that the predicted density decrease in the vicinity of the center of the fuel pellet was occurred for the 10min irradiation. The formation of the central void was observed clearly at the center of the fuel pellet in the 24h irradiation.
- (2) The elongation of about 3mm was observed in the stack length of the fuel pin in the 24h irradiation. This was due to some of the gaps being less than 1mm.
- (3) Bowing of the fuel pins was 7.2mm for the Am-MOX fuel pin (24h irradiation) and 12.5mm for the Np/Am-MOX fuel pin (24h irradiation). This bowing (PFB110) is larger than bowing of the other short-term irradiation fuel pin (PFB052 and PFBF40).
- (4) The γ -ray intensity of Zr-95 decreased and that of Ru-103 increased at the upper region of the fuel stack in the pin irradiated for 24h.

Keywords: MOX Fuel, Minor Actinides, Non-Destructive Post Irradiation Examination

+ Waste Management

目次

1. はじめに	1
2. 燃料ピン仕様	2
3. 照射条件	2
4. 照射後試験	3
4. 1 X 線 CT 検査	3
4. 2 燃料ピン外観検査	3
4. 3 燃料ピン X 線ラジオグラフィ	3
4. 4 燃料ピン重量測定	3
4. 5 燃料ピン寸法測定	3
4. 6 燃料ピン γ スキャン測定	4
4. 7 燃料ピンパンクチャ試験	4
5. 照射後試験結果	5
5. 1 X 線 CT 検査	5
5. 2 燃料ピン外観検査	6
5. 3 燃料ピン X 線ラジオグラフィ	6
5. 4 燃料ピン重量測定	6
5. 5 燃料ピン寸法測定	7
5. 6 燃料ピン γ スキャン測定	7
5. 7 燃料ピンパンクチャ試験	9
6. 考察	10
6. 1 燃料ピン曲がり測定	10
6. 2 燃料ピン γ スキャン測定	11
7.まとめ	13
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Fuel Pin	2
3. Irradiation Conditions	2
4. Post Irradiation Examination	3
4. 1 X-Ray CT Examination	3
4. 2 Fuel Pins Visual Examination	3
4. 3 Fuel Pins X-Ray Radiography Examination	3
4. 4 Fuel Pins Weight Measurement	3
4. 5 Fuel Pins Profile Measurement	3
4. 6 Fuel Pins Gamma Scanning Examination	4
4. 7 Fuel Pins Puncture Examination	4
5. Results	5
5. 1 X-Ray CT Examination	5
5. 2 Fuel Pins Visual Examination	6
5. 3 Fuel Pins X-Ray Radiography Examination	6
5. 4 Fuel Pins Weight Examination	6
5. 5 Fuel Pins Profile Measurement	7
5. 6 Fuel Pins Gamma Scanning Examination	7
5. 7 Fuel Pins Puncture Examination	9
6. Discussions	10
6. 1 Fuel Pins Bowing Examination	10
6. 2 Fuel Pins Gamma Scanning Examination	11
7. Conclusions	13
Reference	13

図表リスト

表2. 1 MA 含有 MOX 燃料ピンの仕様	14
表5. 3 燃料スタック長測定結果	15
表5. 4 燃料ピン重量測定結果	15
表5. 5. 1 燃料ピン全長測定結果	15
表5. 5. 2 燃料ピン曲がり測定結果	16
表5. 5. 3 燃料ピン外径測定結果	16
表5. 7 パンクチャ試験結果	17
図2. 2. 1 B 型照射燃料集合体の概略図	18
図2. 2. 2 Am-MOX 燃料ピン図面	19
図2. 2. 3 Np/Am-MOX 燃料ピン図面	20
図2. 2. 4 燃料スタック構成および集合体内ピン装荷位置	21
図5. 1. 1 10 分間照射燃料集合体の全体透過像	22
図5. 1. 2 微細撮像結果(10 分間照射)	23
図5. 1. 3 通常撮像結果(10 分間照射)	24
図5. 1. 4 10 分間照射燃料ピンの縦断面画像観察	25
図5. 1. 5 24 時間照射燃料集合体の全体透過像	26
図5. 1. 6 微細撮像結果(24 時間照射)	27
図5. 1. 7 通常撮像結果(24 時間照射)	28
図5. 1. 8 24 時間照射燃料ピンの縦断面画像観察	29
図5. 5. 1 10 分間照射燃料ピンの曲がり測定結果(上:Am-MOX 下:Np/Am-MOX)	30
図5. 5. 2 24 時間照射燃料ピンの曲がり測定結果(上:Am-MOX 下:Np/Am-MOX)	31
図5. 5. 3 10 分間照射燃料ピンの外径変化(No.2:Am-MOX 燃料ピン)	32
図5. 5. 4 10 分間照射燃料ピンの外径変化(No.6:Np/Am-MOX 燃料ピン)	33
図5. 5. 5 24 時間照射燃料ピンの外径変化(No.3:Am-MOX 燃料ピン)	34
図5. 5. 6 24 時間照射燃料ピンの外径変化(No.4:Np/Am-MOX 燃料ピン)	35
図5. 6. 1 スペクトル測定結果(No.2:10 分間照射 Am-MOX 燃料ピン)	36
図5. 6. 2 スペクトル測定結果(No.6:10 分間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン)	37
図5. 6. 3 10 分間照射燃料ピンの軸方向 γ 線強度分布	38
図5. 6. 4 スペクトル測定結果(No.3:24 時間照射 Am-MOX 燃料ピン)	39
図5. 6. 5 スペクトル測定結果(No.4:24 時間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン)	40
図5. 6. 6 24 時間照射燃料ピンの軸方向 γ 線強度分布	41
図5. 6. 7 軸方向 γ スキャン測定結果(No.2:10 分間照射 Am-MOX 燃料ピン)	42
図5. 6. 8 軸方向 γ スキャン測定結果(No.6:10 分間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン)	43
図5. 6. 9 軸方向 γ スキャン測定結果(No.1:24 時間照射 Am-MOX 燃料ピン)	44
図5. 6. 10 軸方向 γ スキャン測定結果(No.3:24 時間照射 Am-MOX 燃料ピン)	45
図5. 6. 11 軸方向 γ スキャン測定結果(No.4:24 時間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン)	46
図5. 6. 12 軸方向 γ スキャン測定結果(No.5:24 時間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン)	47
図5. 6. 13 トモグラフィ測定結果(No.1:Am-MOX 燃料ピン、燃料ピン下端から 571mm) ..	48
図5. 6. 14 トモグラフィ測定結果(No.5:Np/Am-MOX 燃料ピン、燃料ピン下端から 613.5mm)	49
図6. 1. 1 最大照射量と燃料ピン最大曲がり量の関係	50
図6. 1. 2 コンパートメント内の断面図	51

図6. 1. 3 燃料部における冷却材流路	51
図6. 2. 1 24 時間照射燃料ピンの γ スキャン測定結果、ラジオグラフィ像及び CT 画像 (No.1:Am-MOX 燃料ピン)	52

写真リスト

写真5. 2. 1 10 分間照射燃料ピンの外観写真	53
写真5. 2. 2 24 時間照射燃料ピンの外観写真	54
写真5. 3. 1 ラジオグラフィ像(10 分間照射:Am-MOX 燃料ピン)	55
写真5. 3. 2 ラジオグラフィ像(10 分間照射:Np/Am-MOX 燃料ピン)	56
写真5. 3. 3 ラジオグラフィ像(24 時間照射:Am-MOX 燃料ピン)	57
写真5. 3. 4 ラジオグラフィ像(24 時間照射:Np/Am-MOX 燃料ピン)	58

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下 JAEA）では高速炉実用化に向け、環境負荷低減等を目指した高速炉におけるマイナーアクチニド（以下 MA）リサイクルの概念についての研究を進めている。MA 含有 MOX 燃料に対する知見⁽¹⁾は少ないので現状であるため、高速実験炉「常陽」における MA 含有 MOX 燃料の照射試験（以下 Am-1 試験）が実施された。

Am-1 試験計画は、MA 含有 MOX 燃料の熱設計余裕及び MA 再分布挙動を評価するための短期照射試験（10 分間及び 24 時間照射）、燃料一被覆管化学的相互作用(FCCI)等の中高燃焼度での照射挙動評価を行う定常照射試験からなる。

MA 含有 MOX 燃料は、アメリシウム（以下 Am）を約 3% 及び 5% 含有した Am-MOX 燃料及びネプツニウム（以下 Np）と Am が各約 2% 含有した Np/Am-MOX 燃料である。

Am-1 試験のうち、短期照射（10 分間及び 24 時間照射）試験は平成 18 年 8 月に終了し、その後 FMF に搬入され照射後試験を実施した。

本報では Am-1 試験のうち短期照射（10 分間及び 24 時間照射）した燃料ピンの非破壊試験結果について報告する。

2. 燃料ピン仕様

Am-1 試験では継続照射を行うため B 型照射燃料集合体を利用している。図 2.2.1 に集合体の概略図を示す。

表 2.1 に Am-MOX 及び Np/Am-MOX 燃料ピンの主な仕様を、図 2.2.2 及び図 2.2.3 に燃料ピン図面をそれぞれ示す。Am-MOX は照射燃料試験施設（以下 AGF）で製造され、Am 含有率が約 3% 及び 5%、O/M 比が 1.95 及び 1.98 であり、Np/Am-MOX は東海 Pu 燃料技術開発センターで製造され、Np 及び Am 含有率が各約 2%、O/M 比が 1.95 及び 1.98 である。

図 2.2.4 に燃料スタックの構成及び集合体内のピン装荷位置を示す。Am-MOX 燃料ピンでは 5%Am-MOX 燃料を軸方向の中央部に配置し、その上下に 3%Am-MOX 燃料を配置した。Np/Am-MOX 燃料ピンでは Np/Am-MOX 燃料を軸方向の中央部に配置し、その上下に通常の MOX 燃料を配置した。被覆管は、Am-MOX 燃料ピンには改良オーステナイト鋼（以下 PNC1520 鋼）、Np/Am-MOX 燃料ピンには改良 SUS316 鋼（以下 PNC316 鋼）を使用した。

3. 照射条件

集合体 PFB110（以下 B11）は、高速実験炉「常陽」第 3-1' サイクルにおいて 10 分間照射された。照射後、FMF において 6 本中 2 本の燃料ピンをダミーピン 2 本と交換して再び「常陽」第 3-2 ' サイクルにおいて 24 時間照射された。

短期照射試験では、「常陽」で照射可能な燃料設計上の上限線出力で照射された。10 分間照射では軸方向最大線出力 435W/cm、最高燃焼度 74.4MWd / t、24 時間照射では軸方向最大線出力 432W/cm、最高燃焼度 376MWd / t を達成した（線出力及び燃焼度は「常陽」照射要素照射評価システム ESPRIT-J による計算値である）。

4. 照射後試験

短期照射燃料ピンの健全性等について確認するため、FMFにおいて燃料ピンの照射後試験を実施した。実施した照射後試験は以下の通りである。

4. 1 X線 CT 検査⁽²⁾

集合体内部の状況を確認するため集合体全体の透過像及び集合体の断面画像を取得した。集合体透過像の撮影は集合体下端 600mm から 2791mm の範囲を 3mm ピッチで撮影した。集合体炉心燃料部の観察を行なうため、炉心燃料部 200mm の範囲を 10mm ピッチ（一部 20mm ピッチ）で撮像した（通常撮像）。また、炉心燃料部の詳細な画像を取得するため炉心軸方向中心位置から+40mm の燃料部の範囲を 10mm ピッチで撮像した（微細撮像）。さらに、炉心燃料部の縦断面画像を取得するために炉心軸方向中心位置から上部側 30mm ~44.4mm の範囲を 0.9mm ピッチで撮像した（縦断面撮像）。

4. 2 燃料ピン外観検査

燃料ピン表面の傷、変色及び付着物等を確認するため、0°、120° 及び 240° の 3 方向（3 方向で燃料ピン表面のほぼ全域を観察できる）からペリスコープと双眼鏡を用いた目視観察を行なった。また、0° 方向から燃料ピン表面の写真を撮影した。

4. 3 燃料ピン X線ラジオグラフィ

燃料ピン内部状況の確認及び燃料スタック長等の測定を行うため、燃料ピンの透過像を撮影した。燃料スタック長の測定誤差は±1.0mm である。

4. 4 燃料ピン重量測定

燃料ピンの重量を天秤により測定し、燃料ピンの重量変化を確認した。ここで、ピン重量測定装置の測定誤差が±0.2g、燃料ピン製造時の測定誤差が±0.2g であることから、二つの測定誤差の合計±0.4g を超える重量変化に対して、照射前後における燃料ピンの有意な重量変化とした。

4. 5 燃料ピン寸法測定

照射後燃料ピンの寸法形状の変化を観察するため、燃料ピンの全長、外径及び曲がり測定を実施した。

4. 5. 1 全長測定

全長はレーザーにより 0° から 45° 間隔で 4 方向 ($0-180^{\circ}$ 、 $45-225^{\circ}$ 、 $90-270^{\circ}$ 、 $135-315^{\circ}$) 測定を行い、これらの平均値とした。燃料ピン全長の測定誤差は $\pm 1.0\text{mm}$ である。

4. 5. 2 曲がり測定

燃料ピンの曲がりは、燃料ピンの上端と下端を結ぶ垂線からのずれを曲がり量とした。曲がり測定の精度は $\pm 0.5\text{mm}$ である。

4. 5. 3 外径測定

燃料ピンの外径測定は、レーザーにより 0° から 45° 間隔で 4 方向 ($0-180^{\circ}$ 、 $45-225^{\circ}$ 、 $90-270^{\circ}$ 、 $135-315^{\circ}$) 、軸方向 1mm ピッチで燃料ピン全長にわたって測定を行った。外径測定の精度は $\pm 0.003\text{mm}$ である。

4. 6 燃料ピン γ スキャン測定

核分裂生成物（以下 FP）及び放射化核種から放出される γ 線の軸方向分布等を測定した。軸方向スキャン測定、定点スペクトル測定及びトモグラフィ測定（24 時間照射燃料ピンの一部）を実施した。

4. 6. 1 軸方向スキャン測定

炉心燃料部（ 200mm ）とその上下 $\pm 200\text{mm}$ の領域を測定ピッチ 1mm 、1 点当たりの測定時間 20 秒で測定した。

4. 6. 2 スペクトル測定

燃料スタック部において 7 点測定した。1 点当たりの測定時間は 6000 秒である。

4. 6. 3 トモグラフィ測定

燃料ピン 1 本に対し 6 方向測定を行い、1 方向あたり径方向に 80 点、1 点当たり 450 秒測定した。測定は No.1 ピン及び No.5 ピン（24 時間照射燃料ピン）について実施した。No.1 ピン（Am-MOX 燃料ピン）は燃料ピン下端からの距離（以下 DFPB : Distance From Pin Bottom）約 571mm 、No.5 ピン（Np/Am-MOX 燃料ピン）は DFPB613.5mm の位置で測定を実施した。

4. 7 燃料ピンパンクチャ試験

燃料ピンプレナム部をレーザーにより穿孔し、その前後の圧力差から燃料ピン内のガス量及び燃料ピン内容積を求めた。また、ガスクロマトグラフによるガス組成分析を実施した。

5. 照射後試験結果

5. 1 X線 CT 検査

5. 1. 1 10分間照射

図 5.1.1 に 10 分間照射された集合体の透過像を示す。観察の結果、コンパートメント等の配列の乱れ、支持構造物の変形、配置等に異常は確認されなかった。図 5.1.2 及び図 5.1.3 に 10 分間照射された集合体の微細撮像及び通常撮像の代表例（炉心中心-50mm から+40mm の範囲）を示す。撮像結果から、図 5.1.2①炉心中心位置における No.6 ピンのように燃料ペレットにクラックが発生していることが確認できた。また、No.2 ピンのように燃料ペレット中央部において密度低下（燃料ペレット中央の黒い部分）が確認された。図 5.1.4 に燃料部縦断面画像（炉心中心+33mm から+44.4mm の範囲）を示す。燃料ペレット中央部において軸方向に密度低下（中央部の縦に黒い線が入っている部分）が予測される。

5. 1. 2 24時間照射

図 5.1.5 に 24 時間照射された集合体の透過像を示す。観察の結果、コンパートメント等の配列の乱れ、支持構造物の変形、配置等に異常は確認されなかった。図 5.1.6 及び図 5.1.7 に 24 時間照射された集合体の微細撮像及び通常撮像の代表例（炉心中心-50mm から+40mm の範囲）を示す。図 5.1.6 の微細撮像結果より、10 分間照射後に No.2 ピンと No.6 ピンを取り出し装荷されたダミーピン以外の全ての燃料ペレット中央部において明確に中心空孔の形成が確認された。また、10 分間照射の図 5.1.2①（炉心中心位置）及び 24 時間照射の図 5.1.6①（炉心中心位置）を比較すると、24 時間照射により中心空孔が成長していることが確認できた。

図 5.1.6⑤（炉心中心から+40mm）の No.3 ピンでは、中心空孔周辺においてペレット密度が高く、さらにその周辺では密度が低下する特異な結果が得られた。この特異な結果は、ここで示した画像以外において確認されている（No.1 ピンの炉心中心から+80mm の位置）。特異部が観察された位置は、後に述べる 5. 3 燃料ピン X 線ラジオグラフィ結果より、ペレット間ギャップの発生位置とほぼ一致していた。

図 5.1.8 に燃料部縦断面画像（炉心中心+33mm から+44.4mm の範囲）を示す。燃料中央部において明確に中心空孔の形成が確認できた。また、中心空孔周辺においてペレット密度が高く、さらにその周辺では密度が低下する特異な結果が、No.3 ピン及び No.5 ピンの縦断面画像においても得られた（No.1 ピンの特異部については縦断面撮像範囲外である）。特異部の発生している位置は、No.3 ピンでは横断面画像と同じ炉心中心+40mm の位置で、No.5 ピンは炉心中心から約+38mm 付近でありラジオグラフィの結果から No.3 ピンと同様にペレット間ギャップの発生位置とほぼ一致していた。

5. 2 燃料ピン外観検査

5. 2. 1 10分間照射燃料ピン

写真 5.2.1 に 10 分間照射燃料ピンの外観写真を示す。燃料ピン表面にシュラウド管のディンプルとの接触跡と変色が確認された。

5. 2. 2 24時間照射燃料ピン

写真 5.2.2 に 24 時間照射燃料ピンの外観写真を示す。10 分間照射燃料ピンと同様に被覆管表面にシュラウド管のディンプルとの接触跡及び変色が確認された（写真 5.2.2 には代表的なものを示す）。

5. 3 燃料ピン X線ラジオグラフィ

5. 3. 1 10分間照射燃料ピン

写真 5.3.1、写真 5.3.2 に 10 分間照射燃料ピンのラジオグラフィ像を示す。No.6 ピンでは約 DFPB510mm に 1mm 未満のペレット間ギャップが観察された。また No.2 ピン及び No.6 ピンの燃料スタック中央部にペレットの割れが観察された。表 5.3 に 10 分間照射燃料のスタック長測定結果を示す。10 分間照射では約 2mm 程度の伸びが確認された。

5. 3. 2 24時間照射燃料ピン

写真 5.3.3、写真 5.3.4 に 24 時間照射燃料ピンのラジオグラフィ像を示す。全てのピンに 1mm 未満のペレット間ギャップが確認され、比較的大きなペレット間ギャップはいずれも炉心燃料スタック上部側で確認された。また、燃料スタック中央部には軸方向に中心空孔の形成が確認できる。

表 5.3 に 24 時間照射燃料のスタック長測定結果を示す。24 時間照射では 3mm 程度の伸びが確認された。

5. 4 燃料ピン重量測定

表 5.4 に 10 分間照射および 24 時間照射された燃料ピンの重量測定結果を示す。全ての燃料ピンで製造時と比較すると測定誤差±0.4g を超える重量変化はないことを確認した。

5. 5 燃料ピン寸法測定

5. 5. 1 全長測定

表 5.5.1 に 10 分間照射および 24 時間照射燃料ピンの全長測定結果を示す。10 分間照射燃料ピンでは、最大で 0.5mm の変化 (No.6 ピン) が確認された。24 時間照射燃料ピンでは、最大で 0.7mm の変化 (No.3 ピン) が確認されたが、測定誤差($\pm 1.0\text{mm}$)範囲内であり有意な変化ではない。

5. 5. 2 曲がり測定

表 5.5.2 に 10 分間照射および 24 時間照射燃料ピンの曲がり測定結果を示す。また、図 5.5.1 に 10 分間照射燃料ピンの曲がりプロファイル、図 5.5.2 に 24 時間照射燃料ピンの代表的な曲がりプロファイルを示す。

10 分間照射では、No.6 ピンにおいて最大 6.8mm の曲がりを確認した。24 時間照射では、Am-MOX 燃料ピンにおいて最大 7.2mm の曲がり (No.1 ピン) が確認でき、Np/Am-MOX 燃料ピンに関しては最大 12.5mm の曲がり (No.4 ピン) を確認した。また、10 分間及び 24 時間照射燃料ピン共に、燃料上端部にて曲がりが最大となっていた。曲がり方向については、炉心燃料集合体で確認できるビアダル状のような特徴はない。

5. 5. 3 外径測定

表 5.5.3 に 10 分間照射および 24 時間照射燃料ピンの外径測定結果を示す。また、図 5.5.3 及び図 5.5.4 に 10 分間照射燃料ピンの軸方向外径プロファイル、図 5.5.5 及び図 5.5.6 に 24 時間照射燃料ピンの代表的な軸方向外径プロファイルを示す。

10 分間照射及び 24 時間照射燃料ピン共に顕著な外径変化はなく 0.01mm 以下であった。また、24 時間照射燃料ピンにおいて 0.02mm 程度のオーバリティが燃料部で確認された。

5. 6 燃料ピンγスキャン測定

5. 6. 1 定点スペクトル測定

(1) 10 分間照射

図 5.6.1 と図 5.6.2 にスペクトル測定結果を示す。Rh-106、Zr-95 等の代表的な FP 核種のピークを確認することができ、Am-MOX 燃料ピンと Np/Am-MOX 燃料ピンで相違は確認されなかった。図 5.6.3 にスペクトル測定の軸方向分布を示す。図中の Y 軸の規格値は、それぞれの平均値で規格化した値である。また比較として ESPRIT-J で計算された燃焼度の規格値についても示した。軸方向において測定値はほぼ平坦な分布を示しており ESPRIT-J による計算値とほぼ一致した。

(2) 24時間照射

図 5.6.4 と図 5.6.5 にスペクトル測定結果を示す。10 分間照射燃料ピンと同様に Rh-106、Zr-95 等の代表的な FP 核種のピークを確認することができるが、24 時間照射燃料ピンでは I-131 (0.364MeV) や Ba-140 (0.424MeV) 等のピークが確認できない核種もあった。I-131 や Ba-140 の半減期はそれぞれ約 8 日、13 日と短いため、照射終了時点から γ スキャン測定を実施するまでの期間が 10 分照射燃料ピン (No.2 ピンの場合は 49 日) に比べ 24 時間照射燃料ピン (No.1 ピンの場合は 107 日) が長いことから減衰し、ピークが確認されなかつたものと考えられる。図 5.6.6 にスペクトル測定の軸方向分布と ESPRIT-J で計算された燃焼度の規格値を示す。軸方向において測定値はほぼ平坦な分布を示しており ESPRIT-J による計算値とほぼ一致した。

5. 6. 2 軸方向スキャン測定

(1) 10分間照射

図 5.6.7 と図 5.6.8 にスキャン測定結果を示す。FP 核種である Ru-103 及び Zr-95 は軸方向にはほぼ平坦な分布を示している。No.2 ピンでは、MA 含有 MOX 燃料部と MOX 燃料部において γ 線強度に顕著な変化は確認されなかつた。また、Cs-137 の移動については確認されなかつた。図 5.6.8 の No.6 ピンでは、DFPB 約 510mm 付近に Ru-103 と Zr-95 の γ 線強度の低下が確認された。

(2) 24時間照射

図 5.6.9 から図 5.6.12 にスキャン測定結果を示す。Am-MOX 及び Np/Am-MOX 共に局所的に γ 線強度の低下が確認されるものの軸方向にはほぼ平坦な分布を示し、10 分間照射燃料ピンと同様に、No. 4 ピン及び No.5 ピンの MA 含有 MOX 燃料部と MOX 燃料部において γ 線強度の顕著な変化は確認されなかつた。

図 5.6.9 に示す No.1 ピンの DFPB 約 563mm では、図 5.6.8 に示す No.6 ピンで発生している γ 線強度の低下と同様の変化が確認できる。しかし、24 時間照射燃料ピンでは、図 5.6.9 に示す No.1 ピンの DFPB 約 571mm、図 5.6.10 に示す No.3 ピンの DFPB 約 532mm、約 555mm 及び約 570mm、図 5.6.12 に示す No.5 ピンの DFPB 約 566mm、約 581mm、約 597mm 及び約 614mm において、Ru-103 の γ 線強度は増加し、逆に Zr-95 の γ 線強度が減少する変化が確認された。

また、これらの結果は MA 含有 MOX 燃料部及び MOX 燃料部にも発生していることから、MA 含有による特異な変化ではないと考えられる。

5. 6. 3 トモグラフィ測定

24時間照射燃料ピンの γ スキャン測定で、図 5.6.12 に示すように、燃料スタック上部で Ru-103 の γ 線強度が増加し、逆に Zr-95 の γ 線強度が低下するところが数箇所観察されたことから、この軸位置の径方向分布を検討するためトモグラフィ測定を行った。No.1 ピン (DFPB 約 571mm) 及び No.5 ピン (DFPB 約 613.5mm) の測定を行った。図 5.6.13 及び図 5.6.14 にトモグラフィ測定結果を示す。測定結果より、Zr-95 は中心空孔における γ 線強度の低下が確認される以外は全体的に均一な分布をしていた。一方、Ru-103 は γ 線強度が低下している中心空孔周辺において γ 線強度が増加していた。この結果は No.1 及び No.5 ピンで同様の結果を示した。

5. 7 燃料ピンパンクチャ試験

表 5.7 に 10 分間照射および 24 時間照射燃料ピンのパンクチャ試験結果を示す。

10 分間照射では、ピン内ガス量が図面寸法上のピン内容積とほぼ同じであったことからガスのリーク等はなく燃料ピンが健全であることを確認した。また、ガスクロによる分析では、Xe や Kr 等の FP ガスは検出されなかった。

24 時間照射では、10 分間照射と同様に図面寸法上のピン内容積ほぼ同じであるため、ガスのリーク等はなく燃料ピンが健全であったことを確認した。また、ガスクロによる分析の結果、Xe や Kr 等の FP ガスは検出されなかった。

6. 考察

6. 1 燃料ピン曲がり測定

表 5.5.2 に示した曲がり測定結果より、10 分間及び 24 時間照射とも Am-MOX 燃料ピンの曲がりに比べ Np/Am-MOX 燃料ピンの曲がりのほうが大きい。この曲がり量の違いは Np/Am-MOX 燃料ピンが全長 1486mm に対し Am-MOX 燃料ピンは全長 999mm と短いためである。

図 6.1.1 に、B11 及び他の短期照射試験（PFB052 及び PFBF40）の燃料ピン最大曲がりの結果を示す。図から 10 分間照射及び 24 時間照射いずれも B11 燃料ピンの曲がりの方が大きいことが分かる。そこで B11 燃料ピンの曲がりについて考察した。

炉心燃料集合体の燃料ピンの場合、①被覆管の周方向熱膨張差に起因した曲がり、②自己ワイヤの引張り力による曲がり、③BDI による曲がりの発生が予測される⁽³⁾。B11 では、キャップセル型照射リグを採用していることから以下に述べる理由により燃料ピンの曲がりは①に起因した曲がりであると言える。

B11 では、コンパートメント内にいくつか冷却材流路が設けられている（図 6.1.2 概略図参照）。図 6.1.3 に示す燃料上端、中心、下端部の CT 画像からコンパートメント内の冷却材流路のギャップ幅が変化しており、キャップセルにおいてはコンパートメントに接触し片側のギャップが閉じていることが確認できる。コンパートメントとキャップセルの間の冷却材流路と冷却材温度との関係については、図 6.1.3 の冷却材流路 A 及び B の位置における冷却材温度差はそれぞれ 140°C 以上になっていると予測され⁽⁴⁾、冷却材流路幅の変化により周方向温度勾配が生じたものと考えられる。この周方向の温度勾配により照射中に熱湾曲が発生したと考えられる。

炉心燃料集合体の最外周に装荷された燃料ピンは、周方向温度勾配により熱湾曲を生じラッパ管等に接触することで被覆管に応力が発生する。発生した応力は照射クリープにより緩和され、緩和された分が歪として被覆管に蓄積することで照射後に塑性変形として曲がりが確認できる。B11 は短期照射試験であり、照射時間が短い（10 分間及び 24 時間）。また照射量に関しても少ない（10 分間照射 : $1.99 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ 、24 時間照射 : $6.0 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ）ことから炉内クリープはほとんど生じていないものと考えられる⁽⁵⁾。そのため PFB11 で生じた曲がりは、照射中に発生した熱湾曲から直接発生したものと予測される。

6. 2 燃料ピンγスキャン測定

6. 2. 1 ラジオグラフィ像による燃料部の観察

図 5.6.8 の軸方向スキャン測定の結果、DFPB 約 510mm において Ru-103 および Zr-95 の γ 線強度の減少が確認された。写真 5.3.2 のラジオグラフィ像より、DFPB 約 510mm の位置ではペレット間ギャップを確認することができる。このことから、Ru-103 及び Zr-95 の γ 線強度の減少はペレット間ギャップが影響しているものと考えられる。

図 5.6.9, 10, 12 で示した軸方向スキャン測定結果では、Zr-95 の γ 線強度は局所的に減少するが、逆に Ru-103 は局所的に増加している部分が観察された。写真 5.3.2 から写真 5.3.4 に示すラジオグラフィ像より、Ru-103 の γ 線強度が増加している全ての位置においてペレット間ギャップを確認することができる。そのため、ペレット間ギャップの存在は Ru-103 の局所的な変化に関係していると考えられる。

6. 2. 2 ラジオグラフィ像及び CT 画像によるペレット間ギャップ部の観察

Ru-103 の γ 線強度の増加、減少が両方確認できる 24 時間照射 An-MOX 燃料ピン (No.1 ピン) に対し、 γ 線強度の変化が確認できる位置のペレット間ギャップについてラジオグラフィ像及び CT 画像で確認した。図 6.2.1 にそれぞれの拡大図を示す。各図の A は Ru-103 及び Zr-95 の γ 線強度が減少している位置、B は Ru-103 の γ 線強度は増加して Zr-95 が減少している位置とした。A では、ラジオグラフィ像及び CT 画像からペレット間が完全に離れる程のペレット間ギャップを確認することができる。一方 B では A に比べ幅の狭いペレット間ギャップが確認でき、CT 画像では中心空孔周辺において密度が高く、その周辺では密度が低くなっていることが確認できる。このため B の位置では、幅の狭いペレット間ギャップの中央付近に燃料が存在している状態である可能性が考えられる。

6. 2. 3 トモグラフィ測定による横断面核種分布の観察

図 5.6.13 及び図 5.6.14 のトモグラフィ測定結果では、Ru-103 は中心空孔の形成されている中央部で大きく減少しその周辺において γ 線強度が増加する分布を示している。トモグラフィ測定では、コリメータが 10mm の幅を持っているため実際にはペレット間ギャップを含む 10mm の領域を測定し、その平均をとっている。ペレット間ギャップを含む 10mm の範囲を測定し平均した結果でも Ru-103 の γ 線強度が中央付近において増加していることから、中央付近に Ru-103 が多く存在しているといえる。Ru-103 が中央付近に多く存在している理由として、①Ru-103 が部分的に多く生成されること、②Ru-103 が移動・蓄積することが考えられる。

6. 2. 4 Ru-103 の γ 線強度増加に関する検討

はじめに①について検討を行った。Ru-103 は Pu 及び U の核分裂により生成される FP であり、核分裂収率は Pu の方が高い。また、高速炉において照射された燃料では、燃料中央部において Pu 濃度が増加する Pu 再分布が生じることが知られている⁽⁶⁾。この

ことから Pu の拡散による部分的な Pu 濃度の増加に伴い、部分的に Ru-103 が多く生成された可能性が考えられる。しかし、Pu の核分裂により Zr-95 も生成されることから（核分裂収率は Ru-103 よりも若干低い）、Zr-95 の γ 線強度分布も Ru-103 と同様の傾向を示すと考えられるが、図 5.6.13 及び図 5.6.14 ではほぼ均一な分布を示していることから、Pu の拡散による Pu 濃度の増加が原因とは考えにくい。

次に②について検討を行なった。FP である Zr は燃料ペレット中では安定な固溶体を作りほとんど動かず、また Ru においても単体、金属析出物として存在しこそ動かないとされている⁽⁶⁾。しかし、高温・高線出力照射された高速炉燃料の γ スキャン測定において、Ru-103 の大きなピークがギャップ部において確認され、Ru-103 が Cs 等の揮発性 FP と同様に高温部からギャップ等の低温部に移動しているという報告がされている⁽⁷⁾。今回の γ スキャン測定結果も同様にペレット間ギャップ部において Ru-103 のピークが確認されていること、また、トモグラフィ測定結果では Ru-103 の強度が部分的に増加していることから、Ru-103 がペレット間ギャップ部へ移動し局所的に蓄積したと考えられる。

ここで、Ru-103 の γ 線強度の局所的な増加は Ru-103 のペレット間ギャップへの移動・蓄積が原因であると考えた場合、写真 5.3.2 及び写真 5.3.3 の 10 分間照射 Np/Am-MOX 燃料ピン DFPB 約 510mm 及び 24 時間照射 Am-MOX 燃料ピン DFPB 約 561.8mm のペレット間ギャップ部においても同様の増加が確認できると考えられる。しかし、図 5.6.8 及び図 5.6.9 の γ スキャン測定結果では、Ru-103 及び Zr-95 の γ 線強度は共に減少していることが確認できる。この結果、A の部分では幅の広いペレット間ギャップにより燃料が存在しない部分が生じたことで Ru-103 及び Zr-95 の γ 線強度が減少しているものと考えられ、B の部分では、幅の狭いペレット間ギャップの中央付近に燃料が存在している状態であり、Ru-103 がペレット間ギャップ（低温側）へ移動して中央付近の燃料部に蓄積することで局所的に γ 線強度が増加したものと考えられる。また Zr-95 については燃料中でほとんど移動することができないため、ペレット間ギャップの影響により γ 線強度は減少したものと考えられる。

以上の検討結果より、燃料ピン γ スキャン測定で確認された Ru-103 の γ 線強度の増加は、Ru-103 のペレット間ギャップへの移動・蓄積に伴うものであると考えられる。ここで Ru-103 の γ 線強度に関して、定常照射された燃料ピンでは γ 線強度が高く Ru-103 のピークを確認することはできないが、24 時間照射燃料ピンでは短期間照射であり全体的に γ 線強度が低くないことから Ru-103 のピークを確認することができたことに注意が必要である。

7. まとめ

MA 含有 MOX 燃料ピンの照射後試験を実施し以下の結果が得られた。

- (1) X線 CT 検査の結果、10 分間照射では燃料中央付近に密度低下が予測され、24 時間照射では燃料中央に明確に中心空孔の形成が確認された。
- (2) スタック長の変化では、24 時間照射燃料ピンにおいて 3mm 程度の伸びを確認した。ラジオグラフィ像より、数箇所で 1mm 未満のペレット間ギャップが確認されていることから、スタック長の変化はペレット間ギャップが生じたことにより商事他見かけ上の変化であると考えられる。
- (3) 燃料ピンの曲がりでは、Am-MOX 燃料ピン（24 時間照射）で 7.2mm、Np/Am-MOX 燃料ピン（24 時間照射）で 12.5mm 発生し、これまでの短期照射燃料ピン（PFB052 及び PFBF40）に比べ大きな曲がりが確認された。
- (4) 軸方向スキャン測定の結果、10 分間照射燃料ピンではペレット間ギャップによる変化以外は平坦な分布を示し、MA 含有 MOX 燃料部と MOX 燃料部において顕著な変化は確認されなかった。24 時間照射燃料ピンにおいては、Ru-103 の γ 線強度は増加し、逆に Zr-95 は減少する変化が確認された。これは、Ru-103 のペレット間ギャップ部へ移動し蓄積したことによるものと考えられる。

参考文献

- (1) C.Prunier,A.Chalony,et al. : “Behavior of Americium-and Neptunium-Based Fuels Under Irradiation” ,International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles,Transmutation of Minor Actinides .Kyoto,Japan,October.28-November 1 (1991) .
- (2) 永峯 他：“高エネルギーX線 CT を利用した非破壊照射後試験技術の開発”，日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2, pp.209-219 (2002) .
- (3) 勝山 他：“X線 CT データを用いた高速炉燃料ピンの曲がり測定及びその解析”，JNC TN9400 2004-016 (2004)
- (4) 高速炉技術課：私信
- (5) 上平 他：“MFA-1, 2 燃料照射データに基づく改良 SUS316 鋼、および 15Cr-20Ni 鋼の照射クリープ特性の評価” ,JNC TN9400 2000-023 (2000)
- (6) N.CHAUVIN,et al. : “THE NUCLERA FUEL” ,pp.104-106
- (7) O.Götzmann : “Fission product behavior in fast breeder fuel pins” , J.Nucl.Mater,188, pp.58-64 (1992)

表 2.1 MA 含有 MOX 燃料ピンの仕様

燃料ピン	種類	Am-MOX 燃料ピン	Np/Am-MOX 燃料ピン
	全長	999±2mm	1486±2mm
被覆管	外径	7.5mm	6.5mm
	肉厚	0.4mm	0.47mm
	材質	PNC1520 鋼	PNC316 鋼
燃料ペレット	直径	6.52±0.05mm	5.42±0.05mm
	理論密度比	93±2(%T.D.)	93±2(%T.D.)
	O/M 比	1.98 ^{+0.02} -0.03	1.98 ^{+0.02} -0.03
		1.95 ^{+0.02} -0.03	1.95 ^{+0.02} -0.03
	Pu 富化度	30wt%以下	30wt%以下
	MA 含有率	Am: 3wt%以下 5wt%以下	Np、Am: 各 2.3wt%以下
	燃料スタック	200±5mm	200±5mm

表 5.3 燃料スタック長測定結果

	ピン No.	照射時間	PIE(mm)	FAB(mm)	PIE-FAB(mm)	変化率(%)
Am-MOX 燃料	1	24 時間	203.9	200.62	3.28	1.6
	2	10 分間	199.13	197.98	1.15	0.6
	3	24 時間	201.7	198.24	3.46	1.7
Np/Am-MOX 燃料	4	24 時間	201.3	199.37	1.93	1.0
	5	24 時間	203.5	200.44	3.06	1.5
	6	10 分間	203.1	201.25	1.85	0.9

表 5.4 燃料ピン重量測定結果

	ピン No.	照射時間	PIE	FAB	重量差
Am-MOX 燃料ピン	1	24 時間	257.0	257.0	0.0
	2	10 分間	256.9	256.7	+0.2
	3	24 時間	256.5	256.5	0.0
Np/Am-MOX 燃料ピン	4	24 時間	239.9	239.7	+0.2
	5	24 時間	240.3	240.2	+0.1
	6	10 分間	240.3	240.4	-0.1

表 5.5.1 燃料ピン全長測定結果

	ピン No.	照射時間	PIE(mm)	FAB(mm)	PIE-FAB(mm)
Am-MOX 燃料ピン	1	24 時間	998.7	999	-0.3
	2	10 分間	998.9	999	-0.1
	3	24 時間	998.3	999	-0.7
Np/Am-MOX 燃料ピン	4	24 時間	1485.6	1485.8	-0.2
	5	24 時間	1485.4	1485.8	-0.4
	6	10 分間	1485.5	1486	-0.5

表 5.5.2 燃料ピン曲がり測定結果

	ピン No.	照射時間	最大曲がり		
			曲がり方向(deg)	DFPB(mm)	曲がり量(mm)
Am-MOX 燃料ピン	1	24 時間	208	560.0	7.2
	2	10 分間	61	526.0	2.6
	3	24 時間	2	568.0	6.0
Np/Am-MOX 燃料ピン	4	24 時間	111	609.0	12.5
	5	24 時間	294	584.0	11.4
	6	10 分間	262	589.0	6.8

表 5.5.3 燃料ピン外径測定結果

ピン No.	照射時間		測定角度(°)				
			0	45	90	135	Ave
1	24 時間	DIA(mm) * 1	7.514	7.512	7.502	7.509	7.505
		REF(mm) * 2	7.497	7.499	7.5	7.502	7.499
		ΔD(mm)	0.017	0.013	0.002	0.007	0.006
2	10 分間	DIA(mm) * 1	7.495	7.498	7.499	7.493	7.494
		REF(mm) * 2	7.489	7.494	7.495	7.493	7.493
		ΔD(mm)	0.006	0.004	0.004	0	0.001
3	24 時間	DIA(mm) * 1	7.521	7.509	7.506	7.508	7.505
		REF(mm) * 2	7.502	7.503	7.498	7.5	7.501
		ΔD(mm)	0.019	0.006	0.008	0.008	0.004
4	24 時間	DIA(mm) * 1	6.5	6.503	6.509	6.515	6.503
		REF(mm) * 2	6.495	6.5	6.499	6.494	6.497
		ΔD(mm)	0.005	0.003	0.01	0.021	0.006
5	24 時間	DIA(mm) * 1	6.514	6.512	6.506	6.51	6.508
		REF(mm) * 2	6.499	6.497	6.498	6.5	6.499
		ΔD(mm)	0.015	0.015	0.008	0.01	0.007
6	10 分間	DIA(mm) * 1	6.503	6.505	6.506	6.505	6.502
		REF(mm) * 2	6.5	6.499	6.499	6.497	6.499
		ΔD(mm)	0.003	0.006	0.007	0.008	0.003

No.1~3:Am-MOX 燃料ピン

No.4~6:Np/Am-MOX 燃料ピン

* 1 燃料部(Am-MOX 燃料ピン:DFPB 390~590mm、Np/Am-MOX 燃料ピン:DFPB 427~627mm)における最大外径値

* 2 上部プレナム部(Am-MOX 燃料ピン:DFPB 854~954mm、Np/Am-MOX 燃料ピン:DFPB 1341~1441mm)の平均外径値

表 5.7 パンクチャ試験結果

ピン No.	照射時間	燃焼度 * 1	ピン内容積	ピン内ガス圧	ピン内ガス量
		(MWd/t)	(cc)	(MPa-STP)	(cc-STP)
1	24 時間	244	11.5	9.30E-02	10.55
2	10 分間	47	11.46	8.87E-02	10.03
3	24 時間	239	11.52	9.21E+02	10.46
4	24 時間	361	18.95	9.29E-02	17.35
5	24 時間	357	19.04	9.09E-02	17.35
6	10 分間	71	18.86	8.96E-02	16.66

No.1~3:Am-MOX 燃料ピン

No.4~6:Np/Am-MOX 燃料ピン

ピン No.	照射時間	ガスクロ分析結果			Xe/Kr	生成ガス量	放出ガス量	放出率
		Kr	Xe	He+α		(cc-STP)	(cc-STP)	放出率(%)
1	24 時間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-
2	10 分間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-
3	24 時間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-
4	24 時間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-
5	24 時間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-
6	10 分間	0.0	0.0	100.0	-	-	0.0	-

No.1~3:Am-MOX 燃料ピン

No.4~6:Np/Am-MOX 燃料ピン

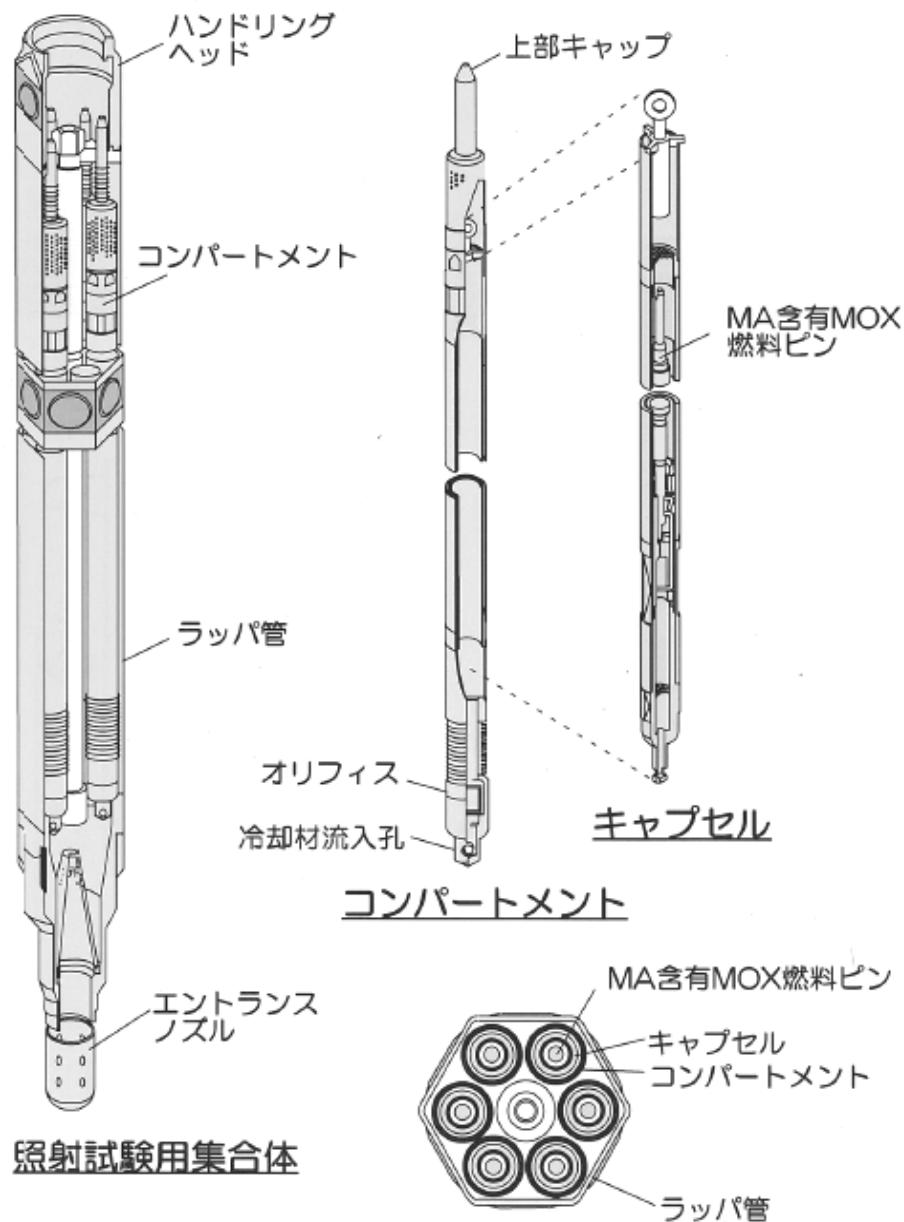


図 2.2.1 B 型照射燃料集合体の概略図

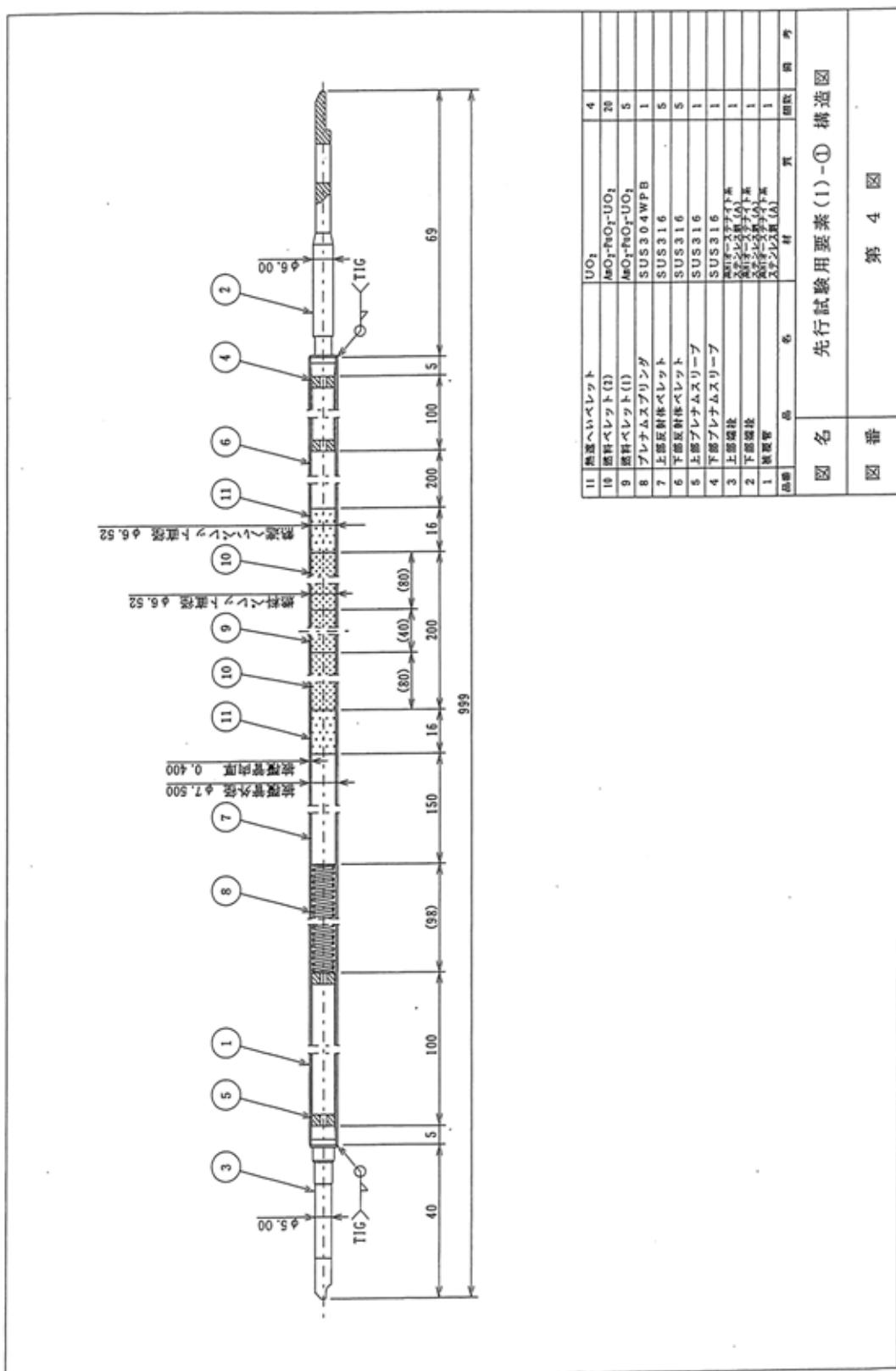


図 2.2.2 Am-MOX 燃料ピッソ面

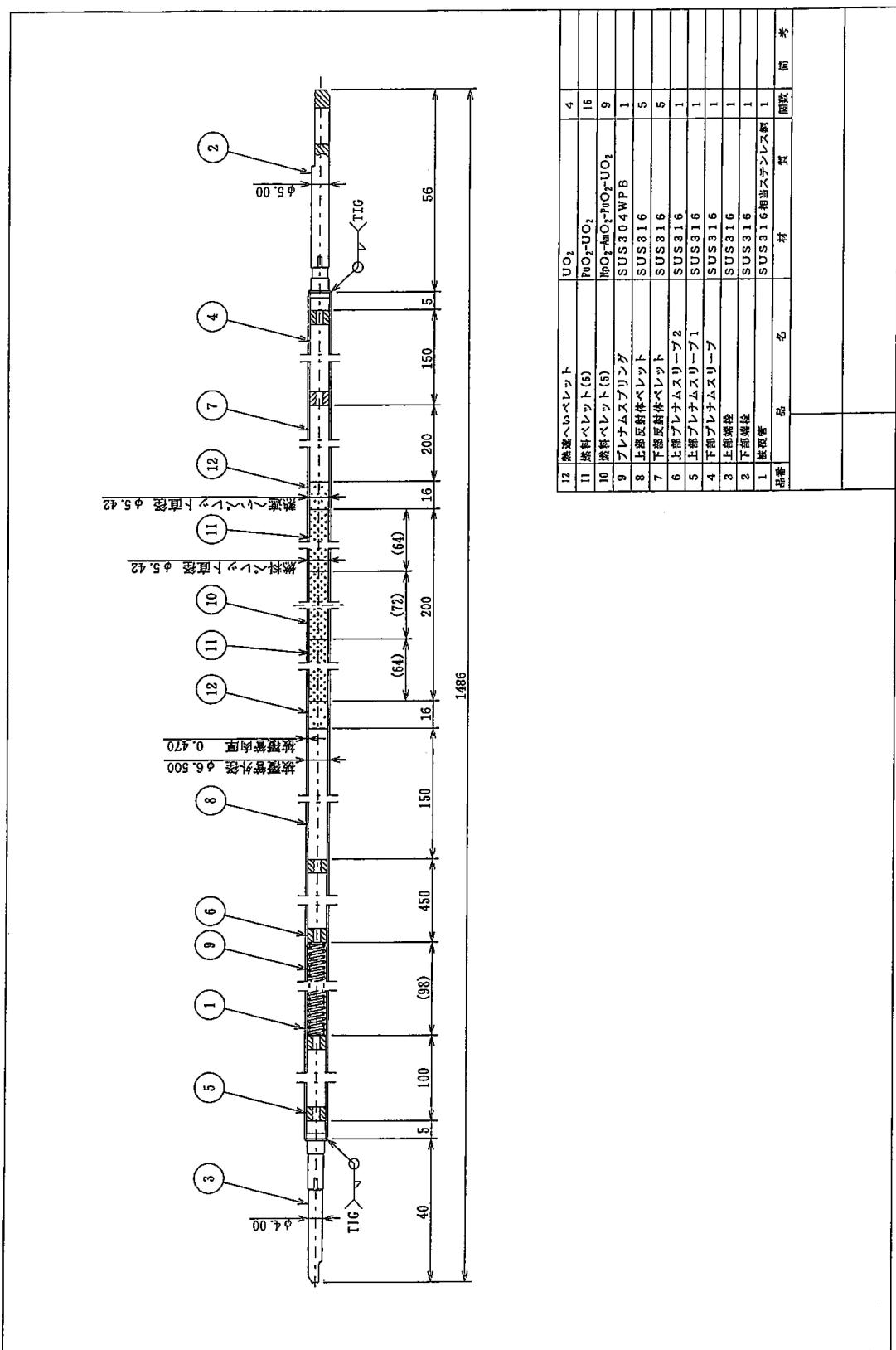
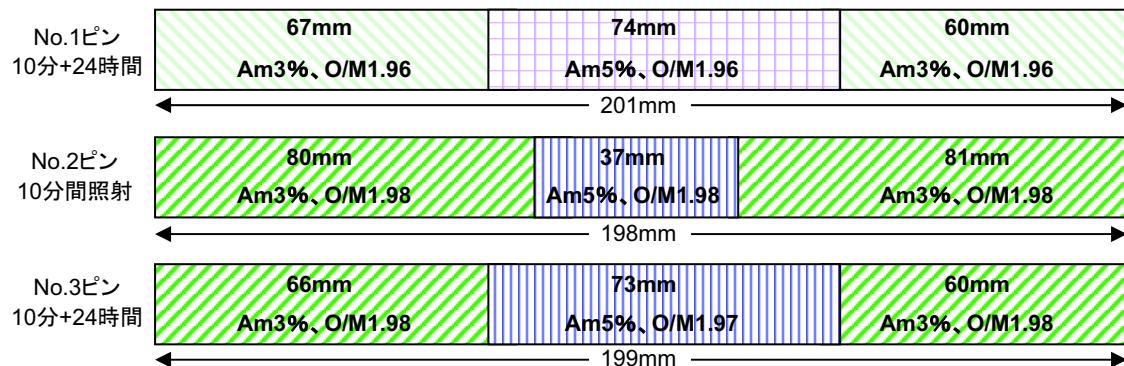


図 2.2.3 Np/Am-MOX 燃料ビン図面

・Am-MOX燃料ピン



・Am/Np-MOX燃料ピン

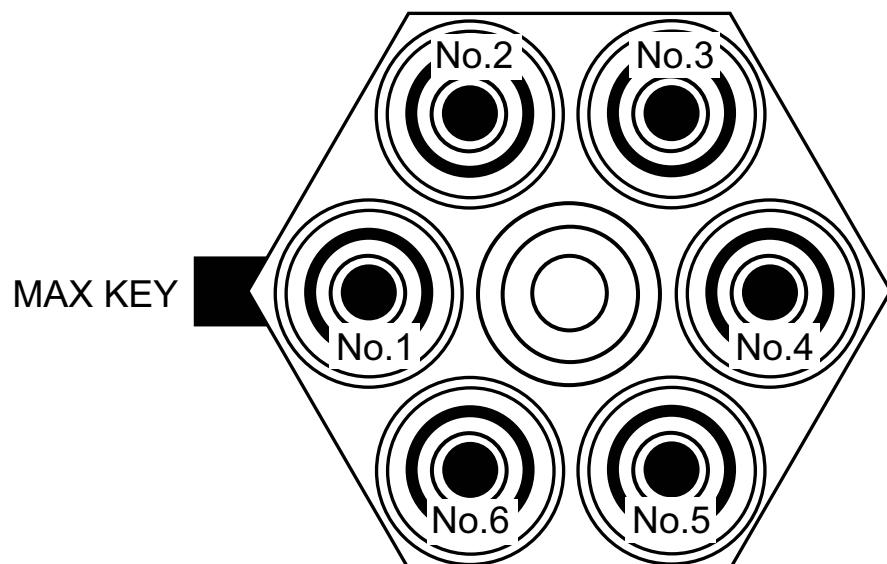
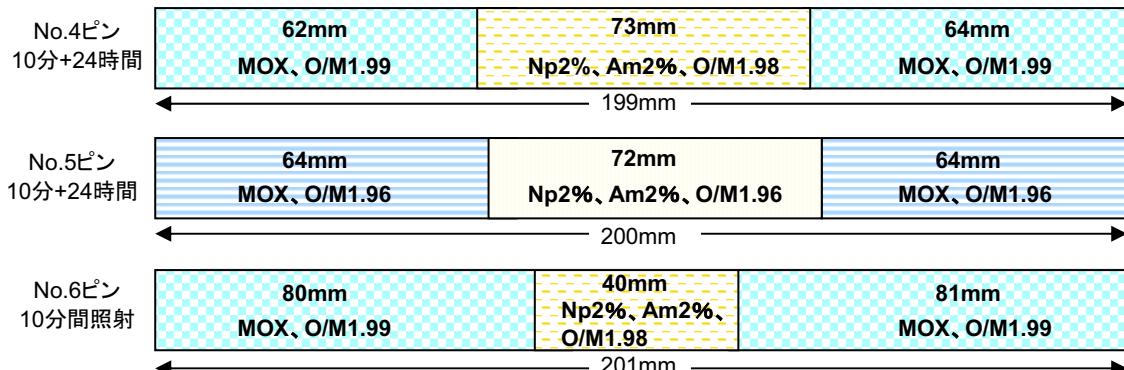
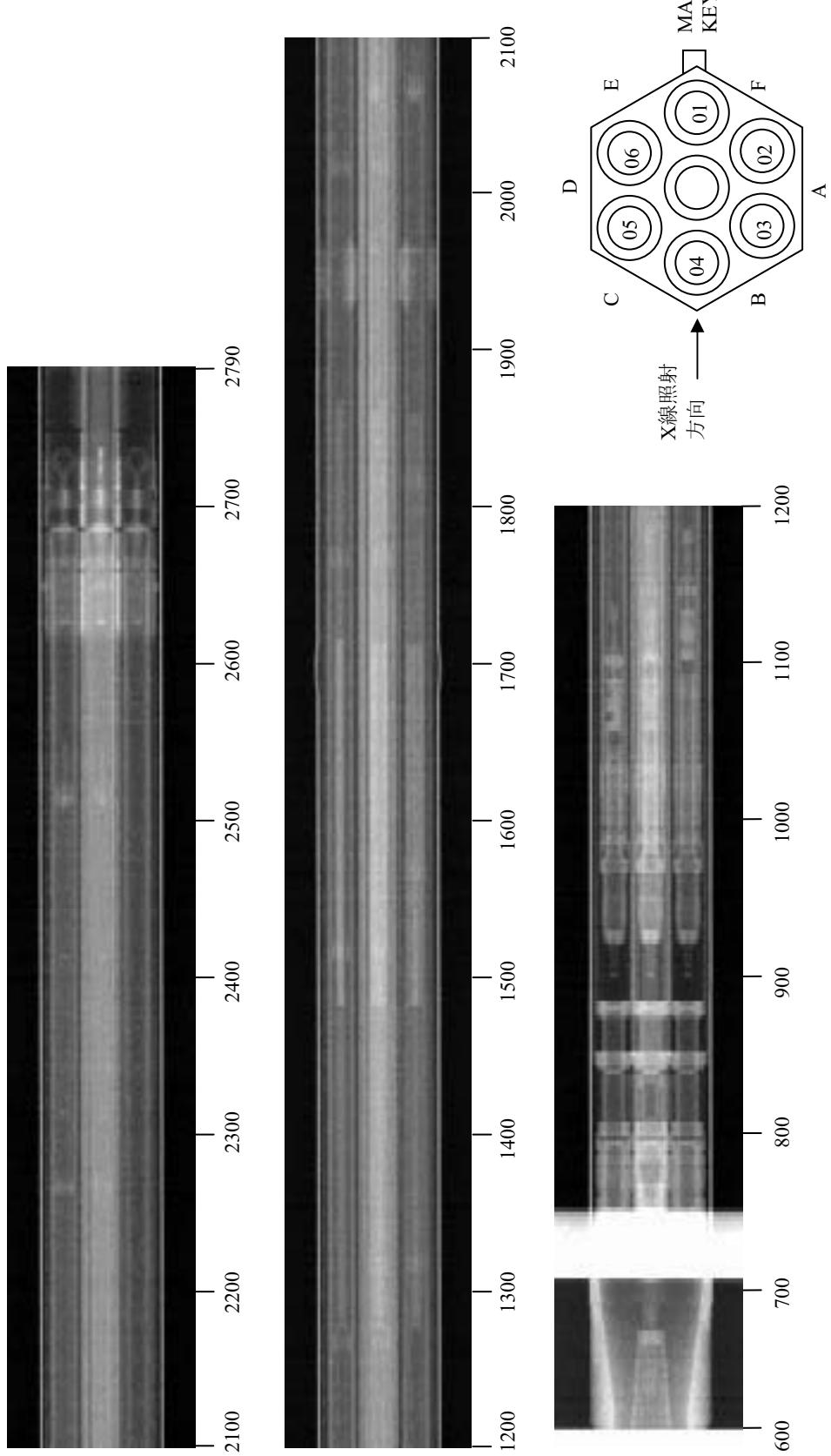


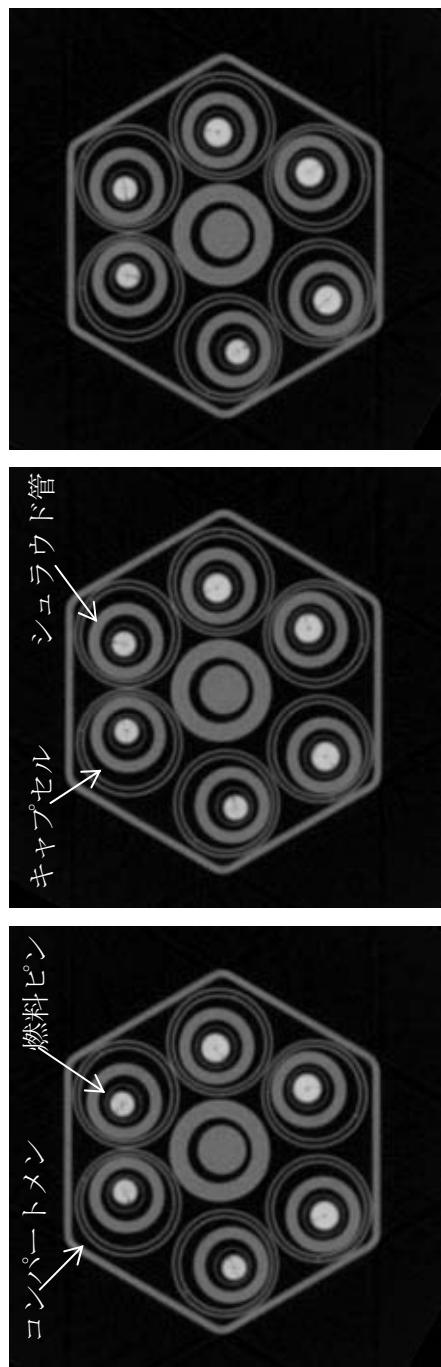
図 2.2.4 燃料スタック構成および集合体内ピン装荷位置

3mmピッチ



寸法は集合体
下端からの距離 (mm)

図 5.1.1 10 分間照射燃料集合体の全体透過像



④炉心中心+30mm(1630mm)

⑤炉心中心+40mm

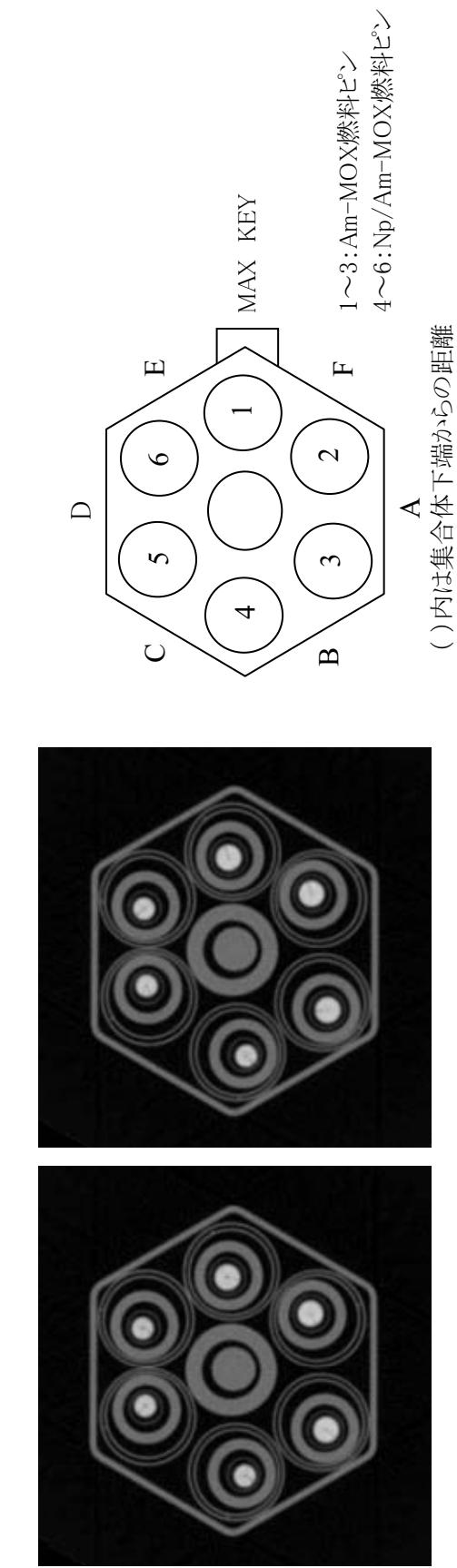
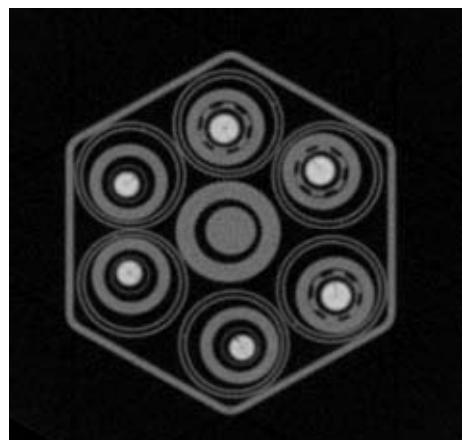
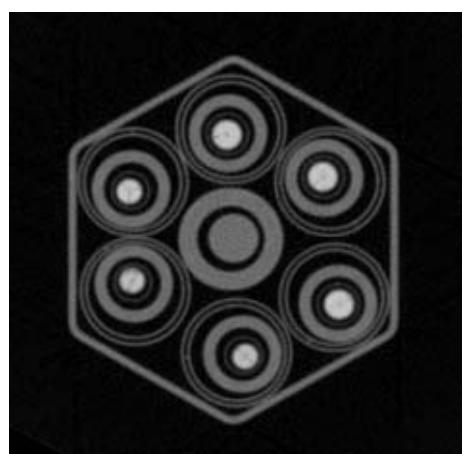


図5.1.2 微細撮像結果(10分間照射)

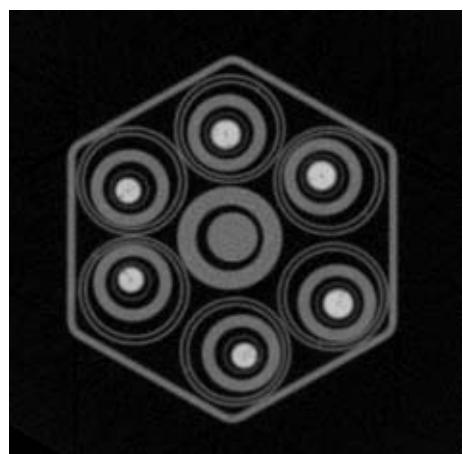
— 23 —



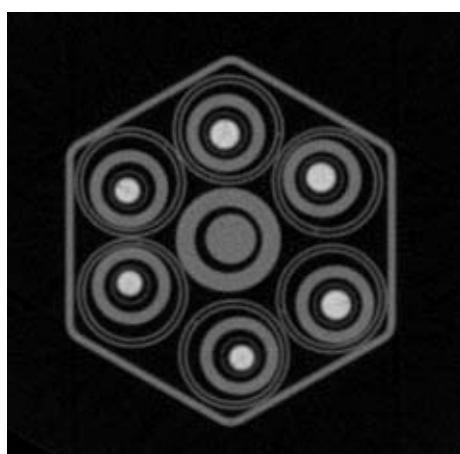
③炉心中心,-30mm



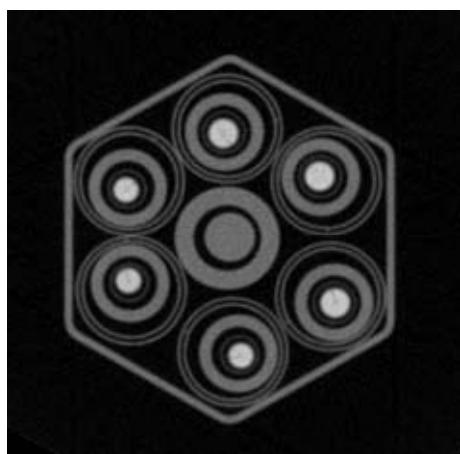
②炉心中心,-20mm



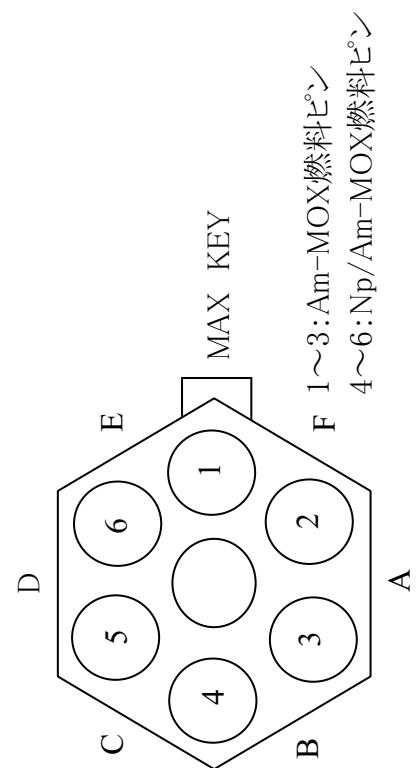
①炉心中心,-10mm



⑤炉心中心,-50mm



④炉心中心,-40mm(1560mm)



()内は集合体下端からの距離

図5.1.3 通常撮像結果(10分間照射)

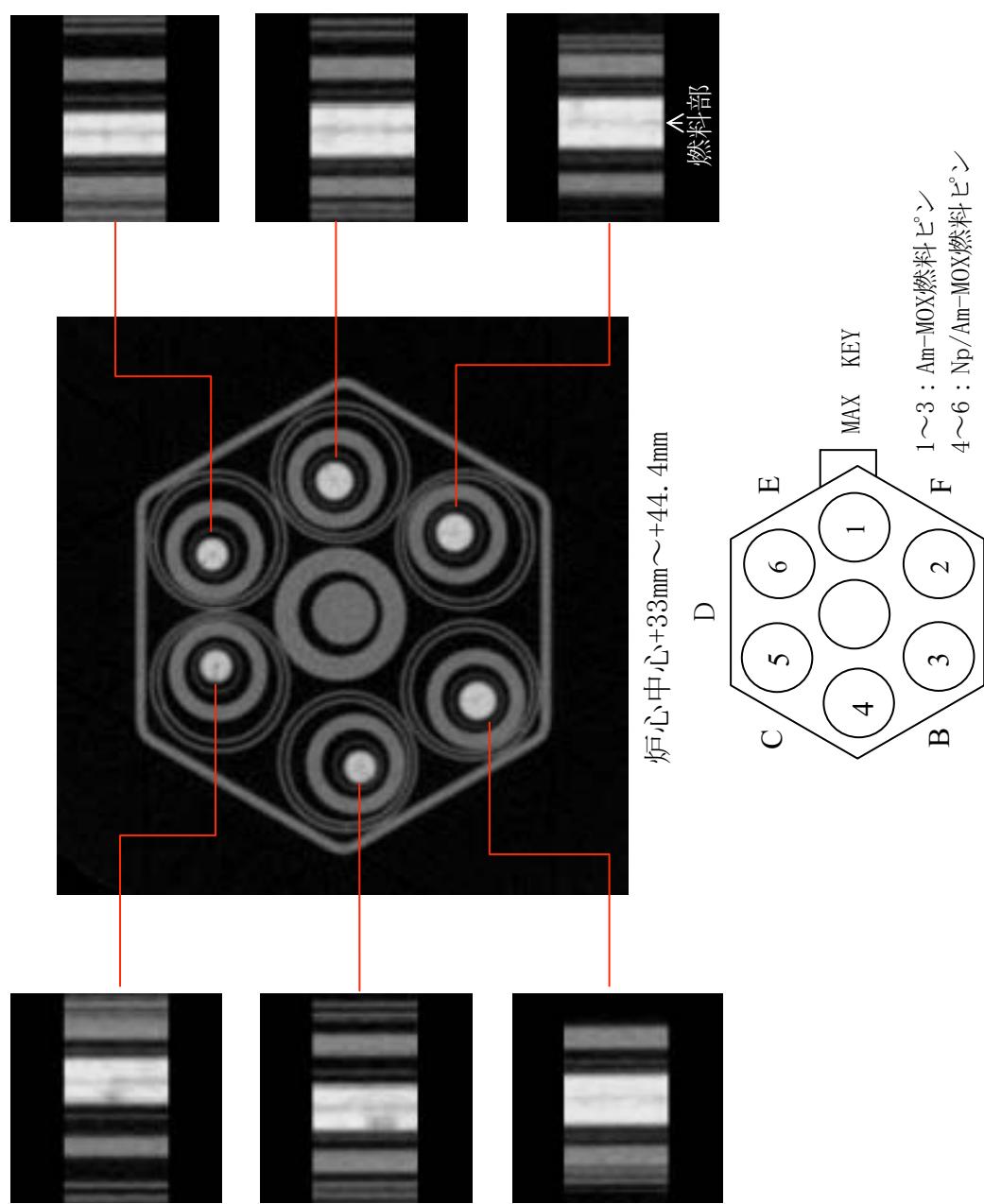
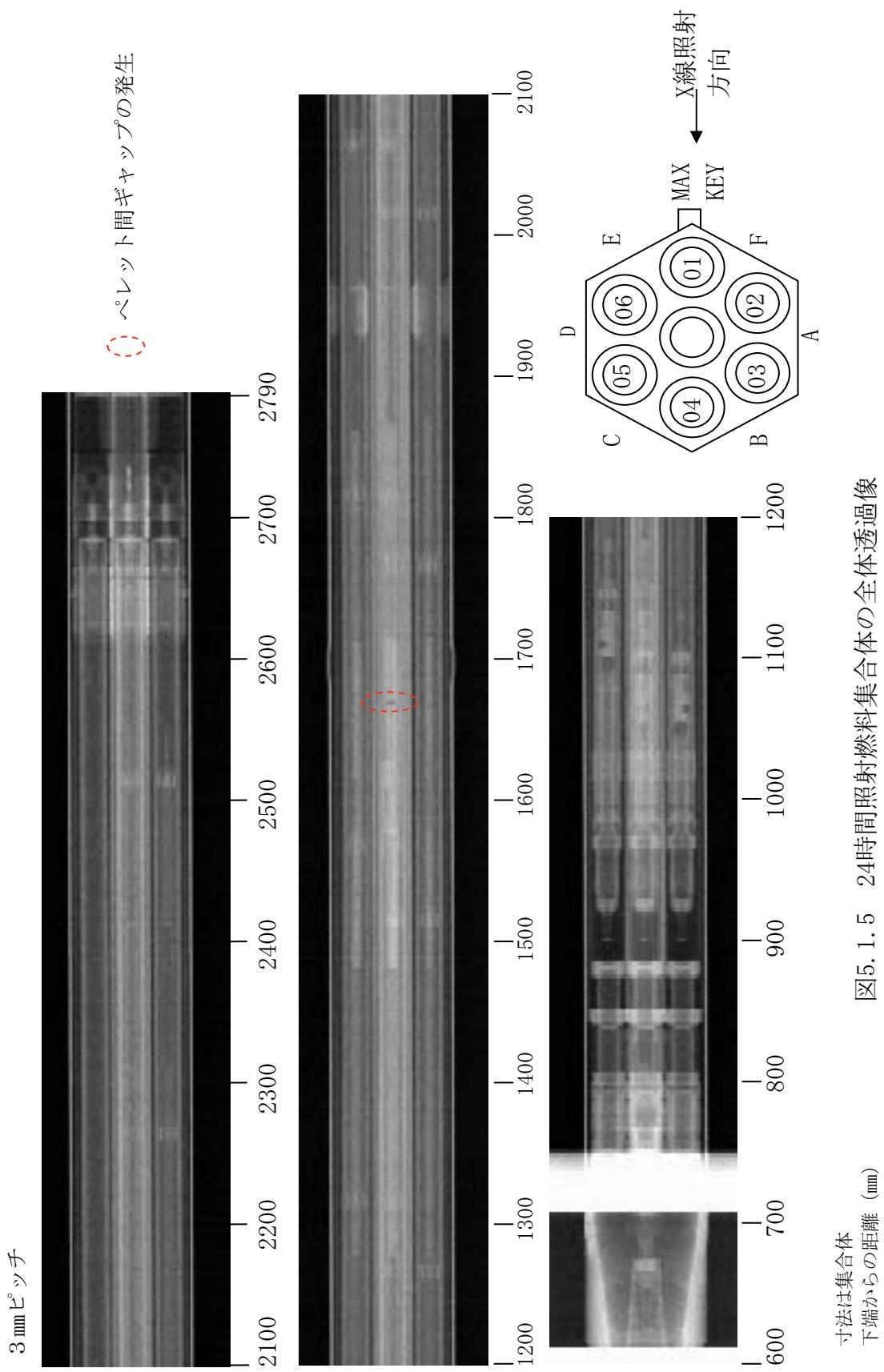
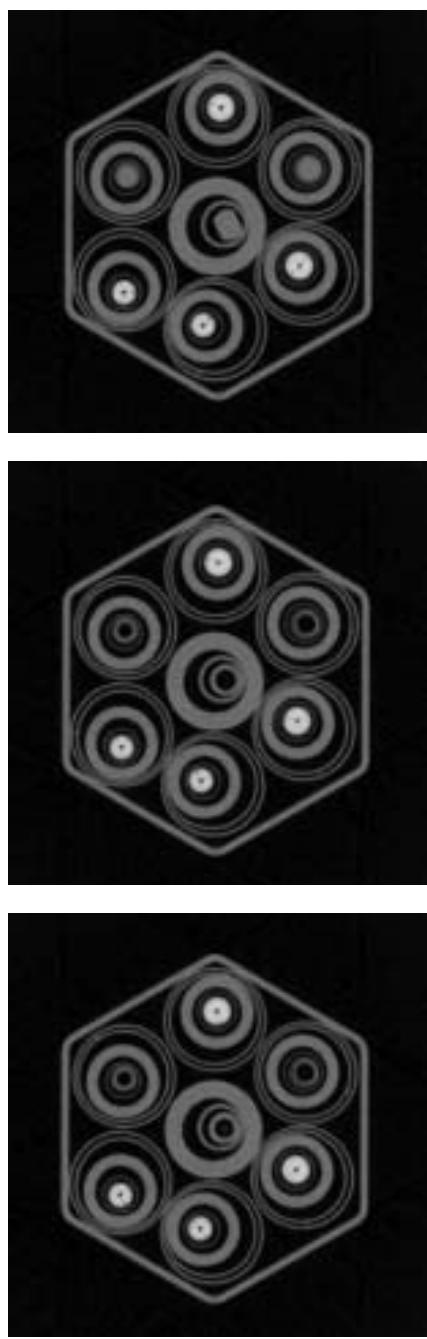
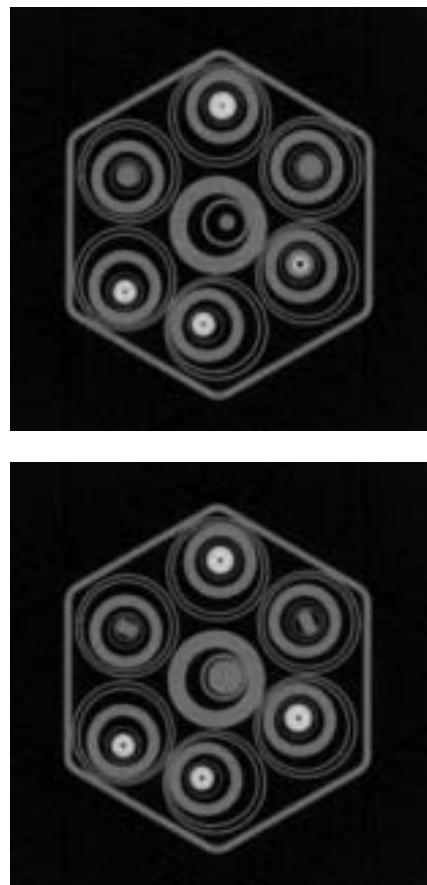


図5.1.4 10分間照射燃料ビンの縦断面画像観察

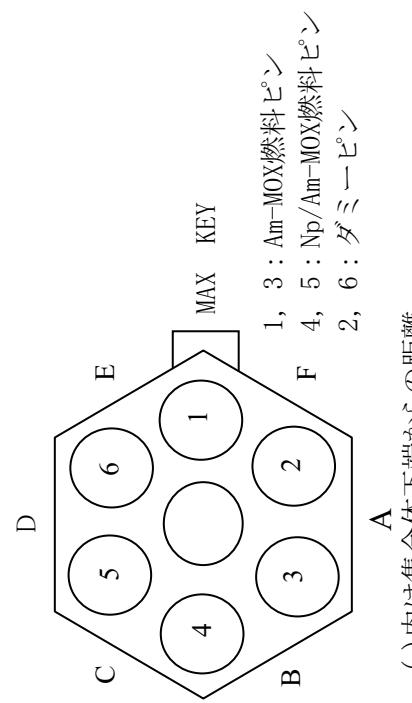




①炉心中心 (1600mm)
②炉心中心+10mm (1610mm)
④炉心中心+30mm (1630mm)

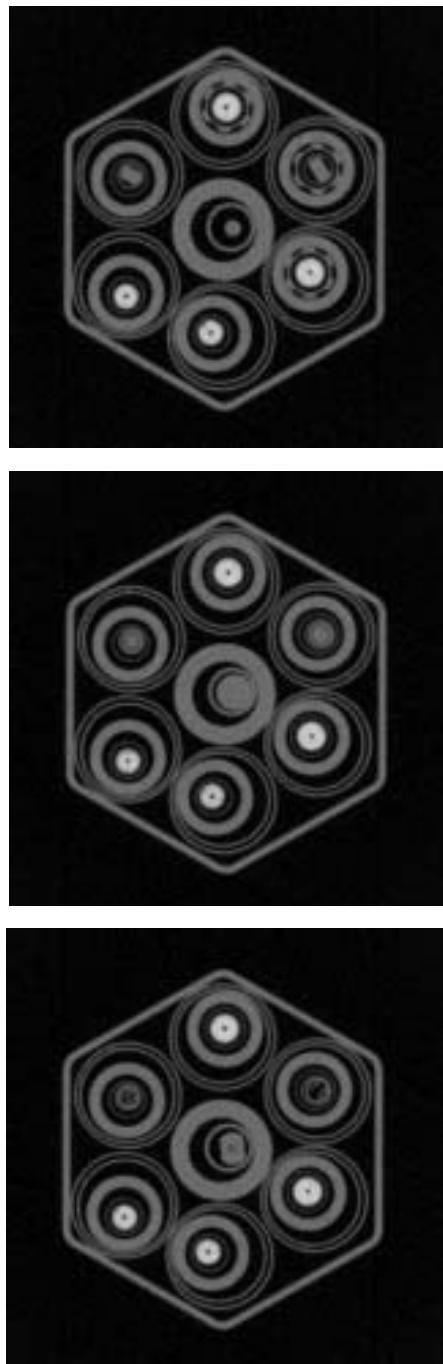


③炉心中心+20mm (1620mm)
⑤炉心中心+40mm (1640mm)

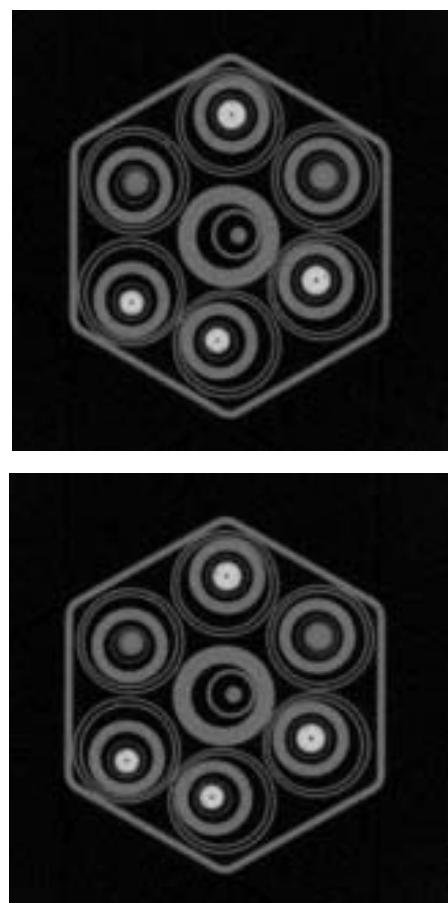


()内は集合体下端からの距離

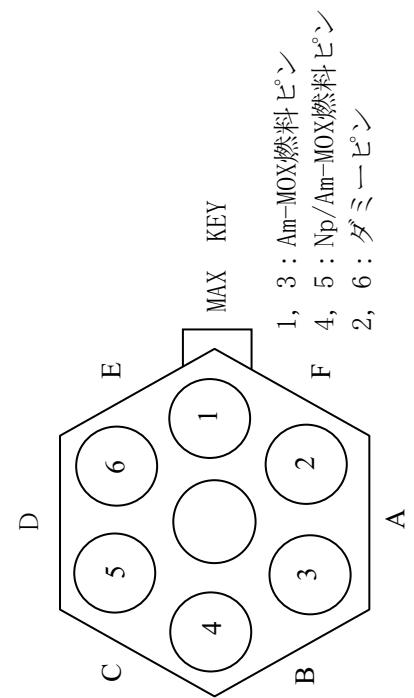
図5.1.6 微細撮像結果 (24時間照射)



①炉心中心 -10mm (1590mm) ②炉心中心 -20mm (1580mm) ③炉心中心 -30mm (1570mm)



④炉心中心 -40mm (1560mm) ⑤炉心中心 -50mm (1550mm)



() 内は集合体下端からの距離

図5.1.7 通常撮像結果 (24時間照射)

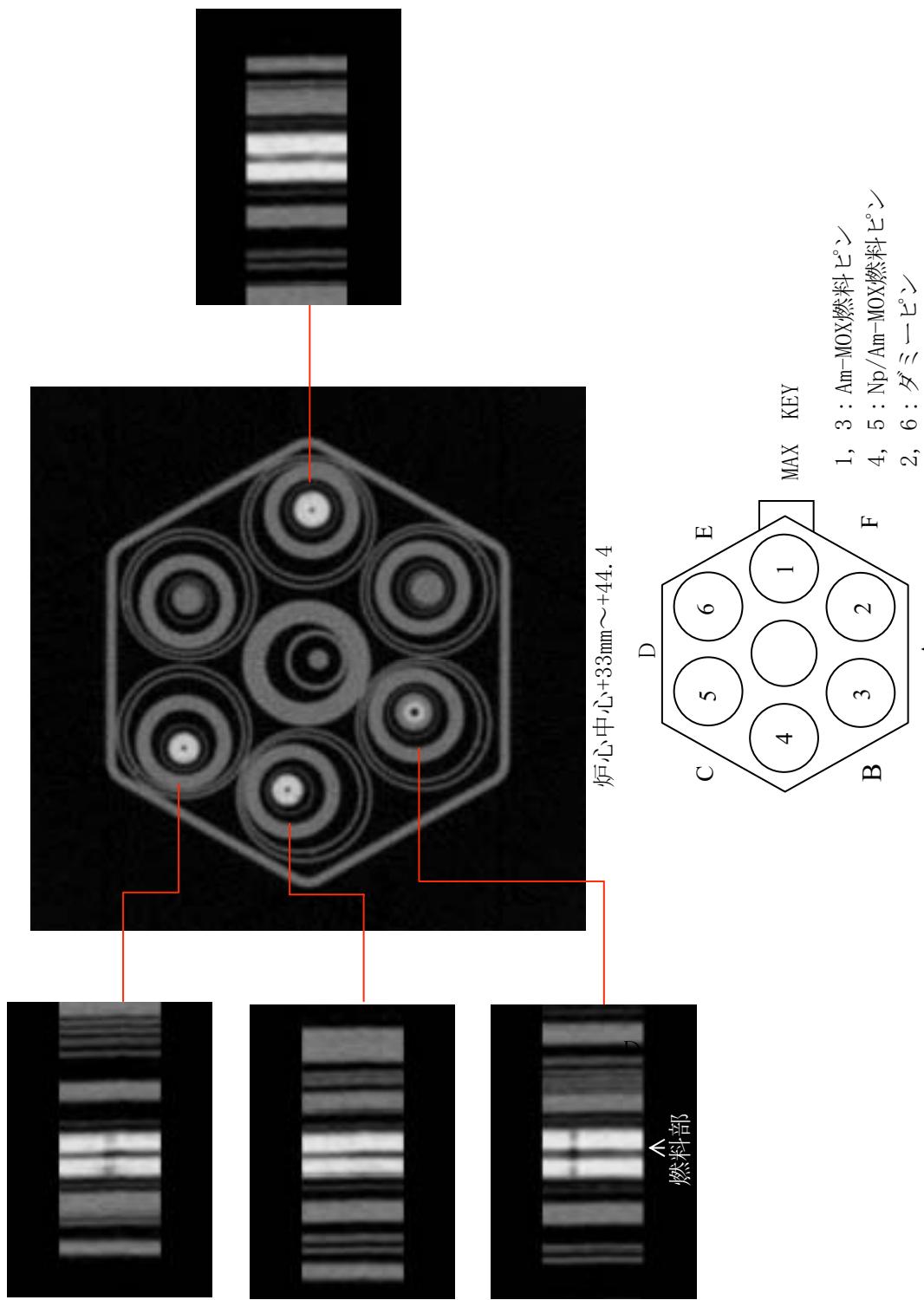


図5.1.8 24時間照射燃料ビーンの縦断面画像観察

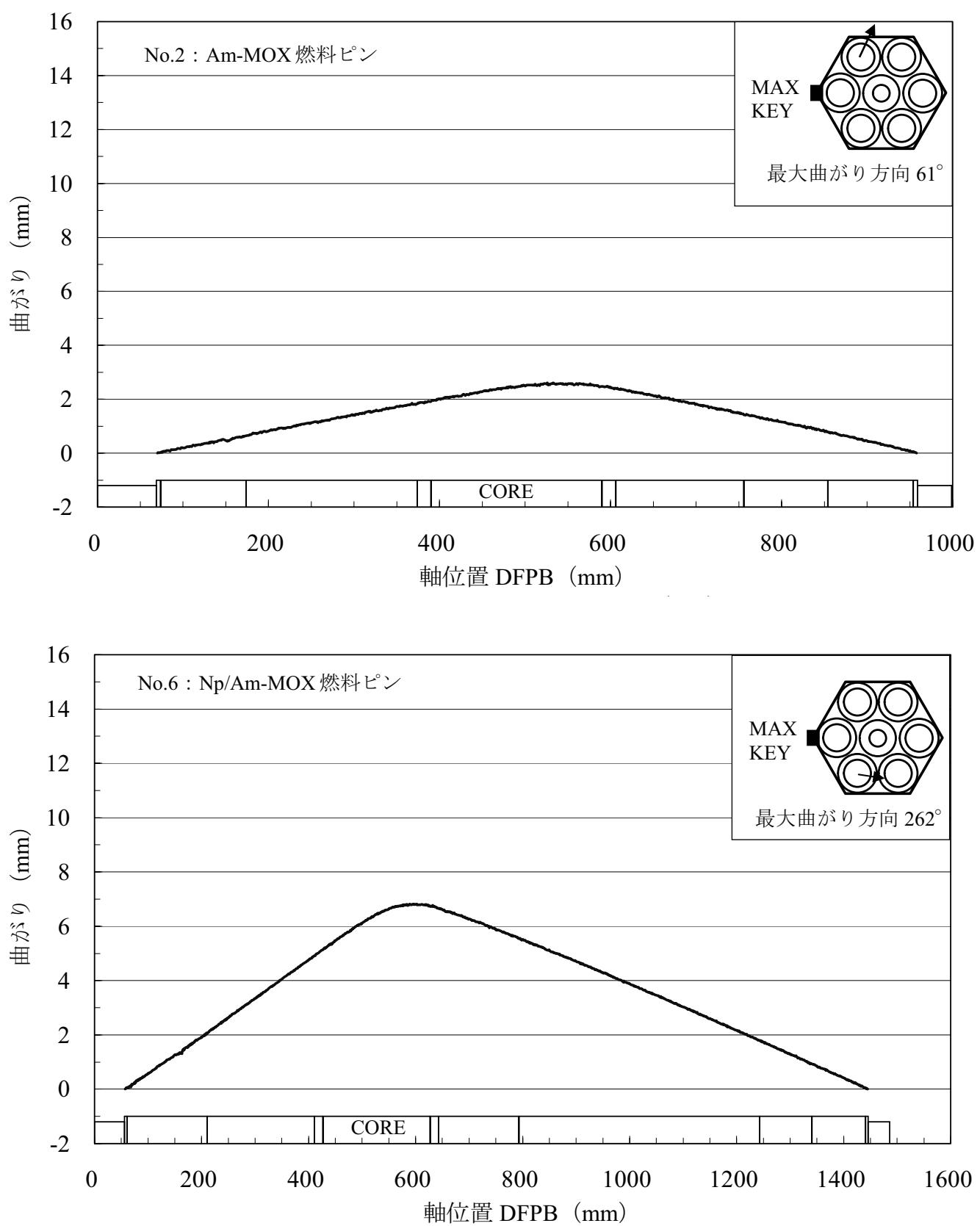


図 5.5.1 10 分間照射燃料ピンの曲がり測定結果（上：Am-MOX 下：Np/Am-MOX）

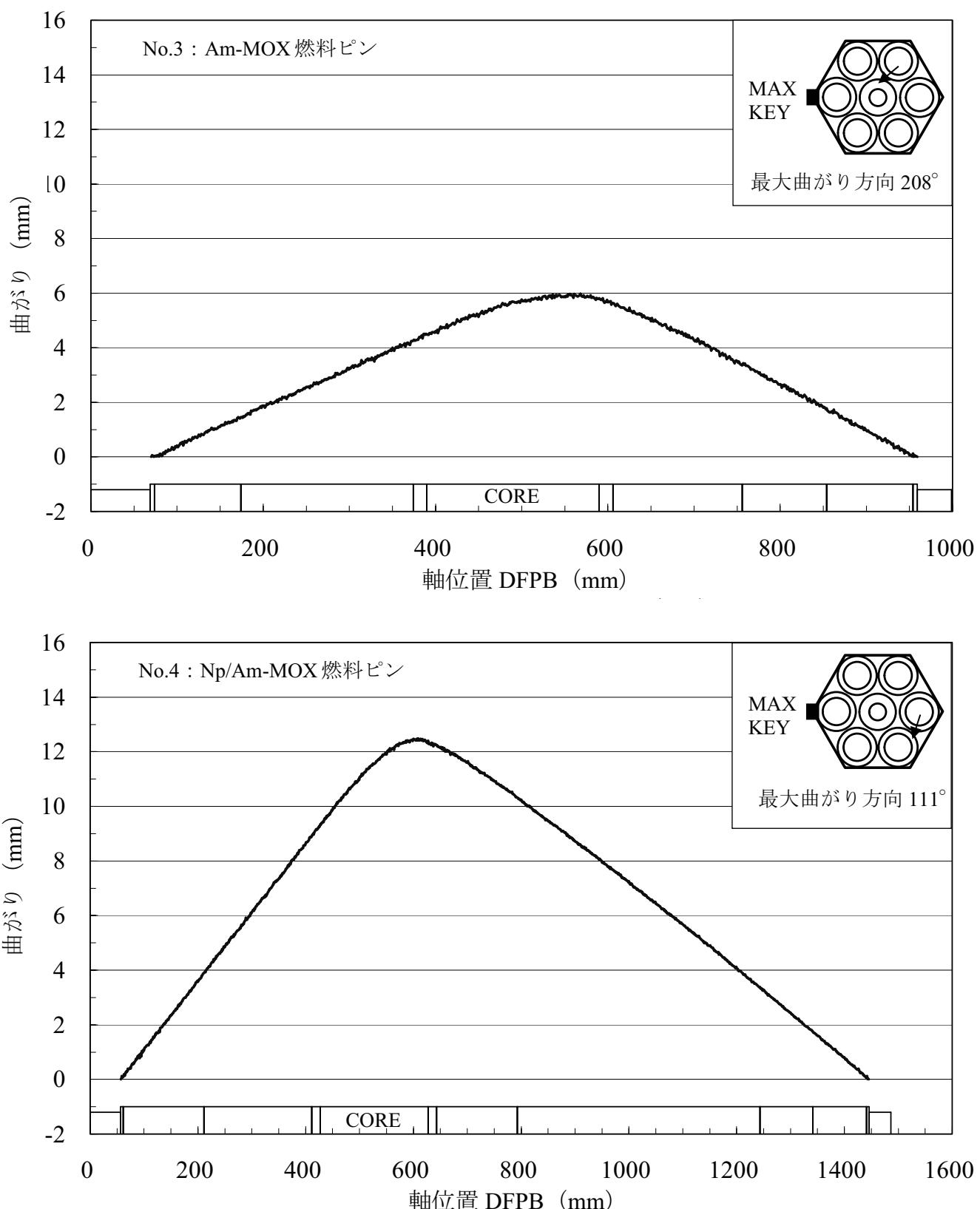
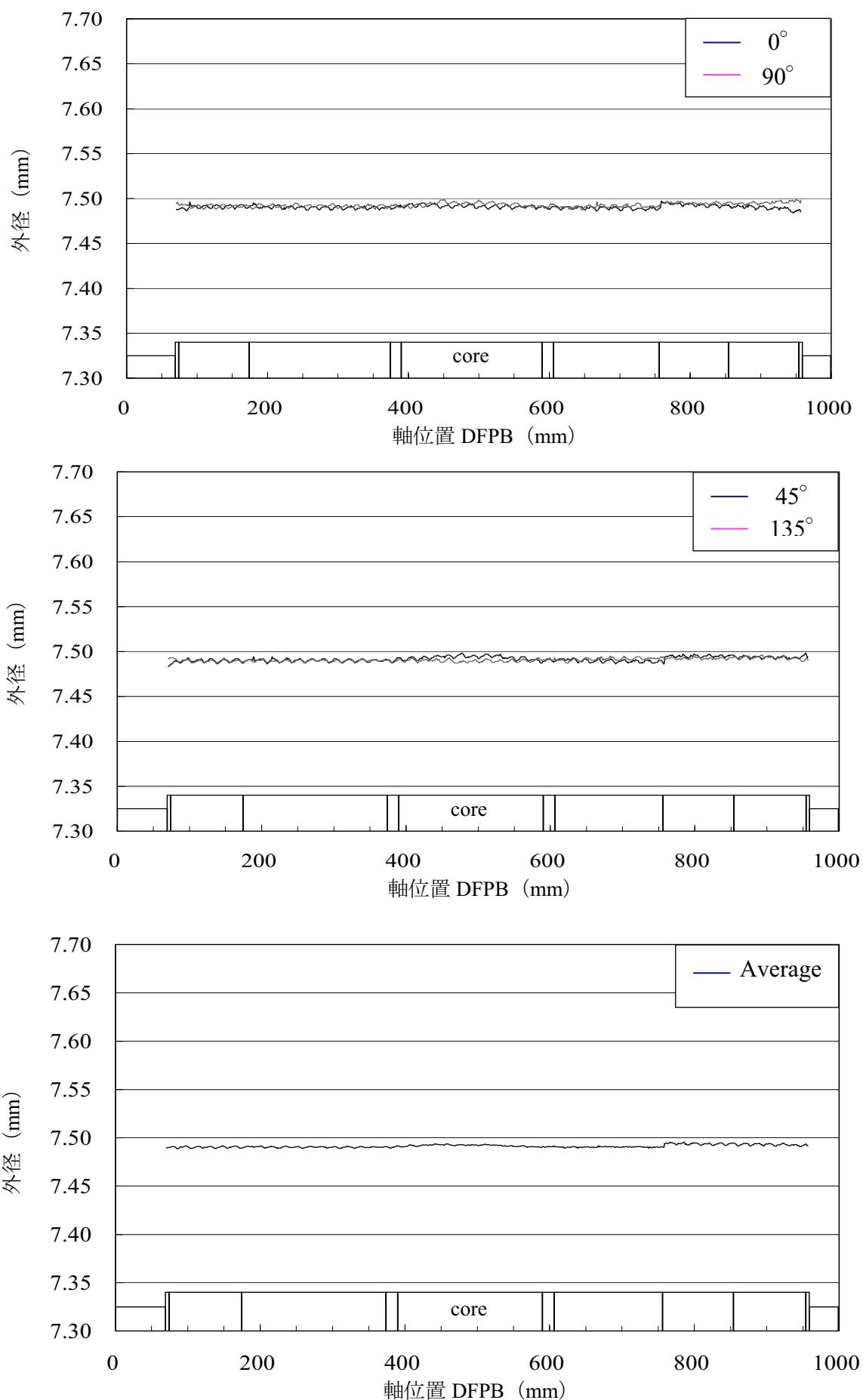


図 5.5.2 24 時間照射燃料ピンの曲がり測定結果（上：Am-MOX 下：Np/Am-MOX）



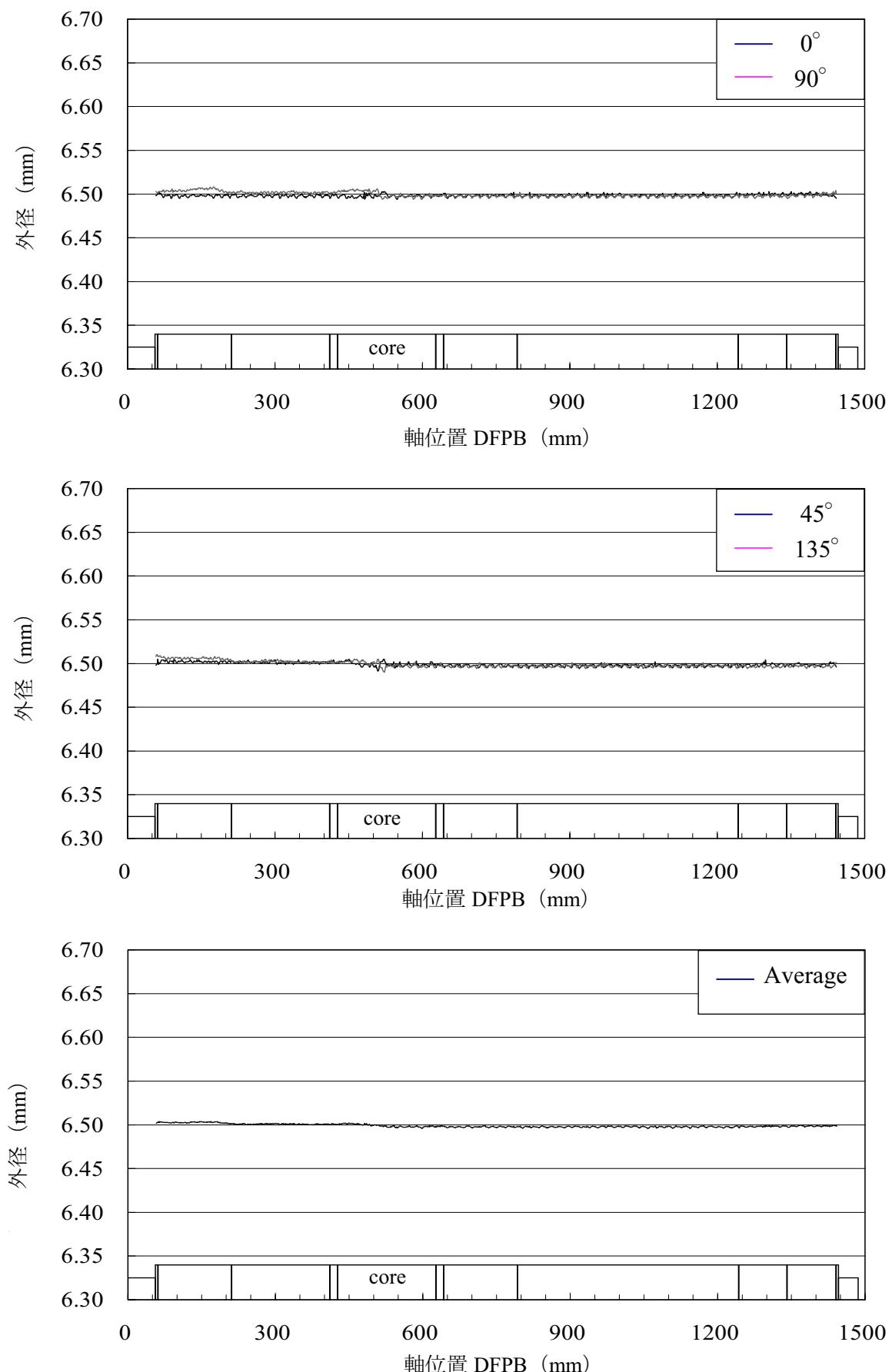


図 5.5.4 10 分間照射燃料ピンの外径変化 (No.6 : Np/Am-MOX 燃料ピン)

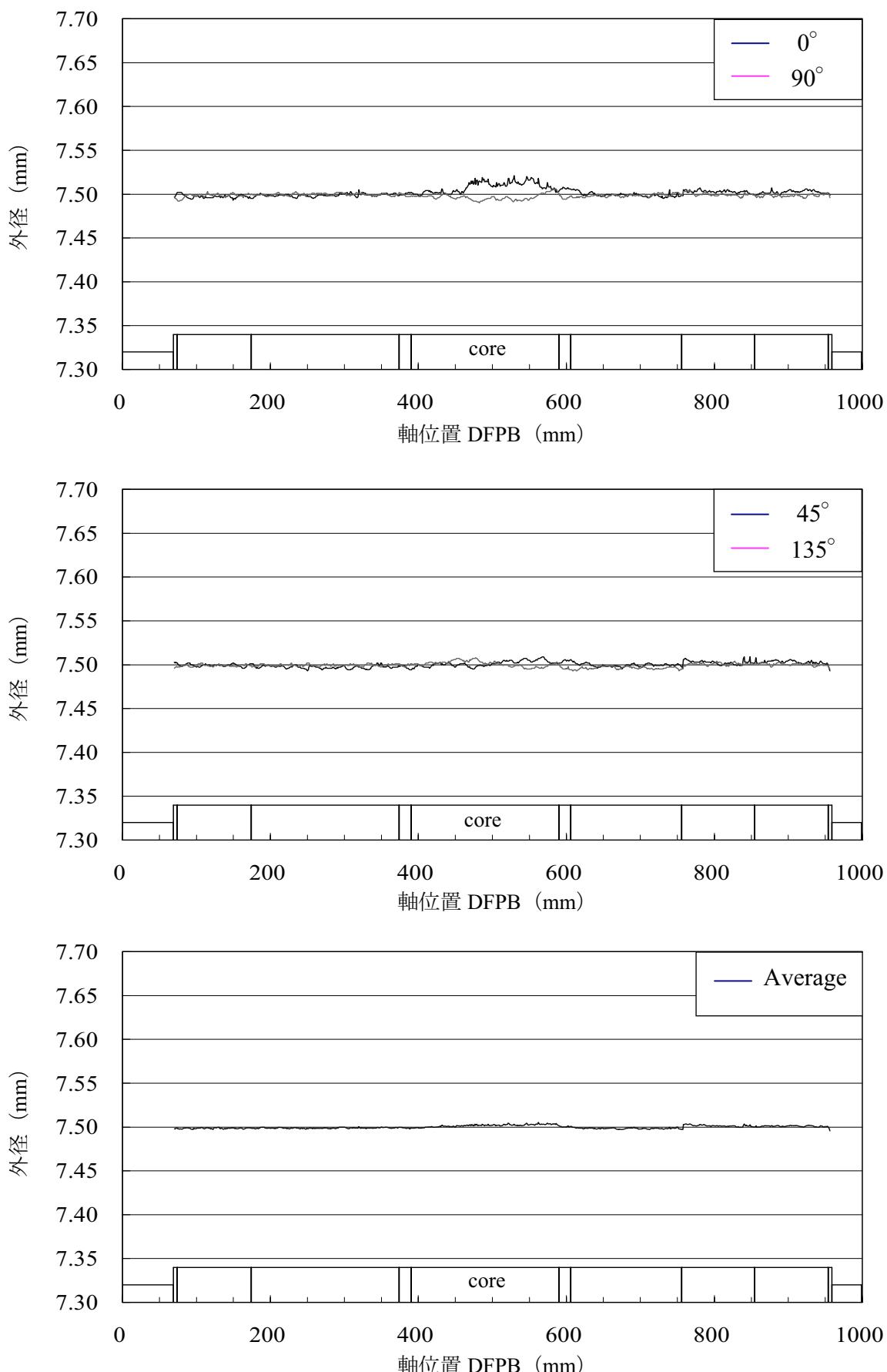


図 5.5.5 24 時間照射燃料ピンの外径変化 (No.3 : Am-MOX 燃料ピン)

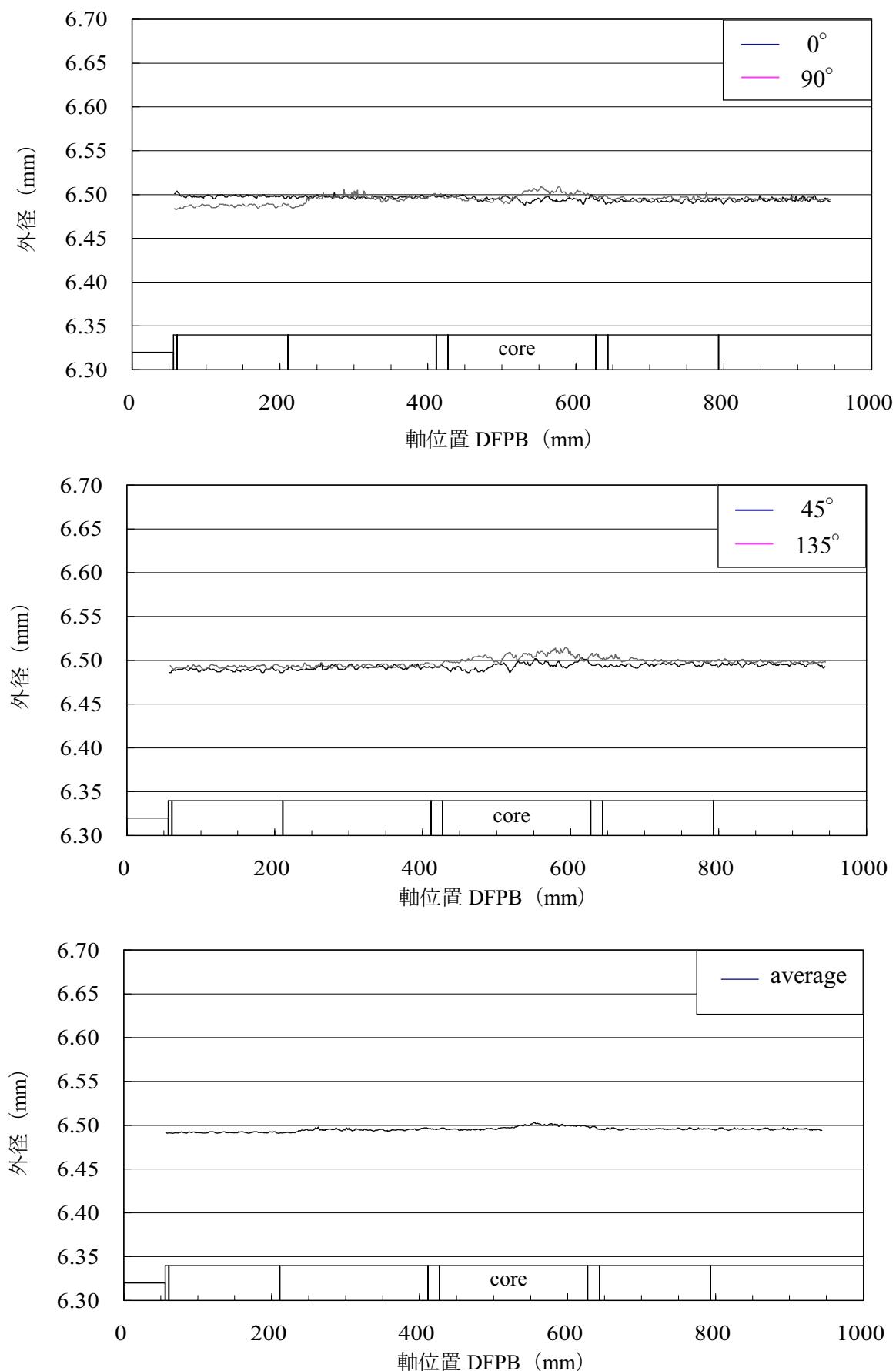


図 5.5.6 24 時間照射燃料ピンの外径変化 (No.4 : Np/Am-MOX 燃料ピン)

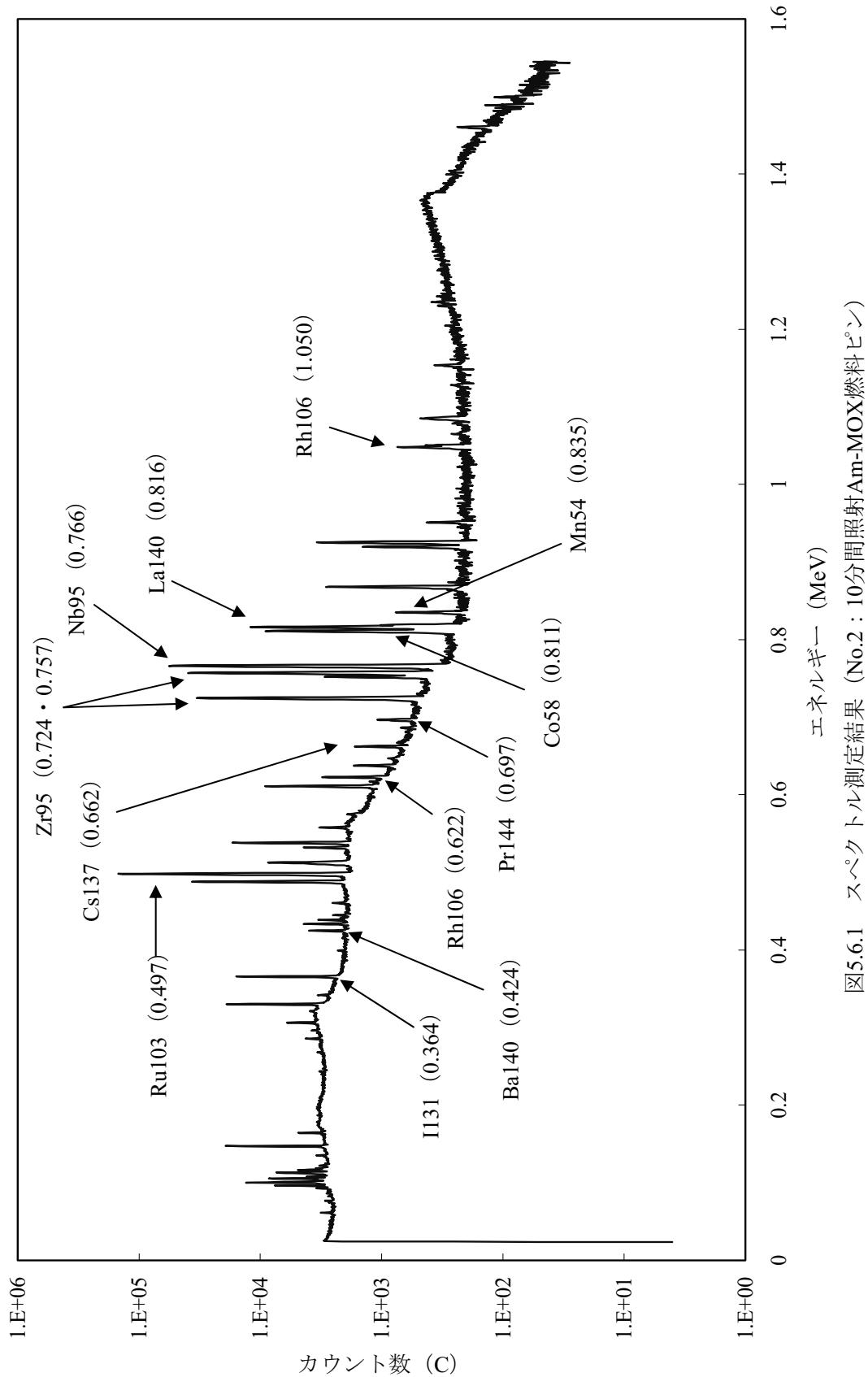
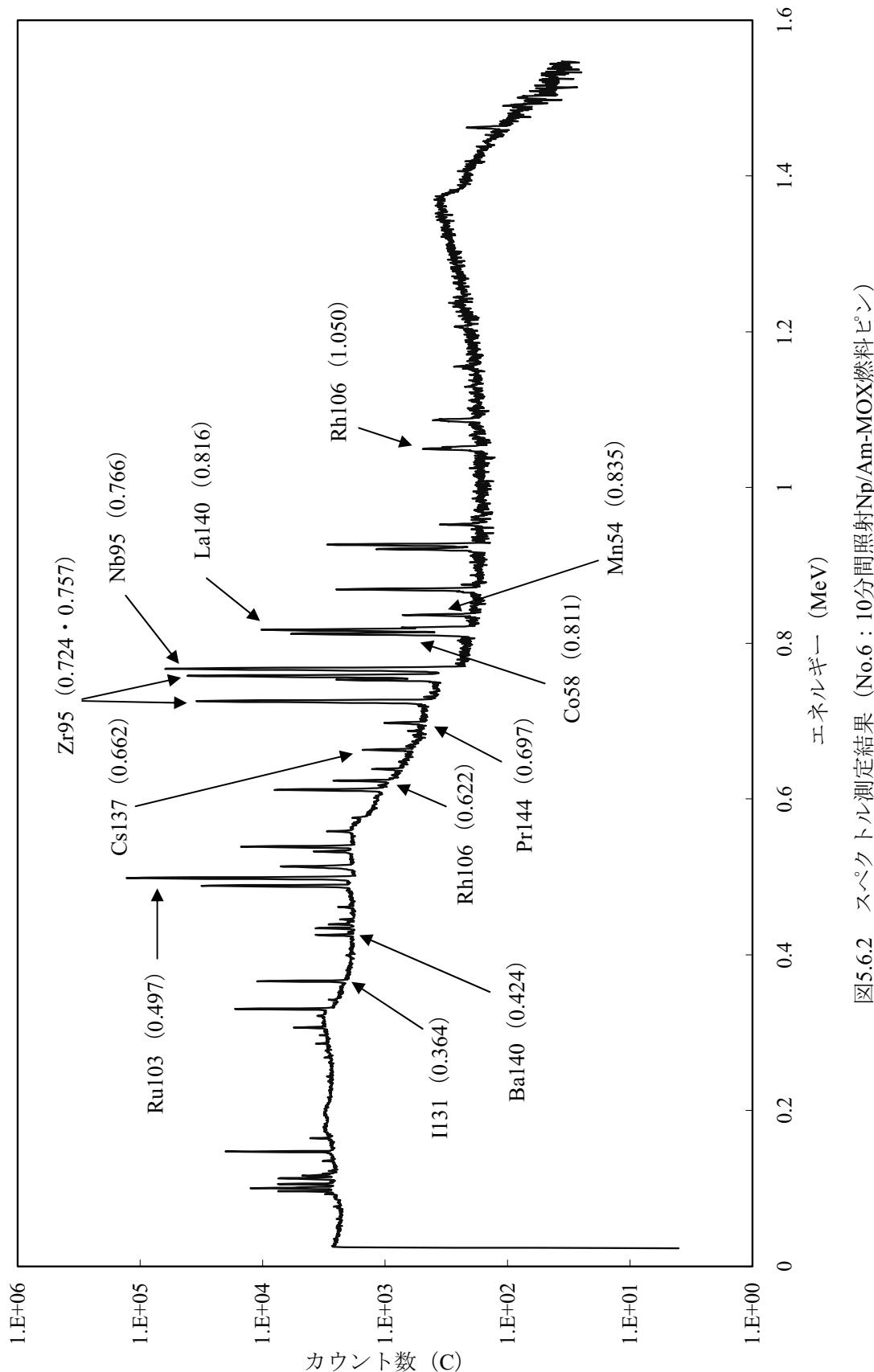
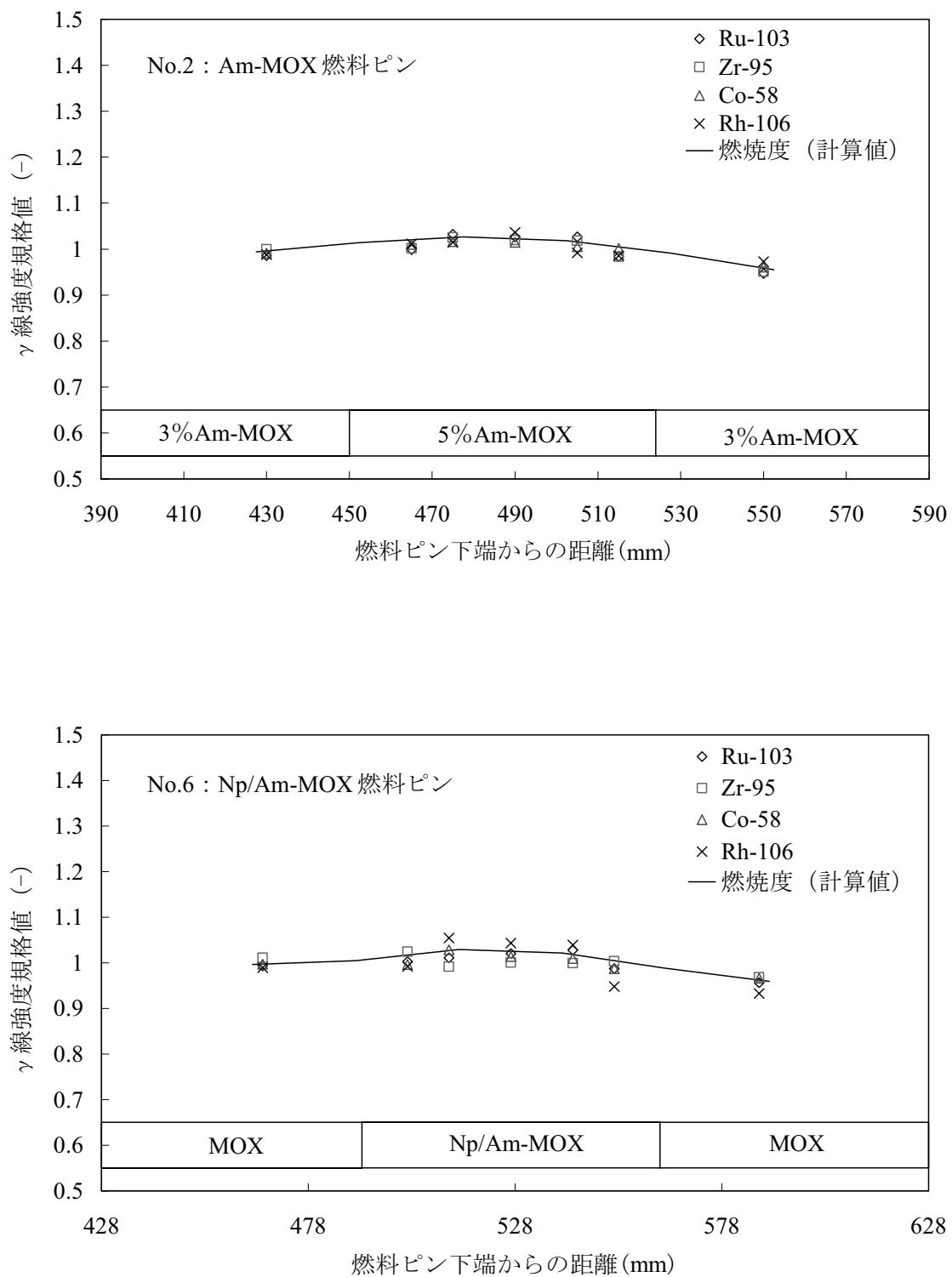


図5.6.1 スペクトル測定結果 (No.2 : 10分間照射Am-MOX燃料ビーン)



図 5.6.3 10分間照射燃料ピンの軸方向 γ 線強度分布

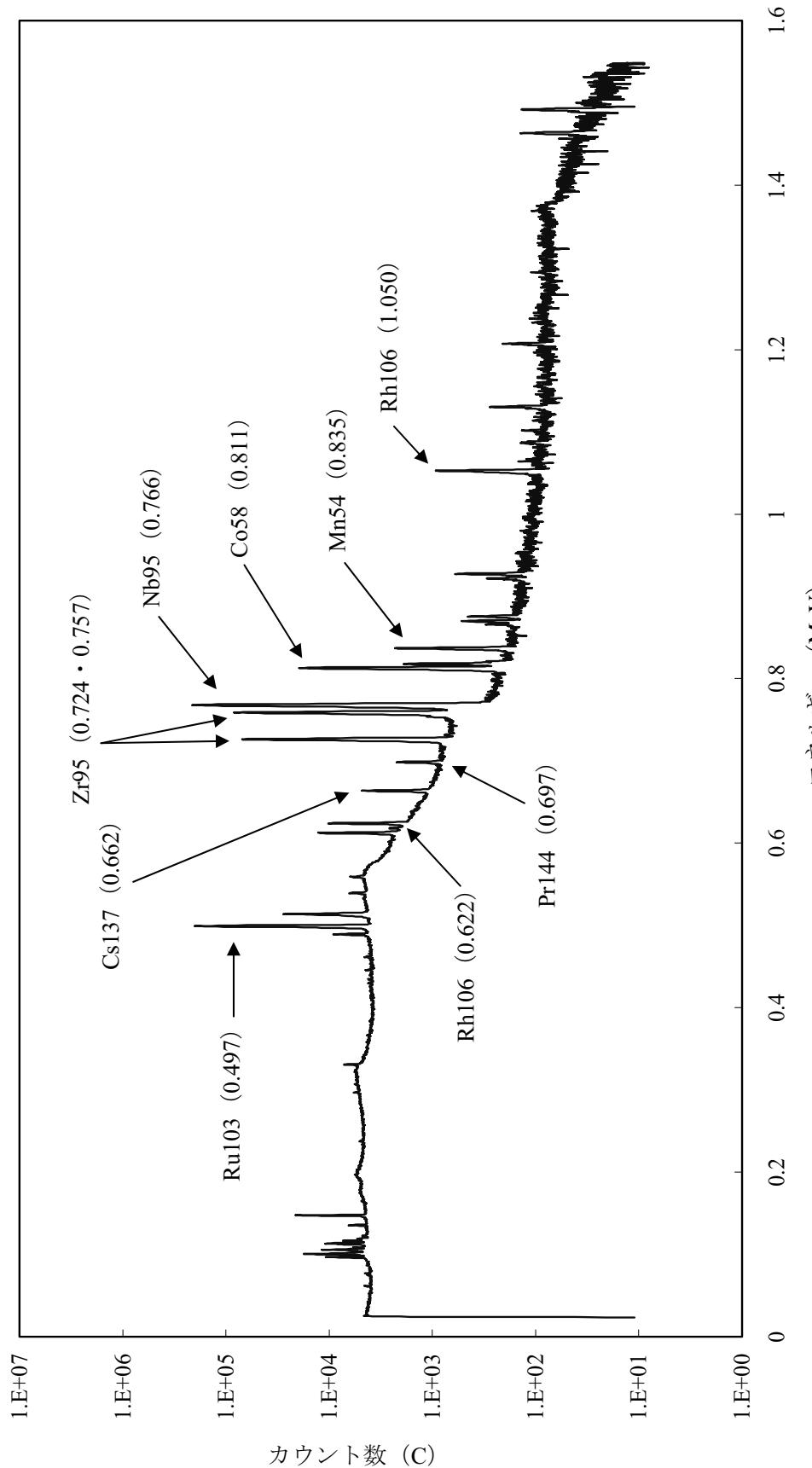
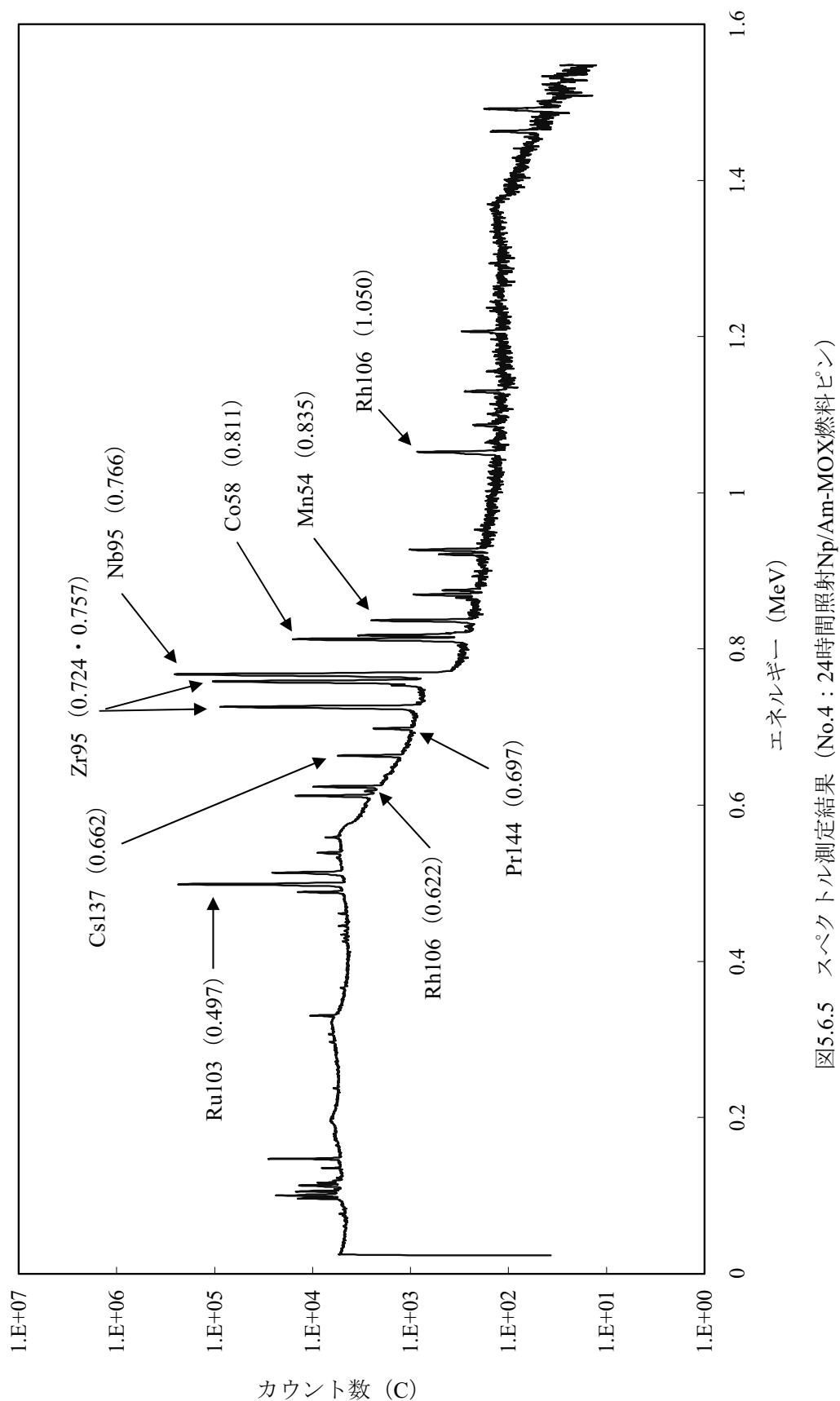
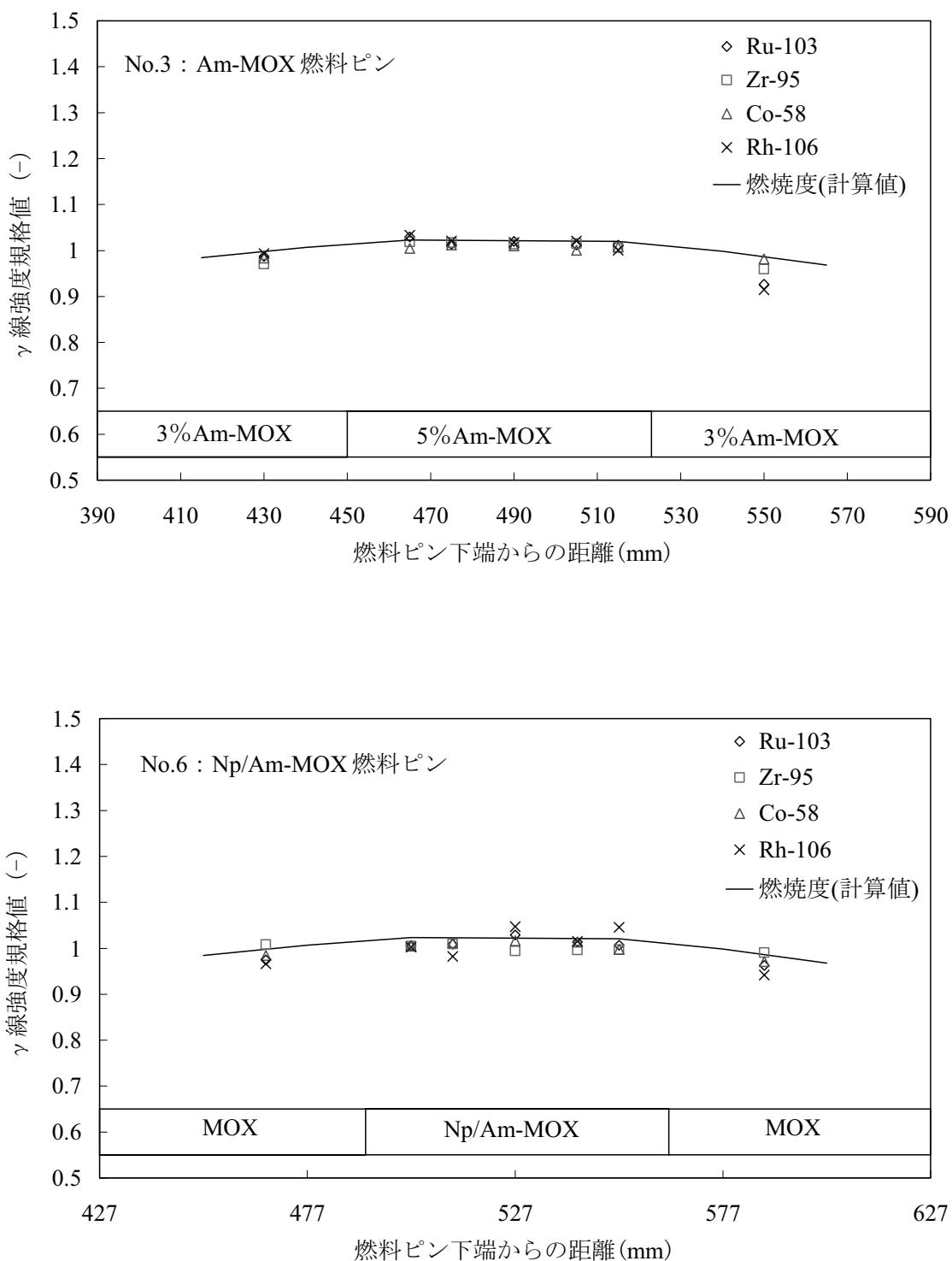
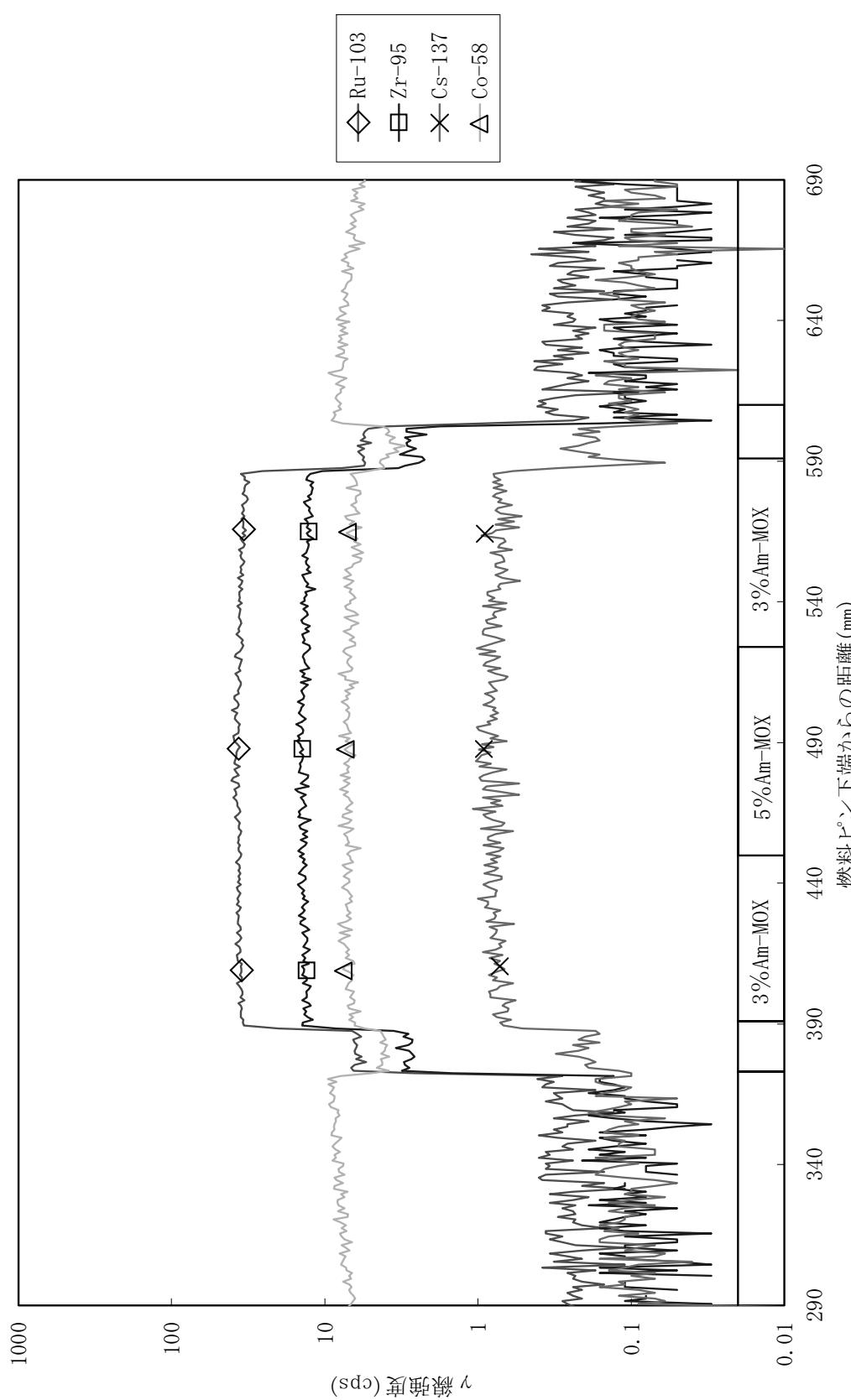


図5.6.4 スペクトル測定結果 (No.3 : 24時間照射Am-MOX燃料ビーン)



図 5.6.6 24 時間照射燃料ピンの軸方向 γ 線強度分布

図5.6.7 軸方向 γ スキャナ測定結果 (No.2 : 10分間照射Am-MOX燃料ビン)

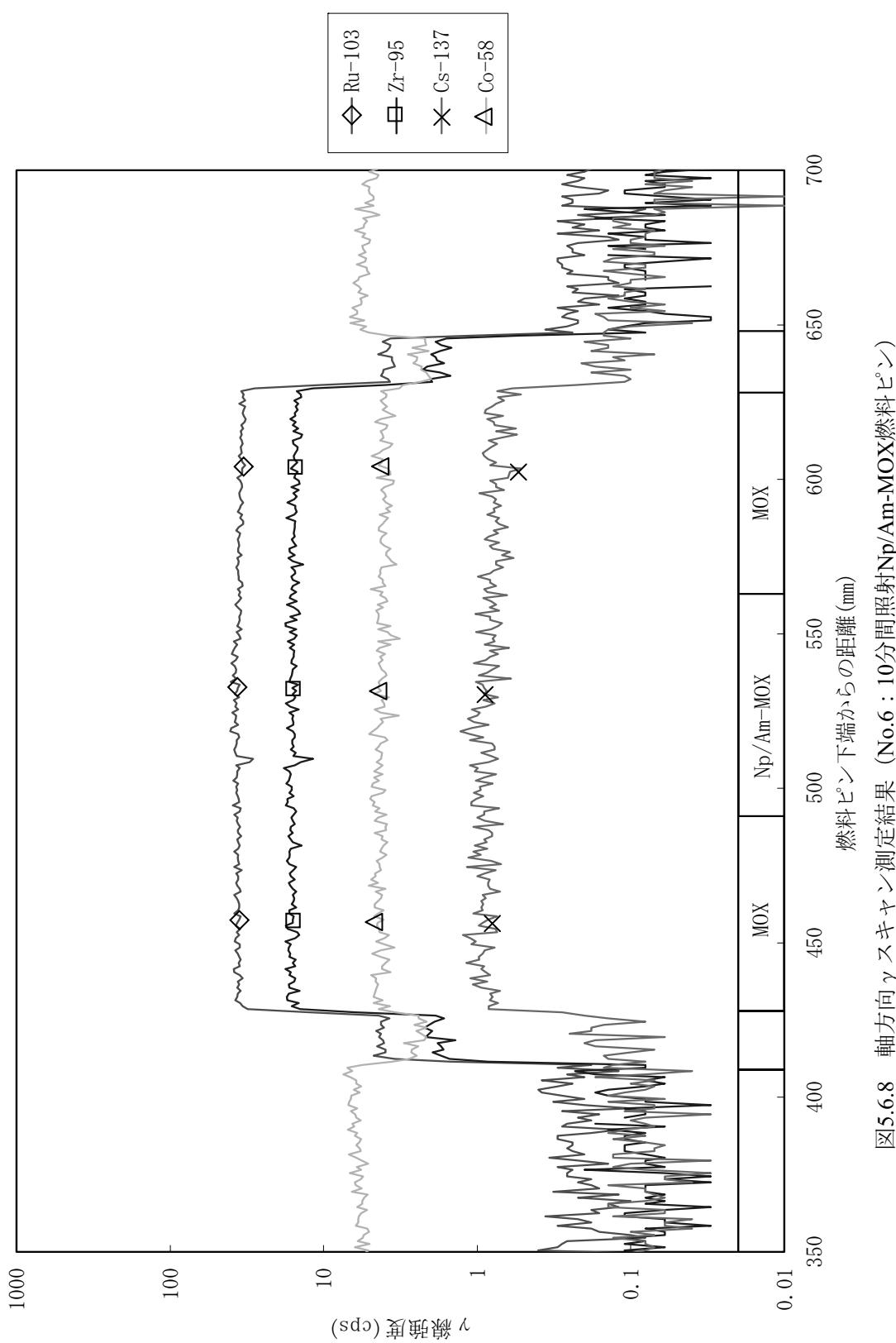
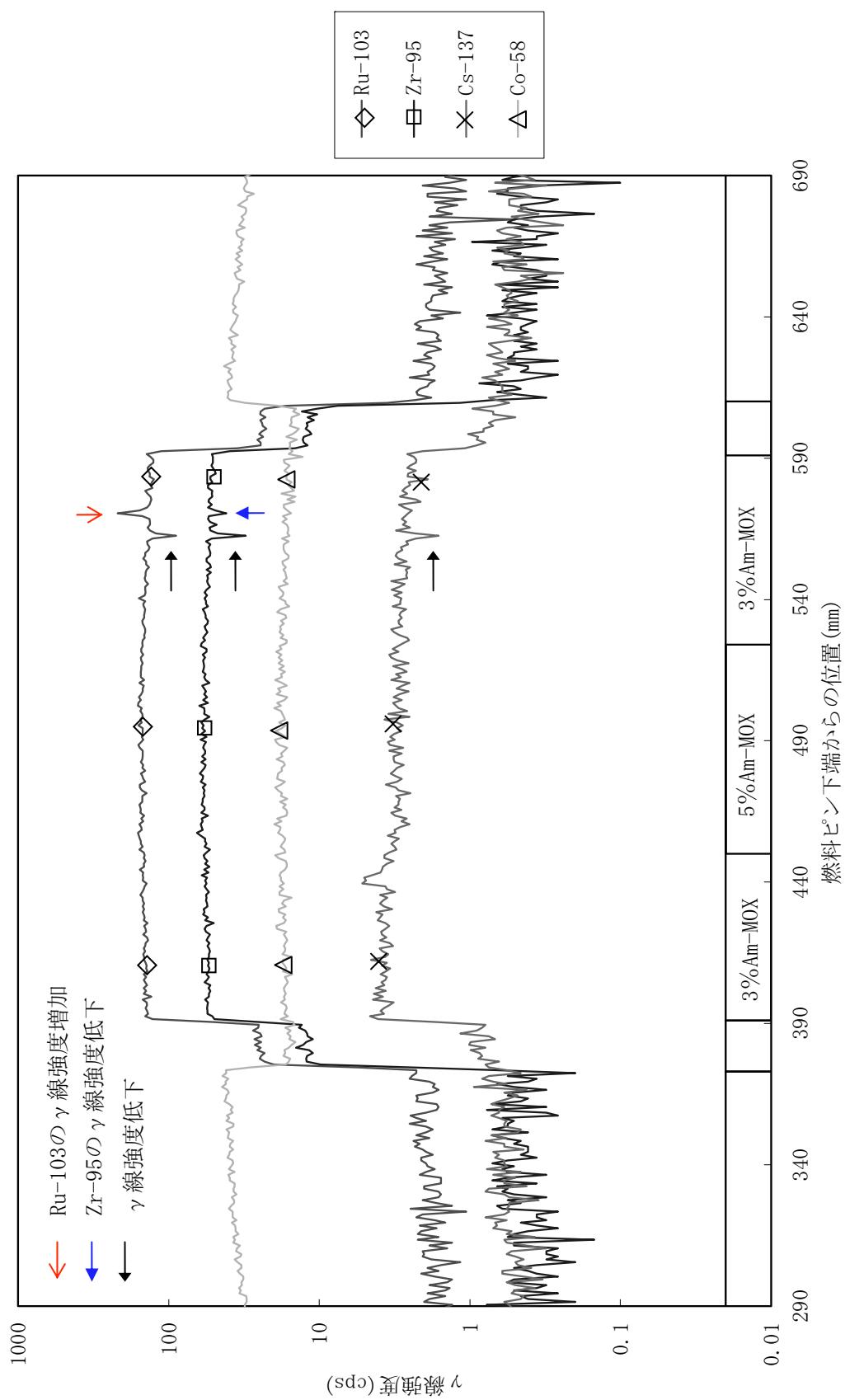


図5.6.8 軸方向 γ スキヤノン測定結果 (No.6 : 10分間照射Np/Am-MOX燃料ピッキン)

図5.6.9 軸方向 γ スキャン測定結果 (No.1 : 24時間照射Am-MOX燃料ビン)

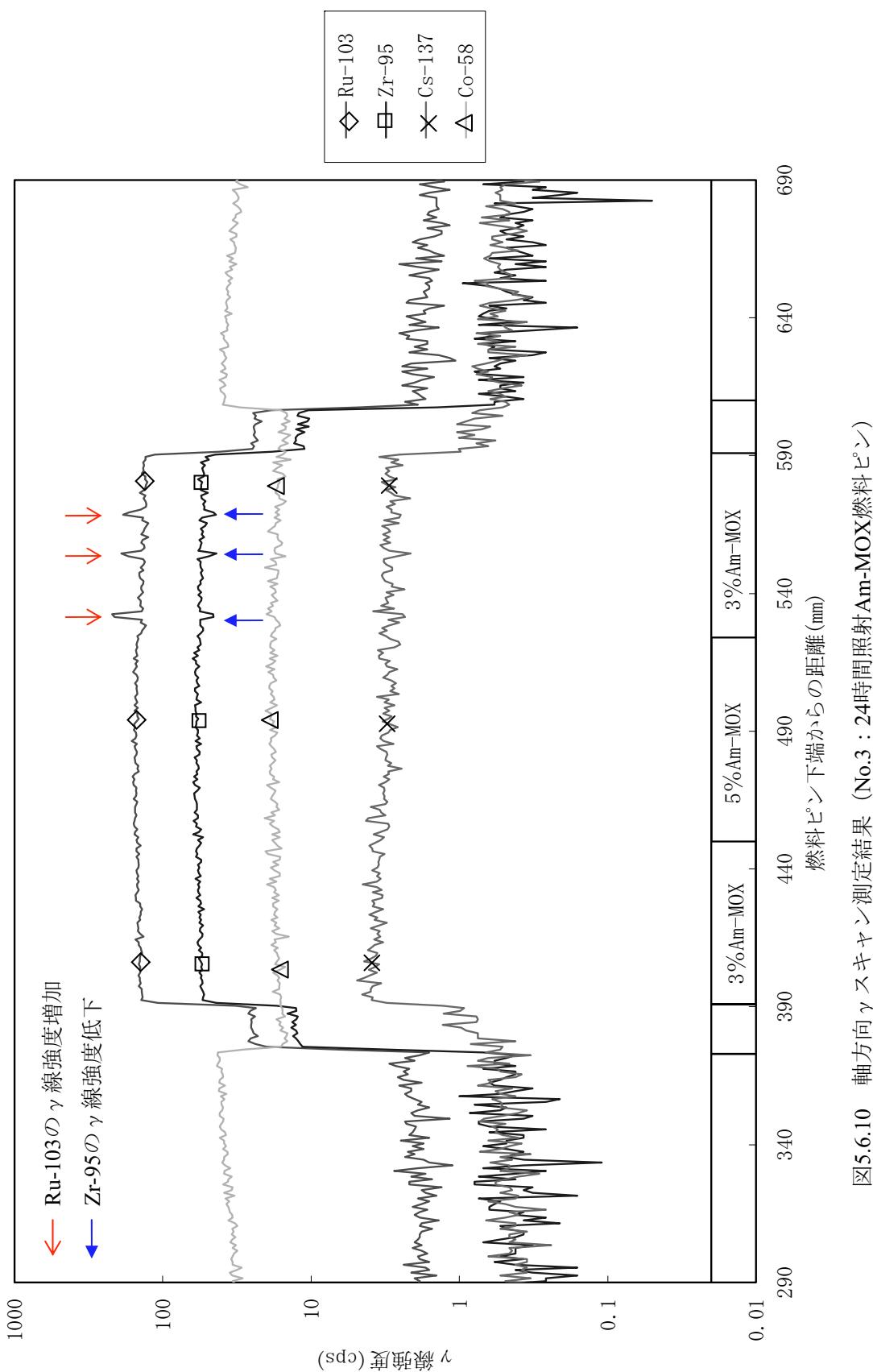
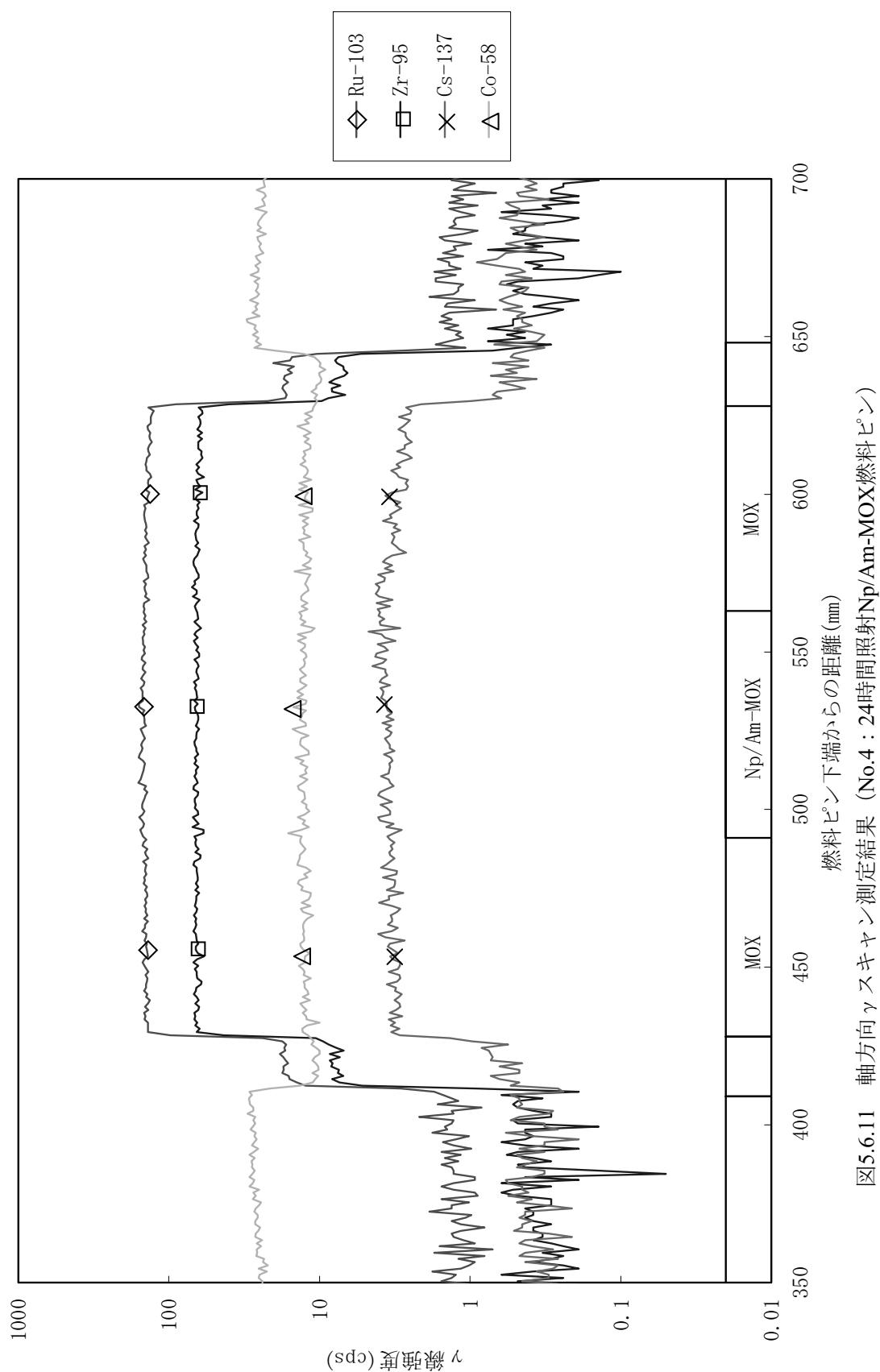


図5.6.10 軸方向 γスキャン測定結果 (No.3 : 24時間照射Am-MOX燃料ビン)

図5.6.11 軸方向 γ スキヤン測定結果 (No.4 : 24時間照射Np/Am-MOX燃料ビーン)

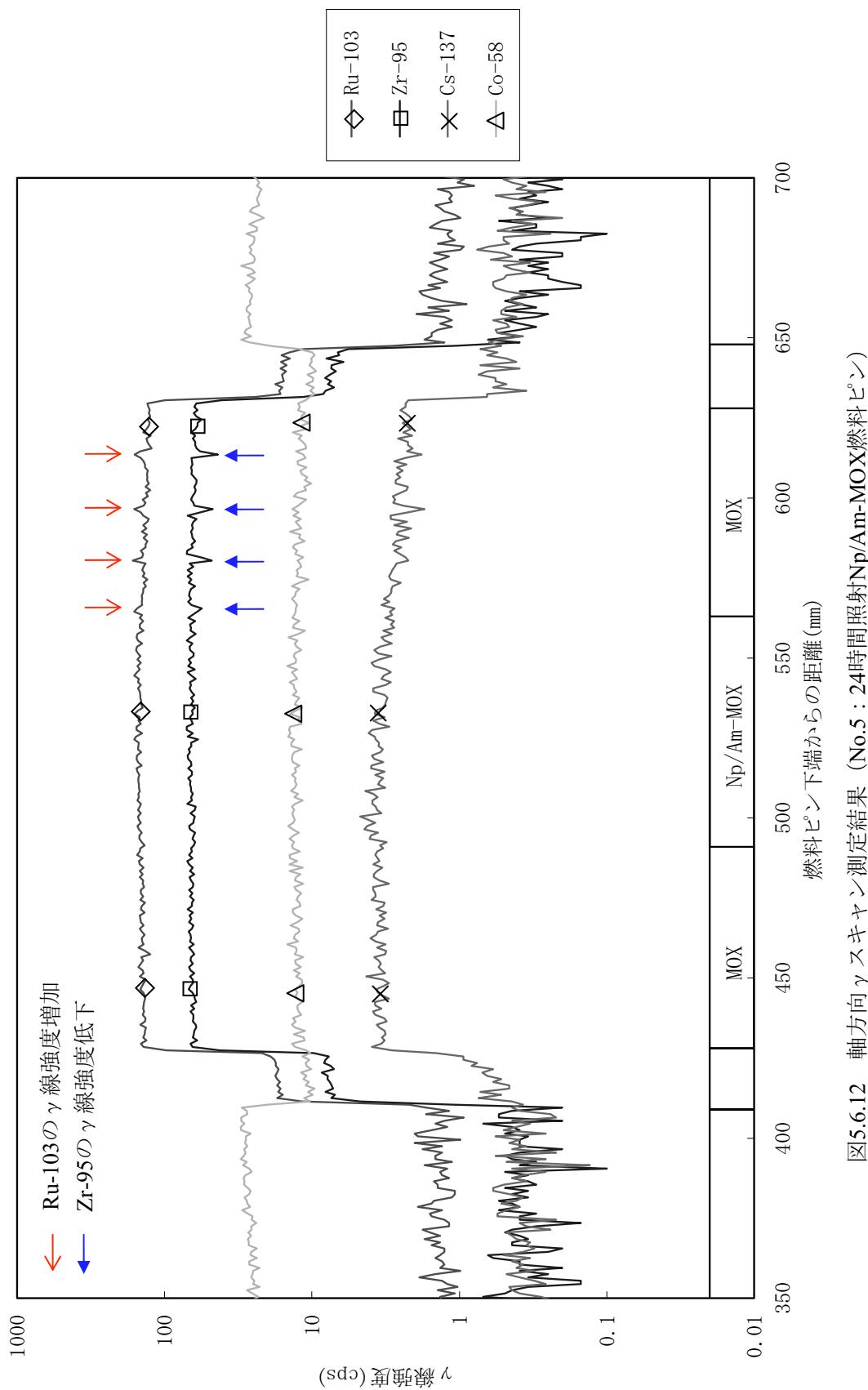
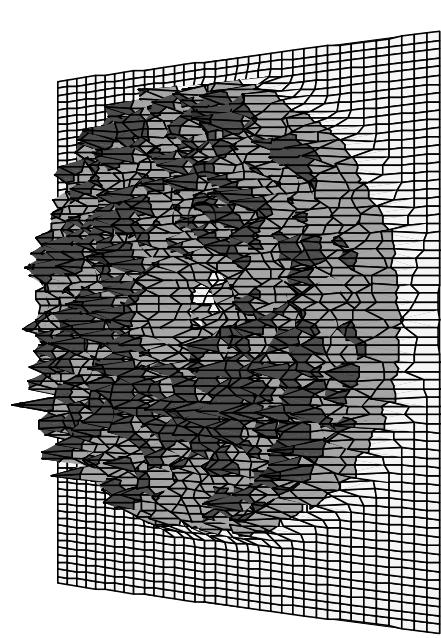


図5.6.12 軸方向 γスキャン測定結果 (No.5 : 24時間照射Np/Am-MOX燃料ピン)

Zr-95



Ru-103

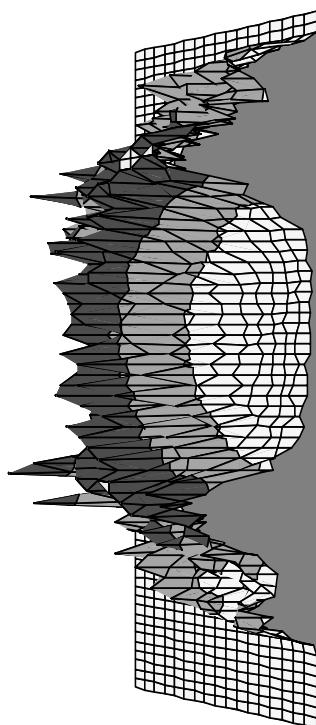
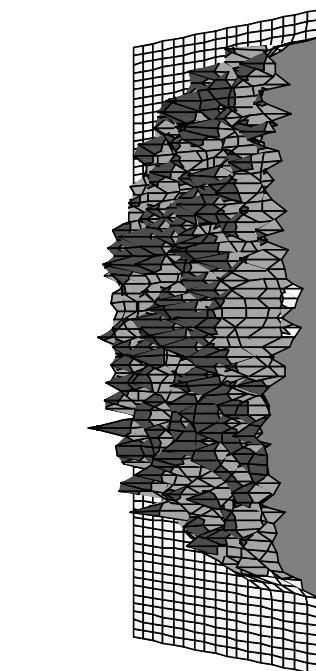
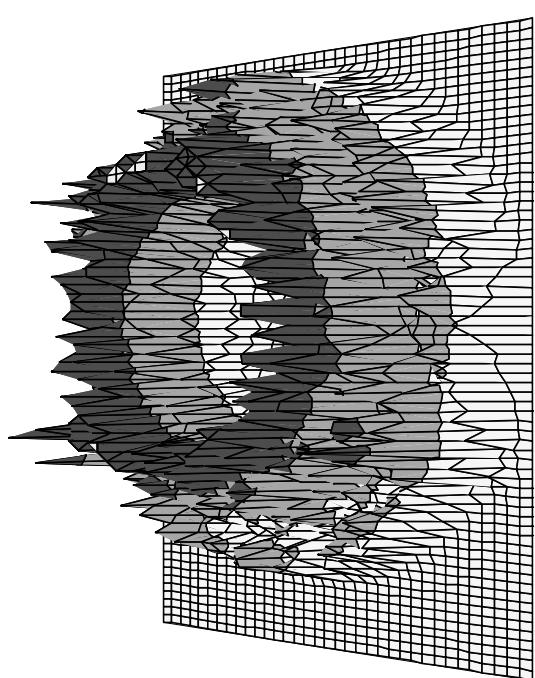
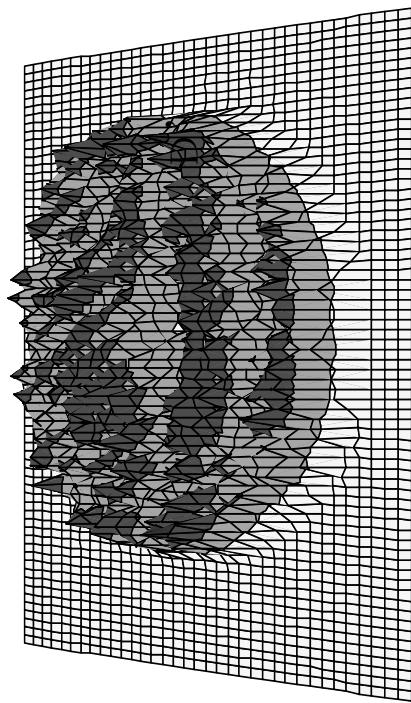


図 5.6.13 トモグラフィ測定結果 (No.1 : Am-MOX燃料ピン、燃料ピン下端から 571mm)

Zr-95



Ru-103

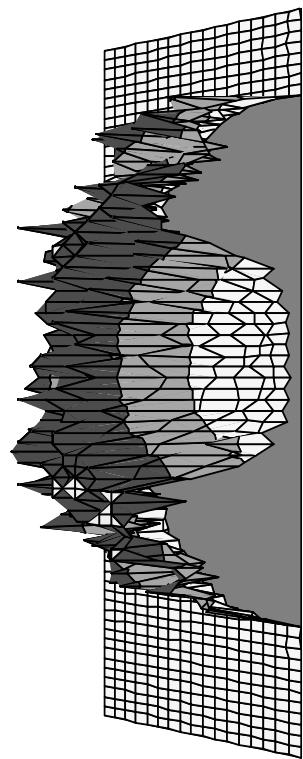
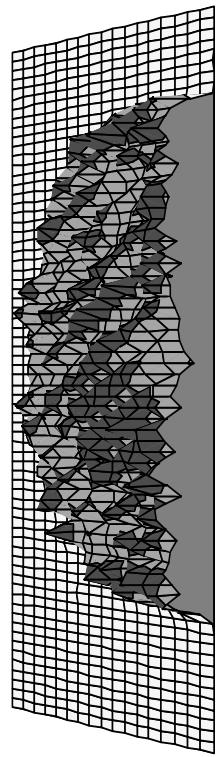
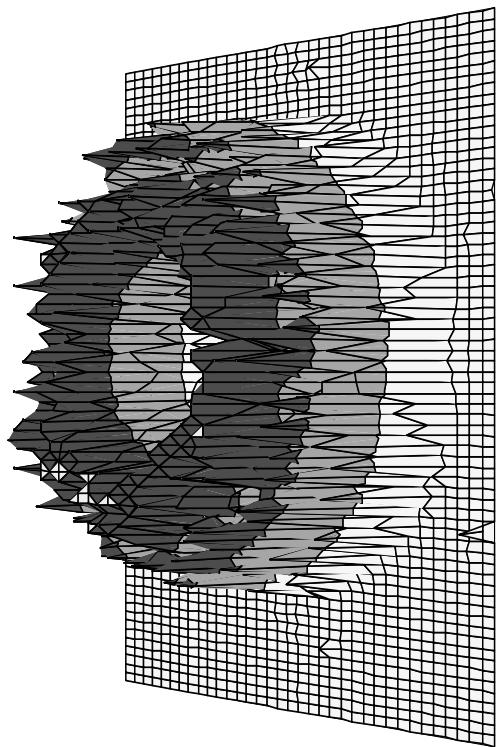


図 5.6.14 トモグラフィ測定結果 (No.5 : Np/Am-MOX 燃料ビン、燃料ビン下端から 613.5mm)

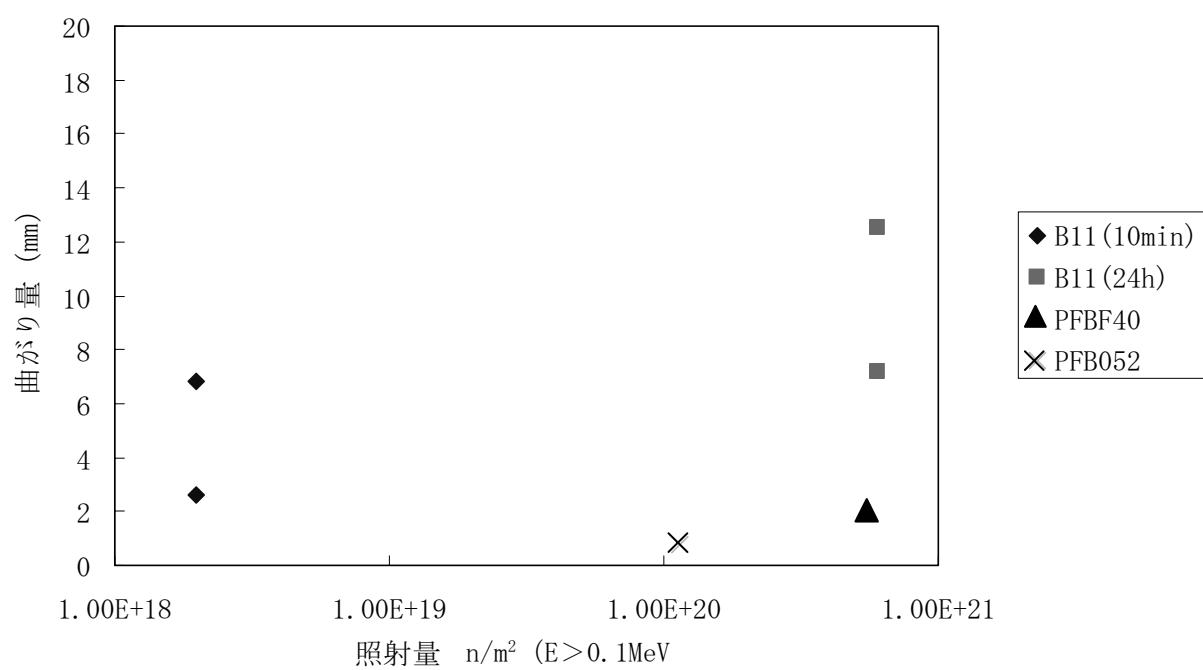


図 6.1.1 最大照射量と燃料ピン最大曲がり量の関係

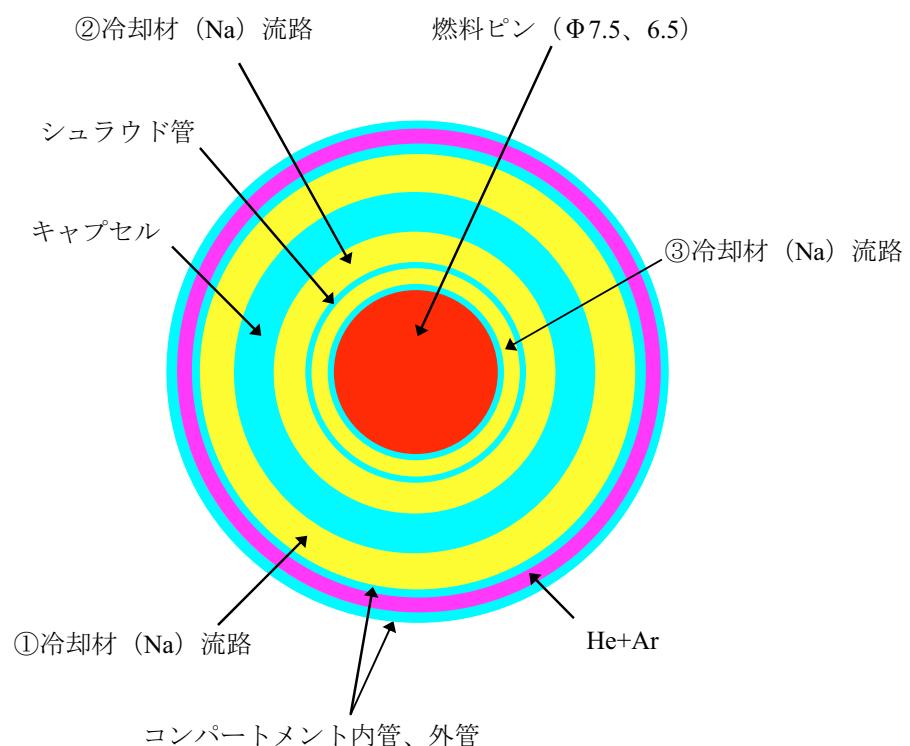


図 6.1.2 コンパートメント内の断面図

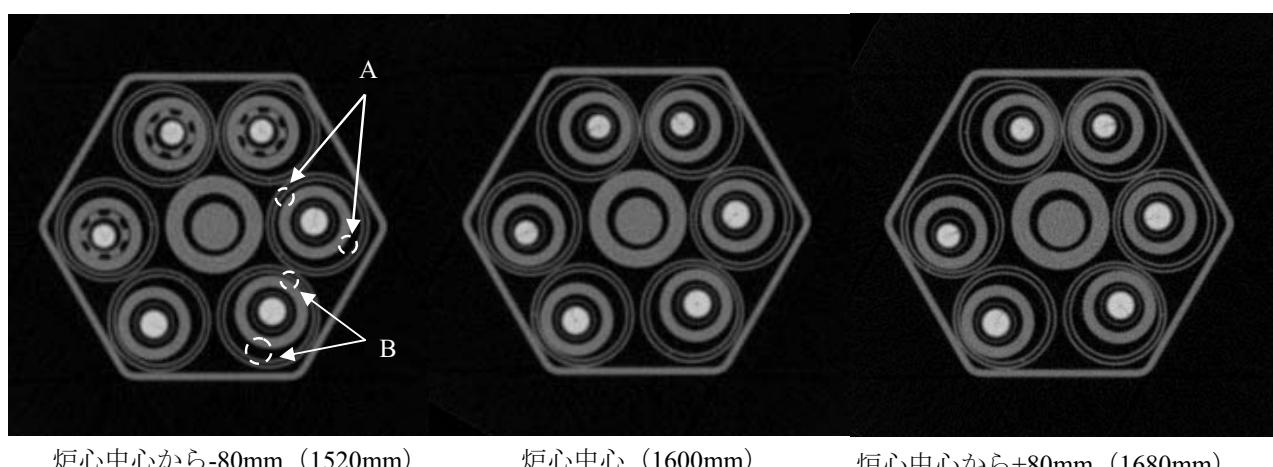


図 6.1.3 燃料部における冷却材流路

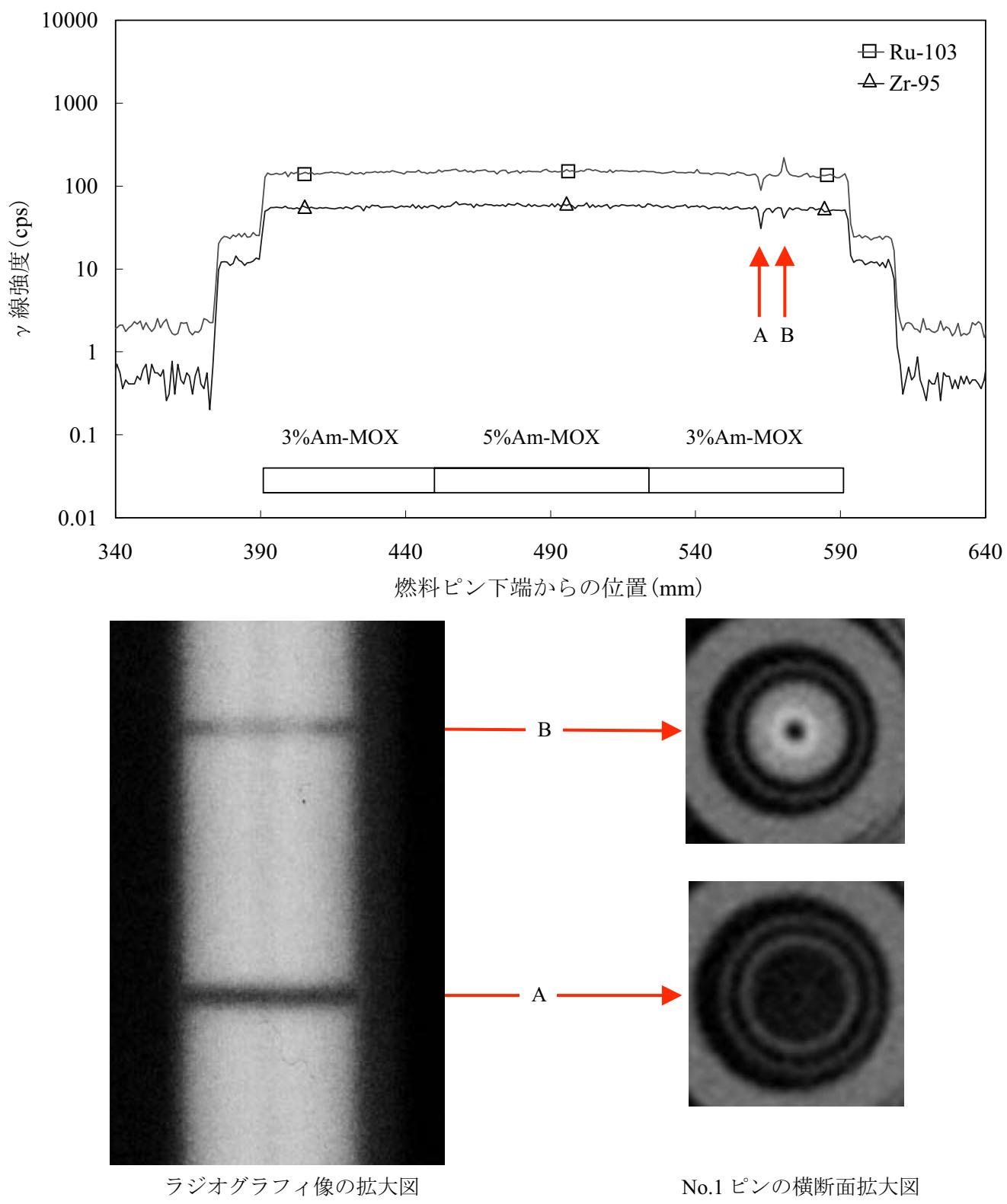
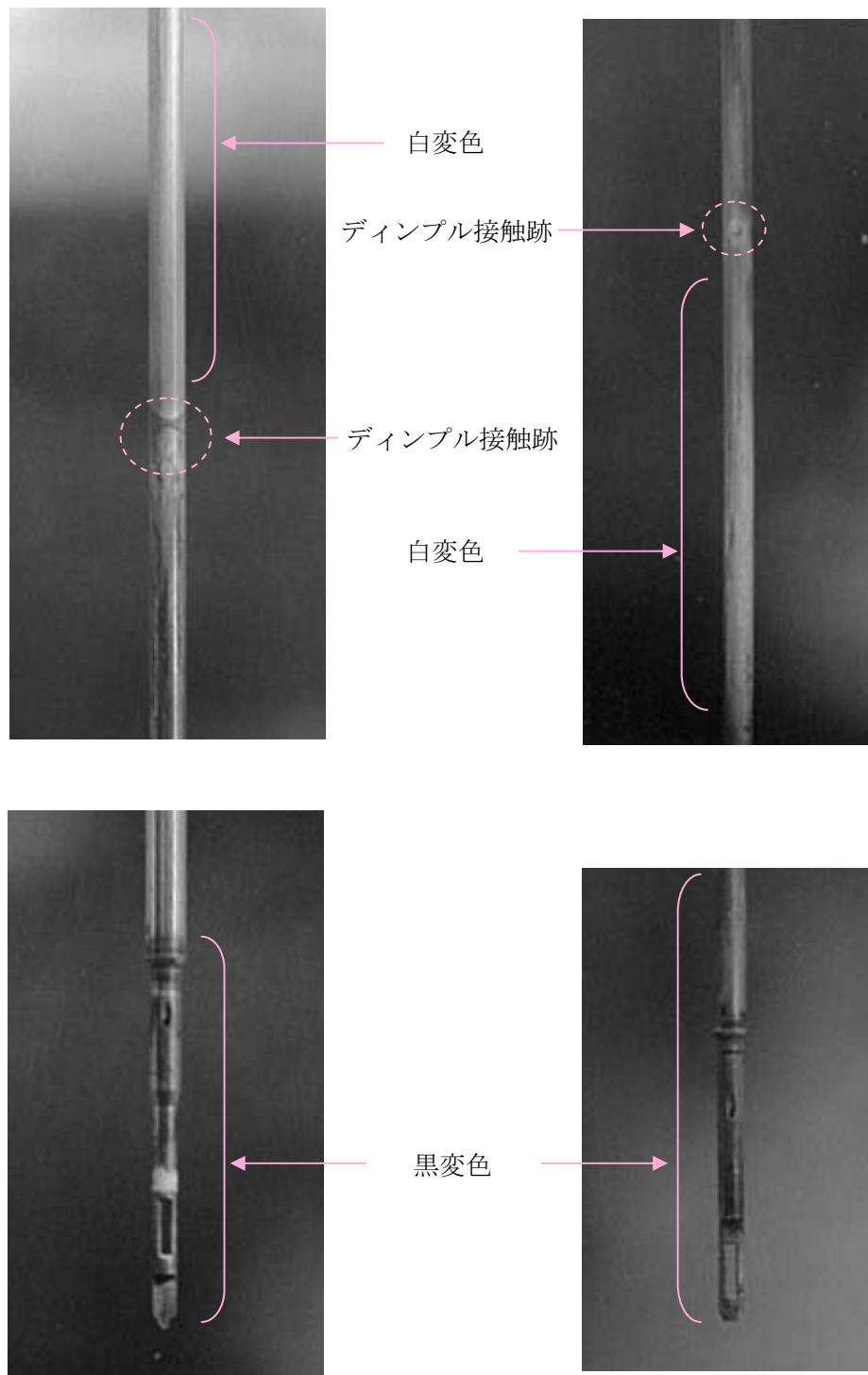


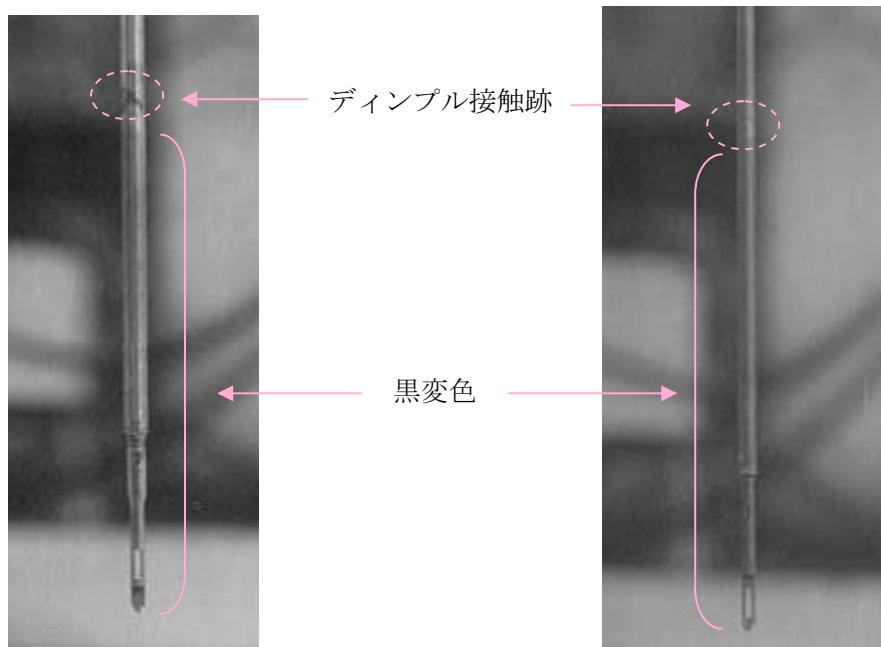
図 6.2.1 24 時間照射燃料ピンの γ スキャン測定結果、ラジオグラフィ像及び CT 画像
(No.1 : Am-MOX 燃料ピン)



No.2 ピン (Am-MOX 燃料ピン)

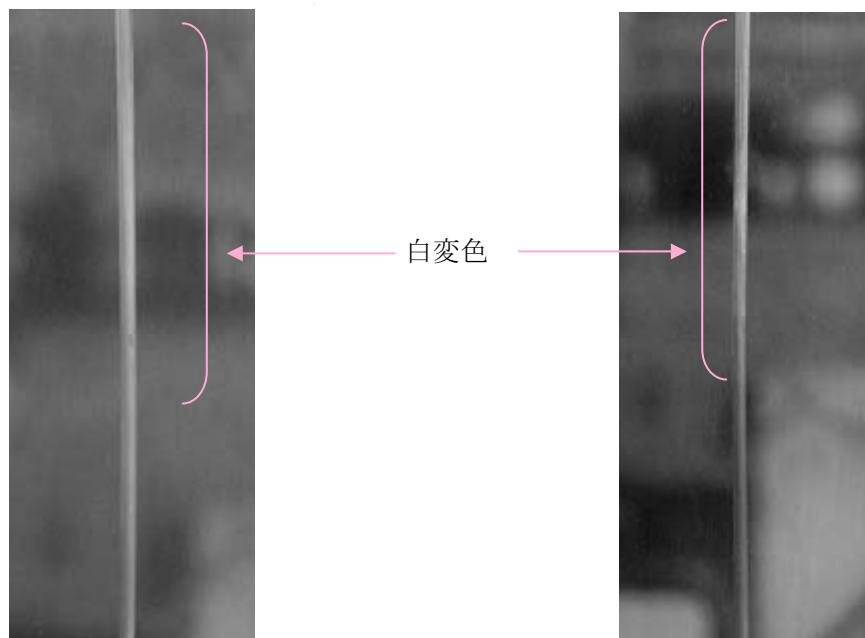
No.6 ピン (Np/Am-MOX 燃料ピン)

写真 5.2.1 10 分間照射燃料ピンの外観写真



No.1 ピン (Am-MOX 燃料)

No.4 ピン (Np/Am-MOX 燃料)



No.4 ピン (Np/Am-MOX 燃料)

No.5 ピン (Np/Am-MOX 燃料)

写真 5.2.2 24 時間照射燃料ピンの外観写真

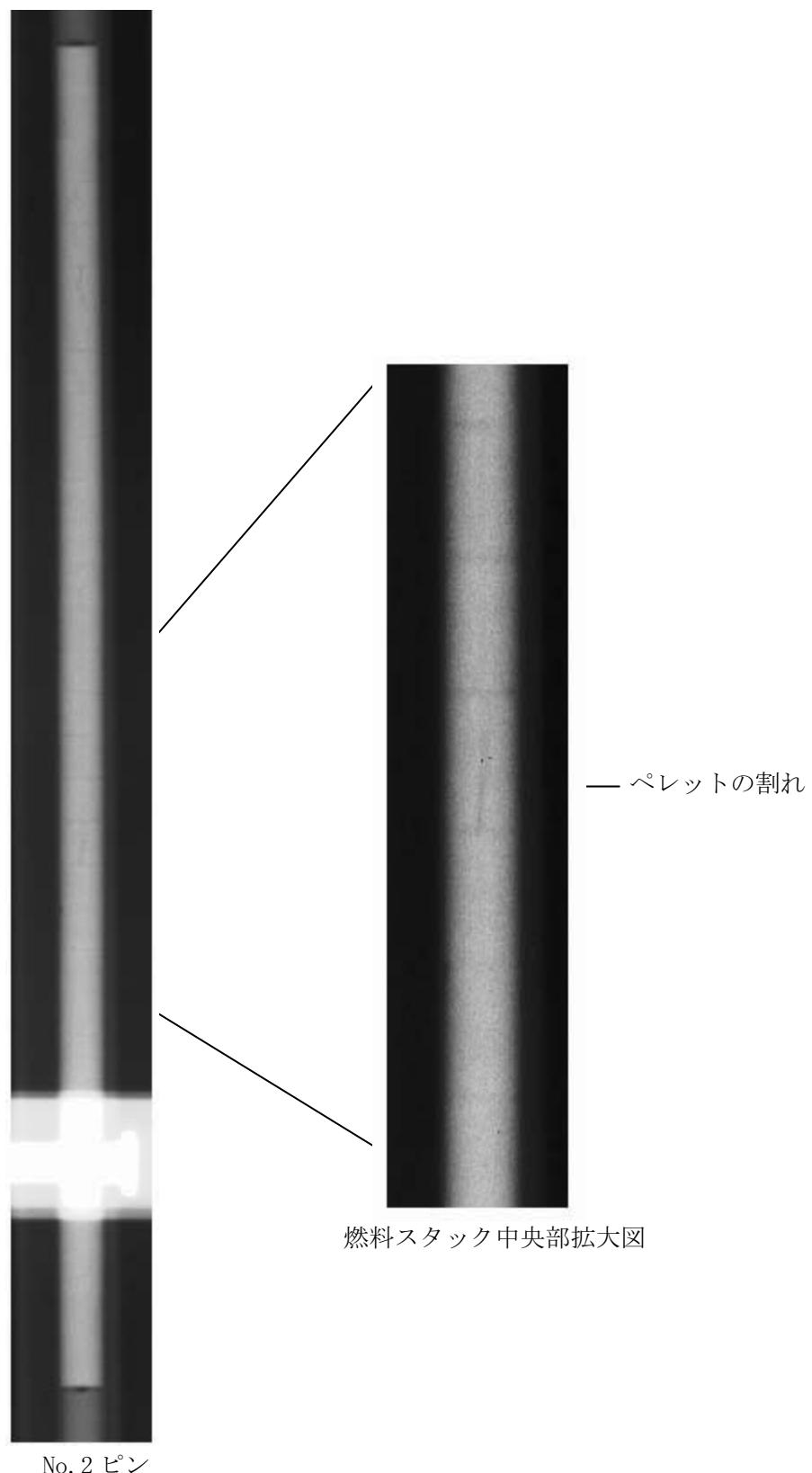


写真 5.3.1 ラジオグラフィ像（10分間照射：Am-MOX燃料ピン）

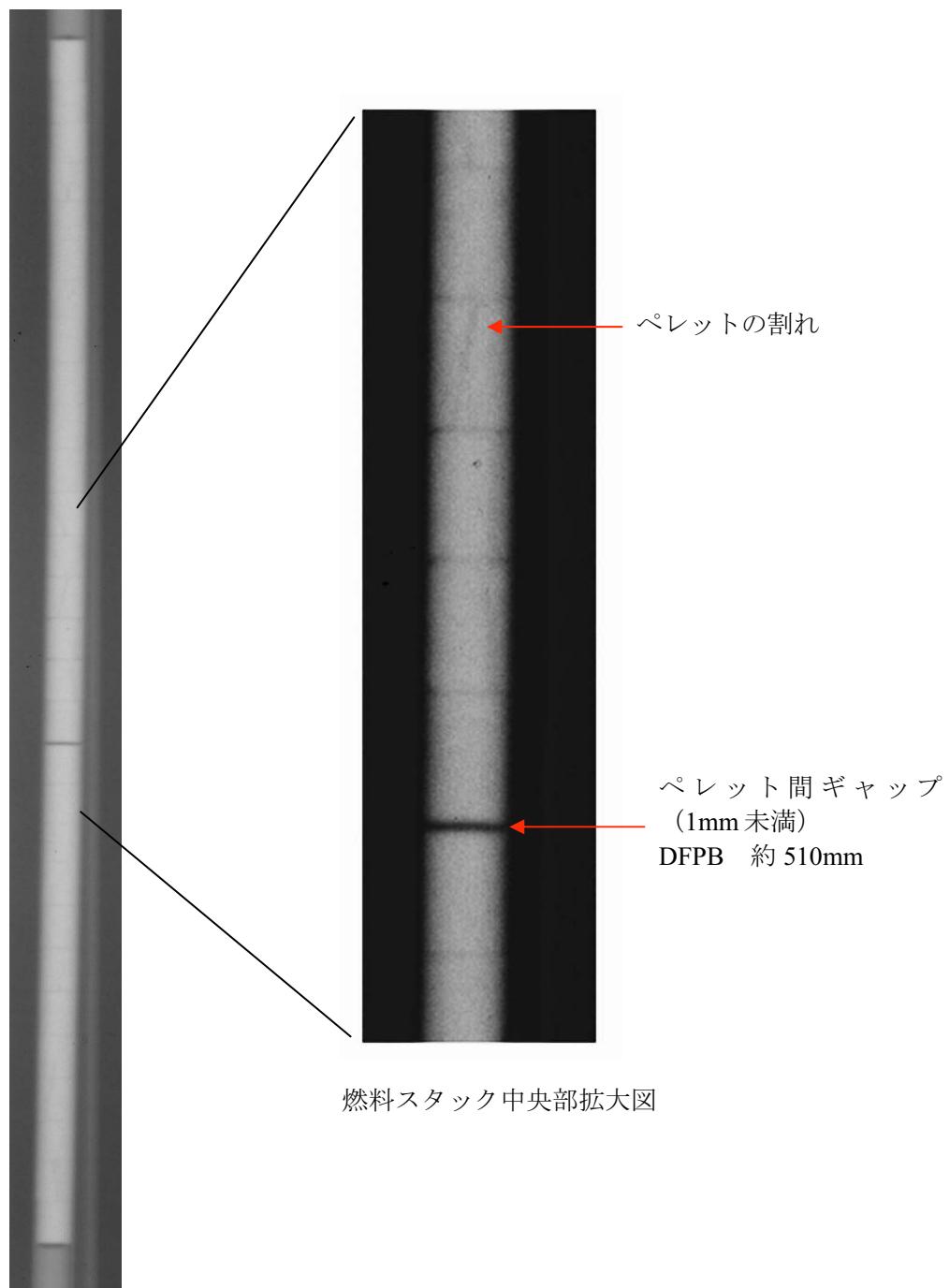


写真 5.3.2 ラジオグラフィ像 (10 分間照射 : Np/Am-MOX 燃料ピン)

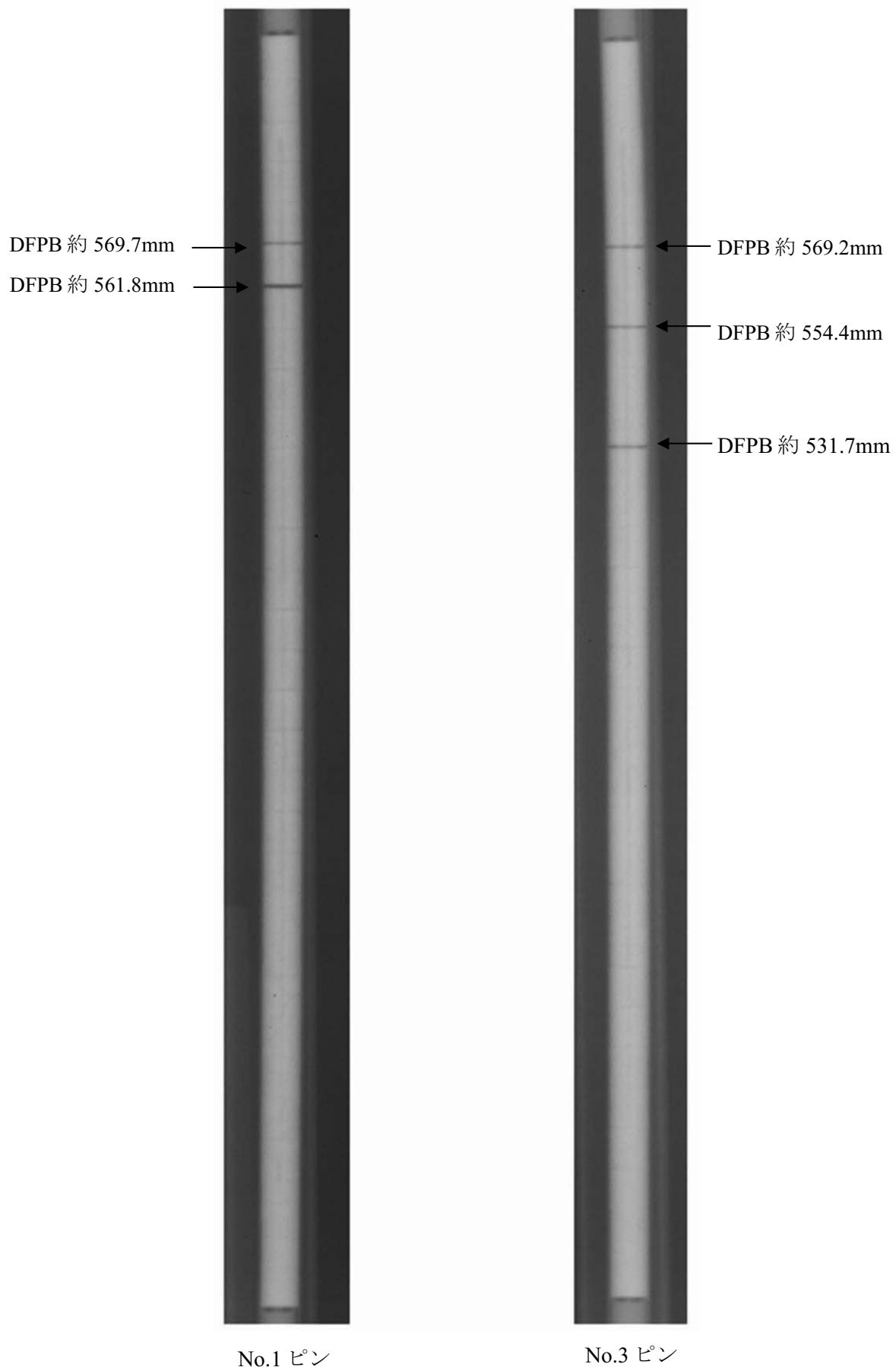


写真 5.3.3 ラジオグラフィ像 (24 時間照射 : Am-MOX 燃料ピン)

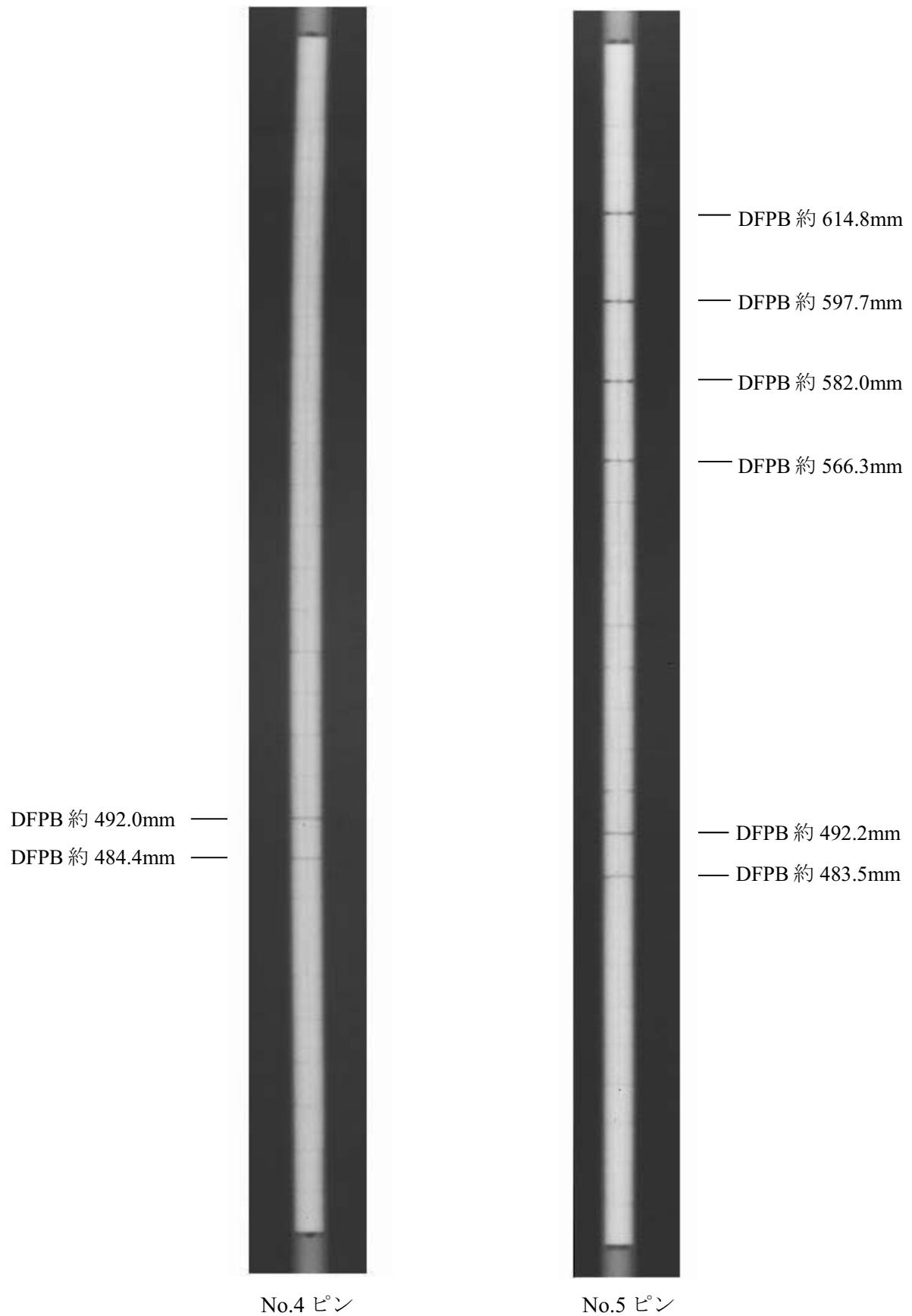


写真 5.3.4 ラジオグラフィ像 (24 時間照射 : Np/Am-MOX 燃料ピン)

国際単位系 (SI)

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

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平立周力	面角	ラジアン ^(b)	rad	$1^{(b)}$
体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	$1^{(b)}$	m/m^2
波数	ヘルツ ^(d)	Hz	$1^{(b)}$	s^{-1}
圧力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
エネルギー、仕事、热量	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}kg\ s^{-2}$
仕事率、工率、放射束	ジュール	J	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
電荷、電気量	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	クーロン	C		s A
静電容量	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^3\ A^{-1}$
電気抵抗	アーメット	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
コンダクタンス	ジーメンス	S	V/A	$m^2\ kg\ s^3\ A^2$
磁束密度	ウエーバー	Wb	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクターン	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^2\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
照度	ルーメン	lm	$cd\ sr^{(e)}$	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s^{-1}
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコピーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号 rad および sr が用いられるが、慣習として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 調光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) については CIPM勧告 2 (CI-2002) を参照。

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1}s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1}s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg\ s^{-3}$
熱容量、エンロジー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量、比エンロジー	ジュール每キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1}kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3}\ sA$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2}\ sA$
電束密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2}\ sA$
誘電率	アーメット每メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエンロジー、モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1}sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^2\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2\ m^2\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バーニー	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =2×10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパル	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デジベル	dB	

(c) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1868J ((15°C)カロリー), 4.1868J ((IT)カロリー) 4.184J ((熱化学)カロリー)
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

