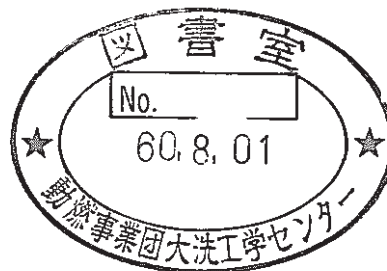


「常陽」MK-I 炉心燃料(PPJX12)の照射後試験(2)

燃料要素の組織観察及び機器分析

要約編



1985年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N941 85-134(1)
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1 9 8 5 年 2 月

「常陽」MK-I 炉心燃料 (PPJX 12) の照射後試験(2)

燃料要素の組織観察及び機器分析

要 約 編

実施責任者	甲野 啓一*	
報 告 者	鵜飼 重治*	林 幸雄**
	呷野 一郎*	杉山 忠夫*
	櫛田 尚也*	水野 峰雄***
	柴原 格*	

要 旨

炉心燃料集合体 (Fab. No. PPJX 12) は「常陽」50 MW出力上昇試験より 75 MW定格第 6 サイクルまで炉心内第 1 列に装荷されていたものであり、集合体平均燃焼度は約 39,000 MWD/MTM である。本集合体は MK-I 炉心燃料集合体としては、PPJX 13 (平均燃焼度約 41,000 MWD/MTM) に次ぐ燃焼度を有する。また集合体は意図的にナトリウム洗浄が不十分な状態で水中保管されていたものである。本試験は、ナトリウム洗浄不足集合体の水中保管における健全性の確認ならびに高燃焼度照射データベースの拡充を目的として走査型電子顕微鏡による被覆管外表面観察、光学顕微鏡による燃料組織観察及び X 線マイクロアナライザとイオンマイクロアナライザを用いた元素分析を実施した。

本試験により以下の結果が得られた。

- 1) 被覆管外表面の微粒子の状況は、MK-I 燃料要素で従来より観察されたものとはほぼ同様であり、外面からの粒界腐食やオーステナイト組織の異状も認められず健全であった。
- 2) 燃料組織は、MK-I 燃料要素で従来より観察されているものと同様、ガスバブル領域、高密度化領域、不変領域から形成されており、中心空孔や柱状晶の形成は認められなかった。また燃料-被覆管ギャップ幅は最高出力部で径方向で約 14 μm にまで減少しており、これらの高燃焼度領域でのデータにより PPJX 13 のデータを補充することができた。
- 3) MK-I 燃料では U, Pu の再分布は生じていないが、Cs がギャップ部に蓄積していることが再確認された。燃料-被覆管化学的相互作用 (FCCI) による被覆管肉厚減少量は最大で 10 μm であった。

* 大洗工学センター燃料材料試験部技術解析室

** 日本放射線エンジニアリング(株)

*** (現)三菱原子力工業(株)

- 4) イオンマイクロアナライザにより求めた燃焼度は詳細照射条件計算コード「JYHIST」による計算値と良い一致を示した。

Feb. 1985

Metallographic Examination of Irradiated Core Fuel Subassembly

(Fab. No. PPJX12) for "JOYO" MK-I

Shigeharu Ukai*¹, Yukio Hayashi*²
Ichiro Unno*¹, Tadao Sugiyama*¹, Naoya Kushida*¹,
Mineo Mizuno*³, Ital Shibahara*¹ and Keiichi Kohno*¹

Abstract

Core Fuel Subassembly (Fab. No. PPJX12) was irradiated at the first row of reactor core all through the "JOYO" MK-I period, and estimated to be the highest average burnup of 39,000 MWD/MTM next to PPJX13 of 41,000 MWD/MTM in the "JOYO" MK-I Subassembly. This subassembly had been intentionally kept in the water pool with insufficient removal of Sodium after irradiation.

The observation of outer surface of cladding by scanning electron microscope (SEM), morphological observation of fuel and cladding by Optical microscope, and instrumental analyses by electron microprobe analyser (EPMA) and ion microprobe analyser (IMA) were performed in order to confirm the integrity of cladding kept in pool with insufficient removal of sodium, and to supplement the data base of high burnup region on "JOYO" MK-I fuel.

The experimental results are summarized as follows:

- 1) The condition of outer surface of cladding observed by SEM was similar to that of cladding kept in pool after sufficient removal of sodium, and intergranular attack and corrosion of outer surface of cladding were not observed.
- 2) Central void and Columnar grain were not formed. Fuel structure was observed as fission gas bubble region, densified region and unrestructured region. Gap width between fuel and cladding at axial midplane of fuel column was reduced to $14\mu\text{m}$ in radius. These results supplement the data base of high burnup region on "JOYO" MK-I fuel.
- 3) Redistribution of Uranium and Plutonium was not observed. Volatile fission product such as Cesium accumulated in the fuel-cladding gap, but the corrosion depth of cladding caused by fuel-cladding chemical interaction was $10\mu\text{m}$ in maximum.
- 4) Burnup measured by IMA showed good agreement with that calculated using "JYHIST" code.

*1 Analysis and Evaluation Section, Fuel and Material Div., O-arai Engineering Center.

*2 Japan Radiation Engineering Co. Ltd.

*3 (Present) Mitsubishi Atomic Power Industry Co. Ltd.

LIST OF TABLES

Table 1	Specifications of Cladding and Core Fuel (Pin No. 6784)
Table 2	Conditions of Ionic Etching and Evaporations
Table 3	Measurement Value of Burn-Up by IMA

LIST OF FIGURES

Fig. 1	"JOYO" MK-I Core Fuel Pin
Fig. 2	Location of the Core Fuel Subassembly (Fab. No. PPJX12) in the Reactor "JOYO"
Fig. 3	Summary of Irradiation History of the Core Fuel Subassembly (Fab. No. PPJX12)
Fig. 4	Location of the Core Fuel Pin (Pin No. 6784) in the Core Fuel Subassembly
Fig. 5	Axial Profile of the Irradiation Condition (Pin No. 6784)
Fig. 6	Axial Profile of Burn-Up and Neutron Fluence (Pin No. 6784)
Fig. 7	Cutting Positions, Optical Micrographs and Irradiation Historys of the Metallographic Specimen
Fig. 8	Cutting Positions, Secondary Electron Micrographs and Irradiation Historys of the Cladding Outer Surface
Fig. 9	Axial Profile of the Gap Width
Fig. 10	Radial Distribution of Mass Spectrum Range between $MZ = 50$ and 200 at Scan No. 8, 21 and 35
Fig. 11	Radial Distribution of Three Cs Isotopes
Fig. 12	Raw Counting Data Over Xe X-ray Line
Fig. 13	Axial Profile of Burn-Up Measurement Value by IMA
Fig. 14	Cladding Westage as a Function of Pin Average Burn-Up

- Fig. 15 Cladding Westage as a Function of Cladding Inner Temperature
- Fig. 16 Residual Gap Size as a Function of Local Burn-Up
- Fig. 17 Change of Effective Pellet Area with Local Burn-Up
- Fig. 18 Pellet Densified Region Diameter as a Function of Local Burn-Up
- Fig. 19 Gas Bubble Growth Region Diameter as a Function of Local Burn-Up

LIST OF CHARTS

- Chart 1 Line Analysis of U and Pu from the Fuel Center to Cladding
(Speciment No. 678442)
- Chart 2 Line Analysis of U and Cs from Non-Restructured Region to Cladding
(Specimen No. 678442)

LIST OF PHOTOGRAPHS

- | | |
|----------|--|
| Photo. 1 | Optical Micrographs of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 678442) As-Polished |
| Photo. 2 | Optical Microstructures of the Core Fuel (Specimen No. 678442) As-Polished |
| Photo. 3 | Optical Microstructures of the Cladding (Specimen No. 678442) AS-Etched |
| Photo. 4 | Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No. 678442) As-Etched |
| Photo. 5 | Secondary Electron Micrographs of the Cladding Outersurface of the Fuel Pin (Fab. No. PPJX12, Pin No. 6784, Lot. No. K001) |
| Photo. 6 | Secondary Electron Micrographs of the Cladding Outersurface of The Fuel Pin (Fab. No. PPJX13, Pin No. 5335, Lot. No. K002) |

目 次

1. まえがき	1
2. 供 試 体	2
3. 照射履歴	3
4. 試験方法	4
4.1 試料調製	4
4.2 光学顕微鏡による観察	4
4.3 X線マイクロアナライザによる観察および元素分析	4
4.4 イオンマイクロアナライザによる質量分析および燃焼度測定	5
4.5 走査型電子顕微鏡による観察	6
5. 試験結果	7
5.1 光学顕微鏡による観察結果	7
5.2 X線マイクロアナライザ, イオンマイクロアナライザによる 燃料内元素分析結果	7
5.3 イオンマイクロアナライザによる燃焼度測定結果	7
5.4 被覆管外表面の観察結果	7
6. 試験結果のまとめ	9
6.1 ナトリウム洗浄不足集合体の水中保管の影響	9
6.2 PPJX 12 燃料要素 PIE データの MK-I 全体での位置づけ	9
7. 謝 辞	10
8. 参考文献	11

1. ま え が き

炉心燃料集合体 (Fab. No. PPJX 12) は実験炉「常陽」MK-I 炉心 50 MW 出力上昇試験より 75 MW 第 6 サイクルまで炉心内第 1 列 (1D1) に装荷されていたものであり、集合体平均燃焼度は PPJX 13 (平均燃焼度約 4,100 MWD/MTM) に次ぐ約 39,000 MWD/MTM を有する。燃料中心温度は最高約 1,680 °C、被覆管内面温度は最高約 545 °C であったものと推定される。又本集合体は意図的に Na 洗浄が不十分な状態で水中保管されていたものである。本集合体は FMF 試験セルに搬入後、集合体およびピンについて一連の非破壊試験が実施され、うち 1 本が金相試験用 (Pin No. 6784) として切断され気送管を經由して金相セルに搬入された。

本試験は、ナトリウム洗浄不足集合体の水中保管における健全性の確認、ならびに高燃焼度照射データベースの拡充を目的として、走査型電子顕微鏡による被覆管外表面観察、光学顕微鏡による燃料組織観察及び X 線マイクロアナライザとイオンマイクロアナライザを用いた元素分析を実施した。本報告書は、AES 金相セルにおいて行った上記試験結果についての要約を記したものである。詳細データは (2) データ編に集録した。

2. 供 試 体

Fig.1に「常陽」MK-I炉心燃料ピンの仕様を示す。

Table.1に今回試験に供された燃料および被覆管各ロットのデータを示す。

3. 照 射 履 歴

炉心燃料集合体 (Fab.NoPPJX 12) は、「常陽」50 MW出力上昇試験より 75 MW定格第 6 サイクルまで炉心内 1D1 の位置に装荷されていた。炉内装荷位置を Fig. 2 に示す。この期間中における「常陽」炉出力の経時変化ならびに本集合体の照射履歴を Fig. 3 に示す。その後、本集合体は昭和 57 年 2 月 8 日に通常は 3 回のところを意図的に 1 回の Na 洗浄が実施され、洗浄不足状態のまま昭和 57 年 10 月 4 日まで水プールに保管されていた。金相試験に供した燃料ピンは Pin No. 6784 であり集合体内の位置を Fig. 4 に示す。同ピンの燃料温度、被覆管温度、線出力の履歴中の最大値を Fig. 5 に示す。また積算燃焼度、積算中性子束の軸方向分布を Fig. 6 に示す。これらは計算コード「JYHIST」を用いた計算値である。Fig. 7 と 8 に供試々料のピン軸方向位置と詳細照射履歴を示す。

4. 試 験 方 法

4.1 試料調製

炉心燃料ピン(Pin No. 6784)はFMF試験セルにおいてピン切断機により乾式切断法にて、金相用試験片として4個切断された。金相セルではそれら試験片を金相試験用と走査型電子顕微鏡による被覆管外表面観察用の試験片に切断した。なお金相試験用試料片の切断は燃料の固定を目的として真空容器内にエポキシ樹脂を注入した後実施した。Fig. 7と8にそれぞれの試料の切断位置を示す。金相試験用試料はエポキシ樹脂によりSUS製リングに埋込み固定した後、研磨用のステンレス製ホルダー(32 mm ϕ $\times$ 20 mm)にねじ止めた。研磨は回転自動研磨機を使用し、ケロシンを滴下しながら耐水研磨紙の# 240, # 320, # 400, # 600, # 800及び# 1000の順に各30分、さらに仕上として、ラッピングオイルを潤滑剤として6 μ m, 3 μ m, 1 μ mのダイヤモンドペーストを用い各20分を行った。研磨の完了した試料はキシレンを用い超音波洗浄した後十分に乾燥させ、As-Polishedの観察を行った。燃料、被覆管のエッチングはイオン腐食装置を使用し、その後Etchedの組織観察を行った。X線マイクロアナライザとイオンマイクロアナライザ分析のための試料表面導電処理はイオン腐食装置を用いてそれぞれカーボンと金の蒸着により行った。Table. 2にイオン腐食条件ならびに蒸着条件を示す。一方被覆管外表面観察用試料は走査型電子顕微鏡の被覆管外表面観察専用ホルダー(SUS製)にねじ止めし、アルコールを含ませたガーゼにより表面をふきとった後、観察を行った。

4.2 光学顕微鏡による観察

エッチング前後における組織観察は、ユニオン光学社製遠隔操作型高倍率光学顕微鏡(FAROM)を使用し、65倍全体コンポーズ写真撮影、130倍帯状(スリット)コンポーズ写真撮影、さらに半径方向6箇所520倍4枚コンポーズ(スポット)写真撮影を行った。As-Polished状態における観察は、ギャップやクラックの状況とその形態、および白色、灰色析出物に注目して行った。Etched状態における観察は燃料、被覆管の結晶粒界の観察、および結晶粒径の測定のため行った。

4.3 X線マイクロアナライザによる観察および元素分析

使用した装置はマテリアルアナリシス社(U. S. A.)製遮蔽型X線マイクロアナライザMAC 450型である。分析条件を次頁に示す。

	通常の観察・分析時			X e 分 析 時
加 速 電 圧 (kV)	25			同 左
プローブ電流 (μ A)	約, 0.05 ~ 0.1			約, 1.0
観 察 像 種	反射電子像			—
	特性X線像			—
観 察 倍 率 (倍)	300 ~ 1,000			—
分 光 結 晶	PET, LiF			LiF
カ ウ ン タ ー	PET-ガスフロー型比例計数管			LiF-PR ガス封入型比例計数管
	LiF-PRガス封入型 "			
プ ロ ー ブ 径	約 1 μ m以下			50 μ m
波 高 分 析 器		PET	LiF	Lower Level 0.6の積分型
	Corse Gain	1/4	1/16	Corse Gain : 1/16
	Fine Gain	0.6	0.65	Fine Gain : 0.65

分析は、燃料-被覆管境界部における各元素の分布、U、Puの径方向濃度分布および核分裂生成物の燃料内の挙動等に注目して行った。

4.4 イオンマイクロアナライザによる質量分析および燃焼度測定

日立製作所製、遮蔽型イオンマイクロアナライザ、IMA-RI型を用いて金相断面の質量分析および燃焼度測定を実施した。分析条件を下記に示す。

〔線分析〕

イオン種	O_2^+
一次イオン加速電圧	15 keV
イオンビーム径	450 μ m ϕ
試料吸収電流値	80 ~ 105 μ A
2次イオン加速電圧	3 keV
ステップ距離	100 μ m

上記条件にて測定された各2次イオン量は付属のデータ処理システム、M003MIにより全イオン量で規格化(TIC相対イオン濃度)されM/e(質量・電荷比)のバーグラフおよびイオン濃度分布を表わすプロファイルとして出力された。

〔燃焼度測定〕

測定位置はペレット半径方向の中間部である。測定には1次イオンビーム径約1.3 mm ϕ によっ

て深さ方向に10回スパッタし、2次イオン強度を測定し、その平均値を用い燃焼度の計算を行った。指標として ^{145}Nd を選んだ。計算式を下記に示す。式中でのイオン化効率比(α)は、現在まで測定してきた結果を統計処理した数値を使用している。

$$\text{燃焼度 (atm\%)} = \frac{I_{\text{Nd}} / (\alpha_{\text{Nd/uo}} \times F_{\text{Nd}})}{I_{\text{uo}} + I_{\text{PuO}} / \alpha_{\text{PuO/uo}} + I_{\text{Nd}} / (\alpha_{\text{Nd/uo}} \times F_{\text{Nd}})} \times 100$$

〔燃焼度計算条件〕

I_{uo}	I MA 測定値	全UOの2次イオン強度
I_{PuO}	"	全PuOの "
I_{Nd}	"	^{145}Nd の "
$\alpha_{\text{PuO/uo}}$	1.357	PuO/UOのイオン化効率比
$\alpha_{\text{Nd/uo}}$	3.217	Nd/UOの "
F_{Nd}	0.0343	^{145}Nd の核分裂の収率

4.5 走査型電子顕微鏡による観察

装置は、日本電子(株)社製遮蔽型走査電子顕微鏡(JSM-50A改造型)を使用し、被覆管外表面観察を実施した。特に今回はNa洗浄不足水中保管中での健全性を確認するため、他集合体の表面状態との差異等に着目して観察を行った。以下に観察条件を示す。

加 速 電 圧	25 keV
試 料 吸 収 電 流	$1 \times 10^{-9} \sim 10^{-10}$ A m p
観 察 像 種	2次電子像
観 察 倍 率	240 ~ 8,000 倍

5. 試 験 結 果

5.1 光学顕微鏡による観察結果

燃料組織は中央部のガスバブル領域、その外側の高密度化領域及び最外周部の製造時領域の3領域からなる。最高燃焼度試料の金相写真をPhoto. 1, Photo. 2に示す。ガスバブル領域において結晶粒の径方向への伸長が見られるが柱状晶には致ってなく、中心空孔も見られない。軸方向最上部の試料を除きガスバブル領域内においてクラックヒーリングが認められ、またガスバブル領域から高密度化領域にかけて約 $1\mu\text{m}\phi$ 以下の白色金属状析出物が認められた。燃料-被覆管ギャップ幅は、Fig. 9に示すとおり軸方向出力分布に対応して変化し、最大出力部では直径で約 $28\mu\text{m}$ にまで減少している。

被覆管は軸方向上部試料の内面で最大約 $10\mu\text{m}$ の粒界腐食が認められた。その位置の写真を、Photo. 3に示す。Photo. 3には被覆管の金相写真も示すが、Na洗浄不足水中保管による外表面の異状は全く認められず健全である。

5.2 X線マイクロアナライザ、イオンマイクロアナライザによる燃料内元素分析結果

Chart 1にU, Puの燃料中心から被覆管方向へかけてのEPMAによる線分析結果を示す。ほとんどU, Puの再分布は生じていないことがわかる。Fig. 10にIMAによる、燃料中心部、中間部、およびギャップ部の質量スペクトルを示す。質量数が90, 140, 155付近にピークを持つスペクトルを有しており、このうち155付近のピークは質量数140付近の元素の一酸化物によるものと推察される。Fig. 11とChart 2にIMAによるCs-133, -135, -137の径方向分布とEPMAによるギャップ部のCsの分布を示す。燃料外周部からギャップにかけてCsが蓄積していることがわかる。またEPMAによるギャップ部の面分析結果をPhoto. 4に示す。Csがギャップに蓄積しているものの、被覆管構成元素の溶出は認められない。EPMAによる燃料マトリックス中のXeの分析結果をFig. 12に示す。製造時領域では Xe_{La} の特性X線が検出されていることから、Xeが燃料内に保持されているが、ガスバブル領域、高密度化領域ではXeの放出が生じていることがわかる。

5.3 イオンマイクロアナライザによる燃焼度測定結果

Table. 3とFig. 13に測定結果と「JYHIST」コードによる計算値を比較して示す。両者の一致は比較的良好い。

5.4 被覆管外表面の観察結果

Photo. 5に被覆管外表面の観察結果を示す。全ての試料表面に従来観察されていたものと同様の微粒子が観察される。軸方向下部の $385^{\circ}\text{C}\sim 448^{\circ}\text{C}$ 領域では粒径が $2\mu\text{m}\phi$ 以下の微粒子が観察される。しかし 485°C 以上になると、表面の荒れ、ピットが著しくなるが、その大きさは最大でも約

PNC-TN9410 85-134(1)

3 $\mu\text{m}\phi$ 以下である。全体的には PPJX13 で観察された表面状態と変らない。

6. 試験結果のまとめ

6.1 ナトリウム洗浄不足集合体の水中保管の影響

(1)

PPJX12と同様の炉内帯在期間を有するPPJX13の被覆管外表面のSEM観察結果をPhoto. 6に示す。両者を同一温度で比較すると、低温域（380℃前後）ではほとんど差は認められないが、高温域（520℃前後）ではむしろナトリウム洗浄不足被覆管（PPJX12）の方が、地肌の荒れが少ないことがわかる。またナトリウム洗浄不足被覆管の断面金相観察によると、外面からの粒界腐食やオーステナイト組織の異常は認められなかった。これらのことより、Na洗浄回数を1回にとどめ水中保管した集合体の被覆管は通常の洗浄を行った被覆管と比較しても差は認められなく、健全であると考えられる。

6.2 PPJX12燃料要素PIEデータのMK-I全体での位置づけ

PPJX13までのMK-I燃料要素の組織観察結果に本試験で得られたPPJX12の結果をあわせてFig. 14～Fig. 19に示す。Fig. 14と15に被覆管内面腐食量のピン平均燃焼度と被覆管内面温度依存性を示す。Fig. 16に残留ギャップ幅と局所燃焼度の関係を示す。Fig. 17,18,19にはそれぞれペレット実効面積、高密度化領域径、ガスバブル領域径の局所燃焼度依存性を示す。

本試験で得られたデータは現在までに得られているデータの範囲内に入っており、MK-I燃料の高燃焼度でのデータを補充することが出来た。またMK-I全運転期間中、1列で照射された燃料には、中心空孔や柱状晶の形成は認められなく、またPuの再分布も生じていないことが確認された。

7. 謝 辞

燃料集合体からの試料採取などの準備作業にあたり、照射燃料集合体試験室（FMS）の田地室長をはじめとする関係室員に、又放射線管理に当っては安管部放射線課平野係長以下の係員に御支援いただいた。又試験遂行に際しては原子力技術（株）の大里行弘、額賀貞芳の両氏に御協力いただきましたことを付記し、これらの方々に感謝の意を表わします。

8. 参 考 文 献

- (1) 榎戸, 林ら:「常陽」MK-I 炉心燃料の照射後試験-燃料被覆管外表面観察および機器分析 -
PNC SN 941, 84-18, 1984年2月
- (2) 井滝ら: 高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の照射後試験結果概要(第三報)
PNC SN 941, 84-05, 1984年1月

Table 1 Specifications of Cladding and Core Fuel (Pin No. 6784)

Spec. of Cladding (Average of Makers Data.)

Items	
Maker	KOBE STEEL LTD.
Material	SUS 316
Lot. No.	K 001
Soln. Temp. (°C)	1010
Treatment Time (Min)	2
Cold Work (%)	10
Chemical Composition (W/%)	
C	0.05
Si	0.55
Mn	1.52
P	0.018
S	0.010
Ni	13.06
Cr	16.52
Mo	2.38
Co	0.04
B	< 0.0010
N	0.176
Al	0.0220
As	0.0045
Cu	0.0275
Nb+Ta	< 0.0010
V	0.0170
Grain Size	9.0
Outer Diameter (mm) Max.	6.302
Min.	6.296
Inner Diameter (mm) Max.	5.603
Min.	5.600

Spec. of Core Fuel (Average of PNC's Data)

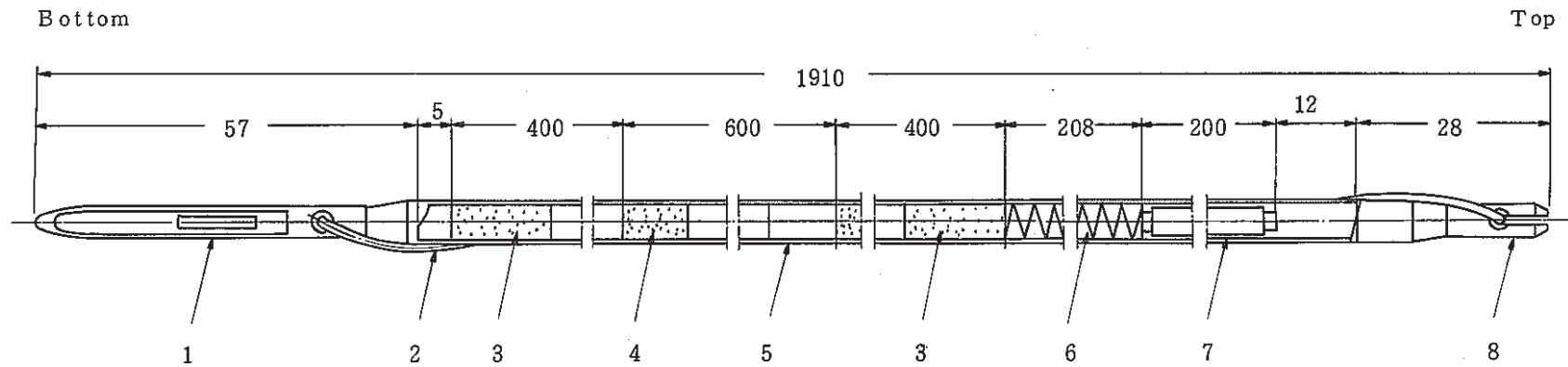
Items	
Lot. No.	FM 0105
$\text{PuO}_2 / \text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ (W/%)	17.6
O/M ratio	1.98
Gas ($\mu\text{l/g}$)	29
Moisture (ppm)	< 10
Impurities (ppm)	
Al	< 50
B	< 1
C	< 30
Ca	< 10
Cd	< 5
Cl	< 25
Cr	< 20
Fe	< 10
Mg	< 10
N	< 50
F	< 50
Ni	< 20
V	< 20
Cu	} < 195
Zn	
Si	} < 171
Ag	
Mn	
Mo	
Pb	} < 697
Sn	
Total	< 697
Density	93.5 ± 2
Diameter	5.4 ± 0.05

Table 2 Conditions of Ionic Etching and Evaporations

	Etching	Evaporation
Ion Source	Ar	Ar
Degree of Vacuum (Torr)	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}
Accelerating Voltage (KV)	1.5	1.5
Cathode Voltage (V)	9.5 ~ 10.5	10.5
Magnet Current (mA)	0.7	0.7
Emission Current (mA)	4 ~ 6	7
Suppression Voltage (V)	300	300
Neutralization Voltage (mV)	—	—
Ion Current (mA)	0.5 ~ 0.55	—
Exposure Duration (min)	12 ~ 20	5 / 2.5
Material of Evaporation (EPMA)	—	C / Au
(IMA)	—	

Table 3 Measurement Value of Burn-Up by IMA

Specimen No	炉心燃料下端 からの距離(mm)	燃焼度(atm%)	JYHIST 計算値 (atm%)
6784 21	26.0	3.37	3.34
6784 42	262.6	5.37	5.11
6784 62	419.6	4.50	4.56
6784 82	592.0	2.96	2.67



8	upper end plug	SUS 316	
7	sleeve	SUS 316	
6	spring	SUS 316	
5	cladding	SUS 316	I. D. 5.6 ϕ , O. D. 6.3 ϕ
4	core pellet	$\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	
3	blanket	UO_2	
2	wrapping wire	SUS 316	1.2 ϕ
1	lower end plug	SUS 316	
No.	parts name	material	remarks

Fig. 1 "JOYO" MK-I Core Fuel Pin

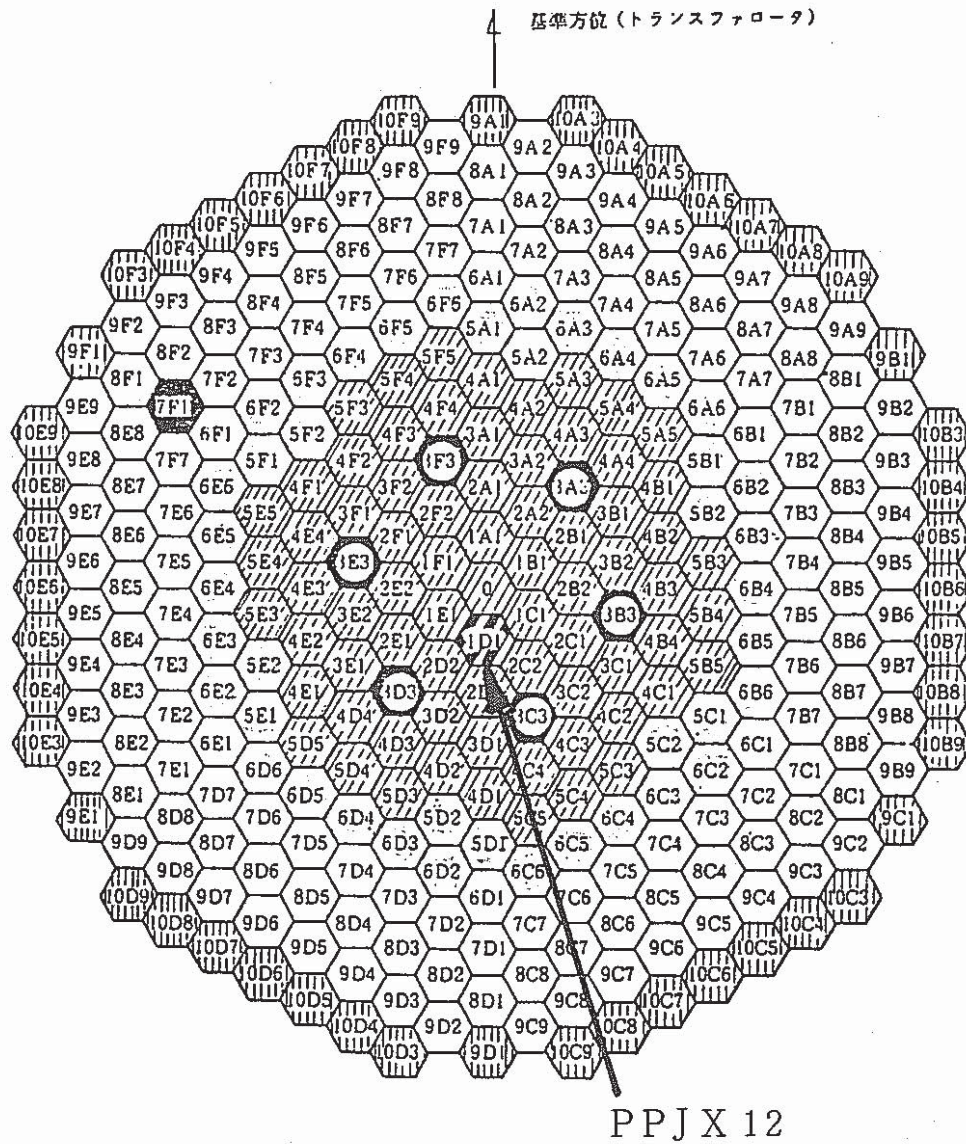
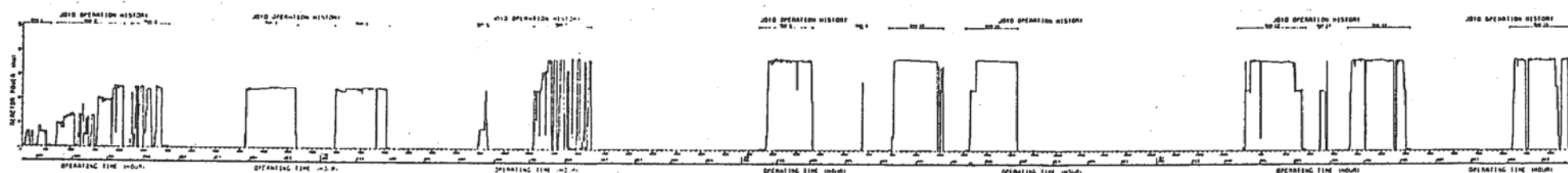


Fig. 2 Location of the Core Fuel Subassembly (Fab. No. PPJX12) in the Reactor "JOYO"



運転サイクル		540MW出力上昇期1サイクル				540MW出力上昇期2サイクル				540MW出力上昇期3サイクル				540MW定常期1サイクル				540MW定常期2サイクル				540MW停炉降圧期1サイクル				75MW出力上昇期1サイクル				75MW定常期1サイクル				550MW停炉運転				75MW定常期2サイクル				75MW定常期3サイクル				75MW定常期4サイクル				75MW停炉運転				75MW定常期5サイクル				75MW定常期6サイクル																																																																																																																																																																																																																																			
炉内装荷位置		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1		1 D 1																																																																																																																																																																																																																																																	
		BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC																																																																																																																																																																																																																																														
原子炉	熱出力 MW	12.78	11.89	19.6	50.1	50.00	48.59	49.07	48.34	49.16	49.14	19.51	48.38	49.52	74.08	74.4	68.6	55.0	55.0	74.30	73.79	75.27	74.05	74.35	73.51	49.2	73.61	74.61	73.85	73.8	74.4																																																																																																																																																																																																																																																														
	1次冷却材流量 kg/sec	597.2	599.7	597.2	602.0	600.2	602.9	602.0	602.5	602.6	600.2	604.2	608.6	603.7	604.4	604.1	605.8	603.4	606.7	607.7	606.6	608.9	607.2	605.5	607.3	608.0	607.8	605.8	607.0	605.9	608.6																																																																																																																																																																																																																																																														
凝合体	熱出力 MW	227.6	212.5	347.4	887.7	880.3	855.5	858.0	847.3	851.5	847.3	269.0	817.1	836.3	1244.0	1227.0	1140.0	869.5	857.5	1200.1	1107.1	1193.9	1172.4	1173.0	1161.4	768.6	1149.0	1155.0	1136.0	1122.0	1124.0																																																																																																																																																																																																																																																														
	炉内蒸気発生率 t/hr	2.6	2.6	28.4	43.1	43.1	42.4	40.1	117.2	117.2	117.2	120.0	124.0	154.0	202.0	202.0	202.0	222.2	231.4	291.0	277.0	291.0	277.0	291.0	277.0	356.4	407.4	407.4	454.7	454.7																																																																																																																																																																																																																																																															
燃料棒	燃焼率 %	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18	4.18																																																																																																																																																																																																																																																
	燃焼率 %	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411	7.411																																																																																																																																																																																																																																																
燃料棒	燃焼率 %	389.3	387.8	402.1	458.0	455.8	453.3	454.4	452.4	455.2	455.8	397.0	454.3	457.9	500.9	500.1	490.7	465.8	465.8	496.9	477.5	479.0	475.1	497.5	495.1	453.8	495.0	495.5	493.3	492.7	493.0																																																																																																																																																																																																																																																														
	燃焼率 %	1.202	1.202	1.202	1.200	1.200	1.199	1.200	1.199	1.199	1.199	1.197	1.197	1.197	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.192	1.192	1.192	1.190	1.187	1.188	1.187	1.187	1.184	1.185	1.183																																																																																																																																																																																																																																																														
燃料棒	燃焼率 %	1.044	1.041	1.044	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040	1.040																																																																																																																																																																																																																																																
	燃焼率 %	50.5	47.5	17.6	197.9	156.2	155.5	171.3	126.5	189.4	187.6	59.7	181.3	185.6	274.8	271.8	291.7	196.5	196.5	265.1	251.3	265.1	251.3	257.5	251.6	168.1	251.3	252.8	247.3	244.7	244.3																																																																																																																																																																																																																																																														
燃料棒	燃焼率 %	42.7	36.6	82.1	158.6	157.2	152.8	163.2	145.3	151.3	151.0	47.9	145.0	149.0	221.5	218.5	202.7	198.1	198.1	213.5	213.5	213.5	213.5	208.0	201.9	136.1	203.5	204.6	200.8	198.3	198.5																																																																																																																																																																																																																																																														
	燃焼率 %	397.7	395.6	414.8	489.7	487.1	483.8	485.0	482.3	485.6	486.1	406.9	483.7	487.9	545.0	543.8	531.5	498.1	498.1	541.7	539.9	542.1	532.1	539.9	536.5	481.8	536.2	537.2	534.4	533.4	533.8																																																																																																																																																																																																																																																														
燃料棒	燃焼率 %	534.2	523.8	861.3	1234.6	1223.5	1192.4	1105.1	1170.6	1193.3	1182.2	573.5	1146.4	1171.9	1605.1	1660.7	1548.7	1626.1	1626.1	1626.1	1600.8	1617.6	1524.7	1585.1	1555.7	1084.0	1553.8	1550.2	1531.1	1511.5	1514.4																																																																																																																																																																																																																																																														
	燃焼率 %	276.7	276.7	3050.4	4632.0	4632.0	4632.0	4632.0	4632.0	4632.0	4632.0	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5	10263.5

Fig. 3 Summary of Irradiation History of the Core Fuel Subassembly (Fab. No. PPJX12)

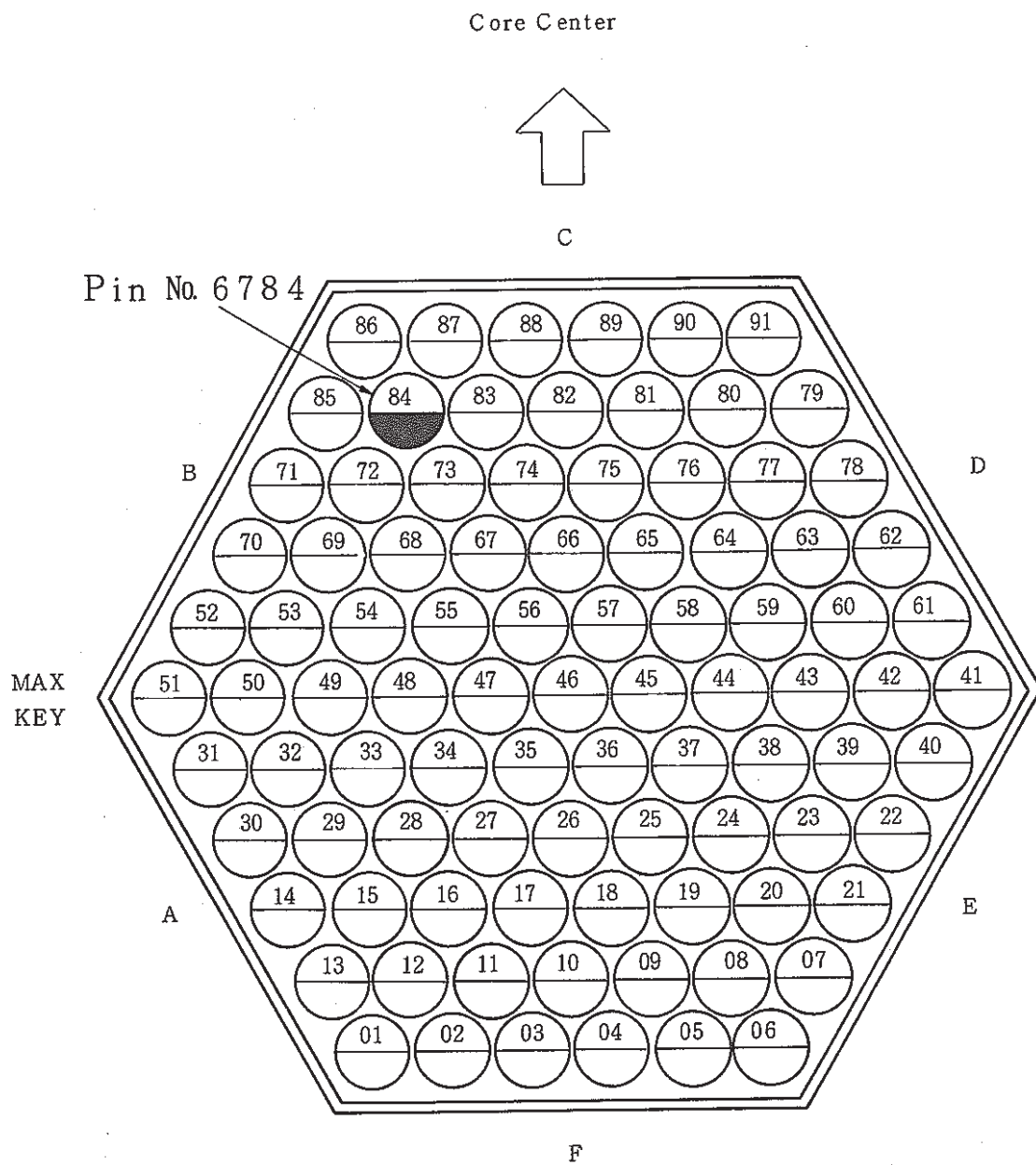


Fig. 4 Location of the Core Fuel Pin (Pin No. 6784) in the Core Fuel Subassembly

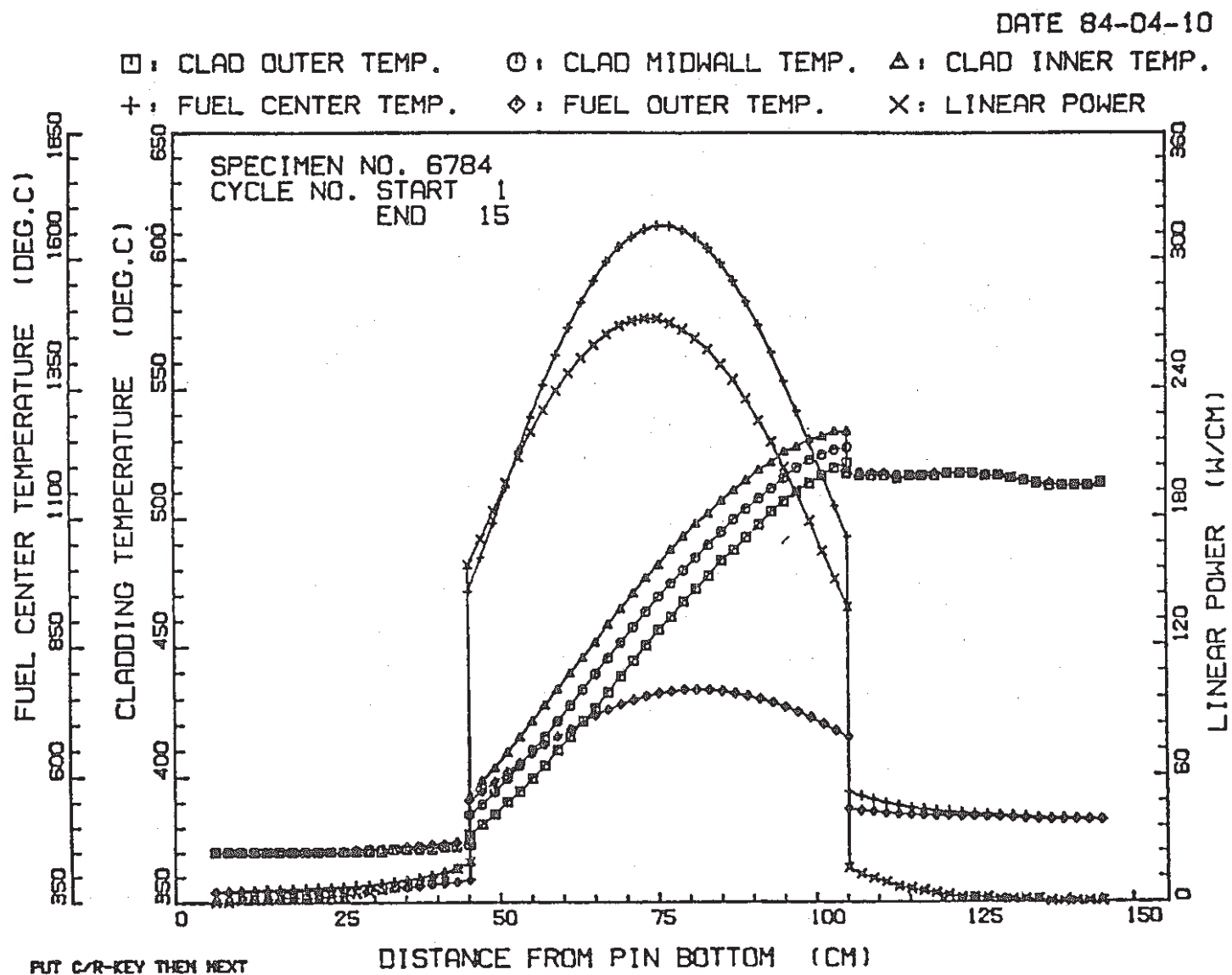


Fig. 5 Axial Profile of the Irradiation Condition (Pin No. 6784)

DATE 84-04-10

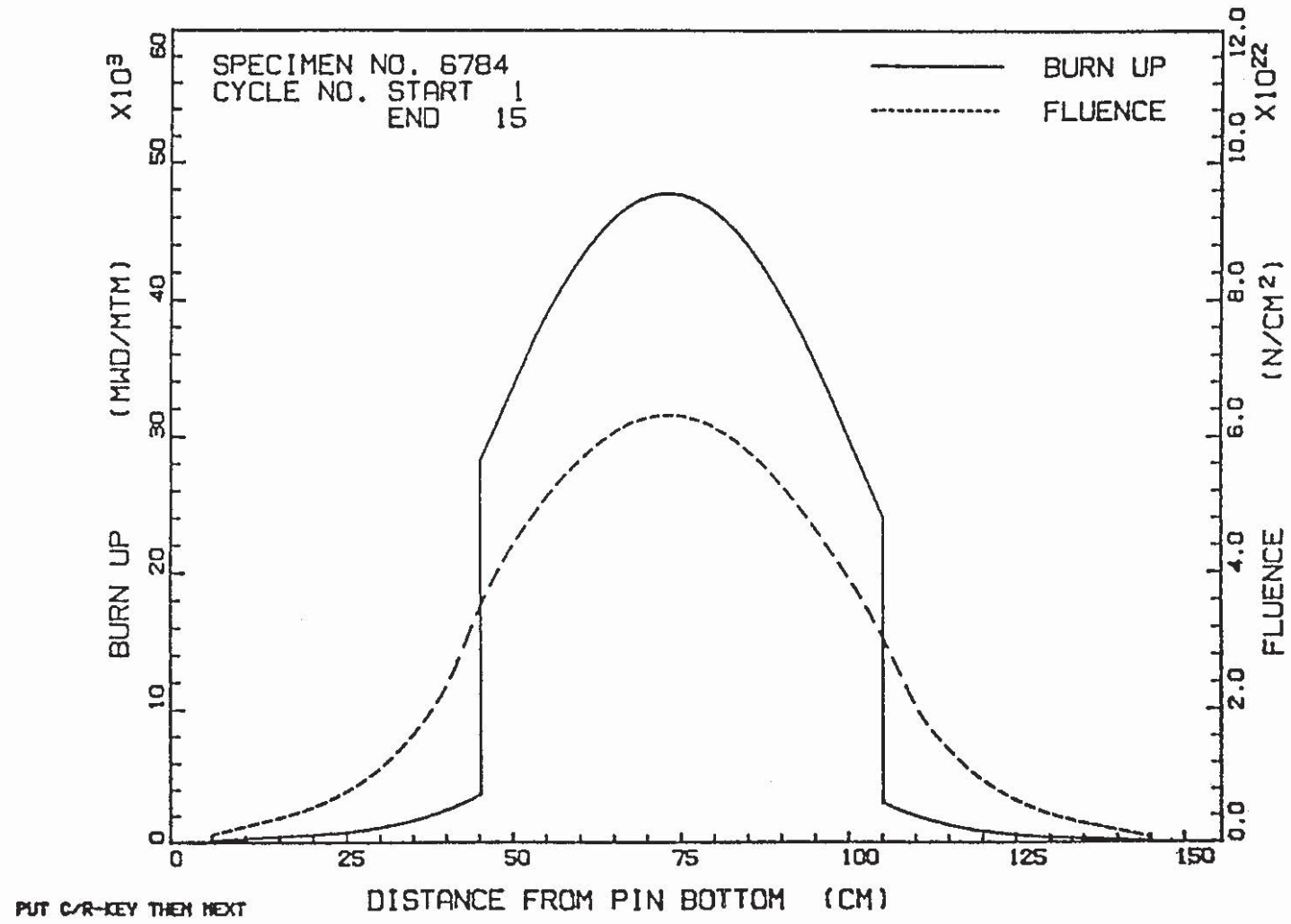


Fig. 6 Axial Profile of Burn-Up and Neutron Fluence (Pin No. 6784)

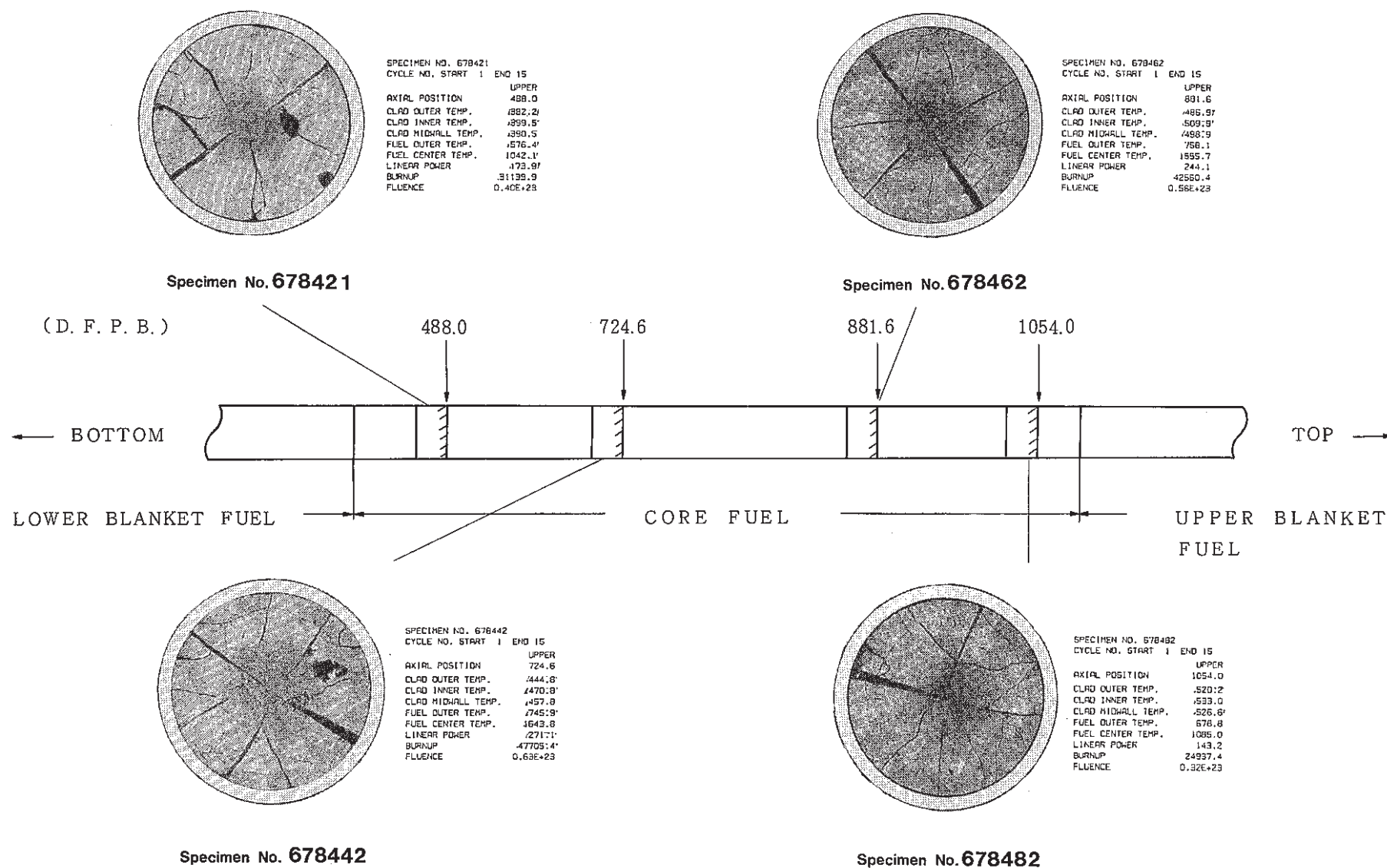


Fig. 7

Cutting Positions, Optical Micrographs and Irradiation Histories of the Metallographic Specimen

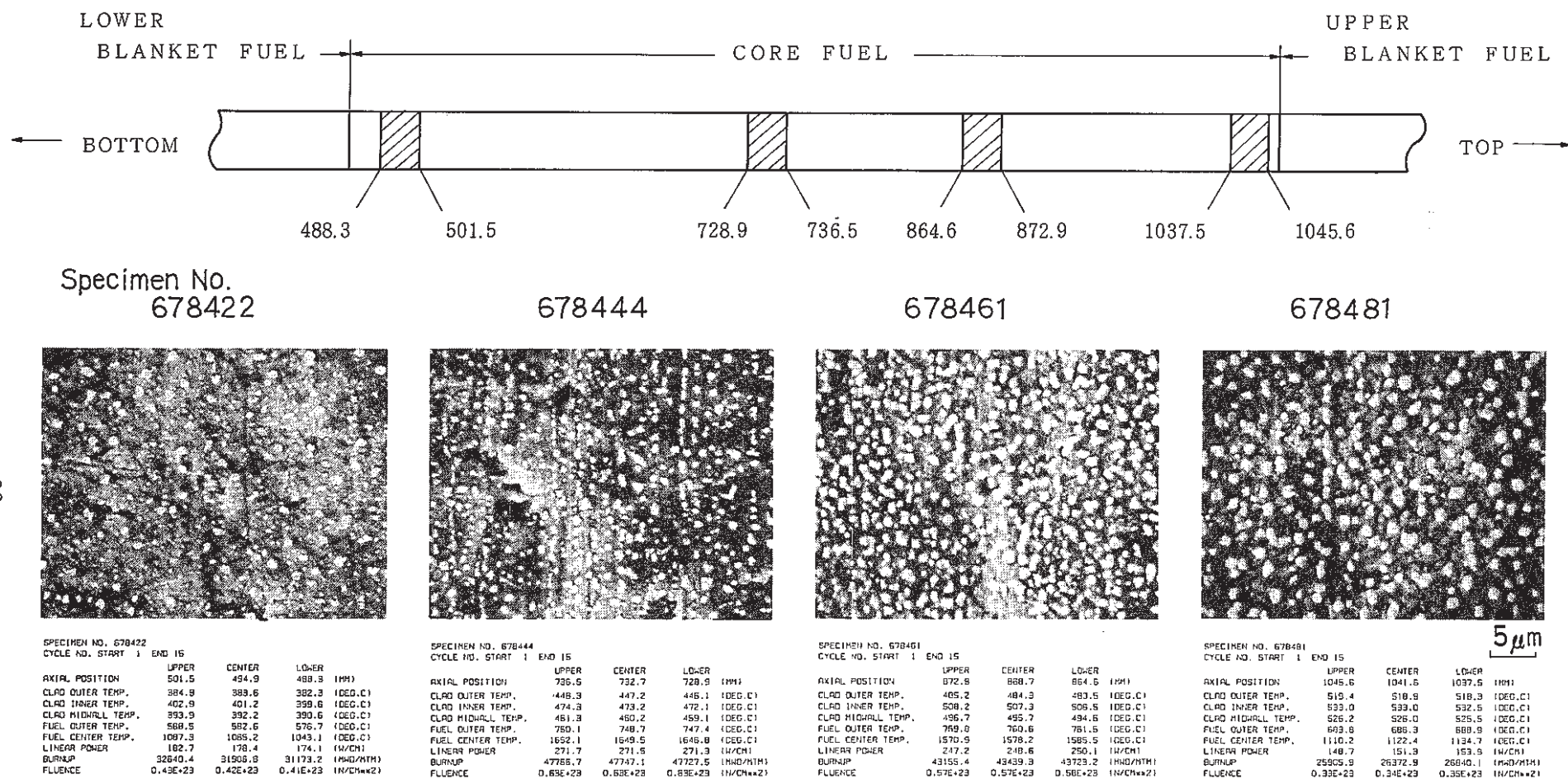


Fig. 8

Cutting Positions, Secondary Electron Micrographs and Irradiation Histories of the Cladding Outer Surface

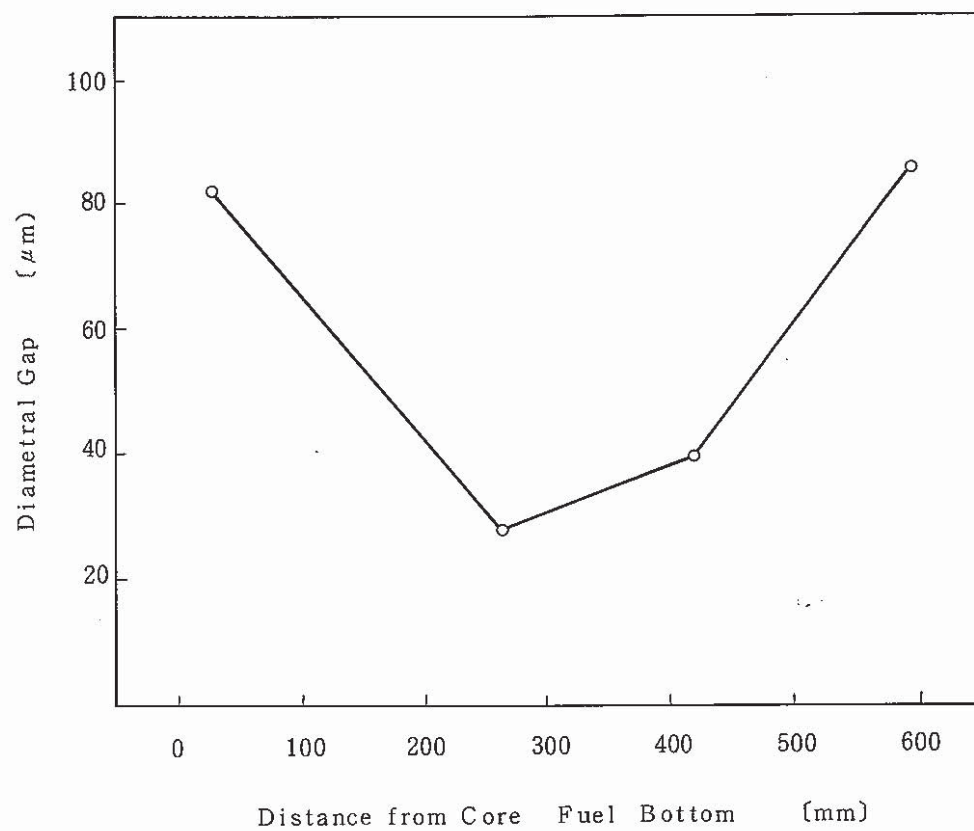


Fig. 9 Axial Profile of the Gap Width

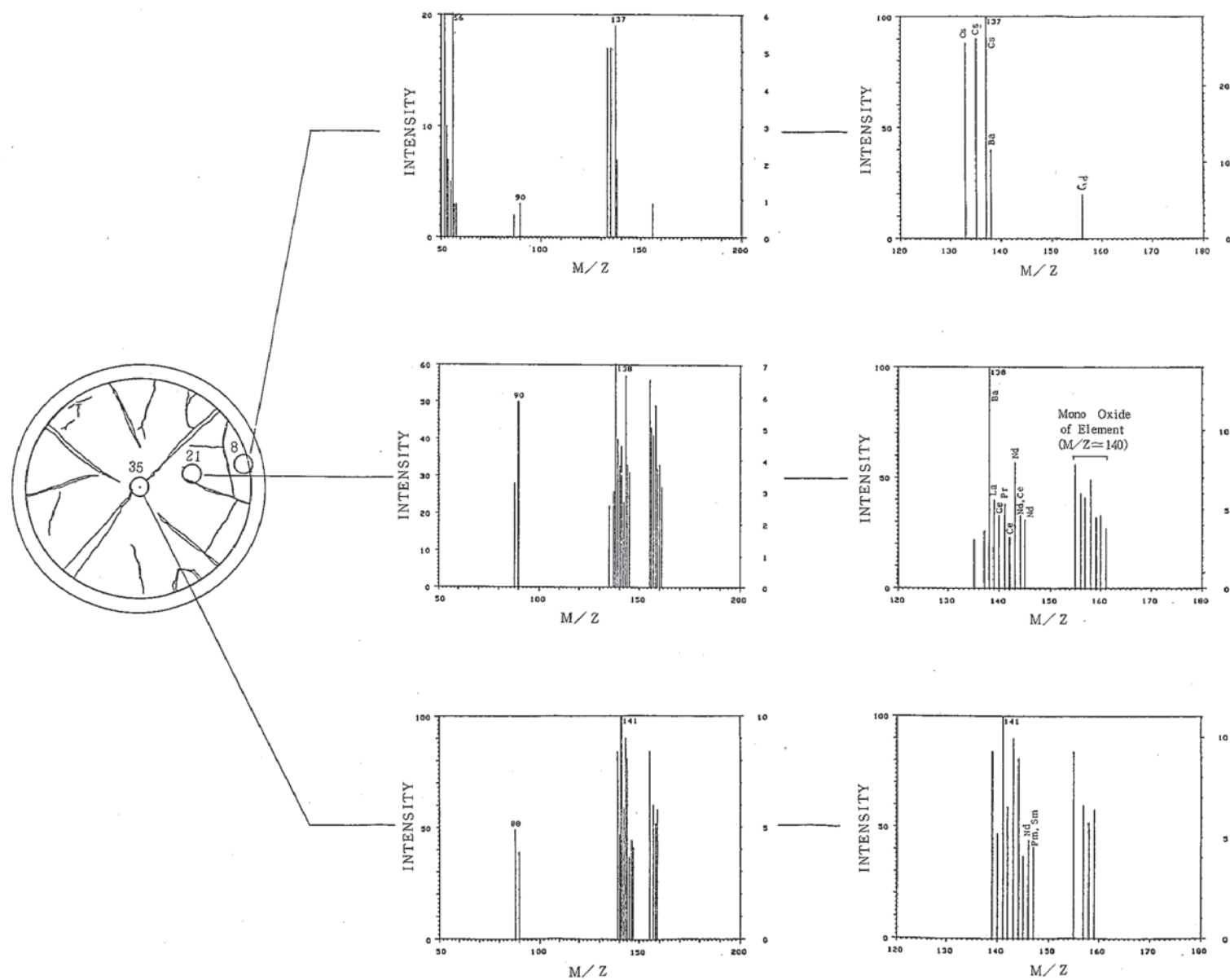


Fig. 10 Radial Distribution of Mass Spectrum Range between MZ = 50 and 200 at Scan No. 8, 21 and 35

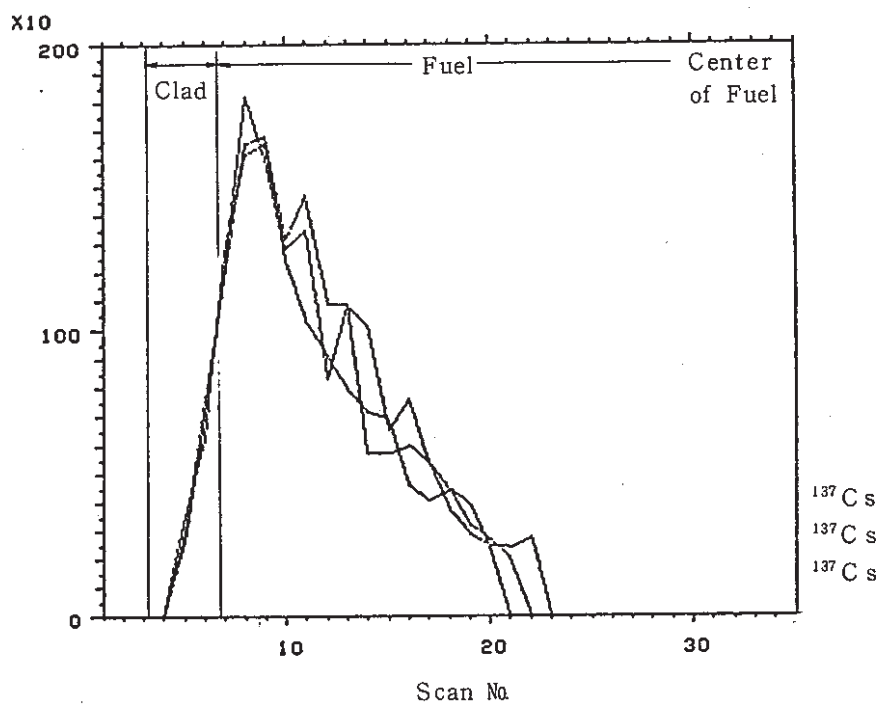


Fig. 11 Radial Distribution of Three Cs Isotopes

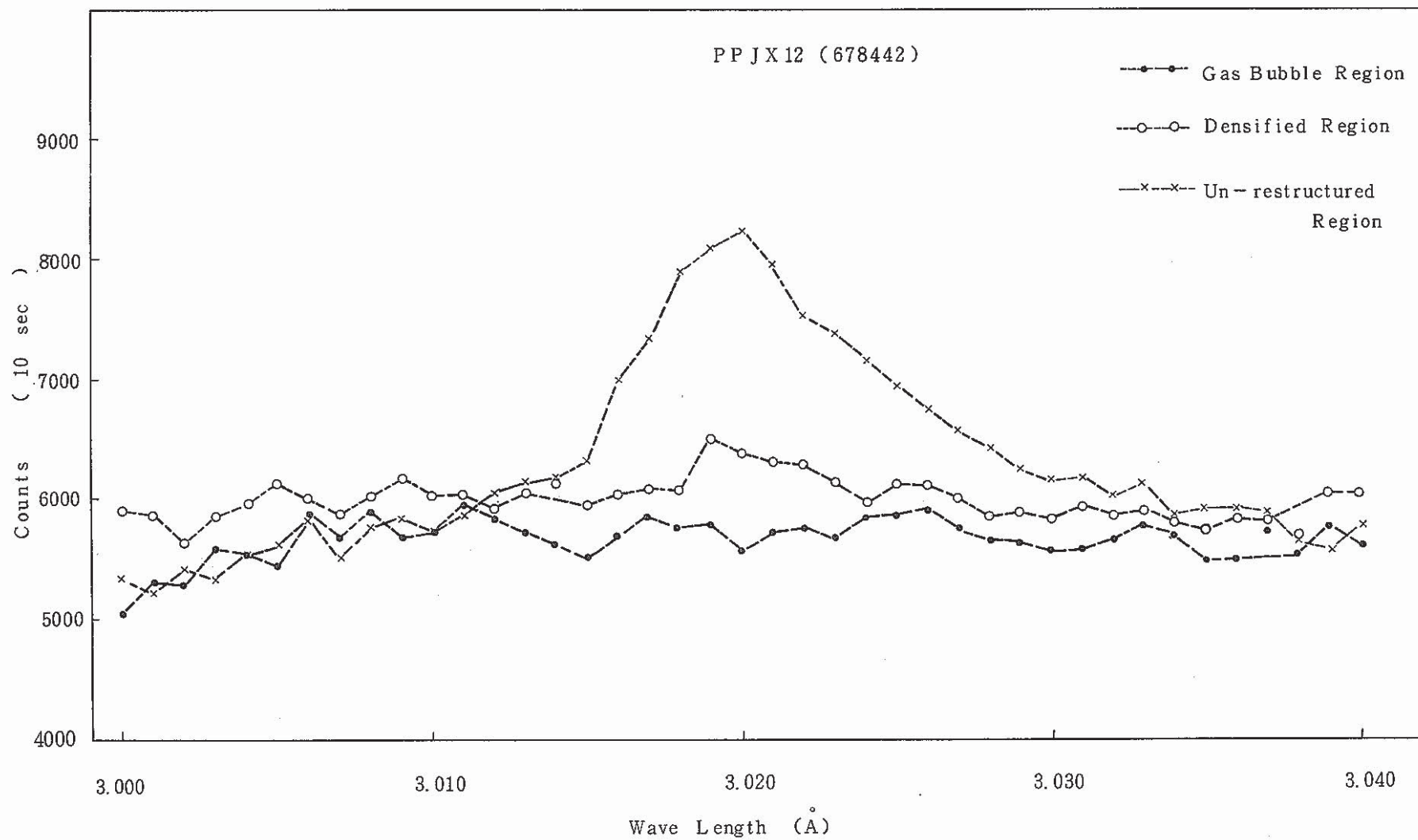


Fig. 12 Raw Counting Data Over Xe X-ray Line

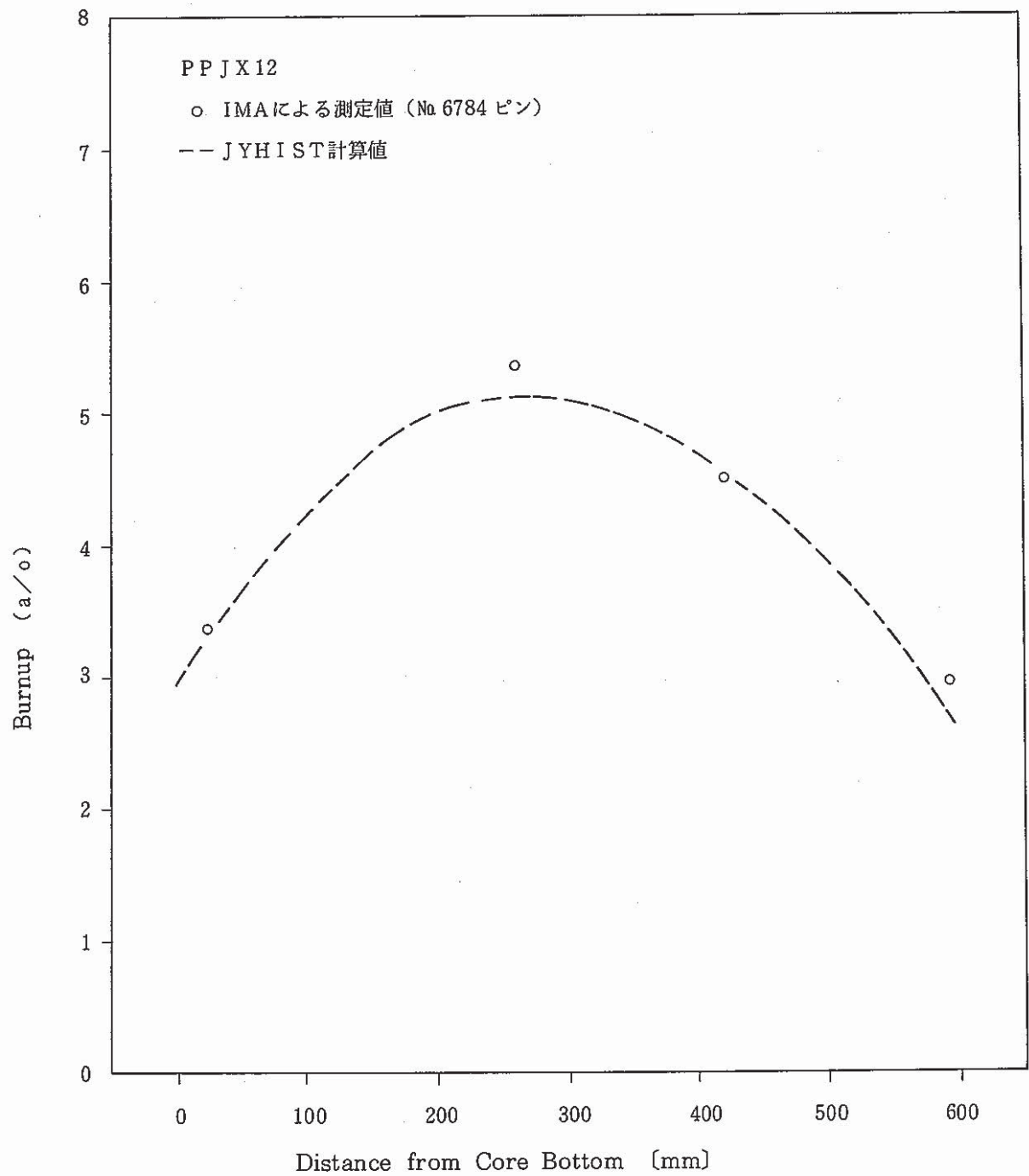


Fig. 13 Axial Profile of Burn-Up Measurement Value by IMA

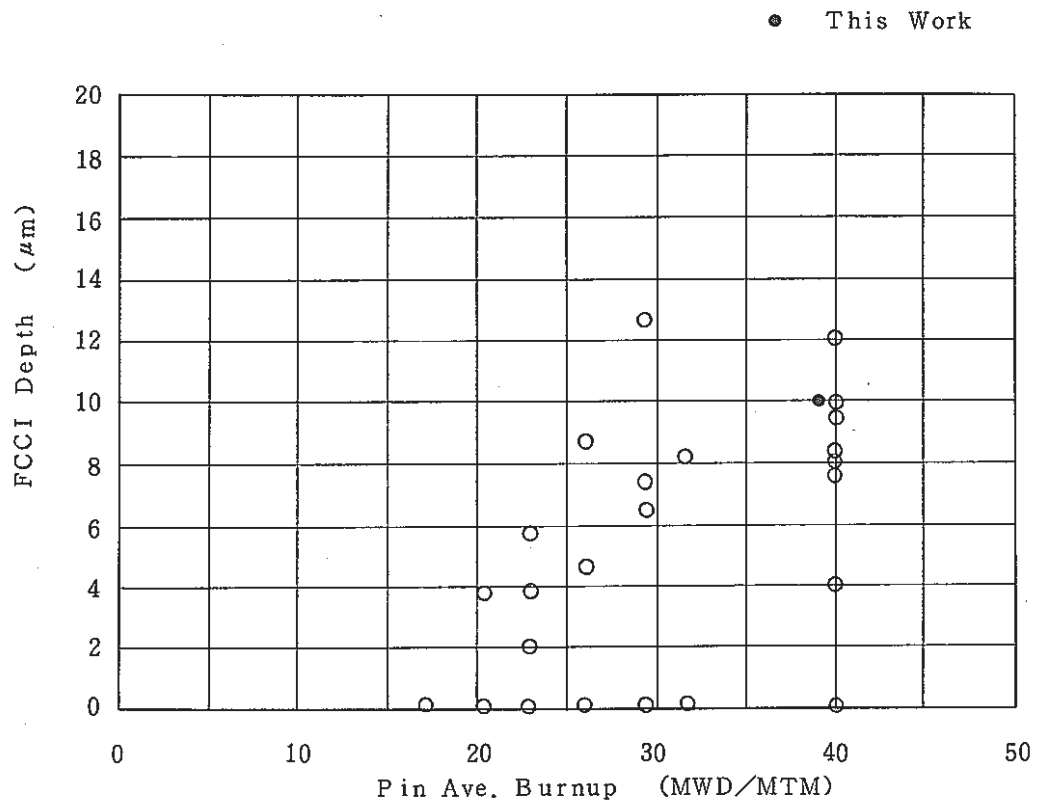


Fig. 14 Cladding Westage as a Function of Pin Average Burn-Up

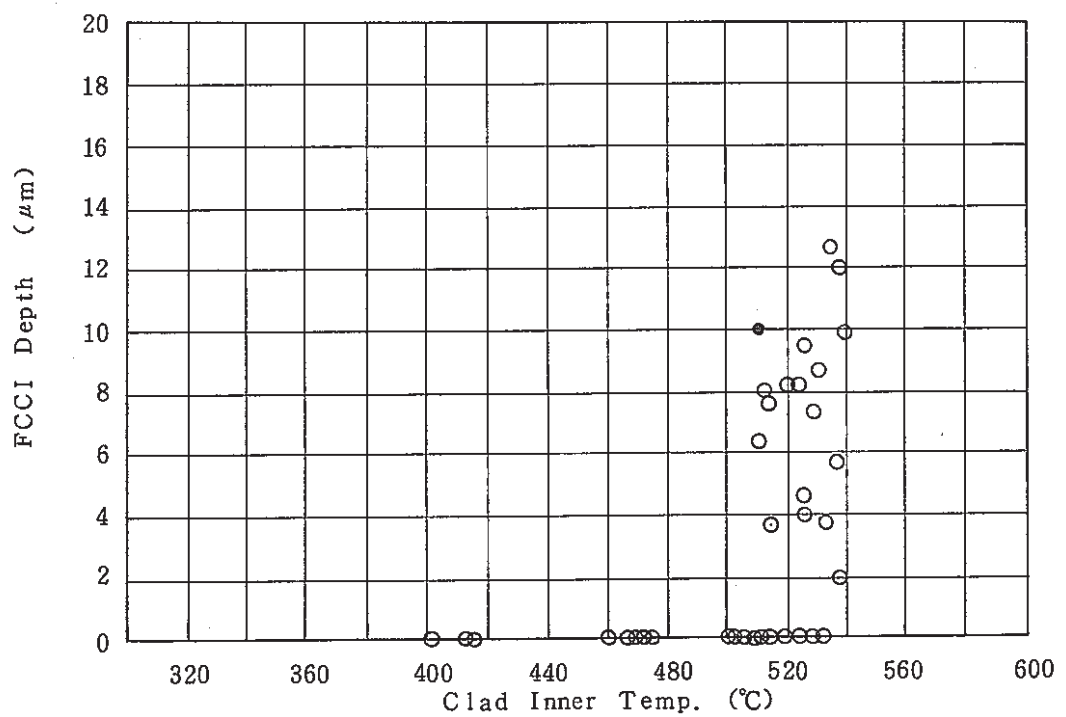


Fig. 15 Cladding Westage as a Function of Cladding Inner Temperature

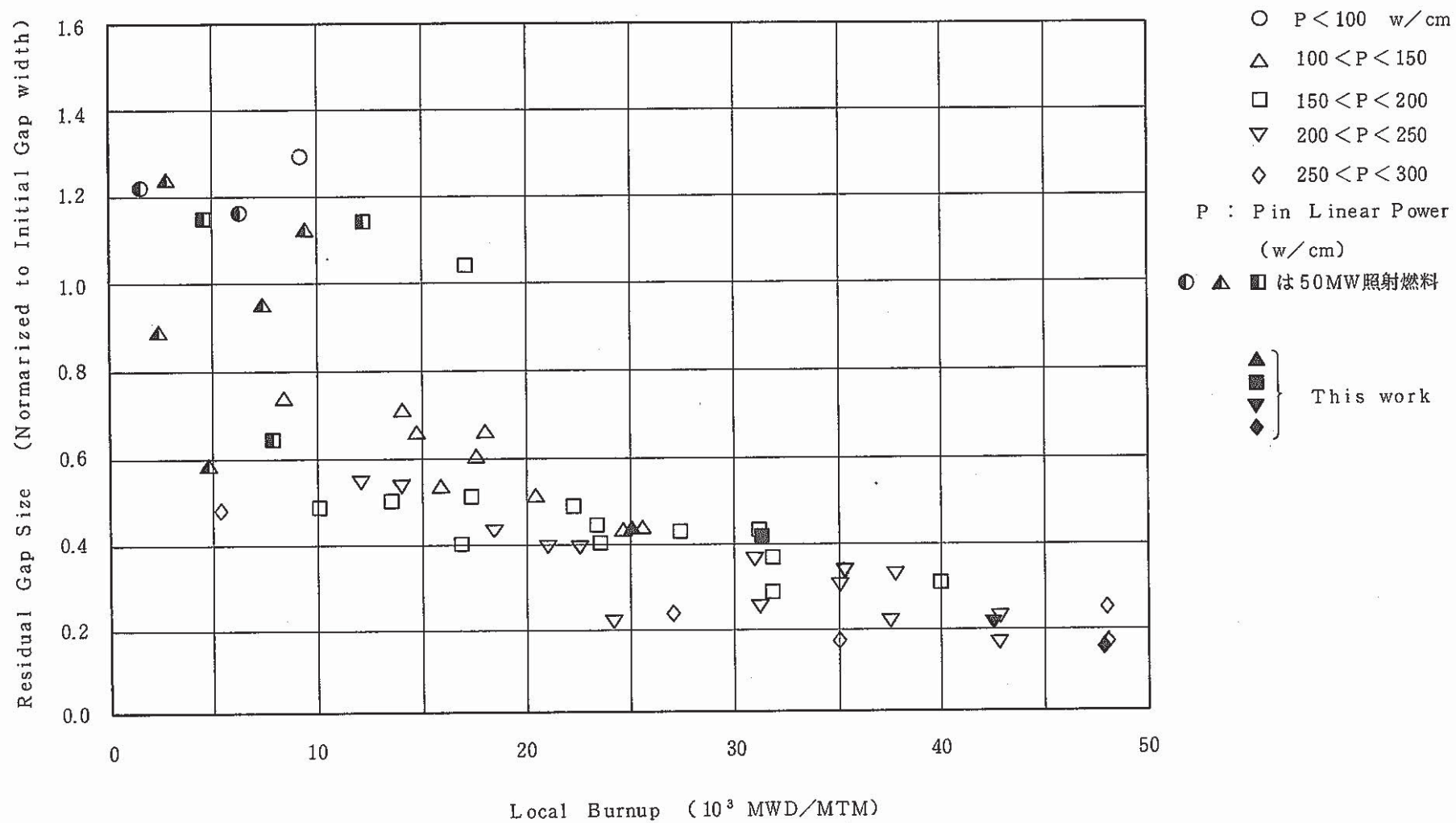


Fig. 16 Residual Gap Size as a Function of Local Burn-Up

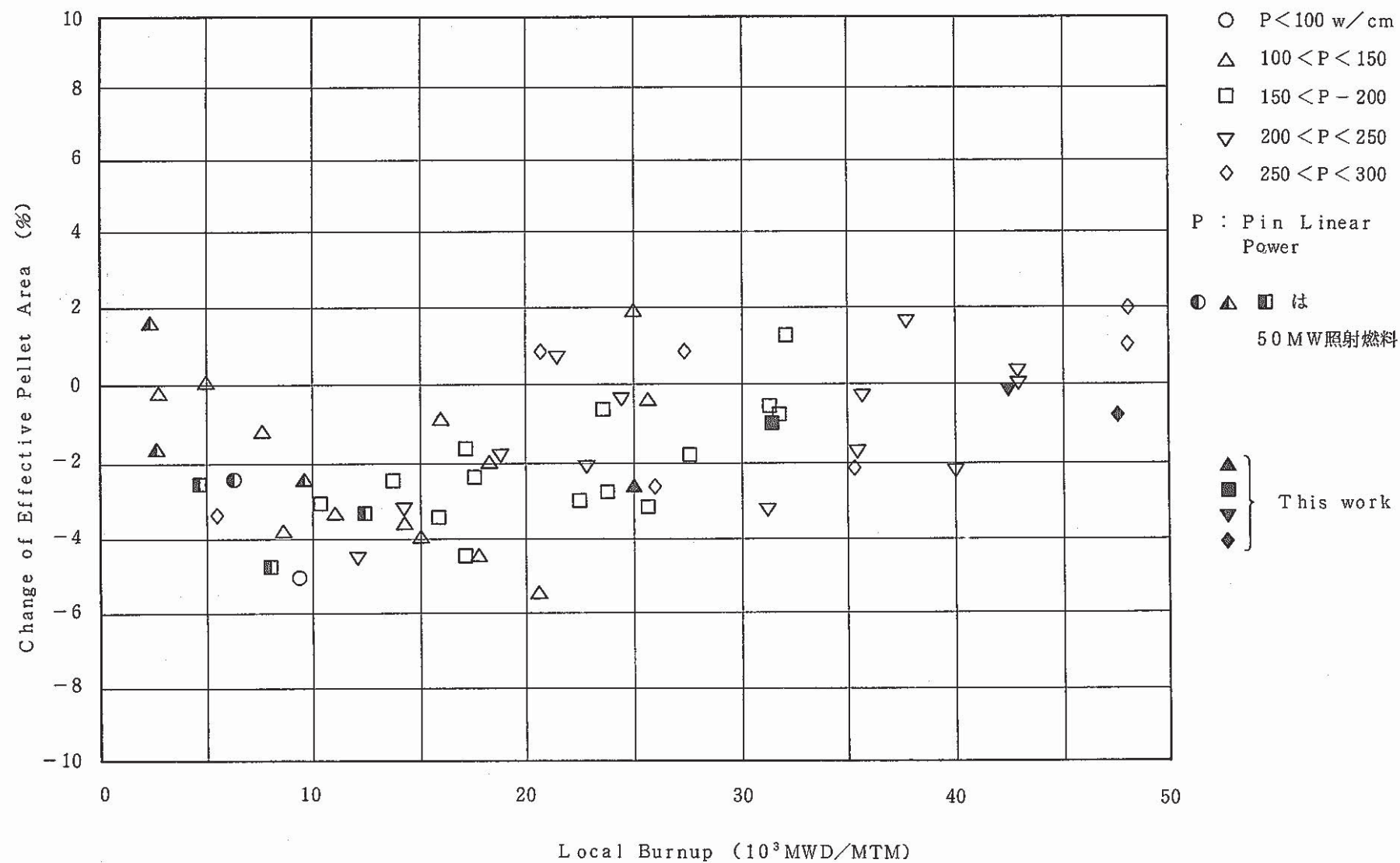


Fig. 17 Change of Effective Pellet Area with Local Burn-Up

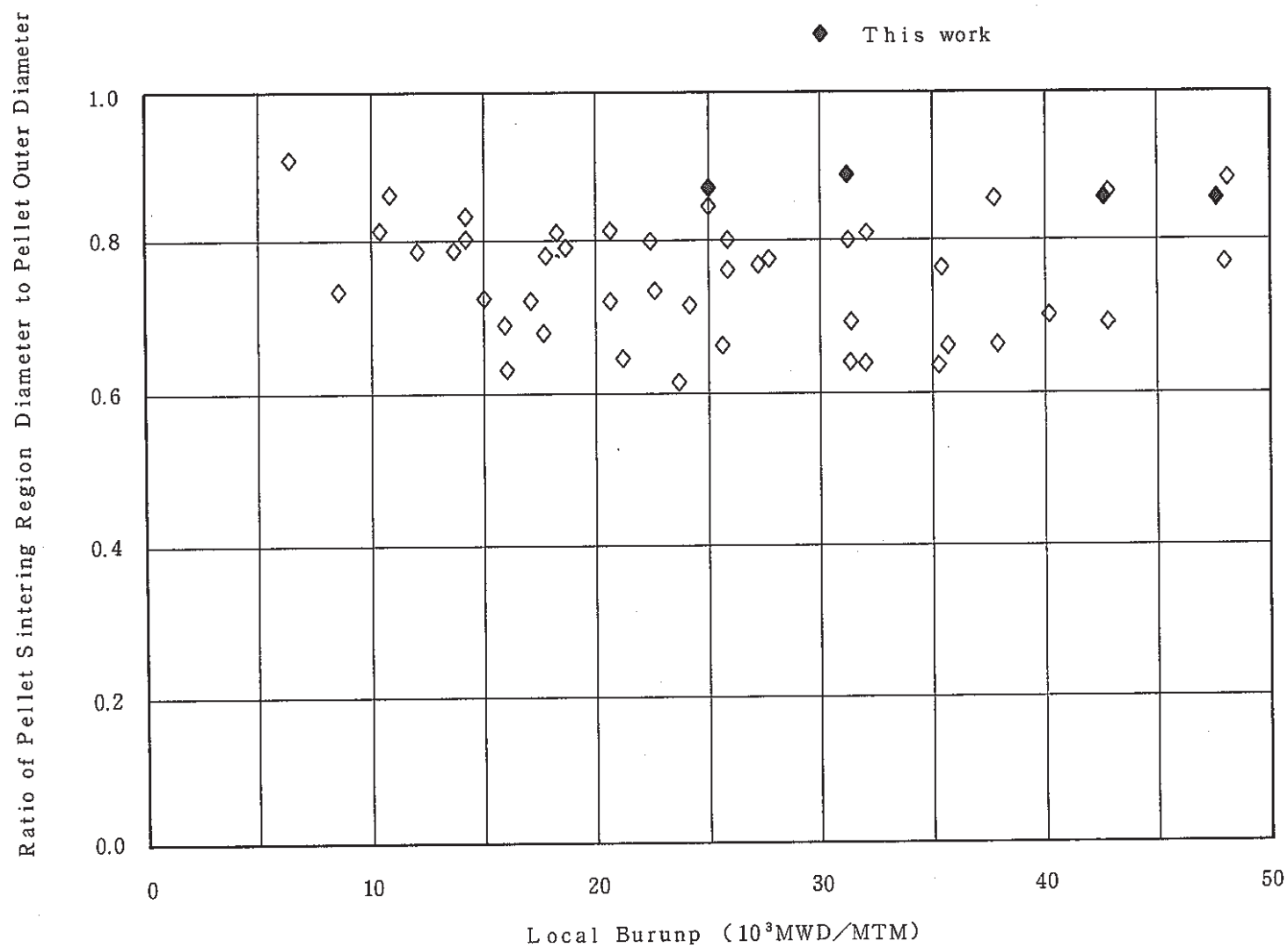


Fig. 18 Pellet Densified Region Diameter as a Function of Local Burn-Up

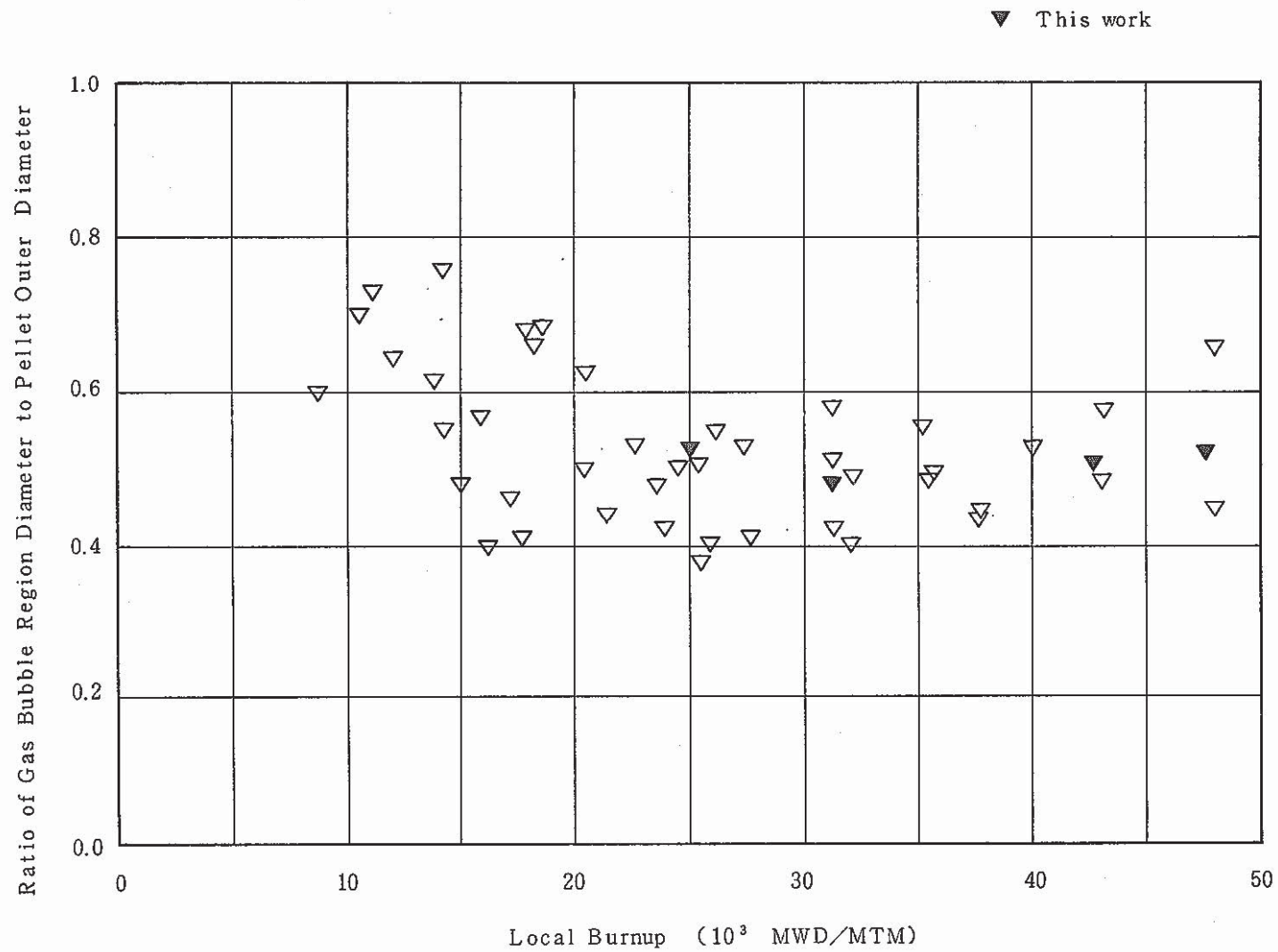


Fig. 19 Gas Bubble Growth Region Diameter as a Function of Local Burn-Up

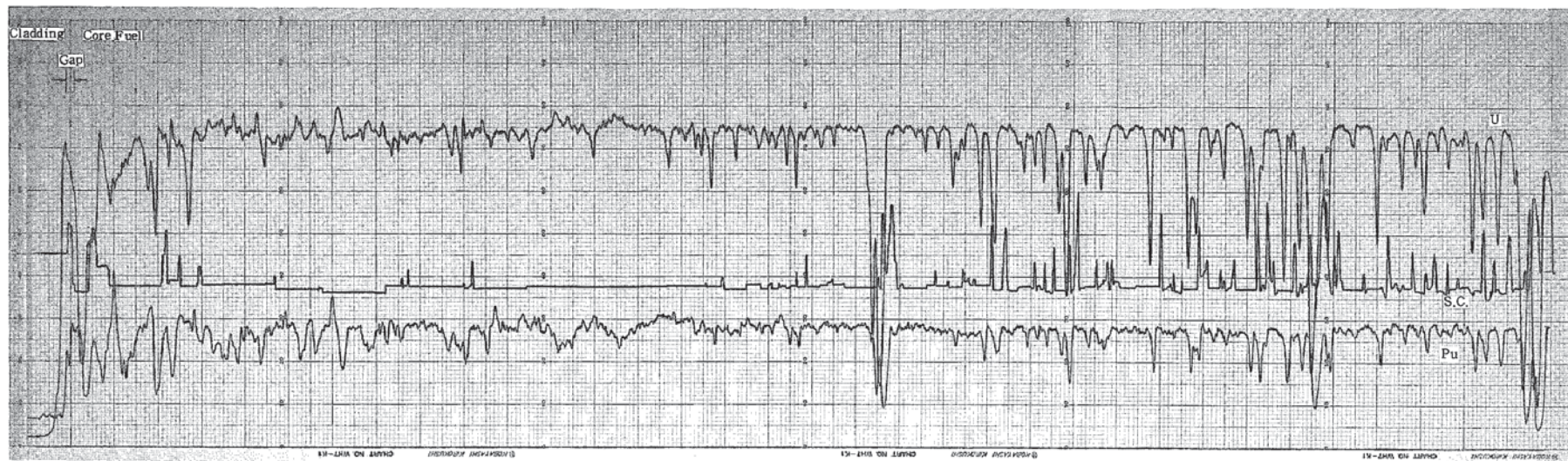


Chart 1 Line Analysis by U and Pu from the Fuel Center to Cladding
(Speciment No. 678442)

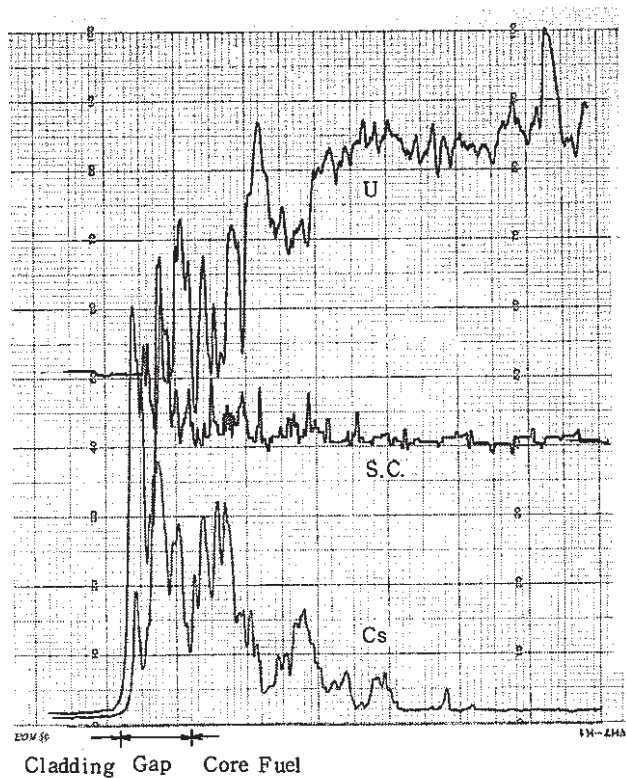


Chart 2 Line Analysis of U and Cs from Non-Restructured Region to Cladding (Specimen No. 678442)

"JOYO" MK-I PPJX12

Specimen NO. 678442

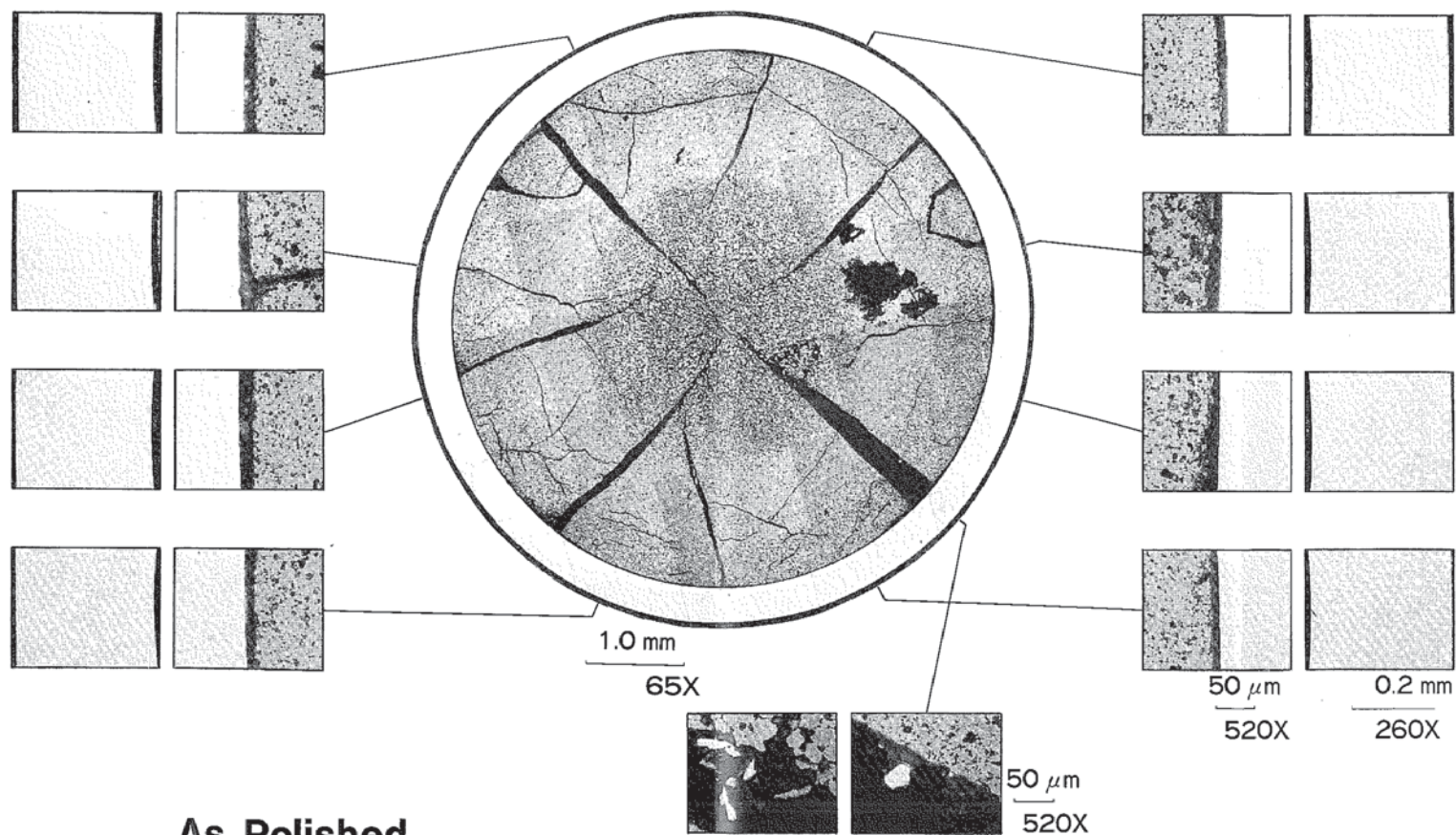


Photo. 1 Optical Micrographs of the Transverse Section of the Core Fuel Pin (Specimen No. 678442) As-Polished

"JOYO" MK-I PPJX12

Specimen NO. 678442

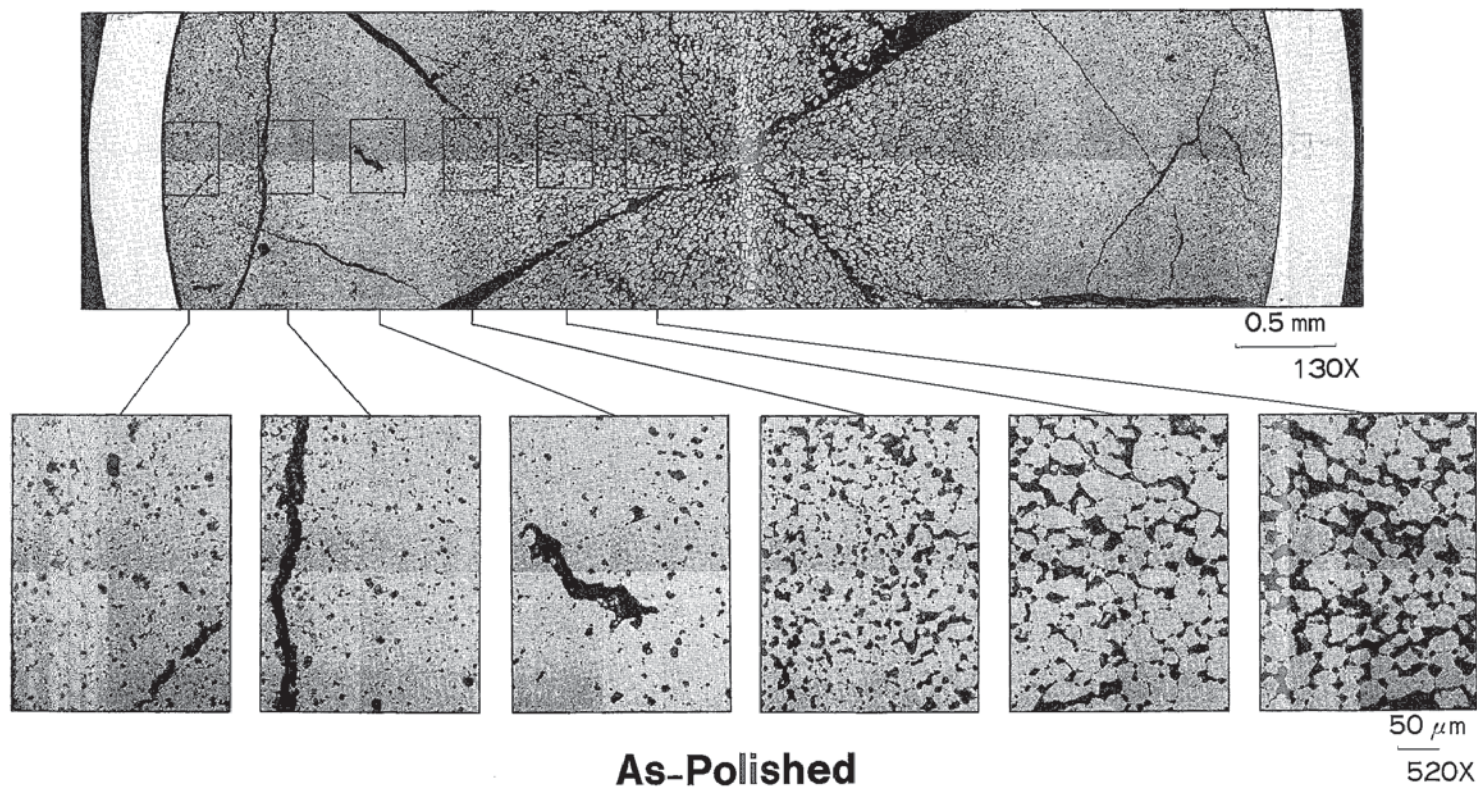


Photo. 2 Optical Microstructures of the Core Fuel (Specimen No. 678442)
As-Polished

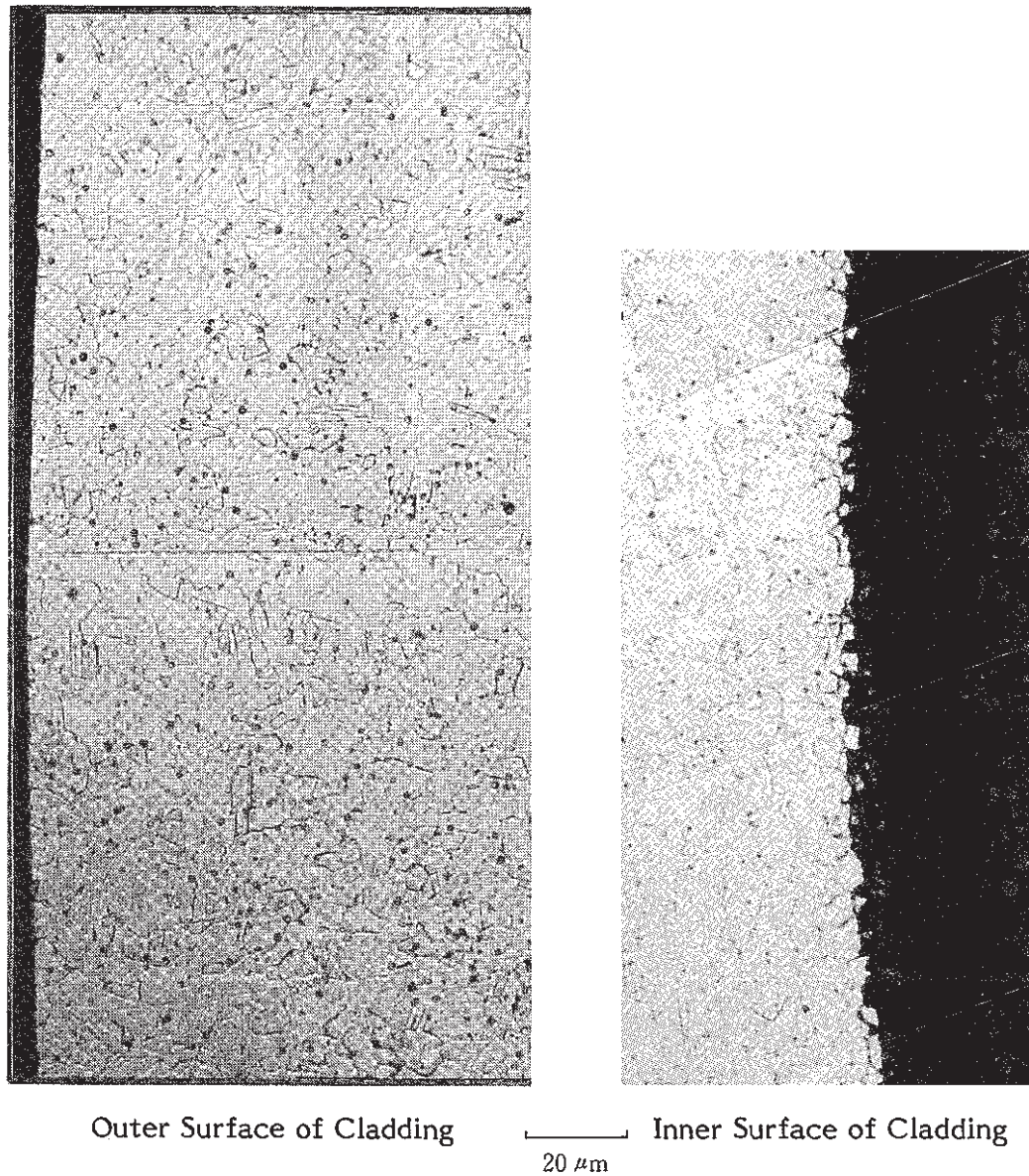


Photo. 3 Optical Microstructures of the Cladding (Specimen No. 678442)
AS-Etched

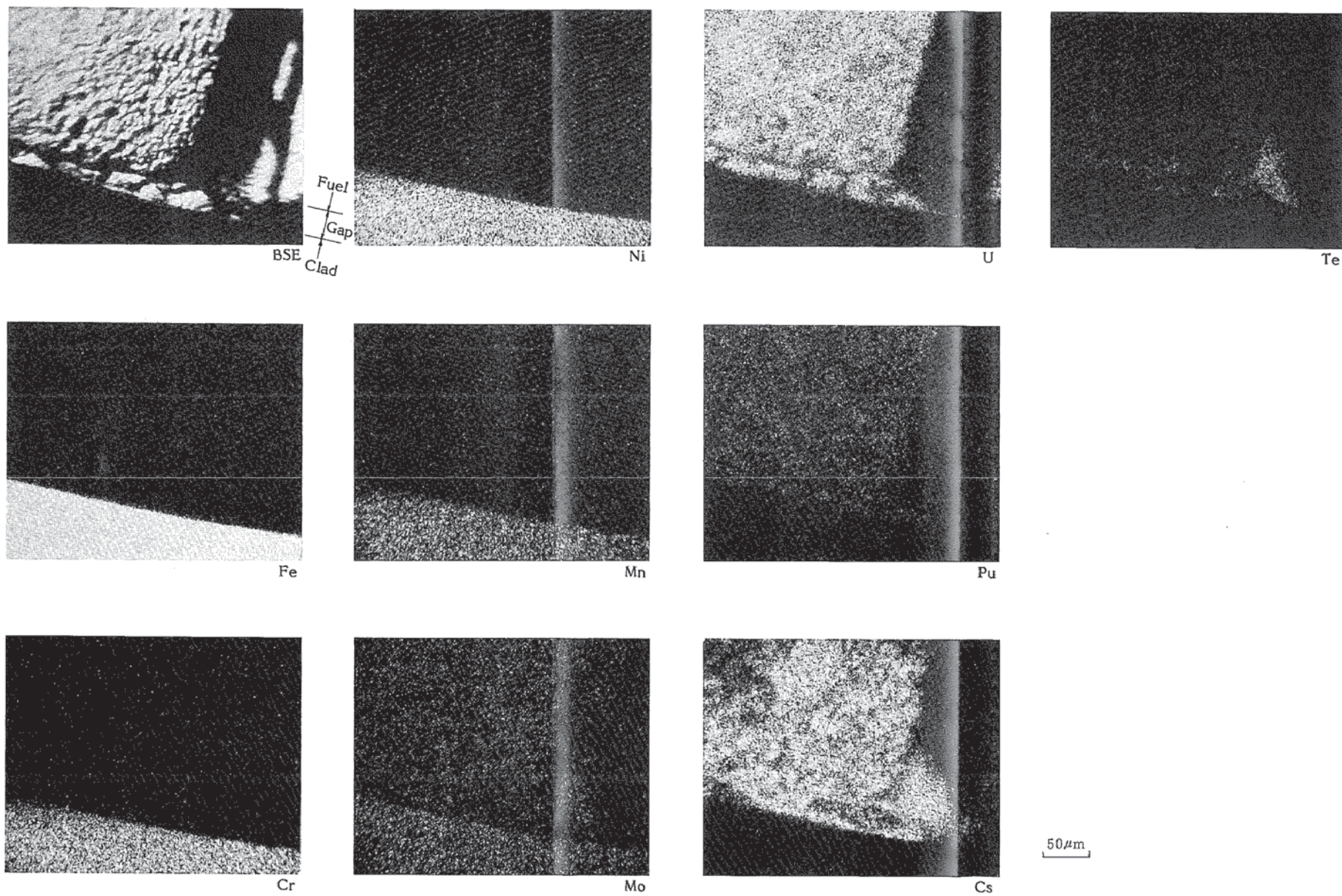


Photo. 4 Various X-ray Images of the Gap Part between the Core Fuel and Cladding (Specimen No. 678442) As-Etched

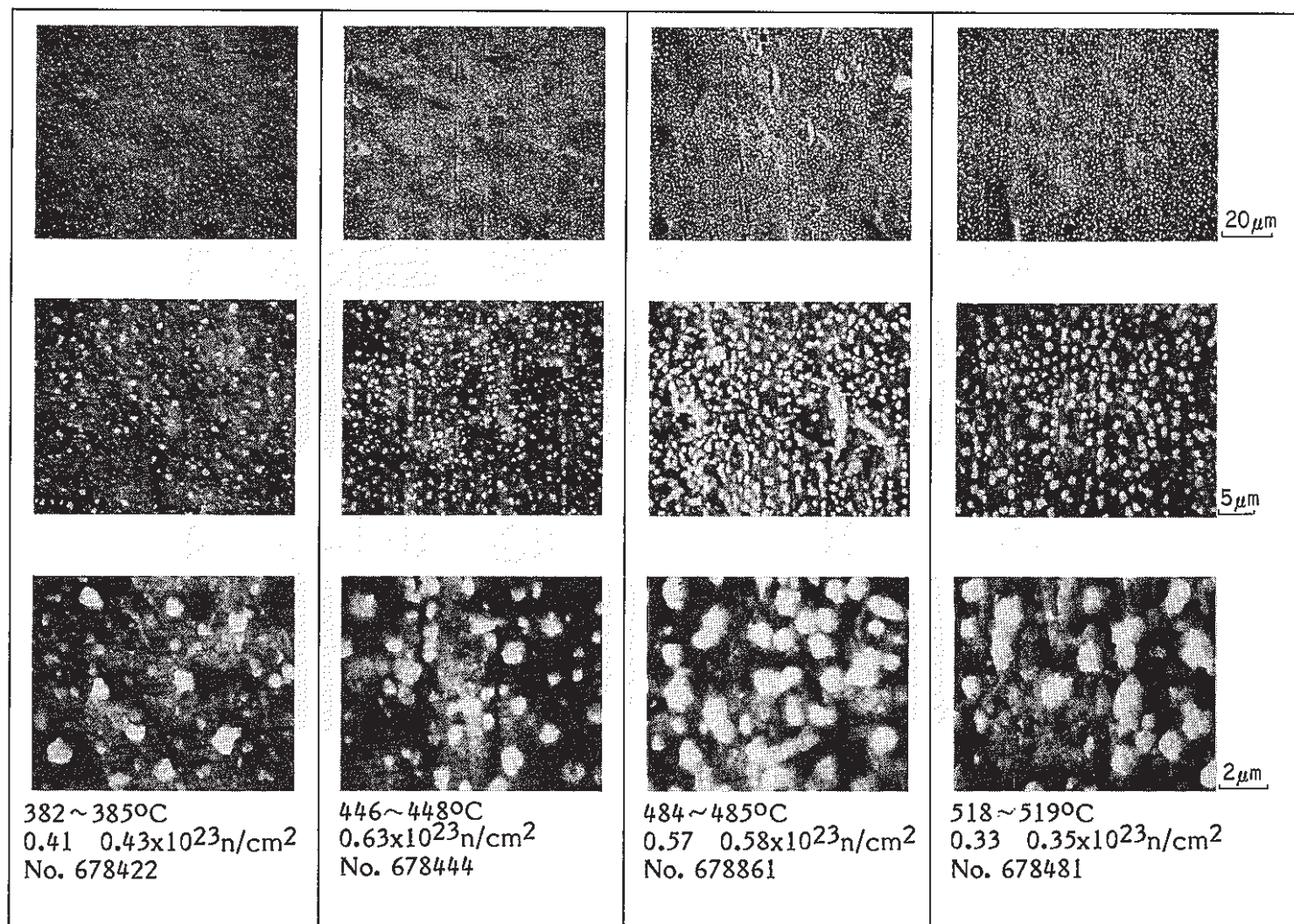


Photo. 5 Secondary Electron Micrographs of the Cladding Outersurface of the Fuel Pin (Fab. No. PPJX12, Pin No. 6784, Lot. No. K001)

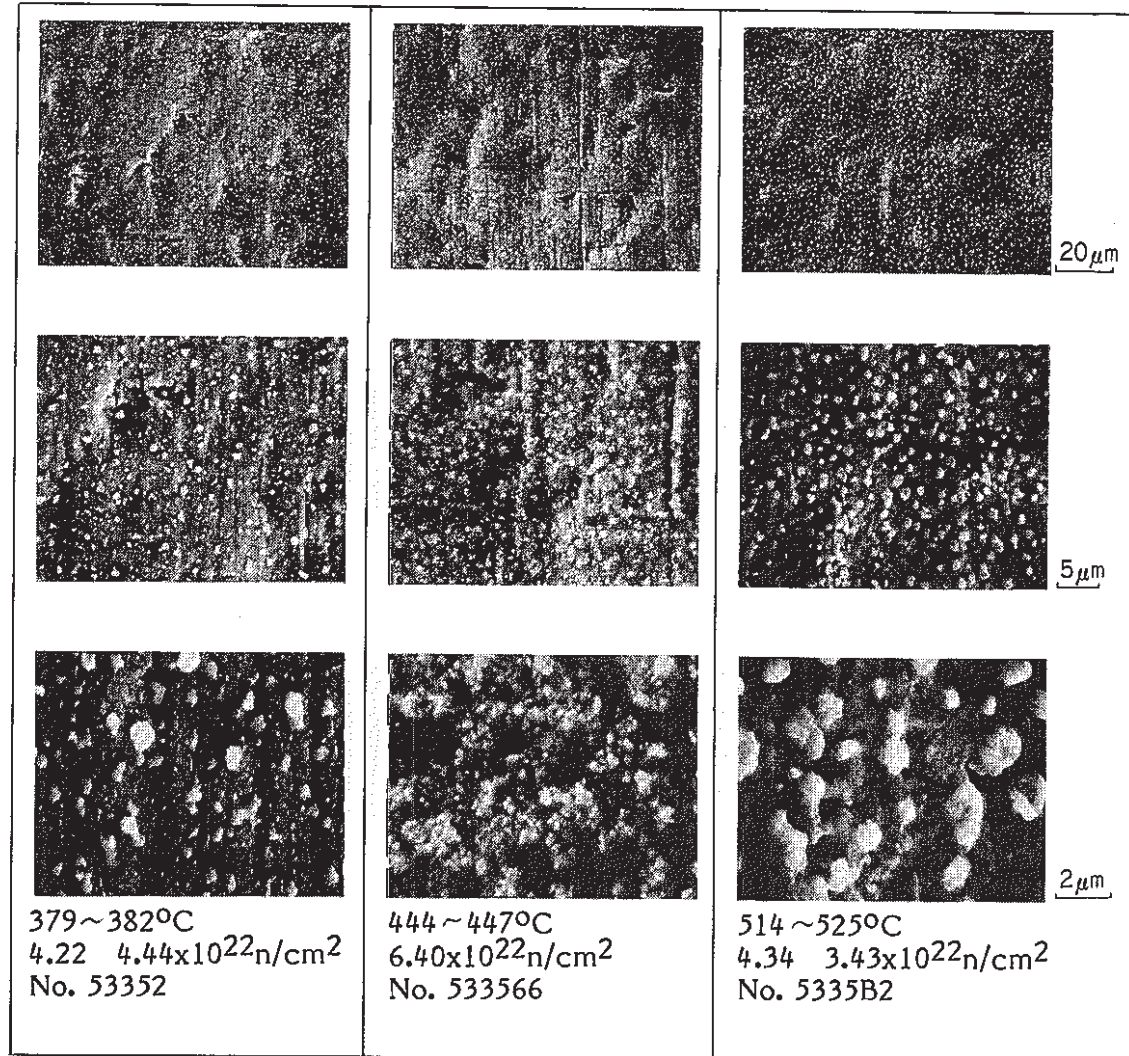


Photo. 6 Secondary Electron Micrographs of the Cladding Outersurface of The Fuel Pin (Fab. No. PPJX13, Pin No. 5335, Lot. No. K002)