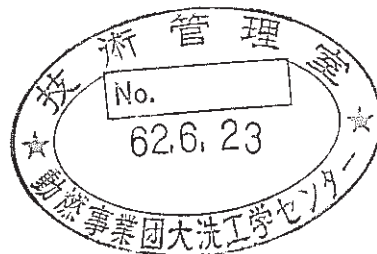


「常陽」MK-I 炉心燃料集合体 (PPJX12) の照射後試験

燃料要素の破壊試験

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 87-198
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	

1987年2月



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)

「常陽」MK-I 炉心燃料集合体(PPJX12)の照射後試験

燃料要素の破壊試験

実施責任者* 山内 勘

報告者* 滑川卓志, 小部 昭, 大久保忠文
桑島幸夫, 三次岳志, 吉川勝則
川澄清一, 富永 功, 乾 俊彦
押味一之, 立花利道

要 旨

「常陽」MK-I 炉心燃料集合体 PPJX 12 (集合体平均燃焼度約 38,900 MWD / MTM) は、「常陽」MK-I 炉心の高燃焼集合体であるとともに、高速炉燃料集合体の水プール保管技術の R&D の一環として、ナトリウム洗浄不足状態で水プール保管試験に供されたものである。照射燃料試験室 (AGS) では、1) 高燃焼度集合体の照射挙動データの充実、2) 水プール保管が被覆管に与える影響を調べることを目的として、6本の燃料ピンを対象に、金相試験 (燃料組織及び被覆管組織観察)、被覆管硬さ測定、被覆管密度測定、及び燃焼率測定を実施した。その結果、以下の内容を確認した。

- (1) 燃料組織は、コア燃料部の軸方向全域でペレット中央部にガスバブル領域が観察された。これにより軸方向上部及び下部の燃料温度が計算値より約 300℃高かったものと推定される。
- (2) FCCI は、粒界腐食が観察され最大 12 μm であった。
- (3) 軸方向上部の被覆管内面組織は鋭敏化が進んでいる。
- (4) 被覆管外表面の組織には異常がなく、水中長期保管の影響は見られなかった。
- (5) 被覆管の硬さ変化は、軸方向中央部が一番硬化しており、上端部では照射前と同程度の値になっていた。また温度と硬さ変化の関係では、照射温度上昇に伴ない変化量は直線的に減少し、メーカ間の差はない。
- (6) 被覆管密度変化は、最大で 0.24% の増加を示していた。
- (7) 燃焼率の実測値は、コア燃料部で 4~14% JYHIST 計算値より大きな値を示した。
- (8) 燃焼率の径方向分布については、実測値は JYHIST 計算値の分布に比べて、緩やかな減衰曲線となっている。

* 大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験室

目 次

1. ま え が き	1
2. 燃 料 ピ ン	2
3. 照 射 条 件	3
4. 照 射 後 試 験	4
4-1 金相試験	4
4-1-1 試料調製	4
4-1-2 試験結果	4
4-2 被覆管硬さ測定	5
4-2-1 測定方法	5
4-2-2 測定結果	5
4-3 被覆管密度測定	5
4-3-1 試料調製及び測定方法	6
4-3-2 測定結果	6
4-4 燃焼率測定	6
4-4-1 試料調製	6
4-4-2 測定結果	6
5. ま と め	8
6. 参 考 文 献	10

List of Table

Table 1	Fuel pin fabrication parameters	11
Table 2	Metallographic examination in AGF	12
Table 3	Summary data from ceramographs (PPJX12)	13
Table 4	Measurement condition and indentation position	14
Table 5	Summary of microhardness measurement of JOYO MK-I fuel cladding (PPJX12)	15
Table 6	Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6736 pin)	16
Table 7	Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6747 pin)	17
Table 8	Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6756 pin)	18
Table 9	Summary of density measurement	19
Table 10	Summary of burnup measurement by Nd-method (PPJX12)	20
Table 11	Calculation of effective fission yield for 674782 sample .	21
Table 12	Composition of spike solution and natural Neodymium	22
Table 13	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 670622 sample)	23
Table 14	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 674722 sample)	24
Table 15	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 674742 sample)	25
Table 16	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 674762 sample)	26
Table 17	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 674792 sample)	27
Table 18	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 6747B2 sample)	28
Table 19	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 6747E3 sample)	29
Table 20	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 6747G2 sample)	30
Table 21	Result of isotope analysis and burnup calculation (PPJX12, 678622 sample)	31

List of Figure

Fig. 1	JOYO MK-I core fuel pin	32
Fig. 2	Irradiation position of PPJX12 subassembly in JOYO MK-I core	33
Fig. 3	Fuel pin position in PPJX12 subassembly	34
Fig. 4	Burnup and fluence distribution (6706 pin)	35
Fig. 5	Burnup and fluence distribution (6736 pin)	36
Fig. 6	Burnup and fluence distribution (6747 pin)	37
Fig. 7	Burnup and fluence distribution (6755 pin)	38
Fig. 8	Burnup and fluence distribution (6756 pin)	39
Fig. 9	Burnup and fluence distribution (6786 pin)	40
Fig. 10	Temperature and linear power distribution (6706 pin).....	41
Fig. 11	Temperature and linear power distribution (6736 pin).....	42
Fig. 12	Temperature and linear power distribution (6747 pin).....	43
Fig. 13	Temperature and linear power distribution (6755 pin).....	44
Fig. 14	Temperature and linear power distribution (6756 pin).....	45
Fig. 15	Temperature and linear power distribution (6786 pin).....	46
Fig. 16	Flow diagram of metallographic examination in AGS	47
Fig. 17	Gas bubble region (D/D_0) as a function of linear heat rate. 48	
Fig. 18	Densified region (D/D_0) as a function of linear heat rate . 49	
Fig. 19	Residual gap size as a function of local burnup	50
Fig. 20	Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6736 pin) . 51	
Fig. 21	Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6747 pin).. 52	
Fig. 22	Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6756 pin).. 53	
Fig. 23	Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6736, 6747 and 6756 pins)	54
Fig. 24	Pin cutting diagram for density measurement of PPJX12	55
Fig. 25	Cladding density change (PPJX12, 6736 pin)	56
Fig. 26	Cladding density change (PPJX12, 6755 pin)	57
Fig. 27	Cladding density change (PPJX12, 6756 pin).....	58
Fig. 28	Cutting diagram of PPJX12 fuel pin for burnup measurement . 59	
Fig. 29	Specimen preparation process for burnup measurement in AGS. 60	
Fig. 30	Burnup axial distribution of PPJX12 (6747 pin)	61

Fig. 31 Burnup axial distribution of PPJX12 (6747 pin, Blanket).... 62
 Fig. 32 Comparison data for burnup radial distribution on various fuel pin in PPJX12 subassembly 63

List of Photo

Photo. 1 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6747 pin) 64
 Photo. 2 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12,6736 pin) 65
 Photo. 3 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6756 pin) 66
 Photo. 4 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6747B3 sample) 67
 Photo. 5 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12,6747B3 sample) 68
 Photo. 6 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6736A2 sample) 69
 Photo. 7 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6736A2 sample) 70
 Photo. 8 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12,675662 sample) . 71
 Photo. 9 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12,675662 sample). 72
 Photo. 10 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6747G3 sample, FCCI region) 73
 Photo. 11 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6736C2 sample, FCCI region) 74
 Photo. 12 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6756C2 sample, FCCI region) 75
 Photo. 13 Optical microstructures of the cladding (6736 pin, etched, K) 76
 Photo. 14 Optical microstructures of the cladding (6756 pin, etched, S) 77
 Photo. 15 Optical microstructures of the cladding (6747 pin, etched, R) 78

1 ま え が き

「常陽」MK - I 炉心燃料集合体 PPJX 12 は、炉心方向を C 面方向として、炉内位置 1 D 1 で 50 MW 出力上昇サイクルから 75 MW 第 6 サイクルまで照射された集合体であり、集合体の平均燃焼度は約 38,900 MWD / MTM (計算値) である。

照射後試験の目的は、1) Na 洗浄が不十分な集合体を水プールで保管した場合の影響の調査、及び 2) 高燃焼度照射後試験データの拡充を図ることである。

照射燃料試験室 (AGS) での試験が終了したので、その結果を報告する。AGS では、燃料ピンの破壊試験を実施した。対象となった燃料ピンは下記の 6 本である。

- (1) 集合体代表ピン (No. 6747 pin, カーペンター社製被覆管)
- (2) 集合体中心位置隣接ピン (No. 6736 pin, K 社製被覆管)
- (3) 同 上 (No. 6756 pin, S 社製被覆管)
- (4) 内 部 ピ ン (No. 6755 pin, 同 上)
- (5) コーナーピン (低出力ピン) (No. 6706 pin, K 社製被覆管)
- (6) コーナーピン (高出力ピン) (No. 6786 pin, S 社製被覆管)

上記のピンについて、照射後試験として (a) 金相試験 (燃料組織観察及び被覆管組織観察)、(b) 被覆管硬さ測定、(c) 被覆管密度測定、及び (d) 燃焼率測定を実施した。

2 燃 料 ピ ン

PPJX 12 集合体中の本照射後試験に供された燃料ピンを Fig. 1 に示し、またその仕様を Table 1 に示す。

3 照射条件

本集合体の炉心装荷位置を Fig. 2 に示す。また本集合体において破壊試験を実施した燃料ピンの集合体内装荷位置を Fig. 3 に示す。さらに集合体の照射条件を以下に記す。

- ① 燃焼度（集合体平均） 38,900 MWD / MTM
- ② 照射サイクル 50 MW 出力上昇第1サイクル～75 MW 第6サイクル
- ③ 集合体ピークフルエンス（ $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ ） $6.4 \times 10^{22} \text{ nvt}$
- ④ 線出力（集合体平均） 218 W / cm
- ⑤ 照射位置 1 D 1（Fig. 2を参照）

試験に供した各燃料ピンの燃焼度分布，中性子照射量分布，温度分布及び線出力分布について燃料部MK-I照射情報検索システムの実験結果を Fig. 4～Fig. 15 に示す。

4 照射後試験

4.1 金相試験

4.1.1 試料調製方法

金相試験工程を Fig. 16 に示す。また金相試験の実施内容を Table 2 に示す。

4.1.2 試験結果

6747 ピン（代表ピン）、6736 ピン（中心位置隣接ピン）及び 6756 ピン（中心位置隣接ピン）の代表的な金相写真を Photo 1～15 に示す。これらの金相写真より以下の結果が得られた。

(1) 燃料組織観察

6747 ピン、6736 ピン及び 6756 ピンの燃料組織は、断面中央部よりガスバブル領域、高密度化領域そして最外周部に不変化領域の 3 領域が順次存在しているのが観察された。燃料カラム中央部付近の試料に、ガスバブル領域の結晶粒が径方向へ伸長しているのが認められたが柱状晶には到っておらず中心空孔も見られなかった。各ピンとも最上部の試料を除きガスバブル領域内で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おいて微細（約 1 μm 以下）な核分裂生成物と見られる白色析出物が分布しているのが観察された。

各ピンの輪切試料につき画像解析を行った測定結果を Table 3 に示す。各ピンの燃料カラム上部及び下部で、ガスバブル領域（推定温度約 1,400 $^{\circ}\text{C}$ ）¹⁾ が認められたが、これは残留ギャップ幅が中央部に比べ開いており（Table 3 参照）、燃料-被覆管ギャップ熱伝達率の差により燃料温度が計算値（Table 3 参照）より約 300 $^{\circ}\text{C}$ ほど高かったと推定される。また、MK-I 燃料で現在まで得られている組織観察結果に PPJX 12 のデータを加えて Fig. 17～19 に示した。Fig. 17 及び Fig. 18 には燃料ペレットの各組織領域径（相対値 D/D_0 、 D_0 は燃料ペレット外径）の線出力依存性を示し、Fig. 19 には、残留ギャップ幅と局所燃焼度の関係を示した。

(2) FCCI の観察

燃料-被覆管の化学的相互作用（FCCI）は、各ピンとも燃料カラム上部試料の内表面に観察され、その形態は粒界腐食で、最大腐食量は 6740 ピン-約 10 μm （Photo 10 参照）、6736 ピン-約 9 μm （Photo 11 参照）6756 ピン-約 12 μm （Photo 12 参照）であった。

(3) 被覆管組織観察

電解腐食後の組織写真を Photo 13～15 に示す。K 材（6736 ピン）、S 材（6756 ピン）は、燃料カラム中央部から上部において粒界に多く炭化物析出が見られるが、K 材より S 材に析出量が多い。また R 材（6747 ピン）は上部で双晶変形した領域に炭化物が析出しており K 材、S 材、R 材とも上部においては、被覆管内面側で鋭敏化が進んでいるのが認められた。

また、被覆管外面側は内面側に比べて炭化物の析出が少く上部側の外表面に荒れが見られるがこの傾向は、同履歴の PPJX 13 の場合と同じであり Na 洗浄不足による影響は観察されず健全であった。

4.2 被覆管硬さ測定

4.2.1 測定方法

測定は L-2 セル内設置の遠隔操作型微小硬さ計（マイクロ・ビッカース法）により実施した。Table 4 に測定条件及び測定位置を示す。試験ピンは、6736（K 材）、6747（R 材）及び 6756（S 材）ピンである。

4.2.2 測定結果

ピン軸方向硬さ値は、Table 5 及び Fig. 20～22 に示すように各ピン共に燃料中心付近が高い値を示し燃料上端になるにつれ低下する傾向を示した。これらの硬さ値を照射前と比較すると燃料中心付近（温度 = 450～460℃、照射量 = $6 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ）では照射前より 52～68（Hv 500）硬化しており、燃料上端（温度 = 520℃、照射量 = $3.1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ）では照射前と同程度の硬さ値であった。

次に Table 6～8 に示す各測定点の硬さ値より、燃料中心付近の試料には被覆管外側の方が内側より高い硬さ値を示す傾向がある。この傾向は燃料上端側には見られない。

Fig. 23 に各ピン（各材質）ごとの温度と硬さ値変化の関係を示す。照射量が $3 \times 10^{22} (\text{n/cm}^2)$ 以上である試料の硬さ値変化は、温度が高くなるにつれ硬さ値変化（硬化量）が小さくなっており、520（℃）付近では照射前と同程度の硬さ値となっている。硬さ値変化は被覆管メーカー間の差はほとんどない。

4.3 被覆管密度測定試験

密度測定は、6736・6755 ピンはそれぞれ 6 箇所、6756 ピンは 4 箇所（いずれのピンも Base 材を含む）について行った。Fig. 24 に試料採取位置を示す。

4.3.1 試料調製及び測定方法

(1) 試料切断

マイクロソーを用いて測定試料(約 25 mm 長)を切断採取。

(2) 脱ミート

脱ミート装置を用いて被覆管内の燃料を除去。

(3) 被覆管端面研磨

耐水研磨紙# 120, # 240, # 600 を用いて各 5 分程度被覆管の端面を研磨。

(4) 被覆管酸洗浄及び純水による洗浄

8 モル硝酸 90 °C 中に 15 分浸した後, 純水による超音波洗浄を 15 分行い自然乾燥。

(5) 最終洗浄及び乾燥

測定直前に, アセトン, アルコールの順で各 1 分ごとの超音波洗浄をした後自然乾燥。

(6) 測定

読み取り限度 $1 \mu\text{g}$ の電子天秤により, 空気中での秤量, 界面活性剤入りの純水中秤量をくり返し測定。

(7) 密度計算

測定データを, 測定温度, 気圧等の条件により補正し密度値を算出する。

4.3.2 測定結果

試料の密度測定結果を Table 9 及び Fig. 25 ~ 27 に示す。

測定試料の最大密度変化は 0.24 % であり測定誤差の範囲 ($\pm 0.2 \%$) を超えスエリングが認められる。潜伏期間を終えスエリング開始直後の状態と考えられる。

4.4. 燃焼率測定

^{148}Nd を指標核種とした同位体希釈法により, 集合体代表ピンについて燃焼率の軸方向分布を, また高出力コーナーピン及び低出力コーナーピンについて軸方向中心位置における燃焼率の集合体内径方向分布を求めた。

4.4.1 試料調製方法

試料の採取位置を Fig. 28 に, また試料調製の方法及び手順を Fig. 29 に示す。

4.4.2 測定結果

今回得られた測定データと JYHIST コードによる計算値をまとめた結果を Table 10 に示す。燃焼率計算で使用した ^{148}Nd , ^{146}Nd 及び ^{145}Nd の実効核分裂収率の計算例(試料 No.6747 B2) を Table 11 に示す。今回の同位体希釈分析計算に使用したスパイク液の濃度及び組成のデー

タ（質量分析値）を Table 12 に示す。また質量分析から得られた同位体組成及び同位体希釈分析から得られた各同位体の原子数、さらにこれらのデータを基にして得られた燃焼率等の計算結果を Table 13 から Table 21 に示す。

次に燃料ピン（代表ピン）の軸方向における燃焼率分布を JYHIST コードによる計算値及び照射燃料集合体試験室（FMS）での γ -スキャン測定結果²⁾と比較して最大値で規格化したものを Fig. 30 及び Fig. 31 に示す。同様に集合体内径方向における燃焼率分布を比較したものを Fig. 32 に示す。

以上の結果から以下のことを確認した。

- ① PPJX 12 燃料集合体の代表ピンの燃料軸方向中心位置（試料 No. 6747 B 2）での燃焼率は、5.15 atom %（49,500 MWD/MTM）であった。
- ② 燃焼率の実測値と JYHIST コード計算値とを比較すると、コア燃料部では実測値の方が、JYHIST コード計算値より 4～14 % 大きい。またブランケット燃料部では JYHIST コード計算値（ γ 線発熱未補正）の方が実測値より 14～40 % 大きい。これらの傾向は、他の MK-I 炉心燃料集合体での測定結果と同じである。
- ③ 燃焼率の軸方向分布については、コア燃料部での実測値と γ -スキャン測定結果及び JYHIST コード計算値との比較では、燃料カラム下端から約 $\frac{1}{4}$ の位置における実測値の方が高いが、他は比較的一致している。またブランケット燃料部での比較では、実測値が γ -スキャン及び JYHIST コード計算値に対して低くなっている。
- ④ 燃焼率の径方向分布については、実測値と JYHIST 計算値の比較では、高出力コーナーピン（6786 ピン）の実測値が低い、他は良く一致している。また Fig. 32 から炉心第 1 列装荷位置での予想された径方向の勾配よりも実測値の方が、高出力コーナーピンと代表ピンにおいてより緩やかな勾配になっている。また最小二乗法による集合体内径方向 ピーキングファクターは、実測値で 1.025 計算値で 1.036 で実測値の方が低い値を示している。この傾向は、炉心第 1 列装荷の集合体に共通している。

5 ま と め

「常陽」MK-I炉心燃料集合体PPJX 12は、炉心装荷位置第1列の1D1にて50 MW出力上昇サイクルから75 MW第6サイクルまで照射された集合体であり、集合体の平均燃焼度計算値は約38,900 MWD/MTMである。この集合体は、「常陽」MK-I炉心の高燃焼集合体であるばかりでなく、高速炉燃料集合体の水プール保管技術のR&Dの一環として、Na洗浄不足状態での水プール保管試験に供されたものである。AGSでは、1)高燃焼度集合体の照射挙動データの充実、2)水プール保管中における被覆管に与える影響を調べることを目的として、6本の燃料ピンを対象に破壊試験を実施した。なお、代表ピンとして6747ピンを採用した。以下に結果を示す。

(1) 金相試験結果

AGSでは、代表ピン及び中心位置隣接ピン2本の計3本のピンを対象に試験を実施した。

- ・3本の燃料ピンの燃料組織は、コア燃料部の軸方向全域にわたって組織変化を生じており、ペレット中央部にガスバブル領域が存在する。これは軸方向上部及び下部の燃料温度が計算値より約300℃高かったことを示している。
- ・FCCIは、全ピンの軸方向上部試料にのみ粒界腐食が観察され、最大値は約12μmであった。
- ・被覆管組織は、軸方向上部において3本のピン(それぞれS材、K材、R材)の全ての被覆管内面で鋭敏化が進んでいるが、特に問題になる量ではない。
- ・被覆管外面の組織には、異常はなく健全であり、水中長期保管の影響は見られない。

(2) 被覆管硬さ測定結果

試験対象ピンは、金相試験と同様に代表ピン及び中心位置隣接ピンの3本(S材、K材、R材)であり、軸方向は、コア燃料中央部から上部にかけて各3箇所を測定した。その結果

- ・各ピンとも、軸方向中央部の硬さ値が一番硬化しており、燃料上端部では照射前と同程度の硬さ値になっていた。
- ・各測定試料の中性子照射量は $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 以上であり、温度と硬さ値の変化量との関係では、メーカー間では大差なく照射温度上昇に伴う硬さ変化量の減少が見られた。

(3) 被覆管密度測定

代表ピン、中心位置隣接ピン及び内部ピンの計3本を対象に測定した。

- ・測定試料の最大密度増加は0.24%であり、測定誤差の範囲を越え、スウェリングが認められた。

(4) 燃焼率測定試験結果

試験対象ピンは、代表ピン、高出力コーナーピン及び低出力コーナーピンの3本である。

- ・燃焼率の実測値は、コア燃料部で4～14% JYHIST計算値より大きい。
- ・燃焼率の軸方向分布については、コア燃料下端から約 $\frac{1}{4}$ の位置の実測値が計算値及びアスキャンプロフィールから少しずれて高い値を示しているが、他は実測値、計算値及びアスキャン

ロフィールともほぼ一致している。

- 燃焼率の集合体径方向分布については、代表ピンと高出力コーナープンの実測値は近い値を示しており、全体的に計算値の減衰曲線より緩やかな勾配の減衰曲線が得られた。

6 参 考 文 献

- 1) 照射燃料中の保持 Xe 濃度の測定と FP ガス放出挙動の評価 PNC SN 941 85 - 141
- 2) 「常陽」MK-I 炉心燃料 (PPJX 12) の照射後試験 (1) - 集合体および燃料要素の非破壊試験 - PNC SN 941 85 - 017

デ ー タ 集

Table 1 Fuel pin fabrication parameters

S / A name	PPJX12	Pin No.	No. 6706, No. 6736, No. 6747,	No. 6755 No. 6756 No. 6786
Fuel				
Fuel form	Flat end solid pellet			
Pellet diameter (mm)	5.4			
Pellet density (% T.D)	93.5			
Fuel composition	17.7 w/o PuO ₂ - UO ₂			
U - 235 enrichment (%)	23			
Pu isotopic composition (%)	Pu 239 / 240 / 241 / 242 76.6 / 19.0 / 3.7 / 0.7			
O / M ratio	1.98 ~ 2.0			
Cladding				
Type and work	SUS 316, 10 % cold work			
Outer/inner diameter (mm)	6.3 / 5.6			
Lot identification	No. 6747 : R 001 No. 6755 : S 008 No. 6706 : K 001 No. 6756 : S 012 No. 6736 : K 002 No. 6786 : S 014			
Fuel pin				
Pin length (mm)	1910			
Pin outer diameter (mm)	6.3			
Fuel column length (mm)	600			
Plenum length (mm)	408			
Blanket length (mm)	{ 上部 400 下部 400			
Fuel/cladding dia. gap (mm)	0.2			
Pin spacing & support	Wrapping wire			

Table 2 Metallographic examination in AGF

	as polished		etched	
	仕 様	目 的	仕 様	目 的
燃料/被覆管 共 通	× 200 部分写真	被覆管肉厚 ギャップ観察		
燃 料	× 10.5 全面写真 × 75 全面写真 × 100 部分写真 × 400 部分写真	燃料全体組織観察 ボイド分布測定 ボイド分布測定	× 10.5 全面写真 × 75 全面写真 × 100 部分写真 × 400 部分写真	燃料全体組織観察 }詳細燃料組織観察
被 覆 管	× 200~750 部分写真	FCCI	× 200 部分写真 × 400 部分写真 × 750 部分写真	位置の同定 結晶粒測定 炭化物観察

Table 3 Summary data from ceramographs (PPJX 12)

Pin No	Section No	Distance from Core Bottom (mm)	Restructured Region Dia. (mm)					Residual Diametral Gap Size (μm)	Fuel Outer Dia. (mm)	Clad Dia. (mm)		Linear Heat Rate (W/cm)	Burnup (MWD/MTM)	Fuel Center Temperature Calculated (°C)
			Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Densified Region	Dark Ring Region			Outer	Inner			
6736	673641	34	None		3.211	4.623		90	5.538	6.320	5.628	165	29,430	994
	6736A2	270	"		3.872	4.868		59	5.567	6.325	5.626	262	46,050	1591
	6736C2	420	"		3.341	4.476		68	5.554	6.315	5.622	240	41,730	1540
	6736G2	590	"		2.799	4.101		94	5.530	6.313	5.624	146	25,420	1102
6747	674763	35	None		3.089	4.493		86	5.541	6.323	5.627	167	29,640	1000
	674793	154	"		2.999	4.381		70	5.562	6.328	5.632	235	41,740	1400
	6747B3	285	"		3.250	4.458		45	5.594	6.328	5.639	265	46,440	1600
	6747E2	420	"		3.032	4.407		55	5.581	6.329	5.636	241	42,030	1540
	6747G3	589	"		2.712	4.388		76	5.543	6.310	5.619	147	25,600	1100
6756	675642	35	None		2.829	4.667		82	5.563	6.333	5.645	167	29,870	942
	675662	270	"		3.047	4.234		44	5.591	6.328	5.635	266	46,750	1615
	675683	414	"		3.157	4.397		41	5.581	6.311	5.622	246	42,760	1560
	6756C2	585	"		3.348	4.342		106	5.511	6.307	5.617	148	25,800	1115

Table 4 Measurement condition and indentation position

1) Measurement Condition

測定方法 試験法	圧子荷重 (g)	保持時間 (秒)
正常硬さ測定	500	30

2) Indentation Position

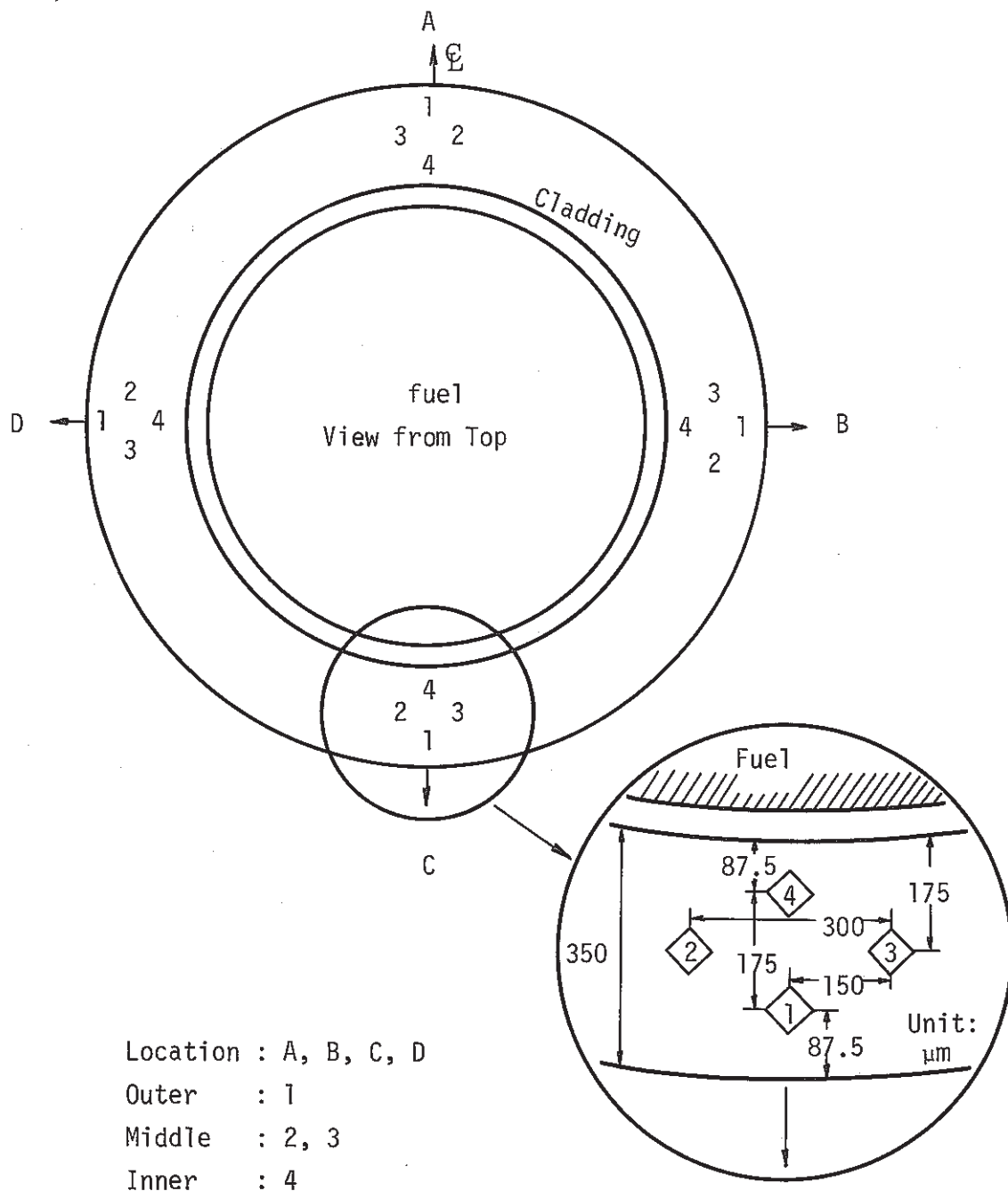


Table 5 Summary of microhardness measurement of JOYO MK-I fuel cladding (PPJX12)

Specimen No		6736A2	6736C	6736G2
D.F.C.B. (mm)		269.7	470.2	589.7
Hardness Number (Hv500)		316	276	253
(*1) ΔH_v (Hv500)		63	23	0
(*2) ΔH_v rate (%)		24.9	9.1	0
(*3)	Clad. midwall temp. ($^{\circ}\text{C}$)	450	500	520
	Fluence ($\times 10^{22}\text{n/cm}^2$)	6.1	4.9	3.1

Cladding Lot No
K002
Unirrad. Hardness
253 (Hv500)

Specimen No		6747B3	6747E2	6747G3
D.F.C.B. (mm)		284.7	419.5	589.1
Hardness Number (Hv500)		290	250	227
(*1) ΔH_v (Hv500)		68	28	5
(*2) ΔH_v rate (%)		30.6	12.6	2.3
(*3)	Clad. midwall temp. ($^{\circ}\text{C}$)	460	490	520
	Fluence ($\times 10^{22}\text{n/cm}^2$)	6.2	5.5	3.1

Cladding Lot No
R001
Unirrad. Hardness
222 (Hv500)

Specimen No		675662	675683	6756C2
D.F.C.B. (mm)		269.9	413.5	584.5
Hardness Number (Hv500)		317	286	258
(*1) ΔH_v (Hv500)		52	21	-7
(*2) ΔH_v rate (%)		19.6	7.9	-2.6
(*3)	Clad. midwall temp. ($^{\circ}\text{C}$)	455	490	520
	Fluence ($\times 10^{22}\text{n/cm}^2$)	6.2	5.5	3.1

Cladding Lot No
S012
Unirrad. Hardness
265 (Hv500)

- (*1) : ΔH_v = Hardness Number - Unirrad. Hardness
 (*2) : ΔH_v Rate = ΔH_v / Unirrad. Hardness
 (*3) : Fluence ($E \geq 0.1$ MeV)

Table 6 Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6736 pin)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6736	
Specimen No.	6736A2				
D.F.C.B.	269.7 (mm)		D.F.P.B.	731.7 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	320	307	315	307	312
B	312	315	309	307	311
C	330	326	318	309	321
D	324	315	318	315	318
RING AVERAGE	322	316	315	310	316

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6736	
Specimen No.	6736C2				
D.F.C.B.	470.2 (mm)		D.F.P.B.	932.2 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	282	268	276	271	274
B	282	273	276	273	276
C	278	268	276	282	276
D	280	278	278	276	278
RING AVERAGE	281	272	277	276	276

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6736	
Specimen No.	6736G2				
D.F.C.B.	589.7 (mm)		D.F.P.B.	1051.7 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	251	249	262	255	254
B	249	249	247	253	250
C	258	253	239	251	250
D	258	253	253	258	256
RING AVERAGE	254	251	250	254	253

(Hv500)

Table 7 Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6747 pin)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6747	
Specimen No.	6747B3				
D.F.C.B.	284.7 (mm)		D.F.P.B.	746.7 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	291	293	296	282	291
B	309	293	287	291	295
C	291	285	291	280	287
D	287	291	282	285	286
RING AVERAGE	295	291	289	285	290

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6747	
Specimen No.	6747E2				
D.F.C.B.	419.5 (mm)		D.F.P.B.	881.5 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	268	258	262	251	260
B	253	264	245	239	250
C	247	245	243	241	244
D	255	251	243	239	247
RING AVERAGE	256	255	248	243	250

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6747	
Specimen No.	6747G3				
D.F.C.B.	589.1 (mm)		D.F.P.B.	1015.1 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	231	235	224	220	228
B	220	224	239	238	230
C	207	221	230	216	219
D	224	239	239	224	232
RING AVERAGE	221	230	233	225	227

(Hv500)

Table 8 Microhardness of fuel cladding (PPJX12, 6756 pin)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6756	
Specimen No.	675662				
D.F.C.B.	269.9 (mm)		D.F.P.B.	731.9 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	324	315	320	303	316
B	324	326	320	318	322
C	326	324	320	318	322
D	318	307	309	298	308
RING AVERAGE	323	318	317	309	317

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6756	
Specimen No.	675683				
D.F.C.B.	413.5 (mm)		D.F.P.B.	875.5 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	291	291	287	287	289
B	293	285	291	280	287
C	293	287	287	276	286
D	285	282	285	280	283
RING AVERAGE	291	286	288	281	286

(Hv500)

S/A NAME	PPJX12		PIN NO.	6756	
Specimen No.	6756C2				
D.F.C.B.	584.5 (mm)		D.F.P.B.	1046.5 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	258	255	259	258	258
B	255	259	258	258	258
C	258	258	259	259	259
D	255	262	258	253	257
RING AVERAGE	257	259	259	257	258

(Hv500)

Table 9 Summary of density measurement

Pin No.	Section No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Fast Fluence (N/cm ² ×10 ²²)	Cladding Mid-Wall Temp. (°C)	Density (g/CC)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
6736	67362	88.5 - 112.5	0.2	370	7.973	(Base)
	67366	525.5 - 554.5	4.9	406	7.962	0.14
	67368	625.5 - 654.5	5.8	434	7.959	00.18
	6736A3	732.0 - 761.5	6.1	466	7.957	0.20
	6736C1	847.5 - 872.2	5.6	496	7.958	0.19
	6736E	942.5 - 966.5	4.5	518	7.962	0.14
6755	67552	82.5 - 107.5	0.2	370	7.970	(Base)
	67554	525.5 - 554.5	4.9	406	7.965	0.06
	67556	625.5 - 654.5	5.9	434	7.957	0.16
	67558	732.5 - 761.5	6.2	468	7.954	0.2
	6755A	847.5 - 871.5	5.8	498	7.961	0.11
	6755D	958.5 - 985.5	4.5	520	7.965	0.06
6756	67562	82.5 - 106.5	0.2	370	7.969	(Base)
	675663	732.2 - 761.5	6.2	468	7.951	0.23
	675682	840.4 - 865.7	5.7	498	7.950	0.24
	6756A	942.5 - 966.5	4.5	520	7.959	0.13

Table 10 Summary of burnup measurement by Nd - method (PPJX12)

Pin No.	Sample No.	Distance from ¹⁾ core fuel bottom (mm)	Pu content ²⁾ (atom %)	Burn up (atom %)	
				Calculated ³⁾	Measured ⁴⁾
6706	670622	270.0 ~ 274.6	17.084	4.64	4.95
6747	674722	-100.2 ~ -95.4	0.908	0.177	0.125
	674742	-22.4 ~ -17.8	1.079	0.334	0.293
	674762	19.8 ~ 24.8	17.259	3.11	3.39
	674792	139.9 ~ 144.6	17.182	4.31	4.86
	6747B2	269.9 ~ 274.9	17.051	4.83	5.15
	6747E3	419.8 ~ 424.8	17.061	4.28	4.63
	6747G2	575.1 ~ 579.5	17.269	2.69	3.07
6786	678622	269.4 ~ 274.2	17.080	4.99	5.20

- 1) Distance from core fuel bottom - 462 (mm)
- 2) $\text{Pu}/(\text{Pu} + \text{U}) \times 100$
- 3) Calculated by JYHIST code
- 4) Measured by ^{148}Nd monitor method

Table 11 Calculation of effective fission yield for 6747B2 sample

Nuclide	Composition (Atom Fraction)	Fission Cross Section [barn]	Nd-148		Nd-146		Nd-145	
			Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield	Fission Yield [%]	Fractional Fission Yield
U 233	nd	- ¹⁾	1.14 ²⁾	-	3.20 ²⁾	-	4.10 ²⁾	-
U 234	0.001111	- ¹⁾	1.44 ²⁾	-	3.08 ²⁾	-	4.00 ²⁾	-
U 235	0.172055	1.63E+00 ¹⁾	1.68 ³⁾	0.821	2.94 ³⁾	1.436	3.76 ⁴⁾	1.837
U 236	0.007361	1.57E-01 ¹⁾	1.81 ²⁾	0.004	3.06 ²⁾	0.006	3.77 ²⁾	0.008
U 238	0.640964	6.05E-02 ¹⁾	2.00 ³⁾	0.161	3.40 ³⁾	0.253	3.50 ²⁾	0.271
Pu238	0.000244	- ¹⁾	1.76 ²⁾	-	2.79 ²⁾	-	3.24 ²⁾	-
Pu239	0.131344	1.70E+00 ¹⁾	1.65 ³⁾	0.641	2.46 ³⁾	0.955	3.01 ³⁾	1.169
Pu240	0.034881	5.10E-01 ¹⁾	1.84 ²⁾	0.058	2.83 ²⁾	0.089	3.34 ²⁾	0.105
Pu241	0.003062	2.16E+00 ¹⁾	1.94 ²⁾	0.022	3.01 ²⁾	0.035	3.52 ²⁾	0.040
Pu242	0.000979	4.10E-01 ¹⁾	2.04 ²⁾	0.001	3.10 ²⁾	0.002	3.70 ²⁾	0.003
Effective Fission Yield [%]			1.71		2.79		3.43	

Note; nd=not detected

Fractional Fission Yield=(AF)(CS)(FY)/SUM(AF)(CS)

AF:atom fraction of U and Pu(PIE data) CS:fission cross

FY:fission yield

Effective Fission yield=SUM(Fractional Fission yield)

1)SMART code

2)TRG-2143-R

3)ICP-1050-1

4)AERE-R-8753

Table 12 Composition of spike solution and natural Neodymium

スパイク液中の原子数 (atoms/ml)	U 233	4.3914×10^{18}
	Pu 242	7.9674×10^{17}
	Nd 150	7.1740×10^{15}
天然ネオジムの同位体比	Nd 142 / Nd 150	4.824980
	Nd 145 / Nd 150	1.472180
	Nd 146 / Nd 150	3.050830
	Nd 148 / Nd 150	1.021325
ネオジムスパイクの 同位体比	Nd 142 / Nd 150	0.008937
	Nd 145 / Nd 150	0.004336
	Nd 146 / Nd 150	0.009122
	Nd 148 / Nd 150	0.007046
ウランスパイクの 同位体比	U 234 / U 233	0.014108
	U 235 / U 233	0.000401
	U 238 / U 233	0.006410
プルトニウムスパイクの 同位体比	Pu 239 / Pu 242	0.001309
	Pu 240 / Pu 242	0.013696
	Pu 241 / Pu 242	0.000859

Table 14 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 674722 w sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6747
SAMPLE NO. ; 674722W	SAMPLE POSITION ; -100.2"-95.4 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 0.500

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.000011	0.001897	0.000071	-(a)	
0.025979	0.000309	0.001880	0.000075	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.000077	0.012693	0.000100	0.000185	-(a)	
0.000077	0.020866	0.000545	0.520160	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.012428	4.064756	3.864919	3.146153	2.813886	1.714222
0.015996	1.011802	0.969416	0.791437	0.711823	0.435190

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.0011	0.1893	0.0071	99.8025		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.0076	98.7113	1.2529	0.0099	0.0183		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0748	24.4624	23.2597	18.9341	16.9344	10.3165	6.0182

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 0.908 / 0.912

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.5634E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;	6.1509E+16	1.0037E+17	1.1286E+17
EFFECTIVE FISSION YIELD ;	1.92E-02	3.08E-02	3.37E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;	3.2036E+18	3.2586E+18	3.3491E+18
BURNUP (atom%)#	0.125	0.127	0.130
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	1110	1130	1160

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.12 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 16 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 674762 sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6747
SAMPLE NO. ; 674762	SAMPLE POSITION ; 19.8~24.8 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 1.000

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001687	0.276425	0.009271	-(a)	
0.081178	0.002622	0.276220	0.009298	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001666	0.259099	0.022726	0.007158	-(a)	
0.001666	0.260037	0.023562	0.077976	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.011346	5.969447	5.327622	4.050351	3.284007	1.991583
0.012276	4.648883	4.150224	3.158901	2.561371	1.554125

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1310	21.4719	0.7201	77.6770		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1291	77.4804	20.0751	1.7608	0.5546		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0524	27.5924	24.6257	18.7218	15.1796	9.2057	4.6223

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.259 / 17.356

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.5237E+21

NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		1.5147E+18	2.4902E+18	3.0844E+18
EFFECTIVE FISSION YIELD	;	1.71E-02	2.79E-02	3.43E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**	;	8.8581E+19	8.9253E+19	8.9923E+19
BURNUP (atom%)#	;	3.39	3.42	3.44
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	;	32600	32800	33100

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.04 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 18 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 6747B2 sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6747
SAMPLE NO. ; 6747B2	SAMPLE POSITION ; 269.9~274.9 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 1.000

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001712	0.265122	0.011342	-(a)		
0.083013	0.002659	0.265259	0.011337	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.001858	0.265571	0.023310	0.007451	-(a)		
0.001858	0.266640	0.024213	0.001899	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.001752	5.780260	5.167048	3.947203	3.221417	1.961613	-(a)
0.010623	4.874095	4.351537	3.321787	2.717168	1.654222	-(b)

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1339	20.7422	0.8874	78.2365		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1431	77.0303	20.4570	1.7956	0.5740		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0083	27.4215	24.5124	18.7255	15.2824	9.3059	4.7440

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.051 / 17.146

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.4441E+21

NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		2.2708E+18	3.7174E+18	4.5311E+18
EFFECTIVE FISSION YIELD	;	1.71E-02	2.79E-02	3.43E-02
NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;		1.3279E+20	1.3324E+20	1.3210E+20
BURNUP (atom%)#	;	5.15	5.17	5.13
SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##	;	49500	49700	49300

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.04 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 19 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 6747E3 sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6747
SAMPLE NO. ; 6747E3	SAMPLE POSITION ; 419.8~424.8 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 1.000

ISOTOPIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001703	0.269107	0.010507	-(a)		
0.001846	0.002653	0.268698	0.010494	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.001987	0.262698	0.023837	0.007360	-(a)		
0.001987	0.263625	0.023846	0.000401	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.009980	5.765218	5.158550	3.939502	3.212136	1.960021	-(a)
0.005236	4.803822	4.289413	3.278447	2.672396	1.629686	-(b)

ISOTOPIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1329	21.0024	0.8200	78.0447		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1533	77.1675	20.2718	1.8394	0.5680		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0474	27.3942	24.5115	18.7191	15.2629	9.3133	4.7516

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.061 / 17.156

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.4854E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	2.0655E+18	3.4072E+18	4.1831E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.79E-02	3.43E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	1.2079E+20	1.2212E+20	1.2195E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	4.63	4.68	4.68
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	44600	45000	45000

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.04 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 20 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 6747G2 sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6747
SAMPLE NO. ; 6747G2	SAMPLE POSITION ; 575.1~579.5 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 1.000

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]			
nd	0.001715	0.279245	0.008485	-(a)		
0.085469	0.002683	0.279433	0.008489	-(b)		
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]			
0.001653	0.256259	0.023224	0.007079	-(a)		
0.001653	0.257044	0.023207	0.0081329	-(b)		
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]	
0.006993	5.942677	5.296322	4.037796	3.266215	1.987310	-(a)
0.002069	4.423248	3.948464	3.010244	2.439712	1.497687	-(b)

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1330	21.6562	0.6580	77.5527		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1283	77.6268	19.8926	1.8028	0.5495		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0325	27.5925	24.5914	18.7479	15.1654	9.2273	4.6431

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.269 / 17.366

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.4011E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	1.2993E+18	2.0668E+18	2.5351E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.79E-02	3.44E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>	7.5982E+19	7.4077E+19	7.3694E+19
<u>BURNUP (atom%)#</u>	3.07	2.99	2.98
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	29500	28800	28600

NOTE ; nd=not detected

* Distance from core fuel bottom

** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)

1.04 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 21 Result of isotope analysis and burnup calculation
(PPJX12, 678622 sample)

S/A NO.(FAB) ; PPJX12	PIN NO.(PIE) ; 6786
SAMPLE NO. ; 678622	SAMPLE POSITION ; 269.4*274.2 (mm)*

VOLUME RATIO OF SPIKE SOLUTION TO SAMPLE SOLUTION ; 1.000

ISOTOPIIC RATIO OF U,Pu,Nd IN (a)SAMPLE AND (b)SAMPLE-SPIKE MIXTURE ;

[U233/238]	[U234/238]	[U235/238]	[U236/238]		
nd	0.001702	0.264302	0.011579	-(a)	
0.074166	0.002530	0.264344	0.011551	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.001534	0.266259	0.023369	0.007482	-(a)	
0.001534	0.267582	0.024866	0.073911	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	5.764500	5.167824	3.935581	3.216799	1.959998
nd	4.947733	4.436755	3.375908	2.761884	1.684664

ISOTOPIIC COMPOSITION OF U,Pu,Nd IN SAMPLE (atom%) ;

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
nd	0.1332	20.6877	0.9063	78.2728		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.1181	77.0034	20.5028	1.7995	0.5761		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	27.3917	24.5564	18.7011	15.2856	9.3135	4.7518

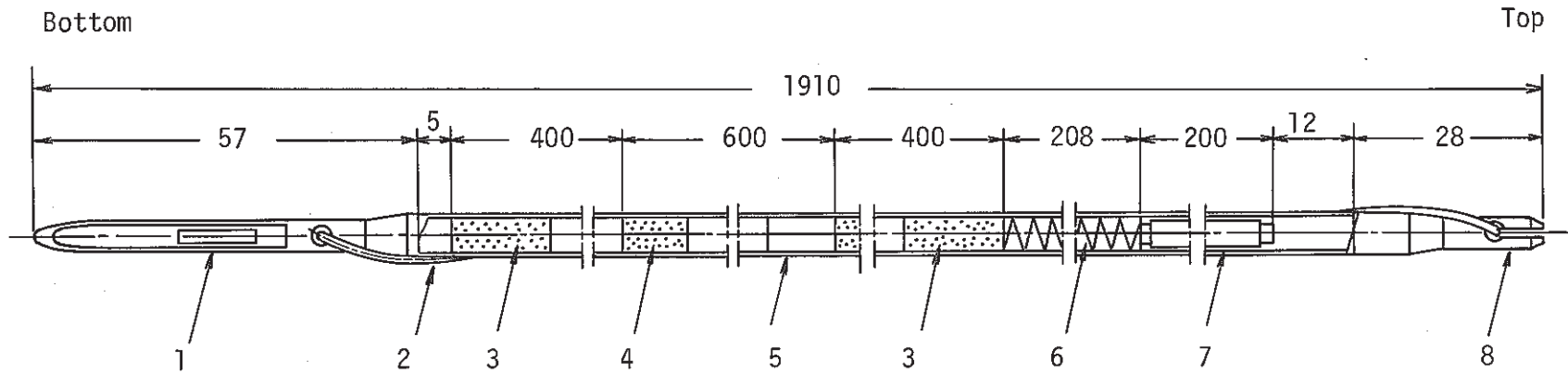
Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.080 / 17.175

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 2.7355E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	2.5683E+18	4.1901E+18	5.0972E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.71E-02	2.79E-02	3.43E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>	1.5020E+20	1.5018E+20	1.4861E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	5.20	5.20	5.15
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	50000	50000	49500

NOTE ; nd=not detected

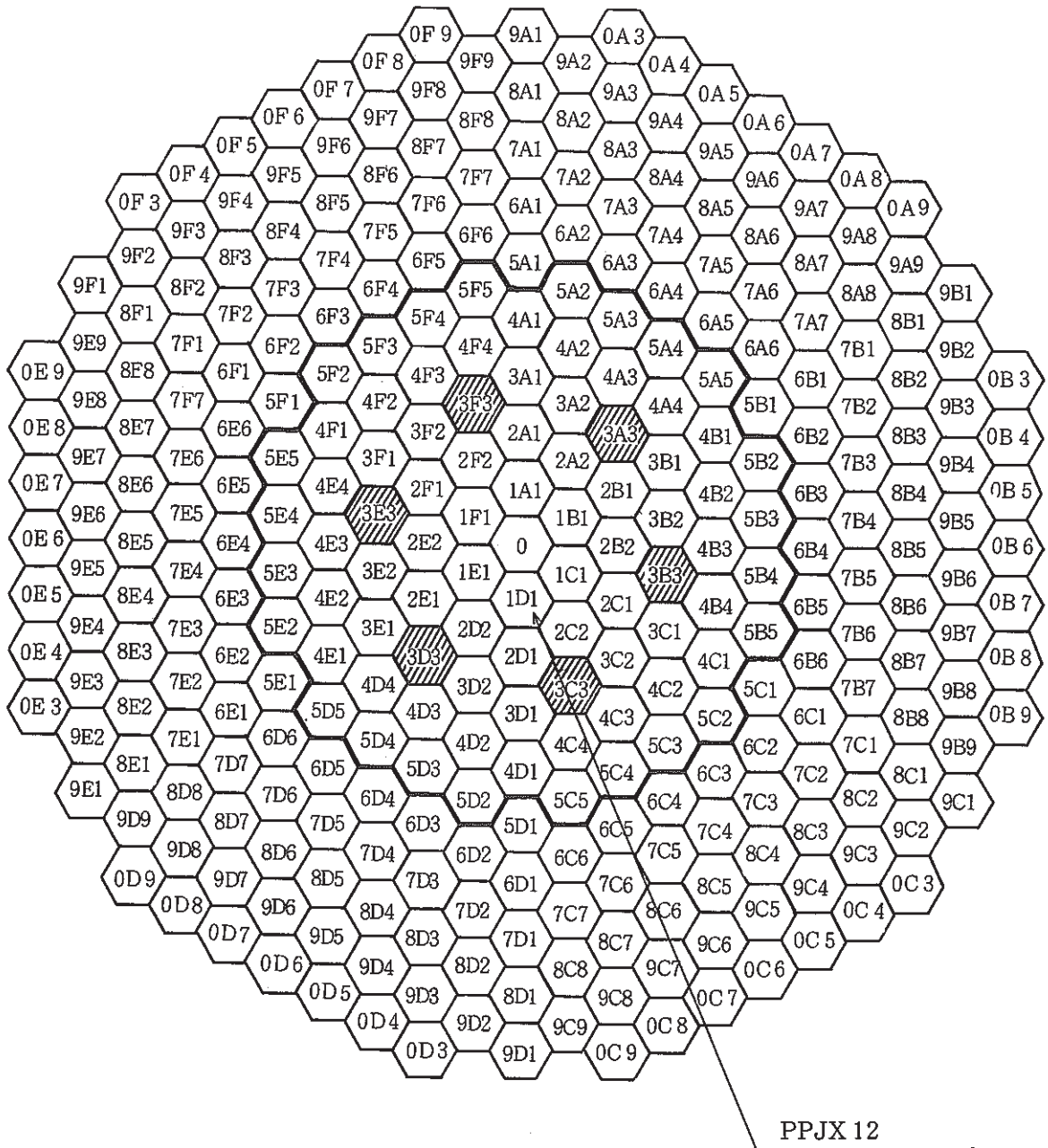
- * Distance from core fuel bottom
- ** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
- # BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)
- ## 1.04 atom% BU=10000 MWD/MTM BU



8	upper end plug	SUS 316	
7	sleeve	SUS 316	
6	spring	SUS 316	
5	cladding	SUS 316	I.D. 5.6φ , O.D. 6.3φ
4	core pellet	PuO ₂ -UO ₂	
3	blanket	UO ₂	
2	wrapping wire	SUS 316	1.2φ
1	lower end plug	SUS 316	
No.	parts name	Material	Remarks

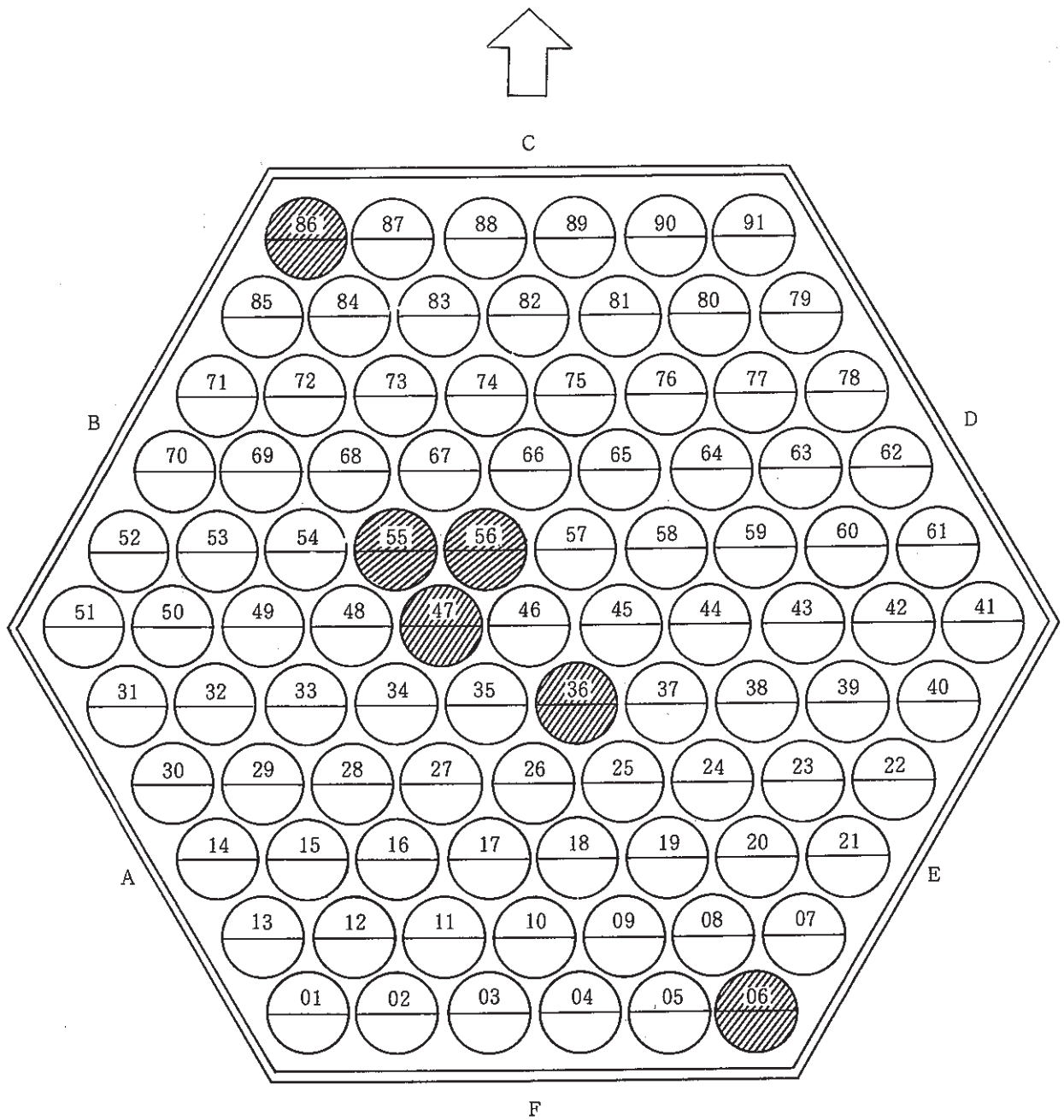
Fig. 1 JOYO MK-I core fuel pin

炉内照射位置



注)  : 制御棒

Fig.2 Irradiation position of PPJX12 subassembly in JOYO MK-I core



注) ← : 炉心方向

● : 試験対象ピン

Fig.3 Fuel pin position in PPJX12 subassembly

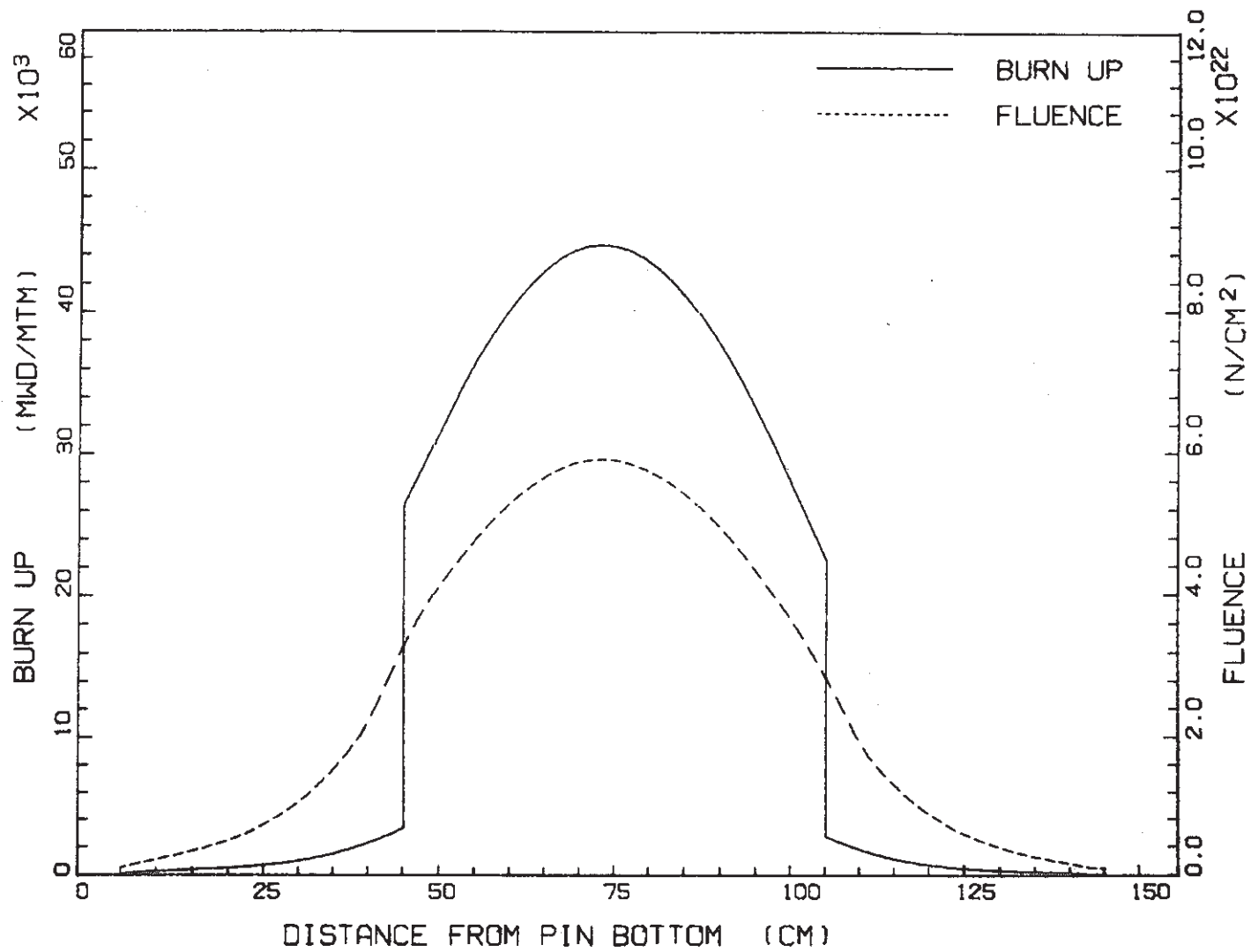


Fig. 4 Burnup and fluence distribution (6706 pin)

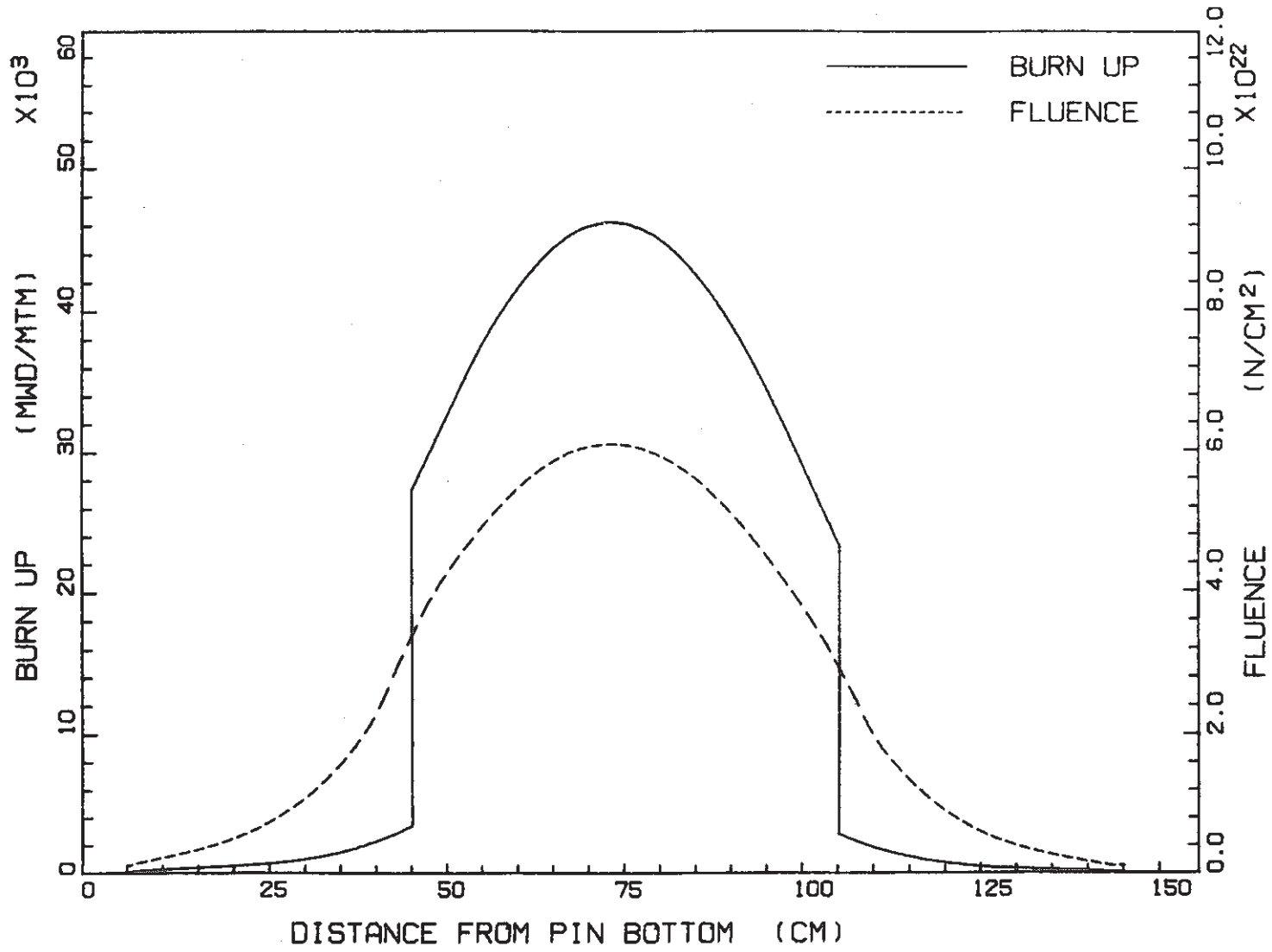


Fig. 5 Burnup and fluence distribution (6736 pin)

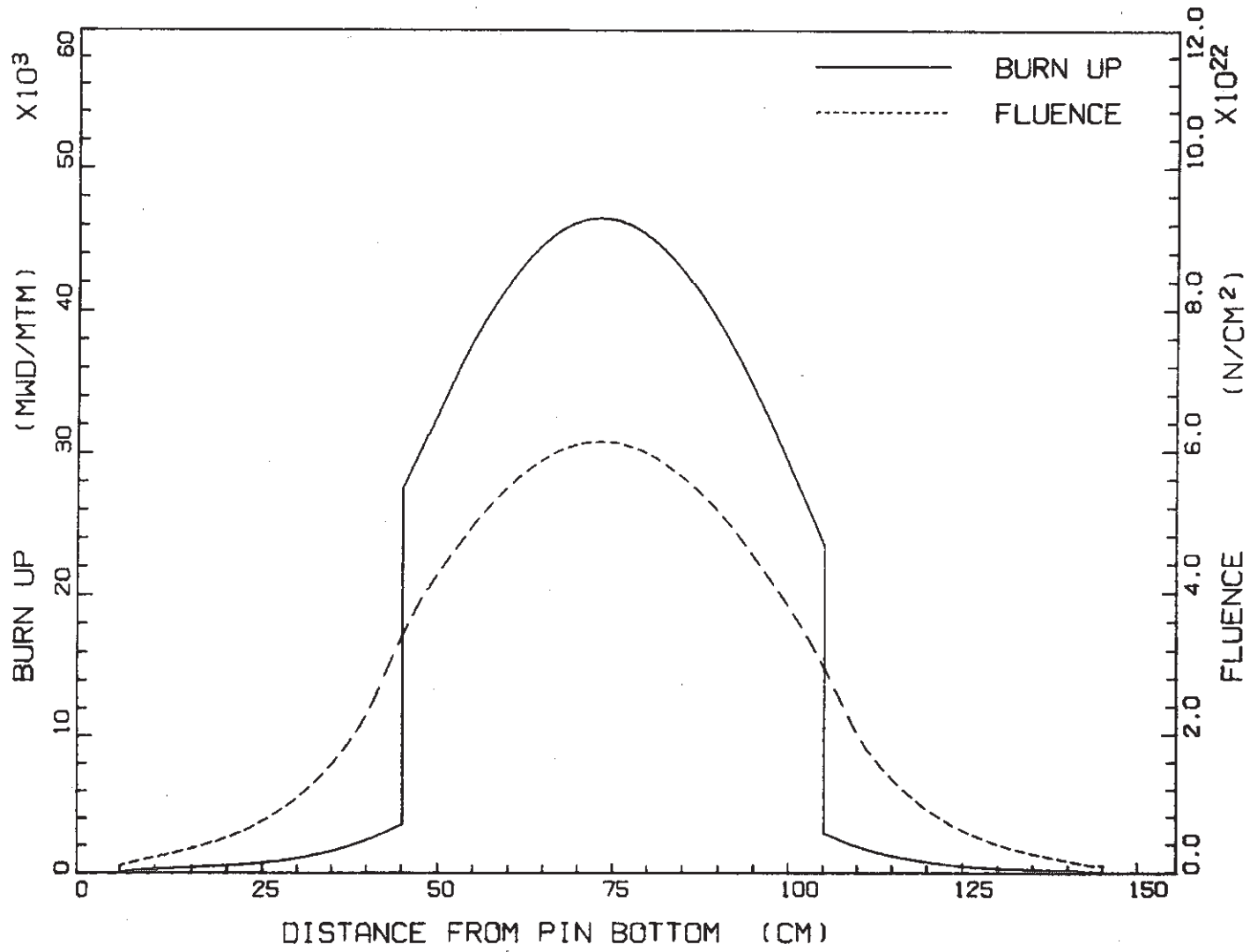


Fig. 6 Burnup and fluence distribution (6747 pin)

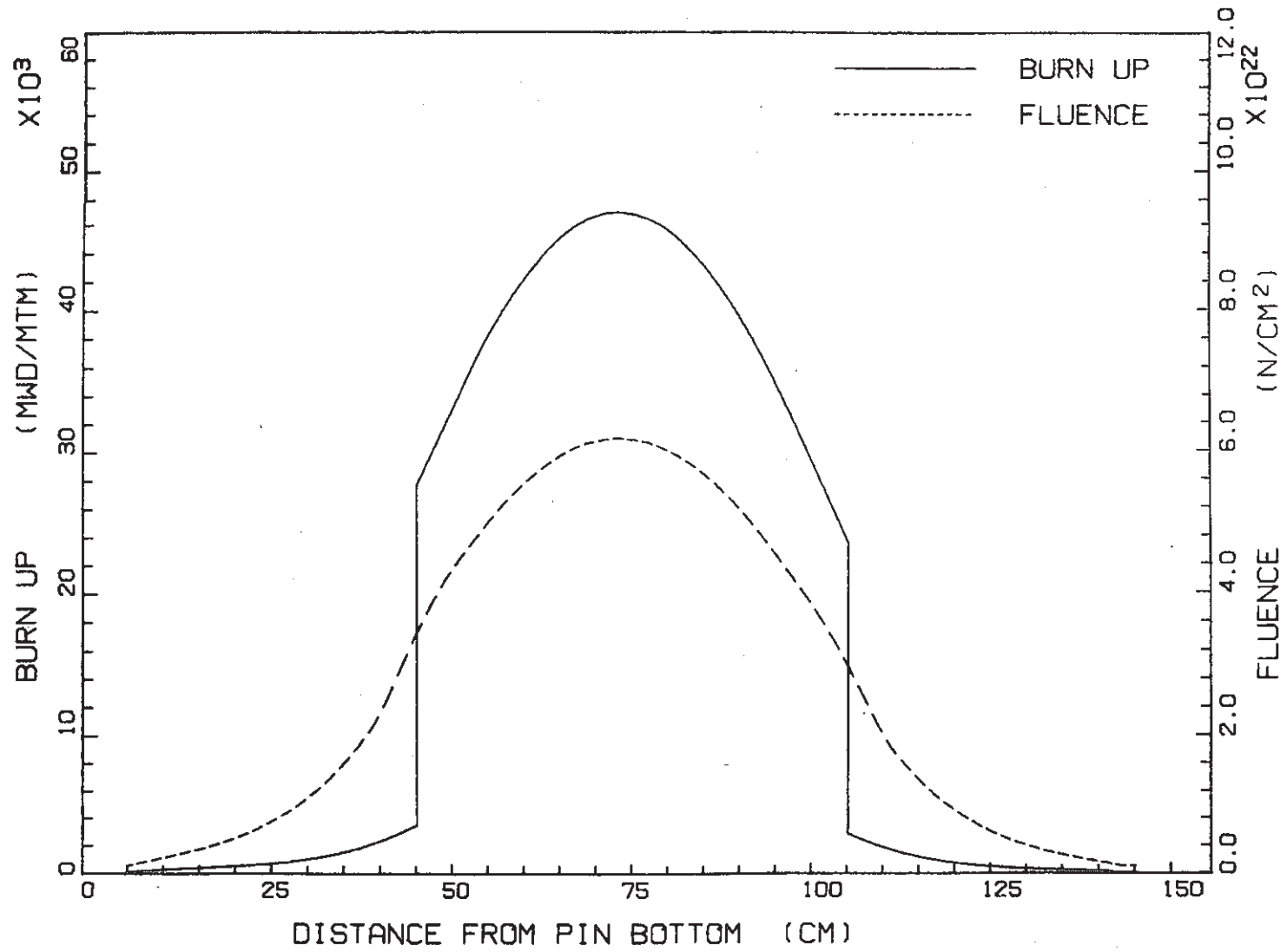


Fig. 7 Burnup and fluence distribution (6755 pin)

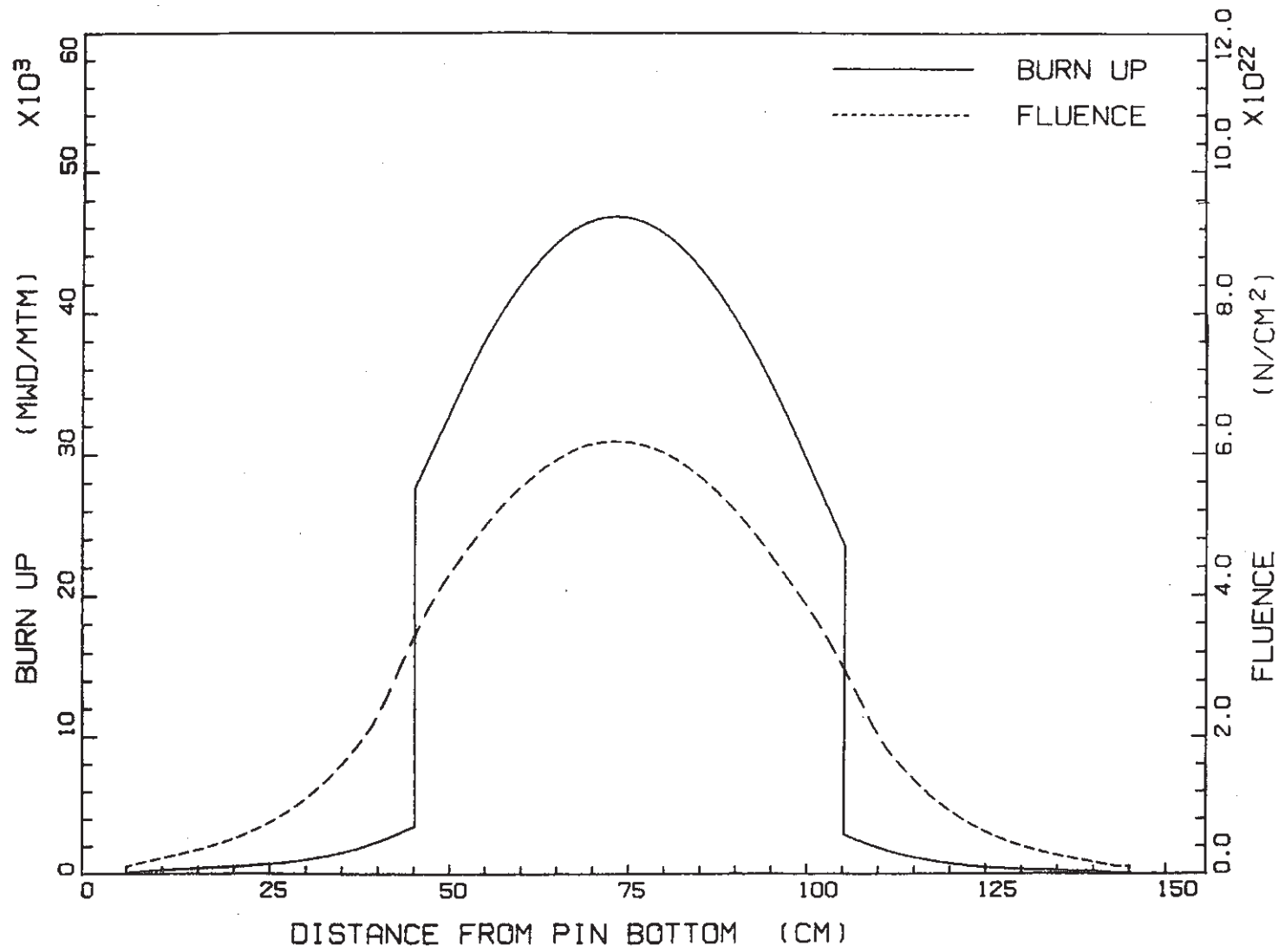


Fig. 8 Burnup and fluence distribution (6756 pin)

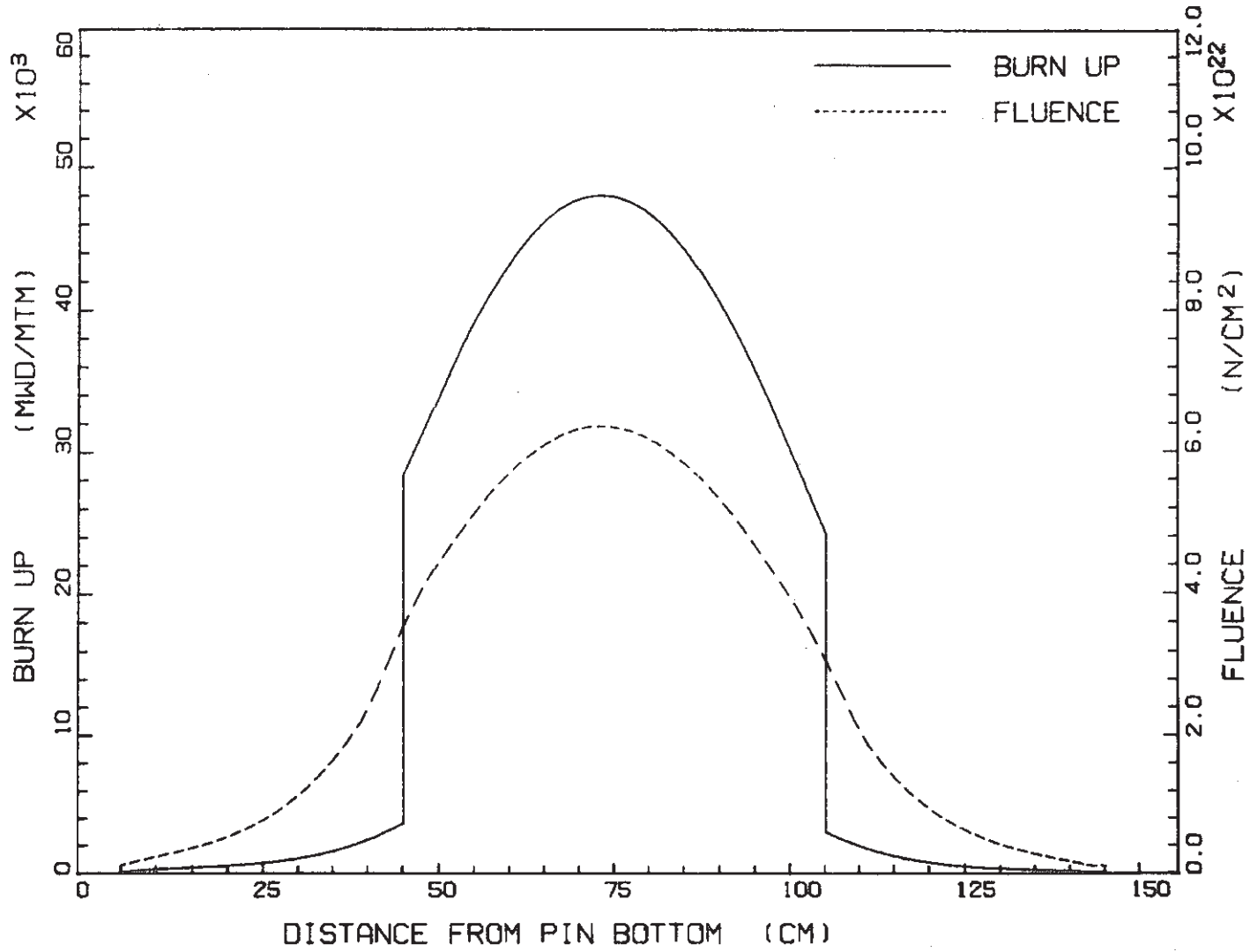


Fig. 9 Burnup and fluence distribution (6786 pin)

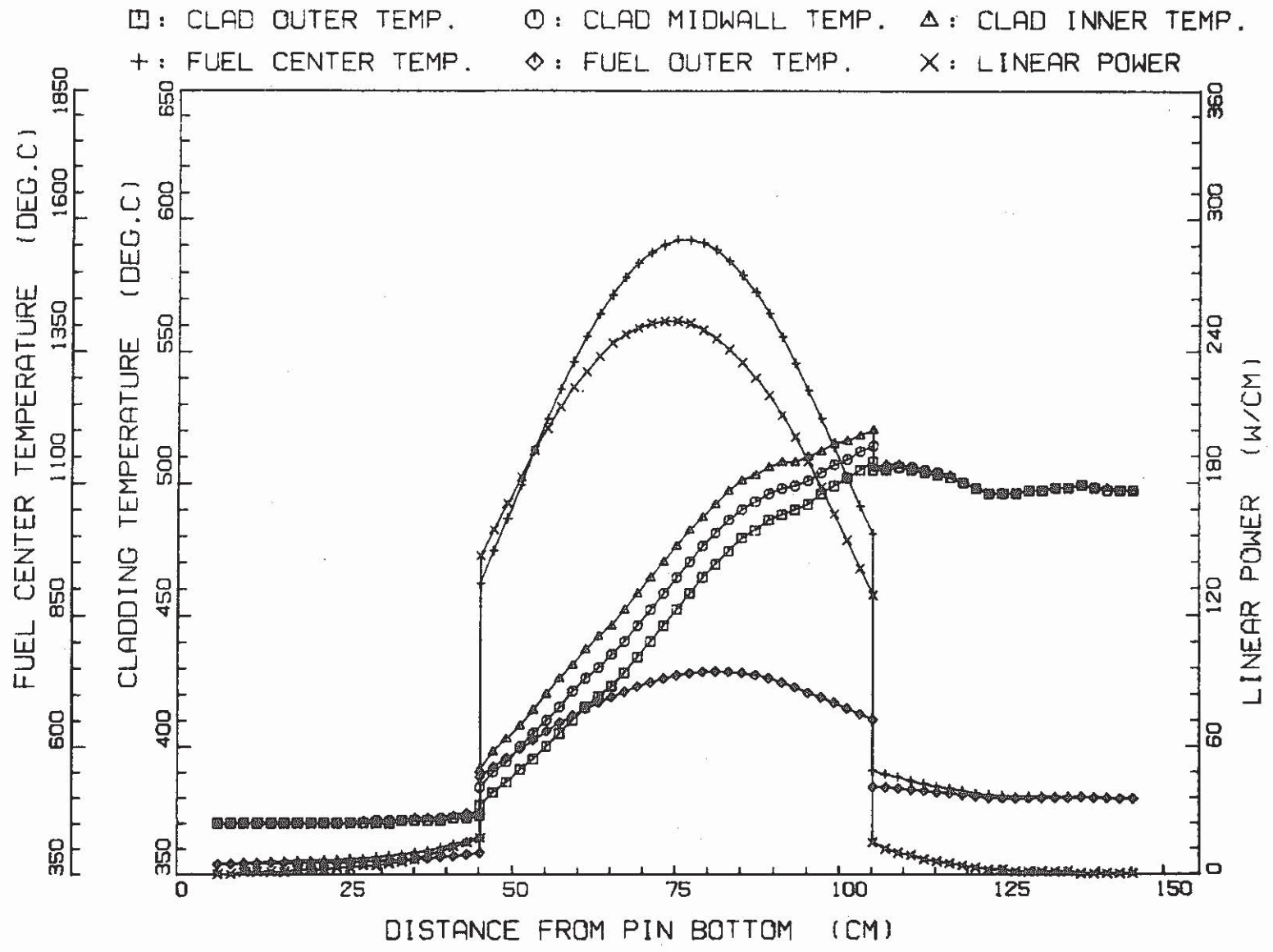


Fig. 10 Temperature and linear power distribution (6706 pin)

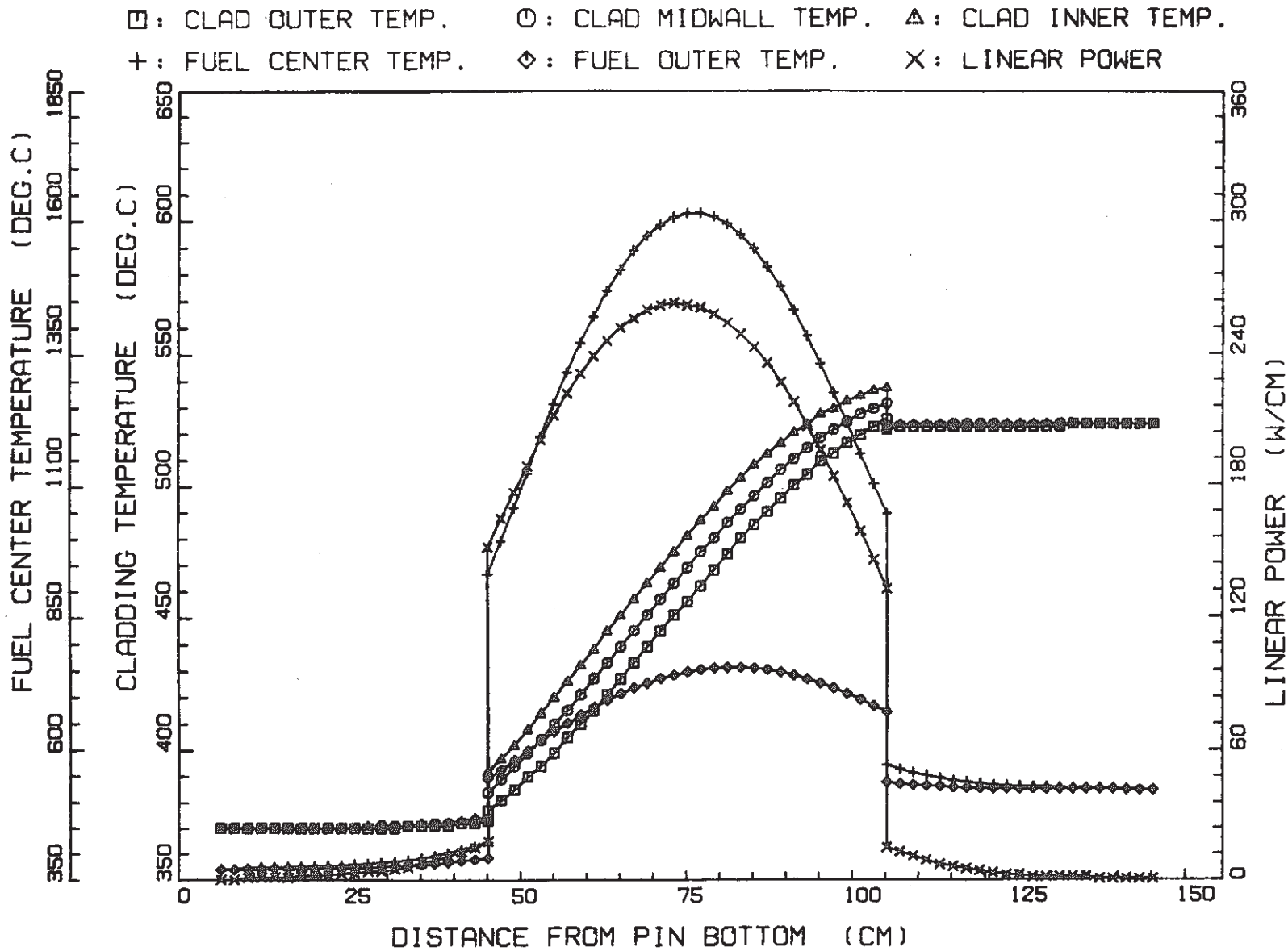


Fig. 11 Temperature and linear power distribution (6736 pin)

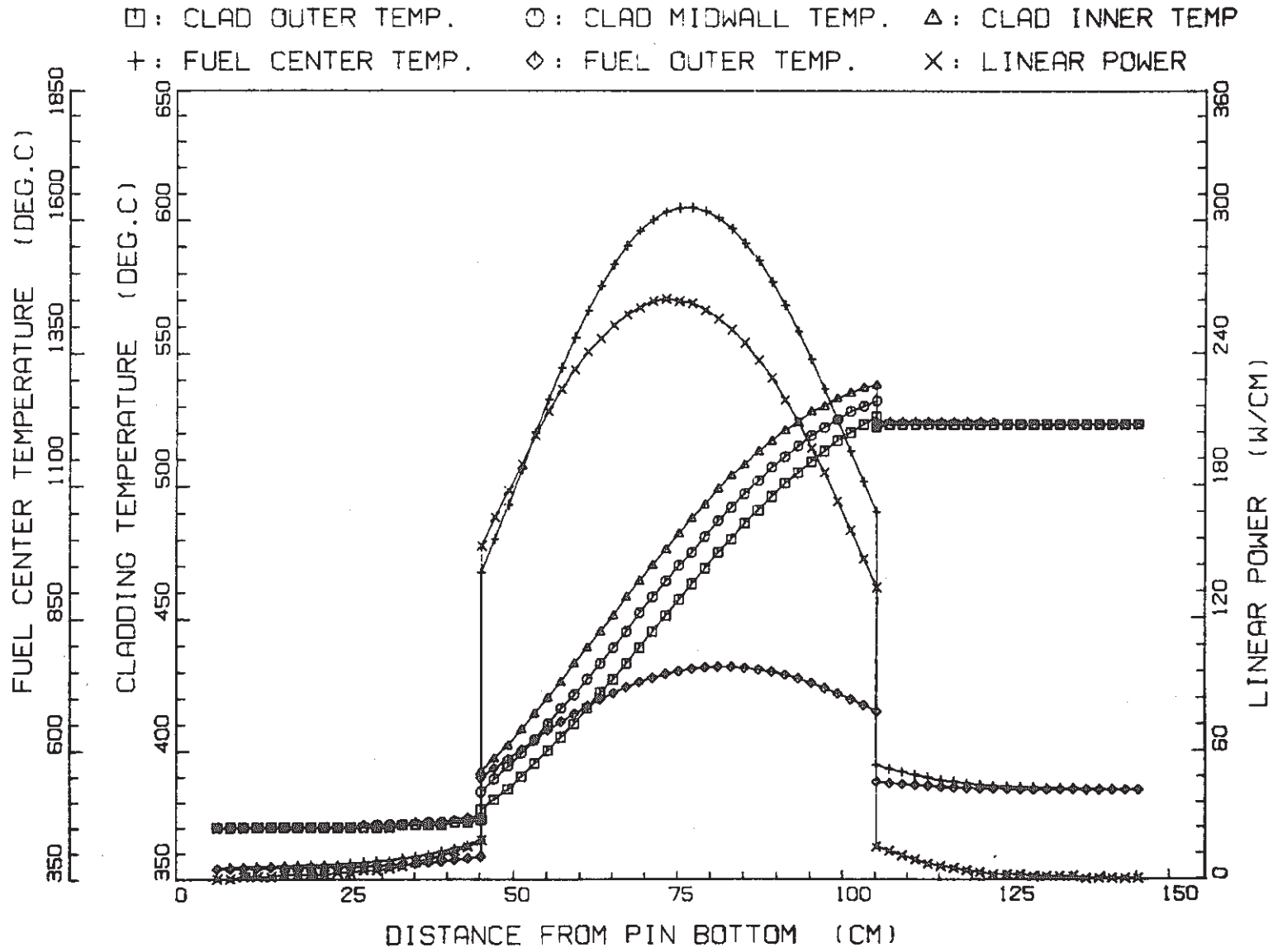


Fig. 12 Temperature and linear power distribution (6747 pin)

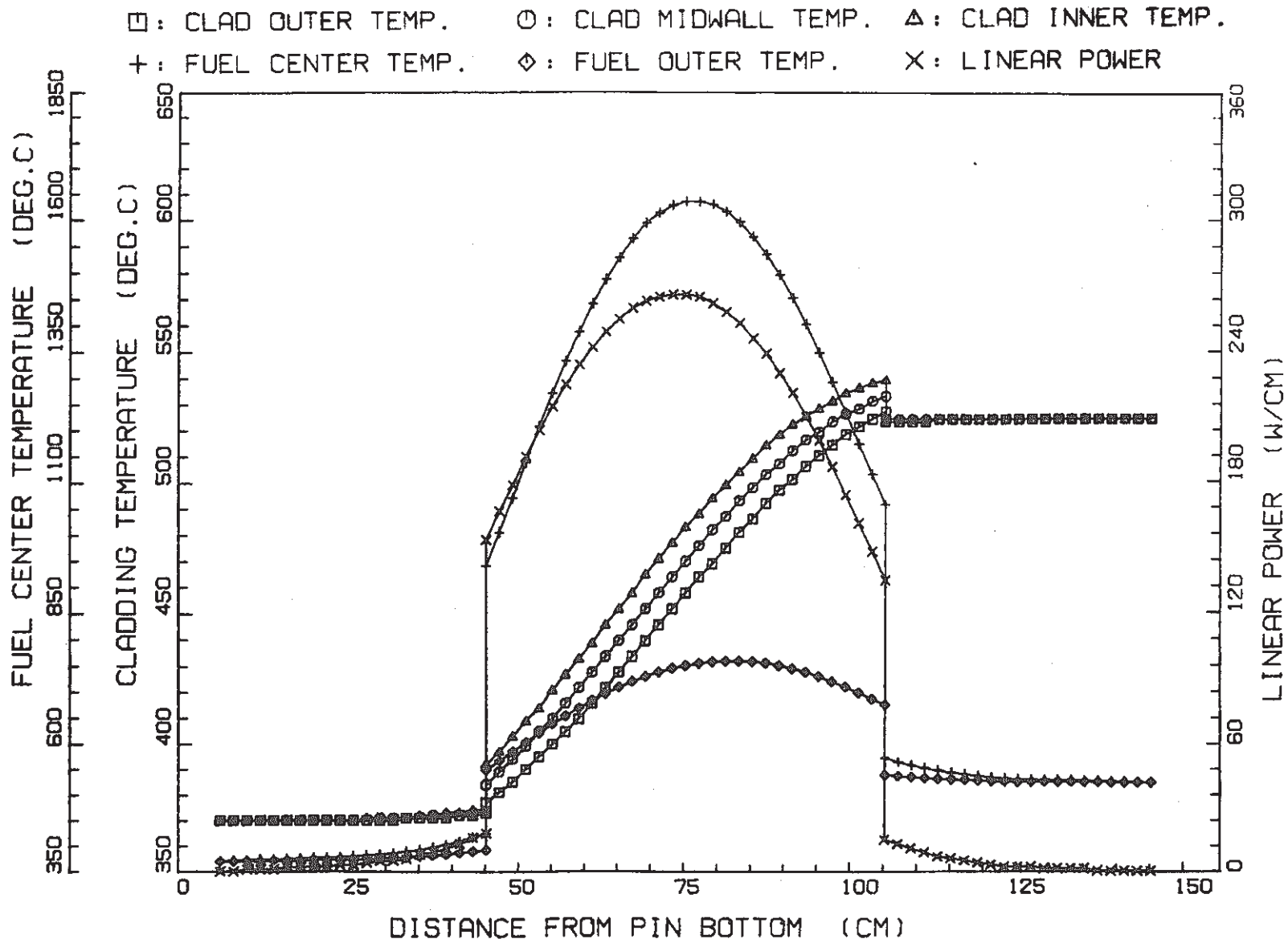


Fig. 13 Temperature and linear power distribution (6755 pin)

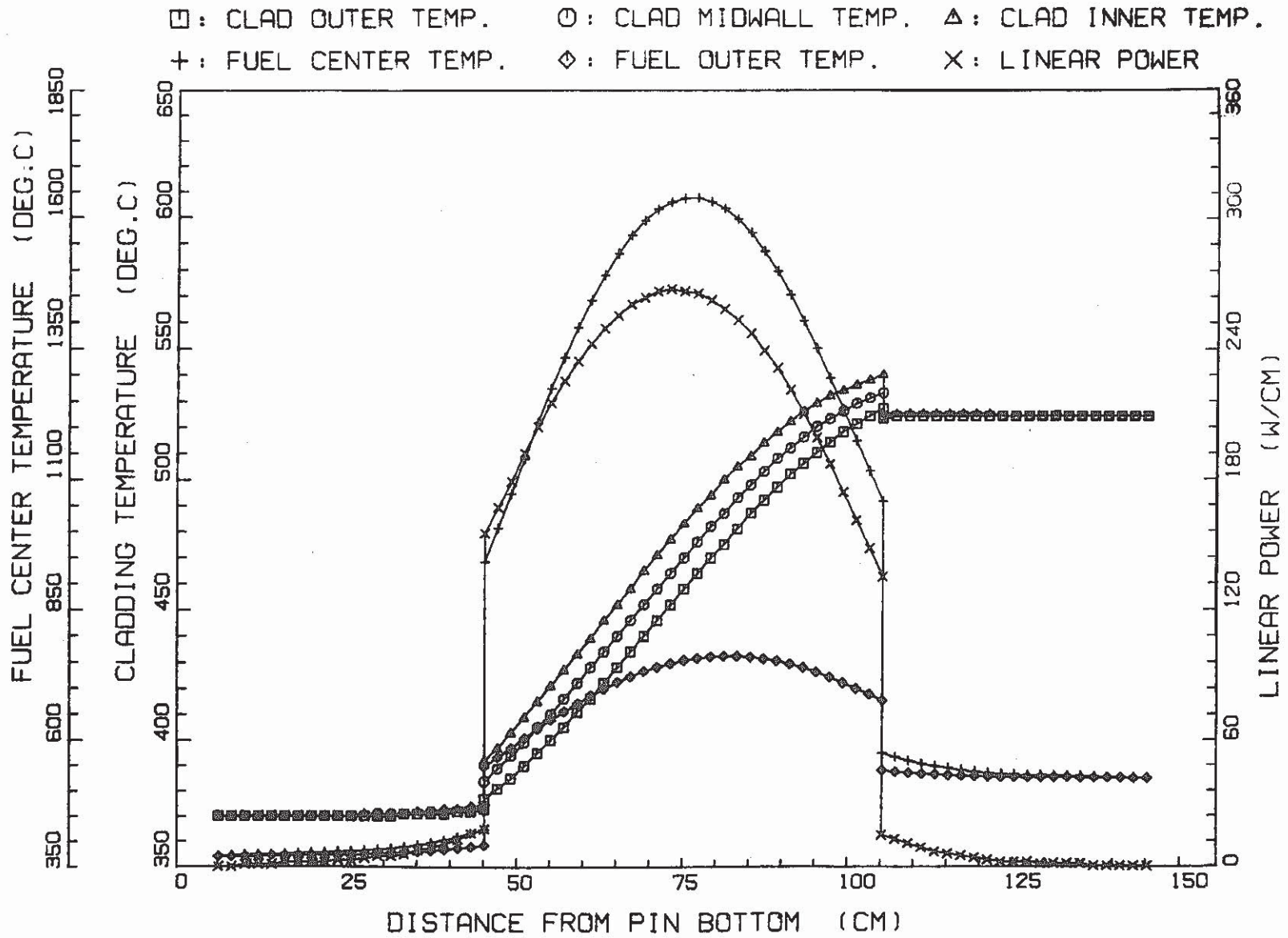


Fig. 14 Temperature and linear power distribution (6756 pin)

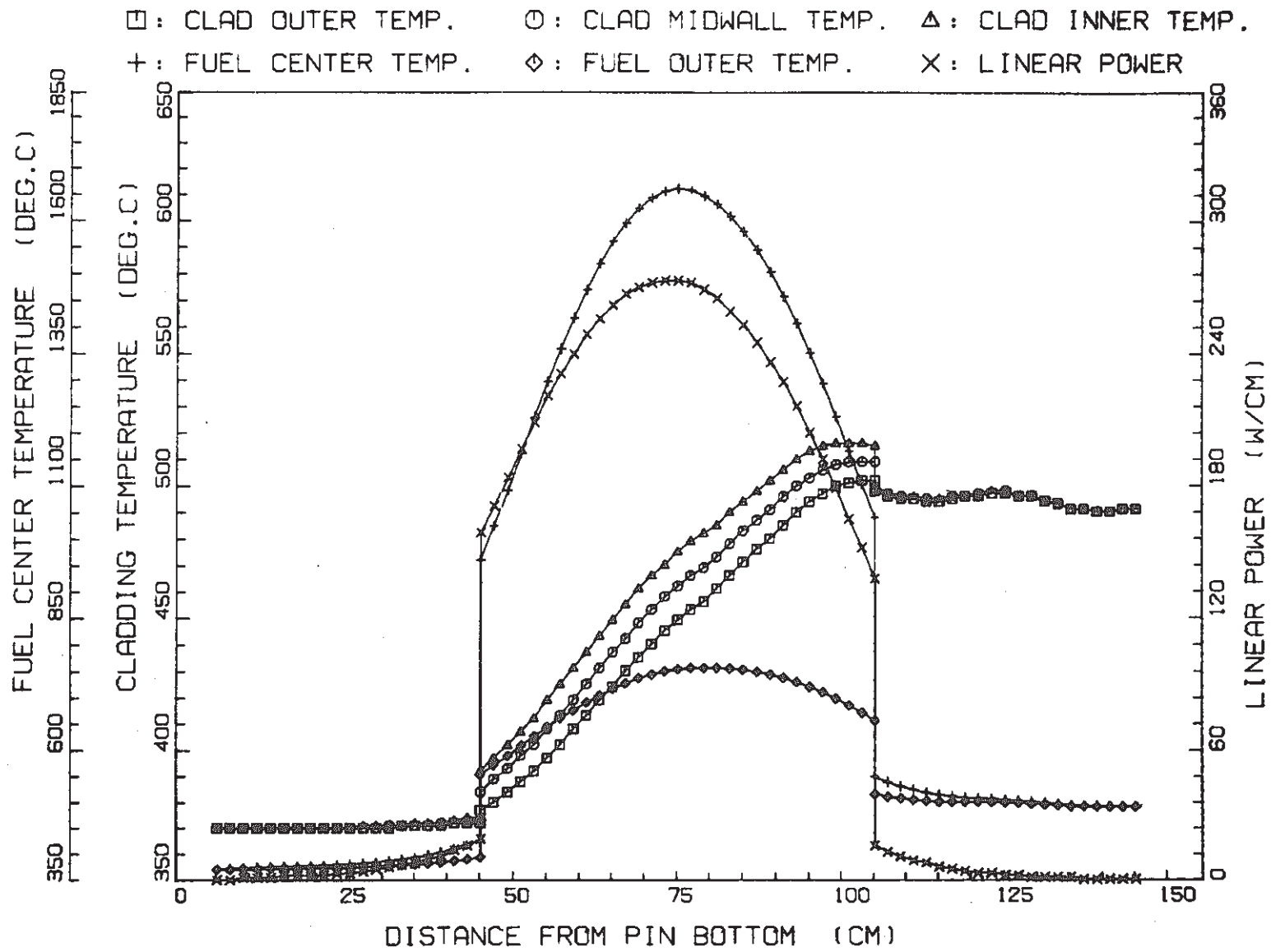


Fig. 15 Temperature and linear power distribution (6786 pin)

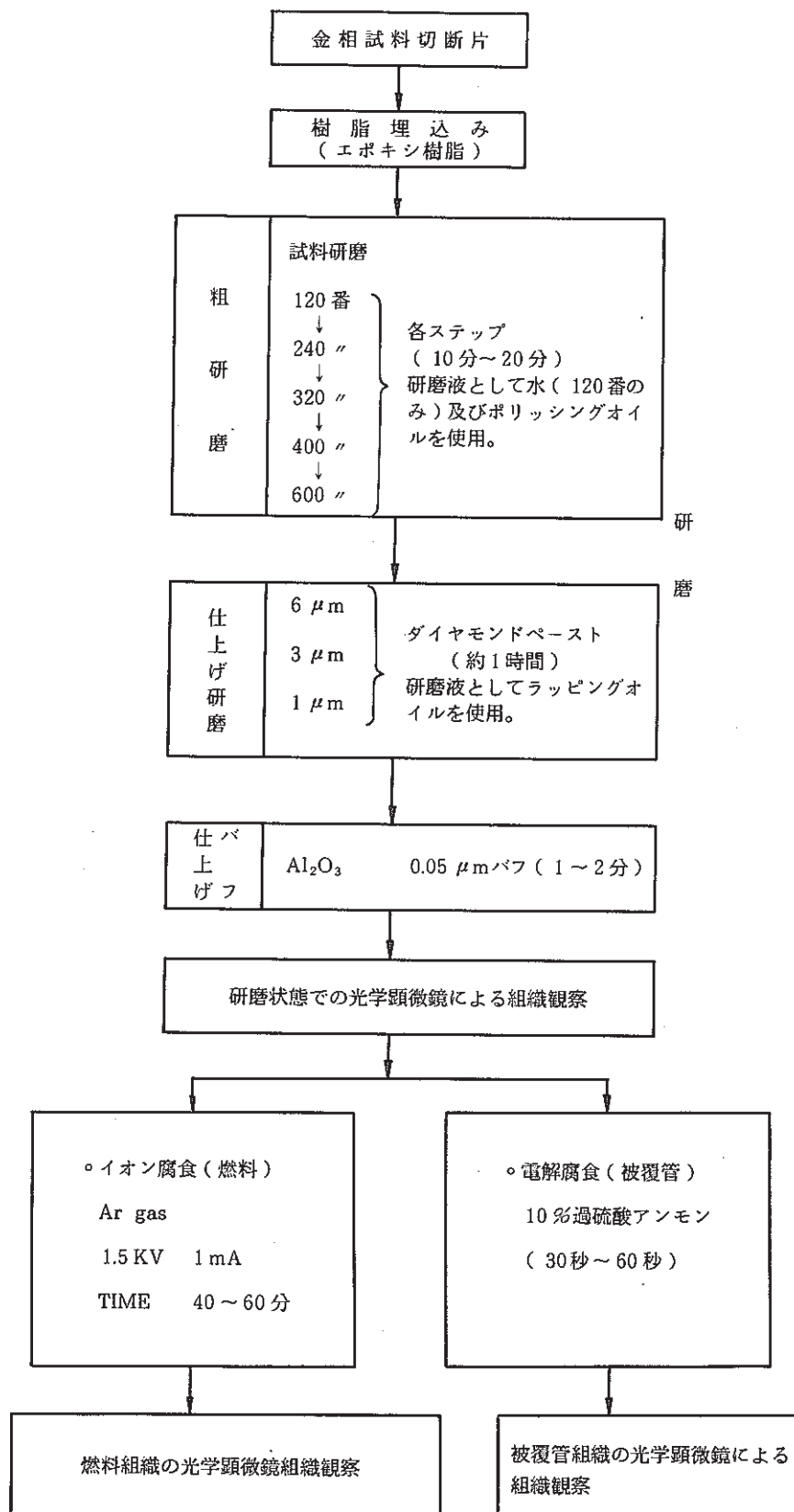


Fig.16 Flow diagram of metallographic examination in AGS

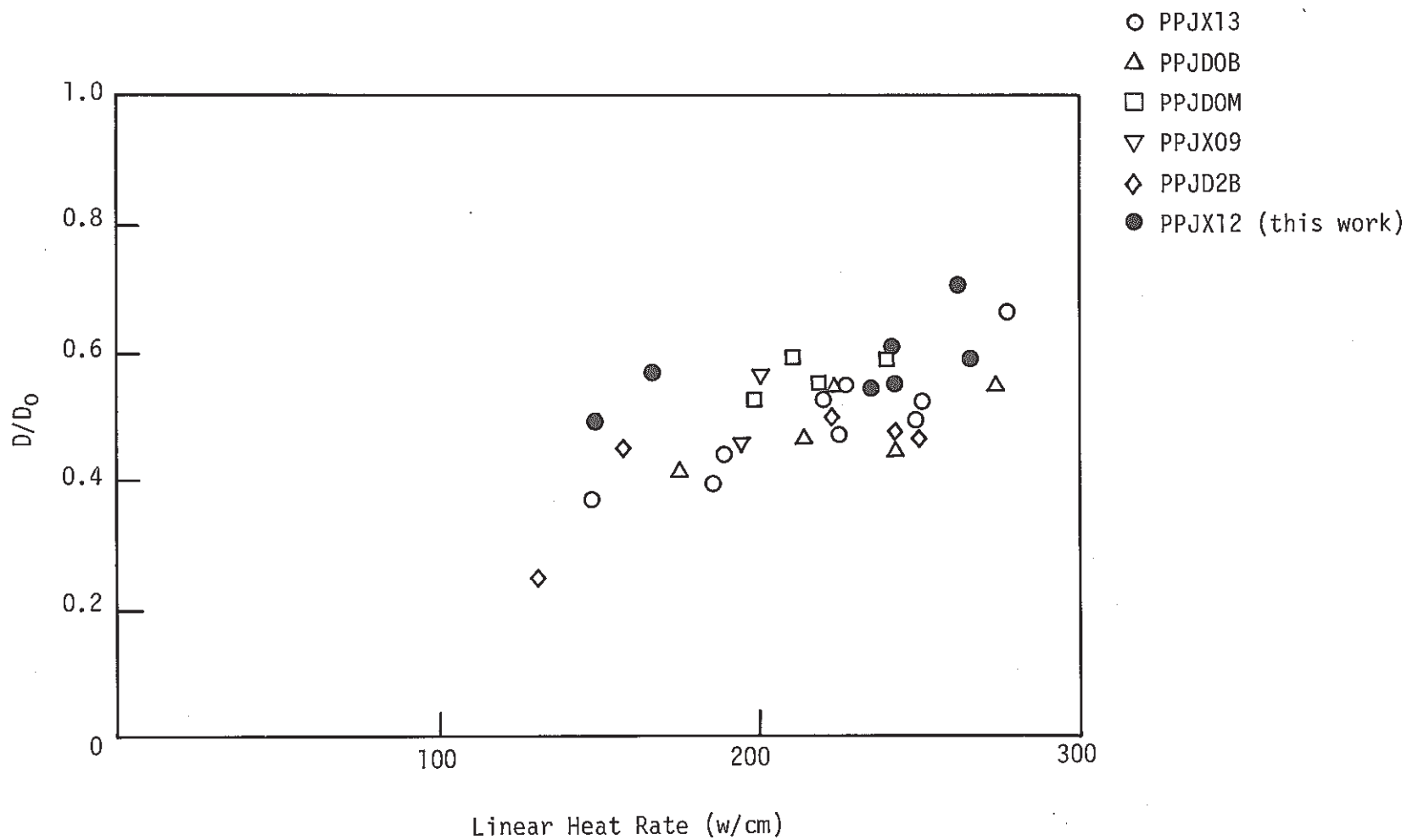


Fig. 17 Gas bubble region (D/Do) as a function of linear heat rate

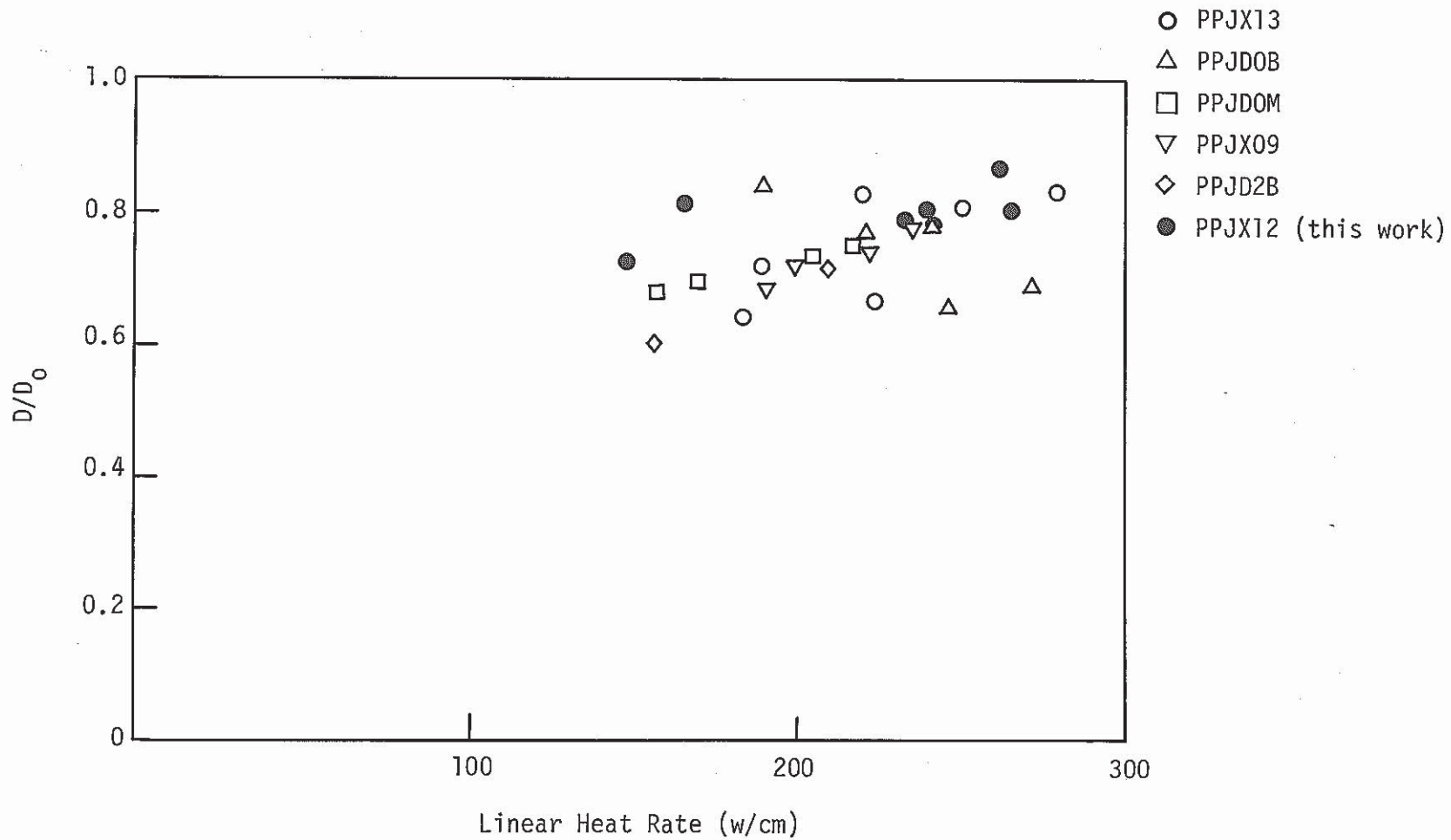


Fig. 18 Densified region (D/D_0) as a function of linear heat rate

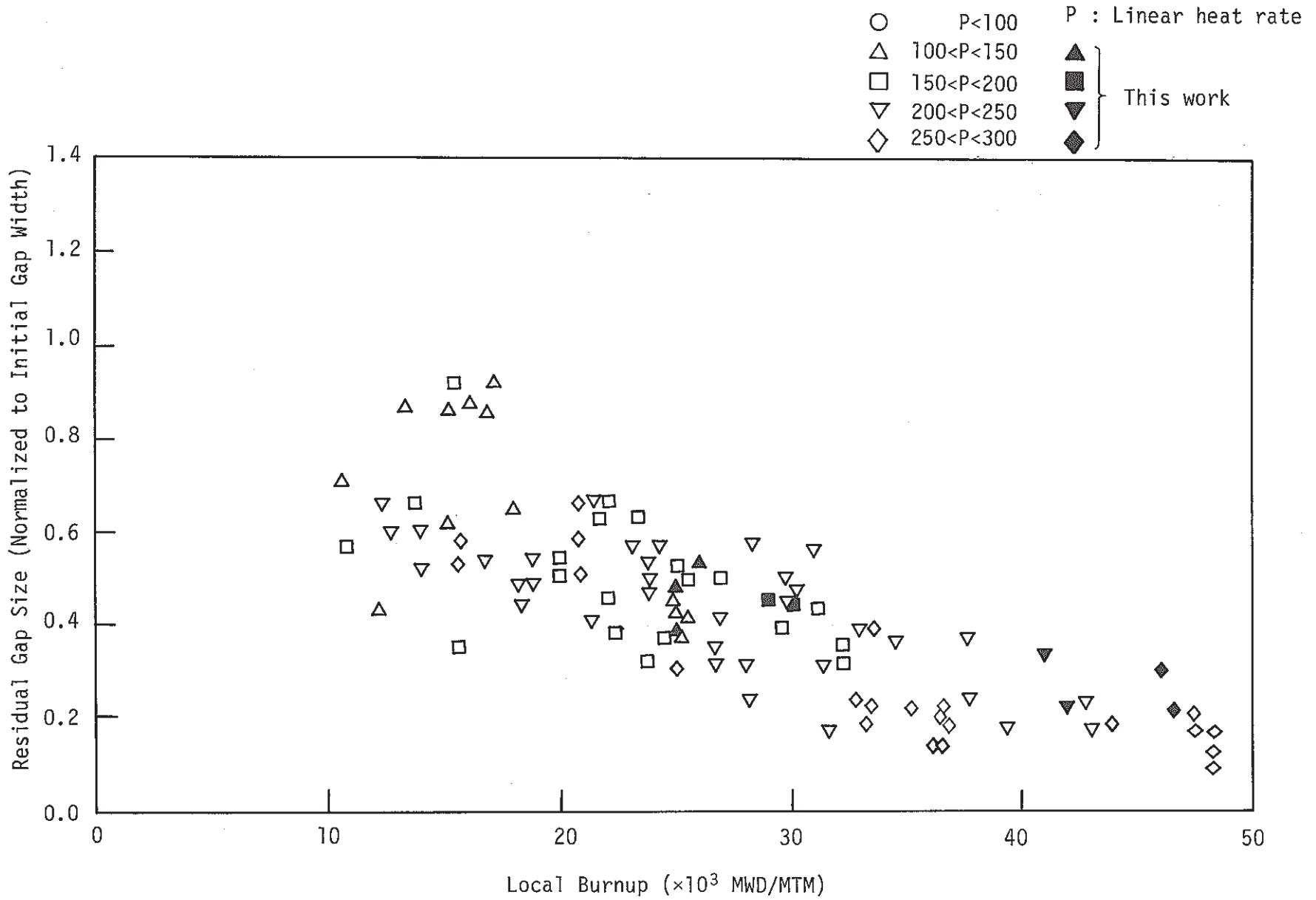


Fig. 19 Residual gap size as a function of local burnup

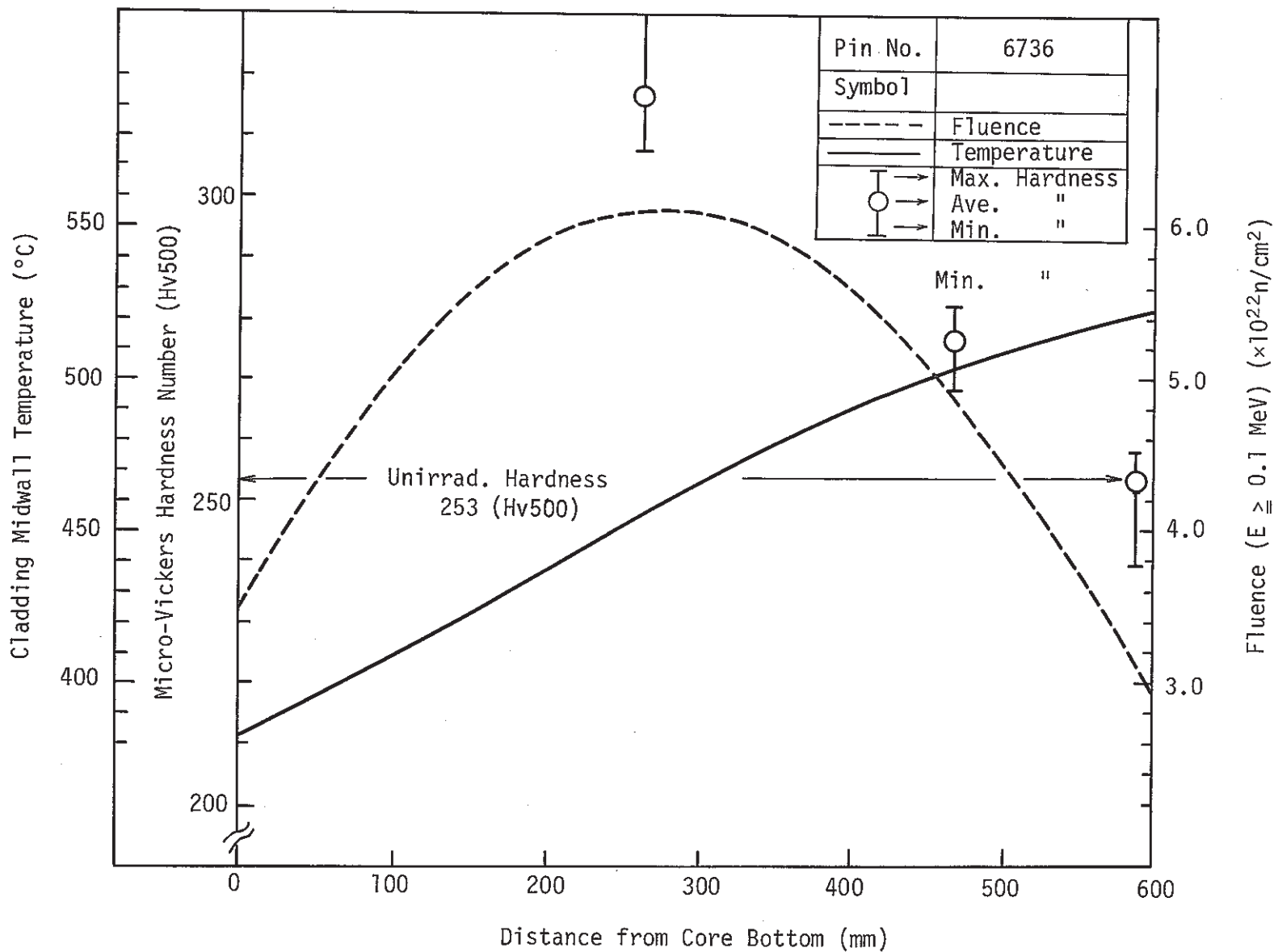


Fig. 20 Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6736 pin)

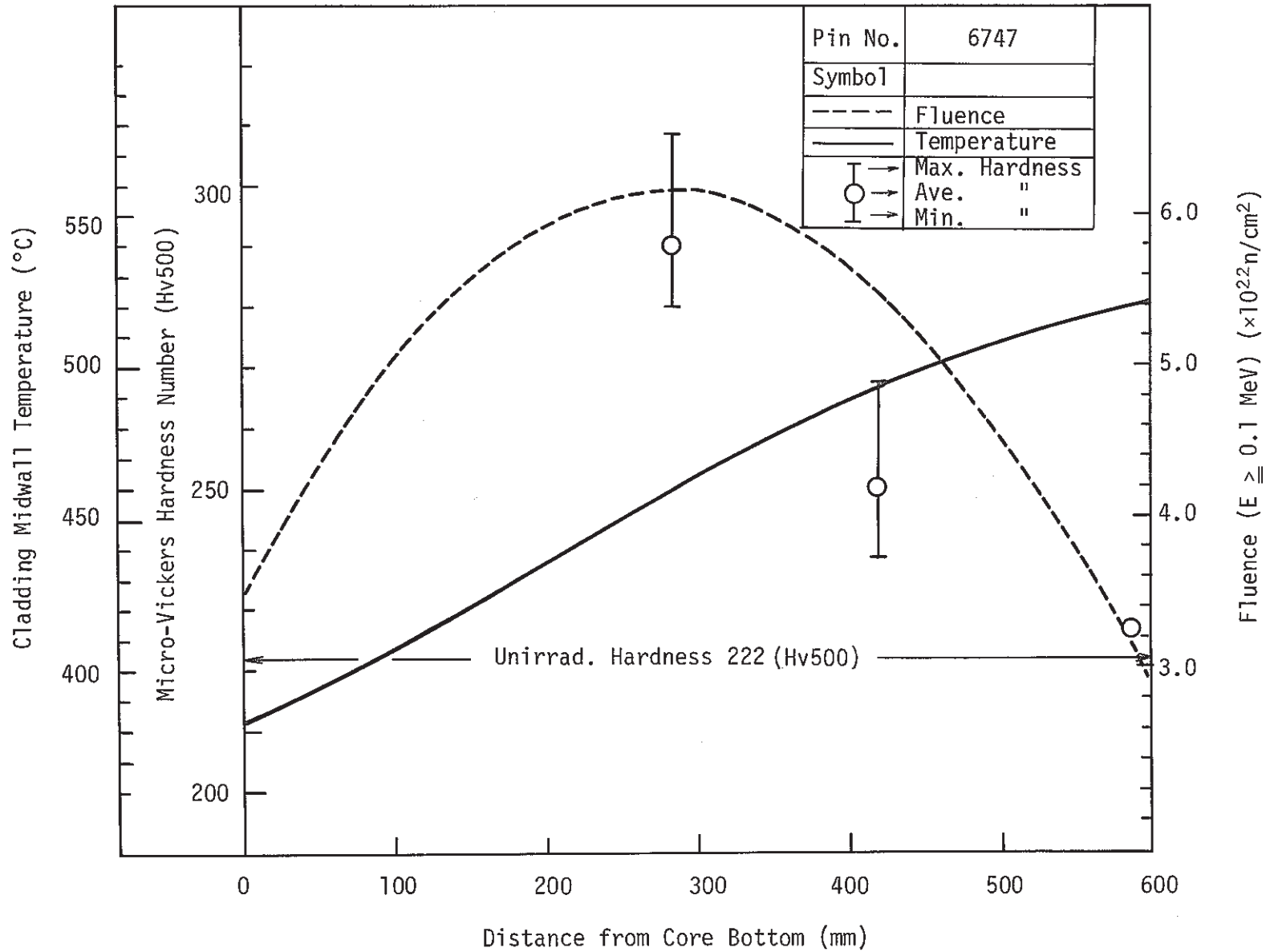


Fig. 21 Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6747 pin)

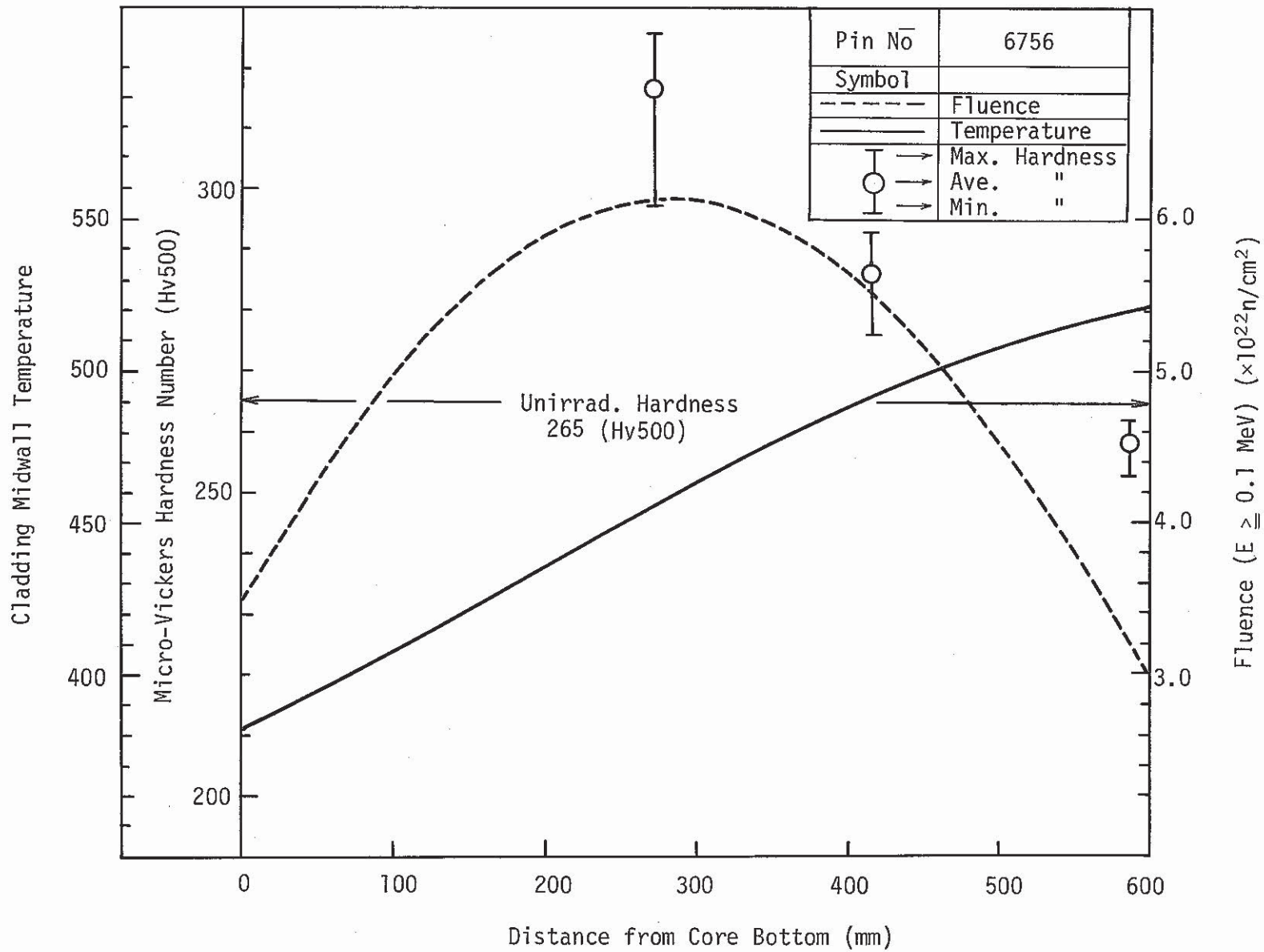


Fig. 22 Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6756 pin)

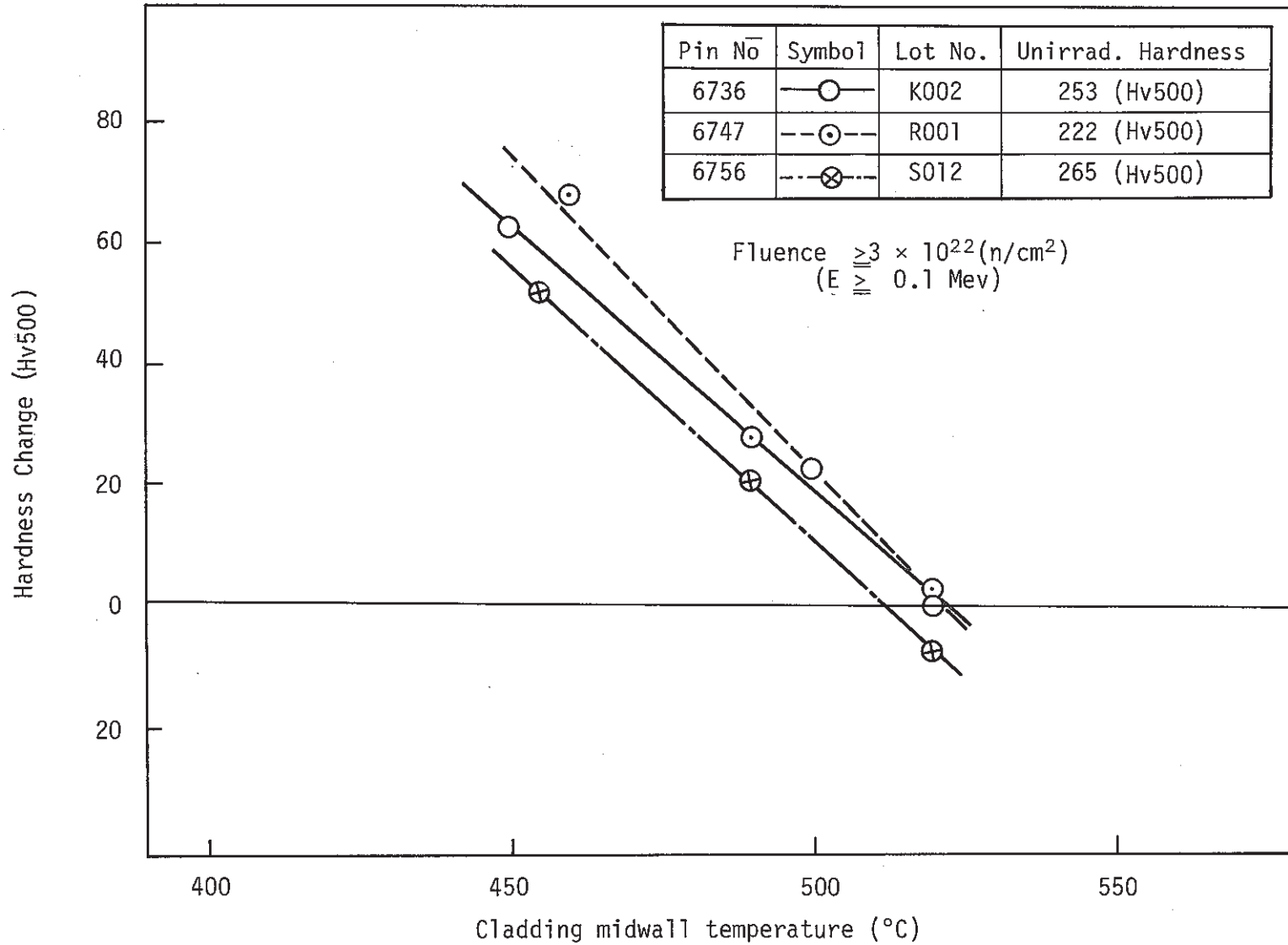



Fig. 23 Relation between hardness, temperature and fluence at various position of JOYO MK-I fuel pin (PPJX12, 6736, 6747 and 6756 pins)

Pin No.	6736	6755	6756
Clad maker	K	S	S
Lot No.	K002	S008	S012

 : density

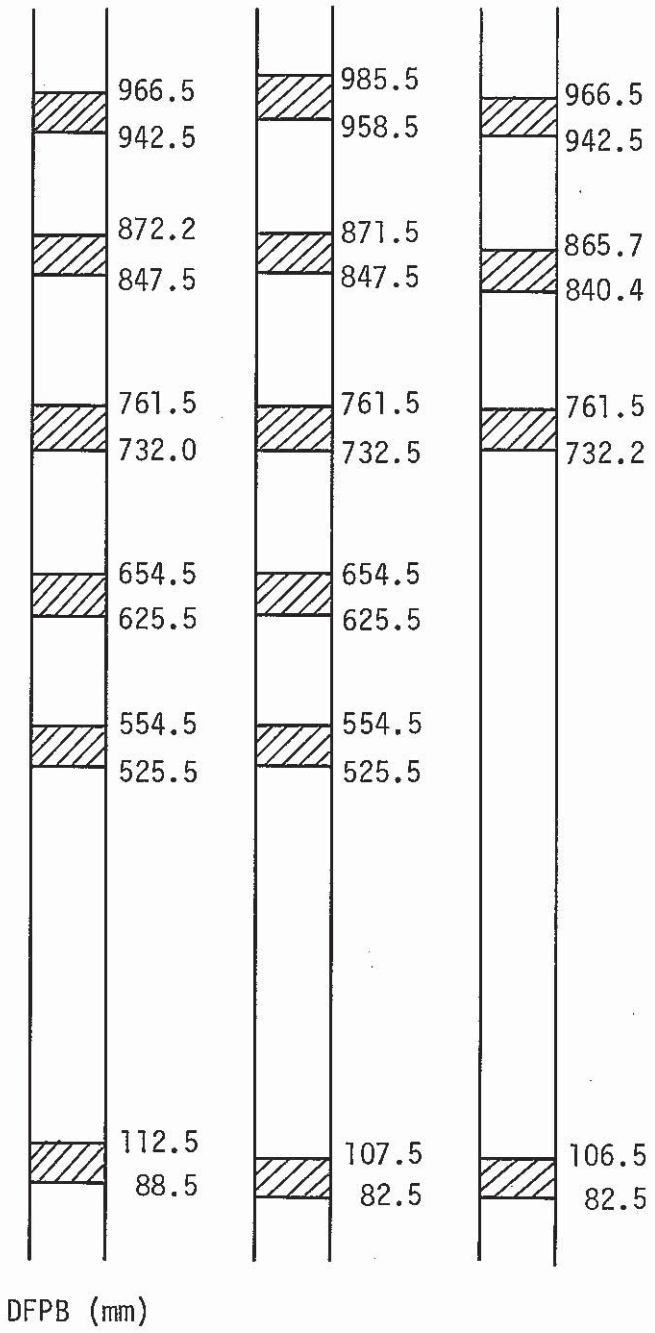


Fig. 24 Pin Cutting diagram for density measurement of PPJX12

S/A NAME PPJX12
PIN NO. 6736

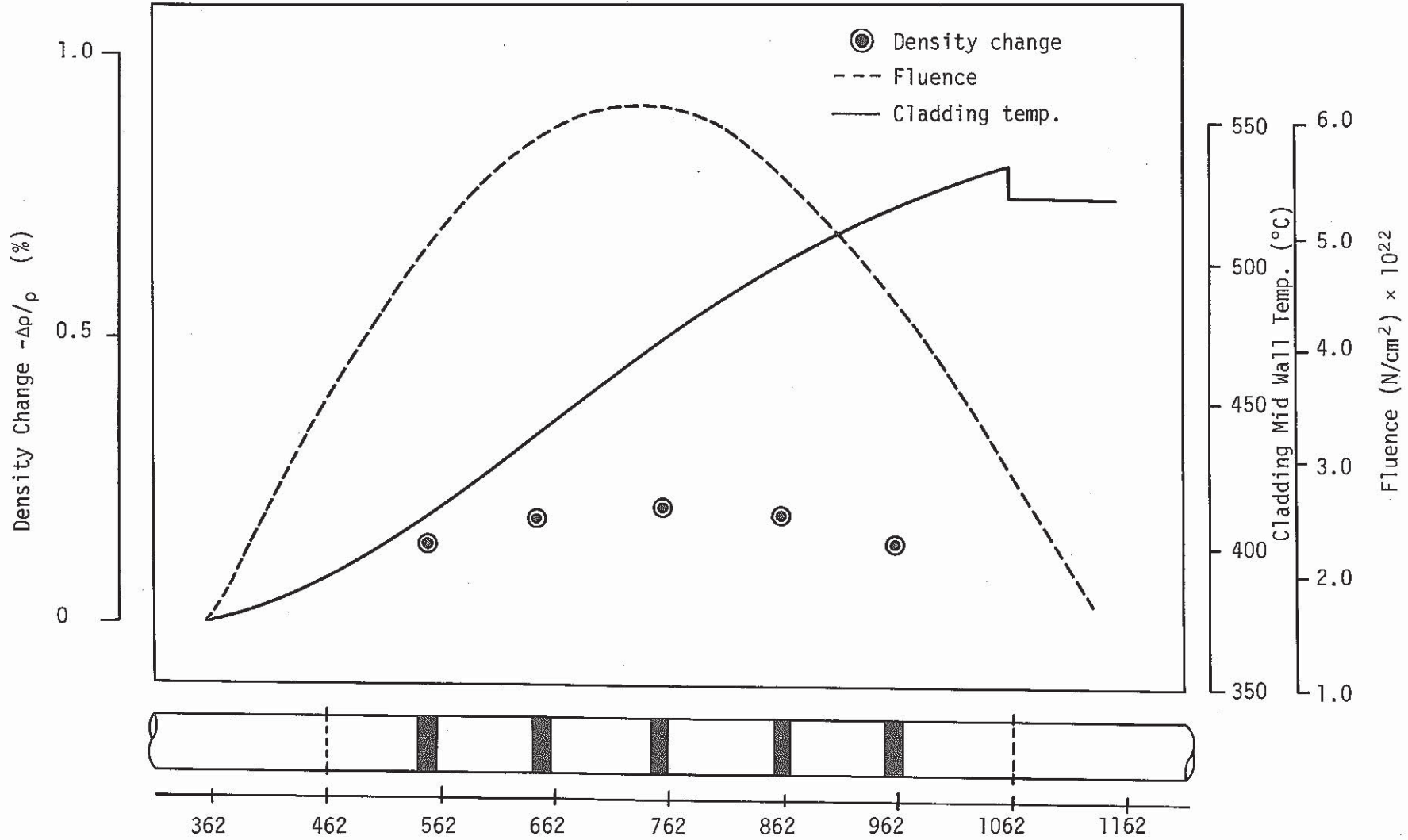


Fig. 25 Cladding density change (PPJX12, 6736 pin)

S/A NAME PPJX12
 PIN NO. 6755

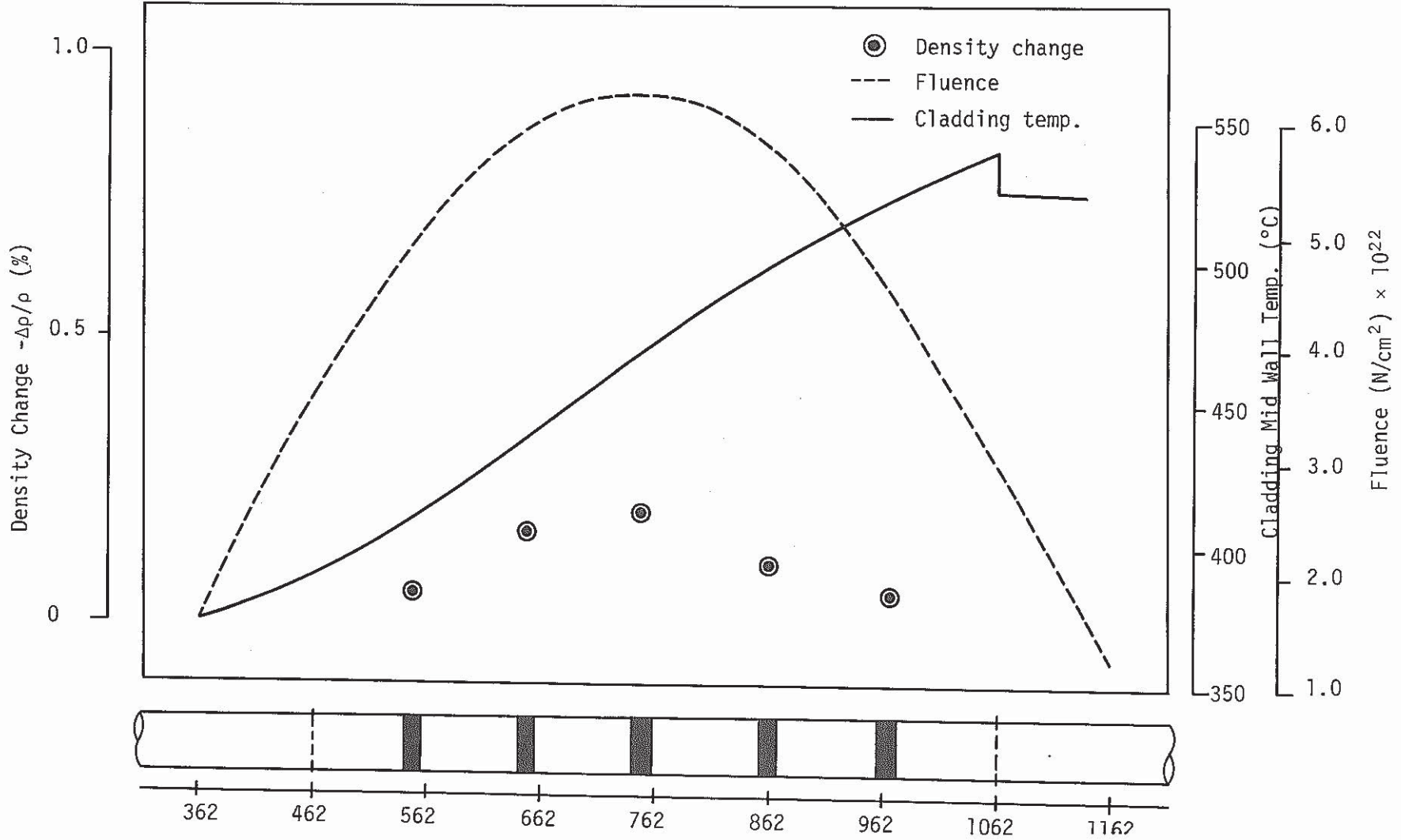


Fig. 26 Cladding density change (PPJX12, 6755 pin)

S/A NAME PPJX12
PIN NO. 6756

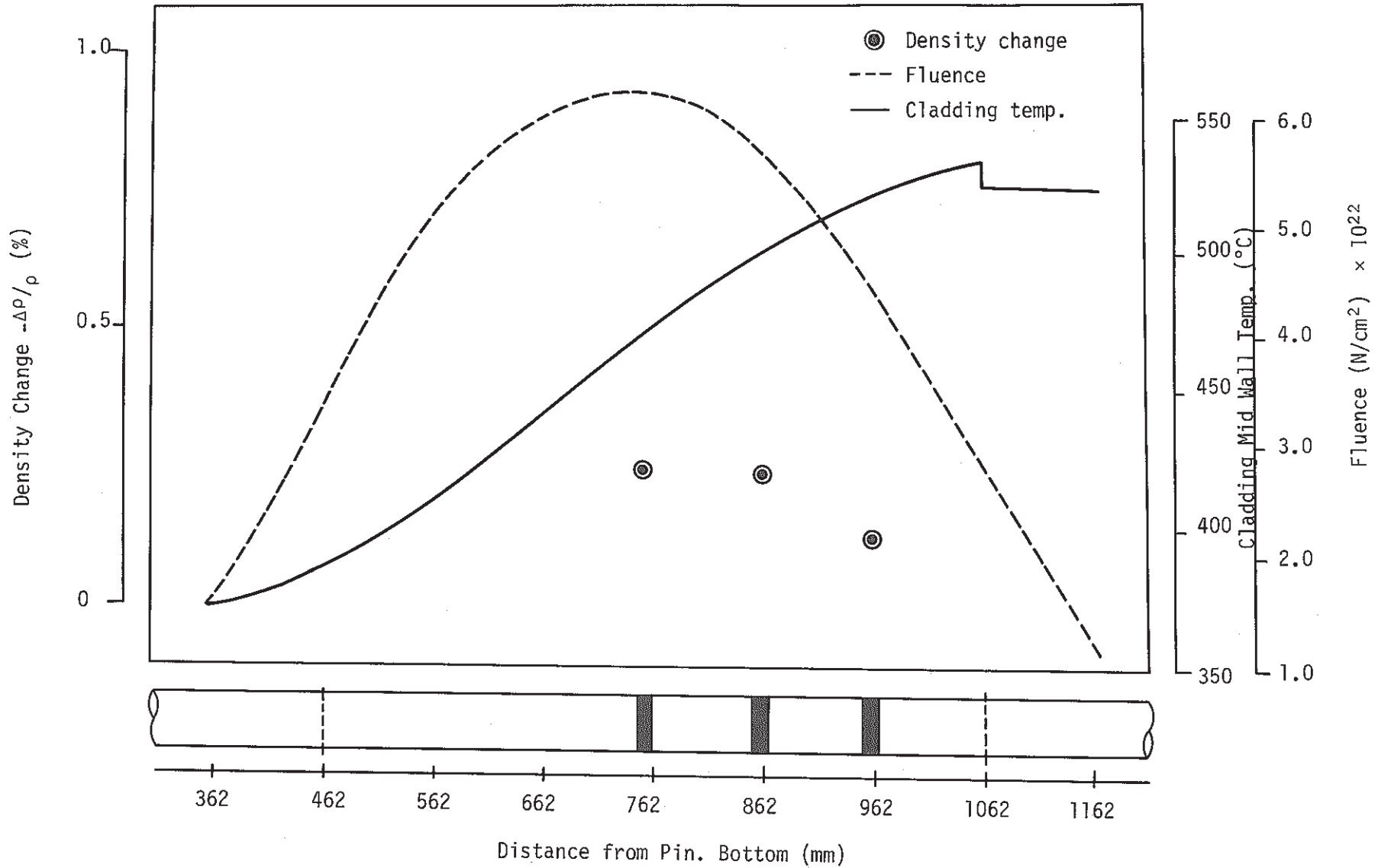


Fig. 27 Cladding density change (PPJX12, 6756 pin)

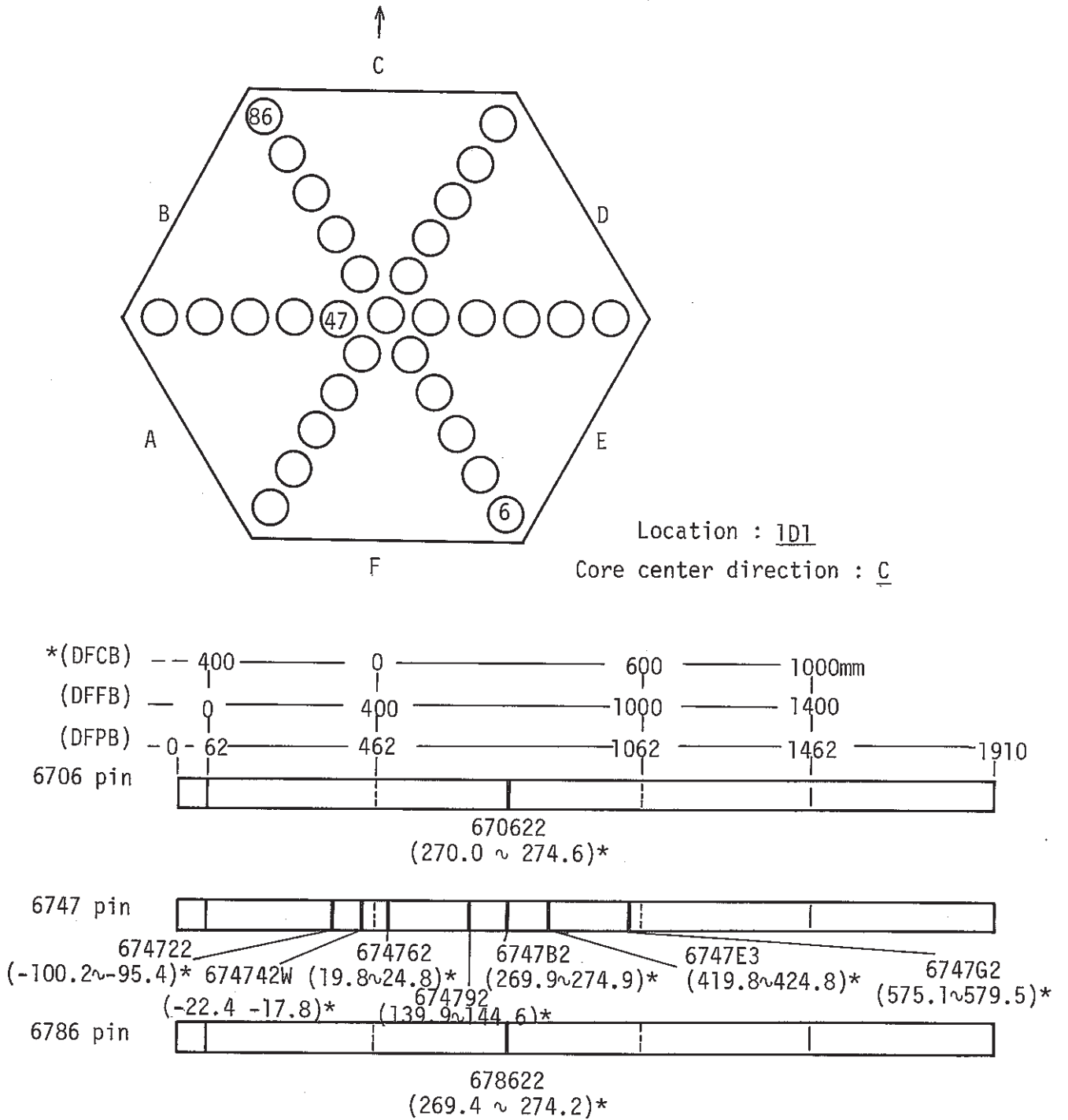


Fig. 28 Cutting diagram of PPJX12 fuel pin for burnup measurement

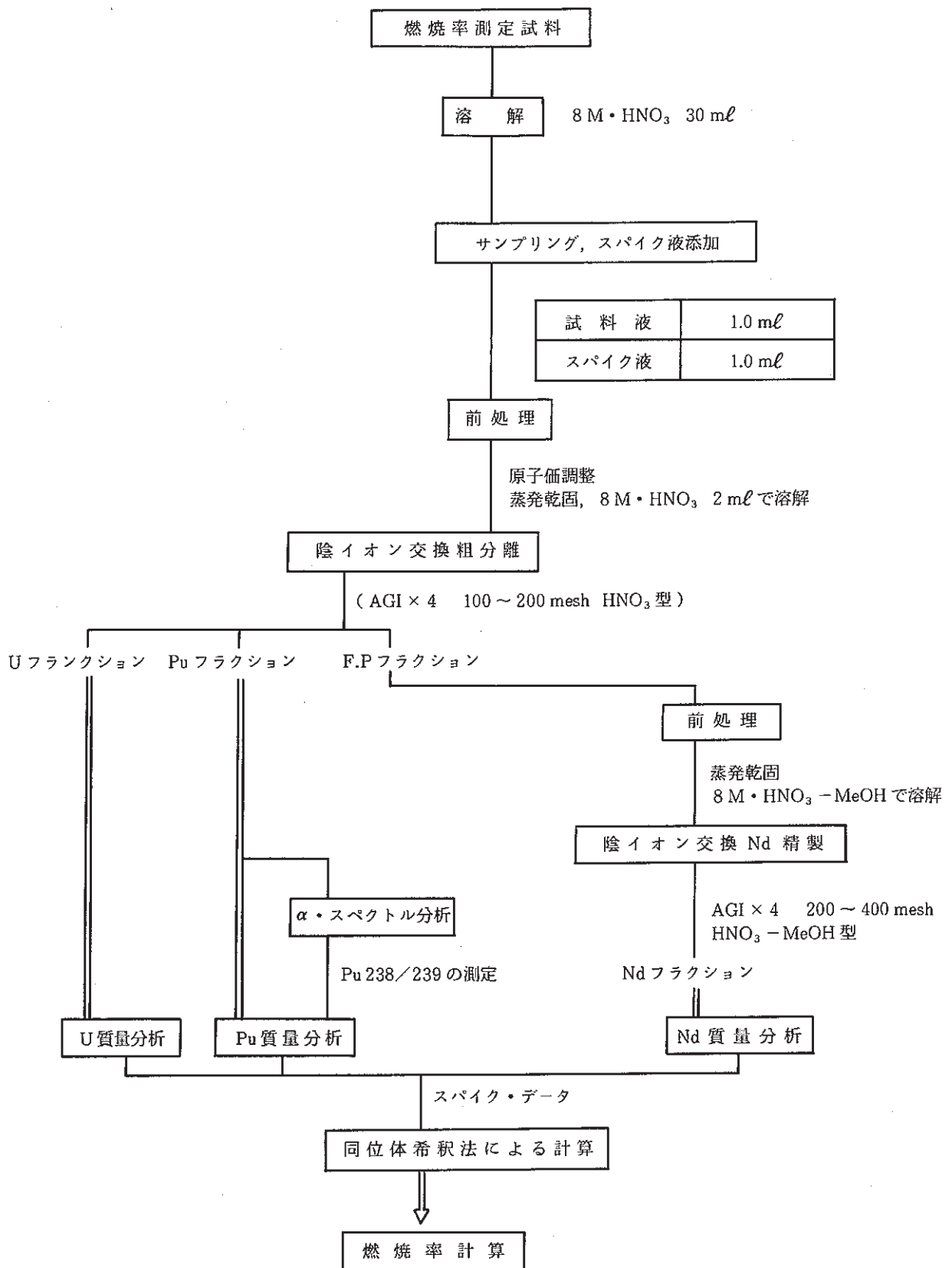


Fig. 29 Specimen preparation process for burnup measurement in AGS

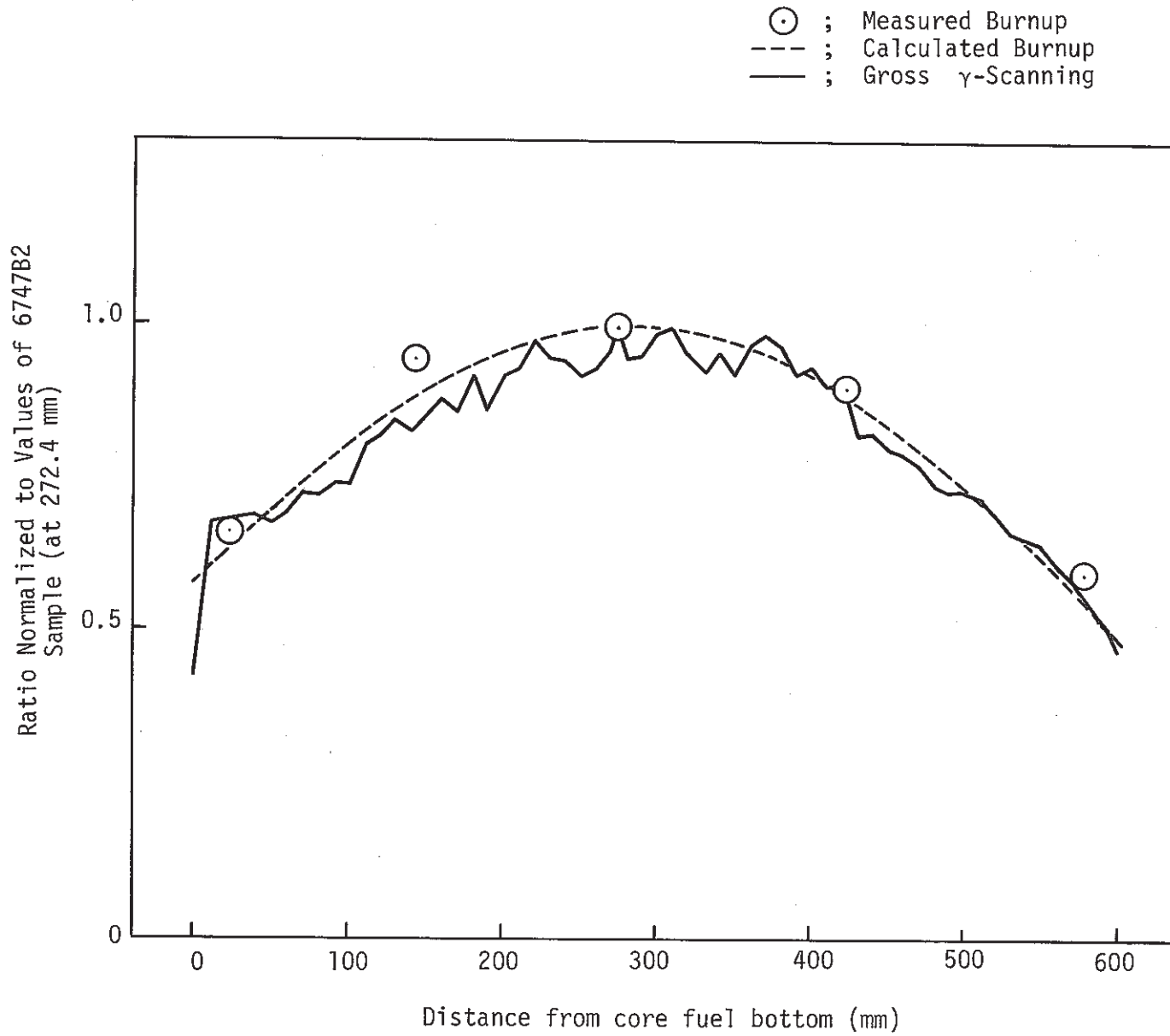


Fig. 30 Burnup axial distribution of PPJX12 (6747 pin)

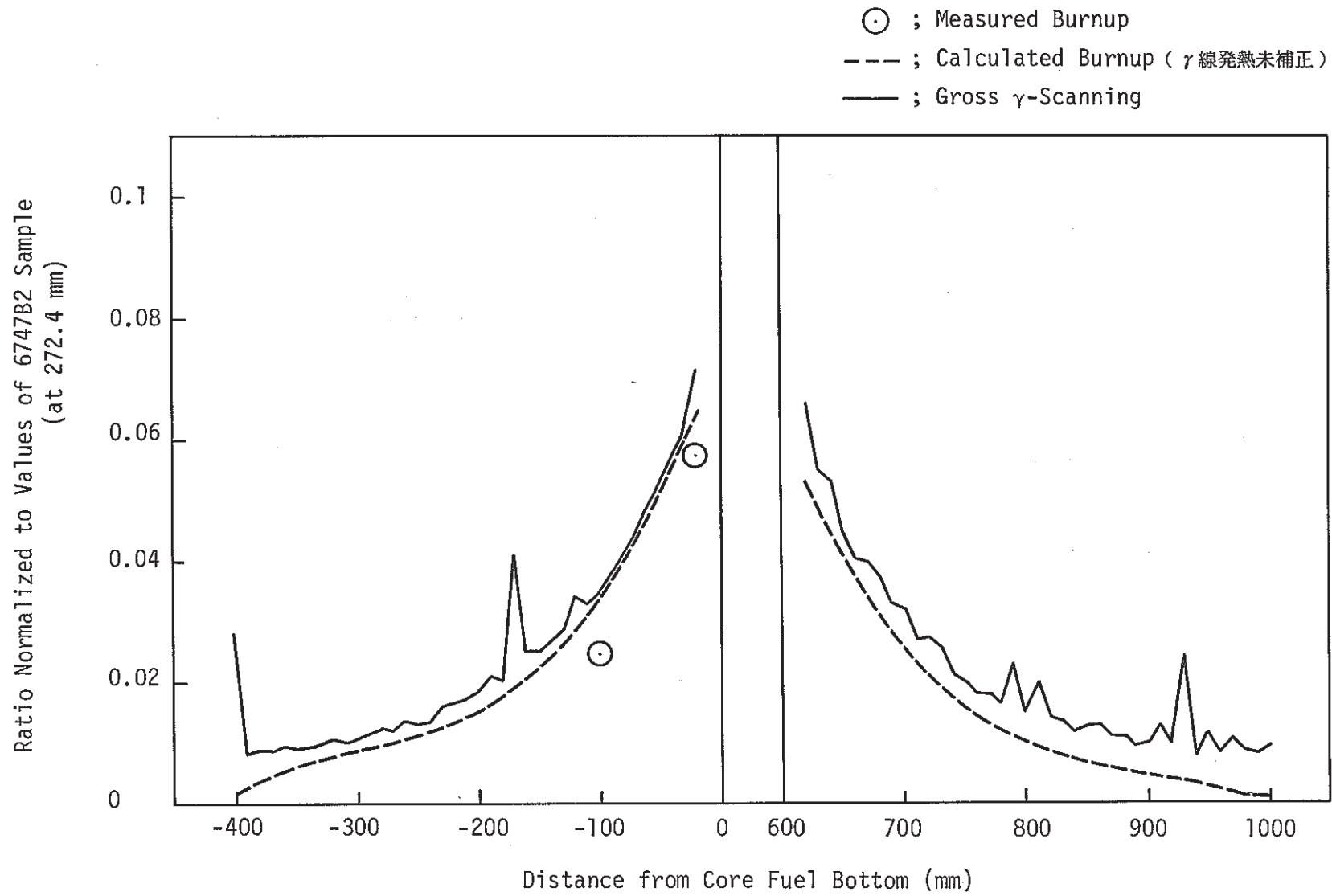


Fig. 31 Burnup axial distribution of PPJX12 (6747 pin, Blanket)

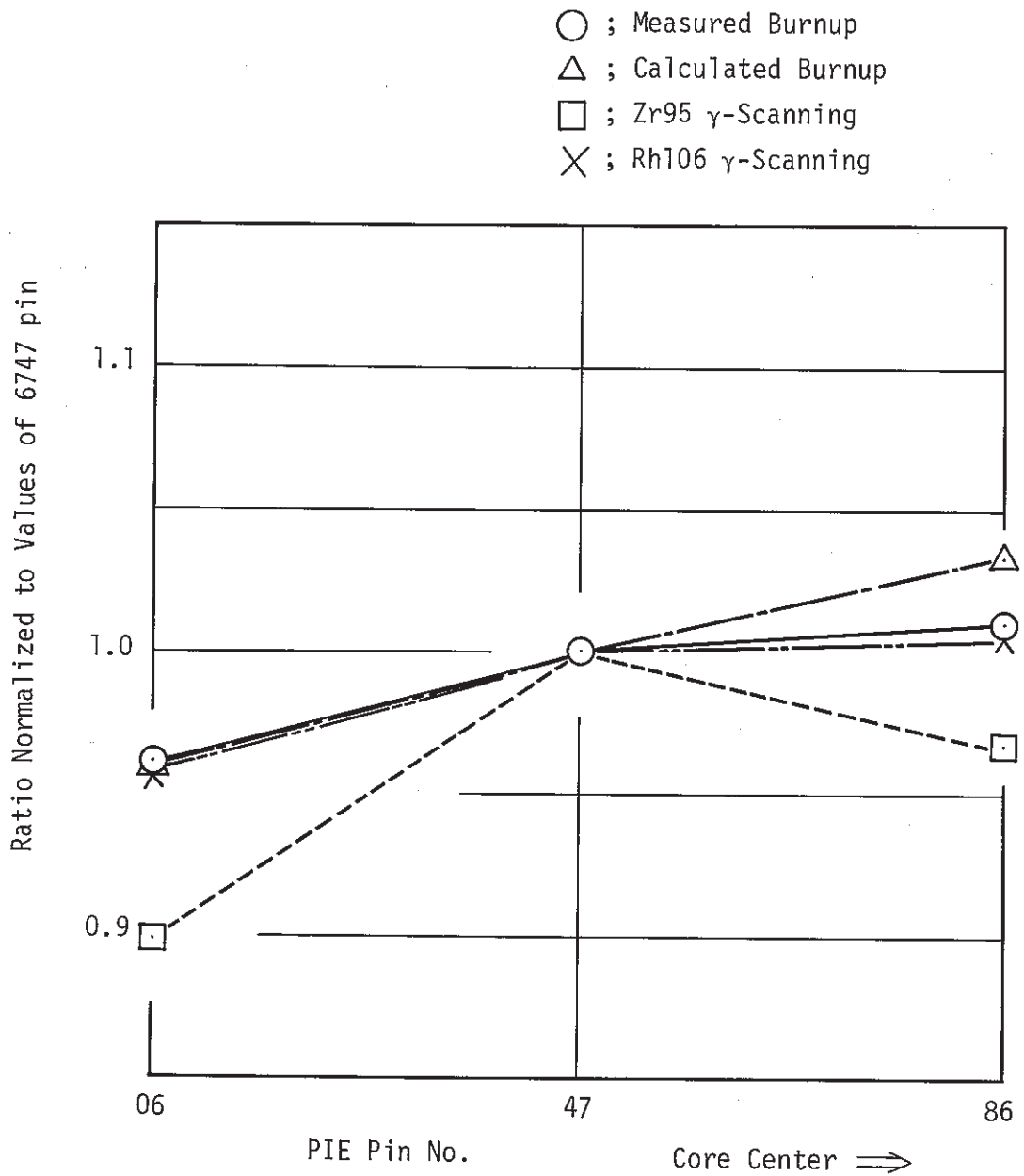


Fig. 32 Comparison data for burnup radial distribution on various fuel pin in PPJX12 subassembly

S/A No.	JOYO-PPJX12
Pin No.	6747
S/A Peak Burn up	48300MWD/MTM

As polished

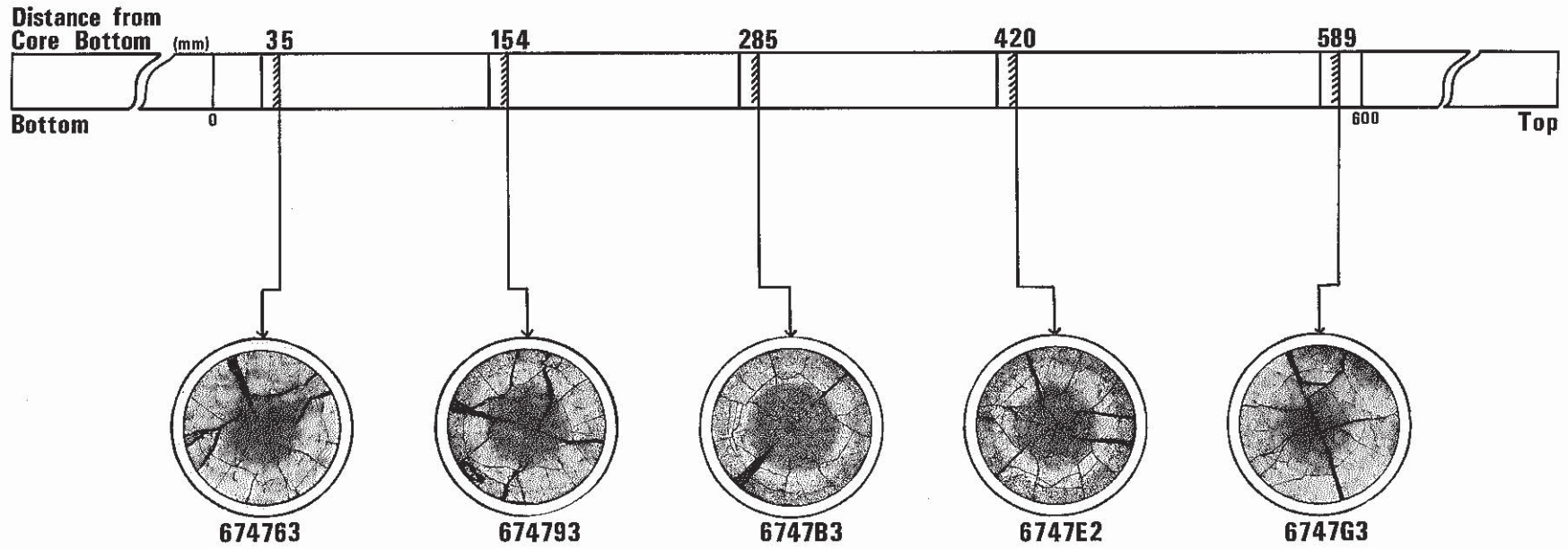


Photo 1 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6747 pin)

S/A No.	JOYO-PPJX12
Pin No.	6736
S/A Peak Burn up	48300MWD/MTM

As polished

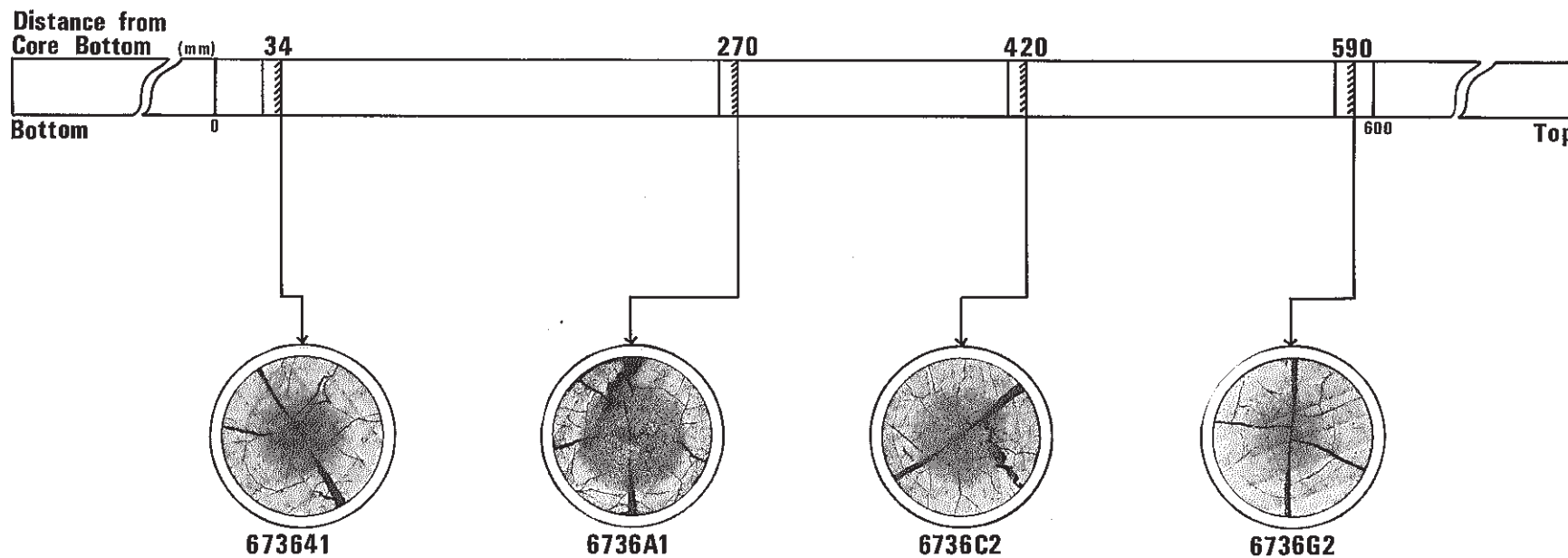


Photo 2 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6736 pin)

S/A No.	JOYO-PPJX12
Pin No.	6756
S/A Peak Burn up	48300MWD/MTM

As polished

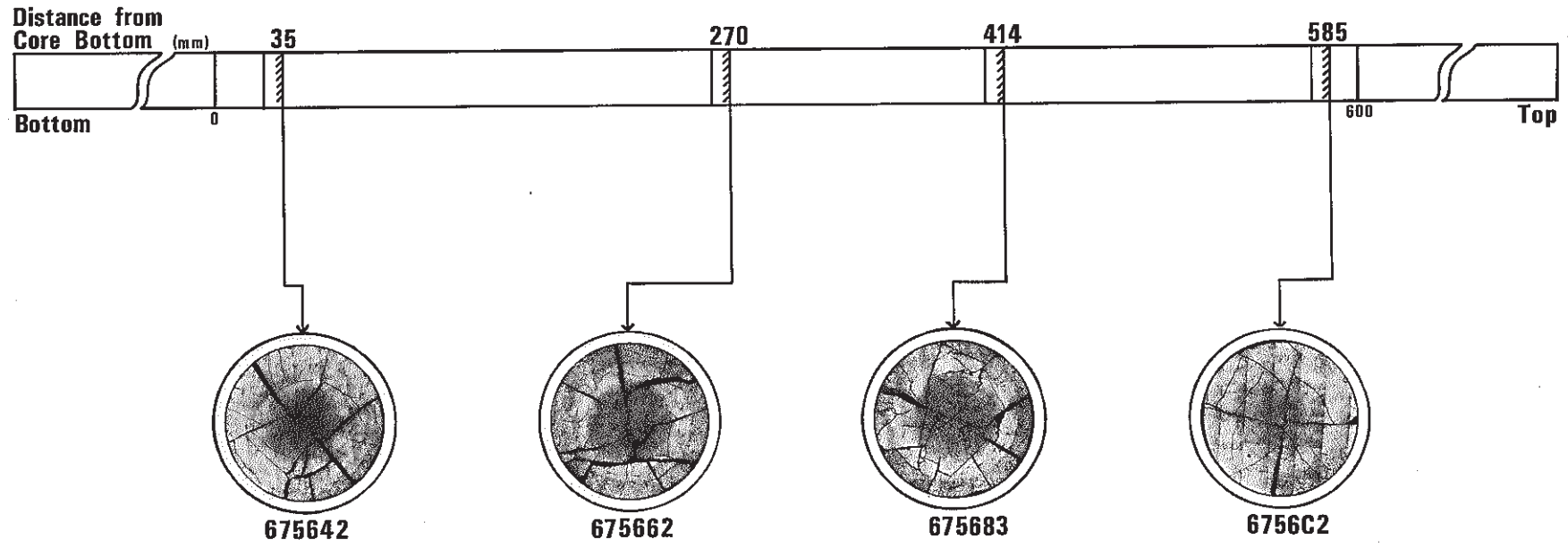


Photo 3 Macrographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6756 pin)

S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6747	
Section No.	6747B3	
Distance from bottom of pin		747mm
Distance from bottom of fuel column		285mm

As polished

1mm

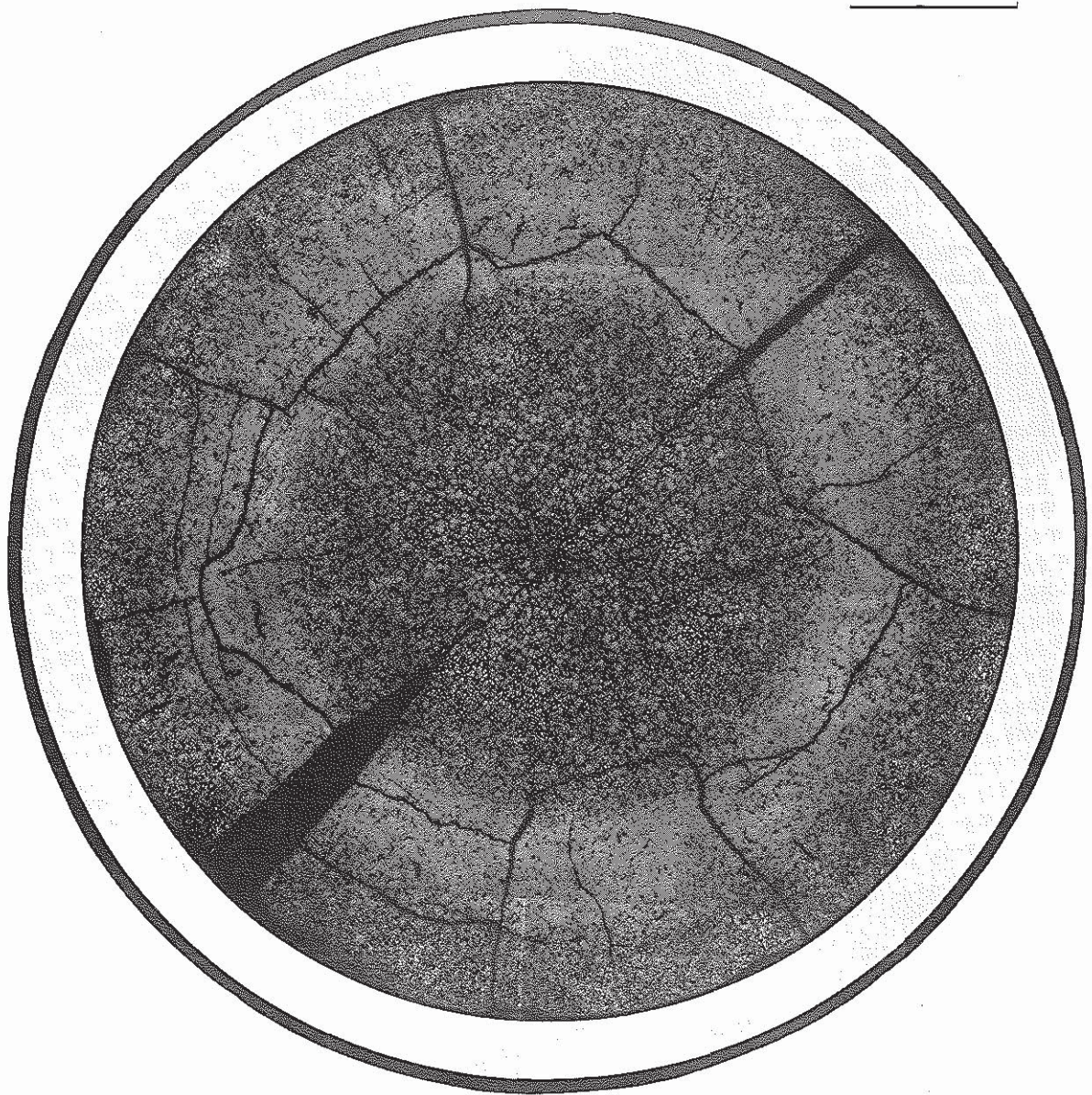
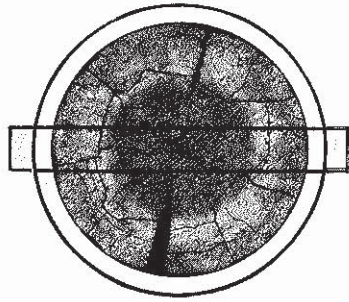


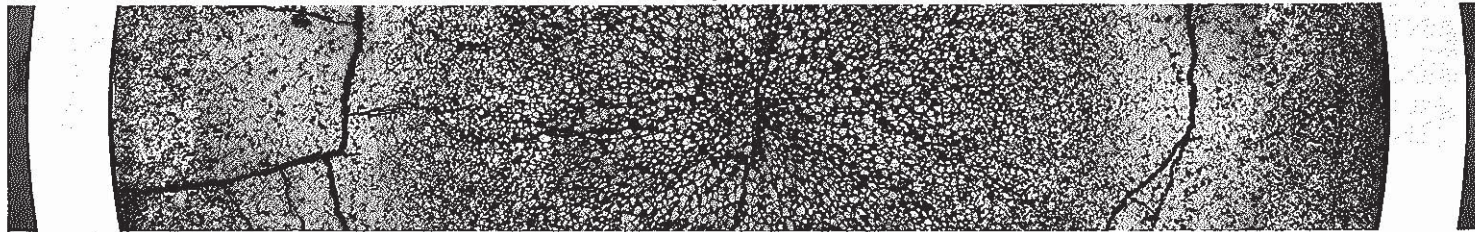
Photo 4 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6747B3 sample)



S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6747	
Section No.	6747B3	
Distance from bottom of pin		747mm
Distance from bottom of fuel column		285mm

As polished

1mm



0.1mm

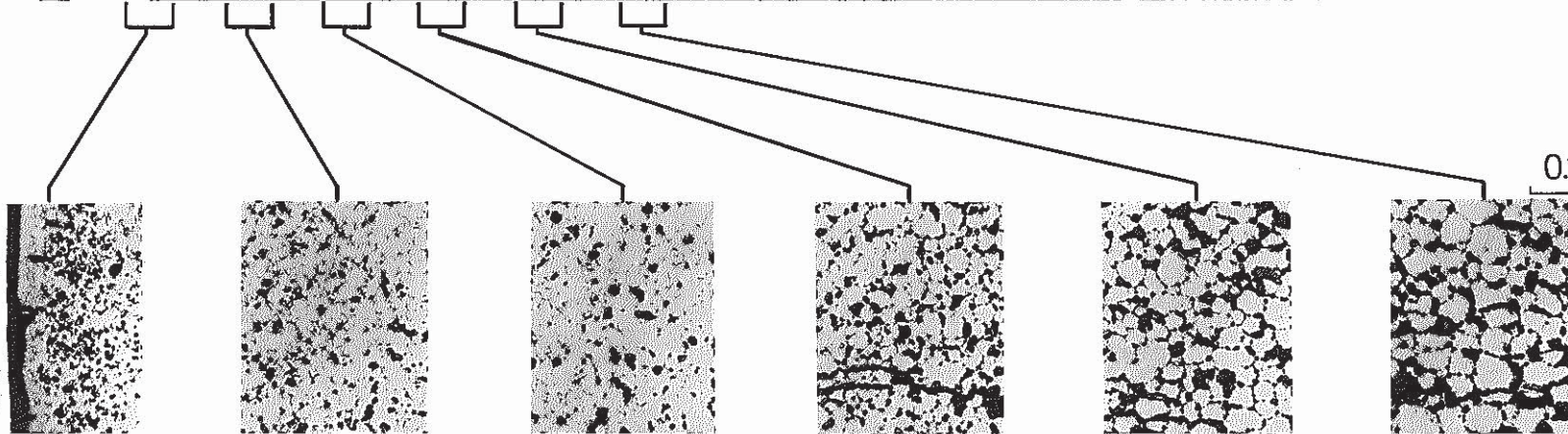


Photo 5 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6747B3 sample)

S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6736	
Section No.	6736A2	
Distance from bottom of pin		372mm
Distance from bottom of fuel column		270mm

As polished

1mm

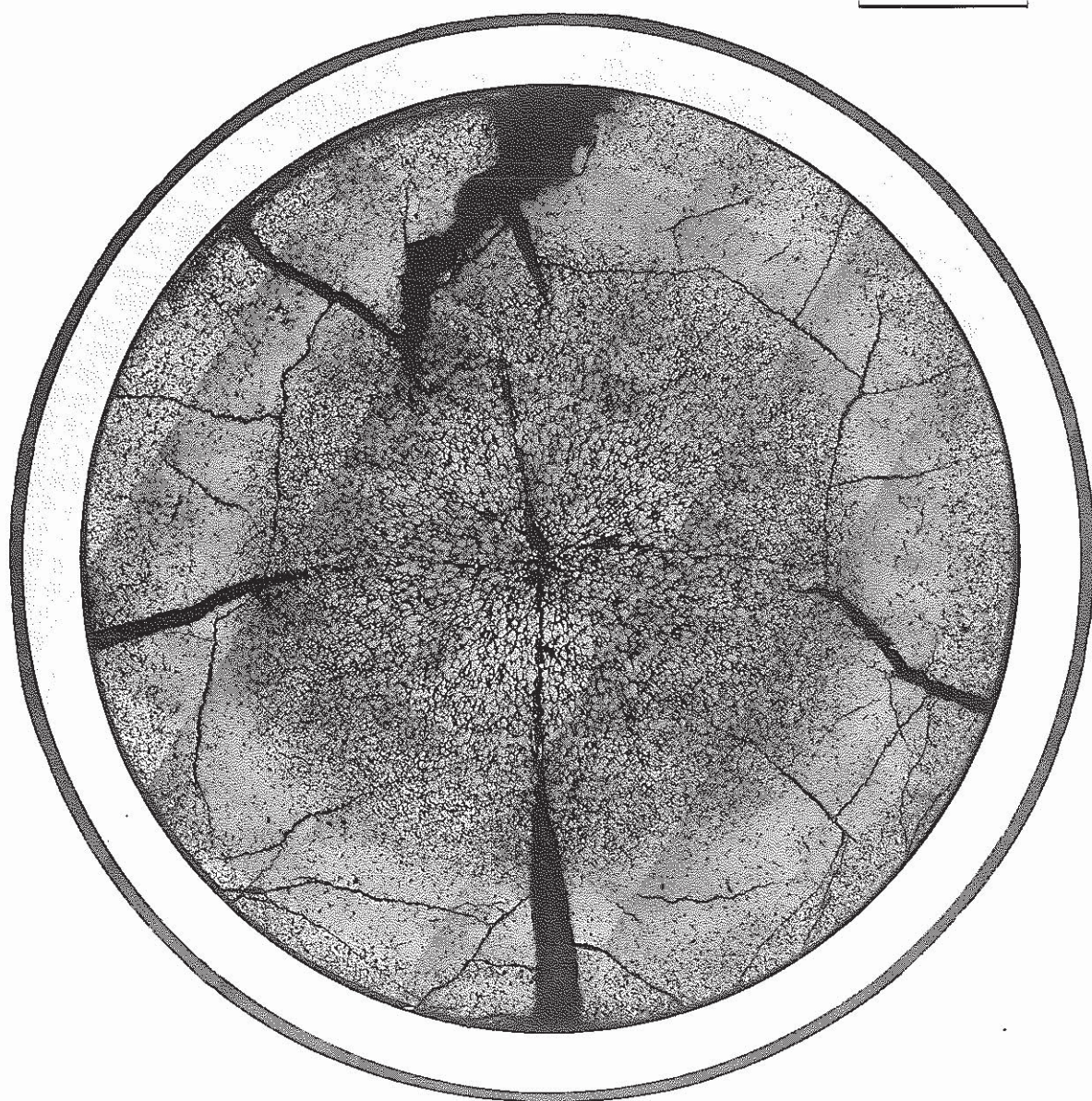
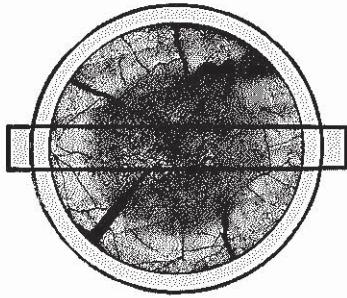


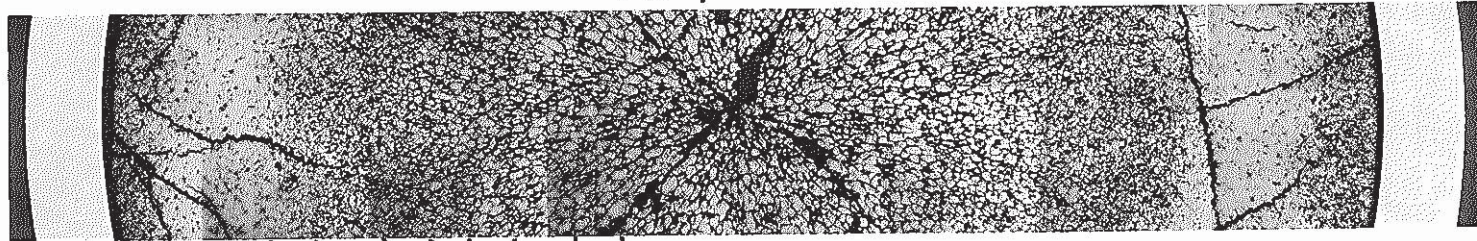
Photo 6 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6736A2 sample)



S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6736	
Section No.	6736A2	
Distance from bottom of pin		372mm
Distance from bottom of fuel column		270mm

As polished

1mm



0.1mm

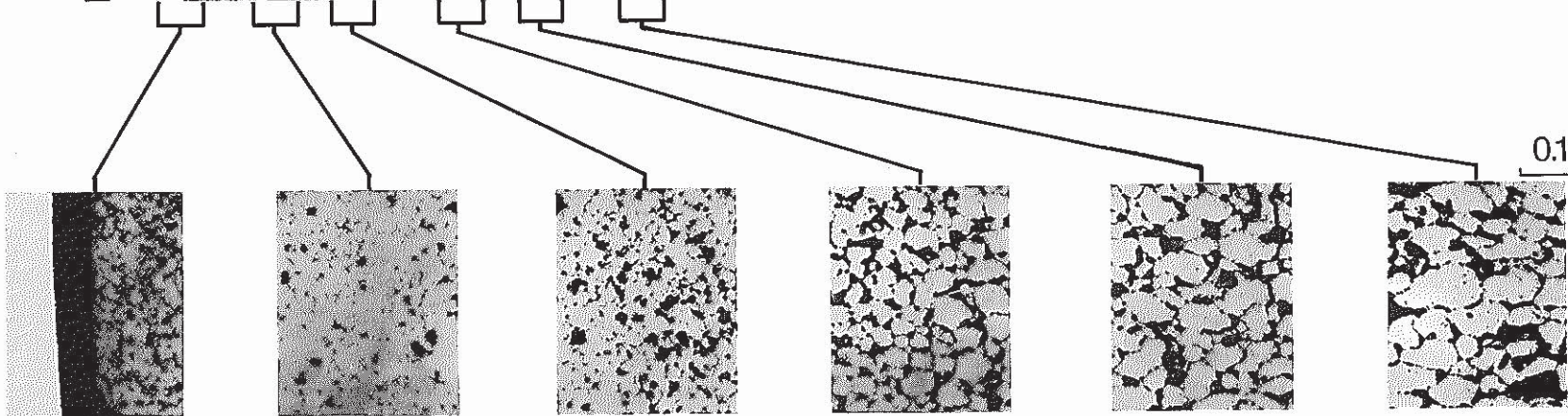


Photo 7 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 6736A2 sample)

S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6756	
Section No.	675662	
Distance from bottom of pin		732mm
Distance from bottom of fuel column		270mm

As polished

1mm

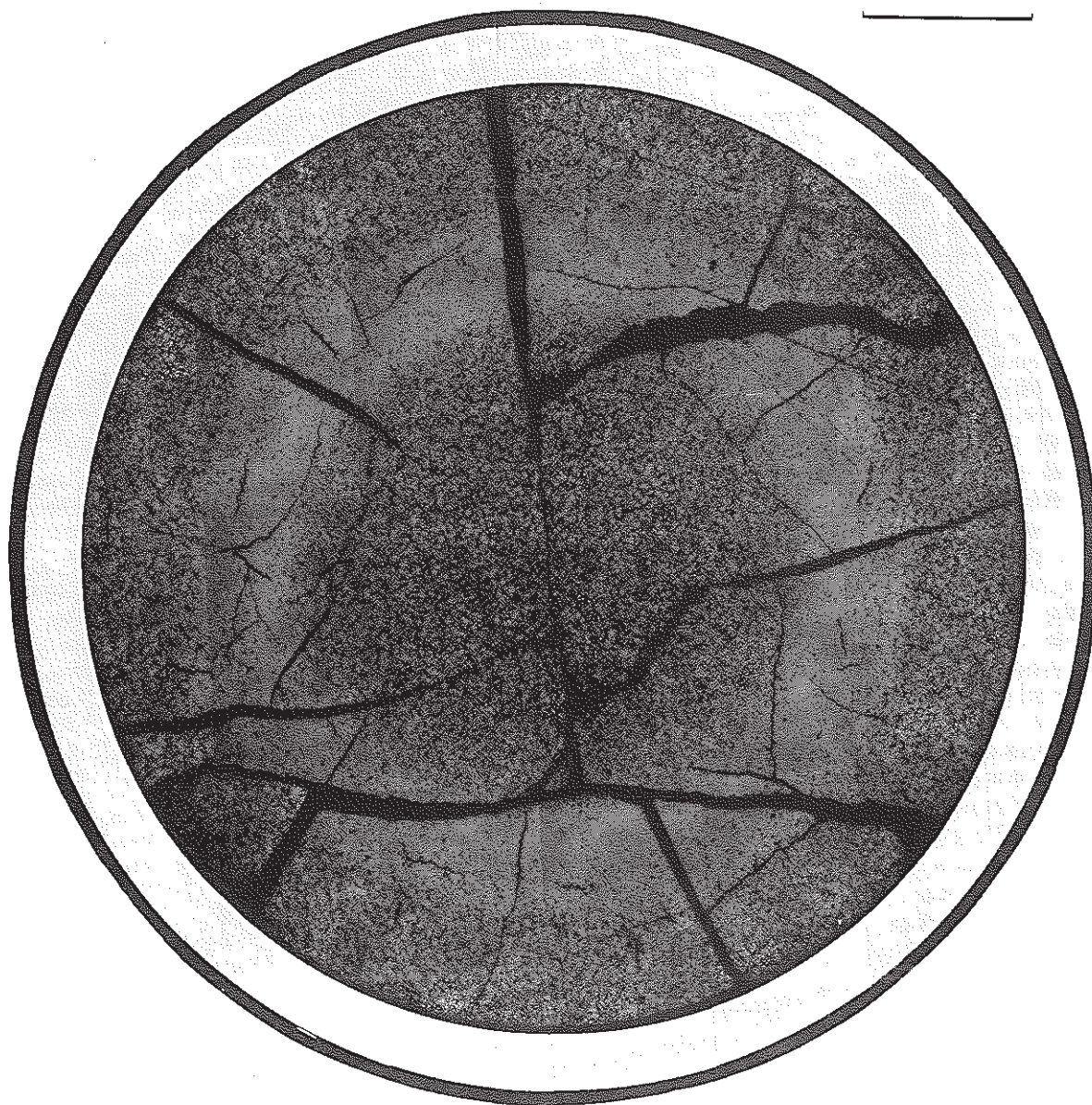
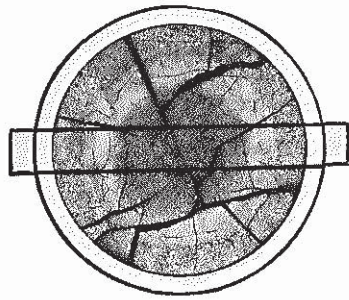


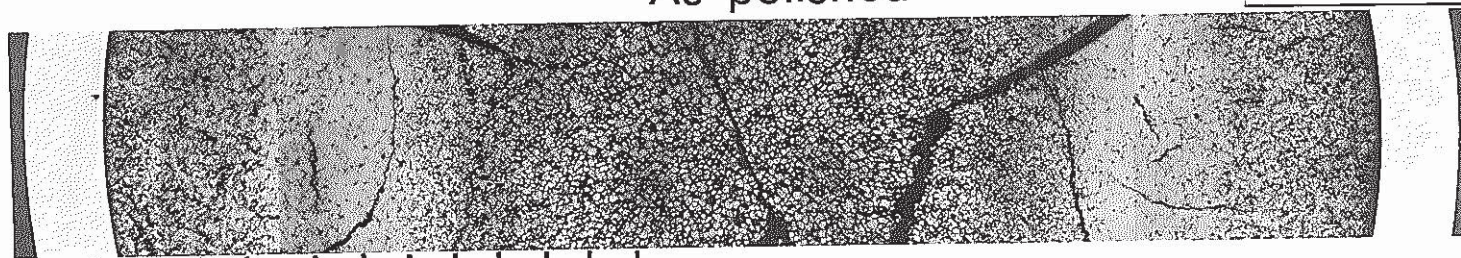
Photo 8 Ceramograph of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 675662 sample)



S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6756	
Section No.	675662	
Distance from bottom of pin		732mm
Distance from bottom of fuel column		270mm

As polished

1mm



0.1mm

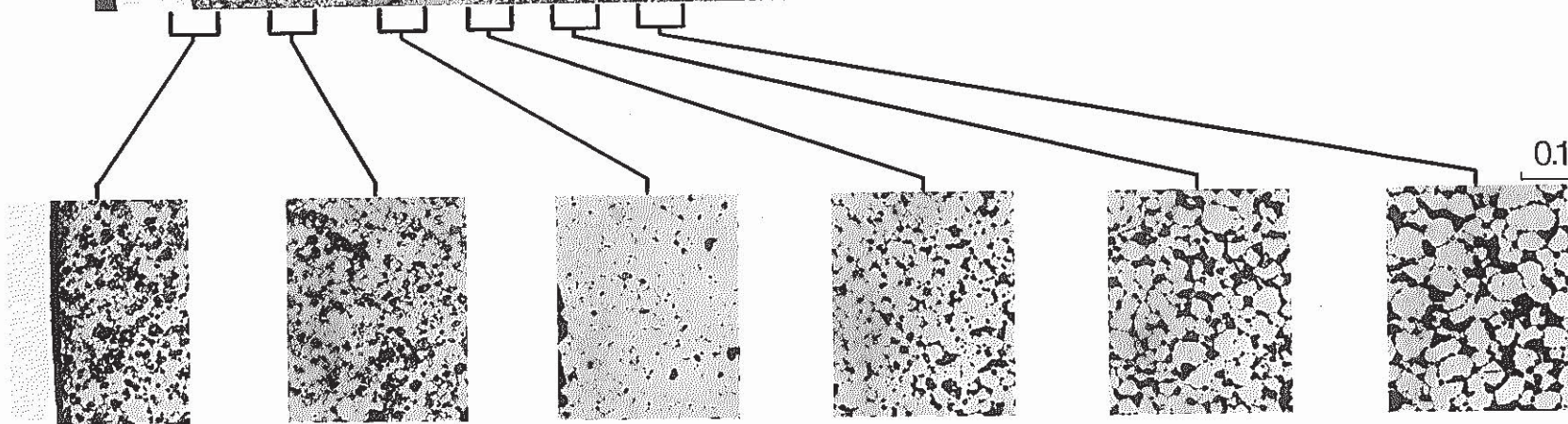
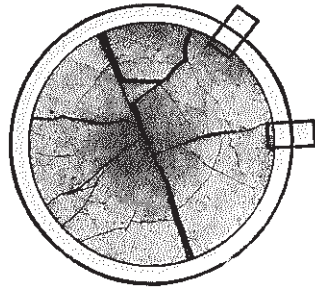


Photo 9 Ceramographs of JOYO MK-I core fuel (PPJX12, 675662 sample)



S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6747	
Section No.	6747G3	
Distance from bottom of pin		1051mm
Distance from bottom of fuel column		589mm

As polished

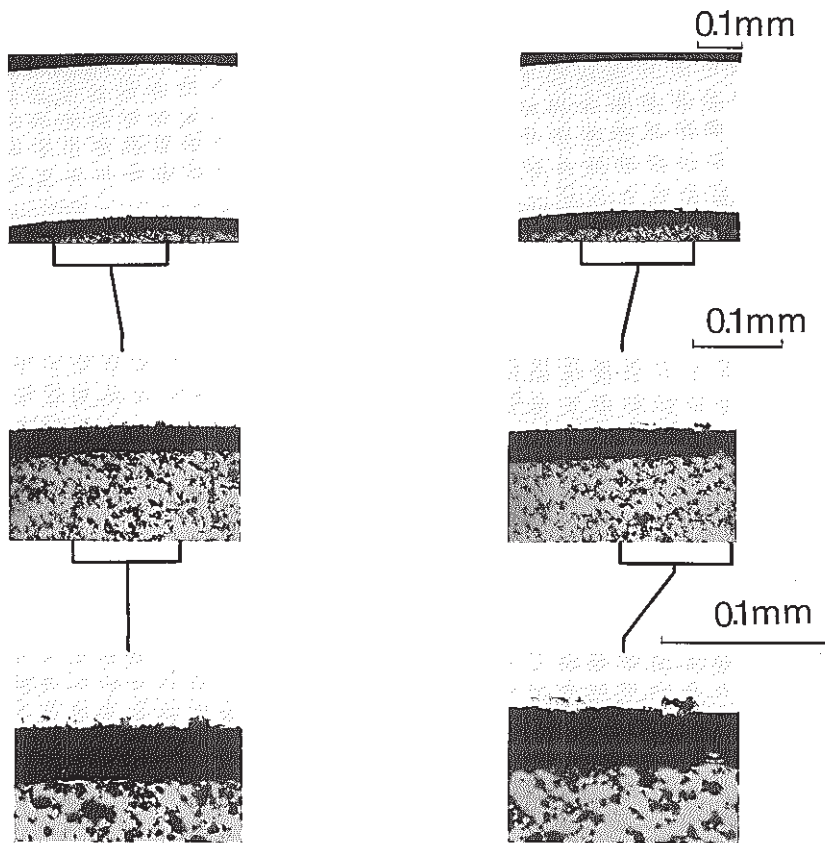
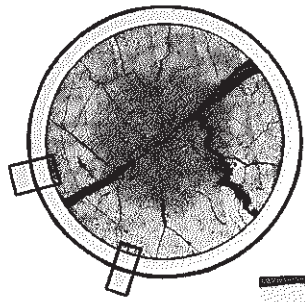


Photo 10 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6747G3 sample, FCCI region)



S/A Name	JOYO-PPJX12	
Pin No.	6736	
Section No.	6736C2	
Distance from bottom of pin	882mm	
Distance from bottom of fuel column	420mm	

As polished

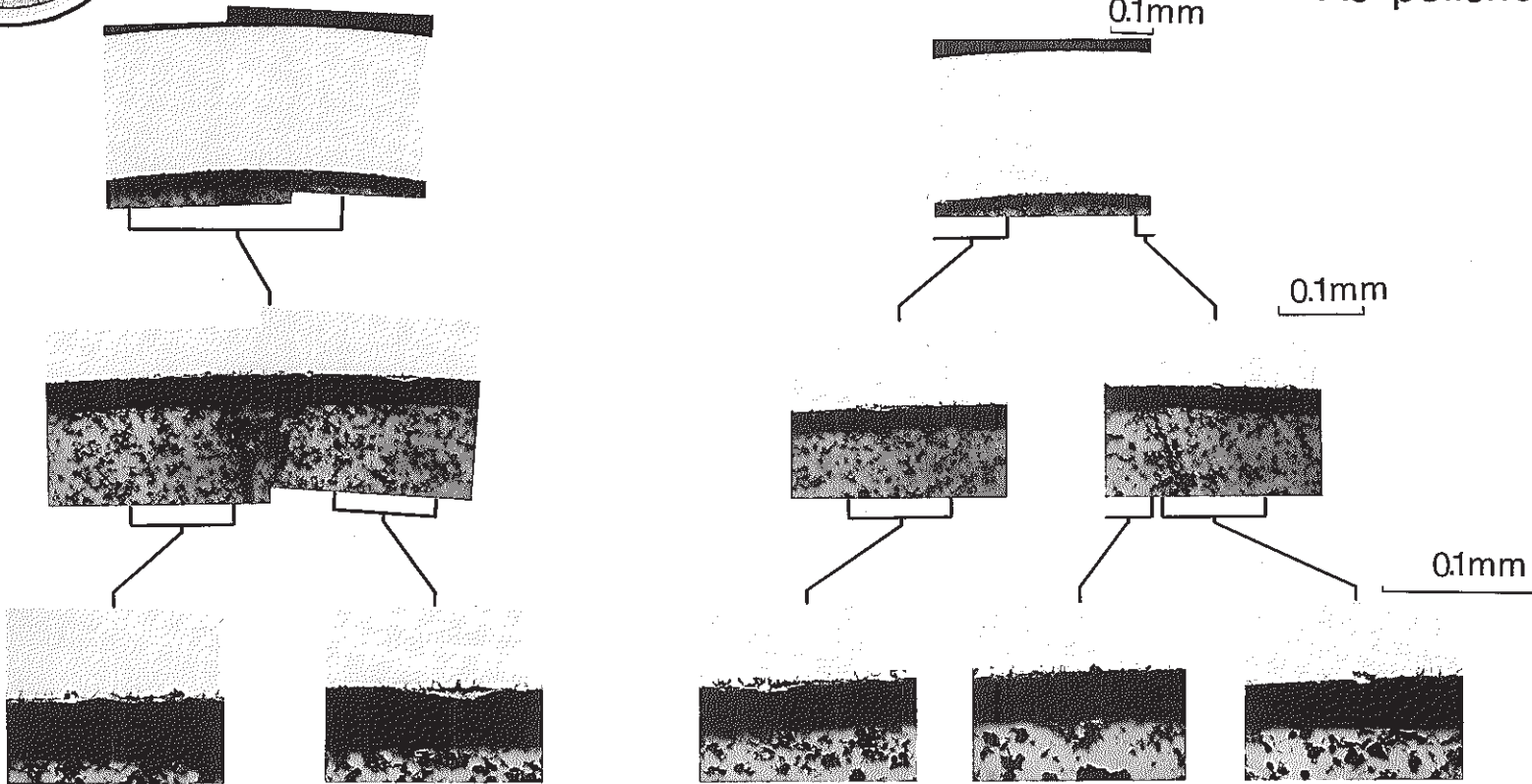
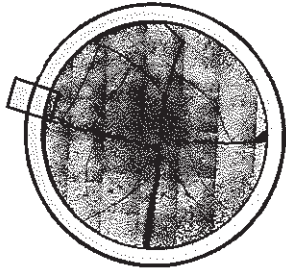


Photo 11 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6736C2 sample, FCCI region)



S/A Name	JOYO - PPJX12	
Pin No.	6756	
Section No.	6756C2	
Distance from bottom of pin		1047mm
Distance from bottom of fuel column		585mm

As polished

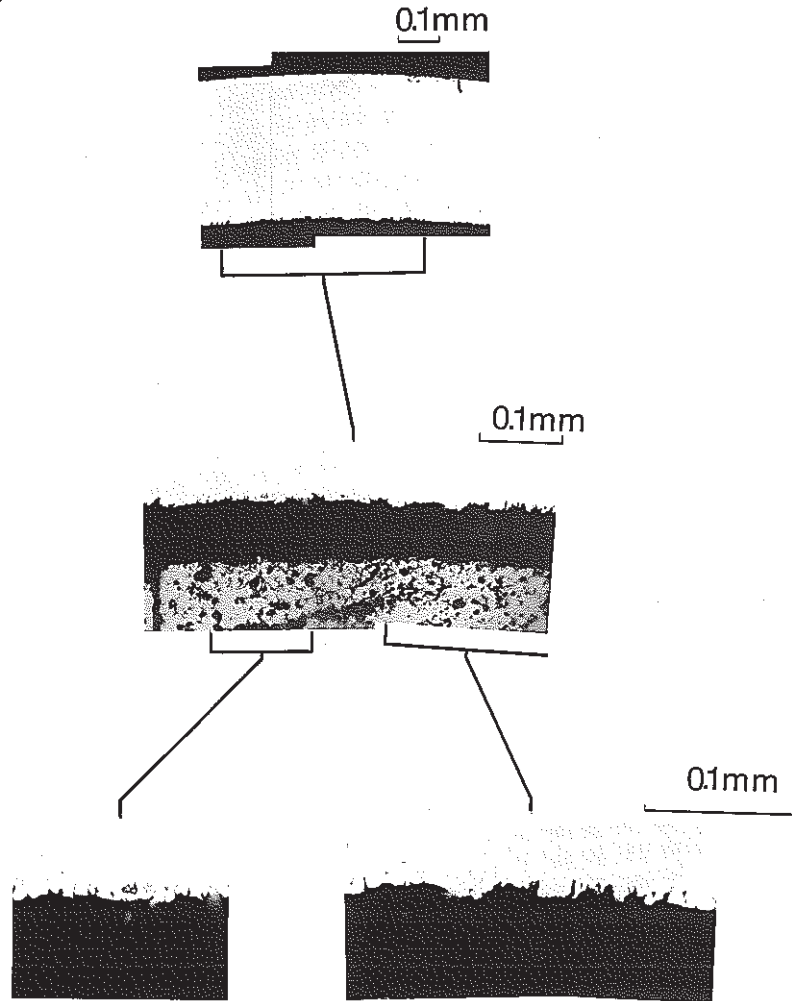


Photo 12 Metallographs of JOYO MK-I cladding (6756C2 sample, FCCI region)

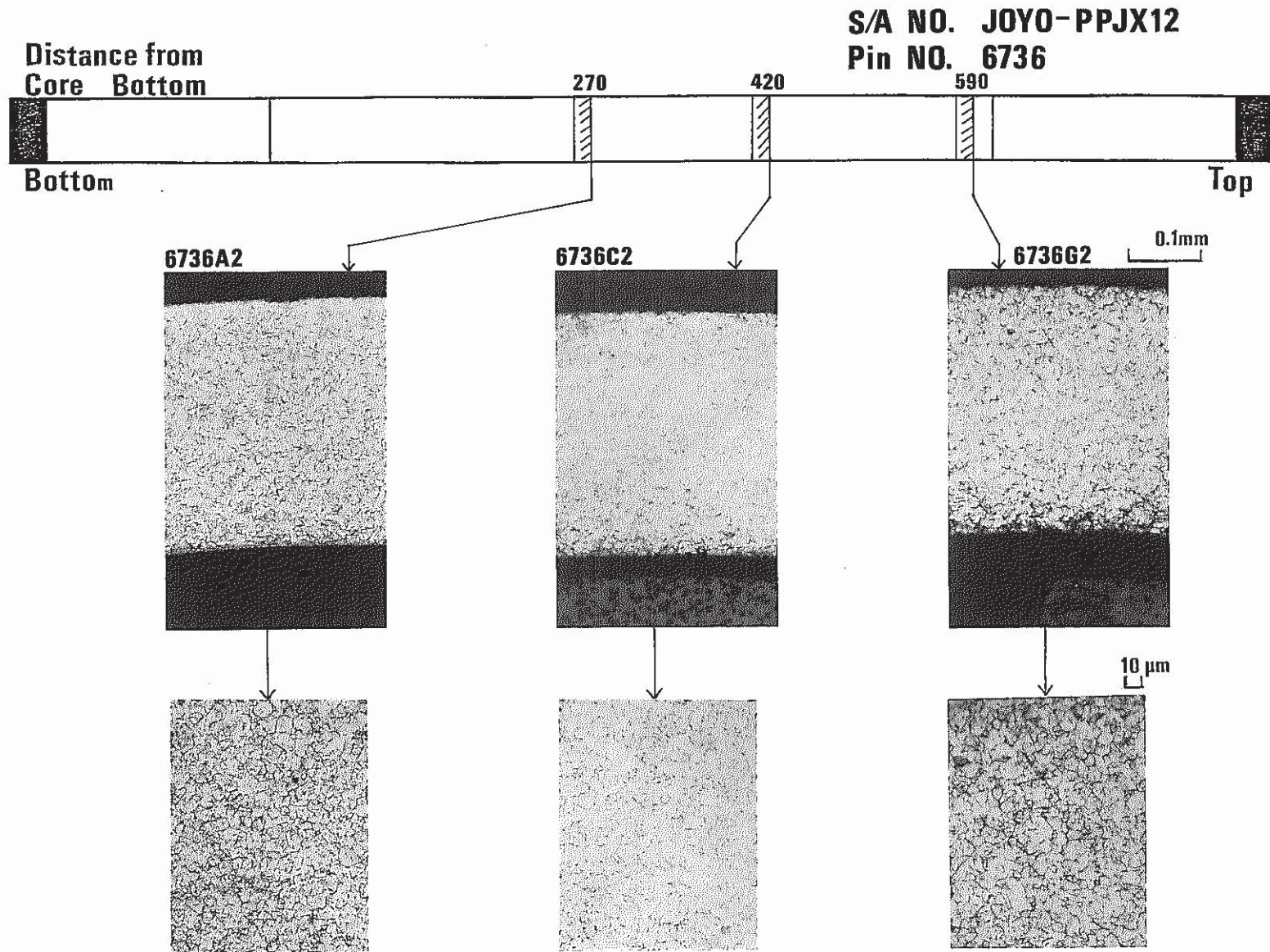


Photo 13 Optical microstructures of the cladding (6736 pin, etched, K)

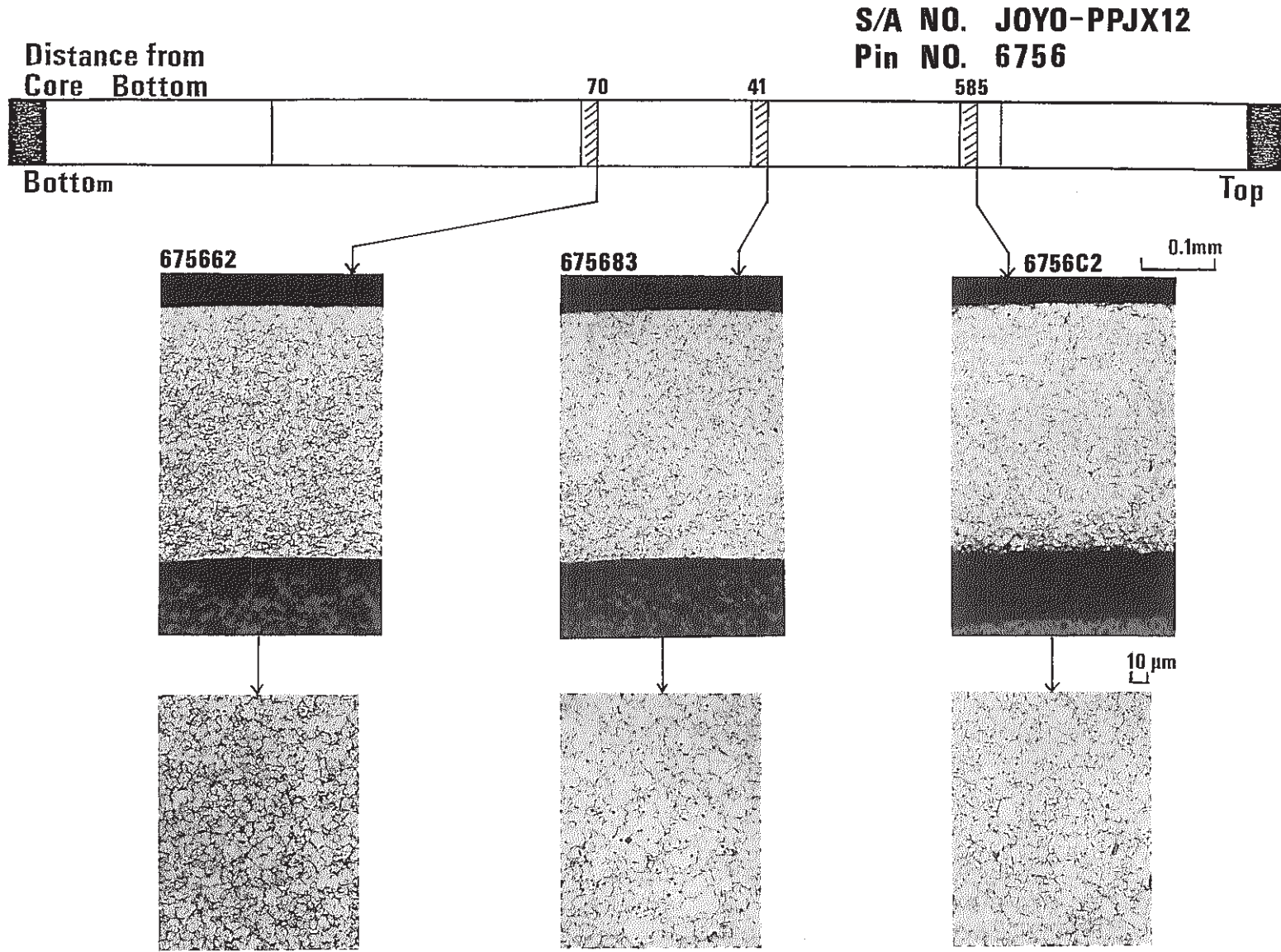


Photo 14 Optical microstructures of the cladding (6756 pin, etched, S)

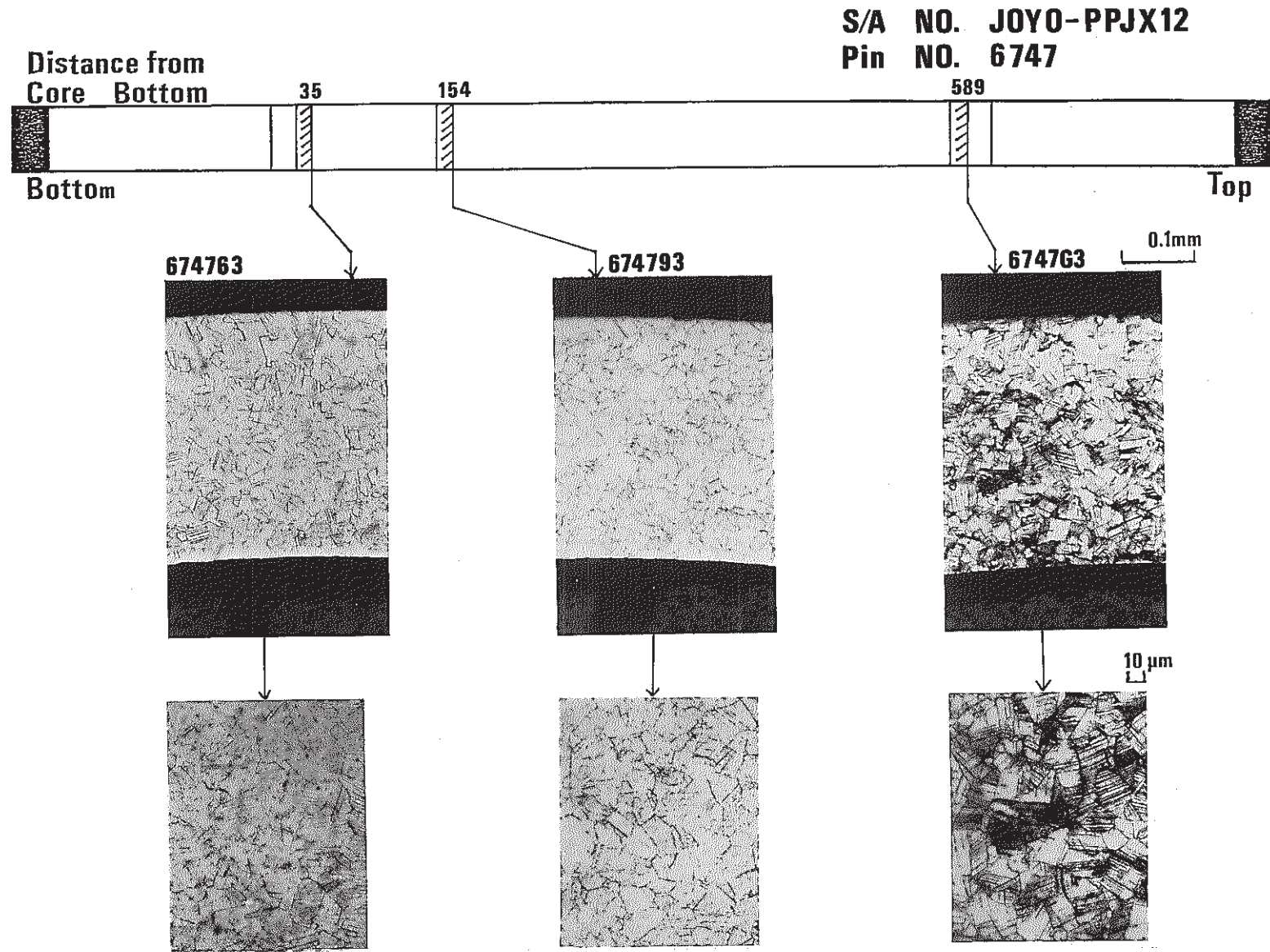


Photo 15 Optical microstructures of the cladding (6747 pin, etched, R)