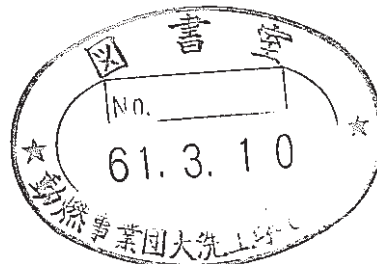


Rapsodie PNC-4 (1) (2) (3) 燃料の照射後試験

燃料要素の破壊試験



1986年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-135
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)

1986年1月

Rapsodie PNC-4 (1) (2) (3) 燃料の照射後試験

燃料要素の破壊試験

実施責任者* 山内 勤

報告者* 滑川 卓志, 小部 昭, 桑島 幸夫
三次 岳志, 近藤 優 乾 俊彦

要 旨

Rapsodie PNC-4 (1), (2), (3)は、「もんじゅ」型燃料の高燃焼度時の照射挙動を把握するため、仏国の高速実験炉Rapsodie炉で照射された。仏国から返送された燃料ピンは、K09ピン（ペレット最大燃焼度約128,000 MWD/MTM）及びK01, K07, K10ピン（同79,000 MWD/MTM）の計4本である。照射燃料試験室（AGS）では、これらの燃料ピンを対象に破壊試験を実施した。試験項目は、金相試験（燃料組織観察、FCCI観察）、被覆管硬さ測定、被覆管密度測定及び燃焼率測定である。試験により以下の結果が得られた。

- (1) 燃料組織は、各燃料ピンとも径方向中央部に中心空孔が観察され、その外側方向に柱状晶領域、F.Pガスバルブ領域、高密度化領域、黒色リング領域があり、最外周部には不変化領域が存在する。これらの各領域の径寸法は、線出力の増大により増加する傾向にある。
- (2) FCCIは、試験を実施したK07ピン及びK10ピンで粒界腐食及び全面腐食として観察され、最大腐食量は約50 μm （全面腐食と粒界腐食の複合型）であった。
- (3) 被覆管硬さ測定値は、中性子照射量（約 $4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 以上）に依存せず照射温度との間に550 $^{\circ}\text{C}$ に屈曲点を持つ直線で近似される良い相関が得られた。変化の割合は550 $^{\circ}\text{C}$ 以下で-0.8（HV500/ $^{\circ}\text{C}$ ）であり、550 $^{\circ}\text{C}$ 以上で-0.06（HV500/ $^{\circ}\text{C}$ ）であった。
- (4) 被覆管密度測定の結果、K07ピンで最大0.40%の密度変化が得られた。
- (5) 燃焼率測定試験の結果、K07ピンの軸方向燃料中心位置で8.74 atom%（80,200 MWd/MTM）の燃焼率であった。

* 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. 序 論	1
2. 燃料ピン	1
3. 照射条件	2
4. 照射後試験	3
4.1 金相試験	3
4.1.1 試料調製方法	3
4.1.2 試験結果	3
4.2 被覆管硬さ測定試験	5
4.2.1 測定方法	5
4.2.2 測定結果	5
4.3 被覆管密度測定試験	5
4.3.1 測定方法	5
4.3.2 測定結果	6
4.4 燃焼率測定試験	6
4.4.1 試料調製方法	6
4.4.2 結 果	6
5. 結 論	8
6. 参考文献	9

1. 序 論

Rapsodie PNC-4は、「もんじゅ」タイプ燃料の高燃焼度時の挙動を把握するため、仏国の高速実験炉である Rapsodie Fortissimo 炉で照射された。

Rapsodie PNC-4 の試験対象ピンは、K01, K07, K09 及び K10 であり、到達した燃焼度はペレット最大値で

- 1) 約 113000 MWD/T-oxide (約 128000 MWD/MTM) (K09 ピン)
- 2) 約 70000 MWD/T-oxide (約 79000 MWD/MTM) (K01, K07 及び K10 ピン)

である。

照射後試験は、仏国及び動燃において行い、仏国はカダラッシュ研究所で非破壊試験（対象ピンは4本）を実施し、フォンテネオローズ研究所で破壊試験（対象ピンはK01及びK09）を実施した。しかし、これらの燃料ピンは「もんじゅ」の最高燃焼度（ペレット最大値約 131,000 MWD/MTM）に匹敵する燃焼度を有するものを含め、高燃焼度における「もんじゅ」型ピンの照射挙動を把握するために貴重な情報を有していると考え、より詳細な破壊試験を行うことにした。照射後試験として前記4本の燃料ピンについて(a)金相試験(燃料組織観察, FCCI観察),(b)被覆管硬さ測定, (c)被覆管密度測定, および(d)燃焼率測定を実施した。

なお、融点測定も実施したが、この結果については、既に配布されている「高速炉照射燃料の物性試験（第2報）」PNC SN 941 85-48（1985年3月）に記載されているので割愛した。

2. 燃 料 ピ ン

Rapsodie PNC-4 照射後試験に供された燃料ピンの仕様を Table 1.1 及び 1.2 に示す。被覆管は、「常陽」MK-I 3次試作材（昭和45年製作）を用いてある。

3. 照射条件

4本の燃料ピンは、Rapsodie 炉の炉内位置（02，06）で照射された(Fig.1.1を参照のこと)。各ピンの照射期間は、次のとおりである。

照射期間	炉サイクル	照射ピン
'73年12月14日～'75年1月5日	Run 33～Run37	K 09
'75年3月21日～'75年10月19日	Run 39～Run41	K01, K07, K09 及び K 10
'76年3月1日～'76年11月19日	Run43～Run45	K 01, K07, K09 及び K 10

また、各ピンの照射履歴の概略をTable 2.1 及びTable 2.2 に示す。

照射用リグは、各中間解体検査毎に交換され、Run 33～Run 37 はNo. 30-22リグ、Run 39～Run 41 はNo. 30-35 リグ、Run 43～Run 45 はNo. 30-23 リグで照射された。なお、照射リグ内の燃料ピンの配置を Fig.1.2～Fig.1.4 に示す。

Fig. 1.5～Fig.1.16 には各ピンの軸方向温度分布、中性子照射量分布、及び線出力分布を示す。

4. 照射後試験

4.1 金相試験

4.1.1 試料調製方法

金相試験の工程をFig. 4.1.1に示す。今回実施した試験の詳細項目をTable 4.1.1に示す。また、各試料の切断位置、製造パラメータおよび照射条件をTable 4.1.2に示す。

4.1.2 試験結果

Photo 1~4に、K07, K09, K10ピンの断面マクロ写真を示す。また各試料断面の×75,×100, ×400の研磨およびエッチング状態における顕微鏡写真をPhoto 5~31に示す。

(1) 燃料組織観察

1) 試料No. YC207 (K07) <Photo 5~8>

燃料中央部に直径約1.8 mm ϕ の中心空孔が存在しその外側に柱状晶領域, ガスバルブ領域, 高密度化領域, 黒色リング領域があり最外周部には不変化領域が存在する。中心空孔内壁からクラックが燃料外表面に向かって数本はいつており, 高密度化領域に周方向クラックがいつている。微細な白色析出物か, おもに柱状晶領域において観察される。不変化領域に, 製造時の大きなボイドが残っており, また外表面付近に約80 μ mの白色析出物が観察された。(Photo 5参照)。

ギャップ幅(直径ギャップの平均値)は, 直径方向で20 μ mである。被覆管内面に一部全面腐食が認められ最大8 μ mの腐食が観察される。その写真をPhoto 5に示す。

2) 試料No. YC20 E (K07) <Photo 7~10>

燃料中央部に直径約1.9 mm ϕ の中心空孔が存在し燃料組織はYC207と同様5領域から成る。また, 燃料ペレット内クラックも同様に半径方向クラックと周方向クラックが数本はいつている。微細な白色析出物が柱状晶領域から高密度化領域まで分布しているのが観察される。ギャップ幅は, 直径方向で143 μ mである。ギャップ部でF.P及び腐食生成物の蓄積が観察され, また被覆管内面では粒界腐食及び全面腐食が全周にわたり認められ最大腐食量は約40 μ mである。その位置の写真をPhoto 26に示す。

Photo 10の被覆管にキズが観察されるが, これは研磨時についたキズである。

3) 試料No. YC20 J (K07) <Photo. 11~14>

燃料中央部に直径約1.5 m ϕ の中心空孔が存在し燃料組織はYC20 Eと同様5領域から成る。燃料ペレット内クラックは, 半径方向クラックが数本はいつている。微細な白色析出物は柱状晶領域に観察されるがYC207, YC20 Eに比べて分布量が少ない。ギャップ幅は, 直径方向

で106 μm である。

ギャップ部ではYC 20 Eと同様にF.P.及び腐食生成物の蓄積と被覆管内面に粒界腐食及び全面腐食が全周に観察され、最大腐食量は約50 μm である。その位置の写真をPhoto 28,29に示す。

4) 試料No. YC2332 (K09) <Photo 15~19 >

燃料組織は、直径約1.9 mm ϕ の中心空孔とその外側に柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域、不変化領域の4領域から成る。燃料ペレット内クラックは、半径方向に入っている。

白色析出物は、YC 20 Eと同様に柱状晶領域から高密度化領域まで分布しており、又析出物の粒成長も起っている。中心空孔内壁に最大長径約60 μm 、不変化領域に最大直径約90 μm の大きさの白色析出物が観察された。(Photo 17 参照) ギャップ幅は、長径方向で162 μm と全輪切試料中で最大値を示している。被覆管内面で、FCCIは認められない。

5) 試料No. YC218 (K10) <Photo 20~24 >

燃料組織及び燃料ペレット内クラックは、YC 207と同様である。微細な白色析出物は、柱状晶領域からガスバブル領域に分布しているのが観察される。ギャップ幅もYC 207と同程度の25 μm を示す。ギャップ部でF.P.及び腐食生成物の堆積が観察され、又被覆管内面には粒界腐食が認められ最大腐食量は約30 μm である。その位置の写真をPhoto 31に示す。

以上の結果をTable 4. 1. 3に示す。また燃料ペレットの各組織領域径(R)と燃料外径(R_o)との比(R/R_o)のピン軸方向依存性をFig. 4. 1. 2に示す。各領域とも炉心中心部近辺で領域径が大きくなる傾向にある。Fig. 4. 1. 3に各領域の線出力依存性を示す。中心空孔及び柱状晶領域は、約400 w/cm近くの線出力でその領域径がほぼ飽和と考えられ、またガスバブル領域及び高密度化領域は、 R/R_o で0.80及び0.85に存在し飽和していると考えられる。

(2) FCCIの観察

燃料-被覆管の化学的相互作用(FCCI)は、K07ピン、K10ピン(Photo 25~31)に観察されその形態は粒界腐食、全面腐食及び複合腐食である。最大腐食量は試料No. YC 20 Jで約50 μm であった。その位置の写真をPhoto 28に示し、Table 4. 1. 4に測定値を示す。

また同表中に、過去のデータから得られたFCCI予測式^{文献5)}を用いて算出したFCCI予測値(最大腐食量)を併記した。YC 20 Jの腐食量が予測値より少し高いことを除いて予測値と実測値はよく一致している。YC 20 Jについては、試料位置が、上部インシュレータ・ペレットの近傍であることから、酸素ポテンシャルが局所的に高くなり易いことや、F.P.が蓄積し易いことなど、FCCI予測式に含まれていない特異な環境が原因しているものと考えられる。

4.2 被覆管硬さ測定試験

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度計（測定荷重：10 gf～1 kgf）により実施した。Table 4.2.1に測定条件及び各試料面での測定位置を示す。

4.2.2 測定結果

各ピンの軸方向の硬さ値は、Table 4.2.2に示すように燃料下端側（D.F.C.B. \leq 100 mm）では、照射前の硬さ値248（HV500）より33～55（HV500）高く、上端側（D.F.C.B. \geq 219mm）では、照射前より3～20（HV500）低くなっている。各ピンの軸方向硬さ値と照射条件をFig. 4.2.1～4に示す。

そしてTable 4.2.3～6に示す各測定点の硬さ値より被覆管周方向には、硬さ値の変化が小さいことがわかる。また同Tableより燃料下端側試料には顕著な肉厚方向硬さ変化（内面側より外面側の方が硬い）が認められる。またこの変化は燃料上端側になるにつれ小さくなっている。

次に、Fig. 4.2.5に硬さ値と照射量の関係を示すが、両者の相関は認められない。しかしながら、適当な温度範囲で区分した図中の各プロットからは照射温度と硬さ値の相関が読み取れる。「常陽」MK-Iシリーズの測定結果^{文献2)}からは、照射量 $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 以下では硬さ値は照射量に比例して増大するが、それ以上で飽和することが知られている。またこの増大曲線は、照射温度に依存することがわかっており、今回の測定点の照射量範囲では、照射量に依存せず硬さ値と温度の相関が得られることが期待される。そこでFig. 4.2.6に硬さ値と照射温度の関係をプロットした図を示す。図中の実線は、最小2乗法により近似したもので550（℃）付近に屈曲点がみられる。そして、屈曲点前後の温度による硬さ値の変化の割合は、温度が屈曲点以下では-0.8（HV500/℃）と大きく、屈曲点以上では-0.06（HV500/℃）と小さくなることがわかる。この屈曲点以下での変化割合-0.8（HV500/℃）は、JOYO MK-Iシリーズの測定結果より求めた値と一致した。

4.3 被覆管密度測定試験

密度測定は、未切断のまま返送されてきたK07、K10ピン合せて6箇所について選定、測定した。Fig. 4.3.1に試料採取位置を示す。

4.3.1 測定方法

(1) 試料調製及び測定

試料調製及び測定は、次のように行った。

a) 試料切断（長さ25 mm）

- b) 脱ミート (燃料除去)
 - c) 被覆管酸洗浄及び乾燥 (硝酸 (8 モル) 中 15 分加熱, 蒸留水による超音波洗浄 20 分後自然乾燥)
 - d) 被覆管密度測定試料の最終洗浄及び乾燥 (No. 14 セル内で, アセトン, アルコール, 蒸留水の順で各 1 分ごとの洗浄をし, 乾燥させる)
 - e) 秤量 (空気中での秤量, 減圧含浸, 界面活性剤入り純水中秤量をくり返し測定)
 - f) 密度計算
- 天秤の読み取り限度は, $1 \mu\text{g}$ である。

4.3.2 測定結果

各試料の被覆管密度測定結果を Table 4.3.1 に示す。また低温度の試料を基順にした密度変化及び体積変化 (燃料ピン外径変化 $\times 3$) を比較した結果を Fig.4.3.2 及び Fig.4.3.3 に示す。これらの結果から, K07 ピンでは 0.13~最大 0.40 % の密度増加がみられた。最大値は, 燃料部上部の 2 箇所 (それぞれ 552°C で, フルエンスは $6.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 及び 570°C , $5.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$) である。また, K10 ピンは, 1 点のみの測定で 0.28 % の増加であった。K07, K10 ピンとも測定誤差の範囲 (0.2 %) を超え, 有意とみられるデータとなっている。また K01 ピンと K07 ピンについて仏国 CEA での密度測定データ³⁾ から, 同仏国 RMI で K01, K09 ピンの密度変化に使用した Base value ($\rho_0 = 7.945 \text{ g/cm}^3$) を使って密度変化を求めた。これらを Table 4.3.2 に示す。さらに, このデータを AGS 測定データと合せて密度とフルエンスとの相関を Fig. 4.3.4 に示す。

図から被覆管温度約 $550 \sim 600^\circ\text{C}$ の試料はスエリングを開始しており照射が進むにつれ増加している。その他の試料 (約 $450 \sim 550^\circ\text{C}$) についても, 照射量で約 $7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ Mev}$) 程度からスエリングを開始しており温度が高い試料ほどスエリングは増加していることがわかる。これらから今回測定した K10, K07 ピンの主な試料は潜伏期間を終えスエリングが開始する状態にあると思われる。

4.4 燃焼率測定試験

4.4.1 試料調製方法

試料調製の方法と手順を Fig. 4.4.1 に示す。

4.4.2 結果

得られた測定データをまとめた結果を Table 4.4.1 に示す。使用した実効核分裂収率及び燃焼率 (atom%) - 燃焼度 (MWD/MTM) 換算値をそれぞれ Table 4.4.2 及び Table 4.4.3 に示す。今回の同位体希釈分析計算に用いたスパイク液の濃度及び組成等を Table 4.4.4 に

示す。また質量分析結果を Table 4.4.5 ~ Table 4.4.7 に示す。同位体希釈分析計算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得られた燃焼率計算結果はまとめて Table 4-4-8 に示す。

以上の計算結果から、Rapsodie PNC-4 K07 ピン (YA20 ピン) の燃料軸方向中心位置での燃焼率は 8.74 atm% (80,200 MWD/MTM) の結果が得られた。

5. 結 論

Rapsodie PNC-4 の4本の燃料ピン（ペレット最高燃焼度 K01, K07, K10 ピン：79,000 MWD/MTM, K09 ピン：128,000 MWD/MTM）の照射後試験から次のことが明らかになった。

1) 燃料組織

4本の各燃料とも、径方向中央部に中心空孔が存在し、その外側に柱状晶領域、F.P ガスバルブ領域、高密度化領域、黒色リング領域があり、最外周部には不変化領域が存在する。これらの各領域の径は、線出力の増大により増加する傾向にある。

2) FCCI

FCCI は、K07 及び K10 ピンに粒界腐食及び全面腐食として観察された。最大腐食量は約 50 μm （全面腐食と粒界腐食の複合型）であった。

3) 被覆管硬さ

今回の測定試料の中性子照射量範囲（約 $4\sim 13\times 10^{22}\text{ n/cm}^2$ ）では、照射量に依存せず照射温度に対して硬さ値との相関が得られた。硬さ値は照射温度 550 ($^{\circ}\text{C}$) 付近に屈曲点を持つ直線で近似され、変化の割合は、550 ($^{\circ}\text{C}$) 以下の領域では $-0.8\text{ (HV500/}^{\circ}\text{C)}$ であり、550 ($^{\circ}\text{C}$) 以上の領域では $-0.06\text{ (HV500/}^{\circ}\text{C)}$ であった。低温領域の変化割合 $-0.8\text{ (HV500/}^{\circ}\text{C)}$ は、JOYO MK-I シリーズの測定結果と同じであった。

4) 被覆管密度

K07 ピン（ピーク燃焼度約 79,000 MWD/MTM）の被覆管密度測定の結果、最大で 0.402 % の密度変化が得られた。

5) 燃焼率測定

K07 ピンの軸方向燃料中心位置での燃焼率は、8.74 atom% (80,200 MWD/MTM) であった。

6. 参 考 文 献

- 1) ZN941 81-202, Rapsodie PNC-4(2)及び4(3)照射後試験結果のまとめ
- 2) SN941 84-05, 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3報)
- 3) ZN941 82-130 Vol.1, FBR 燃料ピン照射データ集(2)
- 4) ZF 115 79-03, DESTRUCTIVES EXAMINATIONS on PNC 4-3 pins -K01 and K09
- 5) SN241 83-13, 燃料被覆管内面腐食(FCCI)検討会成果報告書-FCI予測式の作成-

データ集

1. 燃料仕様

2. 照射データ

Table 1.1	Fuel pin fabrication parameters
Table 1.2	Cladding fabrication sheet
Table 2.1	Rapsodie PNC-4 irradiation condition (K09)
Table 2.2	Rapsodie PNC-4 irradiation condition (K01,K07,K10)
Fig. 1.1	Core location for PNC-4
Fig. 1.2~1.4	Fuel pin arrangement in the capsule
Fig. 1.5~1.8	Cladding temperature and fluence distribution
Fig. 1.9~1.16	Cladding temperature and linear power distribution

Table 1.1 Fuel pin fabrication parameters

Project name	Rapsodie PNC-4	Pin No K 01	Pin No K 07	Pin No K 09	Pin No K 10
Fuel					
Fuel form	Flat end solid pellet	Flat end solid pellet	Flat end solid pellet	Flat end solid pellet	Flat end solid pellet
Pellet diameter (mm)	5.411	5.406	5.396	5.41	5.41
Pellet density (% T.D)	84.32	85.41	84.62	84.64	84.64
Fuel composition	20.37 w/o PuO ₂ -UO ₂	20.32 w/o PuO ₂ -UO ₂	20.37 w/o PuO ₂ -UO ₂	20.37 w/o PuO ₂ -UO ₂	20.37 w/o PuO ₂ -UO ₂
U-235 enrichment (%)	65.36	65.36	65.36	65.36	65.36
Pu isotopic composition (%)	Pu 239/240/241/242 75.52/14.34/7.92/1.39	Pu 239/240/241/242 75.52/14.34/7.92/1.39	Pu 239/240/241/242 75.52/14.34/7.92/1.39	Pu 239/240/241/242 75.52/14.34/7.92/1.39	Pu 239/240/241/242 75.52/14.34/7.92/1.39
O/M ratio	1.99	1.98	1.99	1.99	1.99
Cladding					
Type and work	SUS316相当, 9.7% cold work	SUS316相当, 9.7% cold work	SUS316相当, 9.7% cold work	SUS316相当, 9.7% cold work	SUS316相当, 9.7% cold work
Outer/inner diameter (mm)	6.302 / 5.592	6.304 / 5.603	6.303 / 5.593	6.304 / 5.593	6.304 / 5.593
Lot identification	(被覆管番号) K 4985 - 1) ¹	(被覆管番号) K 4032 - 1) ¹	(被覆管番号) K 4976 - 1) ¹	(被覆管番号) K 4976 - 2) ¹	(被覆管番号) K 4976 - 2) ¹
Fuel pin					
Pin length (mm)	999.8	999.9	1000.0	1000.0	1000.0
Fuel column length (mm)	320.8	320.3	318.3	317.2	317.2
Plenum length (mm)	240.6	222.1	243.8	200.07	200.07
Blanket length (mm)	上部 40.1 下部 200.1	上部 59.9 下部 199.7	上部 40.0 下部 199.9	上部 40.0 下部 200.0	上部 40.0 下部 200.0

Table 1.2 Cladding fabrication sheet

Vender	Lot No.	Clad No.	Melt-ing	Solution Treat-ment	Cold Work (%)	Chemical Composition (Wt%)										Hv	Grain Size	Tensile Properties				
						C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co	Mo	B			N	Test Temp.	σ_u (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	TE (%)
K	1	K4001	Double	1000°C	9.7											245	8.7	RT	72.0	60.8	40.0	
		2																				
		K5000	Melt	x4min		0.05	0.50	1.56	0.02	0.01	13.0	16.4	0.02	2.3	0.0010	0.017	252	8.7	650°C	38.0	35.8	37.0
						0.05	0.51	1.57	0.02	0.01	13.0	16.4	0.02	2.3	0.0010	0.018				40.8	36.9	34.4

Table 2.1 Rapsodie PNC-4 irradiation condition (K09)

注1

Run No.	燃料線出力ピーク (W/cm)	ピーク燃焼度 (atomic%)	ピーク燃焼度 Oxide (MWD/ton)	ピーク燃焼度 Metal (MWD/ton)	ピークフルエンス Total ($\times 10^{22}$ nvt)	ピークフルエンス $E \geq 0.1$ MeV ($\times 10^{22}$ nvt)	実効照射日数 (EFPD)	年.月.日
33 (start)	490.40	0	0	0	0	0	0	73.12.14
33 (end)	485.90	1.316	10,605	12,051	1.24	1.07	47.868	74. 2. 3
34 (end)	477.60	2.640	21,207	24,097	2.52	2.17	96.790	74. 6. 6
35 (end)	469.50	3.960	31,799	36,135	3.80	3.27	146.096	74. 8.18
36 (end)	461.15	5.301	42,567	48,372	5.12	4.40	196.980	74.11. 2
37 (end)	454.13	6.445	51,759	58,817	6.26	5.38	240.915	75. 1. 5
38	第 1 回 中 間 検 査 (43 dpa)							
39 (start)	454.13	6.340	51,759	58,817	6.26	5.38	240.915	75. 3.21
39 (end)	443.98	7.450	61,670	70,080	7.51	6.46	288.929	75. 5.13
40 (end)	437.00	8.510	69,379	78,840	8.64	7.43	332.997	75. 7.16
41 (end)	427.45	9.850	80,621	91,615	10.11	8.69	390.001	75.10.19
42	第 2 回 中 間 検 査 (69 dpa)							
43 (start)	427.45	9.850			10.11	8.69	390.001	76. 3. 1
43 (end)	418.68	11.240			11.64	10.01	450.047	76. 5.10
44 (end)	409.59	12.390	104,516	118,768	12.96	11.15	503.517	76. 7.31
45 (end)	396.65	14.015	113,023	128,435	14.70	12.64	577.496	76.11.19
	(102.8 dpa)							

照射位置 02-06

注1 $E \geq 0.1$ MeV は Total $\times 0.86$

Table 2.2 Rapsodie PNC-4 irradiation condition (K01, K07, K10)

注1

Run No.	燃料線出力ピーク (W/cm)	ピーク燃焼度 (atomic%)	ピーク燃焼度 Oxide (MWD/ton)	ピーク燃焼度 Metal (MWD/ton)	ピークフルエンス Total ($\times 10^{22}$ nvt)	ピークフルエンス $E \geq 0.1$ MeV ($\times 10^{22}$ nvt)	実効照射日数 (EFPD)	年月日
39 (start)	486.0	0	0	0	0	0	0	75. 3.21
39 (end)	480.0	1.325	10,685	12,142	1.25	1.08	48.014	75. 5.13
40 (end)	472.0	2.507	20,216	22,973	2.38	2.05	92.082	75. 7.16
41 (end)	463.0	4.012	32,355	36,767	3.85	3.31	149.086	75.10.19
42	中間検査 (26dpa)							
43 (start)	463.0	4.012	32,355	36,767	3.85	3.31	149.086	76. 3. 1
43 (end)	454.0	5.561	44,844	50,959	5.38	4.63	209.132	76. 5.10
44 (end)	446.0	6.838	55,142	62,661	6.70	5.76	262.602	76. 7.31
45 (end)	434.0	8.656	69,806	79,325	8.43	7.25	336.581	76.11.19

(59.8dpa)

照射位置 02-06

注1 $E \geq 0.1$ MeVはTotal $\times 0.86$

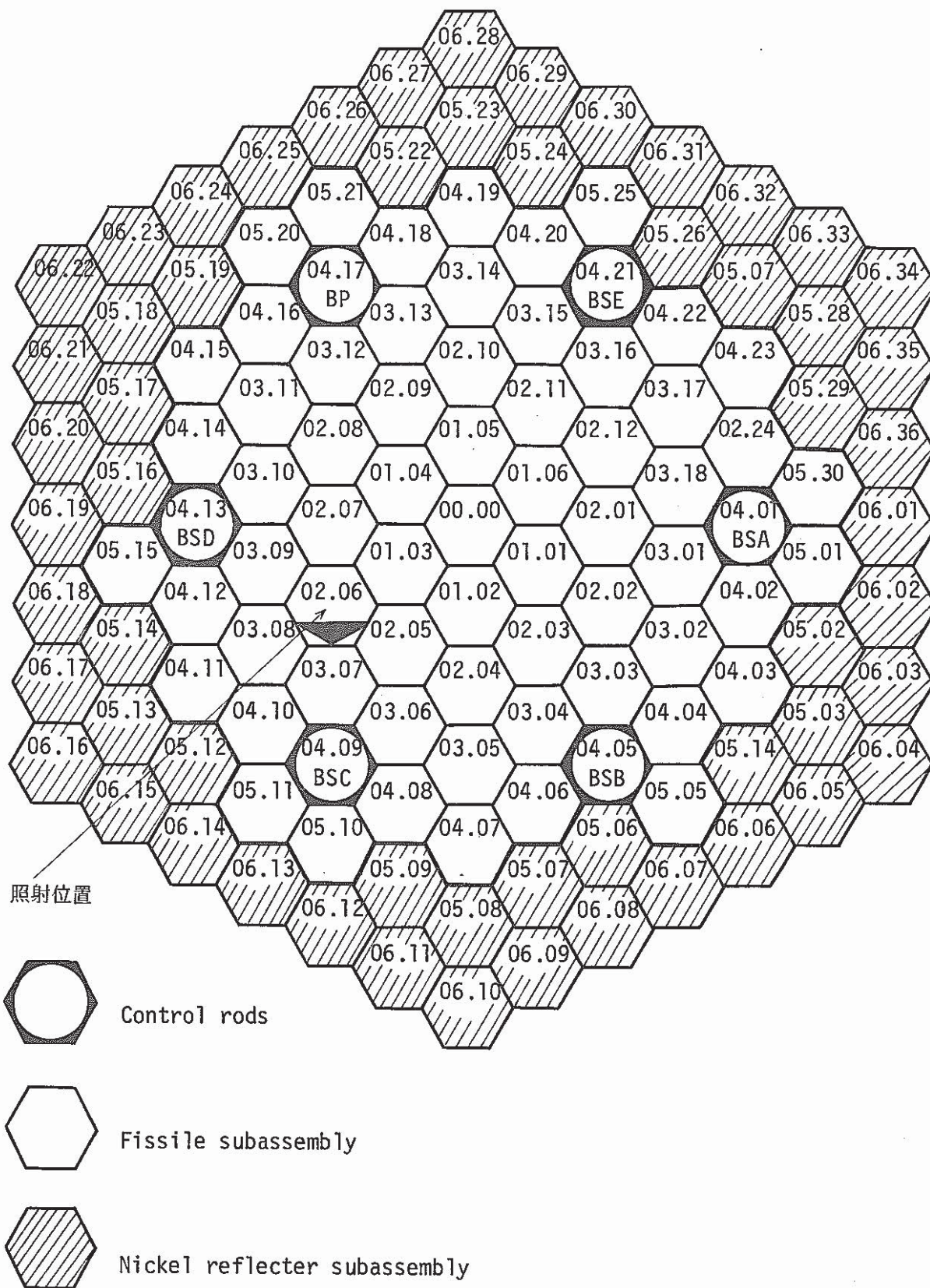
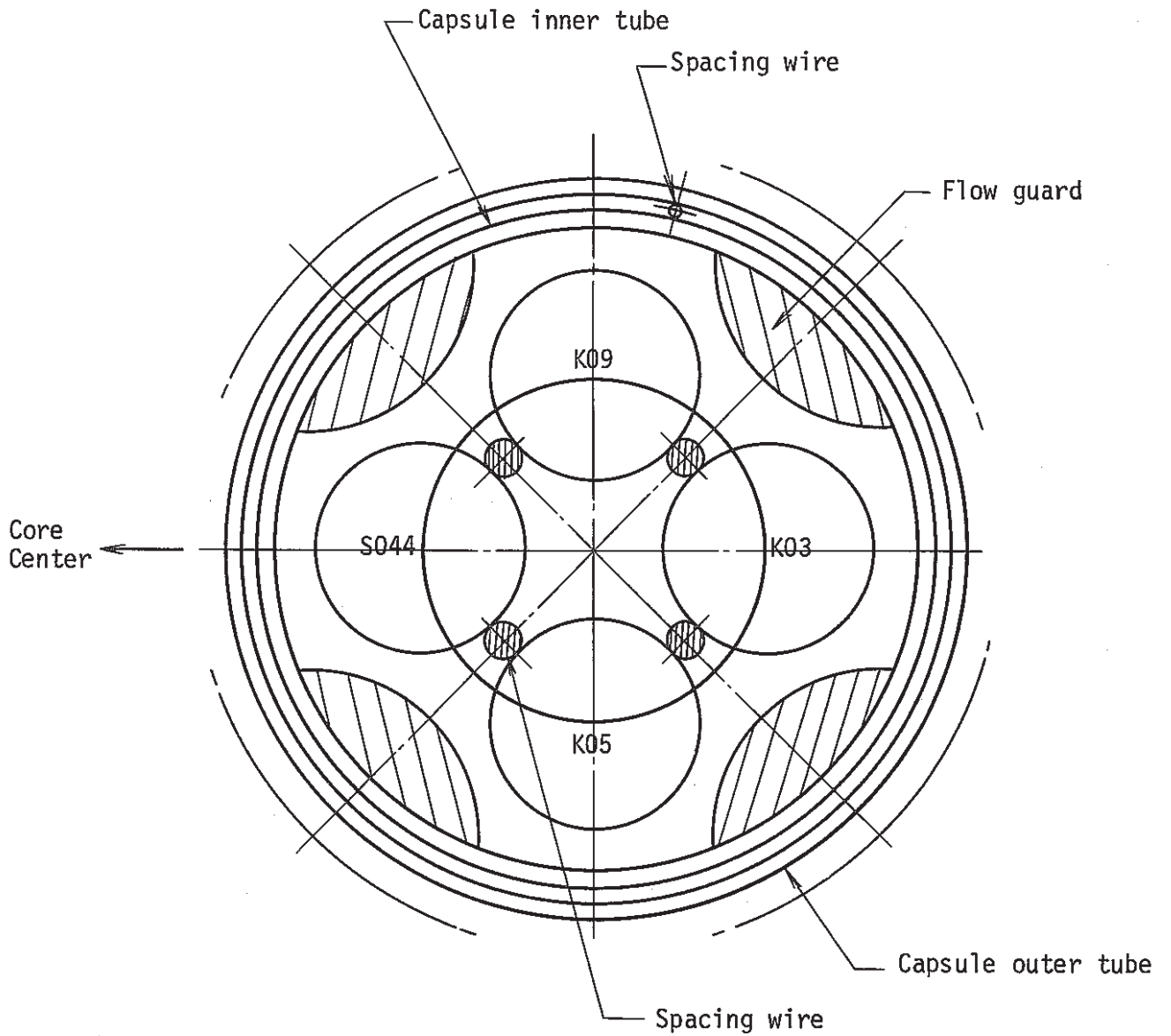


Fig. 1.1 Core location for PNC-4



Run 33, 34, 35, 36, 37
Capsule 30 - 22
Core location 02 - 06

Fig. 1.2 Fuel pin arrangement in the capsule

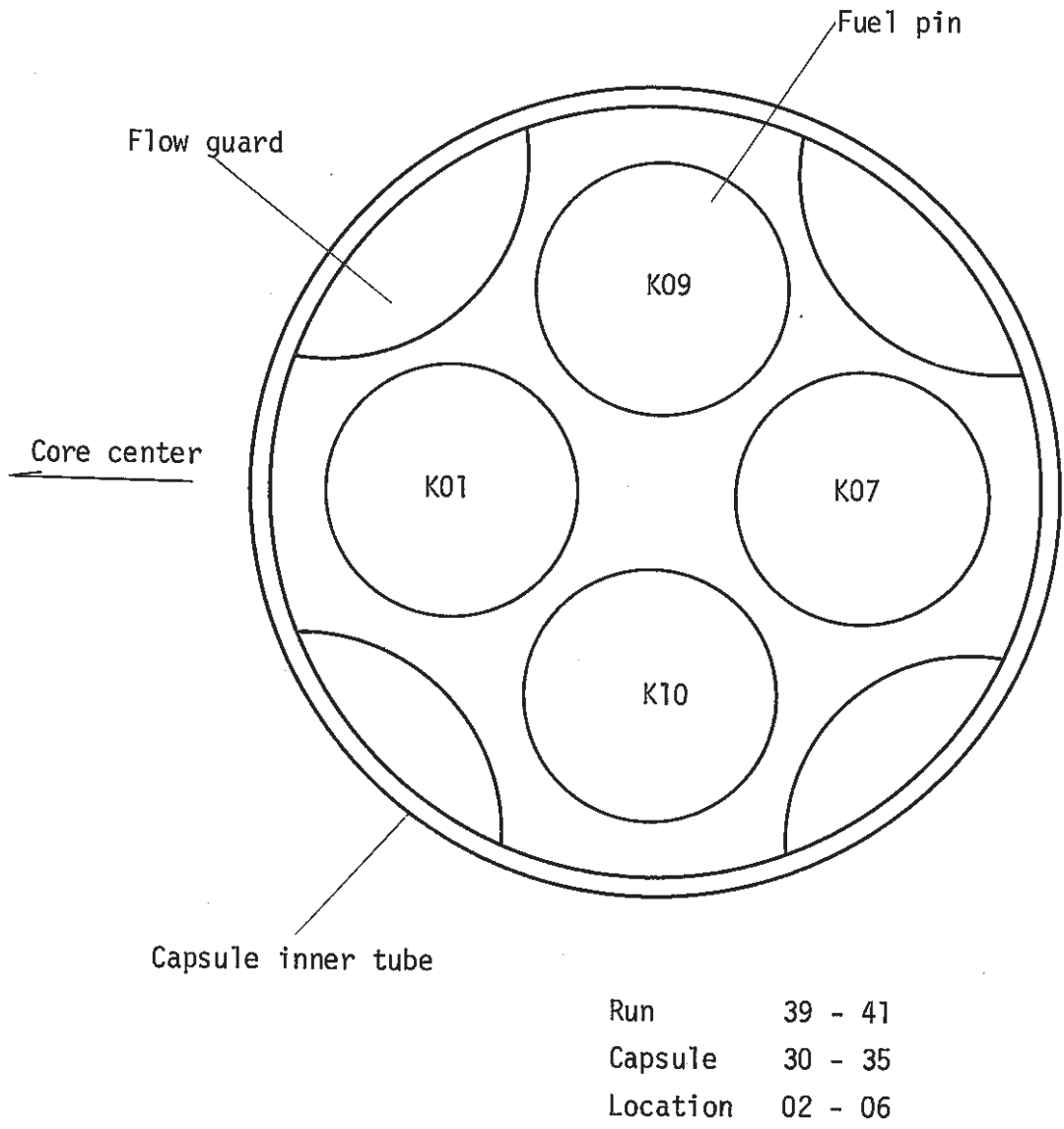
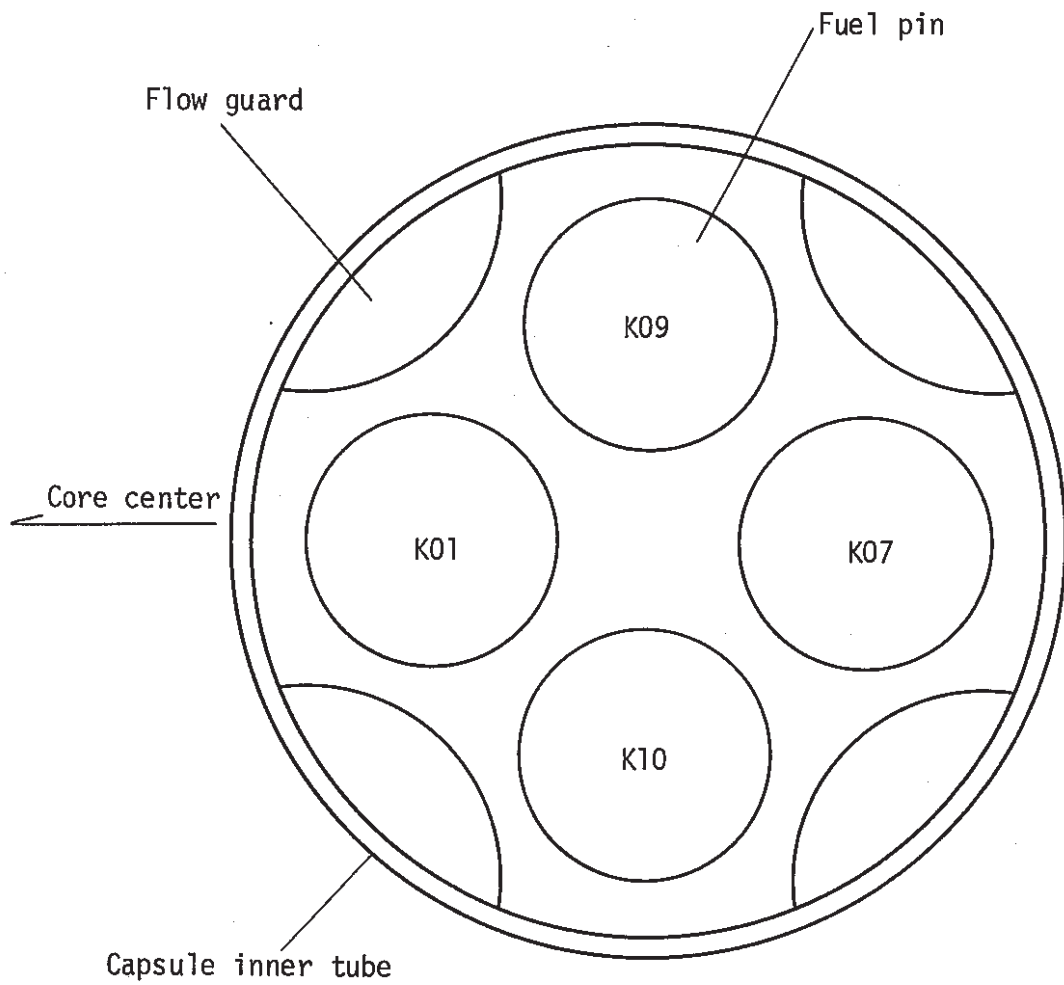


Fig. 1.3 Fuel pin arrangement in the capsule



Pun	43 - 45
Capsule	30 - 23
Location	02 - 06

Fig. 1.4 Fuel pin arrangement in the capsule

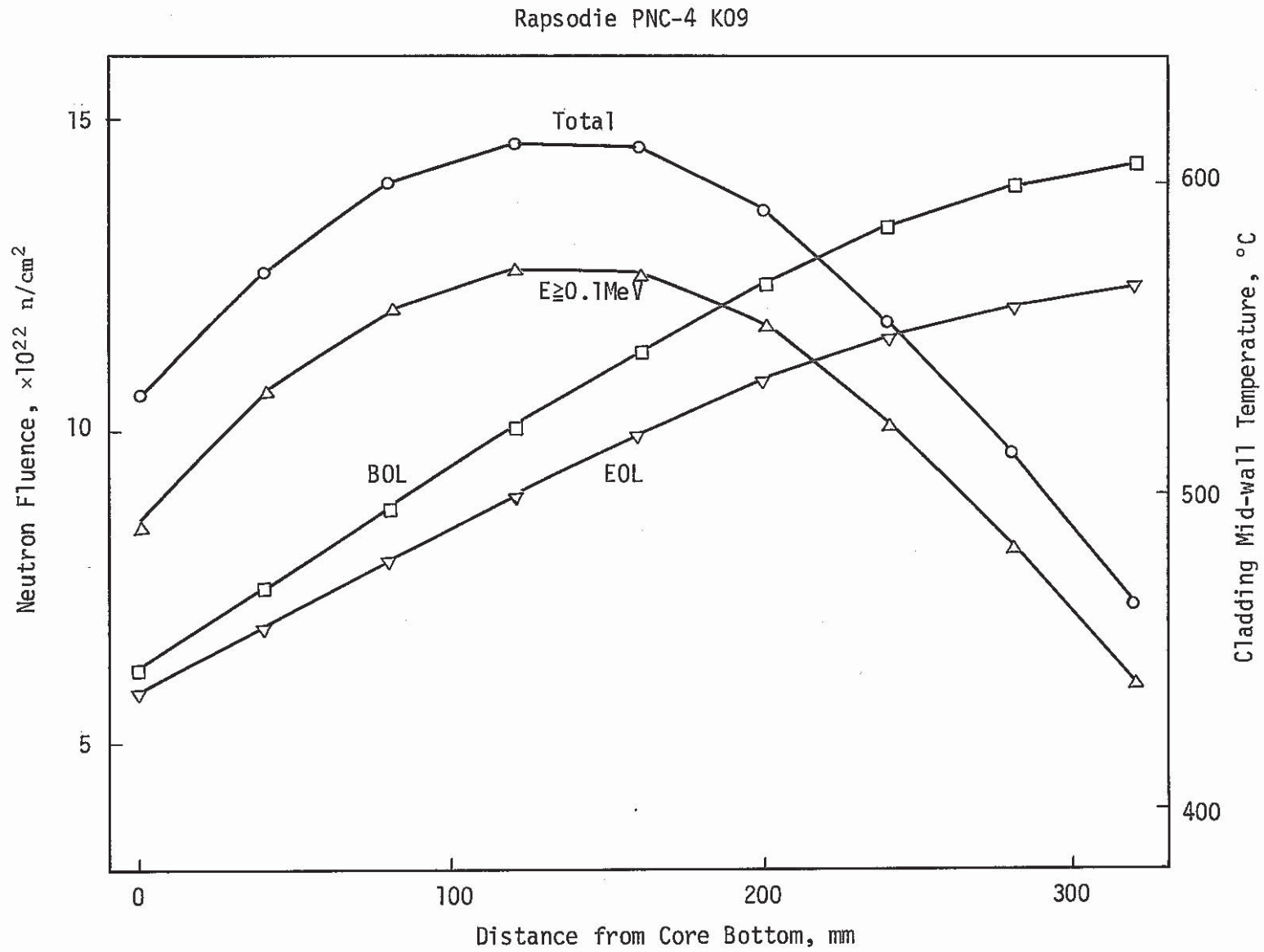


Fig. 1.5 Cladding temperature and fluence distribution (K09)

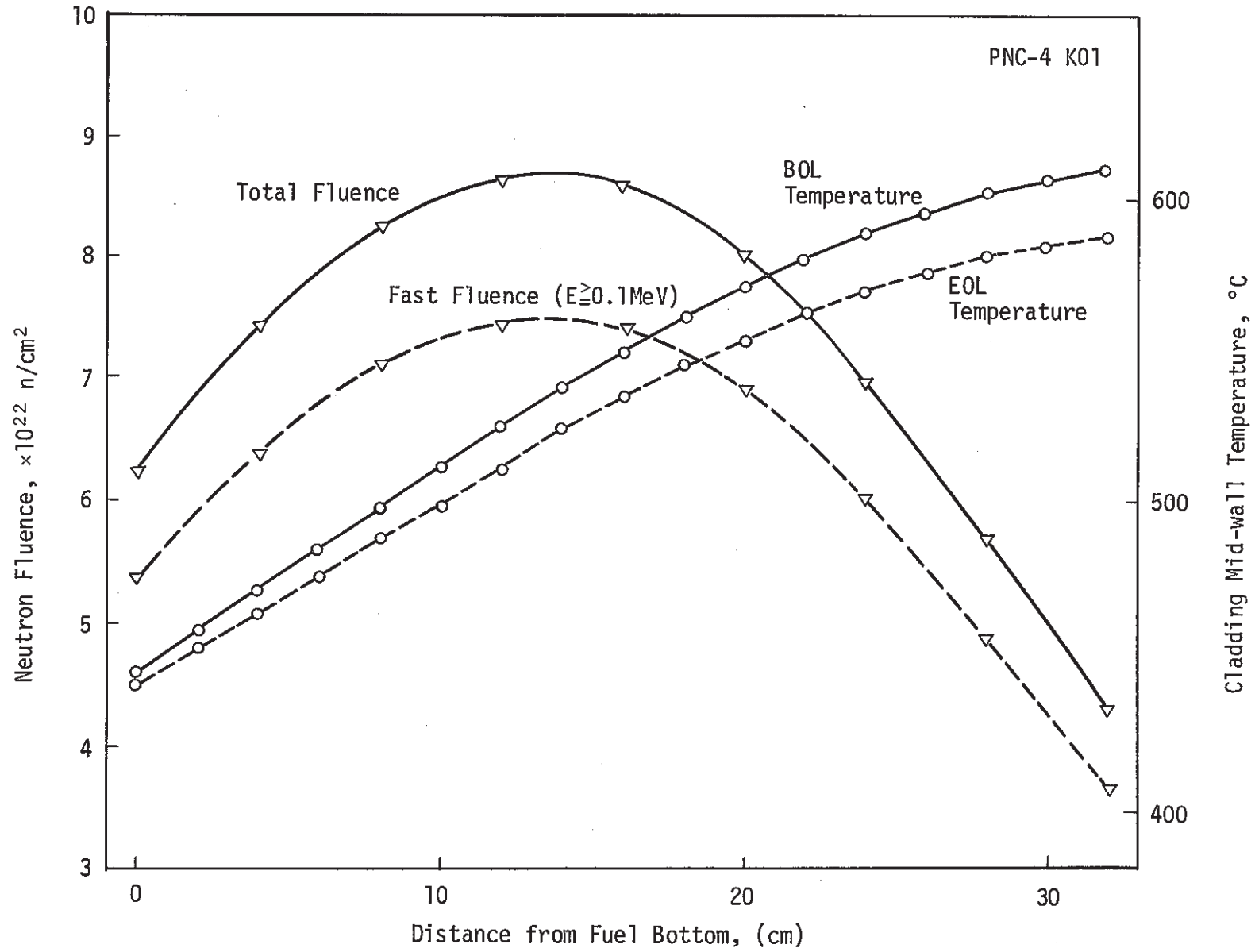


Fig. 1.6 Cladding temperature and fluence distribution (K01)

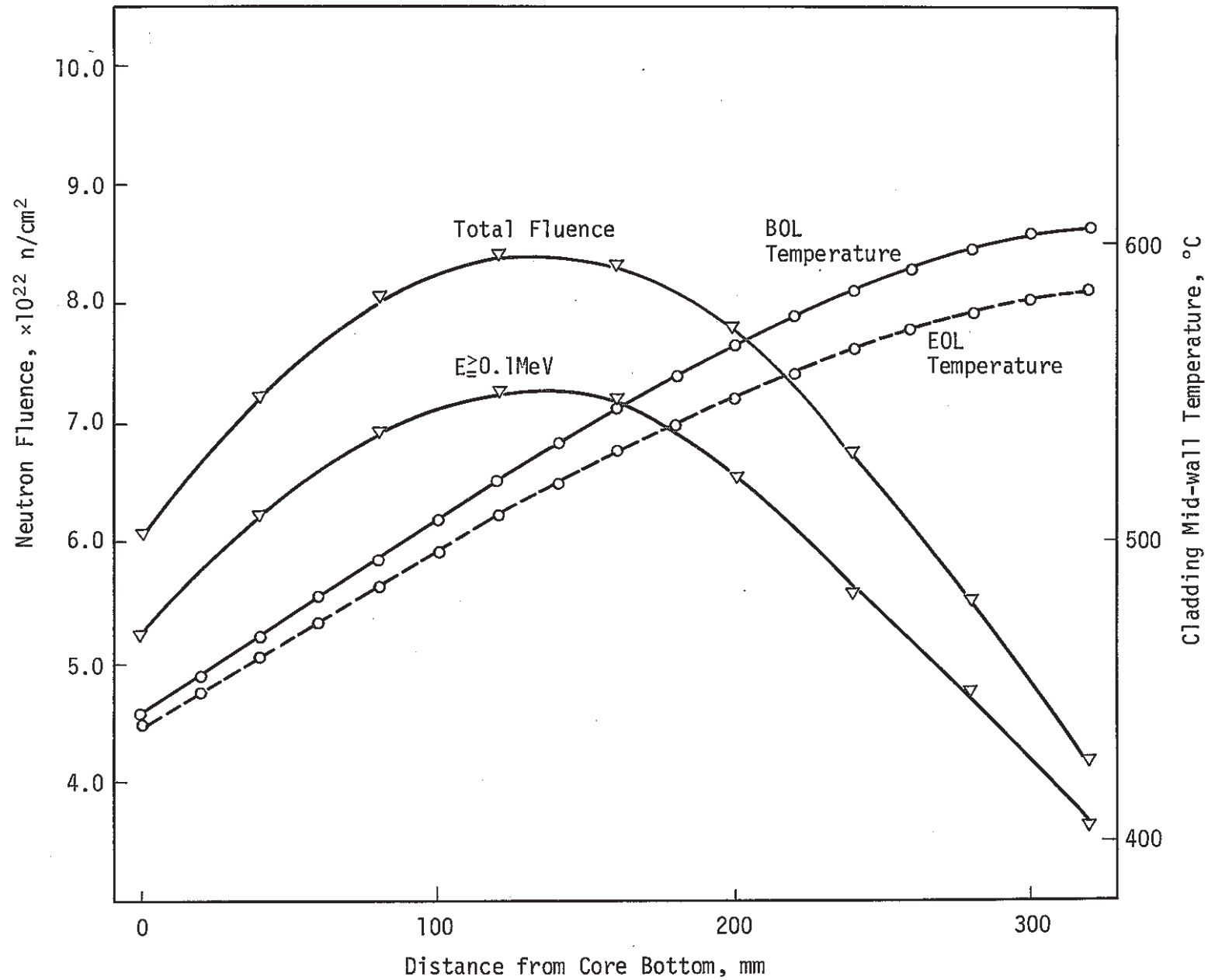


Fig. 1.7 Cladding temperature and fluence distribution (K07)

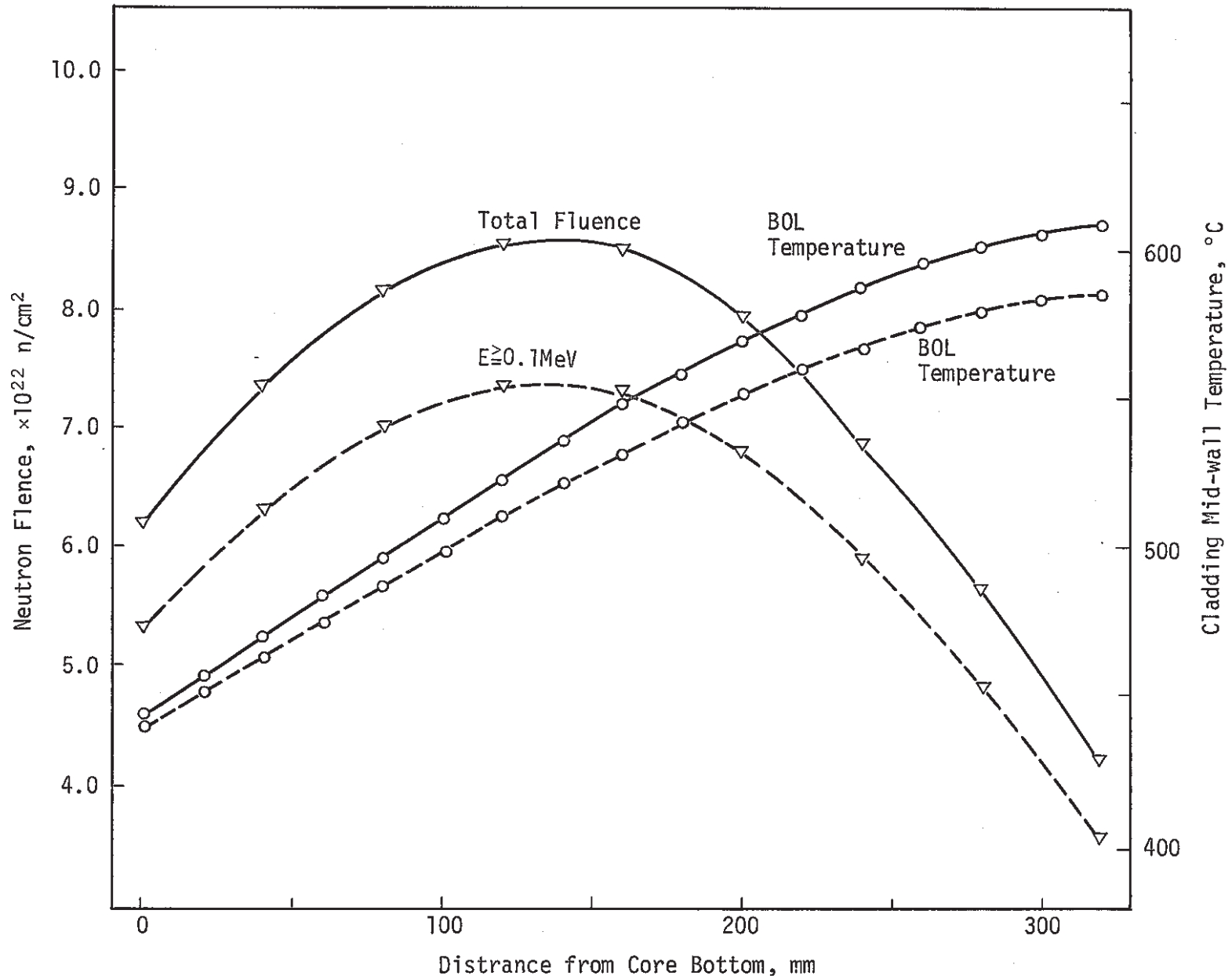


Fig. 1.8 Cladding temperature and fluence distribution (K10)

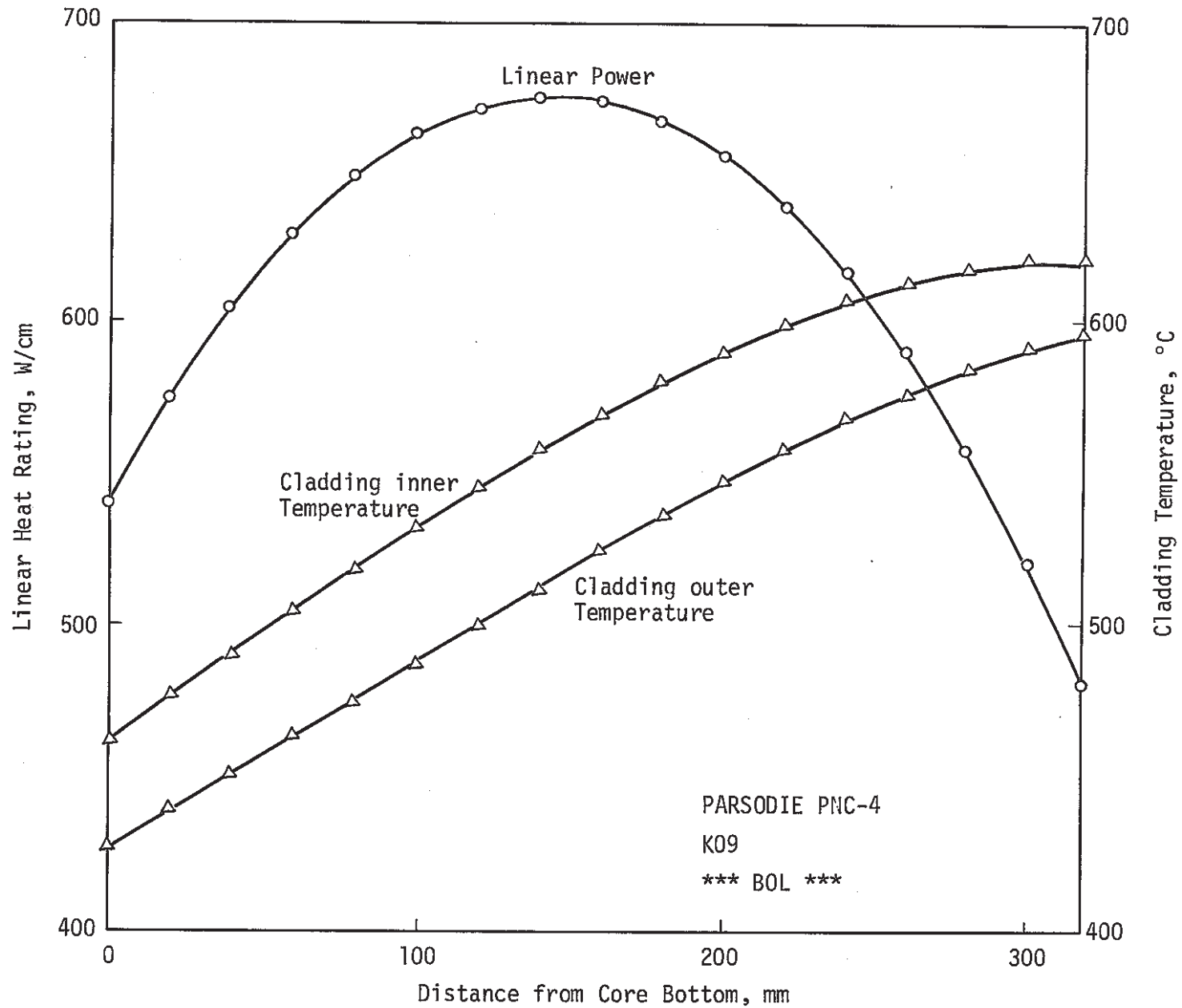


Fig. 1.9 Cladding temperature and linear power distribution (K09-BOL)

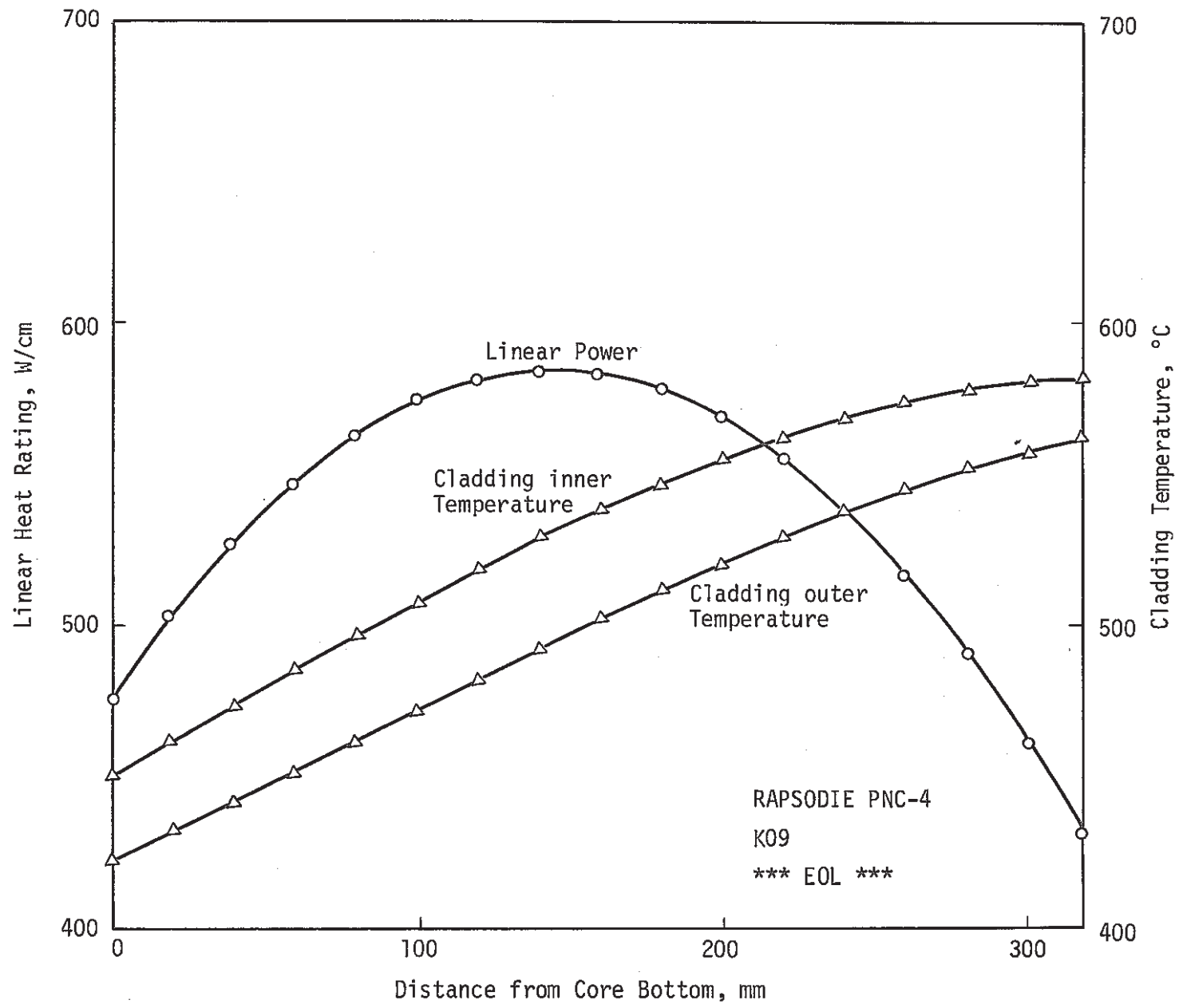


Fig. 1.10 Cladding temperature and linear power distribution (K09-EOL)

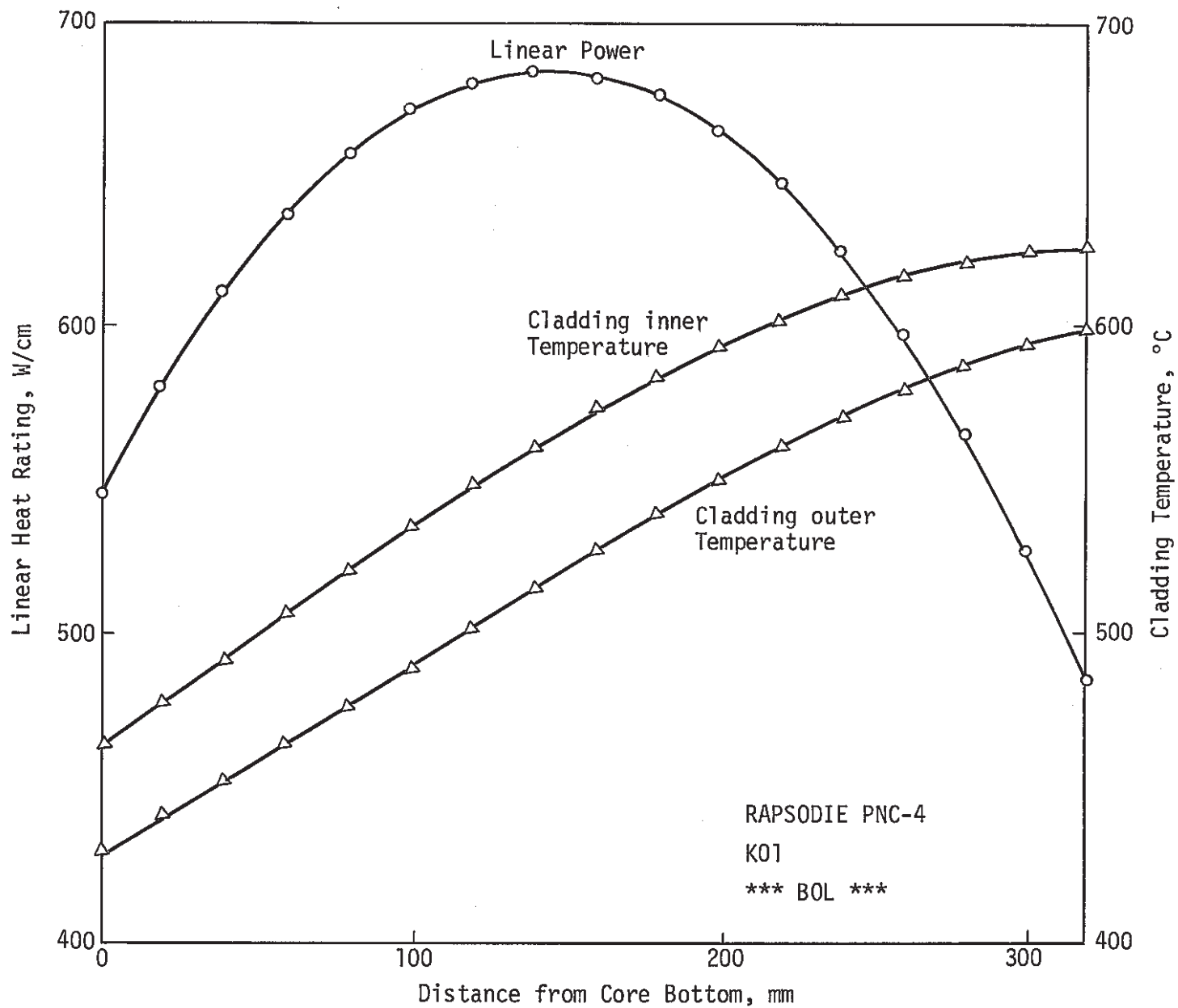


Fig. 1.11 Cladding temperature and linear power distribution (K01-BOL)

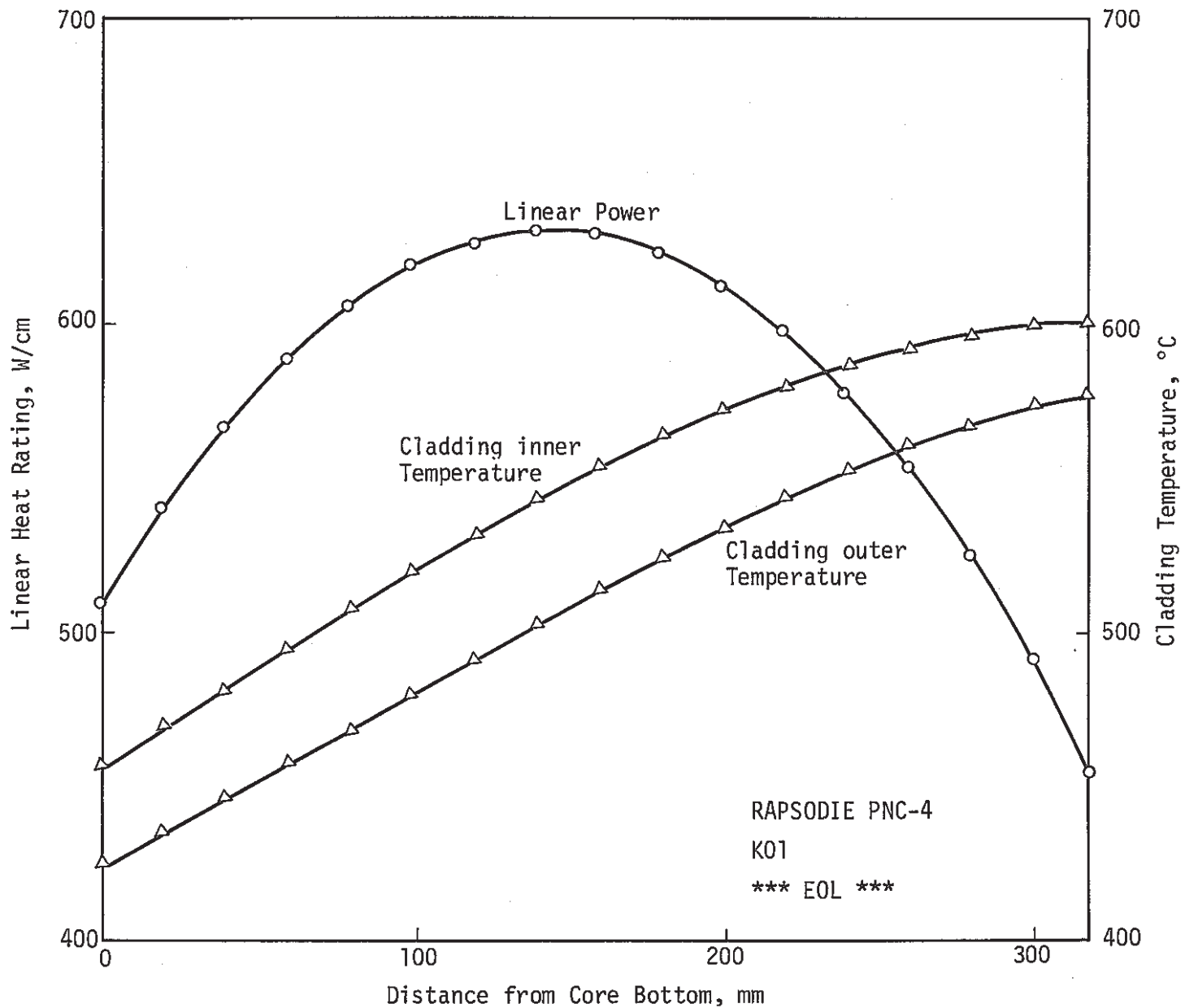


Fig. 1.12 Cladding temperature and linear power distribution (K01-EOL)

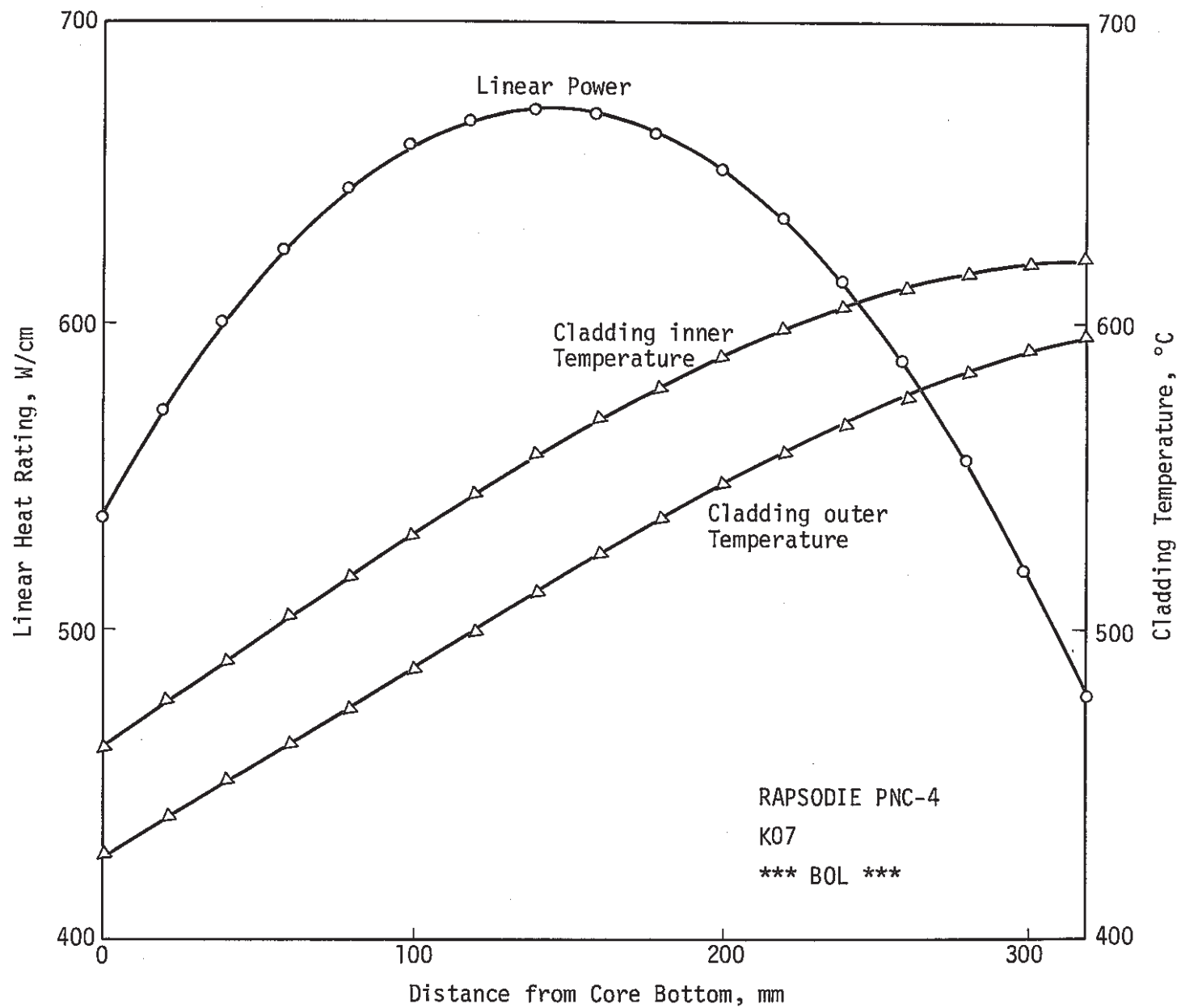


Fig. 1.13 Cladding temperature and linear power distribution (K07-BOL)

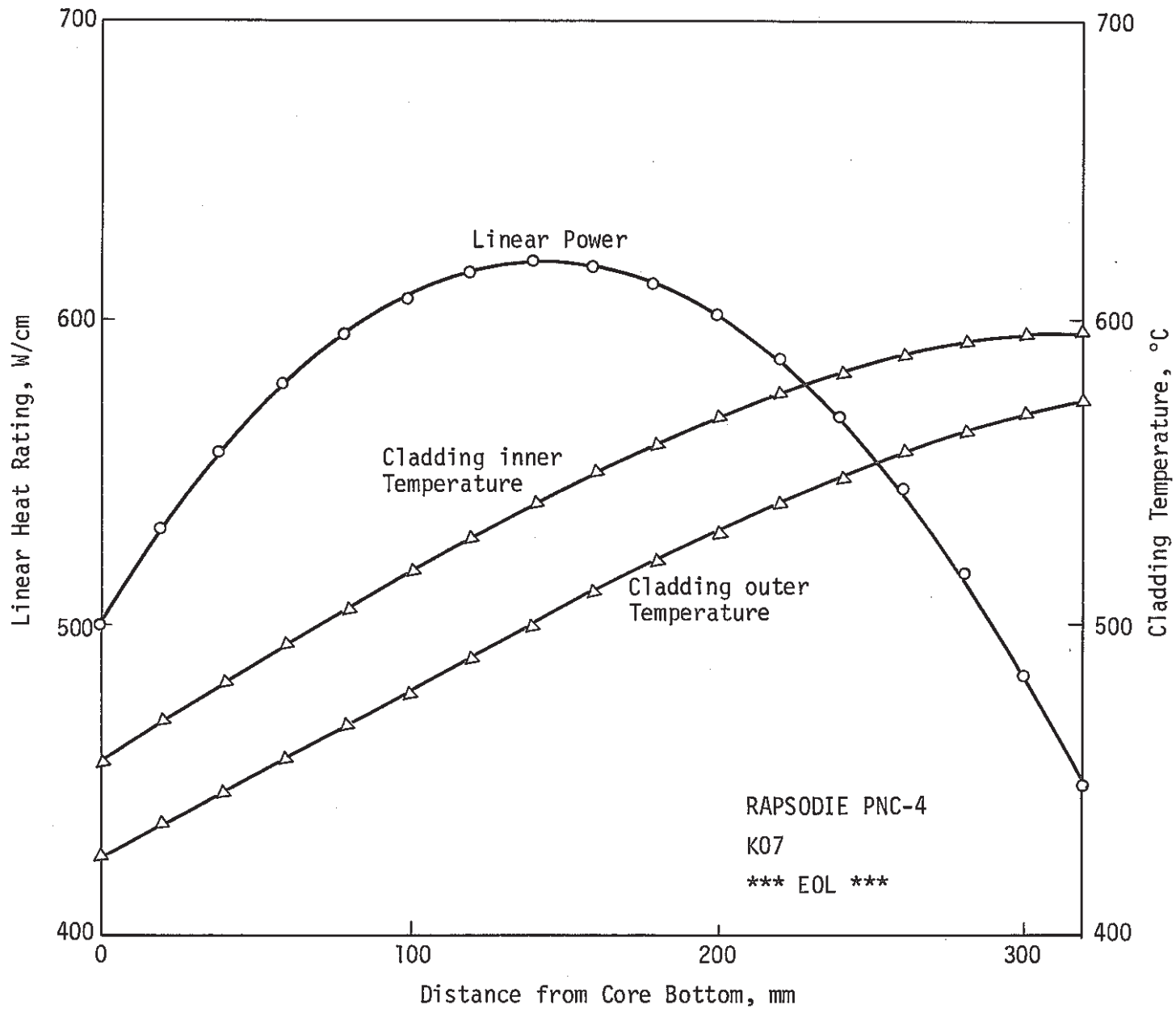


Fig. 1.14 Cladding temperature and linear power distribution (K07-EOL)

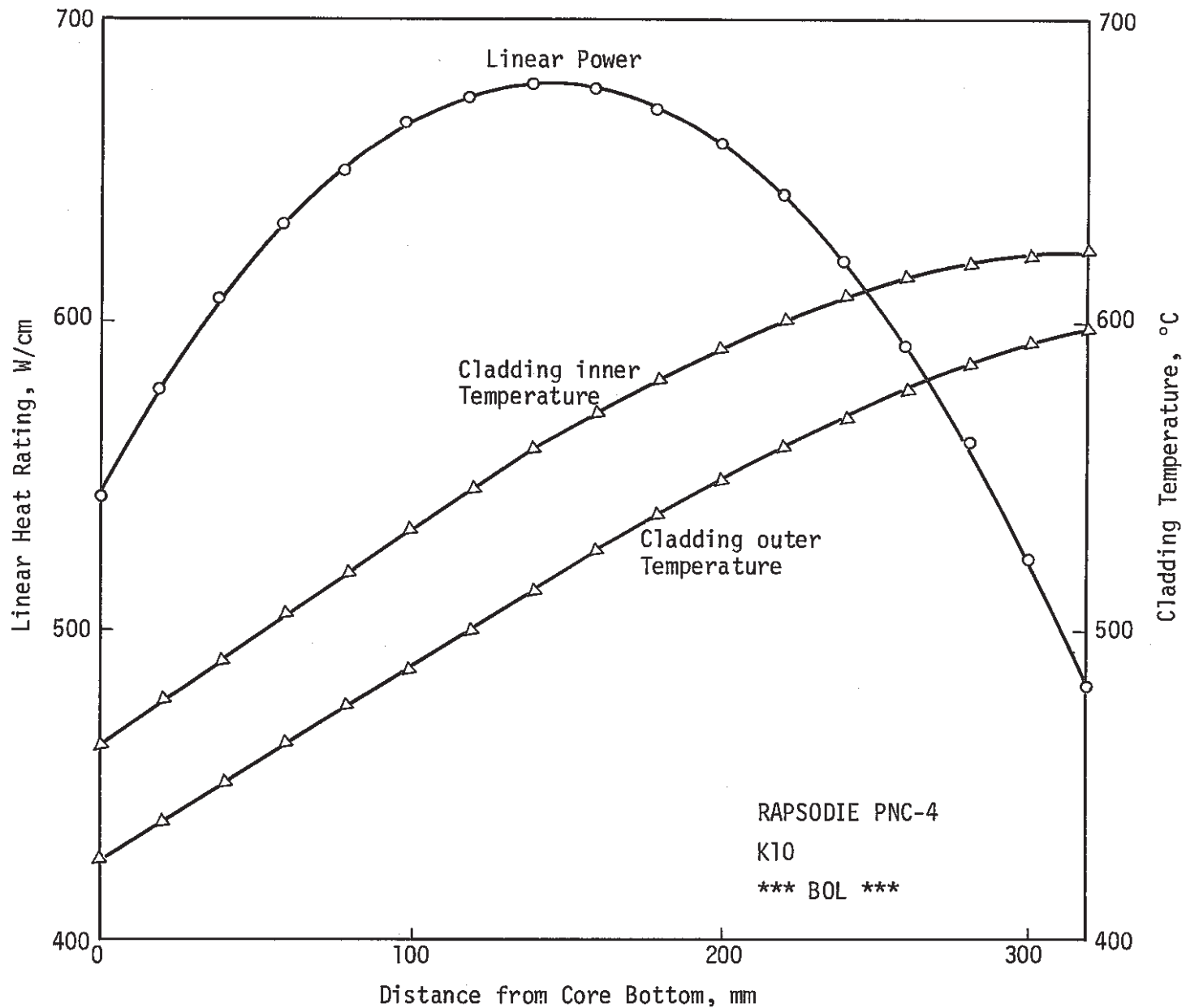


Fig. 1.15 Cladding temperature and linear power distribution (K10-BOL)

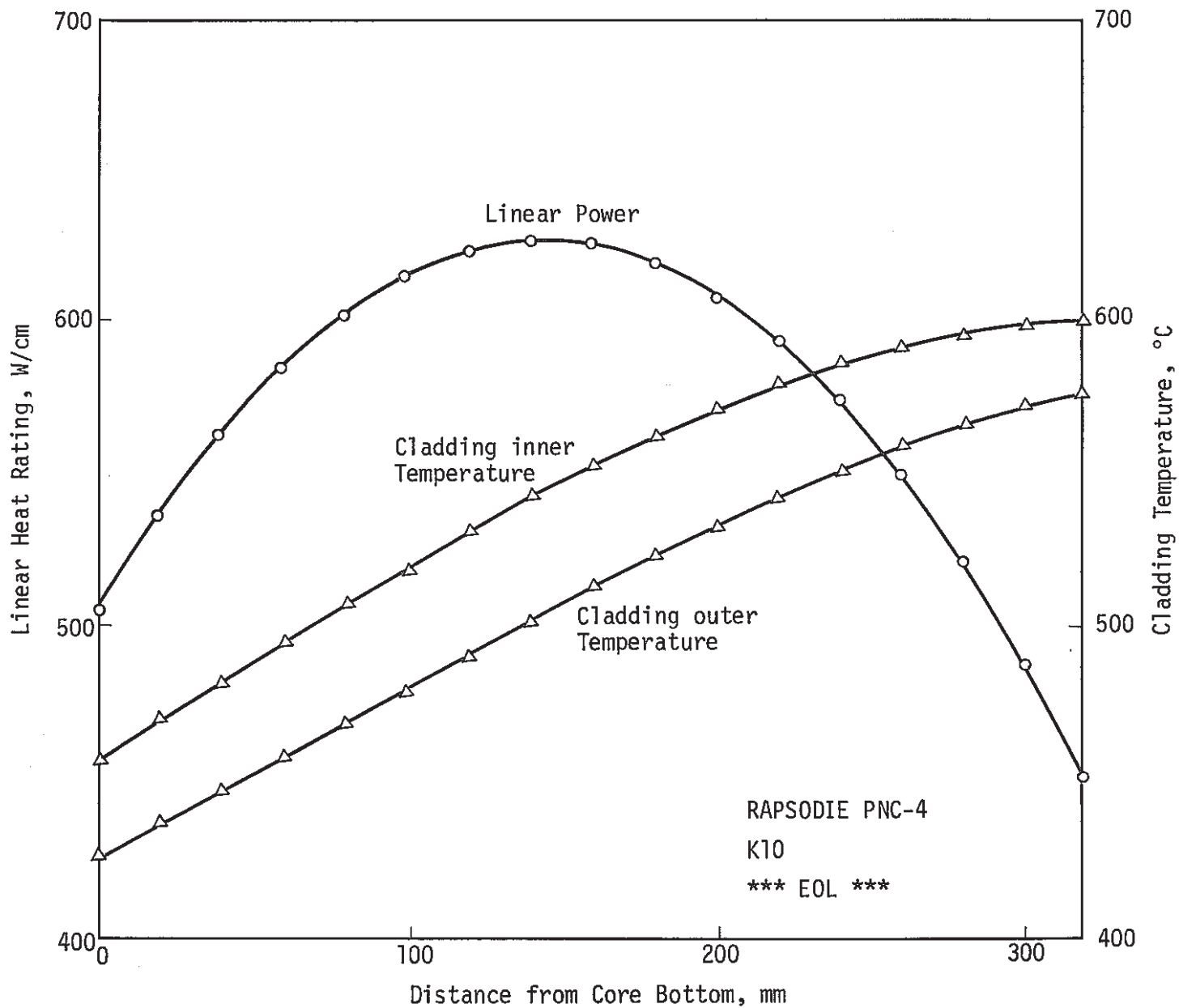


Fig. 1.16 Cladding temperature and linear power distribution (K10-EOL)

データ集

3. 全相試験データ

- | | |
|-------------|---|
| Table 4.1.1 | Metallographic examination in AGS |
| Table 4.1.2 | Irradiation and fabrication parameters of all specimen for ceramography |
| Table 4.1.3 | Summary data from ceramography |
| Table 4.1.4 | FCCI data sheet |
| Fig. 4.1.1 | Flow diagram of metallographic examination in AGS |
| Fig. 4.1.2 | Axial profile of the restructured region (R/R_0) |
| Fig. 4.1.3 | Restructured region (R/R_0) as the function of L.H.R. |
| Photo 1~4 | Macrography of Rapsodie core fuel |
| Photo 5~24 | Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel |
| Photo 25~31 | Postirradiation metallography of Rapsodie cladding |

Table.4.1.1 Metallographic examination in AGS

	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	× 105 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 ポイド分布測定 ポイド分布測定	× 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		

Table 4-1-2 Irradiation and fabrication parameters of all specimen for ceramography

Pin No.	Section No.	*1 Location (DFFB) mm	Burnup (MWD/MTM)		Local Linear Heat Rate (W/cm)			Fluence $E > 0.1\text{MeV}$ (10^{22}n/cm^2)	Clad. Inner Temp. ($^{\circ}\text{C}$)			*2 Pellet Density (%TD)	*2 Pellet O/M	*2 Gap Size (μm)	*2 Carbone in clad. (w/o)	*2 Clad. Grain Size (μm)
			Local	Pin Ave.	BOL	EOL	Ave.		BOL	EOL	Ave.					
K07	YC207	98	74971	67196	454	414	434	7.01	504	496	500	85	1.98	200	0.064	17.3
	YC20E	219	69561	67196	449	418	434	6.51	572	558	565	85	1.98	200	0.064	17.3
	YC20J	318	41737	67196	306	301	304	3.76	602	588	595	85	1.98	200	0.064	17.3
K09	YC2332	56	113023	111662	413	321	367	11.1	477	466	472	85	1.99	200	0.05	17.3
K10	YC218	166	77507	68066	481	437	459	7.23	548	534	541	85	1.98	200	0.05	17.3

*1 Distance from fuel bottom (インシュレータ UO_2 ペレット 10 mm を含む)

*2 全て製造時のデータ (平均値)

Table 4.1.3 Summary data from ceramography

S/A No. Rapsodie PNC-4

Pin No.	Section No.	Distance from fuel bottom (mm)	Restructured Region (Dia. mm)					Residual Diametral Gap Size (μm)	Outer Dia. (mm)
			Central Void	Columnar Region	Gas bubble Region	Densified Region	Drak Ring		
K07	YC207	98	1.8	4.0	4.4	4.7	5.1	20	5.5
	YC20E	219	1.9	3.9	4.3	4.8	5.3	143	5.5
	YC20J	318	1.5	3.7	4.2	4.7	5.1	106	5.5
K09	YC2332	56	1.9	4.0	4.4	4.8		162	5.4
K10	YC218	166	1.8	4.0	4.4	4.7	5.2	25	5.5

Table.4.1.4 FCCI data sheet

Pin No.	Section No.	*1 Attack Type	Average Attack (μm)	Max. Attack (μm)	Comment	Predicted Max. Attack (μm)
K07	YC207	M	3	8		9 ^{*2}
	YC20E	C	20	40	ギャップ部にFP及び腐食生成物の蓄積がある。 M型が優位な腐食	48 ^{*2}
	YC20J	C	20	50	ギャップ部にFP及び腐食生成物の蓄積がある。 M型が優位な腐食	34 ^{*2}
K10	YC218	I	7	30		(28) ^{*3} (40) ^{*4}

*1 M: Matrix Attack

I: Intergranular Attack

C: Combined Attack

*2 FCCI予測式の推奨式による計算値

*3 FCCI予測式の参考式(プル燃・設開式)による計算値

*4 FCCI予測式の参考式(燃材部, AES式)による計算値
(いずれも参考文献5)による)

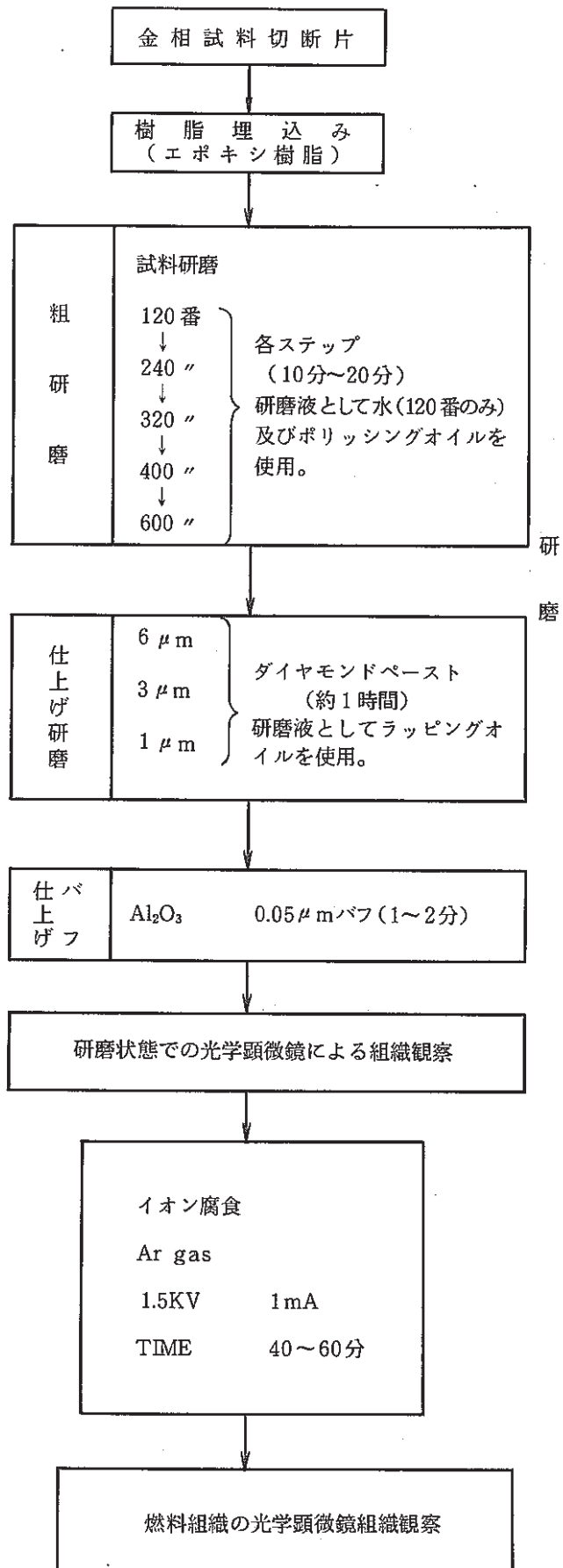


Fig. 4.1.1 Flow diagram of metallographic examination in AGS

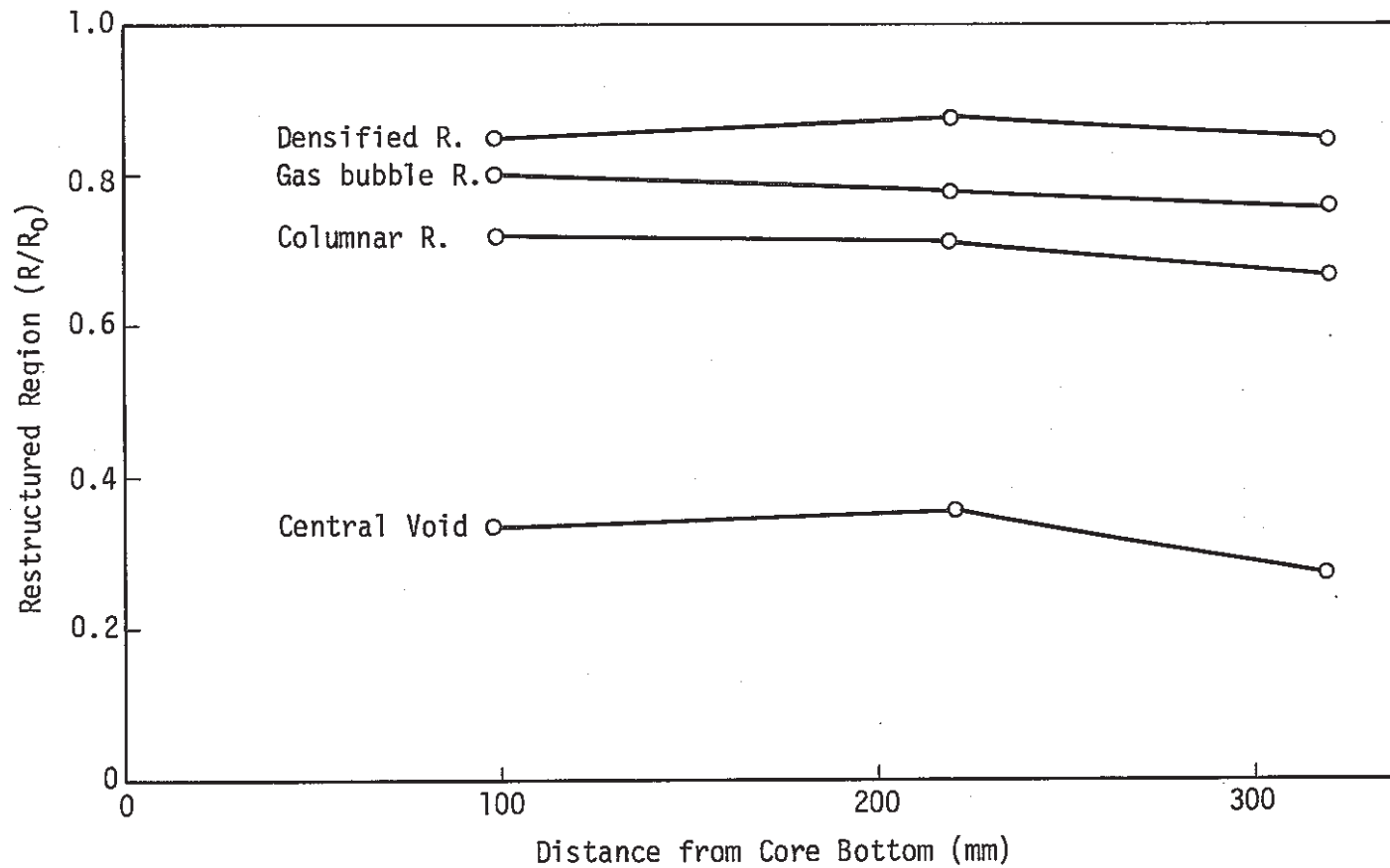


Fig. 4.1.2 Axial profile of the restructured region (R/R₀) (Pin No.K07)

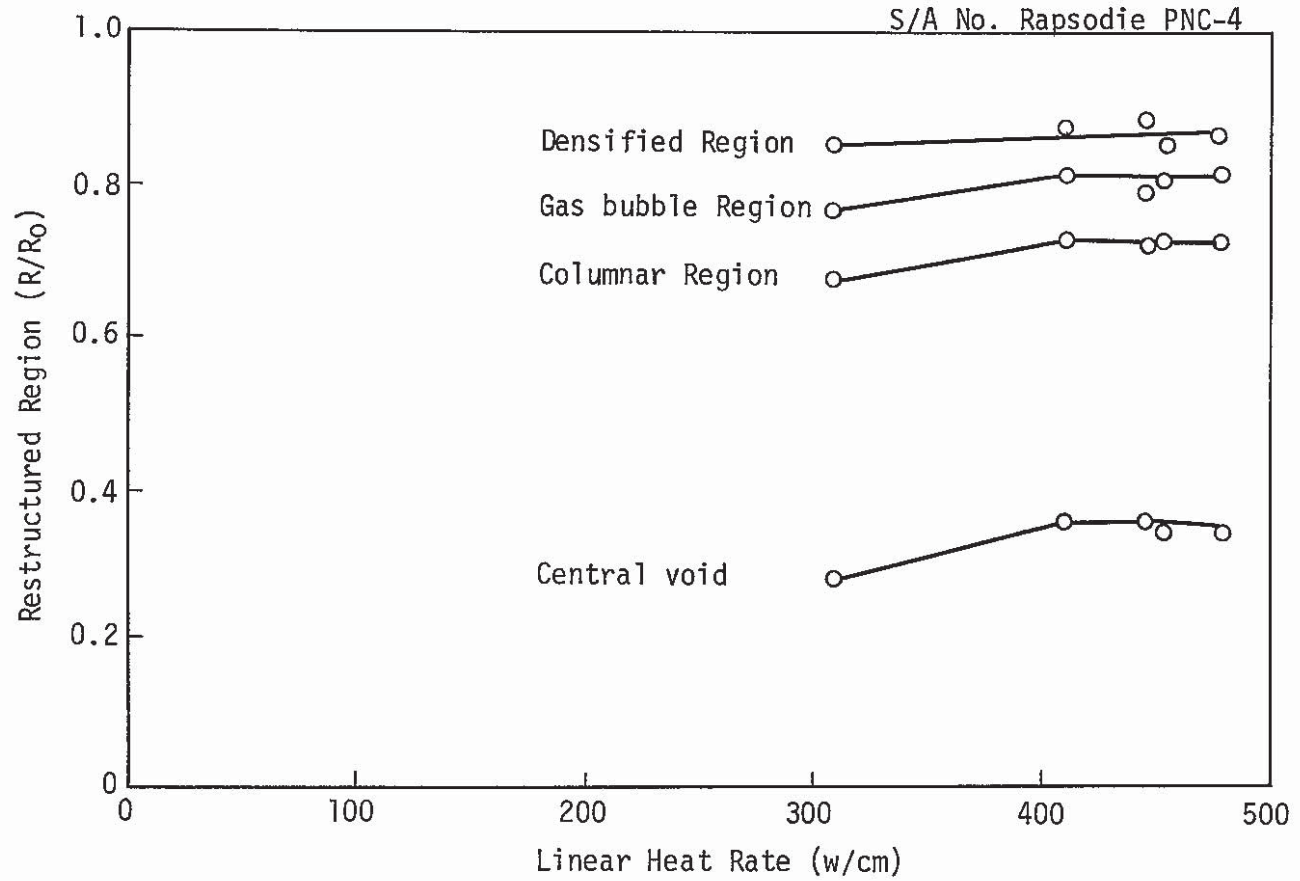


Fig. 4.1.3 Restructured region (R/R₀) as the function of L.H.R.

S/A No.	RAPSODIE PNC-4
Pin No.	K07
S/A Peak Burn up	77290MWD/MTM

As polished

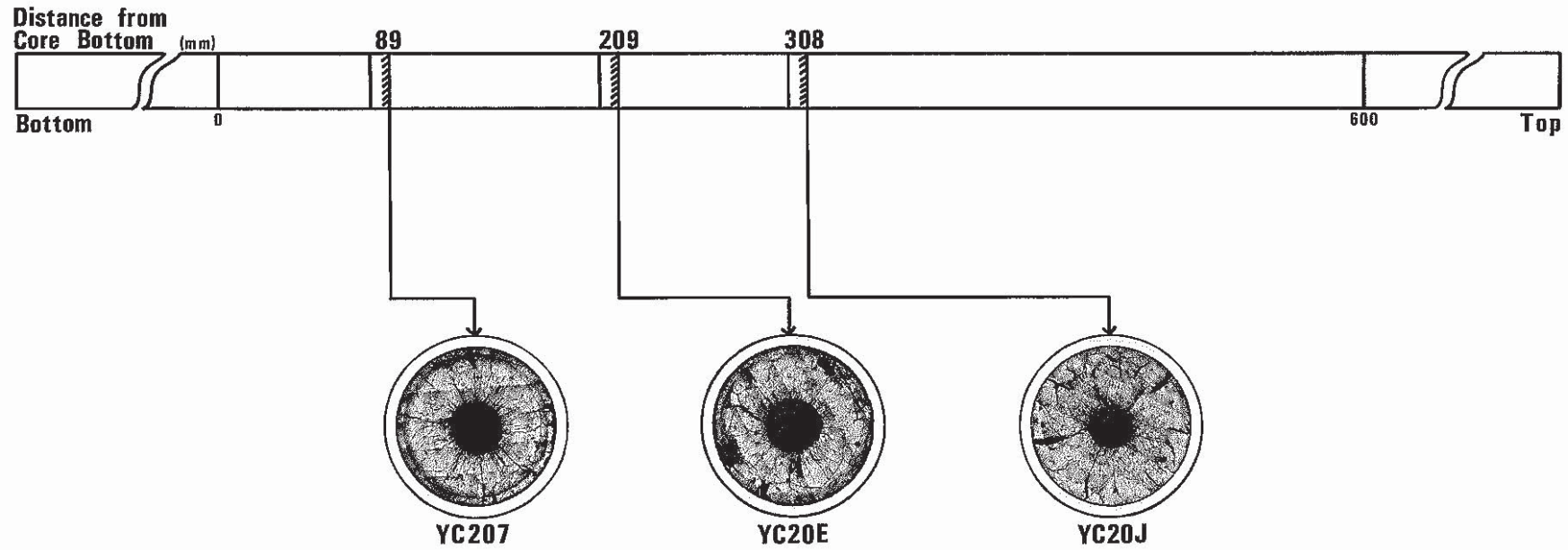


Photo 1 Macrography of Rapsodie core fuel

S/A No.	RAPSODIE PNC-4
Pin No.	K07
S/A Peak Burn up	77290MWD/MTM

etched

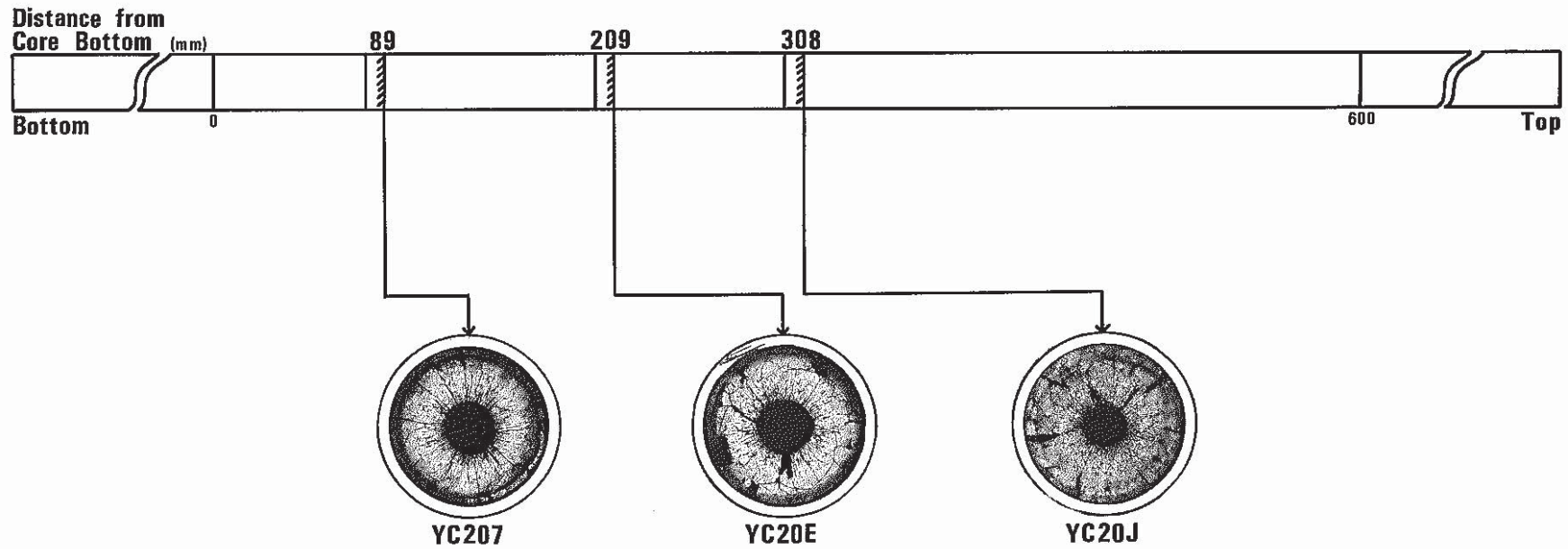


Photo 2 Macrography of Rapsodie core fuel

S/A No.	RAPSODIE PNC-4
Pin No.	K09
S/A Peak Burn up	128435MWD/MTM

As polished
etched

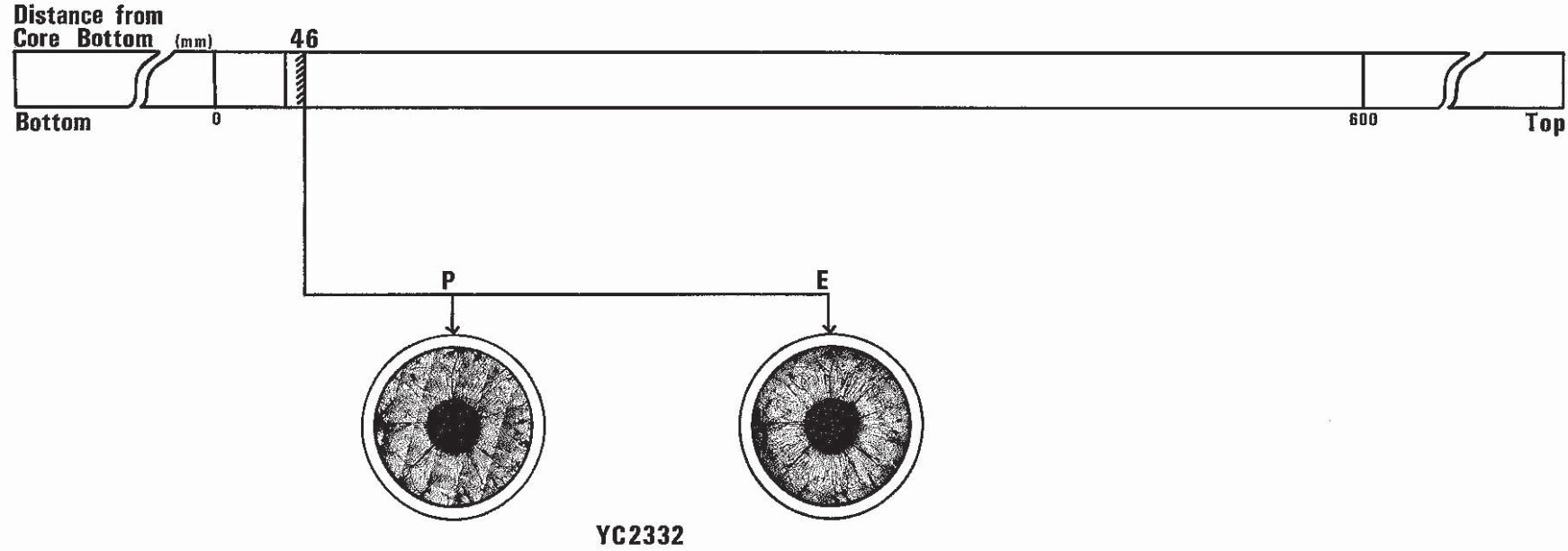


Photo 3 Macrography of Rapsodie core fuel

S/A No.	RAPSODIE PNC-4
Pin No.	K10
S/A Peak Burn up	78290MWD/MTM

As polished
etched

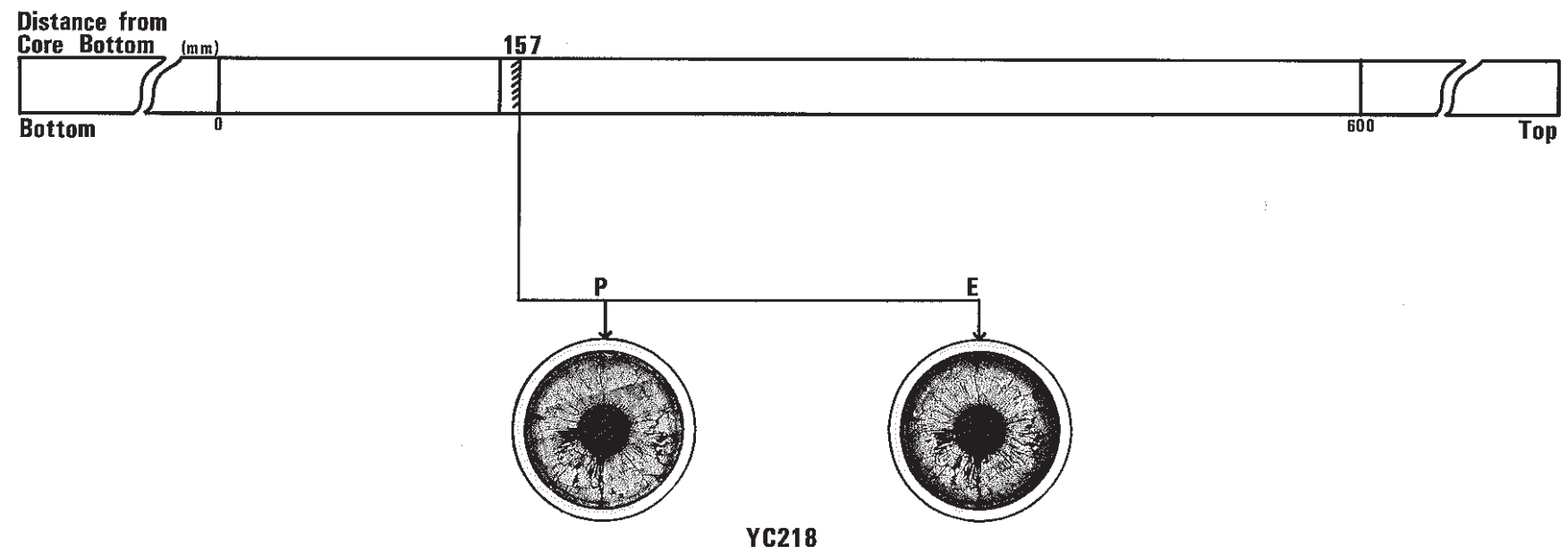


Photo 4 Macrography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC207	
Distance from bottom of pin		424mm
Distance from bottom of fuel column		89mm

As polished

1mm

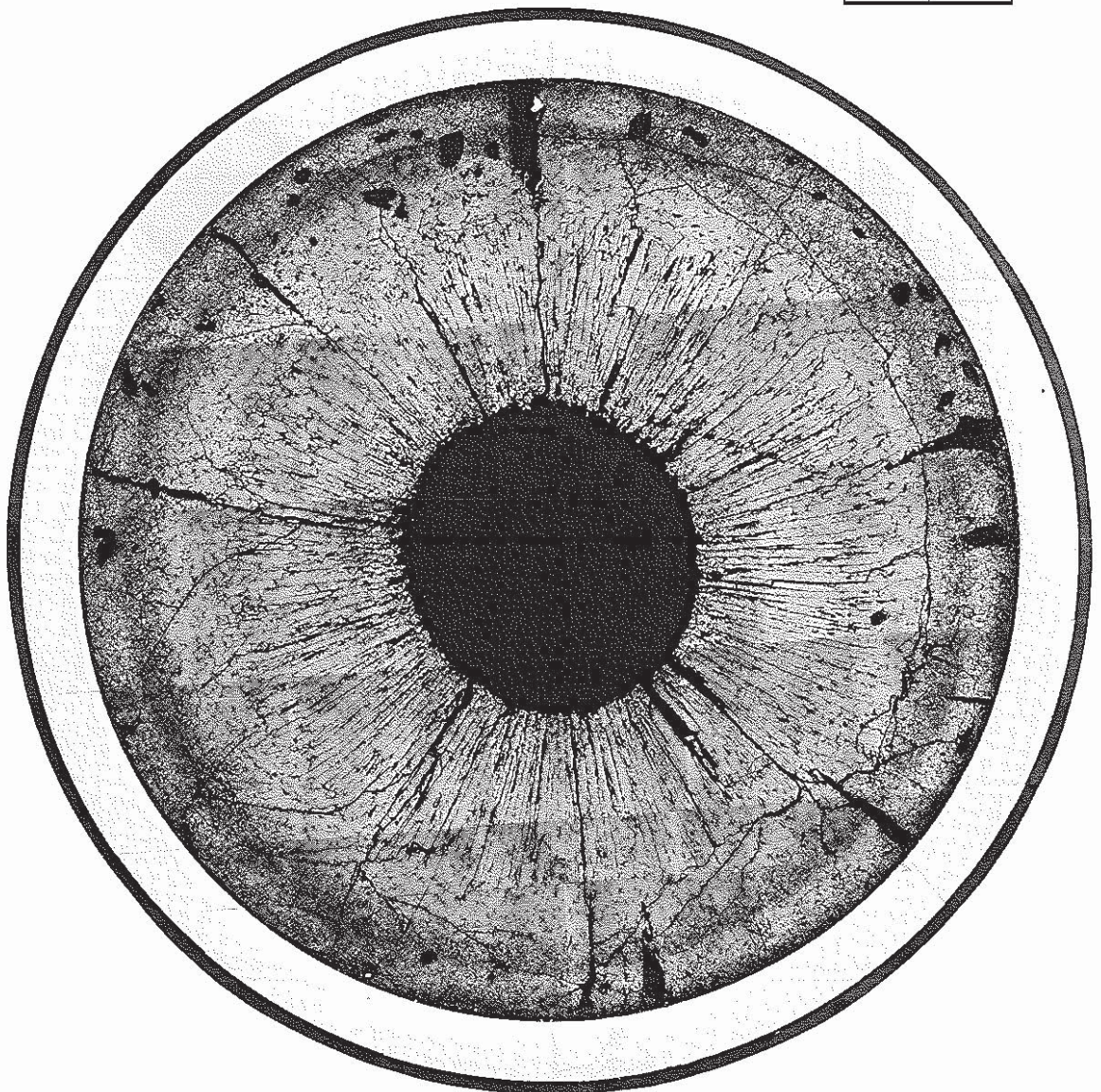


Photo 5 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC207	
Distance from bottom of pin		424mm
Distance from bottom of fuel column		89mm

etched

1mm

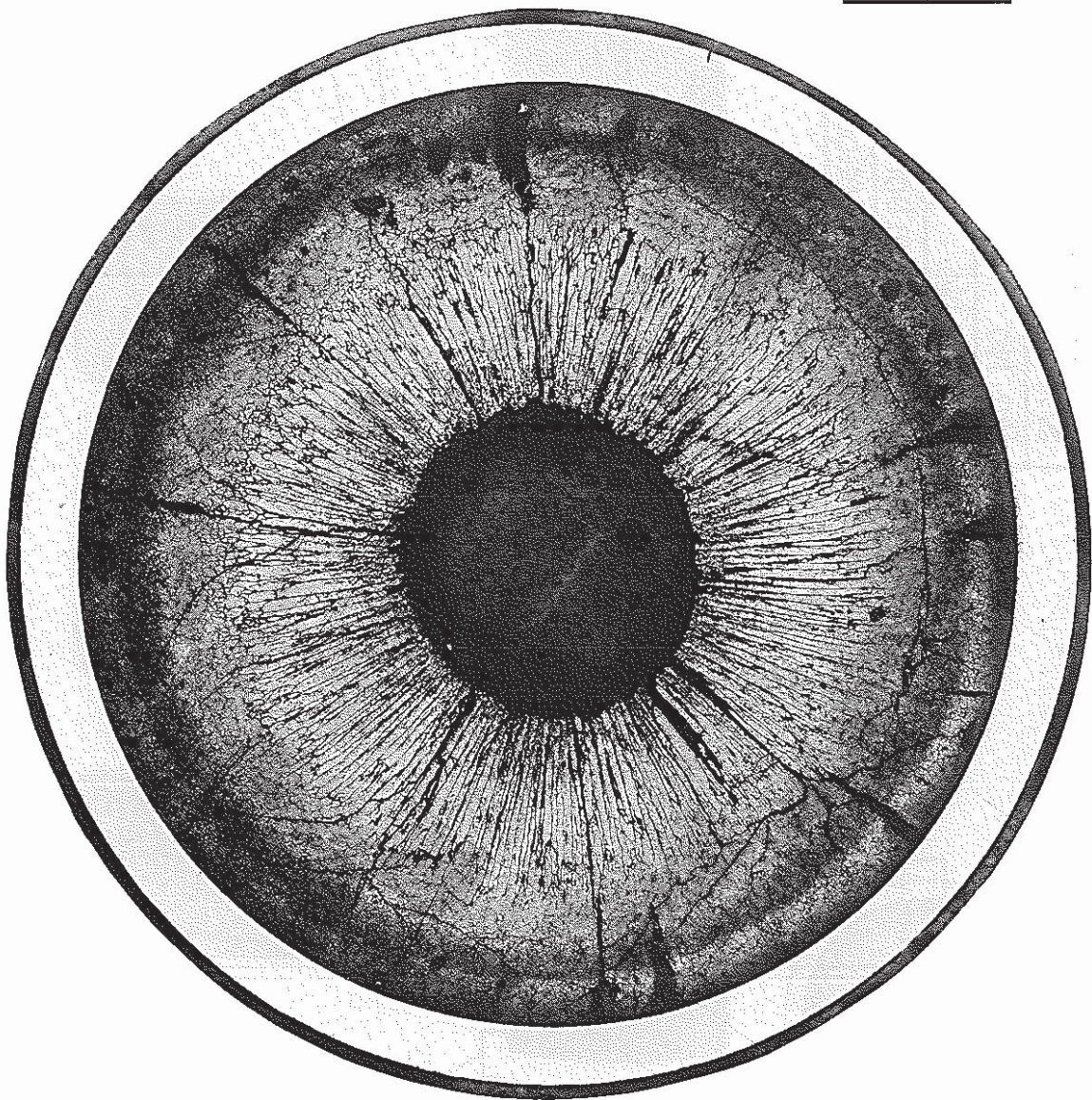
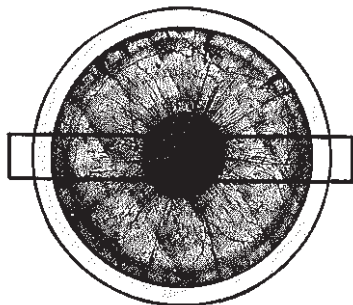


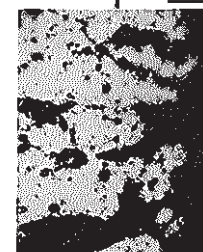
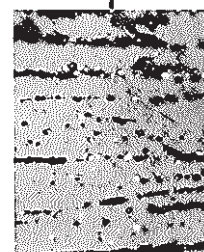
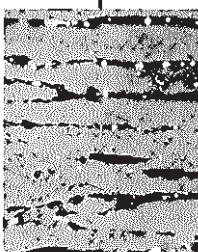
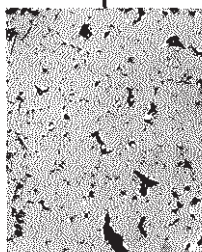
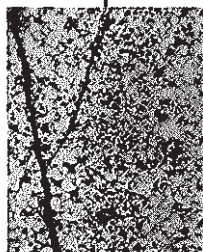
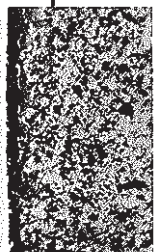
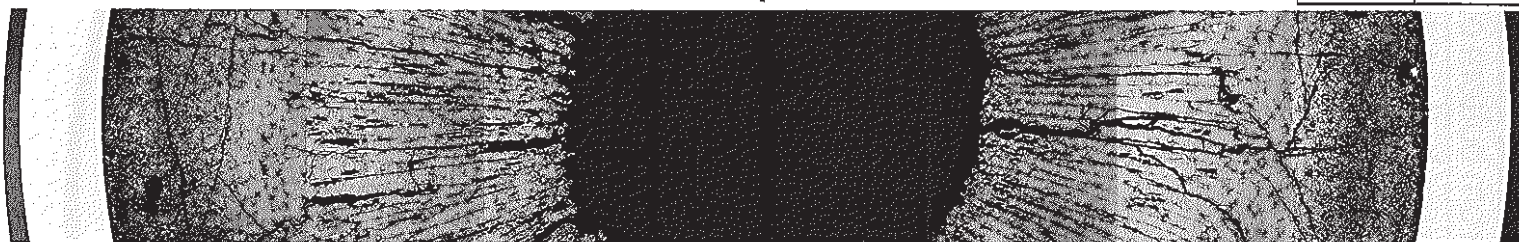
Photo 6 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC207	
Distance from bottom of pin		424mm
Distance from bottom of fuel column		89mm

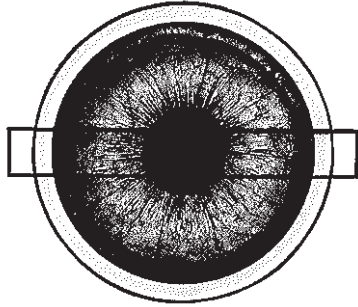
As polished

1mm



50μm

Photo 7 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC207	
Distance from bottom of pin		424mm
Distance from bottom of fuel column		89mm

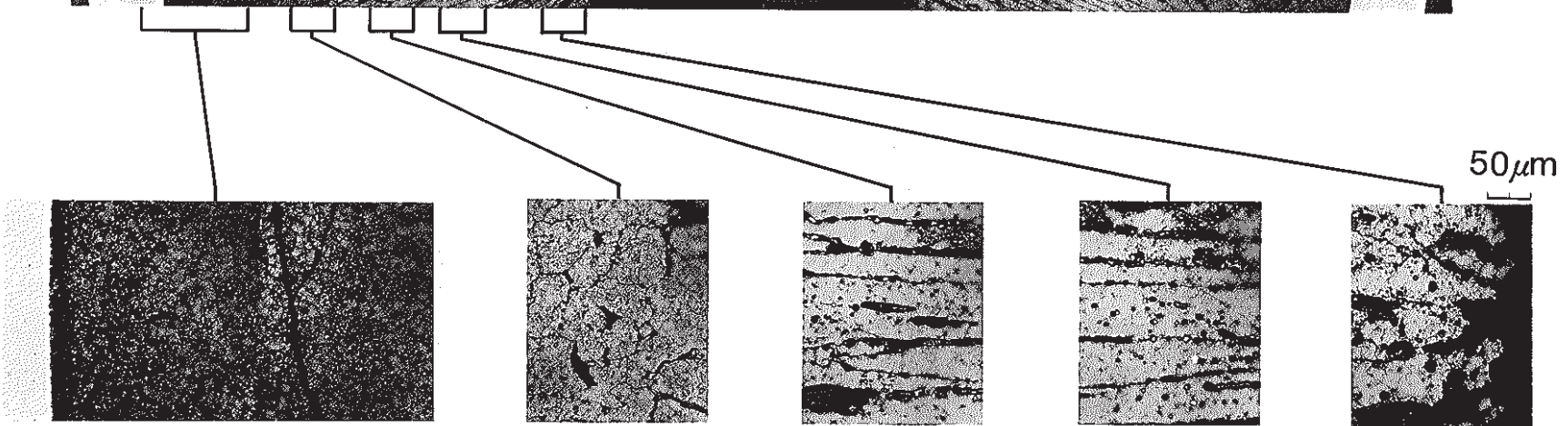
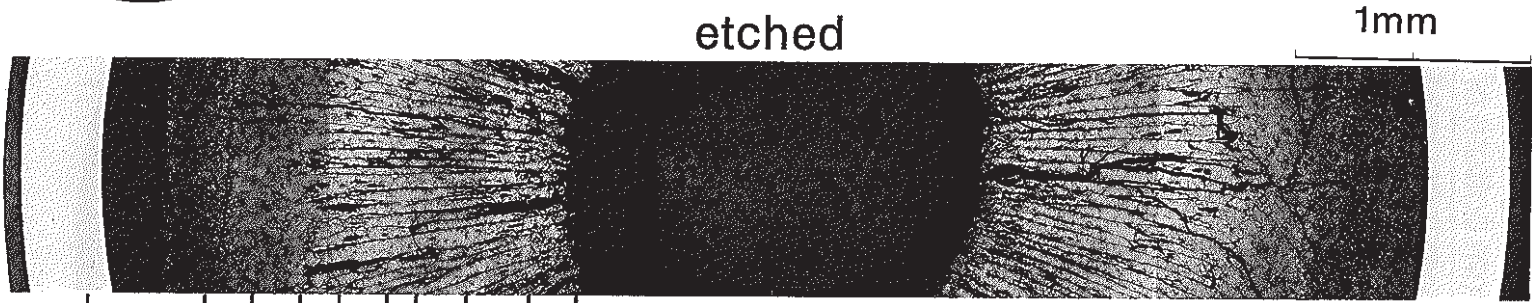


Photo 8 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin		544mm
Distance from bottom of fuel column		209mm

As polished

1mm

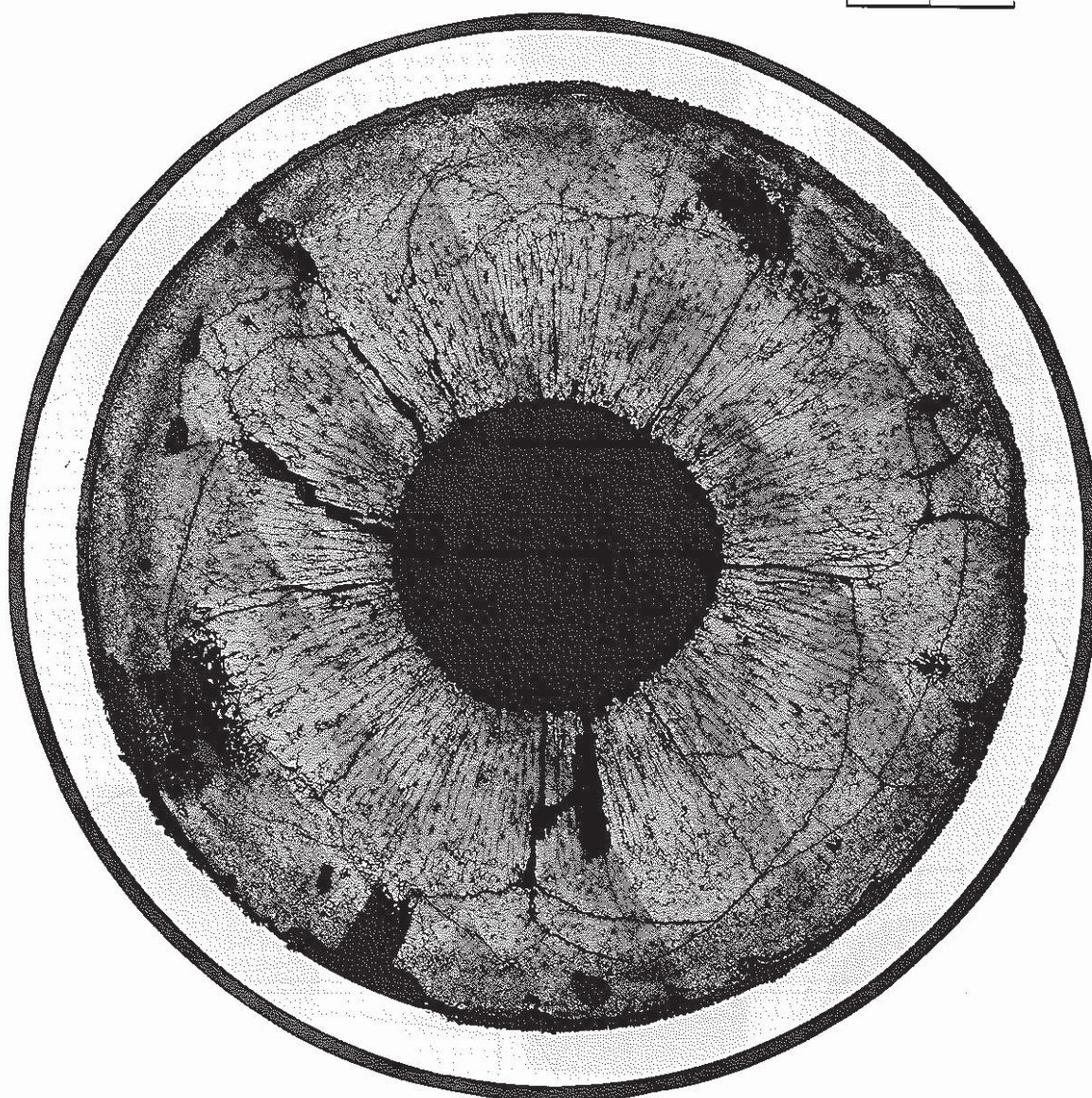


Photo 9 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin		544mm
Distance from bottom of fuel column		209mm

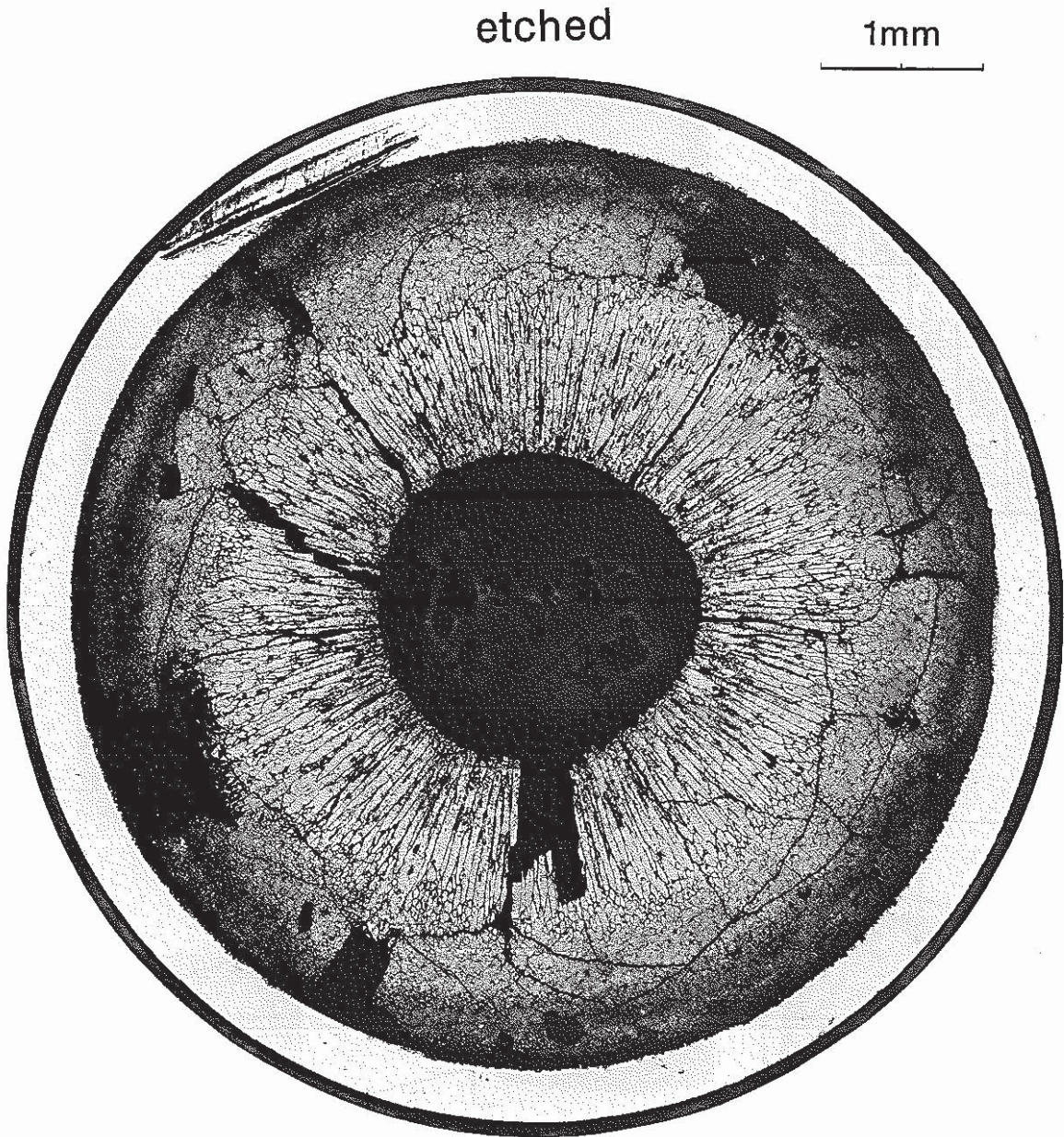
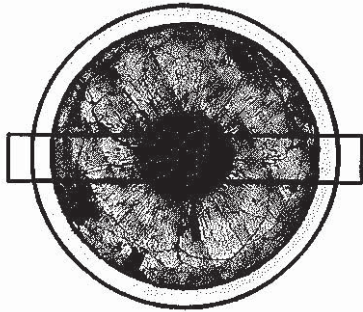


Photo 10 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin		544mm
Distance from bottom of fuel column		209mm

As polished

1mm

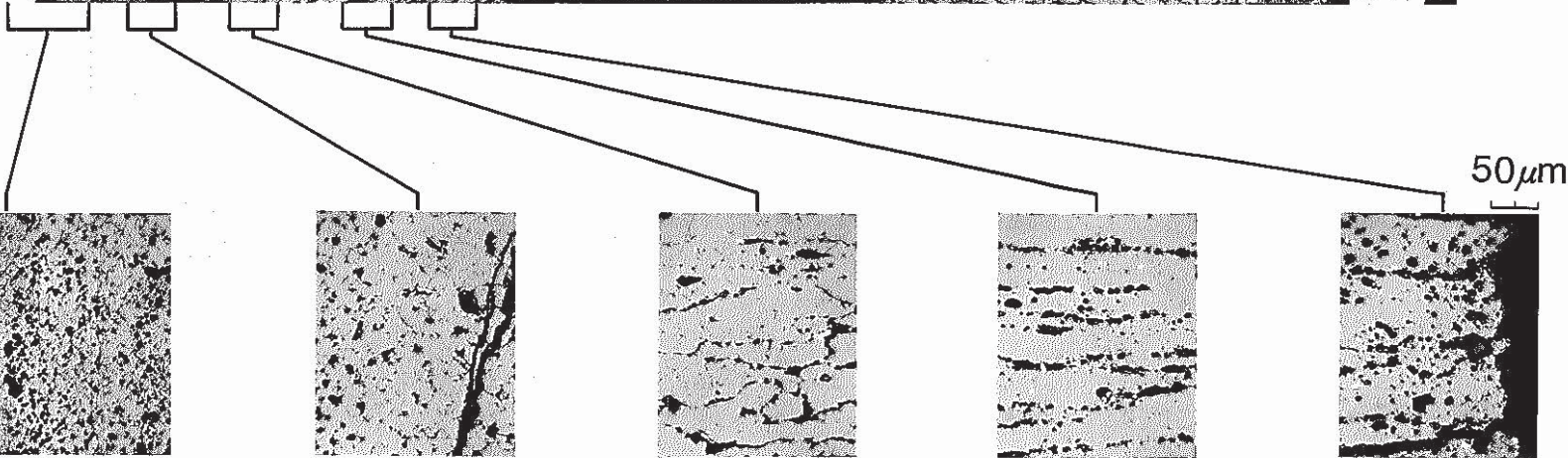
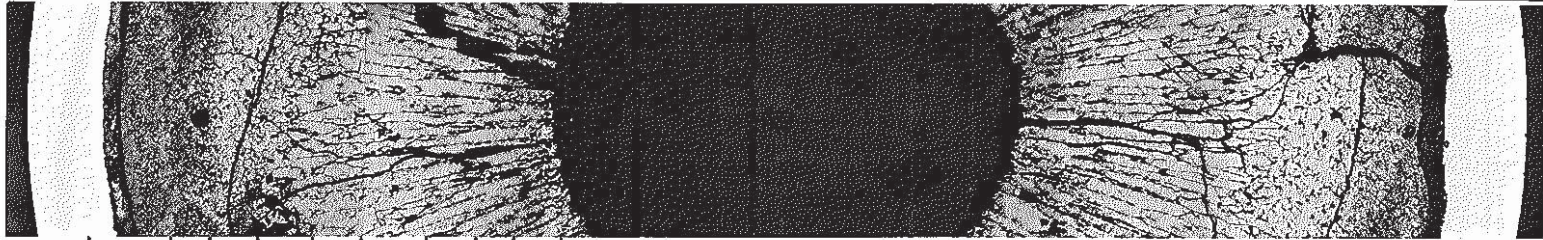
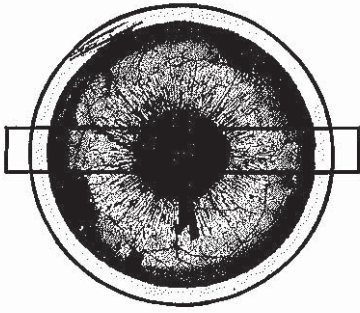


Photo 11 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin		544mm
Distance from bottom of fuel column		209mm

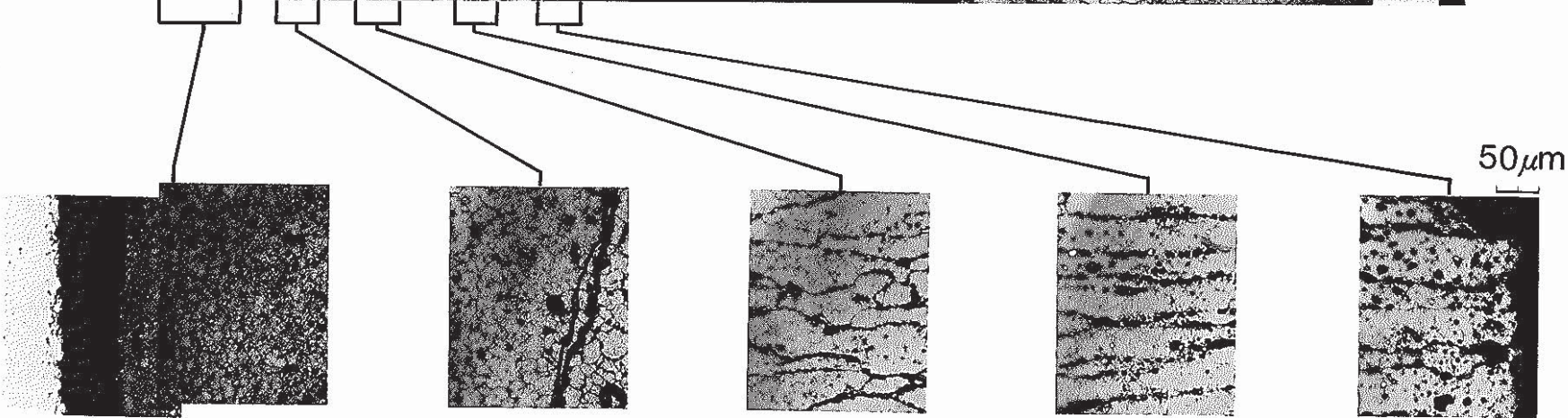
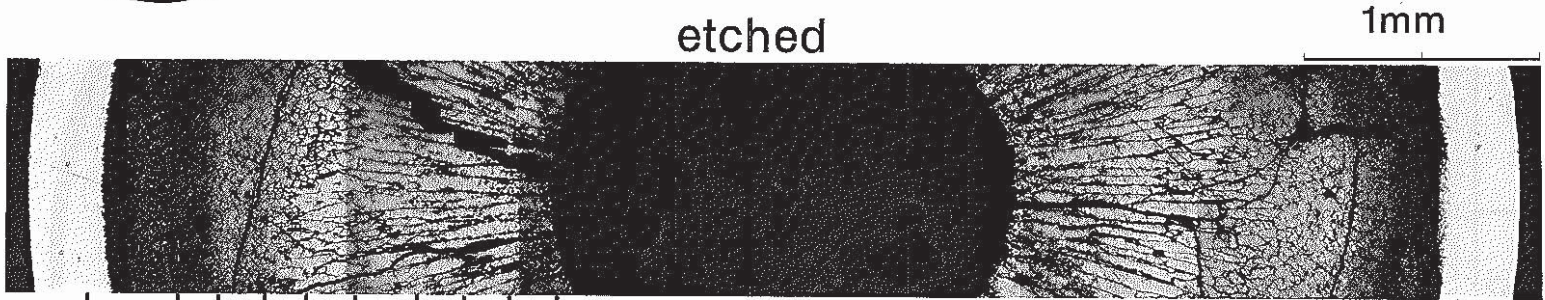


Photo 12 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

As polished

1mm

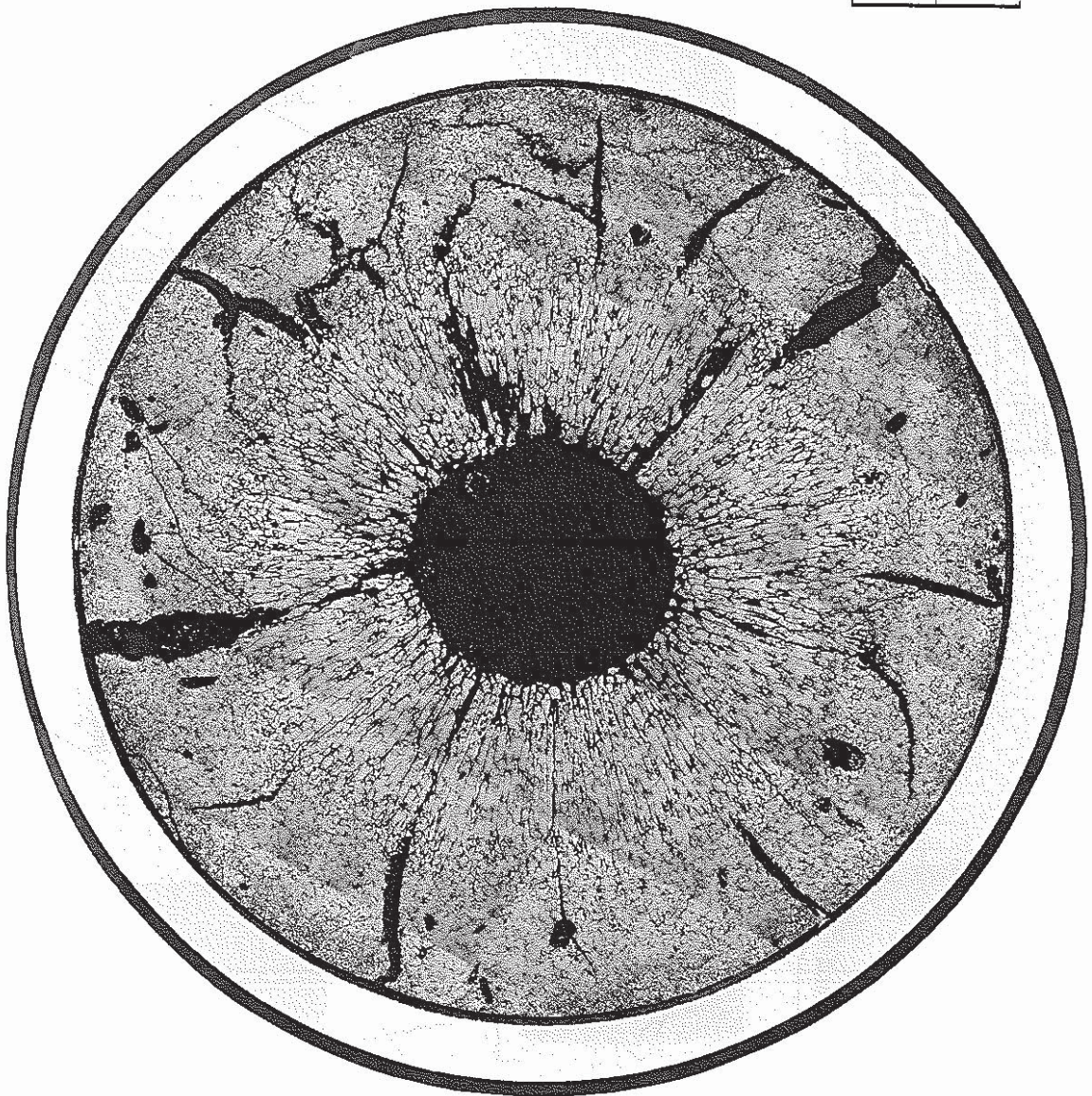


Photo 13 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

etched

1mm

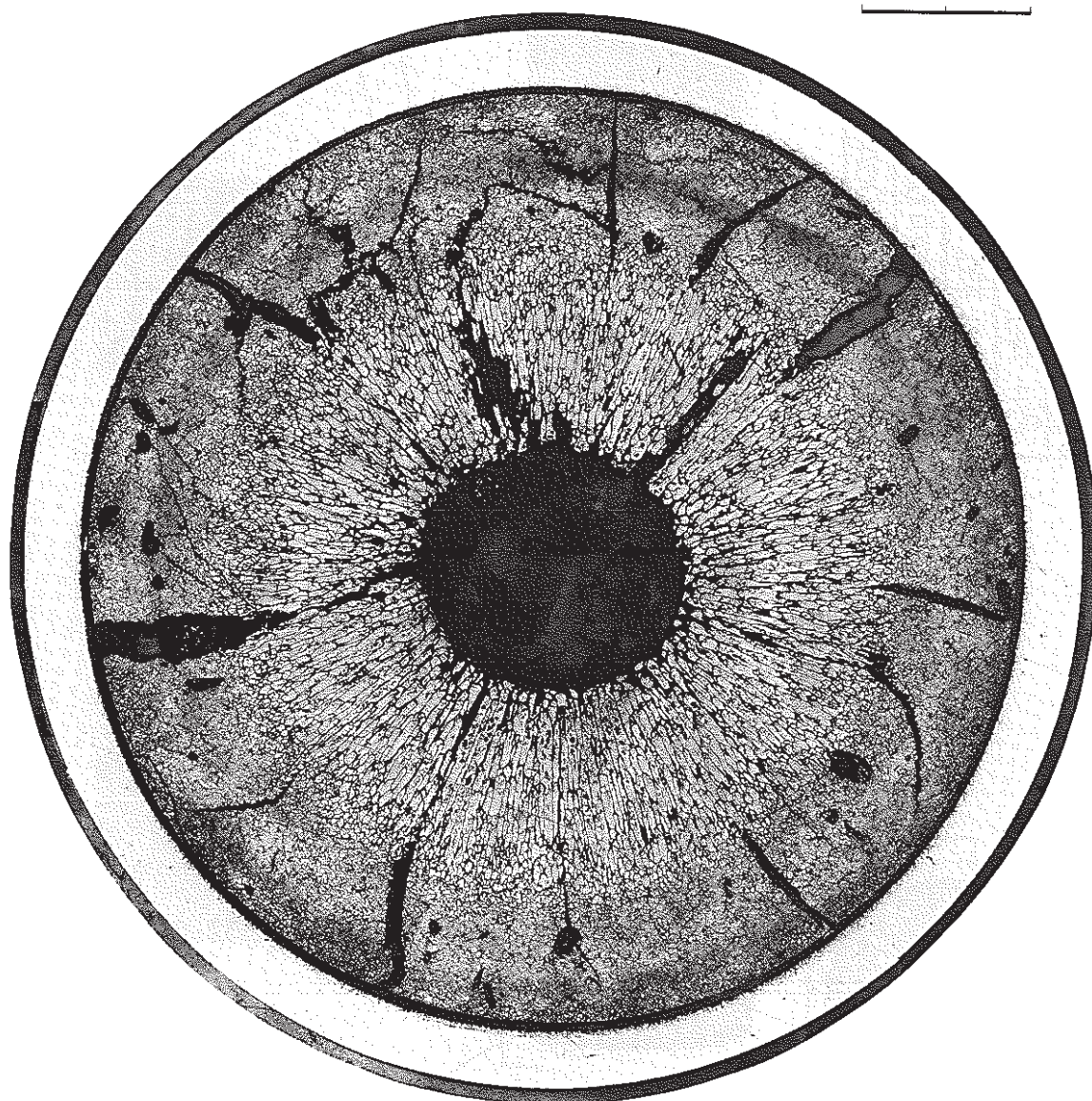
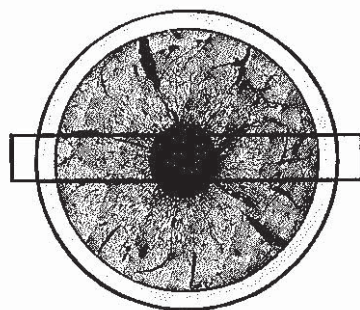


Photo 14 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

As polished

1mm

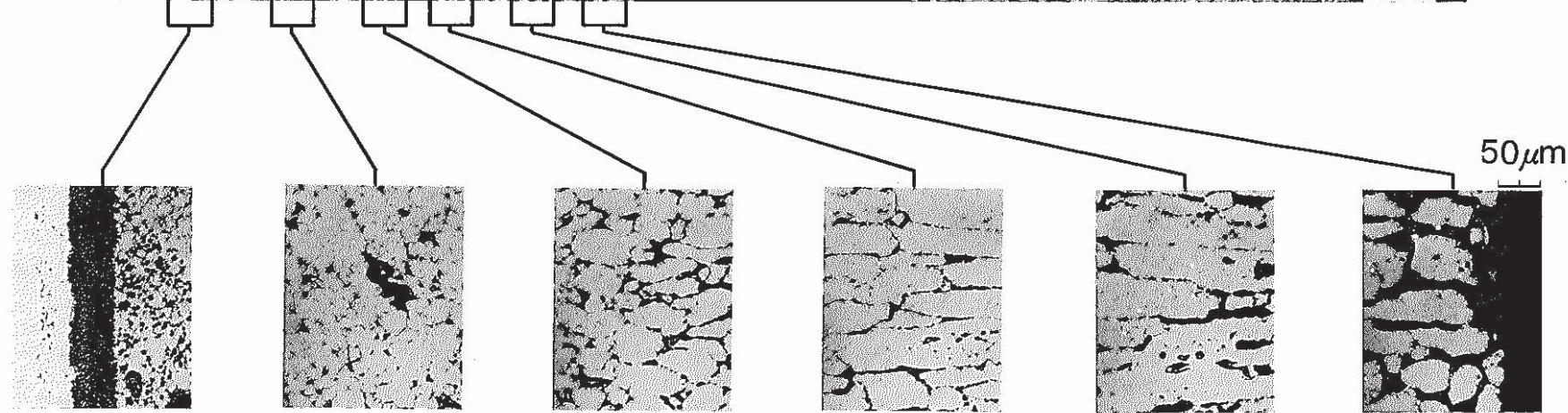
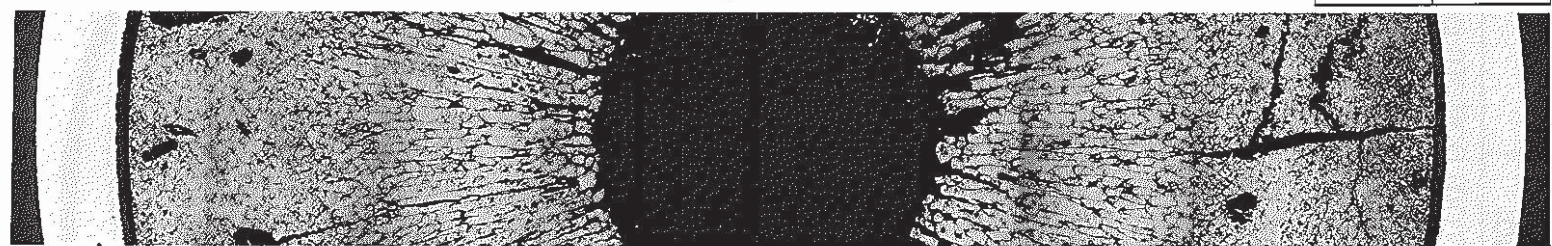
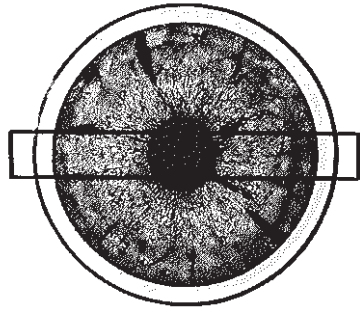


Photo 15 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

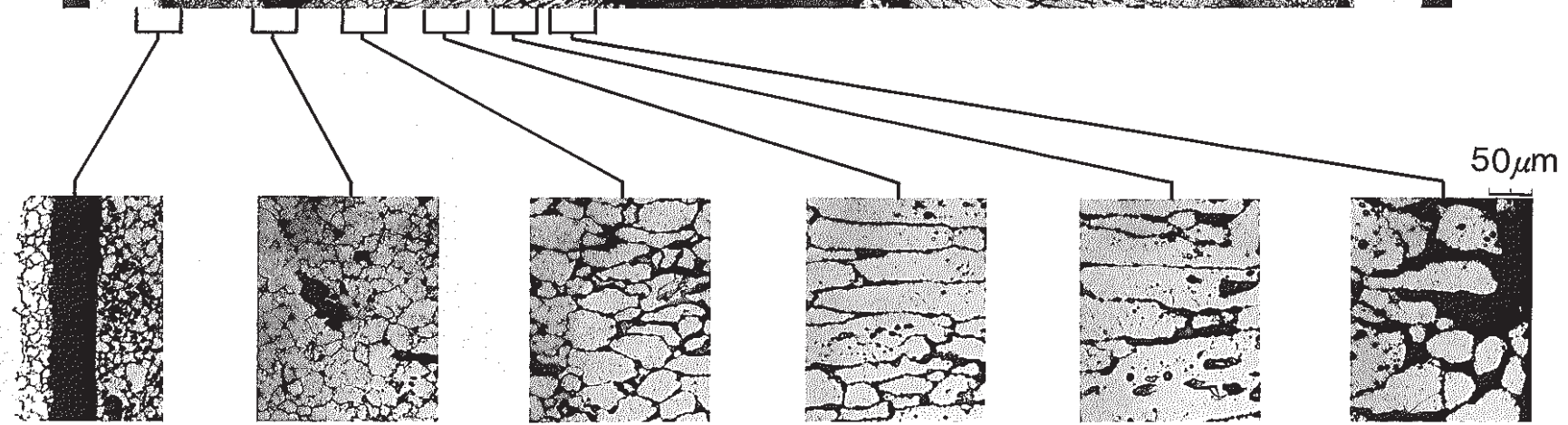
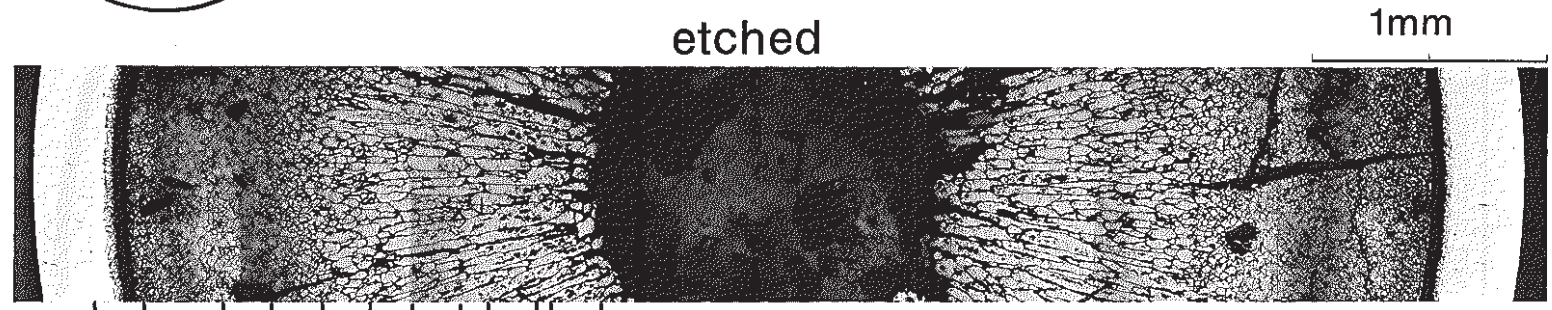


Photo 16 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K09	
Section No.	YC2332	
Distance from bottom of pin		381mm
Distance from bottom of fuel column		46mm

As polished

1mm



Photo 17 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K09	
Section No.	YC2332	
Distance from bottom of pin		381mm
Distance from bottom of fuel column		46mm

etched

1mm

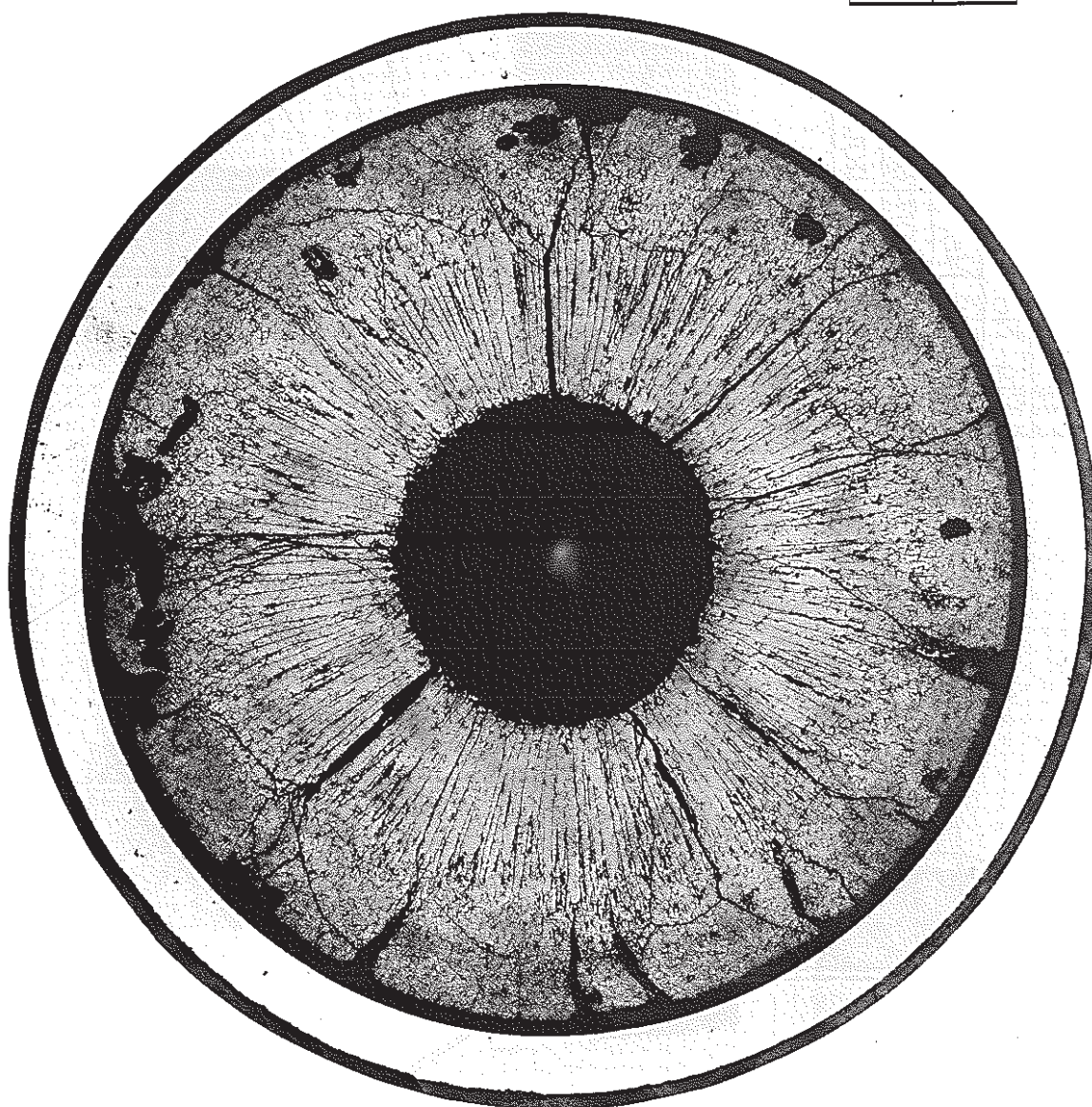
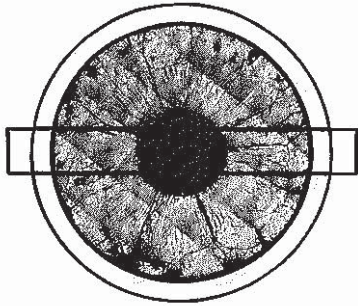


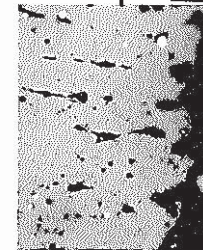
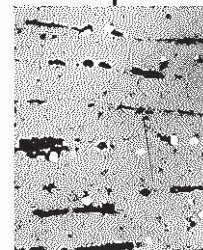
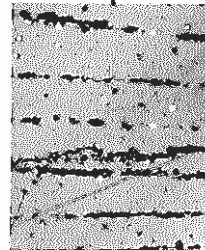
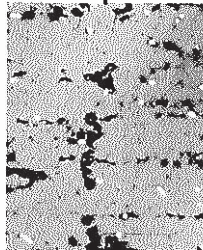
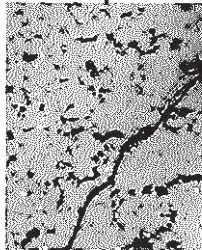
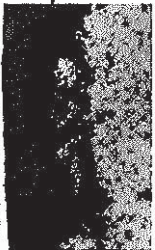
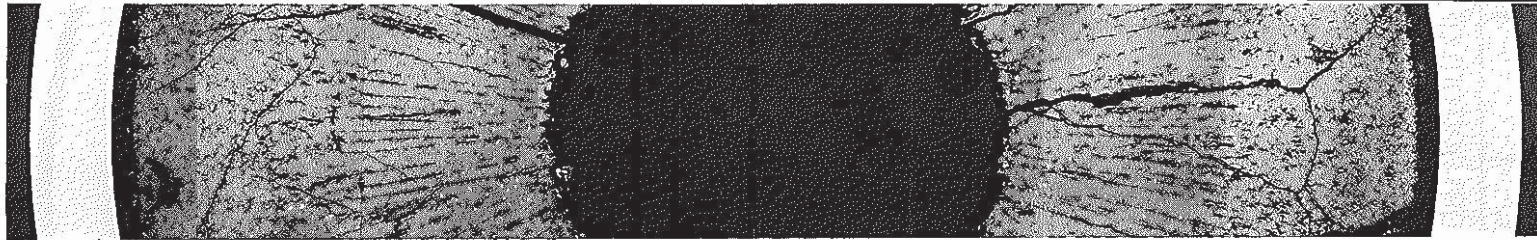
Photo 18 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K09	
Section No.	YC2332	
Distance from bottom of pin		381mm
Distance from bottom of fuel column		46mm

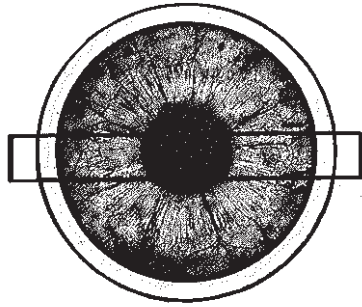
As polished

1mm



50μm

Photo 19 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K09	
Section No.	YC2332	
Distance from bottom of pin		381mm
Distance from bottom of fuel column		46mm

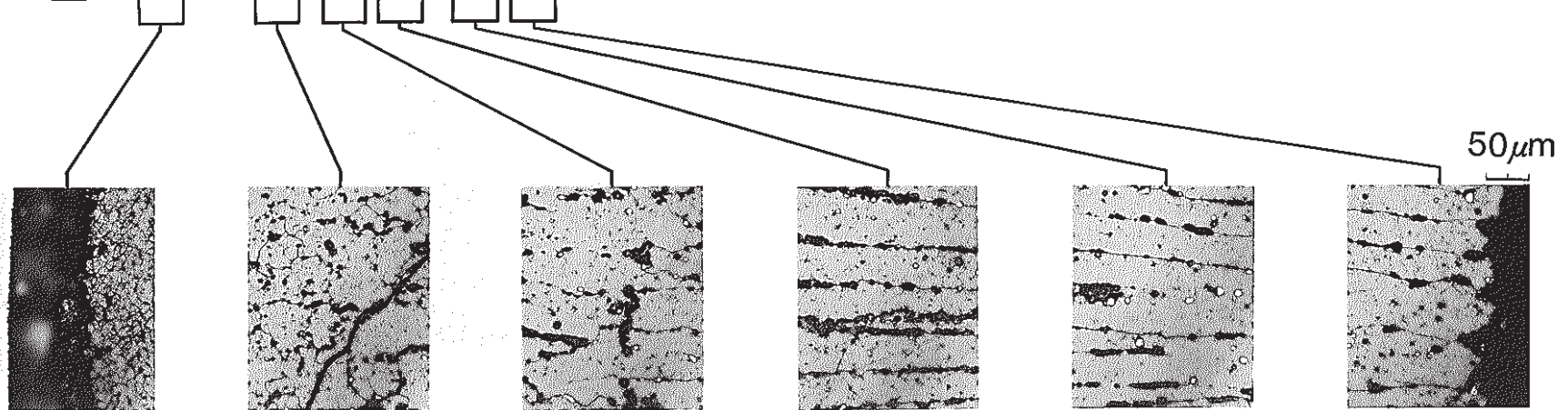
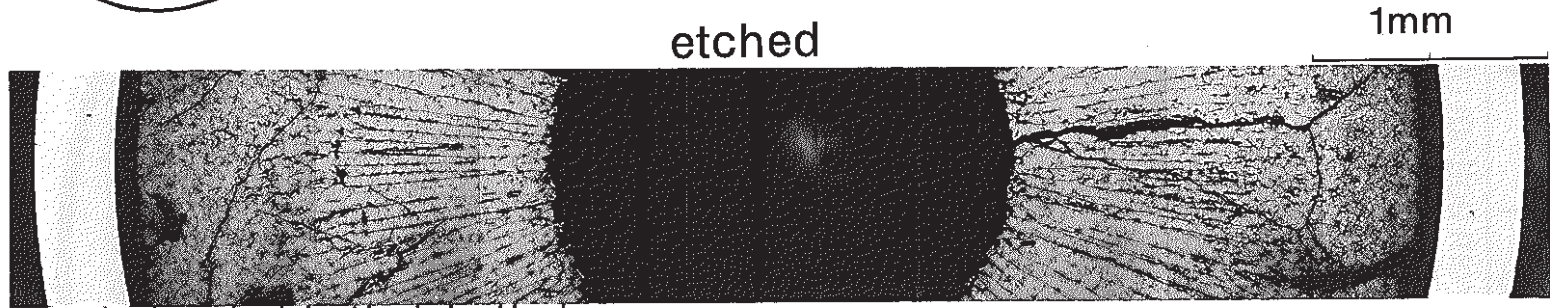


Photo 20 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

As polished

1mm



Photo 21 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

etched

1mm

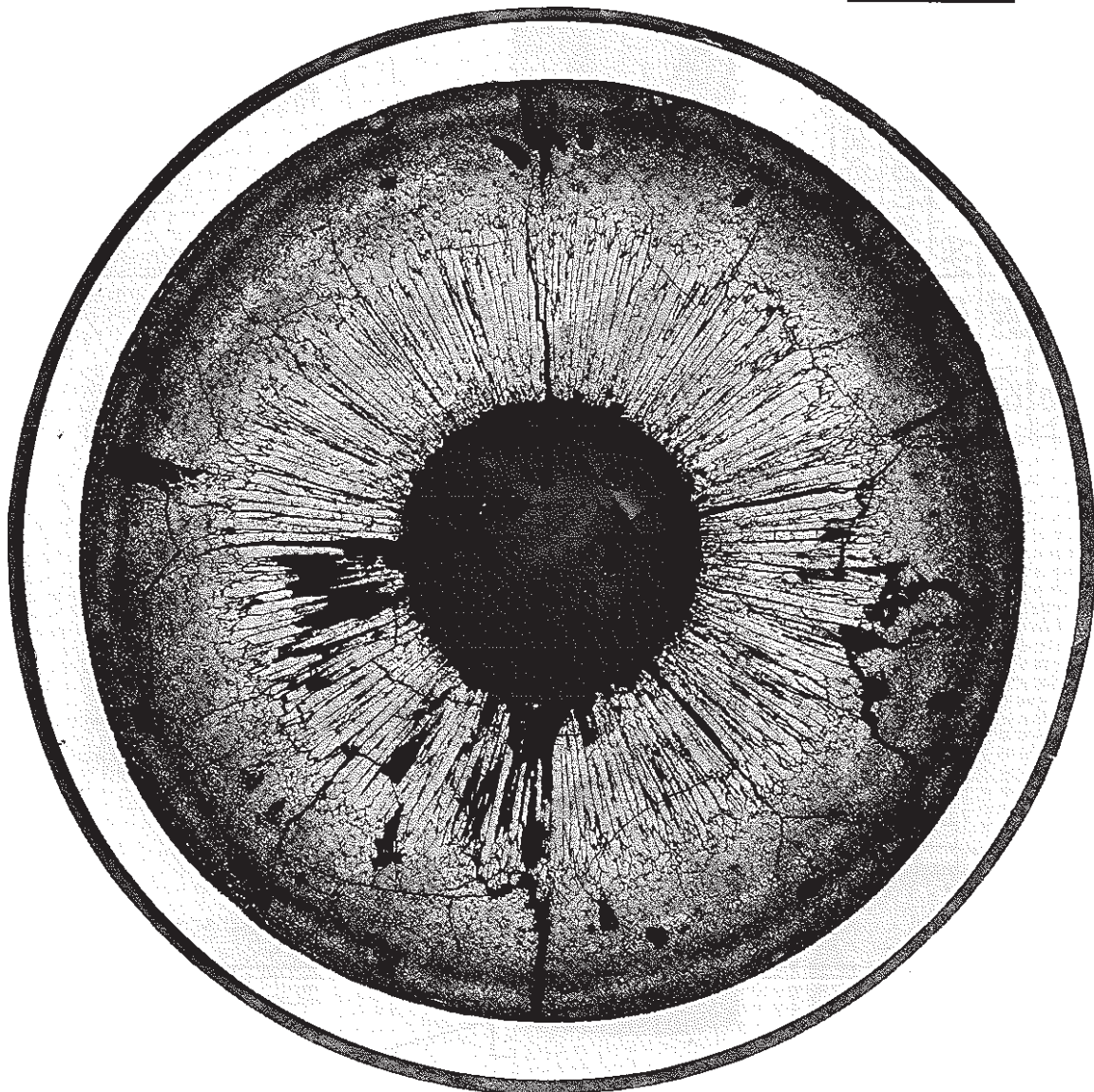
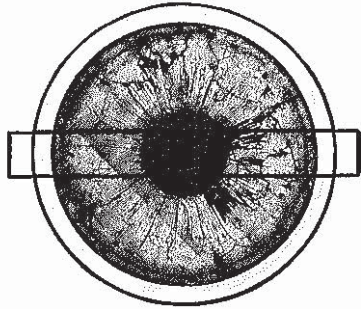


Photo 22 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

As polished

1mm

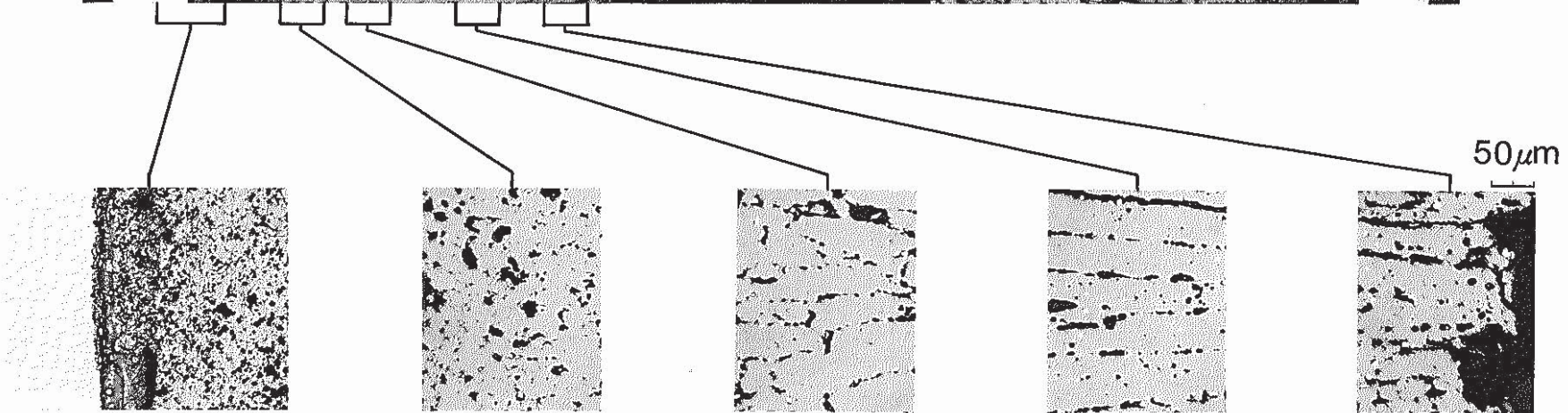
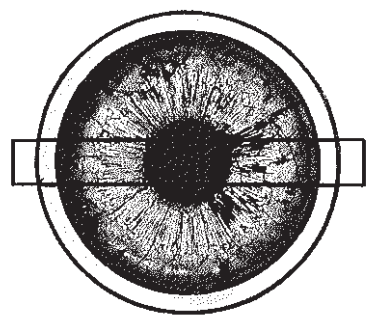


Photo 23 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

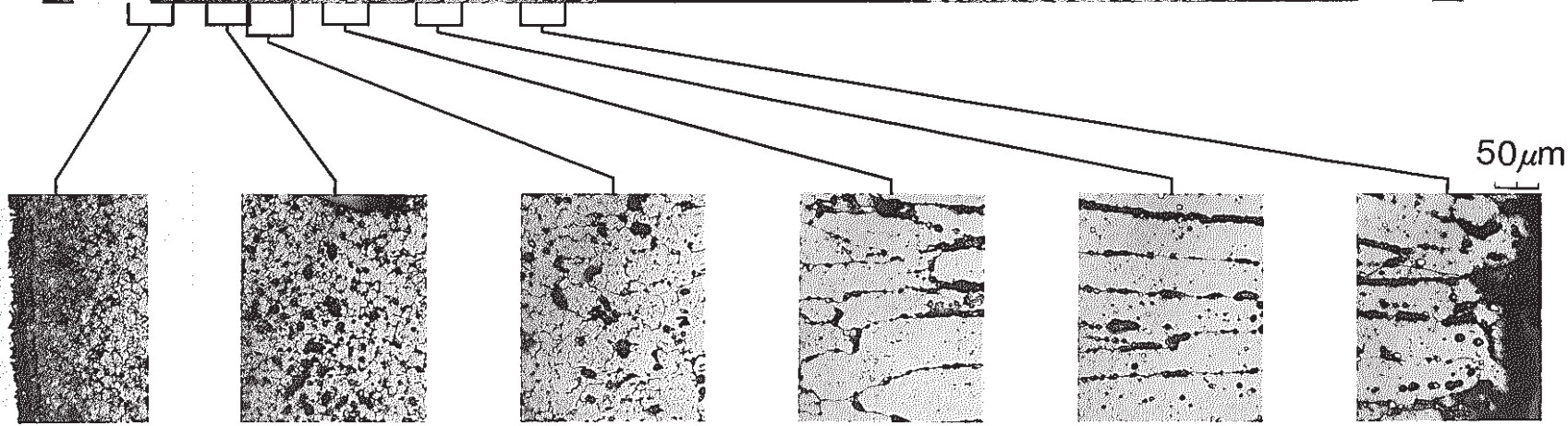
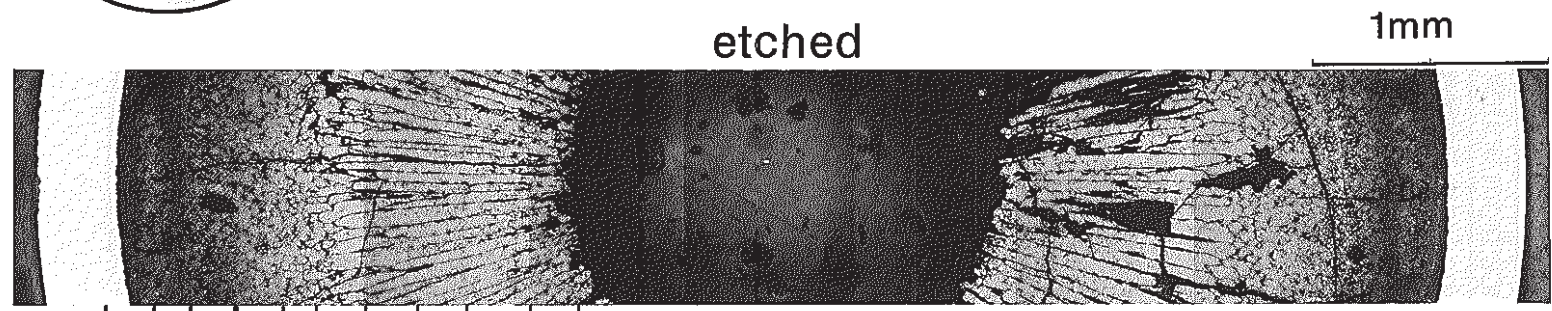


Photo 24 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC207	
Distance from bottom of pin		424mm
Distance from bottom of fuel column		89mm

As polished

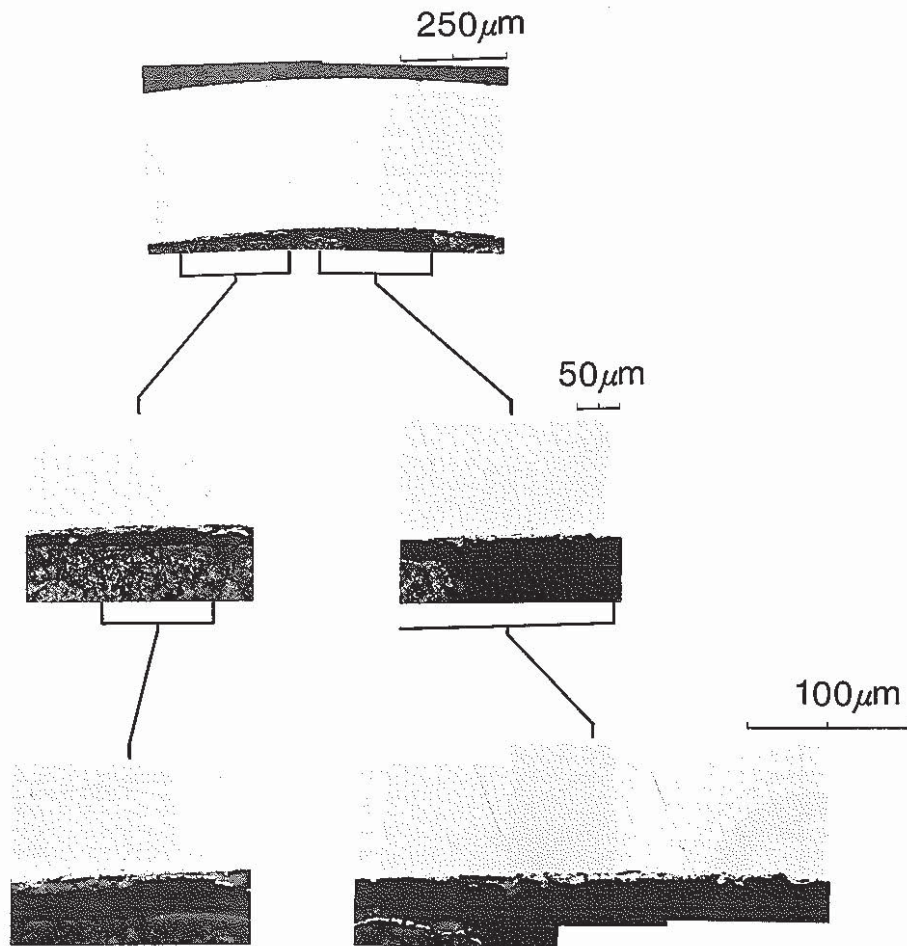
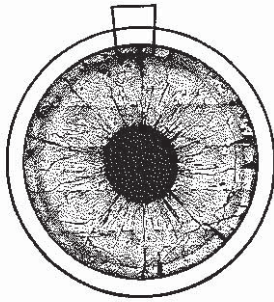
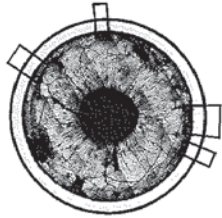


Photo 25 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin		544mm
Distance from bottom of fuel column		209mm

As polished

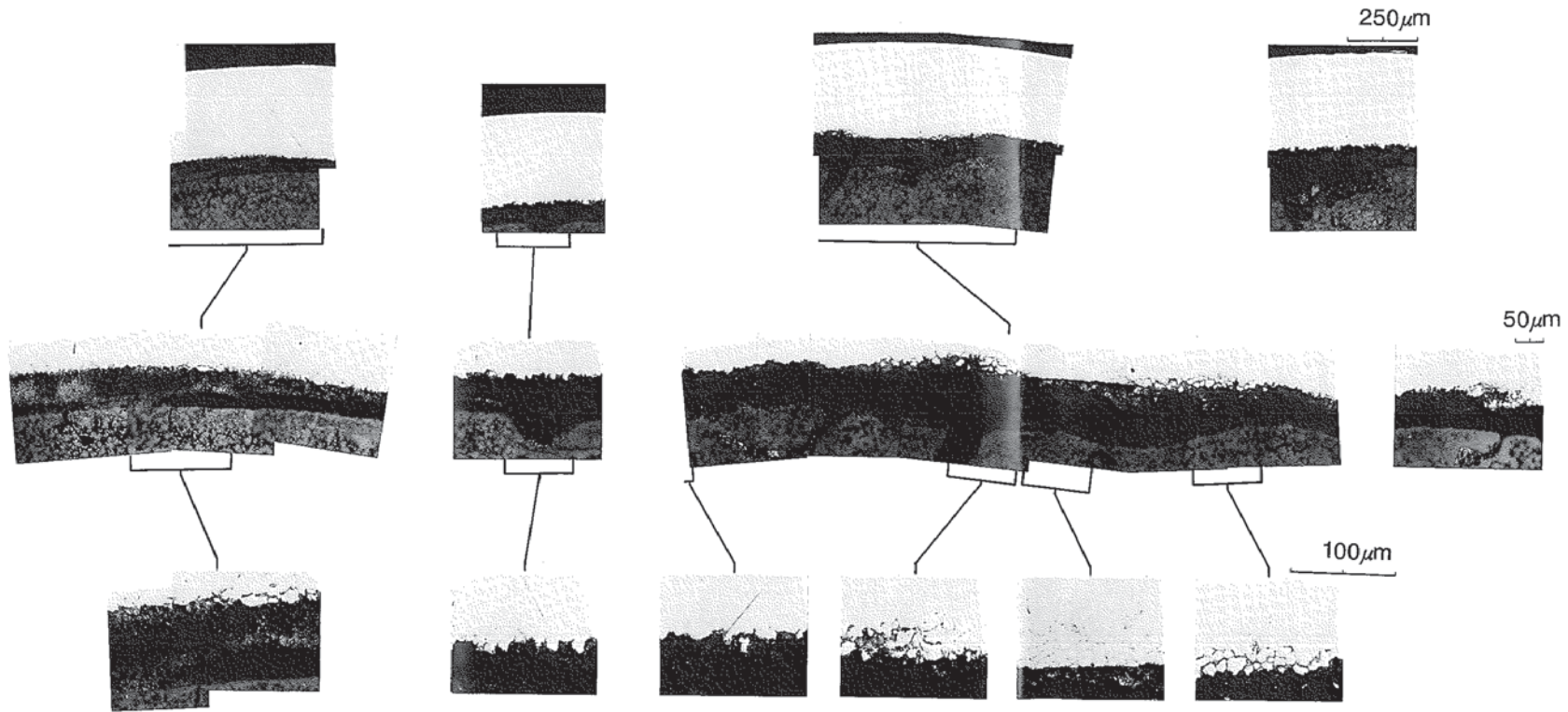


Photo 26 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20E	
Distance from bottom of pin	544mm	
Distance from bottom of fuel column	209mm	

As polished

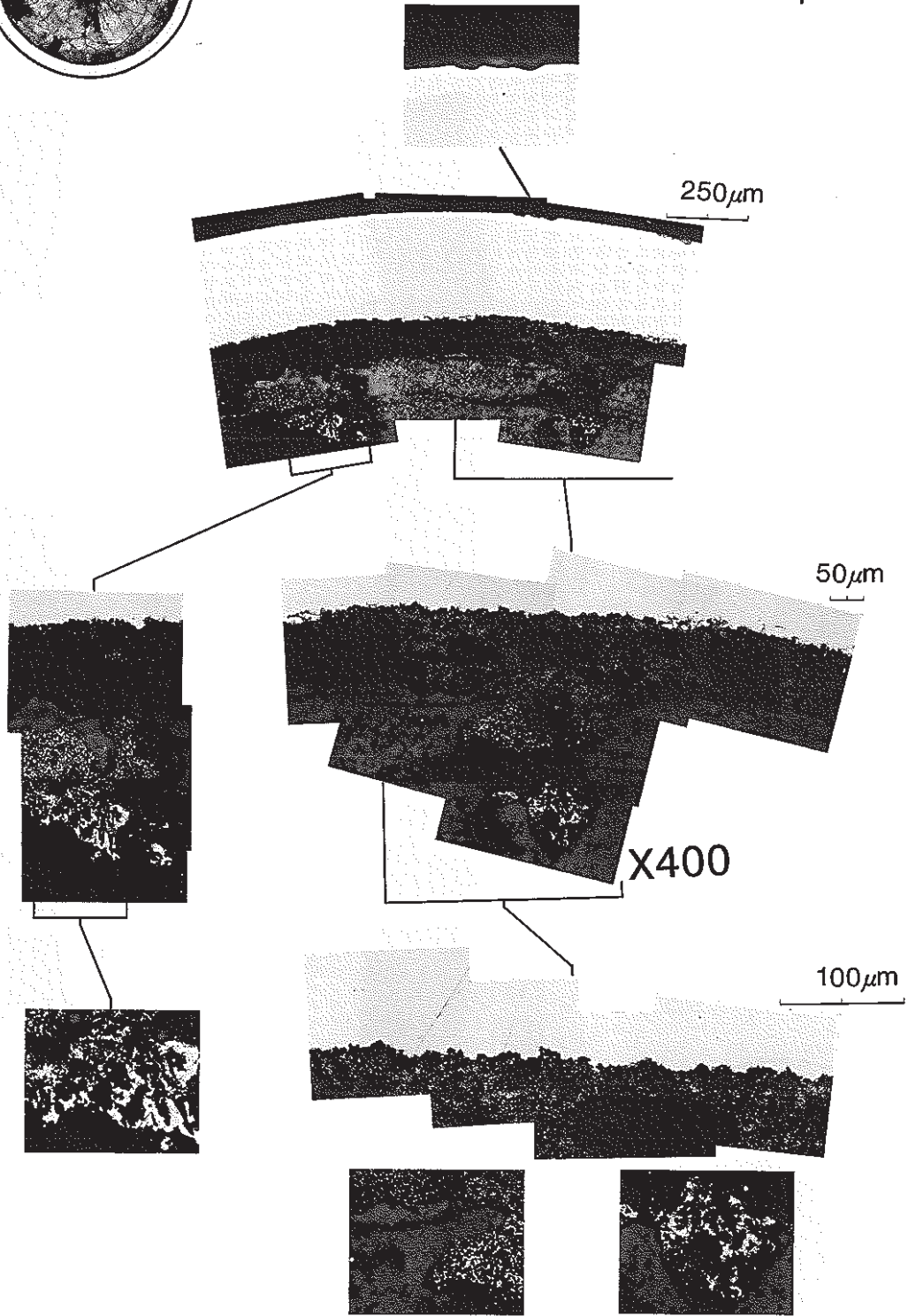
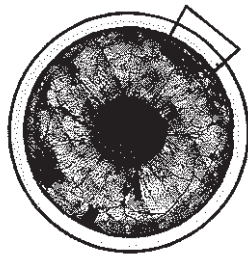
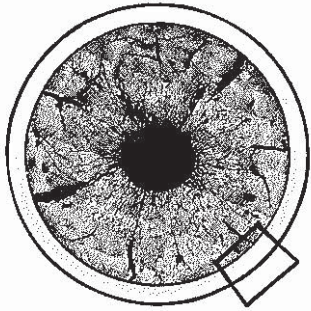


Photo 27 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding



S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

As polished

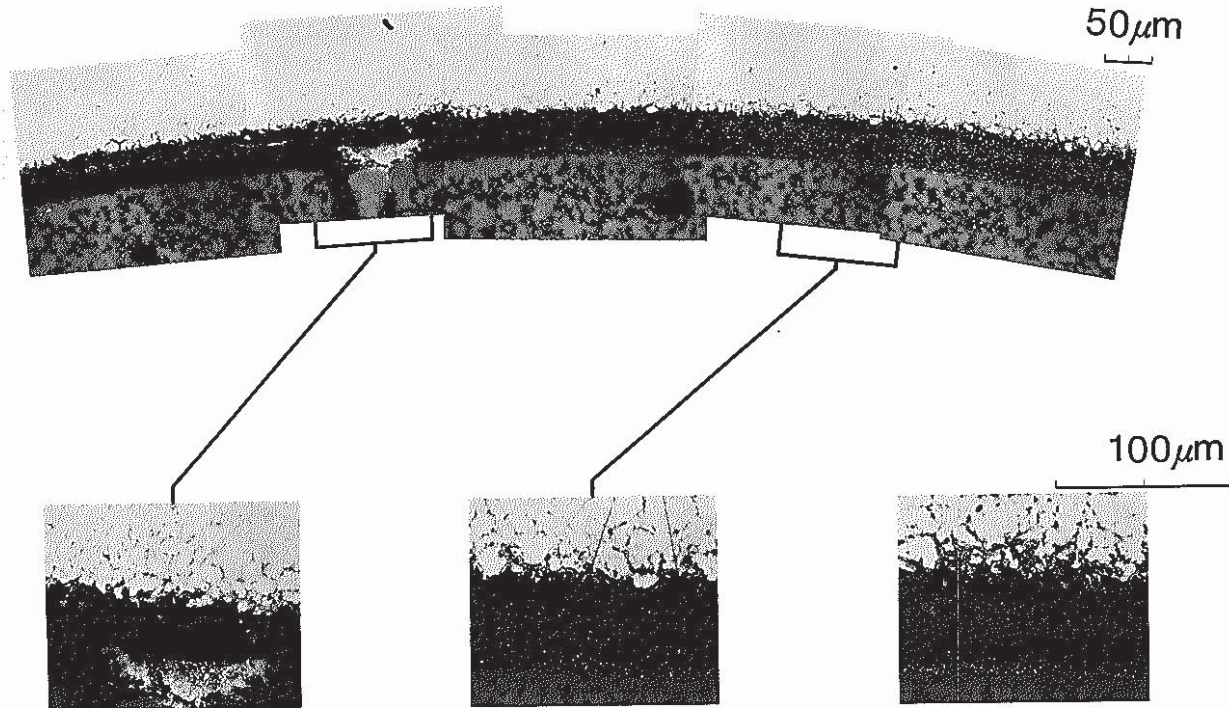


Photo 28 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K07	
Section No.	YC20J	
Distance from bottom of pin		643mm
Distance from bottom of fuel column		308mm

As polished

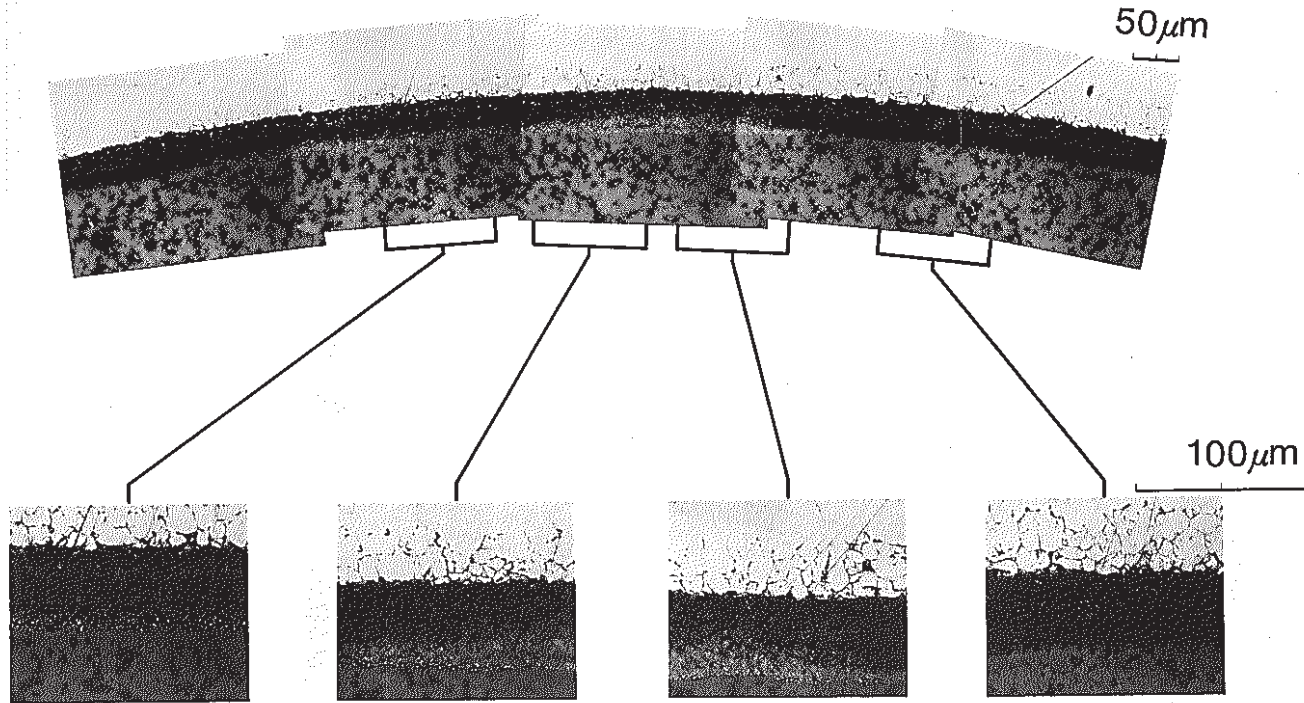
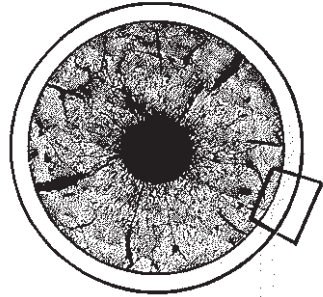


Photo 29 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

As polished

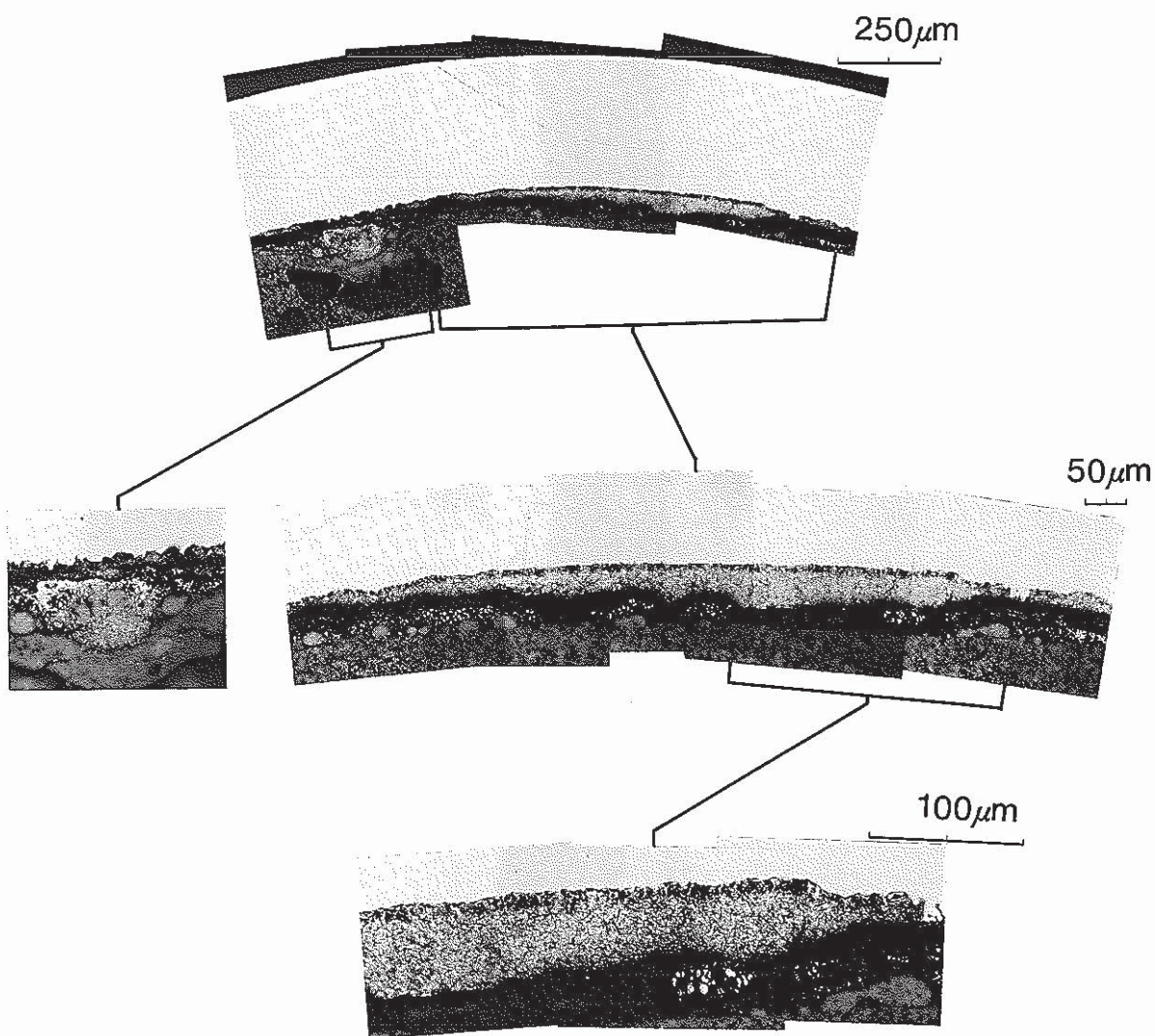
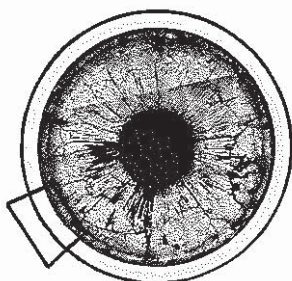


Photo 30 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding

S/A Name	RAPSODIE PNC-4	
Pin No.	K10	
Section No.	YC218	
Distance from bottom of pin		492mm
Distance from bottom of fuel column		157mm

As polished

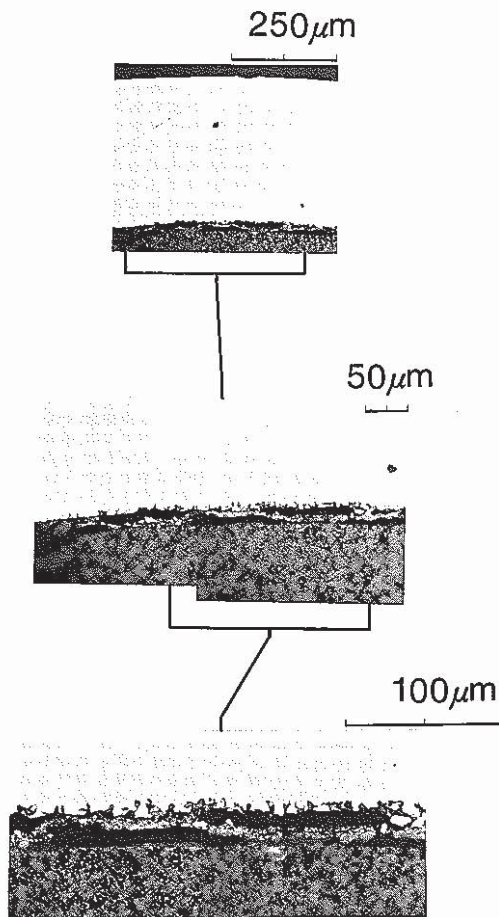
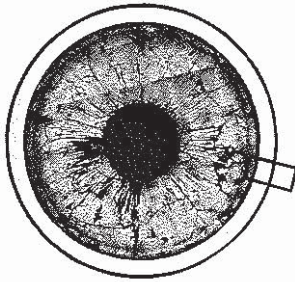


Photo 31 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding

データ集

4. 被覆管硬さ測定データ

Table 4.2.1	Cladding microhardness measurement condition and indentation position
Table 4.2.2	Summary of cladding microhardness measurement of Rapsodie PNC-4
Table 4.2.3	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K01 pin
Table 4.2.4	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K01 pin and PNC-4(3) K10 pin
Table 4.2.5	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K07 pin
Table 4.2.6	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(3) K09 pin
Fig. 4.2.1~4.2.4	Cladding microhardness distribution of PNC-4
Fig. 4.2.5	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4 as the function of luence
Fig. 4.2.6	Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) as the function of temperature

Table 4.2.1 Cladding microhardness measurement condition and indentation position

1) Measurement Condition

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

2) Indentation Position

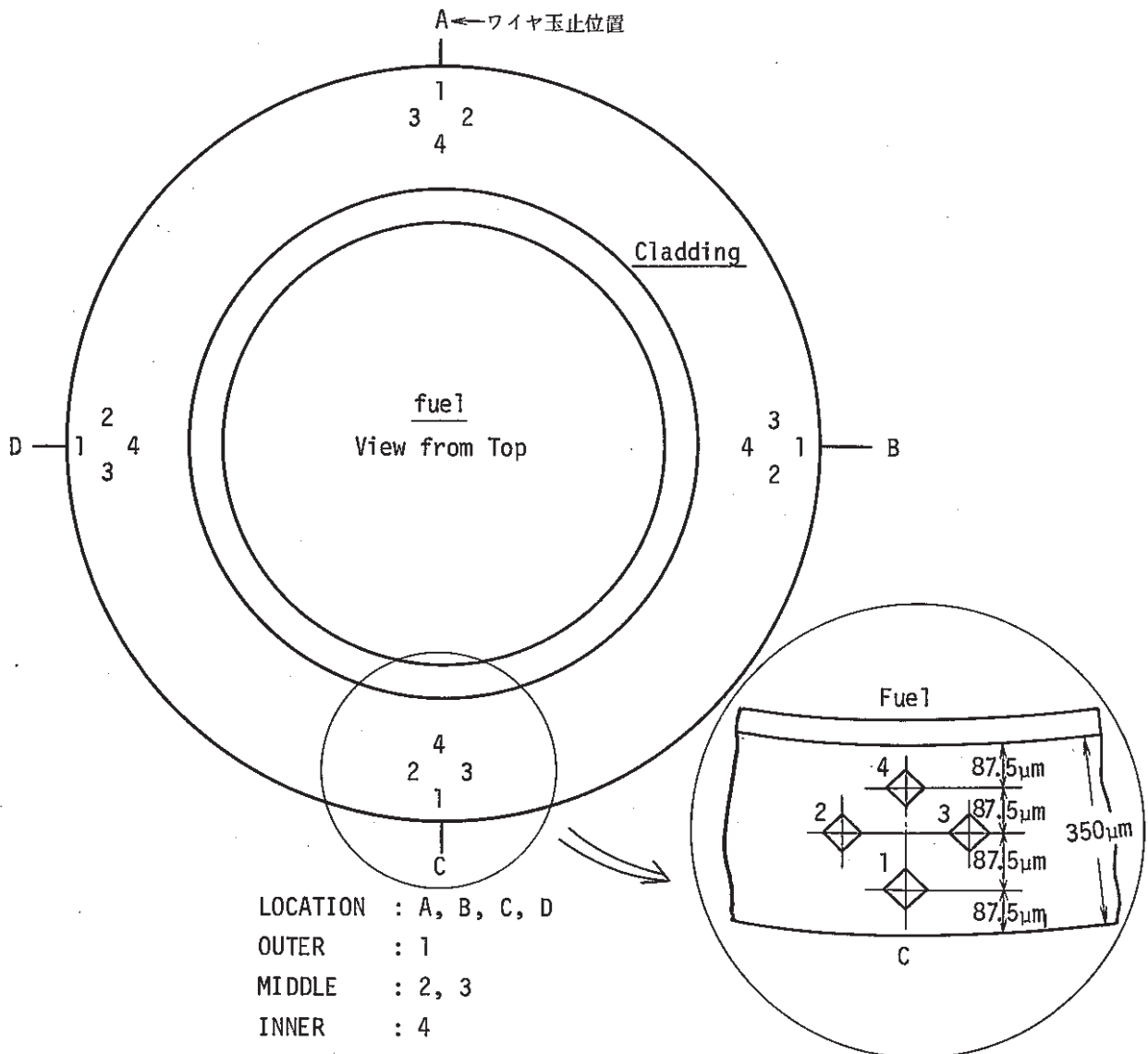


Table 4.2.2 Summary of cladding microhardness measurement of Rapsodie PNC-4

PIN NO.	Rapsodie PNC-4(2) K01 (Unirrad. Hardness = 248(HV))			
Specimen NO.	YC224	YC227	YC22A	YC22D
D.F.C.B. (mm)	100.0	164.0	219.0	274.0
(*1) Hardness (HV500)	282	256	245	232
(*2) Δ HV/HV (%)	13.7	3.2	-1.2	-6.5
PIN NO.	Rapsodie PNC-4(2) K07 (Unirrad. Hardness = 248(HV))			
Specimen NO.	YC207		YC20E	YC20J
D.F.C.B. (mm)	98.7		219.4	318.7
(*1) Hardness (HV500)	281		235	234
(*2) Δ HV/HV (%)	13.3		-5.2	-5.6
PIN NO.	Rapsodie PNC-4(3) K09 (Unirrad. Hardness = 248(HV))			
Specimen NO.	YC2332		YC23C	YC23H
D.F.C.B. (mm)	56.0		219.0	320.0
(*1) Hardness (HV500)	303		232	228
(*2) Δ HV/HV (%)	22.2		-6.5	-8.1
PIN NO.	Rapsodie PNC-4(3) K10 (Unirrad. Hardness = 248(HV))			
Specimen NO.		YC218		
D.F.C.B. (mm)		166.4		
(*1) Hardness (HV500)		249		
(*2) Δ HV/HV (%)		0.4		

(*1) : 測定点 16 箇所の平均値

(*2) : HV = Unirrad. Hardness

 Δ HV = Hardness - Unirrad. Hardness

Table 4.2.3 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K01 Pin

S/A NAME	Rapsodia PNC-4		PIN No.	K01	
SPECIMEN No.	YC224				
D.F.C.B.	100.0	(mm)	D.F.P.B.	435.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	276	271	278	266	273
B	287	282	293	273	284
C	291	287	285	273	284
D	301	296	285	266	287
RING AVERAGE	289	284	285	270	282

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K01	
SPECIMEN No.	YC227				
D.F.C.B.	164.0	(mm)	D.F.P.B.	499.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	255	249	251	247	251
B	251	258	251	239	250
C	268	258	259	249	259
D	271	264	262	251	262
RING AVERAGE	261	257	256	247	256

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K01	
SPECIMEN No.	YC22A				
D.F.C.B.	219.0	(mm)	D.F.P.B.	554.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	249	245	245	243	246
B	255	249	245	239	247
C	239	247	245	239	243
D	247	243	241	238	242
RING AVERAGE	248	246	244	240	245

Unit (HV500)

Table 4.2.4 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K01 Pin and PNC-4(3) K10 Pin

S/A NAME	Rapsodia PNC-4		PIN No.	K01	
SPECIMEN No.	YC22D				
D.F.C.B.	274.0	(mm)	D.F.P.B.	609.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	230	224	224	235	228
B	226	228	230	230	229
C	234	238	231	241	236
D	241	239	223	238	235
RING AVERAGE	233	232	227	236	232

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K10	
SPECIMEN No.	YC218				
D.F.C.B.	166.4	(mm)	D.F.P.B.	501.4	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	259	245	247	243	249
B	253	243	245	241	246
C	262	256	249	247	254
D	251	247	243	241	246
RING AVERAGE	256	248	246	243	249

Unit (HV500)

Table 4.2.5 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) K07 Pin

S/A NAME	Rapsodia PNC-4		PIN No.	K07	
SPECIMEN No.	YC207				
D.F.C.B.	98.7	(mm)	D.F.P.B.	433.7	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	291	280	287	278	284
B	287	276	280	276	280
C	298	278	282	271	282
D	287	282	280	268	279
RING AVERAGE	291	279	282	273	281

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K07	
SPECIMEN No.	YC20E				
D.F.C.B.	219.4	(mm)	D.F.P.B.	554.4	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	241	235	238	234	237
B	230	234	235	223	231
C	239	241	235	231	237
D	234	234	231	239	235
RING AVERAGE	236	236	235	232	235

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K07	
SPECIMEN No.	YC20J				
D.F.C.B.	318.7	(mm)	D.F.P.B.	653.7	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	235	235	226	241	234
B	231	234	226	234	231
C	228	231	238	243	235
D	230	234	241	238	236
RING AVERAGE	231	234	233	239	234

Unit (HV500)

Table 4.2.6 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(3) K09 Pin

S/A NAME	Rapsodia PNC-4		PIN No.	K09	
SPECIMEN No.	YC2332				
D.F.C.B.	56.0	(mm)	D.F.P.B.	391.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	307	298	303	291	300
B	318	307	301	291	304
C	307	303	307	303	305
D	307	307	307	293	304
RING AVERAGE	310	304	305	295	303

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K09	
SPECIMEN No.	YC23C				
D.F.C.B.	219.0	(mm)	D.F.P.B.	554.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	234	235	231	221	230
B	228	223	234	228	228
C	238	231	234	230	233
D	238	235	231	238	236
RING AVERAGE	235	231	233	229	232

Unit (HV500)

S/A NAME	Rapsodie PNC-4		PIN No.	K09	
SPECIMEN No.	YC23H				
D.F.C.B.	320.0	(mm)	D.F.P.B.	655.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	224	228	228	230	228
B	228	226	224	238	229
C	223	224	226	235	227
D	223	230	224	224	225
RING AVERAGE	225	227	226	232	228

Unit (HV500)

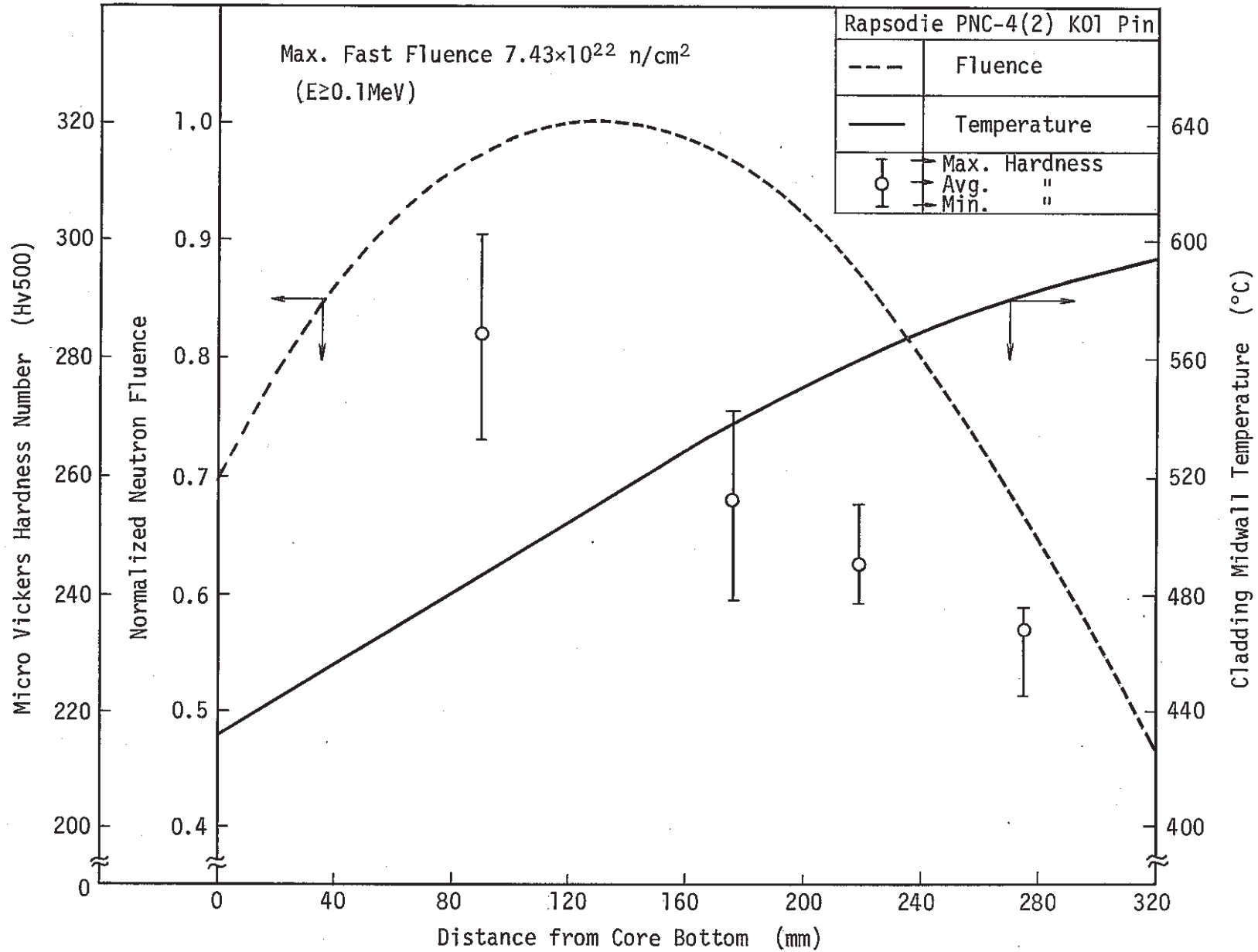


Fig. 4.2.1 Cladding microhardness distribution of Rapsodie PNC-4(2) K01 Pin

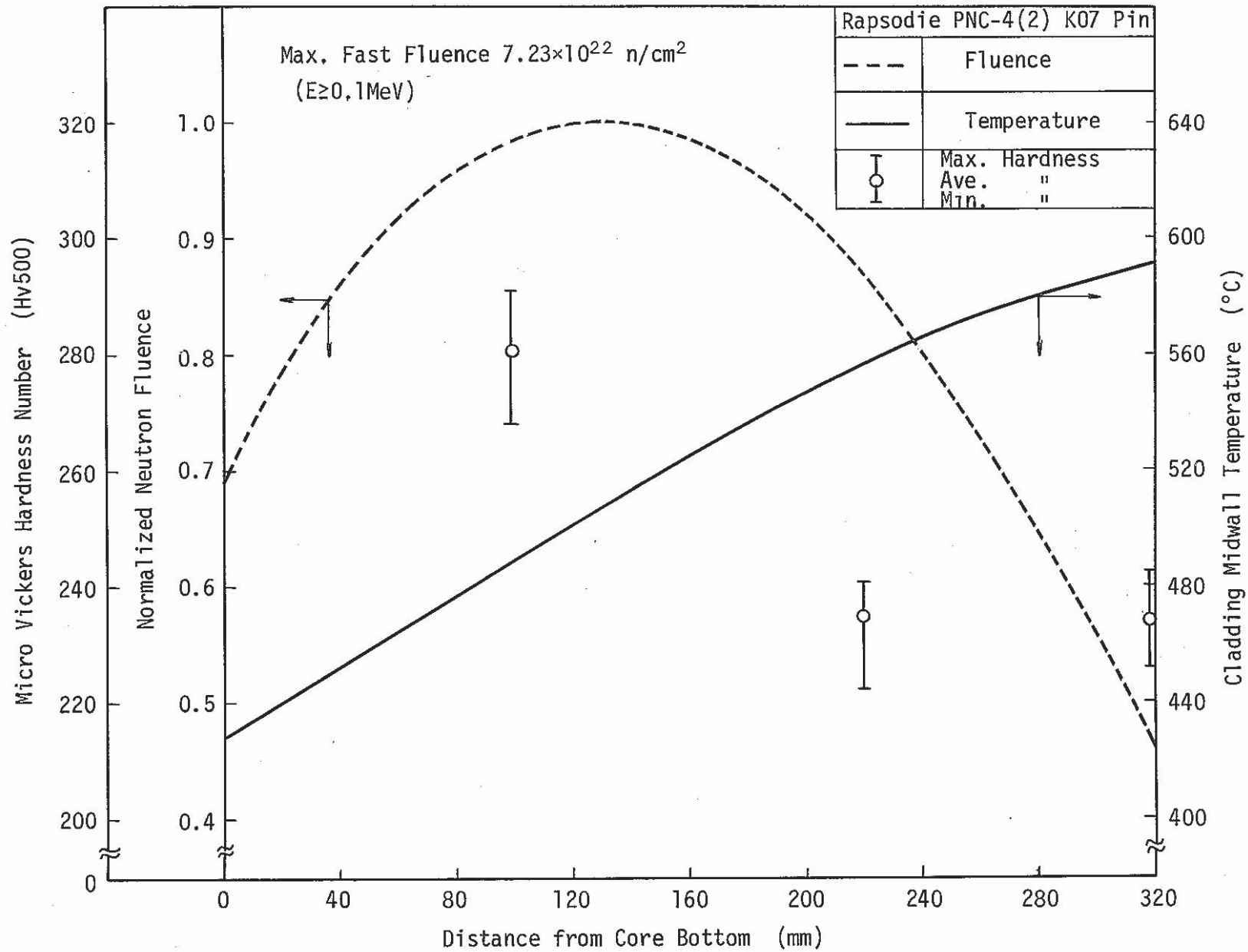


Fig. 4.2.2 Cladding microhardness distribution of Rapsodie PNC-4(2) K07 Pin

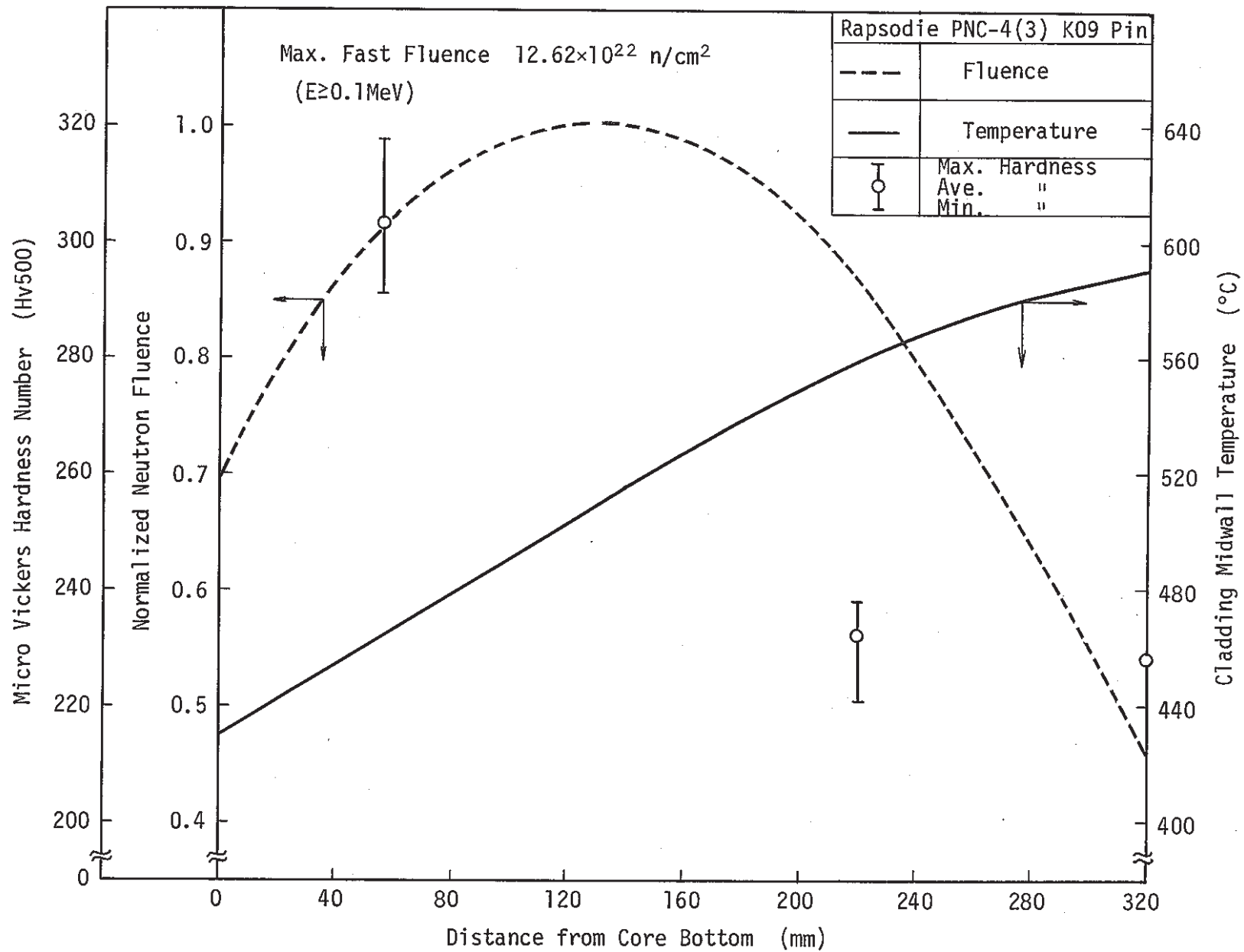


Fig. 4.2.3 Cladding microhardness distribution of Rapsodie PNC-4(3) K09 Pin

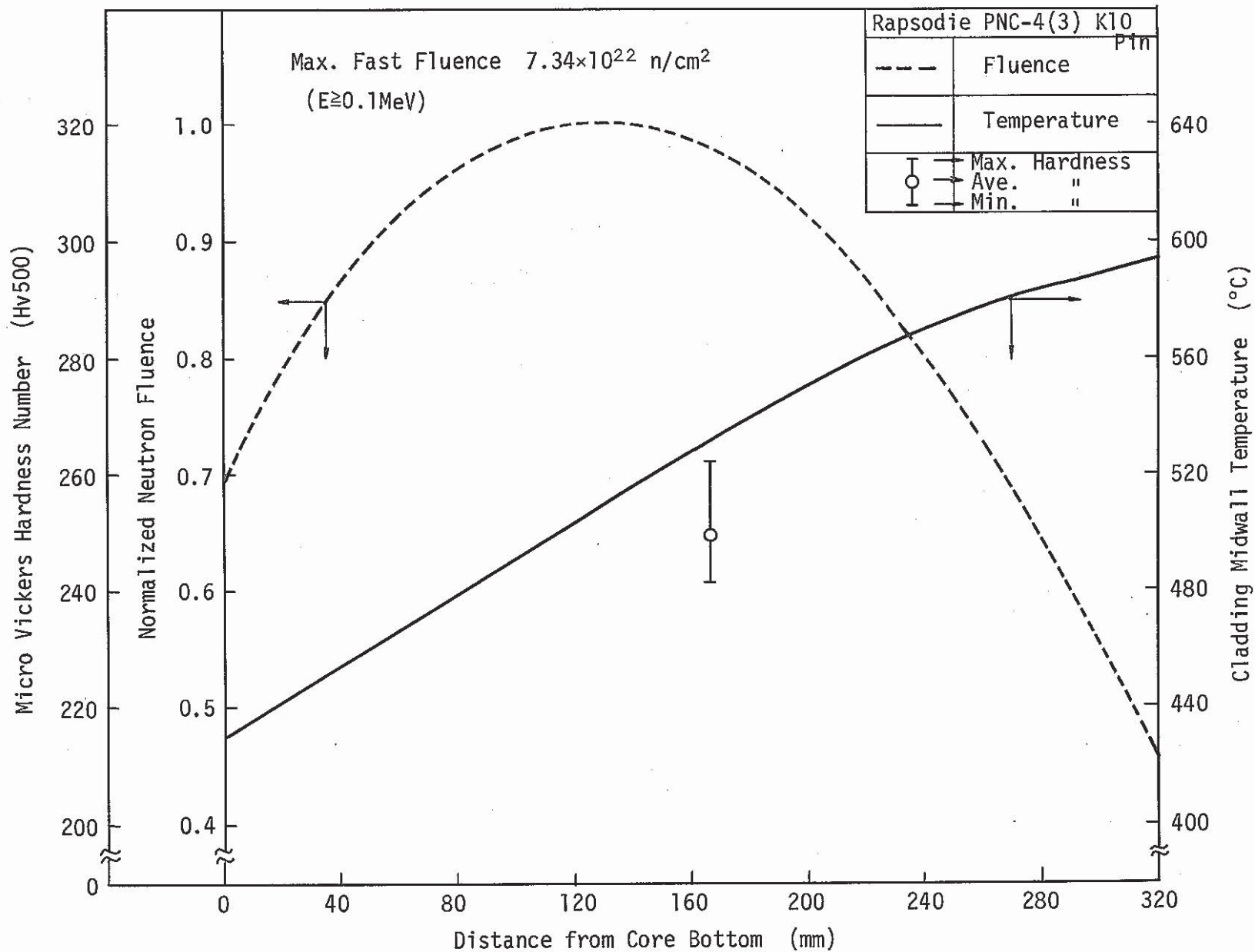


Fig. 4.2.4 Cladding microhardness distribution of Rapsodie PNC-4(3) K10 Pin

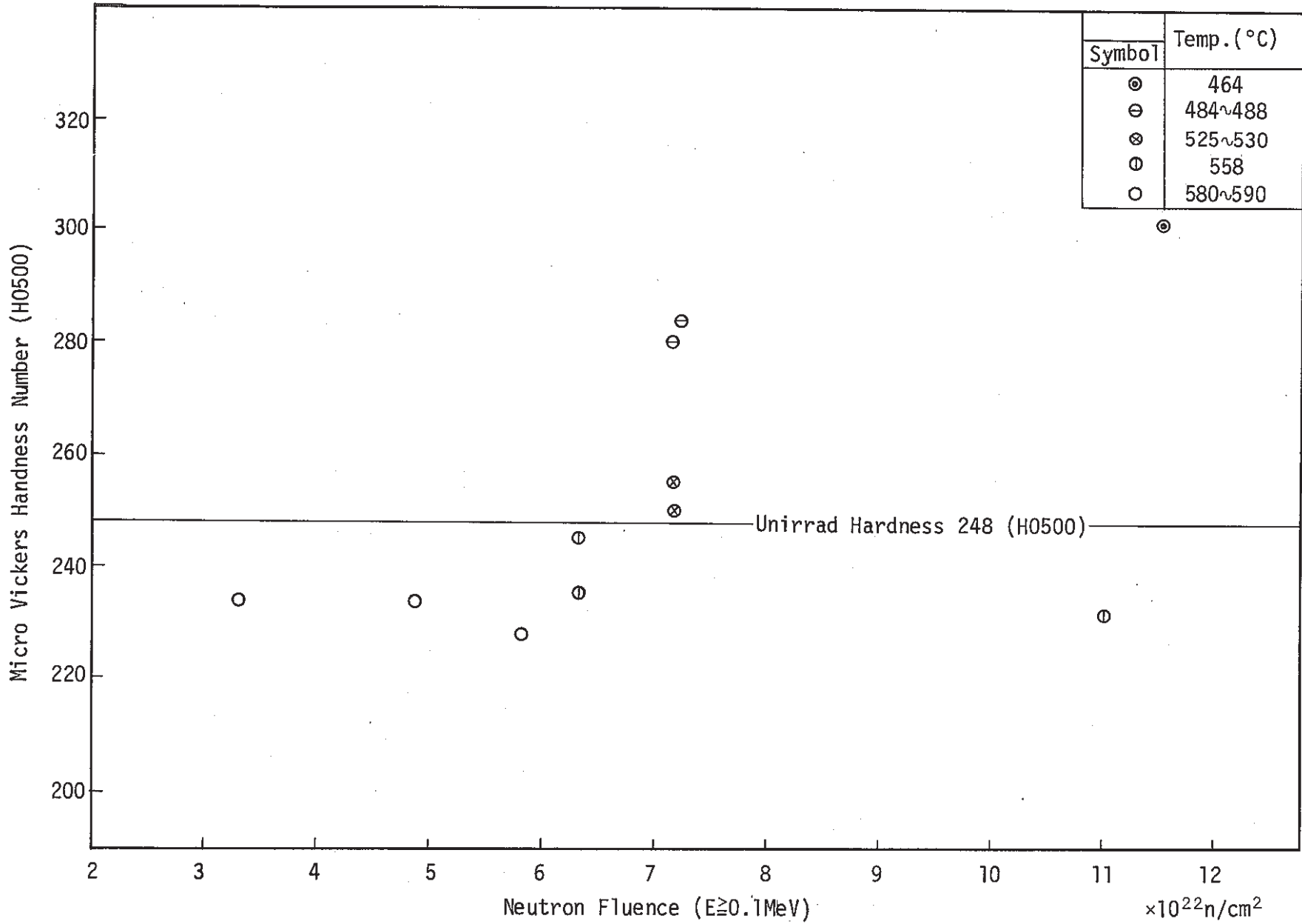


Fig. 4.2.5 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4 as the function of fluence

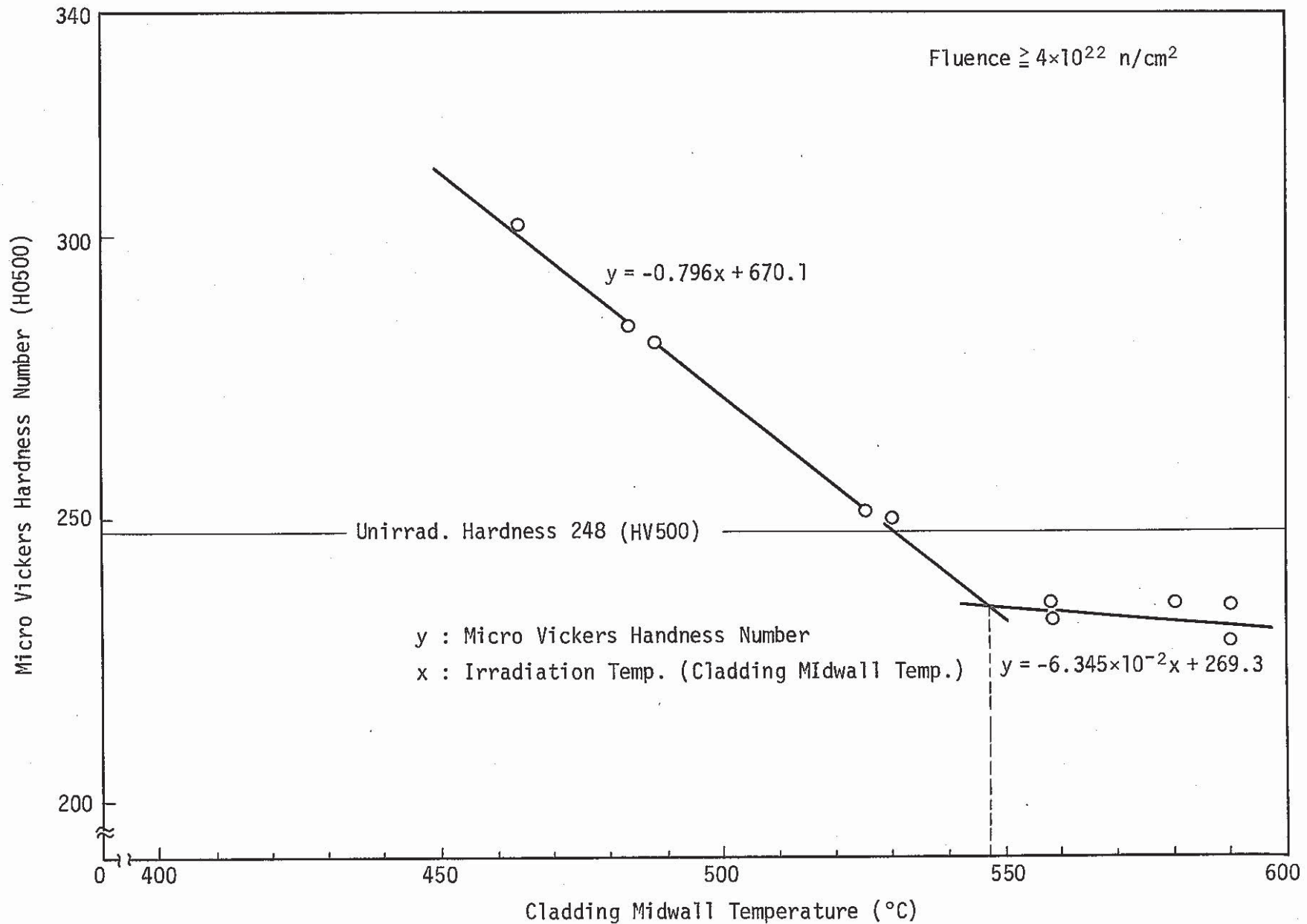


Fig. 4.2.6 Cladding microhardness of Rapsodie PNC-4(2) as the function of temperature

データ集

5. 被覆管密度測定データ

Table 4.3.1 Summary of density measurement (AGS data)

Table 4.3.2 Summary of density measurement (CEA data)

Fig. 4.3.1 Pin cutting diagram for density measurement Rapsodie
PNC-4

Fig. 4.3.2 Cladding density change of Rapsodie PNC-4(2) K07 pin

Fig. 4.3.3 Cladding density change of Rapsodie PNC-4(2) K10 pin

Fig. 4.3.4 Density change of irradiated cladding as the function of
fluence

Table 4.3.1 Summary of density measurement (AGS data)

Pin No.	Section No.	Distance from Pin Bottom (mm)	Fast Fluence ($\times 10^{22} \cdot n/cm^2$)	Cladding Mid-Wall Temp. ($^{\circ}C$)	Density (g/cc)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
K07	YC202	65.5 ~ 90.5	—	430	7.970	BASE
	YC206	384.8 ~ 423.4	7.8	462	7.960	0.13
	YC208	434.0 ~ 468.2	8.4	490	7.945	0.31
	YC20C	498.3 ~ 533.2	8.0	526	7.940	0.38
	YC20F	554.7 ~ 588.1	6.9	552	7.938	0.40
	YC20I	609.8 ~ 642.7	5.0	570	7.938	0.40
K10	YC212	66.3 ~ 91.4	—	430	7.971	BASE
	YC217	453.1 ~ 491.6	8.5	505	7.949	0.28


Table 4.3.2 Summary of density measurement (CEA data)

— France CEA Data —

Pin No.	Section No.	Distance from Core Bottom (mm)	Fast Fluence ($\times 10^{22} \cdot n/cm^2$)	Cladding Mid-Wall Temp. ($^{\circ}C$)	Density (g/cc)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ (%)
K09	—	73	11.86	470	7.884	0.77
	—	118	12.62	500	7.710	3.00
	—	182	12.11	538	7.642	3.81
	—	237	10.22	566	7.668	3.49
	—	293	7.44	584	7.810	1.70
K01	—	70	6.98	472	7.944	0.01
	—	118	7.43	502	7.936	0.11
	—	182	7.13	540	7.915	0.38
	—	237	6.02	566	7.887	0.73
	—	292	4.16	586	7.91	0.44

Base value $\rho_0 = 7.945$ g/cc

Pin No.	K07	K10
Clad maker	K	K

 : density

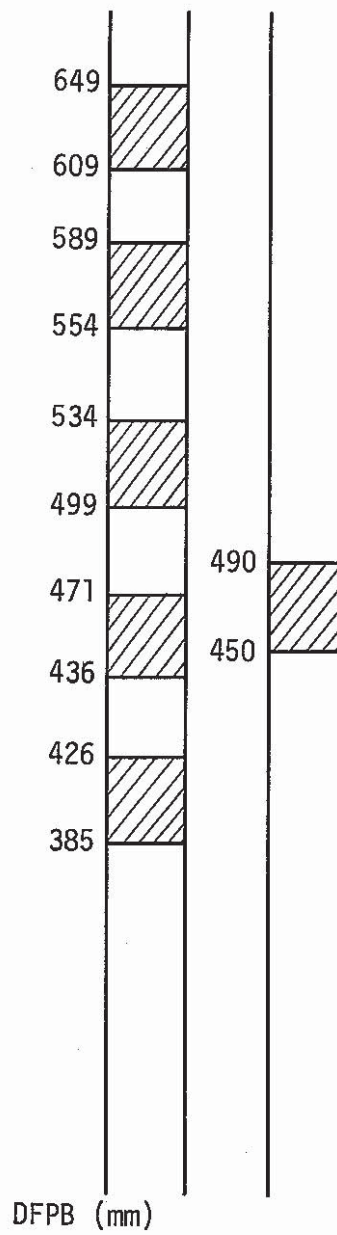


Fig. 4.3.1 Pin cutting diagram for density measurement of Repsodie PNC 4

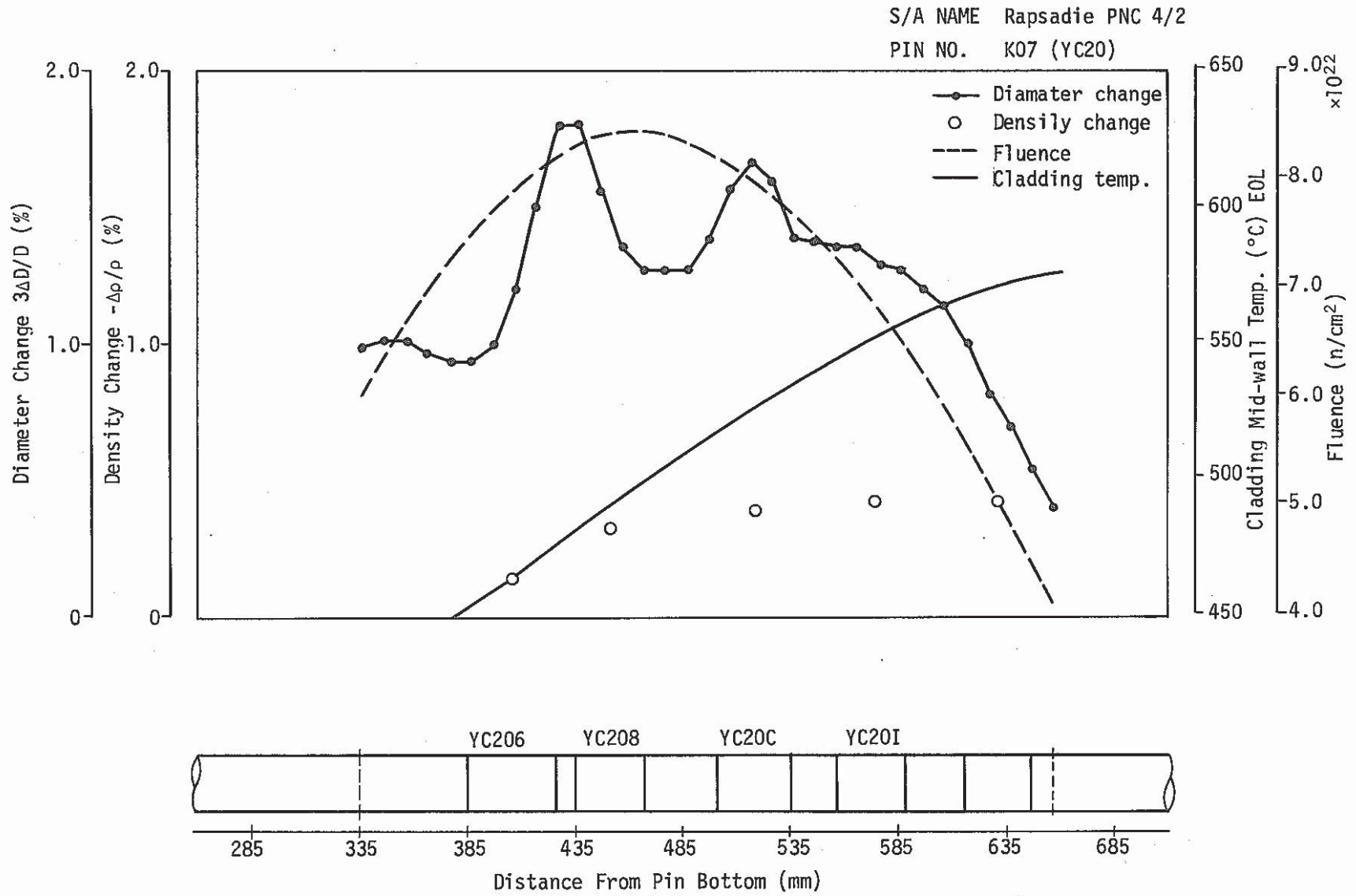


Fig. 4.3.2 Cladding density change of Rapsodie PNC-4(2) K07 pin

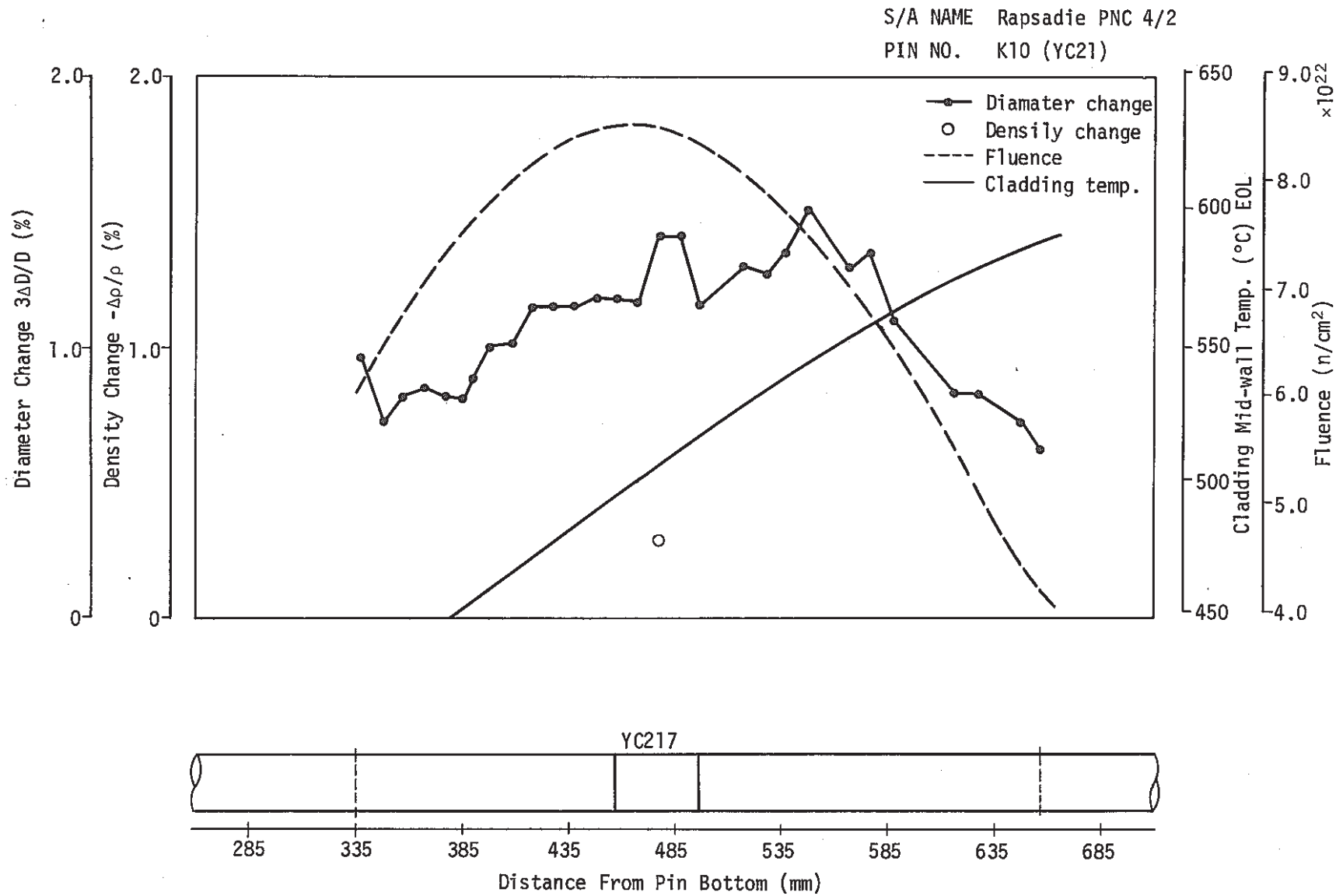


Fig. 4.3.3 Cladding density change of Rapsodie PNC-4(2) K10 pin

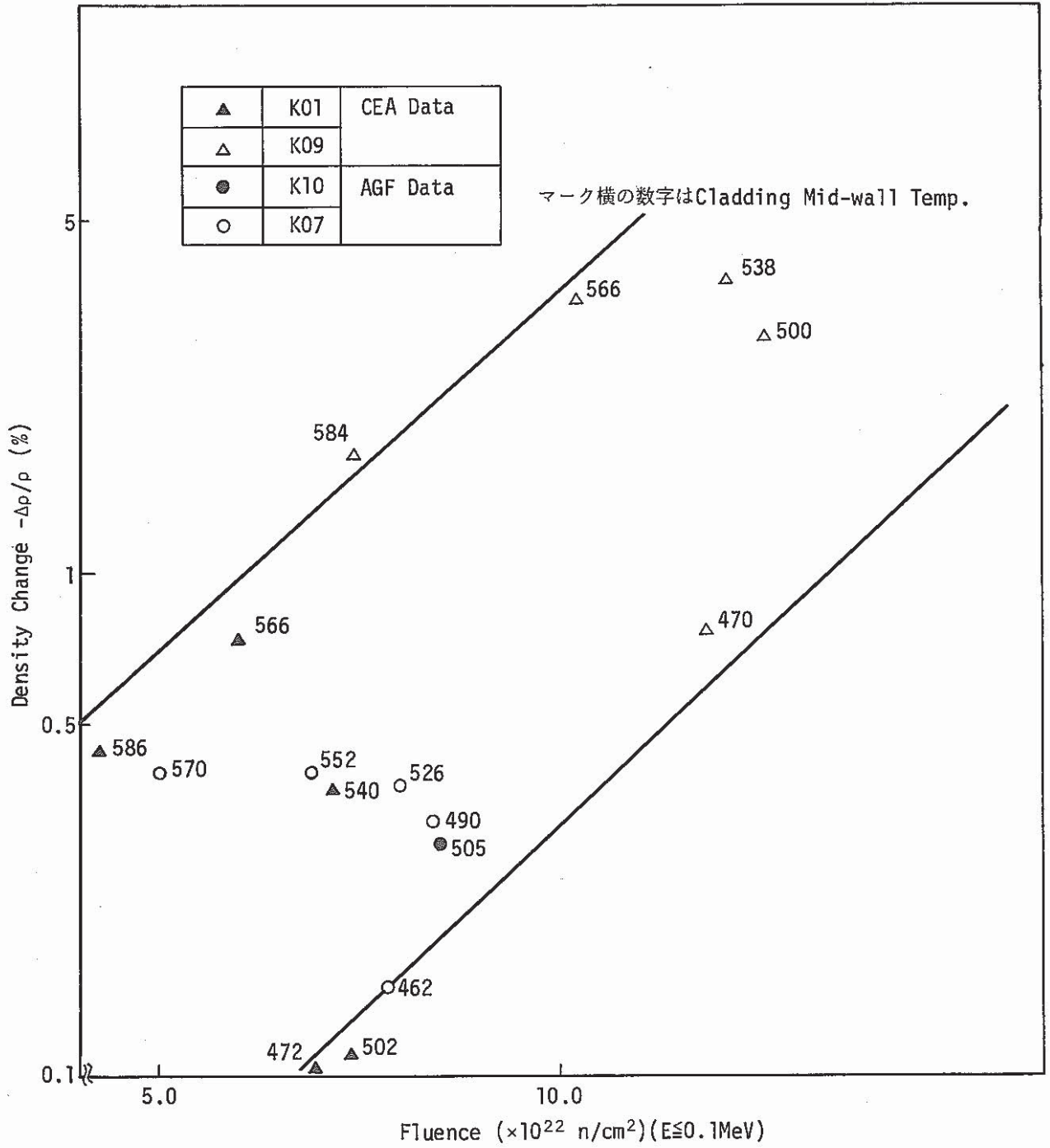


Fig. 4.3.4 Density change of irradiated cladding as the function of fluence

データ集

6. 燃焼率測定データ

- Table 4.4.1 Summary of burnup measurement by Nd-method
- Table 4.4.2 Cladding calculation of effective fission yield for Rapsodie PNC-4 (YC20A)
- Table 4.4.3 Calculation of atom%BU-MWD/MTM BU conversion at PNC-4
- Table 4.4.4 Composition of spike solution and natural Neodymium
- Table 4.4.5 Isotopic analysis of Uranium (YC20A)
- Table 4.4.6 Isotopic analysis of Plutonium (YC20A)
- Table 4.4.7 Isotopic analysis of Neodimium (YC20A)
- Table 4.4.8 Result of isotope dilution analysis and burnup calculation for PNC-4 YC20A sample
- Fig. 4.4.1 Sample treatment procedure for burnup measurement in AGS

Table 4.4.1 Summary of burnup measurement by Nd-method

Pin No.	Sample No.	Distance from ¹⁾ core fuel bottom (mm)	Burnup 2)	
			¹⁴⁸ Nd monitor atom %	MWD/MTM ³⁾
K07	YC20A	144.0 ~ 153.5	8.74	80200

- 1) Distance from fuel bottom; +200 mm
Distance from pin bottom; +335 mm

- 2) Burnup = atom percent fissions

$$= \frac{P/FY}{H + P/FY} \times 100$$

P = atom concentration of fission product burnup monitor

FY = effective fission yield value

H = atom concentration of heavy nuclides

- 3) 1.09 atom% = 10,000 MWD/MTM
(Table 4.4.3 参照)

Table 4.4.2 Calculation of effective fission yield for Rapsodie PNC-4 (YC20A)

Nuclide	Abundances (wt%) *1				Fission*2 Rate (f/s·g)	Nd148		Nd146		Nd145	
	Pu/ (Pu+U)	U and Pu	Fuel	Equiv-*3 alent		Fission Yield (%)	Fractional FY (%)	Fission Yield (%)	Fractional FY (%)	Fission Yield (%)	Fractional FY (%)
U234	81.213	0.4486	0.3643	—	—	—	—	—	—	—	—
U235		61.0088	49.5471	49.5471	1.171×10^{13}	1.68	1.170	2.94	2.047	3.76	2.620
U236		1.6330	1.3262	—	—	—	—	—	—	—	—
U238		36.9097	29.9755	32.7605	0.081×10^{13}	2.08	0.066	3.40	0.108	3.50	0.111
Pu238	18.787	0.7368	0.1384	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu239		76.7972	14.4279	16.6323	1.363×10^{13}	1.65	0.449	2.46	0.669	3.01	0.819
Pu240		16.5985	3.1184	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu241		4.2337	0.7954	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu242		1.6348	0.3071	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	100	200	100	—	—	Effective FY (%)	1.69	Effective FY (%)	2.82	Effective FY (%)	3.55

Note; Fractional FY = (Equivalent Abundance)(Fission Rate)(Fission Yield)/ $\Sigma\{(\text{Equivalent Abundance})(\text{Fission Rate})\}$
 Effective FY = $\Sigma(\text{Fractional FY})$

*1 同位体希釈分析データ

*2 ラプソディー炉照射情報データ DRNR/SEER NT/IRR 72/5 "Neutron Fluxes and Fission Rates in Rapsodie Core" (1972)

*3 $m8eq = m8 + 2.1m6$, $m9eq = m9 + 0.36m0 + 1.36m1$ ($m6$: U236, $m8$: U238, $m9$: Pu239, $m0$: Pu240, $m1$: Pu241)

Table.4.4.3 Calculation of atom%BU-MWD/MTM BU Conversion at PNC-4

核種	質量数	燃料組成 ^{*1}			平均質量数	未照射燃料 1 ton (金属) 当りの総原子数	*2 核分裂率 (fission / g·s)	1 wt.% BU燃料 1 ton (金属) 当りの核分裂量(g)	核分裂した原子数	未照射総原子数に対する核分裂の割合 (atom%)	*2 1核分裂当りのエネルギー純放出量 (MeV)	1 atom%BU 当りのエネルギー純放出量 (MWD / MTM)	換算係数 (atom% vs 10 ⁴ MWD / MTM)
		atom%	wt. %	等価 ^{*3} wt. %									
U 234	234.04				236.74	25437 × 10 ²⁷	1.717 × 10 ¹³	7.6514 × 10 ³	1.9603 × 10 ²⁵	1.0033	194.2	9205	1.09
U 235	235.04	52.328	51.951	51.951									
U 236	236.05												
U 238	238.05	27.852	28.006	28.006									
Pu 238	238.05	0.104	0.105										
Pu 239	239.05	14.939	15.084	18.424									
Pu 240	240.05	2.861	2.901										
Pu 241	241.06	1.658	1.688										
Pu 242	242.06	0.258	0.264										

* 1. 製造時の燃料組成データ

* 2 SN841-73-05, ラプソディー 4 照射用燃料ピンの設計計算書

* 3 * 2 より U238eq = U238 + 2.1 U236, P239eq = Pu239 + 0.36Pu240 + 1.36Pu241
U234, Pu238 and Pu242 are to be neglected

Table.4.4.4 Composition of spike solution and
natural Neodymium

スパイク液中の原子数 (atoms/me)	U 233	4.3914×10^{18}	S 3 *
	Pu 242	7.9674×10^{17}	A 242
	Nd 150	7.1740×10^{15}	A 50
天然ネオジムの 同位体化	Nd 142 / Nd 150	4.824980	C 42 / 50
	Nd 145 / Nd 150	1.472180	C 45 / 50
	Nd 146 / Nd 150	3.050830	C 46 / 50
	Nd 148 / Nd 150	1.021325	C 48 / 50
ネオジムスパイク の同位体化	Nd 142 / Nd 150	0.008937	S 42 / 50
	Nd 145 / Nd 150	0.004336	S 45 / 50
	Nd 146 / Nd 150	0.009122	S 46 / 50
	Nd 148 / Nd 150	0.007046	S 48 / 50
ウランスパイク の同位体化	U 234 / U 233	0.014108	S 43
	U 235 / U 233	0.000401	S 53
	U 238 / U 233	0.006410	S 83
プルトニウムスパイク の同位体化	Pu 239 / Pu 242	0.001309	S 92
	Pu 240 / Pu 242	0.013696	S 02
	Pu 241 / Pu 242	0.000859	S 12

* 計算コードで使用している記号

Table 4.4.5 Isotopic Analysis of Uranium (YC20A)

S/A number	PNC-4		Sample number	YC20A	
Isotopic ratio			Isotopic abundance		
	Unspike	Spike		Unspike	
				atom %	weight %
U 233/238	0.000000 ± 0.000000	0.109095 ± 0.000030	U 233	0.0000	0.0000
U 234/238	0.012361 ± 0.000015	0.013568 ± 0.000012	U 234	0.4526	0.4486
U 235/238	1.674023 ± 0.000069	1.665183 ± 0.000096	U 235	61.2970	61.0099
U 236/238	0.044618 ± 0.000012	0.044269 ± 0.000033	U 236	1.6338	1.6330
			U 238	36.6166	36.9095

Table 4.4.6 Isotopic Analysis of Plutonium (YC20A)

S/A number	PNC-4		Sample number	YC20A	
Isotopic ratio			Isotopic abundance		
	Unspike	Spike		Unspike	
				atom %	weight %
[*] Pu238/239	0.009635 ± 0.000812	0.009635 ± 0.000812	Pu238	0.7408	0.7368
Pu240/239	0.215232 ± 0.000016	0.216147 ± 0.000032	Pu239	76.8898	76.7965
Pu241/239	0.054670 ± 0.000013	0.054978 ± 0.000012	Pu240	16.5492	16.5982
Pu242/239	0.021024 ± 0.000007	0.062345 ± 0.000016	Pu241	4.2036	4.2336
			Pu242	1.6166	1.6349

* corrected by alpha-spectrometry

Table 4.4.7 Isotopic Analysis of Neodimium (YC20A)

S/A number	PNC-4		Sample number	YC20A	
Isotopic ratio			Isotopic abundance		
	Unspike	Spike		Unspike	
				atom %	weight %
Nd142/150	0.000000 ± 0.000000	0.003179 ± 0.000012	Nd143	27.8294	27.4765
Nd143/150	6.467964 ± 0.000443	6.058477 ± 0.000468	Nd144	25.1722	25.0286
Nd144/150	5.850384 ± 0.000456	5.473884 ± 0.000797	Nd145	18.7365	18.7589
Nd145/150	4.354632 ± 0.000299	4.074147 ± 0.000836	Nd146	14.9645	15.0858
Nd146/150	3.477965 ± 0.000225	3.254558 ± 0.000240	Nd148	8.9948	9.1919
Nd148/150	2.090526 ± 0.000117	1.955781 ± 0.000151	Nd150	4.3027	4.4564

Table 4.4.8 Result of isotope analysis and burnup calculation for PNC-4 YC20A sample

S/A NO.(FAB) ; PNC-4	PIN NO.(PIE) ; YC20 (K07)
SAMPLE NO. ; YC20A	SAMPLE POSITION ; 144.0*153.5 (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]		
0.000000	0.012361	1.674023	0.044618	-(a)	
0.109095	0.013568	1.665183	0.044269	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.009635	0.215232	0.054670	0.021024	-(a)	
0.009635	0.216147	0.054978	0.062345	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
0.000000	6.467964	5.850384	4.354632	3.477965	2.090526
0.003179	6.058477	5.473664	4.074147	3.254559	1.955781

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

[U233]	[U234]	[U235]	[U236]	[U238]		
0.0000	0.4526	61.2970	1.6338	36.6166		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.7408	76.8899	16.5492	4.2036	1.6165		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
0.0000	27.8294	25.1722	18.7365	14.9645	8.9948	4.3027

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 18.584 / 18.787

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 4.0479E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	6.5331E+18	1.0880E+19	1.3672E+19
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	1.69E-02	2.82E-02	3.55E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	3.8772E+20	3.8526E+20	3.8513E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	8.74	8.69	8.69
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	80200	79700	79700

NOTE ; * Distance from core fuel bottom
 ** FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD
 # BURNUP=100*FISSIONS/(TOTAL HEAVY ELEMENT+FISSIONS)
 ## 1.09 atom% B.U=10000 MWD/MTM B.U

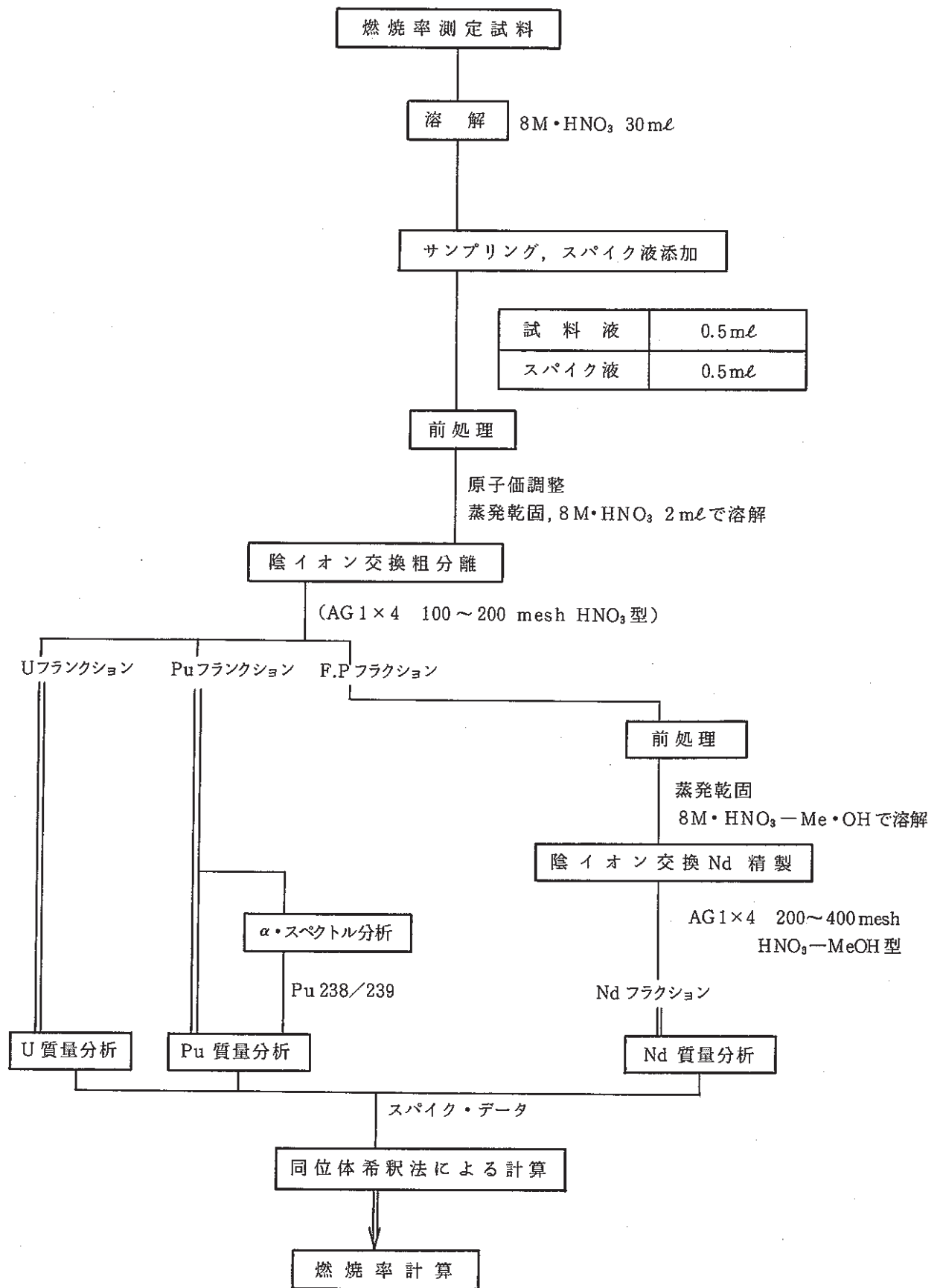


Fig. 4.4.1 Sample treatment procedure for burnup measurement in AGS