

# Rapsodie PNC-5(1)(2)(3)の照射後試験 (I)

## 燃料要素の破壊試験



1987年2月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 87-190
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)

## Rapsodie PNC-5(1)(2)(3)の照射後試験 (I)

### 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  
富永 功, 乾 俊彦, 押味一之  
立花利道

### 要 旨

Rapsodie PNC-5(1)(2)(3)は、「もんじゅ」型被覆管及び燃料の高燃焼度時の照射挙動を把握するために照射されたものであり、「もんじゅ」炉心の目標最高燃焼度に匹敵する125,000 MWD/MTMの燃焼度である。仏国より返送された7本の燃料ピンを対象に照射後試験を実施した。照射燃料試験室で担当した破壊試験(金相, 被覆管硬さ, 被覆管密度及び燃焼率測定)により以下の結果を得た。

- (1) 燃料組織は, Rapsodie PNC-4(128,000MWD/MTM)と比較して同程度の組織変化を示しているが, 柱状晶領域内の結晶粒の大きさにバラツキが見られ, 粒内に微少なボイドが多数存在する。
- (2) 4Kピンの金相縦断面写真では多数の径方向クラックが観察されており, これが燃料カラム長増大の原因となったと考えられる。
- (3) 4Kピン被覆管外表面に, グリッドによるものと推定されるフレッチング傷が認められた。
- (4) FCCIの最大値は約66 $\mu$ m(腐食形態は粒界腐食)であった。
- (5) 被覆管組織は, 被覆管内面側の結晶粒界及び双晶領域に炭化物が多く析出しており, 鋭敏化が進んでいると考えられる。
- (6) 被覆管硬さ値は, 全て照射前より軟化していた。硬さ値と照射温度の関係は, 550 $^{\circ}$ Cまでは温度の上昇とともに硬さ値が大きく低下するが, それ以上ではあまり変化しないことを確認した。
- (7) 被覆管密度は, K材, S材ともスウェリングが見られ, 密度変化の最大値は2.55%であった。またS材はK材に比べて同じ中性子照射量でのスウェリングが大きかった。
- (8) 燃焼率測定の結果と仏国側の燃焼度報告値は良い一致をみており, 仏国側報告値が妥当であることを確認した。

---

\* 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 試料調製方法 .....	4
4.1.2 試験結果 .....	4
4.2 被覆管硬さ測定試験 .....	6
4.2.1 測定方法 .....	6
4.2.2 測定結果 .....	7
4.3 被覆管密度測定試験 .....	7
4.3.1 測定方法 .....	7
4.3.2 測定試料 .....	7
4.3.3 測定結果 .....	7
4.4 燃料率測定試験 .....	8
4.4.1 試料調製方法 .....	8
4.4.2 測定結果 .....	8
5. 結 論 .....	9
6. 参考文献 .....	11

## 1. ま え が き

Rapsodie PNC-5 は、「もんじゅ」タイプ燃料ピンで定常照射下でのピン健全性及び燃料の信頼性確認を目的として、高燃焼度下における照射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。

本試験に供した燃料ピンは、グリッドスペーサタイプの34本ピンバンドル集合体(PNC-5(1)照射)と、グリッドスペーサタイプリグに組み込まれた3本ピン(PNC-5(2)及びPNC-5(3)照射)とから成る。

Rapsodie PNC-5 の試験対象ピンは6S, 8S, 15S, 4K, 22K, 27K及び32Kであり、各ピンの簡単な照射経歴を以下に記す。

6S	: PNC-5(1)照射
8S	: 同 上
4K	: 同 上
22K	: 同 上
15S	: PNC-5(1)及びPNC-5(3)で照射
27K	: PNC-5(1), PNC-5(2)及びPNC-5(3)で照射
32K	: 同 上

また、到達した燃焼度はピーク燃焼度で以下のようなになる。

PNC-5(1):	{	6.443 atom%
	{	59,540 MWD/MTM
PNC-5(2):	{	9.465 atom%
	{	87,460 MWD/MTM
PNC-5(3):	{	13.570 atom%
	{	125,390 MWD/MTM

照射後試験は、仏国及び動燃において行い、仏国では非破壊試験(対象ピンは7本)及び破壊試験(対象ピンは22K)を実施した。さらに、これらの燃料ピンは「もんじゅ」の最高燃焼度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」タイプ燃料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7本の燃料ピンについて(a)金相試験(燃料組織観察, FCCI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, 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3報)」PNC SN941 86-95(1986年10月)<sup>1)</sup>に記載されているので省略してある。

## 2. 燃 料 ピ ン

Rapsodie PNC-5 照射後試験に供された燃料ピンの仕様を Table 1 及び Fig.1 に示す。  
被覆管は原型炉用に試作された 20%冷間加工材（昭和 47 年度試作材）を用いてある。

### 3. 照射条件

PNC-5(1)の照射は、ラプソディ炉で4サイクル(Run No.41, 43, 44, 45)にわたって炉内位置[(04, 15)→(04, 07)→(03, 15)]にて照射された(Fig.2参照)。

また、このときの集合体内ピン配列をFig.3に示す。

PNC-5(2)の照射は、2サイクル(Run No.49, 50)にわたって炉内位置(02, 02)にて照射された(Fig.2参照)。

また、このときのグリッドスペーサタイプブリグ内ピン配列をFig.4に示す。

PNC-5(3)の照射は、2サイクル(Run No.52, 53)にわたって炉内位置(02, 06)にて照射された(Fig.2参照)。

また、このときのグリッドスペーサタイプブリグ内ピン配列をFig.5に示す。

以下に各照射の照射条件概略を記す。

#### 1) PNC-5(1)について

ピークフルエンス： $5.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$

最大燃焼度：59,540MWD/MTM

最大線出力：499.5W/cm

実効照射日数：245.88EFPD

なお、各炉内位置での実効照射日数は以下の通りである。

04-15：1.54EFPD

04-07：56.85 "

03-15：187.49 "

#### 2) PNC-5(2)について

ピークフルエンス： $1.03 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$

最大燃焼度：87,460MWD/MTM

最大線出力：235W/cm

実効照射日数：84.0EFPD

#### 3) PNC-5(3)について

ピークフルエンス： $1.25 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$

最大燃焼度：125,390MWD/MTM

最大線出力：239W/cm

実効照射日数：111.3EFPD

## 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.6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

4 K, 6 S, 8 S, 2 2 K, 1 5 S, 2 7 K及び3 2 Kピンの代表的な金相写真をPhoto 1～3 6に示す。これらの金相写真より以下の結果が得られた。(Table 4-1に同試料の切断位置及び照射履歴を示す。)

##### 1) 燃料組織観察

##### (1) 4 Kピン(ピーク燃焼度5 7,6 0 0 MWD/MTM)〈Photo 1, 8～1 0 参照〉

燃料組織状態は、断面中央部より中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、高密度化領域、不変化領域の5領域が順次存在していた。柱状晶領域は結晶粒の大きさにバラツキが見られ、粒内には微小なボイドが多数存在しているのが認められた。また、微細な白色析出物が柱状晶領域内に分布していた。縦断面試料においては、燃料ペレット軸方向のクラックが多数存在し、またクラック間隙も大きいため、4 Kピンの燃料カラム長が異常に伸びていたのではないかと考えられる(Table 3参照)。燃料カラム中央部及び上部の被覆管内面には、粒界腐食(Photo 2 3参照)及び全面腐食(Photo 2 4参照)が観察された。最大腐食量は、それぞれ約6 6  $\mu\text{m}$ 及び約1 2  $\mu\text{m}$ であった。被覆管外面では試料No.XC0 4 A 1(D.F.C.B. 2.7 7 mm)にグリッド突起物との相互作用で生じたと推定されるフレットングによる傷が観察された。(Photo 2 1, 2 2参照)

##### (2) 6 Sピン(ピーク燃焼度5 7,1 0 0 MWD/MTM)〈Photo 2, 1 1, 1 2 参照〉

燃料組織は、中心空孔・柱状晶領域・ガスバブル領域・高密度化領域・黒色リング領域・不変化領域の6領域から成っており、ガスバブル領域から不変化領域にかけて約1 0 0  $\mu\text{m}\phi$ のボイドが多数分布しているのが観察された。ギャップ部には、燃料カラム上部でF.P.及び腐食生成物が蓄積しているが被覆管内面にFCCIは認められなかった。燃料カラム下部においてもAs polished状態で被覆管内面にFCCIは観察されなかったが、イオン腐食後に粒界腐食が認められ最大腐食量が約8 0  $\mu\text{m}$ であった。(Photo 2 8参照)

##### (3) 8 Sピン(ピーク燃焼度5 8,1 0 0 MWD/MTM)〈Photo 3参照〉

燃料組織は、4 Kピンと同様に5領域から成っており、柱状晶領域の結晶粒の大きさにもバラツキが見られ燃料カラム上部の不変化領域内に白色析出物のインゴット(Photo 1 9参照)が認められた。ギャップ部には、上部でF.P.及び腐食生成物が蓄積しており被覆管内面に全面腐食が認められ最大腐食量約1 3  $\mu\text{m}$ であったが、イオン腐食後、粒界



腐食（最大腐食量約40  $\mu\text{m}$ ）が認められた。（Photo 29 参照）

(4) 22 Kピン（ピーク燃焼度59,000MWD/MTM）〈Photo 4, 13, 14 参照〉

本ピンはPNC-5(1)(Run 41~Run 45)のみ照射された4K, 6S, 8S, 22Kピンの中で最高燃焼度ピンであるが、6Sピンと同様の組織状態を呈していた。柱状晶領域内には微細な白色析出物が多数分布しており、ギャップ部には、F.P.及び腐食生成物が認められるが被覆管内面に異常は認められなかった。

(5) 15 Sピン（ピーク燃焼度87,000MWD/MTM）〈Photo 5 参照〉

燃料組織は、高密度化領域と不変化領域との間に黒色リング領域が存在している6S, 22Kピンと同様に6領域から成っていた。燃料カラム上部において、柱状晶領域の結晶粒に大きさのバラツキが見られ、ガスバブル領域から不変化領域にかけて約130  $\mu\text{m}\phi$ の大きさのポイドが他のピンに比べ多数存在しているのが確認された。また、上部の被覆管内面には最大腐食量約16  $\mu\text{m}$ の全面腐食が観察されたが、6S, 8Sピンと同様にイオン腐食後、粒界腐食（最大腐食量約35  $\mu\text{m}$ ）が認められた。

(6) 27 Kピン（ピーク燃焼度124,800MWD/MTM）〈Photo 6, 15, 16 参照〉

本ピンは、32Kピンと共にPNC-5(1)(2)(3)(Run 41~Run 53)の全期間照射され、PNC-5の中では最高燃焼度ピンである。燃料組織は、4K, 8Sピンと同様に5領域から成っており、又、柱状晶領域の結晶粒径のバラツキと粒内の微細なポイドの存在も観察された。微細な白色析出物が柱状晶領域内に分布しており、燃料カラム上部の中心空孔付近に白色析出物のインゴット（Photo 20 参照）が認められた。上部の被覆管内面にAs polished では見られなかったが、イオン腐食後、粒界腐食（最大腐食量約15  $\mu\text{m}$ ）が認められた。（Photo 30 参照）

(7) 32 Kピン（ピーク燃焼度124,400MWD/MTM）〈Photo 7, 17, 18 参照〉

燃料組織は、27Kピンと同様で5領域から成っている。燃料カラム上部、下部の $\text{UO}_2$ - $\text{PuO}_2$ ペレットの境界部において、 $\text{UO}_2$ ブランケットペレットに組織変化が認められた。上部の被覆管内面には全面腐食が観察され最大腐食量は約12  $\mu\text{m}$ であった（Photo 27 参照）。

ここで、各ピンの輪切試料につき各組織領域径、ギャップ幅、ペレット外径及び被覆管内、外径の直径値を画像解析により測定した結果をTable 4-2に示す。また、Fig. 7~9に燃料ペレットの各組織領域径（相対値 $D/D_0$ 、 $D_0$ はペレット外径）の線出力依存性を示す。

以上より、燃料組織についてまとめるとPNC-4(128,000MWD/MTM)<sup>2)</sup>に比べてPNC-5は、柱状晶領域内の結晶粒の大きさにバラツキが見られ、粒内には微細なポイドが多数存在している。4Kピンの燃料カラム長が異常に伸びていた原因は、縦断面試料を観察した結果ペレット径方向のクラックが多数存在しており、また、クラックの間隙が

大きいためではないかと考えられる。各組織領域は、PNC-4と同じ傾向を示しており約400W/cm近くの線出力でその領域径は飽和状態になっていると考えられる。4Kピンに、グリッド突起物との相互作用で生じたと推定されるフレッキングによる傷が認められた。

## 2) FCCIの観察

燃料-被覆管の化学的相互作用(FCCI)は、4K、8S、15S及び32Kピンに観察され、その形態は粒界腐食、全面腐食及び複合腐食であった。最大腐食量は4Kピンで約66 $\mu$ m(粒界腐食)であった。被覆管内面は、鋭敏化が進んでおりイオン腐食後、6S、8S、15S及び27Kの4本のピンに粒界腐食が認められ、最大腐食量は6Sピンで約80 $\mu$ mであったが、かつてRapsodie PNC-2<sup>3)</sup>で見られたような100 $\mu$ mを超す大きなFCCIはなかった。Table 5に測定値を示し、その位置の写真をPhoto 23~30に示す。また、同表中に、過去のデータから得られたFCCI予測式<sup>4)</sup>を用いて算出したFCCI予測値(最大腐食量)を併記した。FCCIの予測式については、全面腐食と複合腐食については東海プルトニウム燃料部設計開発課式を推奨式としているが、粒界腐食については、設計開発課式と燃料材料開発部AES式を参考式として取扱っているため、粒界腐食については、この2式による計算値を併記した。

予想値と実測値を比較してみると、全面腐食については、実測データは全て予想値以下の値であり、予想式の妥当性が確認された。粒界腐食については、予想値と実測値の差が大きい。鋭敏化組織の取扱いを含めて今後検討していく必要がある。

## 3) 被覆管組織観察

Photo 31~36に試料採取位置及び電解腐食後の光顕写真を示す。

### (1) S材(6S、8S、15Sピン)〈Photo 32~34参照〉

各ピンにおける燃料カラム上部では、結晶粒界及び双晶領域に多くの析出相が見られた。また、特に被覆管内面側に炭化物の析出が多く見られ鋭敏化が進んでいると考えられる。燃料カラム下部でも結晶粒界へ炭化物析出が見られた。

### (2) K材(4K、27K、32Kピン)〈Photo 31, 35, 36参照〉

燃料カラム上部では、炭化物と考えられる微細粒子がマトリックス中に析出しているが、粒界への炭化物析出が認められなかった。燃料カラム下部では、結晶粒界及び粒内に炭化物析出が見られる。またS材と同様被覆管内面側に炭化物が多く析出しているが、S材と比べて少なかった。

## 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さ計(マイクロ・ビッカース法)により実施した。Table 6に測定条件及び測定位置を示す。

測定試料には、K材とS材があり冷間加工度及び照射前硬さ値はK材が17.5%、Hv 293、S材が20%、Hv 272である。

#### 4.2.2 測定結果

各ピンの被覆管硬さ値は、Table 7, 8に示すように全て照射前の硬さ値以下となっている(軟化)。この軟化現象を被覆管軸方向についてみると、各ピンとも燃料下端側(低温側)より燃料上端側(高温側)の方が軟化の度合は大きく、全ピンを通じて燃料下端側で最大Hv(0.5) 14、燃料上端側で最大Hv(0.5) 36軟化している。各ピンの軸方向硬さ値と照射条件をFig.10~16に示す。

また、Table 9~15に示す各測定点の値からは22K, 27K, 32K及び15Sピンの被覆管周方向にHv(0.5) 14~31の硬さ値変化が認められた。更に同テーブルより4K, 22K, 27K, 32K, 6S及び8Sピンの燃料下端側の被覆管肉厚方向にHv(0.5) 10~20の硬さ値変化(内側より外側の方が硬い)が認められた。

次に、Fig.17に硬さ値変化と照射量の関係を示す。図より照射温度600(°C)以上ではK材及びS材ともに照射量の増加( $3\sim 7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ )に従がい硬さ値が低下している。しかし、600(°C)以下の領域では両者の相関は明確ではない。また、Fig.18に示す硬さ値変化と照射温度の関係から、硬さ値は照射温度480~530(°C)の範囲内で温度の上昇により低下し、照射温度570~640(°C)の範囲以上では温度依存性は余り見られない。

### 4.3 被覆管密度測定試験

#### 4.3.1 測定方法

密度測定試験の工程をFig.19に示す。なお、測定に使用した電子天秤(Mettler ME22)の読み取り限度は1 $\mu\text{g}$ であり、密度変化の定量下限は0.2%である。

#### 4.3.2 測定試料

密度測定に供される試料は、4K, 6S, 8S, 15S, 22K, 27K及び32Kピンの各試料であり採取位置をFig.20に示す。これらの試料は中性子照射量 $3.3\sim 12.7 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ 、温度が440~640°Cの照射履歴を有する。

#### 4.3.3 測定結果

各試料の被覆管密度測定結果をTable 16及びTable 17に示す。また密度変化及び34D/Dを比較した結果をFig.21~Fig.26に示す。

密度変化の最大は27Kピンで2.55%( $1.22 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ , 540°C)であった。34D/Dと密度変化が一致しないのはクリープ等による変形が34D/Dに含まれていることによると考えられる。

K材及びS材の中性子照射量による密度変化を、それぞれFig.27及びFig.28に示す。K材は、高照射量側( $9\sim 12 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ )で替伏期を終え立ち上がっている。S材は、高

照射量側のデータがないため正確な比較はできないが、K材に比べより低照射側で立ち上がり、照射量に対する増加率が大きい。

#### 4.4 燃焼率測定試験

$^{148}\text{Nd}$  を指標核種として同位体希釈法により燃焼率を求めた。

##### 4.4.1 試料調製方法

試料の採取位置をFig.29に、また試料の調製方法及び手順をFig.30に示す。

##### 4.4.2 測定結果

今回得られた測定データをまとめた結果をTable18に示す。燃焼率計算で使用した $^{148}\text{Nd}$ 、 $^{146}\text{Nd}$ 、 $^{145}\text{Nd}$ の実効核分裂収率の計算例をTable19に示す。燃焼率(atom%)－燃焼度(MWD/MTM)換算値をTable20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のデータ(質量分析値)をTable21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得られた燃焼率等の計算結果をTable22～25に示す。

以上の結果以下のことを確認した。

1. Rapsodie PNC-5各ピンの燃料軸方向中心位置での燃焼率は、4Kピン6.27atom%(58,100MWD/MTM)、6Sピン6.21atom%(57,500MWD/MTM)、15Sピン9.22atom%(85,300MWD/MTM)、27Kピン13.20atom%(122,000MWD/MTM)の結果が得られた。
2. 燃焼率測定位置は、燃料カラムの中央部であり各ピンの最大燃焼率付近である。得られた結果と仏国側計算値のピーク燃焼率はほぼ一致しており、仏国側の報告値が妥当であることを確認した。

## 5. 結 論

Rapsodie PNC-5 は、仏国高速実験炉 Rapsodie Fortissimo 炉によりバンドル照射 (PNC-5(1)) 及びリグ照射 (PNC-5(2), (3)) として照射されたものであり、「もんじゅ」型燃料ピンとして「もんじゅ」炉心の最高燃焼度に匹敵する燃焼度 (最高燃焼度  $125,390 \text{ MWD/MTM}$ , ピーク値) を有するものである。

AGS では、6S, 8S, 15S, 4K, 22K, 27K 及び 32K の 7 本の燃料ピンを対象に破壊試験を実施した。試験項目は、(a) 金相試験 (燃料組織観察, FCCI 観察, 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。試験の結果、以下の内容を確認した。

### (1) 金相試験結果

- 燃料組織は、同じ「もんじゅ」型燃料ピンの Rapsodie PNC-4 ( $128,000 \text{ MWD/MTM}$ ) に比べて、柱状晶領域内の結晶粒の大きさにバラツキが見られ、粒内には微小なボイドが多数存在しているのが特徴的である。
- 4K ピンの燃料カラム長が異常に伸びていた原因は、多数の径方向のクラックの存在によることが縦断面金相写真観察から推察される。
- 各組織変化の領域は、PNC-4 と同じ傾向を示しており約  $400 \text{ W/cm}$  近くの線出力で領域径の増大は飽和している。
- 4K ピン被覆管外表面に、グリッドによるものと推定されるフレッチング傷が認められた。
- FCCI の最大量は、4K ピン (Ave. BU  $52,280 \text{ MWD/MTM}$ ) で約  $66 \mu\text{m}$  であり、腐食形態は粒界腐食であった。また、最高燃焼度ピンの 27K 及び 32K ピン (Ave. BU  $112,000 \text{ MWD/MTM}$ ) では最大で  $12 \mu\text{m}$  の全面腐食であり、 $100 \mu\text{m}$  を超すような大きな腐食は見られなかった。
- 被覆管組織は、被覆管内面側の結晶粒界及び双晶領域では炭化物と見られる析出相の存在が見られ、鋭敏化が進んでいると考えられる。析出の程度は S 材の方が K に比べて多かった。

### (2) 被覆管硬さ測定結果

- 各ピンの被覆管硬さは、全て照射前より軟化しており、被覆管温度  $600^\circ\text{C}$  以上の領域では、照射量が増大するにつれて硬さ値が低下するが  $600^\circ\text{C}$  以下では両者の関係は明確でない。
- 照射量に無関係に硬さ値と照射温度の関係をみると、 $550^\circ\text{C}$  程度までは温度の上昇により硬さ値が大きく低下するが、 $550^\circ\text{C}$  以上では温度の影響をあまり受けなくなる傾向が見られた。

### (3) 被覆管密度測定結果

K 材、S 材とも高照射側ではスウェリングの替伏期を終えて密度変化を生じている。密度変化の最大は 27K ピンで  $2.25\%$  であった。S 材は K 材に比べて低照射側で早く立上がり、照射量

に対する密度変化の増大率も大きい。

(4) 燃焼率測定結果

AGS で得られた燃焼率測定値と仏国側計算値はほぼ一致しており、仏国側の燃焼度報告値が妥当であることを確認した。

## 6. 参 考 文 献

- 1) PNC SN9410 86-095 高速炉照射燃料の物性試験(第3報) - 熱伝導度及び融点測定 -
- 2) PNC I9410 86-005 Rapsodie PNC-4 (1)(2)(3)の照射後試験
- 3) PNC ZN941 80-115 国産燃料ピンにおけるFCCIに関する検討
- 4) PNC SN241 83-13 燃料 - 被覆管内面腐食(FCCI)検討会成果報告書  
- FCCI予測式の作成 -
- 5) PNC N841 77-33 Rapsodie PNC-5照射試験用燃料の製造(ピン加工)

デ - タ 集



Table 1 Summary of fuel designs

Enrichment	20% PuO <sub>2</sub> -80% UO <sub>2</sub> (75% E. U.)
Fuel Type	Pellet (sintered)
Pellet Density (% T.D.)	85±2
Smear Density (% T.D.)	79.0
Pellet O. D. (mm)	5.40±0.05
Diametral gap (mm)	0.20
Stoichiometry	1.96-2.00
Length of each Pellet (mm)	10
Total Length of Mixed Oxide Fuel Column (mm)	320±3
Fuel Volume (c.c.)	7.32
Fuel Weight (g/Pin)	68.86
Cladding	AISI 316
Clad O. D. (mm)	6.50±0.030
Clad I. D. (mm)	5.60±0.025
Clad thickness (mm)	0.45±0.030

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	燃料全体組織観察 ボイド分布測定 "	×10.5 全面写真	燃料全体組織観察 } 詳細燃料組織観察
	×75 "		×75 "	
	×100 部分写真		×100 部分写真	
	×400 "		×400 "	
被 覆 管	×200~750 部分写真	FCCI	×200 部分写真 ×400 " ×750 "	位置の同定 結晶粒測定 炭化物観察

Table 3 Fuel stack length change of Rapsodie PNC-5(1) fuel pins\*

PIN (Reference)	NEUTRONOGRAPHY ASPECT		
	ELONGATION Fissile Column (in mm)	OBSERVED DEFECT	
		Fracture Peilet	Space Peilet
31 K	- 0.69	-	-
28 S	+ 0.96	-	-
32 K	- 0.82	-	-
29 S	+ 0.79	-	-
26 S	+ 0.08	-	-
12 K	+ 0.32	-	-
16 S	+ 1.39	-	-
36 K	- 0.05	-	=1
27 K	- 0.22	-	-
15 S	+ 2.46	-	-
7 K	+ 5.51	many	-
6 S	+ 1.90	-	-
17 S	+ 1.78	-	-
33 S	- 0.03	-	-
25 S	- 0.14	-	-
5 S	+ 6.35	few	-
1 K	+ 14.29	many	-
9 K	+ 4.15	few	-
13 K	0.00	-	-
40 K	+ 0.48	-	-
23 K	- 1.56	-	-
10 S	+ 4.14	many	-
4 K	+ 12.87	many	-
3 S	+ 7.75	many	-
19 S	+ 3.78	-	=2
37 S	+ 1.78	-	=1
24 S	+ 0.76	-	-
11 K	+ 4.24	many	-
8 S	+ 1.02	many	-
38 S	+ 4.21	many	-
22 K	+ 0.46	few	-
21 S	- 0.51	few	-
14 K	- 0.78	-	-
20 S	- 0.72	-	-

\* 仏側の測定データ

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

Pin No	Section No	Location (D.F.C.B.) mm	Burnup (MWD/MTM)		Local Linear Heat Rate (W/cm)	Fluence $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ ( $10^{22} \text{ n/cm}^2$ )	Clad. Inner Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pellet Density (%T.D.)	Pellet O/M	Gap Size ( $\mu\text{m}$ )	Carbon in clad. (W/O)	Clad. Grain Size ( $\mu\text{m}$ )	
			Local	Pin Ave.									
4K	XC0443	93	52530	52280	461	5.2	528	85	1.98	200	0.044	15.6	
	XC0482	214	52150		448	4.8							618
	XC04A1	277	37380		367	3.7							646
	XC04A3	316	28290		303	2.8							656
6S	XC0643	98	55270	51010	447	5.4	524	85	1.99	200	0.057	22.4	
	XC06F2	315	25590		295	2.5							622
8S	XC0854	140	58080	52730	486	5.4	558	85	1.99	200	0.057	22.4	
	XC0871	314	29550		310	2.9							632
22K	YC2418	127	53550	53750	497	5.0	536	85	1.99	200	0.044	15.6	
15S	XC1552	103	78670	78090	455	8.2	506	85	1.99	200	0.057	22.4	
	XC15G2	315	45090		297	4.7							628
27K	XC2752	51	103960	111980	415	11.5	470	85	1.99	200	0.044	15.6	
	XC2754	96	112090		453	12.4							498
	XC27G2	315	58760		331	6.5							622
32K	XC3253	140	114300	111710	446	12.5	516	85	1.99	200	0.044	15.6	
	XC3281	313	68580		290	7.5							600

Table 4-2 Summary data from ceramographs (Rapsodie PNC-5)

Pin No	Section No	Distance from Core Bottom (mm)	Restructured Region Dia. (mm)					Residual Diametral Gap Size ( $\mu\text{m}$ )	Fuel Outer Dia. (mm)	Clad Dia. (mm)		Linear Heat Rate (W/cm)	Burnup (MWD/MTM)
			Central Void	Columnar Region	Gas Bubble Region	Densified Region	Dark Ring Region			Outer	Inner		
4K	XC0443	93	1.436	4.353	5.279	5.470		80	5.559	6.521	5.639	4.61	52,530
	XC04A1	277	1.741	4.648	5.341	5.486		46	5.593	6.528	5.639	3.67	37,380
	XC04A3	316	1.233	4.164	5.096	5.422		44	5.603	6.535	5.647	3.03	28,290
6S	XC0643	98	1.613	3.695	4.211	4.668	5.037	26	5.614	6.528	5.640	4.47	55,270
	XC06F2	315	0.644	3.353	3.976	4.644	4.908	52	5.587	6.527	5.639	2.95	25,590
8S	XC0854	140	1.585	4.322	4.760	5.260		96	5.565	6.544	5.661	4.86	58,080
	XC0871	314	0.635	3.941	4.799	5.340		49	5.586	6.520	5.635	3.10	29,550
22K	YC2418	127	1.895	3.983	4.335	4.797	5.117	31	5.580	6.508	5.611	4.97	53,550
15S	XC1552	103	1.894	3.580	4.233	4.730	5.068	11	5.642	6.547	5.653	4.55	78,670
	XC15G2	315	0.771	3.369	4.541	4.875	5.192	97	5.552	6.541	5.649	2.97	45,090
27K	XC2752	51	1.697	4.184	4.759	5.360		62	5.601	6.563	5.663	4.15	103,960
	XC2754	96	1.705	4.278	4.878	5.359		98	5.584	6.573	5.682	4.53	112,090
	XC27G2	315	1.462	3.407	4.578	5.211		163	5.518	6.564	5.681	3.31	58,760
32K	XC3253	140	1.819	4.169	4.891	5.371		101	5.604	6.587	5.705	4.46	114,300
	XC3281	313	1.235	3.499	4.379	5.160		163	5.524	6.550	5.687	2.90	68,580

Table 5 FCCI data sheet

Pin No	Section No	Attack* Type	Average Attack ( $\mu\text{m}$ )	Max. Attack ( $\mu\text{m}$ )	Comment	Predicted Max. Attack 4) ( $\mu\text{m}$ )		
						推 奨 式	AES式	設 計 開 発 課 式
4K	XC04A1	M	6	12		32	-	-
	XC0482	I		66		-	81	49
6S	XC0643	(I)		(80)	ギャップ部にF.P.及び腐食生成物の蓄積がある。	-	32	14
8S	XC0871	M(C)	9	13(40)	//	21	-	-
15S	XC15G2	M(C)	10	16(35)	//	42	-	-
27K	XC27G2	(I)		(15)		-	124	58
32K	XC3281	M	8	12		58	-	-

( )内はイオン腐食後の腐食形態と最大腐食量。

\* M: Matrix Attack

I: Intergranular Attack

C: Combined Attack

Table 6 Measurement condition and indentation position

(1) Measurement Condition

測定条件 試験法	圧子荷重 (g)	保持時間 (秒)
定常硬さ測定	500	30

(2) Indentation Position

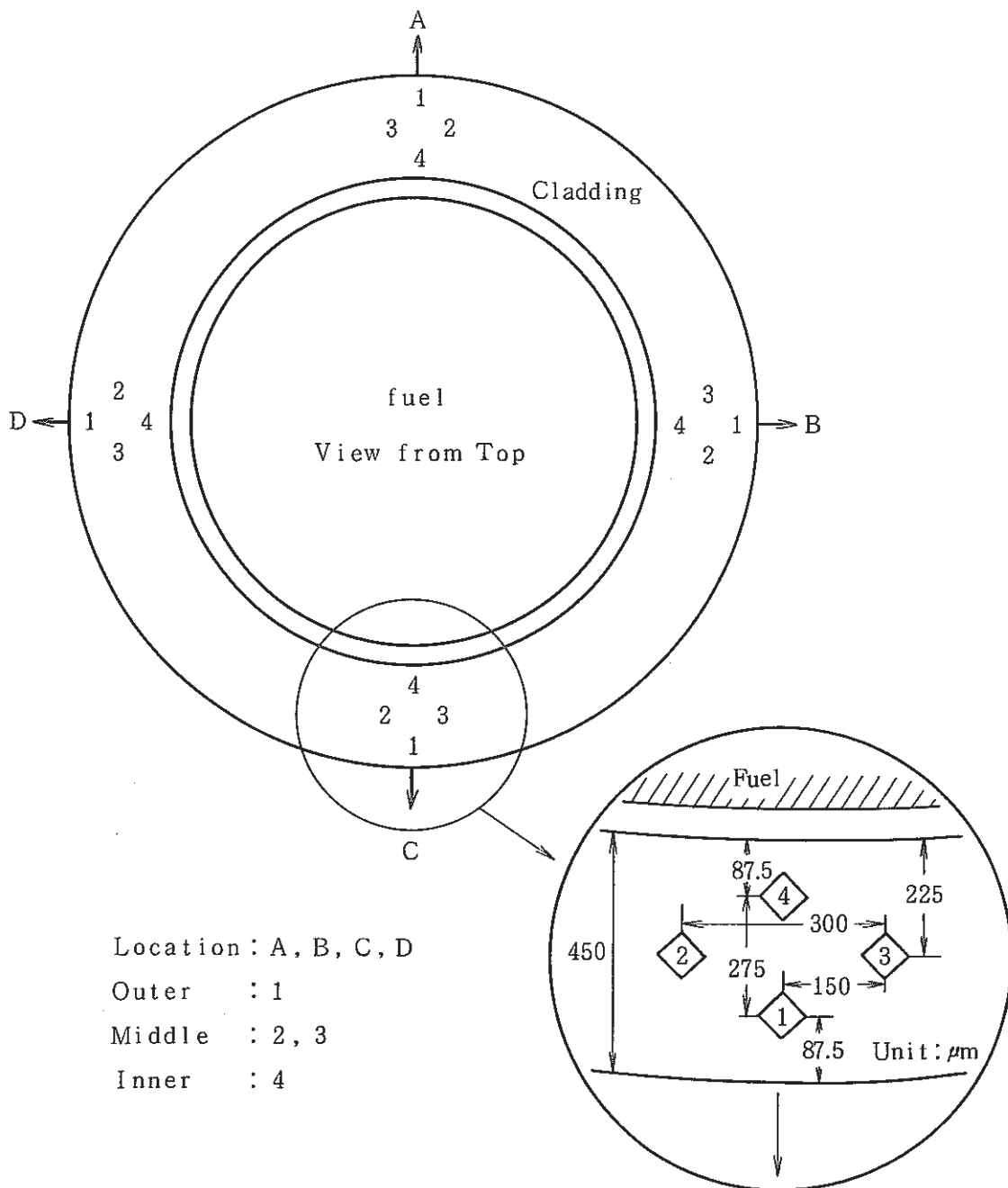


Table 7 Summary of Cladding microhardness measurement of Rapsodie  
PNC-5(1)(3) ... (1)

Pin No.	4K K材 { Unirrad. Hardness = Hv 293 Cold Work = 17.5(%) }			
Specimen No.	XC0443		XC04A1	XC04A3
D.F.C.B. (mm)	92.6		276.7	316.0
Hardness* Hv (0.5)	286		260	268
$\Delta H_v^{**}$ Hv (0.5)	-7		-33	-25
$\Delta H_v/H_v^{***}$ (%)	-2.7		-11.3	-8.5

Pin No.	22K K材 { Unirrad. Hardness = Hv 293 Cold Work = 17.5(%) }			
Specimen No.		YC2418		YC243
D.F.C.B. (mm)		138.0		313.0
Hardness* Hv (0.5)		280		259
$\Delta H_v^{**}$ Hv (0.5)		-13		-34
$\Delta H_v/H_v^{***}$ (%)		-4.4		-11.3

Pin No.	27K K材 { Unirrad. Hardness = Hv 293 Cold Work = 17.5(%) }			
Specimen No.	XC2757			XC27G2
D.F.C.B. (mm)	95.7			314.5
Hardness* Hv (0.5)	279			260
$\Delta H_v^{**}$ Hv (0.5)	-14			-33
$\Delta H_v/H_v^{***}$ (%)	-4.8			-11.3

Pin No.	32K K材 { Unirrad. Hardness = Hv 293 Cold Work = 17.5(%) }			
Specimen No.		XC3253		XC3281
D.F.C.B. (mm)		139.5		312.7
Hardness* Hv (0.5)		274		257
$\Delta H_v^{**}$ Hv (0.5)		-19		-36
$\Delta H_v/H_v^{***}$ (%)		-6.5		-12.3

\* 測定点16箇所の平均値

\*\*  $\Delta H_v = \text{Hardness} - \text{Unirrad. Hardness}$ \*\*\*  $\Delta H_v/H_v = \Delta H_v / \text{Unirrad. Hardness}$

Table 8 Summary of cladding microhardness measurement of Rapsodie  
PNC-5(1)(3) ... (2)

Pin No.	6S S材 $\left[ \begin{array}{l} \text{Unirrad. Hardness} = \text{Hv } 272 \\ \text{Cold Work} = 20(\%) \end{array} \right]$		
Specimen No.	XC0643		XC06F2
D.F.C.B. (mm)	98.4		315.0
Hardness* Hv(0.5)	272		257
$\Delta\text{Hv}^{**}$ Hv(0.5)	0		-36
$\Delta\text{Hv}/\text{Hv}^{***}$ (%)	0		-12.3

Pin No.	8S S材 $\left[ \begin{array}{l} \text{Unirrad. Hardness} = \text{Hv } 272 \\ \text{Cold Work} = 20(\%) \end{array} \right]$		
Specimen No.		XC0854	XC0871
D.F.C.B. (mm)		139.5	313.5
Hardness* Hv(0.5)		260	248
$\Delta\text{Hv}^{**}$ Hv(0.5)		-12	-24
$\Delta\text{Hv}/\text{Hv}^{***}$ (%)		-4.4	-8.8

Pin No.	15S S材 $\left[ \begin{array}{l} \text{Unirrad. Hardness} = \text{Hv } 272 \\ \text{Cold Work} = 20(\%) \end{array} \right]$		
Specimen No.	XC1552		XC15G2
D.F.C.B. (mm)	102.6		315.1
Hardness* Hv(0.5)	272		240
$\Delta\text{Hv}^{**}$ Hv(0.5)	0		-32
$\Delta\text{Hv}/\text{Hv}^{***}$ (%)	0		-11.8

\* 測定点16箇所の平均値

\*\*  $\Delta\text{Hv} = \text{Hardness} - \text{Unirrad. Hardness}$

\*\*\*  $\Delta\text{Hv}/\text{Hv} = \Delta\text{Hv} / \text{Unirrad. Hardness}$



Table 9 Microhardness of Rapsodie PNC-5(1) fuel cladding (No. 4K Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	4K	
SPECIMEN No.	XC0443				
D. F. C. B.	92.6	(mm)	D. F. P. B.	444.6	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	291	282	285	278	283
B	296	282	285	276	285
C	298	280	290	278	287
D	309	280	285	278	288
RING AVERAGE	299	281	285	278	286

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	4K	
SPECIMEN No.	XC04A1				
D. F. C. B.	276.7	(mm)	D. F. P. B.	628.7	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	255	258	266	276	264
B	251	262	260	266	260
C	249	251	266	278	261
D	255	251	249	262	254
RING AVERAGE	253	256	260	271	260

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	4K	
SPECIMEN No.	XC04A3				
D. F. C. B.	316.0	(mm)	D. F. P. B.	668.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	258	269	273	271	268
B	262	276	264	273	269
C	258	271	269	278	269
D	262	264	269	262	264
RING AVERAGE	260	270	269	271	268

Table 10 Microhardness of Rapsodie PNC-5(1) fuel cladding (No.22K Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.		22K
SPECIMEN No.	YC2418				
D. F. C. B.	138.0	(mm)	D. F. P. B.	490.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	301	291	287	276	289
B	307	291	293	282	293
C	276	266	266	266	269
D	282	268	266	262	270
RING AVERAGE	292	279	278	272	280

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.		22K
SPECIMEN No.	YC243				
D. F. C. B.	313.0	(mm)	D. F. P. B.	665.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	264	255	255	264	260
B	258	259	259	271	262
C	249	258	253	259	255
D	262	266	255	258	260
RING AVERAGE	258	260	256	263	259

Table 11 Microhardness of Rapsodie PNC-5(3) fuel cladding (No.27K Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	27K	
SPECIMEN No.	XC2754				
D. F. C. B.	95.7	(mm)	D. F. P. B.	447.7	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	273	262	262	262	265
B	293	285	285	266	282
C	301	296	296	285	295
D	282	271	273	271	274
RING AVERAGE	287	279	279	271	279

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	27K	
SPECIMEN No.	XC27G2				
D. F. C. B.	314.5	(mm)	D. F. P. B.	666.5	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	253	253	251	258	254
B	260	271	269	271	268
C	255	264	266	269	264
D	253	255	249	251	252
RING AVERAGE	255	261	258	262	260

Table 12 Microhardness of Rapsodie PNC-5(3) fuel cladding (No.32K Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	32K	
SPECIMEN No.	XC3253				
D. F. C. B.	139.5	(mm)	D. F. P. B.	491.5	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	293	280	288	280	285
B	255	251	258	253	254
C	278	269	276	260	271
D	290	288	285	278	285
RING AVERAGE	279	272	277	268	274

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	32K	
SPECIMEN No.	XC3281				
D. F. C. B.	312.7	(mm)	D. F. P. B.	664.7	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	249	255	247	251	251
B	253	260	258	262	258
C	260	271	269	273	268
D	241	251	251	251	249
RING AVERAGE	251	259	256	259	257

Table 13 Microhardness of Rapsodie PNC-5(1) fuel cladding (No. 6S Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	6S	
SPECIMEN No.	XC0643				
D. F. C. B.	98.4	(mm)	D. F. P. B.	450.4	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	278	275	269	264	272
B	283	278	271	258	273
C	280	260	262	260	266
D	288	273	278	266	276
RING AVERAGE	282	272	270	262	272

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	6S	
SPECIMEN No.	XC06F2				
D. F. C. B.	315.0	(mm)	D. F. P. B.	667.0	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	239	247	241	249	244
B	245	245	245	241	244
C	245	247	243	239	244
D	255	253	245	251	251
RING AVERAGE	246	248	244	245	246

Table 14 Microhardness of Rapsodie PNC-5(1) fuel cladding (No. 8S Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	8S	
SPECIMEN No.	XC0854				
D. F. C. B.	139.5	(mm)	D. F. P. B.	491.5	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	255	260	264	251	258
B	276	264	264	255	265
C	269	264	253	251	259
D	249	269	255	249	256
RING AVERAGE	262	264	259	252	260

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	8S	
SPECIMEN No.	XC0871				
D. F. C. B.	313.5	(mm)	D. F. P. B.	665.5	(mm)
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	249	255	245	251	250
B	247	251	247	245	248
C	245	245	253	239	246
D	243	243	247	249	246
RING AVERAGE	246	249	248	246	248

Table 15 Microhardness of Rapsodie PNC-5(3) fuel cladding (No.15S Pin)

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	15S	
SPECIMEN No.	XC1552				
D. F. C. B.	102.6 (mm)		D. F. P. B.	454.6 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	276	278	280	270	276
B	264	255	260	258	259
C	278	278	266	276	275
D	285	280	278	273	279
RING AVERAGE	276	273	271	269	272

S/A NAME	Rapsodie PNC-5		PIN No.	15S	
SPECIMEN No.	XC15G2				
D. F. C. B.	315.1 (mm)		D. F. P. B.	667.1 (mm)	
LOCATION	OUTER	MIDDLE		INNER	AVERAGE
	1	2	3	4	
A	237	230	234	235	234
B	237	237	239	241	239
C	241	245	243	243	243
D	243	243	245	241	243
RING AVERAGE	240	239	240	240	240

Table 16 Summary of density measurement

Pin No.	Specimen No.	Distance From Pin Bottom (mm)	Fast Fluence ( $n/cm^2 \cdot X10^{22}$ )	Cladding Mid-Wall Temp. (°C)	Density (g/cc)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
XC04 (4K)	XC0422	202.0~229.5	—	—	7.960	Base
	XC0442	407.5~435.5	5.0	486	7.956	0.05
	XC0444	444.9~467.8	5.3	512	7.951	0.11
	XC0481	517.5~545.1	5.2	570	7.951	0.11
	XC0483	566.4~596.5	4.5	602	7.950	0.12
	XC04A2	629.0~658.2	3.3	636	7.944	0.20
XC06 (6S)	XC0622	202.0~229.5	—	—	7.974	Base
	XC0642	410.8~440.2	5.0	480	7.969	0.06
	XC0644	450.7~479.2	5.3	502	7.959	0.18
	XC068	517.5~546.5	5.1	547	7.937	0.46
	XC06B	567.5~596.5	4.4	575	7.930	0.55
	XC06F1	627.5~656.7	3.2	597	7.944	0.37
XC08 (8S)	XC0822	197.0~229.5	—	—	7.967	Base
	XC0853	453.1~482.0	5.5	516	7.953	0.17



Table 17 Summary of density measurement

Pin No.	Specimen No.	Distance From Pin Bottom (mm)	Fast Fluence ( $n/cm^2 \cdot X10^{22}$ )	Cladding Mid-Wall Temp. ( $^{\circ}C$ )	Density (g/cc)	Density Change $-\frac{\Delta\rho}{\rho}$ (%)
XC15 (15S)	XC1522	199.8~224.8	—	—	7.966	Base
	XC1551	412.5~444.1	8.1	474	7.902	0.80
	XC1553	454.9~486.5	8.4	500	7.827	1.74
	XC159	517.5~546.5	8.2	546	7.800	2.08
	XC15C	567.5~596.5	7.2	580	7.848	1.48
	XC15G1	627.5~655.8	5.4	610	7.903	0.79
XC27 (27K)	XC2722	201.1~229.5	—	—	7.955	Base
	XC2751	372.5~394.6	10.4	442	7.895	0.75
	XC2753	403.2~436.8	11.8	465	7.846	1.37
	XC2755	448.0~481.5	12.7	498	7.814	1.77
	XC279	517.5~546.5	12.2	540	7.752	2.55
	XC27C	567.5~596.5	10.7	574	7.797	1.99
	XC27G1	627.5~656.9	8.0	604	7.877	0.98
XC32 (32K)	XC3222	199.5~229.5	—	—	7.955	Base
	XC3252	448.3~479.9	12.3	482	7.809	1.84

Table 18 Summary of burnup measurement by Nd-method

Pin No	Sample No	Distance from <sup>(1)</sup> core fuel bottom (mm)	Burnup (atom%) <sup>(2)</sup>		
			Calculated <sup>(3)</sup>	Measured <sup>(4)</sup>	MWD/MTM <sup>(5)</sup>
4K	XC046	145.5 ~ 154.5	6.26	6.27	58,100
6S	XC066	145.5 ~ 154.5	6.12	6.21	57,500
15S	XC157	145.5 ~ 154.5	9.47	9.22	85,300
27K	XC277	145.5 ~ 154.5	13.53	13.20	122,000

(1) Distance from fuel bottom; +10mm

Distance from pin bottom ; +352mm

(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) 仏側データ (ピーク値)

(4) Measured by <sup>148</sup>Nd monitor method

(5) 1.08 atom% = 10,000 MWD/MTM

Table 19 Calculation of effective fission yield for Rapsodie PNC-5(XC046) example

Nuclide	Abundances (wt%) <sup>*</sup>				Fission <sup>**</sup> Rate (f/s·g)	Nd 148		Nd 146		Nd 145	
	Pu/ (Pu+U)	U and Pu	Fuel	Equiv- <sup>***</sup> alent		Fission Yield(%)	Fractional FY (%)	Fission Yield(%)	Fractional FY (%)	Fission Yield(%)	Fractional FY (%)
U234	81.992	0.5011	0.4109	-	-	-	-	-	-	-	-
U235		71.5391	58.6563	58.6563	$1.171 \times 10^{13}$	1.68	1.248	2.94	2.184	3.76	2.793
U236		1.3734	1.1261	-	-	-	-	-	-	-	-
U238		26.5863	21.7986	24.1634	$0.081 \times 10^{13}$	2.08	0.044	3.40	0.072	3.50	0.074
Pu238	18.008	0.7324	0.1319	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu239		77.2051	13.9031	16.0054	$1.363 \times 10^{13}$	1.65	0.3849	2.46	0.580	3.01	0.710
Pu240		16.1847	2.9145	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu241		4.2996	0.7743	-	-	-	-	-	-	-	-
Pu242		1.5782	0.2842	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100	200	100	-	-	Effective FY (%)	1.68	Effective FY (%)	2.84	Effective FY (%)	3.58

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

Effective FY =  $\Sigma$ (Fractional FY)

\* 同位体希釈分析データ

\*\* ラブ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)

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

Table 20 Calculation of atom% BU-MWD/MTM BU Conversion at PNC-5

核種	質量数	燃料組成*			平均質量数	未照射燃料 1 ton(金属) 当りの総原子数	核分裂率** ( $\frac{\text{fission}}{\text{g} \cdot \text{s}}$ )	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%)	1核分裂**当 りのエネルギー 放出量 (MeV)	1 atom % BU 当りのエネルギー 純放出量 ( $\frac{\text{MWD}}{\text{MTM}}$ )	換算係数 (atom% vs $10^4 \text{MWD}/\text{MTM}$ )
		atom%	wt.%	等価*** wt.%									
U 234	234.04												
U 235	235.04	60.349	59.978	59.978		$1.171 \times 10^{13}$	$7.2545 \times 10^3$	$1.8587 \times 10^{25}$	$2.5505 \times 10^{25}$	1.0016	194.2	9249	1.08
U 236	236.05												
U 238	238.05	19.862	19.993	19.993		$0.081 \times 10^{13}$	$0.1672 \times 10^3$						
Pu 238	238.05	0.141	0.142		236.49	$2.5464 \times 10^{27}$							
Pu 239	239.05	15.068	15.231	18.314		$1.363 \times 10^{13}$	$2.5783 \times 10^3$	$0.6495 \times 10^{25}$			201		
Pu 240	240.05	2.853	2.896										
Pu 241	241.06	1.472	1.500										
Pu 242	242.06	0.254	0.260										

\* 製造時の燃料組成データ

\*\* SN841-73-05, ラブソディ-4 照射用燃料ピンの設計計算書

\*\*\* \*\*より  $U238eq = U238 + 2U236$ ,  $P239eq = Pu239 + 0.36Pu240 + 1.36Pu241$ 

U234, Pu238 and Pu242 are to be neglected

Table 21 Composition of spike solution and natural Neodymium

スパイク液中の原子数 (atoms/ml)	U 233	$4.3914 \times 10^{18}$
	Pu242	$7.9674 \times 10^{17}$
	Nd150	$7.1740 \times 10^{15}$
天然ネオジムの同位体比	Nd142/Nd150	4.824980
	Nd145/Nd150	1.472180
	Nd146/Nd150	3.050830
	Nd148/Nd150	1.021325
ネオジウムスパイクの 同位体比	Nd142/Nd150	0.008937
	Nd145/Nd150	0.004336
	Nd146/Nd150	0.009122
	Nd148/Nd150	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	Pu239/Pu242	0.001309
	Pu240/Pu242	0.013696
	Pu241/Pu242	0.000859

Table 2 2 Result of isotope analysis and burnup calculation for  
PNC-5 XC046 sample

S/R NO.(FAB) ; PNC-5	PIN NO.(PIE) ; XC04 (4K)
SAMPLE NO. ; XC046	SAMPLE POSITION ; 145.5~154.5 (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]		
nd	0.019171	2.725158	0.052095	-(a)	
0.152446	0.020881	2.721994	0.051918	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.009526	0.208760	0.055229	0.020188	-(a)	
0.009526	0.209356	0.055257	0.063561	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	6.751420	6.119277	4.523241	3.581734	2.141338
nd	6.115935	5.543156	4.098479	3.248286	1.942689

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.5050	71.7822	1.3722	26.3406		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.7363	77.2975	16.1366	4.2691	1.5605		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	27.9944	25.3733	18.7554	14.8515	8.8790	4.1465

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.864 / 18.008

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 3.9905E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample) ;</u>	4.4867E+18	7.4874E+18	9.3720E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD ;</u>	1.68E-02	2.84E-02	3.58E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)** ;</u>	2.6706E+20	2.6364E+20	2.6179E+20
<u>BURNUP (atom%)# ;</u>	6.27	6.20	6.16
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)## ;</u>	58100	57400	57000

NOTE ; nd=not detected

\* Distance from core fuel bottom

\*\* FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

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

## 1.08 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 23 Result of isotope analysis and burnup calculation for PNC-5 XC066 sample

S/A NO.(FAB) ; PNC-5	PIN NO.(PIE) ; XC06 (6S)
SAMPLE NO. ; XC066	SAMPLE POSITION ; 145.5~154.5 (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	0.019362	2.761771	0.051858	-(a)	
0.158772	0.021240	2.754536	0.051777	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.009526	0.208343	0.055207	0.020104	-(a)	
0.009526	0.208910	0.055347	0.062490	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	6.766623	6.118682	4.528947	3.586921	2.143701
nd	6.109394	5.526050	4.091953	3.241127	1.938632

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.5051	72.0526	1.3529	26.0893		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.7366	77.3288	16.1109	4.2691	1.5546		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	28.0251	25.3415	18.7574	14.8558	8.8785	4.1417

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 18.666 / 18.815

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 3.9064E+21

<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
		4.3419E+18	7.2146E+18	9.1067E+18
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.68E-02	2.83E-02	3.57E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	;	2.5845E+20	2.5493E+20	2.5509E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	6.21	6.13	6.13
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	;	57500	56700	56800

NOTE ; nd=not detected

\* Distance from core fuel bottom

\*\* FISSIONS=NUMBER OF Nd/EFFECTIVE FISSION YIELD

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

## 1.08 atom% BU=10000 MWD/MTM BU

Table 2 4 Result of isotope analysis and burnup calculation for PNC-5 XC157 sample

S/A NO.(FAB) ; PNC-5	PIN NO.(PIE) ; XC15 (15S)
SAMPLE NO. ; XC157	SAMPLE POSITION ; 145.5*154.5 (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]		
nd	0.018951	2.609438	0.069916	-(a)	
0.149556	0.020706	2.609203	0.069772	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.010250	0.217770	0.055711	0.021113	-(a)	
0.010250	0.218502	0.055868	0.065130	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	6.751820	6.023160	4.518444	3.589896	2.140395
0.007275	6.305033	5.629462	4.227185	3.357511	2.002929

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.5124	70.5577	1.8905	27.0394		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.7855	76.6375	16.6894	4.2696	1.6181		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	28.1048	25.0717	18.8083	14.9431	8.9095	4.1626

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.877 / 18.018

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 3.9632E+21

		[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	;	6.7601E+18	1.1154E+19	1.4300E+19
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	;	1.68E-02	2.84E-02	3.58E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**;</u>		4.0238E+20	3.9276E+20	3.9945E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	;	9.22	9.02	9.16
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	;	85300	83500	84800

NOTE ; nd=not detected

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



Table 25 Result of isotope analysis and burnup calculation for PNC-5 XC277 sample

S/A NO.(FAB) ; PNC-5	PIN NO.(PIE) ; XC27 (27K)
SAMPLE NO. ; XC277	SAMPLE POSITION ; 145.5*154.5 (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]		
nd	0.018120	2.379311	0.092724	-(a)	
0.150414	0.019807	2.376814	0.092535	-(b)	
[Pu238/239]	[Pu240/239]	[Pu241/239]	[Pu242/239]		
0.011380	0.231118	0.056218	0.022428	-(a)	
0.011380	0.231708	0.056220	0.071052	-(b)	
[Nd142/150]	[Nd143/150]	[Nd144/150]	[Nd145/150]	[Nd146/150]	[Nd148/150]
nd	6.732154	6.047668	4.513374	3.599005	2.137183
0.011467	6.406994	5.752771	4.291057	3.427430	2.036228

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

[ U233]	[ U234]	[ U235]	[ U236]	[ U238]		
nd	0.5192	68.1721	2.6567	28.6520		
[Pu238]	[Pu239]	[Pu240]	[Pu241]	[Pu242]		
0.8614	75.6920	17.4938	4.2553	1.6976		
[Nd142]	[Nd143]	[Nd144]	[Nd145]	[Nd146]	[Nd148]	[Nd150]
nd	28.0163	25.1678	18.7827	14.9775	8.8940	4.1616

Pu CONTENT (atom%)/(weight%) ; 17.535 / 17.670

NUMBER OF TOTAL HEAVY ELEMENT (atoms/sample) ; 3.7033E+21

	[Nd148]	[Nd146]	[Nd145]
<u>NUMBER OF Nd NUCLIDE (atoms/sample)</u>	9.4746E+18	1.5514E+19	1.9320E+19
<u>EFFECTIVE FISSION YIELD</u>	1.68E-02	2.84E-02	3.58E-02
<u>NUMBER OF FISSIONS (fissions/sample)**</u>	5.6396E+20	5.4627E+20	5.3966E+20
<u>BURNUP (atom%)#</u>	13.20	12.90	12.70
<u>SPECIFIC BURNUP (MWD/MTM)##</u>	122000	119000	118000

NOTE ; nd=not detected

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

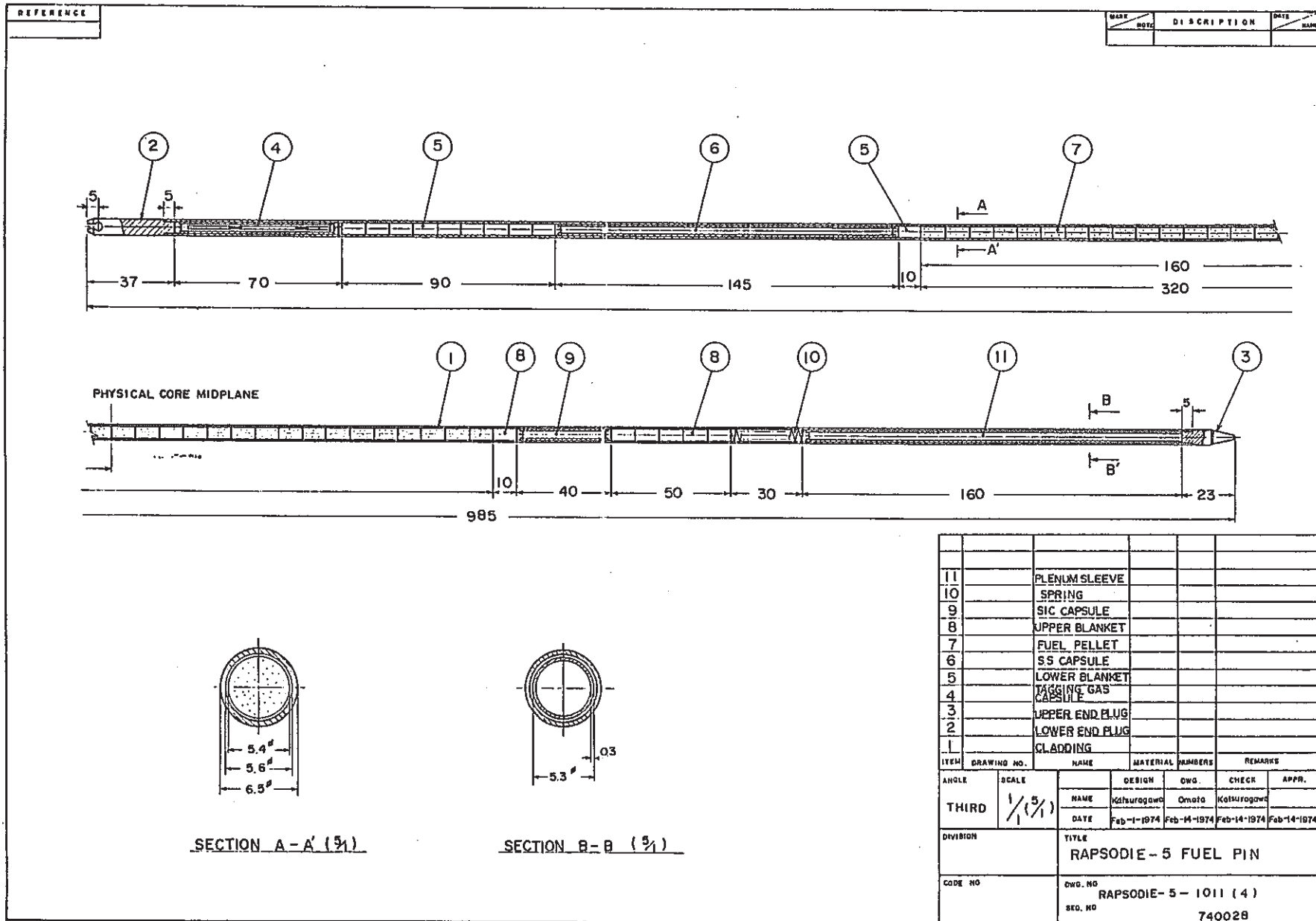


Fig. 1 燃料ピン

IRRADIATION LOADING

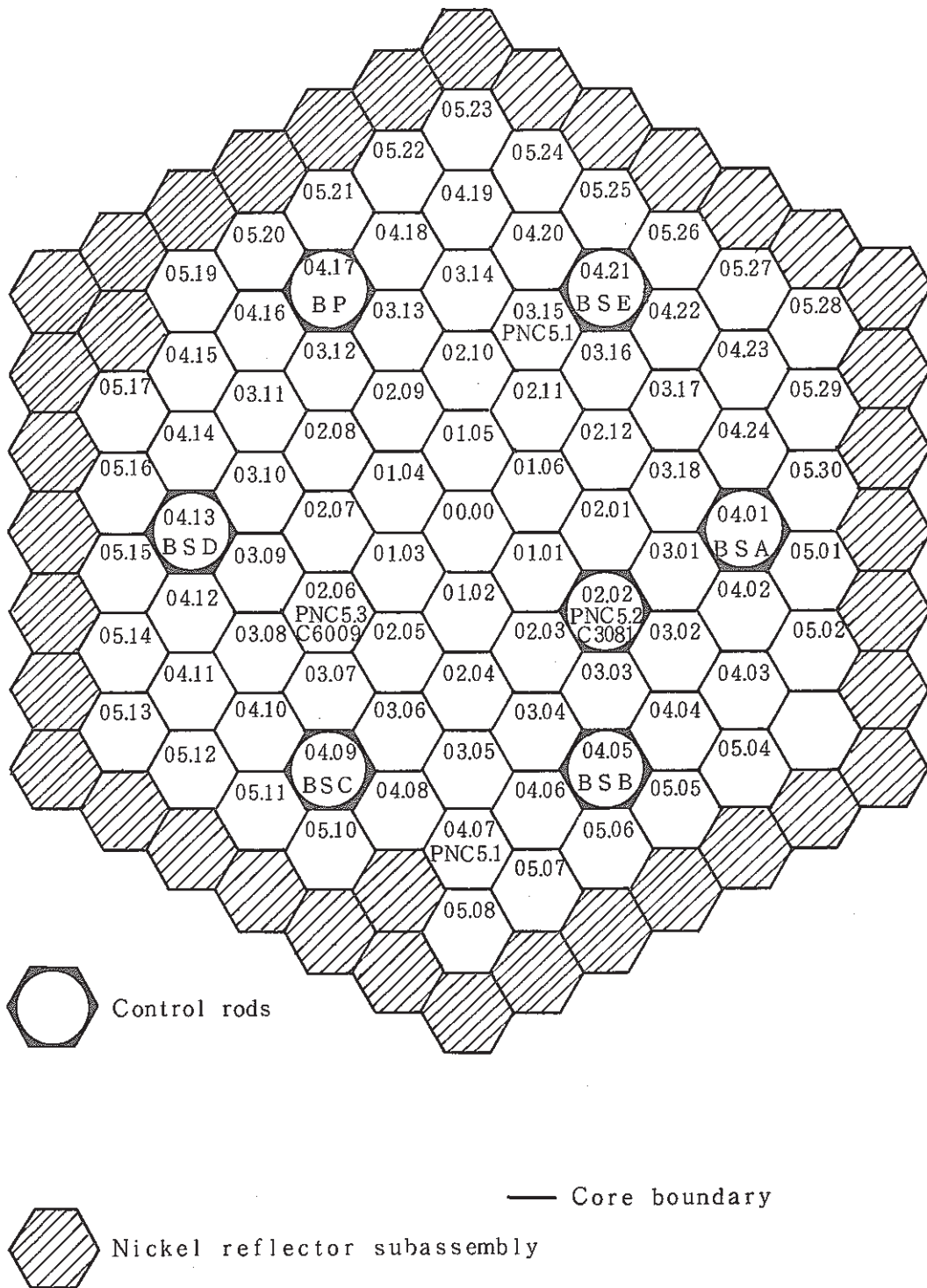


Fig. 2 Core location for PNC-5

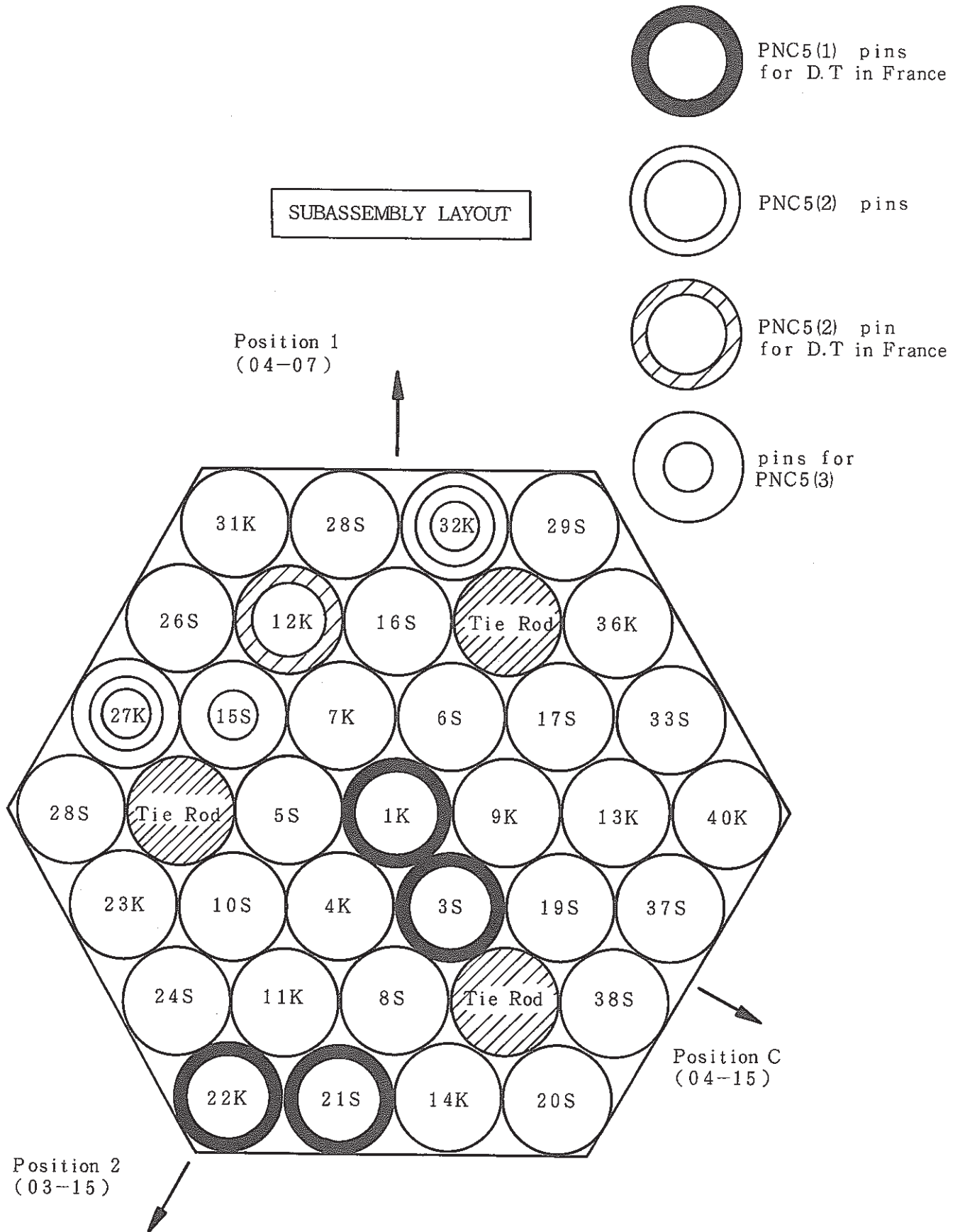


Fig.3 Fuel pin positions in the subassembly

IRRADIATION PNC5-2

(Rig n° 3081)

3 Pins: 12K - 27K - 32K

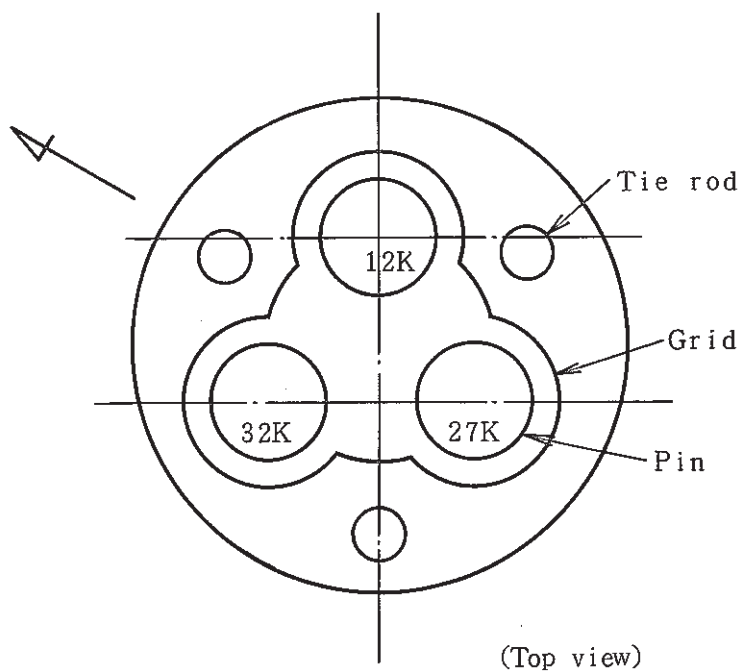


Fig.4 Fuel pin arrangement in the capsule

IRRADIATION PNC5-3

3 Pins: 15S - 27K - 32K

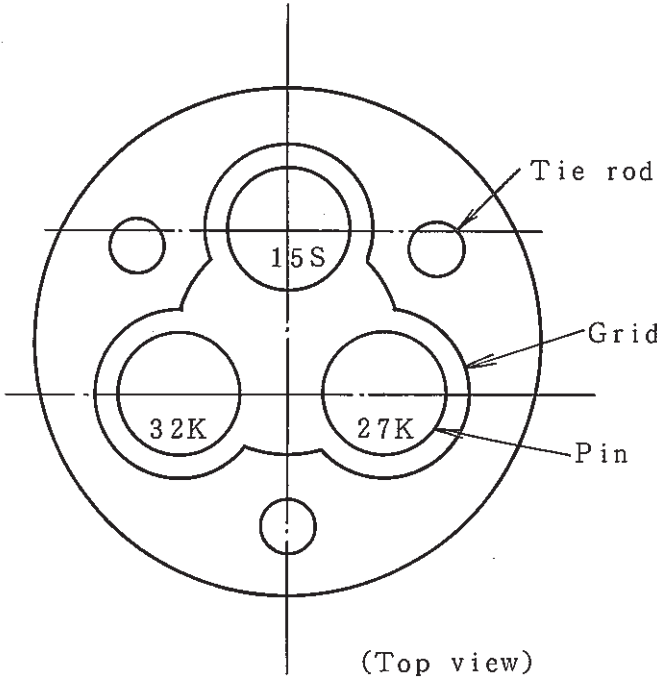


Fig.5 Fuel pin arrangement in the capsule

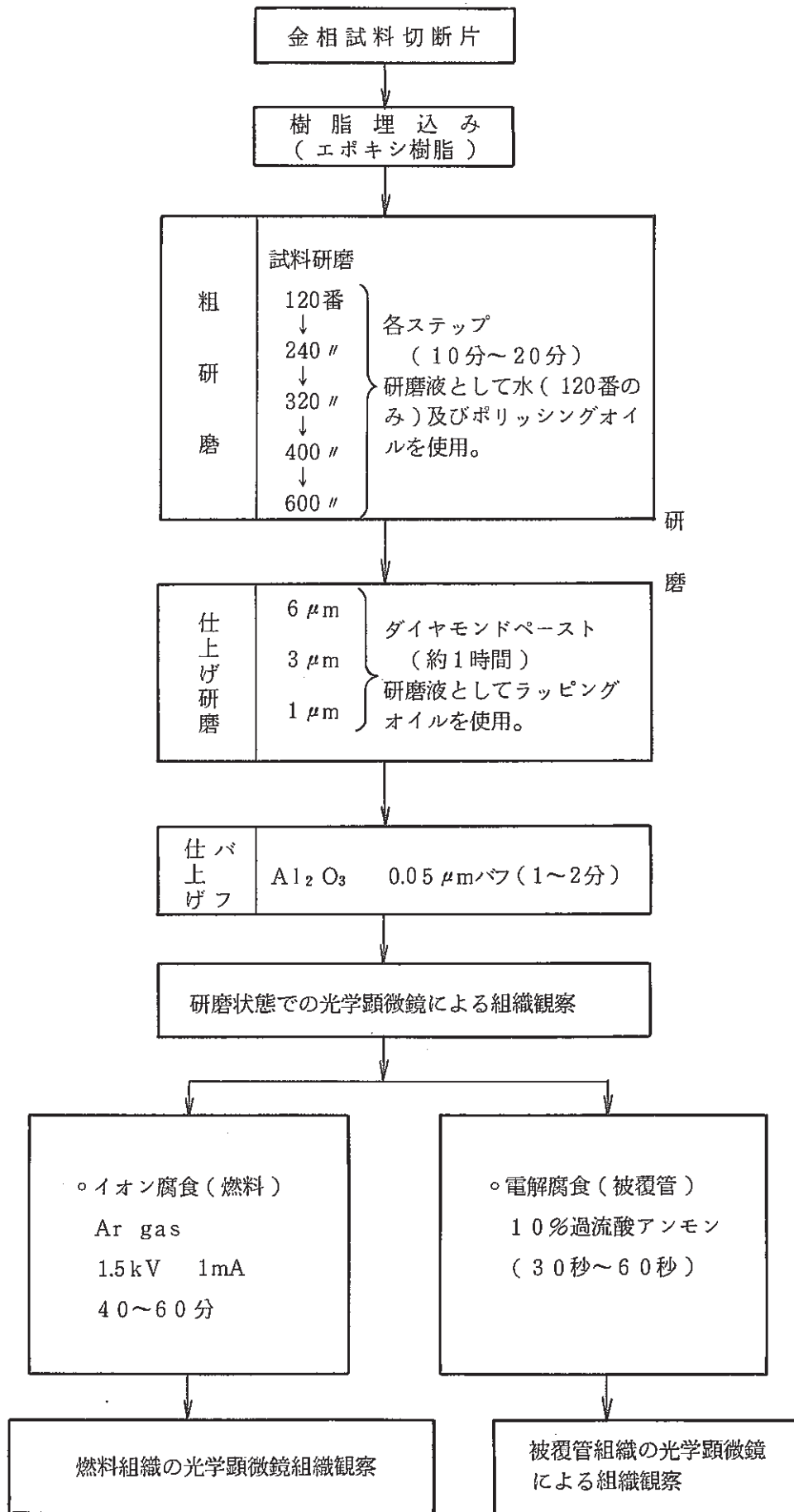


Fig. 6 Flow diagram of metallographic examination in AGS

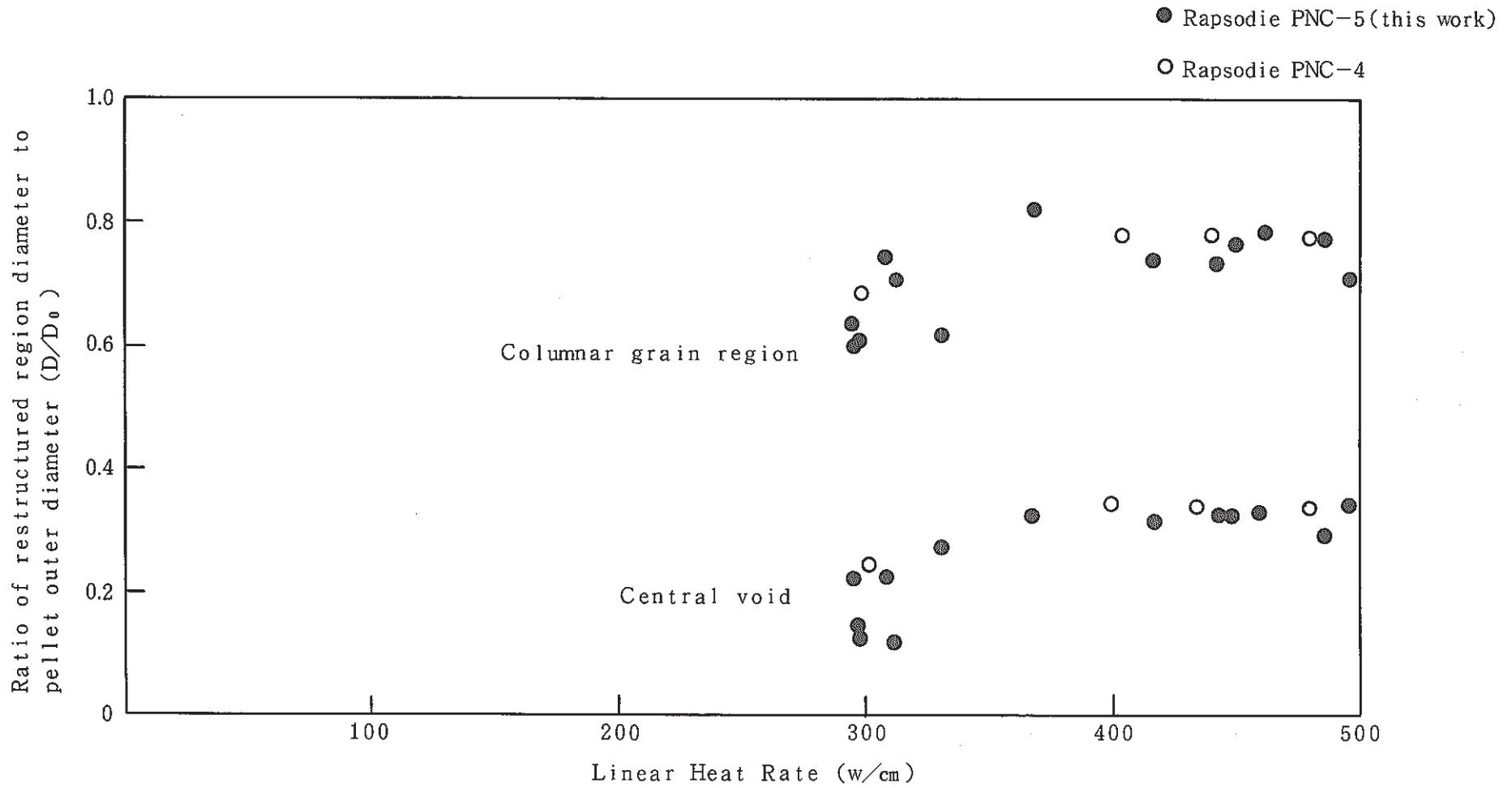


Fig. 7 Central void and columnar grain region diameter as a function of linear heat rate



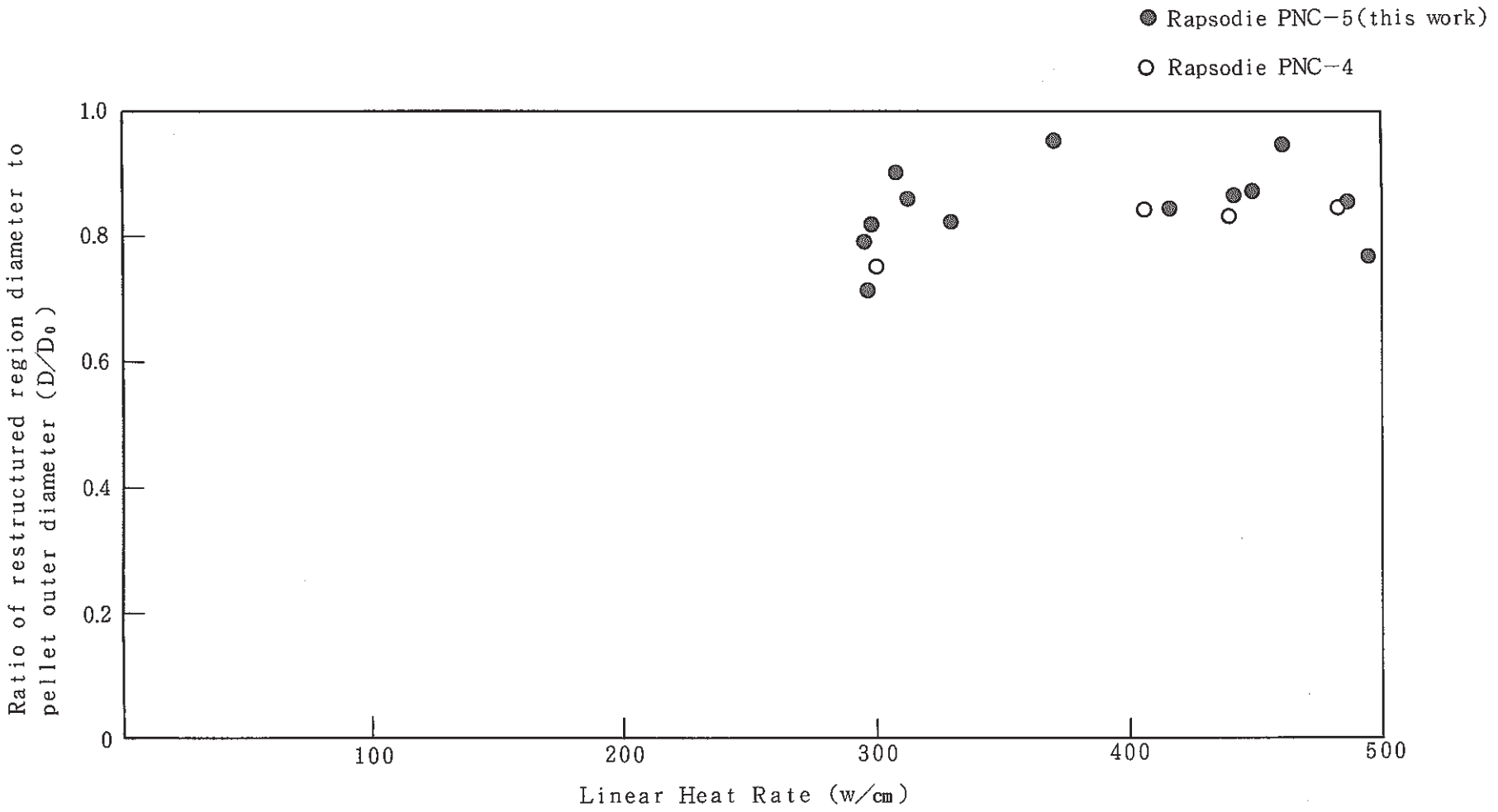


Fig. 8 Gas bubble growth region diameter as a function of linear heat rate

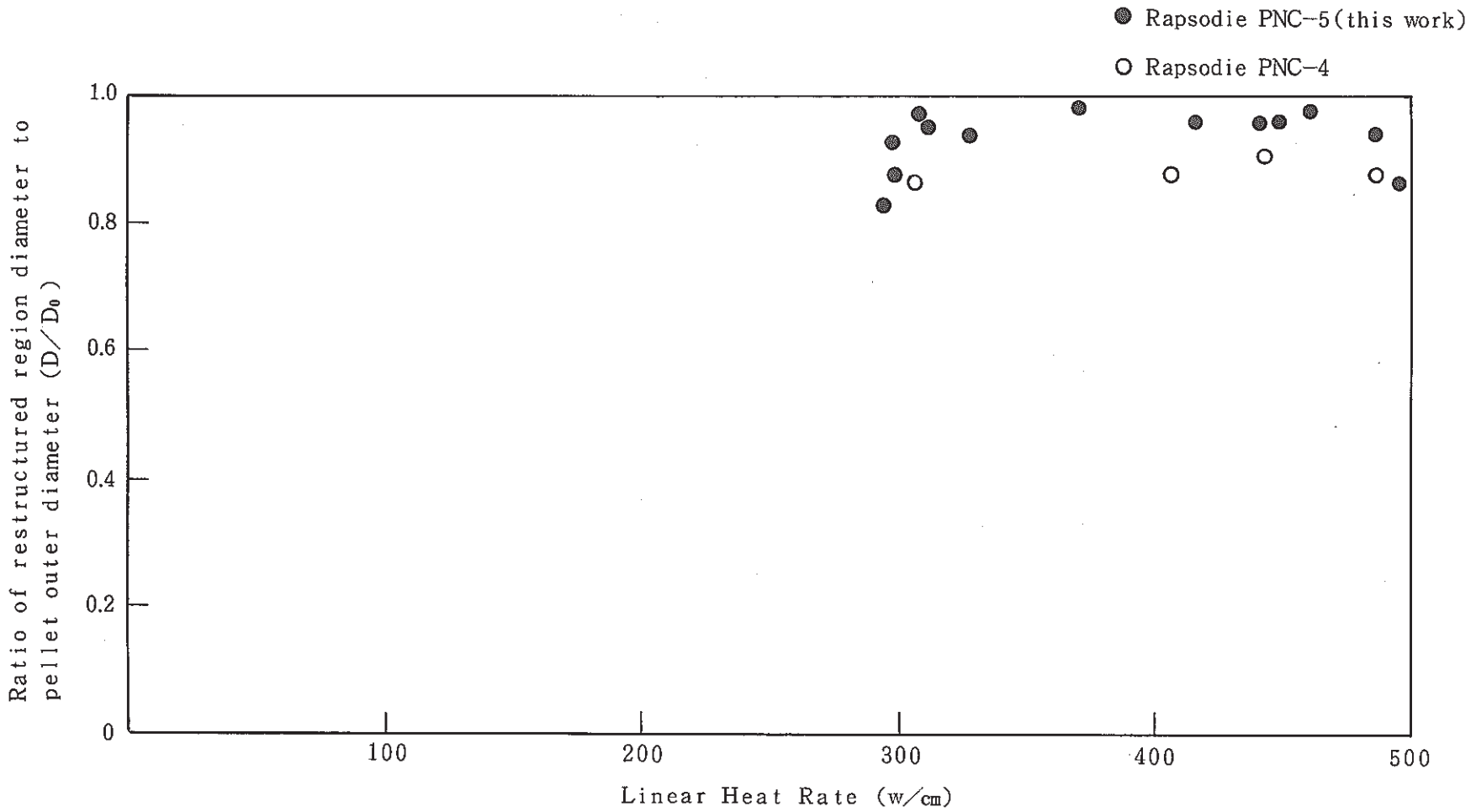


Fig. 9 Densified grain region diameter as a function of linear heat rate

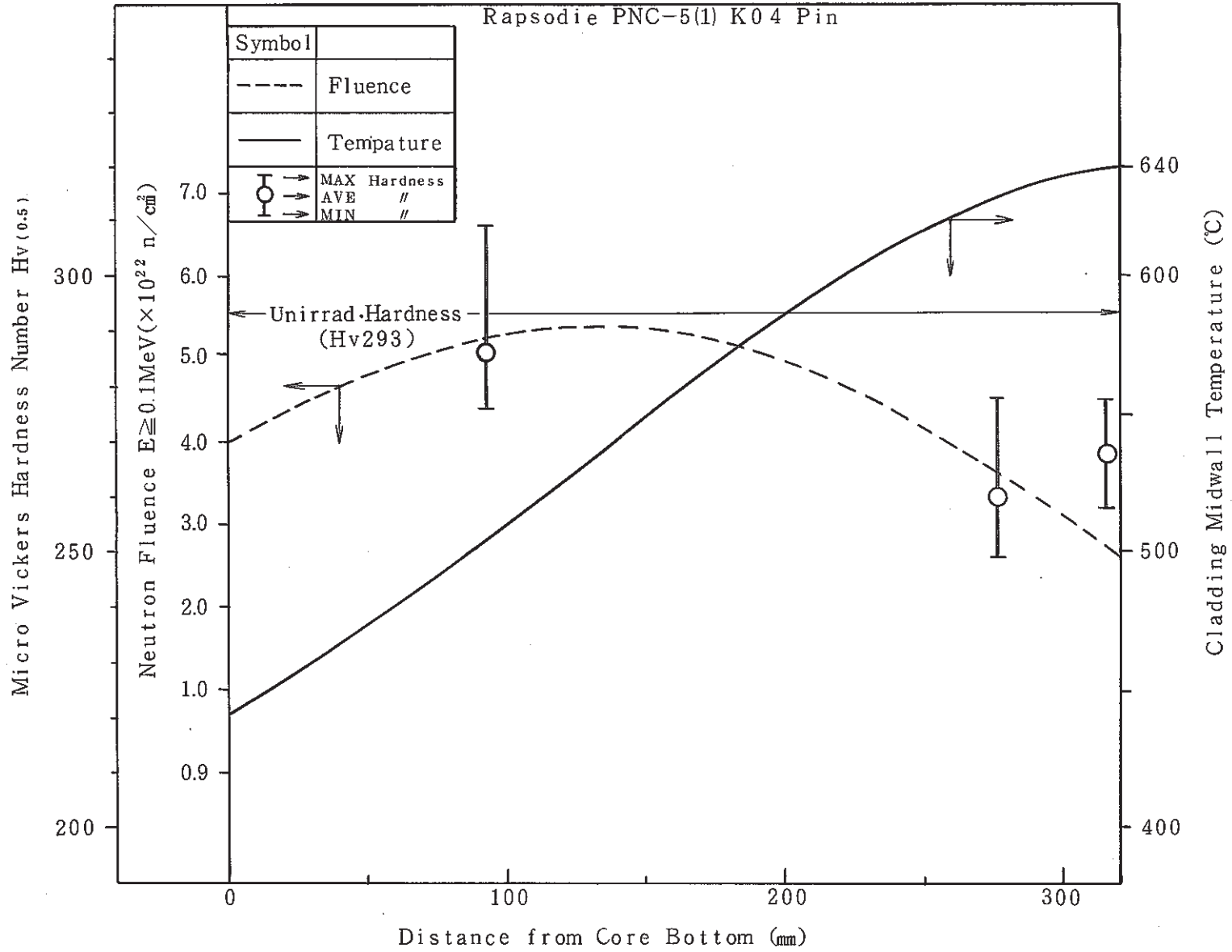


Fig. 10 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(1) fuel pin (No K04 Pin)

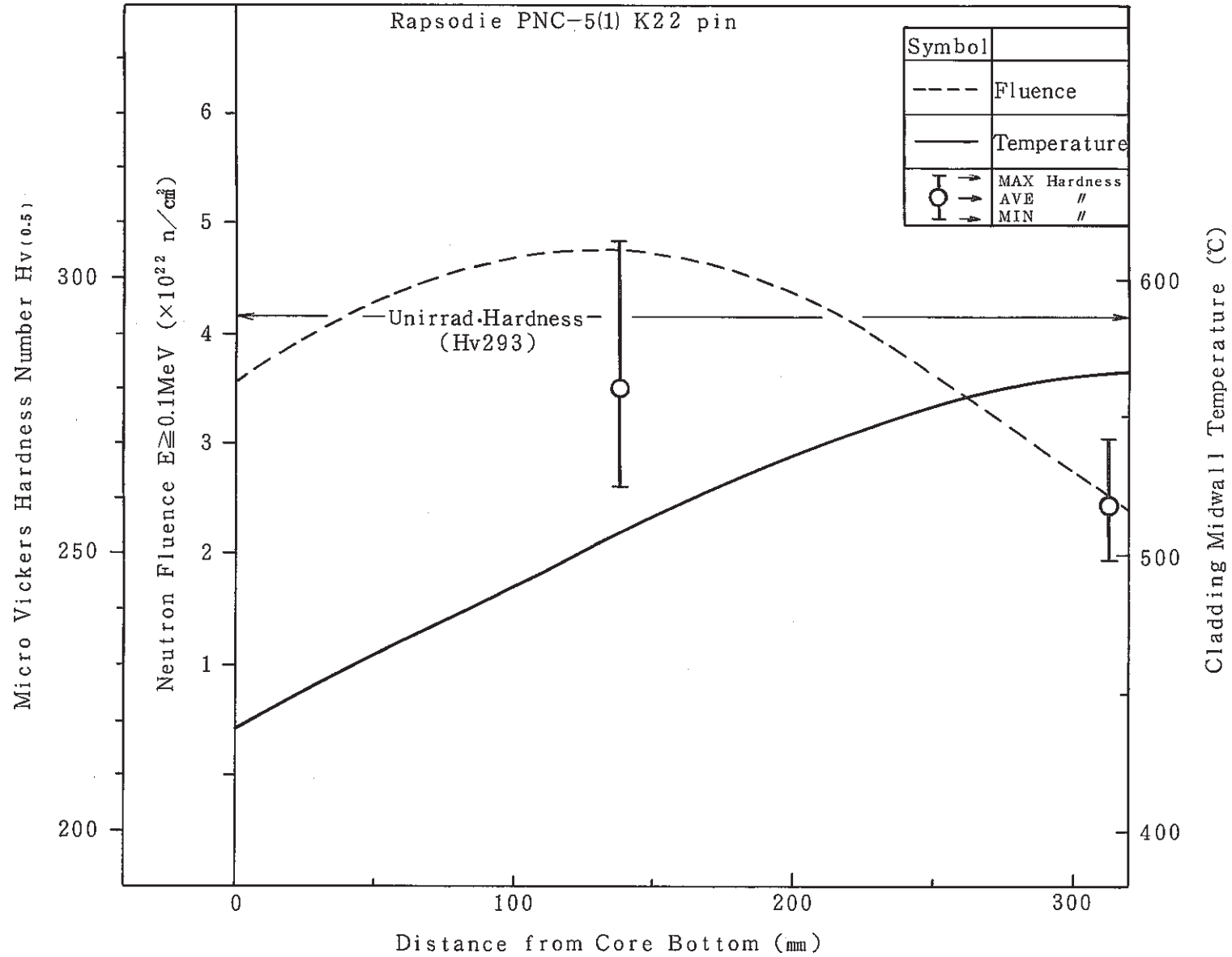


Fig. 11 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(1) fuel pin (No. K22 Pin)

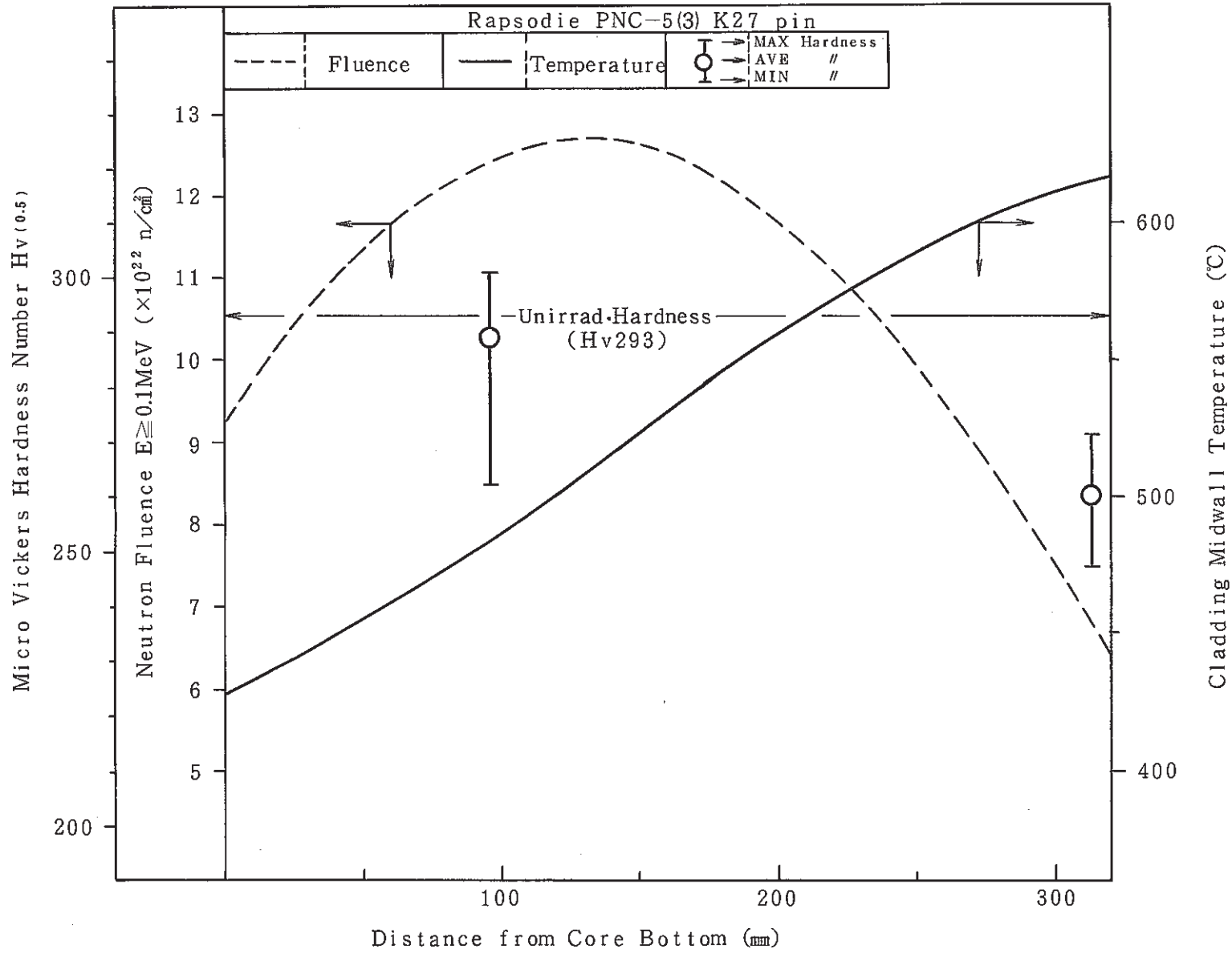


Fig. 12 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(3) fuel pin (No. K27 Pin)

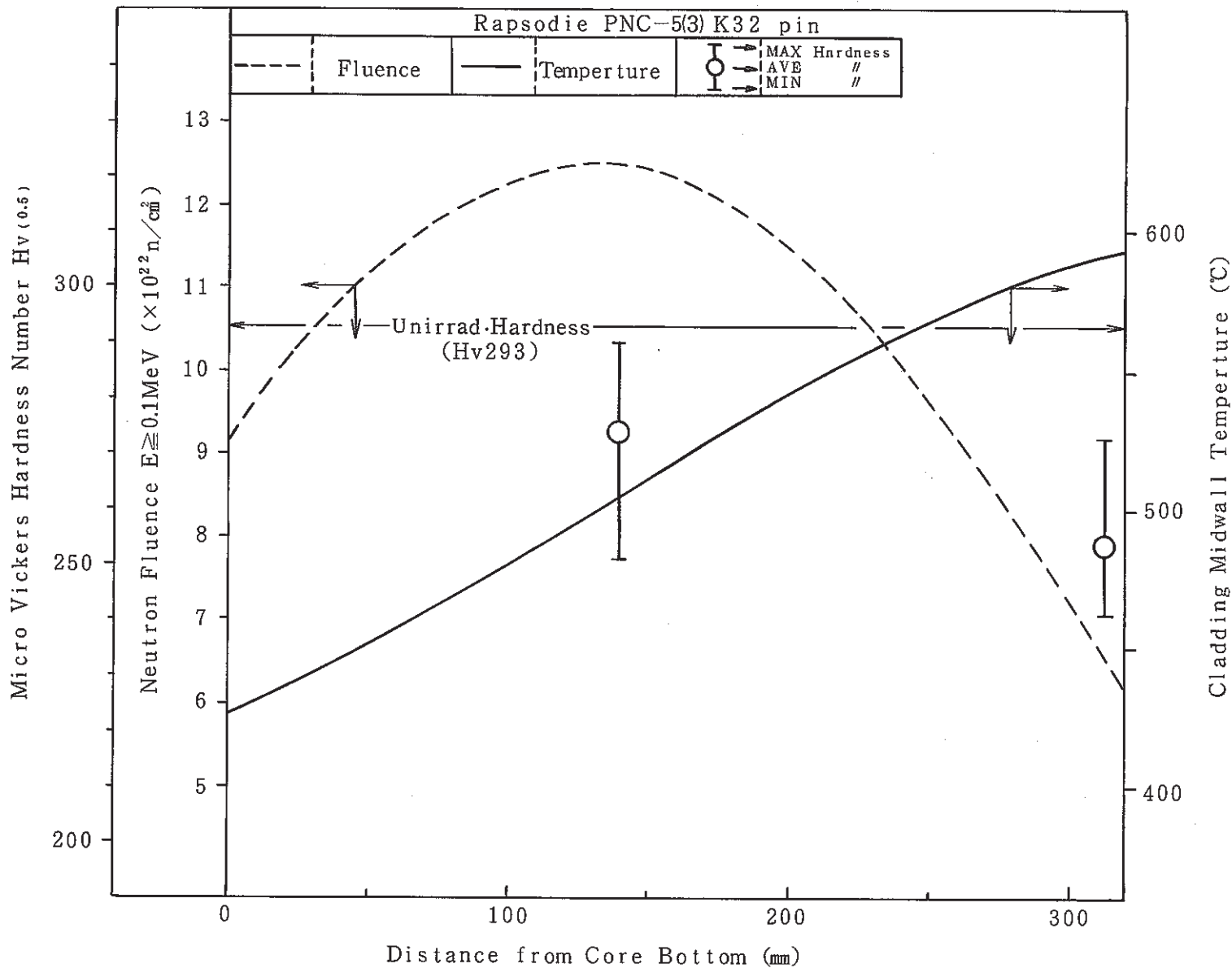


Fig. 13 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(3) fuel pin (No. K32 Pin)

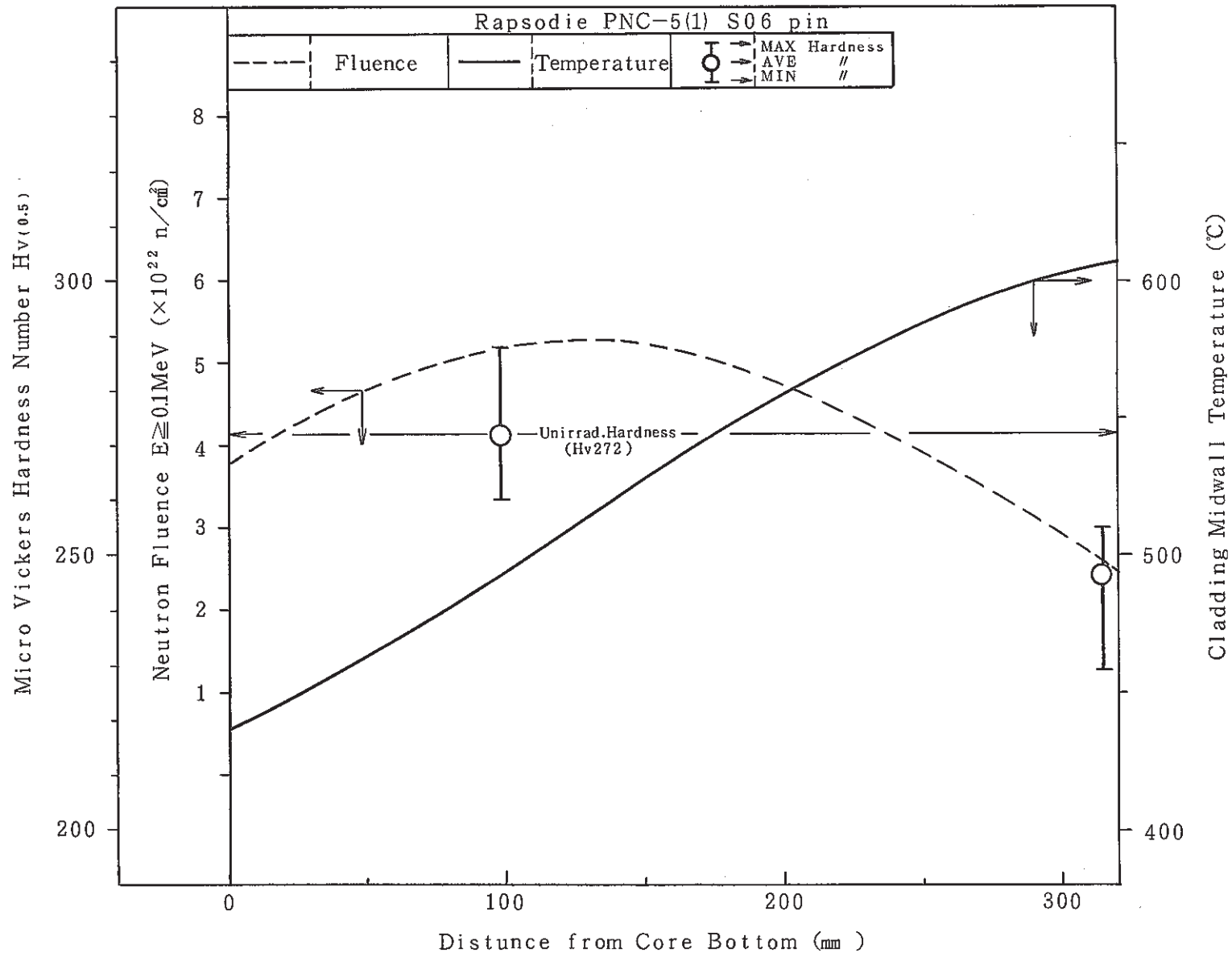


Fig. 14 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(1) fuel pin (No. S06 Pin)

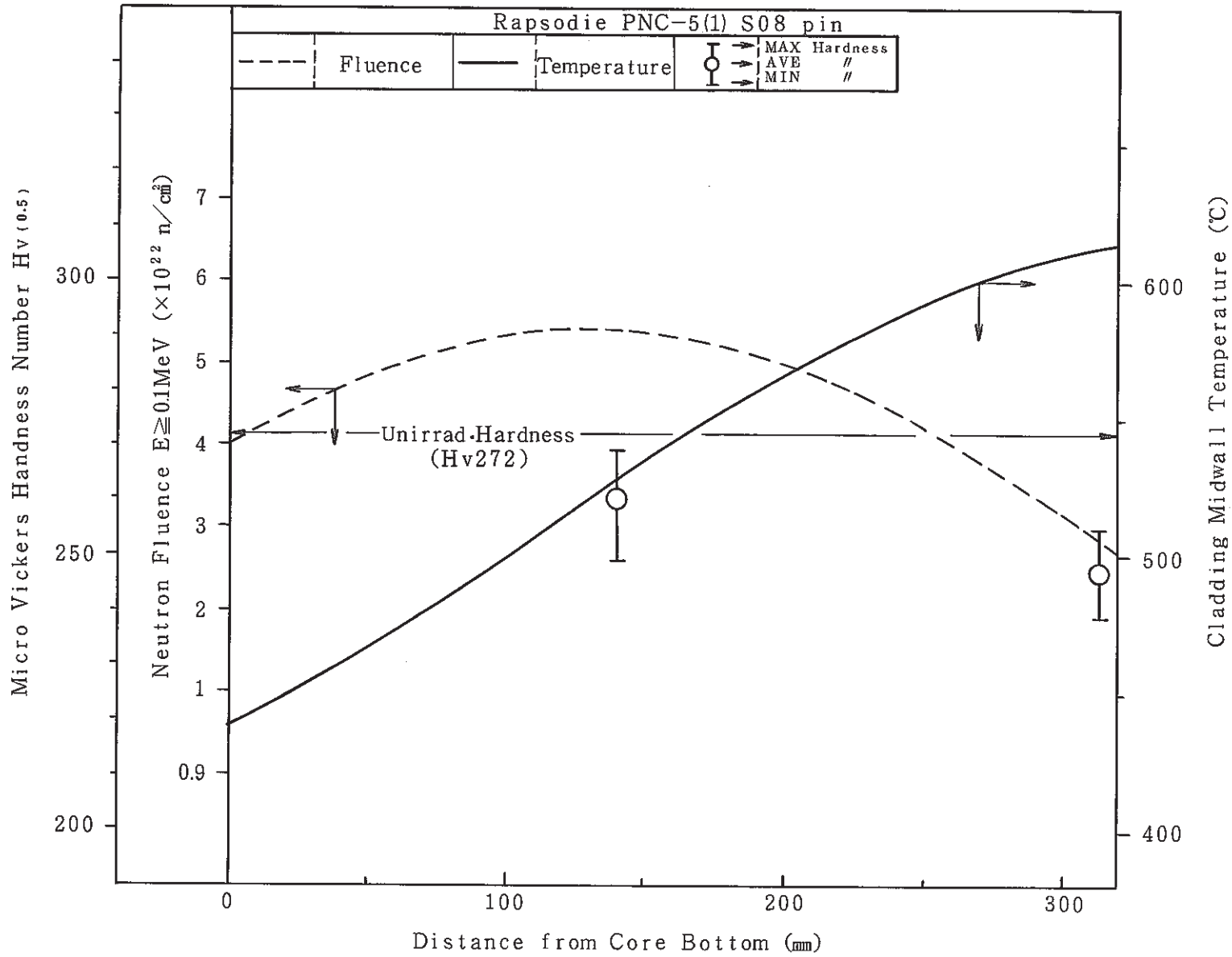


Fig. 15 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(1) fuel pin (No. S08 Pin)



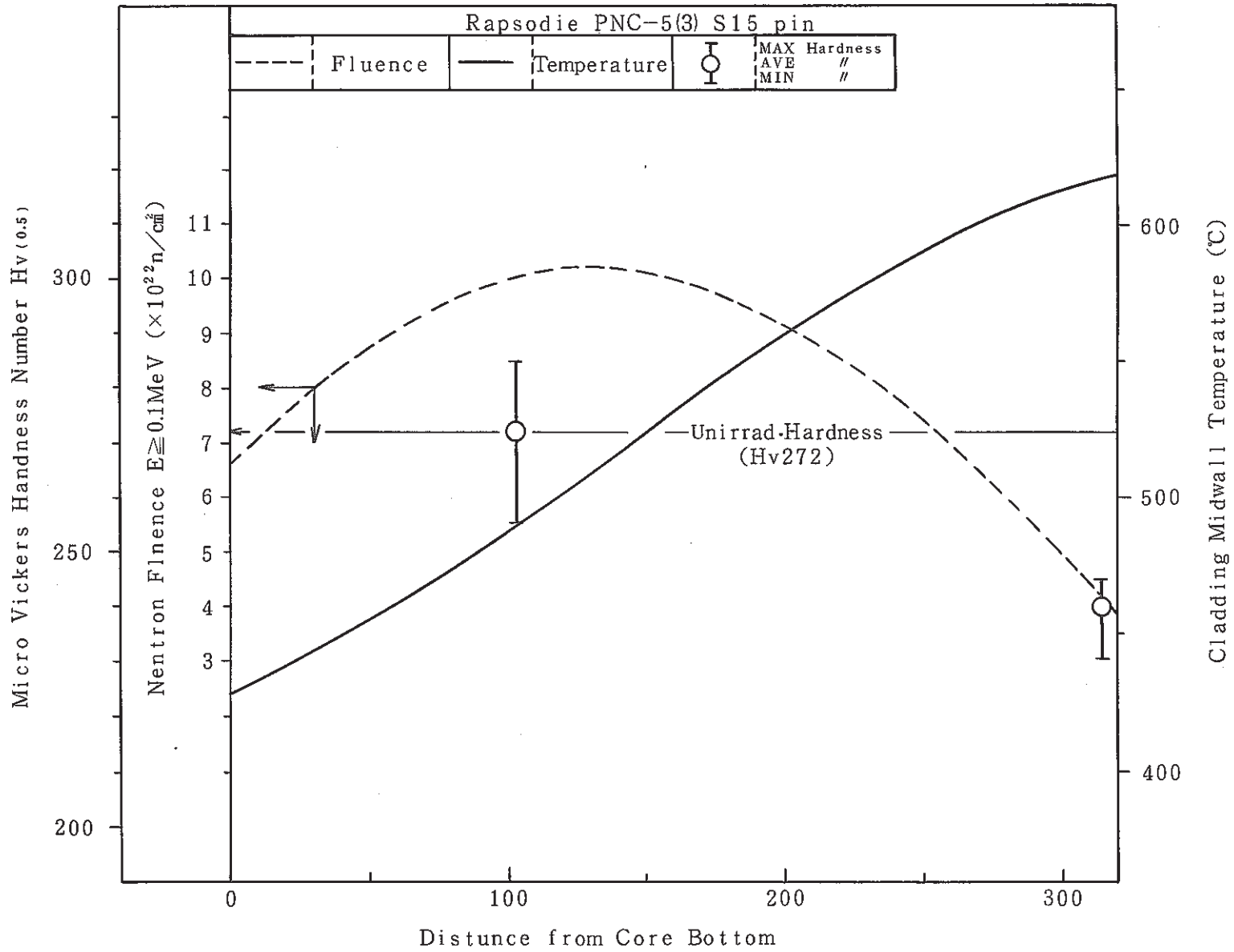


Fig. 16 Relation between hardness, clad. temperature and fluence at various positions for Rapsodie PNC-5(3) fuel pin (No. S15 Pin)

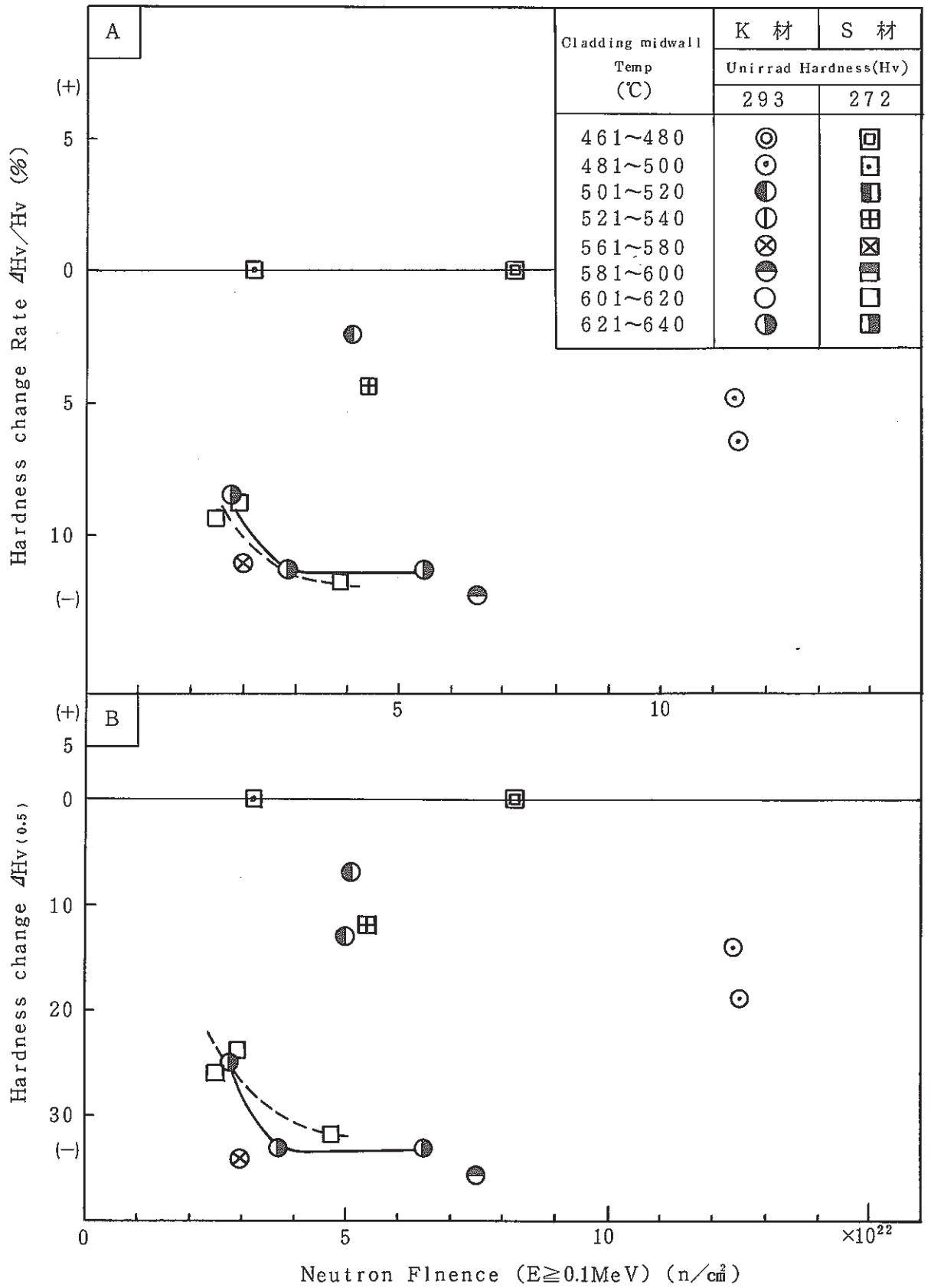


Fig. 17 Relation between hardness and fluence for Rapsodie PNC-5(1)(3) fuel Pin

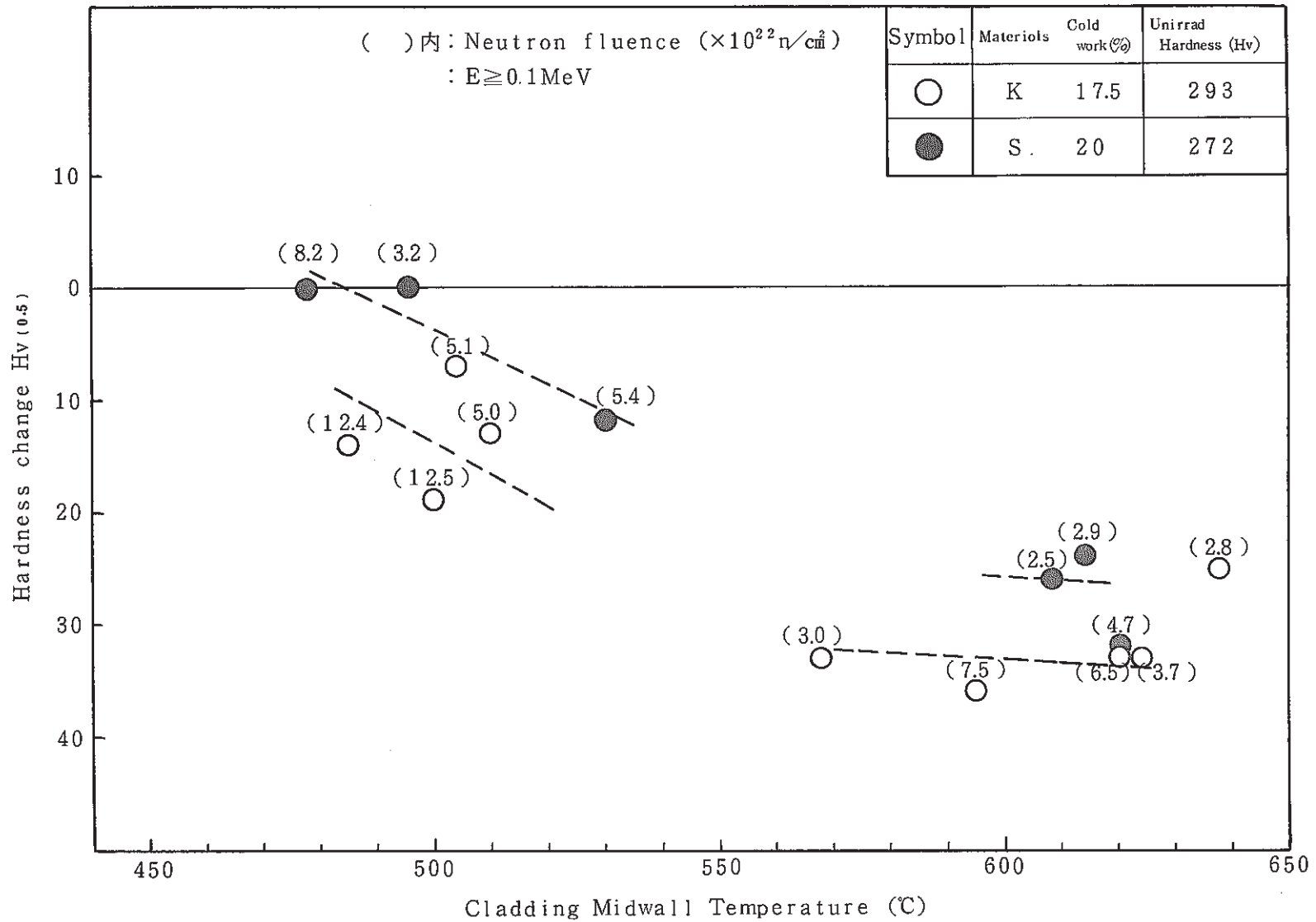


Fig. 18 Relation between hardness and Temperature for Rapsodie PNC-5(1) (3)

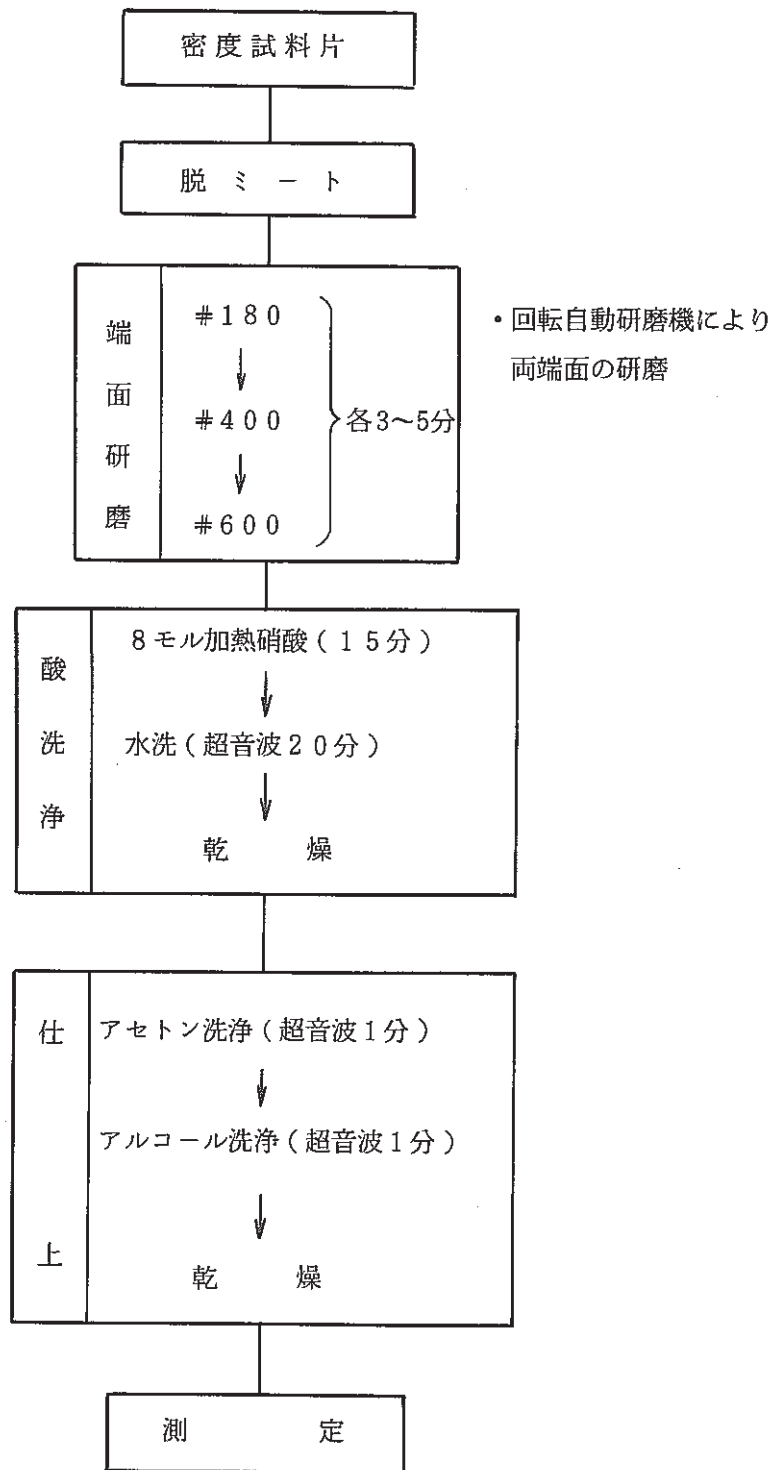


Fig. 19 Flow diagram of density measurement in AGS

Pin No	04K	06S	08S	15S	27K	32K
PIE No	XC04	XC06	XC08	XC15	XC27	XC32
Clad Maker	K	S	S	S	K	K

S : 住友 K : 神戸

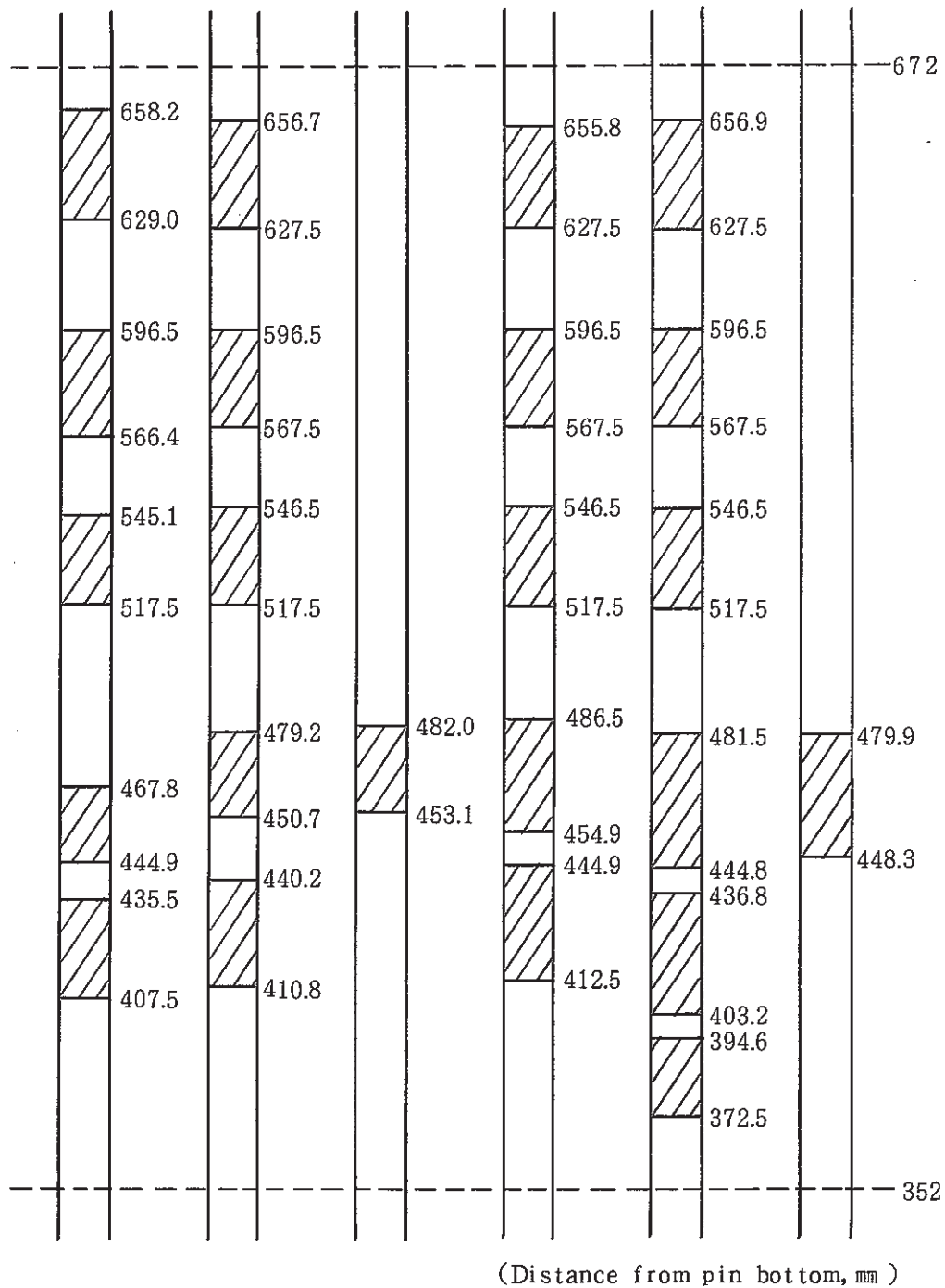


Fig. 20 Pin cutting diagram for density measurement of Rapsodie PNC-5

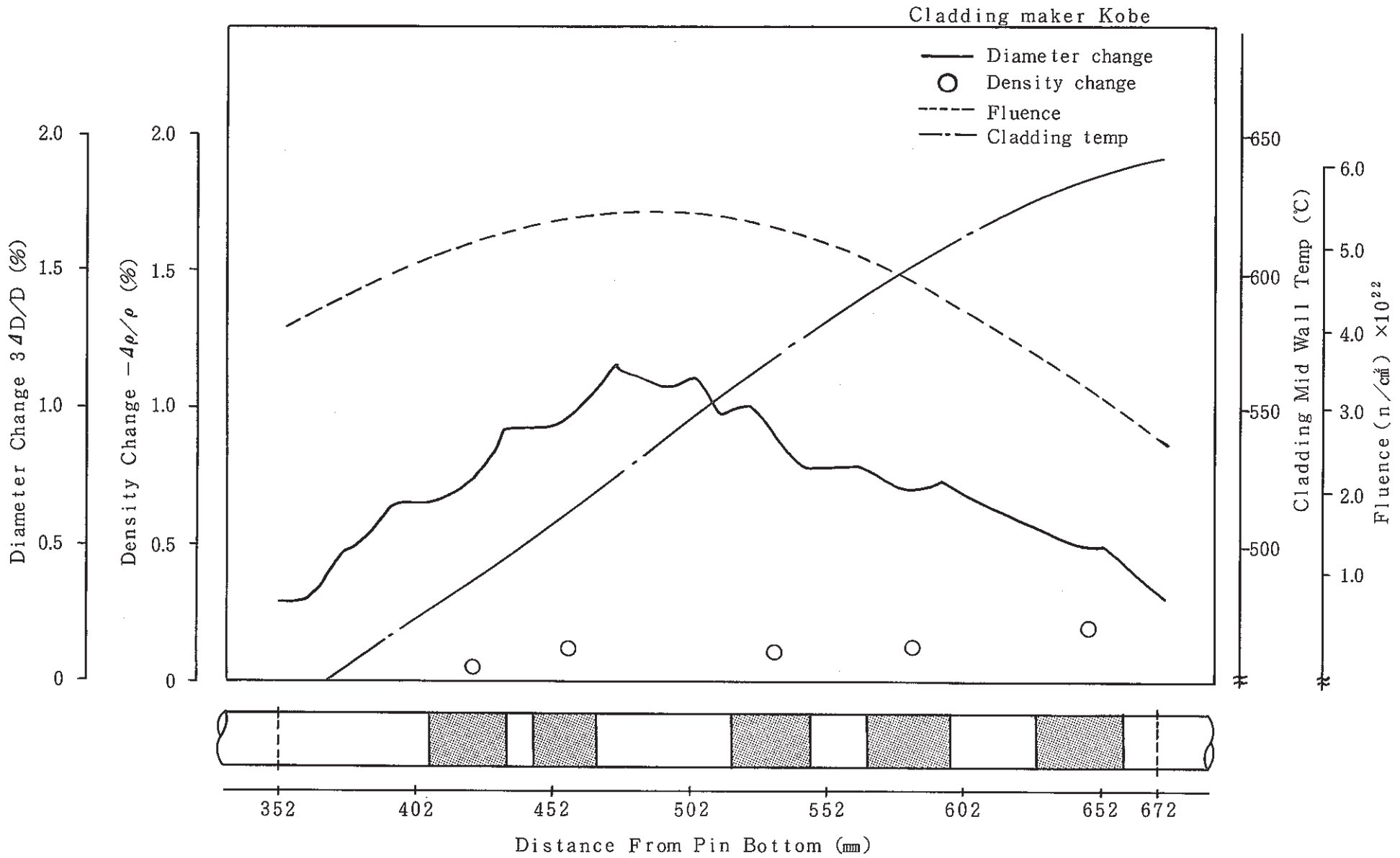


Fig. 21 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 04 pin

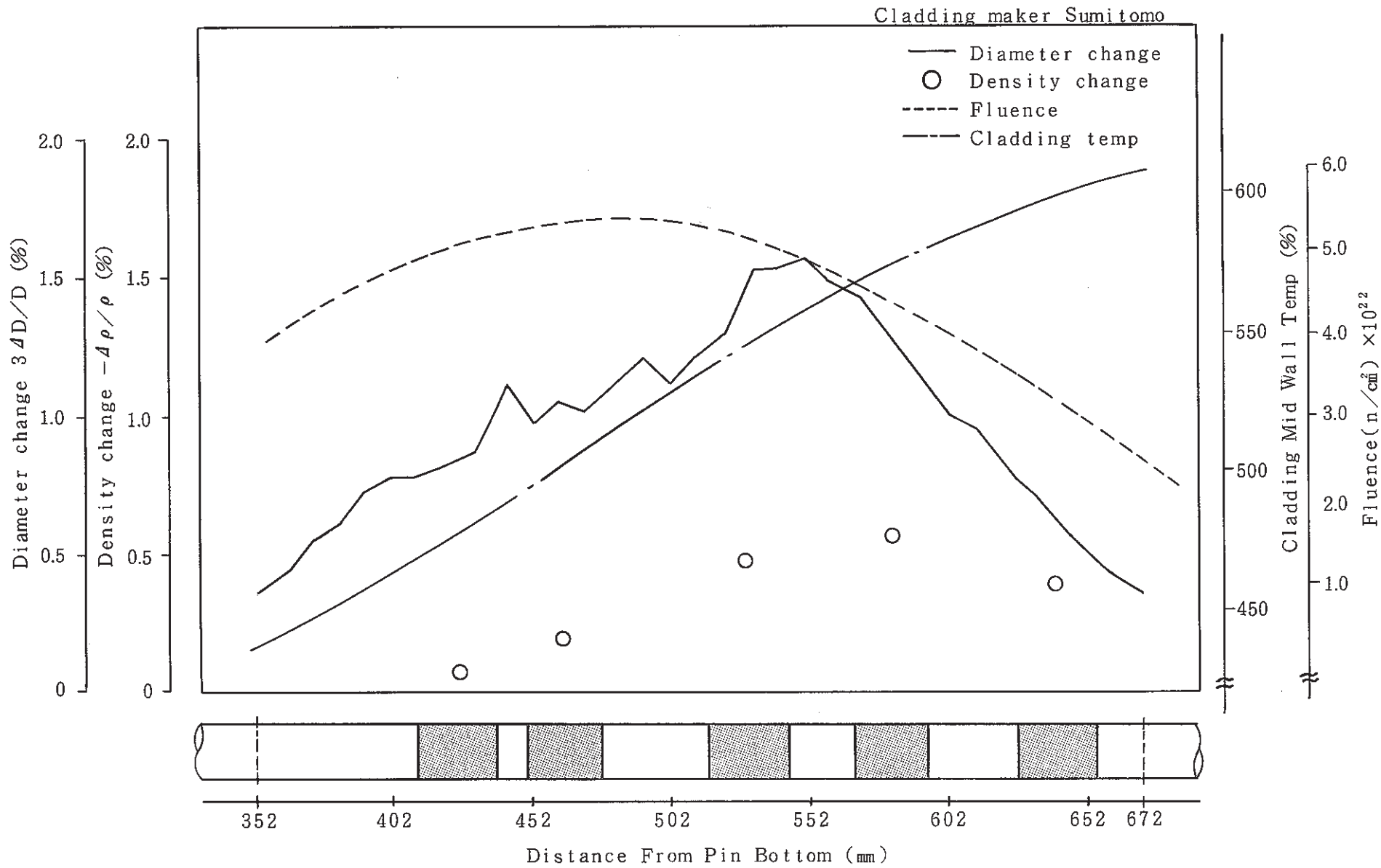


Fig. 22 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 06 pin

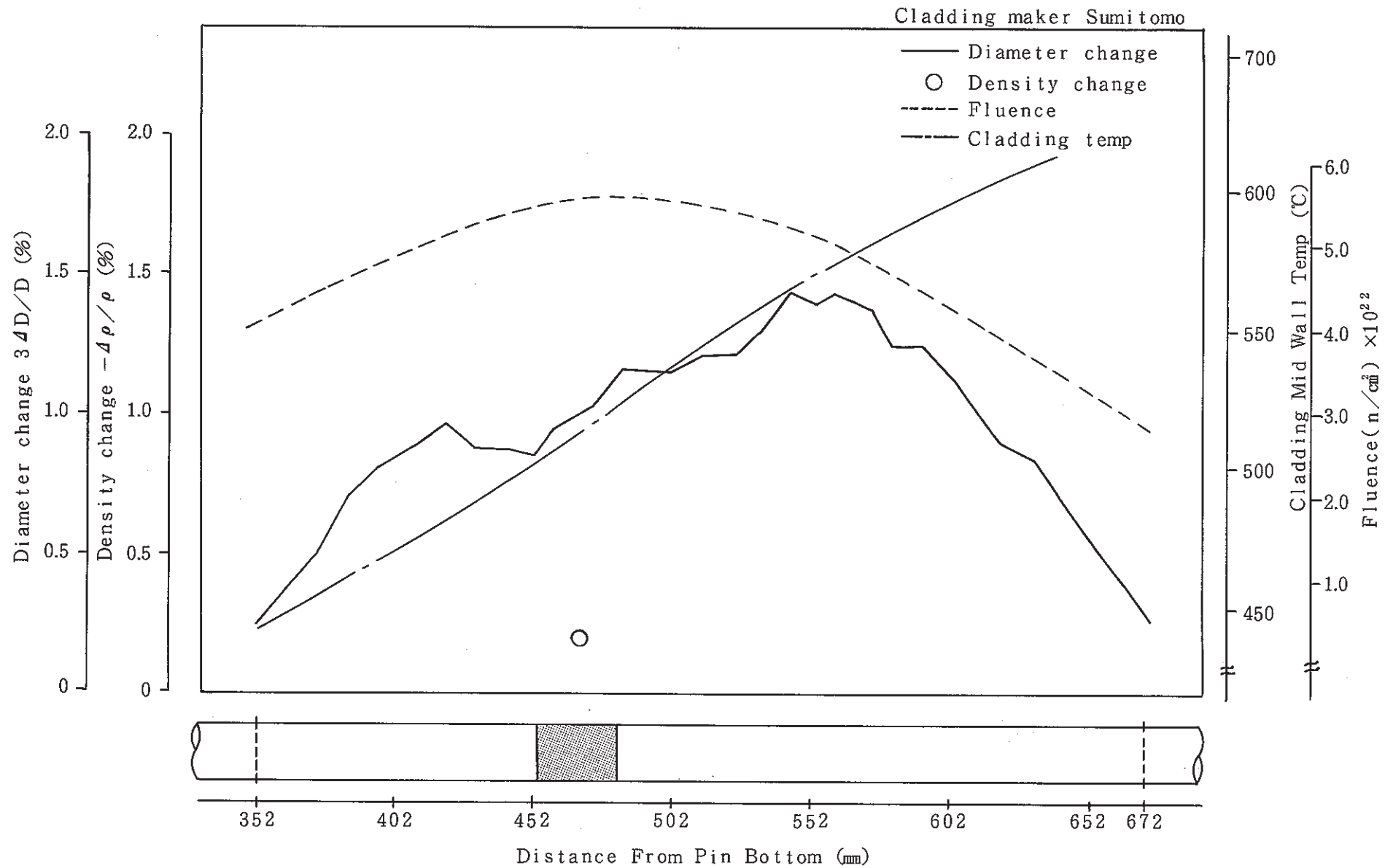


Fig. 23 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 08 pin



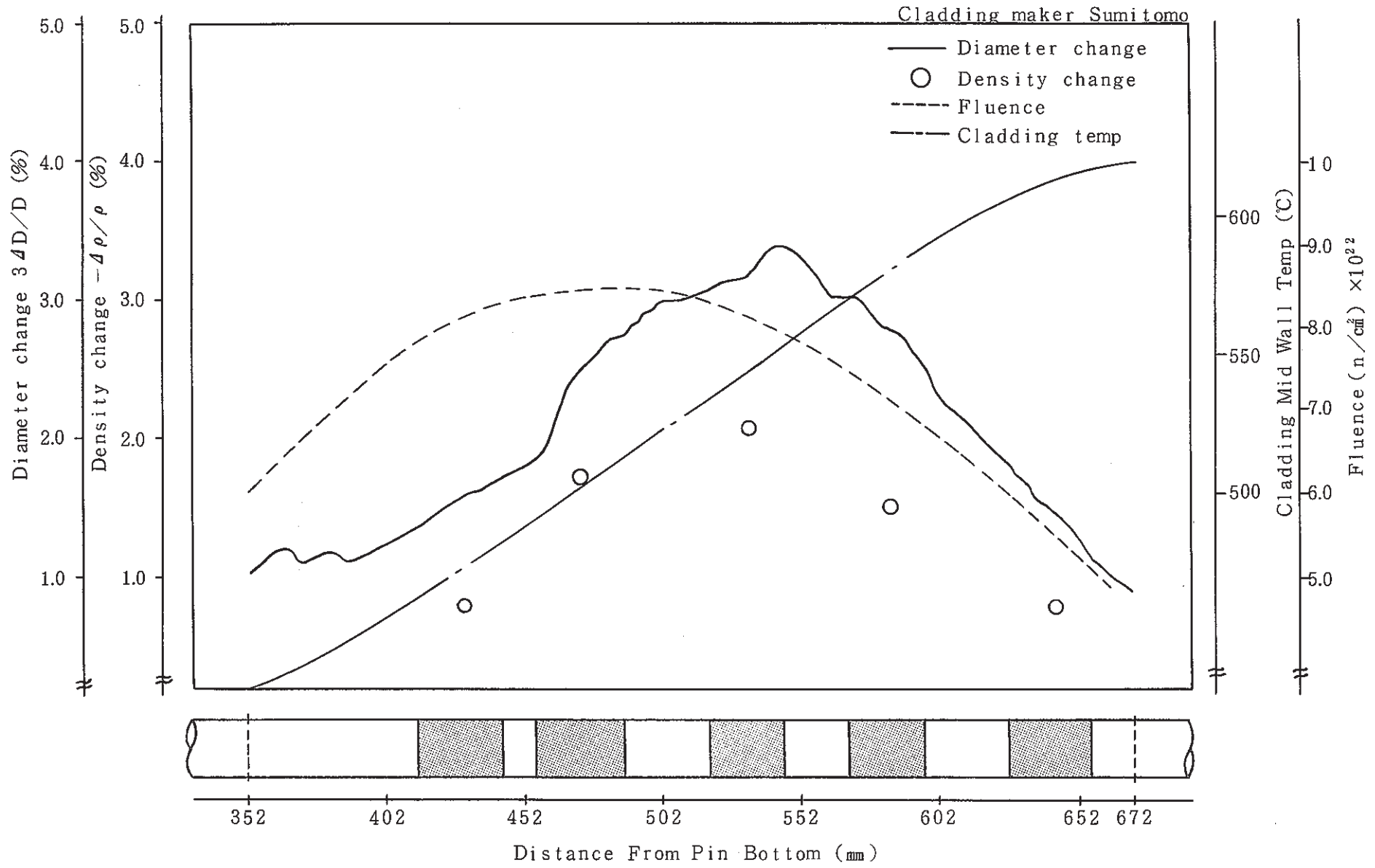


Fig. 24 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 15 pin

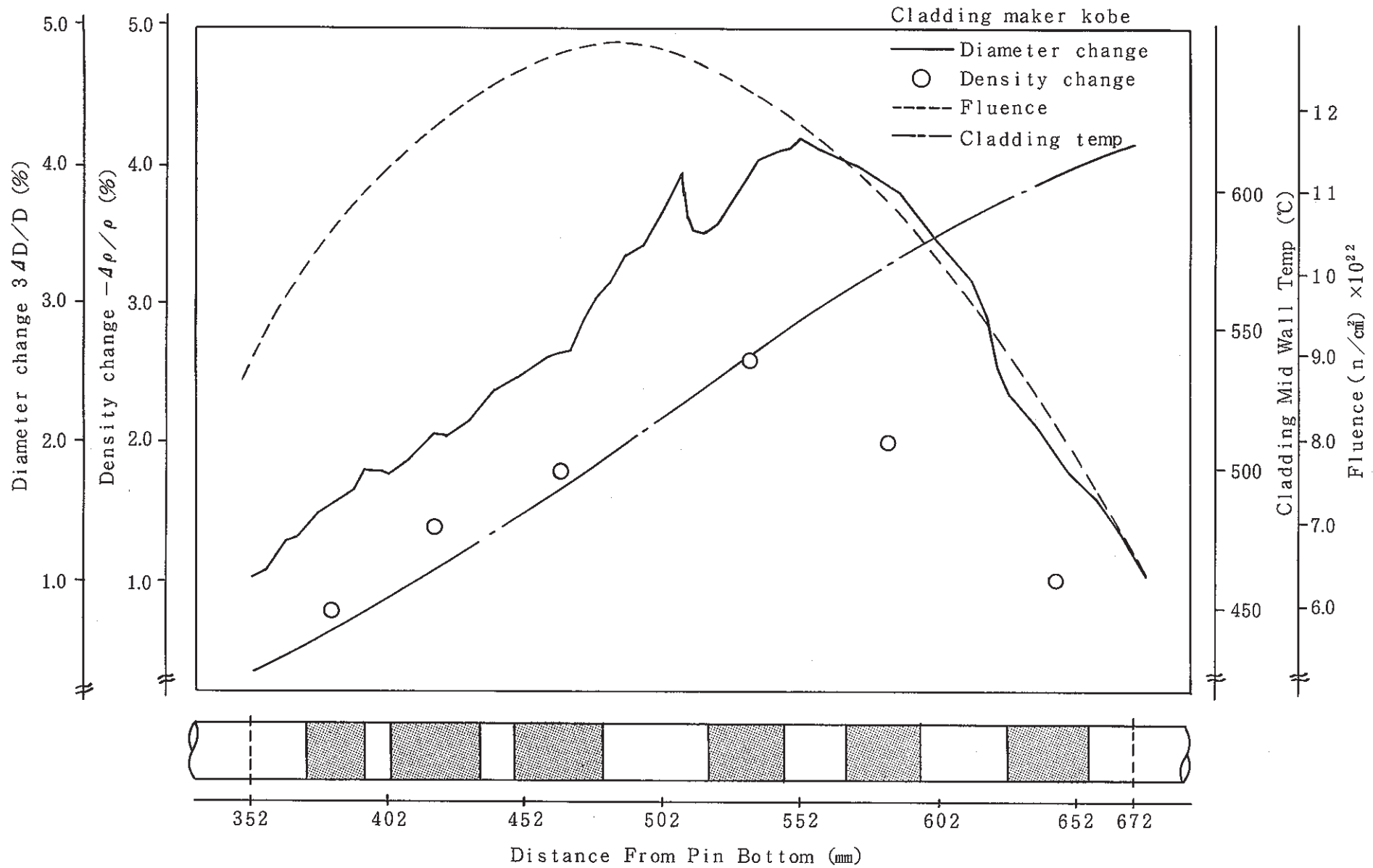


Fig. 25 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 27 pin

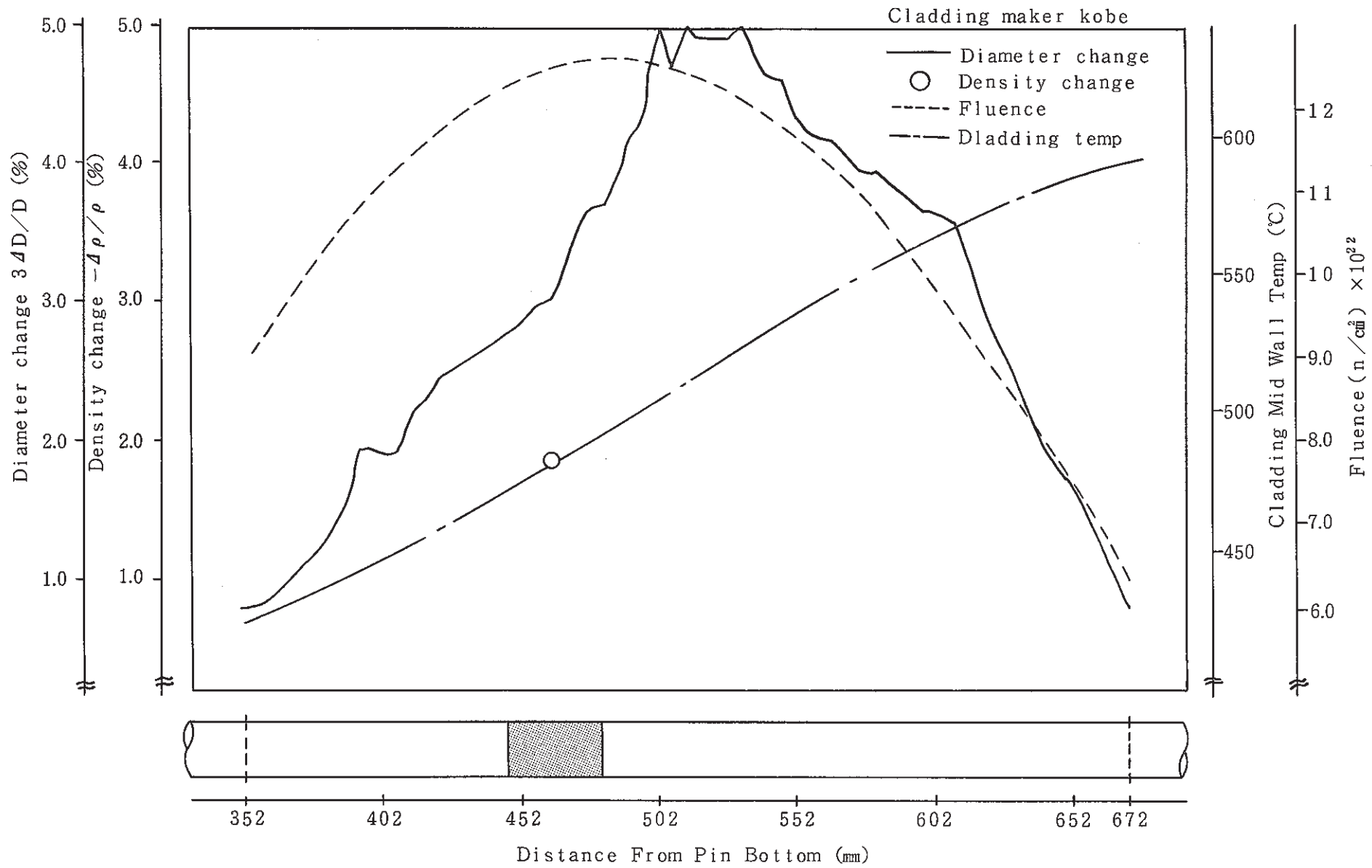


Fig. 26 Cladding density distribution of Rapsodie PNC-5 32 pin

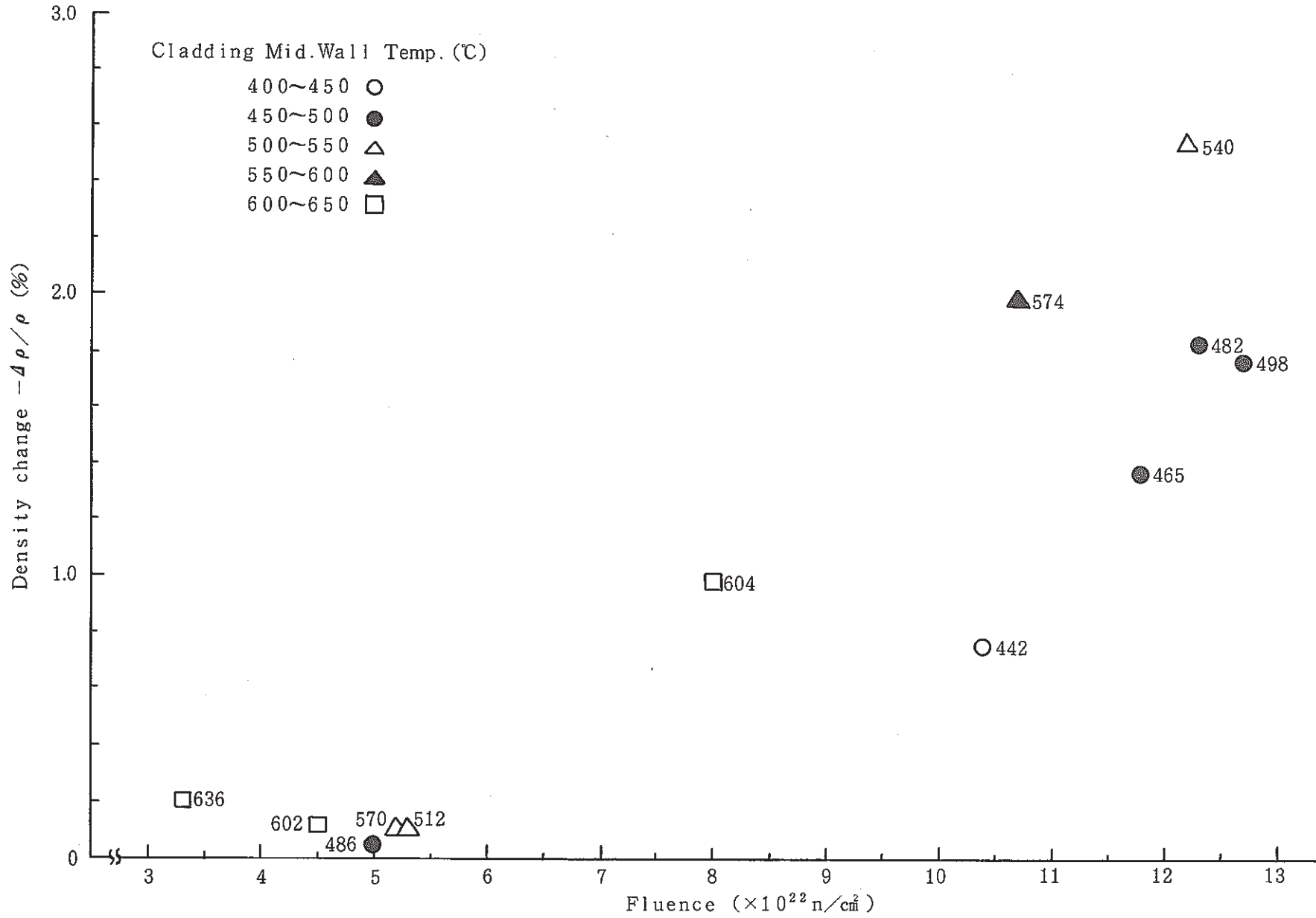


Fig. 2.7 Density change of irradiated cladding (K) as the function of fluence

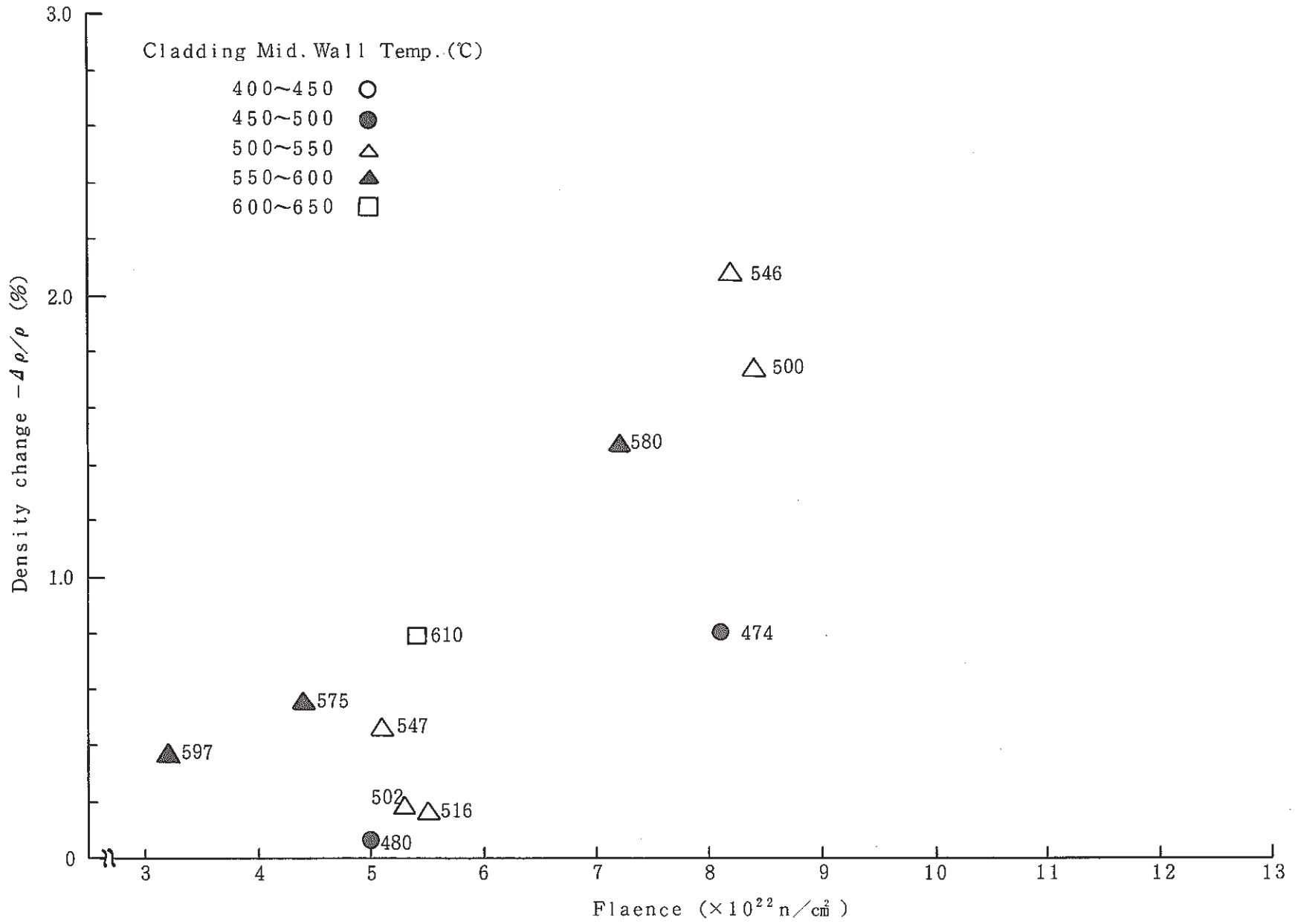


Fig. 28 Density change of irradiated cladding(S) as the function of fluence



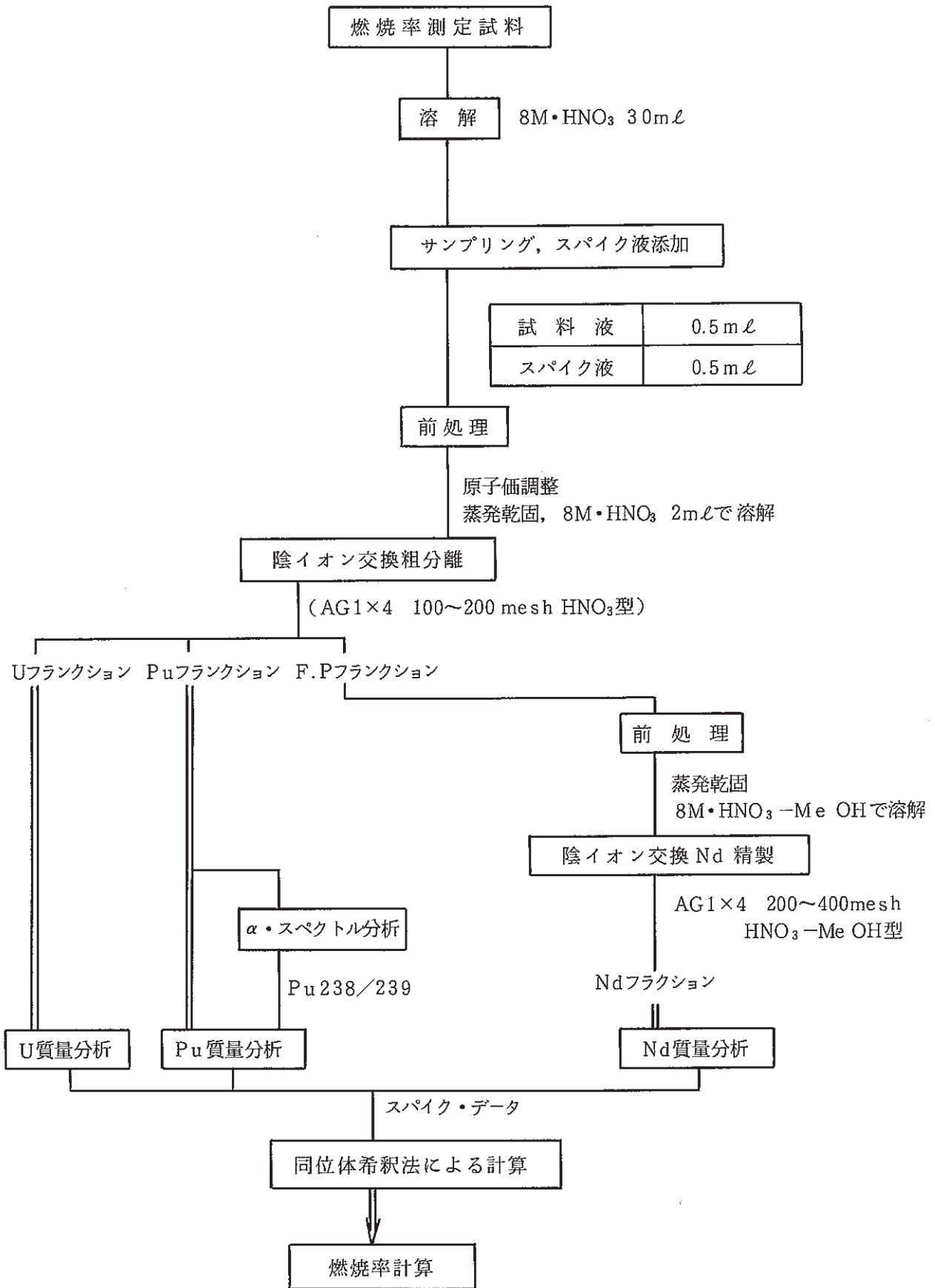


Fig. 30 Sample treatment procedure for burnup measurement in AGS

S/A No.	RAPSODIE PNC-5
Pin No.	4K
S/A Peak Burn up	57600MWD/MTM

As polished

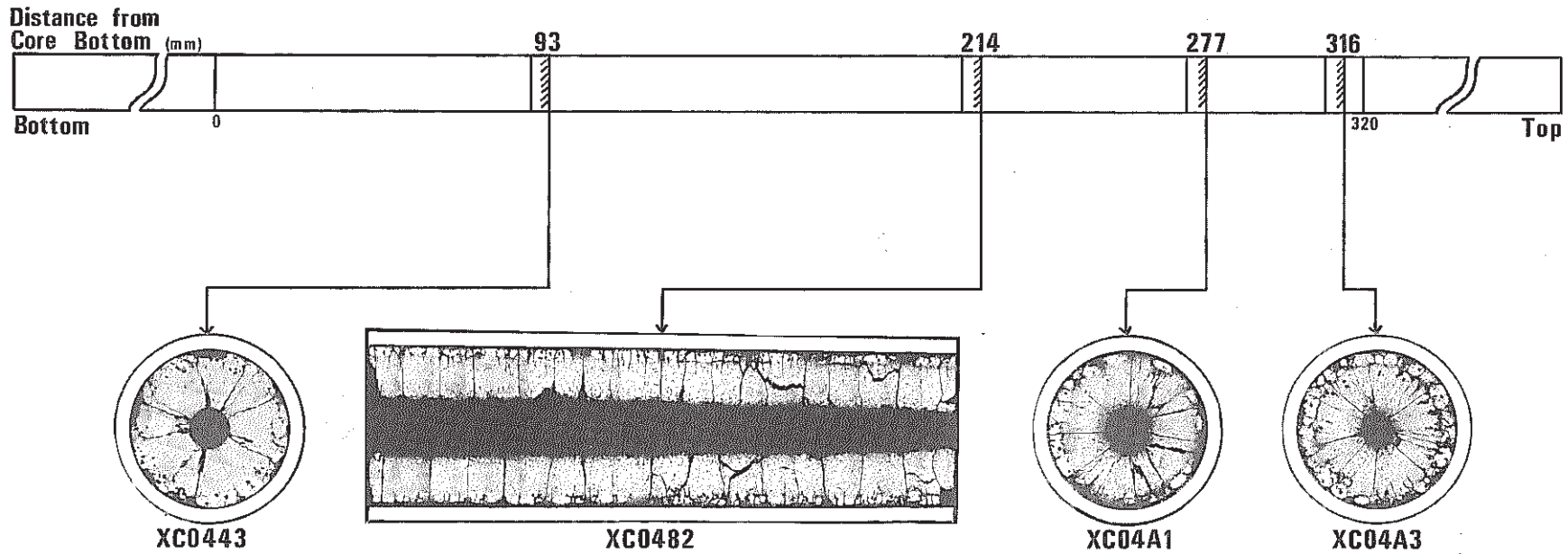


Photo 1 Macrography of Rapsodie core fuel (4K pin)



S/A No.	RAPSODIE PNC-5
Pin No.	6S
S/A Peak Burn up	57100MWD/MTM

As polished

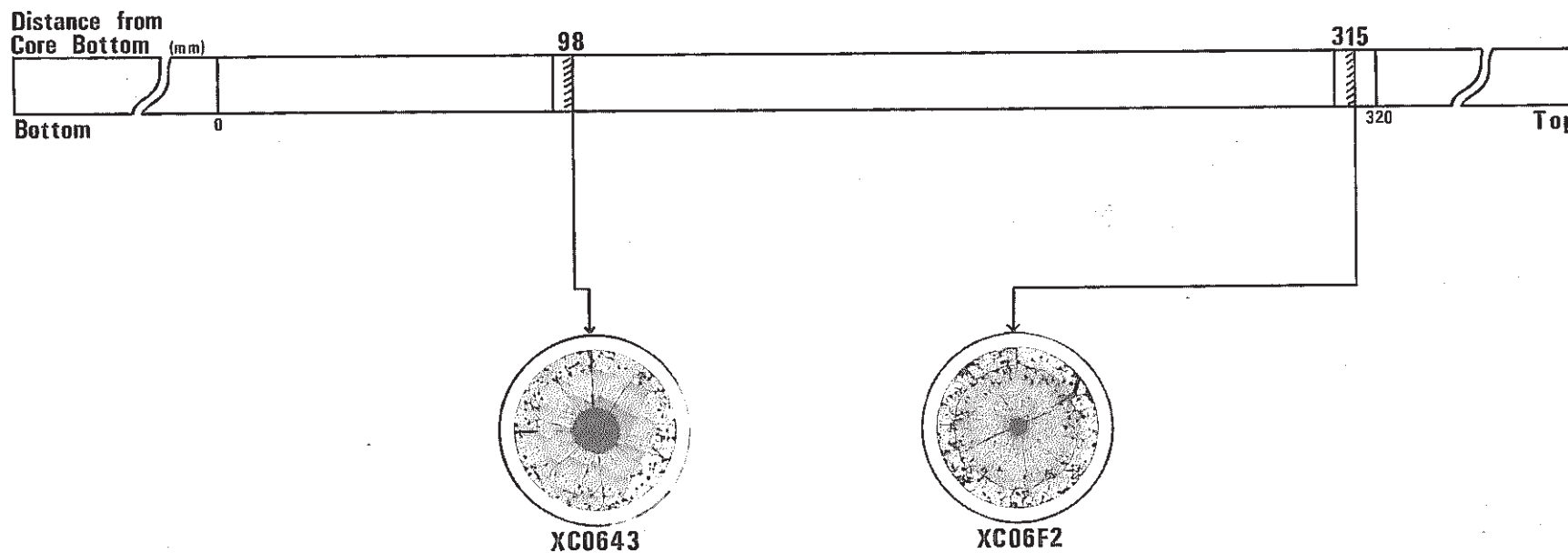
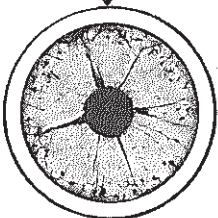
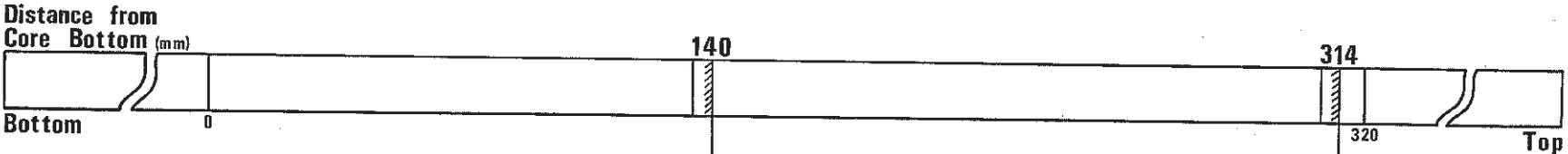


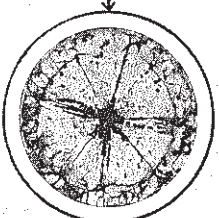
Photo 2 Macrography of Rapsodie core fuel (6S pin)

S/A No.	<b>RAPSODIE PNC-5</b>
Pin No.	<b>8S</b>
S/A Peak Burn up	<b>58100MWD/MTM</b>

As polished



**XC0854**



**XC0871**

Photo 3 Macrography of Rapsodie core fuel (8S pin)

S/A No.	RAPSODIE PNC-5
Pin No.	K22
S/A Peak Burn up	59000MWD/MTM

As polished

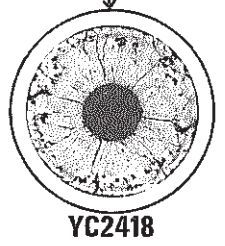
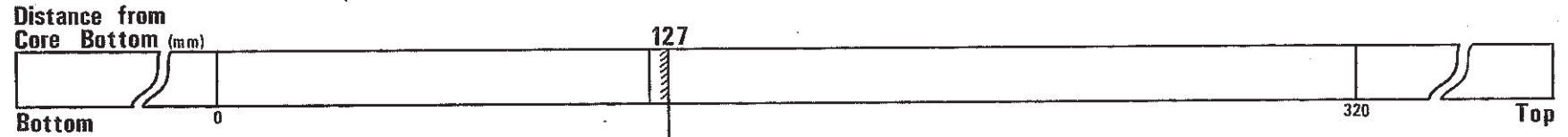
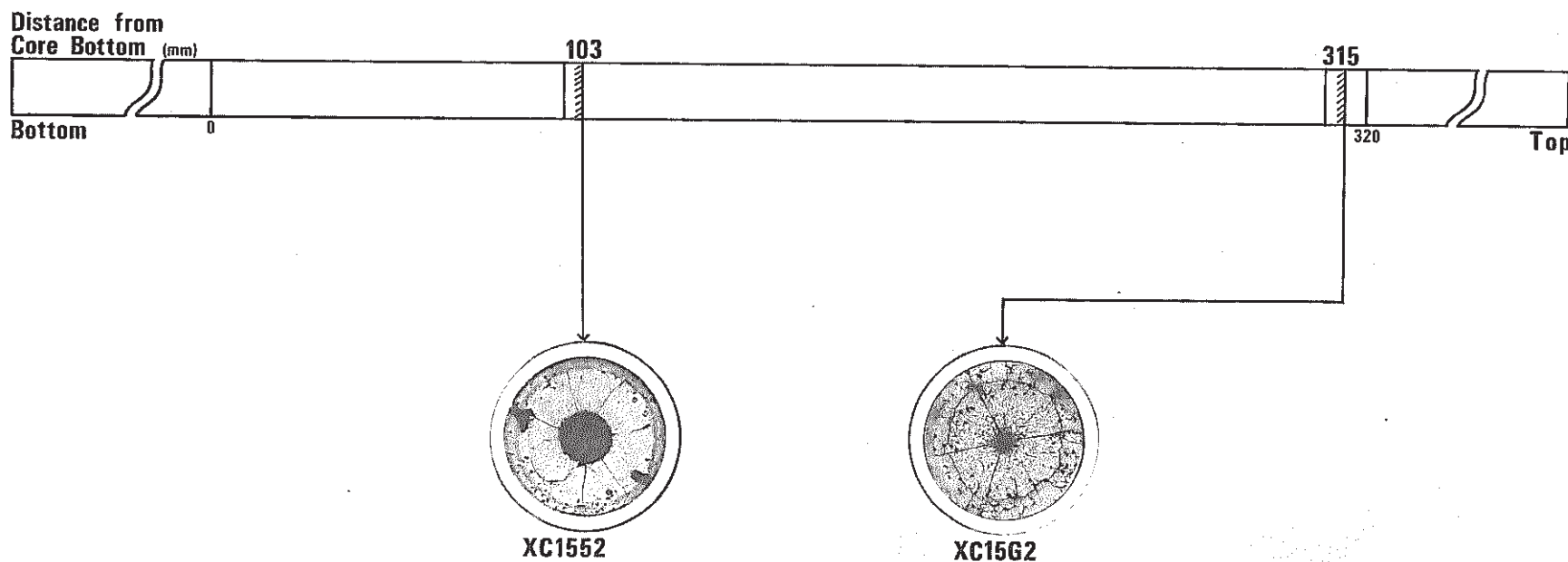


Photo 4 Macrography of Rapsodie core fuel (K22 pin)

S/A No.	<b>RAPSODIE PNC-5</b>
Pin No.	<b>15S</b>
S/A Peak Burn up	<b>87000MWD/MTM</b>

As polished



- 72 -

Photo 5 Macrography of Rapsodie core fuel (15S pin)

S/A No.	<b>RAPSODIE PNC-5</b>
Pin No.	<b>27K</b>
S/A Peak Burn up	<b>124800MWD/MTM</b>

As polished

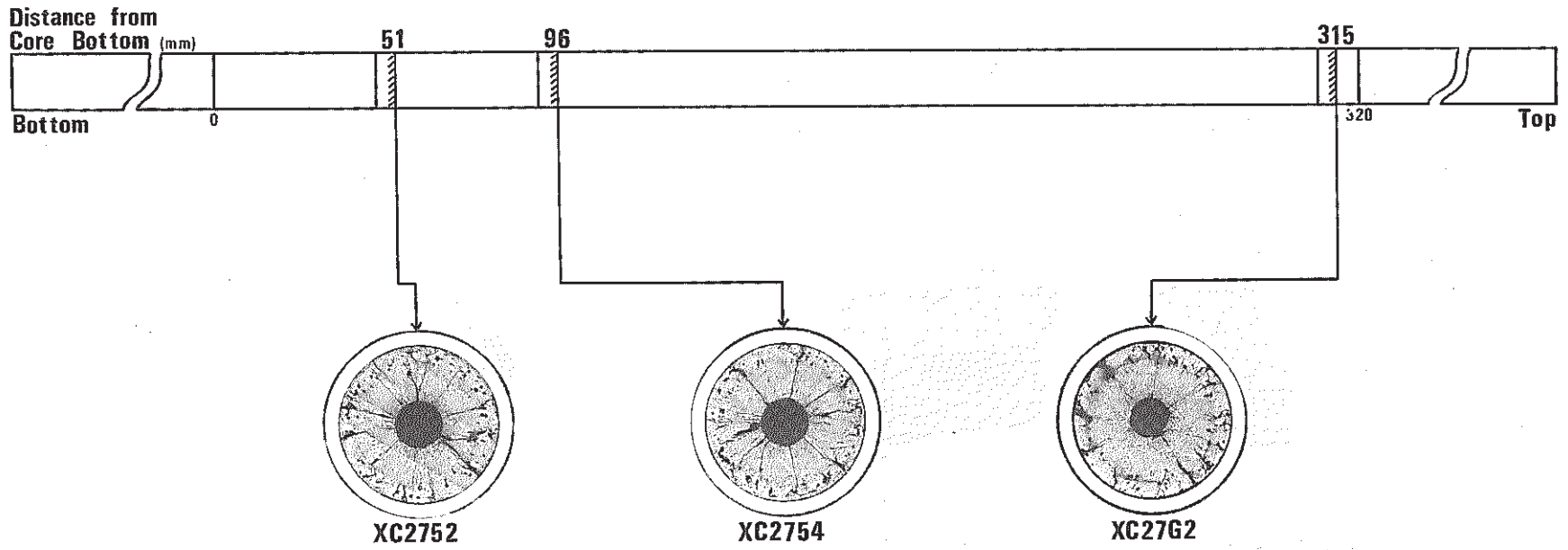


Photo 6 Macrography of Rapsodie core fuel (27K pin)

S/A No.	RAPSODIE PNC-5
Pin No.	32K
S/A Peak Burn up	124400MWD/MTM

As polished

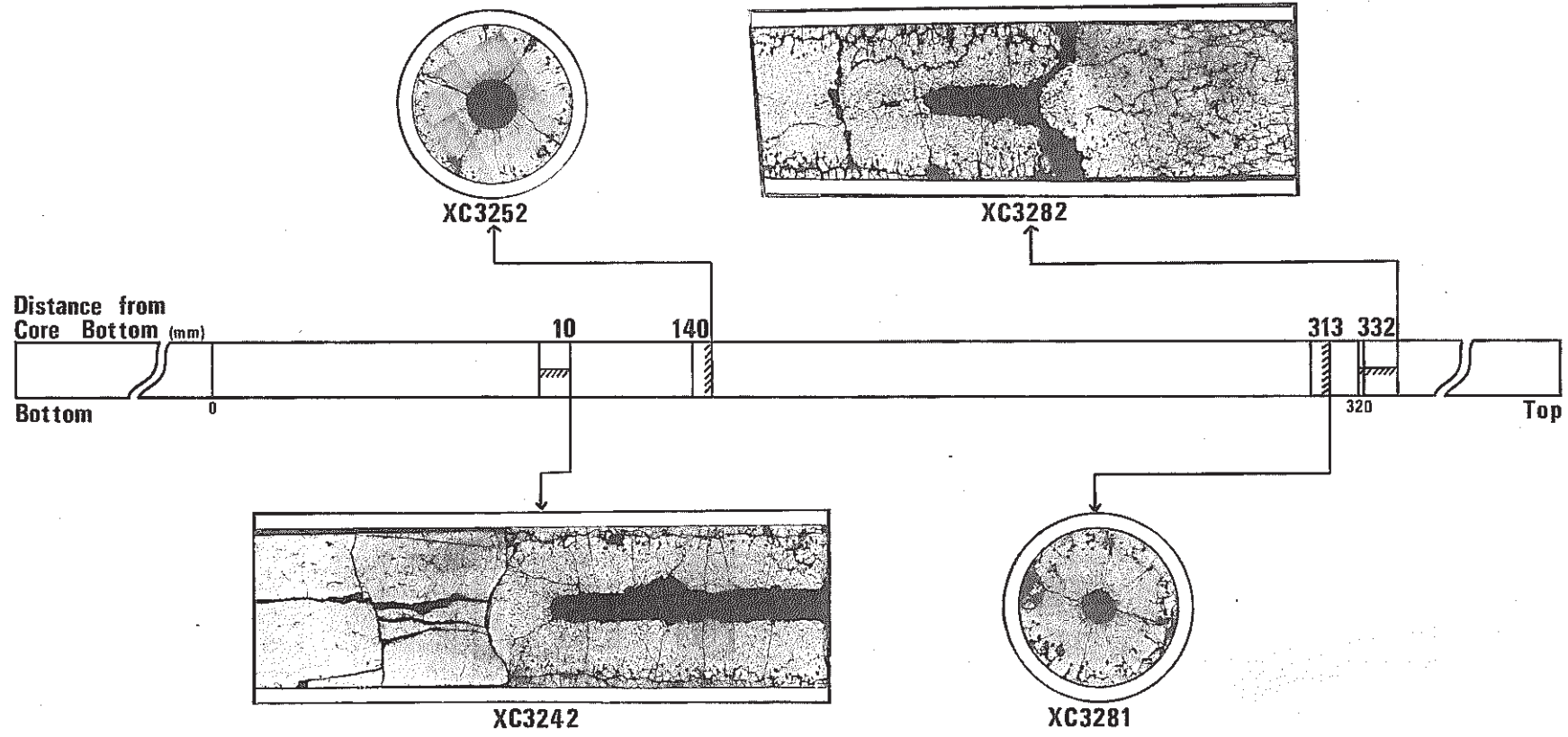


Photo 7 Macrography of Rapsodie core fuel (32K pin)

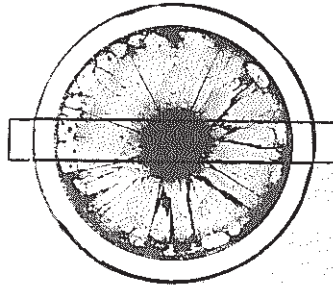
S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>4K</b>	
Section No.	<b>XC04A1</b>	
Distance from bottom of pin		<b>629mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>277mm</b>

As polished

1mm



Photo 8 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel  
(Sample XC04A1)



S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>4K</b>	
Section No.	<b>XC04A1</b>	
Distance from bottom of pin		<b>629mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>277mm</b>

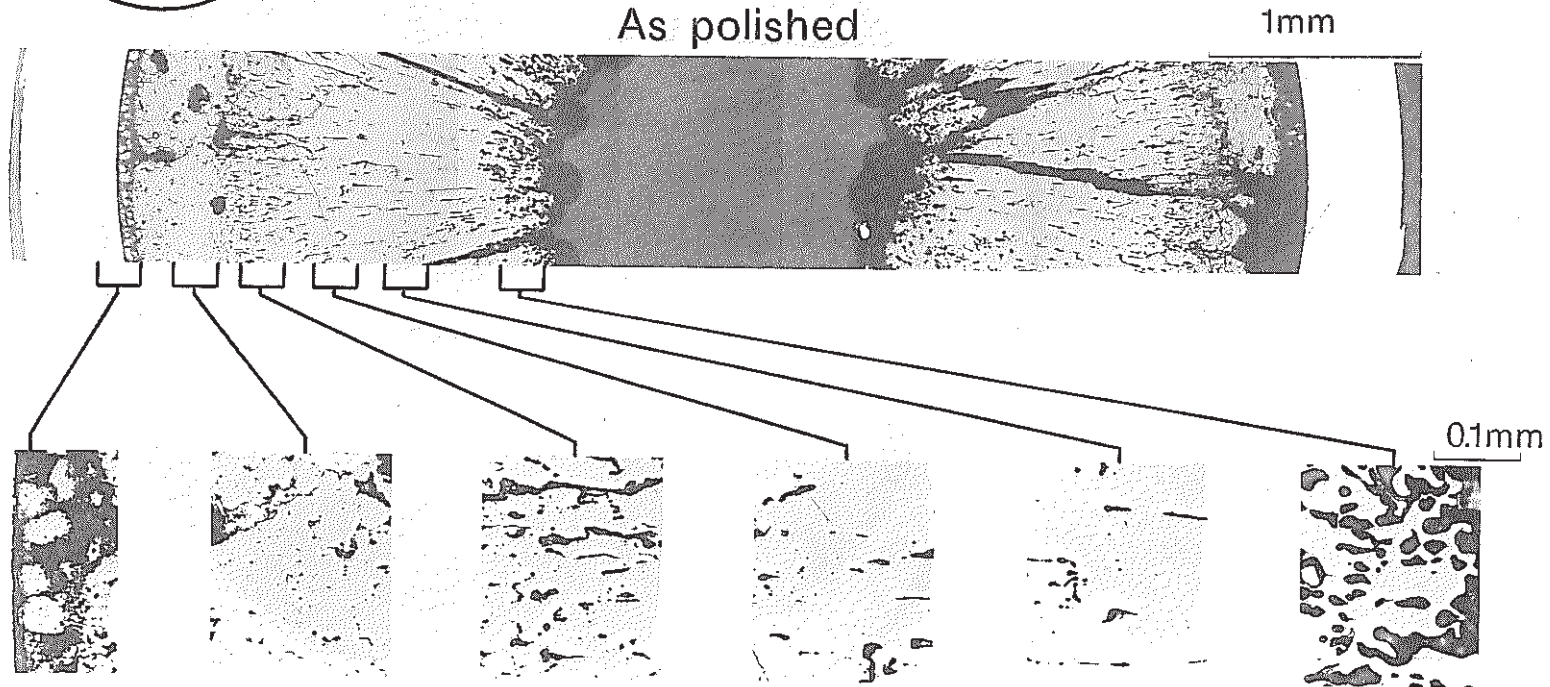


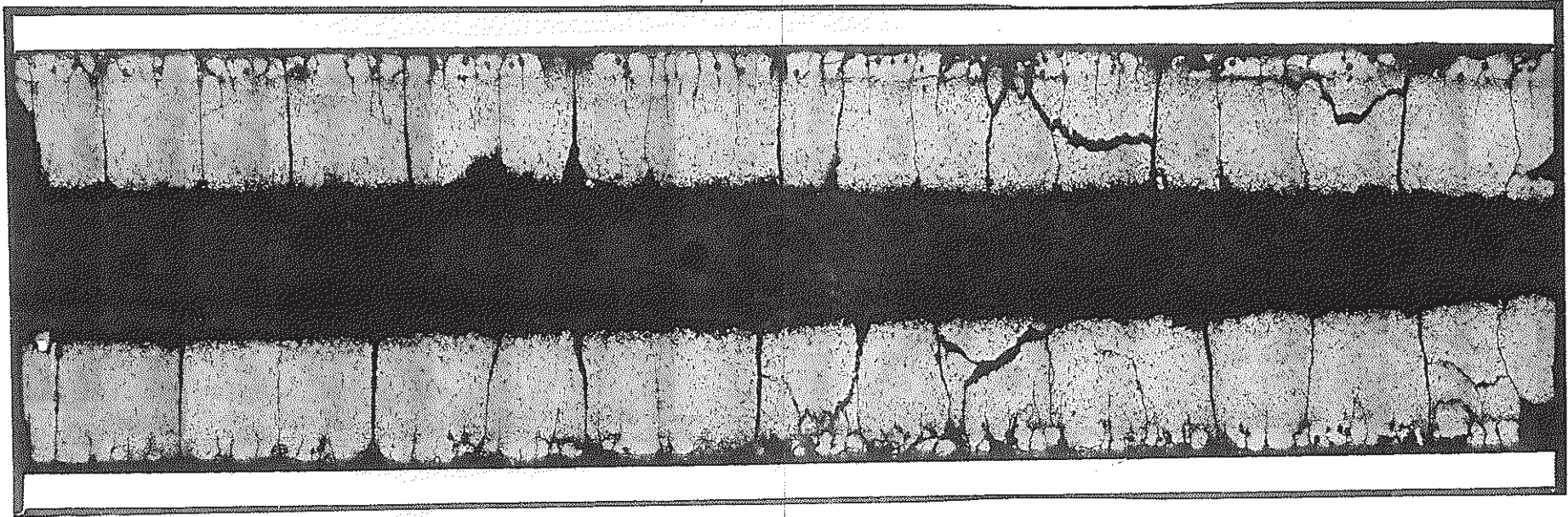
Photo 9 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC04A1)



S/A Name	RAPSODIE PNC-5	
Pin No.	4K	
Section No.	XC0482	
Distance from bottom of pin		566mm
Distance from bottom of core column		214mm

As polished

1mm



- 77 -

Photo 10 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC0482)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>6S</b>	
Section No.	<b>XC0643</b>	
Distance from bottom of pin		<b>450mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>98mm</b>

As polished

1mm

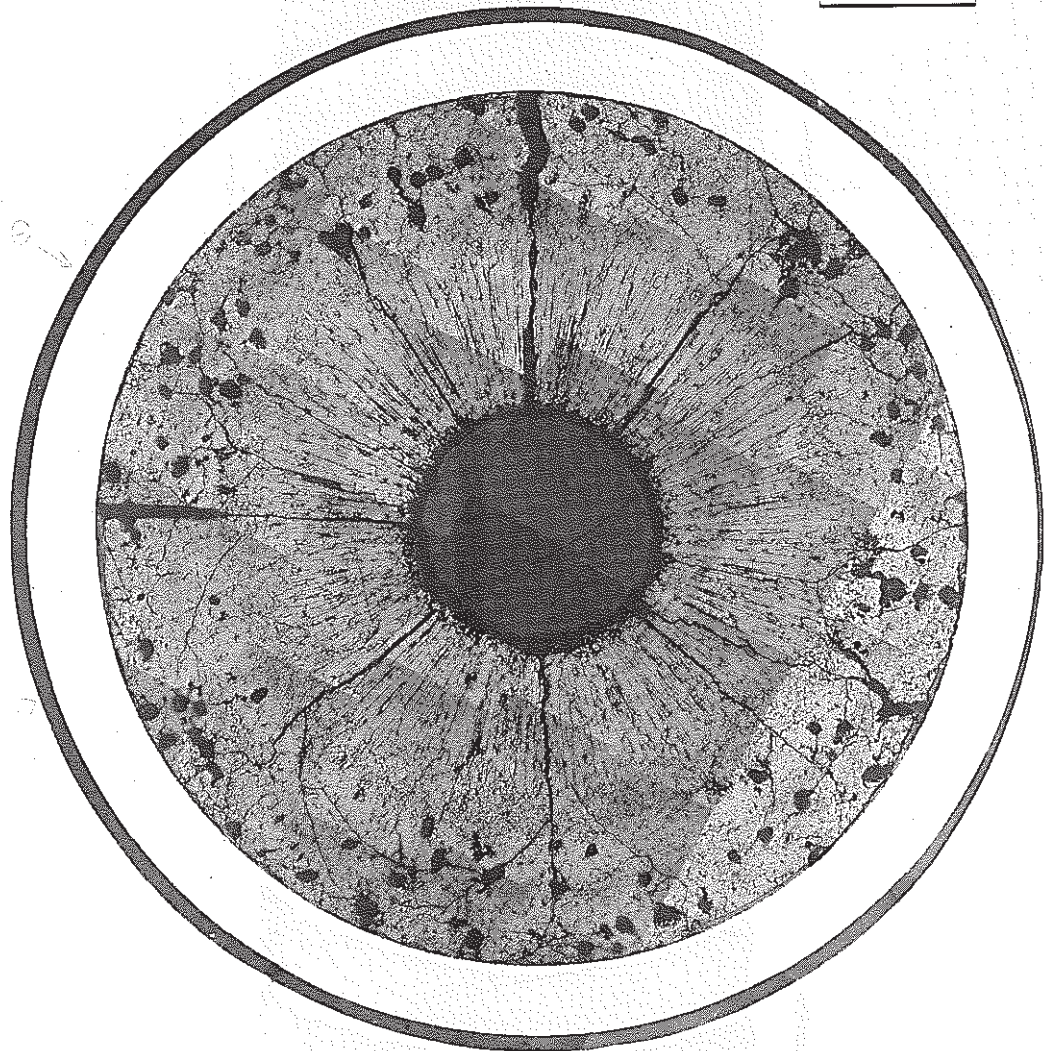


Photo 11 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel  
(Sample XC0643)

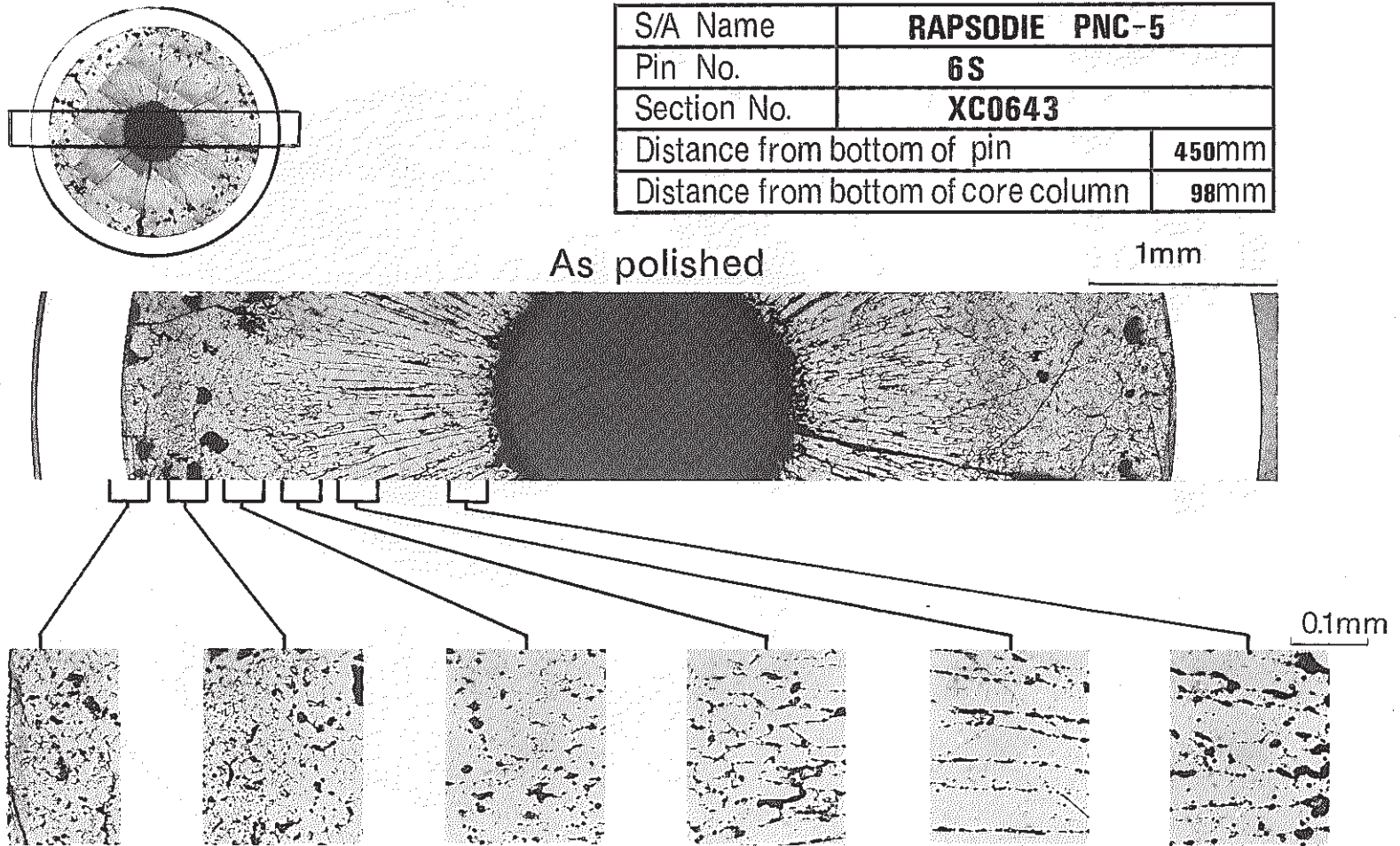


Photo 12 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC0643)

S/A Name	RAPSODIE PNC-5	
Pin No.	K22	
Section No.	YC2418	
Distance from bottom of pin		479mm
Distance from bottom of core column		127mm

As polished

1mm

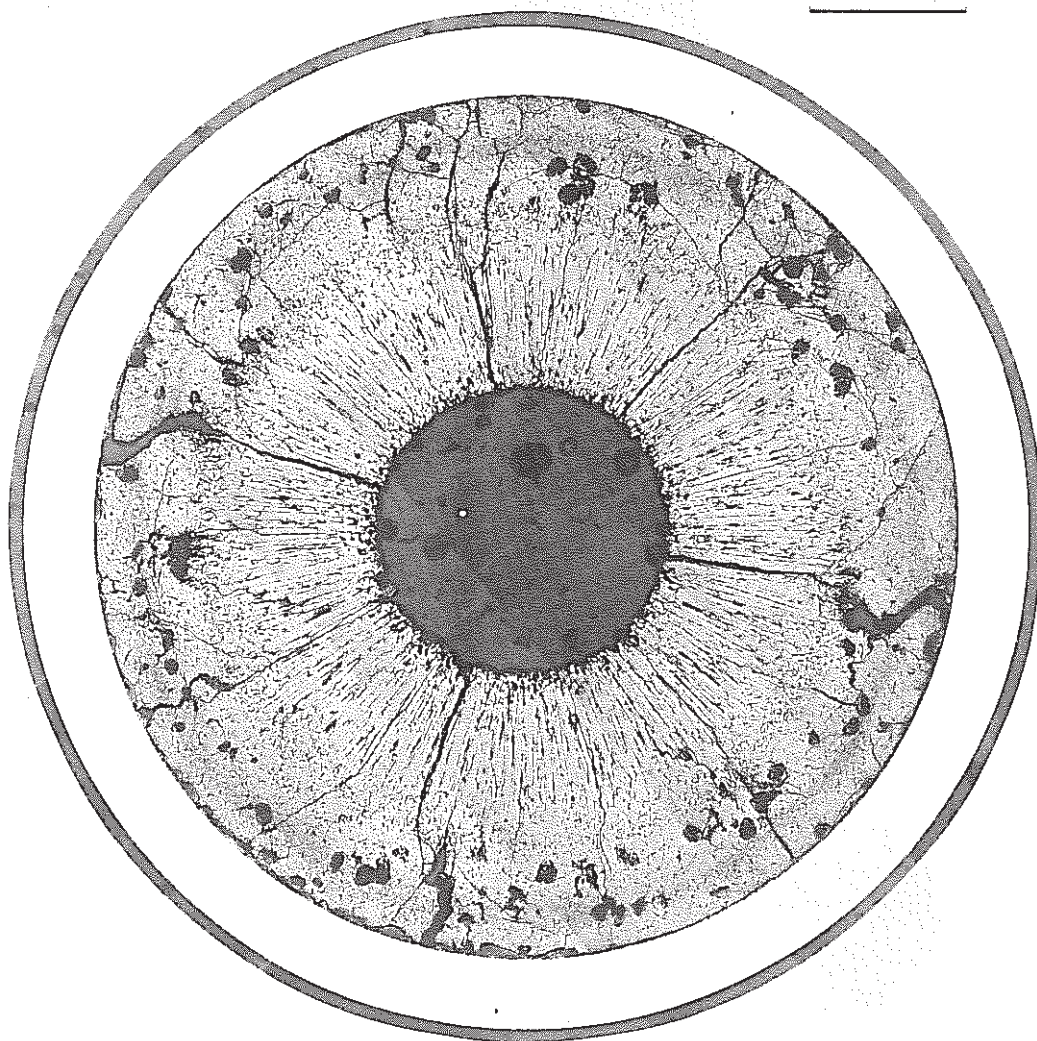


Photo 13 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample YC2418)

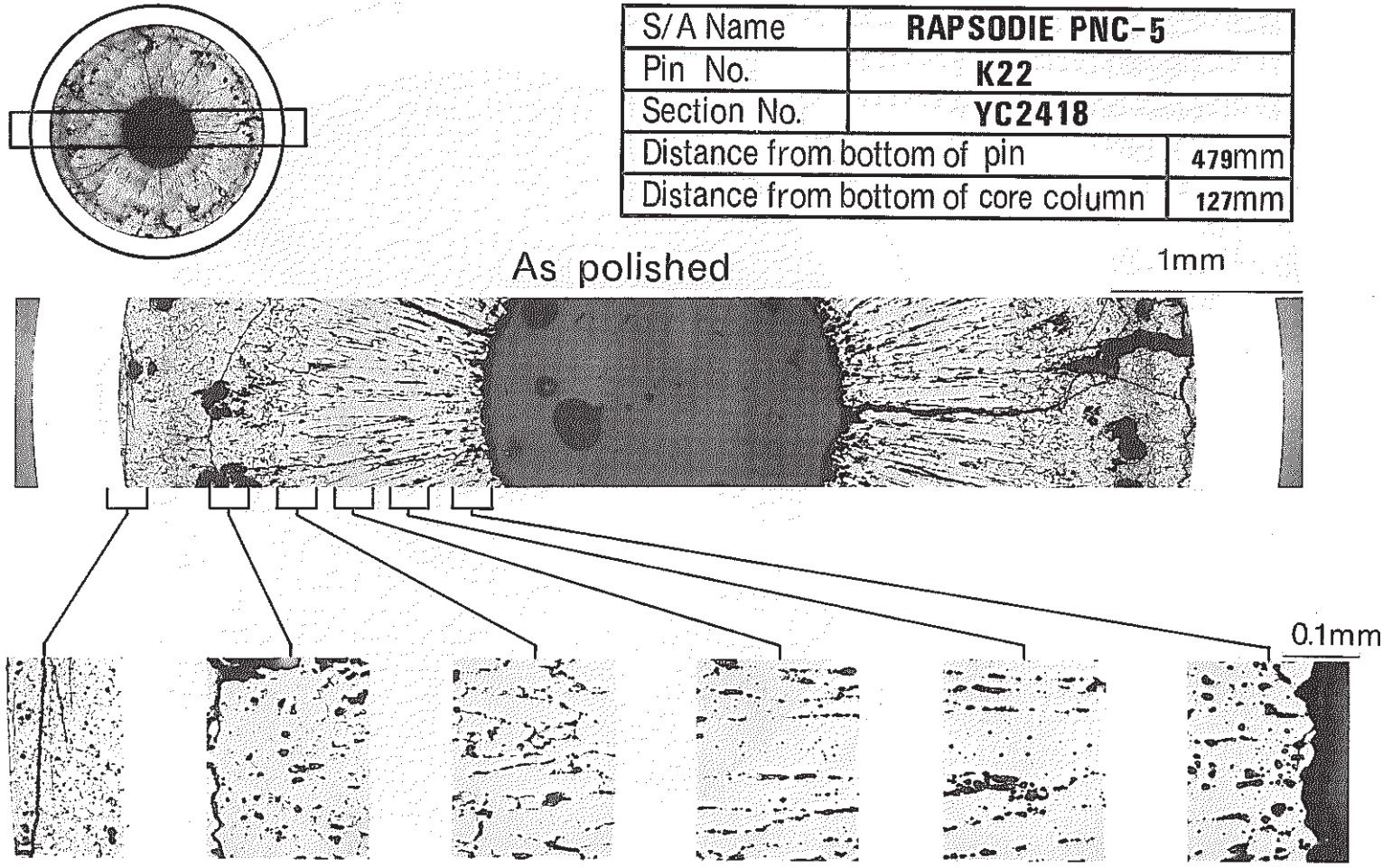


Photo 14 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample YC2418)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>27K</b>	
Section No.	<b>XC2754</b>	
Distance from bottom of pin		<b>448mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>96mm</b>

As polished

1mm

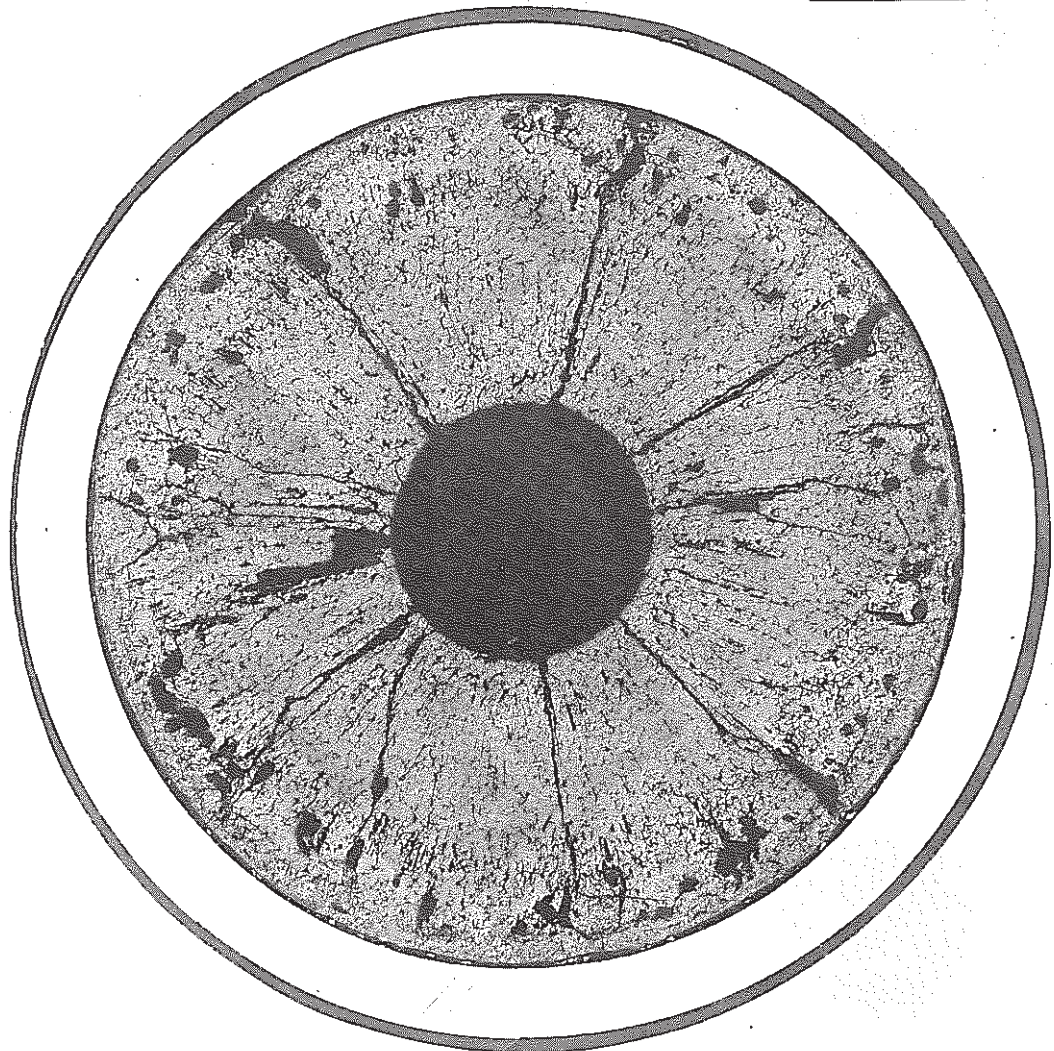
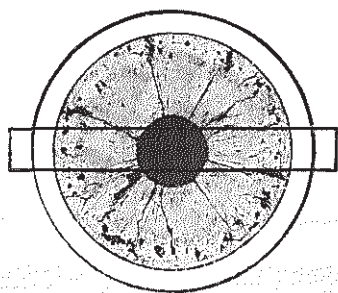


Photo 15 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel  
(Sample XC2754)



S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>27K</b>	
Section No.	<b>XC2754</b>	
Distance from bottom of pin		<b>448mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>96mm</b>

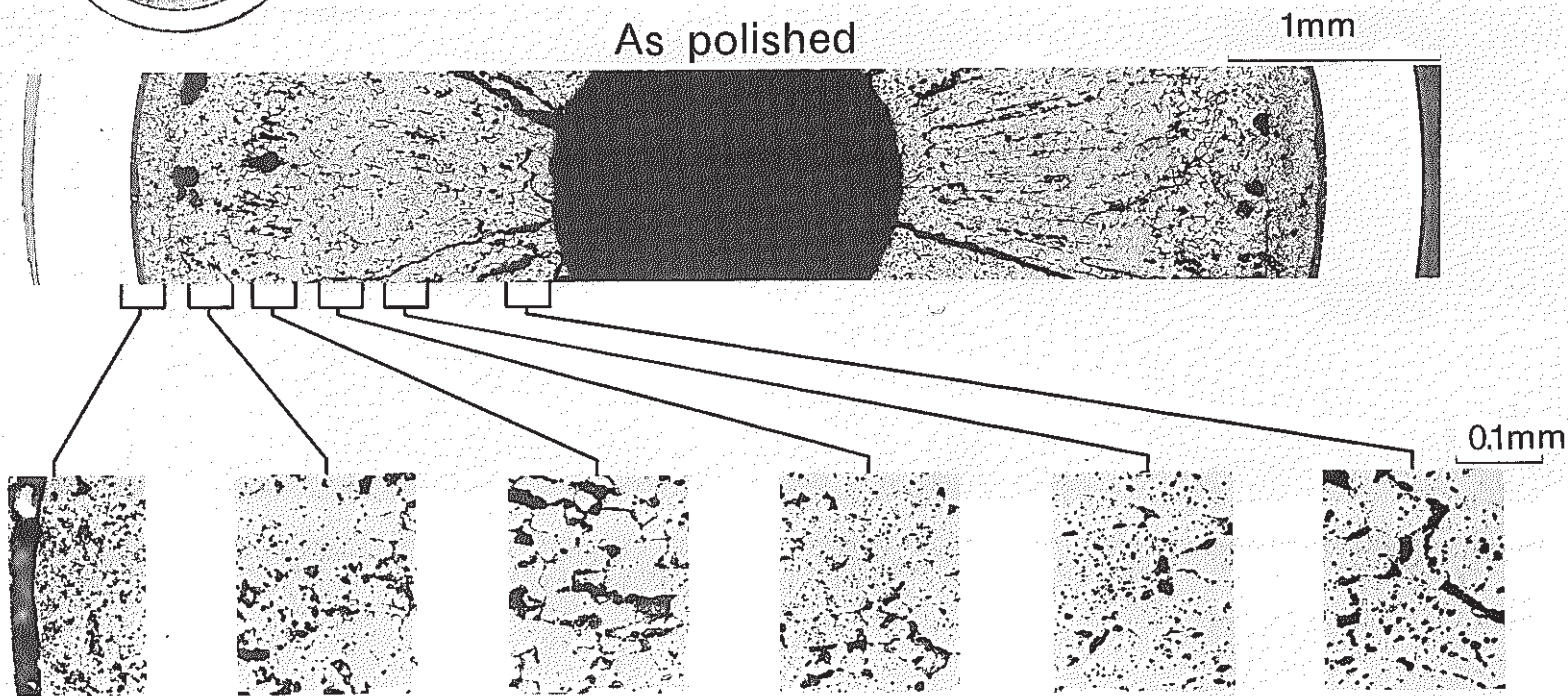


Photo 16 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC2754)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>32K</b>	
Section No.	<b>XC3242</b>	
Distance from bottom of pin		<b>362mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>10mm</b>

As polished

1mm

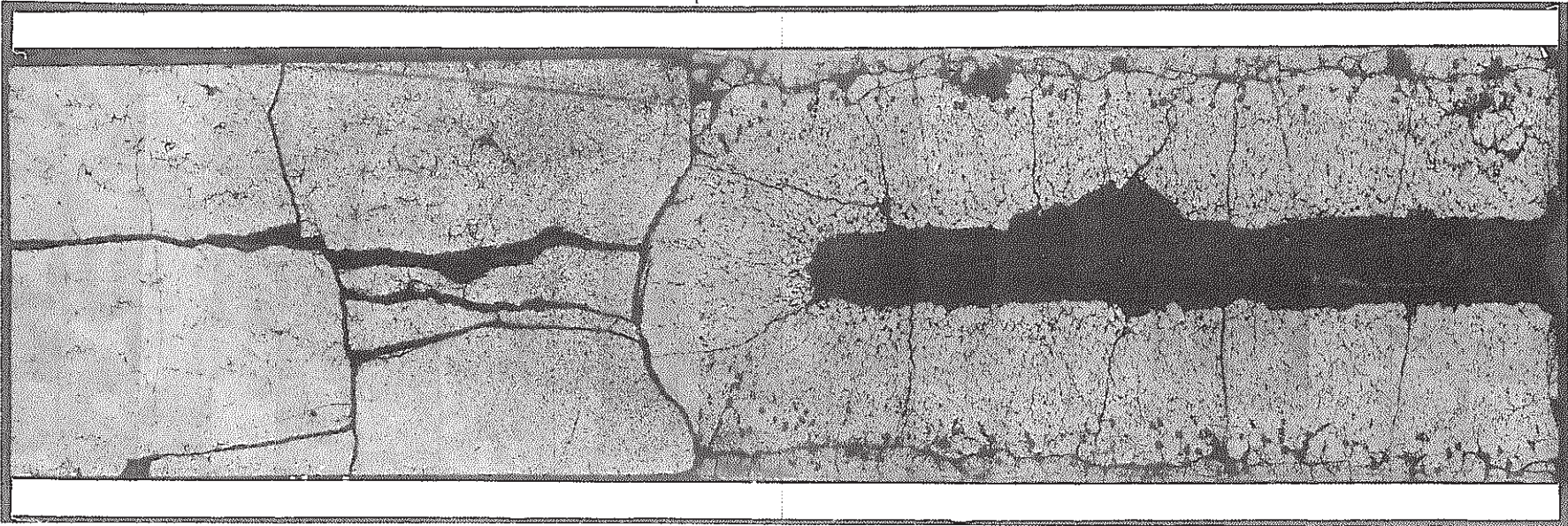


Photo 17 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC3242)



S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>32K</b>	
Section No.	<b>XC3282</b>	
Distance from bottom of pin -		<b>684mm</b>
Distance from bottom of corecolumn		<b>332mm</b>

As polished

1mm



Photo 18 Postirradiation ceramography of Rapsodie core fuel (Sample XC3282)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>8S</b>	
Section No.	<b>XC0871</b>	
Distance from bottom of pin		<b>666mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>314mm</b>

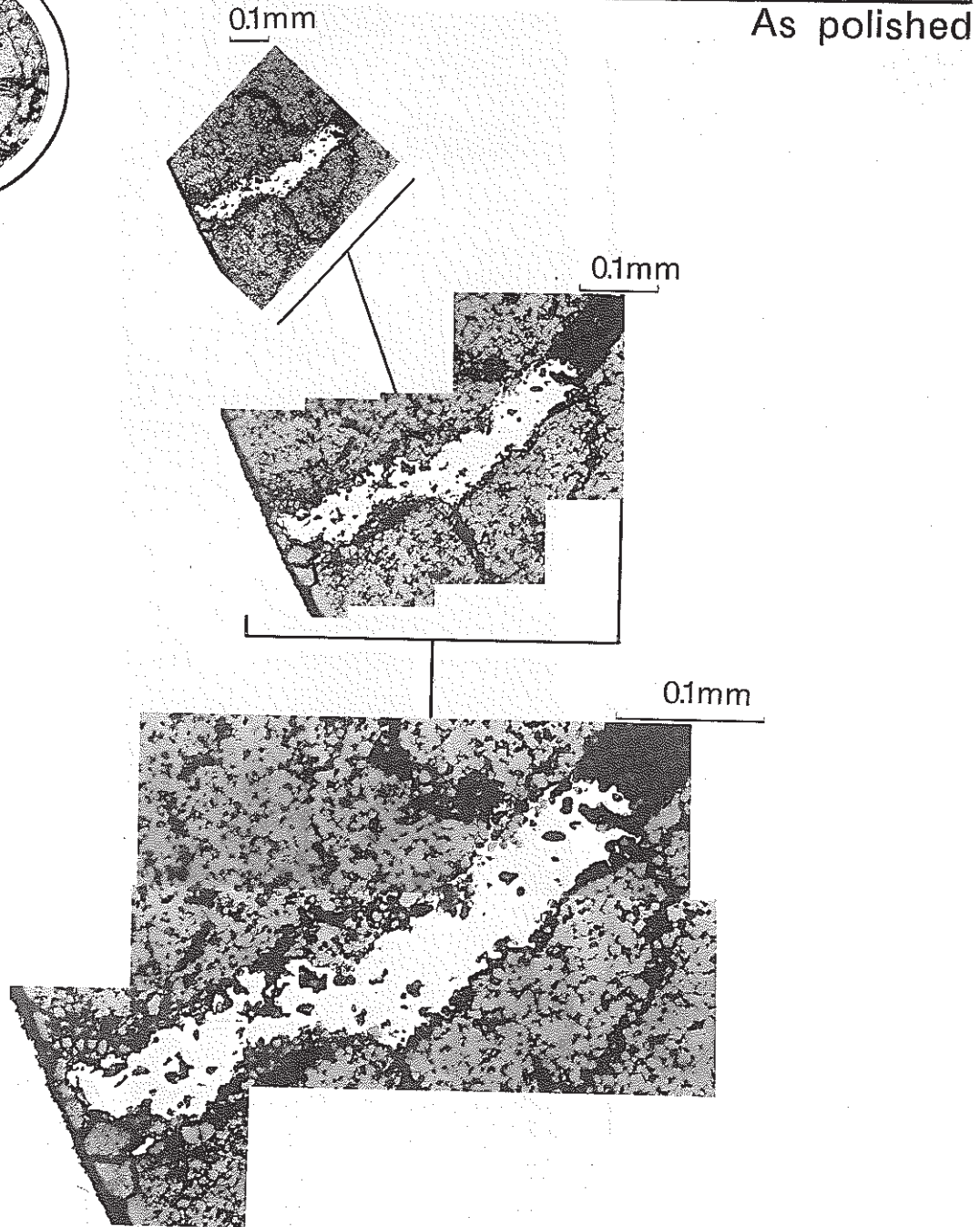
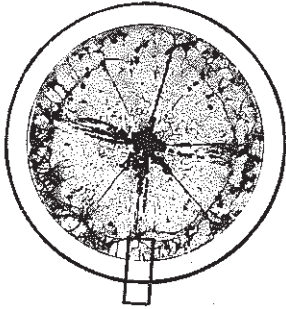


Photo 19 Postirradiation metallography of the metallic inclusion in fuel (Sample XC0871)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>27K</b>	
Section No.	<b>XC27G2</b>	
Distance from bottom of pin		<b>667mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>315mm</b>

As polished

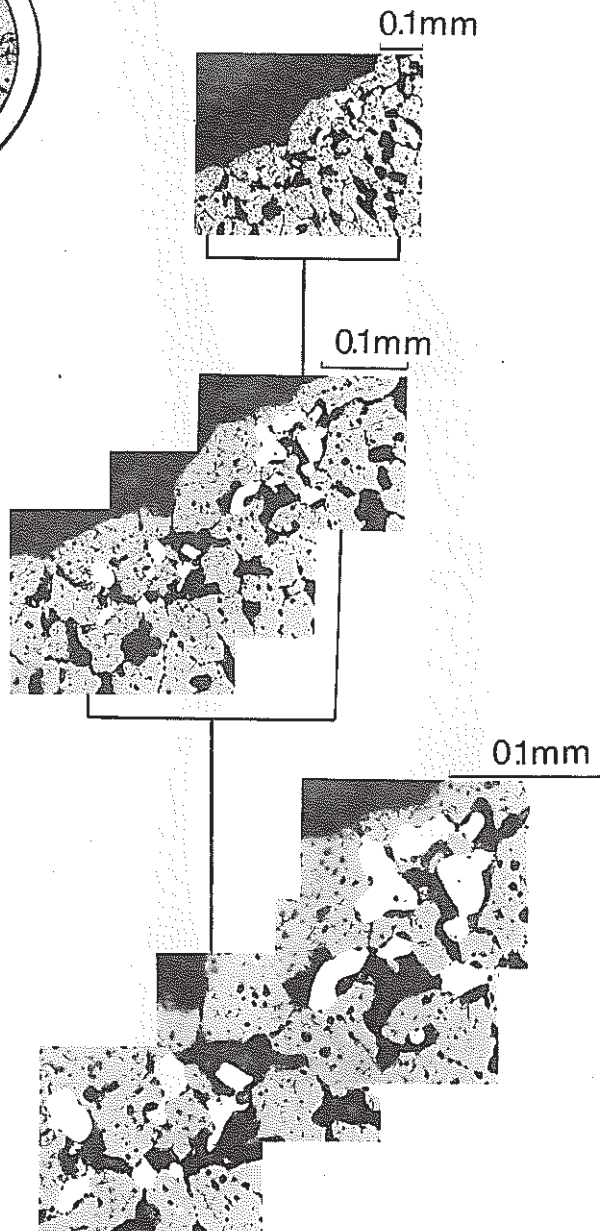
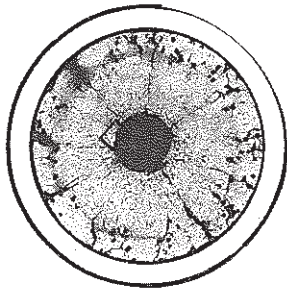


Photo 20 Postirradiation metallography of the metallic inclusion in fuel (Sample XC27G2)

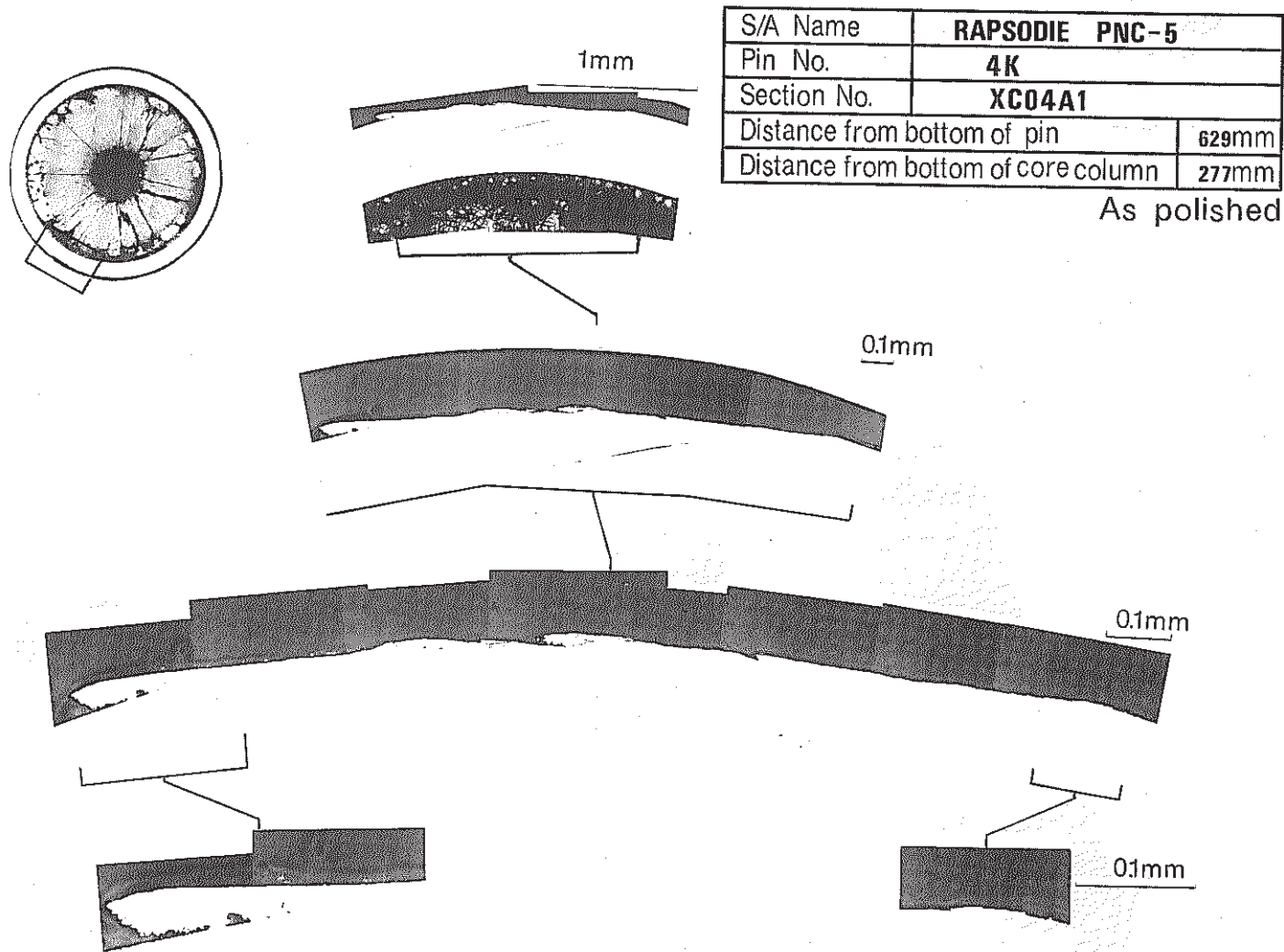


Photo 21 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding (Sample XC04A1)

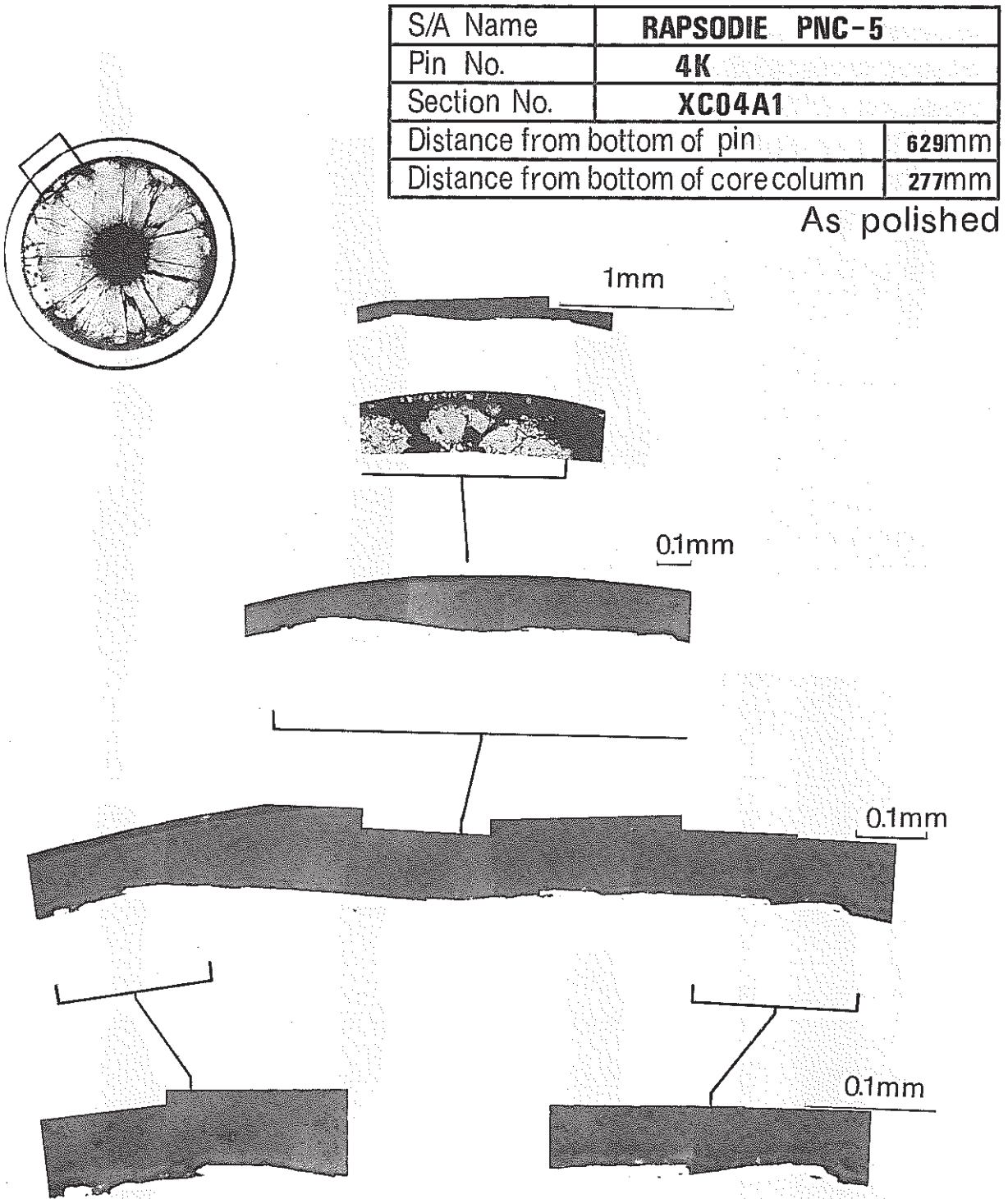
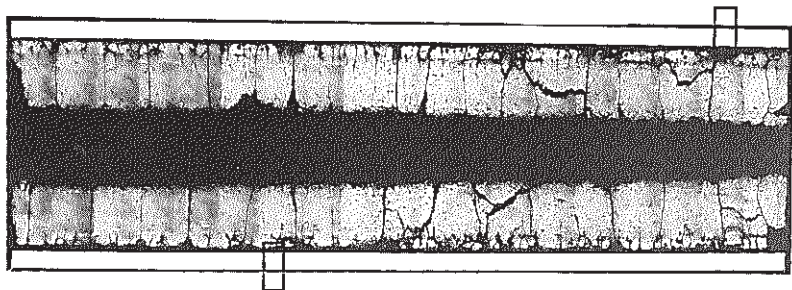
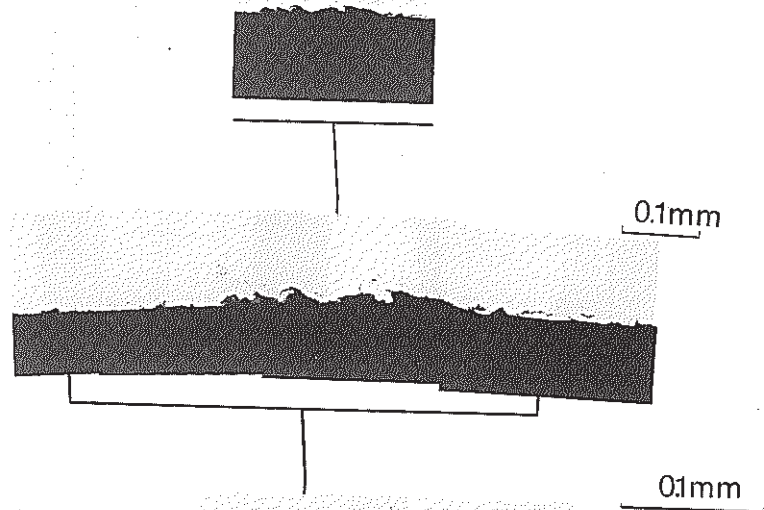
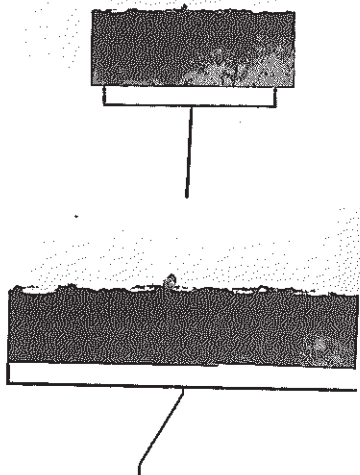


Photo 22 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding  
(Sample XC04A1)



S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>4K</b>	
Section No.	<b>XC0482</b>	
Distance from bottom of pin		<b>566mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>214mm</b>

0.1mm As polished



- 90 -

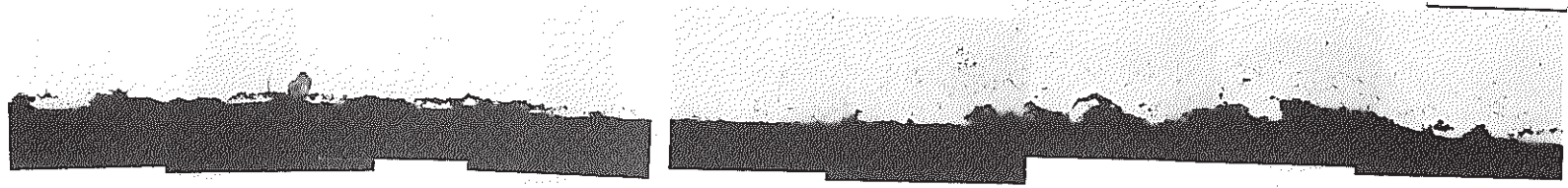
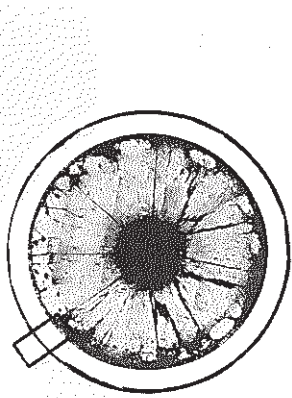


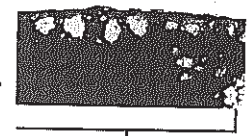
Photo 23 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding (Sample XC0482, FCCI)



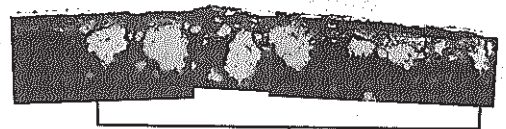
S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>4K</b>	
Section No.	<b>XC04A1</b>	
Distance from bottom of pin		<b>629mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>277mm</b>

As polished

0.1mm



0.1mm



0.1mm

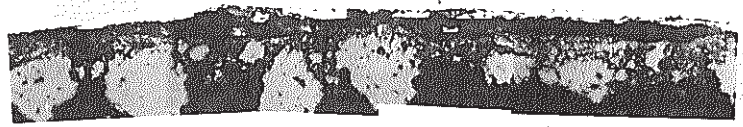


Photo 24 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding (Sample XC04A1, FCCI)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>8S</b>	
Section No.	<b>XC0871</b>	
Distance from bottom of pin		<b>666mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>314mm</b>

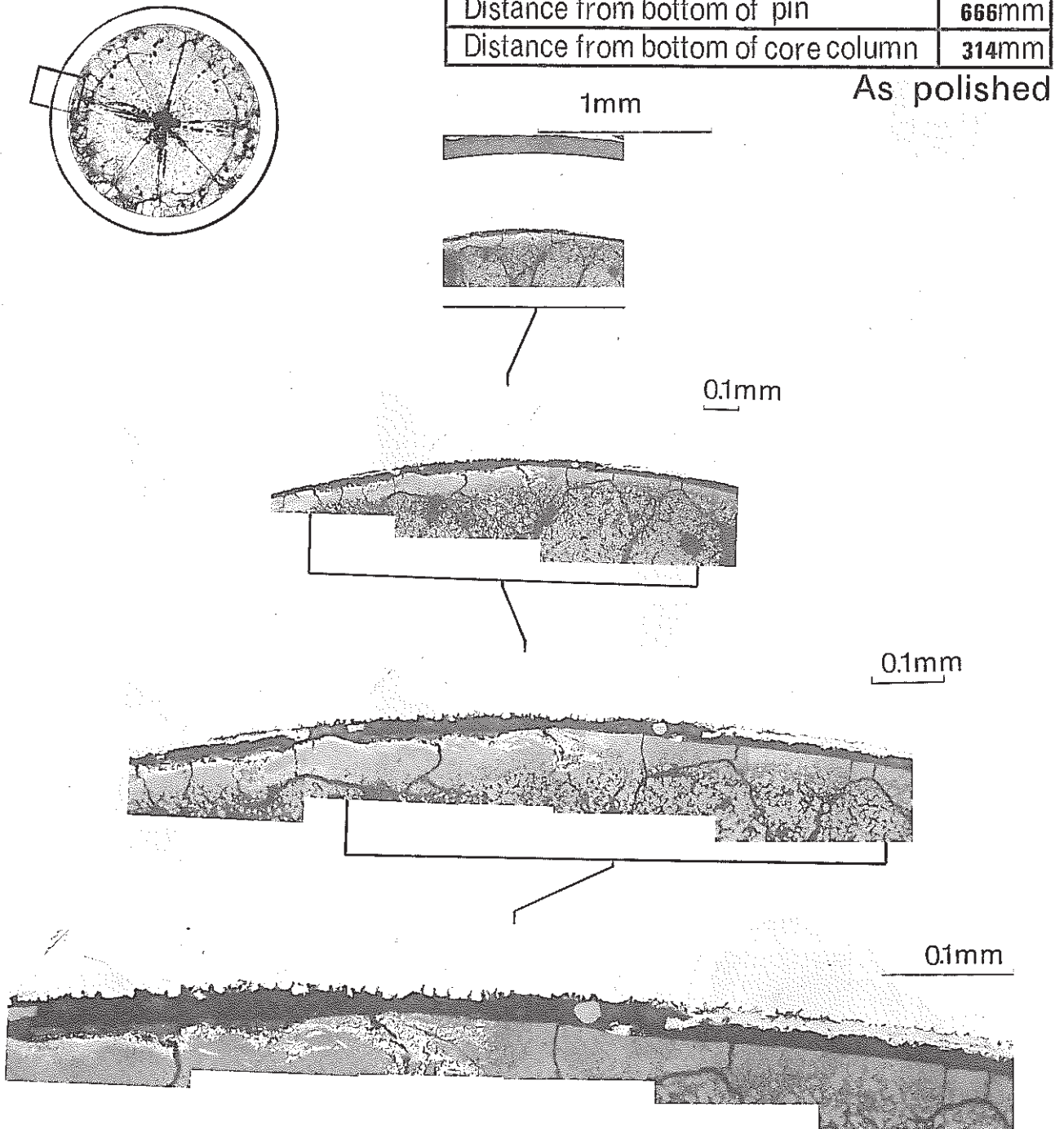
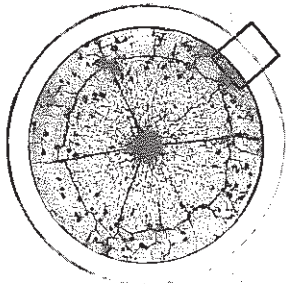


Photo 25 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding  
(Sample XC0871, FCCI)



S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>15S</b>	
Section No.	<b>XC15G2</b>	
Distance from bottom of pin		<b>667mm</b>
Distance from bottom of core column		<b>315mm</b>

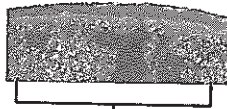
As polished



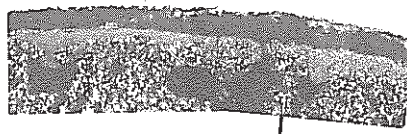
1mm



0.1mm



0.1mm



0.1mm

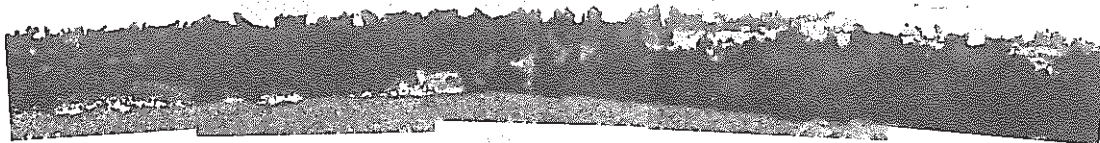
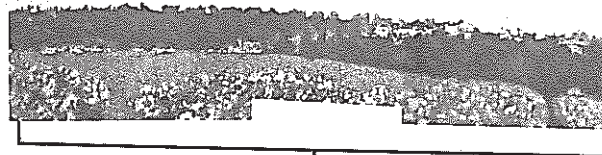


Photo 26 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding  
(Sample XC15G2, FCCI)

S/A Name	<b>RAPSODIE PNC-5</b>	
Pin No.	<b>32K</b>	
Section No.	<b>XC3281</b>	
Distance from bottom of pin	665mm	
Distance from bottom of core column	313mm	

As polished

0.1mm

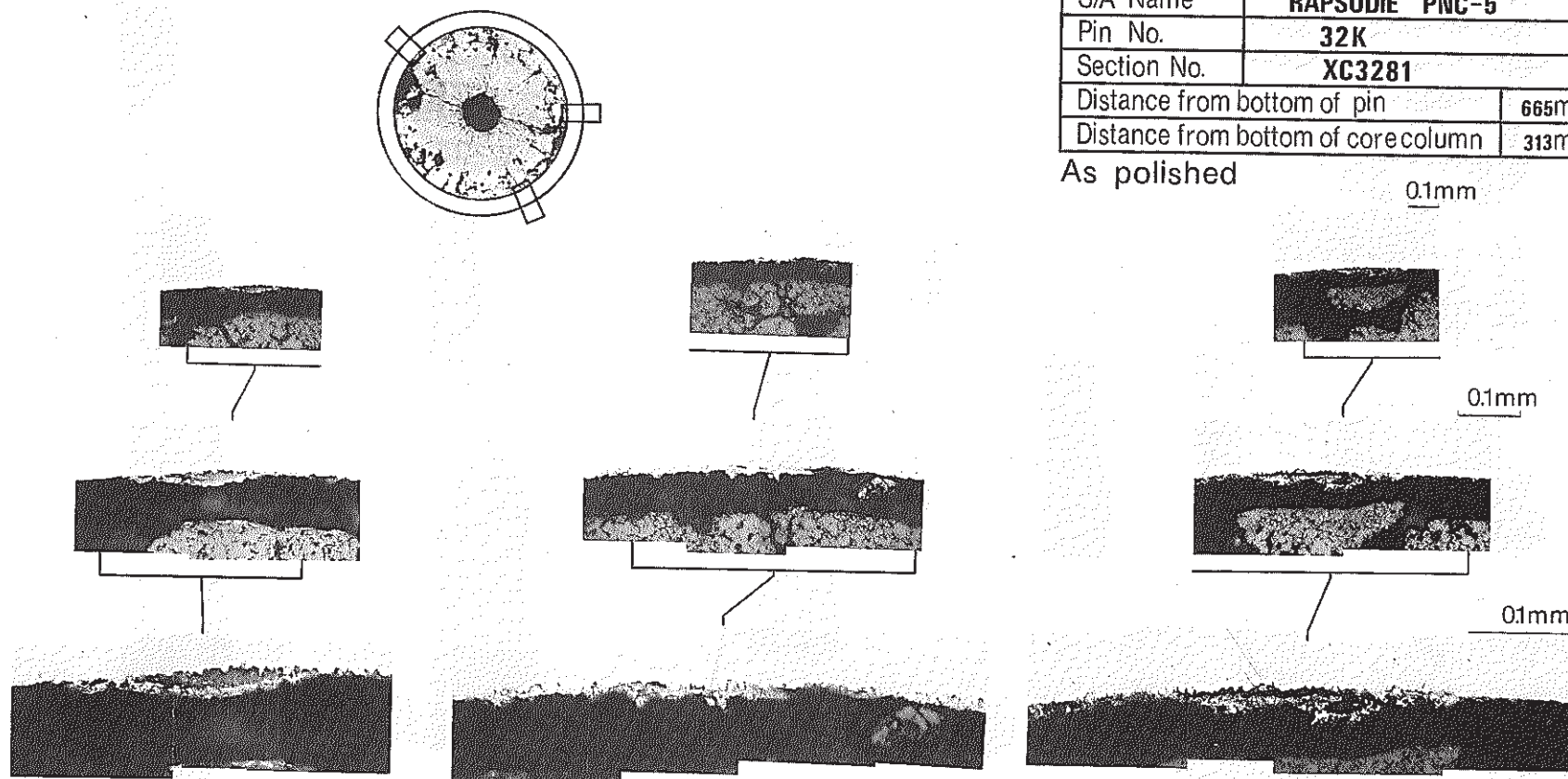


Photo 27 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding (Sample XC3281, FCCI)

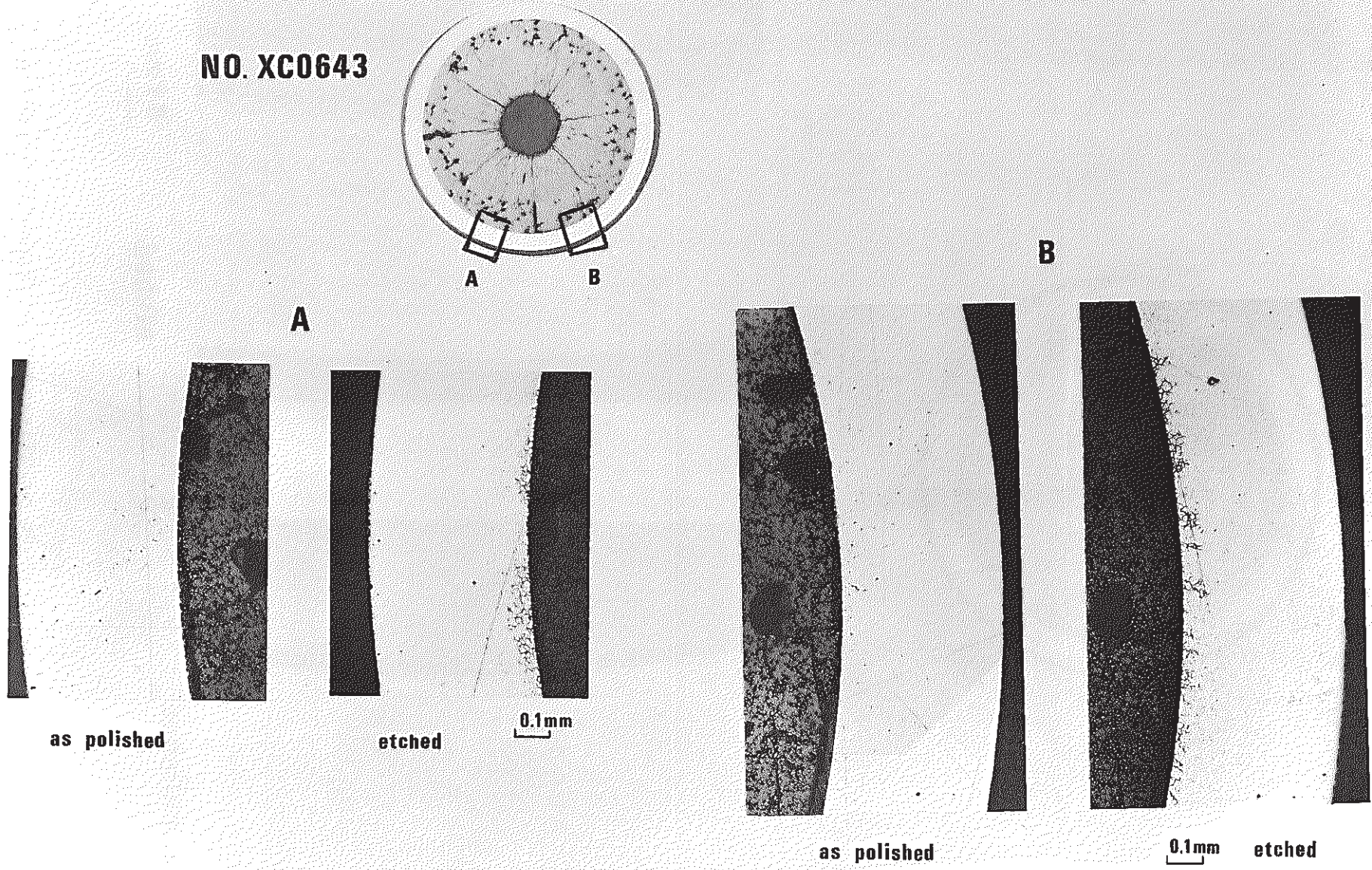
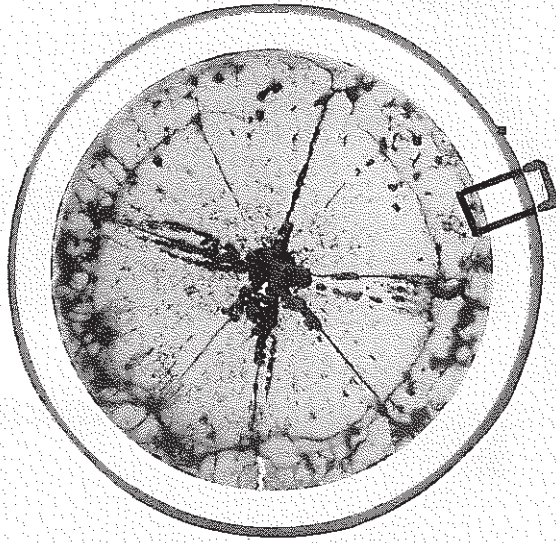
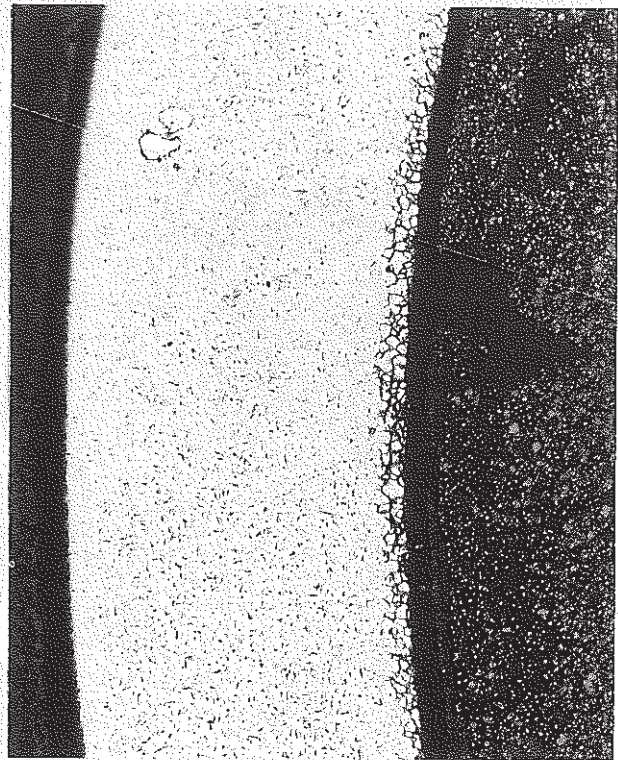


Photo 28 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding (Sample No. XC0643, FCCI)

**No. XC0871**



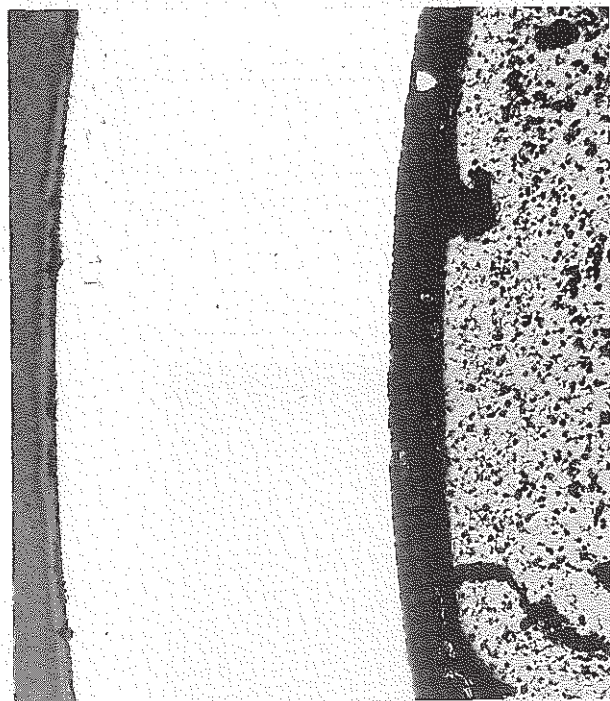
**as polished**



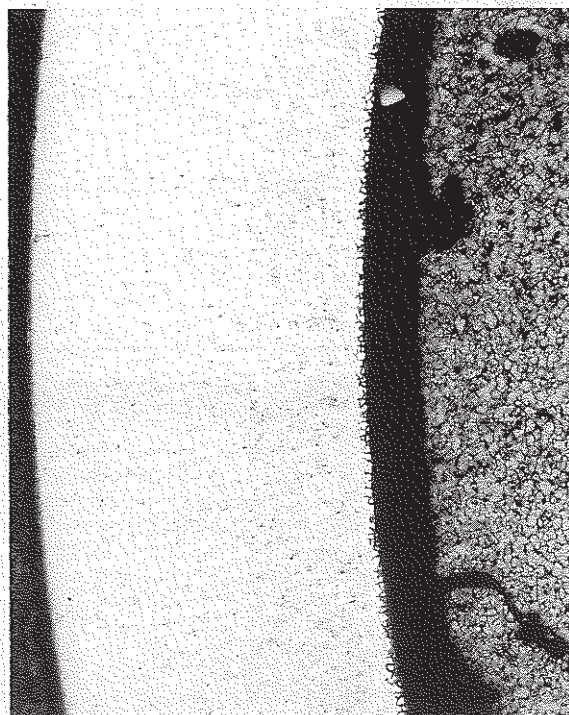
**etched**

**0.1 mm**

Photo 29 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding  
(Sample No.XC0871, FCCI)

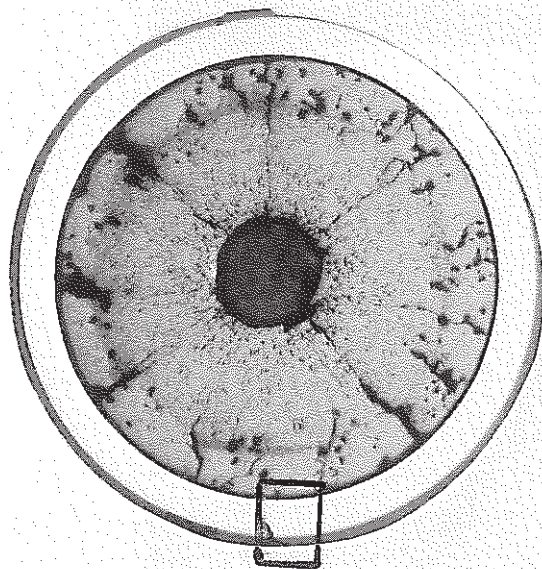


as polished

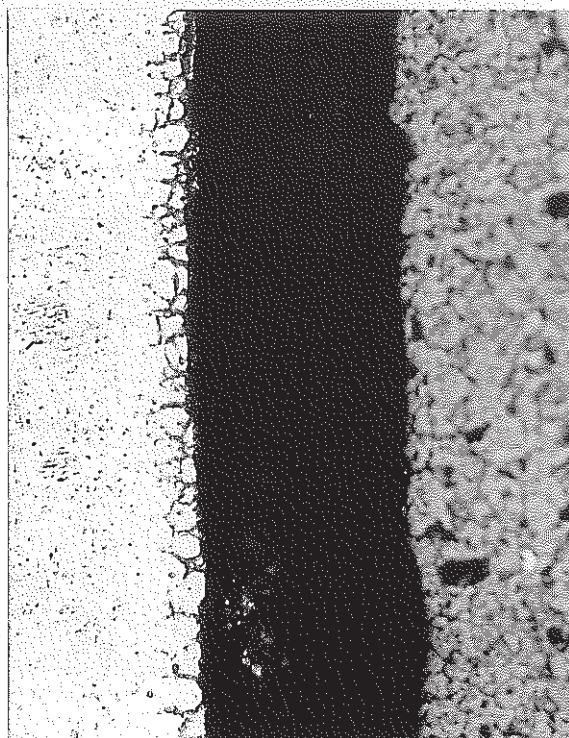


etched

0.1 mm



No. XC27G2



10  $\mu$ m

Photo 30 Postirradiation metallography of Rapsodie cladding  
(Sample No. XC27G2, FCCI)



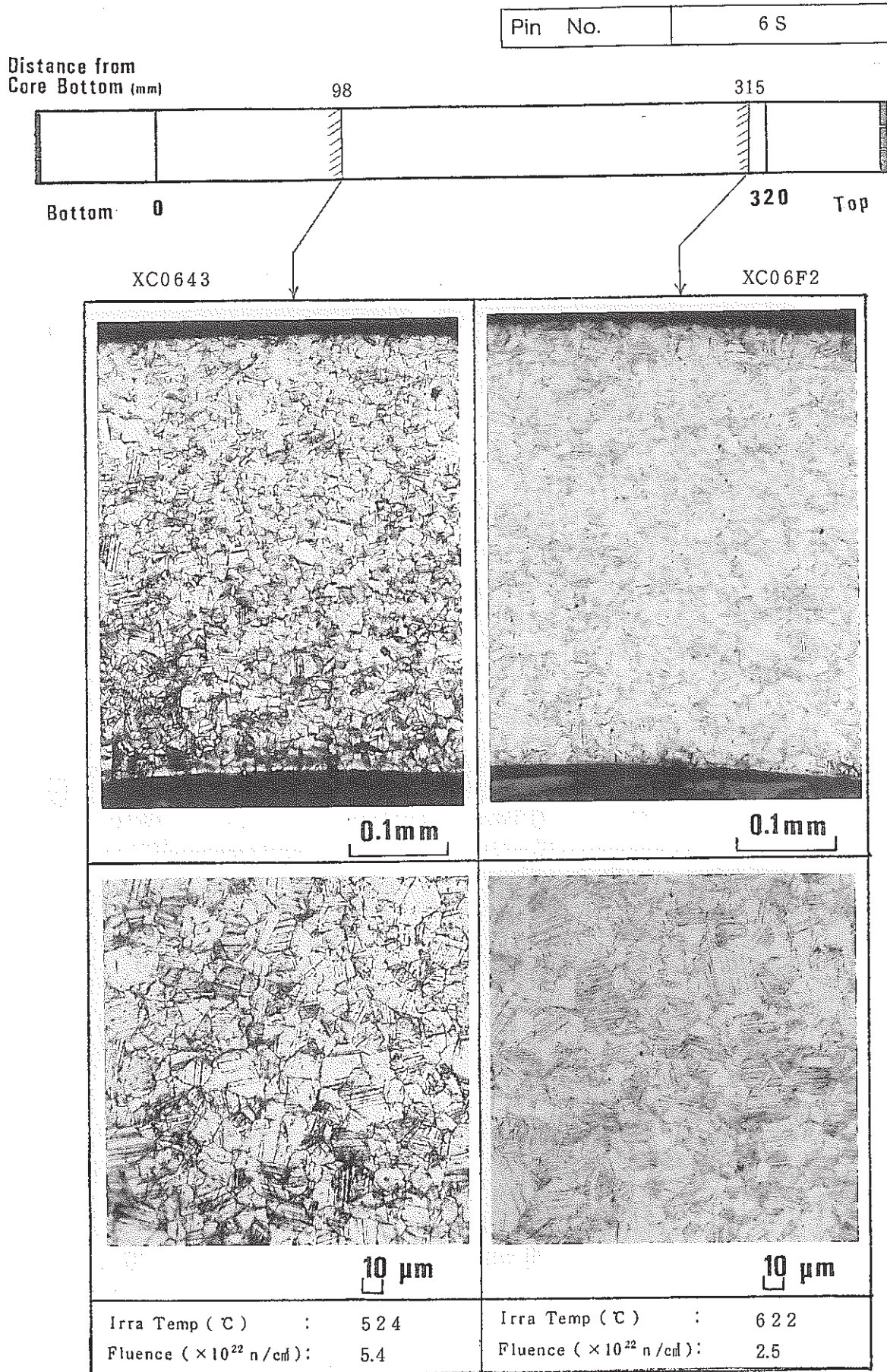


Photo 32 Optical microstructures of the cladding (6Spin, etched)

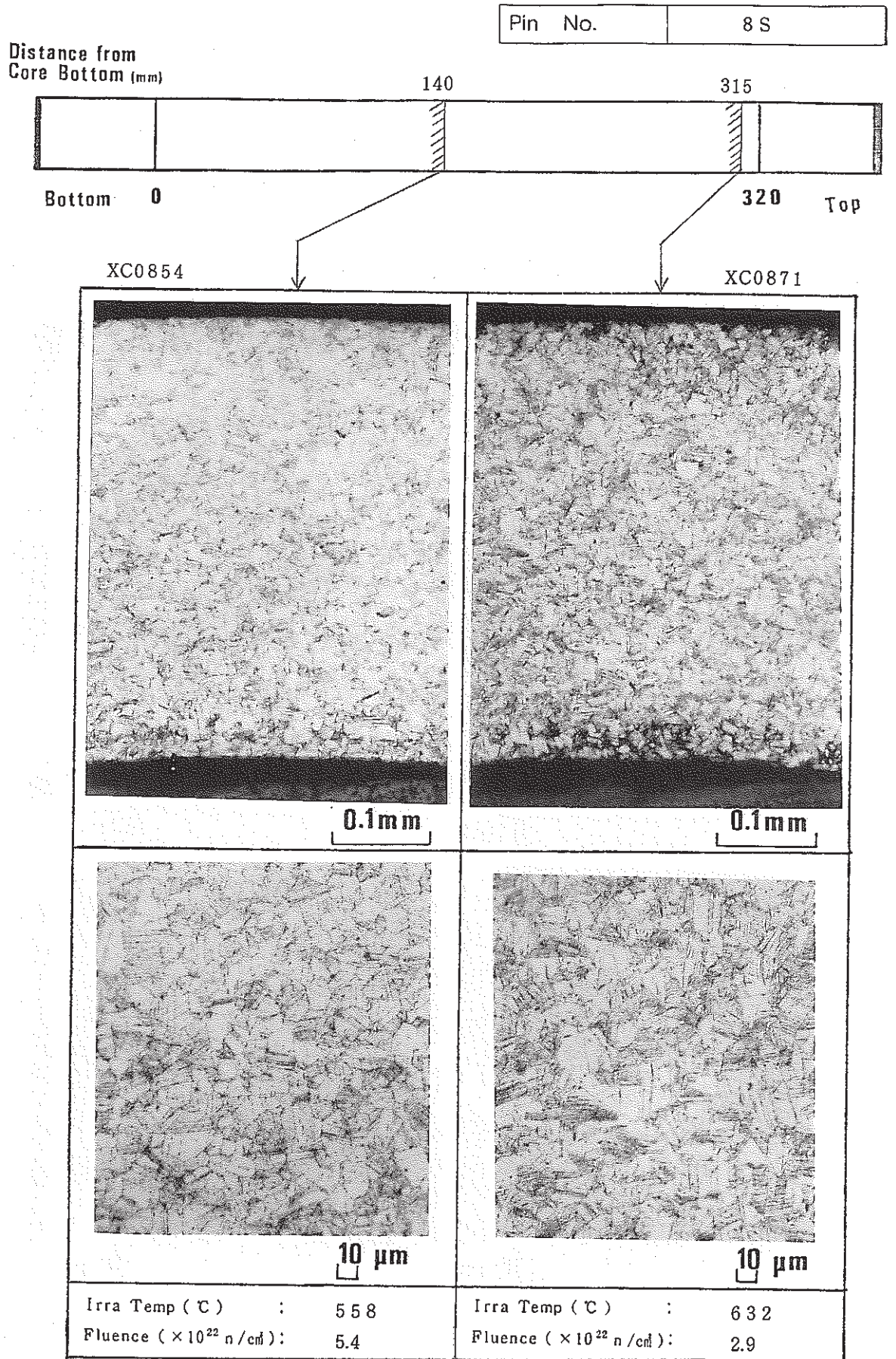


Photo 33 Optical microstructures of the cladding (8Spin, etched)



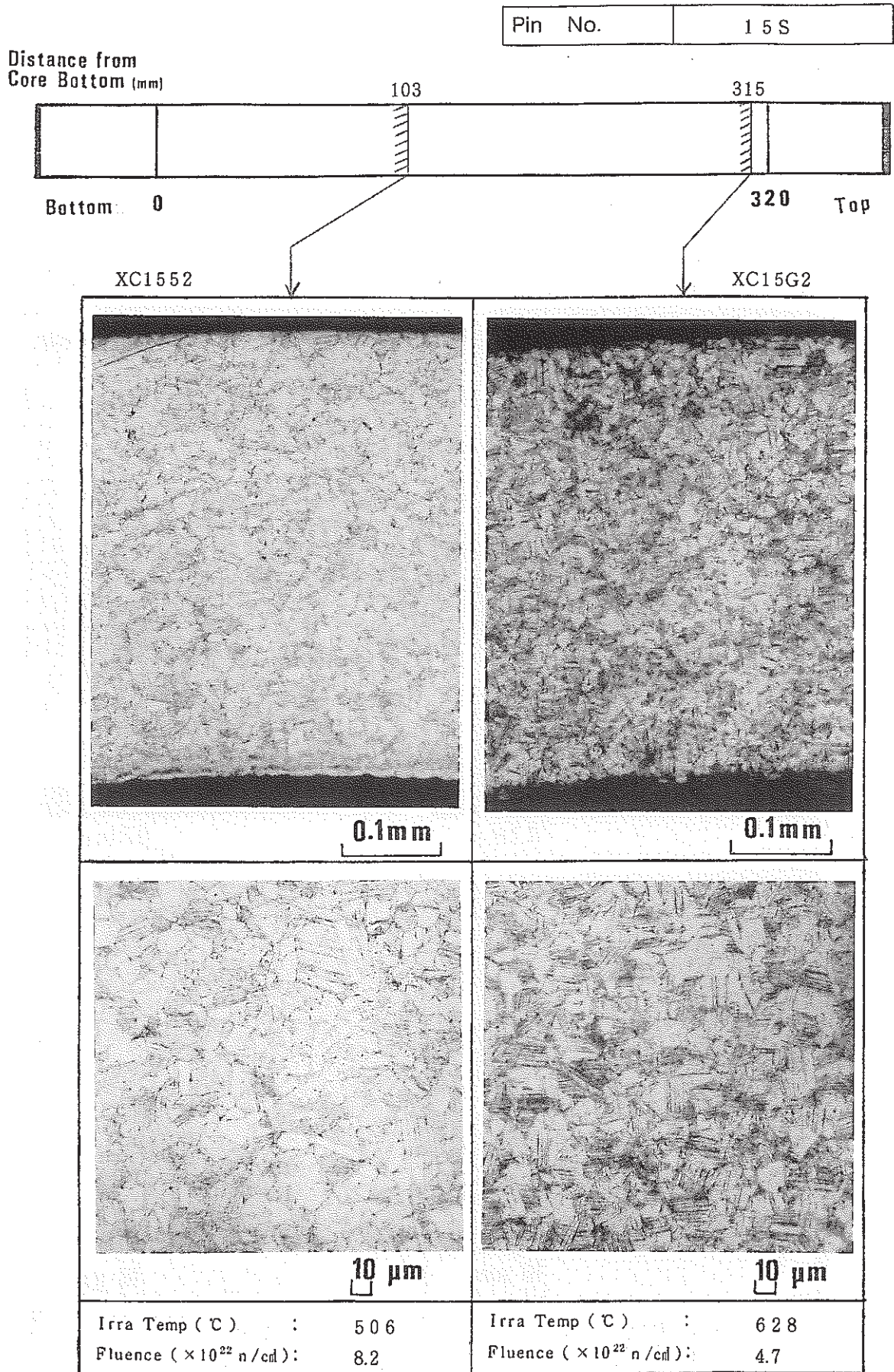


Photo 34 Optical microstructures of the cladding (15Spin, etched)

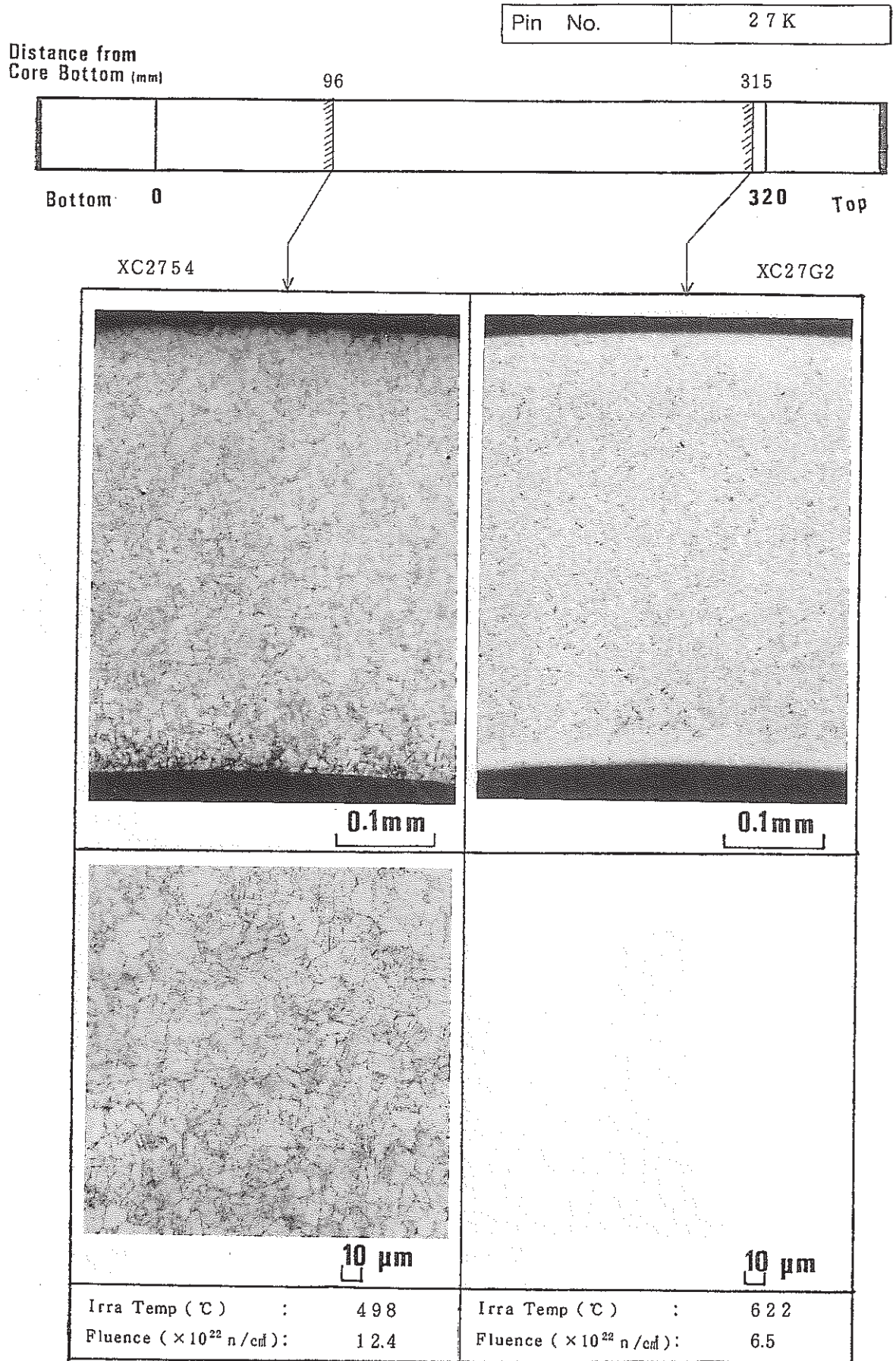


Photo 35 Optical microstructures of the cladding (27Kpin, etched)

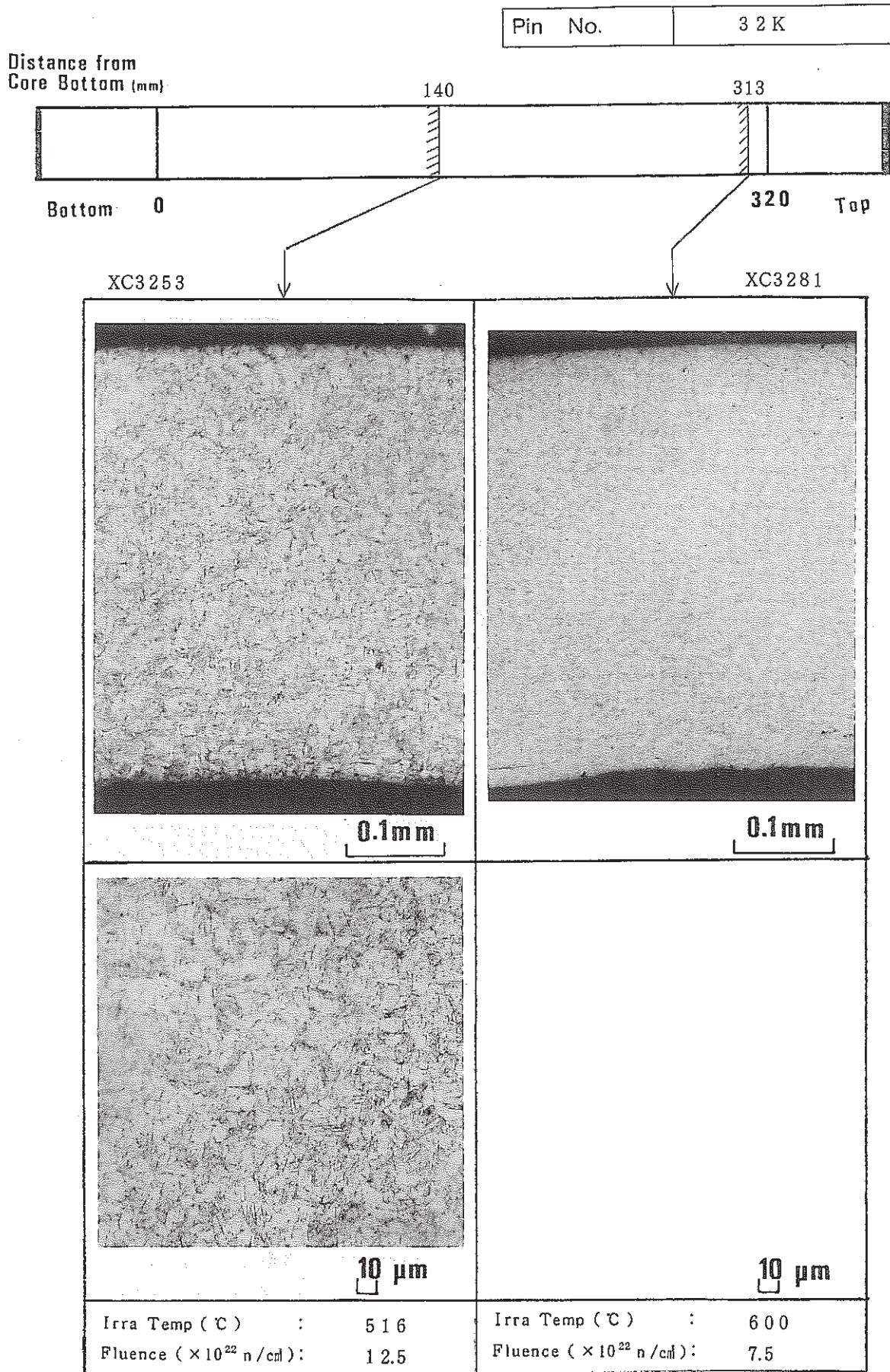


Photo 36 Optical microstructures of the cladding (32Kpin, etched)