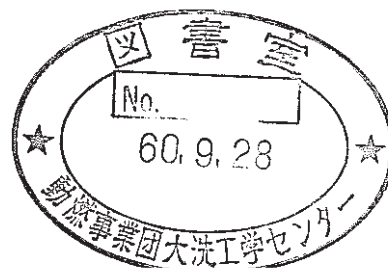


「常陽」MK-I 炉心燃料集合体 (PPJ X13及びPPJ X12) の照射後試験(4)

—— ラッピングワイヤの試験 ——



1985年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 「常陽」MK-I炉心燃料集合体(PPJX13及びPPJX12)の照射後試験(4)

## —— ラッピングワイヤの試験 ——

実施責任者：柚原俊一 \*

鈴木 尚 \* 佐藤義則 \* 吉持 宏 \*\*

岡 裕 \* 谷 賢 \*

## 要 旨

高速実験炉「常陽」の炉心構成要素の健全性を調べ、また高速炉用炉心材料の照射データを得るための試験の一環として、MK-I炉心で使用された一連の集合体ラッピングワイヤ(SUS 316, 溶体化処理材)について照射後試験を行ってきた。今回試験したラッピングワイヤは集合体PPJX 13及びPPJX 12に組み込まれてMK-I炉心の全運転期間中使用されたもので、照射温度は370～519℃、最大照射量はMK-I最大の $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )であった。なお集合体PPJX 12は故意に水洗浄を不十分にし、水中保管されていた集合体である。照射後試験は外径測定、密度測定、金属組織観察及び硬さ測定の各項目について行い、その結果を既に得られている11体分の炉心燃料集合体(照射量 $\sim 4.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ )の照射後試験結果と合わせて検討した。主な結果は次のとおりである。

- 1) 照射材の外径は最大1.5%増加していた。また密度測定結果より得られたスエリングは2.8%であった。これらの値はMK-I照射で得られたデータとしては最大であった。
- 2) スエリングは照射量 $2 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ で現れ、その後は照射量の増加とともに直線的に増加した。K材のスエリングはT材のスエリングより若干小さかった。
- 3) 金属組織観察の結果、主に結晶粒界に炭化物の析出が見られた。
- 4) 硬さは受入材と比較し最高Hv = 170程度増加した。
- 5) 不十分な水洗浄の後に水中保管した集合体PPJX 12のワイヤの試験結果では、他の集合体と比較して特に差は認められなかった。

\* 大洗工学センター燃料材料試験部照射材料試験室

\*\* 現原子力工学試験センター

July, 1985

Post-Irradiation Examination on Wrapping Wire Used in "JOYO" MK-I  
Core Subassembly (PPJX13 & PPJX12)

H. Suzuki\*, Y. Sato\*, H. Yoshimochi\*\*  
Y. Oka\*, S. Tani\* and S. Yuhara\*

Abstract

Post-irradiation examination on the wrapping wire was carried out to make sure the performance of core materials of the fast experimental reactor "JOYO" and to know the behavior of FBR core materials after irradiation. The wrapping wires were fabricated into the subassembly PPJX13 and PPJX12, and irradiated at 370 ~ 519°C up to the fast neutron fluence of  $6.4 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E>0.1 MeV). The subassembly PPJX12 was not fully washed by water and stored in the pool. Diameter measurement, density measurement, metallurgical test and hardness test were performed and the data obtained were compared with previous data. The results are summarized as follows.

- 1) The maximum increase in diameter and maximum swelling by density change are observed to be about 1.5% and about 2.8%, respectively.
- 2) Swelling increases rapidly as the fluence increases over the fluence of  $2.0 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>. The material manufactured by K swells less than that by T.
- 3) Precipitation of carbide is observed on grain boundaries.
- 4) The maximum increase in Vickers hardness Hv is 170.
- 5) Subassembly PPJX12, which was not fully washed and then stored in the water pool, shows no peculiar PIE results compared with other subassemblies.

---

\* Material Monitoring Section, Fuel and Material Division,  
O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Nuclear Power Engineering Test Center.



# 目 次

1. まえがき .....	1
2. 供 試 材 .....	2
2.1 素 材 .....	2
2.2 炉内履歴 .....	2
2.3 集合体の洗浄 .....	2
2.4 試 験 片 .....	3
3. 試験方法 .....	4
3.1 外径測定 .....	4
3.2 密度測定 .....	4
3.3 金属組織観察 .....	4
3.4 硬さ測定 .....	4
4. 試験結果 .....	5
4.1 外径測定結果 .....	5
4.2 密度測定結果 .....	5
4.3 金属組織観察結果 .....	6
4.4 硬さ測定結果 .....	6
5. ま と め .....	7
6. 参考文献 .....	8

## 1. ま え が き

高速実験炉「常陽」は1978年4月の臨界以来、わが国初の高速炉として順調に運転を続け、1981年12月にMK-I炉心としての運転を無事終了し、現在は照射炉心(MK-II炉心)として100 MWの定格サイクル運転を順調に続けている。「常陽」の炉心構成要素の健全性を確認するために、炉心燃料集合体を順次取り出して、燃料材料試験部の各室において照射後試験を行っており、その一環として照射材料試験施設(MMF)でラッピングワイヤの照射後試験を行っている。

これまで炉心燃料集合体PPJD 1 A, PPJX 08, PPJX 14, PPJX06, PPJX11, PPJD 2B, PPJX 09, PPJD 0 M, PPJD 2 U, PPJW 1 F及びPPJD 0 Bのラッピングワイヤについて試験を終了している。<sup>(1)~(9)</sup>本報告はその第12次分として、炉心燃料集合体PPJX 13及びPPJX 12のラッピングワイヤについて行った外径測定、密度測定、金属組織観察及び硬さ測定結果をとりまとめたものである。

本試験の目的は、「常陽」炉心構成要素の健全性を確認するとともに、高速炉用炉心材料である316ステンレス鋼の溶体化処理材に関する照射後試験データを集積することである。なお、「常陽」MK-Iのラッピングワイヤに関するPIEは本試験で終了する。

## 2. 供 試 材

### 2.1 素 材

今回試験したラッピングワイヤの素材は、溶体化処理を施したSUS 316鋼（PPJX 13：ロット番号K 001，PPJX 12：ロット番号T 001）であり、それぞれ神戸製鋼製，住友電工製のものである。Table 1 および Table 2 にミルシートを示す。

### 2.2 炉内履歴

PPJX 13 および PPJX 12 は 50 MW出力上昇サイクルから 75 MW第6サイクルまでの間炉心に装荷されていた。Fig.1 に PPJX 13 及び PPJX 12 の炉心装荷位置を，Fig.2 に集合体ピン配置を示す。PPJX 13 ではピン45（試料番号5345）のラッピングワイヤを，また PPJX 12 ではピン56（試料番号6756）のラッピングワイヤを試験に供した。Fig.3 にラッピングワイヤの巻かれたピンの図を示す。

PPJX 13 の燃焼度はバンドル平均で 40100 MWD/T，ペレット最大で 48300 MWD/T，中性子照射量は最大  $6.42 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) であった。また，PPJX 12 の燃焼度はバンドル平均で 38900 MWD/T，ペレット最大で 48200 MWD/T，中性子照射量は最大  $6.38 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) であった。なお，以下中性子照射量はすべて 0.1 MeV 以上のエネルギーの値を示す。

Fig. 4 に 75 MW第6サイクル末期の炉内温度分布及び中性子照射量分布を示す。ラッピングワイヤの温度及び中性子照射量は JYHIST による 5345 ピン及び 6756 ピンの計算結果を用いた。ただしワイヤの温度は冷却材温度と等しいと仮定した。

PPJX 13 及び PPJX 12 の実照射日数（Actual Operation Days）は 482.5 日，実効照射日数（Effective Full Power Days）は 393.2 日である。

### 2.3 集合体の洗浄

PIE に供しない集合体は原子炉から取り出した後，脱塩水で 3 回洗浄して水封入ボルト締缶に入れて炉外燃料貯蔵槽（水プール）に貯蔵する。また PIE に供する通常の集合体 PPJX 13 等は原子炉から取り出した後，同様に脱塩水で 3 回洗浄し，FMF に搬入する。

集合体 PPJX 12 は，水洗浄不足のまま水プールに保管した後の特性の変化を調べるため，原子炉から取り出した後，脱塩水で 1 回だけ洗浄し，水封入ボルト締缶に入れて水プールに貯蔵した。その後，洗浄より約 1 年 10 ヶ月を経て，水プールから取り出し，照射後試験に供した。

## 2.4 試験片

「常陽」より取り出された炉心燃料集合体は、照射燃料集合体試験施設（FMF）に搬入され、5345ピン及び6756ピンのラッピングワイヤは、Fig. 4に示す部位から切断された。5345W1及び6756W1は、照射効果を明らかにするためのレファレンス試料として、ピン下端付近から切り出された。FMFにおいて切断されたラッピングワイヤはMMFへ移送され、さらに一部の試料は、Fig. 5及びFig. 6に示すように切断し、照射後試験に供した。Table 3及びTable 4に切断したラッピングワイヤの試験項目を、炉内照射条件とともに示す。なお、照射条件は各切断ラッピングワイヤ中央部での値を示している。



### 3. 試験方法

#### 3.1 外径測定

外径測定はレーザ外径測定器\*を用いて、試料のピン下端方向から5 mm間隔で、円周方向45°毎8点(0~315°まで)測定した。測定前後に標準ゲージ(1.196 ± 0.002 mm)を用いて測定器の較正を行った。

#### 3.2 密度測定

外径測定後の試料について、密度計\*\*を用いて液浸法のツウバケット法により密度測定を行った。測定液には蒸留水に微量の界面活性剤(エマルゲン-L 40)を添加したものを使用した。なお、測定は、各試料とも5回以上行った。

#### 3.3 金相試験

ラッピングワイヤの径方向断面(長手方向に垂直な断面)について、光学顕微鏡による組織観察を行った。エッチングは10%過硫酸アンモニウム溶液電解腐食とし、写真は100倍及び400倍で撮影した。

#### 3.4 硬さ測定

ラッピングワイヤの径方向断面(長手方向に垂直な面)について、マイクロビッカース硬さ計を使用し、荷重500 gで試料の中央部5点の硬さを測定した。

---

\* 新日本科学製 SLG - 101

\*\* PPJX 13 : メトラー製 HL - 52  
PPJX 12 : メトラー製 AE - 163

## 4. 試験結果

### 4.1 外径測定結果

PPJX 13 及び PPJX 12 ラッピングワイヤの外径測定結果を、それぞれ Table 5 及び Table 6 に示す。また、Fig. 7 (1) 及び 7 (2) には PPJX 12 の各試料の各測定点での外径を図示する。

Fig. 8 ~ Fig. 10 にこれらの結果をまとめ、照射条件と合わせて示す。「常陽」MK-I の照射条件では炉心中心より 100 ~ 150 mm 程度上部の箇所のワイヤが外径変化率 1.5 % で最もふくられていた (Fig. 8)。

Fig. 9 に  $475 \pm 20^\circ\text{C}$  で照射された試料の外径変化率 (レファレンス材の外径を基準) と照射量の関係を示す。照射量が  $2.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 以上になると、照射量の増加にともない外径変化率がほぼ直線的に増加することが確認された。MK-I の最大照射量である PPJX 13 (最大照射量  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) での外径変化は、最大 1.5 % であった。ワイヤの製造メーカーによる外径変化の相違は、明確ではなかった。

Fig. 10 には外径変化の照射温度依存性を照射量をパラメータとして示す。照射量  $\sim 4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $\sim 6 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  とともに照射温度が  $400^\circ\text{C}$  から  $500^\circ\text{C}$  まで外径変化率は単調に増加している。その変化の割合は照射量の増加と共に大きくなっている。

### 4.2 密度測定結果

Table 7 及び Table 8 にそれぞれ PPJX 13 及び PPJX 12 の密度測定結果を示す。ピン下端付近から採取したレファレンス試料の密度を基準とし、スエリングを求めた。

Fig. 11 にスエリングと炉内照射位置との関係を示す。PPJX 13, PPJX 12 とともにほぼ炉心中心位置のワイヤのスエリングが最大になっている。

「常陽」MK-I ラッピングワイヤの密度と照射量との関係を Fig. 12 に、密度と照射温度との関係を Fig. 13 に示す。これらの密度の値からレファレンス材を基準として求めたスエリングの照射量依存性を Fig. 14 に、照射温度依存性を Fig. 15 に示す。Fig. 14 に示すとおり、照射量が約  $2 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  でスエリングが起これり始め、その後照射量の増加に伴ってスエリングがほぼ直線的に増大している。 $370^\circ\text{C} \sim 525^\circ\text{C}$  の範囲では高温の方がスエリングの発生し始める照射量が小さく、同一照射量でのスエリング量が大きい。また高温側で T 材が K 材よりスエリングの発生時期が早く、スエリング量も大きい傾向が見られた。

Fig. 15 より、スエリングは約  $400^\circ\text{C}$  以上で起こることがわかる。文献によると溶体化処理 316 ステンレス鋼のスエリングピークは  $550^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$  にあり、<sup>(10)(11)(13)(15)</sup> さらに  $430^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  にサブピークがあるが、<sup>(12)~(16)</sup> 「常陽」MK-I 照射では  $500^\circ\text{C}$  以上での高照射データが得られないので本試験で見られる  $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  のスエリングがサブピークに相当するのか、

550℃～600℃のピークのすそ野に相当するのかは不明である。

Table 9 及び Fig. 16 に密度測定結果から算出した体積変化 ( $\Delta V/V$ ) と外径測定結果から算出した外径変化の3倍 ( $3\Delta D/D$ ) とを比較して示す。等方的な材料では  $\Delta V/V = 3\Delta D/D$  の関係があるが、<sup>(5)~(10)</sup> 本試験結果においても比較的良く一致している。

#### 4.3 金属組織観察結果

ラッピングワイヤの径方向断面について光学顕微鏡による組織観察を行った。エッチングは10%過硫酸アンモニウム溶液電解腐食とし、写真は100倍及び400倍で撮影した。

Photo. 1～3 にそれぞれ、PPJX 13のラッピングワイヤ (Lot No. K 001) である5345 W 12 (レファレンス試料), 5345 W 32 (照射温度 446℃, 照射量  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) 及び 5345 W 52 (同 509℃,  $4.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) の試料径方向断面組織を示す。Photo. 4～6 にそれぞれ PPJX 12のラッピングワイヤ (Lot No. T 001) である 6756 W 1 B (レファレンス試料), 6756 W 31 (同 425℃,  $6.13 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) 及び 6756 W 51 (同 492℃,  $4.83 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) の試料径方向断面組織を示す。

ピン下端から切り出したレファレンス試料 5345 W 12 及び 6756 W 1 B の組織は受入材とほぼ同じ組織であった。レファレンス試料以外の4試料では主に結晶粒界に炭化物の析出が見られた。特に高温の試料 5345 W 52 及び 6756 W 51 に、より多くの炭化物析出が見られた。

Fig. 17 に照射温度、照射量と炭化物析出との関係を示す。未照射材の SUS 316 溶体化処理材では一般に炭化物の析出が起らない様な短時間、低温条件<sup>(17)</sup> において、照射材では炭化物が析出しており照射により炭化物の析出が促進されたものと考えられる。

なお、Photo. 3.2 に示すようにワイヤの一部にウェアマークが観察された。

#### 4.4 硬さ測定結果

PPJX 13 及び PPJX 12 ラッピングワイヤの径方向断面のマイクロビッカース硬さを Table 10 及び Table 11 にそれぞれに示す。また、照射位置と硬さとの関係を Fig. 18 に示す。照射材の硬さは受入材 (Lot No. K 001 :  $H_v = 141$ , T 001 : 151) にくらべていずれも増加しており、レファレンス試料でも未照射材にくらべて若干の硬さの増加が確認された。又、MK-I 最大照射量 ( $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ) である 5345 W 32 においては、未照射材よりも  $H_v = 170$  程度増加していた。

径方向断面の硬さと中性子照射量の関係を他の集合体についての試験結果とともに、Fig. 19 に示す。照射量の増加とともに、硬さが急激に増加するが、照射量が  $2.5 \sim 3.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  を越えると硬さがほぼ一定になる傾向を示している。

Fig. 20 に硬さの照射温度依存性を示す。照射量が大きい場合、420℃以上では、照射温度が高くなると、硬さは小さくなっている。

## 5. ま と め

高速実験炉「常陽」炉心で50 MW出力上昇サイクルから75 MW第6サイクルまで使用されたPPJX 13のラッピングワイヤ（最大中性子照射量  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）およびPPJX 12のラッピングワイヤ（同  $6.4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）について外径測定、密度測定、金相試験および硬さ測定を実施し、その結果を一連のラッピングワイヤ試験結果と合わせて検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) PPJX 13およびPPJX 12ラッピングワイヤ照射材の外径変化率は最大1.5%であった。  
また、密度測定から得られたスエリングは最大2.8%であった。これらの値は「常陽」MK-I照射で得られたデータとしては最大であった。
- 2) スエリングは照射量が約  $2 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  で現れ、それ以降は照射量が増加するにつれて直線的に増加した。また、「常陽」MK-I照射条件では、照射温度  $400^\circ\text{C}$  以上でスエリングが見られた。
- 3) スエリングは、T材よりもK材の方がわずかに低い傾向を示した。
- 4) 金属組織観察の結果、結晶粒界に炭化物の析出が見られた。
- 5) 硬さはPPJX 13で、受入材に比べ最高  $H_v = 170$  程度増加した。照射量が約  $3 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  までは硬さは増加するが、それ以降はほぼ一定の値を示した。
- 6) 水洗浄不足のまま水中貯蔵した集合体PPJX 12のラッピングワイヤのPIE結果は、PPJX 13のラッピングワイヤのPIE結果と特に差がなく、洗浄不足、水中貯蔵の影響はワイヤに関しては本試験の範囲内ではみられなかった。

## 6. 参 考 文 献

- 1) 多田, 谷口, 吉持, 関, 谷, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJX 14 ) の照射後試験 (2)" PNC SN 941 80-209, 1980年12月
- 2) 多田, 谷口, 吉持, 関, 谷, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJX 06 ) の照射後試験 (2)" PNC SN 941 80-227, 1980年12年
- 3) 多田, 谷口, 吉持, 関, 谷, 田地, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJX 66 ) の照射後試験(2)" PNC SN 941 81-70, 1981年4月
- 4) 谷, 吉持, 関, 多田, 田地, 一海, " MK - I 炉心燃料 ( PPJD 2 B ) の照射後試験(2) " PNC SN 941 81-142, 1981年7月
- 5) 谷, 吉持, 関, 多田, 田地, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJX 09 ) の照射後試験 (2)" PNC SN 941 81-218, 1981年10月
- 6) 谷, 吉持, 関, 多田, 田地, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJD 0 M ) の照射後試験 (1)" PNC SN 941 82-141, 1982年7月
- 7) 吉持, 谷, 関, 多田, 田地, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJD 2 U ) の照射後試験 (1)" PNC SN 941 82-142, 1982年7月
- 8) 佐藤, 吉持, 佐々木, 野村, 小野, 一海, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJW 1 F ) の照射後試験(2)" PNC SN 941 83-99, 1983年6月
- 9) 佐藤, 吉持, 佐々木, 小山, 柚原, "「常陽」MK - I 炉心燃料 ( PPJD 0 B ) の照射後試験 (4)" PNC SN 941 84-71, 1984年5月
- 10) T.A. Kenfield et al., " Swelling of Type 316 Stainless Steel at High Fluences in EBR - II ", J. Nucl. Mater. 75, 85 ( 1978 )
- 11) J.F. Bates et al., " Irradiation-induced Swelling in Solution Annealed AISI 316" HEDL-TME 78-81
- 12) J.I. Bramman et al., " Void Swelling and Microstructural Changes in Fuel Pin Cladding and Unstressed Specimens Irradiated in DFR ", International Conference : Radiation Effects in Breeder Reactor Structural Materials, June 19-23, 1977, Camelback Inn, Scottsdale, Arizona, p.479
- 13) W.K. Appleby et al., " Swelling in Neutron-Irradiated 300-Series Stainless Steels ", *ibid.*, p.509
- 14) J.L. Boutard et al., " Le Gonflement des Aciers 316 ", Irradiation Behaviour of Metallic Materials for Fast Reactor Core Components : Conference Internationale, 4-8 Juin 1979, Ajaccio, Corse, France, p.135

- 15) J.I. Bramman and C. Brown , " The Temperature Dependence of Void Swelling of Fast Reactor Irradiated 316 Stainless Steel " , *ibid.* , p.155
- 16) A. Languille , " Deformations des Gains dans Phenix " , *ibid.* , p.337
- 17) E. Weiss et al. , " Phase Instabilities During High Temperature Exposure of 316 Austenitic Stainless Steel " , *Met. Trans.* 3 , 851 ( 1972 )

Table 1. Mill sheet of wrapping wire (PPJX13, Lot No. K001).

\*\*\* Chemical Analysis and Destructive Test \*\*\* Lot No. = K001  
(Maker's Data)

Soln Temp	Treatment Time	Cold work
1100°C	2 min	0%

P R O D U C T						Ingot	Raw tube
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
0001	0007	0001	0007	0001	0007	5	

\*\*\* Chemical composition (JOYO STD \*2.1 & \*2.2) \*\*\*

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	AL	As	Cu	Nb+Ta	V
Spec.	Max. (W/O)	0.08	0.75	2.00	0.03	0.03	14.00	18.00	3.00	0.10	0.001	0.035	-	-	-	-
	Min. (W/O)	0.04	-	1.50	-	-	11.00	16.00	2.00	-	-	-	-	-	-	-
Ingot	.06	.53	1.54	.017	.010	12.92	16.36	2.32	.04	.0003	.0224	-	-	-	-	-
Product (1)	.06	.54	1.55	.018	.009	12.82	16.50	2.34	.04	<.0010	.0180	.0230	.0040	.0280	<.0010	.0170
Product (2)	.06	.53	1.53	.018	.010	12.89	16.50	2.34	.04	<.0010	.0172	.0230	.0040	.0280	<.0010	.0170

\*\*\* Tensile properties (JOYO STD \*4.1 & \*4.2) \*\*\*

	R O O M T E M P						650°C				
	Tensile strength	0.2% Y.S. (offset)	Elong.	Reduction	Fracture position		Tensile Strength	0.2% Y.S. (offset)	Elong.	Reduction	Fracture position
Spec. Max.	80	-	-	-		X	-	-	-	-	
Min.	55	-	30	-			-	-	-	-	
	(KG/mm**2)		(%)				(KG/mm**2)		(%)		
Product (1)	68.5	-	54	-	A	Product (1)	34.7	-	32	-	B
Product (2)	68.5	-	55	-	B	Product (2)	35.5	-	34	-	B

\*\*\* Inclusions (JOYO STD \*3.1) \*\*\*

	Type-A		Type-B		Type-C		Type-D	
	(T)	(H)	(T)	(H)	(T)	(H)	(T)	(H)
Raw Tube	1.5	1.0	.0	.0	1.0	.0	1.0	.0
Product (1)	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Product (2)	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

\*\*\* Intergranular Attack (JOYO STD \*3.3) \*\*\*

(1)	1
(2)	1

\*\*\* Grain Size (JOYO STD \*3.2) \*\*\*

	Circumf.	Axial
(1)	8.0	8.0
(2)	8.0	8.0

\*\*\* Wrapping Test (JOYO STD \*4.3) \*\*\*

(1)	1
(2)	1

Table 2. Mill sheet of wrapping wire (PPJX12, Lot No. T001).

\*\*\* Chemical Analysis and Destructive Test \*\*\*

Lot No. = T001

(Maker's Data)

Soln Temp.	Treatment Time	Cold work
1050°C	1 min	0%

TEST SAMPLE							
PRODUCT						Ingot	Raw tube
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
0024	0026	0024	0026	0024	0026	G-148	

\*\*\* Chemical composition (JOYO STD \*2.1 & \*2.2) \*\*\*

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+Ta	V
Spec.	Max. (W/O)	0.08	0.75	2.00	0.03	0.03	14.00	18.00	3.00	0.10	0.001	0.035	-	-	-	-
	Min. (W/O)	0.04	-	1.50	-	-	11.00	16.00	2.00	-	-	-	-	-	-	-
Ingot	.06	.46	1.78	.004	.011	13.18	16.95	2.41	.02	.0004	.0210	-	-	-	-	-
Product (1)	.07	.52	1.77	.003	.006	13.18	16.97	2.32	.02	.0004	.0210	.0030	.0100	.0080	<.0100	<.0010
Product (2)	.07	.50	1.77	.003	.005	13.18	16.95	2.35	.02	.0004	.0220	.0030	.0100	.0080	<.0100	<.0010

\*\*\* Tensile Properties (JOYO STD \*4.1 & \*4.2) \*\*\*

ROOM TEMP						650°C					
	Tensile strength	0.2% Y.S. (offset)	Elong.	Reduction	Fracture position		Tensile strength	0.2% Y.S. (offset)	Elong.	Reduction	Fracture position
Spec. Max.	80	-	-	-		X	-	-	-	-	
Min.	55 (KG/MM**2)	-	30 (%)	-			-	-	-	-	-
Product (1)	71.2	-	49	-	A	Product (1)	51.7	-	22	-	A
Product (2)	70.8	-	47	-	B	Product (2)	53.4	-	24	-	A

\*\*\* Inclusions (JOYO STD \*3.1) \*\*\*

	Type-A (T) (H)		Type-B (T) (H)		Type-C (T) (H)		Type-D (T) (H)	
Raw Tube	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Product (1)	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	.0
Product (2)	.0	.0	.0	.0	.0	.0	1.0	.0

\*\*\* Intergranular Attack (JOYO STD \*3.3) \*\*\*

(1)	1
(2)	1

\*\*\* Grain Size (JOYO STD \*3.2) \*\*\*

	Circumf.	Axial
(1)	8.0	8.0
(2)		

\*\*\* Wrapping Test (JOYO STD \*4.3) \*\*\*

(1)	1
(2)	1



Table 3. Test item of irradiated wrapping wire (PPJX13, Lot No. K001).

Specimen Number	DFPB ** (mm)	Length (mm)	Irradiation Temperature (°C)	Neutron Fluence ( $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> ) (E>0.1MeV)	Test*** Item
5345W1*	65~ 185	119	370	0.27	OD
5345W11*	106~ 185	79	370	0.32	D
5345W12*	79~ 106	27	370	0.19	M, H
5345W13*	65~ 76	13	370	0.12	-
5345W2	592~ 672	75	411	5.93	OD, D
5345W3	672~ 772	99	436	6.39	OD
5345W31	672~ 743	70	432	6.35	D
5345W32	743~ 772	29	448	6.39	M, H
5345W4	803~ 912	106	474	5.90	OD
5345W41	803~ 894	91	472	5.97	D
5345W42	894~ 912	15	486	5.45	-
5345W5	932~1022	87	503	4.47	OD
5345W51	932~ 999	67	501	4.64	D
5345W52	999~1022	23	510	3.98	M, H
5345W6	1062~1132	65	519	2.35	OD, D

\* Reference

\*\* Distance from pin bottom

\*\*\* OD : Outer diameter

M : Metallurgical

D : Density

H : Hardness

Table 4. Test item of irradiated wrapping wire (PPJX12, Lot No. T001).

Specimen Number	DFPB ** (mm)	Length (mm)	Irradiation Temperature (°C)	Neutron Fluence ( $10^{22}n/cm^2$ ) ( $E>0.1MeV$ )	Test*** Item
6756W1A	85~ 115	30	-	-	-
6756W1B*	65~ 85	20	370	0.15	H, OM
6756W12*	115~ 185	70	370	0.33	OD, D
6756W21	592~ 602	10	-	-	-
6756W22	602~ 672	70	412	5.82	OD, D
6756W31	672~ 702	30	425	6.13	H, OM
6756W32	702~ 772	70	439	6.24	OD, D
6756W41	802~ 842	40	-	-	-
6756W42	842~ 912	70	477	5.57	OD, D
6756W51	932~ 952	20	492	4.83	H, OM
6756W52	952~1022	70	502	4.20	OD, D
6756W6	1062~1132	70	515	2.27	OD, D

\* Reference

\*\* Distance from Pin Bottom

\*\*\* OD : Outer diameter

M : Metallurgical

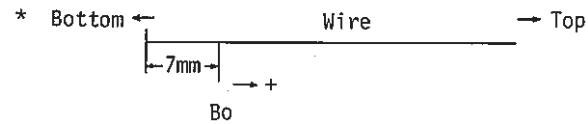
D : Density

H : Hardness



Table 6. Diameter of irradiated wrapping wire (PPJX12).

Specimen Number (Lot No.)	Distance from Pin Bottom (mm)	Irrad. Temp (°C) Neutron Fluence (10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> )	Distance from Bo* (mm)											Average Diameter (mm)	Dia. Change for Reference (%)	*3 Swelling (%)	
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50				55
6756W12** (T001)	112~183	370 0.33	1.206	1.205	1.205	1.206	1.202	1.204	1.204	1.204	1.204	1.205	1.205	1.204	—	0.0	
6756W22 (T001)	599~671	412 5.82	1.215	1.213	1.217	1.212	1.211	1.213	1.215	1.215	1.208	1.209	1.211	1.212	0.7	2.1	
6756W32 (T001)	695~769	439 6.24	1.218	1.216	1.212	1.214	1.212	1.217	1.215	1.213	1.213	1.214	1.214	1.214	0.8	2.4	
6756W42 (T001)	839~912	477 5.57	1.216	1.215	1.215	1.215	1.216	1.216	1.217	1.215	1.214	1.218	1.216	1.215	0.9	2.7	
6756W52 (T001)	950~1022	502 4.20	1.214	1.211	1.209	1.208	1.209	1.207	1.206	1.208	1.210	1.207	1.207	1.206	1.208	0.3	0.9
6756W6 (T001)	1062~1132	515 2.27	1.206	1.204	1.203	1.203	1.206	1.204	1.205	1.206	1.204	1.204	1.204	1.204	1.204	0.0	0.0



\*\* Reference

\*3 Swelling = 3 × Dia. change

Table 7. Density of irradiated wrapping wire (PPJX13).

Specimen No. (Lot No.)	DFPB** (mm)	Irradiation Temperature (°C)	Fluence ( $10^{22}n/cm^2$ ) E>0.1 MeV	Length (mm)	Weight (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )		Swelling*** (%)
						Measured Values	Average	
5345W11* (K001)	106~185	370	0.32	79	0.71	7.967	7.97 <sub>1</sub>	-
						7.969		
						7.972		
						7.969		
						7.978		
5345W2 (K001)	592~672	411	5.93	77	0.69	7.836	7.83 <sub>0</sub>	1.8
						7.827		
						7.827		
						7.831		
						7.831		
5345W31 (K001)	672~743	432	6.35	71	0.64	7.755	7.75 <sub>4</sub>	2.8
						7.757		
						7.754		
						7.754		
						7.751		
5345W41 (K001)	803~894	472	5.97	91	0.84	7.763	7.76 <sub>4</sub>	2.7
						7.767		
						7.760		
						7.764		
						7.764		
5345W51 (K001)	932~999	501	4.64	67	0.81	7.922	7.92 <sub>2</sub>	0.6
						7.924		
						7.919		
						7.919		
						7.926		
5345W6 (K001)	1062~1132	519	2.35	67	0.60	7.962	7.96 <sub>2</sub>	0.1
						7.962		
						7.964		
						7.967		
						7.955		

\* Reference

\*\* Distance from pin bottom

$$*** \text{ Swelling (\%)} = \frac{\rho_{\text{ref}} - \rho_{\text{irr}}}{\rho_{\text{irr}}}$$

$\rho_{\text{ref}}$  : density of reference specimen

$\rho_{\text{irr}}$  : density of irradiated specimen

Table 8. Density of irradiated wrapping wire (PPJX12).

Specimen No. (Lot No.)	DFPB ** (mm)	Irradiation Temperature (°C)	Fluence ( $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> ) (E>0.1 MeV)	Length (mm)	Weight (g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )		Swelling (%)
						Measured Values	Average	
6756W12* (T001)	115~185	370	0.33	71	0.63	7.972	7.96 <sub>8</sub>	-
						7.973		
						7.971		
						7.969		
						7.954		
6756W22 (T001)	602~672	412	5.82	72	0.64	7.842	7.85 <sub>0</sub>	1.5
						7.862		
						7.851		
						7.849		
						7.846		
6756W32 (T001)	702~772	439	6.24	74	0.66	7.775	7.77 <sub>1</sub>	2.6
						7.775		
						7.773		
						7.766		
						7.765		
6756W42 (T001)	842~912	477	5.57	73	0.65	7.754	7.75 <sub>0</sub>	2.8
						7.747		
						7.746		
						7.750		
						7.751		
6756W52 (T001)	952~1022	502	4.20	72	0.64	7.871	7.87 <sub>1</sub>	1.3
						7.866		
						7.874		
						7.867		
						7.879		
6756W6 (T001)	1062~1132	515	2.27	70	0.64	7.931	7.93 <sub>4</sub>	0.5
						7.937		
						7.932		
						7.940		
						7.930		

\* Reference

\*\* Distance from pin bottom

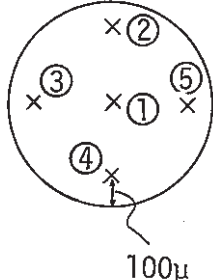
Table 9. Swelling of irradiated wrapping wire (PPJX13, PPJX12).

Fab. No. (Lot No.)	Irradiation Temperature (°C)	Neutron Fluence (n/cm <sup>2</sup> , E>0.1 MeV)	Swelling (%)	
			$\Delta V/V^*$	$3\Delta D/D^{**}$
PPJX13 (K001)	370	$0.32 \times 10^{22}$	0.0	0.0
	411	$5.93 \times 10^{22}$	1.8	1.3
	432	$6.35 \times 10^{22}$	2.8	3.0
	472	$5.97 \times 10^{22}$	2.7	4.5
	501	$4.64 \times 10^{22}$	0.6	1.0
	519	$2.35 \times 10^{22}$	0.1	0.5
PPJX12 (T001)	370	$0.33 \times 10^{22}$	0.0	0.0
	412	$5.82 \times 10^{22}$	1.5	2.1
	439	$6.24 \times 10^{22}$	2.6	2.4
	477	$5.57 \times 10^{22}$	2.8	2.7
	502	$4.20 \times 10^{22}$	1.3	0.9
	515	$2.27 \times 10^{22}$	0.5	0.0

\* by density

\*\* by diameter

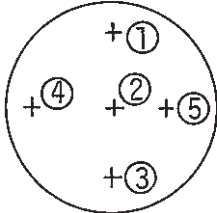
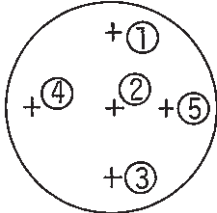
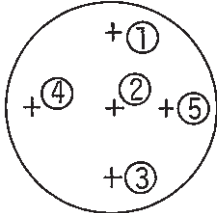
Table 10. Hardness of irradiated wrapping wire (PPJX13).

Specimen No. (Lot No.)	Neutron Fluence (E>0.1 MeV) Irradiation Temperature	Hardness Hv (500g loaded)			Note
		No.	Measured Values	Average	
5345W12* (K001)	0.19×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 370°C	①	179	174	
		②	172		
		③	175		
		④	173		
		⑤	170		
5345W32 (K001)	6.39×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 448°C	①	318	311	
		②	312		
		③	301		
		④	307		
		⑤	315		
5345W52 (K001)	3.98×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 510°C	①	253	259	
		②	249		
		③	258		
		④	262		
		⑤	273		

\* Reference



Table 11. Hardness of irradiated wrapping wire (PPJX12).

Specimen No. (Lot No.)	Neutron Fluence (E>0.1 MeV) Irradiation Temperature	Hardness Hv (500g loaded)			Note
		No.	Measured	Average	
6756W1B* (T001)	0.15×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 370°C	①	196	192	
		②	189		
		③	185		
		④	195		
		⑤	198		
6756W31 (T001)	6.13×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 425°C	①	315	315	
		②	315		
		③	318		
		④	309		
		⑤	315		
6756W51 (T001)	4.83×10 <sup>22</sup> n/cm <sup>2</sup> 492°C	①	266	269	
		②	276		
		③	264		
		④	273		
		⑤	268		

\* Reference

"JOYO" MK-I Core Map

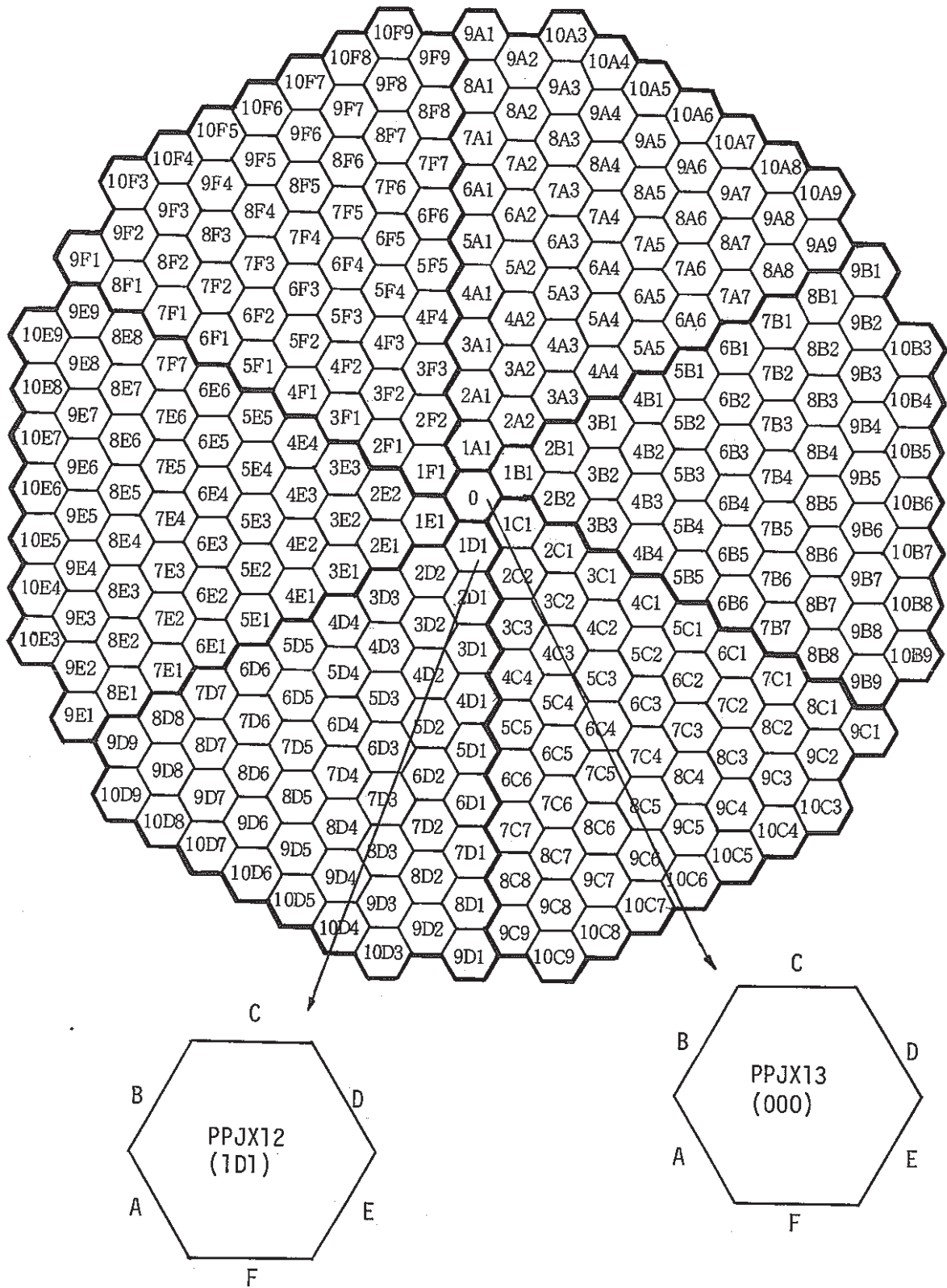
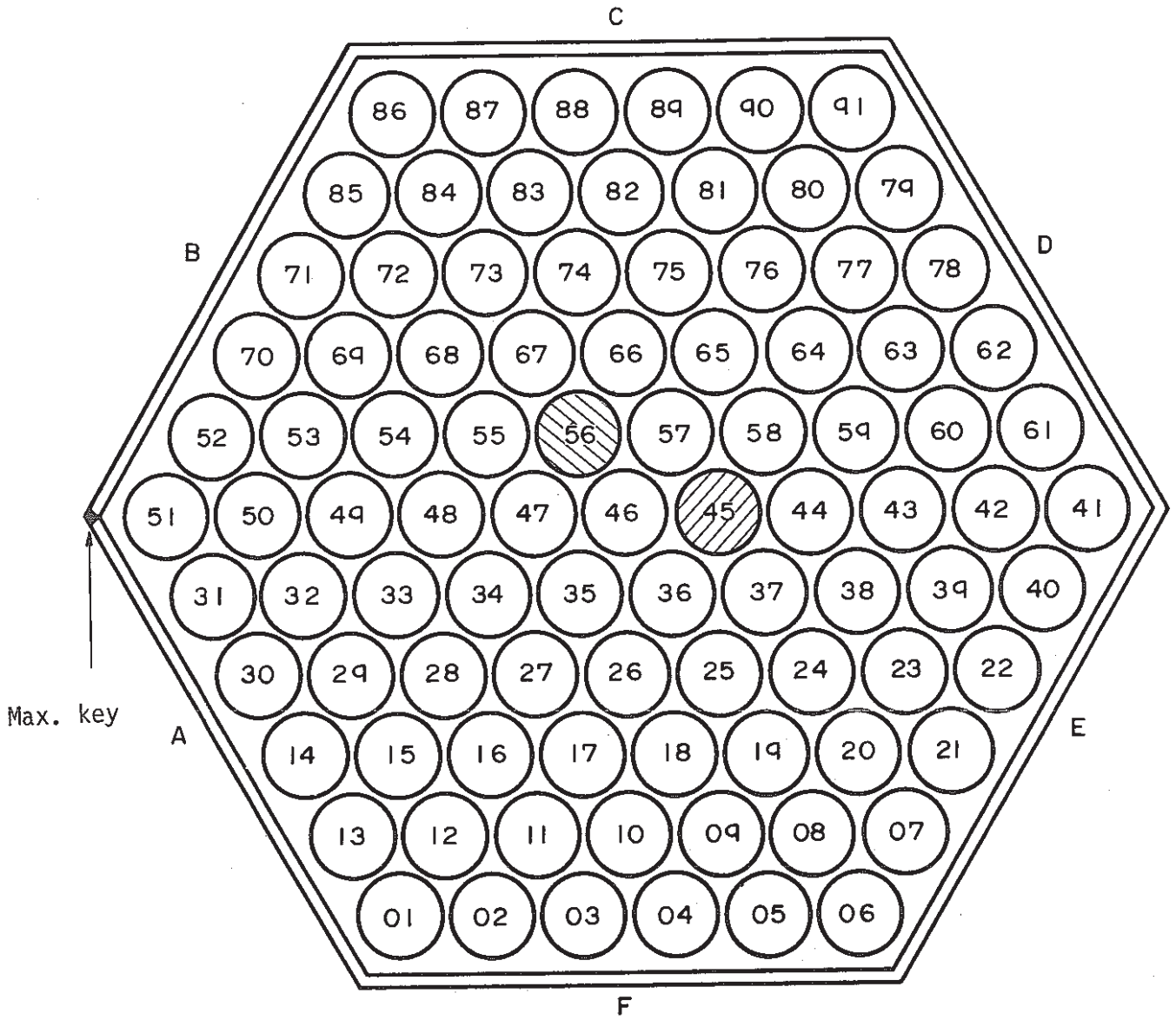
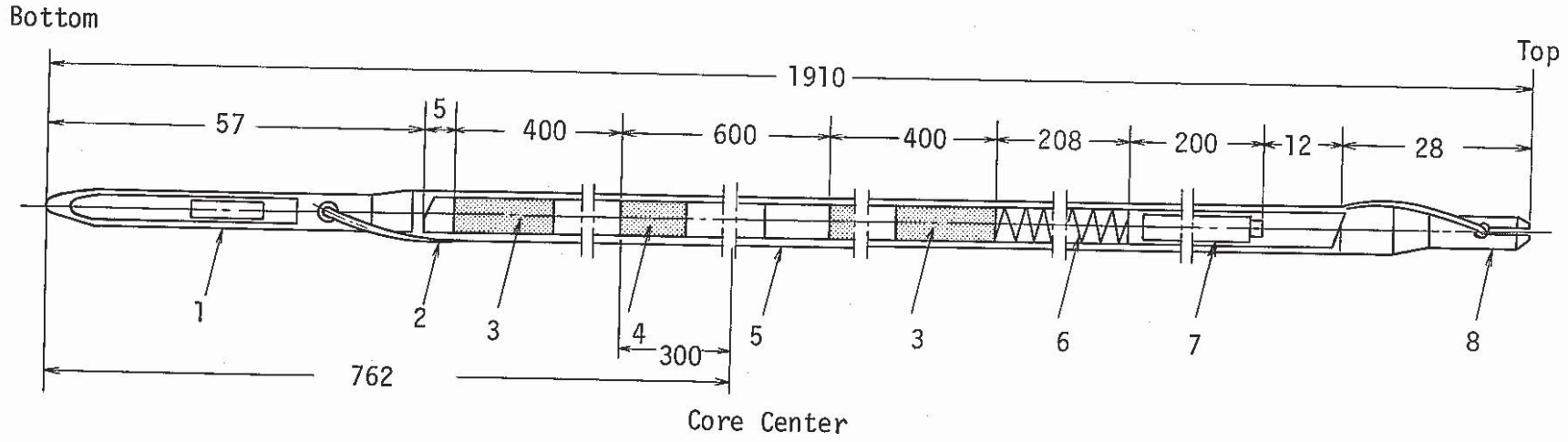


Fig. 1. Subassembly (PPJX13 and PPJX12) orientation in core.



45 : PPJX13  
56 : PPJX12

Fig. 2. Location of the pin in the subassembly (PPJX13 and PPJX12).



8	upper end plug	SUS 316	
7	sleeve	SUS 316	
6	plenum spring	SUS 316	
5	cladding tube	SUS 316	I.D. 5.6φ , O.D. 6.3φ
4	core pellet	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	
3	blanket pellet	UO <sub>2</sub>	
2	wrapping wire	SUS 316	1.2φ
1	lower end plug	SUS 316	
No.	parts name	material	remarks

Fig. 3. JOYO MK-I core fuel pin.

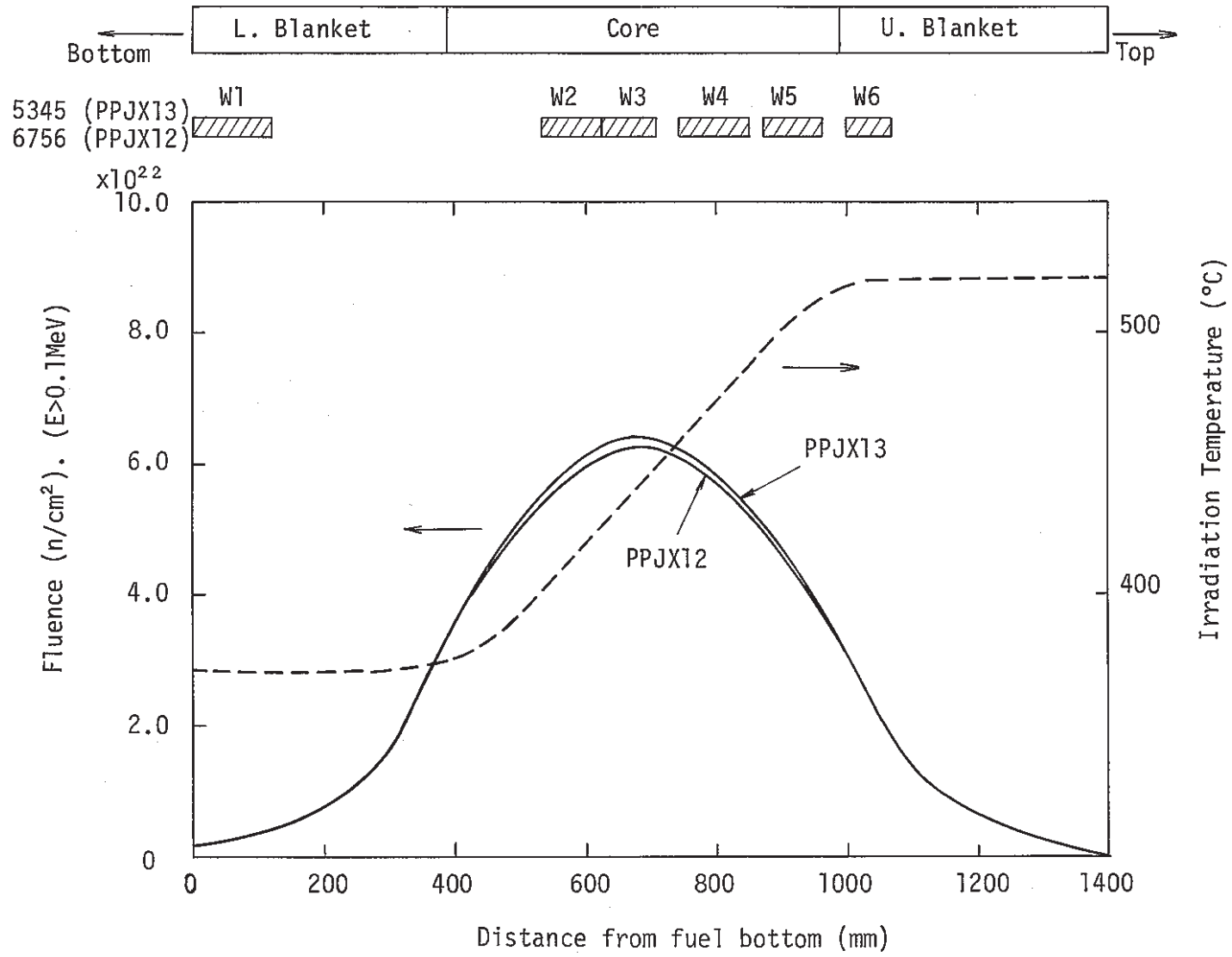


Fig. 4. Irradiation condition and sampling position of wrapping wire (PPJX13 and PPJX12).

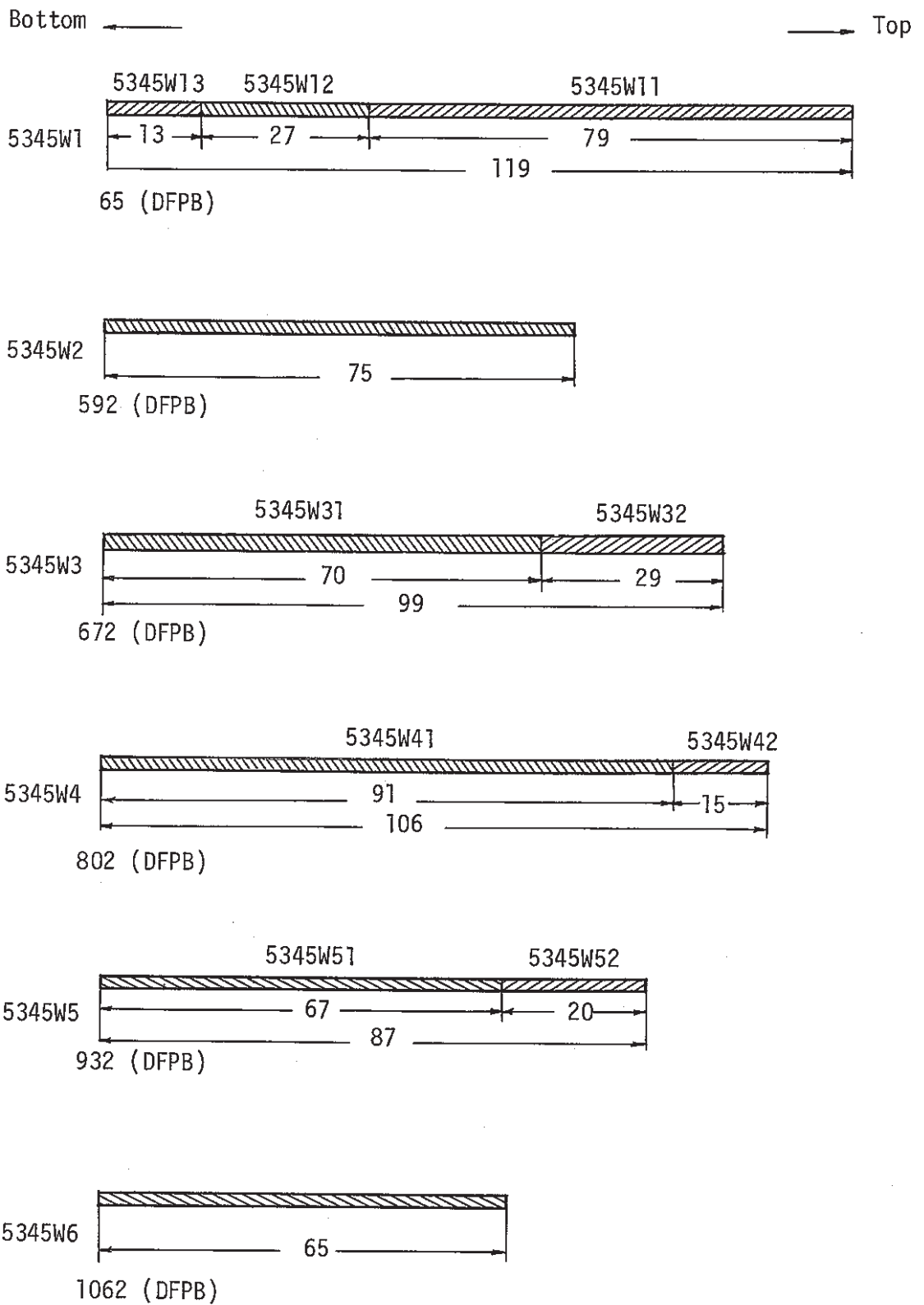


Fig. 5. Sampling position of wrapping wires (PPJX13). Wire length are measured values.

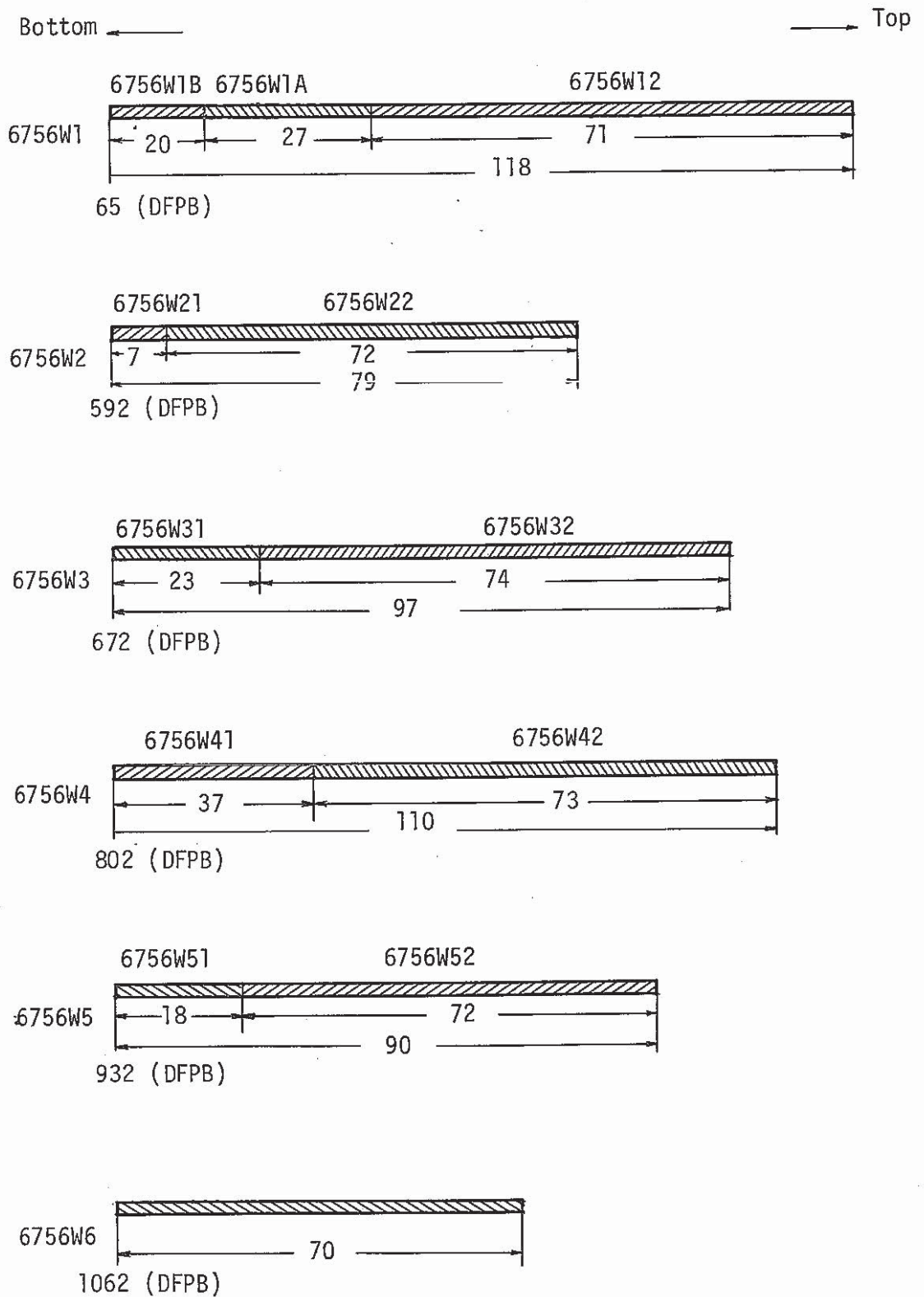


Fig. 6. Sampling position of wrapping wires (PPJX12).  
Wire length are measured values.

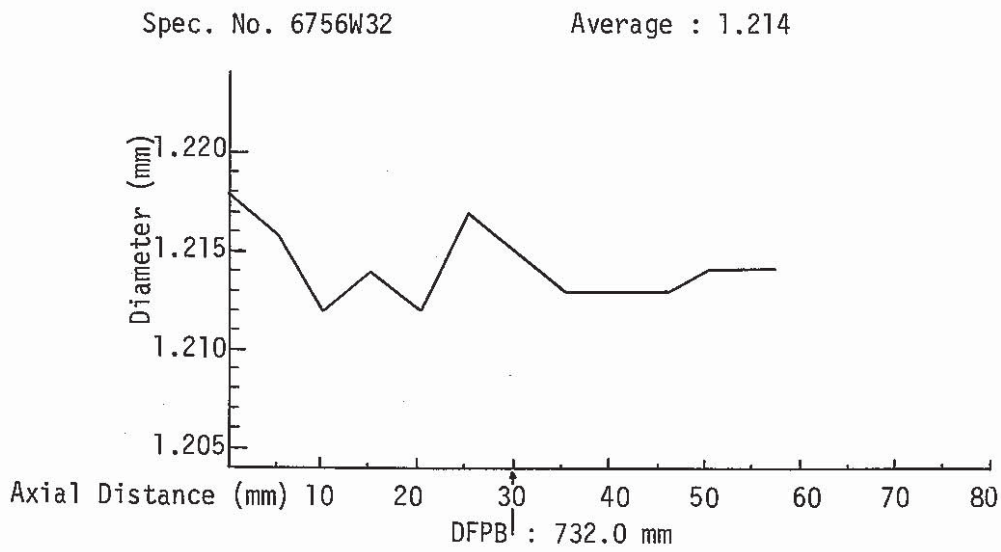
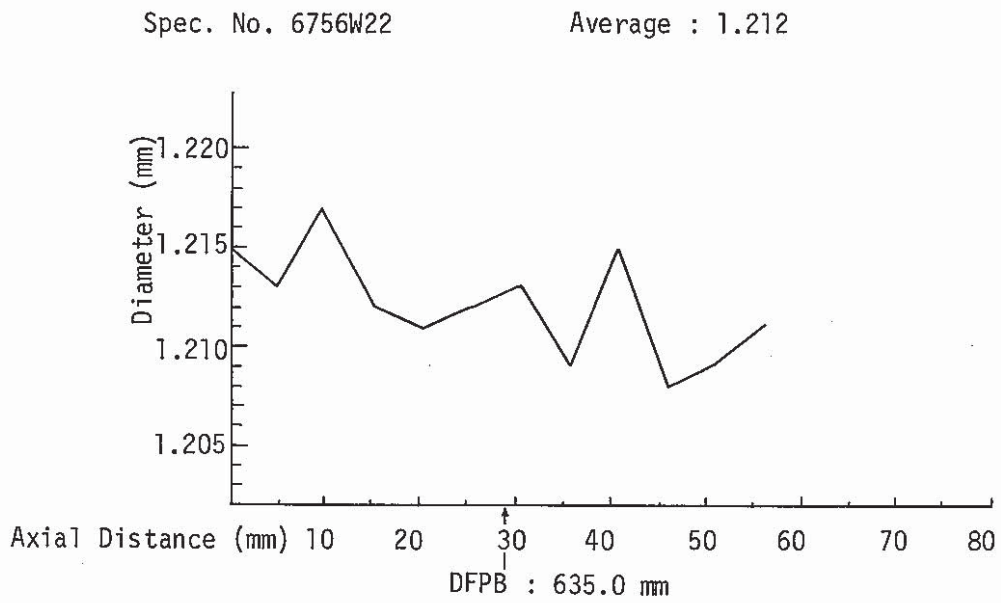
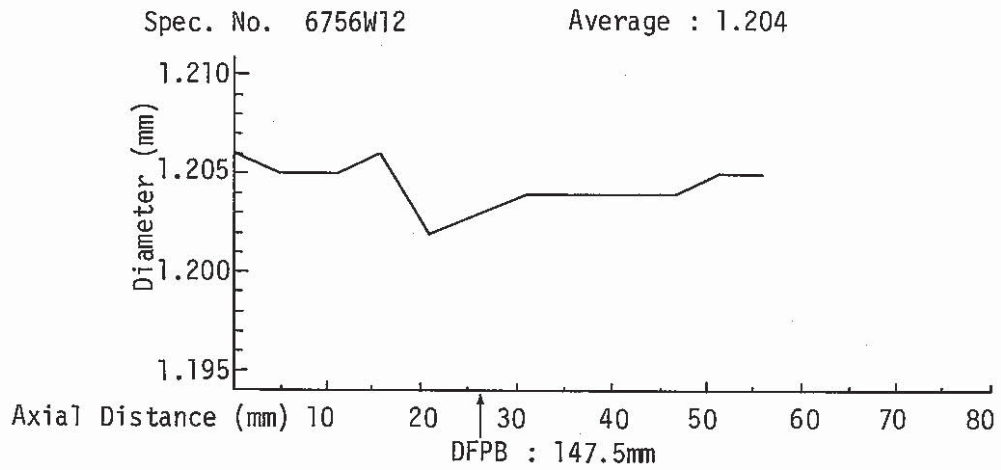


Fig. 7 (1). Diameter measurement results of wrapping wire (PPJX12).



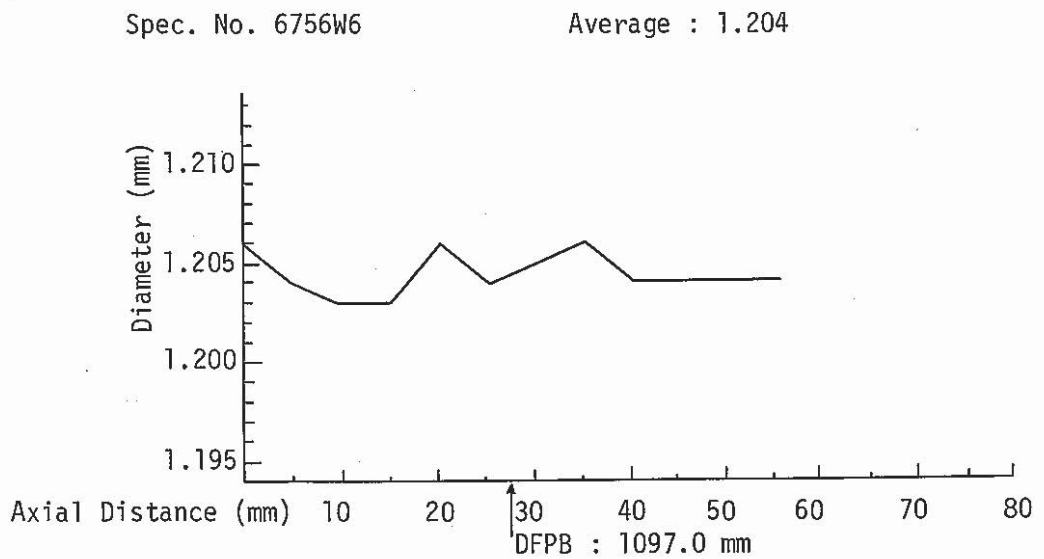
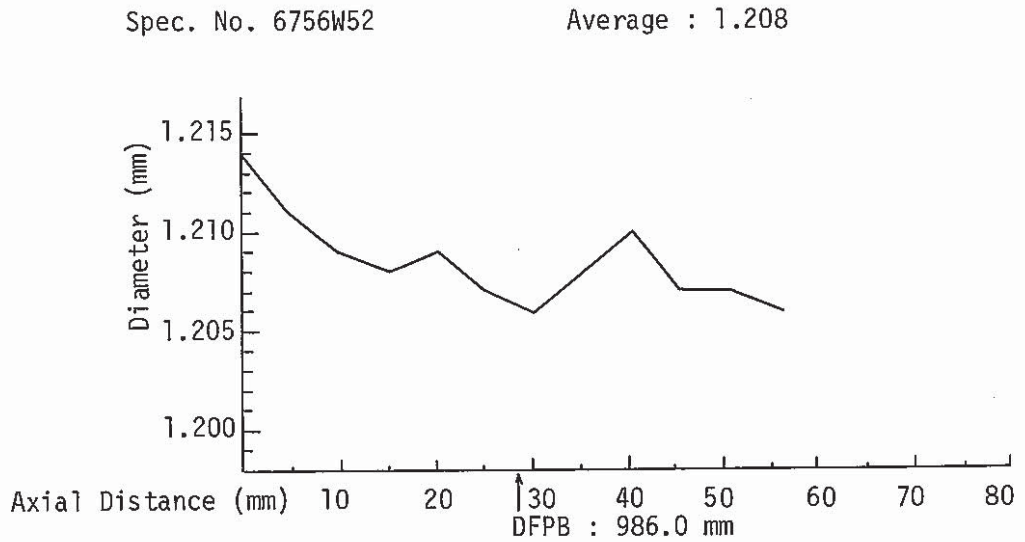
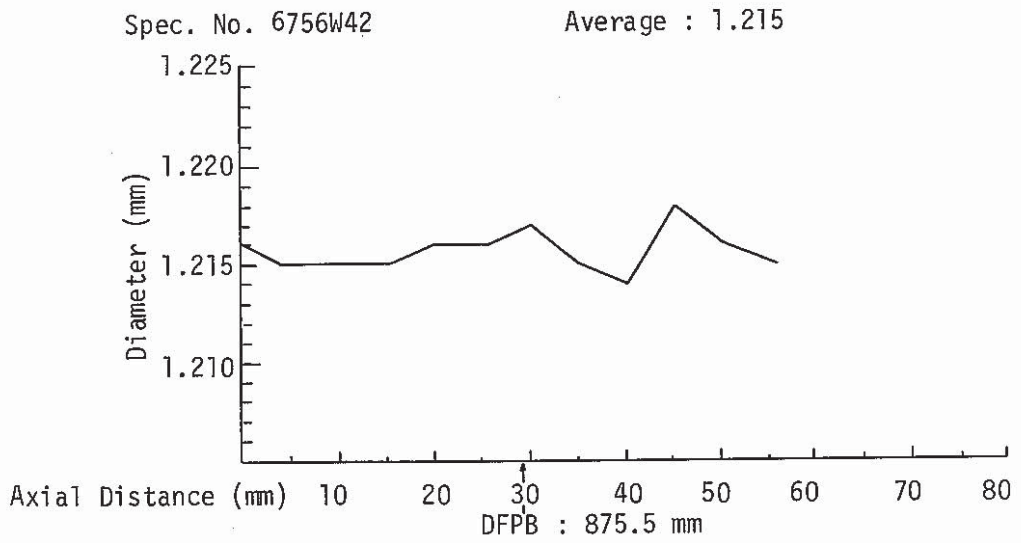


Fig. 7 (2). Diameter measurement results of wrapping wire (PPJX12).

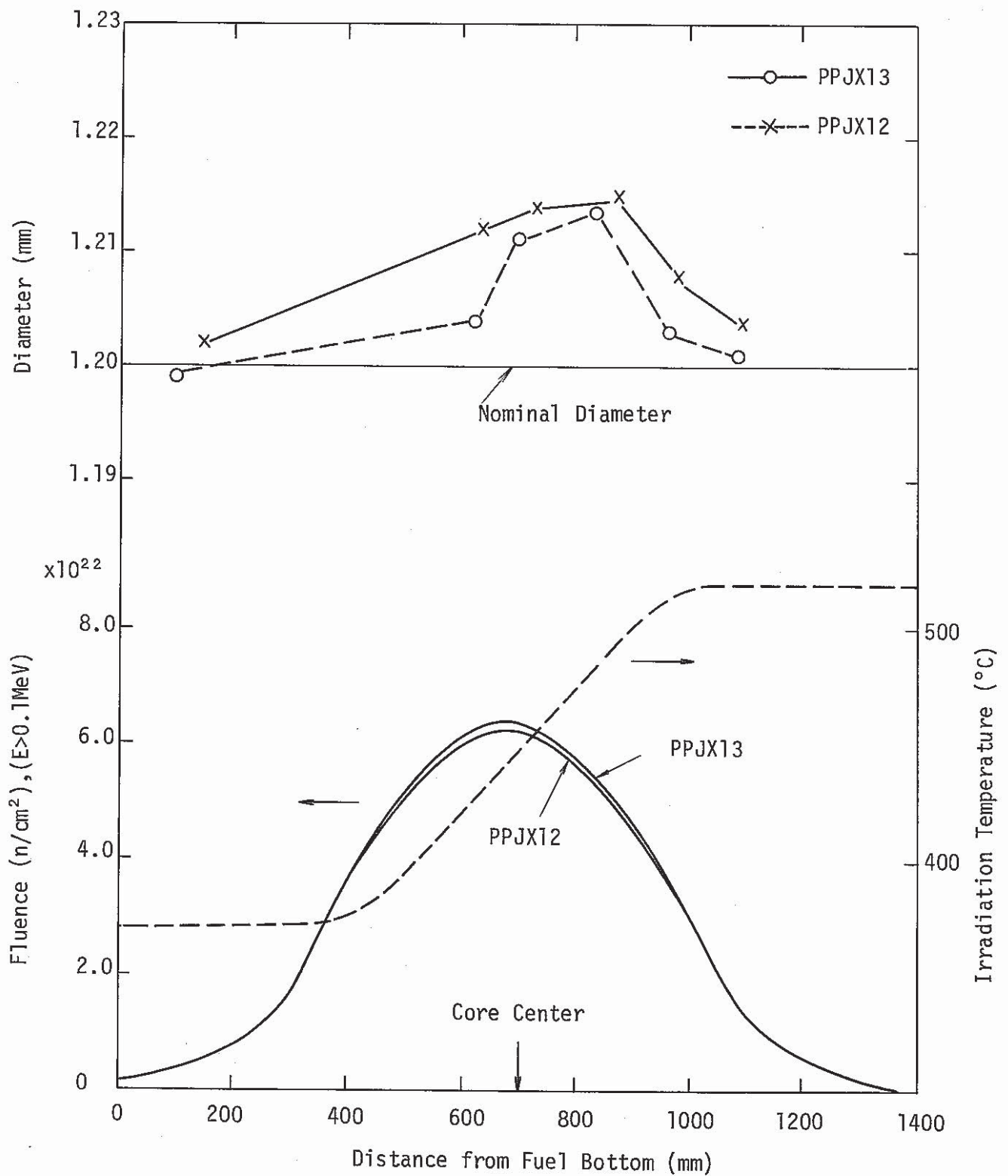


Fig. 8. Diameter profile of irradiated wrapping wire (PPJX13 and PPJX12).

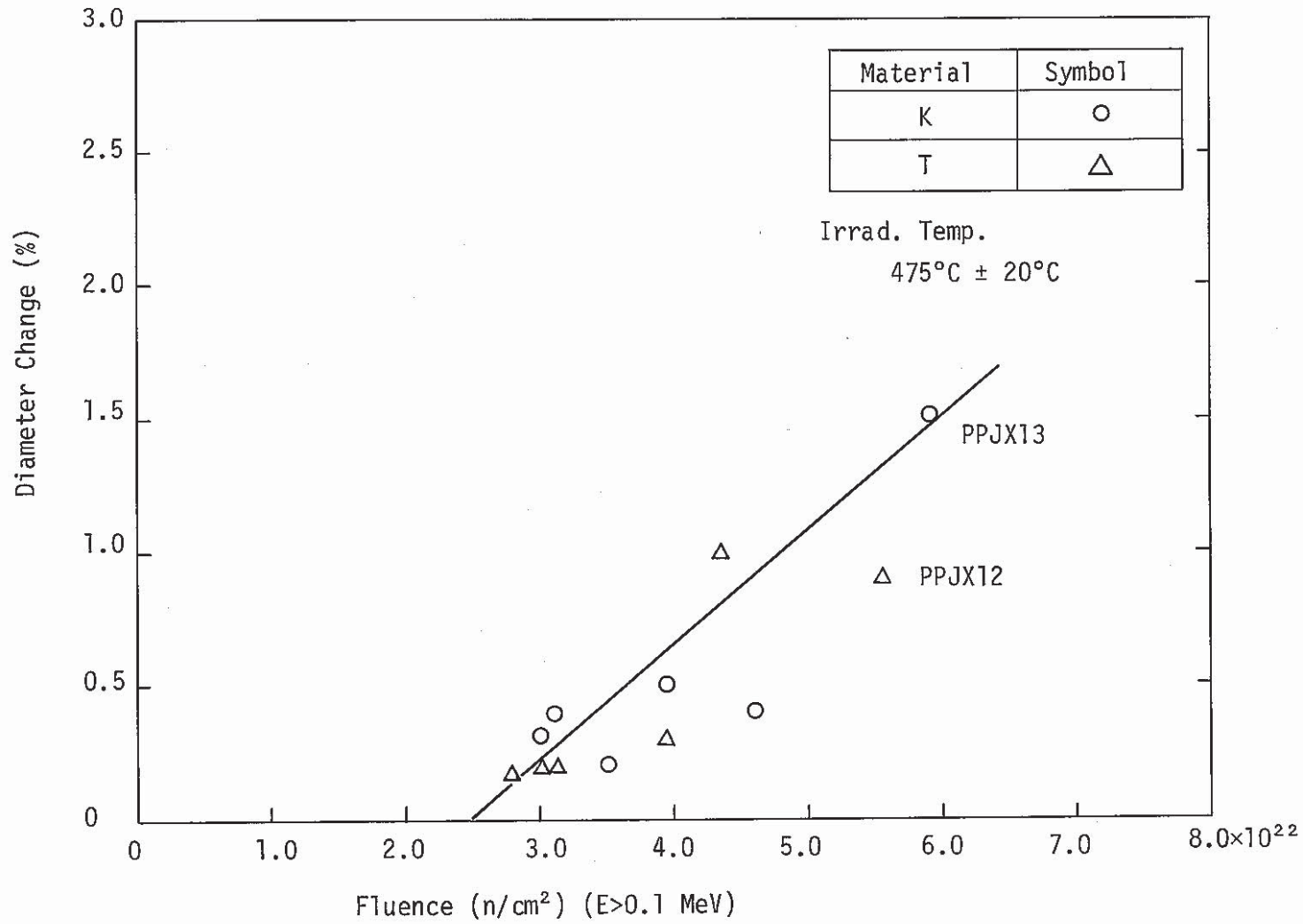


Fig. 9. Diameter change of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

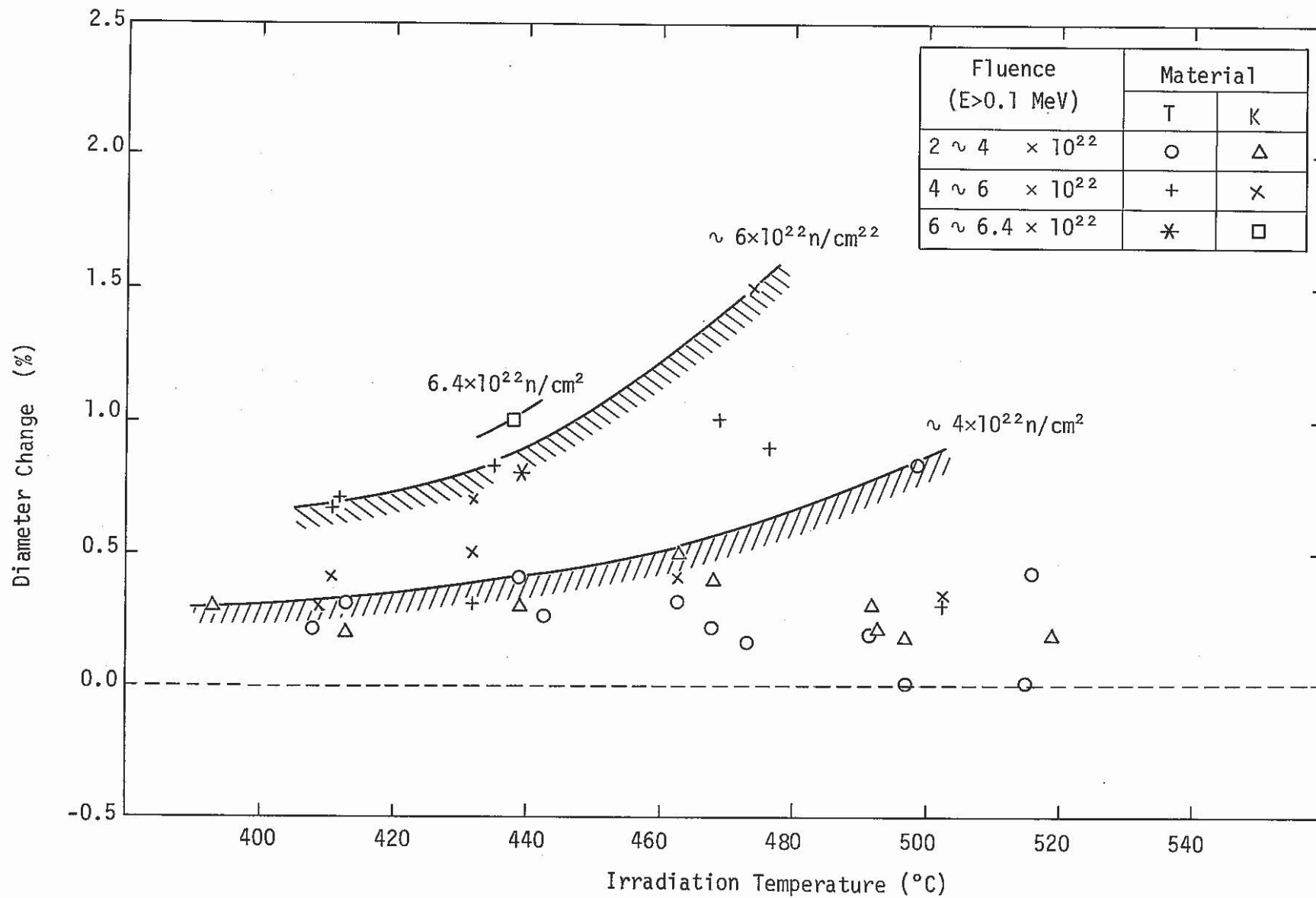


Fig. 10. Diameter change of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature.

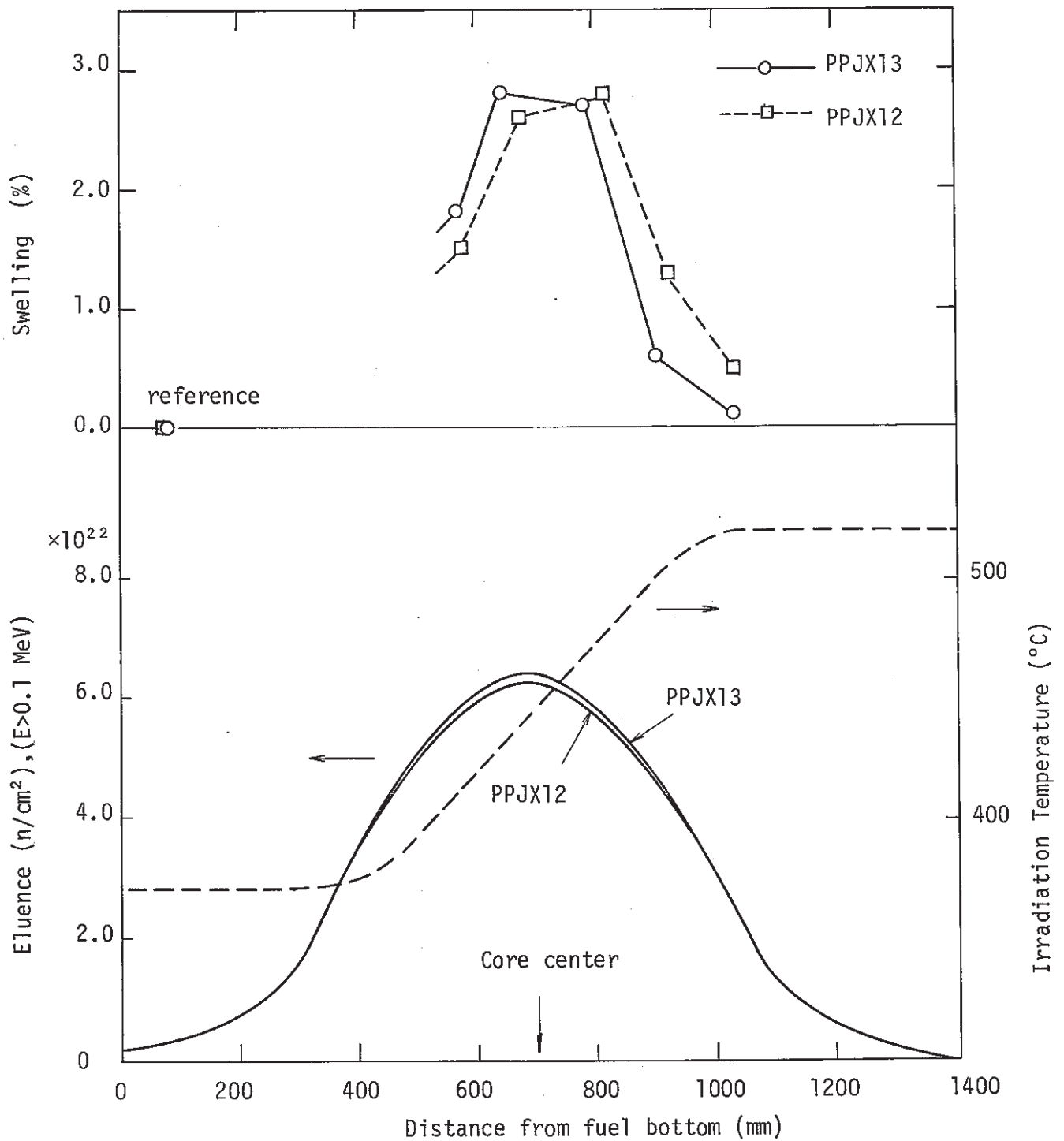


Fig. 11. Swelling profile of irradiated wrapping wire PPJX13 and PPJX12 by density data.

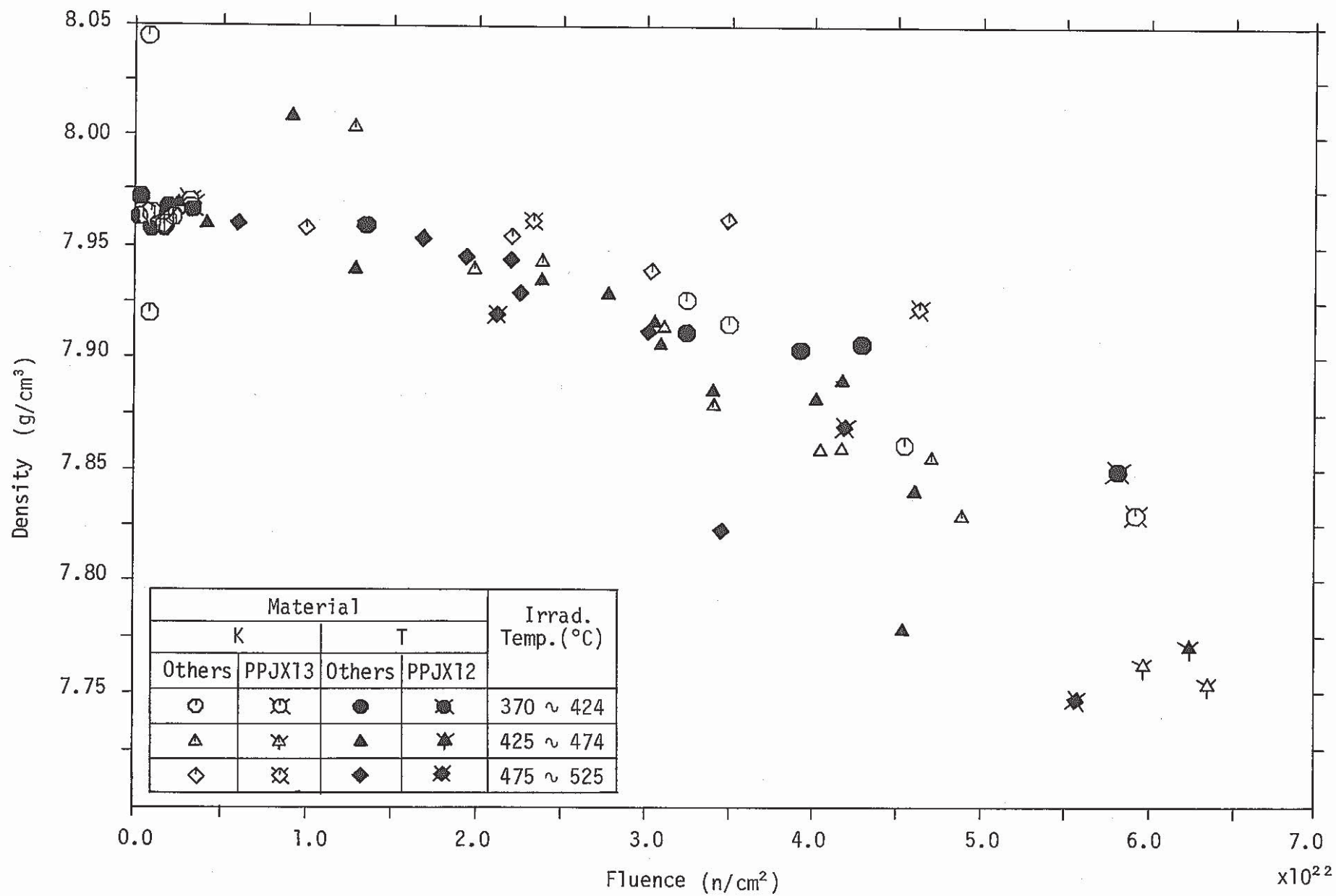


Fig. 12. Density of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

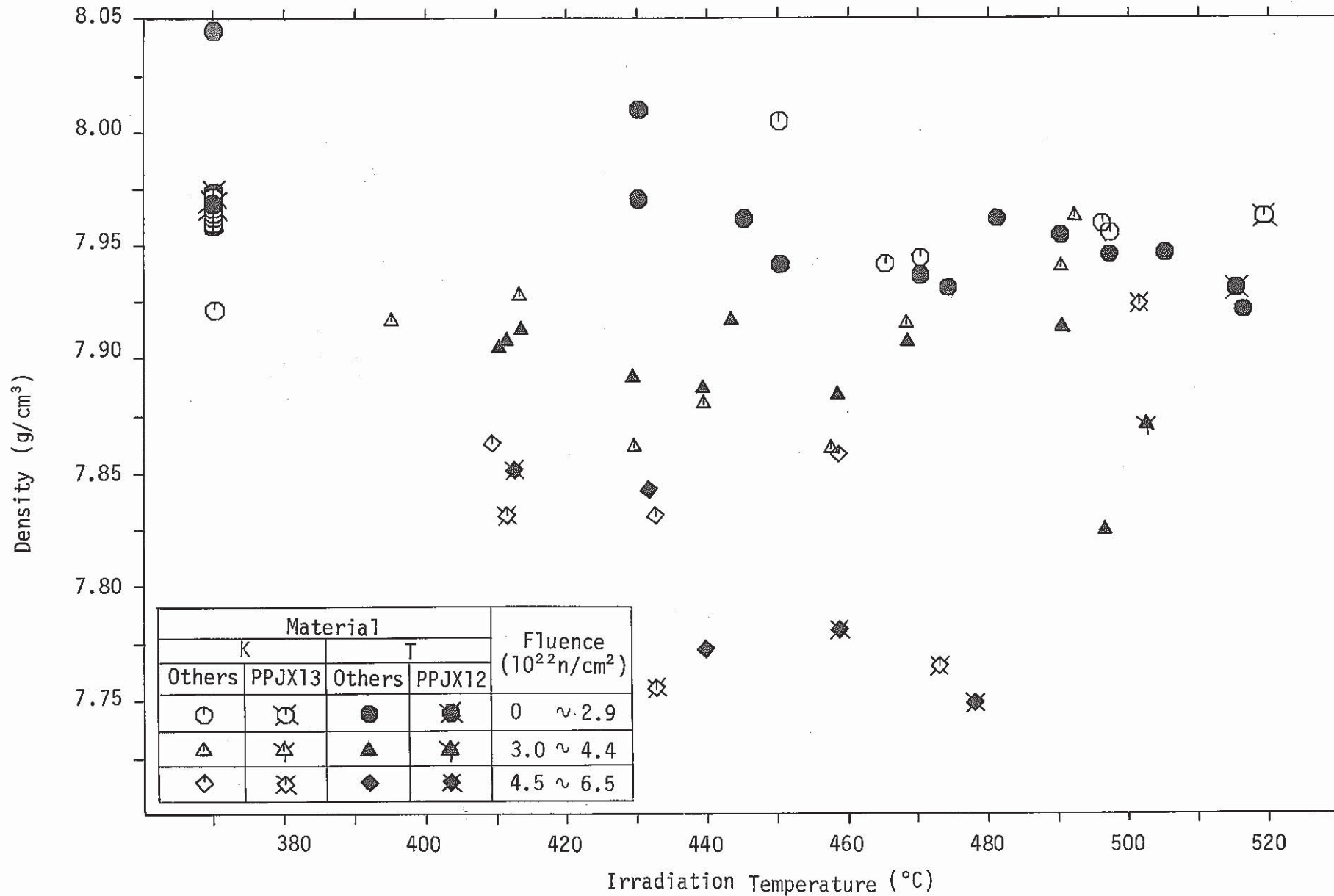


Fig. 13. Density of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature.

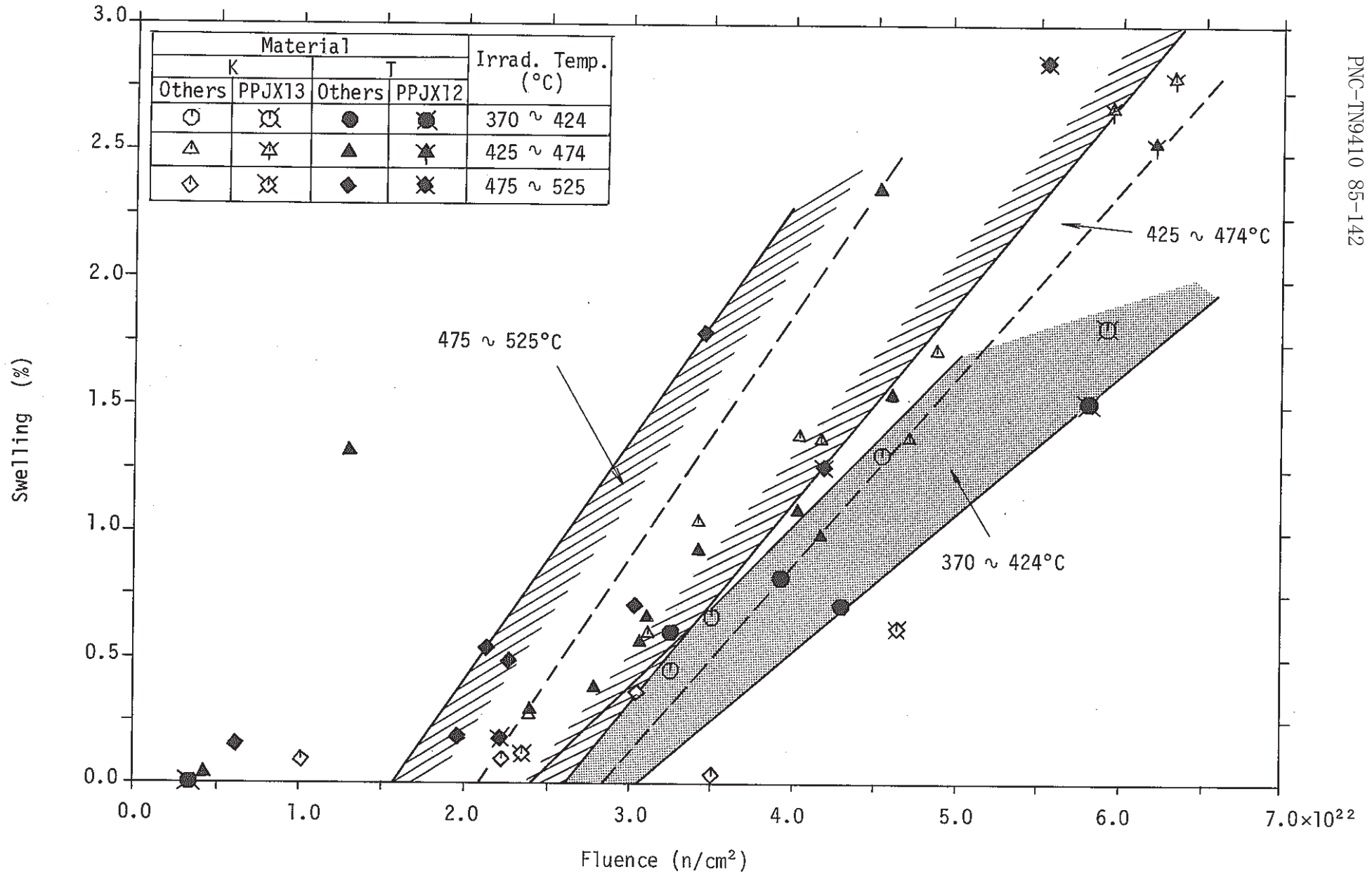


Fig. 14. Swelling of irradiated wrapping wire as a function of fluence (by density data).



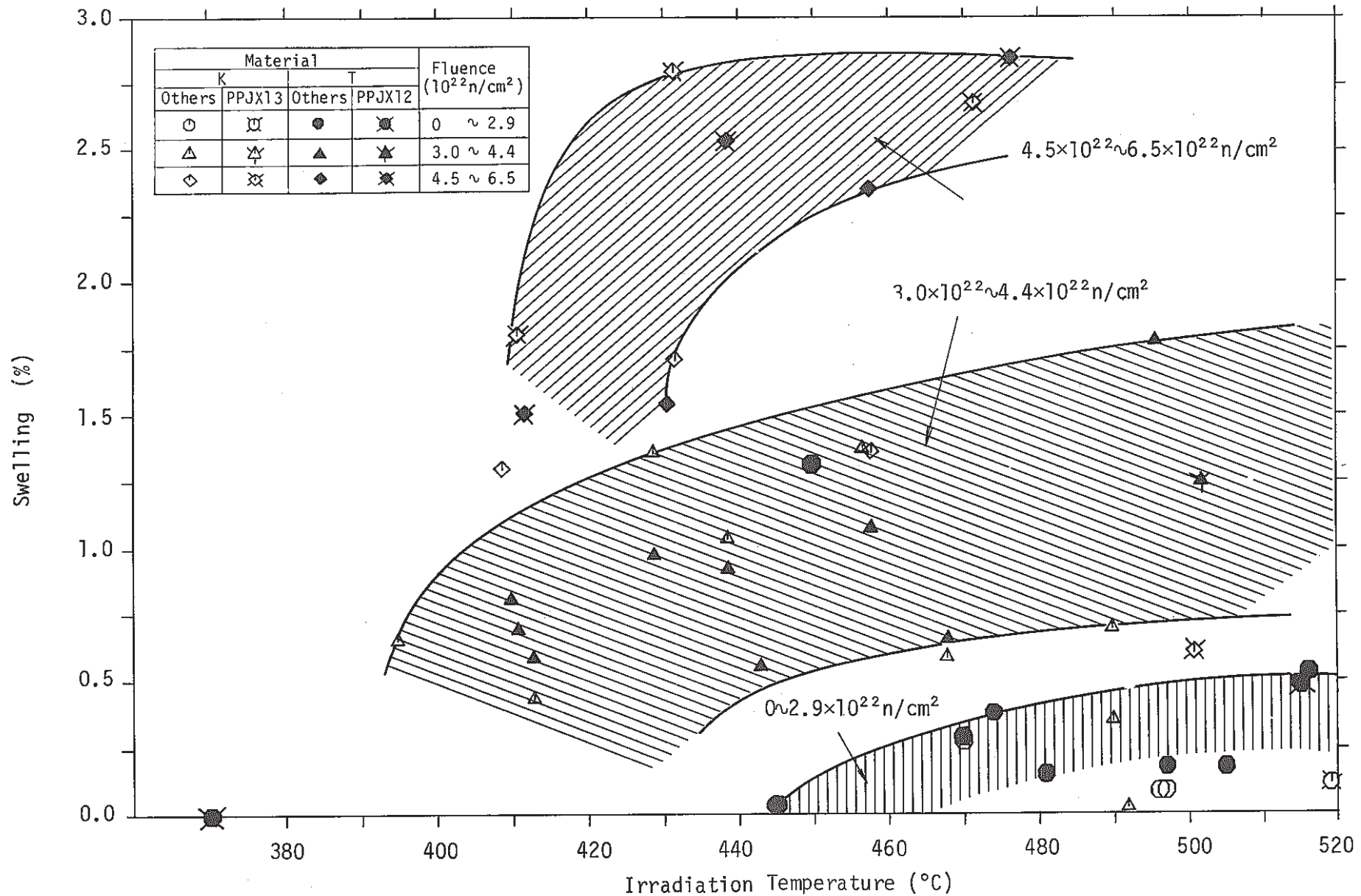


Fig. 15. Swelling of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature (by density data).

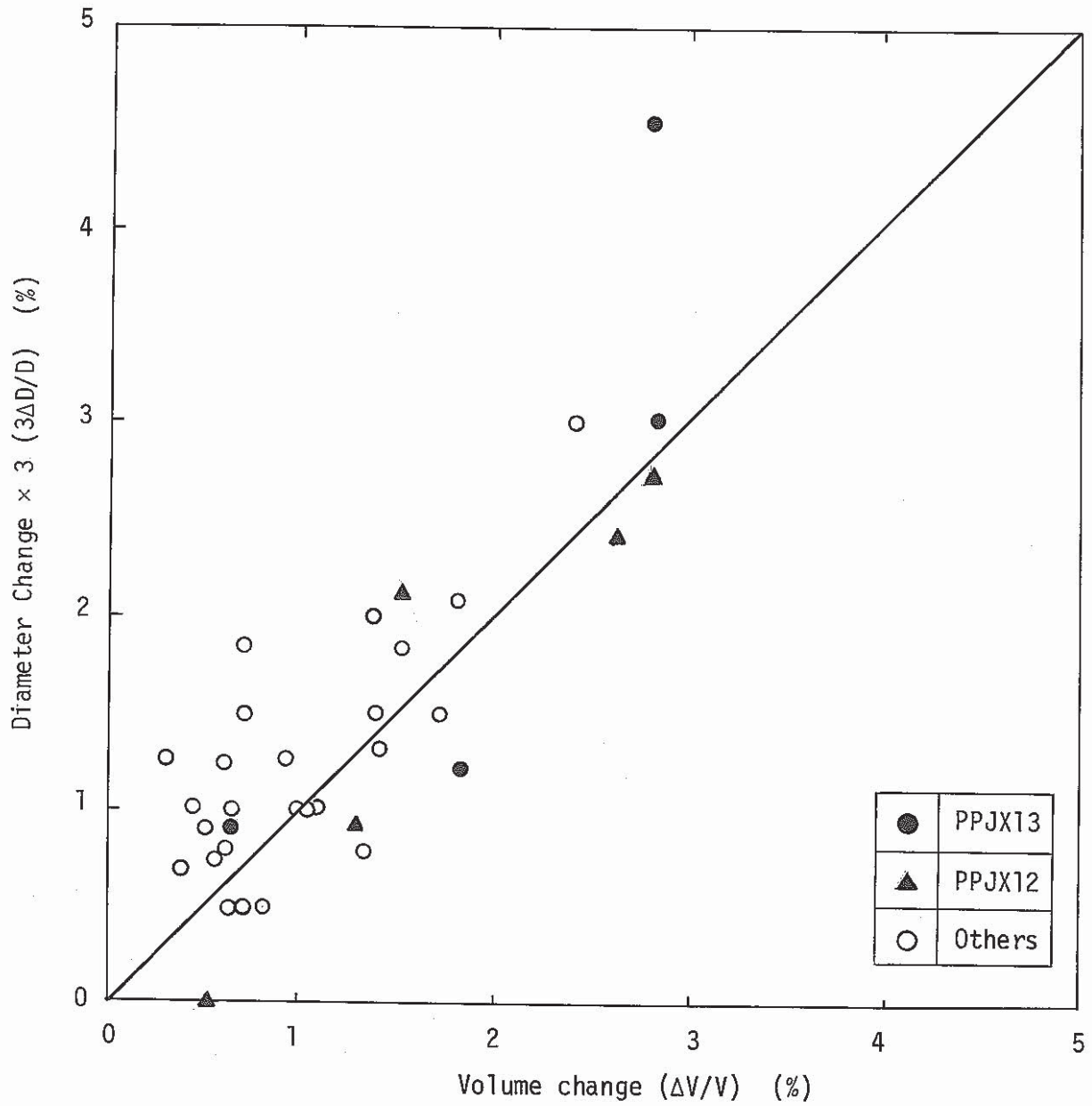


Fig. 16. Relationship between volume change and diameter change of irradiated wrapping wire.

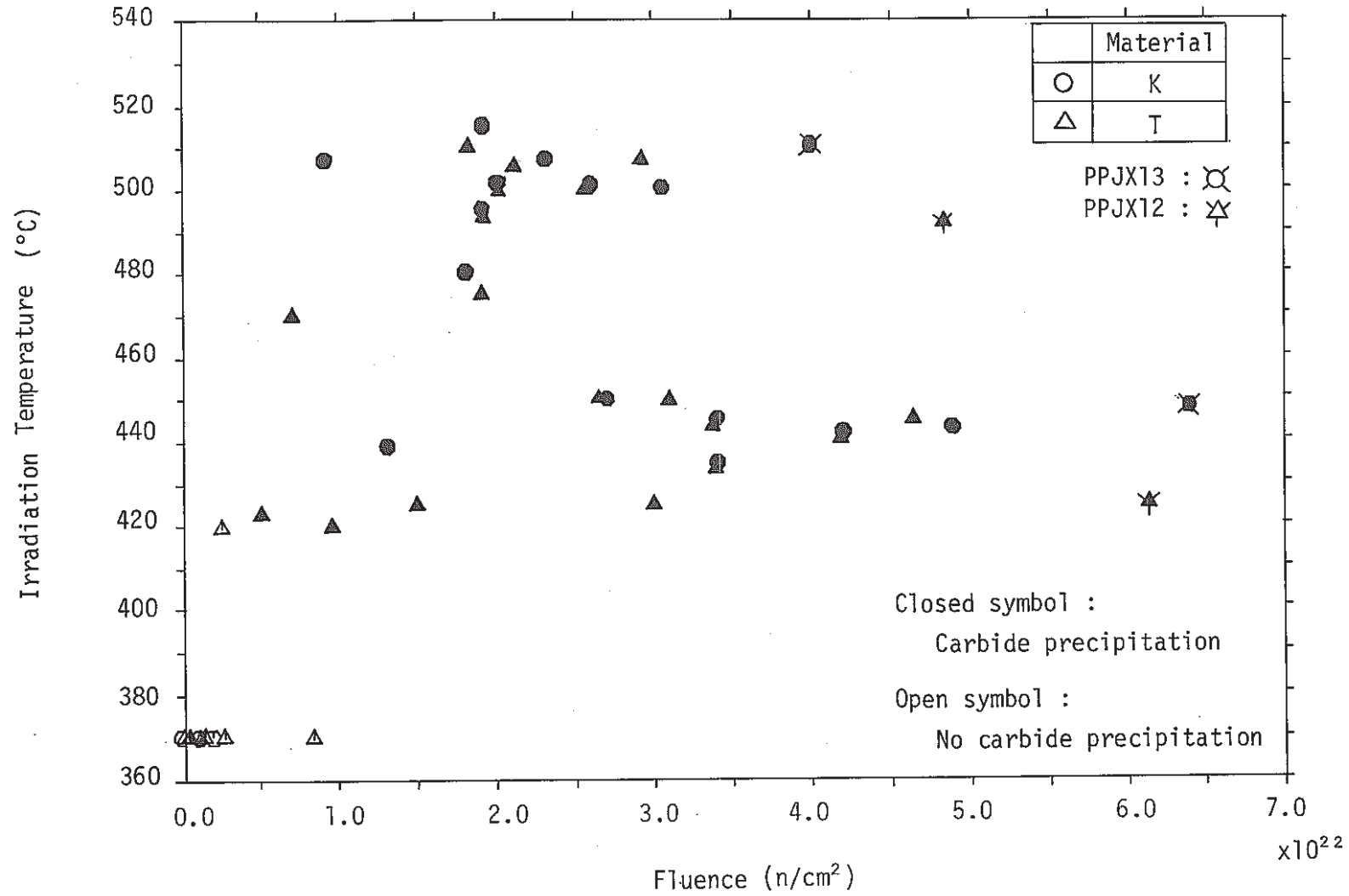


Fig. 17. Precipitation of carbide in irradiated wrapping wire.

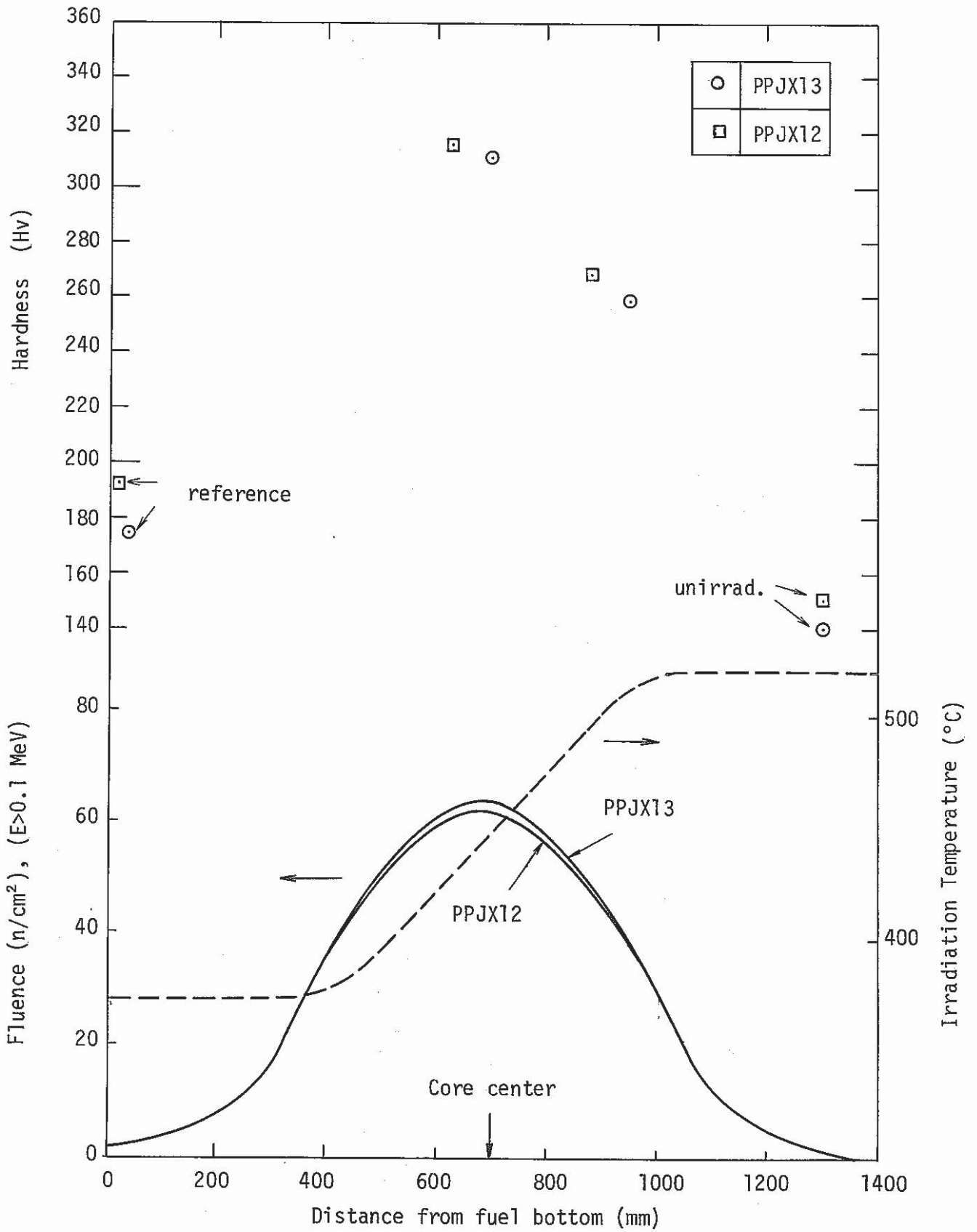


Fig. 18. Hardness profile of irradiated wrapping wire PPJX13 and PPJX12.

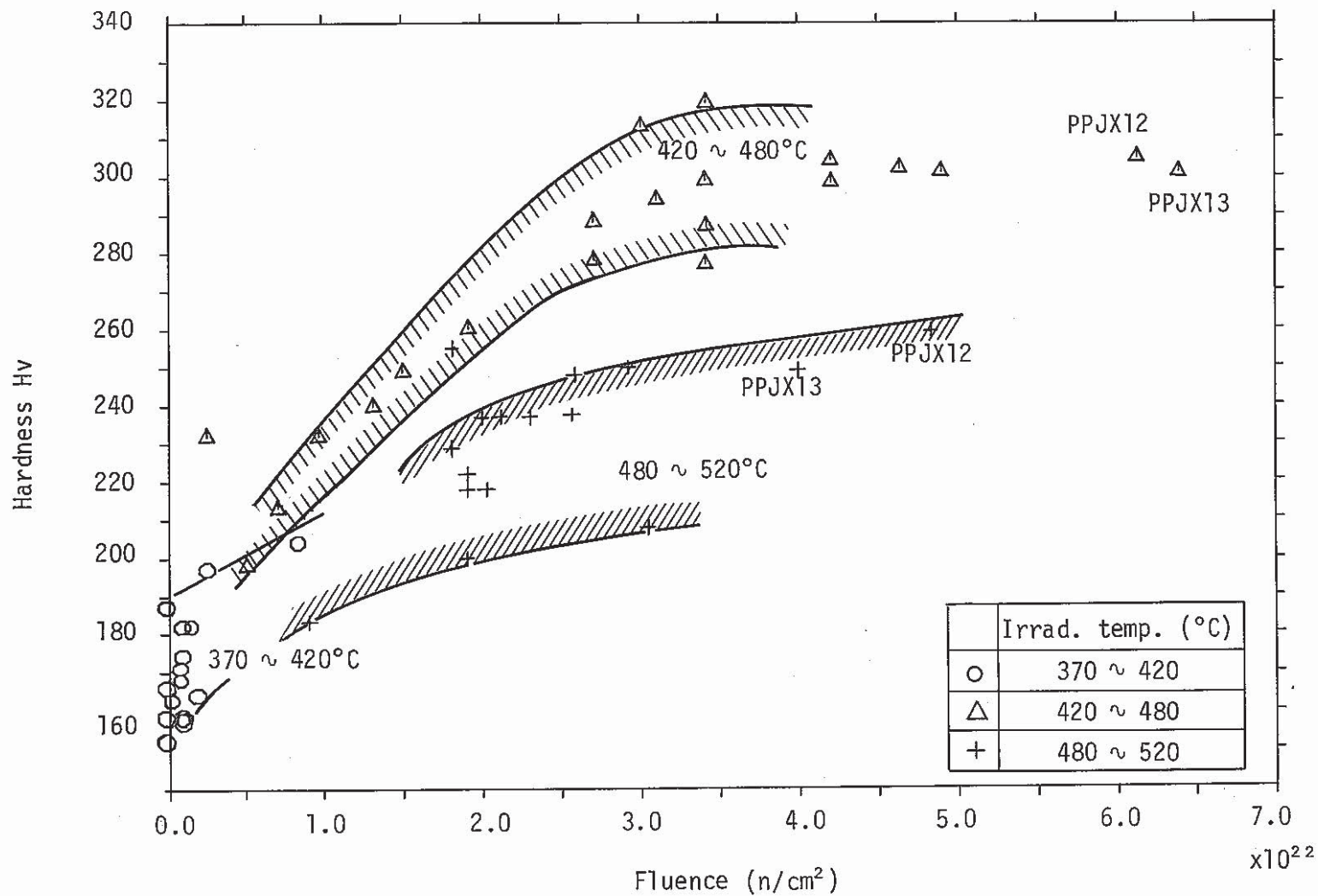


Fig. 19. Hardness of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

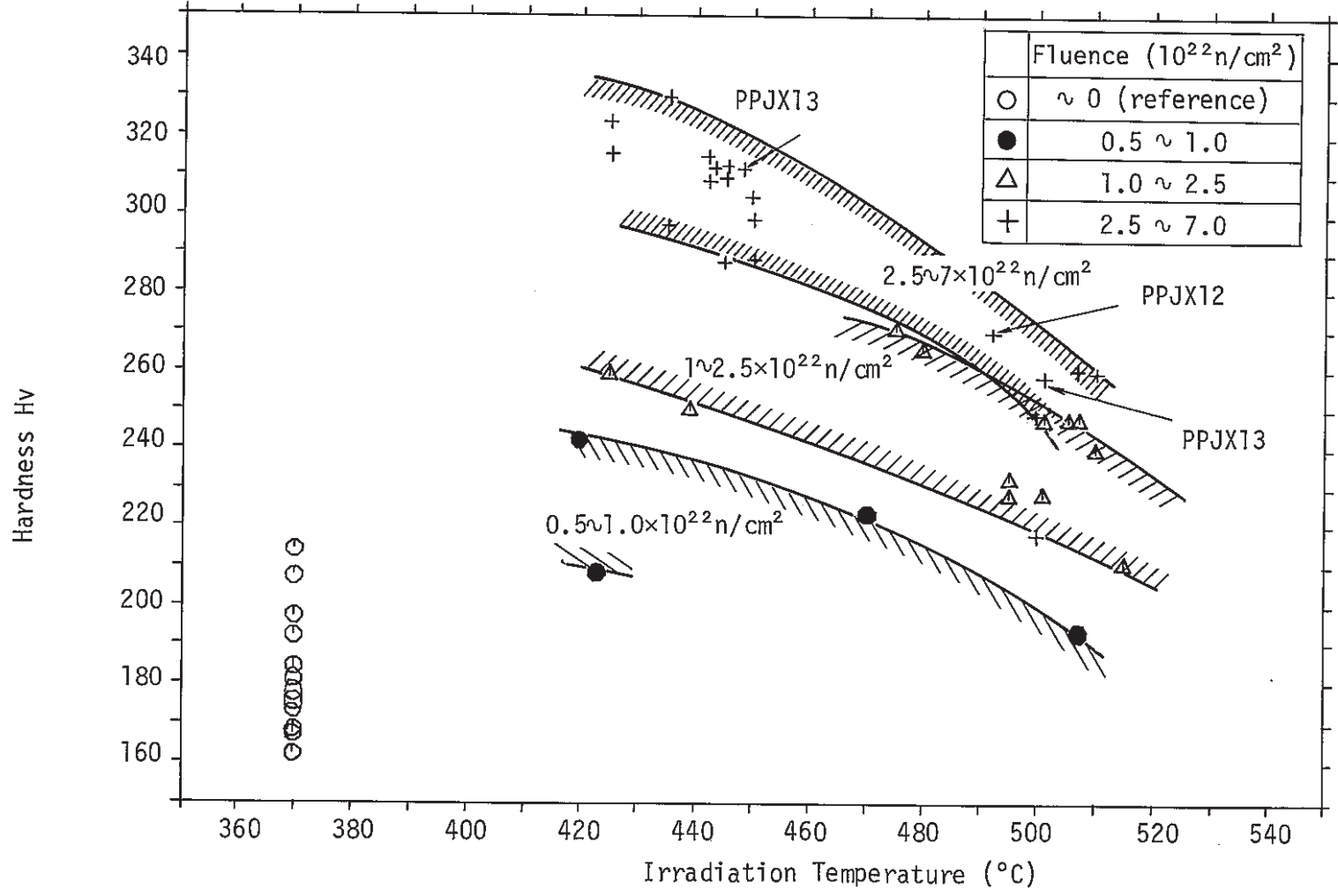
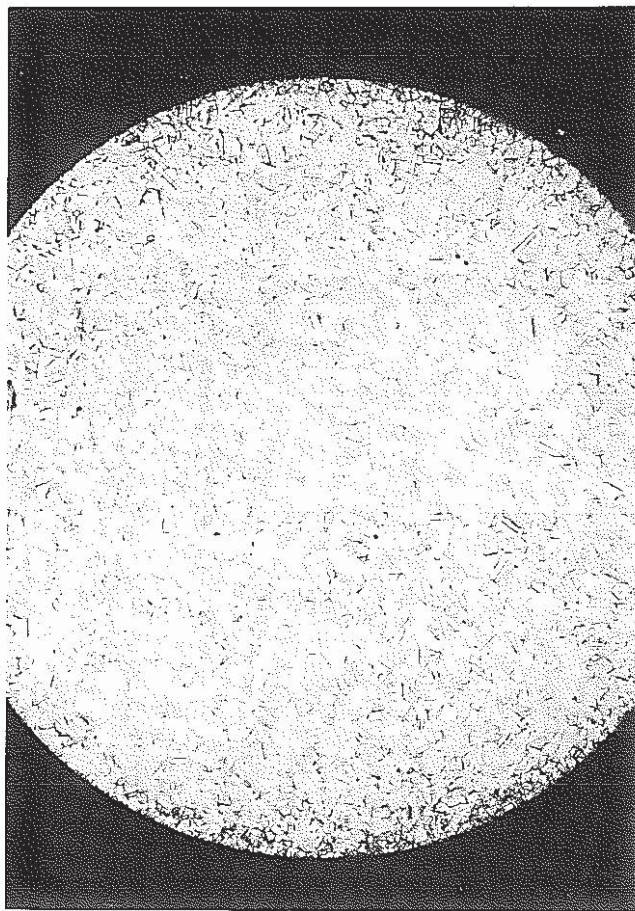
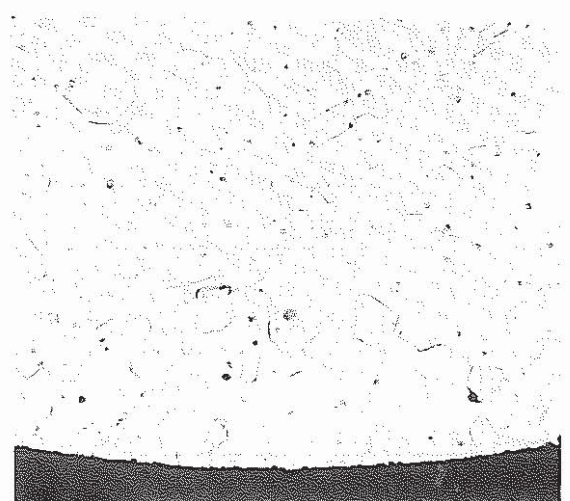
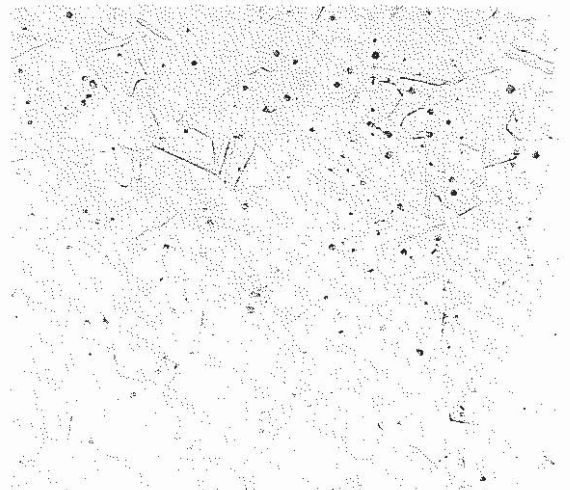
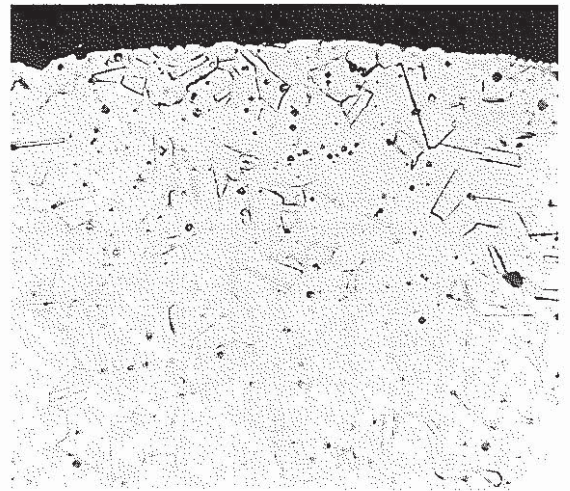


Fig. 20. Hardness of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature.



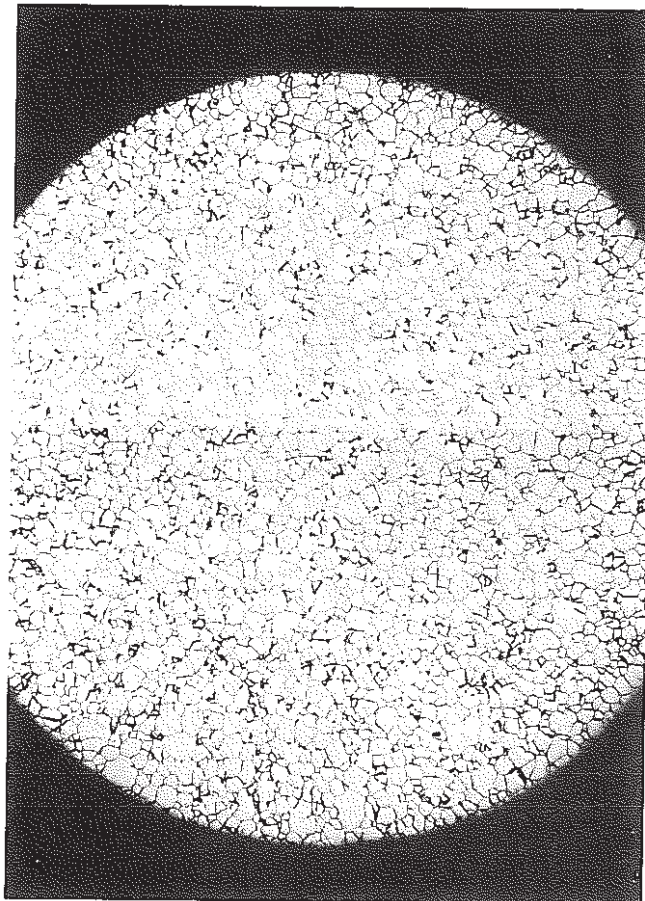
100μ



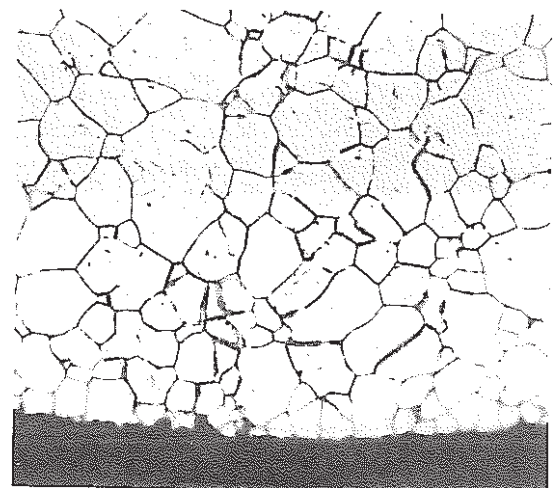
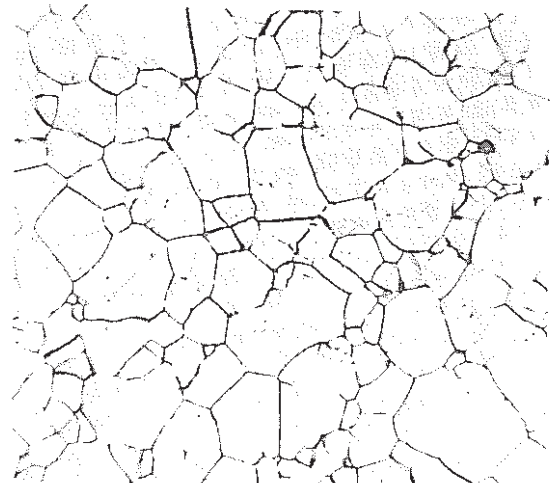
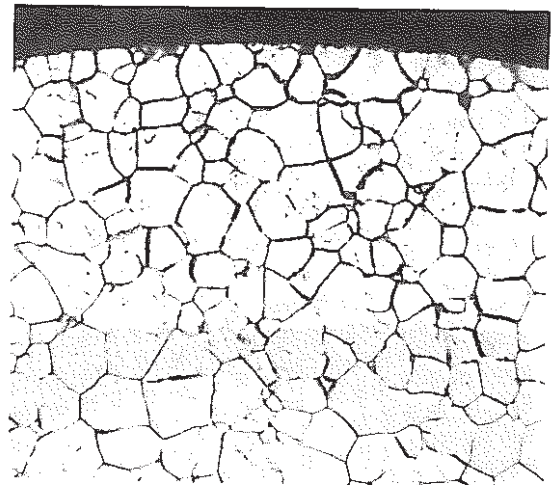
X100

25μ

Photo. 1. Micrographs of wrapping wire 5345W12 (reference) irradiated to the fluence of  $0.2 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$  at  $370^\circ\text{C}$  (PPJX13).



100μ



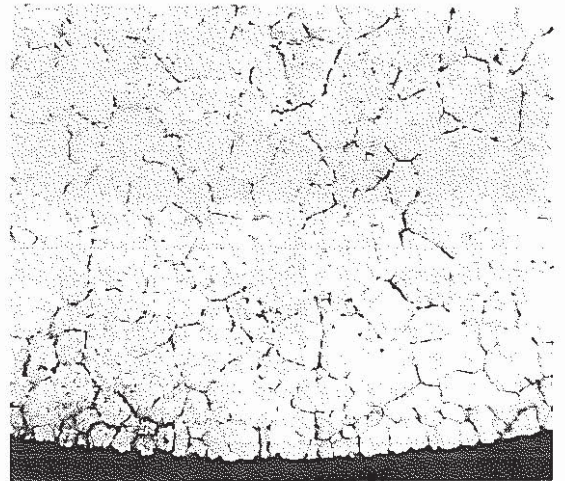
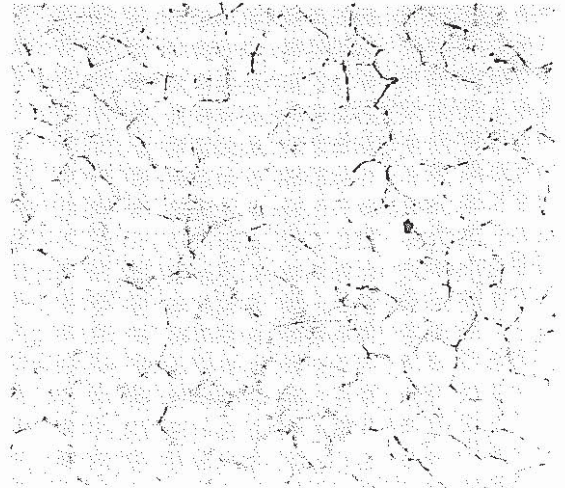
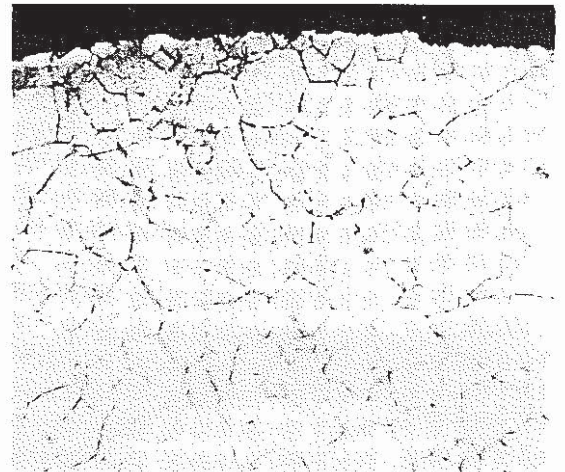
25μ

Photo. 2. Micrographs of wrapping wire 5345W32 irradiated to the fluence of  $6.4 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> at 446°C (PPJX13).





100μ



25μ

Photo. 3.1. Micrographs of wrapping wire 5345W52 irradiated to the fluence of  $4.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  at  $509^\circ\text{C}$  (PPJX13).

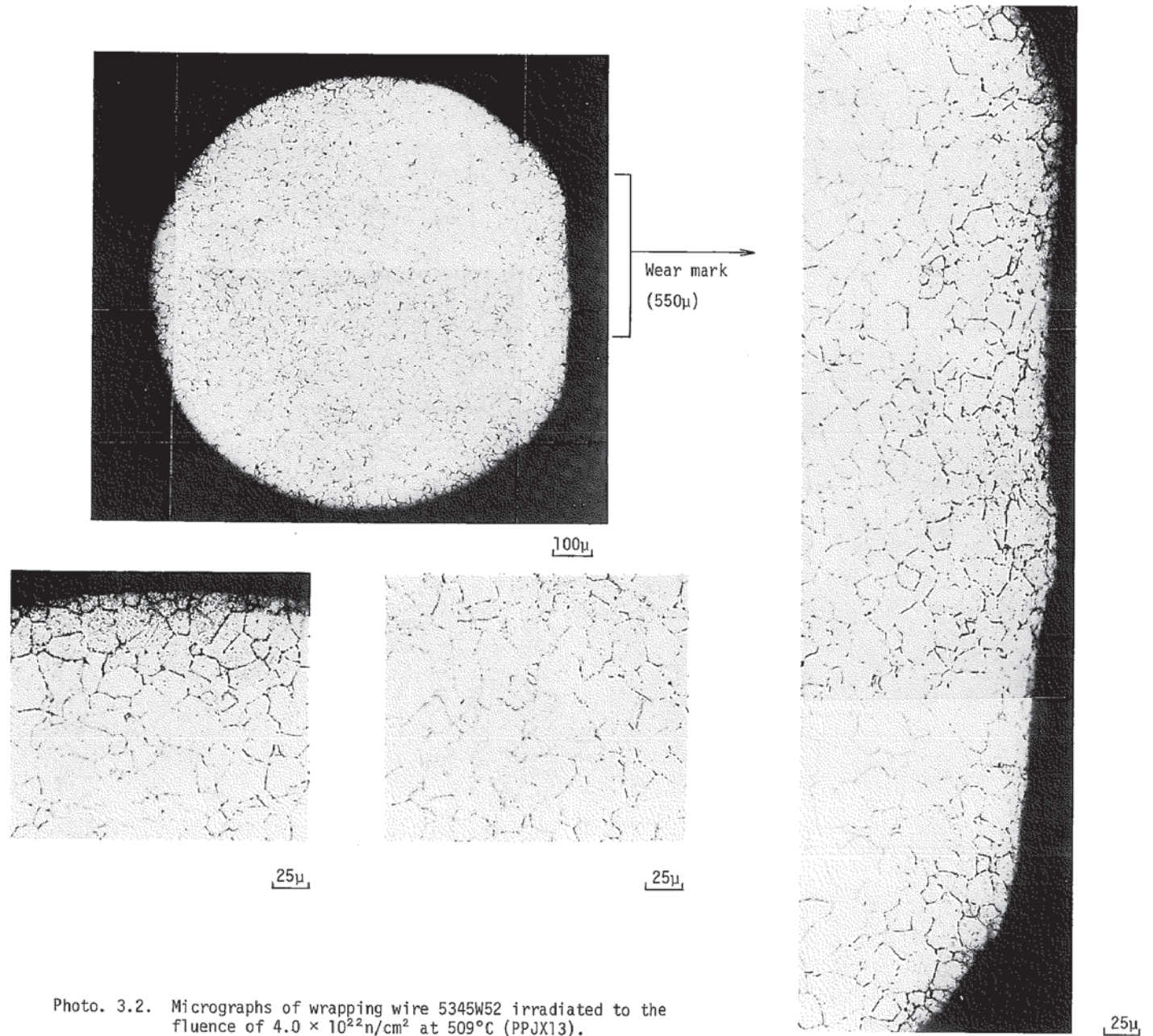


Photo. 3.2. Micrographs of wrapping wire 5345W52 irradiated to the fluence of  $4.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  at 509°C (PPJX13).

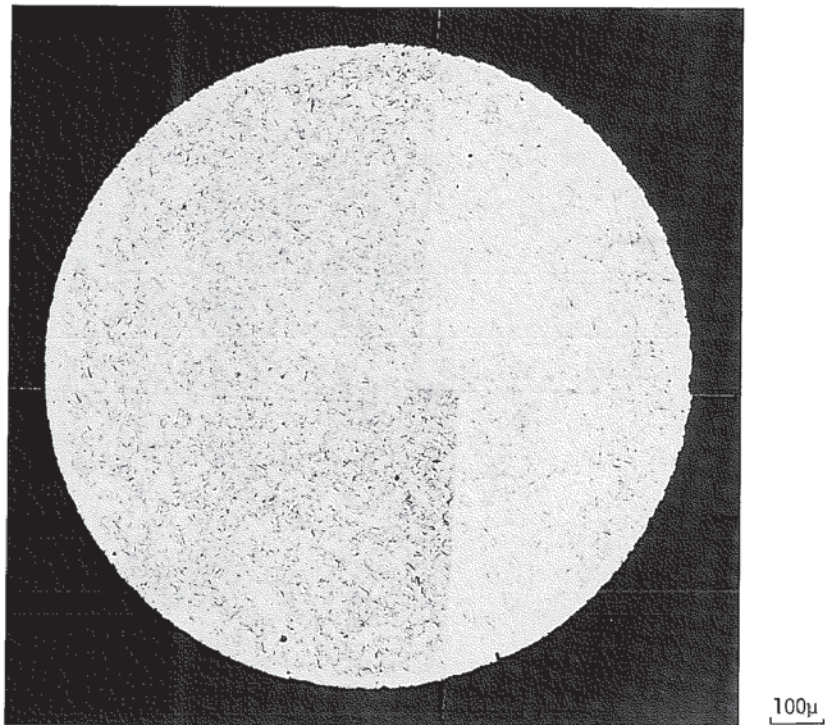
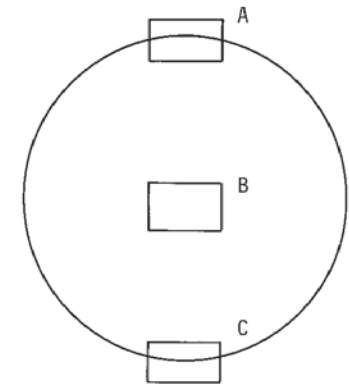
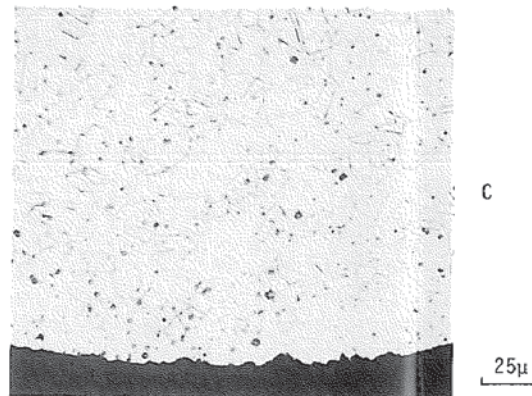
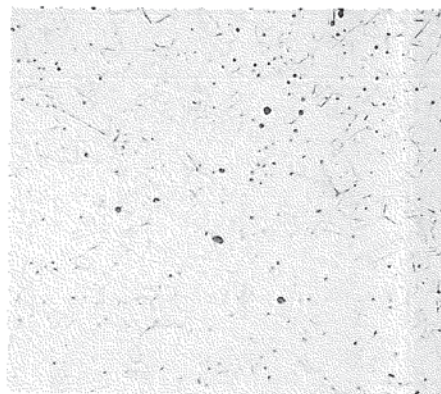
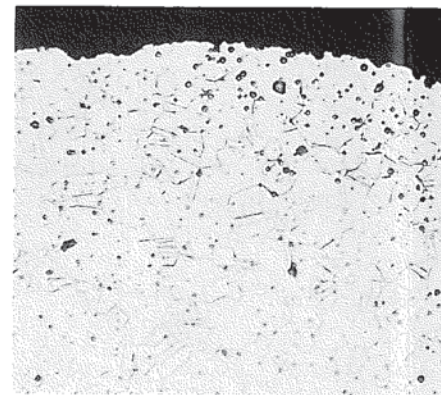
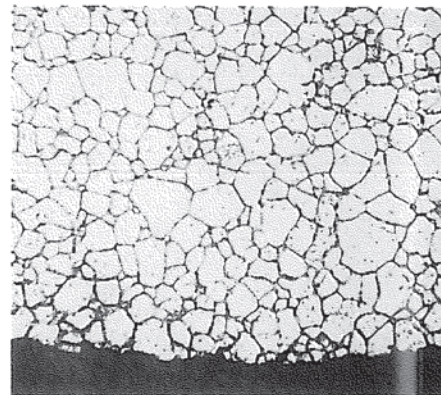
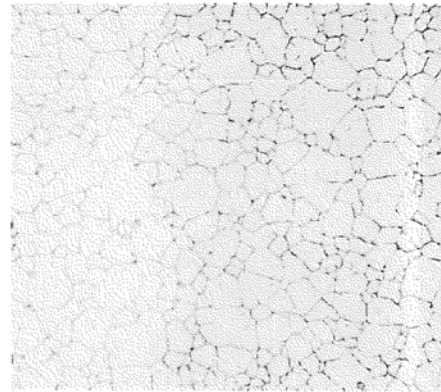
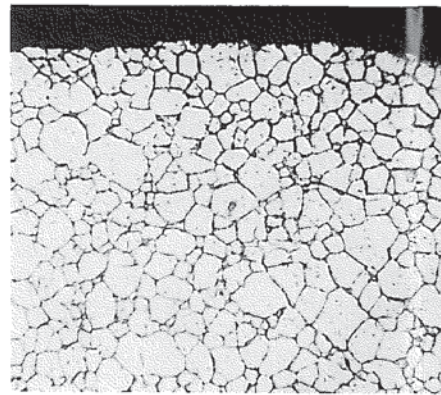
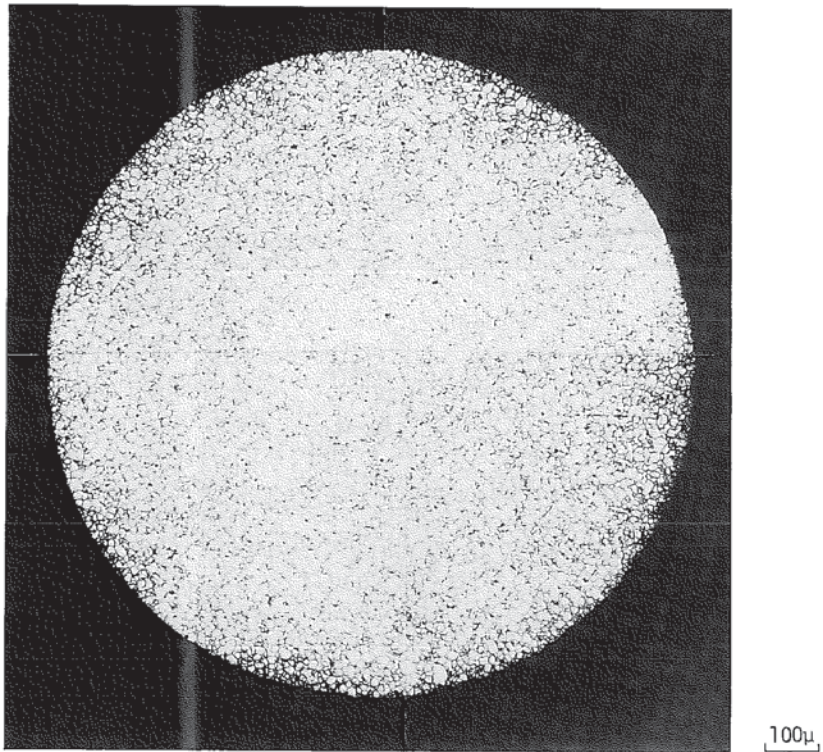


Photo. 4. Micrographs of wrapping wire 6756W1B  
(Reference, PPJX12).



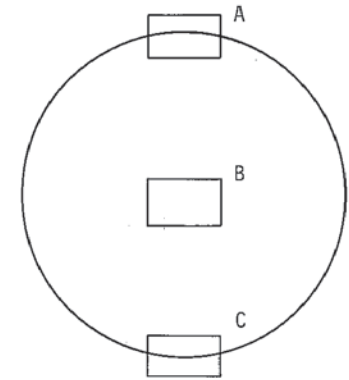
Position of Photo. A.B.C.



A

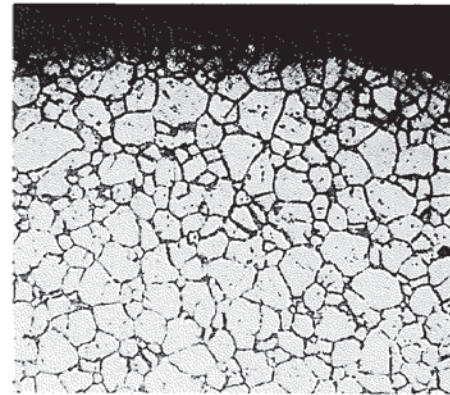
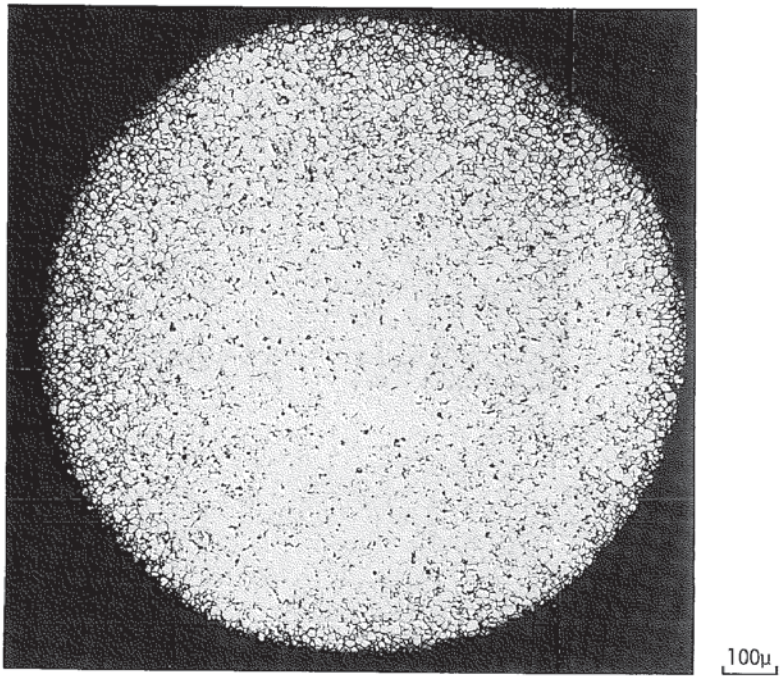
B

C



Position of Photo. A.B.C.

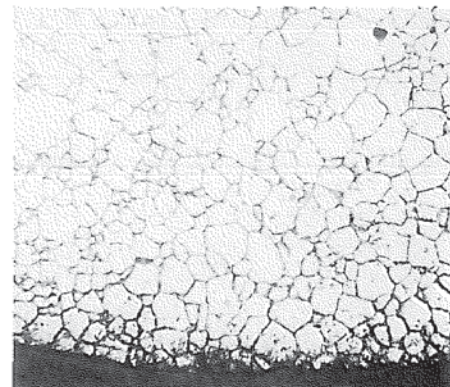
Photo. 5. Micrographs of wrapping wire 6756W31 irradiated to the fluence of  $6.13 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  at  $425^\circ\text{C}$  (PPJX12).



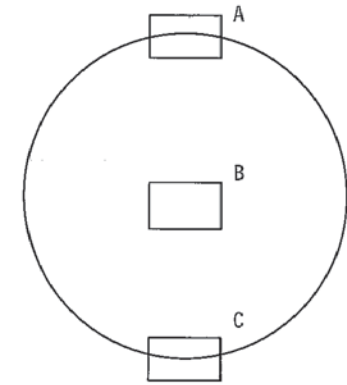
A



B



C



Position of Photo. A.B.C.

Photo. 6. Micrographs of wrapping wire 6756W51 irradiated to the fluence of  $4.83 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  at  $492^\circ\text{C}$  (PPJX12).