

分置

「常陽」MK-I 炉心燃料(PPJDOM)の照射後試験(1)

—ラッピングワイヤの試験—

1982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(PPJDOM)の照射後試験(1)

—ラッピングワイヤの試験—

谷 賢^{**}, 吉持 宏^{*}, 関 成一^{*},
多田 薫^{****}, 田地弘勝^{***}, 一海俊景^{*}

要 旨

高速実験炉「常陽」の炉心構成要素の健全性を確認し、また高速炉用炉心材料の基礎的な照射データを得るための試験計画の一環として、「常陽」炉心で出力75 MWで使用されたラッピングワイヤの照射後試験を行った。

今回試験したラッピングワイヤは集合体PPJD0Mに組み込まれて使用されたもので、供試材の照射温度は370～501℃、最大照射量は 4.19×10^{22} n/cm² (E>0.1 MeV)であった。照射後試験は外径測定、密度測定、金相試験及び硬さ試験の各項目について行い、その結果をPPJD1A、PPJX08、PPJX14、PPJX06、PPJX11、PPJD2B及びPPJX09ラッピングワイヤの試験項目とあわせて検討した。

主な結果は次のとおりである。

- (1) 照射材の外径は最大0.7%程度増加し、密度は最大1.4%程度低下していた。
- (2) 密度測定結果から算出した体積変化($\Delta V/V$)と外径変化の3倍($3\Delta D/D$)はかなりよく一致していた。
- (3) スウェリングは照射量の増加にともない、かなり急速に増加する。スウェリングの照射温度依存性は今のところ明確ではなく、今後のデータの推移を見守る必要がある。
- (4) 金相試験において結晶粒界に炭化物の析出がみられた。
- (5) 硬さは受入材にくらべ最高Hv=160程度増加していた。

* 大洗工学センター燃料材料試験部照射材料試験室

** 現大洗工学センター燃料材料試験部技術解析室

*** 現大洗工学センター燃料材料試験部照射燃料集合体試験室

**** 現東京芝浦電気株式会社総合研究所

Jul. 1982

Post-Irradiation Examination on the Wrapping Wire Used
in "JOYO" MK-I Core (Subassembly PPJDOM) (1)

S. Tani^{**}, H. Yoshimochi^{*}, S. Seki^{*},
K. Tada^{****}, H. Tachi^{***} and T. Ikkai^{*}

Abstract

To make sure that the core materials of the fast experimental reactor "JOYO" are in safety conditions and to get basic knowledge about the behavior of FBR core materials after irradiation, post-irradiation examinations on wrapping wires (SUS316, annealed) were carried out. The wrapping wires were fabricated into the subassembly PPJDOM and irradiated at 370~501°C up to the neutron fluence of 4.19×10^{22} n/cm² (E>0.1MeV).

Diameter measurement, density measurement, metallurgical test and hardness test were performed and compared with the previous data. The results obtained are summarized as follows.

- (1) Maximum diameter increase of 0.7% and maximum density decrease of 1.4% were observed.
- (2) $\Delta V/V$ corresponds well to $3\Delta D/D$.
- (3) Swelling increases rapidly as the fluence increases. Irradiation temperature dependence of fluence is not clear.
- (4) Precipitation of carbide was observed on grain boundaries.
- (5) Maximum hardness increase of Hv=160 was observed.

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

** Analysis and Evaluation Section, Fuel and Material Division, O-arai Engineering Center, PNC.

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

**** Toshiba Research and Development Center.

目 次

1. まえだき	1
2. 供試材	2
2.1 素 材	2
2.2 炉内履歴	2
2.3 試験片	2
3. 試験方法	3
3.1 外径測定	3
3.2 密度測定	3
3.3 金相試験	3
3.4 硬さ試験	3
4. 試験結果	4
4.1 外径測定結果	4
4.2 密度測定結果	4
4.3 金相試験結果	5
4.4 硬さ試験結果	5
5. まとめ	6
6. 参考文献	7

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)では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PPJD1A, PPJX08, PPJX14, PPJX06, PPJX11, PPJD2B及びPPJX09のラッピングワイヤについて試験を終了している。本報はその第8次分として、炉心燃料集合体PPJD0Mのラッピングワイヤについて行った、外径測定、密度測定、金相試験及び硬さ試験結果をとりまとめたものである。

本試験結果は「常陽」炉心構成要素の健全性の確認に役立つだけでなく、高速炉用炉心材料の基礎的な照射後試験データとしても貴重なものと考えられる。

2. 供 試 材

2.1 素 材

ラッピングワイヤの素材は、溶体化処理したSUS 316 鋼であり、2 種類のロットのラッピングワイヤ（住友電工製T 003 及び神戸製鋼製K 001）を照射後試験に供した。別添資料1 に供試材のミルシートを、Table 1 にミルシートから化学成分及び機械的性質を抜き出したものを示す。

2.2 炉内履歴

PPJD 0Mは臨界から75 MW第4 サイクルまでの間炉心に装荷されていた。Fig. 1にPPJD 0Mの炉心装荷位置を、Fig. 2にPPJD 0Mの集合体内ピン配置を示す。No. 3967 ピンのラッピングワイヤ（住友電工製、ロットNa T 003、リールNa 0034）及びNo. 3955 ピンのラッピングワイヤ（神戸製鋼製、ロットNa K 001、リールNa 0017）を試験に供した。

PPJD 0Mの燃焼度はバンドル平均で27,900 MWD/T（ペレット最大は36,100 MWD/T）、中性子照射量は最大 4.58×10^{22} n/cm²（E>0.1 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. 3に75 MW第4 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No. 3046 ピンの計算結果を用いた。ただし、ラッピングワイヤの温度はNo. 3046 ピンの外周冷却材温度に等しいとした。また、Fig. 3には参考のため50 MW第2 サイクル末期の炉内温度分布を示した。50 MWから75 MWへの出力上昇により照射温度が10～35℃上昇していることがわかる。なお、50 MWでのActual Operation Daysは約188日、Effective Full Power Daysは約133日、75 MWでのActual Operation Daysは約204日、Effective Full Power Daysは約178日である。

2.3 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、No. 3055 及び3067 ピンのラッピングワイヤはFig. 3に示すように切断された。3055 W 1 及び3067 W 1 は照射効果を明らかにするためのReference 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. 4に示すように切断され照射後試験に供された。Table 2に切断され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。ただし、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、レーザー外径測定器^{*}を用いて、円周方向45° 毎4点を5mm間隔で測定した。なお、測定前後に標準ゲージ(1.196 ± 0.002 mm)を用いてキャリブレーションを行った。

3.2 密度測定

外径測定後の試料について、密度計^{**}を用いて液浸法により密度測定を行った。測定液は蒸留水に微量の界面活性剤(エマージェンール40)を加えたものを使用した。なお、測定は各試料5回以上行った。

3.3 金相試験

ラッピングワイヤの横断面及び縦断面について、光学顕微鏡による組織観察を行った。エッチングは10%過流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 硬さ試験

ラッピングワイヤの横断面及び縦断面について、微小硬さ計を使用し、荷重500gで試料の中央部5点を測定した。

* 新日本科学製SLG-101

** メトラー製HL-52

4. 試験結果

4.1 外径測定結果

外径測定結果の詳細をTable 3及びFig. 5に示す。Fig. 5にはラッピングワイヤ製造メーカー及び東海検査課で行った受入材の測定結果も参考のため示した。Reference 試料の外径は受入材とほぼ同等であった。照射材の外径はReference 試料と比較して、若干増加している。Table 4に外径変化率をまとめて示す。T材で最大0.3%、K材で最大0.7%の外径増加を示した。

Fig. 6に475°C±15°Cで照射された試料の外径変化率と照射量の関係を他の集合体についての試験結果とあわせて示す。照射量の増加にともない、外径変化率が増加することがわかる。製造メーカーによる差は今のところあまり認められない。

Fig. 7に照射温度が外径変化に及ぼす影響を示す。今のところ照射温度依存性は明確ではなく、今後のデータの蓄積が必要である。

4.2 密度測定結果

Table 4に密度測定結果を示す。照射材の密度はReference 試料と比較して、いずれも低下している。Fig. 8に475°C±15°Cで照射された試料の密度と照射量の関係を他の集合体についての試験結果とあわせて示す。照射量が約 2×10^{22} n/cm² (E>0.1 MeV) 以上になると、ラッピングワイヤの密度がかなり急速に低下する。Fig. 9に照射温度が密度に及ぼす影響を示す。今のところ照射温度依存性は明確ではなく、今後のデータの蓄積が必要である。

Table 6及びFig. 10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 $\Delta V/V = 3 \Delta D/D$ の関係が成立する⁵⁾。本試験結果にはバラツキがあるが、体積変化と外径変化の3倍は比較的良く一致している。

Fig. 11に照射量がスウェリングに及ぼす影響を他の集合体についての試験結果とあわせて示す。照射量が約 2×10^{22} n/cm² (E>0.1 MeV) 以上になるとスウェリングが発生し、照射量の増加にともないスウェリングがかなり急速に増加することがわかる。製造メーカーによる差はあまりないようである。

Fig. 12に照射温度がスウェリングに及ぼす影響を示す。照射温度依存性に関しては、今後のデータの推移を見守る必要がある。現在までのところ、スウェリングはT材で最大1.4%、K材で最大1.1%程度である。

溶体化処理SUS 316 ステンレス鋼のスウェリングのピーク温度は550～600°Cにあるという報告^{6),7),9),11)}が多いが、430～500°Cにもう一つのピークがあるという報告⁸⁾⁻¹²⁾もかなりある。

本試験結果がこの低温側のピークに対応するかどうかについては、今後さらに検討する必要がある。

4.3 金相試験結果

Fig. 13～15にNa 3967ピンのラッピングワイヤ(T 003)から切り出した試料の組織、Fig. 16～18にNa 3955ピンのラッピングワイヤ(K 001)から切り出した試料の組織を示す。Reference試料の組織は受入材とほぼ同じであった。照射材ではいずれも結晶粒界に炭化物の析出が認められた。

照射温度、中性子照射量と炭化物の析出の関係を他の集合体についての試験結果とあわせてFig. 9に示す。非照射材のSUS 316溶体化処理材では一般に炭化物の析出が起らないような低温条件¹³⁾において、照射したラッピングワイヤでは炭化物の析出が起っていることがわかる。

4.4 硬さ試験結果

Table 7に硬さ試験結果を示す。照射材の硬さは受入材(Hv = 150程度)にくらべて、いずれも増加している。また、Reference試料でも非照射材にくらべて若干硬さの増加が認められる。照射材の硬さはT材、K材とも最大Hv = 160程度増加している。

横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及び受入材の結果とともにFig. 22に示す。照射量の増加とともに、硬さが急激に増加していることがわかる。また、同一照射量で比較した場合、照射温度が400～450℃の試料が他の照射温度の試料より硬さが高い。このような照射温度依存性は「常陽」MK-Iのラップ管においても認められているが、ラップ管では照射温度400℃付近に硬さのピークがみられる。¹⁴⁾

5. ま と め

高速実験炉「常陽」炉心で臨界から75 MW第4サイクルまで使用された炉心燃料集合体PPJD 0Mのラッピングワイヤ（最大中性子照射量 4.19×10^{22} n/cm², $E > 0.1$ MeV）について、外径測定、密度測定、金相試験及び硬さ試験を実施した。主な結果を下記に示す。

- 1) Reference 試料に比較し、照射材の外径は最大0.7%程度増加し、密度は最大1.4%程度低下していた。
- 2) 密度測定結果から算出した体積変化 ($\Delta V/V$) と外径変化の3倍 ($3 \Delta D/D$) はかなりよく一致していた。
- 3) スウェリングは照射量の増加にともない、かなり急速に増加する。スウェリングの照射温度依存性は今のところ明確ではなく、今後のデータの推移を見守る必要がある。
- 4) 金相試験において結晶粒界に炭化物の析出がみられた。
- 5) 硬さは受入材にくらべ最高Hv = 160程度増加していた。

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 ZN 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 ZN 941 80-227, 1980年12月
- 3) 多田, 谷口, 吉持, 関, 谷, 田地, 一海, "「常陽」MK-I 炉心燃料 (PPJX 11) の照射後試験(2)" PNC ZN 941 81-70, 1981年4月
- 4) 谷, 吉持, 関, 多田, 田地, 一海, "「常陽」MK-I 炉心燃料 (PPJD2B) の照射後試験 (2)" PNC ZN 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 ZN 941 81-218, 1981年10月
- 6) T.A. Kenfield et al., "Swelling of Type 316 Stainless Steel at High Fluences in EBR-II", J. Nucl. Mater. 75, 85 (1978)
- 7) J.F. Bates et al., "Irradiation-induced Swelling in Solution Annealed AISI 316", HEDL-TME 78-81
- 8) 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
- 9) W.K. Appleby et al., "Swelling in Neutron-Irradiated 300-Series Stainless Steels", *ibid.*, p.509
- 10) J.L. Boutard et al., "Le Gonflement des Aciers 316", Irradiation Behavior of Metallic Materials for Fast Reactor Core Components: Conference Internationale, 4-8 Juin 1979, Ajaccio, Corse, France, p.135
- 11) J.I. Bramman and C. Brown, "The Temperature Dependence of Void Swelling of Fast Reactor Irradiated 316 Stainless Steel", *ibid.*, p.155
- 12) A. Languille, "Deformations des Gains dans Phenix", *ibid.*, p.337
- 13) E. Weiss et al., "Phase Instabilities During High Temperature Exposure of 316 Austenitic Stainless Steel", Met. Trans. 3, 851 (1972)
- 14) 佐藤, 原田, 吉持, 関, 小野瀬, 伊藤, 谷, 田地, 一海, "「常陽」MK-I 炉心燃料 (PPJX 09) の照射後試験(1)" PNC ZN 941 81-217, 1981年10月

Table 1 Properties of investigated material (PPJDOM).

Elements		T003		K001	
	C	0.06		0.06	
	Si	0.52		0.54	
	Mn	1.63		1.54	
	P	0.002		0.018	
	S	0.007		0.010	
	Ni	13.14		12.86	
	Cr	16.88		16.50	
	Mo	2.42		2.34	
	Co	0.01		0.04	
	B	0.0003		<0.001	
	N	0.021		0.0176	
Grain size ASTM No.		8.0		8.0	
R.T.	σ_B (kg/mm ²)	69.8	70.0	68.5	68.5
	ϵ (%)	50	51	54	55
650°C	σ_B (kg/mm ²)	59.0	56.0	34.7	35.5
	ϵ (%)	23	23	32	34

Table 2(1) Test item of irradiated wrapping wire.
(PPJDOM, Lot No. : T003)

Specimen number	Specimen		Irradiation temperature (°C)	Neutron fluence n/cm^2 $E>0.1MeV$	Test*** item
	DFPB** (mm)	Length (mm)			
3967W1*	45~ 166	121	370	0.16×10^{22}	OD
3967W11*	84~ 166	82	370	0.19×10^{22}	D
3967W12*	54~ 84	30	370	0.10×10^{22}	M,H
3967W2	591~ 672	81	408	3.90×10^{22}	OD
3967W21	601~ 672	71	410	3.93×10^{22}	D
3967W3	672~ 771	99	432	4.19×10^{22}	OD
3967W31	682~ 744	62	429	4.18×10^{22}	D
3967W32	744~ 771	27	442	4.19×10^{22}	M,H
3967W4	772~ 905	133	463	3.94×10^{22}	OD
3967W41	785~ 859	74	458	4.03×10^{22}	D
3967W5	912~1023	111	492	2.97×10^{22}	OD
3967W51	922~ 998	76	490	3.04×10^{22}	D
3967W52	998~1023	25	500	2.56×10^{22}	M,H

* Reference

** Distance from pin bottom

*** OD : Outer diameter M : Metallurgical

 D : Density H : Hardness

Table 2(2) Test item of irradiated wrapping wire.
(PPJDOM, Lot No. : K001)

Specimen number	Specimen		Irradiation temperature (°C)	Neutron fluence n/cm ² E>0.1MeV	Test *** item
	DFPB ** (mm)	Length (mm)			
3955W1 *	45~ 164	119	370	0.16 × 10 ²²	OD
3955W11 *	86~ 164	78	370	0.19 × 10 ²²	D
3955W12 *	60~ 86	26	370	0.11 × 10 ²²	M,H
3955W2	530~ 608	78	393	3.47 × 10 ²²	OD
3955W21	540~ 608	68	395	3.51 × 10 ²²	D
3955W3	672~ 772	100	432	4.19 × 10 ²²	OD
3955W31	681~ 743	62	429	4.18 × 10 ²²	D
3955W32	743~ 772	29	442	4.19 × 10 ²²	M,H
3955W4	772~ 907	135	463	3.94 × 10 ²²	OD
3955W41	781~ 852	71	457	4.05 × 10 ²²	D
3955W5	912~1021	109	492	2.97 × 10 ²²	OD
3955W51	921~ 994	73	490	3.06 × 10 ²²	D
3955W52	994~1021	27	501	2.59 × 10 ²²	M,H

* Reference

** Distance from pin bottom

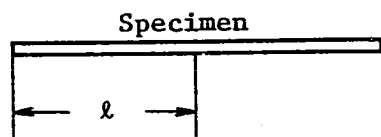
*** OD : Outer diameter M : Metallurgical

D : Density H : Hardness

Table 3(1) Diameter of irradiated wrapping wire (PPJDOM, Lot No. : T003).

Specimen No.	DFPB of specimen (mm)	Irradiation temperature Neutron fluence (E>0.1MeV)	Each measured values (mm)														Average value (mm)
			l^* (mm)														
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
3967W1**	45~ 166	370°C 0.16×10^{22} n/cm ²	1.195	1.195	1.194	1.193	1.194	1.193									1.194
				1.194	1.194	1.194	1.196	1.195	1.194								
3967W2	591~ 672	408°C 3.90×10^{22} n/cm ²	1.196	1.196	1.196	1.197	1.197	1.196									1.196
				1.196	1.196	1.196	1.195	1.199	1.196								
3967W3	672~ 771	432°C 4.19×10^{22} n/cm ²	1.198	1.197	1.198	1.197	1.198	1.198									1.198
				1.197	1.198	1.197	1.197	1.198	1.198								
3967W4	772~ 905	463°C 3.94×10^{22} n/cm ²	1.199	1.199	1.198	1.196	1.197	1.097									1.198
				1.199	1.198	1.197	1.197	1.197	1.197								
3967W5	912~1023	492°C 2.97×10^{22} n/cm ²	1.197	1.197	1.196	1.194	1.195	1.195									1.196
				1.196	1.197	1.195	1.195	1.196									

* Bottom ← → Top



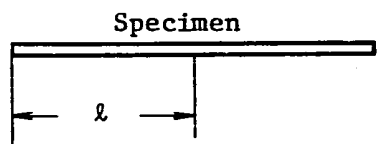
** Reference

Table 3(2) Diameter of irradiated wrapping wire (PPJDOM, Lot No. : K001).

PNC-TN941 82-141

Specimen No.	DFPB of specimen (mm)	Irradiation temperature Neutron fluence (E>0.1MeV)	Each measured values (mm)														Average value (mm)
			l^* (mm)														
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
3955W1**	45~ 164	370°C 0.16×10 ²² n/cm ²	1.200	1.200	1.199	1.197	1.198	1.198	1.198	1.197							1.199
				1.200	1.200	1.199	1.198	1.198	1.198	1.197							
3955W2	530~ 608	393°C 3.47×10 ²² n/cm ²	1.201	1.202	1.202	1.202	1.204	1.205									1.203
				1.201	1.202	1.203	1.203	1.204	1.205								
3955W3	672~ 772	432°C 4.19×10 ²² n/cm ²	1.206	1.205	1.206	1.206	1.208	1.210									1.207
				1.205	1.206	1.206	1.207	1.208	1.210								
3955W4	772~ 907	463°C 3.94×10 ²² n/cm ²	1.205	1.205	1.206	1.204	1.206	1.205									1.205
				1.205	1.206	1.206	1.206	1.205	1.204								
3955W5	912~1021	492°C 2.97×10 ²² n/cm ²	1.204	1.202	1.202	1.201	1.200	1.205									1.203
				1.204	1.204	1.202	1.201	1.203	1.203								

* Bottom ← → Top



** Reference

Table 4 Diameter change of irradiated wrapping wire (PPJDOM).

Lot No.	Specimen No.	Irrad. temp. (°C)	Neutron Fluence ($\frac{n}{cm^2}$ $E > 0.1 MeV$)	Diameter (mm)	$\Delta D/D$ (%)
T003	3967W1	370	0.16×10^{22}	1.194	Reference
	3967W2	408	3.90×10^{22}	1.196	0.2
	3967W3	432	4.19×10^{22}	1.198	0.3
	3967W4	463	3.94×10^{22}	1.198	0.3
	3967W5	492	2.97×10^{22}	1.196	0.2
K001	3955W1	370	0.16×10^{22}	1.199	Reference
	3955W2	393	3.47×10^{22}	1.203	0.3
	3955W3	432	4.19×10^{22}	1.207	0.7
	3955W4	463	3.94×10^{22}	1.205	0.5
	3955W5	492	2.97×10^{22}	1.203	0.3

Table 5(1) Density of irradiated wrapping wire.
(PPJDOM, Lot No. : T003)

Specimen No.	Irrad. temp. Neutron fluence ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	Weight of specimen (g)	Density : (g/cm^3)	
			Each measured values	Average value
3967W11*	370°C $0.19 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.73	7.968 7.968 7.967 7.968 7.967	7.968
3967W21	410°C $3.93 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.63	7.904 7.903 7.905 7.903 7.905	7.904
3967W31	429°C $4.18 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.56	7.893 7.898 7.889 7.890 7.886 7.893	7.891
3967W41	458°C $4.03 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.68	7.883 7.886 7.878 7.888 7.885 7.878	7.883
3967W51	490°C $3.04 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.68	7.911 7.912 7.914 7.915 7.913	7.913

* Reference

Table 5(2) Density of irradiated wrapping wire.
(PPJDOM, Lot No. : K001)

Specimen No.	Irrad. temp. Neutron fluence ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	Weight of specimen (g)	Density (g/cm^3)	
			Each measured values	Average value
3955W11*	370°C $0.19 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.70	7.968 7.968 7.968 7.970 7.967	7.968
3955W21	395°C $3.51 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.61	7.913 7.915 7.913 7.921 7.916	7.916
3955W31	429°C $4.18 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.54	7.862 7.865 7.859 7.867 7.857 7.857	7.861
3955W41	457°C $4.05 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.65	7.863 7.858 7.861 7.859 7.859	7.860
3955W51	490°C $3.06 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	0.65	7.940 7.938 7.942 7.936 7.942	7.940

* Reference

Table 6 Swelling of irradiated wrapping wire (PPJDOM).

Lot No.	Irradiation temperature (°C)	Neutron fluence (n/cm ² , E>0.1MeV)	Swelling (%)	
			$\Delta V/V$ *	$3\Delta D/D$ **
T003	410	3.93×10^{22}	0.8	0.5
	429	4.18×10^{22}	1.0	1.0
	458 "	4.03×10^{22}	1.1	1.0
	490	3.04×10^{22}	0.7	0.5
K001	395	3.51×10^{22}	0.7	1.0
	429	3.18×10^{22}	1.4	2.0
	457	4.05×10^{22}	1.4	1.5
	490	3.06×10^{22}	0.4	1.0

* Density measurement

** Diameter measurement

Table 7 Hardness of irradiated wrapping wire (PPJDOM).

Specimen number (Lot number)	Irradiation temperature Neutron fluence ($E > 0.1 \text{ MeV}$)	Hardness (Hv)	
		Each measured values	Average value
3967W12* (T003)	370°C $0.10 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	195 181 198 198 187	192
3967W32 (T003)	442°C $4.19 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	307 303 307 312 312	308
3967W52 (T003)	500°C $2.56 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	253 238 245 253 249	248
3955W12* (K001)	370°C $0.11 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	167 169 165 167 165	167
3955W32 (K001)	442°C $4.19 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	309 315 315 318 315	314
3955W52 (K001)	501°C $2.59 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	258 253 253 266 259	258

* Reference

"JOYO" MK-I Core Map

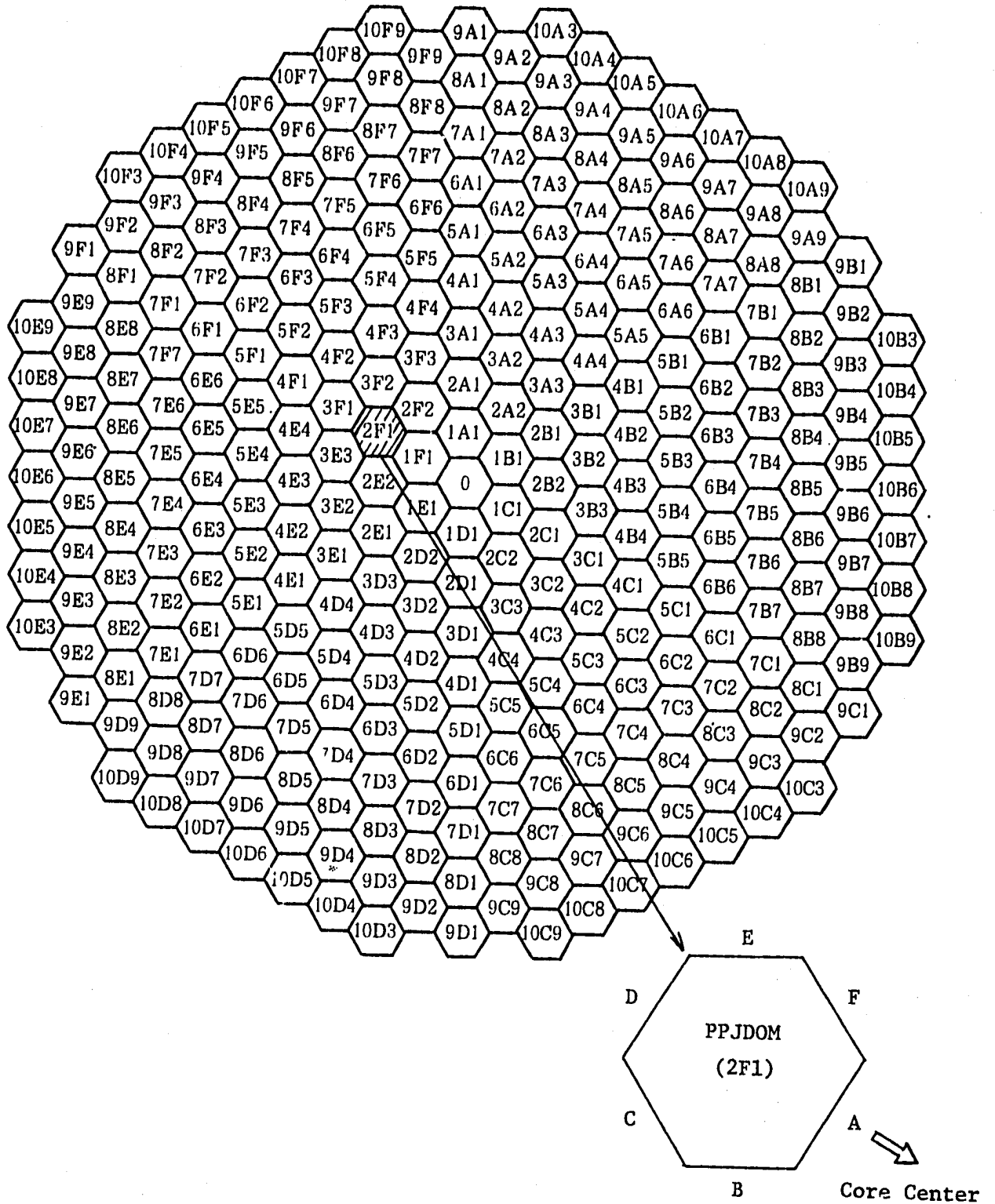


Fig. 1 Subassembly (PPJSOM) orientation in core.

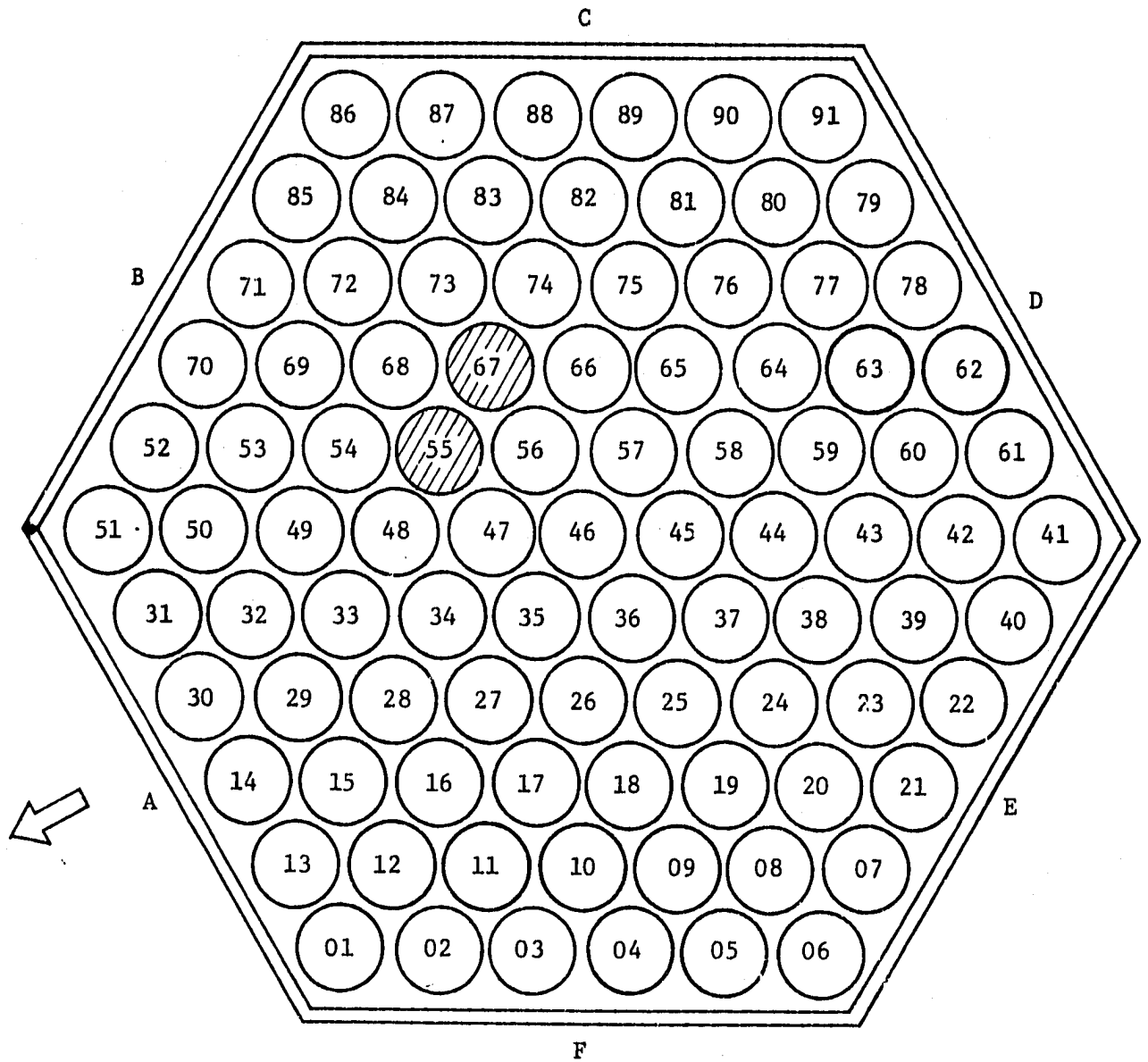


Fig. 2 Location of the pin in the subassembly (PPJDOM).

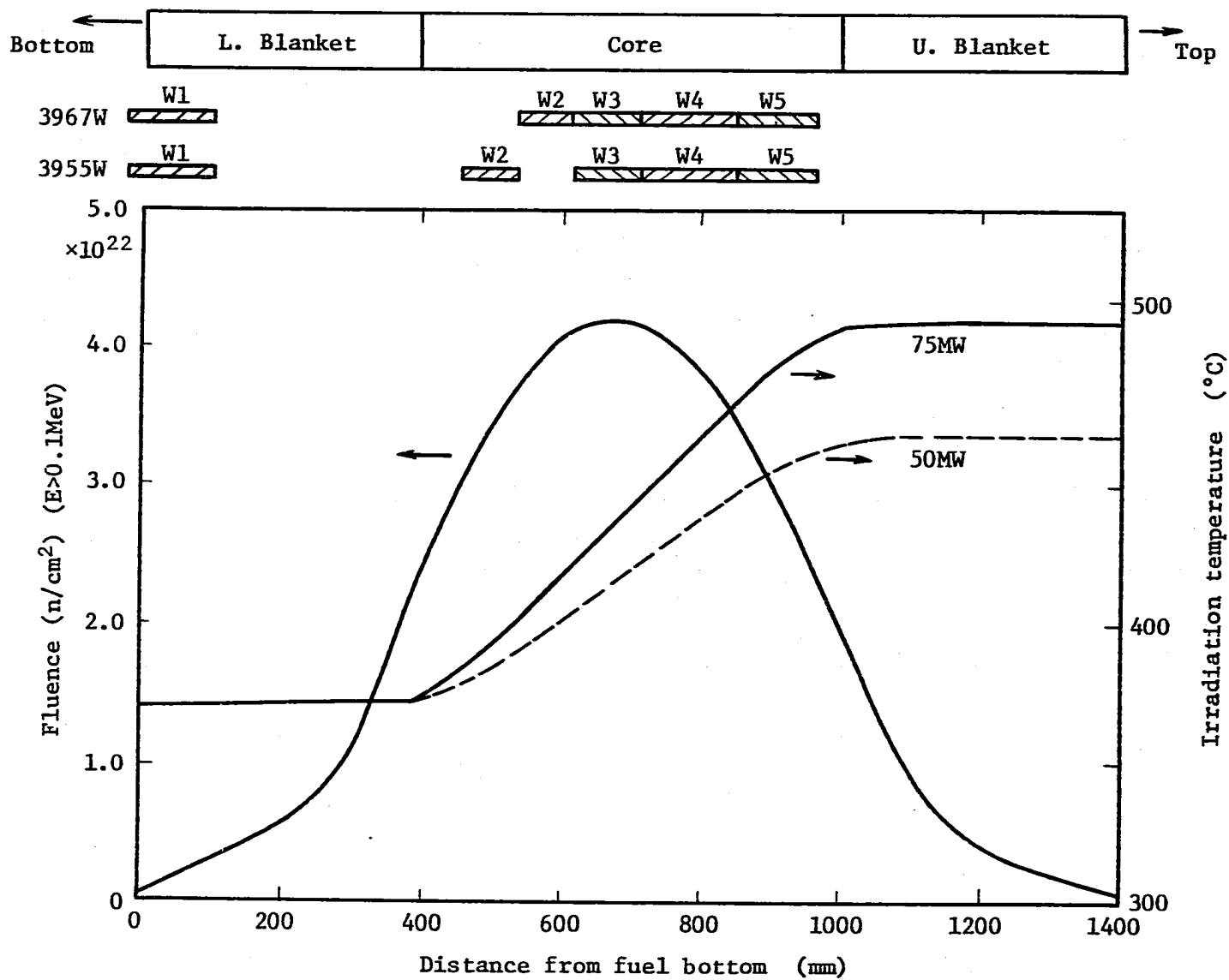


Fig. 3 Irradiation condition and sampling position of wrapping wire (PPJDOM).

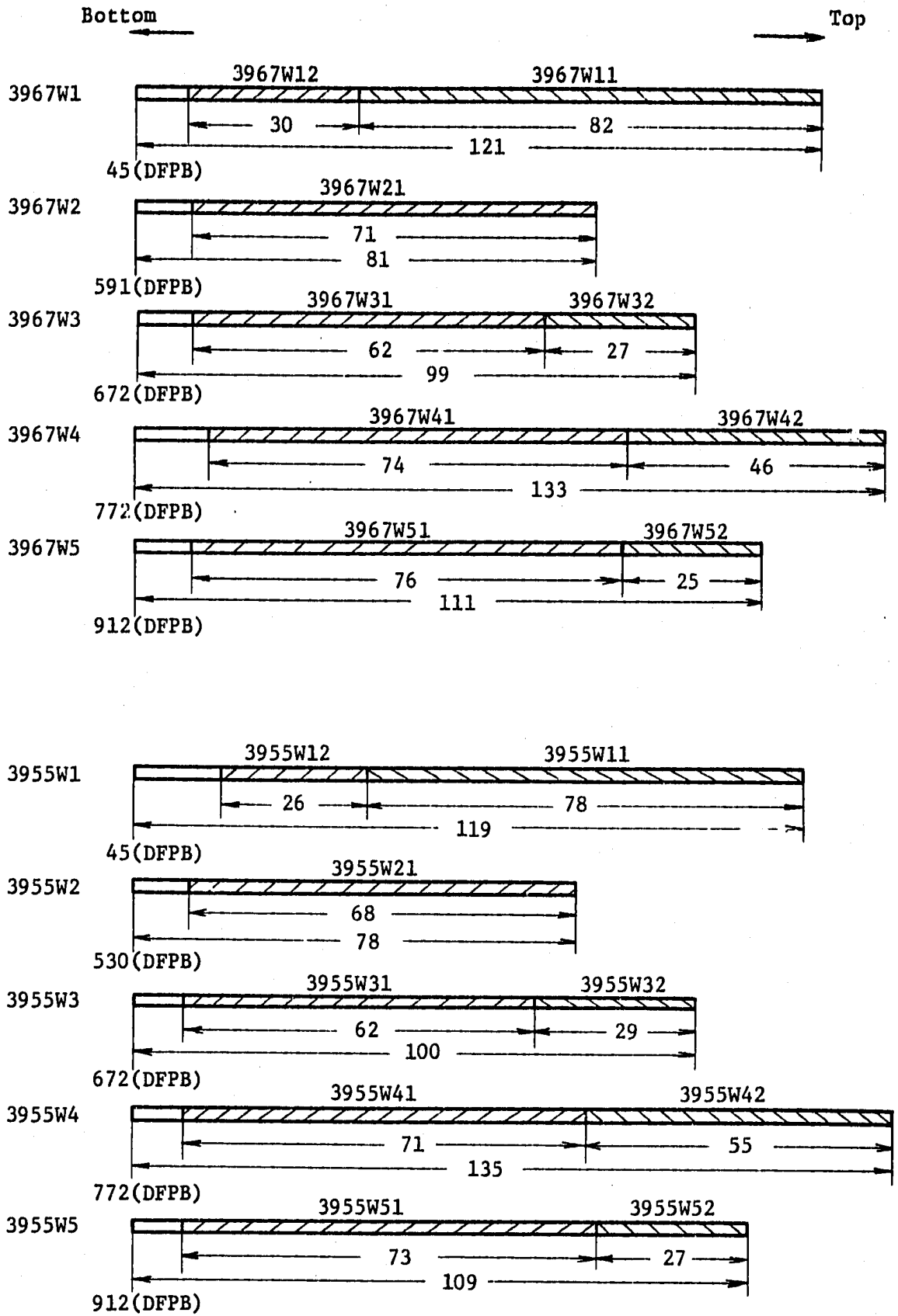


Fig. 4 Sampling position of wrapping wires (PPJDOM).

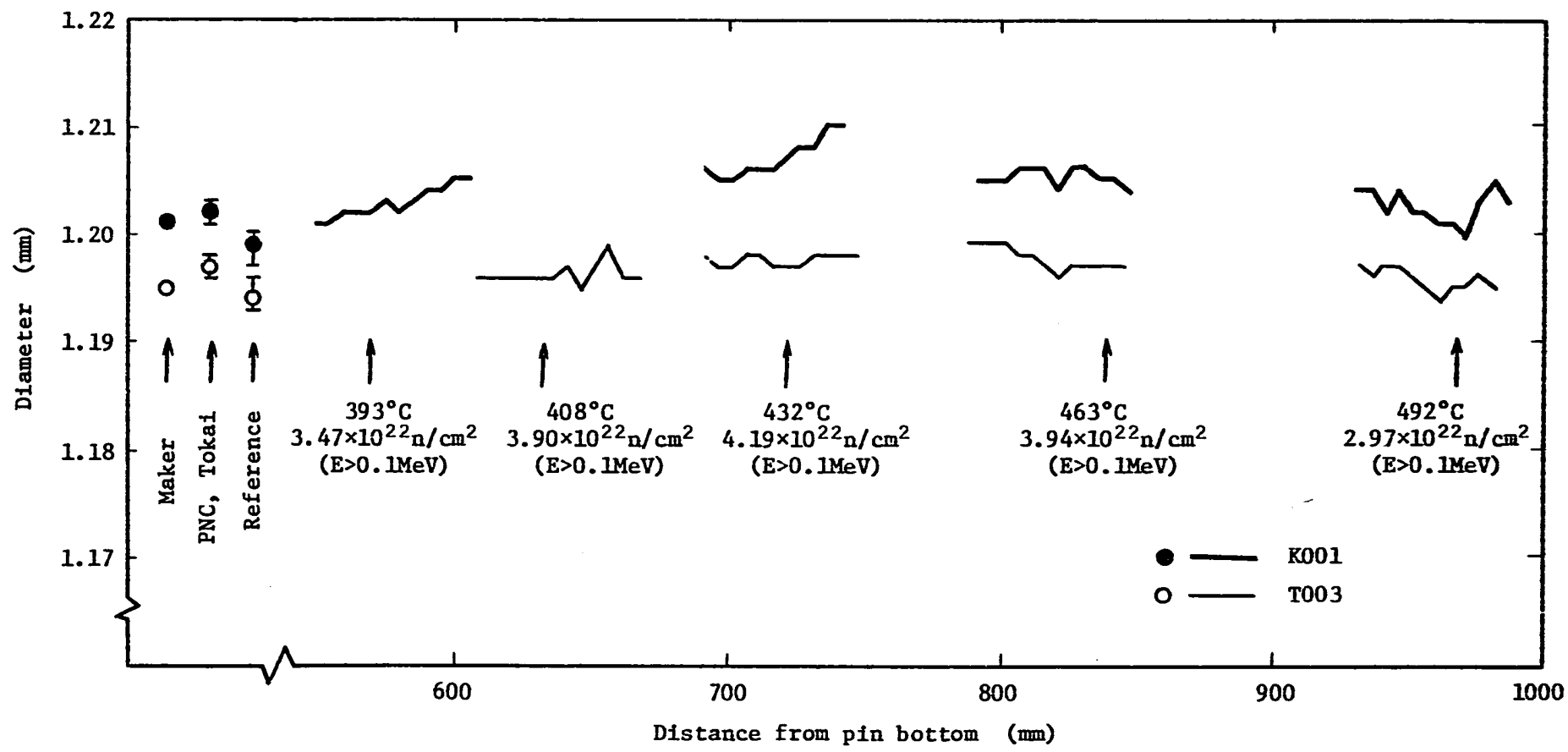


Fig. 5 Diameter distribution of irradiated wrapping wire (PPJDOM).

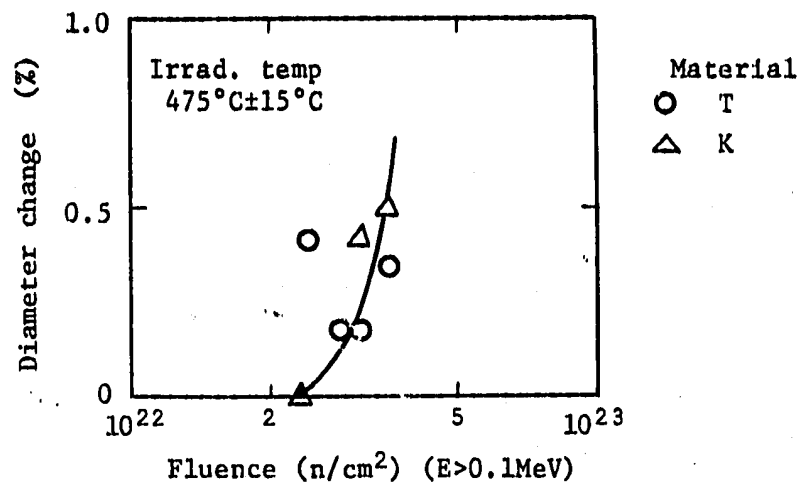


Fig. 6 Diameter change of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

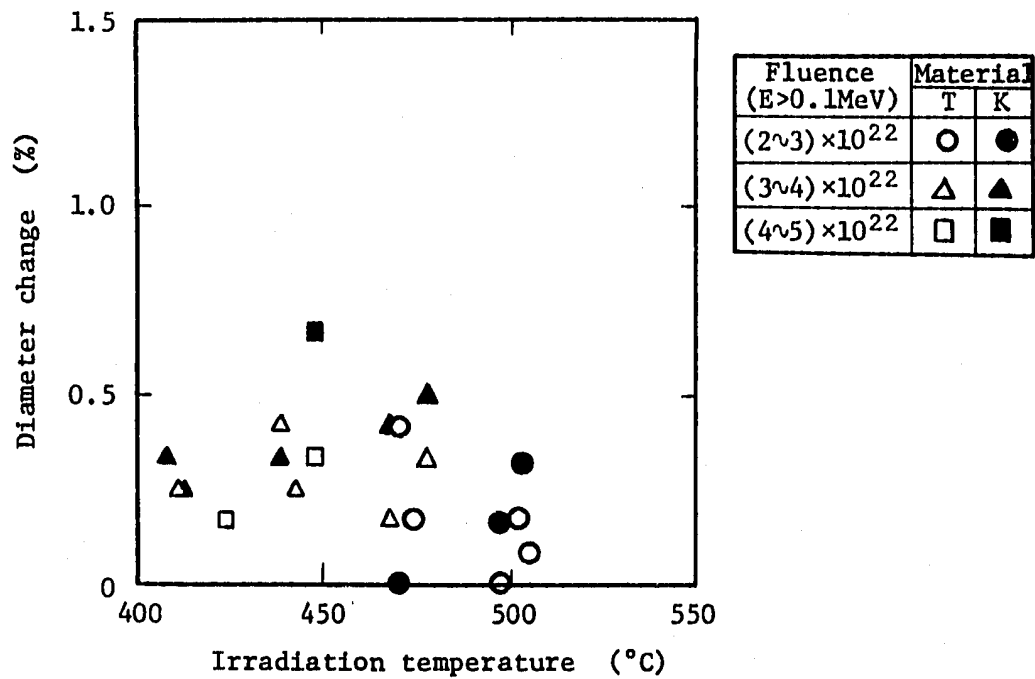


Fig. 7 Diameter change of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature.

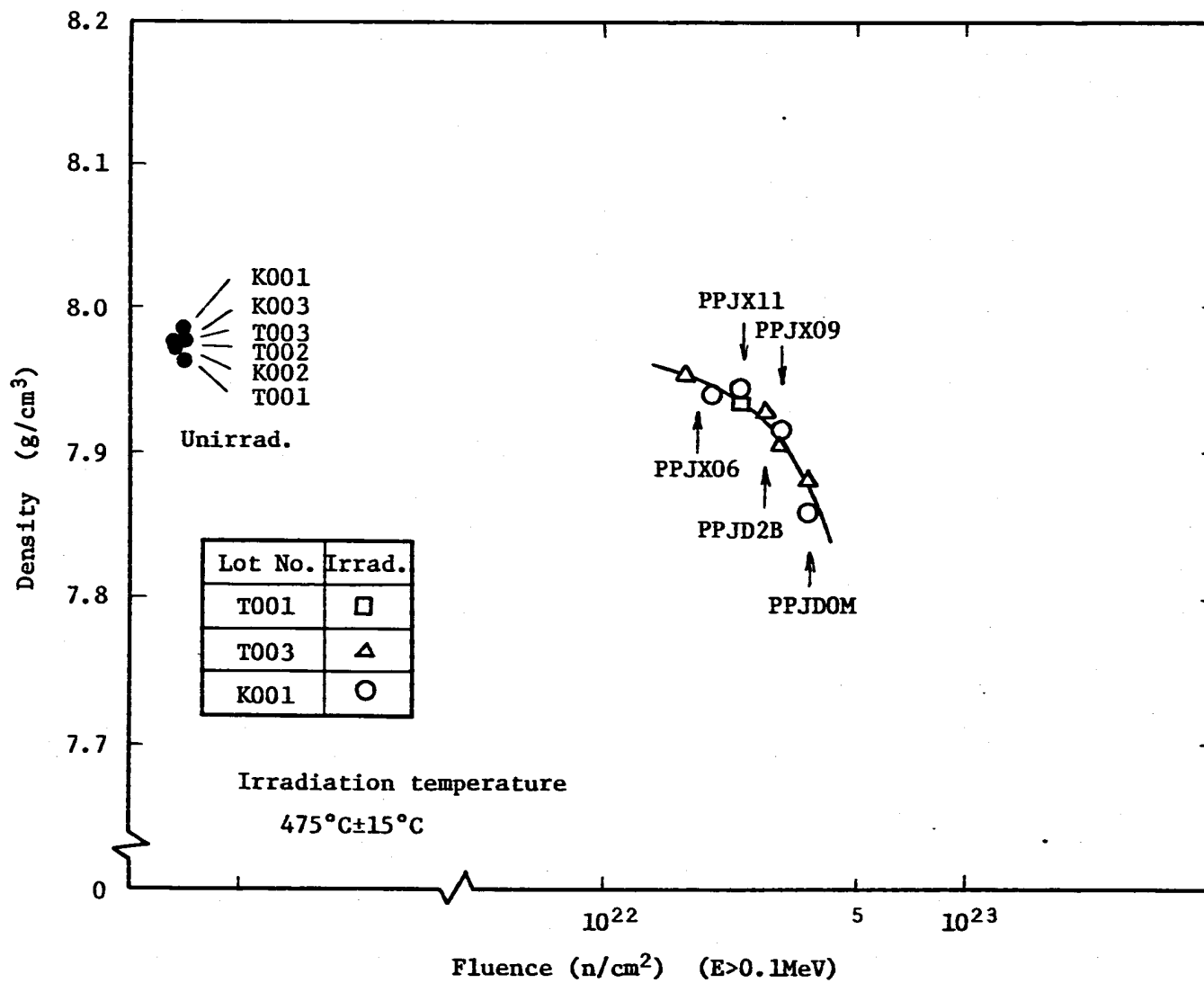


Fig. 8 Density of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

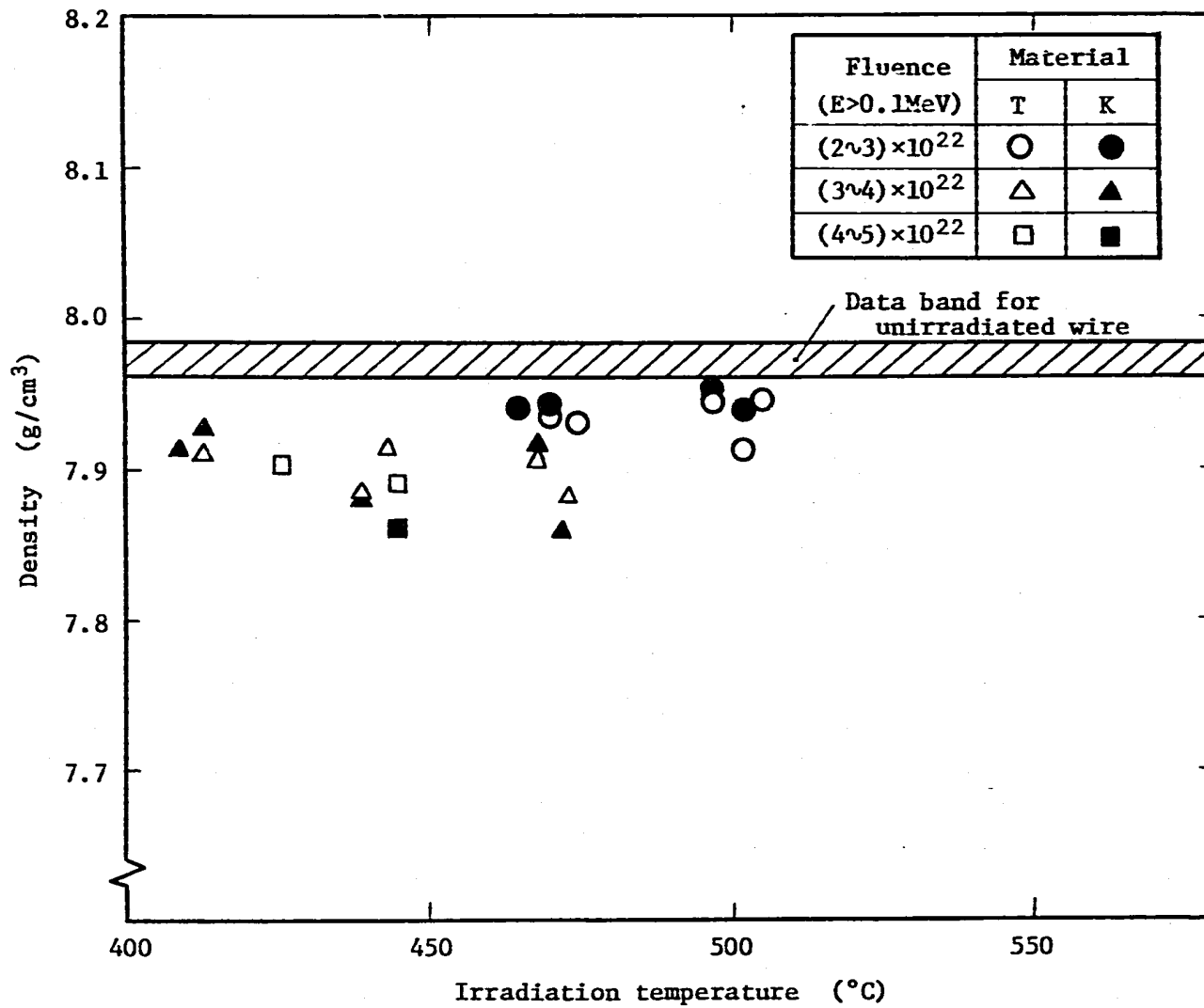


Fig. 9 Density of irradiated wrapping wire as a function of irradiation temperature.

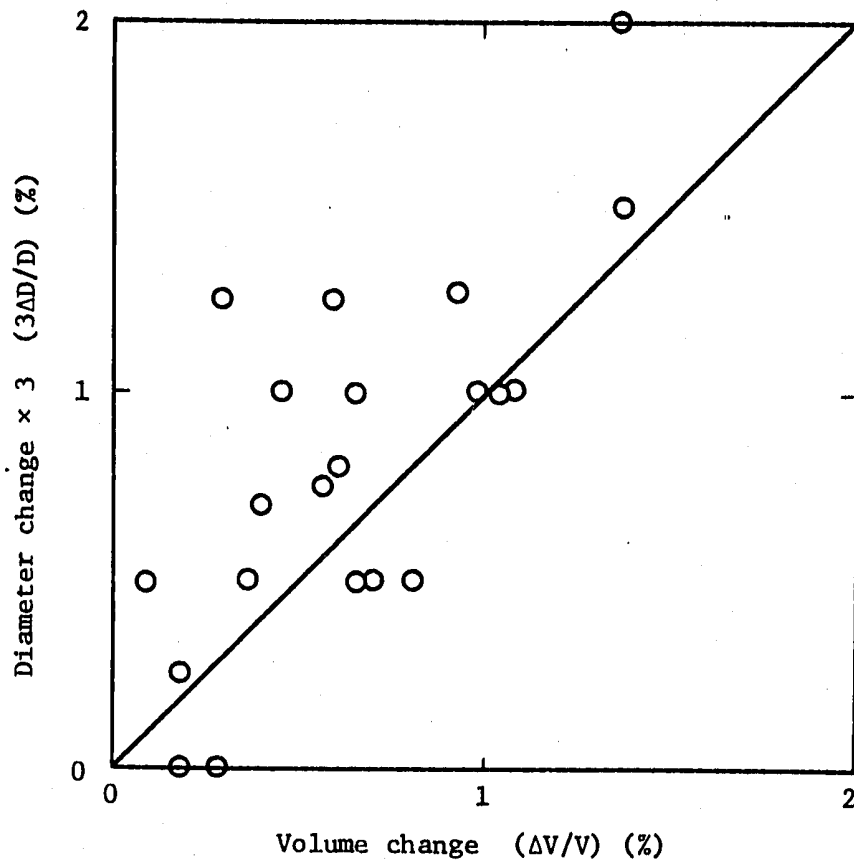


Fig. 10 Relationship between volume change and diameter change of irradiated wrapping wire.

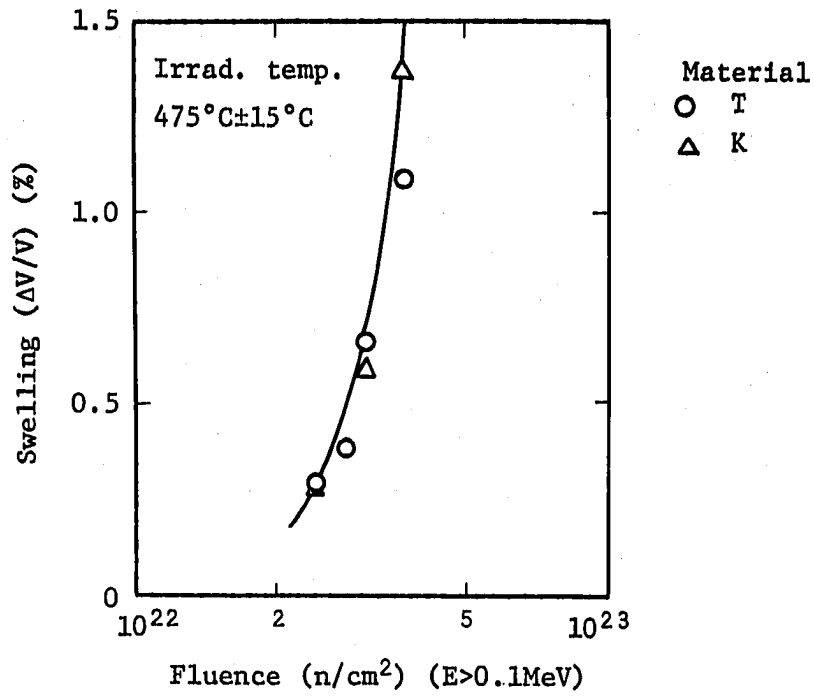


Fig. 11 Swelling of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

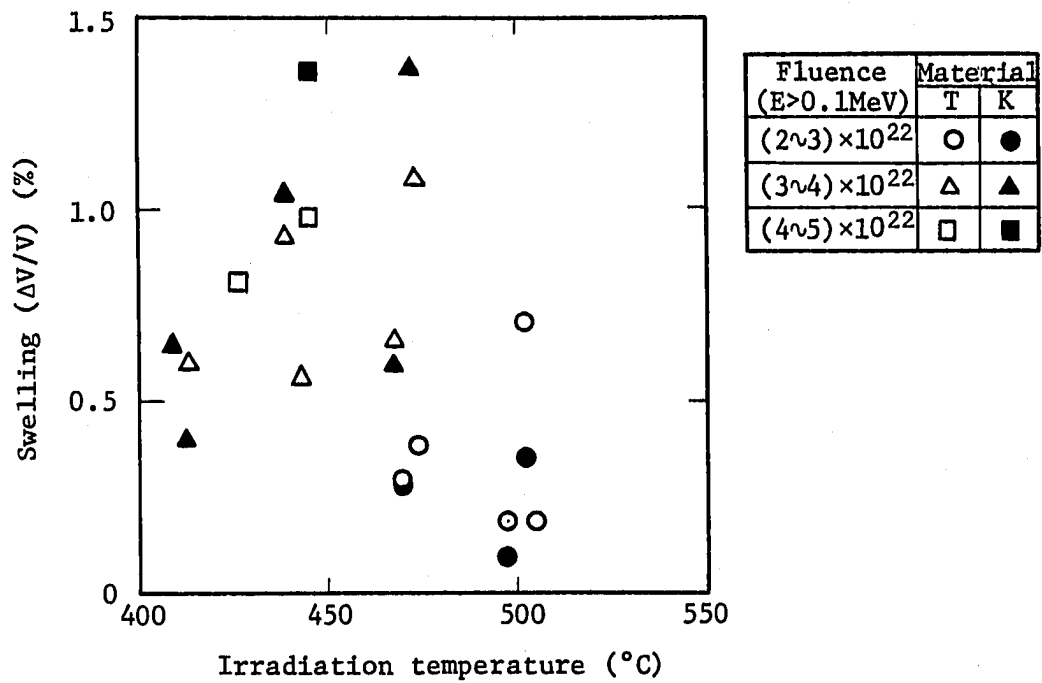
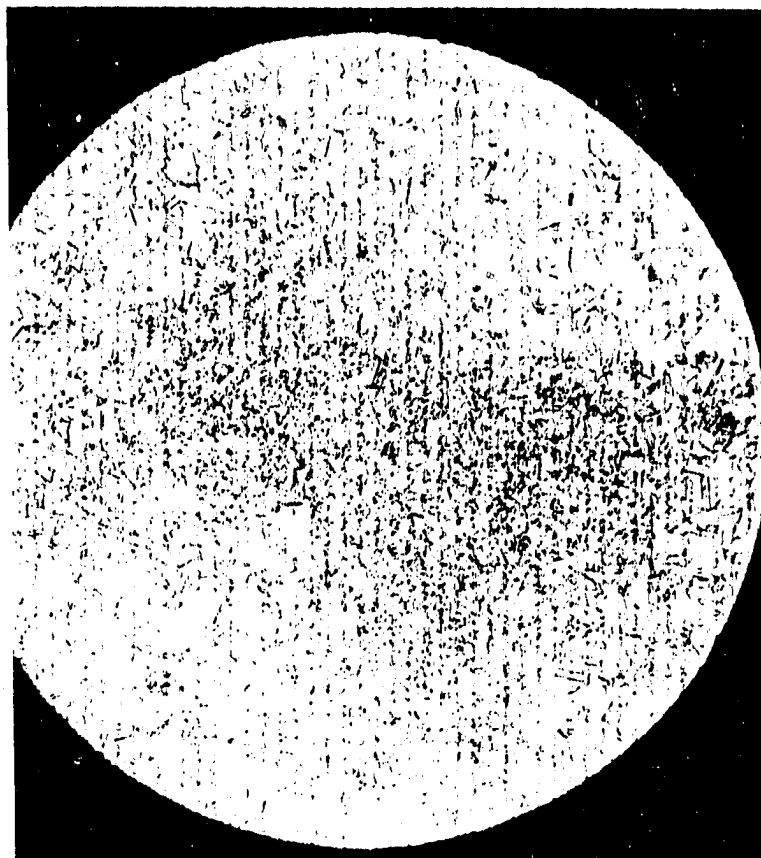


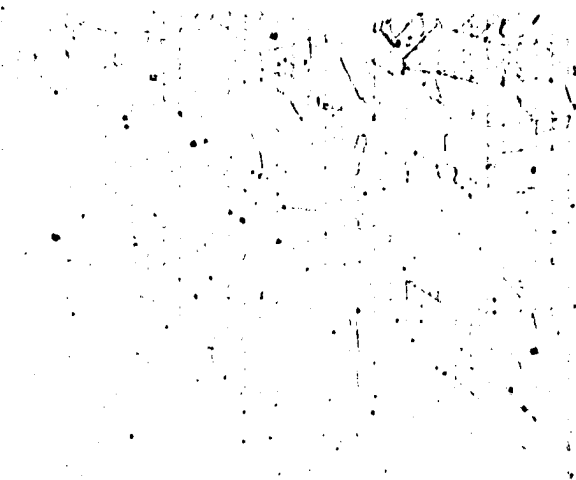
Fig. 12 Swelling of irradiated wrapping wire as a function of fluence.



100 μ



25 μ



25 μ

Fig. 13 Micrographs of wrapping wire.

Specimen No. 3967W12 (T003)
Fluence $0.10 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
Irrad. temp. 370°C

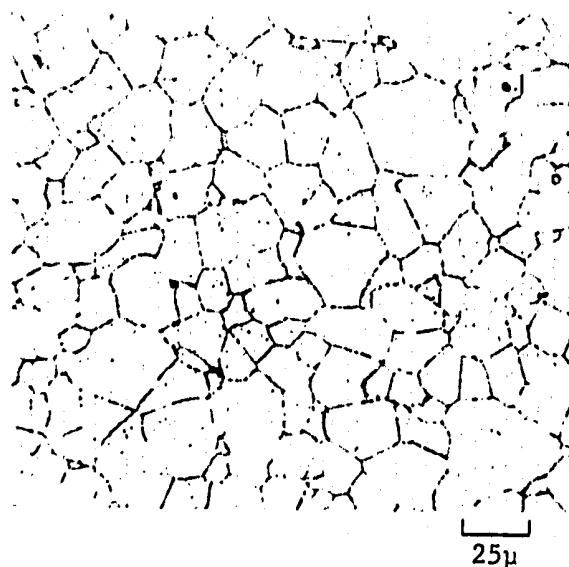
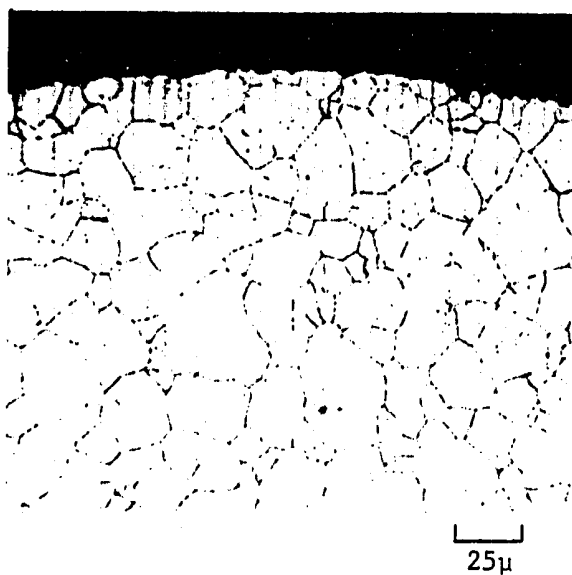
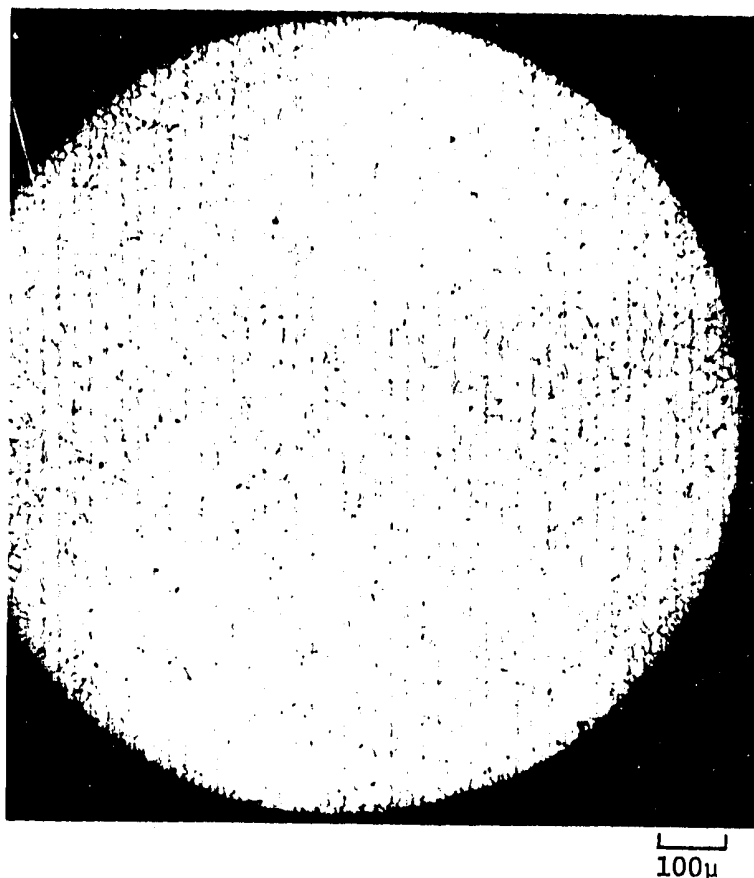
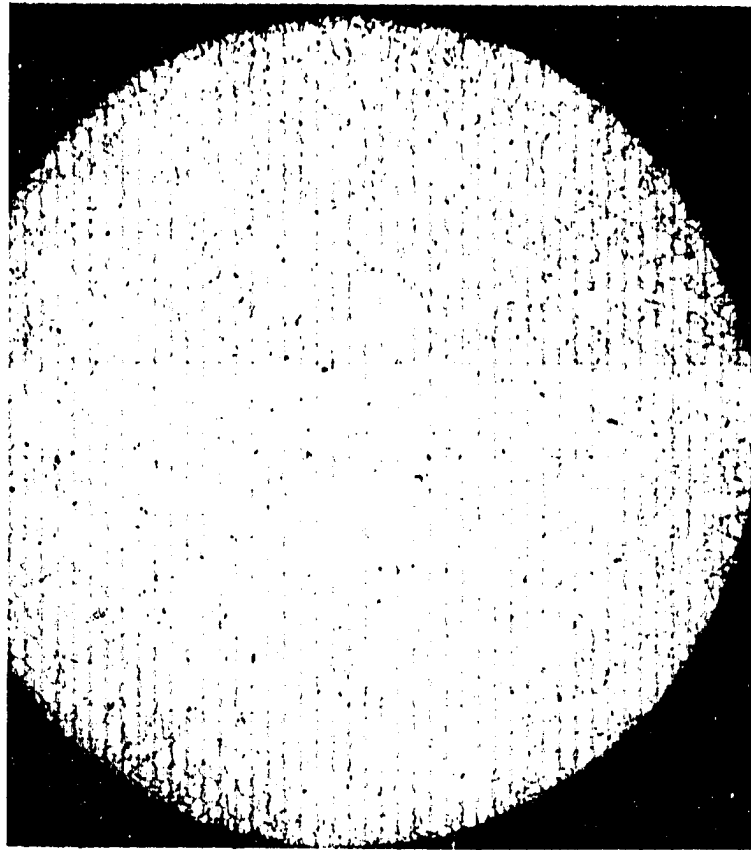


Fig. 14 Micrographs of wrapping wire.

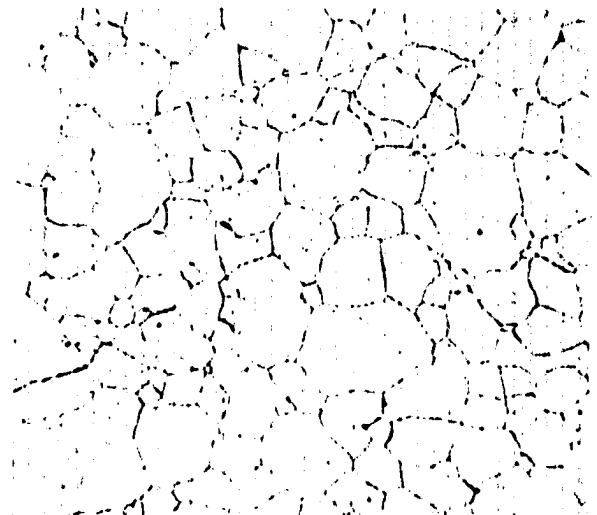
Specimen No. 3967W32 (T003)
Fluence $4.19 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$
Irrad. temp. 442°C



100 μ



25 μ



25 μ

Fig. 15 Micrographs of wrapping wire.

Specimen No. 3967W52 (T003)
Fluence $2.56 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
Irrad. temp. 500°C

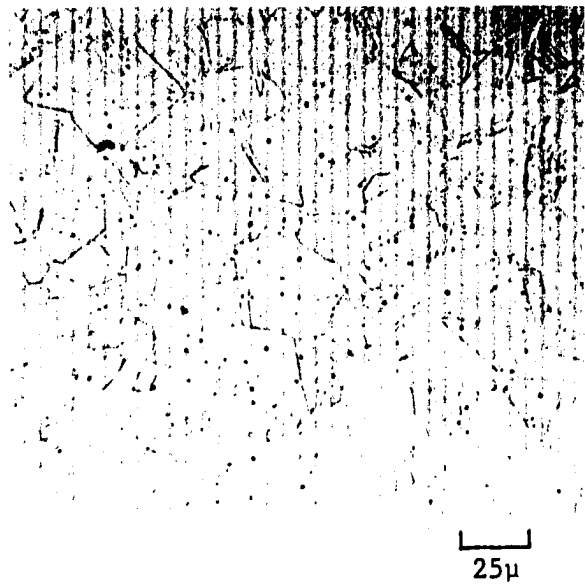
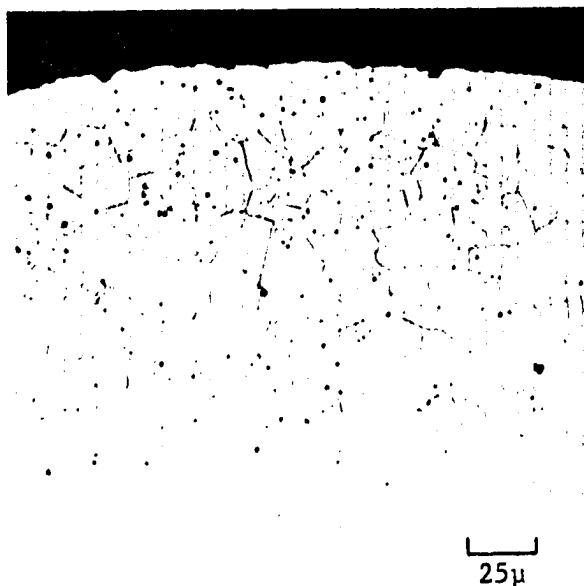
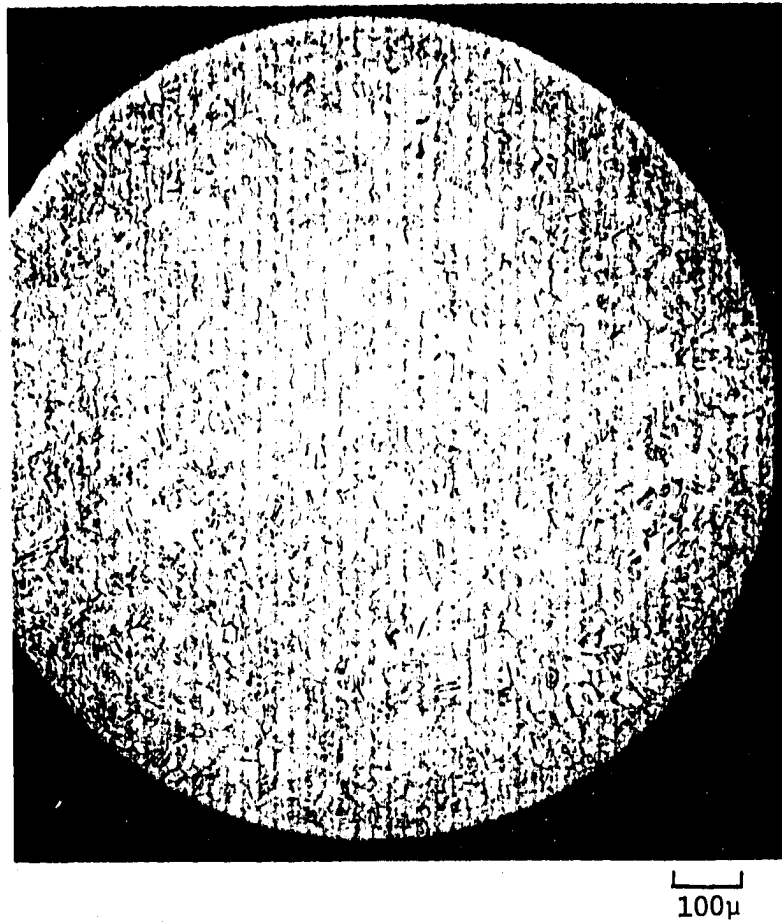
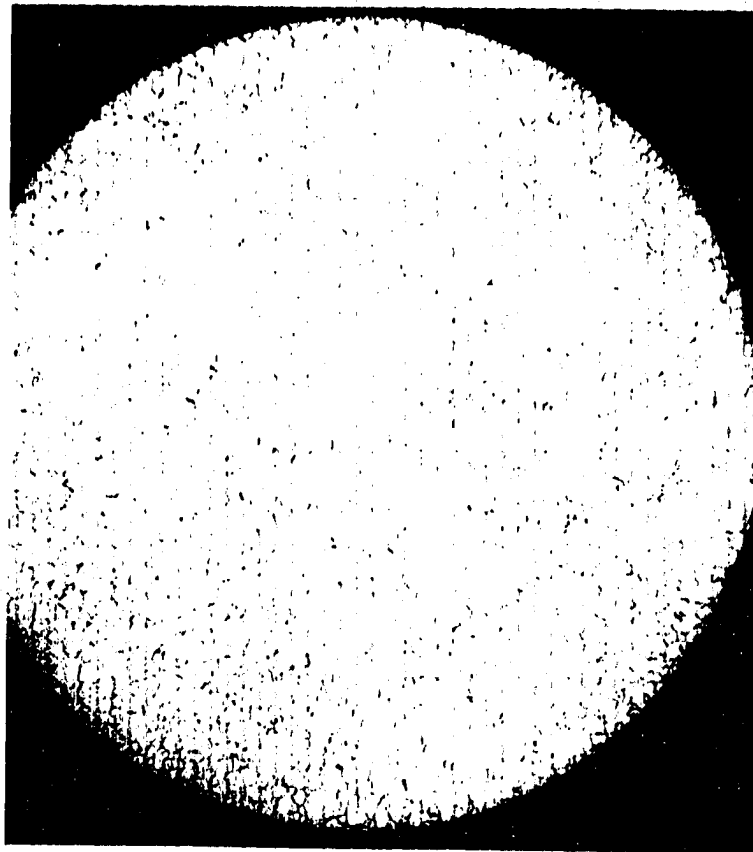
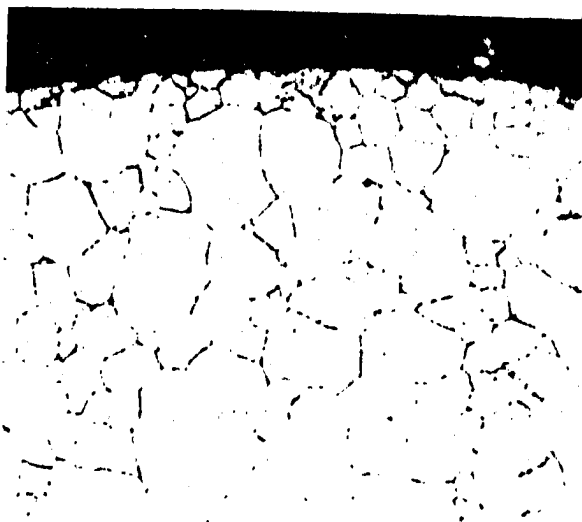


Fig. 16 Micrographs of wrapping wire.

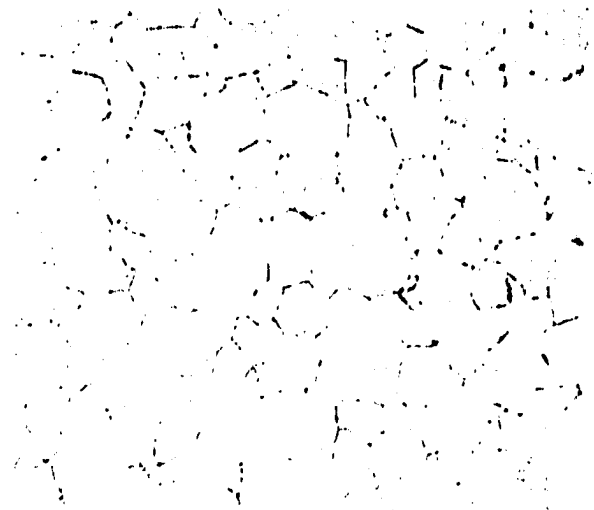
Specimen No. 3955W12 (K001)
Fluence $0.11 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$
Irrad. temp. 370°C



100 μ



25 μ



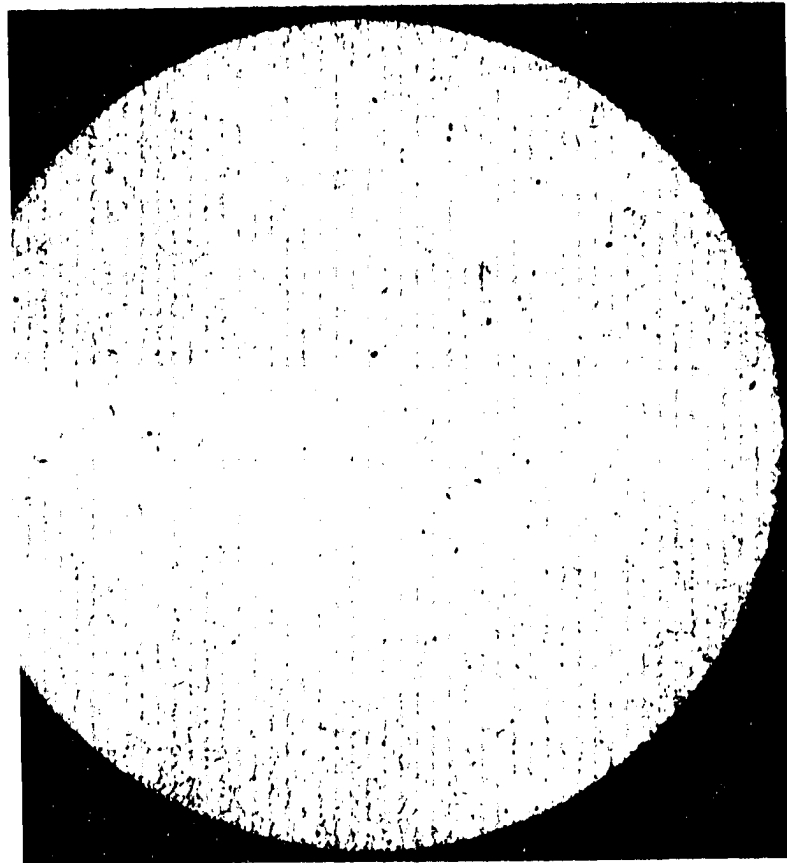
25 μ

Fig. 17 Micrographs of wrapping wire.

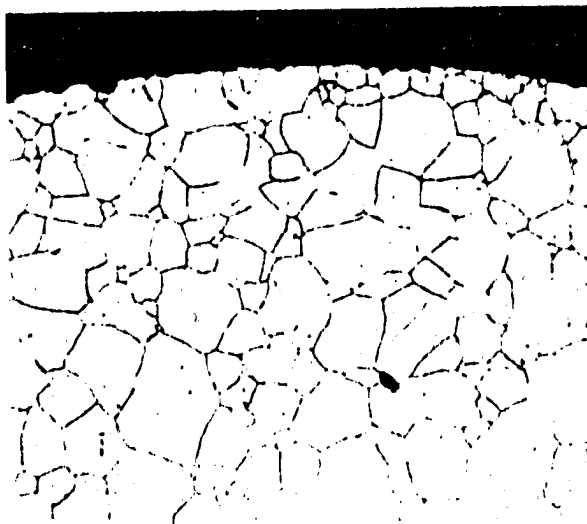
Specimen No. 3955W32 (K001)

Fluence $4.19 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$

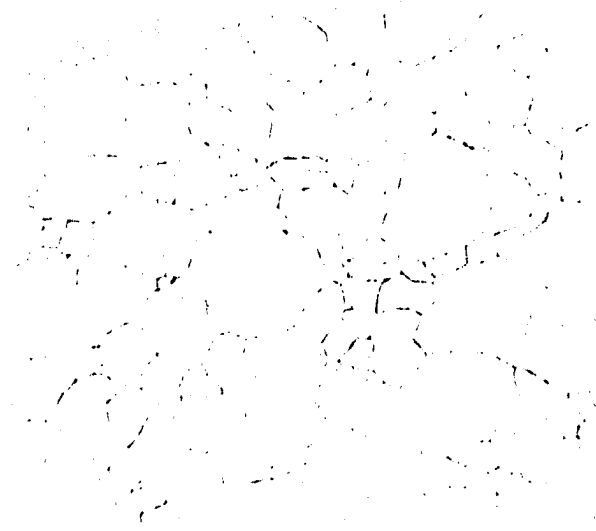
Irrad. temp. 442°C



100μ



25μ



25μ

Fig. 18 Micrographs of wrapping wire.

Specimen No. 3955W52 (K001)

Fluence $2.59 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$

Irrad. temp. 501°C

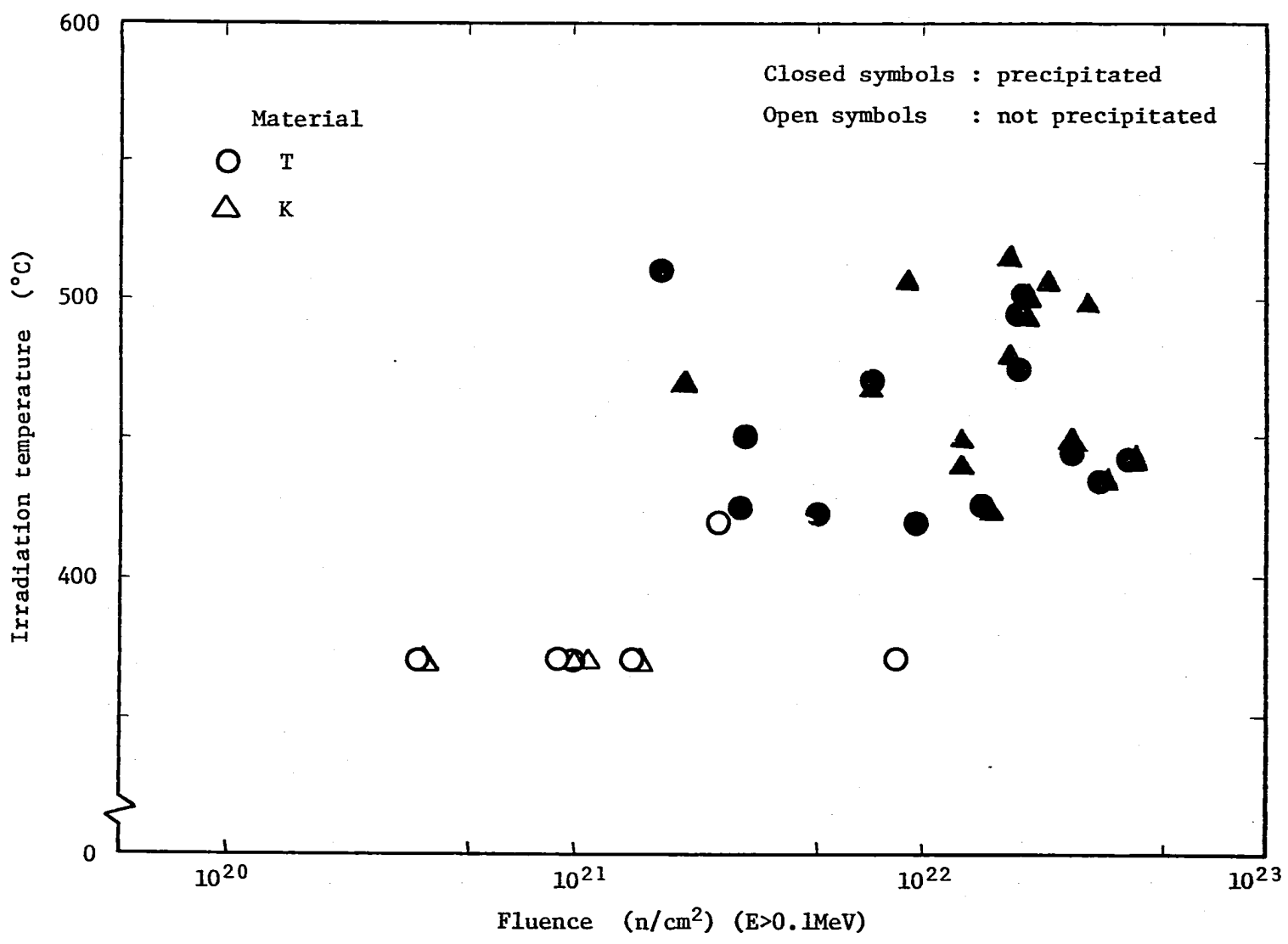


Fig. 19 Precipitation of carbide in irradiated wrapping wire.

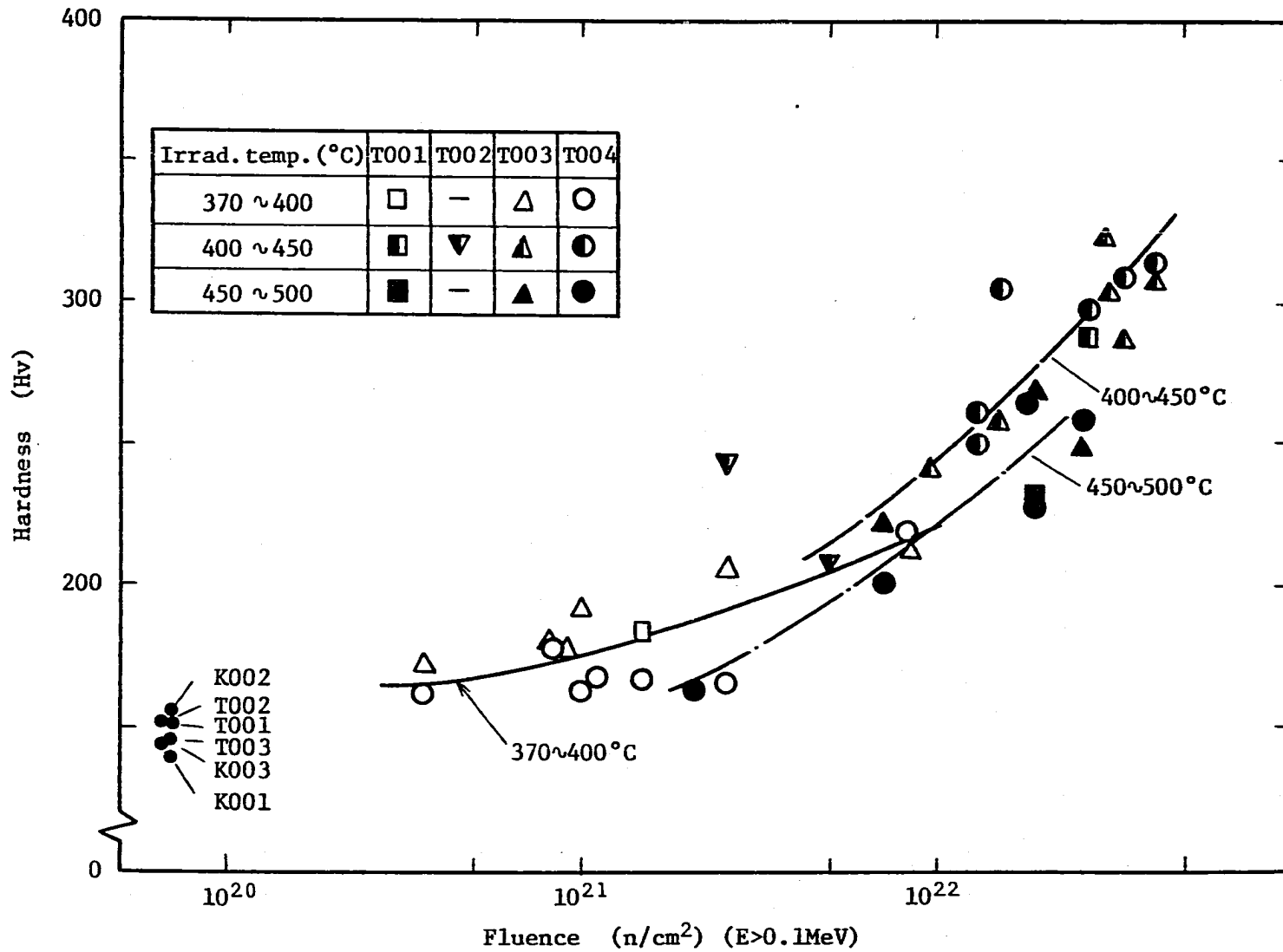


Fig. 20 Hardness of irradiated wrapping wire as a function of fluence.

添 付 資 料

DATA SHEET (I)

シールド系 S-72-14 (完)

製造元 K 001	LOT 番号 001	SEQ 01	区分コード							製造年月日			製造コード		仕様				
			部材 コード WW	検査 名 K	伊 名 J	① 本番 R&D	② 伊心 J	③ 伊心 J	④ 伊心 J	⑤ 伊心 J	⑥ 伊心 J	⑦ 伊心 J	⑧ 伊心 J	⑨ 伊心 J	⑩ 伊心 J	⑪ 伊心 J	⑫ 伊心 J	⑬ 伊心 J	⑭ 伊心 J
			製造年月日			製造コード		仕様		製造元仕様		PNC仕様							
			47 07 89			SV 5 5 0 6 3		T H C 0 3 6 3		7 2 - D 0 1 2		F E I - 1 3 0 6							

SEQ 02	数量 0004	製品(ワール)系				加工条件				試料系 - 1				試料系 - 2				
		開始高	終了高	温度C	時間	加工	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
		0001	0010	1100	0200		1	7	1	7	1	7	1	7	1	7	1	7

SEQ 03 04 05	化学成分																取 品
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	AZ	As	Cu	Nb+Ta	V	
	0.04~0.08	≤0.75	150~200	≤0.03	≤0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≤0.10	≤0.001	≤0.035	-	-	-	-	-	
	0.06	0.53	1.54	0.017	0.010	12.02	16.36	2.32	0.04	0.0003	0.0224	-	-	-	-	-	
	0.06	0.53	1.55	0.018	0.009	12.02	16.50	2.34	0.04	0.001	0.0180	0.0230	0.0040	0.0280	0.001	0.0170	

SEQ 06	非金属材料													
	管													
	A		B		C		D							
	T	H	T	H	T	H	T	H						
1	5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

SEQ 07	境界線		結晶粒度(原寸)				番号		
	①	②	1		2		③	④	
	2	2	A	B	A	B	①	①	
		合格		合格		合格		合格	
		不合格		不合格		不合格		不合格	

SEQ 08	常規引張試験											
	①						②					
	A・軸			B・軸			A・軸			B・軸		
	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置
55~80		≥30						55~80		≥30		
6.8:5		5.4	A					6.8:5		5.5	B	

SEQ 09	高引張試験											
	①						②					
	A・軸			B・軸			A・軸			B・軸		
	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3.4:7		3.2	B					3.5:5		3.4	B	

神戸製鋼

DATA SHEET (I)

シールド No S-07-102-10

製造元 T 003	SEQ 01	区分コード						製造年月日			製造コード		仕様	
		部材 コード	検査 元名	炉 名	1 素材	2 区分	3 種別	年	月	日	製造	ヒート	製造元仕様	PNC仕様
		WW	T	J	R&D	3	2	47	11	07	XS-9305	G-256	JX-2001	FEI-1306

SEQ 02	数量 0004	製品(リール)系			加工条件			試料系-1				試料系-2		
		開始	終了	温度	時間	加工	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	インゴット	実管
		0032	0035	1050	01	00	32	34	32	34	32	34	G-256	G-256-1

SEQ 03	化学成分系															
	C	Si	Nn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	AL	As	Cu	Nb+Ta	V
	0.04~0.09	≤0.75	150~200	≤0.03	≤0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≤0.10	≤0.001	≤0.035	-	-	-	-	-
	0.06	0.48	152	0.003	0.009	13.17	16.90	2.41	0.02	0.0002	0.0250	-	-	-	-	-
04	0.06	0.52	161	0.002	0.007	13.14	16.87	2.42	0.010	0.0003	0.0210	0.0050	0.0100	0.0200	0.010-	0.001-
05	0.06	0.52	164	0.002	0.007	13.14	16.89	2.42	0.010	0.0002	0.0200	0.0050	0.0100	0.0200	0.010-	0.001-

SEQ 06	非金属夹杂物															
	実管				製品				製品							
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D				
	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

SEQ 07	粒界調査		結晶粒度(NO.5以下)				巻付	
	(1)(2)		1.平行	2.コーナ	(1)(2)			
	①① 合格		A・周	B・軸	A・周	B・軸	①① 合格	
	2 2 不合格		8:0	8:0	8:0	8:0	2 2 不合格	

SEQ 08	常温引張試験											
	(1)						(2)					
	A・軸		B・周		C		A・軸		B・周		C	
55~80	≥30	-				55~80	≥30	-				
69.0	50 A					70.0	51 A					

SEQ 09	高温引張試験											
	(1)						(2)					
	A・軸		B・周		C		A・軸		B・周		C	
	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置	抗張力	0.2%耐力	伸び	位置
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
59.0	23	A				56.0	23	A				

住友電工