SN841－81－24

配布限定

「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験

(Ⅶ) 照射後試験結果および評価

1981年3月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

こ配布す
ら，この

Ⓚ

配　布　限　定
TN841−81−24
1981年3月

「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験

(Ⅶ) 照射後試験結果および評価

実施責任者　湯本　鐐三*　栢　明**
報告者　横内　洋二*　横沢　直樹**
梶山　登司*
清永　芳治*

期　間　1978年1月15日〜1981年3月5日

目　的　ふげん燃料集合体の炉内での健全性を調べるために，SGHWRで照射した集合体(タイプD)について，照射後試験を実施した。この結果について報告する。

要　旨

集合体タイプDは，混合酸化物を燃料とし，平均燃焼度5600MWD/TMO(ペレット最大8690 MWD/TMO)まで照射され，ウインズケールの施設で照射後試験を実施した。外観上集合体には，なんの異常も認めらえなく，また，破壊試験においても健全であることが確認された。本報告書は，UKAEAの報告書について詳しく述べるとともに，さらに次の事項について解析を加えてある。

① タイプDとこれまでに照射後試験を行なったタイプA，B，Cの結果の比較

② 照射後試験結果とPNCの解析コードとの比較

③ ピンギャップ，燃料要素の伸び，ペレットの変形，PCMI等についての解析

*　プルトニウム燃料部　設計課

**　プルトニウム燃料部　品質管理課

目　　次

1. はじめに

ふげん燃料の照射試験として，ウインフリスのSGHWRの炉を使用して，今までタイプA，Bおよび Cの3集合体を照射して来た。これらの試験により遂次燃料設計が改良され，ほぼ，設計・製作における確性が得られた。しかし，これらの集合体はすべてウランを燃料とするものである。

「ふげん」プルトニウム燃料の照射試験としては，短尺燃料要素7本からなる集合体をハルデン炉において実施しているが，「ふげん」実機タイプのプルトニウム燃料集合体についての照射試験は，本報のタイプDが最初である。この照射試験の目的は，①プルトニウム燃料集合体の設計について確性を得るとともに，②「ふげん」集合体のため開発したプルトニウム燃料部の製造技術，装置・設備の確性を得ることである。

タイプD集合体は，昭和50年8月に製造を完了し，本集合体の輸送のため，「ふげん」燃料輸送容器（R＆D容器）を改造して輸送容器とし，50年10月初旬にSGHWRサイトへ輸送された。

照射に先だち，外観検査と燃料要素間の間隙測定を行ない，異常の無い事を確認した。間隙はシックネスゲージで測定し，すべて2.0～2.1 mmの範囲に収っていた。[1)]

集合体は，WSGHWRの照射孔に合うようにシュラウドチューブに装入した。

照射は，1975年10月21日から行なわれ，炉からの取出しは1977年4月であり，実質照射日数は360日である。集合体燃焼度は，5600 MWD／tMOであり，ペレットピーク燃焼度は，8690MWD／tMOであった。

照射後試験のため集合体は，1977年12月にウイズケールの照射後試験施設に移され，約6ケ月間照射後試験が行なわれた。この試験に際し，非破壊試験および破壊試験の立合いおよび，試験方法の打合わせのため，PNCからウインズケールに2回派遣が行なわれ，この中間報告書がでている。[2) 3)] この中には，本報告書と関連深い局所酸水あか等に関しての参考資料が載っている。

本報告は，これらの中間報告書およびウインズケール（UKAEA）から提出された最終報告書[4)]を基に，本照射試験の解析・検討を行ない，タイプA，B，Cの照射試験結果と比較して，プルトニウム燃料集合体の健全性に関する評価を試みるものである。

2. 集合体概要

集合体の製作にあたっては，すでに製造報告書として報告[4)]されているので，ここでは，そのごく概要を記載する。

タイプD燃料集合体は先に照射されたタイプC燃料集合体の構造とほとんど同じである。

2.1 ペレット

ペレットの製造ロット数は，13ロットである。その仕様，測定値は次の通りである。

Item	Spec.	Measured Value
∘ Plutonium Isotope Ratio (w/o)		
Pu − 238		0.33
Pu − 239 + Pu − 241		79.52
Pu − 240		19.78
Pu − 242		0.59
∘ Plutonium Enrichment (w/o)	1.70 ± 0.05	1.66 ～ 1.71
∘ Pu + U/MOX	87.3 w/o以上	88.2
∘ O/M Ratio	1.97 ～ 2.02	1.99
∘ Moisture	<10 μl/gMO_2	<10
∘ Adsorbed Gas	<60 μl/gMO_2	<10
∘ Pu spot	<400 μm	<150 μm
∘ Density	$95^{+1.5}_{-2.0}$ %	94.5 ～ 95.1
∘ Dimensions		
Diameter (mm)	14.40 ± 0.05	14.39 ～ 14.41
Height (mm)	18 ± 1	17.9 ～ 18.1
Dish Dia (mm)	8 ± 1	8.2
∘ Chamfer		
Rounding Width (mm)	2.0 ± 0.4	1.9 ～ 2.1
Chamfering Height (mm)	0.5 ± 0.2	0.3 ～ 0.5
∘ Stack Length (mm)	3510 ± 5	

2.2 燃 料 要 素

使用した被覆管は，神戸製鋼製である。（住友金属研究所製被覆管は，この製造時点では使用できなかった。）

被覆管は54本使用中21本が曲がりで不合格になった。これは，取扱いのまずさによるものでなく，被覆管の製造工程が安定していないためである。[5]

燃料要素の製造は，ペレットの製造と同様，ふげん燃料の先行試験という意味あいもあって，後に予定しているふげん燃料の製造方法と同じである。製造図面を，Fig. 2.2−1に示す。

集合体に使用した燃料要素の被覆管番号，燃料要素製造番号，集合体の組立番号の対比をTable 2.2 − 1に示すとともに，同表にペレットと被覆管の間隙を調べた結果を示す。この調査のため，被覆管の内径は，その最大値と最小値との平均をとり，ペレットの径は抜取りペレットの平均径をとった。これによると，ペレットと被覆管の直径間隙は0.27 〜 0.31 mmであり，燃料要素間の差は小さかった。

ペレットスタック長さは，3510 ± 5 mmの規格値を満足していた。この長さと，被覆管等の部材の長さを考慮に入れて，上部プレナム長さを計算してみると，190 ± 5 mmとなっている。しかし，この値とペレット充てん後ノギスにより測定した値と比べると，ノギス法の方が1.0〜1.4mm小さく，またX線透過検査で測定した値は，計算値よりも2.0 〜 2.5 mm大きくなっていた。

2.3 集 合 体

SGHWR照射集合体は，「ふげん」初装荷用集合体に比べ，スペーサが1個，タイロッドが1段少ない。集合体の図面を，Fig. 2.3 − 1に示す。

集合体のピンギャップ測定位置を，Fig. 2.3 − 2に，測定結果を，Table 2.3 − 1に示す。同表の上段には測定区間の最大値，下段には最小値を示した。いずれの区間においてもピンギャップは，2.0 mm以上であった。

その他，まがり，ねじれ等「ふげん」初装荷燃料の検査に準じて行なったがすべて満足していた。

WSGHWRでは，この集合体はシュラウドチューブに入れた状態で装荷される。すなわち「ふげん」の圧力管内径は，WSGHWRの圧力管より小さいため，「ふげん」の流水条件に近い条件を得るため，このシュラウドチューブを使用した。この形状は，タイプCと同じである。

Table 2.2-1 diametral gap between fuel and cladding before irradiation

S/A Location	Pin No.	Clad No.	Wall thickness Max	Wall thickness Min	OD Max	OD Min	ID Max	ID Min	Pellet Lot No.	Pellet $\bar{x}$	Pellet 6	Fuel/clad gap $ID(\frac{Max+Min}{2})-\bar{x}$
A 1	SG 01	693	0.899	0.822	16.438	16.427	14.704	14.689	1	14.397	0.0050	0.304
A 2	05	697	0.888	0.839	16.442	16.434	14.701	14.686	2	14.407	0.0042	0.286
A 3	09	702	0.899	0.825	16.454	16.425	14.697	14.684	4	14.412	0.0043	0.288
A 4	15	711	0.872	0.832	16.436	16.428	14.714	14.700	6	14.412	0.0063	0.305
B 1	25	730	0.880	0.830	16.431	16.420	14.709	14.700	10	14.420	0.0026	0.284
B 2	27	733	0.875	0.830	16.435	16.418	14.715	14.701	11	14.424	0.0025	0.284
B 3	28	734	0.900	0.820	16.438	16.419	14.708	14.692	12	14.398	0.0038	0.302
B 4	32	742	0.905	0.817	16.436	16.423	14.698	14.682	13	14.395	0.0050	0.295
B 5	29	735	0.878	0.838	16.435	16.425	14.705	14.693	12	14.398	0.0038	0.301
B 6	34	744	0.890	0.828	16.436	16.402	14.706	14.689	5, 11	14.409 14.424	0.0040 0.0025	0.288 0.273
B 7	30	738	0.892	0.815	16.435	16.425	14.708	14.693	12	14.398	0.0038	0.302
B 8	31	740	0.880	0.814	16.433	16.418	14.715	14.703	12	14.398	0.0038	0.311
C 1	21	721	0.880	0.818	16.435	16.421	14.708	14.696	8	14.407	0.0037	0.295
C 2	03	695	0.920	0.805	16.441	16.427	14.700	14.684	1	14.397	0.0050	0.295
C 3	16	712	0.890	0.818	16.436	16.415	14.709	14.695	6	14.412	0.0063	0.290
C 4	06	698	0.914	0.805	16.435	16.424	14.700	14.691	2	14.407	0.0042	0.288
C 5	18	716	0.882	0.818	16.433	16.422	14.715	14.698	7	14.408	0.0051	0.298
C 6	07	700	0.875	0.830	16.440	16.421	14.702	14.690	2	14.407	0.0042	0.289
C 7	11	704	0.890	0.831	16.441	16.434	14.698	14.689	4	14.412	0.0043	0.281
C 8	35	747	0.905	0.805	16.430	16.390	14.704	14.695	6, 11	14.412 14.424	0.0063 0.0025	0.287 0.275
C 9	08	701	0.900	0.811	16.436	16.425	14.704	14.692	4	14.412	0.0043	0.286
C 10	20	719	0.895	0.822	16.488	16.420	14.709	14.694	8	14.407	0.0037	0.295
C 11	12	705	0.899	0.816	16.439	16.425	14.700	14.688	5	14.409	0.0040	0.285
C 12	23	723	0.885	0.814	16.431	16.418	14.713	14.701	9	14.408	0.0057	0.299
C 13	13	706	0.890	0.835	16.444	16.430	14.701	14.673	5	14.409	0.0040	0.278
C 14	22	722	0.876	0.836	16.450	16.423	14.707	14.692	8	14.407	0.0037	0.292
C 15	14	707	0.876	0.835	16.436	16.428	14.704	14.690	5	14.409	0.0040	0.288
C 16	24	727							9	14.408	0.0057	

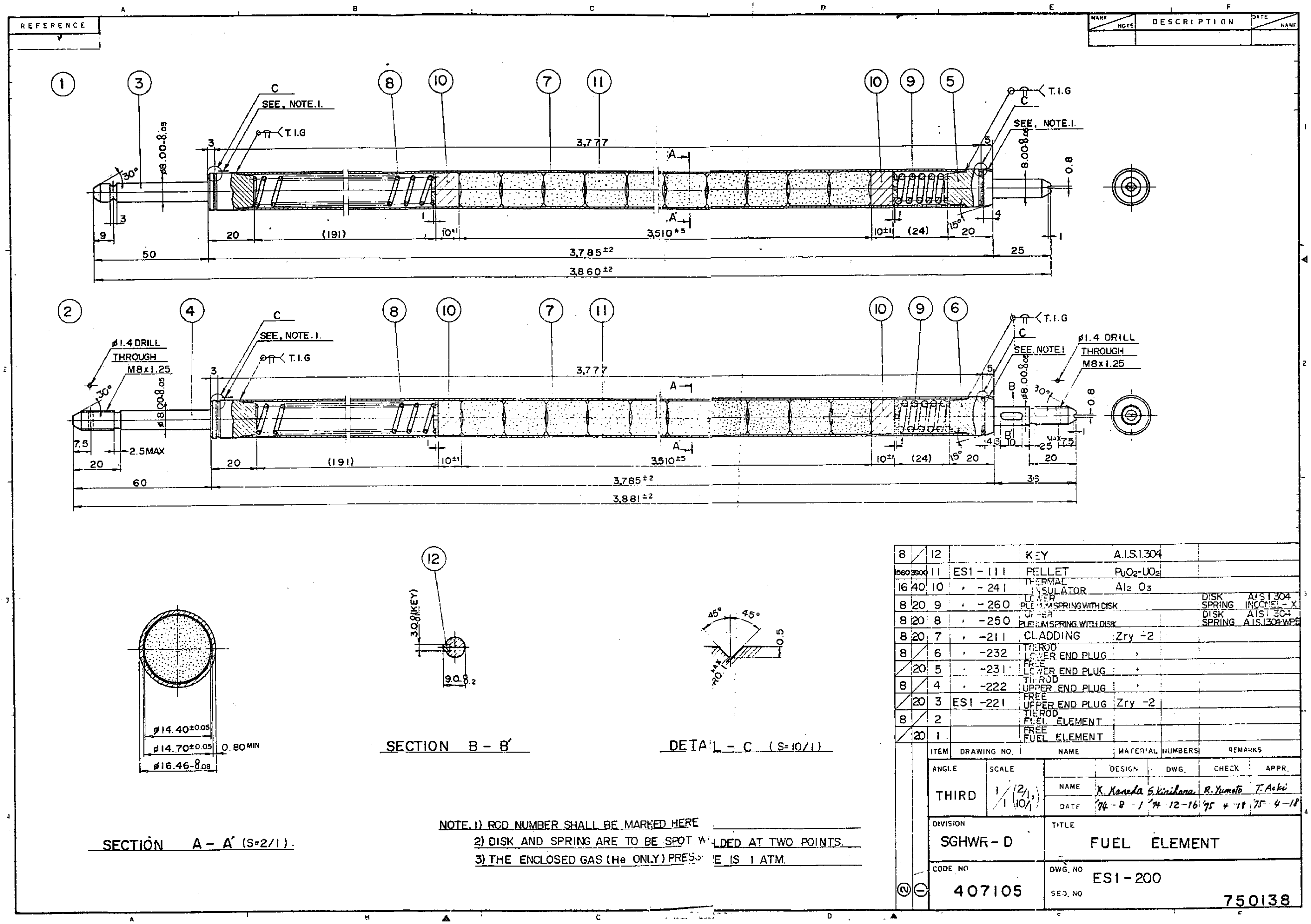


Fig.2.2-1 Type − D Fuel element

Table 2.3-1 Fuel element gap before irradiation

Inner ring

position

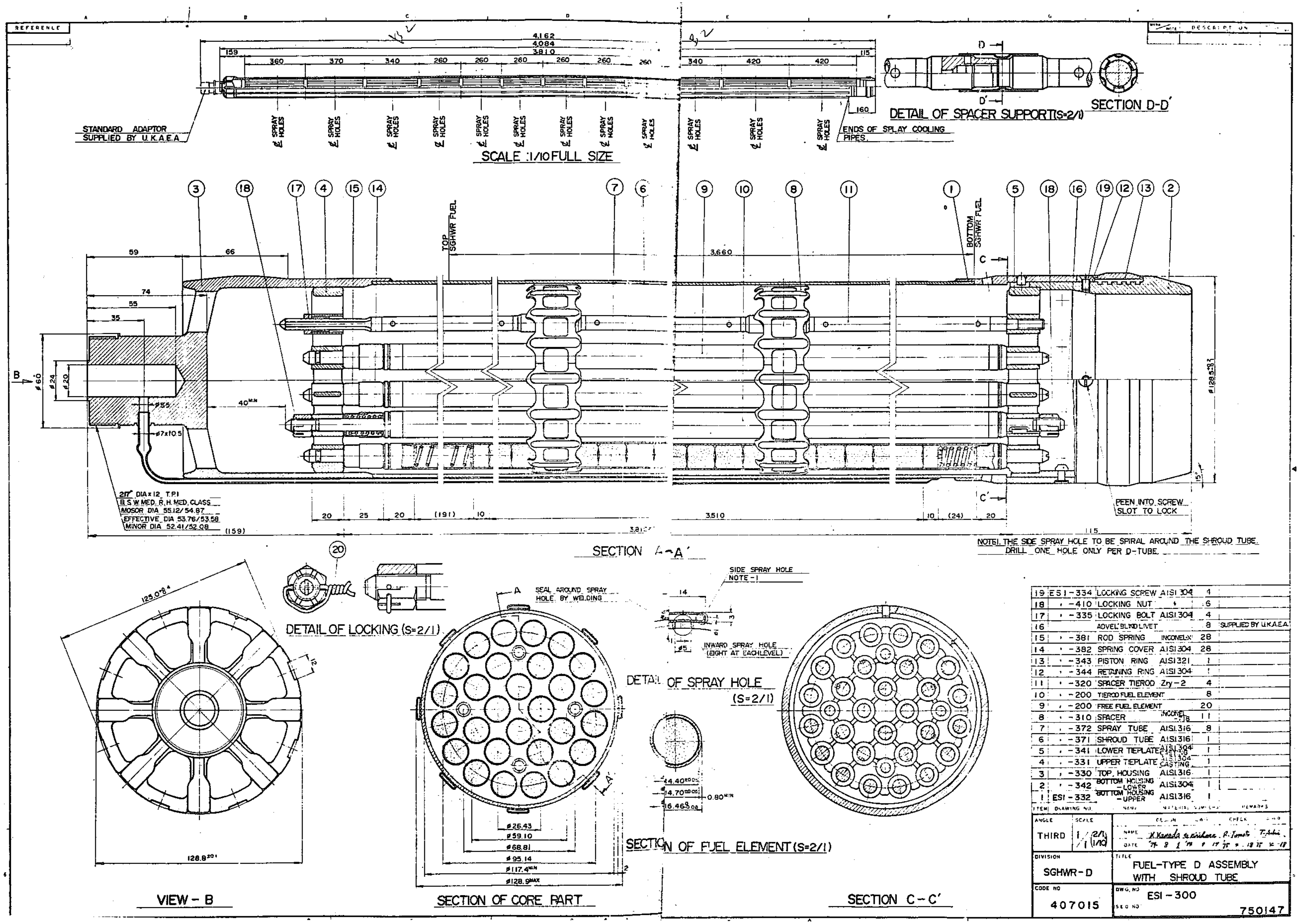
位 置		A	B-1	B-2	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-2	B-4	C	Total	Max	Min	R	$\bar{X}$
	5	2.32 2.22	2.47 2.37	2.30 2.26	2.39 2.31	2.38 2.32	2.28 2.26	2.38 2.38	2.36 2.24	2.36 2.35	2.32 2.29	2.27 2.25		2.32 2.30	28.15 27.55	2.47	2.22	0.25	2.32
	6	2.35 2.24	2.31 2.24	2.30 2.24	2.32 2.30	2.27 2.18	2.15 2.13	2.15 2.13	2.27 2.18	2.30 2.27	2.35 2.30	2.28 2.26		2.29 2.28	27.34 26.75	2.35	2.13	0.22	2.25
	7	2.32 2.23	2.34 2.30	2.30 2.26	2.32 2.27	2.34 2.33	2.29 2.26	2.28 2.24	2.30 2.23	2.30 2.24	2.27 2.23	2.33 2.28		2.26 2.25	27.65 27.12	2.34	2.23	0.11	2.28
	8	2.14 2.06	2.23 2.18	2.23 2.20	2.28 2.26	2.24 2.22	2.21 2.19	2.26 2.21	2.26 2.21	2.26 2.23	2.29 2.25	2.26 2.21		2.20 2.17	26.86 26.39	2.29	2.06	0.23	2.22
Total		17.88	18.44	18.09	18.45	18.28	17.77	18.03	18.05	18.31	18.30	18.14		18.07	217.81				
Max		2.35	2.47	2.30	2.39	2.38	2.29	2.38	2.36	2.36	2.35	2.33		2.32		2.36			
Min		2.06	2.18	2.20	2.26	2.18	2.13	2.13	2.18	2.23	2.23	2.21		2.17			2.16		
R		0.29	0.29	0.10	0.13	0.20	0.16	0.25	0.18	0.13	0.12	0.12		0.15					
X		2.24	2.31	2.26	2.31	2.29	2.22	2.25	2.26	2.29	2.29	2.27		2.26					2.27

Intermediat ring

		A	B-1	B-2	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-2	B-4	C	Total	Max	Min	R	$\bar{X}$
1	45	2.21 2.15	2.32 2.23	2.24 2.16	2.30 2.29	2.30 2.23	2.19 2.17	2.28 2.27	2.26 2.25	2.26 2.24		2.27 2.24	2.22 2.17	2.26 2.20	27.11 26.60	2.32	2.15	0.17	2.24
2	46	2.44 2.32	2.32 2.28	2.44 2.36	2.37 2.35	2.34 2.31	2.30 2.26	2.35 2.33	2.32 2.32	2.26 2.22		2.20 2.12	2.28 2.20	2.28 2.25	27.90 27.32	2.44	2.12	0.32	2.30
3	47	2.26 2.16	2.20 2.17	2.22 2.19	2.20 2.12	2.14 2.12	2.31 2.13	2.14 2.04	2.22 2.18	2.22 2.12		2.14 2.09	2.10 2.02	2.27 2.16	26.42 25.50	2.31	2.02	0.29	2.16
4	48	2.19 2.15	2.44 2.26	2.39 2.33	2.26 2.21	2.28 2.22	2.21 2.16	2.24 2.23	2.26 2.24	2.32 2.26		2.34 2.33	2.46 2.38	2.26 2.20	27.65 26.97	2.46	2.15	0.36	2.28
5	49	2.32 2.22	2.24 2.14	2.26 2.24	2.15 2.12	2.15 2.12	2.25 2.20	2.23 2.23	2.27 2.22	2.18 2.17		2.26 2.26	2.18 2.16	2.18 2.12	26.67 26.16	2.32	2.12	0.20	2.20
6	50	2.31 2.13	2.22 2.18	2.30 2.22	2.32 2.30	2.26 2.19	2.22 2.20	2.25 2.23	2.27 2.25	2.24 2.18		2.14 2.10	2.24 2.18	2.39 2.23	27.16 26.39	2.39	2.10	0.29	2.23
7	51	2.27 2.15	2.32 2.23	2.29 2.21	2.24 2.22	2.19 2.18	2.11 2.09	2.20 2.17	2.22 2.22	2.21 2.20		2.26 2.22	2.23 2.18	2.38 2.25	26.92 26.32	2.38	2.09	0.29	2.22
8	52	2.20 2.17	2.27 2.21	2.19 2.12	2.12 2.08	2.22 2.10	2.12 2.10	2.11 2.10	2.10 2.10	2.22 2.16		2.23 2.16	2.22 2.17	2.18 2.16	26.18 25.63	2.27	2.08	0.19	2.16
9	53	2.34 2.24	2.16 2.13	2.32 2.21	2.36 2.34	2.26 2.21	2.26 2.22	2.26 2.31	2.30 2.27	2.26 2.20		2.20 2.16	2.26 2.22	2.26 2.22	27.24 26.73	2.36	2.13	0.23	2.25
10	54	2.25 2.14	2.26 2.24	2.27 2.25	2.20 2.16	2.22 2.20	2.22 2.20	2.26 2.25	2.28 2.26	2.23 2.22		2.32 2.25	2.24 2.18	2.15 2.08	26.90 26.43	2.28	2.08	0.20	2.22
11	55	2.24 2.20	2.20 2.15	2.16 2.10	2.14 2.10	2.09 2.07	2.18 2.08	2.29 2.26	2.24 2.15	2.15 2.12		2.13 2.07	2.15 2.06	2.42 2.23	26.39 25.60	2.42	2.06	0.36	2.17
12	56	2.20 2.10	2.40 2.23	2.37 2.27	2.21 2.17	2.30 2.22	2.39 2.38	2.34 2.28	2.25 2.25	2.28 2.24		2.28 2.19	2.34 2.24	2.26 2.22	27.62 26.79	2.40	2.10	0.30	2.27
13	57	2.17 2.13	2.24 2.13	2.19 2.13	2.19 2.16	2.22 2.17	2.29 2.24	2.18 2.11	2.11 2.09	2.11 2.08		2.20 2.17	2.23 2.19	2.31 2.19	26.44 25.79	2.31	2.08	0.23	2.18
14	58	2.28 2.17	2.32 2.23	2.20 2.19	2.25 2.20	2.32 2.29	2.22 2.16	2.19 2.16	2.24 2.18	2.27 2.24		2.20 2.19	2.28 2.20	2.32 2.24	27.12 26.45	2.32	2.16	0.16	2.23
15	59	2.24 2.18	2.22 2.18	2.21 2.20	2.23 2.22	2.16 2.06	2.11 2.03	2.15 2.10	2.26 2.23	2.26 2.17		2.13 2.11	2.13 2.11	2.34 2.18	26.44 25.77	2.34	2.03	0.31	2.18
16	60	2.15 2.04	2.13 2.02	2.16 2.14	2.11 2.07	2.16 2.09	2.24 2.20	2.17 2.12	2.07 2.06	2.13 2.07		2.26 2.21	2.26 2.24	2.19 2.10	26.03 25.36	2.26	2.02	0.24	2.14
Total		70.72	71.27	71.53	70.79	70.39	70.44	70.83	70.95	70.49		70.39	70.72	71.48	850.00				
Max		2.44	2.44	2.44	2.36	2.34	2.39	2.35	2.32	2.32		2.34	2.46	2.42		39.89			
Min		2.04	2.02	2.10	2.07	2.07	2.03	2.04	2.06	2.07		2.07	2.02	2.08			33.49		
R		0.40	0.42	0.34	0.29	0.27	0.36	0.31	0.26	0.25		0.27	0.44	0.34					
X		2.21	2.23	2.24	2.21	2.20	2.20	2.21	2.22	2.20		2.20	2.21	2.23					2.21

Outer ring

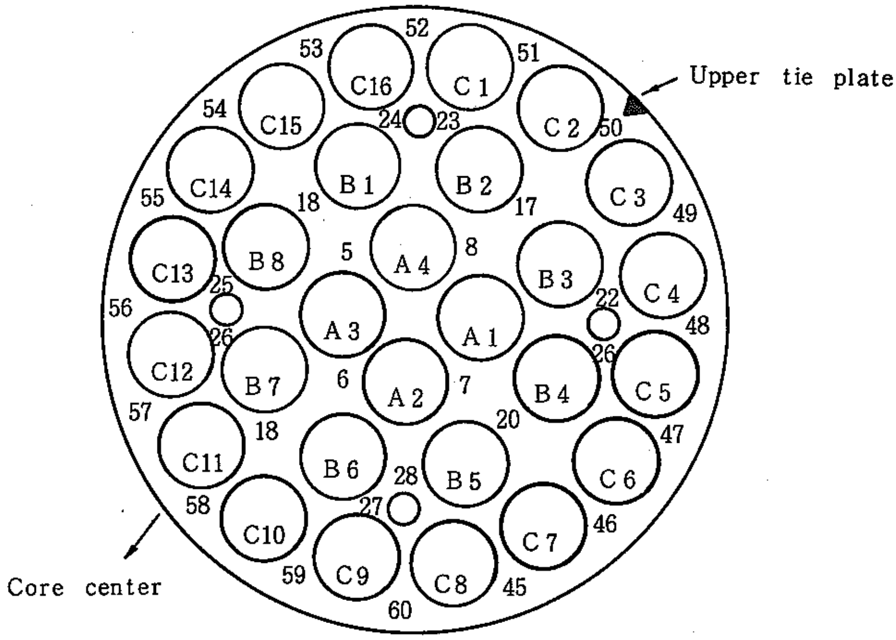
		A	B-1	B-2	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-3	B-2	B-4	C	Total	Max	Min	R	$\bar{X}$
1	17	2.26 2.20	2.23 2.20	2.31 2.27	2.32 2.30	2.32 2.27	2.23 2.19	2.34 2.29	2.38 2.36	2.32 2.26		2.28 2.23	2.30 2.23	2.21 2.20	27.50 27.00	2.38	2.19	0.19	2.27
2	18	2.25 2.23	2.23 2.18	2.23 2.22	2.34 2.28	2.28 2.24	2.28 2.21	2.34 2.33	2.34 2.33	2.30 2.30		2.32 2.28	2.30 2.20	2.30 2.27	27.51 27.07	2.34	2.18	0.16	2.27
3	19	2.28 2.22	2.26 2.15	2.32 2.28	2.29 2.27	2.35 2.30	2.20 2.18	2.23 2.21	2.30 2.23	2.32 2.28		2.28 2.24	2.35 2.24	2.44 2.38	27.62 26.98	2.44	2.15	0.29	2.28
4	20	2.41 2.16	2.34 2.28	2.44 2.43	2.44 2.43	2.44 2.40	2.32 2.31	2.38 2.34	2.41 2.38	2.36 2.34		2.31 2.27	2.33 2.26	2.28 2.20	28.46 27.80	2.44	2.16	0.28	2.34
5	21	2.74 2.69	2.63 2.54	2.56 2.54	2.58 2.58	2.58 2.55	2.64 2.62	2.59 2.54	2.61 2.60	2.54 2.49		2.66 2.55	2.68 2.62	2.60 2.44	28.83 28.14	2.74	2.44	0.30	2.37
6	22	2.93 2.70	2.69 2.64	2.73 2.66	2.58 2.57	2.58 2.54	2.62 2.60	2.67 2.62	2.69 2.61	2.68 2.62		2.70 2.66	2.70 2.66	2.68 2.61	32.25 31.49	2.93	2.54	0.39	2.66
7	23	2.68 2.64	2.80 2.65	2.72 2.60	2.63 2.60	2.68 2.66	2.60 2.56	2.70 2.64	2.76 2.72	2.68 2.64		2.74 2.65	2.66 2.60	2.86 2.64	32.51 31.60	2.86	2.60	0.26	2.67
8	24	2.83 2.72	2.72 2.70	2.71 2.64	2.74 2.70	2.69 2.65	2.72 2.66	2.69 2.59	2.66 2.60	2.63 2.57		2.65 2.62	2.72 2.69	2.50 2.64	32.26 31.78	2.83	2.57	0.26	2.67
9	25	2.89 2.58	2.58 2.54	2.63 2.60	2.71 2.65	2.66 2.64	2.66 2.65	2.71 2.62	2.56 2.52	2.60 2.57		2.67 2.61	2.71 2.66	2.70 2.47	32.08 31.11	2.89	2.47	0.42	2.63
10	26	2.70 2.56	2.65 2.61	2.61 2.58	2.60 2.50	2.54 2.50	2.60 2.56	2.76 2.71	2.66 2.64	2.60 2.57		2.59 2.55	2.90 2.73	2.76 2.55	31.97 31.06	2.90	2.50	0.40	2.63
11	27	2.65 2.60	2.68 2.62	2.72 2.67	2.78 2.73	2.65 2.56	2.64 2.53	2.62 2.58	2.67 2.63	2.60 2.56		2.77 2.69	2.81 2.68	2.60 2.33	32.19 31.18	2.81	2.33	0.48	2.64
12	28	2.79 2.60	2.84 2.70	2.80 2.68	2.63 2.62	2.72 2.67	2.66 2.64	2.80 2.79	2.76 2.72	2.92 2.83		2.74 2.72	2.96 2.79	2.75 2.66	33.37 32.42	2.96	2.60	0.36	2.74
Total		61.31	60.46	60.95	60.87	60.47	59.88	61.09	61.14	60.58		60.78	61.12	60.07	728.72				
Max		2.89	2.84	2.80	2.78	2.72	2.66	2.80	2.76	2.92		2.77	2.96	2.86		2.81			
Min		2.16	2.15	2.22	2.27	2.24	2.18	2.21	2.23	2.26		2.23	2.20	2.20			2.21		
R		0.73	0.69	0.58	0.51	0.46	0.48	0.59	0.53	0.64		0.54	0.76	0.66					
X		2.55	2.52	2.54	2.54	2.52	2.50	2.55	2.55	2.52		2.53	2.55	2.50					2.53



19	ESI-334	LOCKING SCREW	AISI 304	4	
18	-410	LOCKING NUT		6	
17	-335	LOCKING BOLT	AISI 304	4	
16		ADVEL BLIND LIVET		8	SUPPLIED BY U.K.A.E.A
15	-381	ROD SPRING	INCONEL-X	28	
14	-382	SPRING COVER	AISI 304	28	
13	-343	PISTON RING	AISI 321	1	
12	-344	RETAINING RING	AISI 304	1	
11	-320	SPACER TIEROD	Zry-2	4	
10	-200	TIEROD FUEL ELEMENT		8	
9	-200	FREE FUEL ELEMENT		20	
8	-310	SPACER	INCONEL-718	11	
7	-372	SPRAY TUBE	AISI 316	8	
6	-371	SHROUD TUBE	AISI 316	1	
5	-341	LOWER TIEPLATE	AISI 304 CASTING	1	
4	-331	UPPER TIEPLATE	AISI 304 CASTING	1	
3	-330	TOP. HOUSING	AISI 316	1	
2	-342	BOTTOM HOUSING -LOWER	AISI 304	1	
1	ESI-332	BOTTOM HOUSING -UPPER	AISI 316	1	
ITEM	DRAWING NO.	NAME	MATERIAL	NUMBERS	REMARKS

ANGLE	SCALE	DIVISION	TITLE	CODE NO	DWG. NO	SEQ NO
THIRD	1/1 (2/1) (1/10)	SGHWR-D	FUEL-TYPE D ASSEMBLY WITH SHROUD TUBE	407015	ESI-300	750147

Fig.2.3-1 Type - D Fuel assembly



(View from above)

Fig.2.3-2 Inter-pin spacing measurement points

3. 照射後試験

燃料集合体は，UKAEA（ウインズケール）の照射後試験用ケーブに搬入された。

シュラウドチューブの表面は，水あかがうすく付着していた。外観を調べたところ，シュラウドチューブの下端をささえているリベットの溶接部が多少腐食していたが，この他なんの異常もなく，健全であった。

集合体は，シュラウドチューブから，前回の試験と同じ方法で抜き取り，以下に述べる照射後試験を実施した。

(1) 外観試験（集合体，燃料要素）
(2) ピンギャップ
(3) ピン引抜き力
(4) スペーサ保持力（3個）
(5) 燃料要素長さ
(6) 燃料要素直径（8本）
(7) ガンマスキャン（9本）
(8) 渦電流試験（9本）
(9) 中性子ラジオグラフィ（4試料）
(10) 金属試験（ペレット，被覆管）
(11) FPガス放出（8本）
(12) オートラジオグラフィ
(13) 燃焼度分析
(14) ペレット密度
(15) 被覆管内圧破壊試験

照射試験のフローをFig. 3－1に示す。

試験項目のあとに括弧内に示している8本，9本の数字は，試験した燃料要素の本数であり，(5)以降の試験項目について実施するため，特に選択された燃料要素である。この選択する本数は，最初の契約では8本であったが，燃料要素の表面に付着する水あかの状況を調べるためにさらに1本追加されたものである。

以上の照射試験を行なうにあたり，PNCで燃料要素の選択および，それらから試験試料の採取方法を，UKAEAに指定する必要があった。まず，燃料要素の選択について次に述べる。

燃料要素の外観，燃料要素の長さについては，総ての燃料要素について調べた。このデータを基にして，さらに詳しく調べる燃料要素を選択する予定であった。しかし，どの燃料要素も異常な変形，過度の酸化もなく，Crudの付着も特異な部分がなかった。全長測定の結果も，燃焼度の大きい燃料要素は，伸びが多いということはあるが，異常に伸びの多い燃料要素もなかった。PCMIを考

慮してペレットと被覆管との照射前における直径ギャップを調べてみたが，28本とも0.27～0.31mmであり，多くは0.29mmで大きな差はなかった。従ってどの燃料要素を選択しても良いわけであるが一応燃焼度の高い外層の燃料要素を主にして，次のように選択した。（Fig．3−2）。

A4　；内層ピンの代表

B6　；中間層ピンの代表（最もf（n）が大きい。）

C10　；
C11　；｝外層ピンのうち最もf（n）が大きい。

C12　；ペレットの製造歩留まりがクラック発生のため60％と極端にわるいもの。

その他C1，C4，C7，C14，外層燃料要素のうち等間隔に選択

3.1 非破壊試験

3.1.1 外観試験

集合体がシュラウドチューブから引き抜かれる時から，燃料要素が集合体から引き抜かれる時まで，遂次ビデオテープに撮ってある。

集合体は，外観を調べて見たところ，スペーサ，燃料要素等なんら異常が認められなく，また，中間層の燃料要素に回転防止のため施こした，ワイヤの結びも健全であった。

集合体を解体後スペーサタイロッドの曲がりを定盤の上で調べたが，曲がった形跡は認められなかった。スペーサについても，特にスポット溶接部等を注意して調べたが，異常な腐食や変形は認められなかった。

集合体から引き抜かれた各々の燃料要素についても，全部について注意深く全長にわたって調べたが，なんの異常もなく，破損していれば認められる特有のマークは，検出できなかった。

集合体の水あか（Crud）の付着状況は，タイプCと同じであると，このPIEにたずさわった人々の見解は一致していた。水あかの付着については，ビデオテープおよび，カラースライドで調べることができる。次に，この水あかについて述べる。

（1）水あか

水あかは，非発熱部であるハウジング（タイプレート），スペーサ，タイロット等には，ごくわずかしか付着していなかった。

しかし，燃料要素には，タイプCの場合と同様水あかがかなりついていた。大部分の水あかは，容易にブラシにより除去できたが，後に示すようにごく表面には，除去しずらいものも所々にあった。

水あかは，燃料要素の中央部に多く，端には少なかった。次に，外層燃料要素を中心に水あかの付着状況を述べる。

（外層燃料要素）

どの外層燃料要素も同様な外観である。

° 上部ハウジングースペーサNo.1（最上部スペーサ）間

この領域は，大部分プレナム部に相当し，ペレットが充てんされている部分は，スペーサ中央部より上方10 cm以下である。この間の付着は微少であり，被覆管表面は光沢ある黒色を呈していた。スペーサ近傍で少し水あかの付着がみられるようになっていた。

縦すじ状に水あかの付着が1部認められた。

° スペーサNo.1 ースペーサNo.2 間

水あかが薄く付着しており，ペレット境界の部分が水あかの付着の差から，わずかに識別された。この領域においても，上方より下方の方（No.2側）が水あかの付着が多くなっている。燃料要素を円周方向に見ると，シュラウドチューブに面する方が，中間層燃料要素に面する方より多い。

° スペーサNo.2 ースペーサNo.5 間

付着量が下方になるにつれて多くなり，ペレットの境界マークが下方になるにつれて，はっきり認められた。

° スペーサNo.5 ースペーサNo.9 間

水あかは，この間で最も多く付着しており，ペレット境界マークも不鮮明になり，スペーサNo.6 の付近では認められなくなっていた。おそらく，この付近で付着量が最大になっているものと考えられる。スペーサNo.4～6にかけて縦すじの水あかが，1部認められた。

° スペーサ No.9 ー下部ハウジング

スペーサNo.8～11（最下部スペーサ）にペレット境界マークが認められるが，燃料要素の上部程鮮明ではない。燃料要素の下部150 mmは，水あかの付着はなく，表面がきれいであった。

（内層および中間層燃料要素）

内層および中間層の燃料要素は外層と同様な水あか付着状況であるが，全体的に付着量は少ない。また，ペレット境界マークがスペーサNo.1～11間に認められ，No.3～5の間は特に鮮明であった。縦方向の水あかのすじ付着も少し認められることも，外層燃料要素と同じであった。

水あかの付着は，燃料要素の表面の平滑度によっても影響を受けるといわれている。燃料要素の表面を水あか付着の状態で，20倍の顕微鏡を用いて調べたところ，多少凹状の線が観察された。この部分の水あかを除去して調べたところ，集合体に発生した傷の部分であった。

集合体組立を行なう時，スペーサによって発生する被覆管のごく細い切り粉が，小さな渦巻状の玉となり，被覆管の表面にスペーサデンプルで圧着されることがあるが，これらの箇所を数多く調べたが，いずれもこれらの部分においては，水あかがむしろ凹状になっていた。このように傷および凸部に付着する水あかはむしろ少なかった。（この事項は，MITI から与えられた本照射試験に対する宿題であり，特に注意深くウインズケールのスタッフにより調べられたものである。）

選択した燃料要素は水あかを除くため，ブラッシをかけた。大抵の水あかは簡単に除去でき，被覆管特有の黒色を呈していた。しかし，部分的ではあるけれど，褐色となっている箇所もあり，除去できないかたい水あかが表面にまだ残っていた。

水あかの厚さを調べるために，外層の燃料要素（C 12）を選択ピン8本に追加して，試験することとした。最も水あかの付着が多いと思われるスペーサNo.6の上部を，樹脂で水あかを固め試料を採取した。樹脂は，硬化剤配合直後は水と同様に粘性が少なく，また過去の経験から，樹脂は十分に水あかに浸透し，また水あかの層の厚さを変えることがない。この部分を輪切り状に切断して，光学顕微鏡でその全周を調べると，写真に示すように水あかの付着の状況に2つのタイプがあった。1つは，付着物が全く多孔質であり，10〜25 μmの厚さであった。これは，明らかに，ブラッシングで容易に除去できるものである。他の1つは，もっとち密な付着物であり約30 μmの厚さであった。

ち密な水あかについては，金相試料として採取した試料のほとんどに現われており，Photo 3.1－1および3.1－2に示すように，これらの付着物は密度において差が認められた。しかし，最大の厚さはほぼ30 μmと一定であった。

樹脂で固めた試料からさらに小さい試料を採取して，いわゆるやわらかい水あかと，固いち密な水あかについてXMAで元素分析を行なった。Photo 3.1－3にこの2重層の電子像を示すとともに，Fe，Cu，Siの分析状況を示す。

この試料から典型的な層として3箇所選び，定量分析を行なった。結果をTable 3.1－1に示す。多孔質な層は，主に鉄の酸化物であり，一方ち密な層は銅が多かった。この層の内側にはSiに富んだ小さな粒子の層があった。（Photo 3.1－3）これらは非常に薄いため，正確な分析はできないけれど，X線のシグナルによると，大体10％Si，25％Fe，5％Cu（重量パーセント）であった。

（2） フレッテング腐食

スペーサによる燃料要素の表面に生ずるフレッテング腐食については，大洗工学センターCTLで炉外試験がかなり実施されている。これは，ふげんを模擬したループによって行なわれている。一方，SGHWRの流動条件は，Table 3.1－2に見られるように，「ふげん」と冷却水のチャネル流速が大きい等多少相違しているが，フレッテング腐食に関する，重要な参考データになると思われる。

選択した燃料要素9本の表面を水あか除去した後，外観検査によりフレッテング腐食を調査した。肉眼では，フレッテング腐食は観察されなかったため，ペリスコープによって調べた。外観検査用のこのケーブには，燃料要素を軸方向に駆動する装置があり，燃料要素送りローラの回転数により，燃料要素の軸方向の位置を表示することができる。フレッテング腐食を見つけるためには，腐食量が少ないため，この装置によりスペーサ部の正確な位置を割り出し，燃料要素を回転する必要があった。

燃料要素全長について調べてみたところ，スペーサの最上部と2番目の部分および最下部と下から2番目の部分に，フレッテング腐食が多かった。この結果は，既にCTLで行なった試験の結果と同じである。例として，燃料要素A4とC4について，巻末の写真集に外観からみた，フレッテング腐食の様子を，上のスペーサから順に掲げた。いずれも浅い腐食であるが，外観上，上下のスペーサ部に腐食量が多い。

フレッテング腐食量をさらに詳しく調べるため，最も腐食量の多いと思われる燃料要素C10の最上部のスペーサ部（Photo 3.1－4）と，B6の最下部のスペーサ部（Photo 3.1－5）について，金相により断面写真をとった。この前者の腐食は表面観察では，かなり燃料要素の回転と燃料要素の上下があったらしく，デンプルマークが広がっていた部分である。断面金相を採ってみると，Photo 3.2－16に見られるように，かなりえぐられている部分があるが，この周辺には，加工ラインが現われており，明らかに強い力でえぐられていたもので，フレッテングによってできたものではなく，集合体を解体する時にできたものである。この近傍のフレッテング腐食と思われる部分を，Photo 3.2－15に示す。この腐食深さは4 μm程度であった。

一方，B6の最下部のスペーサ部については，Photo 3.2－13に示すとうり，かなり表面が荒くなっており，最も深いところで8 μm程度であった。

外層の燃料要素の許容されるフレッテング腐食深さは，76 μmであるので，この照射期間が約1年と短いが，十分この値よりも小さいといえる。

（3） 被覆管の酸化

タイプCにおいては，被覆管外表面にNodular oxide やPatch と呼ばれる厳しい局所酸化が進んで問題となった。その酸化深さは105 μmに達するものさえ観察され，酸化量はふげんの設計値を上まわった。この意味において，タイプDの酸化状況は非常に重要な調査項目である。

まず，タイプDの酸化状況を調べるために，Crudの除去を行なった。界面活性剤（通称デコン）を2～3%水に溶かし，これを布につけて，Crudを抜き取った。

最初選択した8本の燃料要素について調査したところ，全体的に，Crudが微少であるが残っており，赤褐色を呈していた。このCrudは，表面に固く付着しているものである。

最初，セルのペリスコープにより観察したところ，8本中1本（B6）だけに nodular oxideが見られた。これは丸状の約0.3 mm φの小さな光沢を有するスポットであり，スペーサ部分に集中していた。スペーサ部分においては，概ね燃料要素の中央部に多く，スペーサNo.4の上や，No.11の下にはその数は非常に少なくなっていた。しかし，上部プレナム部や端栓部にも，nodular oxideが観察された。（Photo 3.1－5，Photo 3.1－6）

他の7本の燃料要素については，さらにCrudの除去を行ない，別のセルの高倍率の顕微鏡で調べてみた。Photo 3.1－6（C11），Photo 3.1－7（C14），Photo 3.1－8（C11）にも示されているように，これらのピンにも，nodular oxideができていること

がわかった。すべてレンズ状の酸化物であり，タイプCに見られたダンゴ状（Squat）の厚い酸化物はみられなかった。

nodular oxideの最も多くみられたのは，C11のスペーサの部分であった。概して，スペーサNo.8，9，10の部分に多く見られるが，他のスペーサの部分にも若干見られる。しかし，スペーサNo.1の部分には認められなかった。

比較のために，スペーサ9に相当する部分における，内層（A4），中間層（B6），外層（C4，C11）の各燃料要素の酸化状況を調べた。これを，Photo 3.1－6に示す。

Nodular oxideは，内層，外層の燃料要素については，集合体中心に面した方に多く，一方，中間層は方向に差がなかった。（燃料要素は，スペーサデンプルによる傷から判断すると，照射中に回転した形跡がない。）

以上，スペーサ近傍のnodular oxideの発生状況について述べたが，この他の部分には，nodular oxideの発生が非常に少なかった。内層（A4）には観察されず，中間層，外層にはわずかしか認められなかった。

これらの全Nodular oxideのうち調査したものの最大の深さは，43 μm（C12，Photo 3.2－9）である。この部分の付近には水素化物がわずかに放射状に発生した。

集合体の組立の時に発生する燃料要素表面の傷の部分についても，詳細な調査を行なった。外観上はいずれも黒色の酸化被覆であり，なんの異常も認められなかったが，高倍率の顕微鏡で調べると，わずかではあるが，傷の部分に小さなNodular oxideが点在しているものもあった。とくにスペーサ部分の傷に多かった。（Photo 3.1－5）

端栓溶接部の熱影響部の端が，タイプCでは白色化が認められたが，タイプDにおいては，B6の下部端栓のみにこの白色化が認められた。B6の端栓の白色化について，製造データを調べたが，思い当たるふしがなかった。B6の燃料要素は，他のものに比べて，全長にわたって白色化しやすい傾向はある。

一方，均一の厚さの酸化被覆は，金相断面によれば，その厚さは1～5 μmであった。A4は1 μmであり，C12では5.1 μm（平均値）であった。参考にタイプCの内層，中間層，外層はそれぞれ7.2 μm，10 μm，12 μmであった。このように熱出力の大きい部分の酸化層は厚くなっている。

以上述べたように，タイプCとDとはnodular oxideの大きさや均一な酸化層の厚さが大きく違う。両者について，被覆管と照射条件をまとめてTable 3.1－3に示す。

nodular oxideの生成は，加工度の大きいものに多いといわれているが，被覆管の履歴のうち，最終加工度，歪取焼鈍からみると，タイプCが加工度の点で厳しいことはない。また，炉外腐食試験（400°C，72時間，水蒸気）における腐食量もタイプCが大きいとはいえない。

照射条件としては，ピーク出力，平均燃焼度はタイプCは，タイプDより20％程度大きい。しかし，タイプCの中間層燃料要素はタイプDの外層の燃料要素より，出力，燃焼度は低い。nodular oxideの生成は，タイプCの方が多いことから，これらが主な要因ではない。

原子炉一次冷却水の水質についてはタイプC，Dについて電導度，Cl，Si，Cu，Fe，酸素が測定されている。これをTable 3.1−4に示す。タイプCがタイプDに比べ，Siが多少多い程度で，他の項目については差が認められない。

局所酸化に与える影響は，本照射試験からもわかるようにスペーサによる影響が非常に大きい。SGHWRでの英国燃料の照射試験でもスペーサ（SUS材）の局所酸化に与える影響が大きいことを挙げている。この点を検討すると，実はSUS製であるシュラウドチューブの影響を見落していた。タイプCとタイプDにおけるシュラウドチューブの定量的，定性的データは全くない。この辺が非常に気になる点である。本照射試験で，局所酸化に関するデータが，SGHWRで出しているデータと全く違う点は，本データでは，内層ピンが外層ピンに比べ局所酸化が少ないということである。（SGHWRデータは逆）この矛盾を説明するためには，シュラウドチューブの効果を考える必要があるかも知れない。

3.1.2 燃料要素間隙

タイプC同様，シックネスゲージで燃料要素間隙を調べた。調査対象箇所は，集合体の中央部すなわち，スペーサNo.3からNo.9までの間を，中間層および外層について調べた。間隙は，円周上からみて1つおきに調べた。中間層について24箇所，外層について48箇所である。これらの間隙に1.85 mmのシックネスゲージを通過させたが，多少きつかったところが6箇所あった。照射前のギャップとして，集合体組立直後に測定した各区間の最小値と，間隙が小さかったこの6箇所の位置をTable 3.1−5にまとめた。この6箇所の部分は，組立直後のギャップにおいても，比較的小さいが，他の箇所でももっと小さいところがかなりある。この6箇所の内訳けは，外層に5箇所，中間層に1箇所である。外層は，中間層に比べ調査箇所が2倍であるので，間隙が狭く検出される確率は，中間層の5/2＝2.5倍である。しかし組立後の中間層，外層の各ピンギャップ（最小値）を平均すると，2.31 mm，2.21 mmであり，外層の方が最初から0.1 mm程ギャップが小さくなっているので，この0.1 mmの効果が大きく影響したと考えられるので，外層のピンギャップが小さくなりやすいとは，このデータからはいえない。

タイプCと比較するため，ピンギャップの小さいものについて，Table 3.1−6にまとめる。タイプCは，1.85 mmのシックネスゲージが通らなかった区間が7箇所もあり，中には1.7 mmのシックネスゲージの通りがきつい区間も1箇所あった。このように，タイプCに比べるとタイプDは，燃料要素の間隙は非常に良く保たれているといえよう。

しかしながら，両者のピンギャップデータがこのように相違した原因はなんであろうか。考えられる要因としては，

① 測定する時燃料要素表面にCrudの付着

② 燃焼度はタイプCが大きいこと

③ 照射前のギャップ

④ 燃料要素の曲がり

⑤ スペーサの変形

⑥ 他，取扱いによる変形等

が挙げられよう。以下これらについて簡単に述べる。

① Crudの付着は，両者に外観上差が認められない。また，タイプDについては，比較的除去しやすいやわらかい水あかの厚さは0.01～0.025 mm，硬いものは0.03 mm以下であった。両者に差があっても，外観上大差ないことから，この効果は小さいと考えられる。

② 燃焼度については，タイプCの方が25％程度大きいが，この効果は不明である。

③ 照射前のギャップを両者について比較したが，差は認められなかった。しかし，両者の測定値にかたよりがある場合も考えられるので，燃料要素外径，集合体に組んだ燃料要素の部分の集合体外径を比較したが，全く差は認められなかった。このことから組立後のピンギャップは両者に差がなかったことがいえよう。照射する前には両集合体は，シックネスゲージで異常のないことが確認されている。

④ 燃料要素の曲がりは気がかりな要因の一つである。このあたりのことを少し詳しく調べるため，まずタイプDの組立後のピンギャップデータを調べてみた。このデータには，各区間での最大値と最小値が載ってあり，両者の差が燃料要素の曲がりのパラメータとなる。ギャップが小さい箇所ではこの値は0.05～0.15 mmであり，あまり大きな値となっていない。一方照射後の曲がりについては，正確なデータがないので不明である。定性的にはタイプDの被覆管は，集合体製作中，定尺切断や脱ガス溶接後，かなり曲がり不良が発生したことから，性質上曲がりやすい被覆管ではあった。

⑤ スペーサの変形は，集合体解体後外観を目視で調べた程度であったので，変形は認められなかった。

⑥ 他，取扱いにより集合体をぶつけたり，必要以上の力を加えたりした形跡は認められていない。

以上のようにピンギャップを左右する要因について，つまびらかでない。

しかし，タイプDのTable 3.1－5をもう一度調べてみると，横ならびに連続してピンギャップが小さくなっている。タイプDの外層は，5箇所1.85 mmとなっているが，このうち2組が集合体の縦方向に連続して発生していることとなる。もし燃料要素が曲がっているならば，スペーサ間隔が260 mmと短かいことから，集合体の縦方向からみて，1つのスペーサを境に線対象というよりむしろ点対象に曲がり，スペーサの2区間にわたってS曲線を描くはずである。すなわち，この連続する2区間では燃料要素の曲がりによっては，ピンギャップが小さくならないはずである。この連続するピンギャップの減少化はなにによるものであろうか。単純に確立計算から

この連続に発生する確率を計算すると，0.27％と非常に小さい。よって，偶然に起ったとは考えにくい。

このピンギャップの減少化を1番簡単に説明するには，スペーサの変形である。すなわち，燃料要素を通すスペーサのリング素子の変位または，リング素子内にあるデンプルの変化により，これによって支えられている燃料要素が変位する場合である。

タイプCについても同様のことを調べてみると，Table 3.1−7に示すとおり外層ピンに集合体の1縦方向に見て，3箇所連続で2組発生している。この現象をスペーサの変位で説明するとすれば，同一燃料要素のさしこまれたリング素子が2個連続して，同じ方向に変位したことになる。リングスペーサは同心円といっても方向性をもっており，また照射中に変位しやすい方向が有ることも十分考えられる。集合体を組立てる時，スペーサを同じ方向性に連続してセットすれば，3箇所連続してピンギャップが小さいところがあるのはむしろ自然である。

このように，タイプC，Dのピンギャップの主な要因は，スペーサの変位によるものであるとするとうまく説明がつく。

スペーサの製造方法も，試作から見れば幾度も改良され，このため，タイプCよりもタイプDの方が適正なピンギャップが保たれたのであろう。

照射中に燃料要素がどの程度曲がるかは，ピン間隙に影響を与えるという意味で調べておく必要がある。

選択したピンより3本（A4，C1，C10）を選び，ケーブの中にある比較的直線性の良い平担な鉄ブロックの上で，燃料要素をころがして，鉄ブロックと燃料要素の間隙を調べた。間隙の測定は測定治具がないために目測によった。

曲がりは端栓側にのみ観察され，中央部には認められなかった。結果を下の表に示す。

ピン No.	上部端栓側	下部端栓側
A4	0	0
C1	～1.0	0
C10	0	0.5 mm

集合体に組込む前には，ころがしにより真直度を検査した。この曲がりは，0.25mm以上になると規格外となる。本集合体製作のため加工した被覆管は50本であったが，このうち規格外となったものは17本であり，この製造ロットの被覆管は特に曲がりやすいものであった。しかし，それにもかかわらず，照射後の燃料要素の曲がりは予想以上に小さかった。

3.1.3 燃料要素引き抜き力

燃料要素は解体する時，水あかの付着したままスペーサから引き抜かれる。引き抜きは，集合

体を水平として，引き抜き治具にロードセルをつけて行なった。まず外層16本，次に内層4本，最後に中間層8本を引き抜いた。

ビデオテープには外層と中間層の引き抜く状況を撮ってあるが，内層については，かくれて見えないので撮っていない。

引き抜き力は連続に記録される。Table 3.1−8には引き抜いた順に上から記載する。引き始めてから最初の100 mmの間に記録された最大値を示す。この値は30〜60 kgの範囲にあり，各層で平均値を取ってみると内層が1番小さく34.5 kg，中間層，外層は42.9 kg，43.5 kgであった。これに対して，タイプCのピン引き抜き力は，バラツキがもっとも大きく57〜169 kgとなっていた。また，引き抜き力の平均値が内層73 kg，中間層93 kg，外層90 kgとなっており，タイプDに比べ約2倍大きな引き抜き力となっていた。

この両者の差は，スペーサの保持力や燃料要素の外径の変化では説明できない。また，水あかについても検討したが，水あかの付着量は両集合体に外観上差は認められなかった。

一方局所酸化については，その数と大きさにおいて両者著しく違う。また，断面金相により調査した結果から，その大きさは，スペーサのデンプルがひっかかりをおこすのに十分な大きさである。しかし，このひっかかりは確率的なものであり，ひっかかった部分の追跡は不可能である。このため，局所酸化を全体的にとらえ，タイプDの各燃料要素について，引き抜き力と対比させて調べて見た。Table 3.1−9にこれを示す。調査対象は，選択したピン8本とC 12である。全体的に局所酸化が多いB 6，C 4，C 11は引き抜き力が50 kg以上であった。他の局所酸化の少ないピンは，35〜48 kgであった。このように，局所酸化が引き抜き力に大きく影響していることがわかる。すなわち，タイプDよりタイプCが引き抜き力が大きい原因は，局所酸化であるといえる。

次に，タイプDについて照射前のピン挿入力と照射後の引き抜き力を調べてみる。Table 3.1−8には〔挿入力〕−〔引き抜き力〕が載っている。この値は，−10〜39 kgとなっている。マイナスの値，すなわち引き抜き力の方が大きいピンは，中間層のみに現われ，4本ある。中間層のピンは，ロックナットで固定するため，照射中に回転しない。集合体の組立，解体の時に故意にピンを回転させなければ，ピンを引き抜いた時には，組立中についた傷の上にスペーサデンプルが乗ることになる。このため，引き抜き力が多少大きくなったものと考えられる。

大部分のピンは，引き抜き力の方が小さくなっている。この原因としてまず，① スペーサの保持力の減少，② 燃料棒外径の減少，が挙げられよう。

① まずスペーサ保持力の減少についての調査としては，マンドレルによる引き抜きテストを照射前後に行なっている。この結果によると，照射による保持力の減少率は，

$$\frac{〔照射前引き抜き力〕-〔照射後引き抜き力〕}{〔照射前引き抜き力〕} = \frac{850\ \mathrm{g} - 770\ \mathrm{g}}{850\ \mathrm{g}} = 0.1$$

即ち，照射前より引き抜き力が10％程度減少している。

② 次に燃料棒の外径の減少については，表に示す通り，内層，中間層，外層は各層のピンの平均値で，それぞれ0.02，0.03，0.05 mm程度である。

外径が0.04 mm小さくなると，引き抜き力が15％程減少する。（マンドレル試験結果より）

この値と先に述べたスペーサ保持力の減少の値を合計すると，10＋15＝25（％）となり，組立時の挿入力が50 kg程度なので，50×0.25＝12 kg程引き抜き力が減少するはずである。この値は，外層ピンの減少平均18 kgより多少小さい。

この他の減少効果として，照射中に生じた均一で強固な酸化膜のため，ピンを引き抜いてもピンの表面に傷がつかなかったことが挙げられる。

3.1.4　スペーサ

◦ 外　観

使用した11個のスペーサのうち3個抜き取り，詳細に調査した。このスペーサは，集合体の上方から順にうった番号1，6，9である。すなわち，番号1と9は上下における特殊振動によってスペーサーが異常にならないか，番号6においては出力が最も高い個所であるが，この部分においてはどうであるか等を調べるものである。この外観写真を，Photo 3.1−9 〜 3.1−11に示す。このうち，Photo 3.1−9に示すように，番号1のB1，B3の燃料棒に相当するリング素子の部分に少し変形が認められたが，他のリング素子については良好だった。また他の番号6，9のスペーサについても良好であった。3個のスペーサの表面には赤みがかった褐色の水あかがふんわりとついていた。スプリングデンプルの部分には，下流に沿った流線のマークが見られた。

ふげんの初装荷の集合体製造の当初，スペーサの溶接部の付近にスポット状のさびが発生して問題になったが，このSGHWR用の部材が，その当初のロットを同じであるということで，照射後どうなっているかでその健全性がわかる。選び出した3個のスペーサを調べたところ，溶接部に特に進んだ腐食は認められなかったし，なんの異常も認められなかった。

◦ スペーサ引き抜きテスト

マンドレルにより引き抜きテストを行なった。タイプCに使用したマンドレルは，表面さびがあった。このため硬い工具用のスチールで新しく作った。その外径は，16.464±0.002mmであった。

照射前後の引き抜き力をTable 3.1−10に示す。調べたスペーサ素子は，ピンC1，C10 C14，B1，B6，A4が挿入されていた部分である。測定装置は，タイプAで使用したもので，引き抜き力を調べるため，10 gずつ荷重を増やしていった。引き抜き力を測定する時，マンドレルの引き抜き速度を〜10 cm／secとした。天秤とマンドレルの重量は，446 gあり，測定値からこの分をさし引いた。同じ個所で5回測定したところ，各々の標準偏差は4.2〜21.9 gと小さかった。

スペーサ素子，番号1のB1のみは疑わしき値であり，セルの中での取り扱い中に少し損傷を受けており，このために小さな測定値となったのであろう。この値を除いて考えると，5つのスペーサ素子の平均値は，

スペーサ				（照射前平均）
番号1	$\overline{X}$	＝	871 g	(860 g)
番号6	$\overline{X}$	＝	698 g	(840 g)
番号9	$\overline{X}$	＝	783 g	(850 g)

スペーサ番号6，9は中性子束のピーク付近に位置しており，このため，スプリングの緩和がおこったようにも思われるが，その場合には番号6，9の中性子束が同じ程度なので，同じ程度の緩和になるはずであるが実際にはかなり相違している。この辺のことをタイプCについて調べる。スペーサ番号（上から順に数える）2，4，6，8，10のマンドレル引き抜き力の平均はそれぞれ，580，550，520，700，680 gとなっており，中性子束の多いスペーサ番号8には，中性子によるスプリングの緩和は認められない。このように中性子束は，スプリングの緩和にあまり影響がないといえよう。このスプリングの緩和については，既にタイプB，Cについて調べてありこれをFig. 3.1−1に示す。

先に述べたタイプCの引き抜き力は，16.42 mm ϕ のマンドレルで測定した値であり，タイプDと比較するため，タイプCの結果に120 gを加算する。この平均をとると，タイプCは，722 g，タイプDは778 gで大きな差はない。

3.1.5　燃料要素全長測定

燃料要素の全長はタイプCと同じく，標準棒を基準に温度補正を加えて行なった。

結果をTable 3.1−11に示す。

ATR燃料設計では，燃料要素の照射成長による軸方向の伸びを次式で評価している。

$$\Delta L / L = 6 \times 10^{-14} \sqrt{\phi t} \quad （焼鈍被覆管）$$

ϕ ；高速中性子束（E＞0.82 MeV）　　t ；時間

この設計式と，今までの照射試験タイプA，B，C，Dの結果をFig. 3.1−2に示す。同図に見られるように，燃料要素の増加は設計値より下まわっている。

この設計式は，各国の多数の照射試験を基にして作った実験式であり，照射成長における上限値を採っている。この式は，高速中性子束によるジルカロイの照射成長を考慮に入れ，これに実際の燃料要素の伸びの量に見合う安全係数を乗じた形をとっている。

タイプD燃料要素の軸方向伸びは，別にみると，外層，中間層，内層の順に大きくなっている。これらを燃焼度をパラメータとしてまとめると，Fig. 3.1−3に示すように，燃焼度の大きい方，すなわち外層燃料棒から順に0.21％，0.15％，0.12％となっている。この伸びについて，以下のように検討を行った。

照射における燃料棒の伸びの原因を考えると，高速中性子による照射成長，PCMIによる永久

伸び，クリープダウンによる軸方向寄与などがあげられる。ただし，内圧，外圧，プレナム・スプリングによる軸方向の力は，外圧が大きいために圧縮応力が働くが，ここでは，これによる伸びの減少は無視する。

照射成長による燃料棒の伸びは，高速中性子照射量，照射温度，冷間加工度，焼ナマシ条件，集合組織等によって影響を受けるが，タイプDの場合，後者の三項目は同一条件であるので無視することができる。高速中性子照射量に関しては，集合体内の半径方向高速中性子束分布に若干の差はあるが，これが層間の伸びの差に与える影響は非常に小さい。たとえば，内層と中間層の高速中性子束の差が約30％あると仮定しても，それによる伸びの差は約0.02％程度である。照射温度については，各層間に出力の差があるため，被覆管の温度が若干異なるが，この程度の差では，照射成長による伸びの差にほとんど影響を与えることはない。ピーク線出力の位置における被覆管肉厚平均温度は，「ATFUEL」コード[8]で計算すると以下のようになっている。

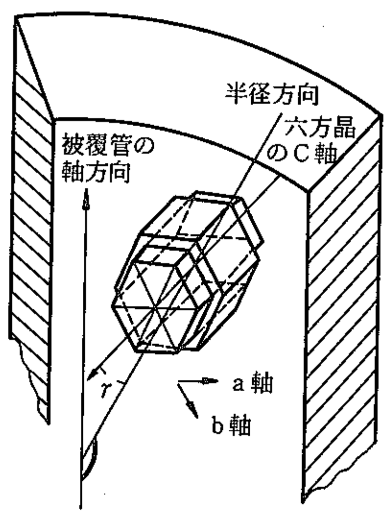
外層燃料棒　：　319℃

中間層燃料棒　：　305℃

内層燃料棒　：　302℃

このようなことから，照射成長による燃料棒の伸びは，各層間で余り差がつくとは考えられない。

PCMI等の効果が入っていない純粋な照射成長の実験としては，タイプCのスペーサ・タイロッド4本について調べている。この管は冷却水が管中にも入るよう穴があいている。この伸びの結果は，0.07％，0.07％，−0.05％，0.02％であった。ジルカロイの照射成長は集合組織により変わることがIbrahimとWinegar[9]によって報告されている。高速中性子の照射により単結晶のa，b軸（prism poles）の方向に成長し，C軸（basal poles）の方向には収縮する。被覆管もタイロッド・スペーサもC軸が管の半径方向に向いていた。この場合，照射成長により管の肉厚が減少し，半径方向，軸方向に等しく成長することとなる。ちなみに，結晶方位を示すデータとして水素化物析出方位Fn値を挙げる。Fn値が0となるとC軸がきれいに半径方向を向いていることとなり，Fn値が0.5となると無秩序にならんでいるということになる。被覆管のFn値は



0.1，タイロッド・スペーサは0.1～0.3であり，この意味ではタイロッド・スペーサの方が少し照射成長が少ないものもあったと言える。そこでスペーサ・タイロッドの照射成長の最大値0.07％を基準にとる。この値は，E. Douncoumbe 等[10]がペレットの入っていない被覆管の照射成長として評価している式

$$\Delta L/L = 3 \times 10^{-14} \times \sqrt{\phi t}$$

ϕ：高速中性子束（E≧1 MeV）

t：照射時間

から求めた値に一致している。この値と比較すると，PCMIが起っていないタイプDの内層，中間層の燃料要素の伸びは，それぞれ0.03％，0.08％大きい。この現象を説明するために，被覆管の外径減少による効果について次に検討する。この効果は一部研究者の中で主張されているが具体的なデータはまだ示されていない。

外径クリープによる直径減少は外層が最も大きく0.23％である。続いて中間層，内層の順に0.18％，0.12％であった。

まず燃料要素の直径の変化について，現象上から考えて見る。被覆管はまず照射成長によって，既述のように長さ方向と円周方向に等しく伸びる。しかし，肉厚は減少するので円周方向伸びから肉厚減少分を差し引いたのが半径方向の減少である。しかし，肉厚減少分は微少で無視することができる。これを$(\Delta D/D)_i$とする。他に外圧，内圧，ペレットによる押上げ等による機械的な力による変化がある。これを$(\Delta D/D)_m$とする。実測に現れる燃料要素の外径変化$(\Delta D/D)_T$は両者の合計であるから，燃料要素の直径変化は

$$(\Delta D/D)_T = (\Delta D/D)_i + (\Delta D/D)_m \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

次に，燃料要素の長さの変化について考えてみる。被覆管の照射成長による軸方向伸びは，前述の通り半径方向伸びと同じであるので$(\Delta D/D)_i$である。さらにPCMIによる伸びを$(\Delta L/L)_{PCMI}$とする。外径変化が軸方向伸びに寄与すると考えられるものは$(\Delta D/D)_m$の項である。これに定数－aを乗じて，この分が長さ変化になるとする。すなわち，ジルカロイの質量は一定であることから，肉厚が一定であれば外径変化$(\Delta D/D)_m$がそのまま長さ変化となりa＝1となる。現象的には質量が増加することがないので，aが1を超えることは考えられないため，もしaが1を超えた場合には，他の効果も全長に効いていることを示す。$0<a<1$の場合には，$(\Delta D/D)_m$の長さ変化の寄与する割合がaであることを示すことから，aの値が同一製造履歴の被覆管に対しては一定であることが予想される。逆にaの値が0と1の間を大きく変動する場合には，外径減少が伸びに寄与するという説明は困難となる。

燃料要素の長さ変化

$$(\Delta L/L)_T = (\Delta L/L)_i - a(\Delta D/D)_m + (\Delta L/L)_{PCMI} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

$(\Delta L/L)_T$；燃料要素全長の伸び率（実測値）

a；直径変化率から伸び変化率への寄与する割合（$(\Delta D/D)_m \leq 0$）

$(\Delta L/L)_i$ ：照射成長による伸び

照射成長による肉厚の減少を無視することができることから$(\Delta L/L)_i=(\Delta L/D)_i$となる。これと(1)，(2)式から

$$a=\frac{-(\Delta L/L)_T+(\Delta L/L)_{PCMI}+(\Delta D/D)_i}{(\Delta D/D)_T-(\Delta D/D)_i} \quad \cdots\cdots (3)$$

aの値を調べるために，まずタイプA，B，C，DのデータをTable 3.1－12に示す。外径の減少に関するデータは二方向に全長にわたって等間隔に各45点を測定し，この平均値から求めた。照射成長による伸びは，タイプCの0.07％を基準に，高速中性子照射量の効果$\sqrt{\phi t}$ に比例するとして，他のタイプA，B，Dの伸びを求めた。

(3)式によりaを求める。まず，タイプC，Dの内層，中間層にはPCMIが起っていないので$(\Delta L/L)_{PCMI}=0$となる。すなわちaが求められる。タイプDはaの平均値が0.3であり，この値を(3)式に入れると外層のPCMIによる伸びの効果が求められる訳であるが，逆にaの値のバラツキを調べているので，PCMIの値を一定とする。このおおよその値を求めるために$(\Delta D/D)_T$，$(\Delta L/L)_T$の平均値を求め，これとa＝0.3を(3)式に代入すると$(\Delta L/L)_{PCMI}$が得られる。ただし，C7およびC11は$(\Delta L/L)_T$が他のデータと比べて差が大きいので平均から抜いて考える。このようにして求めると，タイプDの$(\Delta L/L)_{PCMI}$は0.04％伸びていることを示している。この値$(\Delta L/L)_{PCMI}\doteqdot 0.04$を改めて(3)式に代入してaを求めると，Table 3.1－12に示す通りバラツキは少なく，ほぼa＝0.3の値が得られる。同じTableの末欄(a′)には参考のためにPCMIがゼロとした場合のaの値を示したが，内層，中間層の値よりかなり大きくなり不都合である。外層は中性子束のtilt効果があるので，炉の中心側に面した燃料要素C7，C10，C11はPCMIが他より大きいため，aの値を大きく評価する傾向はある。

一方，タイプCについては，同様の方法でaを求めると，バラツキの少ない約0.4の値が得られる。PCMIによる伸びの効果は，0.05％と計算されたが，ECTや外径測定チャートからも同様にタイプDよりタイプCの方がPCMIが大きくでており，妥当な値であると推定される。タイプBについては，PCMIの効果を同チャートから0.05％とすると，aの値はデータが2個と少ないがいずれも0.3となる。

タイプAについては，aの値が大きくバラツイている。この理由は同表に見られるように，$(\Delta D/D)_T$のデータが原因不明でバラツイているためである。おそらく測定に問題があったのではないかと考えられる。

以上の結果をまとめると，タイプB，C，Dはクリープ・ダウンの30～40％が軸方向の伸びに寄与しており，この中でもタイプCはこの寄与(a)が大きい。

aの値は被覆管の集合組織により変わってくると考えられる。今回は外圧による軸方向の圧縮クリープを無視したが，PWRにおける照射では，この応力は約8 kg/mm^{2}となり，この効果も検討する必要があろう。以上，ここに試みた解析は一手法の紹介であり，他の伸びの要因もあると

思われるので，種々の場合のデータを今後積上げてゆく必要があろう。

3.1.6　渦電流探傷試験（ECT）

すべての選択した燃料要素9本について，ECTを行なった。この結果をTable 3.1−13に示す。ECTはγスキャンテストと同時に行なったため同じチャートに記録されている。

ECTは，被覆管の欠陥の検出のために行なわれたものであるが，欠陥の検出の精度としては，被覆管の肉厚の5％以上の欠陥に対しては十分検出が可能である。また，局所的に水素化物が析出している部分も検出できる。

これらの欠陥によるものと思われる信号は，A4，C11，C14に各1個検出されている。この部分の表面を目視により調べたが，欠陥らしきものは無かった。ただし，C14の信号の箇所に水あかまたは酸化物の剥げ落ちの跡が認められた。

これらの箇所の被覆管を切断して，金相により調べたが，どんな欠陥も検出できなかった。水素化物とかフレッテング等も無かった。

ECTおよびγスキャンチャートから，プレナム長さを測定した。上部，下部のプレナム長さを合計するとその増加分は外層燃料要素は27.5～32.1 mm，中間層，内層はそれぞれ16.2，14.4 mmであった。

ECTのチャートを調べると，外層の燃料要素にはペレット長さの半分を周期とした波形がある。しかし，内層，中間層の燃料要素にはこの波形は見当らない。後に述べる様にこの波形はペレットと被覆管との相互作用によるものである。外層燃料要素の中央部に特に顕著に現われている。しかし，端栓側ではこの波形は小さくなり，ついには不明瞭となっている。一方，燃料要素の外径測定チャートにも周期的波形が見られ，この現われる範囲は両者ほぼ一致していた。

Table 3.1−13にECTチャートに現われたこの波形の範囲を示す。

3.1.7　ガンマ・スキャン

9本の燃料要素についてガンマ・スキャンを行なった。そのテストの要領は次の通りである。

ガンマ・スキャンの検出部の両側には，ガンマ遮蔽の筒があり，この中を燃料要素が移動する。ガンマ線のコリメータは，間隙幅0.5 mm，間隙長さ（ピンに直角方向間隙）25 mm，コリメーション距離600 mmである。

Na I検出器によるシングルチャンネルで計測する。検出しきい値は，0.3 MeVである。燃料要素は，終日4 mm／分の速度でスキャンされた。スタック長さは，精度2 mm（0.1％以上の精度）で測定できる。

ペレットにはデッシュ，チャンファーがついているため，Fig. 3.1−6，Fig. 3.1−7に示す通り，この部分でガンマ強度が減少する。この減少部分の幅が大きくなることは，ペレット間に間隙が有ることを意味するが，いずれの燃料要素にも大きな間隙は検出されず，Table 3.1−14に示すように，ペレット全スタックを通じて，間隙の集計は2 mm以下であった。

軸方向に沿ったペレットの長さ方向の収縮率を調べるために，燃料要素の下部端栓側から順に

30個づつのペレットの長さを測定した。この結果をTable 3.1－15に示す。この収縮率を調べるためには，照射前のペレット高さを知る必要がある。各燃料要素に充てんされてあるペレットについては，Table 2.2－1に示してあるように，製造ロットはまちまちであるが，この調査の対象となっているロットのペレットの平均値は，17.99～18.06 mmであり，各ロットの標準偏差は，0.06 mm程度で，わりとペレットの高さはそろっていた。いずれの燃料要素も同じ高さのペレットが充てんされているとして，収縮率を計算した。この30個のペレットの基準長さのデータとしては，内層，中間層の燃料要素の下部のペレットが寸法変化が非常に少ないことから，この長さ54.4 mmを基準とした。（このペレット1個分の高さは，54.4/30＝18.13 mmで製造データより少し大きくなっているが，この原因はガンマスキャンのチャートが0.4％程伸びているためである。）この場合，Table 3.1－15に示す通り，収縮率は外層燃料要素の中央部で最も大きく，0.7％～1.8％であった。この値に大きなバラツキが見られる理由としては，ペレットの間に間隙が少しではあるが存在するということと，金相でも判るように，ペレットに横割れが入ることも考えられる。

充てん長さの全長にわたっての収縮率については，外層燃料要素は0.6～0.7％，内層，中間層は0.3～0.4％であった。

スペーサの位置でガンマ線の強度が4％程低下していた。

ペレットの境界にCsが蓄積される場合，その様子をガンマスキャンで調べることができる。すなわち，ペレットについているデッシュ，チャンファのため，ペレットの境界はγ強度が下がるが，Csがこの部分に蓄積すると逆にγ強度が上がる。タイプCの場合，燃料要素の中央部においてこのCsの蓄積がおこっていた。一方，このタイプDの場合には，このCsの効果が認められない。燃料要素C 10を例にとると，燃料要素の上部，下部端栓側にあるペレットにおいては，ペレットの境界にあるγ強度の低下が約10％であり，燃料要素の中央部においては全体のγ強度がFPのため高くなるが，やはり相対的な低下は約10％であった。

このようにタイプDでは，ペレットの境界にCsの蓄積が起こらなかった理由は今の段階では見当らない。ペレット形状はタイプCと同じであるし，違いはプルトニウムを含むことであるが，このプルトニウムの効果については今後検討してゆく必要がある。

3.1.8 燃料要素外径測定

燃料要素8本について外径の測定を行なった。

測定方法は，非接触型の空気容量変換器によるものである（CDテスト）。同時に2方向の直径を測定することができ，アナログチャートに記録される。

Table 3.1－16～3.1－23には，照射前後の外径をA，Bの2方向について記載した。測定点は軸方向に45点とっており，これらの測定点の最小値を照射前後について同じように記載した。照射による直径の変化を，Fig. 3.1－8～3.1－15に示す。燃料要素の全長にわたって外径は減少しており，最も大きく減少している燃料要素は外層であった。これらの結果のまと

めをTable 3.1 − 24に示す。

局所的に見れば，外径の最大の減少は0.096 mmであった(C10)。これに対して，平均的に見ると外層，中間層，内層の直径変化はそれぞれ0.035 mm，0.03 mm，0.020 mm であった。スペーサ部での局所的外径変化は認められなかった。

すべての燃料要素は真円度が悪くなっていた。これをTable 3.1 − 25に示す。照射前はオバリティの平均が4 μm程であったが，照射後は10 μmとなっていた。最大値は60 μmであった。

外層の燃料要素には，ペレット長さを周期とする規則的な外径の変化が認められた。(Fig. 3.1 − 16)燃料要素の中央部では，凹凸のなめらかな波形をしていた。一方，燃料要素の中央部から上，下端栓によった側では，凸部はなく，ペレット長さを周期としたシャープな凹部のみが検出された。直径チャートを調べると，この凹凸の起伏はTable 3.1 − 26に示すように，平均で18 μm，最大で28 μm(スペーサNo. 8 − 9間)であった。この値は，測定器の特性上多少ひかえめである。

燃料要素の外径変化の過程を推察してみると，次のようになろう。

① 被覆管の外表面の酸化層を調べてみると，外層，中間層，内層の順に均一酸化層の厚さが大きい。このことはこの順に照射中被覆管の温度が大きいことを示している。すなわち，温度の高い外層の被覆管は外圧によりクリープダウンして，外径が小さくなる。

② ついには，被覆管がペレットに接触する。ペレットの中央部の外径が大きいため，被覆管もこの位置でクリープダウンが止まる。逆にチャンファ部ではクリープダウンが進行する。

チャンファの長さは，ペレットの両端を合わせて1 mmである。外径チャート上では，この幅は5 mmと大きくなっている。これは外径測定の検出端が，電気容量変換器であるため外径変化の追従性がある程度なめらかなためである。

内層，中間層の被覆管には，ペレットの長さを周期とした波形が外径チャートに現われなかった理由は，

① 被覆管のクリープダウンが小さく(クリープダウン最大部の外径平均減少量は，内層燃料要素26 μm，中間層36 μm，外層52 ～ 57 μmであった。)

② 内層，中間層のペレット中心温度は外層に比べ低く，またペレットに発生するクラックが少ないため，ペレットの外径が小さかったためである。(中心温度がペレット外径を左右するとして，600°Cの差でペレットの熱膨張差は，

$$600\,℃ \times 10 \times 10^{-6}\ {}^{1/℃} \times 14.4\ {}^{mm} = 0.09\,\mathrm{mm}$$

$$= 90\ \mu\mathrm{m}$$ である。)

Table 3.1-1　Crud analysis by EPMA

Crud type	Element wt %						
	Fe	Cu	Ni	Mn	Si	Cs	O*
Single layer Porous deposit	43.3	0.9	3.0	1.8	0.05	0.3	50.6
Double layer Porous deposit	43.1	0.2	1.45	0.84	<0.01	0.17	54.2
Double layer Hard deposit	2.6	63.5	0.9	1.45	.17	.24	31.2
	* by difference						

Table 3.1-2 冷却水流量条件

		SGHWR	ふげん
チャンネル内流速		3.66 m／sec	2.4 m／sec
冷却水入口圧力		68 kg／cm^2	72 kg／cm^2
冷却水温度	入口	276°C	279°C
	出口	283°C	286°C

Table 3.1-3 タイプC，Dの被覆管，照射条件の比較

<table>
<tr><th></th><th colspan="2"></th><th colspan="2">タ イ プ C</th><th colspan="2">タ イ プ D</th></tr>
<tr><td rowspan="7">被覆管</td><td colspan="2">製 作 会 社</td><td>住友金属工業KK
(15 本)</td><td>神戸製鋼KK
(13 本)</td><td colspan="2">神戸製鋼KK</td></tr>
<tr><td rowspan="3">履歴</td><td>最終加工度</td><td>52.4 %</td><td>57.6 %</td><td colspan="2">58 %</td></tr>
<tr><td>歪取焼鈍</td><td>520°C</td><td>502°C</td><td colspan="2">490°C</td></tr>
<tr><td>オートクレーブ処理（外表面）</td><td>有</td><td>有</td><td colspan="2">無</td></tr>
<tr><td colspan="2">酸 素 (ppm)</td><td>1350， 1330</td><td>1140， 1160</td><td colspan="2">1330， 1349</td></tr>
<tr><td colspan="2">腐 食 増 量
(400°C, 72 hr)</td><td>15.5， 16.1</td><td>16.2， 16.0</td><td colspan="2">16.3， 16.8</td></tr>
<tr><td colspan="6" style="display:none"></td></tr>
<tr><td rowspan="7">照射条件</td><td colspan="2">照 射 日 数</td><td colspan="2">384 日</td><td colspan="2">360 日</td></tr>
<tr><td colspan="2">S／A燃 焼 度</td><td colspan="2">8,050 MWD／TU</td><td colspan="2">6,420</td></tr>
<tr><td colspan="2">ペレット最大燃焼度</td><td colspan="2">12,250 MWD／TU</td><td colspan="2">10,570</td></tr>
<tr><td rowspan="4">出力特性</td><td></td><td colspan="2">Redial power form factor</td><td>MWD／TMO</td><td>Rpff</td></tr>
<tr><td>内 層</td><td colspan="2">0.635</td><td>4,696＊A</td><td>0.586</td></tr>
<tr><td>中間層</td><td colspan="2">0.755</td><td>6,159＊A</td><td>0.699</td></tr>
<tr><td>外 層</td><td colspan="2">1.207</td><td>9,400＊A</td><td>1.254</td></tr>
</table>

Max 15.8 kw／ft

＊A ： 上部端栓肩からの距離 1940 ～ 1965 の位置から分析サンプリング

Table 3.1-4　タイプC　1次冷却水に含まれる不純物

	1973/11		12月		1974/1		2　月		3　月		4　月		5　月	
	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大
電導度　$\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	12	30	10	21	10	12	11	14	12	27	15	20	< 15	28
Cℓ　mg/t	< 20	20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	20	< 20	50	< 20	< 20	< 20	20
Si　〃	480	650	430	540	410	600	380	470	370	620	280	350	480	600
Cu　〃	9.6	13.2	9.7	12.0	10.5	14.0	11.2	13.5	11.2	18.5	10.0	11.0	15.6	23.0
Fe　〃	32	81	43	85	58	176	72	106	50.4	68	33.3	51.0	86.1	298.0

Table 3.1-4　（続き）

	6　月		7　月		8　月		9月		10月	11月	12月	
	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大			平　均	最　大
電導度　$\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	18	22	19	35	18	37	26	27			24	−
Cℓ　mg/t	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	定	定	< 20	−
Si　〃	450	560	420	700	400	520	360	370			780	−
Cu　〃	16.5	22.0	13.2	17.5	15.7	22.5	14.4	16.5	検	検	17.5	−
Fe　〃	50.8	94.0	58.6	198.0	59.9	316	30.6	55.6			75	−

Table 3.1-4　（続き）

	1975/1		2　月		3　月		4　月		5　月		
	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	全　平　均
電導度　$\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	31	50	42	81	32	60	21	36	20	31	
Cℓ　mg/t	25	50	30	40	20	40	<20	<20	<20	<20	
Si　〃	900	1500	460	820	350	660	475	780	340	400	457
Cu　〃	23	33	22	46	22	29	26	39	31	62	17
Fe　〃	33	71	55	546	52	125	43	79	19	23	50

Table 3.1-4　タイプD　1次冷却水に含まれる不純物（続き）

	1975/10		11月		12月		1976/1		2　月		3　月		4　月	
	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大
電導度　$\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	39	69	31	60	25	70	24	70	24	35	30	68	26	73
Cℓ　mg/t	30	70	20	40	20	70	<20	30	<20	70	<20	40	<20	40
Si　〃	580	920	470	650	430	590	510	950	365	510	330	480	310	550
Cu　〃	24.1	47.5	24.9	34	31.5	43.2	27.4	31.3	26.7	32.8	23.3	28.7	20.7	36.5
Fe　〃	62.5	390	40	151	46.9	68.5	40.3	54	47	144	101*A	890*A	32.5	115

*A：他の系の配管の影響あり。

Table 3.1-4 （続き）

	5 月		6 月	7 月	8 月	9 月		10月		11月	
	平 均	最 大				平 均	最 大	平 均	最 大	平 均	最 大
電導度 $\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	21	31				39	87	11	−	31	49
Cℓ mg／t	＜20		定	定	定	＜20	＜20	＜20	20	＜20	20
Si 〃	250	260				800	1600	500	650	360	430
Cu 〃	19.5	21.2	検	検	検	24.5	34.4	21.4	29.8	29.2	35.4
Fe 〃	46.8	87.9				71.3	192.0	30	88	25.0	33.2
Oxygen cc Kg^{-1}						0.044	0.06	0.049	0.055	0.07	

Table 3.1-4 （続き）

	1976/12		1977/1		2 月		3 月		4月（取出し）		全 平 均
	平 均	最 大	平 均	最 大	平 均	最 大	平 均	最 大	平 均	最 大	
電導度 $\mu\Omega^{-1}m^{-1}$	25	32	34	140	34	160	37	160	24	43	
Cℓ mg／t	＜20	20	20	50	30	60	20	80	＜20	20	
Si 〃	330	400	400	470	473	800	750	3500	360	450	306
Cu 〃	24.0	33.2	29.1	84.2	26.6	37.5	25.9	36.9	17.5	120.0	25
Fe 〃	33.4	87.2	53.4	663	40.0	229	93.3	715	58.6	102.0	51
Oxygen cc Kg^{-1}	0.034		0.066		0.06		0.07		0.075		

Table 3.1-5 照射前と照射後の燃料要素間ギャップ（外層）

ピン間	スペーサ間					
	9 − 8	8 − 7	7 − 6	6 − 5	5 − 4	4 − 3
C2, C3	2.30	2.19	2.20	2.23	2.25	2.18
C4, C5	2.21×	2.22×	2.16	2.23	2.24	2.26
C6, C7	2.35	2.31	2.36	2.33	2.32	2.22
C8, C9	2.07	2.09	2.20	2.12	2.06	2.07
C10, C11	2.20	2.29	2.16	2.16×	2.18×	2.24
C12, C13	2.17	2.22	2.38	2.28	2.25	2.24
C14, C15	2.16	2.20	2.20	2.25	2.26	2.22
C16, C1	2.08×	2.10	2.10	2.10	2.10	2.16

表中数字・照射前ギャップ，表中×印・照射後 1.85 mm，他＞ 1.85 mm

Table 3.1-6 燃料要素間隙 (シックネスゲージ使用)

	検査箇所	1.85 mm ゲージ		
		ゆるい	きつい	通らず
タイプC	72	63	2	7*
タイプD	72	63	6	0

※ 1.70 mm 以上

Table 3.1-7　タイプC　燃料要素間ギャップ

外層

×印　ギャップ小
（1.85mm 以下）

ピン間	スペーサ間					
	9−8	8−7	7−6	6−5	5−4	4−3
K526, S708					×	
S684, K519						
S685, K517			×			
S693, K513						
S693, K507						
S711, K509						
S697, K522				×	×	×
S703, K503				×	×	×

中間層

ピン間	スペーサ間					
	9−8	8−7	7−6	6−5	5−4	4−3
S720, K536			×	×		
S716, S717						
S718, K539						
S719, K502						

Table 3.1-8 燃料要素の引き抜き力

層別	ピンNo.	引き抜き力最大(Kg)	層別平均	組立時の挿入力最大値 (Kg)	参考，タイプCの引き抜き力(最大値)	〔挿入力〕−〔引き抜き力〕
外層	C1	41.6	43.5	81.0	57 ～ 169 Kg 平均 90	39
	C2	43.7		66.5		23
	C3	50.1		64.5		14
	C4	54.2		64.0		10
	C5	42.2		52.5		10
	C6	47.3		52.0		5
	C7	43.8		54.5		11
	C8	50.7		56.0		5
	C9	47.3		71.5		24
	C10	46.4		62.0		16
	C11	51.0		66.0		15
	C12	48.3		−		
	C13	30.7		51.5		21
	C14	35.4		61.3		26
	C15	29.6		51.0		21
	C16	33.3		58.0		25
中間層	B1	31.3	42.9	50.0	66 ～ 123 Kg 平均 93	19
	B2	54.2		44.4		−10
	B3	57.7		41.5		−16
	B4	31.2		48.5		17
	B5	34.9		52.3		17
	B6	51.8		43.5		−8
	B7	47.8		38.0		−10
	B8	33.9		48.5		15
内層	A1	37.6	34.5	50.5	70 ～ 76 Kg 平均 73	13
	A2	29.6		54.5		25
	A3	33.5		51.5		18
	A4	37.2		50.5		13

Table 3.1-9 局所酸化と引き抜き力

ピン No.	局所酸化	引き抜き力 Kg
A 4	ひっかけ傷の部分に局所酸化有り，総じて少ない。	37.2
B 6	局所酸化多い。	51.8
C 1	ひっかけ傷の部分に局所酸化有り，総じて少ない。	41.6
C 4	局所酸化多い（かたい水あか）	54.2
C 7	局所酸化少い	43.8
C10	同　上	46.4
C11	Spacer No.9 ノデュラーオキサイドが多数（かたい水あか）	51.0
C12	局所酸化少ない	48.3
C14	Spacer No.9 デンプルマークは観察されたが局所酸化物発見されず 局所酸化少ない	35.4

Table 3.1-10　照射前後のマンドレル引抜き力

単位：g

ピン No.		Grid No.		
		1	6	9
C　1	前	970 g	890	880
	後	944	785	890
C　10	前	930	970	900
	後	907	680	807
C　14	前	1000	820	1040
	後	824	566	692
B　1	前	760	720	840
	後	554※	722	831
B　6	前	800	760	770
	後	804	634	742
A　4	前	800	950	800
	後	875	800	736

※　この部分に損傷の跡あり

使用マンドレル径　16. 46 mm∮

Table 3.1-11 燃料要素長さ変化

ピン No.	照射前(mm)	照射後(mm)	増加長さ (mm)	増加長さ (%)	平均 %
A 1	3777.0	3781.4	4.4	0.116	0.118
A 2	3777.1	3781.4	4.3	0.114	
A 3	3777.1	3781.8	4.7	0.124	
A 4	3777.1	3781.6	4.5	△0.119	
B 1	3776.6	3782.1	5.5	0.146	0.149
B 2	3776.5	3782.2	5.7	0.151	
B 3	3776.6	3782.1	5.5	0.146	
B 4	3776.9	3782.5	5.6	0.148	
B 5	3777.0	3782.6	5.6	0.148	
B 6	3776.9	3782.7	5.8	△0.154	
B 7	3776.7	3782.4	5.7	0.151	
B 8	3776.9	3782.4	5.5	0.146	
C 1	3777.1	3784.3	7.3	△0.193	0.207
C 2	3777.1	3784.6	7.5	0.199	
C 3	3777.1	3784.8	7.7	0.204	
C 4	3777.0	3784.5	7.5	△0.199	
C 5	3776.8	3784.2	7.4	0.196	
C 6	3777.2	3784.5	7.3	0.193	
C 7	3777.0	3785.5	8.5	△0.225	
C 8	3776.8	3785.2	8.4	0.222	
C 9	3777.1	3785.3	8.2	0.217	
C10	3777.2	3785.2	8.0	△0.212	
C11	3777.2	3785.6	8.4	△0.222	
C12	3777.0	3784.9	7.9	△0.209	
C13	3776.9	3785.1	8.2	0.217	
C14	3777.1	3784.4	7.3	△0.193	
C15	3777.1	3784.8	7.7	0.204	
C16	3777.1	3784.6	7.5	0.199	

△印　詳細試験のために選択した燃料棒

Table 3.1-12 燃料要素の伸びの解析

○ タイプA （燃焼度 2900 MWD／TeU）

2.3% fissile

ピン No.	層別	径変化 $(\Delta D/D)_T$ %	全長変化 $(\Delta L/L)_T$ %	スエリング $(\Delta D/D)_i$ %	PCMI	機械的変化 $(\Delta L/L)_m$ %	$(\Delta D/D)_m \to (\Delta L/L)$ 変換係数 a
A 1	内層	−0.05	0.09	0.04	無	0	0.56
B 1	中間層	−0.05	0.07	〃	〃	〃	0.33
B 5		−0.06	0.065	〃	〃	〃	0.25
C 1	外層	−0.06	0.10	〃	微少	〃	0.60
C 4		−0.04	0.11	〃	〃	〃	0.88
C 9		−0.05	0.07	〃	〃	〃	0.33

○ タイプB （燃焼度 8580 MWD／TeU）

2.8% fissile

ピン No.	層別	$(\Delta D/D)_T$ %	$(\Delta L/L)_T$ %	$(\Delta D/D)_i$ %	PCMI	$(\Delta L/L)_m$ %	a
SA10	外層	−0.08	0.17	0.07	有	0.05	0.33
SA15		−0.11	0.18	0.07	有	0.05	0.33

○ タイプC （燃焼度 8050 MWD／TeU）

2.4％ fissile

ピン No.	層別	$(\Delta D/D)_T$ %	$(\Delta L/L)_T$ %	$(\Delta D/D)_i$ %	PCMI	$(\Delta L/L)_m$ %	a	a′※B
S 714	内層	−0.12	0.155	0.07	無	0	0.45	$(\Delta D/D)_T$ の測定ミスのためaの値が異常となった。
K 536	中間層	−0.11	0.195	0.07	〃	0	0.69	
K 539	〃	−0.18	0.19	0.07	〃	0	0.48	
S 708	外層	−0.15	0.22	0.07	有	0.05	0.45	(0.68)
S 697	〃	−0.17	0.22	0.07	〃	0.05	0.42	(0.63)
K 503	〃	−0.12	0.19	0.07	〃	0.05	0.37	(0.63)

※B $(\Delta L/L)_m = 0$ と仮定した場合

○ タイプD （燃焼度 6420 MWD／TeM）

2.4％ fissile

ピン No.	層別	$(\Delta D/D)_T$ %	$(\Delta L/L)_T$ %	$(\Delta D/D)_i$ %	PCMI	$(\Delta L/L)_m$ %	a	a′※B
A 4	内層	−0.12	0.12	0.07	無	0	0.26	
B 6	中間層	−0.18	0.15	0.07	〃	0	0.32	
C 1	外層	−0.185	0.19	0.07	有	0.04	0.31	(0.47)
C 4		−0.247	0.20	0.07	〃	〃	0.29	(0.41)
C 7		−0.195	0.23	0.07	〃	〃	0.45 *D	(0.60)
C 10		−0.225	0.21	0.07	〃	〃	0.34	(0.47)
C 11		−0.186	0.22	0.07	〃	〃	0.43 *D	(0.59)
C 14		−0.195	0.19	0.07	〃	〃	0.30	(0.45)

*D $(\Delta L/L)_T$ が大きく実測されたためaの値が大きくなった。

Table 3.1-13 Eddy-current test results

Pin identity	Comparative grid signal amplitudes (mm)	Pellet - end signals			' Defect ' signals	
	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	Region showing signals (mm from bottom end)	Region where signals are most prominent (mm from bottom end)	Relative signal amplitude in prominent regions (mm)	Position on pin (mm from bottom end)	Equivalent hole size (mm^2)
A4	No significant signals	0	0	0	2873 (Between gride 2 & 3)	0.5
B6	No significant signals	0	0	0	None	—
C1	Any signals obscured by pellet-end effects	920 - 2330	1230 - 1590	72	None	—
C4	"	520 - 2470	1480 - 1830	80	None	—
C7	"	600 - 2650	1100 - 1700	80	None	—
C10	"	774 - 2410	1100 - 2250	50	None	—
C11	"	600 - 2700	1130 - 1490 1640 - 1980	80 80	2755 (Just above Grid 3)	0.9
C12	"	500 - 2650	980 - 1080 1410 - 1850	50 45	None	—
C14	"	520 - 2460	1600 - 2000	60	2487 (Grid 4)	0.7

Table 3.1-14 Gamma-scanning test results

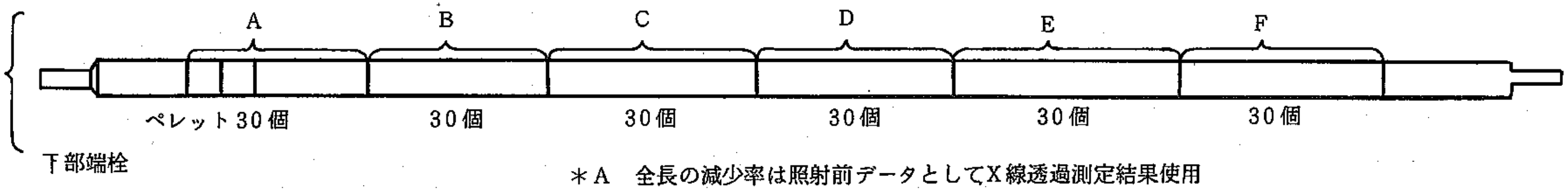
Pin Number	Relative Peak Total Gamma Count (cps)	γ Depression at Grid Positions 5,6,7,8 (%)		Interpellet Gaps		Fuel Stack Measurements				Localised Variations in Gamma Activity between Fuel Pellets		Gamma-Spiking (Cesium peaking)
		Max	Mean	Number and Position (mm from Bottom End)	Total Gap Width (mm)	(1)Pre-Irradiation Length (mm)	Corrected Post-irradiation Length (ie less gaps) (mm)	Difference (mm)	Difference %	Number of Pellets	Fuel Batch Nos.	
A4	381	7.7	6.6	0	0	3509.6	3496.8	-12.8	-0.36	0	6	NIL
B6	535	4.6	4.2	1 (674)	0.1	3509.8	3498.4	-11.4	-0.32	0	5, 11	NIL
C1	827	3.7	3.3	2 (1137 and 1621)	0.5	3508.9	3486.6	-22.3	-0.64	12	8	NIL
C4	815	3.5	3.1	5 (1630-2078)	1.3	3509.3	3484.1	-25.2	-0.72	1	2	NIL
C7	797	4.6	4.3	5 (1570-2163)	0.3	3511.3	3491.5	-19.8	-0.56	2	4	NIL
C10	788	5.0	4.5	9 (1390-2685)	1.0	3509.6	3488.5	-21.1	-0.60	1 (also small variations on 5 others)	8	NIL
C11	825	3.6	3.1	4 (1800-2790)	0.2	3513.4	3491.3	-22.1	-0.63	1 (also small variations on 6 others)	5	NIL
C12	810	4.2	3.2	15 (1492-2446)	1.7	3507.2	3482.7	-24.5	-0.70	0	9	NIL
C14	740	5.1	4.5	10 (1248-2613)	0.8	3506.1	3485.4	-20.7	-0.59	10	8	NIL

(1) Data supplied by PNC representative

Table 3.1-15　ペレット30個の長さ（mm）

（　）減少率（%）（基準値　54.4 mmとする）

ピン No.	測定位置						
	A（最下部30個）	B	C	D	E	F	全長 *A
C 1	54.2 mm （0.4）%	54.1 （0.6）	54.0 （0.7）	53.8 （1.1）	53.8 （1.1）	54.2 （0.4）	（0.64）%
C 4	54.0 （0.7）	53.5 （1.7）	53.4 （1.8）	53.8 （1.1）	53.9 （0.9）	54.1 （0.6）	（0.72）
C 14	54.4 （0）	53.8 （1.1）	53.7 （1.3）	54.0 （0.7）	54.1 （0.6）	54.2 （0.4）	（0.59）
B 6	54.4 （0）	54.4 （0）	54.2 （0.4）	54.0 （0.7）	54.2 （0.4）	54.3 （0.2）	（0.32）
A 4	54.4 （0）	54.4 （0）	54.2 （0.4）	54.0 （0.7）	54.2 （0.4）	54.3 （0.2）	（0.36）



＊A　全長の減少率は照射前データとしてX線透過測定結果使用

Table 3.1-16 Pin diameter measurements-Pin A4

NNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.427	16.429	16.418	16.420	- 0.009	- 0.009
2	.433	.420	.418	.415	- 0.015	- 0.005
3	.436	.427	.415	.415	- 0.021	- 0.012
4	.429	.431	.413	.418	- 0.016	- 0.013
5	.426	.433	.413	.423	- 0.013	- 0.010
6	.431	.425	.408	.415	- 0.021	- 0.010
7	.434	.425	.408	.408	- 0.026	- 0.017
8	.432	.428	.410	.410	- 0.022	- 0.018
9	.435	.431	.413	.413	- 0.022	- 0.018
10	.432	.430	.415	.410	- 0.017	- 0.020
11	.430	.432	.413	.415	- 0.017	- 0.017
12	.434	.430	.408	.410	- 0.026	- 0.020
13	.433	.428	.405	.410	- 0.028	- 0.018
14	.434	.434	.405	.415	- 0.029	- 0.019
15	.436	.434	.408	.413	- 0.028	- 0.021
16	.433	.433	.403	.418	- 0.025	- 0.015
17	.431	.433	.410	.415	- 0.021	- 0.018
18	.434	.434	.410	.413	- 0.024	- 0.021
19	.434	.436	.405	.415	- 0.029	- 0.021
20	.433	.433	.408	.410	- 0.025	- 0.023
21	.430	.437	.405	.413	- 0.025	- 0.024
22	.431	.438	.405	.413	- 0.026	- 0.025
23	.429	.437	.405	.408	- 0.024	- 0.029
24	.429	.433	.408	.408	- 0.021	- 0.025
25	.430	.438	.408	.410	- 0.022	- 0.028
26	.429	.432	.403	.418	- 0.026	- 0.014
27	.435	.431	.403	.418	- 0.032	- 0.013
28	.438	.437	.410	.408	- 0.028	- 0.029
29	.433	.429	.408	.408	- 0.025	- 0.021
30	.434	.429	.410	.408	- 0.024	- 0.021
31	.437	.430	.413	.410	- 0.024	- 0.020
32	.432	.432	.413	.408	- 0.019	- 0.024
33	.430	.428	.400	.408	- 0.030	- 0.020
34	.423	.434	.400	.415	- 0.023	- 0.019
35	.427	.433	.403	.413	- 0.024	- 0.020
36	.427	.437	.410	.413	- 0.017	- 0.024
37	.430	.435	.410	.413	- 0.020	- 0.022
38	.433	.427	.415	.413	- 0.018	- 0.014
39	.432	.426	.408	.423	- 0.024	- 0.003
40	.428	.428	.413	.418	- 0.015	- 0.010
41	.430	.432	.413	.418	- 0.017	- 0.014
42	.427	.433	.413	.423	- 0.014	- 0.010
43	.428	.435	.418	.418	- 0.010	- 0.017
44	.427	.431	.410	.408	- 0.017	- 0.023
45	.428	.432	.410	.408	- 0.014	- 0.024

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (no pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref. 4

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm

Table 3.1-17 Pin diameter measurements-Pin B6

PNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.431	16.426	16.403	16.423	- 0.028	- 0.003
2	.427	.425	.448	.423	+ 0.021	- 0.002
3	.432	.428	.400	.415	- 0.032	- 0.013
4	.428	.428	.400	.408	- 0.028	- 0.020
5	.426	.425	.390	.413	- 0.036	- 0.012
6	.428	.428	.388	.410	- 0.040	- 0.018
7	.426	.426	.390	.418	- 0.036	- 0.008
8	.427	.428	.388	.405	- 0.039	- 0.023
9	.430	.428	.388	.405	- 0.042	- 0.023
10	.429	.425	.393	.398	- 0.036	- 0.027
11	.432	.426	.390	.403	- 0.042	- 0.023
12	.430	.430	.388	.400	- 0.042	- 0.030
13	.425	.426	.380	.398	- 0.045	- 0.028
14	.428	.430	.375	.398	- 0.053	- 0.032
15	.430	.428	.378	.400	- 0.052	- 0.028
16	.426	.430	.393	.395	- 0.033	- 0.035
17	.428	.426	.388	.398	- 0.040	- 0.028
18	.427	.427	.388	.395	- 0.039	- 0.032
19	.428	.431	.388	.398	- 0.040	- 0.033
20	.428	.432	.390	.398	- 0.038	- 0.034
21	.431	.430	.393	.393	- 0.038	- 0.037
22	.433	.431	.388	.400	- 0.045	- 0.031
23	.430	.427	.393	.400	- 0.037	- 0.027
24	.429	.428	.393	.393	- 0.036	- 0.035
25	.429	.431	.388	.395	- 0.041	- 0.036
26	.430	.432	.388	.393	- 0.042	- 0.039
27	.433	.430	.383	.398	- 0.050	- 0.032
28	.427	.432	.380	.400	- 0.047	- 0.032
29	.430	.432	.388	.398	- 0.042	- 0.034
30	.431	.433	.388	.398	- 0.042	- 0.035
31	.432	.432	.385	.403	- 0.047	- 0.029
32	.428	.428	.390	.403	- 0.038	- 0.025
33	.429	.428	.395	.398	- 0.034	- 0.030
34	.430	.426	.388	.405	- 0.042	- 0.021
35	.430	.425	.388	.408	- 0.042	- 0.017
36	.431	.427	.393	.413	- 0.038	- 0.014
37	.430	.427	.398	.408	- 0.032	- 0.019
38	.433	.426	.398	.410	- 0.035	- 0.016
39	.426	.430	.403	.413	- 0.023	- 0.017
40	.434	.428	.408	.410	- 0.026	- 0.018
41	.432	.429	.415	.413	- 0.017	- 0.016
42	.427	.430	.408	.418	- 0.019	- 0.012
43	.430	.435	.410	.418	- 0.020	- 0.017
44	.431	.434	.405	.413	- 0.026	- 0.021
45	.431	.435	.413	.418	- 0.018	- 0.017

__Notes:__

__Grids__ No grid positions evident on traces (no pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-18 Pin diameter measurements-Pin C1

FMC 'axial' measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.434	16.427	16.413	16.413	- 0.021	- 0.014
2	.430	.427	.413	.378	- 0.017	- 0.049
3	.427	.426	.410	.423	- 0.017	- 0.003
4	.426	.428	.408	.428	- 0.018	0
5	.430	.425	.428	.413	- 0.002	- 0.012
6	.426	.425	.425	.408	- 0.001	- 0.017
7	.426	.427	.400	.415	- 0.026	- 0.012
8	.428	.428	.393	.408	- 0.035	- 0.020
9	.427	.425	.410	.398	- 0.017	- 0.027
10	.428	.428	.403	.418	- 0.025	- 0.010
11	.430	.424	.358	.368	- 0.072	- 0.056
12	.428	.426	.405	.375	- 0.023	- 0.051
13	.428	.425	.390	.390	- 0.038	- 0.035
14	.429	.430	.368	.373	- 0.061	- 0.057
15	.427	.433	.388	.358	- 0.039	- 0.075
16	.426	.430	.398	.373	- 0.028	- 0.057
17	.431	.428	.363	.368	- 0.068	- 0.060
18	.430	.432	.363	.373	- 0.067	- 0.059
19	.431	.430	.370	.375	- 0.061	- 0.055
20	.432	.432	.388	.393	- 0.044	- 0.039
21	.432	.431	.388	.400	- 0.044	- 0.031
22	.430	.434	.373	.383	- 0.057	- 0.051
23	.430	.435	.378	.383	- 0.052	- 0.052
24	.428	.432	.375	.360	- 0.053	- 0.072
25	.428	.430	.388	.385	- 0.040	- 0.045
26	.430	.430	.393	.393	- 0.037	- 0.037
27	.432	.428	.388	.398	- 0.044	- 0.030
28	.432	.432	.405	.403	- 0.027	- 0.029
29	.430	.428	.388	.400	- 0.042	- 0.028
30	.428	.433	.388	.405	- 0.040	- 0.028
31	.426	.435	.403	.428	- 0.023	- 0.007
32	.430	.430	.408	.403	- 0.022	- 0.027
33	.427	.428	.408	.408	- 0.021	- 0.020
34	.435	.432	.400	.400	- 0.035	- 0.032
35	.433	.426	.405	.410	- 0.028	- 0.016
36	.438	.428	.410	.415	- 0.023	- 0.013
37	.430	.428	.413	.418	- 0.017	- 0.010
38	.427	.430	.410	.408	- 0.017	- 0.022
39	.433	.430	.415	.413	- 0.018	- 0.017
40	.434	.428	.420	.418	- 0.014	- 0.010
41	.430	.428	.425	.423	- 0.005	- 0.005
42	.427	.435	.423	.423	- 0.004	- 0.012
43	.429	.430	.420	.418	- 0.009	- 0.012
44	.430	.431	.418	.423	- 0.012	- 0.009
45	.432	.432	.425	.425	- 0.007	- 0.007

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref. 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-19 Pin diameter measurements-Pin C4

FNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.435	16.437	16.413	16.385	- 0.022	- 0.052
2	.436	.427	.418	.403	- 0.018	- 0.024
3	.438	.427	.420	.408	- 0.018	- 0.019
4	.433	.433	.413	.408	- 0.020	- 0.025
5	.430	.433	.403	.375	- 0.027	- 0.030
6	.433	.424	.403	.390	- 0.030	- 0.034
7	.433	.437	.413	.403	- 0.020	- 0.034
8	.432	.431	.418	.398	- 0.014	- 0.033
9	.433	.437	.398	.403	- 0.035	- 0.034
10	.433	.437	.408	.398	- 0.025	- 0.039
11	.434	.438	.383	.390	- 0.051	- 0.048
12	.432	.432	.395	.393	- 0.037	- 0.039
13	.433	.436	.395	.385	- 0.038	- 0.051
14	.437	.438	.393	.398	- 0.044	- 0.040
15	.435	.431	.388	.398	- 0.047	- 0.033
16	.436	.434	.383	.388	- 0.053	- 0.046
17	.432	.431	.383	.355	- 0.049	- 0.076
18	.436	.437	.368	.370	- 0.068	- 0.067
19	.429	.433	.355	.383	- 0.074	- 0.050
20	.433	.437	.388	.380	- 0.045	- 0.057
21	.435	.438	.368	.388	- 0.067	- 0.050
22	.435	.433	.340	.360	- 0.095	- 0.073
23	.437	.433	.353	.348	- 0.084	- 0.085
24	.435	.431	.368	.363	- 0.067	- 0.068
25	.433	.431	.398	.393	- 0.035	- 0.038
26	.434	.435	.383	.398	- 0.051	- 0.037
27	.433	.437	.388	.390	- 0.045	- 0.047
28	.437	.437	.378	.378	- 0.059	- 0.059
29	.433	.438	.380	.393	- 0.053	- 0.045
30	.431	.433	.388	.393	- 0.043	- 0.040
31	.435	.429	.390	.400	- 0.045	- 0.029
32	.438	.428	.388	.413	- 0.050	- 0.015
33	.436	.431	.403	.405	- 0.033	- 0.026
34	.438	.432	.408	.403	- 0.030	- 0.029
35	.437	.433	.398	.400	- 0.039	- 0.033
36	.437	.428	.398	.408	- 0.039	- 0.020
37	.436	.435	.408	.405	- 0.028	- 0.030
38	.430	.435	.405	.410	- 0.025	- 0.025
39	.437	.433	.408	.408	- 0.029	- 0.025
40	.439	.428	.400	.405	- 0.039	- 0.023
41	.427	.437	.395	.410	- 0.032	- 0.027
42	.437	.438	.405	.410	- 0.032	- 0.028
43	.437	.433	.405	.410	- 0.032	- 0.023
44	.433	.434	.390	.405	- 0.042	- 0.029
45	.433	.433	.390	.388	- 0.043	- 0.045

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-20 Pin diameter measurements-Pin C7

PNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.430	16.440	16.438	16.440	+ 0.008	0
2	.432	.437	.423	.423	- 0.009	- 0.014
3	.438	.434	.418	.420	- 0.020	- 0.014
4	.437	.433	.405	.428	- 0.032	- 0.005
5	.435	.432	.428	.413	- 0.007	- 0.019
6	.435	.438	.445	.428	+ 0.010	- 0.010
7	.440	.436	.408	.428	- 0.032	- 0.008
8	.438	.436	.415	.403	- 0.023	- 0.033
9	.440	.431	.378	.378	- 0.062	- 0.053
10	.441	.434	.378	.373	- 0.063	- 0.061
11	.438	.438	.370	.383	- 0.063	- 0.055
12	.440	.439	.395	.423	- 0.045	- 0.016
13	.433	.437	.380	.415	- 0.058	- 0.022
14	.436	.438	.360	.388	- 0.076	- 0.050
15	.433	.441	.368	.380	- 0.065	- 0.061
16	.439	.438	.385	.403	- 0.054	- 0.035
17	.439	.438	.393	.403	- 0.046	- 0.035
18	.437	.440	.398	.378	- 0.039	- 0.062
19	.439	.434	.383	.385	- 0.056	- 0.049
20	.441	.433	.375	.398	- 0.066	- 0.035
21	.440	.432	.380	.378	- 0.060	- 0.054
22	.442	.435	.378	.378	- 0.064	- 0.057
23	.440	.432	.373	.393	- 0.067	- 0.039
24	.438	.440	.388	.398	- 0.050	- 0.042
25	.437	.434	.380	.385	- 0.057	- 0.049
26	.435	.440	.385	.408	- 0.050	- 0.032
27	.432	.440	.395	.400	- 0.037	- 0.040
28	.436	.436	.383	.395	- 0.053	- 0.041
29	.441	.433	.390	.388	- 0.051	- 0.045
30	.439	.439	.383	.398	- 0.056	- 0.041
31	.437	.440	.395	.410	- 0.042	- 0.030
32	.439	.434	.425	.420	- 0.014	- 0.014
33	.437	.433	.423	.423	- 0.014	- 0.010
34	.437	.440	.418	.423	- 0.019	- 0.017
35	.438	.438	.410	.420	- 0.028	- 0.018
36	.435	.440	.413	.418	- 0.022	- 0.022
37	.437	.440	.413	.418	- 0.024	- 0.022
38	.438	.439	.413	.425	- 0.025	- 0.014
39	.435	.441	.420	.430	- 0.015	- 0.011
40	.432	.440	.423	.433	- 0.009	- 0.007
41	.439	.430	.423	.428	- 0.016	- 0.002
42	.438	.436	.423	.425	- 0.015	- 0.011
43	.437	.437	.428	.428	- 0.009	- 0.009
44	.435	.434	.428	.423	- 0.007	- 0.011
45	.441	.432	.425	.433	- 0.016	+ 0.001

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-21 Pin diameter measurements-Pin C10

PNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.431	16.427	16.413	16.408	- 0.018	- 0.019
2	.440	.431	.398	.408	- 0.042	- 0.023
3	.436	.420	.405	.400	- 0.031	- 0.020
4	.428	.427	.408	.405	- 0.020	- 0.022
5	.428	.424	.418	.423	- 0.010	- 0.001
6	.430	.425	.420	.418	- 0.010	- 0.007
7	.427	.429	.358	.418	- 0.069	- 0.011
8	.427	.424	.378	.410	- 0.049	- 0.014
9	.429	.426	.378	.358	- 0.051	- 0.068
10	.427	.428	.375	.375	- 0.052	- 0.053
11	.427	.428	.363	.378	- 0.064	- 0.050
12	.428	.425	.340	.368	- 0.088	- 0.057
13	.428	.429	.370	.398	- 0.058	- 0.031
14	.427	.434	.390	.375	- 0.037	- 0.059
15	.426	.428	.363	.383	- 0.063	- 0.045
16	.430	.431	.360	.368	- 0.070	- 0.063
17	.428	.425	.373	.375	- 0.055	- 0.050
18	.431	.426	.410	.390	- 0.021	- 0.036
19	.436	.427	.398	.380	- 0.038	- 0.047
20	.430	.425	.365	.368	- 0.065	- 0.057
21	.434	.426	.338	.350	- 0.096	- 0.076
22	.433	.431	.368	.375	- 0.065	- 0.056
23	.427	.431	.373	.378	- 0.054	- 0.053
24	.426	.431	.368	.350	- 0.058	- 0.081
25	.432	.431	.388	.373	- 0.044	- 0.058
26	.433	.426	.373	.378	- 0.060	- 0.048
27	.434	.427	.353	.363	- 0.081	- 0.064
28	.431	.430	.388	.388	- 0.043	- 0.042
29	.430	.426	.400	.378	- 0.030	- 0.048
30	.424	.434	.383	.390	- 0.041	- 0.044
31	.430	.432	.395	.410	- 0.035	- 0.022
32	.431	.432	.400	.408	- 0.031	- 0.029
33	.432	.427	.398	.408	- 0.034	- 0.019
34	.429	.434	.398	.418	- 0.031	- 0.016
35	.430	.434	.410	.400	- 0.020	- 0.034
36	.433	.430	.405	.408	- 0.028	- 0.022
37	.434	.428	.408	.418	- 0.026	- 0.010
38	.433	.432	.408	.420	- 0.025	- 0.012
39	.431	.434	.410	.418	- 0.021	- 0.016
40	.428	.430	.418	.415	- 0.010	- 0.015
41	.430	.436	.423	.420	- 0.007	- 0.016
42	.431	.434	.420	.418	- 0.011	- 0.016
43	.434	.433	.418	.425	- 0.016	- 0.008
44	.434	.433	.428	.430	- 0.006	- 0.003
45	.431	.438	.435	.428	+ 0.004	- 0.010

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-22 Pin diameter measurements-Pin C11

INC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.432	16.433	16.420	16.430	- 0.012	- 0.003
2	.432	.432	.408	.430	- 0.024	- 0.002
3	.433	.432	.418	.418	- 0.015	- 0.014
4	.433	.437	.410	.433	- 0.023	- 0.004
5	.434	.434	.425	.428	- 0.009	- 0.006
6	.434	.432	.430	.425	- 0.004	- 0.007
7	.434	.435	.408	.403	- 0.026	- 0.032
8	.435	.431	.410	.410	- 0.025	- 0.021
9	.441	.433	.378	.365	- 0.063	- 0.068
10	.435	.434	.400	.378	- 0.035	- 0.056
11	.442	.434	.385	.385	- 0.057	- 0.049
12	.441	.430	.373	.375	- 0.068	- 0.055
13	.445	.434	.375	.380	- 0.070	- 0.054
14	.437	.435	.395	.410	- 0.042	- 0.025
15	.441	.438	.370	.395	- 0.071	- 0.043
16	.441	.435	.373	.393	- 0.068	- 0.042
17	.438	.432	.358	.398	- 0.080	- 0.034
18	.437	.436	.388	.398	- 0.049	- 0.038
19	.434	.436	.398	.403	- 0.036	- 0.033
20	.435	.432	.373	.380	- 0.062	- 0.052
21	.441	.433	.378	.373	- 0.063	- 0.060
22	.436	.435	.358	.378	- 0.078	- 0.057
23	.434	.436	.365	.385	- 0.069	- 0.051
24	.441	.433	.373	.380	- 0.068	- 0.053
25	.434	.434	.378	.400	- 0.056	- 0.034
26	.434	.432	.400	.395	- 0.034	- 0.037
27	.432	.431	.388	.403	- 0.044	- 0.028
28	.433	.433	.403	.400	- 0.030	- 0.033
29	.433	.431	.405	.415	- 0.028	- 0.016
30	.432	.431	.408	.393	- 0.024	- 0.036
31	.432	.438	.393	.410	- 0.039	- 0.028
32	.436	.434	.398	.410	- 0.038	- 0.024
33	.441	.434	.400	.423	- 0.041	- 0.011
34	.434	.433	.415	.418	- 0.019	- 0.015
35	.436	.432	.413	.418	- 0.023	- 0.014
36	.441	.437	.413	.420	- 0.028	- 0.017
37	.442	.433	.420	.418	- 0.022	- 0.015
38	.432	.433	.415	.428	- 0.017	- 0.005
39	.442	.435	.418	.428	- 0.024	- 0.007
40	.432	.435	.418	.420	- 0.014	- 0.015
41	.431	.432	.428	.425	- 0.003	- 0.007
42	.435	.431	.428	.428	- 0.007	- 0.003
43	.431	.431	.425	.433	- 0.006	+ 0.002
44	.433	.433	.408	.415	- 0.025	- 0.018
45	.430	.432	.435	.433	+ 0.005	+ 0.001

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-23 Pin diameter measurements-Pin C14

PNC axial measurement position	(1) Pre-irradiation mm		(2) Post-irradiation mm		Difference mm	
	'A'	'B'	'A'	'B'	'A'	'B'
1	16.435	16.444	16.403	16.433	- 0.032	- 0.011
2	.435	.438	.398	.423	- 0.037	- 0.015
3	.432	.435	.415	.418	- 0.017	- 0.017
4	.430	.439	.418	.430	- 0.012	- 0.009
5	.428	.432	.428	.445	0	+ 0.013
6	.424	.423	.430	.428	+ 0.006	+ 0.005
7	.436	.430	.400	.408	- 0.036	- 0.022
8	.432	.434	.423	.415	- 0.009	- 0.019
9	.433	.431	.398	.395	- 0.035	- 0.036
10	.436	.432	.388	.385	- 0.048	- 0.047
11	.437	.427	.383	.413	- 0.054	- 0.014
12	.436	.434	.408	.395	- 0.028	- 0.039
13	.432	.434	.385	.398	- 0.047	- 0.036
14	.431	.430	.400	.390	- 0.031	- 0.040
15	.430	.434	.378	.388	- 0.052	- 0.046
16	.430	.434	.383	.370	- 0.047	- 0.064
17	.430	.431	.350	.380	- 0.080	- 0.051
18	.430	.430	.375	.383	- 0.055	- 0.047
19	.425	.431	.380	.388	- 0.045	- 0.043
20	.434	.437	.378	.385	- 0.056	- 0.052
21	.437	.432	.375	.363	- 0.062	- 0.069
22	.434	.430	.355	.380	- 0.079	- 0.050
23	.431	.434	.378	.383	- 0.053	- 0.051
24	.431	.428	.378	.373	- 0.053	- 0.055
25	.435	.433	.390	.393	- 0.045	- 0.040
26	.429	.433	.383	.408	- 0.046	- 0.025
27	.429	.429	.378	.398	- 0.051	- 0.031
28	.436	.430	.378	.398	- 0.058	- 0.032
29	.428	.434	.393	.398	- 0.035	- 0.036
30	.427	.427	.390	.398	- 0.037	- 0.029
31	.435	.430	.395	.390	- 0.040	- 0.040
32	.429	.433	.398	.398	- 0.031	- 0.035
33	.427	.428	.393	.403	- 0.034	- 0.025
34	.428	.426	.400	.398	- 0.028	- 0.028
35	.432	.428	.410	.408	- 0.022	- 0.020
36	.433	.438	.413	.410	- 0.020	- 0.028
37	.434	.430	.418	.413	- 0.016	- 0.017
38	.432	.427	.413	.413	- 0.019	- 0.014
39	.432	.424	.420	.415	- 0.012	- 0.009
40	.426	.428	.413	.413	- 0.013	- 0.015
41	.424	.432	.410	.418	- 0.014	- 0.014
42	.431	.430	.415	.418	- 0.016	- 0.012
43	.427	.429	.415	.415	- 0.012	- 0.014
44	.432	.424	.398	.403	- 0.034	- 0.021
45	.429	.429	.400	.408	- 0.029	- 0.021

Notes:

Grids No grid positions evident on traces (lost in pellet-end signals).

(1) Readings taken from Ref 4.

(2) Minimum readings nearest to measurement position. Accurate to ± 7 μm.

Table 3.1-24 Changes in pin diameter

Pin No.	Position in element	Diameter decrease (mm)					
		On axis "A"		On axis "B"		Overall	
		Max.	Mean	Max.	Mean	Max.	Mean
A4	Inner ring	0.032	0.022	0.029	0.018	0.032	0.020
B6	Intermediate ring	0.053	0.035	0.039	0.024	0.053	0.030
C1	Outer ring	0.072	0.030	0.075	0.030	0.075	0.030
C4	" "	0.095	0.042	0.085	0.046	0.095	0.044
C7	" "	0.076	0.037	0.062	0.028	0.076	0.033
C10	" "	0.096	0.040	0.081	0.035	0.096	0.038
C11	" "	0.080	0.036	0.068	0.027	0.080	0.032
C14	" "	0.080	0.035	0.069	0.029	0.080	0.032

Table 3.1-25 Changes in pin ovality

Pin No.	Mean pre-irradiation ovality (μm)	Mean post-irradiation ovality (μm)	Maximum post-irradiation ovality (μm)
A4	4	5	15
B6	3	12	28
C1	4	10	30
C4	4	10	28
C7	4	11	35
C10	4	12	60
C11	3	10	40
C14	4	10	30

Table 3.1-26 Mid-pellet radial ridge heights (from CDT charts)

Pin No. / Position	A4 Mean m	A4 Max m	B6 Mean m	B6 Max m	C1 Mean m	C1 Max m	C4 Mean m	C4 Max m	C7 Mean m	C7 Max m	C10 Mean m	C10 Max m	C11 Mean m	C11 Max m	C14 Mean m	C14 Max m
Top-Grid 1	No. Significant Ridges		No. Significant Ridges		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Grid 1-Grid 2					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Grid 2-Grid 3					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Grid 3-Grid 4					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Grid 4-Grid 5					–	–	Trace	Trace	12	15	9	15	5	8	4	8
Grid 5-Grid 6					6	10	8	15	12	18	10	15	11	18	9	18
Grid 6-Grid 7					10	18	13	20	13	20	12	20	13	18	12	20
Grid 7-Grid 8					12	20	13	17	15	23	10	20	12	18	12	23
Grid 8-Grid 9					12	23	13	23	17	28	15	23	17	28	12	20
Grid 9-Grid 10					12	20	17	25	9	13	17	28	16	28	13	25
Grid 10-Grid 11					8	13	11	20	–	–	9	13	8	15	5	8
Grid 11-Bottom					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

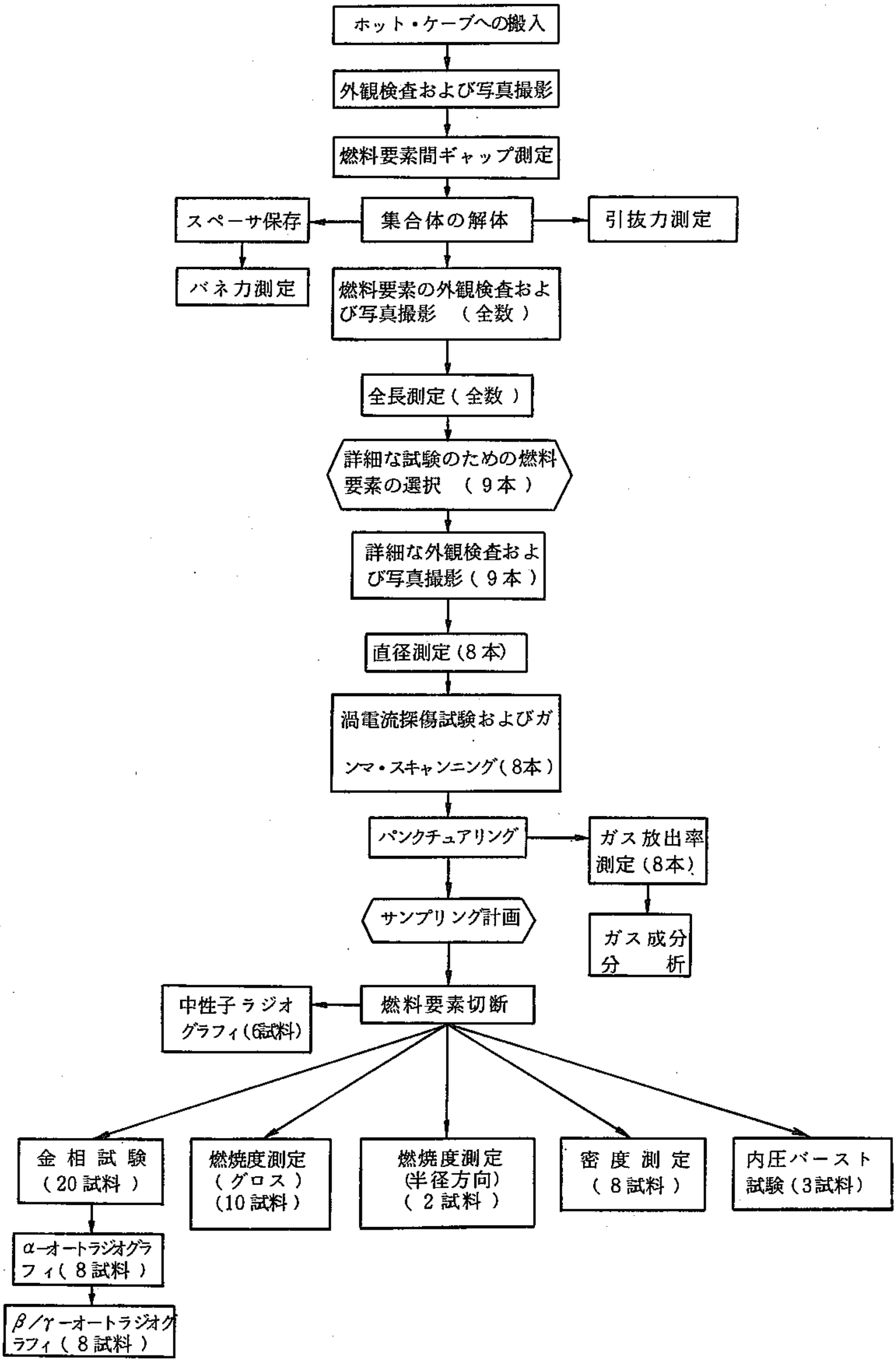


Fig.3-1 照射後試験のフロー

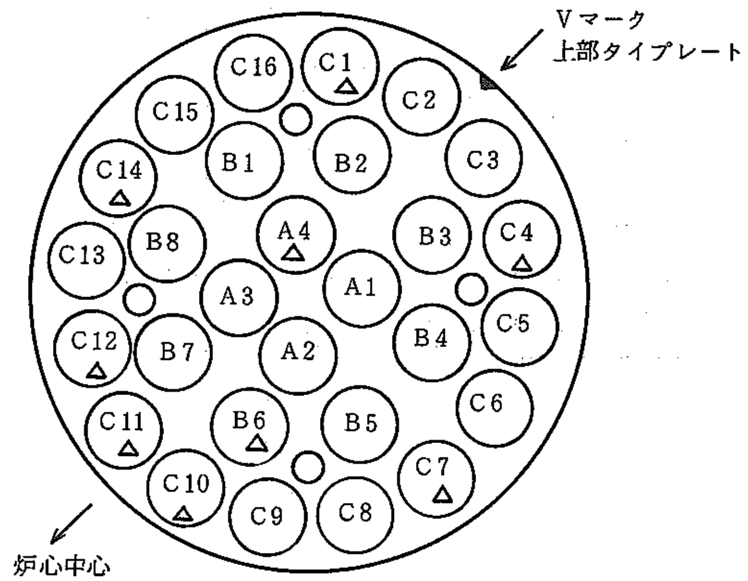


Fig.3-2　選択した燃料要素の集合体内位置（△印で示す）

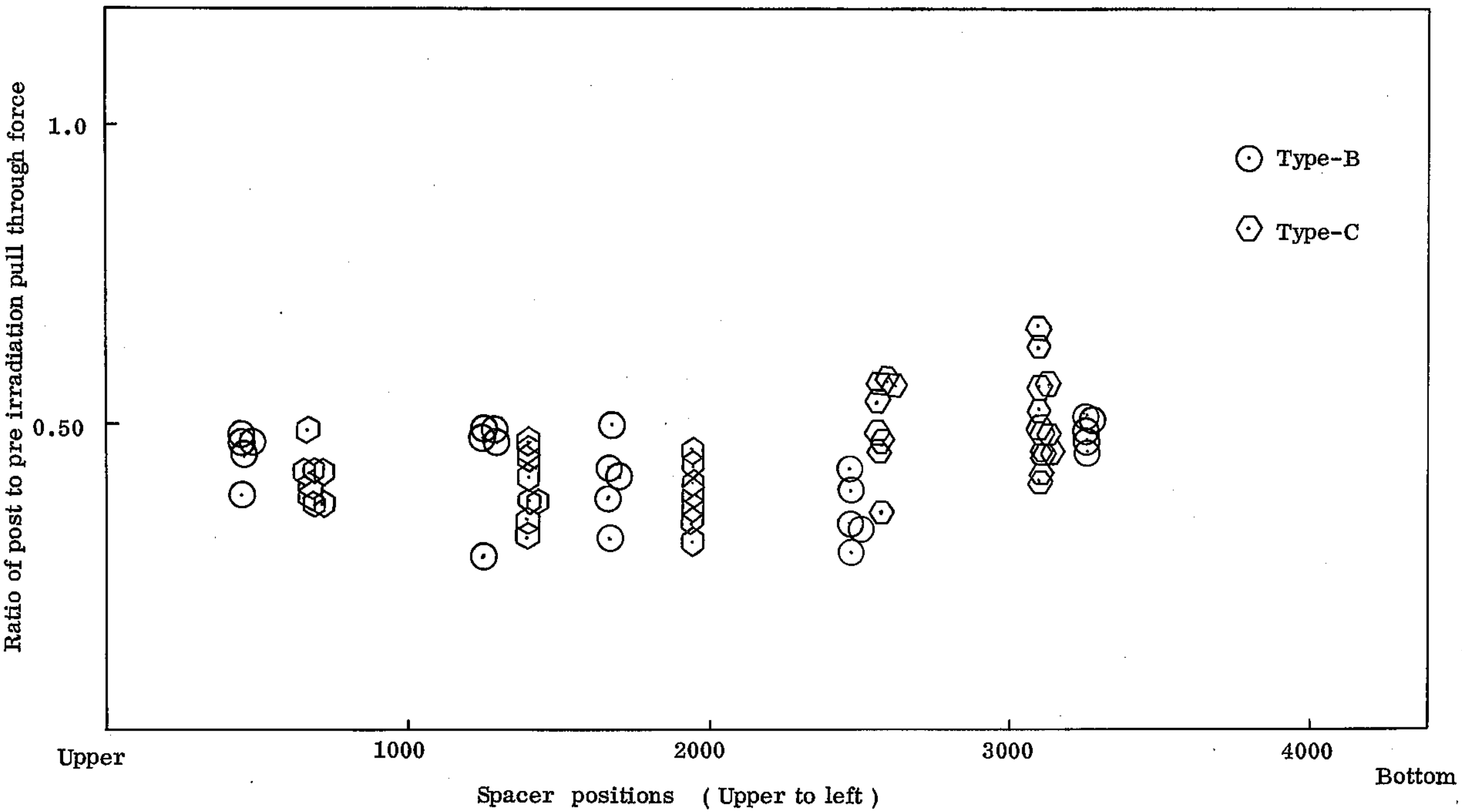


Fig.3.1-1 Relaxation of spacer spring by irradiation (SGHWR Type-B, Type-C)

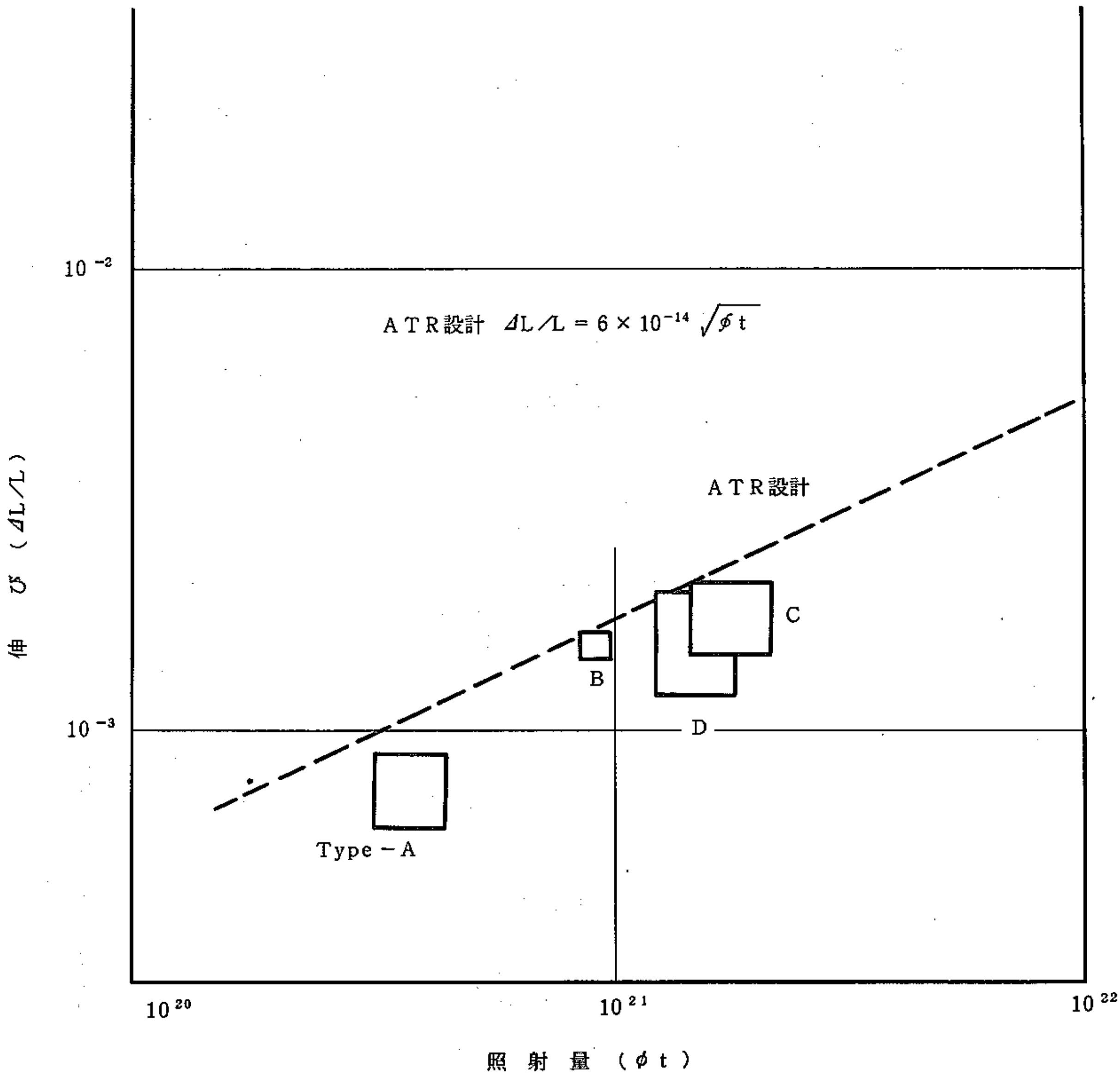


Fig.3.1-2 燃料要素の伸び

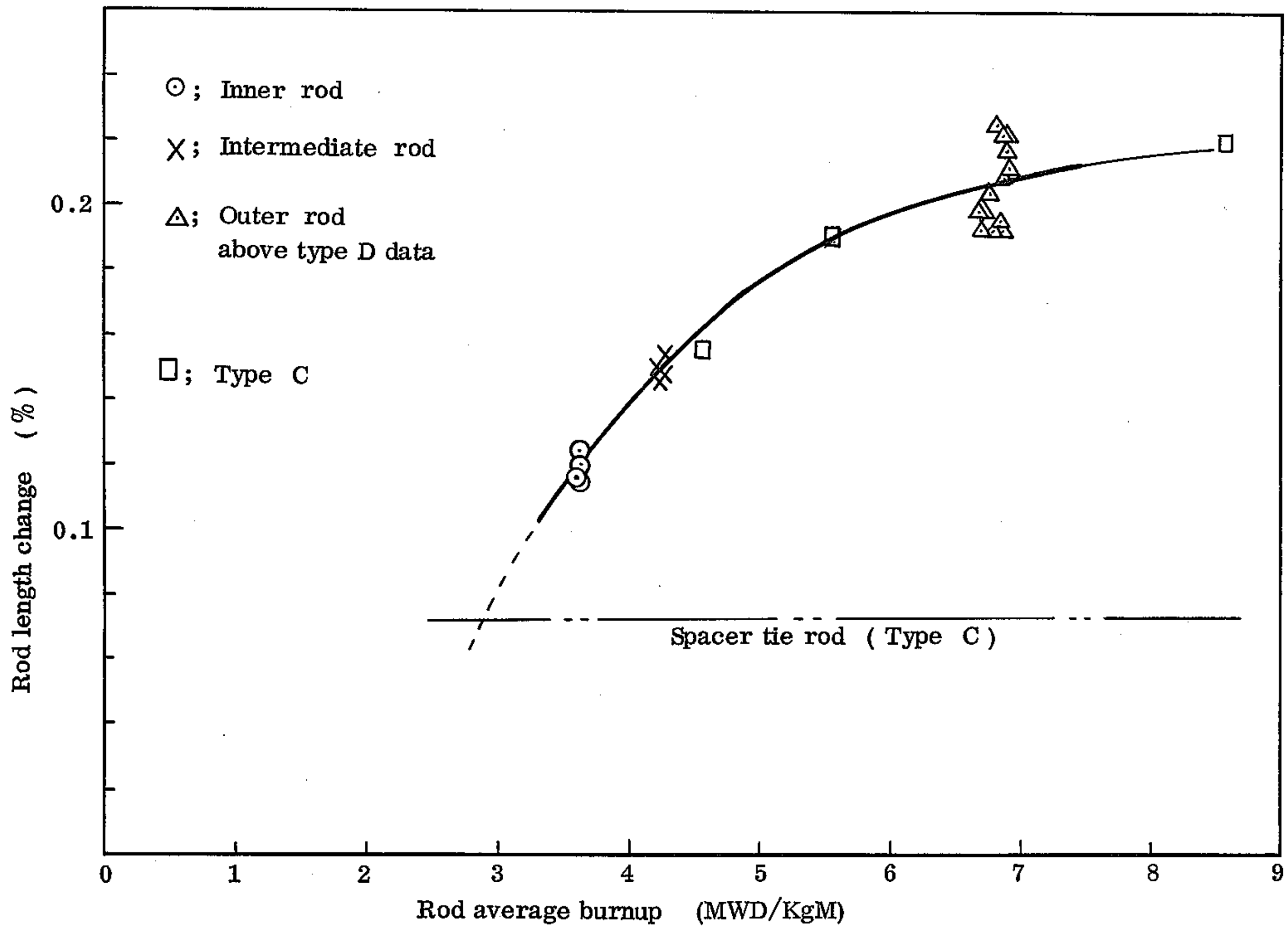


Fig.3.1-3 Rod length change vs rod ave. burnup

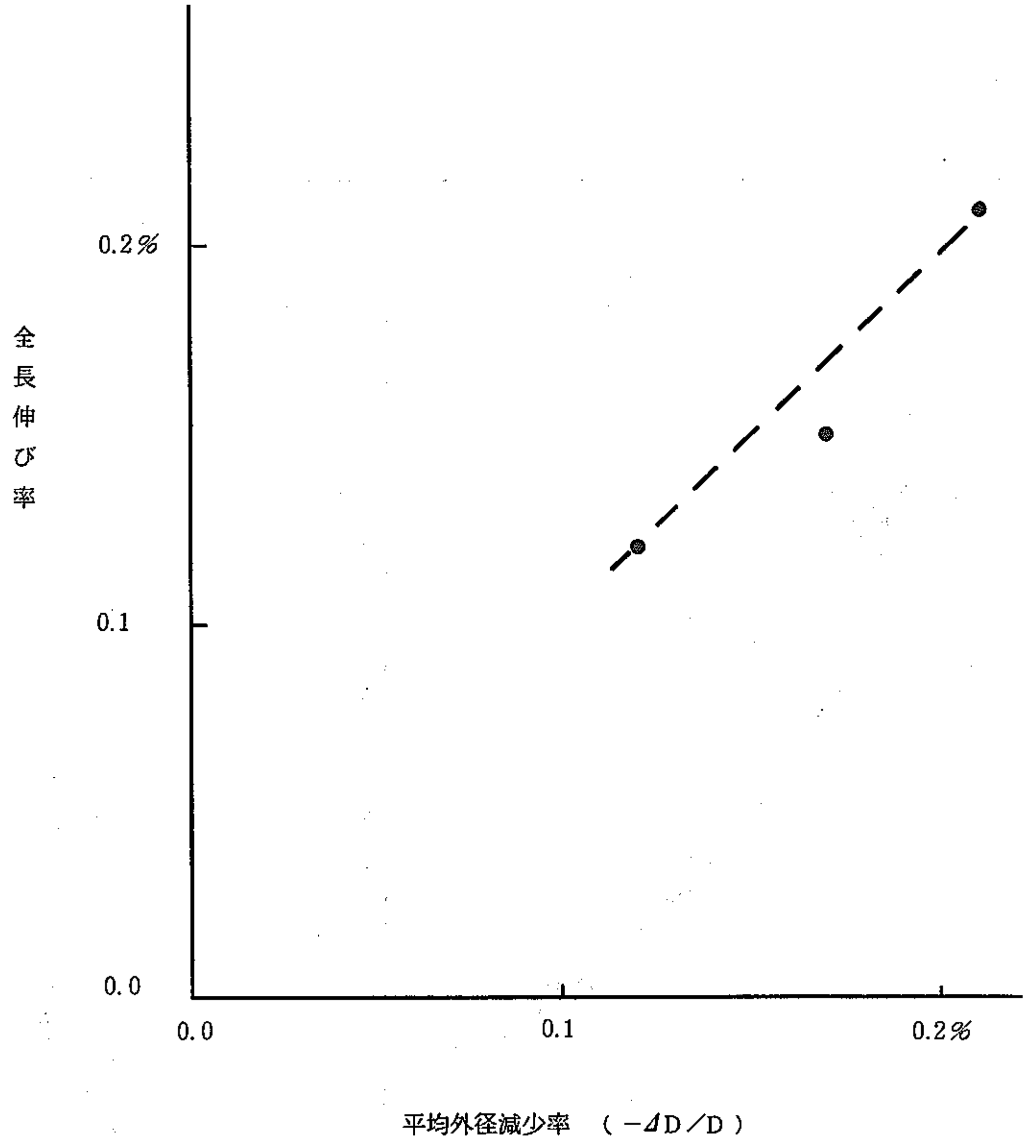


Fig.3.1-4 燃料要素の平均外径減少と全長伸び（タイプD）

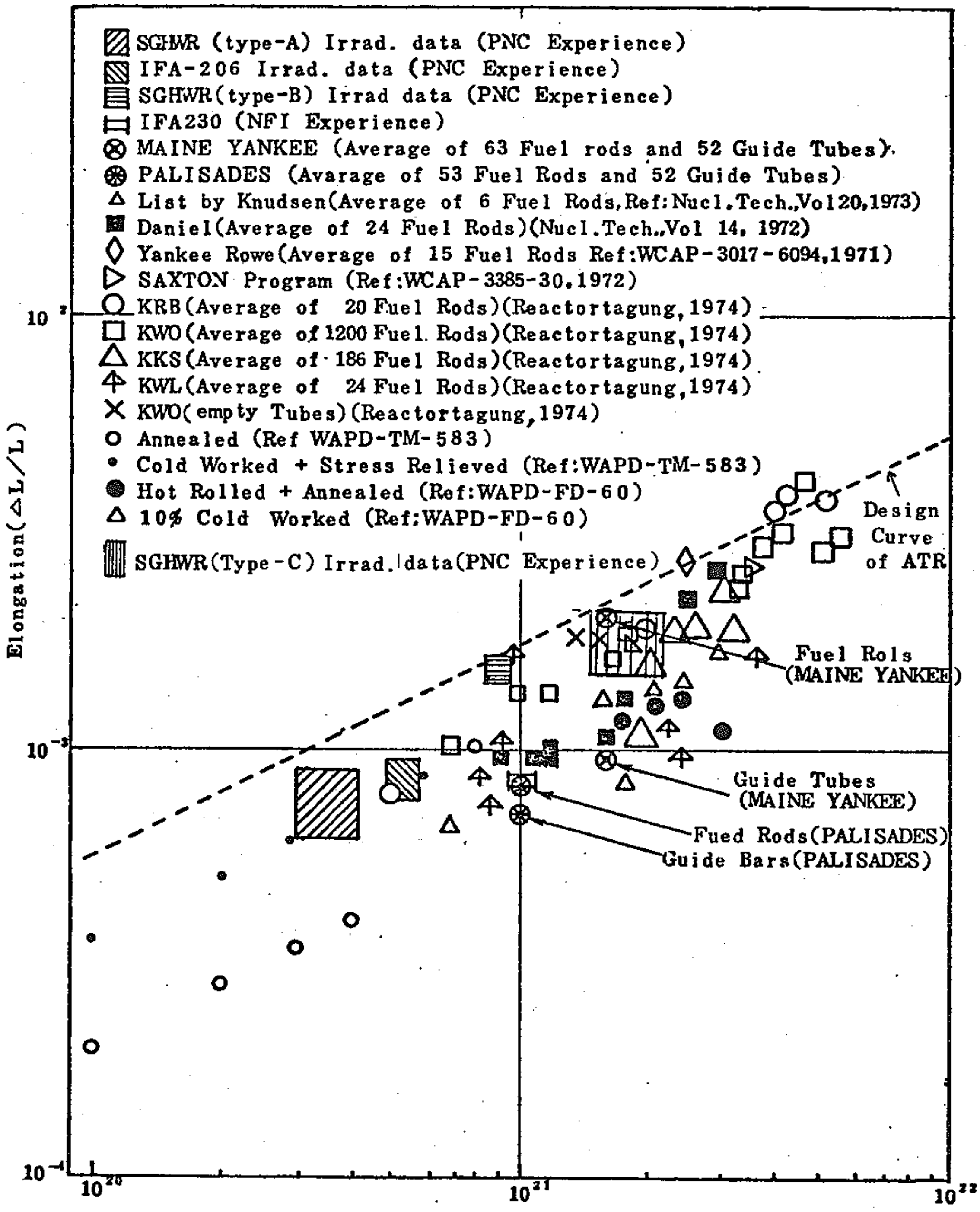


Fig.3.1-5 Elongation of water reactor

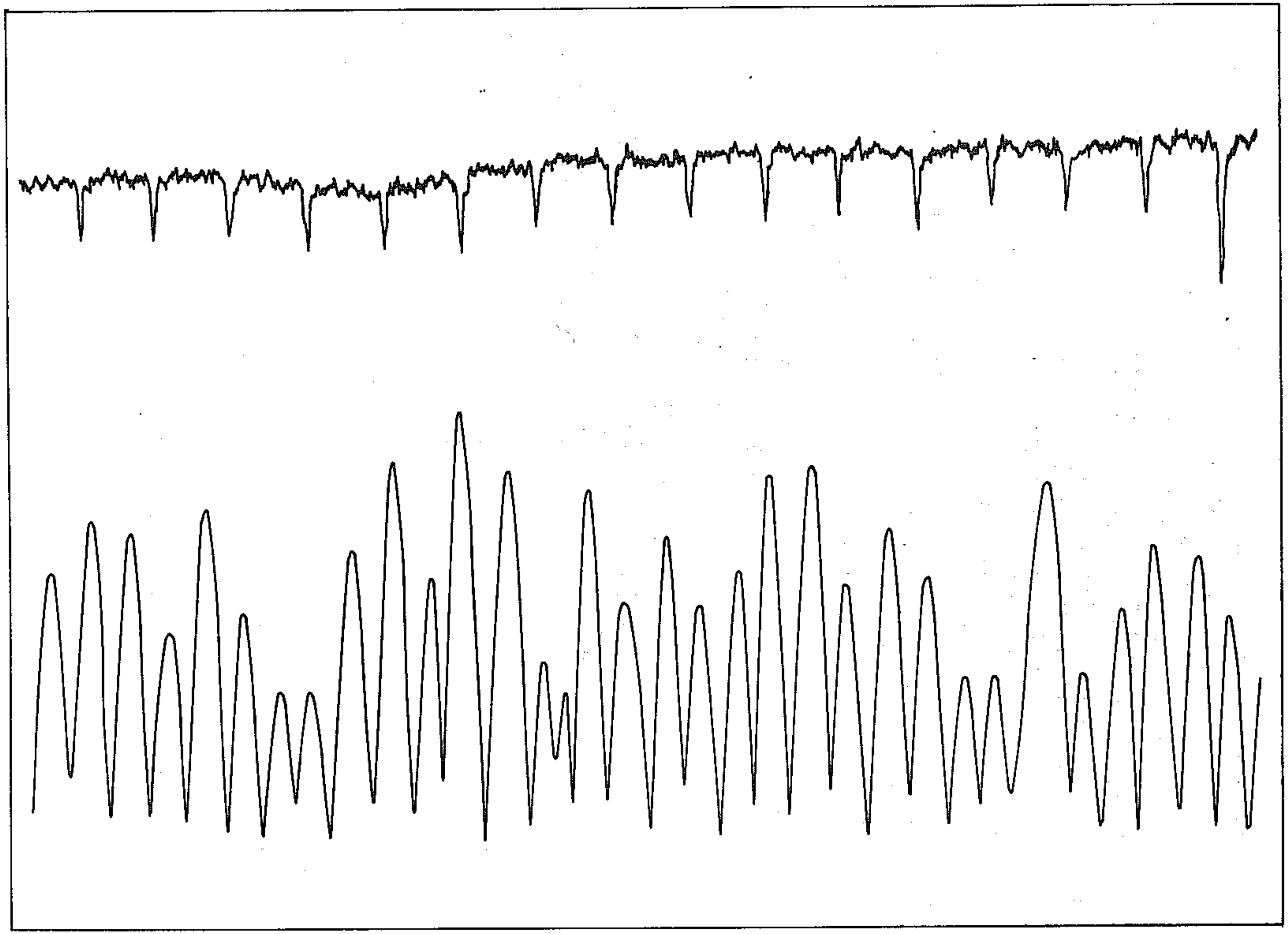


Fig.3.1-6 ECT and gamma scan chart (Pin No.C10, Intermediate region)

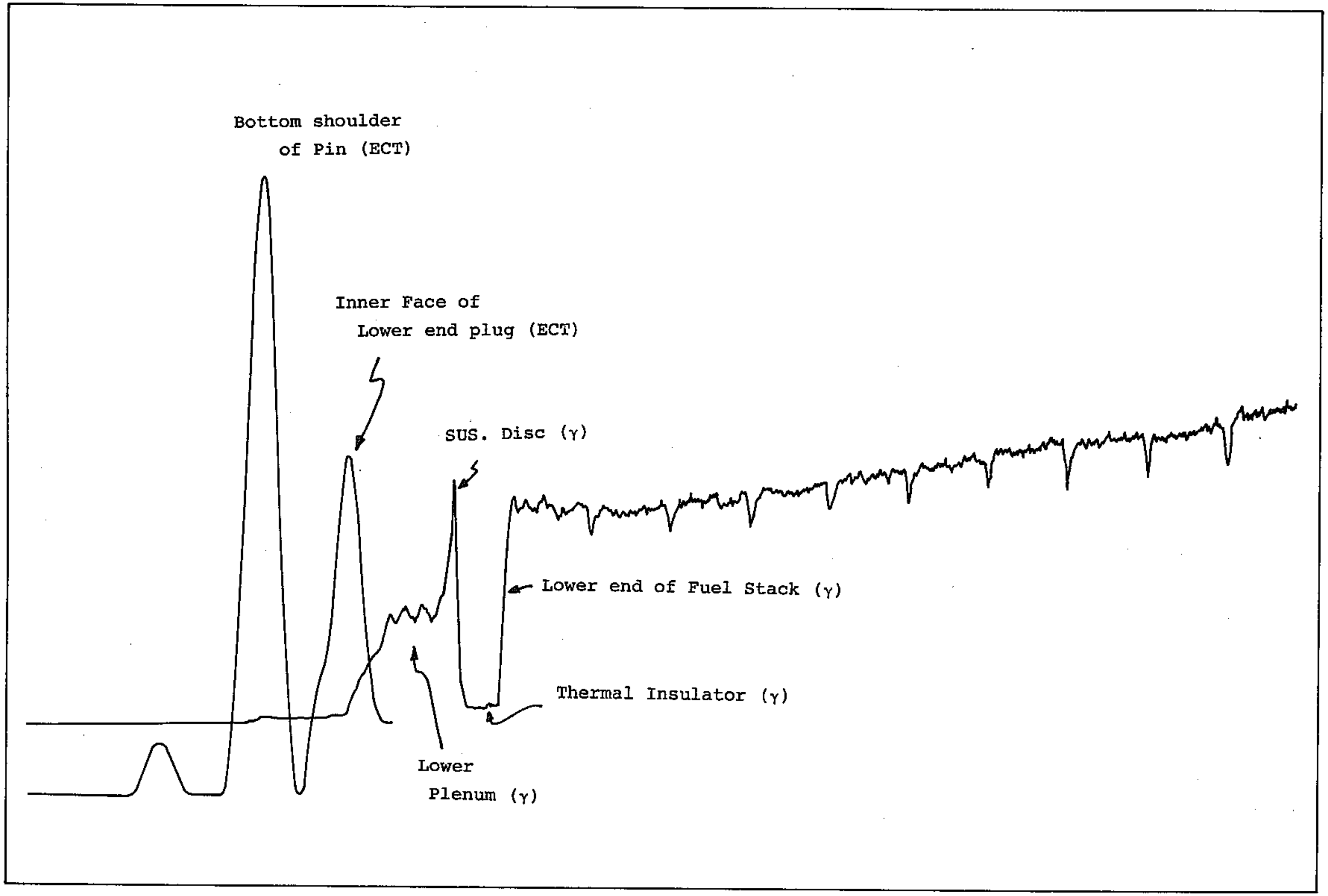


Fig.3.1-7 ECT and gamma scan chart (Pin No.C10, Lower end plug region)

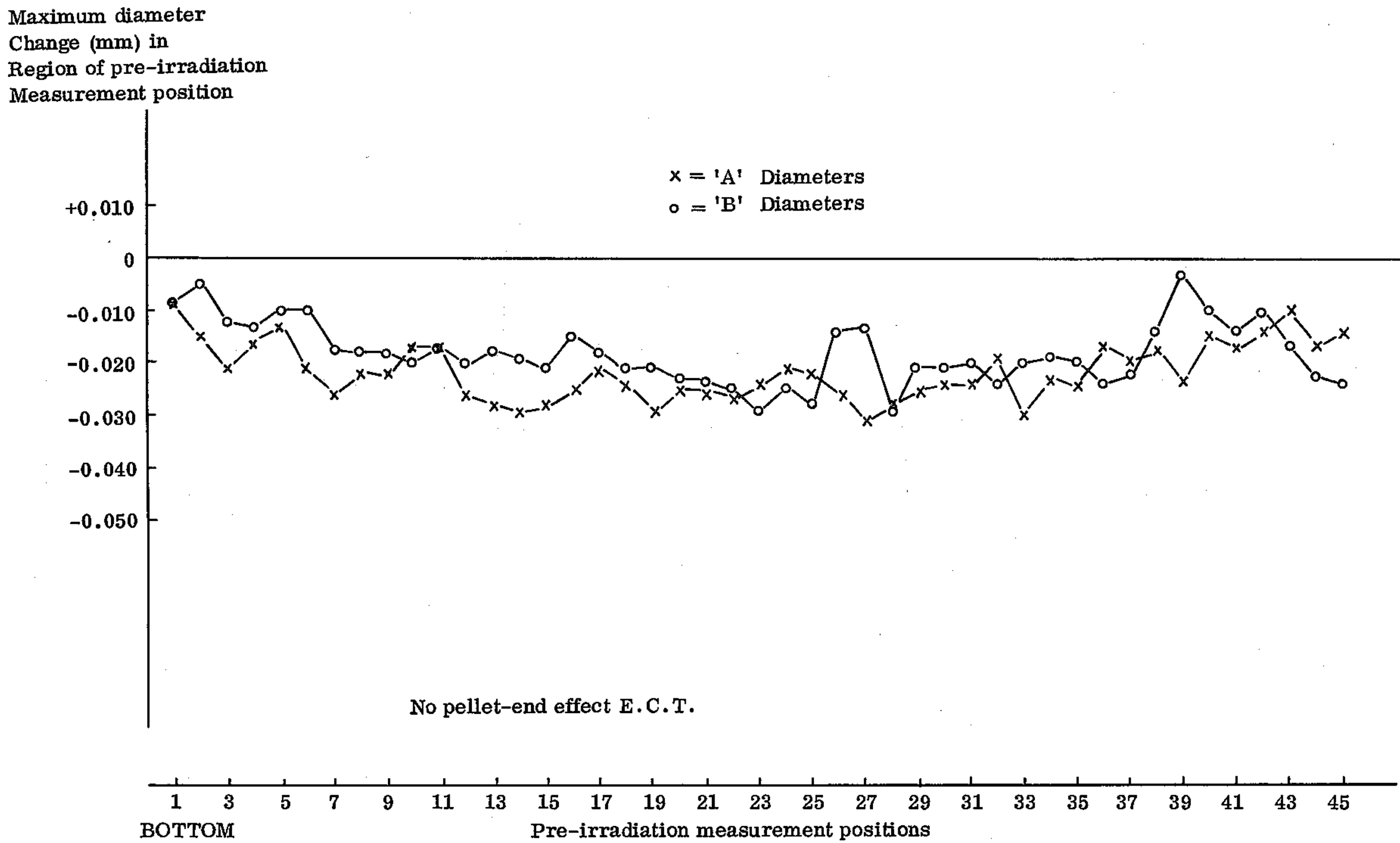


Fig.3.1-8 Pin diameter change Pin A4 (inner ring)

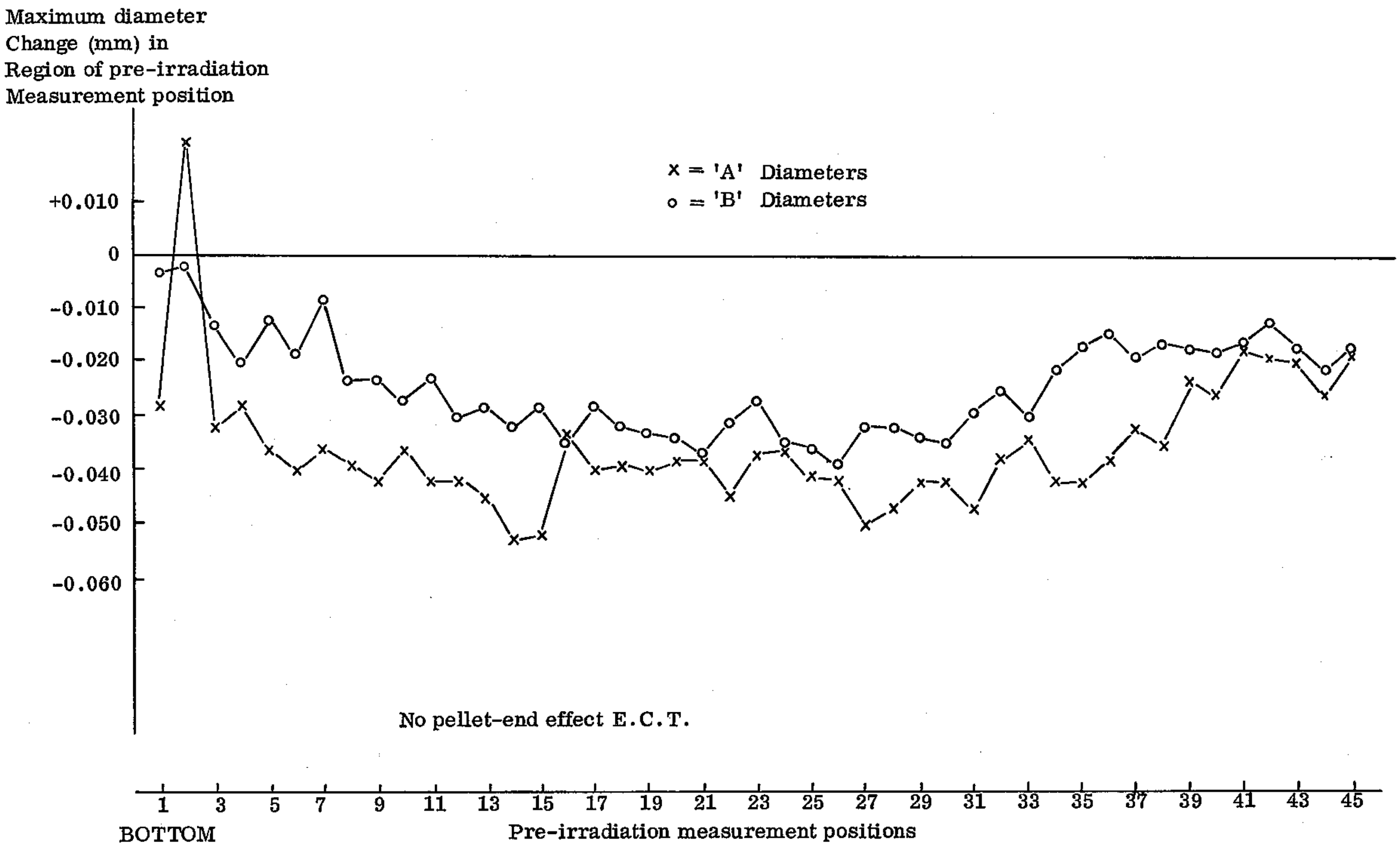


Fig.3.1-9 Pin diameter changes Pin B6 (Intermediate ring)

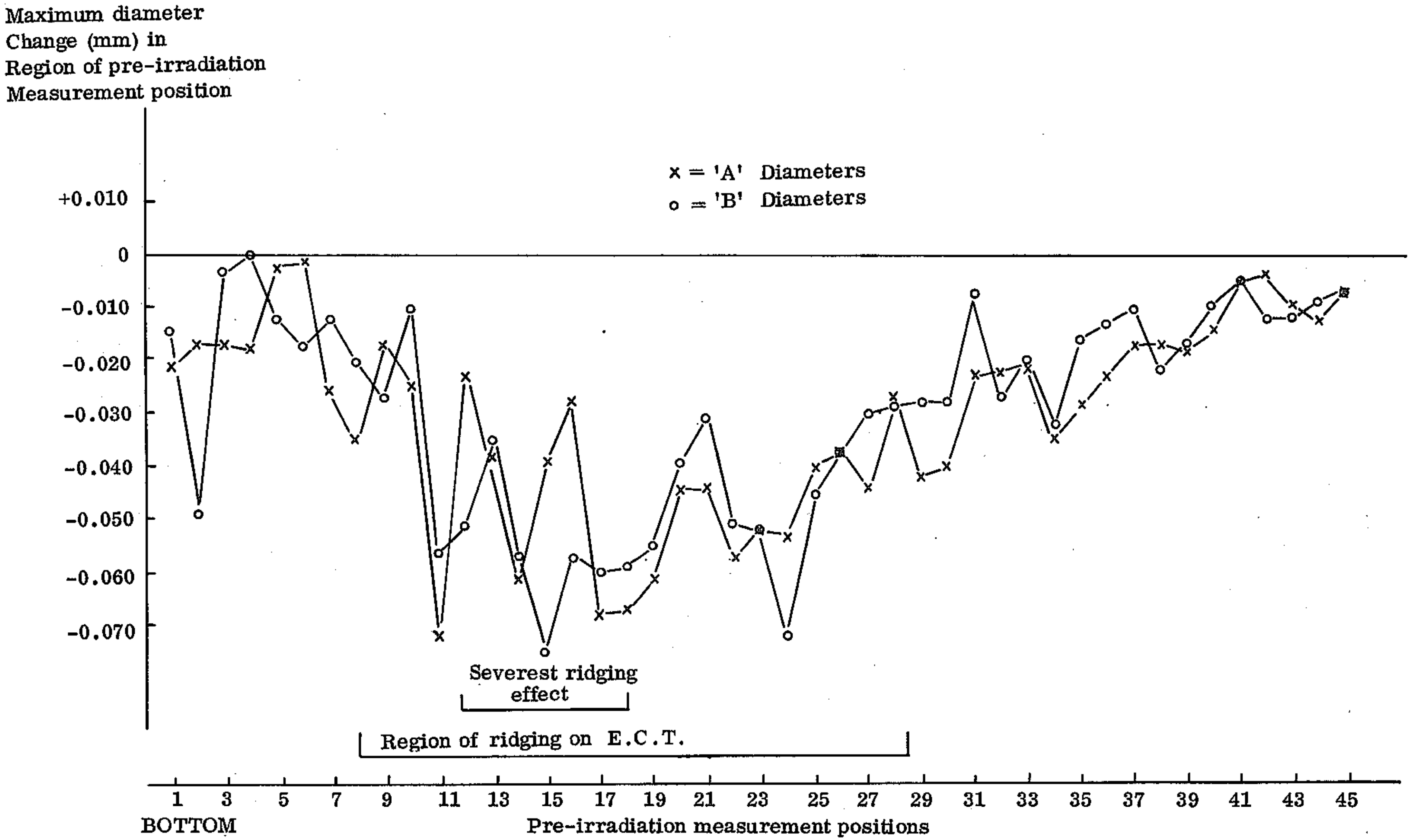


Fig.3.1-10 Pin diameter changes Pin C1 (Outer ring)

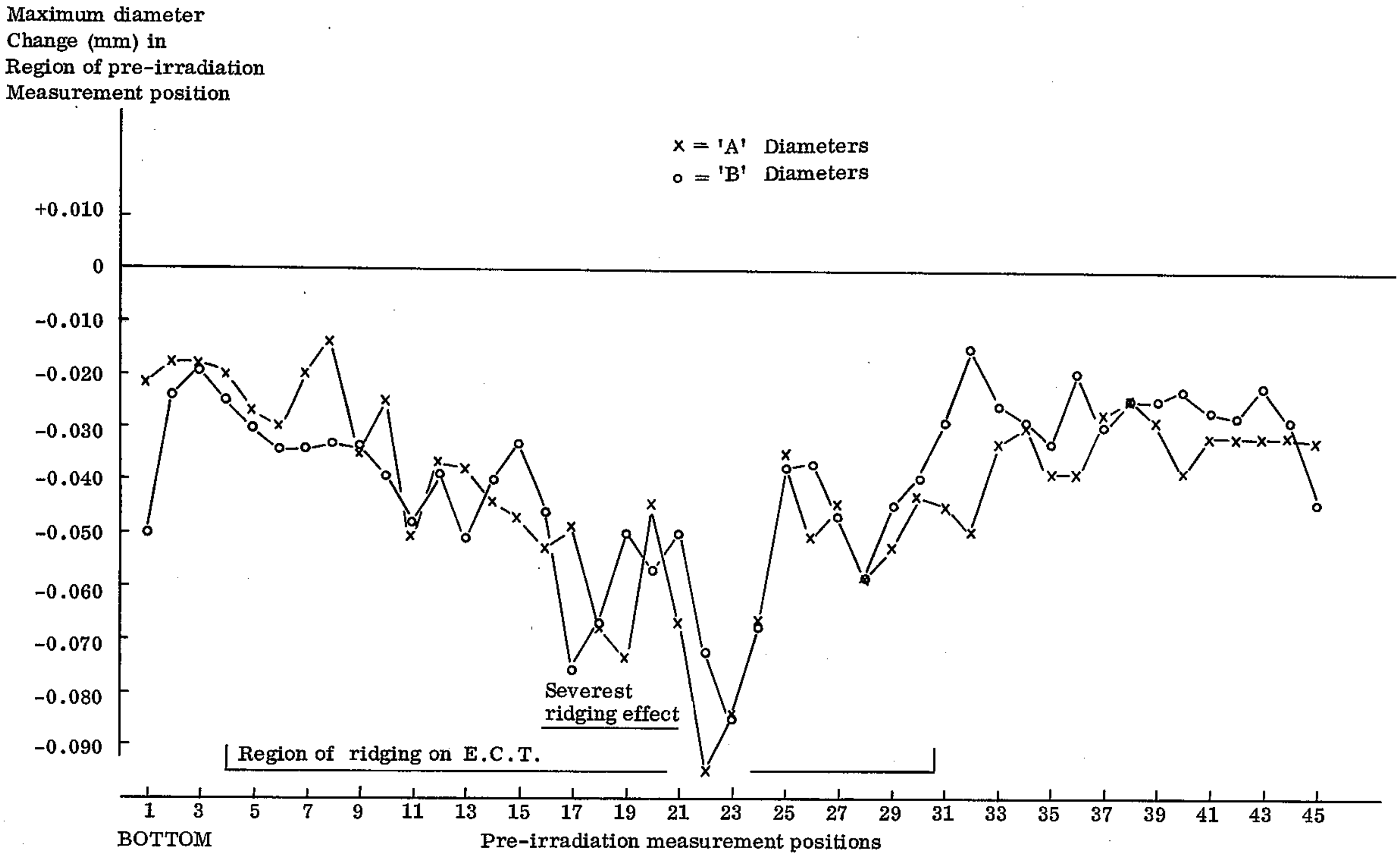


Fig.3.1-11 Pin diameter changes Pin C4 (Outer ring)

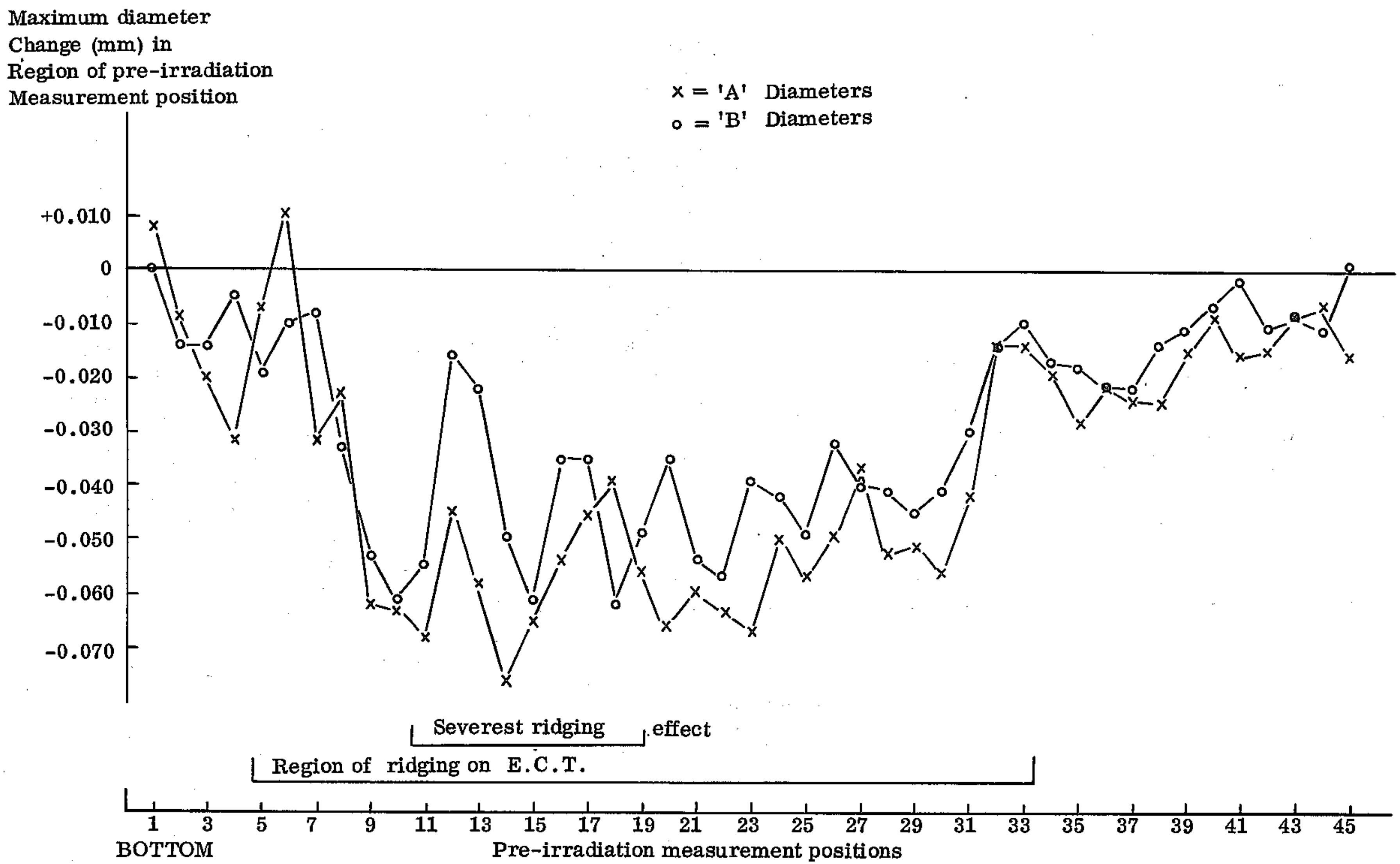


Fig.3.1-12 Pin diameter changes Pin C7 (Outer ring)

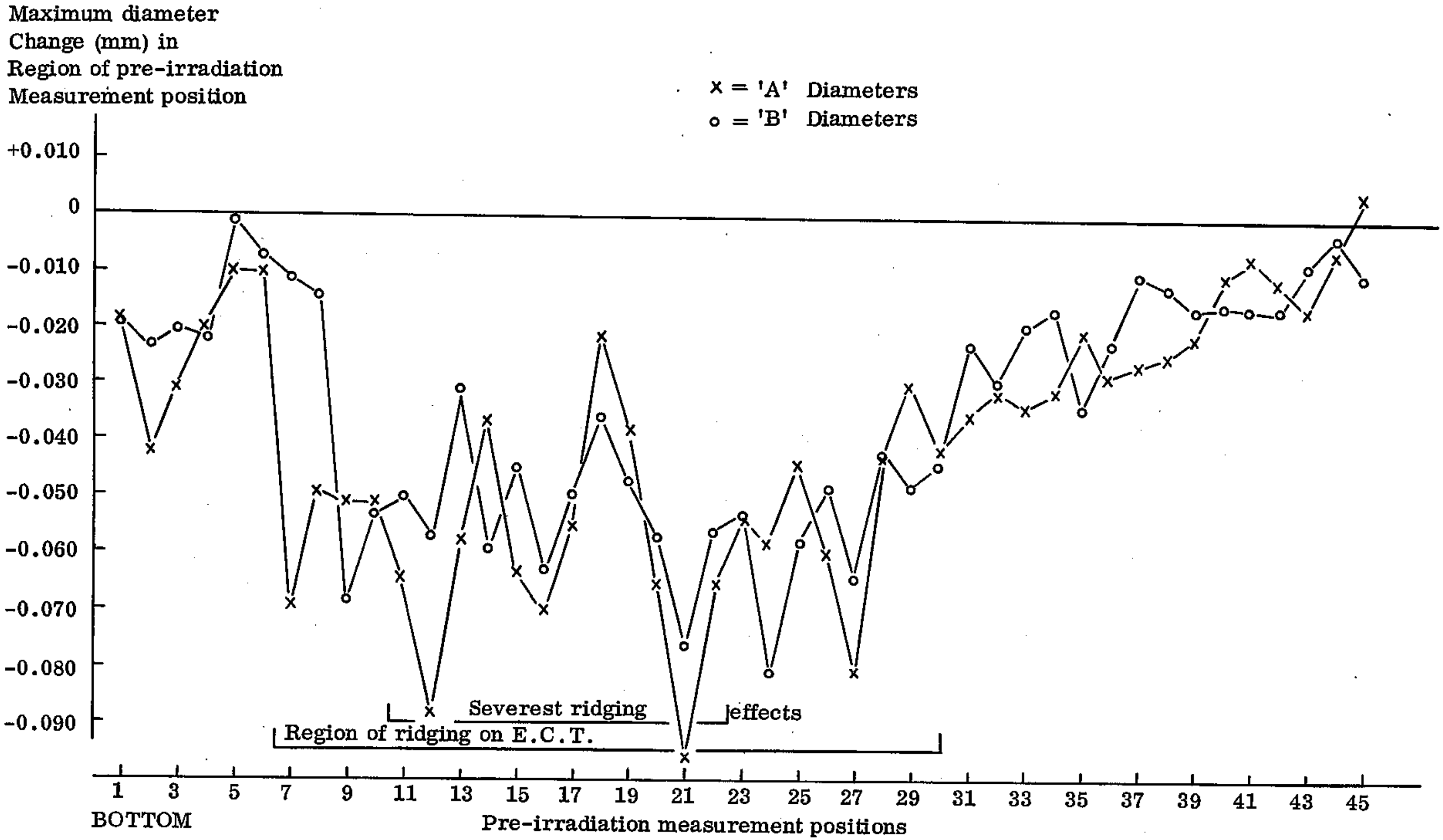


Fig.3.1-13 Pin diameter changes Pin C10 (Outer ring)

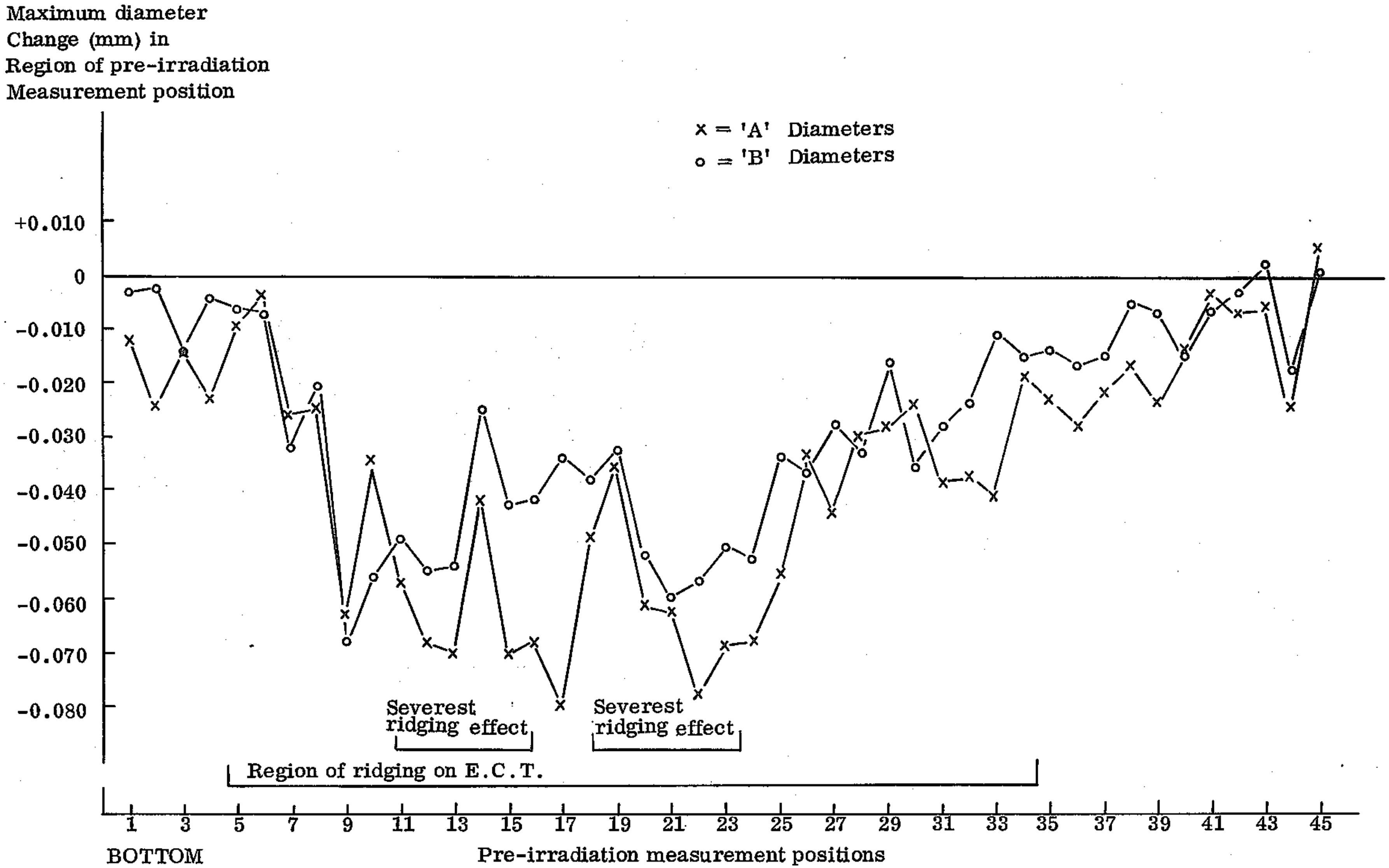


Fig.3.1-14 Pin diameter change Pin C11 (Outer ring)

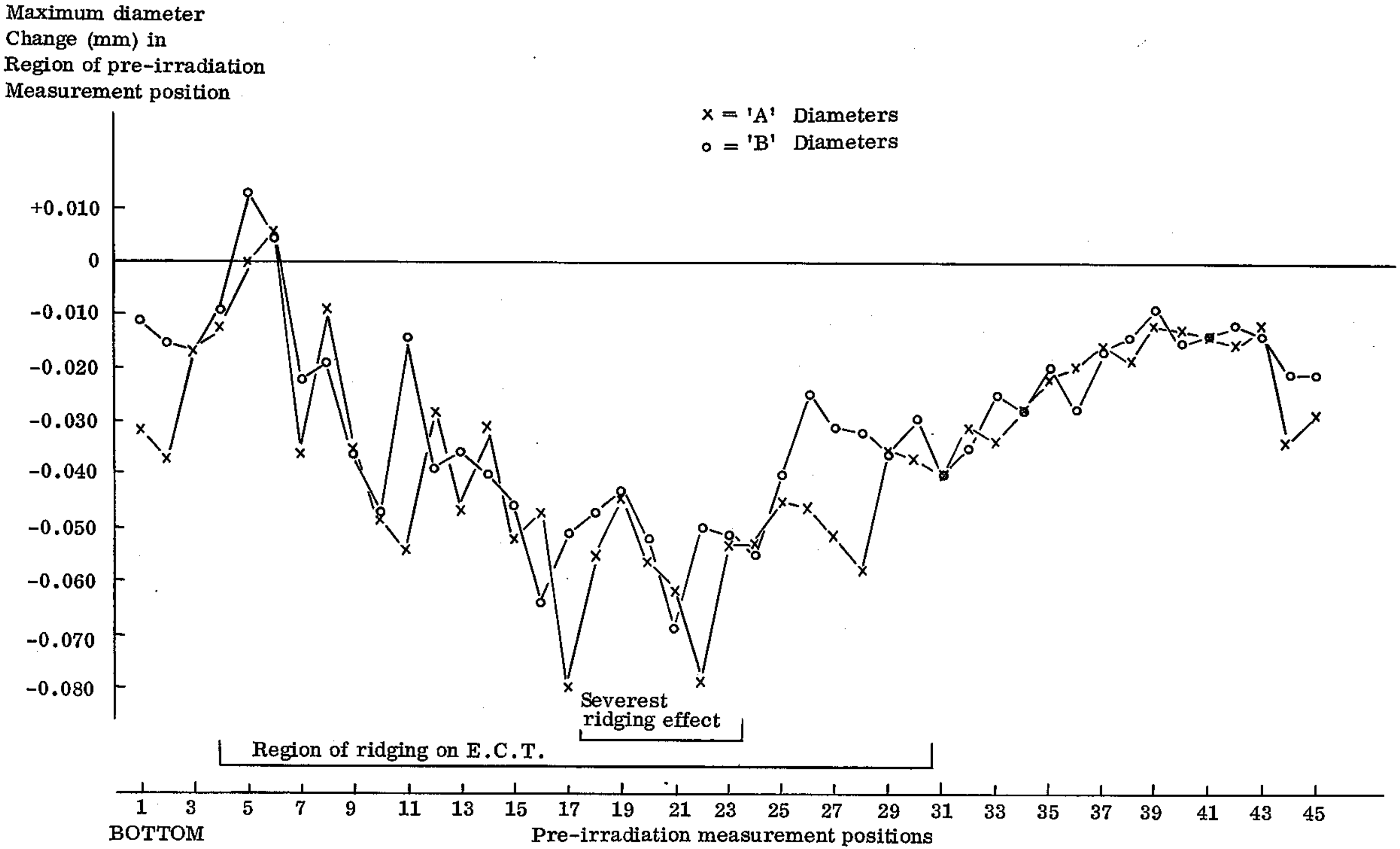


Fig.3.1-15 Pin diameter changes Pin C14 (Outer ring)

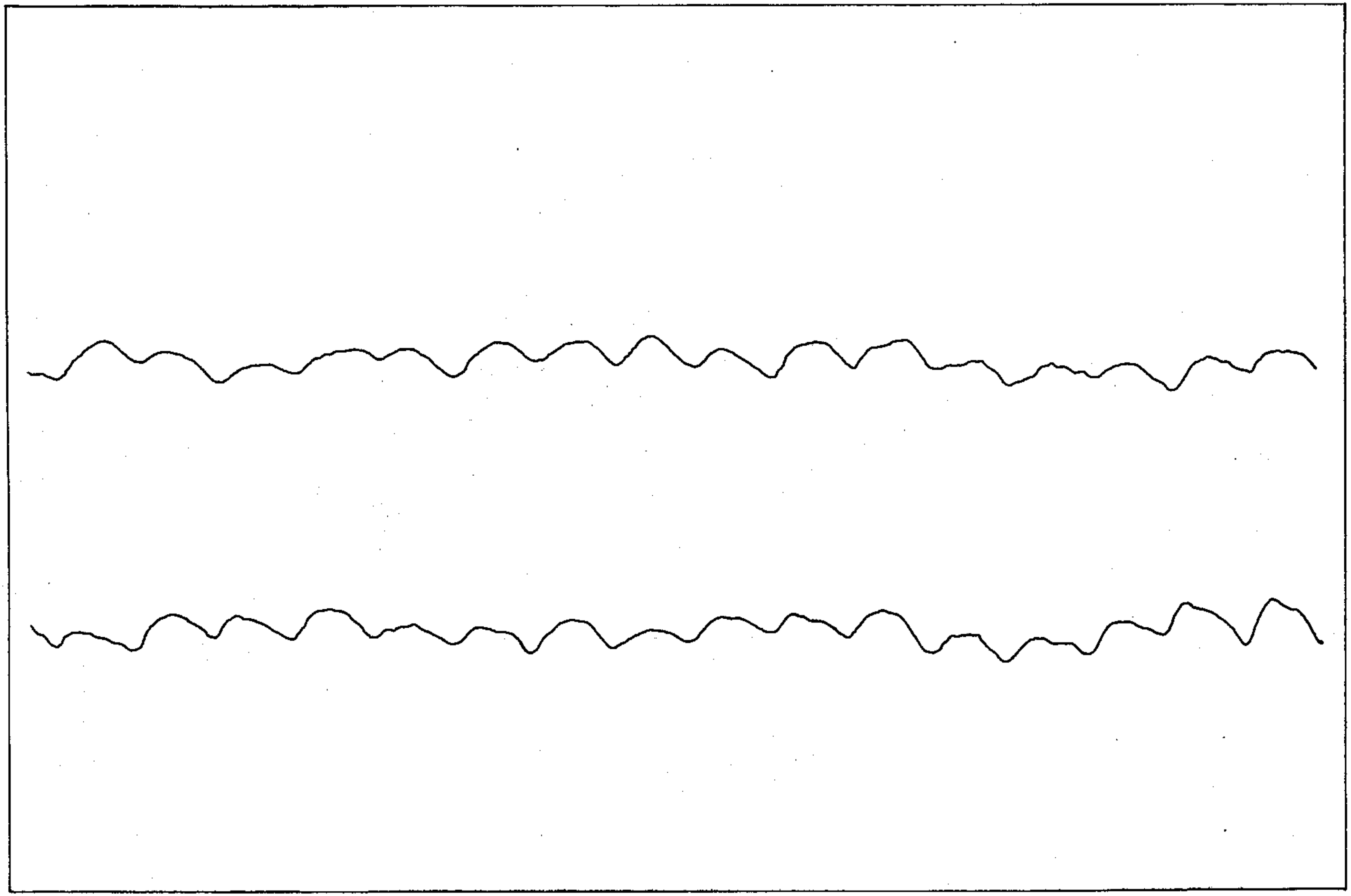
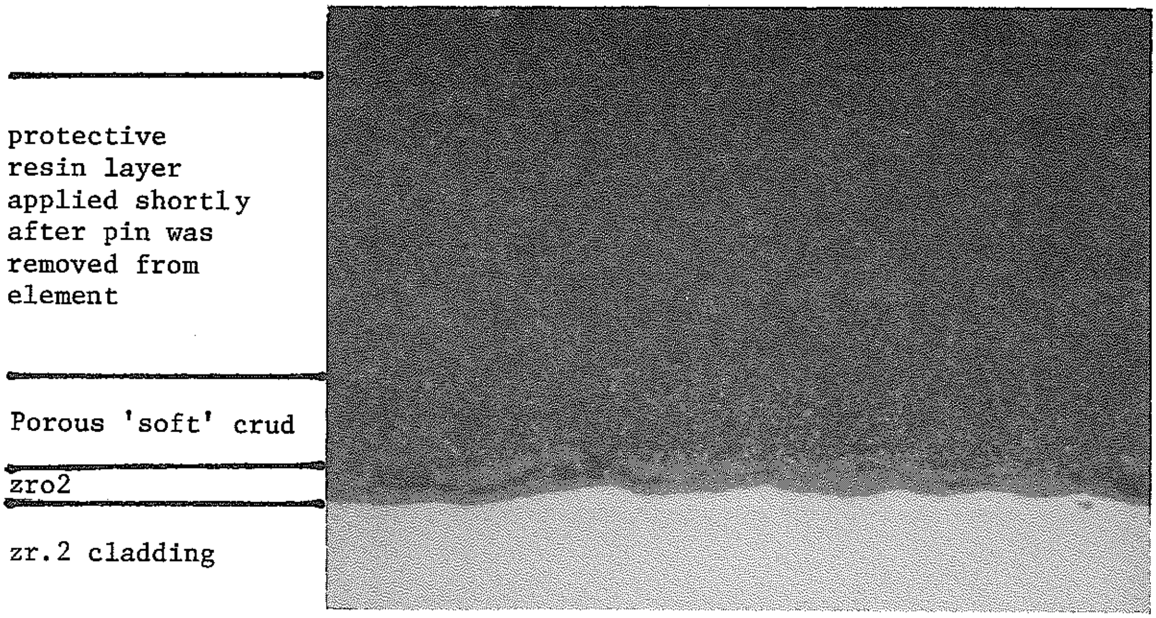
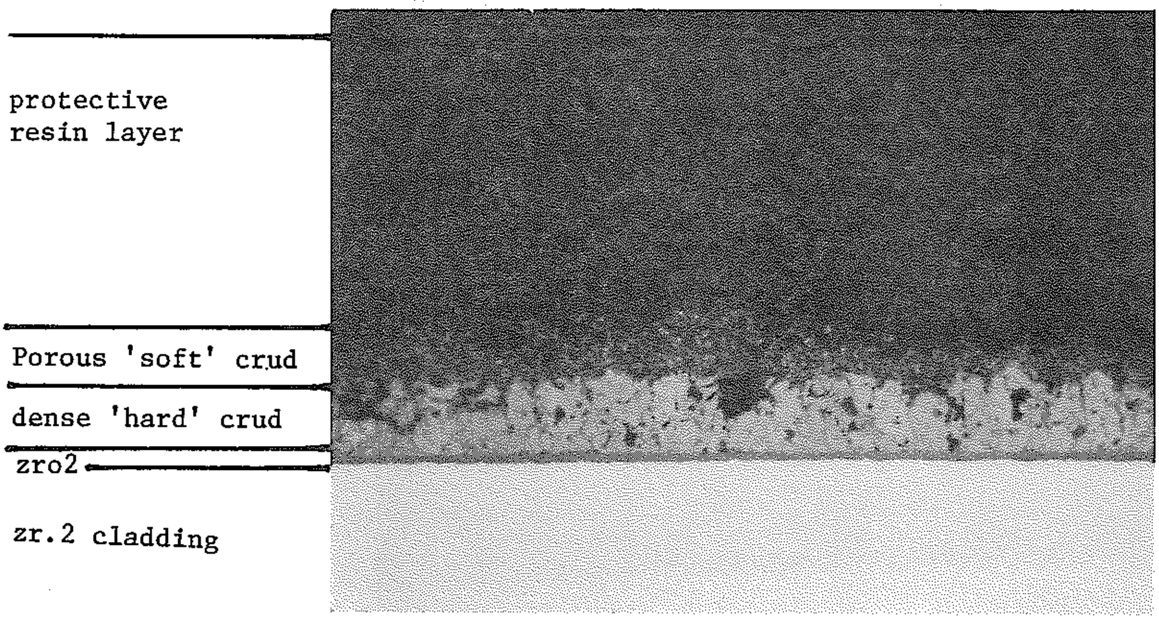


Fig.3.1-16 Chart of pin diameter measurement (Pin No. C10, Intermediate region)

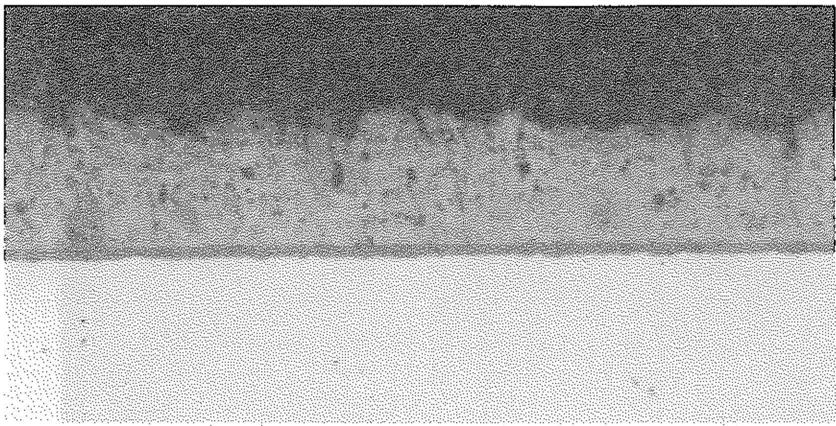


1927(T) a) pin c12 near to grid 6 x500



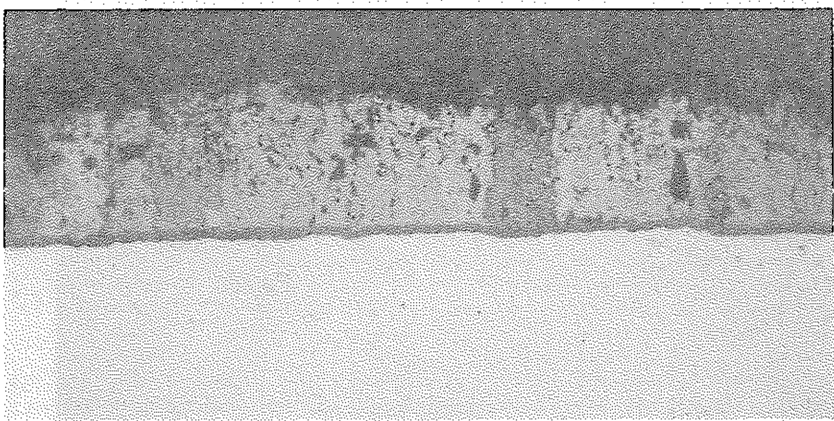
1927(T) b) pin C12 near to grid 6 x500

Photo 3.1-1 Pin C12 crud deposits seen on the resion-protected region



Pin C4
between grids 9 and 10

1924(T) dense, adherent hard crud layer x700



Pin C11
between grids 10 and 11

1935(T) less dense, adherent hard crud layer x500

Pin C11
between grids 10 and 11

1935(T) porous, spalling hard crud layer x500

Photo 3.1-2 Types of crud deposits found on pins

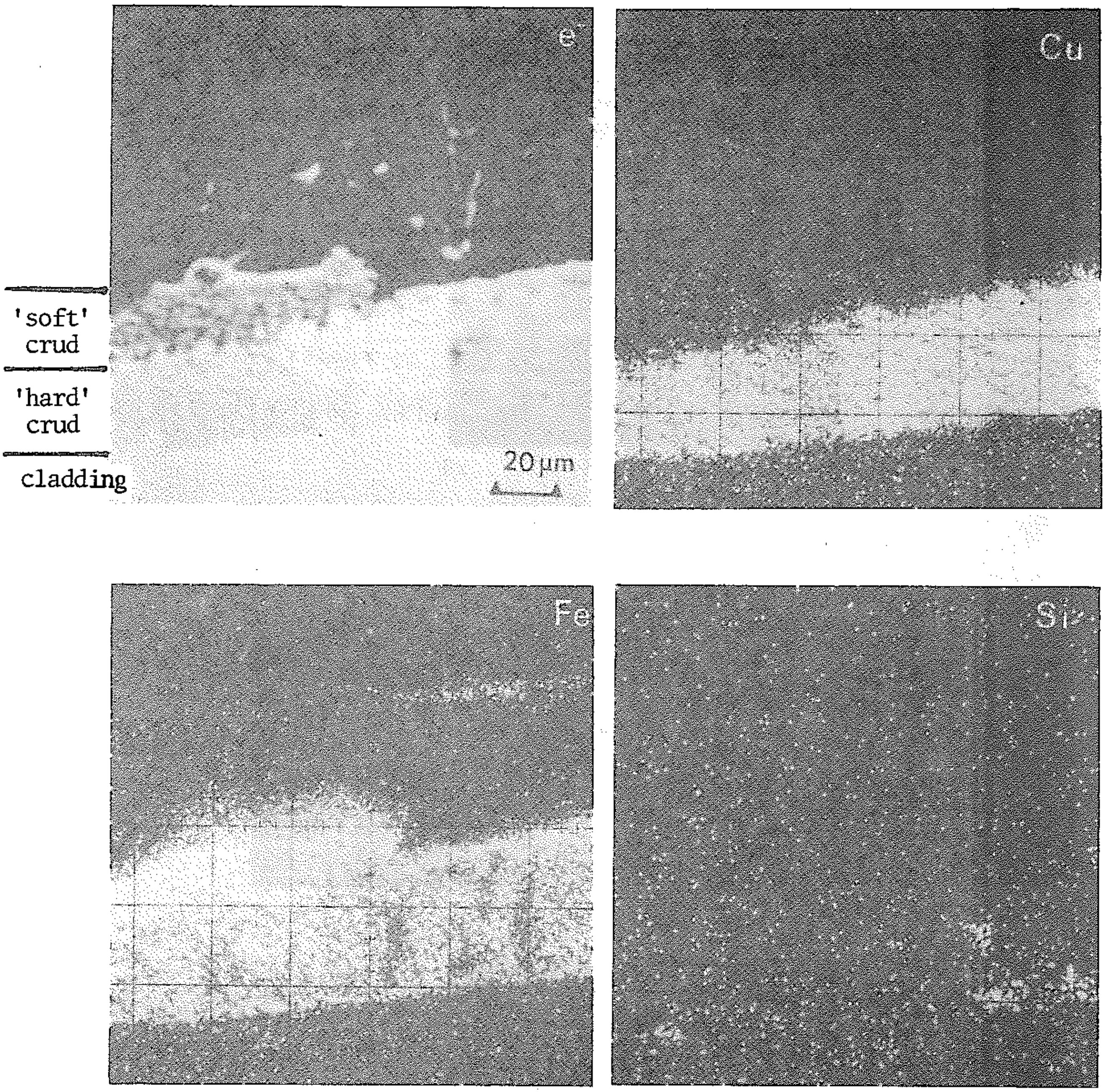
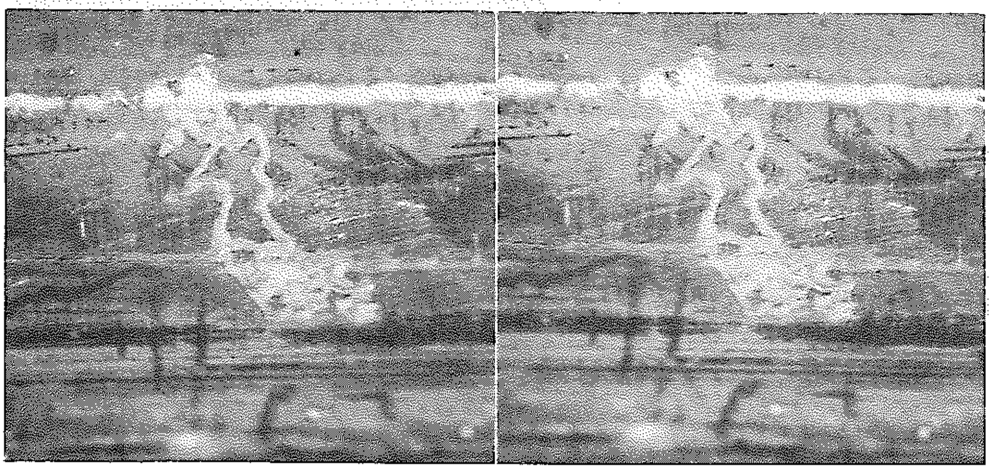


Photo 3.1-3 Pin C12 section from microspecimen 1927. Eectron picture and elemental distributions of Cu,Fe and Si in double layered crud

a) Pin C10. crid 1.
spring contact (arrowed)

(microspecimen "1937" was taken through this contact)

x3



b) Pin C10.
crid 1.

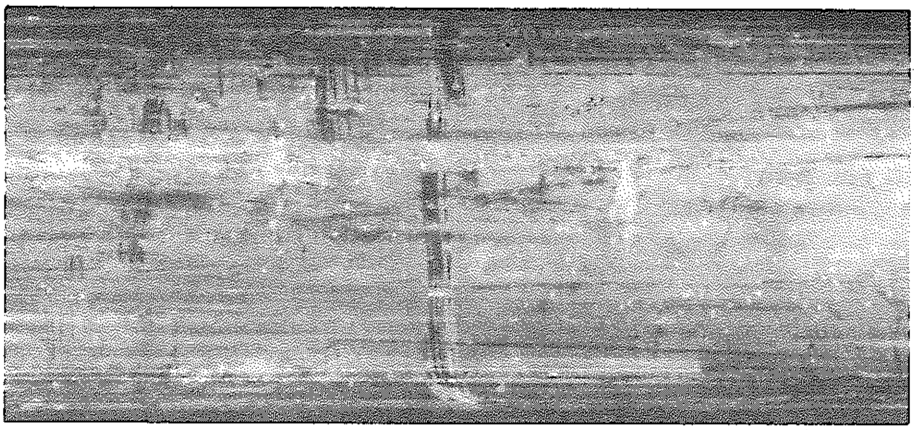
spring contact

stereo pair
(20=11^{0})

c) Pin C10. grid 1.
dimple contacts (arrowed)

x3

Photo 3.1-4   Pin C10. Fretting investigation - grid 1.

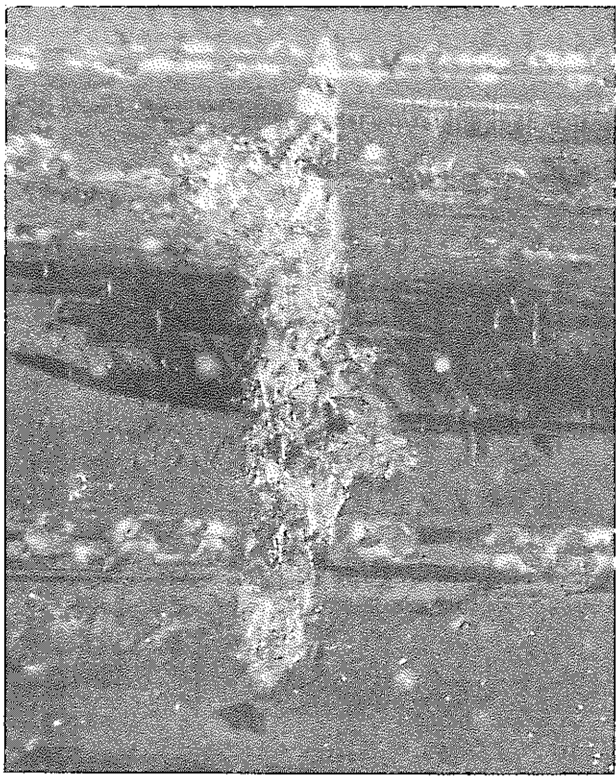


a) Pin B6. grid 11.
2 dimple contacts (arrowed) x3

b) Pin B6. grid 11.
2 dimple contacts (arrowed) x3

Photo 3.1-5 Pin B6. Fretting investigation-grid 11. (continue)

c) Pin B6. grid 11.
spring contact (arrowed) x3



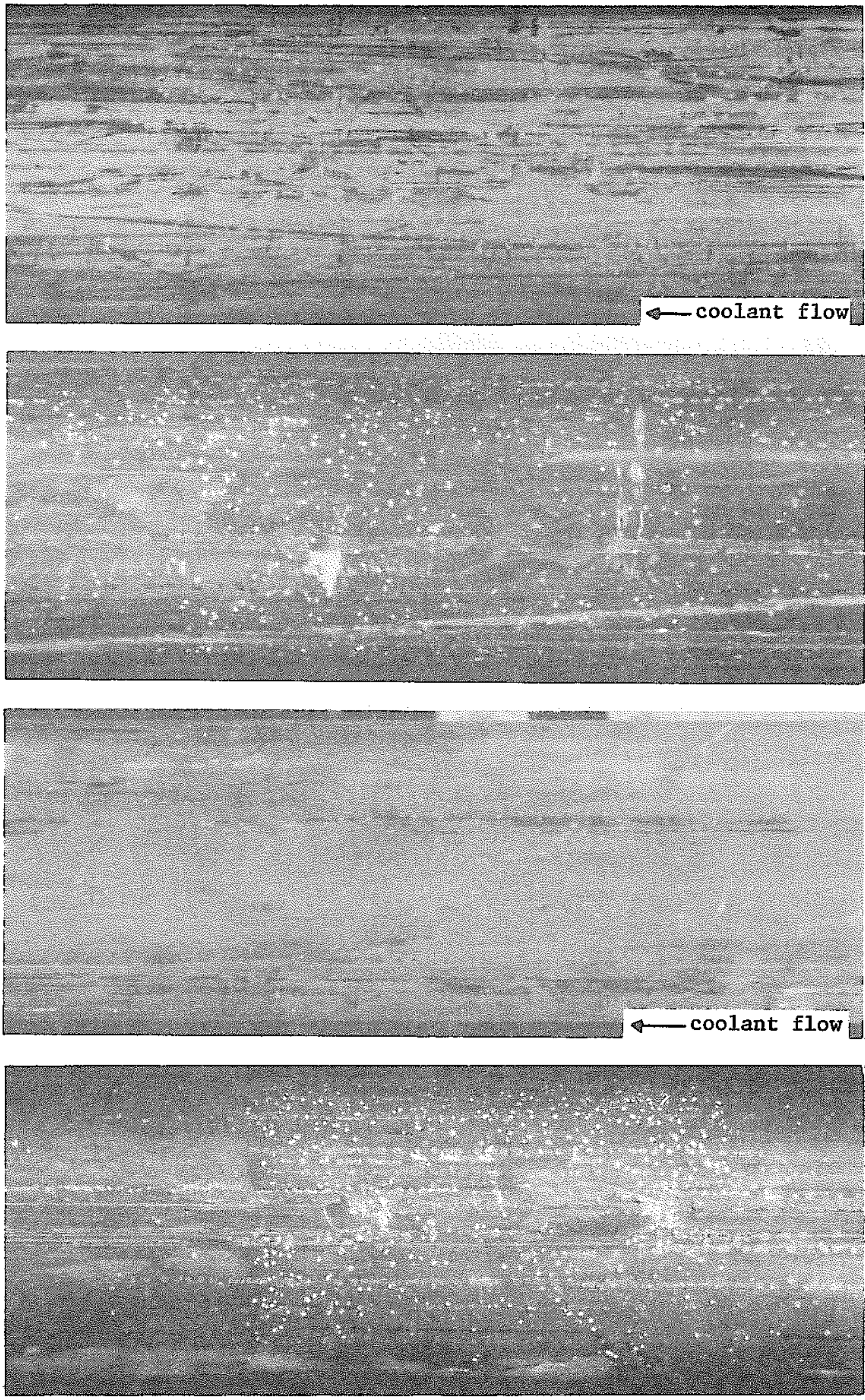
←nodular oxide on pre-irradiation scratch

d) Pin B6 grid 11.
sppring contact

(microspecimen 'X42'
was taken through this contact)

x20

Photo 3.1-5 Pin B6. Fretting investigation-grid 11.



a) Pin A4. x3

b) Pin B6. x3

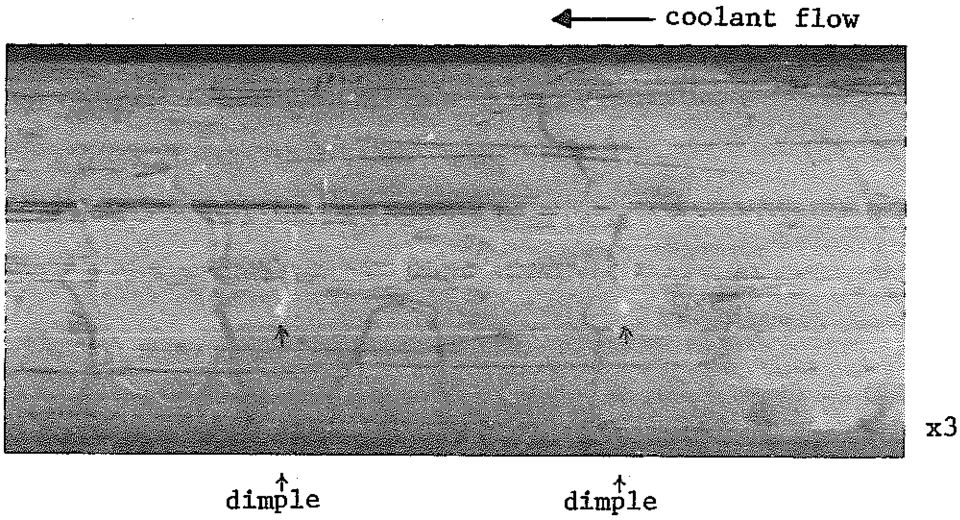
c) Pin C4. x3

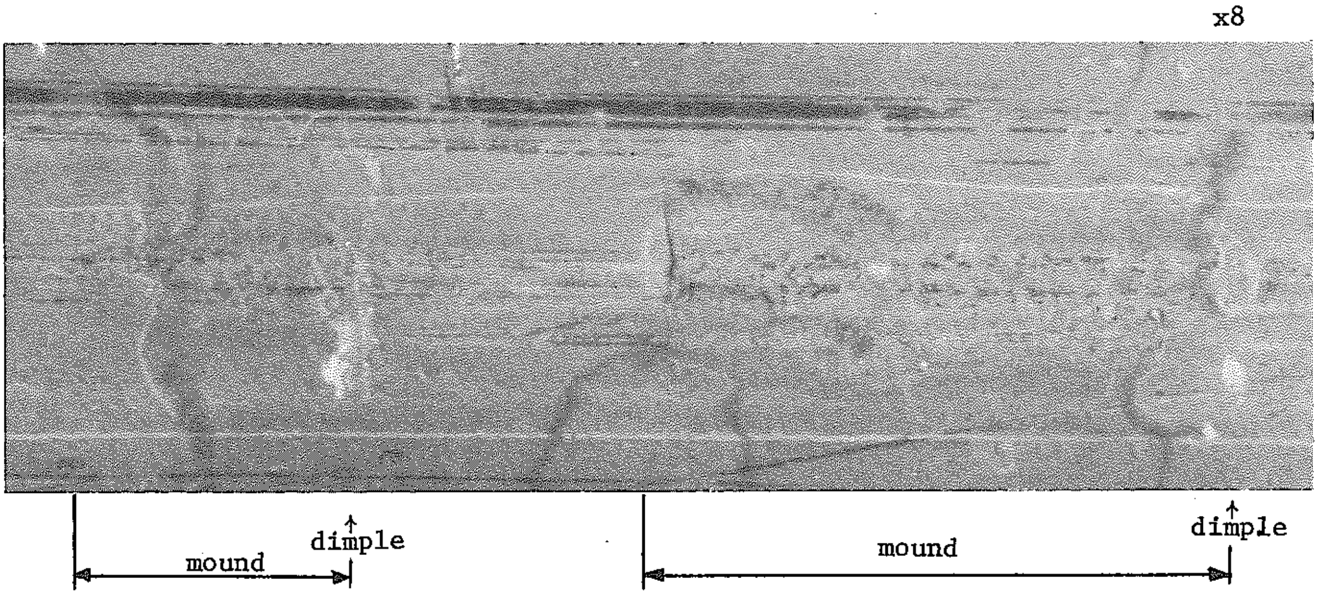
d) Pin C11.

heaviest nodular oxide coverage seen on 8 pins.

x3

Photo 3.1-6 Nodular oxide distribution at grid 9 on pins A4, B6, C4 and C11.





a) Pin C14. grid 4.
dimple contacts (arrowed) and crud mounds shown in the lower photo at higher magnification.
(microspecimen '1940' was taken through the lower nounds)

Photo 3.1-7 Pin C14. grid 4. crud mounds near dimple contacts in area of ECT defect signal. (continue)

b) Pin C14. grid 4.
second set of dimple contacts (arrowed) with spailed crud mound downstream of lower contact shown also in lower photo at higher magnification.

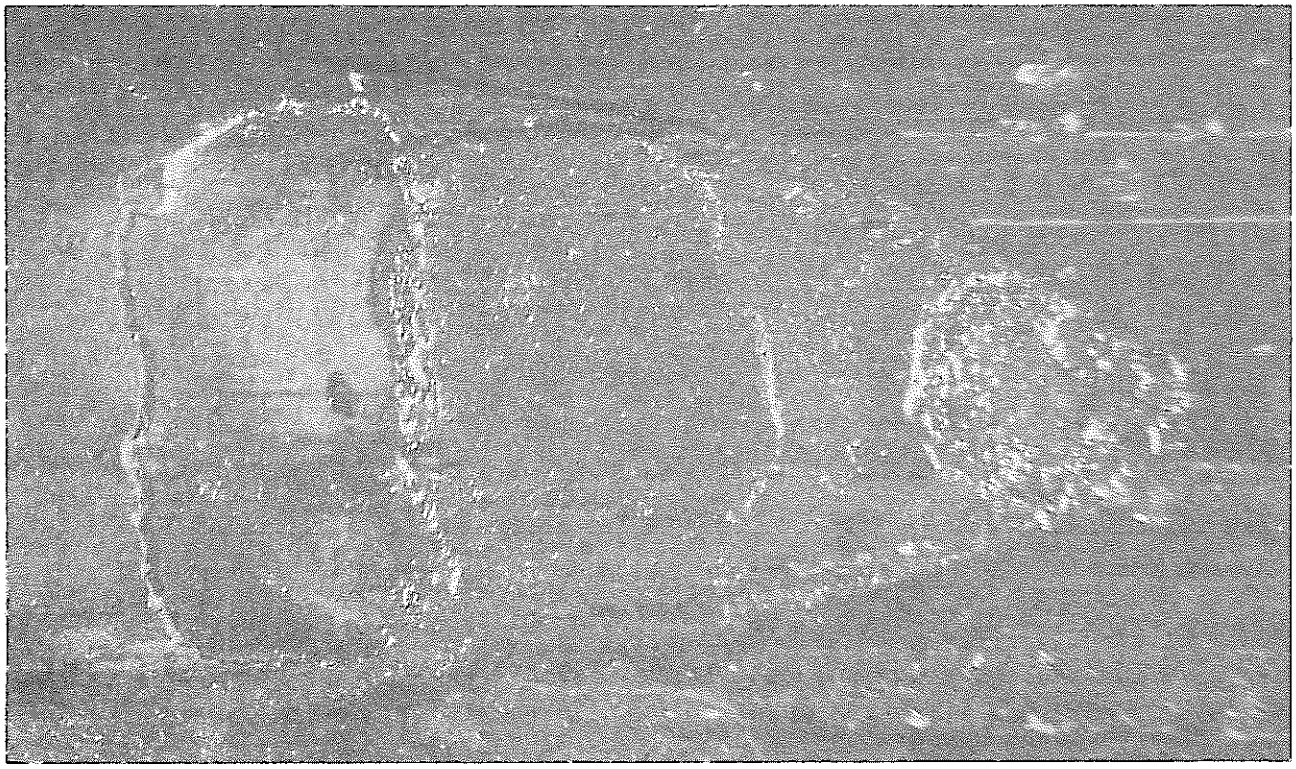
Photo 3.1-7 Pin C14. grid 4. crud mounds near dimple contacts in area of ECT defect signal.

← coolant flow

x3

Pin C11. grid 9. dimple contacts (arrowed)

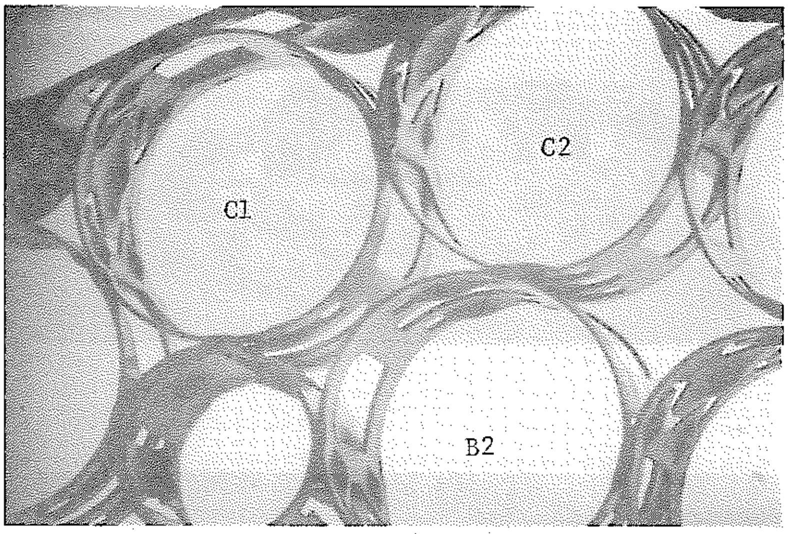
← coolant flow



x20

Pin C11. grid 9. crud mound (partially spalled) at lower grid contact seen in top photo.

Photo 3.1-8 Pin C11. Gride 9. Crud mounds downstream of dimple, contacts.



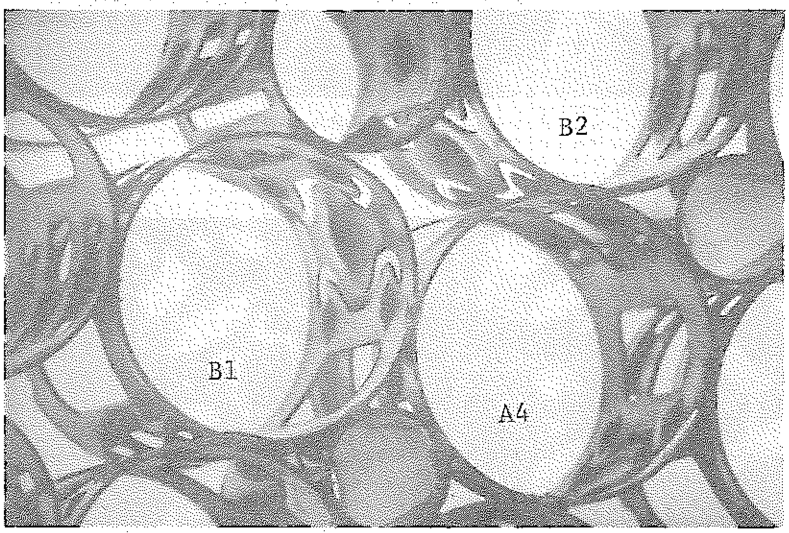


Photo 3.1-9 Typical regions of grid 1 viewed from the top side

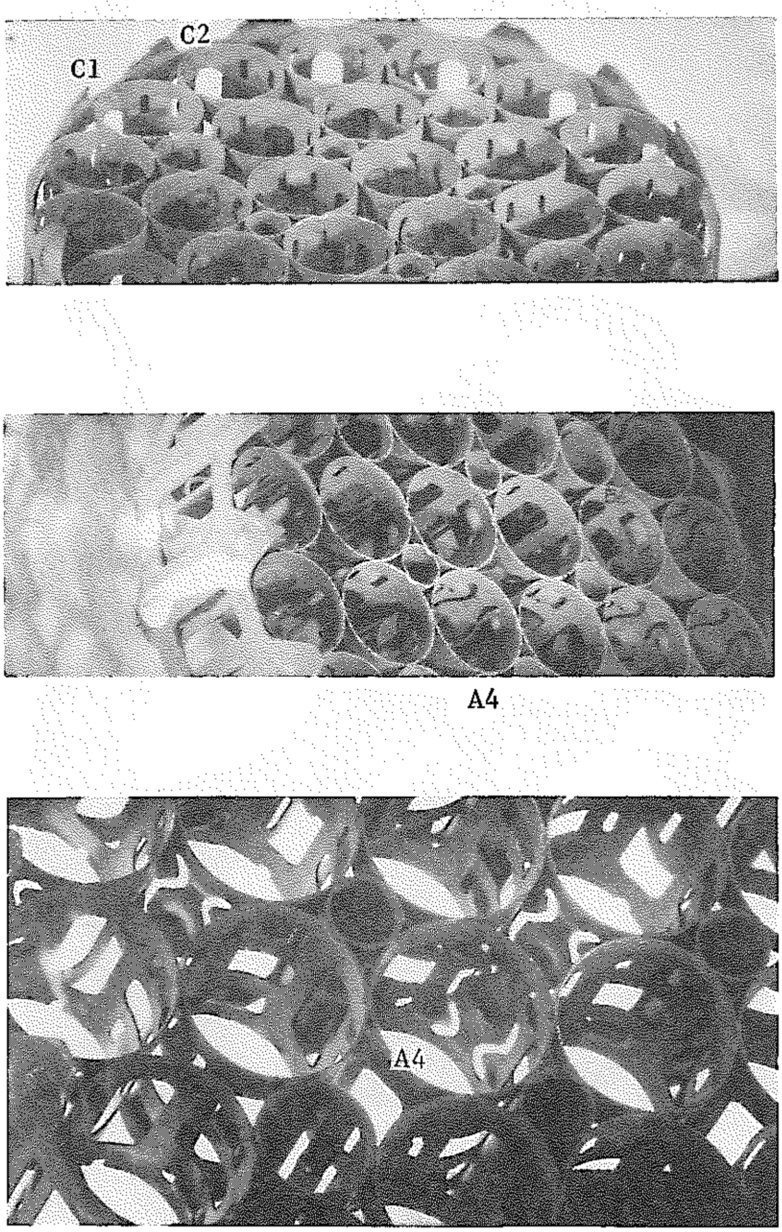
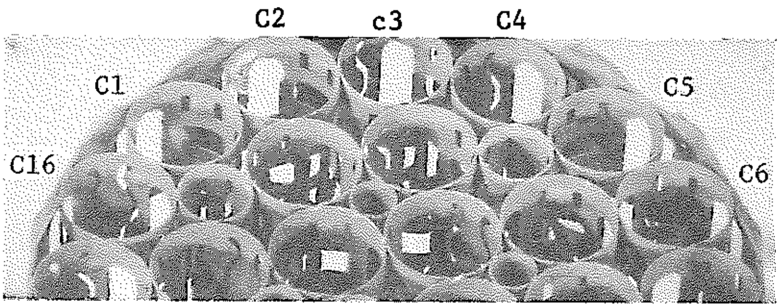


Photo 3.1-10 Typical regions of grid 6 viewed from the top side



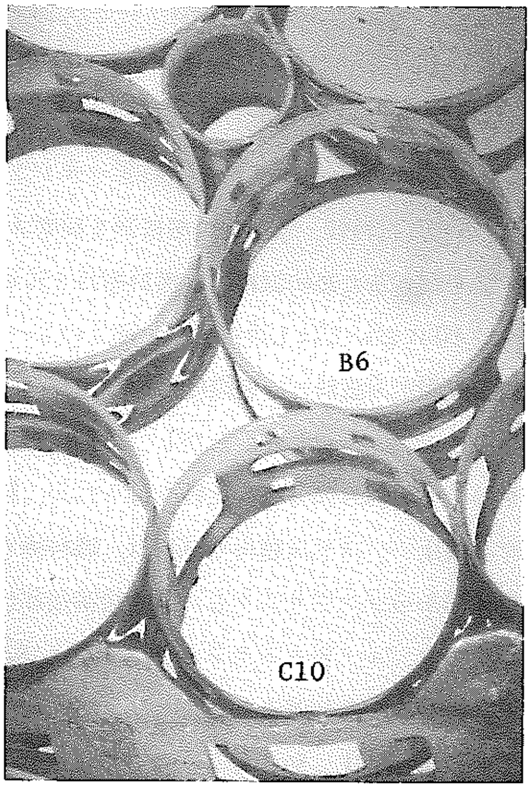


Photo 3.1-11 Typical regions of grid 9 viewed from the top side

3.2 破 壊 試 験

3.2.1 試料選択

破壊試験に選択した燃料棒は，非破壊試験において詳細試験を実施した以下の9本である。

内　層　；　A 4

中間層　；　B 6

外　層　；　C 1，C 4，C 7，C 10，C 11，C 12，C 14

それぞれの燃料棒から試料を採取するに当っては，非破壊試験の観察結果およびTable 3.2−1に示す燃焼度分布を参考にした。

試料の長さは，金相および燃焼度測定用が50 mm，燃料密度測定用は測定を2度実施するために70mmとした。試料の半径方向の向きを表わすために，すべての試料のグリッド・スプリング側に目印をつけた。

各燃料棒ごとの試料数，サンプリング位置，サンプリング番号および試験目的をFig 3.2−1〜Fig 3.2−9に示す。横断面試料のうちA 4，C 11およびC 14については，渦流探傷試験（ECT）で信号が検出された位置から，それぞれ1試料ずつサンプリングした。縦断面試料のうち，C 12からサンプリングした試料は，上部端栓溶接部を観察するためのものである。

被覆管のフレッティング量を調べるための試料は，燃料捧B 6においては11番目（最下部）のスペーサ部から，燃料棒C 10においては1番目（最上部）のスペーサ部から サンプリングした。燃焼度測定および燃料密度測定用試料は，燃焼度との関係を調べるため，燃焼度が大体一定の間隔になるような位置からサンプリングした。しかし，燃料棒C 11からは測定値と計算値（WSGHWRデータ・バンクの値）の軸方向分布の比較を行うため，軸方向の異なる位置から3個の試料をサンプリングした。内圧バースト試験用の試料は，燃料棒C 7の上部端栓溶接部，被覆管中央部および下部端栓溶接部からサンプリングし，両端栓溶接部は室温，被覆管中央部は340℃において試験を実施した。また，α−オートラジオグラフおよびβ/γ− オートラジオグラフ用の試料は，横断面金相試料の中から8個選んだ。

スペーサのバネ測定は，スペーサNo.1，No.6およびNo.9の3個について行った。

Table 3.2−2に破壊試験用の試料数およびそれに対応する燃料棒番号を示す。

3.2.2 中性子ラジオグラフ

中性子ラジオグラフを撮るために，4本の燃料棒から460mm長の試料を6個サンプリングした。6個の試料は切断後に燃料が崩れ落ちないように両端をプラスチックでシールした。中性子ラジオグラフの撮影が実施されるAERE Harwellにおいて，各試料の識別ができるように，Table 3.2−3に示すような識別番号をつけた。

中性子ラジオグラフを実施した主な目的は，燃料中のプルトニウム・スポットの状況を観察するためである。

切断片はAEREで検査され，外表面は洗浄された。中性子ラジオグラフ撮影中に切断片を収納

するために，6個のアルミニウムカンを作った。このアルミニウムカンには，スプリング荷重によるセルフ・センタリング治具がついている。また50±0.1mmのピッチで管壁につけた10個のカドミウム（Cd）・ディスクから成る長さ測定用スケールが備えてある。被覆管切断面の端部をシールしているプラスチック・キャップは，非常に不規則な形状をしているため，カン内の中心位置に試料を配置することができなかった。したがって，これらのキャップは，容器の中へ試料を入れる前に取り除いた。しかし，運悪くいくつかのプラスチック材は，被覆管に付着して残ってしまった。また，いくらかの燃料は容器へ装入している間に数個の試料の端部から粉失した。このようにして準備した6個の試料をDIDO原子炉へ輸送し，その後，輸送容器から試料を取り出し，しゃへいされた観察用セルの中へ移した。さらに試料を引き出し棒に取り付けて観察用セルの上部にあるしゃへい容器に入れ，DIDOの6HGR9孔に付属した中性子ラジオグラフ用施設へ移した。燃料切断試料は，ラジオグラフ・セルの中へおろし，位置決め装置によって検出箔の約50mm前に設定した。

直径を約1700mmにとってコリメートされた中性子線は約5×10^{7} n／cm^{2} secの十分に熱化した中性子束である。切断面が高放射能であるので，インジウム薄片検出器およびKODAK Industrex　Cフィルムを用いた間接撮影技術を用いた。最適の露出時間および撮影時間は，試験によって決められ，それぞれ6分および30分であった。

試料の中性子ラジオグラフは縦の位置で撮影し，試料の全長をカバーするために，重複して3枚のラジオグラフを撮影した。また，各々の試料は90°ずつ二方向から撮影した（6枚／試料）試料の端部にプラスチックのこん跡があるため，最端部のペレットは，どの試料についても撮影することができなかった。

燃料ペレットの外形，クラック模様およびペレット端部のギャップは，中性子ラジオグラフではっきりと見ることができる。時々，破片ペレットも見ることができる。その一例をPhoto 3.2−1aに示す。大きなプルトニウム・スポットあるいは塊の存在する形跡は，Photo3.2−1bに示すように，見られなかった。計算によると，検出箔やコリメータのしかるべき位置への固定の精度およびDIDOの6HGRG孔の中線子線のエネルギからして，直径350μm以下のプルトニウム・スポットは検出されそうになかった。このため，さらに長時間の露出（60分）および撮影（60分）条件，およびKODAK SR フィルムによって，2枚の中性子ラジオグラフを燃料棒A4の試料から撮影した。この方法によると，前に述べた方法より僅かに良い鮮明度が得られたが，プルトニウム・スポットの確かな形跡は見られなかった。

3.2.3　FPガス・パンクチャ

燃料棒内の内部ガス圧および空間体積を測定するため，8本の燃料棒についてパンクチャした。ガス・サンプルを捕集し，質量分析装置によって分析した。その結果をTable 3.2−4 に示した。生成したFP量からXe放出割合を概算するために，核分裂のすべてが^{239}Puから生じたものと仮定した。^{239}PuからのXeの核分裂収率は17.6％である。

内層および中間層燃料棒のXeの放出割合は，0.1％以下と低かったが，これは予想通りであった。外層燃料棒に関しては，C 12を除いて3.1～4.3％の範囲であった。C 12の放出割合は10％と他に比べて例外的に大きかった。このため，燃料棒C 12と残りの外層燃料棒のガス・インベントリィを注意深く調査したが，実際のガス抽出および分析に関して異常はなかった。すなわちすべての外層燃料棒内のヘリウム・ガス量は，平均が58.86 cm^3で，標準偏差が3.64 cm^3であった。また燃料棒C 12に関しても，56.22 cm^3と他の外層燃料棒とほぼ同じ値であった。さらに，それぞれの外層燃料棒の空間体積を測定すると，他の5本の燃料棒の平均値は66.38 cm^3で，標準偏差が0.92 cm^3であった。それに対して，C 12の空間体積は70.2 cm^3であった。

燃料棒C 12の内圧および抽出したガス量は，XeとKrの増加によるものであった。XeおよびKrの量は　70.81 cm^3と4.63 cm^3であり，他の外層燃料棒の平均値に対して，それぞれ2.6倍，2.3倍と大きな放出量であった。このように，他の燃料棒に比べてXe，Kr　の量が多かったということは，燃料棒C 12の運転中の燃料温度が他の外層燃料棒より何らかの原因で高かったものと推定される。これについては金相試験の項でさらに調査する。

3.2.4　金相試験

(1)　燃料の金相試験

金相試験は8本の燃料棒から15試料を採って実施した。このうち横断面用が12試料，縦断面用が3試料である。横断面試料はペレット長の中間部で，縦断面試料はペレットの軸面で切断，研磨した。15試料全部について，グリッドのスプリング位置との関係ははっきりしている。各々のマイクロ試料について，平均結晶粒径の測定（Linear　intercept means），FPガス・ポロシティの生成開始半径，クラック・ヒーリングの開始，ペレット／被覆管ギャップの半径測定を実施した。これらのデータは，一般的なコメントと燃料の結晶組織より推定した燃料中心温度とともにTable 3.2－5に示す。

横断面の各試料では，ペレットの外側から中心までの燃料組織変化の様子を等間隔に8枚の写真に撮り，縦断面の各試料では，ペレットの中間部とディッシュ部について，ペレットの外面から中心に向って，等間隔に5枚の写真を撮った。その他の興味ある特徴についても記録し，さらに代表的な写真をPhoto 3.2－2～3.2－8に示した。以下，内層，中間層，外層の各層について，観察の概略をまとめた。

ⓐ　内層燃料棒　－A 4－

内層燃料棒の温度は，Photo 3.2－2に示したようにペレット中心で高密度化した微細組織および燃料／被覆管ギャップ（何本かの燃料棒で見られた最大－64μm）から低かったことが解る。燃料温度は最大な部分においてもFPガス・バブルが生長するほど高くなかった。

ⓑ　中間層燃料棒　－B 6－

この燃料棒の最大燃焼度領域におけるペレット中心温度は，Photo 3.2－3 C に示すよ

うに，ＦＰガス・バブルの形成をうながすのに十分であった。しかし，マイクロ・ポアが完全に焼結するか，あるいは結晶成長をうながすほどは高くなかった。

ⓒ　外層燃料棒

外層燃料棒の高出力領域のペレット中心で，結晶成長が生じていた。Photo 3.2 − 5 に示したように，燃料棒Ｃ12の98％最大燃焼度位置で燃料組織が良く発達しており，これは，この燃料棒の比較的高いＦＰガス放出と一致している。柱状晶は，燃料棒Ｃ11とＣ14（Photo 3.2 − 4 Ｃ）の高出力部でも見られるが，これらは局部的であり，燃料内のクラックの影響を受けたものである。

製造時の燃料／被覆管ギャップは，運転中の冷却材圧力による被覆管のクリープ・ダウンによって減少していた（燃料棒Ｃ11の最大燃焼度の位置で最小20μmの半径ギャップが測定された）。燃料／被覆管の相互作用の形跡は，Photo 3.2 − 6の燃料棒Ｃ11，Ｃ7およびＣ12の縦断面金相写真により観察できる。

Photo 3.2 − 7に示した燃料棒Ｃ7の高出力部における縦断面金相において，ペレットのスウェリングによって端部のディッシュ部が，80％近く埋められている。また，Photo 3.2 − 8 aの燃料棒Ｃ11のグリッド8と9の間の縦断面金相でも60％程ディッシュが埋められていた。さらに，これらの縦断面金相写真Photo 3.2 − 7 b，7 cおよびPhoto 3.2 − 8 bから，ペレットの境界面（チャンファとディッシュの間の面）に大きな力が作用したと思われる形跡を残している。また，広範囲なクラックがPhoto 3.2 − 7 a，7 b，− 8に見られ，Photo 3.2 − 7 Ｃでは，ペレット端部でペレット同士のゆ着が見られる。

燃料棒Ｃ11のグリッド8と9の間から採った縦断面試料（Photo 3.2 − 8 b，− 8 c）からは，白い相の金属析出物の存在が見つかった。析出部（大体〜10μm）は二相で，明らかにある時点で溶けていた。これらの析出物は金属ＦＰの可能性もあるが，同程度の線出力を経験した他の燃料棒からは観察されないので，断定することはできない。金属析出物の素性を調べるためには，Electron Probe Micro Analysis が必要である。金属析出物は燃料棒Ｃ4とＣ7の低出力部の試料にも見られたが，これらは，たぶんペレットの製造中に混入したものと思われる。

高出力領域から採った試料はクラックのエッジおよびペレット境界面で，局部的に大きな等軸晶が見られる（Photo 3.2 − 8 d）。まれに大きな結晶が低出力領域の試料（Photo 3.2 − 2 b）にも見られるが，たぶんペレット製造時からすでにあったものと思われる。代表的な製造時の燃料の粒径およびマクロ・ボイド分布は，低出力密度領域で見られた組織と同じであった（Photo 3.2 − 6 a）。

ペレットのかけらは，観察したマイクロ試料のどの燃料／被覆管ギャップにも見られなかった。

(2) 被覆管の金相試験

被覆管の金相試験は，準備した22試料の全部について行った。Table 3.2 − 6に，被覆管外表面の酸化とクラッドの付着量測定，内面酸化量の測定，さらにジルコニウム水素化物の形状と分布などの試験結果を示す。それらの中から試験中に撮影した写真のいくつかをPhoto 3.2 − 9〜3.2 − 12に示した。

さらに以下のような特定の試料について，特別な試験を実施した。

ⓘ クラッド付着−燃料棒C 12でクラッドが保護されている領域から採った試料1927

ⓘⓘ フレッティングー燃料棒B 6のグリッド11のところの試料X 42および燃料棒C 10のグリッド1のところの試料1937

ⓘⓘⓘ 被覆管内表面−試料X 46とX 42

ⓘⓥ PCMI −縦割り試料1926（C 4），1936（C 7），1933（C 11）

ⓥ ECT異常信号部−疑しい3つの領域からの試料，1929(A 4)，1942，X 67(C 11)，1940(C 14)

ⓥⓘ 端栓溶接部 −上部端栓溶接部試料1934(C 12)

以上の項目について，試験した結果を以下に述べる。

ⓐ 被覆管外面および内面酸化

22試料のほとんどは被覆管の酸化を調べる目的以外の理由で選ばれたものであるが，表面酸化測定もそれらの各々について実施した。外観試験によるとノジュラー酸化は，グリッド位置7〜10の範囲に最も多かった。試料はグリッド位置1，3，4，11の4ケ所のみだったので，Table 3.2 − 6に示している最大酸化厚さは，それぞれの燃料棒の最大厚さを表わしている訳ではない。

すべての酸化ノジュールの形状はレンズ状であった（Type −C燃料では厚くずんぐりした形状であった）。最も厚いノジュール（43μm）はPhoto 3.2 − 9 aに示した燃料棒C 14のグリッド4のところであった。また，ノジュールの数は燃料棒C 12から採った試料において最も多かった。さらに，この試料は最も厚い均一酸化層を有しており，他の試料の2 μmに対して4 μmであった。

Photo 3.2 − 9 dに示したクラッド層の下の均一酸化層は，クラッドの付着していない領域の酸化層より厚くはなかった。Photo 3.2 − 4 aには，被覆管外表面の照射前スクラッチと思われるものを示した。外観試験では，これらのスクラッチが選択的に酸化されているのが見られた（Photo 3.1 − 6）。Photo 3.2 −10 bおよびPhoto 3.2 − 10 Cに示した酸化ノジュールは，おそらくスクラッチと関係していると思われる。それらはスクラッチ以外の所に生じているノジュールと区別することは難かしい。

個々の試料について比較するために，横断面試料の全平均酸化厚を計算した（Table 3.2−6）。この値は均一酸化層の厚さにノジュール数，平均ノジュール厚および平均ノジ

ュール長さを用いて求めたノジュールによる平均酸化厚を加えて求めた。最も大きい全平均酸化厚は燃料棒C 12のグリッド6の近傍の5.1 μmであった。 リング相互の酸化の比較は，グリッド6と7の間から採った試料の全平均酸化厚を比較することによって得られる。それらの結果はTable 3.2 − 6から内層燃料棒で1 μm，中間層燃料棒で2.1 μm，外層燃料棒で2.2 μmであった。Type − C燃料集合体の各リングの場合，これらの値はそれぞれ7.2 μm， 10 μm， 12 μmであった。

最大内面酸化厚は8 μmで，Photo 3.2 − 11 bに示すように斑点として存在し，外層燃料棒の比較的高出力部表面の80％近くを覆っていた。これらについては，後に述べるPCMIの項で十分検討することとする。内層および中間層燃料棒の内面酸化厚は1 μm以下であった。

ⓑ 被覆管の微細組織とジルコニウム水素化物

被覆管の微細組織（結晶粒）は直径6 μm以下と小さく，等軸晶から成っていた(Photo 3.2 −11 C)。Photo 3.2 − 11 dに示すように，再結晶化の形跡は最も厚いクラッドが付着していた被覆管の所でさえも見られなかった。

ジルコニウム水素化物は二つの形態を有していた。一つはPhoto 3.2 − 12 a およびPhoto 3.2 − 12 bに示すように，短く，まばらで円周方向を向いたものであり，もう一つはPhoto 3.2 − 12 CおよびPhoto 3.2 − 12 dに示すように，非常に短く，数も多く，かなりランダムな方向を向いたものである。局所的水素吸収は外表面の比較的大きな酸化ノジュールの所でのみ見られた。

ⓒ クラッド（水あか）付着および分析

燃料棒の試験中に，クラッド付着の試験用として燃料棒C 12の切断試料が選ばれた。この燃料棒のグリッド6のちょうど上の領域（ Fig 3.2 − 8参照)に存在する表面付着物を保護するためにエポキシ樹脂でコーティングした。試料1927は切断され，横断面試料として準備された。顕微鏡試験によると Photo 3.1 − 1に示したように円周方向のいくつかの位置で，2種類の明らかに異なる形態のクラッド付着物が有った。多孔質な付着物は被覆管の外表面を完全に覆っており，その厚さは10 ～ 25 μmで，ホット・ラボにおいて，ナイロン・ブラシで容易に取り除けるタイプの付着物であった。周囲のいくつかの位置において，この多孔質な層は30 μmの厚さを有する非常に密な付着物を覆っていた。ジルコニウム酸化物の層は被覆管とクラッド付着物の間に有った。すべての燃料棒は直径測定に先だってブラシをかけたので，多孔質な付着物の形跡は残りの試料のどこにもほとんど見られなかった。一方，固いクラッドはブラッシングによって取り除くことができず，それは試験したほとんどの試料で見ることができた。固いクラッドはPhoto 3.1 − 2に示したように，密度が異なっているが，厚さは一様で最大30 μmに達していた。軟かいクラッドと固いクラッドの両方を含んでいる小さな試料がElectron Micro−Probe

Analysisのため，樹脂で保護した燃料棒C 12の試料から切断された。

二重層のクラッドの電顕写真はFe，CuおよびSi分布とともにPhoto 3.1－3に示した。

三つの成分の定量分析をこのサンプルの代表的な層について実施し，その結果をTable 3.2－7に示す。この表から，ポーラスな付着物は主に鉄酸化物から成り，それとは逆に固い付着物は銅が主であった。Photo 3.1－3に示したように，Siに富んだ材料の小さな粒子が固いクラッドの内側の層にも存在していた。これらの領域は注意深い定量分析をするためには小さすぎるが，X線信号によると，それらは重量で約10％Si，25％Fe，5％Cuであった。

ⓓ フレッティング試験

スペーサの保持力に関連して，フレッティングの観察を実施した。観察を実施したのは，燃料棒B 6のグリッド11および燃料棒C 10のグリッド1の部分であり，したがって，これらの位置のグリッド・スプリング接触部の横断面試料が採られた。切断する前のこれらの写真はPhoto 3.1－4とPhoto 3.1－5に示した。

Photo 3.2－13 aと3.2－13 bには，燃料棒B 6のグリッド11のスプリング 接触部の被覆管表面を示す。Photo 3.2－13 aに見られるように深さ＜10 μm の微少なフレッティングが生じていた。Photo 3.2－13 bには，すり減った領域に付着した金属層を示す。またスプリング接触部から離れた被覆管表面上の完全な酸化層をPhoto 3.2－13 cに示す。

同じ程度のフレッティング量は，Photo 3.2－14に示した燃料棒C 10のグリッド1のスプリング接触部で見られた。Photo 3.2－14cには，摩耗した表面の下の冷間加工した微細組織を示す。Photo 3.2－15に示すように56 μm深さのくぼみが，この試料のスプリング接触領域で見られた。くぼみおよび全体の微細組織の様子から，この傷は照射後試験の燃料棒取扱中，しかも燃料棒切断後に生じたものと思われる。

ⓔ 内面試験とPCMI

燃料ペレット－被覆管の機械的相互作用（PCMI）を調査するため三つの縦断面試料と，被覆管内面調査のため，燃料除去後，三つの被覆管縦割試料を最大リッジング信号（通常はペレット端部で発生）を示した領域から採取することにした。その結果，試料は燃料棒C 4，C 7およびC11から採られ，その詳細をTable 3.2－8に示す。ペレット境界面付近の被覆管内面を調べるために，被覆管内面試料から目視試験後さらに横断面と縦断面（試料番号X 46，X 47）の小試験片2個を採った。

スリット状被覆管の内表面を観察し，ステレオ・スコープにより写真を撮った。その結果，3個の試料が外観上似ており，その1例として燃料棒C 4の試料をPhoto 3.2－16に示す。ペレットに面している被覆管表面は，ペレットのクラック模様をしたかすかに黒い線が何本か有り，全体的には金色および青色を帯びていた。ペレット端部に面している

部分では，せまい茶色の帯がはっきりと見られ，それは被覆管表面よりわずかに持ち上がって見える。試料のどこにも燃料粒子の付着は見られなかった。2個の小試験片（X 46, X 47 ）は，ペレット境界面の跡が比較的はっきりしていたC4試料の表面から採った。

両試料は，ペレット端部は8μmの酸化物層であったのに対して，端部から少しずれた部分ではより薄い酸化物が点在していた（Photo 3.2 − 16）

PCMI観察用の縦割り小試片の写真は，Photo 3.2 − 7， 3.2 − 8および3.2 − 17に示す。燃料／被覆管ギャップの測定は，小試片の両面に沿って1.2 mmの間隔で行った。直径ギャップは，被覆管内表面酸化の観察と共にFig 3.2 − 10， 3.2 − 11および 3.2 − 12のグラフに示した。C4の小試片とともに酸化物の分布の写真を Photo 3.2 − 17に示した。

Ⓕ 渦流探傷試験の欠陥タイプの信号領域

渦流探傷試験（ECT）において，燃料棒A4，C 11およびC 14のそれぞれの被覆管に欠陥がある可能性を示した。 燃料棒A4のグリッド2と3の間，および燃料棒C11のグリッド3の位置の二つの領域の外観検査において，ECT信号に対応する被覆管のどこにもはっきりした欠陥はなかった。A4燃料棒のECT信号のところから採った横断面マイクロ試料（ 1929 ）では，正常な被覆管組織を示していた。疑わしい領域を含んだ50mm長の被覆管を燃料棒C 11から切断し，燃料を取り除いて軸方向に長いサンプルとした。内表面の外観検査では，どこにも異常は見られなかった。被覆管の横断面試料（ X 67 ）にも，欠陥の形跡は見られなかった。燃料と被覆管が近接している試料（ 1942 ）も正常な燃料と被覆管の様相を有していた。

三番目に疑わしい領域は，燃料棒C 14のグリッド4のところに生じていた。Photo − 3.1 − 7 の外観検査では，スペーサ部の4つのディンプルとの接触部の下流に割れの 入ったクラッドの盛り上がりが見られた。はっきりした被覆管欠陥の形跡が目視では発見できなかったため，下側のディンプルの下流にある大きな割れの入ったクラッドの盛り上がり部を二分するように，スプリング接触領域から横断面試料（ 1940 ）を採った。Photo 3.2 − 18に示したマイクロ試料の観察では，厚さが43μmのかなり多孔質なクラッドの堆積物が見られた。2つの堆積物（ Photo 3.2 − 18 ）の下には10μm の酸化層があり，他の試料で見られた2μmの均一酸化層より厚かった。もう一方の横断面試料の表面に付着していたクラッドは剥れていた。この二つの試料には割れ，気孔等の欠陥はなく，また水素化集中，フレッティングのような欠陥の形跡もなかった。

Ⓖ 端栓溶接部

金相試験のために燃料棒C 12の上部端栓溶接部が選ばれた。長手方向の試料（1934）は，端栓および端栓と近接している被覆管から採った。溶接部で正常なバスケット紋様からなる微細組織（ Photo 3.2 − 19 ）は，溶接部から約6 mmのところで正常な被覆管組

織に徐々にもどっている。拡散は腐食がなく良好であった。溶接ビード上の酸化厚は，被覆管の酸化厚（2μm）より厚くなかった。また，ジルコニウム−水素化物分布はPhoto−3.2−20に示すように端栓と被覆管の両方とも正常であった。

3.2.5　オートラジオグラフ

αおよびβ／γオートラジオグラフを撮るために，8個の横断面試料を選んだ。試料は最初からの燃料／被覆管試料である1930（A4），1928（B6），1924（C4），1925（C4），1931（C11），1935（C11），1932（C14）の7本と新たに加えた燃料棒C1からの燃料試料1939である（試料の採取位置については3.2.1節を参照）。試料は，オートラジオグラフが撮られる前に普通の金相試験用として準備したものである。オートラジオグラフの撮影技術は以下に記した。また，オートラジオグラフはPhoto 3.2−21〜3.2−26に示す。

(1)　α−オートラジオグラフ

α粒子の放射飛跡を記録するために，Kodak　CA80−15（特殊な感度のCellulose − nitrate）が使用された。最初にオートラジオグラフのフィルムの汚染を防ぐため，および分解能を良くするため，アルミニウム付きMylerfilm（0.012mm厚）の単層で覆った。このフィルムに10分間露光した。フィルムと密着を良くするために試料の上に30 gの分銅を置いた。フィルムは60℃の10％NaOH溶液の中で2分間エッチした。アルファ影像はIlford Ilfoline高濃度淡整色性のフィルムに5倍に拡大し，その後Ilford　Ilfoprint　YR印画紙に密着プリントした。その結果をPhoto 3.2−21〜3.2−24に示す。

Pu濃度の高いスポットが低出力（≦25 w/g）試料の1930と1928（Photo 3.2−21）1924と1925（Photo 3.2−23）および1935（Photo 3.2−24）ではっきり見られた。また，スポットはかなり均等に分布していた。高出力（＞25 w/g）試料の1939と1932（Photo 3.2−22）および1931（Photo 3.2−24）において，Puスポットの均質化がペレット中心で起こっていた。すなわち，スポットを完全に消滅させているか（Photo 3.2−22…試料1932），あるいはわずかに拡大させていてスポットの外部がぼけていた（Photo3.2−24…試料1931）。オートラジオグラフ（Photo 3.2−25）上のいくつかの大きなスポット・サイズは約180μmであった。参考までに照射前の最大スポットは140μmであった。オートラジオグラフで見られた数個のPuスポットは，Photo 3.2−26のマイクロ試料で容易に識別できた。代表的なPuスポット部では，結晶がマトリックスよりわずかに大きいポロシティが見られた。金属FP粒子は，オートラジオグラフを撮ったどの試料にも見られなかった。ペレット表面の数個のPuスポットについて調べたが，被覆管にスポットの接触の形跡は見られなかった。

α−オートラジオグラフのエッジでのより黒い領域は，β／γ−オートラジオグラフにおける黒い領域（高燃焼度）と大体一致した。α−オートラジオグラフの黒化は，Pu生成によるものと推定される。

(2) β/γオートラジオグラフ

Kodak高分解ガラス写真板は，取扱中に光線を入れないためと，感光乳剤に達する汚染を防ぐため，アルミニウムで被覆したマイラー膜で包んだ。すべての試料の露出時間は3分間とした。4個の試料は写真板と良く密着させるため重石を載せて2回露光した。その後，Paterson Acutol FX−14 maximum difinition developer（15：1に希釈）中で撹拌しながら4分間現像し，さらに酢酸停止液に30秒浸した後Kodak Rapid Fixで定着させた。オートラジオグラフを詳細に調べるために，映像を密着露光によってIlford Ilfoline High Contrast Filmに写し，最終的にIlford Ilfoprint YR paper上に拡大した。その結果をPhoto 3.2−21〜3.2−24に示す。

β/γオートラジオグラフは，FPの局部的な濃縮を示している（αオートラジオグラフのPuスポットと同一場所で黒く拡散したスポットがある）。コントラストをつけて写真を撮っているため，燃料棒半径方向の中性子束の傾きの効果が良く現れている。この傾きは中間層あるいは内層燃料棒より外層燃料棒の方が著しかった。

3.2.6　燃焼度測定

(1) ペレット平均燃焼度および燃料組成の分析

U，Pu，Nd，Am，Cmの同位元素分析，Pu/U比，Nd−148／U比を求めるため，燃料棒A4，B6，C4，C10，C11から切断した10個のサンプル（5cm長）を採り，AERE Harwellで質量スペクトルおよびアルファ・スペクトルで測定した。それぞれのサンプルの位置は，3.2.1節で示した。測定結果をTable 3.2−9に示す。

Nd−148/U比による燃焼度の推定は，早くて簡単である。Ndは安定であり生成率および1核分裂当りのエネルギーが，U−235とPu−239で同様である。燃焼度は次式で求められる。

$$\mathrm{Burnup} = 7.547 \times 10^{3} \times \frac{E}{Y} \times R \times \frac{238}{270} \quad \mathrm{MWd/teM}$$

ここで　E；U−235とPu−239の1核分裂当りのエネルギ（MeV）

Y；U−235とPu−239からのFission Yield（%）

R；Nd−148／U重量比

この方法（E＝205.8，Y＝1.685）を用いて推定した燃焼度はTable 3.2−9およびFig 3.2−13に示す。燃料を採取した位置の燃焼度は，WSGHWRデータ・バンクの予測よりわずかに高かった。

(2) 半径方向燃焼度測定および同位元素の分析

半径方向燃焼度測定および同位元素の分析は二個の横断面試料で測定された。
一つは燃料棒B6，もう一つは燃料棒C11からで，3.2.1節で示すように各々の燃料棒の上部肩部から1890mmの所（ちょうどグリッド6の下）から採った。

当初の目的は各々の試料から連続的に同心円の環状試料を作ることであった。各々の試料は切断に先だって準備した時に，燃料にクラック模様が観察されたので，分割した各々の円環片から材料を保持することに大きな困難があった（Photo 3.2 － 27 ）。したがって，超音波ドリルを用いる切錐技術が提案され，後に採用した。

B 6の試料から30個の切錐片（ core ），C 11から31個の切錐片（ core ）が採られた。各々の切錐片は通常直径が0.5 mm，長さが～2 mmである。各々のcoreの位置と割当て番号はPhoto 3.2 － 27 bと3.2 － 27 dに示した。注意すべきことは，分析のために不適当と思われた（Photo 3.2 －27に“Lost” と記した）ところの試料3個が増加して切錐された。

隣接するcoreと非常に短かすぎるCoreが見つかった場合には，重量を埋め合わせるまで，近接のCoreが切錐された。これらのCoreはPhoto 3.2 － 27に添字“A” をつけている（たとえば燃料棒C 11の試料ではcore　11 Aである）。

Coreは，各々の試料で，5つの殻（同心円）になるようにまとめた。そして5つの燃焼度解析が各々の試料で行なわれた。

10個の円環試料の分析結果はTable 3.2 － 10およびFig 3.2 － 14に示す。燃料棒C 11のプルトニウム同位体比の半径方向分布の識別に関して，照射後のPu － 239，Pu－ 241，Pu－ 242の同位体比が，照射前に対してそれぞれ約－ 21％，＋ 4.5％，＋ 15％ 変化している。

3.2.7　燃料密度測定

燃料要素A 4，B 6，C 4，C 11より2試料づつを密度測定のため採取した。試料は4個分のペレット（70mm）であり，これを水銀ピクノメータにより測定した。この測定結果の詳細をTable 3.2 － 11に示す。同表には照射前の密度も載せてある。この標準偏差は0.324以下である。ペレット7個の平均を示してあるのでこの標準偏差は従って$0.324/\sqrt{7}=0.123$ 以下となる。照射によって生じた密度変化は0.19～1.45％の増加であった。

ポロシティの変化を調べるため，核分裂生成分のうち固体によるスエリングの分を密度変化分に加算して，ポロシティの減少分とした。最大の減少はC 4のピンの試料（出力22.4w／g ）に見られ2.03％であった。この試料のすぐそばの部分から，たて割りの金相をとっており，この試料（1924）ペレットの中心部にはFPガスの気泡が認められた。すなわち照射前のポロシティの減少はもっと多かったといえる。FPによる気泡が光学顕微鏡で検出されなかった試料として，A 4からの試料（1930）が有る。この出力は14w／gである。ポロシティの減少は 1.99 ％ であった。出力がさらに大きい部分においては照射前のポロシティはさらに減少すると考えられる。しかし同時にFPによる気泡が生成されるので，全体のポロシティは両者の差で決まってくる。最も大きな出力の部分（C 11，26.5w／g）においても，FPによるスエリングよりも照射前のポロシティの減少の方が大きかった。Fig. 3.2 － 15に出力とポロシティの関係を示す。同図に見られるようにポロシティの減少は中間の出力で最大になる。タイプBのデータも載せてあるの

で対比すると，データのバラツキはあるけれど，タイプDの方がより低い出力でポロシティの減少が最大となっている。

3.2.8　燃料被覆管耐圧試験

①　端栓溶接部の耐圧試験

ピンC7の上部と下部の端栓溶接部分について，20℃で水圧テストを行なった。

端栓部より強制的に破損を起こさせるため，Fig 3.2−16に示すように被覆管部外側に被覆管のふくれを抑える治具をかぶせた。この治具は溶接部端より10mmの位置からかぶせ，この部分のふくれを6％以下に抑えた。

加圧速度19.6 MPa／minで加圧したが，2試験片とも加圧装置の最大加圧まで耐えた。

試験片	到達加圧	
上部端栓部	121.2 MPa	（破損せず）
下部端栓部	128.5 MPa	（破損せず）

加圧は120MPa程度しかかからなかった。この理由は加圧ピストンを抑えている金具がすべったためである。この溶接部の強度は内圧に対しては，次の項で述べる被覆管の破裂圧73.2 MPaより大きく，十分な強度を有するといえる。

②　被覆管部の耐圧試験（340℃）

ピンC7のスペーサNo.6，7の間から約110mm長さの試験片を取り，ペレットが入ったままで内圧破壊試験を340℃で行なった。試験装置の概略図をFig 3.2−17に示す。試験方法はタイプCと同じである。結果をTable 3.2−12に示す。

破裂試験片をPhoto 3.2−28に示す。全周伸びは試験前後の断面金相によって調べた。（Photo 3.2−29）破裂部の被覆管肉厚減少は断面金相から測定した。

UBSと0.2％耐力は次式により計算した。

$$\sigma = \frac{〔内圧〕\times〔\dfrac{内径平均+外径平均}{2}〕}{2\times〔最小肉厚〕}$$

0.2％耐力は599MPa（＝61.1 Kg/mm²）であった。照射前の被覆管についてはタイプCの試験において既に実施されており，0.2％耐力は509MPaであった。すなわち照射によって18％程耐力が増加していた。全周伸びについては8.7％であり，これは照射前のデータ8.7％と比べ変化はなかった。

タイプB，Cの内圧破壊試験の結果もTable 3.2−13～3.2−15およびFig 3.2−18に挙げる。

これらのデータではUBS，0.2％耐力とも未照射の被覆管よりも高い値となっている。全周のびについてはタイプB 8.0，8.5％であったが，タイプCでは2.1～10.6％であった。（タイプCの全周伸び量の少ない被覆管はS 708であり（0.21，0.23％），同社製作の被

覆管S 697についても同じスペーサ5，6間から採取して試験を行なったところ7.0％であった。外径測定，ECTでは両者に差が認められていない。耐力を計算するあたり，被覆管のふくれ分は，加圧ピストンの移動量から算出した。即ち歪ゲージを試験片に貼りつけるような局部的変形量の算出ではなく，試験片を全体的にとらえて，平均的に変形量を出している。全周のび量が小さかったタイプCの試験片においても，被覆管の肉厚減少は破裂部で9.2，9.7％でありこの値は，タイプBの8.0，8.5％より大きい。すなわち被覆管ののびが，ペレットと被覆管とが固着していたために抑えられ，均一化に変形しなかったためとも考えられる。

Table 3.2-1　照射後試験用に選択した燃料要素の燃焼度分布 *

セグメント**	燃料要素番号								
	A 4	B 6	C 1	C 4	C 7	C 10	C 11	C 12	C 14
1	1542.10	1821.21	3031.58	3039.96	3092.87	3124.99	3122.05	3112.10	3078.08
2	3115.56	3675.68	5907.55	5923.63	6027.17	6090.34	6084.70	6065.32	5998.79
3	4001.52	4722.30	7435.45	7455.67	7586.32	7666.09	7658.99	7634.55	7550.62
4	4419.93	5229.49	8137.94	8160.53	8303.35	8390.09	8382.16	8355.32	8263.49
5	4572.08	5432.18	8396.25	8420.04	8566.99	8655.66	8647.31	8619.52	8524.96
6	4603.86	5484.75	8438.19	8462.41	8609.66	8698.12	8639.62	8661.70	8566.90
7	4452.80	5313.89	8164.98	8188.59	8330.61	8415.70	8407.43	8380.42	8288.95
8	4054.16	4847.75	7482.58	7504.33	7634.04	7711.53	7703.89	7679.16	7595.59
9	3263.26	3913.15	6117.77	6135.79	6241.32	6304.06	6297.74	6277.54	6209.49
10	1910.52	2300.04	3686.91	3697.97	3761.23	3798.58	3794.69	3782.51	3741.69
平均	3593.58	4274.03	6679.91	6698.88	6815.34	6885.51	6878.85	6856.80	6781.85

* UKAEA側が行なった計算値

** 燃料スタックを下に示すように10等分している。

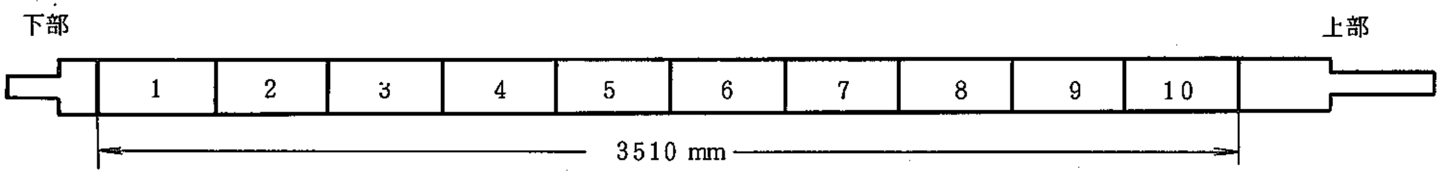


Table 3.2-2 破壊試験の試料数

試　　験	試料数	燃料要素番号
1. 金相試験		
(i) 横断面試料	13	A 4(2),* B 6(1), C 1(1), C 4(2)
		C 11(3), C 12(2), C 14(2)
(ii) 縦断面試料	4	C 4(1), C 7(1), C 11(1), C 12(1)
(iii) フレッティング	2	B 6(1), C 10(1)
(iv) ペレット境界部	1	WNLで選択
2. 燃焼度測定		
(i) グロス燃焼度	10	A 4(2), B 6(2), C 4(2), C 10(1)
		C 11(3)
(ii) 半径方向燃焼度	2	B 6(1), C 11(1)
3. 燃料密度測定	8	A 4(2), B 6(2), C 4(2), C 11(2)
4. 被覆管内表面観察	3	C 4(1), C 7(1), C 11(1)
5. 中性子ラジオグラフィ	6	A 4(2), C 10(2), C 12(1), C 14(1)
6. αーオートラジオグラフィ	8	横断面金相試料の中から選択
7. β/γーオートラジオグラフィ	8	αーオートラジオグラフィと同一試料
8. 内圧バースト試験	3	C 7(3)
9. スペーサのバネ測定	3 × 6	No.1, No.6, No.9 **

*　( ) 内は試料数を表わす。

**　スペーサ番号（No.1 は最上部のスペーサ）

Table 3.2-3 Neutron radiography sections

Pin No.	Position, mm from top shoulder	No. of saw cuts	AERE designation
A4	1420 - 1880	5	Fuel pin 5
A4	2050 - 2510	4	" " 4
C10	1480 - 1940	1	" " 1
C10	1990 - 2450	2	" " 2
C12	2850 - 3310	6	" " 6
C14	1490 - 1950	3	" " 3

Table 3.2-4 Fission product gas analyses

Pin Number	Volume of gas extracted (cm^3)												Pin internal pressure psi	Void volume cm^3	Approximate fractional release of Xenon assuming all Pu fissions %
	Total (at NTP)	He	ΣKr	ΣXe	^{134}Xe	N_2 + CO	O_2	Ar	H_2	CO_2	CH_2	N_2O + NO			
A4	52.4	51.9	0.02	0.21	0.06	0.20	0.04	<0.01	<0.05	<0.02	<0.02	<0.16	12.6	68.0	0.05
B6	52.8	52.2	0.03	0.41	0.12	0.10	<0.02	<0.01	0.05	0.02	<0.02	<0.15	13.3	64.8	0.09
C1	84.6	53.38	2.12	28.68	7.65	0.26	<0.03	0.02	0.10	0.08	<0.03	<0.19	20.8	66.5	4.2
C4	91.5	58.38	2.19	29.46	7.83	1.16	0.03	0.01	0.10	0.18	<0.02	<0.15	22.2	66.7	4.3
C10	97.1	64.38	2.14	29.81	7.86	0.58	0.03	<0.01	0.04	0.09	<0.02	<0.12	23.6	67.2	4.2
C11	90.7	60.50	2.06	27.94	7.49	0.17	<0.02	<0.01	0.04	0.06	<0.02	<0.11	23.0	64.8	3.9
C12	132.6	56.22	4.63	70.81	19.09	0.80	0.11	<0.05	<0.21	0.08	<0.08	<0.56	30.9	70.2	10.0
C14	84.5	59.83	1.59	21.72	5.71	0.99	<0.02	<0.01	0.18	0.25	<0.02	<0.14	20.6	66.7	3.1

Pin Number	Isotopic analyses (v/v ratios)							
	^{131}Xe	^{132}Xe	^{134}Xe	^{136}Xe	^{83}Kr	^{84}Kr	^{85}Kr	^{86}Kr
A4	0.429	0.713	1.000	1.313	0.39	0.59	0.12	1.000
B6	0.428	0.705	1.000	1.397	0.30	0.57	0.13	1.000
C1	0.473	0.796	1.000	1.477	0.317	0.606	0.135	1.000
C4	0.475	0.787	1.000	1.500	0.328	0.602	0.137	1.000
C10	0.502	0.831	1.000	1.469	0.319	0.599	0.136	1.000
C11	0.507	0.815	1.000	1.404	0.326	0.602	0.138	1.000
C12	0.471	0.759	1.000	1.494	0.324	0.600	0.137	1.000
C14	0.486	0.818	1.000	1.493	0.324	0.599	0.133	1.000

Table 3.2-5 Summary of fuel ceramography observations

Pin	Mount No. (Transverse) (Longitudinal)	Distance from top shoulder (mm)	Peak-in-time rating (from measured powers) (W/cm)	Mean grain size (μm)						Radius of porosity onset (mm)	Crack sintering		Approx. fuel centre temperature (℃)	Mean radial fuel/clad gap (excluding fuel cracks) μm	Clad-fuel interaction	Comments
				Transverse sections		Longitudinal sections						Radius of onset (mm)				
						Dimple		Mid pellet								
				Pellet edge	Pellet centre	Pellet edge	Pellet centre	Pellet edge	Pellet centre							
A4	1929 (T)	920	11.4	4	4	–	–	–	–	0	NONE	–	< 900	51	NONE	Pre-irradiation macro-and micropores present at pellet centre.
	1930 (T)	2035	14.0	3	3	–	–	–	–	0	NONE	–	< 900	64	NONE	Less micropores at pellet centre than in 1929 specimen. Occasional large grains (present before irradiations).
B6	1928 (T)	1995	17.1	3	3	–	–	–	–	~1.0 (difficult to define)	NONE	–	1050	40	NONE	Macropores still present at pellet centre.
C1	1939 (T)	1970	28.7	3	15	–	–	–	–	4.1	YES	3.0	1250	24	NONE	Macropores sintered at pellet centre. Occasional large (pre irradiation ?) grains. Local, large columnar grains at edge of cracks in hotter central region of pellet.
C4	1924 (T)	2785	25.0	3	10	–	–	–	–	2.8	NONE	–	1150	41	NONE	No macropore sintering at pellet centre.
	1925 (T)	3460	15.0	4	3	–	–	–	–	0	NONE	–	< 900	42	NONE	Pre-irradiation micropores still present in pellet centre Occasional large grains and metal inclustions (both pre-irradiation ?).
	1926 (L)	2200	28.1	–	–	4	14	3	15	–	YES	2.0	1250	–	NONE	Macropores almost sintered at pellet centre. Local large columnar grains at edge of cracks in centre of pellet. Dimple~80% filled.
C7	1936 (L)	2485	27.6	–	–	5	13	6	15	–	YES	2.0	1250	–	TRACE	Macropores almost sintered at pellet centre. Local large columnar grains at edge of cracks in centre of pellet. Dimple 80% filled. Metallic inclusions (pre-irradiation ?). Apparent high interfacial pressures at pellet end had caused bonding of lands.
C11	1931 (T)	1985	30.1	4	Columnar	–	–	–	–	4.1	YES	2.8	1600	20	TRACE	Macropores sintered at pellet centre. Columnar graing on side of thermal centre.

Table 3.2-5 Summary of fuel ceramography observations (continued)

Pin	Acount No. (Transverse) (Longitudinal)	Distance from top shoulder (mm)	Peak-in-time rating (from measured powers) (W/gm)	Mean grain size (μm)						Radius of porosity onset (mm)	Crack sintering		Approx. fuel centre temperature (℃)	Mean radial fuel/clad gap (excluding fuel cracks) μm	Clad-fuel inter-action	Comments
				Transverse sections		Longitudinal sections										
						Dimple		Mid-pellet				Radius of onset (mm)				
				Pellet edge	Pellet centre	Pellet edge	Pellet centre	Pellet edge	Pellet centre							
C11 (Cont)	1933(L)	2535	28.0	—	—	4	13	4	30	—	YES	1.3	1250	—	NONE	Macropores sintered in pellet centre. Local, large columnar and equiaxed grains at pellet interface and on edge of cracks. Areas of lenticular pores at pellet centre. Numerous fission product ingots not seen in other micro specimens. Dimple~60% filled.
	1935(T)	3110	21.7	4	8	—	—	—	—	3.2	NONE	—	1250	37	NONE	Macropores still present at pellet centre.
	1942(T)	995	25.5	4	7	—	—	—	—	3.8	YES	1.5	1300	33	NONE	Some sintering of macropores. Grains non coherent at pellet centre-grains pulled out during preparation-only microspecimen to exhibit this effect.
C12	1938(T)	1755	30.1	3	Colum-nar	—	—	—	—	4.3	YES	2.8	1650	47	TRACE	Wall estabilished columnar grain growth with lenticular voids at pellet centre. Local columnar grains at edge of cracks.
C14	1932(T)	1975	29.6	3	Colum-nar	—	—	—	—	4.3	YES	2.6	1600	25	NONE	Irregular columnar grains associated with healed cracks at pellet centre.
	1940(T)	1310	28.3	3	8	—	—	—	—	3.7	NONE	—	1250	36	NONE	Some sintering of macropores at pellet centre. Local large columnar grains on edge of cracks at pellet centre.

Table 3.2-6 Summary of metallographic observations on cladding

Pin	Mount No.	Distance along pin from top shoulder (mm)	Outer surface: Number of discrete nodules	Outer surface: Maximum nodule thickness (μm)	Outer surface: Mean nodule thickness (μm)	Outer surface: % Circumference covered by nodules	Outer surface: Maximum base oxide thickness (μm)	Outer surface: Overall mean oxide thickness (μm)	Outer surface: Maximum crud thickness (μm)	Outer surface: Comments	Inner surface: Maximum oxide thickness (μm)	Inner surface: Cladding/fuel interaction	Inner surface: Comments	Hydride form and distribution
A4	1929(T)	920 (between Grids 2+3) ECT 'defect' signal	11	12	8	1.7	2	2.1	Trace	Some of the 'nodules' may be oxidised scratches. No evidence of 'defect'.	<1	None	No visible oxide layer.	Short platelets mainly circumferentially orientated.
	1930(T)	2035 (between Grids 6+7)	0	0	0	0	1	1	0	Few oxide patches 12μm thick-probably oxidised scratches.	<1	None	No visible oxide layer.	Short platelets mainly circumferentially orientated. No local concentrations.
B6	1926(T)	1995 (between Grid 6+7)	33	20	7	5.4	2	2.1	Trace	Some of the 'nodules' may be oxidised scratches which can be confused with long, thin lenticular nodules.	<1	None	No visible oxide layer.	short platelets circumferentially orientated. No local concentrations.
	X42(T)	3375 (Grid 11) Fretting specimen	0	0	0	0	2	2	0	Section thro' spring contact.	<1	None	No visible oxide layer.	Short platelets circumferentially orientated. No local concentrations.
C1	1939(T)	1970 (between Grids 6+7)	13	31	13	2.6	2	2.2	27	Some of the nodules may be oxidised scratches.	6 (patches)	None	Oxide patches covered approx 25% of inner surface.	Short platelets circumferentially orientated.
C4	1924(T)	2785 (between Grids 9+10)	8	23	16	0.7	2	2.1	31	Nodules confined to one small sector	4 (patches)	None	Oxide<1μm between patches.	Sparse short platelet mainly circumferentially orientated.
	1925(T)	3460 (just below Grid 11)	0	0	0	0	2	2	35	—	<1	None	No visible oxide layer.	Sparse short platelets-mainly circumferentially orientated.

Table 3.2-6 Summary of metallographic observations on cladding (continued)

Pin	Mount No.	Distance along pin from top shoulder (mm)	Outer surface: Number of distance nodules	Outer surface: Maximum nodule thickness (μm)	Outer surface: Mean nodule thickness (μm)	Outer surface: % Circumference covered by nodules	Outer surface: Maximum base oxide thickness (μm)	Outer surface: Overall mean oxide thickness (μm)	Outer surface: Maximum crud thickness (μm)	Outer surface: Comments	Inner surface: Maximum oxide thickness (μm)	Inner surface: Cladding/ fuel interaction	Inner surface: Comments	Hydride form and distribution
	1926(L)	2200 (between Grids 7+8) PCMI specimen.	0 ref side 2 non-ref side	— 16	— —	—	2 2	—	8 16	—	4 8	None	Thickest and continuous oxide layer at middle of pellet. Intermittent layer towards pellet end	Longitudinally orientated platelets
	X46(T) X47(L)	(between Grids 7+8) cladding inner surface specimen	—	30	—	—	3	—	6	Lenticular nodules. Dense crud. (PCMI samples).	8	None	Thickest oxide patches on inner surface at pellet end.	Short sparse circumferentially orientated.
C7	1936(L)	2485 (between Grids 8+9) PCMI specimen.	0	—	—	—	2	2	16	—	8	Trace	Thickest oxide near middle of pellet.	Very small platelets longitudinally orientated.
C10	1937(T)	345 (Grid 1) fretting specimen	0	0	0	0	2	2	0	—	<1	None	—	Short platelets, rather random but mainly circumferentially orientated.
C11	1931(T)	1985 (between Grids 6+7)	14	16	10	24	2	2.1	32	Nodules evenly distributed around circumference	6	Trace	—	Numerous, short platelets rather random but mainly circumferentially orientated.
	1933(L)	2535 (between Grids 8+9) PCMI specimen	30 ref side 2 non-ref side	23 8	— —	— —	2 2	— —	Trace 20	—	4 8	None	Thicker and more continuous oxide layer in middle of pellet	Fairly numerous, longitudinally orientated platelets
	1935(T)	3110 (between Grids 10+11)	0	0	0	0	2	2	39	Mixture of porous and dense hard crud.	2	None	—	Very short platelets evenly distributed.

Table 3.2-6 Summary of metallographic observations on cladding (countinued)

Pin	Mount No.	Distance along pin from top shoulder (mm)	Outer surface								Inner surface			Hydrids form and distribution
			Number of discrete nodules	Maximum nodule thickness (μm)	Mean nodule thickness (μm)	% Circumference covered by nodules	Maximum base oxide thickness (μm)	Overall mean oxide thickness (μm)	Maximum crud thickness (μm)	comments	Maximum oxide thickness (μm)	Cladding fuel interaction	comments	
	1942(T)	995 (between Grids 2+3)	8	16	11	1.3	2	2.1	Trace	All nodules on one half of pin.	2	None	—	Short platelets rather random but mainly circumferentially orientated.
	X67(T)	1025 (Grid 3) ECT 'defect' signal	6	33	—	—	2	—	0	Repeated preparation of specimen revealed no evidence of defect.	—	None	—	Short platelets rather rondom but mainly circumferentially orientated.
C12	1927(T)	1800 (adjacent to Grid 6 crud protected specimen)	53	35	17	14.7	4	5.1	27	Crud protected by resin layer prior to cutting. Mixture of 'hard' and 'soft' crud layers.	4	None	Approx 60% of inner clad surface covered by oxide patches.	Very short platelets rather randomly orientated.
	1938(T)	1755 (between Grid 5+6)	7	16	14	1.2	2	2.1	16	Hard crud in one sector only. Some of the nodules (which occurred only in one sector) may be oxidised scratches.	6	Trace	Approx 50% of inner clad surface covered by oxide patches.	Very short platelets rather randomly orientated.
	1934(L)	Top-end weld	0	0	0	0	2	—	0	Weld sound-no enhanced oxidation at weld.	<1	None	—	Very short platelets longitudinally orientated.
C14	1940(T)	1310 (Grid 4) ECT 'Defect' signal	34	43	18	9.9	2	3.0	43 (at grid contact)	Some of the 'nodules' may be oxidised scraches. No evidence of defect.	6	None	Approx 80% of inner clad surface covered by oxide patches	Very stort platelets rather randomly orientated. Some platelets associated with large oxide nodules.
	1932(T)	1975 (between Grids 6+7)	29	20	13	5.4	2	2.4	27	—	6	None	Approx 70% of inner clad surface covered by oxide patches.	Very short platelets rather randomly. orientated.

Table 3.2-7 Crud analysis by EPMA

Crud type	Element wt %						
	Fe	Cu	Ni	Mn	Si	Cs	O*
single layer Porous deposit	43.3	0.9	3.0	1.8	0.05	0.3	50.6
Double layer Porous deposit	43.1	0.2	1.45	0.84	0.01	0.17	54.2
Double layer Hard deposit	2.6	63.5	0.9	1.45	0.17	0.24	31.2
	* by difference						

Table 3.2-8 PCMI and cladding inner surface examination specimens

Pin No.	(1) Region of severest ridging (mm from top shoulder)	PCMI longitudinal microspecimens		Position of cladding inner surface examination specimen (mm from top shoulder)
		Position on pin (mm from top shoulder)	Microspecimen No.	
C4	1900 – 2310	2200	1926 (L)	2080 – 2180
C7	2090 – 2690	2485	1936 (L)	2365 – 2465
C11	1810 – 2150 2300 – 2660	— 2535	1933 (L)	2415 – 2515

(1) From ECT data

Table 3.2-9 Isotopic analyses Pu/U and Nd148/U rations on gross burn-up samples

Pin Number	A4	A4	B6	B6	C4	C4	C10	C11	C11	C11
Distance from top shoulder (mm)	1975	3585	1940	3425	2840	3505	1965	3155	1940	880
Atom % U234	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
U235	0.62	0.69	0.59	0.66	0.53	0.62	0.51	0.55	0.51	0.56
U236	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03
U238	99.35	99.29	99.37	99.31	99.42	99.35	99.44	99.41	99.44	99.40
Atom % Pu238	0.24	0.16	0.28	0.20	0.34	0.22	0.37	0.30	0.36	0.30
Pu239	67.71	72.83	63.80	69.07	56.23	64.97	54.61	58.60	54.67	59.75
Pu240	24.60	21.99	27.68	24.62	33.29	27.93	33.86	31.89	33.83	30.58
Pu241	6.38	4.27	6.90	5.17	8.07	5.68	8.81	7.44	8.79	7.62
Pu242	1.07	0.75	1.34	0.94	2.07	1.20	2.35	1.77	2.35	1.75
Atom % Nd142	0.11	0.08	0.12	0.07	0.13	0.12	0.17	0.10	0.23	0.11
Nd143	26.93	27.62	26.60	27.29	25.91	27.11	25.72	26.54	26.07	26.42
Nd144	21.91	21.37	22.39	21.78	23.29	22.25	22.97	22.39	22.89	22.35
Nd145	18.97	19.21	18.89	19.10	18.81	18.99	18.81	18.99	18.74	18.96
Nd146	16.22	15.97	16.20	15.99	16.15	15.92	16.39	16.18	16.28	16.34
Nd148	10.17	10.10	10.15	10.13	10.12	10.02	10.26	10.15	10.17	10.22
Nd150	5.69	5.65	5.65	5.64	5.99	5.59	5.78	5.65	5.62	5.60
Am241										
Am243										
Cm242										
Cm244										
Pu/U ratio by weight	0.0202	0.0205	0.0195	0.0199	0.0183	0.0189	0.0176	0.0190	0.0176	0.0183
Nd148/U ratio by weight X10-3	0.0578	0.0228	0.0758	0.0418	0.1067	0.0582	0.1157	0.1008	0.1185	0.0917
Burn-up estimate from Nd148/U ratio Mwd/te MO	4696	1853	6159	3396	8670	4729	9400	8190	9628	7451

Table 3.2-10 Isotopic analysis Pu/U and Nd 148/U ratios on radial burn-up sample

Pin No.	B6 sample					C11 sample				
Shell	a (edge)	b	c	d	e (centre)	a (edge)	b	c	d	e (centre)
Mean radius of shell (mm)	6.9	5.3	3.9	2.5	0.9	6.8	5.5	4.0	2.6	1.1
Atom % U234	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004
U235	0.573	0.578	0.581	0.590	0.588	0.490	0.485	0.507	0.507	0.523
U236	0.029	0.029	0.028	0.027	0.027	0.041	0.040	0.038	0.039	0.037
U238	99.394	99.389	99.387	99.379	99.381	99.465	99.472	99.441	99.450	99.436
Atom % Pu238	0.29	0.28	0.27	0.26	0.26	0.39	0.39	0.36	0.36	0.34
Pu239	62.92	63.55	64.01	64.73	65.08	54.53	53.13	55.63	55.29	56.76
Pu240	27.51	28.35	28.31	27.87	27.64	33.10	35.46	33.91	34.62	33.78
Pu241	7.78	6.50	6.15	5.94	5.84	9.44	8.59	7.99	7.69	7.25
Pu242	1.50	1.32	1.26	1.20	1.18	2.54	2.43	2.11	2.04	1.87
Atom % Nd142			Not determined					Not determined		
Nd143	26.36	26.50	26.57	26.64	26.03	25.44	25.60	26.29	25.72	26.20
Nd144	23.22	23.21	23.16	23.09	23.57	24.36	24.40	24.19	24.10	23.58
Nd145	18.62	18.61	18.60	18.58	18.51	18.39	18.29	18.20	18.48	18.46
Nd146	16.08	16.14	16.09	16.11	16.20	16.08	16.13	15.93	16.13	16.17
Nd148	10.10	9.97	10.00	9.98	10.04	10.10	10.02	9.89	10.03	9.99
Nd150	5.62	5.57	5.58	5.60	5.65	5.63	5.56	5.50	5.54	5.60
Pu/U ratio by weight	0.0192	0.0190	0.0192	0.0192	0.0194	0.0170	0.0167	0.0169	0.0171	0.0175
Nd 148/U ratio by weight $\times 10^{-3}$	0.0809	0.0746	0.0724	0.0697	0.0682	0.1183	0.1122	0.1074	0.1084	0.1015
Burn-up estimate from Nd148/U ratio Mwd/te MO	6573	6061	5882	5663	5541	9612	9116	8726	8808	8247

Table 3.2-11 Fuel density results

Pin No.	Specimen distance from top shoulder (mm)	Fuel burn-up (Mwd/teM) (5)	Irradiation time (effective full power days at >312 Mw(h))	Fuel rating (w/gmM) (5)	Approximate fuel centre temperature (℃) (2)	Pre-irradiation density (te/m^3) (3)	Post-irradiation density (te/m^3) (4)	Change in density (%)	Swelling due to solid fission products (%) (1)	Calculated porosity change (%)
A4	1915	5200	372	14.0	< 900	10.36	10.51 10.50 } 10.51	+ 1.45	0.54	− 1.99
	3645	1792	372	4.8	(< 900)	10.36	10.41 10.41 } 10.41	+ 0.48	0.19	− 0.67
B6	2050	6217	372	16.7	1050	10.39	10.46 10.46 } 10.46	+ 0.67	0.65	− 1.32
	3485	3040	372	8.2	(< 900)	10.39	10.46 10.46 } 10.46	+ 0.67	0.32	− 0.99
C4	2900	8327	372	22.4	1150	10.36	10.49 10.49 } 10.48	+ 1.16	0.87	− 2.03
	3565	4084	372	11.0	< 900	10.36	10.46 10.50 10.50 } 10.49	+ 1.25	0.43	− 1.67
C11	2050	9858	372	26.5	1600	10.38	10.42 10.41 10.43 } 10.42	+ 0.39	1.03	− 1.42
	3215	7145	372	19.2	1250	10.38	10.49 10.47 10.50 } 10.49	+ 1.06	0.75	− 1.81

1. Assuming 1% $\Delta V/V$ per 9560 Mwd/teM burn-up.
2. Deduced from fuel microstructural features on adjacent micro-specimens, except for bracketed numbers where a rough estimate has been made.
3. Data supplied by PNC representative.
4. Individual test results and mean densities are shown. Accuracy better than ± 0.5%.
5. From WSGHWR fuel data bank.

Table 3.2-12 Hydrauric burst test results

Bore dia.	Wall thickness			Mean wall dia.	UBS	0.2% proof stress	Wall thinning at fracture	Total circum. elongation
	Min	Max	Mean					
(mm)		(mm)		(mm)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
14.686	0.853	0.884	0.869	15.55	654.5	599	10.8	8.7

Table 3.2-13 Hydrauric burst test results of type B

Specimen	Pin	Test temperature (℃)	Maximum pressure (ksi)	Uitimate burst stress (ksi)	0.2% proof stress (ksi)	Total circumferential elongation (%)	Wall thinning at fracture (%)
CE627	SA-15	350	12.50	103.2	—	10.0	8.5
TE406	SA-10	350	13.46	110.1	90.0	6.5	8.0

Table 3.2-14 Burst test results of type C

Pin	Burst Specimen	Bore Diameter (in)	Wall thickness (10^{-3}in)			Mean wall + diameter (in)	UBS ⊙ (ksi)	0.2% PS ⊙ (ksi)	Wall-thinning at fracture (%)	Total circumferential elongation (%)
			Min.	Max.	Mean					
S708	TE473	0.5796	33.3	35.8	34.7	0.6143	106.1	—	9.7	2.1
K503	TE477	0.5793	33.3	34.0	33.7	0.6130	103.6	96.0	14.1	10.6
S697	TE469	0.5789	33.8	34.8	34.3	0.6132	105.2	94.0	13.8	7.0
S708	TE500	0.5753	32.8	35.7	34.3	0.6096	100.9	98.0	9.2	2.3
—	S712/2*	0.5780	32.9	35.5	34.2	0.6122	74.7	74.4	40.6	8.7
—	S712/3*	0.5786	33.5	35.3	34.5	0.6132	76.7	75.9	32.3	8.7

* unirradiated

\+ Mean wall diameter = bore diameter + mean wall thickness

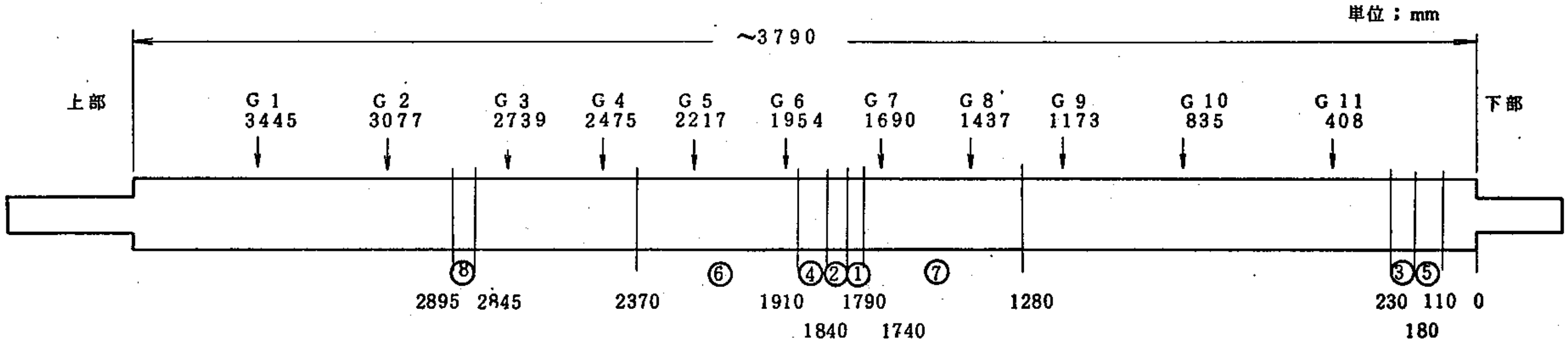
⊙ UBS and 0.2%PS calculated from $\dfrac{\text{P x mean wall diameter}}{\text{2 x min. wall thickness}}$

Table 3.2-15 Pre-test wall thickness variations of type C

Pin	Burst specimen	Wall tickness variation * (%)
S708	TE473	7.6
K503	TE477	2.1
S697	TE469	3.0
S708	TE500	8.8
—	S712/2	7.9
—	S712/3	5.4

* % wall thickness variation $= \dfrac{\text{max} - \text{min}}{\text{min}} \times 100$

燃料要素番号　A4

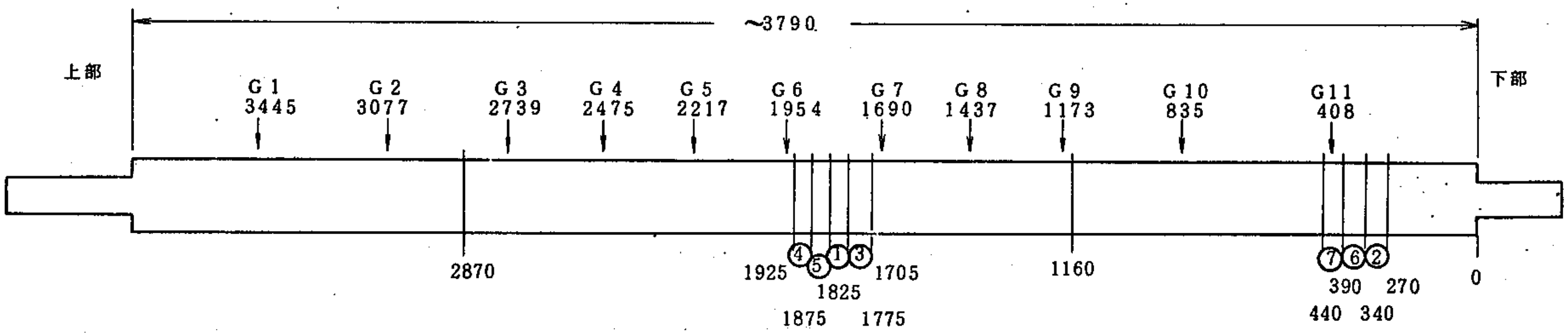


試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）	5	70	燃料密度
2	50	燃焼度（グロス）	6	460	中性子ラジオグラフィ
3	50	燃焼度（グロス）	7	460	中性子ラジオグラフィ
4	70	燃料密度	8	50	金相（横断面） （渦電流信号）

Fig. 3.2-1　破壊試験用試料の切断位置（1）

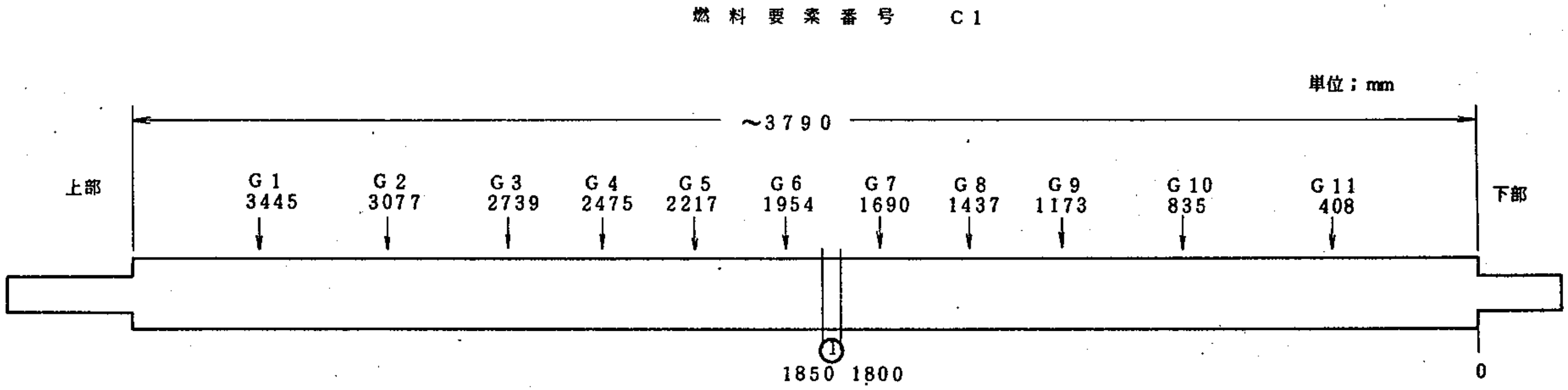
燃 料 要 素 番 号　B 6

単位；mm .



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）	5	50	燃焼度（グロス）
2	70	燃料密度	6	50	燃焼度（グロス）
3	70	燃料密度	7	50	フレッティング
4	50	燃焼度（半径方向）			

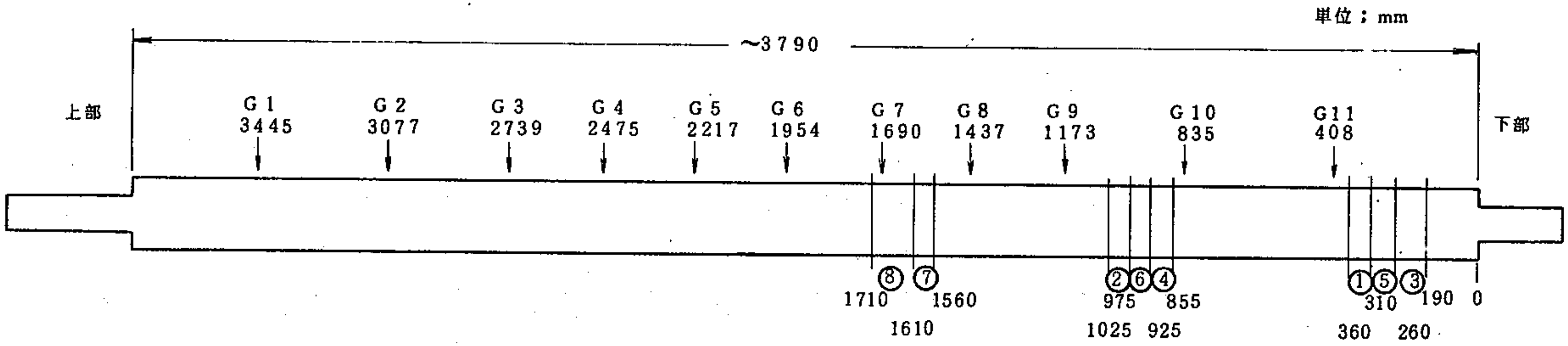
Fig. 3.2-2　破壊試験用試料の切断位置　(2)



試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）

Fig. 3.2-3　破壊試験用試料の切断位置 (3)

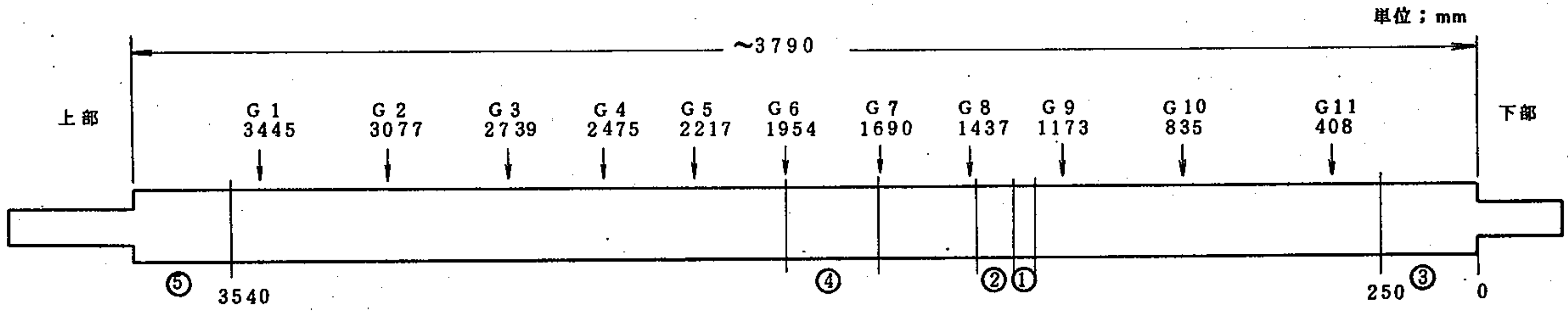
燃 料 要 素 番 号　C 4



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）	5	50	燃焼度（グロス）
2	50	金相（横断面）	6	50	燃焼度（グロス）
3	70	燃料密度	7	50	金相（縦断面）
4	70	燃料密度	8	100	被覆管内表面

Fig. 3.2-4　破壊試験用試料の切断位置 (4)

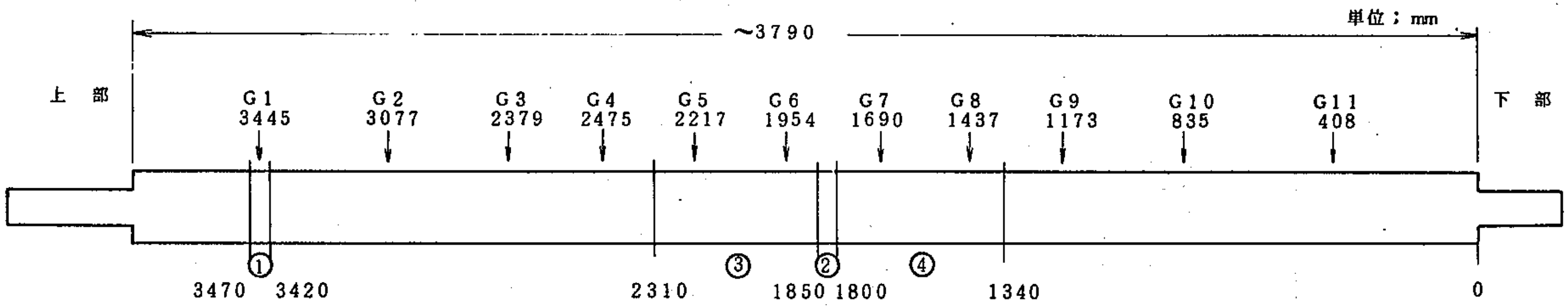
燃料要素番号　C7



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（縦断面）	4	250	バースト試験
2	100	被覆管内表面	5	250	バースト試験
3	250	バースト試験			

Fig.3.2-5　　破壊試験用試料の切断位置 (5)

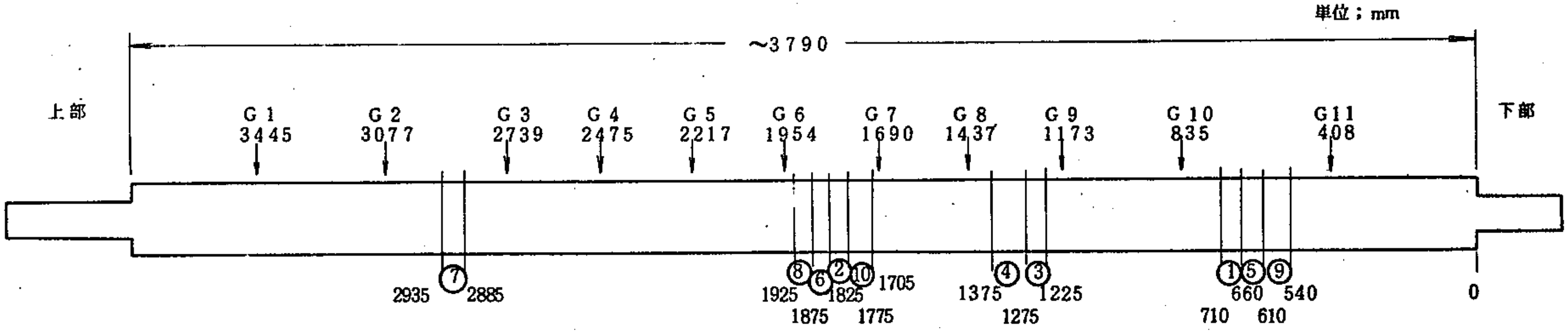
燃 料 要 素 番 号　C10



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	フレッティング	3	460	中性子ラジオグラフィ
2	50	燃焼度（グロス）	4	460	中性子ラジオグラフィ

Fig. 3.2-6　破壊試験用試料の切断位置 (6)

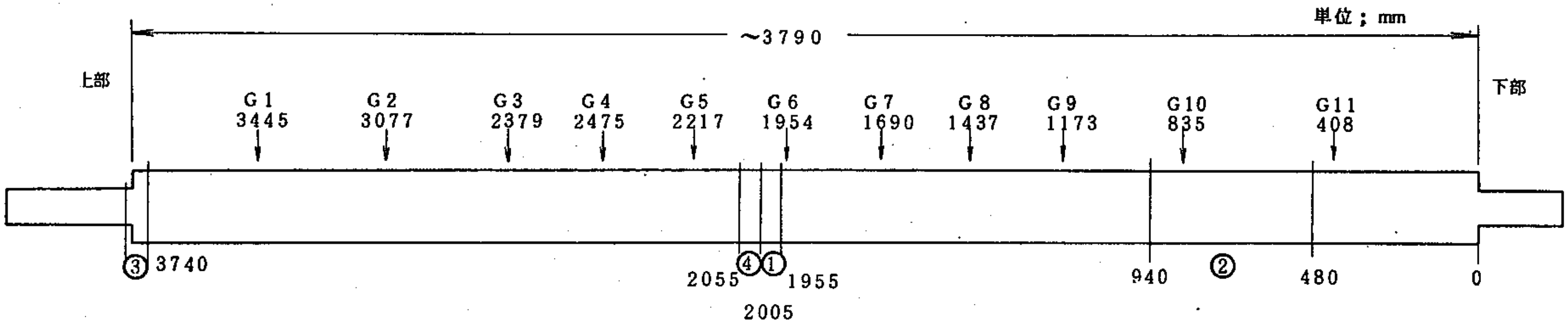
燃料要素番号 C11



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）	7	50	燃焼度（グロス）
2	50	金相（横断面）	8	50	燃焼度（半径方向）
3	50	金相（縦断面）	9	70	燃料密度
4	100	被覆管内表面	10	70	燃料密度
5	50	燃焼度（グロス）	11	50	金相（横断面）（渦電流信号）
6	50	燃焼度（グロス）			

Fig. 3.2-7　　破壊試験用試料の切断位置 (7)

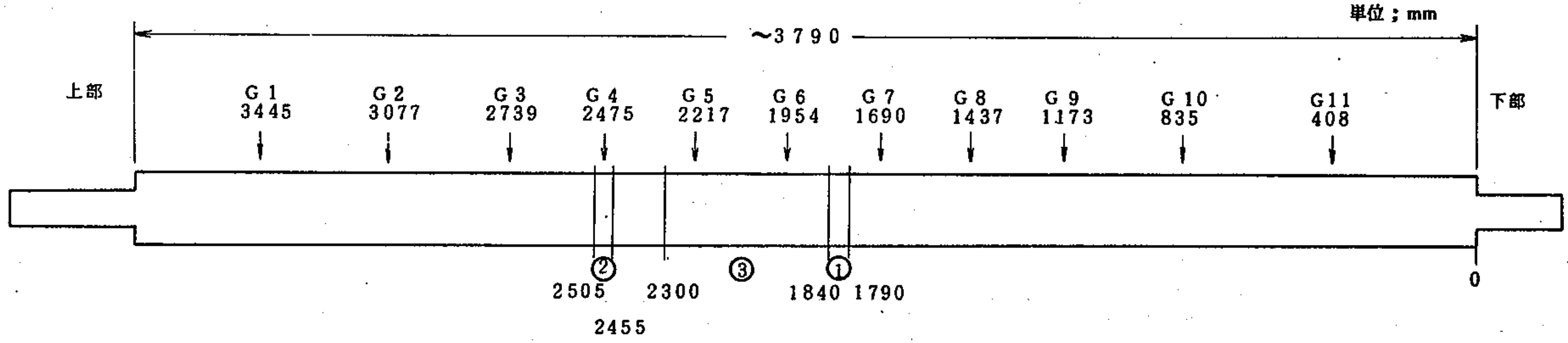
燃料要素番号　C12



試料番号	試料長さ	目的	試料番号	試料長さ	目的
1	50	クラッド厚さ	3	50	金相（縦断面）
2	460	中性子ラジオグラフィ	4	50	金相（横断面）

Fig. 3.2-8　　破壊試験用試料の切断位置　(8)

燃料要素番号　C14



試料番号	試料長さ	目的
1	50	金相（横断面）
2	50	金相（横断面） （渦電流信号）
3	460	中性子ラジオグラフィ

Fig. 3.2-9　　破壊試験用試料の切断位置　(9)

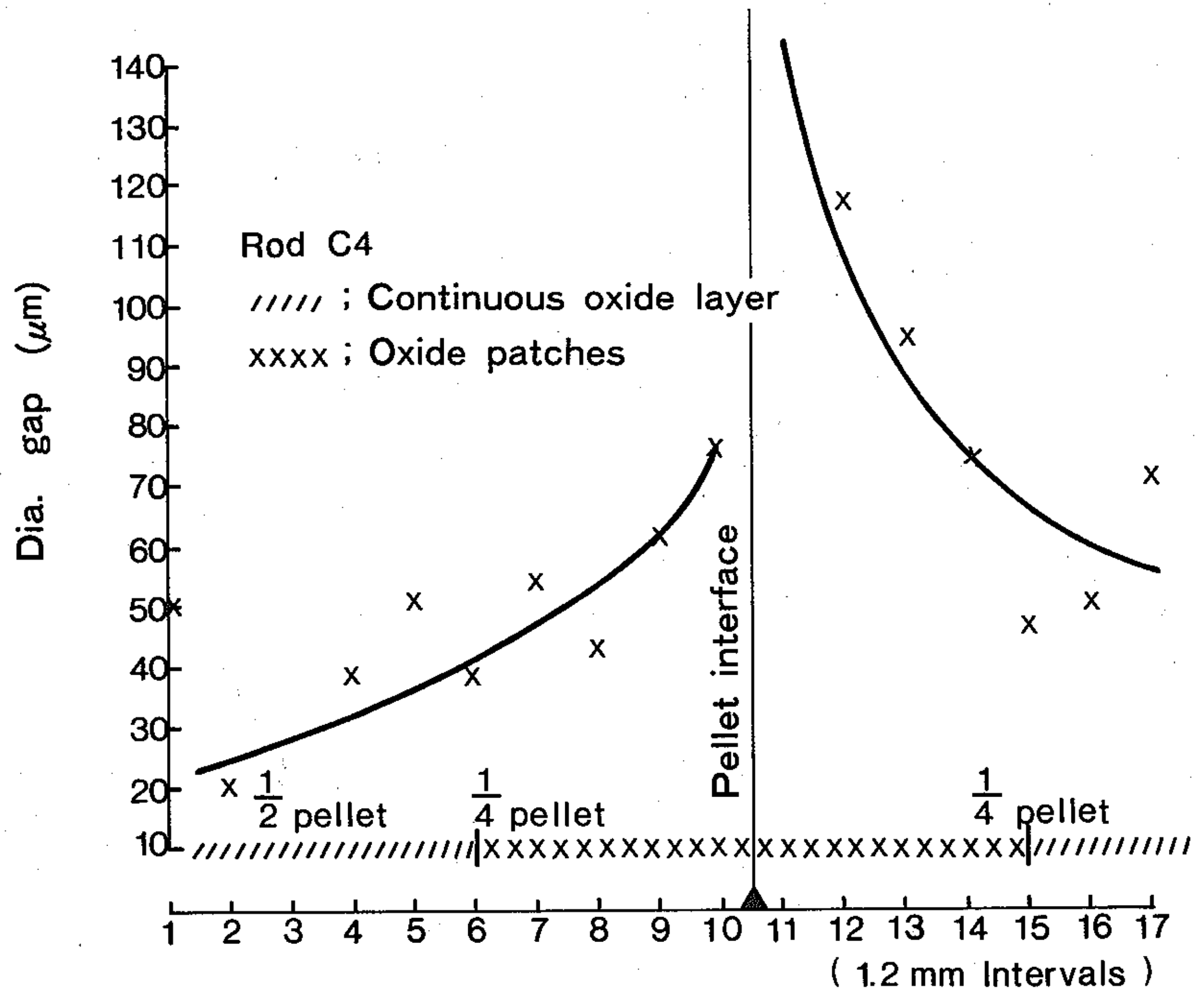


Fig.3.2-10 Pin C4 fuel pellet/cladding gap and internal surface oxidation observations on PCMI microspecimen

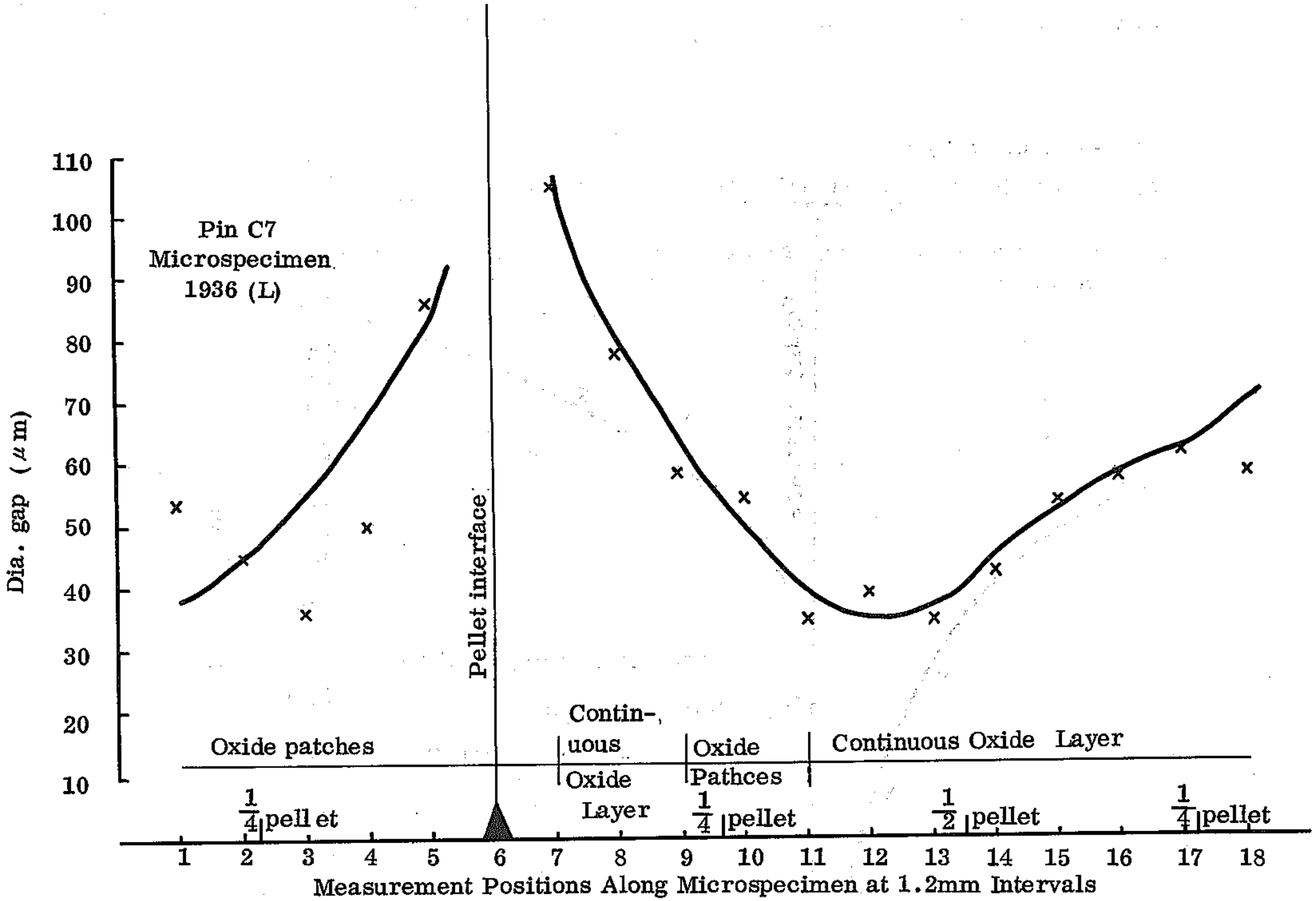


Fig.3.2-11 Pin C7 fuel pellet/cladding gap and cladding internal surface oxidation observations on PCMI microspecimen

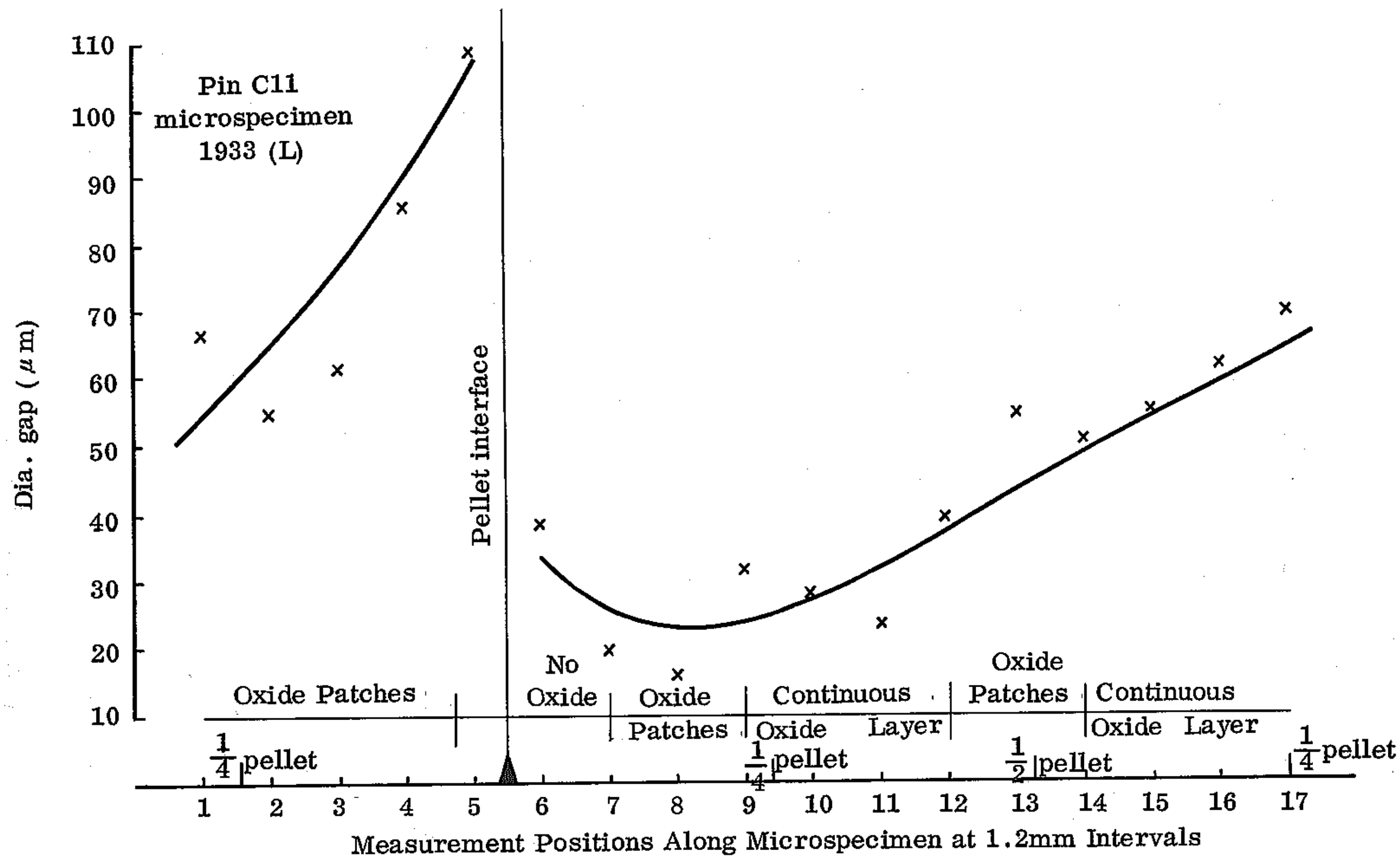


Fig.3.2-12 Pin C11 fuel pellet/cladding gap and cladding internal surface Oxidation observations on PCMI microspecimen

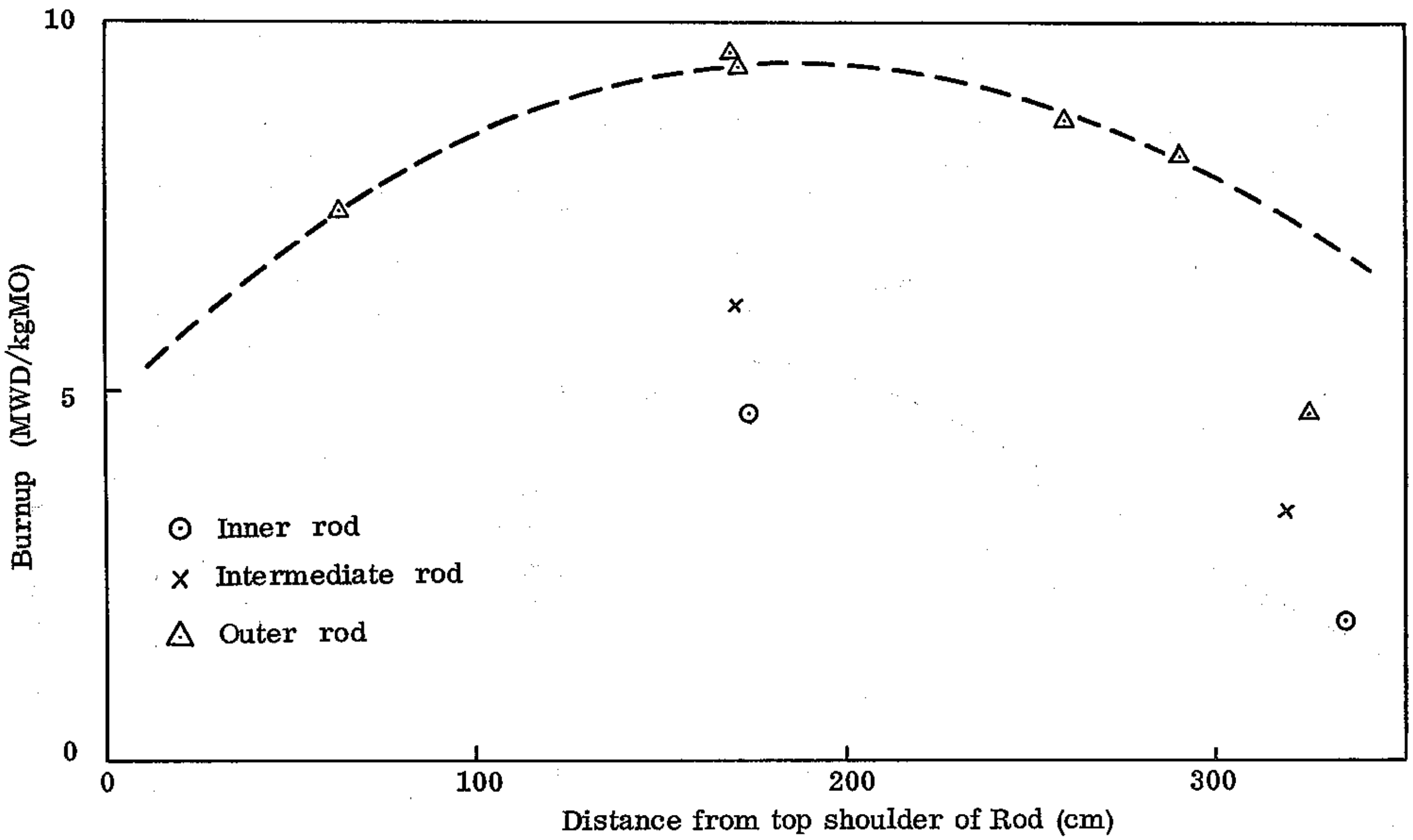


Fig.3.2-13 Burnup estimate from Nd 148/U ratio MWD/kg MO

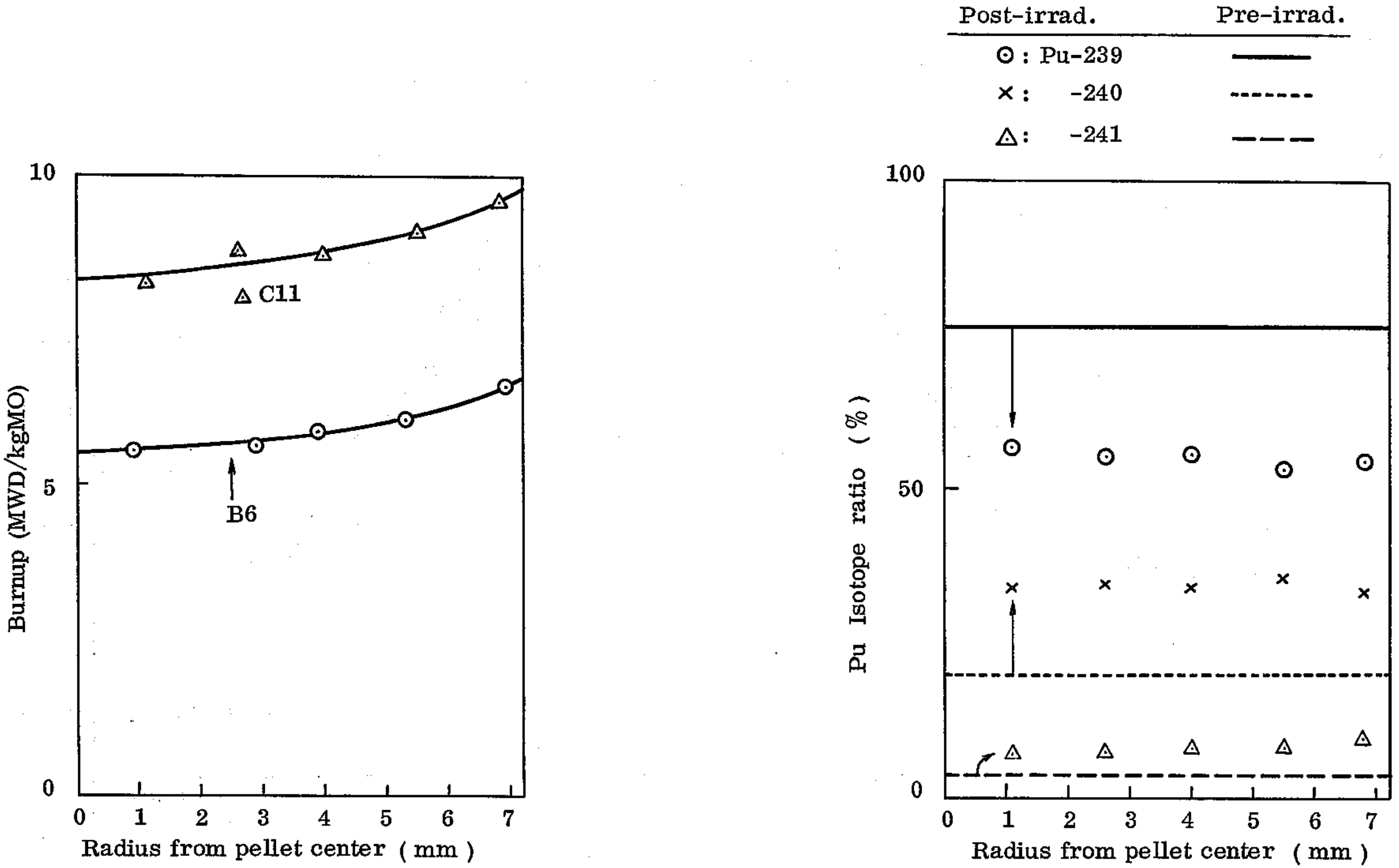


Fig.3.2-14 Radial burnup and plutonium isotope ratio

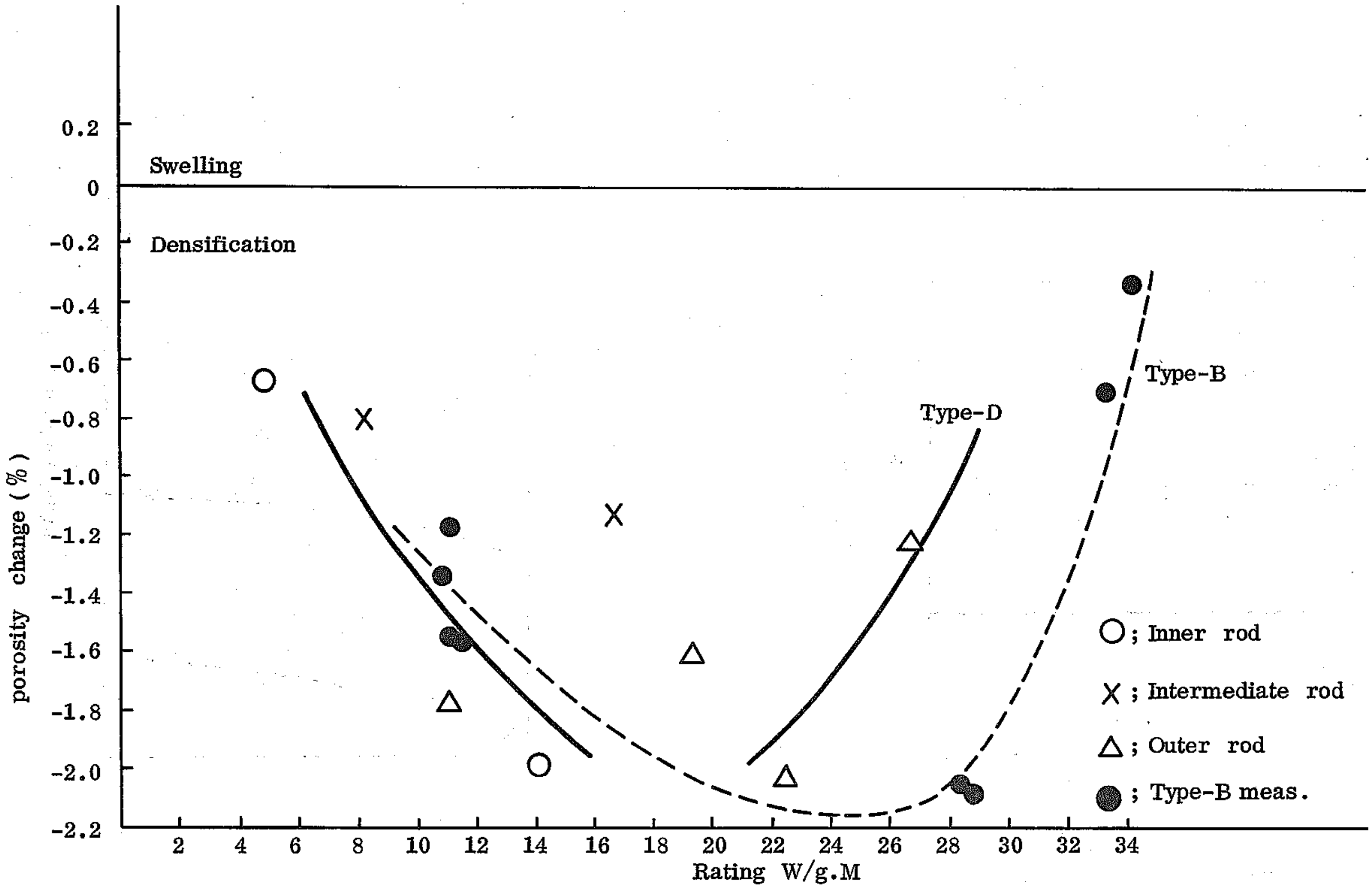


Fig.3.2-15 Comparison of calculated fuel porosity change in Type B and Type D assembly

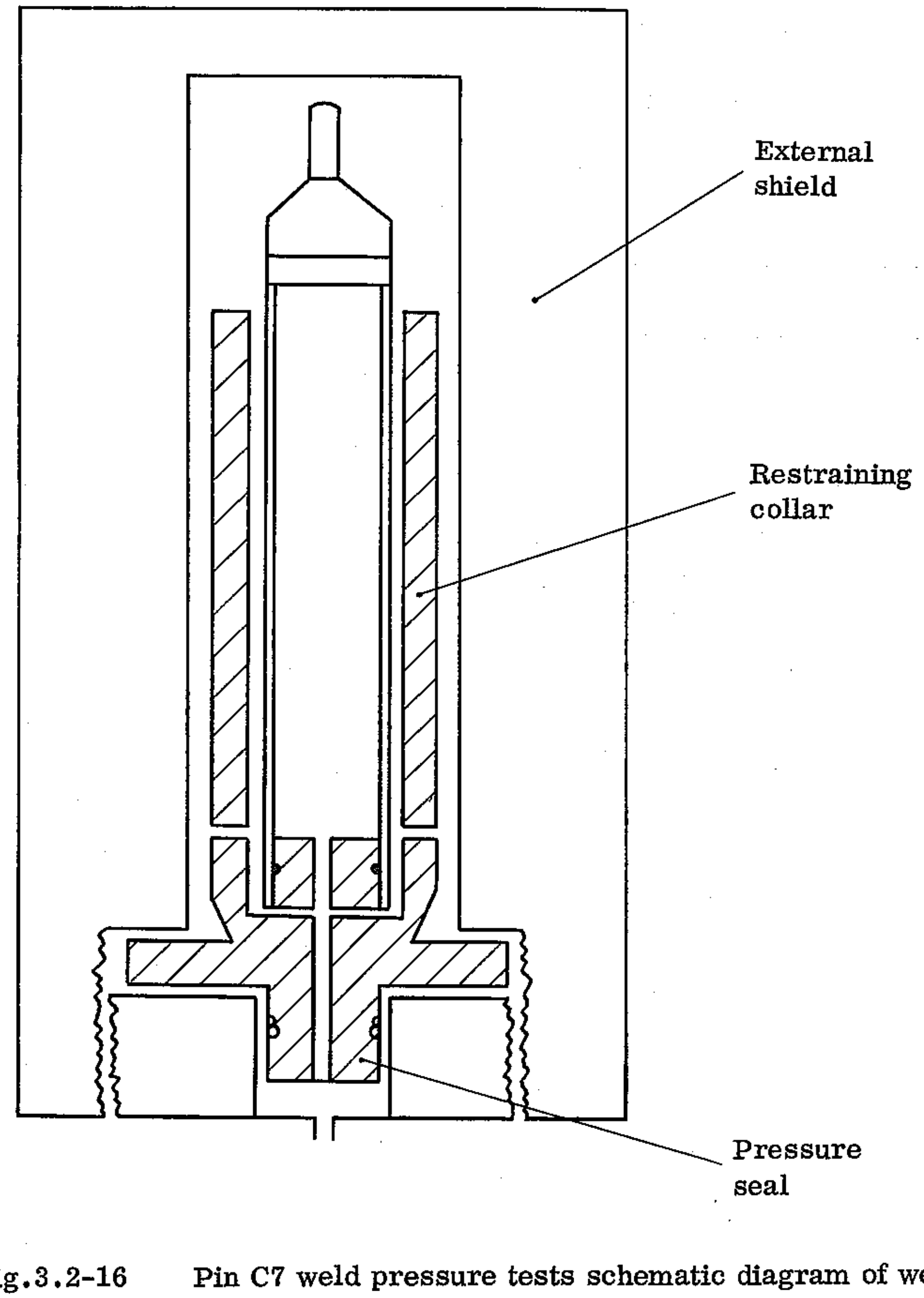


Fig.3.2-16 Pin C7 weld pressure tests schematic diagram of weld specimen with restraining sleeve in position

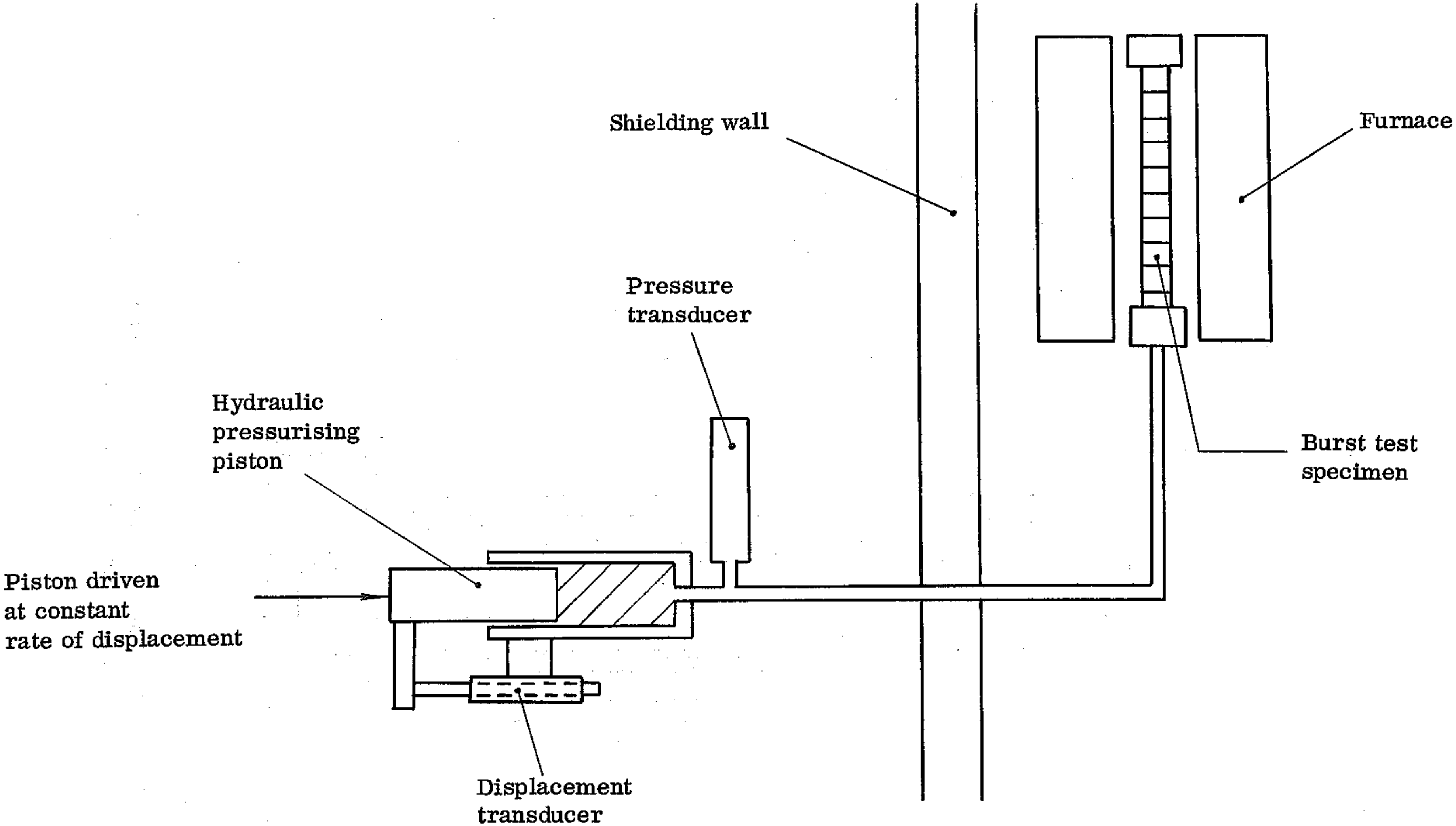


Fig.3.2-17 Schematic drawing of burst test equipment

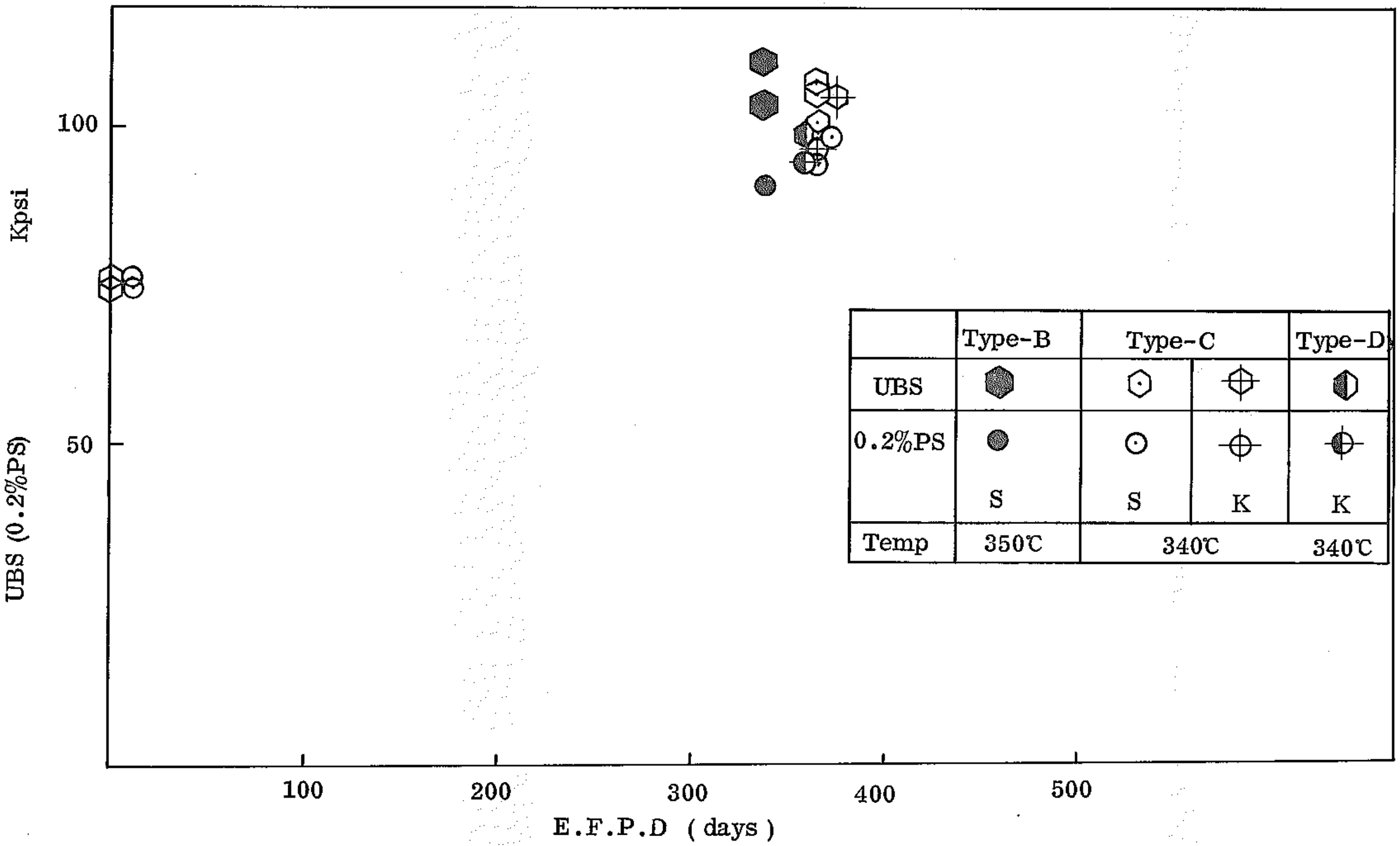
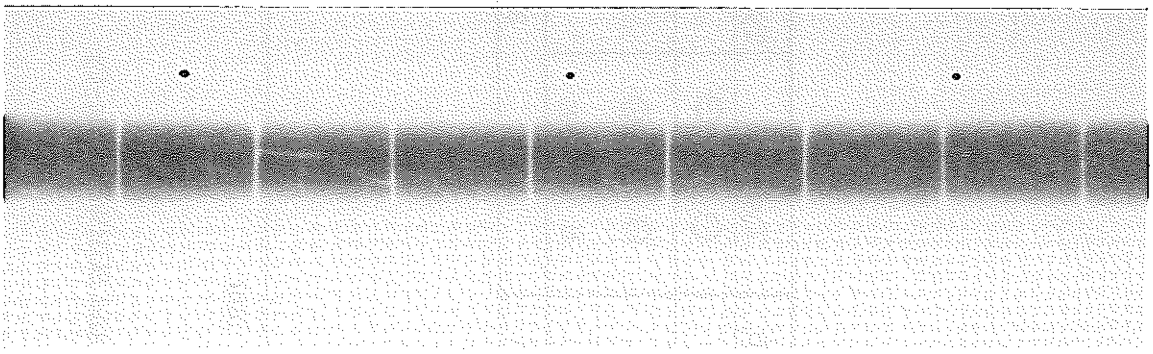
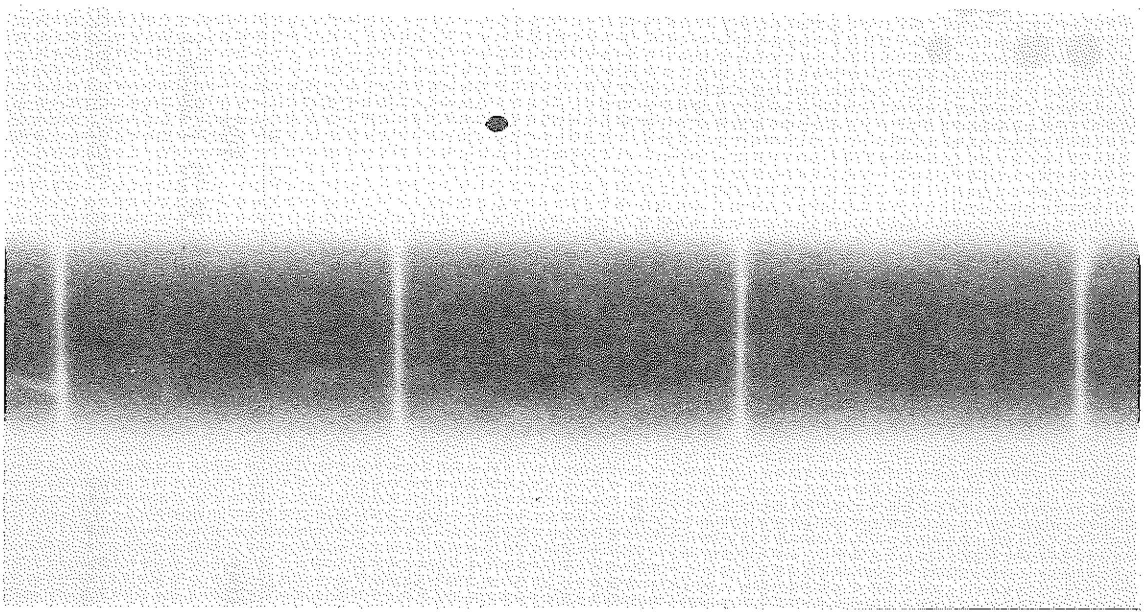


Fig.3.2-18 E.F.P.D.vs. UBS (0.2%PS) (SGHWR Type-B and SGHWR Type-C)

cadmium discs.   50mm ± 0.15mm between centres

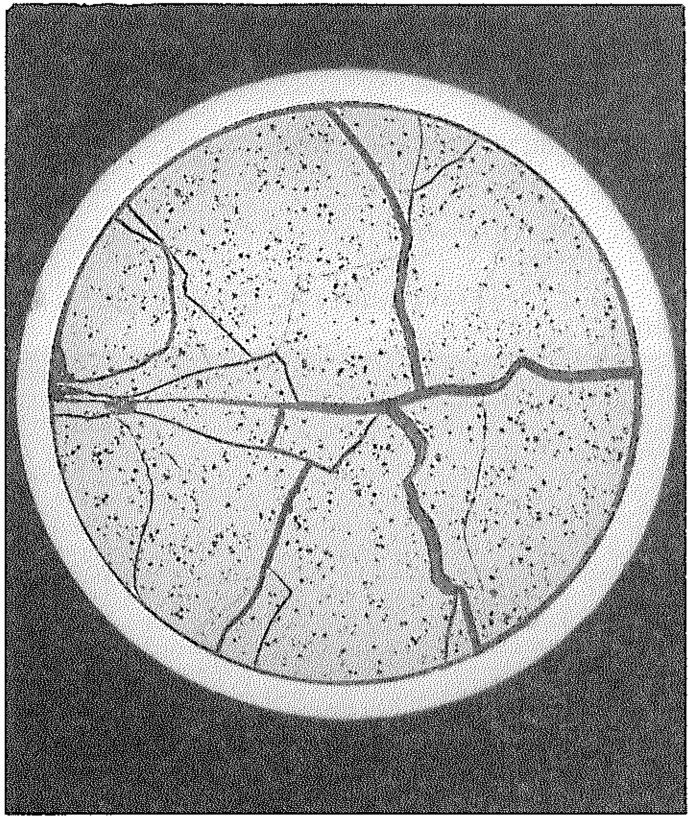


a) n-radiograph 8834. bottom portion of pin section

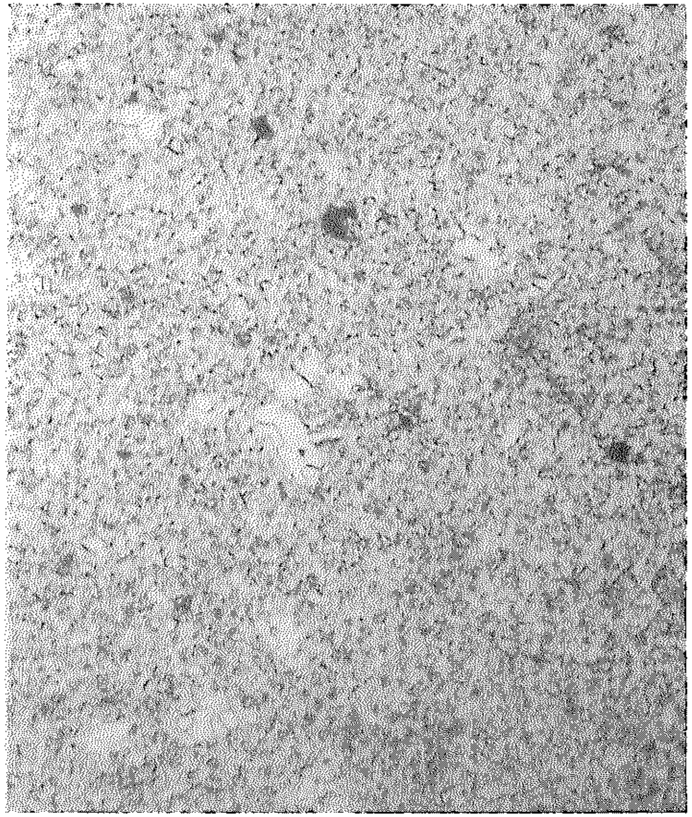


b) n-radiograph 8834. enlarged detail from above radiograph

Photo 3.2-1 Neutron radiography, Pin C10. between grid 5 and 6

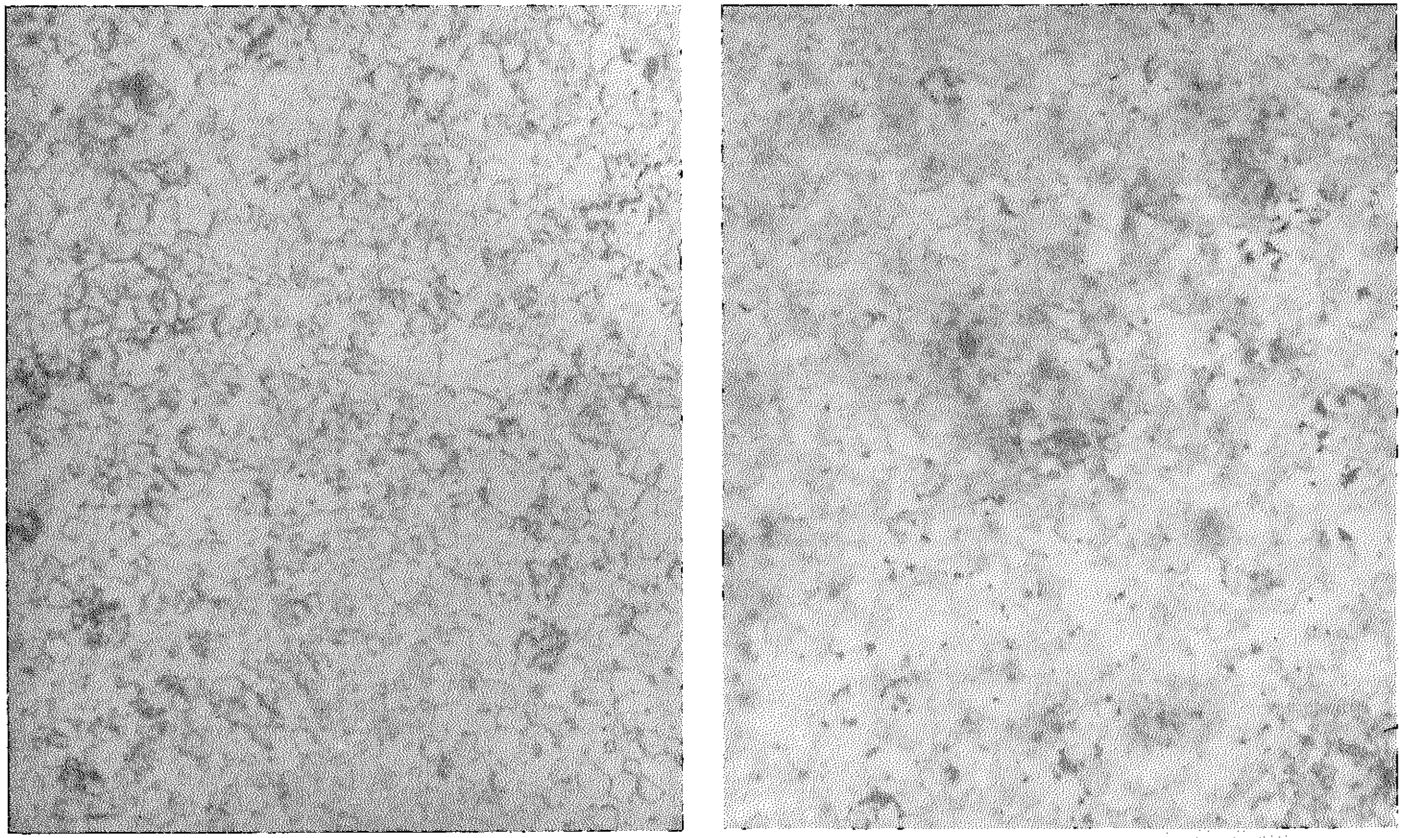


a) 1930(T) x5



b) 1930(T) occasional large grains. x175

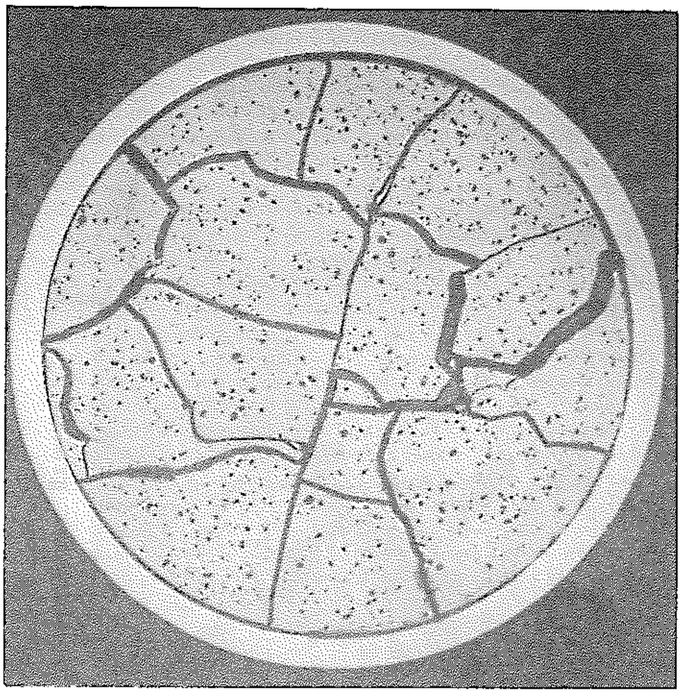
Photo 3.2-2 Pin A4(inner ring pin). Fuel microstructures. Maximum burnup region. (continue)



c) 1930(T) pellet edge. x700

d) 1930(T) pellet centre x700

Photo 3.2-2 Pin A4(inner ring pin). Fuel microstructures. Maximm burnup region.



a) 1928(T)

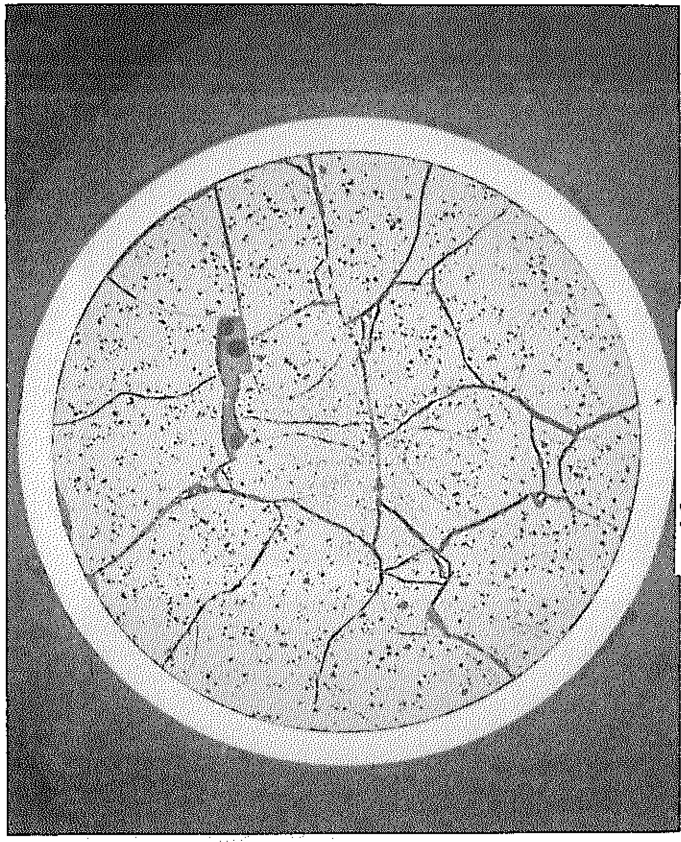
grid spring side

x5

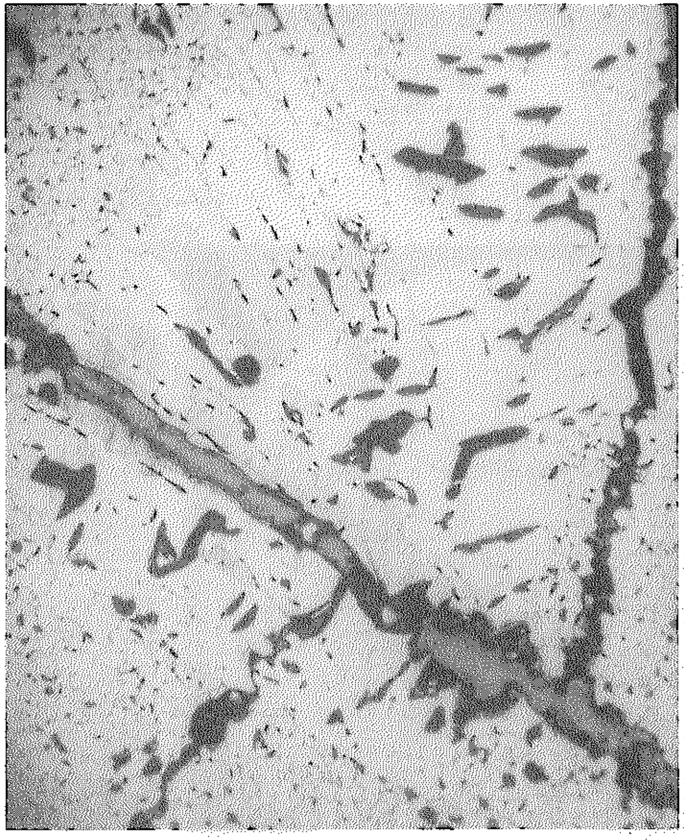
b) 1928(T) pellet edge x700

c) 1928(T) pellet centre x700

Photo 3.2-3 Pin B6 (intermediate ring pin). Fuel microstructures, Maximum burn-up region.

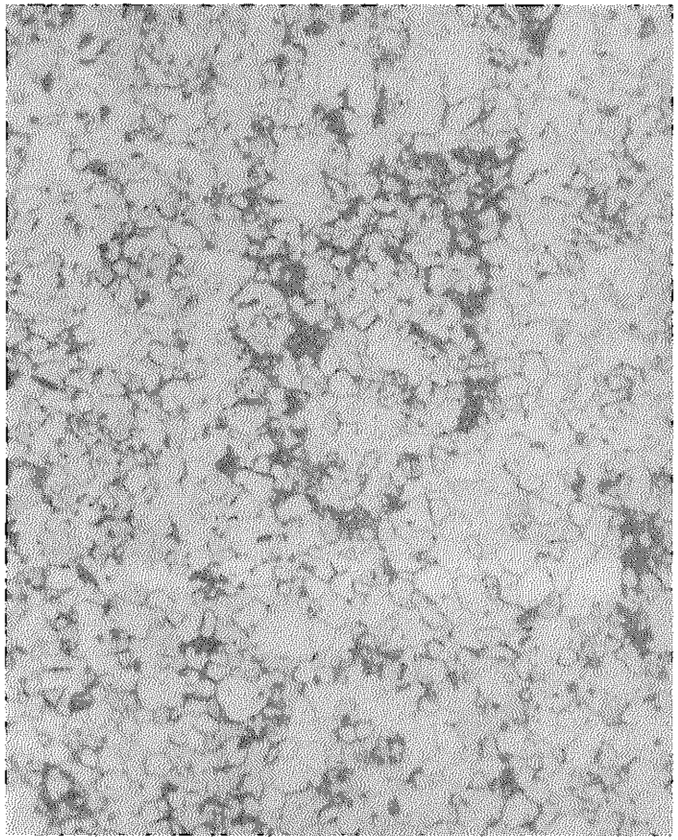


a) 1932(T) x5



b) 1932(T) columnar grains on only one side of thermal centre x75

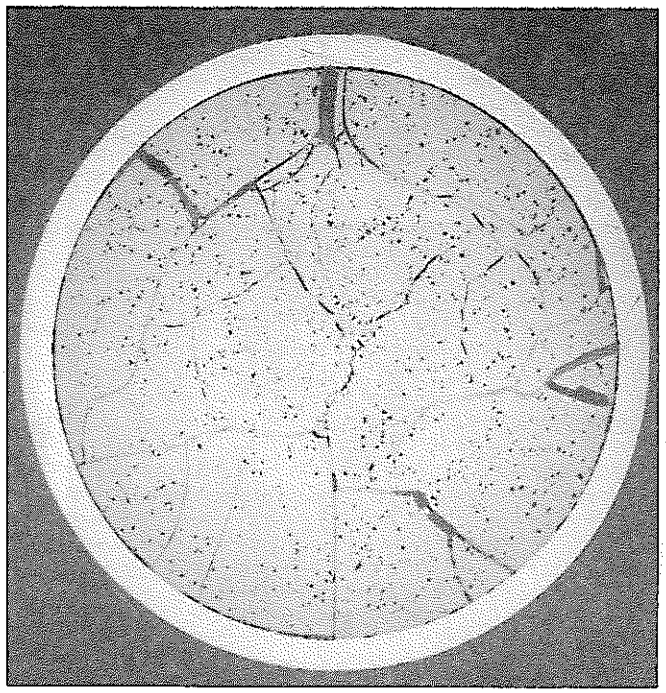
Photo 3.2-4 Pin C14(outer ring pin). Fuel microstructures. Maximum burnup region. (continue)



c) 1932(T) pellet edge x700

d) 1032(T) pellet thermal centre x700

Photo 3.2-4 Pin C14 (outer ring pin). Fuel microstructures.
Maximum burn-up region.

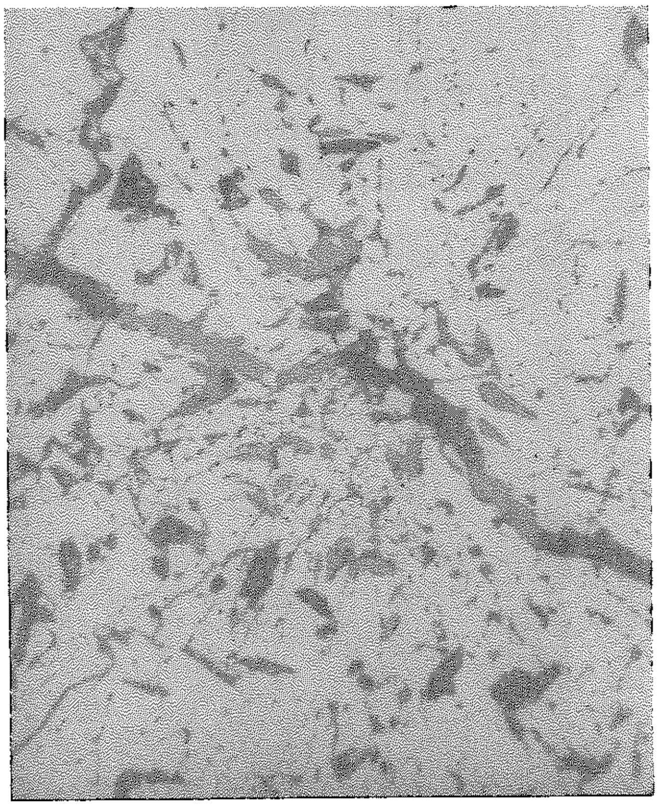


1938(T)

grid spring side

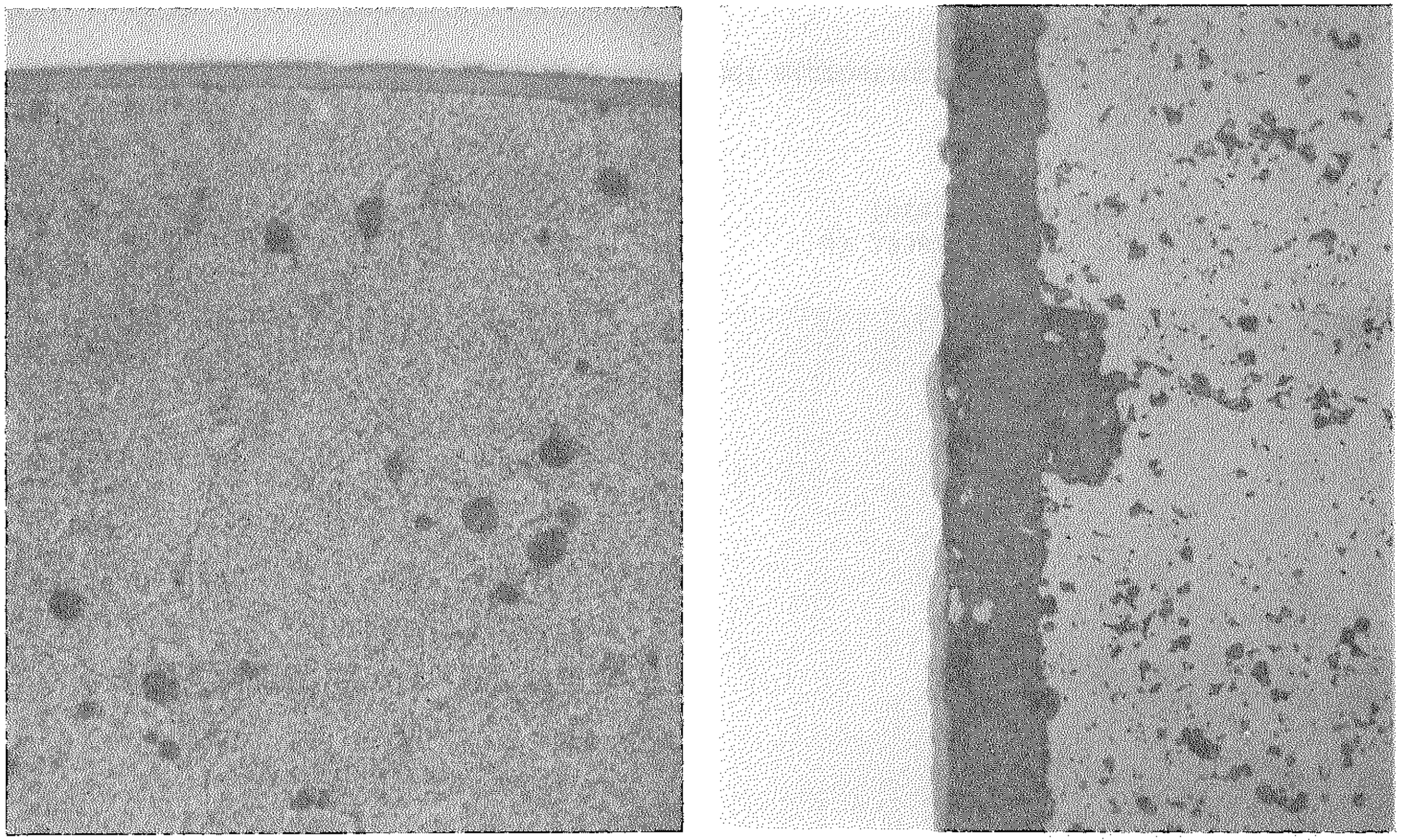
x5

1938(T) pellet edge x700



1938(T) pellet centre x75

Photo 3.2-5 Pin C12 (outer ring pin). Fuel microstructures. 98% maximum burn-up region.



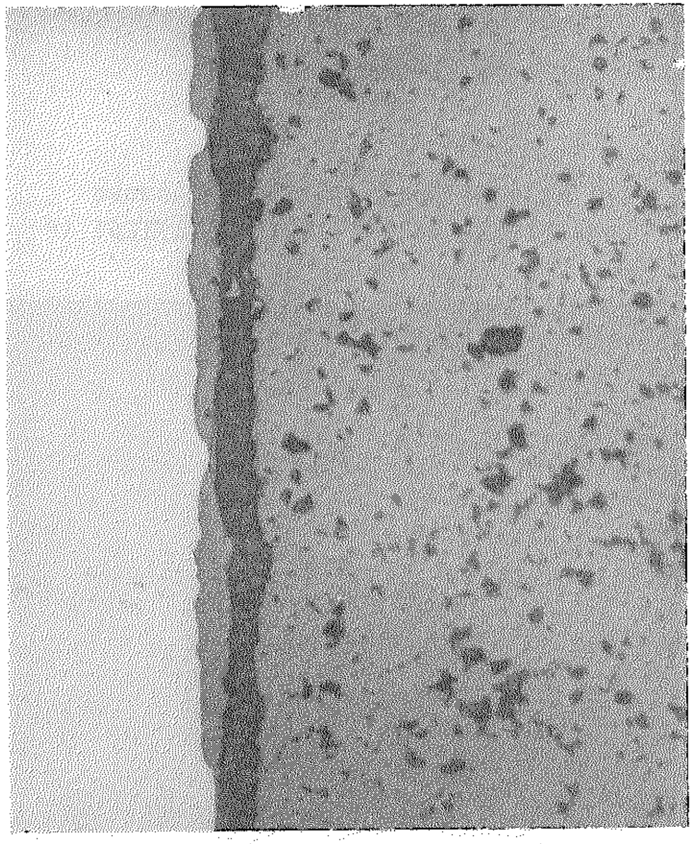
x75

a) 1931(T) typical fuel particle and macro-voidage distribution(Pin C11)

x500

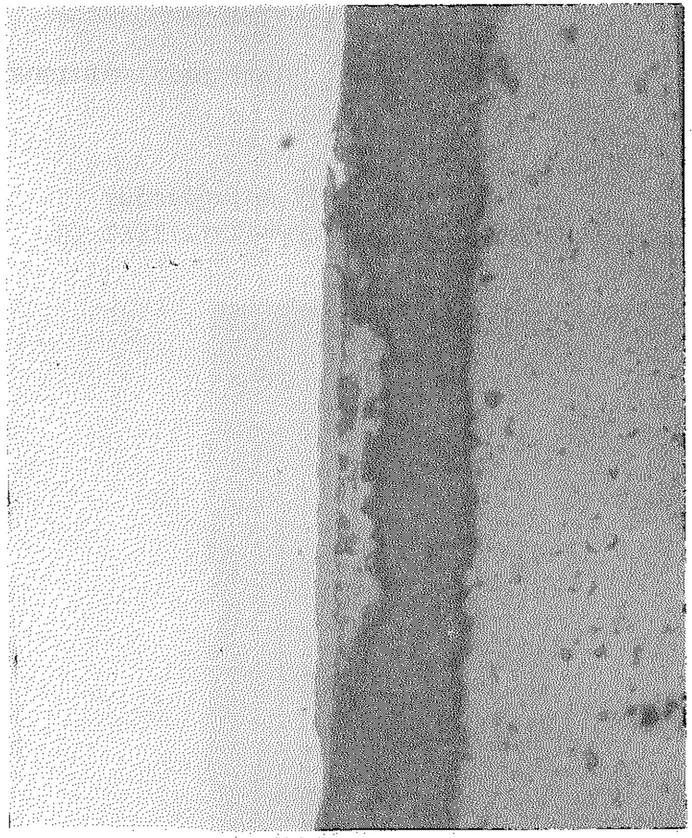
b) 1931(T) trace fuel/cladding interaction (pin C11)

Photo 3.2-6 Fuel microstructures(continue)



x500

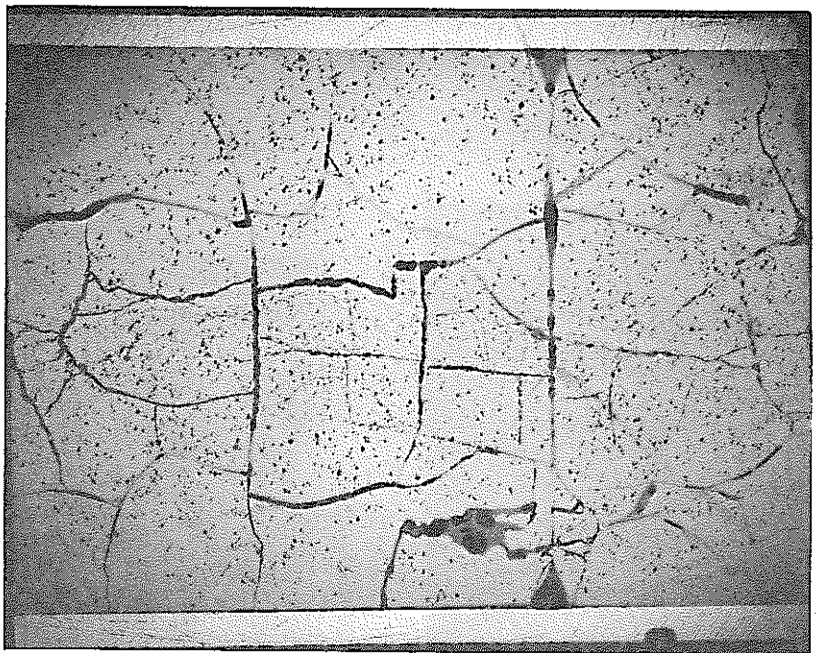
c) 1936(L) trace fuel/cladding interaction (pin C7)



x500

d) 1938(T) trace fuel/cladding interaction (pin C12)

Photo 3.2-6 Fuel microstructures

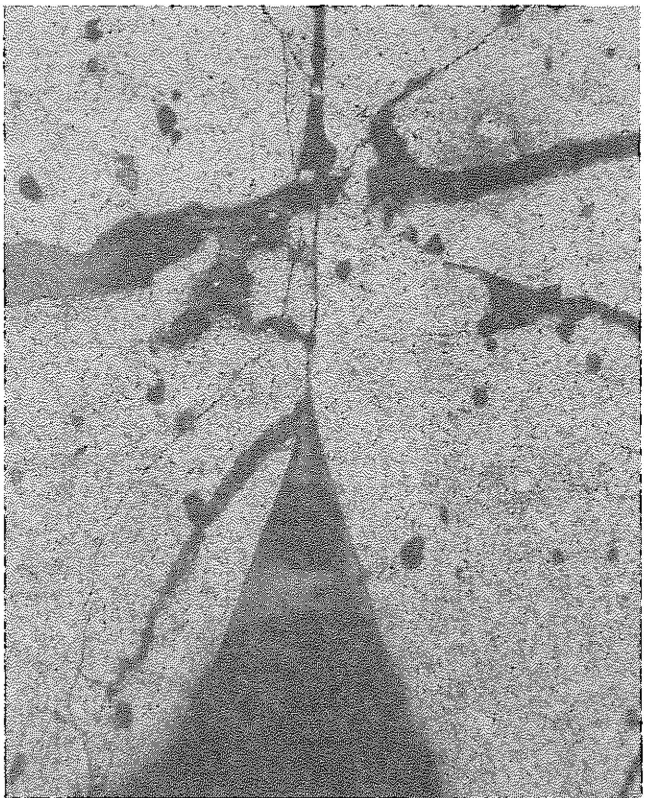


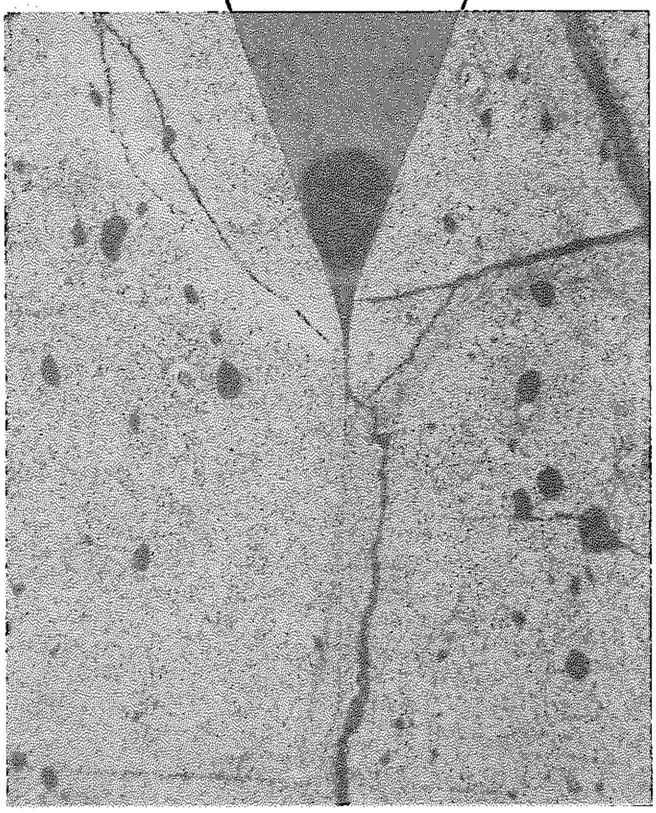
a) 1936(L)

x5

grid spring side

pellet chamfers



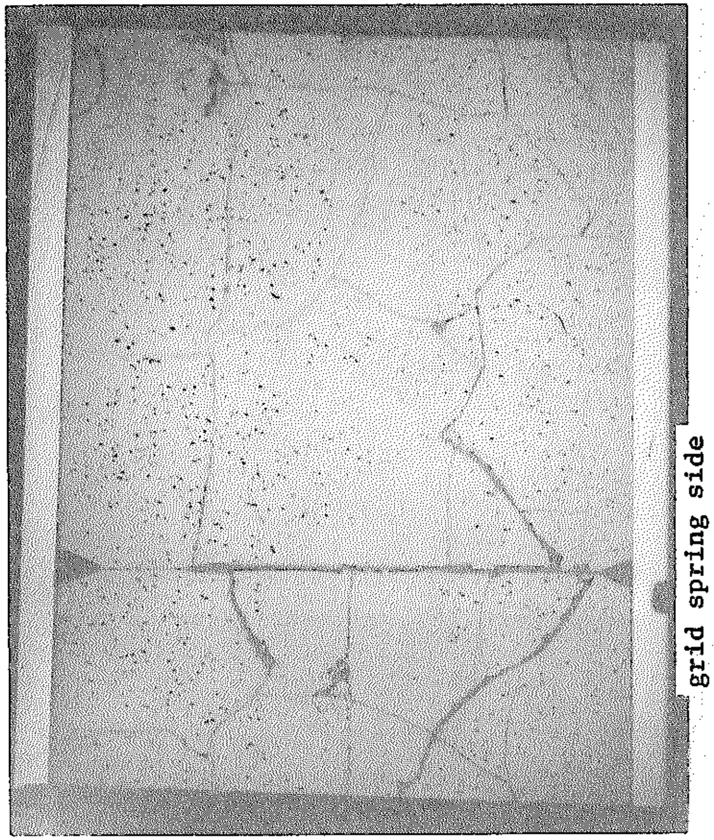


b) 1936(L) pellet chamfers x75

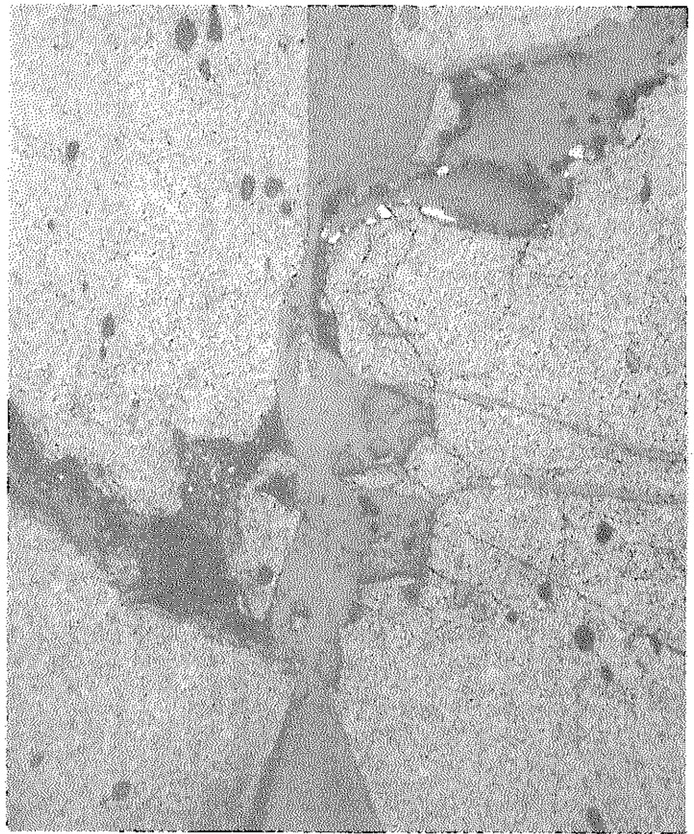
c) 1936(L) x75

high interpellet pressures resulted in sintering of pellet-end lands, and local fragmentation of pellet.

Photo 3.2-7 Pin C11 (outer ring pin). Microstructural features. 95% maximum burn-up region.



a) 1933(L) x5

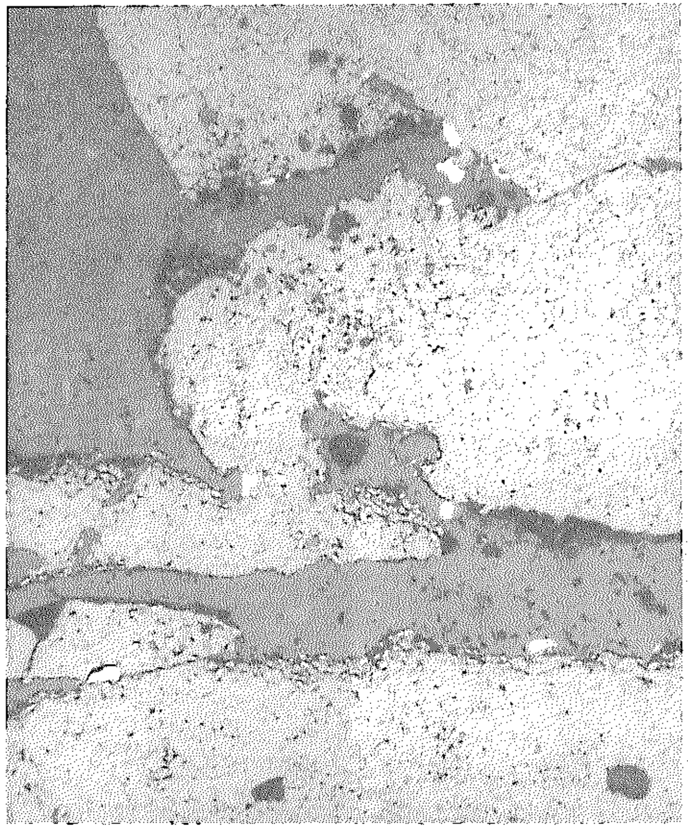


b) 1933(L) x75

pellet chamfers

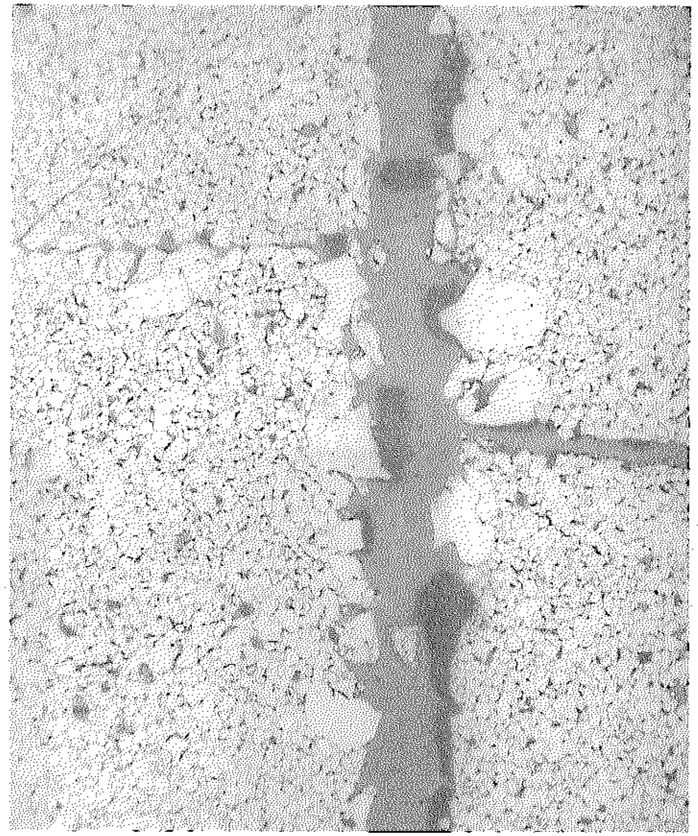
pellet fragmentation at chamfer and metallic(fission product?) inclusions

Photo 3.2-8 Pin C11(outer ring pin). Microstructural features. 95% max. burnup (continue)



x175

c) 1933(L) metallic(fission product?) inclusions near edge of pellet



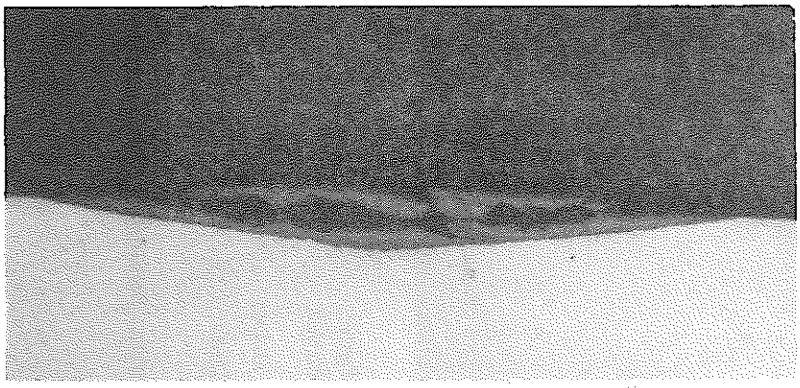
x75

d) 1933(L)

pellet interface
near pelletcenter

local large grains at pellet interface and fuel cracks

Photo 3.2-8 Pin C11(outer ring pin). Microstructural features. 95% max. burnup

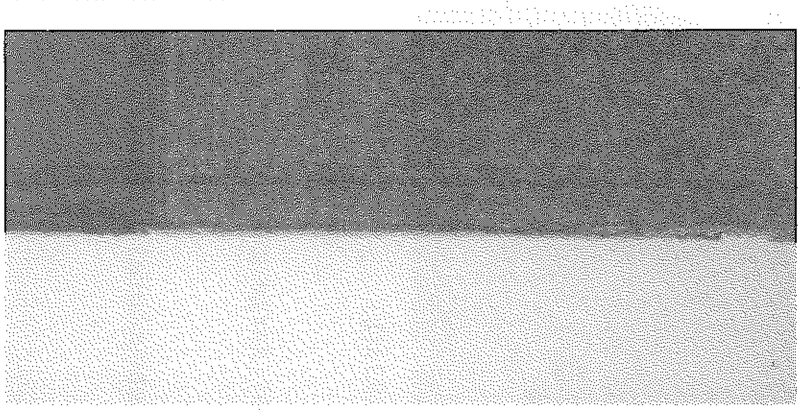


a) Pin C14
grid 4

one of the largest oxide nodules seen on any microspecimen

1940(T)

x250

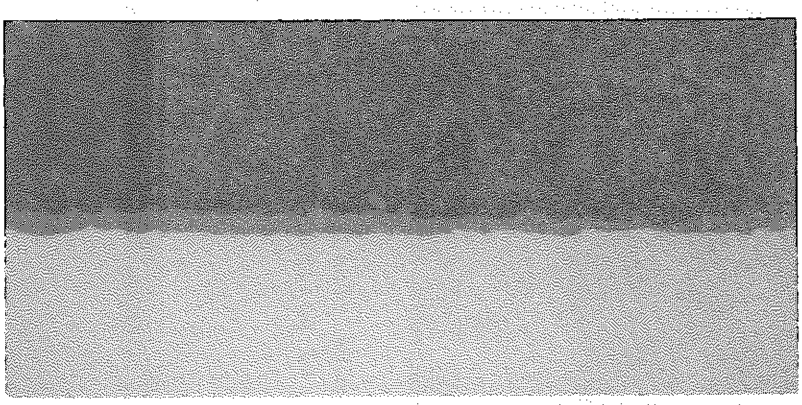


b) Pin C12

between grids 5 and 6
outer surface base oxide typical of most microspecimens

1938(T)

x500



c) Pin C12

adjacent to grid 6

thickest base oxide seen only on this pin

1927(T)

x500

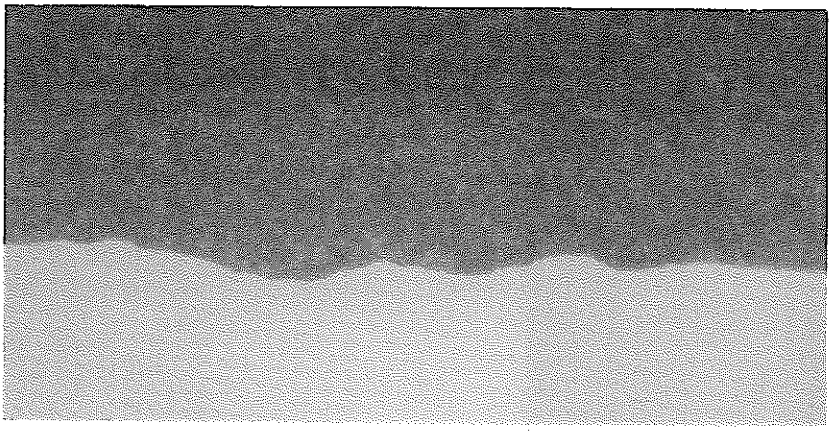
d) Pin C11

between grids 10 and 11
oxide layer beneath thick crud deposit

1935(T)

x500

Photo 3.2-9 Pin outer surface oxidation

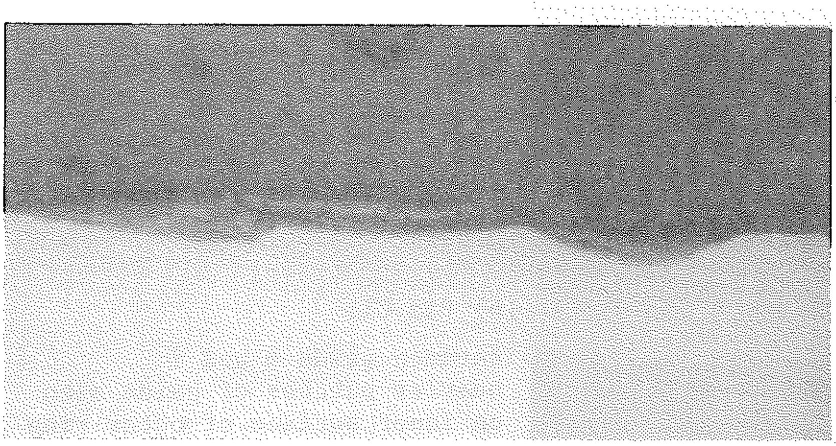


a) Pin C11

between grids 2 and 3
oxidised pre-irradiation
scratches?

1942(T)

x500

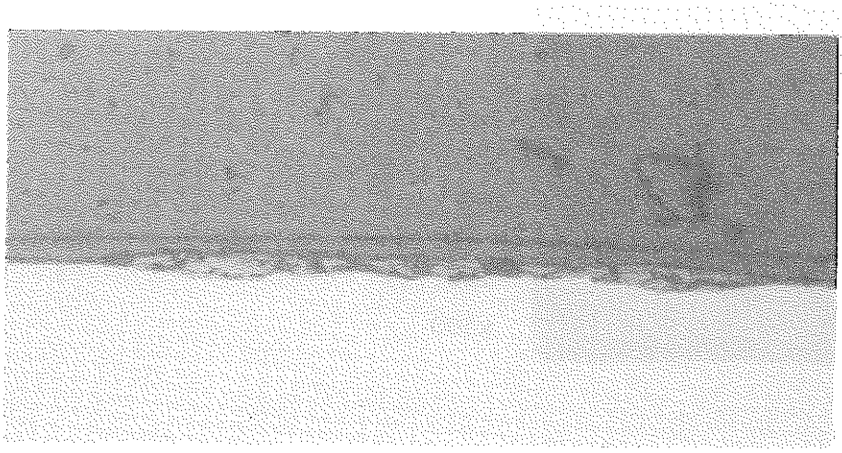


b) Pin C11
grid 3

nodular oxide or oxidised
pre-irradiation scratches?

x67(T)

x500

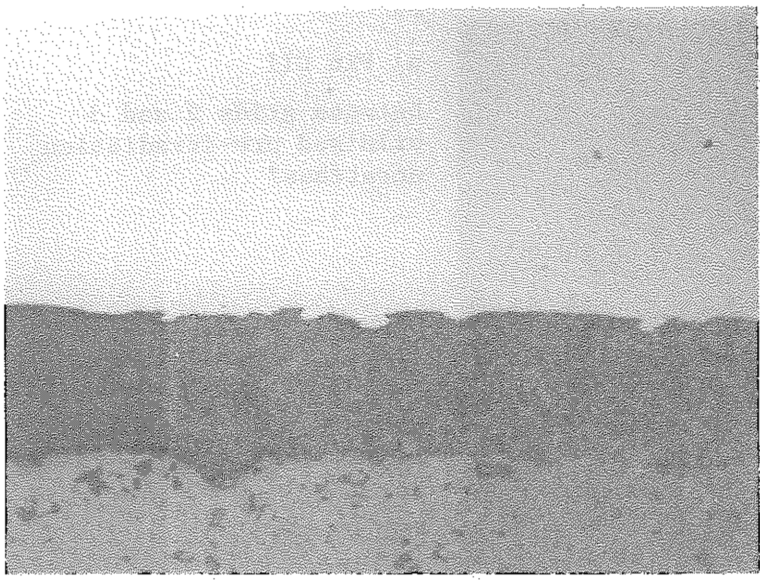


c) Pin C14
grid 4

nodular oxide or oxidised
pre-irradiation scratches?

1940(T)
x250

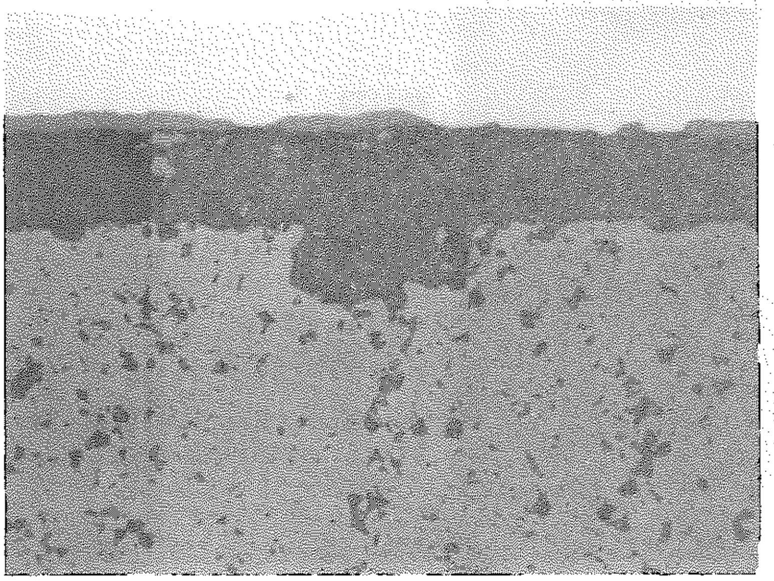
Photo 3.2-10 Pin outer surface oxidation



a) Pin A4

between grids 6 and 7
cladding inner surface typical of all microspecimens from inner and intermediate ring pins

1930(T)
x500



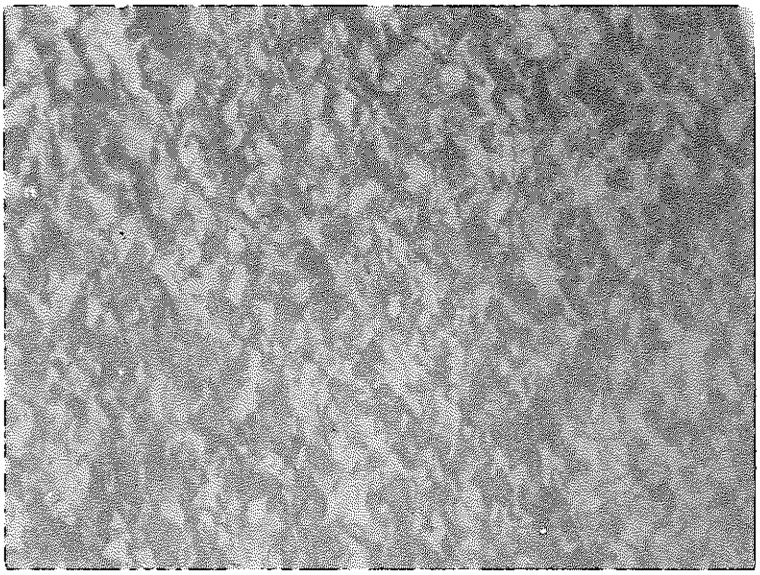
b) Pin C11

between grids 6 and 7
heavier patches of oxide seen on inner surface of outer ring pin cladding

1931(T)

x500

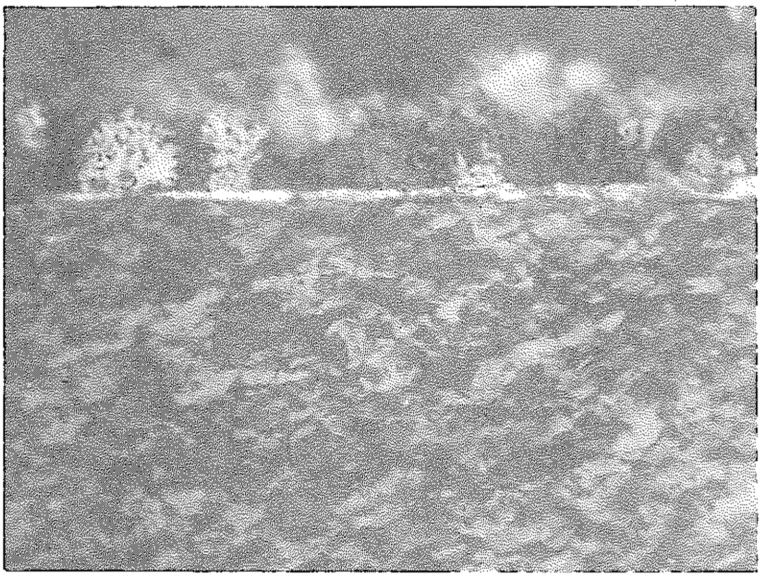
Photo 3.2-11 Cladding inner surface oxidation, and microstructure(continue)



c) Pin B6

between grids 6 and 7
cladding microstructure typical
of all sections

1928(T)
x500
polarised light

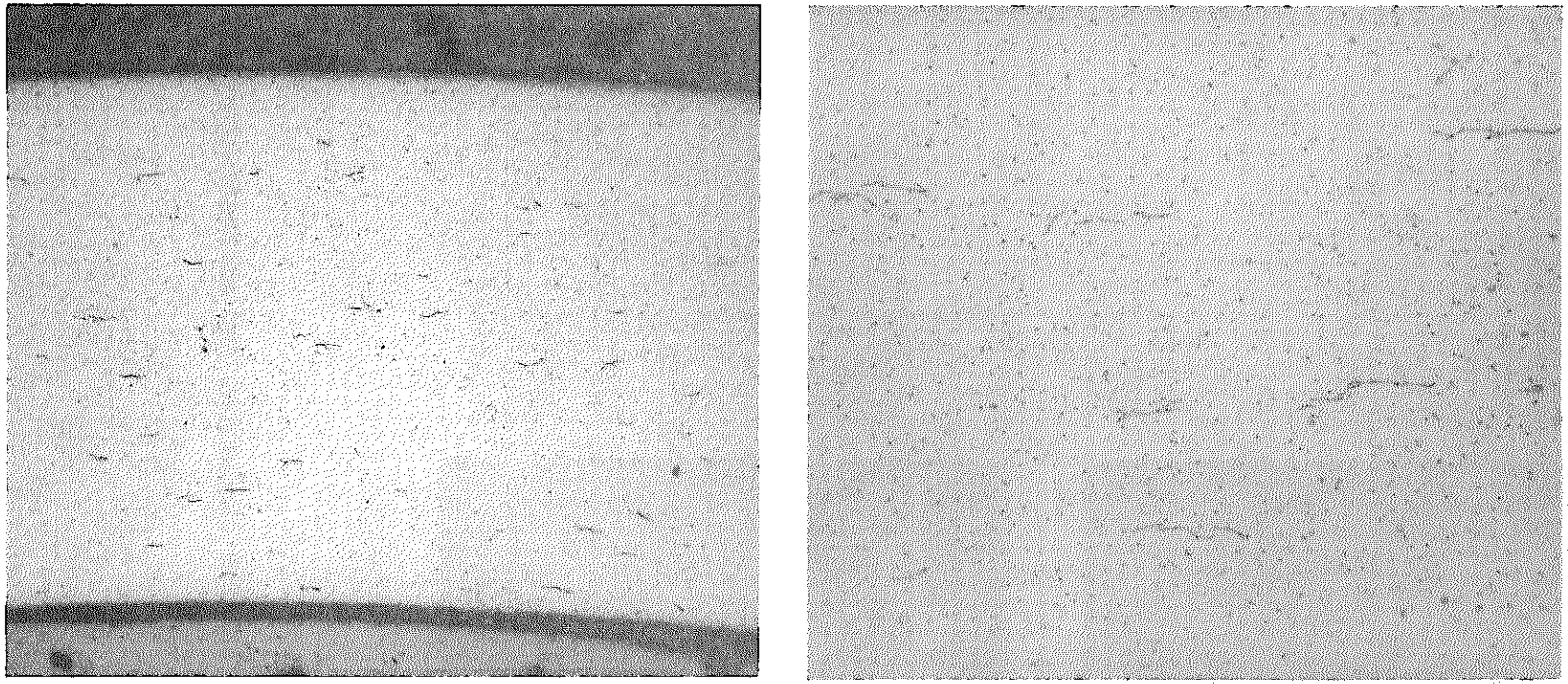


d) Pin C4

just below grid 11
cladding microstructure beneath
thick crud layer-no evidence of
overheating

1925(T)
x500
polarised light

Photo 3.2-11 Cladding inner surface oxidation, and microstructure

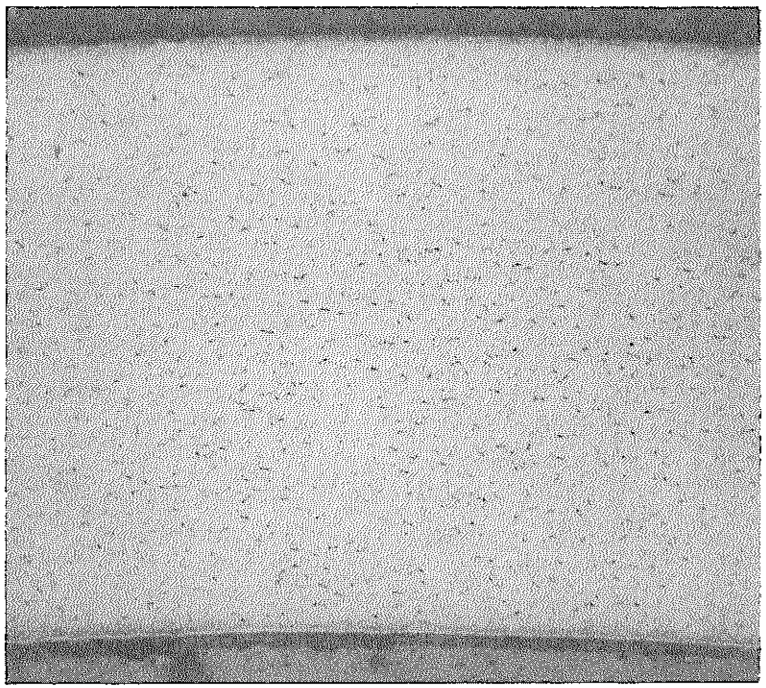


a) 1925(T) Pin C4 x85

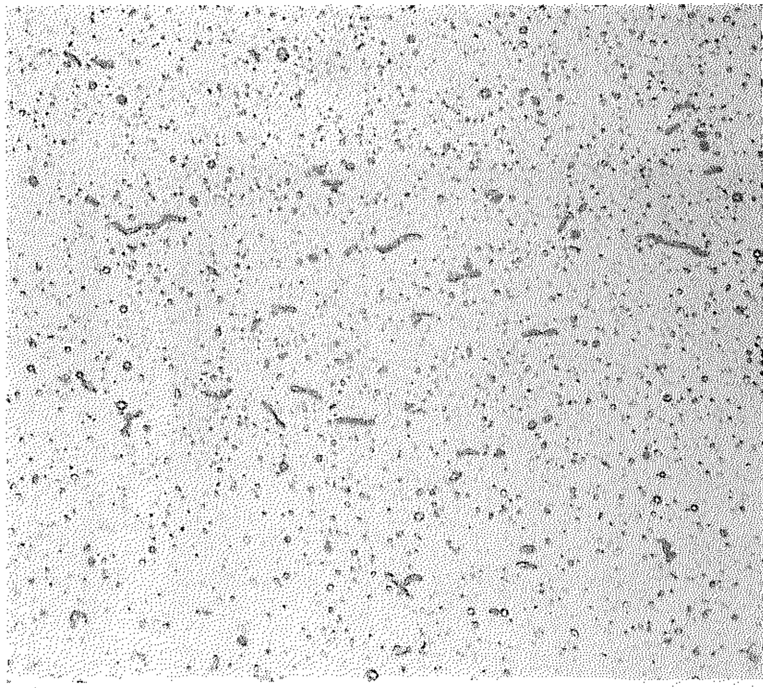
b) 1935(T) Pin C11 x500

short, spasely distributed hydride platelets

Photo 3.2-12 Zirconium hydride morphology and distribution(continue)



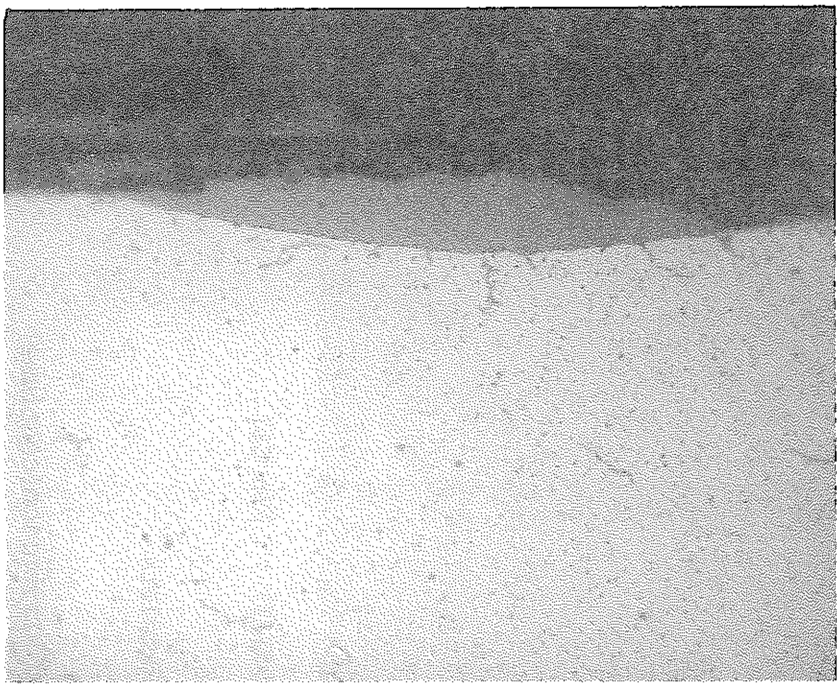
c) 1931(T) Pin C11 x85



d) 1931(T) Pin C11 x500

very short, numerous hydride platelets

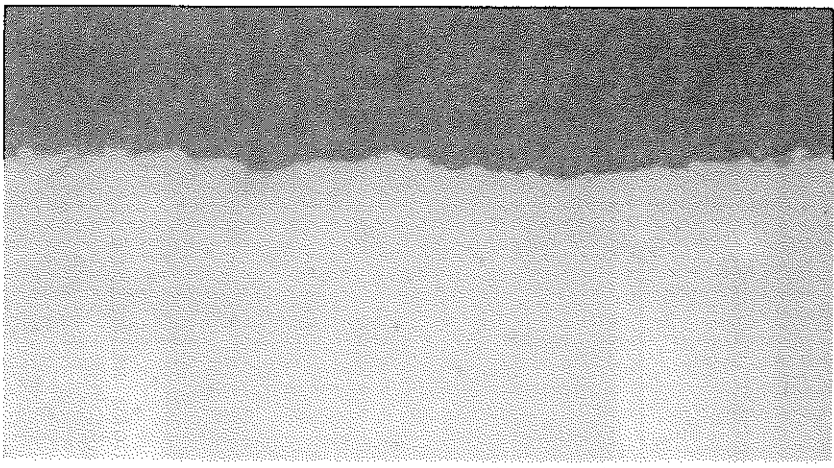
Photo 3.2-12 Zirconium hydride morphology and distribution(contimue)



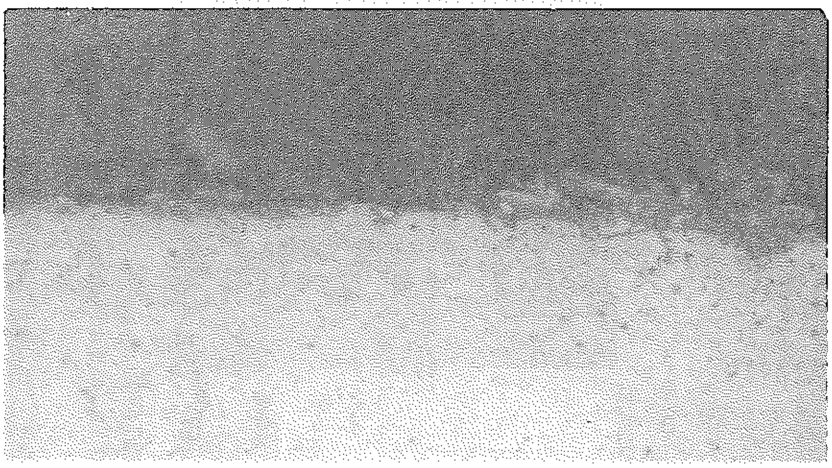
x400

e) 1940(T) hydride associated with outer surface
oxide module

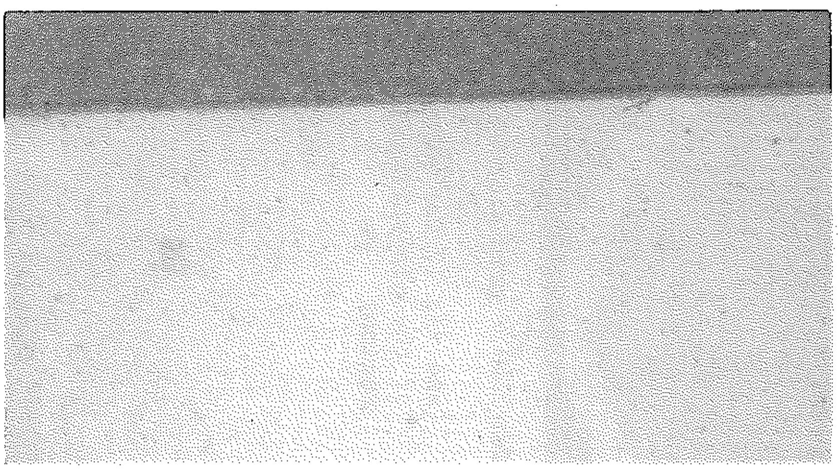
Photo 3.2-12 Zirconium hydride morphology and distribution



a) X42(T) slight fretting at spring contact

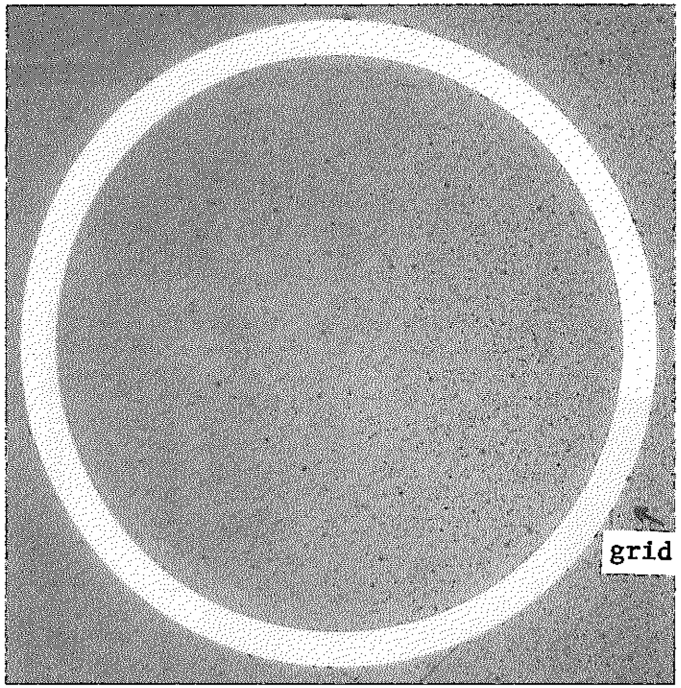


b) X42(T) build-up of metal debris in the fretted



c) X42(T) cladding outer surface away from spring contact

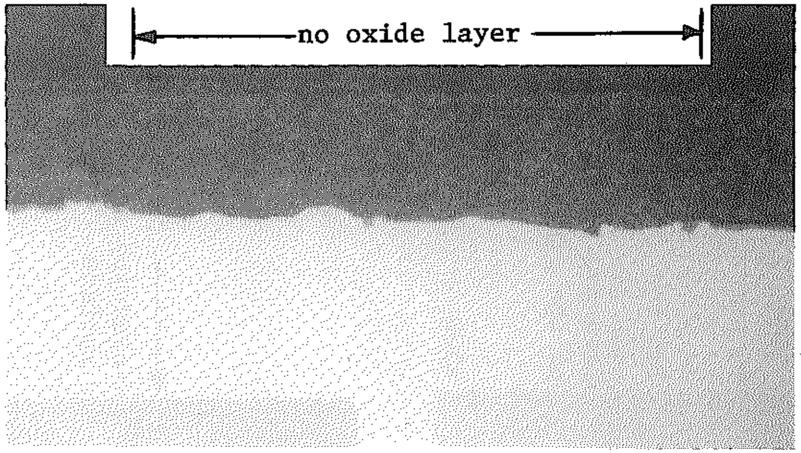
Photo 3.2-13 Pin B6. Grid 11. Fretting investigation



grid spring contact

a) 1937(T) Pin C10 grid 1 x5

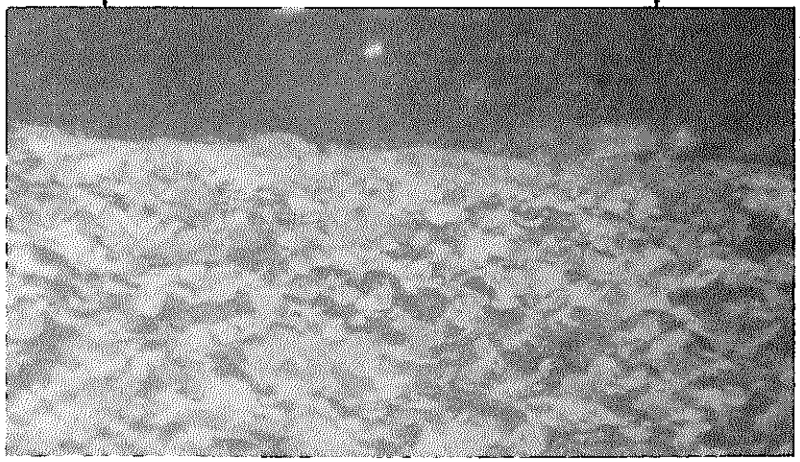
(see fig 17 for photographs of the pin surface in this region)



b) 1937(T) grid spring contact region x500

no oxide layer

polarised light



x500

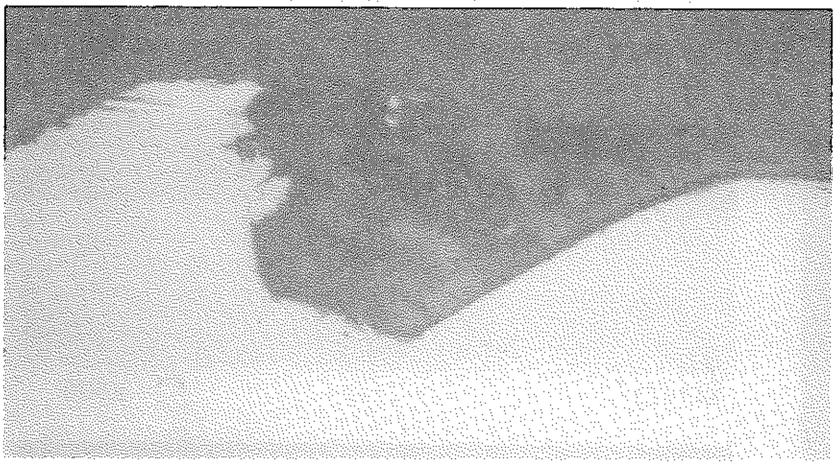
c) 1937(T) same region as in b) above-note structure at cladding surface indicating localised cold work

Photo 3.2-14 Pin C10. Grid 1. Fretting investigation

Pin C10
grid 1

surface indentation in spring contact region (see fig 17 for photographs of the pin surface in this region)

1937(T) crid spring contact region x85



1937(T) same area as top photo x250

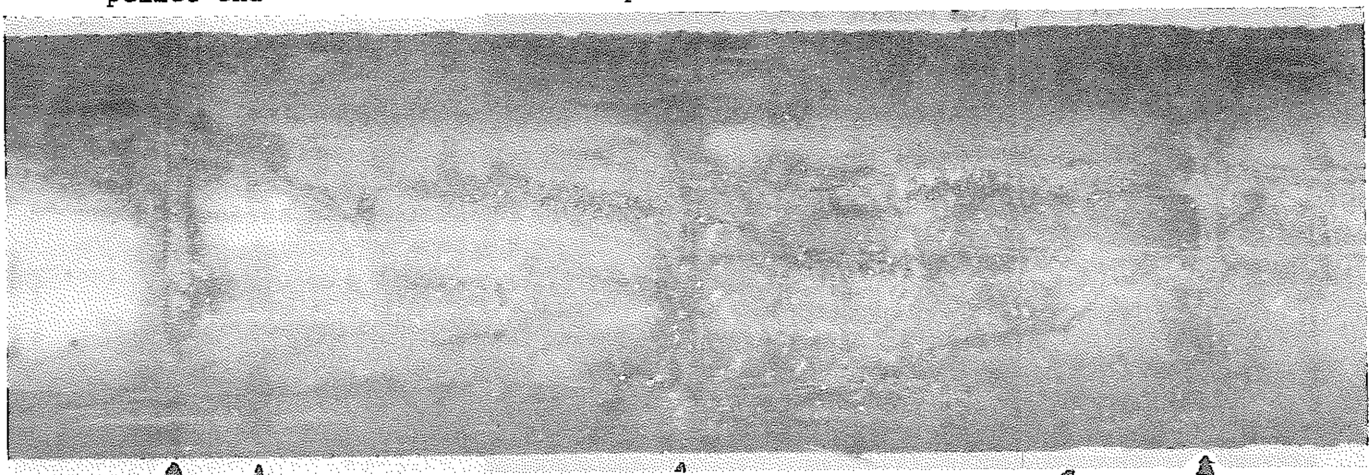
polarised light

x400

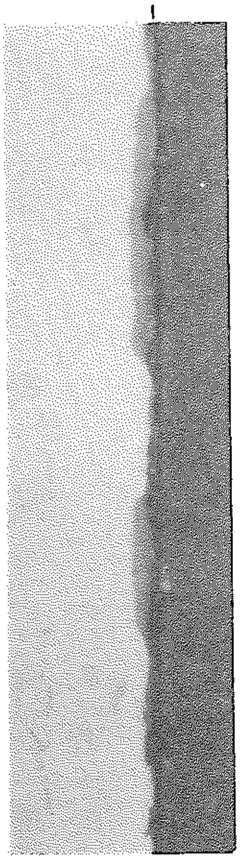
1937(T) same area as middle photo

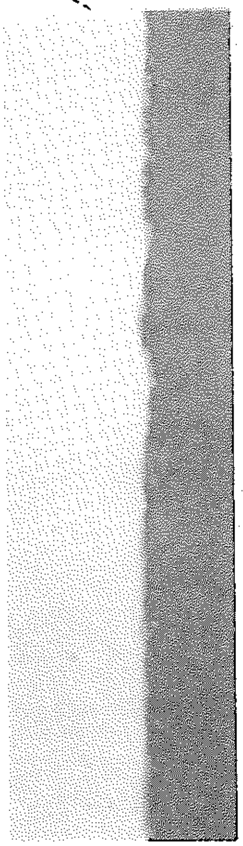
Pin C10. grid 1. fretting investigation

Photo 3.2-15 Pin C10. Grid 1. Fretting investigation pellet end　pellet end　pellet end



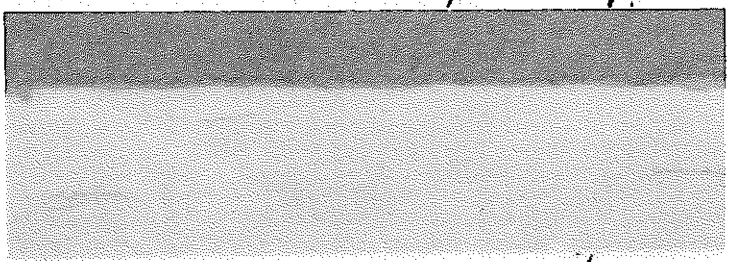
typical cladding inner surface



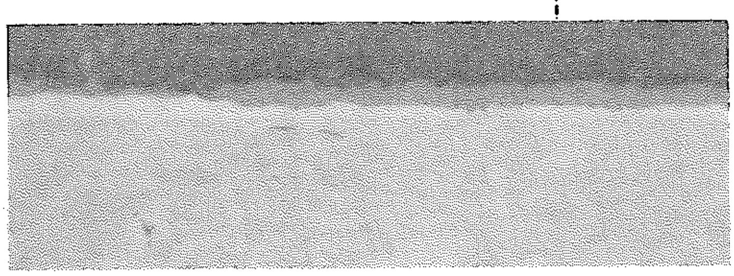


X46(T)　x500　X46(T)

transverse microspecimen X46(T) taken slit cladding sample showing inner surface oxidation at pellet end and (after further grinding) near to pellet end.



X47(L)　x500

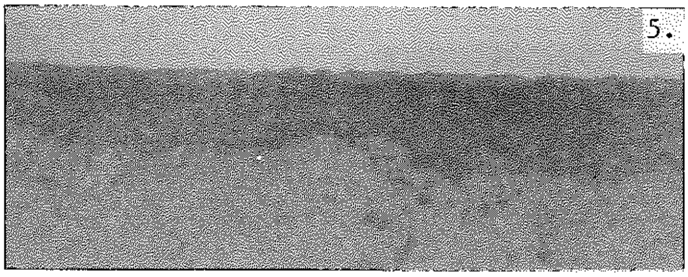


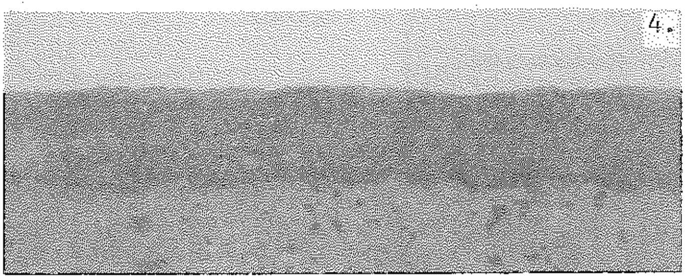
X47(L)　x500

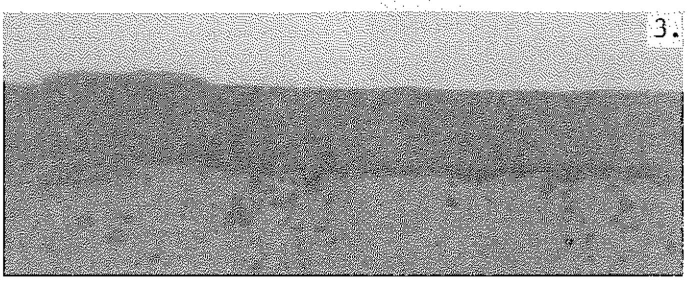
longitudinal microspecimen X47(L) (taken from same slit sample as X46(T)) showing inner surface oxidation at and near to pellet end.

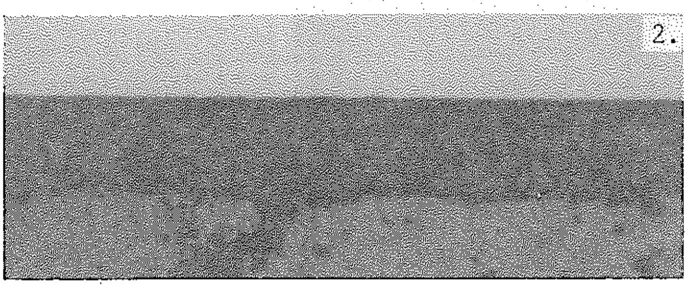
Photo 3.2-16　Pin C 4. Grid 7-Grid 8. Cladding inner surface visual examination and metallography.

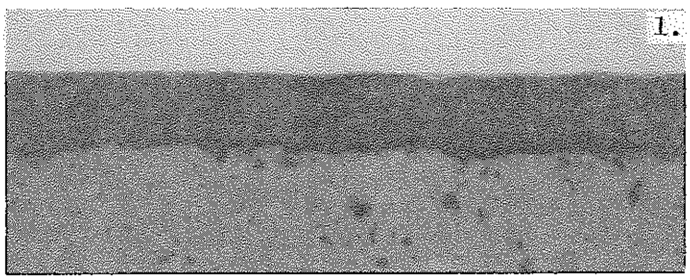
photographs show cladding/fuel gap and cladding inner surface oxidation at the positions indicated on the macrophotograph below



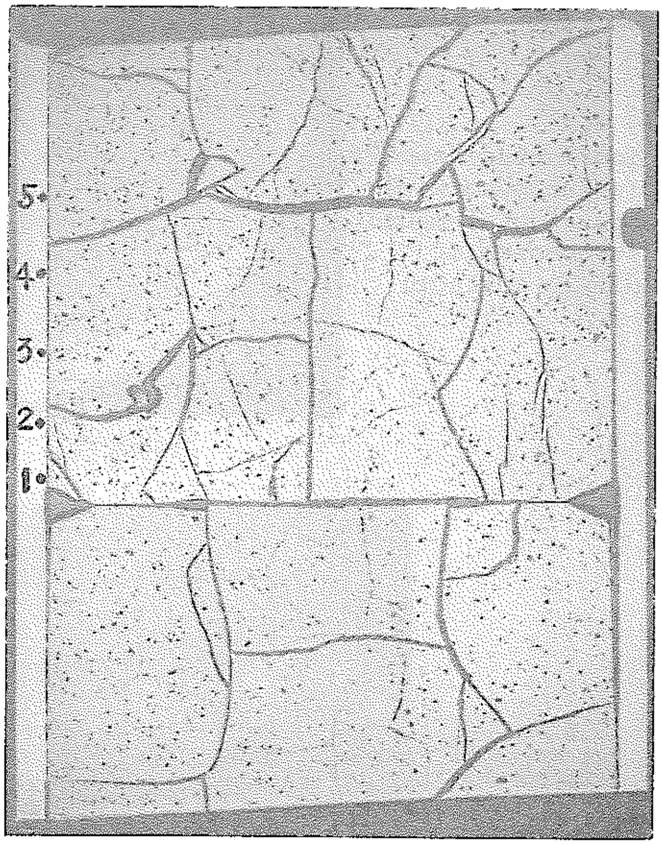






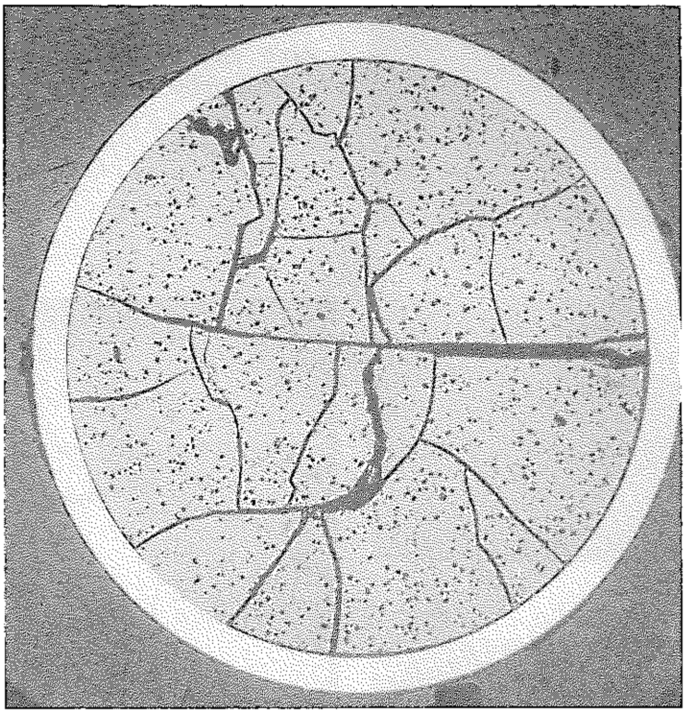


x500



1926(L) x5

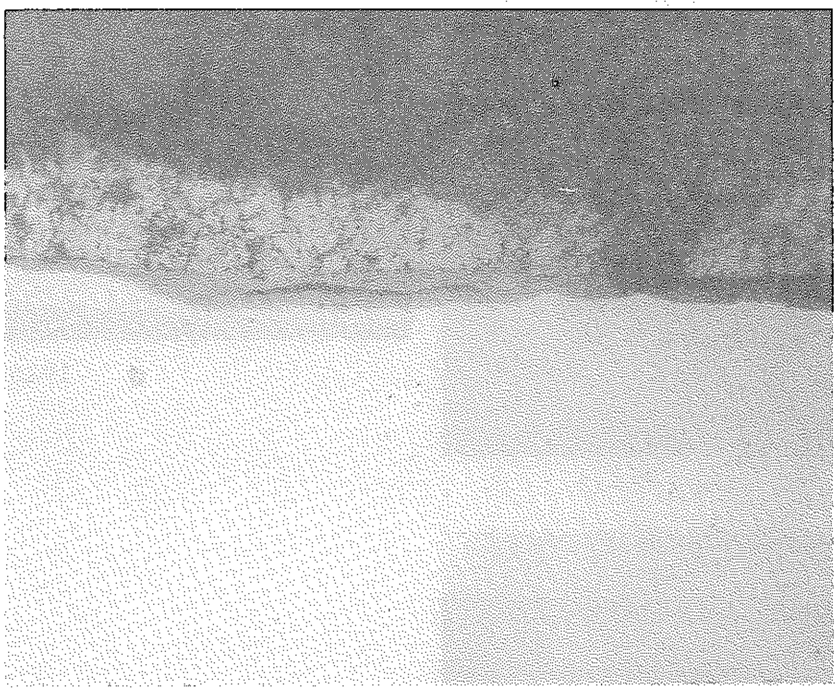
Photo 3.2-17 Pin C4 . PCMI specimen showing greater pellet/cladding interaction at the mid-pellet position grid spring side



Pin C14
section through middle of grid 4(see Photo 3.1-7 for photographs of pin surface in this region)

local crud deposit (coincident with position of mound downstream of dimple contact)

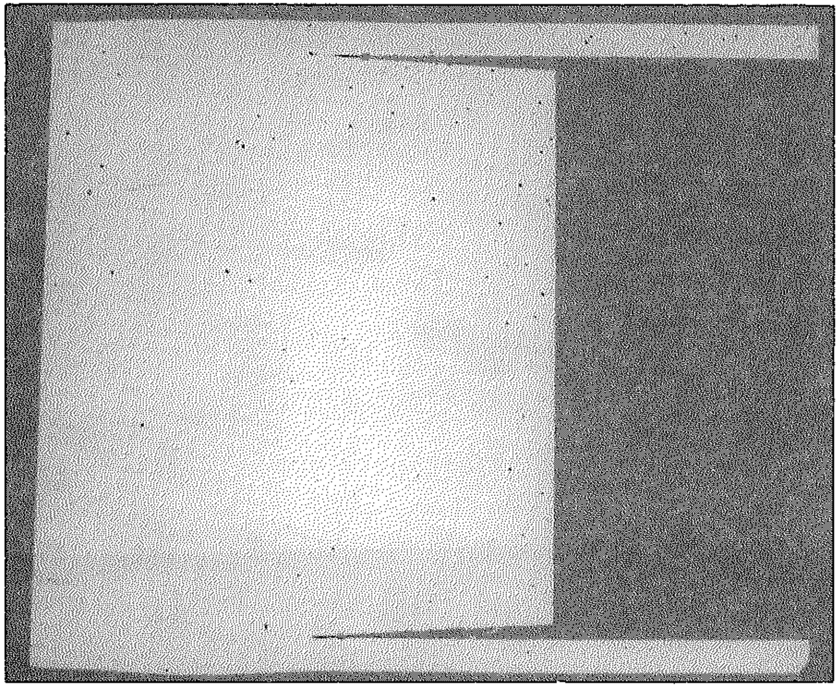
1940(T) x5



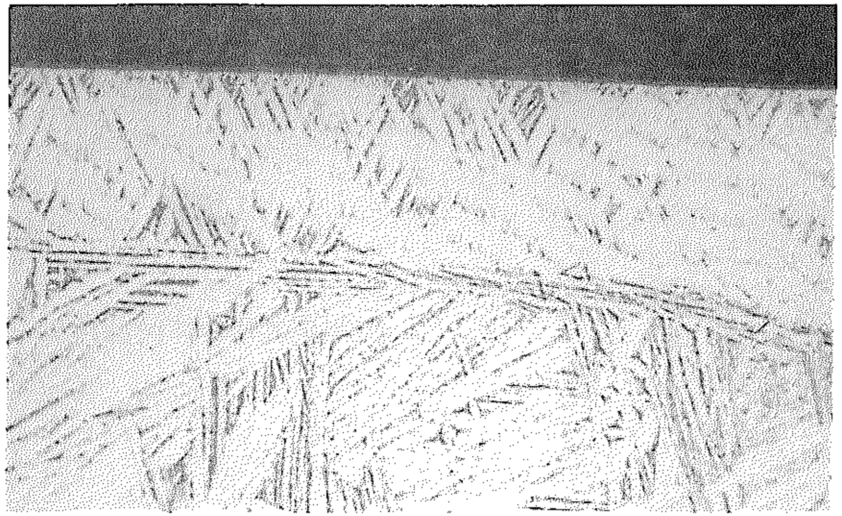
x500

1940(T) local crud deposit with enhanced cladding oxidation

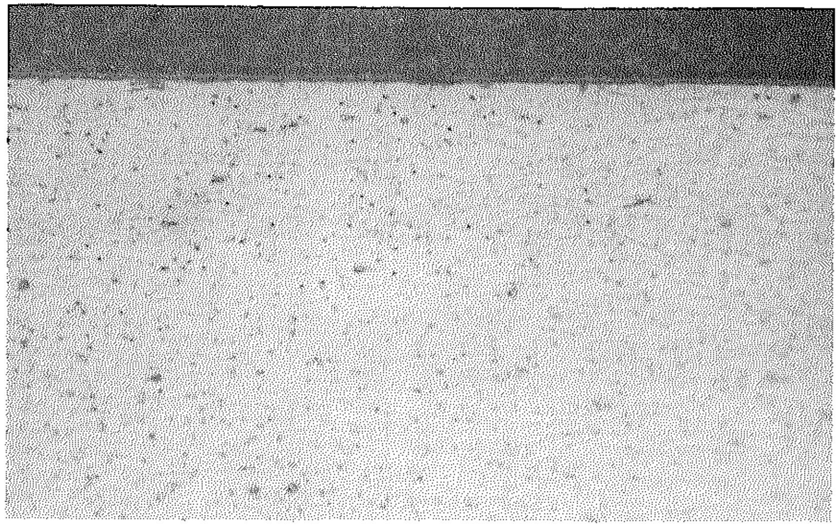
Photo 3.2-18 Pin C14. Grid 4. ECT 'defect' signal region



1934(L) x5



1934(L) weld outer surface x500



1934(L) cladding outer surface away from weld x500

Photo 3.2-19 Pin C12. Top end weld metallography(continue)

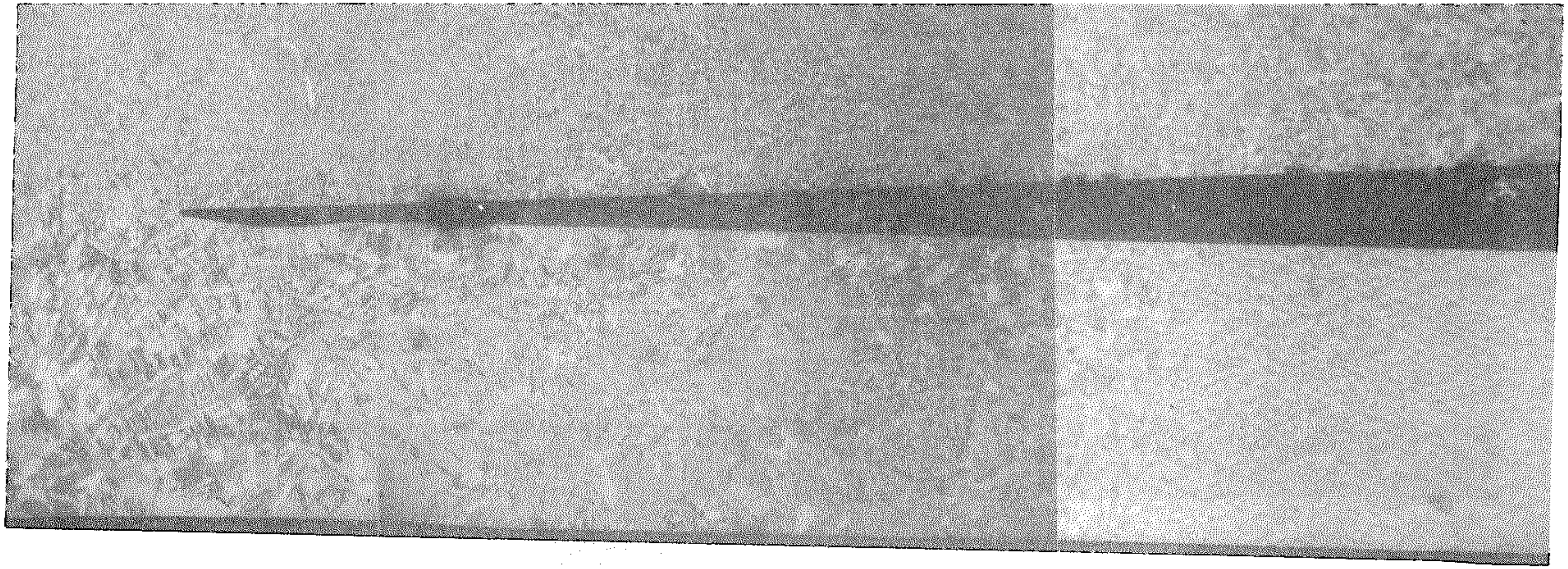
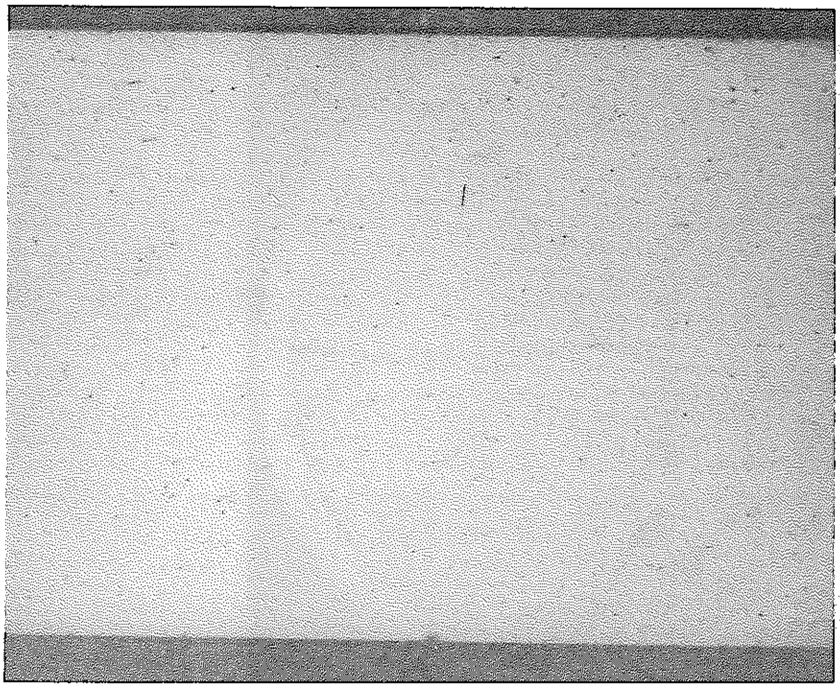
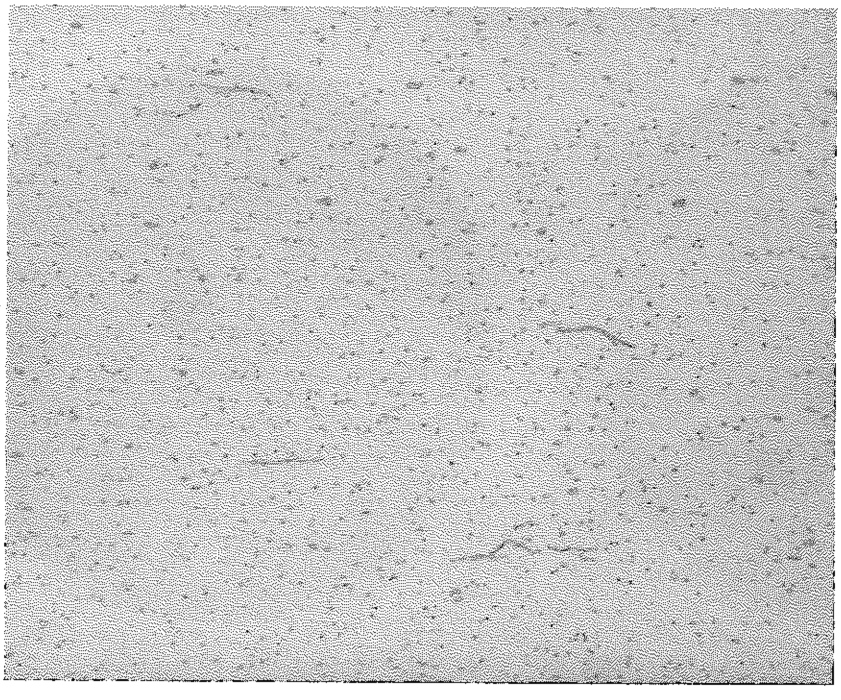


Photo 3.2-19 Pin C12. Top end weld metallography

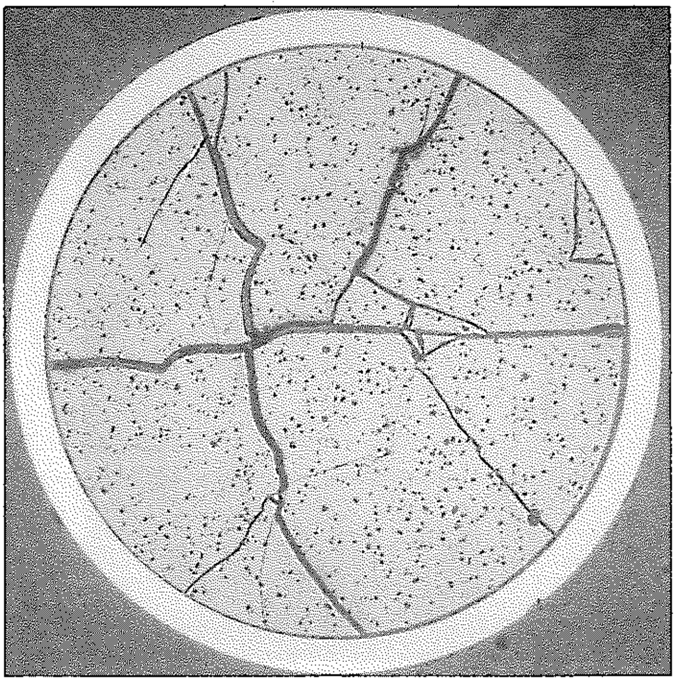


1934(L) hydride distribution near to weld x85

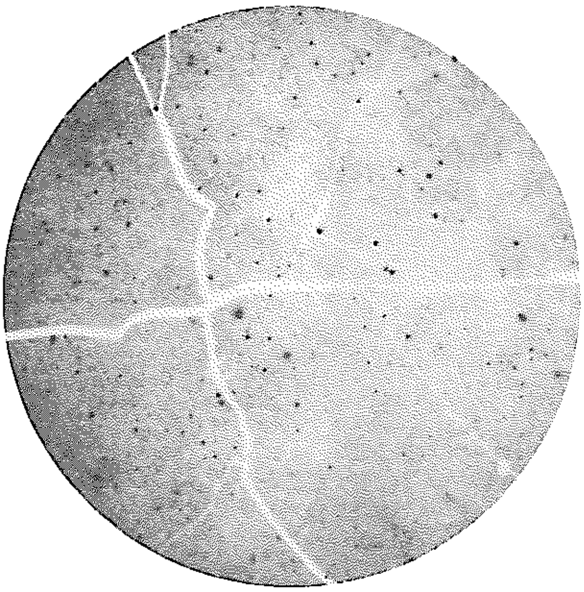


1934(L) typical hydride morphology x500

Photo 3.2-20 Pin C12. Top end weld metallography



1930(T) as autoradiographed x5

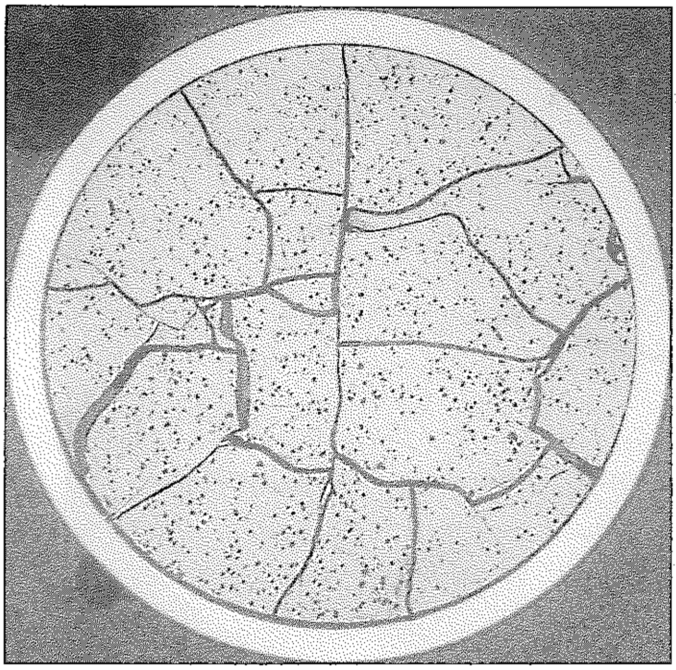


1930(T) α−autoradiograph x5

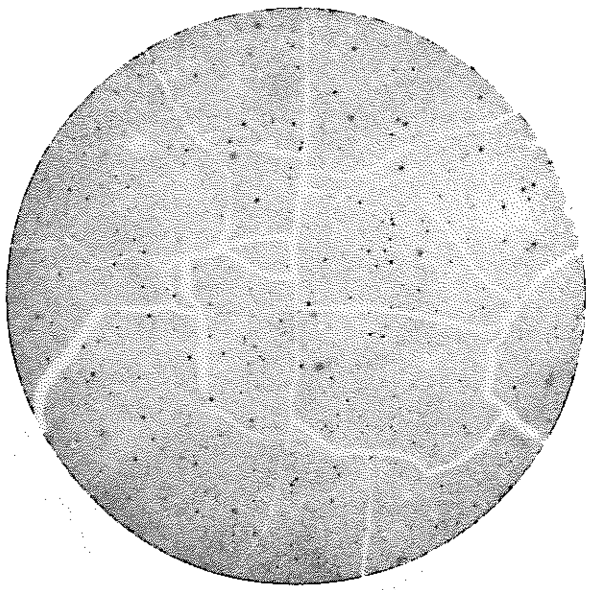
1930(T) βγ−autoradiograph x5

(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing)

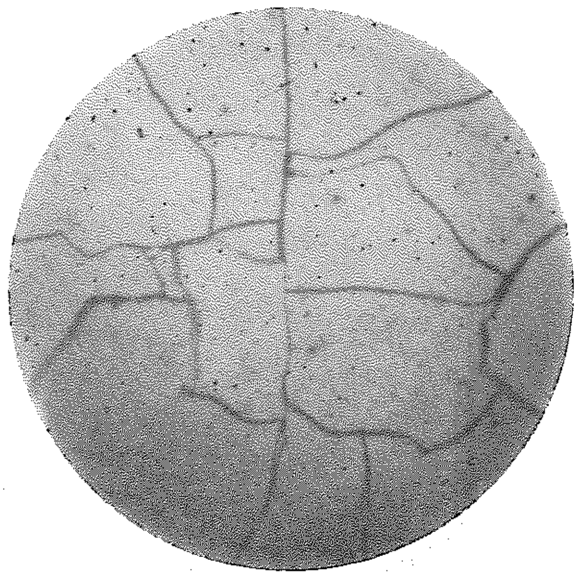
Photo 3.2-21a Pin A4. Alpha and beta-gamma autoradiography(inner ring-grid 6/7)



1928(T) as autoradiographed x5



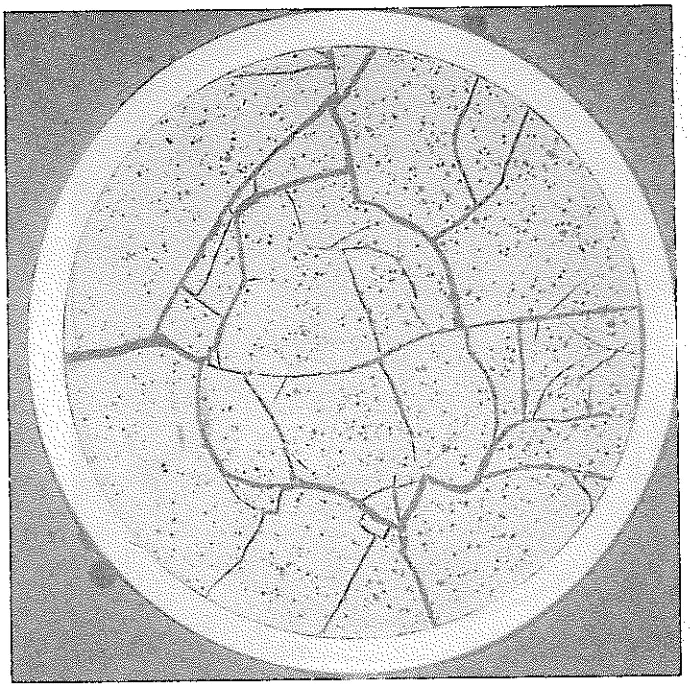
1928(T) α-autoradiograph x5



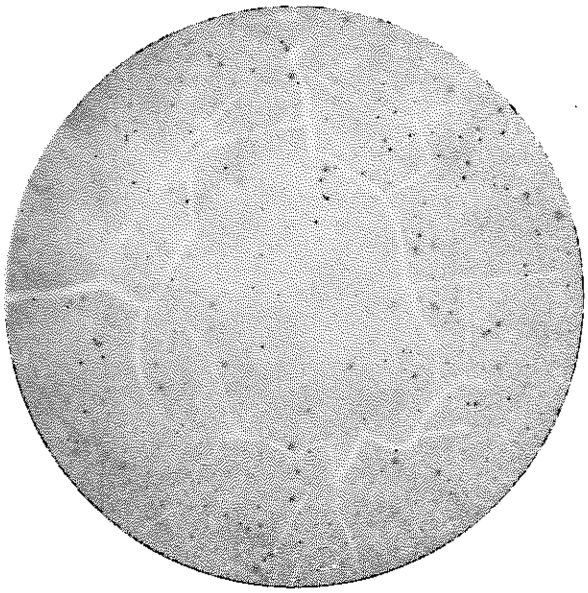
1928(T) βγ-autoradiograph x5

(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing)

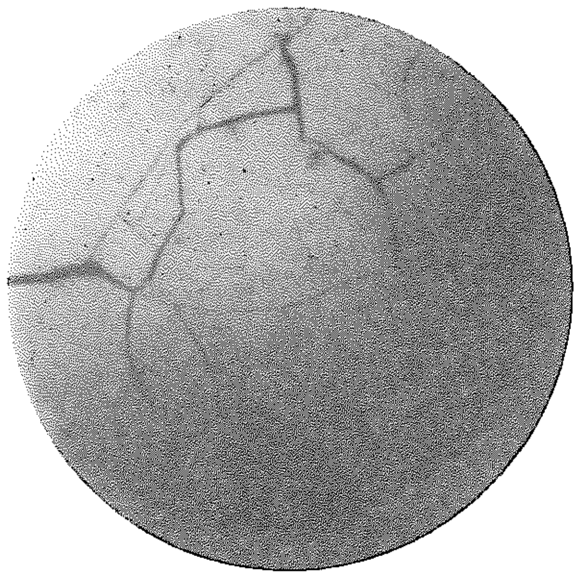
Photo 3.2-21b Pin B6. Alpha and beta-gamma autoradiography(intermediate ring-grid 6/7)



1939(T) as autoradiographed x5



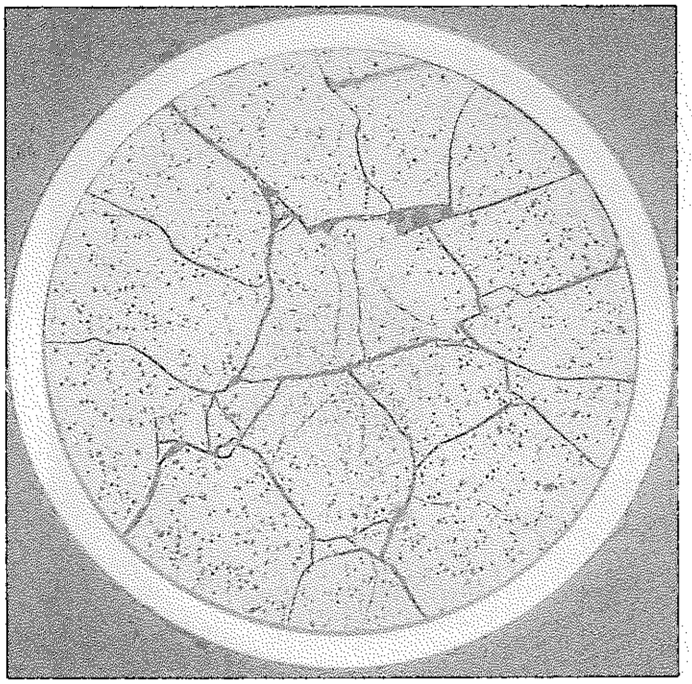
1939(T) α-autoradiograph x5



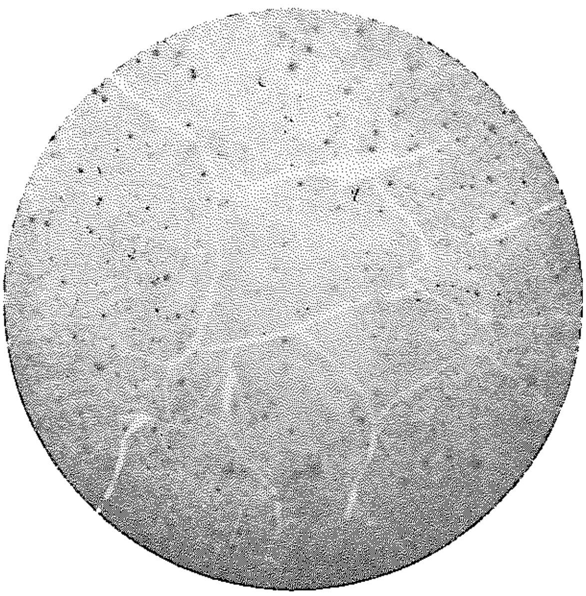
1939(T) βγ-autoradiograph x5

(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

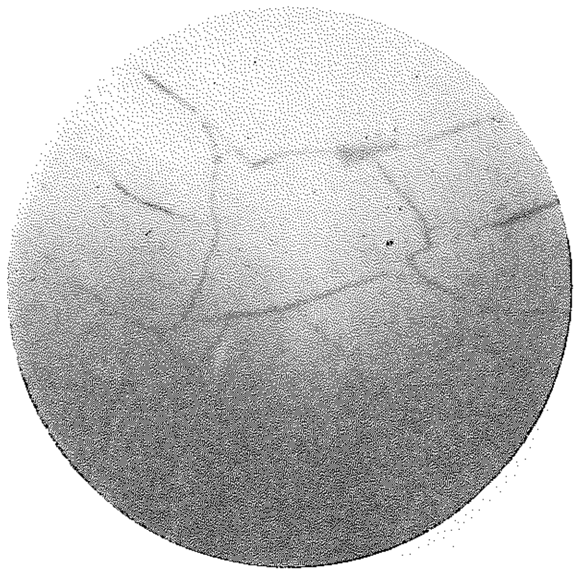
Photo 3.2-22a Pin C1. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-grids 6/7)



1932(T) as autoradiographed x5



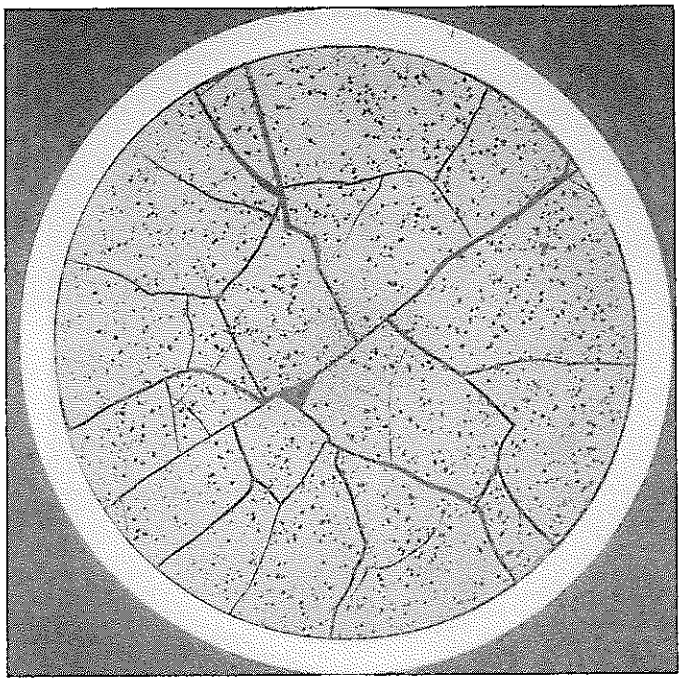
1932(T) α-autoradiograph x5



1932(T) βγ-autoradiograph x5

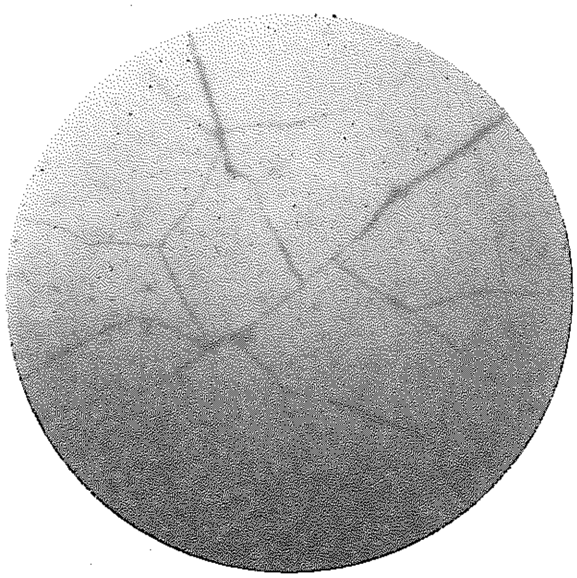
(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

Photo 3.2-22b Pin C14. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-grids 6/7)



1924(T) as autoradiographed x5

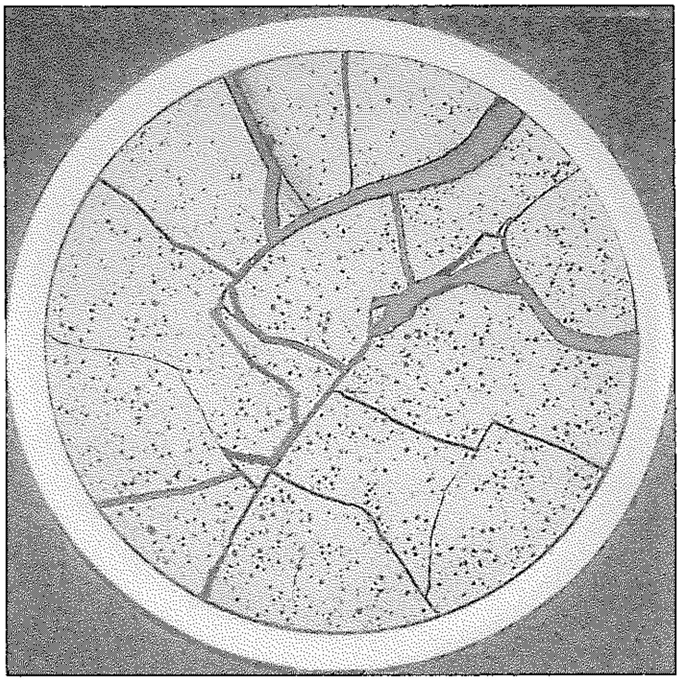
1924(T) α-autoradiograph x5



1924(T) βγ-autoradiograph x5

(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

Photo 3.2-23a Pin C4. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-grid 9/10)

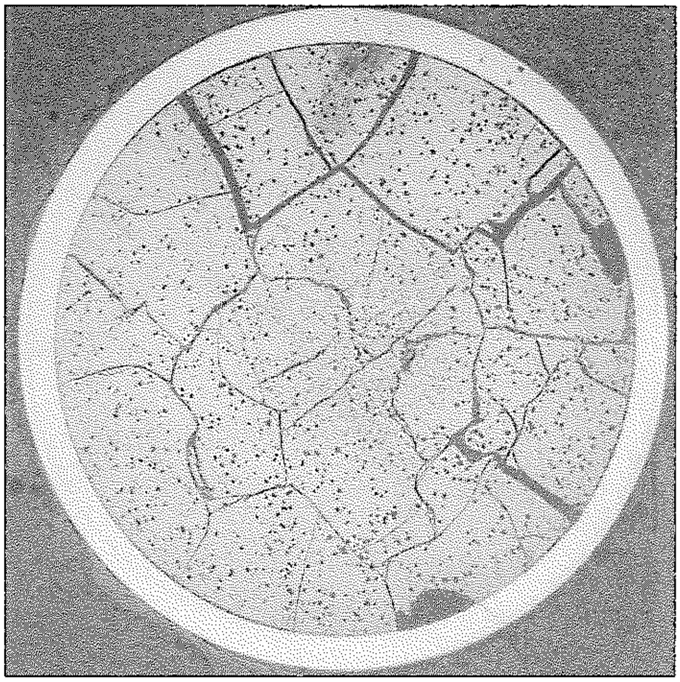


1925(T) as autoradiographed x5

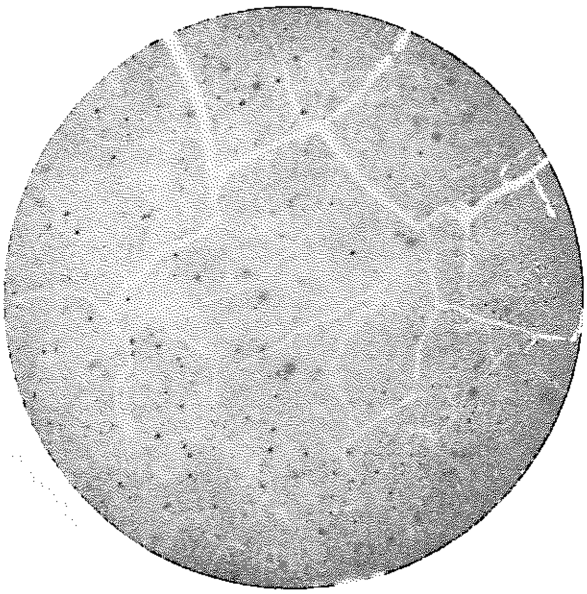
1925(T) α-autoradiograph x5 1925(T)βγ-autoradiograph x5

(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

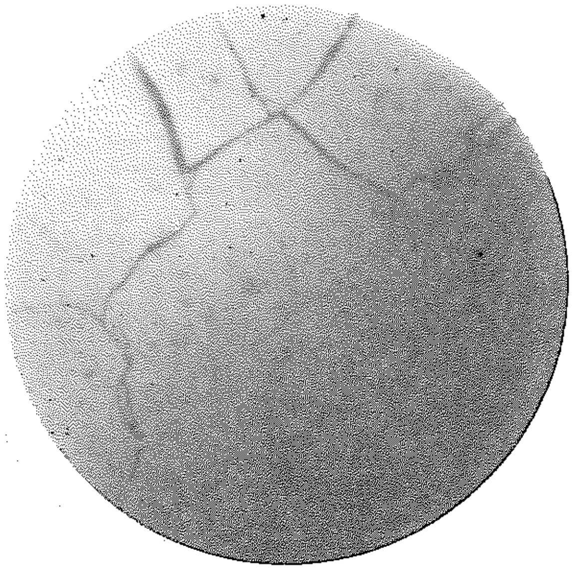
Photo 3.2-23b Pin C4. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-below grid 11)



1931(T) as autoradiographed x5



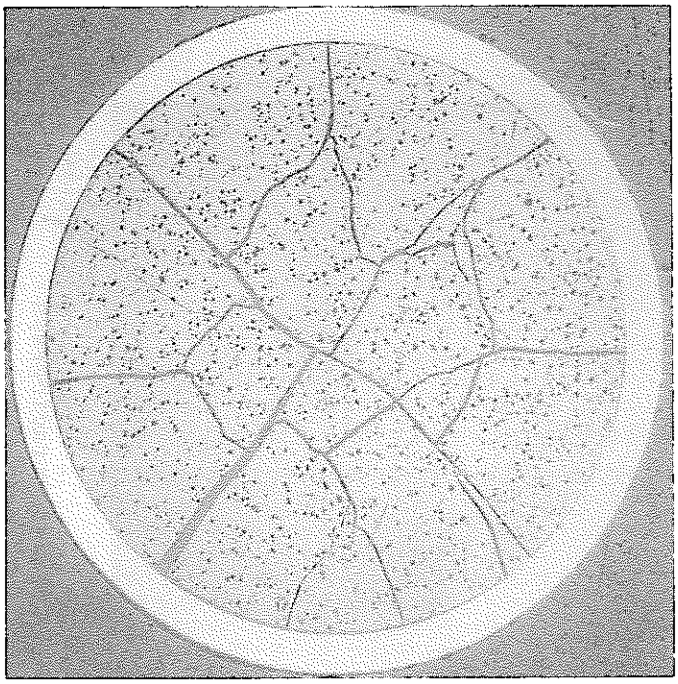
1931(T) α-autoradiograph x5



1931(T) βγ-autoradiograph x5

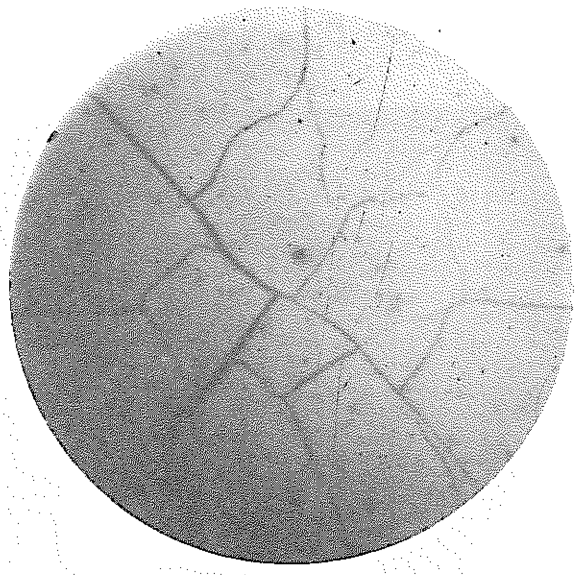
(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

Photo 3.2-24a Pin C11. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-grid 6/7)



1935(T) as autoradiographed x5

1935(T) α-autoradiograph x5



1935(T) βγ-autoradiograph x5

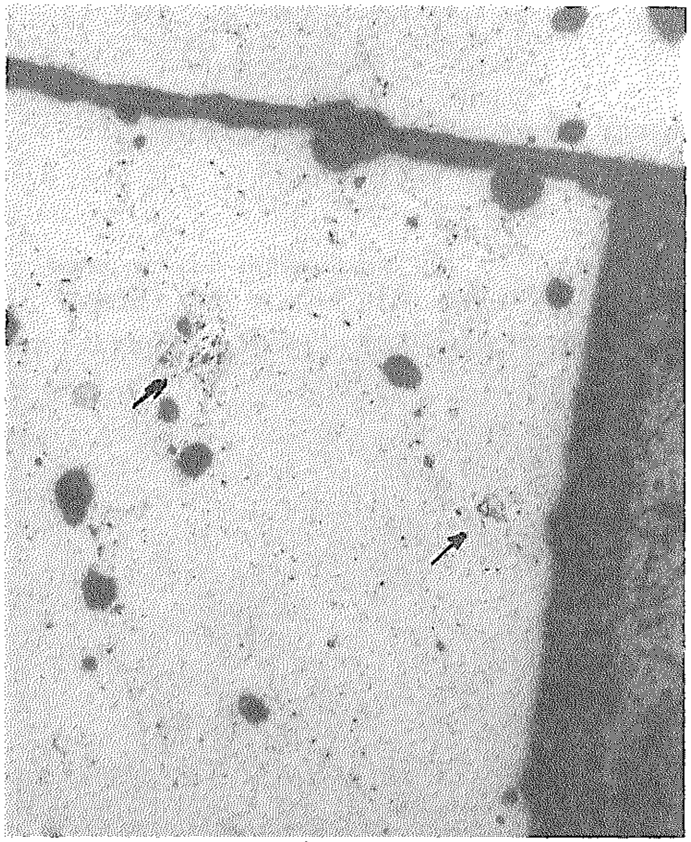
(dark areas = high α/βγ. natural contrast enhanced during photo-printing).

Photo 3.2-24b Pin C11. Alpha and beta-gamma autoradiography(outer ring-grid 10/11)

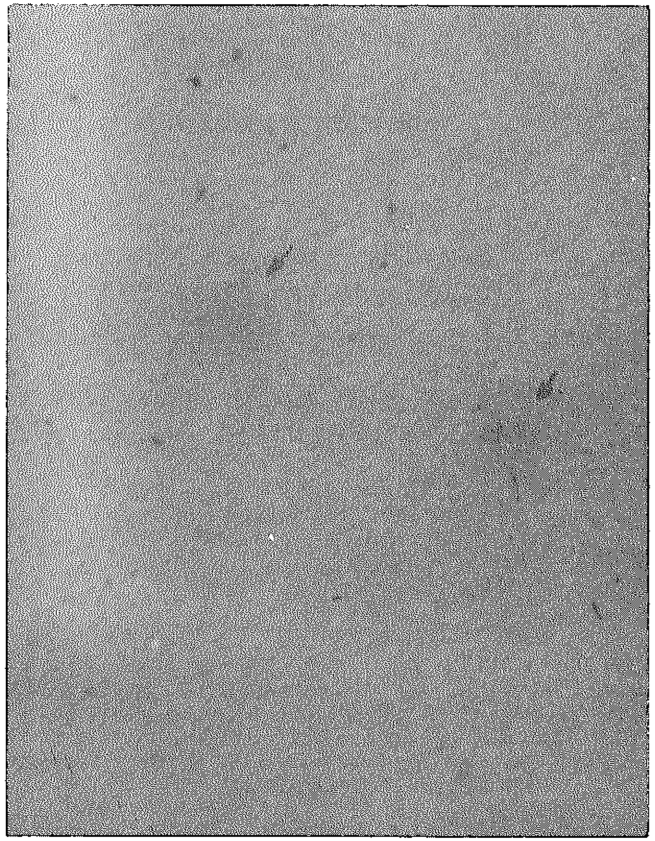
Pin C1 x100
1939(T) α-autoradiograph
group of Pu spots near outer
edge of pellet

Pin A4 x100
1930(T) α-autoradiograph
one of largest Pu spots

Photo 3.2-25 Pins A4 and C1. Some features seen on α-autoradiographs



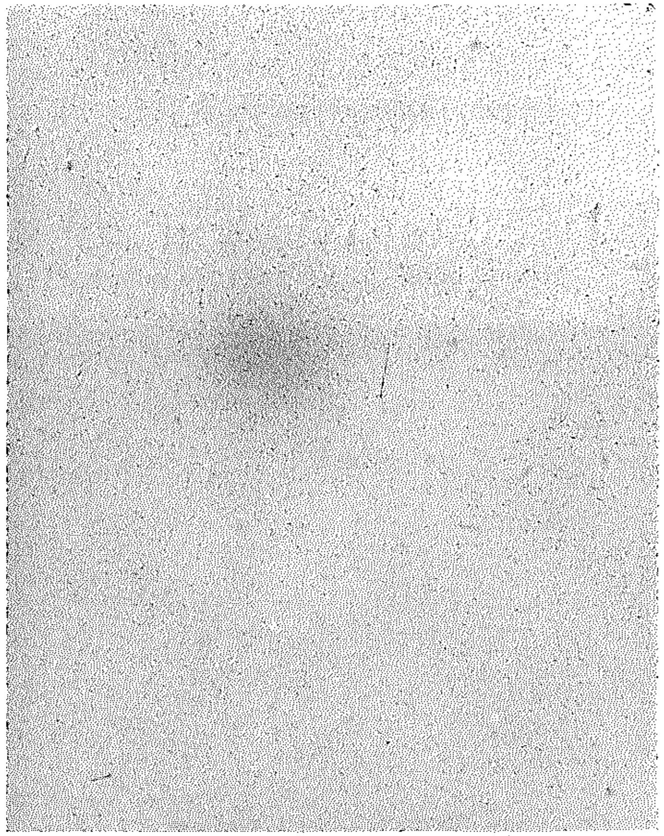
1932(T) two high Pu spots (arrowed) indentified from α-autoradiograph x100



α-autoradiograph of same area in adjacent photo x100

Photo 3.2-26 Pin C14. Some features seen in alpha-autoradiography(continue)

1932(T) one of two high Pu spots
seen in top photograph



α-autoradiograph of 1932(T) x100
one of the largest Pu spots

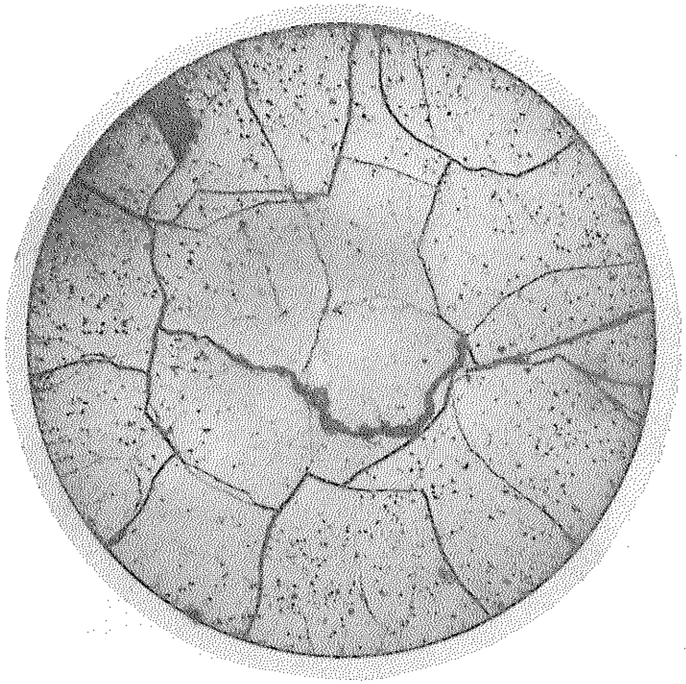
Photo 3.2-26 Pin C14. Some features seen in alpha-autoradiography

(a) before core drilling

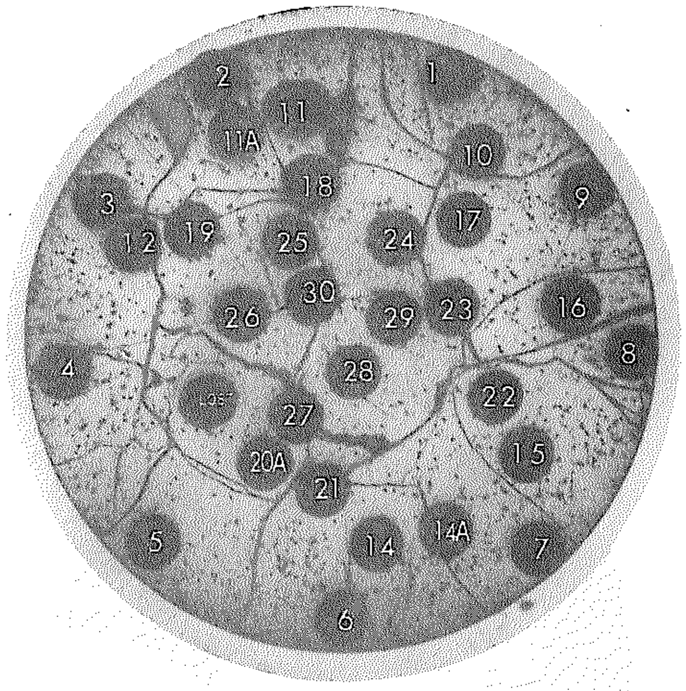
(b) position and numbering of cores

Pin B6 specimen 1890mm from top shoulder

Photo 3.2-27 Radial burn-up specimen from pin No.B6(continue)



(c) before core drilling



(d) position and numbering of cores

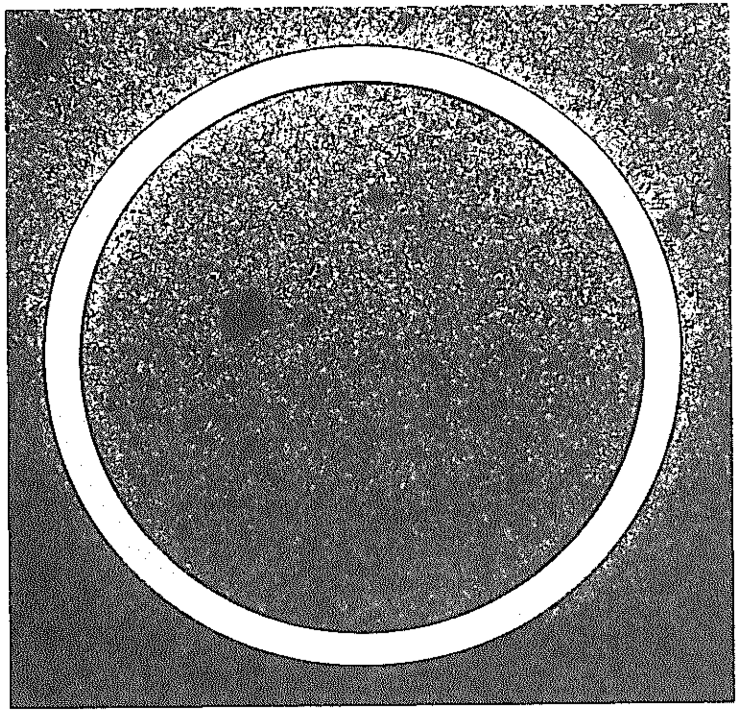
Pin C11 specimen 1890mm from top shoulder

Photo 3.2-27 Radial burn-up specimen from pin No.C11

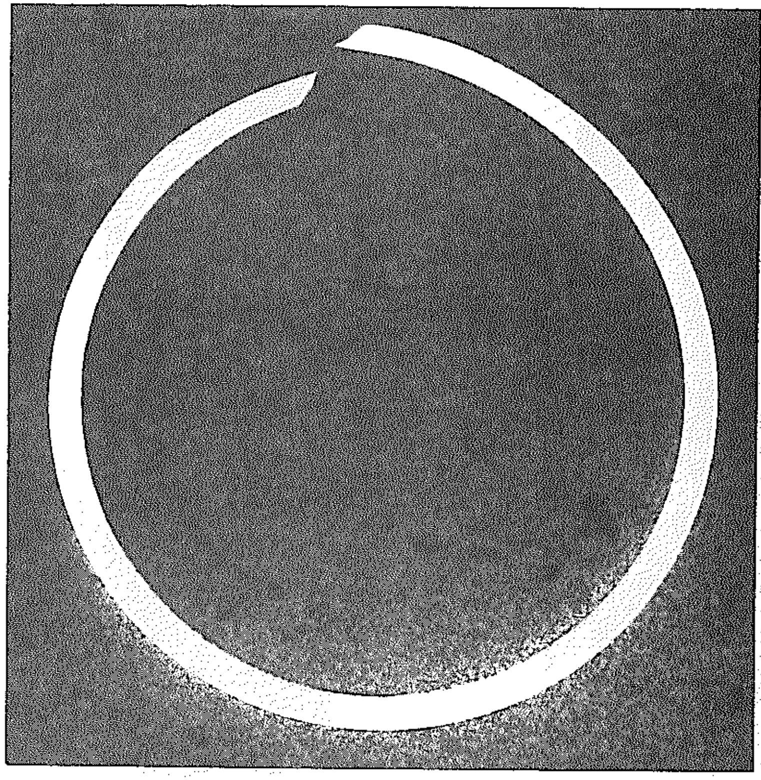
(a)

(b)

Photo 3.2-28 Pin C7. Hydraulic burst test specimen showing burst



(a) transverse section before testing



(b) transverse section after testing through maximum strain region

Photo 3.2-29 Pin C7. Hydraulic burst test specimen. Transverse microspecimens for measuring TCE.

4. 照射後試験結果の評価および解析

4.1 集合体および燃料棒の試験

燃料要素を覆っているシュラウド管は良好な状態であった。また，燃料要素も良好な状態で，異常なクラック模様は見られなかった。スリップ・ゲージによる燃料要素間のギャップ検査では，燃料棒に著しい曲がりがなかったことを示した。燃料棒の引き抜き作業においては，それほど困難にぶつからなかったようである。この引き抜き時に要した力は，外層燃料棒と中間層燃料棒がほぼ同じ値で，内層燃料棒は両者よりさらに低い値を示していた。Type−D燃料棒の引き抜き力は，Type−C燃料棒と比較すると約1／2の値であった。これは，Type−C集合体において，燃料棒とグリッド接触面のクラッド付着量がかなり多かったため，これが引き抜き力の大きさに影響を及ぼす一つの因子となっているものと思われる。一方，燃料バンドルを構成しているタイロッドおよびグリッドも曲がりや損傷はなく，良好な状態であった。

4.2 燃料棒の外観試験

燃料棒全数について実施した外観試験では，各燃料棒は，照射中に破損したような形跡もなく良好な状態であった。数ケ所に照射前の燃料棒組立て中につけられたジルカロイ−被覆管の切粉の形跡が見られたが，特に照射中の燃料棒挙動に影響するようなことはなかった。

一方，詳細試験用の燃料棒として28本の中から選んだ8本の燃料棒の外観試験において，ノジュラー酸化の範囲がType−C燃料棒で見られた酸化範囲に比べて，ひじょうに少なかったことが確認された。しかし，グリッドのディンプル部およびスプリング部において，ほとんどの燃料棒の被覆管表面部に，小さなフレッティング傷が観察された。この部分について，2本の燃料棒から採ったサンプルの金相試験を実施し，フレッティング深さを調べたが，それは10μm以下とひじょうに浅いことが解った。また，一般にグリッド位置の接触マークの下流にクラッド・フレアが観察された。

被覆管表面に付着したクラッドは，二つのタイプからなっているのが解った。これらは燃料棒C12の金相試験で確認され，外側に付着していたクラッドは，ポーラスなもので，ブラッシングによって簡単に取り除け，厚さが10〜25μmであった。内側の層は固い密なもので被覆管にしっかり付着しており，厚さは大むね＜30μmであった。それぞれのクラッドの主成分は，ポーラスなクラッドは鉄酸化物，固い密なクラッドは銅であった。このように成分の異ったクラッドが付着した原因は，照射期中に炉心の冷却材の成分が変化したためではないかと考えられる。

4.3 燃料棒全長の変化

照射後における燃料棒の伸びは，中間層および内層燃料棒ではすでに照射の済んでいるType−Cと似たような傾向を示しているが，外層燃料棒はType−Cの結果から予測した値よりも若干大

きくなっている。燃焼度（燃料出力）に対する燃料棒の伸びはFig 3.1−3に示した。伸びの傾向は，照射中の出力すなわち燃料ペレットおよび被覆管の温度が高かった順に大きくなっている。さらに，Type −D燃料棒の照射成長による伸びは，各リングの被覆管に対する1MeV以上の高速中性子束の照射量が同程度とすると，大むね内層燃料棒の伸びと同程度か，それ以下であると予測される。したがって，各層間に生じている伸びの差は主に燃料ペレット／被覆管の機械的相互作用（PCMI）の度合，および冷却材圧力によって被覆管の径方向に生じたクリープ・ダウンの度合によって生じたものと考えられる。

一方，ATR燃料設計では，燃料棒の照射成長による軸方向伸びを以下の式で評価している。

$$\Delta L / L = 6 \times 10^{-14} \sqrt{\phi t}$$

ϕ ：高速中性子束（E＞1 MeV）＝ 1.34×10^{21} nvt

t ：照射時間

上式を用いた計算値と測定データを比較した結果を，すでに実施したTypc A，B，Cのデータとともに Fig 4.3 − 1に示す。いずれの結果についても ATR 評価式で計算した結果の方がPCMI等の影響を考慮していないのにもかかわらず大きな値を示しており保守的である。Type−Dでは，中間層および内層燃料棒の計算結果が測定値より1.5〜2倍程度大きく，他の照射燃料に比べて保守的すぎる傾向にある。

4.4 渦電流探傷試験（ECT）

ECTにおいて，すべて小さかったが三つの欠陥信号が検知された。その後の信号領域の外観および金相試験では，まったく欠陥はなかった。したがって，これらの欠陥信号は局部的な表面酸化，クラッドあるいは燃料棒取扱中に被覆管表面上につけられた傷によって生じたものと思われる。

ECT チャートから全プレナム長の変化を測定すると，外層燃料棒で 27.5〜32.1 mm，内層および中間層燃料棒でそれぞれ16.2mmおよび14.4mmであった。これは主に燃料ペレットのDensificationによって変化したものと思われる。

4.5 ガンマ・スキャンと燃料スタック長変化

全ガンマ・スキャンの結果，スペーサ・グリッド部におけるγ− depletion は一般に5％以下であった。また，軸方向のペレット・ギャップが数ケ所に見られた。Csスパイクはどの燃料棒にも観察されなかったが，隣接したペレット間にCsによるガンマ放射能の局部的に小さな変化（＜5％）が観察された。

ガンマ・スキャンの結果から測定した燃料スタック長は，全ての燃料棒で減少している。その結果を各燃料棒の平均燃焼度とともにFig 4.5−1に示す。これらの結果は軸方向に生じたペレット・ギャップの補正を行っている。スタック長は燃焼度の進行とともに減少し，外層燃料棒で〜−0.72％，内層および中間層燃料でその1／2の〜−0.36％であった。外層と内・中間層燃料の平均燃

焼度の差は約3000Mwd／tである。参考までにType − C燃料棒のスタック減少は〜− 0.45％（集合体平均燃焼度＝8050 Mwd／tM）であった。燃焼度に対するスタック減少は，燃料ペレットのDensification が終結するとともに止まり，一般には5000 Mwd／t前後で終結するとされている。後で述べるが，Type −D燃料のDensification も密度測定結果によると，ほぼ5000〜6000 Mwd／t で変化が止まっているようである。

測定データの検討として，燃料スタック長の減少が，照射下における焼しまりによるものと想定し，炉内における焼しまり挙動を予測する以下のような二つの評価モデルによって行った。

(1) R.O.Meyer モデル[6)]

$$\frac{\triangle L}{L} = \frac{0.965 - \rho i}{2}$$

ρi ； ペレット初期密度

(2) E.Rolstad モデル[7)]

$$\frac{\triangle L}{L} = 22.2 \times \frac{(100 - TD)}{(TS - 1180)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(a)}$$

TD ； ペレット初期密度（％T.D）

TS ； 製造時のペレット焼結温度（℃）

さらに，燃焼度依存の焼しまりは

$$\frac{\triangle L}{L} = -3.0 + 0.93\,e^{-BU} + 2.07\,e^{-35\,BU} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(b)}$$

BU ； 燃焼度（Gwd／t）

で表わされ，両式の関係はFig 4.5 −2に示したようになる。使い方は，最初に左図により焼結温度とペレット密度から最大の焼しまり量（△L／L）を求め，その点から水平線を右側のグラフの曲線と交わるところまで引くと，その点が予測される焼しまりの出発点となる。このグラフから最大焼しまりは約5000 Mwd/t で生じ，その後は燃焼度が進んでも焼しまりは進行しないとしている。したがって，SGHWR照射の照射後における燃焼度は，すべてこの値を超えているので，測定値との比較は(a)式で求めた△L／Lだけを考慮すればよい。

以上の二つの評価モデルで計算した結果と測定値を比較した結果を，Type A，BおよびCのデータとともにFig 4.5 − 3に示す。Meyerモデルを使用した場合，計算値の方が大き目の評価になり，Rolstadモデルを使用した場合，計算値は小さ目の評価となっており，モデルによって全く逆の傾向になっている。しかし，全体的にはRolstadモデルの方がMeyerモデルより良い予測をしている。一方，Type A，B，C照射はUO_2燃料，Type D照射は$P_uO_2 - UO_2$燃料を使用しているが，この結果からは両者に差は見られず，プルトニウムとしては特別に異った変化はなかった。

4.6 燃料棒直径測定

すべての燃料棒は，ほとんど全長にわたって直径が減少していた。特に外層燃料棒の減少が大きかった。また，被覆管のオーバリティもすべての燃料棒に生じていた。ECT，ガンマ・スキャンおよび直径などの注意深い試験を実施した結果，リッジの形成はペレット端部でなく，ペレットの中央部で生じていたことが判明した。さらに，ペレットの形状は照射中には通常砂時計型(Hourglass状)をしているものが，Type−Dのペレットでは，むしろ樽型をしていたと思われる形跡が金相試験から間接的に観察された。その一例をFig 4.6−1に示す。図中で示すように，ガンマ・スキャンのチャートのくぼみ間がペレット1個分の長さに相当している。これに対して直径測定チャートを観察すると，ガンマ・スキャン・チャートのくぼみの所で直径が減少しており，逆にペレットの中央部(くぼみとくぼみの間)で盛り上がったようになっている(全体的には直径が減少していることに注意)。このリッジの高さは平均および最大でそれぞれ18μmおよび28μmであった。また，この中央部でペレット／被覆管の接触(PCMI)があったことをうらずける形跡が金相試験で観察された(Photo 3.2−5)。

外層，中間層および内層の代表的な燃料棒について，ATR燃料設計計算コード「ATFUEL[8]」で予測し，測定データと比較した。対象燃料棒は外層がNo.C10，中間層がNo.B6，内層がNo.A4である。

比較した結果をFig 4.6−2〜Fig 4.6−5に示す。Fig 4.6−2〜Fig 4.6−4には，3本の燃料棒の軸方向分布を示す。測定値は内層，中間層そして外層の順に変化が大きくなっており，燃料棒の出力に依存した傾向が見られる。また，軸方向の分布でも出力の高かった中央部で変化が大きくなっている。一方，ATFUELによる計算結果も測定値の傾向を良くフォローしている。内層燃料棒の△D／Do は良い一致を示しており，中間層は全長にわたって計算値の方が小さい目である。また，外層燃料棒については，中央部より下側は良く一致しているが，上側については測定データが下側よりくぼんでいるため計算値の方が大きな変化を示している。この現象については計算フォローすることができなかった。燃料棒平均の△D／DoをTable 4.6−1に示したが，この結果を見ても比較的良い一致を示している。

Table 4.6-1 Comparison between predicted and measured average diameter changes

Ring (Rod No.)	Meas. ΔD/Do (%)	Predict. ΔD/Do(%)
Inner (A4)	−0.12	−0.12
Intermediate (B6)	−0.18	−0.13
Outer (C10)	−0.23	−0.28

Fig 4.6−5には，各燃料棒の最大出力部における直径変化（△D／Do）を，その燃料棒の出力履歴を追跡して計算したものである。図に示すように，燃料棒の直径は時間とともに除々に減少し，その割合も燃料棒の出力の大きさ（燃料被覆管温度の高さ）によって異っている。計算結果によると，燃料ペレットのスウェリングによる被覆管の押し戻しはなかったようである。

照射後の冷温状態（被覆管温度＝30℃）における被覆管の△D／Do の測定値と計算値の比較をTable 4.6−2に示す。測定値の△D／Doは，その燃料棒の最大値ではなく，ATFUELで計算した最高出力部の軸方向ノードの平均の値である。ここでも計算値で予測した△D／Doは，測定値と比較的良い一致を示している。

Table 4.6-2　Comparison between measured and predicted cladding diameter changes at max. power position

Ring (Rod No.)	Meas. ΔD/Do (%)	Predict. ΔD/Do (%)
Inner (A4)	-0.14	-0.16
Intermediate (B6)	-0.21	-0.18
Outer (C10)	-0.39	-0.36

4.7 核分裂生成ガス放出

各燃料棒の平均燃焼度に対するFPガス放出率の実測値をFig 4.7−1に示す。内層および中間層燃料棒のXeの放出率は低く，0.1％以下であった。外層燃料棒の値はC12を除いて3〜4％で，C12だけは10％と非常に高い放出率を示した。燃料棒C12と他の外層燃料棒のガス体積を比較すると，C12内のガス体積の増加は，XeとKrのガス体積の増加によることが判明した。このため，C12の燃料断面の金相試験から照射中の燃料温度を推定してみると，他の外層燃料棒に比べて僅かに高かったことが判った。同じように各層の燃料温度を金相から推定すると，内層，中間層で1000℃前後，C12を除く外層で1600℃前後でC12はこれより若干高かったものと思われる。

Fig 4.7−2にATFUELに内蔵されているFPガス放出モデルの値と実測値を各燃料棒の平均線出力に対して示す。モデルは二領域モデル（1650℃以上＝100％放出，1650℃未満＝4％放出）を使用しており，線出力が37 kW／mまで4％放出率で，それ以上は急激に放出率が高くなっている。C12の特異な結果を除いて計算値は実測値を良くフォローしている。同様にFPガス放出量について実測値と計算値を比較するとFig 4.7−3のようになる。Type BおよびCの結果も併せて示した。どの燃料棒の放出量も計算値の方が大きい値を示しているが，これはATFUELの二領域放出モデルがBest Fitモデルでなく，安全余裕を見込んだモデルのためである。

4.8 中性子ラジオグラフ

Puスポットの存在は中性子ラジオグラフで検出することができなかった。これは中性子ラジオグラフのPuスポット検出限界が350 μm以上のためである。したがって，Type − D燃料ペレット中には，350 μm以上のPuスポットが存在しなかったことを意味する。

4.9 燃料の金相と温度

運転中の燃料温度は，核分裂生成ガスの放出量からも予想されたように，内層と中間層燃料棒はかなり低かった。これらの燃料棒における燃料の主な組織変化は，高密度化によって小さなポアが移動しているのが観察された。また，結晶成長は起っていなかった。中間層燃料棒の高出力領域のペレット中心部において，FPガスバルブを検出することができたが，微少ポアを完全に焼結したり，結晶成長をうながしたりするほど高い温度ではなかった。

外層燃料棒はペレットの中心部において結晶成長が観察された。いくつかのサンプルでは，柱状晶成長が局部的に観察された。また高出力を経験した領域において，ペレット端部のディッシュが燃料のスウェリングによって〜80％程度埋められていた。縦断面金相写真から燃料と被覆管の機械的相互作用（PCMI）のあった形跡が観察された。Puスポットと被覆管間の接触の形跡はなかった。

内層，中間層および外層の代表的な燃料棒について，それぞれの金相試験面の中心温度を「ATFUEL」で予測した。対象とした燃料棒はA 4，B 6およびC11である。金相面において観察した燃料中心温度は，おおよそ以下のような値になっている。

A 4	；	〜 900 ℃
B 6	；	1050 ℃
C 11	；	1300 ℃

これに対して，計算で予測した燃料中心温度，ギャップ巾およびギャップ・コンダクタンスは照射時間に対して，Fig 4.9 − 1〜4.9 − 3のようになる。燃料の最高温度は，照射開始時が最も高くその後はギャップ・サイズが閉じるに従い温度が低くなる。さらに燃焼度が進むとFPガスの放出に伴ないギャップ・コンダクタンスが低下し燃料温度も上昇するが，Type − D 照射では照射時間に対して燃料出力が低下しているため，照射開始時の最高温度まで達することはなかった。

同じように「ATFUEL」で予測したギャップ・サイズは図で解るように，内層（A 4）および中間層（B 6）では期間中に接触しなかったが，外層（C11）燃料棒では完全に接触している。照射後試験の縦割り試料においても燃料棒C11は接触した形跡を残していた（Photo 3.2 − 6 b）。

燃料中心温度において，実測値と計算値を比較した結果をType BおよびType C の値とともにFig 4.9 − 4に示した。計算値はATR燃料設計用の諸物性値を使用しているため，実測値より高めの温度予測をしている。この傾向は温度が高くなるにつれて大きくなっている。

4.10 オート・ラジオグラフ

α −オートラジオグラフにおいて，25 w／g 以下の低出力領域では，すべてのプルトニウム・スポットを明瞭に観察することができる。また，25 w／g 以上の高出力領域については，プルトニウム・スポットの均質化がペレットの中心付近において生じていた。オートラジオグラフで観察した最大のスポットの大きさは〜180 μmであった。

β/γ オートラジオグラフにおいて，燃料棒内での flux tilt の効果を見ることができる。 この傾向は内層，中間層燃料棒より外層燃料棒で著しくなっている。外層燃料棒のオートラジオグラフを詳細に観察すると，二方向の tilt angle の存在が確認されたが，これは，照射期間中に集合体の照射位置が変わり炉心中心を向いている面が変ったためである。

4.11 被 覆 管 金 相

外観試験において観察されたクラッド層の詳細試験で二つの異なる層の存在を確認した。一つは外層のポーラスな赤茶色の沈殿物でブラッシングによって簡単に取り除かれ，その厚さは 10〜25 μmで主に鉄酸化物から成っている。もう一つは，主に銅から成る固い密な内側の層である。燃料棒表面において，これらの異った二つのタイプのクラッドが存在したのは，前にも述べたように多分照射期間中に冷却材の成分が変化したためと考えられる。

被覆管表面の酸化ノジュールは，レンズ状の形をしていた。最も厚いノジュールは 43 μm で，燃料棒 C 14 のグリッド 4 のところで見られた。基準酸化層の厚さは 1 〜4 μmの範囲であった。

被覆管内面の最大酸化厚は 8 μmで，小さな斑点として存在し，外層燃料棒の比較的高い線出力を経験した領域の 80 %以上を覆っていた。

被覆管の結晶の大きさは＜6 μmで，結晶は等軸の形をしていた。ジルコニウム水素化物は二つの形態で存在していた。一つは短くてまばらで円周方向を向いたもの，もう一つは非常に短くて数も多く，向きはランダムなものである。水素吸収は，わずかではあるが燃料棒外表面の酸化ノジュールの下に検出された。

4.12 燃料密度測定

燃料密度の変化は，燃焼度に対して整理するとFig 4.12 − 1のようになる。傾向としては燃焼度が進むにつれて燃料密度の変化が大きくなり，5000 Mwd／tM 付近でほぼ最大となる。さらに燃焼度が進むにつれて，密度の変化が小さくなってくる。この現象は，前者が燃料のデンシフィケーションによるものであり，後者が燃料中に蓄積した固体FPのスウェリングによるものと考えられる。この密度測定結果から燃料中のポロシティの変化をみるために，固体FPによってスウェリングした分の補正を行った。固体FPのスウェリング量としては，燃焼度が 9560Mwd／tM 当り 1 %△V／Vとした。固体FPによるスウェリング量と燃料中のポロシティの変化をFig 4.12 − 2 に示す。ポロシティ変化の斜線の部分は，それぞれのデータを最小二乗法によりフィッティング

した結果である。ポロシティの焼結は燃焼度とともに進行し，約5000～6000Mwd／tM でほぼ終結している。その後は余り進行が見られない。この傾向は前に述べた燃料スタック長の減少を支持する傾向にある。また，マイクロ・ポアの焼結により最大2％の高密度化が生じていた。

4.13 燃焼度測定

Nd－148／U比から求められた燃焼度は，現時点のWSGHWRのデータバンクで予測した値より全体的に4.3～12％程度高い値を示している。マイクロ・ドリリング法により行った燃料ペレット半径方向の燃焼度測定によると，燃料内のDepressionは，Fig 4.13－1に示すように，平均燃焼度6040Mwd／tMのサンプル（B6）と9010Mwd／tMのサンプル（C11）では，ほとんど差がなくペレットの中心と外表面の比は約1.18であった。

燃料内のDepressionの割合が燃焼度とともに，どう変わるか興味のもたれるところである。Type－D燃料の場合は，燃焼度が低いため明瞭な結果が得られなかったので，他の実測値を基に調査した。Fig 4.13－2はSaxton炉心のプルトニウム富化率が6.6％の燃料の測定値で，Fig 4.13－3はYankee炉心の3.4％濃縮ウラン燃料の測定値である。プルトニウム富化したSaxtonの燃料では明らかに燃焼度によってDepressionの割合が異なり，その傾向は燃焼度とともに平担化していく傾向にある。一方，濃縮ウランだけを使用したYankee燃料の場合は，Saxton燃料と異なり，反対に燃焼度の増加によりDepressionの割合が大きくなる傾向を示した。

この比較では，初期燃料組成がウラン燃料かウランとプルトニウムの混合燃料かによって傾向が正反対になっているが，データの数が少ないため断定することはできない。今後，数多くのデータを調査し，この傾向を検討する必要があると考える。

4.14 被覆管耐圧試験

(1) 室温（20℃）における端栓溶接部試験

燃料棒C7の上部および下部溶接部の双方は，20℃で1223kg／cm²（120MPa）を越える水圧でも破損しなかった。被覆管の変形は＜6％であった。両方の端栓は試験後，良好な状態を示した。

(2) 破裂試験（340℃）

燃料棒C7の中央部から選んだ試験片を340℃の高温下で試験した。被覆管の伸びは，照射後の試験片で8.7％であり，ふげん燃料被覆管の仕様の5％以上を十分に満足させていた。また，UBSおよび0.2％耐力も仕様に対して十分余裕を有していた。

4.15 照射におけるペレットの変形

Type Dのペレット形状調査

従来各国で行なわれてきた照射後試験によると，照射によりペレットの端部で外径増加を示し，このため燃料被覆管は竹のふしのように周期的に外径が増加することがある。普通これをリッジングと呼んでいる。

ウィンズケールからの報告によるとType Dの場合にはペレットの中央が脹れているという。これは今までに見られない変形であり，特にこれをCentral ridge とウィンズケールでは呼んでいる。リッジングは燃料要素の健全性に関する重要項目であるので，ウィンズケールで報告した結果をさらに検証することとした。

このCentral ridge と判断する直接の根拠は，① γスキャン，ECTチャート，および燃料要素の外径測定チャートを並べてみて，燃料要素の外径がペレットの端部で小さく，中央部で大きくなっていると判定したことと，②金相試験から，ペレットは中央部でよく被覆管とくっついているということである。後者の②金相試験結果については，ペレットと被覆管の間隙測定結果が図に示されているのでペレット中央部の脹れを推定することはできる。しかし送られて来た縦割りペレットの写真を調べた限りでは，問題となっているリッジが 30 μm と小さいためペレットの脹れを検出することは困難であった。

前者の① γスキャン，ECTおよび燃料要素の外径測定データの対比によって再度調査を行なった。これらのチャートは燃料要素C 1，C 12 以外選択した燃料要素についてウィンズケール から全て送られて来たので，これらを基に検証を試みた。

外径測定チャートを調べるとFig 3.1－16 に示す通り燃料要素の中央にペレット長さを周期とする振幅 40 μm 程の規則的なゆるやかな波形があるが，燃料要素の両側にはペレットのチャンファに沿って被覆管が窪んだと思われるするどい凹部がある。 ここがペレットの端部であると判定すれば話は簡単であるが，それでは客観性に欠ける。このため，γスキャンと外径測定のチャートと比較して検証することとした。すなわちγスキャンにより各ペレットの端が判るのでこの位置が外径測定チャートではどうなっているか調べた。このためには両者のチャートの位置合わせが必要である。γスキャンチャートにはECT の結果も同時に記録されていて，両者の長さ方向の記録のずれも少ない。 ECT のスキャンで端栓肩，プレナム端が判り，γチャートでプレナム，ペレット位置が判り，チャートと燃料要素の位置の対応が良くつけられる（Fig 3.1－6と3.1－7)。しかし外径測定チャートでは，どの位置が燃料要素の肩に対応するか不明であり，まずこの調査を行なった。外径チャートの流れ出しの部分に表示が3種類あり，チャート流れの順に並べると①赤線（横にBottom と表示），②O Point Start，③ピークの立ち上がりである。 ②と③の距離は約 6 mmである。下部端栓肩にはゆるやかなテーパが 5 mm にわたってついていて，このテーパの前後いずれかが外径測定チャートの立ち上がりの場合も考えられる。このため，このテーパの効果も含め

て，γスキャン－ECTチャートに示された端栓肩と外径測定チャートの前述の，②，③の部分の各々のケースについて位置合わせを行なった。しかしいずれのケースについても，両チャートからペレット形状に関して統一した結果が得られなかった。両チャートの長さが一致していない場合もあるので，この点についても長さの補正を加える等の検討も行なったがやはり統一した結果が得られなかった。また照射中に被覆管を変形させたペレットが，その元の位置から移動したこともありうる。この点についてはECTとγスキャンのピークを調べると判る。燃料要素の中央部においては，この移動が認められなかったが，両側においては移動が認められることがよくあることがわかったので，γスキャンと外径測定のチャート合わせを燃料要素の中央部のみに注目して再度調査しなおしたが，結果は同じであった。以上の調査からγスキャンと外径測定のチャートを直接比較してペレットの形状を推定することは困難である。

スペーサ位置に相当する燃料要素の部分においては，γ強度が減少している。またこの部分において外径，ECTチャートの周期的波形に乱れが発生している箇所もあった。このことに着目して，両チャートの位置合わせを試みた。しかしスペーサ部分のγ強度の減少が60mm程にわたっておこっており，スペーサの中心部がはっきりわからなくまた外径，ECTの周期的波の乱れが必ずしも，すべての燃料要素に起こっているとは限らなく，また両者の位置合わせは信頼性を欠いていた。

ECTチャートに欠陥と思われる信号が3箇所検出された。これを利用して位置合わせを検討したが，この位置においては外径測定チャートにはなんの特異な信号の変化も認められなかった。

ウィンズケールの説明によると外径が局部的に減少している部分ではECTは極小ピークとして検出されるということであった。この点に着目してECTとγスキャンの比較を行なったところ燃料要素の中央についてはペレットの境界部にECTの極小ピークが現われた。（ただし燃料要素のはじの方ではピークのずれがあるところもあった。）しかしこのことからペレットは中央部で張れていると結論を下すのは早計であり，実はECTのこのするどい極小ピークはペレット長さの1/2のサイクルで現われている（Fig 3.1－6）。すなわちペレットの形状はこのことでは判断できない。

外径測定チャートとECTチャートとの比較も行なった。ECTはペレットの位置には関係がなく被覆管の外径，肉厚のデータが得られるので，まさに両チャートの対応は良いはずである。まず両チャートのだいたいの位置合わせを行なっておき，外径測定のチャートから周期的に現われる外径極小位置を半透明の紙にペレット長さ50個分プロットしておき，この紙をECTチャートにのせ，プロット位置と，ECTの極小ピークを最も合うよう，ピークの付近で左右にふらせて重ね合わせた。このようにして合わせても50個のピークが全て，このプロット上にあることはなく，多少のズレは必ず現われる。（直角2方向から同時に外径測定を行なったチャートにおいてでも，2方向の外径極小の位置は2mm程ずれている場合が多々見られる。） 微少なズレは無視して，1.5mm

以上のズレを示す箇所を数える。次に1つピークをずらして合わせ同様数える。このようにして得られた結果のうち，ズレの箇所が最も少ない位置での合わせが，最も確からしい位置合わせである。このようにして調べてみると，50箇所中普通ずれている箇所は20箇所以上であるが，ある位置合わせでずれの箇所が非常に少なくなるところがある。燃料要素C4，C7，C10，C11，C14チャートについて調べるが（C1，C12はチャートなし）全ての燃料要素においてずれ箇所が10箇所以下でずれ幅も小さいケースがあった。このようにして位置合わせをしてみると，外径が極小である位置に相当するECTの極小ピークは，γスキャンチャートから正確にペレットの端部に発生していることがわかった。（ただし，C14においてはECTと外径測定チャートの位置合わせは適確にできたが，ECTとγスキャンのピークにずれがあった。）すなわちペレットは中央部が脹れていることがわかった。

ECTとγスキャンのチャートのピーク位置が互に合うのは燃料要素の中央部であり，ECTのピクが小さくなっている両側ではC14を除くと少しづつピークの位置がずれていた。これは燃料要素の中央部ではPCMIによりペレットが被覆管に固着しており，原子炉のサイクル中にも軸方向にペレットが移動しなかったためである。

ペレットの中央部が脹れ，端部の外径が減少している原因として，ウィンズケールでは金相写真から次のように説明している。すなわち，ペレット間の境界を調査するため，ペレットを縦割りしてみると，ペレットの境界にあるはずのディッシュの空隙が大半消えてなくなっている。この分の物質は，いずれかの方向から補充されねばならない。このため，ペレットの端部からも補充が起こり，結局ペレット端部の半径が小さくなる。しかし，ペレット中央部はディッシュへの距離が大きいので，ここからの物質補充は少ない。この結果ペレットの中央が端部に比べて大きくなっている。

このような説明では，タイプCのペレットも定性的にはペレットの中央部の膨れがでてくるはずである。すなわち，ペレットの端部には製造図面上全く同じ形のディッシュ，およびチャンファーである。タイプC，Dのこの形の製造データを調べてみると，非常によく一致している。しかしペレット長さはタイプCが16mmであるのに対して，タイプDは18mmであり，ペレット内の温度分布は軸方向に対して多少の差があることは考えられる。またウラン燃料よりプルトニウム燃料の方が20％程クリープ速度が大きいということもあり，この二つの事を考慮に入れてウラン燃料ペレットの変形を検討する必要はある。しかしいずれの相異によっても，ペレットが中央脹れか否かに本質的に影響を与えるとは考え難い。残念ながらタイプCの照射後試験結果の報告書にはペレットの形状に関する調査は載っていない。

タイプCのペレット形状調査

タイプCのペレット変形を調査するため，以下の検討を行なった。

① 金相によるペレット−被覆管ギャップ

② 金相による被覆管の変形

③ 外径チャート，γスキャン，ECTチャートによる被覆管の変形

①，②に対しては，縦断面の金相により調べることができる。この金相の試料は幸い燃料要素の中央部より採取したものであり，変形が最も多く，ペレットと被覆管の相互作用も大きいと考えられる。

まず①について，金相のネガフィルム（倍率5倍）を倍率5倍の投影機によりスリガラスの上に写しだした。ペレットと被覆管のギャップをノギスにより測定した。チャンファーを除く部分の端部からペレット中央部まで調べた結果，タイプDと同様，ペレットの中央部でギャップがわずかに小さくなっている金相写真が3枚中2枚あったが，その測定精度に疑問があり，信頼性に欠ける。

次に②について，同様に写し出した被覆管外表面を投影機に刻まれた中心線に合わせて，被覆管の曲がりを調べた。しかし外径測定に現われるような30 μm程の外径の起伏は検出されなかった。もし被覆管に30 μmの起伏があれば倍率が $5 \times 5 = 25$ 倍であるので $0.03 \times 25 = 0.75$ mmの起伏として投影機に現われるはずであるが，これが検出されなかったことは，試料作成のため縦割りをしたときに，今までペレットによって押され局部的に変形していた被覆管が応力解放のため，この変形箇所が弾性的にもどったためと考えられる。このように②の方法によってもペレットの形状に関する情報は得られなかった。

③の外径チャート，γスキャン，ECTチャートによる方法は二通りについて検討した。まず外径チャートとγスキャンとのピークの重ね合わせである。幸いタイプCの外径チャートには端栓肩の位置が示されており，ここを基準に両者を並べ，比較検討した。外径チャートには，タイプDに見られるように，チャートの中央部より少し両端に寄ったところにシャープな凹部がペレット長さをおいて周期的に現われる。いわゆるここは中央部に比べ出力の低い，ペレットの変形の少ない部分なので，この凹部の変形は被覆管が外圧におされて，チャンファー部にくいこんだものとも考えられる。しかしこのことの確証を得るにはやはりペレットとの位置関係を知る必要がある。タイプCの外径測定はA，B 2方向のスキャンを2回に分けて2枚のチャートにとっている。一方ECTとγスキャンは1枚のチャートに同時にとっているが，これもA，B 2方向2回に分けてチャートにとっている。すなわちチャートは全部で4枚となるが，同一燃料要素のスキャンにかかわらず，A，B 2方向でチャート長さに差がでてきている。このためなるべく長さが合うECT，γスキャンチャート，外径チャートの組合わせを選んで調べた。これらのチャートは燃料要素K503，S697，S708についてとってある。前2者についてはチャート長さが一致しており，被覆管の凹部はペレットの境界の部分に相当することがわかった。すなわちペレットは中央が脹れていた。他の燃料要素S708については，γチャートの方が外径チャートよりも5 mm長かった。外径測定は上部端栓側から行なったため上部端栓肩を基準に両チャートをならべて調べた。その結果上部端栓側ではペレットが中央が脹れていることがはっきりわかった。しかし下部端栓側では外径のピークがγチャートの上部端栓側に4 mm程ずれていた。γチャートが長いことを考慮に入れると，ペレットの中央が脹れているといってよいだろう。

次にタイプＤに成功した方法で検討した。すなわち，まず外径チャートの極小値の位置を透明用紙にプロットしておき，これを ECT のピークに合わせる方法である。この方法で行なうとタイプＤと同じ程度に，ピークがよく重ね合わす位置が発見された。この重ね合わせの良い状態で，ECT と外径測定チャートが端栓肩で位置が合うかどうか調べたところ，チャート長さが同じ燃料要素Ｋ503，Ｓ697では端栓肩が良く一致していた。すなわち以上行なった③の２通りの方法はいずれも妥当であるといえよう。外径ピークと ECT ピークとの対応ができたので次に ECT ピークとγスキャンピークとの対応を行なったところ，外径が極小すると ECT のピークは，ペレットの端部に相当することがわかった。すなわち，タイプＣのペレットは，この方法によっても中央が脹れていることがわかった。

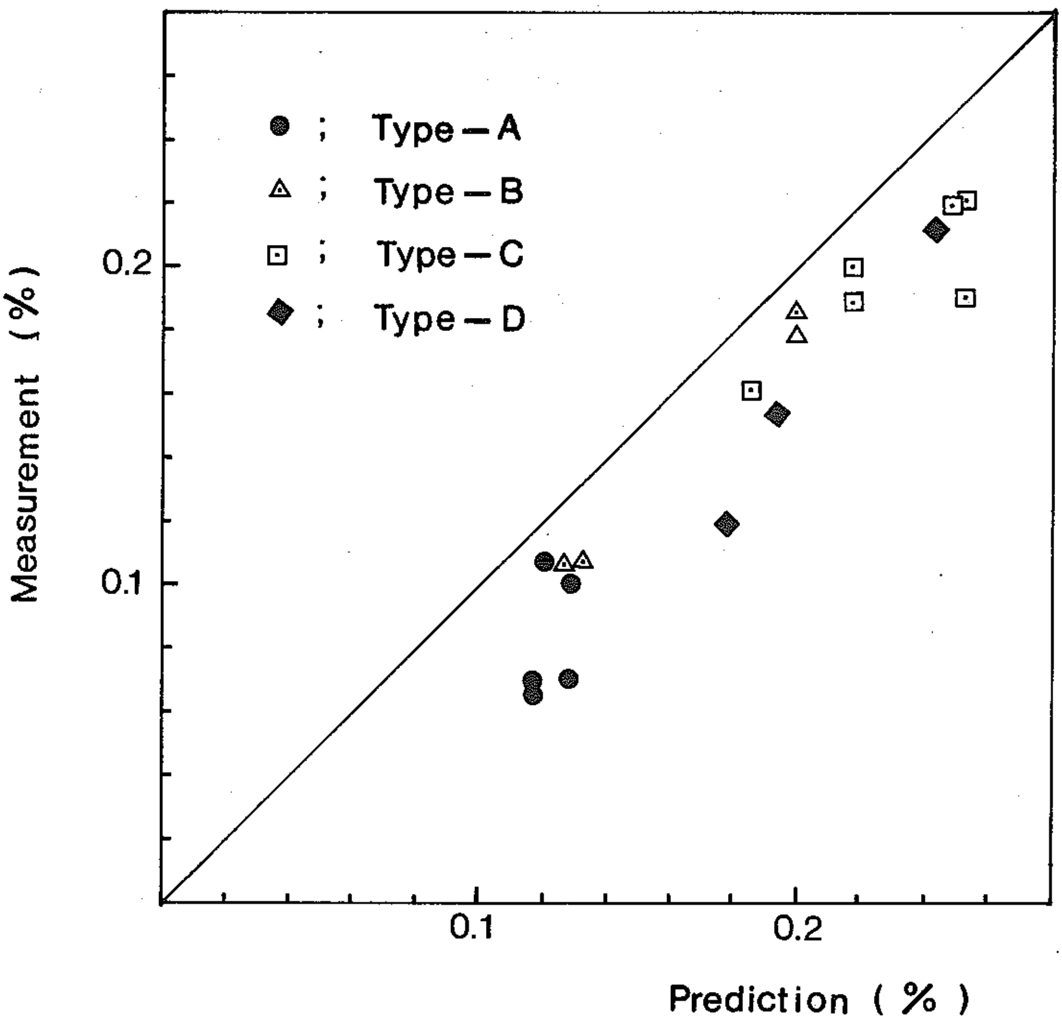


Fig.4.3-1 Comparision of measured and predicted rod length changes in SGHMR irradiated fuel pins

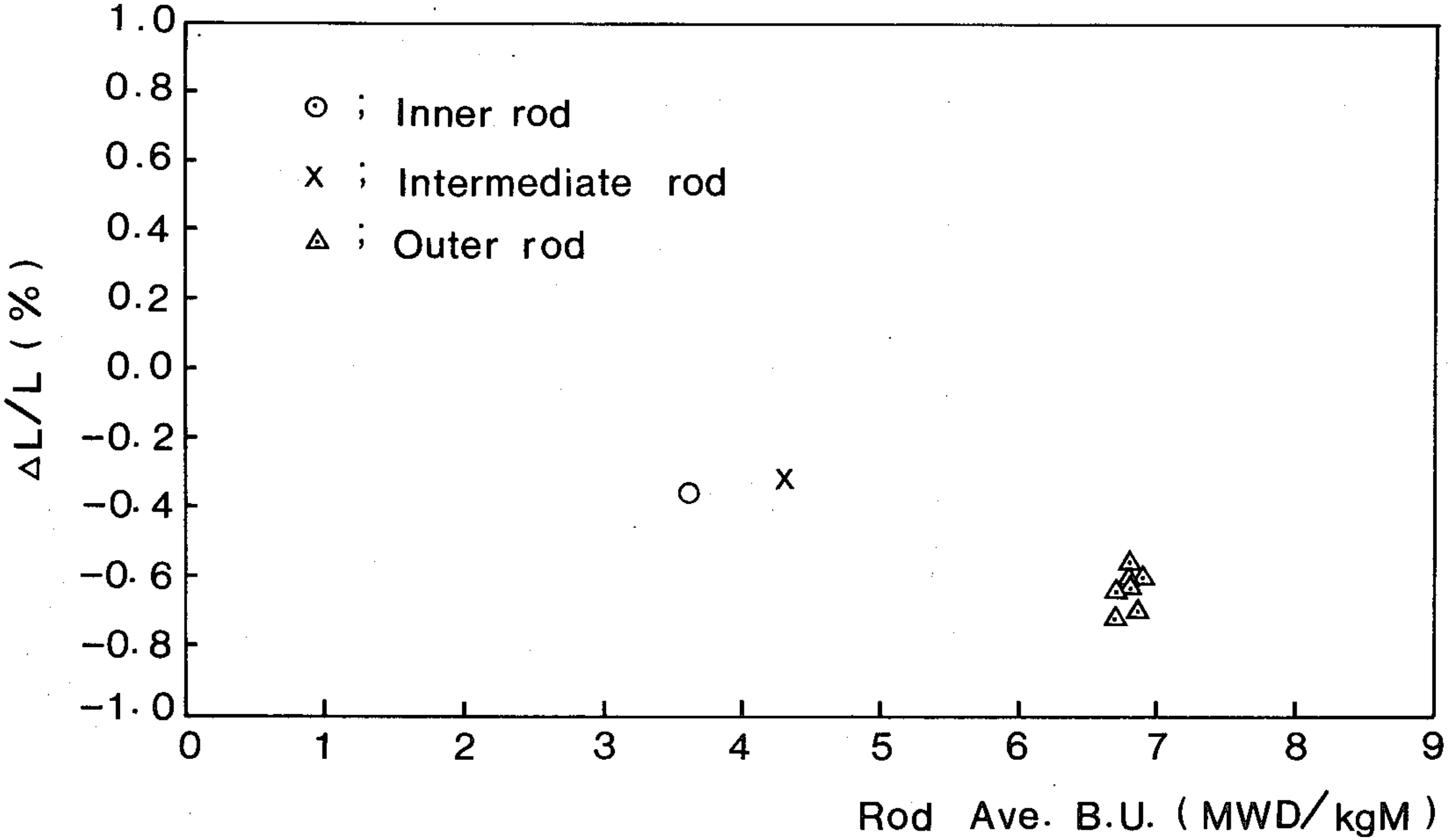


Fig. 4.5-1 Fuel stack length change vs ave. burnup

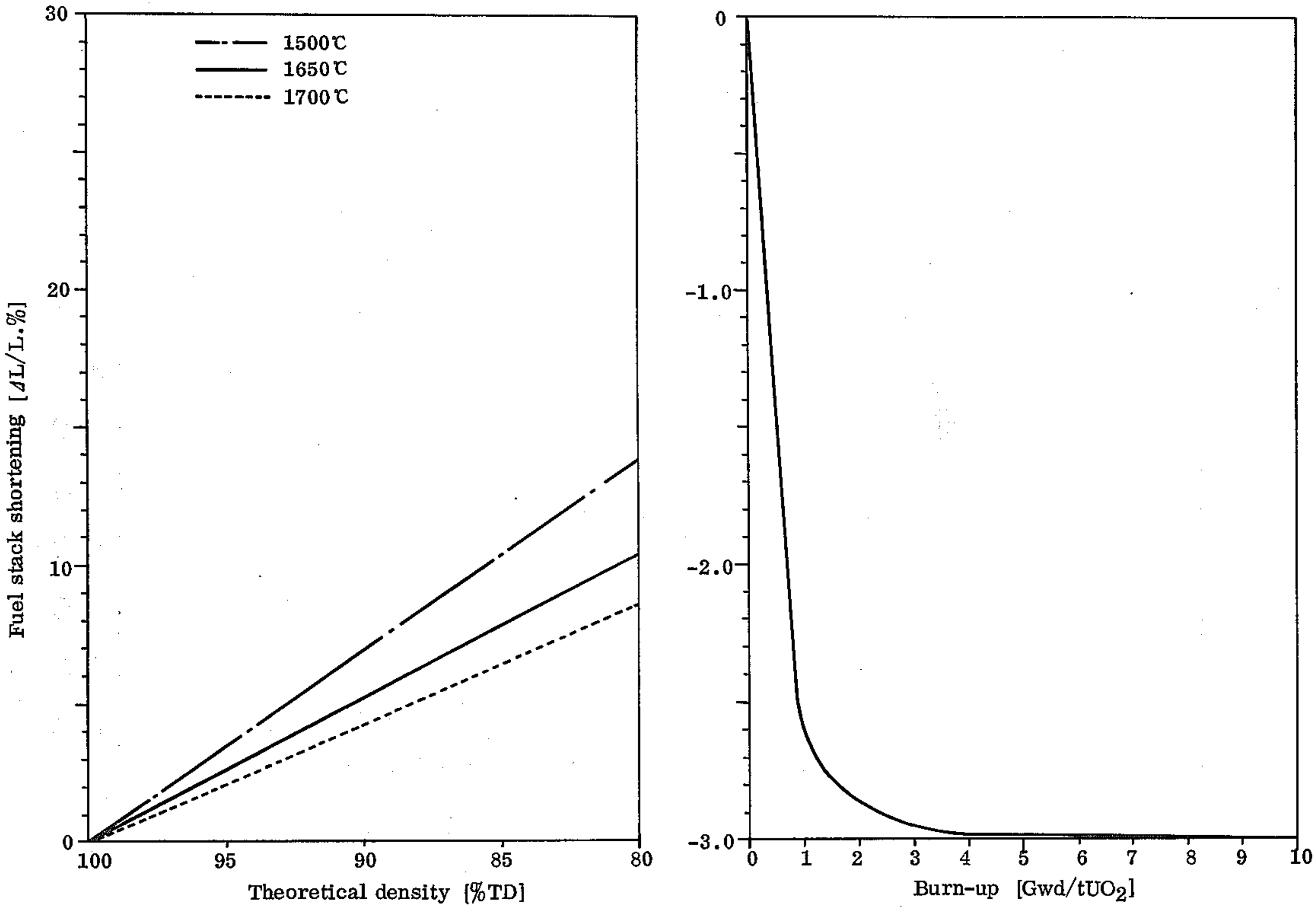


Fig. 4.5-2 Rolstad モデルによる焼しまり曲線の予測図

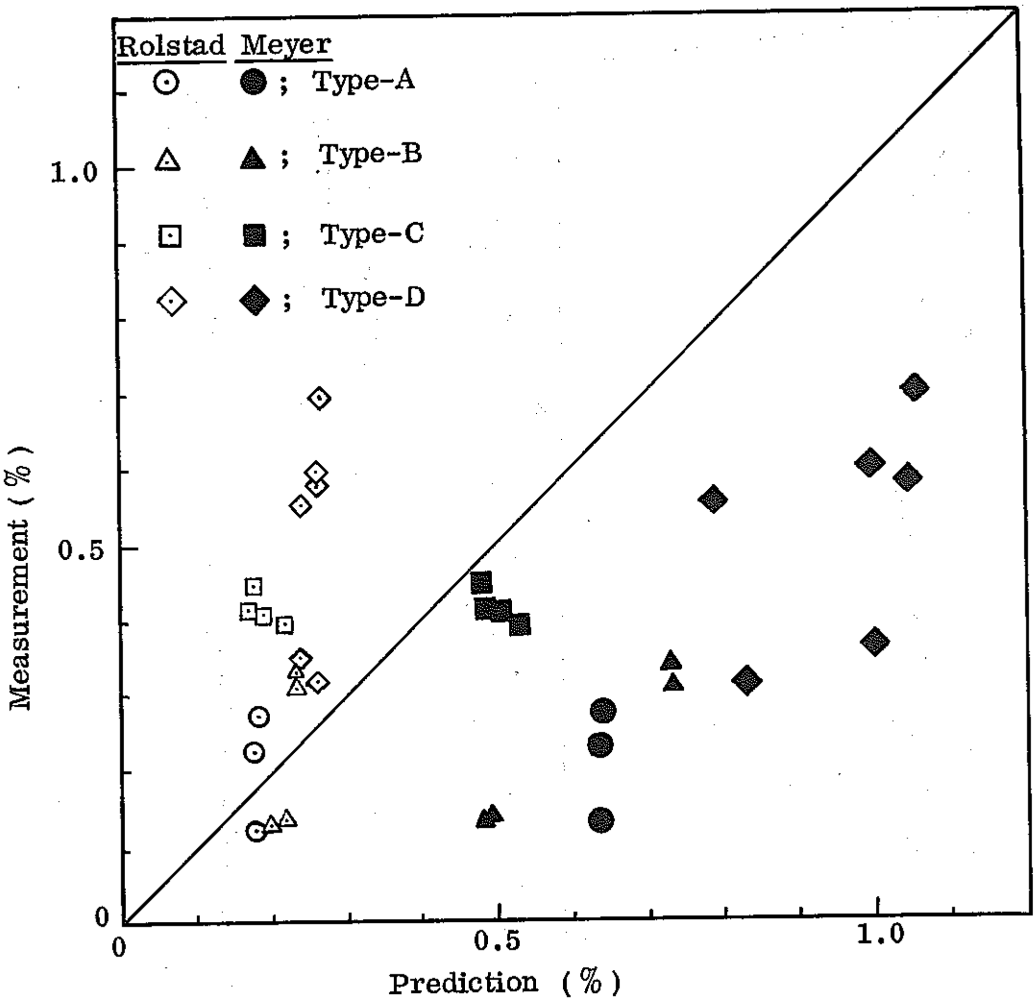
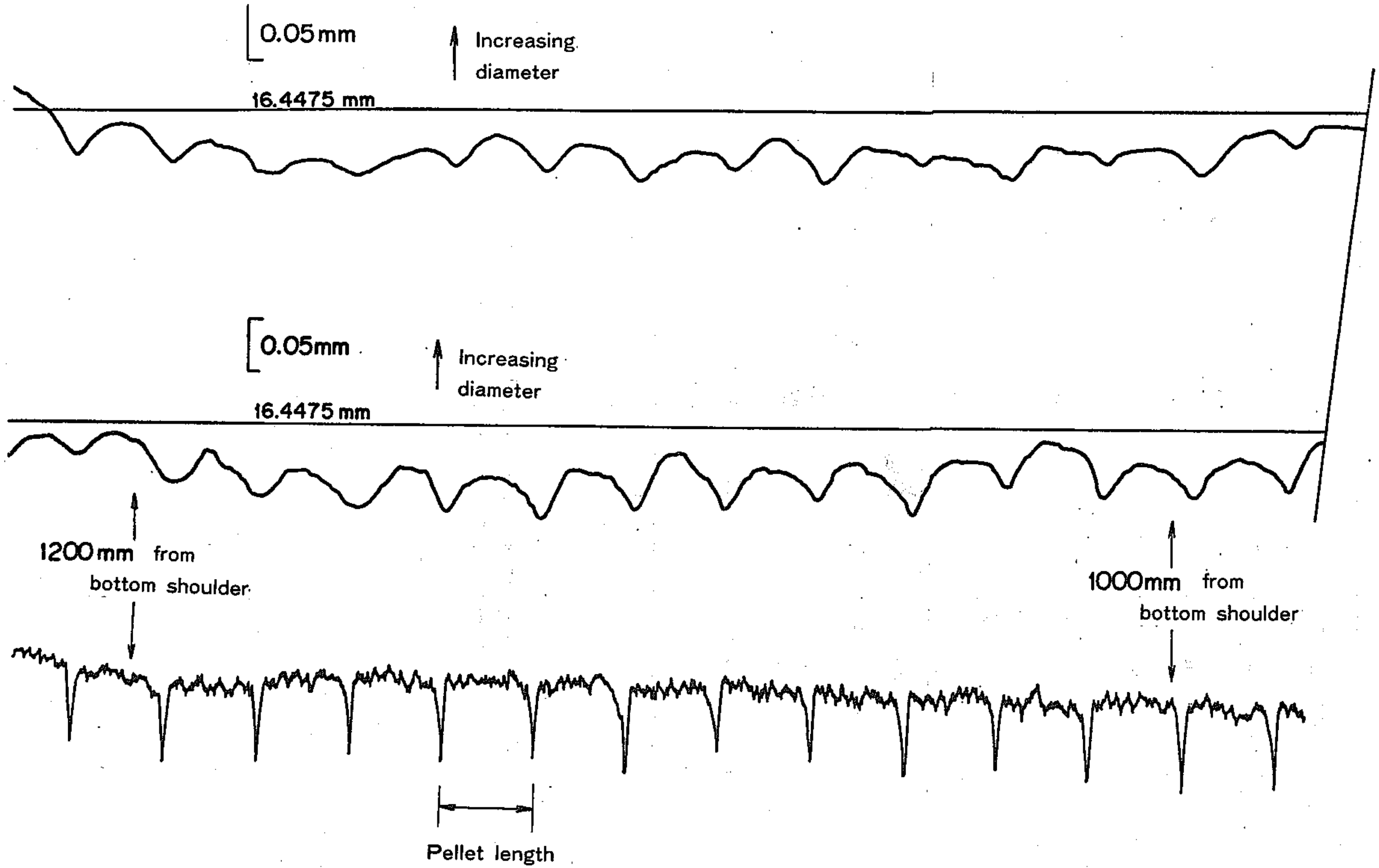


Fig.4.5-3 Comparision of measured and predicted stack length changes in SGHWR irradiated fuel pins.



照射後における外径測定およびガンマ・スキャンのチャート
Fig.4.6-1　（Pin C7）

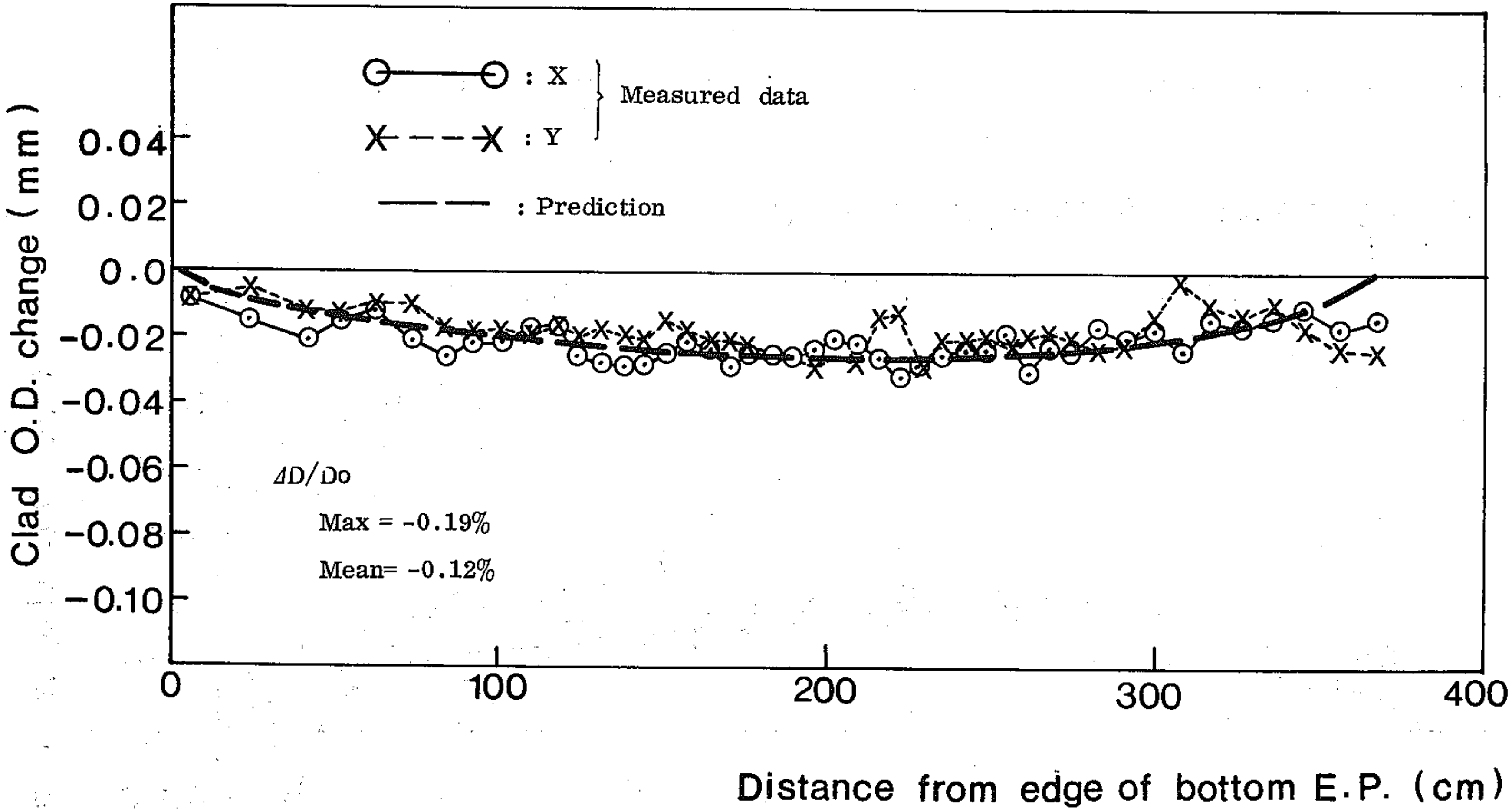


Fig.4.6-2 Comparison of predicted and measured outer diameter changes
(Inner rod No. A4)

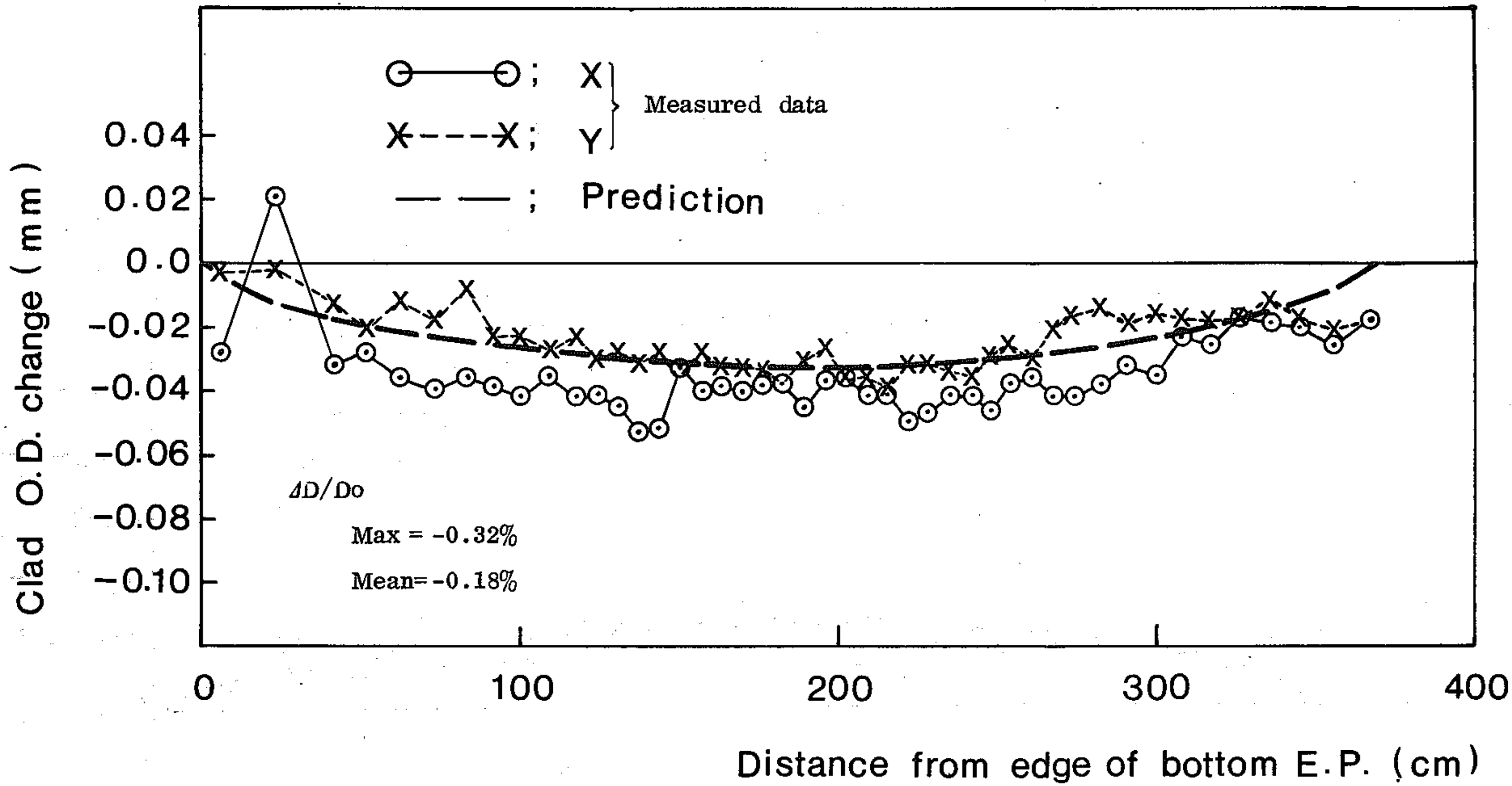


Fig.4.6-3 Comparison of predicted and measured outer diameter changes (Intermediate rod No.B6)

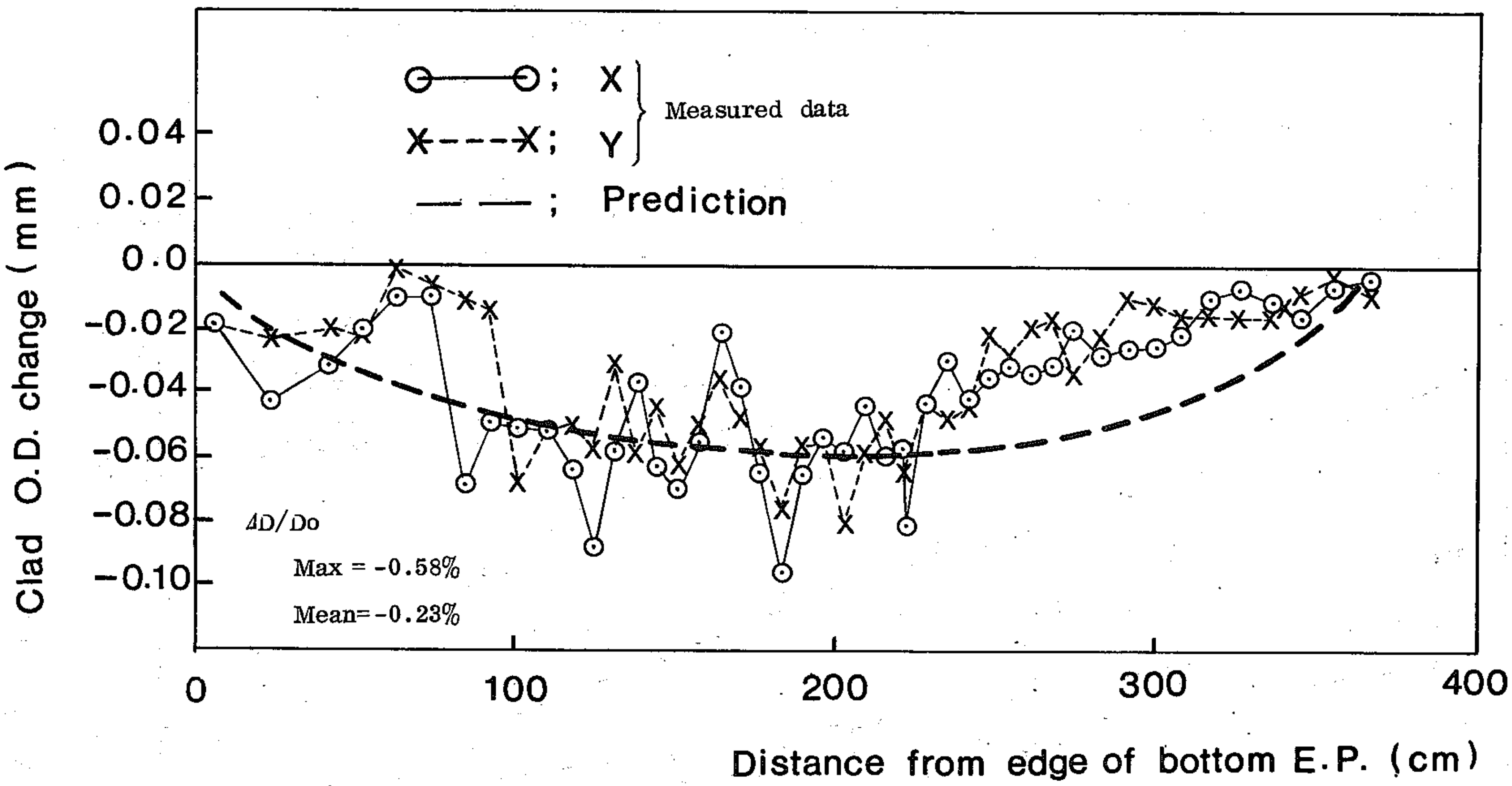


Fig.4.6-4 Comparison of predicted and measured outer diameter changes (Outer rod No. C10)

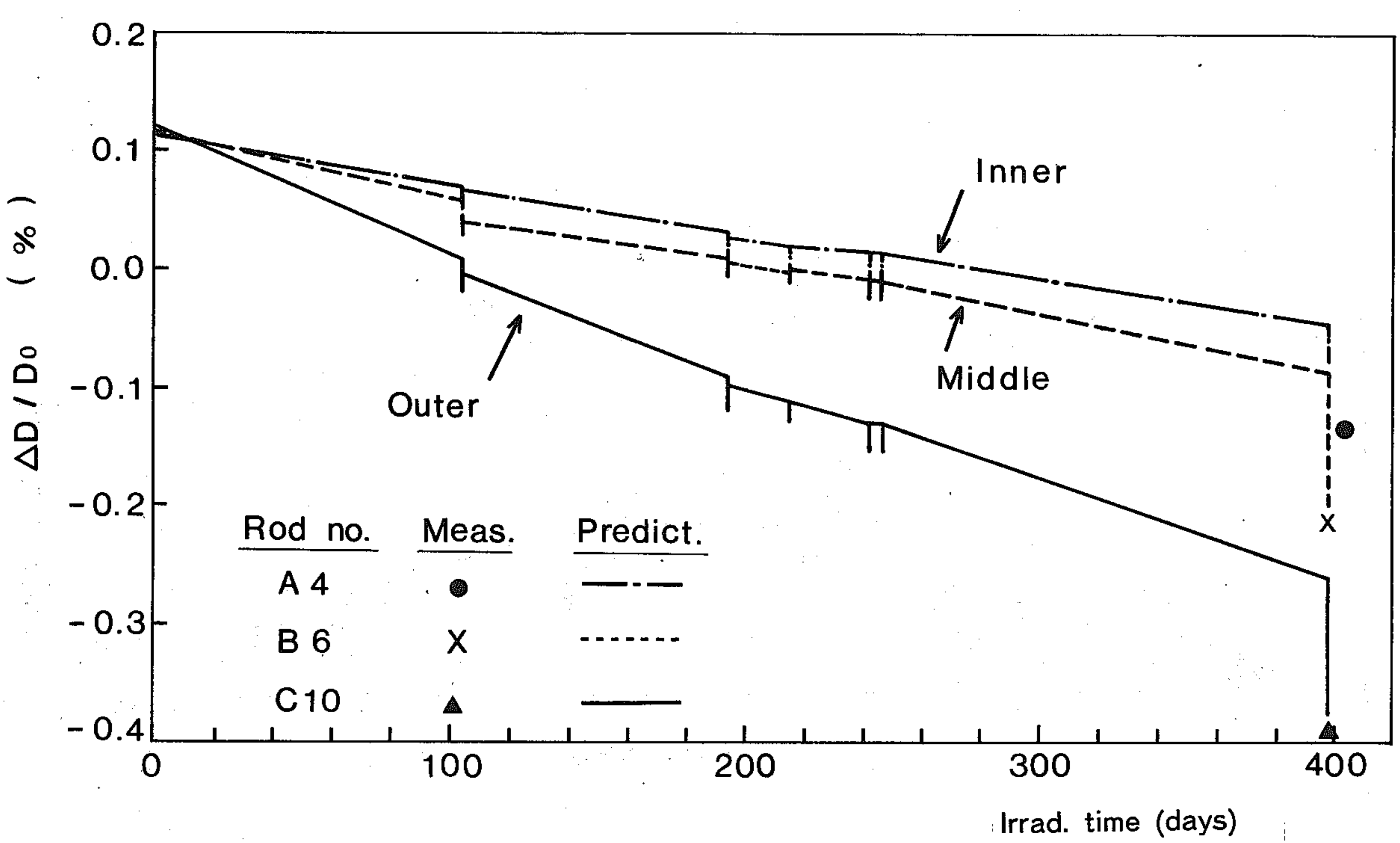


Fig.4.6-5 Changes of cladding outer diameter at maximum linear heat rate location

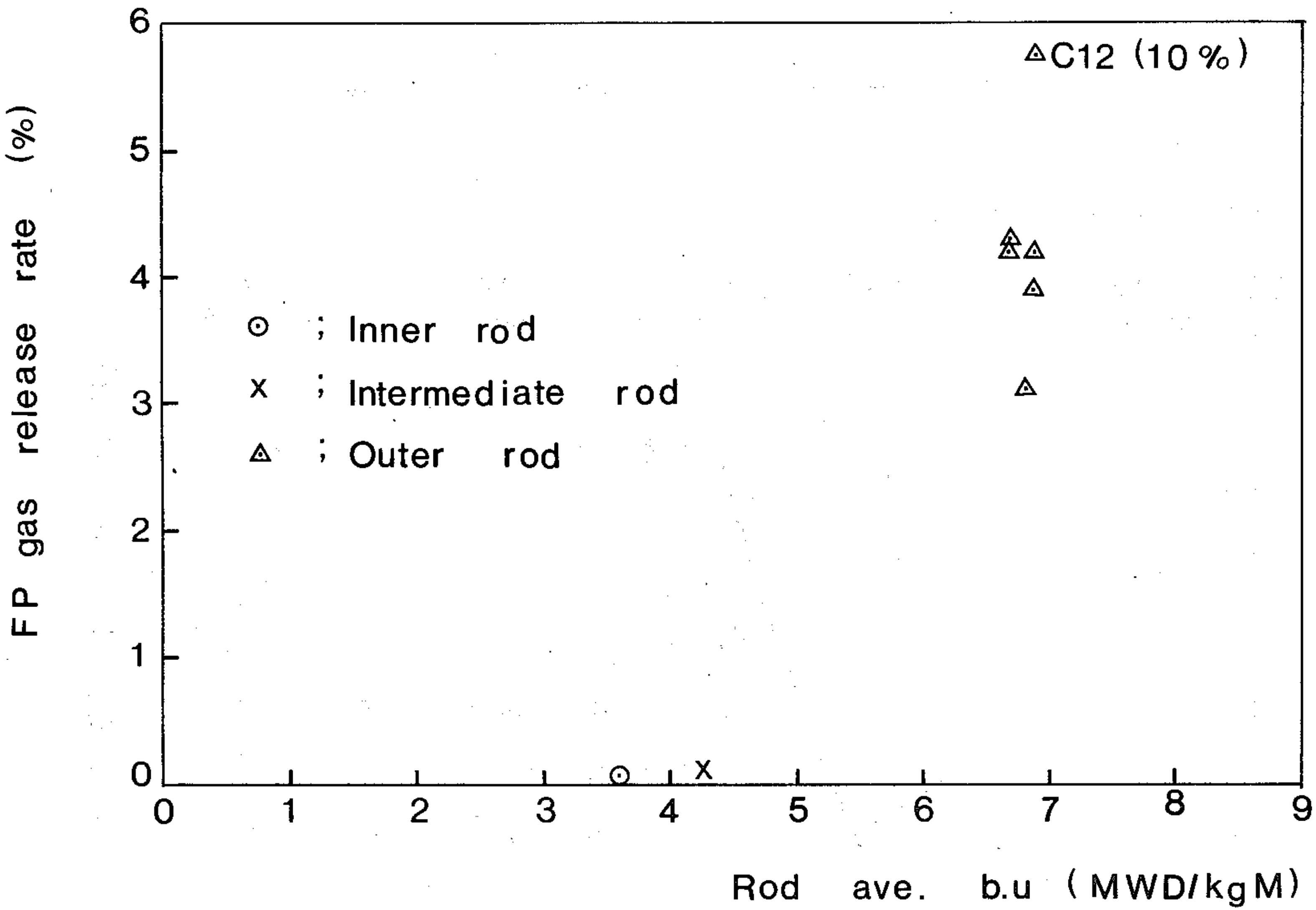


Fig.4.7-1 FP gas release rate vs ave. burnup

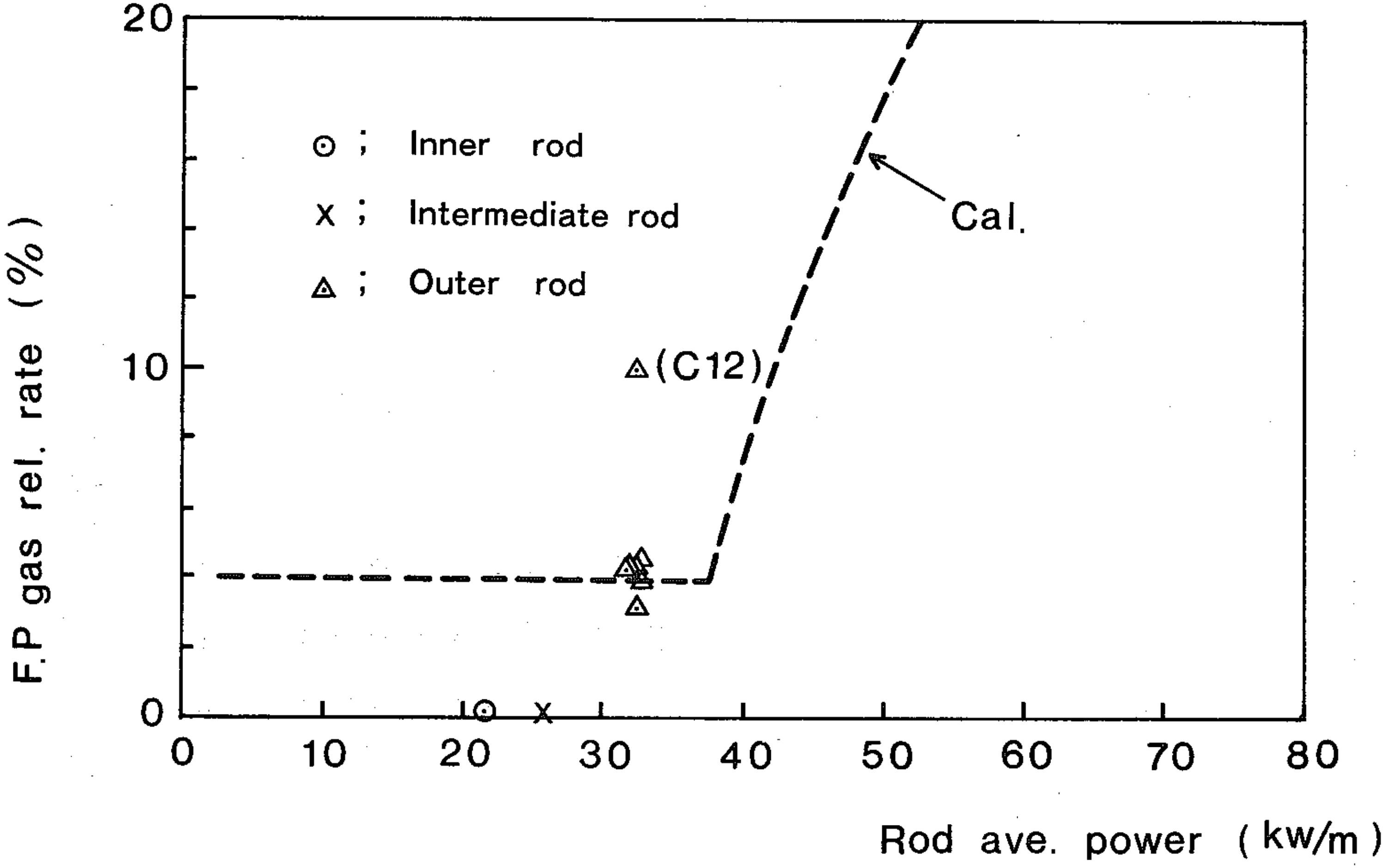


Fig.4.7-2 F.P gas release rate vs rod ave. power

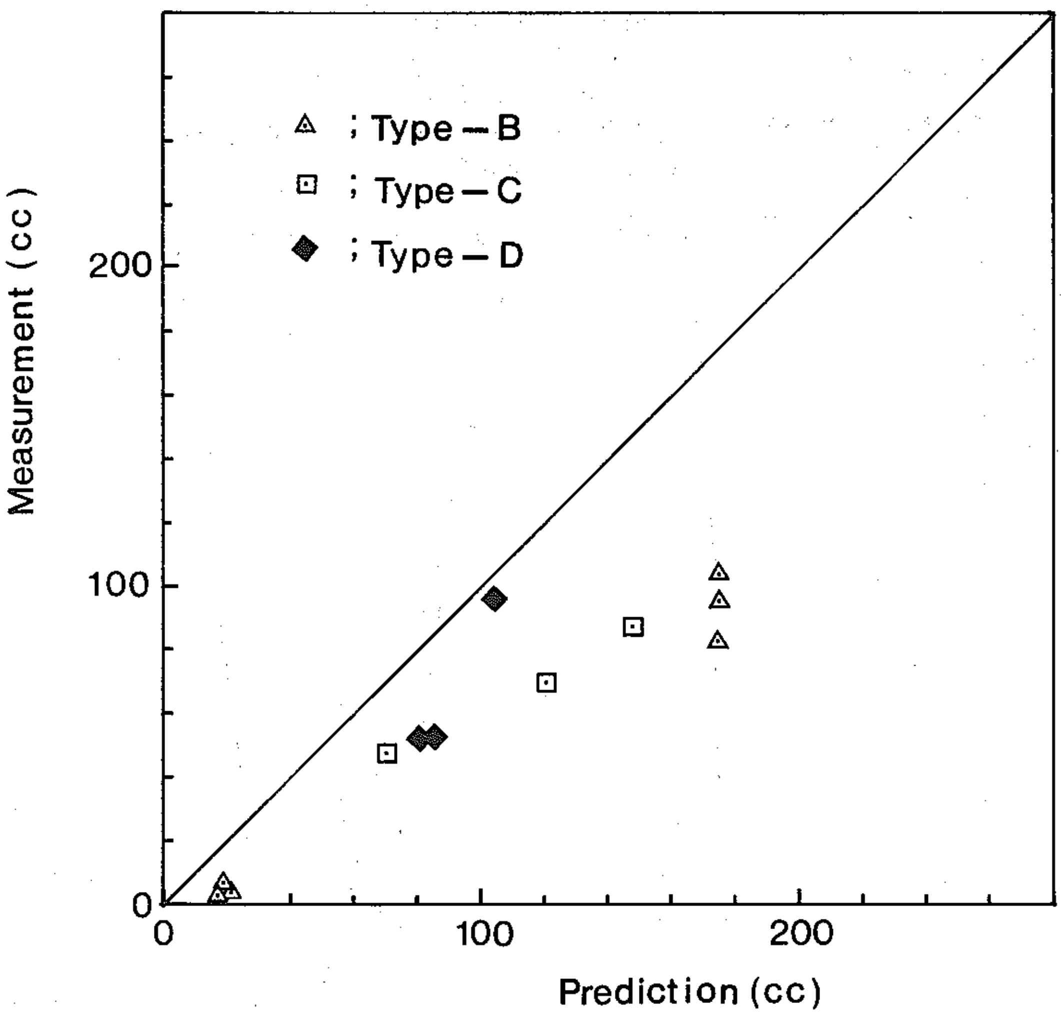


Fig.4.7-3 Comparision of measured and predicted F.P. gas amount in SGHWR irradiated fuel pins

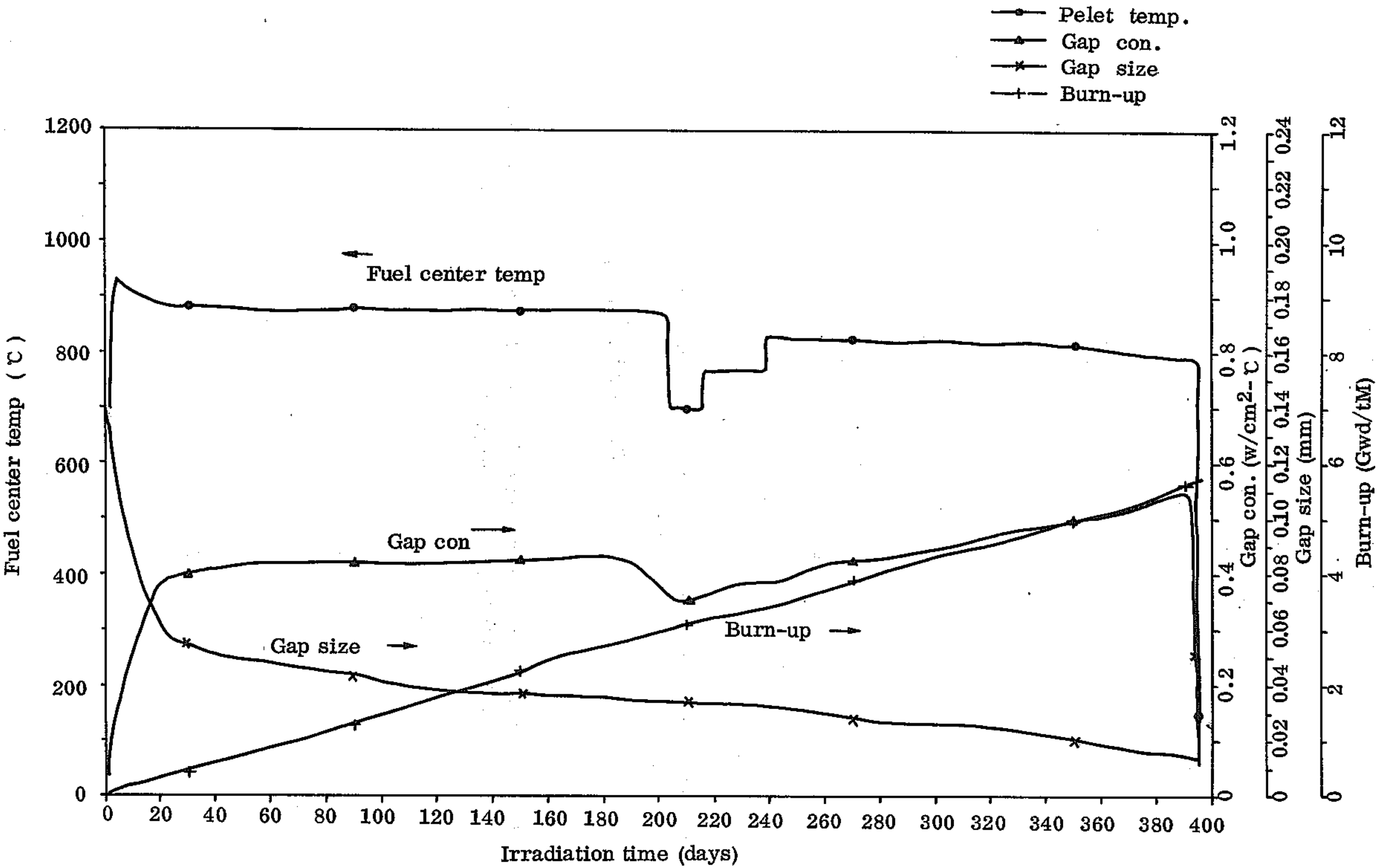


Fig.4.9-1 Fuel center temperature and gap size at max. power region (Rod No.A4)

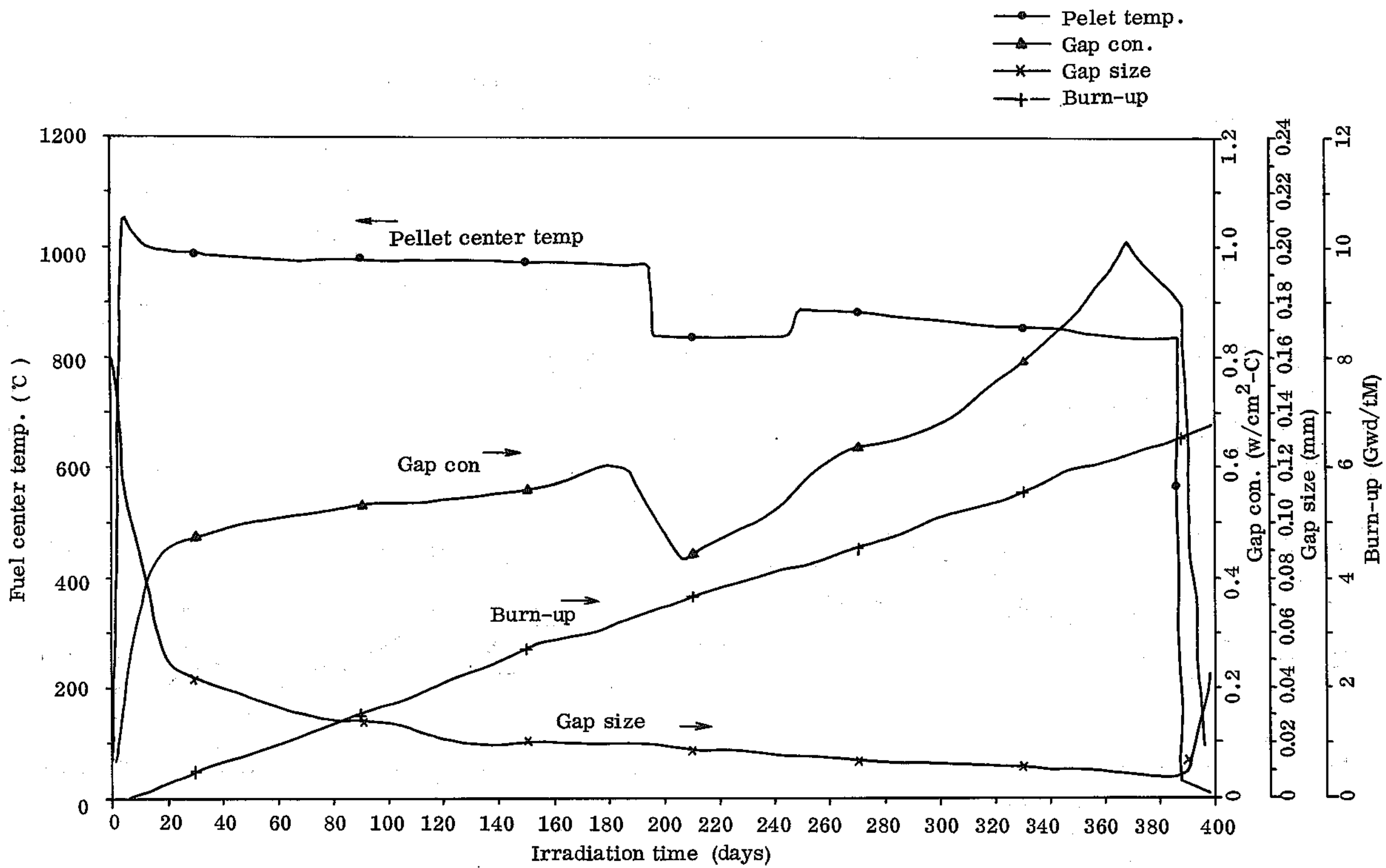


Fig.4.9-2 Fuel center temperature and gap size at max. power region (Rod No.B6)

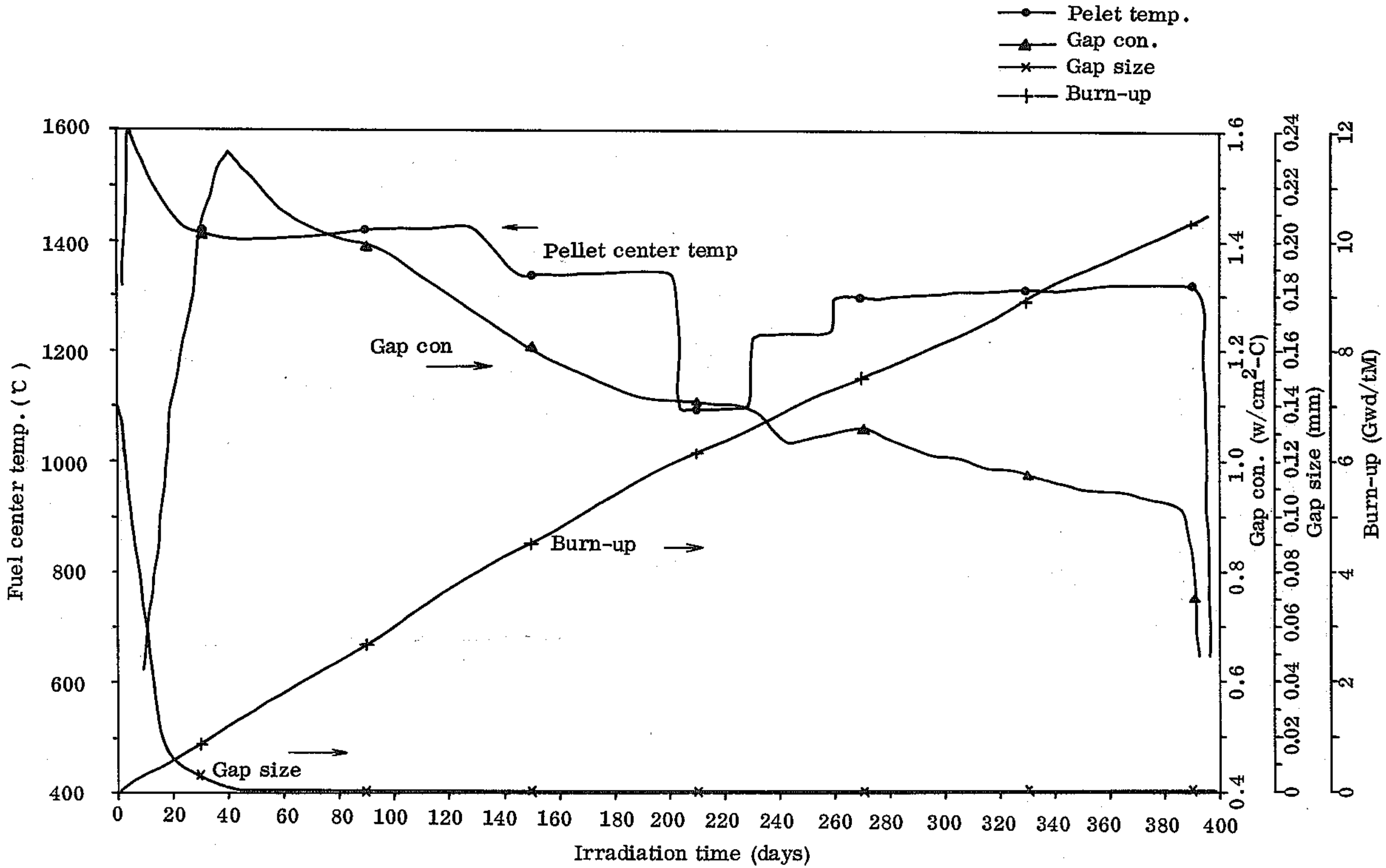


Fig.4.9-3 Fuel center temperature and gap size at max. power region (Rod No.C11)

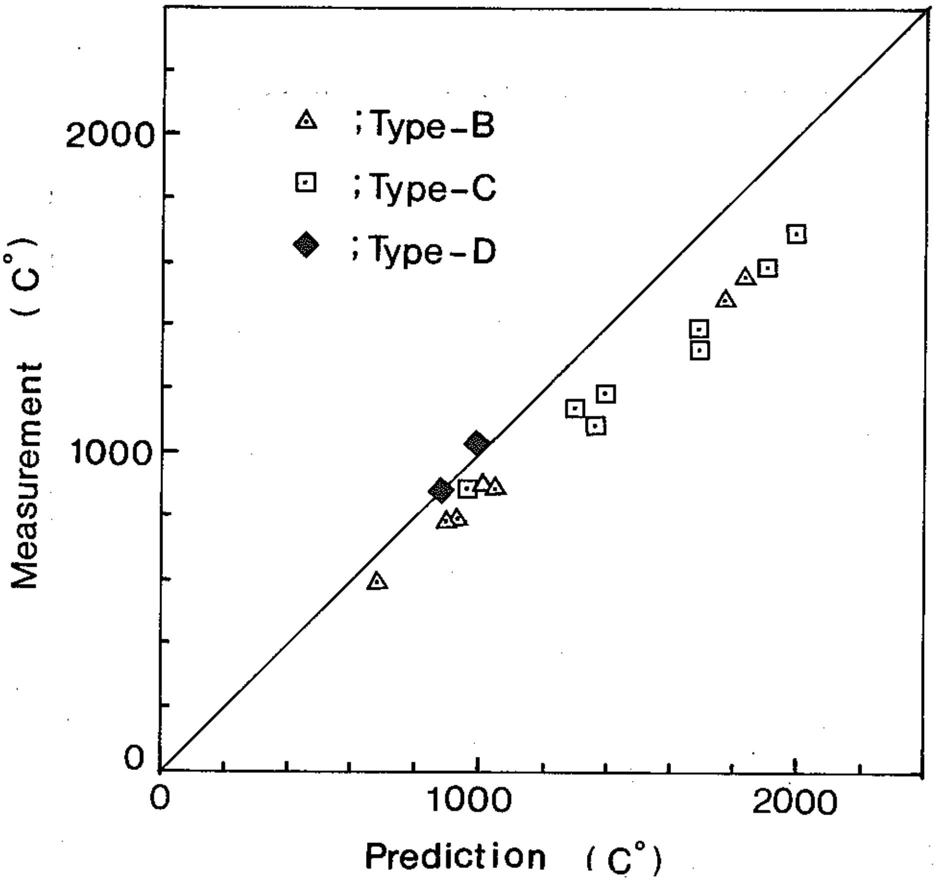


Fig.4.9-4 Comparision of measured and predicted fuel center temp. in SGHWR irradiated fuel pins

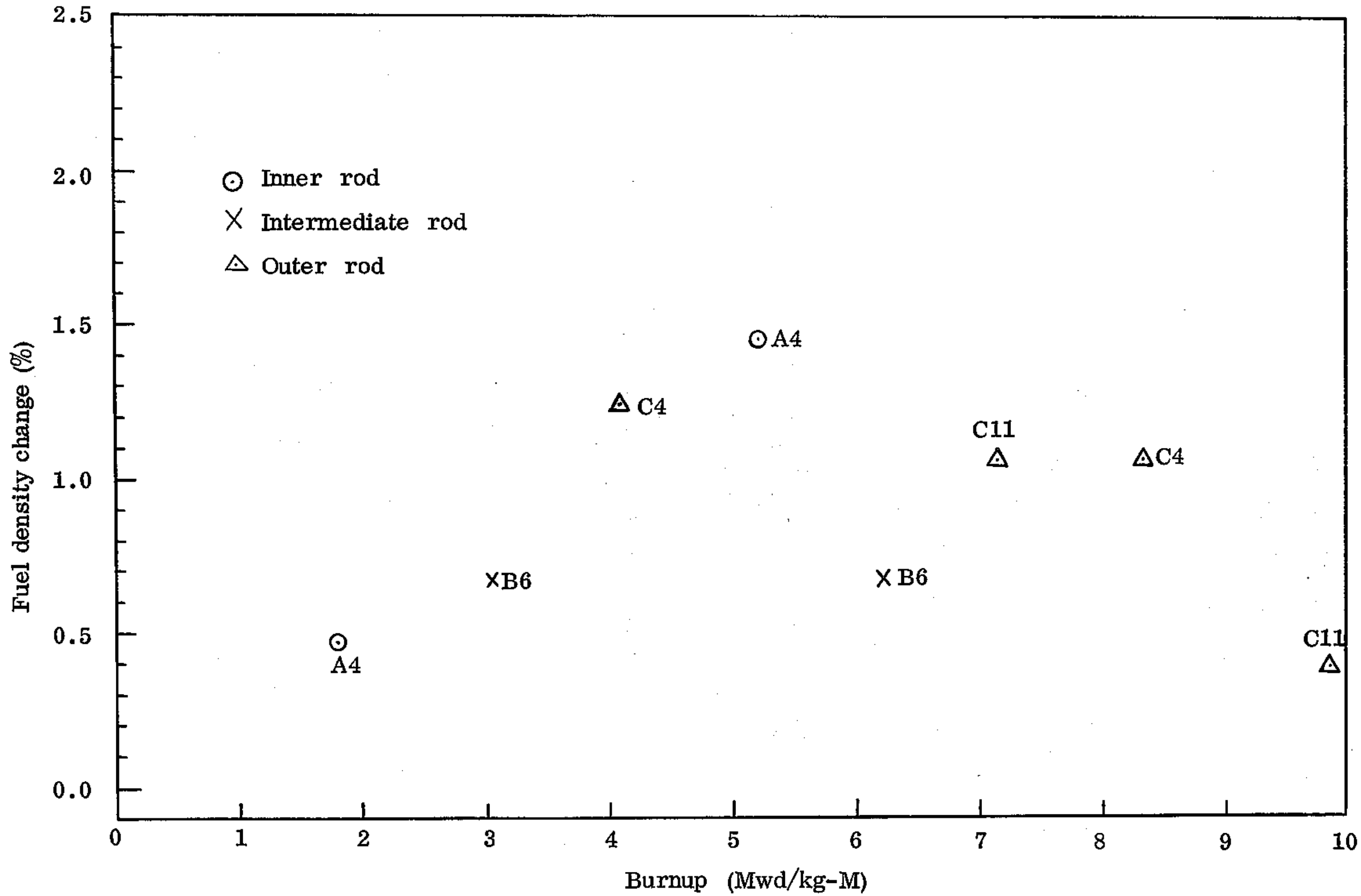


Fig.4.12-1 Fuel Density change vs burnup

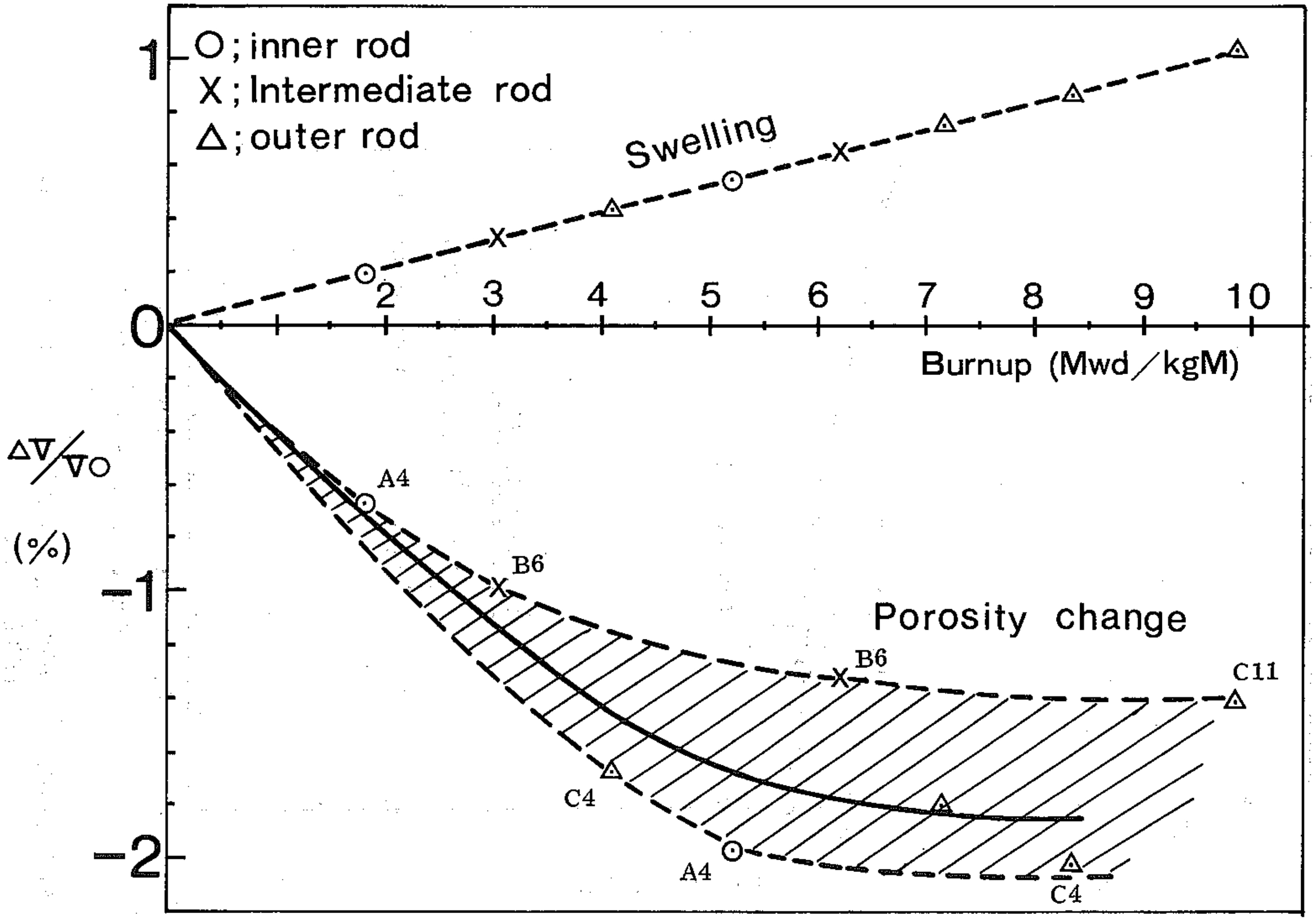


Fig.4.12-2 Porosity change vs burnup

Reference ;

ND-R-297(W), Final report on the post irradiation examination of the Type-D fuel element(IE1718) irradiated in WSGHWR for PNC Japan., Feb.1979

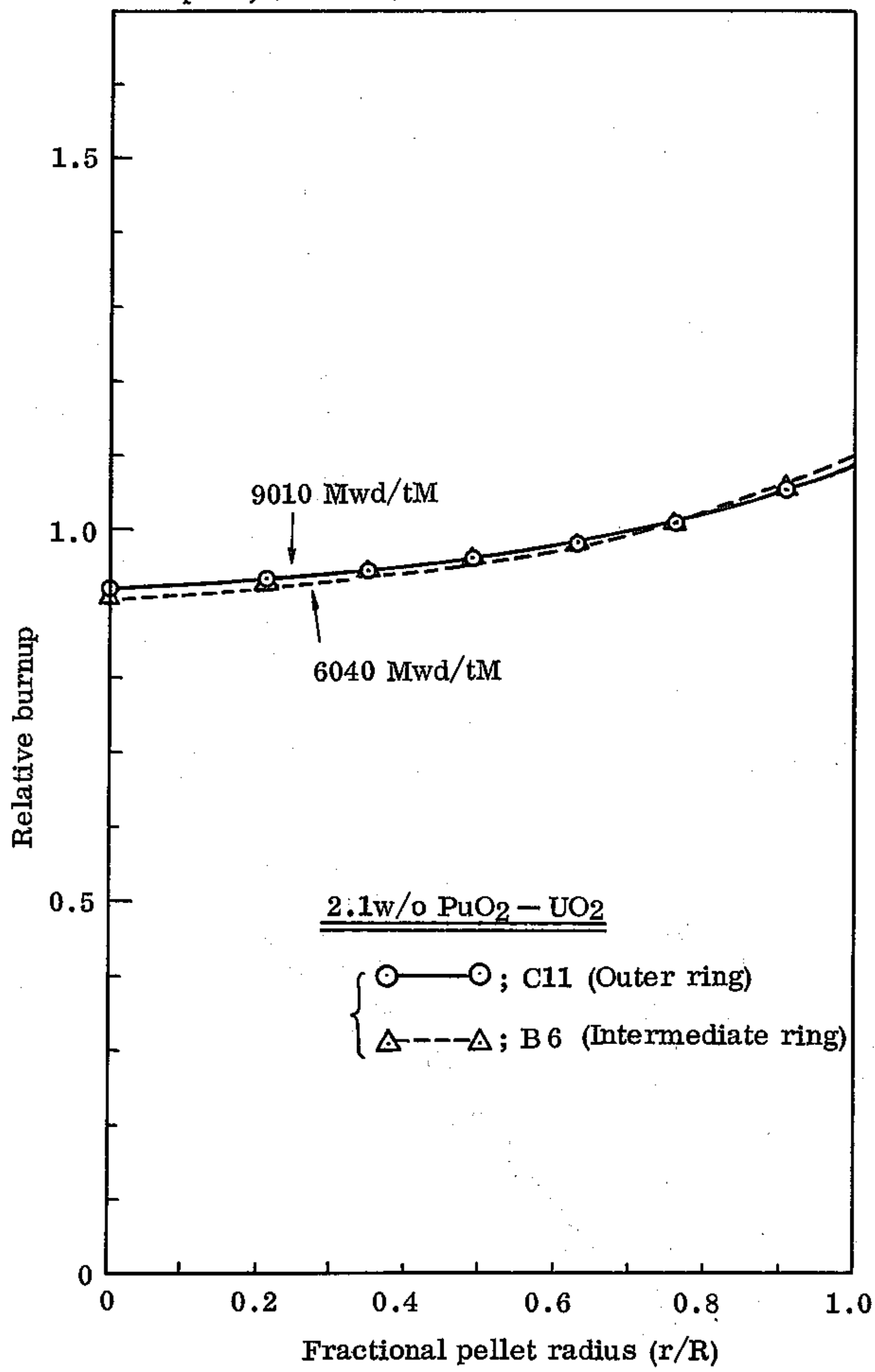


Fig.4.13-1 Radial burnup distribution in SGHWR Type-D fuel pellets.

Reference ;
WCAP-8300, WH & PNC Saxton Plutonium Project Quaterly Progress Report For the Period Ending, September 30, 1973

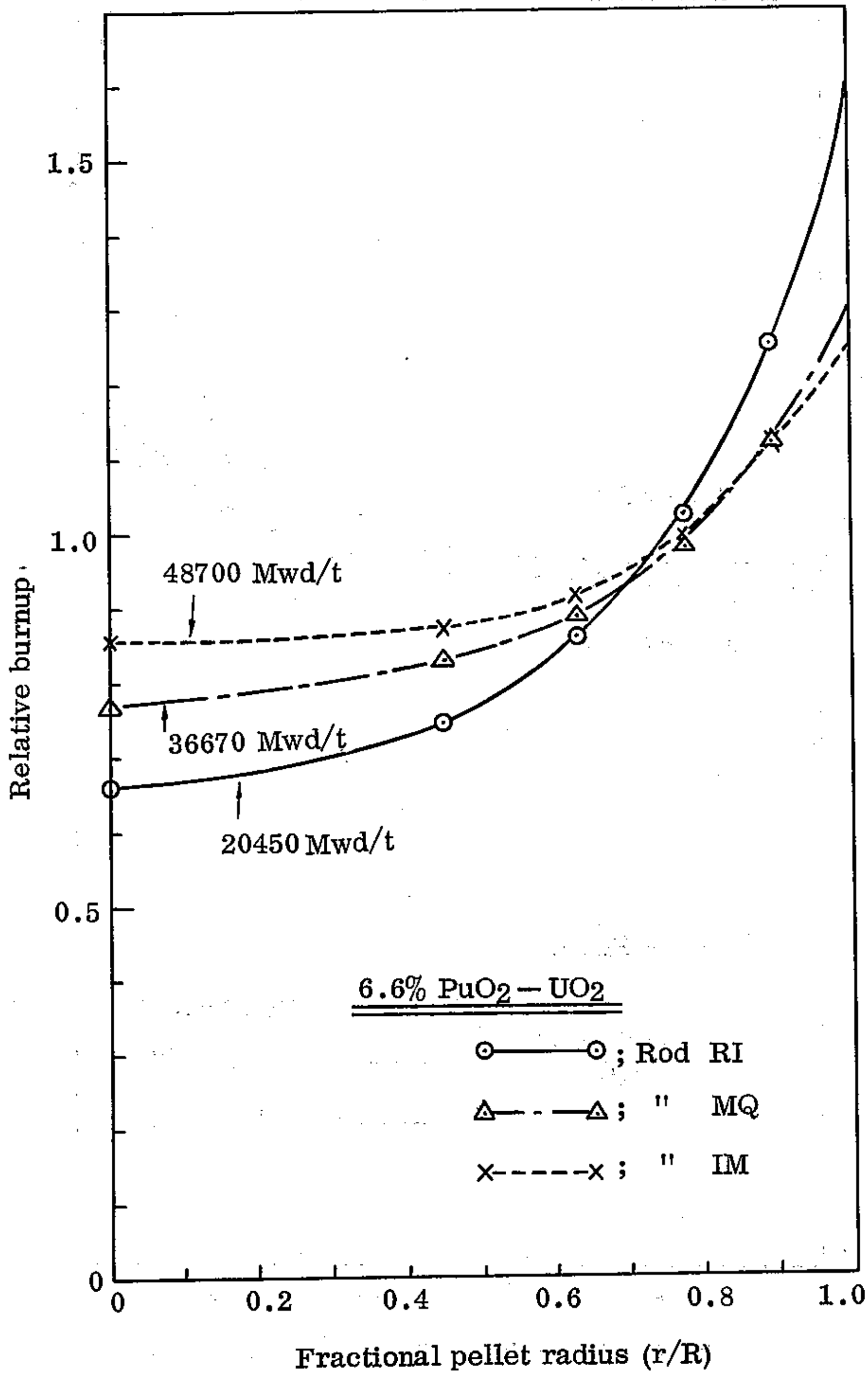


Fig.4.13-2 Radial burnup distribution in SAXTON mixed oxide fuel pellets

Reference ;
WCAP-6069, Burnup Physics of Heterogeneous Reactor Lattice, C.G.Poncelet, June 1965.

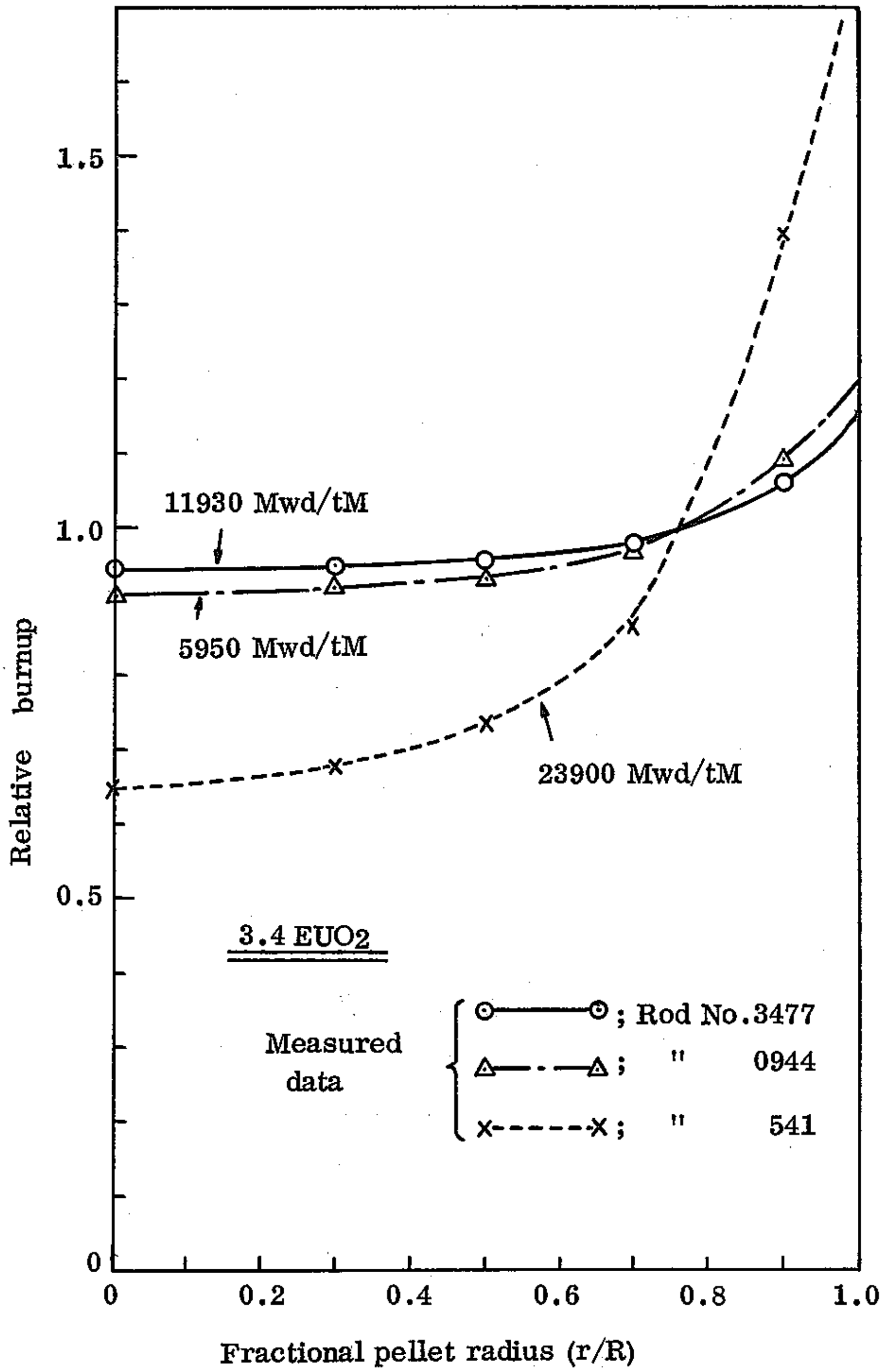


Fig.4.13-3 Radial burnup distribution in YANKEE core fuel pellets

5. まとめ

ふげん用プルトニウム燃料集合体（タイプD）の照射試験は前の3回のウラン燃料集合体（タイプA，B，C）にひきつづき実施された。この燃料設計については既にタイプCで完成しており，このタイプDの燃料設計は，燃料組成のみタイプCと相違しており，両者の照射後結果を比較することにより，プルトニウム燃料の特徴を知ることができた。

照射はなんのトラブルもなく終了することができ，燃焼度もペレットピークで8,690Mwd／tMOまで達成された。

燃料集合体の燃料要素ギャップは適正に保たれていた。また曲がり，外観にも異常はなかった。

燃料集合体からの燃料要素の引き抜きは円滑に行なわれ，引き抜き力は，タイプCより小さかった。この主な原因として，タイプDに局所酸化が少なかったことが挙げられる。

燃料集合体に付着している水あかはタイプCと同様であった。スペーサ，タイロッド等の非発熱部には付着がごくわずかであった。しかし燃料要素の中央部には多く，この部分を樹脂により固めて金相により調べた。付着の状況に2つのタイプがあり，1つは多孔質な層であり容易にブラシで除去できるものである。この層の厚さは10〜25μmであった。もう1つのタイプはもっとち密な層であり，他の金相試料にも認められるもので，厚さはほぼ一定しており，30μm程度であった。このち密な層に特徴的な含有元素は銅であり，約5％含まれていた。

燃料要素は定盤の上にころがして曲がりを調べた。目視で調べたので正確ではないが，3本調べたところ2本の片端にそれぞれ0.5mm，1.0mm程度の曲がりが検出された。

スペーサを3個選び，この外観等を詳しく調べた。溶接部の腐食状況は正常であった。マンドレルにより引き抜き力を調べると，照射により10％程度引き抜き力が減少していた。

燃料要素はすべて全長測定を行なった。伸び量は9mm以下で，ATR燃料設計を満足していた。燃料要素の伸びを高速中性子束により従来評価されているが，今回ペレットと被覆管との相互作用（PCMI）および被覆管外径減少による燃料要素の伸びについて検討してみた。燃料要素の伸びは外層0.21％，中間層0.15％，内層0.12％である。タイプCのスペーサタイロッドの伸びは0.07％が最大で，これに比べるとかなり大きな値となっている。この値は出力（燃焼度）の高い順になっており，PCMIによる効果が考えられる。もしこれが全部PCMIによるものとするとかなり大きな応力が被覆管にかかったこととなる。しかし，内層，中間層の燃料要素はECT，外径測定から調べるとPCMIが発生しておらず，他の効果を考える必要がある。燃料要素の外径減少が伸びによく対応していることから，ジルカロイの集合組織の性質に注目して解析を試みた。すなわちジルカロイ被覆管は肉厚をあまり変えないように変形する性質があり，外径減少が100％肉厚の増加とはならず，一部伸びとなるとも考えられる。この効果（変換係数）を調べたところ，タイプA，B，C，Dとも，外径減少率の30〜40％が伸び率に寄与していると計算された。もちろんこの計算にはジルカロイのスウェリング，PCMIによる伸びの仮定が入るが，より信頼性のあるデータを得るには，外径変化を精

度よく測定する必要がある。燃料要素の伸びに関する要因は他に数多く考えられ，今後データを積み上げ，その都度解析する必要がある。

燃料要素は内層1本，中間層1本，外層7本が選びだされ，さらに詳しい試験を行なった。

まずスペーサによる燃料要素表面のフレッテング腐食について調べた。ペリスコープにより外観を調べたところ，上部のスペーサ2個，下部2個の部分には多少大きなフレッテングが認められたが，中央部は非常に小さい。比較的大きなフレッテング腐食部を金相によって深さを調べたところ8 μm程度であった。許容される深さは76 μmであるので，照射期間が1年と短いが，十分この値よりも小さいといえる。

燃料要素表面の水あかをブラシにより除去した後，表面の酸化状態を調べた。表面は面積にして半分程度まだ固い水あかにおおわれていたが，他の半分は光沢のある黒色を呈していた。しかしスペーサの付近には，約0.3 mm φの小さな光沢を有するスポットが集中していた。金相によって調べたところ，これらはレンズ状の酸化物であることがわかった。この厚みは18 μm位で，最大43 μm であった。酸化物の一部（厚さの約30%）は外側につき出ていた。この局所酸化は，スペーサ部付近に多く，その中でも中央部のスペーサ部に多い。スペーサ以外の部分での局所酸化は，燃料要素についている軸方向の傷に微少ではあるが点在していた。

被覆管の内面を軸方向に切り開いて，被覆管の内面腐食を調べた。ペレットの境界に腐食があり，この腐食深さは最大8 μmであった。内層，中間層の燃料要素については1 μm以下であった。

渦流探傷試験では，欠陥の信号らしきピークが3箇所に認められたが，外観によって調べたところ，このうち1箇所に水あかあるいは酸化物のはげおちが認められた。金相により，詳しく調査したが，欠陥は検出できなかった。

ガンマスキャンでは，ペレット間の隙間の検出が可能だが，いずれの燃料要素にも大きな隙間は検出されなかった。

ガンマスキャンで，軸方向に沿ったペレットの長さ方向の収縮率を調べた。ペレット充てん長さの変化を全長にわたって調べてみると，外層の燃料要素は0.6〜0.7%，内層，中間層は0.3〜0.4%であった。一方局部的に見ると，燃料要素の中央部が収縮率が最も大きく1.8%となっていた。

スペーサの位置でのガンマ線強度が4%程低下していた。

ペレット境界におけるCsによるガンマ線のピーキングは認められなかった。（タイプCの場合にはこのピーキングが現われていた。）

燃料要素の外径測定を行ない，外径の変化を調べた。燃料要素の全長にわたって外径は減少しており，この減少量は，プルトニウム燃料部で開発した「ATFUEL」コードとよく一致していた。この減少率を平均化してみると外層，中間層，内層はそれぞれ0.035mm，0.03mm，0.02mmであった。

外層の燃料要素についてはペレットの境界には局部的に直径の減少が認められた。逆にペレットの中央部では直径が他の部分に比べ大きくなっており，平均で18 μm，最大値は28 μm であった。

FPガス放出率は内層，中間層の燃料要素については0.1%以下であり，外層の燃料要素につい

ては3〜4％であったが，1本（ピンC10）については10％と高かった。この燃料要素を金相で調べると，他のものより照射中高い温度であったと考えられる。

燃焼度をNd／U比から求めた。この結果はWSGHWRで予想した値よりもわずかに高い値を示した。ペレットの中心部と外周部について，ドリルによりC11から局所的に試料を採取して燃焼度を測定したところ，外周部が中心部より1.18倍高い値となった。9400 Mwd／tの燃焼度のペレットはPu fissile量が初期の量の66％となった。

中性子ラジオグラフによりPuスポットを調べたが，Puスポットは検出されなかった。（検出限界は計算上350 μmである。） 他ペレットの異常なクラック等も検出されなかった。

ペレットの密度を測定するため，4個分の長さのペレットを採取した。水銀ピクノメータで測定した結果0.19〜1.45％製造時のかさ密度よりも大きい値であった。一方この値に比べるとガンマスキャンから求めた外層燃料要素中央部の軸方向の収縮率が約1％と大きいことから，軸方向にペレットが力を受け，このため軸方向に選択的に収縮が起ったことと考えられる。この力はPCMIによって起こる。

ペレットを軸方向に縦割り，金相を調べると軸方向にペレットが加圧された様子が現われている。その1例として，照射中に低温であるはずのペレットの外側においても，隣同志のペレットが焼結していた。その境界線がわずかに残っており，必ずしも直線性は良くなかった。これは密着が必ずしも良くないペレット同志でも加圧より焼結がおこっていることを示している。

本燃料の照射挙動をウラン燃料集合体照射試験タイプB，Cと比較すると次の特徴が挙げられる。

① デッシュ部の空隙の体積が非常に減少したこと。

② ペレットのち密化がより低い線出力で起こること。

③ 軸方向のち密化が大きいこと。

④ ペレット境界にCsが集っていないこと等である。

これらの項目①，②，③はペレットの結晶粒径，ボイド分布，密度により影響を受けるが，プルトニウムを含有するために，燃料内の変形が容易になっていることが原因していることも考えられる。

本集合体を照射中，一方では「ふげん」プルトニウム燃料集合体が製造され，通産省の検査を受けた。その時，「ふげん」集合体の健全性について幾多の質問が出されたわけであるが，「目下英国で照射中の集合体は異状が認められておりません。照射後試験でさらにその問題について調査します」ということである程度の回答はできた。また懸案の照射後試験はすべて終わり，回答ができた。

最後にウインフリスSGHWRの関係者，照射後試験を積極的に行ないまた惜しみない協力を下さったウィンズケールのスタッフの方々に感謝いたします。

6. 参 考 文 献

1) 鈴木 征雄 "「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験
(Ⅲ) SGHWR照射集合体(TYPE−D)の組立および照射前検査の立合い"
SN860−76−01, 1976年1月

2) 横沢 直樹 "「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験
(Ⅳ) 集合体(TYPE−D)の照射後試験非破壊検査の立合い" ZN860−78−03,
1978年4月

3) 金田健一郎 "「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験
(Ⅴ) Type−D 集合体の照射後試験(破壊試験)立合い SN860−78−05 1978年5月

4) A Stuttard et al "Final Report on the Post-irradiation Examination of the Type "D" Fuel Element (IE1718) Irradiated in WSGHWR for Power Reactor and Nuclear Development Corporation (PNC) Japan", ND−R−297 Feb 1979

5) プルトニウム燃料部 "「ふげん」プルトニウム燃料集合体のSGHWRにおける照射試験
(Ⅱ) Type D 集合体の製造・加工・検査および出荷" ZN841−76−06 1976年2月

6) R.O.Meyer, "The Analysis of Fuel Densification", NUREG−0085, July 1976.

7) E.Rolstad et.al, "Measurement of the Length Changes of UO_2 Fuel Pellets during Irradiation", H.P.G.Meeting, Norway, August 1974

8) 横内 洋二 et al, "ATR燃料設計用コード「ATFUEL」, SN841−81−06,
1981年1月

9) Ibrabim, E. F. and Winegar, J. E., "Dimensional Changes on Unstressed Zircaloy−2 and Zr−2.5 w/o Nb Specimens in a Fast Neutron Flux," J. of Nuclear Material, Vol. 45 (1972/1973), pp. 335−8

10) E. Douncombe et al, "Comparison with Experiment of Calculated Dimensional Changes and farther Analysis of Irradiated Bulk Oxide Fuel Test" Sept −1966