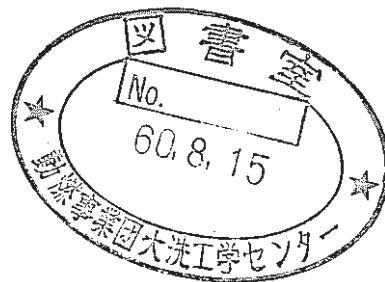


「常陽」MK-II 炉心燃料集合体(PFD003)の照射後試験(I)

—— 集合体及び燃料要素の非破壊試験 ——

1985年5月



動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター  
燃料材料開発部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

## 「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 (PFD003) の照射後試験(I)

## —— 集合体及び燃料要素の非破壊試験 ——

実施責任者 田地弘勝\*

報告書 沖元 豊\* 浅賀健男\* 平沢久夫\*

小形佳昭\*\*

## 要 旨

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体「PFD003」の照射後試験を実施した。本集合体は、MK-II 炉出力 100 MW の出力上昇から定格第 1 サイクルの間照射したものである。照射後試験の目的は炉心燃料集合体の構造体としての健全性を確認すること及び MK-II 運転における集合体及び燃料要素の照射挙動を把握することである。

なお、本集合体の燃焼度は、集合体平均で 13300 MWD / MTM である。

本試験の結果は、下記の通りである。

- (1) 集合体及び燃料ピンには、損傷は全くなく、変形、変色等も認められず、炉内挙動は正常であり、本集合体の構造体としての設計及び製作の妥当性が確認された。
- (2) 被覆管表面に隣接ピンのワイヤとの干渉による接触跡は、一部に見られるが、先行炉心燃料集合体「PFD010」(集合体平均燃焼度 4600 MWD / MTM) の場合と同様、発生量が少なく、長さ、巾もわずかであった。
- (3) MK-II における集合体及び燃料要素の照射挙動を確認したが、照射による有意な特徴は、ほとんど認められなかった。

---

\* 大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料集合体試験室 (FMS)

\*\* " " " " 照射材料試験室 (MMS)

May, 1985

## Postirradiation Examination of "JOYO" MK-II Core Fuel Subassembly

(Fab. No. PFD003)

— Nondestructive Testing on Subassembly and Its Fuel Elements —

## Reporters

Yutaka Okimoto\*, Takeo Asaga\*,  
Hisao Hirasawa\* and  
Yoshiaki Ogata\*\*

## Abstract

Postirradiation Examination (PIE) of "JOYO" MK-II core fuel sub-assembly (Fab. No. PFD003) has been performed.

The purposes of the PIE were to confirm the safty performance of the subassembly in reactor "JOYO" at 100MW reactor power, and to get the basic data on the irradiation behavior of MK-II core fuel sub-assembly and its fuel elements in the early stage of 100MW power operation.

The average burnup of the subassembly is estimated to 13,300MWD/MTM.

The results of the present examination can be summarized below:

- (1) There was no pin failure and/or damages in the subassembly, and the subassembly and its fuel elements have behaved normally in reactor,
- (2) The observation on fuel pin and wire surfaces indicated a slight "contact mark". The size of the mark were very small both in width and in length. The extent of the contact mark is nearly the same as the preceding subassembly 'PFD010',.
- (3) It was confirmed that there was no significant irradiation behavior in the subassembly and its fuel elements.

---

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

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



## 目 次

1. ま え が き .....	1
2. MK - II 炉心燃料集合体の概略 .....	2
3. 照 射 条 件 .....	3
3.1 炉内照射位置 .....	3
3.2 集合体照射条件 .....	3
3.3 ピン照射条件 .....	3
4. 試 験 結 果 .....	4
4.1 試料の取扱い .....	4
4.2 集合体試験 .....	4
4.2.1 外観検査 .....	4
4.2.2 ナトリウム洗浄 .....	4
4.2.3 寸法測定 .....	5
4.2.4 X線ラジオグラフィ .....	6
4.2.5 上部パッド部詳細外観 .....	6
4.2.6 ラッパ管内面観察 .....	6
4.2.7 ラッパ管ガンマスキャン .....	6
4.3 ピン試験 .....	6
4.3.1 外観検査 .....	6
4.3.2 X線ラジオグラフィ .....	7
4.3.3 重量測定 .....	7
4.3.4 詳細外観検査 .....	7
4.3.5 寸法測定 .....	7
4.3.6 ガンマスキャン .....	8
4.3.7 パンクチャテスト .....	9
5. 考 察 .....	10
5.1 集合体及び燃料要素の健全性評価 .....	10
5.1.1 構造体の健全性 .....	10
5.1.2 燃料ピンの健全性 .....	10
5.2 照射挙動評価 .....	11
5.2.1 集合体外形変化 .....	11
5.2.2 スタック長変化 .....	11

5.2.3	ピン外形形状変化 .....	11
5.2.4	FP 核種の挙動 .....	12
5.2.5	ピン内ガス圧変化及びピン内ガス放出率 .....	12
6.	あ と が き .....	13
7.	参 考 文 献 .....	14

## List of Table

Table I	Differences in Specification of Core Fuel Subassembly .....	15
Table II	Irradiation Condition of Subassembly "PFD003" .....	16
Table III	Parts List of Fuel Pin for MK-II Core Fuel Pin .....	17
Table IV	Total Length Changes of Fuel Pins .....	25
Table V	Result of Fission Gas Analysis in Fuel Pins of Subassembly "PFD003" .....	26
Table VI	Relation of Fission Gas Release Rate in Fuel Pins of Subassembly "PFD003" .....	26
Table VII	Peaking Factors of the Subassembly Predicted and Measured by Gamma-Scanning of Fuel Pins .....	27

## List of Figures

Fig. 1	In Reactor Location of the Subassembly (PFD003) .....	28
Fig. 2	Fuel Pins Selected for Each Postirradiation Examination Item .....	29
Fig. 3	Arrangement of Fuel Pin in the Subassembly (PFD003) .....	30
Fig. 4	Direction of Reactor Center Estimated by "JOYO" and Measured by Gamma-Scanning .....	31
Fig. 5	Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (D-A) .....	32
Fig. 6	Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (B-E) .....	33
Fig. 7	Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (C-F) .....	34
Fig. 8	Bowing Vector of Subassembly .....	35
Fig. 9	Surface Temperature Profile of Subassembly in Axial Direction .....	36
Fig. 10	Radial Distribution of Gamma-Ray Intensity .....	37
Fig. 11	Fuel Stack Length Changes in the Subassembly .....	38
Fig. 12	Weight Changes of all Fuel Pins in the Subassembly .....	39

Fig. 13	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 7064) .....	40
Fig. 14	Axial Profile of Pin Bowing (Pin No. 70C3) .....	41
Fig. 15	Vectors of Pin Bowing in the Subassembly .....	42
Fig. 16	Axial Distribution of Intensities of Individual Gamma-ray Nuclide (Pin No. 7064) .....	43
Fig. 17	Gamma-ray Spectroscopy (Pin No. 7058) .....	44
Fig. 18	Radial Distribution of Intensities of Individual Gamma-ray Nuclide .....	45
Fig. 19	Emission Tomographs of Radionuclides in Fuel Pin (Pin No. 7064) .....	47
Fig. 20	Plenum Gas Pressure of Tested Pins in the Subassembly .....	49
Fig. 21	Tendency of Face to Face Distance of Wrapper Tube of MK-I and MK-II Core Fuel Subassemblies as a Function of average Neutron Fluence .....	50
Fig. 22	Tendency of Subassembly Bowing of MK-I and MK-II Core Fuel Subassemblies as a Function of average Fluence .....	51
Fig. 23	Changes of Fuel Stack Length (Lot No.) .....	52
Fig. 24	Tendency of Maximum Fuel Pin Bowing of MK-I and MK-II Core Fuel Pin as a Function of average Subassembly Fluence.	53
Fig. 25	Tendency of Fuel Pin Diameter Changes of MK-I and MK-II Core Fuel Pins as a Function of Subassembly average Fluence (S-Tube) .....	54
Fig. 26	Axial Distribution of Count Rate Ratio of Individual Gamma Emitters .....	55
Fig. 27	Relation of Fuel Pin Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with average Burnup .....	56
Fig. 28	Relation of Fission Gas Release Rate of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with the average Burnup .....	57

## List of Photographs

Photo. 1	Surface Condition of the Subassembly before and after Sodium Removal (Visual Inspection) .....	59
Photo. 2	X-ray Radiography of Subassembly .....	61
Photo. 3	Surface Condition of Middle Pad after Sodium Removal (Visual Inspection) .....	63
Photo. 4	Condition of Fuel Pin Bundle Observed at each Stage of Dismantling .....	65
Photo. 4	Continued .....	67
Photo. 5	Construction Condition inside of the Subassembly Observed by X-ray Radiography .....	69
Photo. 6	Contact Mack on Fuel Pin .....	71

## 1. ま え が き

高速実験炉「常陽」MK-II照射炉心で照射される炉心燃料集合体の照射後試験は燃焼度をパラメータとして初装荷最大燃焼度 50000 MWD/MTM まで集合体の構造体としての健全性及び、照射挙動を評価するためのものである。今回の炉心燃料集合体「PFD003」は、MK-II 炉心出力 100 MW の出力上昇から定格出力第 1 サイクルの間照射され、集合体平均燃焼度は、13,300 MWD/MTM である。構造体健全性確認試験は、初装荷燃料の最大燃焼度 50,000 MWD/MTM 到達まで、継続しておこなわれるが、本集合体は、2 体目として照射後試験をおこなうもので、炉内使用にあたって、燃焼度の上昇に伴う照射挙動及びそれによる炉心燃料集合体の健全性への影響を調べていくためのものである。

本照射後試験により、集合体及び燃料ピンの設計の妥当性を確認し、照射挙動に関するデータを取得することにより、「もんじゅ」以降の炉心設計へのデータベースの蓄積、拡充を計ることとしている。

炉心燃料集合体の仕様を Table I に示す。

## 2. MK-II 炉心燃料集合体の概略

MK-II 炉心燃料集合体は 127 本の燃料ピンを稠密配置で組み、六角形状のラッパー管内に装荷されたもので、ラッパー管上部のハンドリングヘッド部、下方の冷却材導入用エントランスノズル部の主要構造部材から構成されており、集合体の外形形状は基本的には MK-I の炉心燃料集合体とほぼ同一である。

燃料ピンは、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料ペレットを燃料ピン軸方向に長さ 550 mm に渡り装填し、その上下に長さ 12 mm の劣化ウランペレット 1 個を配置させている。MK-I の場合と異なり、上下部ブランケット燃料ペレットは無く、上部はその分ステンレス鋼製反射体で上部遮蔽体を作っているが、下部にはなく MK-I の下部ブランケット燃料相当の長さだけ、ピン全長が短くなっている。

燃料被覆管は外径 5.5 mm  $\phi$ 、内径 4.8 mm  $\phi$ 、燃料/ペレット間直径ギャップは公称 200  $\mu$ m である。ワイヤの巻きつけ数は同じであるが、ワイヤピッチは 209 mm で MK-I よりもかなり小さくなっている。また、バンドル内の P/R 比は約 0.127 mm でこれも MK-I での P/R 比 0.175 mm より小さく、ウェアマークのおこりにくいものとされている。

### 3. 照射条件

#### 3.1 炉内照射位置

照射最終サイクル(100 MW 定格出力第1サイクル)における炉内照射位置を Fig 1 に示す。

#### 3.2 集合体照射条件

100 MW 出力上昇サイクルから定格出力第1サイクルの間照射された。

集合体平均燃焼度は13300MWD/MTM, 線出力最大360 W/cm, 被覆管最高温度約600℃  
である。照射条件を Table II に示す。

#### 3.3 ピン照射条件

現在「常陽」照射中 DBS が整備中であり, 詳細データについては不明な点がある。



## 4. 試験結果

### 4.1 試料の取扱

本試料は炉サイトでナトリウム洗浄されてキャスク渡しでFMFに搬入され、集合体試験として、ナトリウム洗浄、洗浄前後の外観検査、寸法測定、X線ラジオグラフィを実施したのち、集合体を解体した。

ラッパ管については、ガンマスキャン用試料を採取し、上部パッドについては、詳細外観検査を実施した。

ピンについては、Fig.2に示す内容で試験を実施した。試験後、照射材料試験施設(MMF)、照射燃料試験施設(AGF)、技術解析室金相セル(AES)での破壊試験用試料の採取のため切断を実施した。集合体内のピン配列及びピン製造時データをFig.3及びTableⅢに示す。

炉心中心方向の決定後の破壊試験用燃料ピン選択は、Fig.4に示す「常陽」炉心中心方位の推定及び「FMF」のラッパ管周方向 $\gamma$ スキャンの結果をもとに実施した。

また、本試料のうち、燃料ピン6本を高速炉燃料用処理試験の供試体として高レベル放射性物質研究施設(CPF)へ搬出した。

### 4.2 集合体試験

#### 4.2.1 外観検査

ナトリウム洗浄前後の外観写真をPhoto.1に示す。

##### (1) 洗浄前

集合体上部パッドのE面に縦キズが認められ、ラッパ管E面に、集合体下端から、2065 mm位置上側へ455cmの縦キズが認められた。

また、C-D稜に集合体下端から2170 mm位置上側へ690 mmの縦キズが認められた。

##### (2) 洗浄後

洗浄前に認められたキズ以外は何も認められず、変色等もなかった。

その他、集合体の変形等特異な状態は認められない。

#### 4.2.2 ナトリウム洗浄

本集合体は炉サイトで洗浄済のため湿り窒素ガスによるスチーム洗浄は実施せず、純水循環洗浄を2回実施した。洗浄廃液のPH値は、7.48とほぼ中性であり、ナトリウム洗浄が、良好であることを示した。FMSでの洗浄により除去されたナトリウム量は、1.4gであった。

また、廃液中には、FP核種及び $\alpha$ 核種は認められなかった。

## 4.2.3 寸法測定

集合体の対面間距離、曲り及び表面温度を測定し、照射前後での変化の有無を確認した。

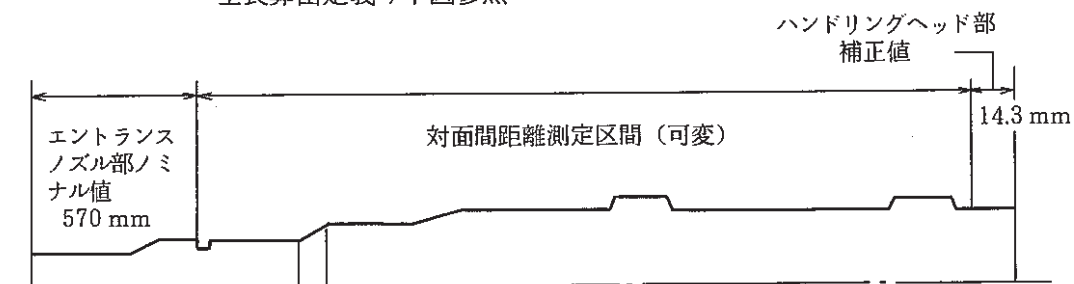
## (1) 全長

照射前後で有意な変化は、認められない。算出結果を以下に示す。

測定値	照射前(mm)	照射後(mm)	変化量(mm)
C-F	2970.7	2969.9	-0.8
B-E	2970.1	2969.9	-0.2
D-A	2970.2	2969.9	-0.3
平均	2970.3	2969.9	-0.4

変化量；照射後-照射前

全長算出定義；下图参照



## (2) 対面間距離

各対面間での照射前後で有意な変化は認められない。照射後の各対面間 D-A 面、B-E 面、及び C-F 面のプロファイルをそれぞれ Fig. 5、Fig. 6 及び Fig. 7 に示す。

## (3) 曲り

照射後において、上部パッド部での曲り量は、1.4 mm、曲り方向は、82° であり、中間パッド部での曲り量は、0.7 mm、曲り方向は 121° であった。測定結果を Fig. 8 に示す。

## (4) 表面温度

寸法測定装置の測定部に装着した接触式温度計を用いて実施した。

集合体表面温度は、炉心中心付近より上部パッドにおいて、エントランスノズル付近に対し、約 5℃ の上昇が認められた。測定結果を Fig. 9 に示す。

崩壊熱による膨張量としては、約 7.5 μm 程度であり、対面間寸法変化には影響はないと思われる。

#### 4.2.4 X線ラジオグラフィ

集合体内部への異物の混入、バンドル配列の乱れ、ねじれ等は観察されなかった。

X線写真を Photo. 2 に示す。

#### 4.2.5 上部パッド部詳細外観

上部パッド E 面において、縦キズが認められた。E 面の傷の最大長さは 23 mm 最大巾 1 mm であった。観察写真を Photo. 3 に示す。

他の面については、キズ等は認められなかった。

#### 4.2.6 ラップ管内面観察

ラップ管内面におけるラッピングワイヤとの接触跡を観察した。

ピン全体において、ラップ管内面とワイヤの接触跡が認められ、接触跡はレンズ状の形状であり、長さは約 2 mm、巾約 1 mm 程度であった。ピン中央より上部にかけ、金属光沢が認められた。

#### 4.2.7 ラップ管ガンマスキャン

炉心燃料集合体の炉心中心方位を求めるため、炉心中心高さ付近に位置するラップ管の放射化核種の周方向の強度分布測定を実施した。

放射化核種のうち、中性子エネルギーの実効しきい値が高い<sup>58</sup>Co 及び<sup>54</sup>Mn に着目し、炉心中心方位の推定を実施した結果、実験炉側で推定した炉心中心方位と一致した。

測定結果を Fig. 10 に示す。

### 4.3 ピン試験結果

#### 4.3.1 外観検査

外観検査をピンバンドル状態で観察した。観察結果を Photo. 4 に示す。

まず、ピン表面のナトリウム洗浄状態は良好であった。また、ピン表面の状況は、一部茶変色が観察されたが、全体として清浄な表面状態を呈していた。

一方、ほぼ全ピンにわたって被覆管表面に隣接ピンのワイヤとの干渉による接触跡が観察されたが、寸法的に小さく、接触跡の数、巾に関し先行の炉心燃料集合体「PFD 010」（集合体平均燃焼度 4600 MWD/MTM）の場合と同様の性状であった。

ピンバンドル状態で、外周ピンに多少の曲りが認められたが、ラッピングワイヤのゆるみもなく、製造時に近い健全な状態であった。

#### 4.3.2 X線ラジオグラフィ

全数のX線写真を実施した結果、全ピンにスプリングのへたりが認められた以外、ピン内部の配列の異常及び異物の混入等の特異な状態は認められない。ただし、70A0ピンにおいて、上部インシュレータペレットと反射体の間で6.8mmのギャップが認められたが取扱中にギャップがなくなった。ピンX線ラジオグラフィの代表列として中心列のX線写真をPhoto.5に示す。

また、照射前後の燃料スタック長を比較した場合、照射前に比べ縮む傾向が認められた。スタック長の縮み量は、ペレットロットNo.FM2009の平均で、-3.7mm、FM2010の平均で-3.4mmであった。スタック長測定結果をFig.11に示す。

#### 4.3.3 重量測定

照射前後の重量差に有意なもの(±0.7g)は認められなかった。

照射前後の重量変化量をFig.12に示す。

上部端栓No.確認の結果、1本のみ刻印No.の異なったものが認められた。

#### 4.3.4 詳細外観検査

対象燃料ピン17本のうち12本をワイヤが付いた状態で観察し、残りをワイヤを取り除いた状態で燃料ピンの被覆管と隣接するワイヤとの干渉による接触跡の観察を実施した。

被覆管上の接触跡については、数も小なく巾も小さかった。

発生状況(長さ、巾)は、「PFD010」と同様な傾向であった。

最大と思われる接触跡の長さ、巾について測定した結果を下表、及びPhoto.6に示す。

ピンNo	長さ(mm)	幅(mm)
7058	4.6	0.6
7063	1.1	0.3
7064	1.7	0.5
7083	4.5	0.4

#### 4.3.5 寸法測定

対象ピンは、直径及び全長測定17本、曲り測定24本をワイヤを取り除いた状態で実施した。

## (1) 全 長

照射前後で有意な変化(±1.0 mm)は認められない。ピン全長の照射前後の変化量を TableIVに示す。

## (2) 直径測定

本集合体の燃料ピン被覆管は、S材であり、ふくれ等の有意な変化は認められない。代表例として、中心ピンのプロファイルを Fig.13 に示す。

## (3) 曲り測定

最大曲りは70C3ピンで18.5 mmであった。測定結果を Fig. 14 に示す。

曲り方向は、集合体外周方向へ曲っており、変化量は「PFD 010」に比べ大きくなっている。測定結果を Fig.15 に示す。

## 4.3.6 ガンマスキャン

## (1) 軸方向スキャン

燃料ピン12本について実施し、そのうち集合体中心ピンについての軸方向FP核種及び放射化核種の計数率分布を測定した結果を Fig.16 に示す。

$^{95}\text{Zr}$  は、原子炉最終サイクルの出力分布を示し、また、 $^{106}\text{Rh}$  はPuの軸方向核分裂率分布に近い分布を示している。それぞれサインカーブを描き、ピン内部構成及び燃焼特性に異常のないことを示している。

また、燃料内を移動しやすい核種  $^{137}\text{Cs}$  について、下部インシュレーターペレットと下部端栓の境界に蓄積が認められた。

(2)  $\gamma$ 線スペクトロメトリー

集合体内の最大燃焼度の燃料中心位置の $\gamma$ 線スペクトロメトリー結果を Fig.17 に示す。

また、集合体の径方向ピーキング係数及び燃焼度分布等を集合体のコーナーピン6本と中心ピン1本を含む11本の軸方向定点 $\gamma$ 線スペクトル測定を実施し、計数率の相互比較した結果、ほぼ平坦な計数率分布が得られており、集合体内で均一な燃焼分布を示したことを示す。測定結果を Fig.18 に示す。

## (3) 燃料ピン径方向スキャン

中心ピンの燃料部中心位置について、横断面FP核種分布測定結果を Fig. 19 に示す。

$^{95}\text{Zr}$ 、 $^{106}\text{Rh}$ 等は移動しにくい核種であり、燃料ペレット内にほぼ均一に分布しペレット形状を表わしている。また、 $^{54}\text{Mn}$ は、被覆管の放射化核種であり、被覆管の形状を表わしている。 $^{137}\text{Cs}$ は、低温部に移動しやすい核種であり、ペレット外周及びペレットと被覆管のギャップに移動蓄積していることが認められる。

#### 4.3.7 パンクチャテスト

燃料ピン17本をプレナムガス圧力測定し、うち7本ガス分析測定を実施した。

##### (1) プレナムガス圧

プレナムガス圧測定結果、1293～1524 Torr (0℃)の範囲であった。測定結果をFig 20に示す。

##### (2) ガス分析

ガス成分比(モル比)はピン平均で、Kr : Xe : He = 4.1 : 39.7 : 56.2であった。結果をTable Vに示す。

##### (3) ガス放出率

ガス放出率は、15.0～37.0%の範囲であった。燃料ピン1本当りのFPガス生成量(Kr + Xe)は次式より求めた。算出結果をTable VIに示す。

$$\text{FPガス生成量 (cm}^3 \cdot \text{std)} = 19.7 \times \text{atom/o Bu}^{4)} .$$

Bu : S/A 燃焼度 (atom%)



## 5. 考 察

### 5.1 集合体及び燃料要素の健全性評価

集合体及び燃料ピンに、一部隣接ピンのワイヤとの干渉による接触跡が見られたものの損傷、異常な変形、変色等は、全く認められず、炉内では設計通りの熱的及び流動特性を本集合体は有していたものと推定される。以下、照射後試験で確認された集合体及び、燃料要素の健全性について、下記にまとめる。

#### 5.1.1 構造体の健全性

集合体に関して、炉内で他集合体と干渉している上部パッドに一部キズが認められたものの変色等認められず良好であった。

寸法変化（対面間、曲り等）についても、照射前後で有意な変化は認められず、その他エントランスノズル、キー、球面座等についても外形変化はなく、健全であったことを確認した。

ピンバンドルに関しては、X線ラジオグラフィの結果、バンドル配列の乱れ、異物の混入等は認められず、健全であったことを確認した。

燃料ピンに関しては、被覆管と隣接するピンのワイヤとの干渉による接触跡は、「PFD 010」の場合と比較すると燃焼度の進行にもかかわらず寸法的に小さく「PFD 010」と同様の性状を示した。これは、P/Rを小さくした結果であり、現段階では接触跡は燃焼度に影響されず、進行性もないと考えられる。

#### 5.1.2 燃料ピンの健全性

ナトリウム洗浄廃液分析結果で、FP核種及び $\alpha$ 核種が検出されなかったこと、ピン重量測定結果においても有意な重量変化はなく、パンクチャテストの結果ピン内ガス圧についても、減圧等の異常は認められず、ピンが密封状態を保持していたことが確認された。

燃料要素の内部構成についてもX線ラジオグラフィの結果配列に異常は認められずペレット等が正常に装荷されていることを確認した。

燃料ピンの燃焼については、 $\gamma$ スキャン結果より燃料出力分布の指標核種 $^{106}\text{Rh}$ 、 $^{95}\text{Zr}$ 等は、炉心燃料部の軸方向に連続的なサインカーブをえがき、炉内では中性子束分布通りに燃焼されていたことが確認された。

また、集合体径方向についても、 $\gamma$ スキャン測定結果より算出したピーキング係数は、約1.1であり、ピン内ガス圧も同様な傾向を示していた。

これらから、燃料ピンは、炉内で健全な状態であったことが確認できた。

## 5.2 照射挙動評価

本集合体は、MK-II炉心で100 MW出力上昇サイクルから1サイクルの間、炉内装荷位置1B1で照射されたものであり、集合体平均燃焼度は約13300 MWD/MTMである。本集合体のPIE結果から、MK-II初期の照射挙動を以下にまとめた。

ただ、現在において、ピンの照射履歴データ等が完備されていないので、厳密なデータ評価はでき難い面がある。

### 5.2.1 集合体外形変化

#### (1) 対面間距離

Fig. 21に炉心中心位置における対面間距離変化量を集合体平均フルエンスで整理して示す。MK-Iの場合は、中性子照射量 $2.0 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ <sup>(1)</sup>付近からふくれが現われており、本集合体の中性子照射量は、 $1.65 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  ( $E \geq 0.1 \text{ Mev}$ )とふくれが生じはじめる照射量であるが、現段階では、顕著なふくれは認められない。

#### (2) 曲り

Fig. 22に集合体上部パッド部における曲り量を集合体平均フルエンスで整理して示す。照射の影響による本集合体の曲りが、MK-I時に比べ若干大きい。

### 5.2.2 スタック長変化

Fig. 23に炉心燃料部スタック長製造ペレット別変化量を整理して示す。本集合体の炉心燃料部スタックは焼きしまっている。炉心燃料部においては3種類のペレットロットが装荷されている(ペレットロットNo.FM 2008は1個のみのため対象外)が、ペレット軸方向の焼きしまり傾向は、ほぼ同程度である。焼きしまりの判断としては、MK-Iでの10000 MWD/T<sup>(2)</sup>以下の焼きしまり傾向、また、ペレット密度93%TDとMK-Iペレットに比べ若干低い値で形成されていること、また、MK-Iに比べ燃料温度が高いことなどから、現段階での燃焼度においても、焼きしまりの傾向にあると推定される。

また、集合体内の温度勾配による影響については、現段階では顕著に現われていない。

### 5.2.3 ピン外形形状変化

Fig. 24にMK-Iにおけるピン曲り量を集合体平均フルエンスで整理して示し、図中に本燃料ピンの曲り量を示す。

MK-Iと比較した場合、被覆管材質は同様のものを使用しているが、冷間加工度が、10%から20%へ、そして、ピン全長が1910 mmから1533 mmと短尺になっている。同一集合体平均フルエンスでのピン曲り量が、MK-Iとほぼ同じことから、MK-IIの方がピン全長が短いことを考慮すると、MK-Iより曲率が大きいことになる。この要因としては、MK-I



とMK-IIの温度条件の差によるものが考えられる。

一方、MK-Iにおける外径変化と集合体平均フルエンスとの関係をFig.25に示し、図中に本燃料ピンの外径変化を示す。

被覆管外形変化の要因（接触跡等は除く）として、フルエンス、被覆管温度及びピン内圧等があるが、同一燃焼度では、パンクチャの結果から、MK-Iとほぼ同一のピン内圧であり被覆管温度は、MK-I最高で約540℃であり、本燃料ピンで約600℃と高くなっている。被覆管温度に違いはあるが、本集合体フルエンスの照射量では、MK-Iと同様、外径変化は認められない。

#### 5.2.4 F.P核種の挙動

ピン軸方向において、下部インシュレータペレットと下部端栓の境界に、 $^{137}\text{Cs}$ の移動が認められた。低温部に移動しやすい $^{137}\text{Cs}$ が、低温部である燃料ピン下端部に移動したものと推定される。燃料ピンのペレット間ギャップへの移動は、顕著には認められない。

ピン軸方向のFP核種及び放射化核種の $^{106}\text{Rh}$ を基準とする計数率の比を求めた結果をFig.26に示す。軸方向FPの放射能相関では、軸方向にほぼ一定値を示している。

ピン軸方向及び径方向ピーキング係数をTable VIIに示す。

ピン軸方向ピーキング係数のそれぞれの核種は「常陽」運転監視コードの値より若干高い値を示しているが、径方向のピーキング係数は、運転監視コードと一致し、炉内において正常に燃焼したと推定される。

#### 5.2.5 ピン内ガス圧変化及びピン内ガス放出率

Fig.27に、MK-I炉心燃料について、ピン内ガス圧の集合体平均燃焼度依存性を示す。本炉心燃料集合体及び先行の炉心燃料集合体「PFD010」のプレナムガス圧を図中に示す。MK-IIとMK-Iで同燃焼度の場合、ピン内部構成（燃料スタック長、プレナム容積等）の違いからガス圧力は低いと予想されるが燃料ペレット温度が約2100℃とかなり高いことでガス放出の増加が予想され、相対的にMK-IIとMK-Iで同様のプレナムガス圧になったと推定できる。

一方、Fig.28に、ピン内ガス放出率と集合体平均燃焼度で整理して示す。

本燃料のピン内ガス放出率の平均は、約30%であり、「PFD010」のガス放出率（約13%）と比べ、2倍以上高く、100MW定格出力運転に入り、燃料温度が高くなり放出量が増えたものと推定される。

## 6. あ と が き

「常陽」MK-II照射炉心で100 MWの出力上昇から定格第1サイクルの間、照射された炉心燃料集合体「PFD 003」(集合体平均燃焼度 13300MWD / MTM)の照射後非破壊検査を実施した。

得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 集合体及び燃料ピンには、損傷は全くなき、異常な変形、変色等も認められず、炉内挙動は正常であり、本集合体の構造体としての設計及び製作が妥当であったと思われる。
- (2) 燃料ピンの被覆管とワイヤとの干渉で生じる接触跡の観察結果、燃焼度の進行にもかかわらず接触跡は一部に認められるものの、接触跡の軸方向の長さも短く、先行の炉心燃料集合体「PFD 010」と同様な性状であった。
- (3) 現段階における燃焼度及び照射量では、特徴的な照射挙動は、ほとんど認められなかったが、本試験を通じ、MK-IIにおける基礎データを取得した。

## 7. 参 考 文 献

- (1) 「常陽」MK-II炉心構成要素照射後試験基本計画  
PNC N908 83-01, 1983
- (2) 井滝俊幸 : 高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の照射後試験結果概要(第3報)  
PNC SN941 84-05, 1984
- (3) 実験炉部: 「常陽」炉心燃料被覆管のウェアマークに関するR&D成果(II)と計画  
PNC SN241 82-19, 1982
- (4) 部内資料 : MK-II燃料FPガス放出率の暫定的算出  
AESテクニカルメモ 83(AES)66



Table II Irradiation Condition of Subassembly [PFD 003]

サ イ ク ル			100MW(0)	100MW(1)	
装 荷 位 置			1 B 1		
燃 焼 度	ポ イ ント 最 大		MWD/T	6100	15800
	集 合 体 平 均		MWD/T	5100	13300
積 算 中 性 子 照 射 量	E <sub>n</sub> ≥0.1MeV	ポ イ ント 最 大	× 10 <sup>20</sup> n/cm <sup>2</sup>	76.3	202
		集 合 体 平 均	× 10 <sup>20</sup> n/cm <sup>2</sup>	62.9	165
	Total	ポ イ ント 最 大	× 10 <sup>20</sup> n/cm <sup>2</sup>	109	285
		集 合 体 平 均	× 10 <sup>20</sup> n/cm <sup>2</sup>	90.9	237
線 出 力	B O C	ポ イ ント 最 大	W/cm	346.3	367.7
		集 合 体 平 均	W/cm	284.6	289.4
	E O C	ポ イ ント 最 大	W/cm	343.9	360.8
		集 合 体 平 均	W/cm	283.3	286.6
被 覆 管 最 高 温 度	B O C		℃	598	601
	E O C		℃	597	599
燃 料 最 高 温 度	B O C		℃	2065	2151
	E O C		℃	2055	2125
集 合 体 出 口 温 度	B O C		℃	546	543
	E O C		℃	546	542
ピーキング係数	B O C	径 方 向	-	1.026	1.058
		軸 方 向	-	1.186	1.201
	E O C	径 方 向	-	1.026	1.057
		軸 方 向	-	1.183	1.191
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	8.92	9.15
	E O C		kg/sec	8.92	9.15



Table III Parts List of Fuel Pin for MK-II Core Fuel Pin

LOCATION	PIN NO	U.F.P. NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.F.P.	L.F.P.	ROD FOR END PLUG		PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO			LOT NO	LOT NO			
001	00352	00327	S001	S00108	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
002	00351	00326	S001	S00115	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
003	00348	00323	S001	S00132	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
004	00346	00321	S003	S00322	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
005	00345	00320	S003	S00317	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
006	00344	00319	S003	S00320	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
007	00343	00318	S003	S00324	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
008	00342	00317	S003	S00318	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
009	00340	00316	S001	S00137	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
010	00339	00315	S001	S00122	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
011	00338	00314	S001	S00136	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
012	00336	00313	S001	S00133	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
013	00335	00312	S001	S00131	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
014	00334	00311	S003	S00316	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
015	00333	00310	S001	S00134	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
016	00332	00309	S003	S00315	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
017	00331	00308	S001	S00130	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
018	00330	00307	S001	S00139	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
019	00328	00306	K002	K00480	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
020	00327	00305	K002	K00478	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
021	00326	00304	K002	K00458	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
022	00382	00352	S003	S00392	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
023	00380	00350	S003	S00385	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
024	00378	00349	S003	S00340	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
025	00376	00347	S003	S00348	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
026	00374	00346	S003	S00345	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
027	00373	00345	S003	S00337	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
028	00371	00343	S003	S00349	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
029	00368	00341	S003	S00347	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
030	00366	00339	S003	S00338	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
031	00364	00338	S003	S00341	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
032	00362	00337	S003	S00333	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
033	00360	00335	S003	S00329	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
034	00358	00333	S003	S00358	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
035	00357	00332	S003	S00359	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001

Table III Continued

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR END PLUG		PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE LOT NO	DISK LOT NO
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO			LOT NO	LOT NO			
036	00356	00331	S003	S00363	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
037	00355	00330	S003	S00357	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
038	00353	00329	S003	S00326	T002	T00051	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
039	00407	00376	S003	S00408	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
040	00406	00375	S003	S00402	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
041	00405	00374	S003	S00409	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
042	00404	00373	S003	S00407	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
043	00402	00372	S003	S00360	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
044	00401	00371	S003	S00356	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
045	00400	00370	S003	S00364	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
046	00399	00369	S003	S00365	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
047	00398	00368	S003	S00352	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
048	00397	00367	S003	S00367	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
049	00396	00366	S003	S00350	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
050	00395	00365	S003	S00361	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
051	00394	00364	S003	S00355	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
052	00393	00363	S003	S00353	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
053	00392	00362	S003	S00366	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
054	00391	00361	S003	S00354	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
055	00390	00360	S003	S00369	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
056	00389	00359	S003	S00368	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
057	00388	00358	S003	S00351	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
058	00386	00356	S003	S00379	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
059	00385	00355	S003	S00376	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
060	00384	00354	S003	S00372	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
061	00383	00353	S003	S00380	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
062	00431	00399	S003	S00399	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
063	00428	00398	S003	S00387	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
064	00427	00397	S003	S00391	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
065	00426	00396	S003	S00377	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
066	00425	00395	S003	S00383	T012	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
067	00424	00394	S003	S00378	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
068	00423	00393	S003	S00371	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
069	00422	00392	S003	S00386	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
070	00421	00391	S003	S00384	T012	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001



Table III Continued

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WIAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR END PLUG		PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO			LOT NO	LOT NO			
071	00420	00390	S003	S00390	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
072	00419	00389	S003	S00382	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
073	00418	00388	S003	S00362	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
074	00417	00387	S003	S00373	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
075	00416	00386	S003	S00381	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
076	00415	00385	S003	S00394	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
077	00413	00383	S003	S00403	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
078	00412	00382	S003	S00400	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
079	00411	00381	S003	S00411	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
080	00410	00380	S003	S00401	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
081	00409	00379	S003	S00404	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
082	00408	00378	S003	S00410	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
083	00459	00426	K002	K00493	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
084	00458	00425	K002	K00487	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
085	00457	00424	K002	K00483	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
086	00456	00423	K002	K00481	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
087	00455	00422	K002	K00494	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
088	00453	00421	S003	S00414	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
089	00452	00420	S003	S00412	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
090	00451	00419	S003	S00398	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
091	00450	00418	S003	S00413	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
092	00449	00417	S003	S00397	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
093	00448	00416	S003	S00405	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
094	00447	00415	S003	S00416	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
095	00446	00414	S003	S00415	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
096	00444	00413	S003	S00434	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
097	00443	00412	S003	S00419	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
098	00442	00411	S003	S00417	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
099	00441	00410	S003	S00429	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
100	00440	00409	S003	S00421	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
101	00439	00408	S003	S00430	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
102	00438	00407	S003	S00431	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
103	00437	00406	S003	S00422	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
104	00436	00405	S003	S00427	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
105	00435	00404	S003	S00435	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001



Table III Continued

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR END PLUG		PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE LOT NO	DISK LOT NO
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO			LOT NO	LOT NO			
106	00434	00403	S003	S00425	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
107	00484	00451	S003	S00456	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
108	00483	00450	S003	S00452	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
109	00482	00449	S003	S00454	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
110	00481	00448	S003	S00458	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
111	00480	00447	S003	S00457	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
112	00478	00446	K002	K00523	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
113	00477	00445	K002	K00455	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
114	00476	00444	K002	K00504	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
115	00475	00443	K002	K00495	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
116	00474	00442	K002	K00505	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
117	00473	00441	K002	K00497	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
118	00472	00440	K002	K00498	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
119	00471	00439	K002	K00449	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
120	00470	00438	K002	K00454	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
121	00469	00437	K002	K00450	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
122	00468	00436	K002	K00513	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
123	00467	00435	K002	K00514	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
124	00466	00434	K002	K00511	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
125	00465	00433	K002	K00515	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
126	00464	00432	K002	K00507	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001
127	00463	00431	K002	K00488	T002	T00069	C002	C002	K001	K001	F001	F001	F001

Table III Continued

LOCATION	PIN NO	SPRING	UPPER	INSULATOR	-- CORE PELLETT --		-- FUO2 POWDER --		-- PUO2 POWDER --	
			REFLECTOR	PELLET	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
		LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
001	00352	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
002	00351	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
003	00348	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
004	00346	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
005	00345	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
006	00344	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
007	00343	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
008	00342	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
009	00340	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
010	00339	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
011	00338	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
012	00336	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
013	00335	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
014	00334	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
015	00333	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
016	00332	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
017	00331	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
018	00330	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
019	00328	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
020	00327	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
021	00326	F001	T001	F001	FM2008	FU0218	FU0219	FP0107	FP0108	
022	00382	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
023	00380	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
024	00378	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
025	00376	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
026	00374	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
027	00373	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
028	00371	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
029	00368	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
030	00366	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
031	00364	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
032	00362	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
033	00360	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
034	00358	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	
035	00357	F001	T001	F001	FM2009	FU0220	FU0221	FP0108	FP0109	

Table III Continued

LOCATION	PIN NO	SPRING	UPPER	INSULATOR	-- CORE PELLETT --		-- FUO2 POWDER --		-- PUO2 POWDER --	
			REFLECTOR	PELLET	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
		LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
036	00356	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
037	00355	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
038	00353	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
039	00407	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
040	00406	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
041	00405	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
042	00404	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
043	00402	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
044	00401	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
045	00400	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
046	00399	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
047	00398	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
048	00397	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
049	00396	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
050	00395	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
051	00394	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
052	00393	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
053	00392	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
054	00391	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
055	00390	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
056	00389	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
057	00388	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
058	00386	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
059	00385	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
060	00384	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
061	00383	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
062	00431	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
063	00428	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
064	00427	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
065	00426	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
066	00425	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
067	00424	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
068	00423	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
069	00422	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
070	00421	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109



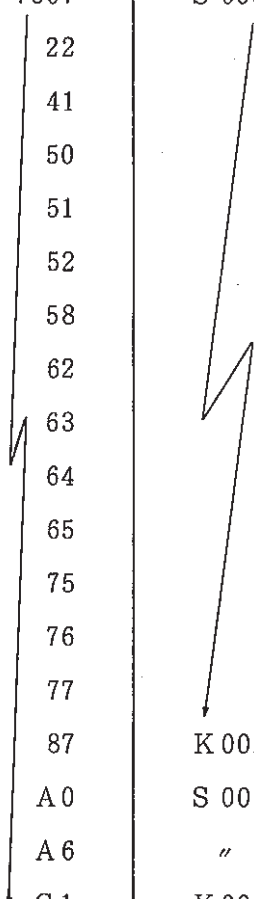
Table III Continued

LOCATION	PIN NO	SPRING	UPPER	INSULATOR	-- CORE PELLETT --		-- FUO2 POWDER --		-- PUO2 POWDER --	
			REFLECTOR	PELLET	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
		LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
071	00420	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
072	00419	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
073	00418	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
074	00417	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
075	00416	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
076	00415	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
077	00413	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
078	00412	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
079	00411	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
080	00410	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
081	00409	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
082	00408	F001	T001	F001	FM2009		FU0220	FU0221	FP0108	FP0109
083	00459	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
084	00458	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
085	00457	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
086	00456	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
087	00455	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
088	00453	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
089	00452	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
090	00451	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
091	00450	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
092	00449	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
093	00448	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
094	00447	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
095	00446	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
096	00444	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
097	00443	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
098	00442	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
099	00441	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
100	00440	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
101	00439	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
102	00438	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
103	00437	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
104	00436	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
105	00435	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	

Table III Continued

LOCATION	PIN NO	SPRING	UPPER	INSULATOR	-- CORE PELLETS --		-- FUO2 POWDER --		-- PUO2 POWDER --	
		REFLECTOR	PELLET	PELLET	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
		LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
106	00434	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
107	00484	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
108	00483	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
109	00482	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
110	00481	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
111	00480	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
112	00478	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
113	00477	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
114	00476	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
115	00475	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
116	00474	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
117	00473	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
118	00472	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
119	00471	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
120	00470	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
121	00469	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
122	00468	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
123	00467	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
124	00466	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
125	00465	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
126	00464	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	
127	00463	F001	T001	F001	FM2010		FU0222	FU0223	FP0109	

Table W Total length changes of Fuel pin

PIE No	Lot No	PIE-1 <sup>1)</sup> (mm)	PIE-2 <sup>2)</sup> (mm)	FAB (mm)	PIE <sup>3)</sup> -FAB (mm)	
7007	S 003	1532.9	1532.9	1533.0	-0.1	
22		1532.9	1533.0	1532.8	0.2	
41		1532.9	1533.1	1532.8	0.2	
50		1531.8	1531.9	1532.8	-0.9	
51		1532.9	1532.9	1532.0	-0.1	
52		1532.9	1533.1	1532.9	0.1	
58		1532.3	1532.4	1533.1	-0.8	
62		1532.4	1532.3	1533.0	-0.7	
63		1533.1	1533.2	1533.0	0.2	
64		1533.3	1533.2	1533.1	0.2	
65		1532.8	1532.8	1532.9	-0.1	
75		1532.2	1532.7	1533.0	-0.6	
76		1533.0	1533.0	1533.1	-0.1	
77		1532.9	1532.8	1533.1	-0.3	
87		K 002	1533.9	1533.6	1533.5	0.3
A 0		S 003	1532.8	1532.9	1533.3	-0.5
A 6	"	1532.8	1532.9	1533.2	-0.4	
C 1	K 002	1533.0	1532.9	1533.4	-0.4	

1) PIE-1はピン0°方向

2) PIE-2はピン90°方向

3) PIE-1とPIE-2の平均値

Table V Result of Fission Gas Analysis  
in Fuel Pins of Subassembly 「PFD 003」

Pin No .....	Gas Chromatography (%) .....		
	Kr	Xe	He その他
7001	4.0	40.5	55.5
7007	2.1	22.2	75.7
7064	5.2	48.4	53.6
7070	3.3	32.1	64.6
7087	4.3	40.8	54.9
70A6	5.0	48.0	47.0
70C 1	4.8	45.9	49.3

Table VI Relation of Fission Gas Release Rate  
in Fuel Pins of Subassembly 「PFD 003」

Pin No .....	Gas Release Rate (%) .....
7001	29.3
7007	15.0
7064	36.4
7070	21.7
7087	32.6
70A6	37.0
70C 1	36.4

Table VII Peaking Factors of the Subassembly Predicted and Measured by Gamma-Scanning of Fuel Pins

PIE No.	FAB No.	炉内装荷位置	運転監視コードによる計算値 <sup>*</sup> )	測定値 <sup>**</sup> )				
				<sup>137</sup> Cs	<sup>106</sup> Rh	<sup>95</sup> Zr	<sup>54</sup> Mn	Gross- $\gamma$
			1.191	1.228	1.248	1.251	1.294	1.307
70	PFD003	1B1	(1.057)	(1.062)	(1.053)	(1.046)	(1.038)	( - )

\*) 上段：軸方向ピーキング係数，下段：( )内径方向ピーキング係数で最終 EOC の値を示す。

\*\*\*)  $\gamma$ スキャニング測定結果

上段：中心ピン軸方向ピーキング係数

下段：( )内径方向ピーキング係数(軸方向 338 mm 位置)



炉内照射位置

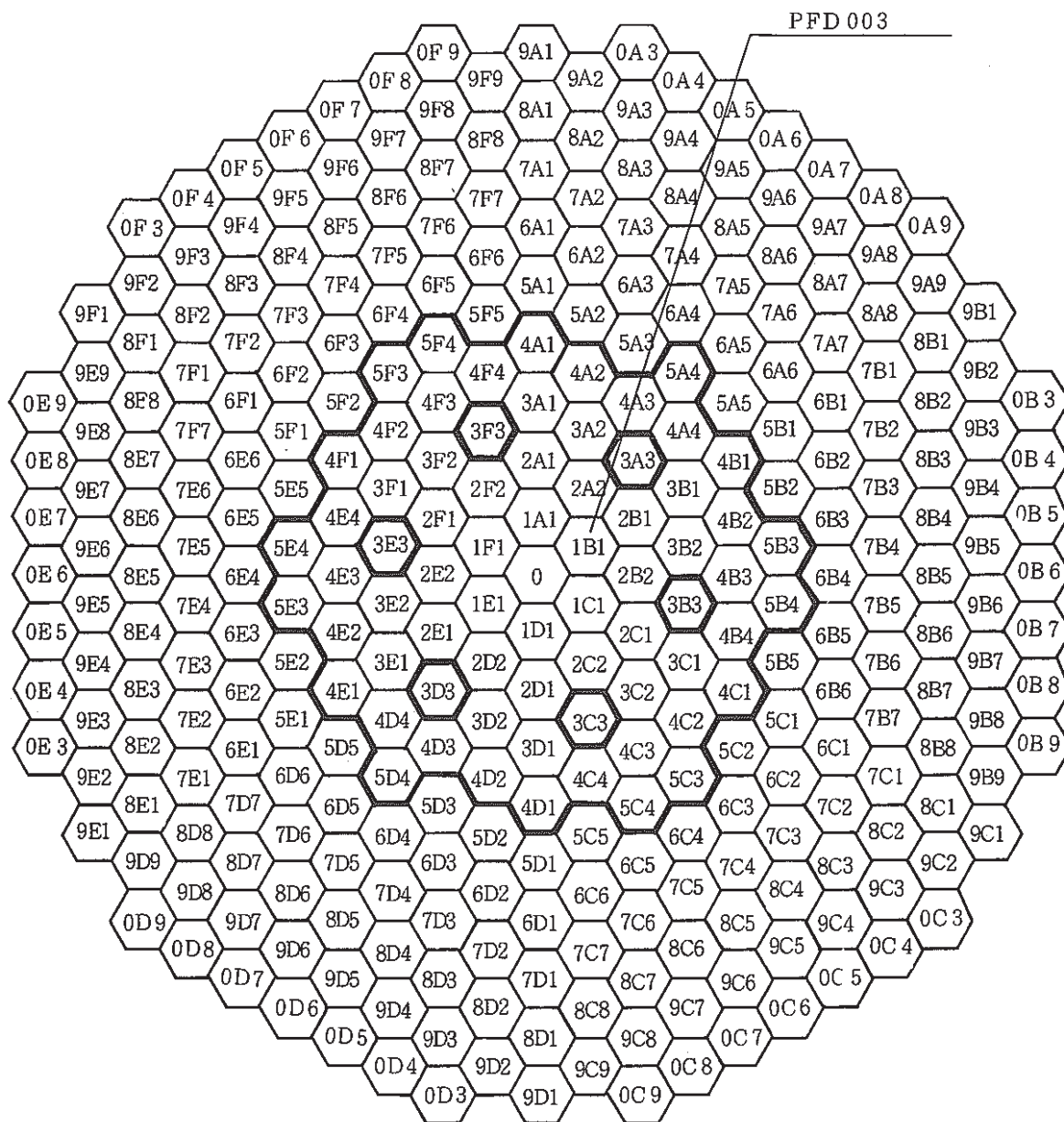


Fig. 1 In Reactor Location of the Subassembly ( PFD 003 )

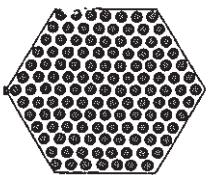
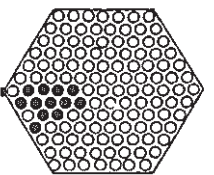
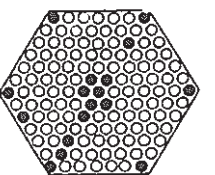
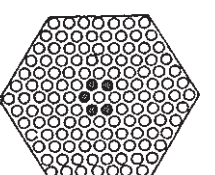
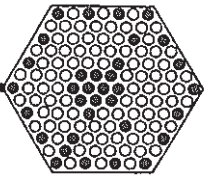
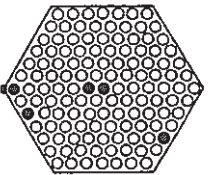
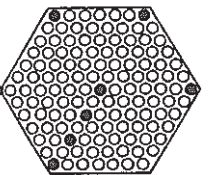
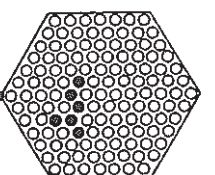
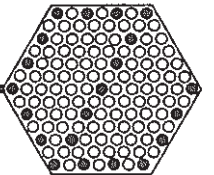
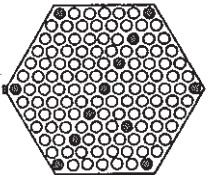
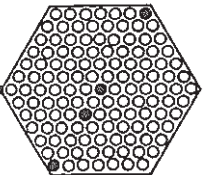
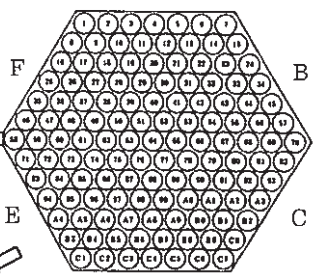
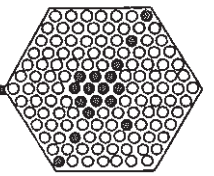
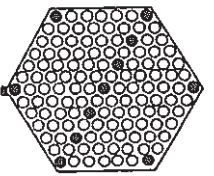
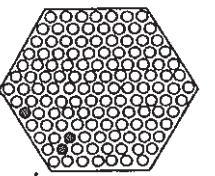
JOYO MK-II 照射後試験計画 (ピン試験) 炉心燃料集合体 PFD003 (70) 装荷位置 [1B1]		集合体試験	
		1. Na 洗浄前・後外観検査 2. Na 洗浄 3. 寸法測定 4. X線ラジオグラフィ 5. W/Tガンマスキャン 6. W/T内面観察	⇐: 炉心方向 ●: 試験対象ピン
1. ピン列外観検査, XRG, 重量測定  127本	5. 詳細外観検査 (ワイヤ付)  12本	9. ピンバンクチャ (ガス圧)  17本	13. ピン切断 (MMS)  5本
2. ワイヤ切断  34本	6. 詳細外観検査 (ワイヤ無)  5本	10. ピンバンクチャ (ガス分析)  7本	CPF 搬出用  6本
3. 寸法測定 (曲がり)  23本	7. ガンマスキャン (プロフィール)  12本	11. ピン切断 (AGS)  4本	⇐: 推定炉心方向を示す A B C D E F MAX KEY 常陽添付データ W/Tγスキャン結果 
4. 寸法測定 (外径)  17本	8. ガンマスキャン (スペクトル)  11本	12. ピン切断 (AES)  3本	

Fig. 2 Fuel Pins selected for each Postirradiation Examination Item

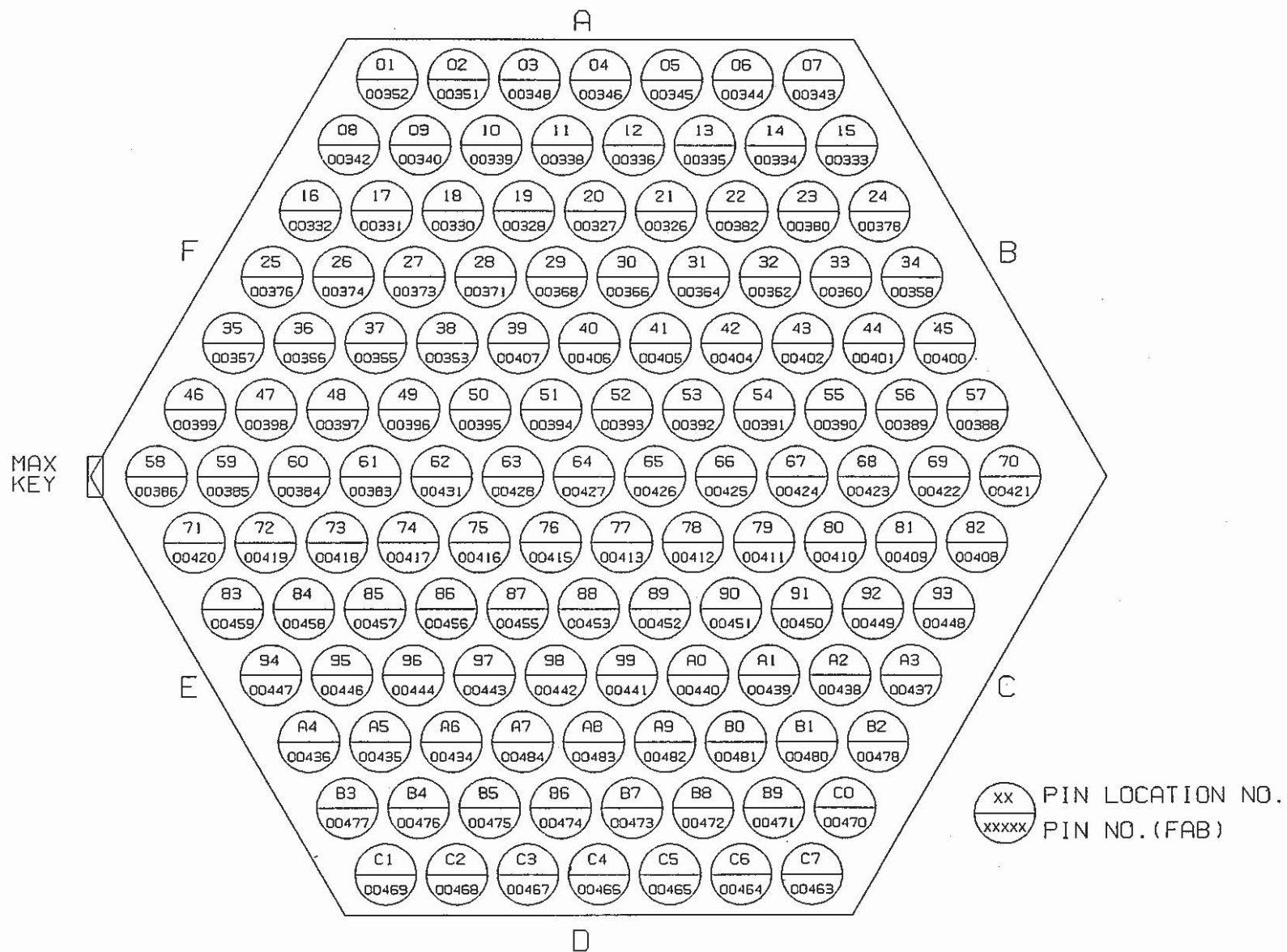
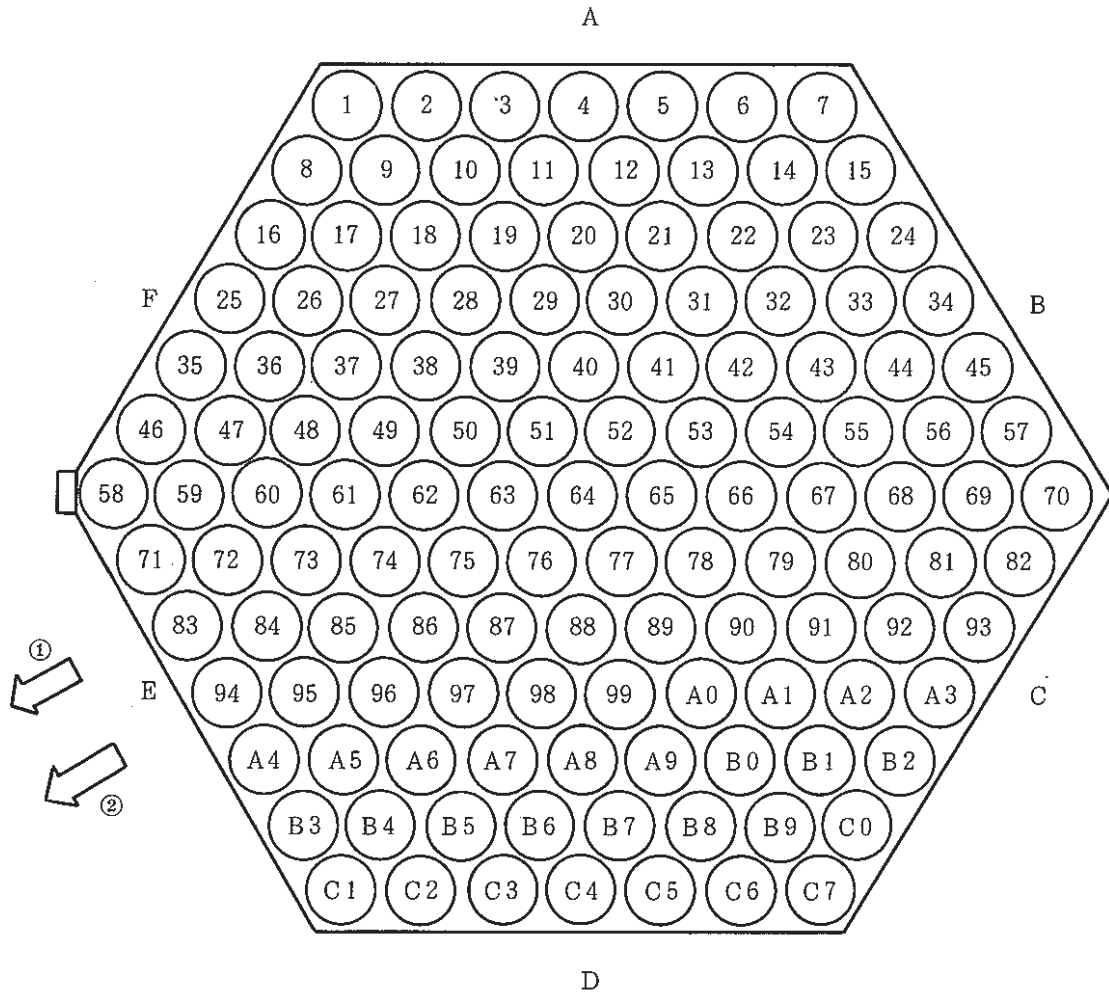


Fig. 3 Arrangement of Pins in Subassembly (PFD003)



① ラッパ管ガンマスキャン結果の最大強度分布

② 「常陽」実験炉の炉心中心推定方位

Fig. 4 Direction of Reactor Center estimated by "JOYO" and measured by Gamma-Scanning



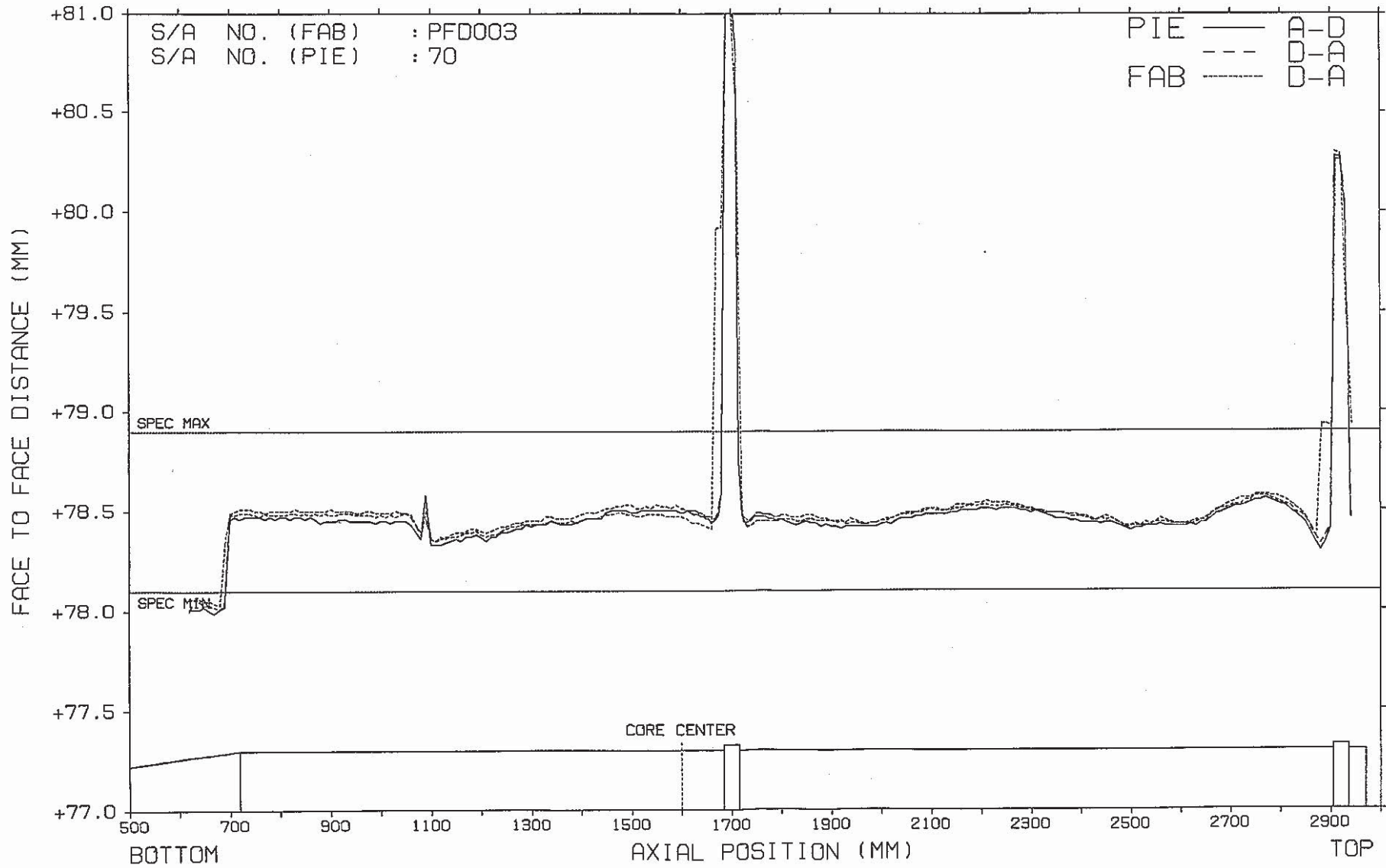


Fig. 5 Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (D-A)

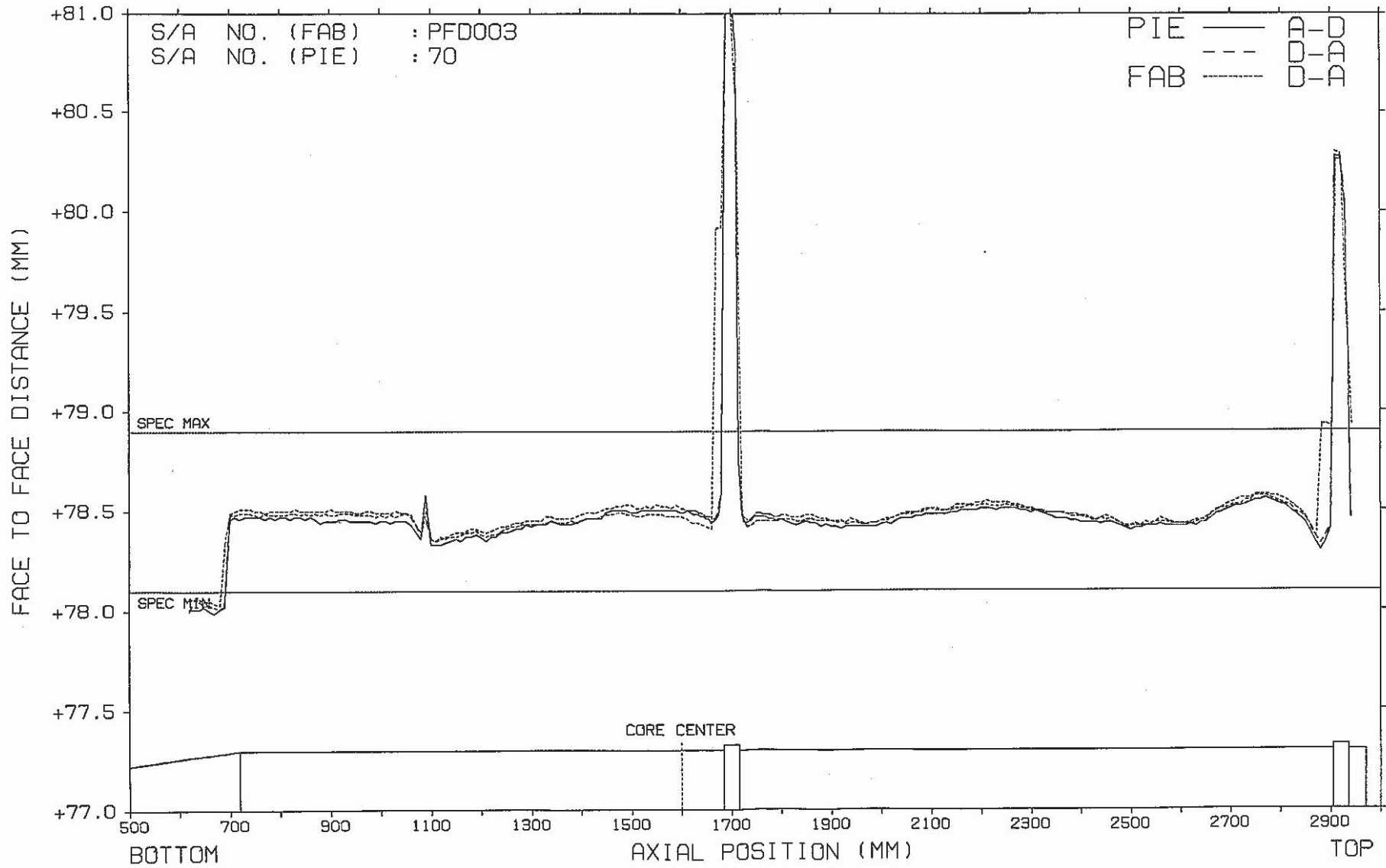


Fig. 5 Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (D-A)

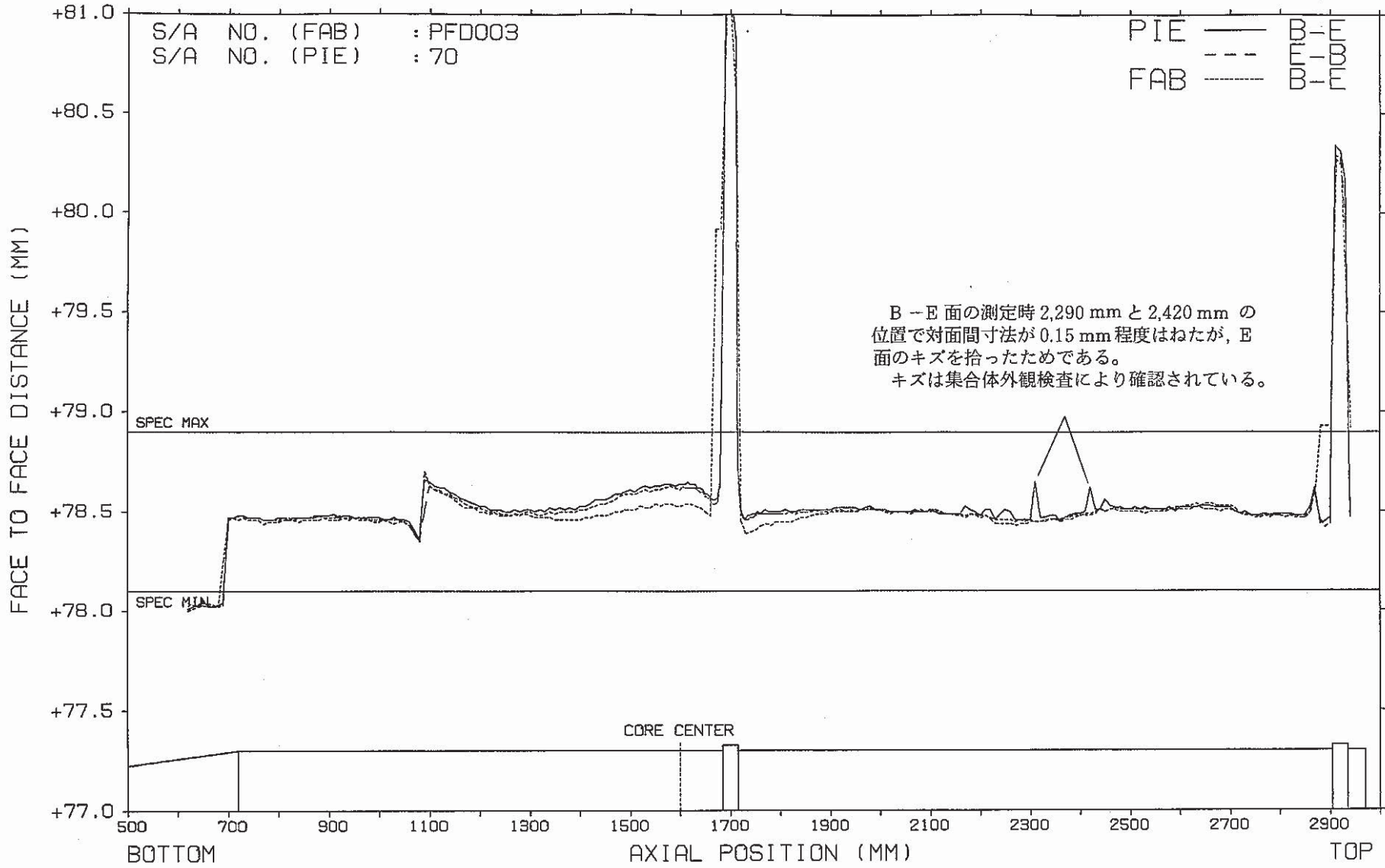


Fig. 6 Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (B-E)

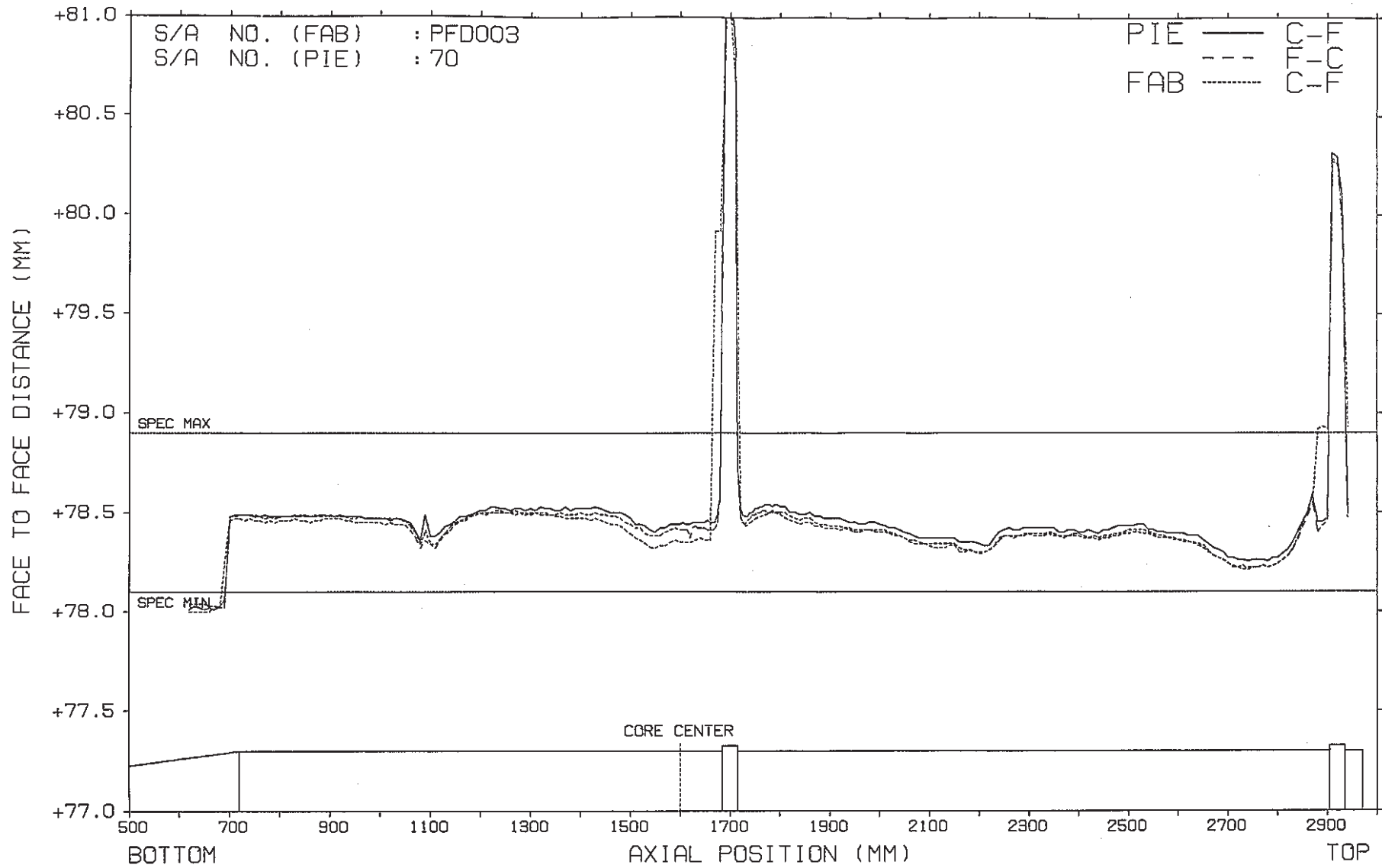
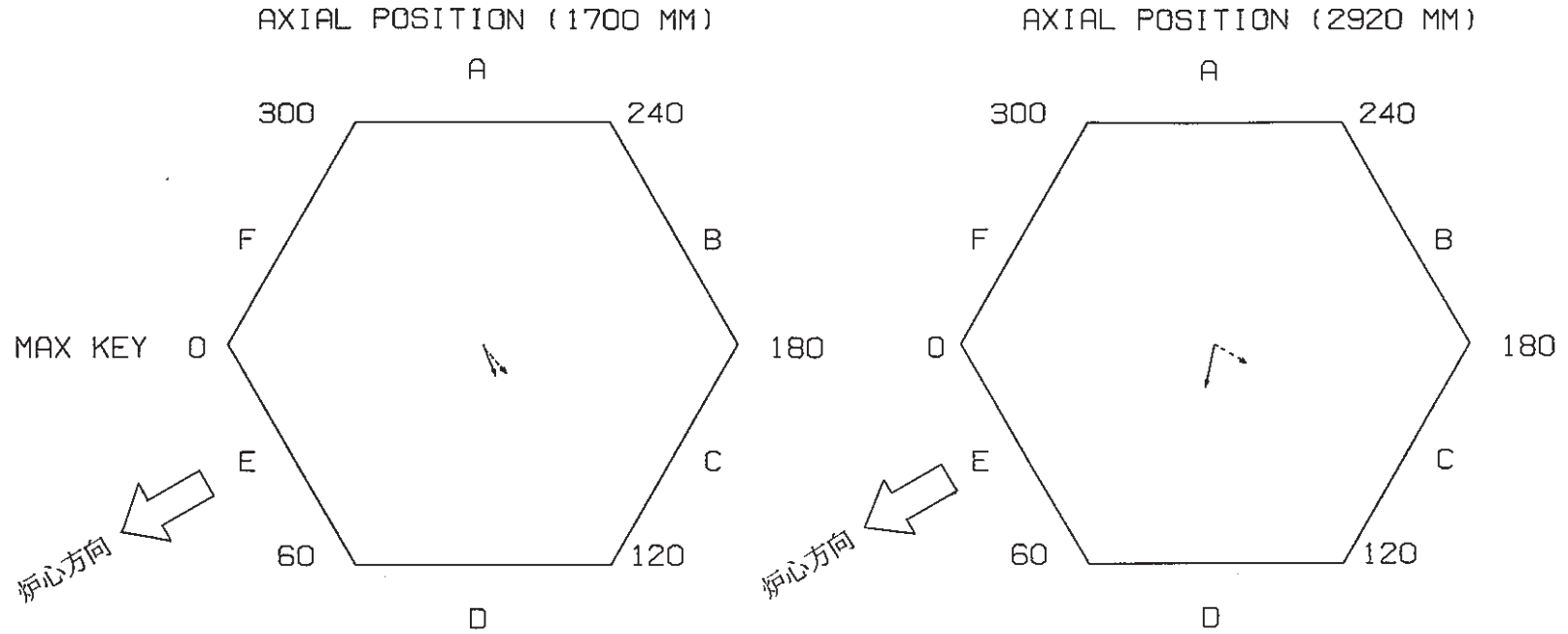


Fig. 7 Face to Face Distance of Wrapper Tube of the Subassembly in Axial Direction (C-F)



S/A FAB NO. : PFD003  
 PIE NO. : 70

VIEW FROM TOP



Axial Position	1700 (mm) (at Middle Pad)		2920 (mm) (at Upper Pad)	
	Bowing (mm)	Direction (Deg)	Bowing (mm)	Direction (Deg)
Irrad.	0.7	121	1.4	82
Unirrad.	0.7	132	0.9	152

IRRAD.  $\longrightarrow$   
 UNIRRAD.  $\dashrightarrow$   
 BOWING SCALE  $\longleftrightarrow$  2.0 MM

Fig. 8 Bowing Vector of Subassembly

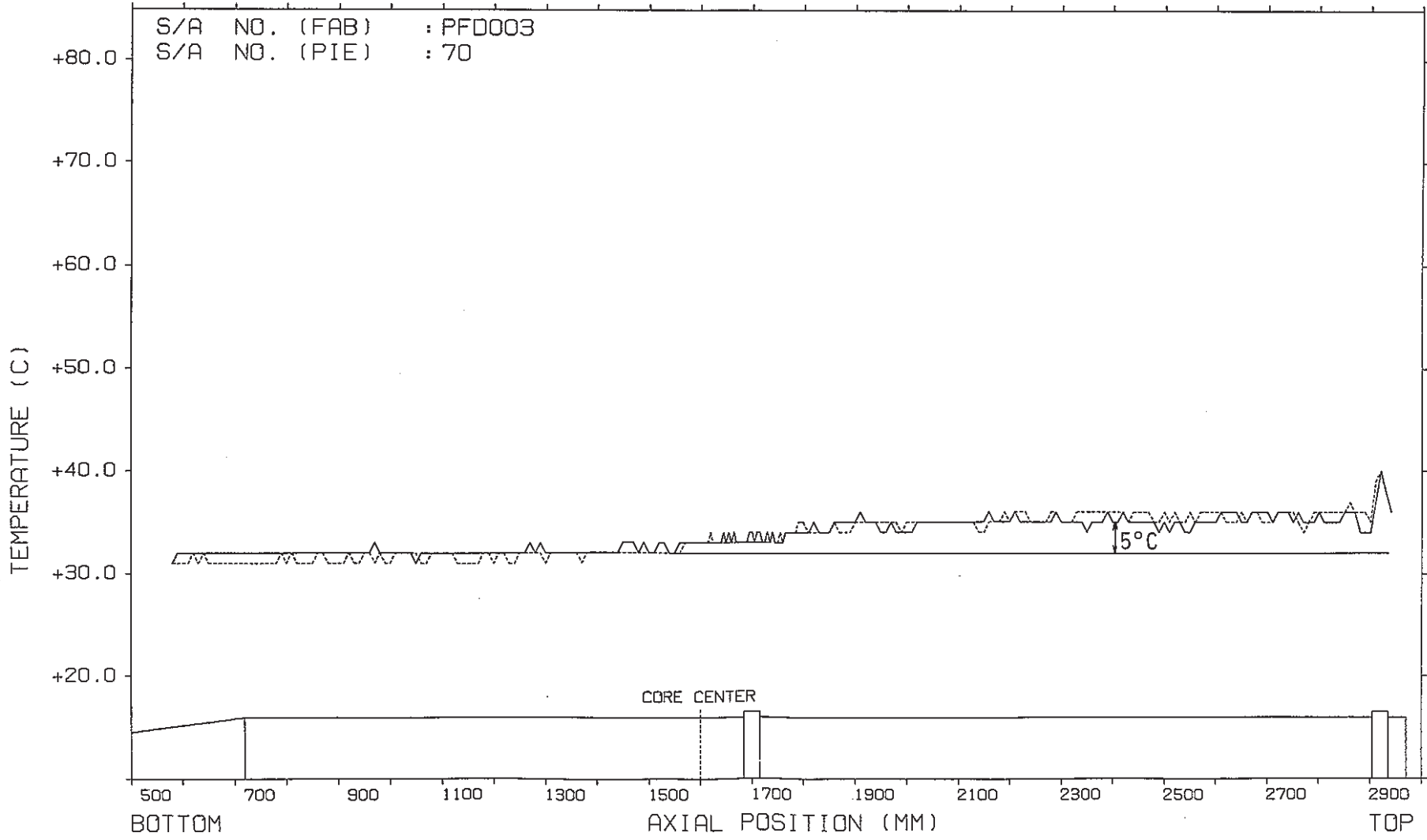
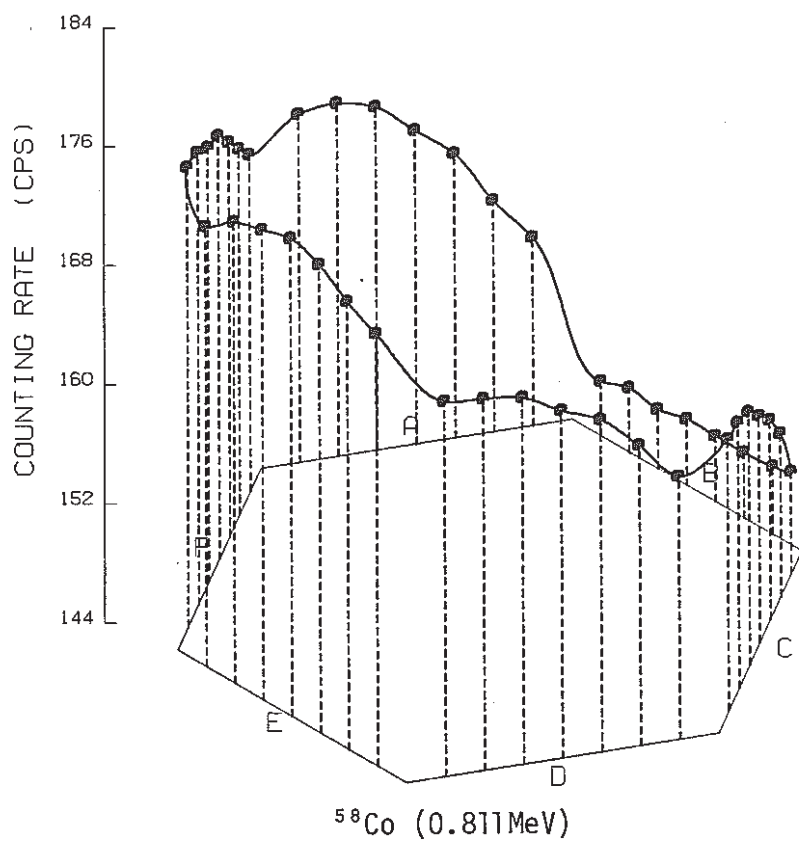


Fig. 9 Surface Temperature Profile of Subassembly in Axial Direction



Ax. Pos. : 1480 mm

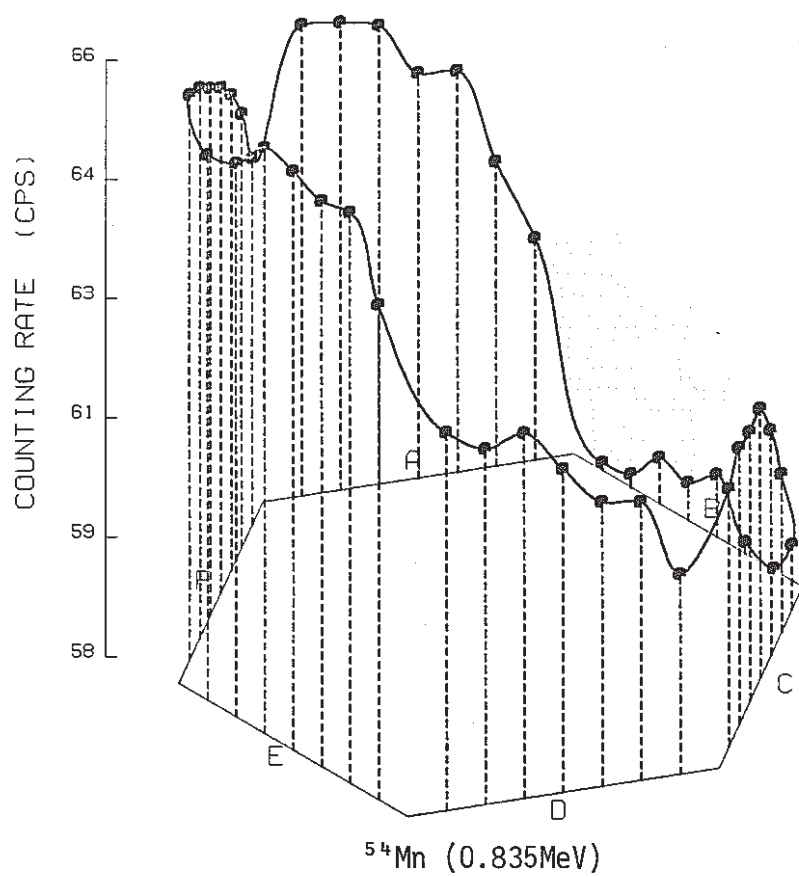


Fig. 10 Radial Distribution of Gamma Ray Intensity

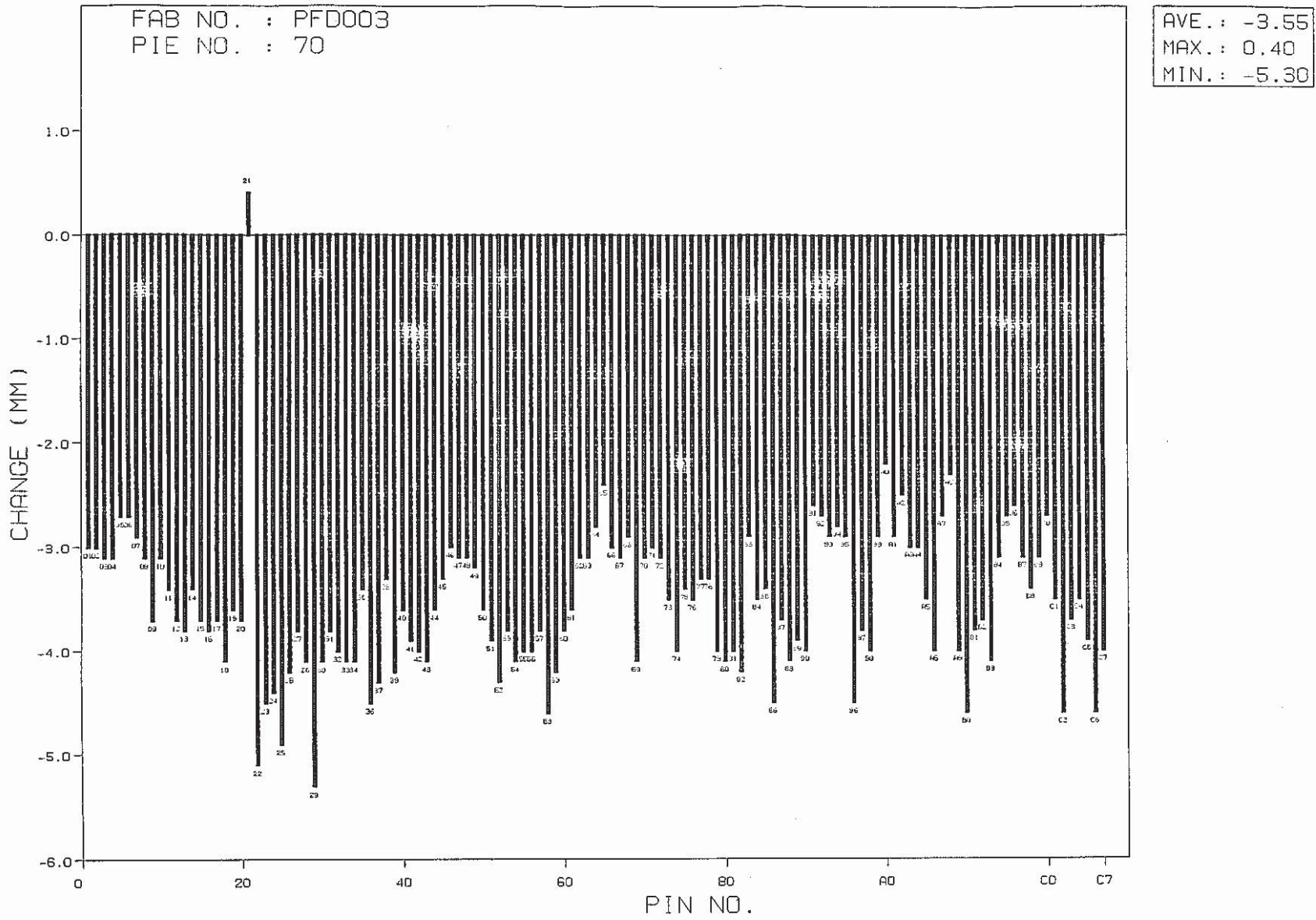


Fig. 11 Fuel Stack Length Changes in the Subassembly

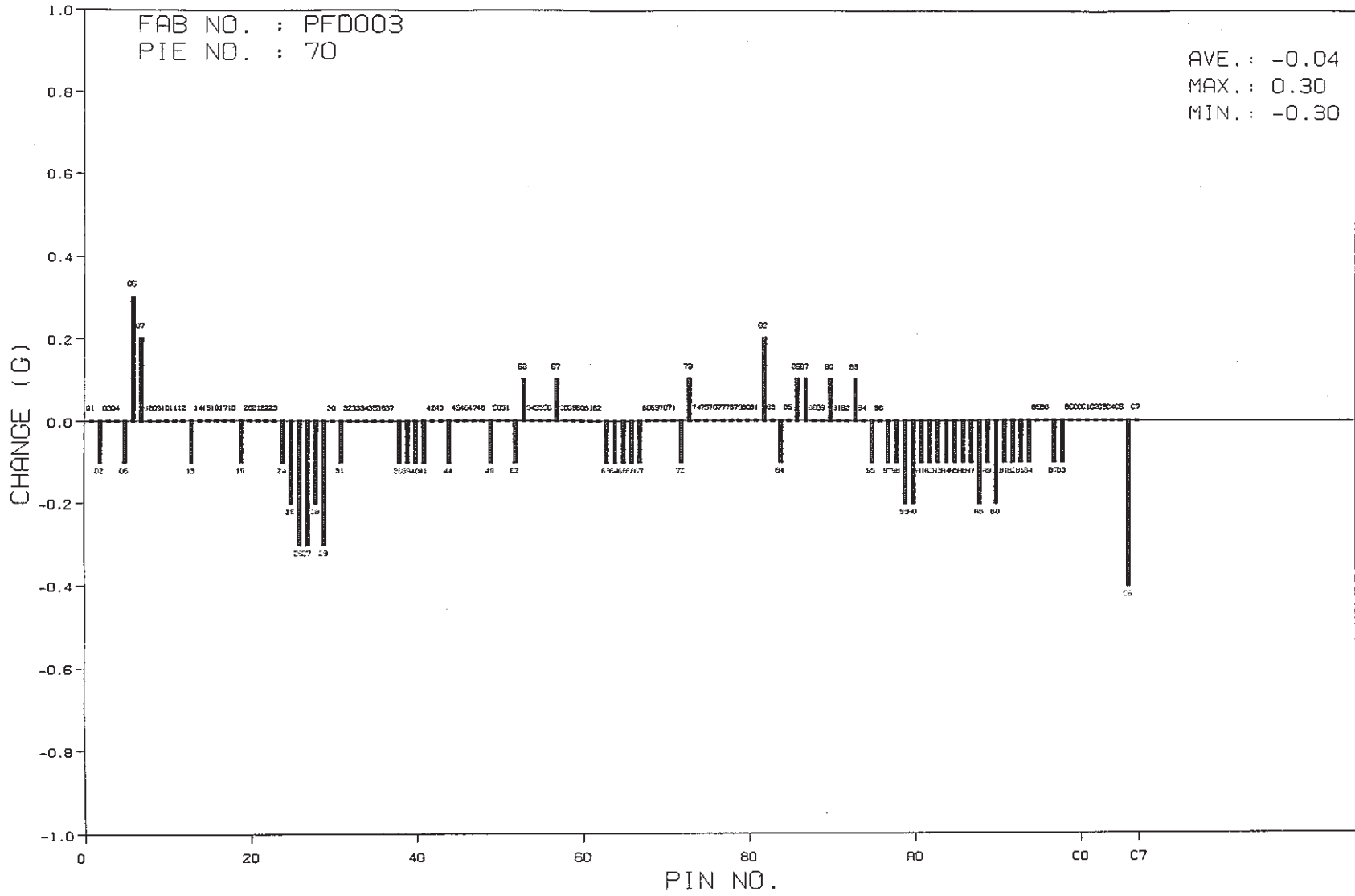


Fig. 12 Weight Changes of All Fuel Pins in the Subassembly

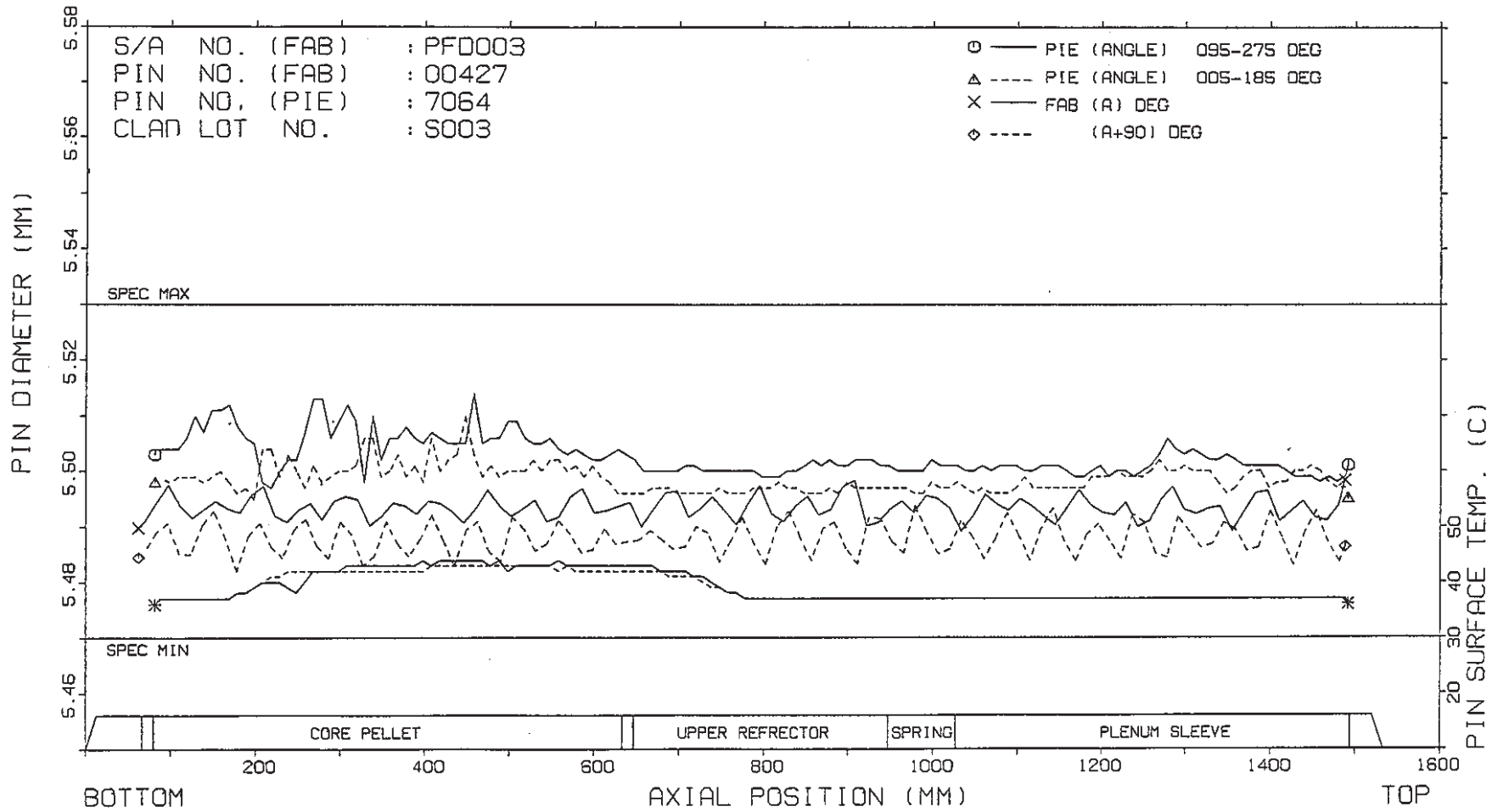


Fig. 13 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 7064)

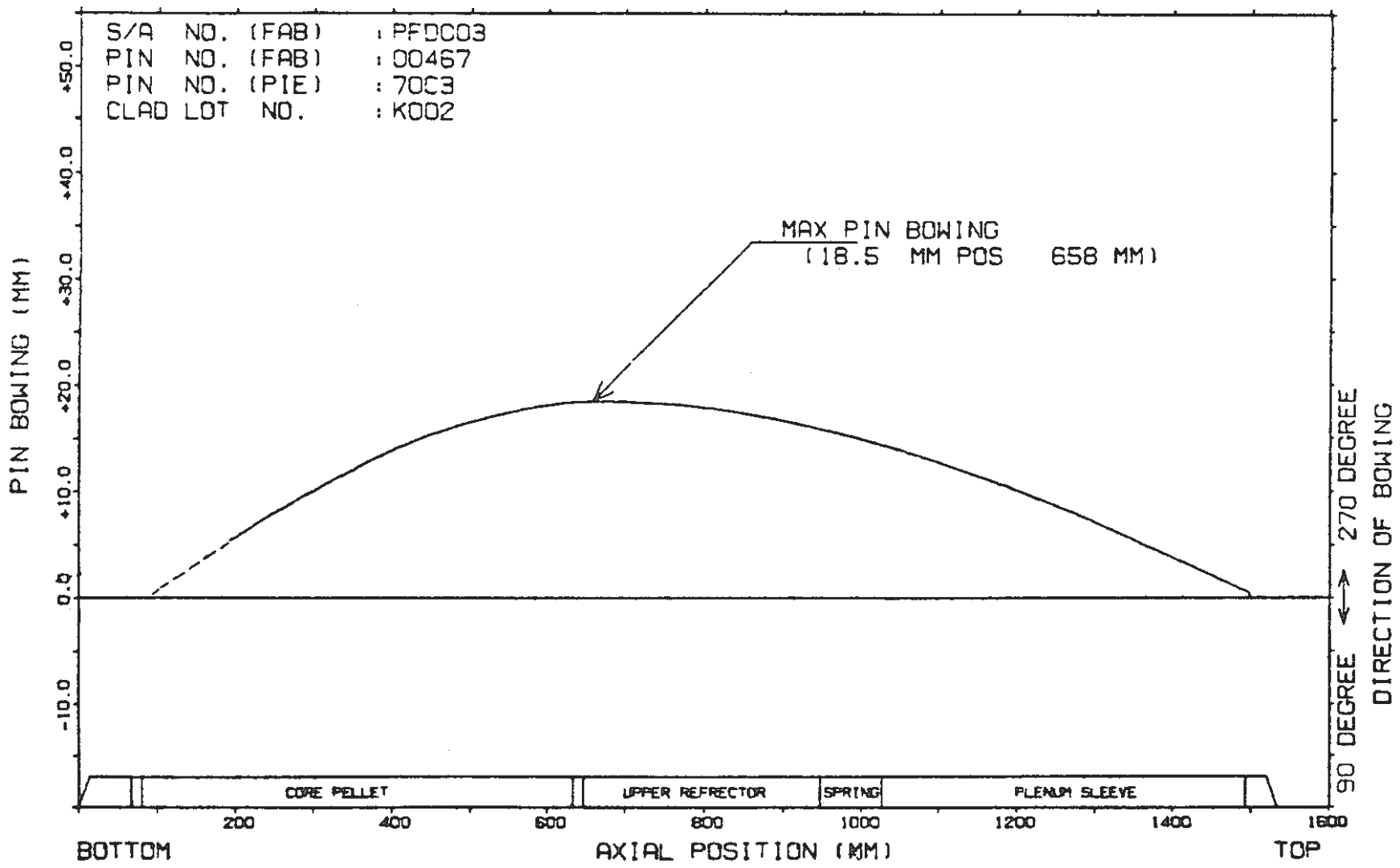


Fig. 14 Axial Profile of Fuel Pin Bowing (Pin No. 70C3)



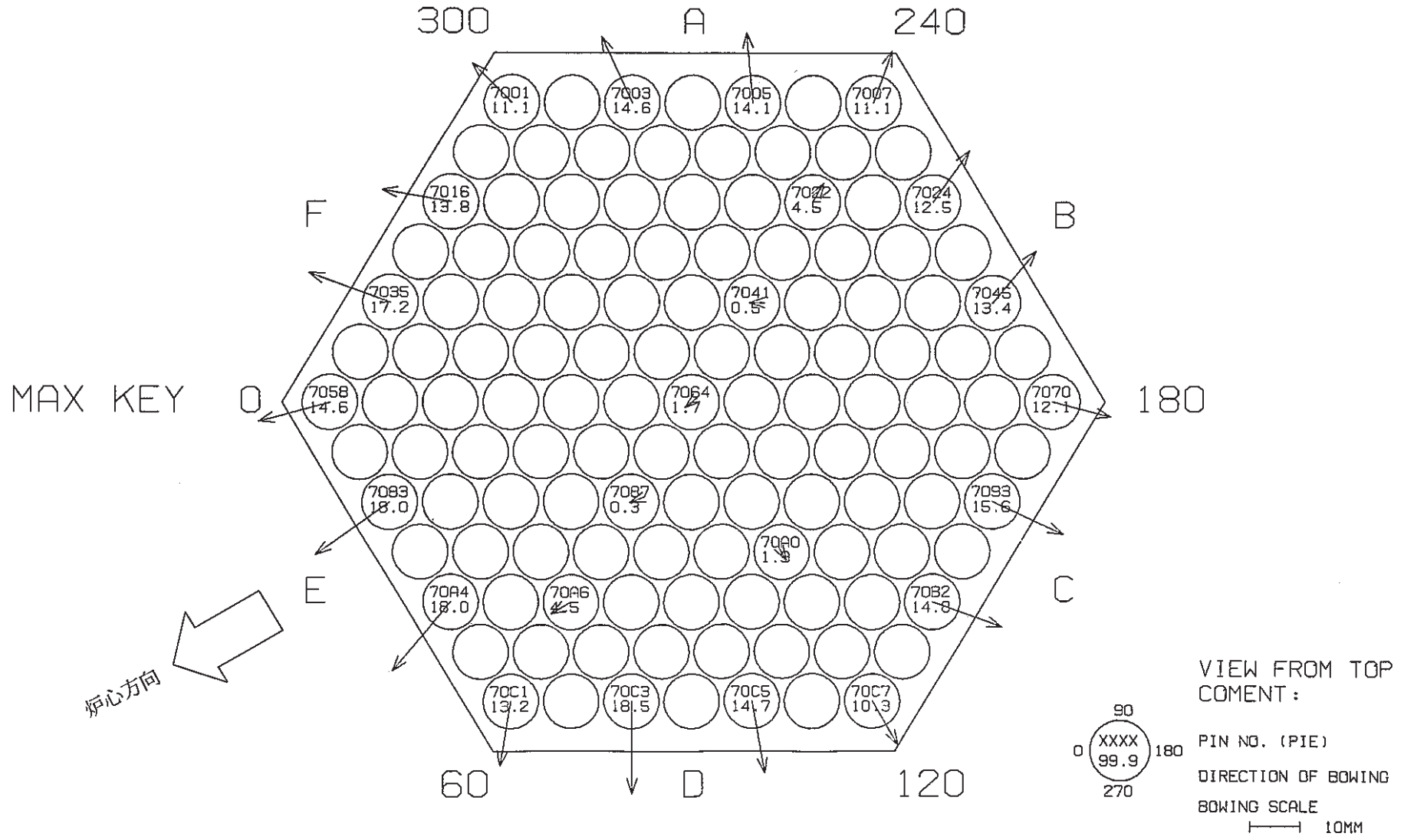


Fig. 15 Vectors of Pin Bowing in the Subassembly

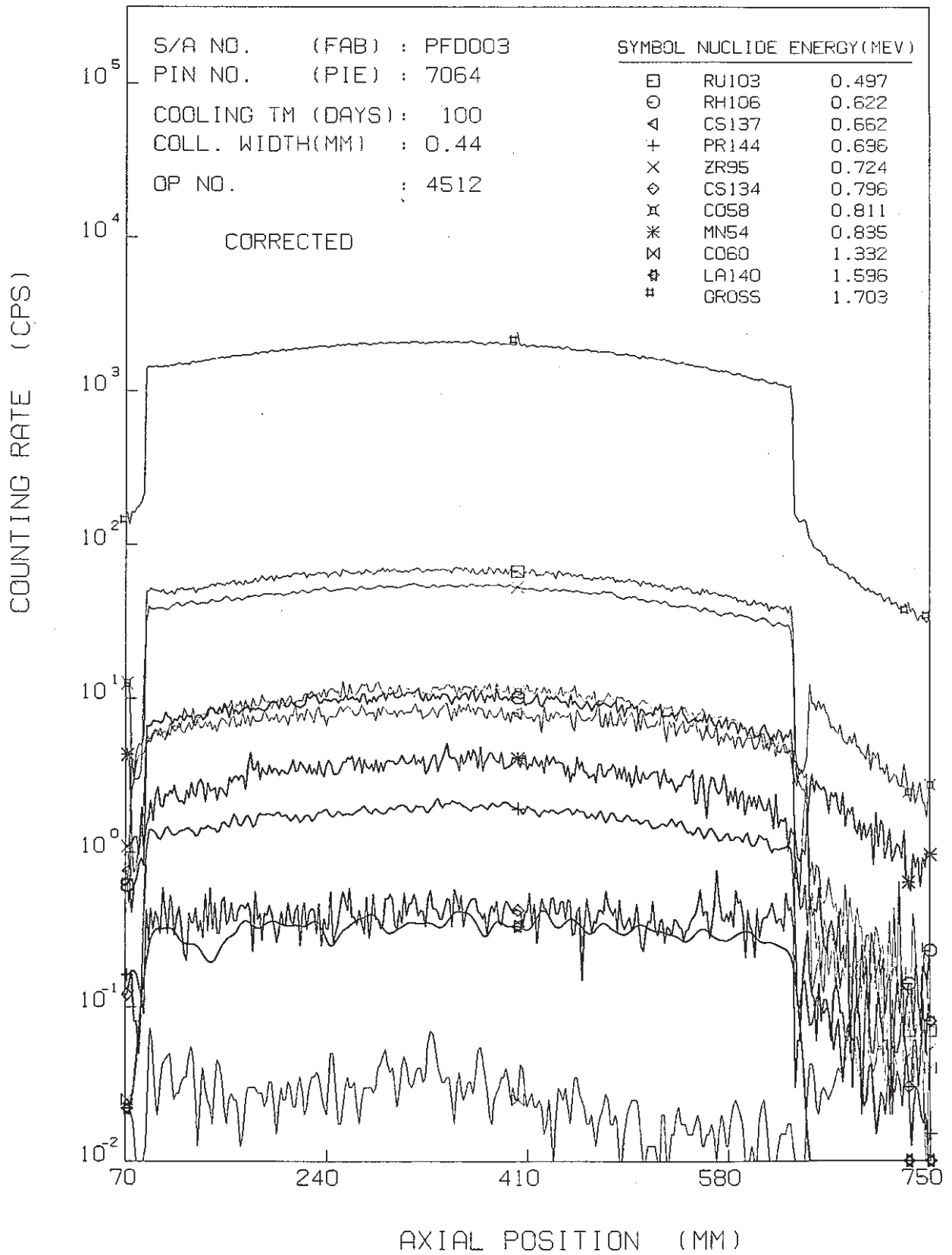


Fig. 16 Axial Distribution of Intensities of Individual Gamma-Ray Nuclide (Pin No. 7064)

# GAMMA-RAY SPECTROSCOPY

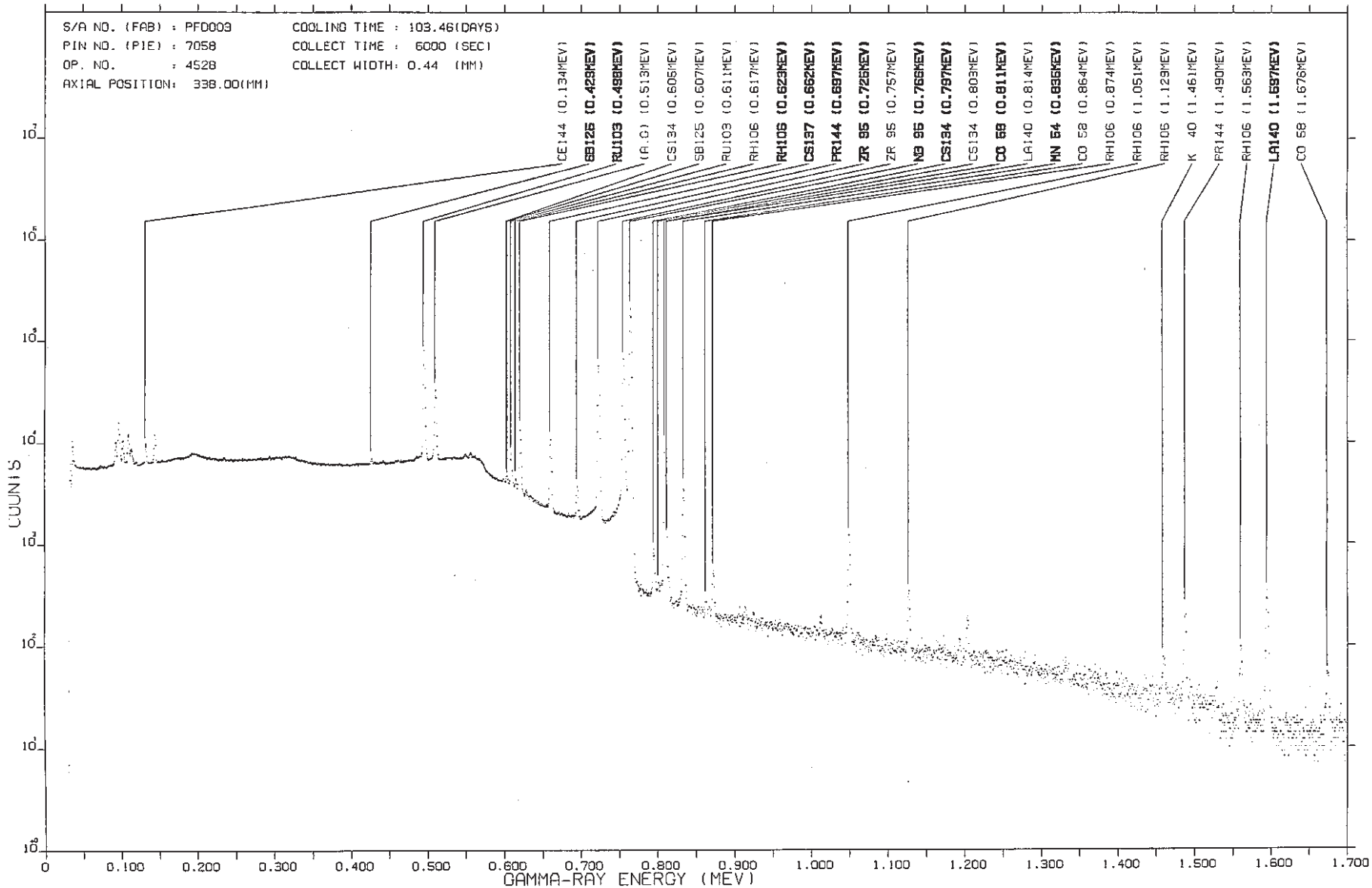
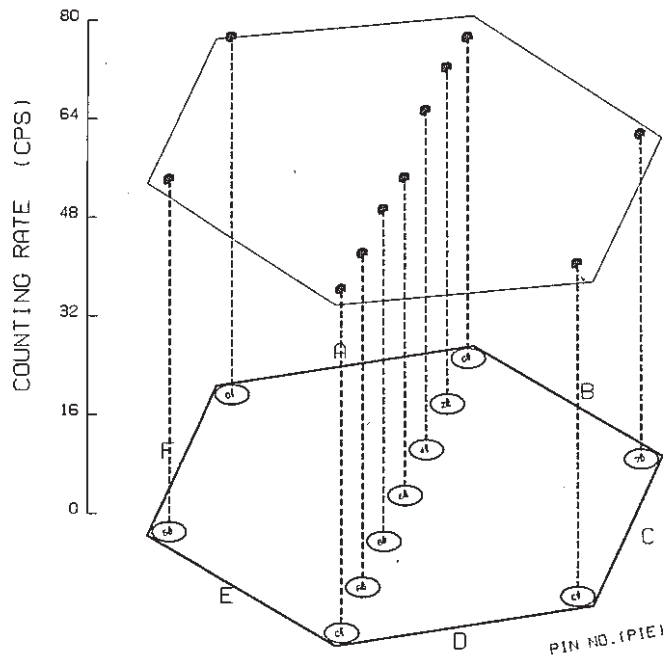
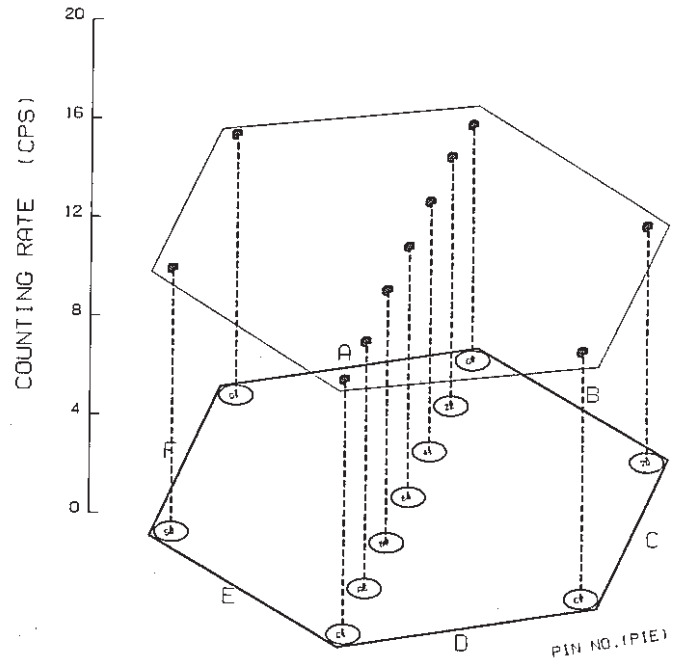


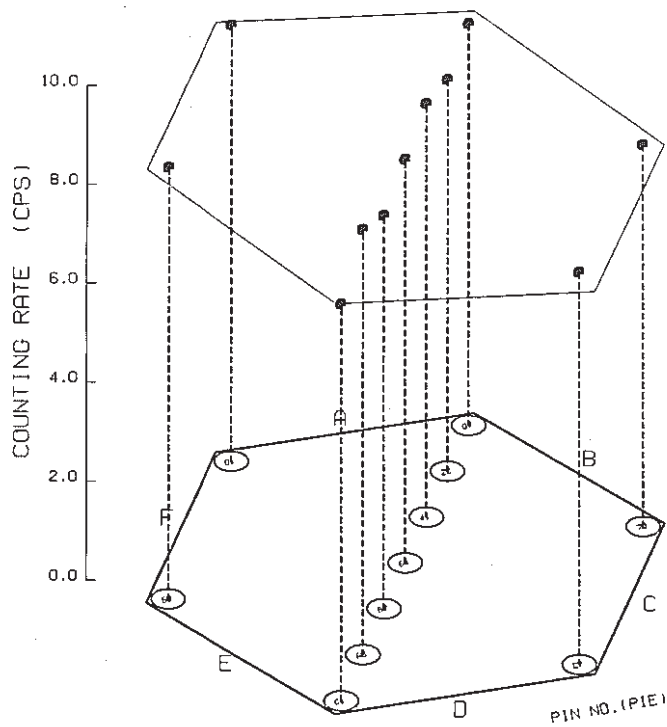
Fig. 17 Gamma Ray Spectroscopy (Pin No. 7058)



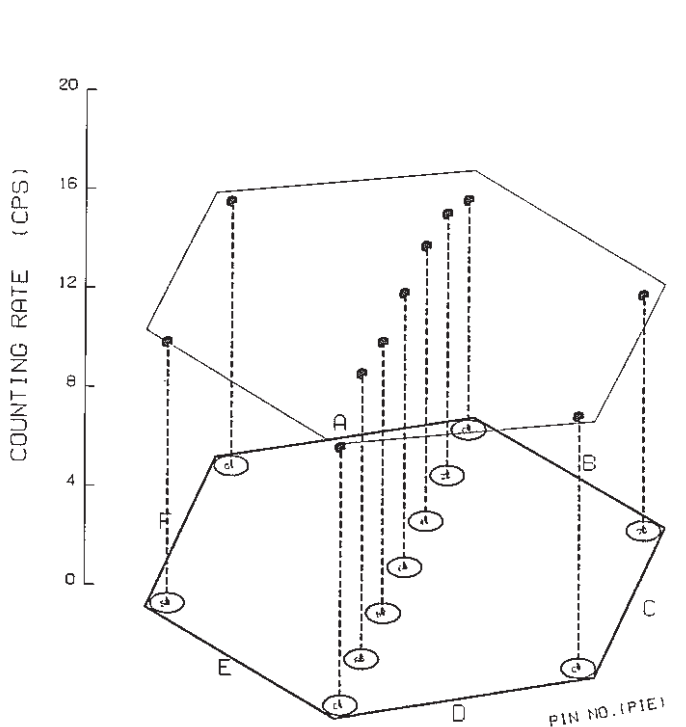
( ZR 95 0.724 MEV )



( RH106 0.622 MEV )



( CS137 0.662 MEV )



( CO 58 0.811 MEV )

Fig. 18 Radial Distribution of Intensities of Individual Gamma-Ray Nuclide





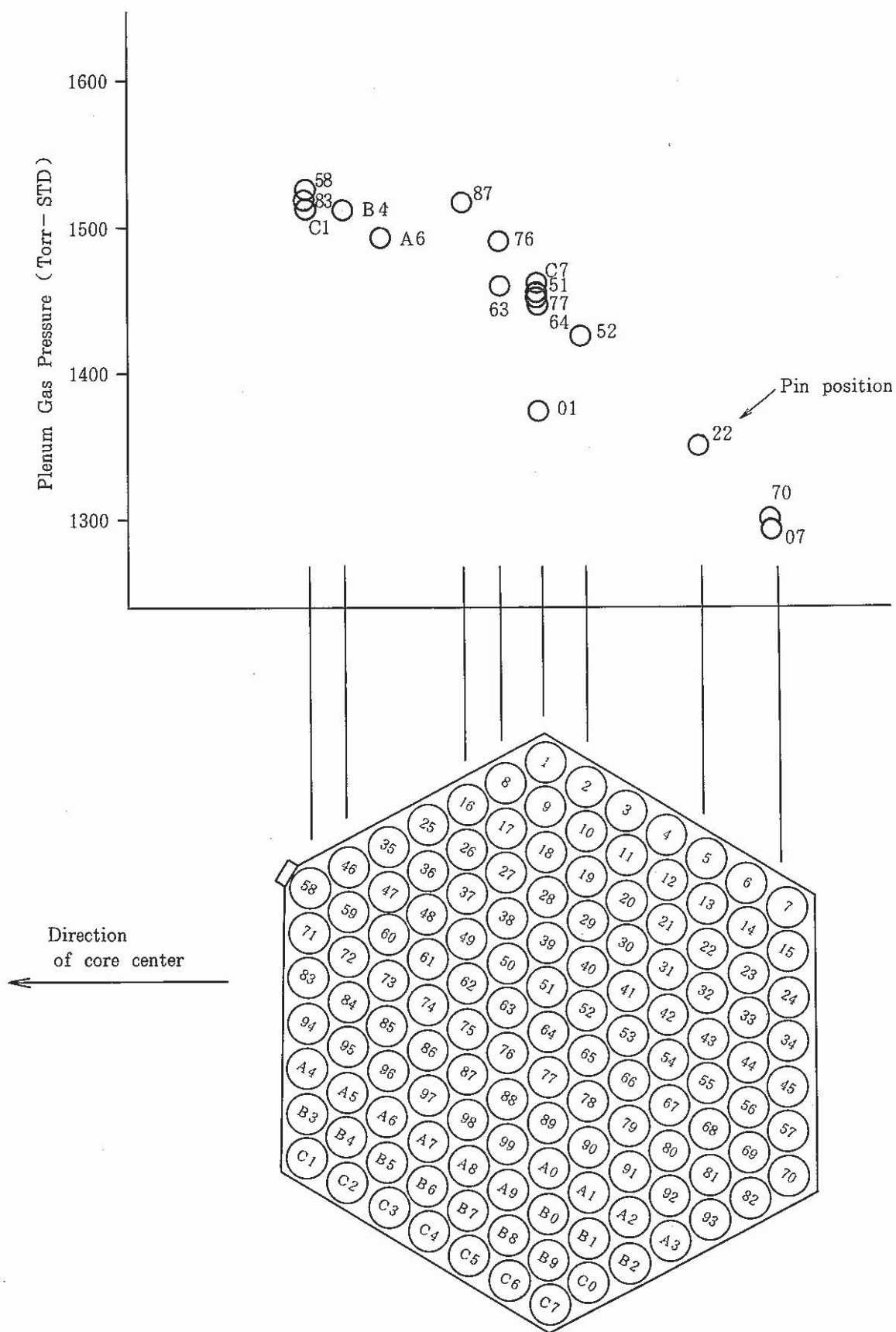


Fig. 20 Plenum Gas Pressure of tested Pins in the Subassembly

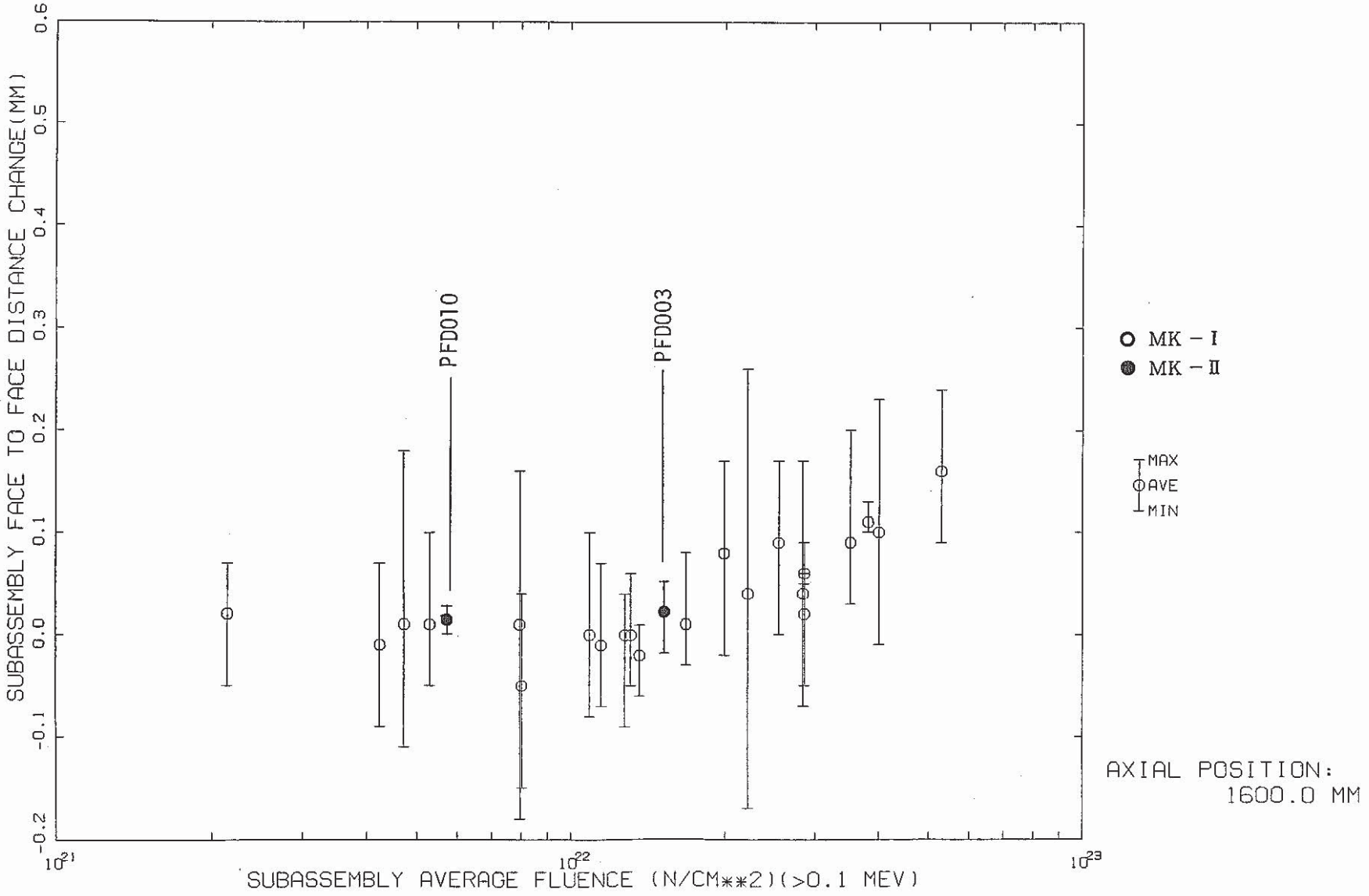


Fig. 21 Tendency of Face to Face Distance of Wrapper Tube of MK-I and MK-II Core Fuel Subassemblies as a Function of Average Neutron Fluence

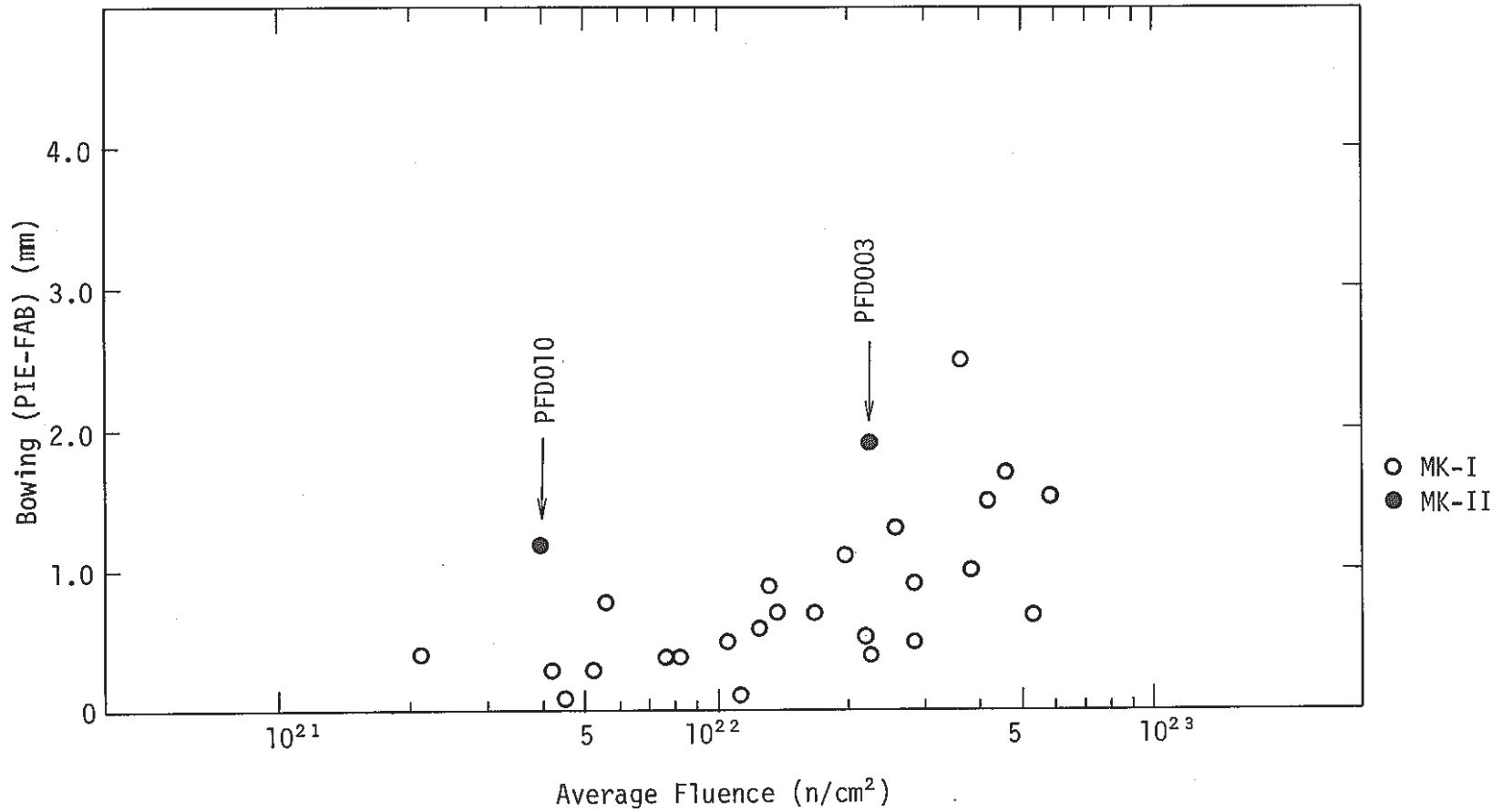
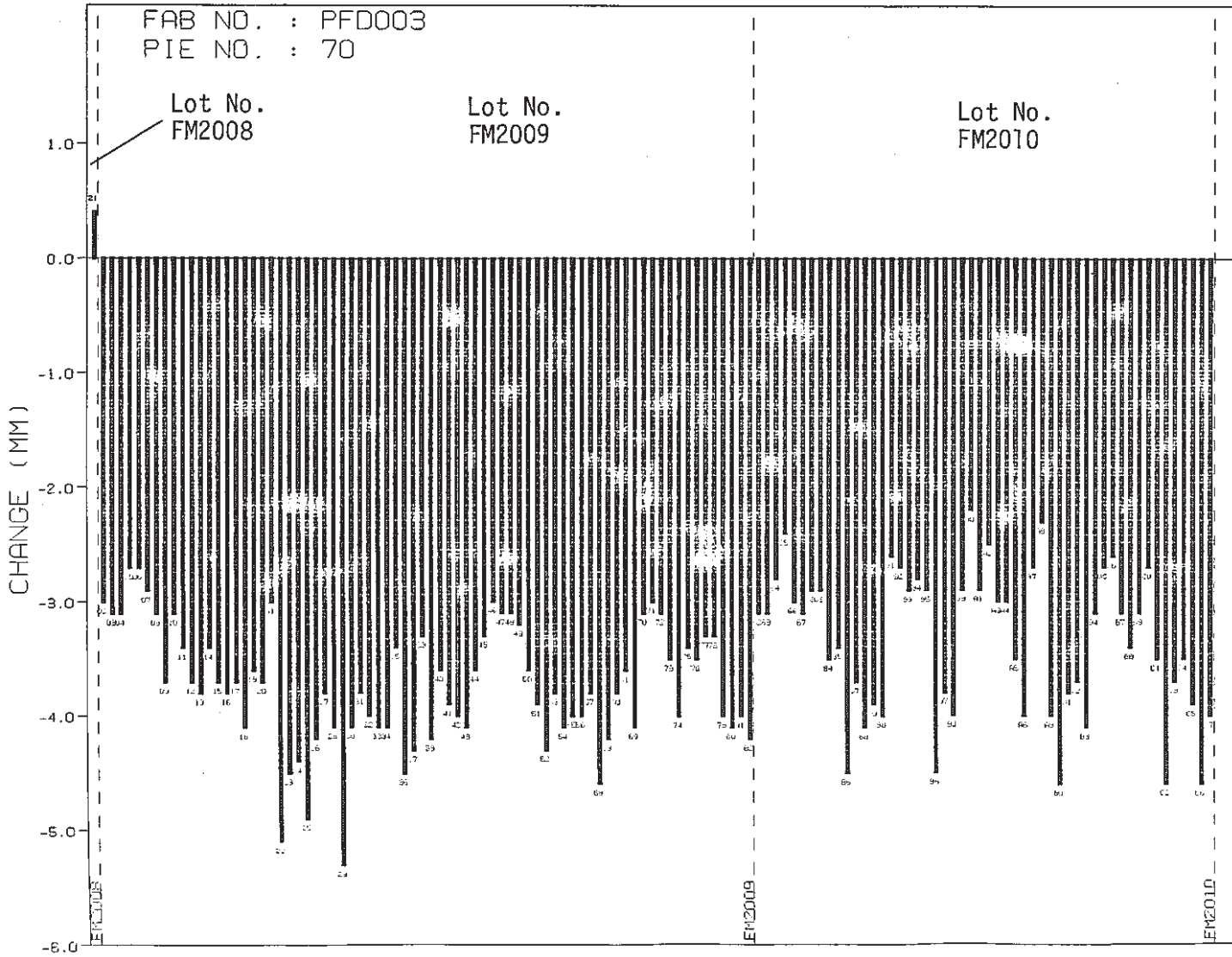


Fig. 22 Tendency of Subassembly Bowing of MK-I and MK-II Core Fuel Subassemblies as a Function of Average Fluence



CORE PELET LOT NO.	NO. OF DATA	AVE.	MAX.	MIN.
FM2008	1	0.4	0.4	0.4
FM2009	74	-3.7	-2.7	-5.3
FM2010	52	-3.4	-2.2	-4.6

Fig. 23 Fuel Stack Length Changes in the Subassembly (PFD003)

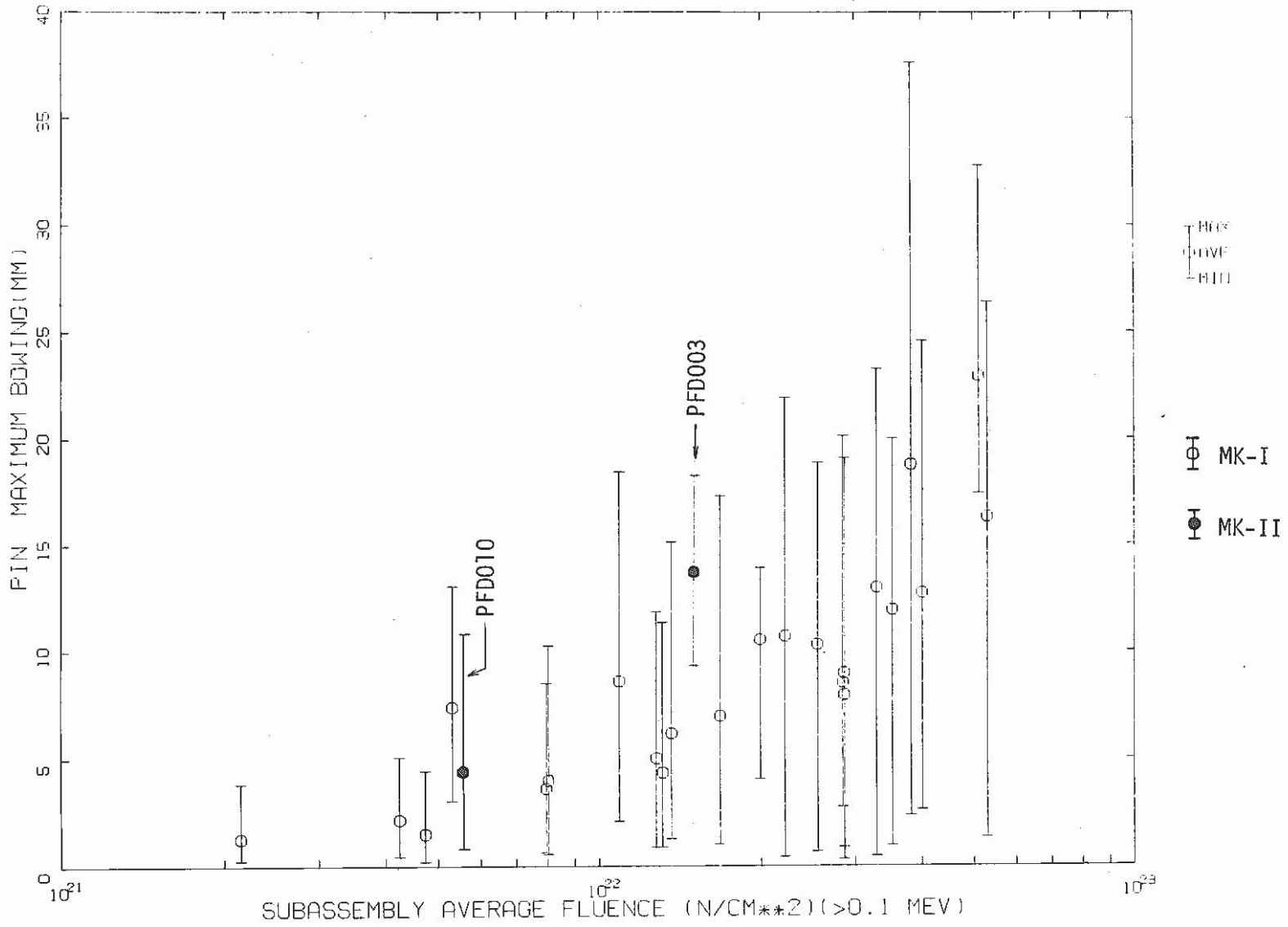


Fig. 24 Tendency of Maximum Fuel Pin Bowing of MK-I and MK-II Core Fuel Pin as a Function of Average Fluence



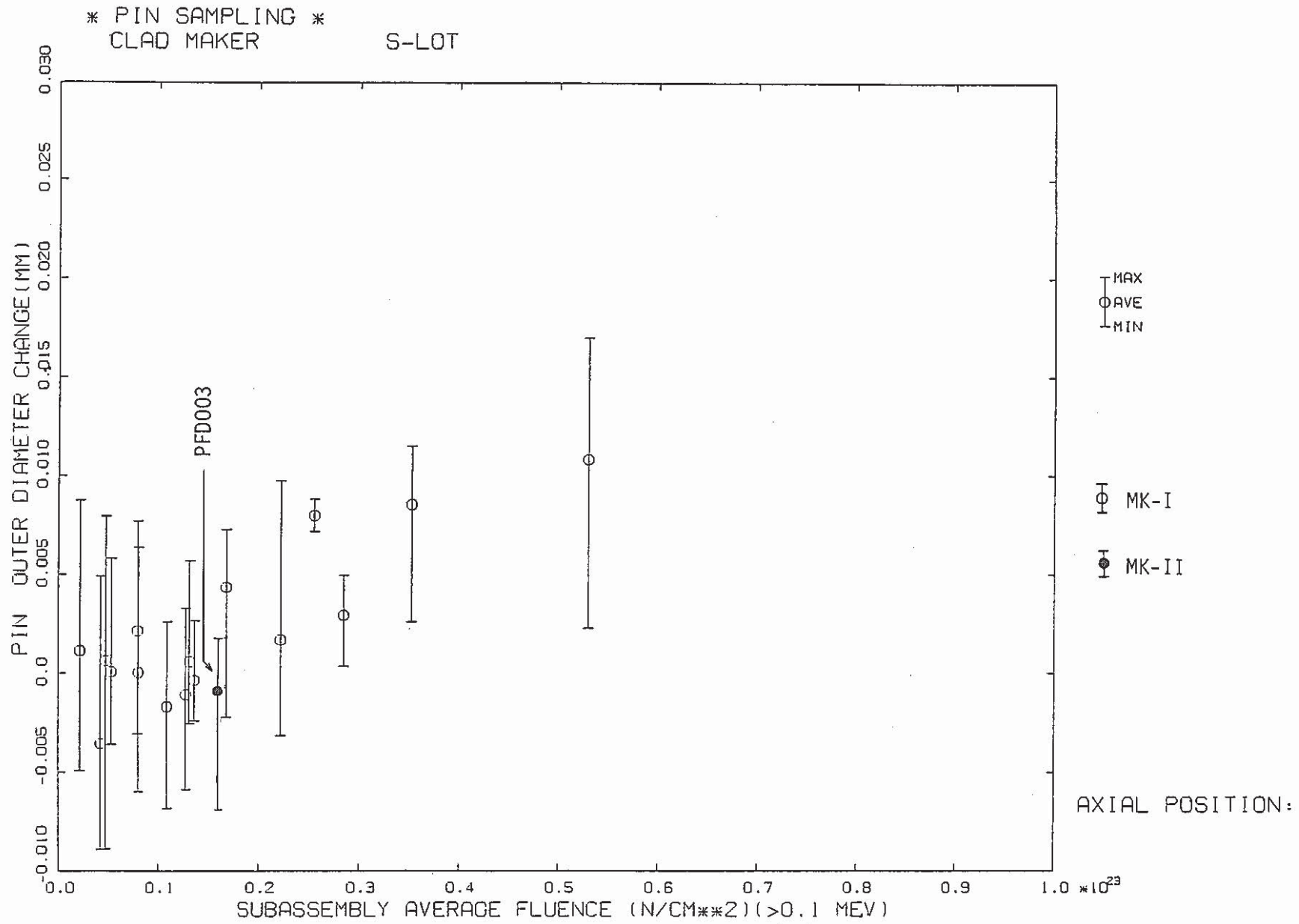


Fig. 25 Tendency of Fuel Pin Diameter Change of MK-I and MK-II, Core Fuel Pins as a Function of Subassembly Average Fluence (S-Tube)

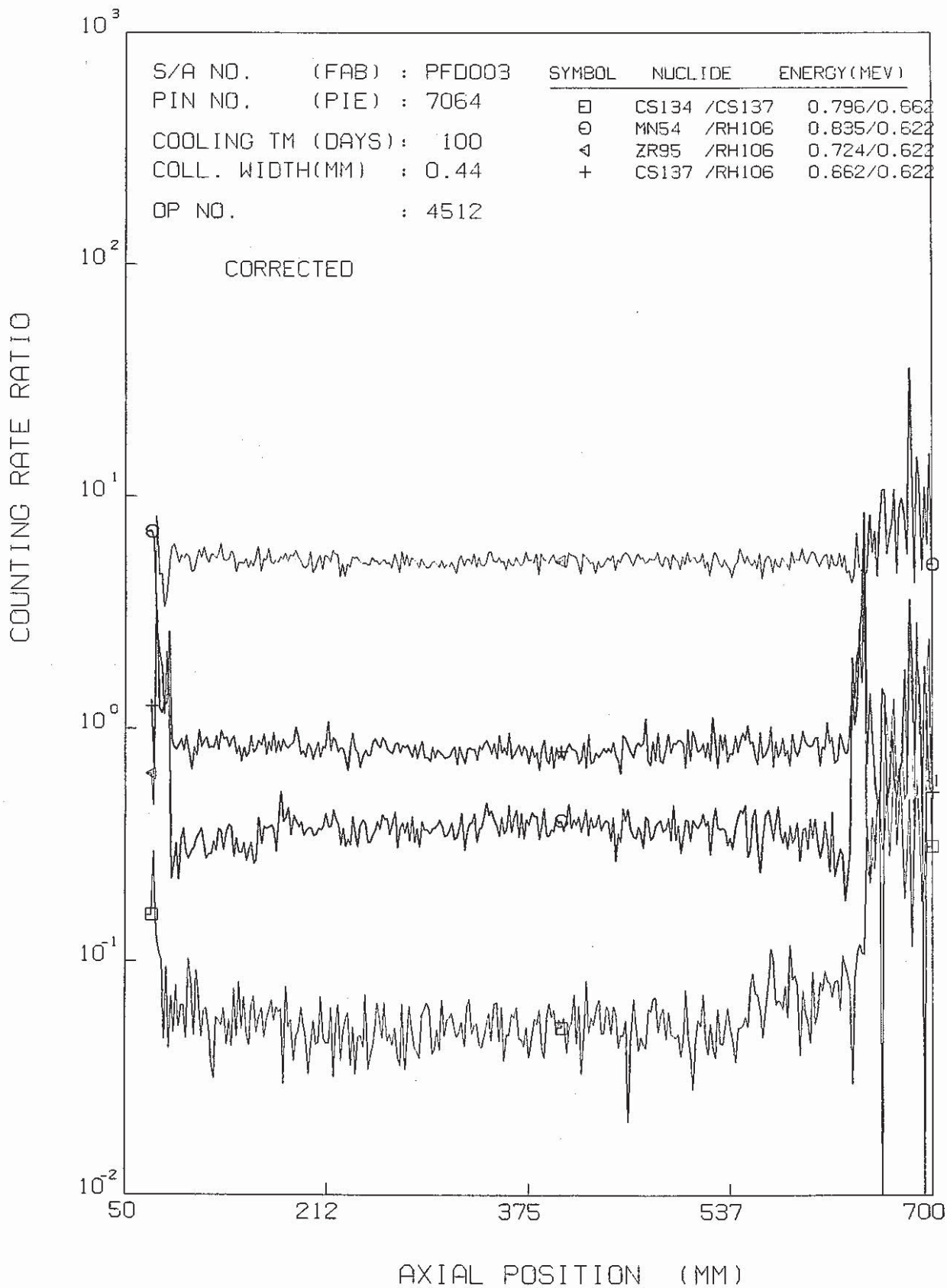


Fig. 26 Axial Distribution of Count Rate Ratio of Individual Gamma Emitters

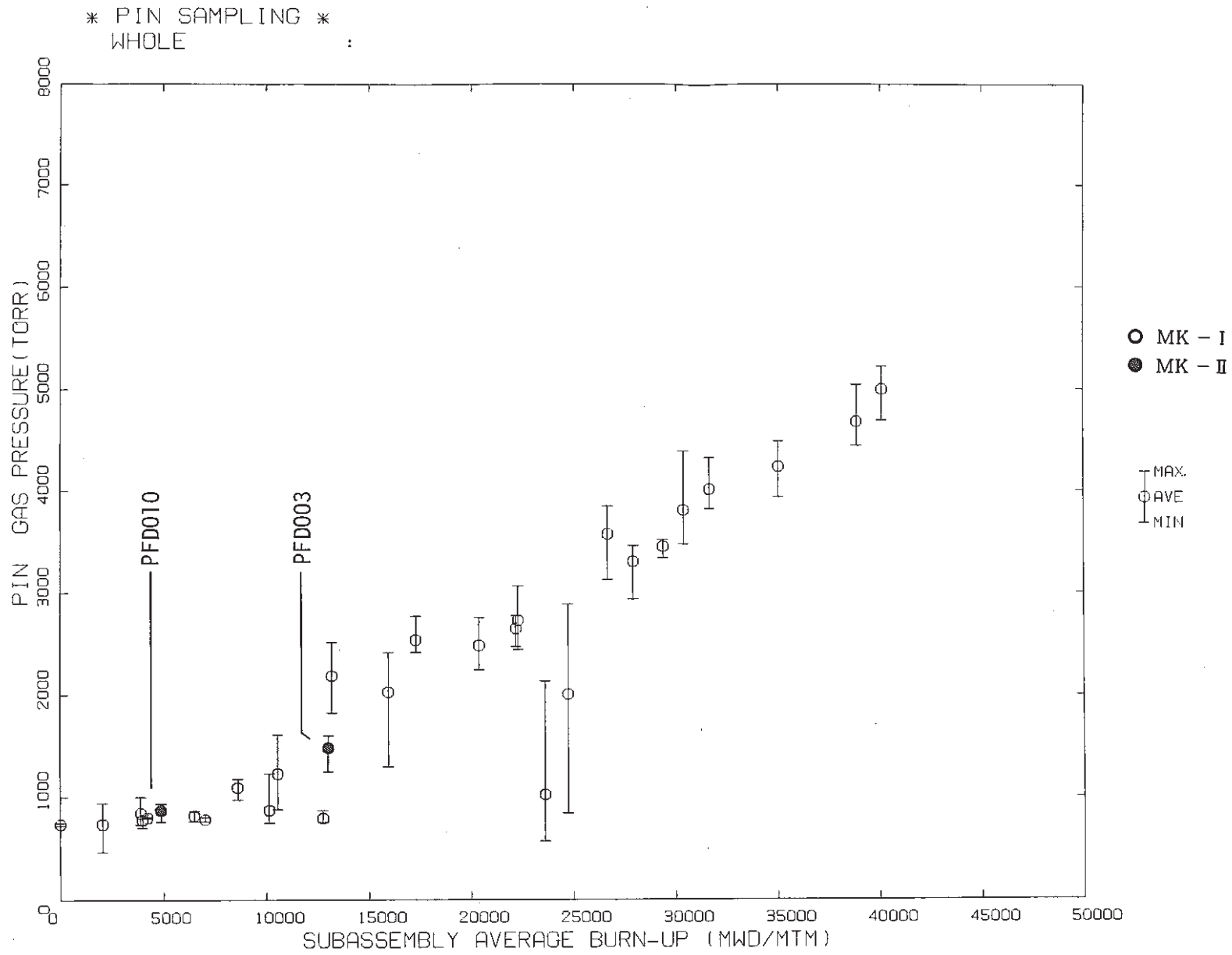


Fig. 27 Relation of Fuel Pin Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with Average Burnup

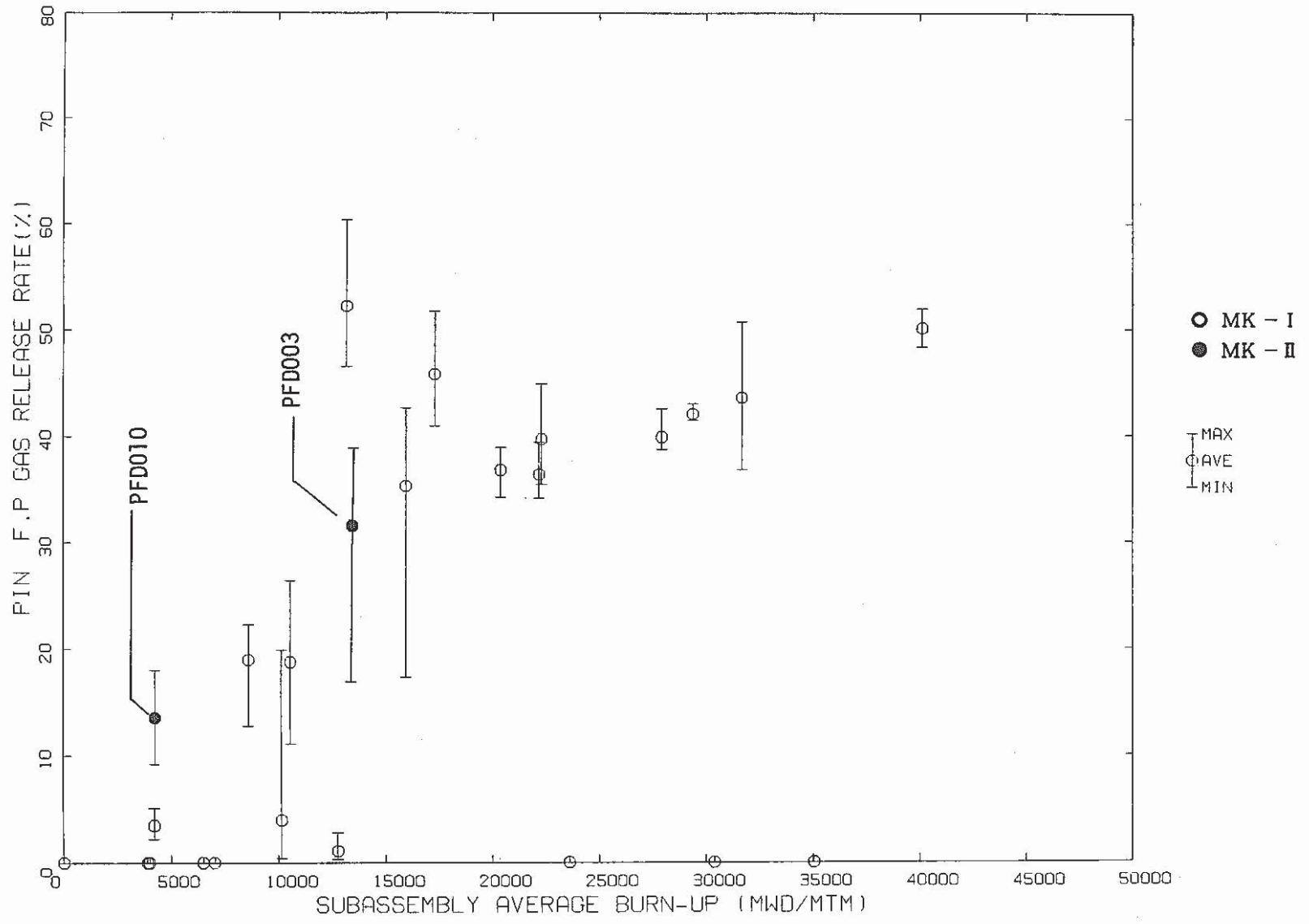
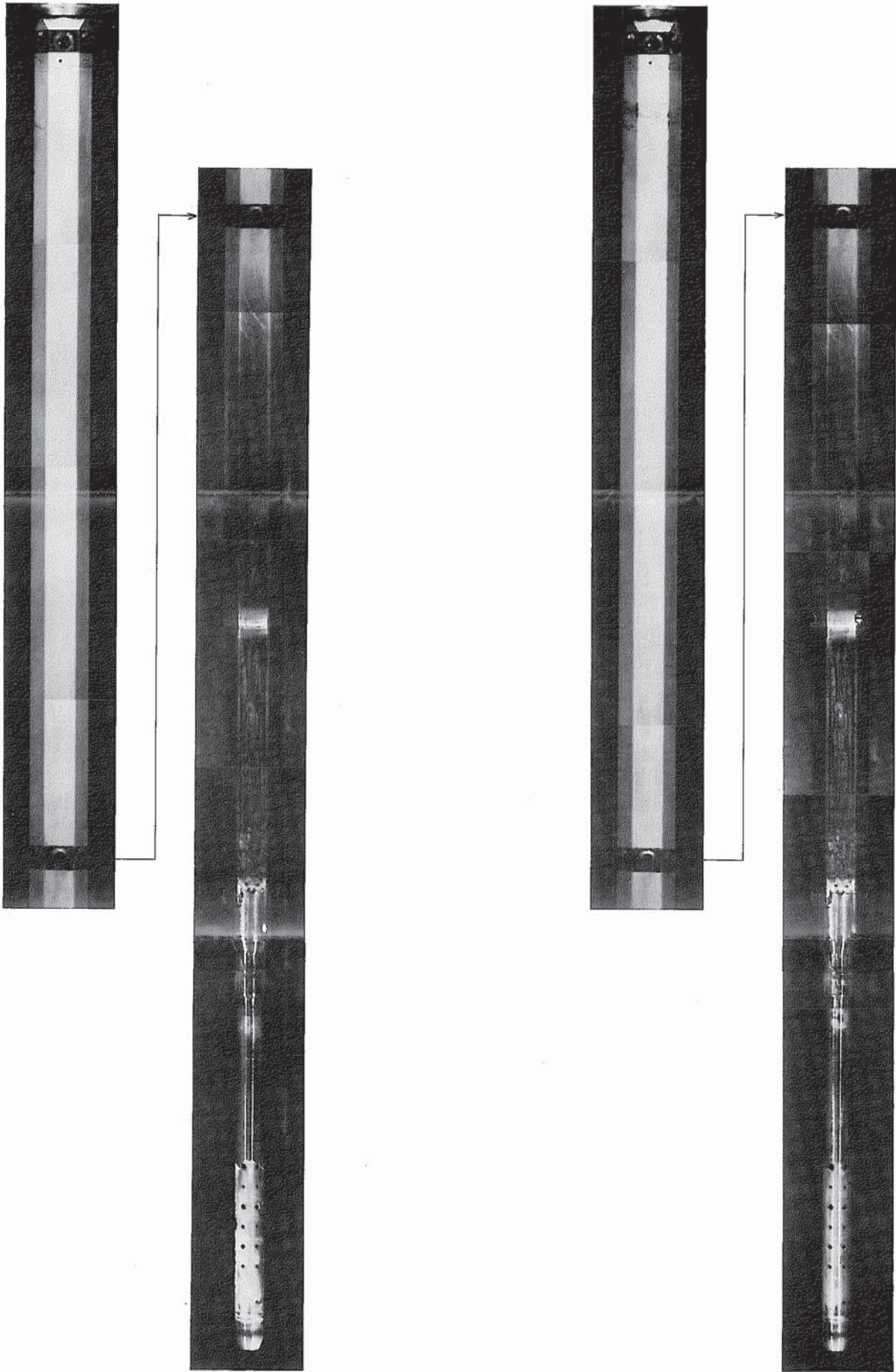


Fig. 28 Relation of Fission Gas Release Rate of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with the Average Burnup



(before)

FACE **F**

(after)

FACE **F**

Photo. 1 Surface Condition of the Subassembly before and after Sodium Removal (Visual Inspection)

**F841001**



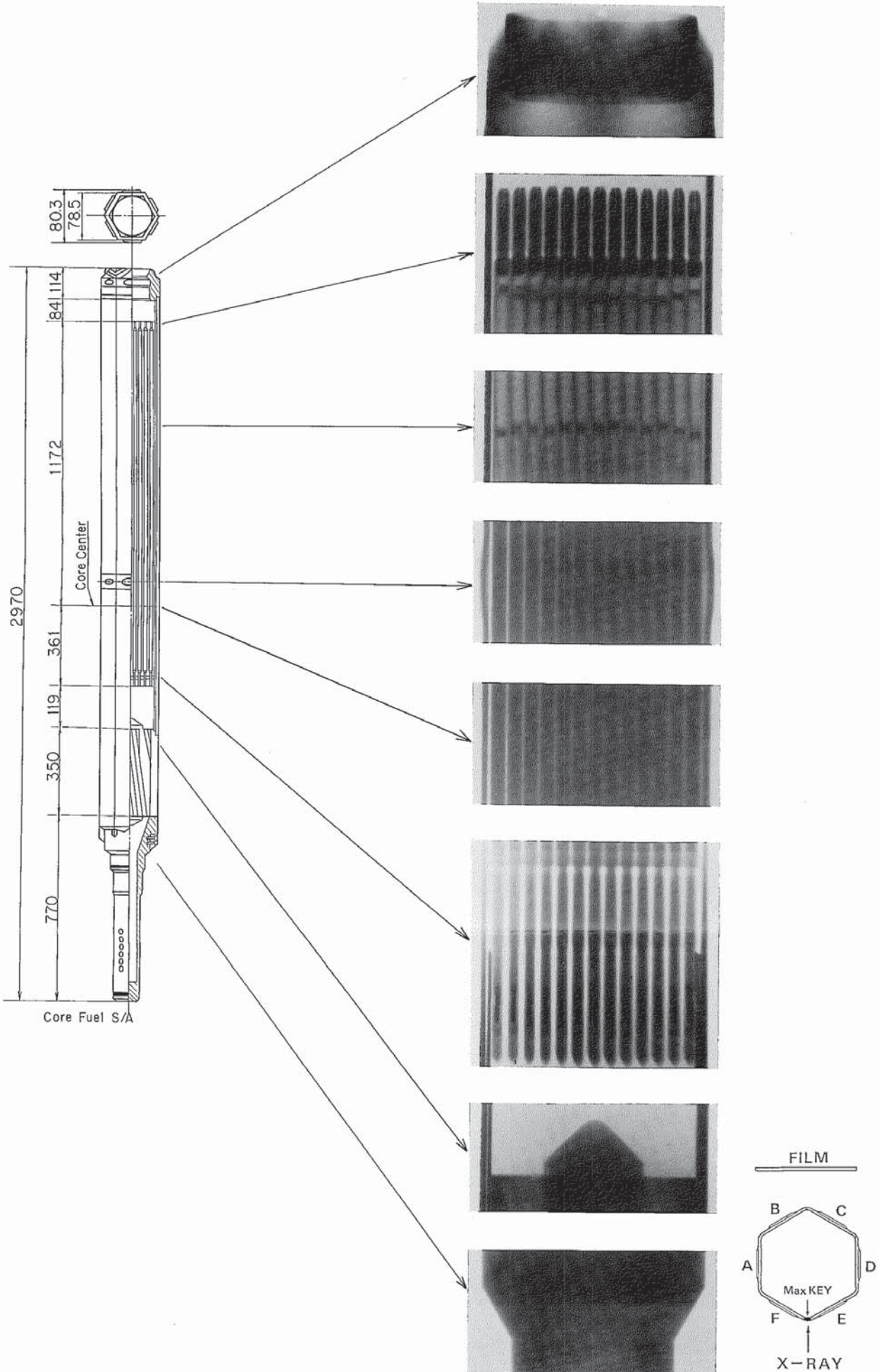
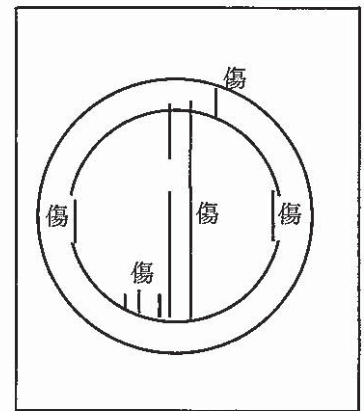
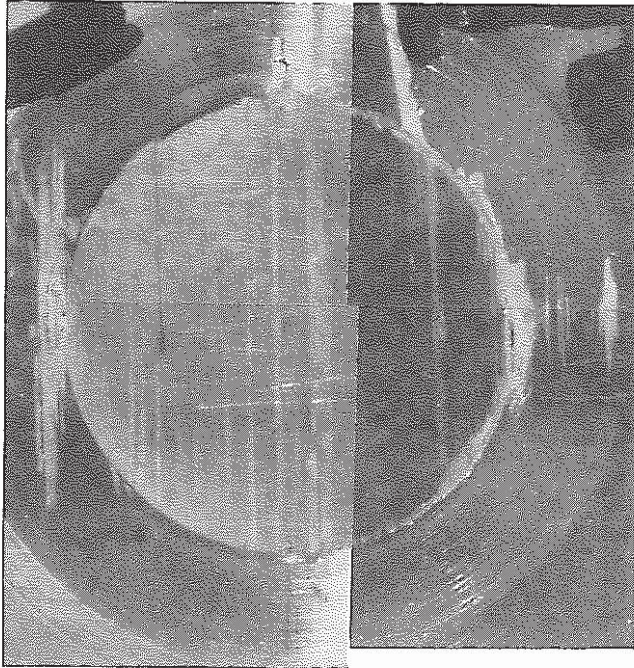


Photo. 2 X-ray Radiography of Subassembly

F842012



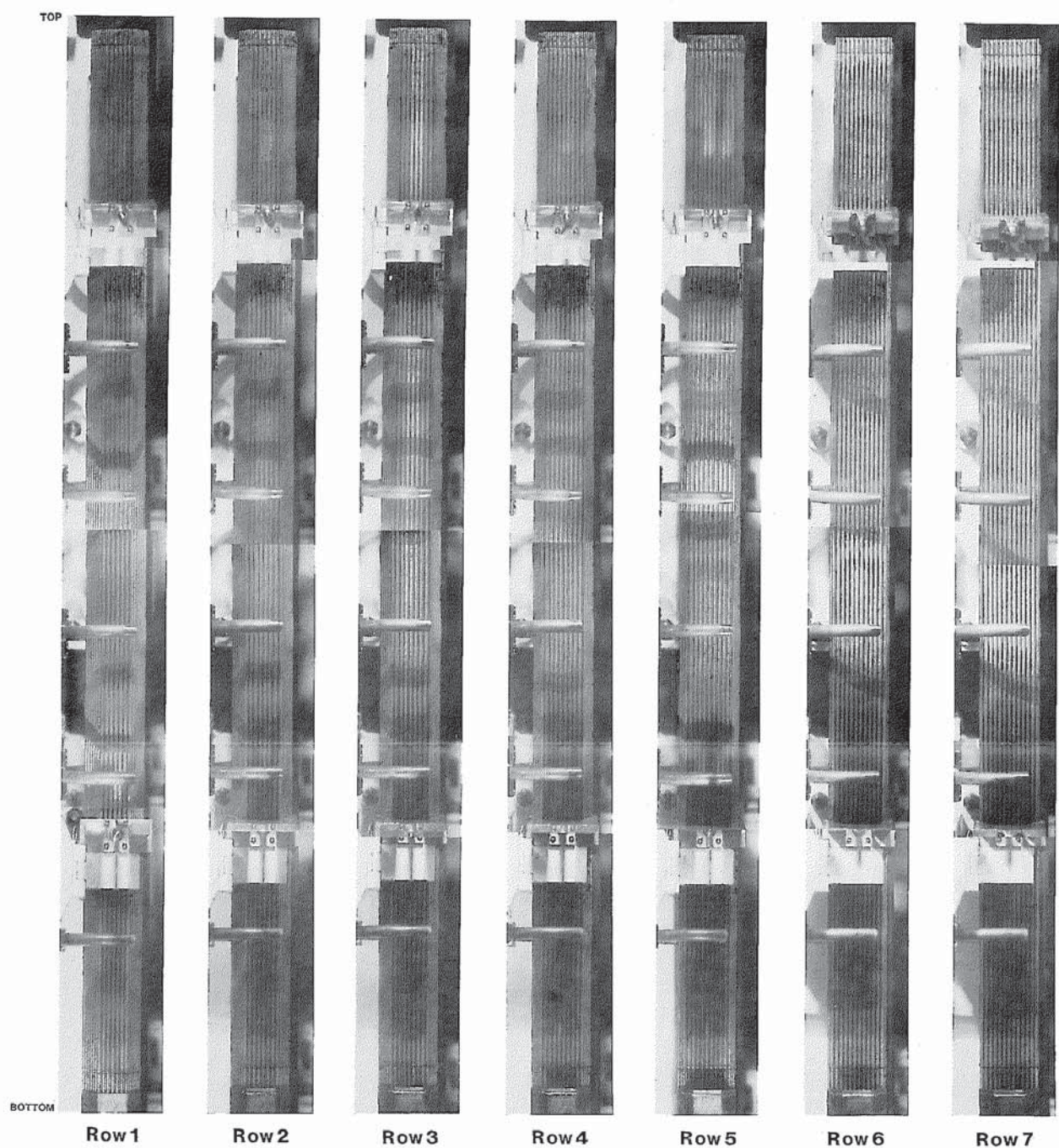
Top



スケッチ

Bottom

Photo . 3 Surface Condition of Middle Pad after Sodium Removal (Visual Inspection)

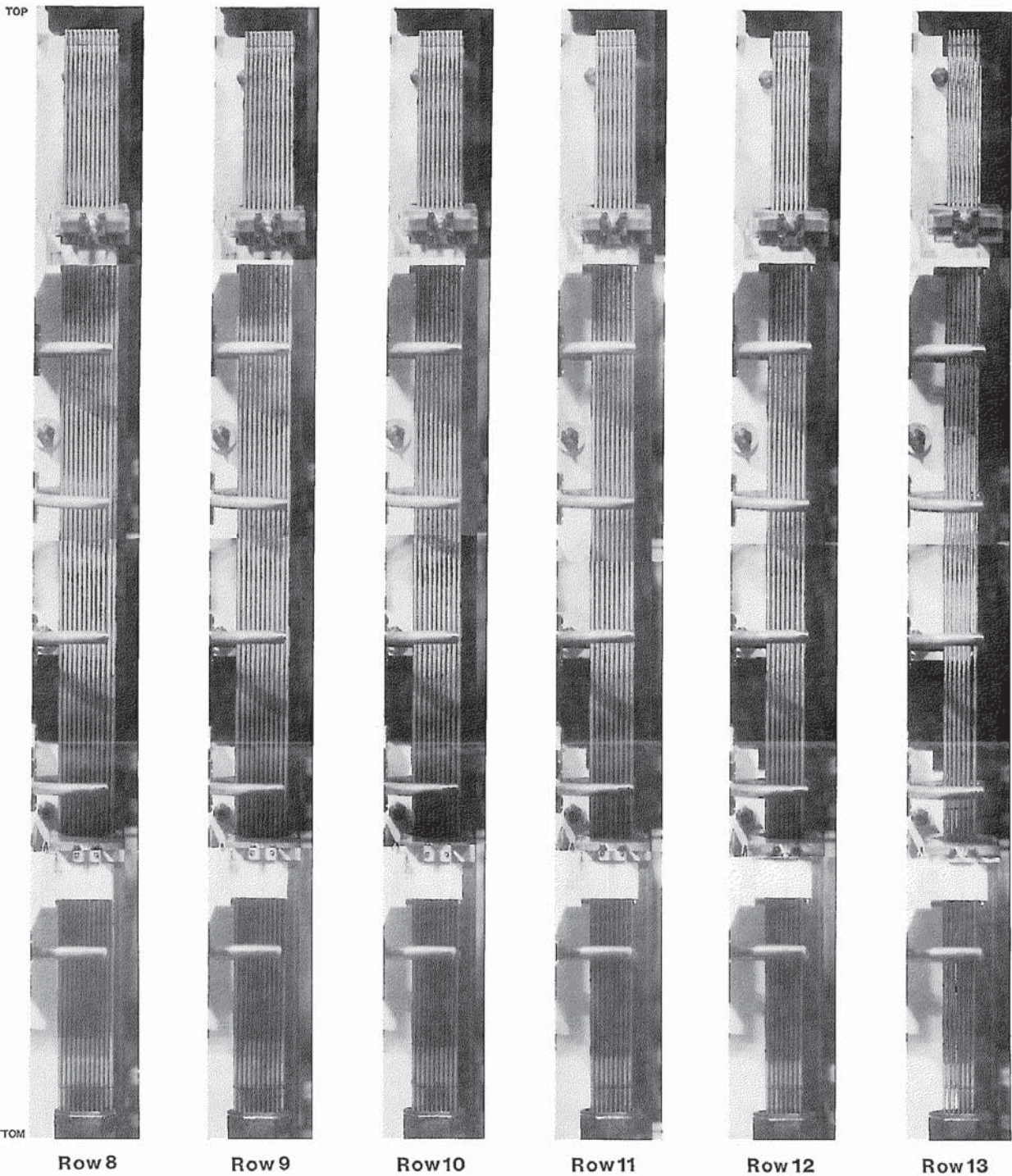


— 65 ~ 66 —

Photo. 4 Condition of Fuel Pin Bundle Observed at each Stage of Dismantling

F843006





- 67 ~ 68 -

Row 8

Row 9

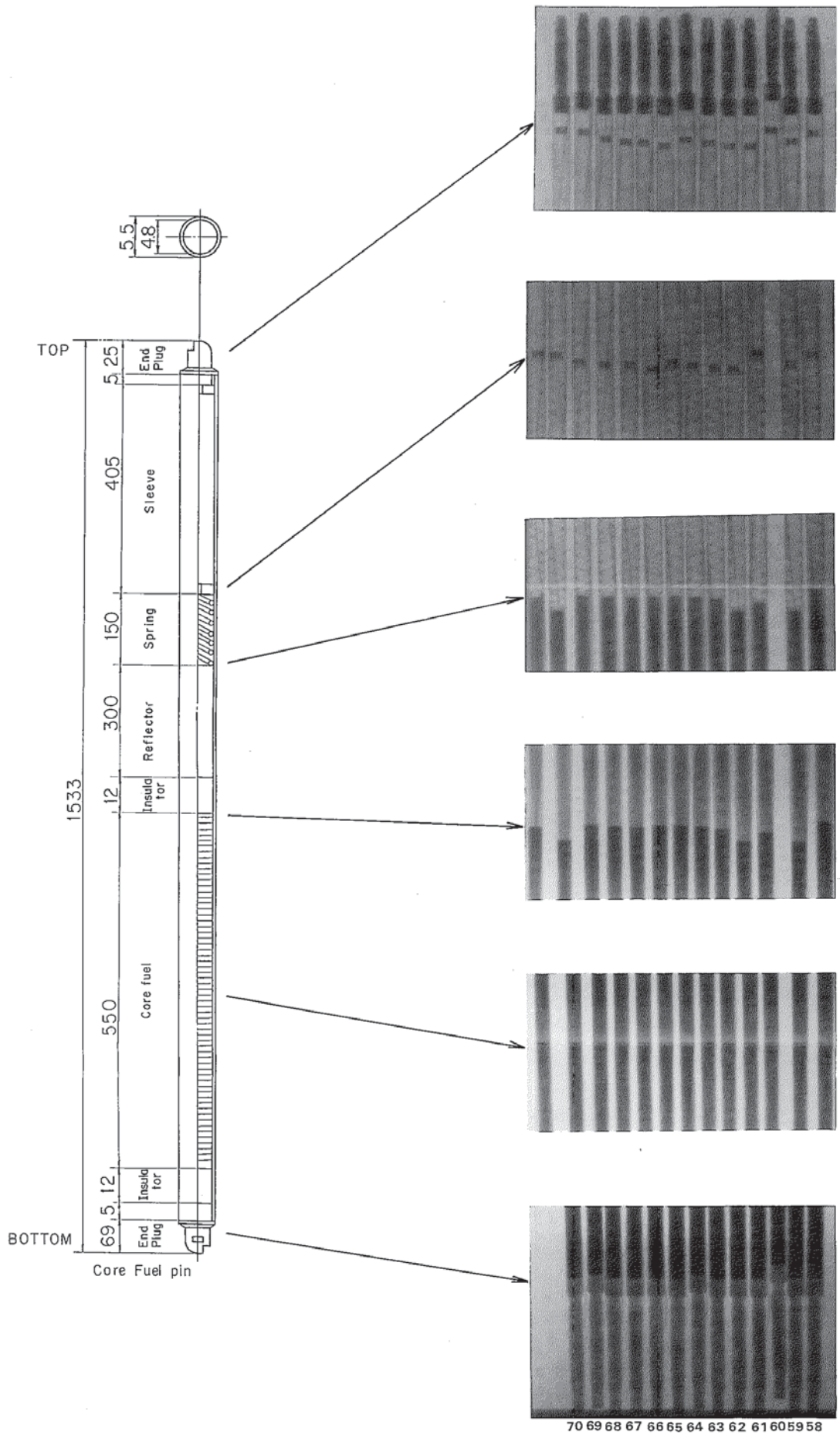
Row 10

Row 11

Row 12

Row 13

**F843007**

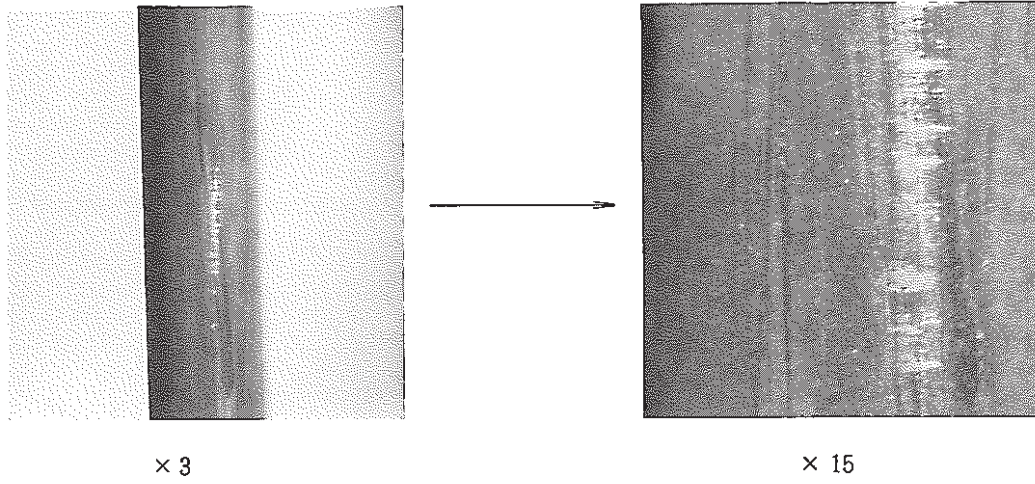


- 69~70 -

Photo. 5 Construction Condition inside of the Subassembly Observed by X-ray Radiography

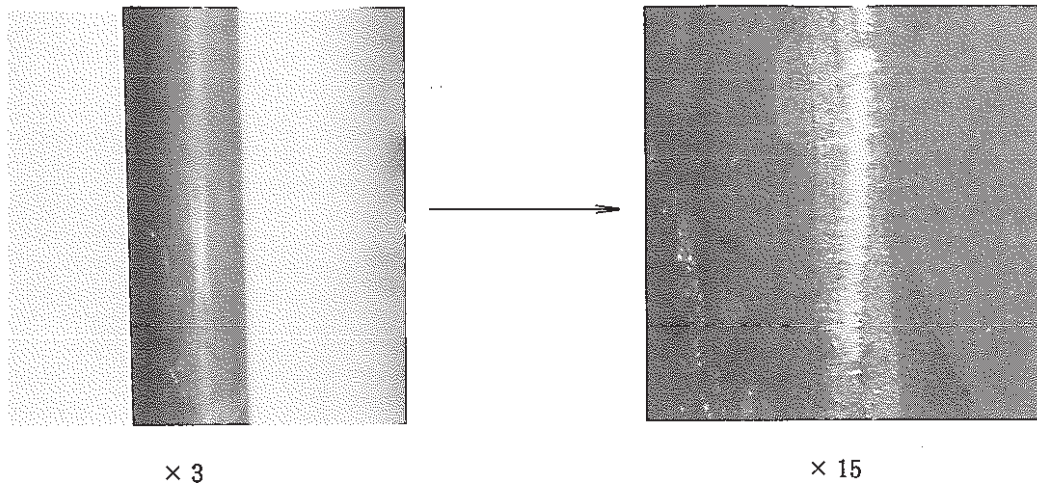
F844010





Pin No. 7058

Z 軸位置 303 mm  
 $\phi$  軸位置 58°



Pin No. 7083

Z 軸位置 266 mm  
 $\phi$  軸位置 83°

Photo.6 Contact Mark on Fuel Pin (Maximum)