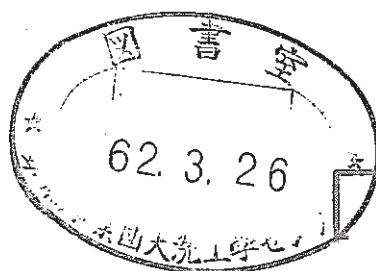


「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 (PFD036) の照射後試験(1)

— 集合体及び燃料要素の非破壊試験 —



1987年2月

技術資料コード	
開示区分	レポート No.
T	N9410 87-191
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体(PFD036)の照射後試験(1)

—— 集合体及び燃料要素の非破壊試験 ——

実施責任者 田地弘勝 *

報告者 川上幸男 * 小泉敦裕 * 新谷聖法 *

要 旨

「常陽」MK-II 炉心燃料集合体「PFD036」の照射後試験を実施した。本集合体は MK-II 炉出力 100 MW の出力上昇から第 7" (自然循環試験) サイクルの間照射されたものであり、初装荷炉心燃料中最長の炉内滞在期間を有するものである。照射後試験の目的は炉内長期滞在に伴う炉心燃料集合体及び燃料ピンの構造体としての健全性を確認すること、及び炉心最外列における集合体及び燃料ピン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 36,800 MWd/t である。

本試験の結果は下記のとおりである。

- (1) 集合体及び燃料ピンに損傷はなく、上部パッドの変色以外には変色及び変形等も認められず、炉内挙動は正常であり、炉心燃料集合体の構造体としての設計及び製作の妥当性が、初装荷炉心燃料集合体中最長の炉内滞在期間を有するものについて確認された。
- (2) MK-II における最長炉内滞在期間を有する炉心燃料集合体及び燃料ピンの照射挙動を確認し、次のような結果を得た。
 - ① ラッパ管対面間寸法変化率は MK-I に比べ大きいが、これは主に冷却材内外圧差の増加により照射クリープひずみが増加したことによるものと考えられる。
 - ② 被覆管の外径は製造時から増加していない。これは冷間加工度を MK-I の 10% から 20% へ変更したことにより、被覆管の耐スエリング性が向上したものと考えられる。
 - ③ 炉心最外列における集合体及び燃料ピンの照射挙動としては、 ^{137}Cs が燃料ピン径方向分布において隣接する反射体側に偏析していた程度であり、特に顕著なものは認められなかった。

* 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)

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 寸法測定	4
4.2.3 X線ラジオグラフィ	5
4.3 ピン試験	5
4.3.1 外観検査	5
4.3.2 X線ラジオグラフィ	6
4.3.3 重量測定	6
4.3.4 詳細外観検査	6
4.3.5 寸法測定	6
4.3.6 ガンマスキャン	7
4.3.7 パンクチャテスト	8
5. 結 果 の 検 討	9
5.1 集合体及び燃料ピンの健全性	9
5.1.1 集合体の健全性	9
5.1.2 燃料ピンの健全性	9
5.2 照射挙動評価	9
5.2.1 ラッパ管対面間寸法変化	9
5.2.2 燃料ピン外形形状変化	10
5.2.3 燃料ペレットスタック長変化	10
5.2.4 F.P.核種の挙動	11
5.2.5 ピン内圧変化及びF.P.ガス放出率	11
6. ま と め	12

7. 参 考 文 献	13
------------------	----

List of Tables

Table I	Differences in Specifications of the Core Fuel Subassembly between MK-I and MK - II	14
Table II.	Subassembly Irradiation Conditions	15
Table III	Pin Parts List	17
Table IV	Pin Outer Diameter and Total Length Changes	25
Table V	Axial Peaking Factors of the Subassembly Predicted and Measured by the Gamma - Scanning of Fuel Pins	26
Table VI	Radial Peaking Factors of the Subassembly Predicted and Measured by the Gamma - Scanning of Fuel Pins	26
Table VII	Results of Plenum Gas Analysis	27

List of Figures

Fig. 1	In Reactor Location of the Subassembly (PFD036)	28
Fig. 2	Axial Profile of Burnup of a Center Pin	29
Fig. 3	Axial Profile of Linear Heat Rate of a Center Pin	30
Fig. 4	Axial Profile of Fuel Temperature of a Center Pin	31
Fig. 5	Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature of a Center pin	32
Fig. 6	Pins Selected for the Examination	33
Fig. 7	Pin Loading Diagram	34
Fig. 8	Wrapper Tube Face to Face Distance (A - D face)	35
Fig. 9	Wrapper Tube Face to Face Distance (B - E face)	36
Fig. 10	Wrapper Tube Face to Face Distance (C - F face)	37
Fig. 11	Bowing Vector of the Subassembly	38
Fig. 12	Surface Temperature Profile of the Subassembly in Axial Direction	39
Fig. 13	Fuel Stack Length Changes in the Subassembly	40
Fig. 14	Pin Weight Changes	41
Fig. 15	Axial Profile of Fuel Pin Outer Diameter	42

Fig. 16	Bowing Vectors of Pins	43
Fig. 17	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 9358)....	44
Fig. 18	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 9364)....	45
Fig. 19	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 9370)....	46
Fig. 20	Radial Distribution of Gamma Ray Intensity in the Sub-assembly (^{95}Zr , 0.725 MeV)	47
Fig. 21	Emission Tomographs of Radionuclides in a Fuel Pin (Pin No. 9370)	48
Fig. 22	Plenum Gas Pressure	49
Fig. 23	Wrapper Tube Face to Face Distance Changes as a Function of the Subassembly Maximum Fluence	50
Fig. 24	Wrapper Tube Face to Face Distance Change and 1/3 Swelling Rate at Axial Core Center	51
Fig. 25	Pin Outer Diameter Changes of MK-I and MK-II Core Fuel Pin as Function of Subassembly Maximum Fluence	52
Fig. 26	Pin Maximum Bowing as a Function of Subassembly Average Fluence	53
Fig. 27	Fuel Stack Length Change of MK-I and MK-II Core Fuel as a Function of Subassembly Average Burnup	54
Fig. 28	Plenum Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins as a Function of Subassembly Average Burnup	55
Fig. 29	Fission Gas Release Rate of MK-I and MK-II Core Fuel Pins as a Function of Subassembly Average Burnup	56

List of Photographs

Photo. 1	Surface View of the Subassembly	57
Photo. 2	Surface View of the Upper Pad (A - face)	59
Photo. 3	X-ray Radiographs of the Subassembly	61
Photo. 4	View of Fuel Pin Bundle Observed at each Stage of Disassembling.....	63
Photo. 5	View of Pin-Hold Observed at each Stage of Disassembling ...	65
Photo. 6	Construction Condition inside of the Subassembly Observed by X-ray Radiography	67
Photo. 7	Contact Mark on a Fuel Pin	69

1. ま え が き

「常陽」MK－Ⅱ初装荷炉心燃料集合体は現在までに5体が照射後試験^{(1)～(5)}に供され、認可燃焼度50,000MWd/tまでの健全性が確認されている。この間燃焼度をパラメータとした照射挙動データが蓄積されてきた。⁽⁶⁾

今回の炉心燃料集合体「PFD 036」は、MK－Ⅱ炉心出力の100 MW出力上昇から第7"（自然循環試験）サイクルの間、炉内装荷位置4B1で照射され、集合体平均燃焼度は36,800MWd/tであり、初装荷炉心燃料集合体中最長の炉内滞在期間を有するものである。本集合体の照射後試験は、

(1) 炉内長期滞在に伴う集合体及び燃料要素の健全性の確認

(2) 炉心最外列における照射挙動の把握

を目的として実施された。

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、六角形状のラッパ管内に装荷されたもので、ラッパ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はほぼ同一である。

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 ϕ 、内径 4.8 mm ϕ 、燃料／ペレット間直径ギャップは公称 200 μ 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、バンドル内のポロシティ／リング比は約 0.127 mm でこれも MK-I でのポロシティ／リング比 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。炉心燃料集合体の仕様を MK-I 燃料と比較して Table I に示す。

3. 照 射 条 件

3.1 炉内照射位置

本集合体「PFD 036」は、100MW の出力上昇から第7"（自然循環試験）サイクルまで炉内装荷位置 4B1 で照射された。Fig. 1 に示す通り、装荷位置 4B1 は炉心最外列に位置し、炉心燃料集合体及び内側反射体それぞれ3体と接する。「PFD 036」装荷期間中、隣接集合体の交換が4度行われており、その内訳は、4A4で2回、3B1及び、4B2でそれぞれ1回、いずれも炉心燃料集合体の交換であった。

3.2 集合体照射条件

集合体平均燃焼度は $36,800\text{MWd/t}$ 、線出力は最大 238 W/cm 、被覆管最高温度は約 568°C である。照射条件を Table II⁽⁷⁾ に示す。

3.3 ピン照射条件

「常陽」炉心要素照射評価システム（ESPRIT-J CODE）により計算された集合体中心ピンの照射条件を Fig. 2 ～ 5 に示す。

4. 試 験 結 果

4.1 試料の取扱い

本集合体は「常陽」サイトでナトリウム洗浄され、キャスク渡しにて照射燃料集合体試験施設（FMF）に搬入された。従来、「常陽」サイトで洗浄済の集合体について、搬入後再びナトリウム洗浄を実施してきたが、炉心燃料集合体の場合、洗浄性が良くこれまでの経験からナトリウムの付着がほとんどないことが分かっているため、本集合体は再度のナトリウム洗浄を実施せず照射後試験に供した。

集合体試験としては、外観検査、寸法測定及びX線ラジオグラフィを実施した後、集合体を解体した。

ラッパ管については、照射材料試験室（MMS）での破壊試験のために上部パッド部の試料採取を行った。

燃料ピンについては Fig. 6 に示す試験を実施し、その後部内他室での破壊試験のための試料採取を行った。集合体内のピン配列及び製造時データをそれぞれ Fig. 7 及び Table III に示す。

4.2 集合体試験

4.2.1 外観検査

外観写真を Photo. 1 に示す。

(1) 形状変化

目視観察では外形形状に変化は認められなかった。

(2) 表面状況

ラッパ管表面では、D、E及びF面で、上部パッドから中間パッドの間に、本集合体及び隣接集合体の燃料交換時に生じたと推定される縦方向の傷が観察されたが、ラッパ管の健全性に影響を及ぼすほどのものではない。

A、B及びD面の上部パッドで、コーナ部に傷が観察された。また、黒変色がA面パッド全面に観察され、B面パッドでは一部に黒色の付着物が観察された。A面パッド全面の黒変色は従来のMK-II初装荷燃料集合体では観察されていないため、MMSにて詳細な観察を行うこととした。Photo. 2に上部パッドA面の外観写真を示す。

中間パッドではC面に僅かな傷と変色が観察された他は、変化は認められなかった。

4.2.2 寸法測定

集合体の全長、対面間寸法、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

照射前の全長 2969.8 mm に対し照射後の全長は 2969.3 mm であり、その差 -0.5 mm は有意差 (± 1.0 mm) を超えておらず、照射前後での全長に有意な変化は認められなかった。

(2) 対面間寸法

照射後の対面間寸法測定結果を照射前測定結果と併せて Fig. 8 ～ 10 に示す。寸法増加は約 1300 mm (エントランスノズル下端からの距離) から中間パッドを含む約 1900 mm の間で認められ、軸方向炉心中心位置近傍で最大となった。各対面間での最大増加量は A-D 面間で 0.16 mm, B-E 面間で 0.25 mm, C-F 面間で 0.10 mm であり、3 対面間の中で B-E 面間に最大の増加がみられた。

炉心位置に近い中間パッド部の寸法増加は最大で 0.2 mm であるが、外観検査の結果では、これによる隣接集合体パッドとの干渉による悪影響は認められなかった。

(3) 曲 り

照射後の曲り量は上部パッド部において 2.6 mm (曲り方向 163°) であり、同位置の照射前の曲り量は 1.1 mm (曲り方向 36°) である。したがって、照射により 3.4 mm (曲り方向 178° , 反射体側) の曲りが発生したことになるが、この値は以前に照射後試験を実施した MK-II 炉心燃料集合体「PFD 018」(2F 1 装荷, 最大中性子照射量 $6.33 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$)) と同程度の曲りである。Fig. 11 に中間パッド, 上部パッド位置での測定結果を示す。

(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、炉心上部に掛けて僅かな温度上昇が認められ、炉心上部から上部パッド間で温度はほぼ一定となる。ここでは、エントランスノズルに対して約 5℃ の温度上昇が認められた。測定結果を Fig. 12 に示す。

4.2.3 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. 3 に示す。

4.3 ピン試験

4.3.1 外観検査

ピンの外観をピンバンドル状態で観察した。ピンバンドルには大きな膨れ及びピン配列の乱れは認められなかった。観察結果を Photo. 4 に示す。

ピン表面のナトリウムの洗浄状態は良好であったが、下部端栓付近に水酸化ナトリウムと思われる白色の付着物が観察された。しかし、付着量は僅かであり、以後の照射後試験に悪影響

を及ぼすことはないと考えられる。

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、巾に関しても先行の炉心燃料集合体 5 体の場合と同様であった。

また、流力振動の影響を調べるために、ピン支持部の観察を行った。各列のピン支持部の観察結果を Photo. 5 に示す。支持部には変形等特異な状態は認められなかった。

ラップ管を引き抜いた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は認められなかった。

4.3.2 X線ラジオグラフィ

全ピンの X 線写真撮影を実施し、ペレット間ギャップ、プレナムスプリングのへたり、中心空孔の有無等を調べた。中心列の X 線写真を Photo. 6 に示す。全ピンのプレナムスプリングにへたりが観察されたが、ペレット間ギャップ、中心空孔及びその他特異な変化は認められなかった。

照射前後の燃料スタック長を比較したところ、照射前に比べ概ね増加していた。スタック長の変化量は全体で -0.7 mm から $+5.9\text{ mm}$ の範囲にあり、平均で約 2.7 mm の増加であった。ペレット製造ロット毎ではロット No. FM 2053 で平均 2.8 mm 、FM 2054 で 2.7 mm 、FM 2055 で 1.6 mm の増加であった。スタック長の測定結果を Fig. 13 に示す。

4.3.3 重量測定

全ての燃料ピンを対象に重量測定を実施し、照射前後の重量変化を調べた。照射前後の重量差は最大で 0.4 g であり、測定上の有意差 ($\pm 0.7\text{ g}$) を超える燃料ピンはなかった。照射前後の重量変化を Fig. 14 に示す。

4.3.4 詳細外観検査

4 本のピンについてワイヤを取り除いた状態で、被覆管とそれに隣接するワイヤとの干渉による接触部跡の観察を行った。被覆管表面で観察された接触跡は長さ、巾とも小さいものであった。

最大と思われる接触跡は、9364 ピンに認められた長さ 1.6 mm 、巾 0.6 mm のものであった。これを Photo. 7 に示す。

4.3.5 寸法測定

試験対象ピンは、全長及び外径測定 7 本、曲り測定 13 本である。

(1) 全 長

照射前後で有意な変化 ($\pm 1.0 \text{ mm}$) は認められなかった。ピン全長の照射前後の変化量を Table IV に示す。

(2) 外径測定

被覆管にはふくれ等の有意な変化は認められなかった。炉心軸方向中心位置近傍における外径の照射前後の変化量を Table IV に示す。軸方向外径プロファイルの代表例として集合体中心ピンである 9364 ピンの測定結果を Fig. 15 に示す。

(3) 曲り測定

最大曲りは 9325 ピンの 18.6 mm であった。曲りはピン束がビヤ樽状になる方向で、従来と同様の傾向である。測定結果を Fig. 16 に示す。

4.3.6 ガンマスキャン

(1) 軸方向燃焼分布

集合体コーナーピン 6 本及び中心ピン 1 本の計 7 本について、軸方向スキャンを実施した。炉心燃料集合体 2 体と隣接するコーナーピンである 9358 ピン、中心ピンである 9364 ピン及び反射体 2 体と隣接するコーナーピンである 9370 ピンの軸方向 F.P. 核種及び放射化核種の計数率分布を測定した結果を Fig. 17 ~ 19 に示す。各ピンとも ^{95}Zr 及び ^{106}Rh の分布に異常は認められず、燃料が健全に燃焼したことが推定される。また、全ピンの上部インシュレータ部及び燃料ペレット間に ^{137}Cs が認められた。そして、9364、93C1 ピンでは炉心燃料下部に ^{137}Cs の移動が認められ、9301、9307、9370、93C7 ピンについては炉心燃料上部へも ^{137}Cs の移動が認められた。9358 ピンについては、燃料上下部への ^{137}Cs の移動は認められなかった。

^{95}Zr 及び ^{106}Rh による軸方向ピーキング係数は 1.11 から 1.17 であり「MAGI」による計算結果 1.153 と大体一致する。測定結果を Table V に示す。

(2) 集合体径方向燃焼分布

集合体コーナーピン 6 本及び中心ピン 1 本の計 7 本のピンの軸方向各 5 点について、 γ 線スペクトル測定を実施した。炉心軸方向中心位置での測定結果を Fig. 20 に示す。径方向ピーキング係数は、炉心軸方向中心位置で ^{95}Zr 、 ^{106}Rh について 1.08 の値が得られており、この値は「MAGI」による計算結果 1.147 を下回っている。また、 ^{95}Zr 、 ^{106}Rh のピーキング係数は炉心軸方向中心部で大きく、上下部で小さい傾向がある。測定結果を Table VI に示す。

推定炉心方向は、炉心軸方向中心位置の ^{95}Zr の分布から E 面であり、「常陽」の推定方向と一致した。

(3) 燃料ピン径方向燃焼分布 (トモグラフィ)

9370 ピンの炉心燃料上部 (軸位置 625 mm) について径方向核種分布を測定した結果を

Fig. 21 に示す。 ^{137}Cs はこれまでの炉心燃料の場合と同様にペレット外周及びペレットと被覆管のギャップに移行蓄積しているのが認められ、特に 180° （反射体側）方向に多く蓄積している。 ^{95}Zr は燃料ペレット内にほぼ均一に分布しており、中心空孔は生じていないと考えられる。

4.3.7 パンクチャテスト

燃料ピン5本に対しプレナムガス圧測定を行い、内3本についてガス分析を実施した。測定結果を Table VII に示す。

(1) プレナムガス圧

プレナムガス圧は、約 $2670 \sim 3500 \text{ Torr}$ (0°C) の範囲であった。測定結果を集合体内の燃料ピンの位置をパラメータにとり整理して Fig. 22 に示す。

(2) ガス分析

ガス成分比（モル比）は平均で $\text{Kr} : \text{Xe} : \text{He} = 6.4 : 64.4 : 29.1$ であった。

(3) ガス放出率

ガス放出率は、 $33.6 \sim 37.2\%$ の範囲であった。燃料ピン1本あたりの F.P. ガス生成量 ($\text{Kr} + \text{Xe}$) は、参考文献 (8) とほぼ同様な手法を用いて求めた。すなわち、次式で求まる単位燃焼度あたりの燃料ピン内 F.P. ガス生成量に燃焼度を乗じて、燃料ピン1本あたりの F.P. ガス生成量を求めた。

$$G = C \cdot \sum_i (R_i \cdot \sum_j Y_{ij}) \cdot W$$

ここで G : F.P. ガス生成 (atoms/pin/a/o B.U.)

C : 燃焼度-核分裂数換算係数 (fissions/g/a/o B.U.)

R_i : 全核分裂数に占める核分裂核種 i の核分裂数の割合 (核分裂率)
(-)

Y_{ij} : 核種 i の核分裂による、F.P. ガス核種 j の核分裂収率 (-)

W : ピン内の燃料の重量 (g)

核分裂率 R_i は次式より求めた。

$$R_i = \frac{N_i \cdot \sigma_i}{\sum_k N_k \cdot \sigma_k}$$

ここで、 N_i は核種 i の数密度であり、MAGI CODE の照射前と照射後のサイクルの値の平均値を用いた。 σ_i は核種 i の核分裂断面積であるが、参考文献 (9) で 1 群に縮約した値を使用した。また、燃焼度は各ピンについて ESPRIT-J CODE の値を使用した。

5. 結果の検討

5.1 集合体及び燃料ピンの健全性

5.1.1 集合体の健全性

集合体に関しては一部に傷は認められたが、変形、破損等は認められなかった。また、寸法測定では炉心中心近傍で対面間寸法に最大 0.25 mm の寸法増加が認められたが、中間パッドの高さを十分下回っており燃料装脱荷時に隣接集合体との干渉が生じる恐れはない。上部パッドには変色が認められた。また、中間パッド部では最大 0.2 mm の対面間寸法の増加が認められたが、パッド部の外観には特に異常は認められず、また炉心からの脱荷も問題なく行われており、この程度の寸法増加は集合体の健全性に影響を与えるようなものではないと判断される。

ピンバンドルに関しては、外周燃料ピンに残留湾曲によるピア樽状の曲りが観察された。しかし、バンドル配列の乱れ、ワイヤのゆるみ等は観察されず、バンドルとしても健全であったことを確認した。

5.1.2 燃料ピンの健全性

ピン重量測定においては重量変化は認められなかった。また、燃料ピンの内部構成についても、X線ラジオグラフィーで確認し異常は認められなかった。

燃料ピンの燃焼については、ガンマスキャンにより、燃料の出力分布を示す核種 ^{95}Zr 、 ^{106}Rh は炉心燃料部軸方向に連続的なカーブを描き、炉内では中性子束分布通りに燃焼していたと考えられる。

これらのことから燃料ピンの健全性は保たれており、炉内においても健全な状態であったことが確認された。

5.2 照射挙動評価

MK-II 初装荷炉心燃料集合体のうち最長の炉内滞在期間を有し、かつ炉心の最外列で照射された集合体の挙動について、これまでに照射後試験に供された炉心燃料集合体 5 体の照射挙動データとの比較を含めて評価した。

結果を以下に示す。

5.2.1 ラップ管対面間寸法変化

Fig. 23 に炉心中心位置における MK-I 及び MK-II 炉心燃料集合体ラップ管の対面間寸法の変化量を集合体最大中性子照射量で整理して示す。MK-I 及び MK-II とも中性子照射量が約 $3.0 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ までは顕著な増加は認められないが、中性子照射量が $5 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$

cm^2 を超えると明らかな寸法変化が見られ、MK-II ラッパ管の対面間寸法の増加量が MK-I のそれを上回っていることがわかる。

ラッパ管対面間寸法の増加は、材料のスエリングと照射クリープによる影響と考えられている。Fig. 24 は MK-I、MK-II のラッパ管対面間寸法の変化率と密度測定結果による $1/3$ スエリング率の照射量依存性を示しており、この差が照射クリープひずみの寄与分と考えられる。この図から MK-I では、スエリングひずみと照射クリープひずみがほぼ同程度であるが、MK-II では、スエリングひずみは大体 MK-I と同程度があるが照射クリープひずみが MK-I と比較して増加していることがわかる。照射クリープの主要な要因は冷却材内外圧差であり、例えば炉心第 4 列の軸方向炉心中心位置における冷却材内外圧差は、MK-I で 0.3 kg/cm^2 、MK-II では 0.74 kg/cm^2 である。したがって MK-II でラッパ管対面間寸法の増加量が MK-I を上回ったのは、主に冷却材内外圧差が増加したことによる照射クリープひずみの増加が主な原因と考えられる。

5.2.2 燃料ピン外形形状変化

(1) 燃料ピン外径変化

Fig. 25 に被覆管外径変化率の中性子照射量依存性を MK-I 炉心燃料ピンと比較して示す。MK-I 炉心燃料ピンの外径変化率が中性子照射量の増加と共に若干増える傾向にあるのに対し、MK-II 燃料ピンでは外径変化率の増加が認められない。これは冷間加工度を増加させて耐スエリング性を図ったことによると考えられる。

(2) 残留湾曲量

Fig. 26 に燃料ピンの残留湾曲量を集合体最大フルエンスで整理して示す。ピン残留湾曲量は照射の進展に伴い MK-I 同様漸増するが、高照射量では MK-I よりも量的に小さくなる。これは MK-I のピン全長 1910 mm に比べ MK-II が 1533 mm と短いことによると考えられる。

また、他の MK-II 燃料ピンと比較した場合、本燃料ピンは同程度の照射を受けた「PFD 001」のピンより残留湾曲量が小さい。これは本集合体が照射期間中炉心最外列に位置し、照射温度が低かった為と考えられる。

5.2.3 燃料ペレットスタック長変化

Fig. 27 に MK-II 燃料ピンの炉心燃料部スタック長変化量を集合体平均燃焼度で整理して示す。MK-II 燃料ピンは、MK-I 炉心燃料ピンが $10,000 \text{ MWd/t}$ 以下ではほとんどスタック長に変化が認められないのに対し、 $30,000 \text{ MWd/t}$ 以下の燃焼度で減少している。

本集合体では、ペレット製造ロットによる顕著なスタック長変化量の違いは認められなかった。

5.2.4 F.P.核種の挙動

燃料ピン軸方向及び集合体径方向においてF.P.核種分布に特異なものは認められず、燃料の健全な燃焼が推定される。特に移動しやすいF.P.核種 ^{137}Cs については、上部インシュレータ部及び燃料ペレット間の低温部に認められ、燃料上下部への移動が認められるピンもあった。また、ピン径方向燃焼分布では、 ^{137}Cs が反射体側のペレット外周及びペレットと被覆管のギャップに多く移行著積しているのが認められ、本集合体が反射体に隣接していることにより集合体径方向の温度勾配が著しかったことが推定される。

5.2.5 ピン内圧変化及びF.P.ガス放出率

Fig. 28 にピン内圧の燃焼度依存性をMK-I 炉心燃料と比較して示す。MK-II 炉心燃料のピン内圧は燃焼度の増加とともに増加する傾向を示している。MK-I と比較すると、同一燃焼度でも内圧は低いが、これは燃料ピン1本当たりの核分裂性物質重量がMK-I より小さく、またMK-II では燃料に対してプレナム容積が大きく設計されているためと考えられる。「PFD 036」炉心燃料と先行のMK-II 炉心燃料との比較をした場合に、Fig. 28からもわかるように本炉心燃料で得られたピン内圧は若干低目である。

Fig. 29 にF.P.ガス放出率の燃焼度依存性を示す。「PFD 036」炉心燃料においては、F.P.ガス放出率は他のMK-II 炉心燃料よりも若干低目であるが、これはピンの線出力が低く燃料温度が低いいため放出率が低下したものと考えられる。

6. ま と め

「常陽」MK-II照射炉心で100MW出力上昇から第7"（自然循環試験）サイクルの間照射された炉心燃料集合体「PFD 036」の照射後試験を実施した。本集合体は初装荷炉心燃料集合体中、最長の炉内滞在期間を有する集合体であり、炉内装荷位置をパラメータとして初装荷炉心燃料集合体の健全性の確認、照射挙動データの取得を行ったものである。

本試験の結果は以下の通りである。

- (1) 集合体及び燃料ピンに損傷はなく、上部パッドの変色以外には変色及び変形等も認められず炉内挙動は正常であり、炉心燃料集合体の構造体としての設計及び製作の妥当性が、初装荷炉心燃料集合体中最長の炉内滞在期間を有するものについて確認された。
- (2) MK-IIにおける最長炉内滞在期間を有する炉心燃料集合体及び燃料ピンの照射挙動を確認し、次の様な結果を得た。
 - ① ラップ管対面間寸法変化率はMK-Iに比べ大きいが、これは主に冷却材内外圧差の増加により照射クリープひずみが増加したことによるものと考えられる。
 - ② 被覆管の外径は製造時から増加していない。これは冷間加工度をMK-Iの10%から20%へ変更したことにより、被覆管の耐スエリング性が向上したものと考えられる。
 - ③ 炉心最外列における集合体及び燃料ピンの照射挙動としては、 ^{137}Cs の燃料ピン径方向分布において反射体側に偏析していた程度であり、特に顕著なものは認められなかった。

7. 参 考 文 献

- (1) 沖元他：「常陽」MK-II炉心燃料集合体（PFD 010）の照射後試験(1)
PNC I941 84-03, 1984年11月
- (2) 沖元他：「常陽」MK-II炉心燃料集合体（PFD 003）の照射後試験(1)
PNC I941 85-10, 1985年5月
- (3) 小高他：「常陽」MK-II炉心燃料集合体（PFD 001）の照射後試験(1)
PNC I9410 86-007, 1986年2月
- (4) 永峰他：「常陽」MK-II炉心燃料集合体（PFD 018）の照射後試験(1)
PNC I9410 86-003, 1986年1月
- (5) 浅賀他：「常陽」MK-II炉心燃料集合体（PFD 029）の照射後試験(1)
PNC I9410 86-010, 1986年2月
- (6) 小泉他：日本原子力学会昭和61年秋の分科会予稿集J30
- (7) 実験炉部内：「常陽」照射試験サイクル報（第11サイクル）
PNC SN9360 86-003, 1986年10月
- (8) 燃料部部内資料：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
- (9) 燃材部部内資料：「常陽」MK-II運転監視コードの7群核定数について
AES テクニカルメモ 86（AES）63
- (10) 実験炉部：MK-II炉心燃料集合体ラッパ管内圧
照射後試験関連データ支給票 59-JY支-13

- 14 -

Table II Subassembly Irradiation Conditions

集合体番号 PFD 036

サ イ ク ル				0	1	2	3	4	5	6
装 荷 位 置				4 B 1						
燃 焼 度	ポ イ ン ト 最 大		MWd/t	3800	9300	15100	21000	26200	31700	37100
	集 合 体 平 均		MWd/t	3200	7900	12900	17900	22500	27300	32000
積算中性子照射量	En ≧ 0.1 MeV	ポイント最大	×10 ²⁰ n/cm ²	44.1	108	177	246	312	376	442
		集合体平均	×10 ²⁰ n/cm ²	36.6	89.8	147	204	259	312	367
	Total	ポイント最大	×10 ²⁰ n/cm ²	66.8	165	271	375	476	573	675
		集合体平均	×10 ²⁰ n/cm ²	56.4	139	228	317	402	485	571
線 出 力	B O C	ポイント最大	W/cm	238	227	227	227	223	218	214
		集合体平均	W/cm	179	168	169	173	168	165	161
	E O C	ポイント最大	W/cm	238	225	225	227	221	217	212
		集合体平均	W/cm	179	168	170	174	168	165	162
被覆管最高温度	B O C		℃	568	551	554	562	556	554	549
	E O C		℃	568	551	555	563	557	555	552
燃料最高温度	B O C		℃	1579	1509	1513	1524	1501	1479	1453
	E O C		℃	1578	1509	1508	1527	1492	1471	1446
集合体出口温度	B O C		℃	512	498	502	506	503	501	497
	E O C		℃	512	499	502	506	503	502	498
ピーキング係数	B O C	径 方 向	——	1.141	1.150	1.144	1.145	1.146	1.147	1.148
		軸 方 向	——	1.166	1.174	1.170	1.160	1.158	1.156	1.156
	E O C	径 方 向	——	1.141	1.149	1.143	1.144	1.145	1.146	1.147
		軸 方 向	——	1.164	1.164	1.158	1.152	1.148	1.147	1.146
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	6.9	7.1	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0
	E O C		kg/sec	6.9	7.1	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0
備 考										

Table II Subassembly Irradiation Conditions (continued)

集合体番号 PFD 036

サ イ ク ル				7	7'	7''			
装 荷 位 置				4 B 1					
燃 焼 度	ポ イ ン ト 最 大		MWd/t	42300	42600	42600			
	集 合 体 平 均		MWd/t	36500	36800	36800			
積算中性子照射量	En≥ 0.1 MeV	ポイント最大	×10 ²⁰ n/cm ²	508	512	512			
		集合体平均	×10 ²⁰ n/cm ²	422	425	426			
	Total	ポイント最大	×10 ²⁰ n/cm ²	776	781	782			
		集合体平均	×10 ²⁰ n/cm ²	657	661	662			
線 出 力	B O C	ポイント最大	W/cm	210	214	63			
		集合体平均	W/cm	159	163	47			
	E O C	ポイント最大	W/cm	209	214	63			
		集合体平均	W/cm	160	163	47			
被覆管最高温度	B O C		℃	547	553	420			
	E O C		℃	548	553	420			
燃料最高温度	B O C		℃	1436	1458	633			
	E O C		℃	1429	1457	633			
集合体出口温度	B O C		℃	497	500	408			
	E O C		℃	497	500	408			
ピーキング係数	B O C	径 方 向	——	1.146	1.146	1.147			
		軸 方 向	——	1.152	1.148	1.153			
	E O C	径 方 向	——	1.145	1.146	1.147			
		軸 方 向	——	1.144	1.147	1.153			
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	6.9	6.9	6.9			
	E O C		kg/sec	6.9	6.9	6.9			
備 考 第7'' サイクル終了後炉内より取り出し、照射後試験に払い出した集合体を本サイクル報に追加した。									

Table III Pin Parts List

 * FUEL PIN PARTS LIST (1/2) *

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR (LOW.)	END PLUG (UPP.)	PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO							
001	04700	04669	K006	K02898	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
002	04699	04668	K006	K02891	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
003	04698	04667	K006	K02894	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
004	04697	04666	K006	K02899	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
005	04745	04713	K008	K03986	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
006	04743	04711	K008	K03987	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
007	04741	04710	K006	K02886	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
008	04740	04709	K006	K02887	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
009	04739	04708	K006	K02882	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
010	04738	04707	K006	K02881	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
011	04737	04706	K006	K02877	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
012	04736	04705	K006	K02875	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
013	04735	04704	K006	K02880	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
014	04734	04703	K006	K02888	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
015	04733	04702	K006	K02874	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
016	04732	04701	K006	K02878	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
017	04731	04700	K006	K02884	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
018	04730	04699	K006	K02872	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
019	04729	04698	K006	K02889	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
020	04728	04697	K006	K02876	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
021	04727	04696	K006	K02885	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
022	04726	04695	K006	K02871	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
023	04725	04694	K006	K02879	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
024	04724	04693	K006	K02870	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
025	04723	04692	K006	K02883	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
026	04722	04691	K006	K02866	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
027	04721	04690	K006	K02865	T002	T00067	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
028	04769	04738	K008	K03956	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
029	04768	04737	K008	K03942	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
030	04767	04736	K007	K03862	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
031	04766	04735	K008	K04001	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
032	04765	04734	K008	K04009	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
033	04764	04733	K008	K04005	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
034	04763	04732	K008	K04000	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
035	04762	04731	K008	K04002	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001

Table III Pin Parts List (continued)

 FUEL PIN PARTS LIST (1/2) *

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	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO			(LOW.) LOT NO	(UPP.) LOT NO			
036	04761	04730	K008	K04015	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
037	04760	04729	K008	K04016	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
038	04759	04728	K008	K04004	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
039	04758	04727	K008	K04010	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
040	04757	04726	K008	K03998	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
041	04756	04725	K008	K03993	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
042	04755	04724	K008	K03996	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
043	04754	04723	K008	K03997	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
044	04753	04722	K008	K03995	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
045	04752	04721	K008	K03984	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
046	04751	04720	K008	K03983	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
047	04750	04719	K008	K03991	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
048	04749	04718	K008	K03990	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
049	04748	04717	K008	K03988	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
050	04747	04716	K008	K03994	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
051	04746	04715	K008	K03992	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
052	04793	04739	K007	K03837	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
053	04792	04762	K007	K03855	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
054	04791	04761	K007	K03856	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
055	04790	04760	K007	K03912	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
056	04789	04759	K007	K03926	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
057	04788	04758	K007	K03928	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
058	04787	04757	K007	K03910	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
059	04786	04756	K007	K03913	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
060	04785	04755	K007	K03931	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
061	04784	04754	K007	K03927	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
062	04783	04753	K007	K03907	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
063	04782	04752	K007	K03915	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
064	04781	04751	K007	K03923	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
065	04780	04750	K007	K03908	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
066	04779	04749	K007	K03906	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
067	04778	04748	K007	K03930	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
068	04777	04747	K007	K03920	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
069	04776	04746	K007	K03917	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
070	04775	04745	K007	K03909	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001

Table III Pin Parts List (continued)

 * FUEL PIN PARTS LIST (1/2) *

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR END PLUG (LOW.)	END PLUG (UPP.)	PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
071	04774	04744	K008	K03947	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
072	04773	04743	K007	K03932	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
073	04772	04742	K007	K03933	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
074	04771	04741	K008	K03949	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
075	04770	04740	K008	K03953	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
076	04818	04787	K007	K03794	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
077	04817	04786	K007	K03796	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
078	04816	04785	K007	K03793	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
079	04814	04784	K007	K03860	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
080	04813	04783	K007	K03871	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
081	04812	04782	K007	K03869	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
082	04811	04781	K007	K03870	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
083	04810	04780	K007	K03840	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
084	04809	04779	K007	K03845	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
085	04808	04778	K007	K03843	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
086	04807	04777	K007	K03839	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
087	04806	04776	K007	K03846	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
088	04805	04775	K007	K03847	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
089	04804	04774	K007	K03841	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
090	04803	04773	K007	K03848	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
091	04802	04772	K007	K03849	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
092	04801	04771	K007	K03838	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
093	04800	04770	K007	K03850	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
094	04799	04769	K007	K03852	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
095	04798	04768	K007	K03851	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
096	04797	04767	K007	K03842	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
097	04795	04765	K007	K03836	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
098	04794	04764	K007	K03854	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
099	04842	04788	K008	K04841	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
100	04841	04811	K008	K04847	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
101	04840	04810	K008	K04846	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
102	04839	04809	K008	K04850	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
103	04838	04808	K008	K04849	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
104	04837	04807	K008	K04838	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
105	04836	04806	K008	K04856	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001

Table III Pin Parts List (continued)

 * FUEL PIN PARTS LIST (1/2) *

LOCATION	PIN NO	U.E.P NO	CLADDING TUBE		WRAPPING WIRE		U.E.P	L.E.P	ROD FOR END PLUG (LOW.)	END PLUG (UPP.)	PLEN. SLEEVE ASSEMBLY	SLEEVE	DISK
			LOT NO	PROD. NO	LOT NO	LEEL NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO	LOT NO
106	04835	04805	K008	K04854	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
107	04834	04804	K008	K04852	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
108	04833	04803	K008	K04851	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
109	04832	04802	K008	K04853	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
110	04831	04801	K007	K03810	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
111	04830	04800	K007	K03807	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
112	04829	04799	K007	K03806	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
113	04828	04798	K007	K03812	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
114	04827	04797	K007	K03805	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
115	04826	04796	K007	K03811	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
116	04825	04795	K007	K03813	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
117	04824	04794	K007	K03809	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
118	04823	04793	K007	K03808	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
119	04822	04792	K007	K03802	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
120	04821	04791	K007	K03798	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
121	04820	04790	K007	K03799	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
122	04819	04789	K007	K03795	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
123	04866	04836	K008	K04795	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
124	04865	04835	K008	K04796	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
125	04864	04834	K008	K04799	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
126	04863	04833	K008	K04822	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001
127	04862	04832	K008	K04821	T002	T00071	C009	C009	K002	K002	F001	F001	F001

Table III Pin Parts List (continued)

 FUEL PIN PARTS LIST (2/2) *

LOCATION	PIN NO	SPRING LOT NO	UPPER REFLECTOR LOT NO	INSULATOR PELLET LOT NO	-- CORE PELLETS -- (1) (2) LOT NO LOT NO		-- EUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO		-- PUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO	
001	04700	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
002	04699	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
003	04698	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
004	04697	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
005	04745	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
006	04743	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
007	04741	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
008	04740	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
009	04739	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
010	04738	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
011	04737	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
012	04736	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
013	04735	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
014	04734	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
015	04733	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
016	04732	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
017	04731	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
018	04730	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
019	04729	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
020	04728	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
021	04727	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
022	04726	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
023	04725	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
024	04724	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
025	04723	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
026	04722	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
027	04721	F001	T001	F001	FM2053		FU0426	FU0427	FP0514	FP0515
028	04769	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
029	04768	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
030	04767	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
031	04766	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
032	04765	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
033	04764	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
034	04763	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	
035	04762	F001	T001	F001	FM2054		FU0428	FU0429	FP0515	

Table III Pin Parts List (continued)

 * FUEL PIN PARTS LIST (2/2) *

LOCATION	PIN NO	SPRING LOT NO	UPPER REFLECTOR LOT NO	INSULATOR PELLET LOT NO	-- CORE PELLET -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- EUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- PUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO
036	04761	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
037	04760	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
038	04759	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
039	04758	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
040	04757	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
041	04756	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
042	04755	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
043	04754	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
044	04753	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
045	04752	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
046	04751	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
047	04750	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
048	04749	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
049	04748	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
050	04747	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
051	04746	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
052	04793	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
053	04792	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
054	04791	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
055	04790	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
056	04789	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
057	04788	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
058	04787	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
059	04786	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
060	04785	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
061	04784	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
062	04783	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
063	04782	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
064	04781	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
065	04780	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
066	04779	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
067	04778	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
068	04777	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
069	04776	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
070	04775	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515

Table III Pin Parts List (continued)

 * FUEL PIN PARTS LIST (2/2) *

LOCATION	PIN NO	SPRING LOT NO	UPPER REFLECTOR LOT NO	INSULATOR PELLET LOT NO	-- CORE PELLET -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- EUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- PUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO
071	04774	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
072	04773	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
073	04772	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
074	04771	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
075	04770	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
076	04818	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
077	04817	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
078	04816	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
079	04814	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
080	04813	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
081	04812	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
082	04811	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
083	04810	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
084	04809	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
085	04808	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
086	04807	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
087	04806	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
088	04805	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
089	04804	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
090	04803	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
091	04802	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
092	04801	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
093	04800	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
094	04799	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
095	04798	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
096	04797	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
097	04795	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
098	04794	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
099	04842	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
100	04841	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
101	04840	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
102	04839	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
103	04838	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
104	04837	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
105	04836	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515

Table III Pin Parts List (continued)

 * FUEL PIN PARTS LIST (2/2) *

LOCATION	PIN NO	SPRING LOT NO	UPPER REFLECTOR LOT NO	INSULATOR PELLET LOT NO	-- CORE PELLETS -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- EUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO	-- PUO2 POWDER -- (1) (2) LOT NO LOT NO
106	04835	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
107	04834	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
108	04833	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
109	04832	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
110	04831	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
111	04830	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
112	04829	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
113	04828	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
114	04827	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
115	04826	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
116	04825	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
117	04824	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
118	04823	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
119	04822	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
120	04821	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
121	04820	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
122	04819	F001	T001	F001	FM2054	FU0428 FU0429	FP0515
123	04866	F001	T001	F001	FM2055	FU0430 FU0431	FP0515 FP0516
124	04865	F001	T001	F001	FM2055	FU0430 FU0431	FP0515 FP0516
125	04864	F001	T001	F001	FM2055	FU0430 FU0431	FP0515 FP0516
126	04863	F001	T001	F001	FM2055	FU0430 FU0431	FP0515 FP0516
127	04862	F001	T001	F001	FM2055	FU0430 FU0431	FP0515 FP0516

Table IV Pin Outer Diameter and Total Length Changes

Pin No	Lot No CLAD	Diameter (mm) *1			Length (mm) *2		
		PIE	Fab.	PIE-Fab.	PIE	Fab.	PIE-Fab.
9351	K 008	5.500 ± 0.01	5.501	- 0.001	1533.4 ± 1.0	1533.4	0.0
9352	K 007	5.498 ± 0.01	5.500	- 0.002	1532.7 ± 1.0	1532.9	- 0.2
9363	K 007	5.498 ± 0.01	5.499	- 0.010	1532.8 ± 1.0	1533.0	- 0.2
9364	K 007	5.499 ± 0.01	5.499	0.000	1532.9 ± 1.0	1533.0	- 0.1
9365	K 007	5.496 ± 0.01	5.494	0.002	1532.9 ± 1.0	1533.0	- 0.1
9376	K 007	5.488 ± 0.01	5.495	- 0.007	1533.2 ± 1.0	1533.1	0.1
9377	K 007	5.492 ± 0.01	5.495	- 0.003	1532.7 ± 1.0	1533.2	- 0.5

*1 PIEの値は、軸方向炉心中心、軸方向炉心中心+ 10 mm 及び軸方向炉心中心- 10 mmの3点についての直角2方向6点の平均とした。

尚、Fab.の値は、PIEと角度及び軸方向位置について一致するデータがないため近傍のデータを採用した。

*2 PIE全長は、被覆管の上端から下端までの長さを測定し、その値に上部及び下部端栓の図面上の寸法を加え算出する。（表の値は、2方向の平均）

Table V Axial Peaking Factors of the Subassembly Predicted
and measured by the Gamma-Scanning of Fuel Pins

No.	Pin No.	^{137}Cs	^{106}Rh	^{95}Zn	^{54}Mn	Gross	常陽運転監視 コード
1	9301	1.15	1.15	1.13	1.20	1.13	1.153
2	9307	1.10	1.14	1.11	1.19	1.12	
3	9358	1.17	1.16	1.17	1.24	1.19	
4	9364	1.13	1.16	1.16	1.20	1.16	
5	9370	1.50	1.14	1.13	1.21	1.13	
6	93C1	1.21	1.16	1.16	1.23	1.17	
7	93C7	1.10	1.15	1.15	1.23	1.15	

Table VI Radial Peaking Factors of the Subassembly Predicted
measured by the Gamma-Scanning of Fuel Pins

No.	Axial Position(mm)	^{137}Cs	^{106}Rh	^{95}Zr	^{54}Mn	常陽運転監視 コード
1	113	1.03	1.04	1.03	1.29	1.147
2	213	1.06	1.08	1.07	1.30	
3	338	1.10	1.08	1.08	1.30	
4	508	1.12	1.07	1.06	1.30	
5	608	1.07	1.03	1.02	1.28	

Table VII Results of Plenum Gas Analysis

No.	PIN No.	Volume in Pin (cc)	Pressure in Pin (Torr-stp)	Gas Golums in Pin (cc-stp)	Result of Gas Analysis			Xe/Kr	Release Rate %
					Kr (%)	Xe (%)	He (%)		
1	9358	10.78	3501	49.66	6.6	67.5	25.9	10.2	37.2
2	9361	10.94	3152	45.39	—	—	—	—	—
3	9364	10.99	3013	43.56	6.5	64.2	29.4	9.9	35.0
4	9365	10.90	2957	42.40	—	—	—	—	—
5	9370	10.87	2673	38.22	6.2	61.6	32.1	9.9	33.6

炉内照射位置

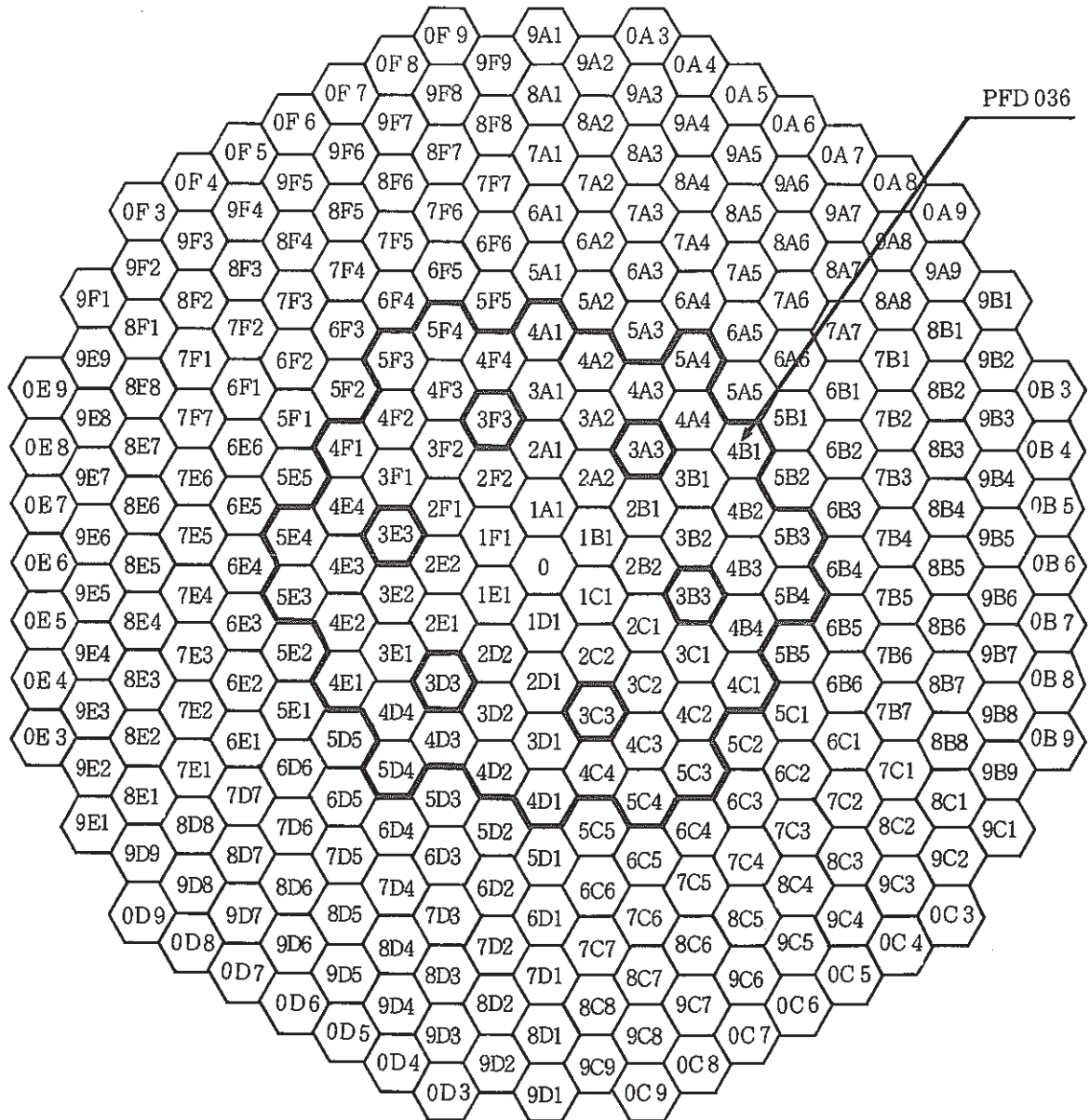


Fig.1 In Reactor Location of the Subassembly (PFD 036)

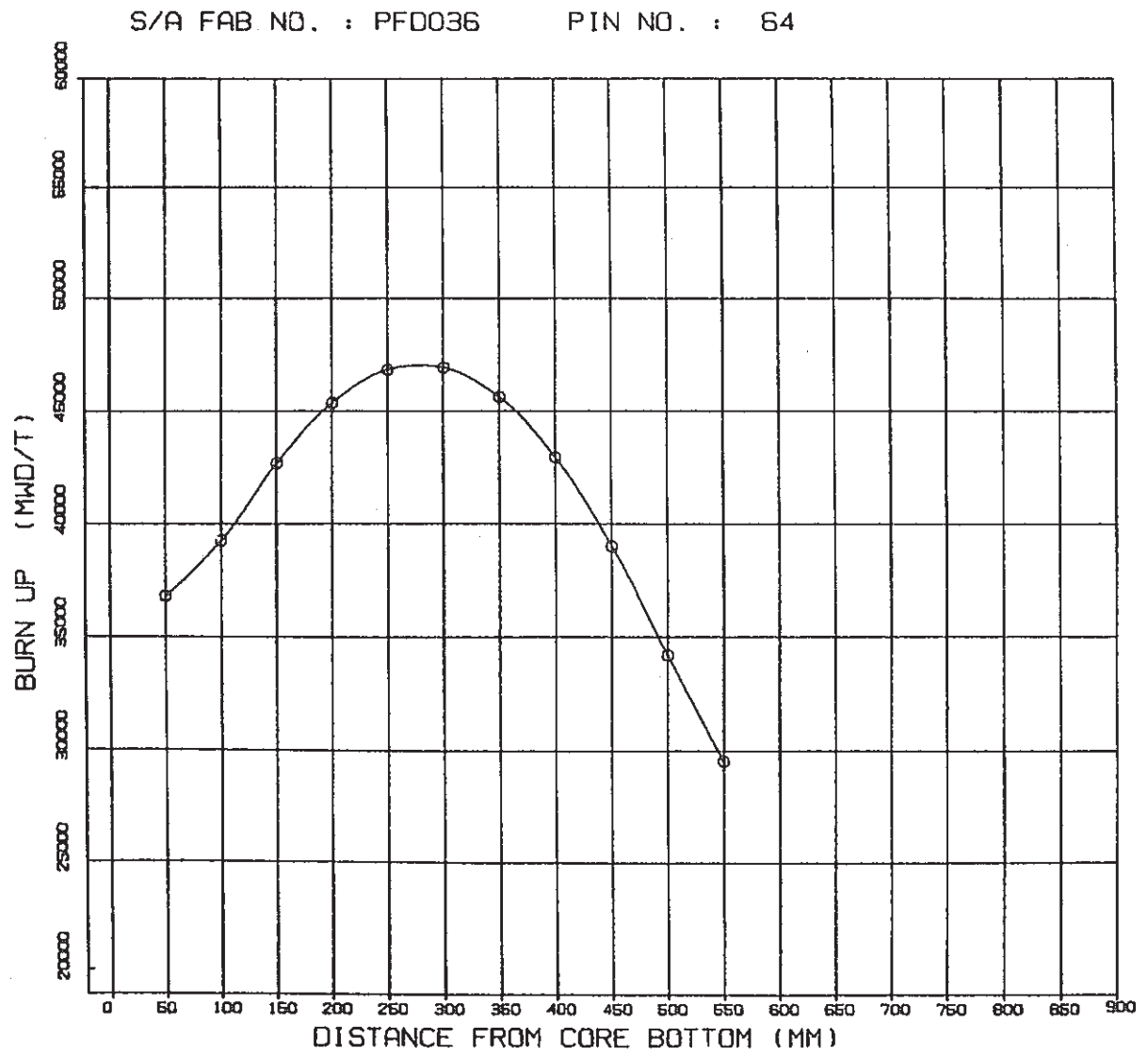


Fig. 2 Axial Profile of Burnup of a Center Pin

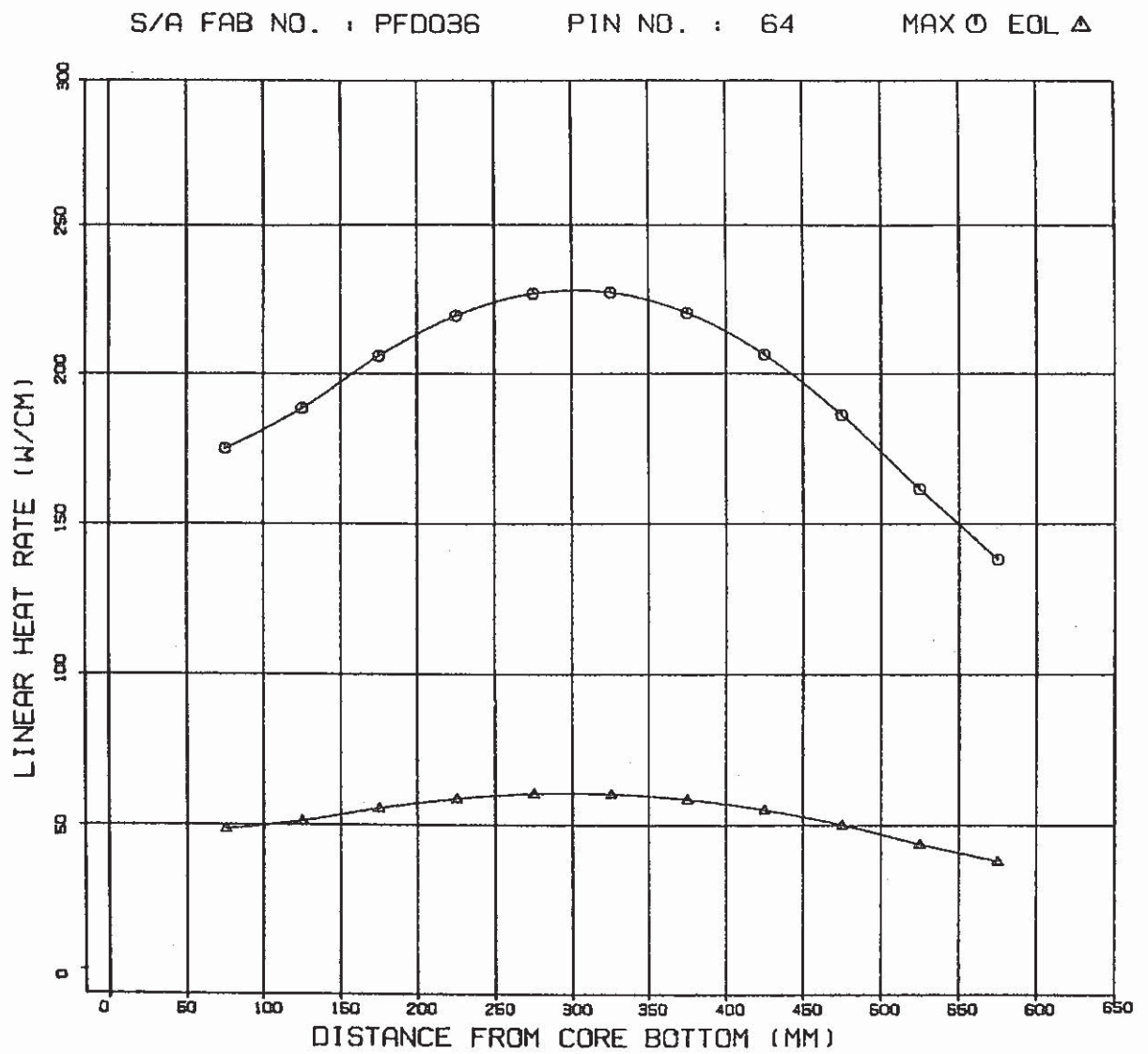


Fig.3 Axial Profile of Linear Heat Rate of a Center Pin

S/A FAB NO. : PFD036

PIN NO. : 64

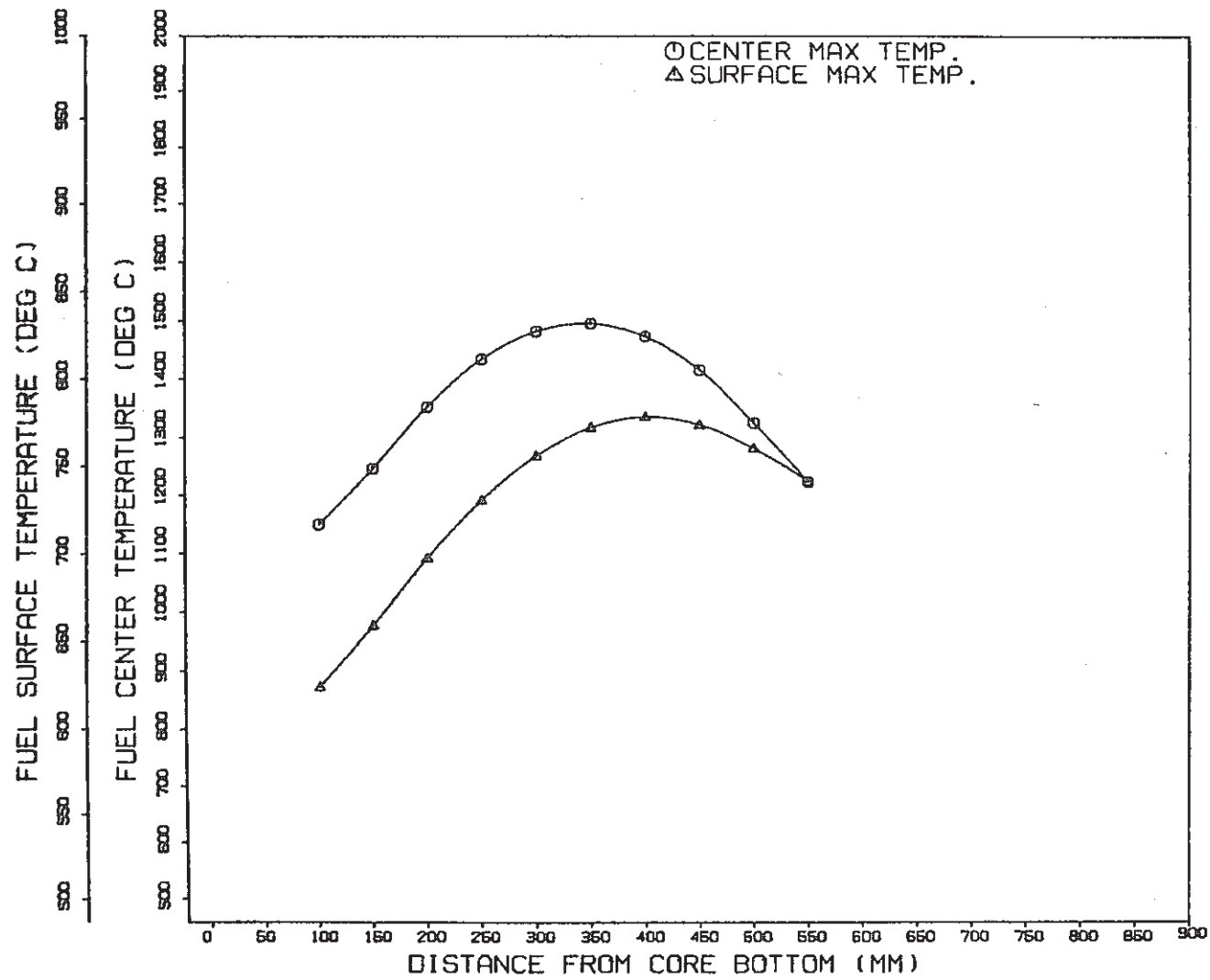


Fig.4 Axial Profile of Fuel Temperature of a Center Pin

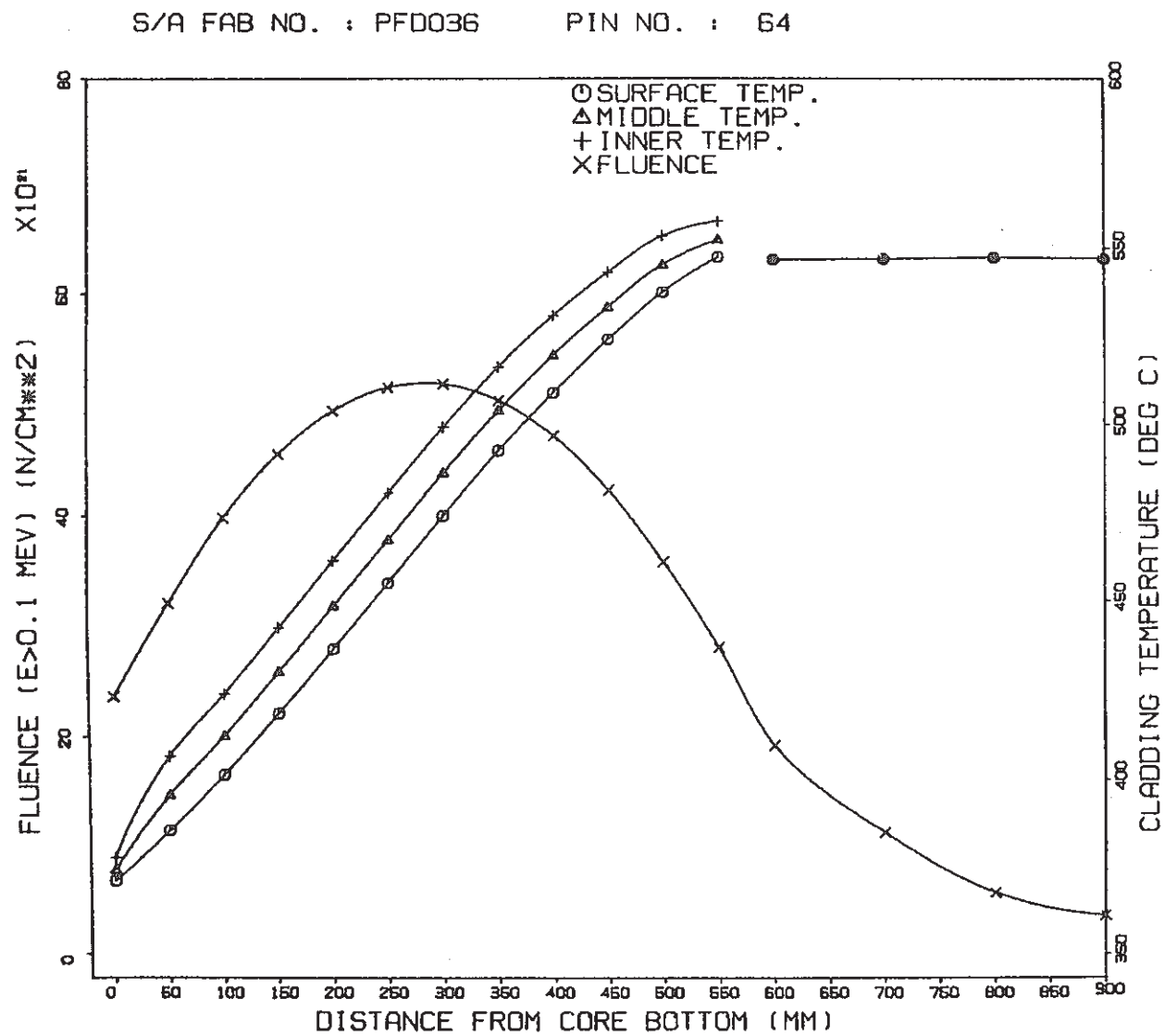


Fig.5 Axial Profile of Fluence and Cladding Temperature of a Center Pin

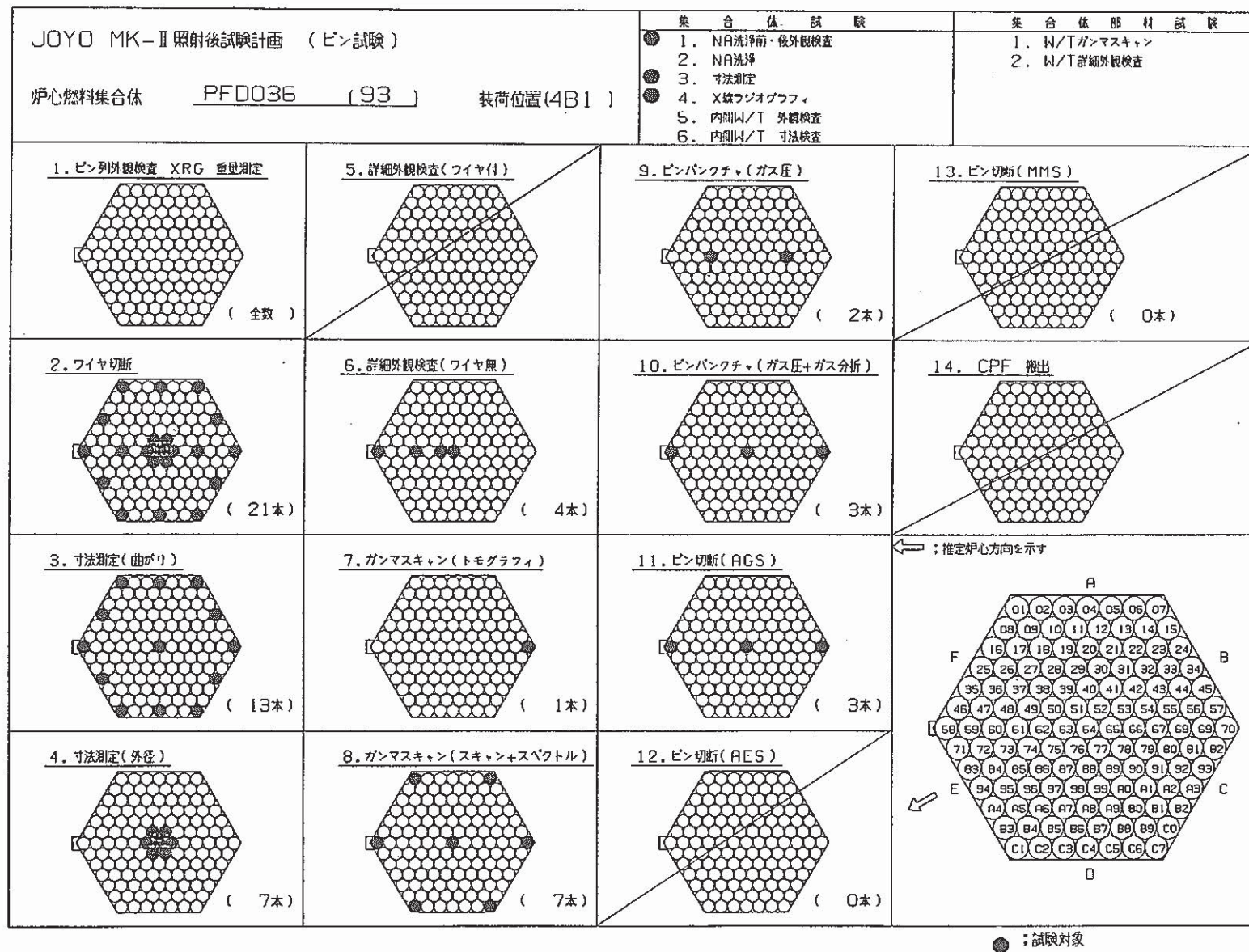


Fig.6 Pins Selected for the Examination

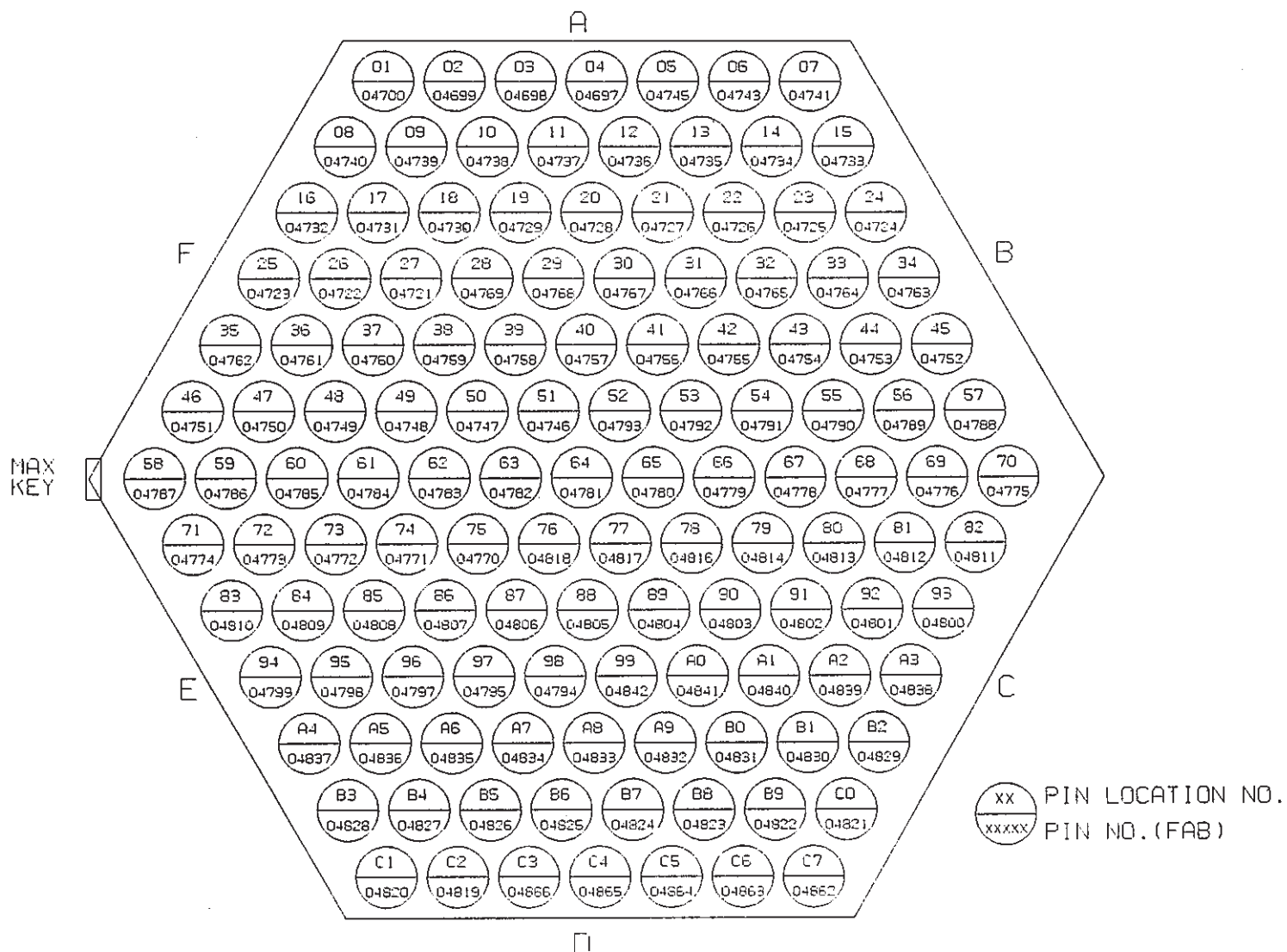


Fig.7 Pin Loading Diagram

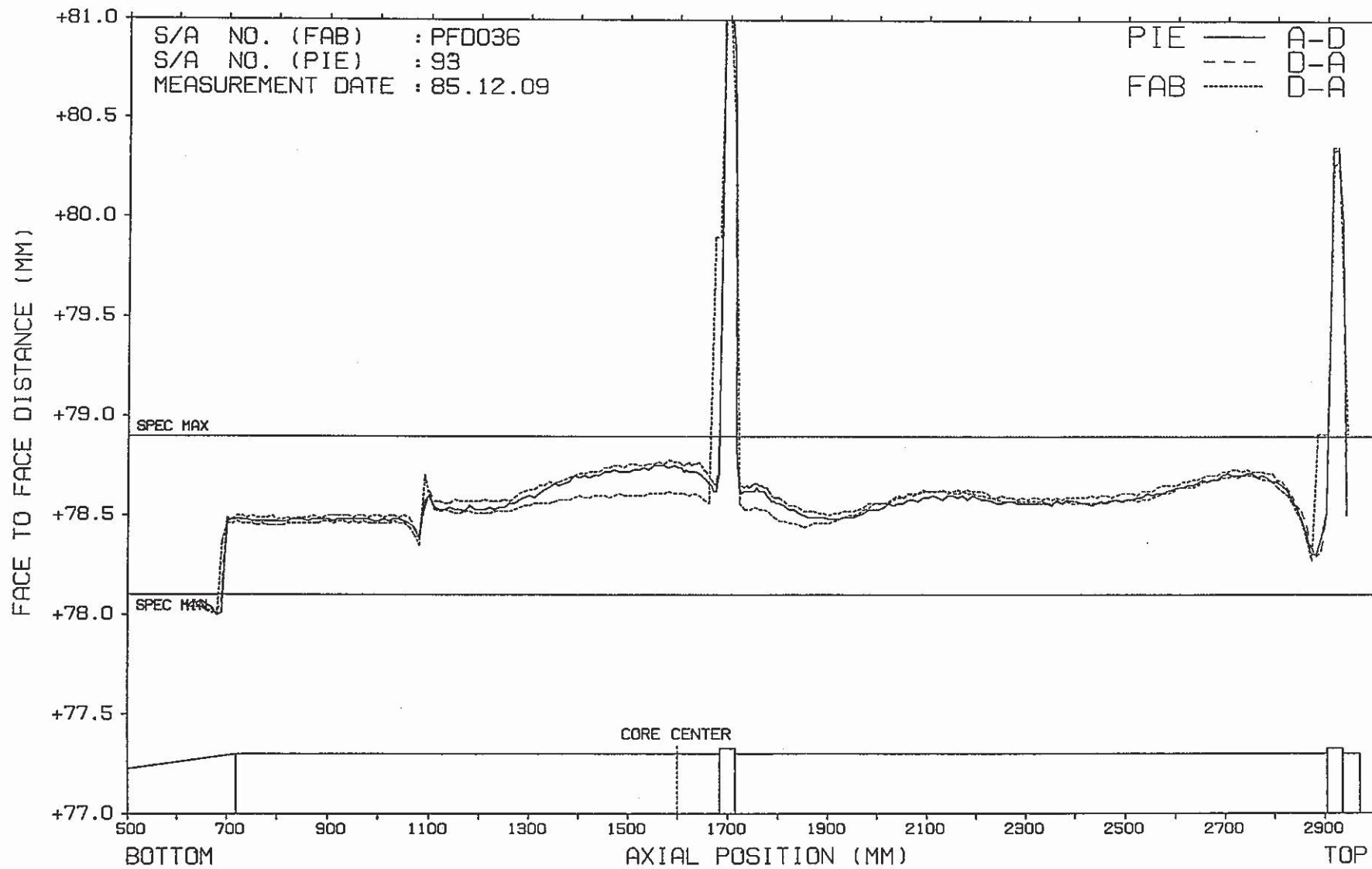


Fig.8 Wrapper Tube Face to Face Distance (A - D face)

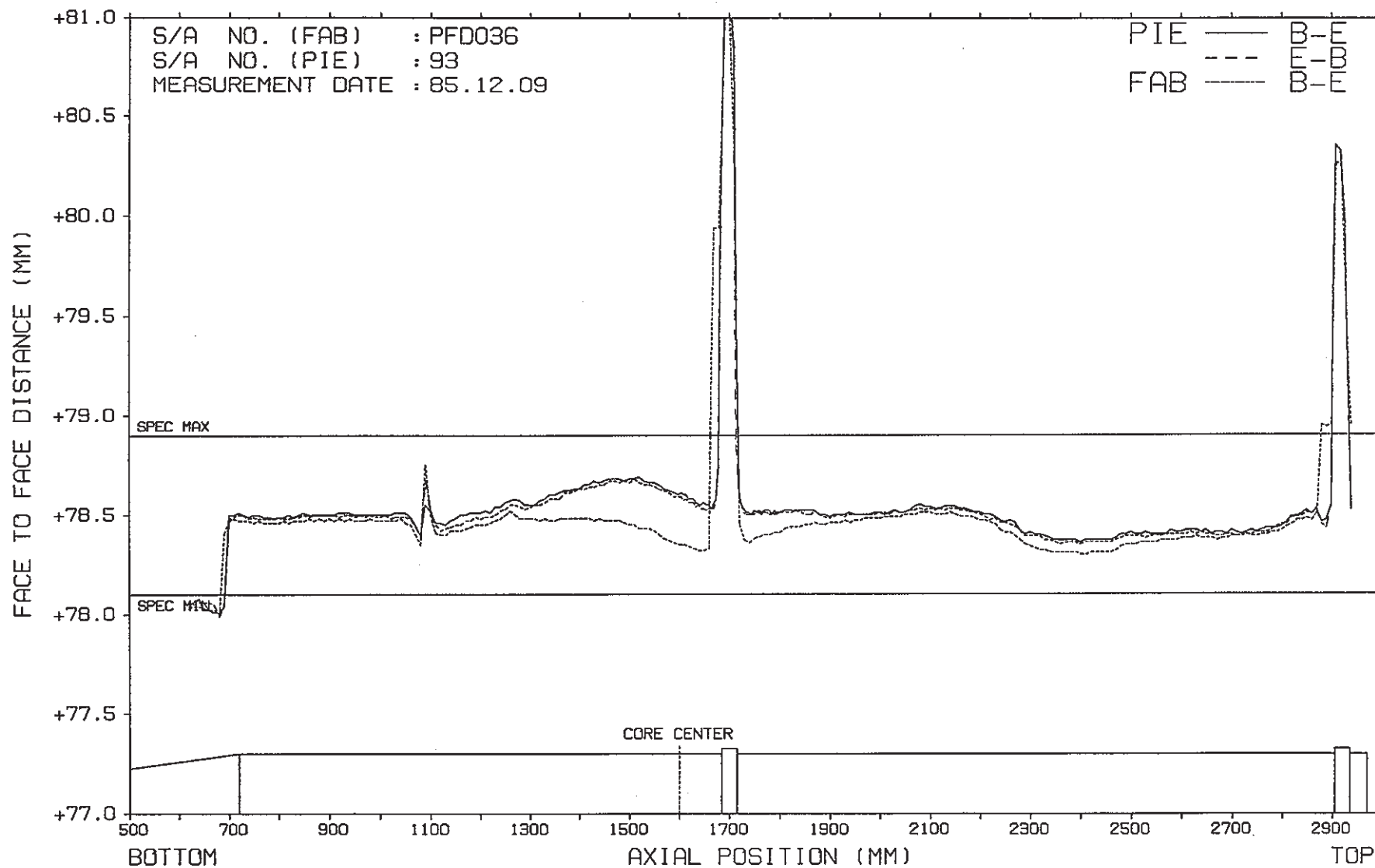


Fig.9 Wrapper Tube Face to Face Distance (B - E face)

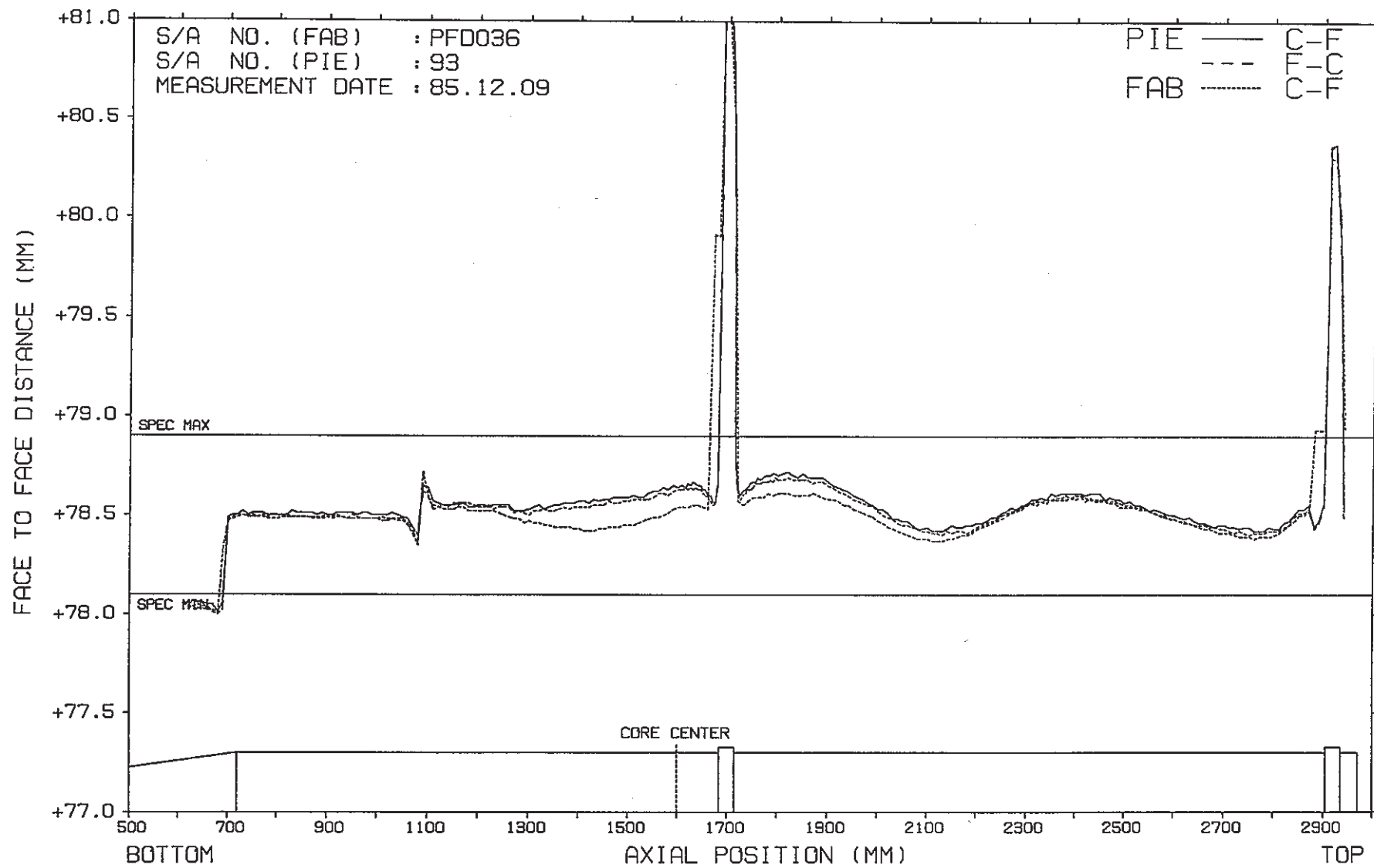
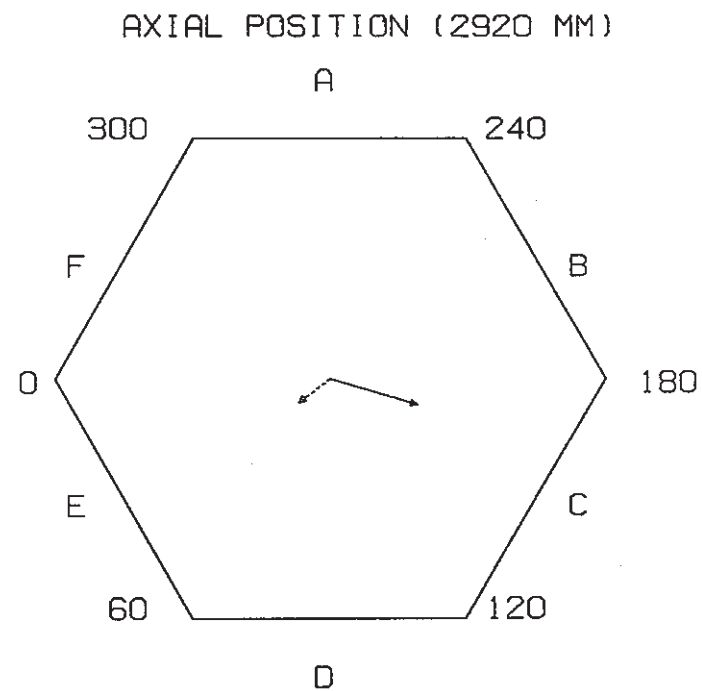
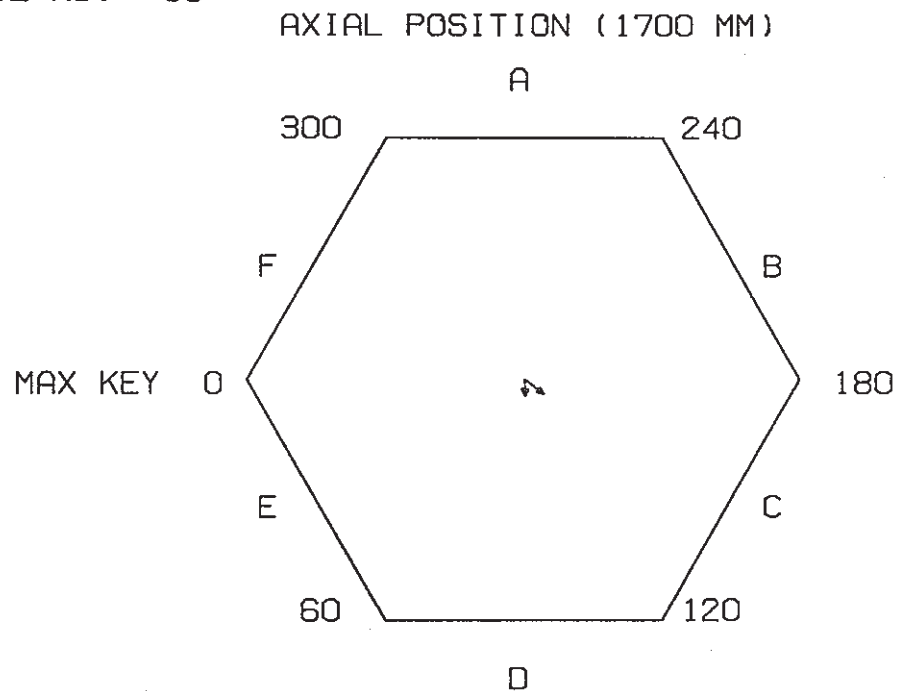


Fig.10 Wrapper Tube Face to Face Distance (C-F face)

S/A FAB NO. : PFD036
 PIE NO. : 93

VIEW FROM TOP



AXIAL POSITION	1700 (MM) (AT MIDDLE PAD)		2920 (MM) (AT UPPER PAD)	
	BOWING (MM)	DIRECTION (DEG)	BOWING (MM)	DIRECTION (DEG)
IRRAD.	0.6	141	2.6	163
UNIRRAD.	0.4	88	1.1	36

IRRAD. 
 UNIRRAD. 
 BOWING SCALE  2.0 MM

Fig.11 Bowing Vector of the Subassembly

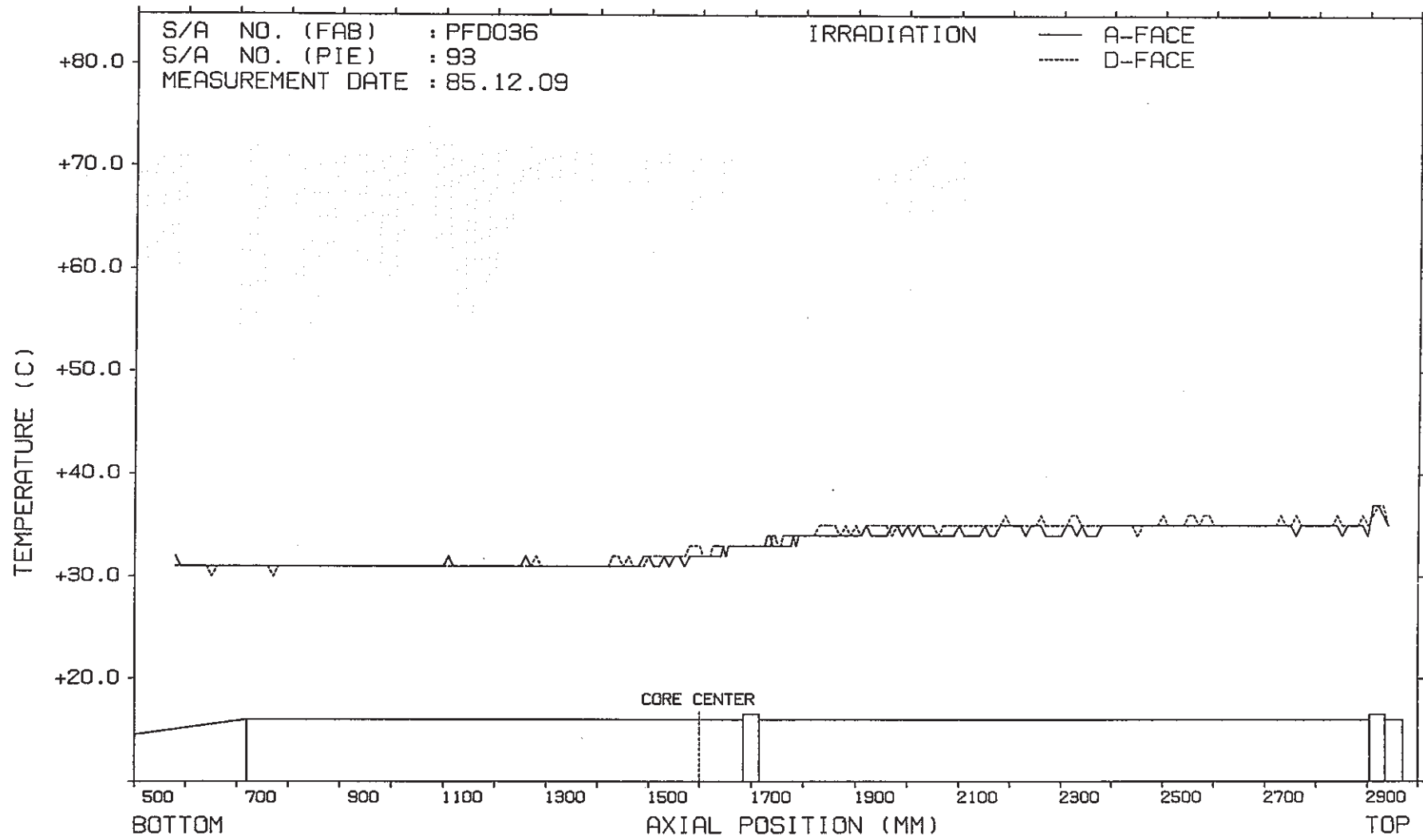


Fig.12 Surface Temperature Profile of the Subassembly in Axial Direction

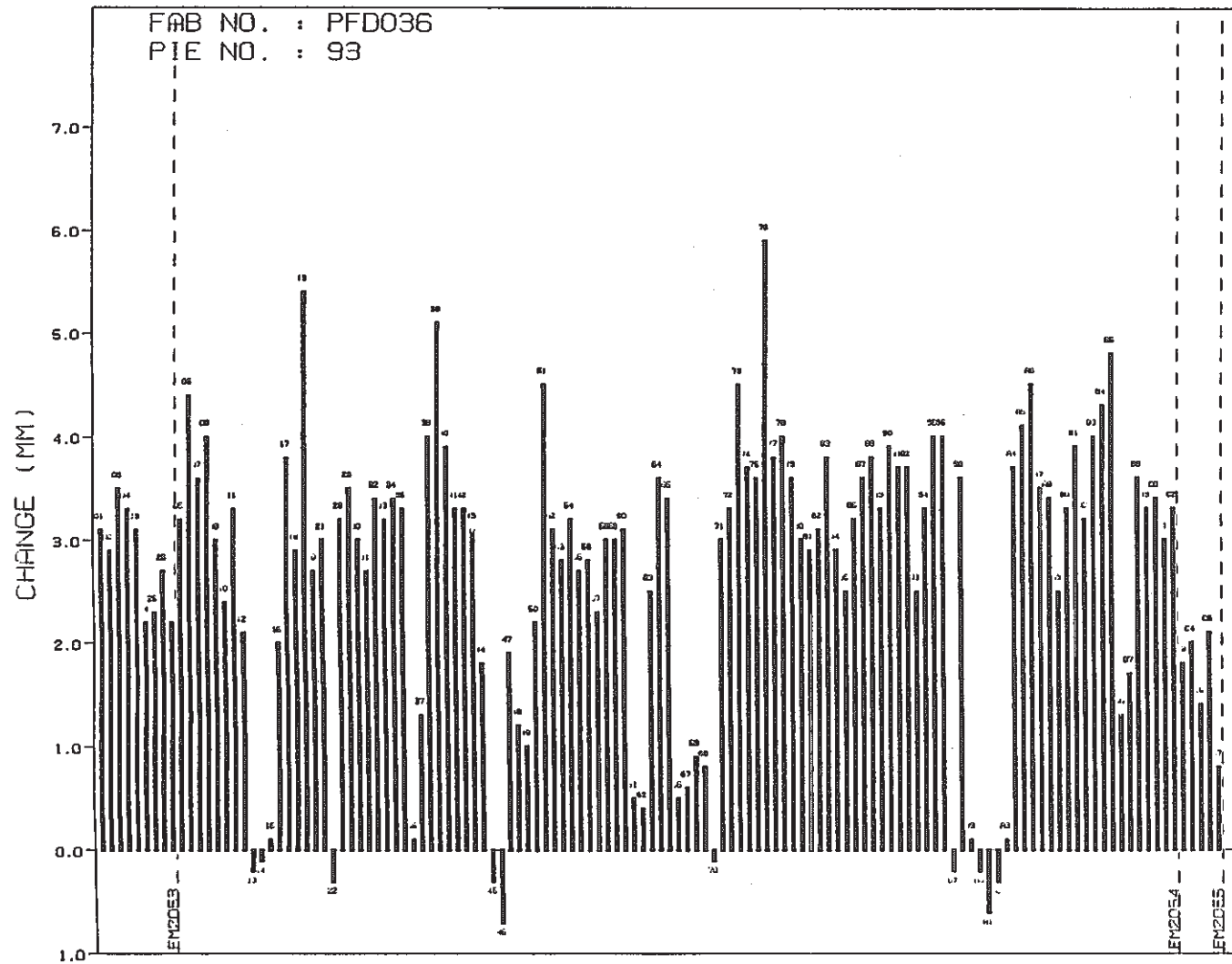


Fig.13 Fuel Stack Length Changes in the Subassembly

CORE PELET LOT NO.	NO. OF DATA	AVE.	MAX.	MIN.
FM2053	9	2.8	3.5	2.2
FM2054	113	2.7	5.9	-0.7
FM2055	5	1.6	2.1	0.8

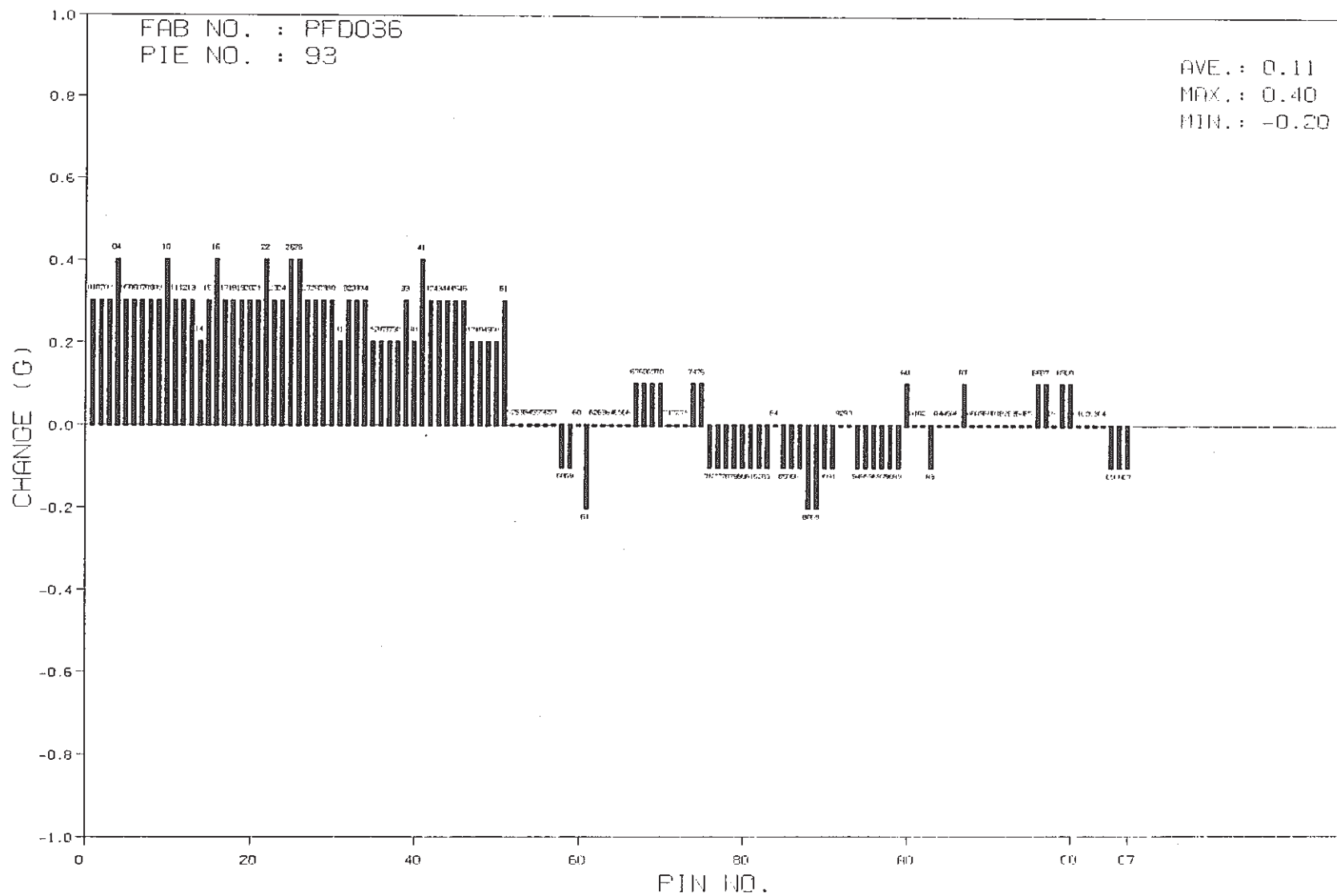


Fig. 14 Pin Weight Changes

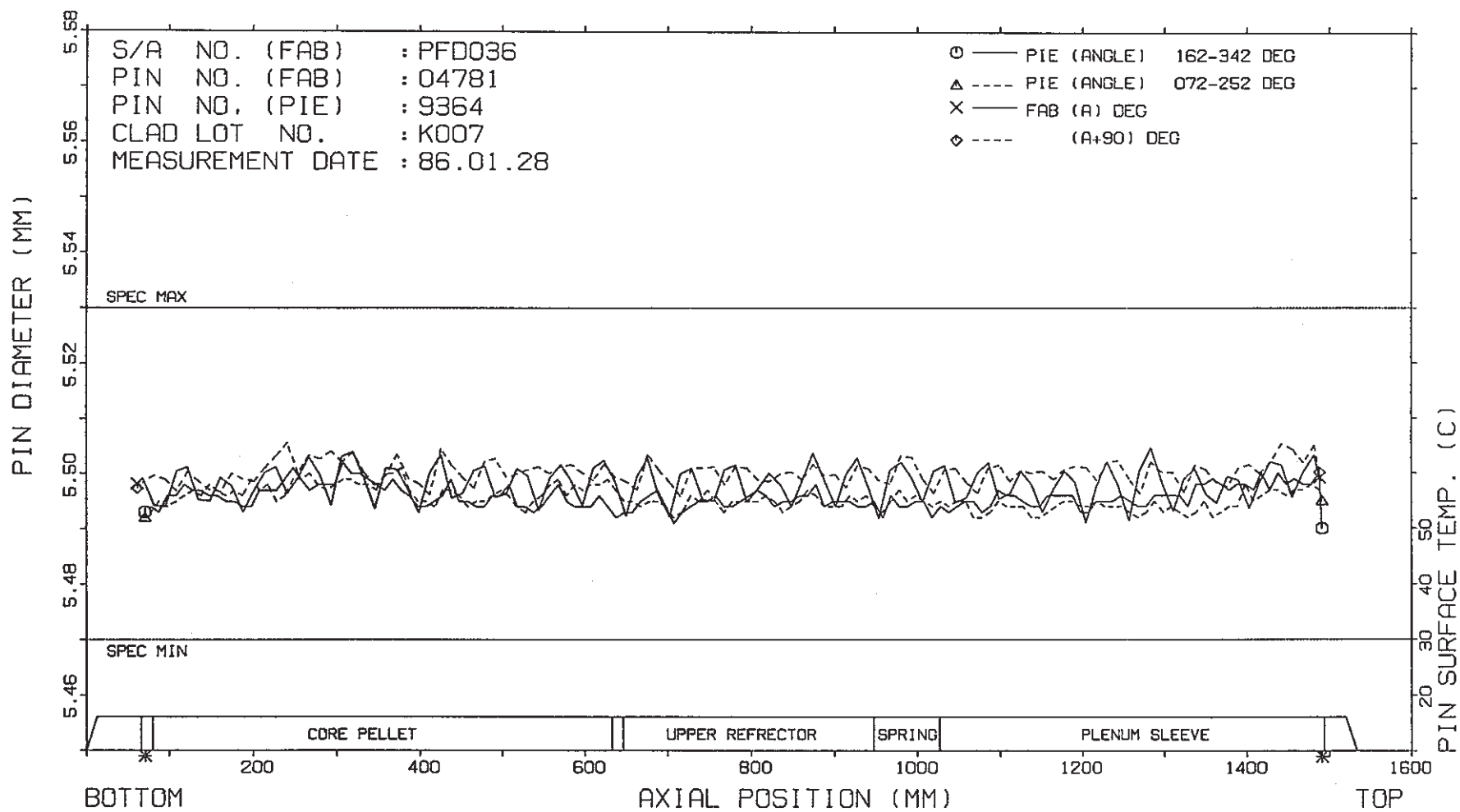


Fig.15 Axial Profile of Fuel Pin Outer Diameter

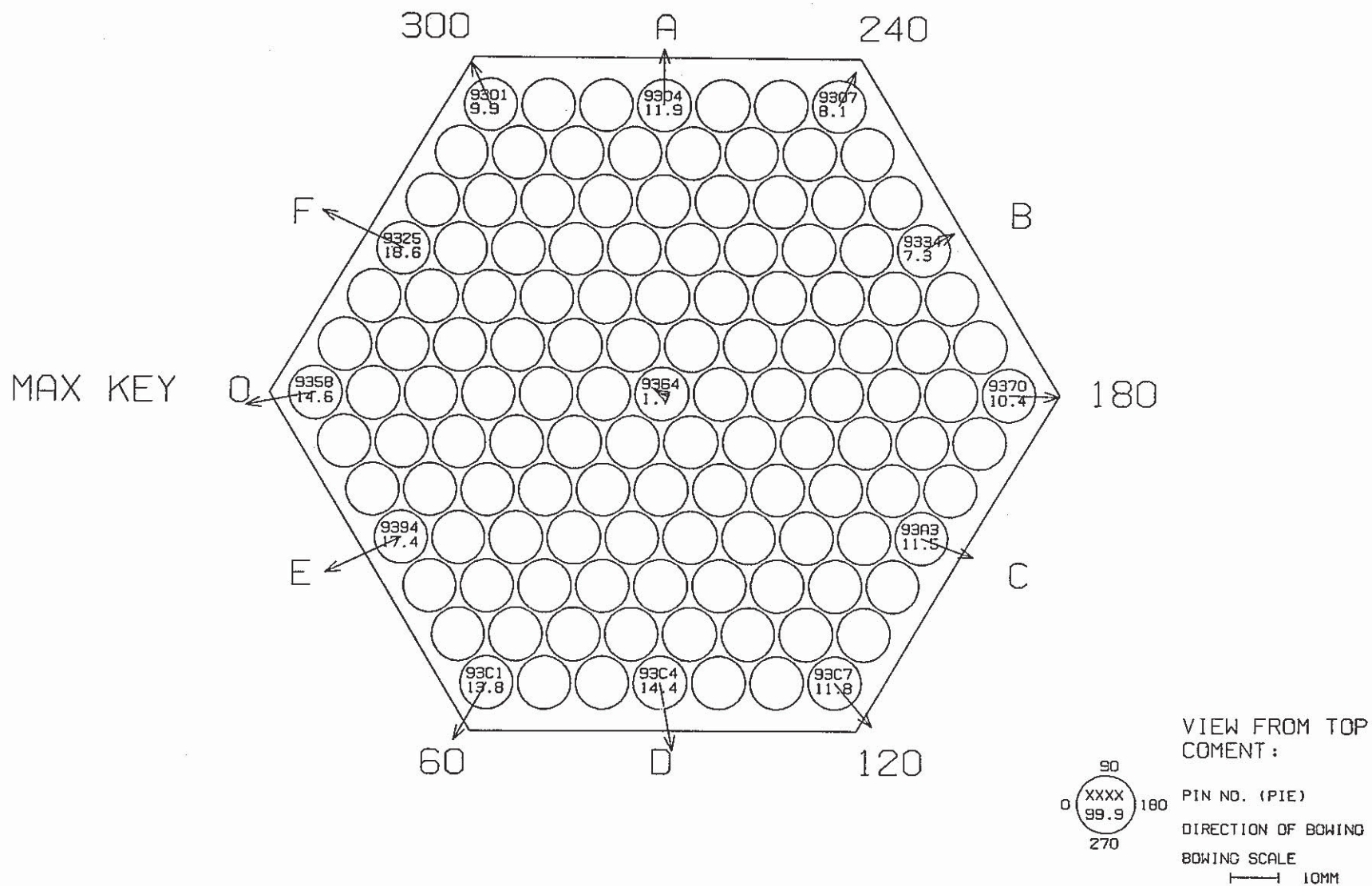


Fig. 16 Bowing Vectors of Pins

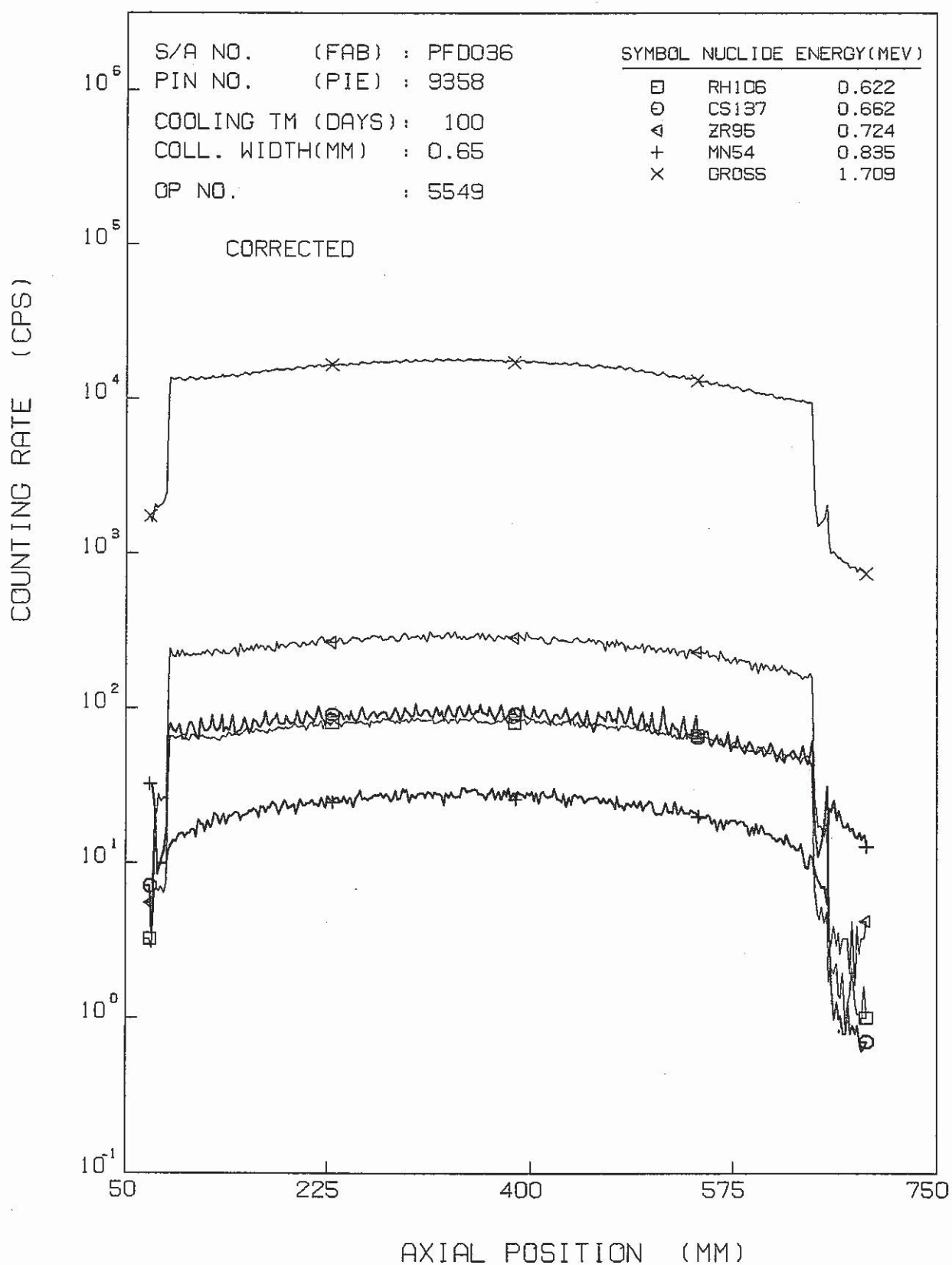


Fig. 17 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (PinNa 9358)

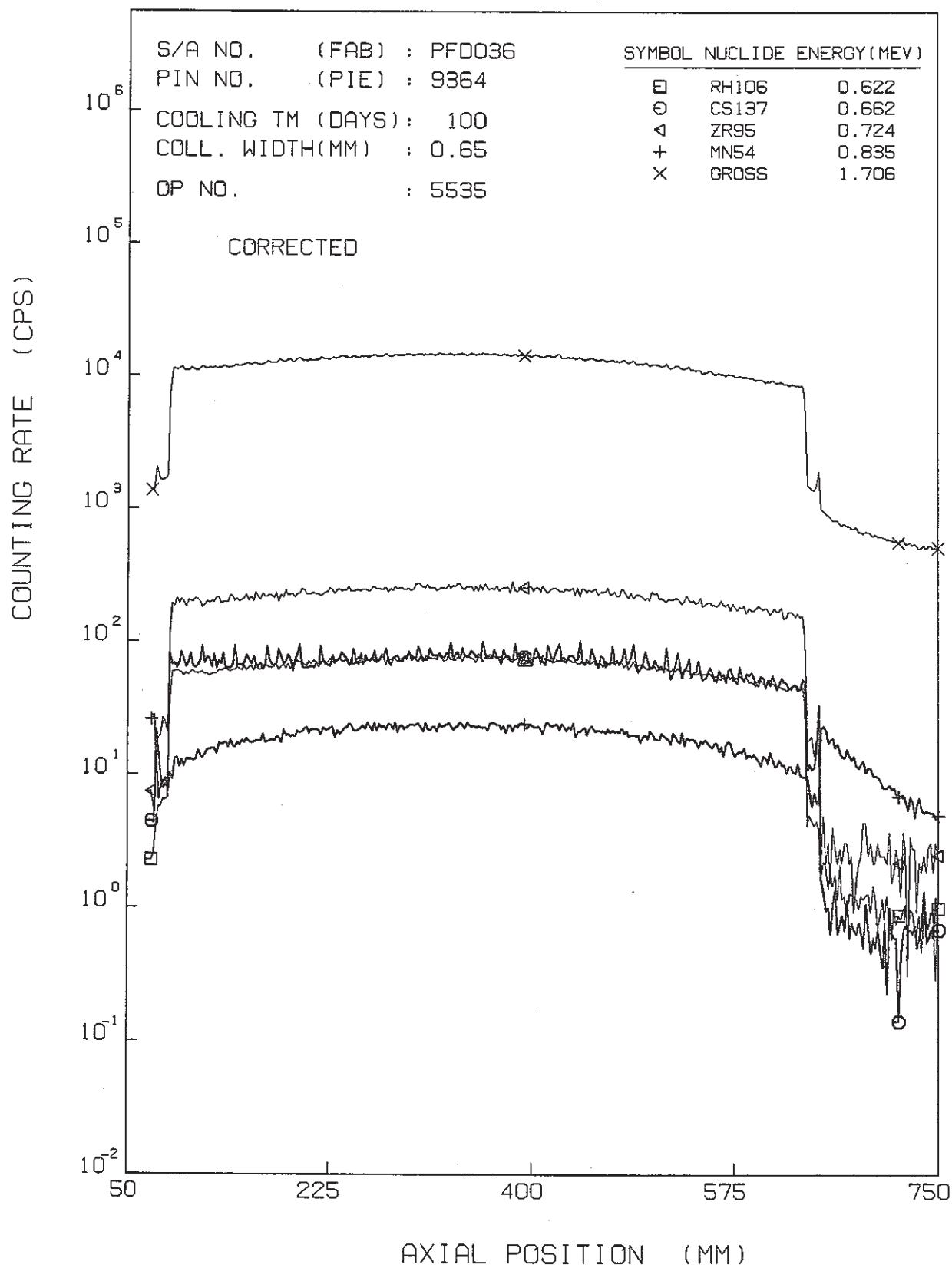


Fig.18 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 9364)

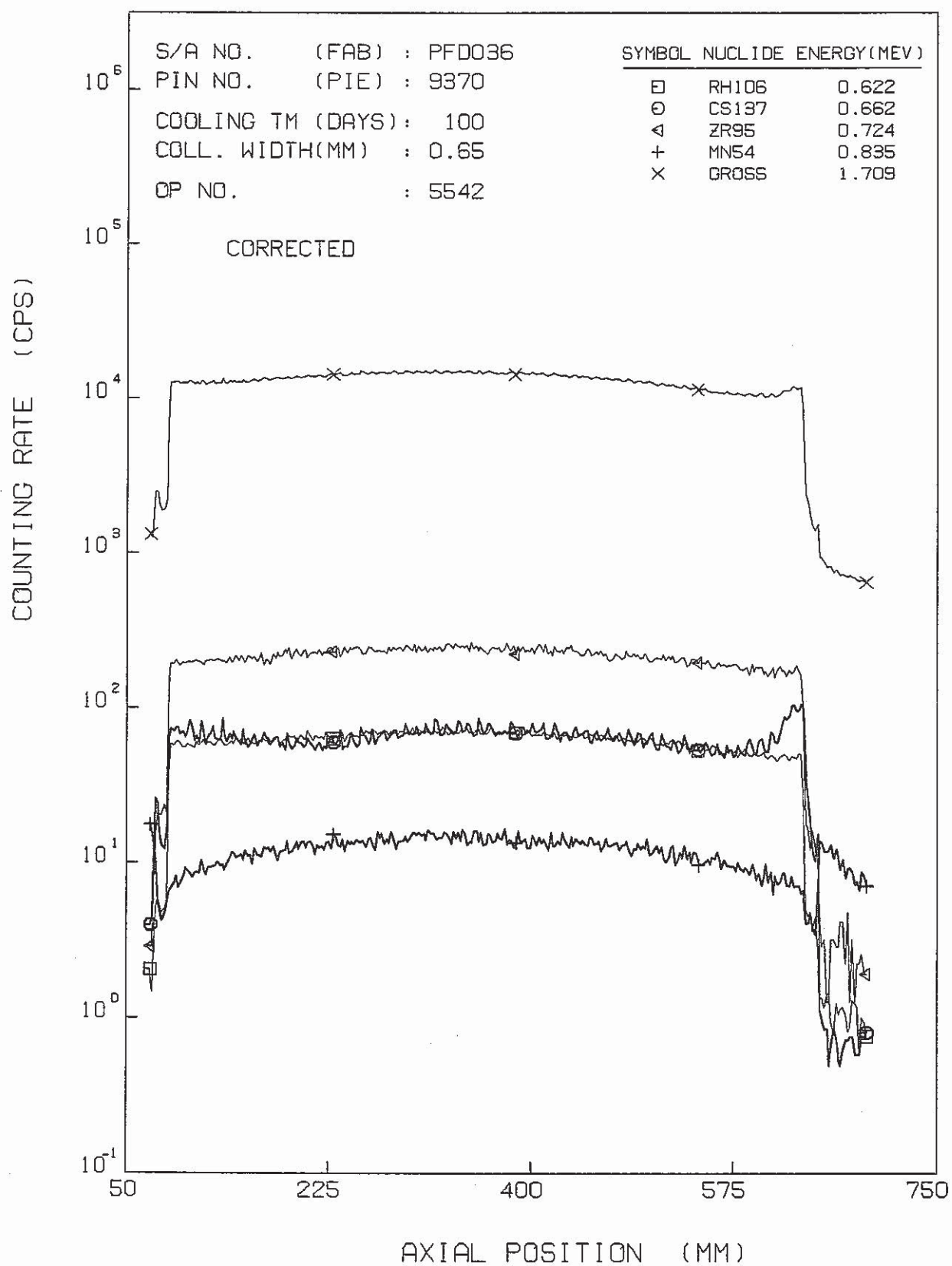


Fig.19 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No 9370)

S/A NO. (FAB) :	PFD036	ANGLE OF MAX RATE (DEG):	24.23
S/A NO. (PIE) :	93	MAX COUNT RATE (CPS):	272.27
AXIAL POS. (MM) :	338.00	AVERAGE COUNT RATE(CPS):	252.68
COOLING TM (DAYS):	100	PEAKING FACTOR :	1.077
COLL. WIDTH(MM) :	0.65		
OP NO. :	5514-5552		

CORRECTED

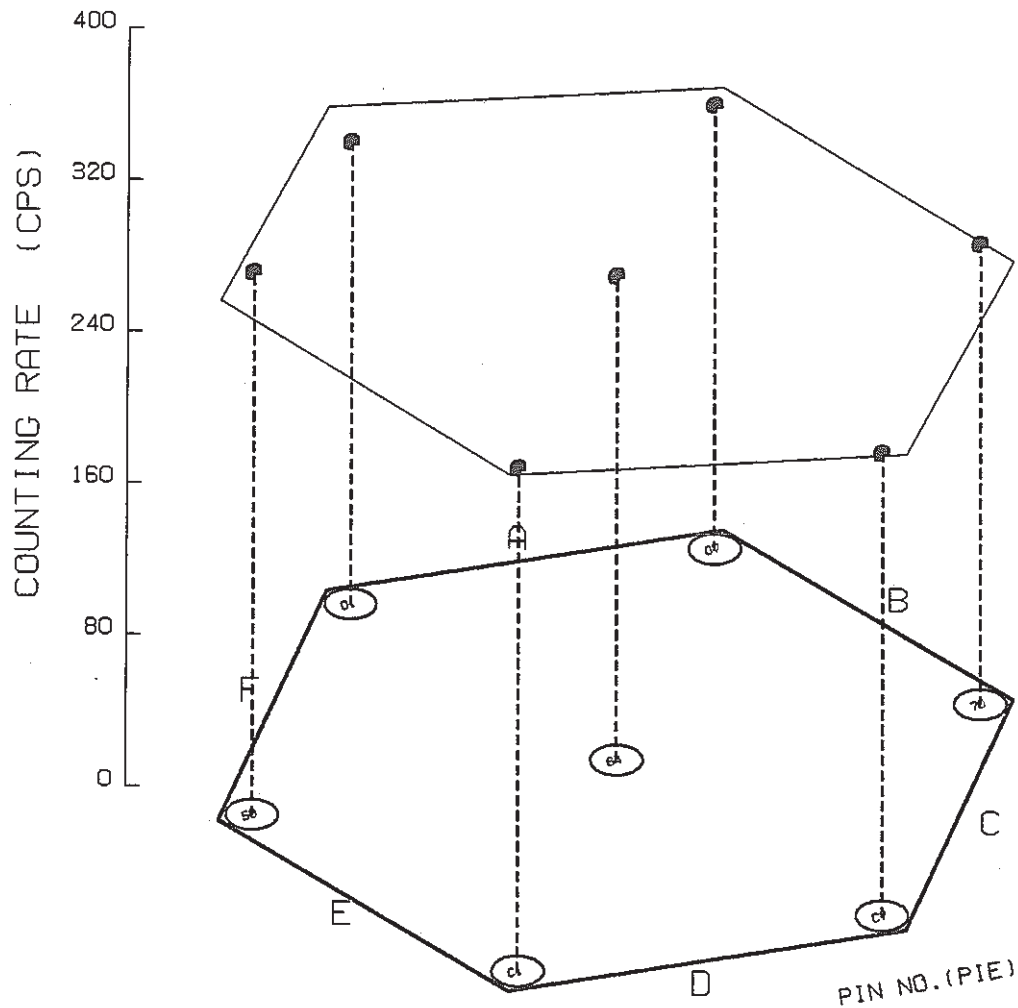
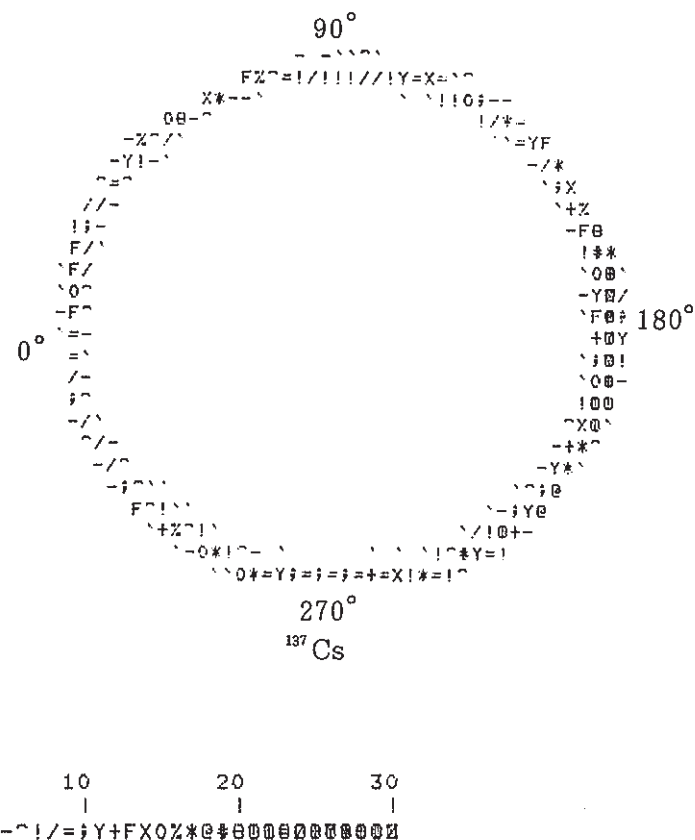
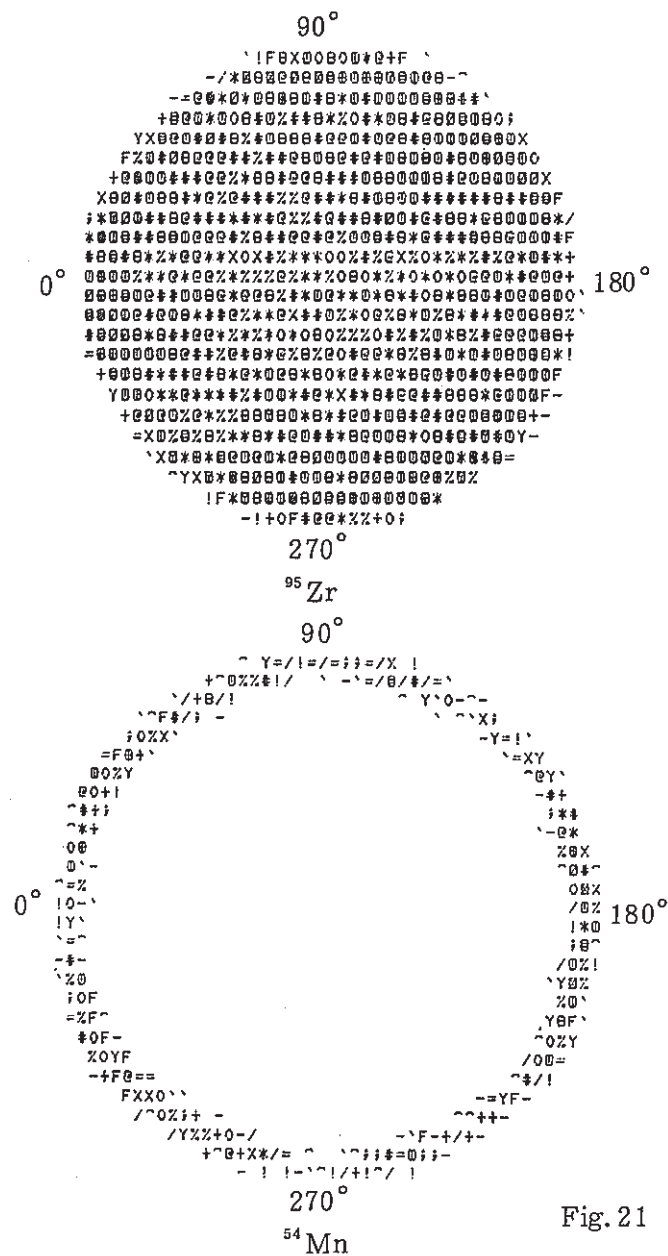


Fig. 20 Radial Distribution of Gamma Ray Intensity in the Subassembly
(^{95}Zr , 0.725 MeV)



軸方向位置 625 mm

Fig.21 Emission Tomographs of Radionuclides in a Fuel Pin (Pin No 9370)

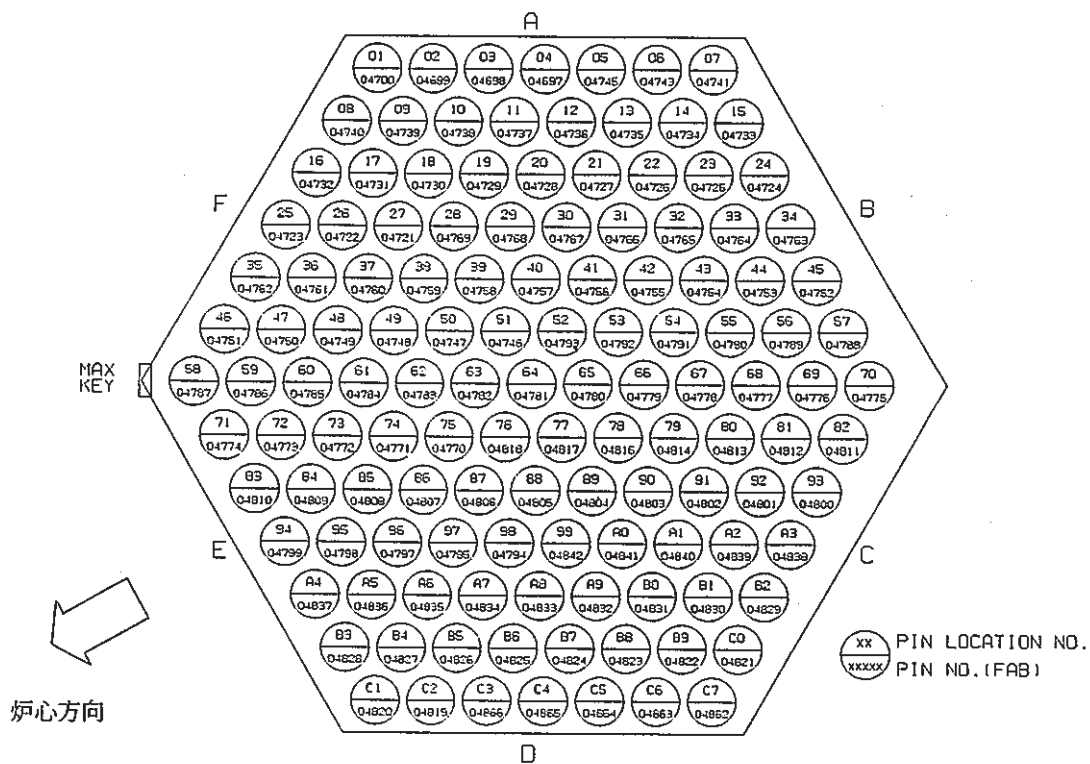
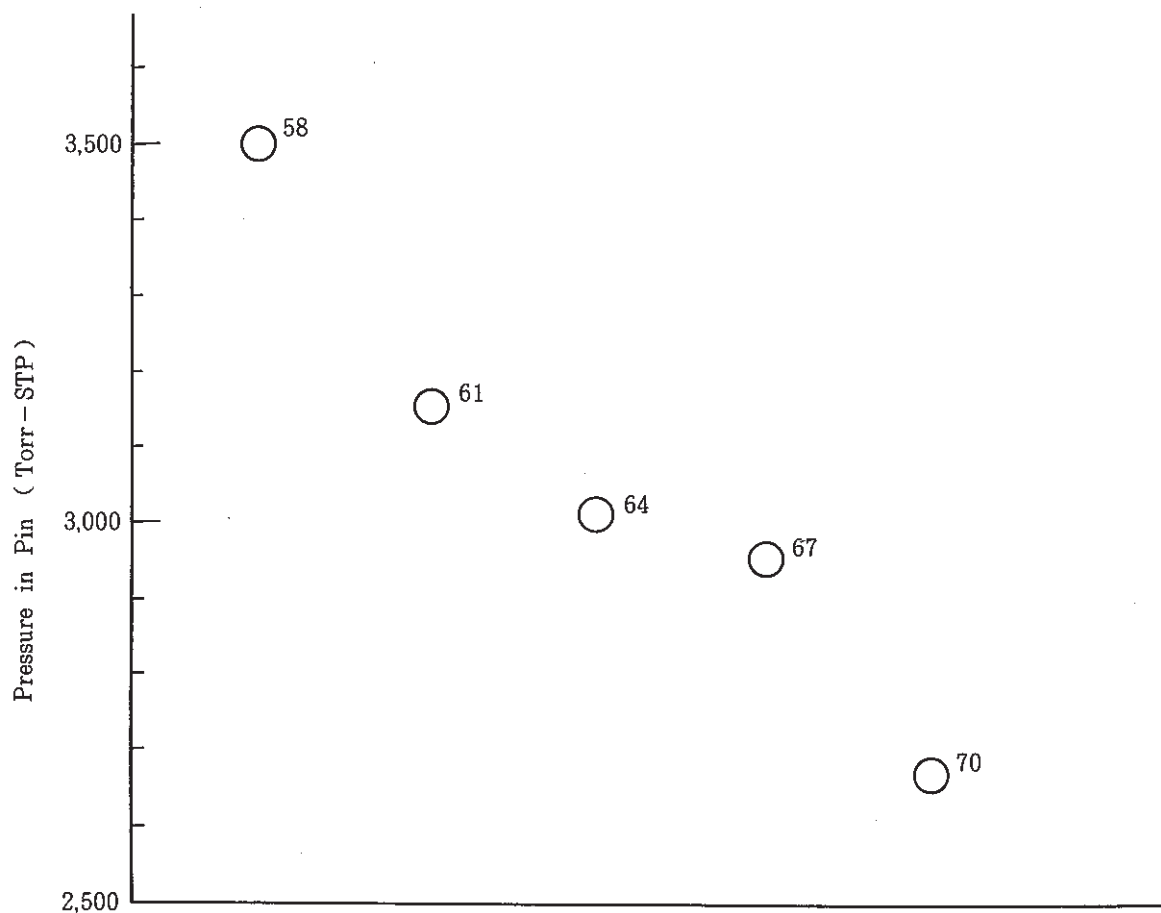


Fig.22 Plenum Gas Pressure

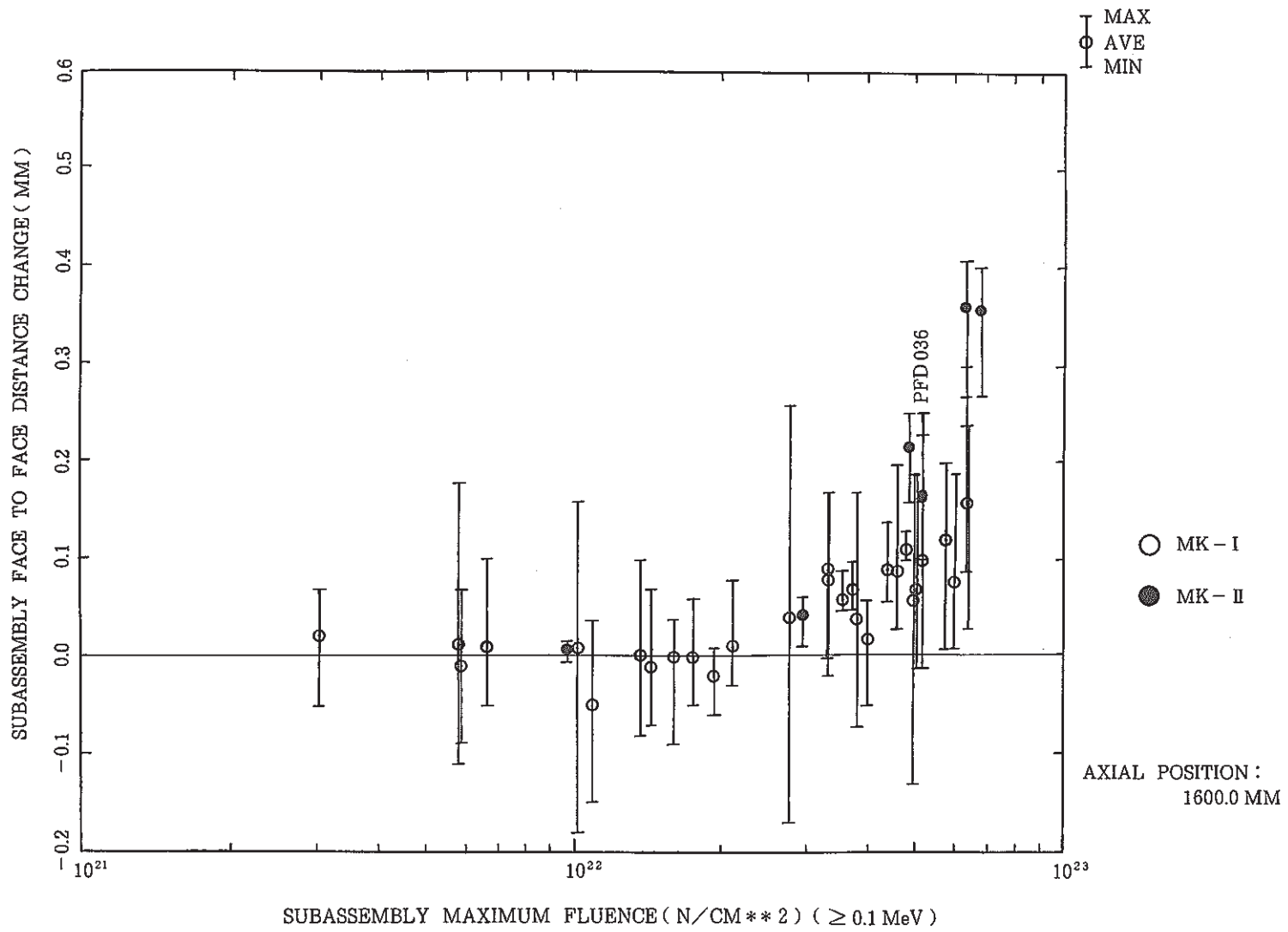


Fig.23 Wrapper Tube Face to Face Distance Changes as a Function of the Subassembly Maximum Fluence

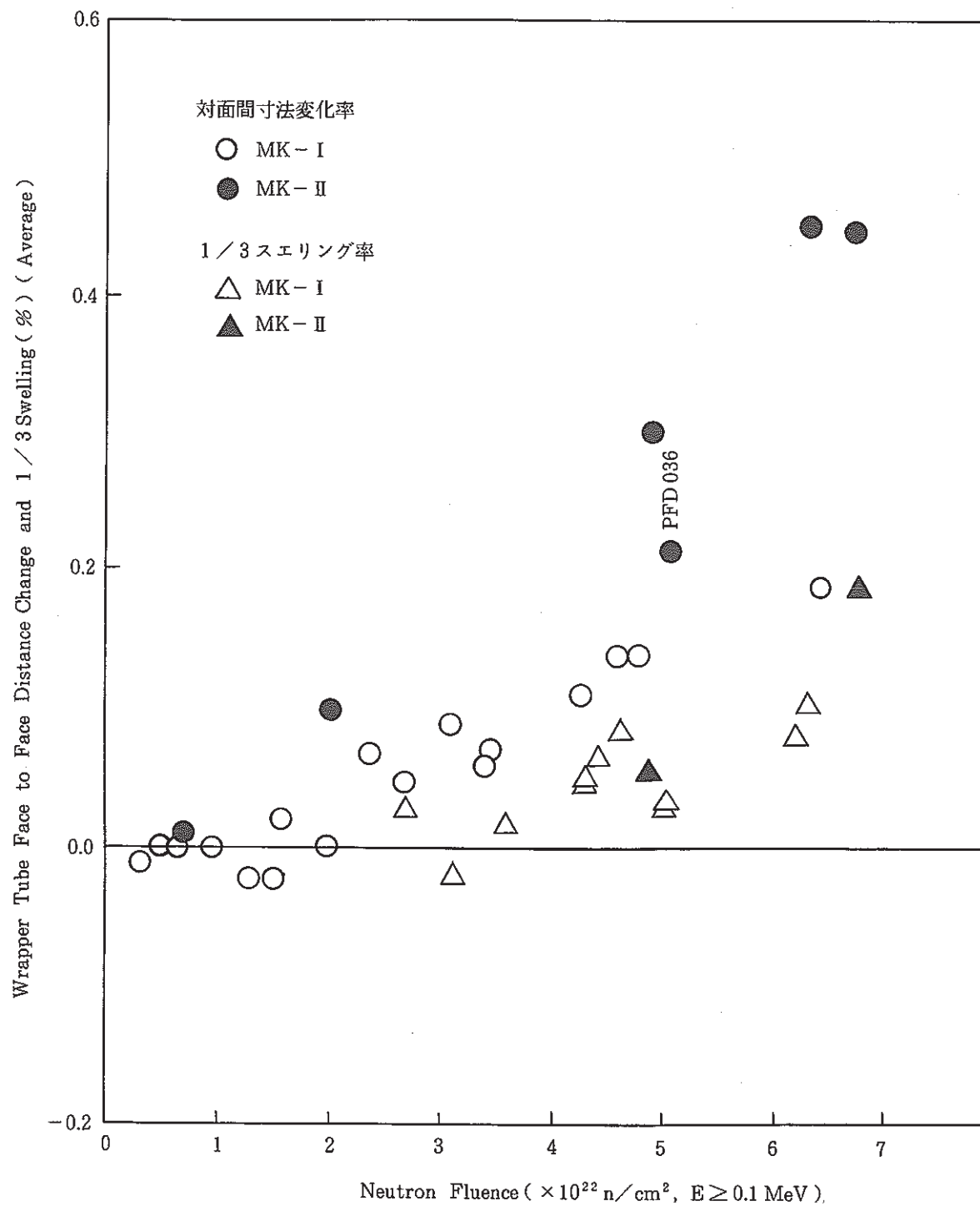


Fig.24 Wrapper Tube Face to Face Distance Change and 1/3 Swelling Rate at Axial Core Center

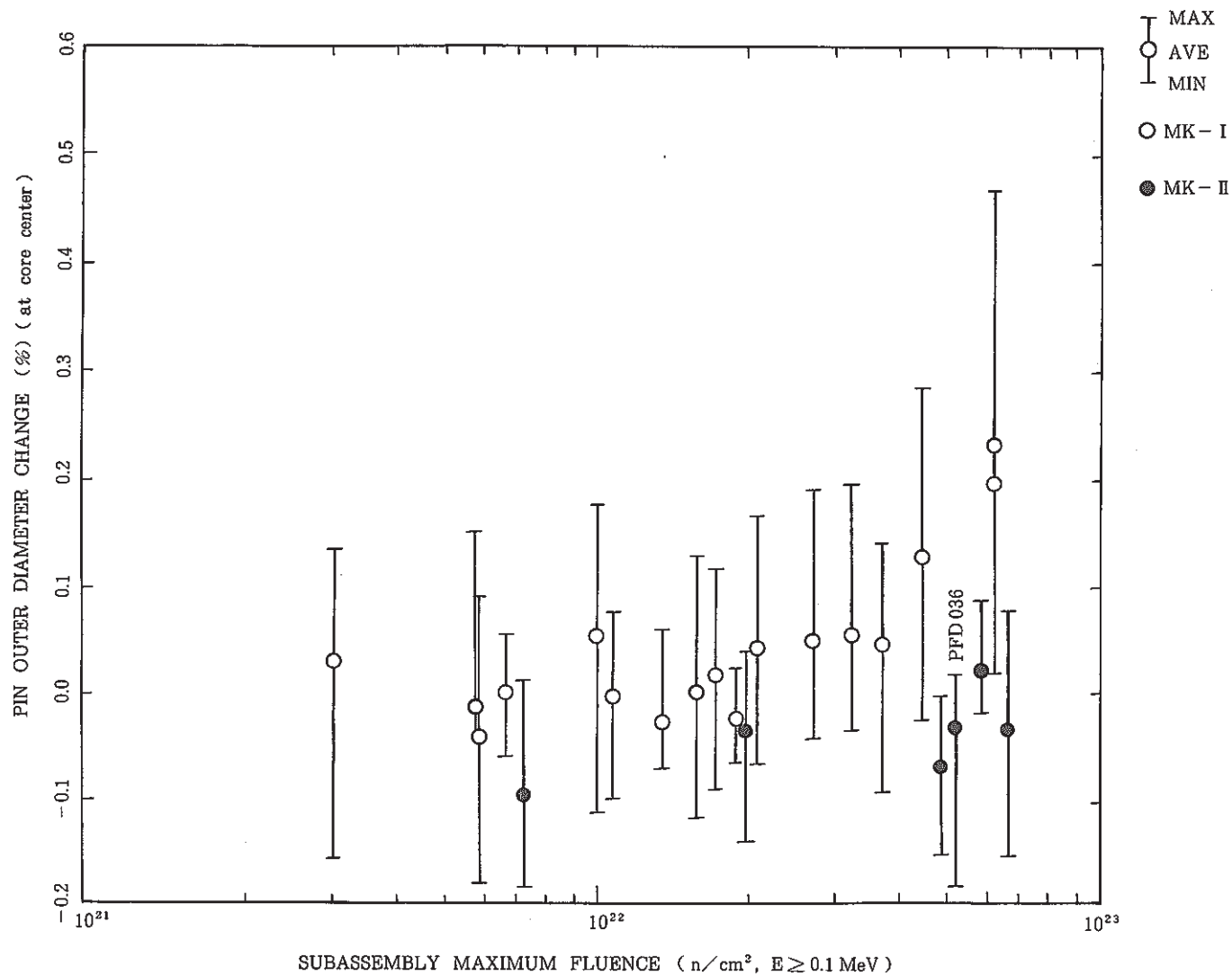


Fig.25 Pin Outer Diameter Changes of MK-I and MK-II Core Fuel Pin as a Function of Subassembly Maximum Fluence

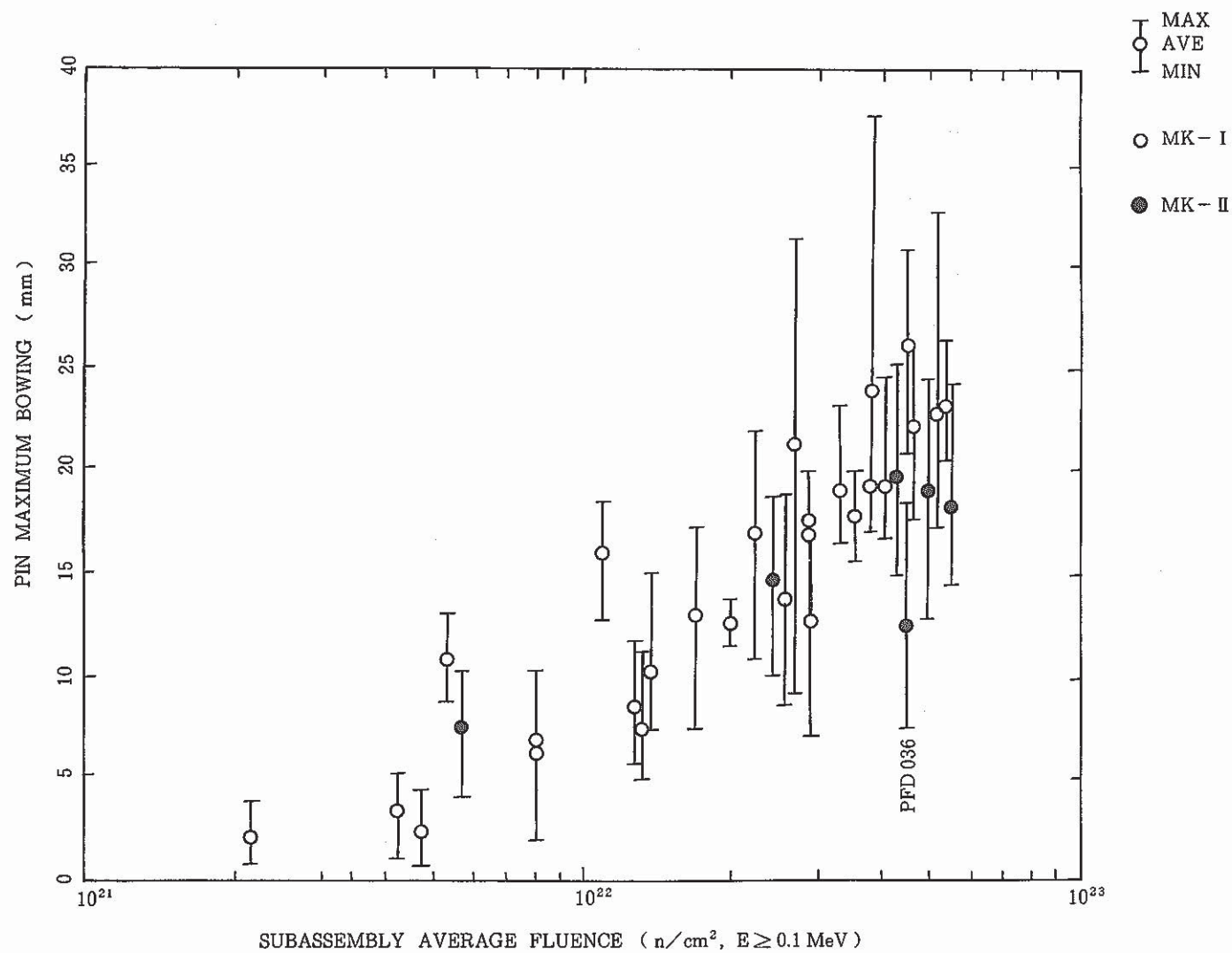


Fig.26 Pin Maximum Bowing as a Function of Subassembly Average Fluence

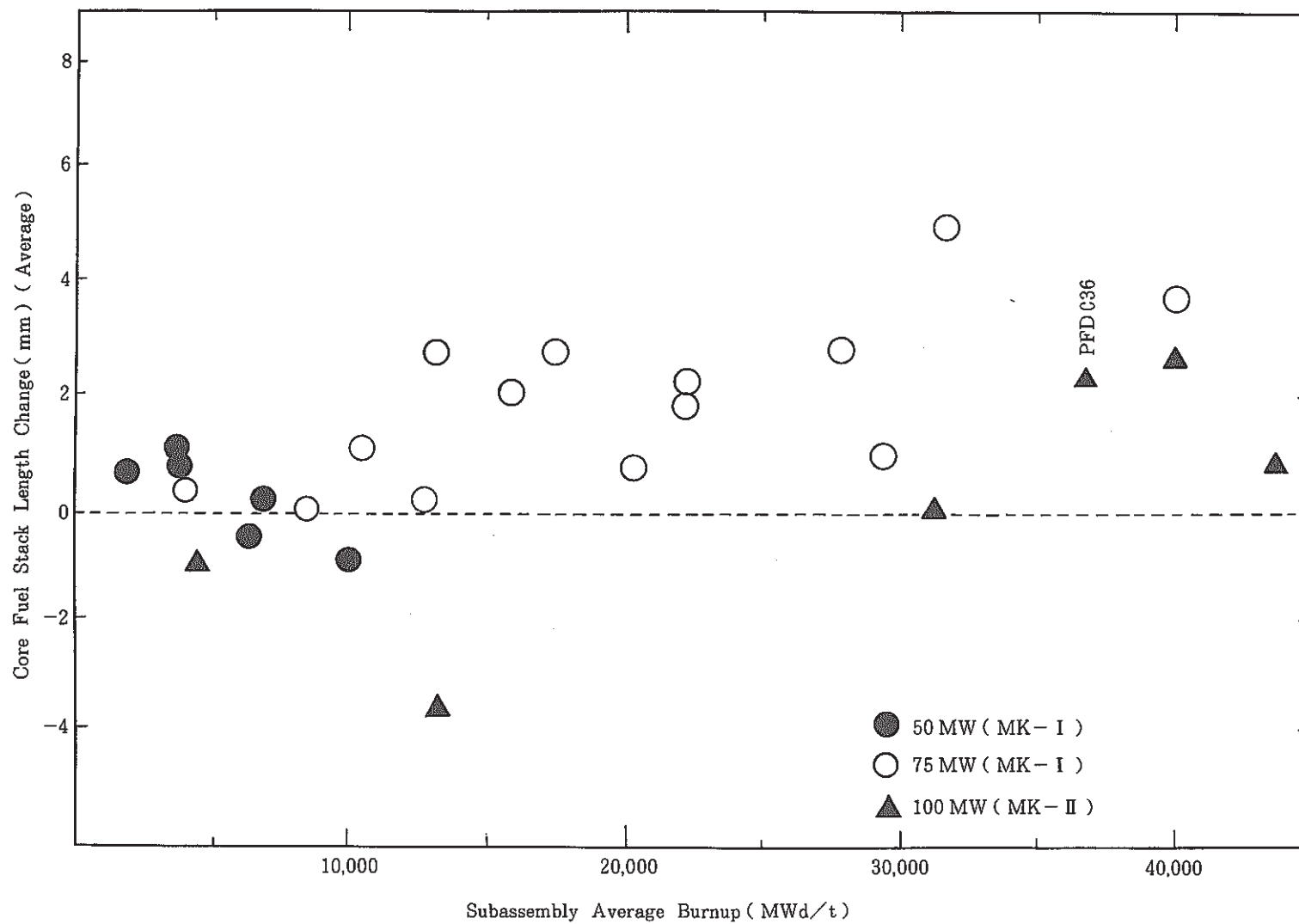


Fig.27 Fuel Stack Length Change of MK-I and MK-II Core Fuel as a Function of Subassembly Average Burnup

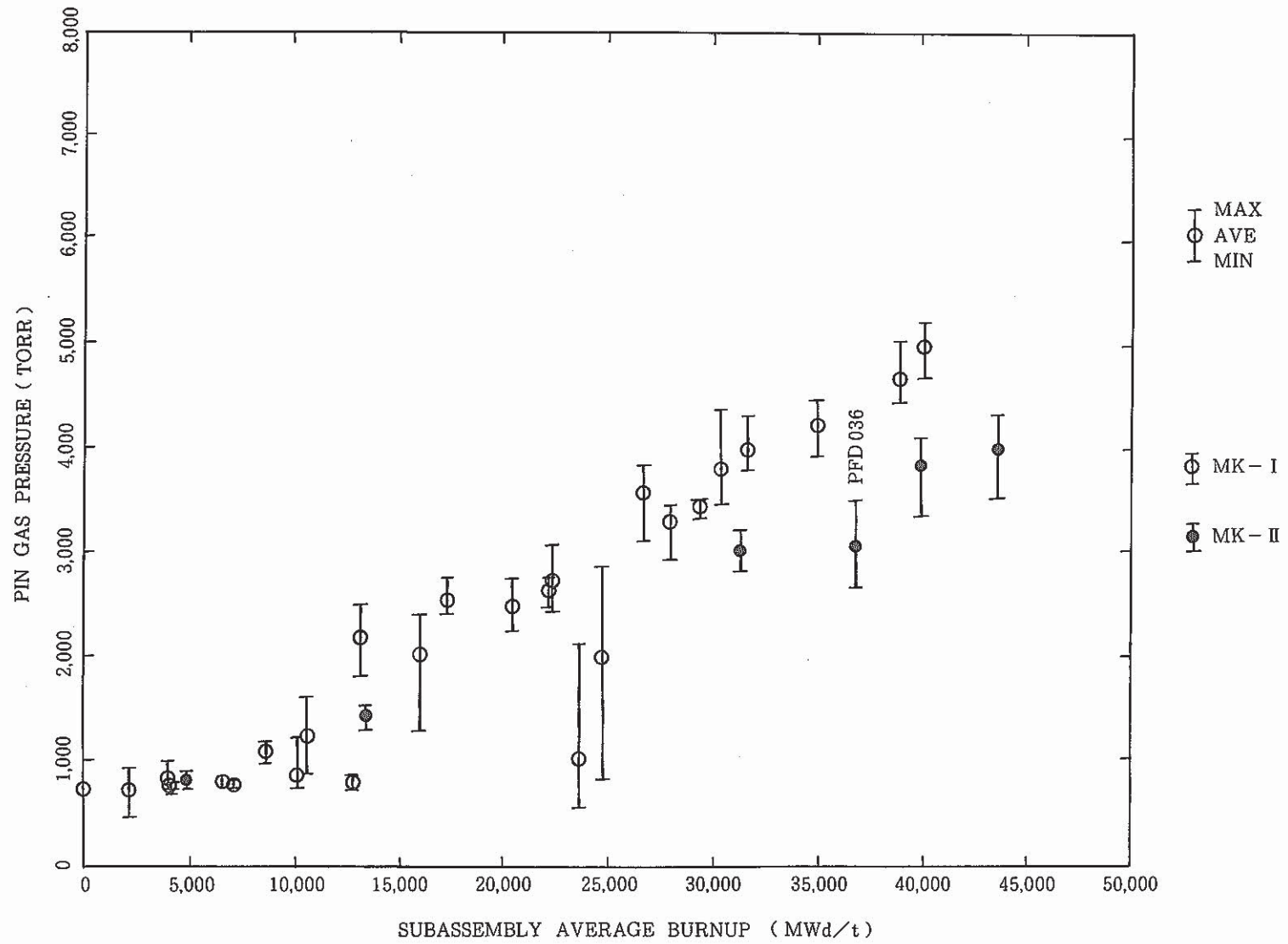


Fig.28 Plenum Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins
as a Function of Subassembly Average Burnup

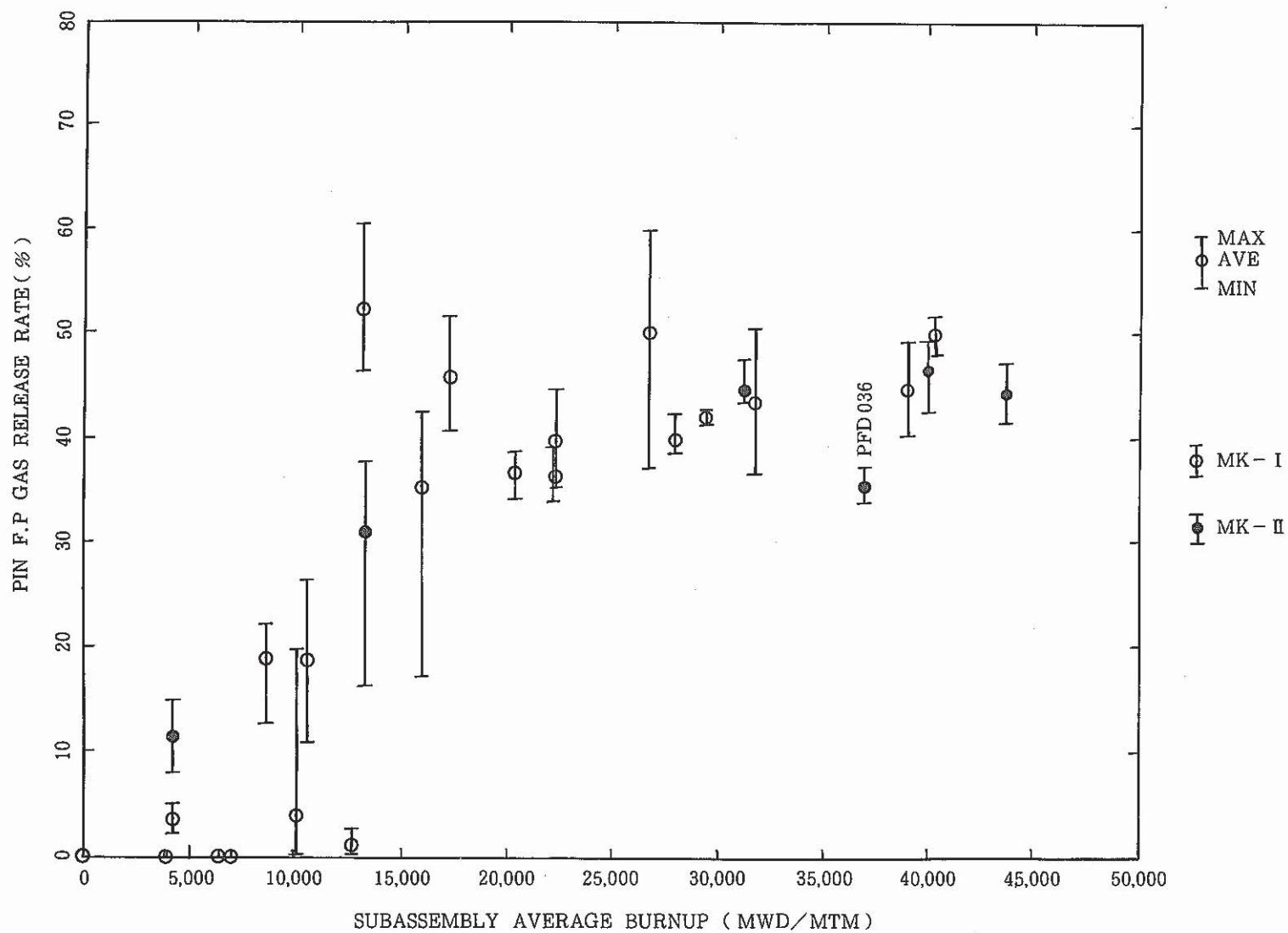
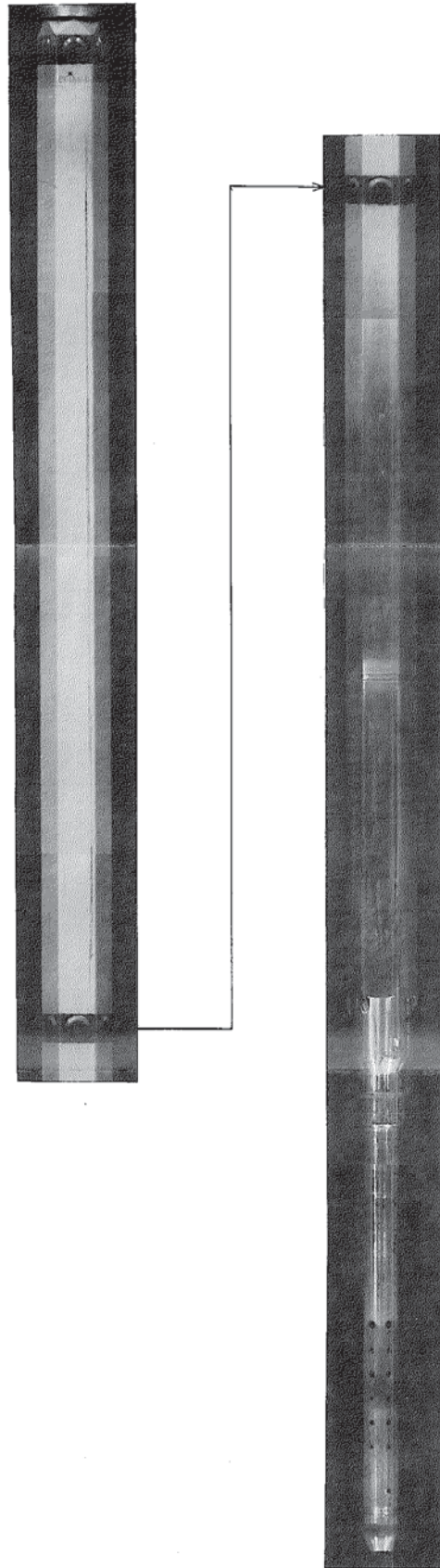


Fig.29 Fission Gas Release Rate of MK-I and MK-II Core Fuel Pins
as a Function of Subassembly Average Burnup



(before)

FACE **F**

F861001

Photo.1 Surface View of the Subassembly

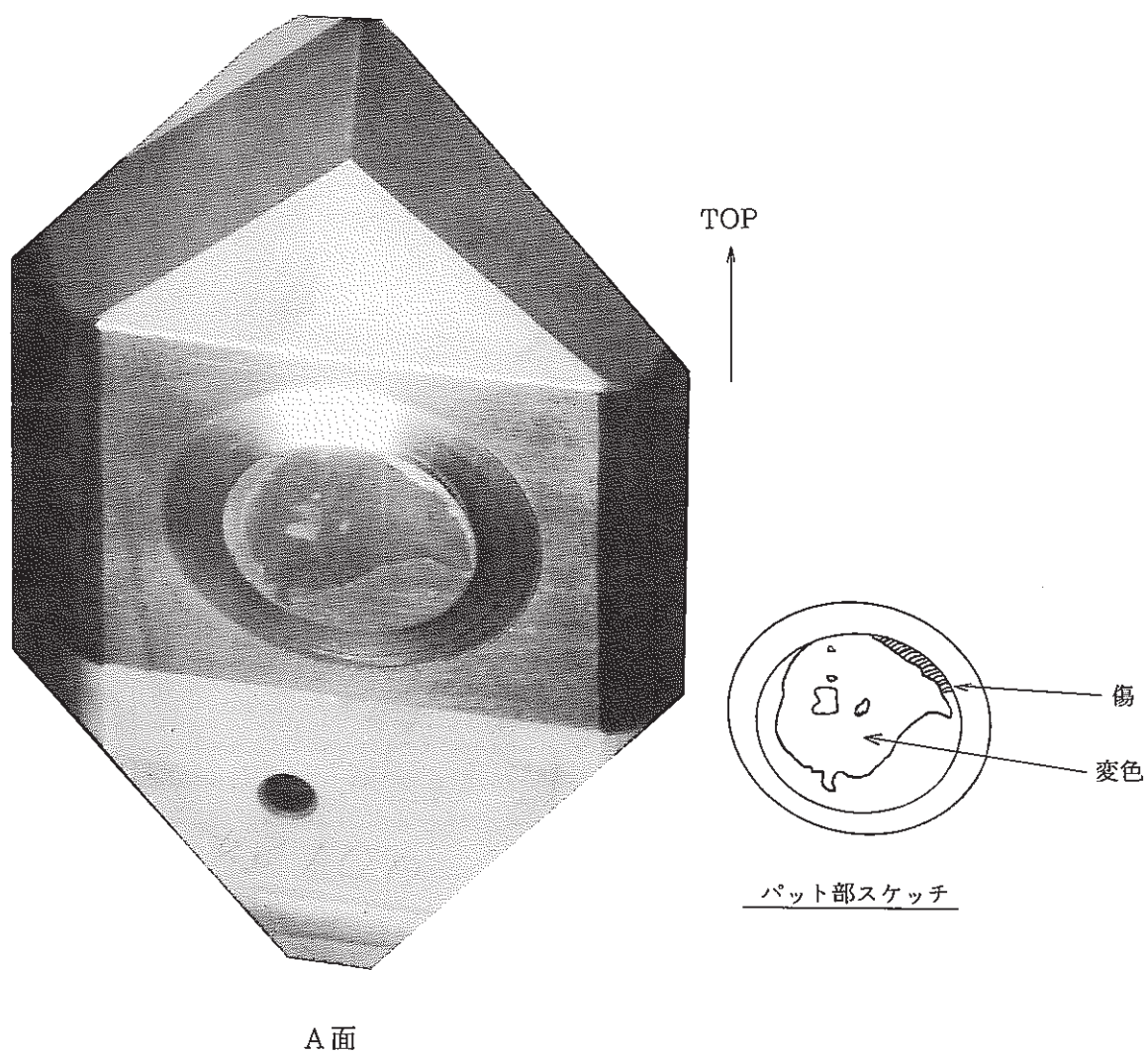
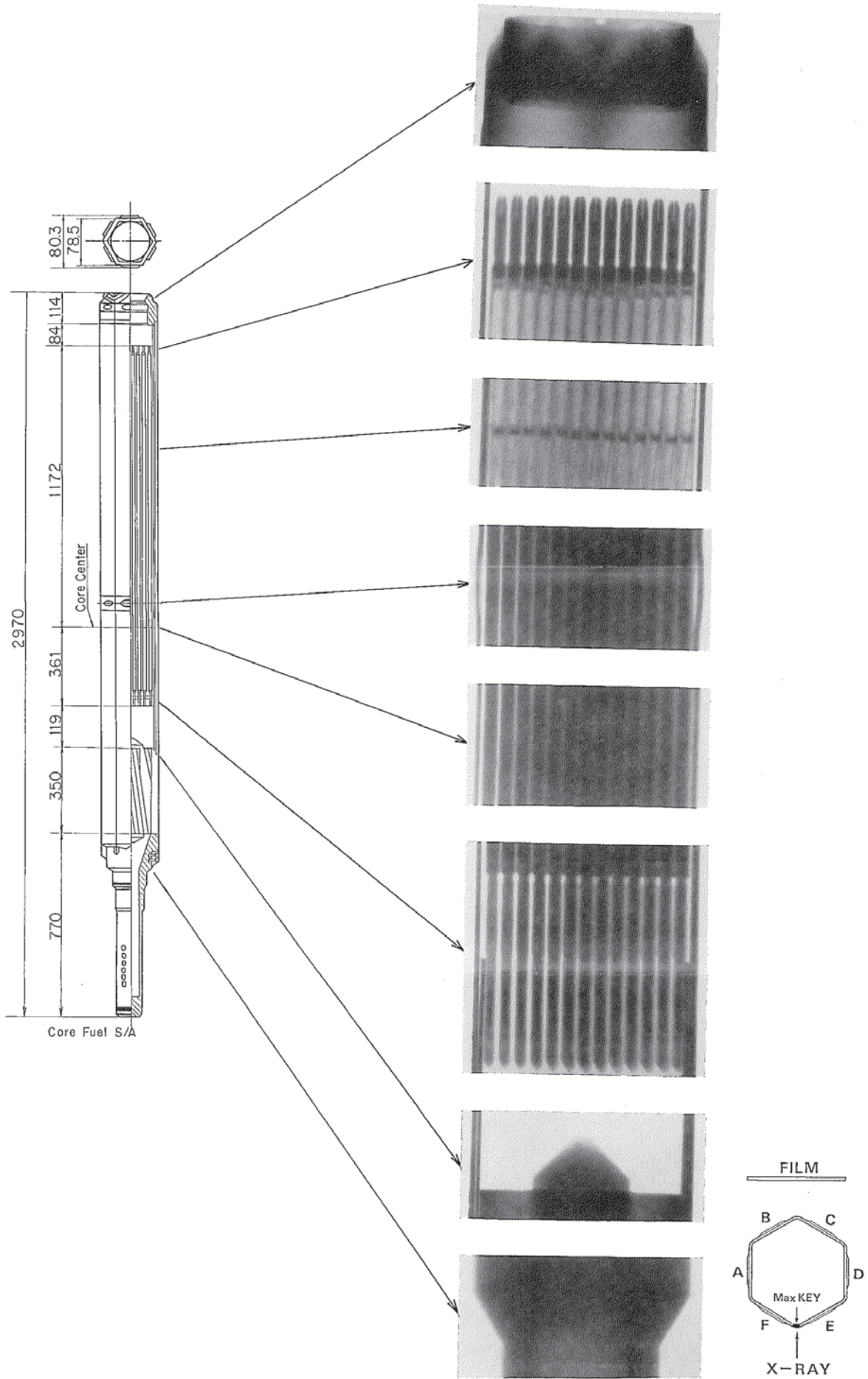


Photo.2 Surface View of the Upper Pad (A-face)

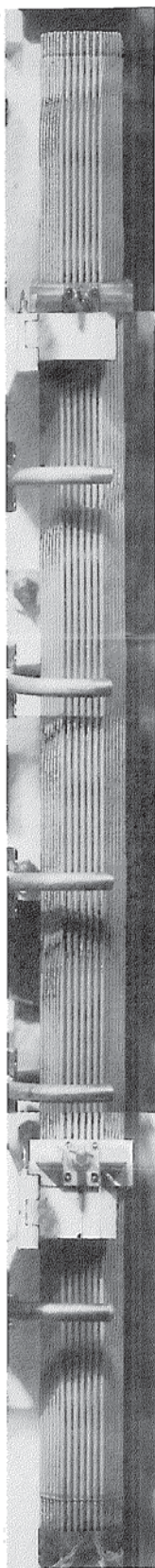


F862002

Photo. 3 X-ray Radiographs of the Subassembly

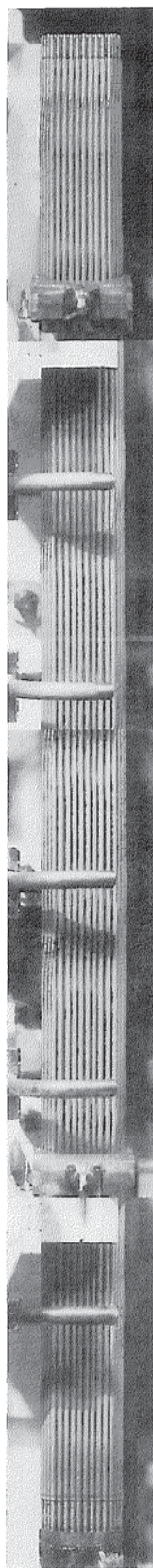


TOP

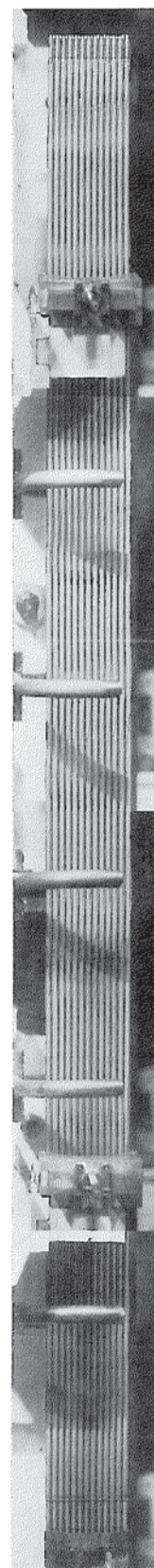


BOTTOM

Row 1



Row 4



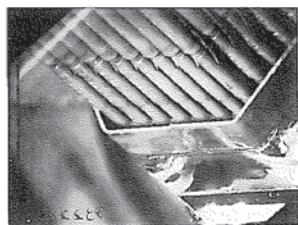
Row 7

F863001

Photo. 4 View of Fuel Pin Bundle Observed at each Stage of Disassembling



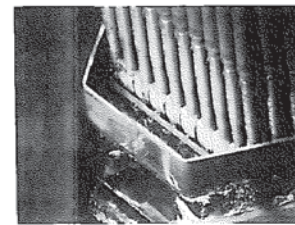
Row 1



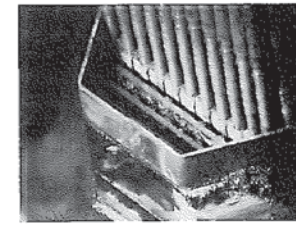
Row 2



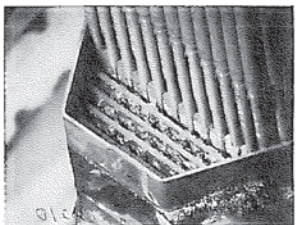
Row 3



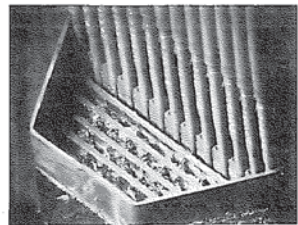
Row 4



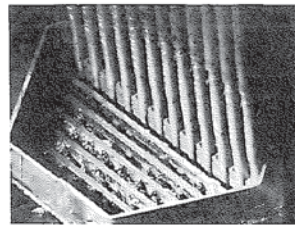
Row 5



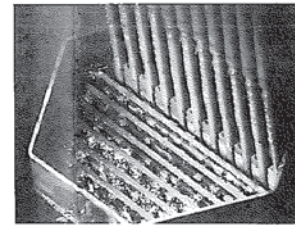
Row 6



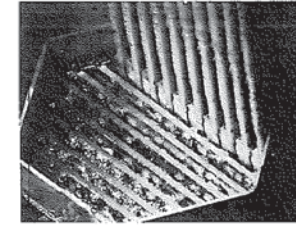
Row 7



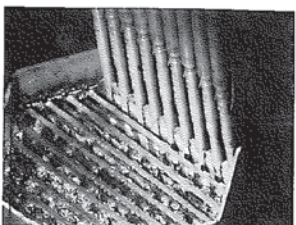
Row 8



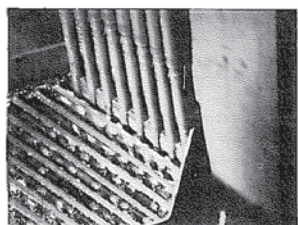
Row 9



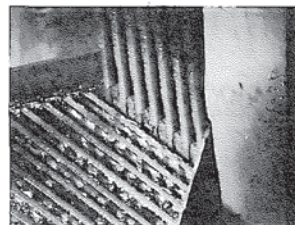
Row 10



Row 11

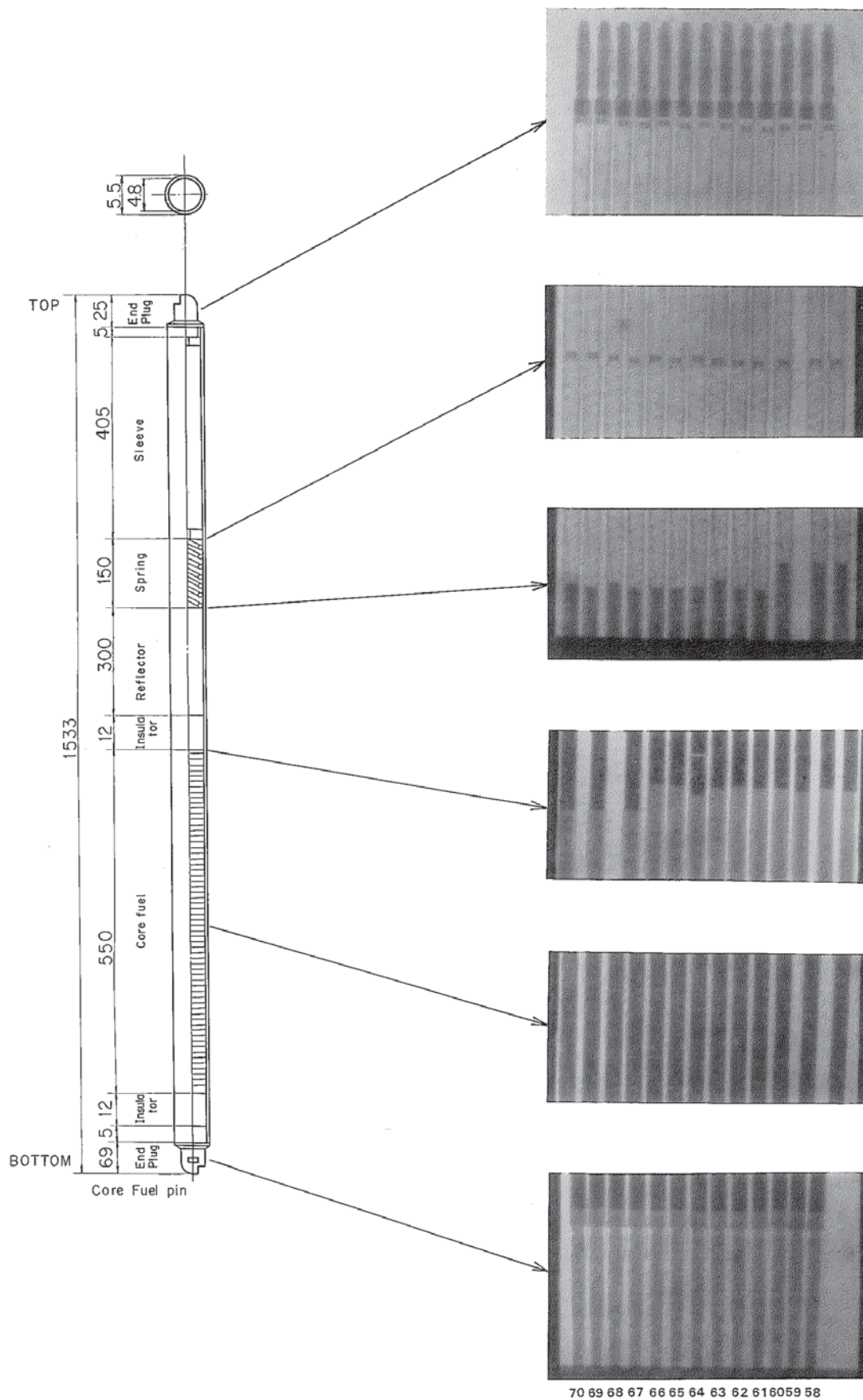


Row 12



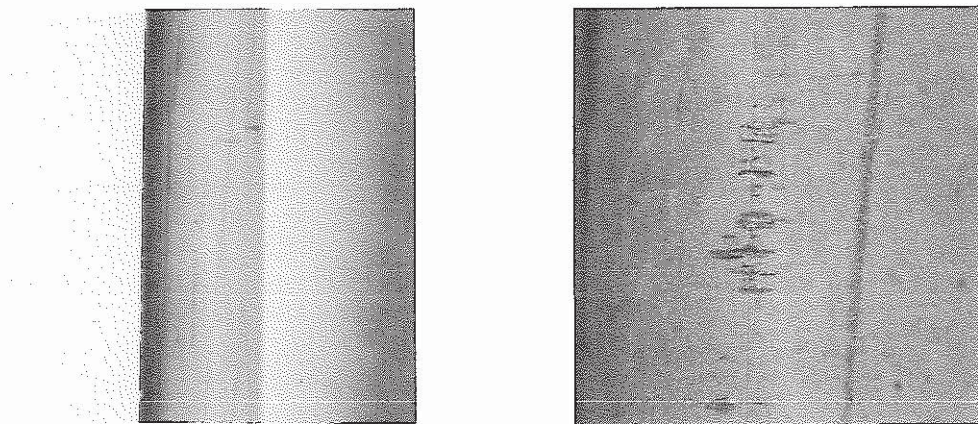
Row 13

Photo. 5 View of Pin-Hold Observed at each Stage of Disassembling



F864001

Photo. 6 Construction Condition inside of the Subassembly Observed by X-ray Radiography



Z 軸位置 656 mm

Ø軸位置 241°

Photo. 7 Contact Mark on a Fuel Pin