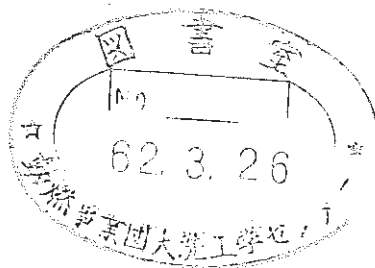


「常陽」MK-II A型特殊燃料集合体(PFA010)の照射後試験 (I)

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 87-188
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 A型特殊燃料集合体(PFA010)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*

報告者 沖元 豊* 平沢久夫* 新谷聖法*

要 旨

「常陽」MK-II 照射炉心 100 MW 定格出力第 5 サイクルから第 8 サイクルの間、照射された A 型特殊燃料集合体「PFA 010」(集合体平均燃焼度 38,100 MWD/T)の照射後試験を実施した。

本試験の照射燃料集合体試験室(FMS)における試験の目的は

- ① 「もんじゅ」仕様の燃料要素の高線出力下での照射挙動の確認
- ② A型特殊燃料集合体の設計妥当性の評価及び遠隔取扱性の確立
- ③ FCCI 低減のために被覆管内面にチタンを蒸着させた燃料要素の照射挙動の確認
- ④ 高レベル放射性物質研究施設(CPF)からの回収粉を使用したペレットの照射挙動の確認
- ⑤ 腐食性生成物(C.P.)捕獲材の有効性の確認

である。

本照射後試験により下記の結果を得た。

- ① 「もんじゅ」仕様の燃料要素の高線出力下での照射挙動は、燃焼度が同程度のMK-II 炉心燃料に比べ、中心空孔が明瞭であること、FP ガスによる内圧が約 1.6 倍であること、FCMI の影響と推定される外径変化(最大 $\Delta D/D = 0.3\%$)の有ること等が認められ線出力により挙動に差異のことが確認された。中心空孔の形成については、ペレット密度が低いことも寄与していると考えられる。
- ② 集合体及び燃料要素には、傷等の損傷はなく異常な変形等も認められず、照射リグの構造体としての健全性が確認された。また、本照射リグのナトリウムドレン性は良好であった。遠隔での解体及び取扱いについては治具を使用することにより容易に実施できることが確認された。
- ③ FCCI を低減するために被覆管内面にチタンを蒸着した燃料要素の照射挙動について、非破壊試験では標準燃料要素と比べ顕著な挙動変化は認められなかった。
- ④ CPF 回収粉と転換 2 kg MOX 施設の転換粉とでは、非破壊試験において照射挙動に差異は認められなかった。
- ⑤ Niメッキ材の腐食性生成物の捕獲有効性について、 ^{54}Mn の捕獲材としての有効性がホット試験でも確認された。

* 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. A型特殊燃料集合体（PFA 010）の構造	2
3. 照 射 条 件	3
3.1 炉内照射位置	3
3.2 照射条件	3
4. 照射後試験計画	4
5. 照射後試験結果と検討	6
5.1 A型特殊燃料集合体の設計妥当性の評価	6
5.1.1 照射リグ各部の健全性	6
5.1.2 ナトリウム洗浄性及びドレン性	7
5.1.3 照射リグの解体性及び取扱性	8
5.2 特殊燃料ピンの高線出力下における照射挙動	8
5.3 チタン内面蒸着被覆管の照射挙動	11
5.4 Niメッキ材による腐食性生成物捕獲の有効性	12
6. ま と め	13
7. 参 考 文 献	14

List of Table

Table I	Fabrication Parameters of the A-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly and Pins	15
Table II	Irradiation Conditions of the A-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFA010]	16
Table III	Fuel Stack Length Changes	17
Table IV	Pin Weight Changes	18
Table V	Pin Total Length Changes	18
Table VI	Results of Puncture Test	19
Table VII	Peak γ -Counting Rates from Ni-coated Test Section	20

List of Figures

Fig. 1	A Drawing of the Subassembly [PFA010]	21
Fig. 2	A Drawing of the Test Fuel Pin	23
Fig. 3	Pin Loading Diagram	24
Fig. 4	In Reactor Location of the Subassembly	25
Fig. 5	Flow Diagram of the Post Irradiation Examinations	26
Fig. 6	Fuel Pins Selected for Post Irradiation Examinations	27
Fig. 7	Bowing Vectors of the Subassembly	28
Fig. 8	An Axial Profile of the Face to Face Distance of the Wrapper Tube (B-E Face)	29
Fig. 9	Wrapper Tube Face to Face Distance Charges as a Function of the Subassembly Maximum Fluence	30
Fig. 10	Fuel Stack Length Changes as a Function of the Subassembly Average Burnup	31
Fig. 11	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B1)	32
Fig. 12	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B2)	33
Fig. 13	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B3)	34
Fig. 14	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B4)	35
Fig. 15	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B5)	36

Fig. 16	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B6)	37
Fig. 17	An Axial Profile of Test Fuel Pin outer Diameter (Spec. No. 98B7)	38
Fig. 18	Pin Outer Diameter Changes as a Function of the Subassembly Maximum Fluence	39
Fig. 19	Pin Bowing Vectors in the Subassembly	40
Fig. 20	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B1)	41
Fig. 21	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B2)	42
Fig. 22	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B3)	43
Fig. 23	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B4)	44
Fig. 24	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B5)	45
Fig. 25	Axial Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B6)	46
Fig. 26	Aixal Distributions of Gamma Ray Intensities (Spec. No. 98B7)	47
Fig. 27	Axial Distribution of Count Rate Ratio (Spec. No. 98B4)	48
Fig. 28	Emission Tomographs of Radionuclides and Radial Distribution of Gamma Ray Intensity in Test Fuel Pins	49
Fig. 29	Plenum Gas Pressure as a Function of the Subassembly Average Burnup	50
Fig. 30	Fission Gas Release Rate as a Function of the Subassembly Average Burnup.....	51
Fig. 31	Measurement Position of Gamma Ray Intensity	52

List of Photographs

Photo. 1	Surface Condition of the Subassembly before and after Sodium Removal	53
Photo. 2	Surface Condition of the Outer Duct and Specimen Duct	55
Photo. 3	X-ray Radiography of the Subassembly	57
Photo. 4	Surface Condition of the Orifice	59
Photo. 5	Surface Condition of Test Fuel Pins	61
Photo. 6	X-ray Radiography of the Test Fuel Pins	63

1. ま え が き

高速炉で使用されている燃料材料の高速中性子、高温ナトリウム流動下での照射挙動を把握し、燃料・材料の高性能化を図るための照射試験が高速実験炉「常陽」MK-II 照射用炉心において実施されている。この目的を達成するために、A型、B型及びC型の3種類の特殊燃料集合体が開発され、このうち、A型特殊燃料集合体（II型照射用）は、高速原型炉「もんじゅ」炉心燃料ピンとほぼ同一仕様の特種燃料ピンを照射し、「もんじゅ」燃料の高線出力下での照射挙動を把握することを目的としている。

今回照射後試験に供される「PFA 010」は、「常陽」100 MW定格第5サイクルから第8サイクルの間照射されたものであり、MK-II 炉心燃料集合体と同一仕様の炉心燃料ピンを周囲に、中央に「もんじゅ」炉心燃料ピンとほぼ同一仕様の特種燃料ピンを収納したもので、以下の目的を有している。

- 1) 「もんじゅ」炉心燃料ピンとほぼ同一仕様の特種燃料ピンの高線出力下での照射挙動を調査し、挙動評価する。
- 2) 照射リグとしてのA型特殊燃料集合体各部の健全性を確認するとともに、遠隔取扱性を調査し、設計の妥当性を評価する。
- 3) FCCI 低減のため、被覆管内面にチタンを蒸着させた特殊燃料ピンの照射挙動を調査し、チタン薄膜の有効性を評価する。
- 4) 照射リグの内部に腐食性生成物（C.P.）の ^{54}Mn の捕獲材として、Niメッキが部材表面に施されている。このNiメッキ材のC.P.捕獲上の有効性を調査する。
- 5) 特殊燃料ピンの中に、高レベル放射性物質研究施設（CPF）からの回収粉を使用した燃料ペレットが充填されており、その照射挙動を調査し、挙動評価する。

FMSでは、これらの目的に沿って照射後試験を実施した。

2. A型特殊燃料集合体(PFA010)の構造

「PFA010」は、Fig.1に示すように、照射目的に合致した特殊燃料ピン7本(「もんじゅ」炉心燃料要素とほぼ同一仕様)を正三角格子状に配置し六角管の試料部ダクト内に装荷している。これを試料部ダクトの保持及び炉心燃料ピンの内側の境界壁として機能する外側ダクト内に装荷固定している。これをリグ中央に配置し、周囲にMK-II炉心燃料集合体と同一仕様の炉心燃料ピン106本とフラックスモニタピン2本を稠密配置し、炉心燃料集合体と同じ外形形状のラップ管内に装荷したものである。炉心支持板の中性子照射量の低減を目的とした下部反射体内に、試料部ダクトへの冷却材流量を調節するためのオリフィスを設け、リグ全体の流量調節用オリフィスは、エントランスノズル流路部に設けられている。リグ全体の外形形状は炉心燃料集合体と同一である。

モニタ類として、中性子モニタ及び温度モニタをリグ軸方向及び特殊燃料ピンの上部端栓に封入している。

試料部ダクト上部及び外側ダクト支持棒部表面には、腐食性生成物の⁵⁴Mn捕獲に有効と考えられているNiが15μm厚でメッキされている。

特殊燃料ピンの構造は、Fig.2に示すように、外径6.5mm、肉厚0.47mmの20%冷間加工316ステンレス鋼の被覆管を下部端栓及び温度モニタ付上部端栓で溶接密封したものである。その内部には、直径5.4mm劣化ウラン酸化物インシュレータペレットを上下8mm、その中央には直径5.4mmの混合酸化物ペレット(ペレット密度85%TD)550mmさらに反射体要素、プレナムスプリング及びスリーブが収納されている。混合酸化物ペレットには、高レベル放射性物質研究施設(CPF)にてMK-I照射済炉心燃料ピンからの回収粉(ピン1本相当分)及びプルトニウム燃料部の転換2kg MOX 施設で生成された転換粉(ピン6本分)のそれぞれ20:1の高比率転換粉を用い、製品としたものが充填されている。また、被覆管には、FCCI低減のために被覆管内面に厚さ15μmのチタンを蒸着したものを1本使用している。被覆管の外側には、直径0.9mmのラッピングワイヤを209mmピッチで巻付けてある。

これらの主要仕様をTable. Iに示す。

集合体内のピン配置をFig. 3に示す。

3. 照射条件

3.1 炉内照射位置

本集合体は、100 MW定格出力第5サイクルから第8サイクルの間照射され、その間の炉内照射位置を Fig. 4 に示す。ただし、FFDL 炉内試験及び自然循環試験サイクルでは燃料貯蔵ラックで保管されていた。

3.2 照射条件

集合体平均燃焼度は、38,100 MWD/T で、中性子照射量は集合体最大で $4.65 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 0.1 \text{ MeV}$) である。

その他の集合体照射条件も含めて Table. II に示す。

ピンの照射条件については最大燃焼度 42,100 MWD/T，最大線出力 458 W/cm (BOL) であり、被覆管最高温度は 636 °C (BOL) である。

4. 照射後試験計画

「PFA 010」の燃料要素は、MK-II 炉心燃料集合体と同一仕様の炉心燃料ピンと「もんじゅ」炉心燃料要素とほぼ同一仕様の特殊燃料ピンが収納されており、このうち、炉心燃料ピンは、本照射リグの到達燃焼度レベルまでは、すでにMK-II 炉心燃料集合体で健全性が確認されている。したがって、本照射リグの取扱いは、照射リグとしての健全性及び遠隔取扱性の確認、高線出力下での特殊燃料ピンの照射挙動調査、被覆管内面のチタンコーティング燃料ピンの照射挙動調査等という本照射リグ固有の目的に限定し、これらに添った照射後試験を実施した。

本照射リグは、100 MW 定格第 5 サイクルから定格第 8 サイクルの間照射され、第 8 サイクル終了後、炉心より取出され燃料貯蔵ラックで 1 サイクル冷却された後、昭和 61 年 4 月 10 日キャスカカー経由で FMF に搬入された。

試験項目及び着目点は、以下のとおりである。

1) 集合体及び部材試験

- ① 外観検査……………表面状況（キズ，変色）の観察
- ② ナトリウム洗浄……………燃料ピンの健全性確認
リグのナトリウム洗浄性，ドレン性の確認
- ③ 寸法測定……………寸法外形変化の確認
- ④ X線ラジオグラフィ……………リグ内部状況の確認
- ⑤ 解体……………リグの解体性，取扱性の確認，特殊燃料ピンの取出し
- ⑥ 外側ダクト外観検査……………表面状況（キズ，変色）の観察
- ⑦ 試料部ダクト外観検査……………同 上
- ⑧ 外側ダクト支持棒部外観検査…表面状況（キズ，Niメッキのはくり）の観察
- ⑨ 試料部オリフィス外観検査……キャビテーション発生の有無確認
- ⑩ 試料部ダクト Ni メッキ部アスキャン
…腐食性生成物の捕獲状況確認

2) ピン試験（高線出力の特殊燃料ピン対象）

- ① 外観検査……………表面状況（キズ，変色）の観察
- ② X線ラジオグラフィ……………内部構成要素の装荷状況確認
- ③ 重量測定……………重量変化の有無確認
- ④ 寸法測定……………寸法形状変化（外径，曲り，全長）の有無確認
（曲りについては一部炉心燃料要素についても実施）
- ⑤ アスキャン……………軸方向及び径方向の FP 分布の確認

チタンコーティング有効性の調査

高比率転換粉燃料ペレットの照射挙動調査

- ⑥ パンクチャテスト……………ピン内圧，ガス組成及びガス放出率の調査

Fig. 5 に照射後試験フローを示す。また，ピン試験を Fig. 6 に示す。

5. 照射後試験結果と検討

5.1 A型特殊燃料集合体の設計妥当性の評価

5.1.1 照射リグの健全性確認

1) 集合体，外側ダクト及び試料部ダクトの外観検査

集合体外観写真を Photo. 1 に示す。パッド部に黒変色が若干認められ，ラップ管表面ですり傷が若干認められた以外，特異な表面状況は認められなかった。

エントランスノズル，球面座について傷，変形等は認められなかった。

外側ダクトの外観写真を Photo. 2(a) に示す。外側ダクトの炉心燃料ピン側の表面にラッピングワイヤとの接触と考えられる接触跡が若干観察された。また，燃料要素の炉心部に相当する部分で黒変色が認められた。その他，傷，変形等の特異状況は，認められなかった。

試料部ダクトの外観写真を Photo. 2(b) に示す。試料部ダクト表面の燃料要素の炉心部に相当する部分で黒変色が認められたが，傷，変形は認められなかった。また，試料部ダクト Ni メッキ部で，はくり等の異常は認められなかった。

2) 集合体寸法測定

照射前後の全長に有意な差は認められなかった。

Fig. 7 に，集合体の曲りを示すが，照射後において上部パッド部での曲り量は 1.3 mm，曲り方向 11°であった。

ラップ管の対面間寸法について，B-E 対面間の炉心中心付近で Fig. 8 に示すように有意差（±0.1 mm）を越える最大 0.26 mm のふくれが認められ，他の 2 対面間はこれより小さいふくれであった。Fig. 9 に炉心中心位置におけるラップ管の対面間寸法変化量と集合体最大中性子照射量の関係を示す。本リグのラップ管対面間寸法変化は，同程度の燃焼度レベルの炉心燃料集合体³⁾と比べ同程度である。ラップ管の対面間寸法変化は，材料のスエリングと冷却材内外圧差を主要な応力源とする照射クリープの和として表わされることが炉心燃料集合体の照射挙動解析結果より示されている。ラップ管材料として，MK-II 炉心燃料集合体と同じ SUS 316 相当鋼の 20%冷間加工材を使用し，化学成分もほぼ同等であり，寸法変化へのスエリング寄与は MK-II 炉心燃料集合体並みと考えられる。

一方，照射クリープはラップ管の内外圧差に起因すると考えられるが，炉心装荷第 2 列における MK-II 炉心燃料集合体のラップ管の内外圧差は 1.4 kg/cm^2 ⁹⁾と計算されている。本リグのラップ管の内外圧差を A 型特殊燃料集合体の水流動試験結果¹⁰⁾を基に，炉心装荷第 2 列におけるラップ管の内外圧差を算出すると約 1.3 kg/cm^2 程度となり，MK-II 炉心燃料集合体とはほぼ同程度となる。したがって，照射クリープ量も MK-II 炉心燃料集合体と同

等と考えられ、ラッパ管のスエリングと照射クリープの和によるラッパ管の対面間寸法変化量が本リグと炉心燃料集合体で同程度になったと考えられる。

中間パッド部の寸法変化は最大増加0.22mmであったが外観検査の結果、これによる隣接集合体のパッドとの干渉による傷等は認められなかった。

3) 集合体X線ラジオグラフィ

X線ラジオグラフィを実施し、集合体内部を観察した。X線写真をPhoto. 3に示す。リグ内部への異物の混入、ピンバンドルのみだれは認められず、組棒部等にも異常は認められなかった。

4) 試料部オリフィス観察

試料部オリフィスは、試料部ダクト内への冷却材流量を調節する目的で設けてあり、このオリフィスの出口付近についてキャビテーションによる浸食等の有無を観察した結果、目視観察上、特異なものは認められなかった。試料部オリフィス出口付近の外観写真をPhoto. 4に示す。

5) 特殊燃料ピンの健全性

特殊燃料ピン7本について、キズ等の損傷はなく異常な変形も認められず、照射前後における重量変化も認められなかった。さらに、パンクチャテストでピン内ガス圧測定を実施した結果、約6,500 Torr前後のガス圧が認められた。また、照射リグのナトリウム洗浄廃液放射能分析結果から、 α 放射能及びFP核種は認められなかった。したがって、燃料ピンは原子炉内において健全であったと考えられる。

5.1.2 リグのナトリウムの洗浄性及びドレン性

1) ドレン性

本リグは、キャスクカーでFMFに搬入されたため「常陽」炉サイトでの洗浄は実施していない。FMF搬入時のナトリウム付着量は、洗浄結果から約18gと算出された。これは、MK-II炉心燃料集合体と同程度でリグのナトリウムドレン性は良好と考えられる。

2) 洗浄性

本リグは、試料部オリフィス径が9mmと小さいのでこの部分に、ナトリウムが溜りやすく洗浄性がよくないと考えられる。実際、試作体を用いて、ナトリウム洗浄のモックアップ試験と実施した結果試料部ダクトを固定している固定ネジ部に残留ナトリウムが固着して遠隔操作での解体が困難であった。これらを解決する方策として、純水循環による洗浄方法に

加えリグを水に浸漬してナトリウムを除去する方法を計画した。まず、湿り窒素ガスによるスチーム洗浄を実施し、純水循環洗浄を2回行いその後、純水浸漬を1時間及び純水循環洗浄を1回実施した。各洗浄ごとの洗浄廃液のPH値低下傾向は緩やかで、最終PH値は、10.1とアルカリ性を示した。これは、試料部オリフィス径が小さいことに加えオリフィスが多段であることにより、洗浄性が悪くなっているものと推定される。その後、リグを解体して、内部を観察したが、ピン表面、組棒部及び固定ネジ等に残留ナトリウムは認められなかった。したがって、本リグの構造上、洗浄性は悪いが、リグを水に浸漬することによって、ナトリウム洗浄の目的は達せられたと考えられる。

5.1.3 照射リグの解体性及び取扱性

本照射リグは、ラップ管、外側ダクト及び試料部ダクトの三重構造になっている。ラップ管の切断・引抜きは、炉心燃料集合体と同様な方法で実施し、最大引抜き力は10 kgであり容易に引抜けた。次に、試料部ダクトの引抜きは、リグのエントランスノズル部に設けてあるダクト固定ネジを治具で解除し、ダクト上部に専用治具を取付け、外側ダクト内から引抜くことができた。試料部ダクトの引抜き力は6.5 kgで容易に引抜け、引抜き力が小さいことから、試料部ダクトのふくれ、曲り等による外側ダクトとの干渉はないと考えられる。外側ダクトの取出しは、炉心燃料要素の下部端栓切断と同じ軸位置で切断しダクト上部に専用治具を取付けて取出した。試料部ダクトの解体は横置きにしノックバー部を切断して特殊燃料ピンを取出した。これらリグの解体及びセル内取扱いは、A型特燃試作体を使用したモックアップとこの結果を実機に反映させたこと及び専用治具を使用することにより容易に取扱うことができ、解体性も遠隔技術上問題のないことが確認された。エントランスノズル内のモニタ取出しについてもB型特燃の経験から、容易に行うことができた。

5.2 特殊燃料ピンの高線出力下における照射挙動

1) 外観検査

特殊燃料ピン7本の外観写真をPhoto. 5に示す。

全ピンにおいて、炉心部付近の表面に黒変色が認められ、残留湾曲も認められたが、傷等は認められなかった。ラッピングワイヤのゆるみも全ピンについて認められなかった。

2) X線ラジオグラフィ

特殊燃料ピン7本及びフラックスモニタピン2本のX線ラジオグラフィを実施した。X線写真をPhoto. 6に示す。フラックスモニタピンの内部状況を観察した結果、内部配列の異常等は認められなかった。全特殊燃料ピンにスプリング長の減少(へたり)及び炉心部の軸方向全域にわたり中心空孔が明瞭に観察された。集合体平均燃焼度38,100 MWD/Tにもかかわらず

ず中心空孔が明瞭に認められたのは、MK-II 炉心燃料と比べペレット密度が低いこと及び高線出力による径方向の大きな組織変化によるものと考えられる。

燃料スタック長の測定結果を Table. III に示す。燃料スタック長は、照射前に比べて全てのピンで約 6 mm 伸びていた。被覆管-ペレット間ギャップの違いによる燃料スタック長の伸びの挙動変化が考えられたが、これによる顕著な差は認められなかった。Fig. 10 に燃料スタック長変化量の燃焼度依存性を炉心燃料ピンと比較して示す。同燃焼度の炉心燃料ピンと比べ約 2 倍のスタック長変化量となっている。特殊燃料ピンは、高線出力により燃料温度が高くなるため、ペレット内の気泡の発生が大きくなり、スエリングが増加したことが、燃料スタック長の変化量の差として現われたものと推定される。

高レベル放射性物質研究施設 (CPF) からの回収粉を使用したピンの燃料スタック長の伸びは、プルトニウム燃料部の転換 2 kg MOX 施設の転換粉を使用した燃料スタック長の伸びと比べ有意な差はなかった。

3) 重量測定

特殊燃料ピン 7 本の重量測定を実施した結果、照射前後の重量差は最大 0.1 g であり有意差 (± 0.7 g) 内であった。したがって、重量変化に影響を与えるような状況 (例えば破損等) はないものと判断される。測定結果を Table. IV に示す。

4) 寸法測定

特殊燃料ピン 7 本について外径、曲り及び全長測定を、外側ダクトに接する炉心燃料ピン 4 本について曲り測定を各々実施した。特殊燃料ピンの外径測定結果を Fig. 11 から Fig. 17 に示す。ペレット-被覆管ギャップの最も小さい 98 B 3 ピン (123 μ m), 98 B 7 ピン (140 μ m) の炉心部において 0.3 %, 0.28 % の外径増加が認められた。一般に被覆管の外径変化の要因としては、スエリング及び FP ガス圧、FCMI 等による塑性変化が考えられている。本特殊燃料ピンの被覆管は、「もんじゅ」55 年試作の SUS 316 相当鋼の 20 % 冷間加工材であり MK-II 炉心燃料ピンと組成が類似している。MK-II 炉心燃料ピンにおいては、本特殊燃料ピンと同程度の照射量において被覆管はスエリングしておらず (Fig. 18 参照)、実際に認められたプロファイル上の特徴もスエリングによるものとは考えにくい。したがって、この変形の主因は塑性変形と考えられるが被覆管-ペレットギャップの小さい特殊燃料ピンに認められること、プロファイル上変形は炉心部に限られており軸方向にかなり凹凸のあるプロファイルであることから、燃料と被覆管の機械的相互作用 (FCMI) によるものと考えられる。すなわち、線出力が高いために核分裂性生成物の蓄積によるペレットのスエリングが大きくなり、このために被覆管-ペレットギャップの小さい特殊燃料ピンにおいて FCMI が発生したと推定される。

集合体内における特殊燃料ピン及び炉心燃料ピンの最大曲り量と曲り方向の関係を Fig. 19

に示す。中心ピンを除く特殊燃料ピンは、試料部ダクトの外側にピア樽状に曲がっている。また、炉心燃料ピンは、外側ダクトの方向へ凸状に曲がっている。この要因として、集合体径方向温度分布の影響が考えられるが、本リグの集合体径方向温度分布は炉心燃料部で約470℃、特殊燃料部で約530℃、この間の試料部ダクト及び外側ダクトで約450℃と計算され、径方向に温度勾配が生じていることがいえる。特殊燃料ピン及び炉心燃料ピンは、ピン周囲の温度差により特殊燃料ピンはつづみ状になり炉心燃料ピンは外側ダクトに対し凹状に曲る。それぞれ曲った燃料ピンは、試料部ダクト、外側ダクトにより拘束され、照射クリープによる試料部ダクトと特殊燃料ピン及び外側ダクトと炉心燃料ピンの応力緩和が起き、それぞれの燃料ピンにクリープ変形の蓄積が起る。したがって、リグを炉内から取出した場合には、燃料ピン周囲の温度差が解消されるために燃料ピンの湾曲が前述のごとく照射中とは逆方向に観察されると考えられる。

全長測定結果を Table. V に示す。照射前後で有意な変化 (± 1.0 mm) は認められなかった。

5) ガンマスキャン

特殊燃料ピン7本について、軸方向のFP核種等の強度分布を測定した。

それぞれの強度分布を Fig. 20 から Fig. 26 に示す。これらの分布で燃料の出力分布を示す⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Rh等は、炉心燃料部の軸方向に連続的なカーブをえがき、ピン内部構成及び燃焼特性に異常のないことを示し、高線出力による燃料熔融等に起因する異常ピークは認められない。

また、この核種の軸方向分布より算出したピーキング係数は1.15程度であり、炉心燃料とほぼ同一であり、特殊燃料ピンは炉内において正常に燃焼したと推定される。

低温部に移動しやすい核種Csは、径方向でペレット間ギャップへの移動・蓄積が認められ、軸方向で炉心上下部への移動・蓄積が認められた。Fig. 27 に示すように軸方向FPの放射能相関では、炉心中心部で一定値を示し、軸方向低温部では、移動しやすい核種による変動が認められる。

MK-I 照射済燃料要素からの回収粉とその他の転換粉末では、軸方向FP核種の強度分布に差異は認められない。

6) パンクチャテスト

特殊燃料ピン7本について、プレナムガス圧力測定及びガス分析を実施し、分析結果よりガス放出率を算出した。測定結果を Table. VI に示す。

プレナムガス圧は5,895 Torr ~ 7,127 Torr (0℃)の範囲であり、全ピン健全状態であったことが確認された。Fig. 28 に示すように、MK-II 初装荷に最大燃焼度を有する炉心燃料の内圧(約4,300 Torr)に比べ、特殊燃料ピンのガス圧は高い。これはMK-II 炉心燃料ピン

に比べ、ピン1本当りの核分裂性物質重量が多く、燃料温度が高くかつプレナム容積が小さいためと推定される。

「もんじゅ」炉心燃料要素の設計使用期間末期の運転時内圧は、 70 kg/cm^2 とされているがこれとほぼ同一仕様の特殊燃料ピンのガス圧最大値 $7,127 \text{ Torr}$ (0°C) は、運転中(集合体出口温度 520°C) に換算すると、約 27 kg/cm^2 であり設計値を十分下回る。また、高線出力による炉心部の軸方向全域にわたる中心空孔のため、ピン内容積が製造ノミナル値 6.7 cc に対し約 8 cc を示し1割以上の容積増加があり、ピン内圧を緩和させる方向にある。

ガス分析の結果、ガス成分比(ピン平均)は、 $\text{Kr}:\text{Xe}:\text{He} = 8.2:76.6:15.2$ であった。CPF回収粉とその他転換粉では、 Xe/Kr 比が異なる傾向を示した。これは、 Xe/Kr がPuの同位体組成、核分裂収率、燃料重量等による積の比であり、このうちPuの同位体比が異なるために生じたものであると考える。

ガス放出率は、 $52.4\% \sim 59.9\%$ の範囲であった。⁶⁾ Fig. 29に、FPガス放出率の燃焼度依存性を炉心燃料ピンと比較して示す。特殊燃料ピンは、炉心燃料ピンに比べピン線出力が大きく燃料温度が高温になり高い放出率を示したといえる。

5.3 チタン内面蒸着被覆管の照射挙動

燃料-被覆管化学的相互作用(FCCI)低減のため、被覆管内面にチタンを蒸着させた特殊燃料ピンの照射挙動を確認するための一方策として要素の径方向 γ スキャンを実施した。これは、同一目的にて、既にJMTRを利用した77F-2P照射後試験の結果⁸⁾で被覆管内面に蒸着したチタンが、ほとんど初期の位置から離脱し、燃料内の高温部に移動していることが認められ、それと反応したCsの移動・蓄積が、被覆管内面にチタンを蒸着していないピンと顕著な差を示した経緯がある。したがって、Csの移動・蓄積状況を見ることによって、チタン離脱等の状況が非破壊にて推定できる。

測定結果を標準仕様の被覆管と比較してFig. 30に示す。 ^{95}Zr 、 ^{106}Rh は移動しにくい核種であり、燃料ペレット内にはほぼ均一に分布しペレット形状を表わしている。 ^{58}Co は被覆管の放射化核種であり被覆管の形状を表わす。

Csは低温部に移動しやすいためペレット外周及びペレット-被覆管のギャップに移動・蓄積していることが認められたが、被覆管内面のチタン蒸着の有無による挙動変化は認められなかった。したがって、FCCIに寄与するCsの挙動の差は、非破壊試験結果では判断できない。詳細は破壊試験で確認される。また、被覆管内面から顕著なチタンの離脱はなかったと推定できる。

5.4 Niメッキ材による腐食性生成物捕獲の有効性

腐食性生成物(C.P.)の捕獲試験として、本照射リグの試料部ダクト上部及び外側ダクト支持枠部に、特に ^{54}Mn の捕獲として有効とされているNiが、それぞれの表面に15 μm 厚にメッキされている。

試料部ダクト上部におけるCP捕獲の有効性を γ 線スペクトロメトリで確認した。測定位置及び測定結果をFig. 31及びTable. VIIに示す。試料部ダクト上部は、炉心軸方向の熱中性子領域であり、 ^{54}Mn が生成される速中性子核反応(n, p)はおこりにくいため、試料部ダクト上部では ^{54}Mn は生成されないと考えられる。そこで、母材部とNiメッキ部を比較すると、母材部にほとんど認められない ^{54}Mn が、メッキ部に認められたことから ^{54}Mn については捕獲能力があると判断される。他のCP核種はメッキ部で顕著に認められないため、捕獲効果がほとんどないと考えられる。したがって、 ^{54}Mn の捕獲材としてNi材質の有効性が、ホット試験でも確認できたといえる。

^{54}Mn の計数率から、試料部ダクト上部における捕獲量を推定すると、炉内滞在528日で、約0.3 mCi/12.5 cm²となる。

6. ま と め

「常陽」MK-II照射炉心100 MW定格出力第5サイクルから第8サイクルの間、照射されたA型特殊燃料集合体「PFA 010」（集合体平均燃焼度38,100 MWD/T）の照射後試験を実施した。

主な結果は、以下のとおりである。

- 1) 高線出力下における特殊燃料ピンの照射挙動調査の結果、同程度のMK-II炉心燃料ピンの照射挙動と比べ明らかに差異のあることがわかった。即ち、中心空孔が明瞭に観察されたこと、FPガスによる内圧が1.6倍であること及びFCMIの影響と推定される外径変化（最大 $\Delta D/D=0.3\%$ ）のあることがわかった。また、中心空孔に関してはペレット密度も関与していると考えられる。その他の挙動については炉心燃料と比べ変化はなかった。
- 2) 集合体及び燃料要素には、キズ等の損傷はなく、異常な変形も認められず、照射リグの構造体としての健全性が確認された。
- 3) 本リグのナトリウムドレン性は、良好であった。しかし、リグ内のオリフィス設定等による構造上の問題から、リグの洗浄性は悪い。一方、遠隔取扱性については試作体によるモックアップとこの結果を実機に反映させたこと及び治具を使用することにより、容易に取扱うことができ、リグの解体性、取扱性に問題のないことを確認した。
- 4) FCCI低減のため、被覆管内面にチタンを蒸着させた燃料要素の照射挙動については、非破壊試験では顕著な挙動変化が認められなかった。より詳細には破壊試験で確認していく。
- 5) Niメッキ材の腐食性生成物の捕獲有効性について、 ^{54}Mn の捕獲材としての有効性がホット試験でも確認された。より詳細には、破壊試験及び後続試験で確認していく。
- 6) CPF回収粉と転換2 kg MOX施設の転換粉とでは、非破壊試験において照射挙動に差異は認められない。

7. 参 考 文 献

- 1) 燃材部部内資料 : 「常陽」A型特殊燃料集合体の照射後試験計画
AESテクニカル 86 (AES) 27
- 2) 実験炉部 : 「常陽」照射試験サイクル報 (第8サイクル)
PNC SN936 85-04
- 3) 永峯 剛他 : 「常陽」MK-II炉心燃料集合体 (PFD018) の照射後試験 (I)
PNC I 941 86-003
- 4) 浅賀健男他 : 「常陽」MK-II炉心燃料集合体 (PFD029) の照射後試験 (I)
PNC I 941 86-10
- 5) 東海事業所 : 高速実験炉「常陽」特殊燃料集合体 (A1M)
II型燃料要素製造記録
PNC I 843 85-20
- 6) 燃材部内資料 : A1M試験ピンのFPガス生成量及びガス放出率の計算
AESテクニカルメモ 86 (AES) 65
- 7) 東海事業所 : 高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素
製作設計書 (A型特燃II型要素)
PNC ZN852-83-37
- 8) 燃 材 部 : JMTR-CM (III) ・ 77 F - 2 P 照射後試験
PNC SN941 83-76
- 9) 実 験 炉 部 : MK-II炉心燃料集合体のラッパ管内外差圧
技術課メモ 技-59-262
- 10) 安全工学部 : 「常陽」特殊燃料集合体水流動試験 (V)
A型集合体内の流量配分
PNC N941 83-32

Table. I Fabrication Parameters of the A-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly and Pins

主要目	設計仕様		
(1) 燃料集合体	試料部ダクト型	(5) 炉心燃料要素	
型式	2,970 mm	型式	ワイヤラッピング型密封式
全長	約 60 kg	全長	1,533 mm
全重量	113 本(特殊燃料要素 7 本, 炉心燃料要素 106 本)	被覆管外径	5.5 mm
燃料要素数		被覆管内径	4.8 mm
		被覆管肉厚	0.35 mm
		被覆管-ベレット間隔	0.085 mm
(2) ラッパ管	正六角形	燃料部長さ	550 mm
形状	78.5 mm	インシュレータベレット(上・下)	12 mm
外対面距離	74.7 mm	要素反射体全長	300 mm
内対面距離	1.9 mm	ガスプレナム容積	9.3 CC
肉厚		ラッピングワイヤ径	0.9 mm
(3) 試料部ダクト	正六角形	ラッピングピッチ	209 mm
形状	23.3 mm	(I) 燃料ベレット材料	
外対面距離	21.3 mm	種類	ウラン・プルトニウム混合酸化物ベレット
内対面距離	1.0 mm	ベレット直径	4.63 mm
肉厚	24.0 mm	ベレット長	9 mm
上部パッド部外対面距離	24.0 mm	ベレット密度	93% TD
中央パッド部外対面距離		(II) インシュレータベレット材料	
(4) 特殊燃料要素	ワイヤラッピング型密封式	種類	劣化ウラン酸化物ベレット
型式	1,533 mm	ベレット直径	4.6 mm
全長	6.5 mm	ベレット長	12 mm
被覆管外径	5.56 mm	ベレット密度	94% TD
被覆管内径	0.47 mm (チタン膜厚を含まない)	個数	上下各 1 個
被覆管肉厚	0.08 mm	(III) 要素反射体	
被覆管-ベレット間隔	550 mm	材料	SUS 316 相当
燃料部長さ	8 mm	直径	4.5 mm
インシュレータベレット(上・下)	618.8 mm	長さ	100 mm
要素反射体全長	3.9 CC	個数	3 個
ガスプレナム容積	0.9 mm	(6) 外側ダクト	
ラッピングワイヤ径	209 mm	形状	正六角形
ラッピングピッチ		外対面距離	26.2 mm
(I) 燃料ベレット材料	ウラン・プルトニウム混合酸化物ベレット	内対面距離	24.2 mm
種類	5.4 mm	肉厚	1.0 mm
ベレット直径	8 mm	(7) 下部反射体	
ベレット長	85% TD	型式	フィンブロック型
ベレット密度		材料	SUS 316
(II) インシュレータベレット材料	劣化ウラン酸化物ベレット	外径	61 mm
種類	5.4 mm	長さ	350 mm
ベレット直径	8 mm	(8) 試料部オリフィス	
ベレット長	94% TD	型式	3 段オリフィス型
ベレット密度	上下各 1 個	材料	SUS 316
個数		外径	26 mm
(III) 要素反射体	SUS 316 相当	長さ	215 mm
材料	5.2 mm	(9) フラックスモニタピン	
直径	100 mm 5 個	材料	SUS 316
個数	118.8 mm 1 個	外径	5.5 mm
		全長	1,533 mm

Table. II Irradiation Condition of the A-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly 「PFA 010」

サ イ ク ル			5	6	7	7' & 7''	8	
装 荷 位 置			2 E 2			R 7		
燃 焼 度	ポ イ ン ト 最 大		MWD/T	12000	23500	34400	—	45300
	集 合 体 平 均		MWD/T	10000	19700	28900	—	38100
積 算 中 性 子 照 射 量	En ≥ 0.1 MeV	ポ イ ン ト 最 大	× 10 ²⁰ n/cm ²	119	236	350	—	465
		集 合 体 平 均	× 10 ²⁰ n/cm ²	94.4	194	288	—	383
	Total	ポ イ ン ト 最 大	× 10 ²⁰ n/cm ²	169	336	500	—	662
		集 合 体 平 均	× 10 ²⁰ n/cm ²	140	279	413	—	551
線 出 力	BOC	ポ イ ン ト 最 大	W/cm	463	450	434	—	414
		集 合 体 平 均	W/cm	388	378	365	—	352
	EOC	ポ イ ン ト 最 大	W/cm					
		集 合 体 平 均	W/cm					
被 覆 管 最 高 温 度	B O C		°C	636				
	E O C		°C					
燃 料 最 高 温 度	B O C		°C					
	E O C		°C					
集 合 体 出 口 温 度	B O C		°C	529	524	521	—	520
	E O C		°C	528	523	521	—	520
ピ ー キ ン グ 係 数	B O C	径 方 向	—					
		軸 方 向	—	1.197	1.195	1.189	—	1.181
	E O C	径 方 向	—					
		軸 方 向	—	1.183	1.182	1.176	—	1.164
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	8.6	8.6	8.6	—	8.6
	E O C		kg/sec	8.6	8.6	8.6	—	8.6

Table. III Fuel Stack Length Changes

ピンNo.	スタック長 (mm) PIE	※1 スタック長 (mm) FAB	スタック伸び量 (mm) PIE-FAB	スタック変化率 (%) PIE-FAB/FAB	※1 被覆管・ペレット トギャップ (μ m)	※1 ペレット Lot. No.
98B1	552.9 \pm 0.5	547.0	5.9	1.08	174	TMA002
98B2	553.2 \pm 0.5	547.2	6.0	1.10	175	"
98B3	553.1 \pm 0.5	546.6	6.5	1.19	123	"
98B4	553.0 \pm 0.5	546.7	6.3	1.15	148	"
98B5	552.7 \pm 0.5	547.4	5.3	0.97	159	TMA002+ TMA001
98B6	553.5 \pm 0.5	547.3	6.2	1.13	137	TMA002
98B7	553.3 \pm 0.5	547.4	5.9	1.08	140	"

※1. PNC I 843-85-20 の燃料要素製造結果の一覧表より転記した。

Table. IV Pin Weight Changes

ピン番号	測定値	製造値	重量差
98B1	361.0	361.0	+0.0
98B2	360.7	360.7	+0.0
98B3	362.0	362.0	+0.0
98B4	361.0	361.0	+0.0
98B5	358.8	358.7	+0.1
98B6	361.5	361.5	+0.0
98B7	362.2	362.1	+0.1

Table. V Pin Total Length Changes

PIE No.	FAB No.	※1 被覆管 材質	ペレット被 覆管ギャップ (μm)	備 考	全 長 (mm)		
					FAB	※2 PIE	PIE-FAB
98B1	A1M03	S 材	174		1532.6	1532.5	-0.1
B2	" 04		175		1532.6	1532.4	-0.2
B3	" 01		123	チタンコーティング グピン	1532.1	1532.4	+0.3
B4	" 02		148		1532.7	1532.8	+0.1
B5	" 08	K 材	159	CPFリサイクル 粉末ペレット	1533.0	1532.9	-0.1
B6	" 05	S 材	137		1532.9	1532.6	-0.3
B7	" 06		140		1532.5	1532.2	-0.3

※1. 被覆管材質S材は、住金製，K材は神鋼製

※2. PIE全長は、2方向の平均値を採用した。

測定有意差は、 $\pm 1.0\text{ mm}$

Table .VI Results of Puncture Test

PIE No	PIN No	※1 ペレット LOT No	ピン内容積 (CC)	ピン内ガス圧 (Torr - STP)	ピン内ガス量 (CC - STP)	ガス分析結果			Xe/Kr 比	放出率 (%)
						Kr (%)	Xe (%)	He + α (%)		
98B1	A1M03	TAM002	8.02	6631	70.01	8.22	76.73	15.05	9.34	57.5
B2	" 04	"	8.02	6454	68.10	8.36	75.70	15.94	9.06	55.3
B3	" 01	"	7.82	7127	73.30	8.26	77.02	14.72	9.33	59.9
B4	" 02	"	7.98	6878	72.20	8.25	76.83	14.92	9.31	58.9
B5	" 08	TAM002 + TAM001	8.28	5895	64.20	8.09	75.92	15.90	9.39	52.4
B6	" 05	TAM002	7.86	6896	71.28	8.27	76.88	14.85	9.30	57.9
B7	" 06	"	7.89	6700	69.62	8.25	76.91	14.89	9.32	56.4

※1. TAM01は、CPFにてMK-I照射済燃料要素を再利用して回収したリサイクル粉末を使用。

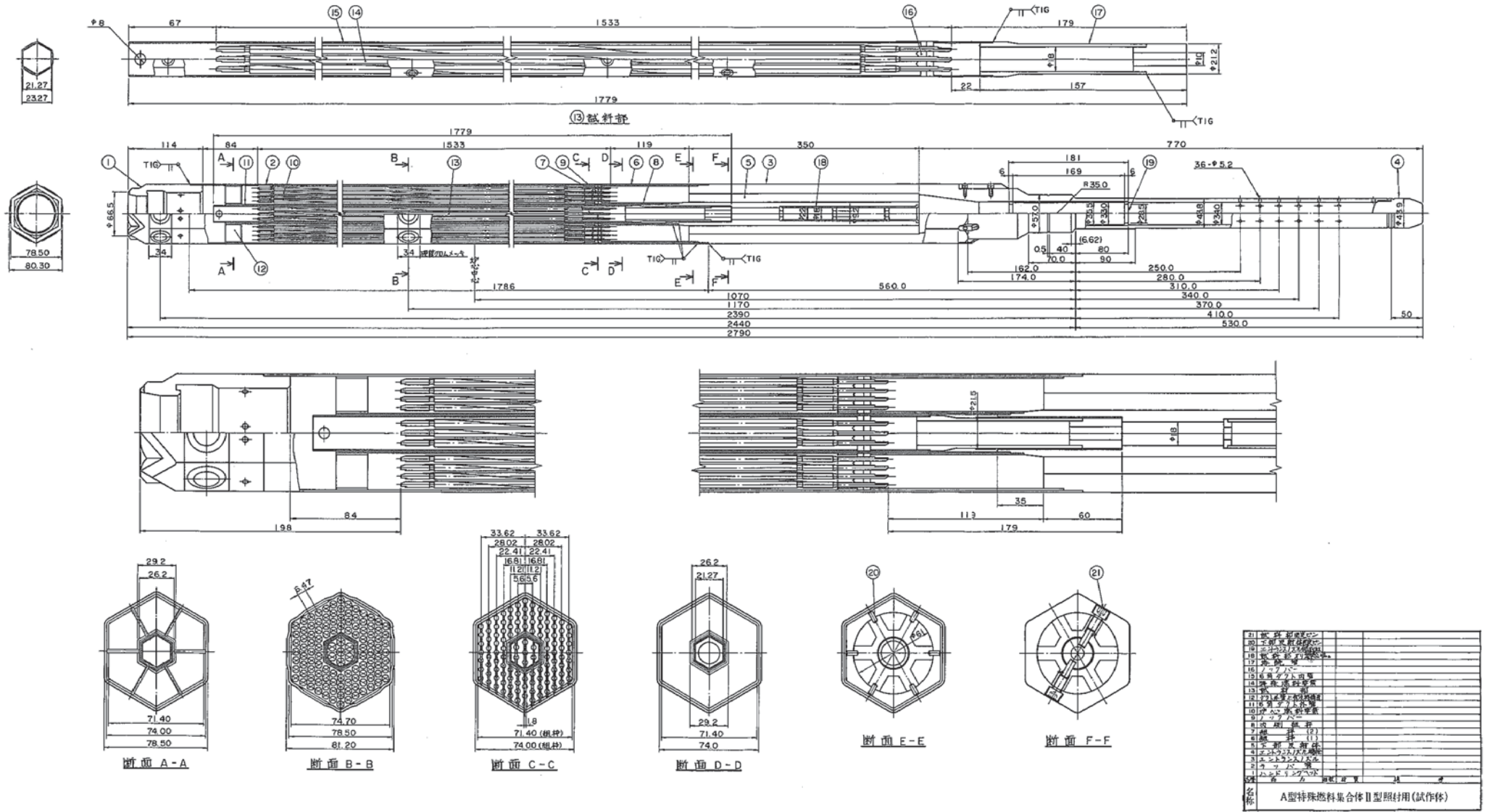
TAM02は、高比率(20:1)混合転換粉末を使用

Table. VII Peak γ -Counting Rates from Ni-coated Test Section

測定部	〔カウント/6000sec〕 ^{*2}				
	⁵¹ Cr	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁶⁰ Co
母材部 A (Niメッキ下部)	14401	162	- *1	1617	6484
Niメッキ部 B	11630	- *1	258	1191	5210
母材部 C (Niメッキ上部)	13656	- *1	- *1	1215	5660

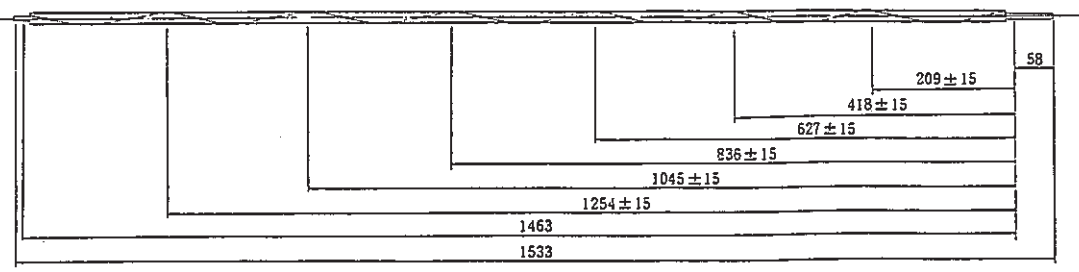
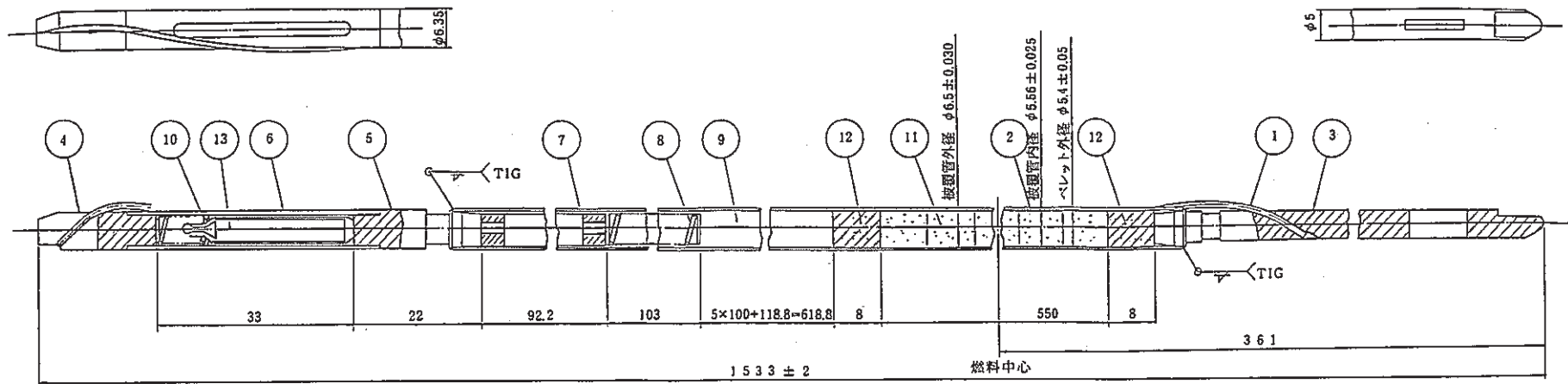
* 1 ピークとは認められず。

* 2 測定は炉停止日後44日に実施し本データは炉停止日に補正值したものである。



21	特殊燃料集合体II型照射用(試作体)				
20	燃料集合体II型照射用(試作体)				
19	燃料集合体II型照射用(試作体)				
18	燃料集合体II型照射用(試作体)				
17	燃料集合体II型照射用(試作体)				
16	燃料集合体II型照射用(試作体)				
15	燃料集合体II型照射用(試作体)				
14	燃料集合体II型照射用(試作体)				
13	燃料集合体II型照射用(試作体)				
12	燃料集合体II型照射用(試作体)				
11	燃料集合体II型照射用(試作体)				
10	燃料集合体II型照射用(試作体)				
9	燃料集合体II型照射用(試作体)				
8	燃料集合体II型照射用(試作体)				
7	燃料集合体II型照射用(試作体)				
6	燃料集合体II型照射用(試作体)				
5	燃料集合体II型照射用(試作体)				
4	燃料集合体II型照射用(試作体)				
3	燃料集合体II型照射用(試作体)				
2	燃料集合体II型照射用(試作体)				
1	燃料集合体II型照射用(試作体)				
名称	A型特殊燃料集合体II型照射用(試作体)				

Fig.1 A Drawing of the Subassembly [PFA010]



ワイヤラッピング全体図

13	TED温度モニター		1		
12	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2		
11	燃料ペレット	PuO ₂ -UO ₂			
10	温度モニター固定スプリング	SUS 304WPB	1		
9	要素反射体	SUS 316相当	6		
8	プラチナムスプリング	SUS 304WPB	1		
7	抑エ板付プラチナムスリーブ	SUS 316	1		
6	温度モニター収納管	SUS 316	1		
5	上部端栓(B)	SUS 316相当	1		
4	上部端栓(A)	SUS 316相当	1		
3	下部端栓	SUS 316相当	1		
2	被覆管	SUS 316相当	1		
1	ラッピングワイヤ	SUS 316相当	1		
品番	図番	品名	材質	個数	備考

Fig.2 A Drawing of the Test Fuel Pin

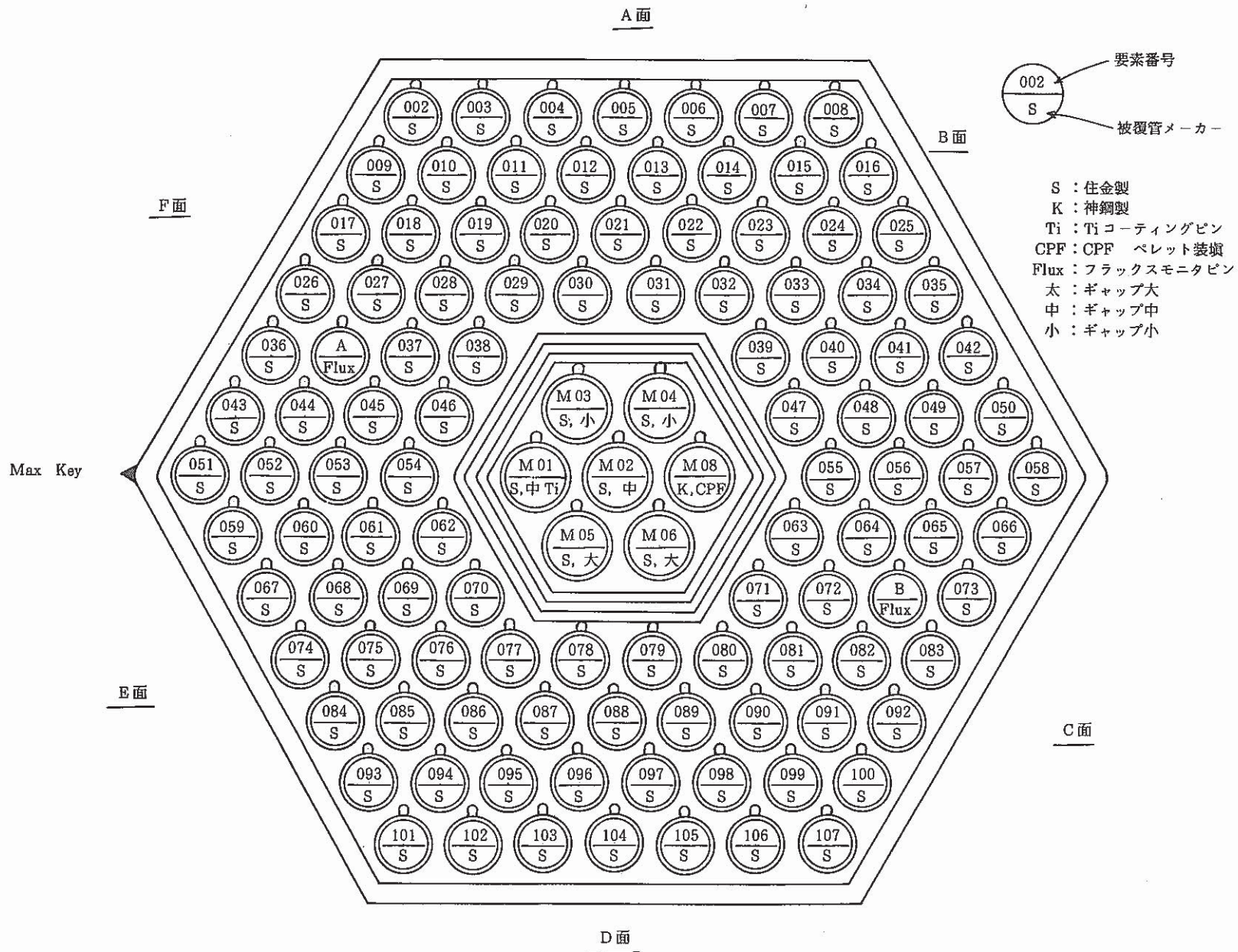


Fig. 3 Pin Loading Diagram

炉内照射位置

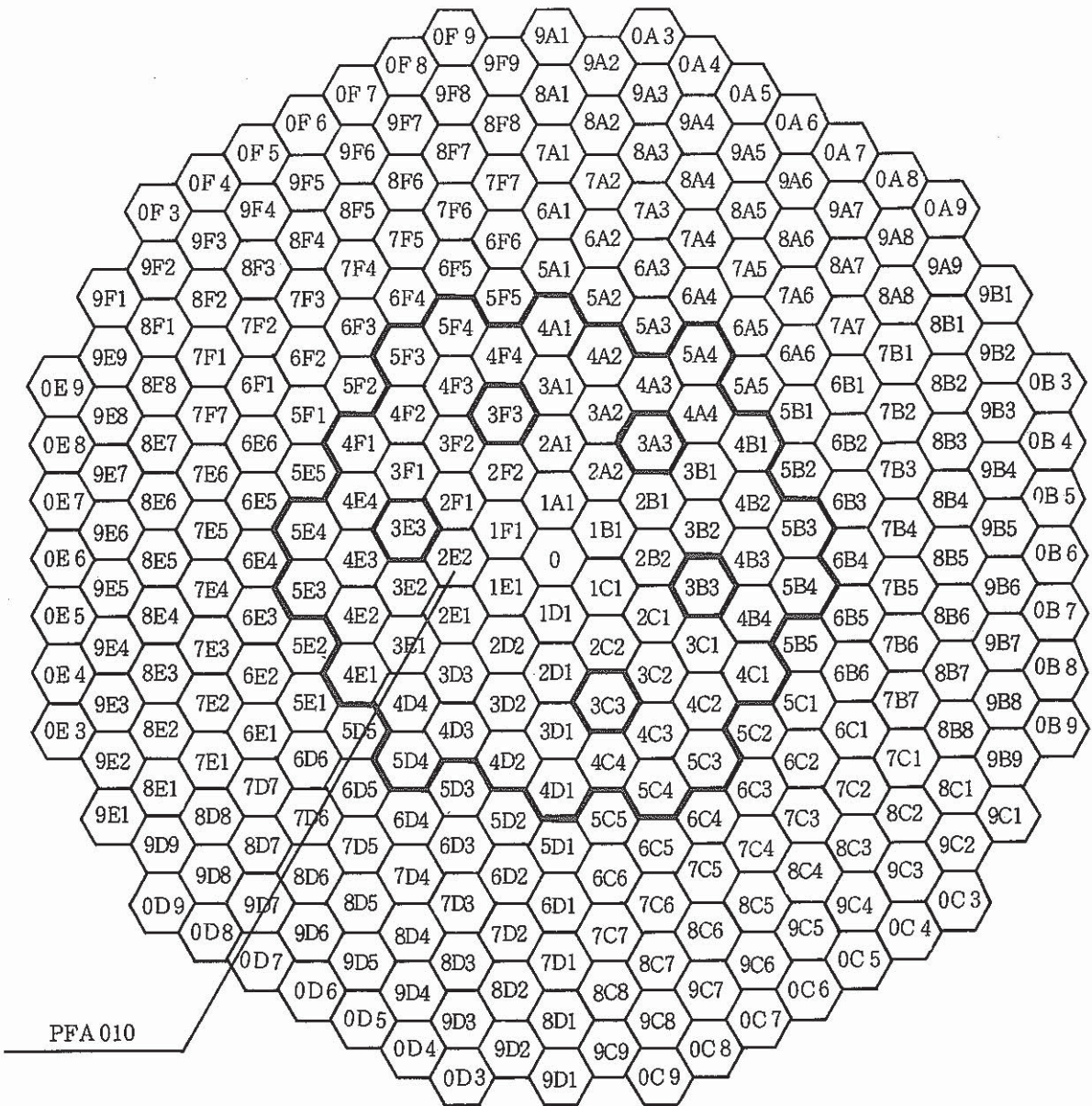


Fig.4 In Reactor Location of the Subassembly (PFA 010)

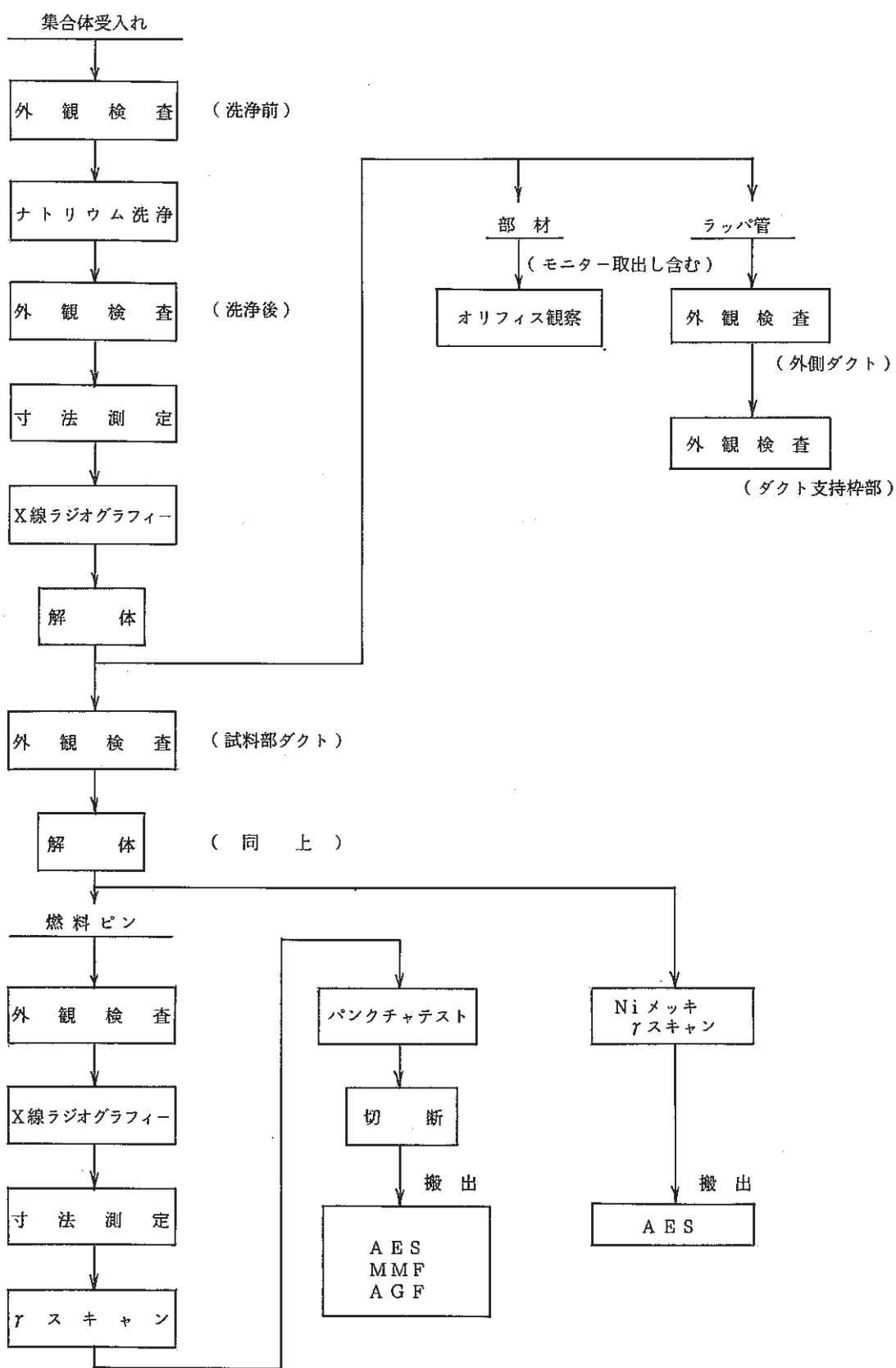


Fig.5 Flow Diagram of the Post Irradiation Examination

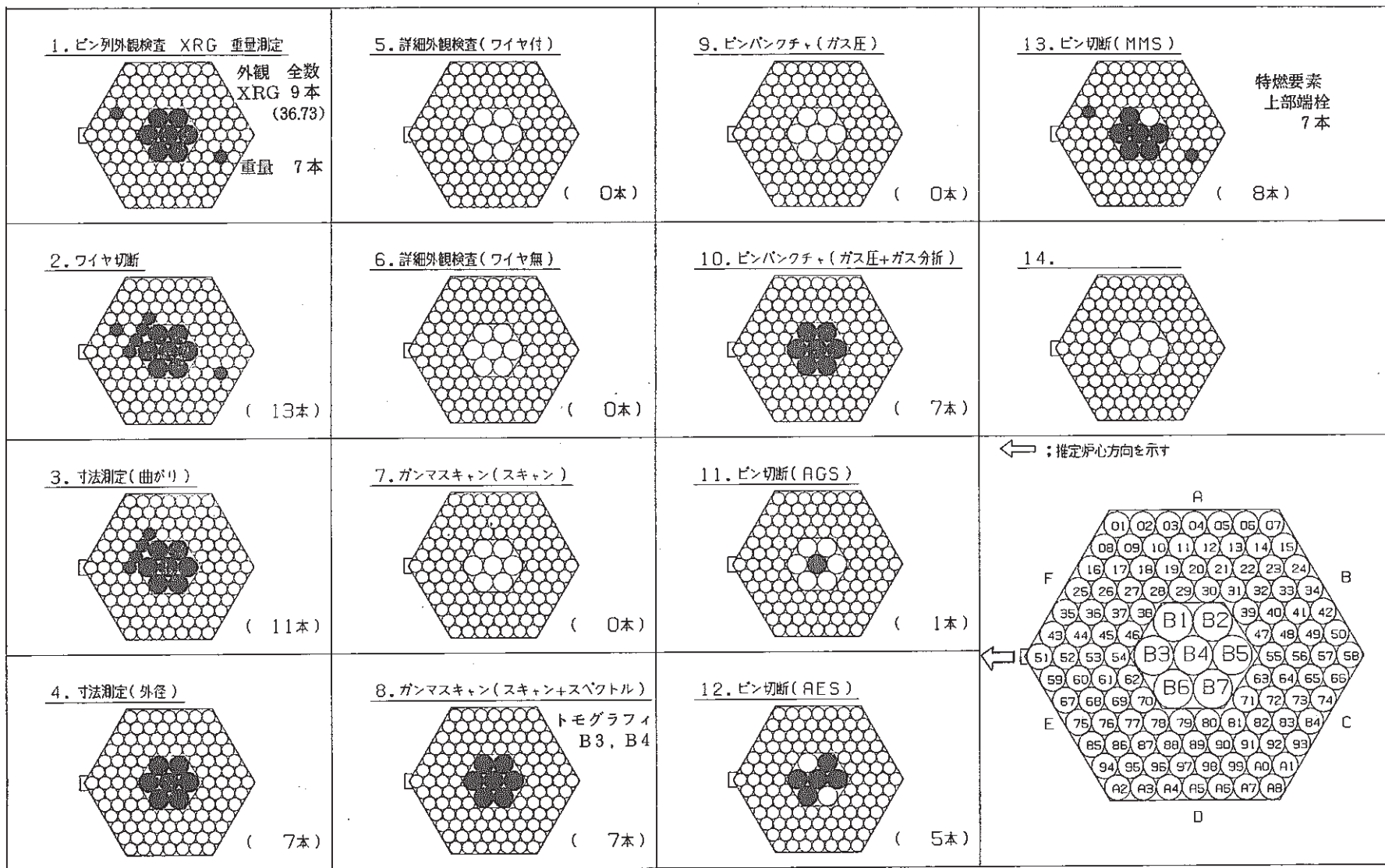


Fig.6 Fuel pins Selected for post Irradiation Examination

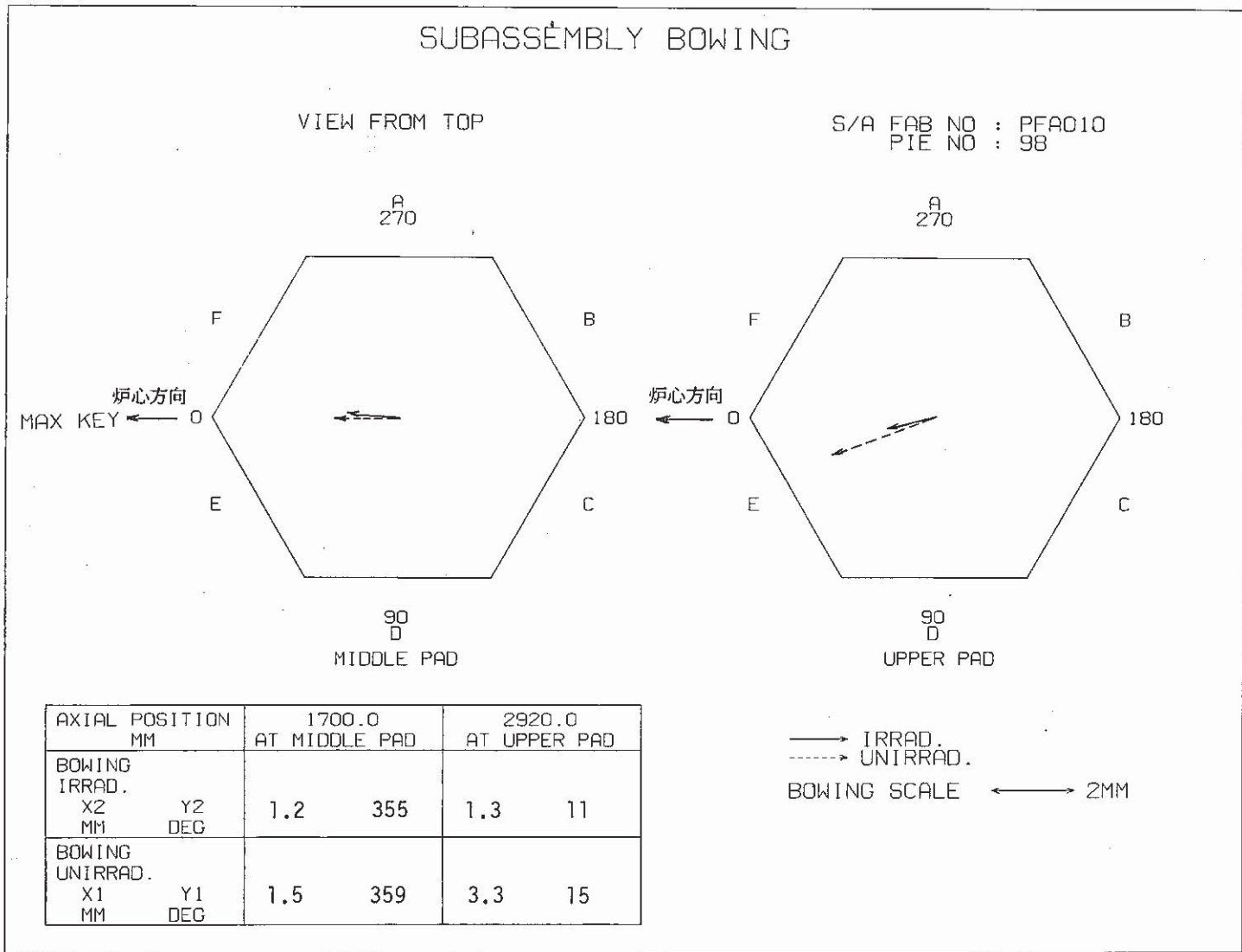


Fig.7 Bowing Vectors of the Subassembly

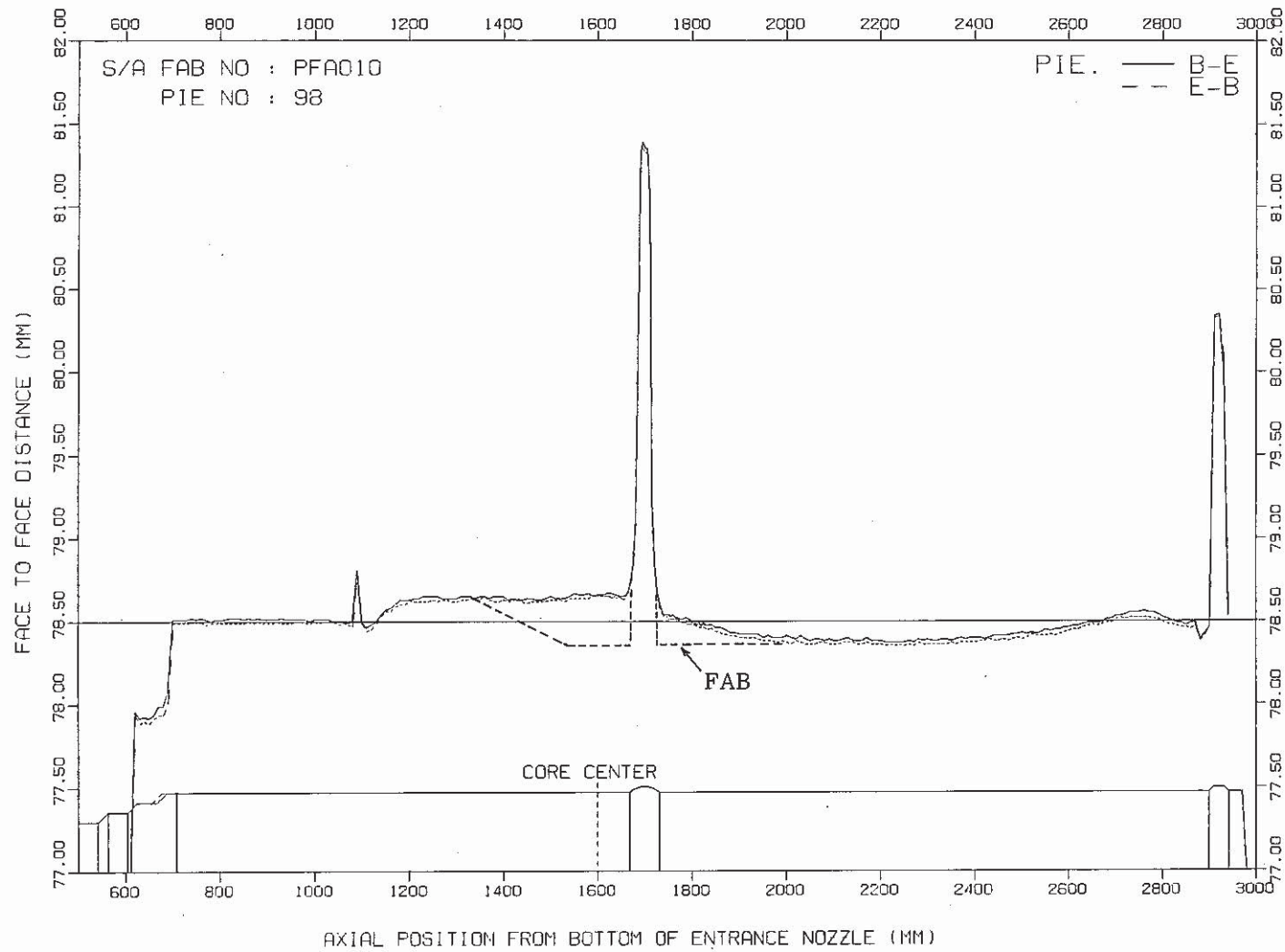


Fig.8 An Axial Profile of the Face to Face Distance of the wrapper Tube (B-E Face)

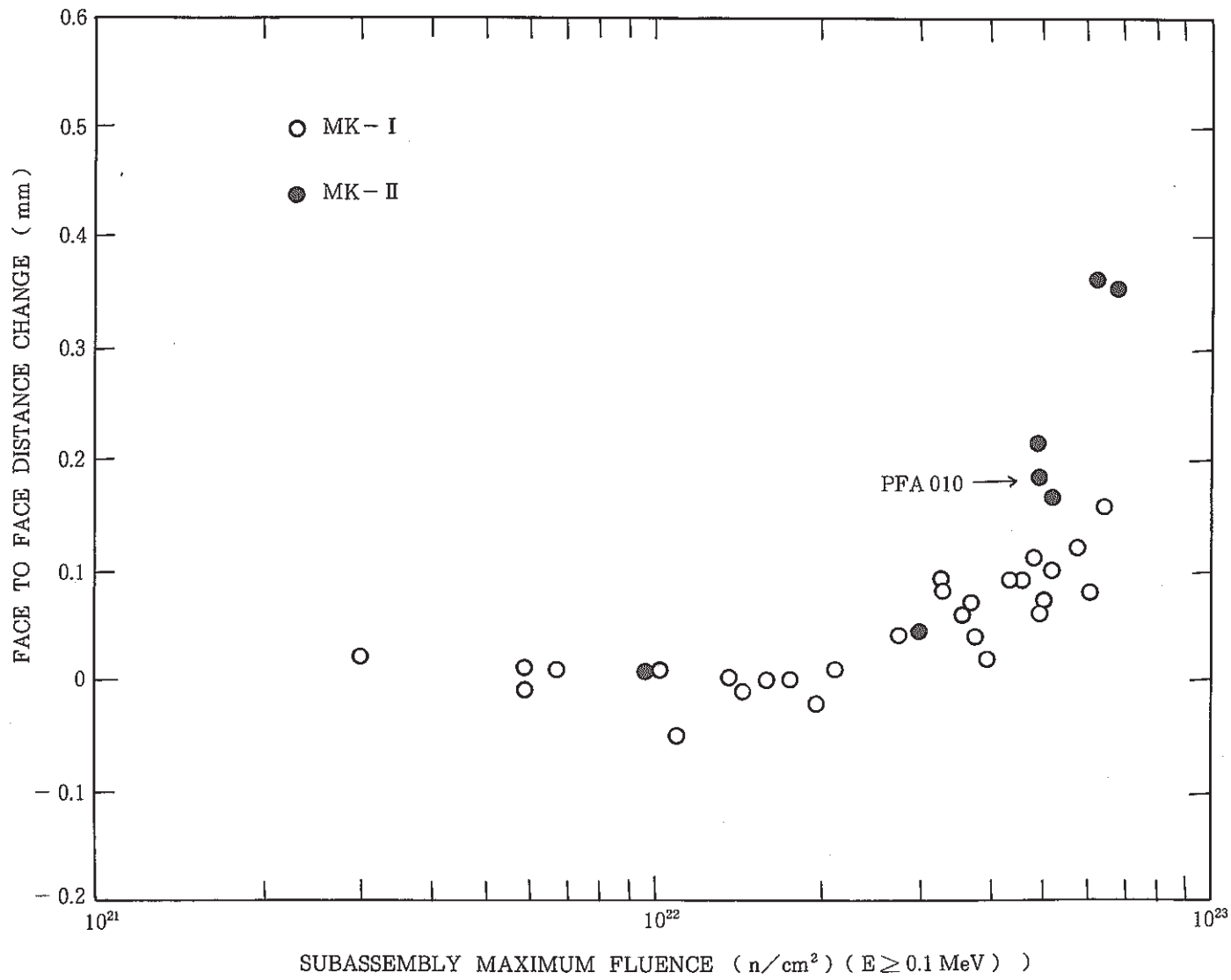


Fig.9 Wrapper Tube to Face to Face Distance Changes as a function of the Subassembly Maximum Fluence

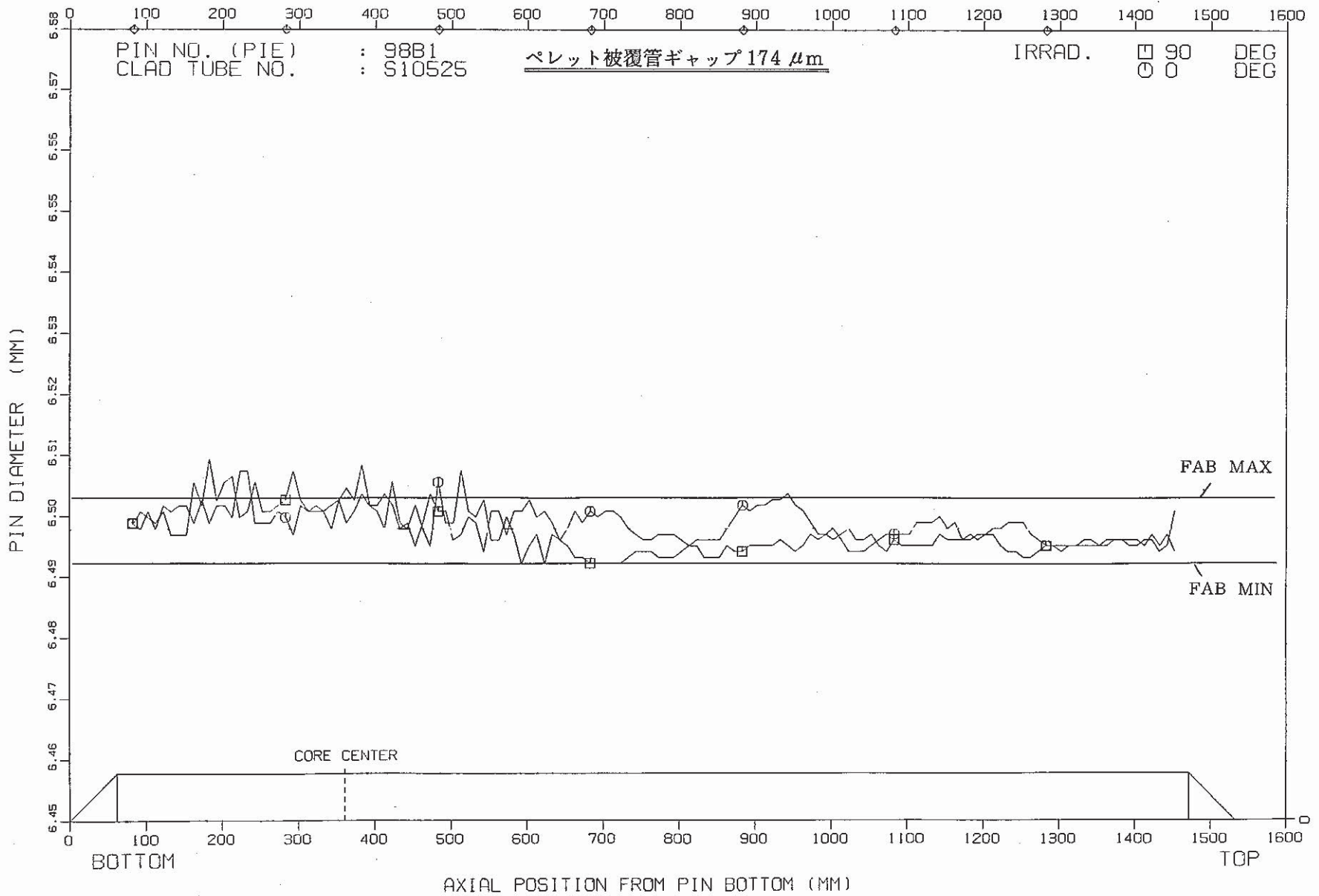


Fig.11 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B 1)

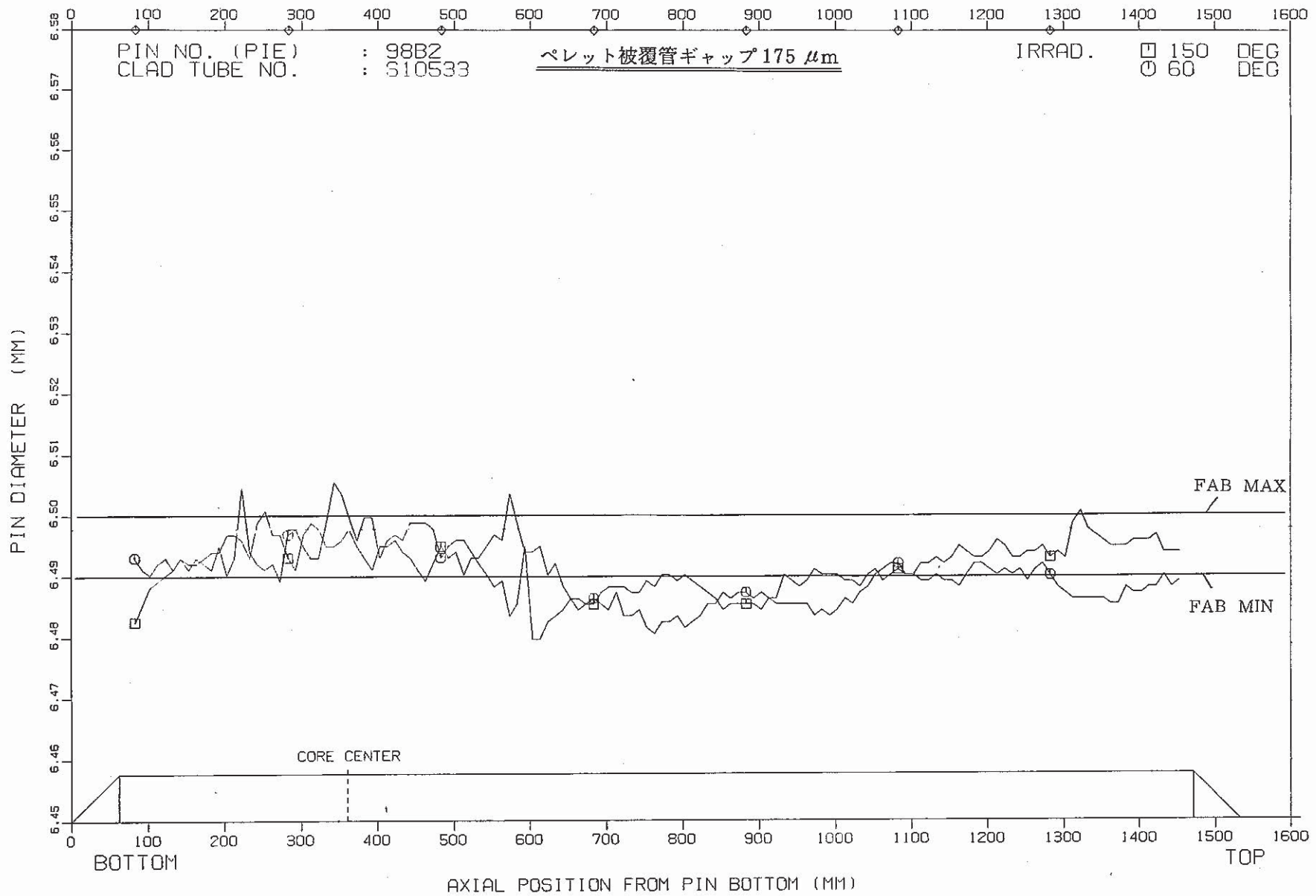


Fig.12 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B 2)

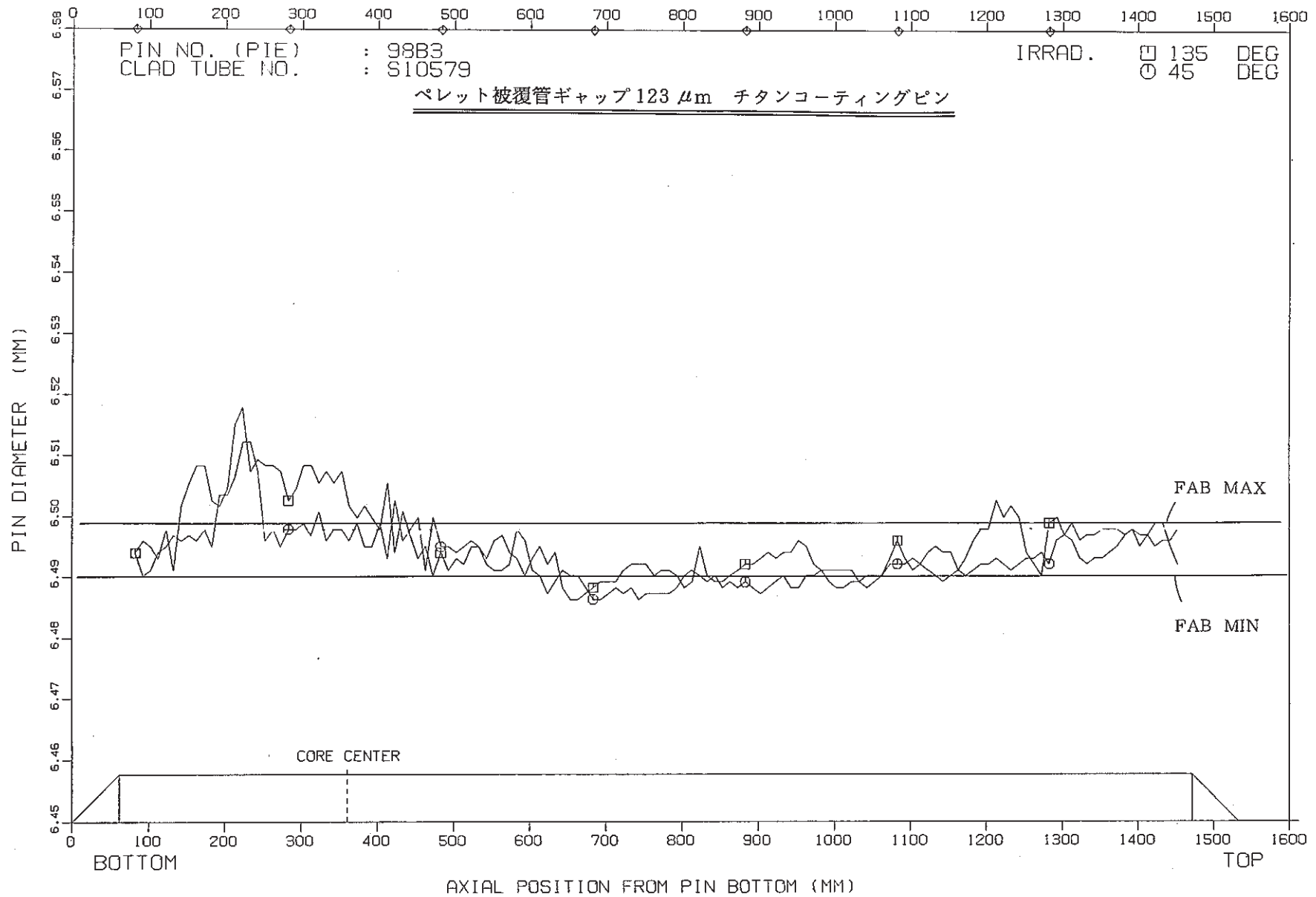


Fig.13 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B 3)

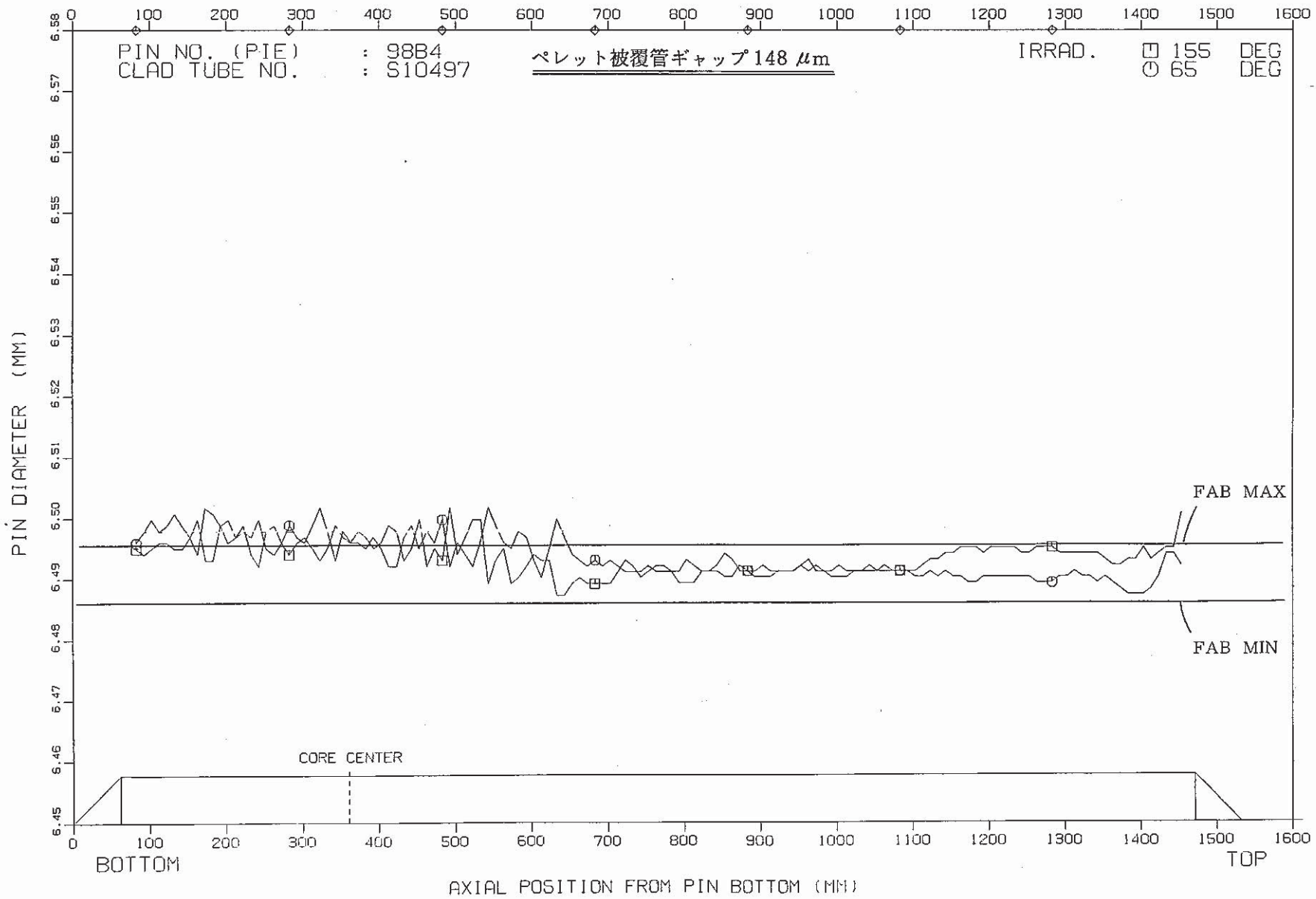


Fig.14 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B 4)

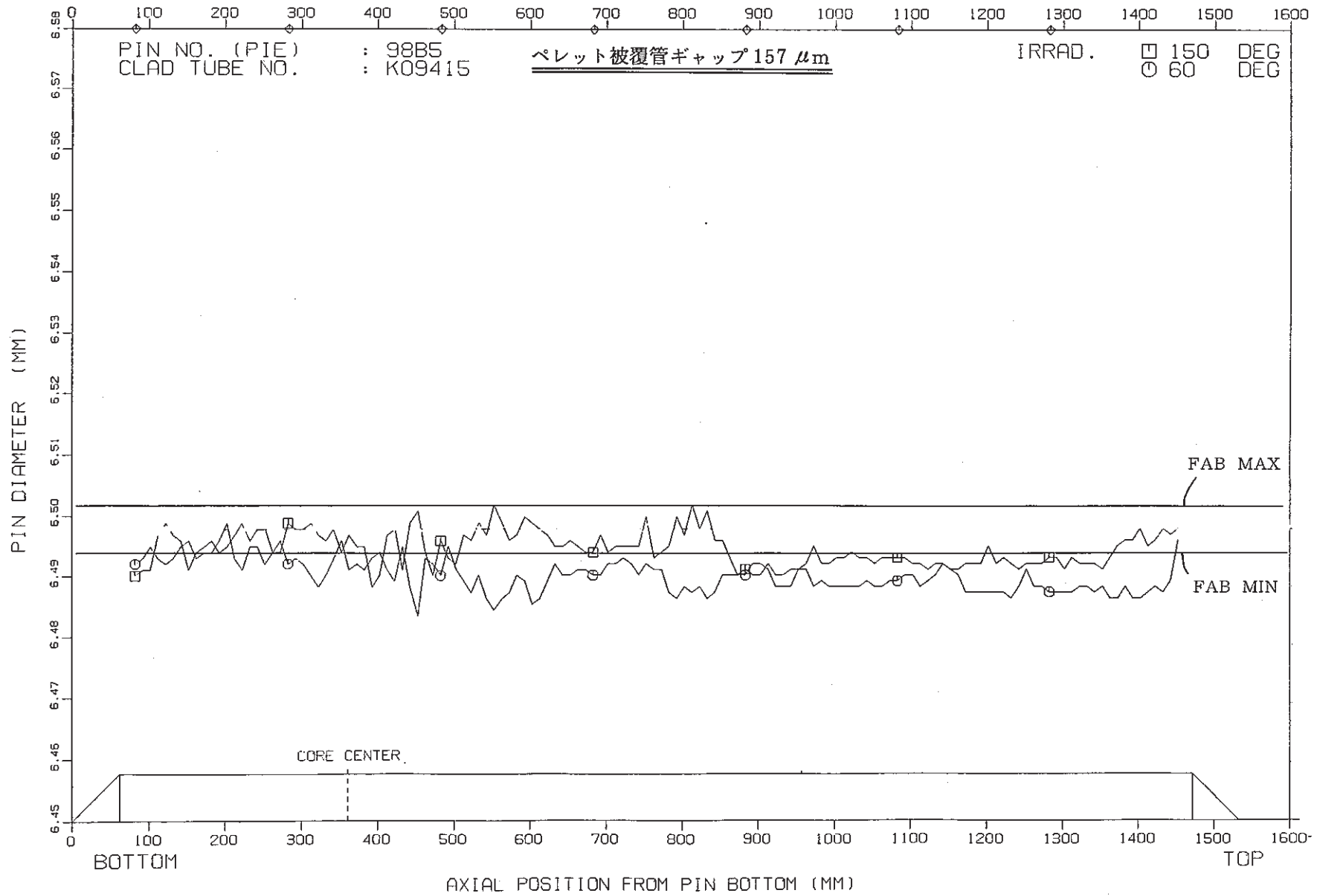


Fig.15 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B5)

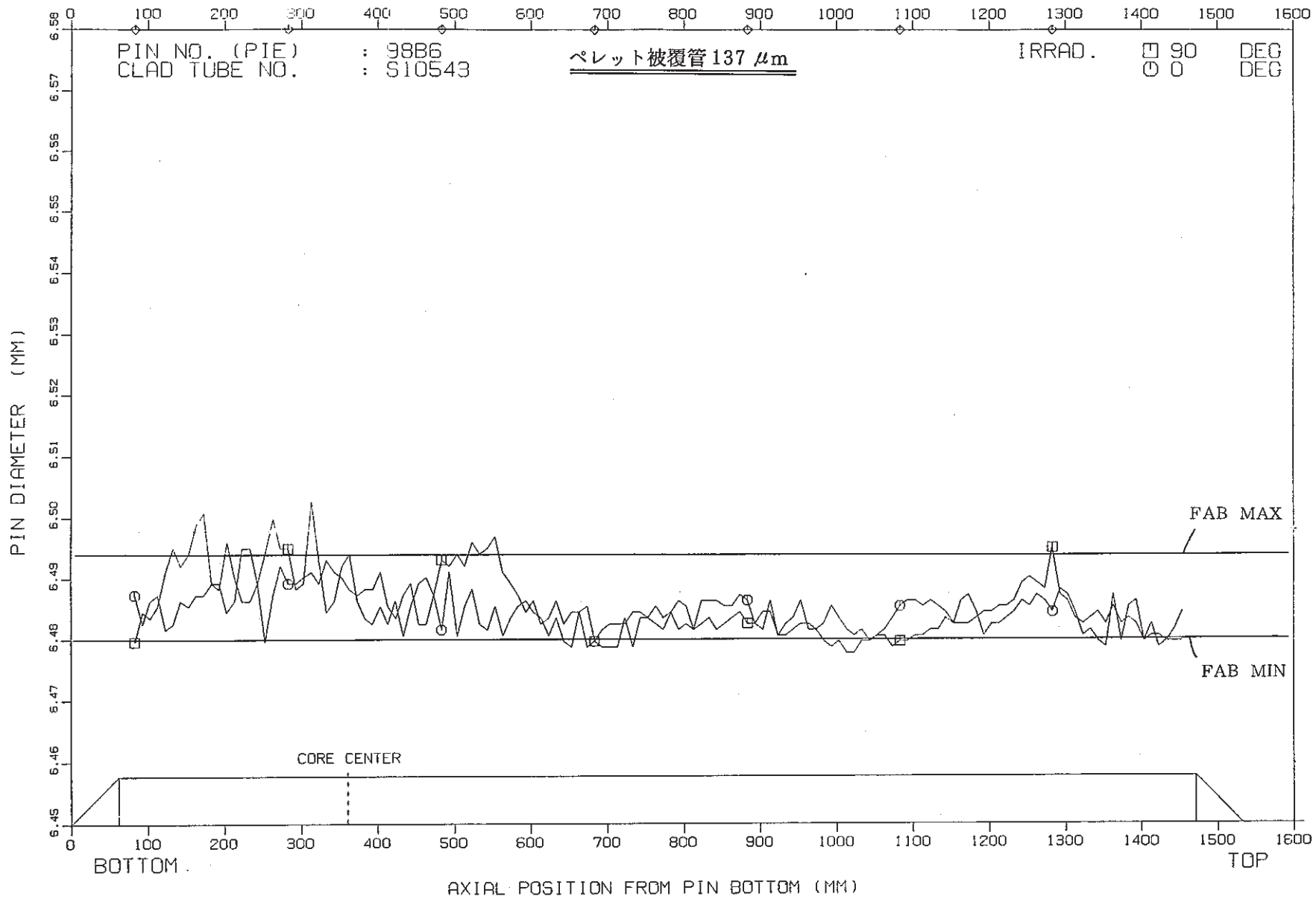


Fig.16 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B6)

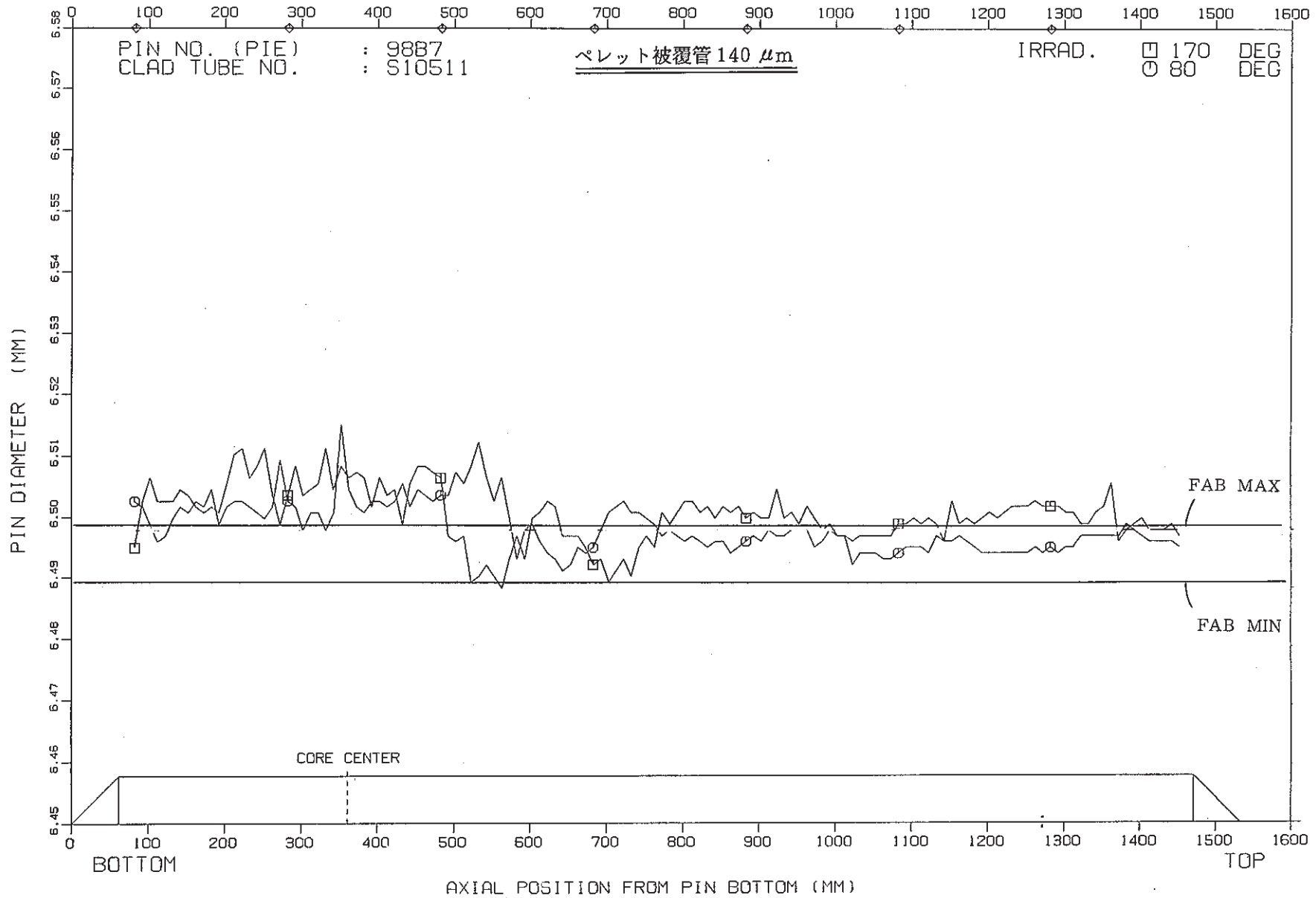


Fig.17 An Axial Profile of Test Fuel Pin outer diameter (Spec. No.98 B7)

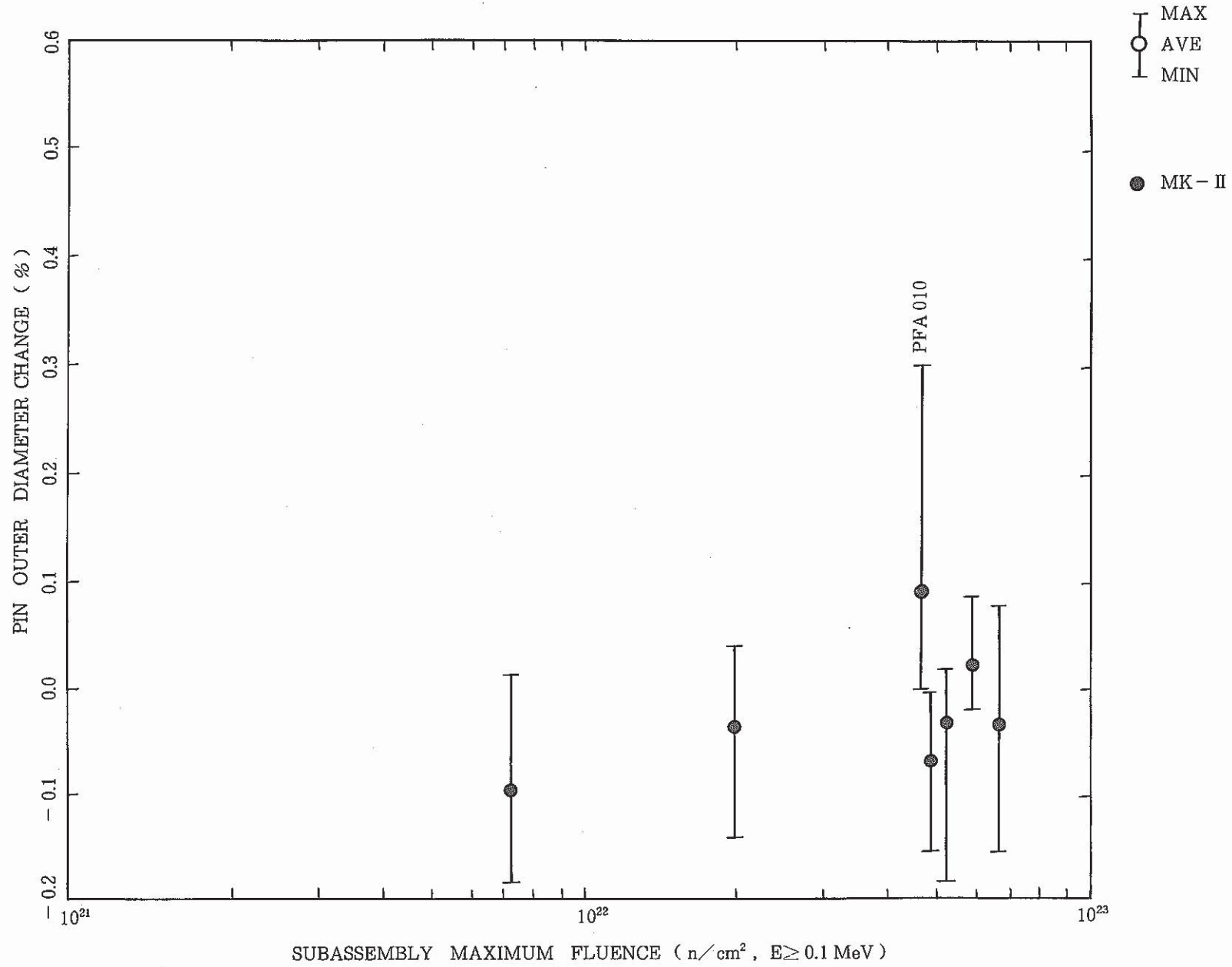


Fig.18 Pin Outer Diameter Changes as a Function of the Subassembly Maximum Fluence

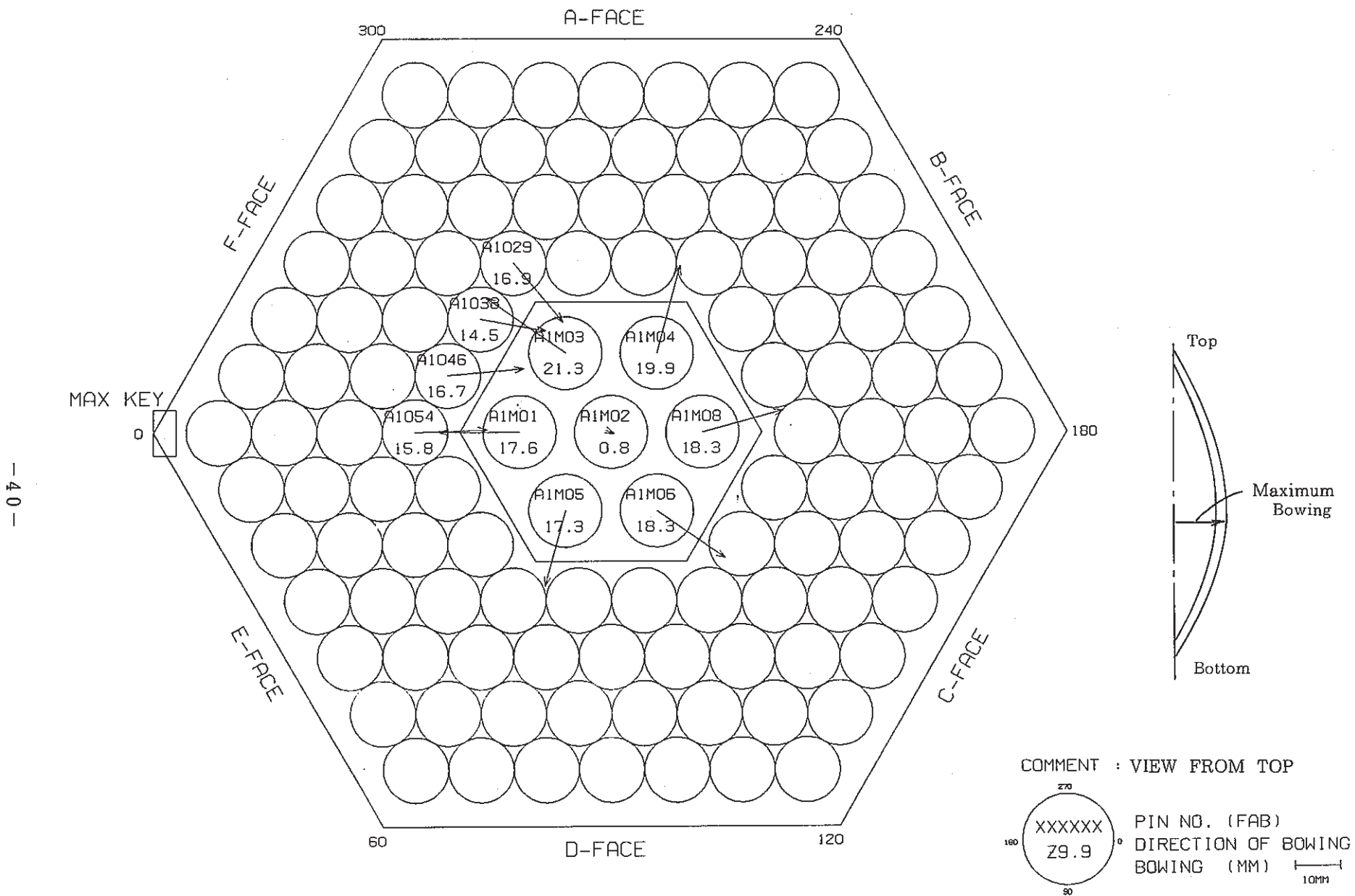


Fig.19 Pin Bowing Vectors in the Subassembly

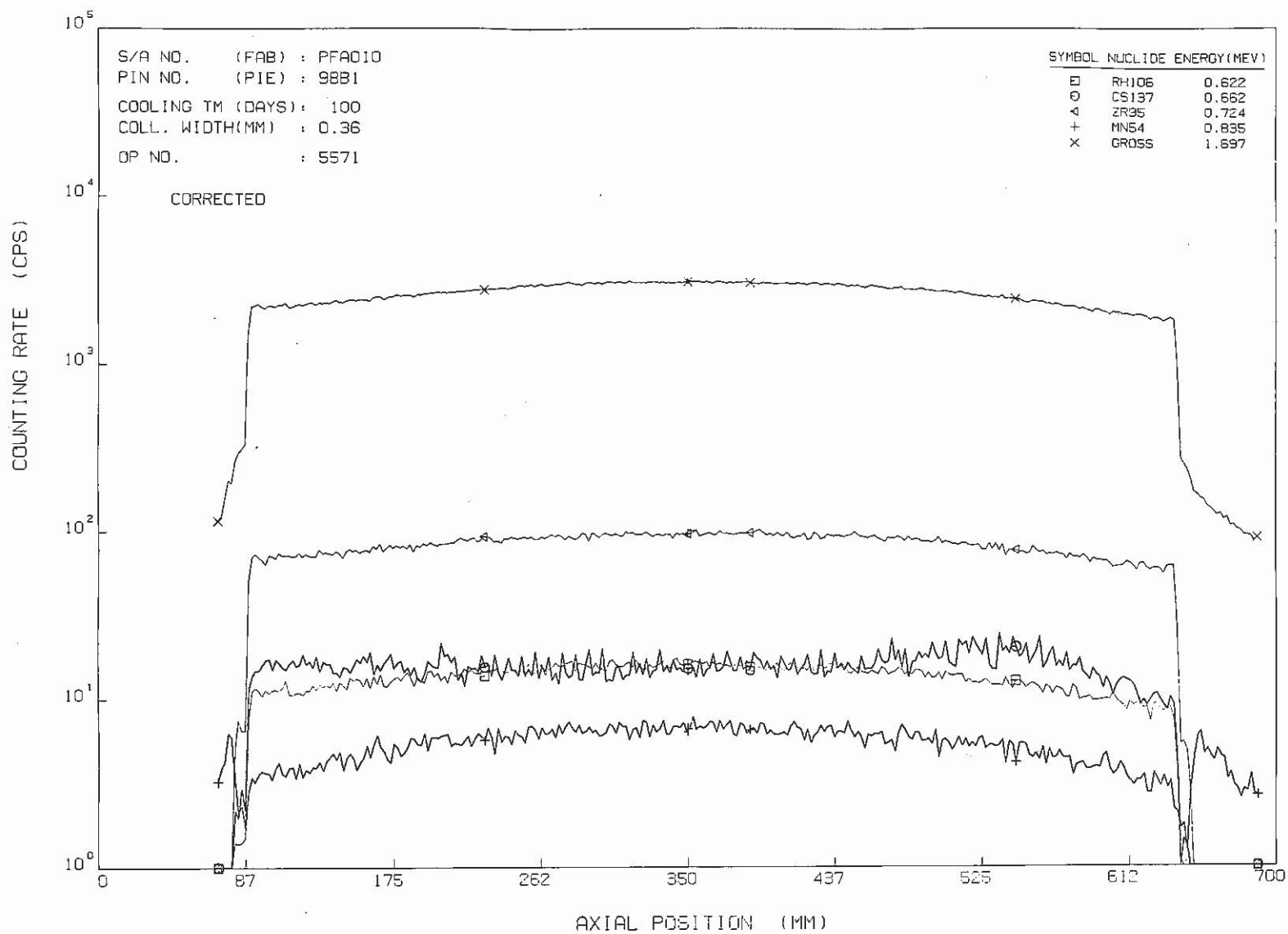


Fig.20 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No.98 B 1)

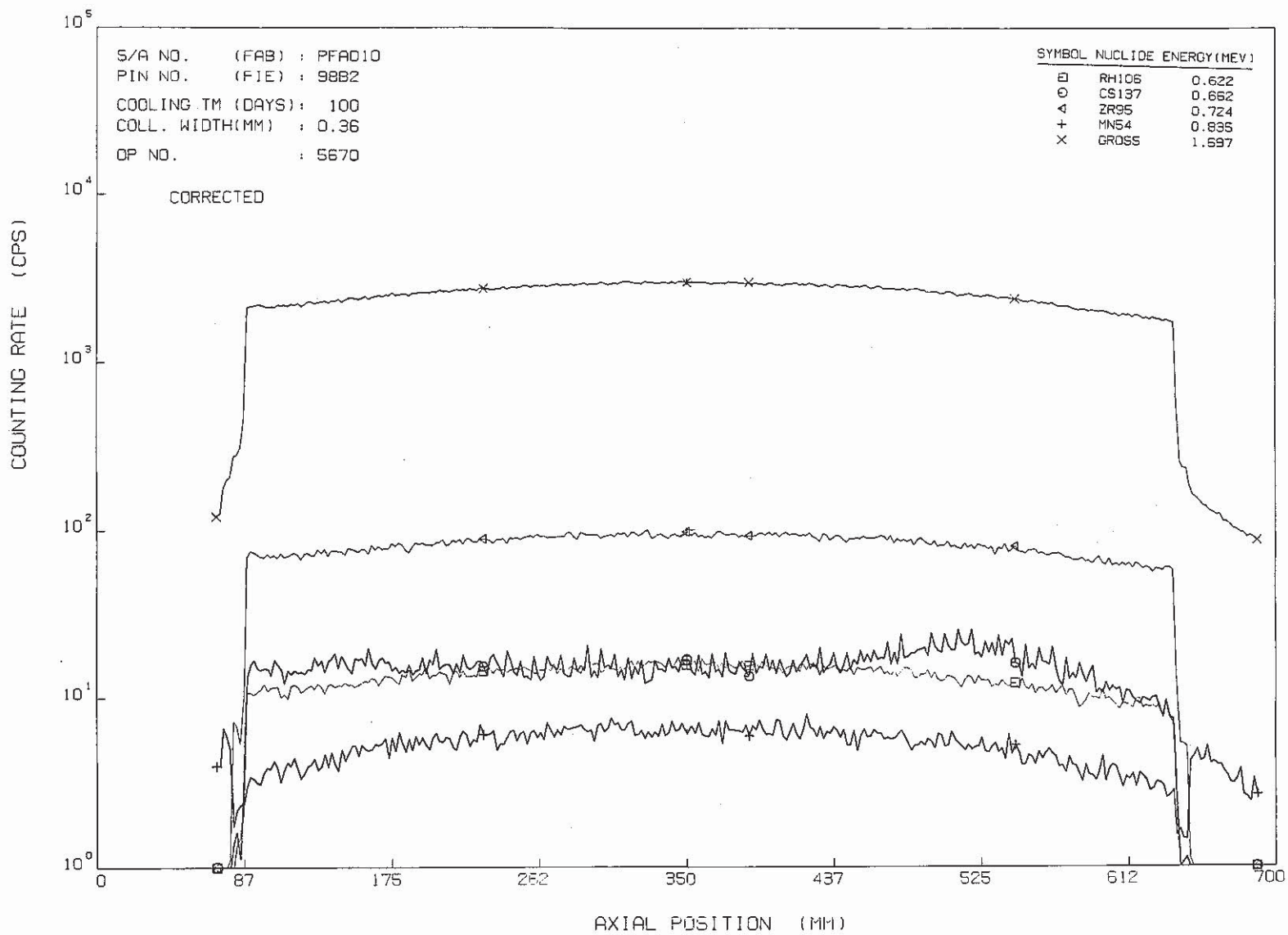


Fig.21 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No 98 B 2)

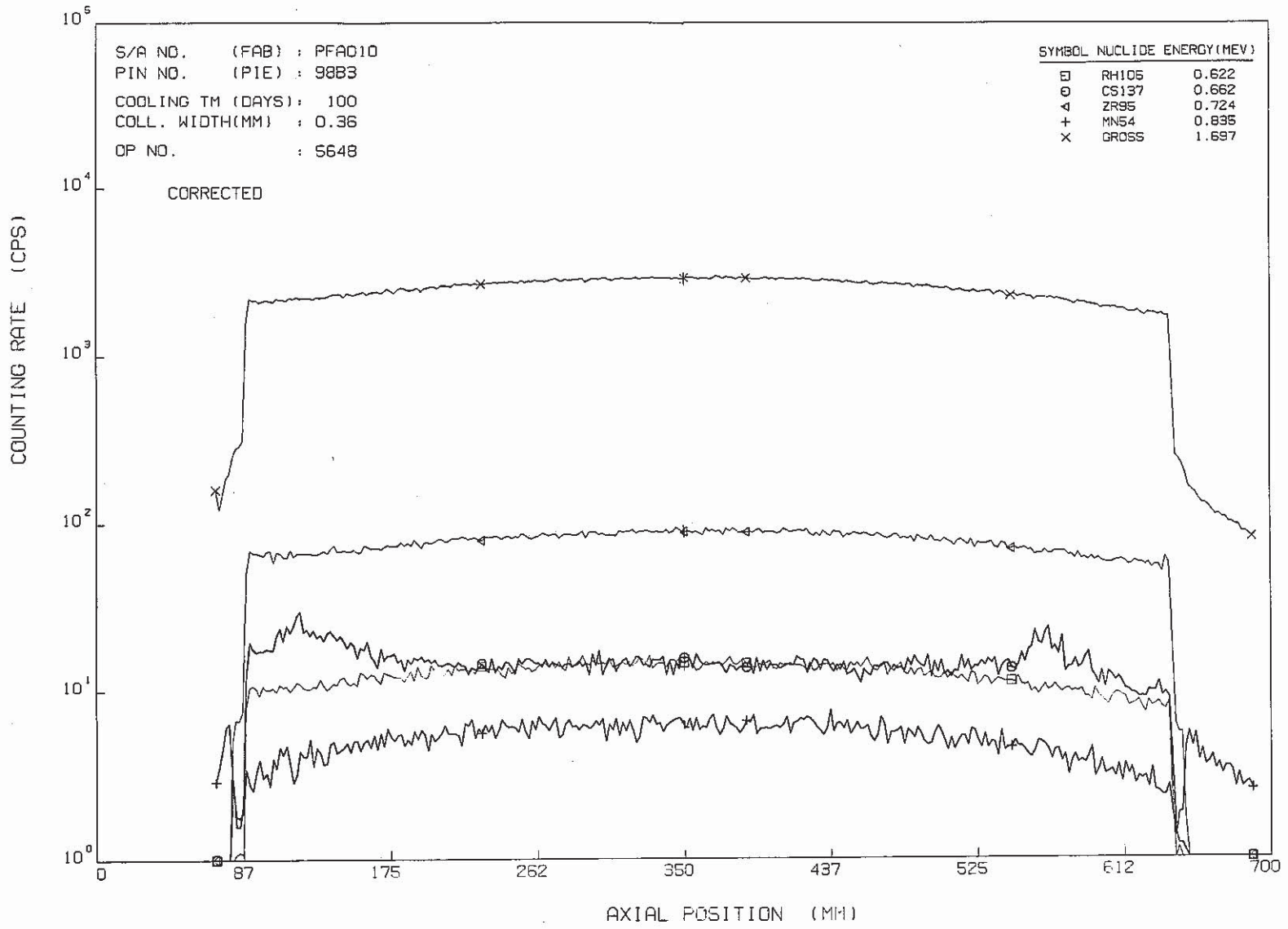


Fig.22 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No.98 B 3)

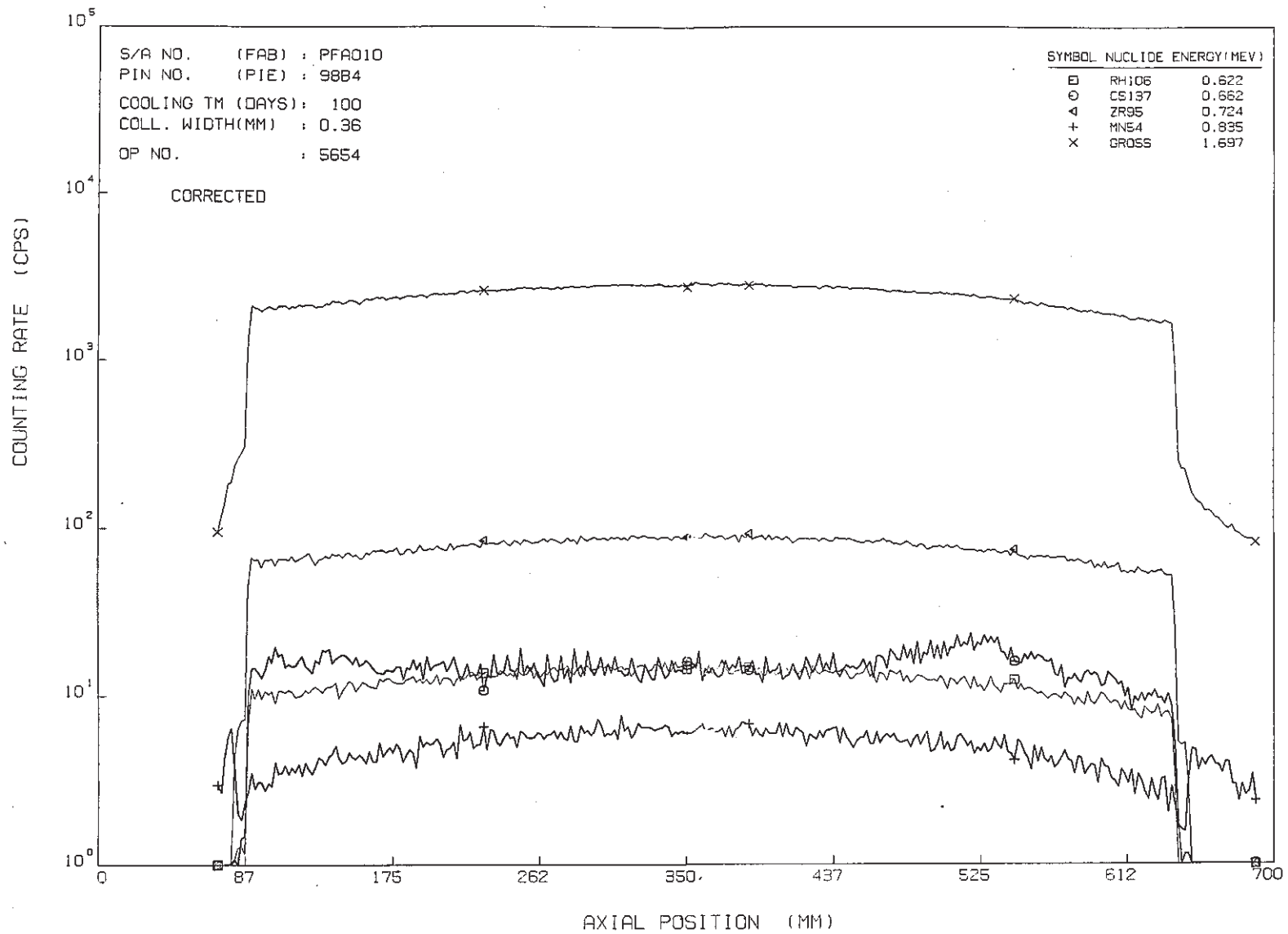


Fig.23 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No 98 B 4)

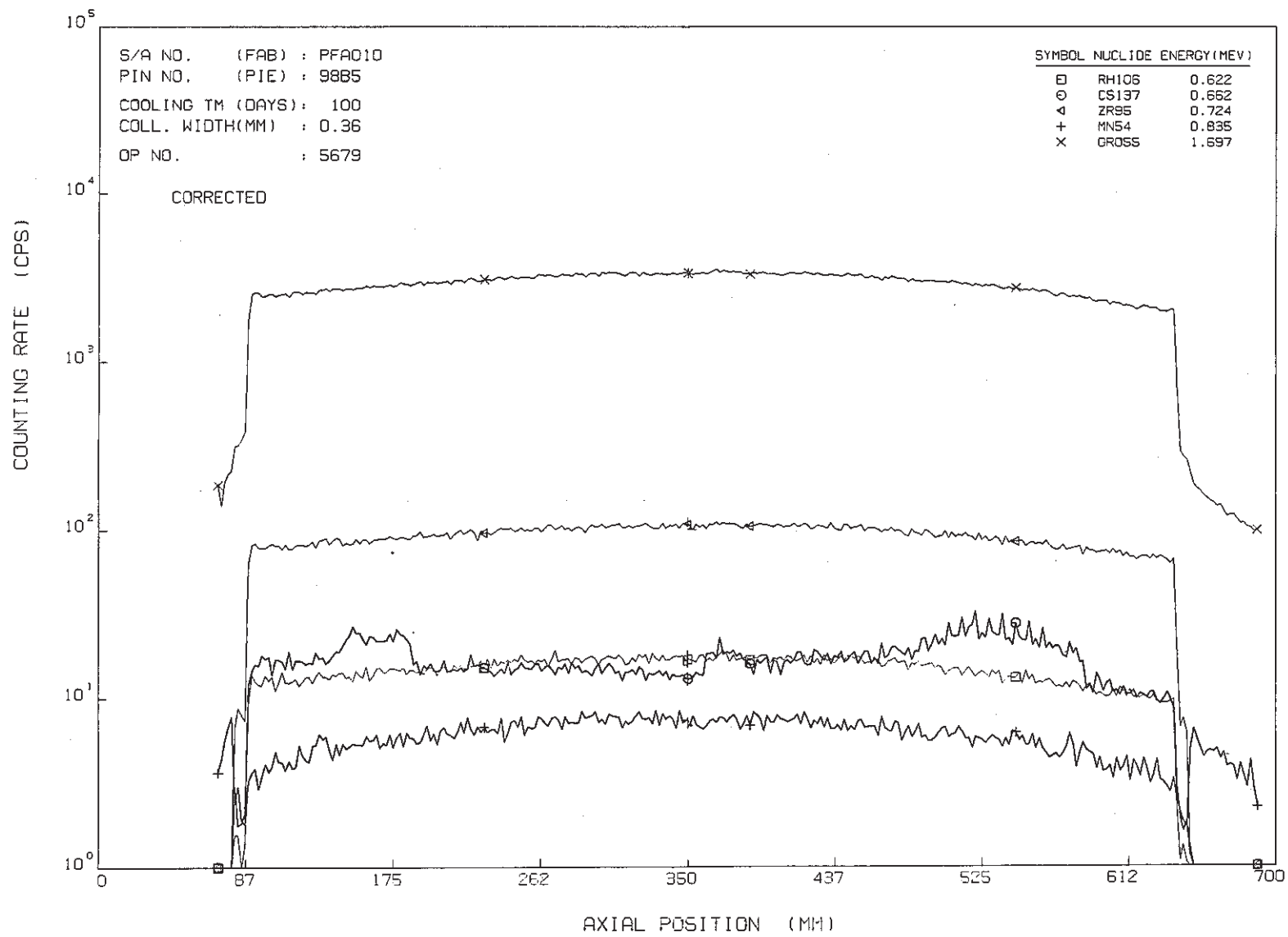


Fig.24 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No.98 B5)

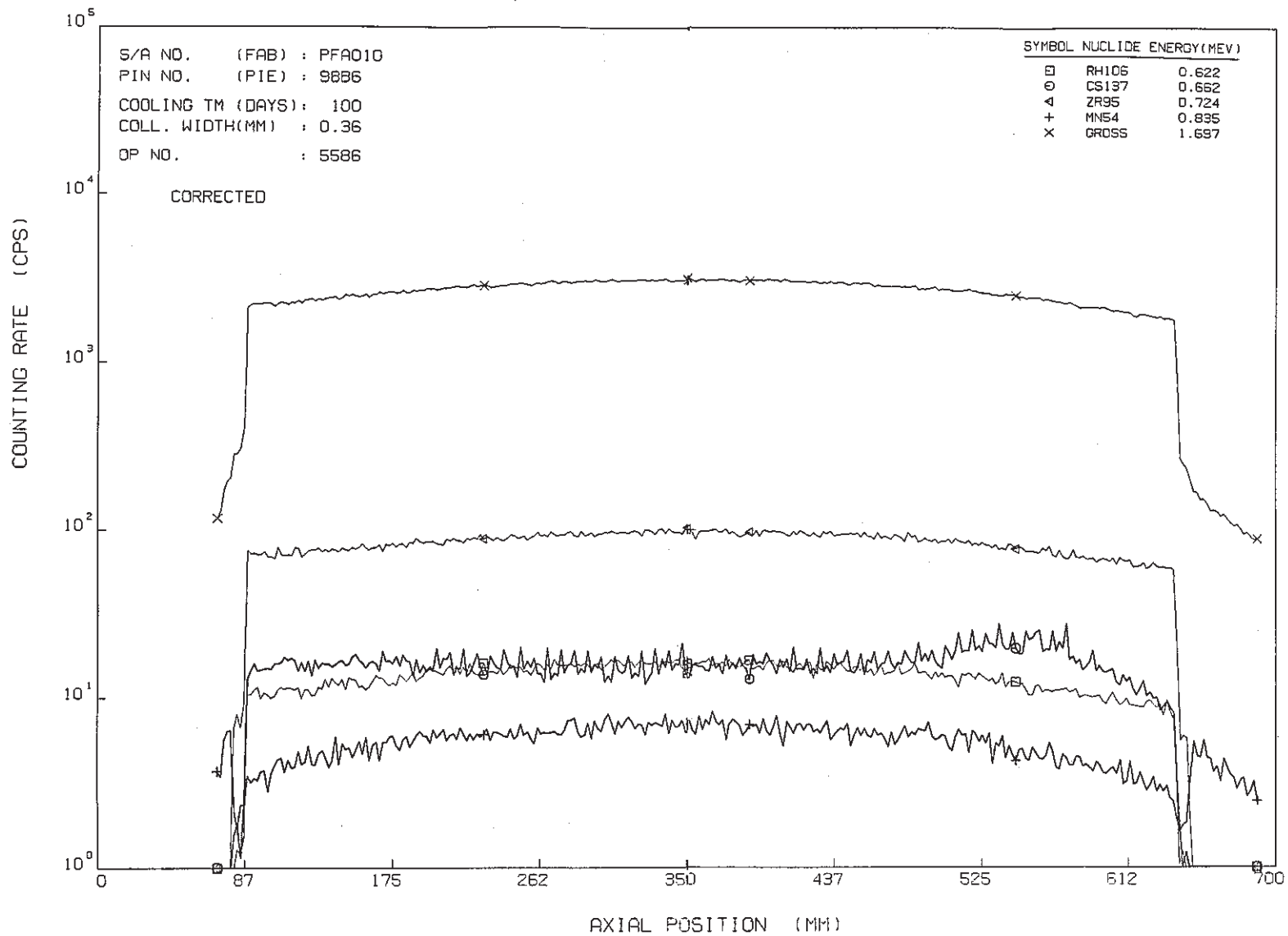


Fig.25 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No 98 B 6)

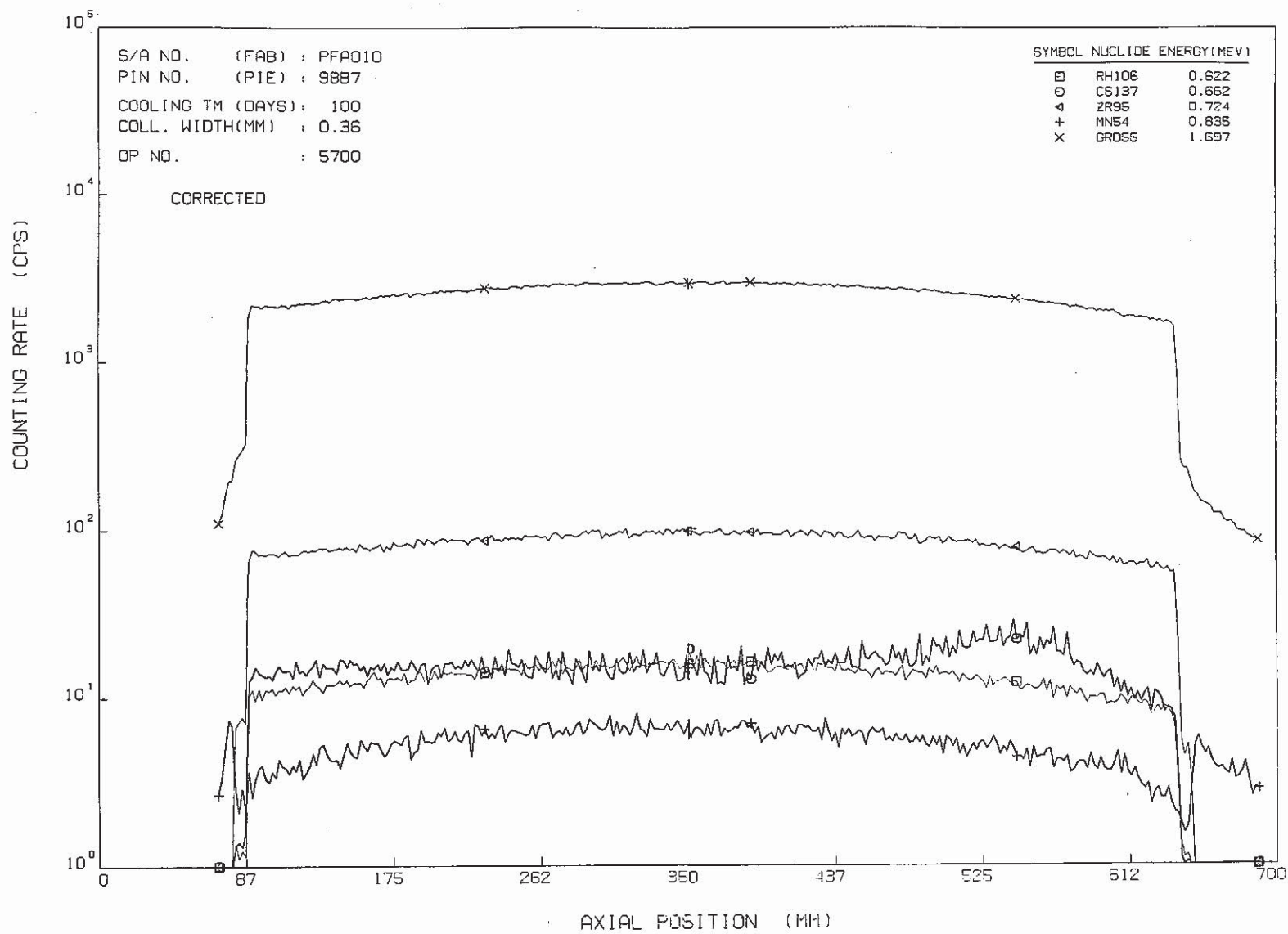


Fig. 26 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Spec. No 98 B 7)

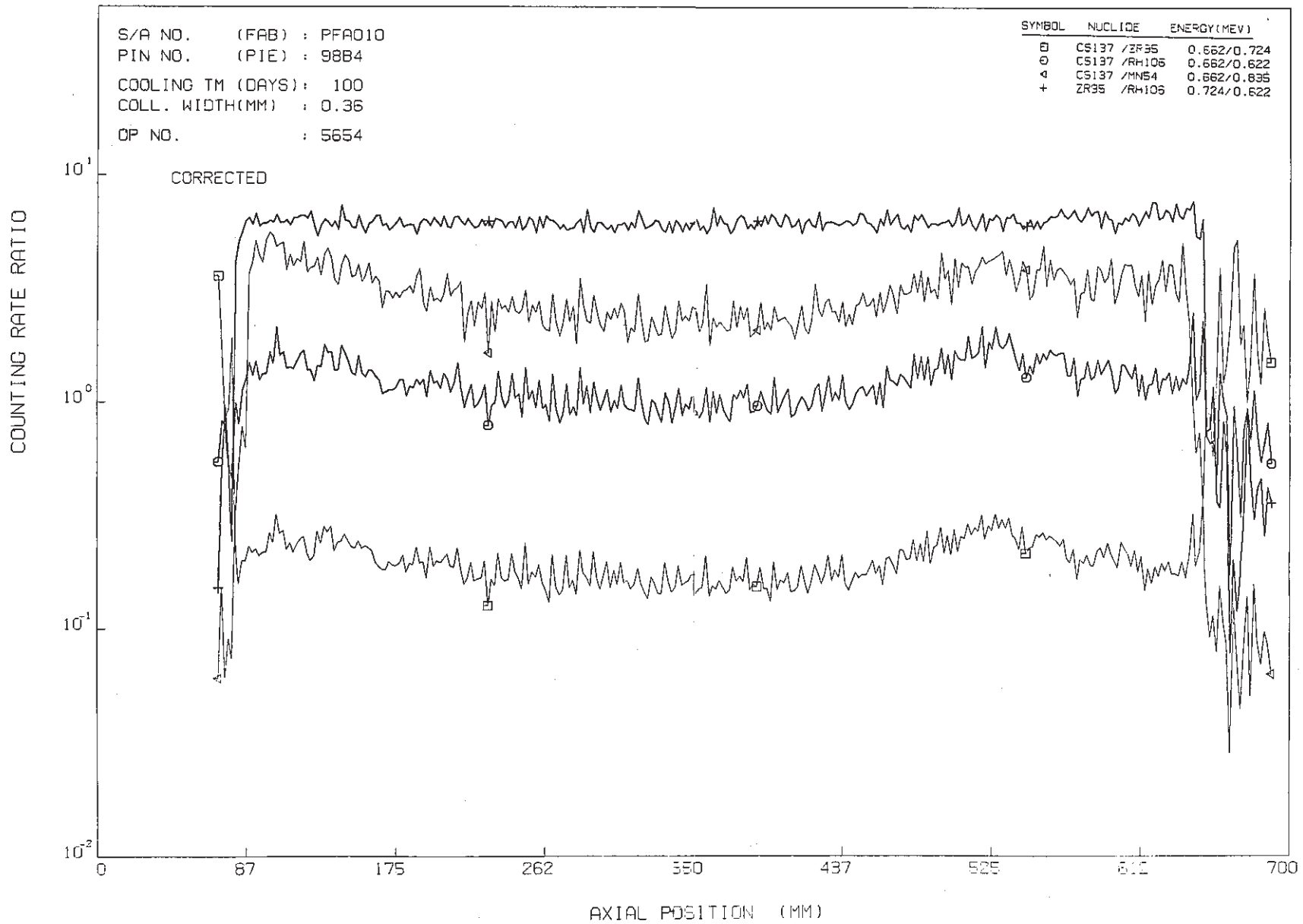


Fig.27 Axial Distribution of Count Rate Ratio (Spec. No.98 B 4)

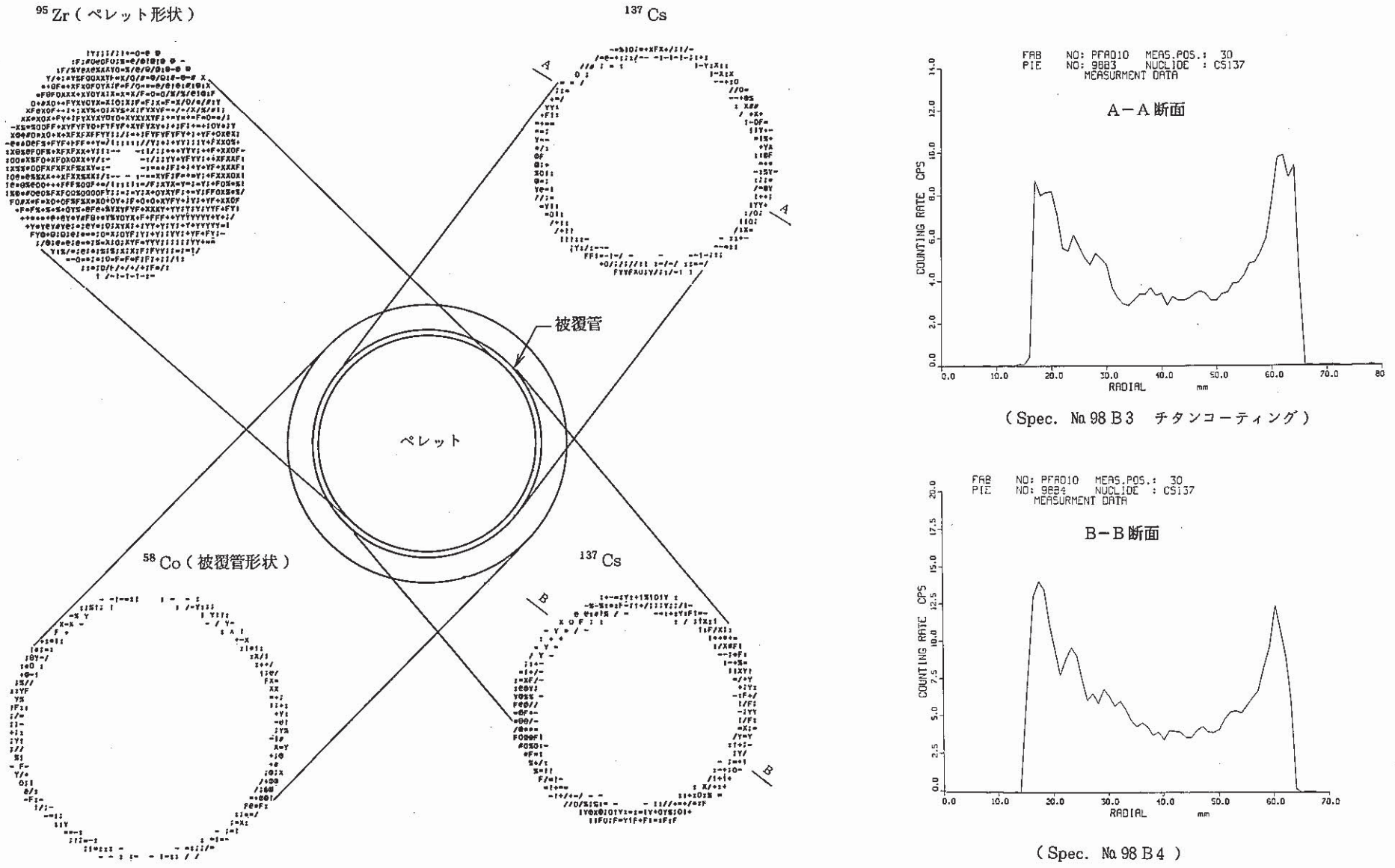


Fig.28. Emission Tomographs of Radionuclides and Radial Distribution of Gamma Ray Intensity in Test Fuel Pins

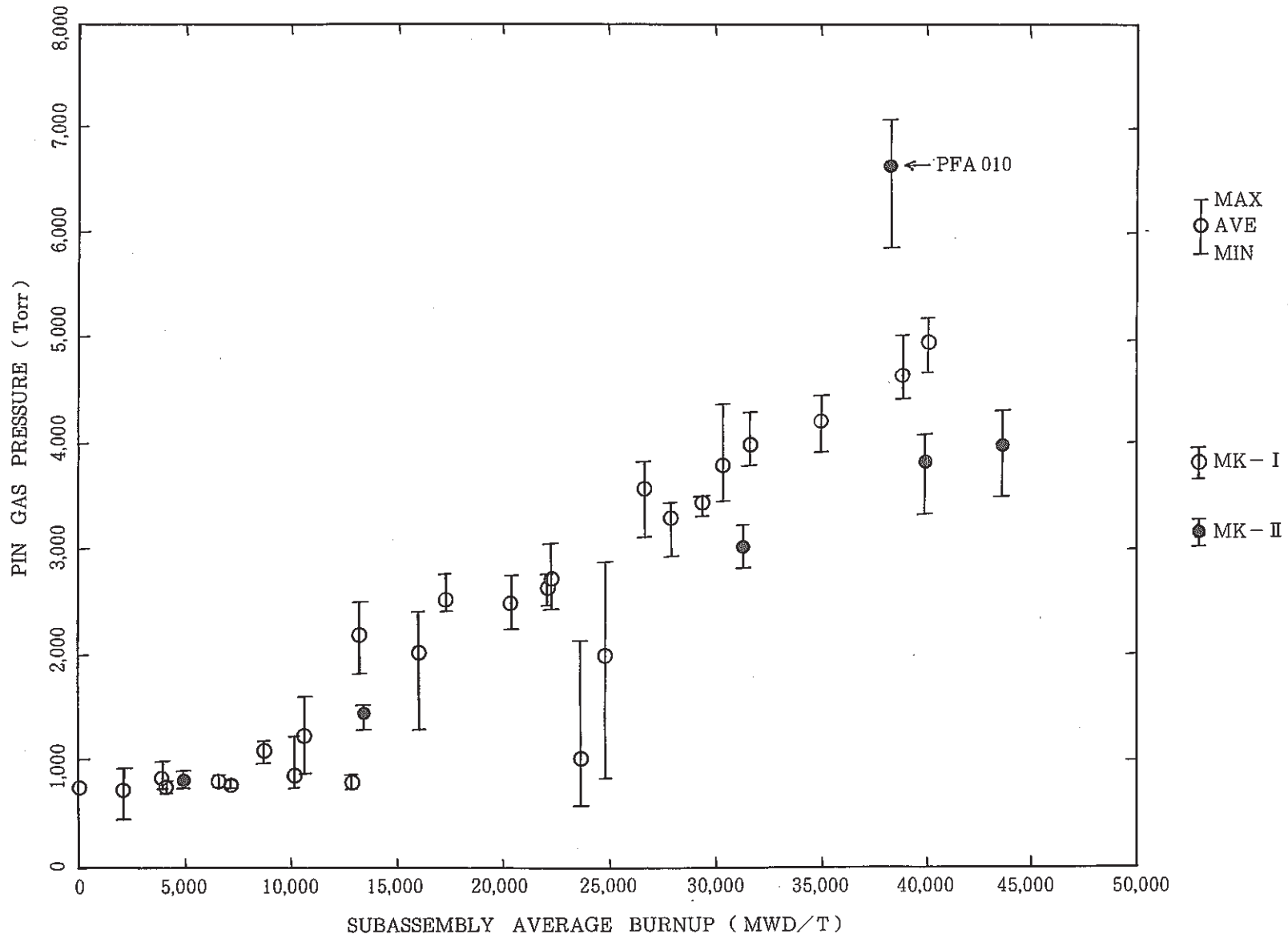


Fig.29 Plenum Gas Pressure as a Function of the Subassembly Average Burnup

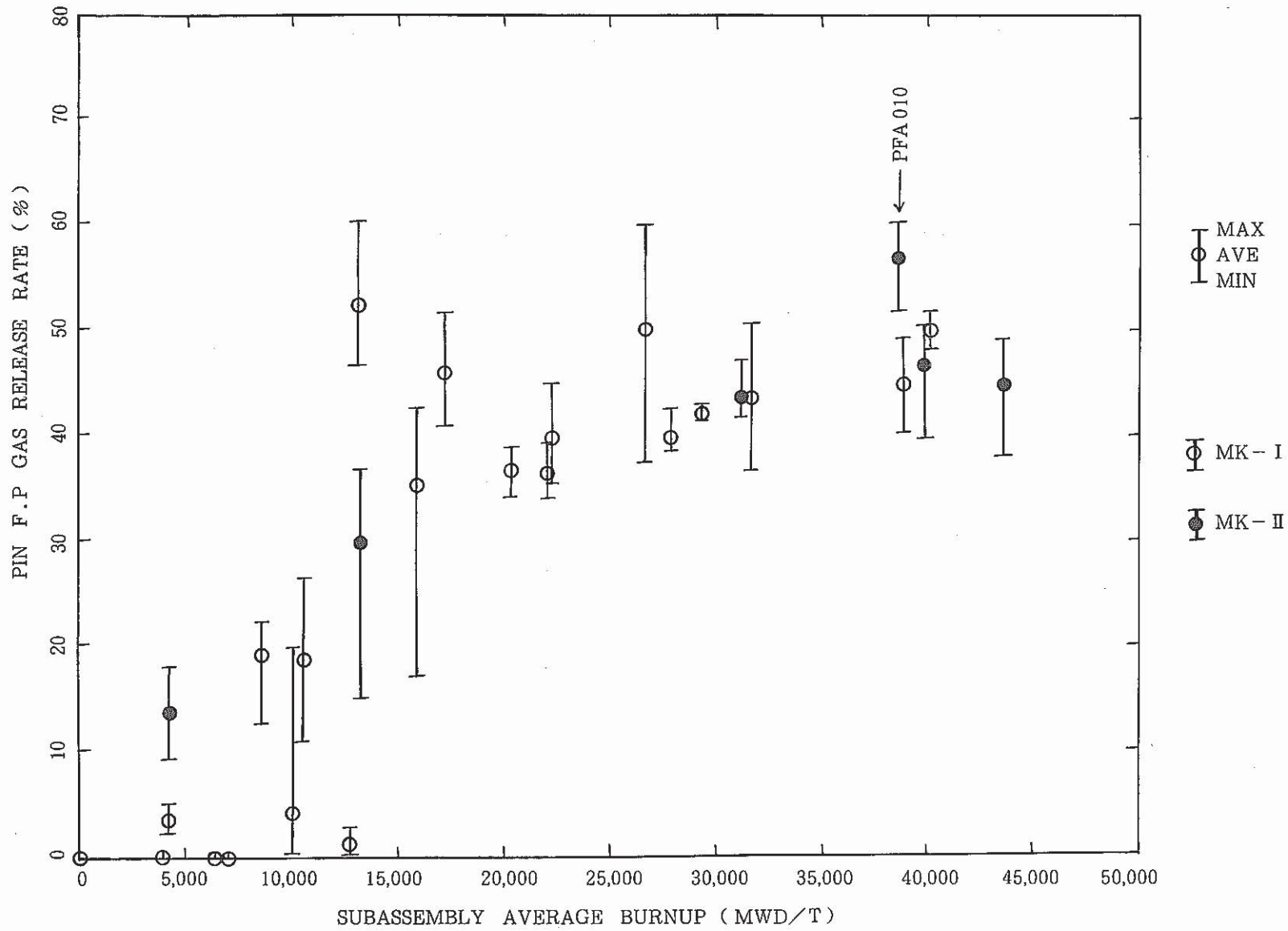


Fig. 30 Fission Gas Release Rate as a Function of the Subassembly Average Burnup

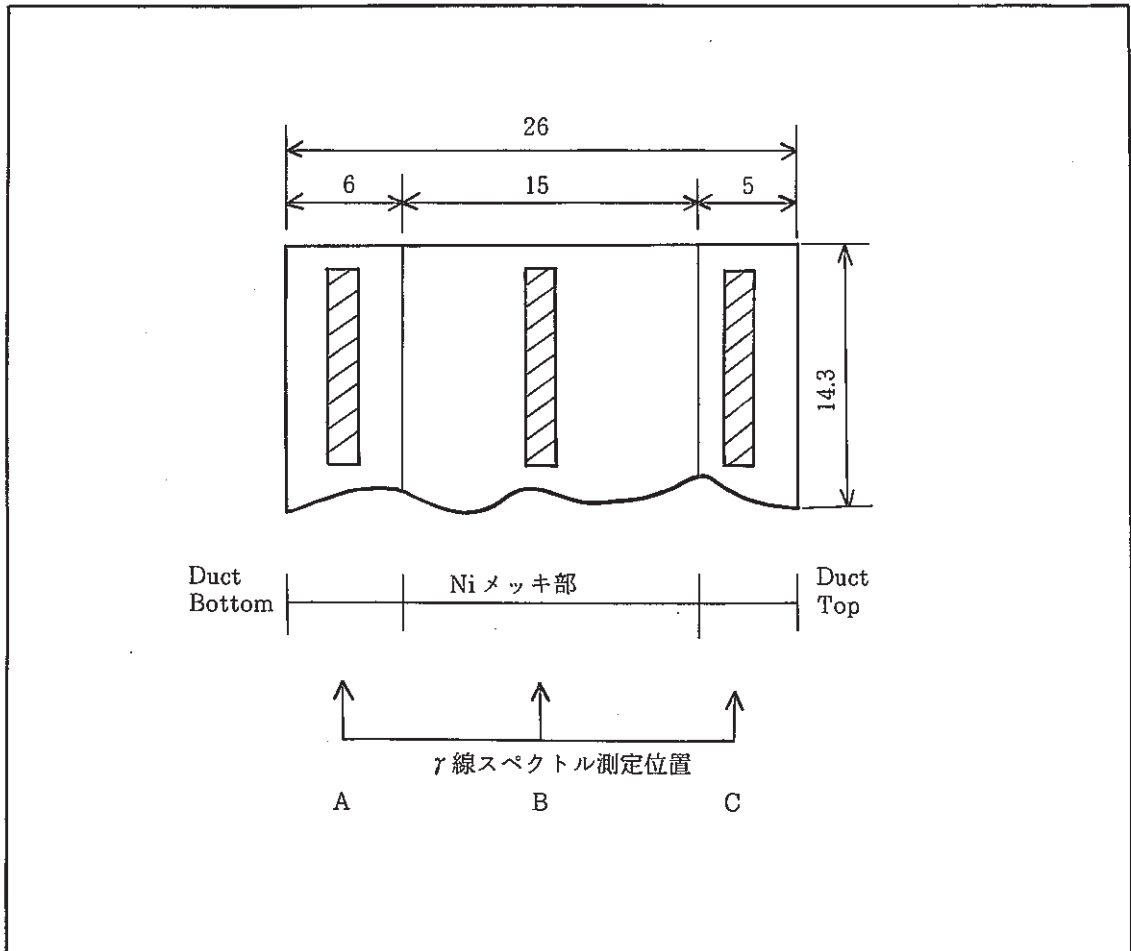
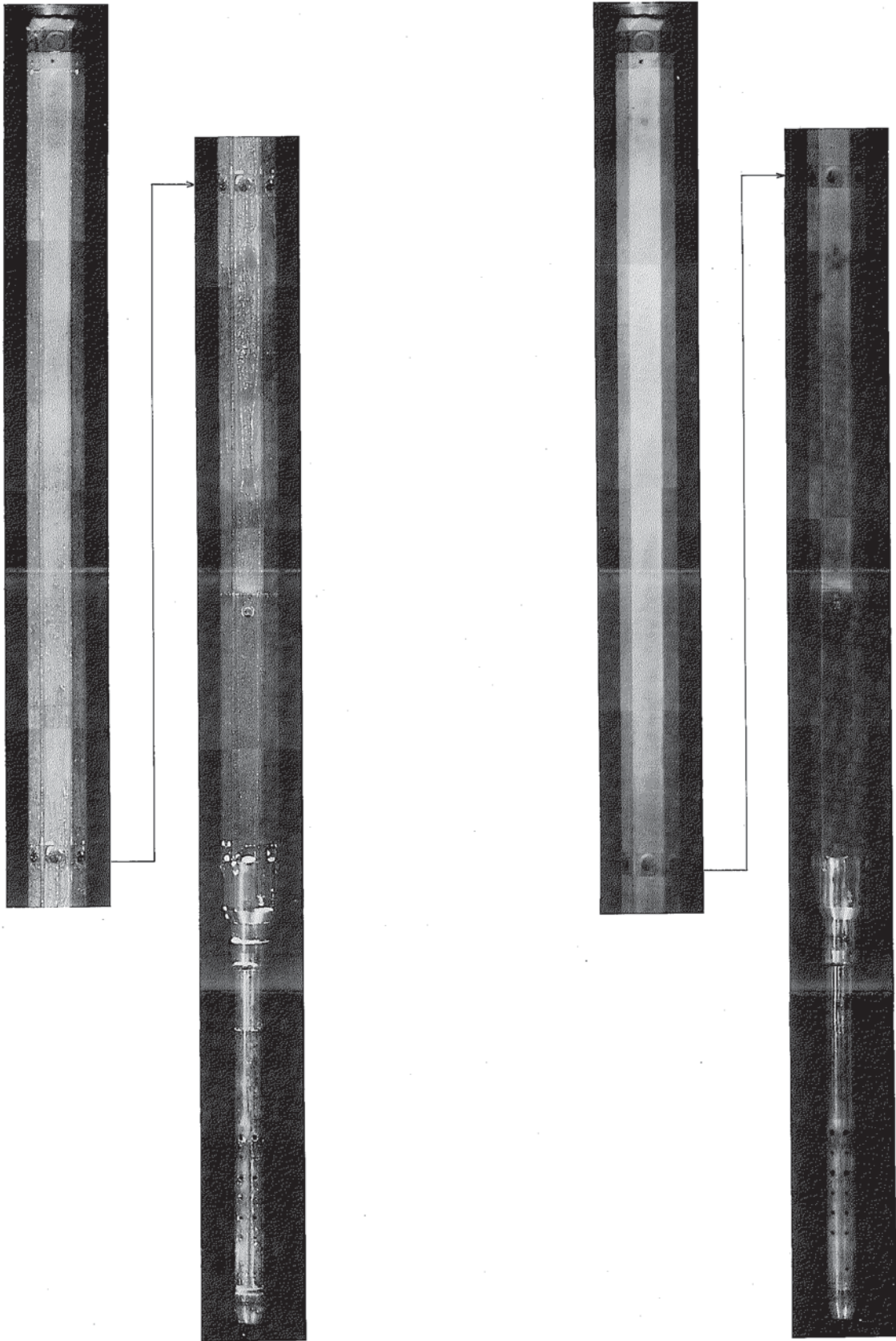


Fig.31 Measurement Position of Gamma Ray Intensity



(before)

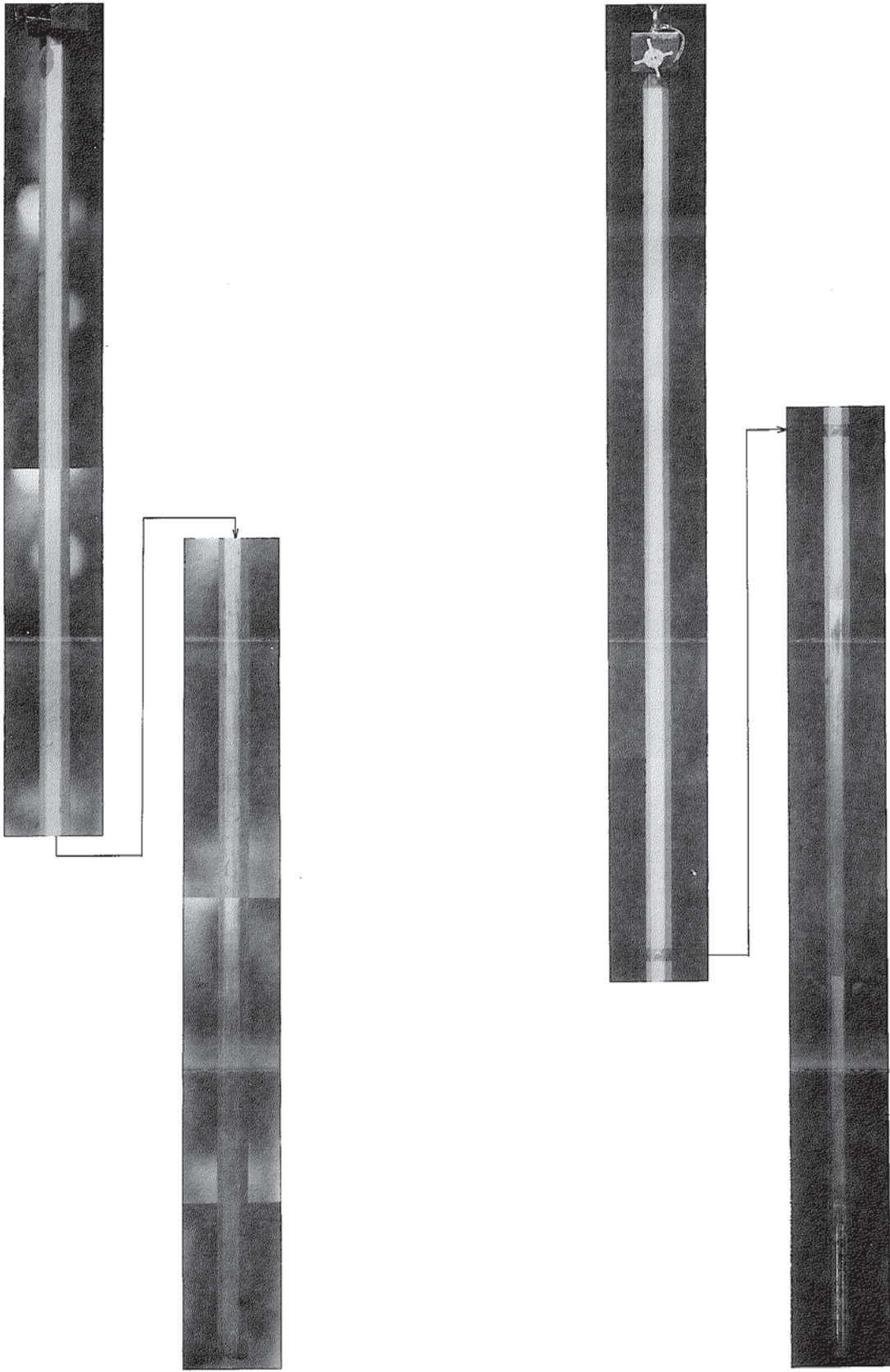
FACE F

(after)

FACE F

F861006

Photo 1 Surface Condition of the Subassembly before and after Sodium Removal

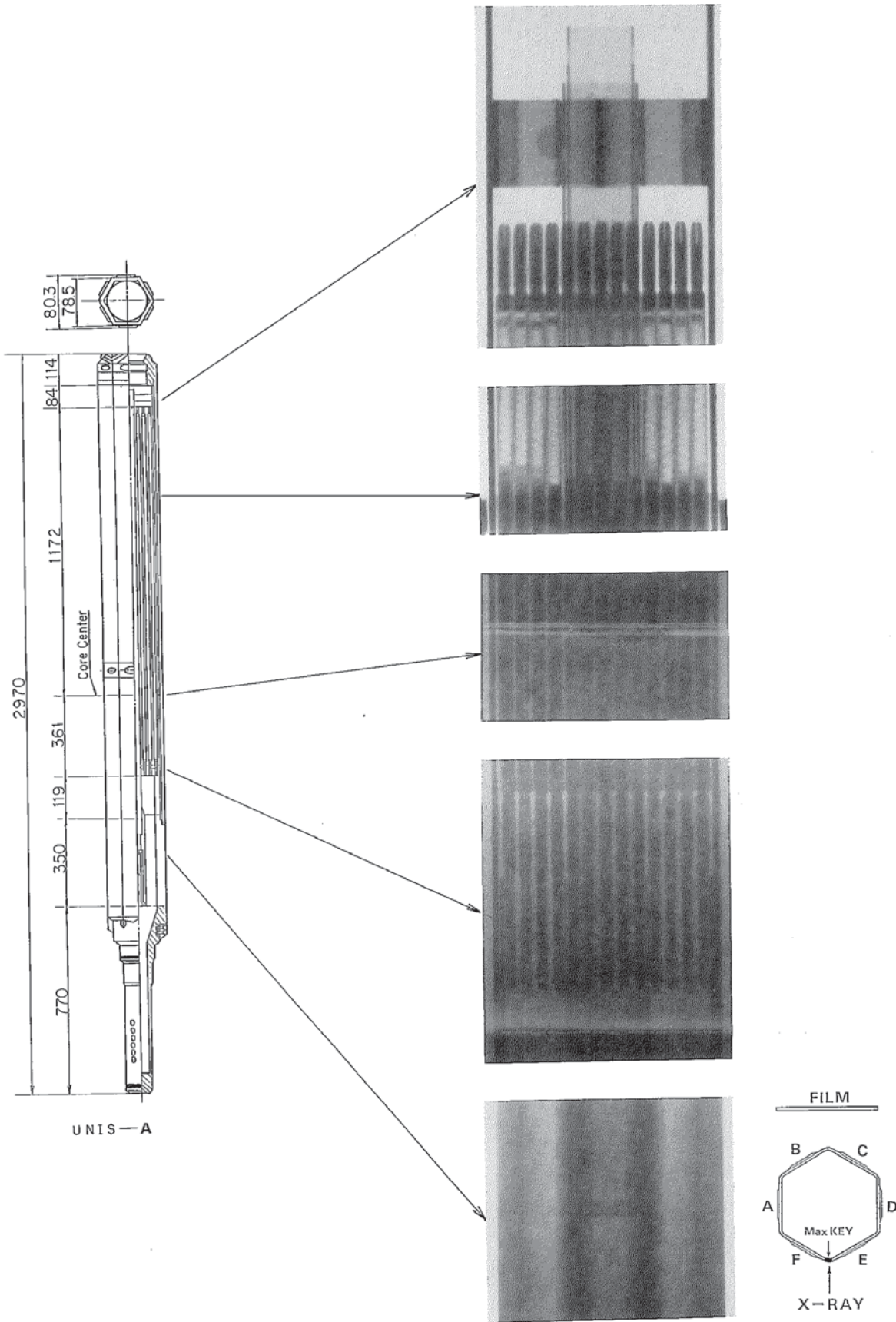


(a)
FACE F

(b)
FACE A

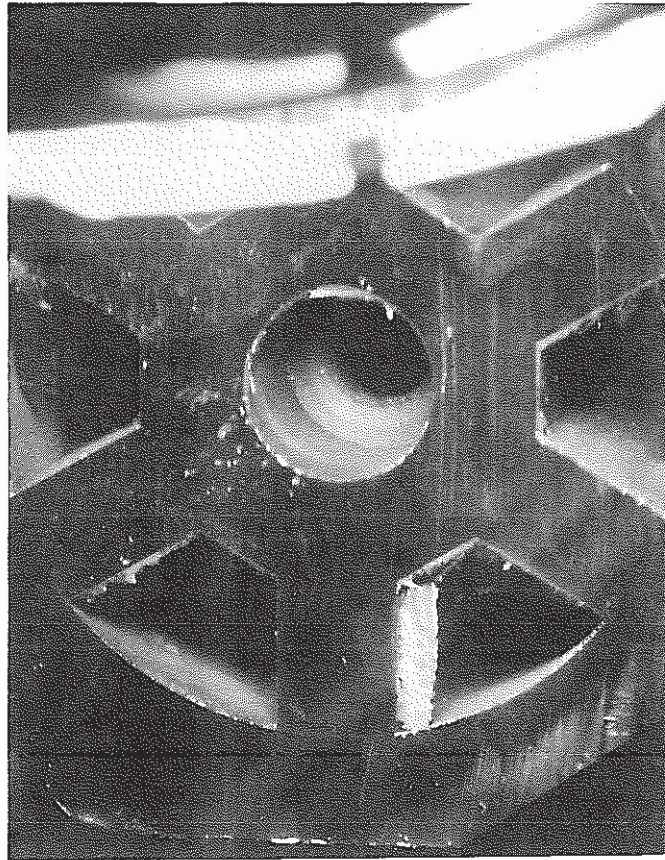
F861007

Photo 2 Surface Condition of the Outer duct and Specimen duct



F826008

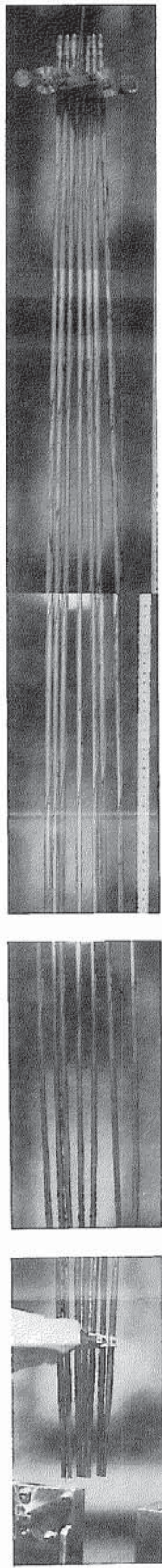
Photo 3 X-ray Radiography of the Subassembly



View from TOP

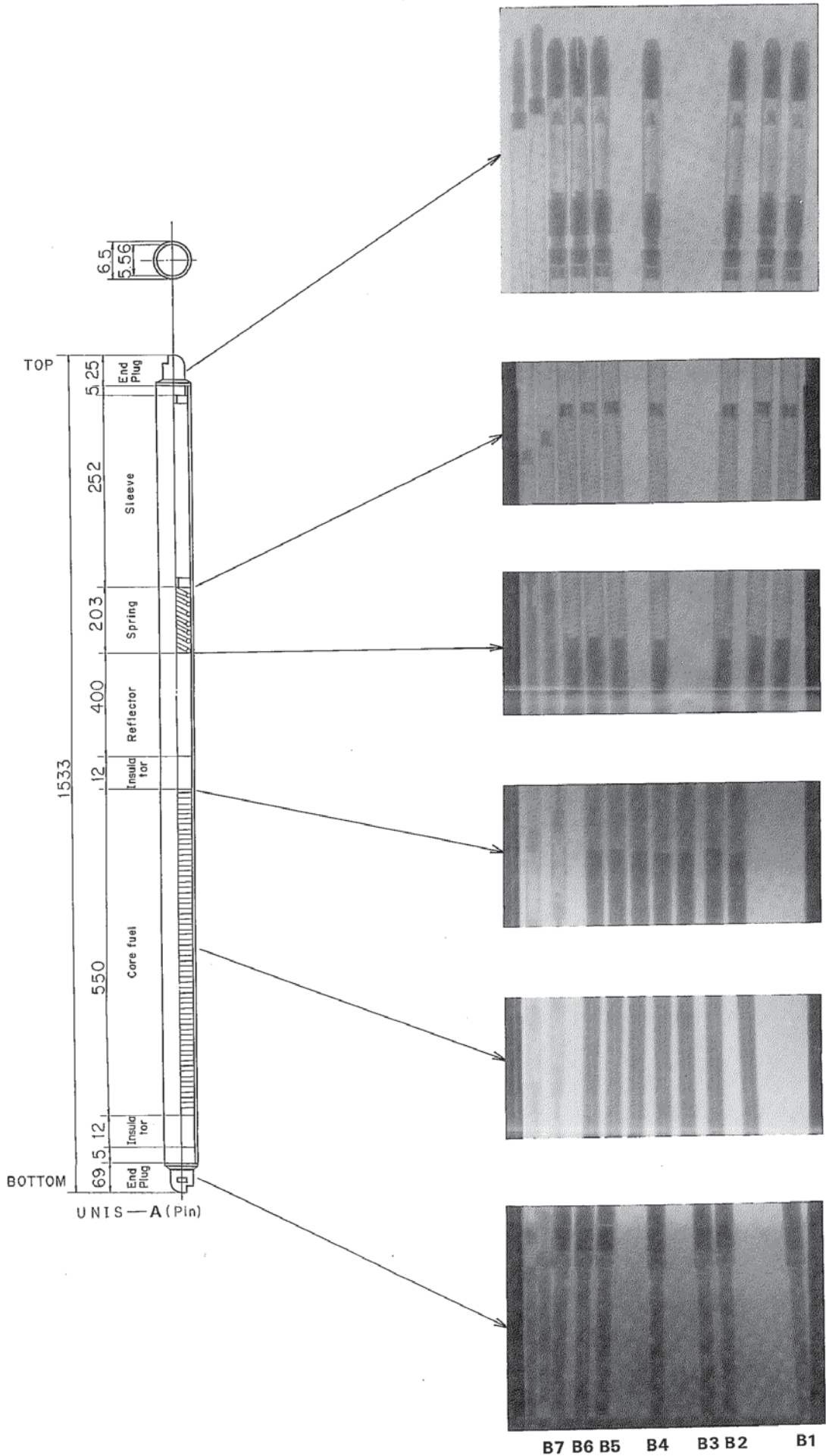
A 面

Photo 4 Surface Condition of Orifice



F863003

Photo5 Surface Condition of Test Fuel Pins



F864004

Photo 6 X-ray Radiography of the Test Fuel Pins