

「常陽」MK-II C型特殊燃料集合体(PFC 010)の照射後試験(I)

集合体及び燃料要素の非破壊試験



1985年11月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

「常陽」MK-II C型特殊燃料集合体(PFC 010)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*

筆者氏名 沖元 豊* 浅賀 健男* 西野入賢治*

永峰 剛* 金丸 好行*

要 旨

「常陽」MK-II照射炉心100MW定格出力第1サイクルから第4サイクルの間、照射されたC型特殊燃料集合体「PFC010」(集合体平均燃焼度 29,300 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施設(FMF)における試験の目的は

- ① C型特殊燃料集合体の設計妥当性の評価
- ② 「もんじゅ」のP/R(ポロシティ/リング)及びワイヤピッチに相当する燃料ピンバンドルにおけるウエアマーク発生状況の確認
- ③ カケ・ワレペレット充填ピンの照射挙動把握である。

本照射後試験により下記の結果を得た。

- ① 集合体及び燃料ピンには、キズ等の損傷はなく、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。
- ② 本照射リグのナトリウム洗浄性は良好であった。遠隔解体性については、若干の問題点はあるものの治具等の使用により十分可能である。
- ③ P/R比0.1mmの条件下でのウエアマーク発生状況調査の結果、本集合体のウエアマークはMK-II炉心集合体で認められた接触跡と比べ、寸法的に大きく、性状も異なり、MK-I時に認められたウエアマークに類似していた。
- ④ カケ・ワレペレット充填ピンは、炉内において健全に燃焼していることが確認され、非破壊試験の結果ではカケ・ワレペレット充填による照射挙動への影響は、現燃焼度では無視できると言える。
- ⑤ 「PFC010」の照射後試験を通してC型特殊燃料集合体の遠隔取扱技術を確立することができた。

但し、遠隔取扱性の観点から以下の改善が必要であると考える。

- i) ハンドリングヘッド部温度モニター取付方法の再検討
- ii) グラディエントモニター取付方法の再検討
- iii) 下部支持板と内側ラッパ管の嵌合部寸法及び製造公差への再検討

* 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. C型特殊燃料集合体(PFC010)の構造	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. 照射後試験計画	4
5. 照射後試験結果と検討	6
5.1 C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 リグの解体性及び取扱性	7
5.2 ピンバンドルの照射挙動	8
5.3 カケ・ワレペレット充填ピン挙動	10
6. まとめ	12
7. 参考文献	13

List of Table

Table I	Fabrication Parameters of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly and its Fuel elements	14
Table II	Irradiation Conditions of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFC010]	15

List of Photographs

Photo. 1	Surface Condition of the Subassembly after Sodium Removal.	43
Photo. 2	Surface Condition of Inner Wrapper Tube	45
Photo. 3	Surface Conditions of Orifice	46
Photo. 4	Surface Condition of Fuel Pin Bundle	47
Photo. 5	Wear Mark on Fuel Pin	49
Photo. 6	Construction Condition Inside of Fuel Pin by X-ray Radiography	50
Photo. 7	Continued	51

List of Figures

Fig. 1	Structure of "JOYO" MK-II C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFC010]	17
Fig. 2	Structure of I-Type Fuel Pin of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFC010]	19
Fig. 3	Arrangement of Fuel Pin in the Subassembly	20
Fig. 4	In Reactor Location of the Subassembly [PFC010]	21
Fig. 5	Flow Diagram of Postirradiation Examination on Subassembly [PFC010]	22
Fig. 6	Fuel Pins Selected for Each Postirradiation Examination Item	23
Fig. 7	Axial Profile of Face to Face Distance of Outer Wrapper Tube of the Subassembly (C-F)	24
Fig. 8	Axial Profile of Face to Face Distance of Inner Wrapper Tube of the Subassembly	25
Fig. 9	Vector of Pin Bowing in the Subassembly	26
Fig. 10	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8302)	27
Fig. 11	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8386)	28
Fig. 12	Plenum Gas Pressure of Tested Pins in the Subassembly	29
Fig. 13	Relation of Porosity Per Ring and Wire Pitch to Wear Mark	30
Fig. 14	Fuel Stack Length Changes in the Subassembly	31
Fig. 15	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8335)	32
Fig. 16	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8357)	33
Fig. 17	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8345)	34
Fig. 18	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8336)	35
Fig. 19	Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8346)	36
Fig. 20	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8335) .	37
Fig. 21	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8357) .	38
Fig. 22	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8345) .	39
Fig. 23	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8336) .	40
Fig. 24	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8346) .	41

1. ま え が き

高速炉で使用され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及び計画がされている。この目的を達成するために、A型、B型、C型の3種類の特殊燃料集合体が新たに開発された。このうち、C型特殊燃料集合体は、特殊燃料要素のピンバンドル状態での照射挙動を把握することを目的としており、3種類のうちで最も多数の燃料要素を同一照射条件で照射できる。

今回照射後試験に供される「PFC 010」は、MK-II炉心燃料集合体の燃料要素とほぼ同一仕様の特殊燃料要素を収納し

- 1) 照射リグとしてのC型特殊燃料集合体各部の健全性を、後続のC型特殊燃料集合体に先立って確認するとともに2重ラップ管構造照射リグの設計妥当性を評価する。
- 2) 高速実験炉増殖炉心の炉心燃料集合体で発生したウエアマーク（擦り痕）の発生条件を求める開発研究の一環として「もんじゅ」のP/R（Porosity/Ring：バンドルの緻密さを表わすパラメータ）及びワイヤピッチ相当の燃料ピンバンドルにおいて、ウエアマークが発生するかどうかを確認するピンバンドル挙動調査。
- 3) 運転用炉心燃料の経済性向上のため、燃料ペレットのプルトニウムスポット径を最大200 μ mまで許容した燃料要素と燃料ペレットの外観が従来の限界見本近傍のカケ・ワレペレットを特に選択し収納した燃料要素を照射し、その照射挙動を調査確認することにより検査工程の合理化・製造仕様の緩和を図る。

等を照射目的として、「常陽」100 MW定格第1サイクルから第4サイクルの間照射された。

これらの特性を把握するために、FMFでは下記の目的に限定し試験を実施することとした。なお燃料要素の健全性確認については、本照射リグの燃料要素がMK-II炉心燃料要素とほぼ同一仕様であり、すでに本照射リグと同程度の燃焼度を持つ炉心燃料集合体で燃料要素の健全性が確認されていることから極力省略した。

- 1) 照射リグとしてのC型特殊燃料集合体各部の健全性を確認し、設計の妥当性を確認する。
- 2) C型のI型特殊燃料要素（「常陽」炉心燃料要素とほぼ同一仕様）のバンドル挙動、特にウエアマーク（擦り痕）の発生状況を観察する。
- 3) カケ・ワレペレット充填燃料ピンの非破壊での健全性、照射挙動を確認する。
- 4) 今回の「PFC 010」の照射後試験を通して、C型特殊燃料集合体の遠隔での取扱技術を取得する。

2. C型特殊燃料集合体(PFC 010)の構造

PFC 010 は、Fig. 1 に示すように 91 本の燃料ピンを稠密配置で組み、照射目的に合致した燃料要素を形成するための内側ラップ管内に装荷し、さらにそれをMK-II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、ラップ管上部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、リグの外形形状は炉心燃料集合体と同一である。

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は、集合体の冷却材流量を調節するためのオリフィスをノズル内に取付けるため、反射体形状を砲弾型（炉心燃料集合体はスパイラル状の溝を持った下部反射体）とし、かつその寸法を短かくしている。また、オリフィスは、エントランスノズル流路部に押入固定されている。

モニター類として、中性子モニター及び温度モニターを内側ラップ管の外壁に固定し、燃料要素の上部にモニターを組み、集合体出口の冷却材最高温度を測定している。

燃料ピンは、Fig. 2 に示すように、形状、内部構成は、MK-II炉心燃料ピンと同様であるが、ワイヤピッチが 295 mm と炉心燃料ピンよりもかなり大きく、「もんじゅ」用燃料ピンのワイヤピッチ（307 mm）を模擬している。

ピンバンドル内のP/R比は、0.10 mmで、これもMK-II炉心燃料のP/R比0.127 mm より小さくウェアマーク（擦り痕）の発生しにくいものとされている。

燃料ピンのうち4本には、カケ・ワレペレット（同一ロット）が充填されている。このペレットはMK-II炉心燃料初装荷のロットから抜き取ったものである。ペレット仕様中のプルトニウムスポット径については200 μ m以下とし、運転用炉心燃料の仕様（100 μ m）より緩和している。これら主要仕様をTable Iに示す。また、カケ・ワレペレット充填状況及び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

100 MW定格出力第4サイクルにおける炉内照射位置をFig. 4に示す。

3.2 集合体照射条件

100 MW定格出力第1サイクルから定格出力第4サイクルの間、照射された。集合体燃焼度は、29,300 MWD/Tで、線出力は第4サイクル末期時点でピン平均253 W/cmである。⁸⁾ 集合体照射条件を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. 照射後試験計画

「PFC 010」の燃料要素は、MK-II 炉心燃料要素とほぼ同一仕様であり、本照射リグの到達燃焼度レベルでは、すでにMK-II 炉心燃料要素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、バンドルタイプ照射リグとしての健全性及び遠隔取扱性の確認、ピンバンドル挙動の調査、炉心燃料製造の経済性向上調査という本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、昭和59年8月26日100MW定格第4サイクル終了後、炉心より取出され貯蔵ラックで1サイクル冷却された後、炉サイトでNa洗浄され昭和59年12月5日キャスク渡してFMFに搬入された。

1) 集合体及び部材試験

- | | |
|--------------------|--|
| ① Na 洗浄前のラッパ管組棒部切欠 | 外側-内側ラッパ管間のNa 残留の有無
(Na ドレン孔の有効性調査) |
| ② Na 洗 浄 | 燃料ピンの健全性確認
リグのナトリウム洗浄性、ドレン性確認 |
| ③ 外 観 検 査 | 表面状況(キズ・変色)の確認 |
| ④ 寸 法 測 定 | 寸法形状変化の有無 |
| ⑤ 内側ラッパ管外観検査 | 表面状況(キズ・変色)の確認
モニタ装着状況の確認 |
| ⑥ 内側ラッパ管寸法測定 | 寸法形状変化の有無 |
| ⑦ 解 体 | リグの解体性確認 |
| ⑧ オリフィス外観検査 | キャビテーション発生の有無 |
| ⑨ 下部反射体外観検査 | 取付健全性確認 |
| ⑩ 各モニタ類取出し | 遠隔解体性確認(難易度の評価) |
| ⑪ 内側ラッパ管内面観察 | バンドルとの干渉の有無 |

2) ピ ン 試 験

- | | |
|-------------|----------------------------|
| ① 外 観 検 査 | バンドル状態の確認
表面状況(キズ・変色)確認 |
| ② X線ラジオグラフィ | カケ・ワレペレット観察 |
| ③ 重 量 測 定 | カケ・ワレペレットの健全性確認 |
| ④ 詳細外観検査 | ウエアマーク発生状況の確認 |
| ⑤ 寸 法 測 定 | 変色ピンの健全性、カケ・ワレペレットの照射挙動 |
| ⑥ ア ス キ ャ ン | カケ・ワレペレットの照射挙動 |

⑦ パンクチャ 変色ピンの健全性確認

カケ・ワレペレットの照射挙動

なお、当初予定していた集合体X線ラジオグラフィについては、受入時点での崩壊熱が高い（ $> 400 \text{ W}$ ）ため中止した。

Fig. 5 に照射後試験フローを示す。ピン試験についてはFig. 6 に示す内容で実施した。

5. 照射後試験結果と検討

5.1 C型特殊燃料集合体の設計妥当性の評価

5.1.1 照射リグ各部の健全性

1) 外観検査

集合体外観写真を Photo.1 に示す。パッド部に特異な干渉キズは認められず、表面状況も良好であった。また、エントランスノズル、球面座等についても、キズ、変形等の損傷はなかった。

内側ラップ管外観写真を Photo.2 に示す。内側ラップ管の外壁に固定してあるグラディエントモニター管に伸びが認められた。これは、モニター管の材質が SUS316ST（溶体化処理）のため、材料のスエリングが大きかったものと判断される。

これらモニター類の内側ラップ管への溶接固定部は、健全であった。

2) 寸法測定

集合体寸法測定で、照射前後の全長比較では有意な差は認められなく、集合体曲りについても、炉心燃料集合体と同程度である。

外側ラップ管の対面間距離寸法について内側ラップ管の外壁にモニター管を取付けてある C-F 対面間の炉心中心付近で、Fig.7 に示すように有意差を越える $50\ \mu\text{m}$ のふくれが認められたが、他 2 対面間では、有意な変化は認められなかった。

内側ラップ管寸法測定では、モニタ装着面（CF 面）が測定不可のため曲り量の評価はできなかった。内側ラップ管対面間寸法で 2 対面間を測定した結果、Fig.8 に示すように有意差を越える $50\ \mu\text{m}$ （A-D 面）～ $150\ \mu\text{m}$ （B-E 面）のふくれが認められた。

外側ラップ管の特定面のふくれの原因であるが、「PFD001」のラップ管密度測定ではスエリングは小さく測定されており、内圧によるクリープと考えられる。内圧の要因としては外側ラップ管-内側ラップ管間のナトリウムによる圧力は小さいこと、また、変形方向が内側ラップ管の C-F 対面に限られていることから、内側ラップ管表面のモニタ管の存在が外側ラップ管の変形に何らかの寄与をしている可能性がある。

設計方法では、外側ラップ管、内側ラップ管及びモニタ管により構成される二重管間隙部のクリアランスは $0.9\ \text{mm}$ であり、モニタ管のスエリング（MMS の測定結果：炉心中央部で $+20\ \mu\text{m}$ ）、内側ラップ管対面間寸法の増加（ $50\ \mu\text{m}$ ）を考えると、モニタ管と外側ラップ管との接触は起きないが、運転中の高温状態、温度勾配下での外側ラップ管、内側ラップ管及びモニタ管の熱膨張、外側ラップ管、内側ラップ管の曲り、製造時の組立精度等を考慮して、さらに詳細な解析をする必要がある。

3) 下部反射体及びオリフィス観察

下部反射体は、炉心支持板の中性子照射量の低減を目的とし、エントランスノズル流路部の内部オリフィスの上側に、冷却材流動抵抗の少ない砲弾形状のものが2本のピンにより取り付けられている。この固定状況、表面状況を目視にて確認した結果、ズレ、キズ等は認められず、炉内において健全であったと判断される。

一方、オリフィスは、エントランスノズルの横穴オリフィスと共に、リグ内の冷却材流量を調節する目的で、4枚のオリフィス板が等間隔に配列しエントランスノズル流路部に挿入固定されている。このオリフィス出口付近について、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、特異な表面状態は認められないため、キャビテーションは発生しなかったものと判断する。オリフィスの状態を Photo. 3 に示す。

5.1.2 ナトリウム洗浄性及びドレン性

本照射リグは、実験炉サイトでナトリウム洗浄されて FMF に搬入された。

したがって、FMF 搬入時の Na 付着量は 0.4 g とわずかで、水洗回数 2 回で洗浄廃液が中性に達し、その後の解体においても残留ナトリウムは、認められなかった。

一方、実験炉サイトでのナトリウム洗浄方法は、炉心燃料集合体と同様に実施されているが、2 回の水洗浄で電気伝導度が規定値以下に達したことから、リグの洗浄性は、炉心燃料集合体と同程度と考えられる。また、Na 付着量は、常陽側推定で約 30 g と少なく、リグの Na ドレン性は良好と考えられる。

当初、二重ラップ管構造を有する本照射リグでは特に内側と外側のラップ管間部への Na 残留が懸念され、その対策として内側ラップ管下部にドレン用の孔をつけてある。その確認のため、ナトリウム洗浄に先だち、集合体ラップ管の一部を切り欠いたが、二重ラップ管のすきまには、ナトリウム残留は全くなく、ドレン孔の有効性が確認された。

なお、FMF の洗浄廃液核種分析では、FP 核種及び α 核種は認められなかった。

5.1.3 リグの解体性及び取扱性

本リグのラップ管は、外側ラップ管と内側ラップ管の二重構造になっている。

外側ラップ管の切断・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 5 kg であり、容易に引抜けた。

一方、内側ラップ管については、ラップ管上部形状がハンドリングヘッドと異なるため、専用治具（フック状のもの）を使用し、引抜きを実施したが容易に抜けず、引抜き力が約 200 kg でも引抜けなかった。そこで、200 kg の引抜き力とラップ管へ木ハンマによる振動を与えることで、ようやく組棒部から引抜くことができた。ピン束部では、引抜き力 8 kg 以下で容易に引抜けたことから、組棒部のはめ合いがきびしいためと考えられる。

したがって、組棒部の下部支持板と内側ラップ管の製作方法、公差を再検討し、容易に引抜けるよう改善が必要である。なお、過去の最大ラップ管引抜力は、140 kgであった。

内側ラップ管のセル内取扱いは、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、遠隔技術上特に問題はない。

集合体ハンドリングヘッド部の温度モニターカプセルは、集合体出口冷却温度を測定する温度モニタを封入したカプセルを板状の保持バーに固定したもので、ハンドリングヘッド下端部に組込まれている。

この温度モニターカプセル取出しのためハンドリングヘッド部の溶接部を6面切削し、ハンドリングヘッドをラップ管より抜くことでモニタを取出そうとしたところ、引抜力が、150 kg～170 kgでも引抜けなかった。そこで、約500 kg（推定値）の引抜力とラップ管へ木ハンマによる振動を与えることで、ハンドリングヘッド部の中に温度モニターカプセルが付いた状態で抜けた。温度モニターカプセル保持バーも容易に取出せる状態ではなかった。ハンドリングヘッド部温度モニタについては、遠隔解体性を考慮した取付方法について再検討し、容易に取出せるよう改善が必要である。

内側ラップ管の外壁部取付モニタ管は、専用治具で容易に取れた。ただし、モニタ管の膨れ、伸びによる他の部材との干渉の可能性、取扱いの観点から内側ラップ管部モニタについては、その材質、取付位置について再検討する必要がある。

エントランスノズル内のモニタについては、容易に取出しができた。

これらのモニタ識別番号は、ドッドマーク方式であり、ドットマーク識別には問題なかった。

以上、C型特殊燃料集合体（PFC010）の遠隔解体については、若干の改善余地はあるものの、専用治具を使用することにより取扱上問題なく進めることができ、本リグの取扱方法は確立したと考えられる。

5.2 ピンバンドルの照射挙動

1) ピンバンドル状態での外観検査

内側ラップ管引抜後、ピンバンドル外観検査を実施したところをPhoto.4に示す。炉心中心部付近を中心にピアダル型のふくらみが認められるとともに、全てのピン被覆管表面に、MK-I時に認められたような隣接ピンのワイヤとの干渉による擦り跡が認められた。

また、外周ピンの1本（ピンNo.8302）に、ピン下端から約500 mmの位置に約80 mmの長さの変色部分が認められた。

その他、全ピンについて、ラッピングワイヤのゆるみは認められなかった。

2) 外周ピン外観検査及び外周ピン曲り量測定

ピンNo.8302の変色部分がラップ管に接する方向であることから、ピンの曲りによって被覆管がラップ管と接触した可能性がある。

そこで、外周ピンの各ピンの外観検査をピン全周について再度実施した結果、外周ピン 30 本中 15 本について内側ラップ管と接する方向に同様な変色部分が、認められた。

内側ラップ管との接触の有無を調べるため、内側ラップ管の内面観察を実施したところ、ピン No. 8302 と相対する面のピン変色部と同位置に変色が認められた。この部分については、試料採取を実施し、詳細試験をするために照射材料試験施設 (MMF) へ搬出した。

他方、バンドル最外周ピンの残留湾曲量を調査するため、外周ピン 24 本の曲り量測定を実施した。その結果を Fig. 9 に示す。これをほぼ同じ燃焼度の MK-II 炉心燃料集合体「PFD 001」と比較すると外周ピンの平均では同程度であったが、最大曲り量は本リグのピンの方が若干大きいことがわかった。

3) 変色ピンの健全性

一般外観検査で観察された変色部分を、8302 ピンと 8386 ピンについて詳細に観察した。その結果、ピン表面にキズ等の損傷は認められず、単なる変色であることがわかったと同時に、変色部位の大きさが、各試験の取扱中に減少し、消えてしまった。

さらに、健全性確認のため、変色部分の寸法測定を 4 方向について実施したが、Fig. 10, Fig. 11 に示すようにオーバーティ等の外径の変化は認められなかった。さらに、パンクチャテストで、ピン内圧測定を実施したが、Fig. 12 に示すように健全ピンと比べ、ピン内ガス圧に変化がないことから、密封状態が確認された。

このことから、変色ピンは健全であったと判断する。

なお、この部分についてさらに、詳細な試験を実施するため、試料採取を行い、照射燃料試験施設 (AGF)、技術解析室金相セル (AES) へ搬出した。

4) ウェアマーク発生状況の確認

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を観察した。

本照射リグで認められた最大のものは、8335 ピンで認められた長さ 5.0 mm、巾 0.8 mm のものであった。この部分の外観写真を MK-I、MK-II の代表的な外観写真と共に、Photo. 5 に示す。これからわかるように、本照射リグで認められる表面キズ跡は、同燃焼度の MK-II 炉心燃料集合体「PFD 001」の接触跡と比べ、性状が異なり、MK-I 時に認められたウェアマークと類似している。

本照射リグのバンドル内 P/R 比は 0.1 mm で、MK-II 炉心燃料集合体の P/R 比 0.127 mm より小さく、その点についてはウェアマークの発生しにくいものとされていた。

しかし、Fig. 13 の関係図⁹⁾より、ワイヤピッチを「もんじゅ」仕様を模擬して 295 mm と長くしているため、ウェアマーク発生有無の境界線上であり、組立精度によって P/R が変化することで発生の有無が左右されるかもしれない。あるいは、ワイヤピッチが長いので、同一荷重下では、MK-II 炉心燃料ピンよりはたわみ量及び、振動振幅が大きく広範囲に隣接ピンワイヤと接触する可能性は大きくなりウェアマークが発生しやすい状態であったと考えられる。

以上のことから、本照射リグでは、ウェアマークが発生したと推定される。

ウェアマークの発生の有無判断は、Fig. 13の境界線上付近のP/R比の集合体では、注意を要する。

なお、今回の結果と「もんじゅ」ピンとの関連であるが、「もんじゅ」ピンはより太径で剛性も大きいため、直接比較して議論するのは難しい。従って、「もんじゅ」のウェアマーク発生状況は、後続のC型特殊燃料集合体（「もんじゅ」仕様燃料要素）で調査していく計画である。

5.3 カケ・ワレペレット充填ピンの照射挙動

運転用炉心燃料の製造時の経済性向上のため、検査基準を緩和し製造コストを低減させることが考えられるがこのため、本集合体には燃料ペレットのプルトニウムスポット径を最大200 μm まで許容した燃料要素と燃料ペレットの外観が従来の限界見本近傍のものを特に選択し、装荷した燃料要素が組込まれており、これらの燃料要素の照射挙動を調査することが本集合体の照射目的の1つである。

本照射リグの燃料要素数91本のうち、カケ・ワレペレットを充填した燃料要素は4本である。カケ・ワレペレット充填した燃料要素は、被覆管製造メーカーK材及びS材を各2本で、それぞれ、カケペレットを炉心スタック中央部及び上部に各5個装荷し、また、ワレペレットを炉心スタック中央部に5個装荷している。

これら燃料要素と同一集合体内の通常燃料要素を比較して、影響を調べることにした。

1) X線ラジオグラフィ

検査対象として、第1列（通常燃料要素6本）、第6列（カケ・ワレを含む11本）及びカケ・ワレペレット充填ピンのピン内部状況を観察した。特に、カケ・ワレペレットが充填されている燃料ピンについてペレット状況をPhoto.6に示す。また、スタック長変化をFig.14に示す。

観察全ピンについて、スプリングのへたりが認められた以外、異物の混入等の特異な状態は認められない。カケ・ワレペレットについても、クラック、カケが認められるものの、それ以外、特異な状況は認められない。スタック長変化についても通常ピンと比べ変化ない。

2) 重量測定

検査対象として、集合体内ピン列の第1列、第6列及びカケ・ワレペレット充填燃料ピンの重量測定を実施した。

製造時のピン重量測定は、ラッピングワイヤ無し状態で実施したものであり、これとラッピングワイヤ重量を計算にて補正したものと、照射後の重量測定を比較した結果、重量差に有意なもの（ $\pm 0.7\text{g}$ 越えるもの）は認められない。

3) 寸法測定

検査対象ピンとしてカケ・ワレペレット充填ピン4本及びリファレンスとして近傍の通常ピン1本の計5本を選び、外径、曲り測定をワイヤを取り除いた状態で実施した。

外径測定結果については、Fig. 15からFig. 19に示す。これらから被覆管製造メーカーの違い及びふくれ、へこみ等の有意な変化は認められない。なお、製造時データは、超音波測定によるアナログデータだけであり、厳密な評価はできない。

4) ガンマスキャン

検査対象として、通常燃料ピン1本、カケ・ワレペレット充填燃料ピン4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. 24に示す。これらの強度分布から燃料の出力分布を示す核種⁹⁵Zr、Puの核分裂率に近い分布を示す¹⁰⁶Rh等は、炉心燃料部の軸方向に連続的なカーブをえがき、通常の燃料ピンと比べて、ワレペレット充填による出力分布等の影響はなく、カケペレット充填については、若干の落ち込みが認められるものの、通常ペレットに比べ絶対量が少ないことを考慮すれば、現段階では影響はないと判断される。

また、Puスポットについて、同燃焼度でPuスポット径100 μm以下の仕様で製造された「PFD 001」と比べ、¹⁰⁶Rhの強度は同程度であり、現段階では影響はないと判断される。

移動しやすい核種Cs等について、軸方向及びカケ部への顕著な移動・蓄積は認められない。

5) パンクチャテスト

検査対象ピン15本(カケ・ワレペレット充填ピン含む)をプレナムガス圧測定し、うち7本のガス分析測定を実施した。

プレナムガス圧測定の結果、2711～3013 Torr(0℃)の範囲であり、これからカケ・ワレペレット充填燃料ピンは、通常燃料ピンと比べガス圧に異常はなく、密封状態であったことが確認された。

ガス分析の結果、ガス成分比(ピン平均)は、Kr: Xe: He = 6.3 : 63.4 : 30.3であり、「PFD 001」と比べ同程度であった。

以上のことから、非破壊試験結果の上からはカケ・ワレペレット充填燃料ピンは炉内において、約30000 MWD/Tの燃焼度まで健全な状態であったと判断される。但しカケ・ワレペレットピンの健全性についての最終判断は今後実施される破壊試験結果も踏まえて総合的に評価する必要がある。

6. ま と め

「常陽」MK-II照射炉心100 MW定格出力第1サイクルから第4サイクルの間、照射されたC型特殊燃料集合体「PFC010」（集合体平均燃焼度29,300 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) 集合体及び燃料ピンには、キズ等の損傷はなく、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。

その他、オリフィス及び下部反射体等の健全性も確認された。

- 2) 本照射リグのナトリウム洗浄性は良好であった。

遠隔取扱についても治具を使用することにより、容易に取扱え、後述する問題点を除けば遠隔技術上特に問題はない。

- 3) P/R比0.1 mmの条件下でのウェアマーク（接触跡）の発生状況調査の結果、MK-II炉心燃料集合体で認められた接触跡と比べ、明らかに相違があることがわかった。即ち、MK-II炉心燃料ピンで認められるような接触跡と異なり、寸法的に大きく、性状も異なり、MK-I時に認められたウェアマークに類似していた。

今後は、「もんじゅ」仕様によるピンバンドル挙動調査を実施していく。

- 4) カケ・ワレペレット充填燃料ピンは、炉内において健全に燃焼していることが確認され、カケ・ワレペレット充填による照射挙動への影響は、現燃焼度では無視できると判断する。
- 5) 照射前データで、燃料要素組立時（ワイヤ付状態）の重量値がなく、被覆管外径データがアナログ値であったため、照射後データと直接比較できなかった。

今後は、その照射目的に合致するように照射前データの整備を希望する。

- 6) C型特殊燃料集合体の構造について、若干改善の余地があるので、再検討し改善を希望する。改善点は以下のとおりである。

- (1) 内側ラッパ管モニターについては、集合体外側ラッパ管と干渉する可能性があり、好ましくない。モニター管の取付位置、材質を再検討する必要がある。
- (2) ハンドリングヘッド部温度モニター取付方法の再検討
- (3) 組棒部の下部支持板と内側ラッパ管の嵌合部寸法及び製造公差の再検討

7. 参 考 文 献

- 1) 部内メモ AES テクニカルメモ
83 - AES - 66
- 2) 部内メモ 燃材部メモ
83 - F2 - 490
- 3) 沖元豊他：「常陽」MK-II 炉心燃料集合体（PFD010）の照射後試験(I)
PNC I941 84-03
- 4) 沖元豊他：「常陽」MK-II 炉心燃料集合体（PFD003）の照射後試験(I)
PNC I941 85-04
- 5) 小高英男他：「常陽」MK-II 炉心燃料集合体（PFD001）の照射後試験(I)
印刷中
- 6) 高速実験炉：「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
- 7) 東海事業所：「常陽」照射用炉心特殊燃料集合体 C1J の製造報告
PNC SN841 83-11, 1983
- 8) 高速実験炉：「常陽」照射試験サイクル報（第4サイクル）
PNC SN936 84-03, 1984
- 9) 燃材部：燃料材料開発部試験研究成果速報（60年度第1四半期）
PNC I943 85-03

Table I Fabrication Parameters of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly and its fuel elements.

設計仕様		主要目	
(1) 燃料集合体		(6) 要素反射体	
型式	2重ラップ管型	材料	SUS 316
全長	2,970mm	直径	4.5mm
全重量	約 55kg	長さ	100mm
燃料要素数	91本	個数	3個
外側ラップ管		(7) 下部反射体	
形状	正六角形	型式	紡錘ブロック型
外対面距離	78.5mm	材料	SUS 316
内対面距離	74.7mm	外径	35mm
肉厚	1.9mm	長さ	160mm
内側ラップ管		(8) オリフィス	
形状	正六角形	型式	4段オリフィス型
外対面距離	66.9mm	材料	SUS 316
内対面距離	63.5mm	外径	44mm
肉厚	1.7mm	長さ	322mm
上部パッド部外対面距離	80.3mm	(9) ノックバー	
中央パッド部外対面距離	81.2mm	材料	SUS 316 相当
(3) 特殊燃料要素		数量	11組
型式	ワイヤラッピング型密封式	(10) 組 梓	
全長	1,533mm	形状	正六角形
被覆管外径	5.5mm	材料	SUS 316
被覆管内径	4.8mm	外対面距離	63.2mm
被覆管肉厚	0.35mm	長さ	57.6mm
被覆管-ペレット間隔	0.085mm	(11) 温度モニタカプセル集合体	
燃料長さ		形状	保持バー挿入型
炉心部	550mm	材料	SUS 316
インシュレータペレット(上・下)	12mm	カプセル外径	7.6mm
要素反射体全長	300mm	保持バー板厚	4mm
ガspreナム容積	9.0cc	(12) ハンドリングヘッド	
ラッピングワイヤ径	約 0.9mm	材料	SUS 316
ラッピングピッチ	295mm	長さ	114mm
(4) 炉心燃料材料		(13) エントランスノズル	
種類	ウラン・プルトニウム 混合酸化物ペレット	材料	SUS 316
ペレット直径	4.63mm	長さ	1,230mm
ペレット長	9mm		
ペレット密度	93%TD		
(5) インシュレータペレット材料			
種類	劣化ウラン酸化物ペレット		
ペレット直径	4.6mm		
ペレット長	12mm		
ペレット密度	94%TD		

Table II Irradiation Conditions of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly 「PFC010」

サ イ ク ル			1	2	3	4	
装 荷 位 置			2 E 2				
燃 焼 度	ポ イ ン ト 最 大		M W D / T	9,000	18,100	26,900	35,000
	集 合 体 平 均		M W D / T	7,400	15,000	22,400	29,300
積 算 中 性 子 照 射 量	En ≥ 0.1 MeV	ポ イ ン ト 最 大	×10 ²⁰ n/cm ²	114	232	347	458
		集 合 体 平 均	×10 ²⁰ n/cm ²	92.9	189	284	375
	Total	ポ イ ン ト 最 大	×10 ²⁰ n/cm ²	163	332	496	656
		集 合 体 平 均	×10 ²⁰ n/cm ²	134	273	411	544
線 出 力	B O C	ポ イ ン ト 最 大	W / cm				
		集 合 体 平 均	W / cm	266	260	261	254
	E O C	ポ イ ン ト 最 大	W / cm				
		集 合 体 平 均	W / cm	265	259	260	253
被 覆 管 最 高 温 度	B O C		°C				
	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	560	558	559	556
	E O C		°C	560	558	558	556
ピ ー キ ン グ 係 数	B O C	径 方 向	-				
		軸 方 向	-	1.210	1.202	1.187	1.183
	E O C	径 方 向	-				
		軸 方 向	-	1.195	1.187	1.173	1.170
冷 却 材 流 量	B O C		kg / sec	5.5	5.4	5.4	5.4
	E O C		kg / sec	5.5	5.4	5.4	5.4

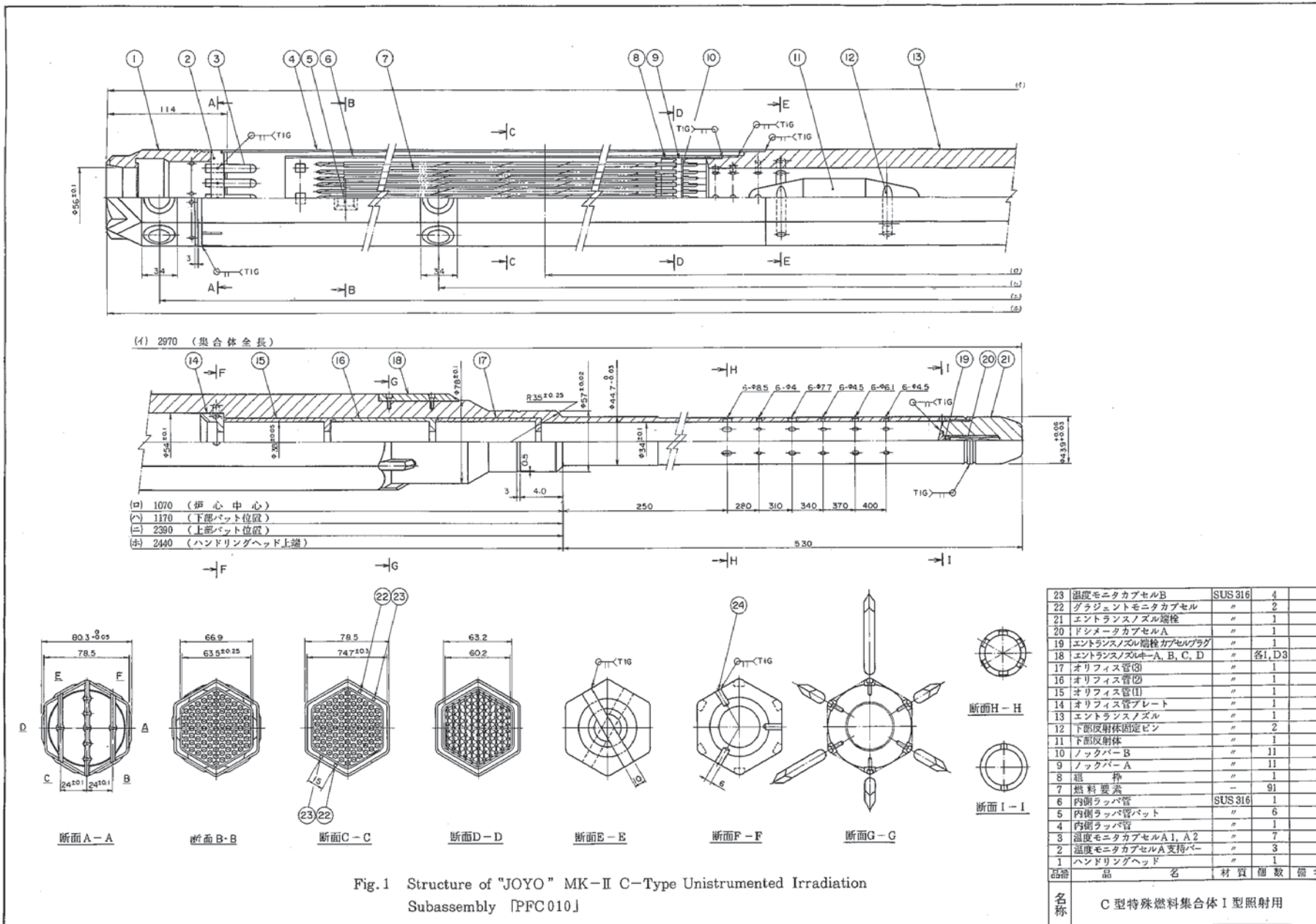
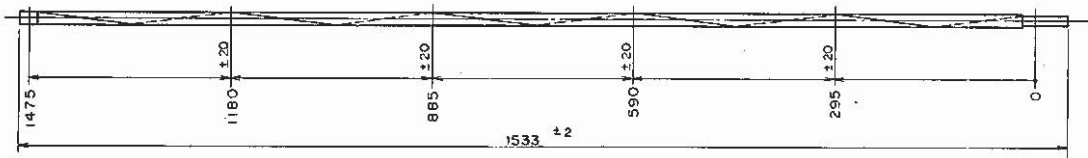
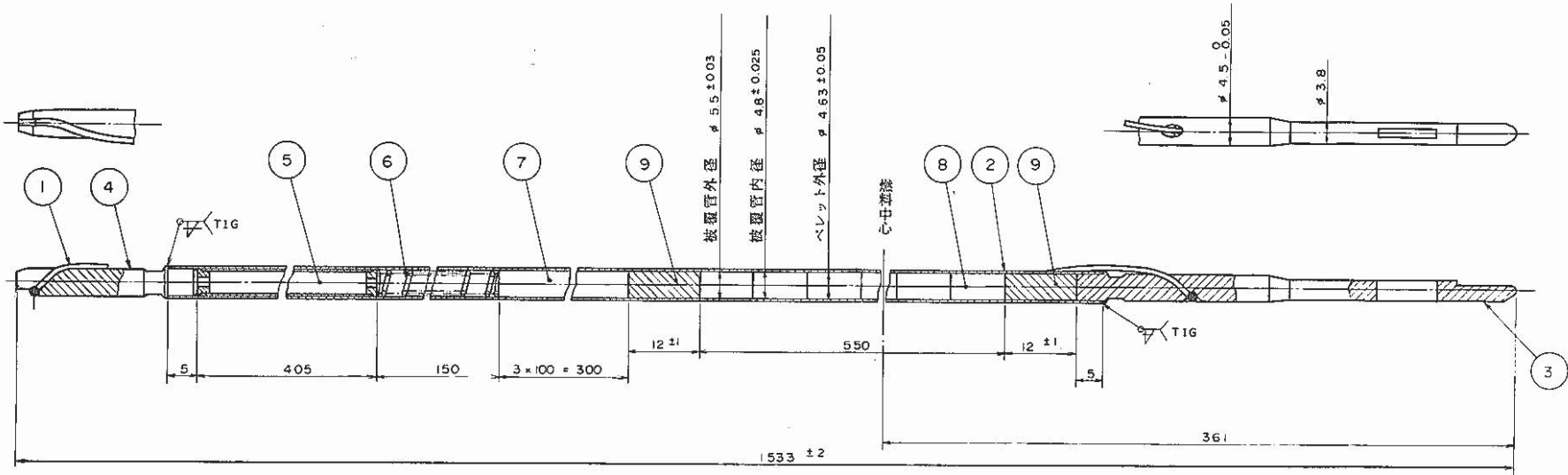


Fig.1 Structure of "JOYO" MK-II C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFC010]



ラッピングワイヤ配置図(1/5)

9	インシュレータペレット	劣化UO ₂	2	
8	炉心用ペレット	PuO ₂ -UO ₂		
7	要素反射体	SUS 316	3	
6	プレナムスプリング	SUS 304 WPB	1	
5	仰工板付プレナムスリーブ	SUS 316	1	
4	上部端栓	SUS 316	1	
3	下部端栓	SUS 316	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	品名	材質	個数	備考
名称	C型特殊燃料集合体I型特殊燃料要素			

Fig. 2 Structure of I-Type Fuel Pin of C-Type Uninstrumented Irradiation Subassembly [PFC 010]

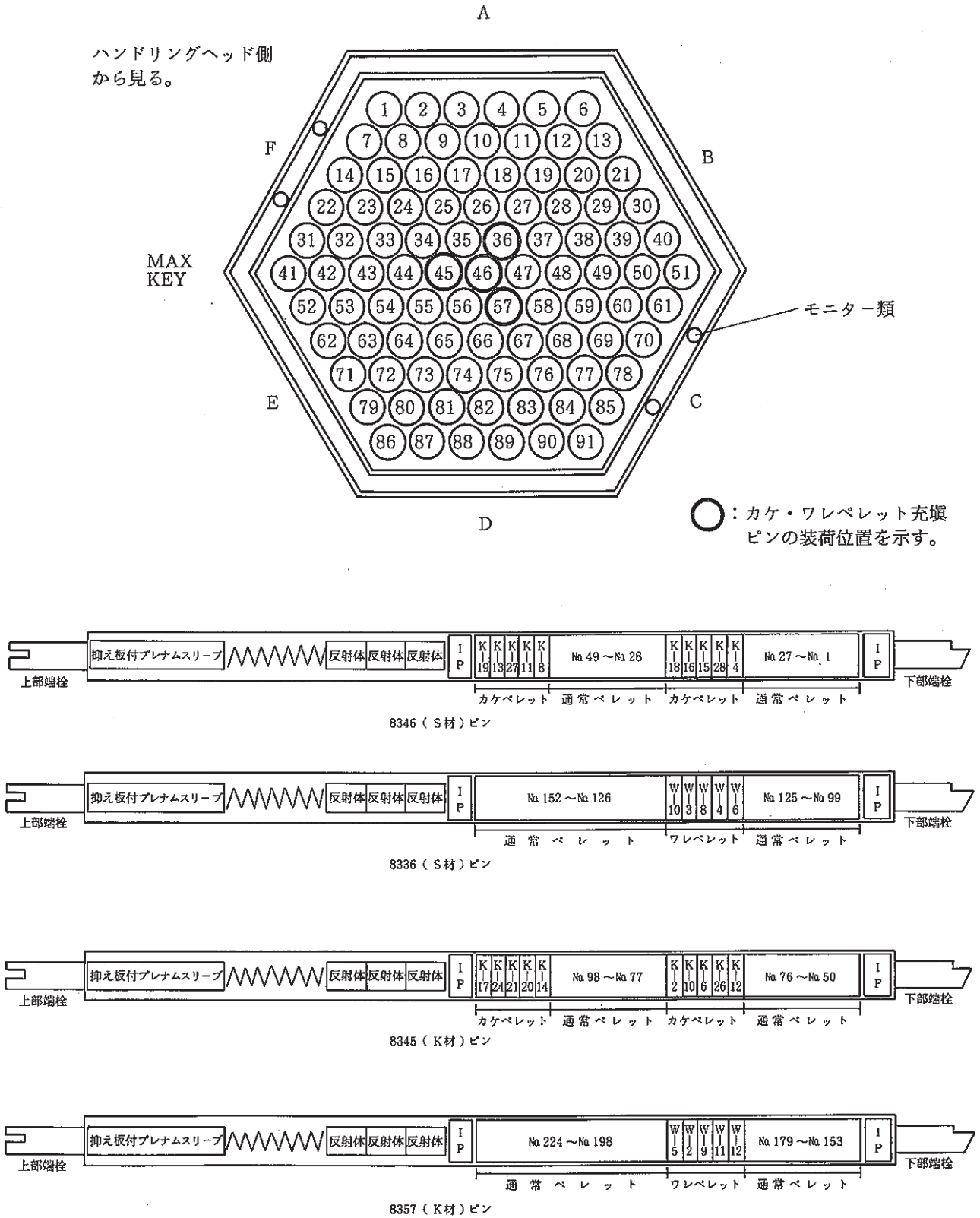


Fig. 3 Arrangement of Fuel Pin in the Subassembly

炉内照射位置

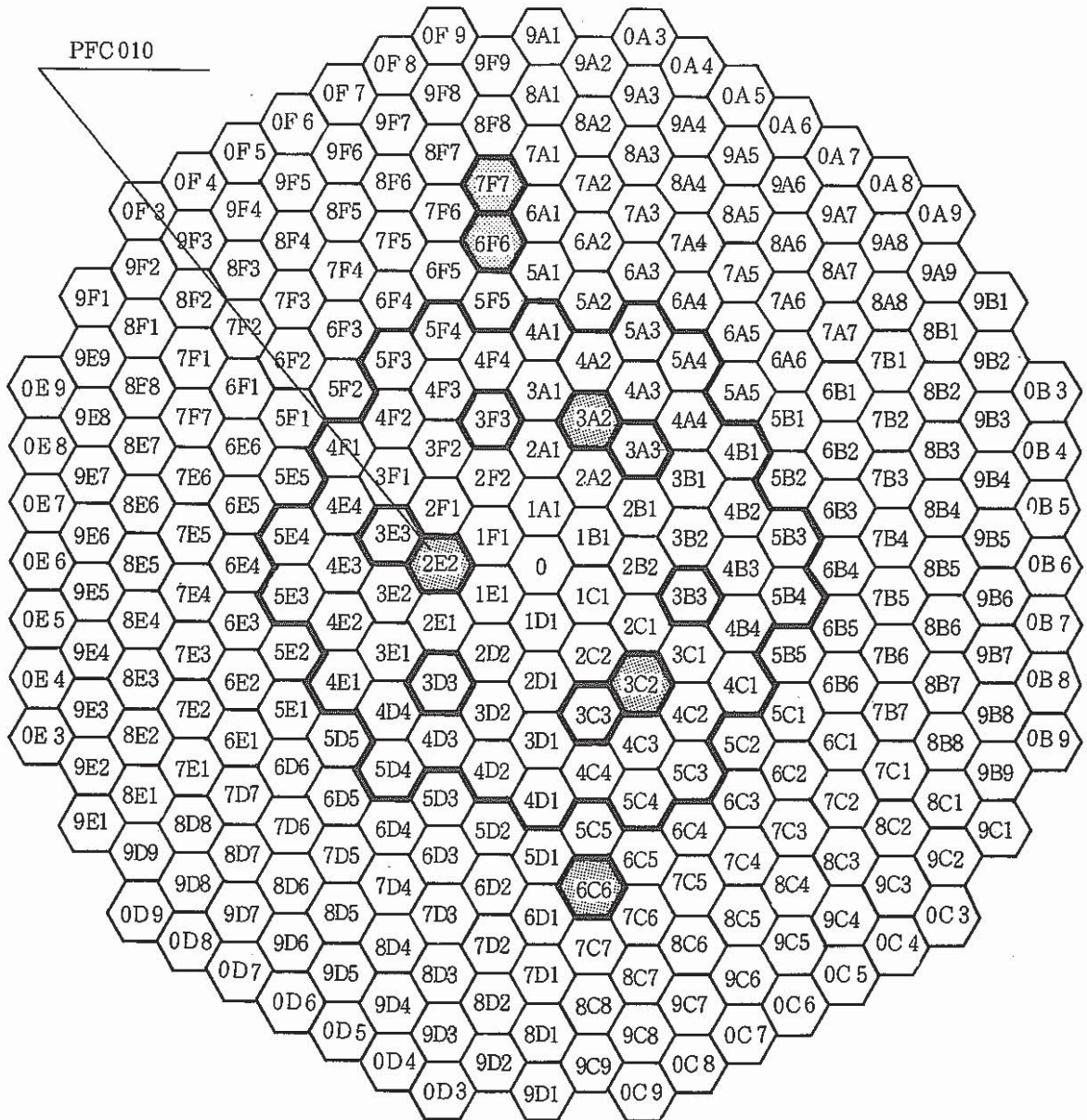


Fig.4 In Reactor Location of the Subassembly (PFC010)

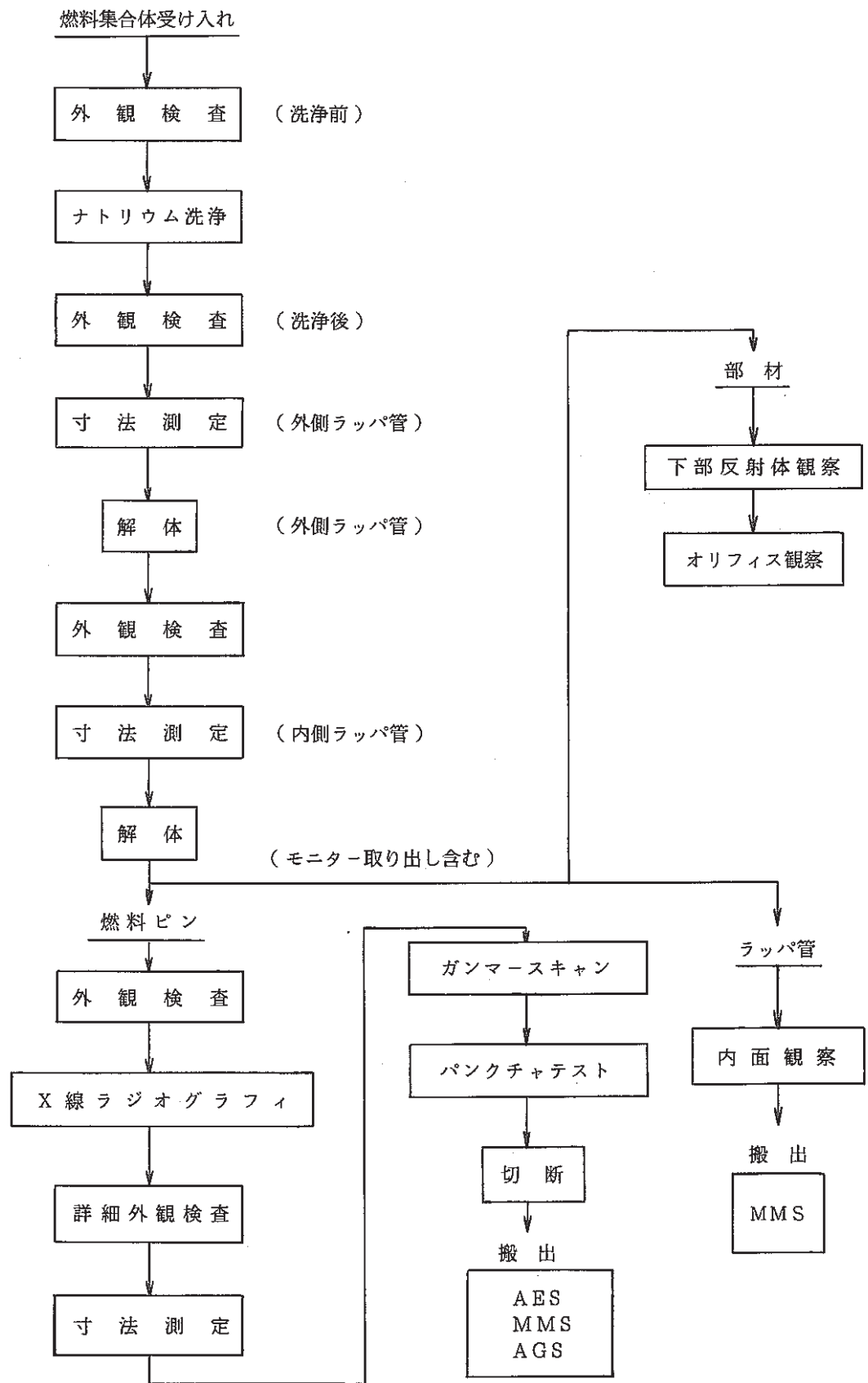


Fig.5 Flow Diagram of Postirradiation Examination on Subassembly 「PFC010」

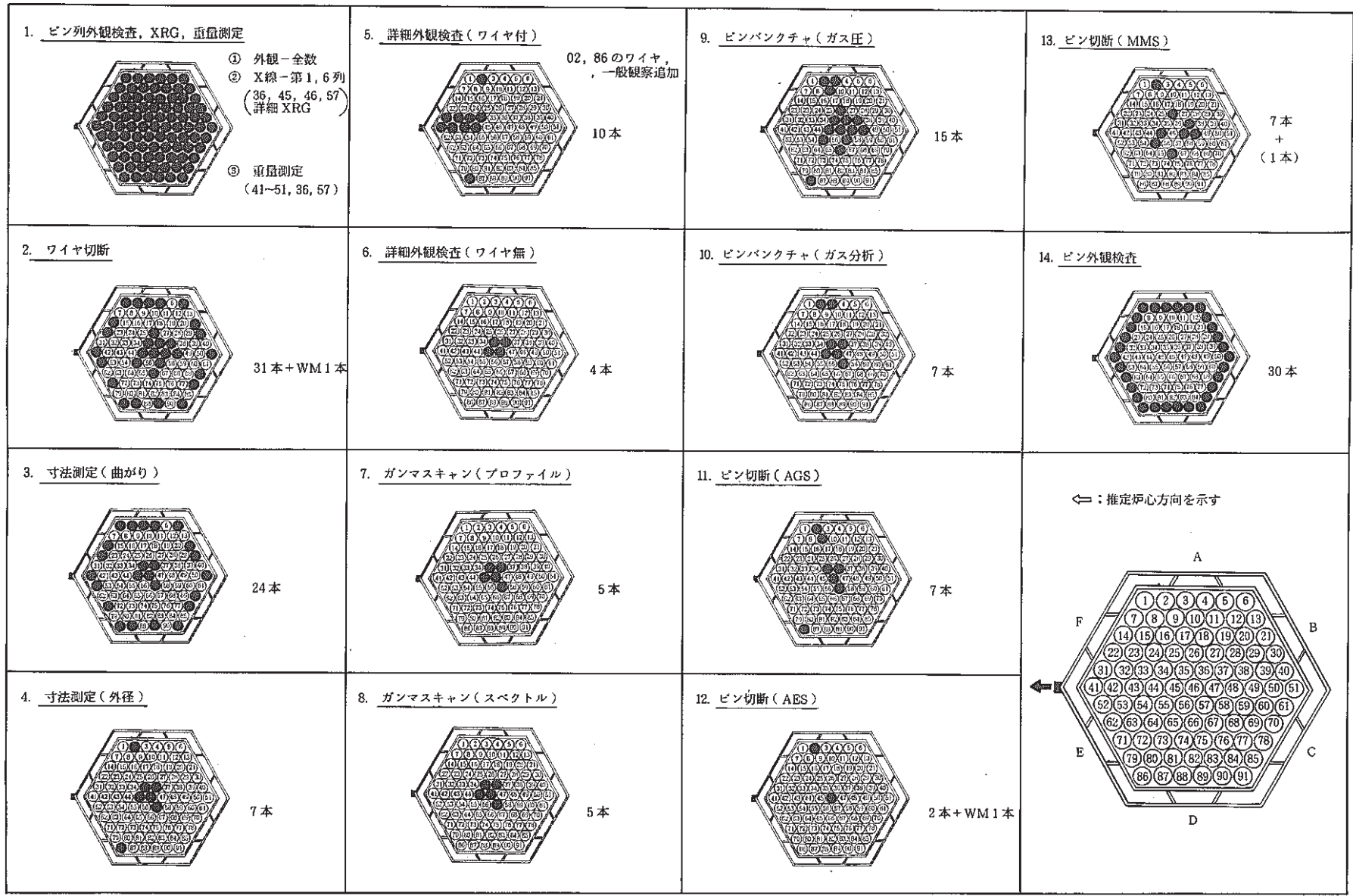


Fig.6 Fuel pins Selected for each postirradiation Examination Item

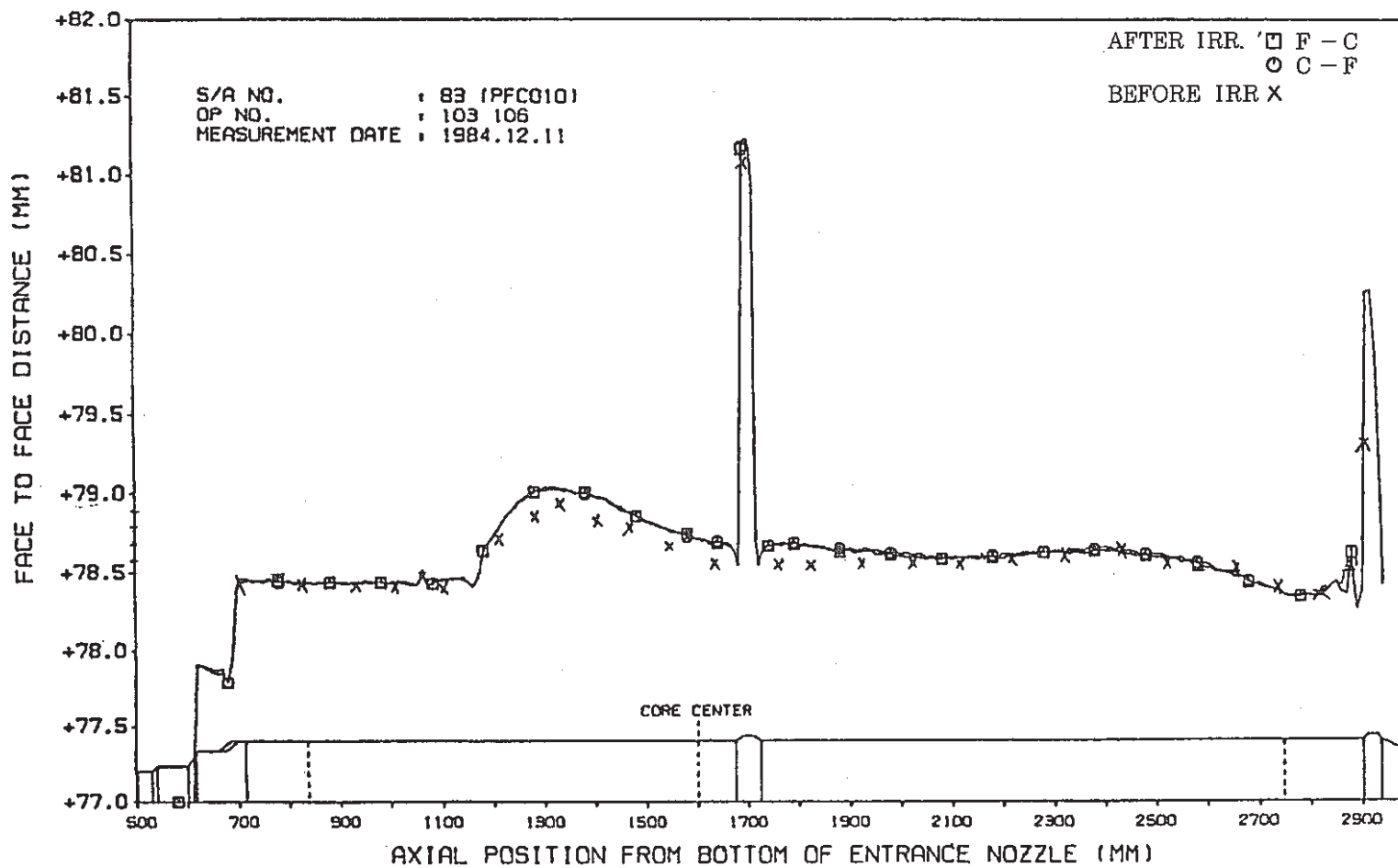


Fig. 7 Axial Profile of Face to Face Distance of outer Wrapper Tube of the Scabassembly (C-F)

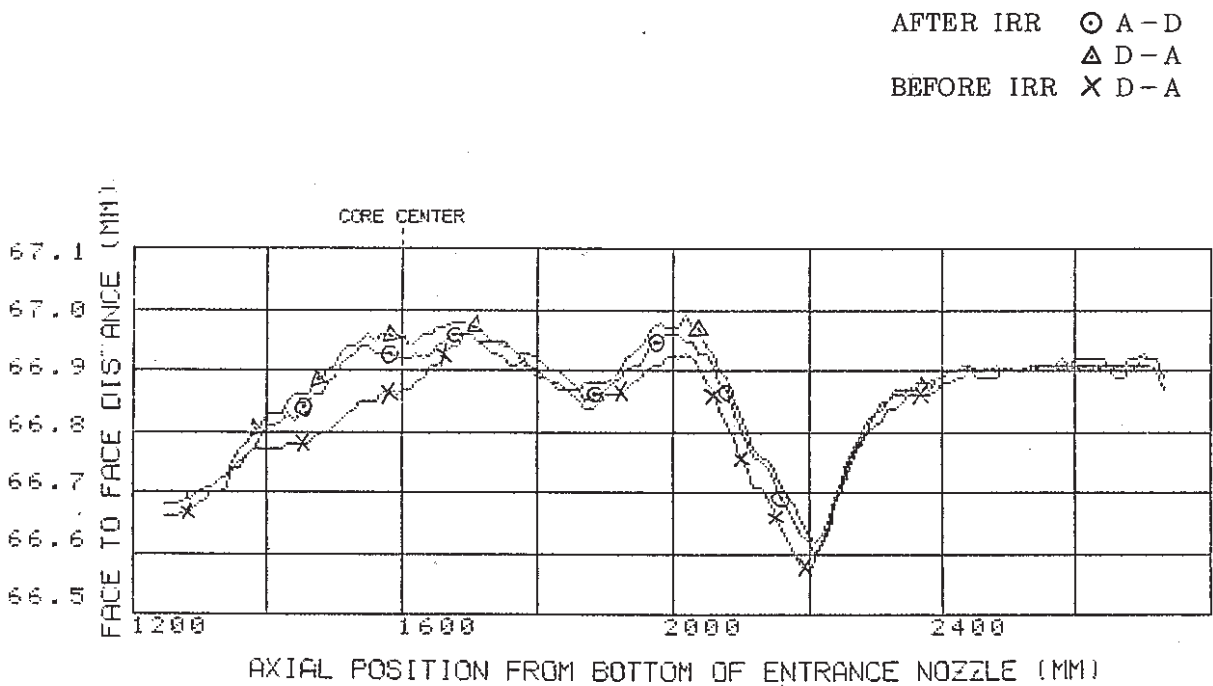
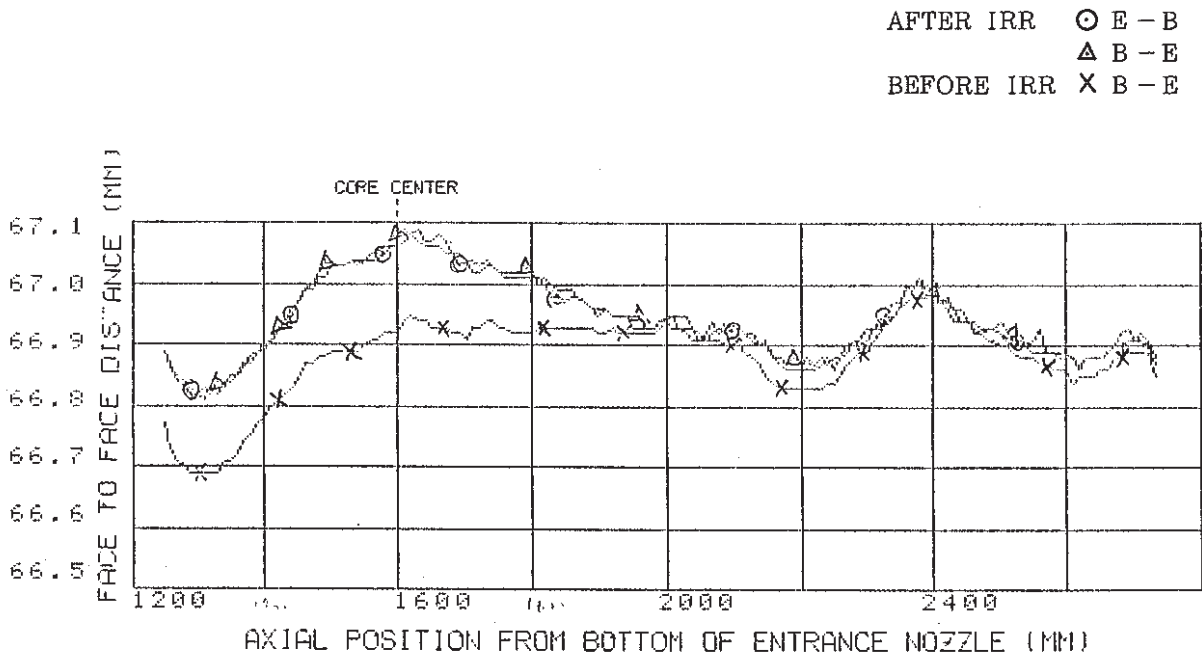


Fig. 8 Axial Profile of Face to Face Distance of Inner Tube of the Subassembly

(VIEW FROM TOP)

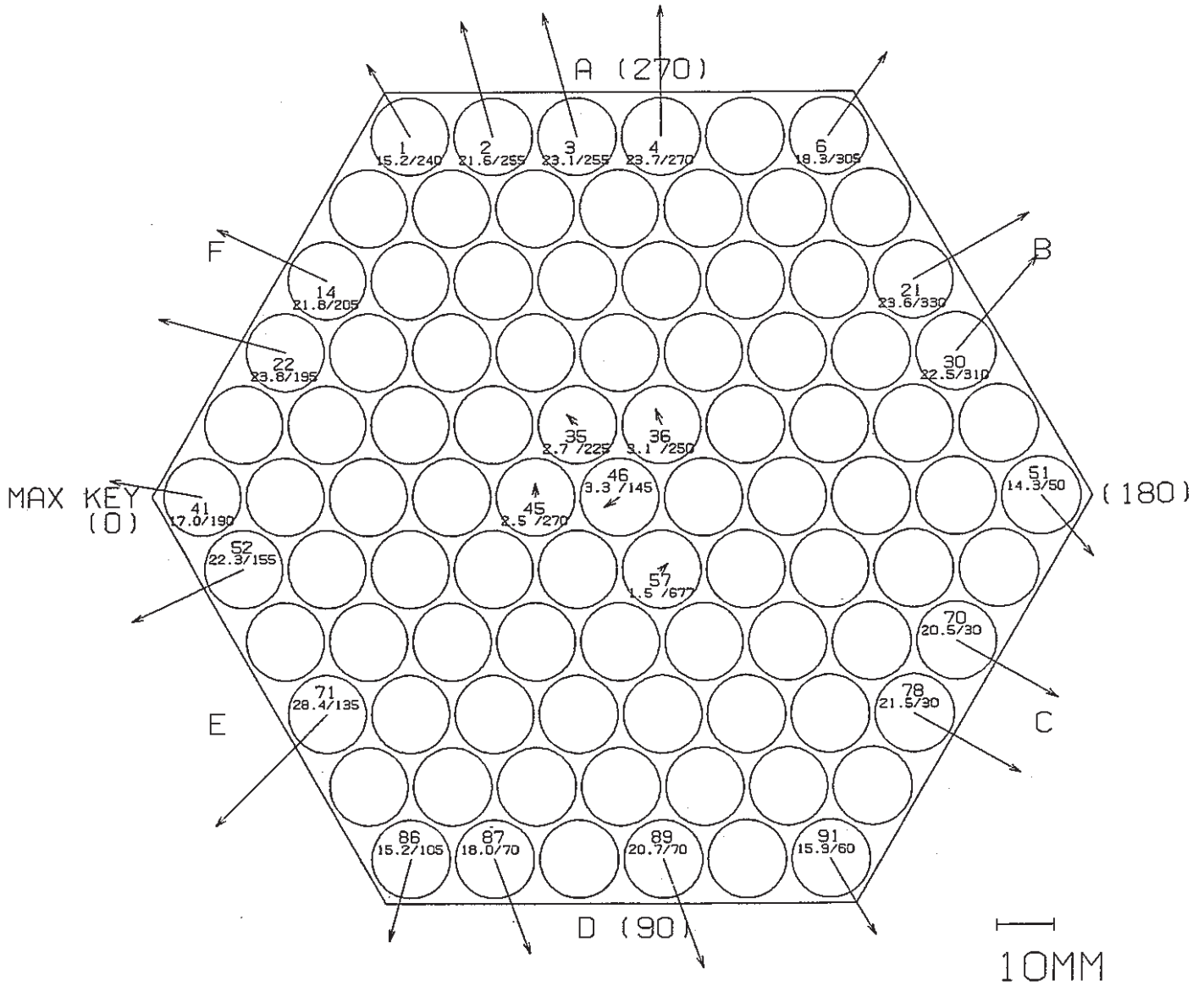
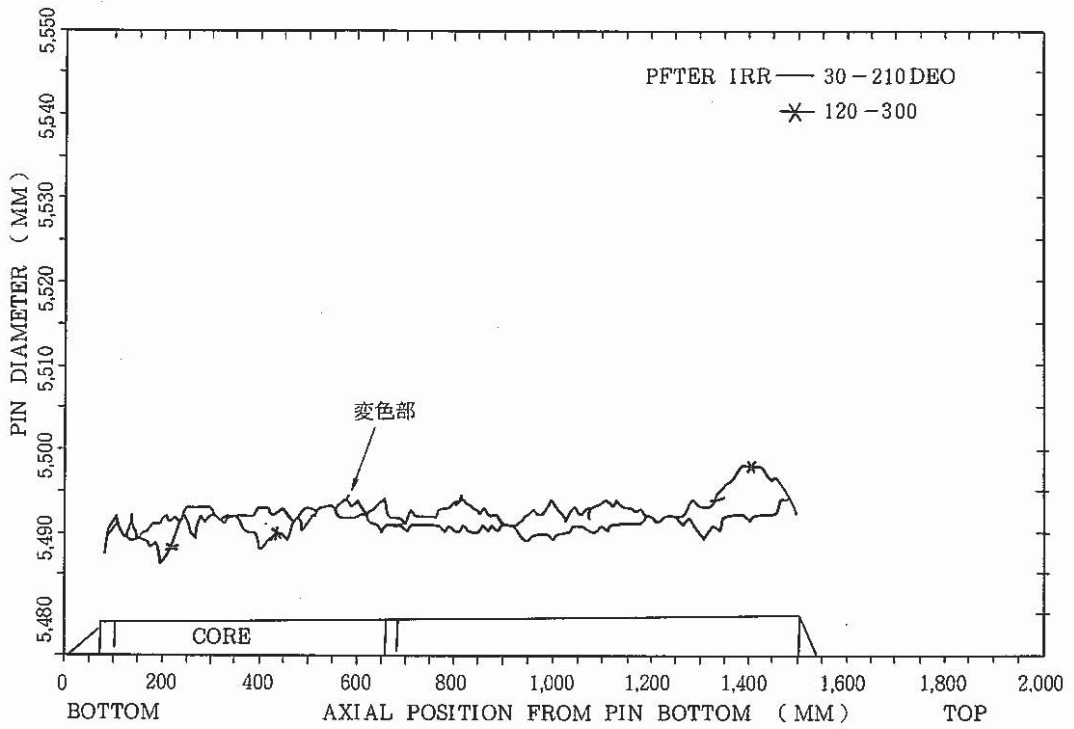


Fig. 9 Vector of Pin Bowing in the Subassembly



<PIN DIAMETER & PIN TEMPERATURE> M. DATE : 850305
 SA NAME : OP. NO. : 052
 PIN NO. : 8302 LENGTH : 0884.6
 U.E.P.NO. :

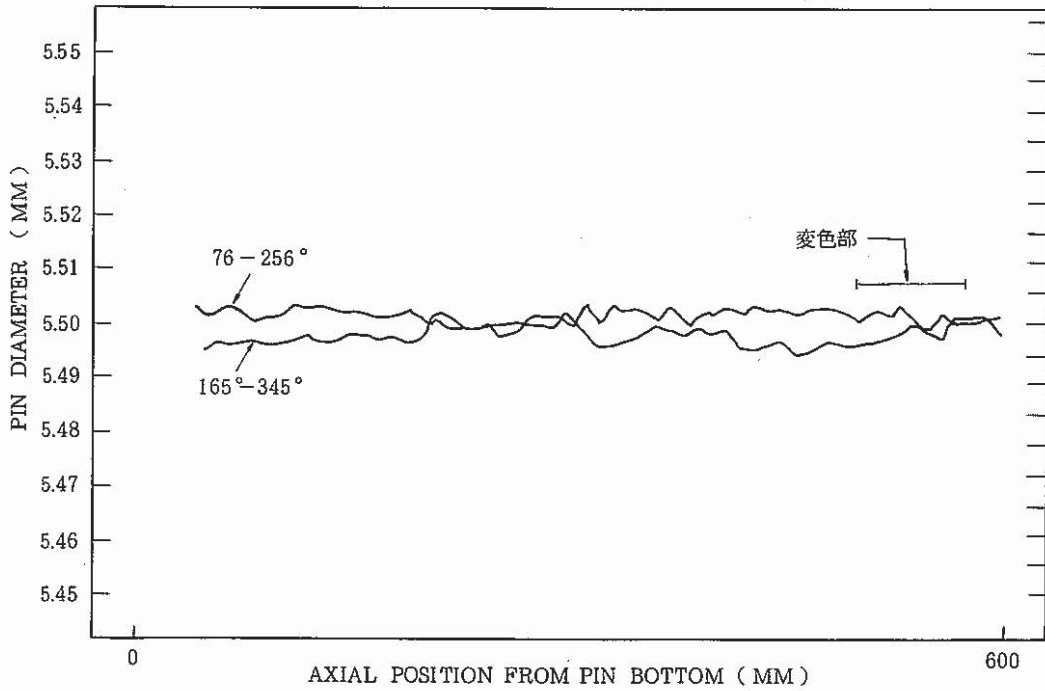


Fig. 10 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8302)

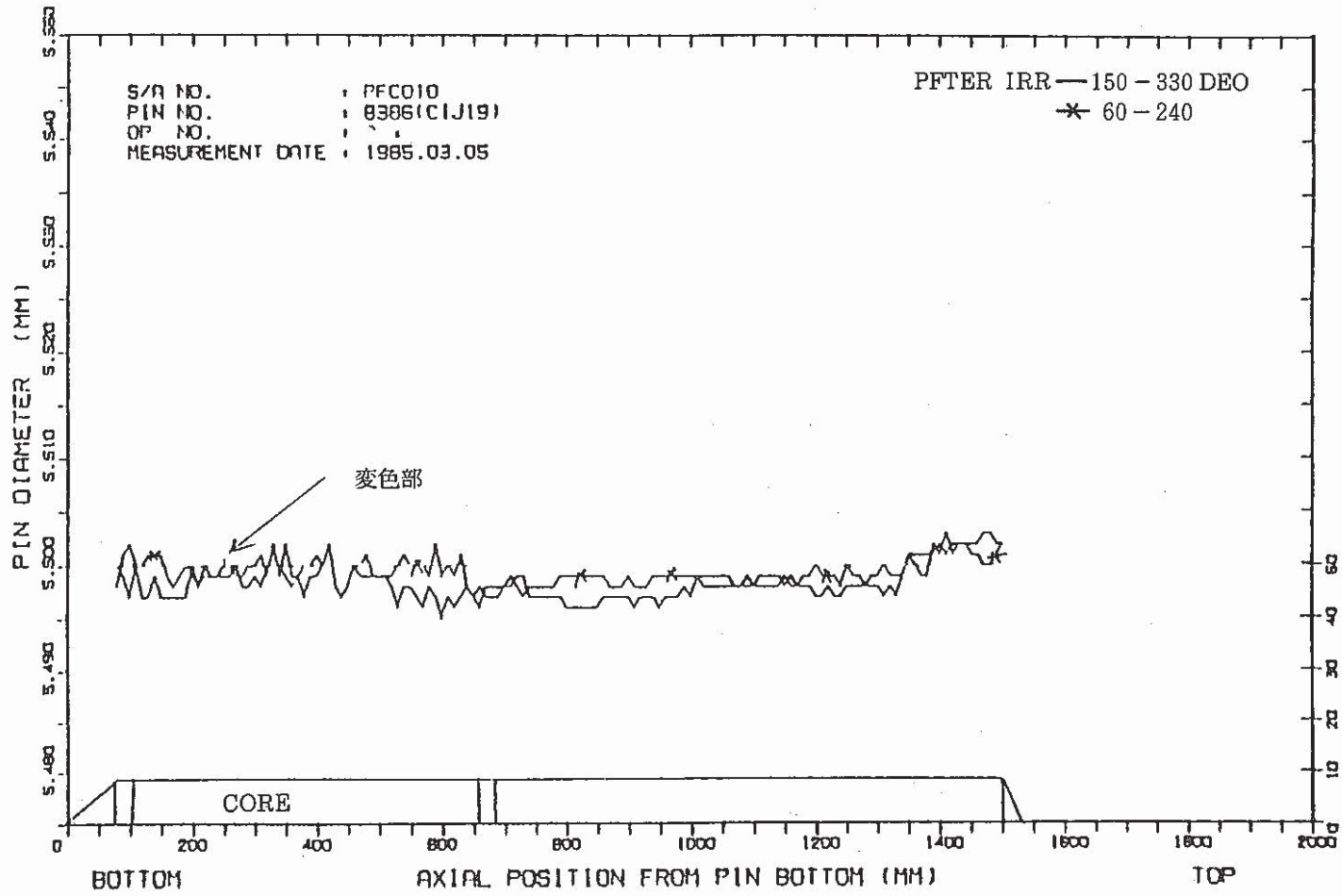


Fig. 11 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No.8386)

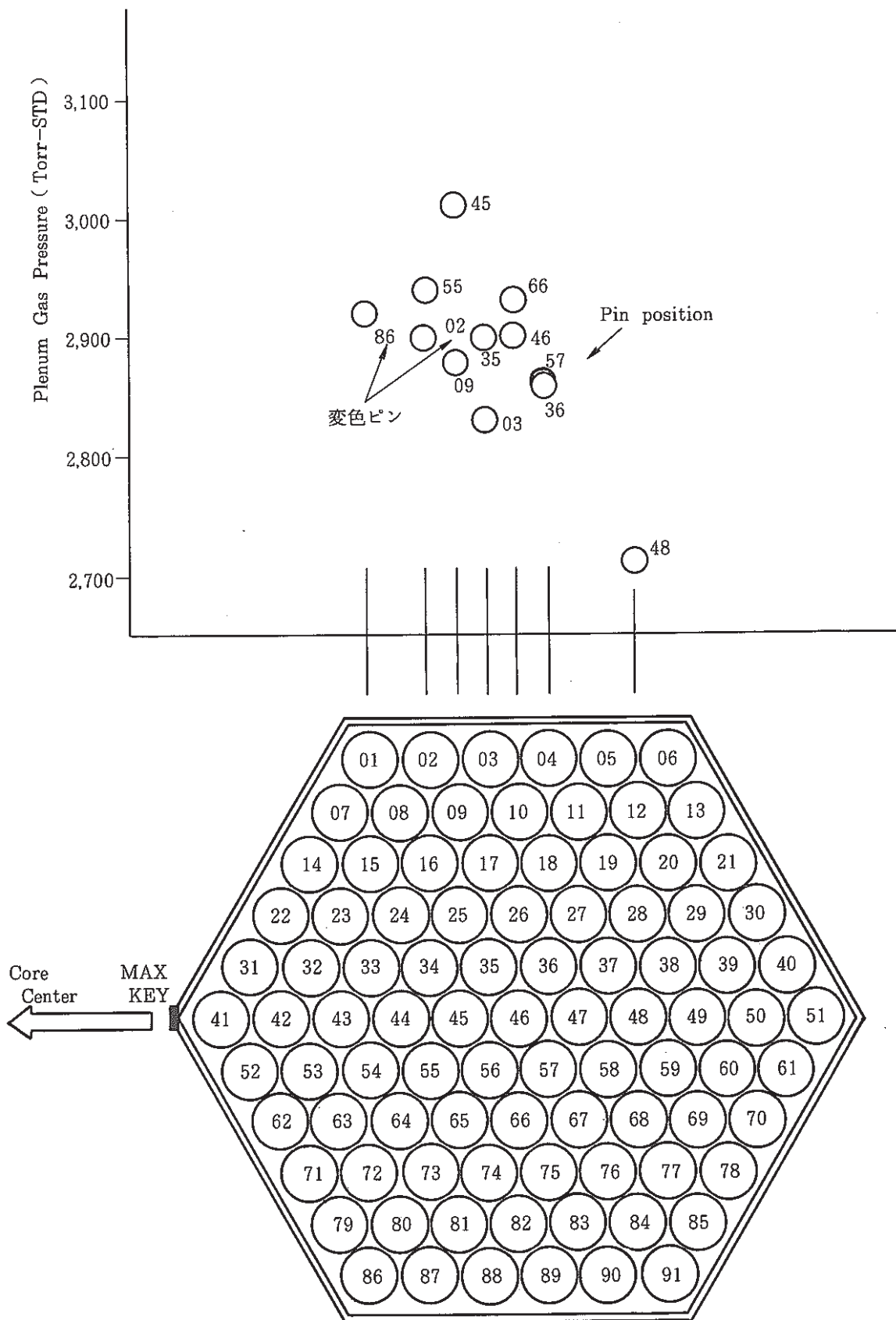


Fig.12 Plenum Gas Pressure of tested Pins in the Subassembly

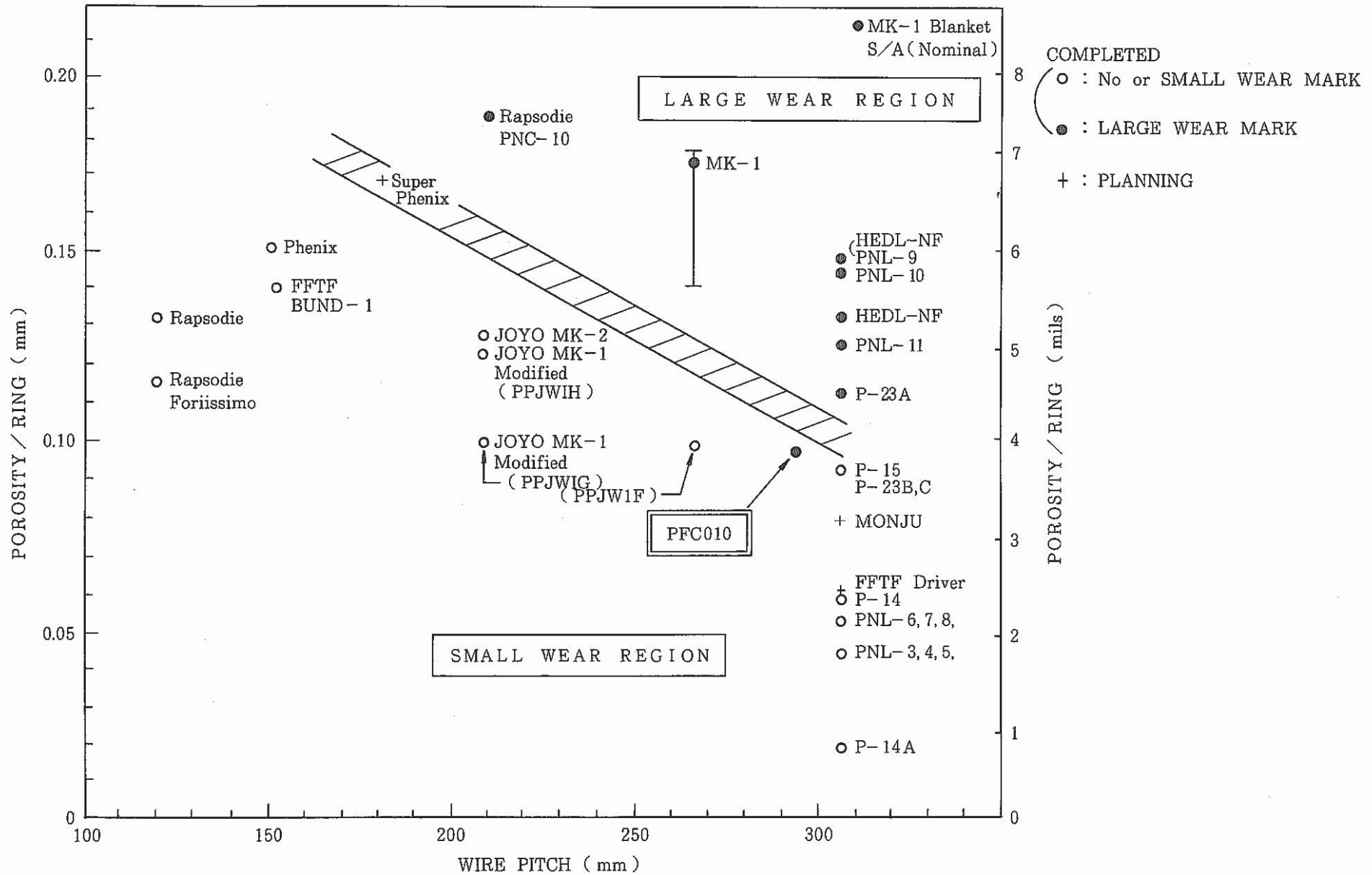


Fig.13 Relation of Porosity Per Ring and Wire Pitch to Wear Mark

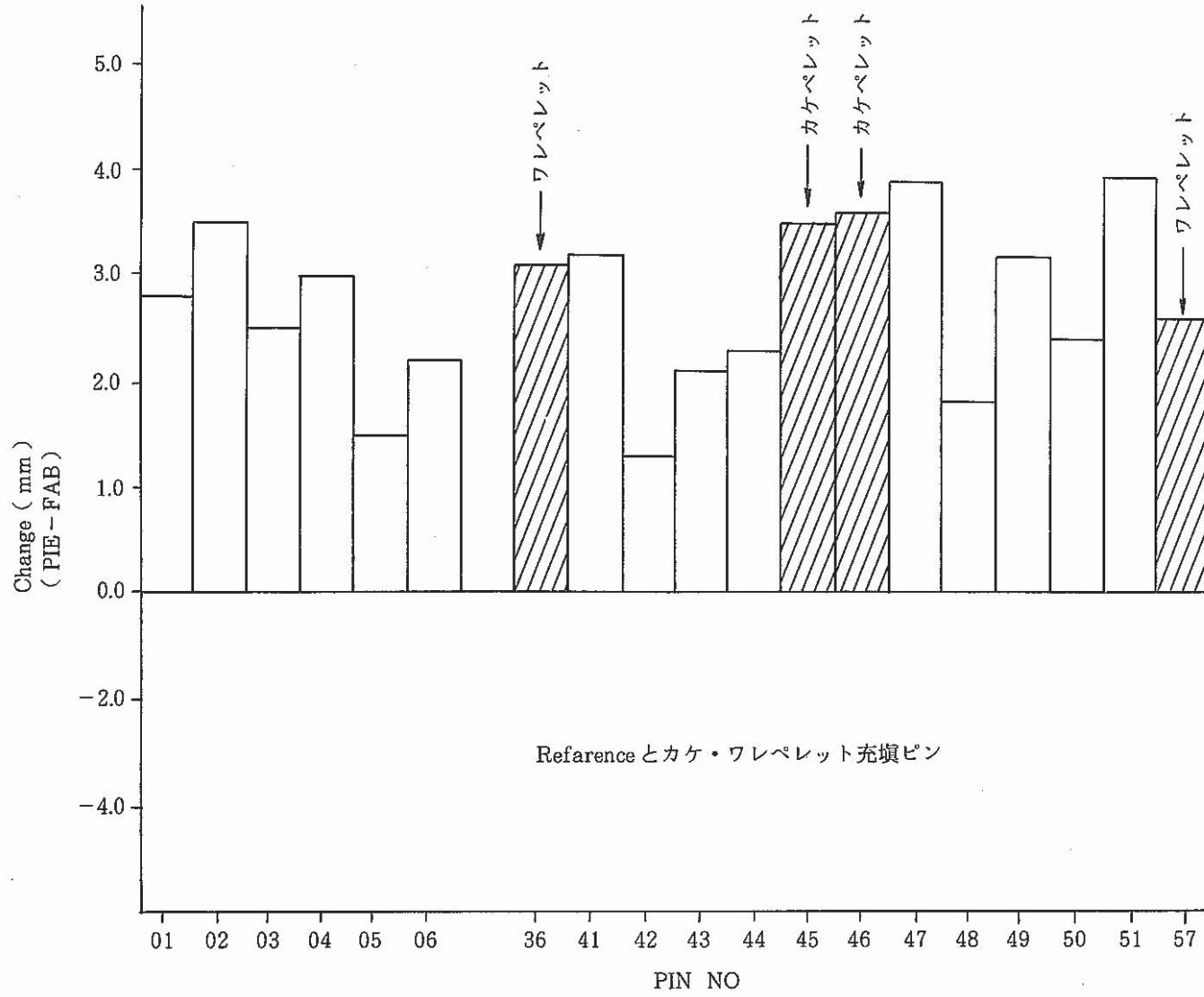


Fig.14 Fuel Stack Length Changes in the Subassembly

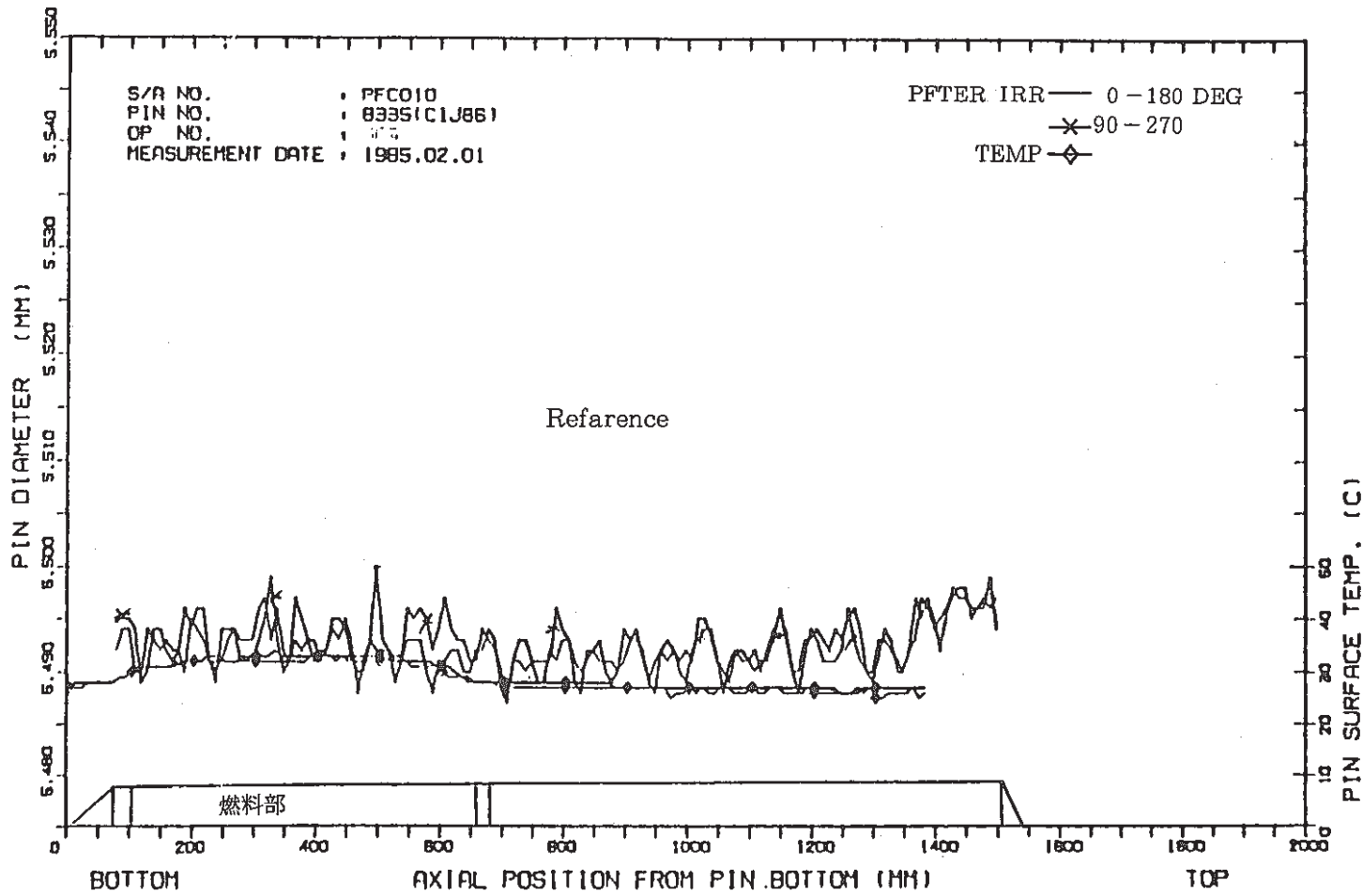


Fig. 15 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8335)

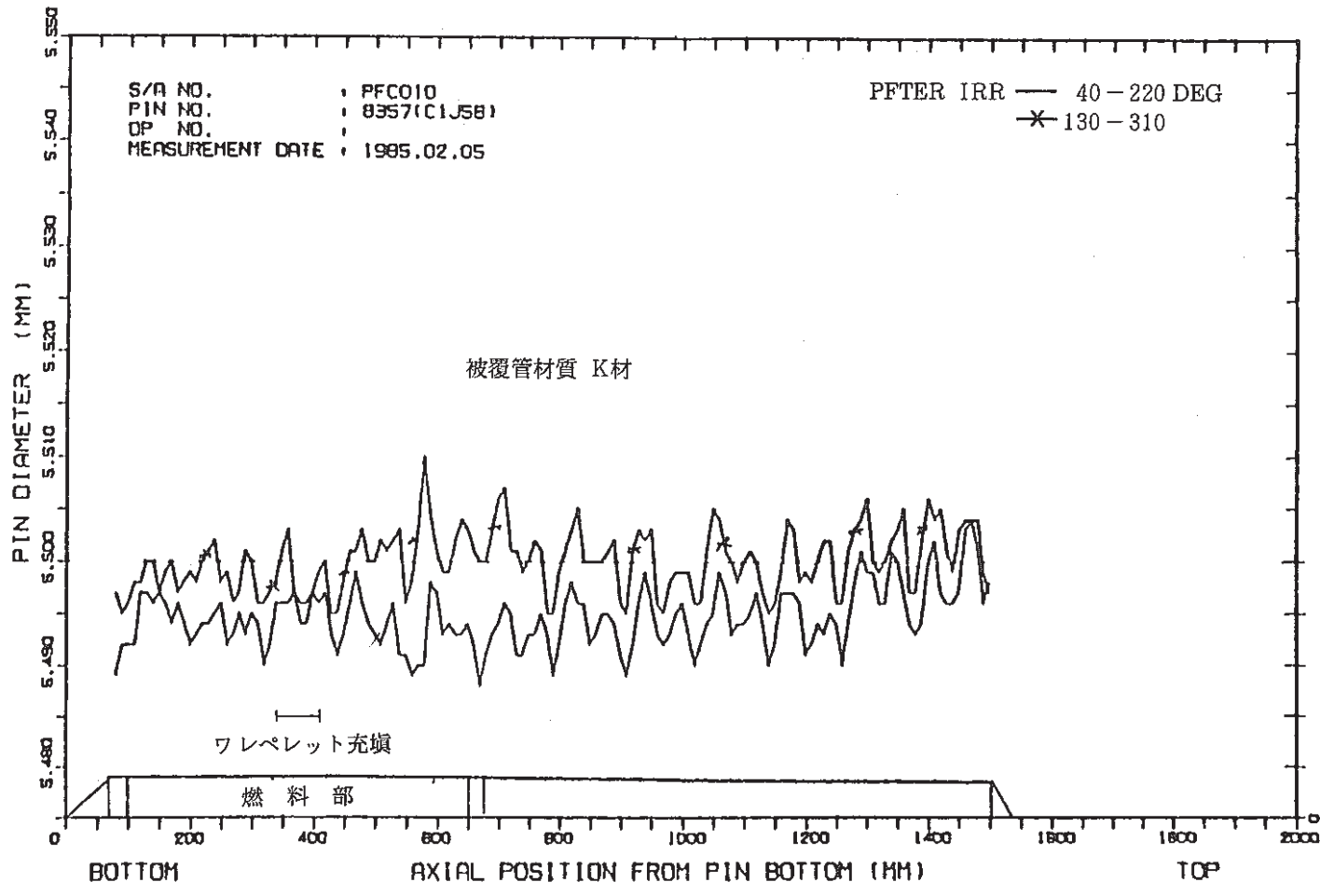


Fig. 16 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8357)

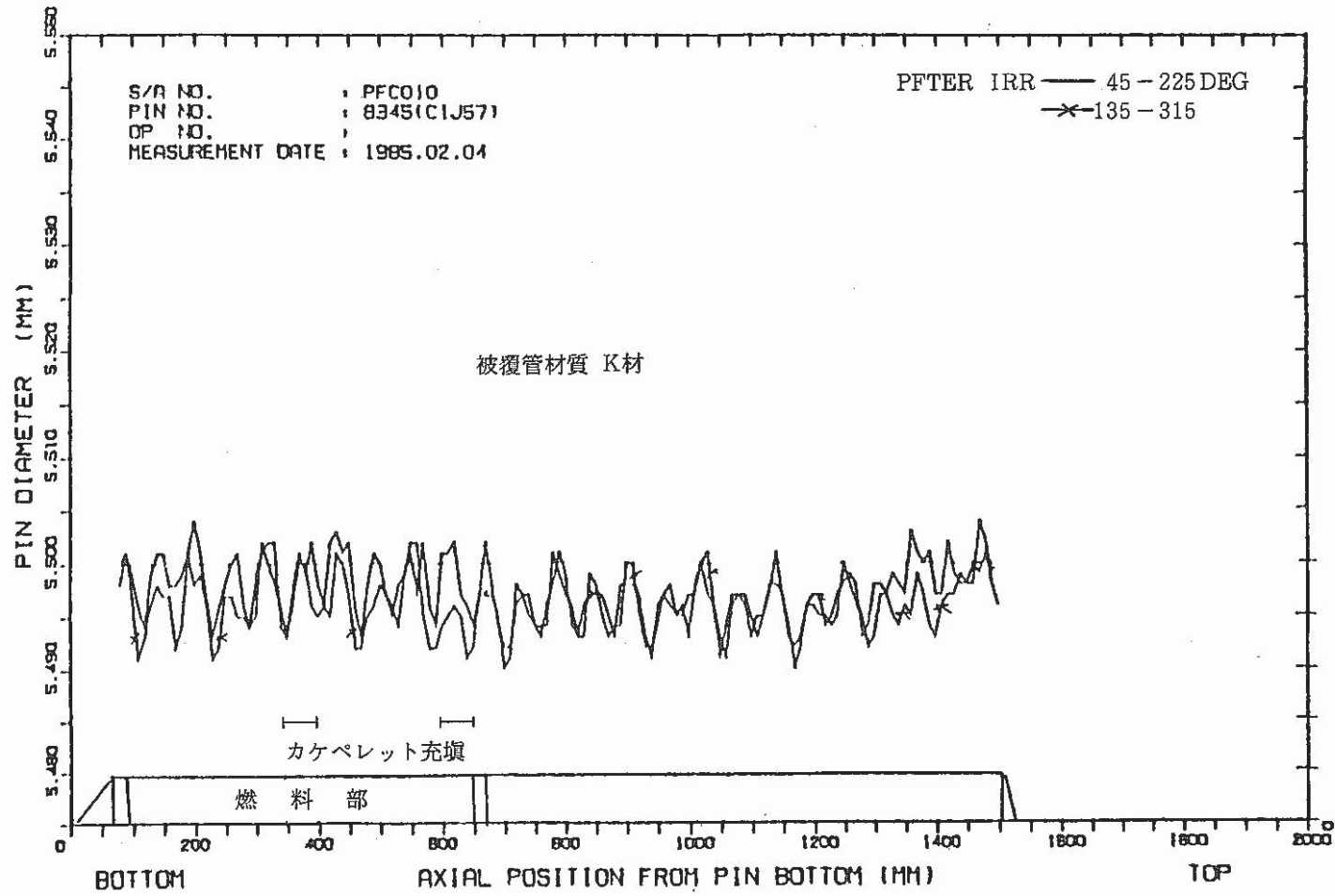


Fig. 17 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8345)

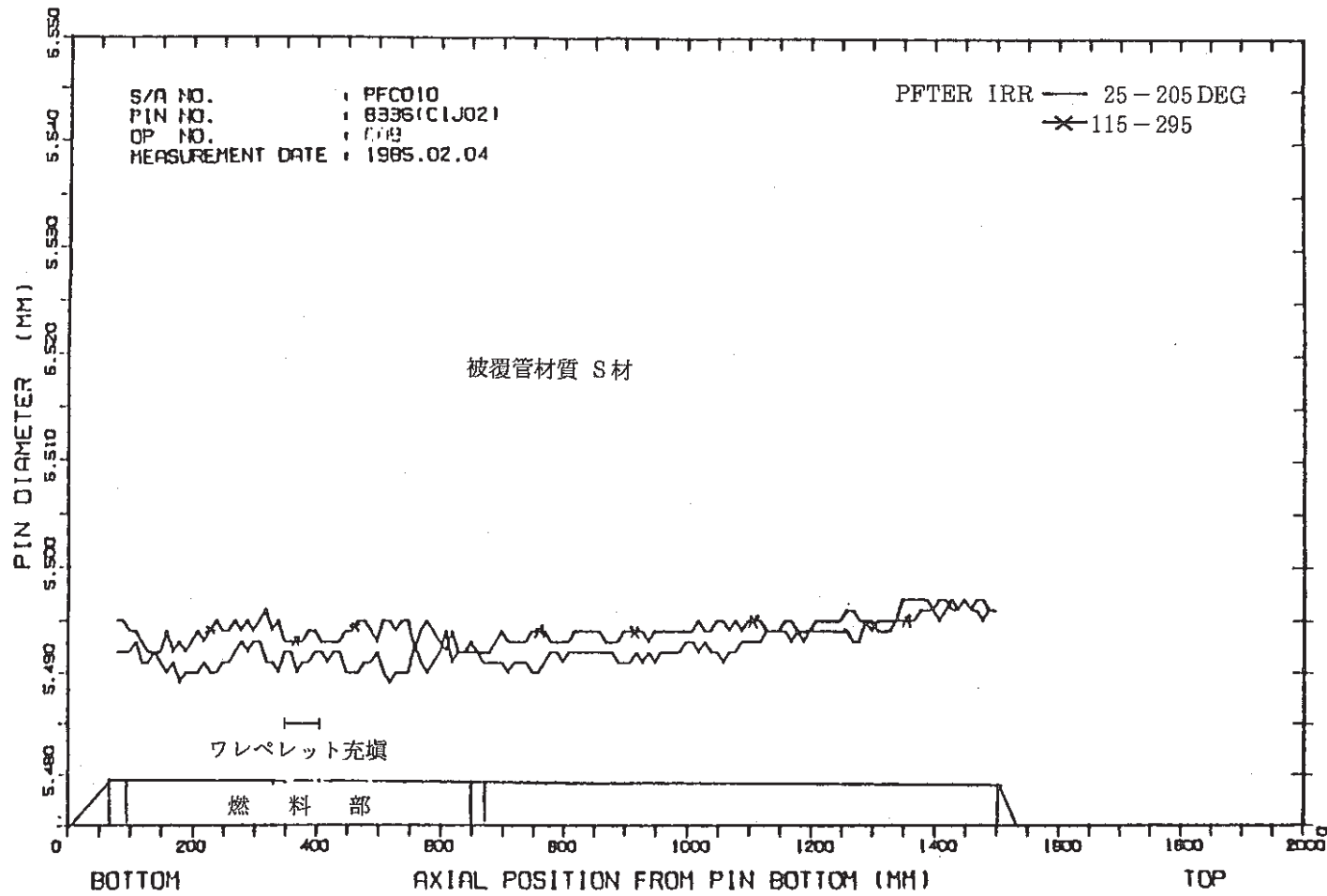


Fig. 18 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8336)

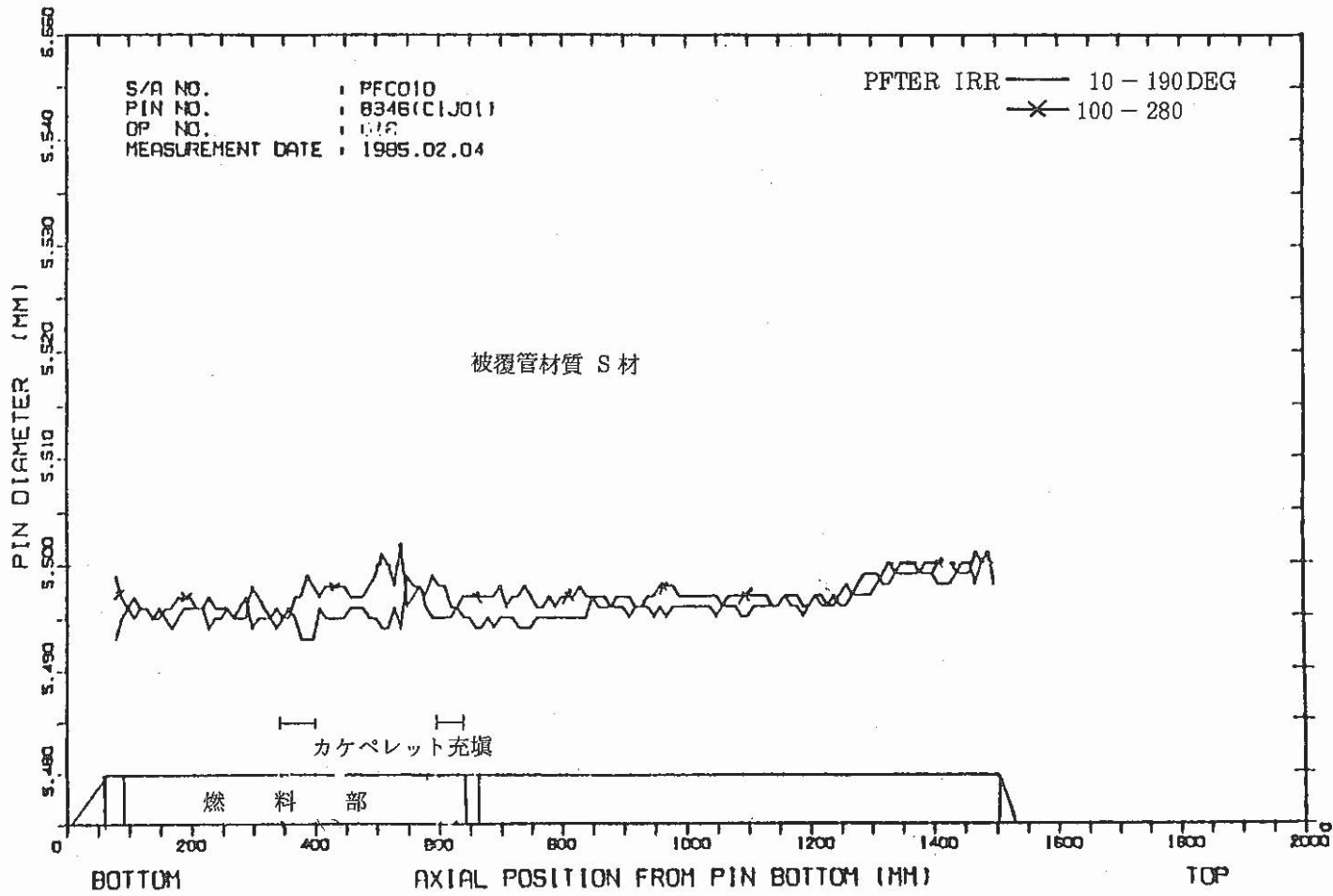


Fig. 19 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. 8346)

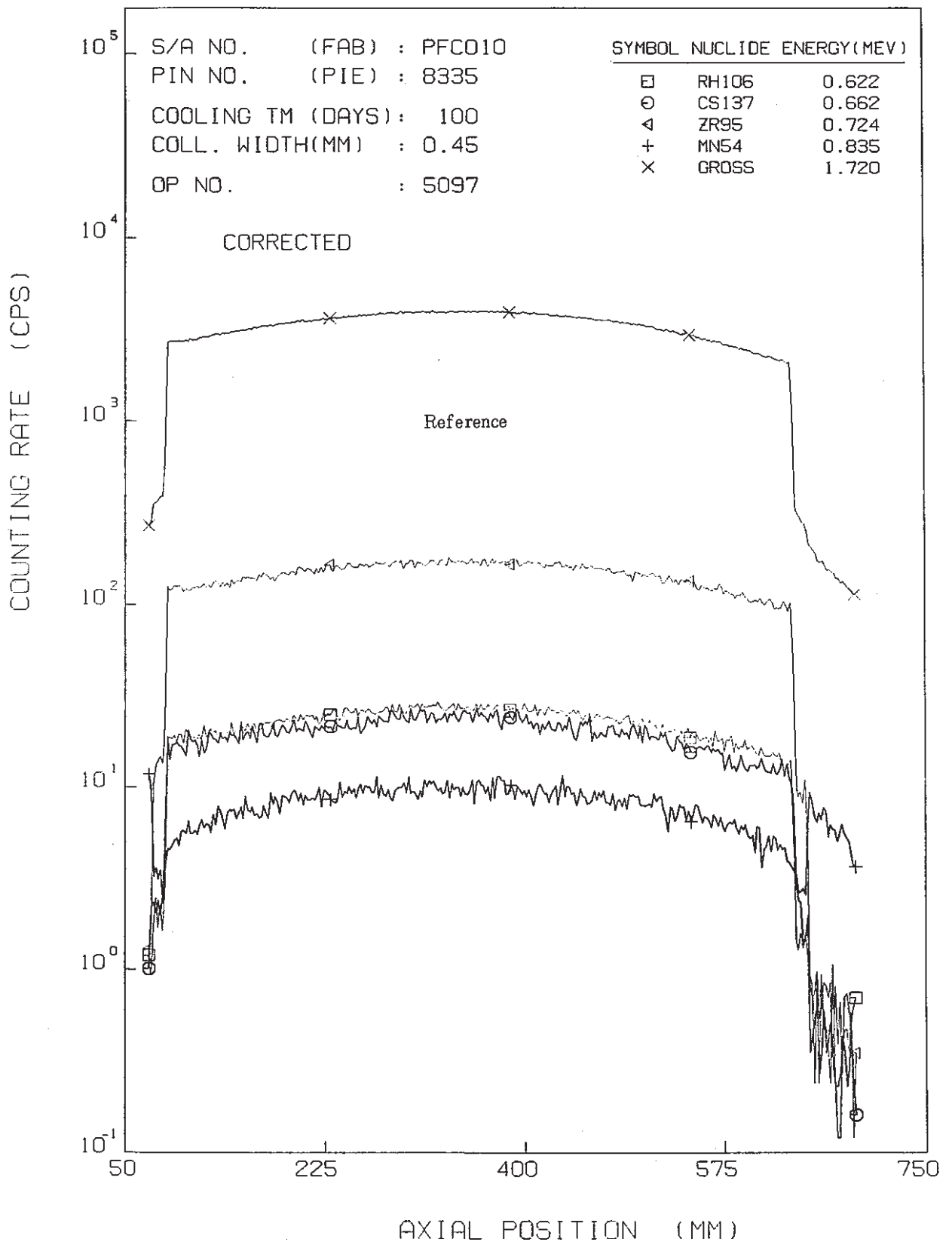


Fig. 20 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin. No. 8335)

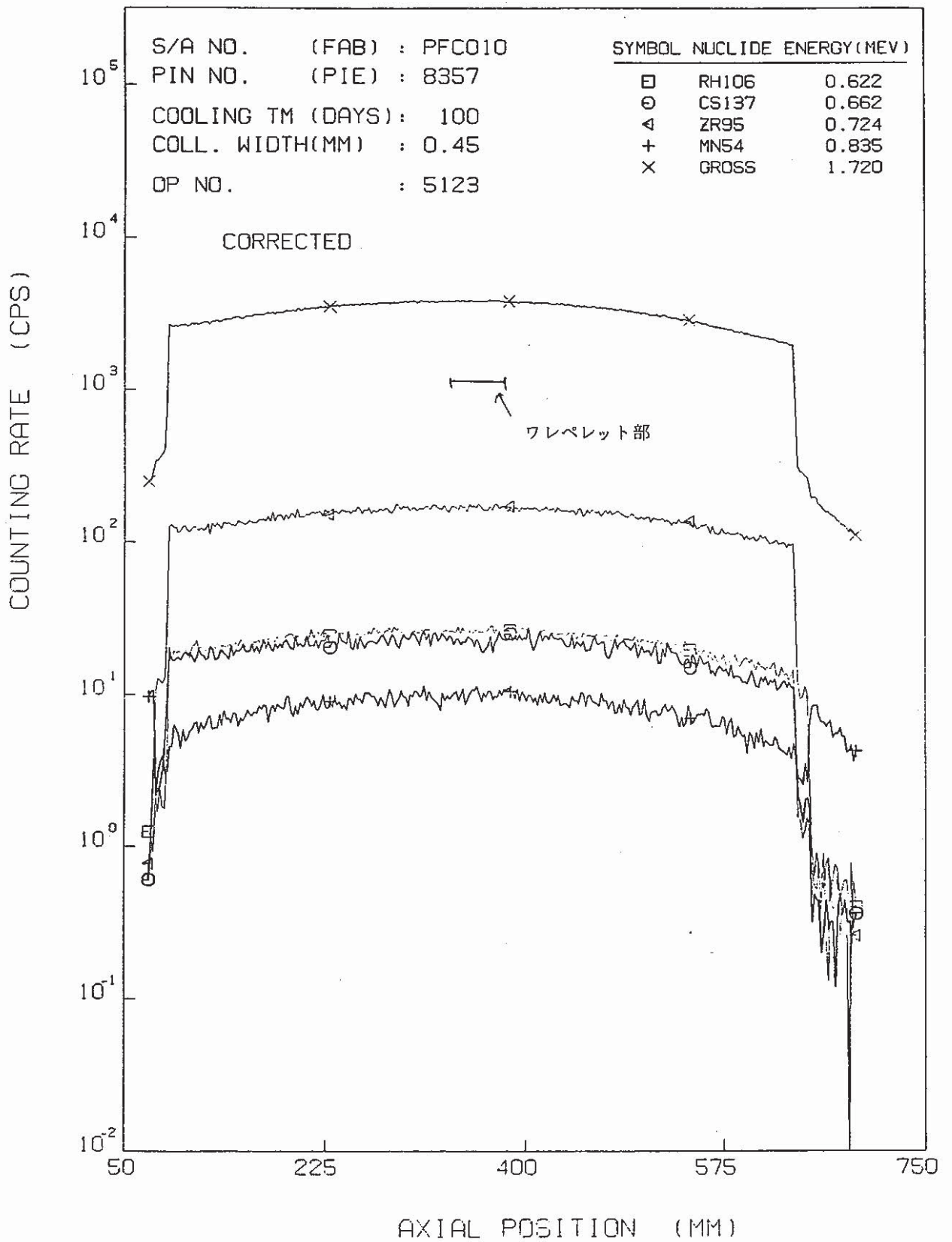


Fig. 21 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin. No. 8357)

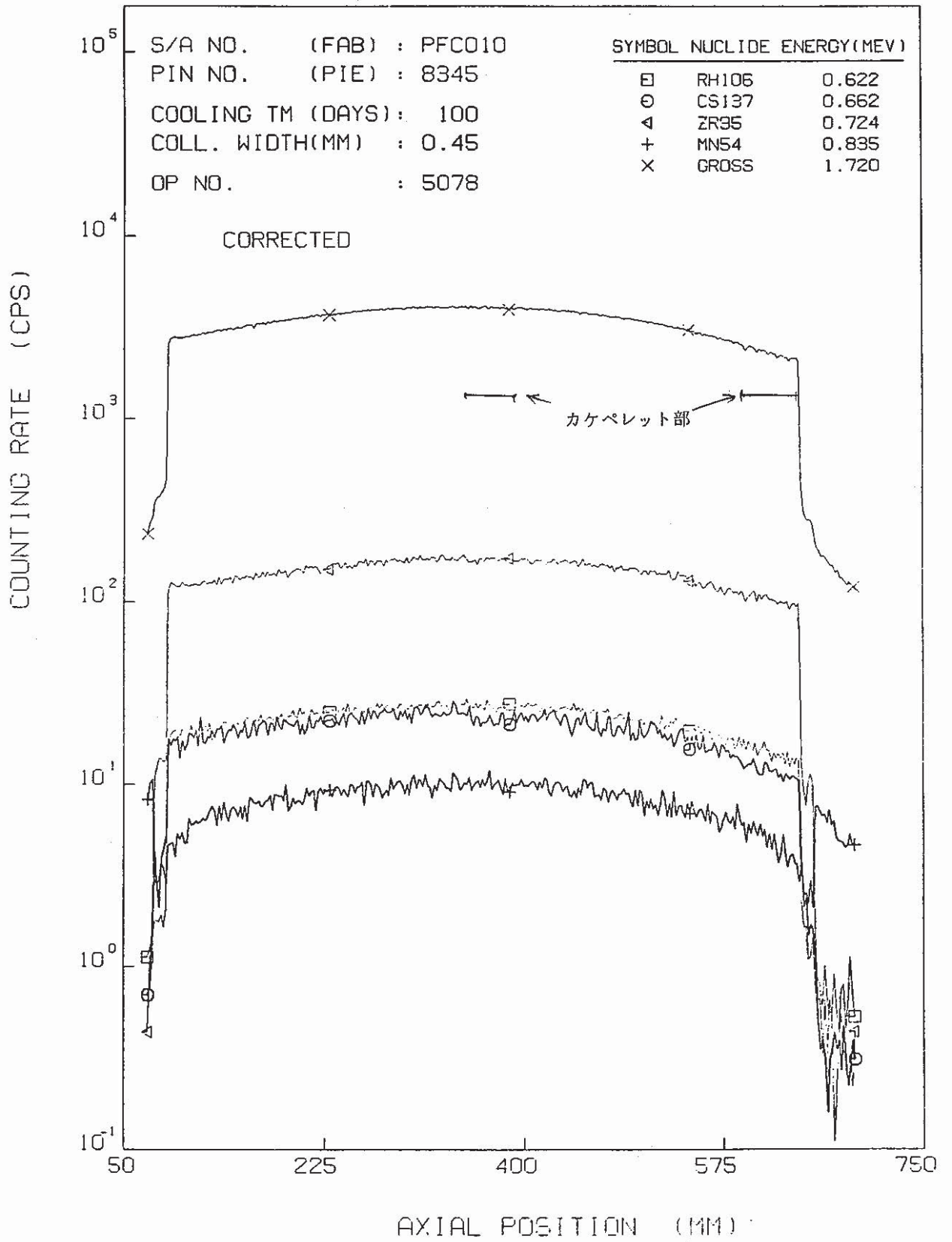


Fig. 22 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin.No. 8345)

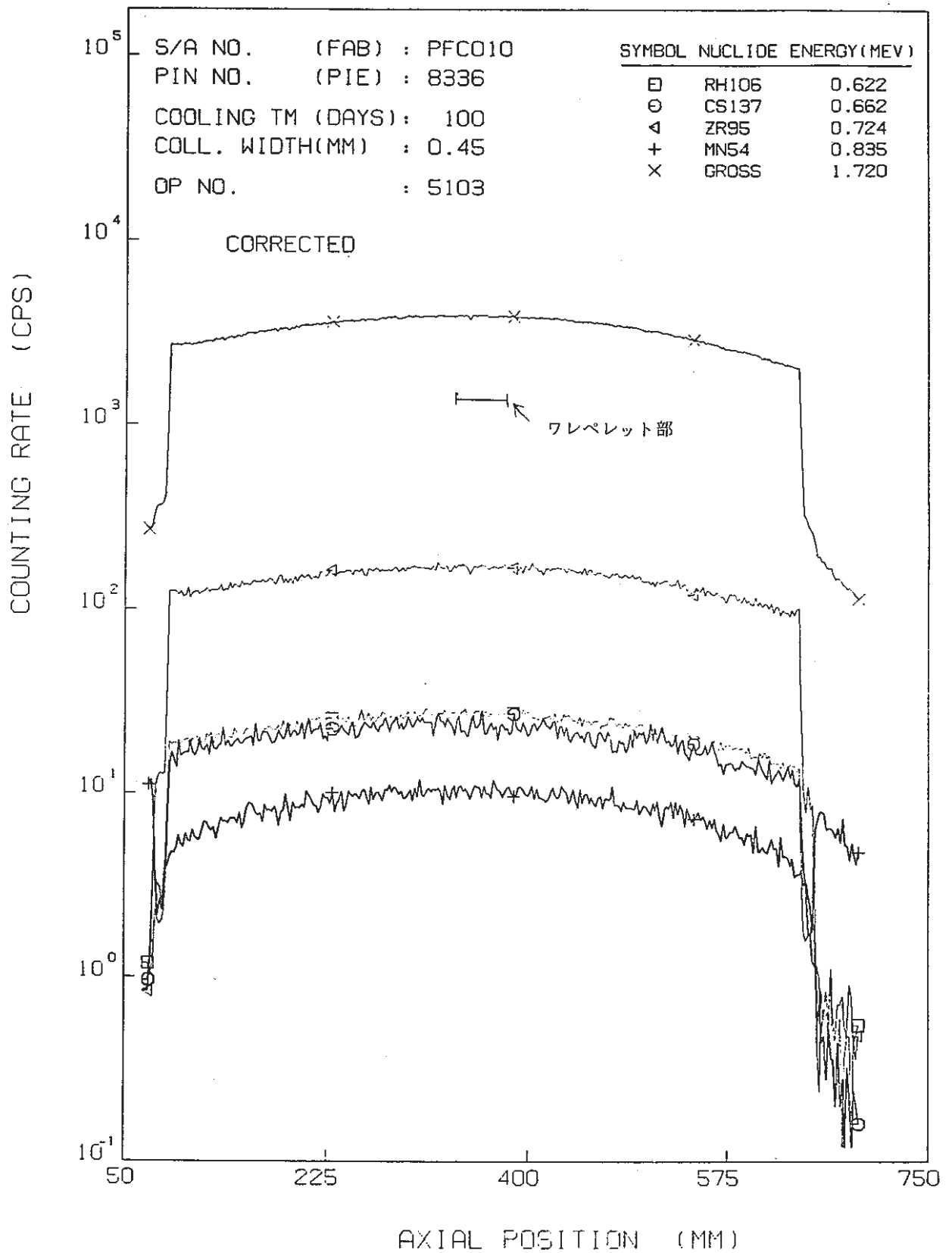


Fig. 23 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin. No. 8336)

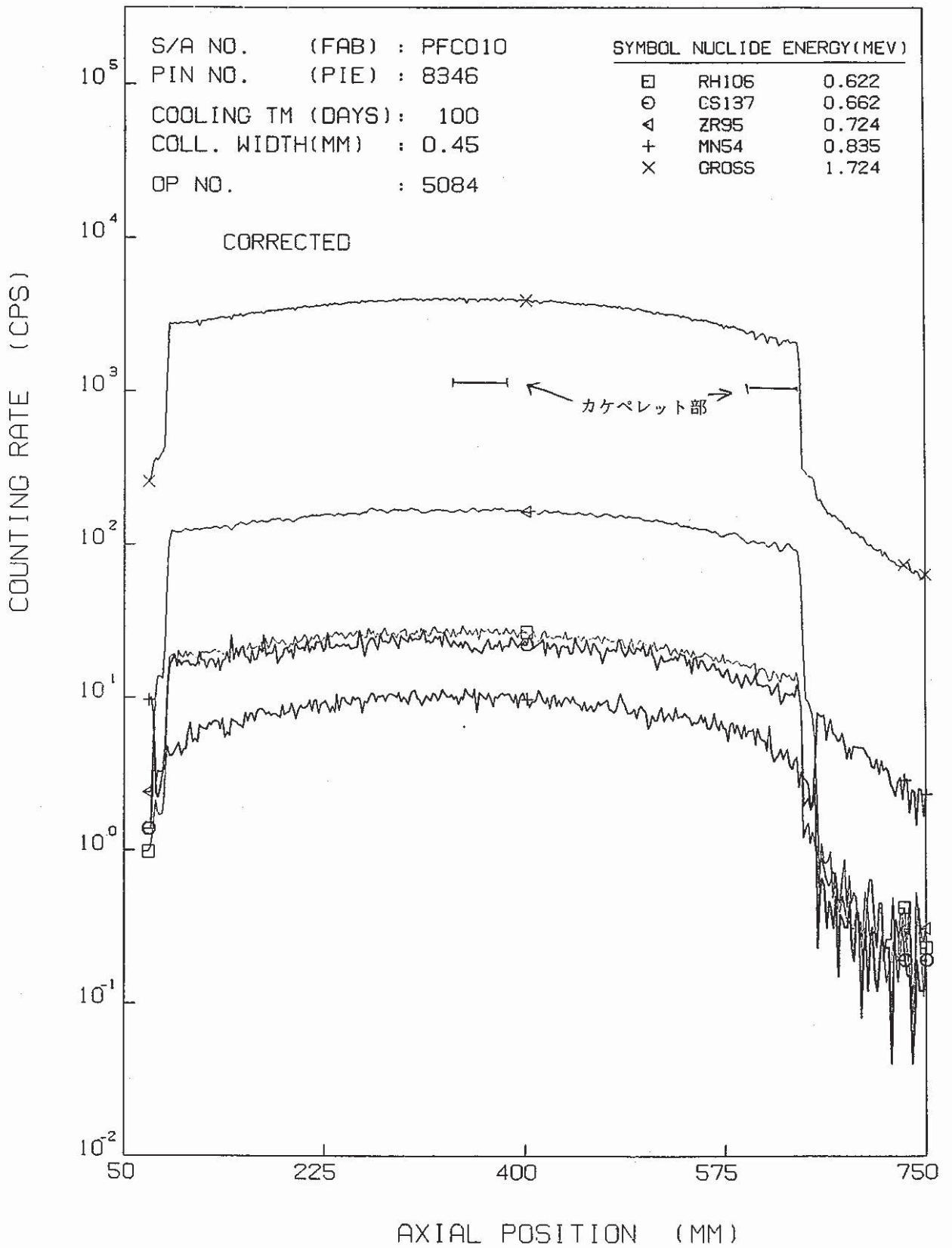
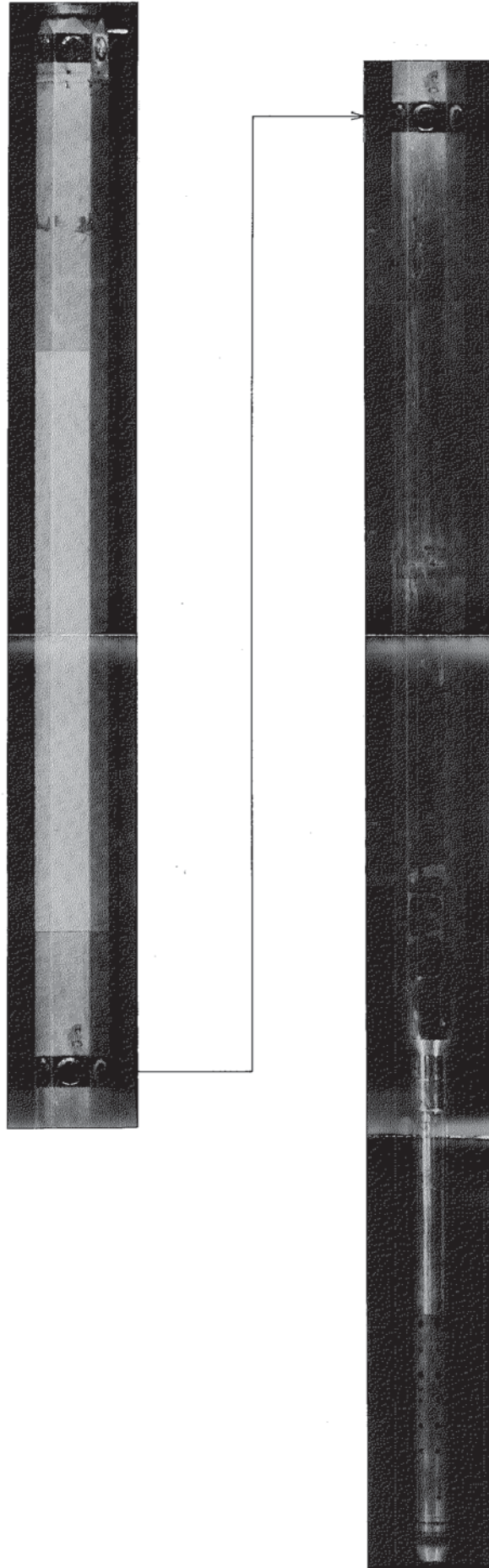


Fig. 24 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin. No. 8346)



(after)

FACE **F**

F851003

Photo.1 Surface Condition of the Subassembly after Sodium Removal

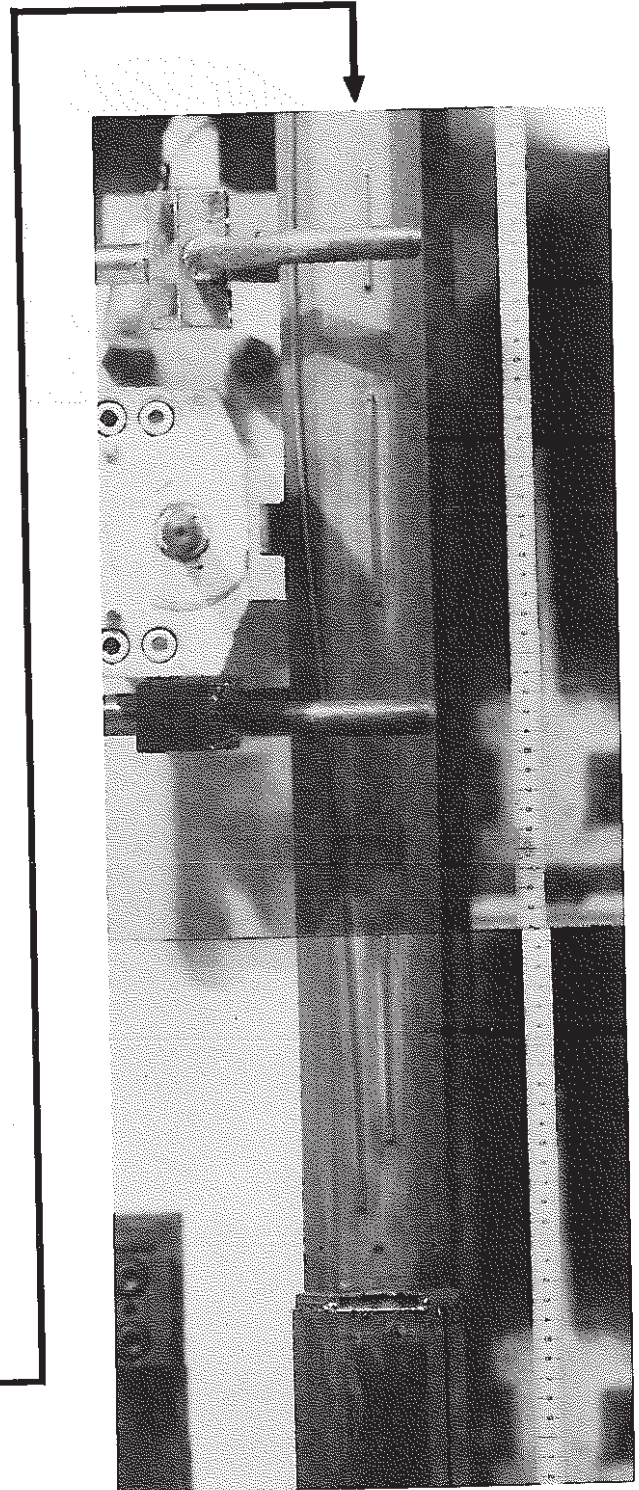
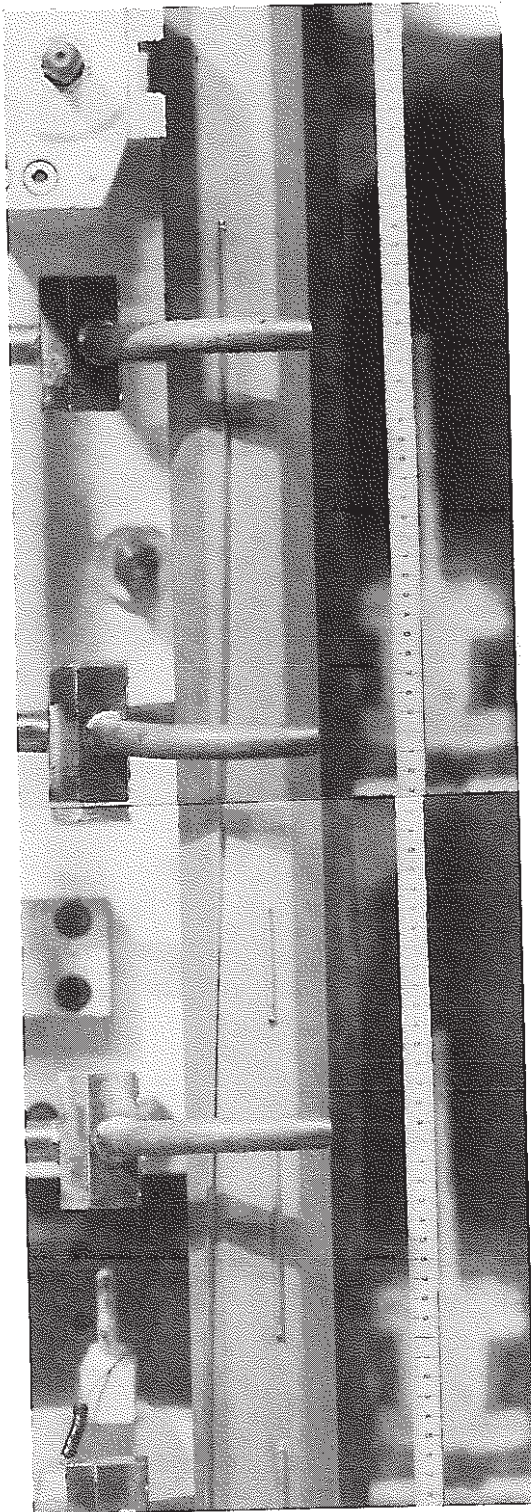


Photo.2 Surface Condition of Inner Wrapper Tube

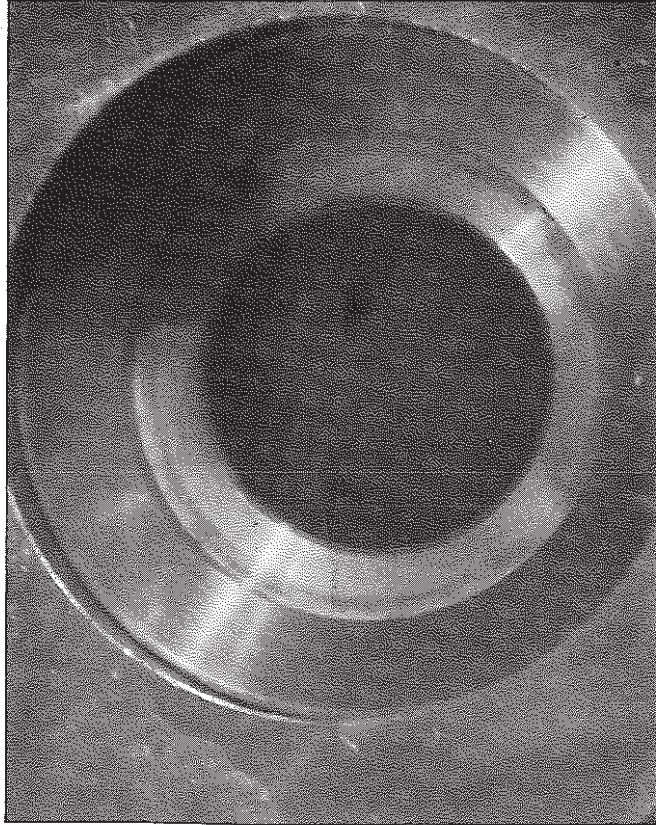
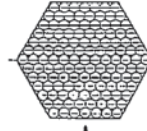
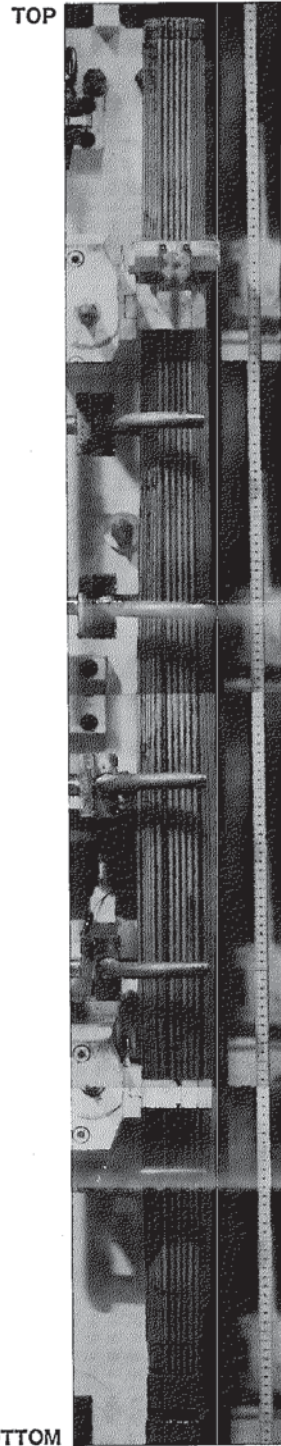


Photo.3 Surface Condition of Orifice



↑
VIEW FROM A FACE



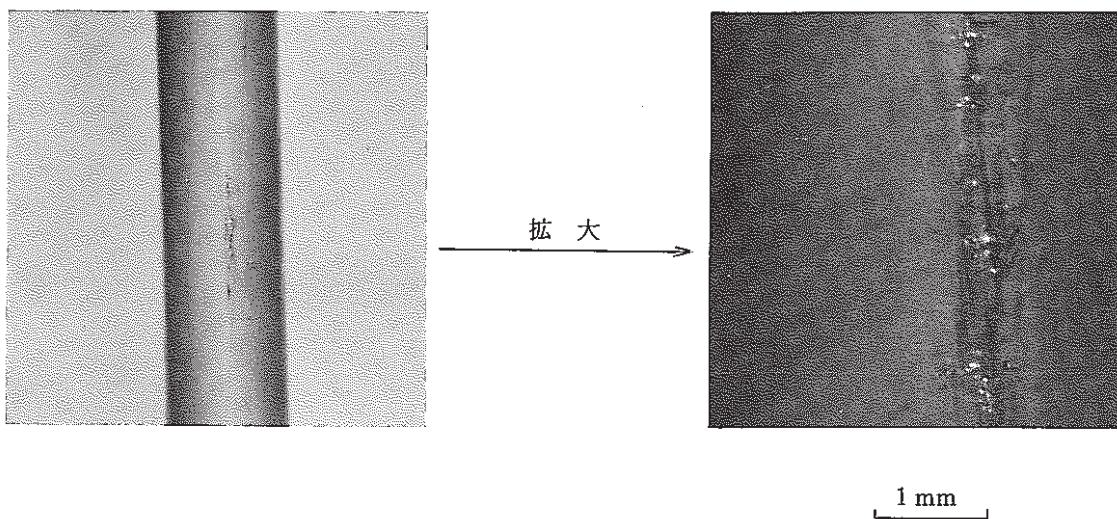
} 変色部
(8302ピン)

Row 1

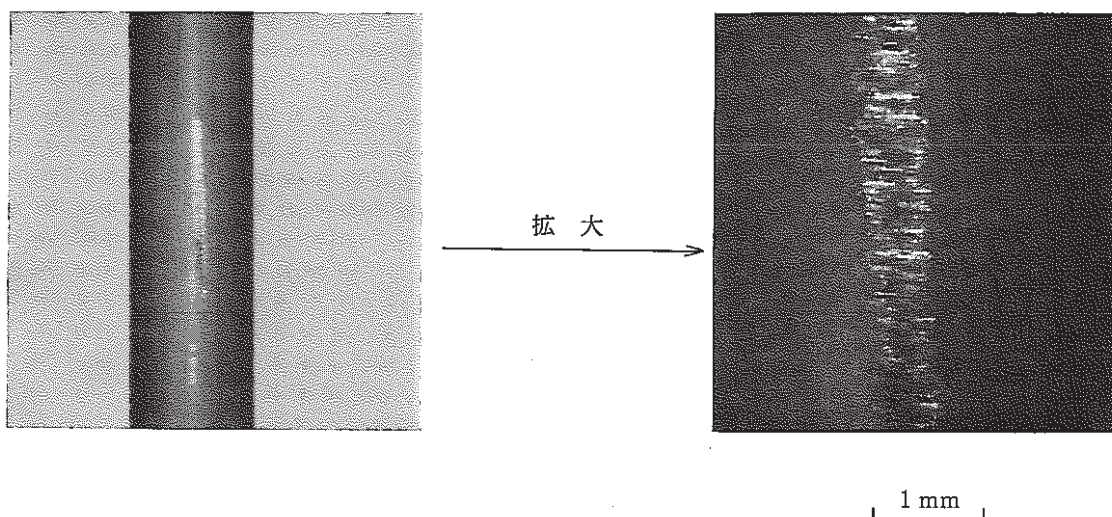
F853001

Photo.4 Surface Condition of Fuel Pin Bundle

PIN No. 8146 (PFD001 : MK - II 炉心燃料)



PIN No. 8335 (PFC010)



PIN No. 5327 PPJX 13 (MK - I 炉心燃料)

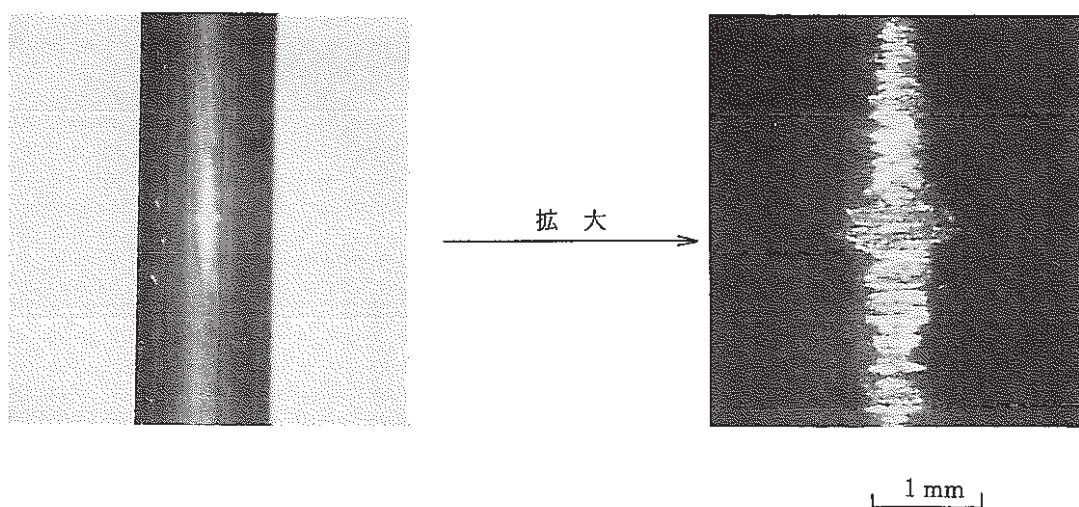
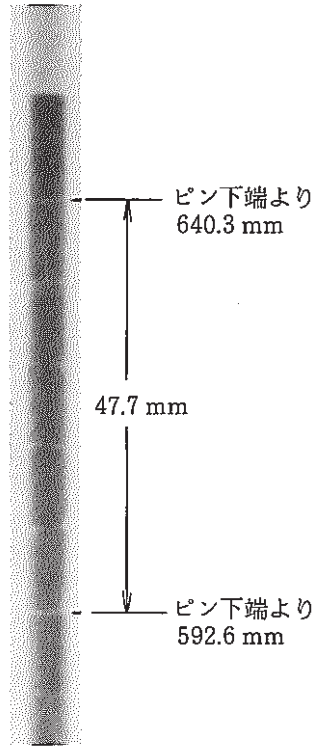
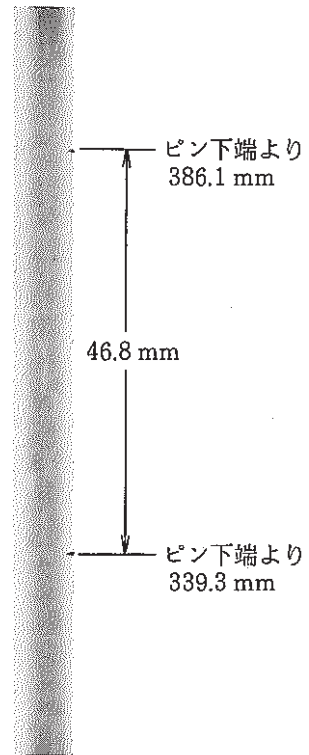


Photo.5 Wear Mark on Fuel Pin

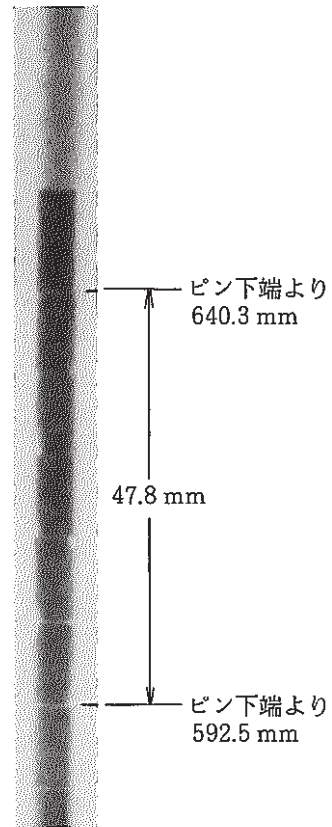
8345 ピン



8345 ピン



8346 ピン



8346 ピン

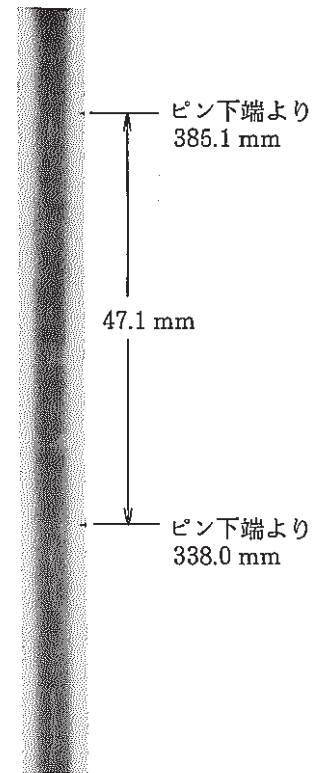
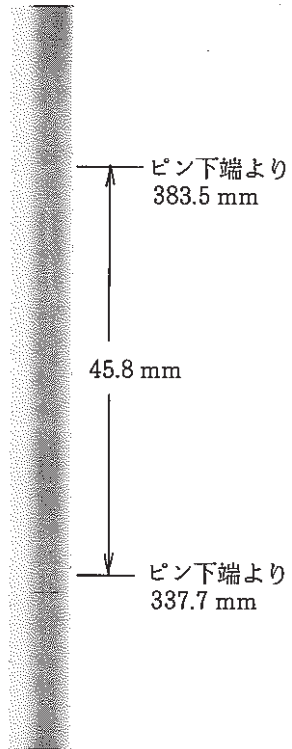


Photo.6 Constraction Condition inside of Fuel Pin by X-ray Radiography

8357 ピン



8336 ピン

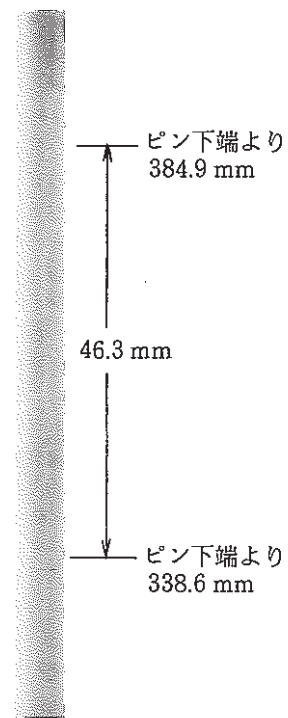


Photo.7 Continued