

「常陽」MK-II計測線付C型特殊燃料集合体
(PFI010)の照射後試験
—集合体及び燃料要素の非破壊試験—



1988年1月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 88-190

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)

1988年1月

「常陽」MK-II計測線付C型特殊燃料集合体(PFI010)の照射後試験 —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 西野入賢治 * 平澤 久夫 *

宇留鷺真一 * 長谷川正泰 *

要 旨

計測線付C型特殊燃料集合体(PFI010)の健全性確認及び照射中に計測したデータの精度確認に資するためのデータ取得を目的に照射後試験を実施した。試験は、集合体外観検査を始めとする集合体試験及びラスキャン、パンクチャ等燃料ピン試験である。本集合体は、100MW定格出力第8サイクルから第12"サイクルまで照射され、集合体平均燃焼度32400MWd/tである。本試験により以下の結果を得た。

1. 集合体及びピン表面に傷、付着物等の異常は観られなかったが、ピンの外れ、ノックバーの変形、計測線の曲りが観察された。
2. 計測線及び計測機器の外観検査の結果、冷却材温度測定用熱電対とラッピングワイヤとの接合部及び電磁流量計部には、傷及び変形はなく健全であることを確認した。又、パンクチャ試験結果において、照射中のFPガス圧計測データ(約2520 Torr-STP)と照射後の測定データ(約2543 Torr-STP)とが良く一致したことから、FPガス圧力計は正常に作動していたと判断できる。

* 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. 計測線付C型特殊燃料集合体の概略構造	2
3. 照射条件	4
3.1 炉内装荷位置	4
3.2 照射条件	4
4. 照射後試験計画	5
5. 照射後試験結果	6
5.1 試料の取扱い	6
5.2 集合体試験	6
5.2.1 外観検査	6
5.2.2 寸法測定	7
5.2.3 X線ラジオグラフィー	7
5.2.4 内側ラッパ管外観検査	8
5.2.5 冷却材入口ノズル部及びオリフィス部外観検査	8
5.2.6 電磁流量計部の内面観察	8
5.2.7 ハンドリングヘッド内面観察	8
5.2.8 計測線切断面の観察	8
5.3 燃料ピン試験	9
5.3.1 外観検査	9
5.3.2 X線ラジオグラフィー	9
5.3.3 詳細外観検査	9
5.3.4 寸法測定	9
5.3.5 ツスキャン	10
5.3.6 パンクチャ	10
6. 試験結果の検討	11
6.1 リグの取扱い及び健全性	11
6.2 計測線データの信頼性	12
7. まとめ	13
8. 参考文献	14

List of tables

	Page
Table I Fabrication Parameters	15
Table II Irradiation Conditions	16
Table III Fuel Stack Length Change	17
Table IV Results of Plenum Gas Analysis	18

List of figures

Fig. 1 Schematic view of the Subassembly (PFI010)	19
Fig. 2 In Reactor Location of the Subassembly	21
Fig. 3 Flow Diagram of Postirradiation Examinations	22
Fig. 4 Fuel pin Selected for each Postirradiation Examination	23
Fig. 5 Axial Profile of Face to Face Distance (Face C-F)	24
Fig. 6 Axial Profile of Face to Face Distance (Face B-E)	25
Fig. 7 Axial Profile of Face to Face Distance (Face A-D)	26
Fig. 8 Axial Profile of Wrapper Tube Bowing	27
Fig. 9 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. A518)	28
Fig. 10 Vector of Pin Bowing in the Diameter	29
Fig. 11 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A516)..	30
Fig. 12 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A501)..	31
Fig. 13 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A537)..	32
Fig. 14 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A504)..	33
Fig. 15 Fission Gas Release Rate as a Function of the Subassembly Average Burnup	34
Fig. 16 Temperature of Core Center	35
Fig. 17 Comparison of F.P Gas Pressure between In and After Irradiation	36

List of photographs

	Page
Photo. 1 Surface Condition of Subassembly	37
Photo. 2 X-ray Radiography of Subassembly	39
Photo. 3 Surface Condition of Inner Wrapper Tube	41
Photo. 4 Surface Condition of Nozzle	43
Photo. 5 Surface Condition of Orifice	43
Photo. 6 Inside Condition of Magnet for Measuring Flow Rate	45
Photo. 7 Inside Condition of the Handring Head	47
Photo. 8 Condition of Cable	47
Photo. 9 Surface Condition of pin Bundle	49
Photo. 10 Condition of a pin Comming off the Knock-Bar	51
Photo. 11 Condition of Knock-Bar	51
Photo. 12 X-ray Radiography of pins	53

1. まえがき

燃料、材料の開発には、その照射挙動を正確に把握する必要がある。そのため、従来から燃焼の各段階毎に照射リグを炉外へ取出し、照射後試験を通して照射挙動データの蓄積を図って来た。

しかし、この方法では、照射の累積した挙動を炉外で測定あるいは観察することになり炉内での照射挙動は、炉外でのデータをもとに間接的に推定する他なかった。このため、炉内での照射挙動を直接把握することを目的に計測線付C型特殊燃料集合体（以下INTA-1と呼ぶ）が開発された。INTA-1は、照射中の燃料温度、冷却材流量、FPガス圧等をオンラインで計測するため、センサの開発、信号の取出し方法の開発及びリグ構造の確立を主テーマとして昭和47年度より開発が開始され、昭和59年に実験炉部照射課にて組立を終了し、炉内に設置され照射されたものである。

照射燃料集合体試験室（FMS）では、照射中に計測されたデータの信頼性及び構造設計の妥当性を確認することを目的に照射後試験を実施した。

2. 計測線付C型特殊燃料集合体の概略構造

INTA-1は、炉心中心に挿入される試料部集合体と、試料部集合体内の中性子束、燃料温度、ピン内圧力及び冷却材流量を測定する検出器、検出器、検出器から引き出される計測線を炉外へ接続し、かつ試料部集合体を炉心の所定の位置に支持させる保持装置、そして試料部集合体を含む全体を炉心下端に保持し冷却材を導入する下部案内管よりなる。

今回照射後試験に供されたのは、この内試料部集合体である。試料部集合体（以降「集合体」と呼ぶ）には、「もんじゅ」タイプの燃料ピン34本及び模擬燃料ピン3本の計37本が、内側六角管、外側六角から成る2重管構造物の中にバンドル状態で収納されており、その上部にハンドリングヘッド及び下部にノズル、オリフィスを備えている。

集合体全長は、約2250mmであり、最大外径は、ハンドリングヘッドで78mmØである。

INTA-1に使用されている計測器は、電磁流量計、中性子検出器、FPガス圧計、冷却材温度計、熱料中心温度計の5種類である。電磁流量計は、冷却材流量を測定するために2個の永久磁石（磁束密度1.4Kガウス）が、集合体冷却材入口ノズル上部に組込まれている。磁場内をナトリウムが流れることにより発生した電圧は、計測線により保持装置を通過し、炉外記録計に導かれる。電磁流量計の測定範囲は0～3kg/sec(at 370°C)である。中性子検出器は、炉心中心部の中性子照射量を測定するために、小型核分裂電離箱型中性子検出器を、模擬燃料ピン上部に装着している。検出器外径は燃料ピン外径と同じ6.5mmØと小型で測定範囲は、最大 $2 \times 10^{15} n/cm^2 \cdot sec$ である。

FPガス圧力計は、ピン内に放出されたFPガスの圧力を測定するために、ベローズシール型ヌルバランス圧力計を、燃料ピン上部に装着している。この圧力計は、温度、中性子照射に対して安定で0～35kg/cm²の圧力を測定できる。ナトリウムの温度を測定するために、熱電対（クロメル/アルメル）を導くシーズ管とワイヤを溶接し、炉心中心に相当する軸位置より上部に熱電対が対応するよう、ラッピングワイヤ状に燃料ピンに巻き付けてある。燃料中心温度計は、燃料ペレット内の温度を測定するために熱電対（タングステン/レニウム）を中空ペレット内の中空部に挿入している。測定温度は2300°Cまで使用できる。

燃料ピンは、内側六角管内で、フック型ノックバーと組合からなる支持格子により固定されており、計測線付きのものは、13本ある。その種類と本数は、FPガス圧測定用燃料ピン2本、中心測度測定用燃料ピン4本、冷却材温度測定用燃料ピン4本（3本は、中心測度測定用燃料ピンを使用）、入口温度測定用燃料ピン1本、出口温度測定用燃料ピン2本、電磁流量計用計測線導入ピン1本、中性子検出用模擬燃料ピン2本の7種類である。

被覆管は、全て外径6.5mm、内径5.56mm、肉厚0.47mmのSUS316相当ステンレス鋼で20

%冷間加工を施してある。

ピン内部は、ウラン・プルトニウム混合酸化物ペレット 550 mmを中央に配し、その上下に劣化ウラン酸化物インシュレータペレットを 8 mm、さらにインシュレータペレットの上下に夫々長さ 52 mm、112 mmの反射体があり、上部にはプレナムスプリングと抑え板付プレナムスリーブを収納したガスプレナム部を構成している。なお、燃料中心温度測定ピンには、熱電対を挿入するため、燃料ペレット及び上部インシュレータペレットの中央に直径 1.9 mmの空孔のある中空ペレットを収納している。

集合体の概略図を Fig1 に、仕様⁽¹⁾を Table I に示す。

3. 照射条件

3.1 炉内装荷位置

試料部集合体（PFI010）は、100 MW第8サイクルから第12[”]サイクルまでの期間照射された。INTA-1は、その計測線と格納容器内で他の燃料集合体の交換、移送の位置決めを行う回転プラグと干渉しないようするため、回転プラグ駆動時に上部案内機構内に引き上げる必要がある。従ってこの上部案内機構部と接続可能である5F2（制御棒予備孔）に装荷された。5F2は、内側反射体領域であり、炉心燃料集合体及び内側反射体それぞれ3体と接する。

炉内装荷位置をFig 2に示す。

3.2 照射条件

集合体平均燃焼度は、32400 MWd/t、集合体平均線出力は、290 W/cm（BOC）である。

各サイクルでの照射条件⁽²⁾をTable IIに示す。

4. 照射後試験計画

試料部集合体燃料ピンは、「もんじゅ」炉心燃料ピンとほぼ同一仕様の特殊燃料ピンが収納されている。「もんじゅ」仕様ピンは、これまでC型特殊燃料集合体およびA型特殊燃料集合体に組み込まれ、本集合体の燃焼度レベルまでの健全性が確認されている。したがって、照射後試験計画は、照射リグとしての取扱い性及び健全性の確認、並びに照射中に計測したデータの精度確認に資するためのセンサーの健全性確認に主眼を置き、照射後試験を実施した。

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…………… 表面状態の観察。
- (2) 寸法測定…………… 外側ラッパ管の寸法形状変化の測定（対面間距離、曲り）。
- (3) X線ラジオグラフィー…… 内部状況の観察、特に電磁流量計のカケ、ワレ等の有無の観察及び計測線切断状態の観察。
- (4) 内側ラッパ管外観検査…… 外表面に残されたナトリウム液面位置の観察。
- (5) 冷却材入口ノズル部及びオリフィス部外観検査…… 表面状態の観察。特にオリフィス出口付近のキャビテーションの有無観察。
- (6) 電磁流量計部の内面観察…… 電磁流量計装着部の冷却材流路表面状態（変形、付着物等）の観察。
- (7) ハンドリングヘッド 内面観察…… 計測線付集合体を取扱う上での特有な傷の発生有無観察。
- (8) 計測線切断状況の観察…… 切断状態観察。

2) 燃料ピン試験

- (1) 外観検査…………… 表面状態の観察。
- (2) X線ラジオグラフィー…… 内部状態の観察。
- (3) 詳細外観検査…………… シース管とワイヤの接合状態の観察。
- (4) 寸法測定…………… 寸法形状変化の測定（外径、曲り、全長）
- (5) アスキャン…………… 軸方向および径方向のFP分布の観察。
- (6) パンクチャ…………… ピン内ガス圧、ガス放出率の測定。

Fig 3 に照射後試験フローを示す。また、ピン試験を Fig 4 に示す。

5. 照射後試験結果

5.1 試料の取扱い

本集合体は、炉内のナトリウム液位跡が残っているラッパ管内面を観察するため、ナトリウム洗浄は実施せず、拭き取りによりナトリウムを除去しながら解体することとした。構造は、Fig 1 に示すように外側ラッパ管と内側ラッパ管の二重構造で、それぞれが上部で溶接されているため、外側ラッパ管だけを分離して上方向に引き抜くことは不可能である。したがって、組立部中心の軸位置で、エンドミルを用いて削り、両ラッパ管を同時に引き抜いた。ラッパ管引抜力は、引き抜き開始時が最大を示し 130 kgf で以後は約 20 kgf であった。その後、内側ラッパ管及び外側ラッパ管溶接部を切断し両ラッパ管を分離した。したがって内側ラッパ管は、ノズル及びハンドリングヘッドと切り離された状態となり集合体寸法測定装置に据え付けることができず、内側ラッパ管の寸法形状測定は実施できなかった。

さらに、照射中の流力振動による計測線の破損を防止するため計測線を数本づつハンドリングヘッド内 3箇所に区分けし固定するケーブル固定具は、ラッパ管引き抜き時に計測線に損傷を与えないために前もって取外す手順であったが、ケーブル固定具のネジ部とハンドリングヘッド側ネジ部とがナトリウムの付着によってカジリ、ケーブル固定具を取外すことができなかった。

ラッパ管引き抜き後の燃料ピンの取出しは、ピンを切斷せずにフック型ノックバーを切断することで容易に行えた。

解体された部材のうち、電磁流量計部、ノズル部の外観検査試料及び磁束密度測定、硬さ試験試料を採取した。燃料ピンについては、熱電対とラッピングワイヤー接続部の金相、引張り試験試料、計測線の硬さ試験試料、燃焼率測定用試料を採取し、照射材料試験室、技術開発室及び、照射燃料試験室に搬出した。

5.2 集合体試験

5.2.1 外観検査

内側ラッパ管表面のナトリウム液面の痕跡を観察するため、ナトリウム洗浄は行わなかった。そのためナトリウム除去前の状態で外観検査を実施した。

集合体外観検査を Photo 1 に示す。

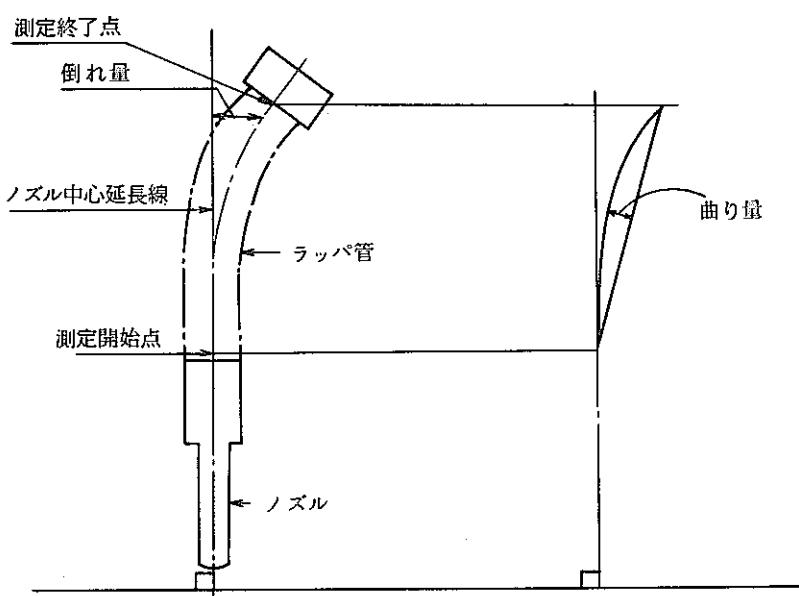
集合体表面、パッド部、冷却材入口ノズル、球面座及び外側ラッパ管とノズルとの接続溶接部等は、ナトリウムが粒状に付着していたが、傷、変形等の損傷はなかった。

5.2.2 寸法測定

集合体の断面形状は Fig 1 に示すように、ラッパ管が 6 角形状でハンドリングヘッド部が円筒形状である。寸法測定は円筒形状のものに対しては、その直径を 1 対のウェッヂ型接触子で、6 角形状のものに対しては対面間距離を 3 対の先端が球状になった接触子で測定している。従って、断面形状が異なるものについては、接触子を交換しないと測定ができず、接触子を交換する場合は、マスター ゲージで調整をし直す必要があり、同時期に測定はできない。従って測定範囲はラッパ管部のみとした。測定の結果、外側ラッパ管の対面間距離は、最大 6.1.0.8 mm であり製造時の値との差は、有意差 ± 0.1 mm 以下であった。

照射前の曲り量は、定盤上に集合体を横置きにし、ラッパ管表面にダイヤルゲージ（測定精度 ± 0.1 mm）を接触させ高さ量を 6 面について測定したものである。

よって、照射後においても、下図のように集合体を立て、ノズル中心の延長線に対してラッパ管の倒れ量を軸方向位置に従い測定し、その結果を曲線で結び、さらに測定開始点と終了点とを直線で結び、直線との距離を算出し照射前データと比較した。



その結果、各面とも ± 0.1 mm 以内（有意差 ± 0.3 mm）の差で一致し、照射による曲り量の変化は、認められなかった。

5.2.3 X 線ラジオグラフィー

X 線ラジオグラフィーを Photo 2 に示す。

本集合体の X 線ラジオグラフィーは、内側六角管と外側六角管のギャップ内残留ナトリウムの有無及び電磁流量計磁石のカケ、ワレの有無並びに計測線の「常陽」における切断状況を観察するため、 0° 、 60° 及び 300° の 3 方向から撮影した。その結果、ナトリウムの残留、電磁

流量計のカケ、ワレ及び集合体内部への異物の混入は、観られなかった。計測線の切断状況は、切断された端部が一様に内側に曲り切断長さに違いは観られなかった。しかし、F Pガス圧測定用燃料ピン2本（A 532, A 517）の計測線が上部端栓から多少曲っているのが観られた。

5.2.4 内側ラッパ管外観検査

内側ラッパ管外観写真を Photo 3 に示す。

ラッパ管表面に外側ラッパ管から引抜く際切断バリによってついたと思われる浅い縦方向の傷が観察された他は、特異な傷、変形等はなかった。

ナトリウム液面は、冷却材入口ノズル下端から約 580 ㍉位置に境界が観られた。

5.2.5 冷却材入口ノズル部及びオリフィス部外観検査

Photo 4 及び Photo 5 に示す。

ノズル部は、下部案内管に保持されることからノズル表面には、集合体の外側流路を確保するため溝が設けてある。ノズル部には、試料部集合体の全重量がかかった状態で下部案内管と接触した場合に生じる傷防止、炉内使用中におこる同金属どうしの融着防止、及び冷却材が流れる時の抵抗によって傷つくことを防止するためにコルモノイ（ニッケル基合金）⁽³⁾ 相当溶射を施し硬度を 800 Hv としている。この部分の傷、変色等の有無を観察した結果、ノズル上部球面座にすり跡が観察された。

オリフィスは、集合体への冷却材流量を調節する目的で設けてある。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の有無を観察したが、目視観察上特異なものは観察されなかった。

5.2.6 電磁流量計部の内面観察

内面写真を Photo 6 に示す。

電磁流量計は、集合体内のナトリウム流量を測定するもので永久磁石が使用されている。内面観察の結果、カケ、ワレ、変色及び付着物も観られず、健全な状態であった。

5.2.7 ハンドリングヘッド内面観察

内面写真を Photo 7 に示す。

他の集合体のハンドリングヘッド内面同様集合体を取扱う時に使用する集合体グリッパーの接触で生じたと思われるわずかなすり傷が観られたが、その他特異と思われる変色、変形等は観られなかった。

5.2.8 計測線切断面の観察

ハンドリングヘッド除去後の計測線の状況を観察した。計測線の状況を Photo 8 に示す。

計測線は、すべて内側に押されるように曲っている。切断面は、計測線を斜め上から一瞬のうちに切断されたごとく鋭角であり、計測線によって切り口が異なるといったことは観られなかった。

5.3 燃料ピン試験

5.3.1 外観検査

バンドル状態での外観写真を Photo 9 に示す。

炉心部付近に相当する軸位置の被覆管表面に黒変色及び、残留湾曲が全ピン共観られたが、傷及びラッピングワイヤのゆるみは観られなかった。

しかし、Photo 10 に示すように計測線の付いていない A 531 ピンが、ピンを保持していたフック型ノックバーから外れているのを確認した。また Photo 11 に示すように、FPガス圧測定用ピン 2 本のうち 1 本 (A 517) のフック型ノックバーに変形が観られた。

5.3.2 X 線ラジオグラフィー

全ピンの X 線ラジオグラフィー写真を撮影した。中心列に位置する計測線付ピンと無計測ピンの内部状況を Photo 12 に 1 例として示す。

全ピン共、燃料ペレット、インシュレータペレット等内部構成部材の配列に乱れは観られなかった。しかし、一部スプリング長の減少（へたり）が、無計測ピン 24 本中 14 本、FPガス圧測定用ピン 2 本、出口温度測定用ピン 1 本計 17 本のピンに観察された。スタック長の変化量は、製造時と比較して -5.8 mm から +4.4 mm の範囲にあり、平均で約 -0.5 mm の変化であった。スタック長の変化をペレットロット別に比較するとロット No. TIM 003 及び TIM 004 ペレットは伸び、ロット No. TIM 007 及び TIM 008 は縮んでいる。

燃料スタック長の測定結果を Table III に示す。

中実ペレットは、全ピン共軸方向全域にわたり中心空孔が明確観察された。この他、燃料中心温度測定用ピン (A 508, A 513, A 518, A 519) の中空ペレット部に挿入されている熱電対の状況を観察した。X 線ラジオグラフからは、断線、シース部の融着は観察できなかった。

5.3.3 詳細外観検査

冷却材温度及び入口温度測定用計測線付ピンの熱電対を導くシース管とラッピングワイヤとの溶接状況を観察した。全ピンとも溶接部表面に傷、ワレ等は観られなかった。また隣接ピンのラッピングワイヤとの接触によって発生する被覆管表面のすり跡は、最大巾 0.5 mm、長さ 0.8 mm で、従来照射後試験に供された C 型特殊燃料集合体 (PFC 020) に比べ、最大巾は約 1/2、長さは、約 1/9 程度であった。

5.3.4 寸法測定

燃料中心温度測定用ピン (A 518) の全長及び外径を測定し、製造時データと比較した結果、いずれも有意差 (全長 ± 0.5 mm、外径 ± 10 μm) 以内であった。

外径測定結果を Fig 9 に示す。

冷却材温度測定用ピン（A 504, A 513, A 519）及び熱料中心温度測定用ピン（A 508, A 513, A 519）の4本について曲りを測定した結果、集合体で一番外側に位置するA 504ピンの曲りが最大であり、その量は10mmで、方向は、220°であった。

曲り測定結果Fig 10に示す。

5.3.5 ツスキャン

中空ペレット燃料と中実ペレット燃料照射挙動の相異を観察するため、中実ペレットが挿入されている冷却材温度測定用ピン（A 504）及び無計測ピン（A 501, A 516, A 522, A 525, A 534, A 537）と中空ペレットが挿入されている燃料中心温度測定用ピン（A 508, A 513, A 518, A 519）について、軸方向のFP核種等の強度分布を測定した。燃料の出力分布を示す⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Rhの分布は、中空ペレット部と中実ペレット部のPu富化度が同一のため、中空ペレットの断面積と中実ペレットの断面積との比（0.9）にほぼ比例して中空ペレット部の計数値が落ち込んでいるのが観察されたが、炉心燃料部の軸方向に連続的なカーブを描いていた。

また、軸方向の⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Rhのγ線計数率の最大値と平均値から求めたピーキング係数は、共に約1.12であった。

¹³⁷Csの挙動は、軸方向プロファイルから燃料部上下への移動、蓄積が、またトモグラフィー結果では、¹³⁷Csが燃料ペレット外周及び燃料ペレットと被覆間のギャップへの移動、蓄積が観られた。特徴的なこととして、ペレットロットNo.TIM 007, 又は、TIM 008の装荷ピンでは、燃料部中央のペレット境界部に¹³⁷Csが多く分布している。

軸方向強度分布をペレットロット別にFig 11からFig 14に示す。

5.3.6 パンクチャ

照射中のFPガス圧計測データの精度確認を目的にFPガス圧測定用ピン（A 517, A 532）とリファレンスとして、冷却材温度測定用ピン（A 504），無計測ピン（A 516, A 525, A 537）の計6本について、プレナムガス圧測定及びガス分析を実施した。

プレナムガス圧は、2414 Torrから2839Torr（0°C）の範囲であった。

ガス分析の結果ガス成分比平均は、Xe / Kr = 7.6であった。

ガス放出率は、41.1%から52.8%⁽⁴⁾の範囲であった。

測定結果をTable N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Fig 15に示す。

6. 試験結果の検討

6.1 リグの取扱い及び健全性

INTAの取扱いは、今回が初めてであった。

通常の炉心構成要素と大きく異なる点は、エントランスノズル部の形状が短く細いということ、さらに、下部に非常に強力な磁石を備えていること、そしてハンドリングヘッド部内に切断された計測線が束になっていることである。

エントランスノズル部の形状に対しては、エントランスノズル部受け台専用治具を、キャスクカバー、集合体寸法測定装置、解体機にそれぞれに製作し、取扱いを可能にした。

磁石に対しては、フェライト製の治具類の使用を禁止するとともに、寸法測定では、渦電流測定検出器への影響が無いことをコールドで充分に確認後、照射後試験を実施した。また、切断切り粉が極力付着しないように取扱いを注意した。

ハンドリングヘッド部内切断計測線束に対しては、解体のラッパ管引抜き時に計測線に損傷を与えないように、前もってケーブル固定具（照射中の流力振動による計測線の破損を防止するため計測線を数本づつ、ハンドリングヘッド内3ヶ所に区分けしている固定具）を取り外す手順で作業を進めたが、ケーブル固定具は、ボルト型で4mmφと小さいうえ、ナトリウムの付着により、ケーブル固定具ネジ部とハンドリングヘッド側ネジ部とがカジリ、ケーブル固定具を回すことができず取外せなかった。そのため、取付けた状態でハンドリングヘッド付ラッパ管を引抜いた。この結果計測線上部がケーブル固定に引っかかり切断あるいは、変形させ計測線の状況、切断面の状態が観察できなくなる恐れがあったが、今回はこれによる切断、変形はなかった。

以上のように一部予定通りの作業はできなかったが、十分な準備、治具対応をもって作業を行った事により、取扱い性に劣るといった事はなかった。

構造の健全性については、照射後試験を実施しながら確認していった。先ず、X線ラジオグラフィーでは、FPガス圧測定用燃料ピンの計測線に曲りが観察され、またバンドル状態での外観検査では、ピンの外れ、フック型ノックバーの変形が観られた。計測線の曲りは、計測線切断用カッタで押し切りする時の力が加わったためと考えられる。

このように当初予想していない現象が発生していたが、ラッパ管表面、ハンドリングヘッド内面及びコルモノイ溶射部表面には、大きな傷、変形はなく、オリフィス部にはキャビテーションの発生は観られなかった。さらに計測線は、全て内側に一様に曲り切り口は鋭角であり、「常陽」側での計測線切断機能も正常に働き健全な状態で炉内から取り出すことができている。

以上のことから、構造については特に長尺ということで組立性の観点から、再検討が必要と考えられる。

6.2 計測データの信頼性

内側六角管外観検査で、ナトリウムの液面が当初考えられていた冷却材入口ノズル下端から約400mm位置よりさらに180mm上の位置まで達していた。冷却材温度評価をする際には、ナトリウム液面上昇分の温度補正を考慮することが必要と考えられる。

F P核種強度分布は、正常なプロファイルを示し、軸方向ピーキング係数も運転監視コード「MAG I」の計算結果(1.17から1.41 BOC)と良く一致し、炉内で正常に燃焼したと考えられ、計測データに影響を及ぼすことは少ないと考える。しかし燃料中心温度測定データのうちFig 16に示すようにA 518に限り、 10^{21} nvt以上の熱中性子照射量によって損傷し計測できなくなるであろうとの予想に反し、計測が継続されている。原因を探るため熱電対素線の抵抗値測定を行う事を考えたが、素線が照射の影響でもろく、かつ遠隔で細かい取扱いができないため照射後試験では確認できなかった。

軸方向スキャンでは、燃料ペレット上下及びピン上部への ^{137}Cs の移動、蓄積が認められた。これらCsの移動蓄積が計測線あるいは、計測データに対しどのように影響するか、電磁流量計及び中性子検出器の性能確認とあわせて、破壊試験によって確認される予定である。

F Pガス放出率を燃料ピン別に比較すると、燃料中心温度が高い方がF Pガス放出率も大きくなる傾向にある。「常陽」計算コード“SATURN-C”によって算出した燃料中心温度及びパンクチャ試験で測定されたF Pガス放出率は、それぞれA 504ピンで、1976°C, 52.74% A 517ピンでは、1920°C, 48.02%, A 532ピンでは、1876°C, 45.36%である。6%である。

このように、計算による燃料中心温度とF Pガス放出率の傾向は良く一致し、相方とも信頼できるものと考える。さらにF Pガス圧にも有意な差はなく、Fig 17に示すように照射中計測データ(約11 kg/cm²をTorr単位に換算すると約2520 Torr 0°C)と良く一致しており、照射中のF Pガス圧力測定も正常に行われていたものと考える。

7. まとめ

「常陽」 MK-II 照射炉心 100 MW 定格出力第 8 サイクルから第 12" サイクルまで照射された計測線付 C 型特殊燃料集合体「PFI 010」（集合体平均燃焼度 32400 MW d/t）の照射後試験を実施した。計測線付 C 型特殊燃料集合体の照射後試験は、今回が最初であり、計測線付集合体としての健全性の確認及び照射中に計測したデータの精度確認に資するためのデータ取得を行ったものである。

本試験により以下の結果を得た。

- 1) コルモノイ溶射部を含む集合体表面に傷、変色はなく、また外径形状にも変化はなかった。
- 2) 燃料ピンのフック型ノックバーからの外れ、ノックバーの変形及び、FPガス圧測定用計測線の上部の曲りが観察されたが、バンドルの乱れ、ピンの外径形状及び表面状態に異常はなかった。
- 3) 計測線の切り口は、鋭角で内側に曲るように切断されており、「常陽」での計測線切断機能が正常に働いたことが確認された。
- 4) 冷却材温度測定用の熱電対とラッピングワイヤとの接合部及び電磁流量計磁石挿入部表面に傷は観られなかった。
- 5) 燃料中心温度測定用ピン内にあるトランジション部（補償導線と素線との接合部）に¹³⁷Cs が観られた。
- 6) FPガス圧は、照射中計測データ（約 2520 Torr - STP）と照射後試験での測定値（約 2543 Torr - STP）とが良く一致した。

8. 参考文献

- | | |
|--|---------------------------|
| 1) 適速実験炉, 設計及び工事の方法の認可申請書 | 5 9 動燃 (高速) 0 0 5 |
| 2) 「常陽」照射試験サイクル報 (第 1 2 ^回 サイクル) | P N C S N 9 3 6 0 86-004 |
| 3) 表面硬化材のナトリウ試験 (VII) | P N C S N 9 4 1 8 5 - 7 7 |
| 4) A E S テクニカルメモ | 8 3 - A E S - 6 6 |

Table I Fabrication Parameters

項 目	II 型 計 測 照 射 用 C 型 特 殊 燃 料 集 合 体
集合体材質, 形状	SUS-316, 六角形
ラッパ管外側対辺間距離 (mm)	(内側) 54.5
ラッパ管内側対辺間距離 (mm)	(内側) 50.1
ラッパ管肉厚 (mm)	(内側) 2.2
燃料要素配列, ピッチ (mm)	7.88
集合体当り要素数 (本)	34
被覆管材質	SUS-316
被覆管外径 (mm)	6.5
被覆管内径 (mm)	5.56
ワイヤ直径 (mm)	1.32
ワイヤ巻ピッチ (mm)	3.02
ペレット直径 (mm)	5.4
ペレット材質	(Pu, U) O ₂
燃料密度 (%T-D)	85
O/M比	1.97
核分裂性物質含有率	46.9
核分裂性物質とは, ²³⁵ U, ²³⁹ Pu 及び ²⁴¹ Pu とする。	
核分裂性物質量 (kg)	

Table II Irradiation Conditions

計測線付燃料集合体

計画番号 INTA-1

集合体番号 PFI 010

サ イ ク ル			8	9	10	11	12	12'	12"	12'''
装 荷 位 置			5 F 2							
燃 烧 度	ポ イ ン ト 最 大	MWD / T	7600	14900	22300	29600	36500	36600	36700	36800
	集 合 体 平 均	MWD / T	6700	13100	19600	26100	32200	32300	32400	32400
中 性 子 照 射 量	En \geq 0.1 Mev.	ポ イ ン ト 最 大	$\times 10^{20} n/cm^2$	50.4	98.8	149	198	245	246	246
		集 合 体 平 均	$\times 10^{20} n/cm^2$	42.3	82.9	125	166	206	206	207
	Total	ポ イ ン ト 最 大	$\times 10^{20} n/cm^2$	81.6	160	242	322	399	400	401
		集 合 体 平 均	$\times 10^{20} n/cm^2$	70.1	138	208	277	342	343	344
線 出 力	B O C	ポ イ ン ト 最 大	W / cm	—	—	—	—	—	—	—
		集 合 体 平 均	W / cm	290	286	281	279	268	272	80.5
	B O C	ポ イ ン ト 最 大	W / cm	—	—	—	—	—	—	—
		集 合 体 平 均	W / cm	290	287	282	279	268	272	80.5
被 覆 管 最 高 温 度	B O C		°C	—	—	—	—	—	—	—
	B O C		°C	—	—	—	—	—	—	—
燃 料 最 高 温 度	B O C		°C	—	—	—	—	—	—	—
	B O C		°C	—	—	—	—	—	—	—
集 合 体 出 口 温 度	B O C		°C	456	454	453	453	451	452	395
	B O C		°C	456	454	453	453	452	452	387
ピーキング係数	B O C	径 方 向	—	—	—	—	—	—	—	—
		軸 方 向	—	1.138	1.136	1.135	1.131	1.132	1.117	1.124
	B O C	径 方 向	—	—	—	—	—	—	—	—
		軸 方 向	—	1.129	1.128	1.127	1.122	1.123	1.117	1.124
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	5.0	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0
	E O C		kg/sec	5.0	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0
備 考										

Table III Fuel Stack Length Change

ビン No	スタック長 (mm)±0.5 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 (%) PIA-FAB/FAB	※1 ペレット Lot. No.
A 5 0 7	550.2	546.3	2.9	0.5	TIM 004
A 5 1 1	551.7	548.2	3.5	0.6	"
A 5 1 2	558.7	554.3	4.4	0.8	TIM 003
A 5 1 3	552.5	550.8	1.7	0.3	"
A 5 1 4	546.3	550.9	-4.6	0.8	TIM 007
A 5 1 5	542.5	546.2	-3.7	0.7	"
A 5 1 6	545.6	550.0	-4.4	0.8	"
A 5 1 7	551.0	547.7	3.3	0.6	TIM 004
A 5 2 0	547.8	551.9	-4.1	0.7	TIM 007
A 5 2 3	544.9	549.3	-4.4	0.8	"
A 5 2 4	547.7	552.2	-4.5	0.8	"
A 5 2 5	543.4	547.1	-4.0	0.7	"
A 5 2 6	557.6	554.2	3.4	0.6	TIM 003
A 5 2 7	543.4	546.3	-2.9	0.5	TIM 007
A 5 2 8	546.2	550.3	-4.1	0.7	"
A 5 3 1	544.8	549.6	-4.8	0.9	"
A 5 3 2	550.0	547.4	2.6	0.5	TIM 003
A 5 3 3	542.2	546.5	-4.3	0.8	TIM 007
A 5 3 6	542.9	546.7	-3.8	0.7	

※1 PNC ZN8430 86-07から引用した。

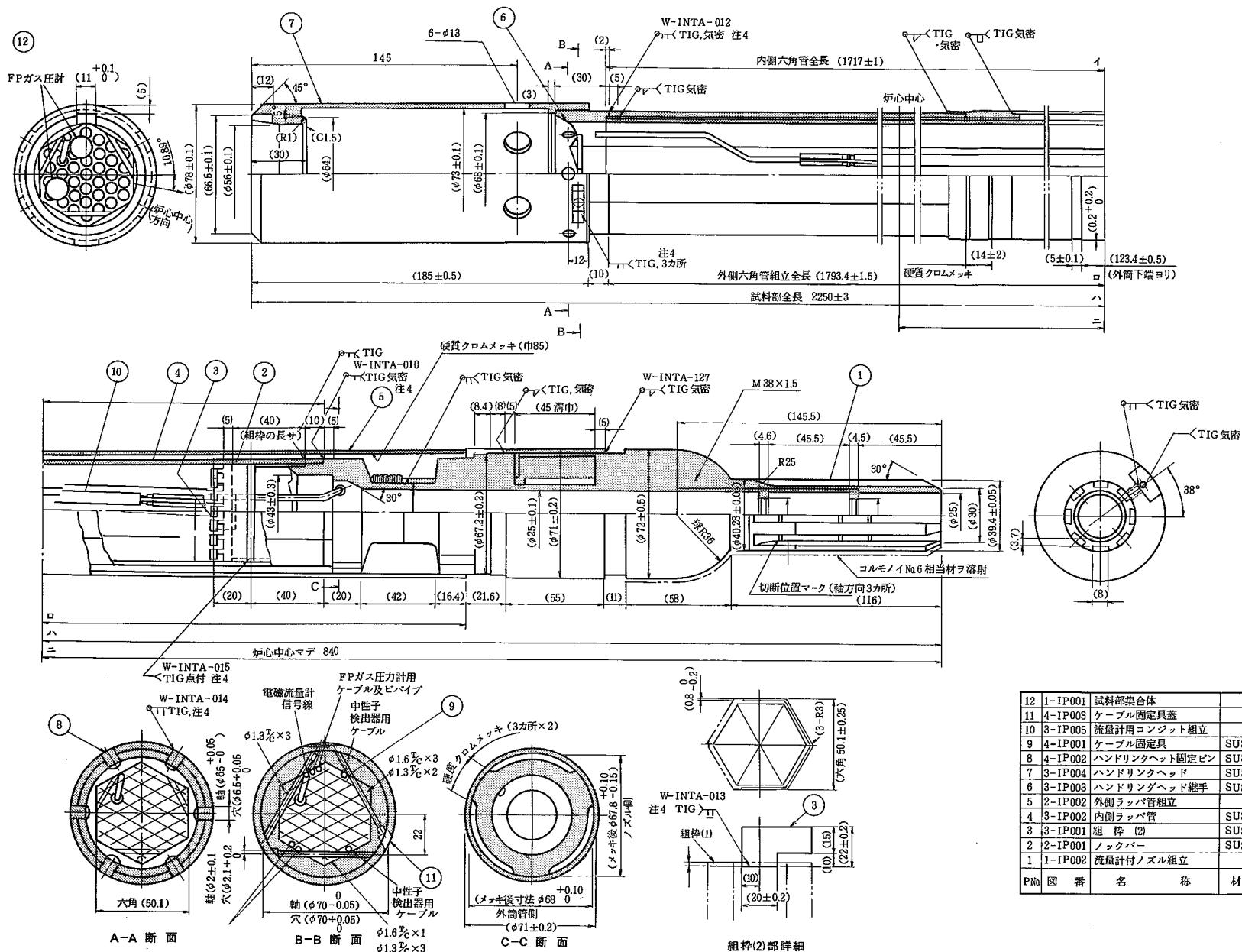
Table IV Results of Plenum Gas Analysis

ピ ン No.	ピ ン 内 容 積 (cc)	ピ ン 内 ガス 壓 (Torr - STP)	ピ ン 内 ガス 量 (cc - STP)	ガス 分 析 結 果			Xe/Kr 比	※ 放 出 率 %	備 考
				Kr %	Xe %	He + α %			
A 5 0 4	18.37	2839	68.60	8.02	61.77	30.21	7.70	52.74	冷却材温度測定用
A 5 1 6	18.29	2548	61.31	7.73	58.74	33.53	7.60	44.23	
A 5 1 7	19.09	2569	64.50	7.60	58.80	33.60	7.74	48.02	F P ガス圧力測定用
A 5 2 5	18.44	2414	58.59	7.47	56.98	35.55	7.63	41.18	
A 5 3 2	19.23	2462	62.27	7.69	57.69	34.62	7.50	45.35	F P ガス圧力測定用
A 5 3 7	18.40	2425	58.69	7.64	57.50	34.86	7.53	41.45	

$$\text{※放出率} = \frac{\text{放出ガス量}}{\text{生成ガス量}}$$

生成ガス量はAESテクニカル・メモ83-AES-66の計算式を用いた。

また $1\text{a}/\sigma\text{B.U.} = 8769 \text{ MWD/MTM}$ (燃材部メモ83-(F₂) - 490) という換算で S/A 平均燃焼度 32200 MWD/MTM を使って計算した。したがって (n,r) 反応等の核分裂反応以外の発熱量が含まれており、かつ、各ピ ン 每の燃焼度の相違は考慮していない。



PNo	図番	名 称	材 質	1	2	3	個数	備考
12	1-IP001	試料部集合体		1		2		
11	4-IP003	ケーブル固定具蓋		3		6		
10	3-IP005	流量計用ゴムシート組立		1		2		
9	4-IP001	ケーブル固定具	SUS316	3		6		
8	4-IP002	ハンドリングヘッド固定ピン	SUS316	6		12		
7	3-IP004	ハンドリングヘッド	SUS316	1		2		
6	3-IP003	ハンドリングヘッド握手	SUS316	1		2		
5	2-IP002	外側ラバ管組立		1		2		
4	3-IP002	内側ラバ管	SUS316相当	1		2		
3	3-IP001	組 梱 (2)	SUS316	1		2		
2	2-IP001	ノックバー	SUS316	7		12		
1	1-IP002	流量計付ノズル組立		1		2		

Fig. 1 Schematic view of the Subassembly (PFI010)

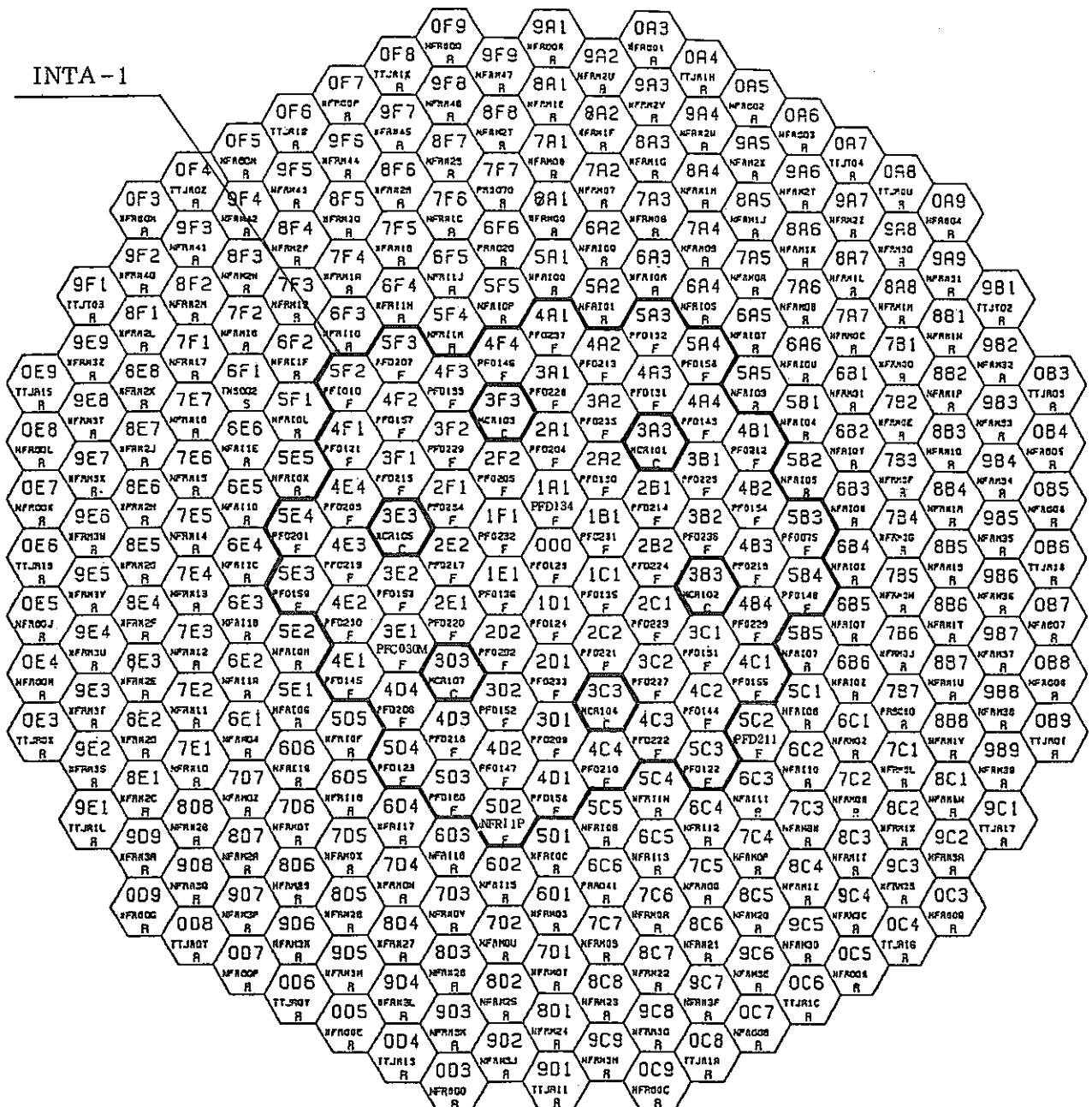


Fig. 2 In Reactor Location of the Subassembly

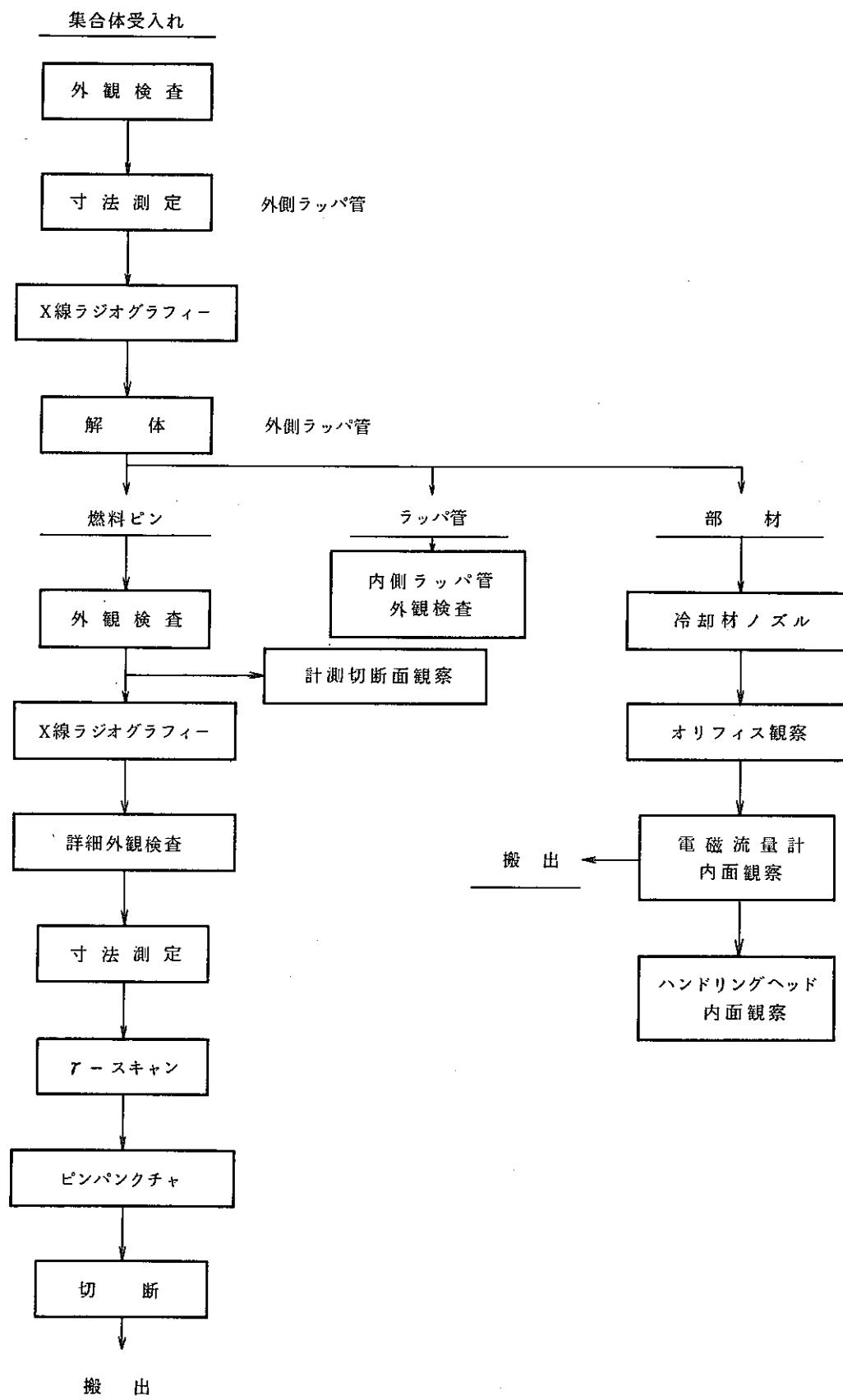


Fig. 3 Flow Diagram of Postirradiation Examinations

昭和 62 年 01 月 21 日作成

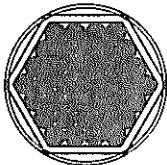
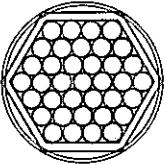
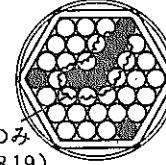
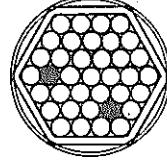
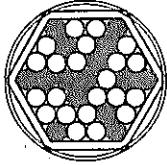
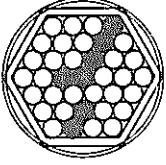
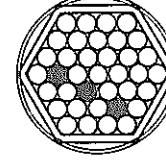
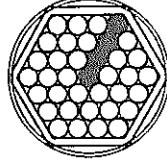
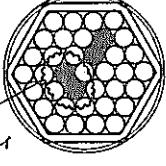
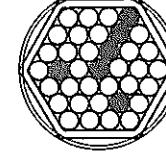
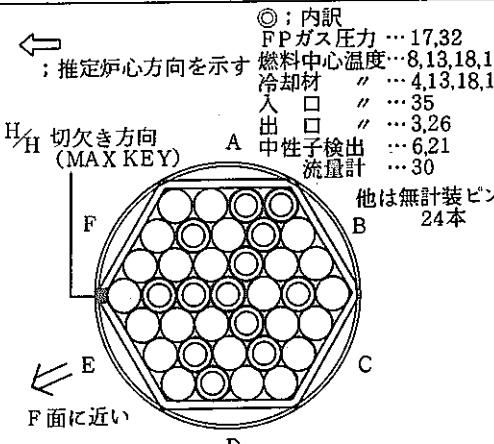
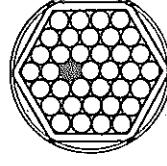
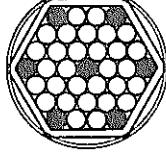
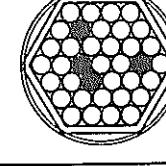
JOYO MK-II 照射後試験計画 (ピン試験) INTA 燃料集合体 PFI 1010 (A5) 装荷装置 (5F2)		集 合 体 試 験	集 合 体 部 材 試 験
		● 1. NA 洗浄前・後外観検査 ● 2. NA ふきとり ● 3. 寸法測定 ● 4. X線ラジオグラフィ ● 5. 内側 W/T 外観検査 ● 6. 内側 W/T 寸法検査	1. W/T ガンマスキャン 2. W/T 詳細外観検査
1. ピン列外観検査 XRG 重量測定	5. 詳細外観検査 (ワイヤ無)	9. ピンパンクチャ (ガス圧)	13. ピン切断 (MMS) SiCモニタ取出し
 (全数)		 ガス抜きのみ (08,13,18,19) (7本)	 (2本)
2. ワイヤ切断	6. 詳細外観検査 (ワイヤ付)	10. ピンパンクチャ (ガス圧+ガス分析)	14. 試料採取 ○ ケーブル 2本 (06,18) ○ T/C 4本 (08,13,19)
 (12本)	 (6本)	 (3本)	
3. 寸法測定 (曲がり, ワイヤ付)	7. ガンマスキャン (スキャン)	11. ピン切断 (AGS)	◎ : 内訳 FPガス圧力 … 17,32 燃料中心温度 … 8,13,18,1 冷却材 " … 4,13,18,19 H/H 切欠き方向 (MAX KEY) A 中性子検出 … 6,21 入口 " … 3,26 出口 " … 30 流量計 … 30 他は無計装ピン 24本
 (4本)	 トモグラフィ (4本)	 (6本)	
4. 寸法測定 (外径)	8. ガンマスキャン (スキャン+スペクトル)	12. ピン切断 (AES)	
 (1本)	 (7本)	 (4本)	

Fig. 4 Fuel pin Selected for each Postirradiation Examination

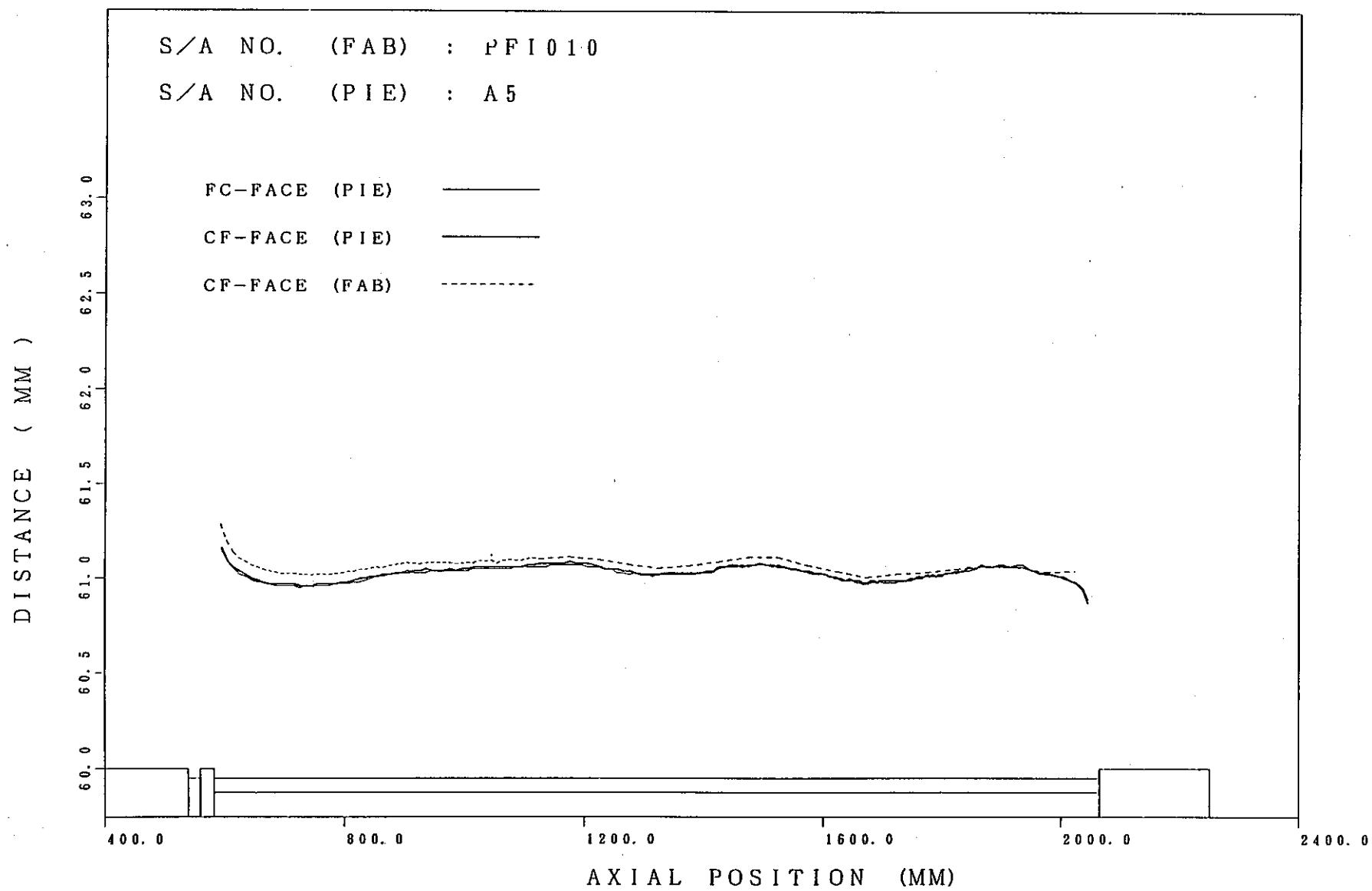


Fig. 5 Axial Profile of Face to Face Distance (Face C-F)

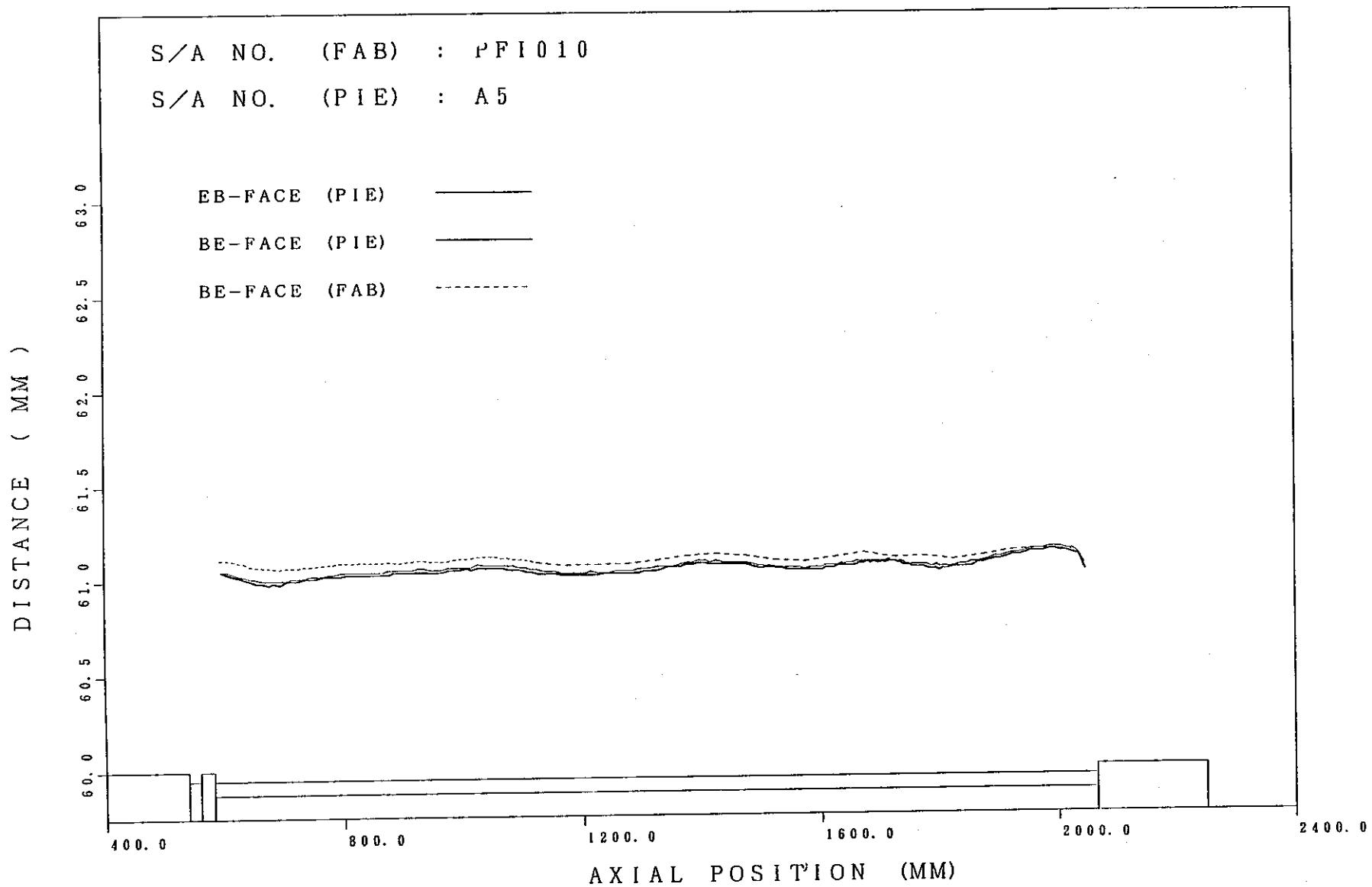


Fig. 6 Axial Profile of Face to Face Distance (Face B-E)

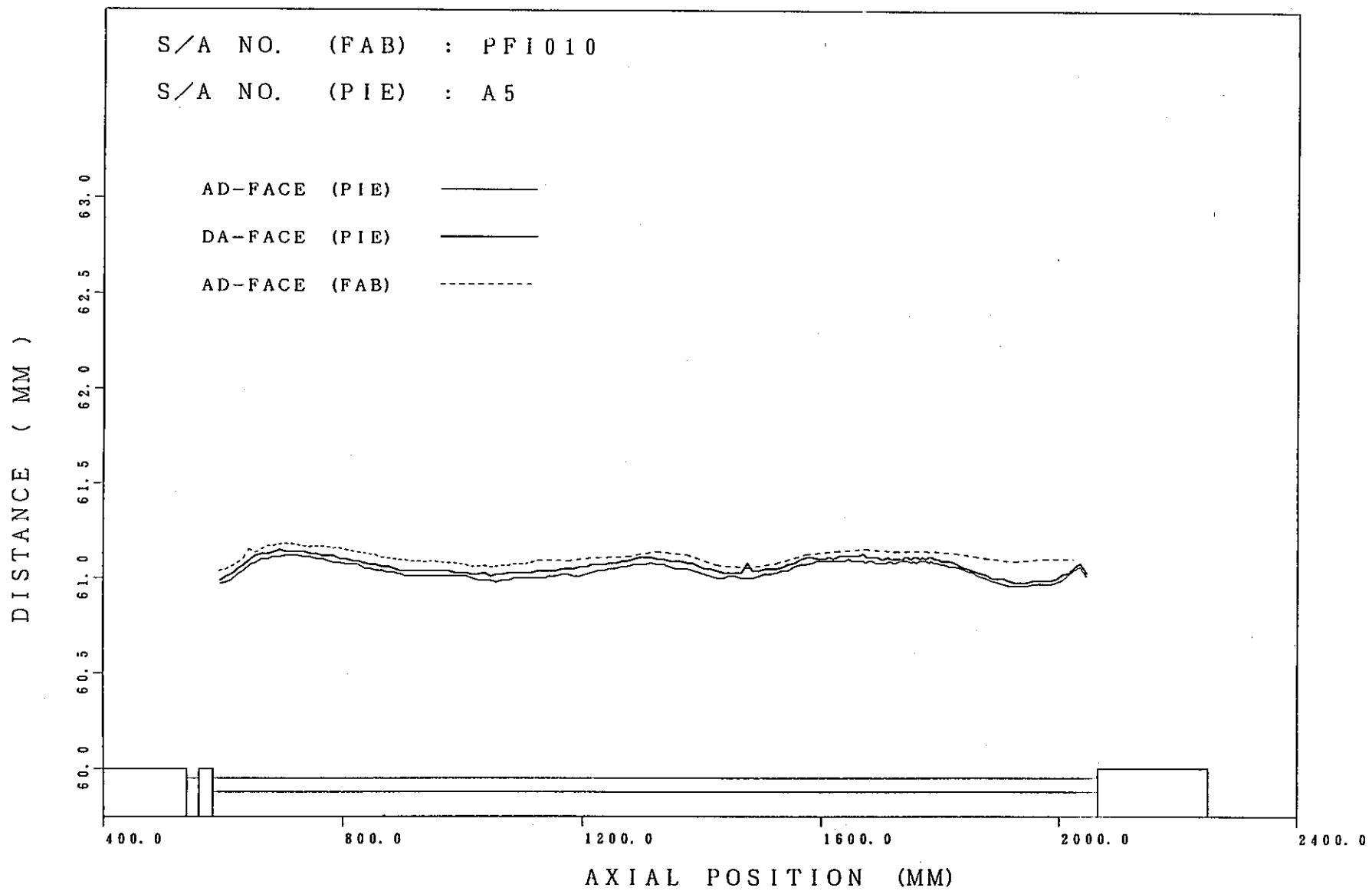


Fig. 7 Axial Profile of Face to Face Distance (Face A-D)

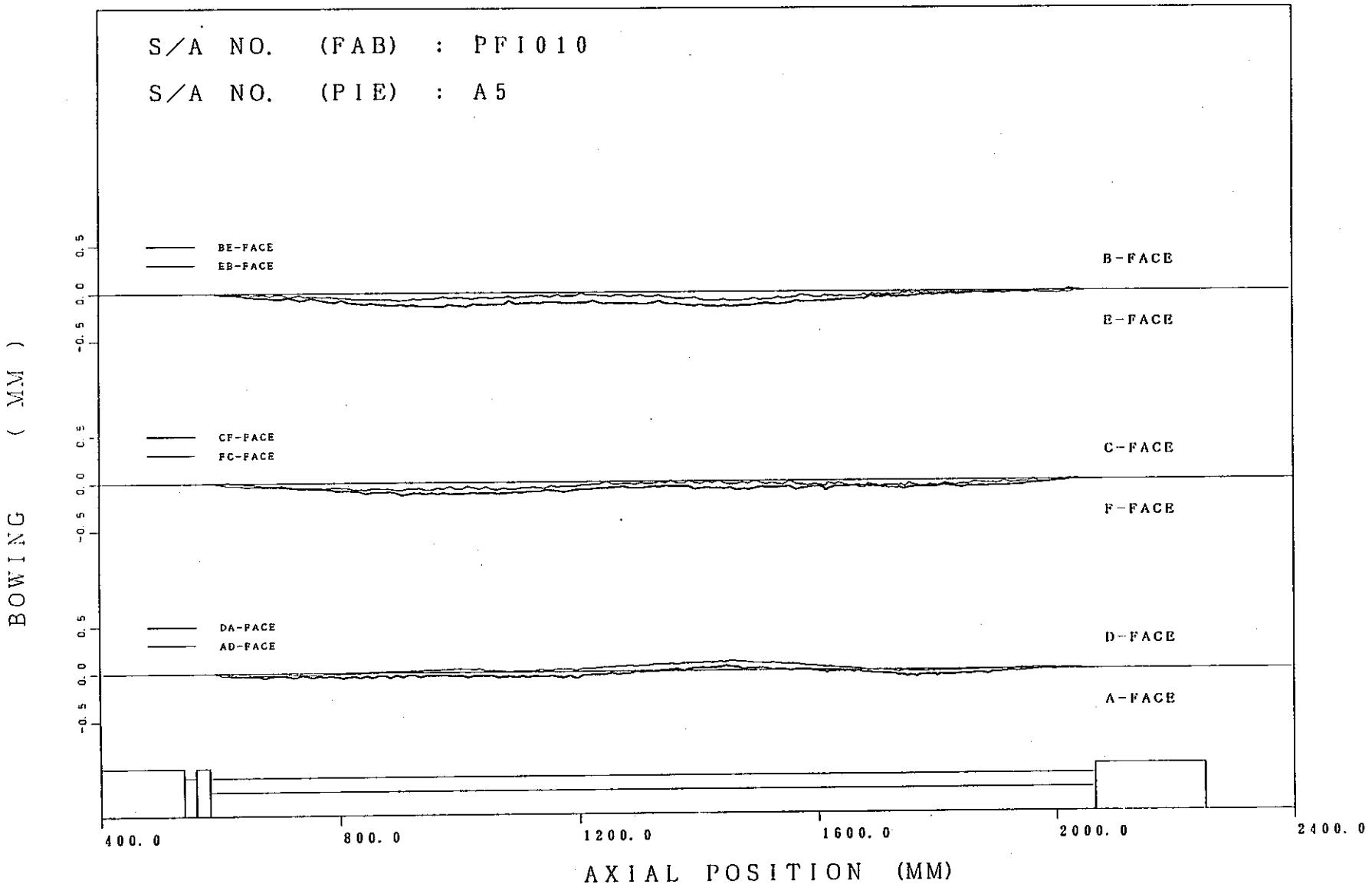


Fig. 8 Axial Profile of Wrapper Tube Bowing

M. DATE : 87-04-02

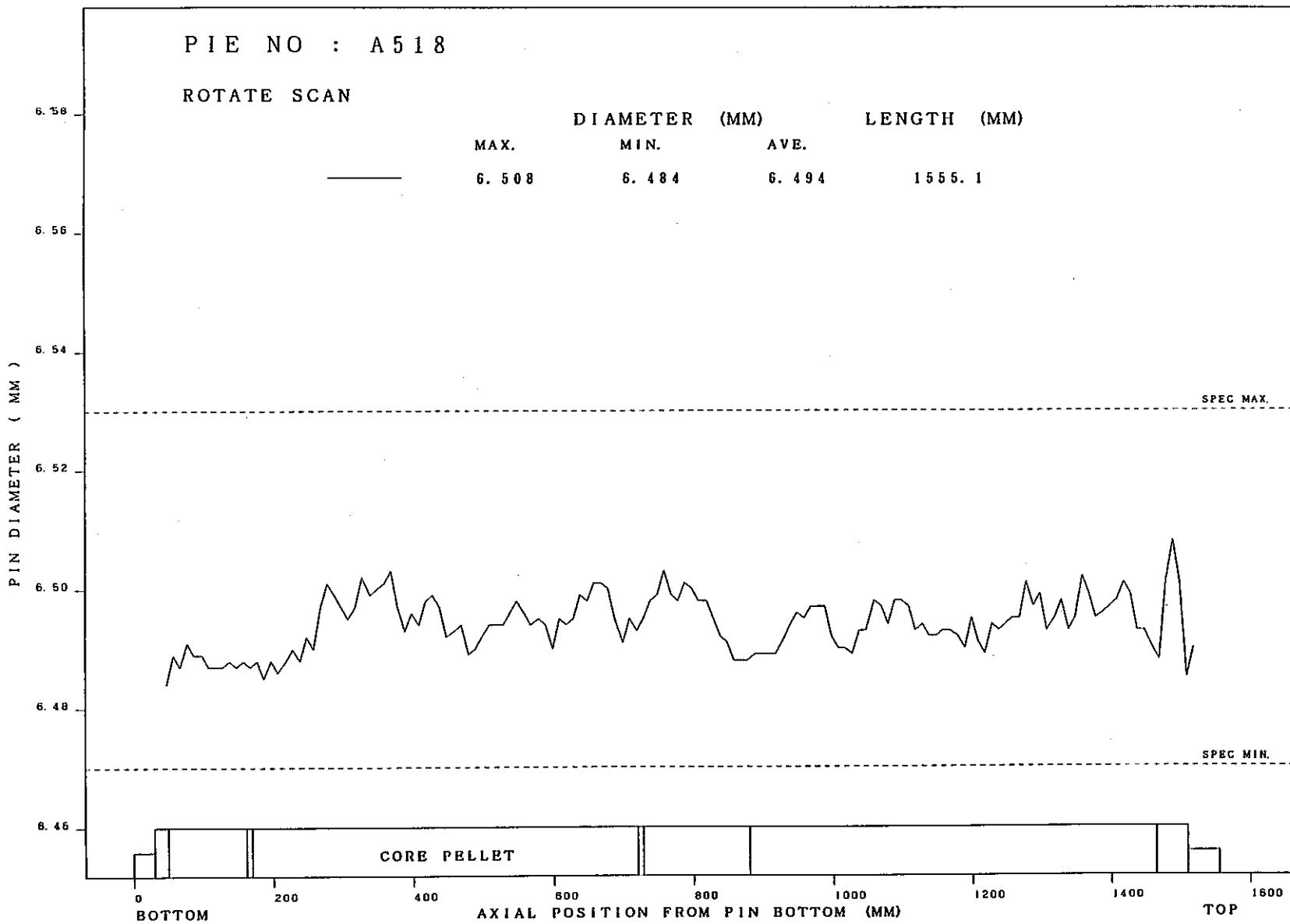


Fig. 9 Axial Profile of Fuel Pin Diameter (Pin No. A518)

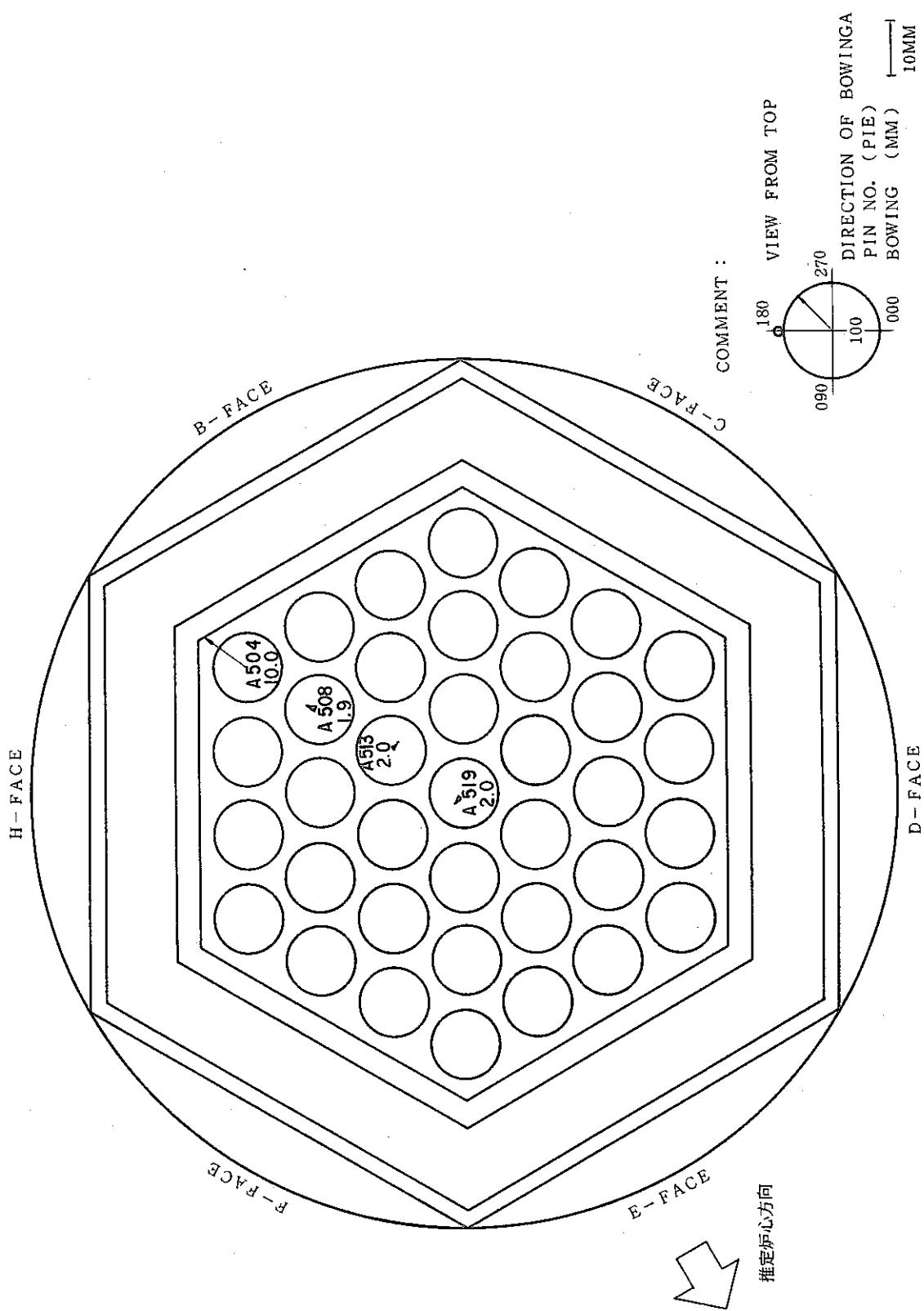


Fig. 10 Vector of Pin Bowing in the Diameter

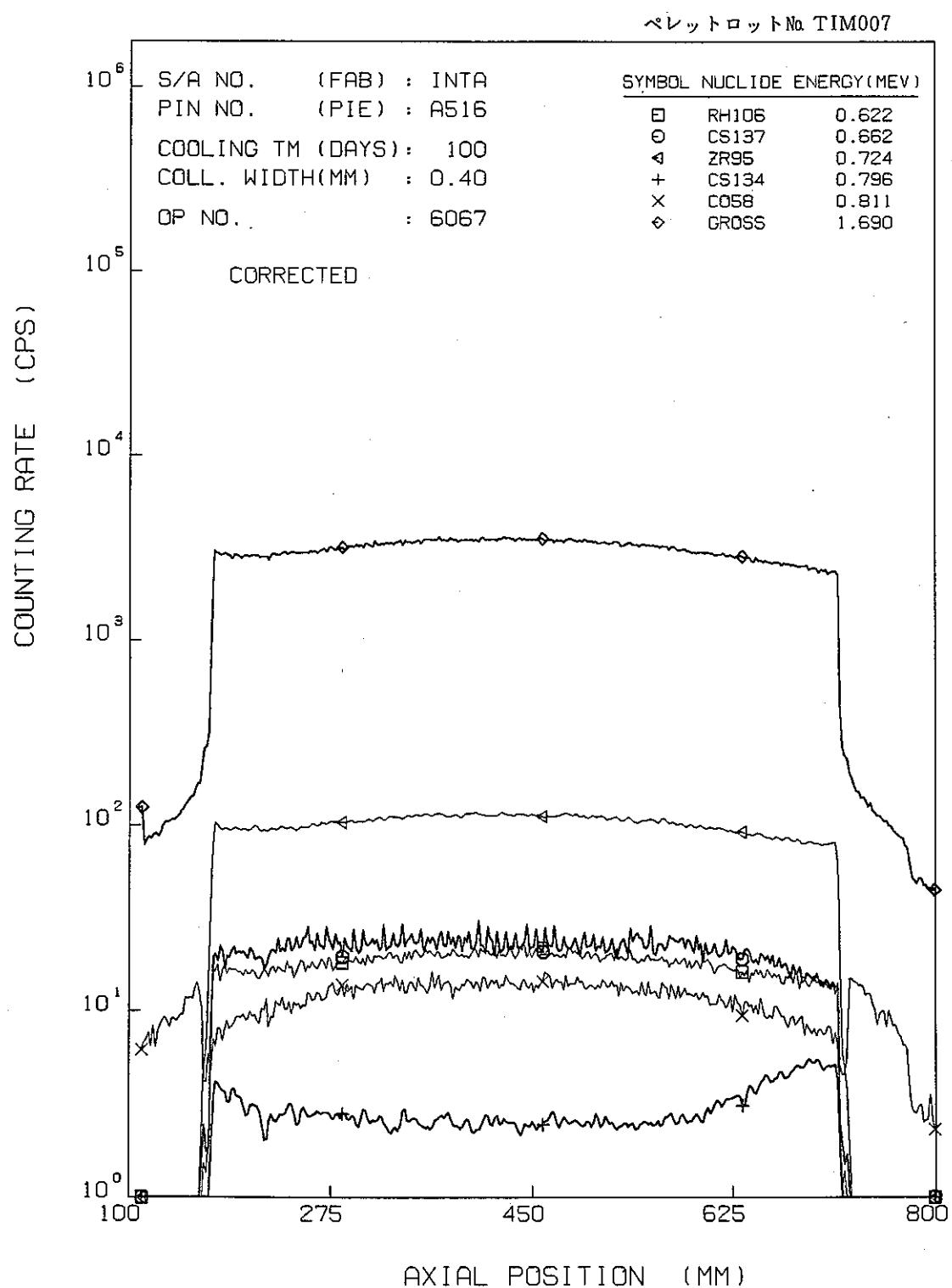


Fig. 11 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A516)

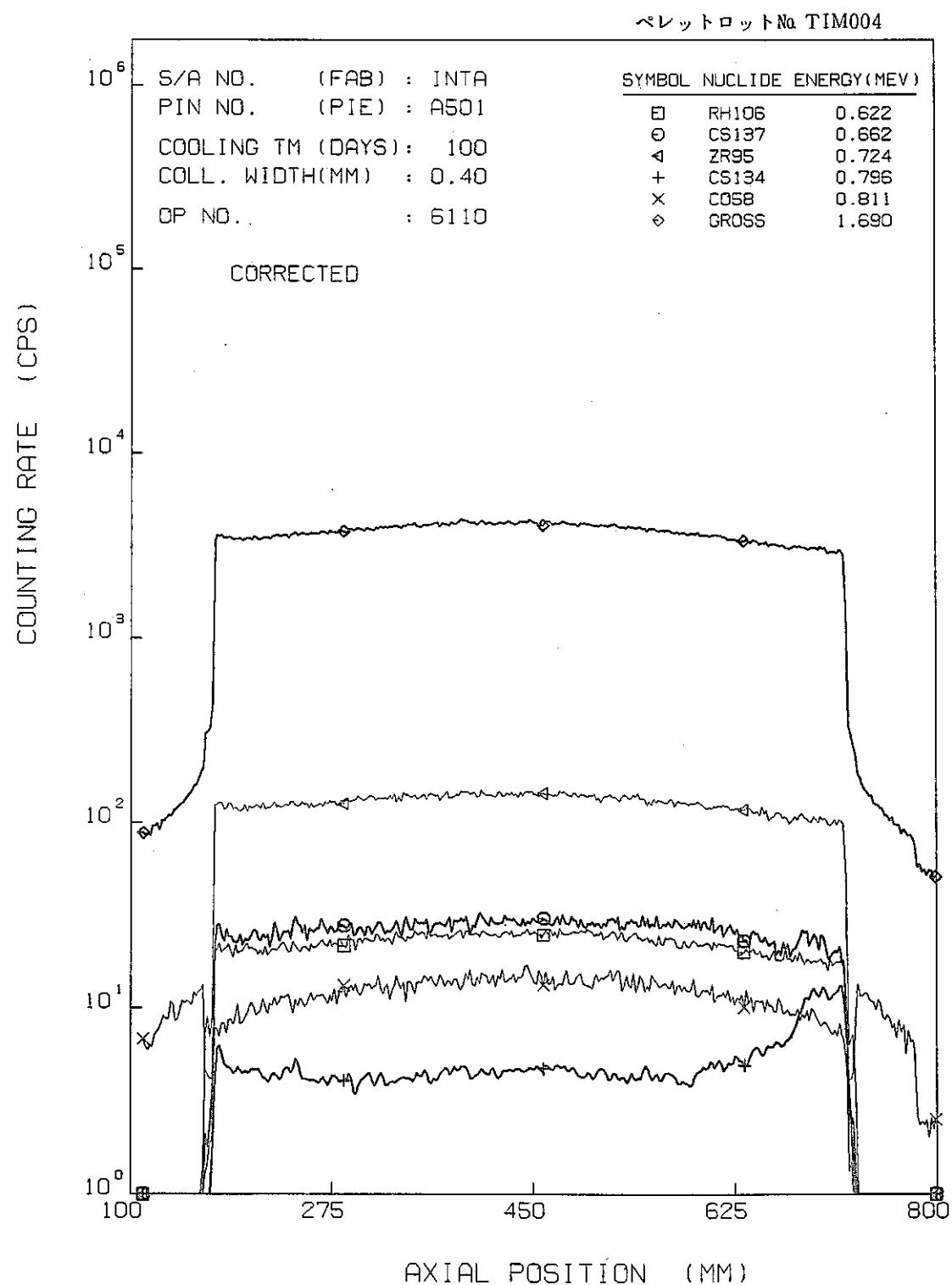


Fig. 12 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A501)

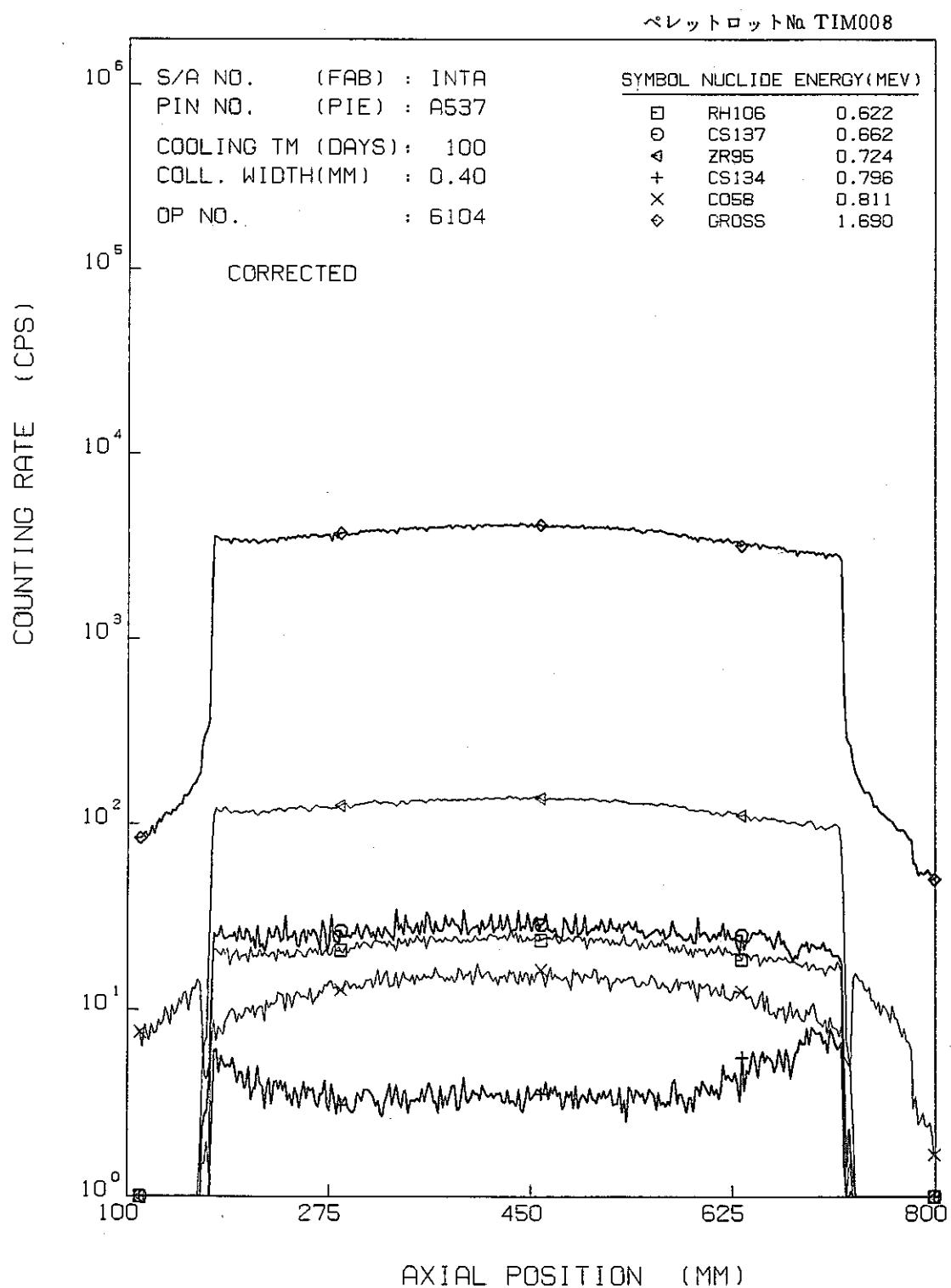


Fig. 13 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A537)

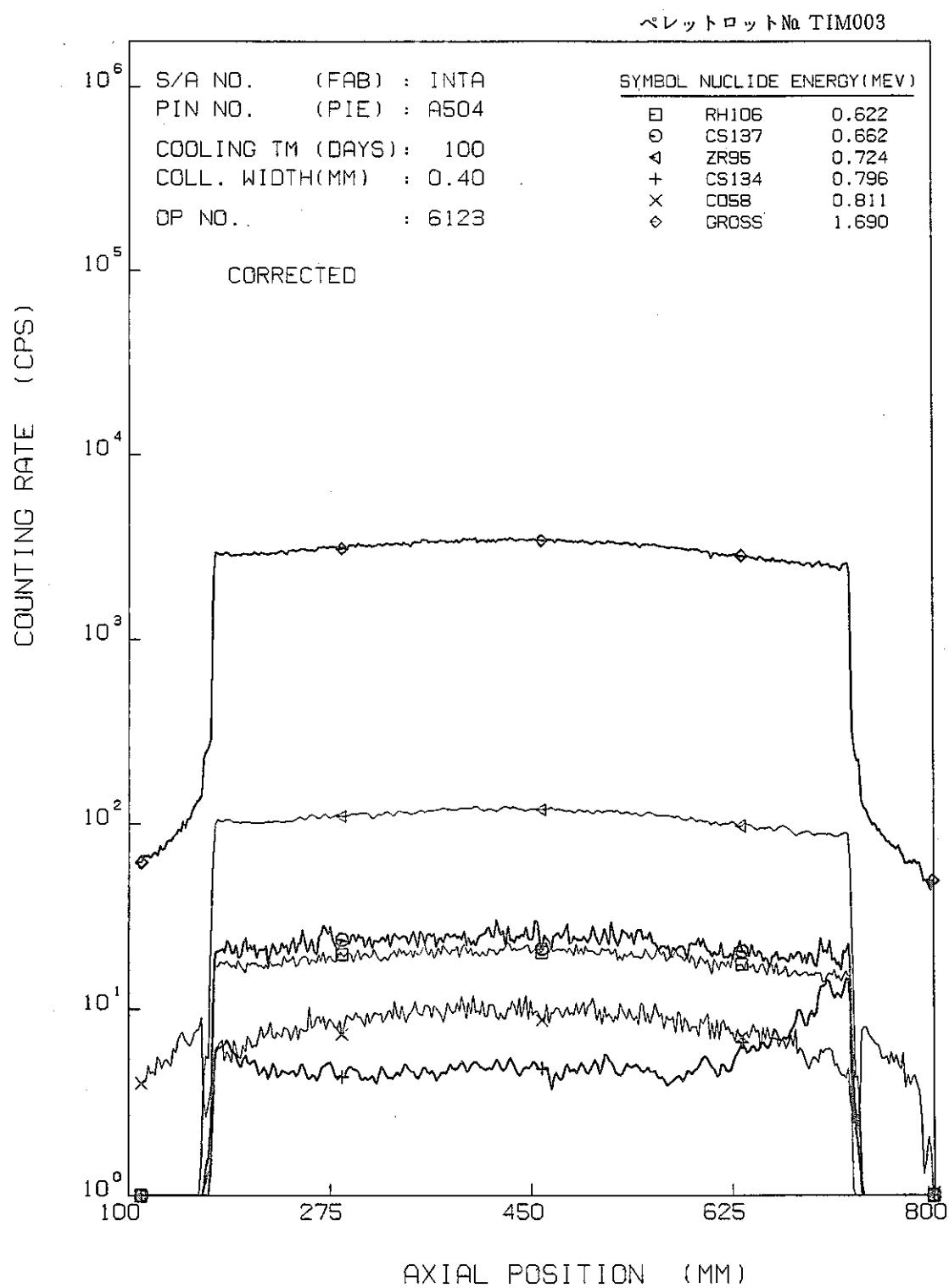


Fig. 14 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. A504)

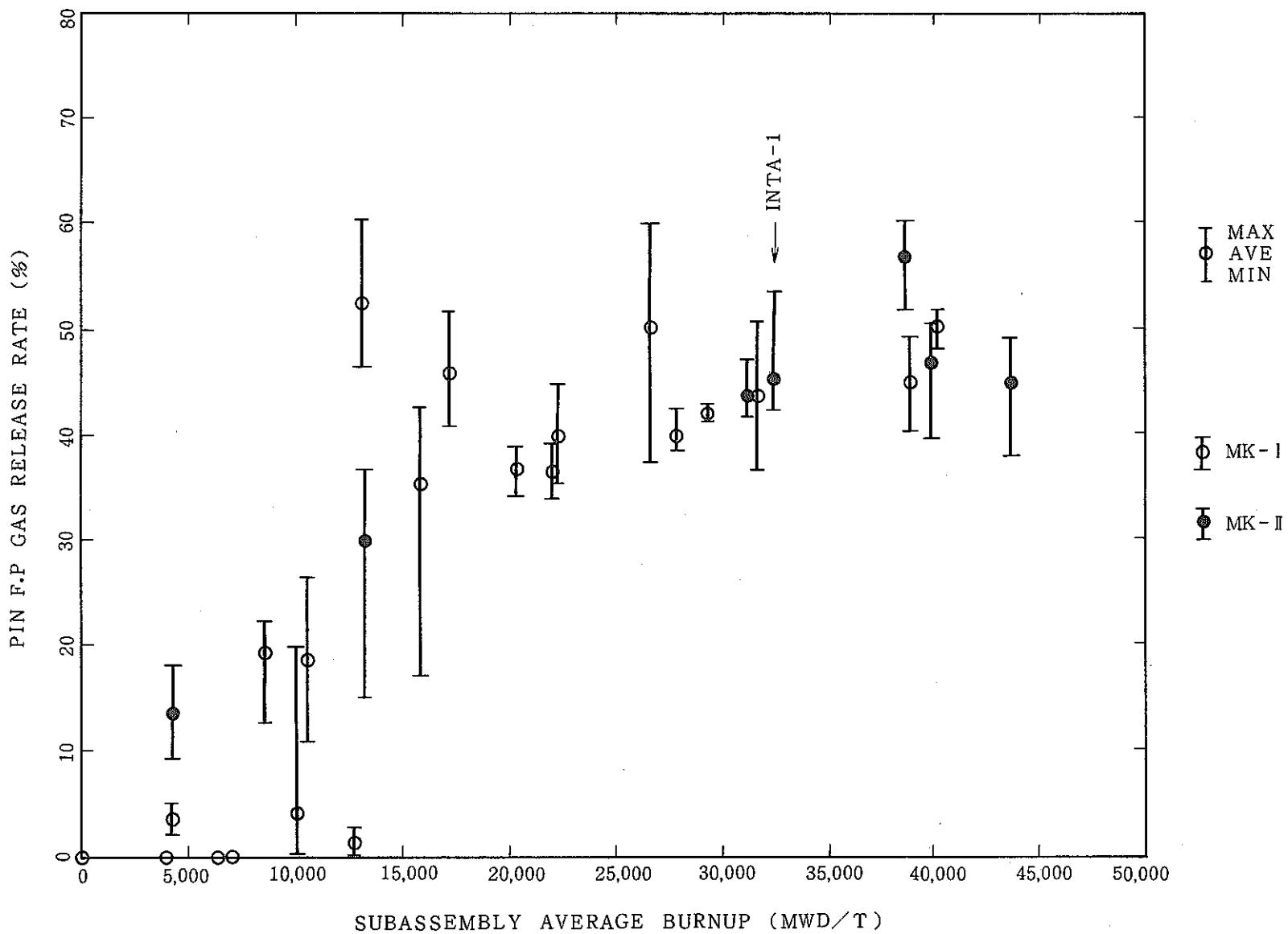


Fig. 15 Fission Gas Release Rate as a Function of the Subassembly Average Burnup

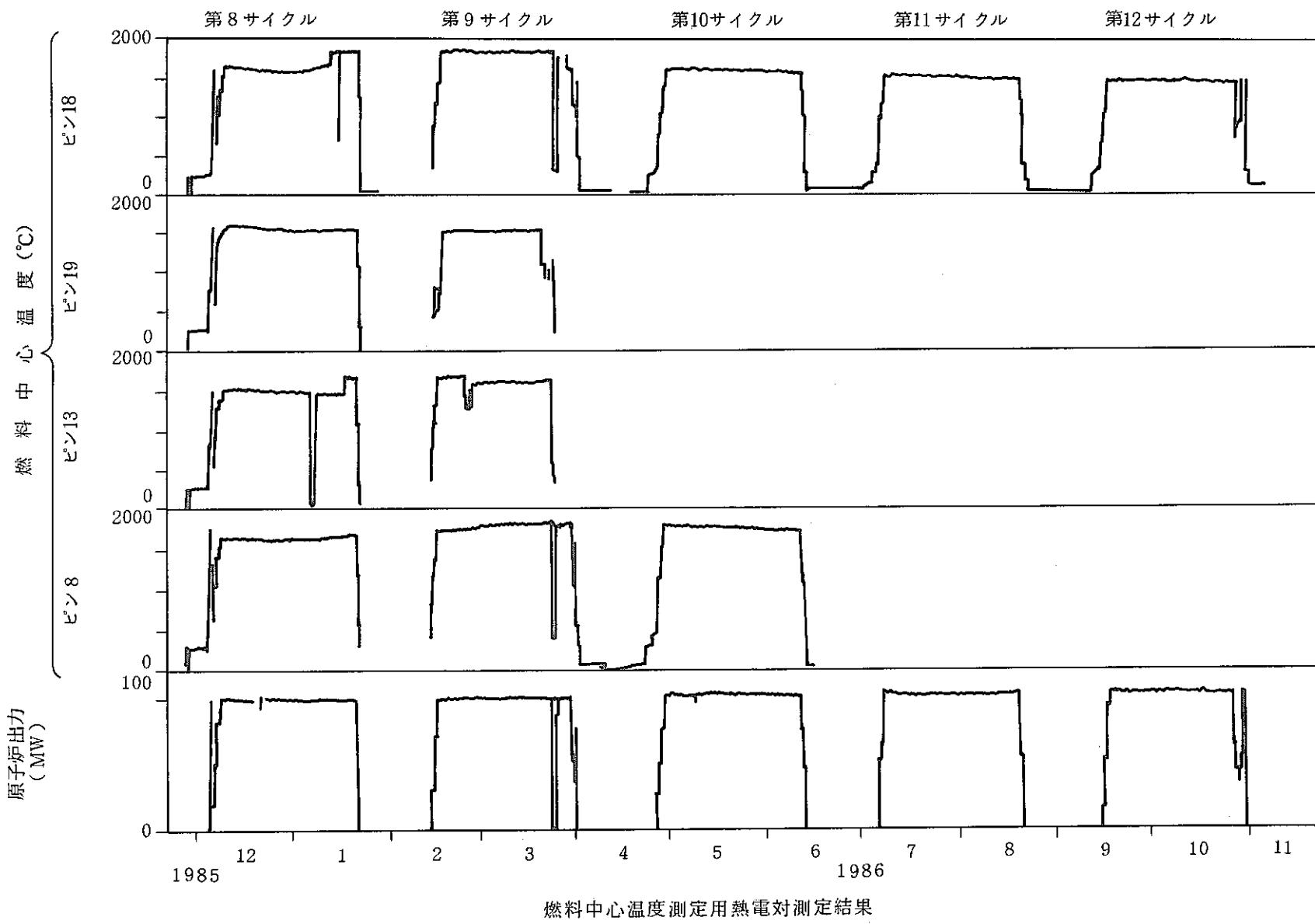


Fig. 16 Temperature of Core Center

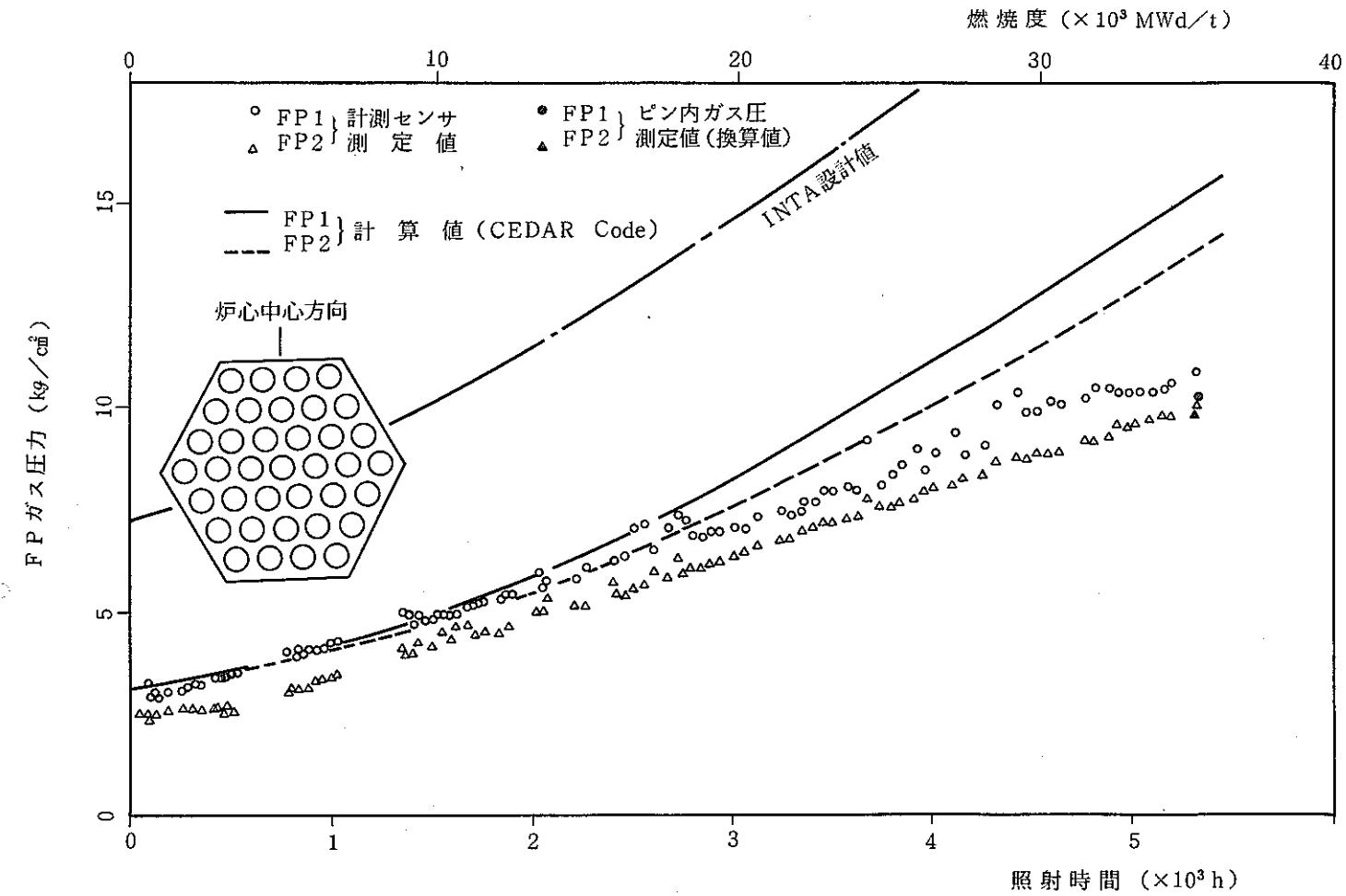
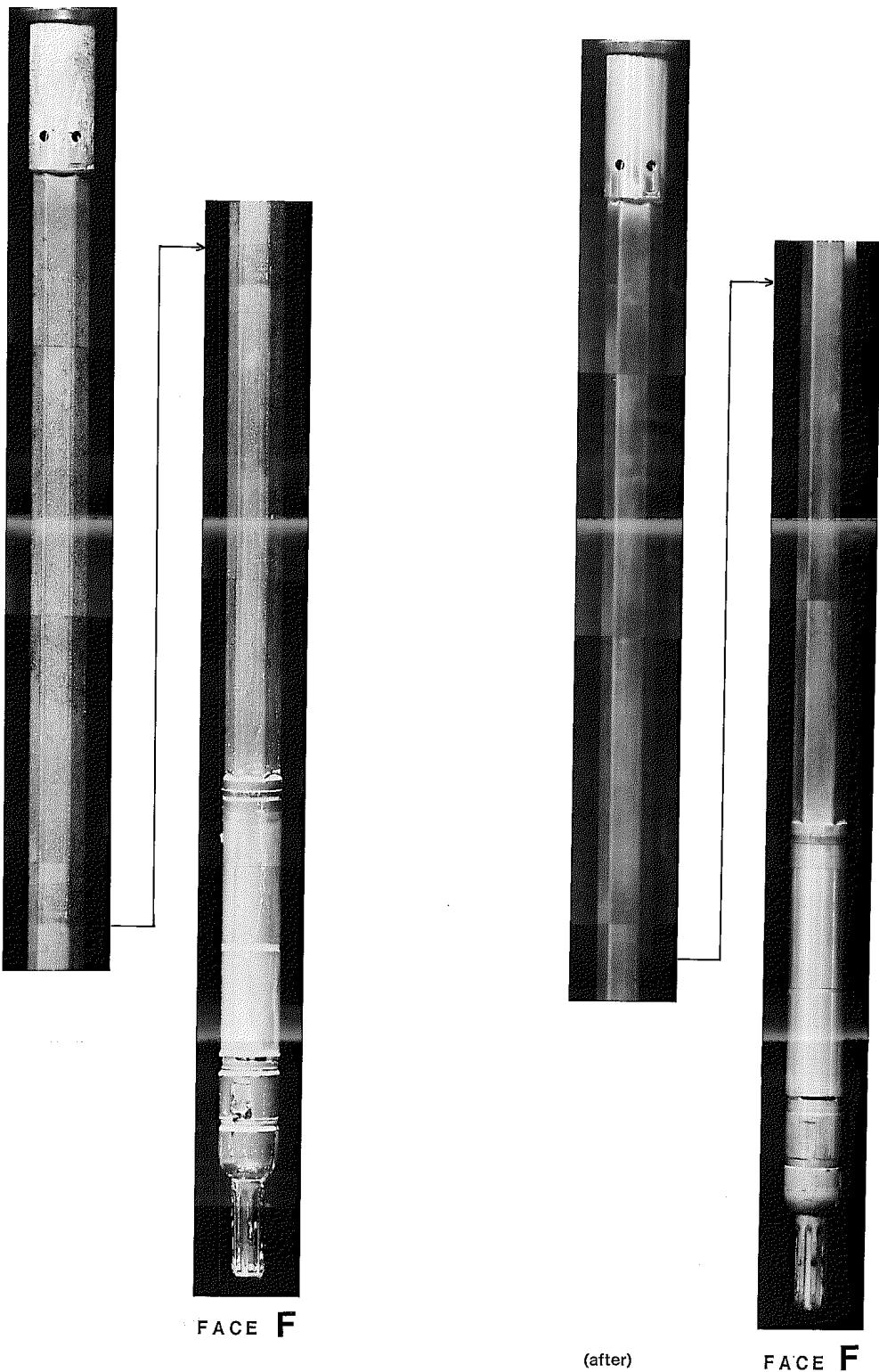


Fig. 17 Comparison of F.P Gas Pressure between In and After Irradiation

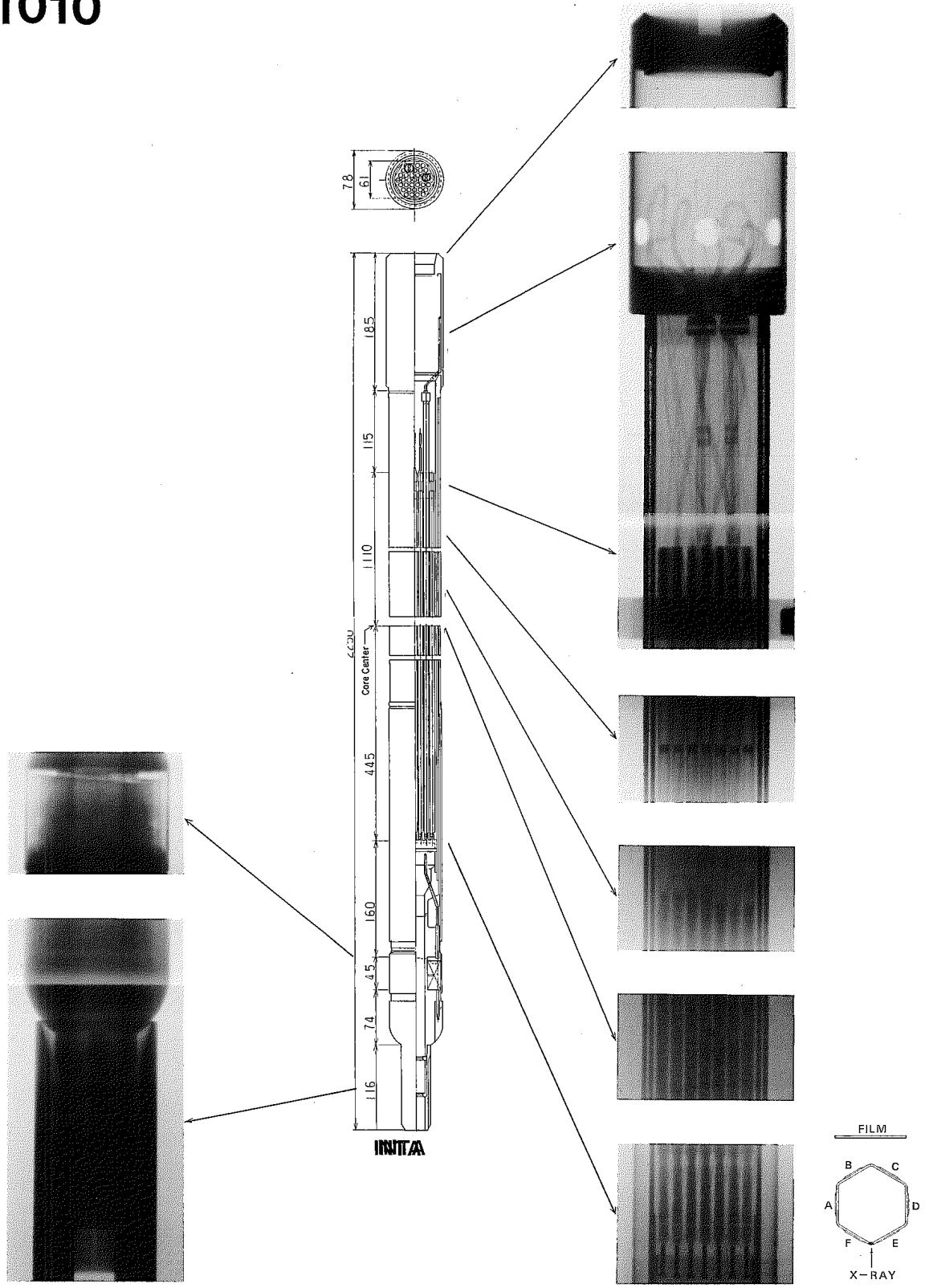
PFI010



F871006

Photo. 1 Surface Condition of Subassembly

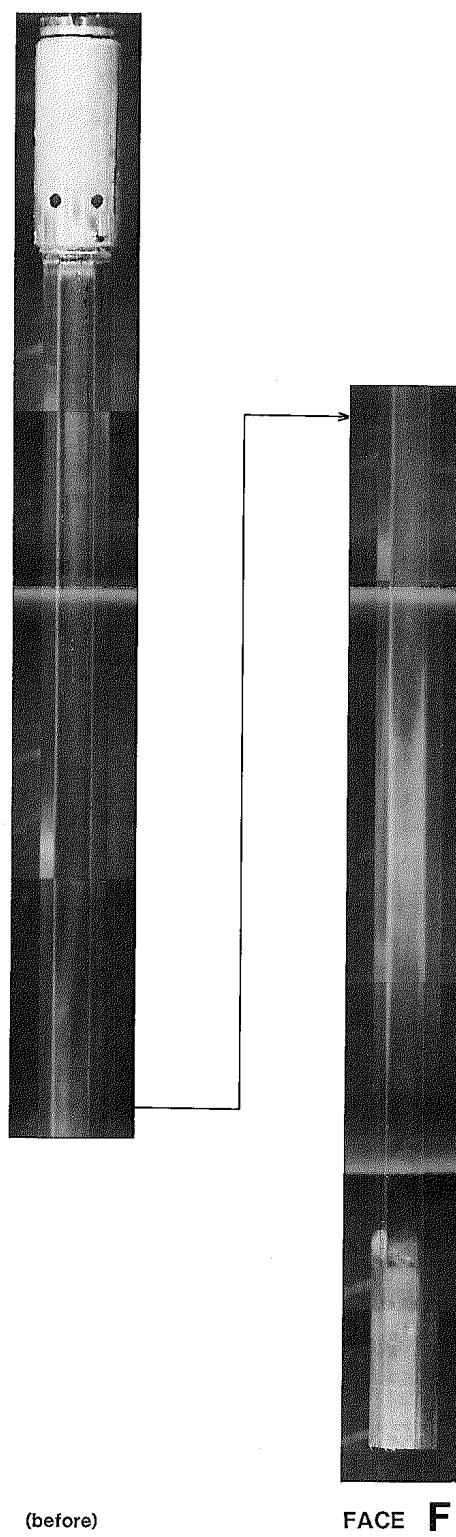
PF1010



F872004

Photo. 2 X-ray Radiography of Subassembly

PFI010



F871007

Photo. 3 Surface Condition of Inner Wrapper Tube

PNC-TN9410 88-190

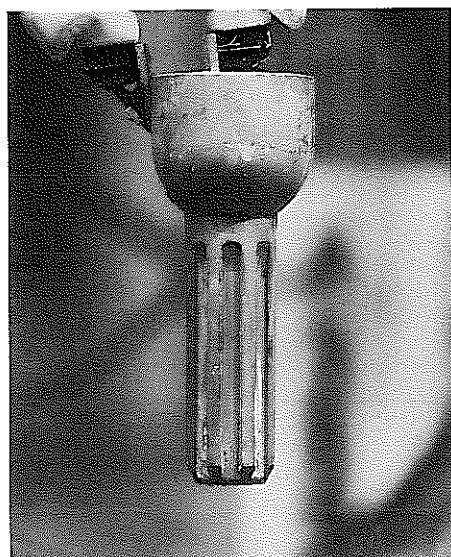


Photo. 4 Surface Condition of Nozzle

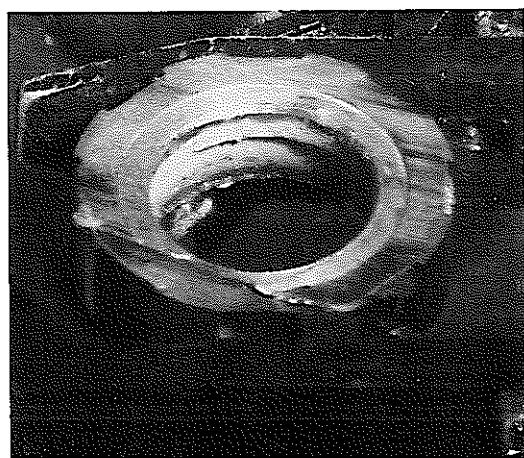


Photo. 5 Surface Condition of Orifice

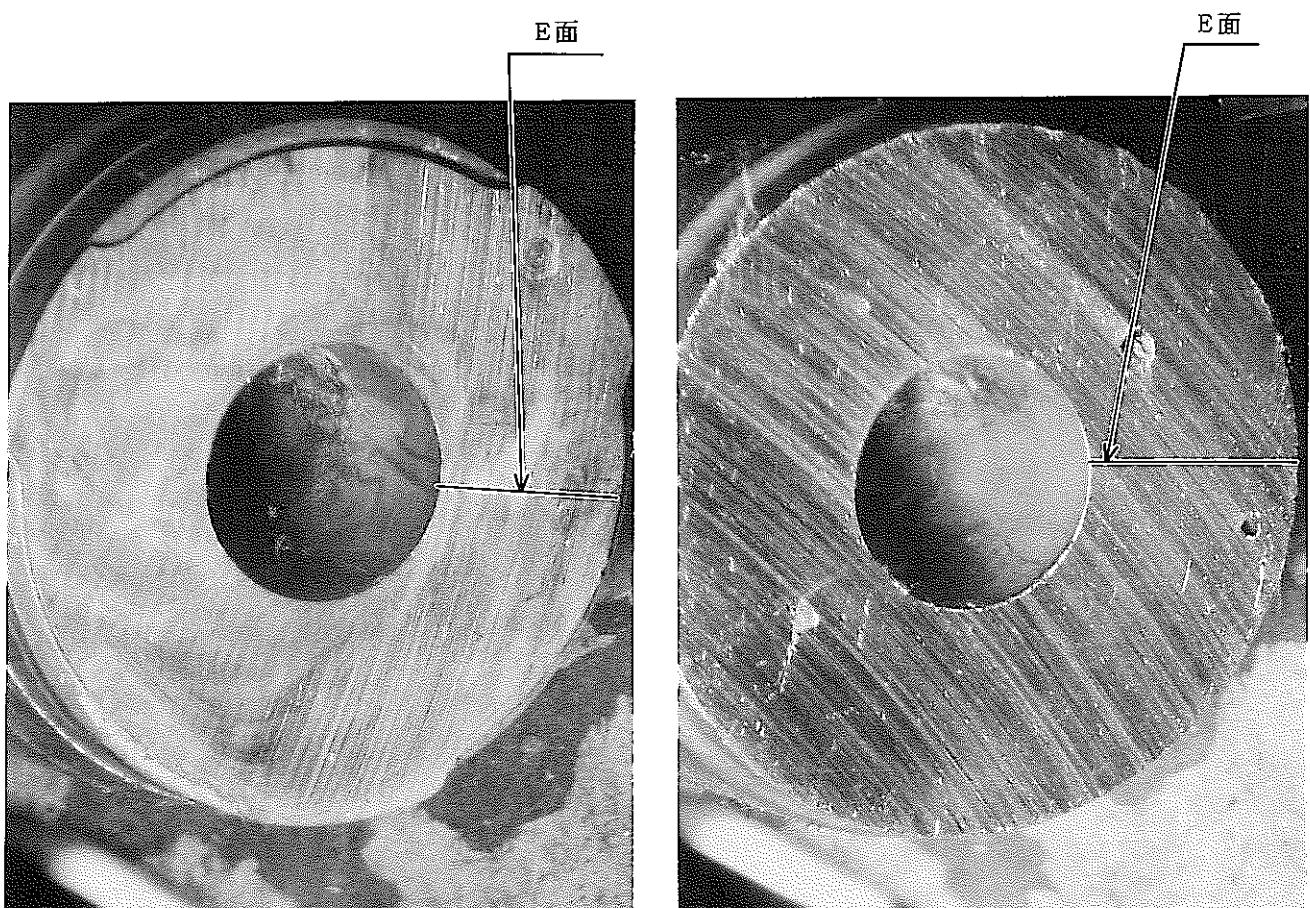


Photo. 6 Inside Condition of Magnet for Measuring Flow Rate

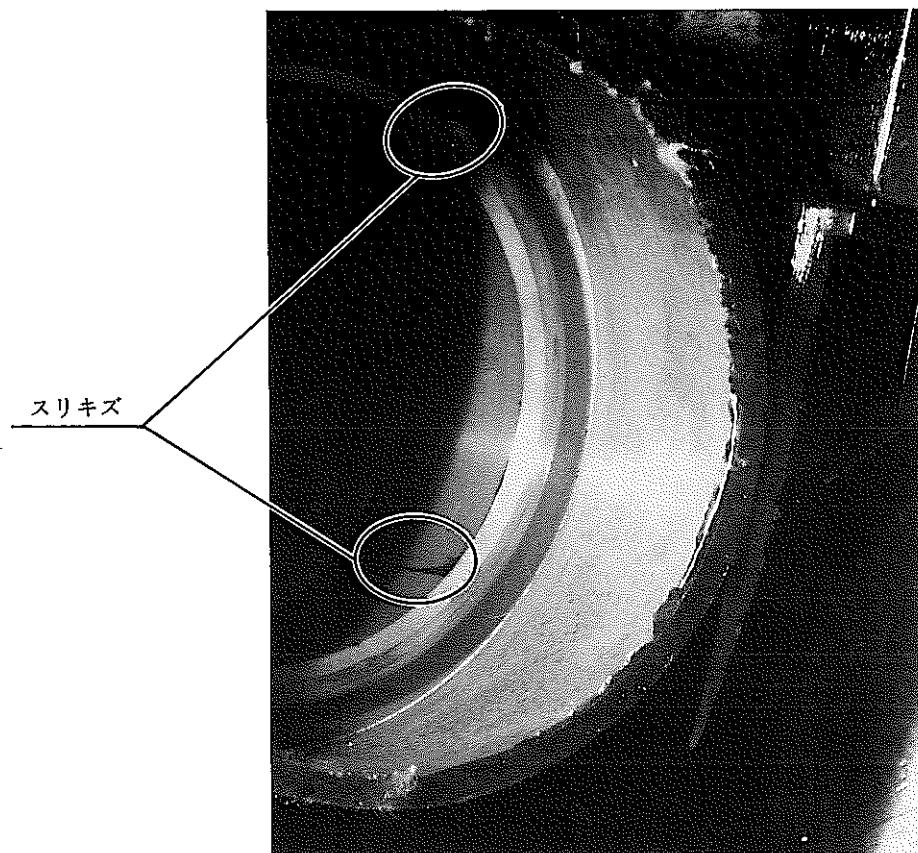


Photo. 7 Inside Condition of the Handring Head

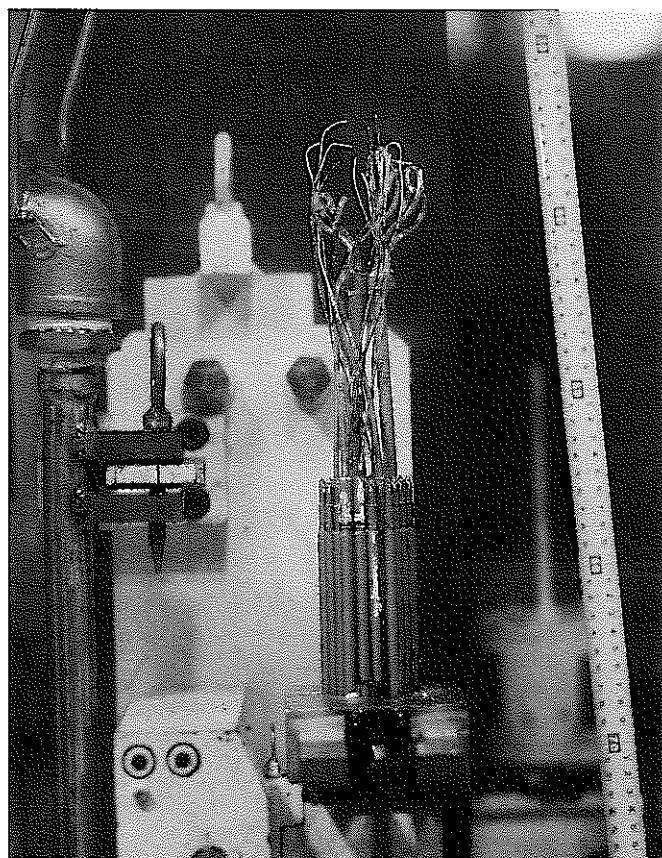
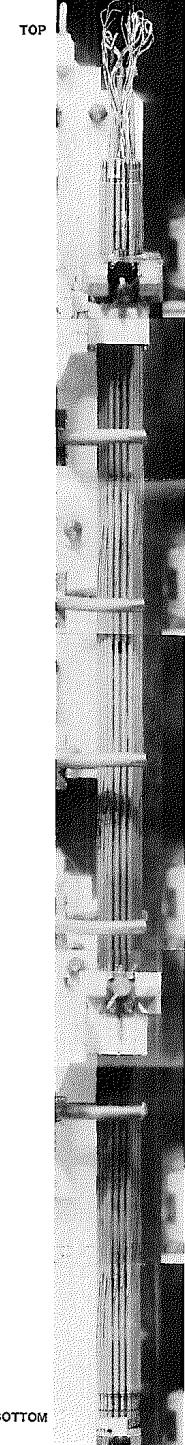
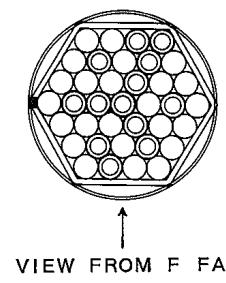
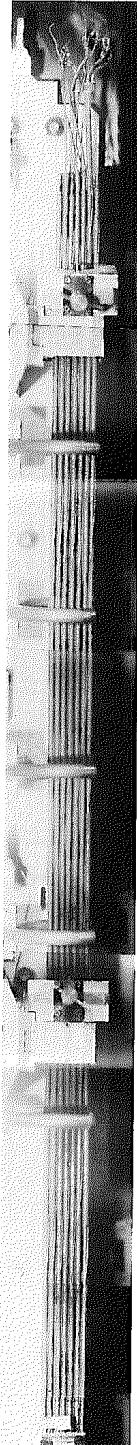


Photo. 8 Condition of Cable

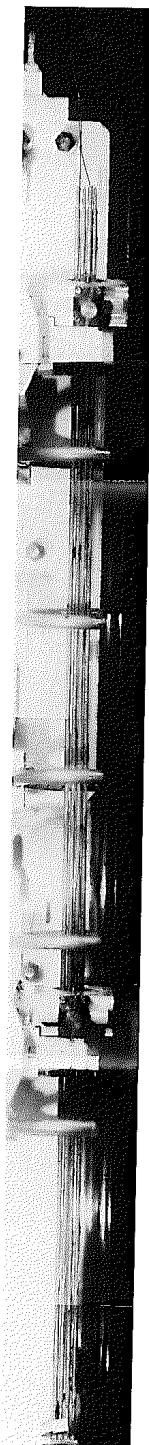
PFI010



Row 1



Row 4



Row 7

F873004

Photo. 9 Surface Condition of pin Bundle



Photo. 10 Condition of a pin Comming off the Knock-Bar

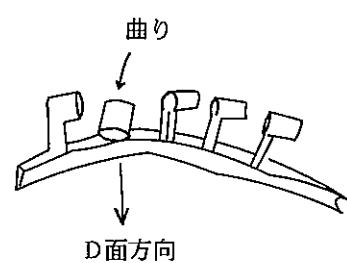
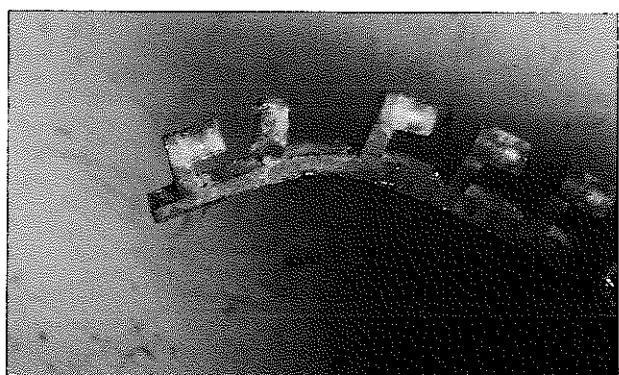
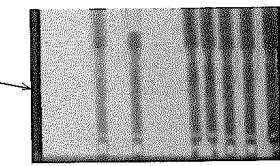
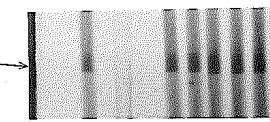
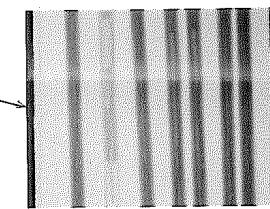
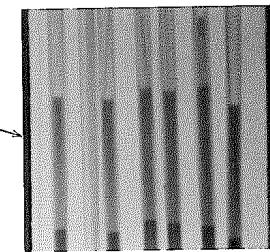
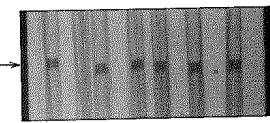
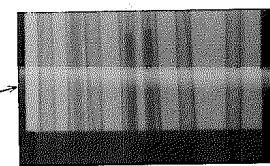
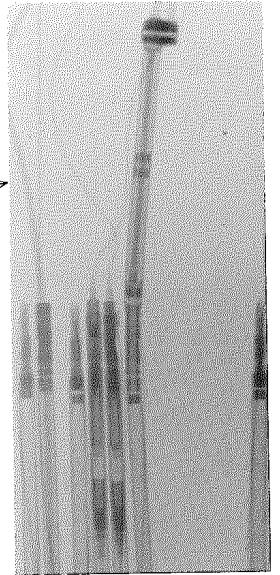
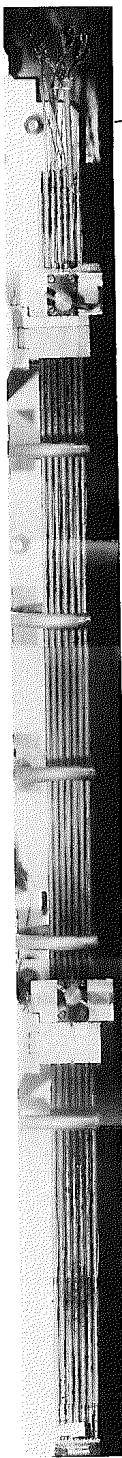


Photo. 11 Condition of Knock-Bar

PFI010



F874005

Photo. 12 X-ray Radiography of pins