

FFDL炉内試験用集合体(F1B;PFB011)の照射後試験(1)

集合体及び燃料要素の非破壊試験



1986年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-145
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)

FFDL炉内試験用集合体(F1B;PFB011)の照射後試験(1)

集合体及び燃料要素の非破壊試験

実施責任者 田地弘勝
報告者 小泉敦裕* 西野入賢治* 秋山 隆**
永峯 剛* 平譚久夫*

要 旨

FFDL炉内試験用集合体 (Fab. No. PFB 011, 平均燃焼度 510 MWD/MTM) を受け入れ、人工欠陥ピン、校正ピン、タグガスカプセル入りの模擬ピンについて照射後試験を実施した。照射後試験の目的は、「常陽」における FFDL 炉内試験評価のためのデータの取得、照射後試験での破損燃料検出技術の開発のための基礎データの取得、及び破損燃料集合体、破損燃料ピン取扱い技術の習得である。

試験結果の概要は下記の通りである。

- (1) 人工欠陥ピンのスリット溶接部が開孔したこと、及び模擬ピン内のタグガスカプセルが開封針で破られていたことより、本集合体は計画通り機能を果していたことを確認した。
- (2) 人工欠陥ピンでは、約 3 g の重量増加があり、ナトリウムが開孔部を通してピン内に浸入していたことを確認した。更に、2 本中 1 本の人工欠陥ピンでは、10 mm の燃料スタック長増加及び約 0.2 % の外径増加が認められた。このことから浸入したナトリウムが燃料と反応し体積増加を起こしていること、また被覆管との間に機械的相互作用 (FCMI) を起こしたことが予想される。
- (3) 照射後試験での破損燃料検出技術のうち、破損燃料ピンの同定は、重量変化、 ^{135}Xe の喪失、開孔部からのガスリーク等により現有の試験機で十分可能であるが、破損位置検出は、現状では詳細外観検査以外には可能でないことが判明した。これらのことから現有の試験機を使用して、最も効率的に破損燃料ピンを検出するための照射後試験フローを確立した。

* 大洗工学センター燃料材料開発部照射燃料集合体試験室 (FMS)

** " " 照射材料試験室 (MMS)

List of Tables

Table I	Inspection Data of Subassembly	19
Table II	Inspection Data of Compartment	20
Table III	Reference Table of Parts Number of Compartment	21
Table IV	Inspection Data of Tie Rod	22
Table V	Irradiation Condition of the Subassembly [PFB011]	23
Table VI	Items of Postirradiation Examination of Compartments and Pins	24
Table VII	Results of Smear (α)	25
Table VIII	Results of Smear (γ)	26
Table IX	Fuel Stack Length Change	27
Table X	Pin Weighing	27
Table XI	Pin Total Length Change and Maximum Bowing	28
Table XII	List of Flux Monitors	29
Table XIII	Problem and Solution in the Work of Transfer of Failed Fuel	30
Table XIV	Possibility and Problem of Identification of Failed Fuel Pin	31

List of Figures

Fig. 1	Schematic Drawings of the Subassembly, its Compartment and Fuel Pin (FFDL)	32
Fig. 2	Structure of Fuel Pin for the Test	33
Fig. 3	Transverse Cross-Section of the Subassembly	34
Fig. 4	In Reactor Location of the Subassembly [PFB011]	35
Fig. 5	Flow Diagram of Postirradiation Examination on the Sub- assembly [PFB011]	36
Fig. 6	Radial Distribution of Gamma Ray Intensity (^{58}Co 0.811MeV)	37
Fig. 7	Gamma Ray Spectroscopy (Pin No. 8905, 8922)	38
Fig. 8	Axial Distribution of Pin Diameter (Pin No. 8922)	39

Fig. 9	Axial Distribution of Pin Diameter (Pin NO. 8927)	40
Fig. 10	Axial Profile of Bowing of Pin (Pin No. 8922)	41
Fig. 11	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8927) .	42
Fig. 12	Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No. 8905) .	43
Fig. 13	Change of Pressure in Gas Collection System	44
Fig. 14	Installation Position of Dosimeter Capsule in the Part of Entrance Nozzle of the Subassembly	45
Fig. 15	Fuel Stack Length Change of MK-II Core Fuel Pins with Average Burn-up	46
Fig. 16	Relation of Fuel Pin Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with Average Burn-up	47
Fig. 17	Flow Diagram of Postirradiation Examination for Identifica- tion of Failed Fuel Pin	48

List of Photographs

Photo. 1	X-ray Radiograph of Pins	49
Photo. 2	Artificial Defect of Pins	51
Photo. 3	Tag Gas Capsule	52

目 次

1. ま え が き	1
2. FFDL 炉内試験用集合体の構造	2
2.1 試験用集合体の概要	2
2.2 人工欠陥ピン	3
2.3 模擬ピン	3
2.4 校正ピン	4
2.5 試験用集合体のピン配置	4
3. FFDL 炉内試験用集合体 (PFB 011) の使用前検査結果の概要	5
4. 照 射 履 歴	6
5. 照射後試験の目的	7
6. 照射後試験結果	8
6.1 集合体の移送	8
6.2 集合体・コンパートメント試験	8
6.2.1 解体・再組立	8
6.2.2 ナトリウム洗浄	9
6.2.3 ラッパ管アスキャン	9
6.3 ピン試験	9
6.3.1 スミヤ測定	9
6.3.2 アスキャン (短半減期核種の測定)	9
6.3.3 X線ラジオグラフィー	10
6.3.4 重量測定	10
6.3.5 詳細外観	10
6.3.6 寸法測定	11
6.3.7 アスキャン (通常の測定)	11
6.3.8 ピンパンクチャ	11
6.3.9 ピン切断	12
6.4 モニタ類の採取	12
6.4.1 エントランスノズル部ドジメータ	12
6.4.2 フラックスモニタ管内モニタ	12
7. 検 討	13
7.1 移 送	13

7.2 試験結果についての考察	13
7.2.1 校正ピンの照射後試験結果	13
7.2.2 人工欠陥ピンの照射後試験結果	14
7.3 破損燃料ピンの同定法の確立	15
8. ま と め	17
9. 参 考 文 献	18

1. ま え が き

運転中の原子炉内で何らかの原因により燃料破損が発生した場合、当該破損燃料を速やかに検出して炉外へ取出すことが、原子炉を安定に運転し、稼働率を高める上で重要である。このため「常陽」では炉内ナトリウムショッピング法による破損燃料集合体検出装置（Failed Fuel Detection and Location System, 以下FFDLと称す）を開発し、その性能確率等を行うため、2本の人工欠陥ピンと1本の校正ピンの他に、ステンレス製のペレットを充填した模擬ピンを組み込んだ試験用集合体を炉内で照射した。⁽¹⁾⁽²⁾

照射燃料集合体試験室（FMS）では、このFFDL炉内試験用集合体の照射後試験を実施し、ナトリウムの燃料ピン内への浸入状況、人工欠陥孔からのFPガス放出の有無等、上記試験のバックアップデータを取得するとともに、照射後試験項目ごとに人工欠陥ピンのデータを取得し、現状の試験機における照射後試験での破損燃料ピンの同定方法について検討した。

2. FFDL炉内試験用集合体の構造

2.1 試験用集合体の概要

試験用集合体は、Fig. 1に示すように、燃料及び模擬ピン 30 本、燃料要素支持機構 6 本、コンパートメント 6 本、ハンドリングヘッド、ラッパ管、ノズル・軸心（エントランスノズル、コンパートメント支持機構、軸心管等）から構成されている。燃料及び模擬ピン計 5 本が 1 本の燃料要素支持機構に組み込まれ、1 本のコンパートメントに挿入される。コンパートメント 6 本はエントランスノズルに溶接されたコンパートメント支持機構に組み込まれる構造となっている。これらの寸法及び構造は B 型特殊燃料集合体に同じである。

試験用集合体は炉心燃料集合体と同様の外形形状を有し、全長は 2,970 mm、エントランスノズル球面座より集合体上部までの長さは 2,440 mm、ラッパ管パッド部の外対面距離は 81.2 mm である。

試験用集合体の構成部品を以下に示す。

- (1) ハンドリングヘッド
- (2) ラッパ管
- (3) エントランスノズル
- (4) コンパートメント支持機構
- (5) 軸心管
- (6) コンパートメント
- (7) 燃料要素支持機構
- (8) 燃料及び模擬ピン

燃料及び模擬ピンの構成は次のとおり。

イ 人工欠陥ピン	2 本
ロ 校正ピン	1 本
ハ 模擬ピン	27 本

これらの寸法及び構造は I 型特殊燃料要素に同じである。イ及びロは炉心燃料ピンと同等の組成を有する。これらの燃料ピンは 1 つのコンパートメントに 1 本配置されている。すなわち、3 つのコンパートメントにはそれぞれ燃料ピン 1 本と模擬ピン 4 本が装填され、残りの 3 つのコンパートメントには模擬ピンのみが装填されている。

2.2 人工欠陥ピン

(1) 概要

人工欠陥ピンは、外径 5.5 mm、内径 4.8 mm、肉厚 0.35 mm の 20%冷間加工 SUS316 相当ステンレス鋼製の被覆管（スリット付）と上・下部端栓で溶接密封された構造で、内部には直径 4.6 mm 劣化ウラン酸化物インシュレータペレットを上下に 12 mm、その中央に直径 4.63 mm のウラン・プルトニウム混合酸化物ペレット 550 mm、更にインシュレータペレットの上部と下部に夫々 183 mm、117 mm の要素反射体（上）と要素反射体（下）、要素反射体（上）の上部に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ている。これらペレット及び反射体の組成は MK-II 炉心の炉心燃料ピンに同じである。なお、燃料ピン内部はヘリウムガス雰囲気である。被覆管の外側には直径 0.9 mm のラッピングワイヤを 209 mm のピッチで 7 回巻きつけ、両端を上・下部端栓部で玉どめする。ラッピングワイヤは各模擬ピンとの間隙を保持するとともに、コンパートメントの流入管より導入された冷却材に回転ベクトルを与えて混合を促進する機能を有する。ラッピングワイヤ、抑え板付プレナムスリーブ、要素反射体（上）、要素反射体（下）、上・下部端栓の材質は SUS 316 ステンレス鋼であり、要素反射体（上）、要素反射体（下）及びラッピングワイヤは 20%冷間加工材である。また、プレナムスプリングは SUS 304 ステンレス鋼である。

人工欠陥ピンの全長は 1,533 mm である。Fig. 2 に寸法・構造を示す。

(2) スリット付被覆管

人工欠陥ピンには、被覆管にスリットを設けてある。スリットは巾 0.1 mm、長さ 1 mm であり、プレナムスプリング部、要素反射体（上）より 100 mm 上方に位置する。

スリットは燃料ピン及び集合体の組立並びに輸送時の密封性を確保するため、ステンレスハンダにより密封した。密封部のステンレスハンダは炉内温度約 300℃において溶融する。

2.3 模擬ピン

模擬ピンの寸法及び構造は人工欠陥ピンに同じである。燃料部には燃料体を模擬したステンレス鋼を装填してある。尚、模擬ピンの内 1 本にはタグガスを封入したカプセルを装填し、被覆管に人工欠陥ピンと同じスリット及びハンダによる密封を施してある。タグガスカプセルは、ピンの炉内照射中に形状記憶合金のばねについた開封針が薄膜を突き破り、非放射性 Kr、Xe のタグガスを放出する構造になっている。

2.4 校正ピン

校正ピンの寸法・構造及び組成は、被覆管にスリットを有していないことを除いて、全て人工欠陥ピンに同じである。

2.5 試験用集合体のピン配置

試験用集合体のピン配置を Fig.3 に示す。人工欠陥ピンを炉心中心に近い位置に、また校正ピンが人工欠陥ピンのうち 1 本と同条件の位置となるよう配置を決定した。

3. FFDL炉内試験用集合体(PFB0 1.1)の使用前検査結果の概要

実験炉部照射課において炉装荷前に検査された項目とその結果，および各炉心構成要素のID番号並びに集合体内配置を Table I から TableIV⁽³⁾に示す。

4. 照射履歴

FFDL 炉内試験用集合体 (PFB 011) は、昭和 60 年 4 月 7 日に「常陽」MK-II 炉心内ラック位置 (R-15) に装荷された。その後同年 4 月 10 日にラッパ管 E 面を炉心中心とする方向で、炉心装荷位置 1 D 1 に装荷された。ここで同年 4 月 17 日より 19 日まで照射され、到達燃焼度は集合体平均で 510 MWD / MTM、積算中性子束は、ポイント最大 $5.38 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($E_n \geq 0.1 \text{ MeV}$) であった。続いて 19 日より 23 日まで FFDL 試験が行われ、23 日にラック位置 (R-15) に移送された。照射燃料集合体試験室への搬入は、昭和 60 年 4 月 24 日に行われ、その時点での放射エネルギーは 2380 Ci / 集合体、また崩壊熱は 16.2 W / 集合体と評価されている。Fig. 4 に FFDL 炉内試験時の炉心構成と PFB 011 の装荷位置を示す。また Table V に PFB 011 の集合体照射条件を示す。

5. 照射後試験の目的

FFDL 炉内試験用集合体の照射後試験の目的は、次の項目である。

- (1) 「常陽」における FFDL 炉内試験評価のためのデータの取得
- (2) 照射後試験での破損燃料検出技術開発のための基礎データの取得
- (3) 破損燃料集合体及び破損燃料ピン取扱い技術の取得

また、本集合体の照射が最大 100 MW で 2 日間の短時間照射であり、かつ照射後 5 日間で照射後試験に供されたため、照射初期及び直後の燃料挙動データを取得することも目的の一つである。

6. 照射後試験結果

FMSで行った照射後試験の試験項目と対象試料、および試料数を Table VI に示す。また、試験の流れ図を Fig. 5 に示した。以下にその詳細を述べる。

6.1 集合体の移送

本集合体の移送は、「常陽」と FMF の受渡しポートである。(P-0)まで、双方のキャスクカーを移動し接続する。接続された FFMF キャスクカーは、「常陽」側のキャスクカー内の雰囲気であるアルゴンガスにキャスクカー内の循環ライン配管内及びポート内を予め置換しておき、双方のキャスクカー ドアバルブを開き集合体の受渡しを行った。

キャスクカー ドアバルブを開いた状態で燃料集合体の冷却のために、「常陽」キャスクカーと FFMF キャスクカー内を循環する冷却系が運転される。通常の健全な集合体の受渡し時は、循環ライン内の線量の上昇はないが、今回の集合体の受渡し時は循環ラインの線量の上昇が確認された。次に、キャスクカー切り離し時に行っている循環ライン内及びポートの N₂ 置換を実施したが、通常行っている 2 回の置換回数では、循環ライン内の線量上昇が 0.3 mR/h と依然として僅かではあるが確認されたため、さらに置換回数を追加し 4 回実施した結果、表面線量は 0.15 mR/h まで下った

ポート (P-0) より切り離されたキャスクカーは、試験セル床ポート (P-1) まで移動し、セル内へ搬入した。今回の一連の搬入作業の中で、キャスクカー内の N₂ 置換及びポート (P-0, P-1) の PVC バックの溶着時に、僅かではあるがスタックモニターの線量上昇が確認された。キャスクカー内循環ライン及びスタックモニターで線量上昇に影響した核種は、核種分析の結果 ¹³³Xe であることが確認された。また、希ガスの放出量及び最大濃度は、0.13 Ci, 3.0×10^{-5} $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ であった。

6.2 集合体・コンパートメント試験

6.2.1 解体、再組立

本集合体は、 γ スキャンを早期に実施するために FFMF 搬入後、解体機との取り合い部であるエントランスノズル部のみナトリウムを拭き取り、直ちに解体を行った。そして、コンパートメントから人工欠陥ピン 2 本、校正ピン 1 本、タグガスカプセル入りの模擬ピン 1 本の計 4 本を取り出し ID を確認した。残りのものについては、廃棄のためにナトリウム洗浄を行う必要があるため再びコンパートメントの組立、集合体の組立を実施した。この際の手順については、前もって B 型特殊燃料集合体 (PFB 010) を使いモックアップを行っていたので、問題なく行うことができた。再組立した集合体は、ナトリウム洗浄、⁽⁴⁾ 外観検査を行った後、再度廃棄

のため解体を行い、コンパートメントを取出し、さらに模擬ピンを取り出した。模擬ピンは、エアニッパで切断廃棄した。

6.2.2 ナトリウム洗浄

集合体を解体し、試験対象ピン4本を取り出し再組立を行った後、部材の廃棄のためナトリウム洗浄を実施した。洗浄後の廃液を分析した結果、集合体付着ナトリウム量は、105.4gであった。また廃液中の放射性核種分析では、C. P. の主要核種⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co等が検出された他、 α 放出核種も検出された。しかし、 α 放射能濃度は燃料破損無判断値である $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ⁽⁵⁾以下であった。

6.2.3 ラップ管 γ スキャン

部材切断機で切り出したラップ管について、周方向の γ 線強度分布を γ スキャン装置で測定した。得られた結果から最大の周方向強度分布を示す方向を求めた結果、実験炉部側で推定した炉心推定方向とほぼ一致した。Fig. 6に⁵⁸Coの周方向強度分布を示す。図より最大強度方向は約20°（ラップ管E面側）であり、径方向ピーキング係数は、1.066であった。

6.3 ピン試験

6.3.1 スミヤ測定

人工欠陥部付近の α 、FP核種の有無を確認するためにスミヤを採取し、その放射能濃度を測定した。人工欠陥ピン及び校正ピンについて、ピン1本当たり3種類のスミヤを採取した。ピン取り出し直後ナトリウム付きの状態、まず乾いたろ紙により採取し、次にろ紙にアルコールを付けて採取した。それからピン表面のナトリウムを除去後、乾いたろ紙により採取した。放射能濃度測定結果をTable VII及びTable VIIIに示す。

α 放射能濃度測定では、ナトリウム拭き取り後のスミヤ結果が、どのピンでも最大であった。また、ピン取り出し直後ナトリウム付きの状態、ろ紙にアルコールを付けて採取したスミヤ結果は、欠陥のない校正ピンが検出限界以下であるのに対して、人工欠陥ピンには2本共に α 放射能が検出された。

FP核種では、¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁰⁶Ruが人工欠陥ピンのみに検出されていた。

6.3.2 γ スキャン（短半減期核種の測定）

人工欠陥ピン2本、校正ピン1本について、プレナム部及び燃料部の γ 線スペクトロメトリーを実施した。本測定の目的は、短半減期核種の¹³³Xe（81 keV, 半減期 5.3 日）、¹³¹I（364 keV, 半減期 8 日）、¹³³I（530 keV, 半減期 21 時間）及び人工欠陥部より侵入すると考えられる²²Na（1.275 MeV, 半減期 2.6 年）、²⁴Na（1.369, 2.754 MeV, 半減期 15 時間）を

測定することである。冷却日数を少なくし短半減期核種を調べるために、本測定はコンパートメントからのピン取り出し後、スミヤ採取を行ってすぐにワイヤ付きの状態で行った。

^{133}Xe は校正ピンでは燃料部、プレナム部共に検出されたが、人工欠陥ピンでは燃料部のみに検出され、プレナム部には検出されなかった。これは、生成した ^{133}Xe が一部ペレットから放出され、さらに欠陥部から漏洩したことを示している。 ^{131}I 、 ^{133}I は、人工欠陥ピン、校正ピン共に、燃料部に検出されたが、プレナム部には検出されなかった。また、 ^{22}Na 、 ^{24}Na については、人工欠陥ピン、校正ピン共に検出されなかった。Fig. 7に校正ピンの8905ピンと人工欠陥ピンの8922ピンのプレナム部の γ 線スペクトロメトリーの結果を示す。

6.3.3 X線ラジオグラフィ

8905ピン(校正ピン)、8922、8927ピン(人工欠陥ピン)、8929ピン(タグガスカプセル入り模擬ピン)計4本についてX線ラジオグラフィ試験を行い、内部状況の観察を実施した。Photo. 1にX線写真を示す。人工欠陥のあるピンへのナトリウムの浸入、及び人工欠陥部の観察はできなかった。8929ピンのタグガスカプセルについては、正規の位置に装荷されていることが確認された。

また、人工欠陥ピンと校正ピンについて燃料部スタック長の測定を実施し、照射前の値と比較した。測定結果をTable IXに示す。8905、8927ピンについては大きなスタック長変化は認められないが、8922ピン(人工欠陥ピン)は10 mm伸びていた。

6.3.4 重量測定

8905ピン(校正ピン)、8922、8927ピン(人工欠陥ピン)、8929ピン(タグガスカプセル入り模擬ピン)の計4本について、重量測定を実施した。測定結果をTable Xに示す。照射後試験結果と製造時データとを比較すると、人工欠陥のあるピンについてはすべてに有意差(±0.4 g)を超える重量増加が見られ、最大では3.0 g増加していた。しかし、人工欠陥のない8905ピンについては、製造時データとの有意な差はなかった。

6.3.5 詳細外観

人工欠陥のある3本について、人工欠陥部の観察を実施した。欠陥部は、特に拡大しているようなことはなかったが、ナトリウムが浸入した形跡が見られ、開口部はナトリウムによって一部ふさがれている状態であった。Photo. 2に人工欠陥部の観察結果を示す。

また、8929ピンから取り出したタグガスカプセルの観察を実施し、カプセルの薄膜が開封針により破られていることを確認した。Photo. 3に、観察結果を示す。

6.3.6 寸法測定

人工欠陥ピンの8922, 8927ピンについて, 全長, 外径, 曲りの3項目の測定を行った。測定結果を以下に示す。

(1) 全長測定

全長測定の結果, 人工欠陥ピンの全長変化(照射後-照射前全長)には, 有意差(± 1.0 mm)を越える値を示すピンはなく, 有意な変化は認められなかった。ピン全長の照射前後の変化量をTableXIに示す。

(2) 外径測定

8922ピンの燃料部に外径変化が認められた。また, 燃料上部及び下部付近には, 最大20 μ m程度のオーバーティニーが認められた。しかし, 8927ピンについては有意差($\pm 10 \mu$ m)を超える外径変化は認められなかった。8922, 8927ピンの軸方向プロファイルをFig. 8及びFig. 9に示す。

(3) 曲り測定

特異な曲りは認められなかった。最大曲り量をTableXIに, 8922ピンのプロファイルをFig. 10に示す。

6.3.7 γ スキャン(通常の測定)

本測定は, 6.3.2で述べた核種の測定の後に, 通常のピン試験フローの中でワイヤなしの状態を実施した。人工欠陥ピン2本, 校正ピン1本について軸方向スキャンを行い, 全 γ , ^{95}Zr , ^{137}Cs 等について燃焼分布プロファイルを確認した。人工欠陥ピンである8927ピンと, 校正ピンの8905ピンの測定結果をFig. 11及びFig. 12に示す。人工欠陥ピン, 校正ピン共にFP分布等の異常は認められてはいない。しかし, 人工欠陥ピンである8922ピンは, 燃料スタック長が10 mm程度伸びているのが観察された。

6.3.8 ピンパンクチャ

人工欠陥のない校正ピンについて, ガス圧測定, ガス組成分析等を実施した。結果は, ピン内容積11.14 cm^3 , ピン内ガス圧724.7 Torr (0 $^{\circ}\text{C}$ 換算), ピン内ガス量10.62 cc - STPであった。Kr, Xeは検出できなかった。

また, 人工欠陥ピンをレーザーにより穿孔したところ, 通常のピンではピン内のFPガスが真空引きした捕集系に拡散し一定の圧力を示すが, この場合には一定とならず上昇し続けた。このことは, 人工欠陥部が開孔しており, ここからセル内大気が漏れ込んでいることを示している。Fig. 13に穿孔後の拡散圧の変化を示す。8922ピンと8927ピンのリーク速度は装置本体のリーク速度よりも大きく, またそれぞれのリーク速度には大きな差があった。

6.3.9 ピン切断

校正ピン1本、人工欠陥ピン2本、タグガスカプセル入り模擬ピン1本についてピン切断を行った。人工欠陥ピンのプレナム部を切断したところ、2本共にナトリウムと思われる灰色の固体が詰まっているのが観察された。また、タグガスカプセル上部にも、灰色の固体が詰まっていた。

6.4 モニタ類の採取

6.4.1 エントランスノズル部ドジメータ

本モニタは集合体最下部のエントランスノズル部に挿入されているもので、炉心支持板における高速中性子フラックスを測定するものである。Fig. 14 にドジメータの装荷位置を示す。

本モニタの取出しは問題なく行うことができた。Fig. 14 に示す切断位置を部材切断機の高速度切断機により切り落とすことによって、刻印番号 DS 11 (PIE No. 89 DS 1) のモニタカプセルを取り出した。カプセルは外観上特に異常は認められなかった。

6.4.2 フラックスモニタ管内モニタ

Table XII にフラックスモニタ管から採取したモニタの一欄を示す。

モニタは3種で温度モニタ6個、ドジメータ1個およびタグガスカプセル1個である。取出しは、フラックスモニタ管の上部より120 mmにある切断マーク部分を切断することにより行った。切断時には管の内側にバリができるので、マイクロスピンドルでバリを削りとることにより全モニタを採取した。照射前の各カプセルの装荷順序には間違いはなかった。また、採取されたカプセルの外観には特に異常は認められなかった。

7. 検 討

7.1 移 送

模擬破損燃料の移送作業を通して、破損燃料集合体の移送方法の確立及びキャスクカー設備における破損燃料集合体の受入時の問題点の抽出を行った。その結果、現有移送設備にて破損燃料集合体の受入れが、ほぼ可能であることが確認された。但し、燃料冷却循環ラインの線量上昇の防止対策及びキャスクカー内ガスの排気方法については、今後、対策を検討し改善しておく必要がある。移送作業において生じた問題点及び対策について、Table XIII にまとめた。

破損燃料集合体の移送手順については、通常の健全な集合体の移送と異なる手順となるため今回の移送経験を基に破損燃料集合体の受入れ手順を整備する必要がある。

キャスクカー内で模擬破損ピンの人工欠陥部より放出されたと思われる¹³³Xeが検出されたことにより、冷却日数の短い集合体については、キャスクカーにおいても、破損の有無を確認できる場合もある。

7.2 試験結果についての考察

照射後試験結果を校正ピンと人工欠陥ピンに分けて考える。

7.2.1 校正ピンの照射後試験結果

FFDL 炉内試験用集合体は、集合体平均燃焼度 510 MWD / MTM で、照射後 5 日間で照射後試験に供された。したがって、照射初期及び直後の照射後試験データを取得することができた。

冷却日数が少ないことから、 γ 線スペクトロメトリーにより、通常は認められない短半減期核種が認められた。プレナム部の γ 線スペクトロメトリーによる¹³³Xeのピークからキセノンのガス放出率を求めたところ、6.3%と推定された。⁽⁶⁾

X線ラジオグラフィーでは、燃料部スタック長の変化量を測定した。Fig. 15 に MK-II 燃料ピンの燃料部スタック長変化量を集合体平均燃焼度で整理して示す。今までに FMF で実施された「常陽」MK-II 燃料ピンの照射後試験では、スタック長は燃焼の初期には燃きしまりにより減少し、燃焼が進むにしたがってスエリングにより増加していく傾向があった。本集合体の平均燃焼度は 510 MWD / MTM と小さく、スタック長は燃きしまりにより若干減少しており、今までに得られていた結果と一致していた。

ピンパンクチャ試験では、校正ピンのピン内ガス圧を測定した。Fig. 16 にピン内ガス圧(0℃換算)を集合体平均燃焼度で整理して示す。図中、○印は MK-I、●印は MK-II の燃料ピンを示している。MK-I、MK-II 共に燃焼度の増大に伴い、ピン内ガス圧は増加する傾向にある

が、MK-IIのピンはMK-Iに比べピン内ガス圧が全体的に小さくなっている。これは、MK-IIのピンがMK-Iよりも燃料部に対してプレナム容積が大きく設計されているためと考えられるが、本集合体の校正ピン程度の燃焼度では、MK-IとMK-IIで差はほとんど見られない。

ピンパンクチャ試験のガス分析からFPガス放出率を算出することができなかったため、FMFのスタックでの放出放射能からガス放出率を推定する。8905ピンのガス放出時に、FMFのスタックで検知した放射能は0.220 Ciであった。また、ピンパンクチャ試験実施日の校正ピンに含まれる ^{133}Xe の放射能は、文献(7)の「常陽」払出し時の値から減衰を考慮して2.53 Ciと求まる。したがってガス放出率は、 $0.220 / 2.53 = 8.7\%$ と推定できる。

7.2.2 人工欠陥ピンの照射後試験結果

人工欠陥ピンの照射後試験結果を、校正ピンの結果とも比較しながら検討する。

スミヤ結果の α 放射能濃度を測定したところ、ナトリウム拭き取り後のスミヤ結果がどのピンでも最大であったが、これはナトリウム拭き取り時にセル内浮遊物がピン表面に付着したためと考えられる。また、ピン取り出し直後にろ紙にアルコールを付けて採取したスミヤ結果で、人工欠陥ピンにのみ α 放射能が検出されたことから、スミヤの α 放射能濃度測定により破損ピンの同定が可能であると考えられる。FP核種では、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 、 ^{106}Ru が人工欠陥ピンにのみ検出されたが、どの核種もセル内で検出されており、またFP核種が検出されたスミヤの採取方法も同一ではないため、スミヤの γ 線測定により破損ピンを同定することは無理であると考えられる。

プレナム部の γ 線スペクトロメトリーにより、人工欠陥ピンは2本共に校正ピンのように ^{133}Xe が観察されなかったことから、炉内で照射中に欠陥部よりプレナム部のガスが放出されたことがわかった。また、 ^{22}Na 及び ^{24}Na は検出されなかったが、これは ^{22}Na は生成量が少ないため、 ^{24}Na は、半減期が短いためであると考えられる。

X線ラジオグラフィーで、ピン燃料部のスタック長変化量を測定したところ、人工欠陥ピンのうち8927ピンでは1 mm程度の伸びであるのに対し、8922ピンでは10 mm伸びていた。この伸びは γ スキャンでも観察されたが、Fig. 17に示すように今までの照射後試験では燃焼度の高いピンでも最大で7 mm程度であり、燃焼度の低いピンが10 mm伸びていたのは特異なことである。また、寸法測定でも、人工欠陥ピンのうち8922ピンにのみ燃料部に約0.2%の外径増加が観察され、燃料上部、下部付近にはオーバーリティーが見られた。このことからペレットと被覆管との間に機械的相互作用(FCMI)が起きたことが予想される。これらのことは、燃焼度が低いことから当初予測していなかったものである。

重量測定では、人工欠陥のあるピンでは有意差を超えた重量増加が見られたが、これは欠陥部から浸入したナトリウムによるものであると考えられる。

またピンパンクチャ試験で、レーザによる穿孔後、欠陥部からのセル内大気の漏れ込みにより拡散圧が一定にならなかったことから、欠陥部が開孔状態であることがわかった。2本の人工欠陥ピンでリーク速度に差が見られたのは、人工欠陥部のナトリウムの付着状況の違いによるものと考えられる。

詳細外観検査では欠陥部にナトリウムが浸入した形跡が見られ、プレナム部のピン切断ではナトリウムが浸入していたことが確認された。ナトリウムの浸入量はピン重量測定の結果から8922ピンで3.0g、8927ピンで2.6gと考えられ、2本のピンで大きな差はない。

以上のように、人工欠陥ピンへのナトリウムの浸入が確認され、浸入量も大差ない。しかし、8927ピンでは、燃料部のスタック長、被覆管の外径に大きな変化は認められないのに対し、8922ピンには、10mmのスタック長増加及び0.2%の外径増加が認められた。これは、おそらくナトリウムが浸入した時期が異なり、8922ピンは炉内で燃焼中にナトリウムが浸入しペレットと反応を起こしてスエリングが発生し、スタック長、外径の増加が見られたが、8927ピンは炉停止後にナトリウムが浸入したので、燃料-ナトリウム反応が起こる要因である酸素量、燃料表面温度等が、そのしきい値を超えなかったためペレット反応を越さなかったものと考えられる。

7.3 破損燃料ピンの同定法の確立

本照射後試験の結果から、各試験で破損燃料ピンを同定できる可能性及びその問題点について、Table XIVにまとめた。 γ スキャン、重量測定、ピンパンクチャにより破損燃料ピンの同定が可能で、詳細外観検査により破損部を観察できるものと考えられる。当初有効であるとされていたスマイヤ法では、FP核種の γ 線測定による破損燃料ピンの同定は無理であることがわかった。これは、対象となるFP核種が既にセル内に浮遊しているため、判別できないためである。しかし、スマイヤ結果の α 放射能濃度の測定では、ピンにナトリウムの付いた状態で紙にアルコールを付けて採取すれば、破損燃料ピンの同定は可能であると考えられる。X線ラジオグラフィでの燃料部スタック長測定、及び寸法測定では、破損を同定できる場合もある。

今後、照射後試験で破損燃料ピンを同定する場合について、2つのケースに分けて考えてみる。
ケース1 破損燃料集合体である旨の情報がなく、通常の集合体のように照射後試験に供された場合。

ケース2 破損燃料集合体である旨の情報がある場合

ケース1の場合は、ナトリウム洗浄での廃液分析により α 放射能濃度が燃料破損無判断値 $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以上である場合は、破損の恐れがあると判断される。仮に破損燃料ピンがあった場合には、洗浄時にピン内で、浸入したナトリウムと水との反応が起こると考えられる。したがって集合体解体後、ピン内に残留した反応により生成した水酸化ナトリウムあるいは未反応のナトリウムに起因する重量変化の有無を重量測定で確認することにより、破損燃料ピンが同定できると考

えられる。

しかし、ピンホール程度の極めて小さい破損では、ほとんど問題なくナトリウム洗浄がなされるものと思われ、通常の照射後試験に供される。この場合には、炉外取り出し後冷却日数をかなり経ているため、 γ スキャンでの ^{133}Xe の検出による破損燃料ピンの同定は不可能である。

ケース2の場合には、スミヤ測定、 γ スキャン、重量測定、ピンパンクチャ等により破損燃料ピンの同定は可能であると思われる。しかし実際には、運搬のために冷却日数が必要な場合や炉心燃料のようにピン本数が多く、解体されるまでに1週間程度要する場合には、短半減期核種 ^{133}Xe の有無による破損燃料ピンの同定は不可能である。 ^{133}Xe による破損燃料ピンの同定は、炉停止後早期に実施しなければならない。そこで、半減期が10.7年の ^{85}Kr による破損燃料ピンの同定法の確立が今後の課題となる。ピンパンクチャでは実施時期の制約はないが、全ピンの試験終了までに炉心燃料の場合には1か月以上要するため、 γ スキャン同様有効な手段とは言い難い。

したがって現状では、全ピンを試験しても1週間以内で終了し、かつ集合体の冷却日数と無関係のスミヤ測定、重量測定が最も有効な破損燃料ピンの同定手段であると考えられる。まずスミヤ結果の α 放射能濃度測定、重量変化により破損燃料ピンを同定し、同定されたピンについてピンパンクチャで確認し、次いで詳細外観検査において破損部が観察されるであろう。

以上の考察では、破損の規模が本集合体の人工欠陥部程度である場合の同定法について考えたが、炉内で起こる可能性のある燃料破損には様々な大きさ、形態のものが考えられる。したがって今回破損燃料ピンの同定に有効であると考えられた同定法も、破損の種類によっては必ずしも有効でない場合も考えられる。そのため破損の有無を調べるには、現在FMFにある試験機により総合的に判断することが望ましい。この際の試験の流れ図をFig. 19に示す。本図に従い、異常の見られるピンを絞り込んでいけば、最も効率的に破損の同定が行えるものと考えられる。また、どの程度の破損まで同定できるかについては、今後の検討課題である。

8. ま と め

FFDL 炉内試験用集合体は、模擬破損燃料としては初めて照射後試験を行ったものである。本集合体の試験から下記のことが確認された。

- (1) 校正ピンのプレナム部には ^{133}Xe が検出されたが、人工欠陥ピンでは同核種は存在せず、スリット溶封部が開孔したことがわかった。
- (2) 模擬ピン内のタグガスカプセルは、開封針で薄膜が破られており、計画通りの機能を果たしていた。
- (3) 人工欠陥ピンでは、約 3 g の重量増加があり、ナトリウムが開孔部を通して浸入していた。
- (4) 2 本中 1 本の人工欠陥ピンでは、10 mm のスタック長増加が認められ、外径測定では約 0.2 % の外径増加があった。このことから浸入ナトリウムが燃料と反応し体積増加を引き起こしていること、また被覆管との間に機械的相互作用 (FCMI) を起こしたことが予想される。
- (5) 校正ピンでは上記(3)、(4)の事実は認められなかった。
- (6) 破損燃料ピンの同定は、重量変化、 ^{133}Xe の喪失、開孔部からのガスリーク等により可能である。破損位置の検出は、詳細外観検査以外には可能ではない。また、当初有効とされていたスミヤ法による破損燃料ピンの同定は、FP を指標核種とするとセル内にも同じ核種が存在するため困難であるが、 α 濃度測定によれば可能であることがわかった。

9. 参 考 文 献

- (1) “高速実験炉「常陽」FFDL炉内試験実施要領”
1985年2月
- (2) “高速実験炉「常陽」FFDL炉内試験実施要領参考資料集”
1985年2月
- (3) “PFB 011 (FFDL試験用)照射前データ”
照射後試験関連データ支給票, 60-JY支-3 1985年4月
- (4) “「常陽」MK-II B型特殊燃料集合体(PFB 010)の照射後試験(1)”
田地ら, PNC I 9410 86-011 1986年2月
- (5) “集合体Na洗浄廃液分析結果の取扱いについて”
松島, 燃料部テクニカルレポート, 56(FMS)60 1981年10月
- (6) “低燃焼度ピンの希ガス(^{133}Xe)放出率の推定”
永, 燃材部テクニカルレポート, 86(FMS)10 1986年4月
- (7) “「常陽」払出し燃料等の添付データ”
JF-60-02 1985年4月

Table I Inspection Data of Subassembly

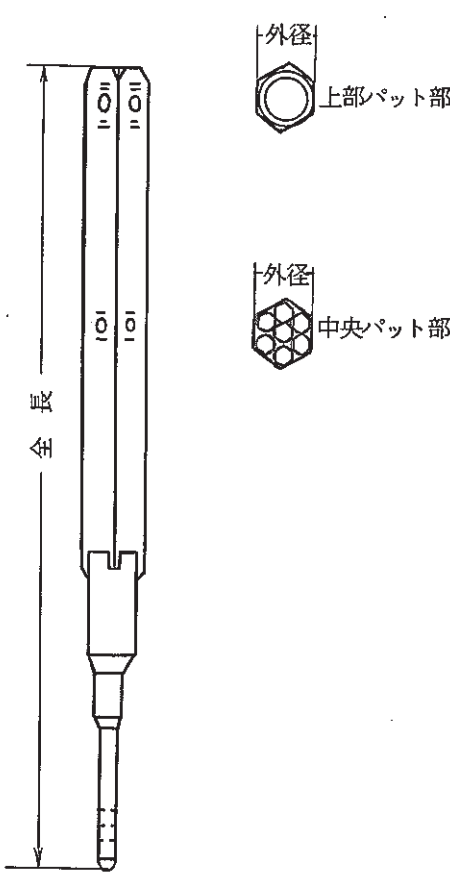
名称	「試験用集合体」 (破損燃料集合体検出試験装置)		項目	規格	検査結果			
集合体No	PFB-011J							
試験用集合体 			健全性検査	刻字の確認	集合体番号が規定通りであること。	良		
			表面洗浄度	酸化物・油脂等の付着物がないこと。	良			
			表面の損傷	深さ200 μm以上のキズ・ピットがないこと。	良			
			最長キースリット位置確認	最長キースリットが一直線上にあること。	良			
寸法検査	全長		2,970 ^{+2.5} _{-3.0} mm	2969.5				
	曲り	中央パッド部	1.3 mm以下	A-D 0.3	B-E 1.2	C-F 0.2		
		上部パッド部	3.4 mm以下	A-D 0.9	B-E 1.1	C-F 0.8		
	外径	中央パッド部	81.2 ⁺⁰ _{-0.05} mm	A-D 81.19	B-E 81.18	C-F 81.19		
		上部パッド部	80.3 ⁺⁰ _{-0.05} mm	A-D 80.27	B-E 80.27	C-F 80.27		
		エントランスノズル部	57.00 ± 0.02 mm	57.01	57.01	57.01		
重量		参考値(kg)	43.5					
ロックナット締付トルク		参考値(kgf・cm)	80					

Table II Inspection Data of Compartment

名称	「試験用集合体」 (破損燃料集合体検出試験装置)		項目		寸法検査		健全性検査		
集合体No.	PFB - 011J		規格 コンパート メントNo.	全長 (2,172 ± 2 mm)	曲り (≤1.0 mm)	コンパートメントの表面に 酸化物・油脂等の付着物及 び深さ 200 μm 以上のキズ ピットがないこと。		規定のピンタイロッド が規定の位置に組込ま れていること	
コンパートメント	<p>上部キャップ</p> <p>廻り止めパッド</p> <p>金具付ベローズ</p> <p>全長 (2,172 ± 2 mm)</p>								
111			2171	0.6	良	良			
112			2171	0.7	良	良			
113			2171	0.5	良	良			
114			2171	0.3	良	良			
115			2171	0.9	良	良			
116			2171	0.5	良	良			

Table III Reference Table of Parts Number of Compartment

部 品 名	「試験用集合体」 (破損燃料集合体検出試験装置)
集 合 体 No.	PFB-011J
ラ ッ パ 管 No.	1007
ハンドリングヘッドNo.	1004
エントランスノズルNo.	1004
ロックナット No.	4
フラックスモニタ No.	4

(ハンドリングヘッド側より見た図)

位置	コンパートメント Fab.No. (PIE No.)	上部キャップ No.	温度モニタNo.	ピンタイ ロッド No.	ピ ン		
					位置	Fab.No.	PIE No.
A	111 (89C1)	19	111	19	1	F 1302	8901
					2	F 1303	8902
					3	F 1304	8903
					4	F 1305	8904
					5	B 1J 19	8905
B	112 (89C2)	20	112	20	1	F 1306	8906
					2	F 1307	8907
					3	F 1308	8908
					4	F 1309	8909
					5	F 1310	8910
C	113 (89C3)	21	113	21	1	F 1311	8911
					2	F 1312	8912
					3	F 1313	8913
					4	F 1314	8914
					5	F 1315	8915
D	114 (89C4)	22	114	22	1	F 1316	8916
					2	F 1317	8917
					3	F 1318	8918
					4	F 1319	8919
					5	F 1320	8920
E	115 (89C5)	23	115	23	1	F 1321	8921
					2	F 1102	8922
					3	F 1322	8923
					4	F 1323	8924
					5	F 1324	8925
F	116 (89C6)	24	116	24	1	F 1325	8926
					2	F 1101	8927
					3	F 1326	8928
					4	F 1201	8929
					5	F 1327	8930

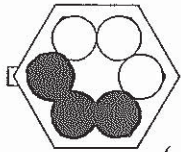
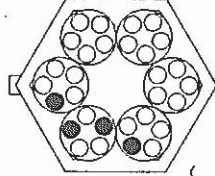
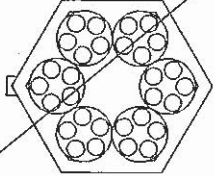
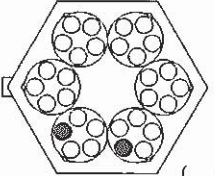
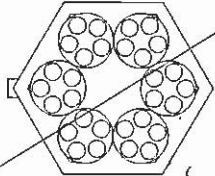
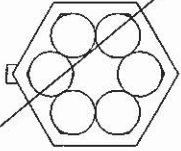
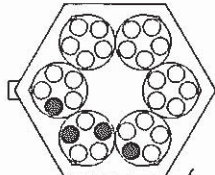
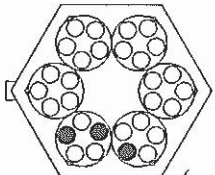
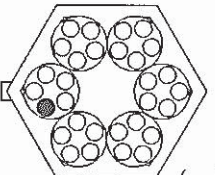
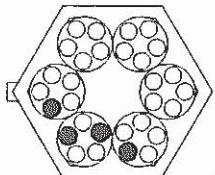
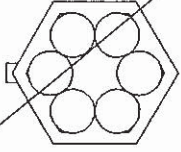
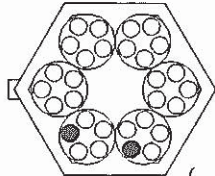
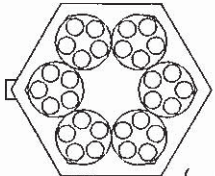
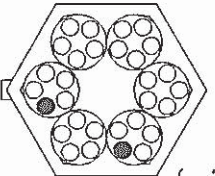
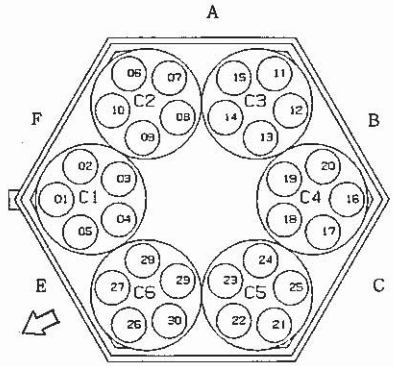
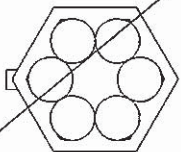
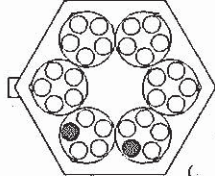
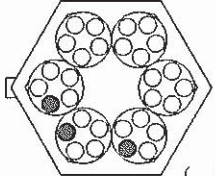
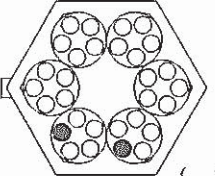
Table VI Inspection Data of Tie Rod

名称	「試験用集合体」 (破損燃料集合体検出試験装置)					
集合体No.	PFB-011J					
<p>ピンタイロッド</p>						
規格 ピンタイ ロッドNo.	寸法検査			全長 (参考値)	健全性検査	
	位置	外径 (3.5 ± 0.04mm)			ピンタイロッドの表面に 酸化物・油脂等の付着物 及び深さ70 μm以上の キズ、ピットがないこと	規定の燃料要素又はダミ ー要素が規定の位置に組 込まれていること。
19	①	3.51	3.50	1618		
	②	3.49	3.50			
20	①	3.51	3.51	1618	良	良
	②	3.50	3.50			
21	①	3.50	3.50	1618	良	良
	②	3.50	3.50			
22	①	3.50	3.50	1618	良	良
	②	3.49	3.50			
23	①	3.50	3.50	1618	良	良
	②	3.50	3.50			
24	①	3.51	3.51	1618	良	良
	②	3.50	3.50			

Table V Irradiation Condition of the Subassembly (PFB011)

サイクル			7'	
装荷位置			1D1	
燃 焼 度	ポイント最大		MWD/T	
	集合体平均		MWD/T	510
積算中性子 照射量	En ≥ 0.1 MeV	ポイント最大	× 10 ²⁰ n/cm ²	5.38
		集合体平均	× 10 ²⁰ n/cm ²	4.29
	Total	ポイント最大	× 10 ²⁰ n/cm ²	8.60
		集合体平均	× 10 ²⁰ n/cm ²	6.97
線出力	B O C	ポイント最大	W/cm	
		集合体平均	W/cm	
	E O C	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		℃	
	E O C		℃	
燃料最高温度	B O C		℃	
	E O C		℃	
集合体出口温度	B O C		℃	389
	E O C		℃	389
ピーキング係数	B O C	径方向	-	
		軸方向	-	1.185
	E O C	径方向	-	
		軸方向	-	1.184
冷却材流量	B O C		kg/sec	4.1
	E O C		kg/sec	4.1

Table VI Items of Postirradiation Examination of Compartments and Pins

<p>1. コンパートメント 解体 (3本)</p> 	<p>1. X線ラジオグラフィ, 重量測定 (4本)</p> 	<p>5. 詳細外観検査(ワイヤ付) (0本)</p> 	<p>9. ピンパンクチャ(ガス圧) (2本)</p> 	<p>13. ピン切断(MMS) (0本)</p> 
<p>2. コンパートメント寸法測定 (0本)</p> 	<p>2. ワイヤ切断 (4本)</p> 	<p>6. 詳細外観検査(ワイヤ無) (3本)</p> 	<p>10. ピンパンクチャ(ガス圧+ガス分析) (1本)</p> 	<p>14. スミヤ採取 (4本)</p> 
<p>3. コンパートメント X線ラジオグラフィ (0本)</p> 	<p>3. 寸法測定(曲がり) (2本)</p> 	<p>7. ガンマスキャン(スキャン) (0本)</p> 	<p>11. ピン切断(AGS) (2本)</p> 	<p>← ; 推定炉心方向を示す</p> 
<p>4. コンパートメント 内管の切出し及び外観 (0本)</p> 	<p>4. 寸法測定(外径) (2本)</p> 	<p>8. ガンマスキャン(スキャン+スペクトル) (3本)</p> 	<p>12. ピン切断(AES) (2本)</p> 	

● ; 試験対象

Table VII Results of Smear (α)

検出効率：23%

検出限界：3.52E-07

Pin No	スミヤ採取内容*	α 濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)
8922 (人工欠陥ピン)	A	<3.52E-07
	B	7.47E-06
	C	1.66E-05
8927 (人工欠陥ピン)	A	5.08E-07
	B	2.31E-06
	C	5.22E-05
8905 (校正ピン)	A	<3.52E-07
	B	<3.52E-07
	C	1.57E-05
8929 (模擬ピン)	A	<3.52E-07

* A：ピン取り出し直後，Na付の状態 で乾いたろ紙により採取

B：ピン取り出し直後，Na付の状態 で，ろ紙にアルコールを付け採取

C：ピン表面のNaを除去後，乾いたろ紙により採取

Table VIII Results of Sumear (r)

Pin No	スミヤ 採取内容*	r - 濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$) cm² : スミヤの単位面積															
		⁵¹ Cr	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	⁵⁷ Co	⁵⁴ Mn	²² Na	⁹⁵ Nb	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	¹⁸² Ta	¹²⁴ Sb	¹⁴⁴ Ce	¹⁰⁶ Ru	⁹⁵ Zr	⁶⁵ Zn	⁵⁹ Fe
27	A	-	3.1E-5	5.7E-4	-	1.4E-4	1.1E-4	4.7E-6	4.5E-6	1.7E-6	3.9E-6	-	-	-	-	-	-
	B	-	9.4E-4	4.8E-4	-	5.3E-3	7.1E-5	2.4E-4	-	-	-	3.1E-5	-	-	-	-	-
	C	-	1.1E-3	1.3E-3	-	1.7E-3	-	3.5E-4	1.5E-4	2.5E-5	-	-	6.6E-4	4.3E-4	1.1E-4	-	-
22	A	3.0E-4	3.3E-4	7.4E-4	-	5.0E-3	3.8E-5	2.6E-4	-	2.9E-5	2.9E-5	-	-	-	-	5.6E-5	-
	B	-	1.1E-3	3.5E-3	-	5.3E-3	1.8E-4	2.6E-4	1.8E-4	-	-	-	2.1E-4	-	-	-	-
	C	4.0E-4	8.0E-3	8.6E-3	4.2E-5	7.7E-3	-	-	-	2.9E-5	-	-	-	-	-	-	-
05	A	-	-	6.4E-3	-	1.9E-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	2.8E-4	5.2E-4	6.3E-4	-	5.4E-3	4.1E-5	2.9E-4	-	1.3E-5	6.6E-5	-	-	-	-	1.0E-4	-
	C	-	6.9E-3	7.3E-3	3.6E-5	6.6E-3	-	-	-	1.7E-6	-	-	-	-	-	-	-

* A : ピン取り出し直後, Na 付の状態 で乾いたろ紙により採取
 B : ピン取り出し直後, Na 付の状態 でろ紙にアルコールを付けて採取
 C : ピン表面の Na を除去後, 乾いたろ紙により採取

Table IX Fuel Stack Length Change

ピン種類	Pin No.	スタック長		スタック長 変化量 PIE-FAB(mm)
		PIE (mm)	FAB (mm)	
校正ピン	8905	549	550	- 1
人工欠陥ピン	8922	564	554	+10
	8927	553	552	+ 1

Table X Pin Weighing

Pin No.	ピン重量測定結果(g)		
	PIE	FAB	PIE-FAB
8905	225.3	225.2	+ 0.1
8922	230.5	227.5	+ 3.0
8927	229.8	227.2	+ 2.6
8929	196.0	194.7	+ 1.3

Table XI Pin Total Length Change and Maximum
Bowling

Pin No.	全 長 (mm)			最大曲がり量 (mm)
	PIE	FAB	PIE-FAB	
8922	1533.5	1533.2	+0.3	2.4
8927	1532.4	1532.6	-0.2	1.6

Table XII List of Flux Monitors

	モニターキャプセル番号					
	SM 216	SM 215	SM 214	SM 213	SM 212	SM 211
装 荷 位 置	炉心中心位置 より上 1100 mm	炉心中心位置 より上 700 mm	炉心中心位置 より上 290 mm	炉心中心位置 より上 26 mm	炉心中心位置 より下 260 mm	炉心中心位置 より下 760 mm

尚, SM 213 の下にドジメータキャプセル D 211, その下にタグガスキャプセル 89 TG 1 が装荷されている。

Table XIII Problem and Solution in the work of Transfer of Failed Fuel

項 目	問 題 点	対 策
1. 置 換 ラ イ ン	キャスクカー内胴の真空引き用真空ポンプの前後の配管の一部にゴムホースが使用されている。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 真空ポンプの振動を吸収するためにベロー付きの金属配管に変更する。また、真空ポンプのリリースバルブも排気側に接続し外部への漏洩を防止する。 ○ 置換ラインからのFPガス漏洩を防止するため、アルゴンガスから窒素ガスへの置換は実施しない手順に変更する。
2. 燃料冷却循環ライン	FMF キャスクカーと「常陽」キャスクカーへの配管の接続は、気密カプラーを使用しているが、キャスクカー移動のための切り離しの際、循環ライン内のガスが漏洩する可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 「常陽」側での循環ラインの置換回数を追加し循環ライン内ガスの放射能濃度を低減させる。 ○ 破損が予想される集合体については気密カプラーの切り離す際に、PVC等で養生し局所排気の処置を行う。
3. ポートへの接続	キャスクカーとポート間の密封を取っているPVCバックに負圧調整用のHEPAフィルターが付いているがEPガスの漏洩する可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> ○ 破損が予想される集合体の搬入に際しては気密状態で作業を実施する。 ○ PVC内の負圧調整はキャスクカーの置換ラインを使用し実施する。
4. そ の 他	キャスクカー配管系内の気密漏洩試験方法が確立していない。	<ul style="list-style-type: none"> ○ キャスクカー配管系内の定期的な気密漏洩試験方法を検討し、実施する。

Table XIV Possibility and Problem of Identification of Failed Fuel Pin

	試験名	破損同定の可能性	問題点	PIE実施上の条件
1	解体(外観)	疑わしい部分の識別程度なら可能である。	表面のNa及びワイヤによってかくれた部分は確認できない。	
2	スミヤ法	破損燃料ピンに特有なFP核種が検出された場合もしくは α 濃度が健全なピンに比べて高い場合は判断できる。	スミヤろ紙が他のもので汚染した場合、又はピン表面にセル内に浮遊しているFPが付着した場合は判断できない。 健全なピンとの比較が必要である。	セル内が除染されていること。
3	γ スキャン	プレナム部の ^{135}Xe を観察することで判断できる。破損部の位置は、わからない。	冷却日数が長くなると測定不可となる。 (^{135}Xe 半減期 5.3日) 健全なピンとの比較が必要である。 ^{135}Xe がプレナム部に残留している場合判断がむずかしい。	冷却日数の制限。
4	X線ラジオグラフィ	プレナム部に浸入したNaの有無を観察できる場合もある。また、スタック長の伸びより、破損の有無を確認できる場合もある。	表面の付着Na量が多い場合判断できない。	(工業用X線を導入すれば、より細かな観察が可能である。)
5	重量測定	重量差により破損の有無は、判断できる。破損部の位置は、わからない。	ピン重量差が、有意差(±0.7g)以下である場合は、判断できない。	照射前のピン重量が明確であること。 表面の付着Na量を極力少くすること。
6	詳細外観	破損状況確認及び写真撮影が可能である。	破損部がNaでかくれている場合は確認できない。破損部が極めて小さい場合、ウェアマーク、変色など見分けがつかない。 従来の観察方法では、倍率を上げた場合死角になる部分がある。	表面の付着Naが除去されていること。 観察方法を変更する為、破損の可能性を事前に知る必要がある。
7	寸法測定	外径変化の測定で、破損の有無が確認できる場合もある。	表面にNaが付着している場合は、Naの影響により正確な測定ができない。	表面の付着Naが除去されていること。 ワイヤーが切断されていること。
8	パンクチャ	ベルジャーの外に位置する部分に破損がある場合、拡散圧の変化により破損の有無がわかる。破損部の位置はわからない。	拡散圧の変化が装置本体のリークと同等又はそれ以下である場合は、確認できない。(この場合は、ピン内容積、ガス分析の測定結果により、判断できる可能性もある。)	装置本体のリーク量があらかじめであること。(現状のリーク量0.003 Torr/10分) ワイヤーが切断されていること。
9	ナトリウム洗浄	燃料破損無断値($\alpha: 10^{-5}\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)以下である場合は、判断できない。	判断値は過去の実績から変更することはむずかしい。 α 、FP核種については、破損によるものか、取扱いのものか判別できない。	α 濃度が $10^{-5}\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 以上であること。 セル内が除染されているか、又は洗浄装置が隔離されていること。

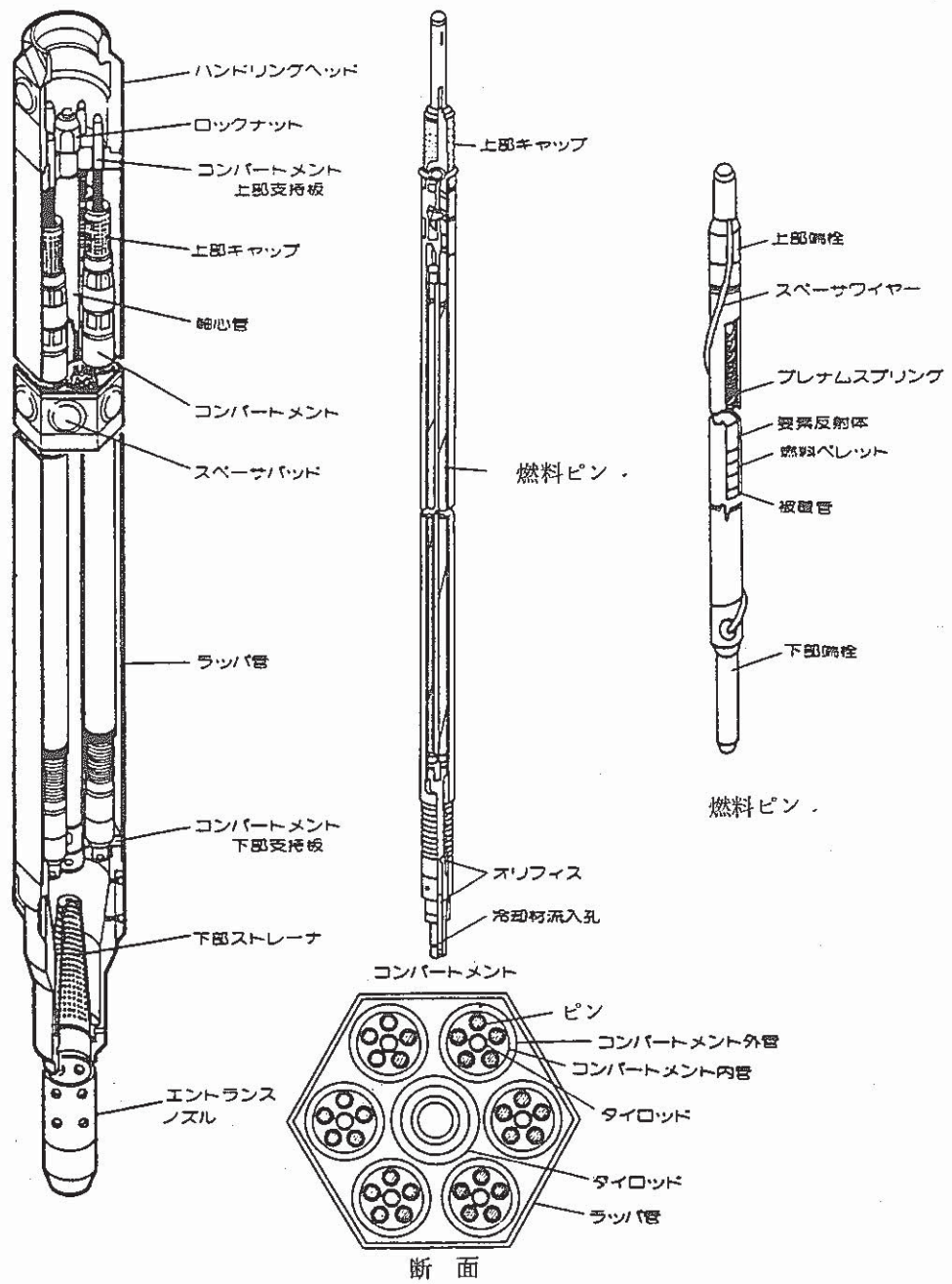
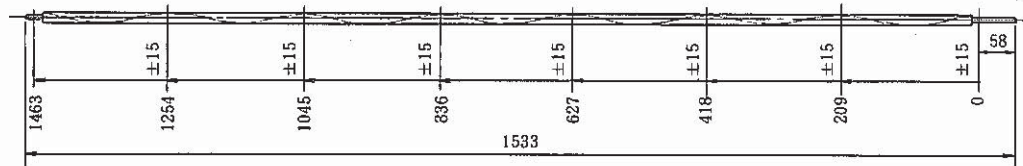
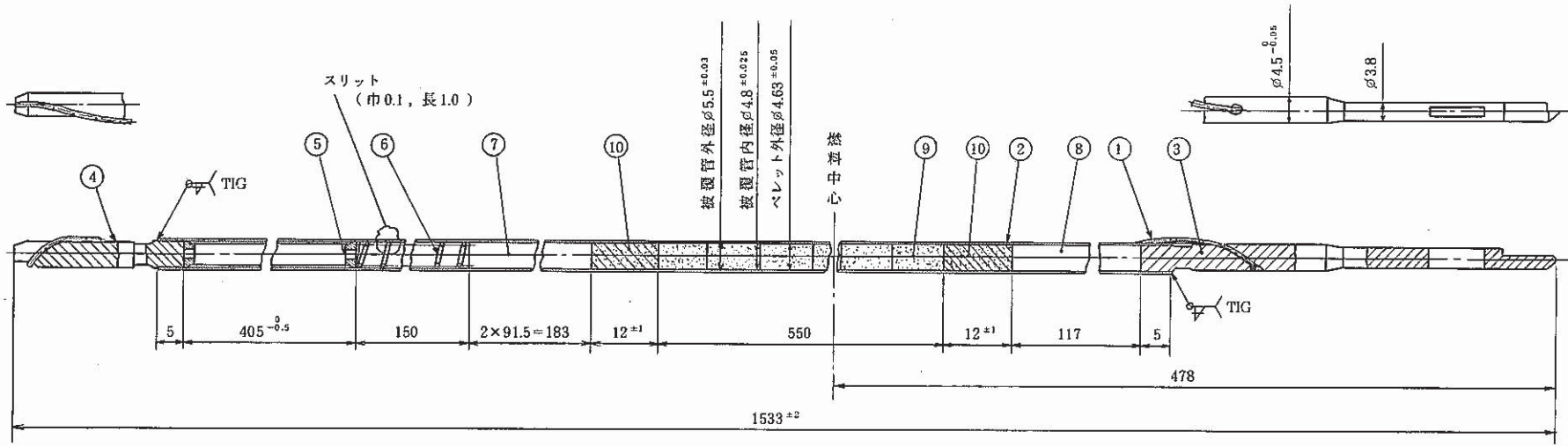


Fig.1 Schematic Drawings of the Subassembly, its Compartment and Fuel Pin (FFDL)



10	インシュレータベレット	劣化 UO ₂	2	
9	炉心用ベレット	PuO ₂ -UO ₂	61	
8	要素反射体 (下)	SUS 316	1	
7	要素反射体 (上)	SUS 316	2	
6	プラチナムスプリング	SUS 304 WPPB	1	
5	抑エ板付プラチナムスリーブ	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	φ0.9 ± 0.01
品番	品名	材質	個数	備考

ワイヤラッピング全体図 (1 / 5)

Fig.2 Structure of Fuel Pin for the Test

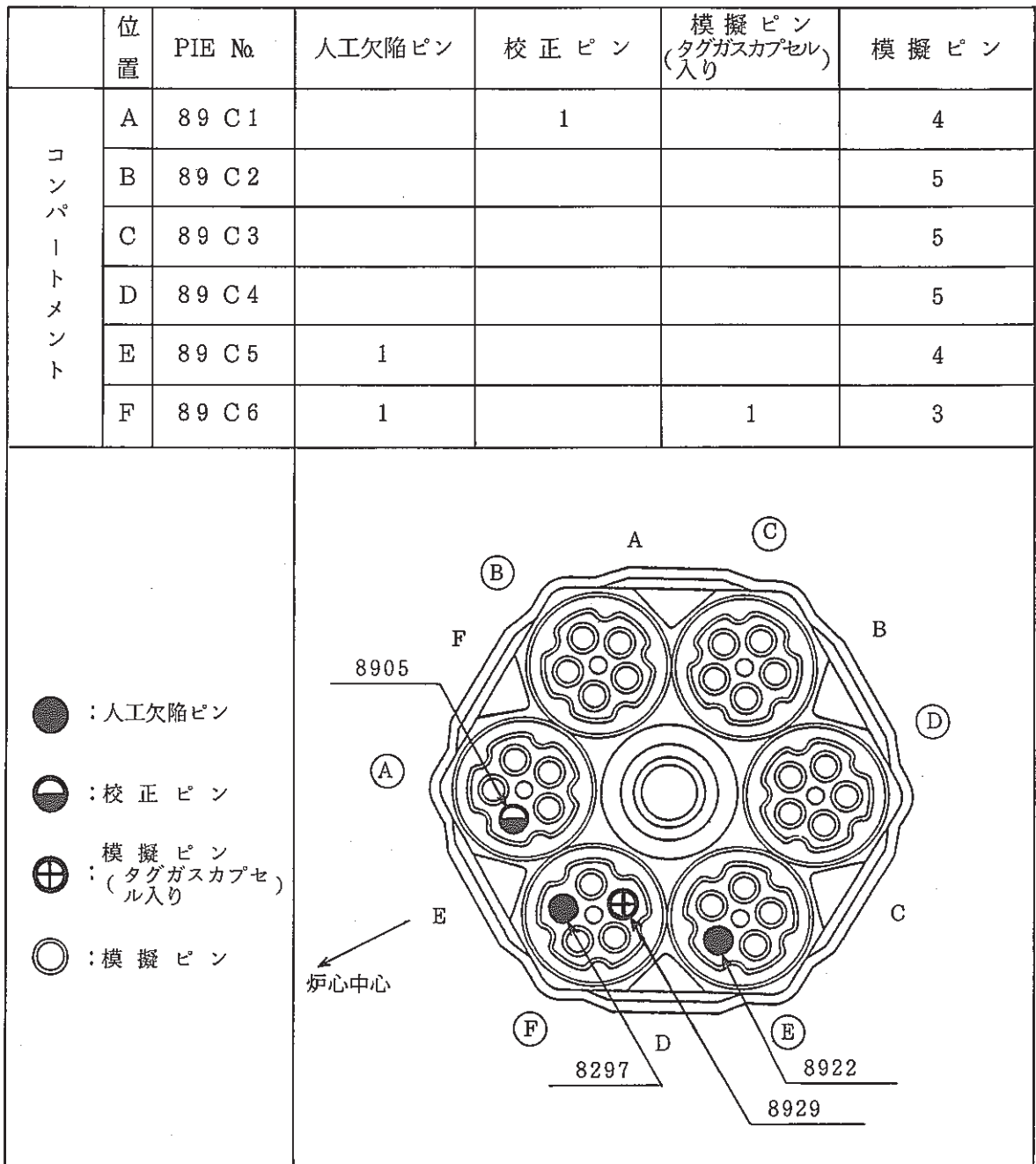


Fig. 3 Transverse Cross-section of the Subassembly

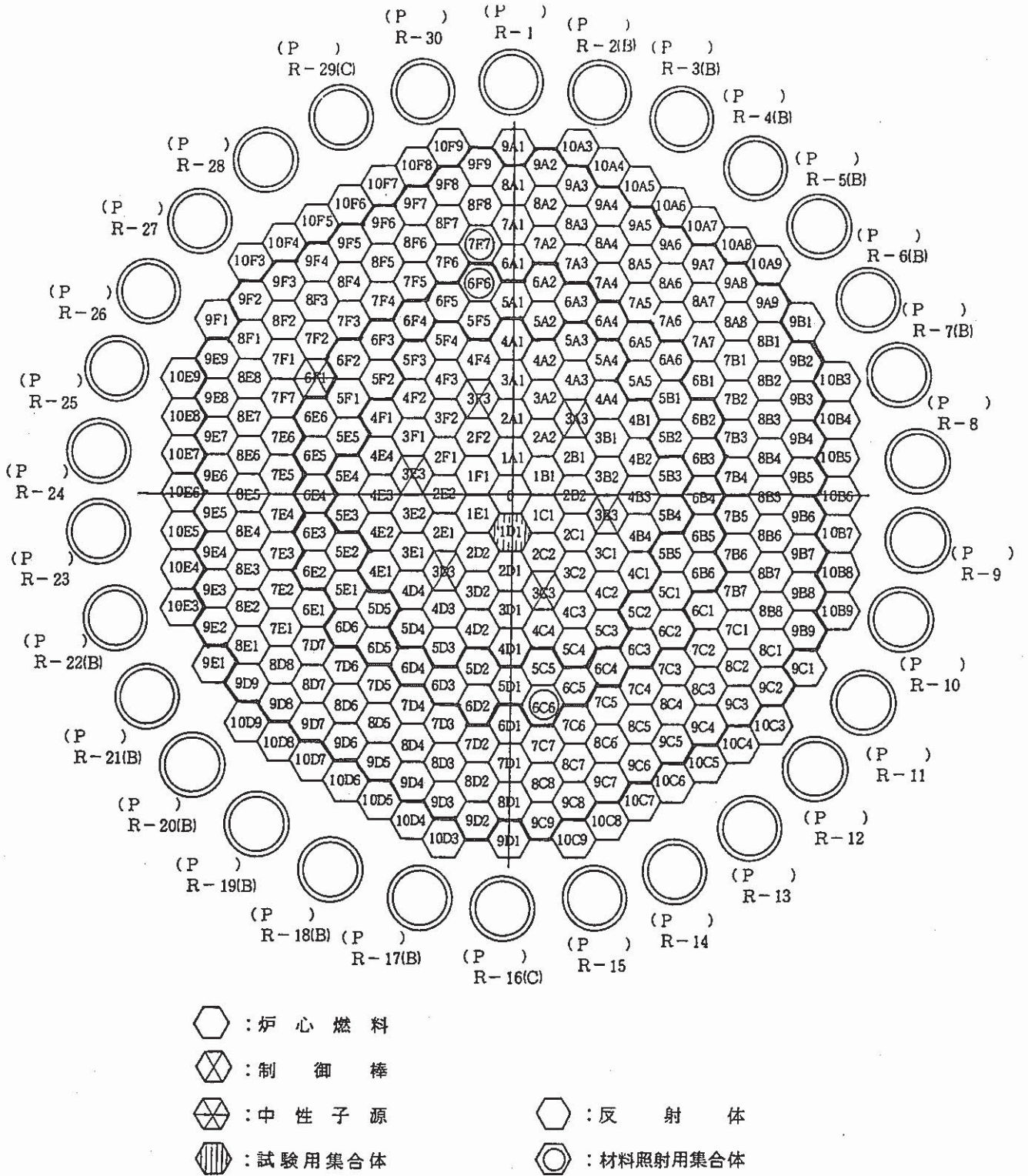


Fig.4 In Reactor Location of the Subassembly [PFB011]

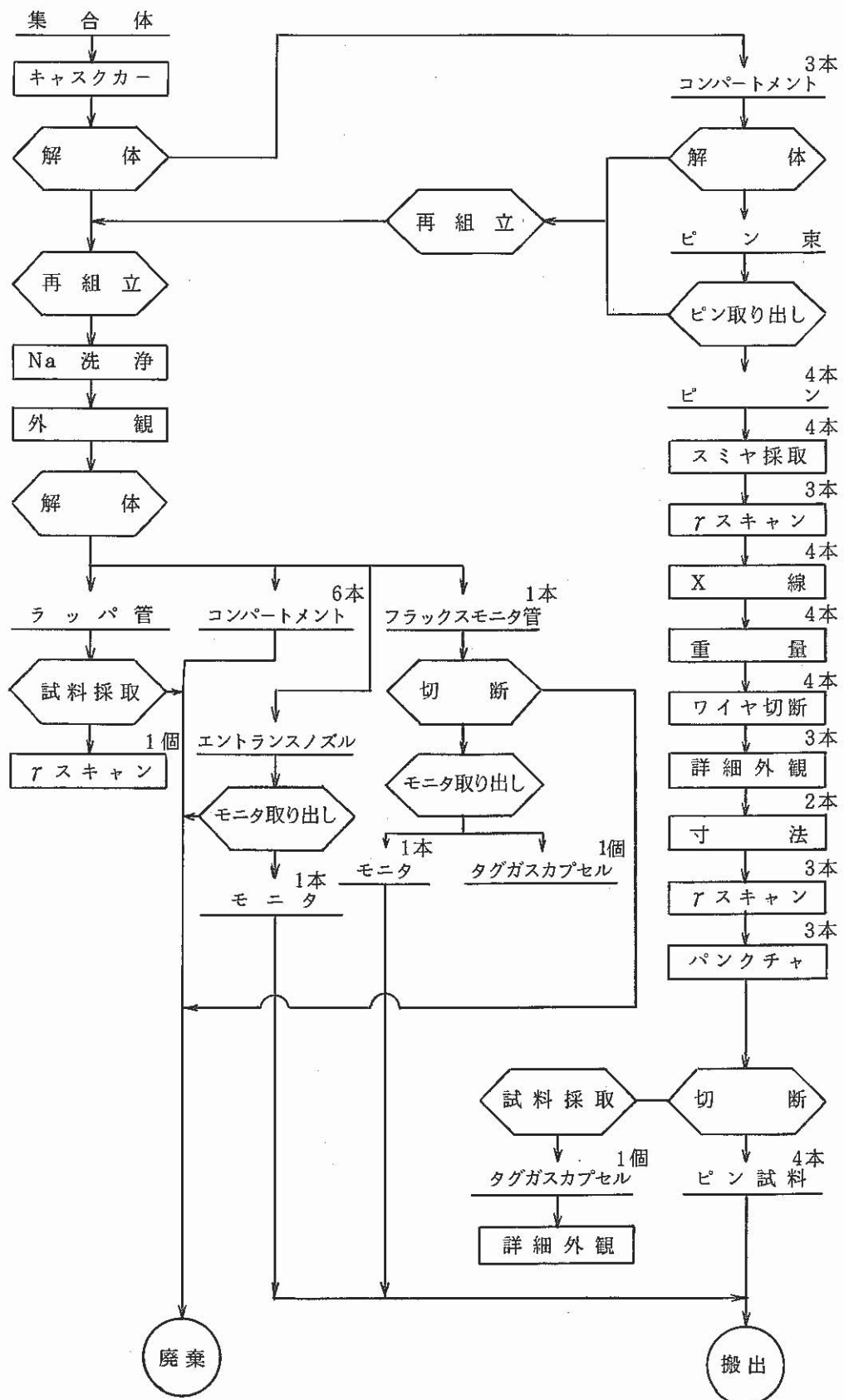


Fig. 5 Flow Diagram of Postirradiation Examination on the Subassembly (PFB 011)

S/A NO. (FAB) :	PFB011	ANGLE OF MAX RATE (DEG) :	19.78
S/A NO. (PIE) :	89WH2	MAX COUNT RATE (CPS) :	28.23
AXIAL POS. (MM) :	1412.00	AVERAGE COUNT RATE(CPS) :	26.47
COOLING TM (DAYS) :	100	PEAKING FACTOR :	1.066
COLL. WIDTH(MM) :	1.40		
OP NO. :	5308-5308		

CORRECTED

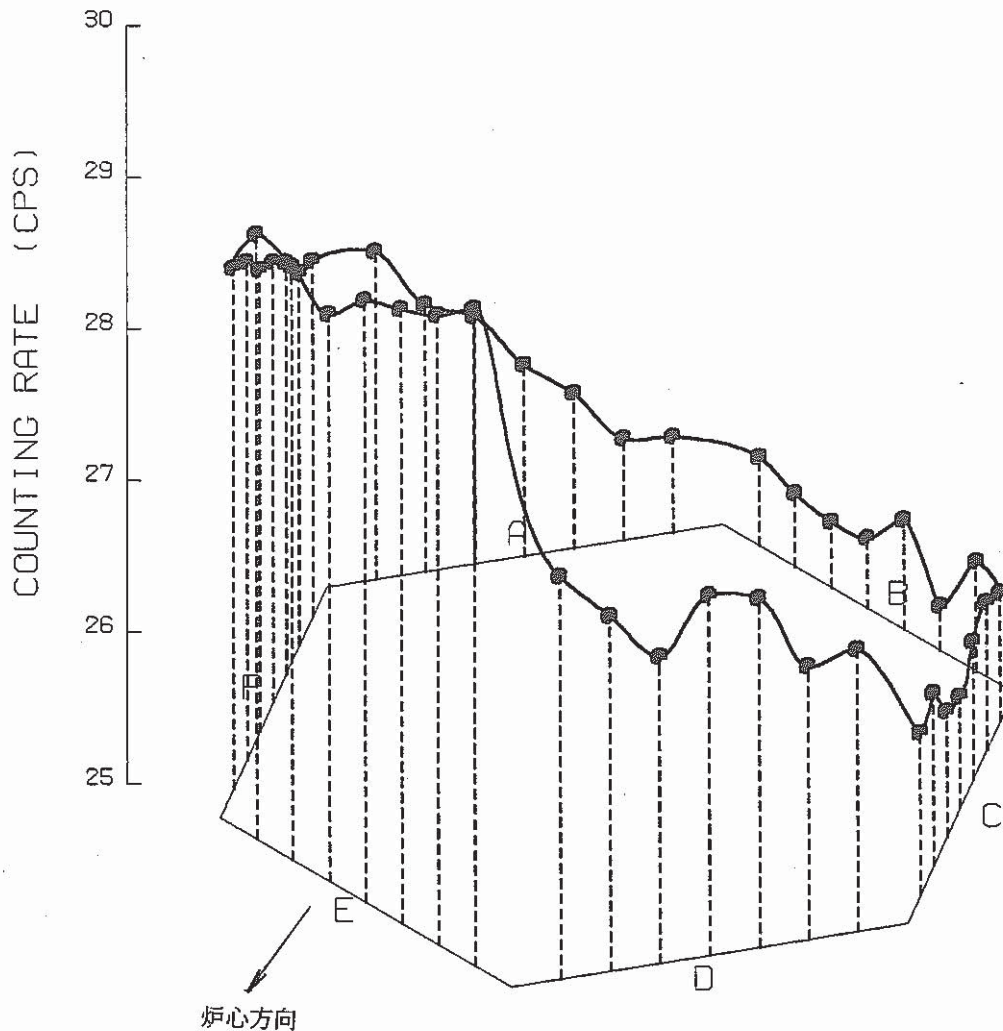
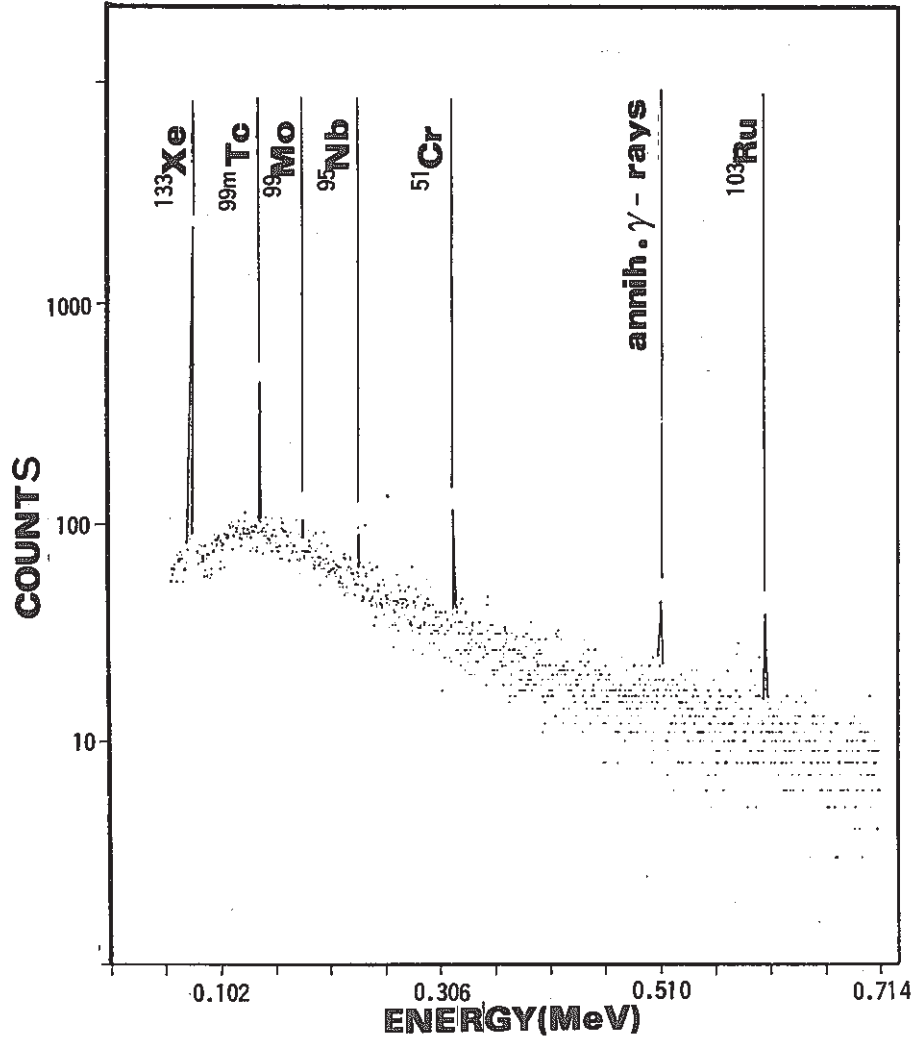


Fig. 6 Radial Distribution of Gamma Ray Intensity
 [^{58}Co 0.811 MeV]

8905Pin



8922Pin

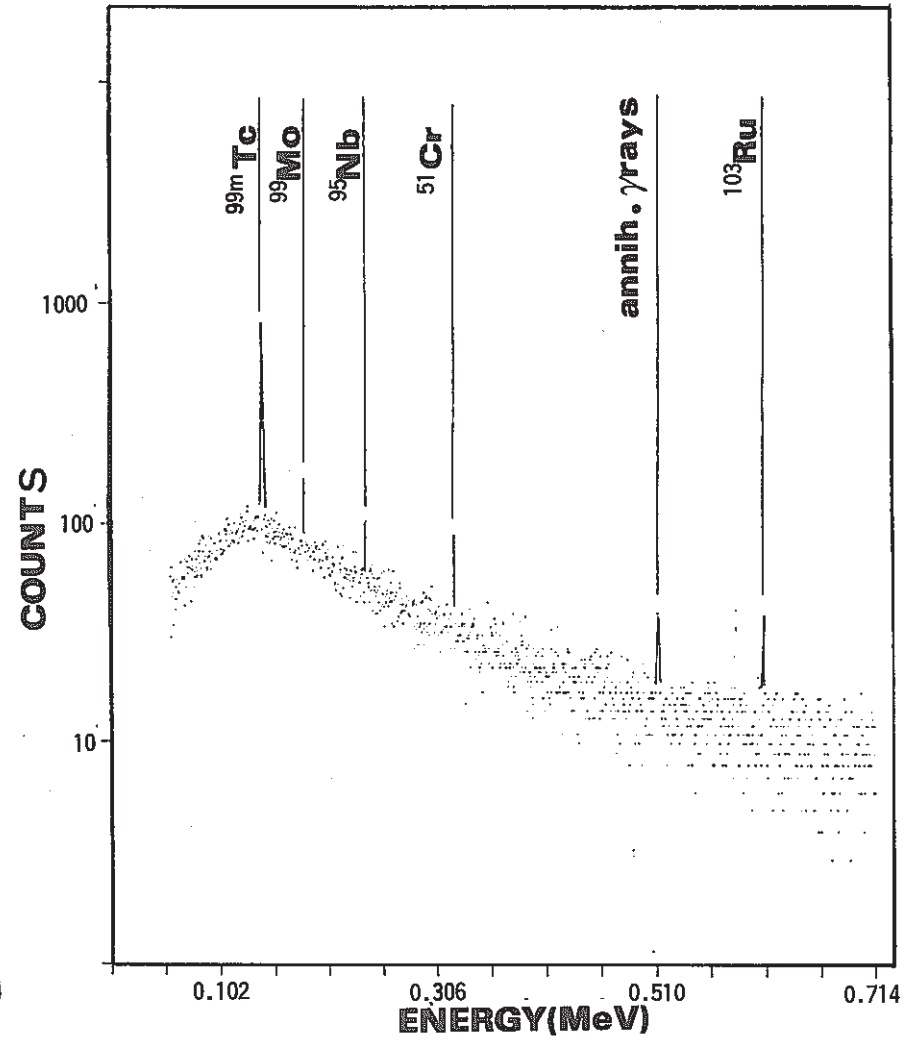


Fig. 7 Gamma - Ray Spectroscopy (Pin No 8905 , 8922)

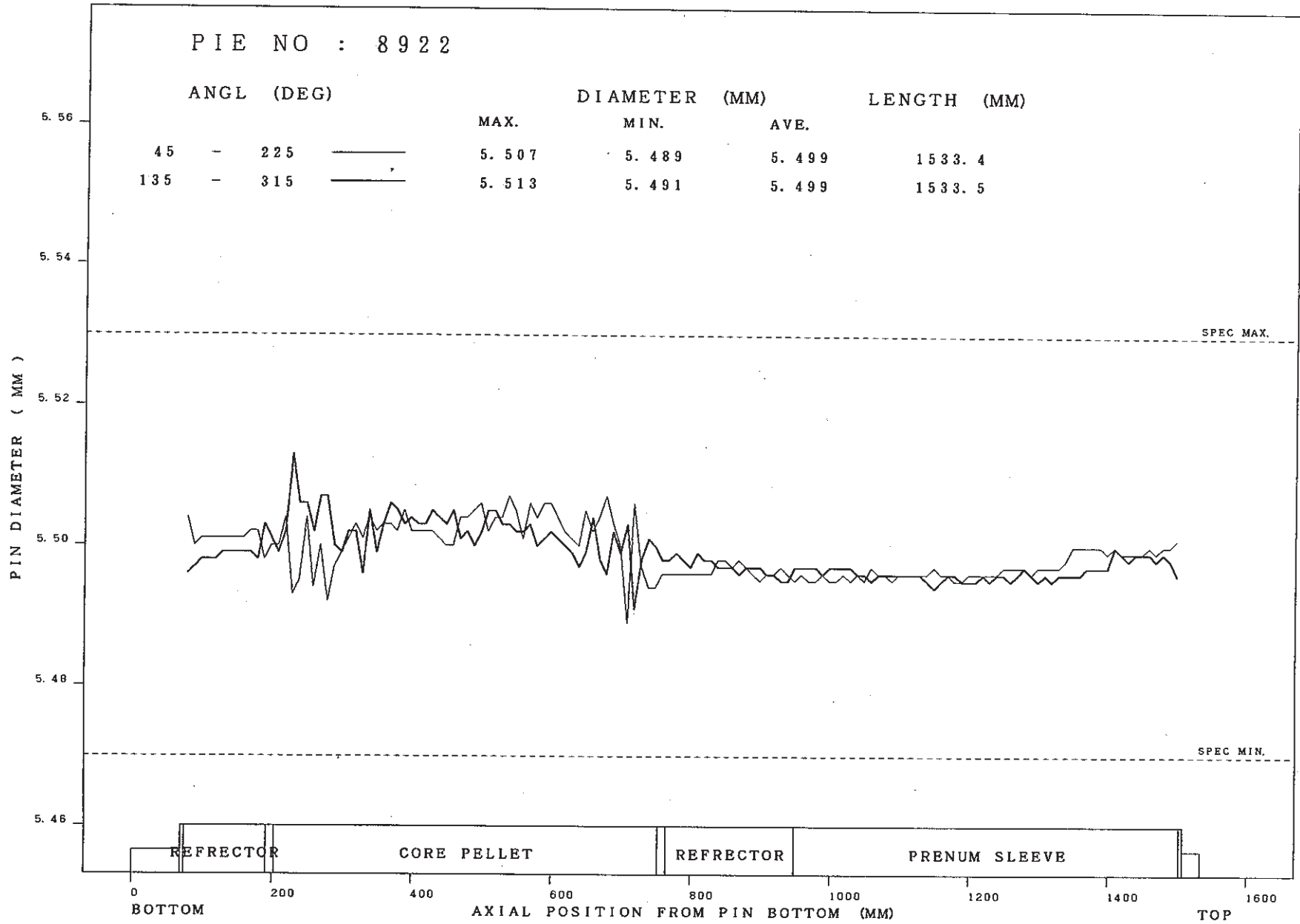


Fig.8 Axial Distribution of Pin Diameter (Pin No.8922)

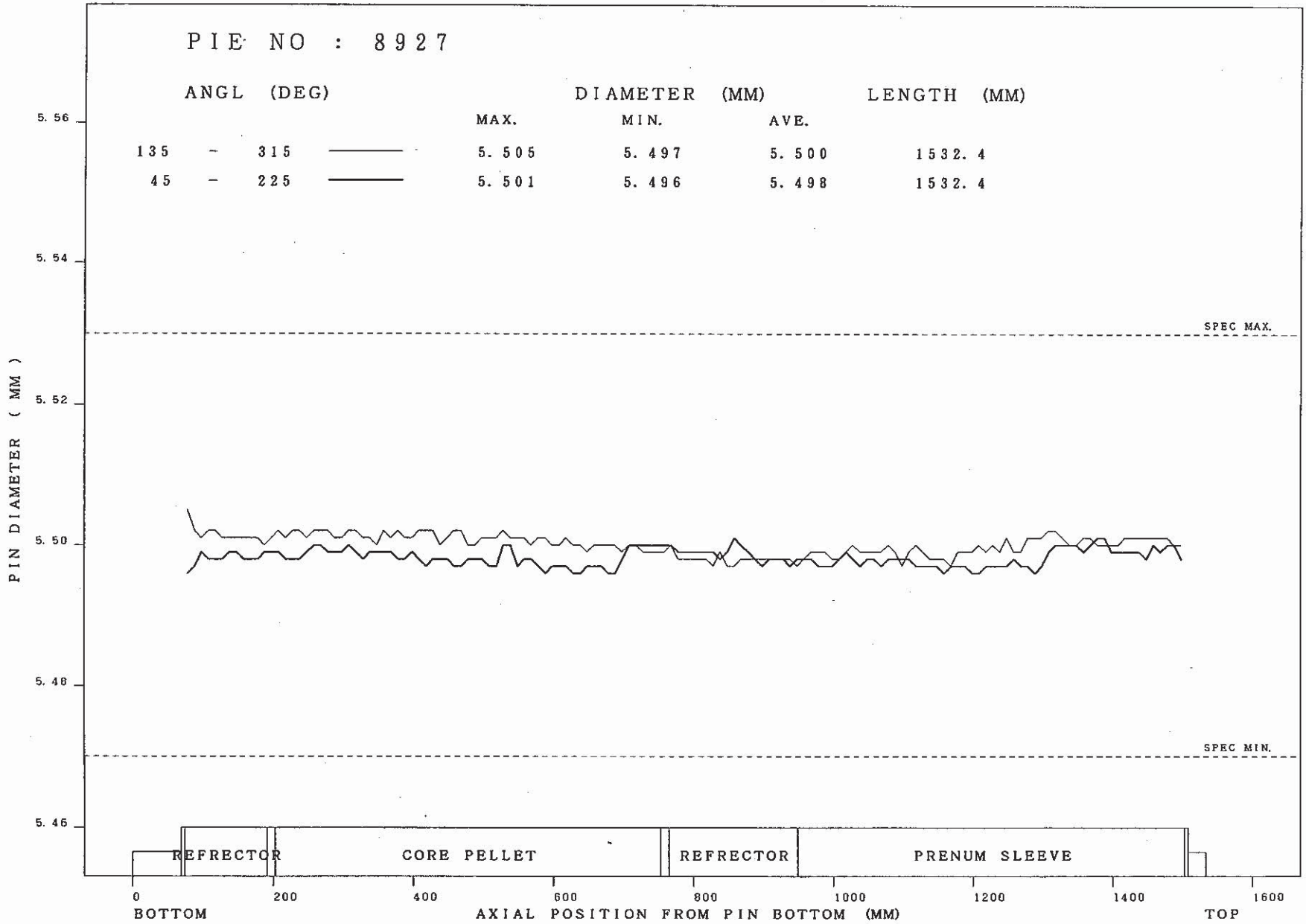


Fig.9 Axial Distribution of Pin Diameter (Pin No.8927)

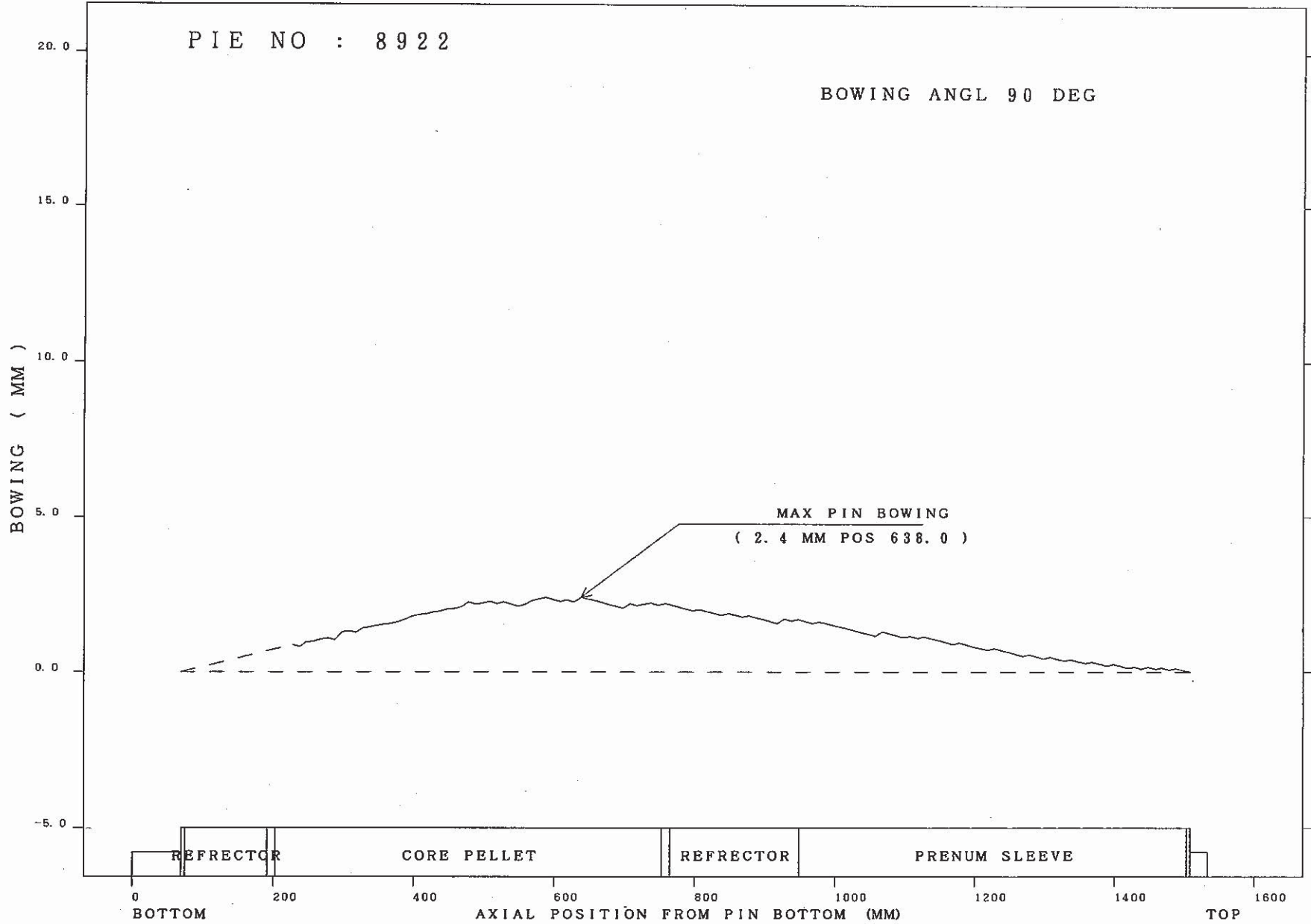


Fig. 10 Axial Profile of Bowing of Pin (Pin No 8922)

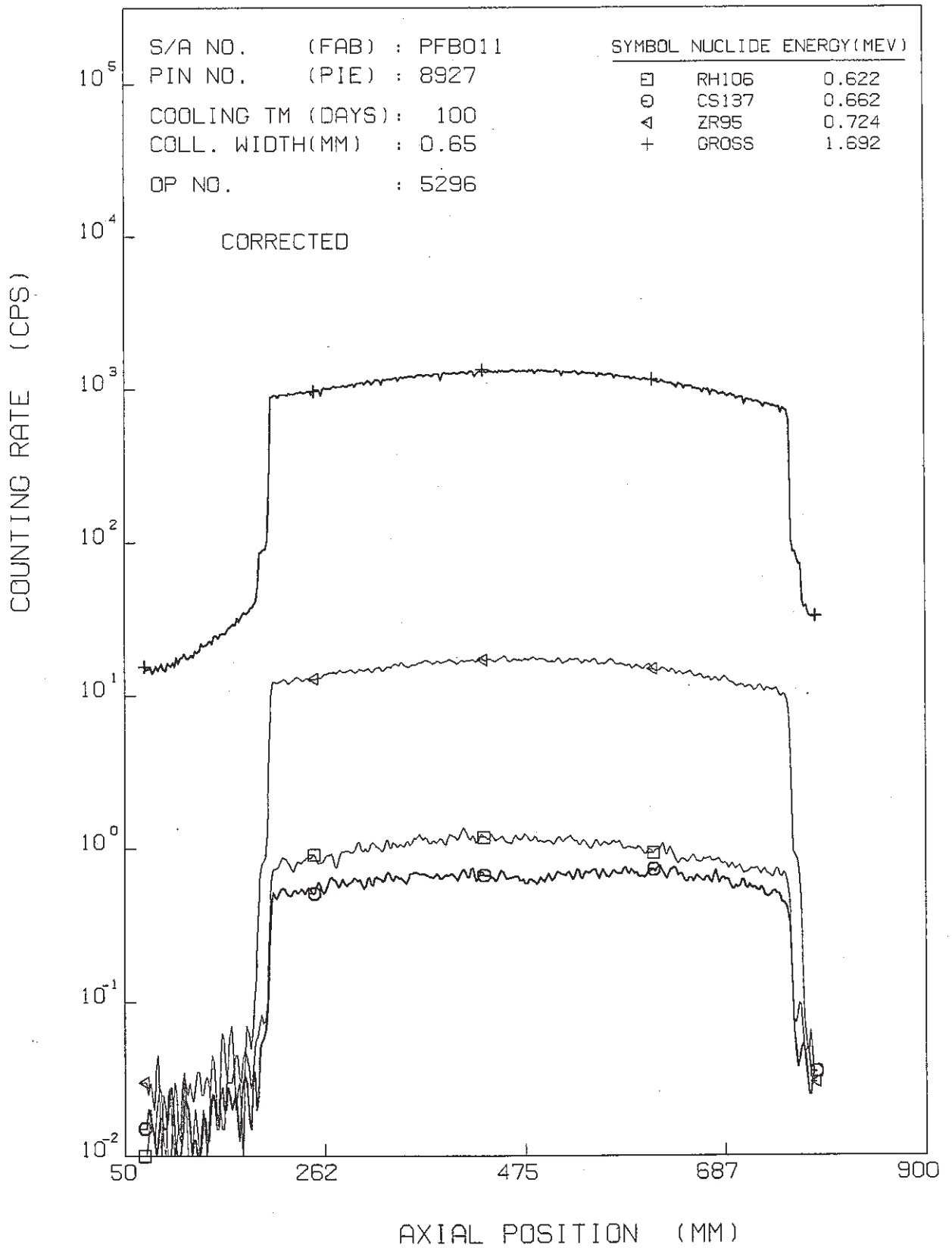


Fig. 11 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No 8927)

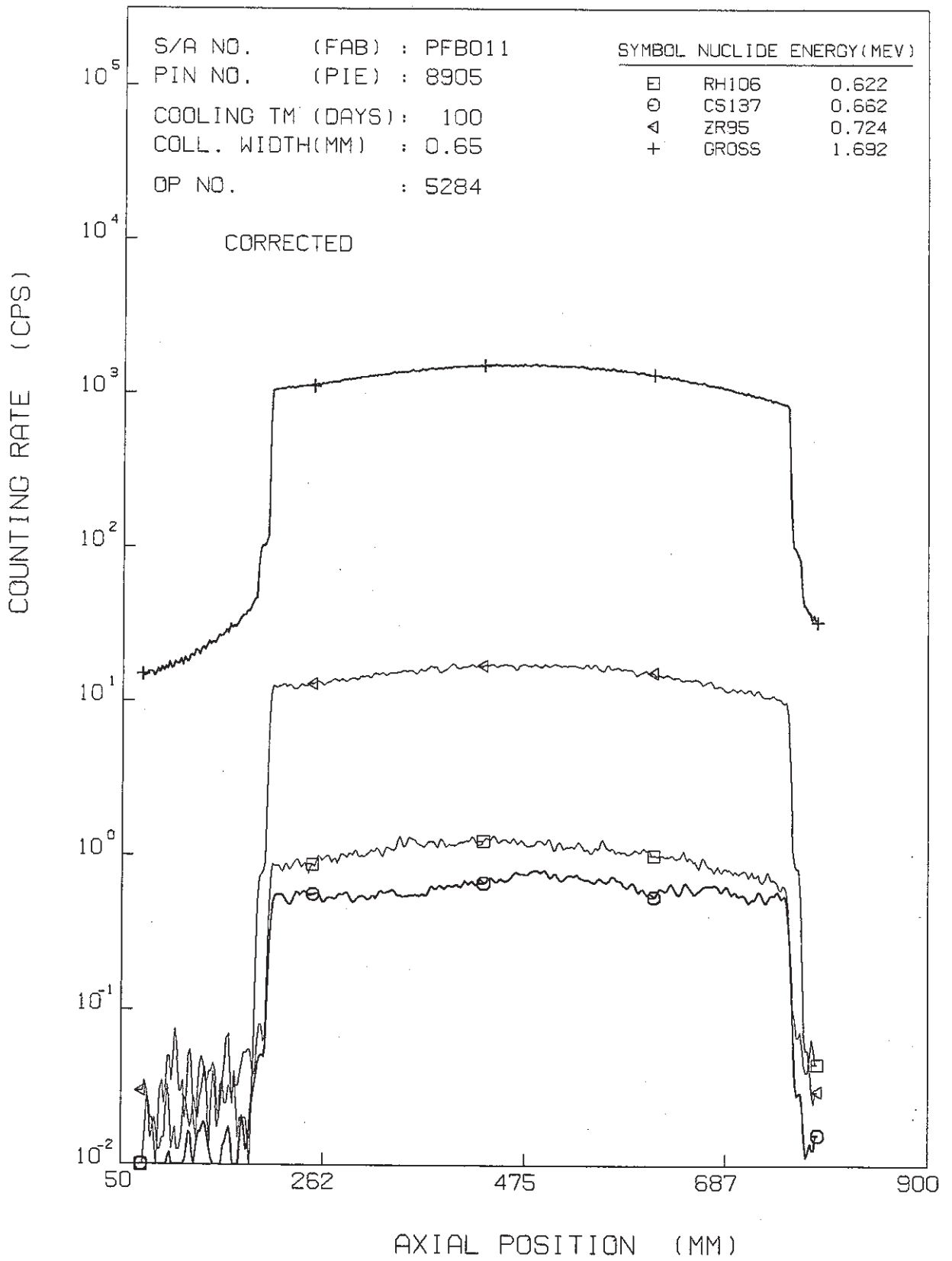


Fig. 12 Axial Distribution of Gamma Ray Intensity (Pin No.8905)

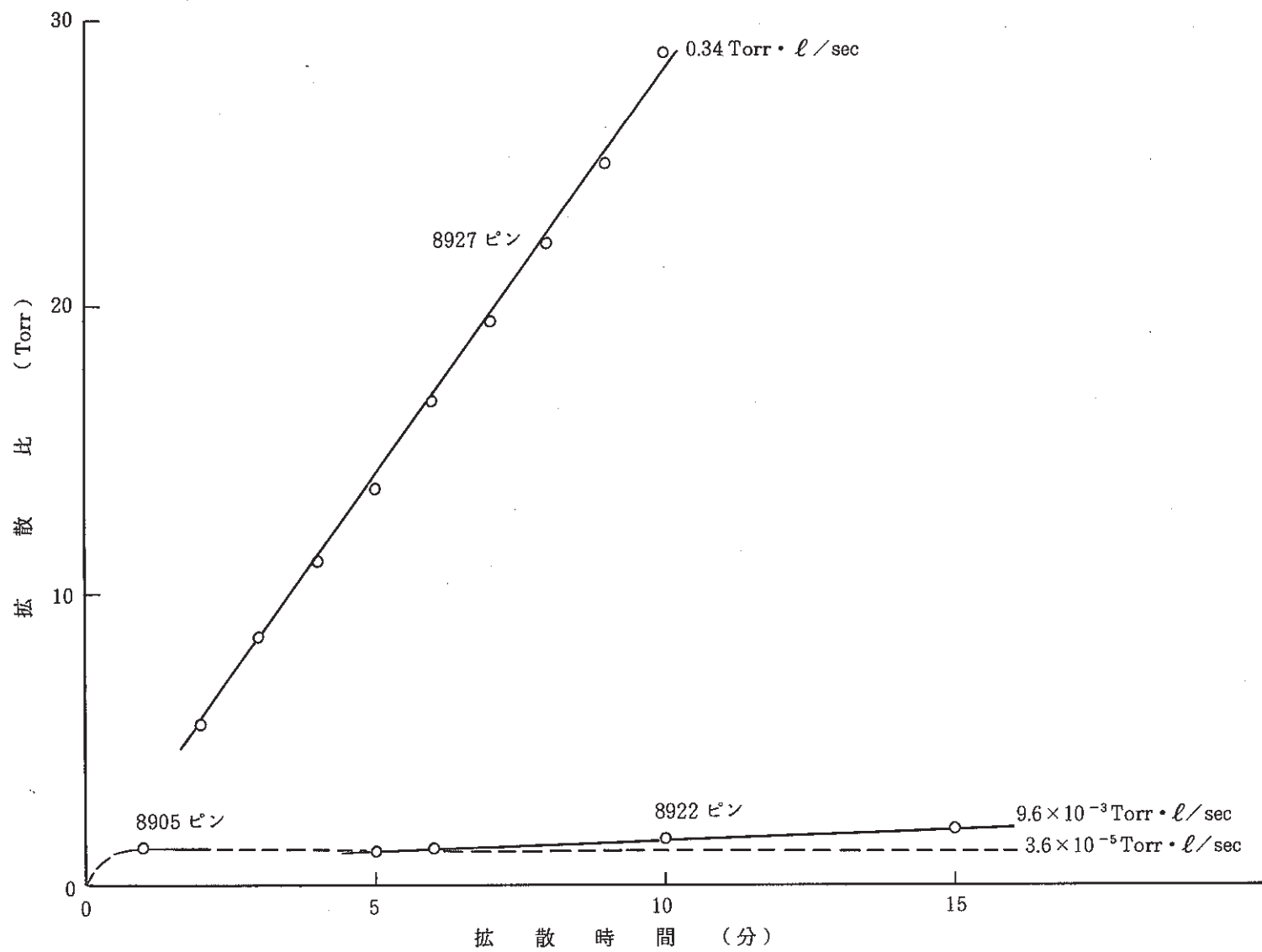


Fig.13 Change of Pressure in Gas Collection System

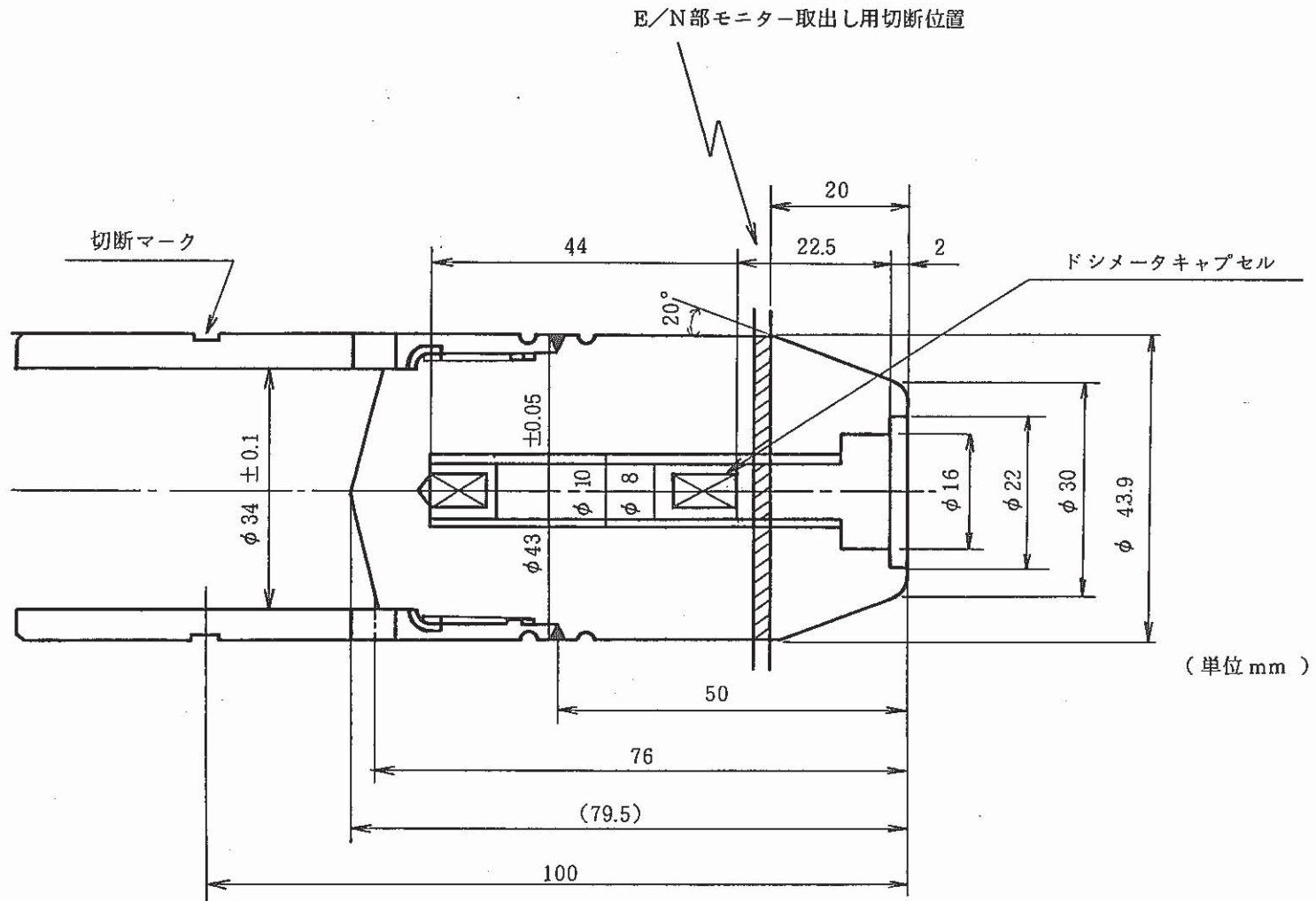


Fig.14 Installation Position of Dosimeter Capsule in the Part of Entrance Nozzle of the Subassembly

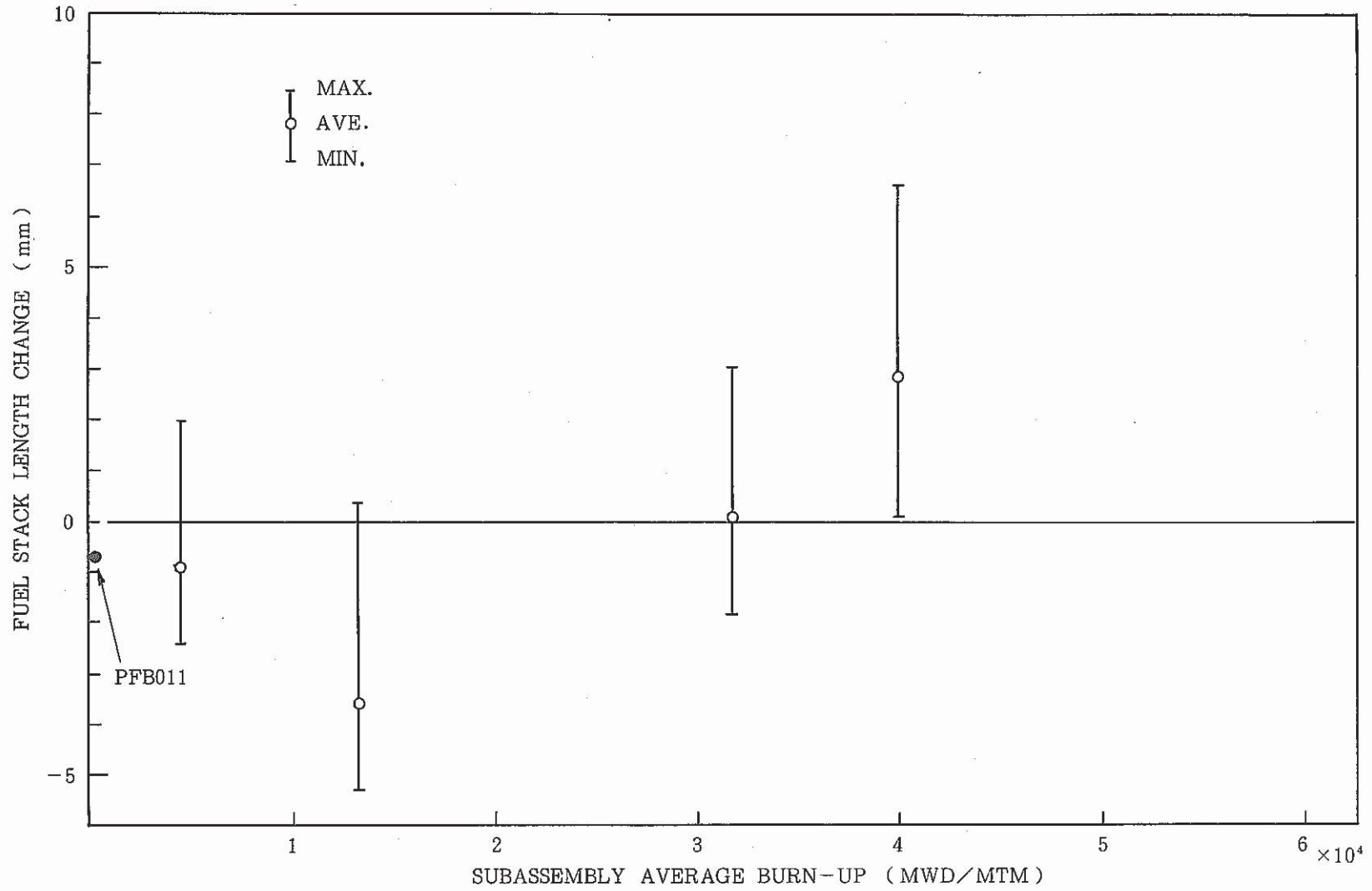


Fig.15 Fuel Stack Length Change of MK-II Core Fuel Pins with Average Burn-up

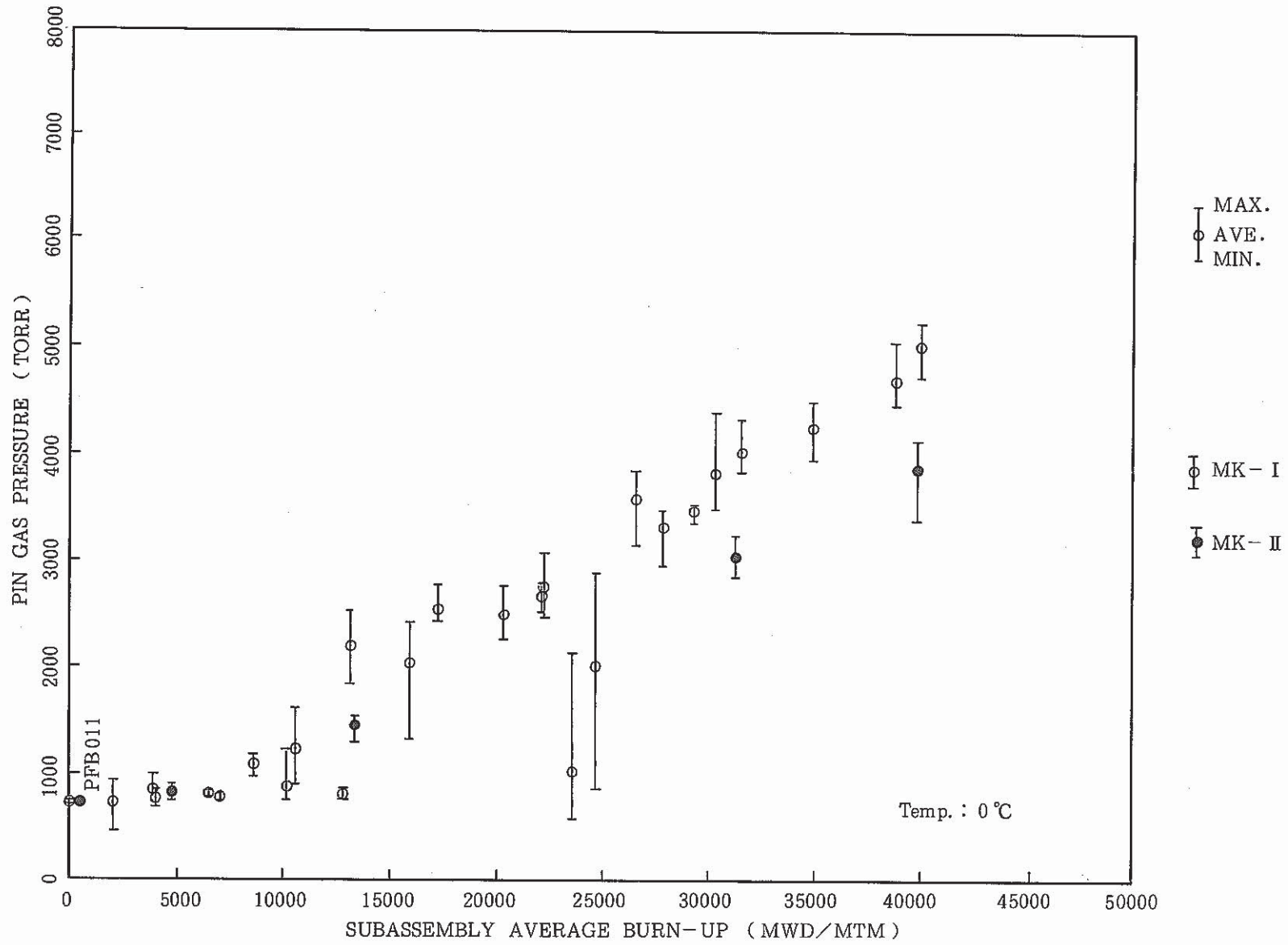


Fig.16 Relation of Fuel Pin Gas Pressure of MK-I and MK-II Core Fuel Pins with average Burn-up

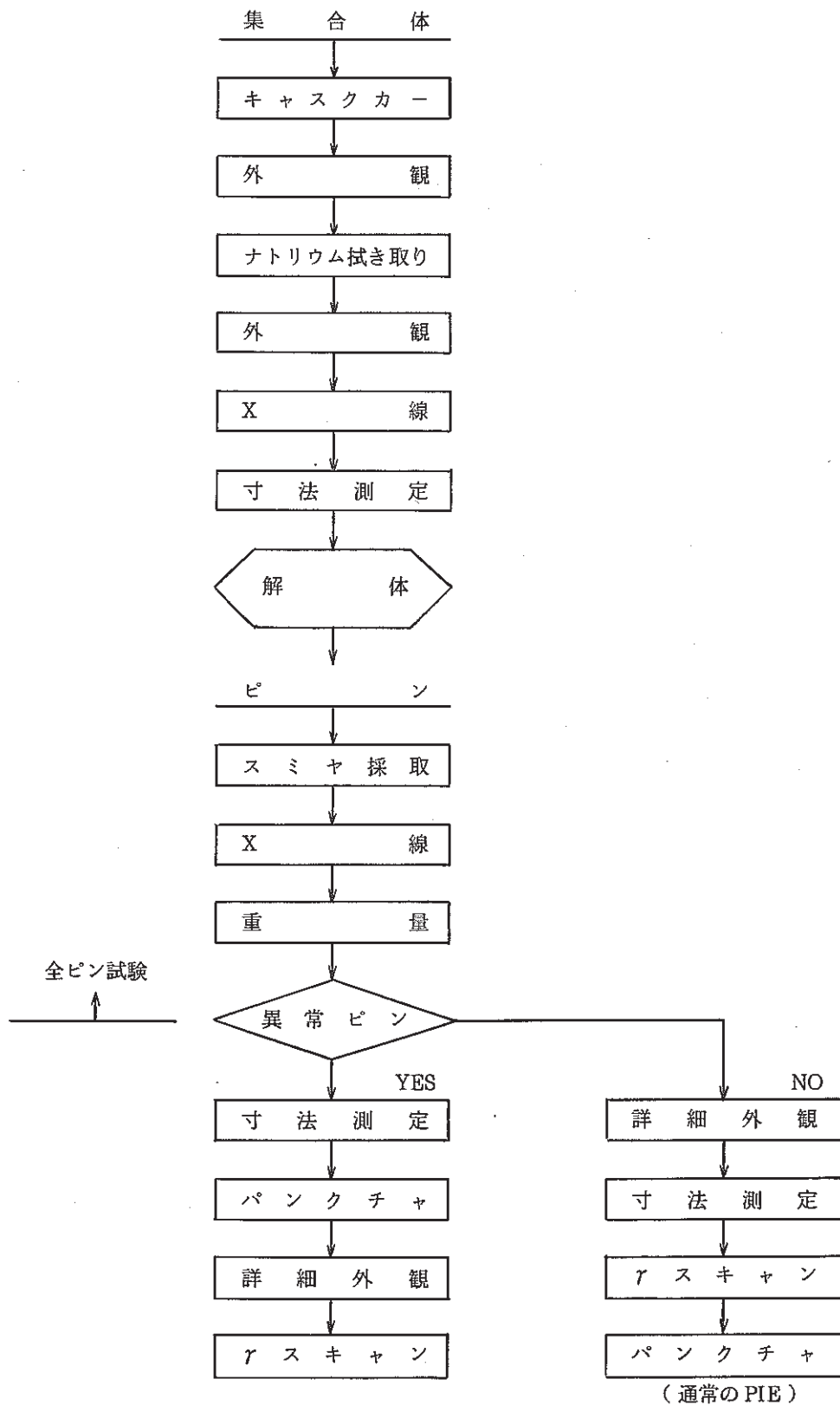


Fig. 17 Flow Diagram of Postirradiation Examination for Identification of Failed Fuel Pin

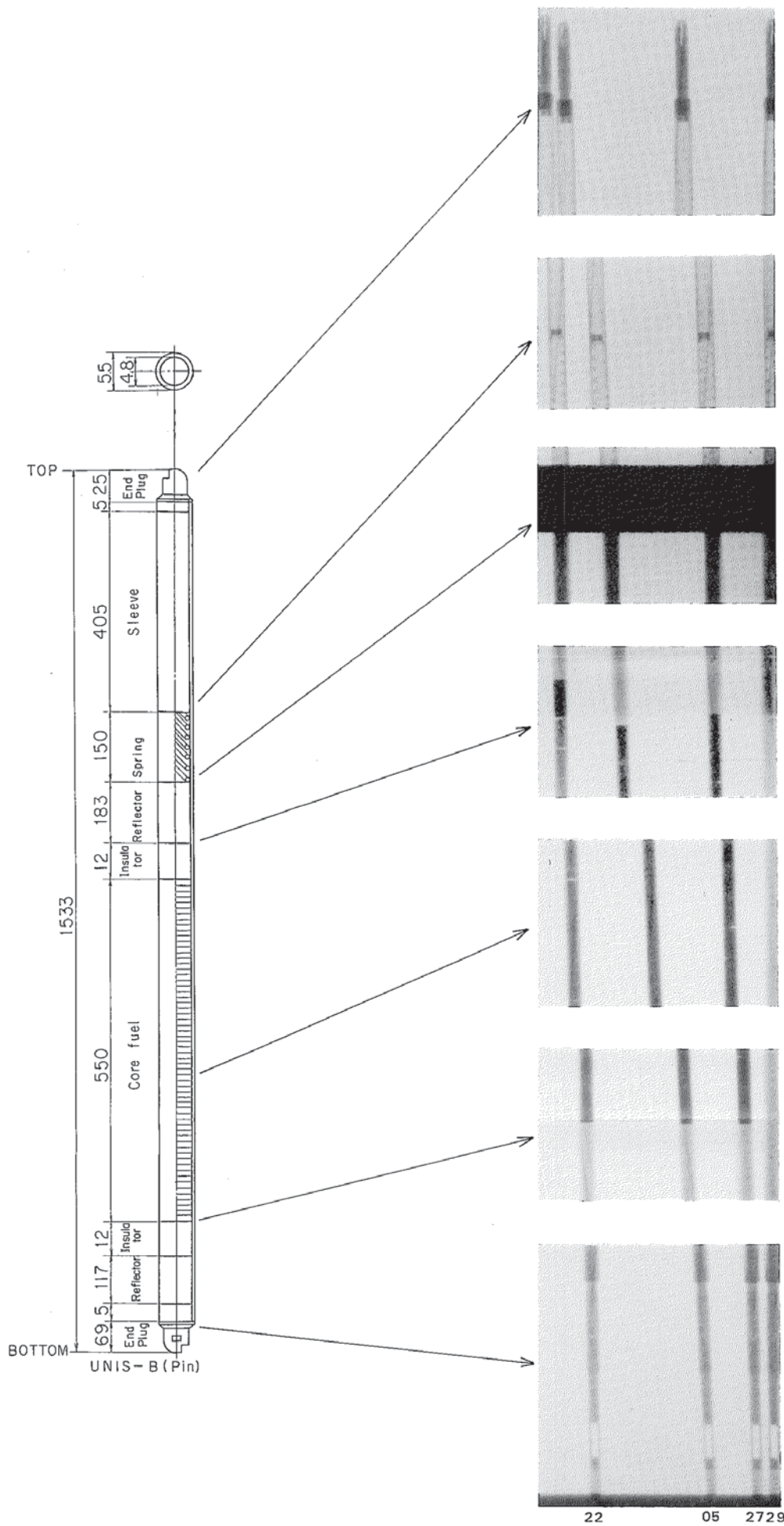


Photo.1 X-ray Radiograph of Pins

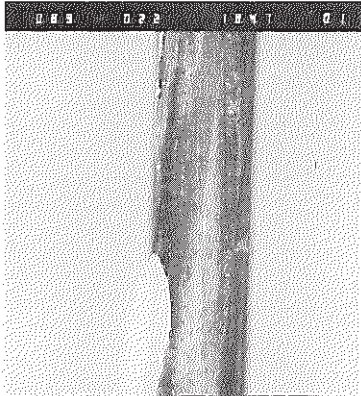
F854002

ARTIFICIAL DEFECT

PNC-TN9410 86-146

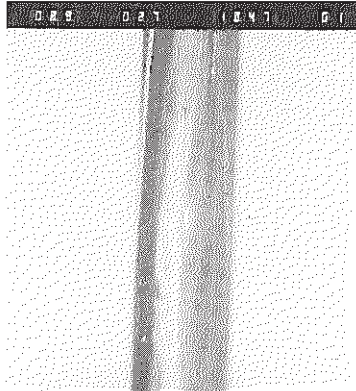
8922

x3



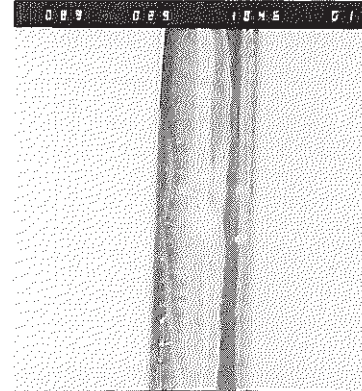
8927

x3



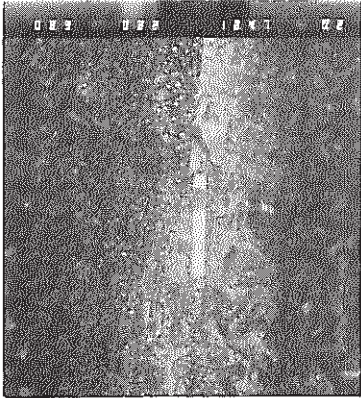
8929

x3

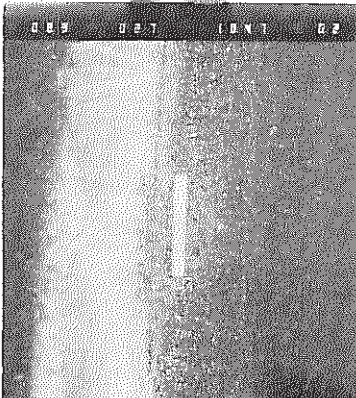


↑ TOP

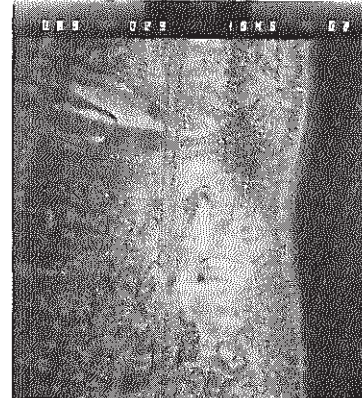
x15



x15



x15



Scale

x3 1mm

x15 1mm

↓ BOTTOM

Photo.2 Artificial Defect of Pins

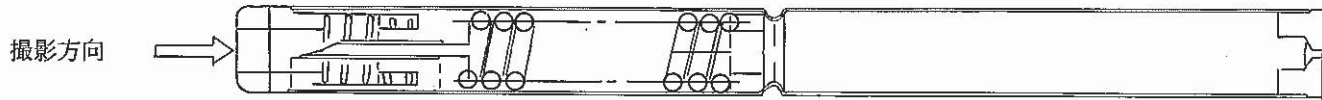
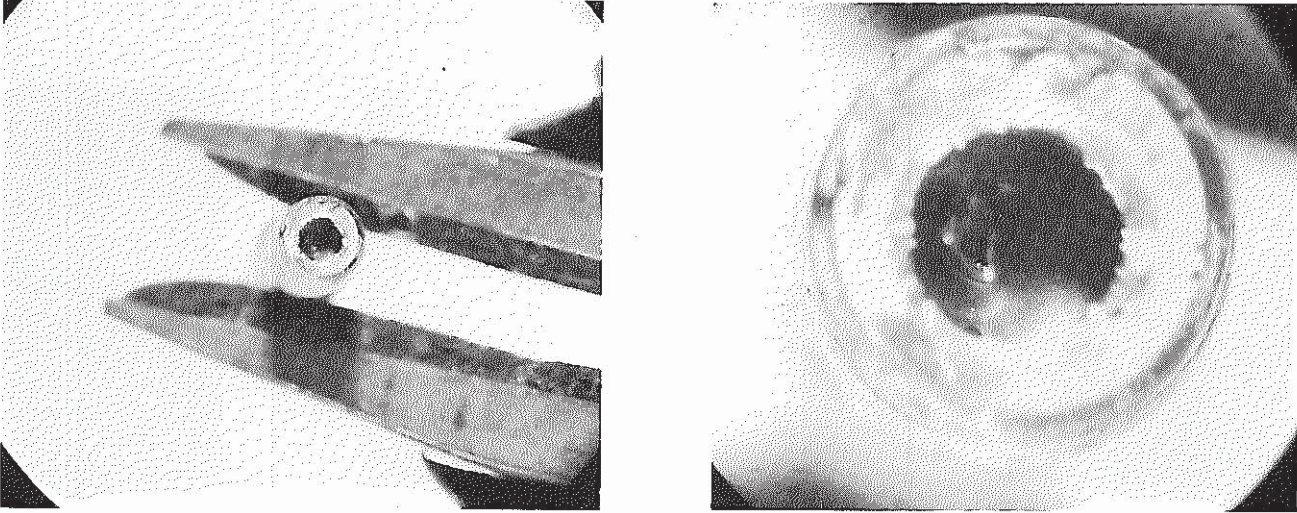


Photo.3 Tag Gas Capsule