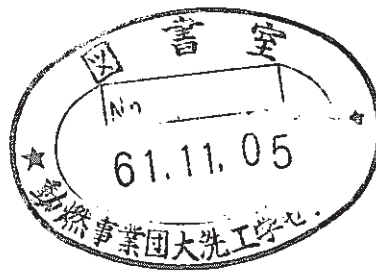


「常陽」MK-II 制御棒 (MCR 005) の照射後試験

制御棒及び吸収ピンの非破壊試験



1986年9月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	PNC TN9410 86-147
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

「常陽」MK-II 制御棒(MCR005)の照射後試験

制御棒及び吸収ピンの非破壊試験

実施責任者 田地弘勝*

報告者 小高英男* 平沢久夫* 浅賀健男**

沖元 豊*

要 旨

「常陽」MK-II 炉心にて定格第6サイクルまで使用された制御棒 MCR005 について、構造体の健全性確認、照射挙動把握の観点から制御棒試験及び吸収ピン試験を実施した。

以下に照射後非破壊試験の実施結果の概要を示す。

- (1) 制御棒の外観検査、寸法測定及びX線ラジオグラフィ検査の結果、定格第6サイクルまで使用した MCR005 は、外形形状及び内部状況等において特異な変化は認められず使用中健全であったことが確認された。
- (2) ダッシュラム部の膨れは、外径変化で約0.15%の増加であり、制御棒下部案内管ダッシュポットの内径が製造時と同一とした場合、両者のクリアランスは、当初の約半分に減じているといえる。
- (3) 吸収ピン試験では、ペレットスタック下部の被覆管外径増加(最大増加率: 1.04%)及びスタック長の伸び(最大 5.9 mm)が確認された。また、ベント機構部ではベント管に白色付着物が確認された。これはベント孔からナトリウムの侵入があったためと思われる。
- (4) 被覆管の外径増加は、 B_4C ペレットのスエリングによるペレット-被覆管相互作用によるものと考えられる。外径増加率は照射の進行に伴い増加してきている。またスタック長の変化も照射の進行に伴い伸びており、MCR005 では定格第3サイクルまで照射した MCR002 の約2倍の伸びである。

* 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

** 大洗工学センター 燃料材料開発部 技術解析室

目 次

1. まえがき	1
2. MK-II 制御棒の仕様	2
3. 供試試料	3
4. 照射条件	4
5. 照射後試験計画	5
6. 試験結果	6
6.1 集合体試験	6
6.1.1 外観検査	6
6.1.2 X線ラジオグラフィ検査	7
6.1.3 寸法測定	7
6.2 集合体部材試験	9
6.2.1 保護管ガンマスキャン	9
6.3 吸収ピン試験	9
6.3.1 外観検査	9
6.3.2 X線ラジオグラフィ検査	9
6.3.3 重量測定	10
6.3.4 寸法測定	10
6.3.5 ピンアスキャニング	11
6.3.6 ベント管部詳細外観検査	11
7. 結果の検討	12
7.1 制御棒及び吸収ピンの健全性評価	12
7.1.1 構造体の健全性	12
7.1.2 防振機構部健全性	12
7.1.3 ベント機構部健全性	12
7.2 照射挙動評価	13
7.2.1 ダッシュラム寸法変化	13
7.2.2 被覆管寸法変化	14
7.2.3 B ₄ Cスタック長変化	15
8. まとめ	16
9. 参考文献	17

List of Table

Table 1	Pin parts list	18
Table 2	Irradiation condition of control rod	19
Table 3	B ₄ C stack length changes	20
Table 4	Results of pin weighing	21
Table 5	Outer dia. changes of claddings in the lower region of the B ₄ C stack	22
Table 6	Irradiation condition of the dashrun	23
Table 7	B ₄ C pellet swelling	24
Table 8	B ₄ C stack length changes	25

List of Figures

Fig. 1	Pin loading diagram	26
Fig. 2	In-reactor location of the control rod	27
Fig. 3	Selected pins for the examinations	28
Fig. 4	Control rod outer diameter profile (0° - 180°)	29
Fig. 5	Control rod outer diameter profile (90° - 270°)	30
Fig. 6	Control rod bowing profile	31
Fig. 7	Outer diameter change diagram of the dashram	32
Fig. 8	Radial distribution of gamma-ray intensity	33
Fig. 9	Pin bowing profile (Pin No. MCE-29 8501)	34
Fig. 10	Pin diameter profile (Pin No. MCE-29 8501)	35
Fig. 11	Pin diameter profile (Pin No. MCE-32 8504)	36
Fig. 12	Pin diameter profile (Pin No. MCE-35 8507)	37
Fig. 13	Pin diameter profile (Pin No. MCE-31 8503)	38
Fig. 14	Axial distribution of gamma-ray intensity	39
Fig. 15	Diameter changes of the dashrams	40
Fig. 16	Pin diameter change as a function of control rod peak burnup	41
Fig. 17	Diametral changes of the B ₄ C pellets	42
Fig. 18	Pin bowing as a function of control rod burn-up	43
Fig. 19	B ₄ C stack length change as a function of control rod peak burn-up	44

List of Photographes

Photo. 1	Surface condition of the control rod	45
Photo. 2	Scar marks and dent marks on the surface of the control rod	47
Photo. 3	Scar marks of the dashram surface	48
Photo. 4	Scar marks of the dashram	49
Photo. 5	Control rod X-ray radiography	51
Photo. 6	Surface condition of the absorber pin	53
Photo. 7	Surface condition of the vent hole	55
Photo. 8	Pin X-ray radiography	57
Photo. 9	Vent system X-ray radiography	59
Photo. 10	Outer surface condition of the vent tube (Pin No. MCE-35 8507)	60
Photo. 11	Surface condition of the upper end B ₄ C pellet (Pin No. MCE-35 8507)	61

1. ま え が き

「常陽」MK-II炉心に装荷される制御棒は6本であり、全ての制御棒が調整機能とスクラム機能を持つものである。制御棒は原子炉を安全に運転する上で重要な炉心構成要素であり、その設計寿命までの使用中の健全性を、燃焼度をパラメータとして確認する必要がある。

「常陽」MK-II炉心で使用される制御棒の主な特徴としては次の二つがあげられる。一つは、流体力振動防止機構である。これは、制御棒が冷却材流動等により不必要な振動を起し、出力変動を生じさせないようにするための機構であり、また制御棒の挿入性を保証する役目も兼ねている。もう一つは、ベント機構である。この機構は、吸収ピンの上部に設けられ照射により発生したヘリウムガスを制御棒要素外に排除し、制御棒の寿命延長を図るためのものである。

照射後試験では、この特徴部についても使用中の健全性を確認する。この他にも、B₄Cペレットのスエリングによるペレットと被覆管の機械的相互作用(ACMI)、ダッシュラムの膨れによる下部案内管ダッシュポットとの干渉等これらが要因となって生じる制御棒の寿命への影響についても評価を行う。

本制御棒 MCR 005 は、現在までに照射燃料集合体試験室(以下「FMS」と呼ぶ)で照射後試験を実施した制御棒のうち燃焼度が最高であり、「常陽」MK-II 初装荷制御棒のうち照射後試験を実施する最終の制御棒である。

2. MK-II 制御棒の仕様

「常陽」MK-II 炉心に使用される制御棒の主な仕様を以下に示す。

制 御 棒

炉内使用本数	6 体
保護管材質	ステンレス鋼管 (SUS 316 相当)
全長×外径	2250 mm×64.7 mm ϕ
保護管厚さ	1.5 mm

制御棒要素

要 素 数	7 本/制御棒
吸 収 材 数	炭化硼素 (B ¹⁰ 濃縮)
全長×外径	1151 mm×18.1 mm ϕ
吸収材有効長	650 mm
吸収材ペレット外径	16.3 mm ϕ
被覆管厚さ	0.8 mm

ベント機構 ダイビングベル型

流力振動防止機構 ガイドボールベアリング型

(注) MK-I と MK-II の相違点については、参考文献 (1) を参照されたい。

3. 供 試 試 料

本制御棒 MCR 005 の吸収ピンの配置と要素番号を Fig. 1 に示す。また各吸収ピンのパーツリストを Table 1 に示す。

4. 照射条件

MCR 005の照射条件⁽¹⁾の概要を下記に示す。また、Table 2に各サイクル毎の照射条件を、Fig. 2に最終サイクル（定格第6サイクル）時の炉心構成を示す。

炉内装荷位置	3 E 3
最大燃焼度	78×10^{20} cap/cc
最大積算中性子照射量	3.85×10^{22} n/cm ² ($E \geq 0.1$ MeV)
使用サイクル	100 MWt出力上昇～100 MWt第6サイクル

5. 照射後試験計画

本制御棒は、集合体キャスクで「常陽」よりFMSへ搬入され、照射後試験基本計画の標準試験⁽²⁾に沿って照射後試験を実施した。

照射後試験は、集合体の健全性を確認するための集合体試験（外観検査、寸法測定、X線ラジオグラフィ）を実施した後、集合体の解体を行い吸収ピンの取出しを行った。

吸収ピンは健全性確認のために全数試験（外観検査、X線ラジオグラフィ、重量測定）を実施した後、吸収ピンの照射挙動を把握するためにピン選択試験（寸法測定、ガンマスキャンニング）を実施した。

また、一部の吸収ピンについてはベント機構部の健全性確認のため、ベント管部の詳細外観検査を実施するとともに、吸収ピンの最上部B₄Cペレット端面の詳細外観検査も実施した。これらの吸収ピンについては、照射材料試験室（MMS）及び技術解析室（AES）で実施する破壊試験用試料の採取を実施した。Fig. 3に本制御棒MCR 005の実施試験の内容を示す。

6. 試験結果

6.1 集合体試験

6.1.1 外観検査

表面状況について保護管の全面にわたり目視観察を行い、制御棒番号の刻印マークを基準に
(注)
0°、120°、240°の位置でスケッチを実施した。Photo.1 に0°方向の外観写真を示す。

(1) 形状変化及び表面状況

保護管表面の変形、亀裂等は確認されなかった。

制御棒下端 1,585 mm から 1,650 mm に約 1 ~ 2 mm でほぼ等間隔に並ぶ縞状の浅い傷が確認された。(Photo. 2 - A) この保護管に発生した周方向の傷は、原子炉の出力上昇時あるいは出力調整時に制御棒が引き抜かれたとき、冷却材の流力振動により下部案内管の上端部と保護管が接触し発生したものと考えられる。この周方向の縞状の傷は、現在までに照射後試験を実施した3体の制御棒 MCR 006⁽³⁾、MCR 002、MCR 004⁽⁴⁾ においてもほぼ同位置での発生が確認されている。また、制御棒のハンドリングヘッド部の約 240° 方向で上端より 100 mm ~ 150 mm 付近に浅い円形のへこみが点在しているのが確認された。(Photo. 2 - B) この円形のへこみの発生原因は不明であるが、制御棒全挿入時に制御棒下部案内管の上端部が制御棒上端より 150 mm 付近になるため両者の接触により発生した可能性も考えられる。

ダッシュラム部には、下端から約 160 mm の位置に周方向の傷がほぼ全周にかけて観察された。(Photo. 3 - A) この傷は MCR 006 及び MCR 004 においても同位置で観察されている。また、周方向の 300° から 330° の位置には浅い軸方向の傷が観察された。(Photo. 3 - B) また、ダッシュラム下部テーパ部には凹状の傷が 120° 方向に観察された。(Photo. 4)

ダッシュラムは、原子炉停止時に制御棒下部案内管のダッシュポット内へ挿入される部位であり、ダッシュラムの周方向、軸方向の傷は冷却材流動によるダッシュポットとの干渉により発生したと思われる。また、凹状の傷は原子炉のスクラムテスト時にダッシュポット部と接触し生じたものと推定できる。

(2) 防振機構部

目視観察による結果では、一箇所にガイドボールの光沢の無いものがあった。この原因は不明であるが、マニプレータによりこのガイドボールを含め回転状態を確認したが、全数異常なく滑らかに回転し、目視上も大きな傷は確認されなかった。

(注) 制御棒の周方向角度は、制御棒保護管下部の制御棒番号の刻印部の中心を 0° として、ハンドリングヘッドから見て反時計回りの角度定義をしている。

6.1.2 X線ラジオグラフィ検査

制御棒をX線ラジオグラフィセルに装荷し、 0° 方向から全長撮影を行い制御棒の内部状況を観察した。Photo. 5にX線写真を示す。

制御棒内部への異物の混入、吸収ピンの配列の乱れ、吸収ピン支持部の異常、制御棒構成部材の配置等の観察を実施したが異常はみられなかった。

6.1.3 寸法測定

(1) 全 長

全長測定は、 0° 、 90° 、 180° 、 270° と4方向を測定しその平均が2,247.9mmであった。照射前の寸法は2,250.0mmでありその差は -2.1 mmであるが、照射後の全長測定は、制御棒のダッシュラム及びハンドリングヘッド部を固定し、その間の測定を行い未測定部のノミナル値を加算しているためこの誤差により有意差(± 1.0 mm)を超えた変化が生じたと思われる。

(2) 外径寸法

Fig. 4, Fig. 5に $0^\circ - 180^\circ$ 、 $90^\circ - 270^\circ$ における外径測定結果を示す。

照射前データとの比較では各測定位置とも照射前後の差が有意差(± 0.1 mm)以下であり、照射による有意な外径変化は認められない。

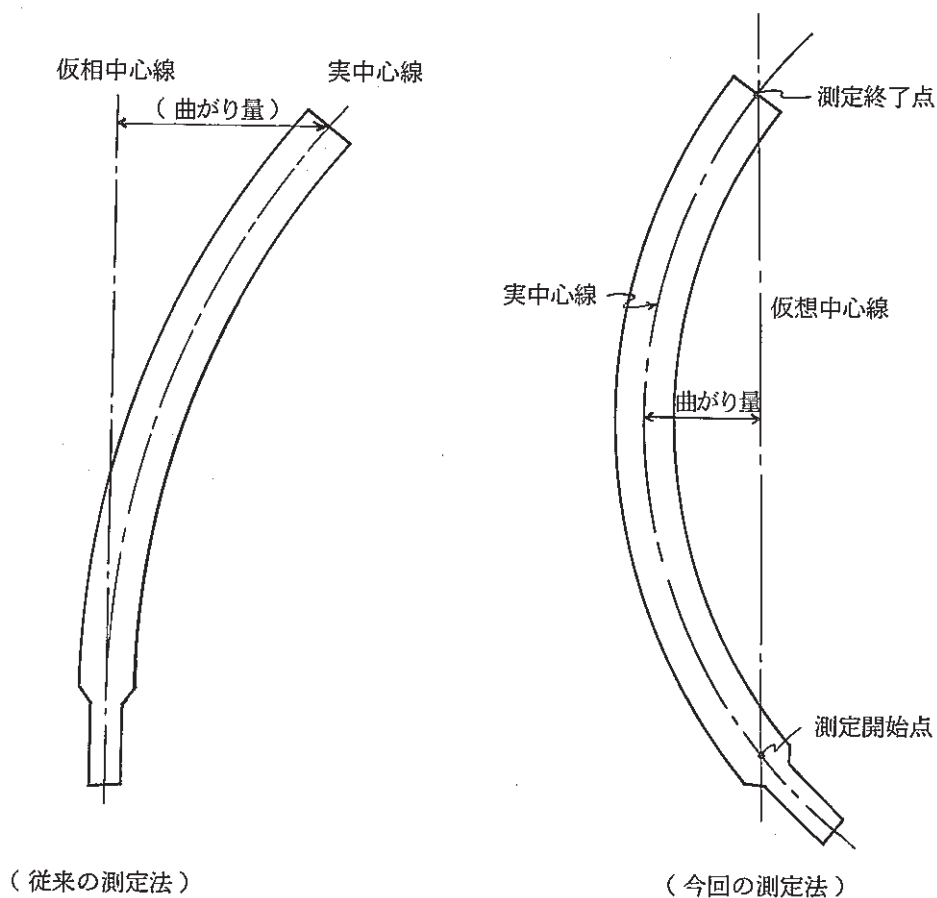
なお、図中の約1600mm～1700mmにかけての凹凸は上部グリッド板の溶接部及び周方向の溝によるものである。

(3) 曲 が り

曲がり量の測定は、集合体寸法測定装置の下部チャックに制御棒のダッシュラムを挿入し、検出素子を保護管に接触させ軸方向にスキャンさせて測定を行っている。これにより下部チャックより割り出した仮想中心線と制御棒の測定した実中心線との水平方向のへだだりを曲がりの定義としている。(次図参照)

ただし、今回の制御棒MCR 005では、ダッシュラム部の膨れにより下部チャックで完全に把持できずに傾きが生じるため測定誤差が大きくなると考えられる。したがって、接触子の測定開始点と終了点の2点を仮想直線で結び、実測を行った制御棒の実中心線と仮想直線のへだだりを曲がり量として測定を行った。(次図参照)

測定結果をFig. 6に示す。曲がり量は測定2方向の合成から最大で0.9mmである。製造時のデータは全長に対する真直度が最大1.1mmであった。照射前後の最大曲がり量を比較すると、有意(± 0.3 mm)な変化は生じていない。



(4) ダッシュラム寸法測定

ダッシュラム部の寸法測定は外径測定によりスエリングに起因する膨れ量の確認を行うものであり、^(注) ツールセッティングゲージ法を用いて実施した。

測定は照射前データの整備されている制御棒下端より 162 mm 及び 260 mm の位置で実施したが、参考値として 180 mm、220 mm の位置についても行った。測定結果を下表に示す。

測定点 (下端より)	照射前寸法 (mm)	照射後寸法 (mm)	変化量 (μ m)	変化率 (%)	備考
260 mm	40.31 mm	40.503 (平均)	193	0.48	220 mm 及び 180 mm 位置に関しては、参考値、 (260 mm の寸法使用)
		40.524 (最大)	214	0.53	
220 mm	—	40.435 (平均)	125	0.31	
180 mm	—	40.382 (平均)	72	0.18	
162 mm	40.27 mm	40.325 (平均)	55	0.15	

また Fig. 7 に 260 mm 位置の照射後最大変化量の図形処理を示す。図及び表より、下端より 260 mm の位置での最大外径は、40.524 mm となる。

(注) ツールセッティングゲージ法

被測定物をブロックゲージ部に当て、マスターの円柱物との変位をダイヤルゲージで測定し、変位から半径を計算で算出し直径を求める。

6.2 集合体部材試験

6.2.1 保護管ガンマスキャン

制御棒の炉内装荷時の最大中性子照射方向を求め、吸収ピンの挙動把握をするための試験ピンを定めるため制御棒下端約 600 mm 付近より保護管を切り出し、保護管の主要放射化核種 ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co について保護管円周方向にガンマスキャンを実施した。

Fig. 8 に ^{54}Mn の円周方向強度分布を示す。図より最大強度方向は、約 320° でありこの方向を最大中性子照射方向として、この方向に沿って 3 本の吸収ピン (MCE-29, 32, 35) について選択試験を実施することとした。

6.3 吸収ピン試験

6.3.1 外観検査

制御棒を解体して取り出した吸収ピンは、全ピン目視による外観検査及びスケッチを実施した。また、代表として MCE-29(8501) の全長写真撮影を実施した。結果を Photo. 6 に示す。

外観検査の結果、全ピンとも曲がり等の変化は見られず、表面には取扱い時に生じたと思われる多少のすり傷があるものの健全性に影響を及ぼす様な傷、凹凸は観察されなかった。吸収ピン表面の付着物については、全ピンのベント孔付近にナトリウム化合物と思われる白色の付着物が観察された。これは炉内装荷時に冷却材のナトリウムがベント機構部に吸い込まれたためと思われる。Photo. 7 にベント孔部の白色付着物の状況を示す。

6.3.2 X線ラジオグラフィ検査

Photo. 8 に要素番号 MCE-29～MCE-32 までの X 線ラジオグラフィ写真を示す。

(1) B₄C ペレットスタック部

ペレット間のギャップは認められず、ペレットの欠け、割れも観察されなかった。スタック長については、照射前に比べて全てのピンで増加しており、平均で 5.1 mm、最大で 5.9 mm の増加であった。Table 3 にスタック長及び管内長の変化量を示す。

(2) ベント機構部

ベント管は曲がりも認められず、中間端栓への取付状況にも異常は認められない。しかし、

MCE-29 (8501)を除く残りのピン全てのベント機構部内に、ベント孔部から浸入したナトリウム化合物と思われる物が観察された。(Photo. 9)

6.3.3 重量測定

照射後の重量値はMCE-29 (8501)を除く全てのピンが照射前の値より7.9～10.5g大きく測定された。この増加量は、X線ラジオグラフィの観察結果からも見られる様にベント孔からのナトリウム化合物の浸入によるものと考えられる。Table 4に全7本の測定結果を照射前と比較して示す。

6.3.4 寸法測定

ピン寸法測定装置を用いてピン全長、ピンの曲がり及び被覆管外径の測定を最大中性子照射方向に沿った3本の吸収ピンMCE-29 (8510), MCE-32 (8504), MCE-35 (8507)について実施した。

(1) 全 長

照射前後の全長変化量は、MCE-29 (8501)が+0.3 mm, MCE-32 (8504)が-0.2 mm, MCE-35 (8507)が-0.4 mmであり有意な変化は認められない。(有意差 ± 1.0 mm)

(2) 曲がり

照射後の曲がり量は、MCE-29, 32が共に0.5 mm/全長, MCE-35が0.3 mm/全長であり、製造時検査基準の真直度 ≤ 2 mm/全長を下回っている。

Fig. 9に曲がりプロファイルの例としてMCE-29 (8501)の測定結果を示す。曲がりプロファイル及びピンの曲がり方向については、曲がり量が小さいこともあり、特に傾向は認められない。

(3) 外 径

外径測定を実施した3本のピンの軸方向プロファイルで、ペレットスタック下端部付近の外径寸法が大きくなっている。照射前後の2方向平均外径の比較では、最大でMCE-32 (8504)の189 μ m, 外径変化率で1.04%の増加が確認された。また、同ピンは他の2本のピンと比較すると、ペレットスタック全体にかけてオーバーバリティが認められている。

ピンの外径測定結果をTable 5にFig. 10～Fig. 12に3本の吸収ピンの軸方向プロファイルを示す。

ペレットスタック下端部の外径について、より詳細なプロファイルを得るために測定ピッチを小さくして測定を実施した。測定したピンはMCE-31 (8503), MCE-34 (8506)である。Fig. 13にMCE-31 (8503)の測定ピッチ0.5 mmのプロファイルを示す。図からわかるように、下端から200 mmくらいのところまででは、ペレット境界部に対応した位

置で外径の落ちこみが認められる。

6.3.5 ピンアスキャンニング

アスキャンニングは、推定炉心方向に近いMCE-29(8501)について、ピン下端84 mmから844 mmの位置で実施した。

Fig. 14にMCE-29(8501)の軸方向強度分布を示す。被覆管放射化核種である ^{54}Mn 、 ^{60}Co の軸方向プロファイルは吸収ピン下部で最大計数率を示している。また、吸収ピンの上部にいくにしたがって計数率は減少していく傾向となっている。これは、ペレットスタック部の中性子照射量分布がスタック下部で最大であったことを示している。

なお、下端より800 mm付近で計数率が高くなっているのは、中間端栓(材質:SUS 316)の影響により構造材の放射化核種の計数率が上昇したものである。

6.3.6 ベント管部詳細外観検査

MCE-35(8507)のベント孔付近を円周切削し、ベント管をおおう被覆管を除去しベント管表面の詳細外観検査を実施した。

ベント管については変形等の異常は認められないが、Photo. 10に示すように付着物が認められた。また被覆管内側にも付着物が確認されたが、ベント管内部には付着物は確認されなかった。しかし、最上部の B_4C ペレット付近を切断し端面の観察を実施したところ、端面中心部にかけて付着物が確認された。Photo. 11に B_4C ペレット端面の観察結果を示す。これらの付着物はベント孔部から浸入したナトリウムによる化合物と思われる。

7. 結果の検討

7.1 制御棒及び吸収ピンの健全性評価

7.1.1 構造体の健全性

「常陽」MK-II 制御棒については、100 MWt 定格第2サイクルまでに1体 (MCR 006)、定格第3サイクルまでに1体 (MCR 002)、定格第5サイクルまでに1体 (MCR 004) 及び定格第6サイクルまで使用した本制御棒の合計4体の照射後試験を実施している。4体の制御棒のうち MCR 004 については、制御棒ダッシュラム部の外径の測定を行い、ダッシュポットとの干渉の発生の有無を確認するための照射後試験を実施した。

制御棒の健全性を確認するための試験、検査としては、外観検査、寸法測定、X線ラジオグラフィ検査を実施した。検査を実施したいずれの制御棒においても、外形形状や内部状況に異常は認められず、100 MWt 炉心定格第6サイクルまで炉内で構造体としての健全性は保持していたと考えられる。保護管表面状況は、4体の制御棒とも制御棒下端から約1550 mm ~ 1650 mm (保護管上端付近)の位置に周方向の縞状の傷が確認されている。この傷の位置は、制御棒の通常運転時における下部案内管頂部の位置にあたる。冷却水の流れによる励振力を受け、下部案内管との干渉により発生したと思われる。また、使用サイクル数による傷の中には特別な傾向は認められない。

一方吸収ピンについてはピン外観検査では特異な状態は観察されなかったものの、ピン X線ラジオグラフィ及びピン重量測定結果からはベント機構部へのナトリウム化合物の残留が認められた。但し、これは、構造体としての健全性に影響を与えるほどのものではない。

7.1.2 防振機構部健全性

防振機構部は検査を実施した制御棒3体 (MCR 006, 002, 005) とともに、ボール押え金具、止めボルト等各構成部材の脱落、損傷は認められない。またガイドボールについては、MCR 002の300°方向のボール1つを除いて全数滑らかに回転することを確認した。また回転しなかった原因は不明であるがこのボールも含めて変形、傷等は認めておらず機能的には何ら問題はないと考えられる。

7.1.3 ベント機構部健全性

ベント機構部においては、X線ラジオグラフィ、抜き取りでの詳細外観検査の結果から取付状況、外形形状には異常は認められず、構造的に問題となるような現象は認められない。また、炉内でのナトリウムの吸い込みについては、1本を除いて照射前後での重量差が大きく、ベント管表面にナトリウム化合物と思われる白色付着物が認められていることから、炉内でベント機構部にナトリウムが侵入したと考えられる。また、吸収ピン上端ペレット端面にも白色

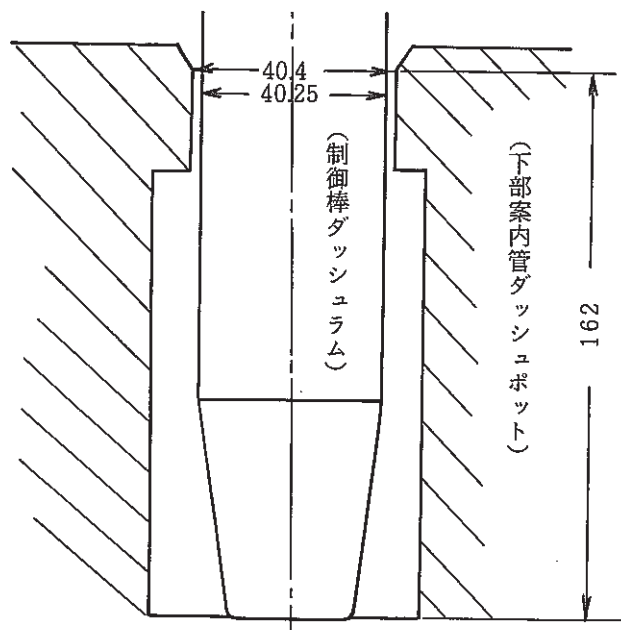
付着物が確認されていることから、ナトリウムがベント管内へも侵入したことが考えられるが、詳細は、破壊試験の結果も含めて検討する必要があると思われる。

7.2 照射挙動評価

7.2.1 ダッシュラム寸法変化

ダッシュラム部の外径変化を測定した2体(MCR 004, MCR 005)の制御棒照射条件及びダッシュラム部中性子照射量を Table. 6 に示す。また Fig. 15 に MCR 004 及び MCR 005 のダッシュラム外径変化率を示す。図中の曲線は、制御棒ダッシュラムと同じ SUS 316 アニール材のスエリング式⁽⁵⁾から求めたものである。MCR 005 の下端より 260 mm (中性子照射量: $6.1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$) での外径増加率は、最大 0.51 % でスエリング式の 0.53 % とよく一致している。その他の外径変化率についてはスエリング式を下回る結果となっている。

ダッシュラム部と制御棒下部案内管のダッシュポットとの干渉の可能性を MCR 005 で考えてみると、下図からわかるようにダッシュラム部下端より 162 mm の位置で干渉が生じ、制御棒の引抜き荷重が増加すると考えられる。下部案内管ダッシュポット部は、「常陽」定格第 14 サイクルまでスエリングの発生は生じないと報告されていること⁽⁶⁾から、ダッシュラムの外径増加から両者のクリアランス量を求めてみる。下部案内管ダッシュポットの内径を検査基準 ($40.4 \text{ mm} \pm \begin{smallmatrix} 0.025 \\ 0.0 \end{smallmatrix}$) から 40.4 mm とすると、MCR 005 のダッシュラム部の外径は下端より 162 mm で 40.325 mm (変化率 $\Delta D/D = 0.15\%$) で 75 μm のクリアランスとなり、照射前のクリアランス 150 μm の半分に減じていることになる。また同じ位置でのスエリング式からは、外径変化率が 0.33 % であり外径にすると 40.403 mm となりクリアランスはなくなる。このことから、定格第 6 サイクルまで使用した制御棒 MCR 005 では、照射によるダッシュラム外径増加により下部案内管ダッシュポットとの干渉が生じた可能性は大きいといえる。



7.2.2 被覆管寸法変化

(1) 外径変化

MCR 005 の吸収ピン外径測定結果から、 B_4C ペレットの下部に外径増加の現象が認められた。中性子照射量は B_4C ペレットの下端にいくに従い大きくなり、これに伴い外径増加は Fig. 12 に示すように下端部の B_4C ペレット付近で最も大きく測定されている。

この外径増加は、本制御棒の中性子照射量 ($3.85 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$) では被覆管スエリングは小さく、またベント型の制御棒であるため被覆管の外径増加に内圧は影響しないことなどから、 B_4C ペレットのスエリングによるペレットと被覆管の機械的相互作用 (ACMI) によるものと考えられる。

測定を実施した MCR 005 の 3 本の吸収ピンは、各ピンの最大外径増加率が 0.95%~1.04% でありピンの下端から約 100~124 mm の範囲で最大外径変化を起こしている。2 方向の測定とも同様に増加を示しており、オーバリティではない。したがって B_4C ペレットの全周で被覆管とペレットのギャップがなくなり、さらに照射により B_4C ペレットがスエリングしたことで等方的に ACMI により被覆管の外径が増加したものと考えられる。

Fig. 16 に MK-I, MK-II 制御棒要素の外径変化率を最大燃焼度で整理して示す。MK-II 制御棒要素の外径増加は、燃焼度の進行に伴って大きくなっている。また、MK-I 制御棒では、外径増加の認められた 2 体の制御棒 (TTJC 07, TTJC 08) についてみると、やはり燃焼度に依存する傾向を示している。この 2 体の MK-I 制御棒は他の MK-I 制御棒より、製造時の被覆管と B_4C ペレットのギャップが小さくなっているものである。

(2) B_4C ペレット外径変化率

被覆管の外径変化量と製造時の被覆管とペレットのギャップ及びペレット外径データから、 B_4C ペレットのスエリングによる外径変化率を MCR 005 について求めた。Table 7 に外径変化率と試算に使用したデータを示す。外径変化率は、被覆管外径変化が B_4C ペレットのスエリングのみによって生じた ACMI であり、ペレットが弾性変形をしていないと仮定した場合の試算である。

Fig. 17 に MK-I 及び MK-II 制御棒の B_4C ペレット外径変化率を燃焼度で整理して示す。図に示す直線は、「もんじゅ」設計推奨式⁽⁷⁾ $d\epsilon/dB = 0.45 \times 10^{-3} / 10^{20} \text{ cap/cm}^3$ より求めた外径変化率であり、試算した MCR 005 の外径変化率は実測された MCR 002, TTJC 07 の B_4C ペレットの外径変化率の増加傾向とよく一致しており燃焼度とともに上昇している。MCR 005 の燃焼度は、 $78 \times 10^{20} \text{ cap/cc}$ でありこの段階では十分に「もんじゅ」設計推奨式を下回っている。

(3) 曲がり

Fig. 18 に MK-I 及び MK-II 制御棒の吸収ピンの曲がりを示す。

MK-I 制御棒の吸収ピンにおいては、MK-I 末期で大きな曲がり認められている。

この曲がりは、燃焼度が最大で外径変化の生じた制御棒のペレット下端で認められた。この位置はMK-I 吸収ピンの下端B₄C ペレットと下部プレナム部の境界付近であり、外径増加に伴いこの部分に応力がかかり曲がりが生じたものと考えられる。MK-II 吸収ピンでは溶接された下部端栓の上に下端ペレットが配置されているので、MK-I のような曲がりは生じないと考えられる。

7.2.3 B₄C スタック長変化

Table 8 及び Fig. 19 に MK-II 制御棒吸収ピンのスタック長変化を示す。

スタック長は、照射が進むにつれて増加している。3体の制御棒のスタック長の増加は、燃焼度と比例して増加している。スタック長の増加は吸収ピン上部にあるスプリングにより吸収される。スプリングの収縮時の長さは27 mm であり、スタック上部空隙長さは43 mm である。これからB₄C スタック上部クリアランスはスプリング座長さを3 mm を入れると13 mm となり、定格第6 サイクルまで照射されたMCR 005 の吸収ピンスタック長は最大5.9 mm でB₄C スタック上部クリアランスの13 mm の約半分となり、これを下回っているものの定格第3 サイクルまで照射されたMCR 002 の吸収ピンスタック長に対して最大で約2 倍の増加となっている。

8. ま と め

「常陽」MK-II 炉心にて定格第6サイクルまで使用された制御棒 MCR 005 について、構造体の健全性確認、照射挙動把握の観点から制御棒試験、吸収ピン試験を実施した。

以下に照射後非破壊試験の実施結果の概要を示す。

- (1) 制御棒の外観検査、寸法測定及び X 線ラジオグラフィ検査の結果、定格第6サイクルまで使用した MCR 005 は、外形形状及び内部状況等において有意な変化は認められず使用中健全であったことが確認された。
- (2) ダッシュラム部の膨れは、定格第6サイクルまで使用した MCR 005 で、制御棒下部案内管のダッシュポットと制御棒ダッシュラムの隙間が当初より $1/2$ に減じる程のダッシュラムの膨れ ($\Delta D/D = 0.15\%$) であり、制御棒引抜時に両者の干渉が生じる可能性があったといえる。また、定格第5サイクルまで使用された制御棒 MCR 004 では、この隙間が当初より $2/3$ の減少であった。
- (3) 吸収ピンの試験では、ペレットスタック下部の被覆管外径増加 (最大外径増加率: 1.04%) 及びスタック長の伸び (最大, 5.9 mm) が確認された。また、ベント機構部ではベント管に白色付着物が確認された。この付着物はベント孔からナトリウムの侵入があったためと思われる。
- (4) 被覆管に認められた外径変化は、B₃C ペレットのスエリングによるペレット-被覆管機械的相互作用 (ACMI) によるものといえる。外径増加率は、照射の進行に従って増加してきている。また、スタック長の変化も照射の進行に従い伸びており MCR 005 では定格第3サイクルまで照射した MCR 002 の約2倍の伸びであり、スタック上部の隙間が当初の約 $1/2$ に減じている。

今回の制御棒 MCR 005 で「常陽」MK-II 初装荷制御棒の照射後試験は終了した。定格第6サイクルまで炉内で使用した制御棒は、構造体としての健全性が確認され使用期間中炉内で正常にその役割を果たしてきたといえる。照射挙動については、被覆管外径変化率が6サイクル照射で1%を超える増加となっている。ダッシュラムの外径増加では6サイクル照射で下部案内管ダッシュポットとのクリアランスが、7.2.1で述べたように下端より162mmの位置で75 μm とダッシュラムのスエリングにより狭くなっておりまた、SUS316アニール材のスエリング式からでは隙間がなくなってしまうダッシュポットとの干渉が生じることになる。したがってダッシュラムのスエリングによる膨れは制御棒の寿命評価上重要な評価項目と考えられる。

9. 参 考 文 献

- (1) 「常陽」照射試験サイクル報(第6サイクル)
PNC SN936 85-01
- (2) 「常陽」MK-II炉心構成要素照射後試験基本計画
PNC N908 83-01
- (3) 「常陽」MK-II制御棒(MCR006, MCR002)の照射後試験
PNC 1941 85-13
- (4) 「常陽」MK-II制御棒(MCR004)照射後試験
燃材部テクニカルレポート 84(FMS)30
- (5) JOYO MK-IラッピングワイヤのSUS316アニール材スエリング式の改良II
燃材部テクニカルレポート 83(AES)54
- (6) MK-I下部案内管のMK-II炉心での使用限界評価(アニール材)
照射課メモ 照-(58)-113
- (7) 制御棒材料検討会報告-第3報-
PNC N241 80-15

Table 1 Pin parts list

「常陽」燃料炉心用初装荷制御棒 製造・検査履歴表																									
制 造 年 月 日		ハンドリングヘッド				上 部 ティ ュ ー ン				保 護 管				上 部 グ リ ッ プ 板											
№	検査年月日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日								
MCR 005	56.3.18	L-09	RA1-06	54.9.7.	55.11.13	N-09	RA1-07	54.9.7.	55.11.13.	K-05	PB1-10	55.7.4.	55.7.22.	O-16	RA1-09	54.9.7.	55.12.16								
保 護 管		下 部 グ リ ッ プ 板				下 部 構 造 物				組 立 体 (上 部 構 造 部)		組 立 体 (保 護 管 部)		組 立 体 (部 品 取 出 用 入 口)											
№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	検査年月日	№	検査年月日	№	検査年月日								
J-05	PB1-09	55.7.4.	55.7.22.	F-05	RA1-03	55.9.7.	55.12.16.	N-05	RA1-03	54.9.7.	56.2.12.	AF-05	56.1.29.	AG-05	56.1.13.	AH-05	56.1.29.								
ス プ リ ン グ 座		ベ ン ト 管				止 心 棒				ベ ン ト 管				ス プ リ ン グ 座											
№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日						
S-25	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-30	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-106	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-113	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-120	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
S-26	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-31	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-107	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-115	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-121	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
S-27	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-32	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-108	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-116	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-122	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
S-28	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-34	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-109	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-117	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-123	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
S-29	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-35	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-111	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-118	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-124	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
S-30	SB1-05	56.1.29	56.1.29	Q-36	RA1-08	54.9.7.	56.1.29.	R-112	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-119	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.	R-125	RC1-02	55.8.6.	55.10.9.						
制 造 年 月 日		上 部 構 造 部				保 護 管 (A)				ベ ン ト 管				中 間 構 造 部				保 護 管 (B)				ベ レ ッ ト 押 え ス プ リ ン グ 座			
№	検査年月日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日
NCE-29	56.1.13.	C-29	RB1-02	54.9.7.	55.9.24.	A-29	PA1-29	55.6.19.	55.8.21.	G-29	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-29	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-29	PA1-29	55.6.19.	55.8.21.	H-29	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-30	56.1.13.	C-30	RB1-02	54.9.7.	55.9.24.	A-30	PA1-30	55.6.19.	55.8.21.	G-30	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-30	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-30	PA1-30	55.6.19.	55.8.21.	H-30	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-31	56.1.13.	C-31	RB1-03	54.9.7.	55.9.24.	A-31	PA1-31	55.6.19.	55.8.21.	G-31	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-31	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-31	PA1-31	55.6.19.	55.8.21.	H-31	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-32	56.1.13.	C-32	RB1-03	54.9.7.	55.9.24.	A-32	PA1-32	55.6.19.	55.8.21.	G-32	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-32	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-32	PA1-32	55.6.19.	55.8.21.	H-32	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-33	56.1.13.	C-33	RB1-03	54.9.7.	55.9.24.	A-33	PA1-33	55.6.19.	55.8.21.	G-33	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-33	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-33	PA1-33	55.6.19.	55.8.21.	H-33	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-34	56.1.13.	C-34	RB1-03	54.9.7.	55.9.24.	A-34	PA1-34	55.6.19.	55.8.21.	G-34	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-34	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-34	PA1-34	55.6.19.	55.8.21.	H-34	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
NCE-35	56.1.13.	C-35	RB1-03	54.9.7.	55.9.24.	A-35	PA1-35	55.6.19.	55.8.21.	G-35	PC1-23	55.7.4.	55.7.22.	D-35	RB1-13	54.9.7.	55.9.4.	B-35	PA1-35	55.6.19.	55.8.21.	H-35	WA1-01	55.7.4.	55.7.4.
ス プ リ ン グ 座		B4ベ レ ッ ト				イ ン シ ュ レ ー ト ベ レ ッ ト				下 部 構 造 部				ワ イ ヤ		ベ ン ト 管 高 程 接 続		上 部 構 造 部 接 続		中 間 構 造 部 接 続		下 部 構 造 部 接 続			
№	素材№	素材検査日	部品検査日	スタック №	スタック 検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	素材検査日	部品検査日	№	素材№	検査年月日	№	検査年月日	№	検査年月日	№	検査年月日	№	検査年月日	
F-29	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J29	55.6.11.	I-29	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-29	RB1-08	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-26	55.10.9.	AD-29	55.11.13.	AC-29	55.11.13.	AD-29	55.12.16.		
F-30	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J30	55.6.11.	I-30	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-30	RB1-08	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-27	55.10.9.	AD-30	55.11.13.	AC-30	55.11.13.	AD-30	55.12.16.		
F-31	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J31	55.6.11.	I-31	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-31	RB1-08	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-28	55.10.9.	AD-31	55.11.13.	AC-31	55.11.13.	AD-31	55.12.16.		
F-32	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J32	55.6.11.	I-32	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-32	RB1-12	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-29	55.10.9.	AD-32	55.11.13.	AC-32	55.11.13.	AD-32	55.12.16.		
F-33	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J33	55.6.11.	I-33	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-33	RB1-09	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-29	55.10.9.	AD-33	55.11.13.	AC-33	55.11.13.	AD-33	55.12.16.		
F-34	RB1-15	54.9.7.	55.9.4.	05J34	55.6.11.	I-34	AL1-01	54.12.24.	54.11.6.	E-34	RB1-09	54.9.7.	55.9.24.	WB1-01	55.7.4.	AA-30	55.10.9.	AD-34	55.11.13.	AC-34	55.11.13.	AD-34	55.12.16.		

Table 2 Irradiation condition of control rod

サ イ ク ル			0	1	2	3	4	5	6	
装 荷 位 置			3 E 3							
燃 焼 度	ポ イ ント 最 大		$\times 10^{20}$ cap/cc	7.5	20.2	33.4	44.8	56.1	67.1	78.0
	集 合 体 平 均		$\times 10^{20}$ cap/cc							
積 算 中 性 子 照 射 量	$E_n \geq 0.1$ MeV	ポ イ ント 最 大	$\times 10^{20}$ n/cm ²	35.2	99.6	166	222	274	327	385
		集 合 体 平 均	$\times 10^{20}$ n/cm ²	8.7	27.0	45.2	58.7	71.6	84.2	98.7
	Total	ポ イ ント 最 大	$\times 10^{20}$ n/cm ²	46.6	130	217	292	363	433	510
		集 合 体 平 均	$\times 10^{20}$ n/cm ²	12.0	36.6	61.4	80.3	98.3	116	136
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		°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	383	388	389	387	387	389	388
	E O C		°C	382	387	386	384	385	386	386
ピ ー キ ン グ 係 数	B O C	径 方 向	—							
		軸 方 向	—	3.636	3.256	3.236	3.347	3.358	3.606	3.949
	E O C	径 方 向	—							
		軸 方 向	—	3.320	3.368	3.349	4.623	4.564	4.612	4.422
冷 却 材 流 量	B O C		kg/sec	3.6	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
	E O C		kg/sec	3.6	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
備 考										

Table 3 B₄C stack length changes

測定項目 PIN. No. (PIE. No.)	インシュレータ ペレット長 (mm)	B ₄ C スタック長 (mm)			管内長 (mm)			スプリング (mm)
		照射前 (FAB)	照射後 (PIE)	変化量 (PIE-FAB)	照射前 (FAB)	照射後 (PIE)	変化量 (PIE-FAB)	上部端栓境界
MCE-29 (8501)	20.6	650.2	656.1	5.9	1050.5	1051.6	1.1	320.6
MCE-30 (8502)	20.6	651.0	656.7	5.7	1050.4	1051.4	1.0	319.7
MCE-31 (8503)	20.6	651.2	656.6	5.4	1050.5	1051.1	0.6	320.0
MCE-32 (8504)	20.3	650.7	656.3	5.6	1050.6	1051.3	0.7	320.4
MCE-33 (8505)	20.4	650.8	655.3	4.5	1050.6	1050.7	0.1	321.4
MCE-34 (8506)	20.3	650.9	656.0	5.1	1050.5	1051.1	0.6	320.5
MCE-35 (8507)	20.5	651.5	655.3	3.8	1050.5	1050.7	0.2	320.8

Table 4 Results of pin weighing

Pin. No. (PIE. No.)	吸 収 ピ ン 重 量 (g)		
	照 射 前 (FAB)	照 射 後 (PIE)	変 化 量 (PIE-FAB)
MCE-29 (8501)	914.0	915.4	1.4
MCE-30 (8502)	911.5	919.4	7.9
MCE-31 (8503)	915.5	924.9	9.4
MCE-32 (8504)	911.5	921.6	10.1
MCE-33 (8505)	913.5	924.0	10.5
MCE-34 (8506)	911.0	920.6	9.6
MCE-35 (8507)	912.0	921.7	9.7

Table 5 Outer dia. change of cladding in the lower region of the B₄C stack

Pin. No. (PIE No.)	照 射 後					照 射 前		変 化 量 ΔD (μm) (ΔD/D%)
	軸方向位置 (ピン下端から) mm	測 定 1 (mm)	測 定 2 (mm)	測 定 1 角 度	測 定 平 均 (mm)	軸方向位置 (ピン下端より) mm	測 定 平 均 (mm)	
				測 定 2 角 度				
MCE-29 (8501)	124	18.269	18.258	55-235°	18.263	75	18.090	173
				145-325°				(0.95)
MCE-32 (8504)	124	18.286	18.262	75-255°	18.274	75	18.085	189
				165-345°				(1.04)
MCE-35 (8507)	104	18.246	18.284	105-285°	18.265	75	18.085	180
				15-195°				(1.00)

※ 軸方向位置は、照射後データと一致する照射前データがないため近傍のデータを使用。

Table 6 Irradiation condition of the dashrum:

制御棒番号	最大積算中性子 照射量 (n/cm^2) $E \geq 0.1 \text{ MeV}$	最大燃焼度 (cap/cc)	装荷サイクル	ダッシュラム部中性子照射量 (n/cm^2)	
				下端より 160 mm	下端より 260 mm
MCR004	3.24×10^{22}	67.5×10^{20}	100 MW出力上昇～ 100 MW 5 サイクル	3.96×10^{22}	5.41×10^{22}
MCR005	3.85×10^{22}	78×10^{20}	100 MW出力上昇～ 100 MW 6 サイクル	4.49×10^{22}	6.10×10^{22}

Table 7 B₄C pellet swelling

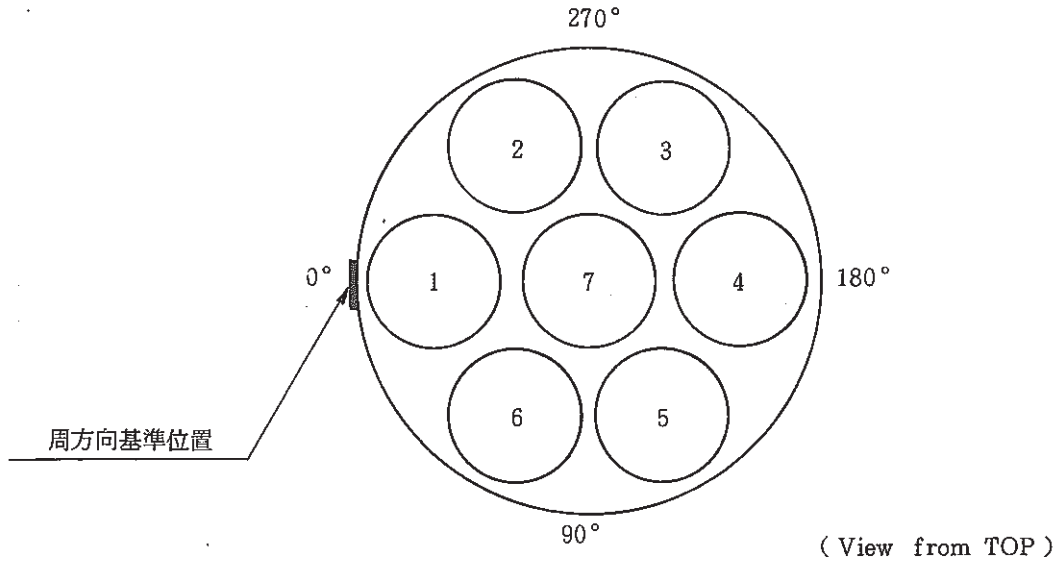
pin. No. (PIE. No.)	被覆管平均外径 変化量 (mm)	被覆管下端部 平均内径 (mm)	スタック下端B ₄ Cペレット 製造時平均外径 (mm)	製造時被覆管 ペレットギャップ (mm)	B ₄ Cペレットスエリング ($\Delta D/D$: %)
MCE-29 (8501)	0.174	16.51	16.31	0.20	2.29
MCE-322 (8504)	0.189	16.51	16.33	0.18	2.26
MCE-35 (8507)	0.180	16.51	16.28	0.23	2.52

B₄Cペレットスエリング式

$$\text{B}_4\text{Cペレットスエリング (\%)} = \frac{\text{被覆管平均外径変化量} + \text{製造時被覆管・ペレットギャップ}}{\text{スタック下端B}_4\text{Cペレット製造時平均外径}} \times 100$$

Table 8 B₄C stack length changes

制御棒番号	照射後 下部インシュレータ ペレット長(mm) (平均)	B ₄ C スタック長			変化量最大 mm
		照射前(平均) mm	照射後(平均) mm	変化量(平均) mm	変化量最小 mm
MCR 006	21.2	650.8	652.7	+ 1.9	+ 2.2
					+ 1.6
MCR 002	20.5	650.8	653.5	+ 2.7	+ 3.1
					+ 2.3
MCR 005	20.5	650.9	656.1	+ 5.2	+ 5.9
					+ 3.8



制御棒内 位置No.	制 御 棒 要 素 番 号						
	1	2	3	4	5	6	7
制御棒 No.							
MCR 005	MCE - 29 (8501)	MCE - 30 (8502)	MCE - 31 (8503)	MCE - 32 (8504)	MCE - 33 (8505)	MCE - 34 (8506)	MCE - 35 (8507)

PNC TN9410 86-147
() は PIE における Pin No

Fig. 1 Pin loading diagram

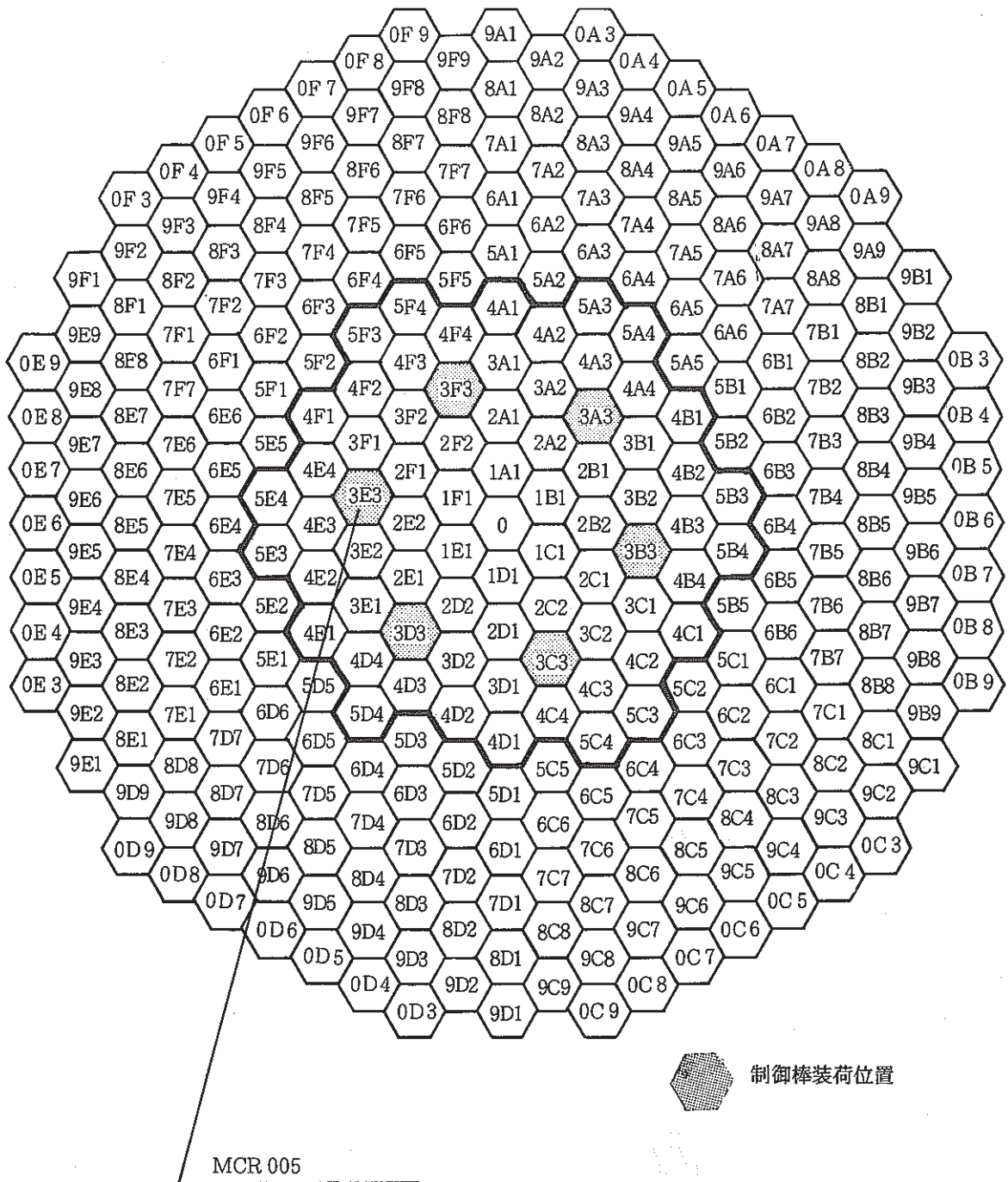
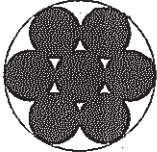
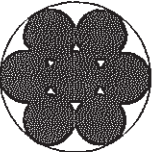
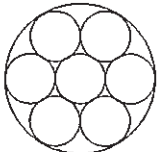
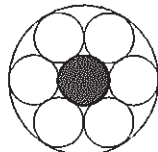
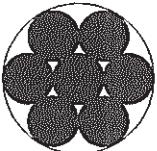
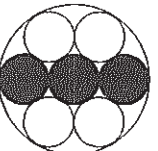
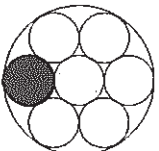
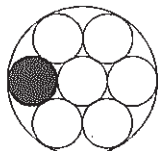
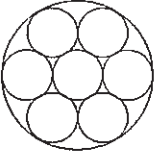
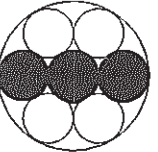
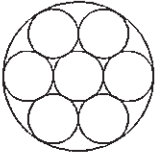
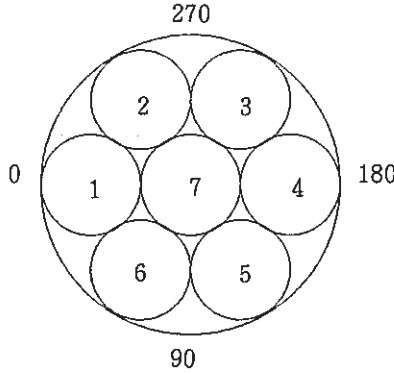
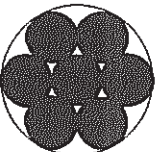
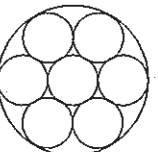
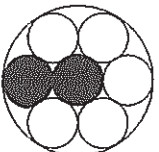


Fig. 2 In-reactor location of control rod

昭和 61 年 09 月 24 日作成

JOYO MK-II 照射後試験計画 (ピン試験)		集 合 体 試 験	集 合 体 部 材 試 験
制 御 棒 MCR005 [85] 装荷位置(3E3)		<ul style="list-style-type: none"> ● 1. NA洗淨前・後外観検査 2. NA洗淨 ● 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 	<ul style="list-style-type: none"> ● 1. W/Tガンマスキャン 2. W/T詳細外観検査
1. <u>ピン外観検査</u>  (全数)	5. <u>ワイヤ切断</u>  (全数)	9. <u>ガンマスキャン(スキャン)</u> 	13. <u>ベンド管詳細外観</u>  (1本)
2. <u>ピンX線ラジオグラフィ</u>  (全数)	6. <u>寸法測定(外径)</u>  (3本)	10. <u>ガンマスキャン スキャン+スペクトル</u>  (1本)	14. <u>吸収ピン内部観察</u>  (1本)
3. _____ 	7. <u>寸法測定(曲がり)</u>  (3本)	11. <u>ピン切断(AES)</u> 	<p>← ; 推定炉心方向を示す</p> 
4. <u>重量測定</u>  (全数)	8. <u>詳細外観検査</u> 	12. <u>ピン切断(MMS)</u>  (2本)	

● ; 試験対象

Fig. 3 Selected pins for the examination

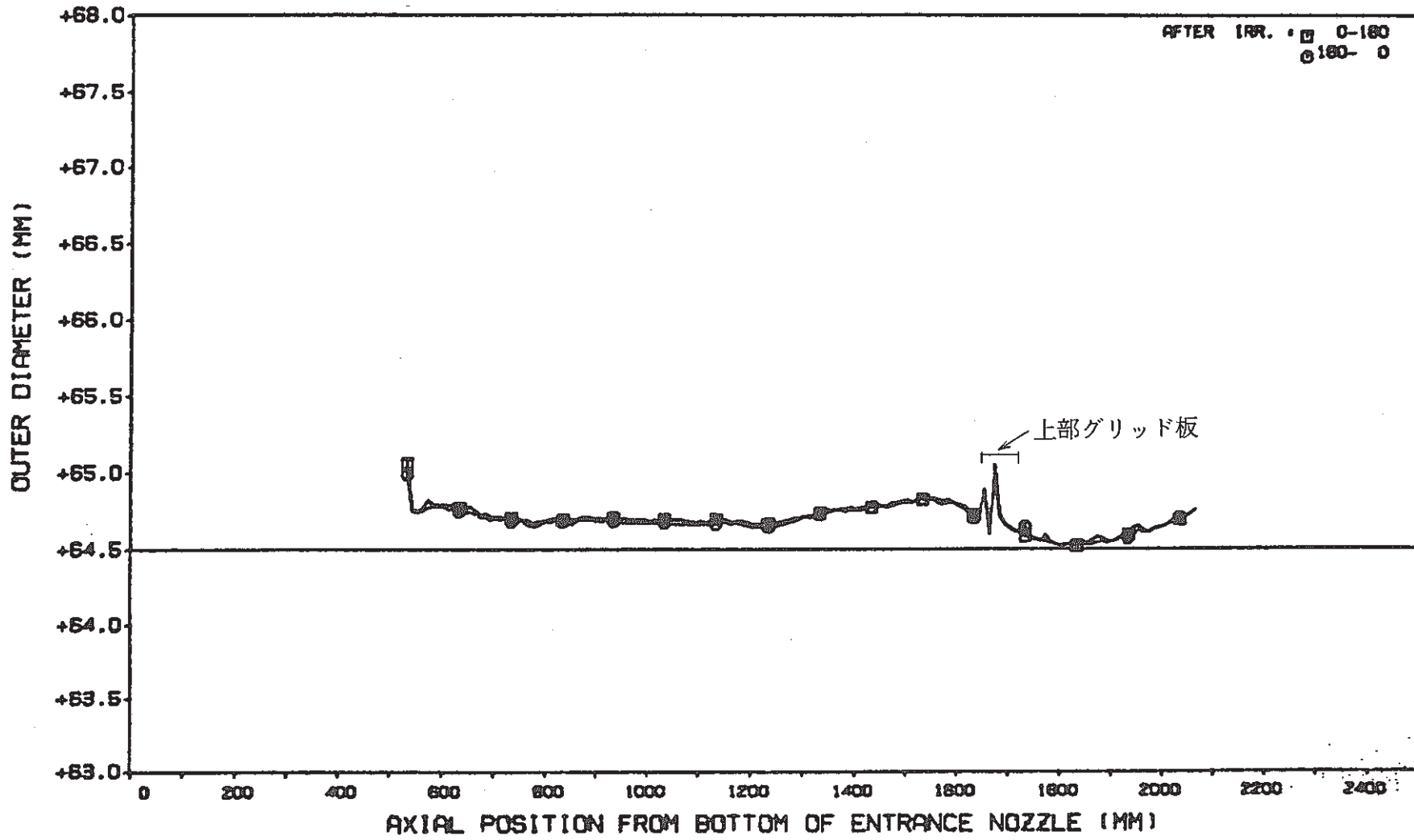


Fig. 4 Control rod outer diameter profile (0°-180°)

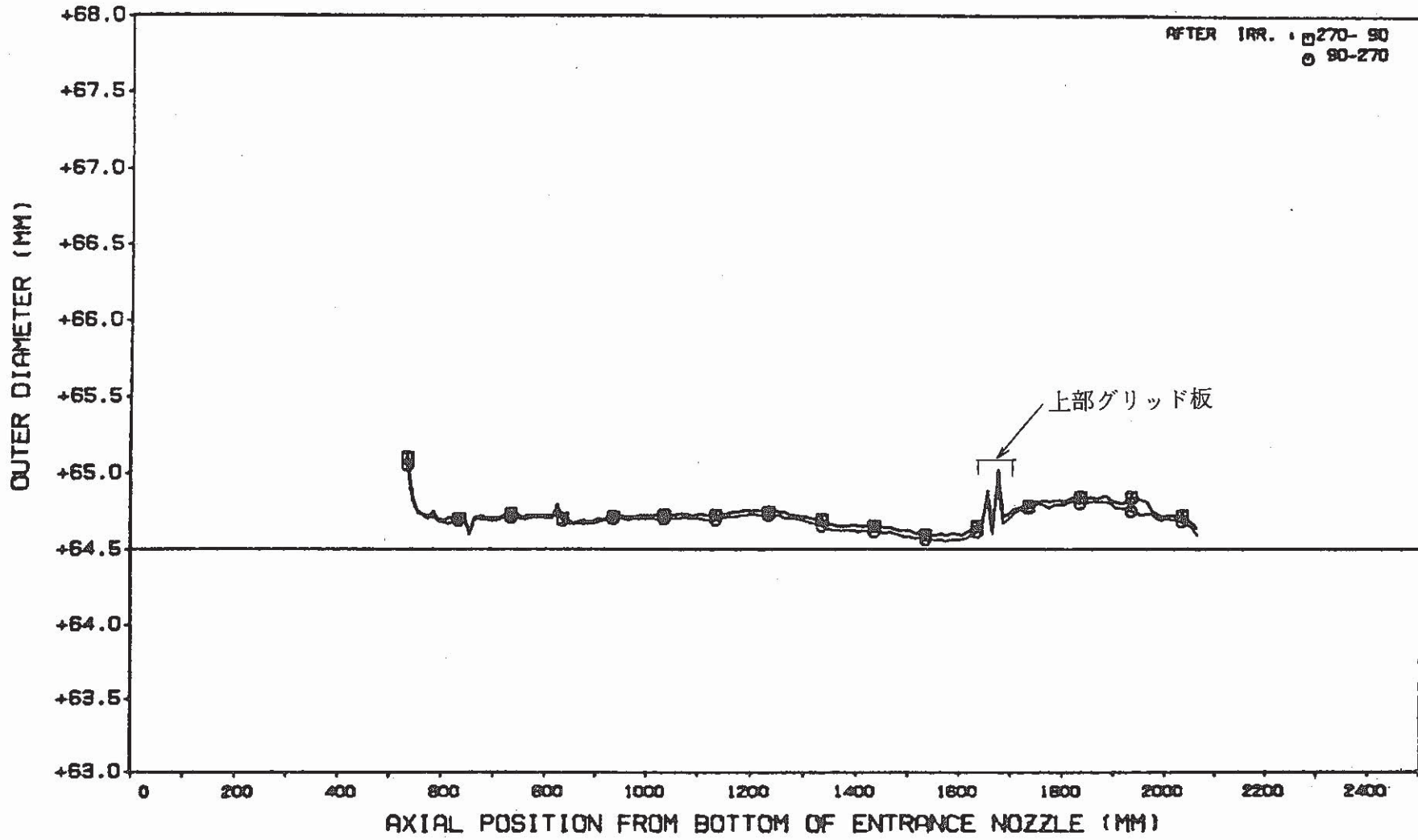


Fig. 5 Control rod outer diameter profile (90°-270°)

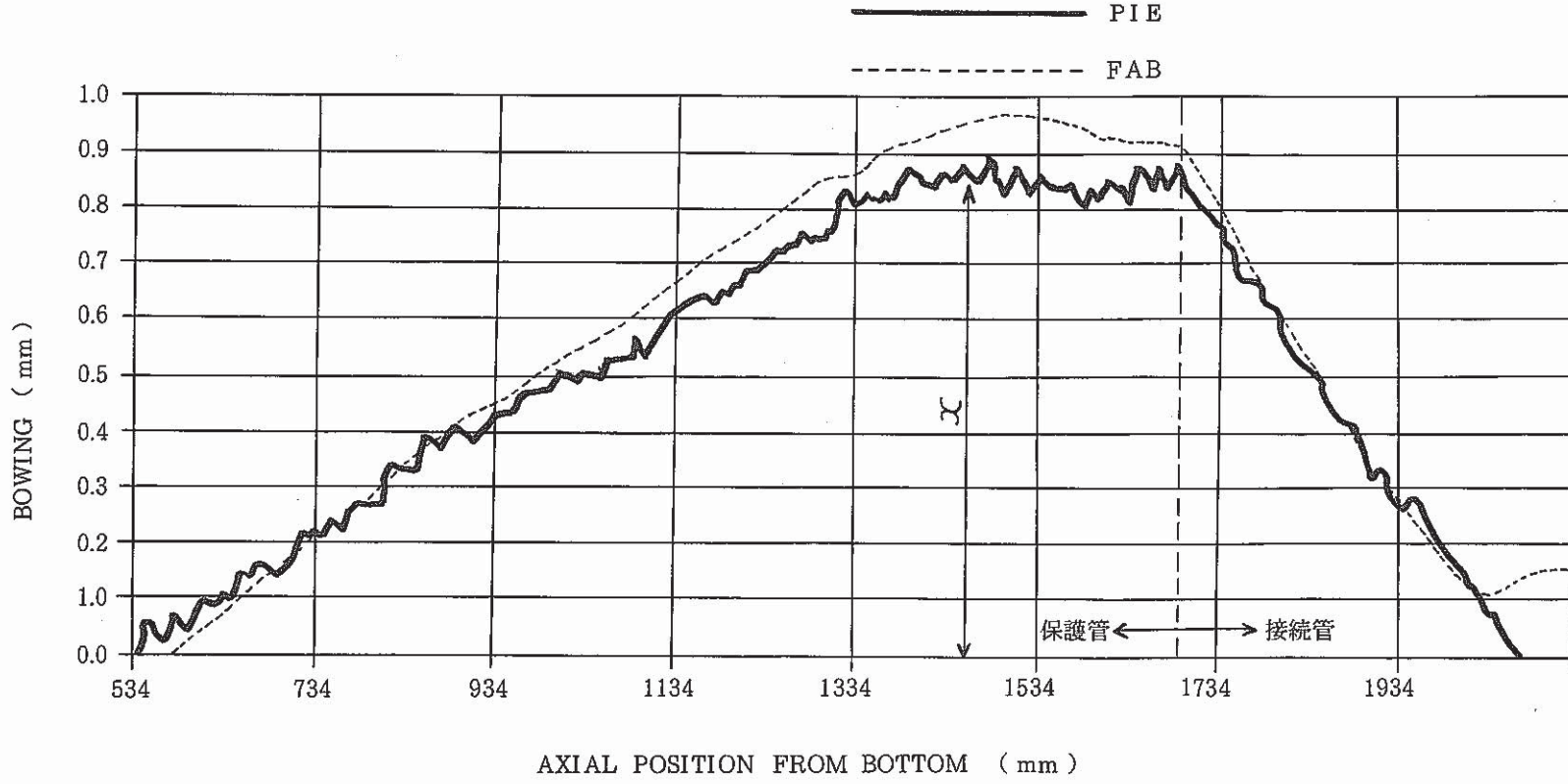
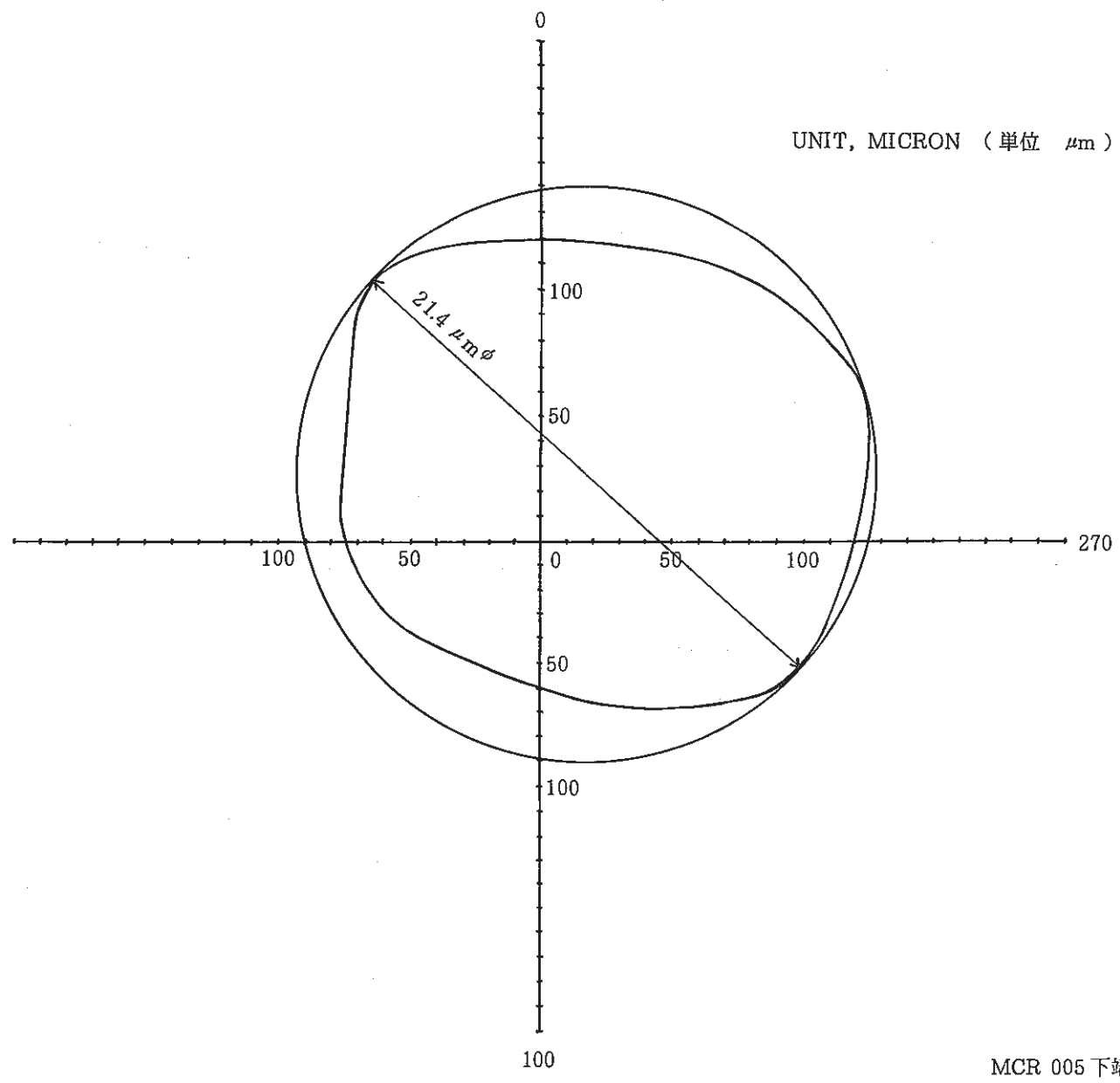


Fig. 6 Control rod bowing profile



MCR 005 下端より 260 mm 位置の半径変差図

Fig. 7 Outer diameter change diagram of the dashrum

S/A NO. (FAB) :	MCR005	ANGLE OF MAX RATE (DEG) :	312.10
S/A NO. (PIE) :	85WH2	MAX COUNT RATE (CPS) :	65.12
AXIAL POS. (MM) :	621.50	AVERAGE COUNT RATE (CPS) :	61.78
COOLING TM (DAYS) :	100	PEAKING FACTOR :	1.055
COLL. WIDTH (MM) :	0.80		
OP NO. :	5122-5122		

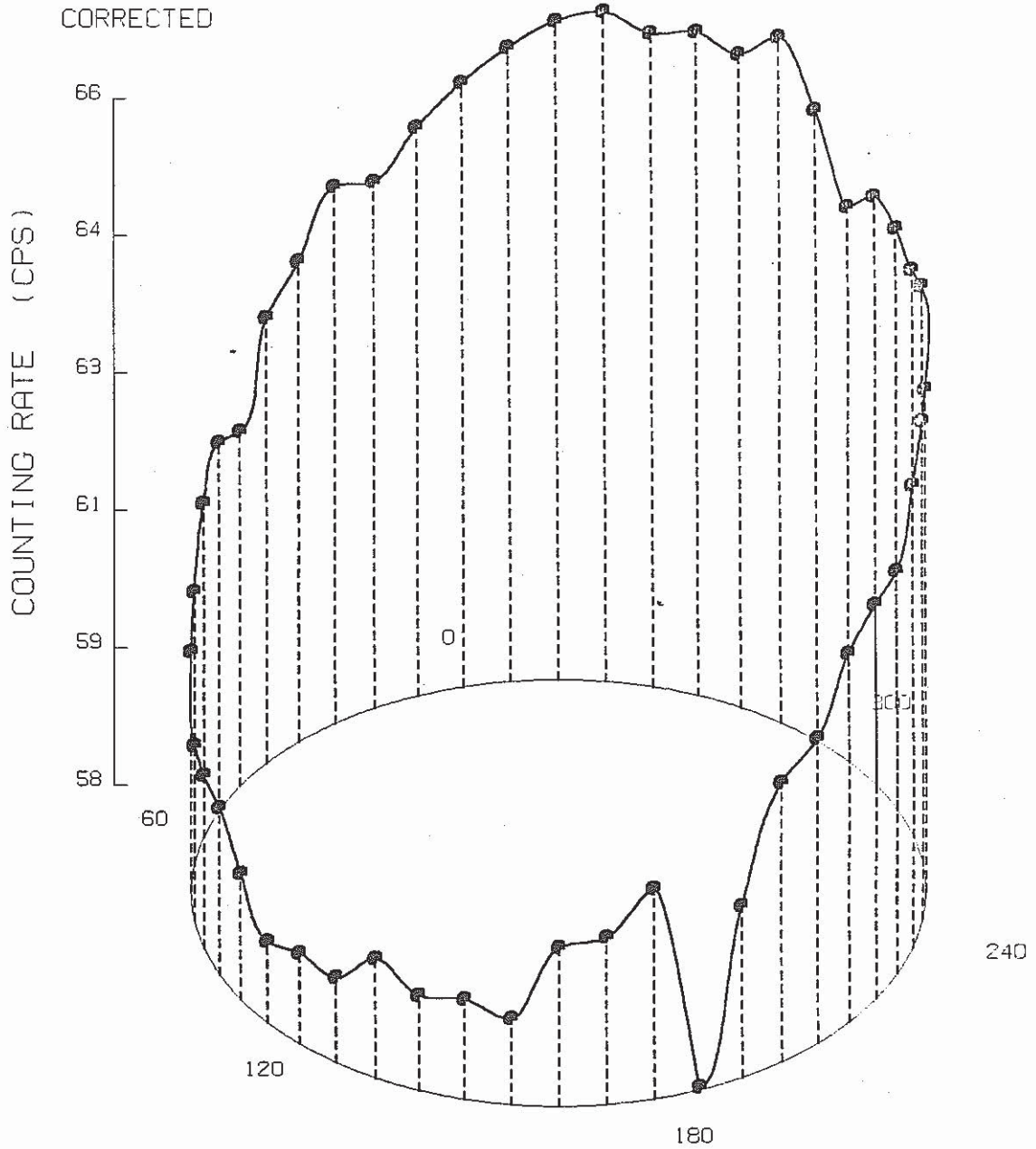


Fig. 8 Radial distribution of gamma-ray intensity
[MN 54 0.835 MEV]

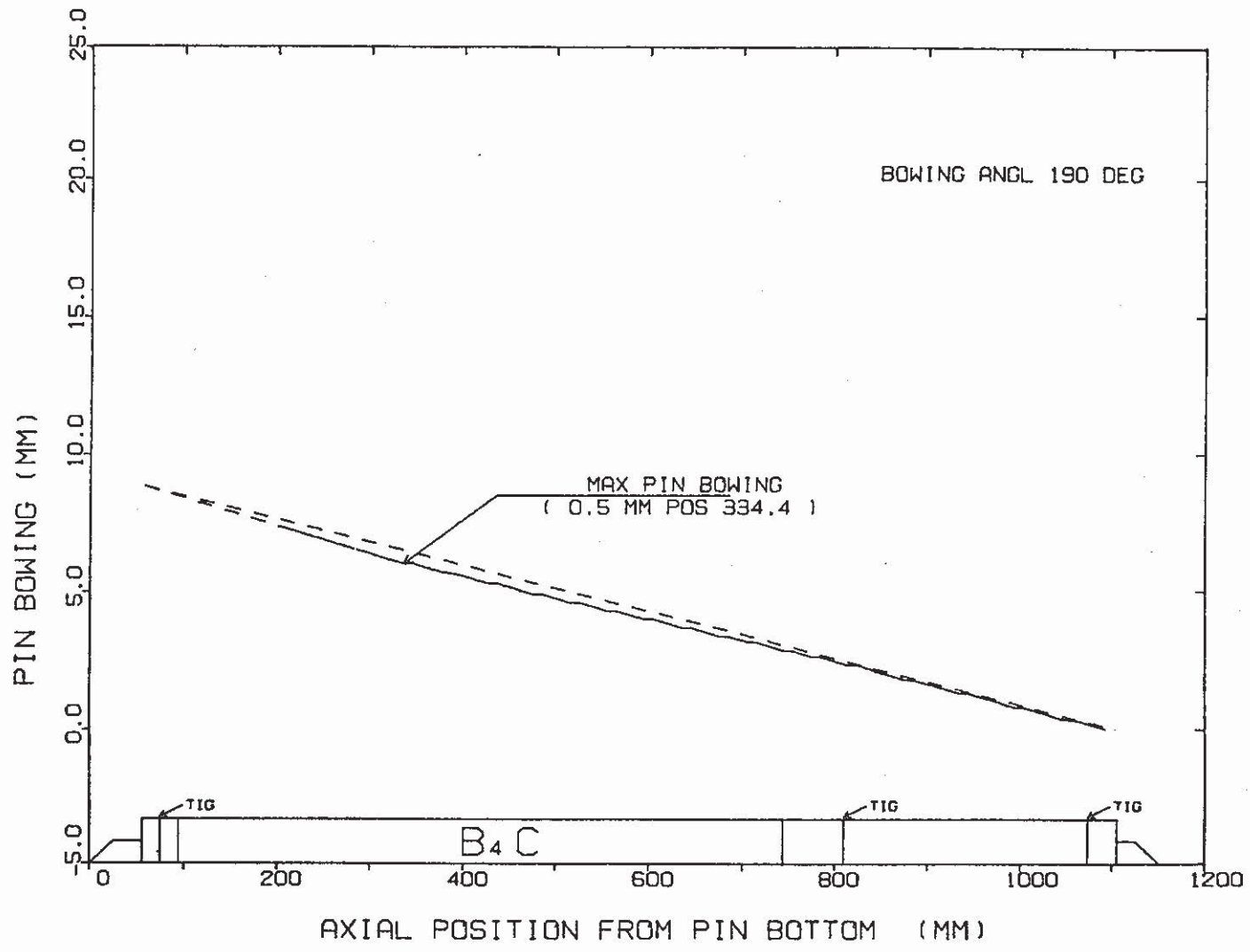


Fig. 9 Pin bowing profile (PIN NO. MCE - 29 8501)

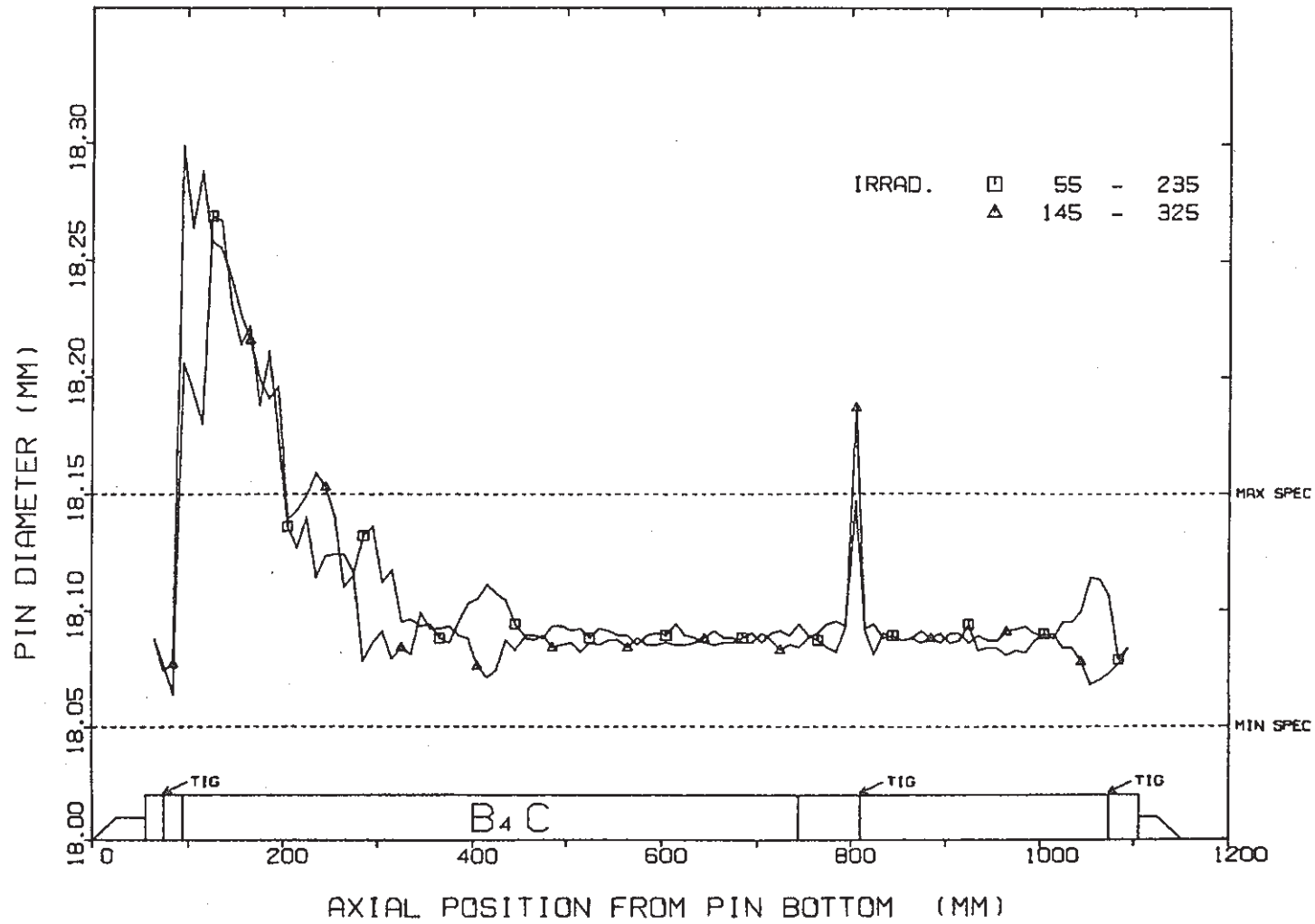


Fig. 10 Pin diameter profile (PIN NO. MCE-29 8501)

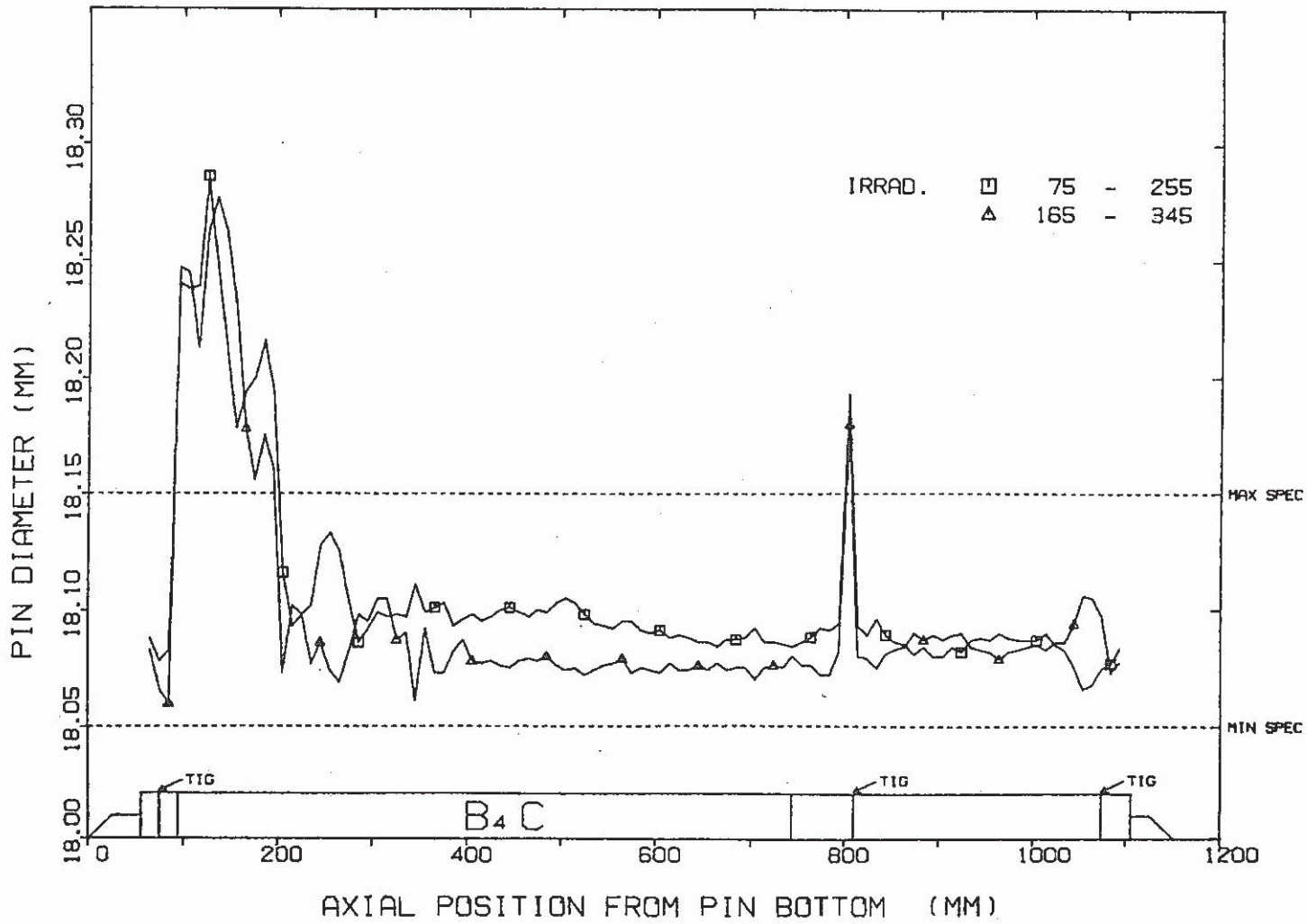


Fig. 11 Pin diameter profile [PIN NO. MCE-32 8504]

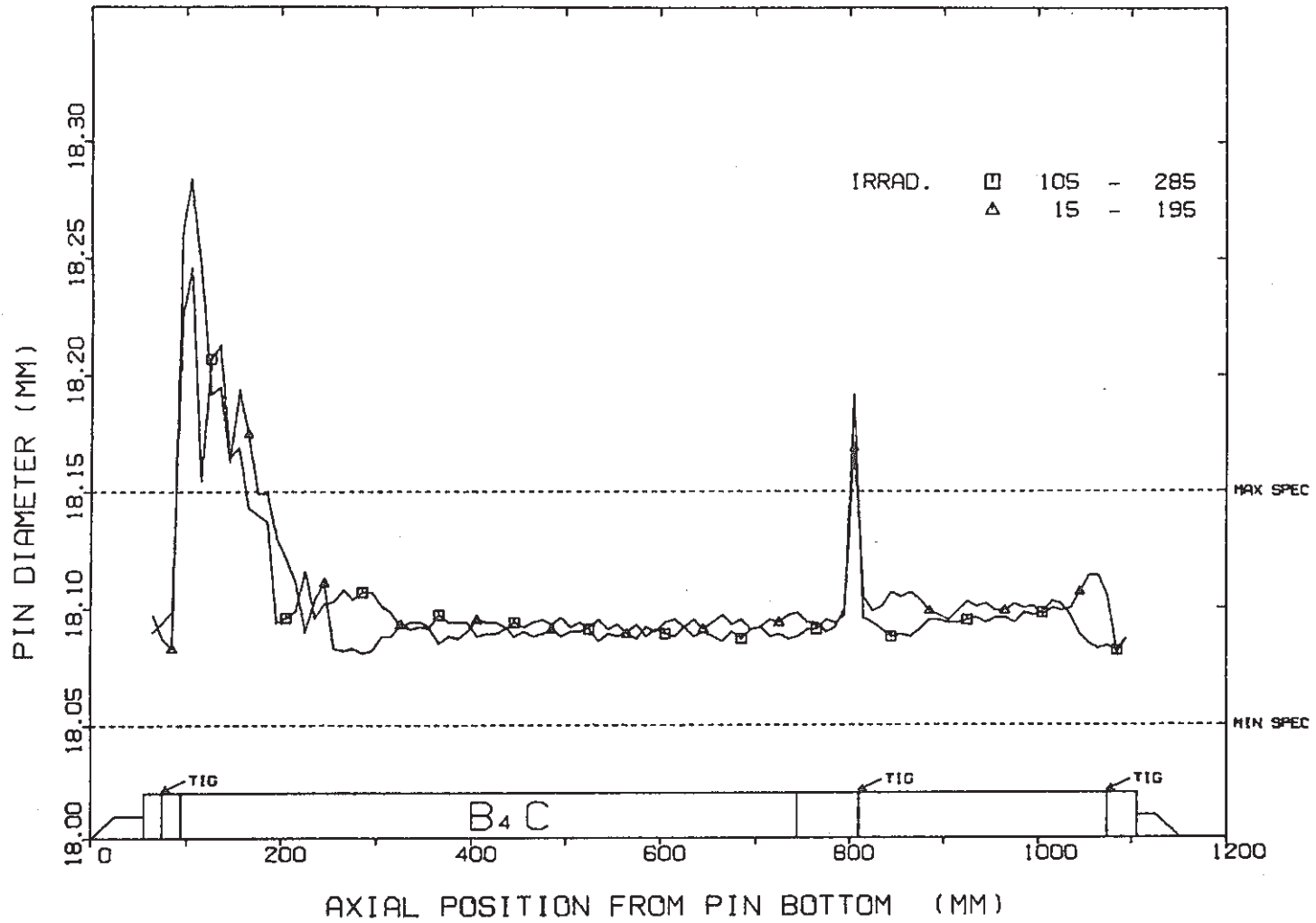


Fig. 12 Pin diameter profile (PIN NO. MCE-35 8507)

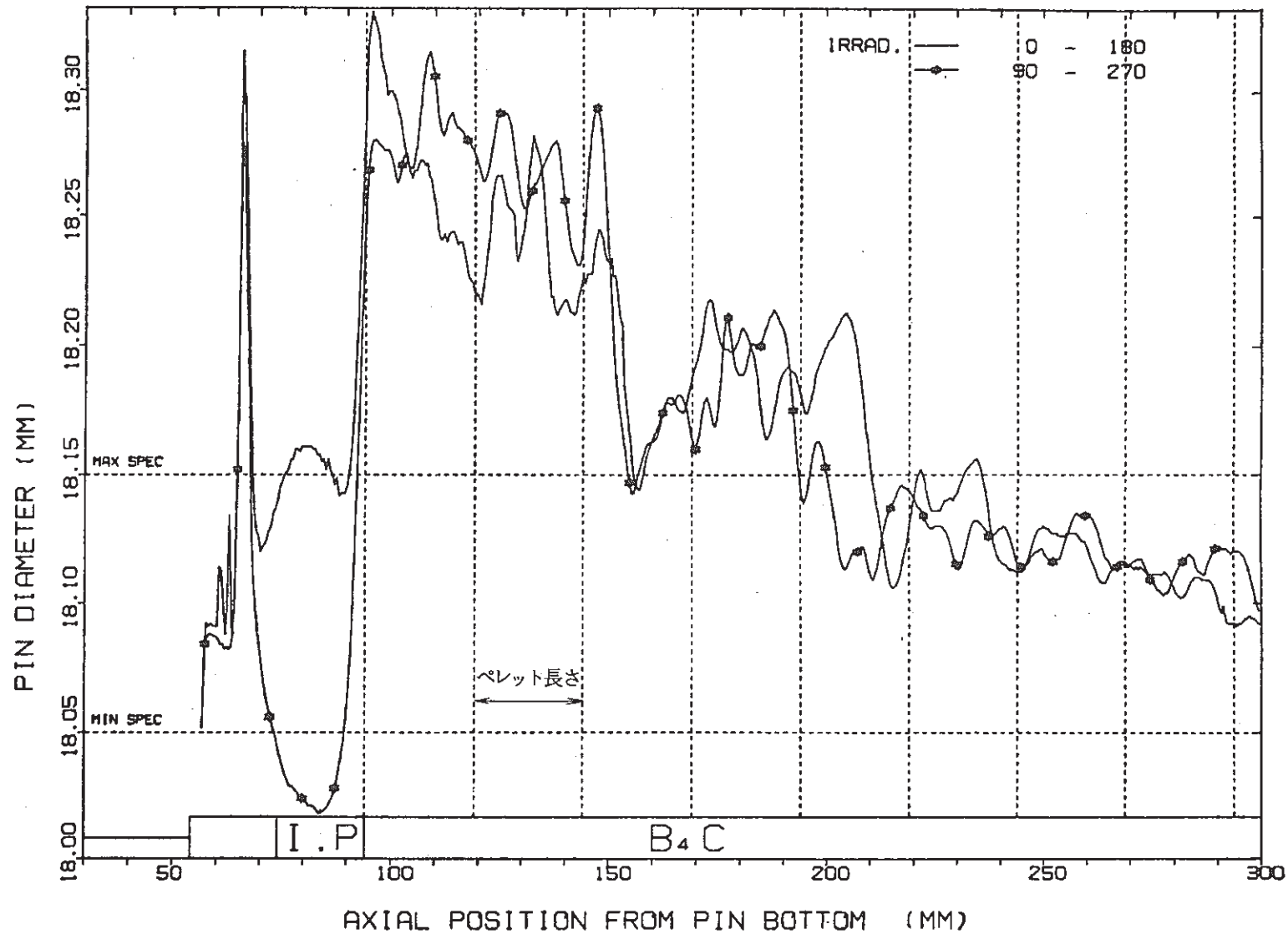


Fig. 13 Pin diameter profile [PIN NO. MCE - 31 8503]

OPTION7C

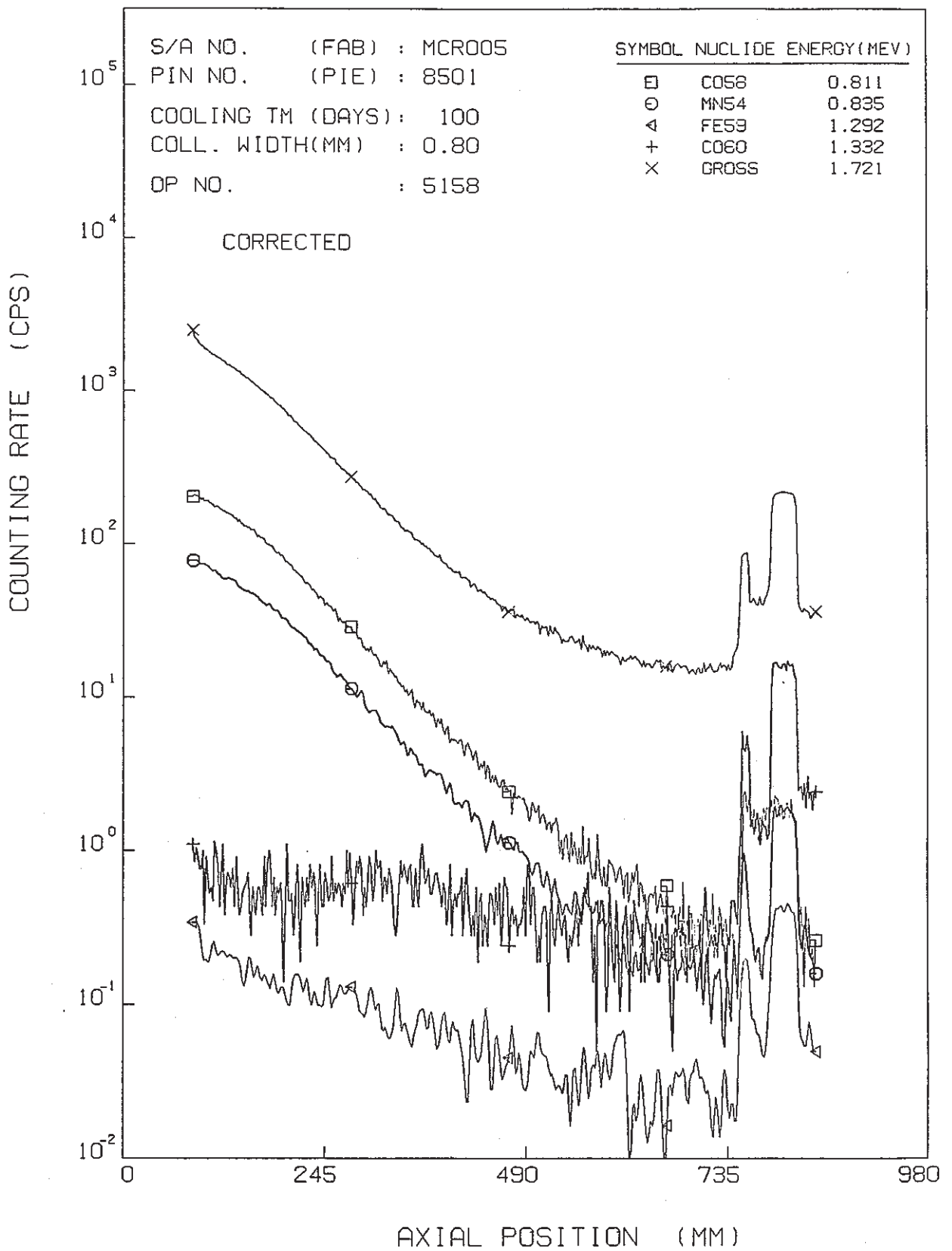


Fig. 14 Axial distribution of gamma-ray intensity

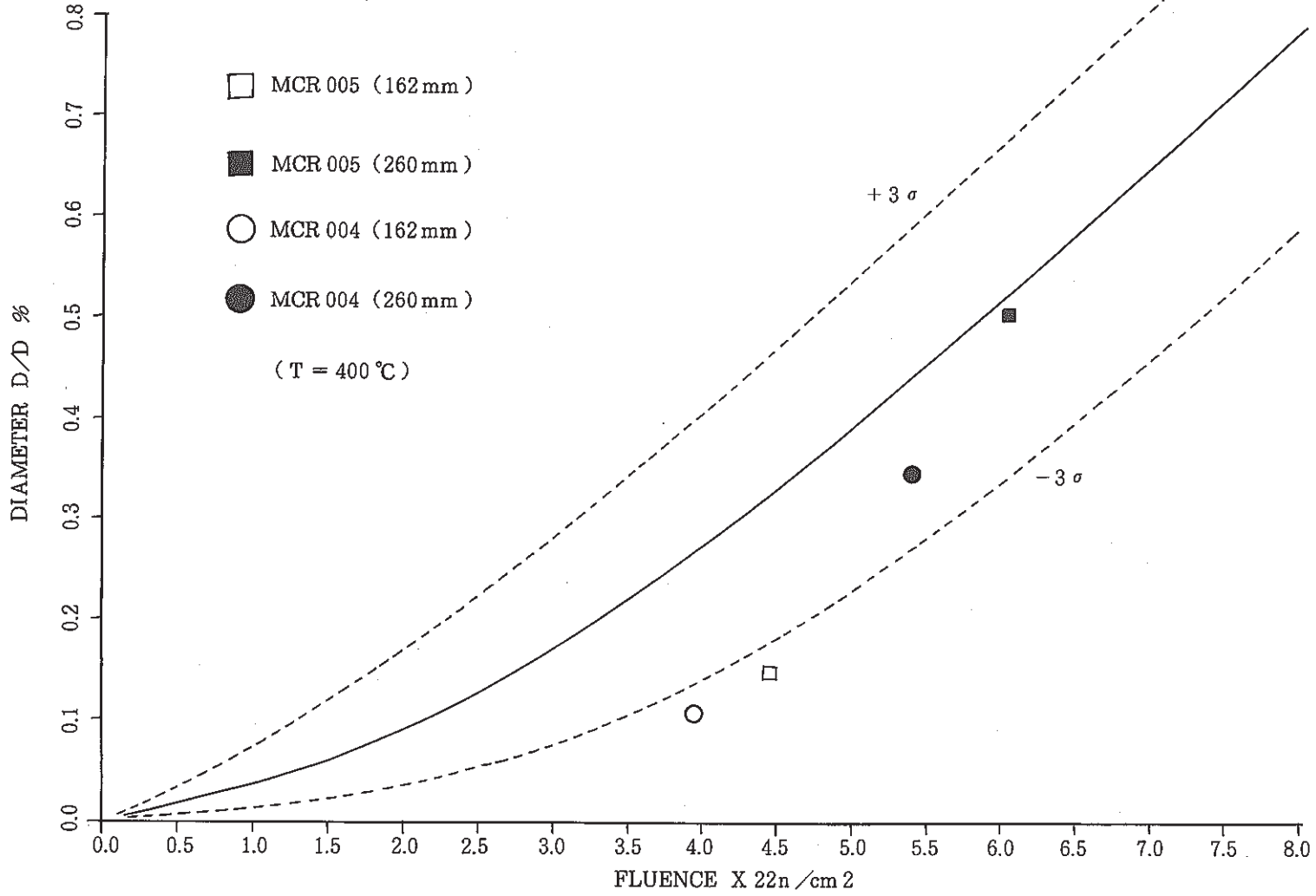


Fig. 15 Diameter change of the deshrum

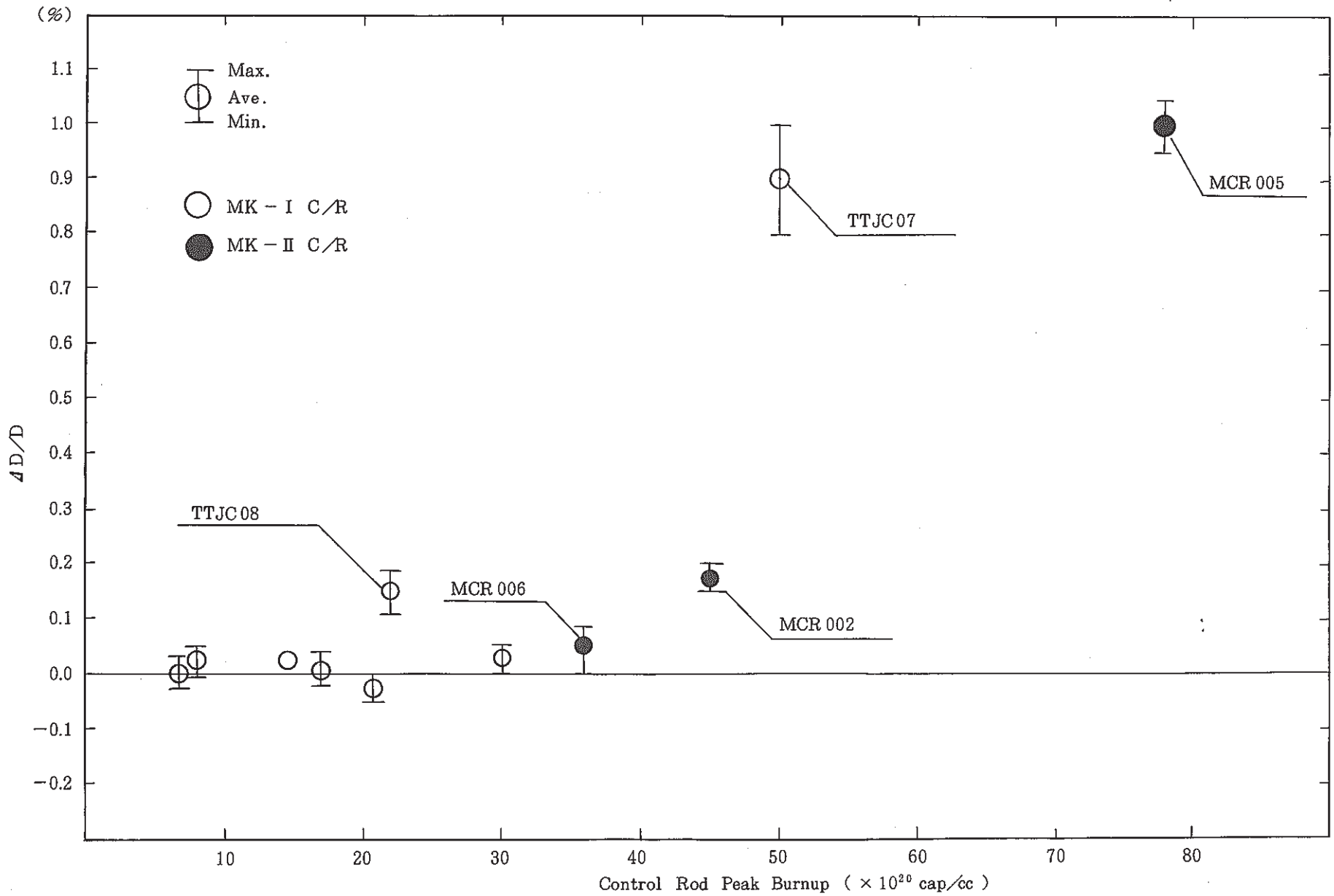


Fig. 16 Pin diameter change as a function of control rod peak burnup

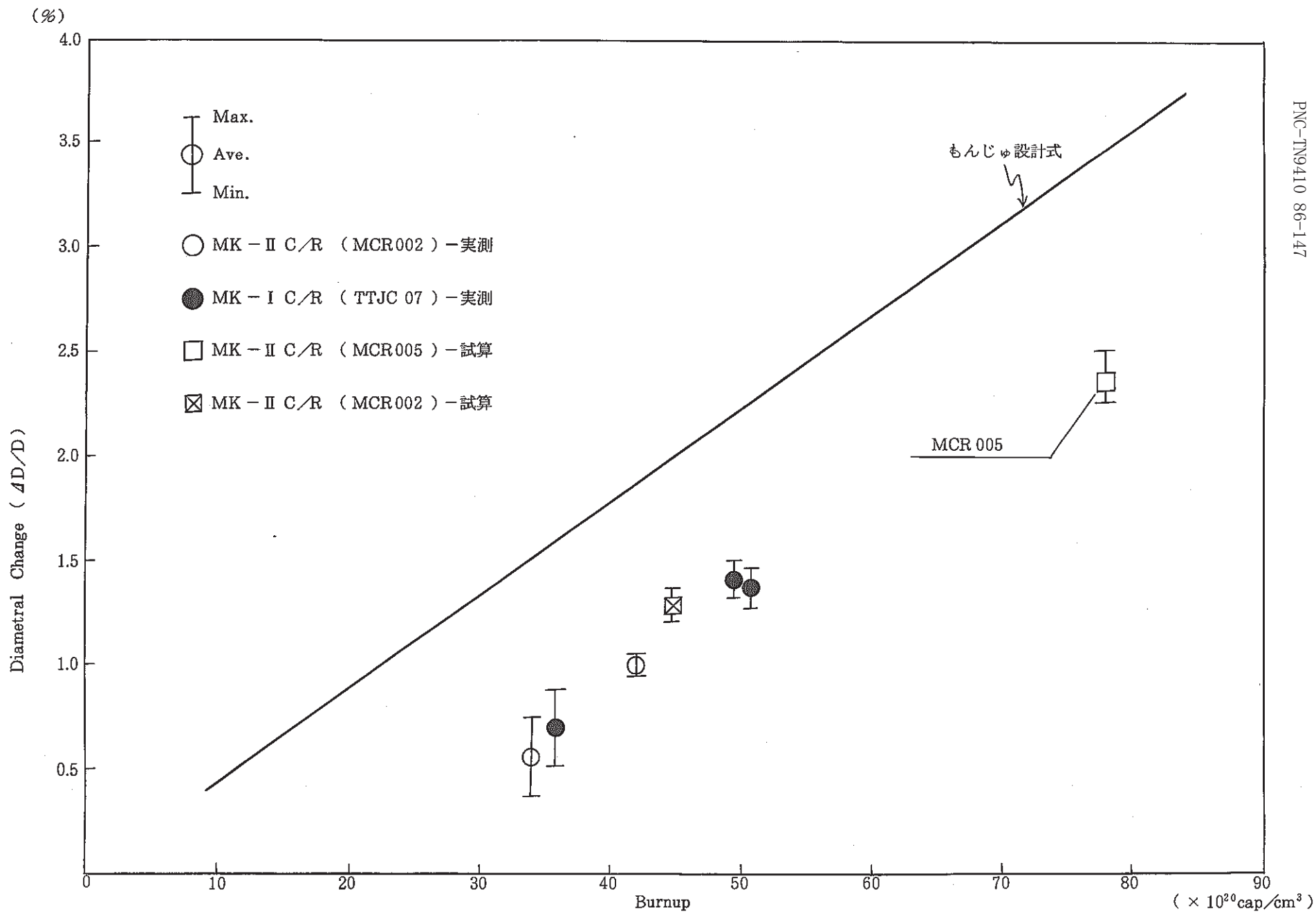


Fig. 17 Diametral changes of the B₄C pellets

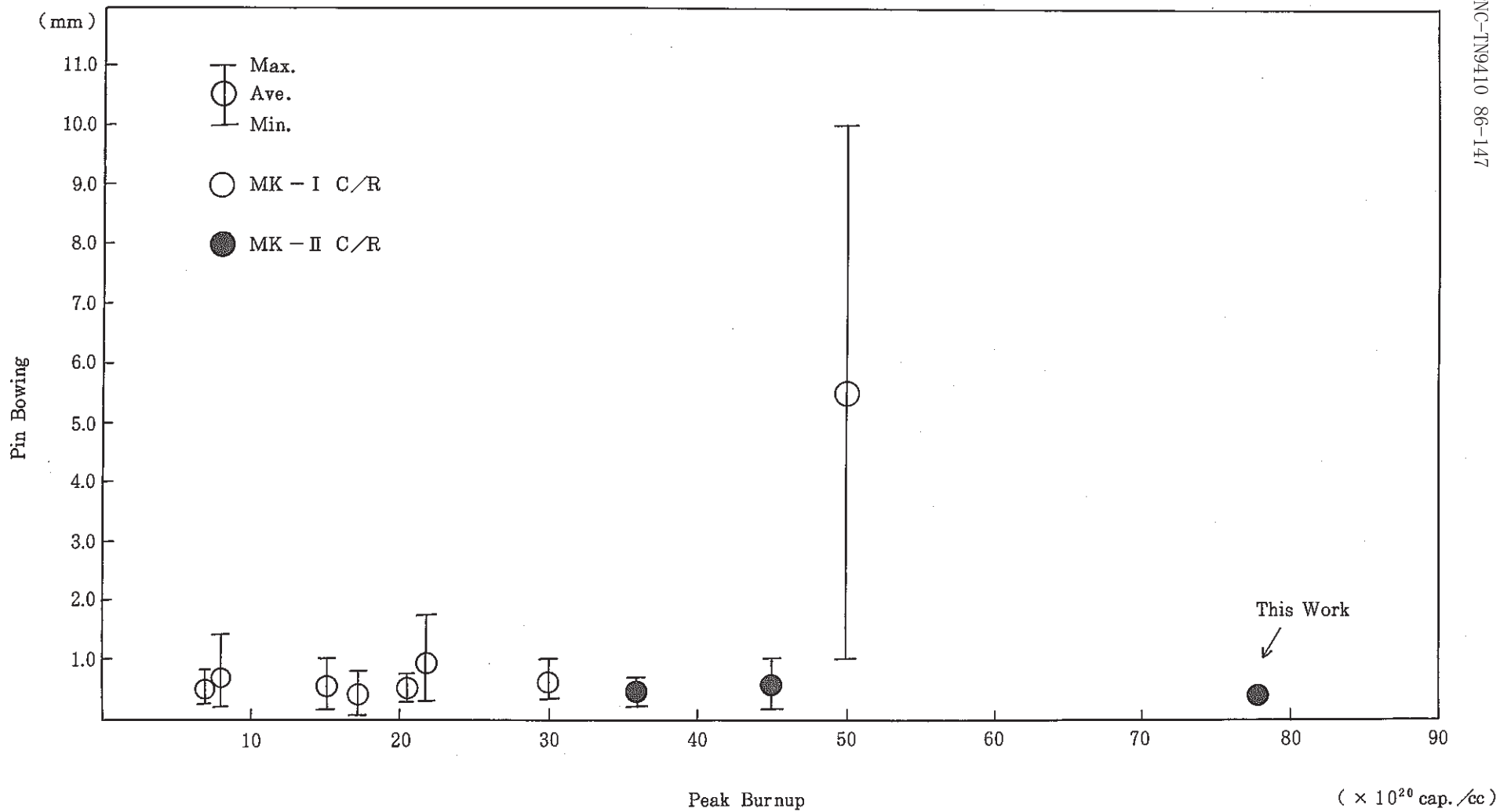


Fig. 18 Pin bowing as a function of a control rod burnup

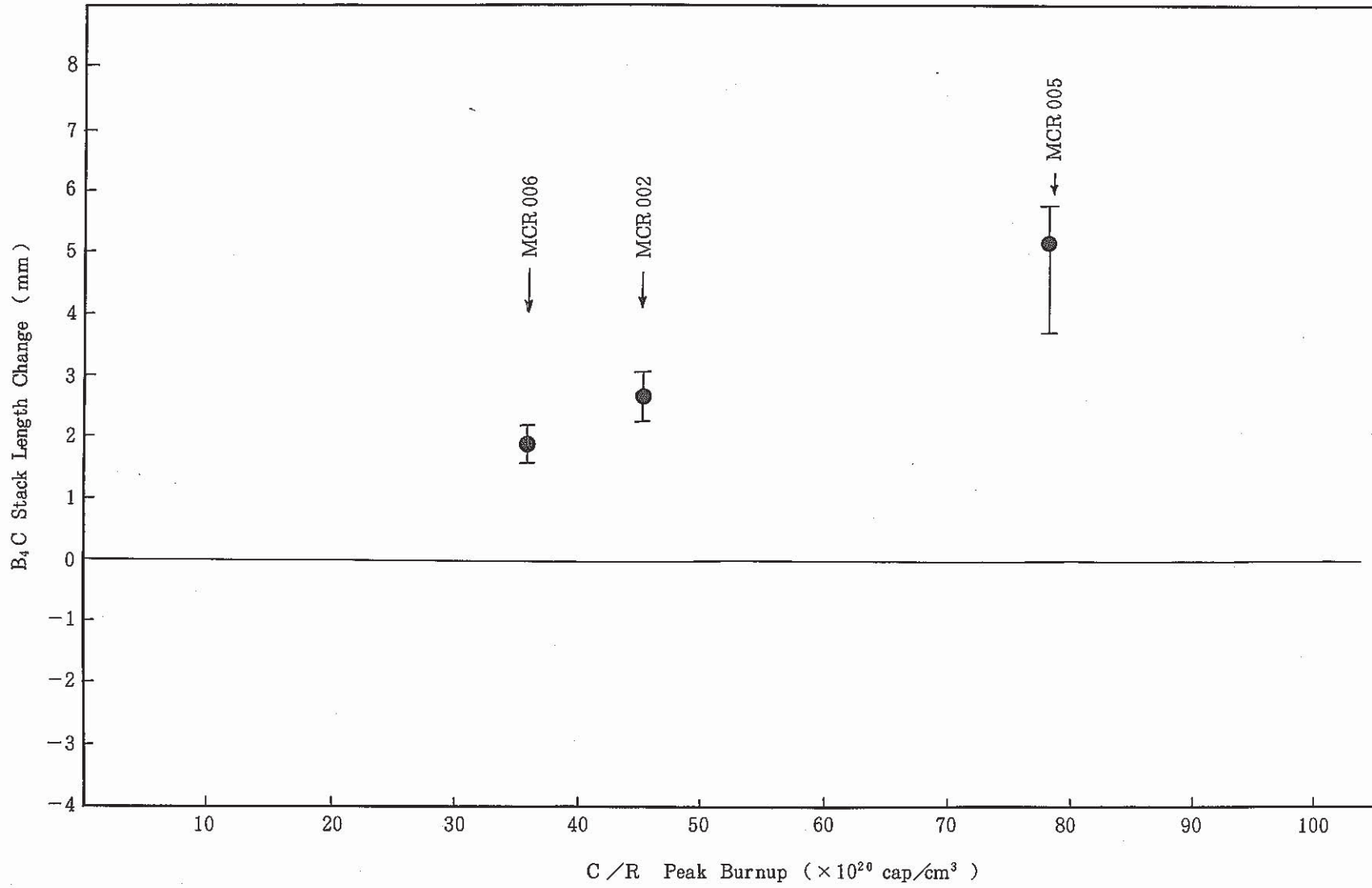
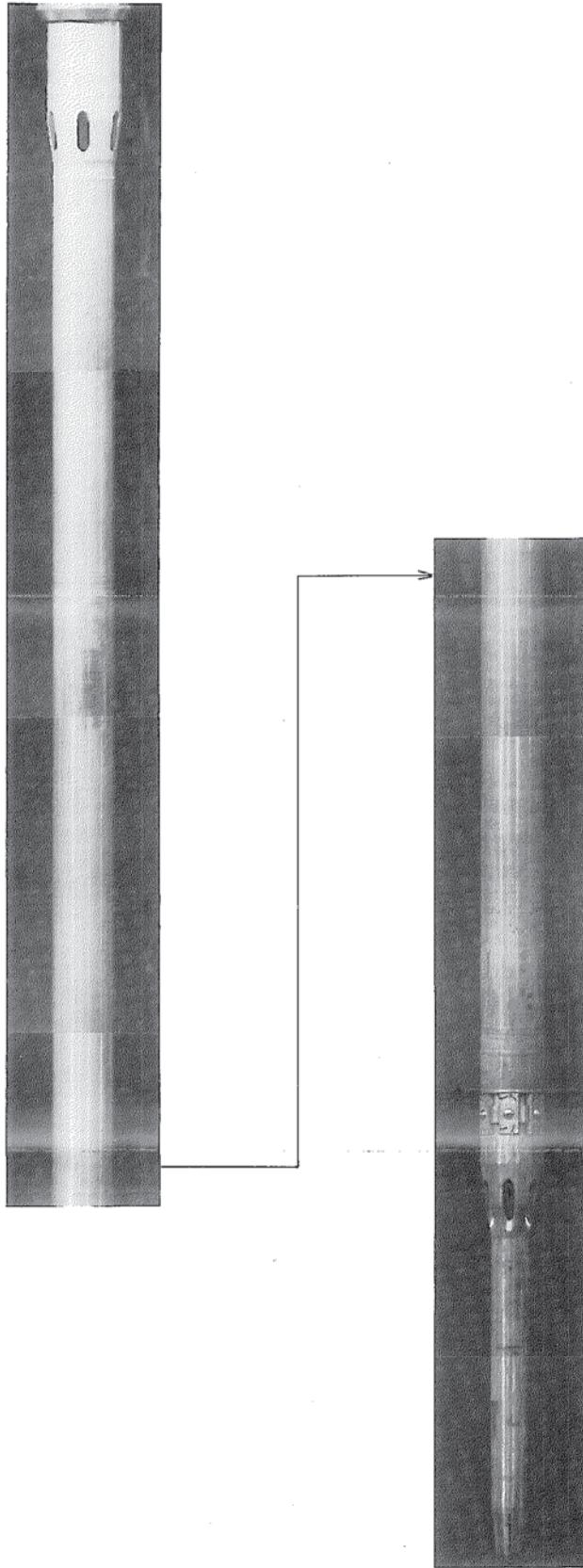


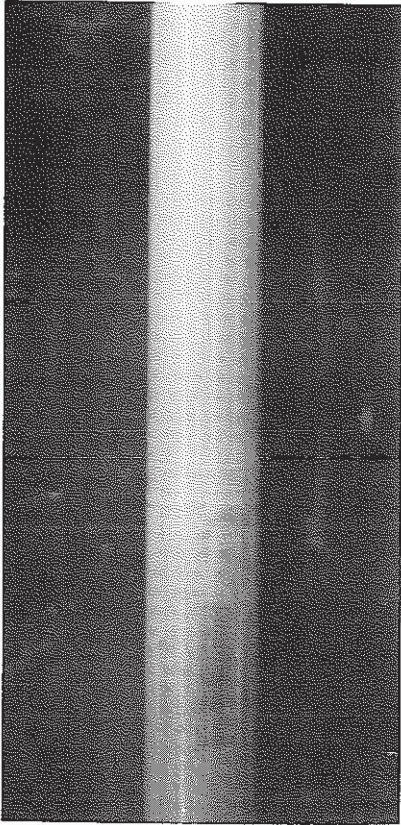
Fig. 19 B₄C stack length change as a function of control rod peak burnup



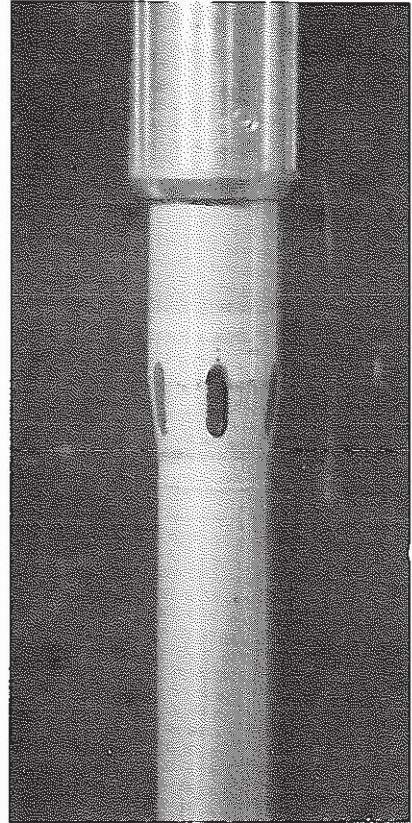
(before)

DIRECTION 0°

Photo. 1 Surface condition of the control rod

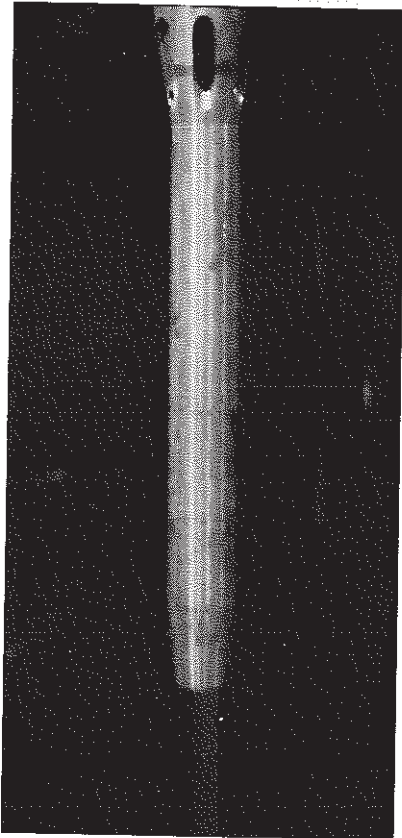


(A)

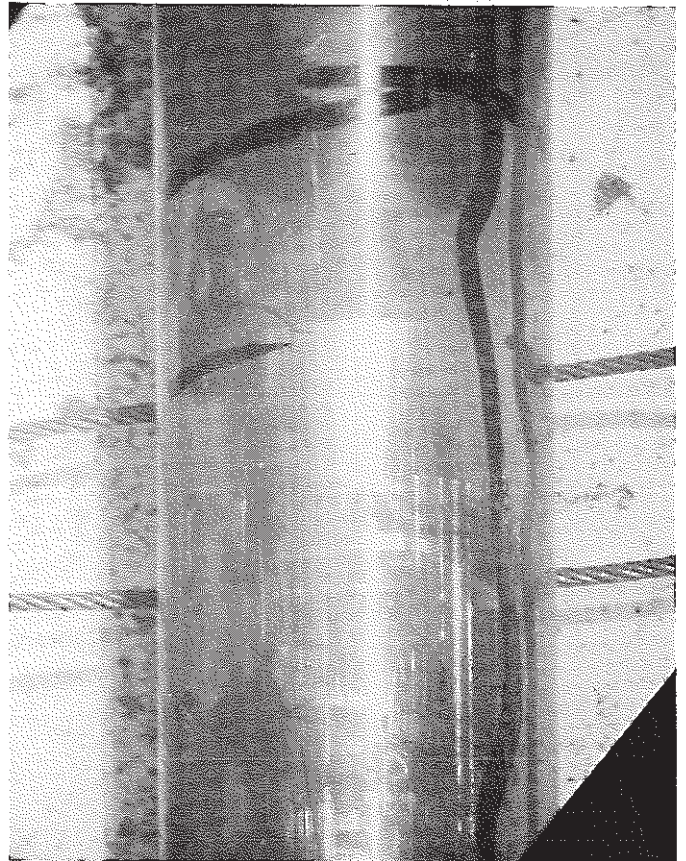


(B)

Photo. 2 Scar marks and dent marks on the surface of the control rod



(A)



(B)

Photo. 3 Scar marks of the dashrum surface

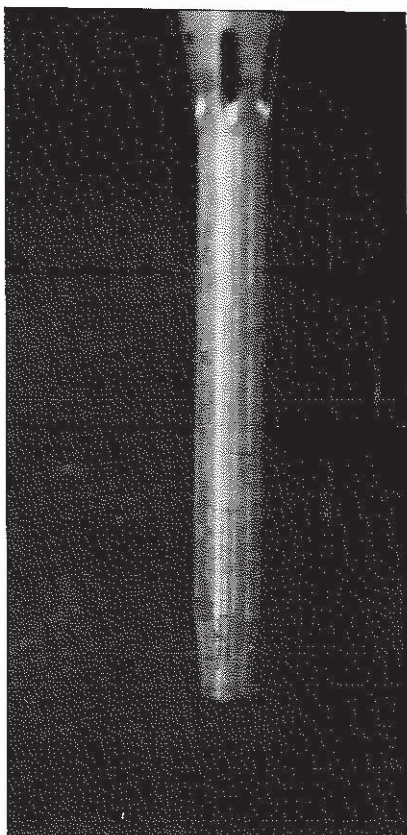


Photo. 4 Scar marks of the dashrum

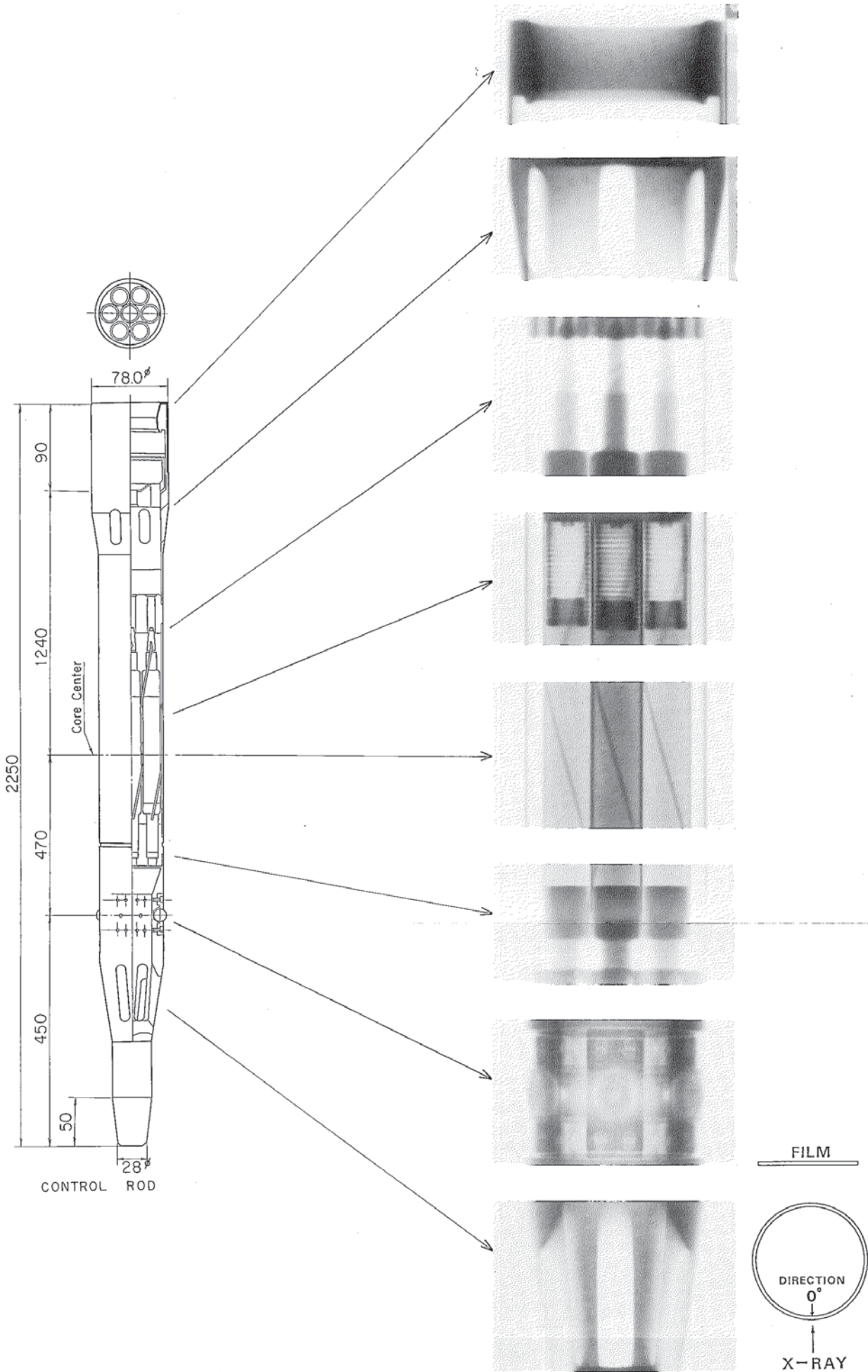


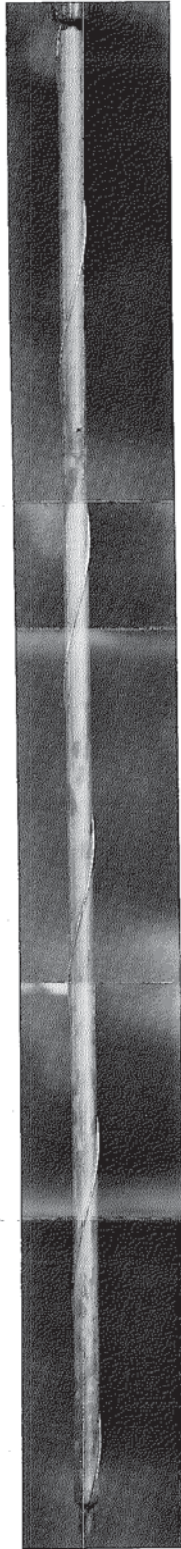
Photo. 5 Control rod X-ray radiography

F852001

PIN NO.8501

PNC-TN9410 86-147

TOP



BOTTOM

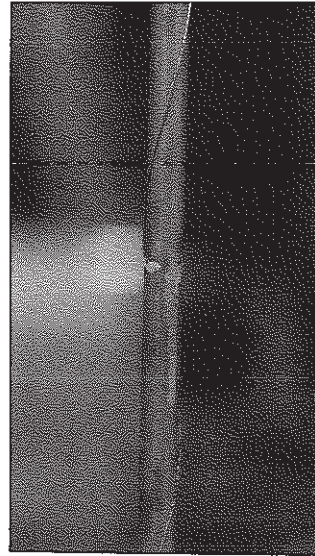
DIRECTION 0°

F853004

Photo. 6 Surface condition of the absorber pin



(Pin.No.MCE- 34 8506)



(Pin.No.MCE- 35 8507)

Photo. 7 Surface condition of the vent hole

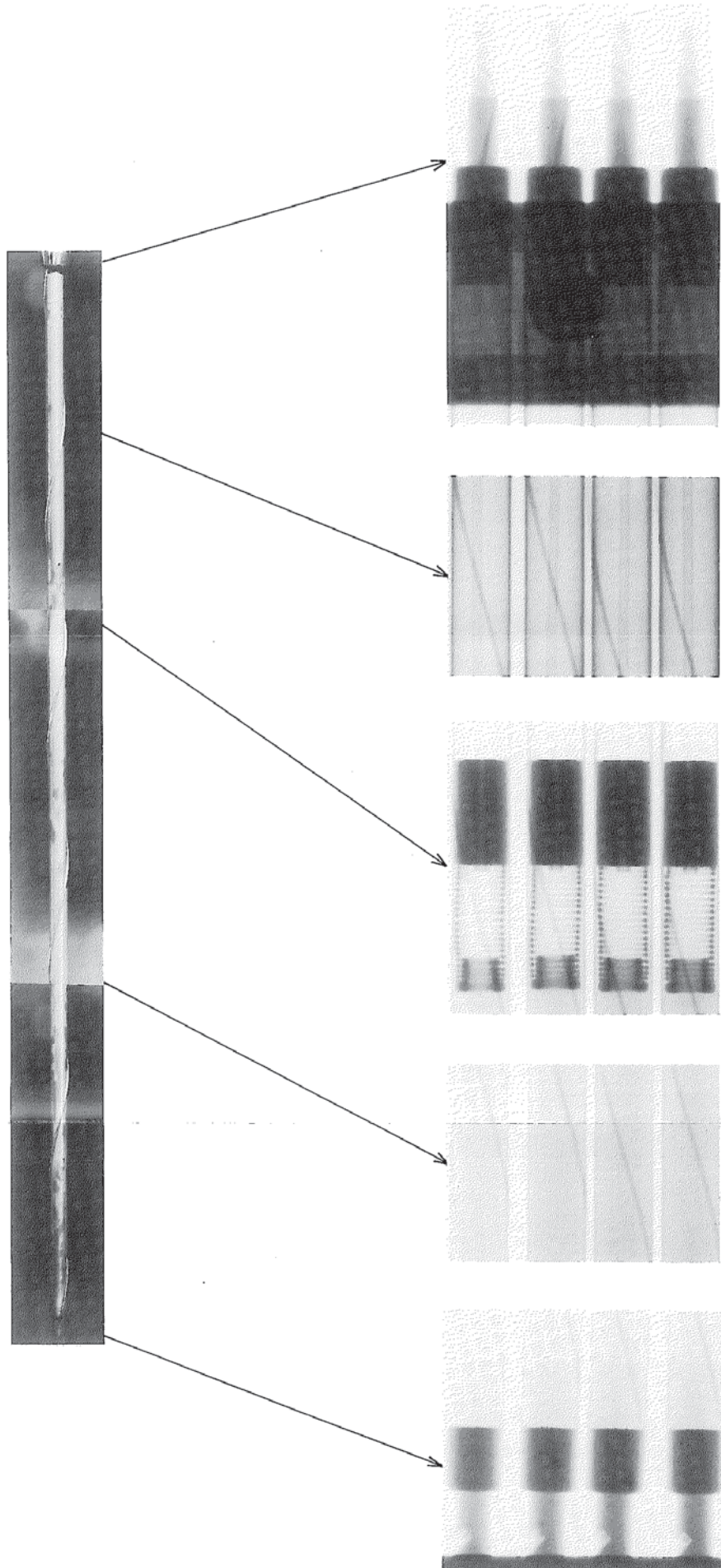


Photo. 8 Pin X-ray radiography

F854004

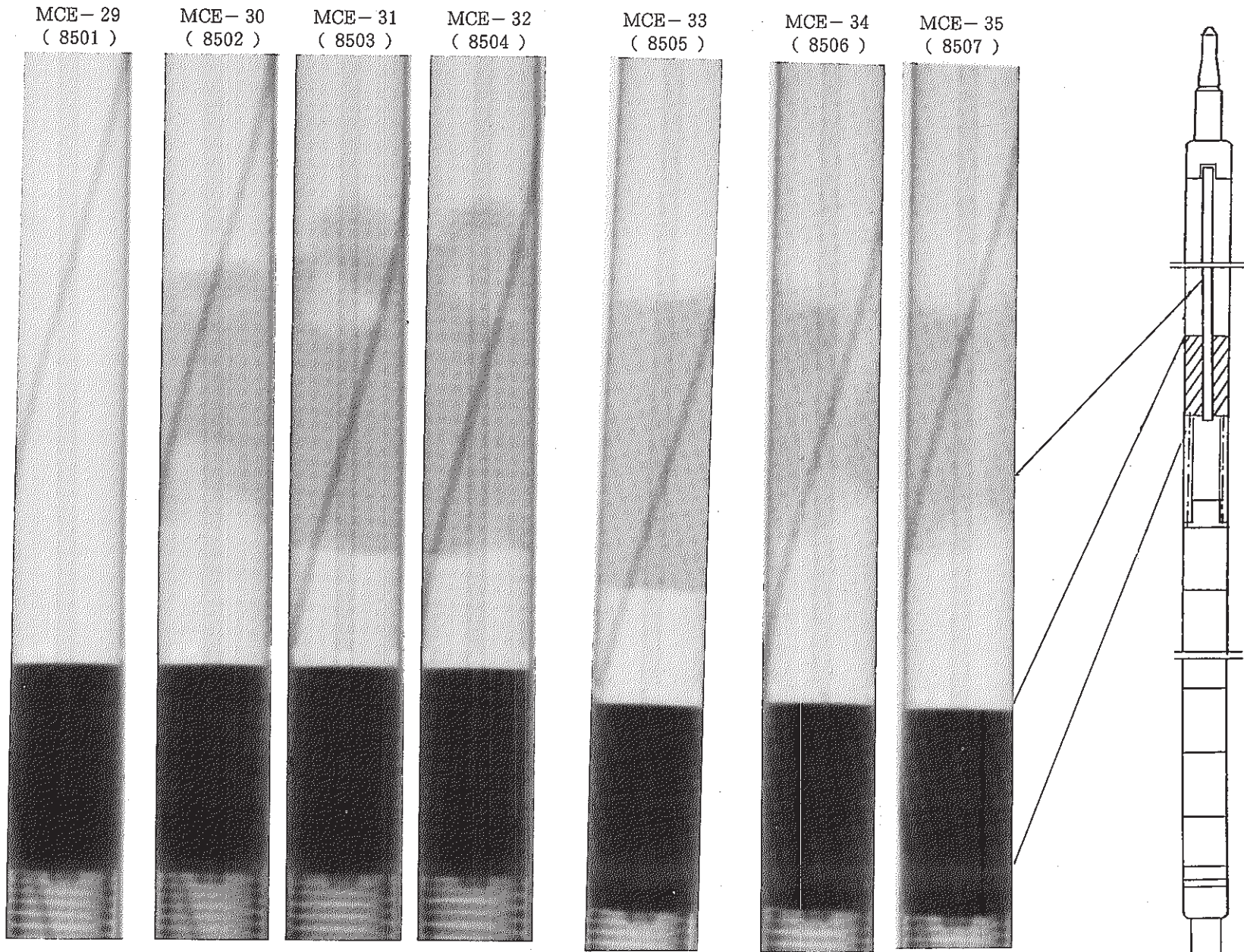
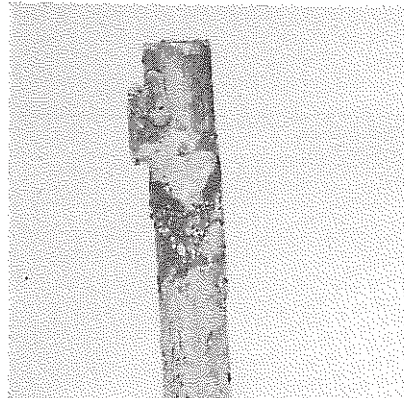


Photo. 9 Vent system X-ray radiography



撮影位置：ピン下端から 1064.3 mm

撮影角度：90°

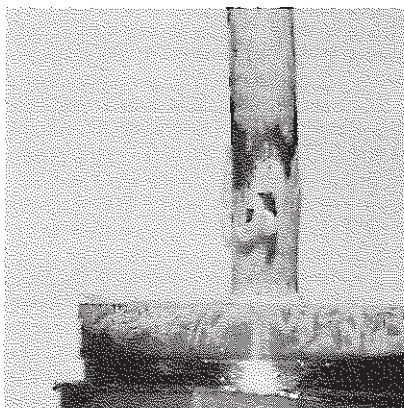
倍 率：× 3



撮影位置：ピン下端から 916.4 mm

撮影角度：90°

倍 率：× 3



撮影位置：ピン下端から 820.4 mm

撮影角度：90°

倍 率：× 3

Photo. 10 Outer surface condition of the vent tube
(Pin.No. MCE-35 8507)

PIN NO. 8507

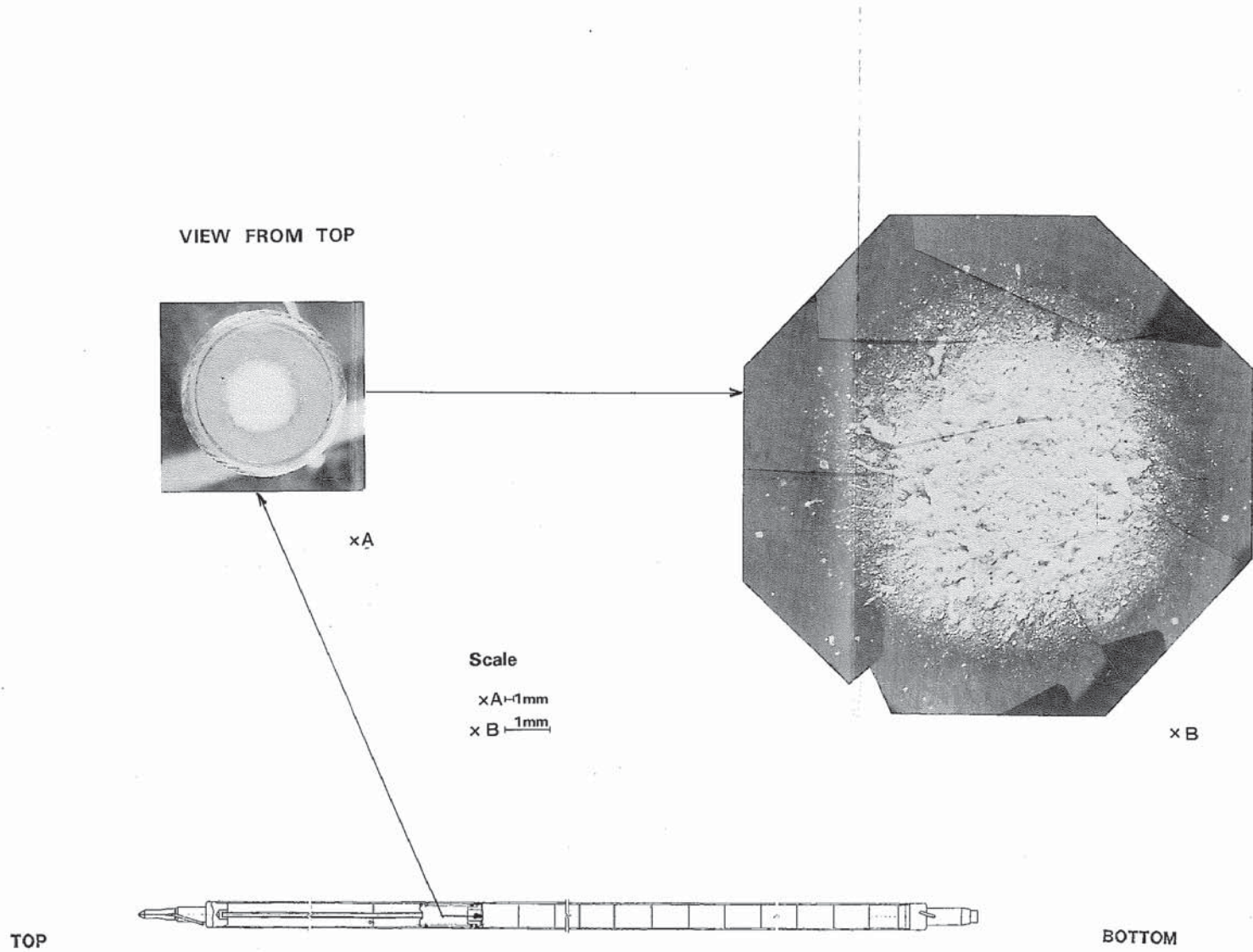


Photo 11 Surface condition of the upper and B₄C pellet (Pin No. MCE-35 8507)