

JAERI - M
85-196

計装付BWR型燃料棒の局所高温化
による破損

1985年12月

柳澤 和章

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

計装付BWR型燃料棒の局所高温化による破損

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

柳澤 和章

(1985年11月8日受理)

ハルデン炉内に設置したBWR型軽水ループを用いて、燃焼度5.6 MWd/kg Uまで予備照射した8×8 BWR燃料を出力急昇したところ、燃料棒の直径が局所的に大きくふくらむPCIとは異なるふるまいが生じ、燃料棒が破損した。この破損原因究明の結果、次の事が明らかになった。

- (1) 燃料被覆の大きなふくらみは、被覆表面の0°-180°方向に流線形に生成した高温酸化物であった。
- (2) 局所的な高温化で軟化した被覆材は、冷却材外圧：7 MPaにより、ペレット境界面にあるチャンファ（面取り）空間内へ押しつぶされた。
- (3) 局所的に著しい酸化が生じた所には、計装機器のトランスフォーマーがあった。トランスフォーマー内径と燃料棒外径の間の冷却材流路面積は僅かであった。この冷却材流量不足は、予備照射中に生じていた燃料棒の曲りにより更に著しくなった。これが、局所的な流路閉鎖とそれによる被覆管の高温化を発生させた原因であると考えられる。

IN-CORE FAILURE OF THE INSTRUMENTED BWR ROD
BY LOCALLY INDUCED HIGH COOLANT TEMPERATURE

Kazuaki YANAGISAWA

Department of Fuel Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 8, 1985)

In the BWR type light water loop instrumented in HBWR, a current BWR type fuel rod pre-irradiated up to 5.6 Mwd/kgU was power ramped to 50 kW/m. During the ramp, the diameter of the rod was expanded significantly at the bottom end. The behaviour was different from which caused by pellet-cladding interaction (PCI). In the post-irradiation examination, the rod was found to be failed. In this paper, the cause of the failure was studied and obtained the followings.

- (1) The significant expansion of the rod diameter was attributed to marked oxidation of cladding outer diameter, appeared in the direction of 0°-180° degree with a shape of nodular.
- (2) The cladding in the place was softened by high coolant temperature. Coolant pressure, 7MPa intruded the cladding into inside chamfer void at pellet interface.
- (3) At the place of the significant oxidation, an instrumented transformer was existed and the coolant flow area was very little. The reduction of the coolant flow was enhanced by the bending of the cladding which was caused in pre-irradiation stage. They are considered to be a principal cause of local closure of coolant flow and resultant high temperature in the place.

Keywords: Failure, Instrumented BWR Rod, High Coolant Temperature
Expansion, Oxidation, Cladding

目 次

1. はじめに	1
2. 炉内実験	1
2.1 冷却条件と出力履歴	1
2.2 直径プロフィール	2
3. 照射後試験	3
3.1 燃料棒表面の外観検査	3
3.2 被覆管縦割りによる被覆内面検査	3
3.3 FPガス解析	4
4. 討 論	4
5. まとめ	5
6. あとがき	6
謝 辞	6
付録Ⅰ. 直径測定時の燃料棒局所線出力の評価結果	16
付録Ⅱ. BWR 8 燃料棒の直径測定から得られた燃料外径プロフィールと冷却条件	17

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	In-core experiment	1
2.1	Coolant condition and power history	1
2.2	Diameter profile	2
3.	Post Irradiation Examination	3
3.1	Inspection of the rod outer surface	3
3.2	Inspection of the rod inner surface after cladding split	3
3.3	F.P. gas analysis	4
4.	Discussion	4
5.	Summary	5
6.	Postface	6
	Acknowledgment	6
Appendix I:	Result of the evaluation for the linear power of fuel rod during diameter measurement	16
Appendix II:	Fuel rod profiles and cooling condition during diameter measurement of BWR 8.	17

1. はじめに

原研は、ペレット-被覆相互作用（以後 PCI と略記する）に基づく炉内燃料破損の機構究明のための出力急昇実験を、ノルウェーハルデン炉（HBWR）内に設置した軽水ループにて行った。実験では、商用炉にて使用されているのと同じ 8×8 型 BWR 燃料棒を準備し、あらかじめ予備照射を行った。これは商用炉に近い条件で燃料棒をあらかじめ照射し、燃焼度を十分に与えたいうで PCI による燃料破損（以後 PCI 破損）下の燃料ふるまいを研究する目的で行ったものである。

予備照射を行った燃料棒は、予備照射リグ：IFA-523 から除荷したのち、別に準備した BWR 燃料棒用の出力急昇リグ：IFA-525 に移し替え、出力急昇実験にかけた。

この出力急昇実験に於て、1本の予備照射済 BWR 型燃料棒に、今までにあまり報告例がない燃料ふるまいが観られ、最終的には燃料は破損した。本報は、その燃料棒の炉内ふるまいの評価及び照射後試験（以後 PIE と略記する）からの評価をとりまとめたものである。計装付燃料棒について、この様な破損報告例は少ないので、報告する。

2. 炉内実験

2.1 冷却条件と出力履歴

燃料棒 BWR 8 は、出力急昇実験では直径ギャップが PCI に及ぼす影響を研究する為に準備されたものである。このため初期直径ギャップは、従来の BWR 燃料の直径ギャップとして使用されている値：0.23 mm の約半分の 0.1 mm であった。これ以外の設計主要寸法は、セグメント燃料棒である事を除けば、Table 1 に示す様に現行 8×8 型 BWR 燃料に近いものとなっていた。

Fig. 1 は、BWR 8 の予備照射中の冷却材の温度及び圧力を炉内データから評価したものである。BWR 8 は、Fig. 1(d) の左側に模式的に示されている予備照射リグ IFA-523 の、二段重ねクラスター（一段クラスターは 4 本の燃料棒を含む）の上側クラスター中であつた。従つて、燃料棒の外側を流れる冷却材の温度は、Fig. 1 の(a) と (b) から分る様に、予備照射中 280 °C から 300 °C の間であつた。また冷却軽水の圧力は、Fig. 1 の(e) から分る様に、ほぼ 7 MPa であつた。

Fig. 2 は、BWR 8 の予備照射中及び出力急昇中の平均線出力密度（以後、平均線出力と略記する）を、前者はクラスター燃焼度、後者は出力急昇時間で表示した、いわゆる出力履歴である。図から分る様に、予備照射中の平均線出力は 25 ~ 30 kW/m の範囲であつた。一方、出力急昇実験では、ならし運転（コンディショニング）を平均線出力 30 kW/m で約 1 日行つたのち、ステップ（階段）状の出力急昇を行った。これは、例えば、30 kW/m から 35 kW/m までは 2.5 kW/m・h の急昇速度で出力を増加し、そこで約 1 時間出力を保持するといった方法で、平均線出力 50 kW/m 付近まで次々に出力を急上昇させる方法である。

1. はじめに

原研は、ペレット-被覆相互作用（以後 PCI と略記する）に基づく炉内燃料破損の機構究明のための出力急昇実験を、ノルウェーハルデン炉（HBWR）内に設置した軽水ループにて行った。実験では、商用炉にて使用されているのと同じ 8×8 型 BWR 燃料棒を準備し、あらかじめ予備照射を行った。これは商用炉に近い条件で燃料棒をあらかじめ照射し、燃焼度を十分に与えたいうえで PCI による燃料破損（以後 PCI 破損）下の燃料ふるまいを研究する目的で行ったものである。

予備照射を行った燃料棒は、予備照射リグ：IFA-523 から除荷したのち、別に準備した BWR 燃料棒用の出力急昇リグ：IFA-525 に移し替え、出力急昇実験にかけた。

この出力急昇実験に於て、1本の予備照射済 BWR 型燃料棒に、今までにあまり報告例がない燃料ふるまいが観られ、最終的には燃料は破損した。本報は、その燃料棒の炉内ふるまいの評価及び照射後試験（以後 PIE と略記する）からの評価をとりまとめたものである。計装付燃料棒について、この様な破損報告例は少ないので、報告する。

2. 炉内実験

2.1 冷却条件と出力履歴

燃料棒 BWR 8 は、出力急昇実験では直径ギャップが PCI に及ぼす影響を研究する為に準備されたものである。このため初期直径ギャップは、従来の BWR 燃料の直径ギャップとして使用されている値：0.23 mm の約半分の 0.1 mm であった。これ以外の設計主要寸法は、セグメント燃料棒である事を除けば、Table 1 に示す様に現行 8×8 型 BWR 燃料に近いものとなっていた。

Fig. 1 は、BWR 8 の予備照射中の冷却材の温度及び圧力を炉内データから評価したものである。BWR 8 は、Fig. 1(d) の左側に模式的に示されている予備照射リグ IFA-523 の、二段重ねクラスター（一段クラスターは 4 本の燃料棒を含む）の上側クラスター中であつた。従つて、燃料棒の外側を流れる冷却材の温度は、Fig. 1 の(a) と (b) から分る様に、予備照射中 280 °C から 300 °C の間であつた。また冷却軽水の圧力は、Fig. 1 の(e) から分る様に、ほぼ 7 MPa であつた。

Fig. 2 は、BWR 8 の予備照射中及び出力急昇中の平均線出力密度（以後、平均線出力と略記する）を、前者はクラスター燃焼度、後者は出力急昇時間で表示した、いわゆる出力履歴である。図から分る様に、予備照射中の平均線出力は 25 ~ 30 kW/m の範囲であつた。一方、出力急昇実験では、ならし運転（コンディショニング）を平均線出力 30 kW/m で約 1 日行つたのち、ステップ（階段）状の出力急昇を行った。これは、例えば、30 kW/m から 35 kW/m までは 2.5 kW/m・h の急昇速度で出力を増加し、そこで約 1 時間出力を保持するといった方法で、平均線出力 50 kW/m 付近まで次々に出力を急上昇させる方法である。

Fig. 3は、出力急昇実験中のBWR 8の冷却材温度及び圧力を示したものである。実験中、燃料棒全体平均の冷却材温度は273℃、冷却材圧力はほぼ7 MPaであった。

2.2 直径プロフィール

直径測定は、Fig. 4に示す出力急昇リグの模式図から分る様に、あらかじめ計画しておいた線出力に達した時点で、燃料棒を水圧シリンダーで駆動し、出力急昇リグにとりつけた2つの直径ゲージで測定した。この2つの直径ゲージは、Fig. 4に示す様に、下側が燃料棒の0°-180°方向の、上側が燃料棒の90°-270°方向の直径形状（プロフィール）を測定した。

この直径ゲージはステンレス鋼を主体に構成されていた。その為、直径測定のため燃料棒がそこに移動してくると、その線出力が局所的に低下した。この低下した局所的な線出力（以下局所線出力と称す）は、直測定開始直前の燃料棒平均線出力 P (kW/m)から求めた。その評価結果は付録Iに示すが、局所線出力 P_0 (kW/m)は次の様になった。

$$P_0 = (1 - 0.157)P \quad 111$$

即ち、直径測定時の局所線出力はその直前の平均線出力よりも15.7%低かった。

出力急昇実験中に、BWR 8の直径測定は32回行った。それから得られた直径プロフィールは、局所線出力、冷却材温度等とともに付録IIとしてとりまとめた。

直径プロフィールに異常がみられたのは、30 kW/mn コンディショニングを終了して、階段状に出力を急昇していく途中であった。Fig. 5(A)はコンディショニング中の燃料棒の0°-180°及び90°-270°方向（以後二方向と略記する）に於ける直径プロフィールであるが、それが局所線出力45.4 kW/mに達した時点でFig. 5(B)の様になった。即ち燃料底部から長さ率（燃料棒軸方向の直径測定ストロークを1としたときの燃料底部（図中左）から測った距離の比）、30~40%前後で、直径が被覆管内側へ食い込んだ。

更に線出力が増加し、最高値近くの49.6 kW/mに達したとき、Fig. 5(C)に示す様に、燃料棒外径はFig. 5(A)の直径値より、最大92 μmも増加した。

Fig. 5(D)は、最高線出力到達後17時間における直径プロフィールであるが、軸方向長さ率20~40%の範囲で、0°-180°方向に最大180 μmの直径のふくらみが観られた。又、逆に被覆管が内側に最大100 μmくいこんだのも観られた。この被覆のくいこみは燃料軸長に沿って7~8箇所あったが、その間隔は1ペレット長約10.3 mmに近かった。

Fig. 6は、燃料棒の局所線出力が6.6 kW/mとなったときの直径プロフィールである。この直径測定がBWR 8の最後の炉内測定であった。Fig. 6から次の様なことが分った。

- 1) 燃料棒が異常にふくらんだのは、0°-180°方向については燃料有効長44.7 cmに対してその約2/5(16 cm)で、燃料底部側であった。ふくらみの最大は、実験終了時で約130 μmである。ふくらみと同時に、1ペレット長間隔で、被覆管の内側へのくいこみが生じていた。その数は約8箇所であり、最大くいこみ量は約100 μmである。
- 2) 90°-270°方向についても燃料棒のふくらみが1)で観られたのと同じ範囲内で生じた。ふくらみの最大は約32 μmである。また同時に1ペレット長間隔で、3~4個の被覆管の

内側へのくいこみが観察された。

- 3) 1) 及び 2) で観察された燃料外径のふくらみは、Fig. 6 の燃料棒頂部の外径形状と大きく異っている。即ち後者は、明らかに PCI によって生じたリッジング変形であり、前者とは異なる。

出力急昇後、BWR 8 は原子炉から除荷された。実験中、冷却材の放射能濃度を監視した結果では、大きな変化はなく、炉内に於てはこの燃料棒は非破損とされた。

3. 照射後試験

燃料棒は約 3 ヶ月の冷却後、照射後試験のため HBWR からノルウェーエネルギー技術研究所・シェラーホットラボに輸送した。

3.1 燃料棒表面の外観検査

Photo. 1 は、ホットセル内で撮影した BWR 8 の 0° - 180° 方向の外観写真である。これから次の様なことが分った。

- 1) 炉内直径プロフィールからの解析で、燃料棒が異常にふくらんだ個所を PIE でみると著しい酸化が生じていた。酸化物の形状は、Photo. 1 の左から中央に向かって幅広くなっており、更に右に向うと狭くなる流線形であった。
 - 2) Photo. 1 中、矢印で位置を示した例の様に 7 個以上の被覆管の内側へのくいこみが観察された。
 - 3) Photo. 1, 長手方向には直径測定時、ゲージとの擦過によって生じたと思われる小さな傷があった。
- 1) 及び 2) の観察結果から、燃料棒の異常ふくらみ部分には流線形に酸化物が生成していたこと、また炉内直径プロフィールで観られた被覆管の内側へのくいこみも、PIE から実在していることが確認された。

3.2 被覆管縦割りによる被覆内面検査

外観検査の後、Photo. 1 に示した燃料棒を 0° - 180° 方向で縦割りにし、被覆管の内面観察を行った。Photo. 2 はその被覆管の内面写真である。写真中、○印で例を示した個所に、被覆管が内側にくい込んだ為が生じたと考えられる突起があった。この突起高さは、Photo. 2 中の拡大写真(B)から、被覆肉厚の約 12%、ほぼ $100 \mu\text{m}$ 程度であることが分った。

即ち、Photo. 2 の縦割り写真から、個々のペレットの境界位置で、被覆管が内側のチャンファ(面取り)空間にくいこみ、そのため内面に突起が生じたことが分った。この突起の数は、炉内直径プロフィールで観察した数とほぼ同じであった。

内側へのくいこみが観察された。

- 3) 1) 及び 2) で観察された燃料外径のふくらみは、Fig. 6 の燃料棒頂部の外径形状と大きく異っている。即ち後者は、明らかに PCI によって生じたリッジング変形であり、前者とは異なる。

出力急昇後、BWR 8 は原子炉から除荷された。実験中、冷却材の放射能濃度を監視した結果では、大きな変化はなく、炉内に於てはこの燃料棒は非破損とされた。

3. 照射後試験

燃料棒は約 3 ヶ月の冷却後、照射後試験のため HBWR からノルウェーエネルギー技術研究所・シェラーホットラボに輸送した。

3.1 燃料棒表面の外観検査

Photo. 1 は、ホットセル内で撮影した BWR 8 の 0° - 180° 方向の外観写真である。これから次の様なことが分った。

- 1) 炉内直径プロフィールからの解析で、燃料棒が異常にふくらんだ個所を PIE でみると著しい酸化が生じていた。酸化物の形状は、Photo. 1 の左から中央に向かって幅広くなっており、更に右に向うと狭くなる流線形であった。
 - 2) Photo. 1 中、矢印で位置を示した例の様に 7 個以上の被覆管の内側へのくいこみが観察された。
 - 3) Photo. 1, 長手方向には直径測定時、ゲージとの擦過によって生じたと思われる小さな傷があった。
- 1) 及び 2) の観察結果から、燃料棒の異常ふくらみ部分には流線形に酸化物が生成していたこと、また炉内直径プロフィールで観られた被覆管の内側へのくいこみも、PIE から実在していることが確認された。

3.2 被覆管縦割りによる被覆内面検査

外観検査の後、Photo. 1 に示した燃料棒を 0° - 180° 方向で縦割りにし、被覆管の内面観察を行った。Photo. 2 はその被覆管の内面写真である。写真中、○印で例を示した個所に、被覆管が内側にくい込んだ為に生じたと考えられる突起があった。この突起高さは、Photo. 2 中の拡大写真(B)から、被覆肉厚の約 12%、ほぼ 100 μm 程度であることが分った。

即ち、Photo. 2 の縦割り写真から、個々のペレットの境界位置で、被覆管が内側のチャンファ(面取り)空間にくいこみ、そのため内面に突起が生じたことが分った。この突起の数は、炉内直径プロフィールで観察した数とほぼ同じであった。

3.3 FP ガス解析

BWR 8 に対して、燃料棒内圧測定を行ったところ、燃料製造時に充填したガス圧力 0.1 MPa が、0.088 MPa となっていた。即ち出力急昇後のガス圧力は初期ガス圧力よりも低かった。ガス圧力に対する測定誤差は±10%程度である為、0.088 MPa という値ではガスが破損によって抜けたのか、それとも誤差範囲なのか判定しにくい。

しかし FP ガスの成分分析の結果、空気の成分である N_2 が 0.33 cm^3 、 O_2 が 0.08 cm^3 含まれていたことから、破損と判定された。

4. 討 論

炉内直径プロフィールや PIE による評価の結果をまとめると次の様になる。

- 1) 燃料棒は出力急昇実験中、最高線出力 45 kW/m 付近から、直径値が $0^\circ - 180^\circ$ 方向で異常にふくらんだ (最高 $168 \mu\text{m}$)。通常 PCI における変形は高々この $1/4$ 程度であり、この異常ふくらみは PCI によるものではない。PIE の外観検査の結果、このふくらみ部に大きな酸化が生じていたことがわかった。

従って、このふくらみは燃料被覆の高温化 ($> 320^\circ\text{C}$) による酸化物の形成 (実験終了時で約 $130 \mu\text{m}$) が原因と考えられる。

- 2) 異常ふくらみが観られた範囲-被覆長手方向約 16 cm 以内、PIE ではそのうち約 12 cm の範囲を観察-では、直径プロフィールから、被覆管の燃料側へのくいこみが生じたことが分った。PIE の被覆管内面観察から、ペレットとペレットの境界面に相当する位置に於て、被覆管の燃料側：チャンファ-空間へのくいこみによって生じたと思われる突起が観察された。BWR 燃料棒は通常 $6 \sim 7 \text{ MPa}$ の冷却材圧力、 300°C 前後の冷却材温度下で使用されることが多いが、今までに燃料棒へのくいこみがあった報告例は数が少ない。本実験に於ても冷却材圧力及び温度は、Fig. 3 に示す通り、十分に前記 BWR 使用条件の範囲内にあった。

従って、この被覆管の燃料側へのくいこみ (最大約 $100 \mu\text{m}$ 長) は、局所的に被覆管が高温化した時点で外圧が作用し、ペレット界面に存在していたチャンファ空間 (幅 0.2 mm 、深さ 0.4 mm) 中に被覆がクリープにより押しつぶされてできたものと考えられる。

この 1) と 2) は、燃料棒底部約 16 cm の範囲で、何らかの原因により局所的な被覆管の高温化が生じたことを予想させるため、改めて出力急昇リグの構造と燃料棒の直径測定時の位置との関係を調べた。

その調査の結果、燃料被覆が直径測定中、最も高温になりやすいのは、Fig. 7 の様な状態になったときである事が判明した。この状態を詳しく説明すると次の様になる。

- イ) 燃料棒は直径測定のため出力急昇リグ底部から頂部に移動してきて、DG 1 及び DG 2 を通過し、ストロークのほぼ上死点に達している。
- ロ) このとき燃料の下部は、出力急昇リグに取付けた燃料棒内ガス圧力測定用のトランスフォーマ-付近にあった。この機器の長さは 84 mm であり、その内径は約 13.4 mm であった。

3.3 FP ガス解析

BWR 8 に対して、燃料棒内圧測定を行ったところ、燃料製造時に充填したガス圧力 0.1 MPa が、0.088 MPa となっていた。即ち出力急昇後のガス圧力は初期ガス圧力よりも低かった。ガス圧力に対する測定誤差は±10%程度である為、0.088 MPa という値ではガスが破損によって抜けたのか、それとも誤差範囲なのか判定しにくい。

しかし FP ガスの成分分析の結果、空気の成分である N_2 が 0.33 cm^3 、 O_2 が 0.08 cm^3 含まれていたことから、破損と判定された。

4. 討 論

炉内直径プロフィールや PIE による評価の結果をまとめると次の様になる。

- 1) 燃料棒は出力急昇実験中、最高線出力 45 kW/m 付近から、直径値が $0^\circ - 180^\circ$ 方向で異常にふくらんだ (最高 $168 \mu\text{m}$)。通常 PCI における変形は高々この $1/4$ 程度であり、この異常ふくらみは PCI によるものではない。PIE の外観検査の結果、このふくらみ部に大きな酸化が生じていたことがわかった。

従って、このふくらみは燃料被覆の高温化 ($> 320^\circ\text{C}$) による酸化物の形成 (実験終了時で約 $130 \mu\text{m}$) が原因と考えられる。

- 2) 異常ふくらみが観られた範囲-被覆長手方向約 16 cm 以内、PIE ではそのうち約 12 cm の範囲を観察-では、直径プロフィールから、被覆管の燃料側へのくいこみが生じたことが分った。PIE の被覆管内面観察から、ペレットとペレットの境界面に相当する位置に於て、被覆管の燃料側：チャンファ空間へのくいこみによって生じたと思われる突起が観察された。BWR 燃料棒は通常 $6 \sim 7 \text{ MPa}$ の冷却材圧力、 300°C 前後の冷却材温度下で使用されることが多いが、今までに燃料棒へのくいこみがあった報告例は数が少ない。本実験に於ても冷却材圧力及び温度は、Fig. 3 に示す通り、十分に前記 BWR 使用条件の範囲内にあった。

従って、この被覆管の燃料側へのくいこみ (最大約 $100 \mu\text{m}$ 長) は、局所的に被覆管が高温化した時点で外圧が作用し、ペレット界面に存在していたチャンファ空間 (幅 0.2 mm 、深さ 0.4 mm) 中に被覆がクリープにより押しつぶされてできたものと考えられる。

この 1) と 2) は、燃料棒底部約 16 cm の範囲で、何らかの原因により局所的な被覆管の高温化が生じたことを予想させるため、改めて出力急昇リグの構造と燃料棒の直径測定時の位置との関係を調べた。

その調査の結果、燃料被覆が直径測定中、最も高温になりやすいのは、Fig. 7 の様な状態になったときである事が判明した。この状態を詳しく説明すると次の様になる。

- イ) 燃料棒は直径測定のため出力急昇リグ底部から頂部に移動してきて、DG 1 及び DG 2 を通過し、ストロークのほぼ上死点に達している。
- ロ) このとき燃料の下部は、出力急昇リグに取付けた燃料棒内ガス圧力測定用のトランスフォーマー付近にあった。この機器の長さは 84 mm であり、その内径は約 13.4 mm であった。

一方、燃料棒の外径は、ほぼ 12.275 mm であった。従って、流量 2.0～2.5 kl/h の冷却軽水は、最大でも $13.4 - 12.275 = 1.13$ mm の狭い円筒状の流路幅の中で、BWR 8 燃料棒を冷却する状態にあった。

ハ) 燃料棒の直径の異常なふくらみは、線出力の高い 45 kW/m 以上から生じた。この時点では、燃料棒は熱膨張、PCI によってその直径を増加させ、トランスフォーマー位置の流路面積を更に減少させたと考えられる。この事態をより悪化させたのは、燃料棒の曲りである。BWR 8 の曲りは未照射時には観られなかった。しかし予備照射終了時の炉外非破壊検査では、全長にわたって、0.05 mm の曲りが 0° – 180° 方向に生じていた。従って、トランスフォーマー位置での流路幅は 0° – 180° 方向では更に狭くなって、部分的には接触も生じていたと考えられる。

ニ) この部分接触の可能性を示唆するのが、Photo. 1 の流線状に生成された酸化物である。即ち、最も接触の強かった個所で、冷却材不足の高温化により、最も多量の酸化物が生じた。

BWR 8 は、高線出力下での直径測定のたびに、この状況（燃料棒は上死点に於て、約 5 分間程度停止する）を繰り返した。この為、Fig. 5 (B)～(D) に経時的に示した様な、直径の変形異常が徐々に生じたと考えられる。

5. ま と め

ハルデン炉内に設置した BWR 型軽水ループを用いて、燃焼度 5.6 MWd/kg U まで予備照射した 8×8 BWR 燃料棒の出力急昇実験を行った。階段状の出力急昇中、局所線出力 45 kW/m 付近から、PCI 変形とは明らかに異なる直径のふくらみが生じ、それは次第に大きくなって最大では 170 μ m に達した（注：PCI による直径のふくらみは通常、40 μ m 程度）。この大きな直径ふくらみは局所的であり、約 45 cm の燃料有効長のうち、燃料底部側 12～16 cm に集中していた。また円周方向： 0° – 180° 方向に大きなふくらみが生じた。

PIE における外観検査及び燃料棒縦割り検査等からのデータに基づいて、この直径の大きなふくらみの原因究明を行い、以下の結論を得た。

- (1) 燃料直径プロフィールで観られた大きなふくらみは、PIE の外観検査の結果、被覆管外面、 0° – 180° 方向に、流線形に生成した高温酸化物であった。
- (2) 燃料直径プロフィールで観られた、ペレット境界面に於ける被覆管の燃料棒内へのくいこみを、PIE で確認した。これは、被覆管が高温化して軟らかくなった際に、7 MPa の外圧の作用により、ペレット境界面のチャンファ空間に、それが押しつぶされてきたと考えられる。
- (3) 被覆管を高温酸化し、局所的なふくらみを生じさせたのは、リグ内に取付けた燃料棒内圧測定用のトランスフォーマー（内径：13.4 mm）と燃料棒（外径：12.275 mm）にはさまれた狭い流路断面面積、燃料棒の曲り（0.05 mm）により生じた局所的交流路閉鎖の 2 つであると考えられる。
- (4) PIE のガスパンクチュアリングの結果、燃料棒は破損と判定された。

一方、燃料棒の外径は、ほぼ 12.275 mm であった。従って、流量 2.0～2.5 kl/h の冷却軽水は、最大でも $13.4 - 12.275 = 1.13$ mm の狭い円筒状の流路幅の中で、BWR 8 燃料棒を冷却する状態にあった。

ハ) 燃料棒の直径の異常なふくらみは、線出力の高い 45 kW/m 以上から生じた。この時点では、燃料棒は熱膨張、PCIによってその直径を増加させ、トランスフォーマー位置の流路面積を更に減少させたと考えられる。この事態をより悪化させたのは、燃料棒の曲りである。BWR 8 の曲りは未照射時には観られなかった。しかし予備照射終了時の炉外非破壊検査では、全長にわたって、0.05 mm の曲りが 0° – 180° 方向に生じていた。従って、トランスフォーマー位置での流路幅は 0° – 180° 方向では更に狭くなって、部分的には接触も生じていたと考えられる。

ニ) この部分接触の可能性を示唆するのが、Photo. 1 の流線状に生成された酸化物である。即ち、最も接触の強かった個所で、冷却材不足の高温化により、最も多量の酸化物が生じた。

BWR 8 は、高線出力下での直径測定のために、この状況（燃料棒は上死点に於て、約 5 分間程度停止する）を繰り返した。この為、Fig. 5 (B)～(D)に経時的に示した様な、直径の変形異常が徐々に生じたと考えられる。

5. ま と め

ハルデン炉内に設置した BWR 型軽水ループを用いて、燃焼度 5.6 MWd/kg U まで予備照射した 8×8 BWR 燃料棒の出力急昇実験を行った。階段状の出力急昇中、局所線出力 45 kW/m 付近から、PCI 変形とは明らかに異なる直径のふくらみが生じ、それは次第に大きくなって最大では 170 μ m に達した（注：PCI による直径のふくらみは通常、40 μ m 程度）。この大きな直径ふくらみは局所的であり、約 45 cm の燃料有効長のうち、燃料底部側 12～16 cm に集中していた。また円周方向： 0° – 180° 方向に大きなふくらみが生じた。

PIE における外観検査及び燃料棒縦割り検査等からのデータに基づいて、この直径の大きなふくらみの原因究明を行い、以下の結論を得た。

- (1) 燃料直径プロフィールで観られた大きなふくらみは、PIE の外観検査の結果、被覆管外面、 0° – 180° 方向に、流線形に生成した高温酸化物であった。
- (2) 燃料直径プロフィールで観られた、ペレット境界面に於ける被覆管の燃料棒内へのくいまを、PIE で確認した。これは、被覆管が高温化して軟らかくなった際に、7 MPa の外圧の作用により、ペレット境界面のチャンファ空間に、それが押しつぶされてきたと考えられる。
- (3) 被覆管を高温酸化し、局所的なふくらみを生じさせたのは、リグ内に取付けた燃料棒内圧測定用のトランスフォーマー（内径：13.4 mm）と燃料棒（外径：12.275 mm）にはさまれた狭い流路断面積、燃料棒の曲り（0.05 mm）により生じた局所的交流路閉鎖の 2 つであると考えられる。
- (4) PIE のガスパンクチュアリングの結果、燃料棒は破損と判定された。

6. あ と が き

この種の燃料破損は、商用炉では起きにくい。しかし、燃料をセグメント（短尺）化し、各種の計装機器を取りつけて実験をする試験炉では、条件次第では起こり得る。燃料照射実験は、その設計・製造及びそれに続く照射と、多くの日数と経費をかけるので、このような予期せぬ事—特に本実験では、予備照射後の燃料の曲りが破損に与えた影響が大きかった—で試験計画を中止又は変更するのは残念というほかない。

原研はJMTRをはじめ試験炉を有しており、このHBWRでの破損経験を貴重な踏み台とし、より高性能の照射リグや燃料の設計・製作にフィードバックして行くことが必要であろう。

謝 辞

出力急昇リグ内に於ける破損被覆管の局所高温化位置の同定については、当時ハルデンプロジェクトへの原研派遣員であった、燃料安全工学部、中村仁一氏に御協力をいただきました。炉内実験の遂行については、ハルデンプロジェクトのA、ハネビック及びK.D. クヌッドセン両氏に、照射後試験については、ノルウェーエネルギー技術研究所シエラーホットラボのP. アルネセン氏に御尽力をいただきました。ここに御礼申し上げる次第です。

6. あ と が き

この種の燃料破損は、商用炉では起きにくい。しかし、燃料をセグメント（短尺）化し、各種の計装機器を取りつけて実験をする試験炉では、条件次第では起こり得る。燃料照射実験は、その設計・製造及びそれに続く照射と、多くの日数と経費をかけるので、この様な予期せぬ事—特に本実験では、予備照射後の燃料の曲りが破損に与えた影響が大きかった—で試験計画を中止又は変更するのは残念というほかない。

原研はJMTRをはじめ試験炉を有しており、このHBWRでの破損経験を貴重な踏み台とし、より高性能の照射リグや燃料の設計・製作にフィードバックして行くことが必要であろう。

謝 辞

出力急昇リグ内に於ける破損被覆管の局所高温化位置の同定については、当時ハルデンプロジェクトへの原研派遣員であった、燃料安全工学部、中村仁一氏に御協力をいただきました。炉内実験の遂行については、ハルデンプロジェクトのA、ハネビック及びK.D.クヌッドセン両氏に、照射後試験については、ノルウェーエネルギー技術研究所シエラーホットラボのP.アルネセン氏に御尽力をいただきました。ここに御礼申し上げる次第です。

Table 1 Characteristics of the fuel rod: BWR 8

1. Fuel

Form	Sintered and ground UO_2
Bulk density (% T.D.)	94.80
Outer diameter (mm)	10.440
Enrichment (wt %)	13.0
End form	Chamfered in both sides
Length (mm)	10.279

2. Cladding

State	Fully annealed zircaloy-2
Outer diameter (mm)	12.275
Inner diameter (mm)	10.547
Thickness (mm)	0.864

3. Fuel rod

Enriched column length (mm)	447.0
Plenum volume (c.c.)	5.4
Diametral gap (mm)	0.108
Fuel weight (kg)	0.395

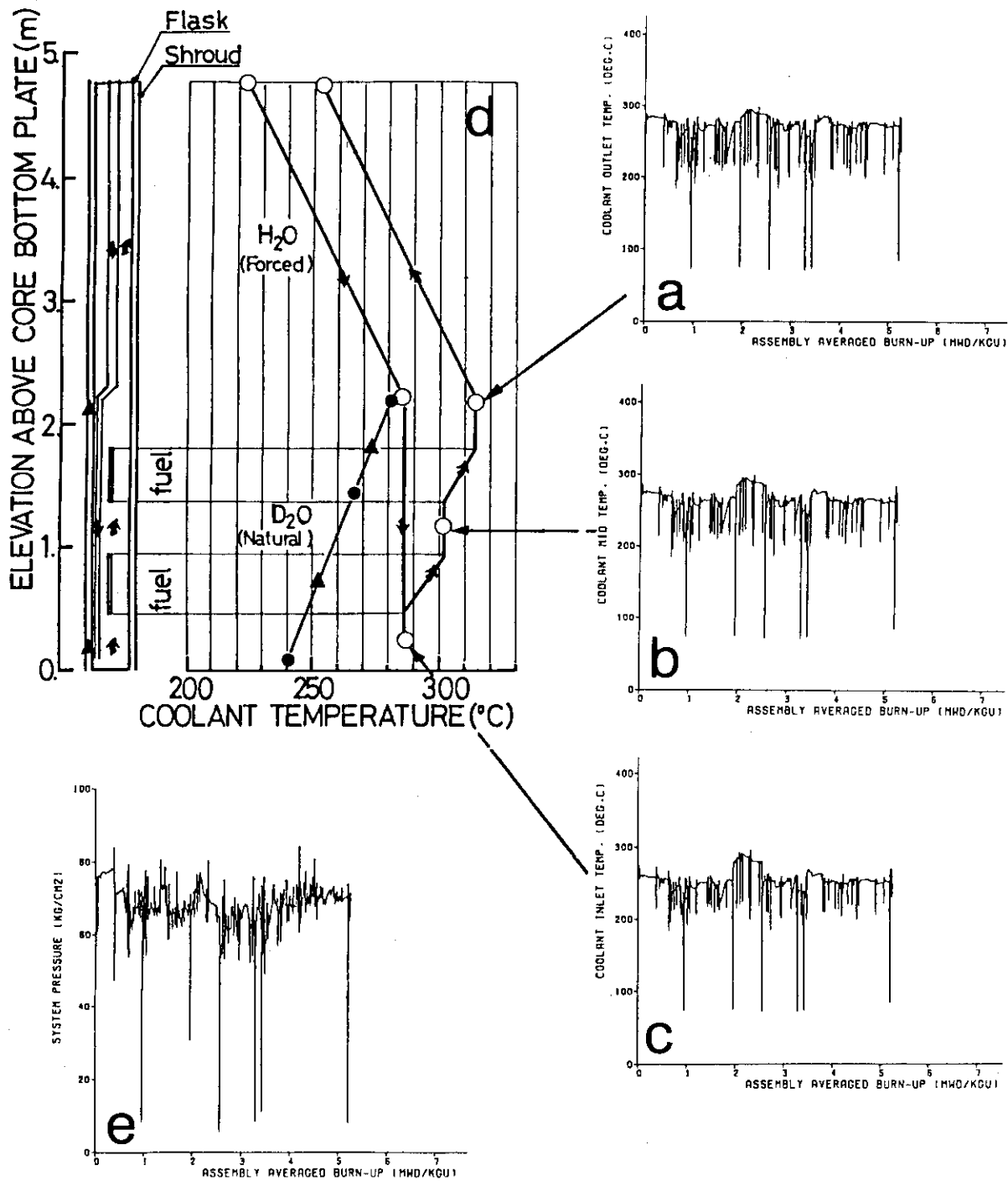


Fig. 1 Coolant temperature at the various location (a ~ c), flow direction and typical temperature of coolant in the pre-irradiation rig (d), and coolant pressure in the system (e), as a function of assembly averaged burn-up of a BWR type rod.

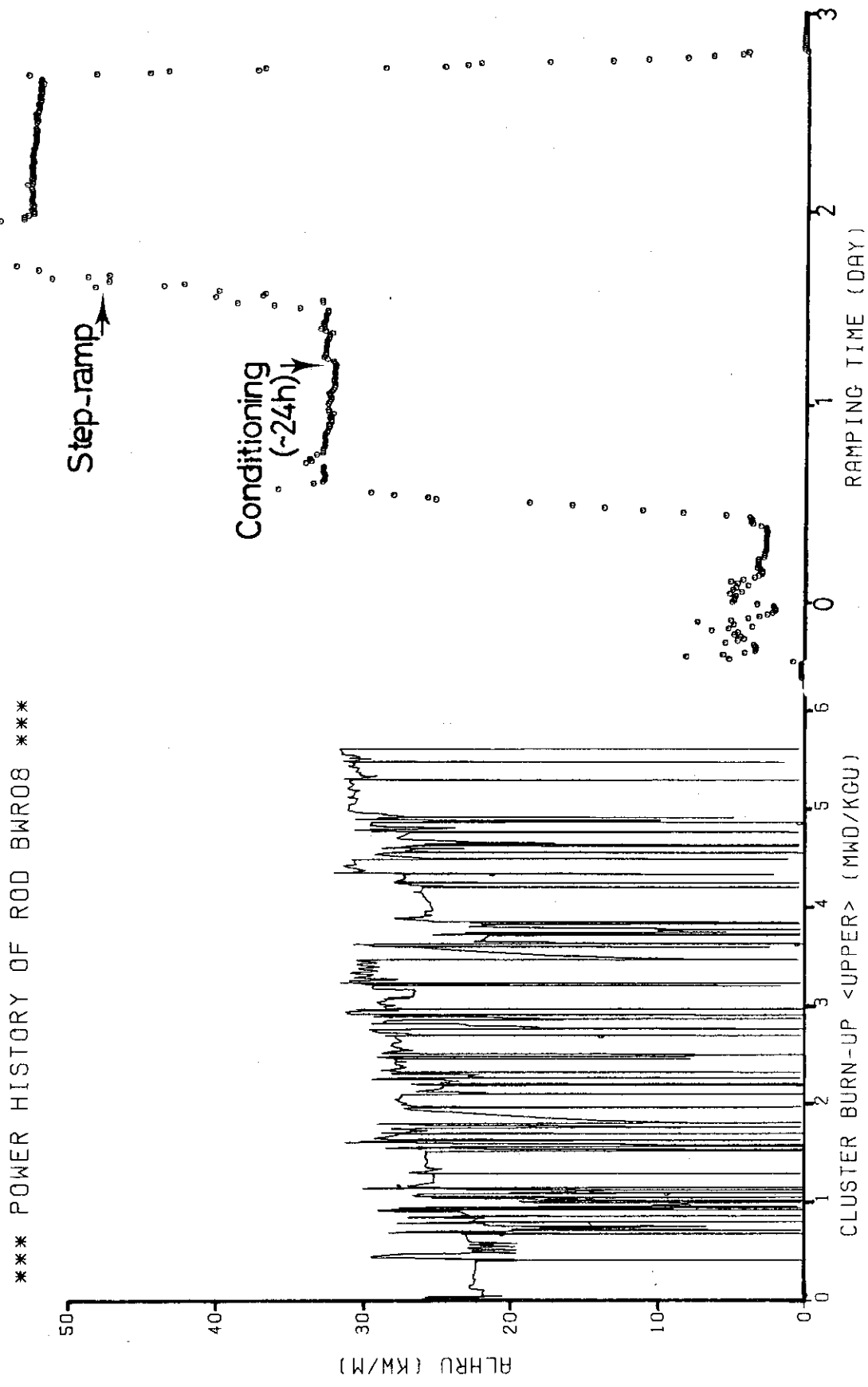


Fig. 2 Power history of the rod BWR8 during base irradiation (half left) and power ramping (half right).

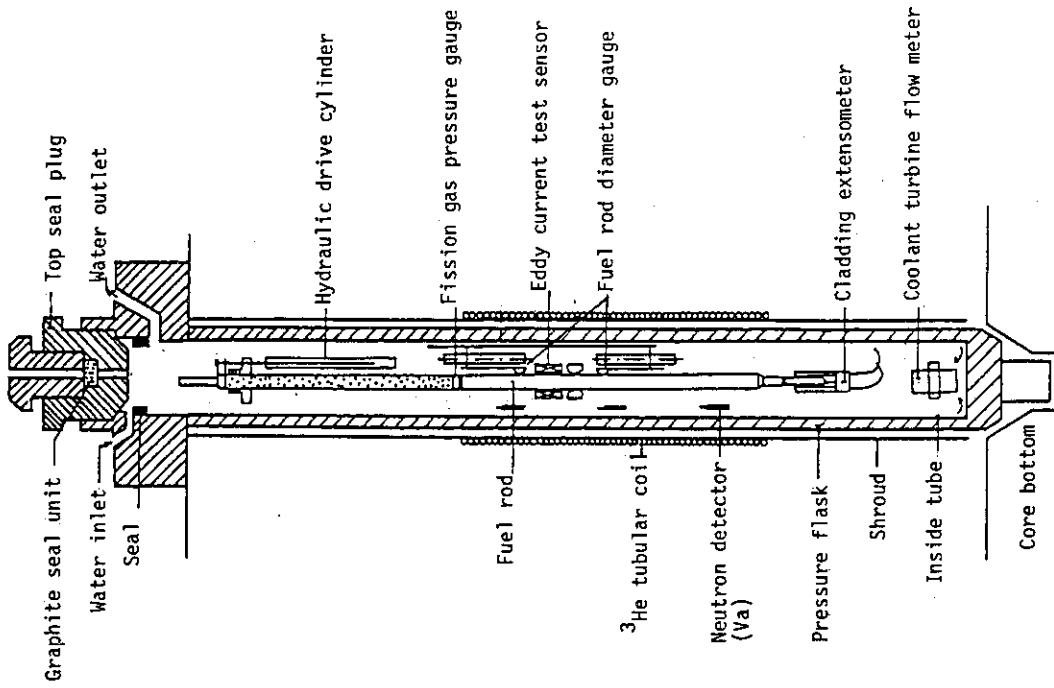


Fig. 4 Structure of the power ramp rig, IFA-520 and in-core instrumentations attached to.

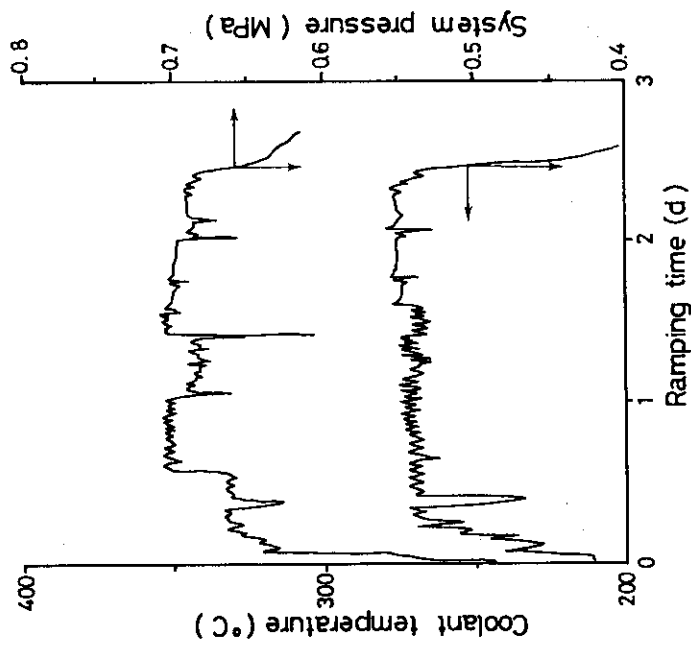


Fig. 3 Coolant temperature and system pressure of the BWR8 as a function of ramping time.

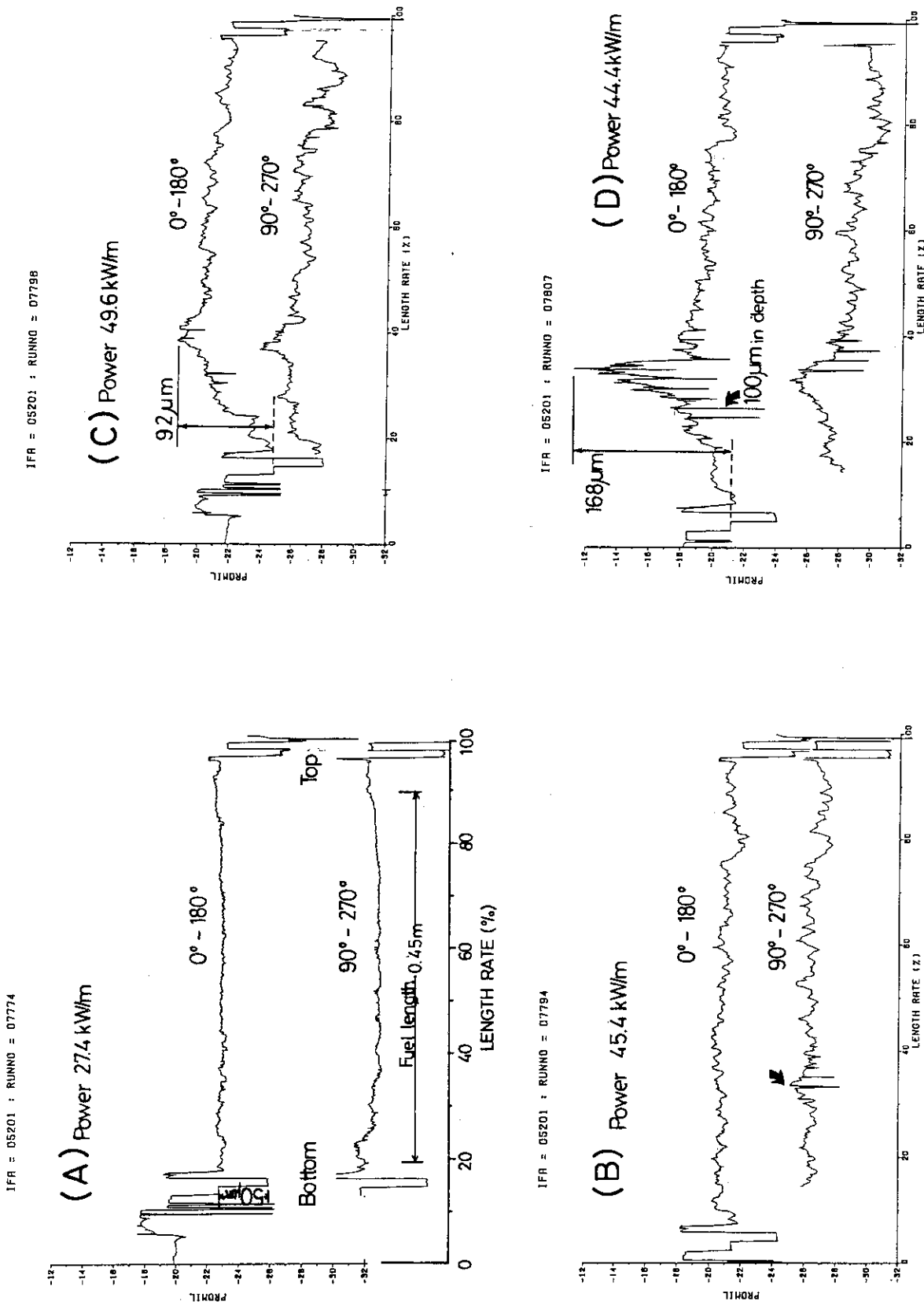


Fig. 5 Fuel rod profiles as a function of the axial length rate and two generatrices, at the local power of (A) 27.4 kW/m, (B) 45.4 kW/m, (C) 49.6 kW/m and (D) 44.4 kW/m: Broken lines in (C) and (D) show the rod diameter level at the beginning of irradiation.

IFA = 05201 : RUNNO = 07820

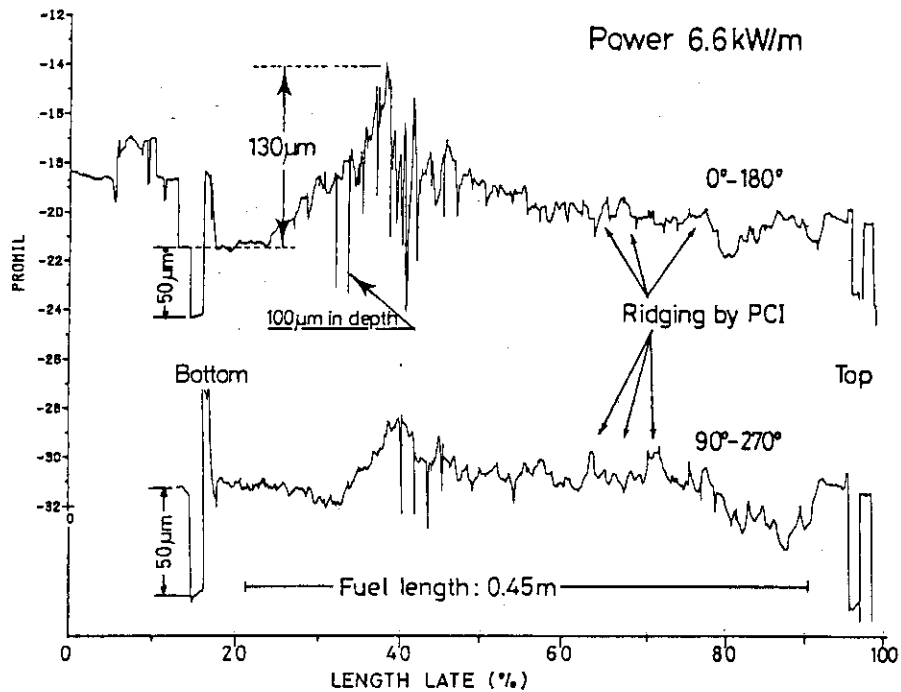


Fig. 6 Fuel rod profiles as a function of the axial length rate and two generatrices at the local down power of 6.6 kW/m.

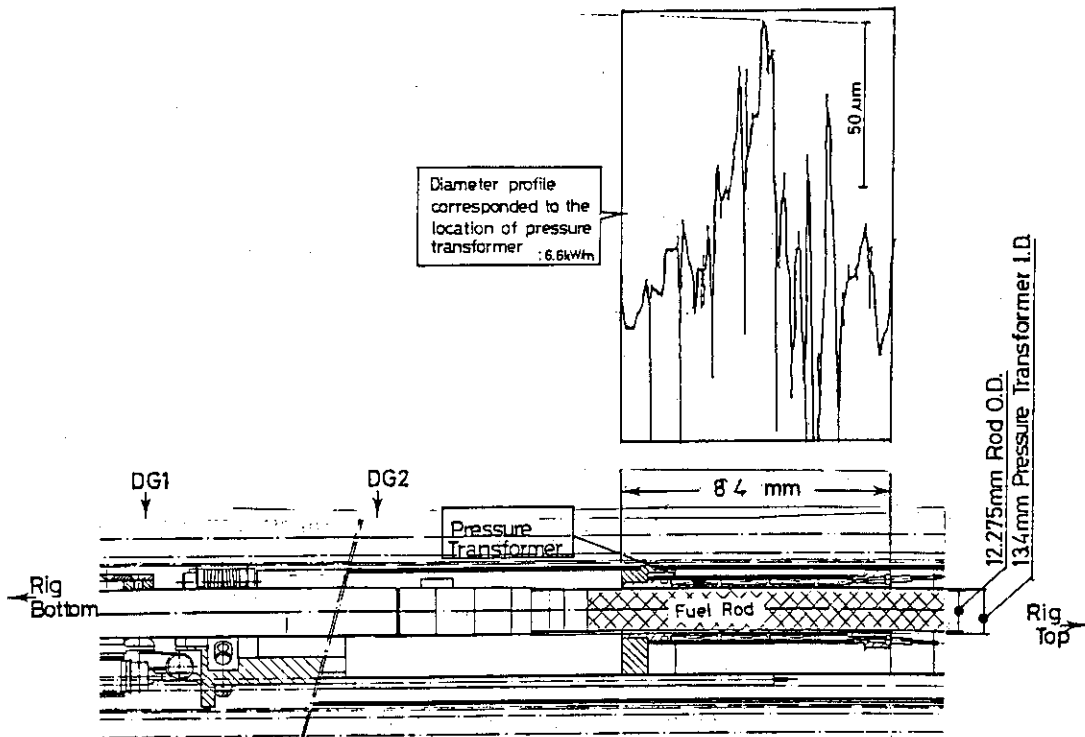


Fig. 7 (Bottom) Condition of the fuel rod stayed at the upper dead point in a stroke of diameter measurement, in which the coolant flow gap between rod O.D. and pressure transformer was to be 1.13 mm. (Top) Diameter profile at the power of 6.6 kW/m.

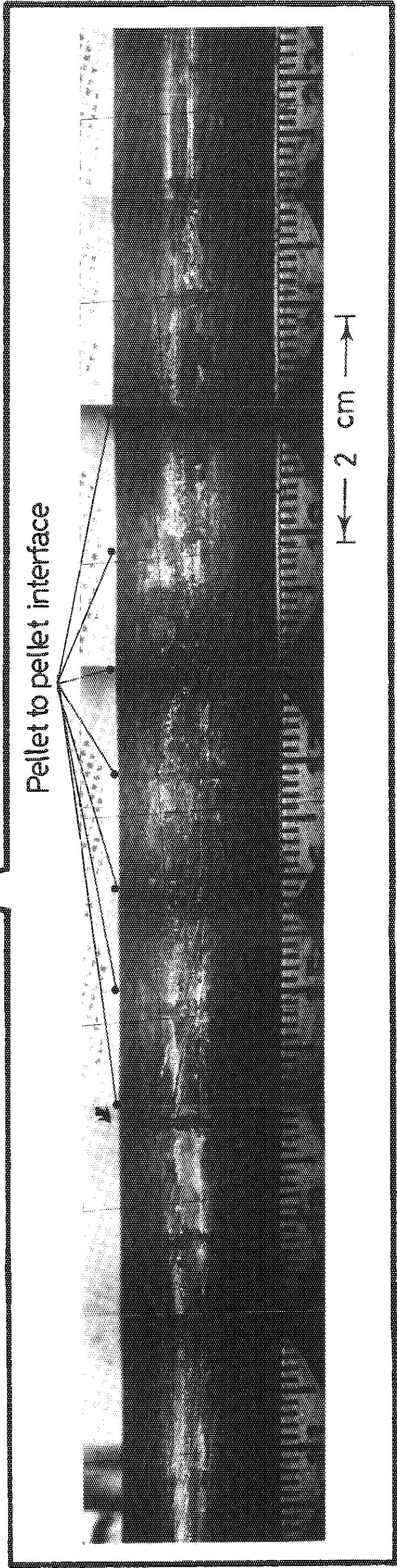
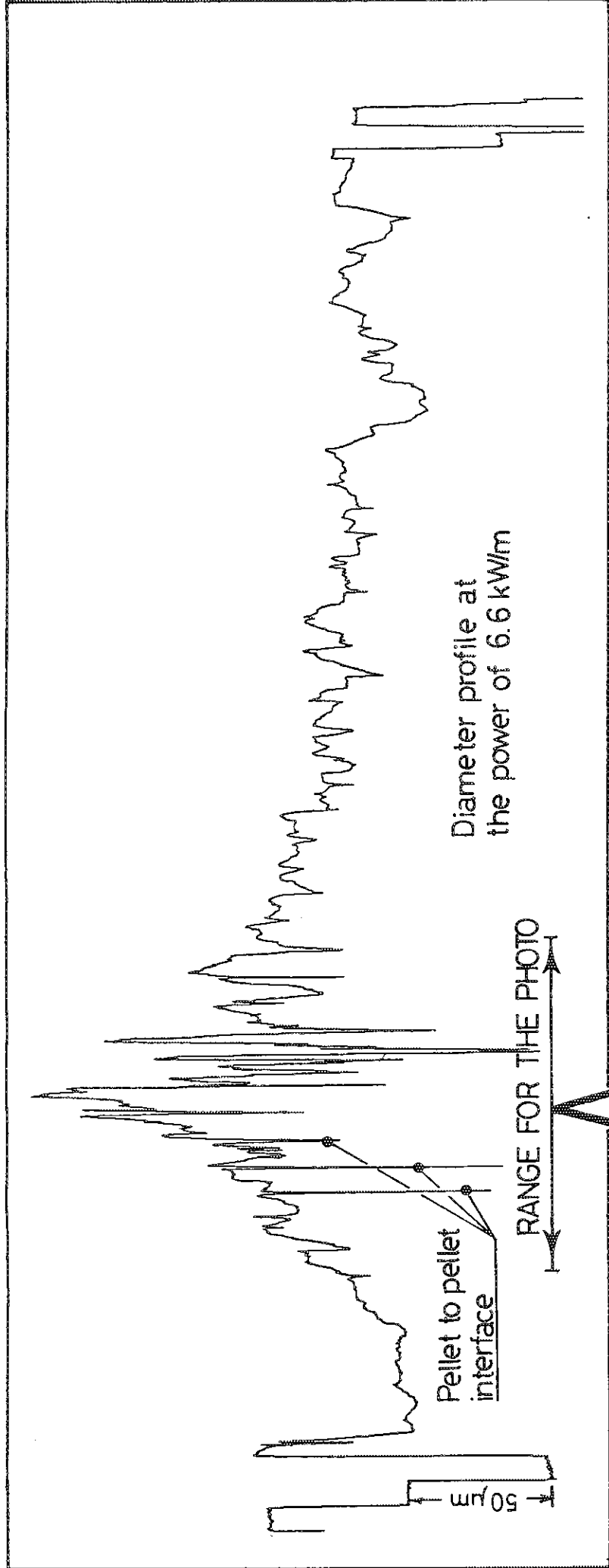


Photo. 1 (Bottom) Outerview of the oxidized surface of BWR8 observed in PIE,
(Top) Corresponded diameter profile at the local power of 6.6 kW/m.

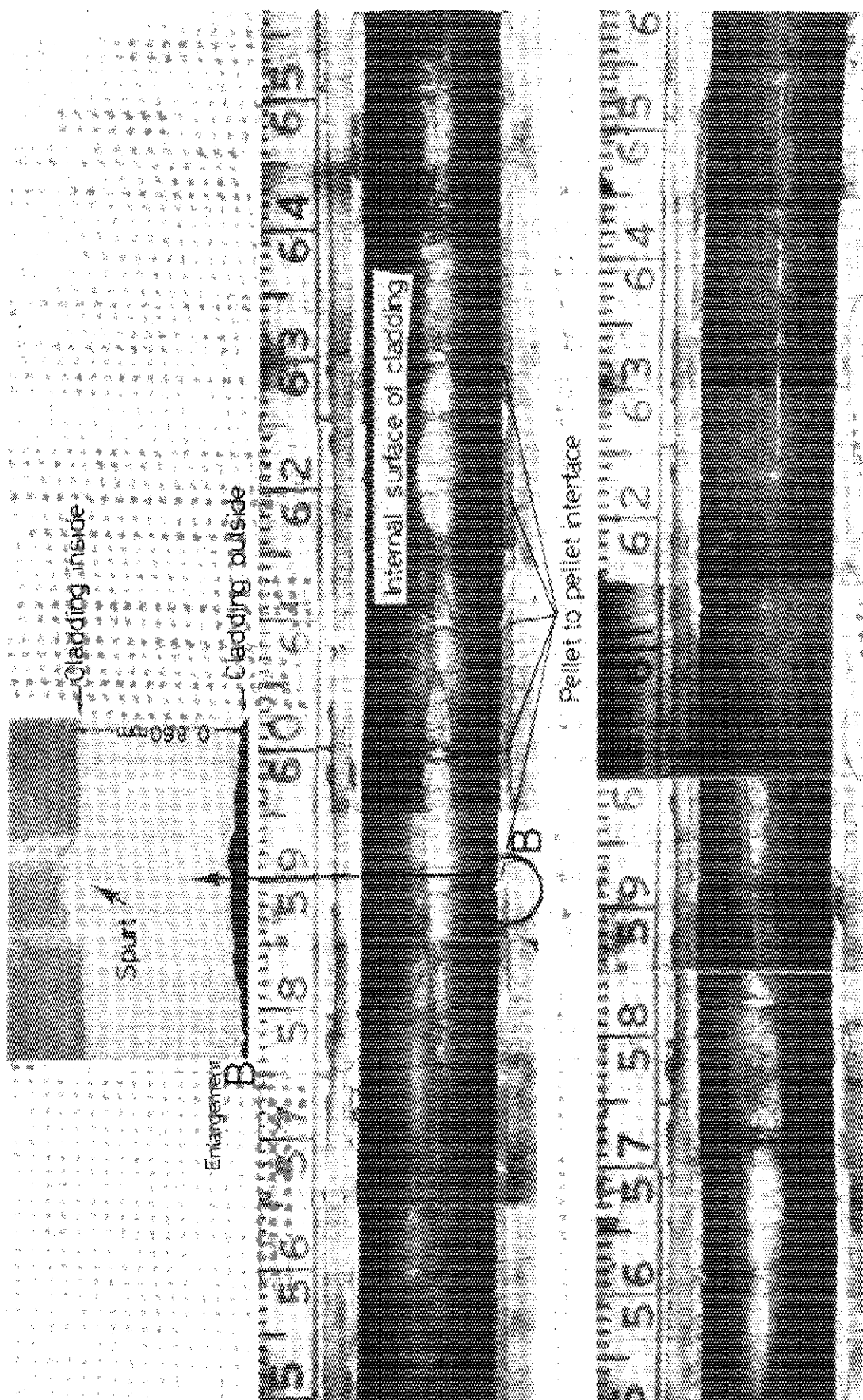


Photo. 2 Result of the cladding split for BWR8, in which one of the spurt at the location B was enlarged and shown in the top.

付録 I 直径測定時の燃料棒局所線出力の評価結果

HBWRの炉内測定システムでは、燃料棒の直径測定中は線出力が変動する。このため、直径測定開始直前と終了直後の2回、リグに計装したバナジウム型中性子検出器(ND)から読取った中性子量から次式にて、燃料棒の平均線出力： P (kW/m)を評価した。

$$P = k_g \times f(ND) / L \quad (1)$$

ここに k_g (kW/nA)は、バナジウム型中性子検出器からの読取值(単位nA)と、冷却材の温度上昇を使って熱水力的に定めた燃料棒発熱量(単位kW)、との比率であり、照射中はほぼ一定である。また $f(ND)$ は中性子検出器から15分おきに得られる遅発中性子の読取平均値(単位nA)であり、 L は燃料棒の発熱部の長さ(有効長)である。

つぎに、燃料の直径測定時の局所線出力 P_o は、実験前にこの平均線出力 P から換算できる様にしておく必要があった。このため、出力急昇実験に先立って、燃料中心温度測定用の熱電対を計装した未照射燃料棒を用いて較正試験を行った。これは未照射燃料中心温度からの起電力が、線出力に良く比例するのを利用したものである。

Fig.A.1は、測定データの1例を示している。図は原子炉出力9.7 MW時に燃料棒を上方に駆動し、得られた燃料中心温度からの起電力をプロットしたものである。この結果は、燃料棒駆動直前即ち直径測定開始直前の起電力を1.0とした評価結果である。また、DGの位置等は燃料棒内に計装した同期計で決めたが、そのデータも図中に含めた。これから、DG1(0°-180°測定)及びDG2(90°-270°測定)の各個所で燃料棒の局所線出力は、直径開始直前の平均線出力より低下することが分かった。

Fig.A.2は、原子炉出力を変動させたときの、DG1及びDG2における相対起電力即ち相対出力を評価した結果である。この図から、DG1については、 0.864 ± 0.021 、DG2については 0.821 ± 0.034 を得た。即ち直径測定時に、DG1では約14%の出力低下、DG2では約18%の出力低下がおこる。

両者には、約4%の差があったが、局所線出力の解析評価上、この差は有意でないと判断し、最終的には燃料棒の出力低下率は両者の平均値、即ち 0.843 ± 0.028 とした。

これから、燃料棒直径測定を開始する直前の平均線出力 P とすると、直径測定時の燃料棒局所線出力 P_o は

$$\begin{aligned} P_o &= (1 - 0.157) P \\ &= 0.843 P \end{aligned}$$

となる。

付録II BWR8燃料棒の直径測定から得られた燃料 外径プロフィールと冷却条件

燃料棒の直径測定は、測定を行うごとにそれに固有の番号（以後ラン番号と称す）がつけられている。Table A. 1は、32回実行した直径測定のラン番号、第1回目の直径測定時を基準とした経過時間、局所線出力、冷却材の温度（燃料棒下部：TI-1、燃料棒上部 TO-1 及び冷却材流速）をまとめたものである。

Fig. A. 3から Fig. A. 68は、各々のラン番号に対応した燃料直径形状（プロフィール）を示している。1回のランで 0° - 180° 及び 90° - 270° の二方向の直径プロフィールが得られるため、同一ラン番号に対して、2枚の直径プロフィールが存在する。

Table A.1 Conditions of the rod diameter measurement at power

RUN NO	TIME (h)	POWER (kW/m)	TI-1 (°C)	TO-1 (°C)	FI (m/s)
7753	0.0	2.5	198	198	2.2
7755	0.258	2.9	186	187	2.2
7757	0.552	2.8	184	184	2.2
7759	1.61	8.9	212	216	2.2
7761	2.54	17.2	223	228	2.2
7763	3.57	26.8	211	217	2.2
7765	3.78	30.6	210	217	2.2
7767	4.02	30.4	194	198	2.2
7770	7.41	28.5	216	219	2.1
7772	13.57	27.4	221	227	2.1
7774	25.60	27.4	226	228	2.1
7776	25.90	29.4	223	225	2.1
7778	26.20	29.7	221	223	2.1
7780	26.99	29.3	223	226	2.1
7782	27.70	31.1	225	229	2.1
7784	28.04	34.7	222	226	2.1
7786	28.75	35.4	220	225	2.1
7788	29.07	38.7	227	231	2.1
7790	29.76	40.2	222	227	2.1
7792	30.16	44.1	226	231	2.1
7794	30.64	45.4	222	227	2.1
7796	31.10	45.9	225	228	2.1
7800	31.64	40.6	224	229	2.1
7803	35.72	51.1	224	228	2.1
7805	40.21	44.6	223	227	2.1
7807	47.55	44.4	225	229	2.1
7809	53.61	44.4	223	227	2.1
7811	54.42	37.9	226	228	2.1
7813	55.03	29.9	223	224	2.1
7816	55.90	20.0	223	223	2.1
7818	56.71	10.6	222	223	2.1
7820	57.09	6.6	217	217	2.1

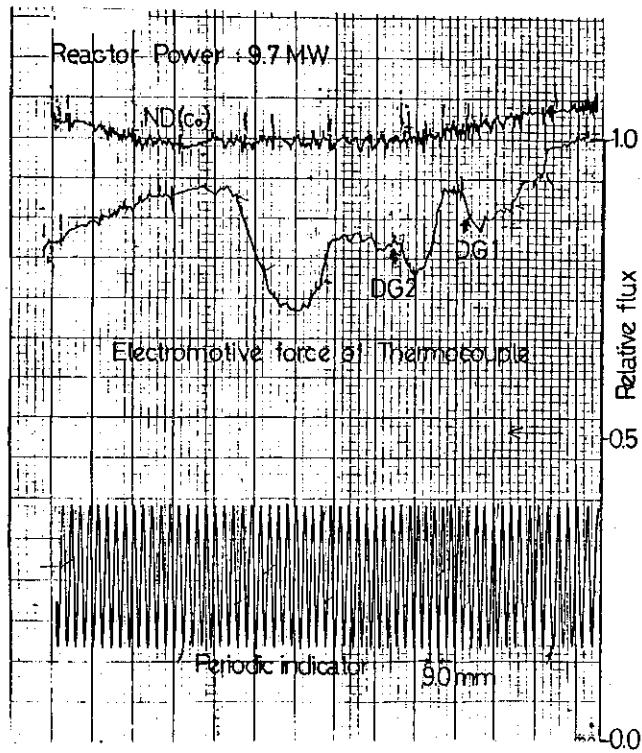


Fig. A.1 Result of the experiment for determining the local power reduction at DG1 and DG2.

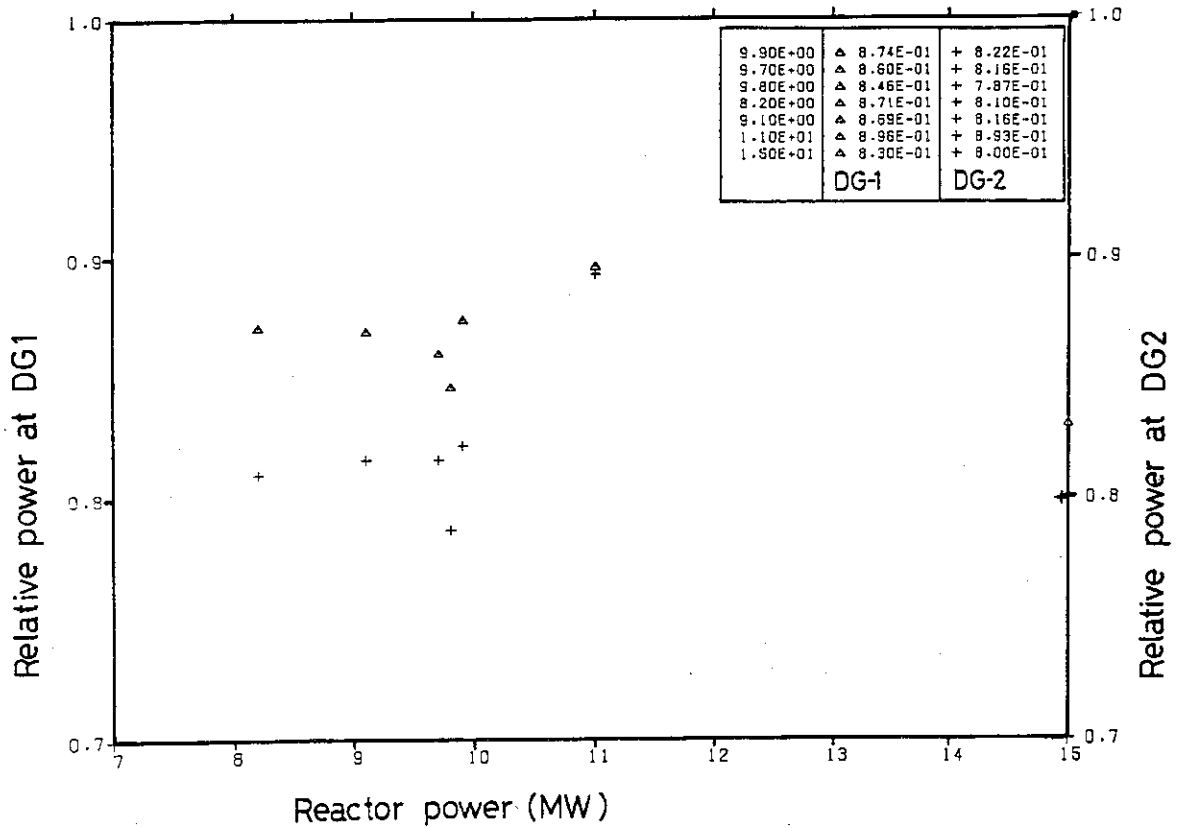


Fig. A.2 Relative power at two DGs as a function of the reactor power.

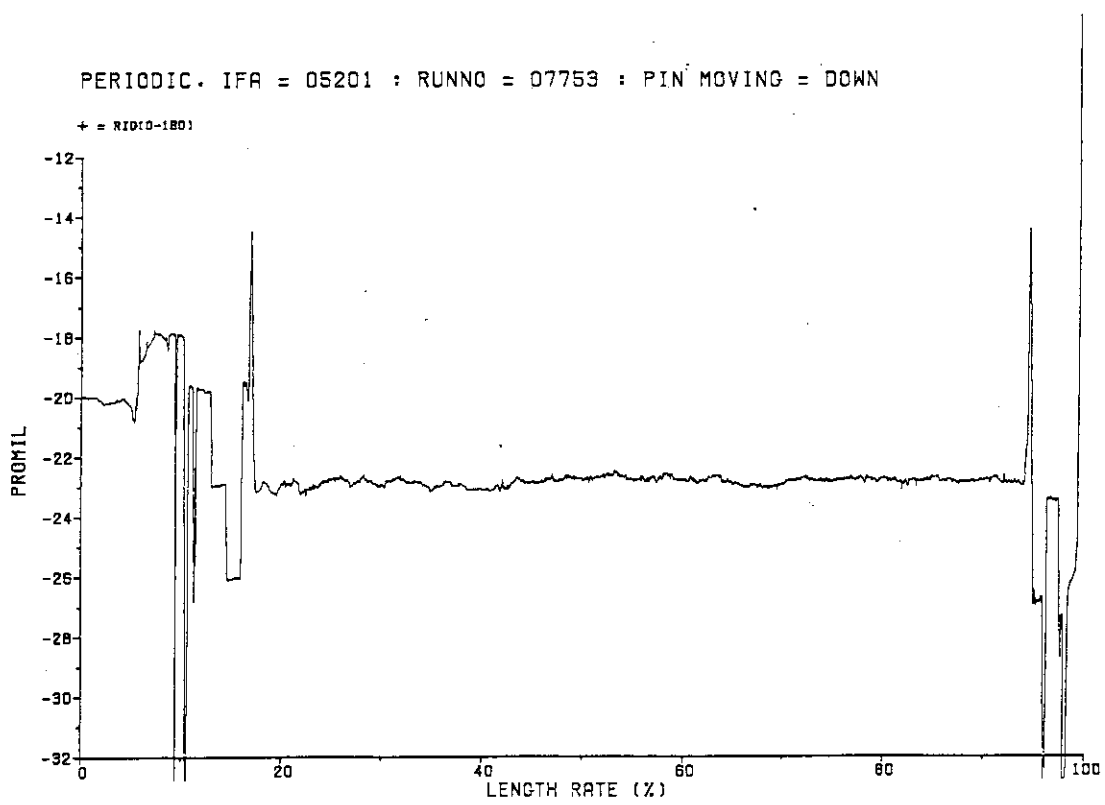


Fig. A.3 Diameter profile at run 7753 (0° - 180°).

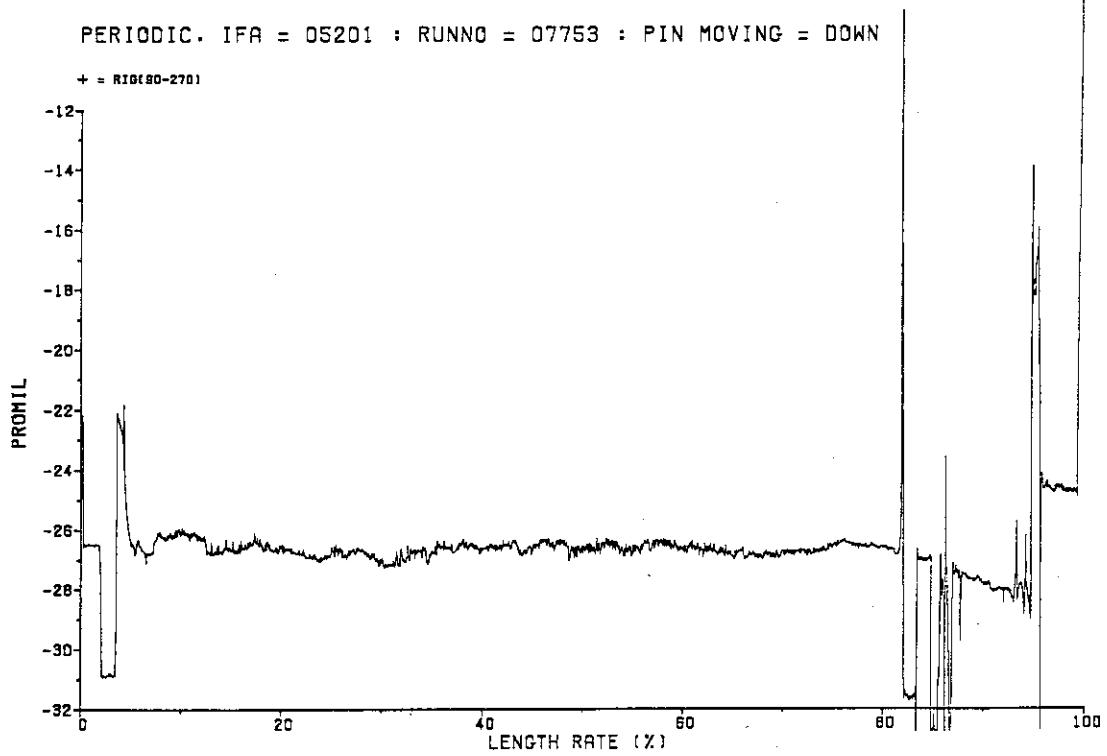


Fig. A.4 Diameter profile at run 7753 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07755 : PIN MOVING = DOWN

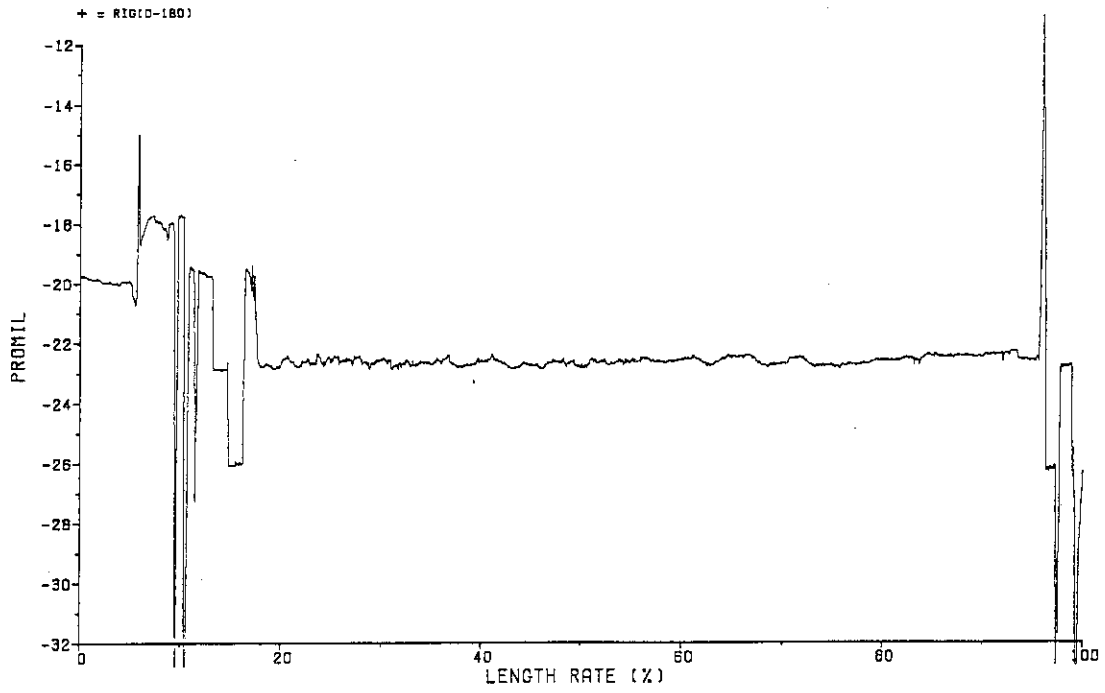


Fig. A.5 Diameter profile at run 7755 (0° - 180°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07755 : PIN MOVING = DOWN

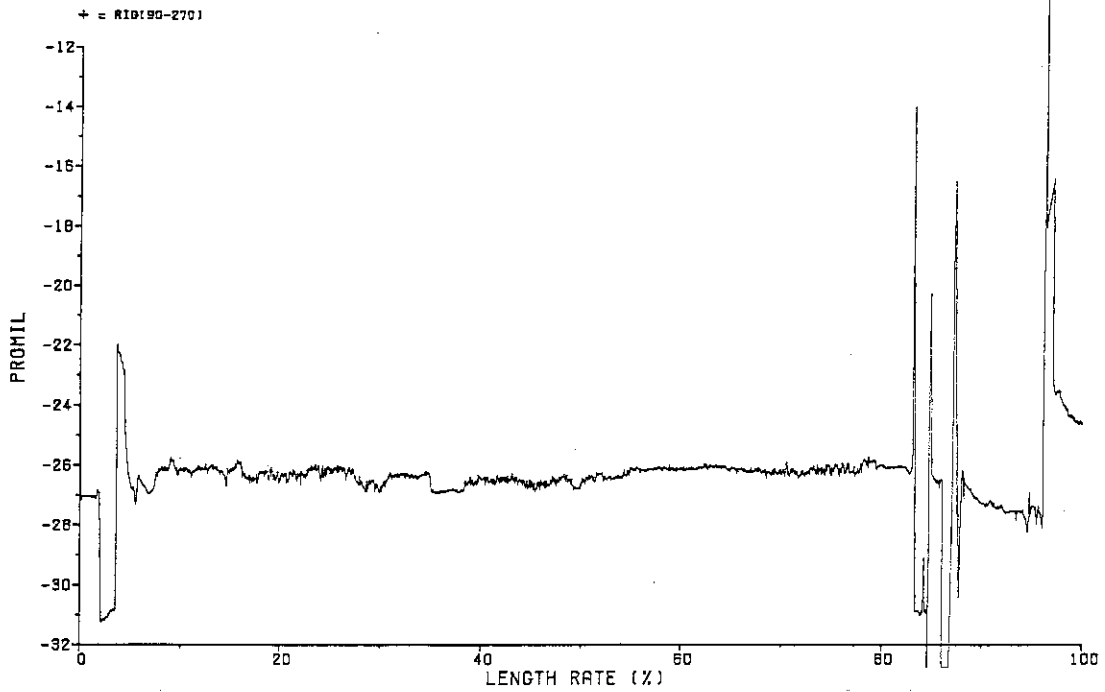


Fig. A.6 Diameter profile at run 7755 (90° - 270°).

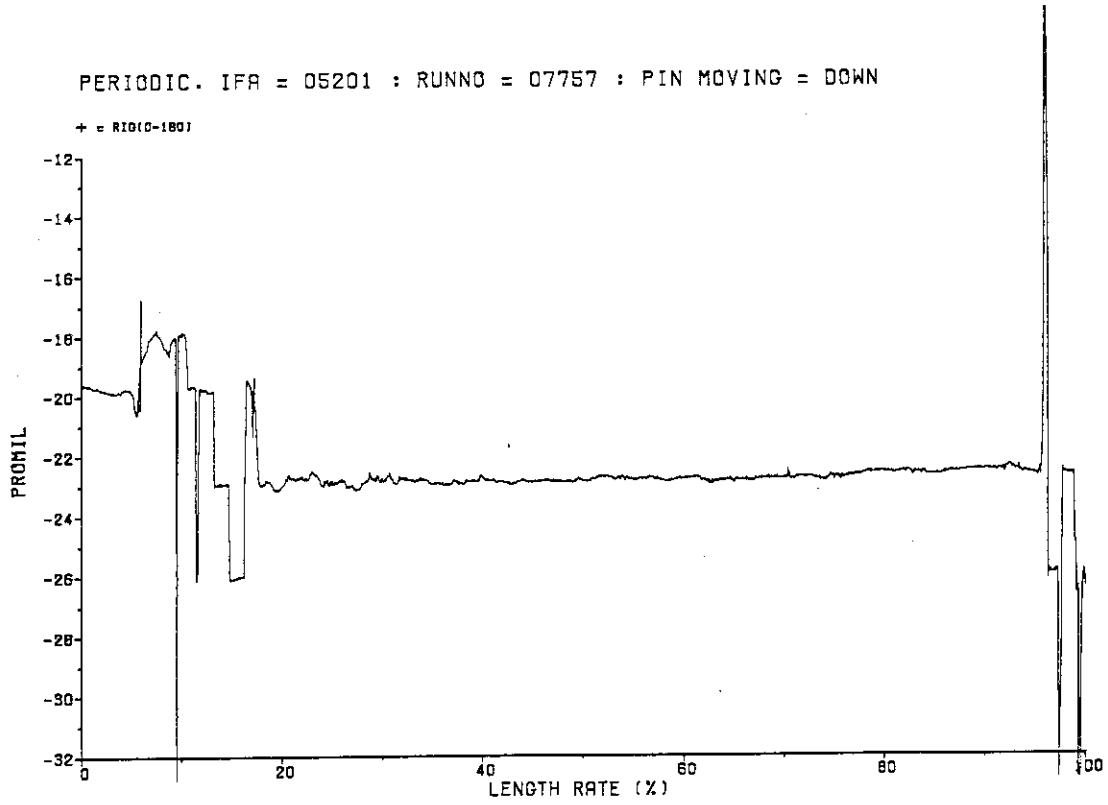


Fig. A.7 Diameter profile at run 7757 (0° - 180°).

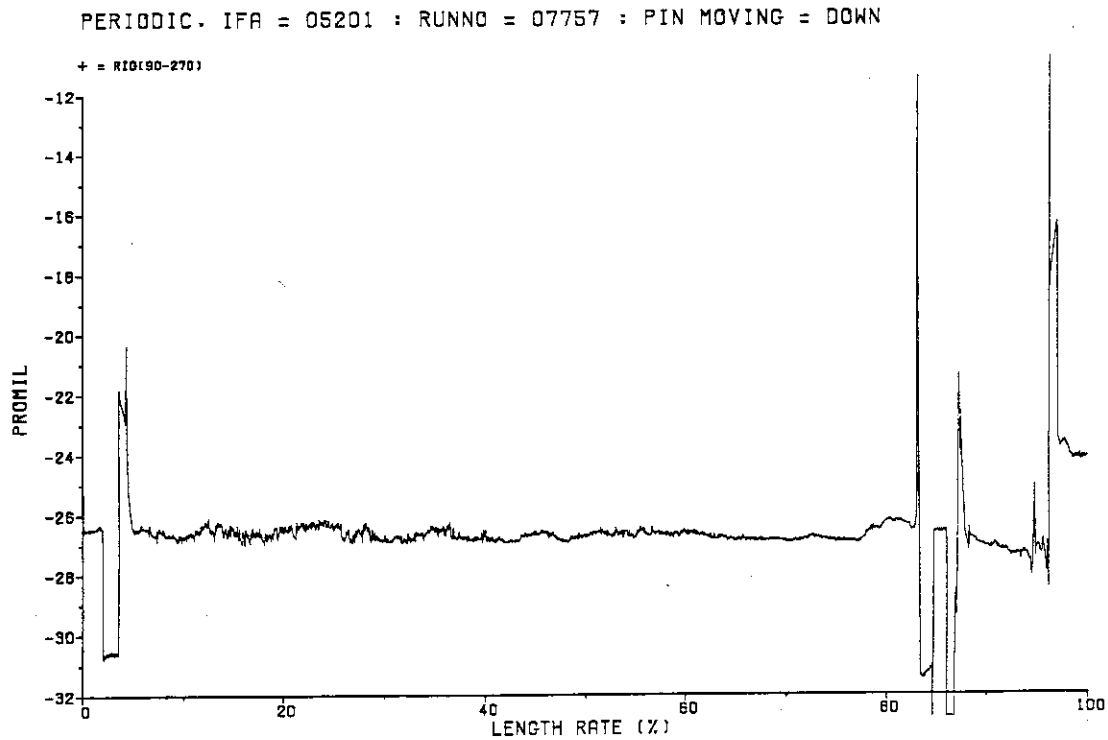


Fig. A.8 Diameter profile at run 7757 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07759 : PIN MOVING = DOWN

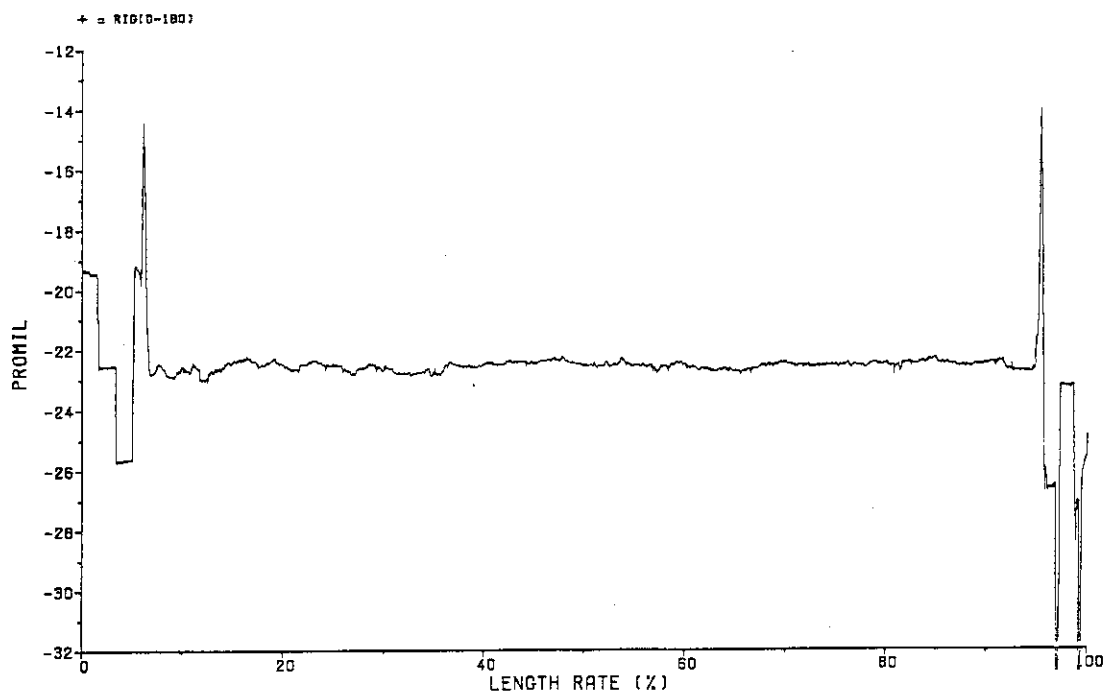


Fig. A.9 Diameter profile at run 7759 (0° - 180°).

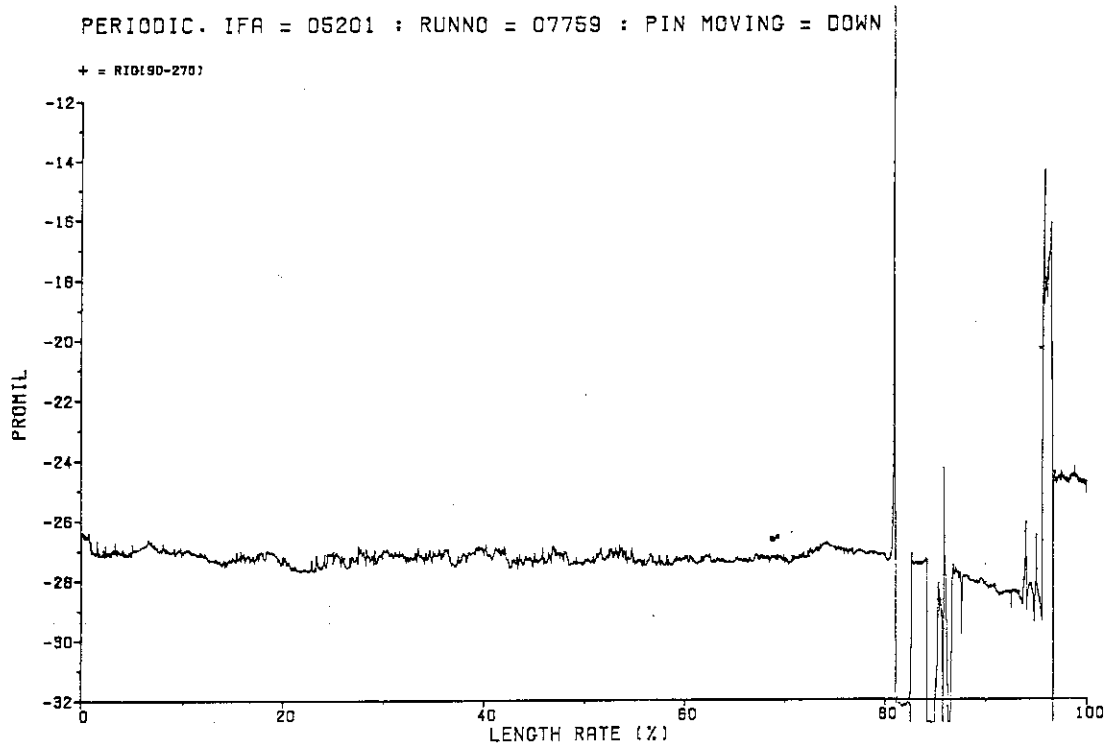


Fig. A.10 Diameter profile at run 7759 (90° - 270°).

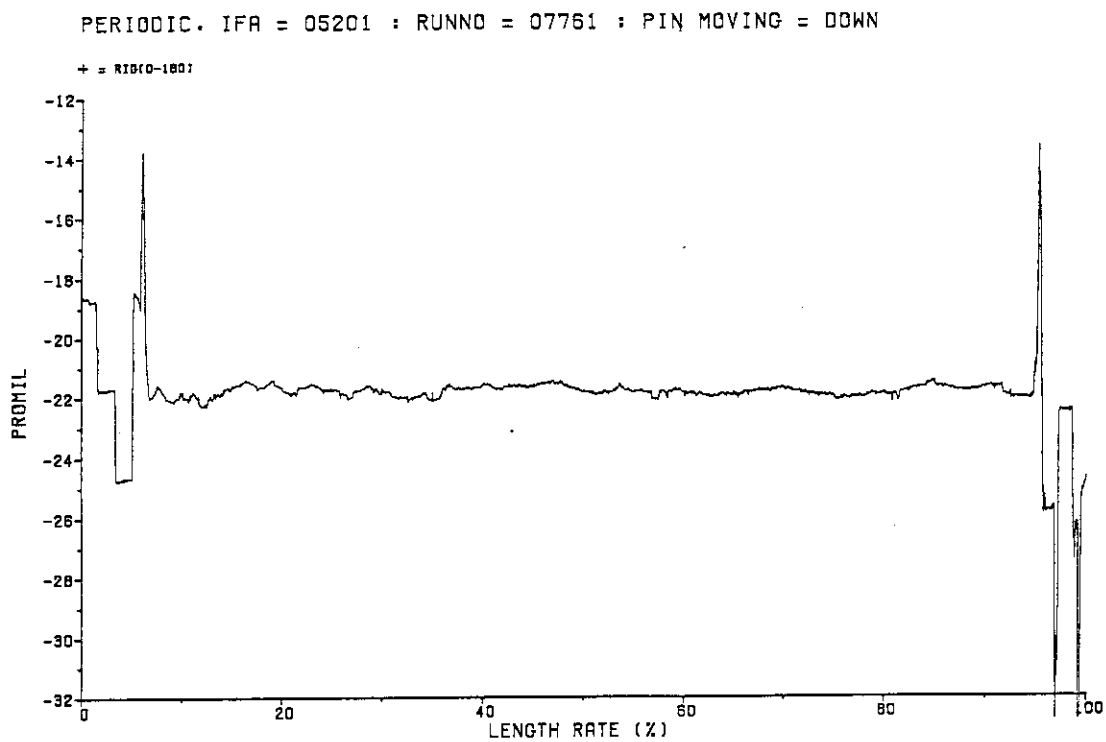


Fig. A.11 Diameter profile at run 7761 (0° - 180°).

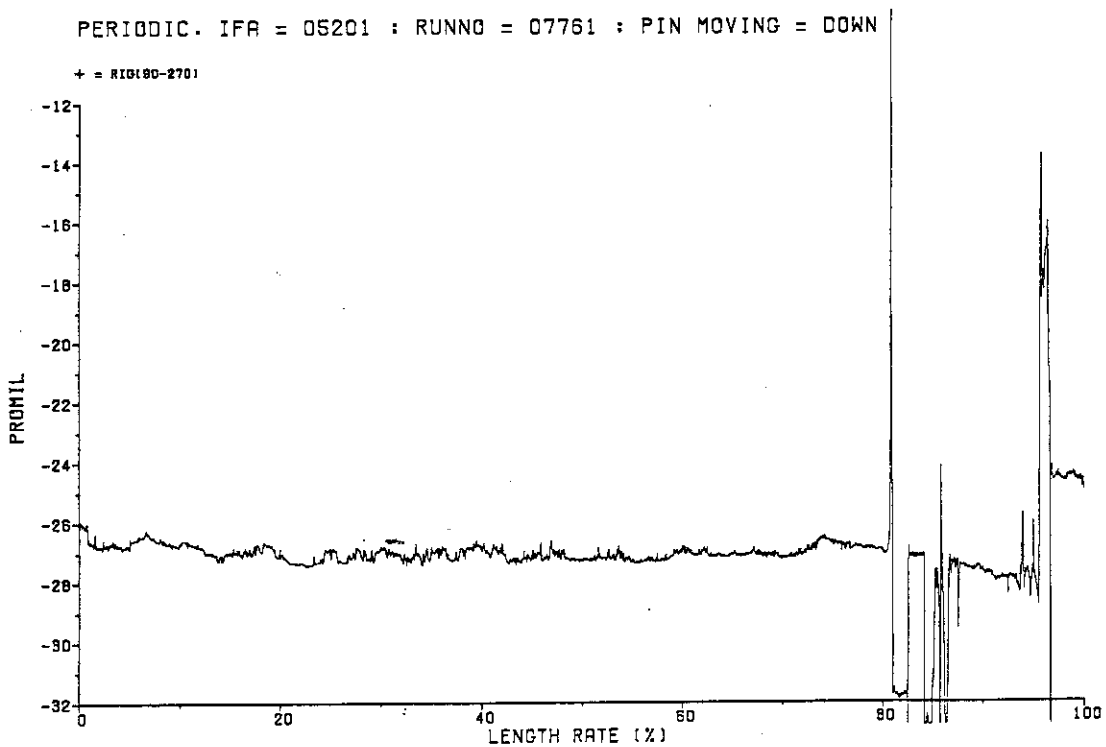


Fig. A.12 Diameter profile at run 7761 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07763 : PIN MOVING = DOWN

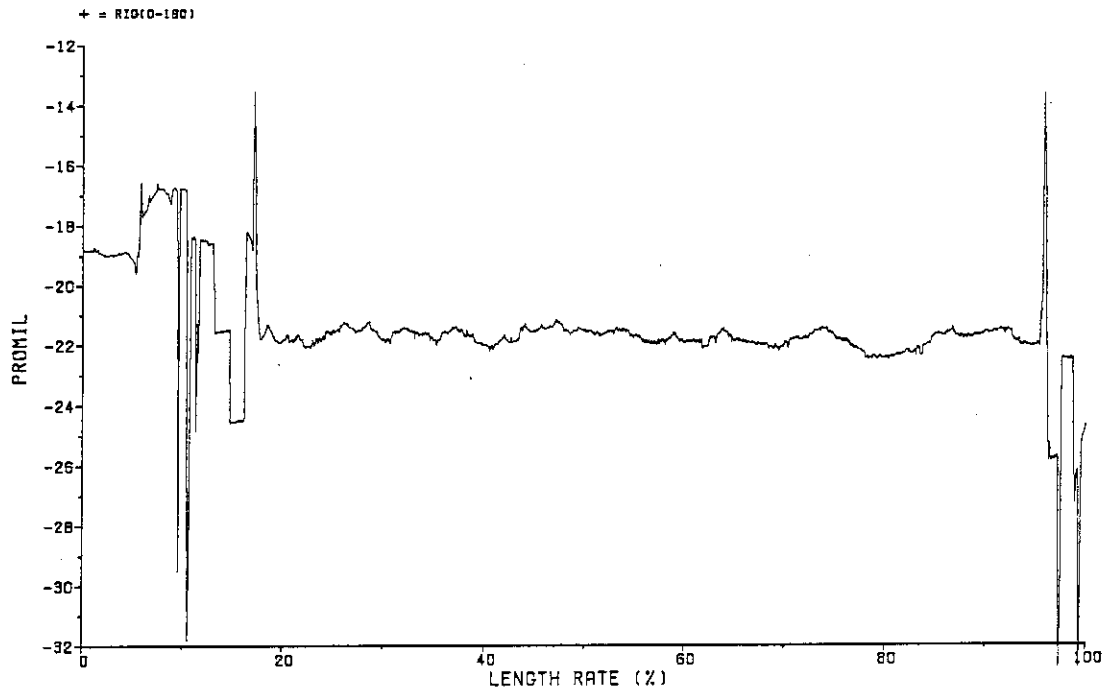


Fig. A.13 Diameter profile at run 7763 (0° - 180°).

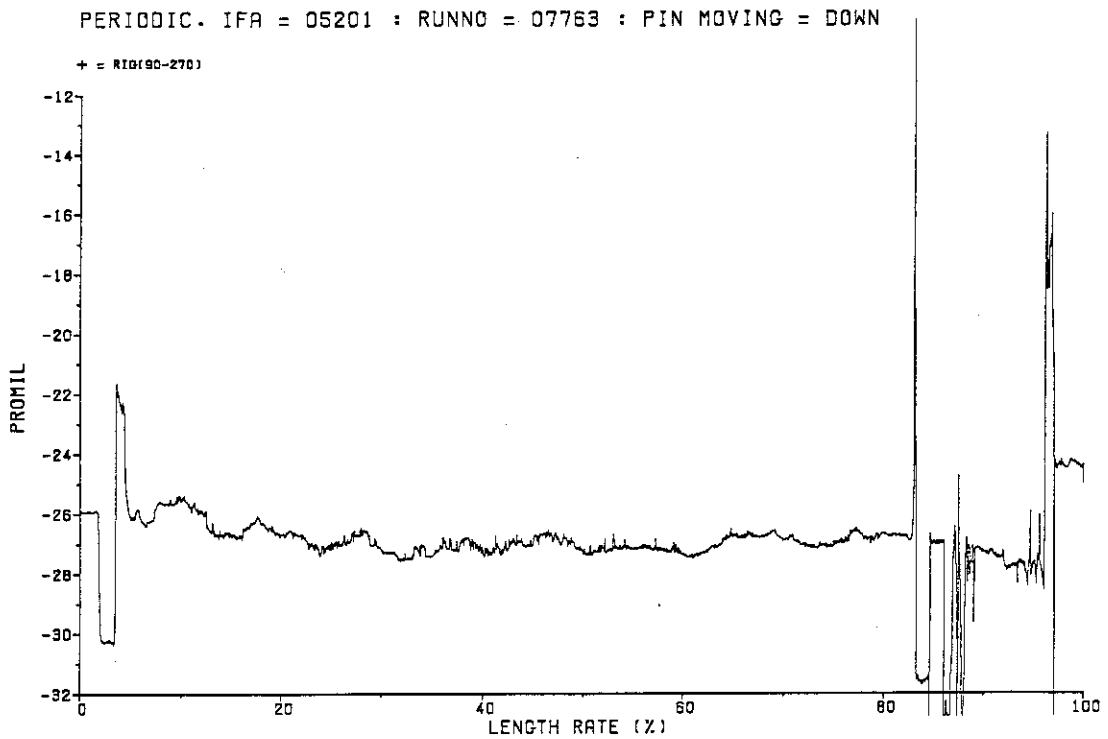


Fig. A.14 Diameter profile at run 7763 (90° - 270°).

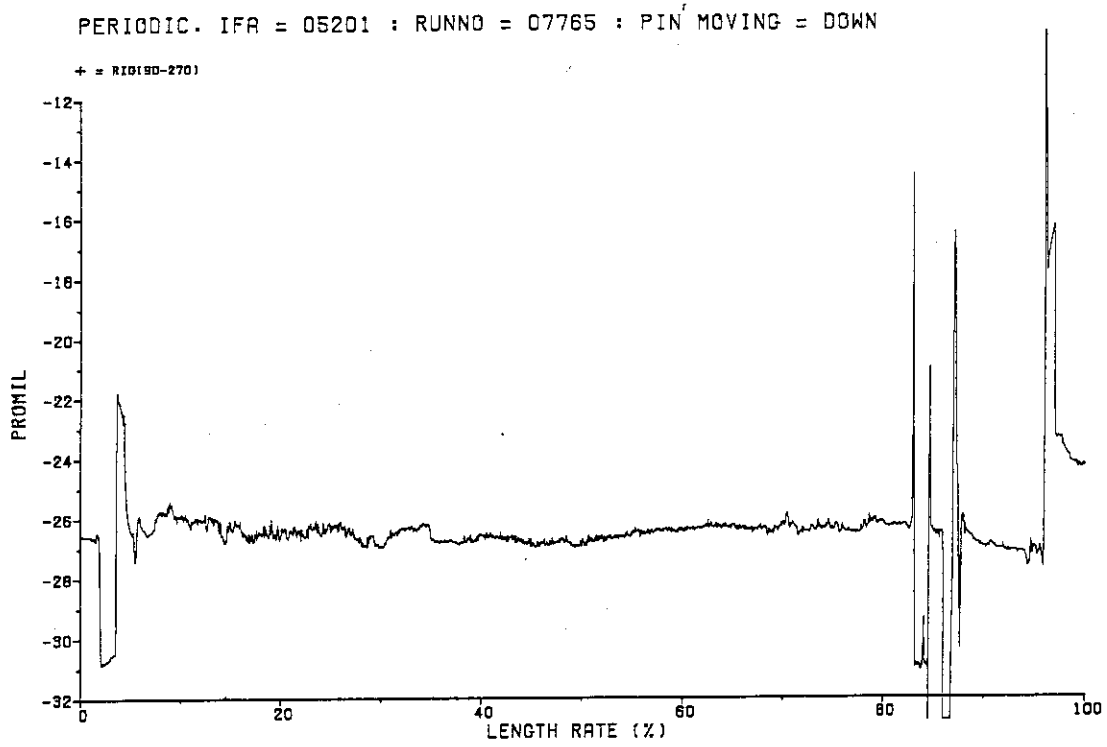


Fig. A.15 Diameter profile at run 7765 (0° - 180°).

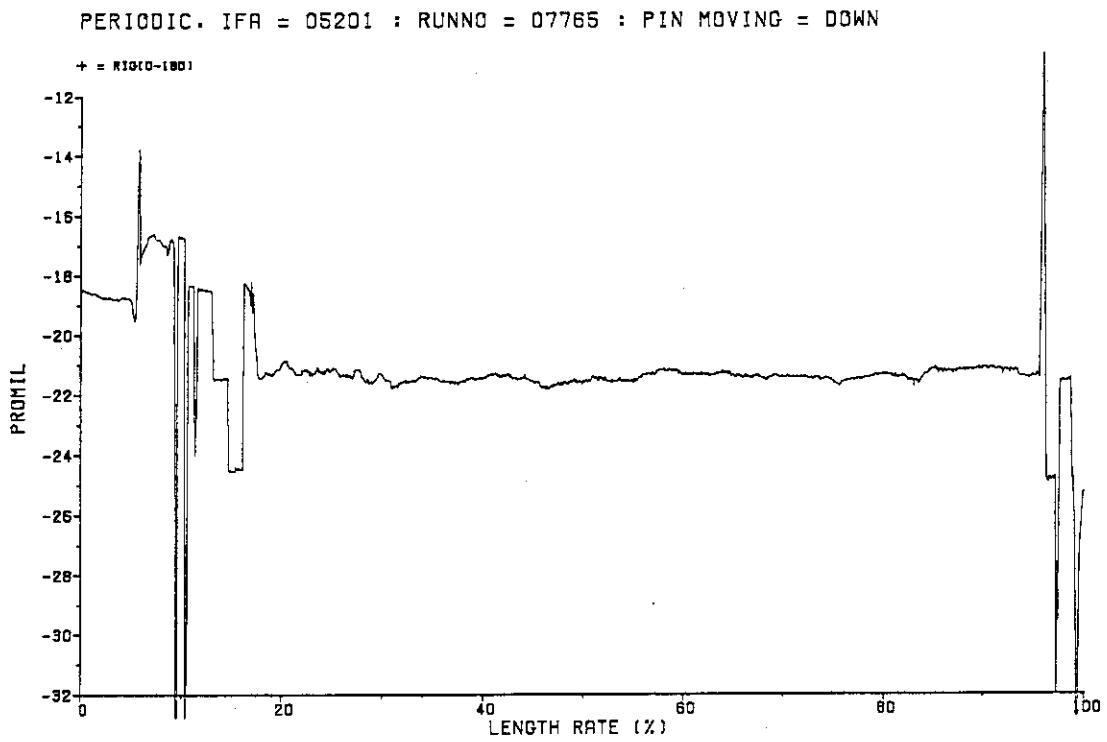


Fig. A.16 Diameter profile at run 7765 (90° - 270°).

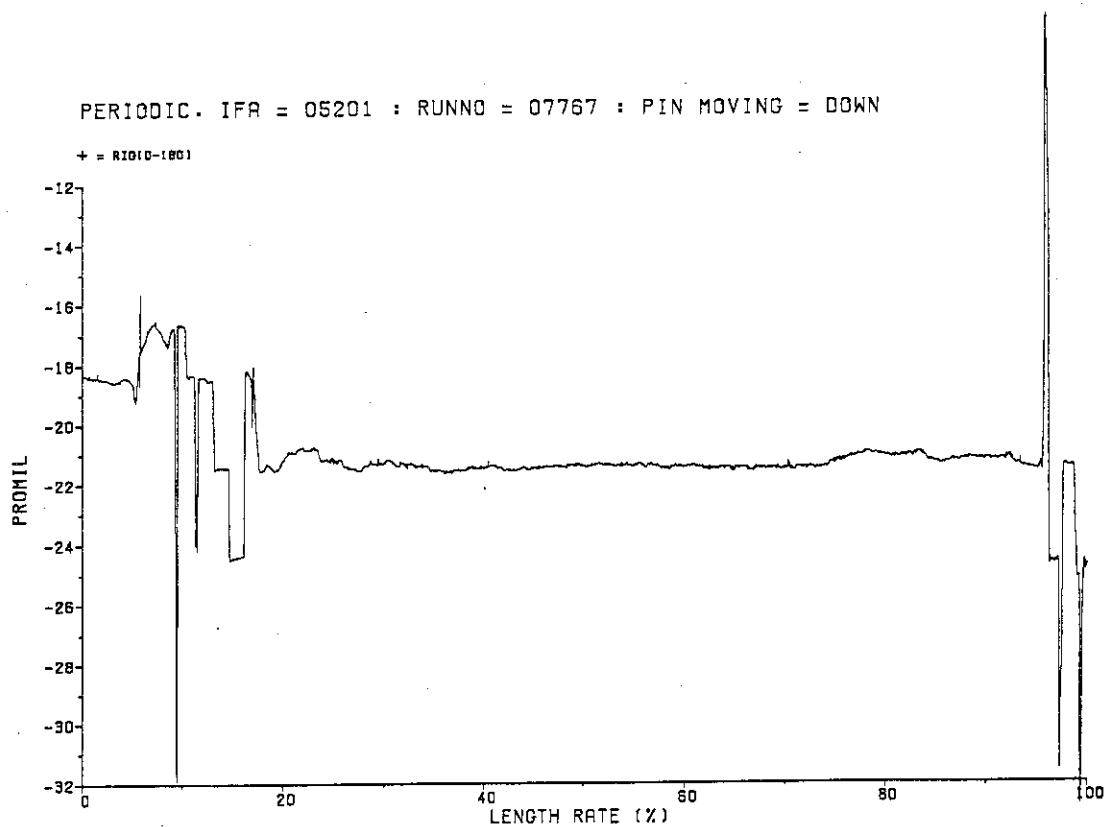


Fig. A.17 Diameter profile at run 7767 (0° - 180°).

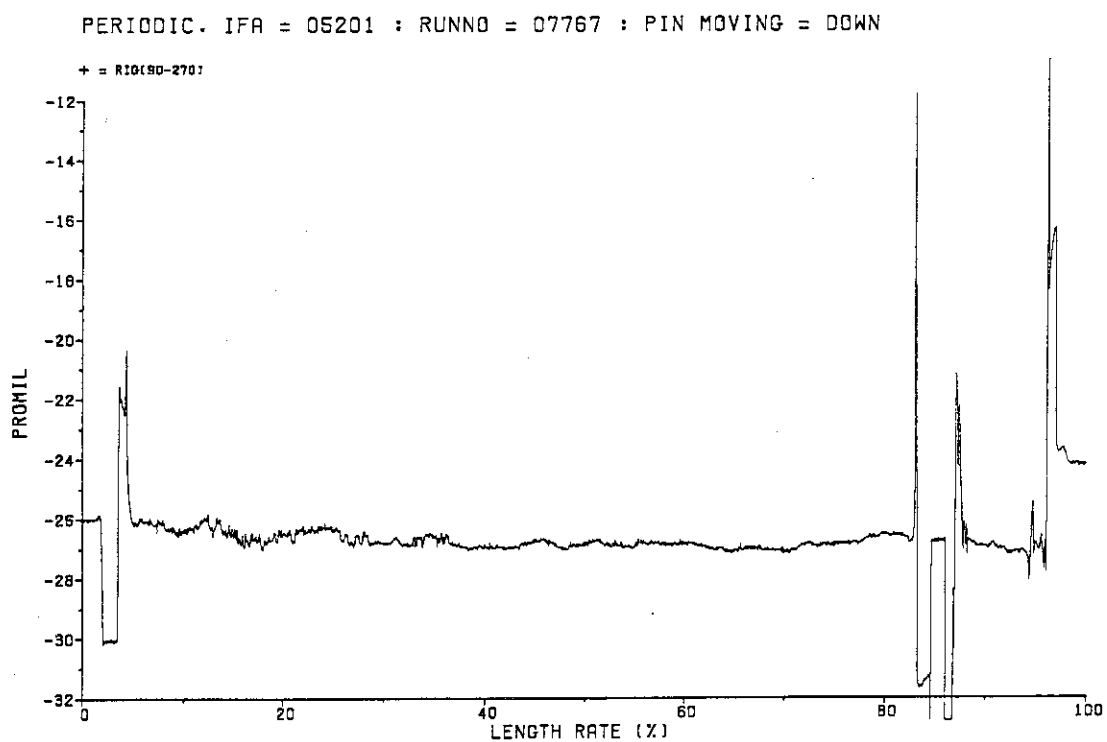


Fig. A.18 Diameter profile at run 7767 (90° - 270°).

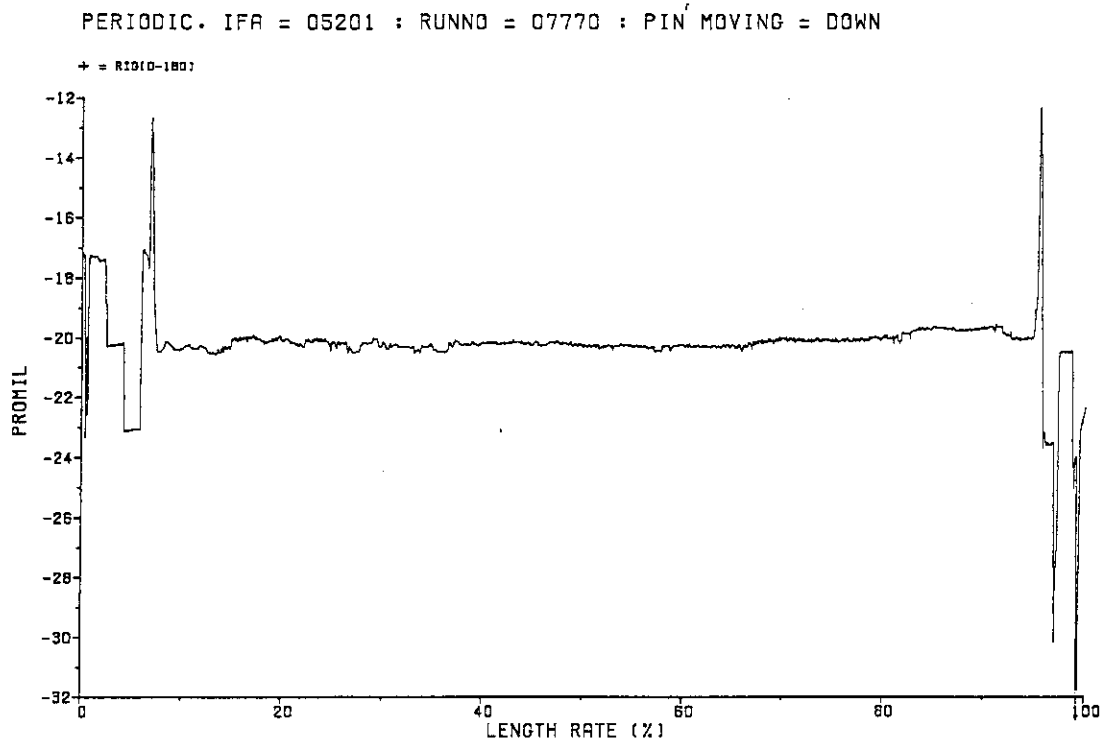


Fig. A.19 Diameter profile at run 7770 (0° - 180°).

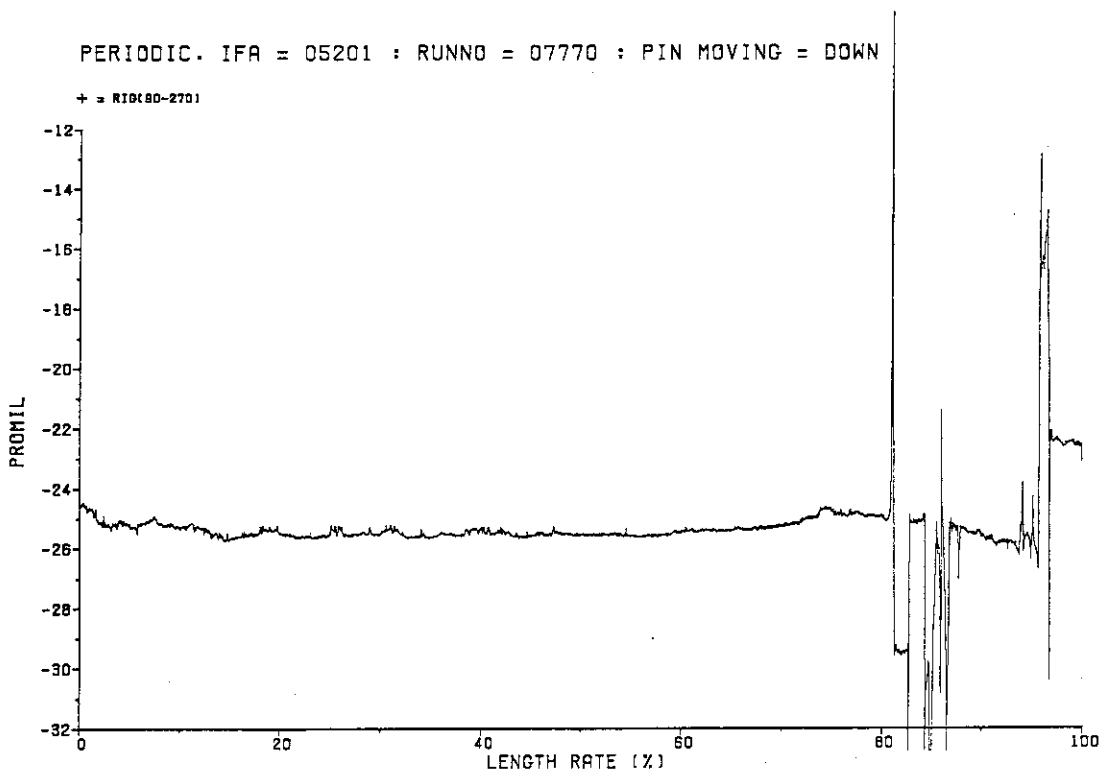


Fig. A.20 Diameter profile at run 7770 (90° - 270°).

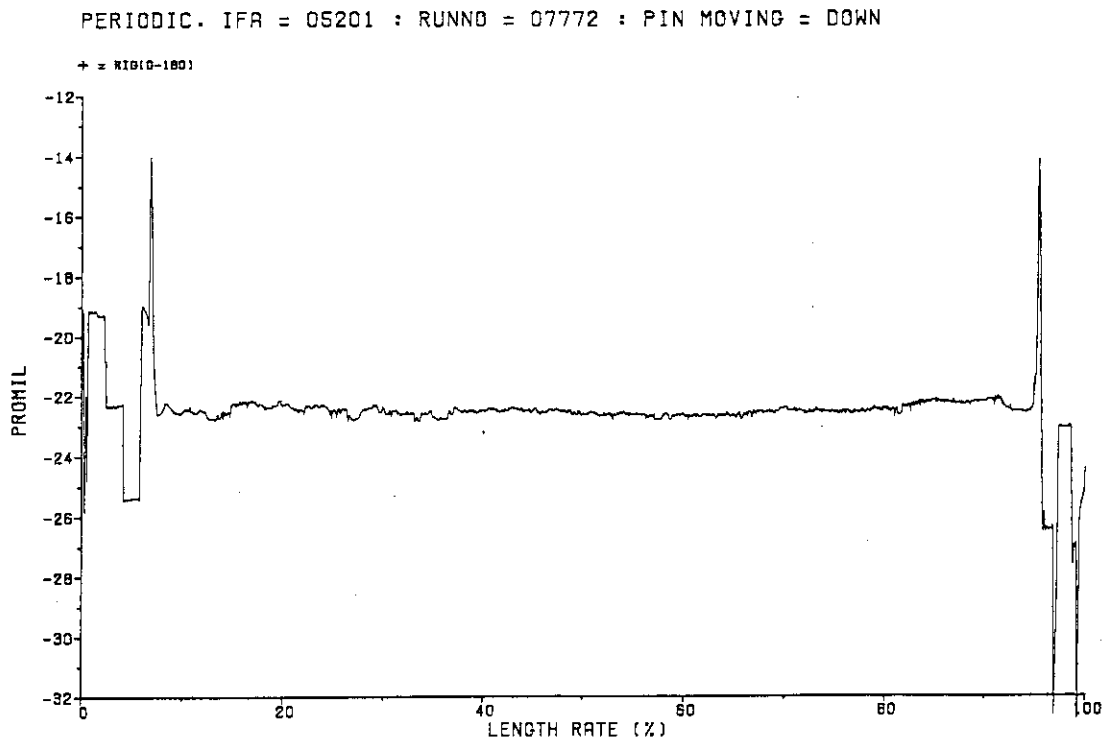


Fig. A.21 Diameter profile at run 7772 (0° - 180°).

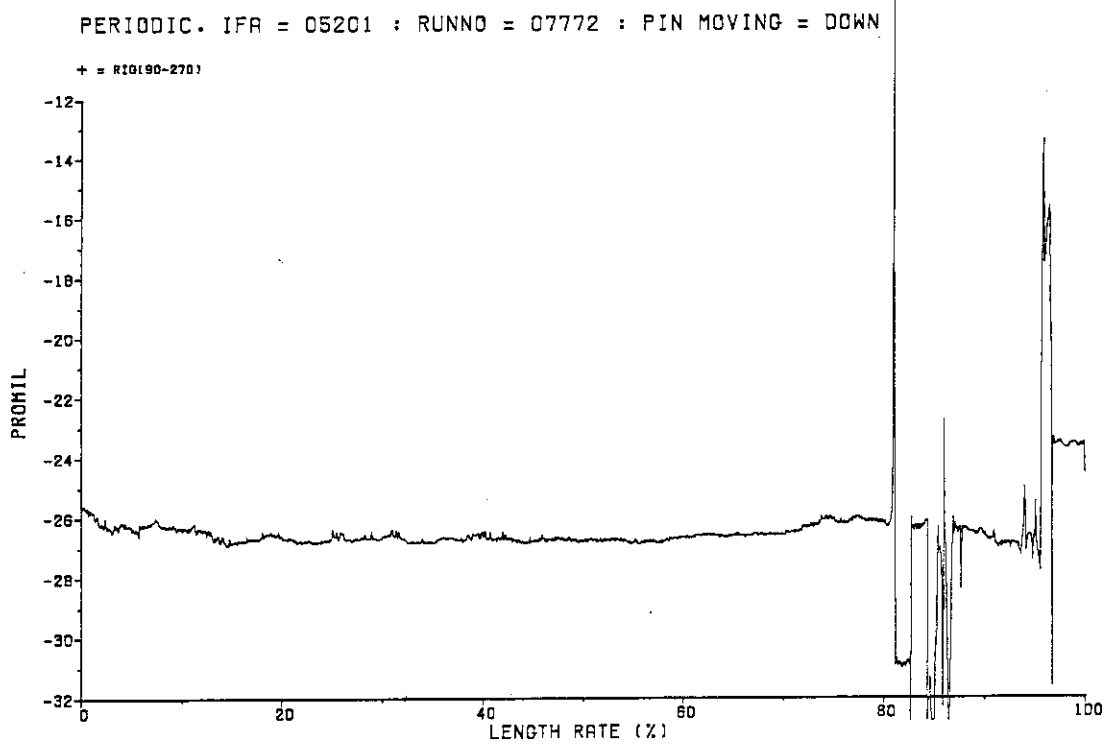


Fig. A.22 Diameter profile at run 7772 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07774 : PIN MOVING = DOWN

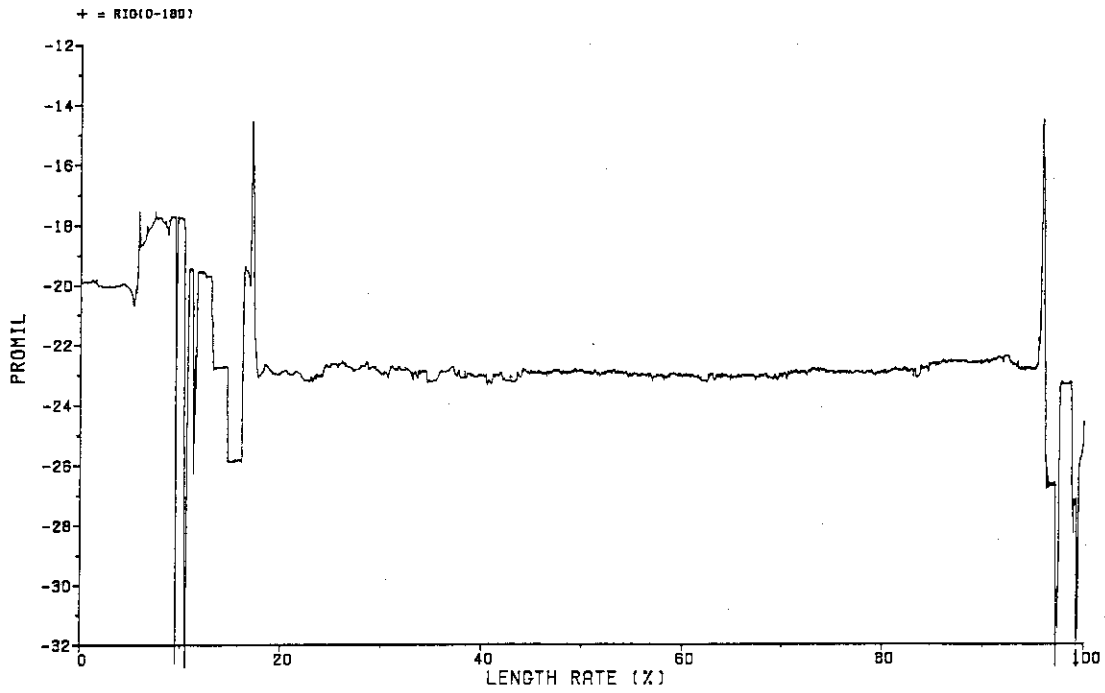


Fig. A.23 Diameter profile at run 7774 (0° - 180°).

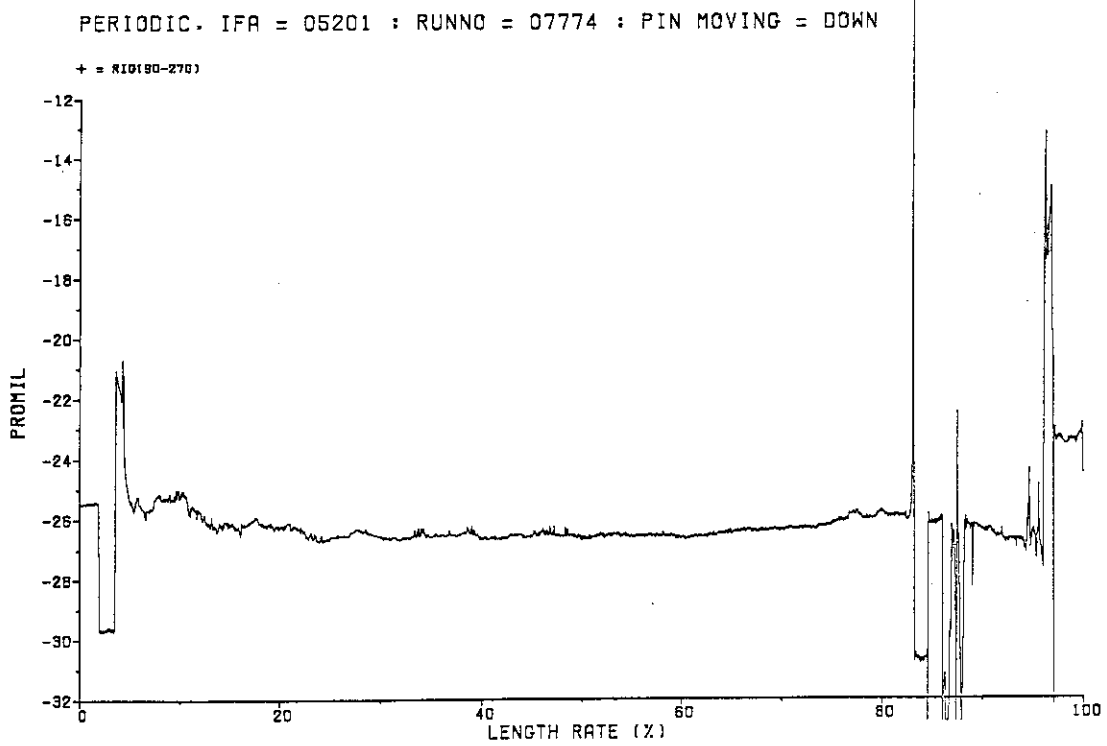


Fig. A.24 Diameter profile at run 7774 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07776 : PIN MOVING = DOWN

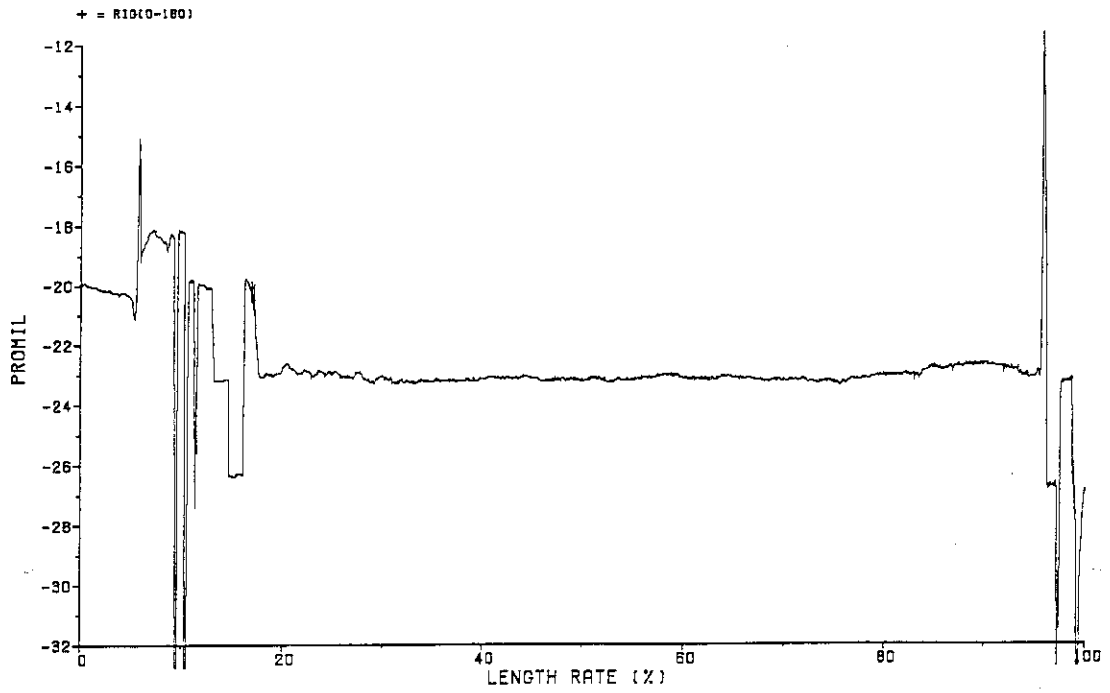


Fig. A.25 Diameter profile at run 7776 (0° - 180°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07776 : PIN MOVING = DOWN

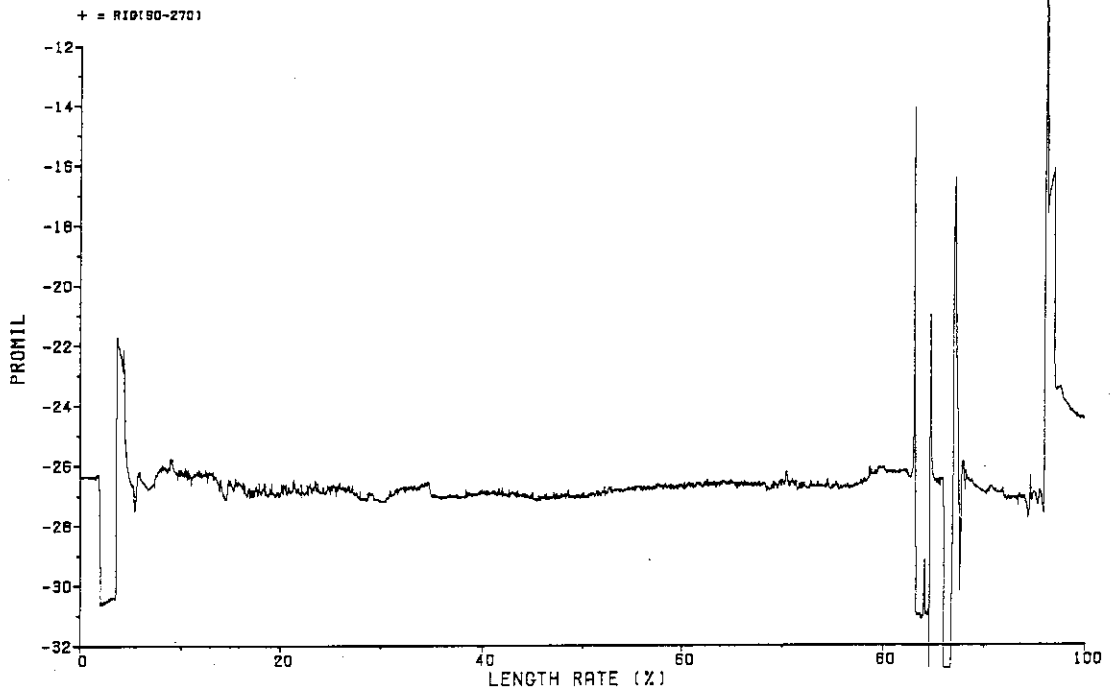


Fig. A.26 Diameter profile at run 7776 (90° - 270°).

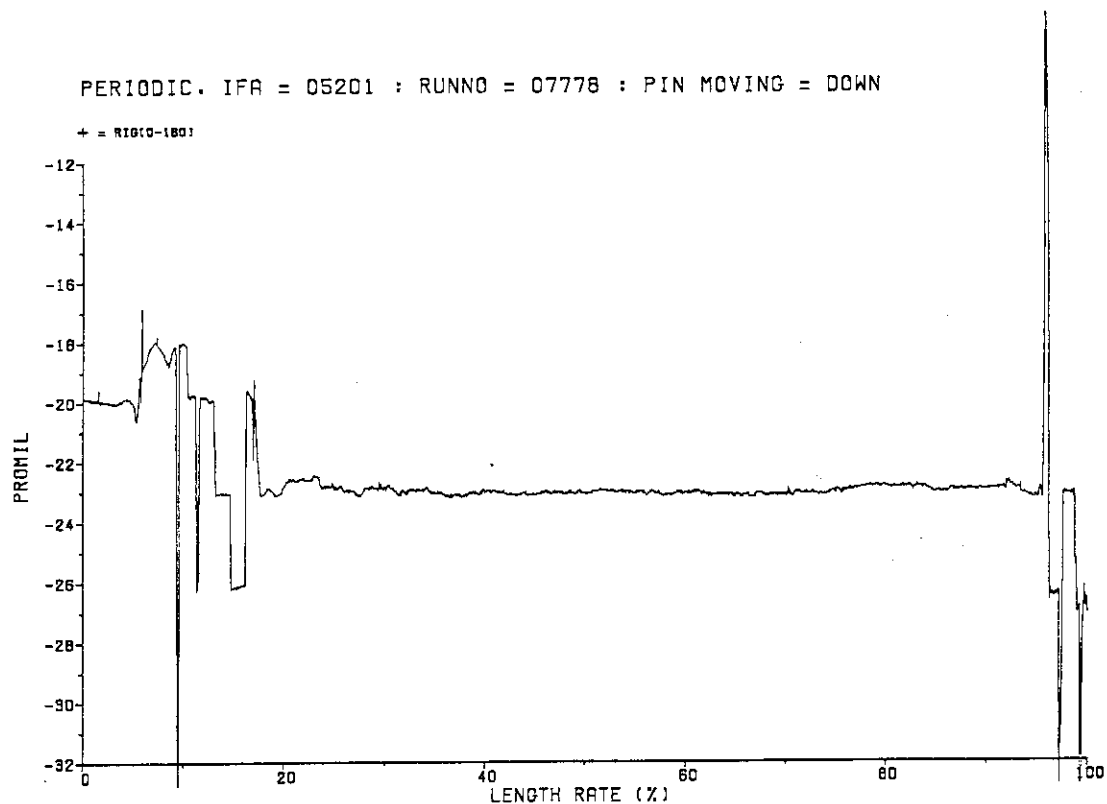


Fig. A.27 Diameter profile at run 7778 (0° - 180°).

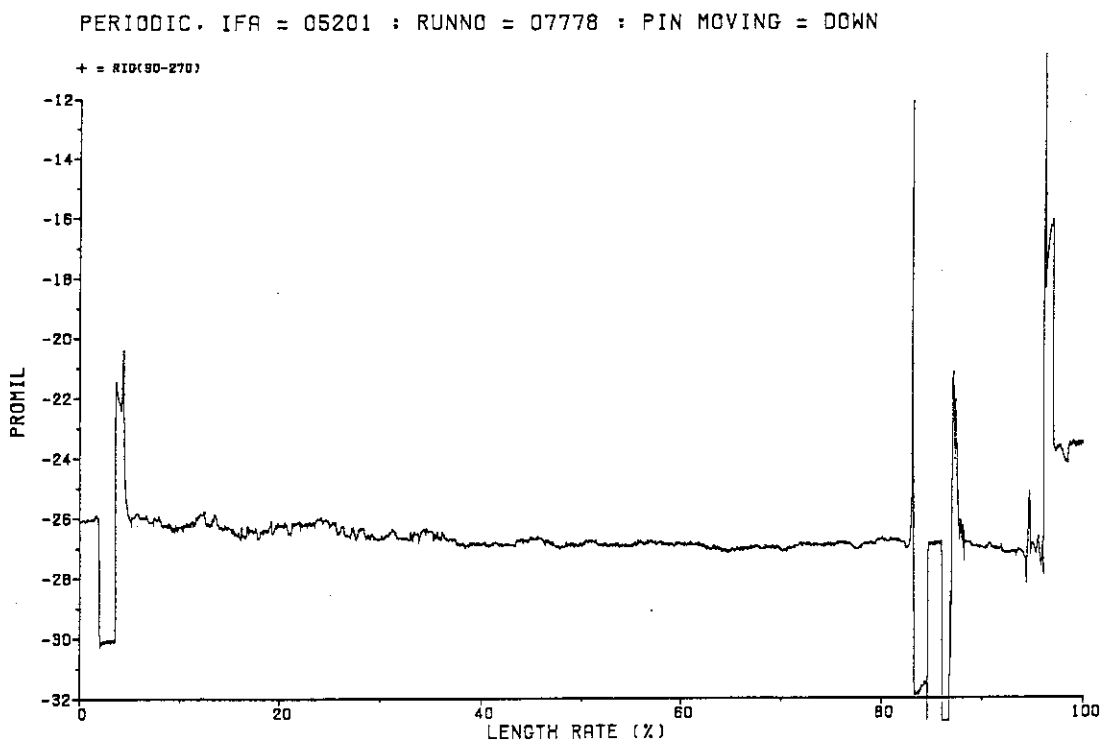


Fig. A.28 Diameter profile at run 7778 (90° - 270°).

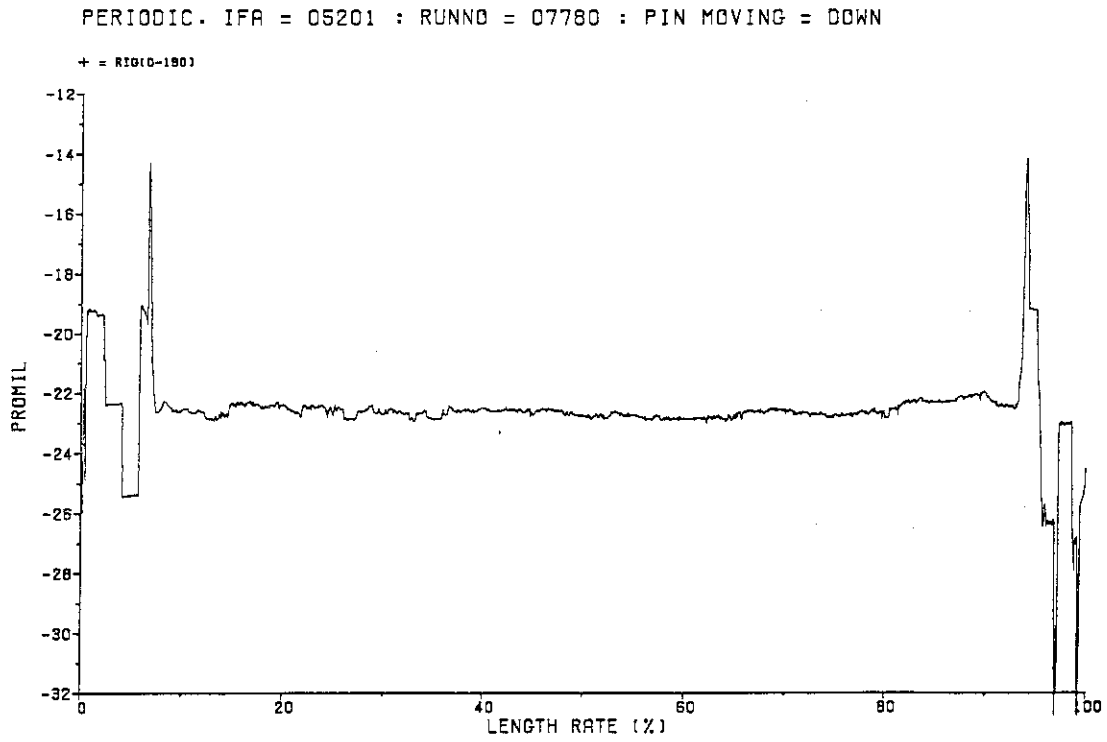


Fig. A.29 Diameter profile at run 7780 (0° - 180°).

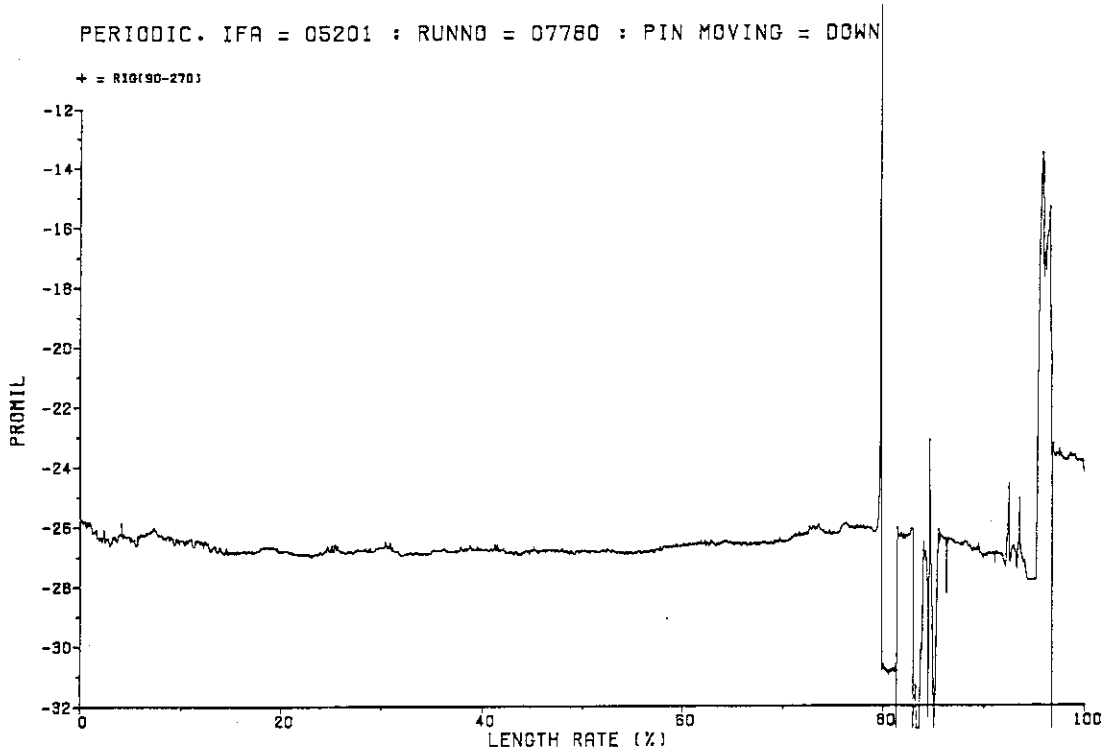


Fig. A.30 Diameter profile at run 7780 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07782 : PIN MOVING = DOWN

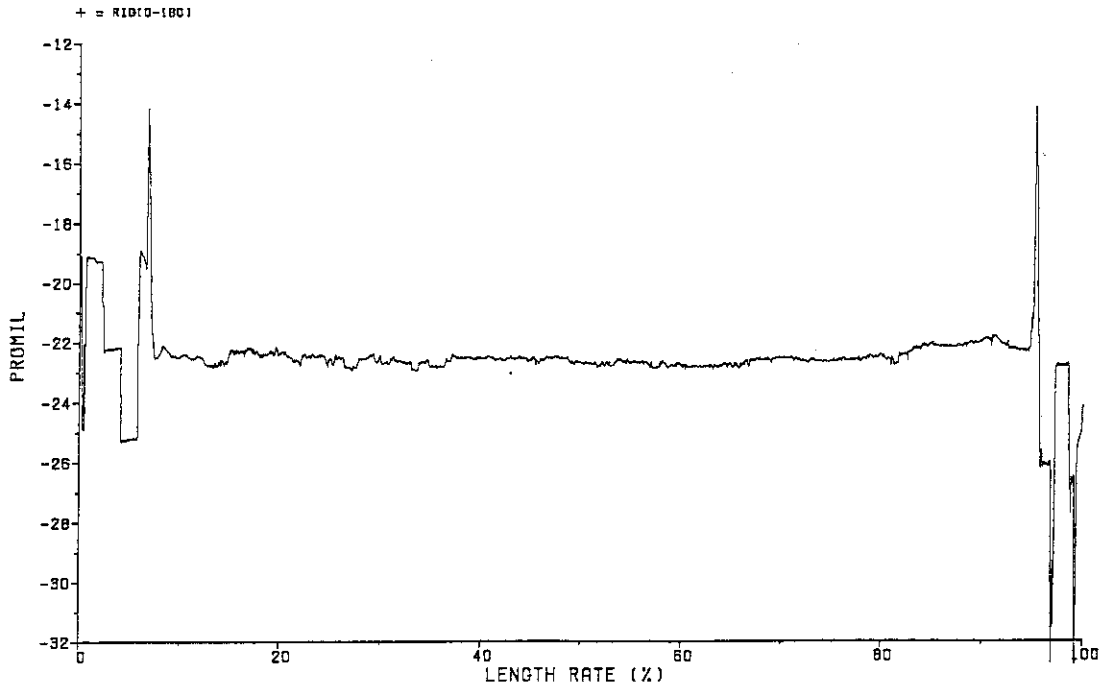


Fig. A.31 Diameter profile at run 7782 (0° - 180°).

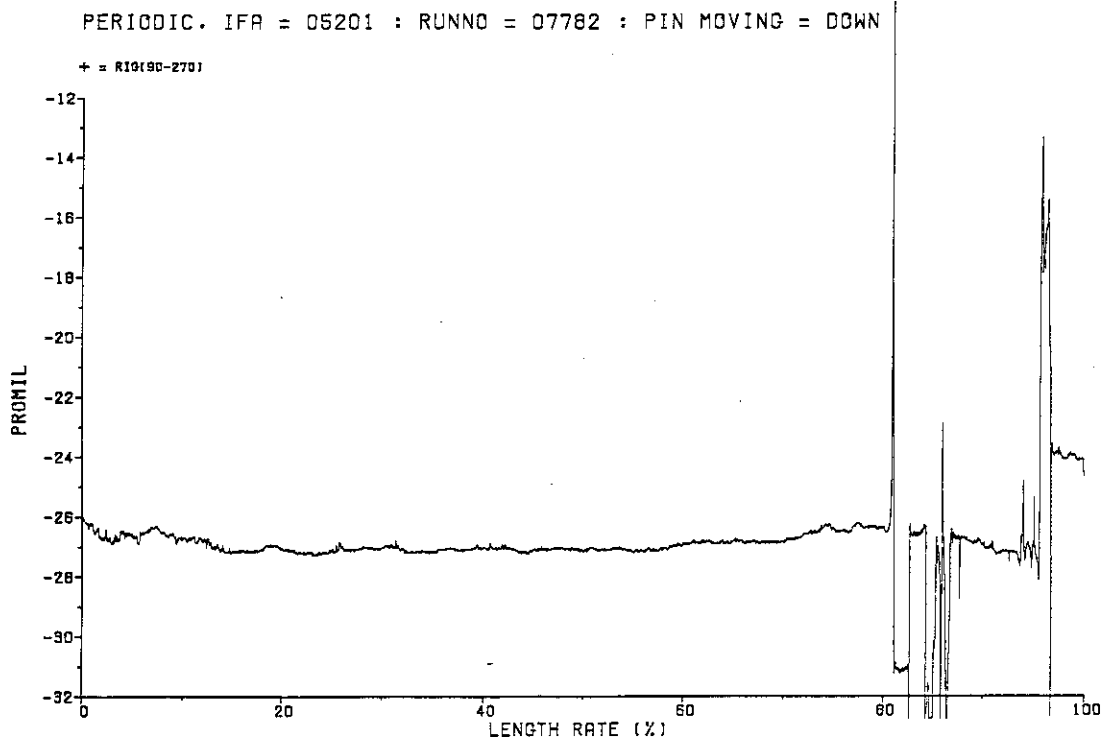


Fig. A.32 Diameter profile at run 7782 (90° - 270°).

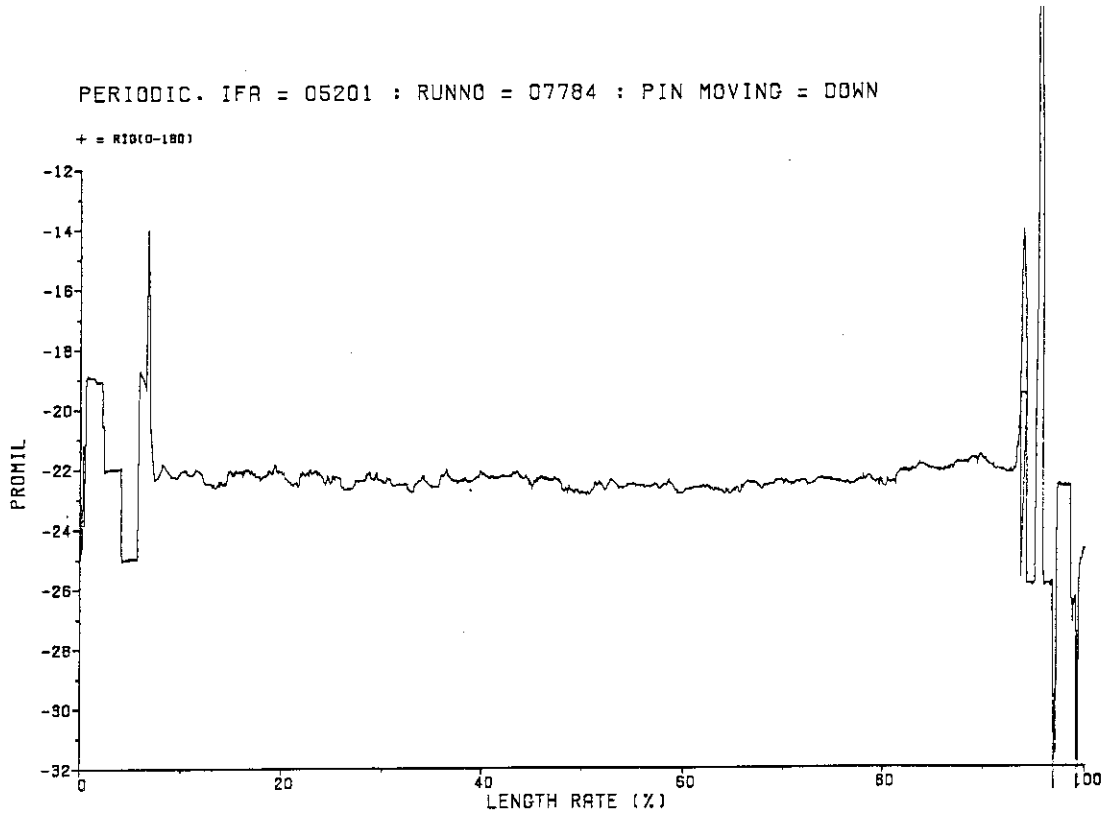


Fig. A.33 Diameter profile at run 7784 (0° - 180°).

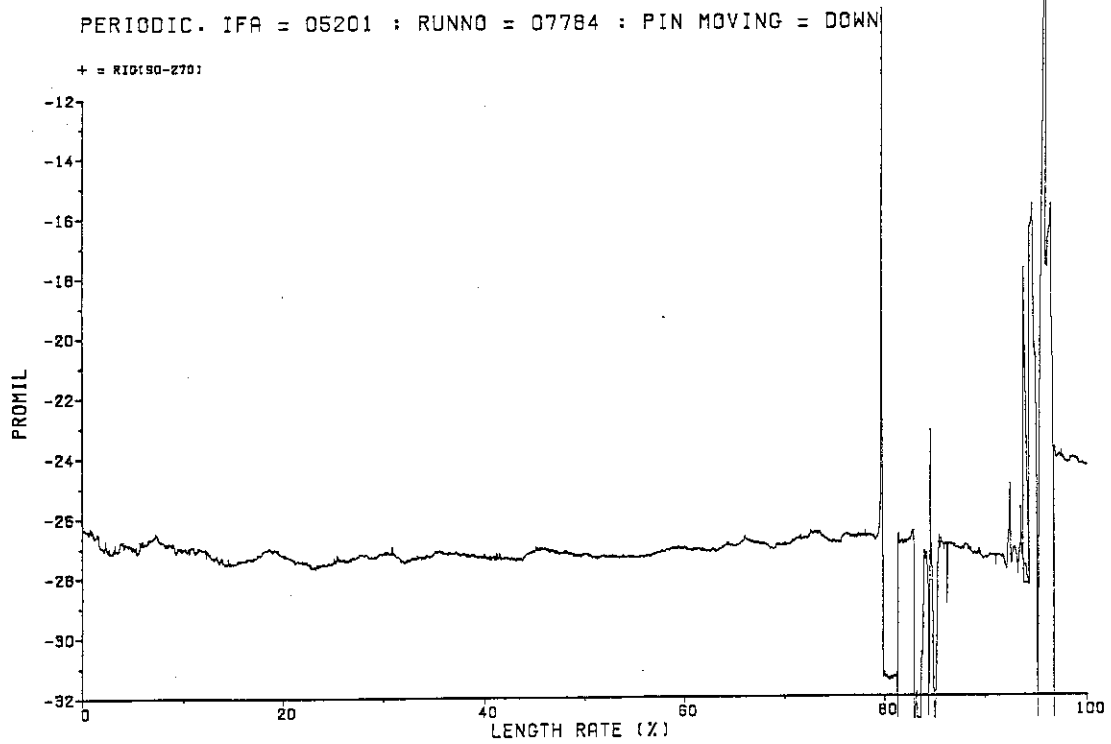


Fig. A.34 Diameter profile at run 7784 (90° - 270°).

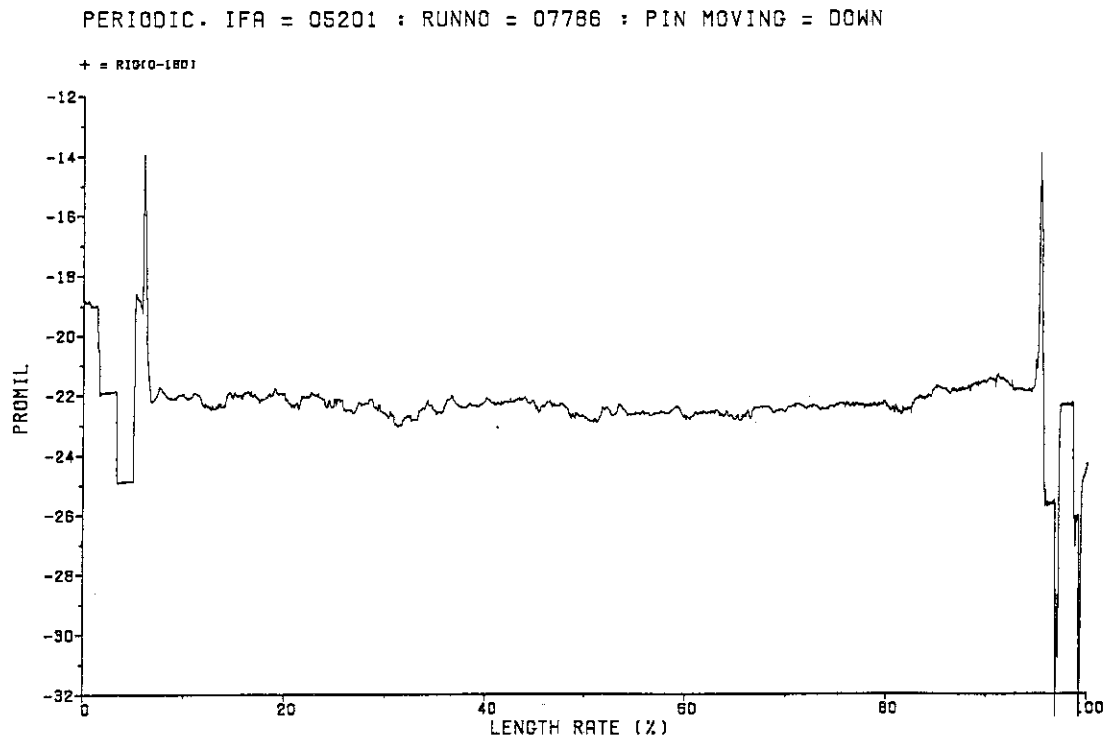


Fig. A.35 Diameter profile at run 7786 (0° - 180°).

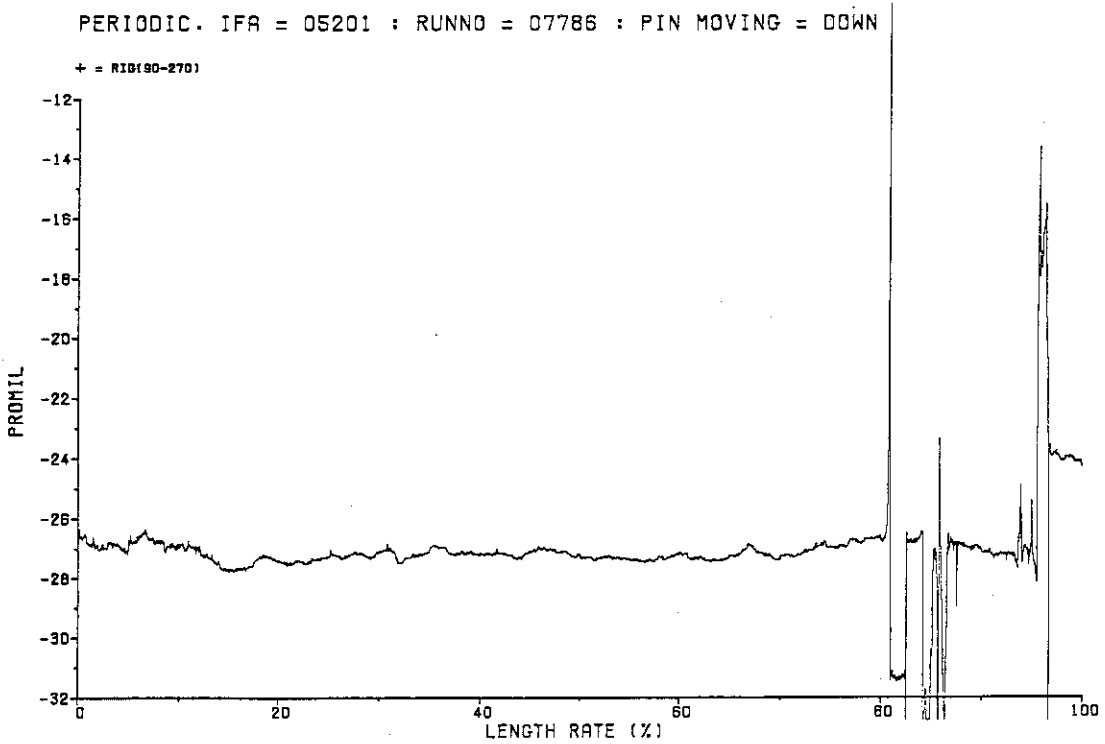


Fig. A.36 Diameter profile at run 7786 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07788 : PIN MOVING = DOWN

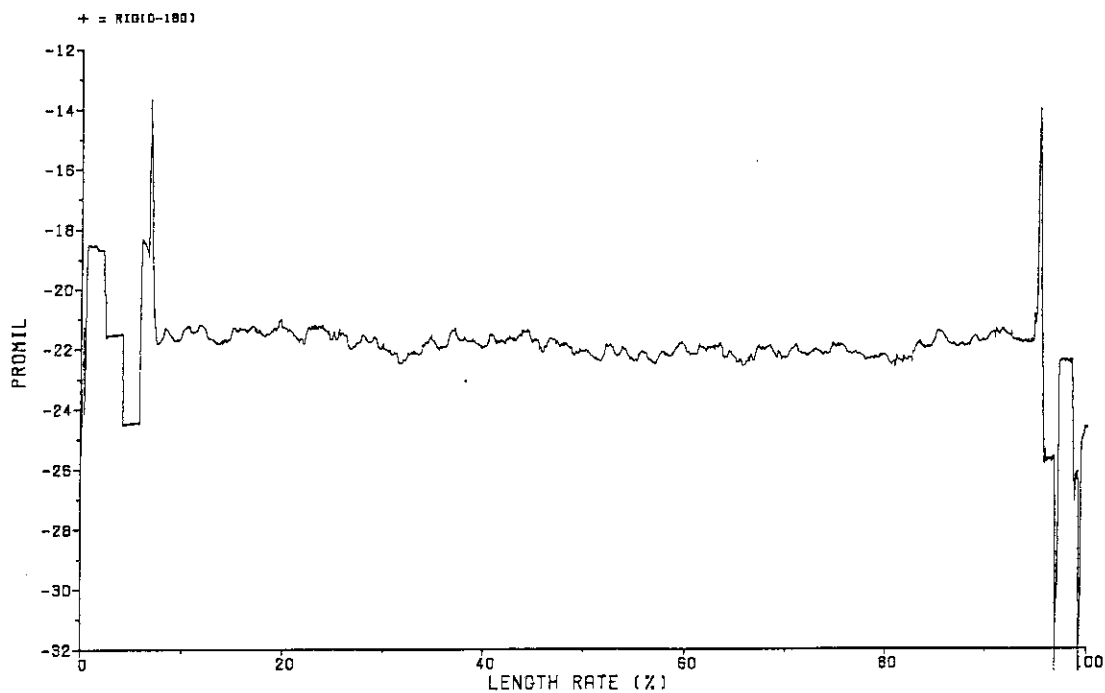


Fig. A.37 Diameter profile at run 7788 (0° - 180°).

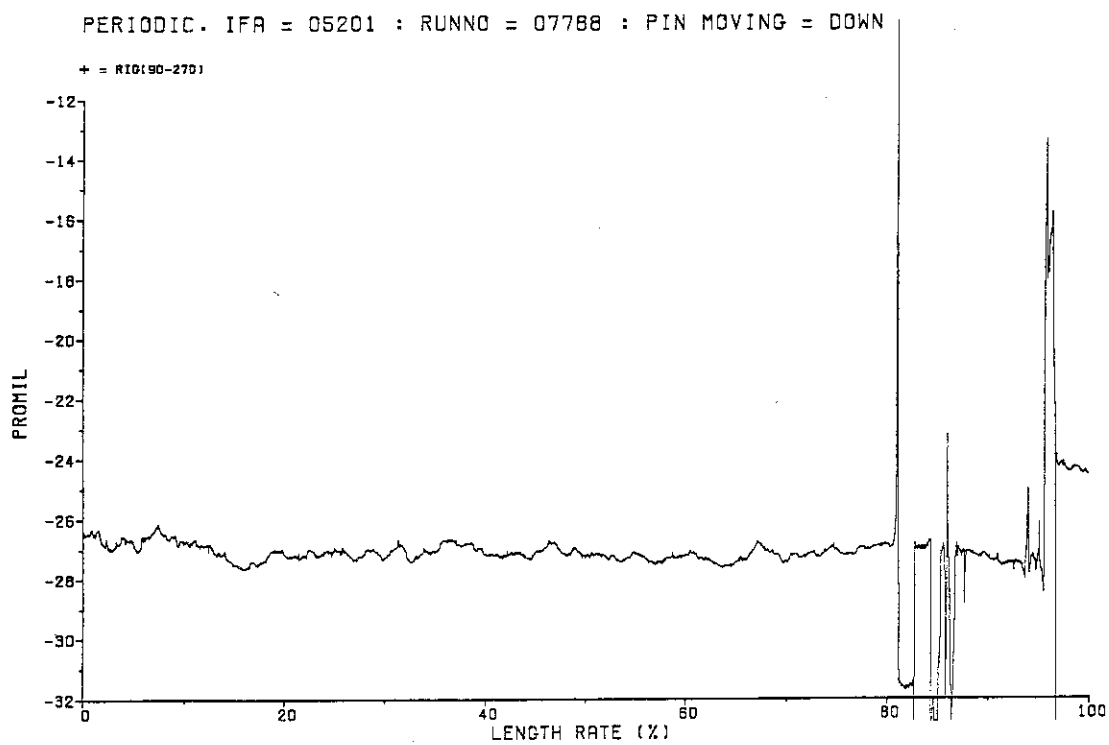


Fig. A.38 Diameter profile at run 7788 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07790 : PIN MOVING = DOWN

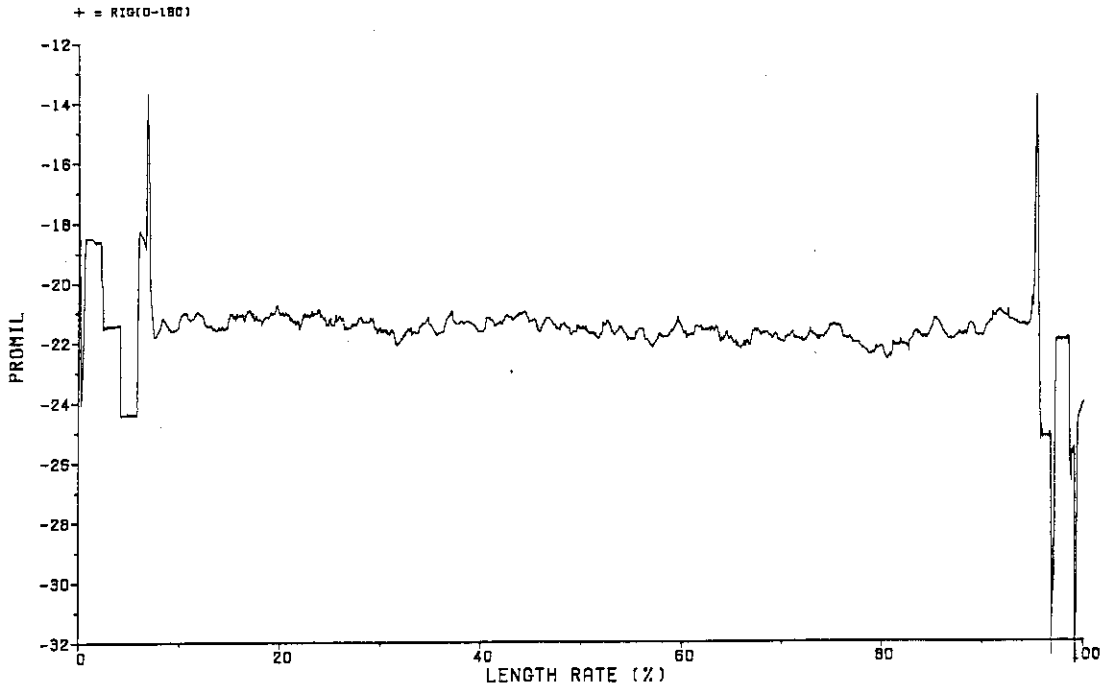


Fig. A.39 Diameter profile at run 7790 (0° - 180°).

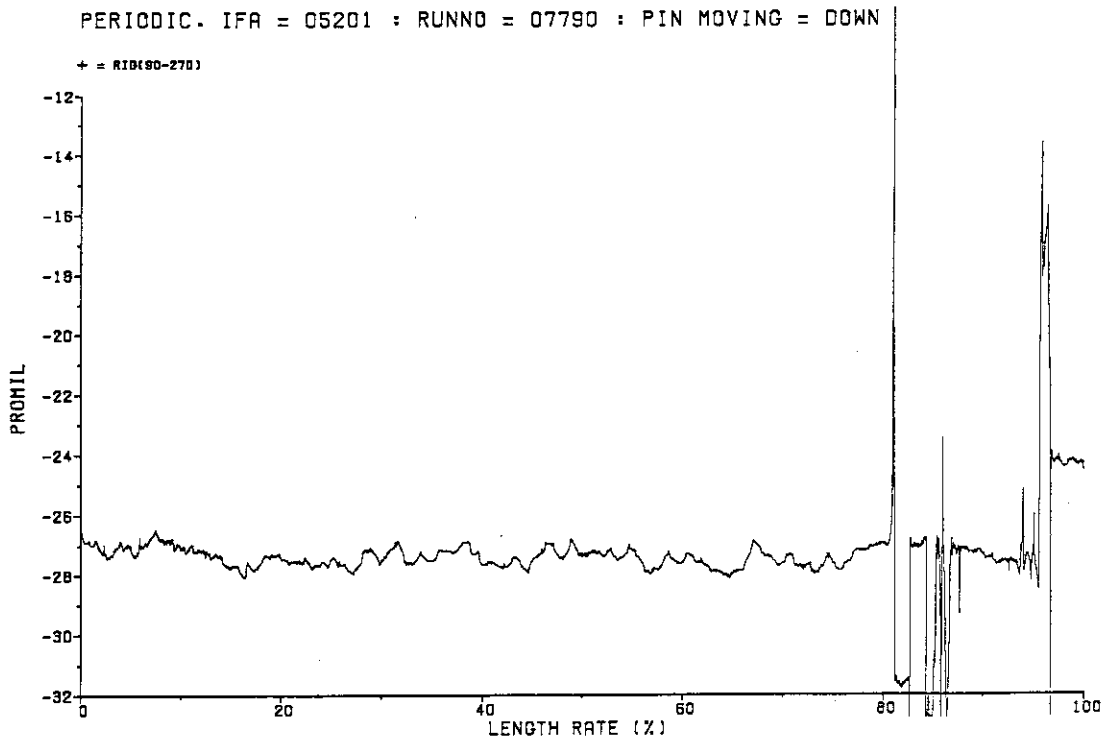


Fig. A.40 Diameter profile at run 7790 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07792 : PIN MOVING = DOWN

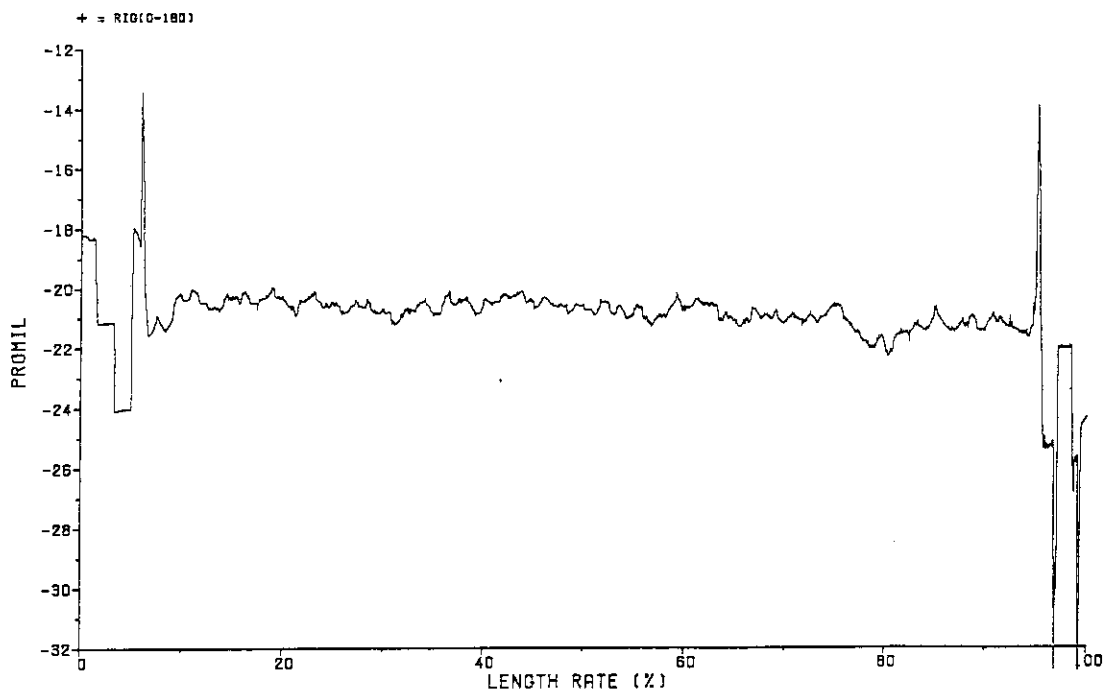


Fig. A.41 Diameter profile at run 7792 (0° - 180°).

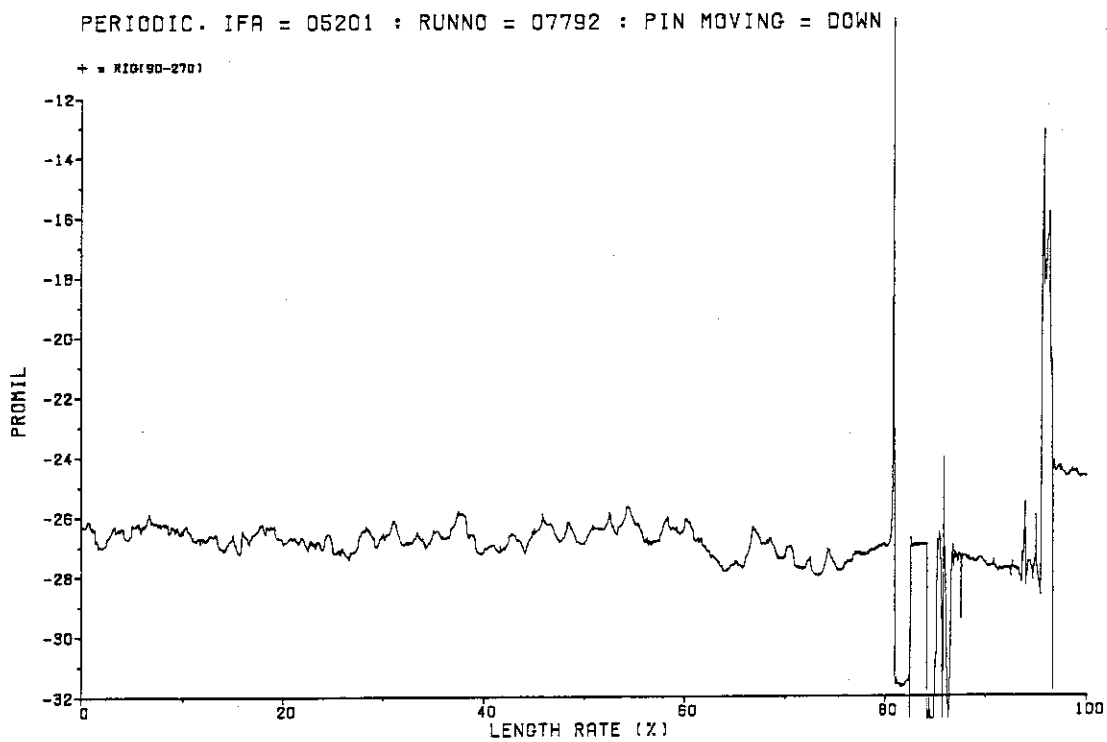


Fig. A.42 Diameter profile at run 7792 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07794 : PIN MOVING = DOWN

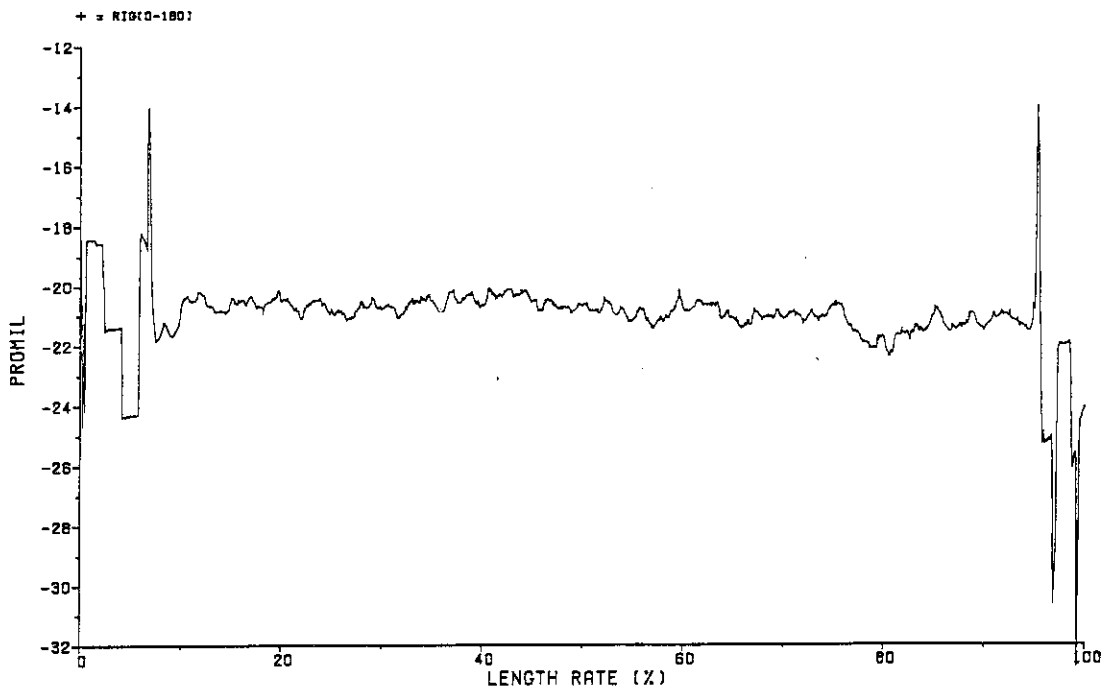


Fig. A.43 Diameter profile at run 7794 (0° - 180°).

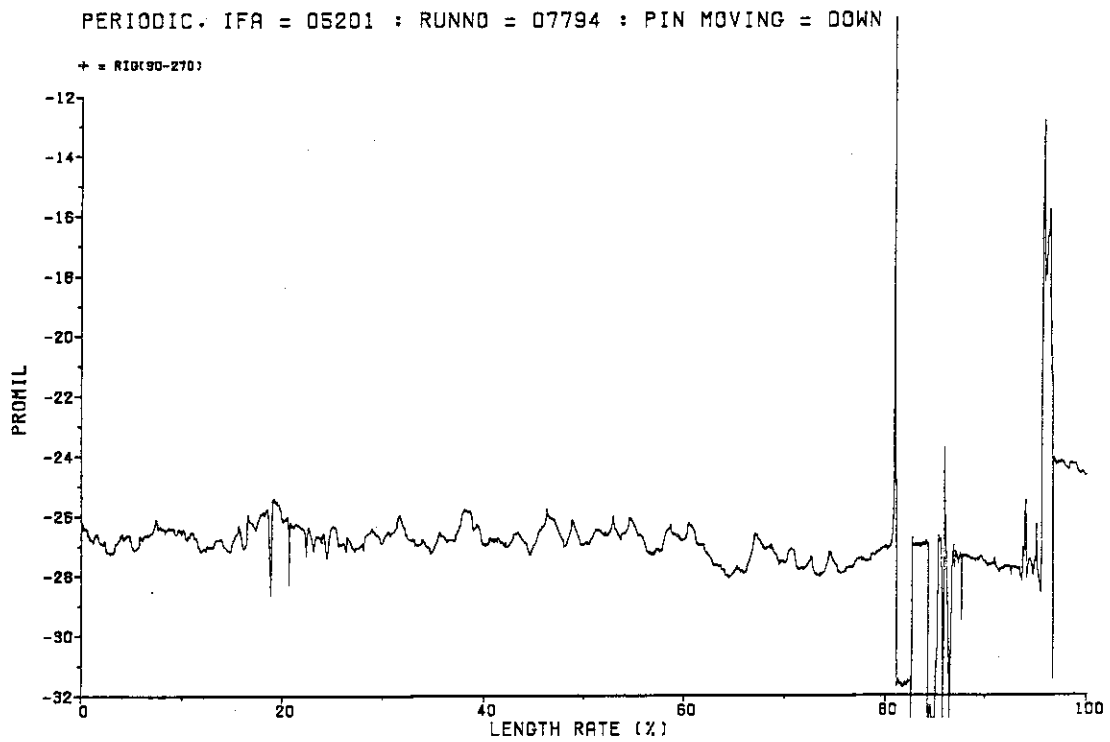


Fig. A.44 Diameter profile at run 7794 (90° - 270°).

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 07796 : PIN MOVING = DOWN

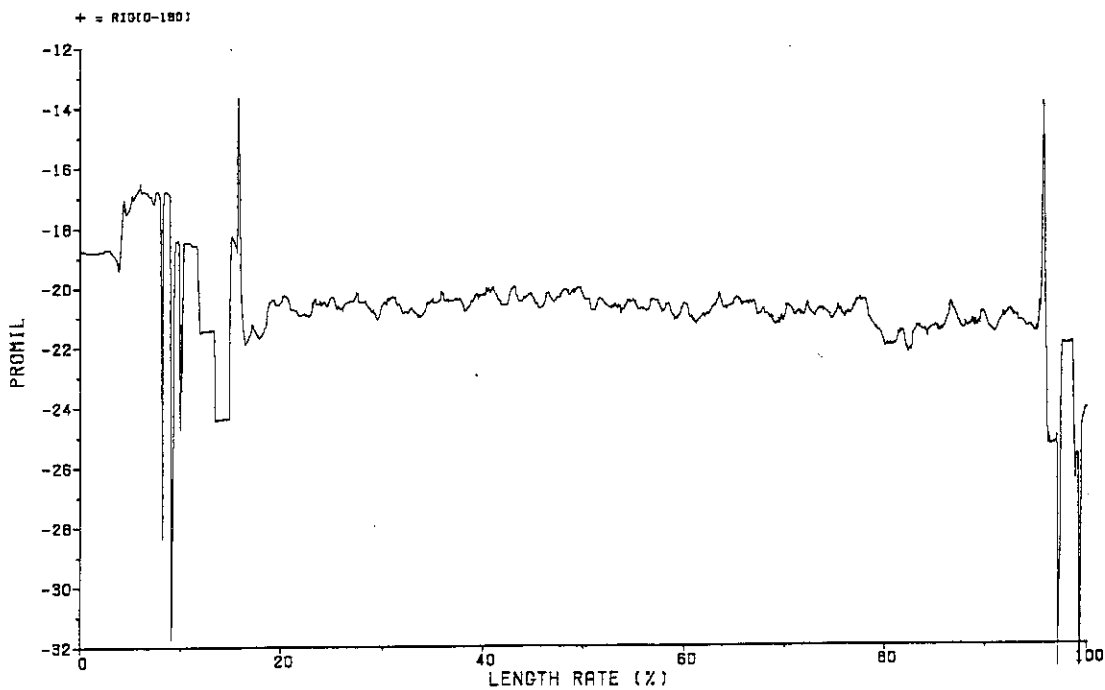


Fig. A.45 Diameter profile at run 7796 (0° - 180°).

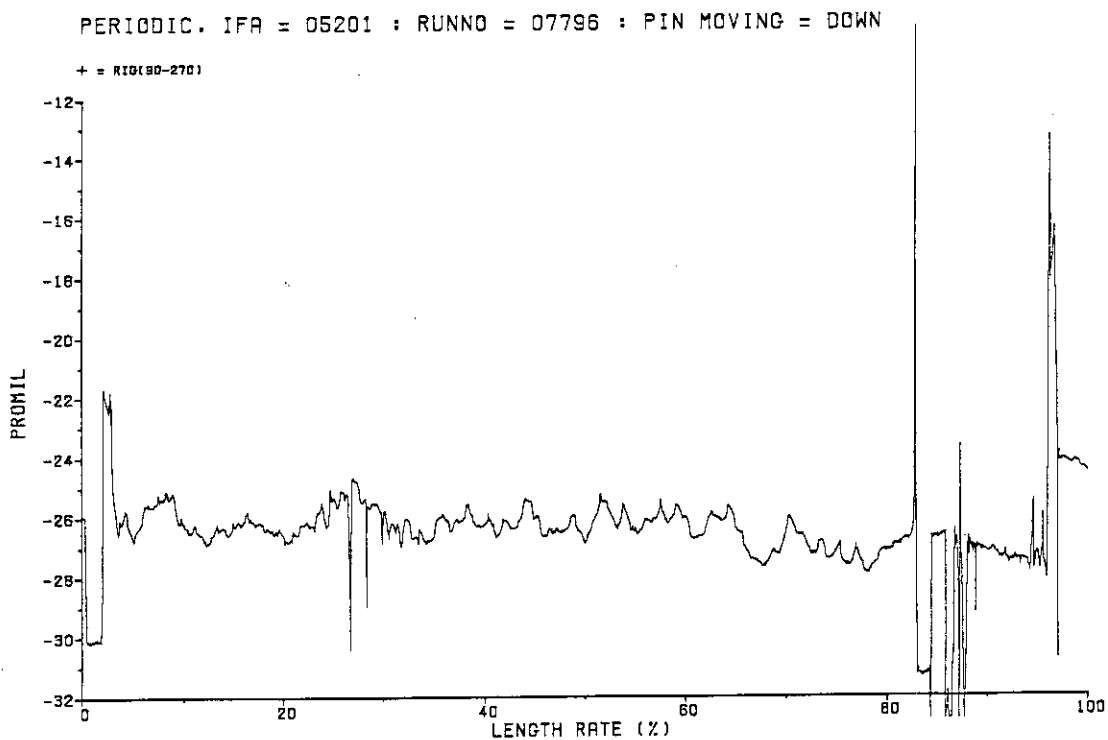


Fig. A.46 Diameter profile at run 7796 (90° - 270°).

PERIODIC. IFR = 05201 : RUNNO = 07798 : PIN MOVING = DOWN

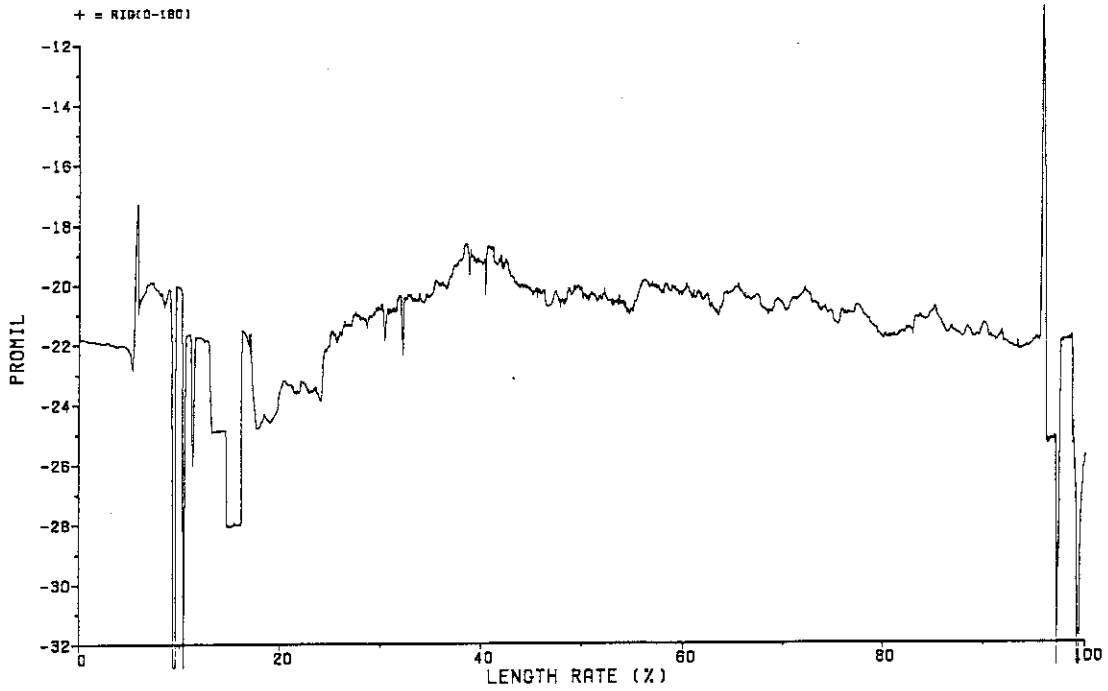


Fig. A.47 Diameter profile at run 7798 (0° - 180°).

PERIODIC. IFR = 05201 : RUNNO = 07798 : PIN MOVING = DOWN

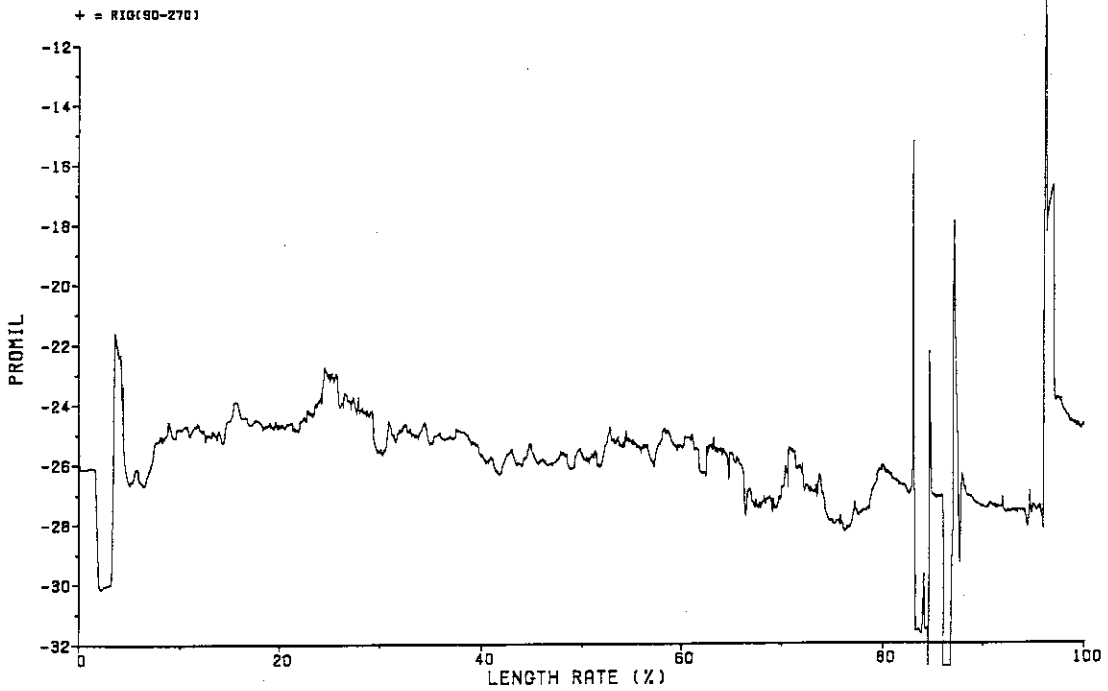


Fig. A.48 Diameter profile at run 7798 (90° - 270°).

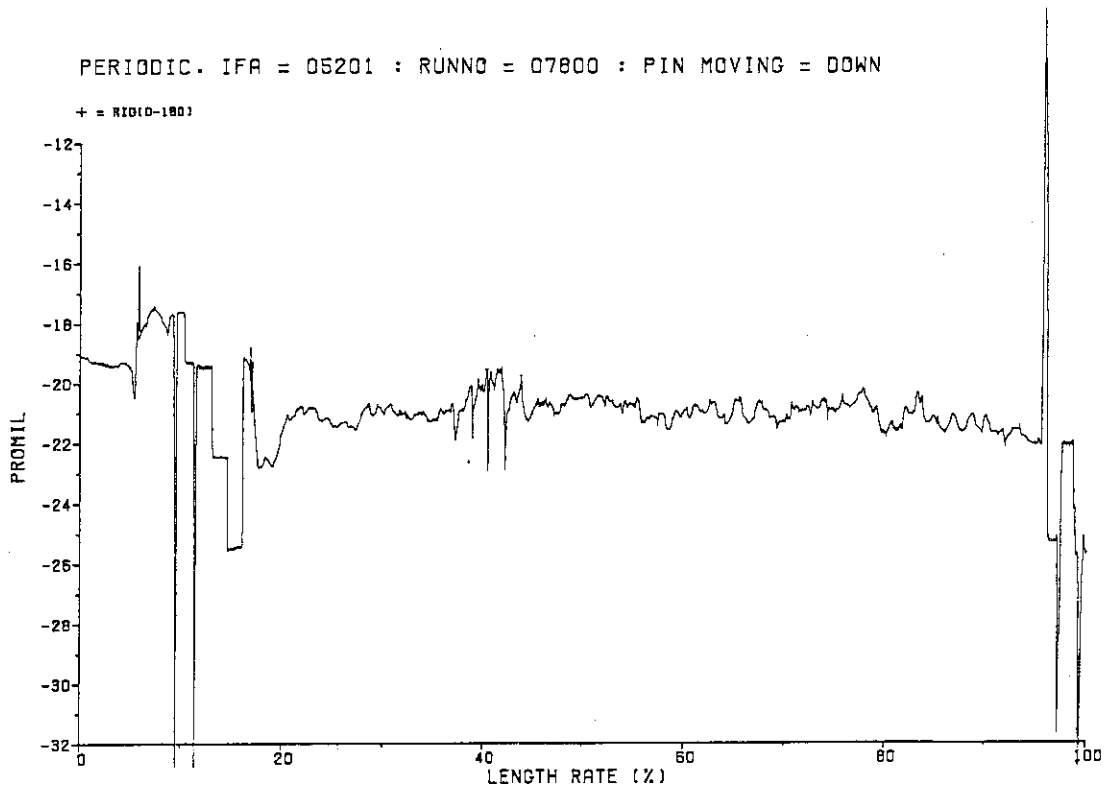


Fig. A.49 Diameter profile at run 7800 (0° - 180°).

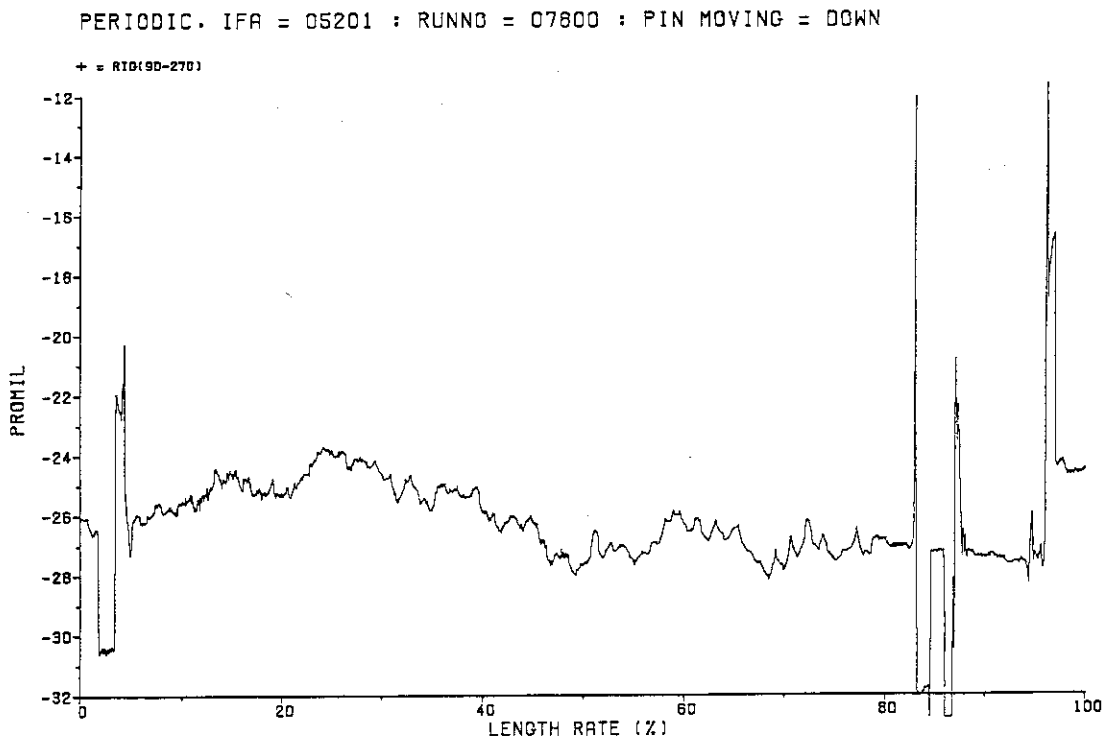


Fig. A.50 Diameter profile at run 7800 (90° - 270°).

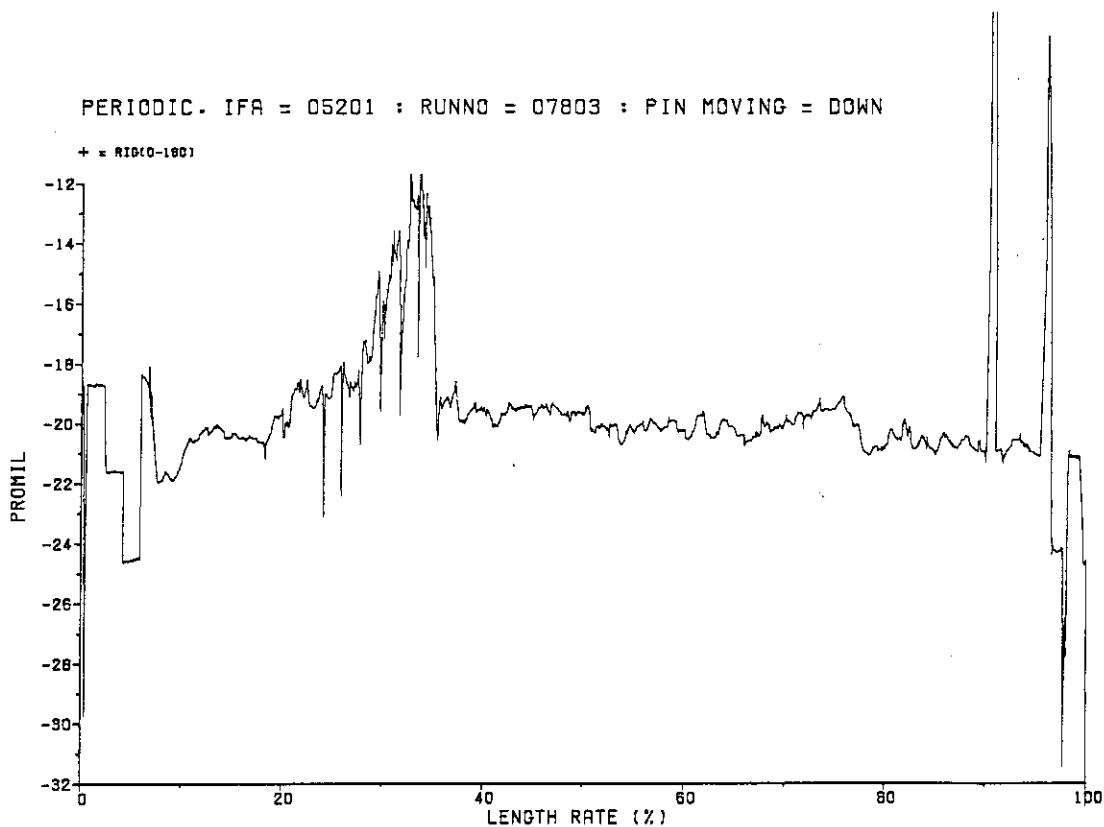


Fig. A.51 Diameter profile at run 7803 (0° - 180°).

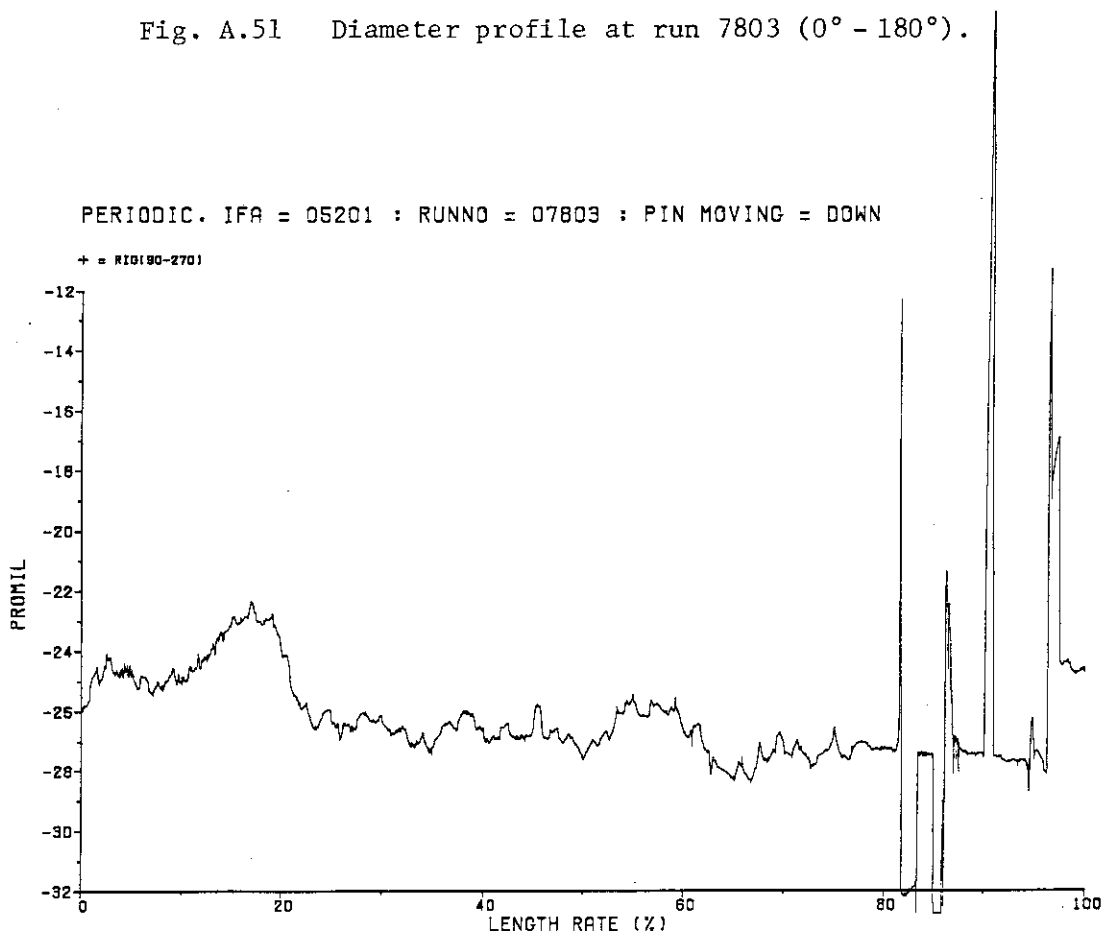


Fig. A.52 Diameter profile at run 7803 (90° - 270°).

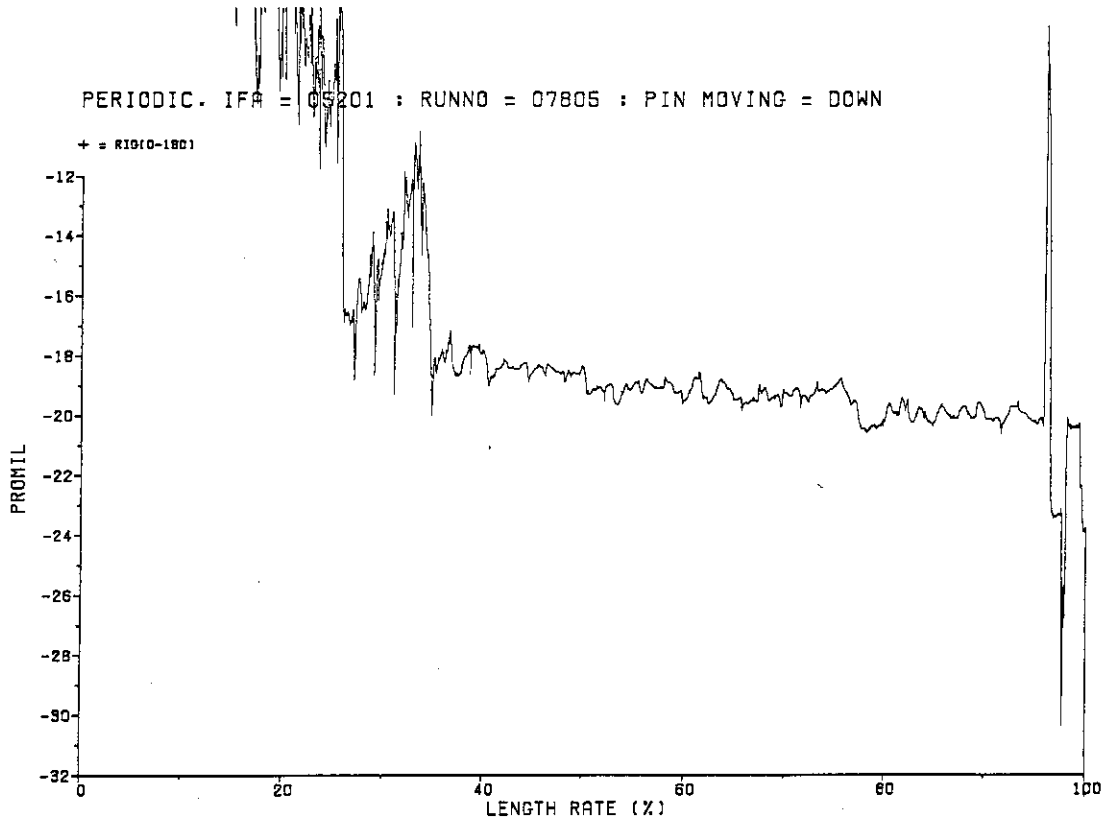


Fig. A.53 Diameter profile at run 7805 (0° - 180°).

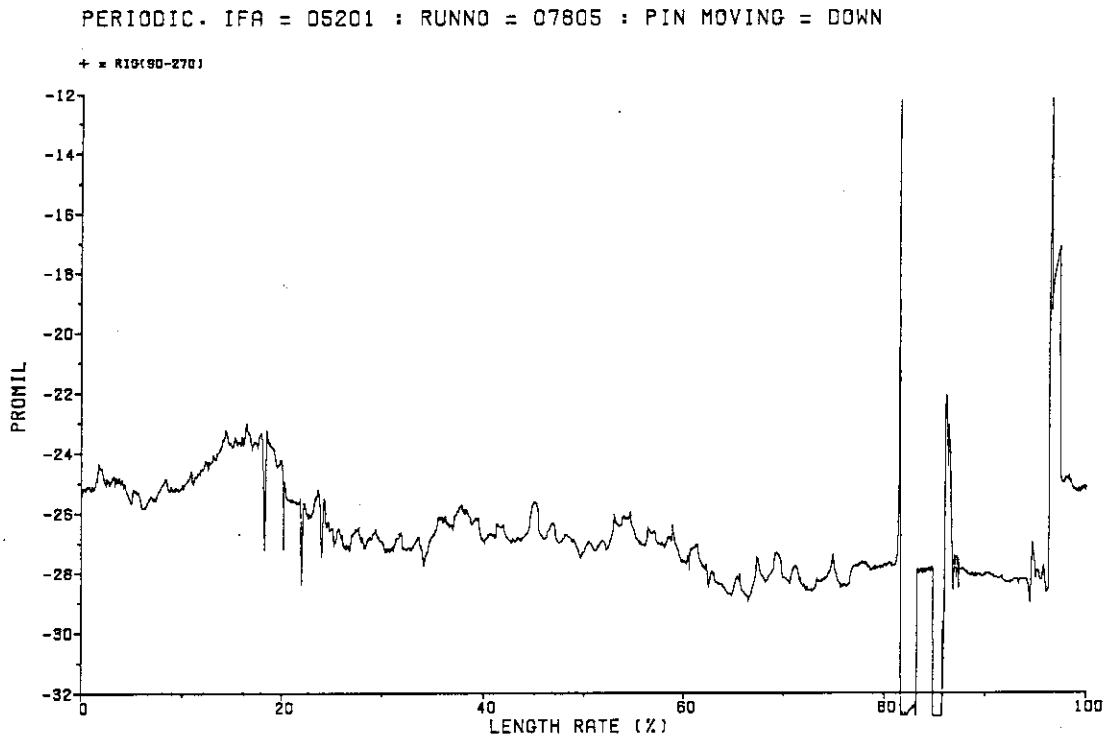


Fig. A.54 Diameter profile at run 7805 (90° - 270°).

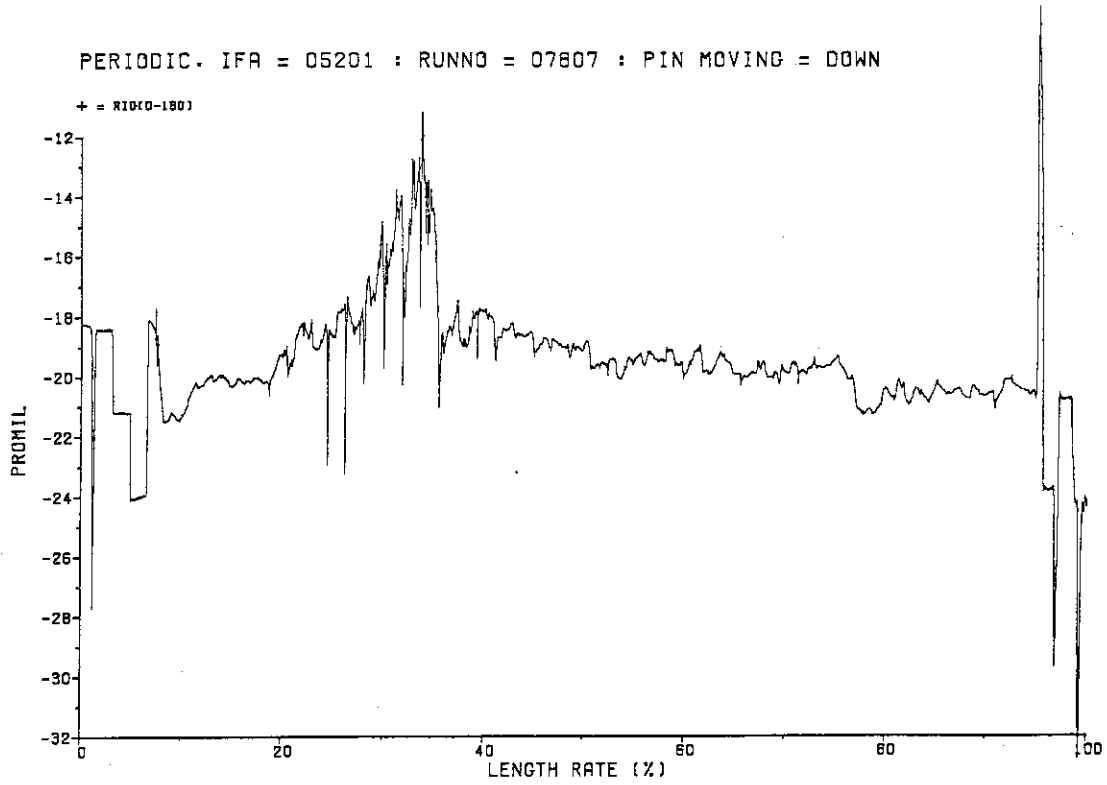


Fig. A.55 Diameter profile at run 7807 (0° - 180°).

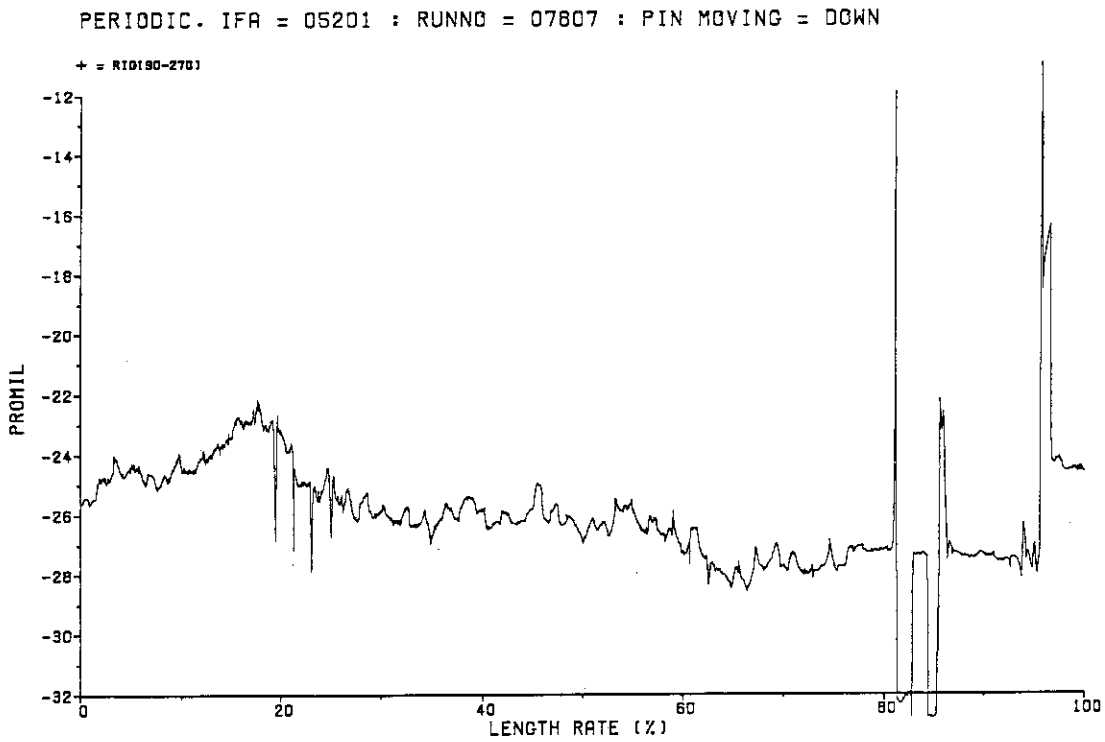


Fig. A.56 Diameter profile at run 7807 (90° - 270°).

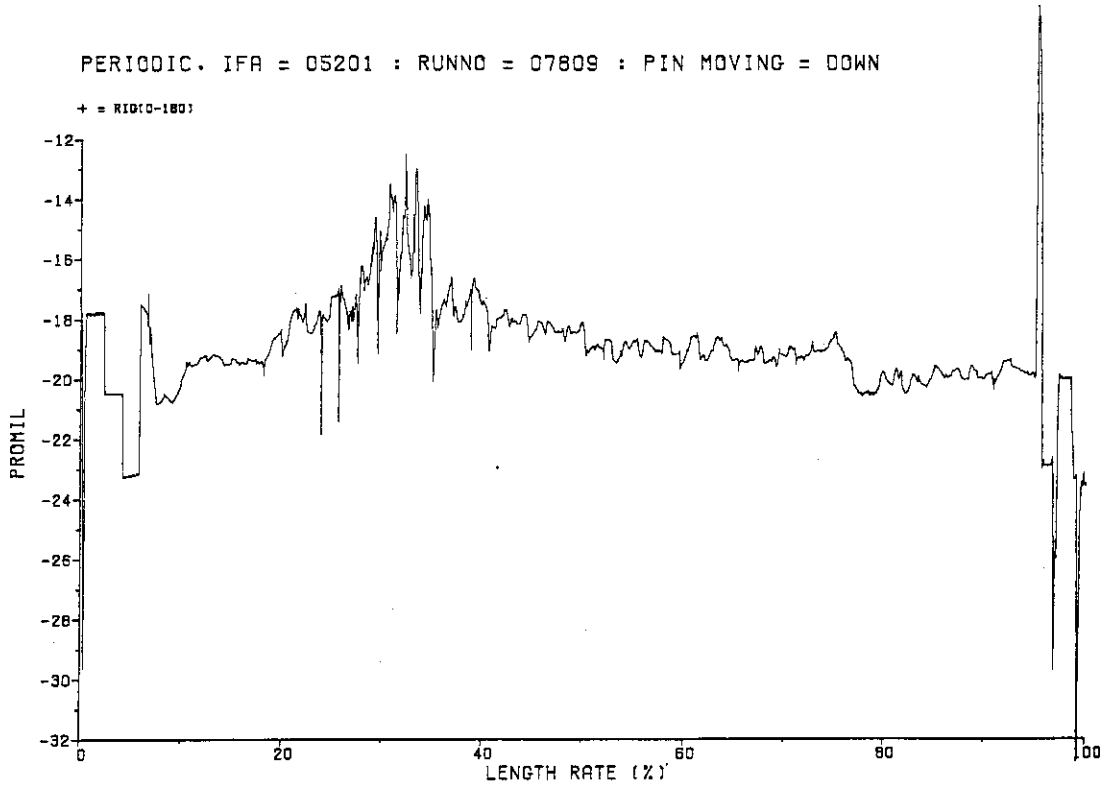


Fig. A.57 Diameter profile at run 7809 (0° - 180°).

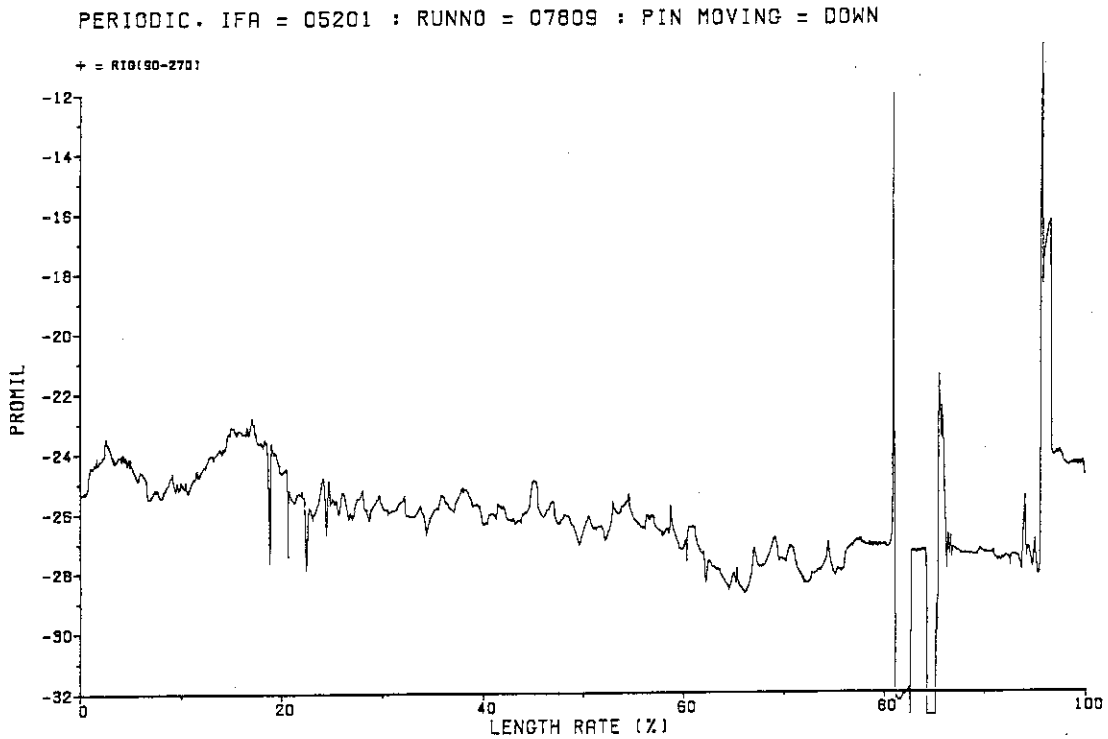


Fig. A.58 Diameter profile at run 7809 (90° - 270°).

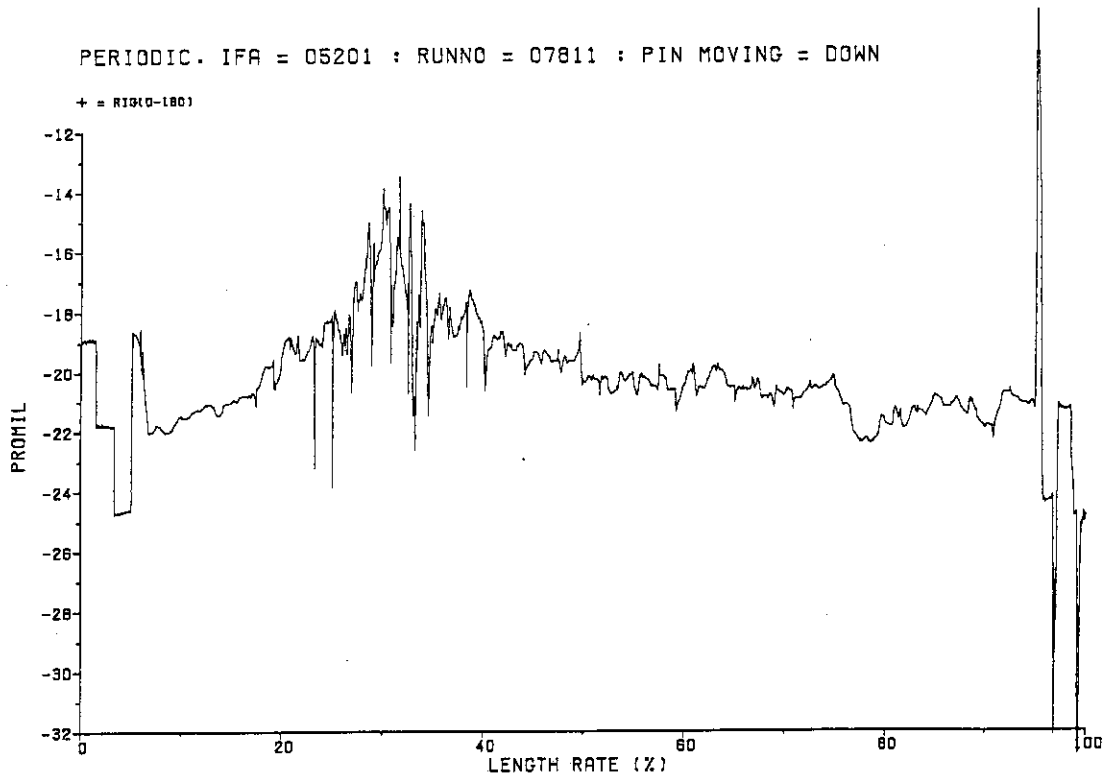


Fig. A.59 Diameter profile at run 7811 (0° - 180°).

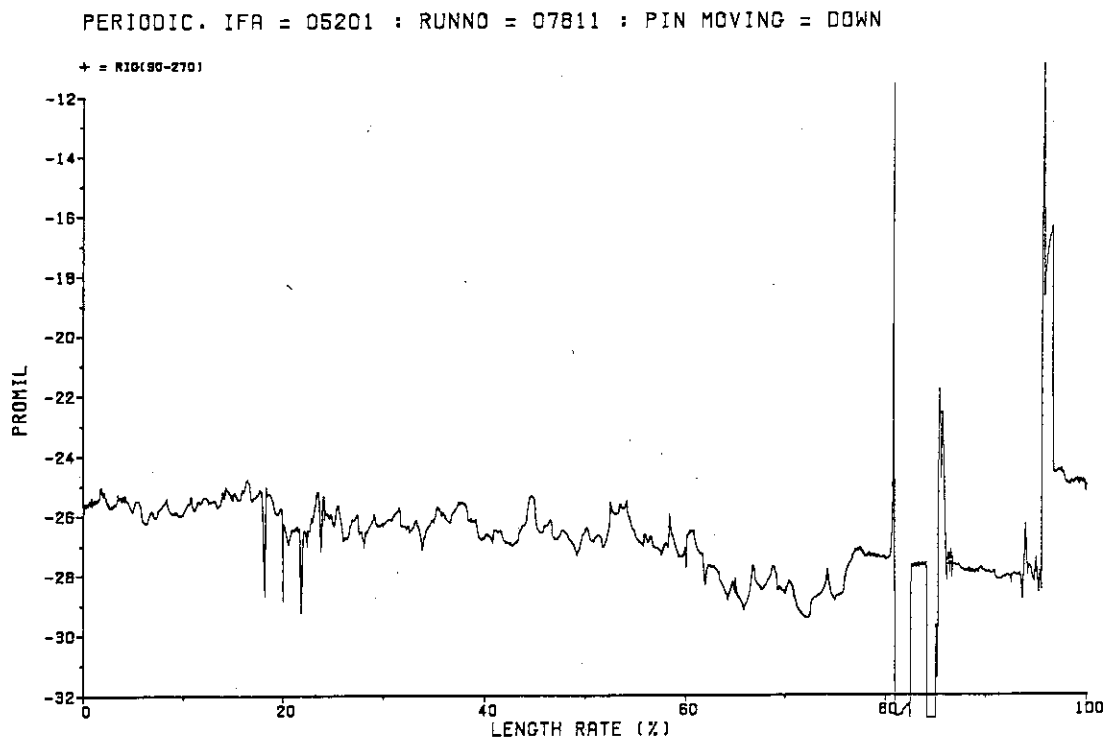


Fig. A.60 Diameter profile at run 7811 (90° - 270°).

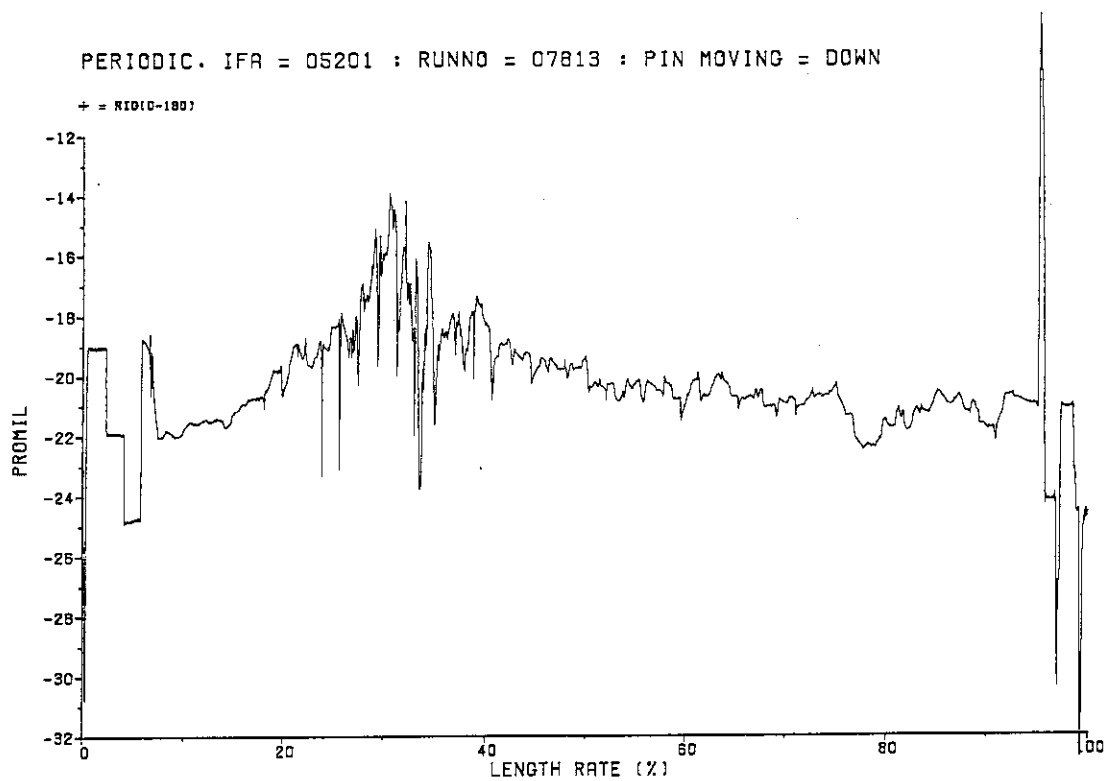


Fig. A.61 Diameter profile at run 7813 (0° - 180°).

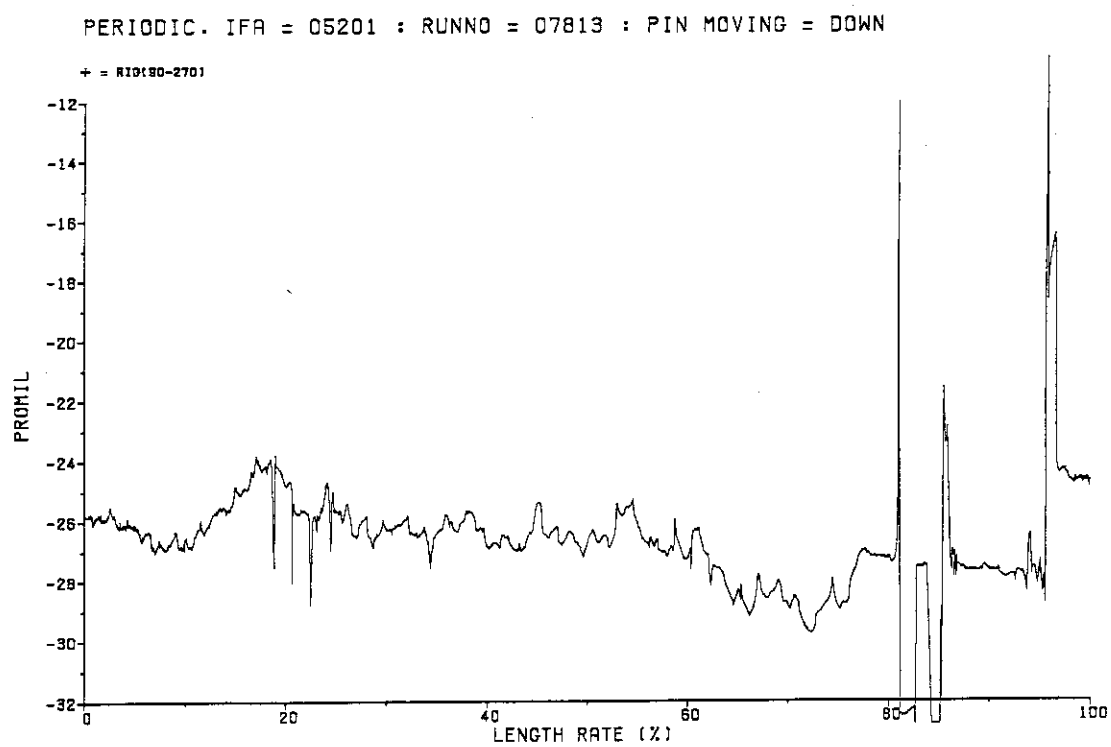


Fig. A.62 Diameter profile at run 7813 (90° - 270°).

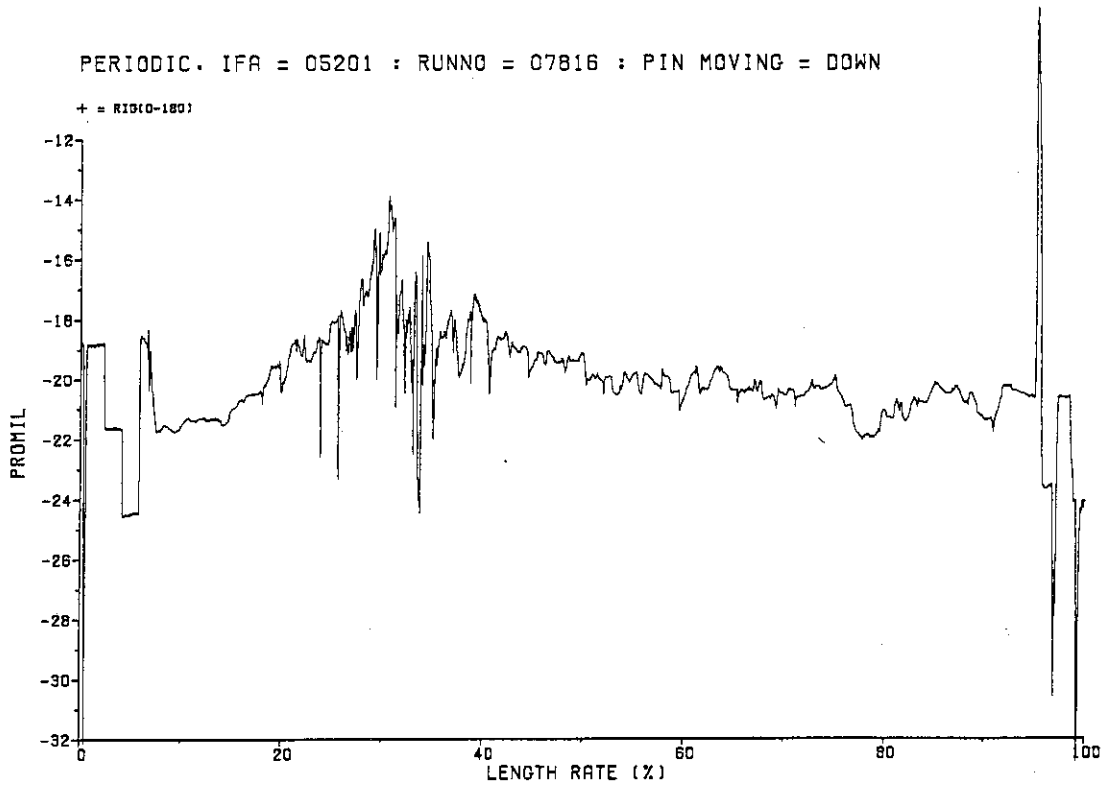


Fig. A.63 Diameter profile at run 7816 (0° - 180°).

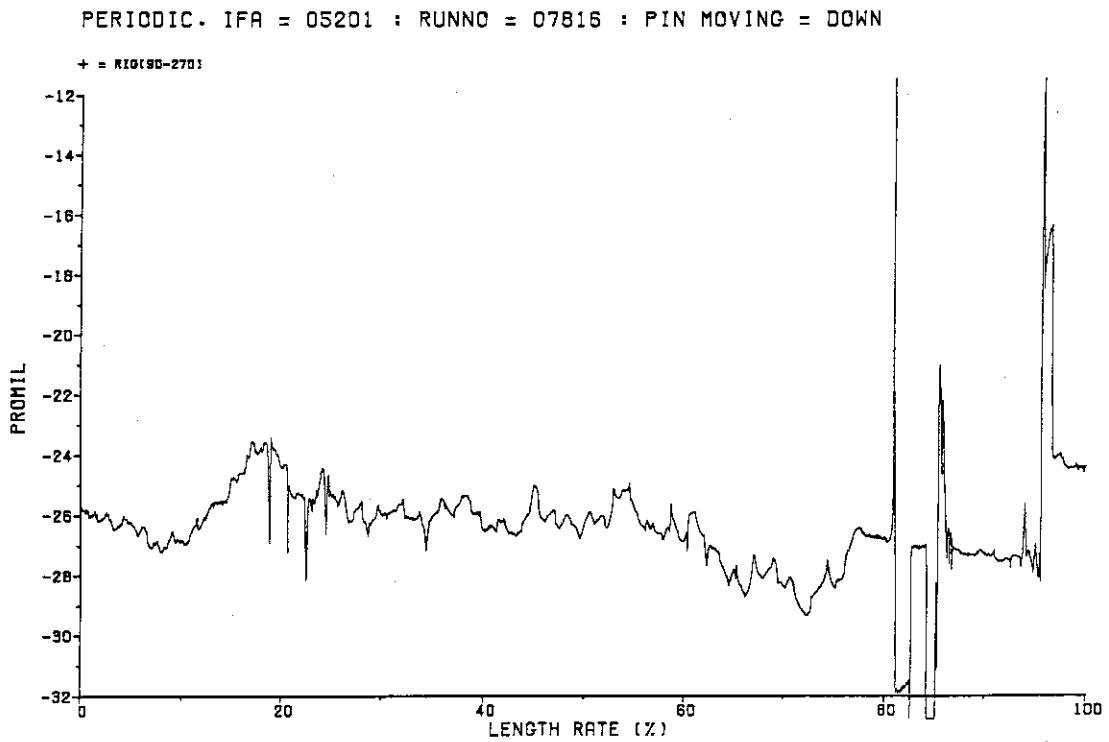


Fig. A.64 Diameter profile at run 7816 (90° - 270°).

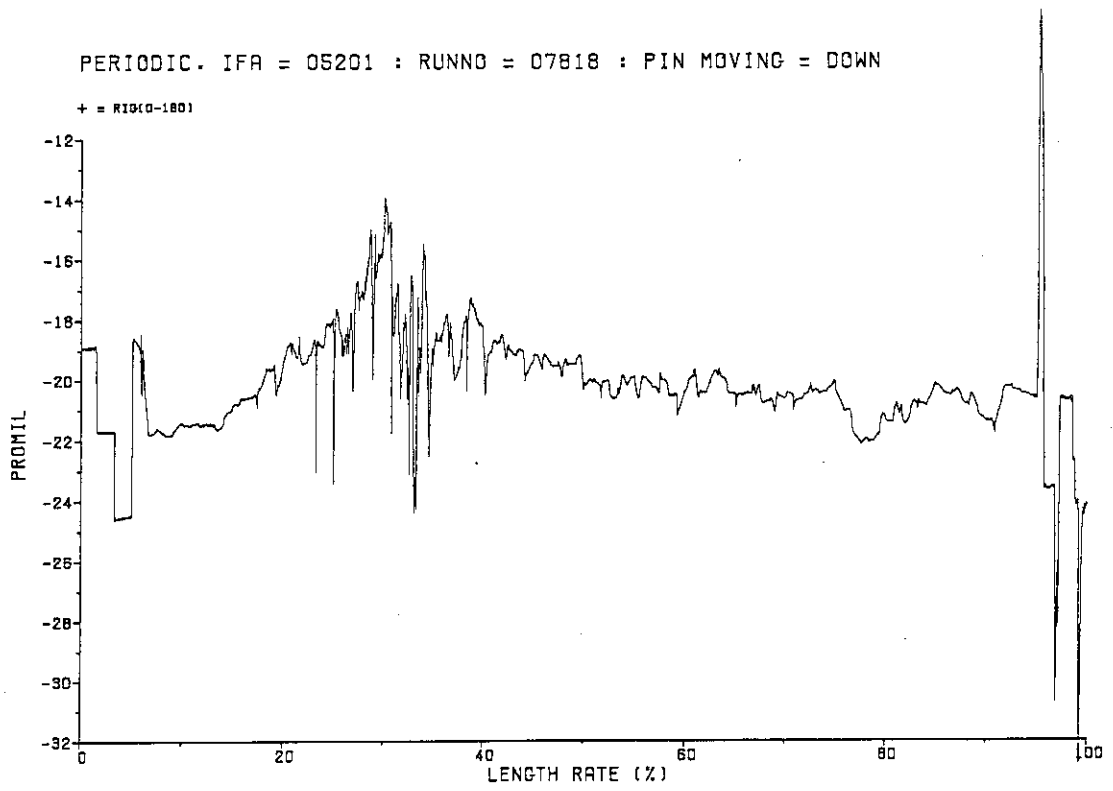


Fig. A.65 Diameter profile at run 7818 (0° - 180°).

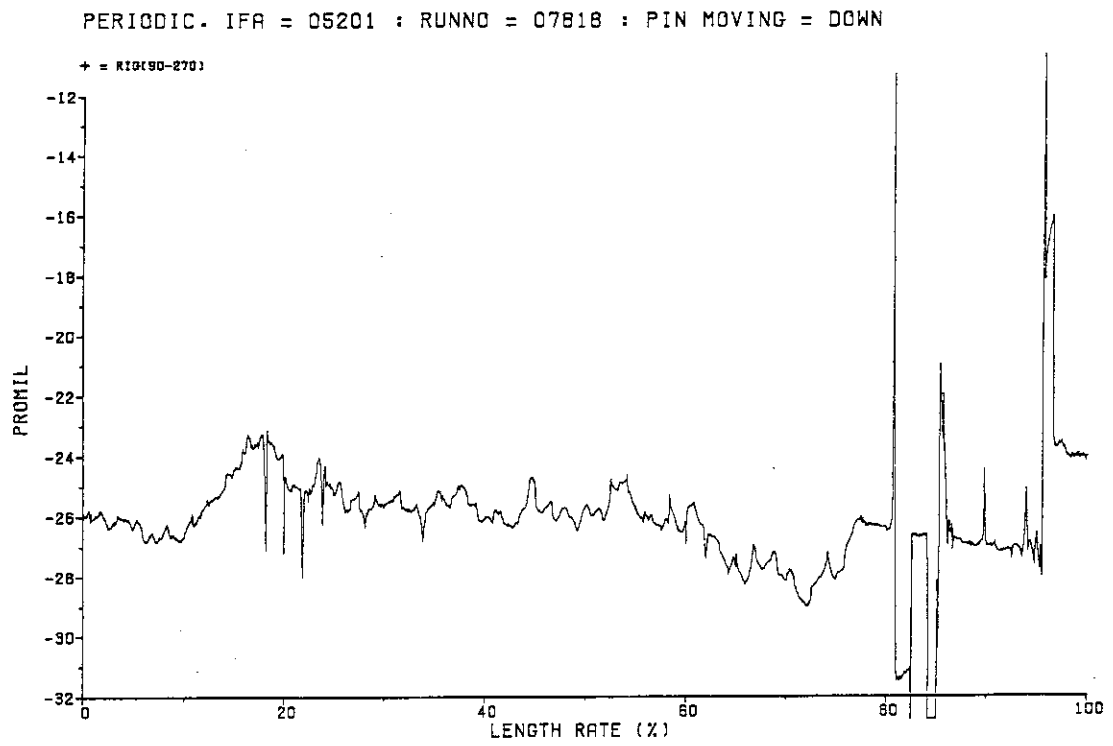


Fig. A.66 Diameter profile at run 7818 (90° - 270°).

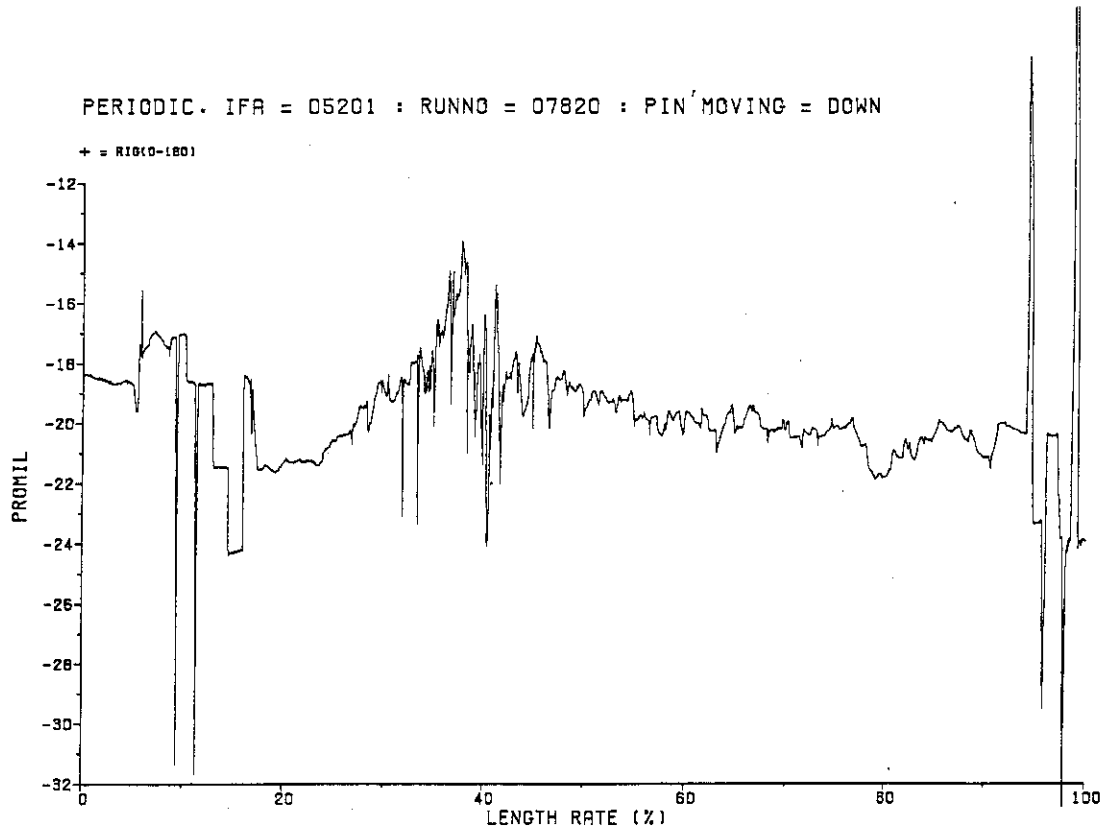


Fig. A.67 Diameter profile at run 7820 (0° - 180°).

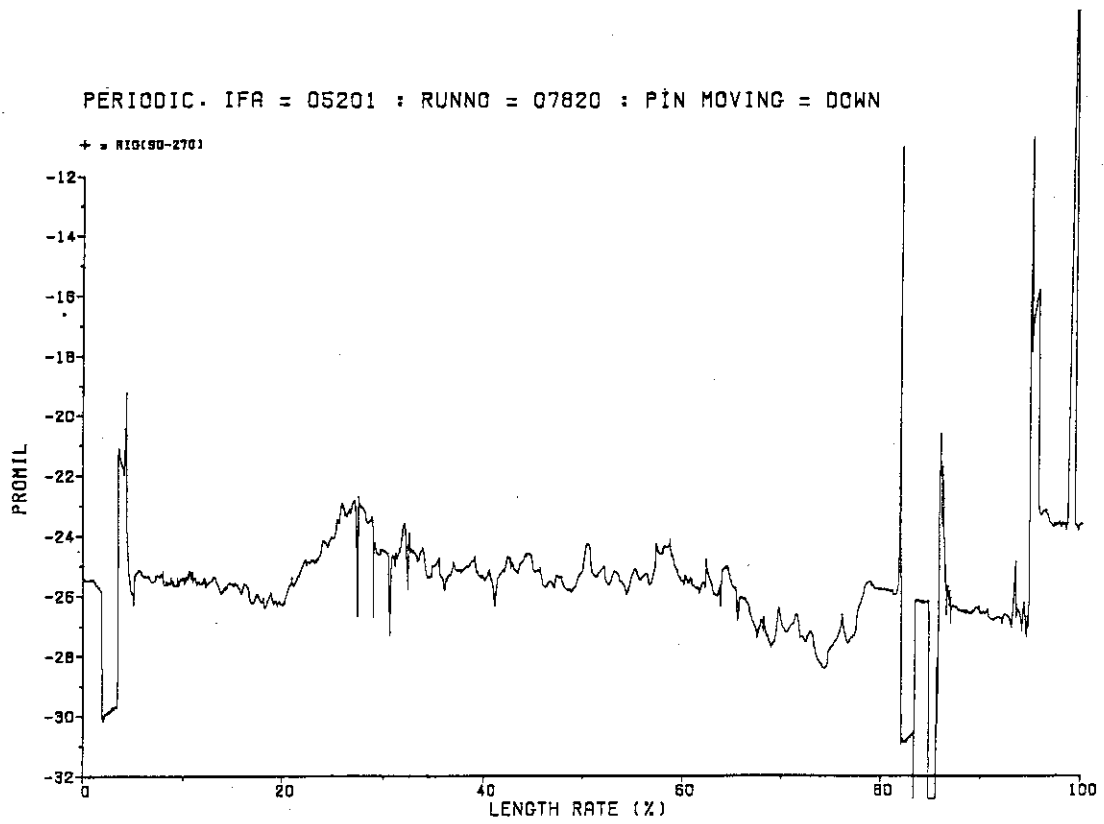


Fig. A.68 Diameter profile at run 7820 (90° - 270°).