

JAERI - M
85-197

ハルデン出力急昇実験中のBWR型燃料棒
に生じた異常な直径増加と陥没

1985年12月

柳澤和章

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合せは、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, Tokaimura, 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 燐高野高速印刷

ハルデン出力急昇実験中のBWR型燃料棒に
生じた異常な直径増加と陥没

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)

ハルデン炉内に設けたBWR型軽水ループにて、出力急昇実験を行ったところ、2本の燃料棒に予想外のペレット-被覆相互作用（PCI）ふるまいが観られた。

1つは、14MWd/kgUまで予備照射した直径ギャップ0.10mmの燃料棒に於けるもので、高線出力での直径が、殆んど軸方向の伸びを伴なわずに、著しく増加したふるまいである。

別の1つは、8MWd/kgUまで予備照射した直径ギャップ0.23mmの燃料棒に於けるもので、出力急昇後の定出力保持中に行った直径測定により、直径の大きな陥没が生じたふるまいである。

計装機器からの炉内データや照射後試験からの評価データを用い、それらの原因究明を行った。その結果、それら予想外のPCIふるまいの主たる原因是、出力急昇リグ内のトランスフォーマー取付け位置で生じた、燃料棒の冷却不足にあることが判明した。燃料被覆は局所的な冷却材の不足によって高温となったのち軟化し、冷却材外圧によって陥没を生じたと考えられる。

JAERI-M 85-197

FUEL ROD FAILURE DUE TO MARKED DIAMETRAL EXPANSION AND FUEL ROD COLLAPSE OCCURRED IN THE HBWR POWER RAMP EXPERIMENT

Kazuaki YANAGISAWA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 8, 1985)

In the power ramp experiment with the BWR type light water loop at the HBWR, the two pre-irradiated fuel rods caused an unexpected pellet-cladding interaction (PCI).

One occurred in the fuel rod with small gap of 0.10 mm, which was pre-irradiated up to the burn-up of 14 MWd/kgU. At high power, the diameter of the rod was increased markedly without accompanying significant axial elongation.

The other occurred in the rod with a large gap of 0.23 mm, which was pre-irradiated up to the burn-up of 8 MWd/kgU. The diameter of the rod collapsed during a diameter measurement at the maximum power level.

The causes of those were investigated in the present study by evaluating in-core data obtained from equipped instruments in the experiment.

It was revealed from the investigation that these behaviours were attributed to the local reduction of the coolant flow occurred in the region of a transformer in the ramp rig. The fuel cladding material is seemed to become softened due to temperature increase caused by the local reduction of the coolant flow, and collapsed by the coolant pressure, either locally or wholly depending on the rod diametral gap existed.

Keywords: In-core Failure, Diametral Expansion, Collapse,
Pre-irradiation, BWR, Fuel Rod, PCI, HBWR, Power Ramp

目 次

1. はじめに.....	1
第Ⅰ部 燃料直径の急激な膨張と破損.....	3
1. 炉内実験.....	5
1.1 冷却条件と出力履歴.....	5
1.2 直径プロフィール.....	6
1.3 直径と軸方向伸びの変化.....	6
1.4 燃料破損時のふるまい.....	7
2. 照射後試験.....	8
2.1 渦電流探傷試験.....	8
2.2 中性子ラジオグラフィー.....	8
2.3 直径ギャップ.....	8
3. 討 論.....	8
4. まとめ.....	9
第Ⅱ部 燃料直径の陥没.....	11
1. 炉内実験.....	13
1.1 冷却条件と出力履歴.....	13
1.2 直径プロフィール.....	13
1.3 直径と軸方向伸びの変化.....	14
2. 討 論.....	14
2.1 直径陥没の原因究明.....	14
2.2 直径陥没後の燃料棒のリグ内固着.....	15
3. まとめ.....	15
謝 辞.....	16
参考文献.....	16
付録Ⅰ：急激な直径変形を生じたBWR9の詳細な直径プロフィール.....	31
付録Ⅱ：BWR9：出力急昇実験中の燃料棒平均線出力，棒内ガス圧 力及び軸方向伸びの経時データ.....	63
付録Ⅲ：直径陥没を生じたBWR14の詳細な直径プロフィール.....	75

CONTENTS

1.	Introduction	1
<i>Part I</i>		
1.	Marked diametral expansion and failure of the rod	3
1.	In-core experiment	5
1.1	Coolant condition and power history	5
1.2	Diameter profile	6
1.3	Change of diametral and axial elongation	6
1.4	Fuel behaviour during the failure	7
2.	Post-irradiation examination	8
2.1	Eddy current testing	8
2.2	Neutron radiography	8
2.3	Squeezed diametral gap	8
3.	Discussion	8
4.	Concluding summary	9
<i>Part II</i>		
1.	Collapse of the rod diameter	11
1.	In-core experiment	13
1.1	Coolant condition and power history	13
1.2	Diameter profile	13
1.3	Change of diametral and axial elongation	14
2.	Discussion	14
2.1	Investigation of the cause of rod rod collapse	14
2.2	Mechanical locking of the rod with ramp rig after the collapse of diameter	15
3.	Concluding summary	15
	Acknowledgment	16
	Reference	16
Appendix	I : Detail diametral profiles of BWR 9 which caused the marked diametral deformation	31
Appendix	II : BWR 9;averaged power of the rod, internal rod pressure, and axial elongation data as a function of ramping time	63
Appendix	III : Detail diametral profiles of BWR 14 which caused the collapse of rod diameter	75

1. はじめに

原研は、ノルウェーハルデン炉（H B W R）で、ペレットー被覆相互作用（以後 P C I と称す）に起因する燃料棒の破損機構究明のため、B W R型の模擬ループを設置し出力急昇実験を行った。実験で用いた燃料棒はセグメント棒であり、燃料長は約 0.45 m であった。

この燃料棒を格納し、冷却材がその格納容器を流れる様にしたもの（商用炉の圧力容器に相当するもの）を H B W R では照射リグと称している。H B W R では、この照射リグや燃料棒に組込んだ計装機器類から、炉内の燃料ふるまいを解析・評価するために必要な炉内実験データを得ることが可能である。

この B W R 型ループによるセグメント燃料棒を用いて行った出力急昇実験中、1本の燃料棒は従来の P C I 変形の域を越える大きな直径増加をおこして破損、また別の1本の燃料棒は破損には至らなかったが、実験中に直径が大きく陥没した。この2本の燃料棒に生じた燃料ふるまいに関しては、殆んど報告例がない。実験では、そこに取付けた計装機器からのデータにより、それらの燃料ふるまいを経時的に追跡できた。

本報は、それら炉内データに照射後試験（以後 P I E と称する）から得たデータを加え、上記2本の燃料ふるまいについて、評価を行った結果について報告するものである。報告は全体を二部構成とした。第Ⅰ部では“燃料直径の大きな膨張と破損”と称して報告を行い、第Ⅱ部では“燃料直径の陥没”と称して報告を行う。

第Ⅰ部：燃料直径の急激な膨張と破損

1. 炉 内 実 験

1.1 冷却条件と出力履歴

出力急昇時に大きな膨張をおこした燃料棒を、ここではBWR9と称す。その製造時の代表的な寸法はTable 1に示す通りである。直径ギャップが 0.100 mm と通常のBWR燃料の直径ギャップ 0.23 mm に較べ狭いこと、HBRW使用の為、濃縮度が高いこと、及びセグメント形式の燃料棒であること等を除けば、商用炉で用いられている 8×8 BWR型燃料棒に良く似ている。

BWR9は、出力急昇実験に入る前に、一定線出力で長期間照射を継続し燃焼度を増加する、いわゆる予備照射を行っている。この予備照射は、直径 5.6 mm の同心円上に燃料棒を4本配置し、それを二段に重ねたクラスター構造にて行った。BWR9は、上側のクラスター中に組み込まれた。二段クラスターに対する中性子束分布は、余弦曲線の形をしており、分布のピークはクラスターのほぼ中間にあった。即ちピーニング係数は約1.2で、BWR9の場合、そのピークは燃料底部付近にあった。

Fig.1は予備照射中のBWR9の出力履歴である。この図から、燃料棒は平均線出力 3.0 kW/m (ピーク 3.3 kW/m)で、燃焼度約 1.4 MWd/kgU まで予備照射されたことが分る。Fig.2は予備照射中の冷却材圧力、Fig.3は冷却材温度を燃料棒の平均燃焼度で評価したものである。Fig.2からBWR9は予備照射中、ほぼ 7.0 MPa の冷却材圧力下にあったことが分る。冷却材温度は燃料棒底部から頂部にむかって高くなっている。Fig.3は、冷却材温度が最も高い燃料頂部での冷却材温度変化を示している。この図から、予備照射中の燃料頂部の冷却材温度は、ほぼ 280°C であったことが分る。燃料底部の温度は、平均これより 10°C 程度低かった。

予備照射後、燃料棒BWR9を上部クラスターから除荷し、その後Fig.4に示す様な出力急昇リグに装荷した。このリグでは、燃料棒の出力や冷却材圧力・温度のほか、出力急昇中の燃料棒直径、軸方向の伸び、燃料棒内圧等の測定を行った。またリグ内には炉内渦電流探傷装置もあり、これを用いた被覆割れの検出実験もできる様にしてあった。

Fig.5は、このリグを用いて行った出力急昇実験中の燃料棒の出力履歴を示している。出力急昇実験では、まず平均線出力 3.0 kW/m まで、 7.6 kW/mh の速度で出力急昇し、そこでならし運転(コンディショニングと称する)を約1日行った。実験では、このコンディショニングに入った直後に原子炉の冷却材リークの為、スクラムがあった。

コンディショニング後、階段状(ステップ状)の出力急昇を行った。これはFig.4に示す様な、リグ外壁に巻きつけたコイルに、 ^3He ガスを導入する出力制御方式を用いた。ステラップ状の出力急昇とは、例えば、 3.0 から 3.5 kW/m まで 5.5 kW/mh の速度で出力急昇し、そこで約1時間程定出力保持する、階段を一段ずつ昇って行く様な方法で、燃料棒に出力急昇を課すものである。

最高線出力に達したのち、BWR9は約6時間保持されたが、後で詳述する様に、その間に破損した。Fig.6は、出力急昇実験中の燃料棒の冷却材圧力(ループ内で測定)及び温度変化(燃料棒の上方、リグに取付けた熱電対で測定)を示している。図から分る様に、冷却材圧力は $6.6 \sim 7.0\text{ MPa}$ の範囲、冷却材温度は 270°C 付近にあった。

1.2 直径プロフィール

Fig.4 から分る様に、直径測定を行わないときには、燃料棒はリグの所定の位置に静止しているが、あらかじめ設定した線出力になると、水圧駆動機構によりリグ内を上下動する。リグ上方部二ヶ所に設置した直径測定ゲージ：D G 1 と D G 2 を燃料棒が通過した際に直径測定がなされ、その結果それぞれ 0° – 180° , 90° – 270° 方向の直径プロフィールが得られる。静止位置から上方に移動して行った燃料棒は、通常はストローク中のある位置で（上死点）で静止した後、今度は元の静止位置に向って下方に動いていく。しかし、実験ではストロークのある位置で静止した後、その位置で 120° ずつ回転し、その回転角に於ける直径プロフィールも測定できる工夫がなされていた。

⁽¹⁾ 別報で詳述した様に、燃料棒の直径測定用のゲージはステンレス鋼でできており、中性子吸収が生じる。このため、燃料棒の平均線出力は直径測定時には約 15.7%，直径測定を行わない場合にくらべて減少する。従って、本報では、直径測定時の線出力（局所線出力）を平均線出力と区別して用了いた。

Fig.7 は、直径測定から得た燃料直径プロフィールを、ステップ状の出力急昇に於ける 3 つの代表的な局所線出力 ((A) : 1.6 kW/m, (B) : 3.3 kW/m 及び (C) : 5.36 kW/m) について、示したものである。この図から次の様なことが分る。

- 1) Fig.7 (A) : 局所線出力 1.6 kW/m ; 出力急昇実験開始直後の直径プロフィールである。燃料直径は、予備照射中に生じた P C I による残留変形のため、多少の凹凸はあるが、全体的には殆んど平らであった。
- 2) Fig.7 (B) : コンディショニングを終了して、局所線出力が 3.3 kW/m と上昇した時点での直径プロフィールである。1) に較べ、P C I によって生じた竹の節状の変形（以下リッジング変形と称す）のため、燃料直径の凹凸が大きくなっていた。また平均直径も 1) に較べ $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度増加した。
- 3) Fig.7 (C) : 出力急昇による最高局所線出力 5.36 kW/m での直径プロフィールである。燃料棒全体が大きく膨らんだ。平均直径は 1) に比較し、 $115 \mu\text{m}$ も増加した。同種類の燃料棒による、通常の P C I での変形量は、ほぼ $40 \sim 60 \mu\text{m}$ 以内であるから、この変形は極めて大きい。図から燃料底部の一部に直径の陥没があること、また燃料中央部から上部にかけて、P C I によって生じたリッジング変形があることが分る。

Fig.7 には、代表的なプロフィールを示したが、B W R 9 の個々の局所線出力に対する直径プロフィールを、付録 I に経時的にまとめ、読者の便宜に供した。

1.3 直径と軸方向伸びの変化

燃料棒直径プロフィールを用いて、軸方向各位置に於ける直径値を測定し、その算術平均を局所線出力で評価した結果を Fig.8 中実線にて示す。これから、次の様なことが分る。

- 1) 燃料棒直径は 30 kW/m 付近までは、殆んど P C I を生じなかった。
- 2) 30 kW/m 以後、局所線出力の増加とともに、急激に直径が増加した。局所線出力 53 kW/m での直径増加量は $115 \mu\text{m}$ に達した。
- 3) 図中の破線は、B W R 9 (燃焼度 14 MWd/kg U) よりも更に高い燃焼度 (21 MWd/kg U)

まで予備照射した燃料棒の出力急昇中の直径変化であり、通常状態での燃料棒 P C I ふるまいの代表例として示した。この燃料棒は B W R 9 と全く同じ製造仕様であり、出力急昇中の出力履歴もほぼ等しい（この燃料棒 B W R 1 1 の詳細については、文献(1)を参照されたい）。両者を変形の勾配の大きさで比較すると、 30 kW/m 以後の局所線出力ではそれ程相違がない。ところが、B W R 9 は 45 kW/m 以上で、局所線出力の増加 ($45 \rightarrow 53 \text{ kW/m}$) で $50 \mu\text{m}$ も直径値が増加した。

Fig.9 は B W R 9 の軸方向伸びを平均線出力で評価した結果である。この図から、直径値が増加した 30 kW/m 付近からの伸び量は 0.8 から 1.1 mm までの約 0.3 mm (0.07% 軸歪) であったことが分かる。しかし、直径値が大きくなつた 45 kW/m 以上では殆んど軸方向の伸び増加がなかった。

Fig.10 は、直径変形に関する P C I ふるまいと B W R 9 と比較用に用いた燃料棒の軸方向伸びを示す。図から分る様に、この燃料棒では、平均線出力の増加とともに、軸方向伸びも増加した。 30 kW/m 付近からの伸び量は約 0.6 mm (0.14% 軸歪) であった。

この 45 kW/m 以後の P C I から、当該燃料棒の破損が生じた。次節では、その破損中の B W R 9 の燃料ふるまいを評価した結果を報告する。

1.4 燃料破損時のふるまい

Fig.11 は、B W R 9 に計装した燃料棒内圧力測定器から得た燃料棒内圧データを平均線出力で評価した結果である。ガス圧力データは、出力急昇実験開始時の燃料棒内圧力を基準とし、それ以後の相対圧力の変化を示したものである。又データは 30 kW/m 付近からしか得られなかった。この図から、ステップ状の出力急昇中、殆んど燃料棒ガス圧力は増加しなかつた事が分る。しかし、出力急昇後、燃料棒を定出力で保持中に図に示す様なガス圧力の増加 (①～③：時間は約 15 分) が生じた。相対圧のため、約 3 MPa しか増加していない様にみえるが、これはガス圧力計の測定限界に達したためであり、実際には③の時点で、燃料棒内圧は冷却材圧力 7 MPa 近くになったと考えられる。即ち、燃料棒は破損した（破損確認は冷却材中の放射能濃度によつた）。

図では、①～⑦まで番号が打つてあるが、これはこの付近で直径測定及び渦電流探傷試験が行われた事を示している（また④～⑥は直径測定途中の圧力データ点あり、燃料棒が移動中のため圧力に動きがある様にみえるが、実際は③、⑦の圧力値と同値である）。この各番号に対応する直径プロファイルを Fig.12 に、渦電流探傷の結果を Fig.13 に示す。

Fig.12 の線出力は、各番号に対応した時点での燃料棒平均線出力であり、局所線出力ではない。破損は①～③の間で発生したが、直径プロファイル及び渦電流データからは被覆割れの発生等を同定できなかつた。

これは、恐らく割れが小さく、それがリッジと重なり合つたために、割れ特有の信号が渦電流探傷で検出できなかつた為と考えられる。

また破損は、十分大きな P C I が生じていることが直径プロファイル等から明らかであり、P C I 破損に基づいていると考えられる。

出力急昇中の燃料棒線出力、相対圧力及び軸方向伸びを実験時間に対して示した詳細なデータを、付録Ⅱに収録した。

2. 照射後試験

2.1 涡電流探傷試験

単一巻コイル、周波数 100 kHz で探傷を行った。Fig.14 は、その結果で、二つある曲線のうち、上側が位相曲線、下側が振幅曲線である。位相曲線では、頂部に不規則な信号が出ているが、これは残留リッジによるものであろう。PCI 破損では、この信号に外面や内面割れが疊重して来るのと、線出力を下げる燃料棒の収縮で割れ口がとじてくるので、破損割れとそれ以外を区別するのは、割れが小さい場合、極めて困難である。

2.2 中性子ラジオグラフィー

Photo. 1 は、BWR 9 の中性子ラジオグラフィーの結果である。殆どの燃料ペレットの中央部に、周方向割れが入っているのがわかる。しかし、破損に関する情報は、ここからは得られなかった。

2.3 直径ギャップ

軸方向約 10 cm の幅で合計 5ヶ所、燃料棒を機械的に押しつぶした結果、残留直径ギャップは $73 \pm 8 \mu\text{m}$ であった。即ち、照射初期約 $100 \mu\text{m}$ あった燃料ギャップは、スウェーリング等で約 $30 \mu\text{m}$ 減少した。つぶれた部分とそうでない部分に差がでなかったのは、押しつぶしの範囲が 10 cm と広く、局所的なつぶれ個所のみを測定しなかった為であると考えられる。

3. 討論

1.3 節、PCI ふるまいに関する評価結果から、BWR 9 は、線出力 45 kW/m 以上の出力では、直径値が軸方向の伸びをあまり伴なわずに大きくなり破損に至ったと考えられる。この軸方向変形が小さいままの直径の大きな増加は、例えば一本の燃料棒内で、直径ギャップが軸方向位置によって大きく異なる場合の PCI 变形に現われることがある。⁽²⁾

この観点から、例えば Fig.12 (最高線出力保持中の直径プロファイル) を見直すと、BWR 9 は底部 $10 \sim 30\%$ の範囲の直径値が他よりもかなり小さい ($\sim 50 \mu\text{m}$) ことが分る。即ち、この部分では直径値が極めて小さくなっているのに軸方向には伸びない現象 (直径太さの差による軸伸びのロッキング) が生じたと考えられる。

この底部 $10 \sim 30\%$ の範囲に直径変化 (陥没の一種) がいつ生じたのかを付録 I のプロファイルで見直すと、線出力 38 kW/m (ラン番号 8864) 付近であることが分る。即ち、この線出力以後、燃料棒の底部 $10 \sim 30\%$ 範囲陥没による軸方向のロッキングがおこり、直径変形は軸伸びをあまり伴なわずに大きくなつたと推定される。

燃料底部にこの様な変化が生じた理由については、すでに筆者らが解析した同種の燃料破損事故の原因究明結果が参考できる。即ち燃料直径測定時、冷却材流路面積は底部 10～30%相当位置で最も狭くなり、被覆管温度が高温化する。この高温化によって軟化した被覆材料部分は冷却外圧 7 MPa を受けてつぶれる。この高温化は燃料棒に曲りがあったりすると、更に流路面積が狭くなる場所が生じて、より進む。また Fig.12 の④～⑥では、燃料棒がこの高温化をおこす位置におかれたままで 120°ずつ回転して直径測定を行っており、ここでは燃料の高温化による直径陥没が更に加速されたと考えられる。⁽¹⁾

4. まとめ

直径ギャップを 0.1 mm とした BWR 型燃料棒を、HBR 内に設置したループ内で 14 MWd/kgU まで予備照射したのち、ステップ状の出力急昇実験を行った。出力急昇中、45 kW/m 以後の直径変形が、殆んど軸方向変形をともなわずに、著しく増加した。通常、直径及び軸方向変形は生じた PCI により両者一様に増加する傾向にある。

この PCI ふるまいの原因を究明した結果、燃料軸方向の伸びを抑制したのは、燃料底部に生じた被覆管の局所的な陥没であることが分った。陥没により、燃料の軸方向伸びは固着された。この局所的な被覆管の陥没は、発生部分の冷却材流路面積が極端に狭く、曲りの加わった被覆材が局所的に高温化したのち軟化したため、冷却材の圧力により変形してつぶされたものと考えられる。

第Ⅱ部：燃料直径の陥没

1. 炉 内 実 験

1.1 冷却条件と出力履歴

全面的な直徑陥没をおこした燃料棒を、ここではBWR14と称す。その製造時の代表的寸法は、Table 2に示す通りである。この燃料棒は、初期充填ガス圧力を純ヘリウムガスで0.3 MPaに加圧したいわゆるBWR型の改良燃料であった。燃料棒は、H B W Rで使用するため濃縮度が高いのセグメント棒であることを除けば、商用炉で用いられている 8×8 BWR型の寸法に類似していた。

BWR14も、第I部1.1で説明した様な予備照射リグで定常照射された。Fig.15は予備照射中のBWR14の出力履歴である。この図から燃料棒は平均線出力30 kW/m(ピーク33 kW/m)で、燃焼度約8 MWd/kg Uまで予備照射されたことが分る。予備照射中の冷却材圧力及び温度の履歴は前出Fig.2及びFig.3ですでに示した。

予備照射後、燃料棒BWR14を上部クラスターから除荷し、出力急昇リグに装荷した。そこに装備した計装機器類は第I部で説明した。Fig.16は、このリグによる出力急昇実験中の燃料棒の出力履歴を示す。実験では、平均線出力30 kW/mまで、13 kW/m hの速度で出力急昇し、その出力でならし運転(コンディショニング)を行った。その後、ステップ状に約5.5 kW/m hで出力急昇し最高出力に到達した。最高線出力約50 kW/mで燃料棒は3.5時間保持されたが、その間に行なわれた直徑測定中に「直徑陥没」が生じた。

Fig.17に軽水循環ループ内で測定した冷却材圧力及び燃料棒の上方における冷却材温度を示す。冷却材温度は280°C前後で比較的一定であったが、冷却材圧力は7.0 MPaを中心に変動した。特に、実験後半の圧力の変動は、後で記述する様に、リグ内で機械的に固着した燃料棒を冷却材圧力等により、移動させようとした結果、生じたものである。

1.2 直径プロフィール

燃料直徑を測定する為に燃料棒が上下動するしくみやストローク上死点で静止したのち燃料棒を120°Cずつ回転しその直徑を測定できるしくみ等は、総て第I部1.2節で説明した通りである。

Fig.18は直徑測定から得た燃料直徑プロフィールを、ステップ状の出力急昇に於ける4つの代表的な局所線出力：(A) 2.6 kW/m, (B) 44.4 kW/m; 最高線出力到達直後, (C) 44.7 kW/m; 保持後1時間及び(D) 44.7 kW/m; 保持後3時間、について示したものである。これらの4つのプロフィールから次の様なことが分る。

- 1) Fig.18(A)：局所線出力が低い所では、燃料棒に凹凸はなく、平坦であった。即ち、予備照射中のPCIによる残留変形の形跡は殆んどなかった。
- 2) Fig.18(B)：PCIにより最大 $15 \mu\text{m}$ 程度のリッジが生じた。しかし燃焼度が8MWd/kgUと小さく、スウェーリングによるギャップ閉鎖の進行がそう大きくなかったのと、直徑ギャップが $230 \mu\text{m}$ と大きかった為、変形は、例えば同様な小ギャップ棒のそれ(Fig.7)と較べ比較的小さかった。
- 3) Fig.18(C)：最高線出力保持後、1時間の状態であるが、PCI変形が緩和により小さくな

った。

4) Fig.18(D): 最高線出力保持後、3時間の状態である。ここでは燃料棒を回転させながら、直径測定を行った。また直径プロフィールの詳細データを得る（磁気テープに入れるデータ密度を濃くする）ため、燃料棒の上方への移動速度を通常の1/2程度に抑えた。その結果、得たのは、図の様に燃料有効長のほぼ全域に渡って、平均約 $5.0 \mu\text{m}$ も陥没した直径プロフィールであった。直径陥没は $90^\circ - 270^\circ$ 方向の底部が最も大きく、直径測定ゲージの読み取り限界を越えてしまった。

燃料棒の底部と頂部に1ヶ所ずつ機械加圧されたレファレンスステップ（直径測定の読み取り電気信号を、このステップ幅 $5.0 \mu\text{m}$ で、評価可能な数値に変換する較正用の階段）は、Fig.18(A)からわかる様に、実験初期はほぼ同一水平位置にあったが、Fig.18(D)では $90^\circ - 270^\circ$ 方向で $1.7 \mu\text{m}$ 程度、相対的に差が生じていた。これは、燃料棒に曲りが生じている事を示唆するものである。

Fig.18では、代表的な4つの直径プロフィールを示したが、BWR14の出力急昇実験に於ける、個々の局所線出力に対する直径プロフィールを、経時的にまとめて、付録IIIとした。

1.3 直径と軸方向伸びの変化

燃料棒直径プロフィールを用いて、直径陥没が生ずる前までの軸方向各位置に於ける直径値を測定し、その算術平均を局所線出力で評価した結果を、Fig.19に示す。この図から、1) 燃料棒のPCI変形は 3.5kW/m 付近から生じたこと、2) 平均的な直径増加量は最大 $1.0 \mu\text{m}$ （0.08%直径歪）程度であったこと、及び3) 出力保持中に緩和が生じたこと、等が分る。

Fig.20はBWR14の軸方向の伸び変化を平均線出力で評価したものである。この図から、1) 燃料棒は 3.5kW/m 付近からPCIを生じたが、ステップ状の出力急昇中に、何度も緩和により変形が低下していることや2) 平均的な軸方向伸びの増加量は最大 0.18mm （0.04%軸歪）程度であったことが分る。

2. 討論

2.1 直径陥没の原因究明

燃料棒BWR14について、照射後試験は行なわなかった。Fig.18(D)に示す様に、燃料有効長である 447mm のほぼ全域に渡って直径が陥没した原因是、第I部の討論が参考になる。即ち、別報で詳細に記述した様に、出力急昇リグ頂部には、燃料棒の内圧測定用のトランスフォーマーがリグ長手方向に 84mm の範囲で装備されていた。燃料棒が直径測定の為、上方に移動して来てストロークの上死点付近で停止すると、丁度燃料棒底部がこのトランスフォーマー部に入る。ところが、燃料棒直径（ 12.27mm ）とトランスフォーマー内径（ 13.4mm ）とが作り出す円環状の冷却材流路断面は、直径ギャップ幅で評価すると 1.13mm と狭いえに、燃料棒に曲り等があると、更にその個所での冷却性が悪化する。

直径陥没が生じる前の実験条件を整理すると、1) まず密度の濃いデータを得るために、通常の約

1/2のゆっくりとした速度で燃料棒を移動させたこと，2)上方への移動が終了した上死点付近で，データを大型計算機に格納するため，燃料棒を3~5分間，そこで停止させたこと，3)燃料棒を上死点位置付近においていたままで，直徑測定のため 120° ずつの回転を行ったこと，等があげられる。これらは，いずれも前記の狭い流路断面内で，冷却材不足即ち燃料被覆の高温化を加速するものであることが分る。

もう1つ燃料棒の全面的な陥没を生ずるのに決定的であったのは，この燃料棒の直徑ギャップが $230\mu\text{m}$ と大きかったことである。1.3節のPCI評価からも分る様に，この燃料棒の変形はあまり大きくなく，直徑陥没時にも十分な残留ギャップが燃料棒内に存在していたと考えられる。第Ⅰ部の小ギャップ： $100\mu\text{m}$ 燃料棒では，流路面積が小さい燃料底部領域だけで局所的な直徑陥没だけが生じたが，第Ⅱ部の大ギャップ： $230\mu\text{m}$ 燃料棒は外圧により，ほぼ燃料有効長全域に渡って，直徑陥没が生じたと言える。Fig.18(D) $90^{\circ}-270^{\circ}$ 方向で，燃料底部での陥没が著しく，ペレット境界部にあるチャンファー空間へのくいこみまでもが生じているのは，この個所の燃料高温化が最も著しかった為と考えられる。

2.2 直径陥没後の燃料棒のリグ内固着

直径陥没後，燃料棒はその個所（上死点付近）で動かなくなった。実験継続のためには，燃料棒を移動して，リグの下方静止位置に戻す必要があった。このため，燃料棒駆動用のポンプ圧力を増加したり，軽水ループ中の圧力を減少させたり，燃料棒線出力を低下させたりした。前の2つは，下方から上方に向う冷却材に対して，燃料棒の下方への移動を補助するための対策であり，後者は燃料線出力を低下させてPCI変形を下げ，燃料棒の直徑を細くさせて下方に移動させ易くする為にとった対策である。しかし燃料棒は，移動できずリグ内に固着した。

この固着は，出力急昇リグ内のどこかで燃料棒と装備した機器あるいは部品が，機械的に相互作用していなければ生じない。このため，あらためて固着の発生個所を同定した。その結果，Fig.21に示す様に，燃料棒の最下部の直徑 8mm の部分が，燃料棒案内ガイドの個所に機械的にくい込んでいる個所がみつかった。通常の状態では，燃料棒先端が案内用の板でできた空間にくいこむ事は考えられない。従って，そのくいこみは，高温化と直徑陥没で加速された燃料棒の曲りが原因で生じたものと考えられる。

実験では，燃料棒を下方静止位置に戻すため，前記の様な操作を行ったが，それらは結果的に，燃料棒先端と案内棒との機械的固着をより強固させたことになる。

3. まとめ

初期充填ガス圧力を 0.3 MPa としたBWR型燃料棒を，HBWR内に設置したループ内で 8 MWd/kg U まで予備照射したのち，ステップ状の出力急昇実験を行った。出力急昇後，定出力約 50 kW/m で3時間保持したところ，燃料有効長：約 0.45 m 全域に渡って，最大 $50\mu\text{m}$ の直徑陥没が生じた。

この主要原因是，冷却材流量が極端に少なくなる燃料棒内圧測定用のトランスマーマー部（

8.4 mm長)を、直徑測定時にゆっくりと通過させ被覆温度を十分に高温にした事にある。また燃料有効長ほぼ全域に渡って陥没が生じたのは、出力急昇中に発生したPCIが小さく、燃料棒に十分な直徑ギャップがあったためと考えられる。

直徑陥没が最も大きかったのは、トランسفォーマー部に、長くおかれた燃料底部である。そこでは燃料棒内のチャンファーラー空間に更に被覆管がくいこんでいるのが観察された。

直徑陥没時に20 μm程度あった燃料棒の曲りのため、燃料棒先端と燃料棒移動用の案内棒との間で機械的固着が生じた。

謝 辞

H B W Rでの出力急昇実験では、ハルデンプロジェクトの研究員、H. デイボルド、E. コルスタッフの両氏に実験準備や遂行期間を通じて、全面的に御協力を戴きました。また照射後試験については、ノルウェーエネルギ技術研究所シェラーホットラボ課長、P. アルネセン氏に御協力と助言をおぎました。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Yanagisawa, K. : JAERI-M 85-196 (1985)
- (2) Vilpponen, K.O., et al : IAEA Specialists' Meeting on Pellet Cladding Interaction in Water Reactors, Risø Denmark (1980)

8.4 mm長)を、直徑測定時にゆっくりと通過させ被覆温度を十分に高温にした事にある。また燃料有効長ほぼ全域に渡って陥没が生じたのは、出力急昇中に発生したPCIが小さく、燃料棒に十分な直徑ギャップがあつたためと考えられる。

直徑陥没が最も大きかったのは、トランسفォーマー部に、長くおかれた燃料底部である。そこでは燃料棒内のチャンファーラー空間に更に被覆管がくいこんでいるのが観察された。

直徑陥没時に20 μm程度あつた燃料棒の曲りのため、燃料棒先端と燃料棒移動用の案内棒との間で機械的固着が生じた。

謝 辞

H B W Rでの出力急昇実験では、ハルデンプロジェクトの研究員、H. デイボルド、E. コルスタッフの両氏に実験準備や遂行期間を通じて、全面的に御協力を戴きました。また照射後試験については、ノルウェーエネルギ技術研究所シェラーホットラボ課長、P. アルネセン氏に御協力と助言をおぎました。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Yanagisawa, K. : JAERI-M 85-196 (1985)
- (2) Vilpponen, K.O., et al : IAEA Specialists' Meeting on Pellet Cladding Interaction in Water Reactors, Risø Denmark (1980)

8.4 mm長)を、直径測定時にゆっくりと通過させ被覆温度を十分に高温にした事にある。また燃料有効長ほぼ全域に渡って陥没が生じたのは、出力急昇中に発生したPCIが小さく、燃料棒に十分な直径ギャップがあったためと考えられる。

直径陥没が最も大きかったのは、トランスフォーマー部に、長くおかれた燃料底部である。そこでは燃料棒内のチャンファーエ空間に更に被覆管がくいこんでいるのが観察された。

直径陥没時に20 μm程度あった燃料棒の曲りのため、燃料棒先端と燃料棒移動用の案内棒との間で機械的固着が生じた。

謝 辞

H B W Rでの出力急昇実験では、ハルデンプロジェクトの研究員、H. デイボルド、E. コルスタッドの両氏に実験準備や遂行期間を通じて、全面的に御協力を戴きました。また照射後試験については、ノルウェーエネルギ技術研究所シェラーホットラボ課長、P. アルネセン氏に御協力と助言をおぎました。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Yanagisawa, K. : JAERI-M 85-196 (1985)
- (2) Vilpponen, K.O., et al : IAEA Specialists' Meeting on Pellet Cladding Interaction in Water Reactors, Risø Denmark (1980)

Table 1 Characteristics of the fuel rod: BWR 9

1. Fuel	
Density (% T.D.)	94.80
Outer diameter (mm)	10.440
Length (mm)	10.274
End form	Chamfered
Enrichment (wt %)	13.0
2. Cladding	
State	Fully annealed and autoclaved
Outer diameter (mm)	12.279
Inner diameter (mm)	10.549
Wall thickness (mm)	0.865
3. Fuel rod	
Diametral gap (mm)	0.100
Filler gas pressure (MPa)	0.1 with pure helium
Length of enriched column (mm)	447.5
Plenum volume (c.c.)	5.7

Table 2 Characteristics of the fuel rod: BWR 14

1. Fuel	
Density (% T.D.)	94.80
Outer diameter (mm)	10.311
Length (mm)	10.160
End form	Chamfered
Enrichment (wt %)	13.0
2. Cladding	
State	Fully annealed and autoclaved
Outer diameter (mm)	12.271
Inner diameter (mm)	10.547
Wall thickness (mm)	0.862
3. Fuel rod	
Diametral gap (mm)	0.236
Filler gas pressure (MPa)	0.3 with pure helium
Length of enriched column (mm)	446.7
Plenum volume (c.c.)	3.9

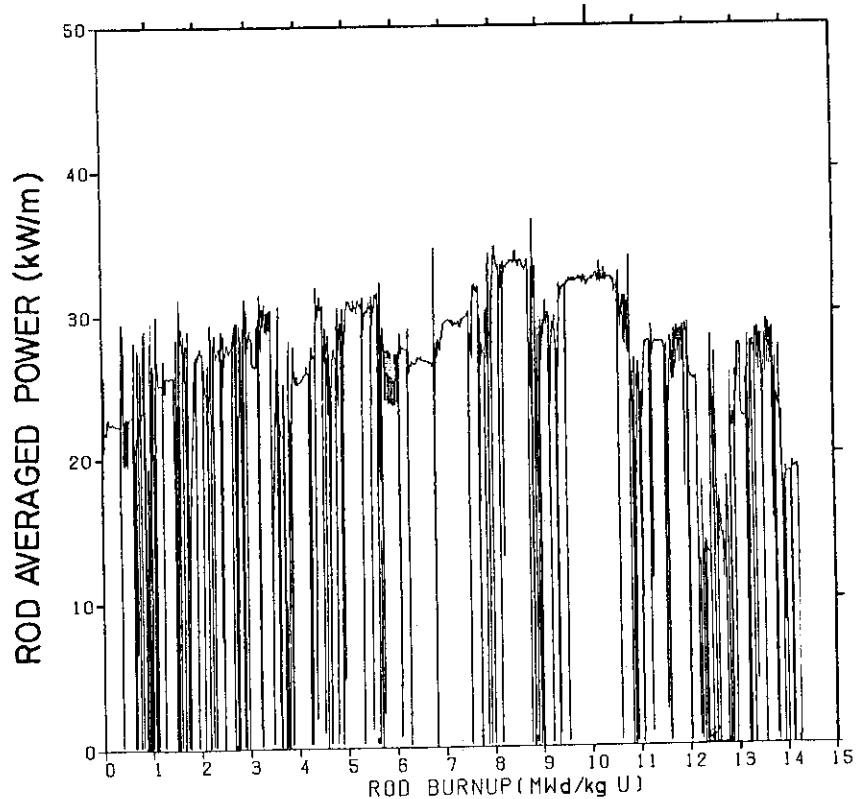


Fig. 1 Power history of BWR9 in the pre-irradiation condition

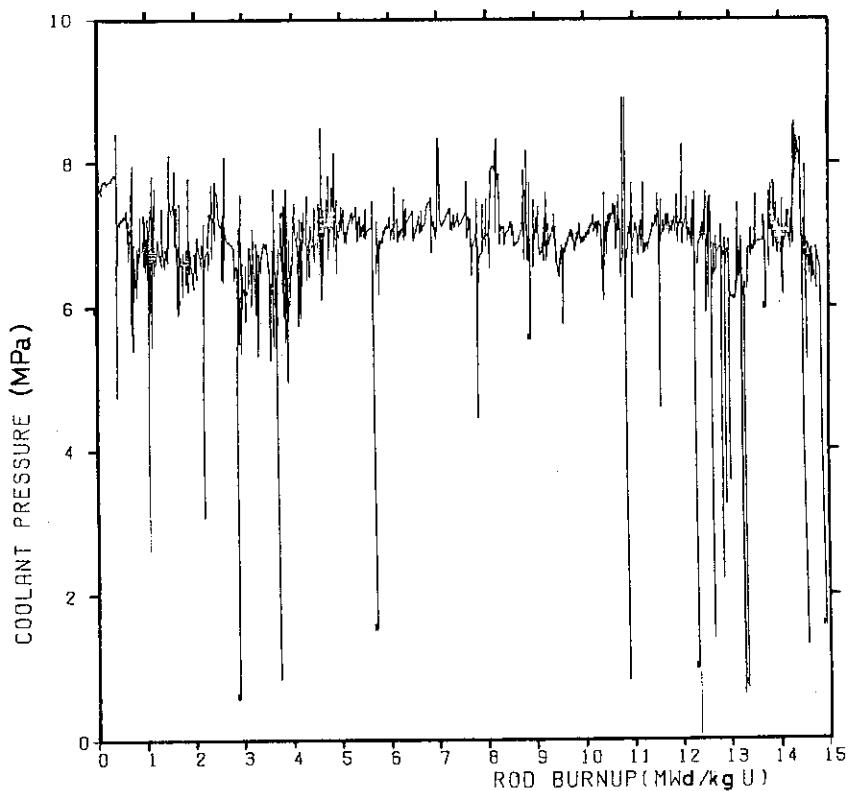


Fig. 2 Coolant pressure of BWR in the pre-irradiation condition evaluated as a function of rod averaged burn-up

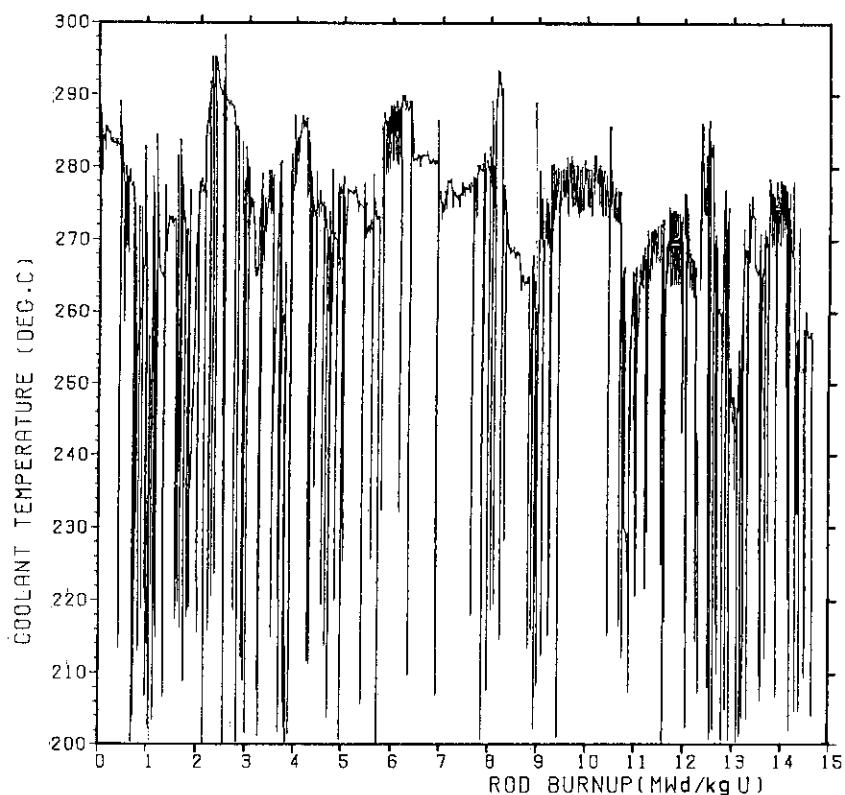


Fig. 3 Coolant temperature of BWR9 evaluated as a function of rod averaged burn-up

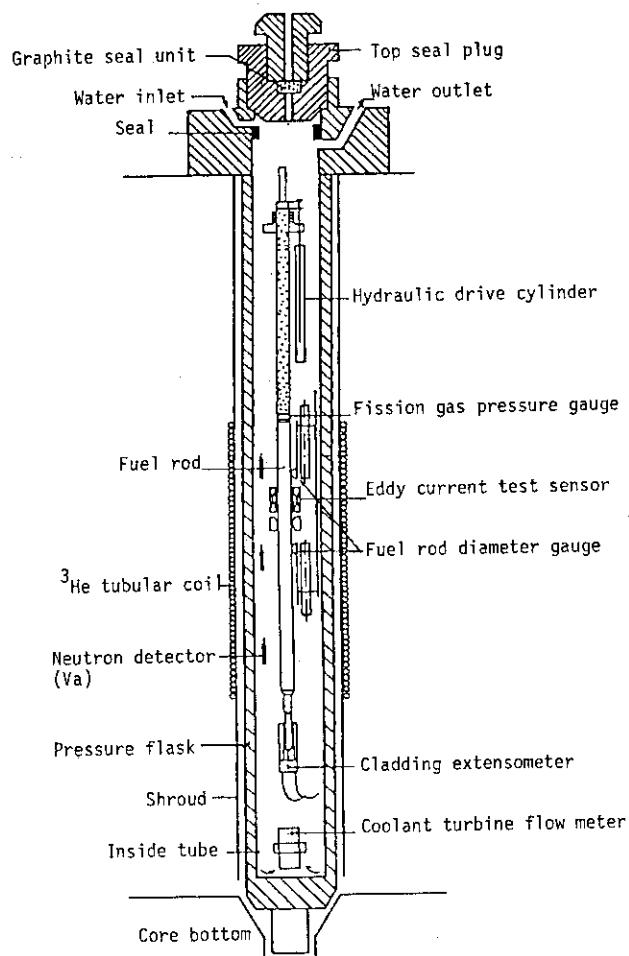


Fig. 4 Power ramp rig equipped with instrumentations

*** POWER HISTORY OF ROD BWR9 ***

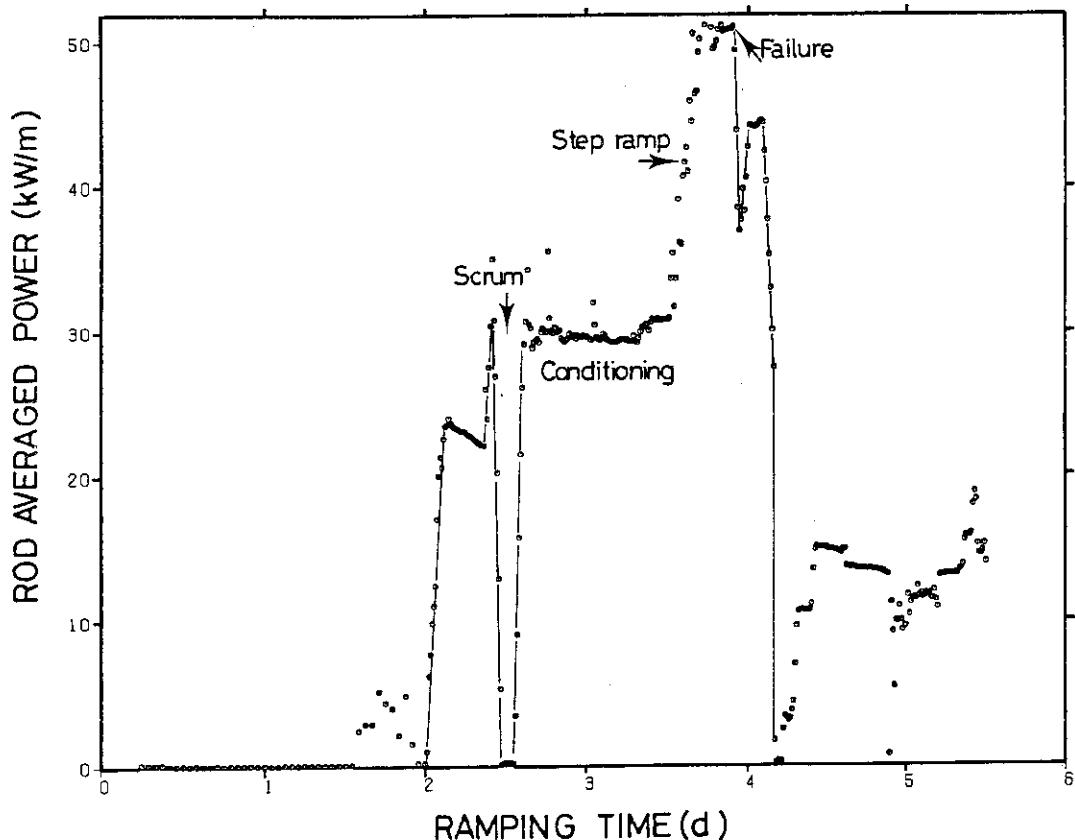


Fig. 5 Power history of BWR9 during ramp experiment

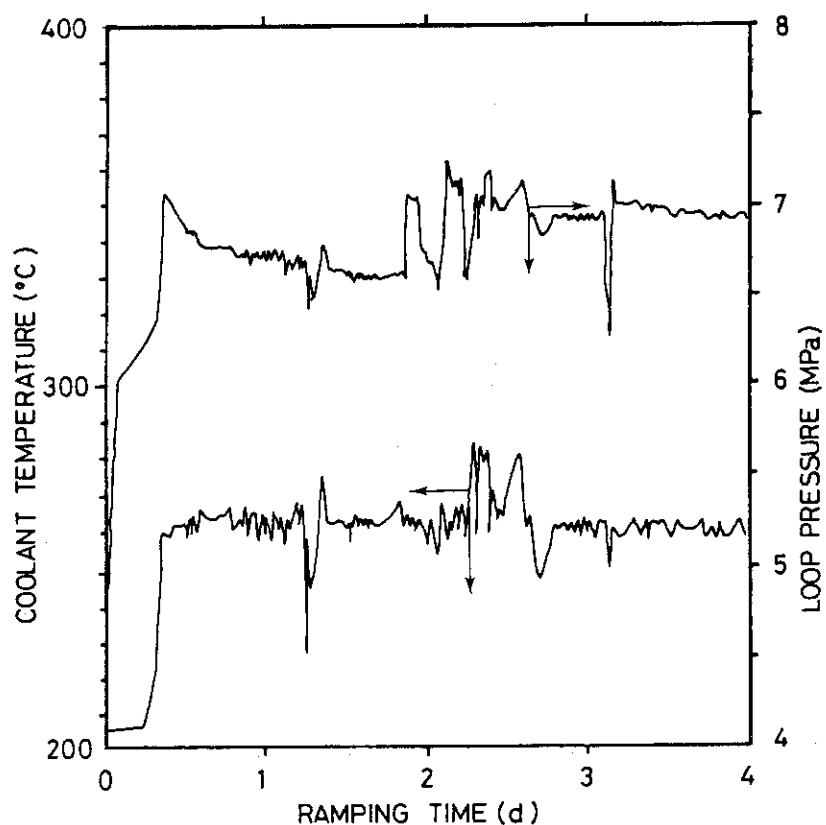


Fig. 6 Coolant temperature and loop pressure of BWR9 as a function of ramping time

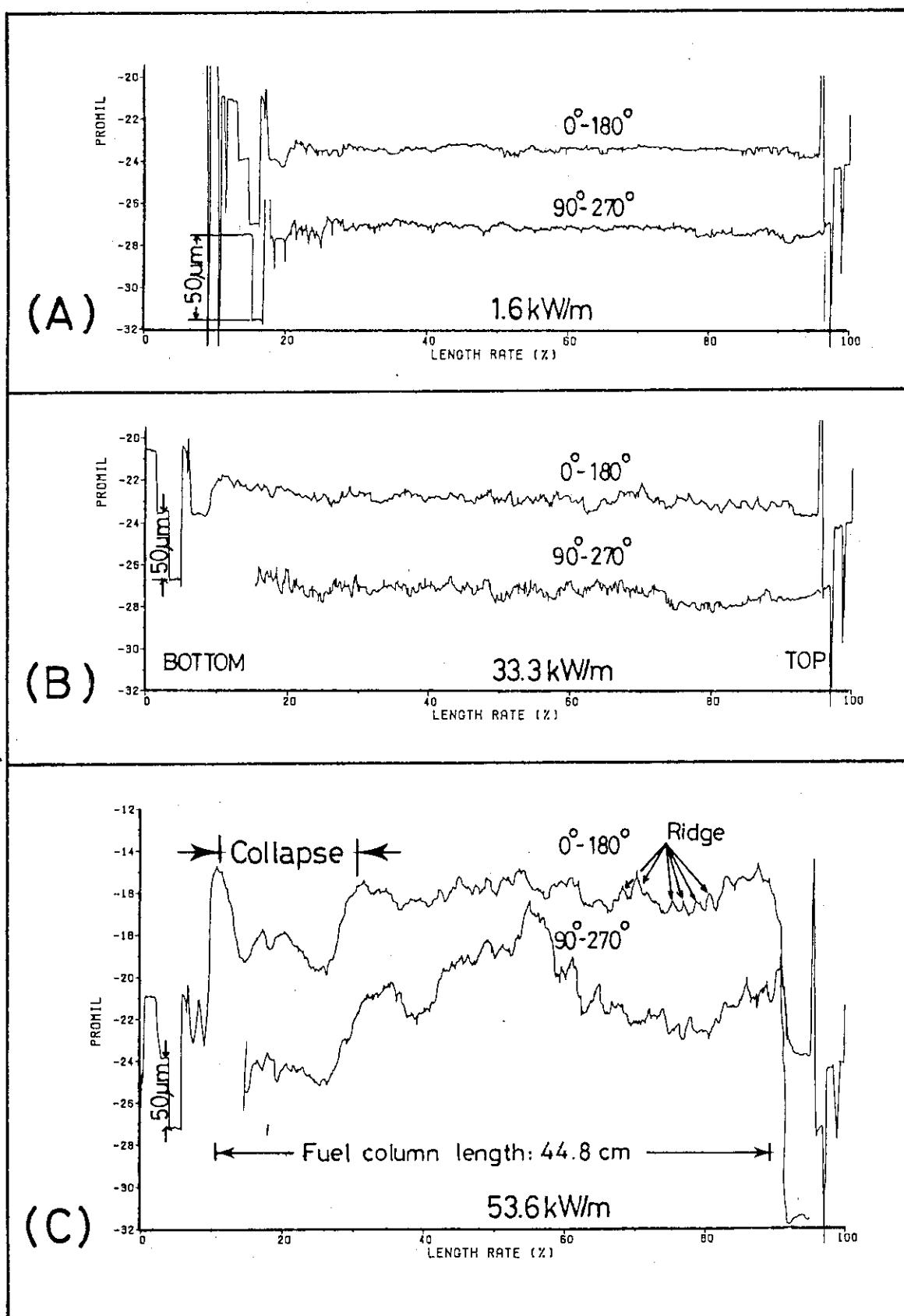


Fig. 7 Selected representative diameter profiles of BWR9 pre-irradiated to the burn-up of 14 MWd/kg U:
 (A) low power, 1.6 kW/m, (B) beginning of the step-ramp, 33.3 kW/m and (C) maximum power, 53.6 kW/m at the ramp peak, respectively

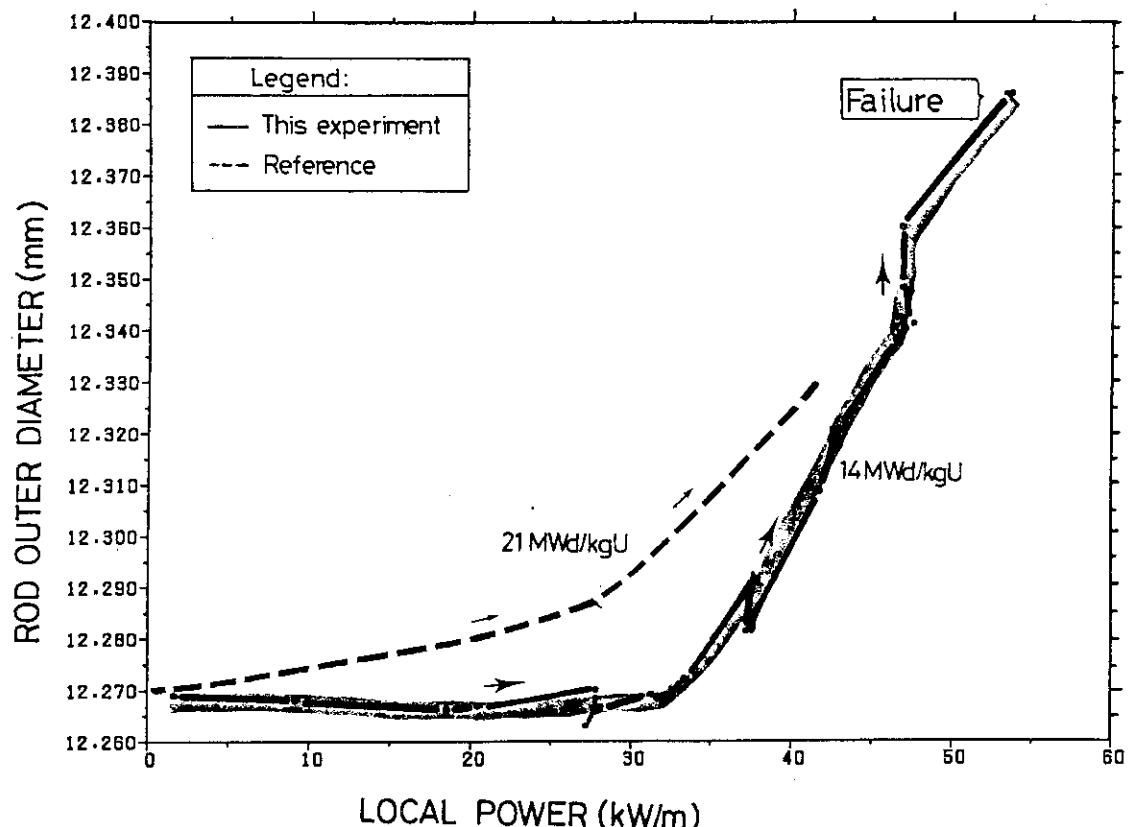


Fig. 8 Rod outer diameter of BWR9 as a function of the local power (solid line) and that of a pre-irradiated rod (BWR11) up to 21 MWD/kg U (dotted line). The latter is used as a reference as normal PCI behaviour under power ramping

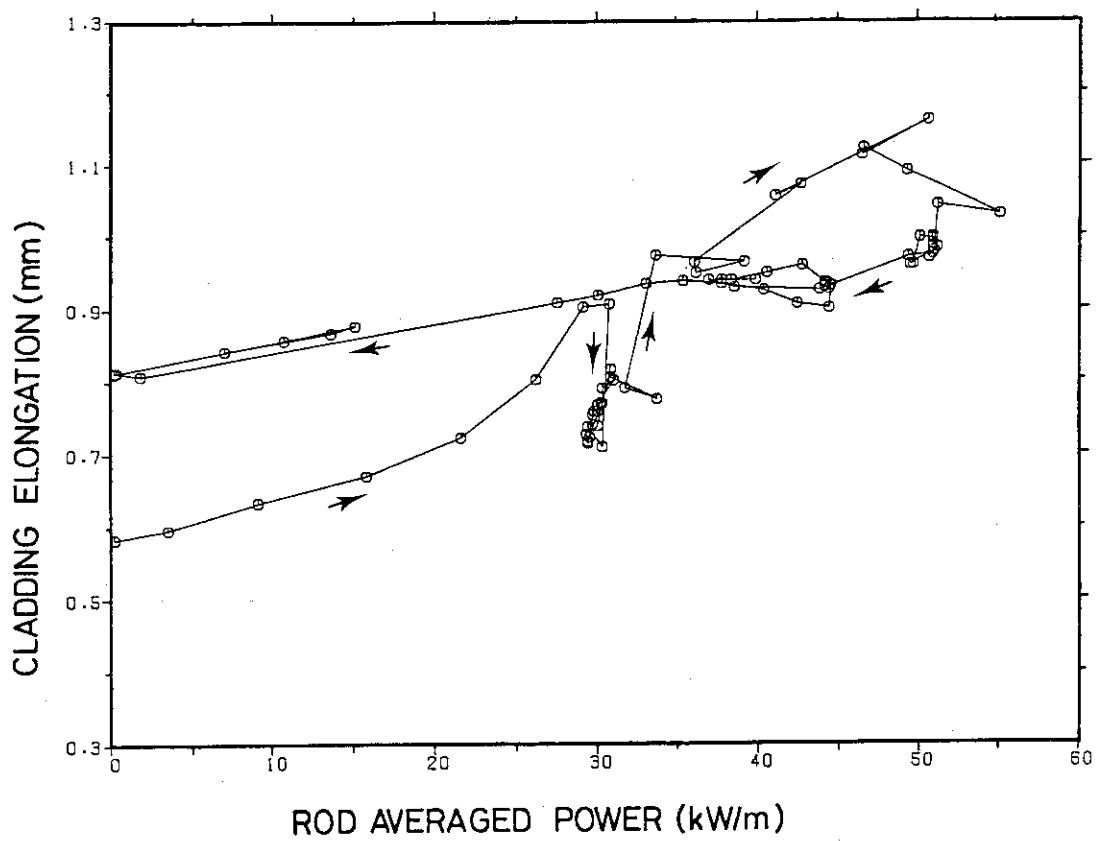


Fig. 9 Axial cladding elongation of BWR9 as a function of rod averaged power

*** AXIAL PCMI OF POWER RAMP:REFERENCE BWR 11 ***
 $\sigma = EC$

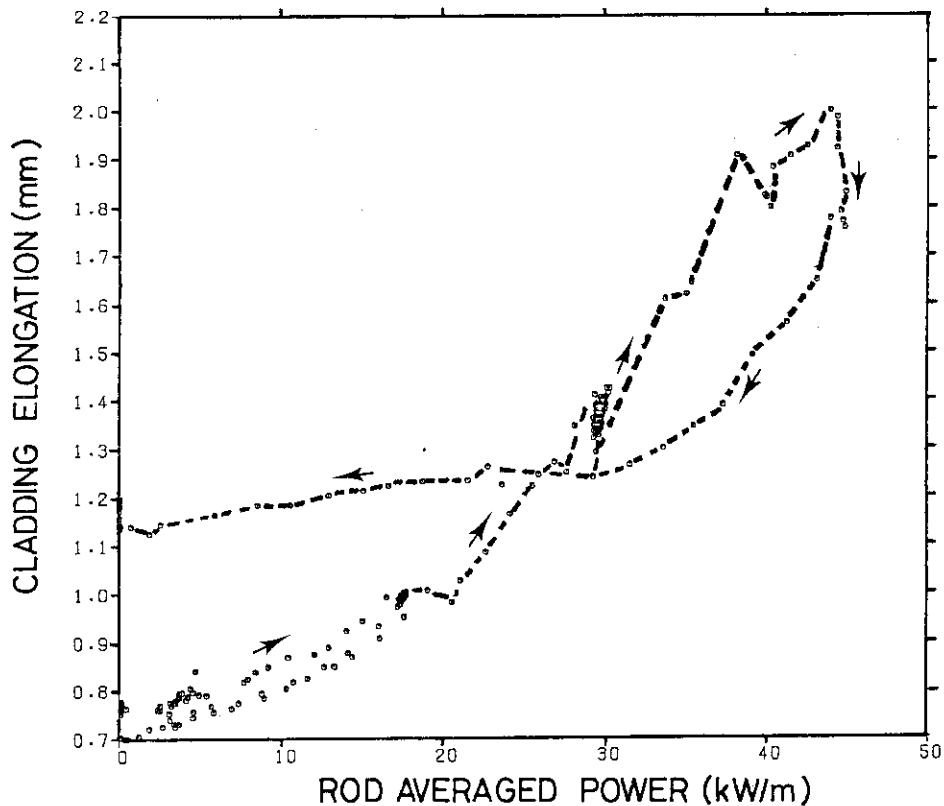


Fig. 10 Axial cladding elongation of reference rod BWR11,
as a function of rod averaged power

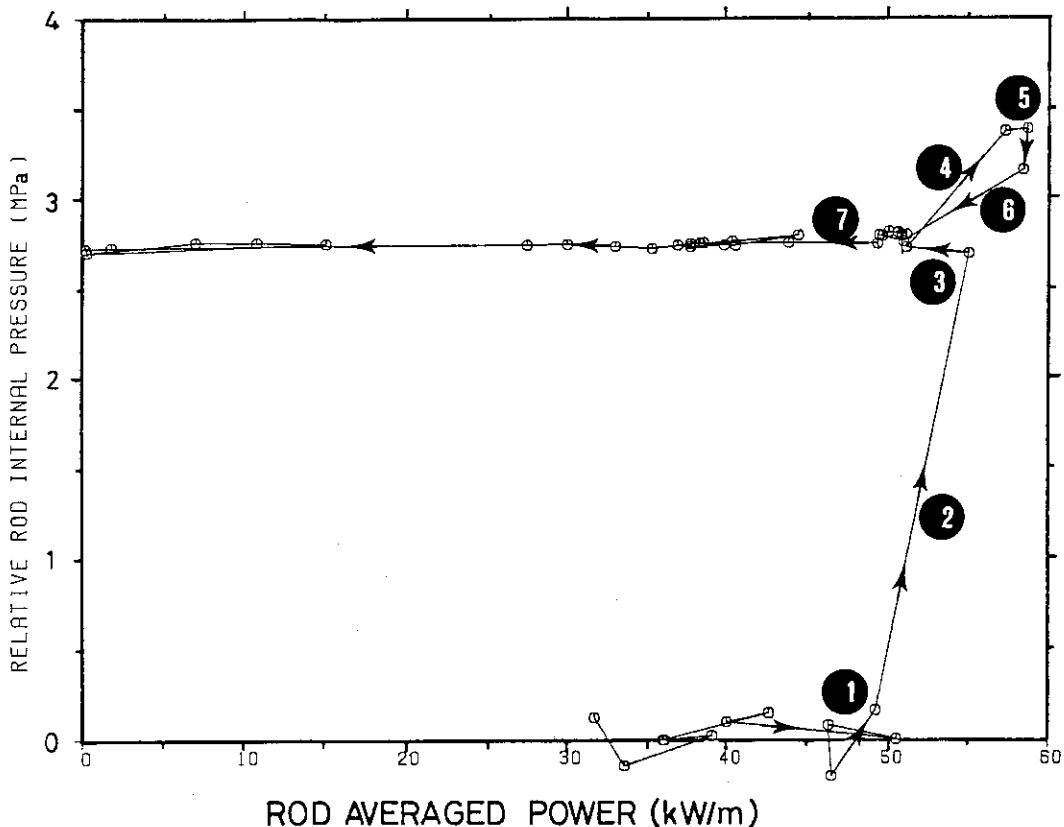


Fig. 11 Relative rod internal pressure of failed rod BWR9
as a function of rod averaged power, numbers in
the figure show the location of diameter measure-
ment at the power

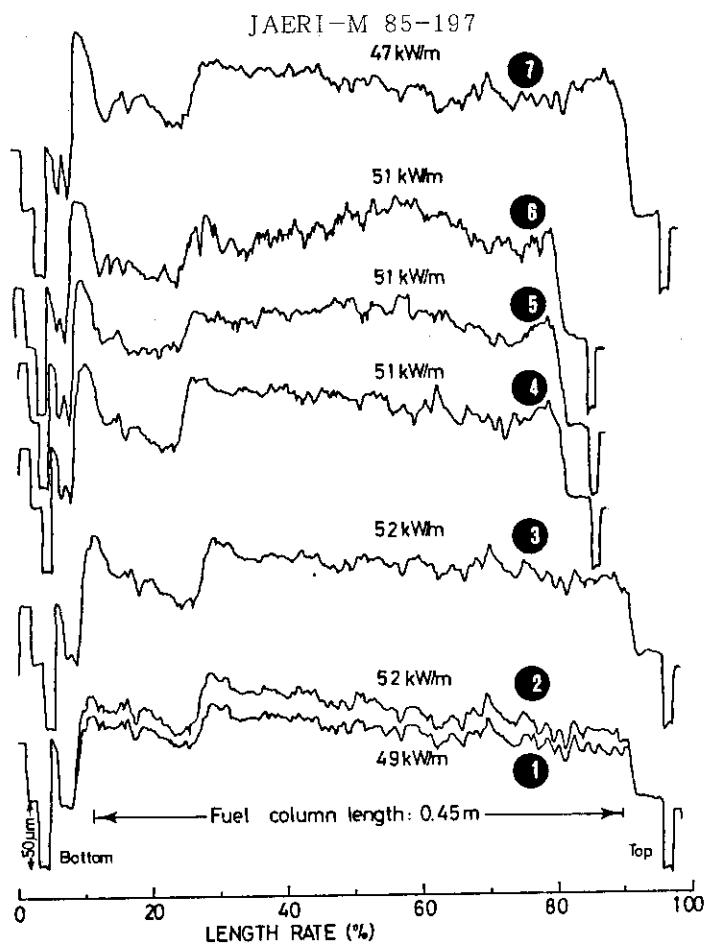


Fig. 12 Corresponded diameter profiles measured at the numbers shown in Fig. 11

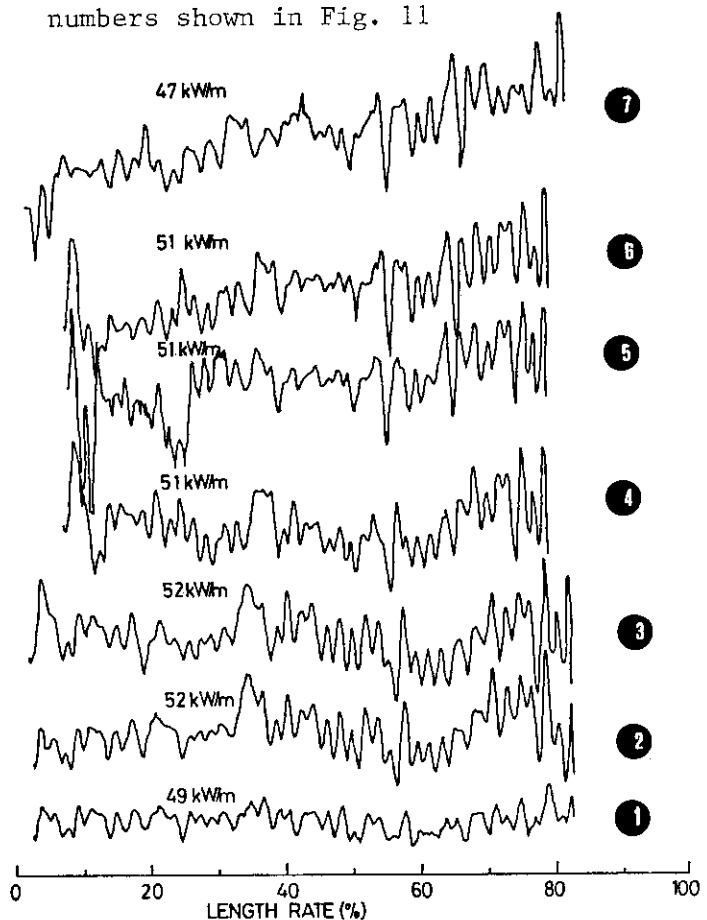


Fig. 13 Corresponded traces of eddy current testing, measured at the numbers shown in Fig. 11

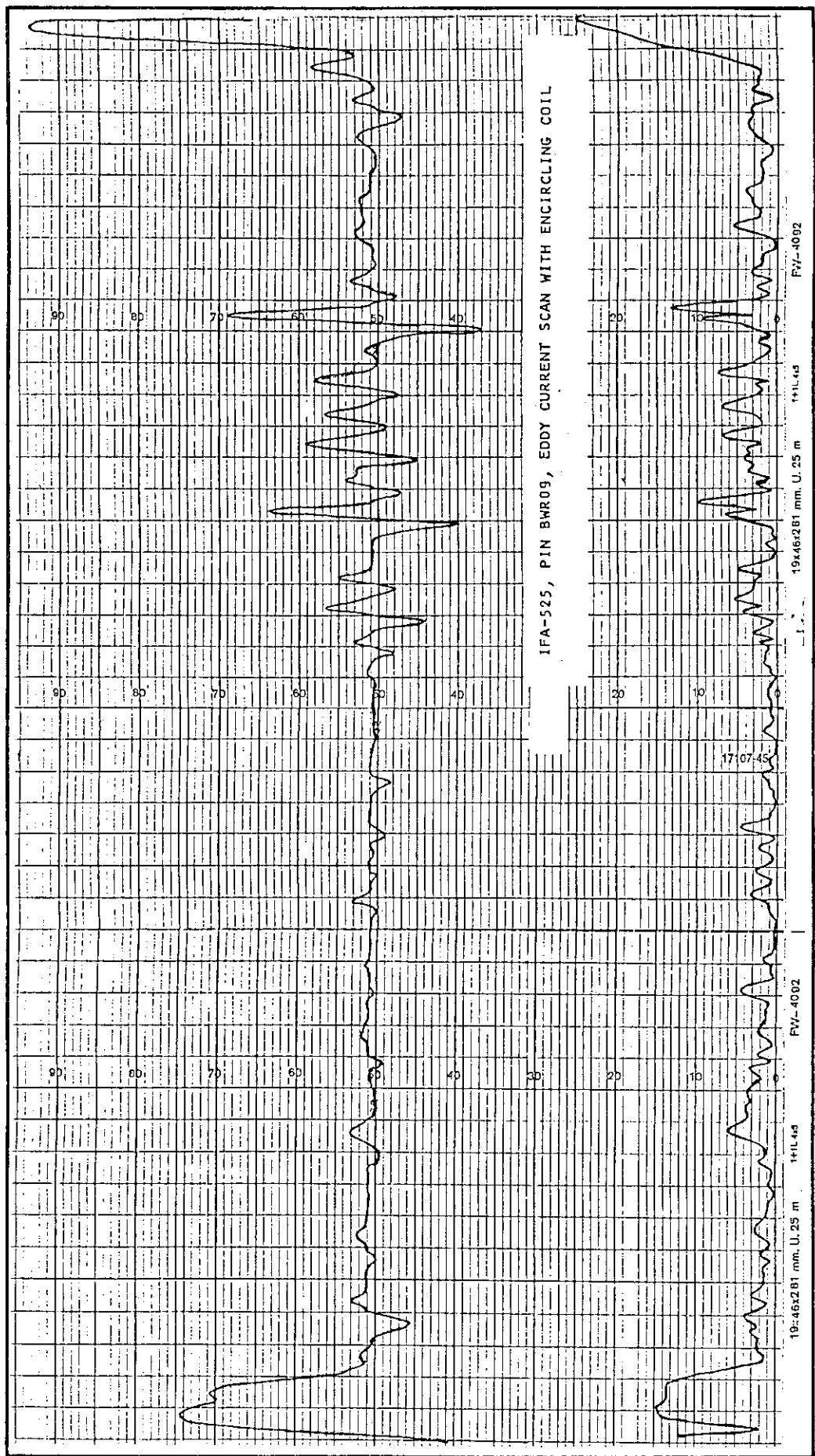


Fig. 14 Result of eddy current testing in PIE, (top)
phase and (bottom) amplitude curve

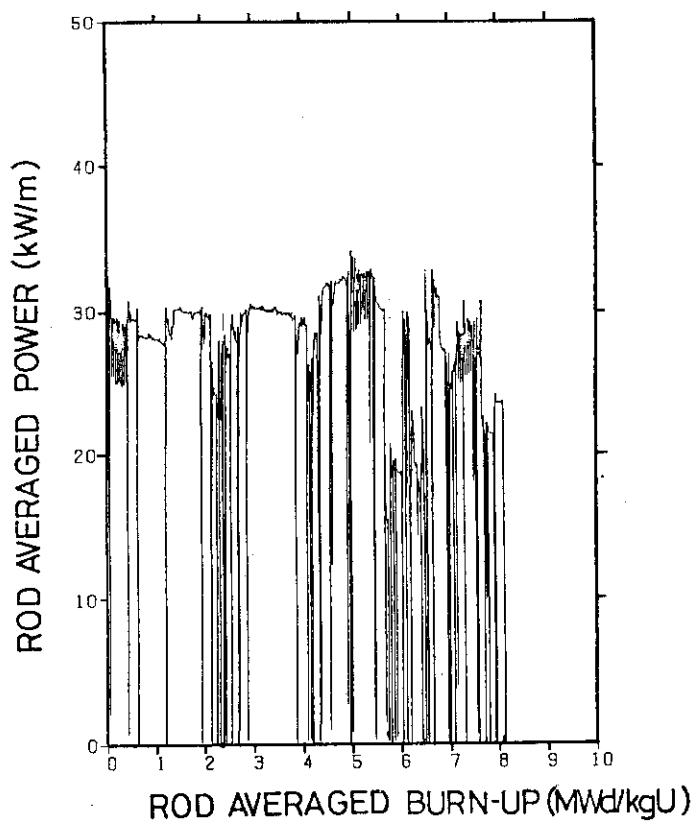


Fig. 15 Power history of BWR14 in the pre-irradiation condition

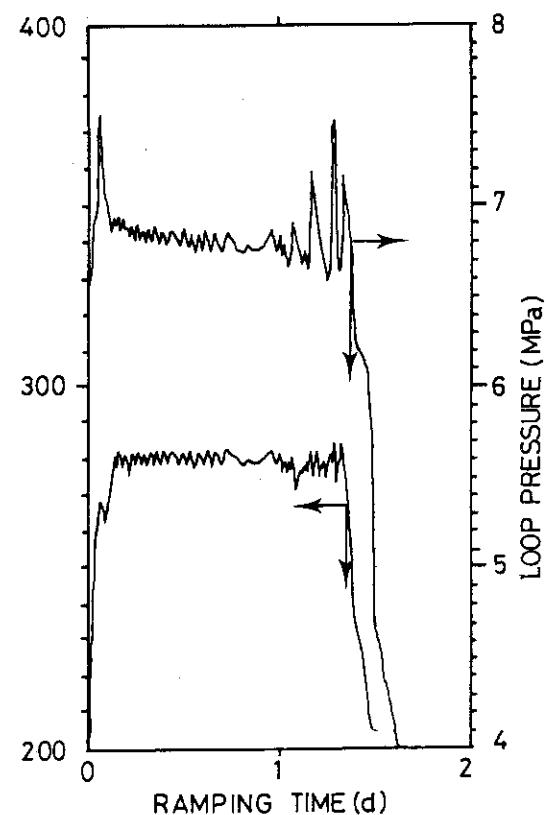


Fig. 17 Coolant temperature and loop pressure of BWR14 as a function of ramping time

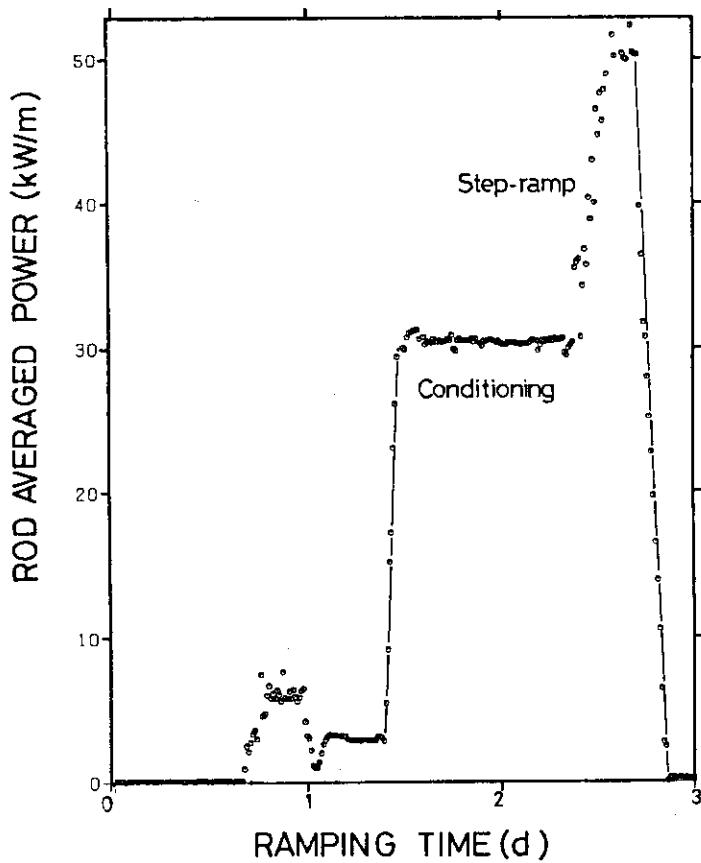


Fig. 16 Power history of BWR14 during ramping

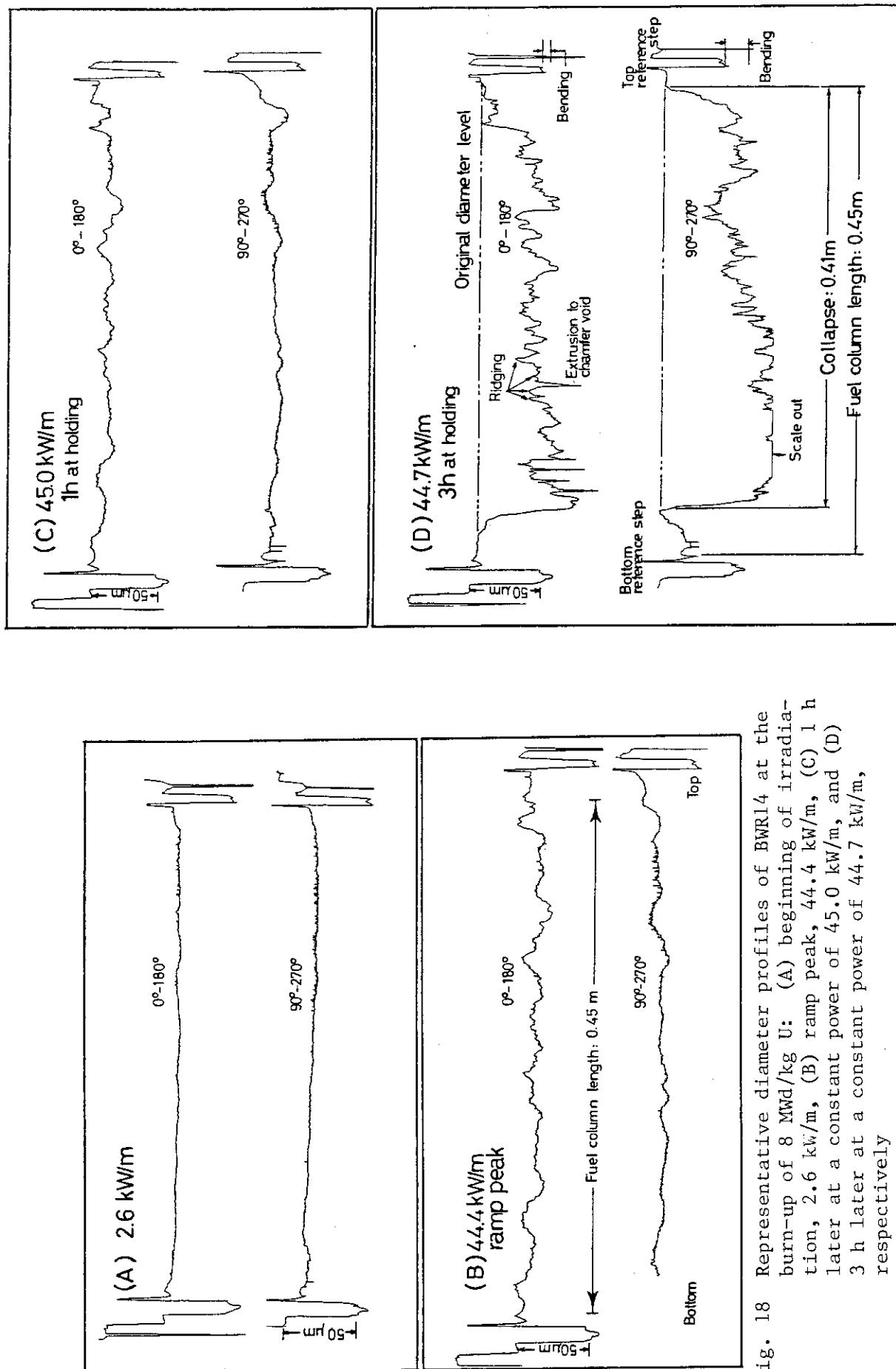


Fig. 18 Representative diameter profiles of BWR14 at the burn-up of 8 MWD/kg U: (A) beginning of irradiation, 2.6 kW/m, (B) ramp peak, 44.4 kW/m, (C) 1 h later at a constant power of 45.0 kW/m, and (D) 3 h later at a constant power of 44.7 kW/m, respectively

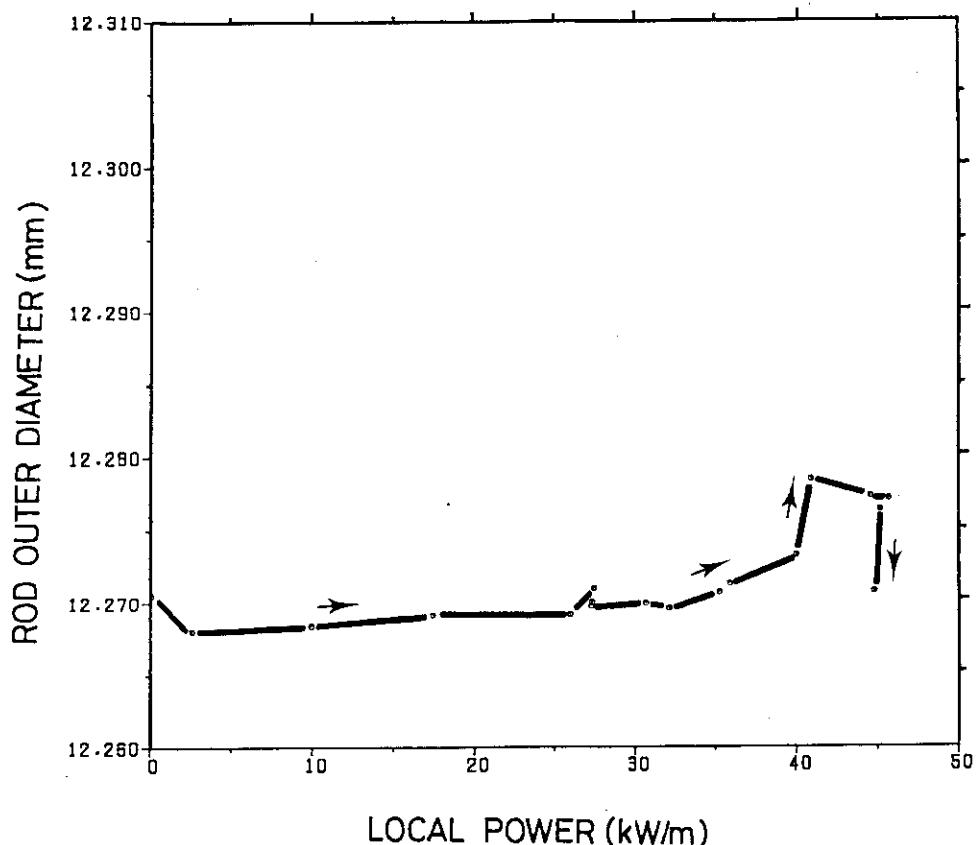


Fig. 19 Rod outer diameter of BWR14 at the burn-up of 8 MWD/kg U, where the evaluation against collapsed rod diameter was excluded

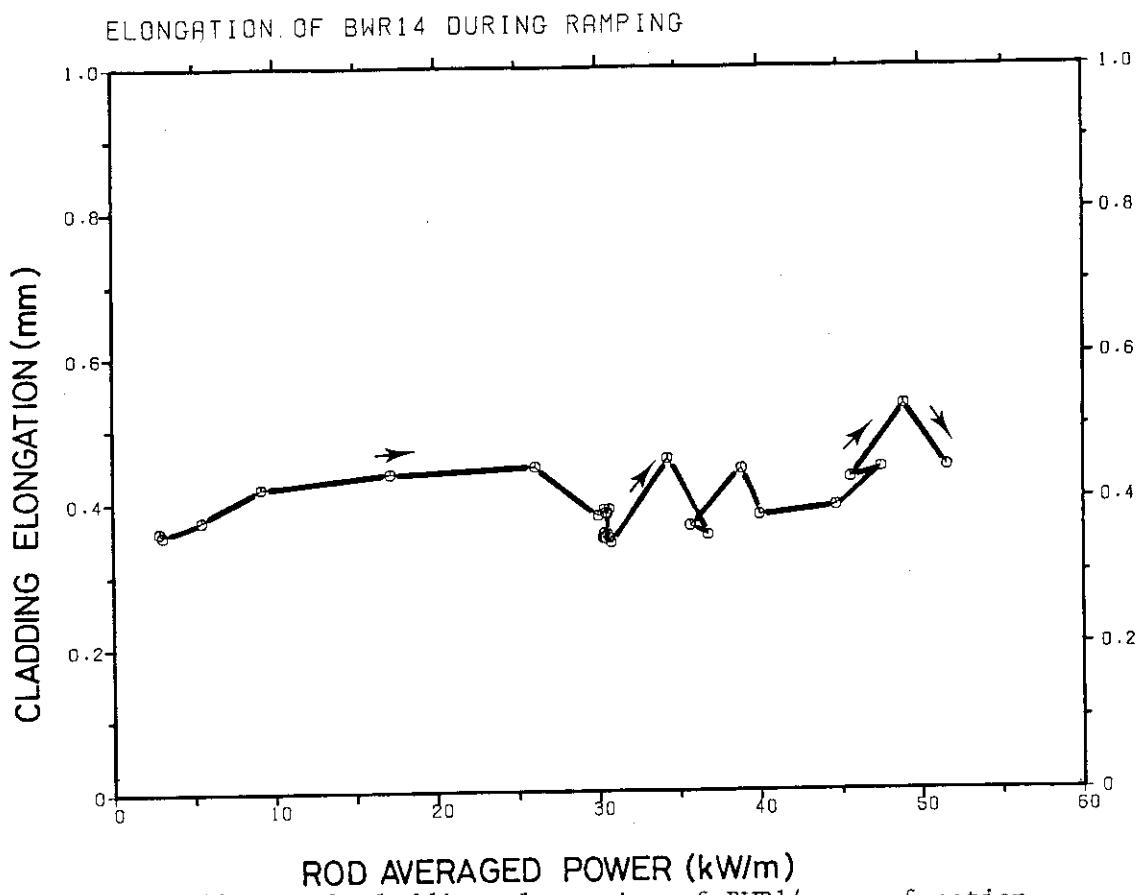


Fig. 20 Axial cladding elongation of BWR14 as a function of rod averaged power

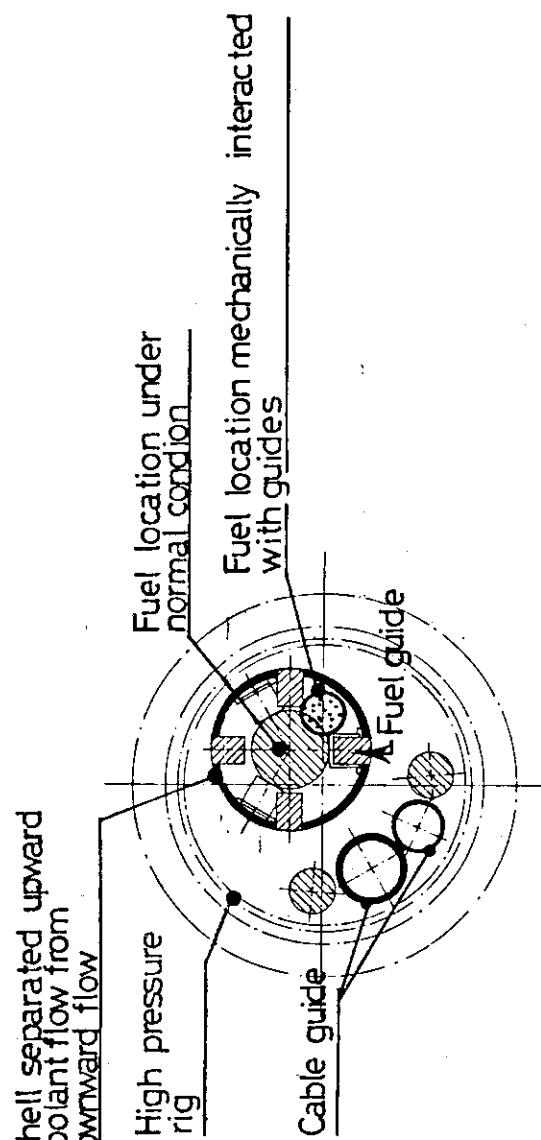
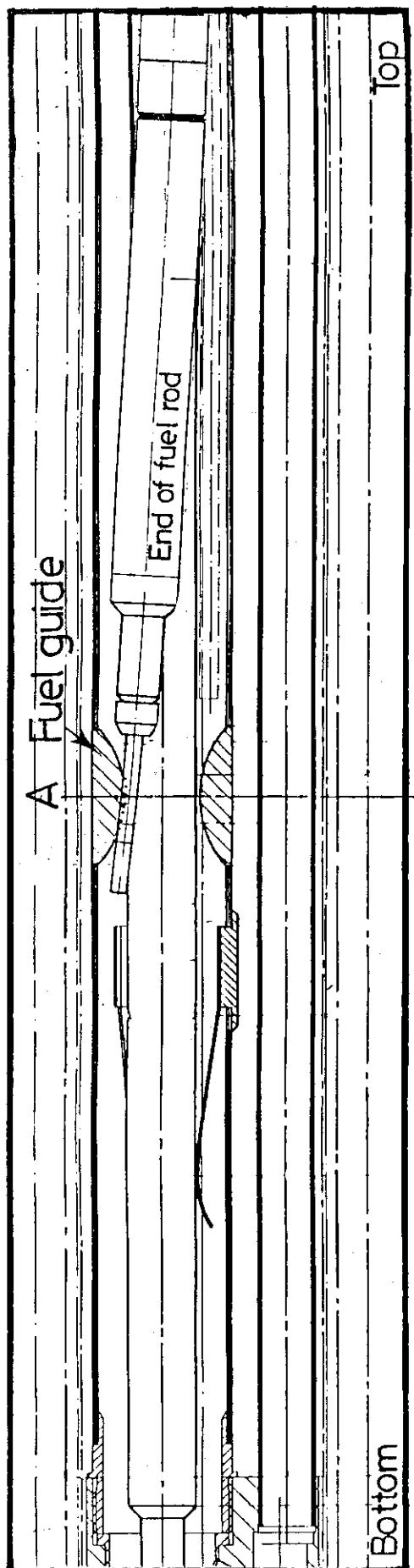


Fig. 21 (Top) the location where the fuel rod was mechanically interacted with guide tubes and (bottom) cross section at the location where the locking is occurred

Cross section A-A

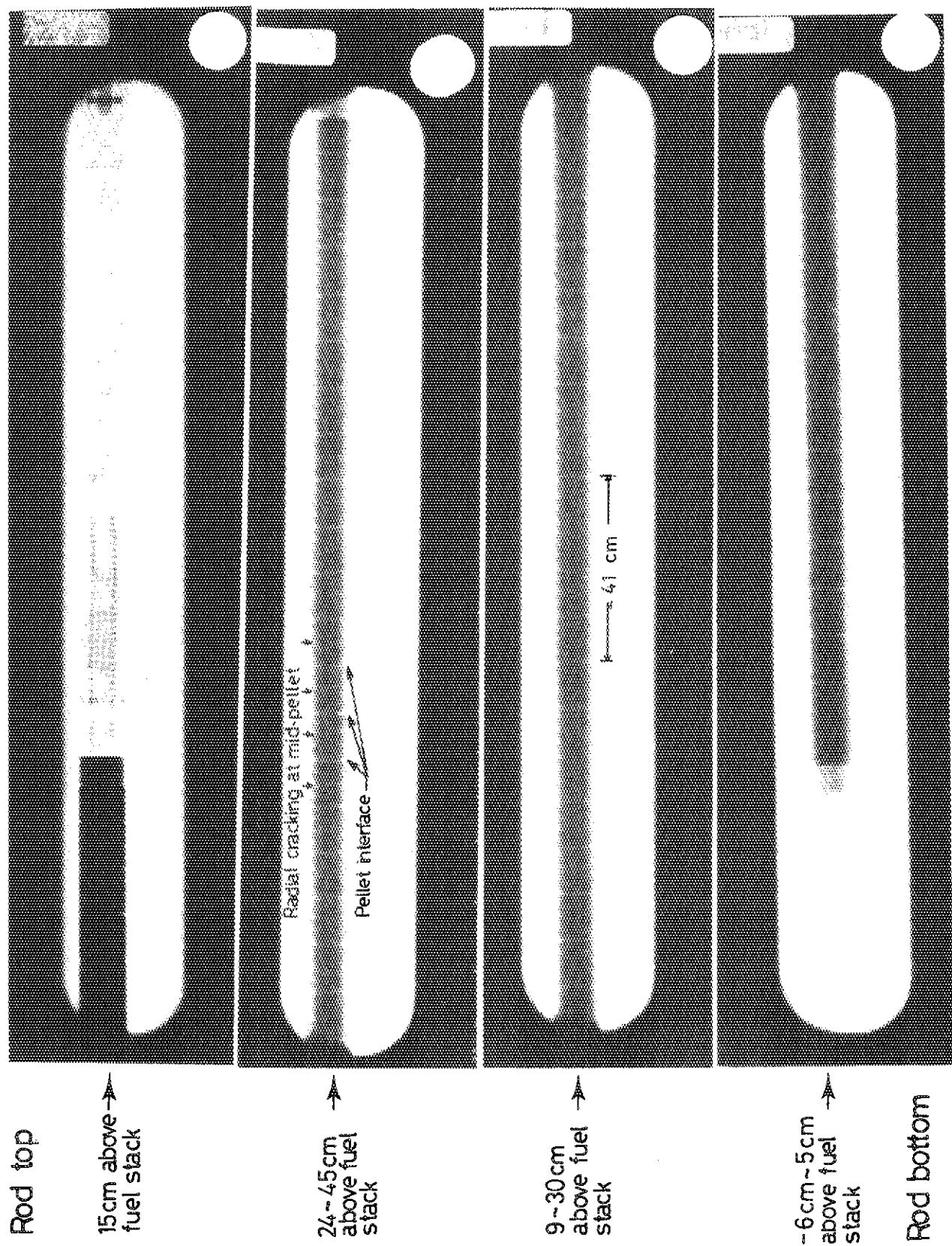


Photo 1 Neutron radiography of BWR9,

付 錄 I
急激な直径変形を生じたBWR9
の詳細な直径プロフィール

付録 I に収集した直径プロフィール：

<説明>

直径プロフィールは、1回の実行（以後ランと称す）につき DG 1 (0° - 180° 方向) 及び DG 2 (90° - 270° 方向) が得られる。例えば、Fig.2.2 は、ラン番号 8828 に於ける、DG 1 での直径プロフィールであり、Fig.A.2 はラン番号 8828 に於ける、DG 2 での直径プロフィールである。ラン番号、最初のランからの経過時間及び直径測定時の局所線出力については、下に示す。

ラン番号	経過時間(h)	局所線出力(kW/m)
8828	21.704	1.644
8834	25.078	9.147
8836	26.089	18.515
8838	32.854	20.421
8840	33.776	27.803
8842	39.109	28.072
8848	42.131	27.655
8850	48.963	27.186
8856	60.731	31.279
8858	61.379	32.031
8860	62.140	33.319
8862	62.514	37.171
8864	63.210	37.695
8866	63.622	41.721
8868	64.305	42.862
8870	64.783	46.164
8872	65.181	47.493
8874	65.615	46.808
8880	67.614	46.714
8881	67.747	53.586
8882	69.608	46.902

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08828 : PIN MOVING = DOWN

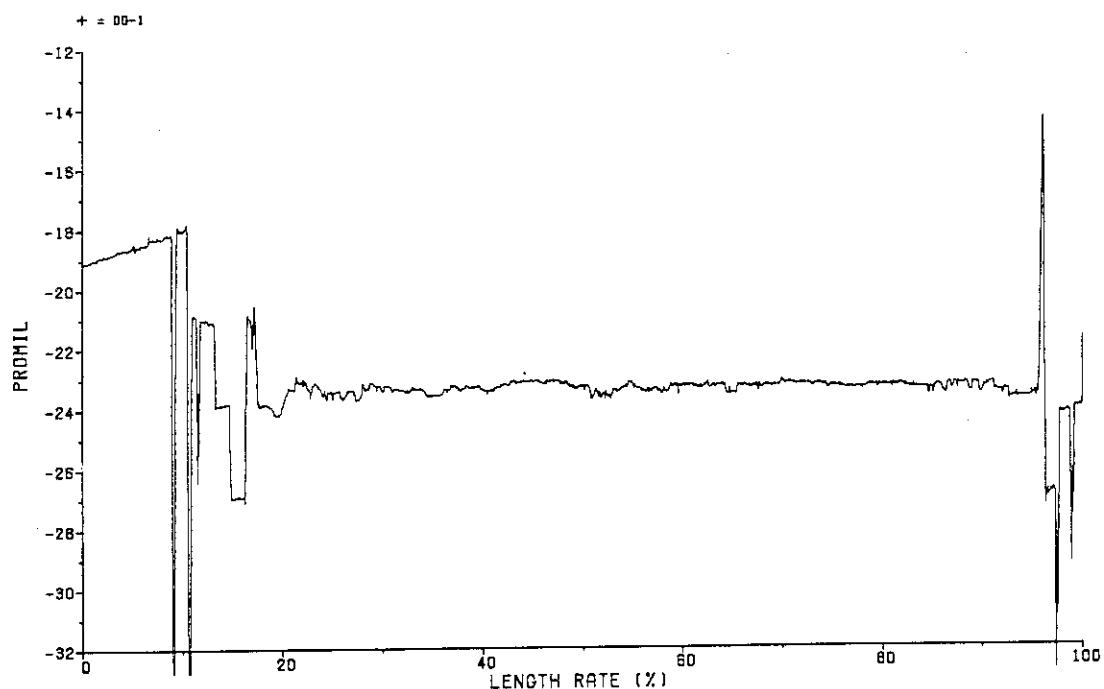


Fig. A.1 Diameter profile of BWR9 at the run number
8828: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08828 : PIN MOVING = DOWN

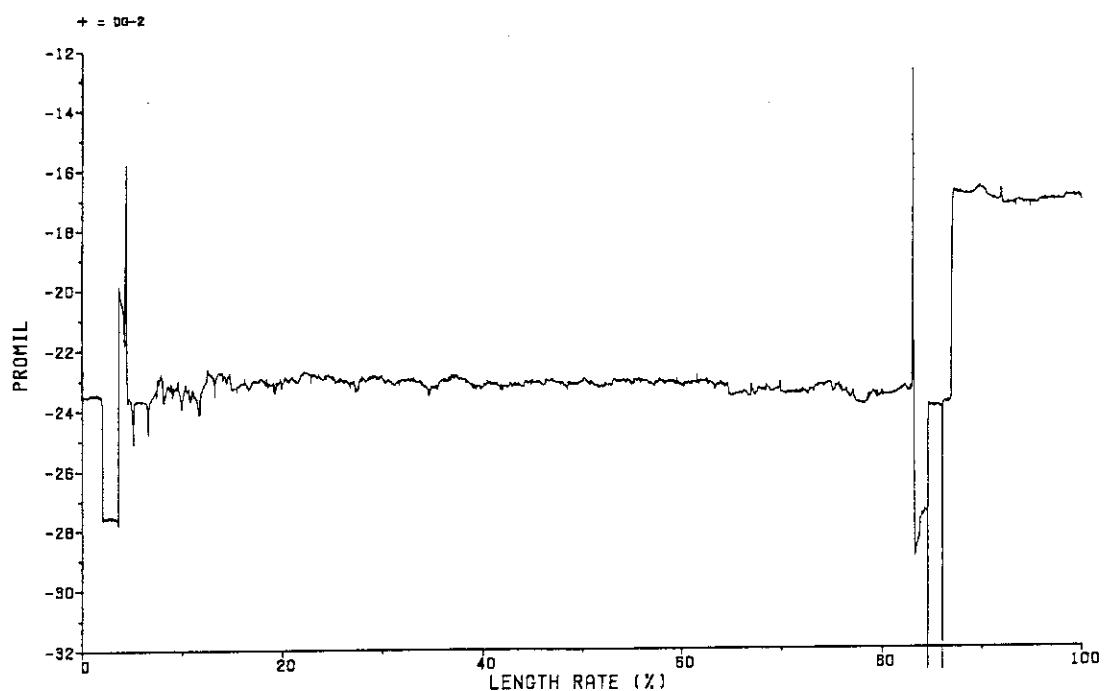


Fig. A.2 Diameter profile of BWR9 at the run number
8828: DG-2

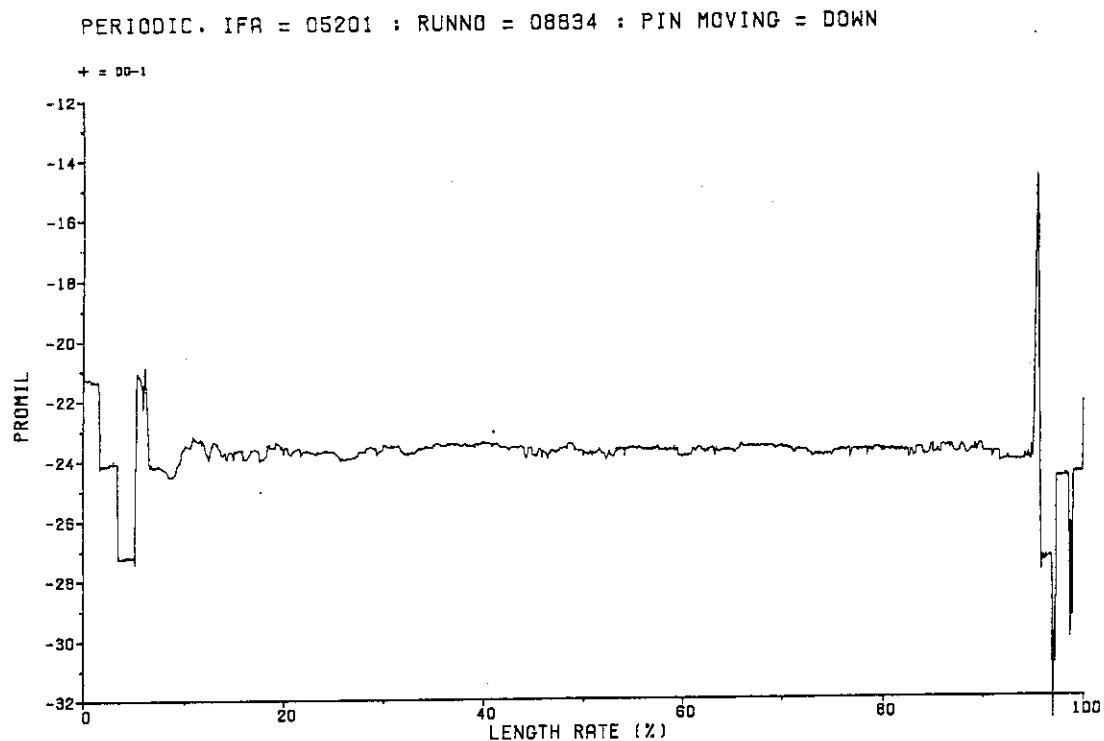


Fig. A.3 Diameter profile of BWR9 at the run number
8834: DG-1

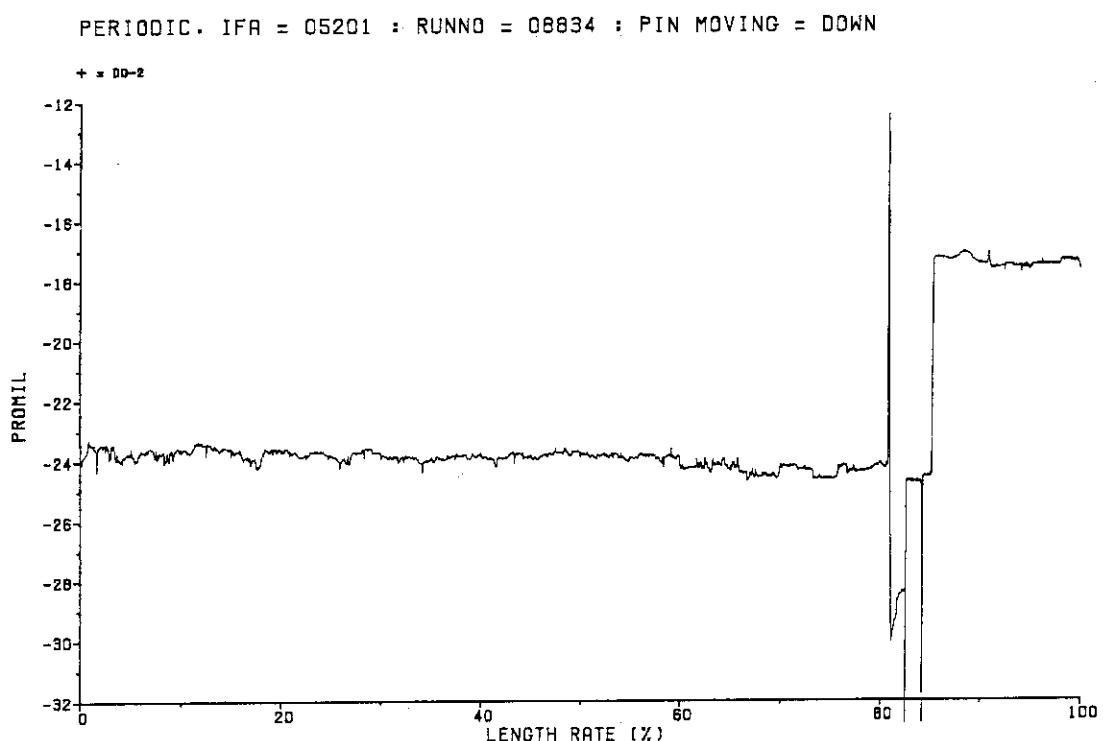


Fig. A.4 Diameter profile of BWR9 at the run number
8834: DG-2

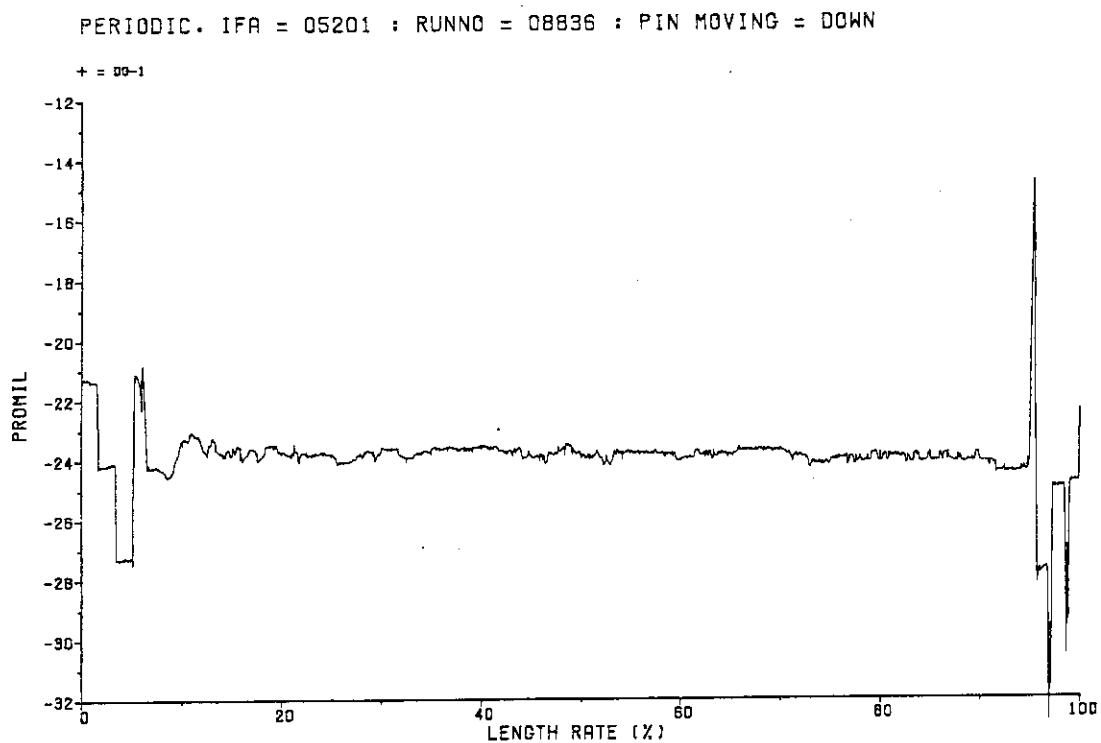


Fig. A.5 Diameter profile of BWR9 at the run number 8836: DG-1

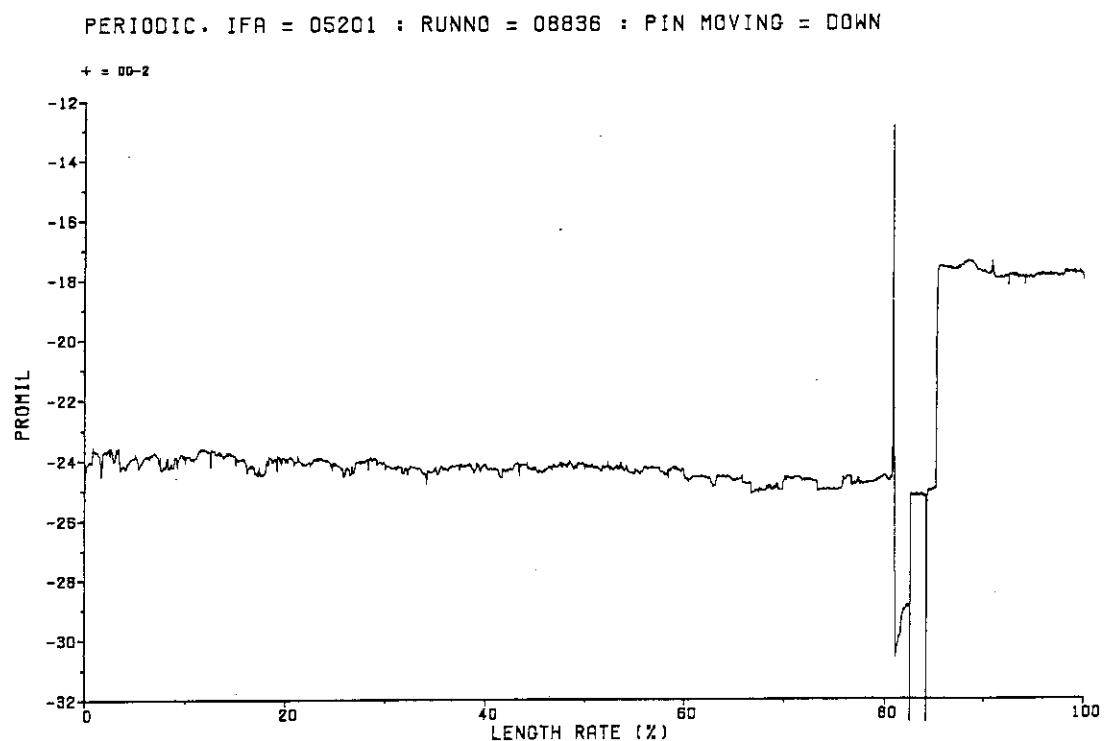


Fig. A.6 Diameter profile of BWR9 at the run number 8836: DG-2

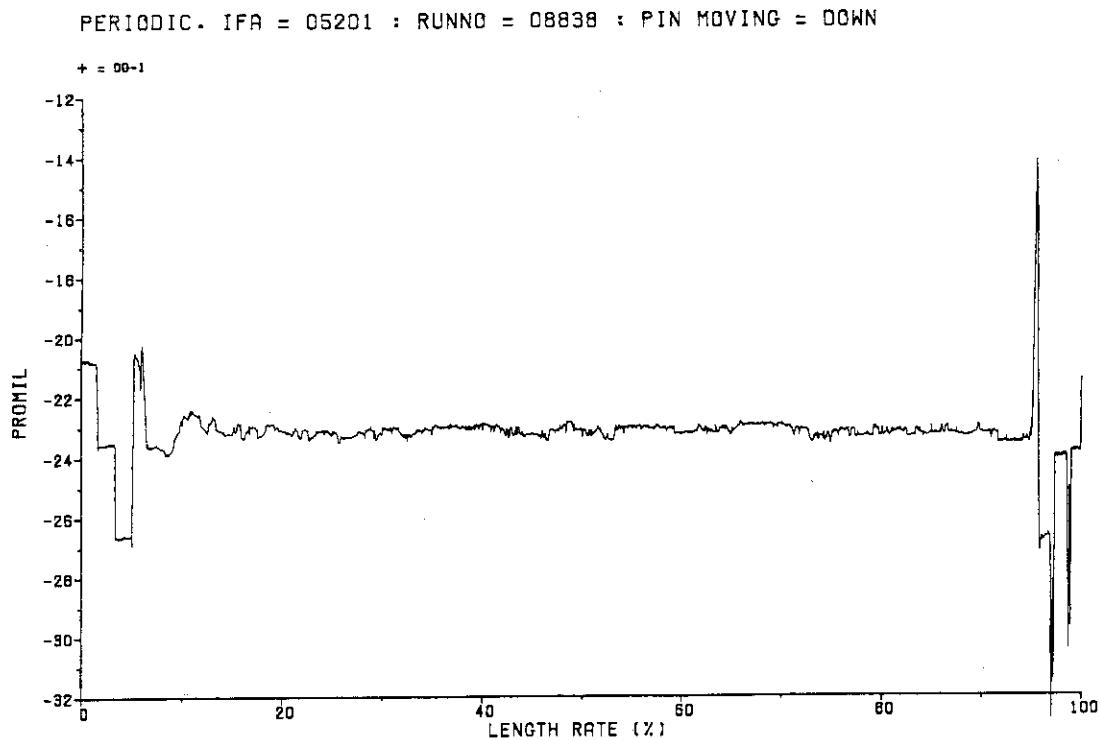


Fig. A.7 Diameter profile of BWR9 at the run number 8838: DG-1

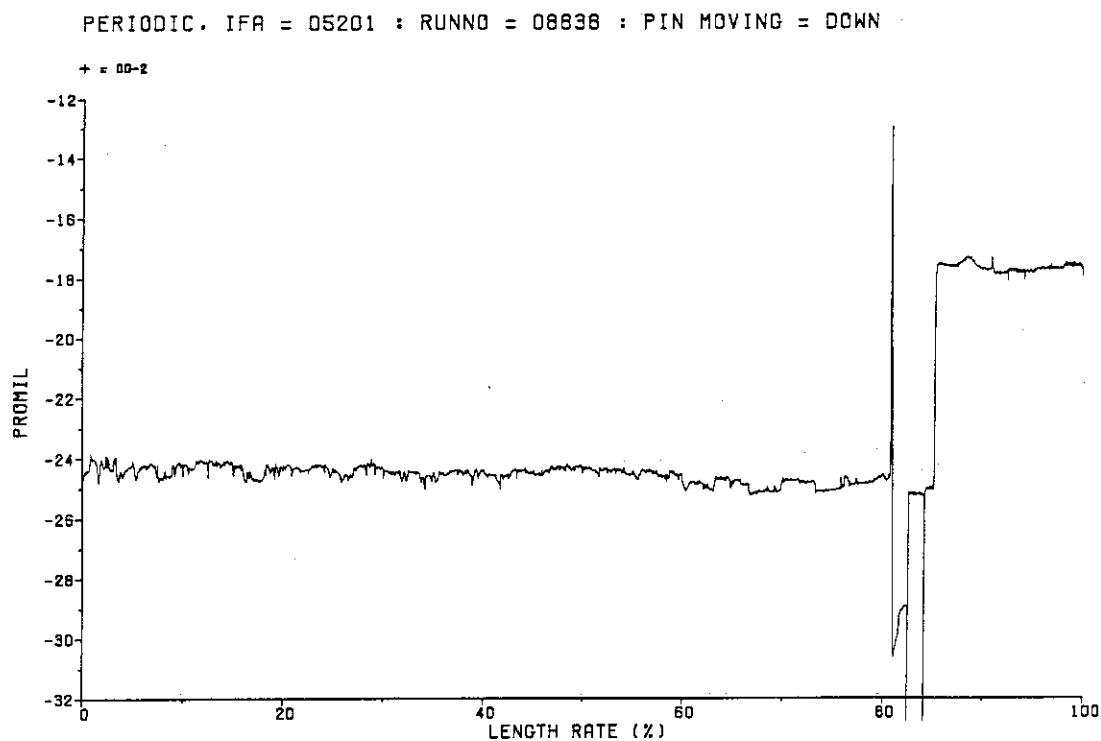


Fig. A.8 Diameter profile of BWR9 at the run number 8838: DG-2

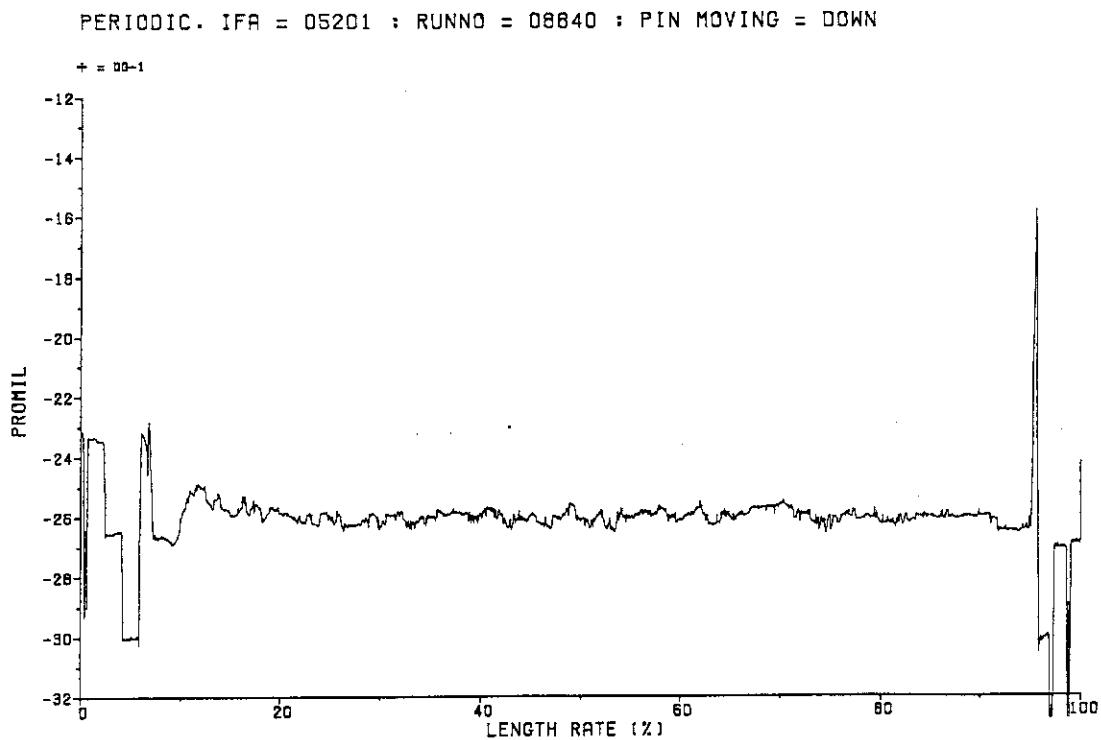


Fig. A.9 Diameter profile of BWR9 at the run number
8840: DG-1

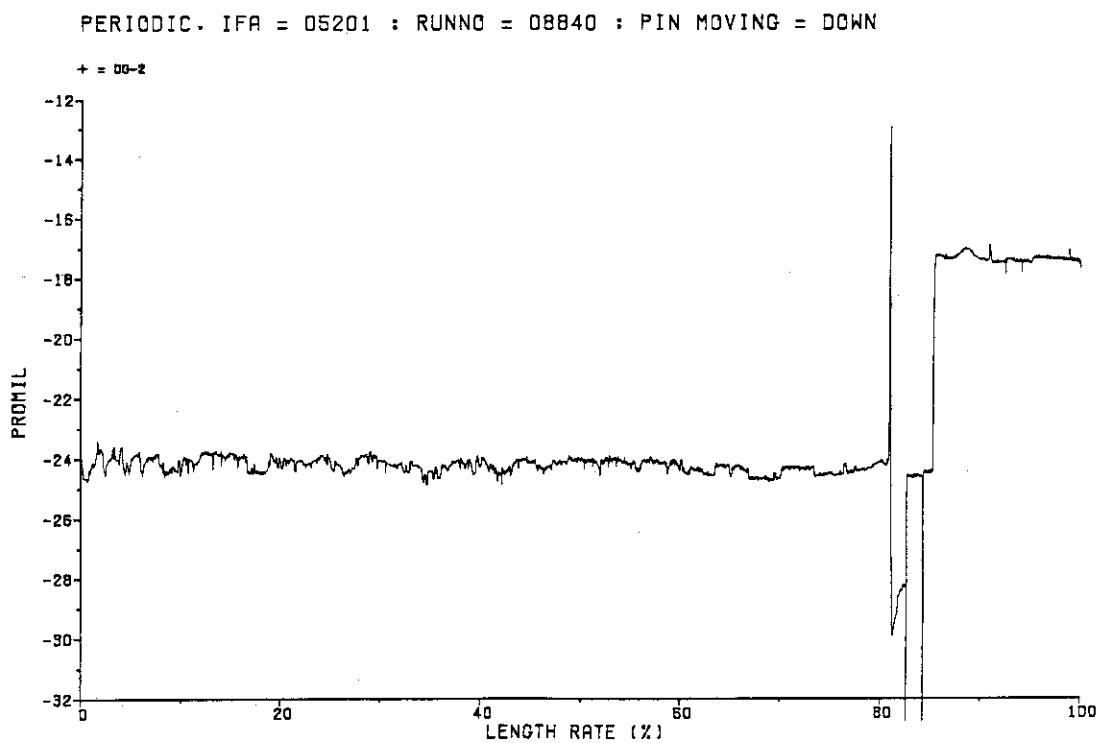


Fig. A.10 Diameter profile of BWR9 at the run number
8840: DG-2

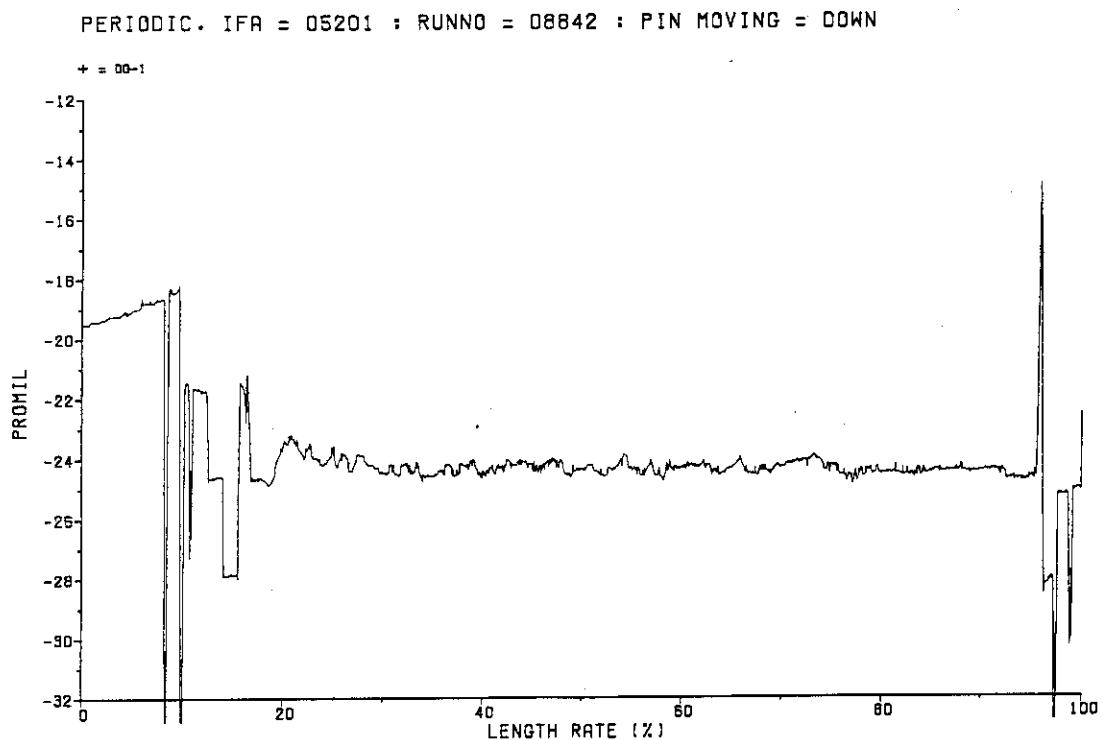


Fig. A.11 Diameter profile of BWR9 at the run number
9942: DG-1

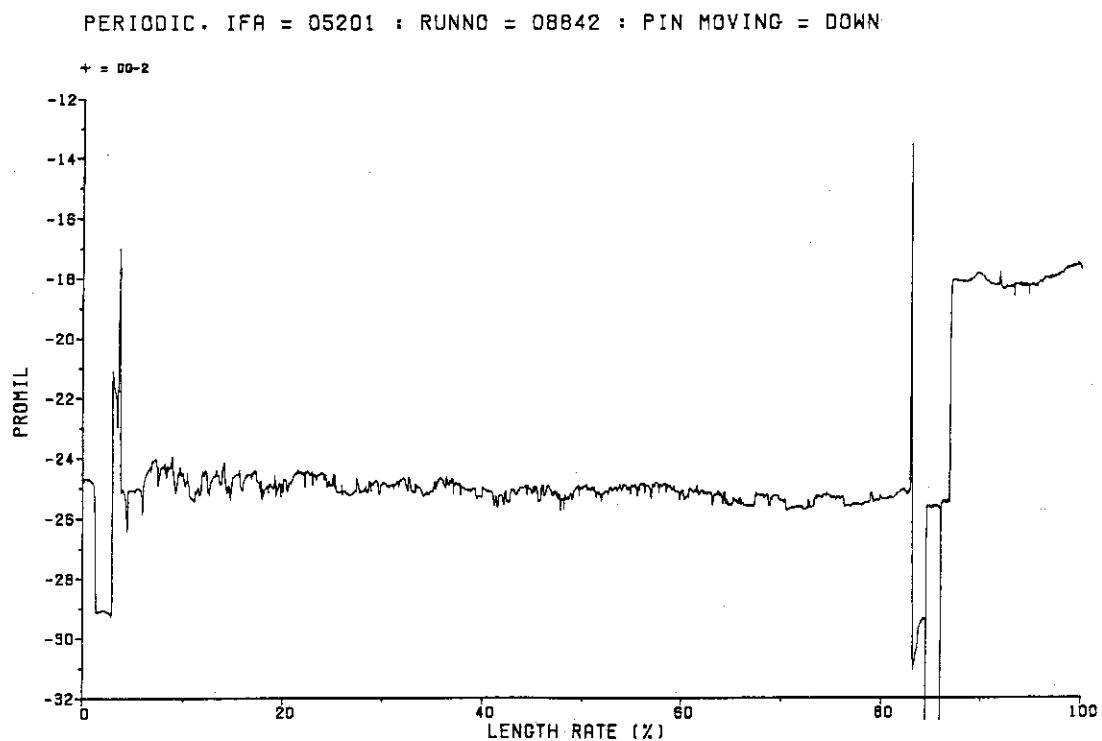


Fig. A.12 Diameter profile of BWR9 at the run number
8842: DG-2

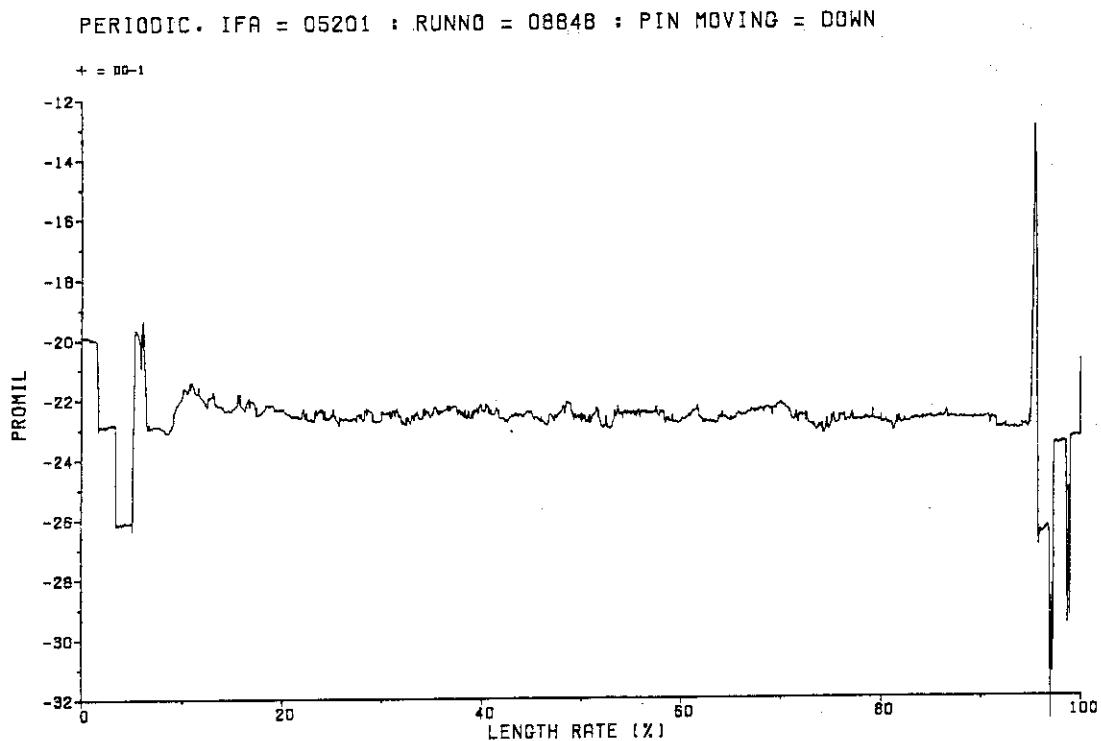


Fig. A.13 Diameter profile of BWR9 at the run number 8848: DG-1

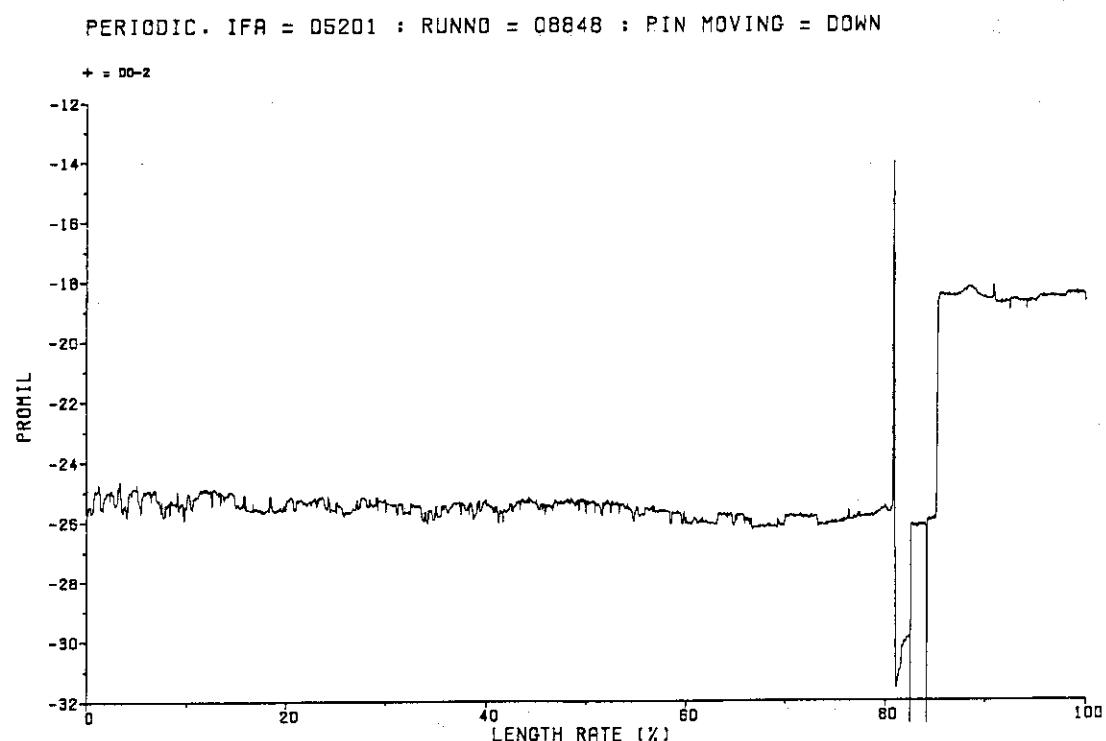


Fig. A.14 Diameter profile of BWR9 at the run number 8848: DG-2

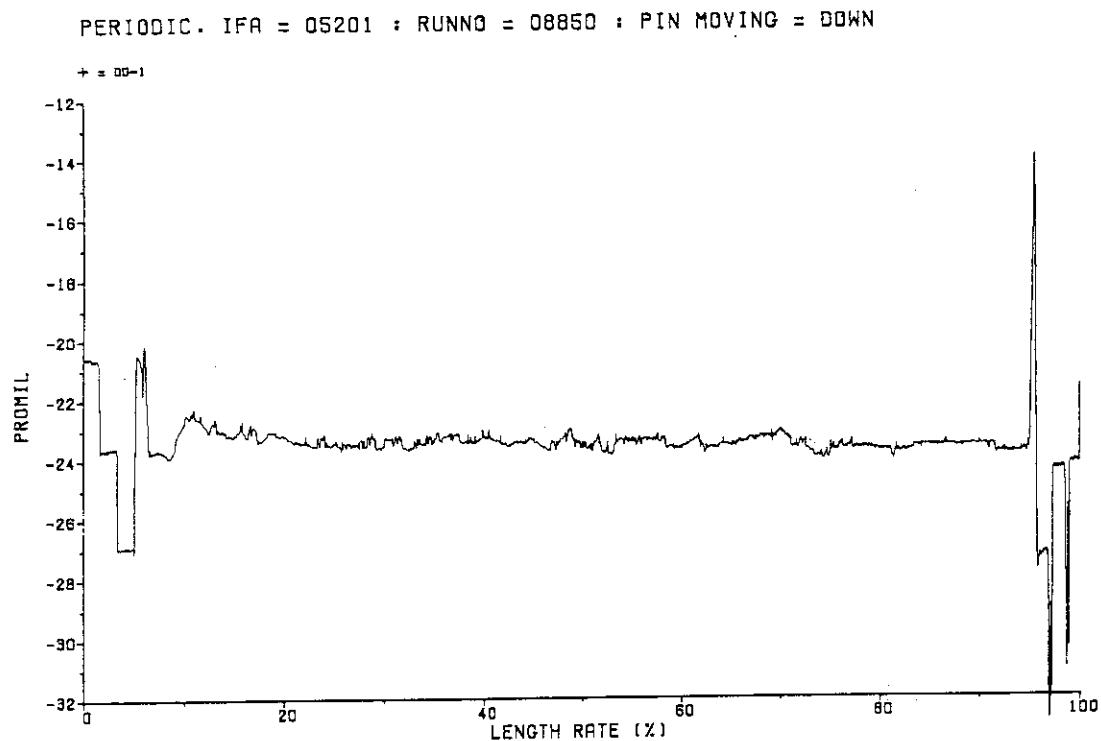


Fig. A.15 Diameter profile of BWR9 at the run number 8850: DG-1

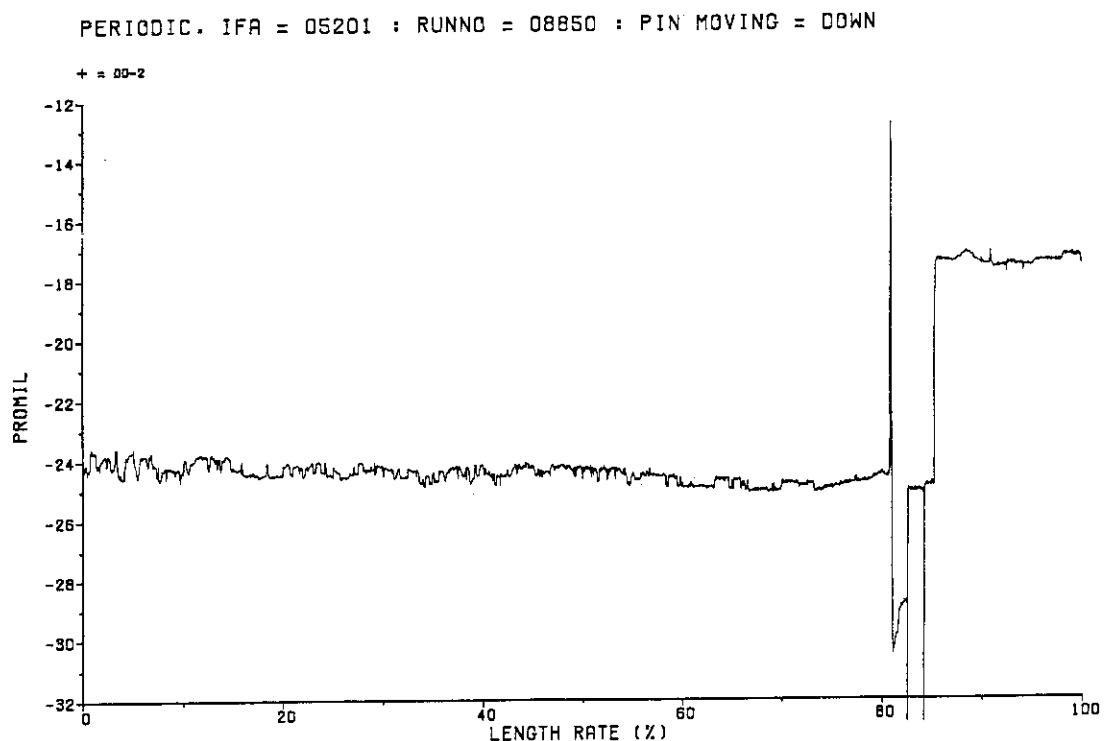


Fig. A.16 Diameter profile of BWR9 at the run number 8850: DG-2

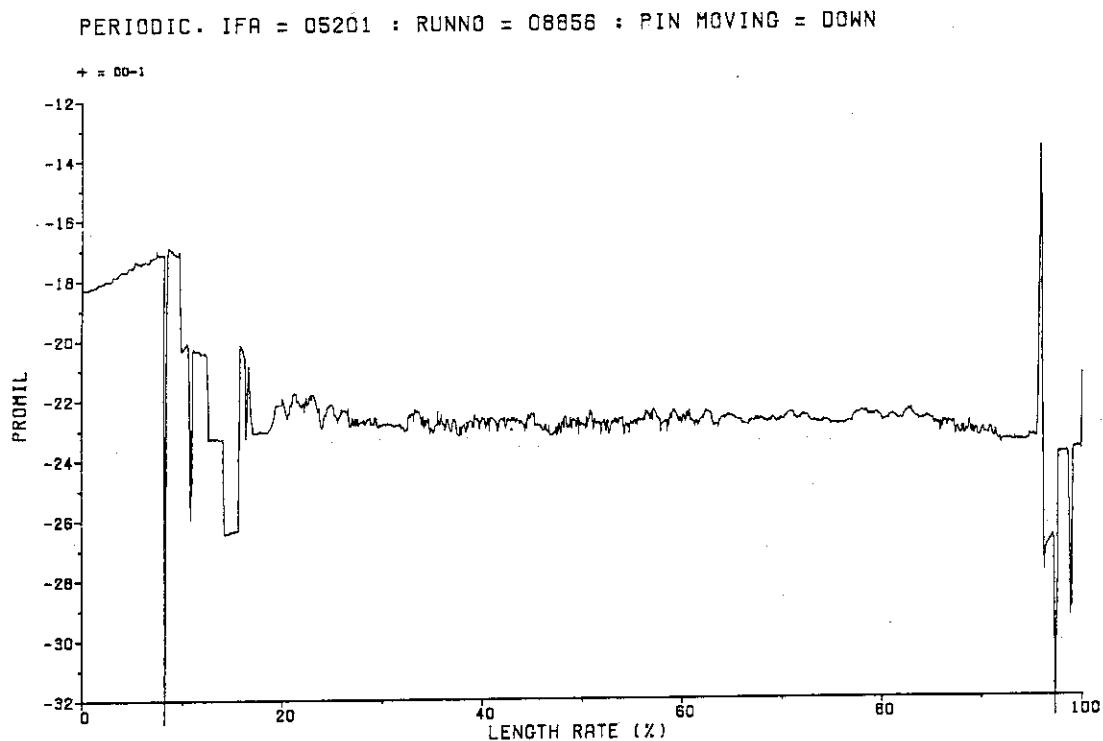


Fig. A.17 Diameter profile of BWR9 at the run number 8856: DG-1

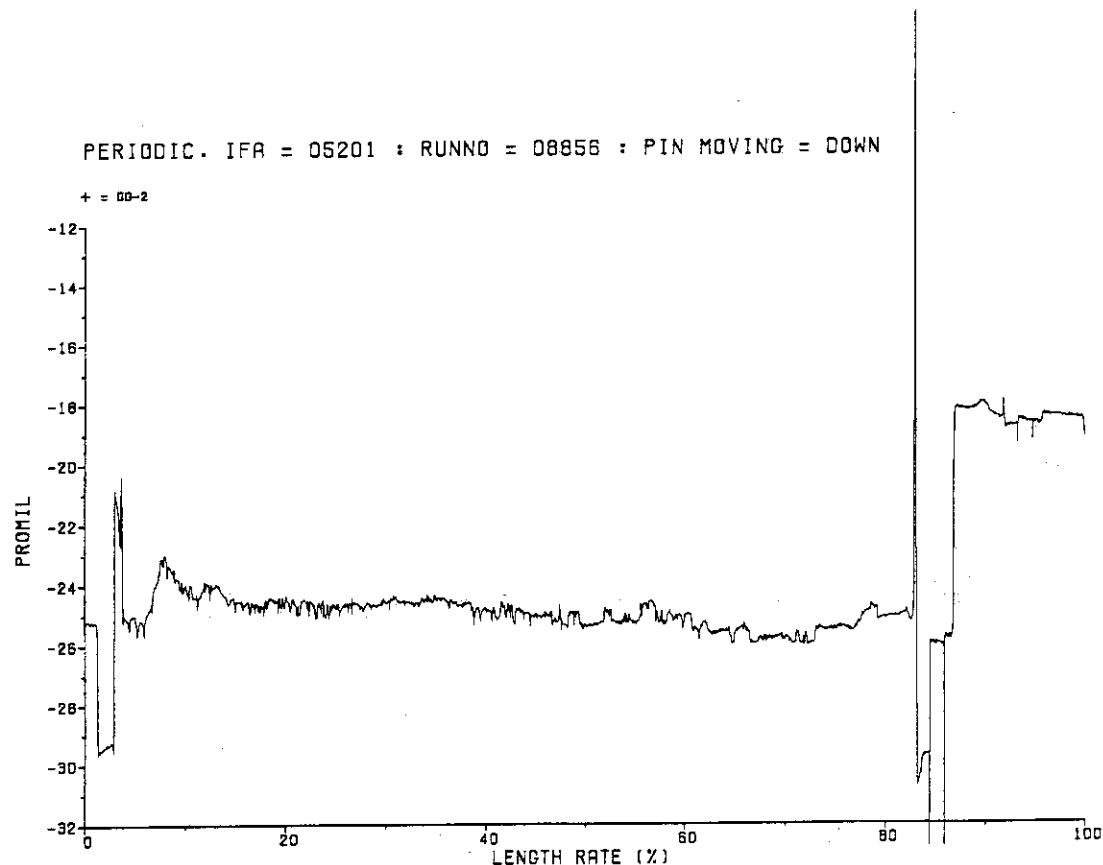
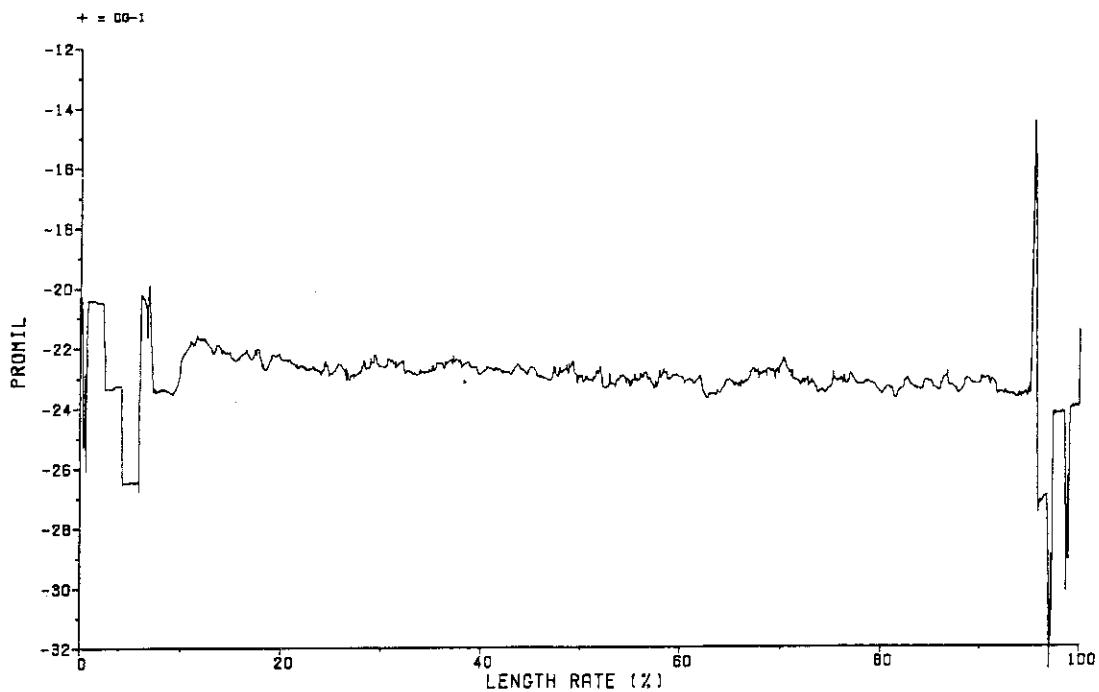
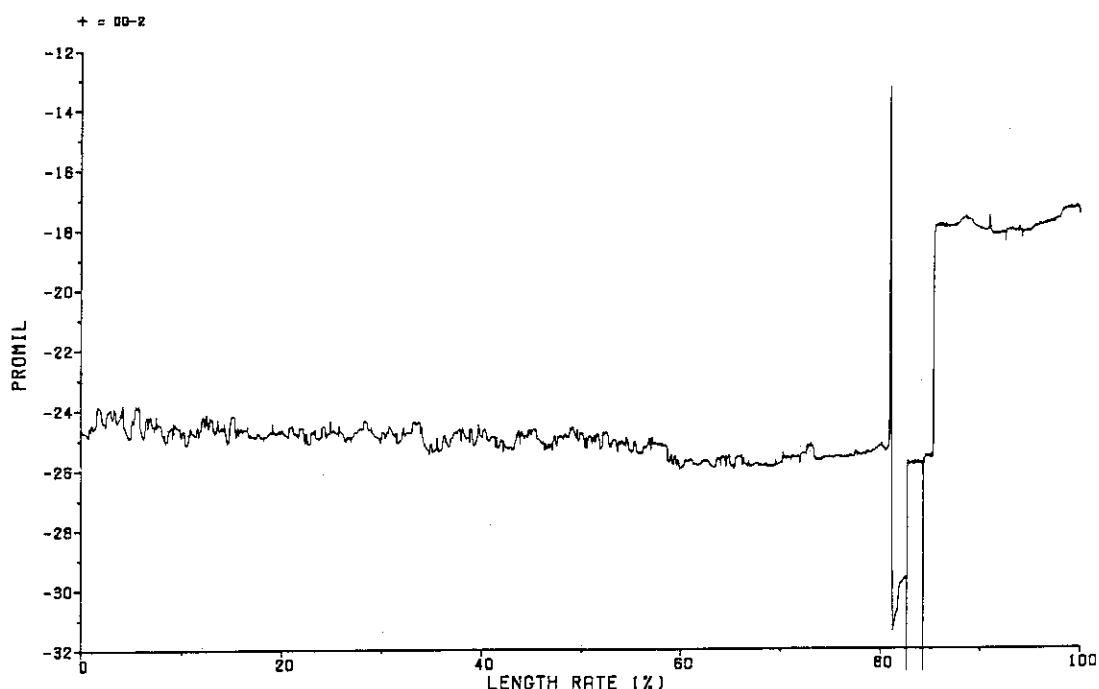


Fig. A.18 Diameter profile of BWR9 at the run number 8856: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08858 : PIN MOVING = DOWN

Fig. A.19 Diameter profile of BWR9 at the run number
8858: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08858 : PIN MOVING = DOWN

Fig. A.20 Diameter profile of BWR9 at the run number
8858: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08860 : PIN MOVING = DOWN

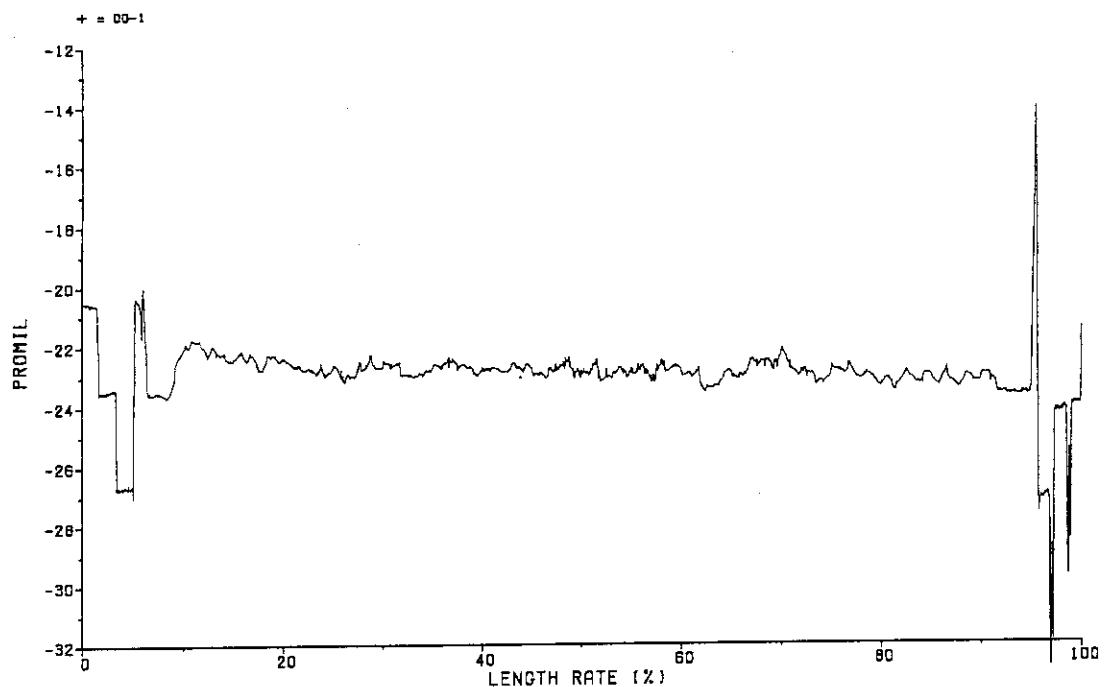


Fig. A.21 Diameter profile of BWR9 at the run number 8860: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08860 : PIN MOVING = DOWN

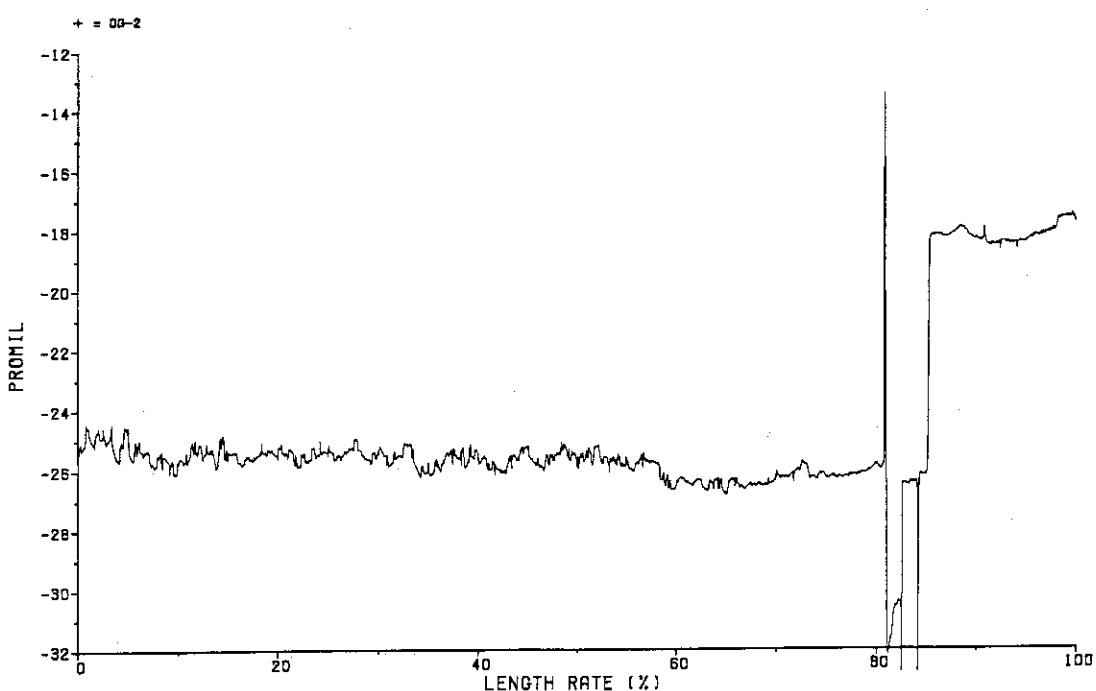


Fig. A.22 Diameter profile of BWR9 at the run number 8860: DG-2

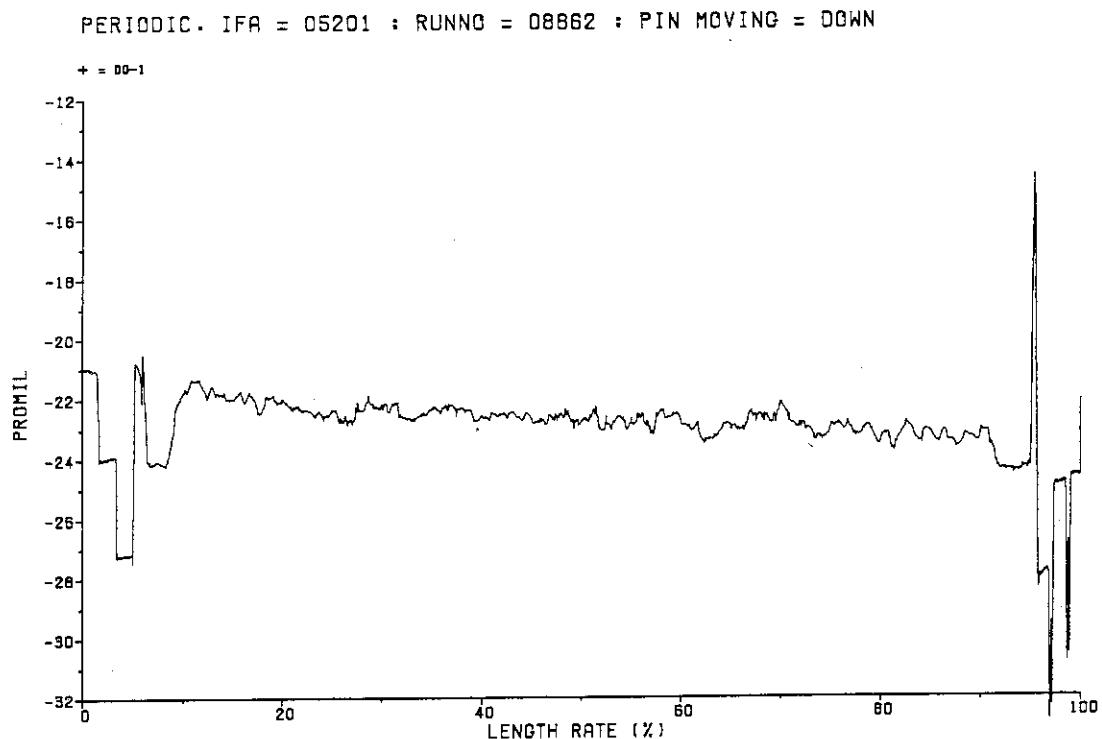


Fig. A.23 Diameter profile of BWR9 at the run number 8862: DG-1

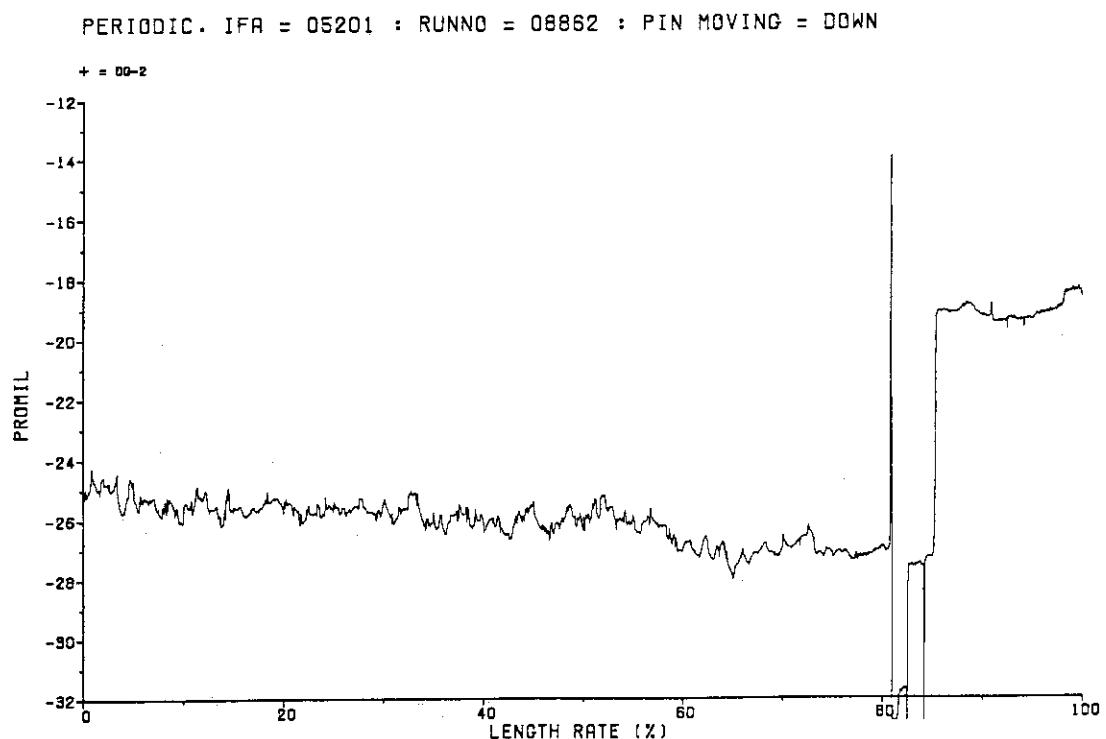


Fig. A.24 Diameter profile of BWR9 at the run number 8862: DG-2

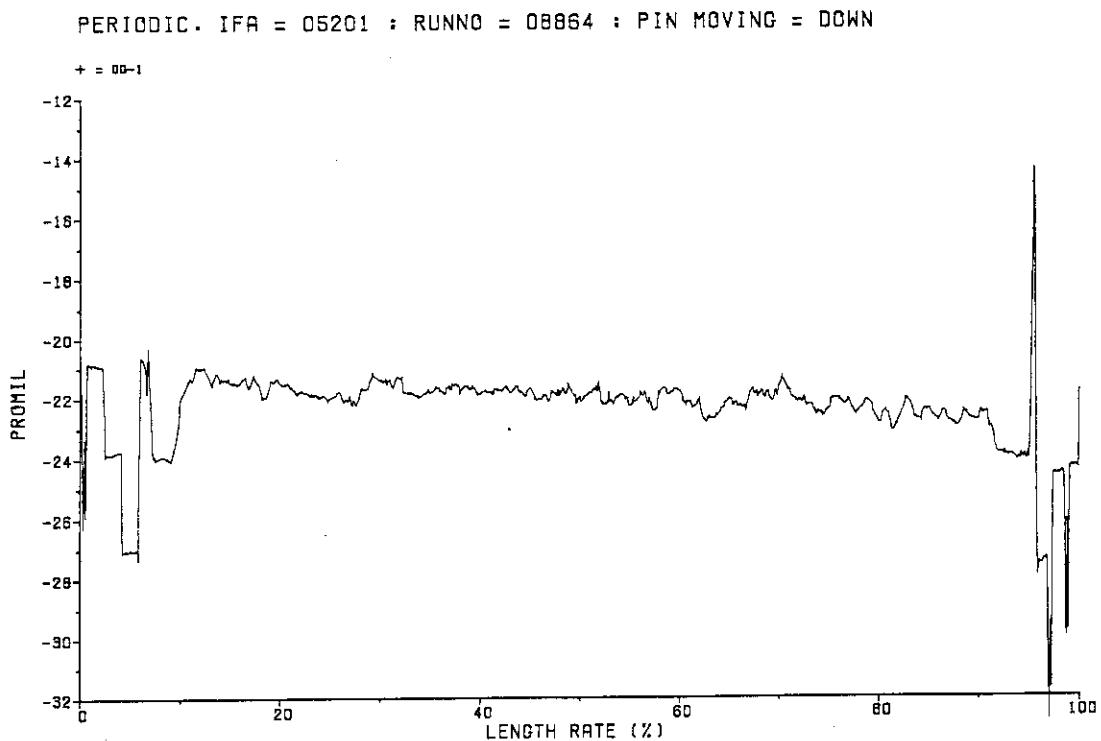


Fig. A.25 Diameter profile of BWR9 at the run number 8864: DG-1

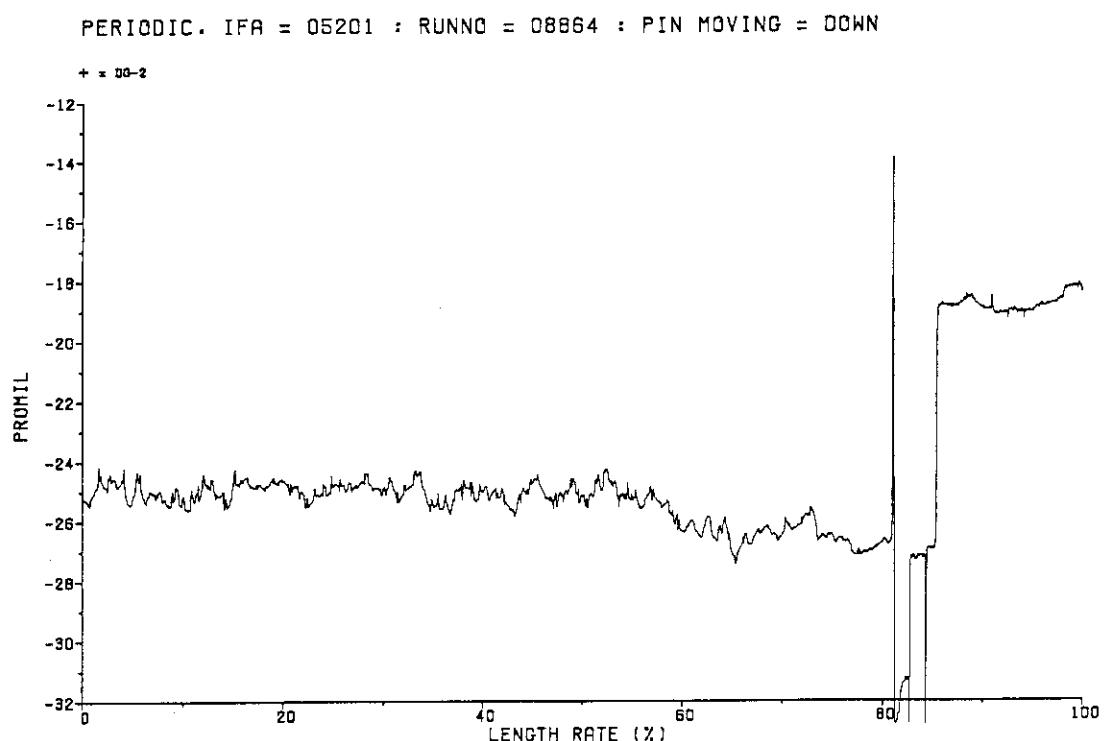


Fig. A.26 Diameter profile of BWR9 at the run number 8864: DG-2

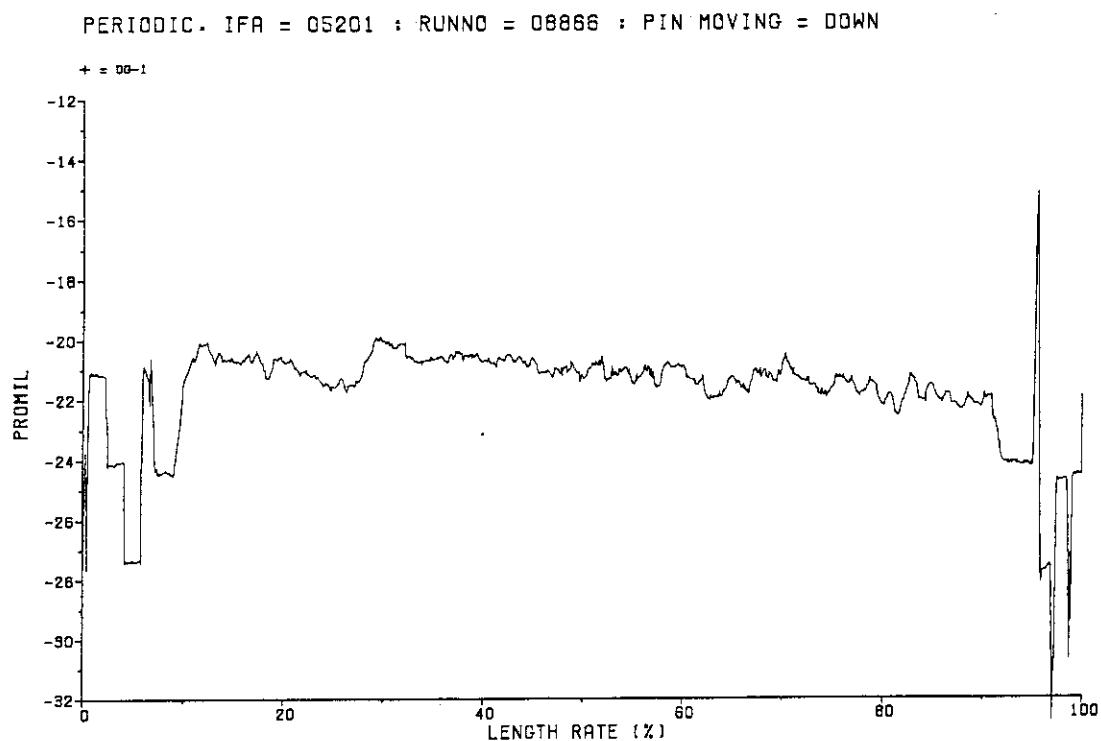


Fig. A.27 Diameter profile of BWR9 at the run number 8866: DG-1

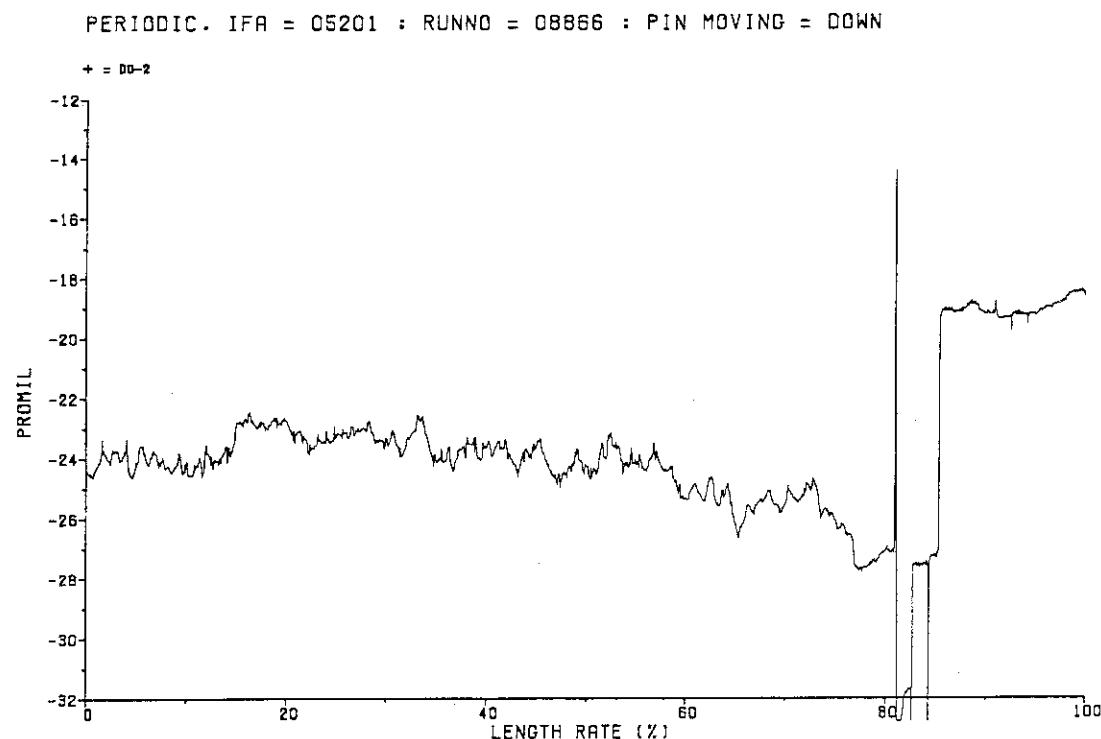


Fig. A.28 Diameter profile of BWR9 at the run number 8866: DG-2

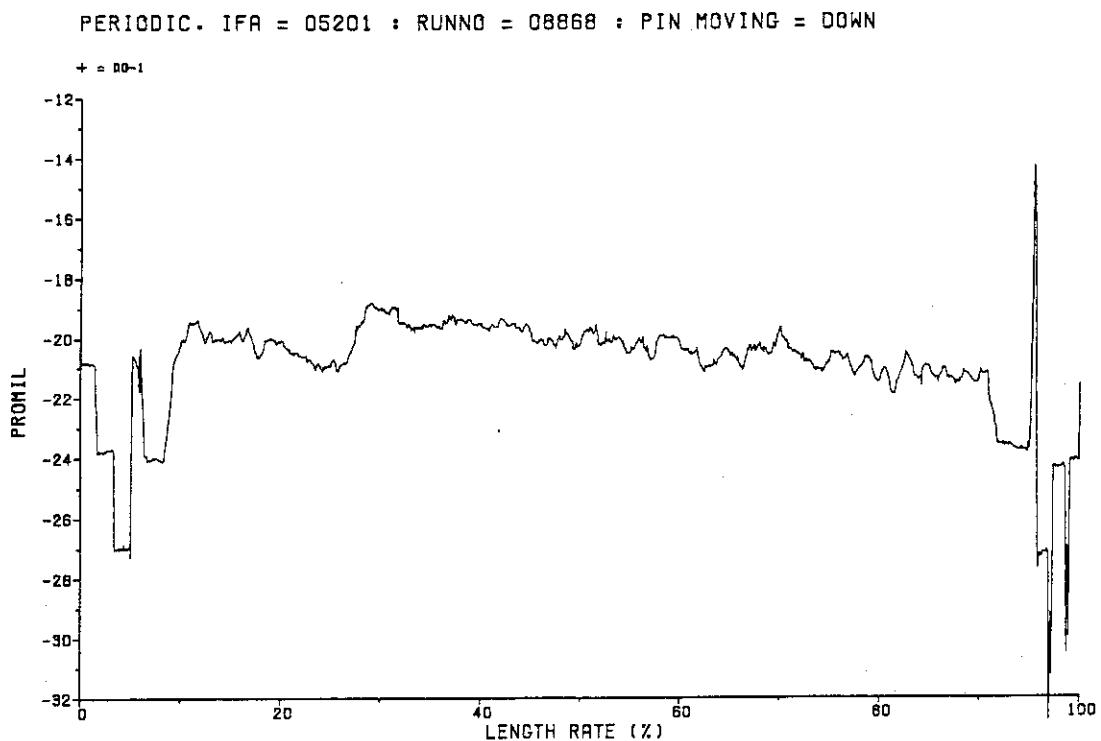


Fig. A.29 Diameter profile of BWR9 at the tun number 8868: DG-1

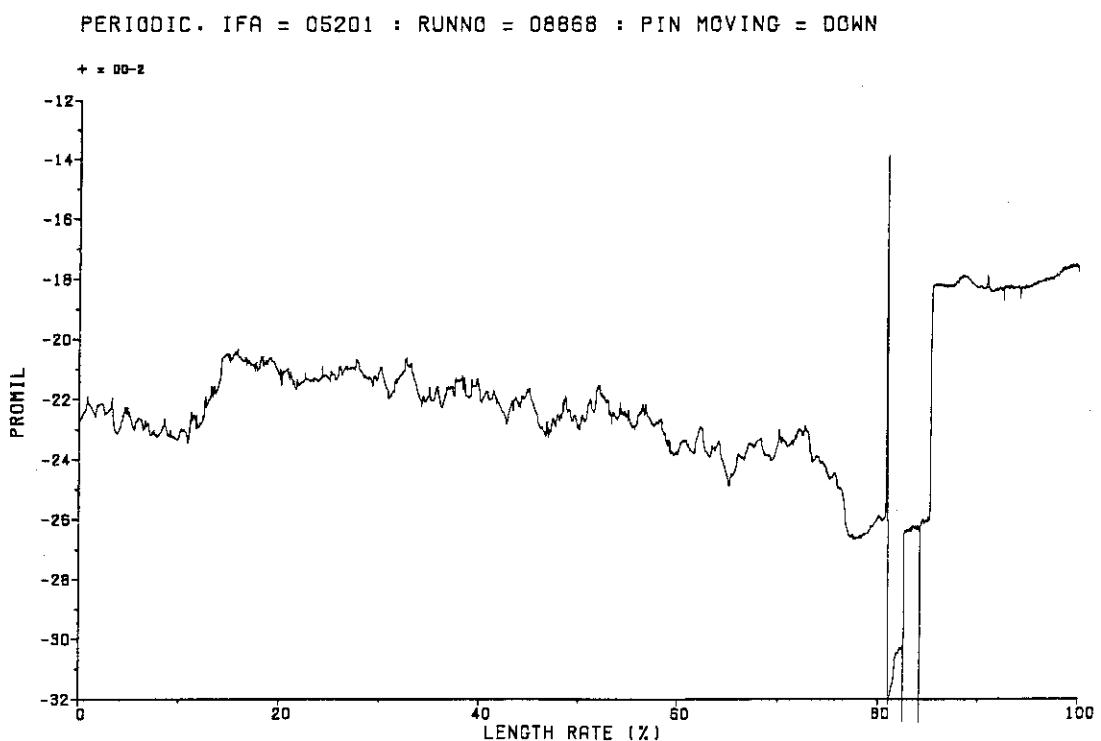


Fig. A.30 Diameter profile of BWR9 at the run number 8868: DG-2

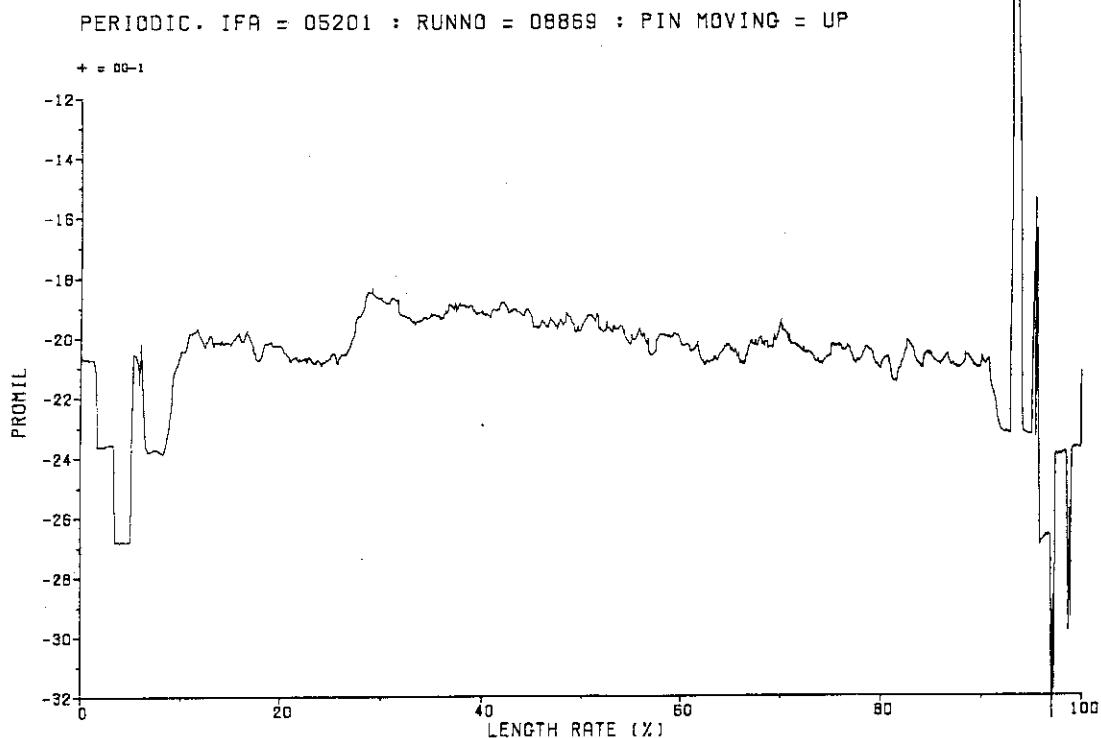


Fig. A.31 Diameter profile of BWR9 at the run number 8869: DG-1

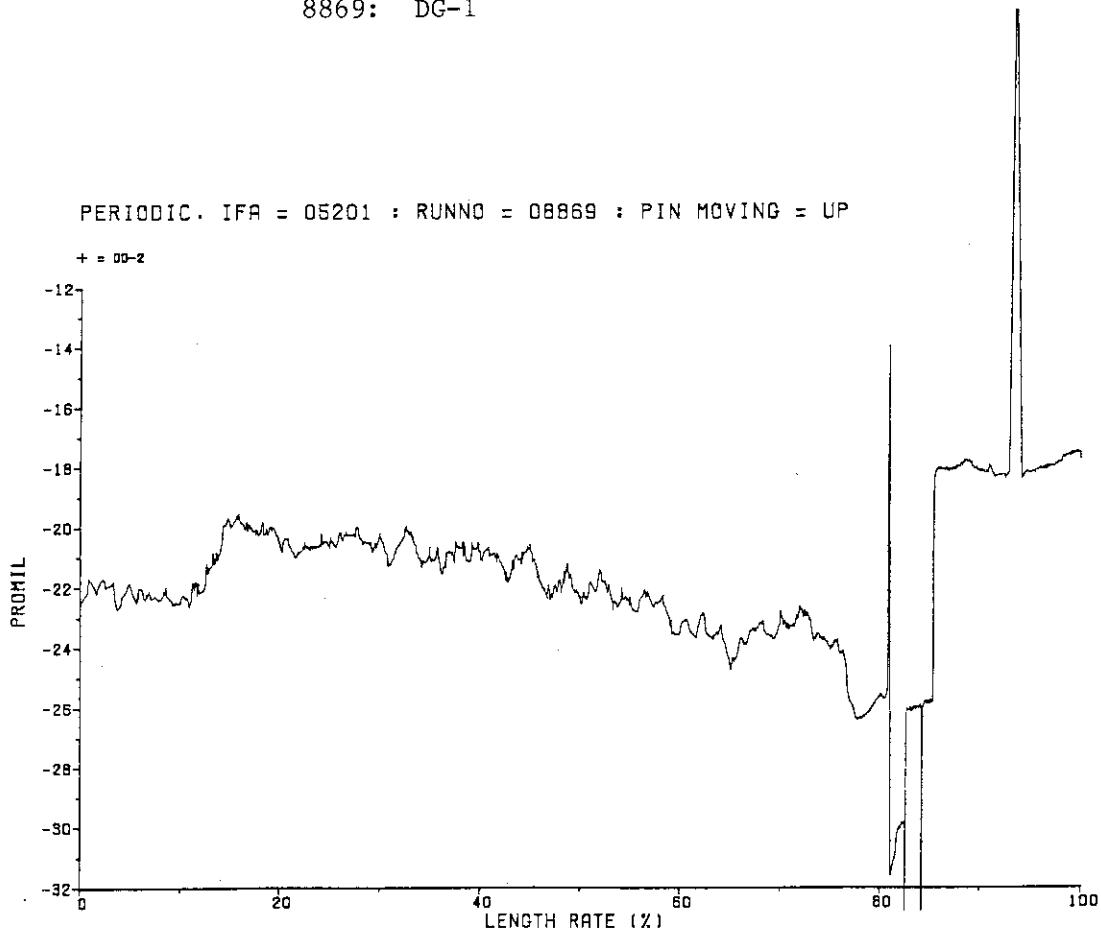


Fig. A.32 Diameter profile of BWR9 at the run number 8869: DG-2

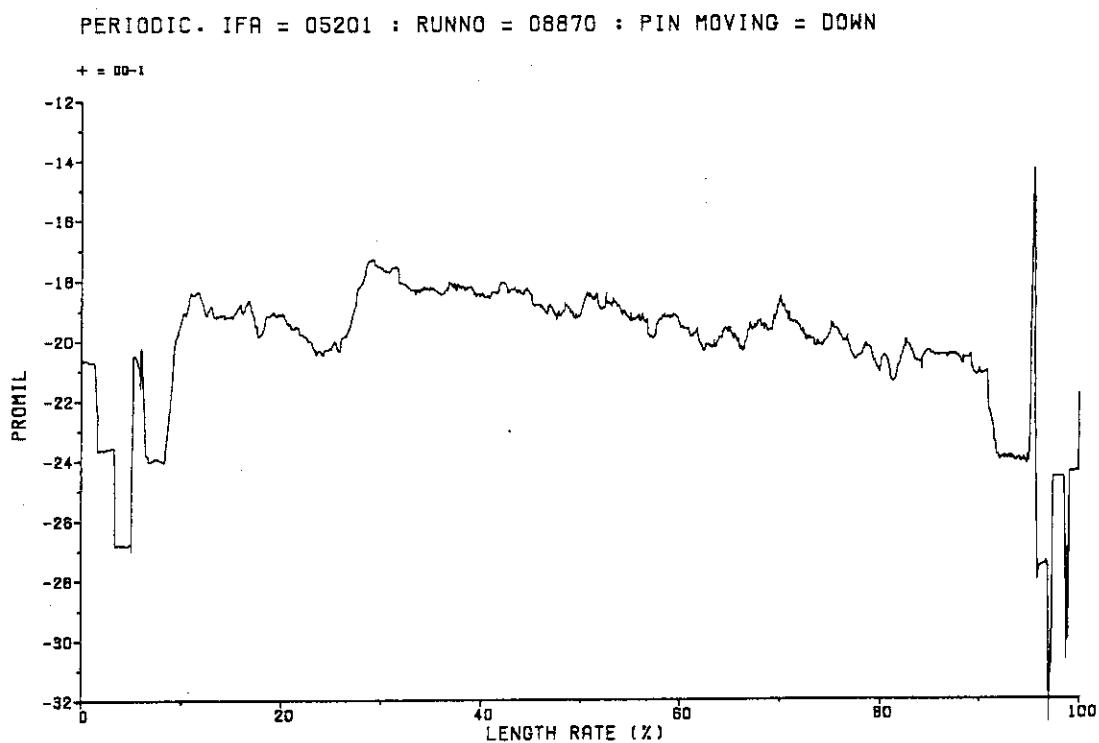


Fig. A.33 Diameter profile of BWR9 at the run number 8870: DG-1

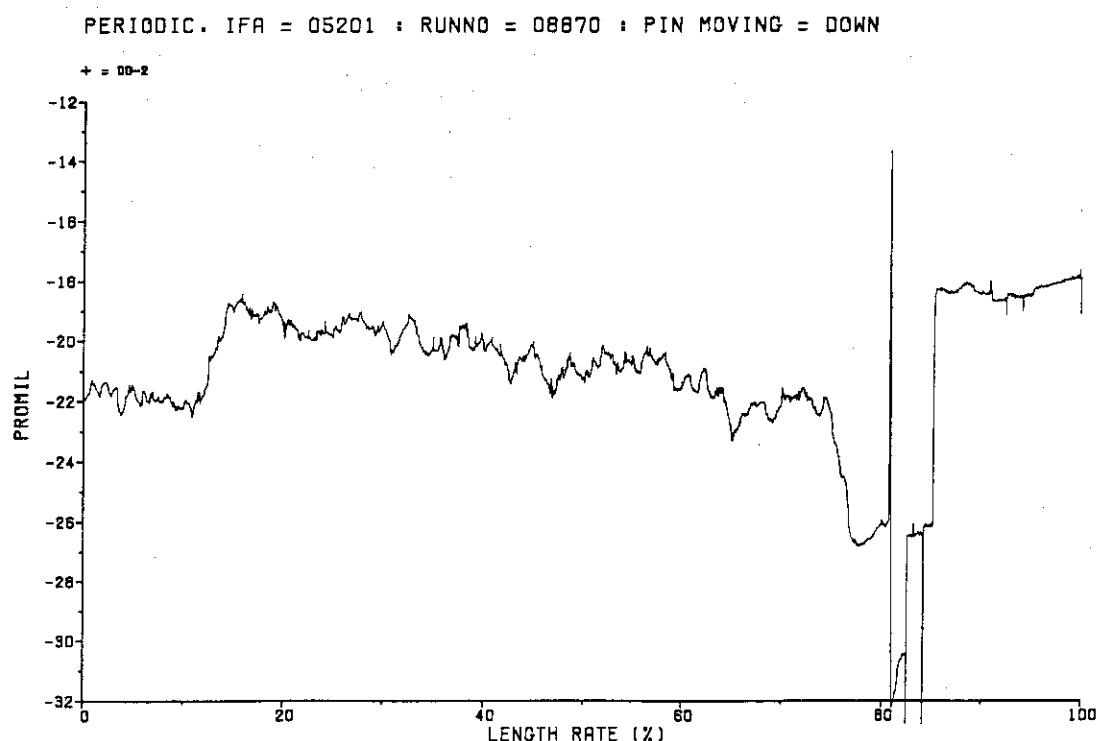


Fig. A.34 Diameter profile of BWR9 at the run number 8870: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08871 : PIN MOVING = UP

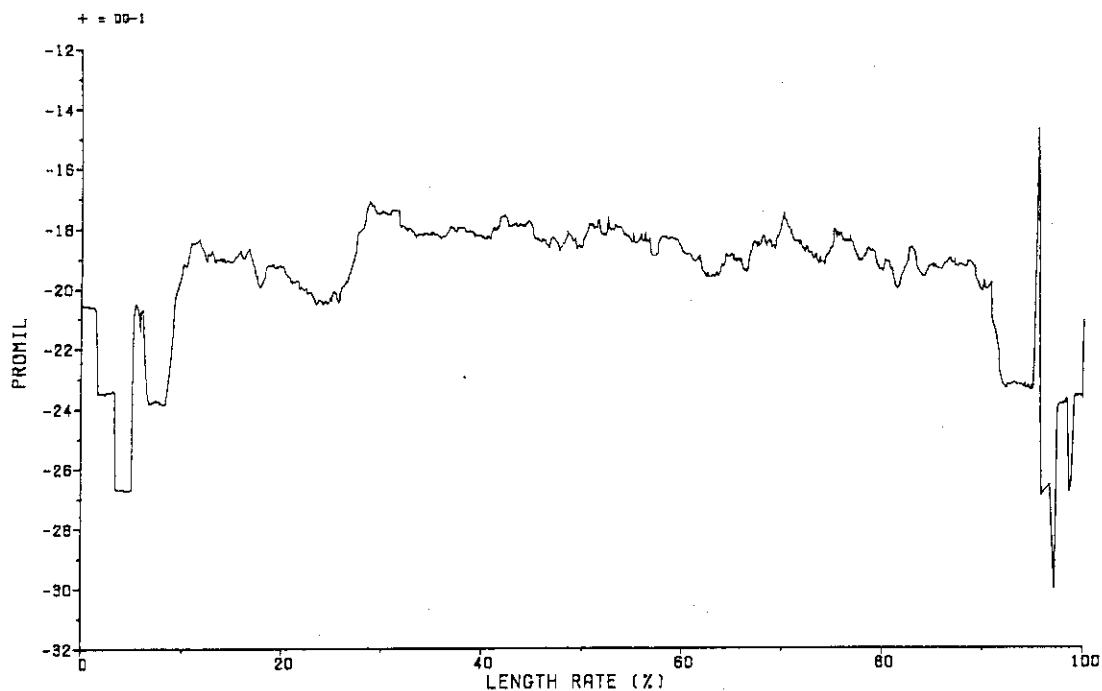


Fig. A.35 Diameter profile of BWR9 at the run number 8871: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08871 : PIN MOVING = UP

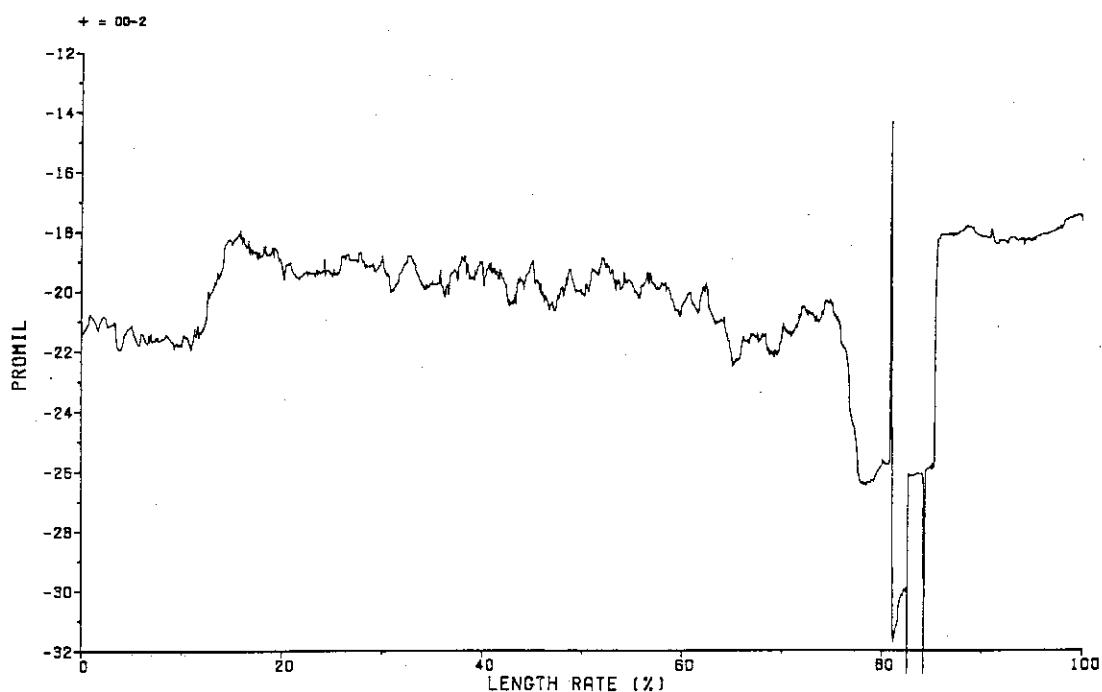


Fig. A.36 Diameter profile of BWR9 at the run number 8871: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08872 : PIN MOVING = DOWN

+

= DG-1

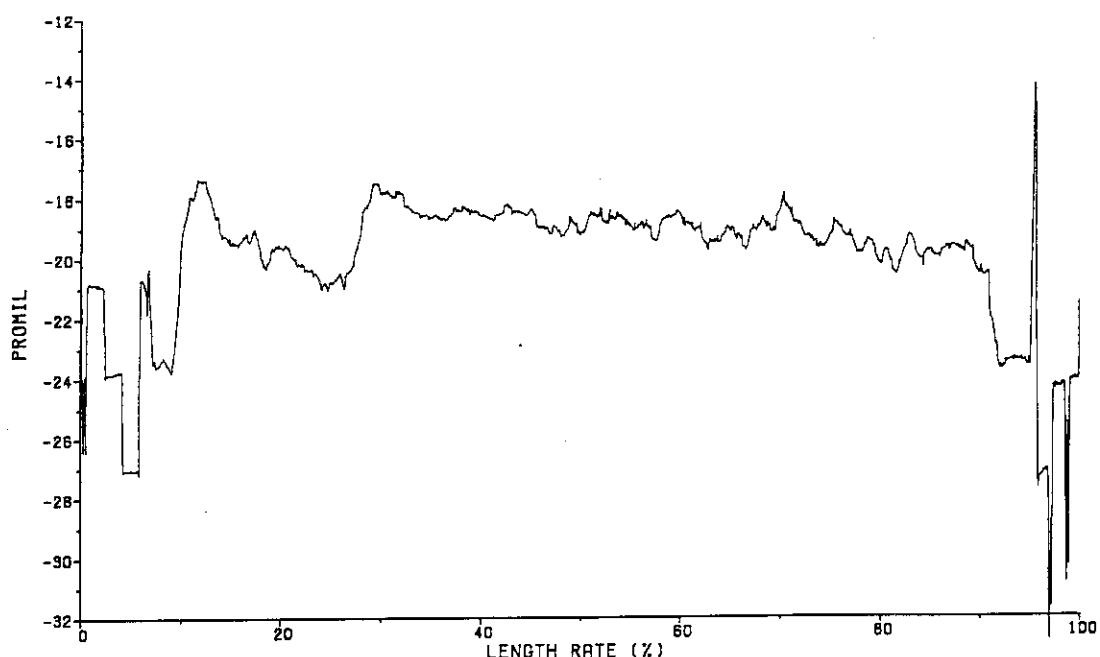


Fig. A.37 Diameter profile of BWR9 at the run number
8872: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08872 : PIN MOVING = DOWN

+

= DG-2

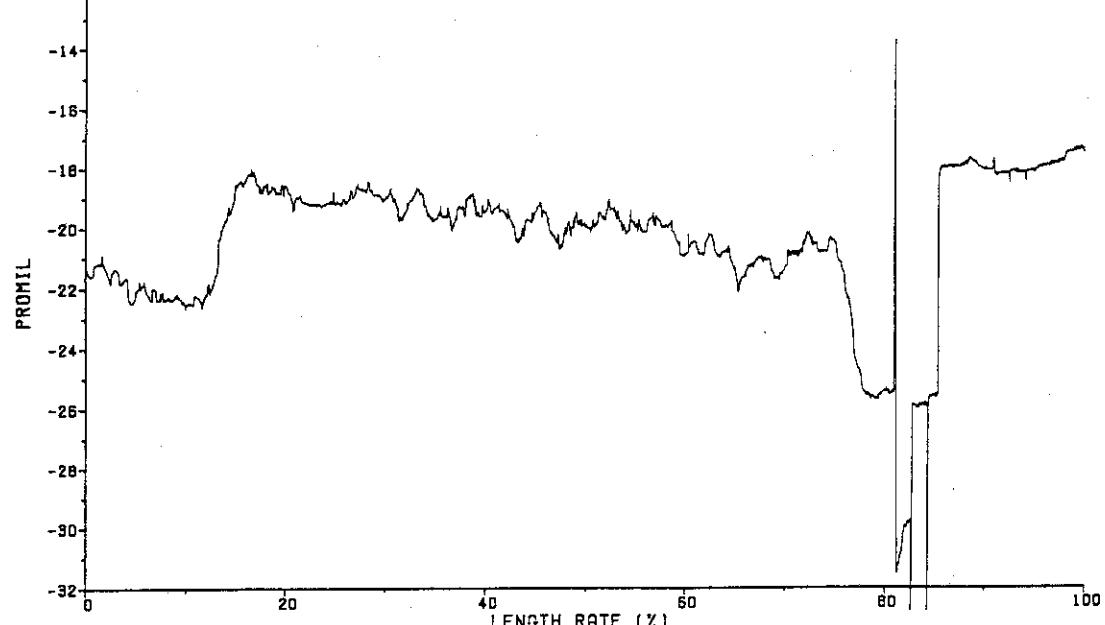


Fig. A.38 Diameter profile of BWR9 at the run number
8872: DG-2

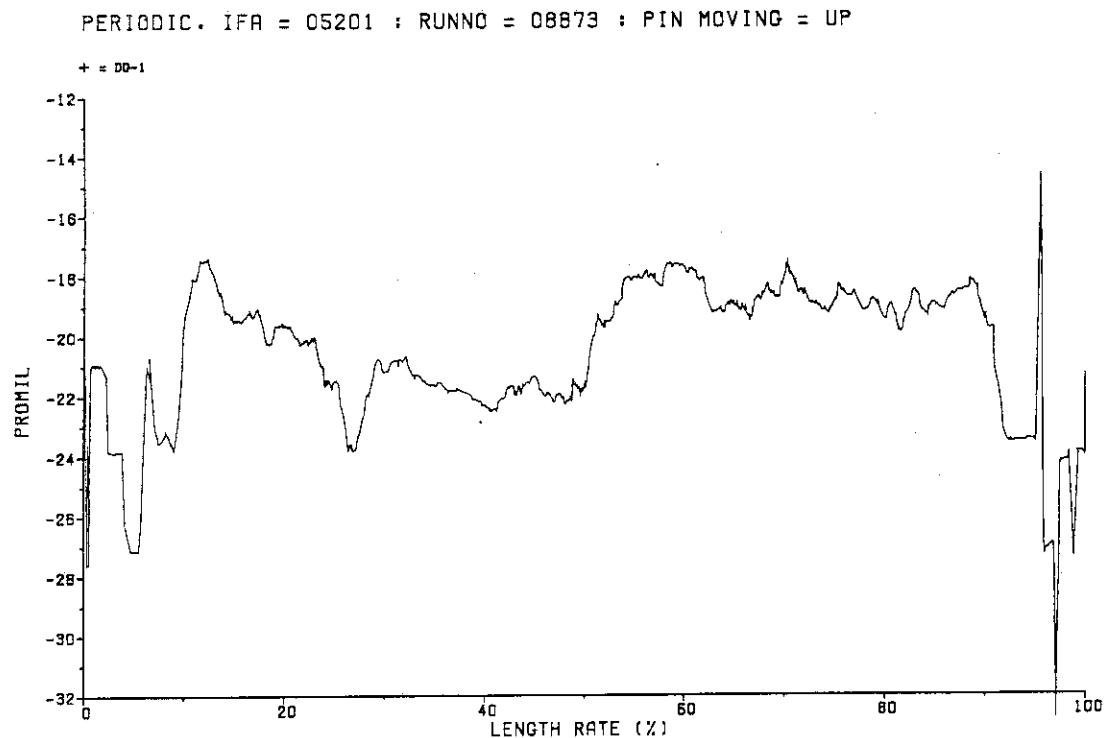


Fig. A.39 Diameter profile of BWR9 at the run number 8873: DG-1

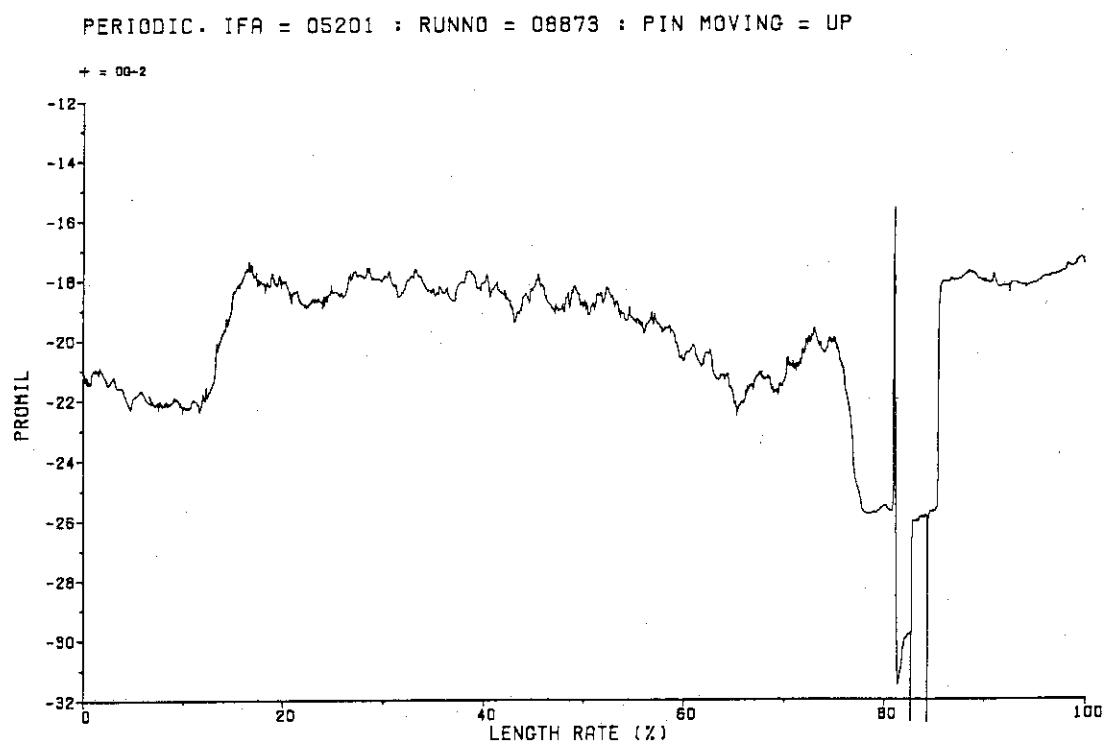


Fig. A.40 Diameter profile of BWR9 at the run number 8873: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08874 : PIN MOVING = DOWN

+ = DG-1

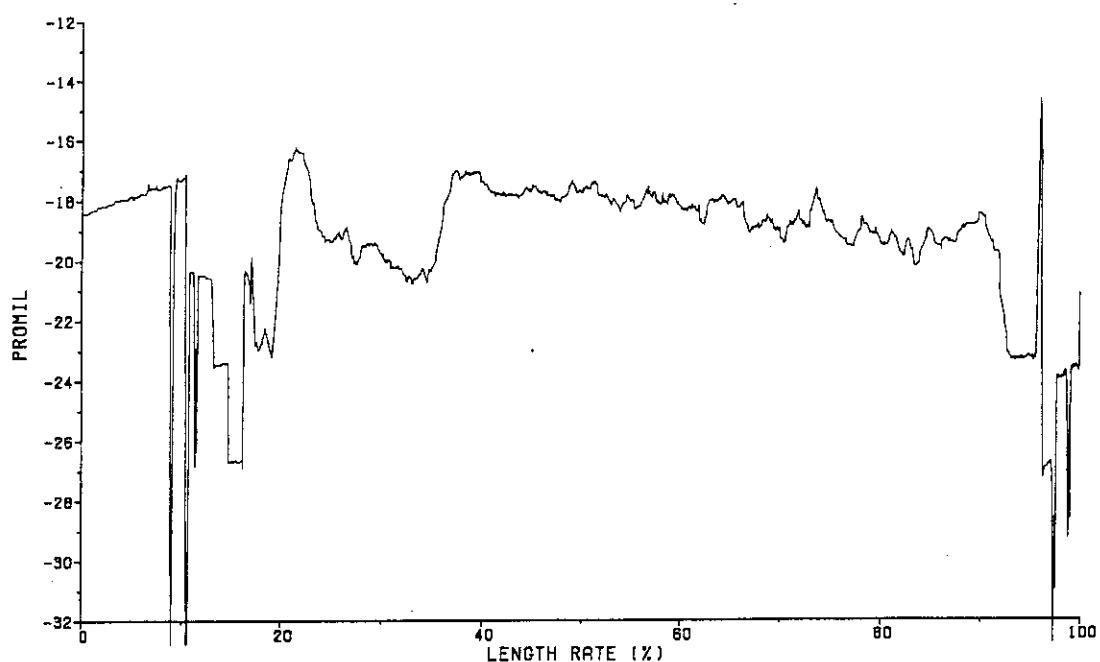


Fig. A.41 Diameter profile of BWR9 at the run number
8874: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08874 : PIN MOVING = DOWN

+ = DG-2

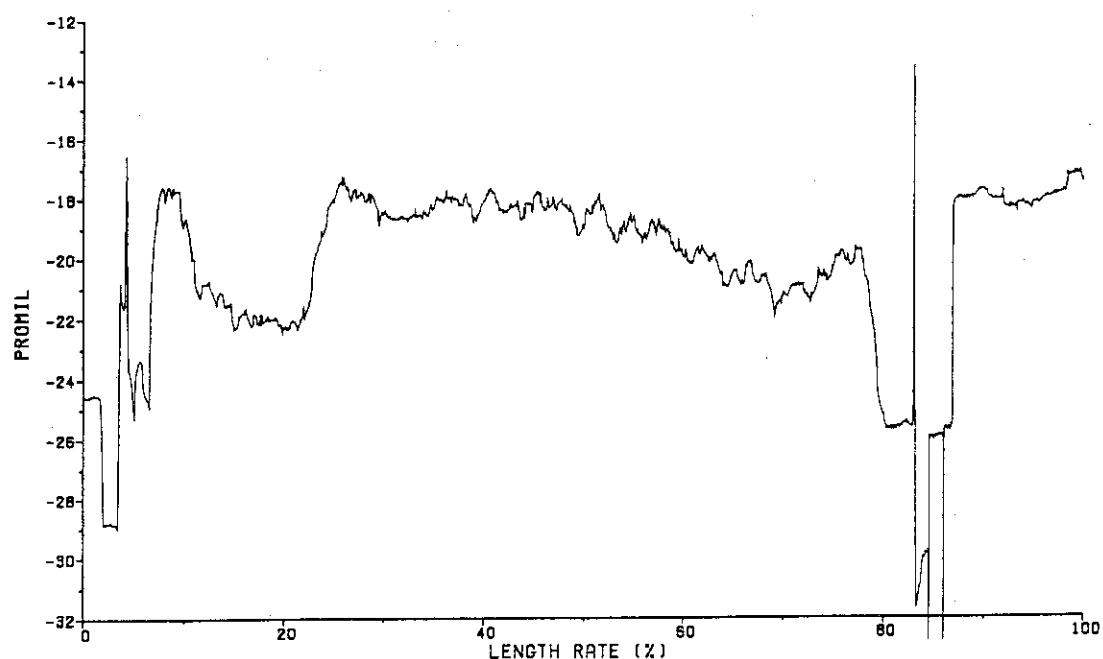


Fig. A.42 Diameter profile of BWR9 at the run number
8874: DG-2

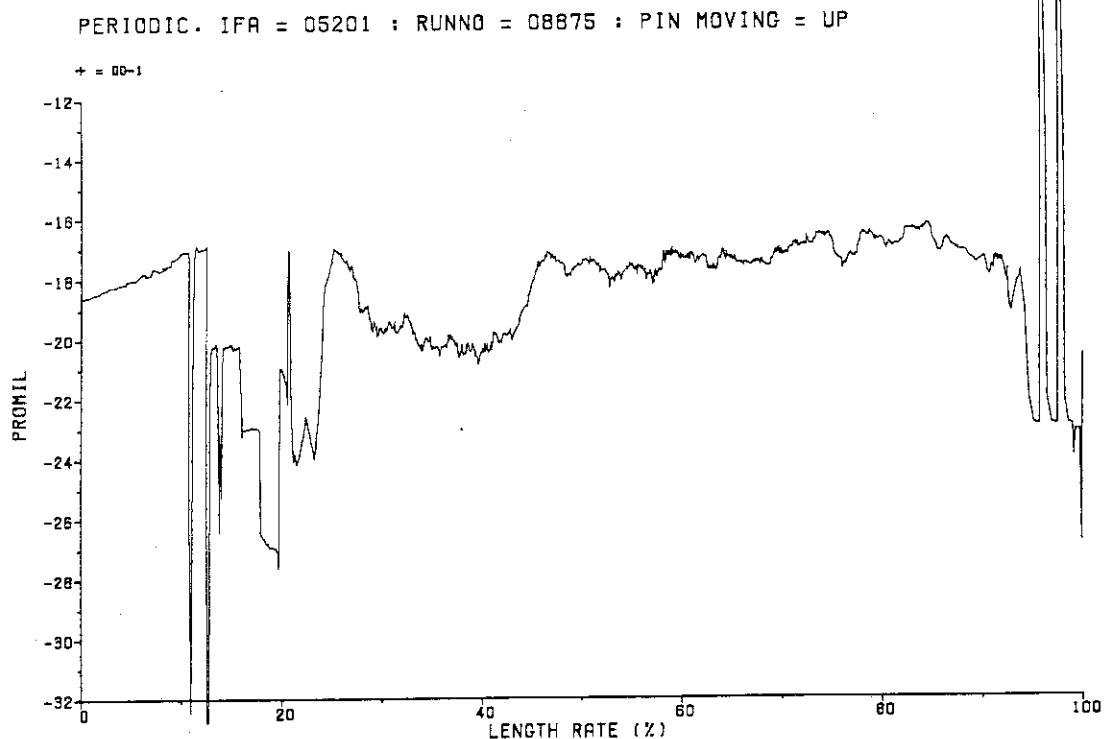


Fig. A.43 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8875: DG-1

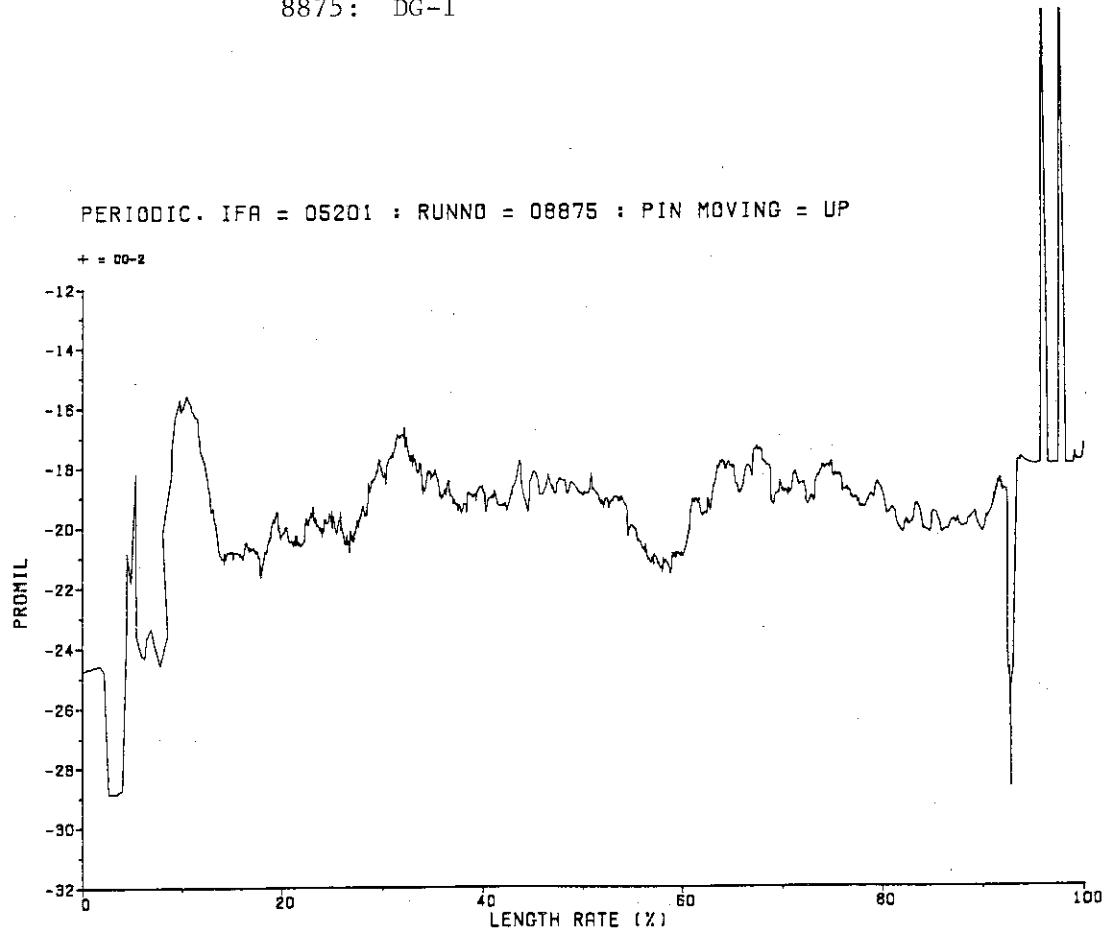


Fig. A.44 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8875: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08876 : PIN MOVING = DOWN

+ = DD-1

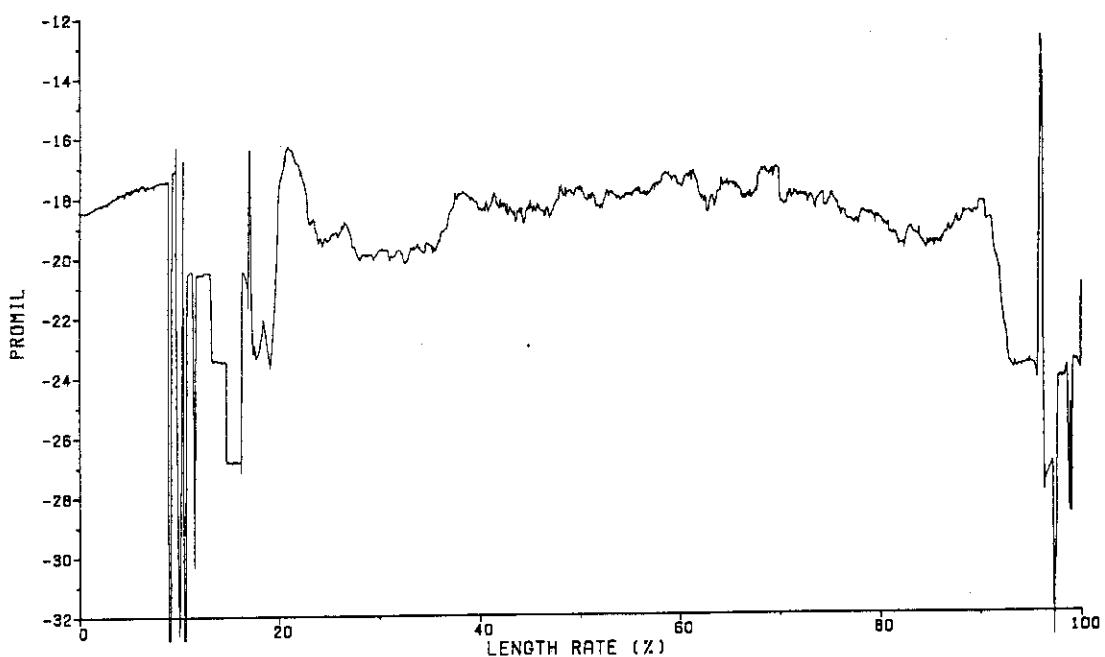


Fig. A.45 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8876: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08876 : PIN MOVING = DOWN

+ = DD-2

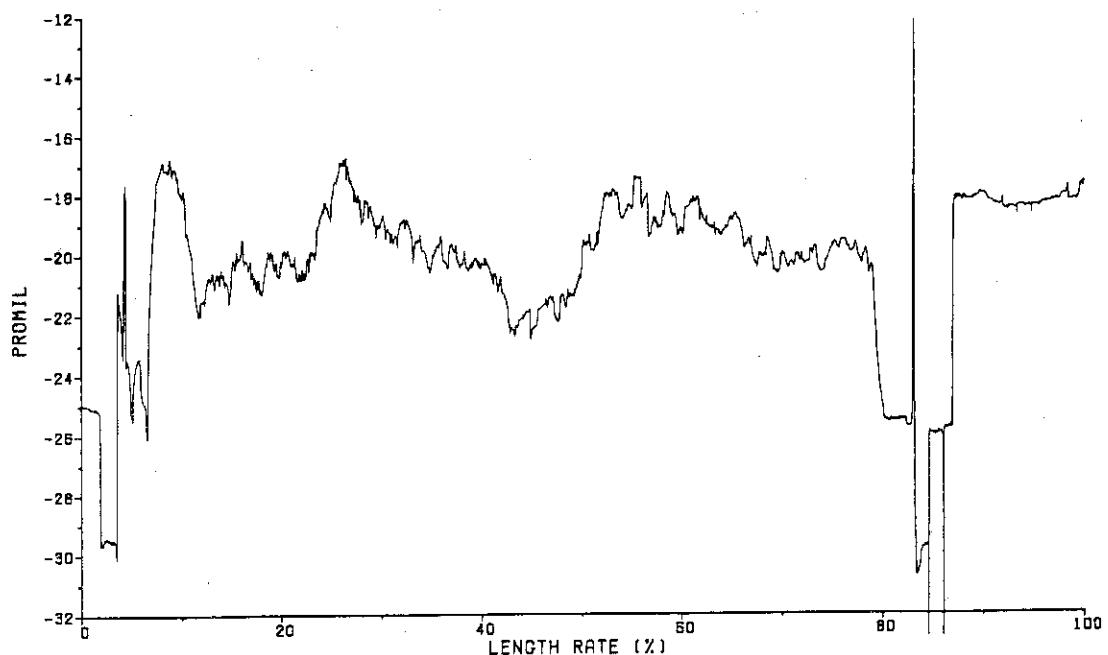


Fig. A.46 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8876: DG-2

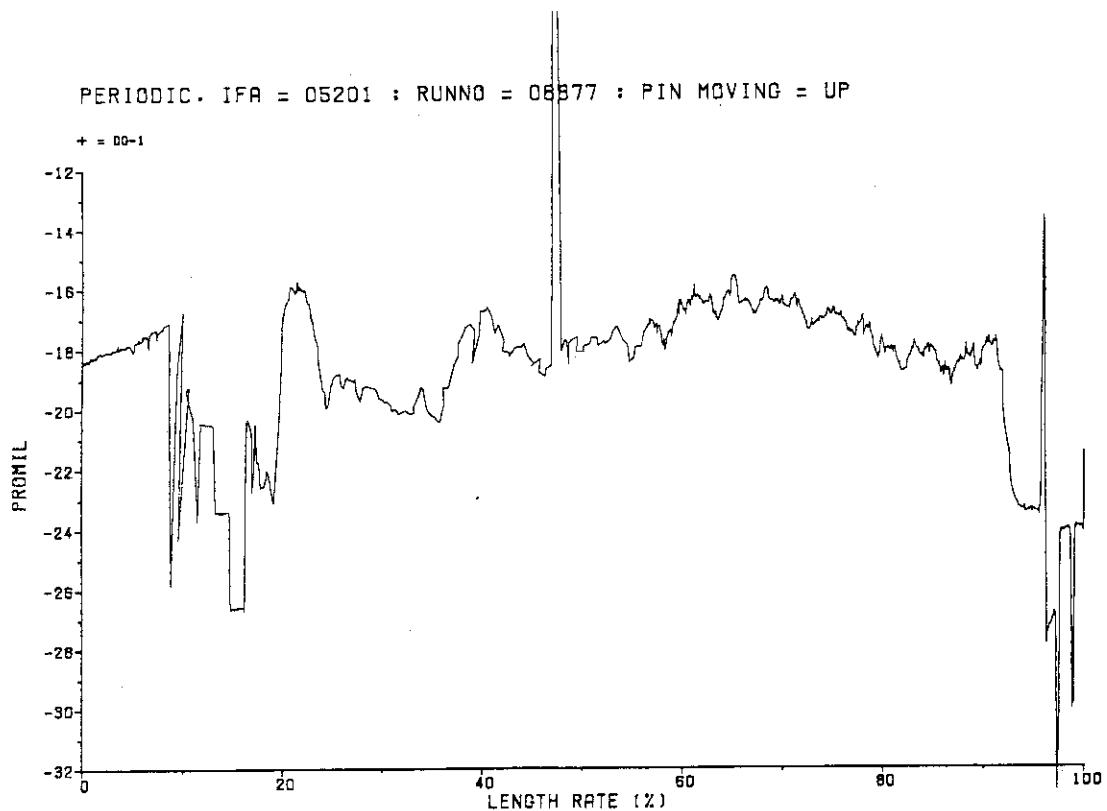


Fig. A.47 Diameter profile of BWR 9 at the run number
8877: DG-1

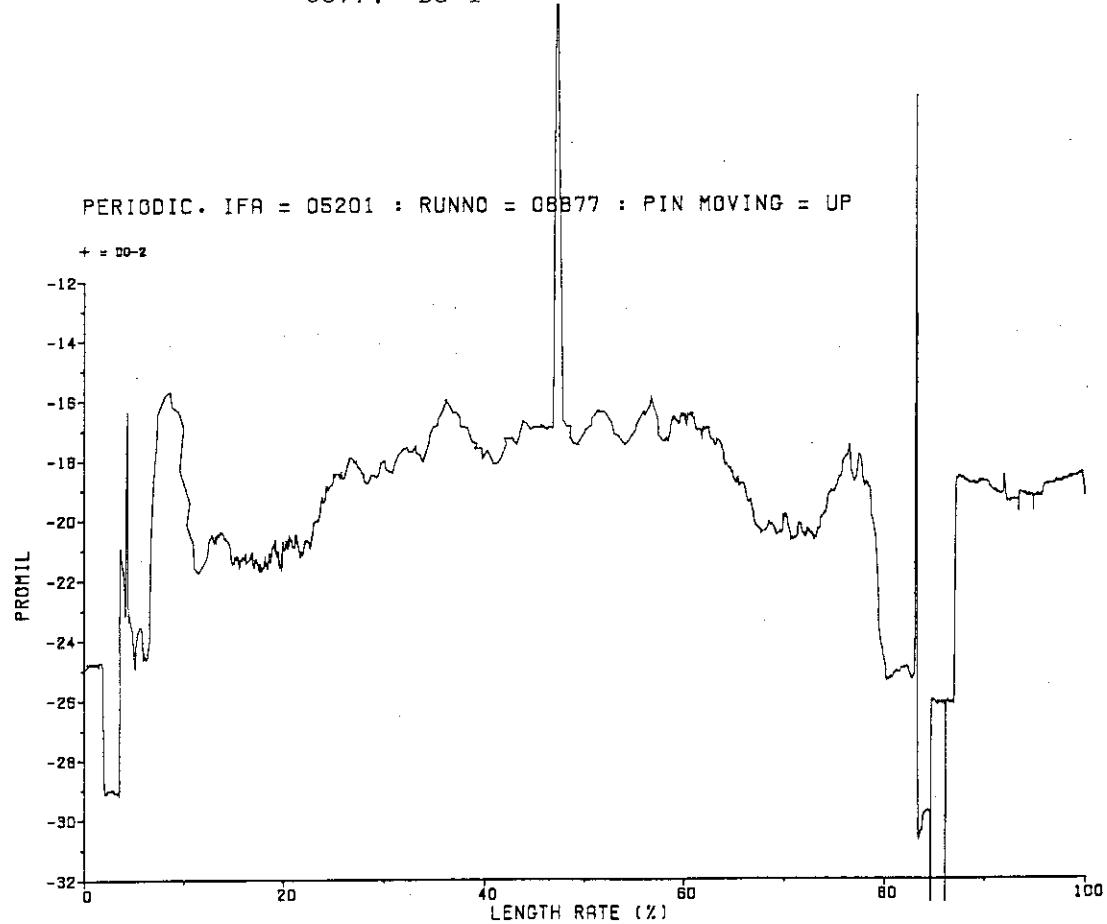


Fig. A.48 Diameter profile of BWR 9 at the run number
8877: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08878 : PIN MOVING = DOWN

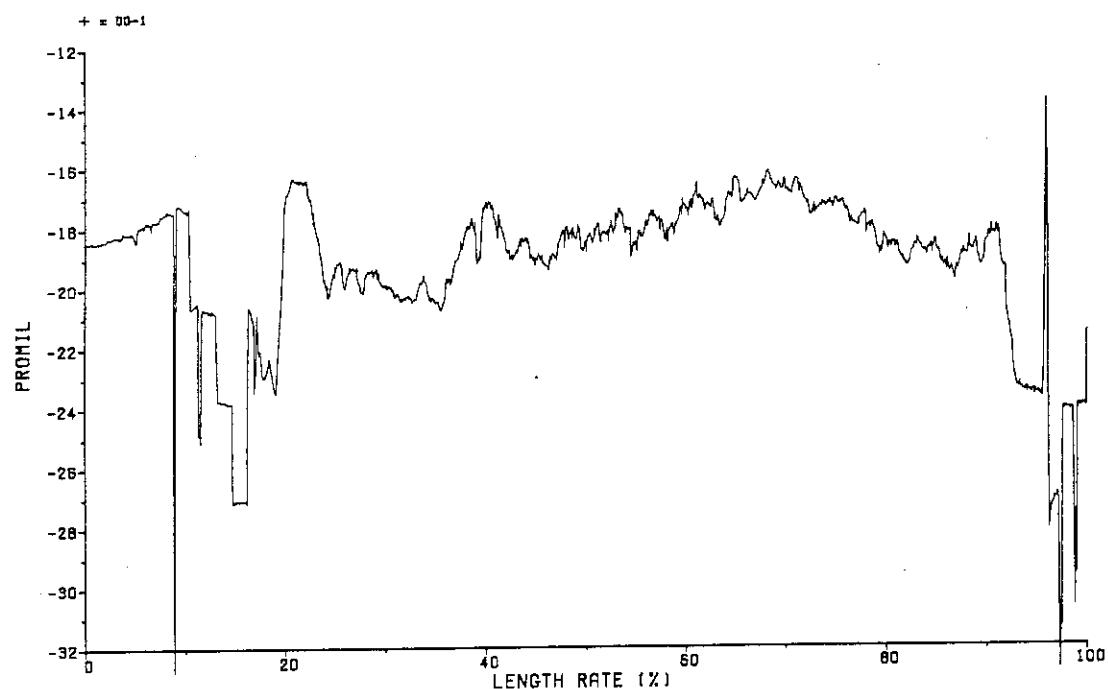


Fig. A.49 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8878: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 08878 : PIN MOVING = DOWN

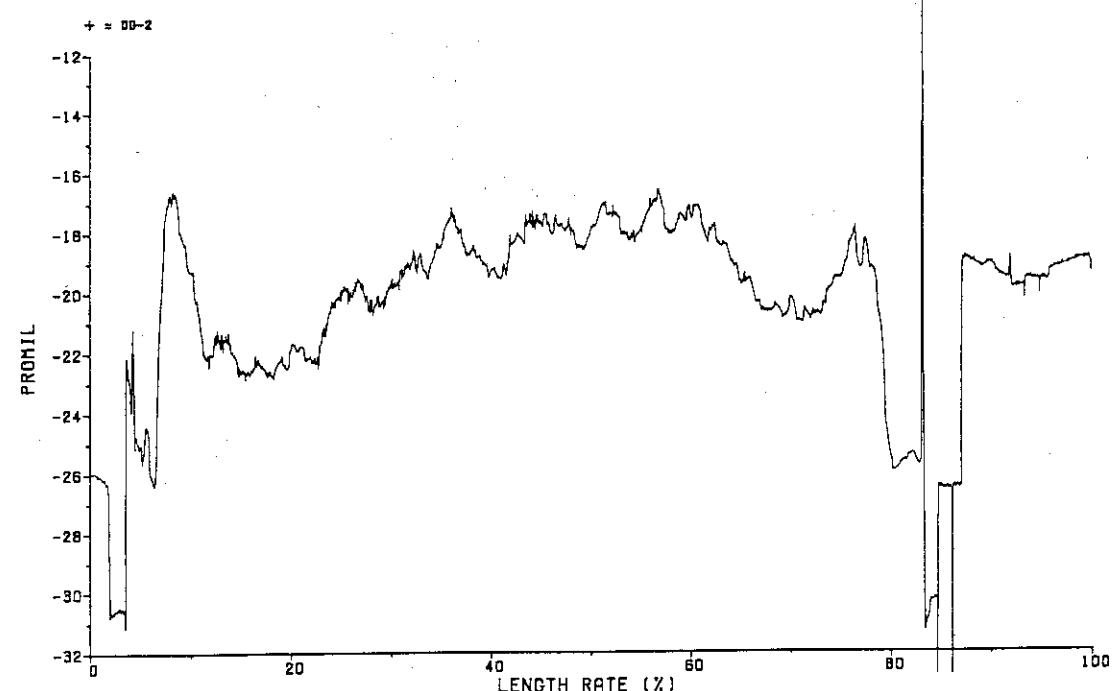


Fig. A.50 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8878: DG-2

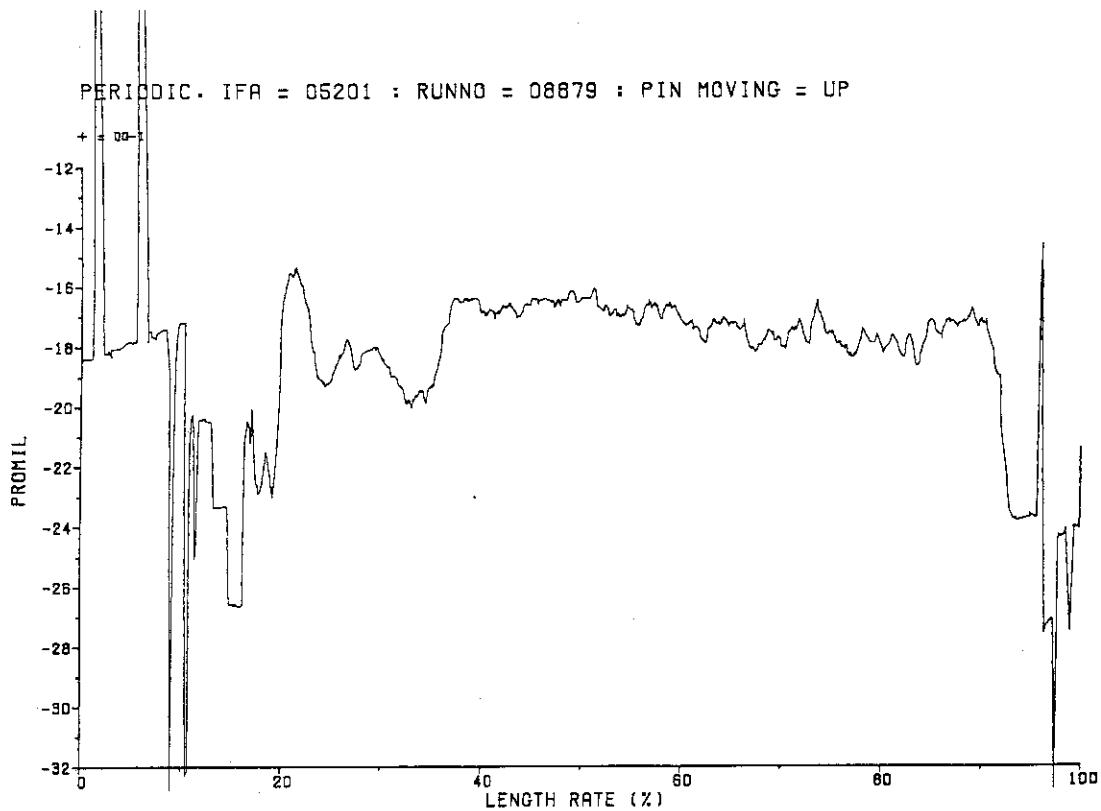


Fig. A.51 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8879: DG-1

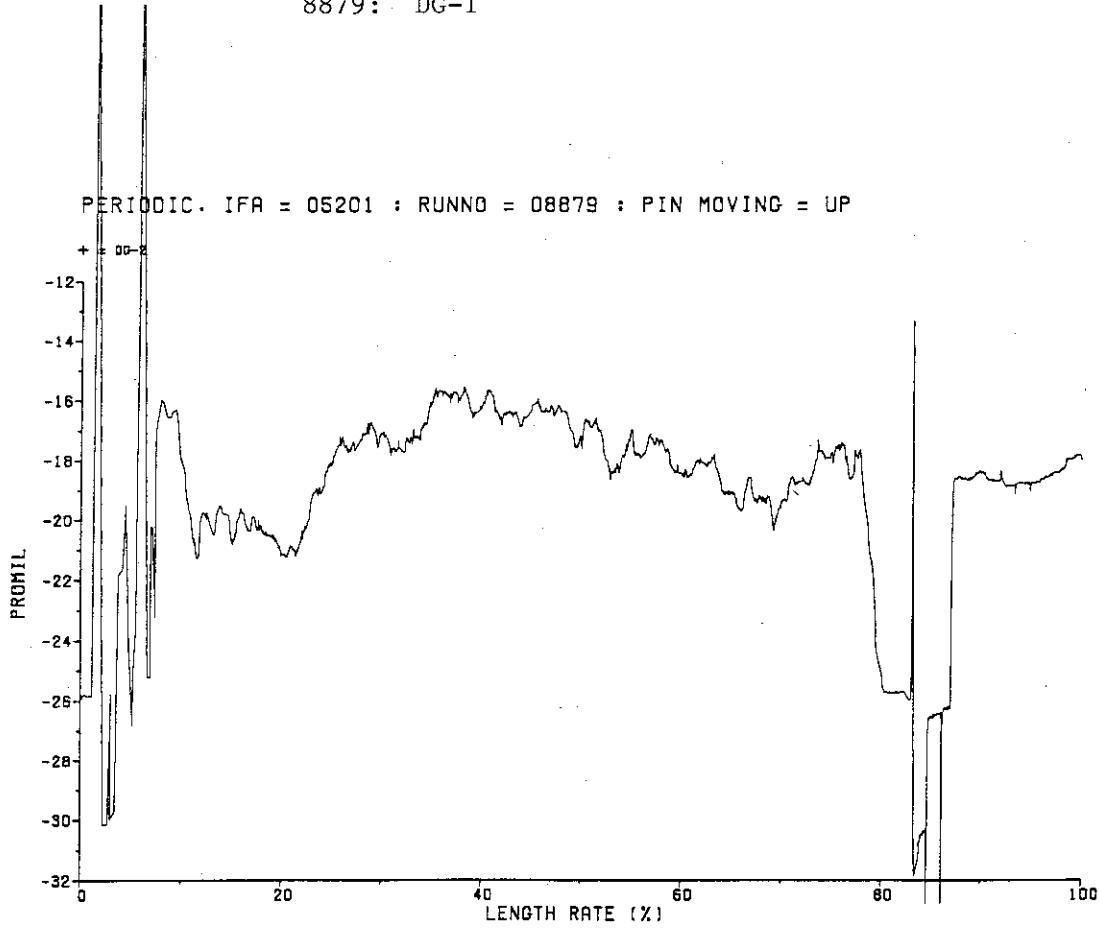


Fig. A.52 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8879: DG-2

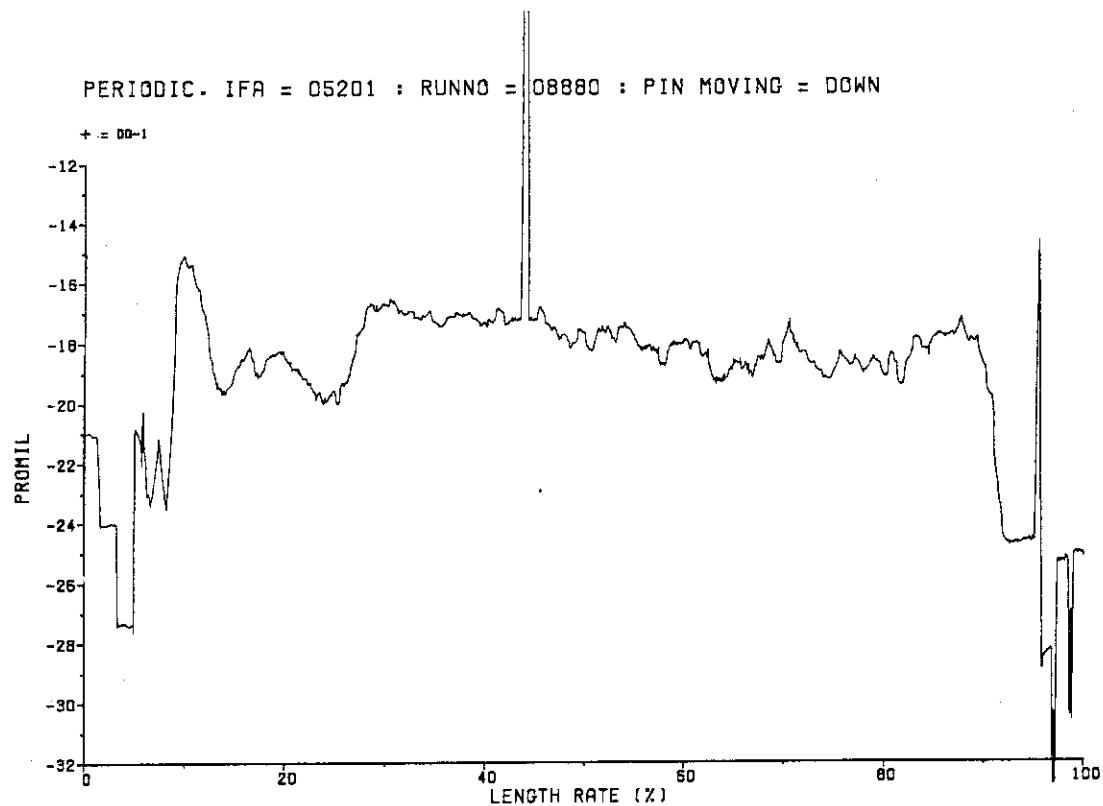


Fig. A.53 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8880: DG-1

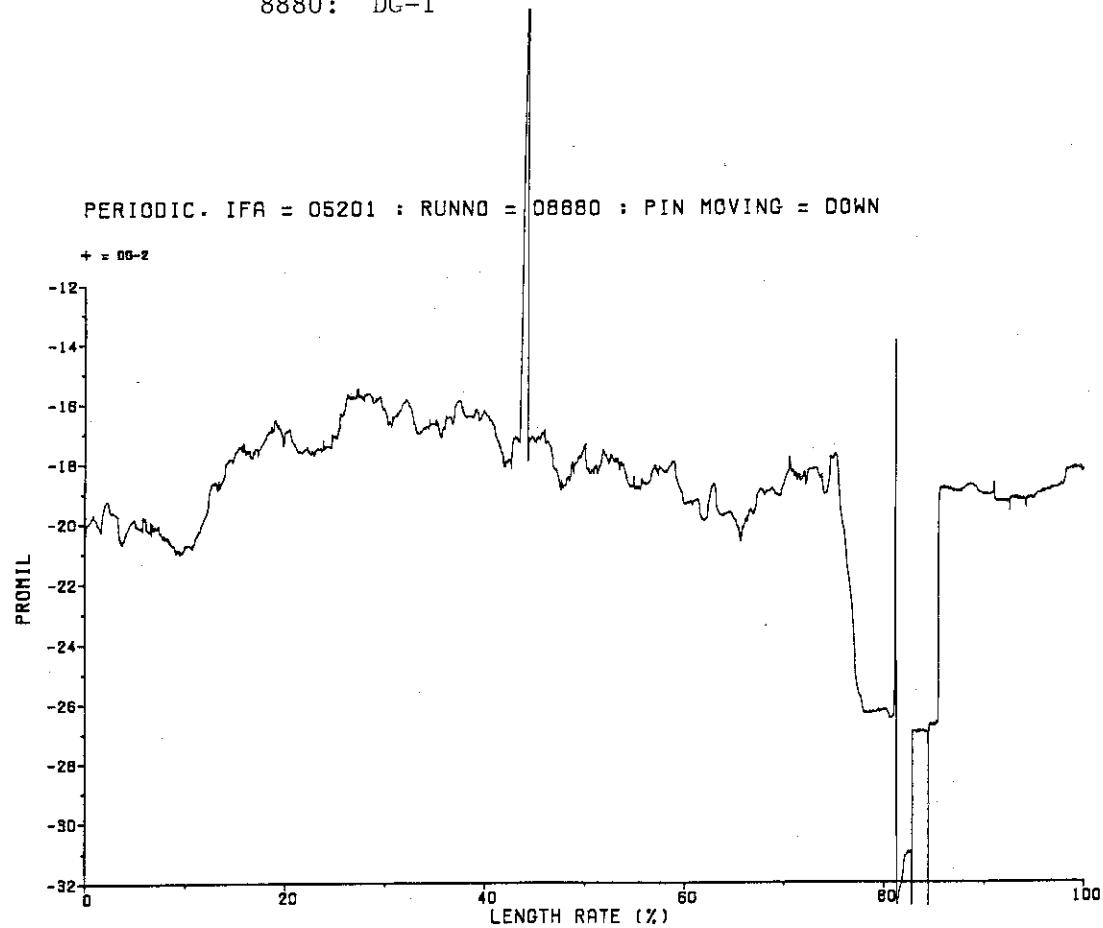


Fig. A.54 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8880: DG-2

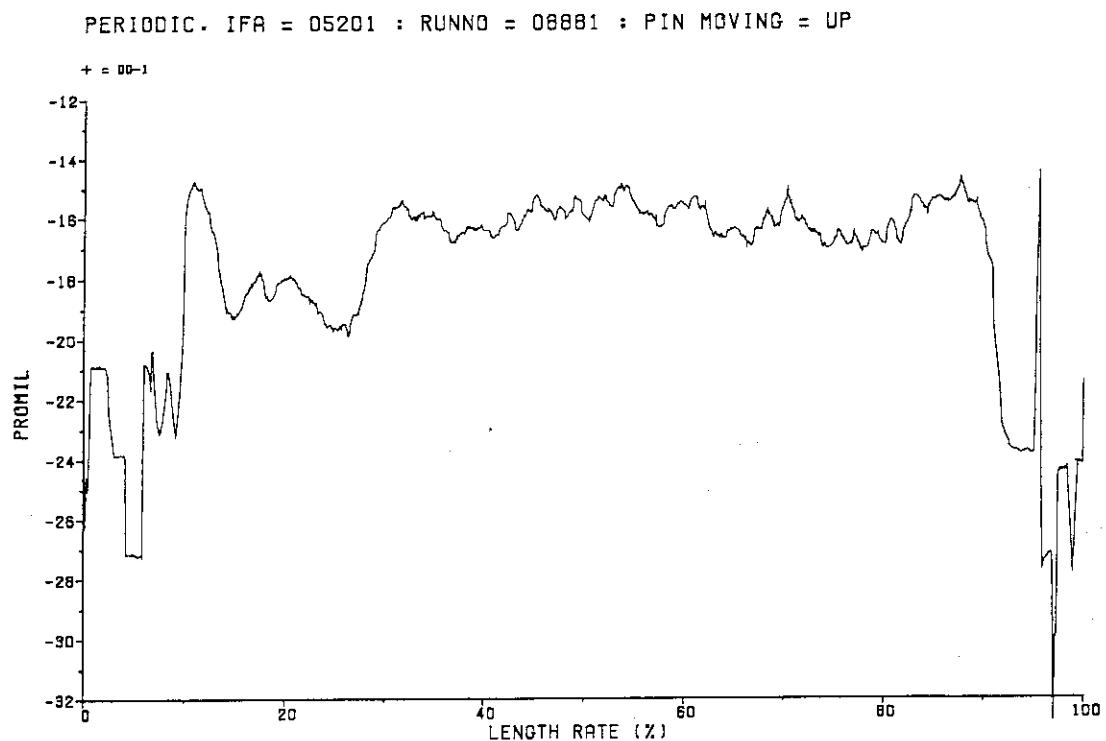


Fig. A.55 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8881: DG-1

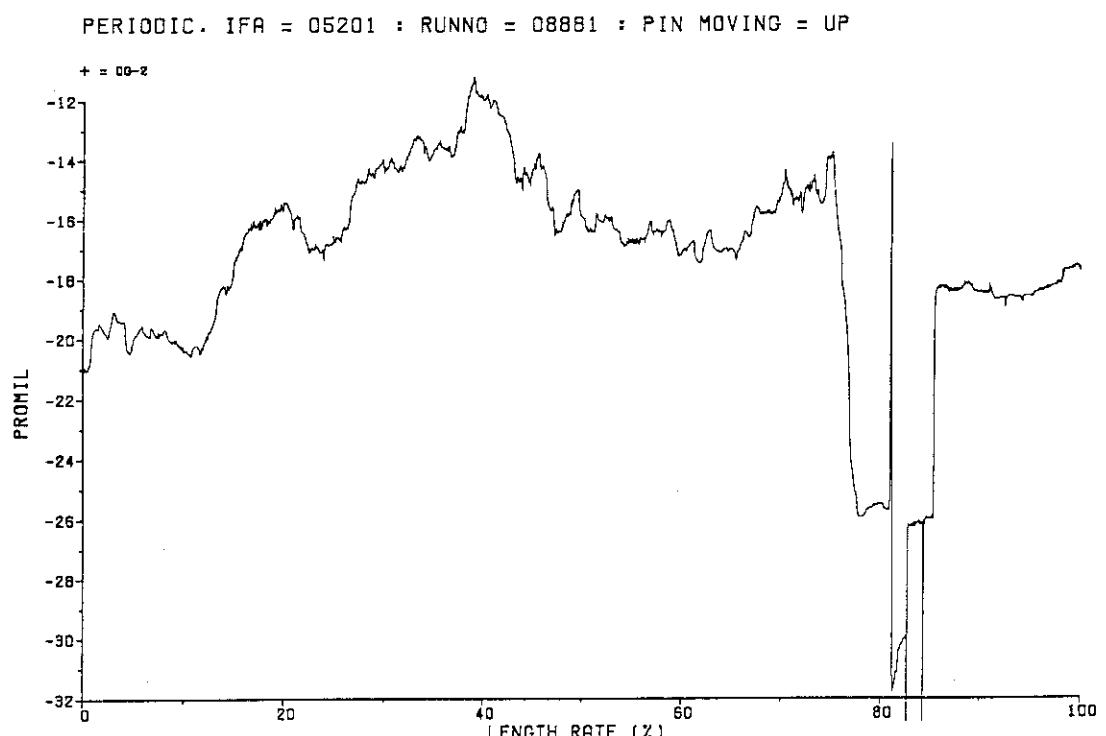


Fig. A.56 Diameter profile of BWR 9 at the run number 8881: DG-2

付 錄 II
BWR 9 : 出力急昇実験中の燃料
棒平均線出力, 棒内ガス圧力及び
軸方向伸びの経時データ

<データの見方>

データは4群よりなっている。

第Ⅰ群は、実験時間(h)表示しており、データの先頭はT I M Eとなっている。第Ⅱ群は、燃料棒の平均線出力(kW/m)を表示しており、データの先頭はA L H Rとなっている。

第Ⅲ群は、相対値で示した燃料棒内圧(MPa)を表示しており、データの先頭はP Fとなっている。このデータは実験開始時に正常でなかったため、入力エラーを示す-99.999からはじまっている。また直径測定時には、燃料棒が測定個所を離れるので、正常値を示さなくなる。このとき入力エラーではないので、-99.999とは表示されないが、他の数値群から飛び抜けて大きくなるので、判別は容易である。

第Ⅳ群は、燃料被覆管の伸び(mm)を表示しており、データの先頭はE Cとなっている。第Ⅲ群データと同様に、直径測定時には異常値が出現するが、判別は容易である。

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 25 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
6.000	0.196	-99.999	4.784
7.000	0.152	-99.999	4.701
8.000	0.152	-99.999	4.688
9.000	0.167	-99.999	4.688
10.000	0.094	-99.999	4.672
11.000	0.065	-99.999	4.677
12.000	0.109	-99.999	4.675
13.000	0.065	-99.999	4.675
14.000	0.109	-99.999	4.675
15.000	0.094	-99.999	4.673
16.000	0.080	-99.999	4.673
17.000	0.123	-99.999	4.673
18.000	0.094	-99.999	4.678
19.000	0.123	-99.999	4.651
20.000	0.123	-99.999	4.657
21.000	0.138	-99.999	4.657
22.000	0.138	-99.999	4.654
23.000	0.123	-99.999	4.646

COVERD 26 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
0.0	0.123	-99.999	4.646
1.000	0.094	-99.999	4.646
2.000	0.094	-99.999	4.638
3.000	0.152	-99.999	4.638
4.000	0.138	-99.999	4.633
5.000	0.109	-99.999	4.633
6.000	0.152	-99.999	4.633
7.000	0.123	-99.999	4.625
8.000	0.138	-99.999	4.625
9.000	0.123	-99.999	4.625
10.000	0.123	-99.999	4.630
11.000	0.152	-99.999	4.630
12.000	0.152	-99.999	4.622
13.000	0.152	-99.999	4.622
14.000	2.526	-99.999	4.647
15.000	2.934	-99.999	4.651
16.000	2.934	-99.999	4.649
17.000	5.191	-99.999	4.658
18.000	4.433	-99.999	4.647
19.000	4.055	-99.999	4.645
20.000	2.206	-99.999	4.608
21.000	4.885	-99.999	7.137
22.000	1.609	-99.999	7.163
23.000	0.240	-99.999	4.611

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 27 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
0.0	0.211	-99.999	4.617
0.150	1.041	-99.999	4.636
0.300	6.224	-99.999	4.707
0.450	7.739	-99.999	4.726
1.000	9.894	-99.999	4.724
1.150	11.117	-99.999	4.710
1.300	12.471	-99.999	4.751
1.450	17.058	-99.999	4.834
2.000	20.043	-99.999	4.853
2.150	21.354	-99.999	4.773
2.300	20.655	-99.999	4.776
2.450	22.635	-99.999	4.819
3.000	23.494	-99.999	4.851
3.150	23.611	-99.999	4.846
3.300	24.033	-99.999	4.857
3.450	23.727	-99.999	4.833
4.000	23.596	-99.999	4.833
4.150	23.451	-99.999	4.833
4.300	23.378	-99.999	4.833
4.450	23.305	-99.999	4.819
5.000	23.247	-99.999	4.814
5.150	23.159	-99.999	4.819
5.300	23.116	-99.999	4.819
5.450	23.145	-99.999	4.806
6.000	23.087	-99.999	4.814
6.150	22.941	-99.999	4.800
6.300	22.868	-99.999	4.800
6.450	22.824	-99.999	4.792
7.000	22.737	-99.999	4.787
7.150	22.606	-99.999	4.787
7.300	22.504	-99.999	4.795
7.450	22.388	-99.999	4.803
8.000	22.358	-99.999	4.795
8.150	22.242	-99.999	4.795
8.300	-99.999	-99.999	-99.999
8.450	22.169	-99.999	0.362
9.000	26.086	-99.999	7.110
9.150	24.018	-99.999	16.100
9.300	27.557	-99.999	10.897
9.450	30.382	-99.999	10.758
10.000	35.056	-99.999	2.350
10.150	30.804	-99.999	3.322
10.300	26.974	-99.999	3.835
10.450	20.276	-99.999	4.131
11.000	12.966	-99.999	4.186
11.150	5.380	-99.999	4.809
11.300	0.138	-99.999	4.887
11.450	0.211	-99.999	5.044
12.000	0.225	-99.999	5.155
12.150	0.269	-99.999	5.059

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 27 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
12.300	0.211	-99.999	0.575
12.450	0.211	-99.999	0.574
13.000	0.211	-99.999	0.583
13.150	0.196	-99.999	0.579
13.300	3.502	-99.999	0.596
13.450	9.079	-99.999	0.633
14.000	15.791	-99.999	0.670
14.150	21.572	-99.999	0.723
14.300	26.232	-99.999	0.803
14.450	29.144	-99.999	0.903
15.000	30.717	-23.104	0.907
15.150	34.313	40.301	2.379
15.300	30.527	7.478	0.673
15.450	30.251	3.150	0.710
16.000	28.897	3.143	0.737
16.150	29.290	3.132	0.727
16.300	29.421	3.114	0.738
16.450	29.508	2.858	0.734
17.000	29.275	-2.743	0.718
17.150	29.989	-3.271	0.759
17.300	30.236	-2.781	0.771
17.450	30.105	-2.752	0.751
18.000	29.974	3.151	0.768
18.150	35.566	23.462	2.408
18.300	30.950	4.205	0.802
18.450	30.047	3.189	0.747
19.000	29.901	5.656	0.775
19.150	30.324	5.725	0.791
19.300	30.251	3.590	0.770
19.450	30.018	5.030	0.767
20.000	30.076	3.145	0.753
20.150	29.537	2.846	0.724
20.300	29.392	2.592	0.715
20.450	29.290	1.249	0.720
21.000	29.435	2.594	0.726
21.150	29.537	2.853	0.739
21.300	29.843	3.133	0.759
21.450	29.668	3.134	0.754
22.000	29.756	3.143	0.769
22.150	29.727	3.134	0.754
22.300	29.508	3.136	0.754
22.450	29.697	3.130	0.754
23.000	29.683	3.126	0.749
23.150	29.610	3.125	0.744
23.300	29.712	4.501	0.749
23.450	29.712	3.136	0.744

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 28 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
0.0	29.668	3.139	0.754
0.150	29.595	3.157	0.754
0.300	29.494	3.152	0.754
0.450	29.421	3.143	0.754
1.000	32.013	24.160	2.379
1.150	30.484	3.133	0.728
1.300	29.595	3.150	0.733
1.450	29.479	3.130	0.733
2.000	29.406	3.111	0.718
2.150	29.581	3.150	0.748
2.300	29.814	1.501	0.728
2.450	29.697	3.150	0.743
3.000	29.450	3.121	0.723
3.150	29.392	3.152	0.733
3.300	29.290	1.497	0.723
3.450	29.275	3.143	0.727
4.000	29.290	4.549	0.727
4.150	29.261	2.886	0.712
4.300	29.275	3.139	0.723
4.450	29.348	3.141	0.721
5.000	29.421	3.144	0.727
5.150	29.464	3.145	0.733
5.300	29.464	3.140	0.733
5.450	29.392	3.139	0.727
6.000	29.464	3.136	0.723
6.150	29.348	3.123	0.717
6.300	29.290	1.502	0.723
6.450	29.304	3.121	0.728
7.000	29.697	1.497	0.734
7.150	29.377	2.877	0.718
7.300	29.231	2.873	0.712
7.450	29.537	2.866	0.739
8.000	29.959	2.858	0.739
8.150	30.280	2.849	0.745
8.300	30.338	2.844	0.741
8.450	30.469	3.152	0.759
9.000	30.513	3.139	0.759
9.150	30.047	2.893	0.765
9.300	30.629	4.493	0.771
9.450	30.862	3.148	0.786
10.000	30.833	3.157	0.817
10.150	30.760	1.505	0.802
10.300	30.921	3.144	0.812
10.450	30.848	3.159	0.806
11.000	30.746	3.139	0.802
11.150	30.775	3.140	0.796
11.300	30.789	1.509	0.802
11.450	30.833	3.158	0.796
12.000	30.833	8.514	0.806
12.150	30.935	13.821	2.379

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 28 . JUN . 1983		PF	EC
TIME	HOUR	ALHR KW/M	MPA MM
12.300		33.658	7.881 0.776
12.450		35.405	22.089 2.379
13.000		31.692	-3.877 0.791
13.150		33.644	-4.144 0.974
13.300		39.075	-3.978 0.965
13.450		36.104	-4.003 0.950
14.000		35.988	-4.003 0.965
14.150		40.633	-0.748 2.379
14.300		41.609	-0.616 2.379
14.450		42.613	-3.851 1.072
15.000		40.982	-3.901 1.056
15.150		45.861	21.078 2.408
15.300		44.433	-3.952 1.236
15.450		50.520	-3.995 1.162
16.000		46.356	-3.919 1.113
16.150		46.516	-4.199 1.123
16.300		49.210	-3.835 1.091
16.450		50.127	-22.990 2.011
17.000		55.049	-1.312 1.030
17.150		57.131	16.758 2.379
17.300		51.103	-1.279 1.043
17.450		57.277	-0.630 2.408
18.000		58.747	-0.616 2.379
18.150		58.398	-0.844 2.379
18.300		50.928	-1.244 0.979
18.450		49.443	-1.211 0.960
19.000		49.603	-1.213 0.961
19.150		49.996	-1.192 0.998
19.300		50.782	-1.214 0.996
19.450		59.344	-0.749 2.379
20.000		51.088	-1.207 0.984
20.150		50.637	-1.197 0.970
20.300		50.768	-1.216 0.980
20.450		50.753	-1.214 0.999
21.000		50.797	-1.207 0.984
21.150		50.826	-1.215 0.989
21.300		50.826	-1.211 0.974
21.450		50.972	-2.282 0.356
22.000		49.326	-1.255 0.971
22.150		43.836	-1.251 0.926
22.300		38.492	-1.251 0.930
22.450		36.920	-1.265 0.940
23.000		37.662	-1.272 0.940
23.150		39.774	-1.263 0.940
23.300		38.274	-1.254 0.940
23.450		40.546	-1.263 0.950

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 29 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
0.0	42.672	-1.252	0.960
0.150	44.157	-1.252	0.935
0.300	44.142	-1.229	0.930
0.450	44.084	-1.233	0.936
1.000	44.055	-1.226	0.931
1.150	44.128	-1.219	0.937
1.300	44.244	-1.213	0.937
1.450	44.419	-1.208	0.927
2.000	44.492	-1.203	0.932
2.150	44.361	-1.209	0.901
2.300	42.366	-1.218	0.907
2.450	40.269	-1.242	0.926
3.000	37.677	-1.256	0.935
3.150	35.260	-1.283	0.939
3.300	32.974	-1.270	0.935
3.450	30.047	-1.258	0.919
4.000	27.499	-1.261	0.909
4.150	1.754	-1.273	0.808
4.300	0.225	-1.280	0.813
4.450	0.313	-1.299	0.813
5.000	0.225	-1.299	0.812
5.150	0.298	-1.302	0.817
5.300	2.511	-1.300	0.833
5.450	3.429	-1.290	0.828
6.000	3.341	-1.281	0.828
6.150	3.137	-1.274	0.824
6.300	3.254	-1.264	0.824
6.450	3.822	-1.270	0.830
7.000	4.419	-1.259	0.825
7.150	6.982	-1.246	0.842
7.300	9.646	-1.253	0.857
7.450	10.666	-1.253	0.857
8.000	10.739	-1.252	0.857
8.150	10.768	-1.249	0.862
8.300	10.768	-1.248	0.852
8.450	10.753	-1.254	0.842
9.000	10.768	-1.248	0.846
9.150	10.724	-1.264	0.851
9.300	10.797	-1.248	0.846
9.450	11.204	-1.258	0.856
10.000	13.593	-1.261	0.867
10.150	14.947	-1.260	0.873
10.300	15.136	-1.276	0.877
10.450	15.121	-1.268	0.872
11.000	15.107	-1.256	0.867
11.150	15.121	-1.265	0.867
11.300	15.078	-1.263	0.872
11.450	15.092	-1.265	0.867
12.000	15.063	-1.255	0.867
12.150	14.990	-1.269	0.862

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

TIME HOUR	COVERD 29 . JUN . 1983		
	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
12.300	14.976	-1.260	0.872
12.450	14.947	-1.259	0.867
13.000	14.932	-1.260	0.867
13.150	14.874	-1.262	0.872
13.300	14.874	-1.268	0.866
13.450	14.801	-1.253	0.862
14.000	14.743	-1.258	0.862
14.150	14.699	-1.259	0.862
14.300	14.961	-1.258	0.867
14.450	14.961	-1.258	0.862
15.000	13.796	-1.273	0.861
15.150	13.753	-1.255	0.852
15.300	13.709	-1.284	0.861
15.450	13.738	-1.290	0.875
16.000	13.738	-1.279	0.866
16.150	13.709	-1.265	0.862
16.300	13.636	-1.257	0.862
16.450	13.636	-1.276	0.862
17.000	13.622	-1.263	0.866
17.150	13.636	-1.263	0.866
17.300	13.622	-1.277	0.866
17.450	13.593	-1.262	0.866
18.000	13.578	-1.273	0.862
18.150	13.593	-1.273	0.862
18.300	13.593	-1.257	0.862
18.450	13.593	-1.254	0.862
19.000	13.549	-1.264	0.862
19.150	13.534	-1.247	0.857
19.300	13.534	-1.256	0.857
19.450	13.491	-1.257	0.857
20.000	13.476	-1.265	0.862
20.150	13.403	-1.276	0.862
20.300	13.418	-1.264	0.866
20.450	13.287	-1.258	0.862
21.000	13.228	-1.266	0.862
21.150	13.185	-1.257	0.857
21.300	0.779	-1.264	0.857
21.450	11.263	-1.277	0.866
22.000	9.239	-1.261	0.857
22.150	5.438	-1.259	0.857
22.300	9.981	-1.260	0.857
22.450	9.923	-1.260	0.857
23.000	11.030	-1.248	0.857
23.150	10.040	-1.260	0.857
23.300	9.370	-1.259	0.857
23.450	9.588	-1.256	0.857

*** POWER HISTORY OF BWR09 DURING POWER RAMPING ***

COVERD 30 . JUN . 1983

TIME HOUR	ALHR KW/M	PF MPA	EC MM
0.0	9.617	-1.260	0.857
0.150	11.787	-1.251	0.862
0.300	10.433	-1.258	0.862
0.450	11.263	-1.279	0.862
1.000	11.496	-1.265	0.862
1.150	11.568	-1.263	0.862
1.300	11.554	-1.267	0.866
1.450	12.384	-1.269	0.862
2.000	11.729	-1.259	0.857
2.150	11.845	-1.248	0.857
2.300	11.612	-1.251	0.862
2.450	11.714	-1.266	0.862
3.000	11.903	-1.266	0.862
3.150	11.903	-1.257	0.862
3.300	11.889	-1.257	0.862
3.450	11.583	-1.258	0.862
4.000	11.539	-1.257	0.862
4.150	12.122	-1.268	0.862
4.300	11.437	-1.266	0.857
4.450	10.957	-1.265	0.862
5.000	13.097	-1.249	0.862
5.150	13.199	-1.260	0.862
5.300	13.214	-1.256	0.857
5.450	13.170	-1.263	0.862
6.000	13.272	-1.259	0.862
6.150	13.243	-1.281	0.866
6.300	13.258	-1.265	0.866
6.450	13.243	-1.273	0.862
7.000	13.199	-1.268	0.857
7.150	13.214	-1.266	0.862
7.300	13.301	-1.272	0.862
7.450	13.243	-1.266	0.866
8.000	13.520	-1.282	0.866
8.150	13.622	-1.248	0.867
8.300	13.898	-1.257	0.872
8.450	15.558	-1.277	0.887
9.000	15.879	-1.280	0.892
9.150	15.879	-1.268	0.892
9.300	15.864	-1.269	0.887
9.450	16.039	-1.269	0.897
10.000	18.019	-1.284	0.913
10.150	18.907	-1.277	0.913
10.300	18.354	-1.257	0.887
10.450	15.282	-1.251	0.867
11.000	14.626	-1.260	0.867
11.150	14.583	-1.257	0.862
11.300	14.816	-1.277	0.867
11.450	15.311	-1.261	0.872
12.000	14.044	-1.267	0.866

付 錄 Ⅲ

直径陥没を生じたBWR14の
詳細な直径プロフィール

付録Ⅲに収集した直径プロフィール：

<説明>

直径プロフィールは、1回の実行（以後ランと称す）につき DG-1 (0° - 180° 方向) 及び DG-2 (90° - 270° 方向) が得られる。例えば、Fig.A.57は、ラン番号 9160 に於ける、DG-1 での直径プロフィールであり、Fig.A.58は、ラン番号 9160 に於ける、DG-2 での直径プロフィールである。

ラン番号、最初のランからの経過時間及び直径測定時の局所線出力については、下に示す。

ラン番号	経過時間(h)	局所線出力(kW/m)
9160	10.333	0.087
9162	32.560	2.588
9168	34.187	9.916
9170	34.742	17.419
9172	35.278	25.917
9178	38.205	27.248
9180	45.138	27.382
9182	57.149	27.275
9188	58.303	30.636
9190	58.952	32.102
9192	59.343	35.194
9194	59.931	35.826
9196	60.305	39.900
9198	61.009	40.788
9200	61.387	44.432
9202	61.744	45.574
9204	62.287	45.037
9210	63.963	44.700

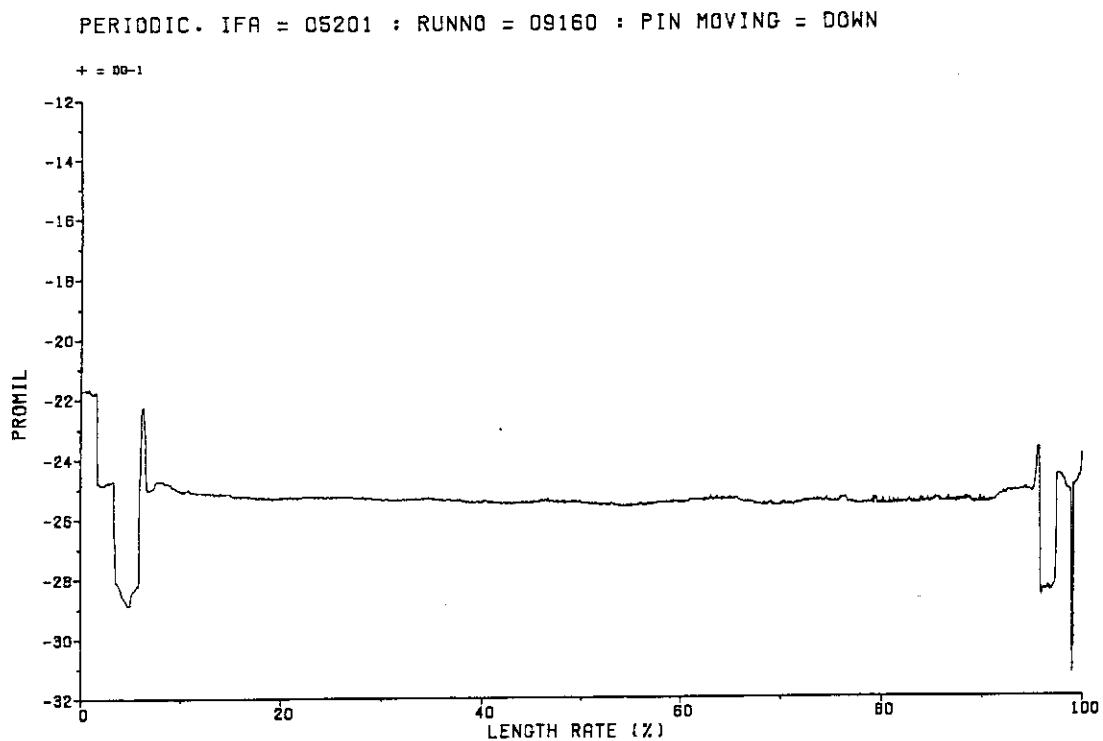


Fig. A.57 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9160: DG-1

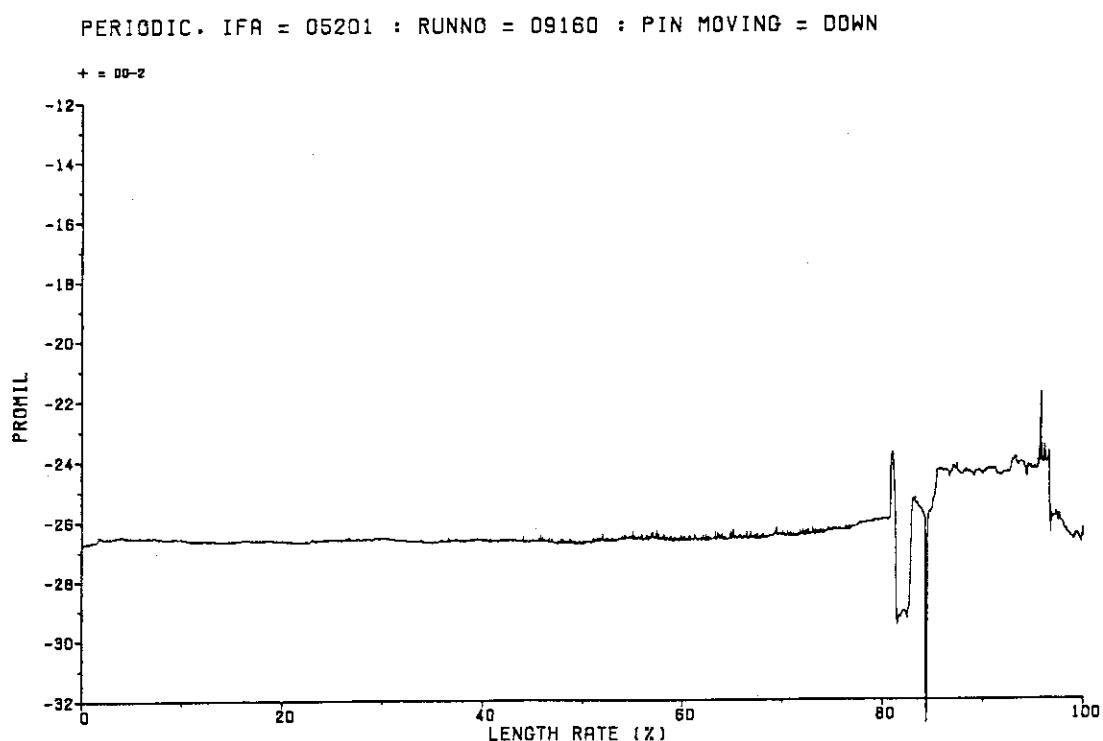


Fig. A.58 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9160: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09162 : PIN MOVING = DOWN

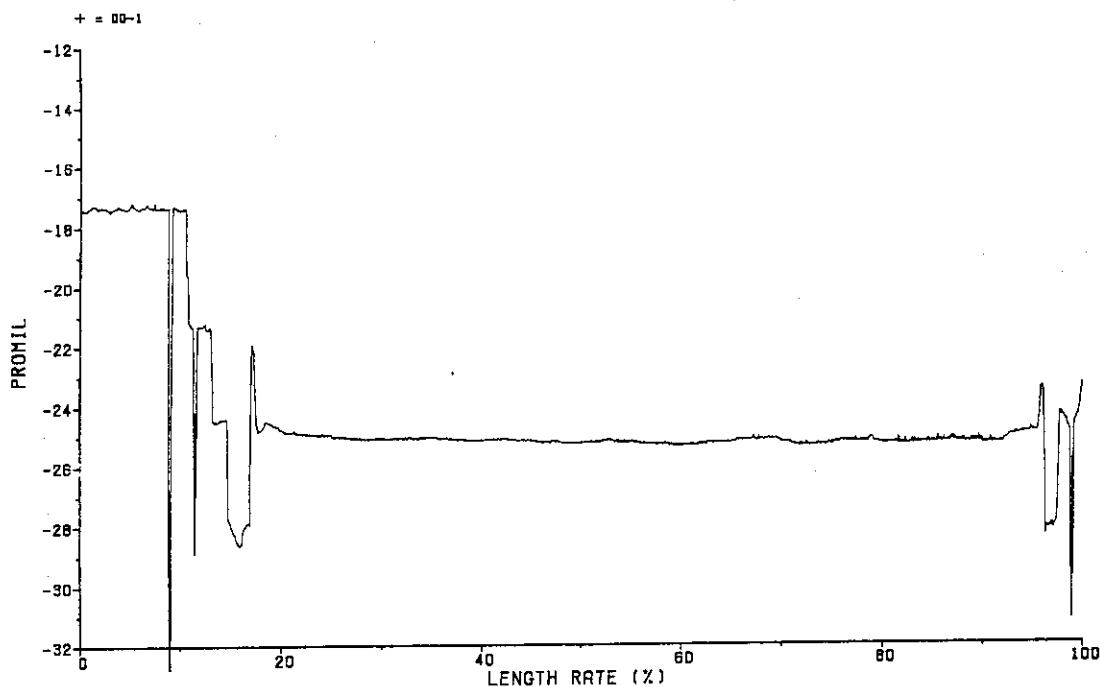


Fig. A.59 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9162: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09162 : PIN MOVING = DOWN

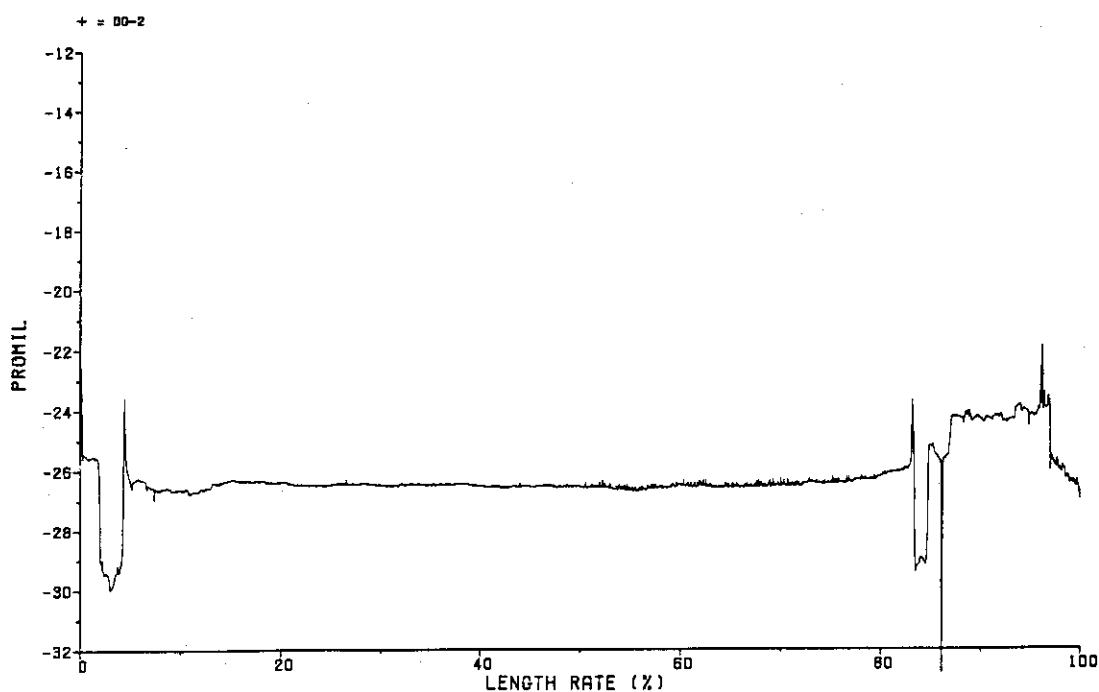


Fig. A.60 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9162: DG-2

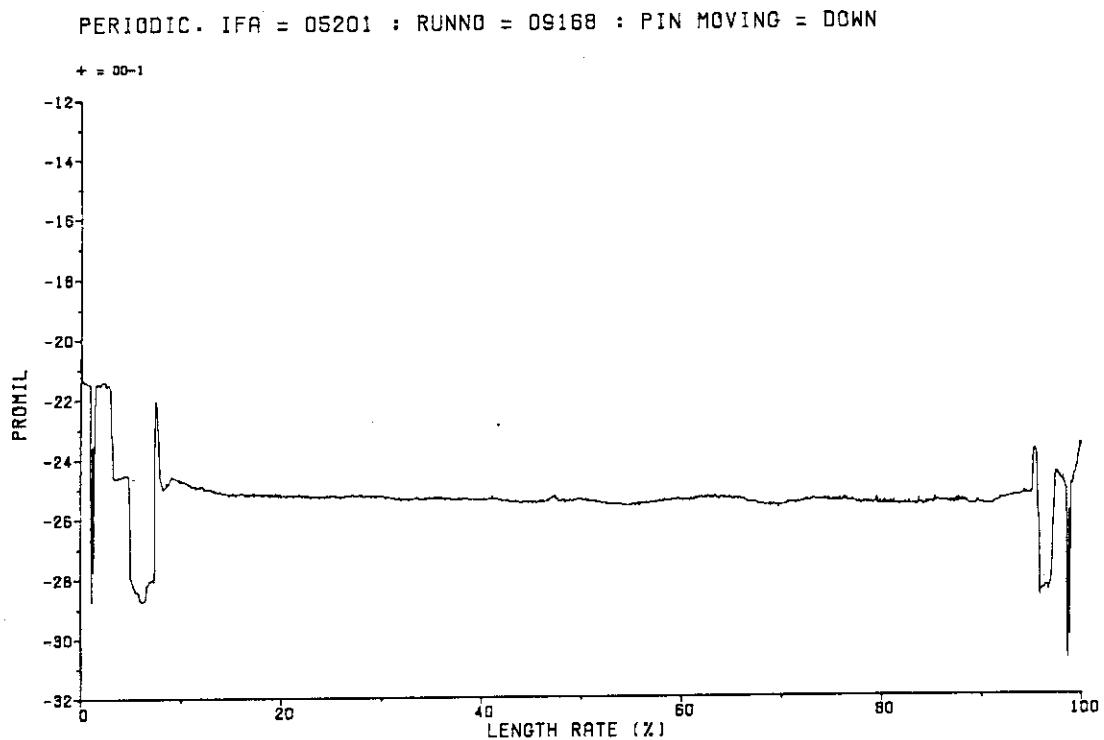


Fig. A.61 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9168: DG-1

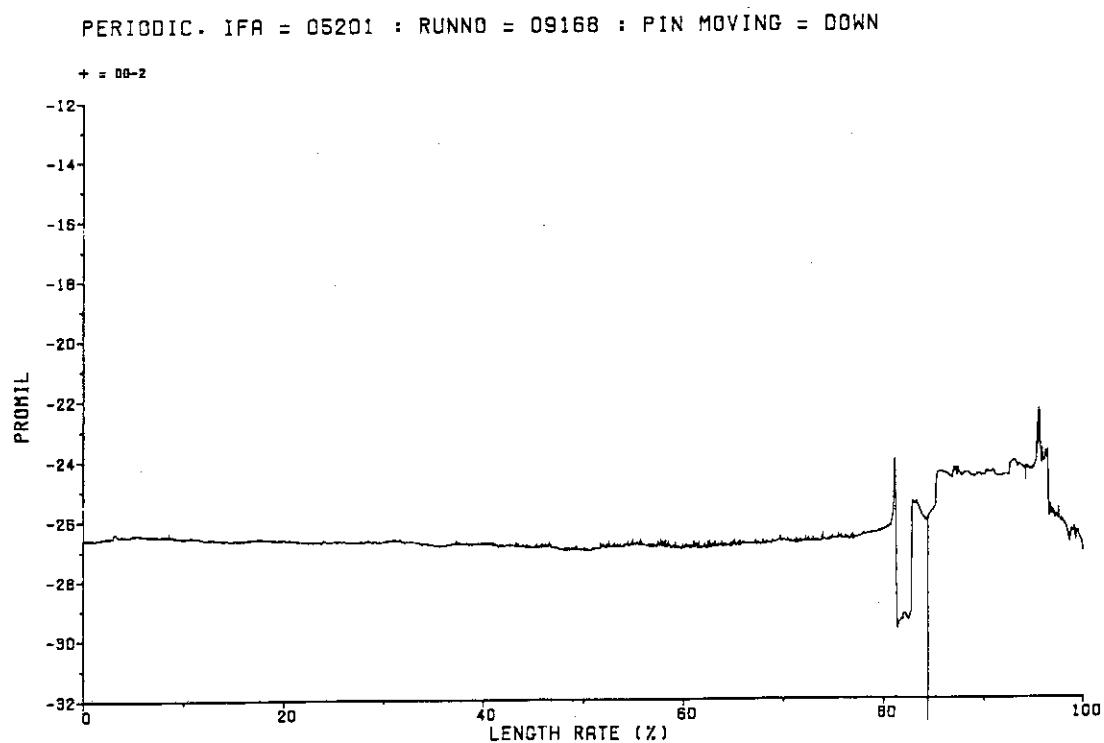


Fig. A.62 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9168: DG-2

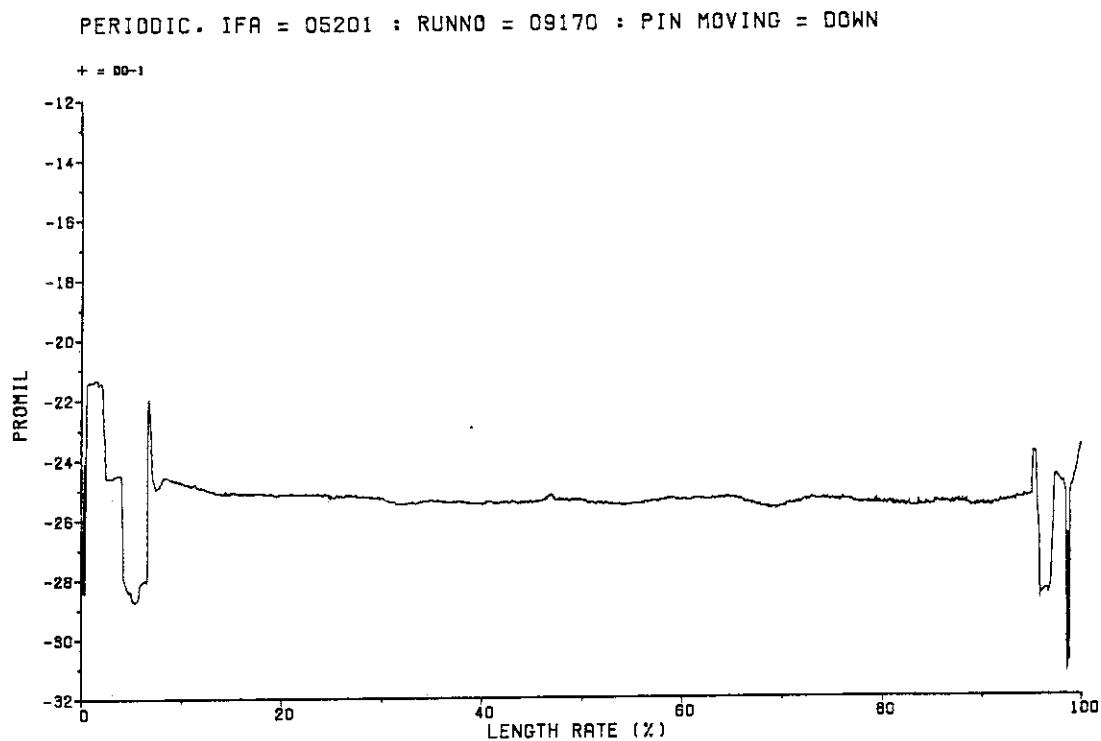


Fig. A.63 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9170: DG-1

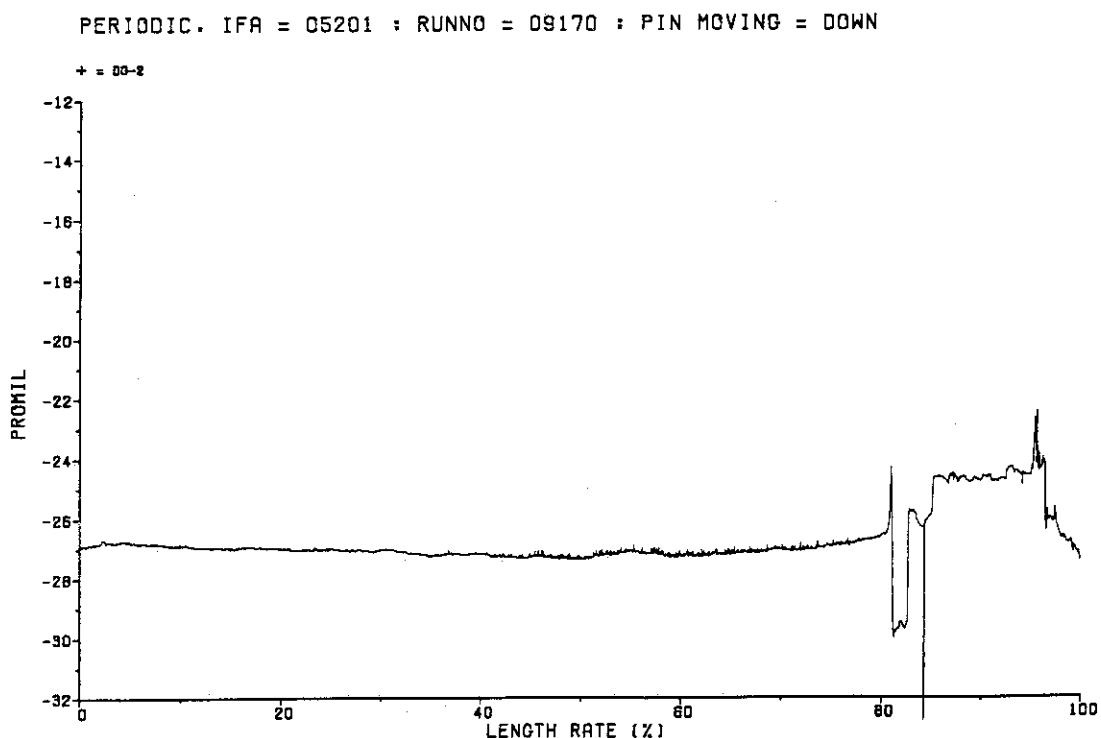


Fig. A.64 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9170: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09172 : PIN MOVING = DOWN

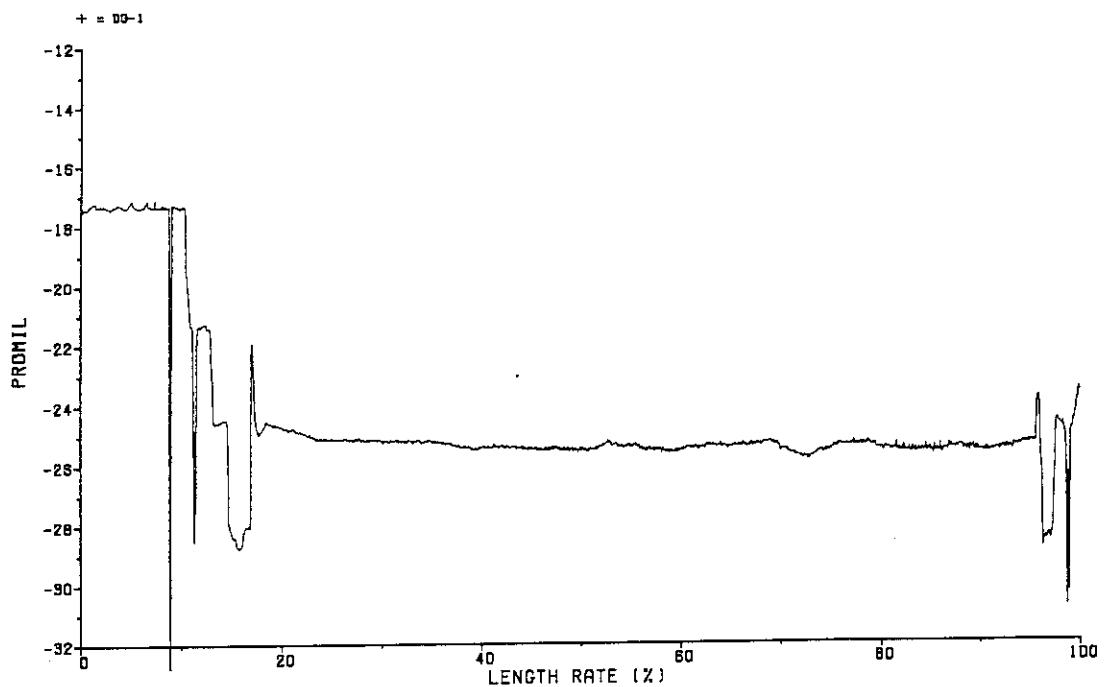


Fig. A.65 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9172: DG-1

PERIODIC. IFR = 05201 : RUNNO = 09172 : PIN MOVING = DOWN

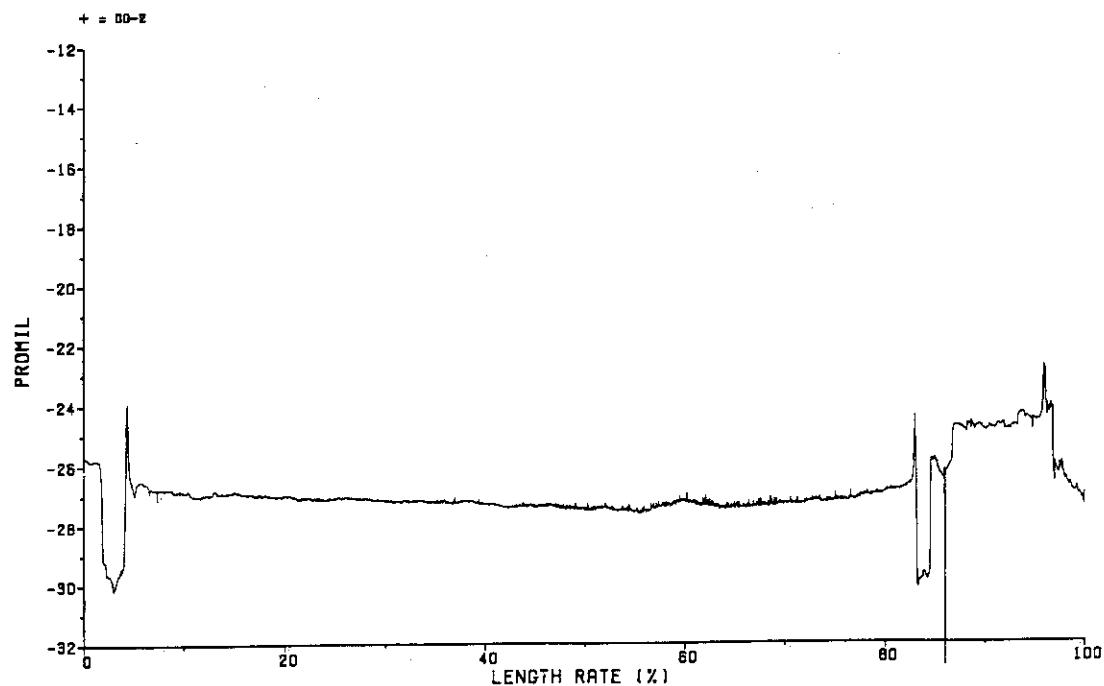


Fig. A.66 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9172: DG-2

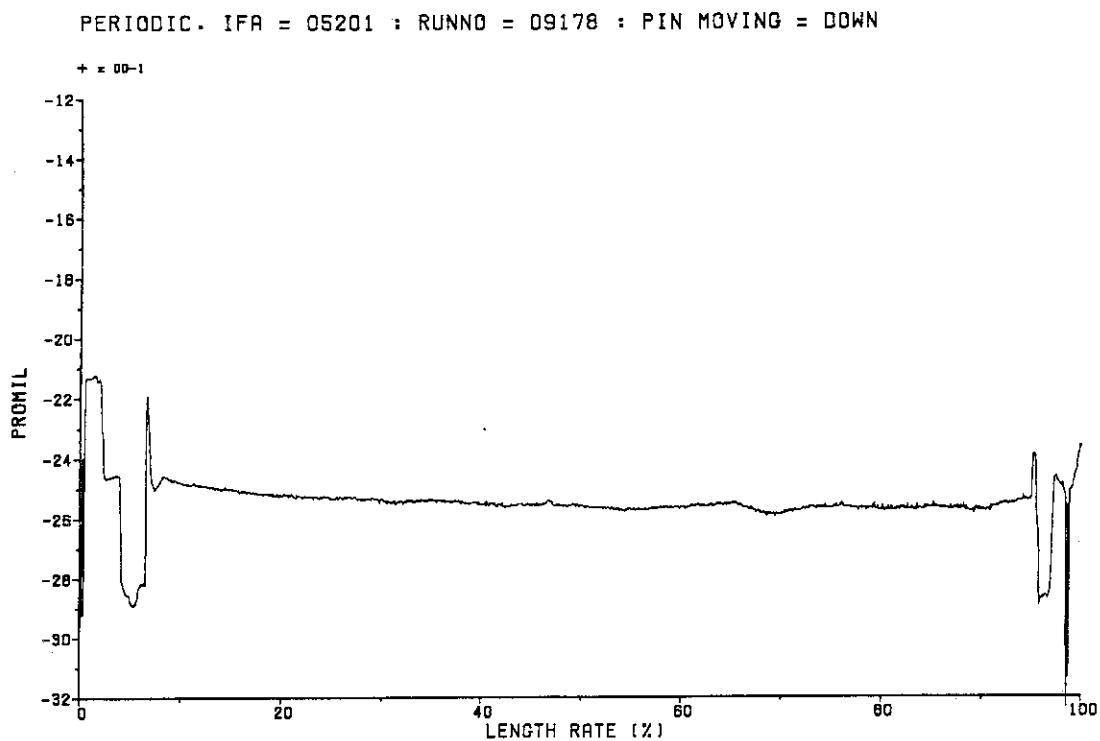


Fig. A.67 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9178: DG-1

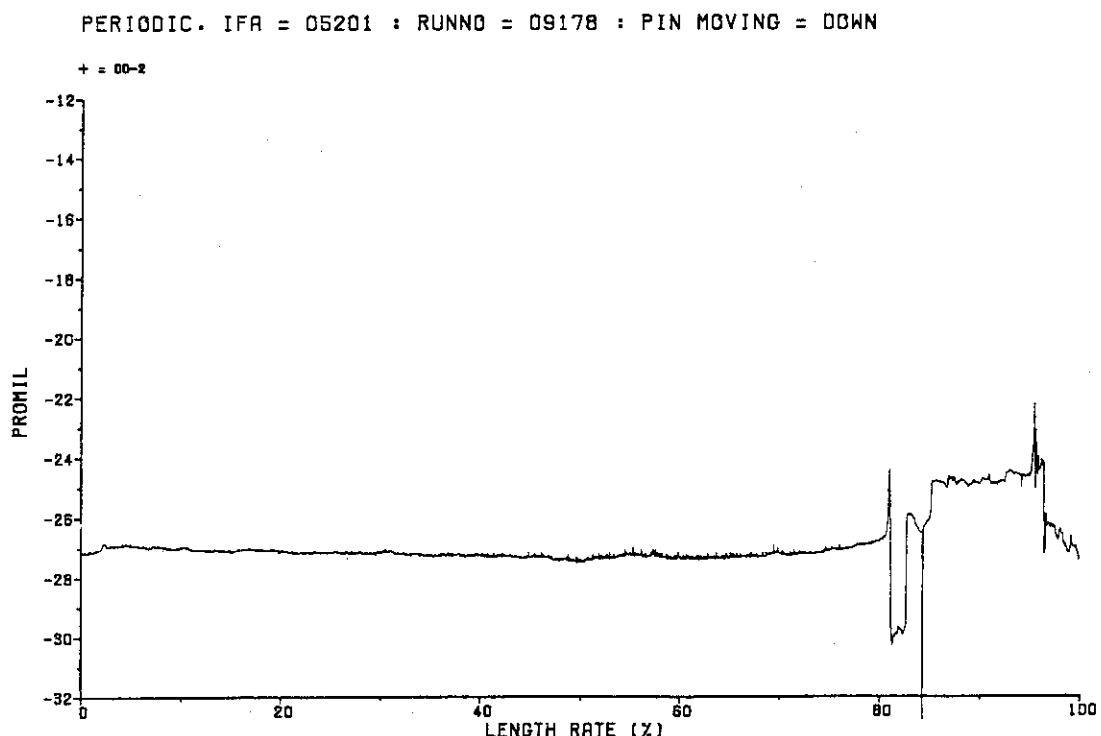
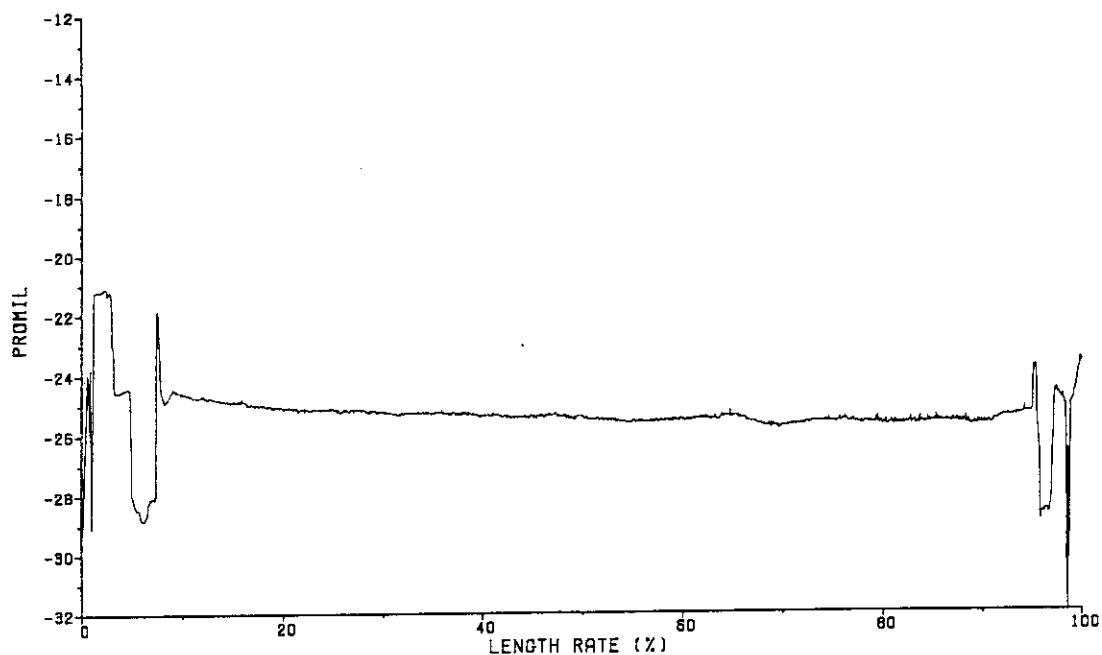


Fig. A.68 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9178: DG-2

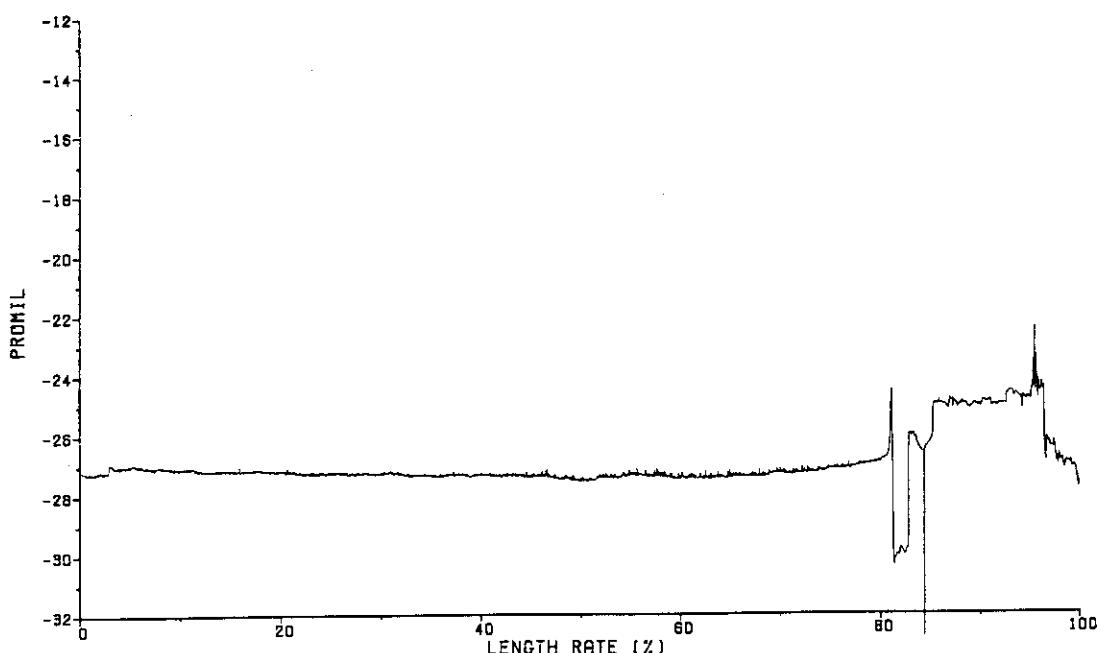
PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09180 : PIN MOVING = DOWN

+ = 00-1

Fig. A.69 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9180: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09180 : PIN MOVING = DOWN

+ = 00-2

Fig. A.70 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9180: DG-2

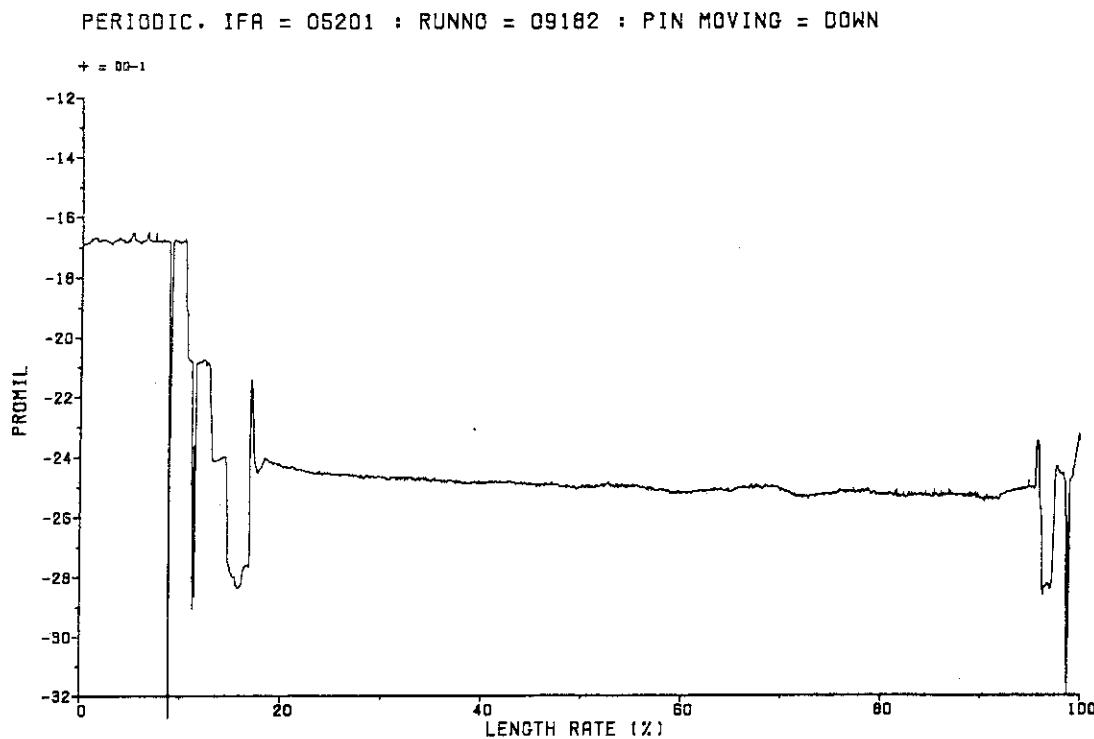


Fig. A.71 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9182: DG-1

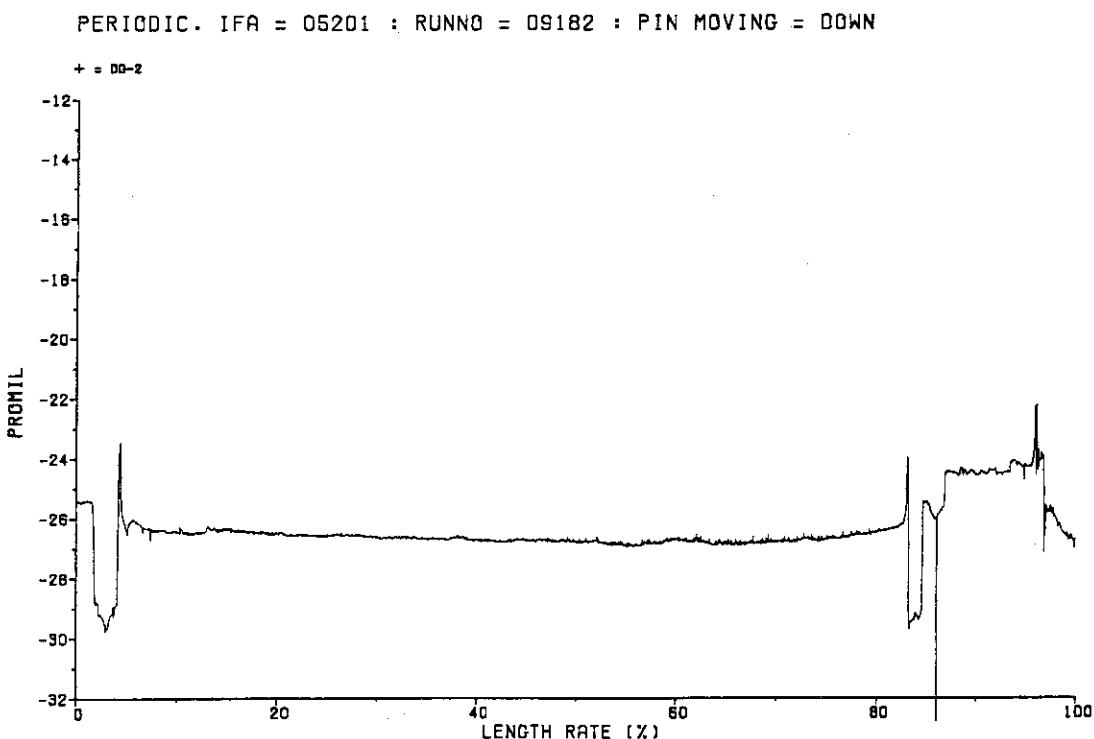


Fig. A.72 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9182: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09188 : PIN MOVING = DOWN

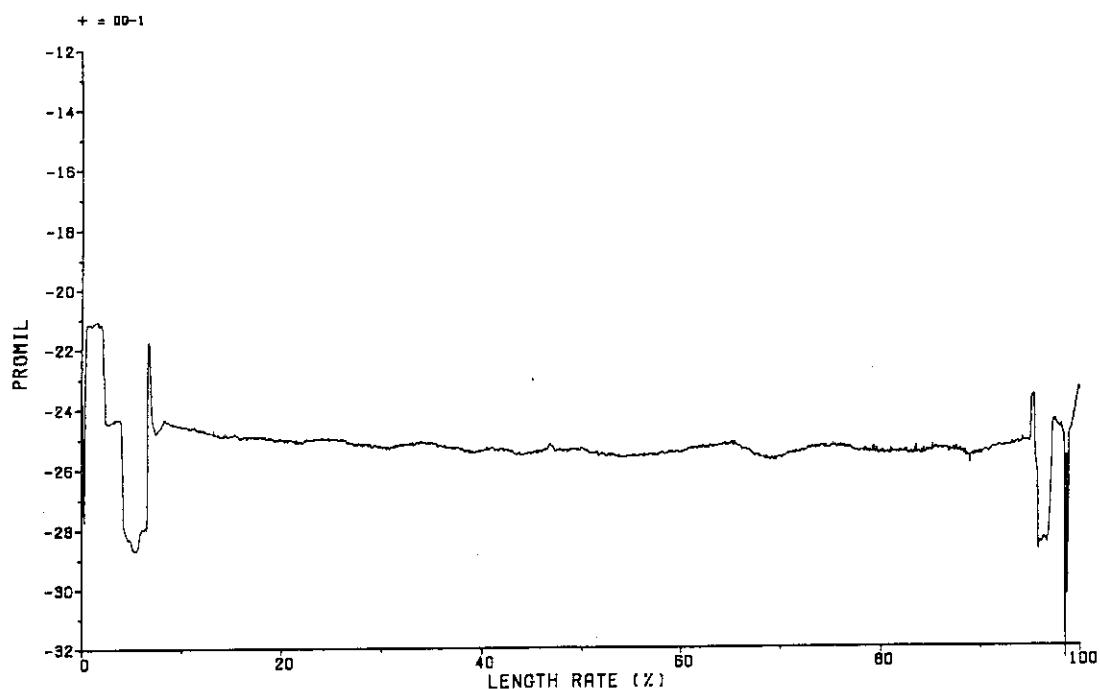


Fig. A.73 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9188: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09188 : PIN MOVING = DOWN

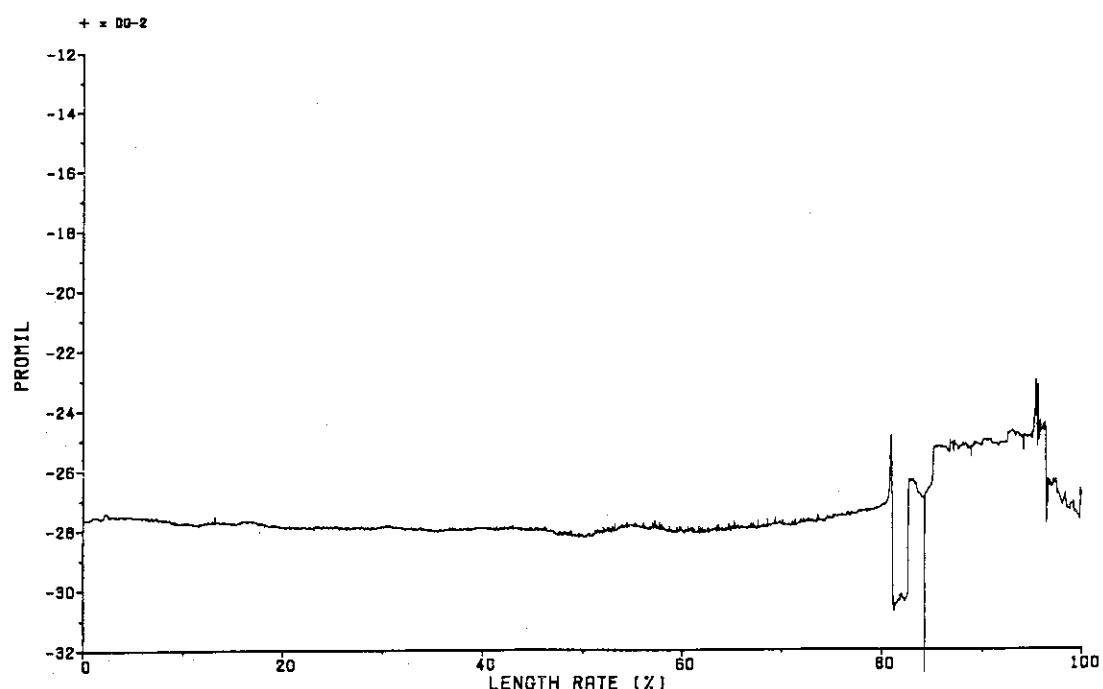


Fig. A.74 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9188: DG-2

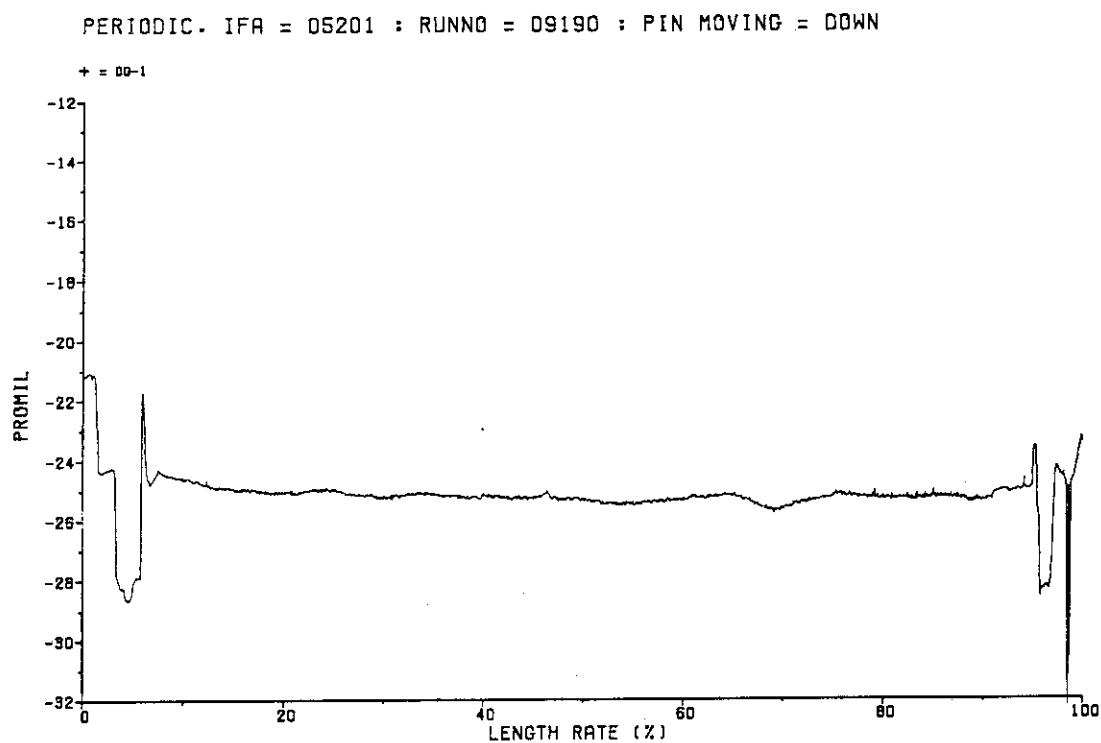


Fig. A.75 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9190: DG-1

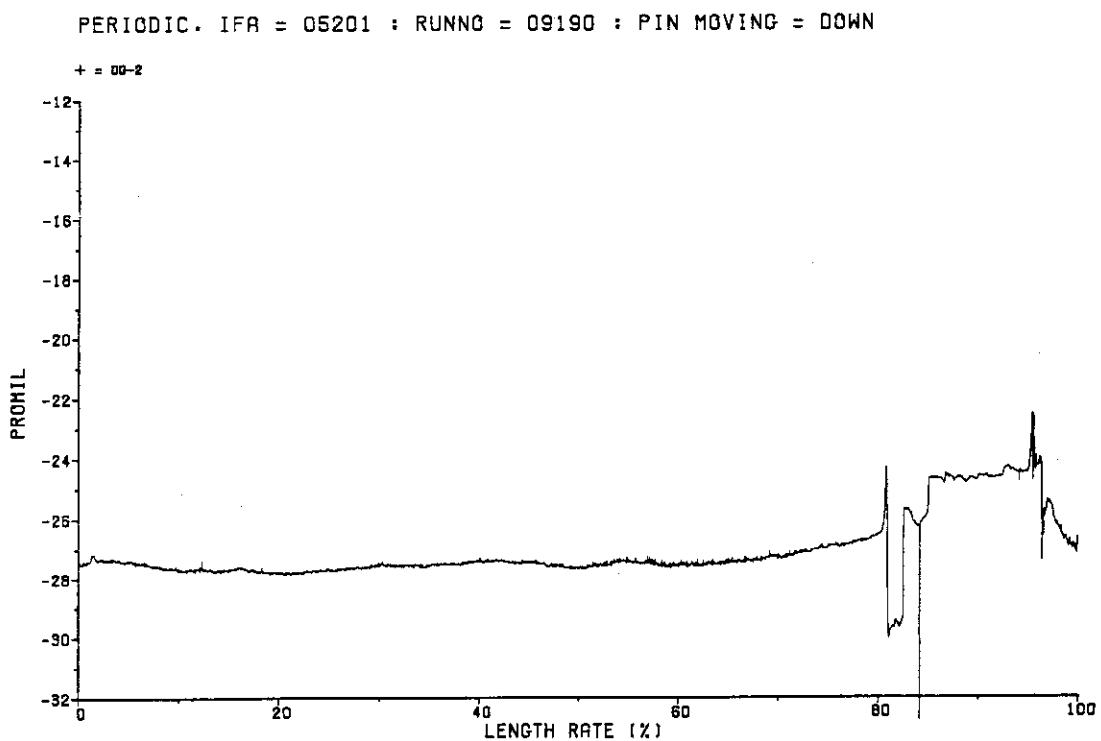


Fig. A.76 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9190: DG-2

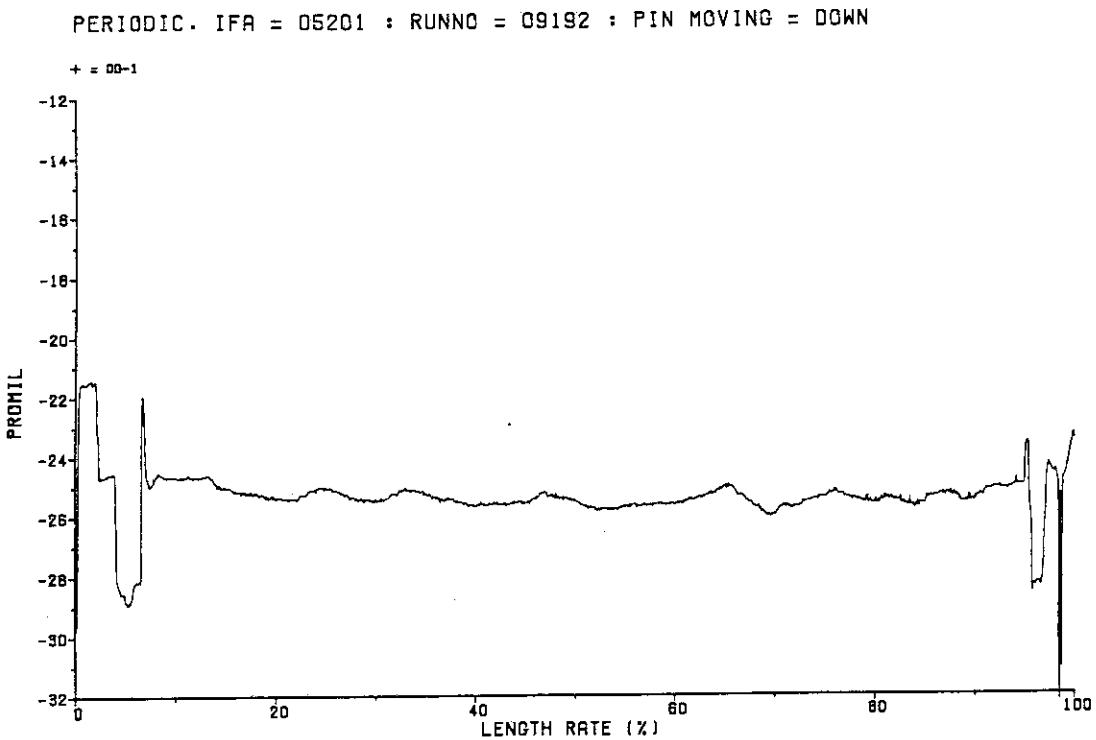


Fig. A.77 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9192: DG-1

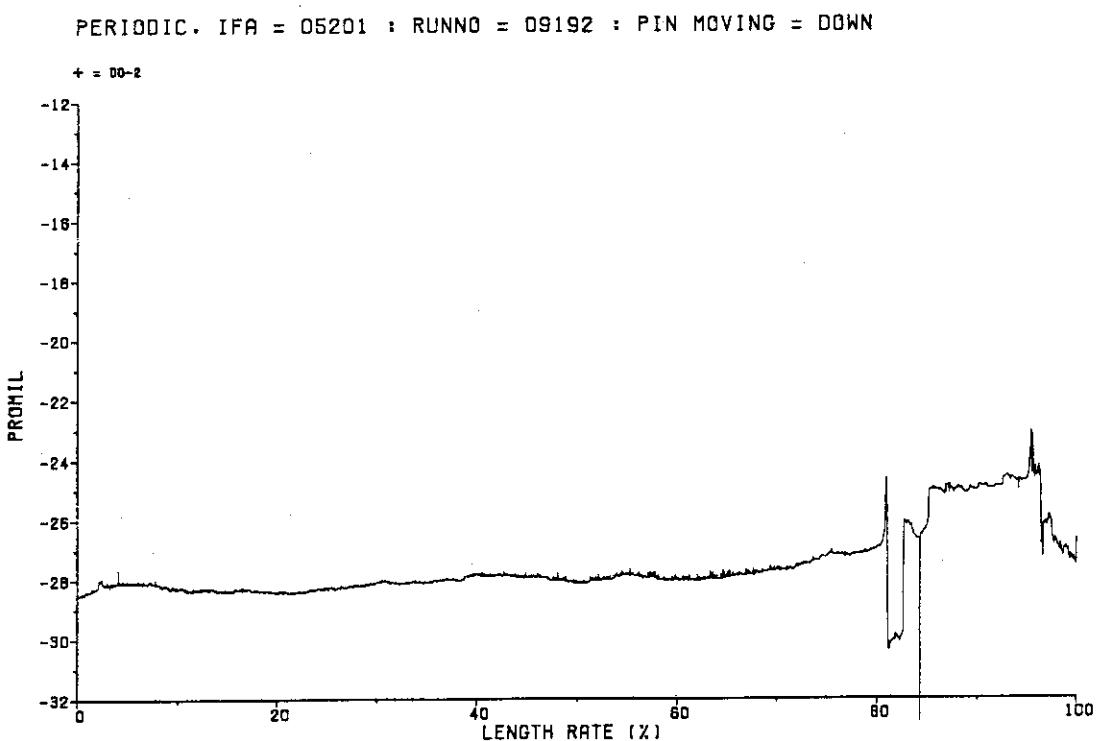


Fig. A.78 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9192: DG-2

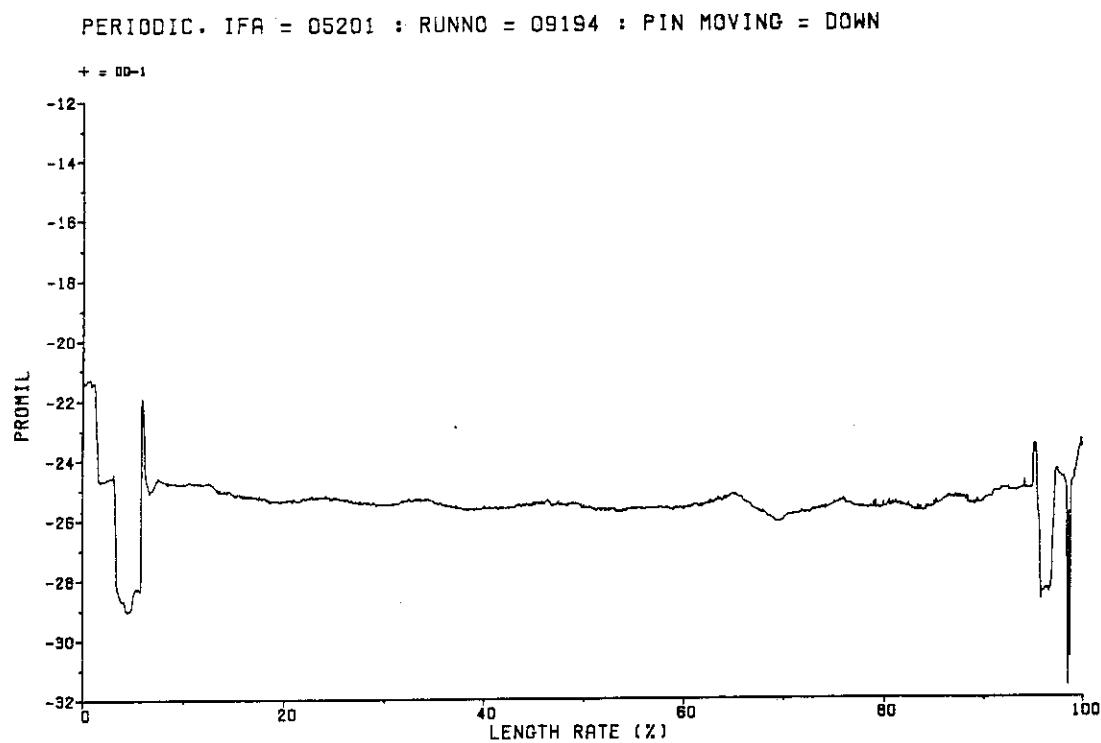


Fig. A.79 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9194: DG-2

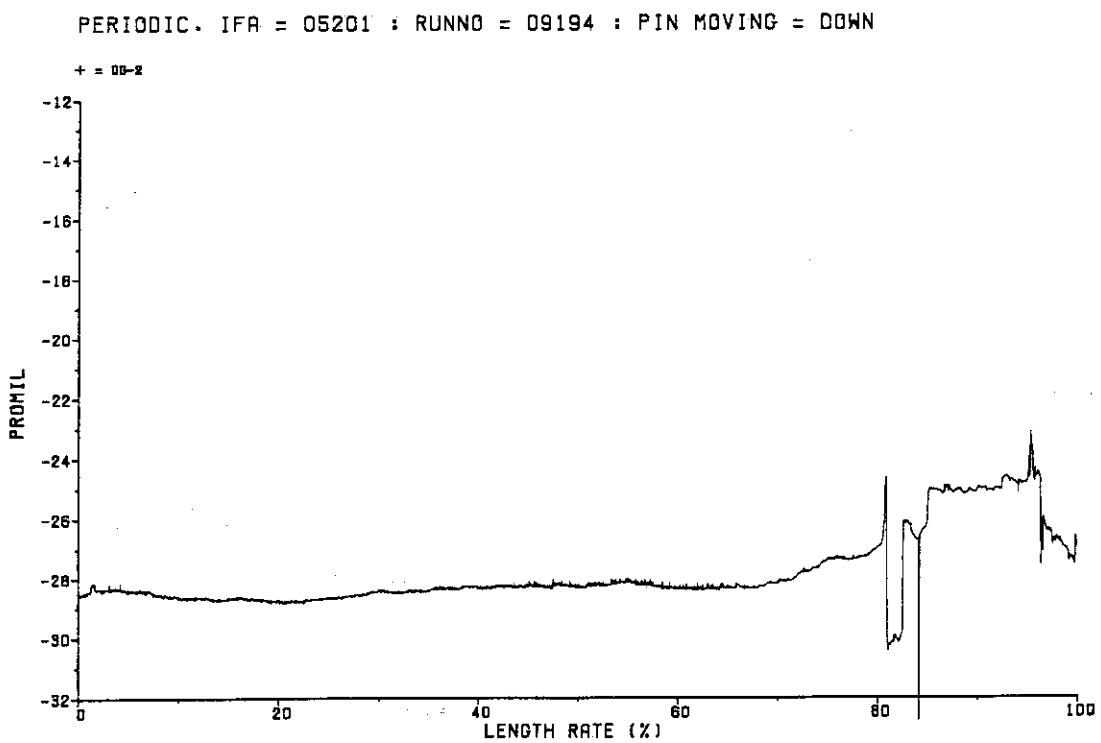


Fig. A.80 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9194: DG-2

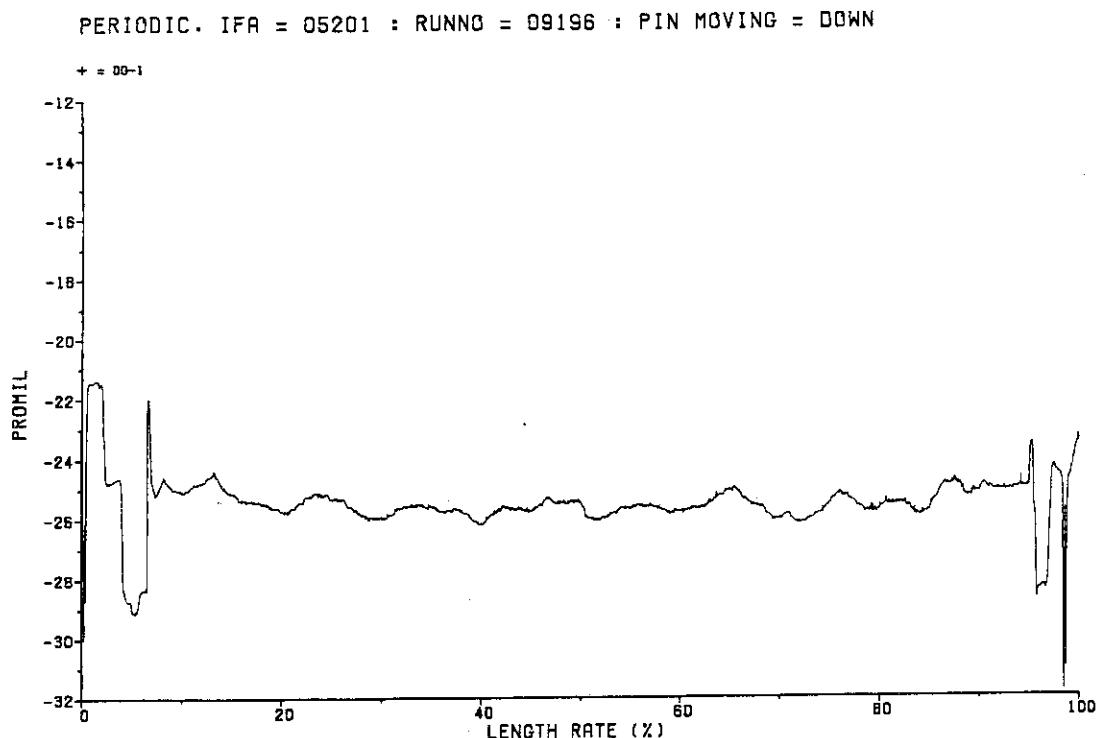


Fig. A.81 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9196: DG-1

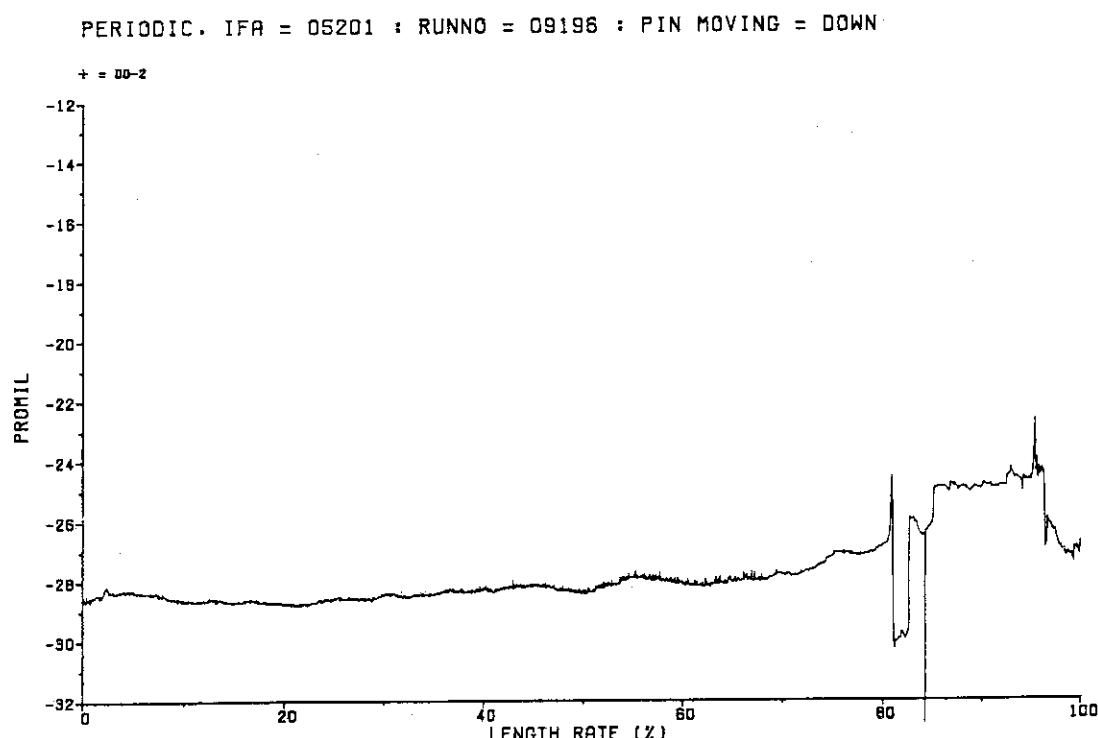


Fig. A.82 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9196: DG-2

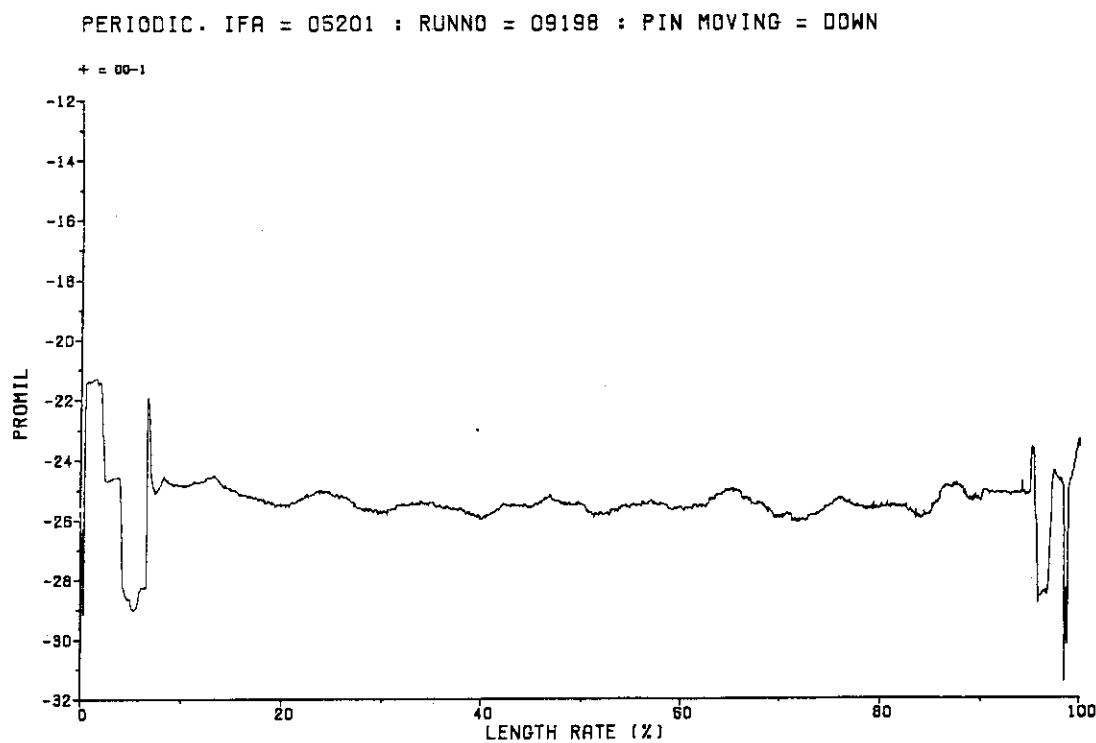


Fig. A.83 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9198: DG-1

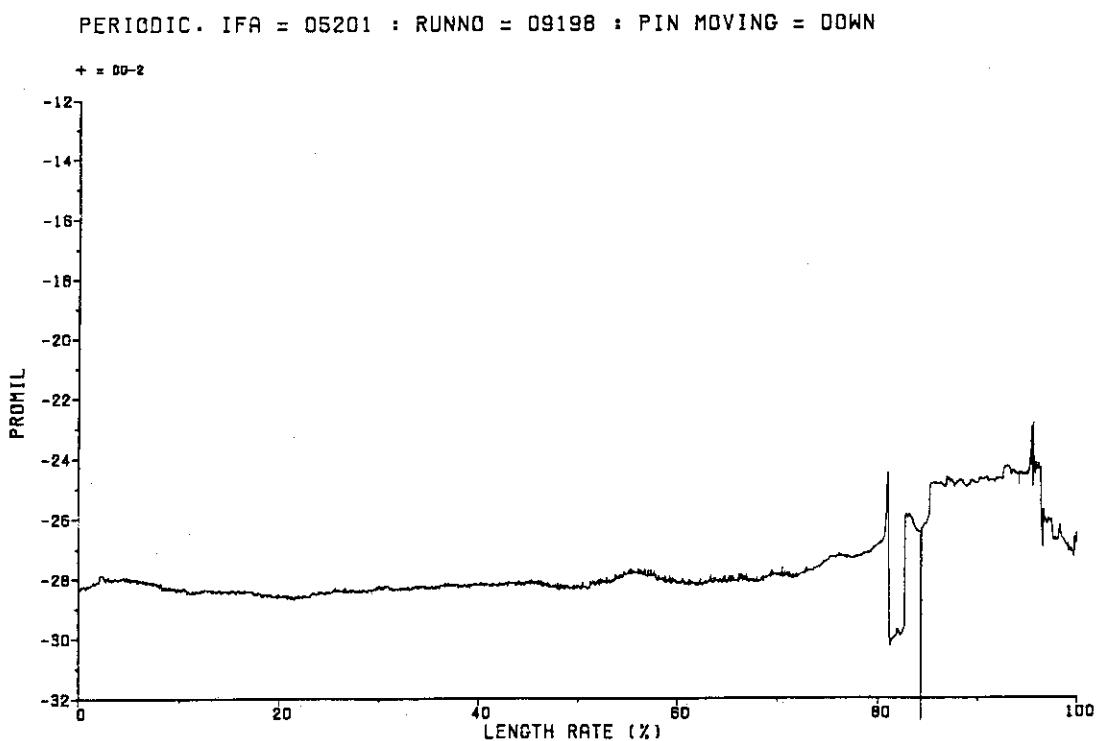


Fig. A.84 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9198: DG-2

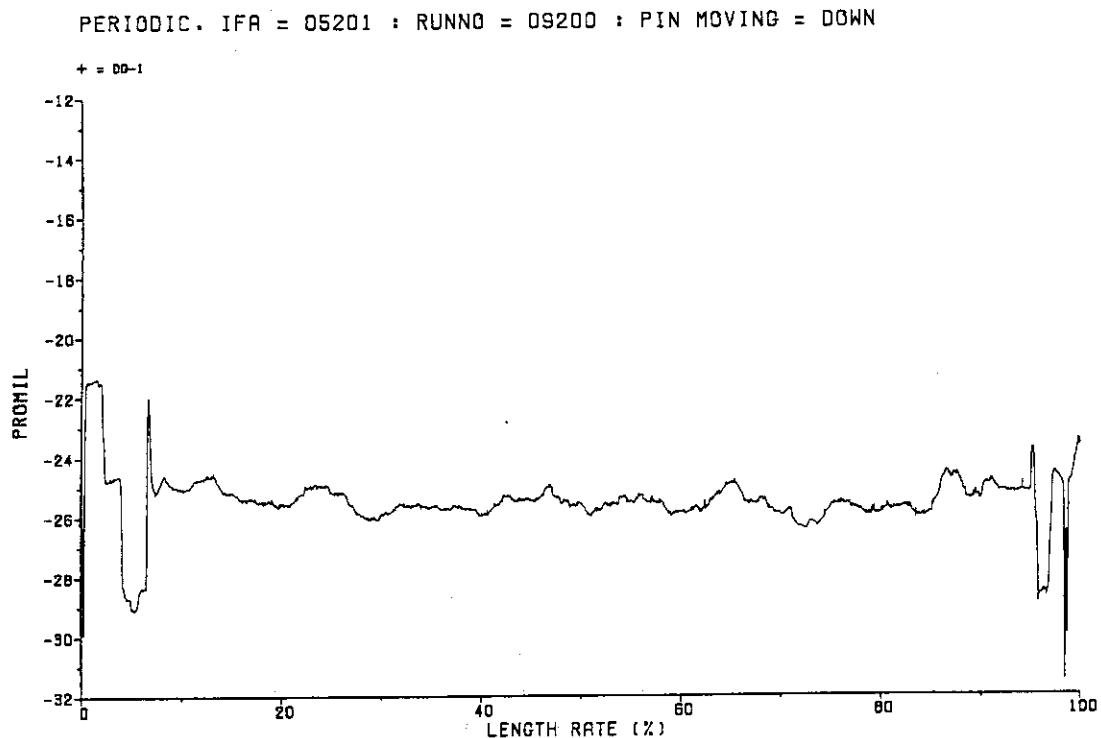


Fig. A.85 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9200: DG-1

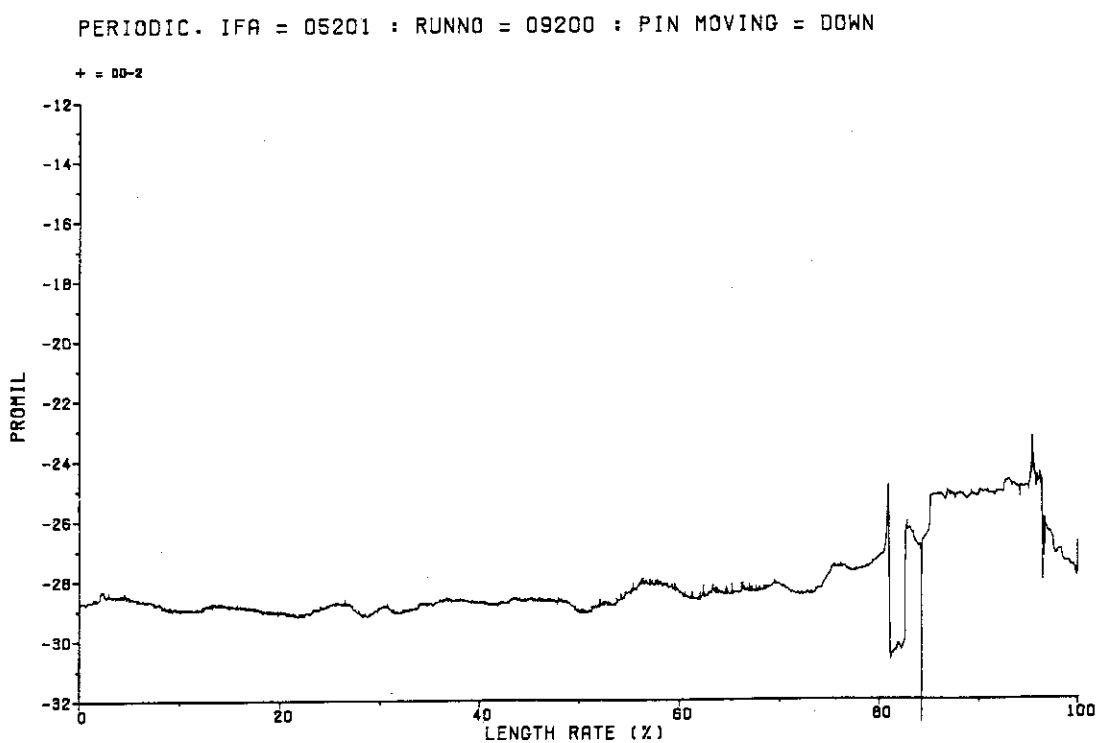


Fig. A.86 Diameter profile of BWR 14 at the run number
9200: DG-2

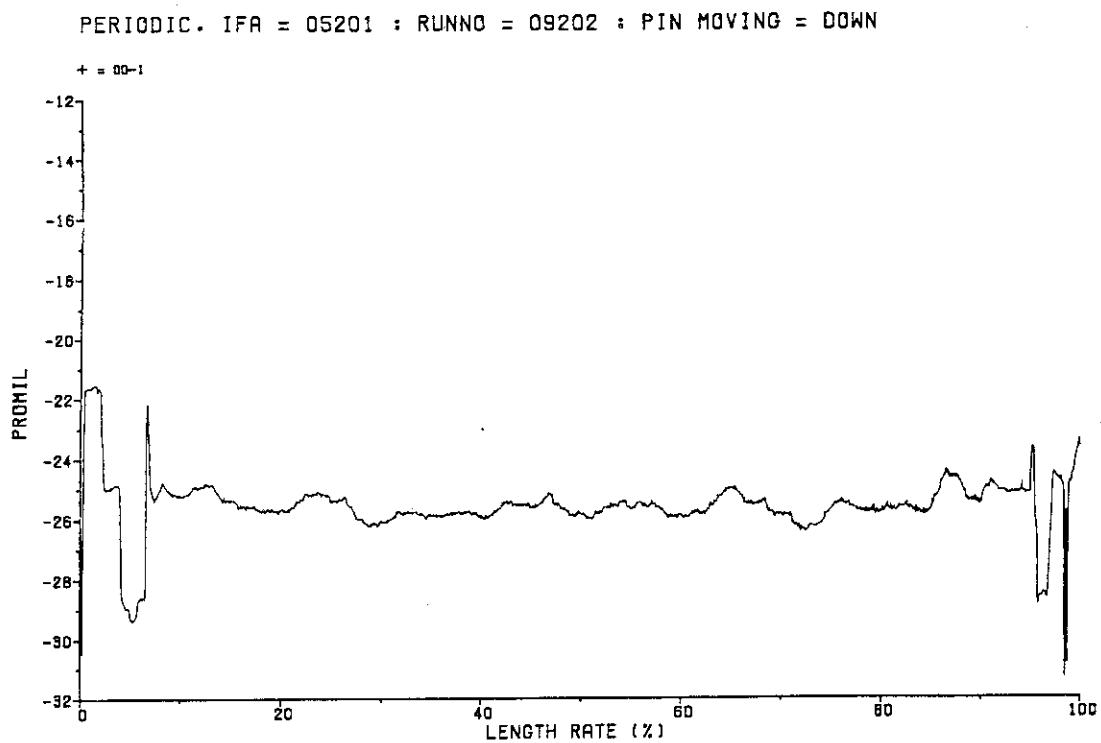


Fig. A.87 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9202: DG-1

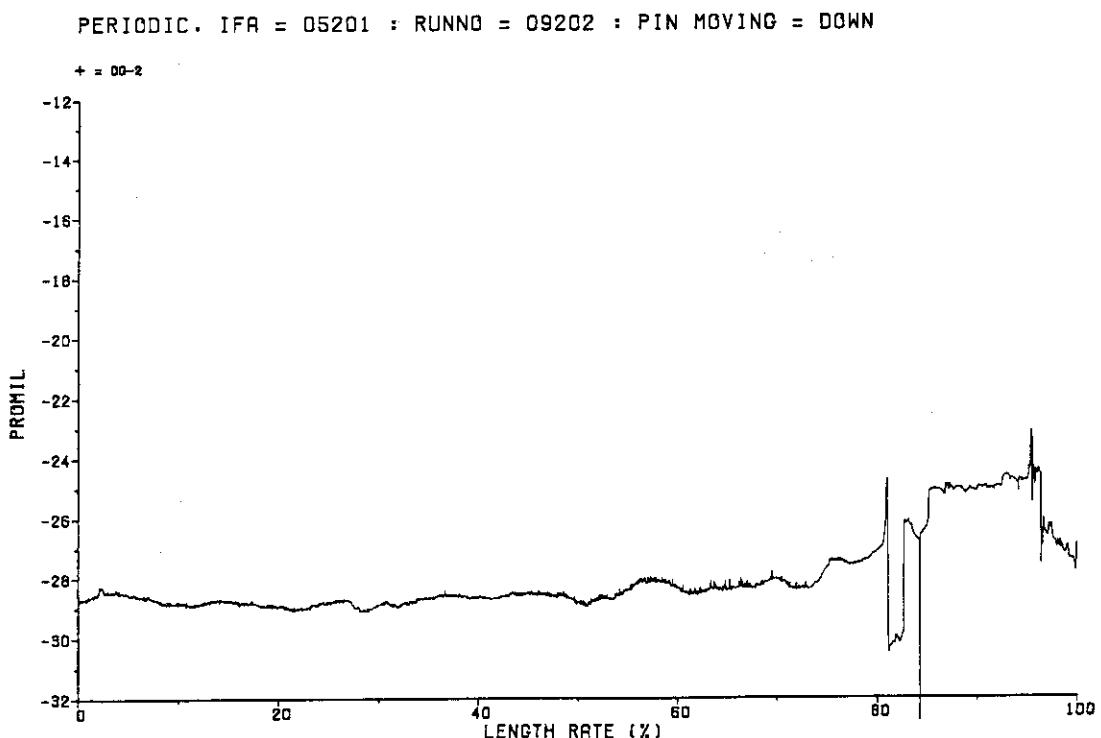


Fig. A.88 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9202: DG-2

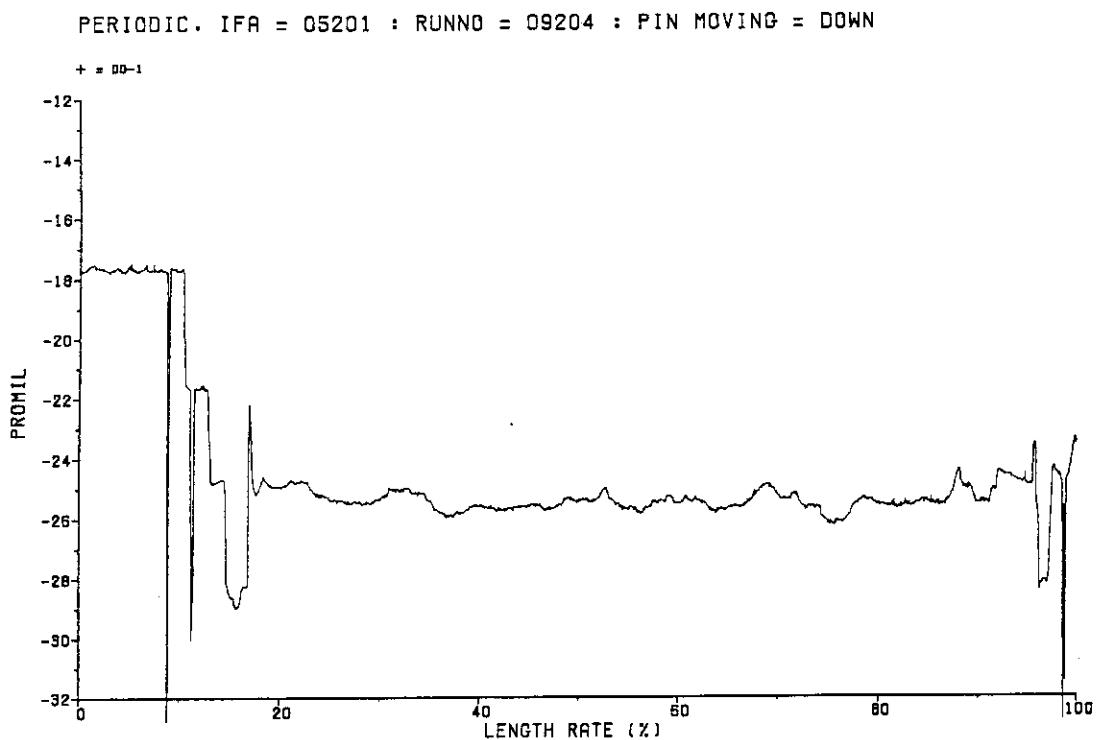


Fig. A.89 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9204: DG-1

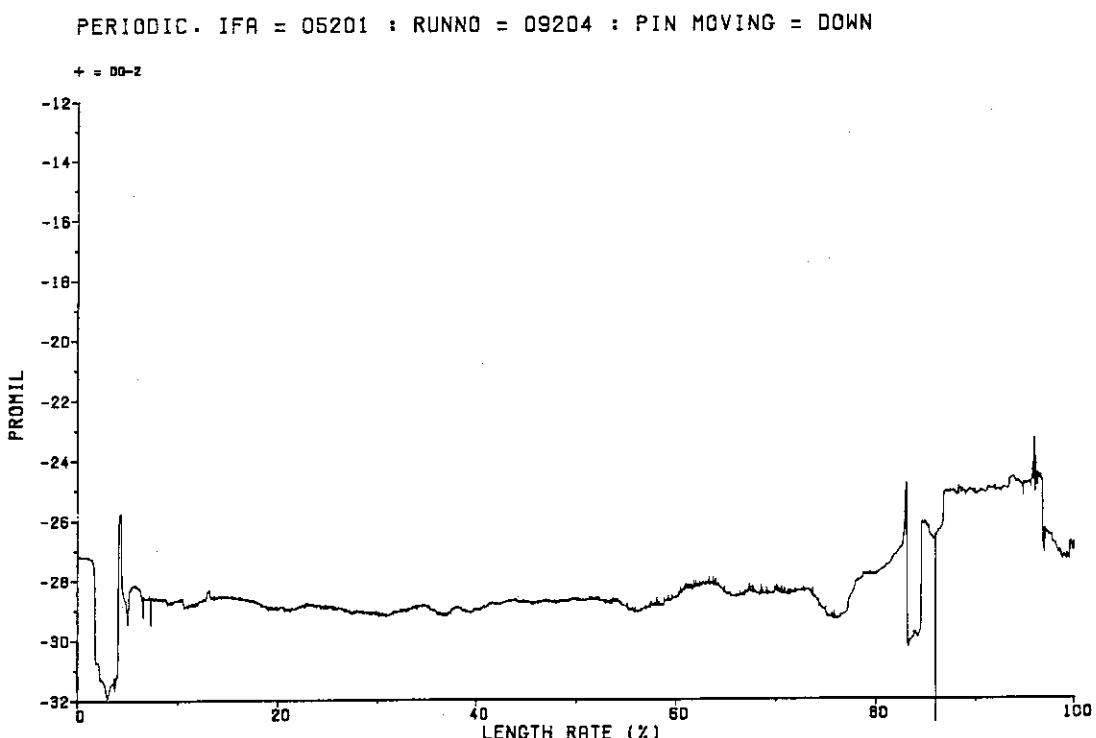


Fig. A.90 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9204: DG-2

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09210 : PIN MOVING = DOWN

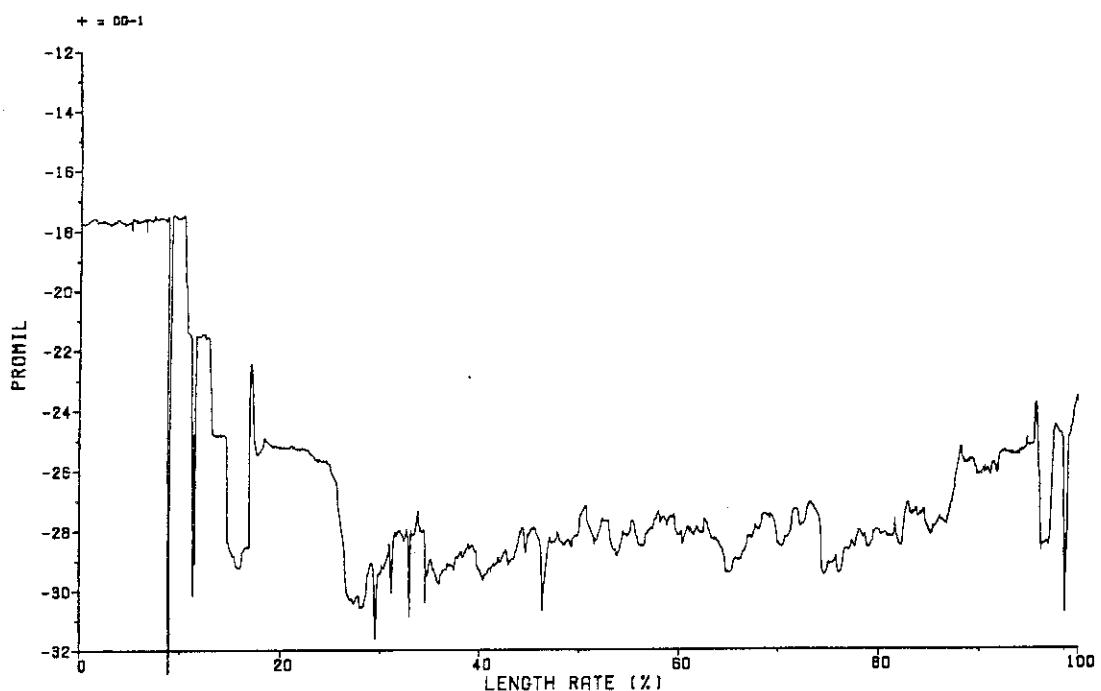


Fig. A.91 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9210: DG-1

PERIODIC. IFA = 05201 : RUNNO = 09210 : PIN MOVING = DOWN

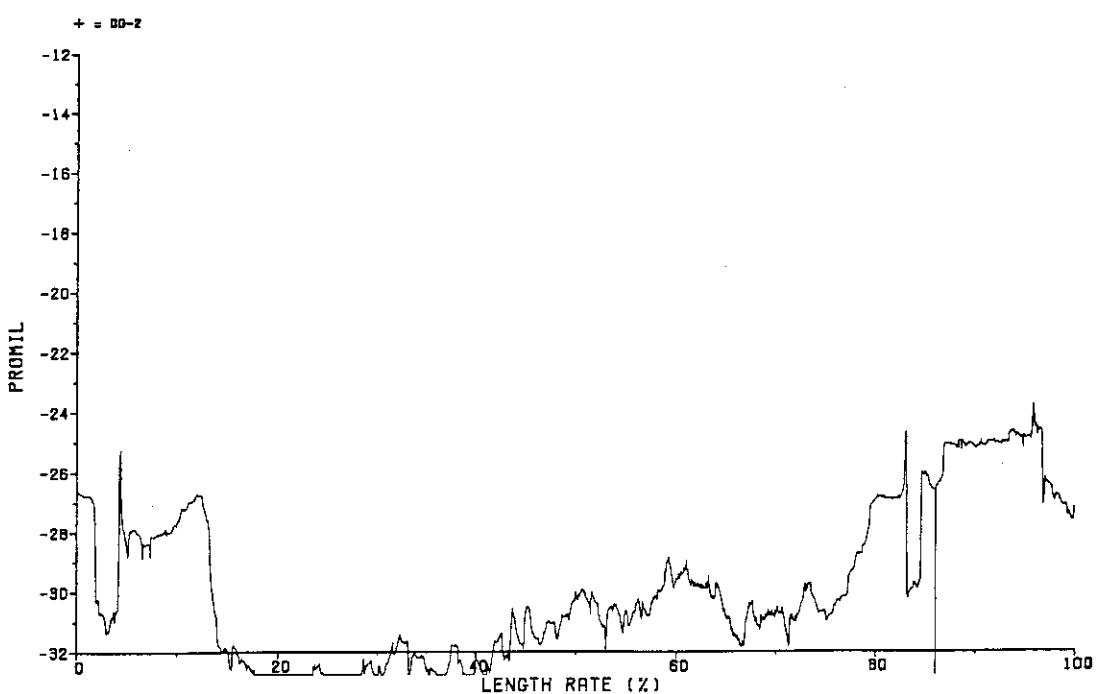


Fig. A.92 Diameter profile of BWR 14 at the run number 9210: DG-2