

JAERI-M
7711

IFA—508 (I) データ解析速報 No. 2

— 燃料棒の直径変形 —

照射期間：1977年6月—7月

到達燃焼度： 70 MW d/t UO₂

1978年6月

柳澤 和章

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

IFA-508(I) データー解析速報, №2

——燃料棒の直径変形——

照射期間：1977年6月～7月

到達燃焼度：70 MWd/tUO₂

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳沢 和章

(1978年5月15日受理)

国産燃料体のHBWRにおける照射実験結果の解析を速報する。主に被覆管の直径変化について報告する。解析の対象となった照射期間は1977年6月～7月、到達燃焼度は70 MWd/tUO₂である。得た結果は下記の通りである。

- (1) 被覆管にうねりが発生した。
- (2) リッジD_r, サブリッジD_sおよび谷の径D_tを定義した。
- (3) D_rは出力の増加と共に増加した。燃料棒のギャップと被覆管肉厚の違いによってD_r, D_sおよびD_tにも挙動の相違がみられた。
- (4) 薄肉小ギャップ棒の最高出力(500 W/cm)での最大歪はD_r値で0.20%, 永久歪は0.13%であったが厚肉小ギャップ棒の最高出力(500 W/cm)での最大歪はD_r値で0.14%, 永久歪は0.05%であった。
- (5) D_rは燃料棒の底部, 中央部および頂部で異なった。これにはサブリッジD_sの効果大きいことがわかった。
- (6) 高出力保持中の緩和では薄肉管と厚肉管との間に差がみられた。径歪と軸歪との相関は薄肉管ではよく一致したが厚肉管では一致がなかった。径方向と軸方向の変形様式はよく似ていた。
- (7) FEMAXIコードによる計算値は比較的よく実験値と一致した。

Preliminary Analysis of Data for IFA-508(I), No.2

— Diameter Deformation of Fuel Rod —

Irradiation period: June to July, 1977

Attained burnup : 70 MWd/tUO₂

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 15, 1978)

The results are described of irradiation experiments of JAERI's instrumented fuel assembly with HBWR. Presented are the preliminary analysis of cladding diameter variation and data. Irradiation period is covered from June to July 1977, with attained burnups 70 MWd/tUO₂.

Obtained results are the following:

- (1) Wavy deformations of claddings are observed.
- (2) Physical quantities of RIDGE D_r , SUBBRIDGE D_s and TROUGH DIAMETER D_t are defined.
- (3) RIDGE D_r increases with linear heat rating. D_r , D_s and D_t values depend on fuel gap and thickness of the cladding.
- (4) The thin clad, small gap fuel rod at a maximum output power (500 W/cm) shows a maximum strain 0.20% of D_r and permanent strain 0.13%.
The thick clad, small gap fuel rod at a maximum output power (500 W/cm) shows a maximum strain 0.14% of D_r and permanent strain 0.05%.
- (5) D_r depends on the regions of bottom, middle and top of the fuel rod, due significantly to the effect of SUBBRIDGE D_s .
- (6) In the relaxation during high output power holding, there is thickness effect of the cladding. The correspondence between axial and diametral strains is good in the thin cladding, but not in the thick one.
Deformation behaviors in axial and diametral directions are similar.
- (7) Calculation by FEMAXI code agrees well with experiment.

Keywords: Diameter Deformation, Fuel Rod, HBWR, Preliminary Analysis, Ridge, Subridge, Clad Thickness, Diametral Gap, Strain, Relaxation, FEMAXI Code, Elongation, Wavy Phenomena, Irradiation Experiment.

目 次

1. はじめに	1
2. 棒全体の直径変動の観察	1
3. リッジの観察	3
3.1 リッジの定義	3
3.2 照射中のリッジの挙動	4
(1) 平均的なリッジの挙動	4
(2) 棒を3分割した場合のリッジの挙動とサブリッジの効果	8
3.3 出力保持中のリッジの緩和効果	9
4. 直径方向の変形と軸方向の変形との比較	10
5. FEMAXIによる直径変形の実験結果との照合	11
6. 結 言	11
謝 辞	12
参考文献	12

C o n t e n t s

1. Introduction	1
2. Observation of diameter variation through the rod	1
3. Observation of ridge	3
3.1 Definition of ridge	3
3.2 Subridge	4
3.3 Behavior of ridge during irradiation	9
(1) Behavior of total averaged ridge	
(2) Ridge behavior on three divided parts of rod and effect of subridge on ridge behavior	
3.4 Relaxation behavior of ridge during power holding	
4. Comparison of diametral deformation with axial deformation ...	10
5. Verification of FEMAXI against the experimental result of diameter deformation	11
6. Conclusion	11
Acknowledgement	12
References	12

1. はじめに

IFA-508(I)の直径測定によるデーターおよびデーターの解析結果を取りまとめたので報告する。燃料棒等に関する仕様その他はすでに文献(1)に報告済みである。

さらに本報告書中に含まれる照射期間中での燃料棒の軸方向の伸び変形、中心温度は文献(2)で報告済みである。

今回報告するのは文献(1)で示した照射履歴に関する解析のとりまとめである。解析結果については現在も照射が進行中であるのでここで報告する内容は予備的なものであり、将来修正することがありうる。

2. 棒全体の直径変動の観察

3本の棒の直径測定データーをラン毎にFig.1～Fig.4 2に示した。ランの番号が奇数のものは上方スキャン、偶数のものは下方へのスキャンである。各部分を拡大した更に詳しいデーターは別途データー集(3)にて報告する予定である。Fig.1～Fig.4 2より各棒について棒全体の直径変動を線出力に対してプロットしたのがFig.4 3～Fig.4 5である。燃焼度は全て70 MWd/tでのものである。

(1) Fig.4 3は棒1 1 (ギャップ=100 μ m, 被覆管肉厚=390 μ m)についてのものである。図中左側が燃料棒の底部、右側が頂部に相当する。図から次の様な現象が観察される。

- (i) 50 W/cm : 直径の変動は殆んどない。
- (ii) 180 W/cm : 棒にうねりが生ずる。それは底部の方が頂部に比べて大きい。
- (iii) 270 W/cm : うねりの模様は変化しないが底部のうねりの最大山の所にリッジが発生した。
- (iv) 360 W/cm : うねりに大きな変化はないがペレットとペレットの境界面に相当する場所にリッジが発生して来た。その発生の仕方はうねりの山と谷のどちらにも生じている。
- (v) 430 W/cm : うねりが消失を始めた。頂部の最右端(温度測定用の中心孔付ペレットが数個入っている部分)を除いてリッジが出揃った。
- (vi) 500 W/cm : うねりは消失した。ペレットとペレットの境界位置に相当する部分のリッジの大きさは底部、中央部、頂部の順に大きかった(ただしペレット中央位置に相当する部所に2次的なリッジ——サブリッジ{正確な定義は3章で記述する}——が発生しており、この大きさは上記の逆であった……後の節で詳しく述べる)。

(2) Fig.4 4は棒1 2 (ギャップ=100 μ m, 被覆管肉厚=690 μ m)について横軸に燃料棒の長さ、縦軸に直径変動の様子を棒1 1と同じ線出力に対してプロットしたものである。図から次の様な現象が観察される。

1. はじめに

IFA-508(I)の直径測定によるデータおよびデータの解析結果を取りまとめたので報告する。燃料棒等に関する仕様その他はすでに文献(1)に報告済みである。

さらに本報告書中に含まれる照射期間中での燃料棒の軸方向の伸び変形、中心温度は文献(2)で報告済みである。

今回報告するのは文献(1)で示した照射履歴に関する解析のとりまとめである。解析結果については現在も照射が進行中であるのでここで報告する内容は予備的なものであり、将来修正することがありうる。

2. 棒全体の直径変動の観察

3本の棒の直径測定データをラン毎にFig.1～Fig.4 2に示した。ランの番号が奇数のものは上方スキャン、偶数のものは下方へのスキャンである。各部分を拡大した更に詳しいデータは別途データ集(3)にて報告する予定である。Fig.1～Fig.4 2より各棒について棒全体の直径変動を線出力に対してプロットしたのがFig.4 3～Fig.4 5である。燃焼度は全て70 MWd/tでのものである。

(1) Fig.4 3は棒1 1 (ギャップ=100 μ m, 被覆管肉厚=390 μ m)についてのものである。図中左側が燃料棒の底部、右側が頂部に相当する。図から次の様な現象が観察される。

- (i) 50 W/cm : 直径の変動は殆んどない。
- (ii) 180 W/cm : 棒にうねりが生ずる。それは底部の方が頂部に比べて大きい。
- (iii) 270 W/cm : うねりの模様は変化しないが底部のうねりの最大山の所にリッジが発生した。
- (iv) 360 W/cm : うねりに大きな変化はないがペレットとペレットの境界面に相当する場所にリッジが発生して来た。その発生のはうねりの山と谷のどちらにも生じている。
- (v) 430 W/cm : うねりが消失を始めた。頂部の最右端(温度測定用の中心孔付ペレットが数個入っている部分)を除いてリッジが出揃った。
- (vi) 500 W/cm : うねりは消失した。ペレットとペレットの境界位置に相当する部分のリッジの大きさは底部、中央部、頂部の順に大きかった(ただしペレット中央位置に相当する部所に2次的なりッジ——サブリッジ{正確な定義は3章で記述する}——が発生しており、この大きさは上記の逆であった……後の節で詳しく述べる)。

(2) Fig.4 4は棒1 2 (ギャップ=100 μ m, 被覆管肉厚=690 μ m)について横軸に燃料棒の長さ、縦軸に直径変動の様子を棒1 1と同じ線出力に対してプロットしたものである。図から次の様な現象が観察される。

- (i) 50 W/cm : 直径は殆んど変動しない。
- (ii) 180 W/cm : 底部においてうねりが1箇所発生したが全体としてはおだやかである。
- (iii) 270 W/cm : 最初にできたうねりは大きくなり、かつ棒の中部、頂部にもうねりが生じはじめた。初期のリッジが発生しはじめている。
- (iv) 360 W/cm : うねりは依然としてそのままであり、うねりの山、谷に無関係にペレットとペレットとの境界面に相当する位置にはっきりとしたリッジが発生しはじめた。
- (v) 430 W/cm : 最初にできたうねり以外はリッジの出揃いと共に平坦化(消失)がおこっている。最右端(温度測定用中心孔付ペレットのあるところ)ではリッジの発生は全くみられない。
- (vi) 500 W/cm : うねりは消失した。ペレットとペレットの境界位置に発生したリッジの大きさの順は底部、中央部、頂部の順であった。サブリッジは中央部、頂部、底部の順であった。
- (3) Fig.4 5は棒13(ギャップ=220 μ m, 被覆管肉厚=380 μ m)についてのものである。図から次の様な現象が観察される。
- (i) 50 W/cm : 直径の変動は殆んど生じていない。
- (ii) 180 W/cm : 直径の変動は殆んど生じていない。
- (iii) 270 W/cm : 直径の変動は殆んど生じていない。
- (iv) 360 W/cm : 棒底部と中央部の境界および中央部と頂部との境界にうねりが発生した。
- (v) 430 W/cm : 360 W/cmで発生したうねりは更に大きくなりその他の所にもうねりが発生した。しかしリッジの発生は見られない。
- (vi) 500 W/cm : うねりは依然として生じており傾向は変わらない。はっきりとしたリッジの発生はなかった。
- (4) 棒11, 12および13についての観察のまとめ

棒11/12はギャップが100 μ mで被覆管肉厚が前者が390 μ m, 後者が690 μ mである。棒13はギャップが棒11と12の約2倍の220 μ mほどある被覆管肉厚380 μ mの燃料棒である。これらについて全体的な棒の直径変動を観察した結果を(1)~(3)で述べたが各棒について特徴を比較するとTable 1の様になる。Table 1より次のことがわかる。

- (i) うねりの効果は棒11/12は同じ様な形態をとり線出力180~430 W/cmの間でうねり現象をおこし、高出力域で消失したのに対して棒13は360 W/cm付近からうねりがおこり高線力域まで続く。このうねりは500 W/cm, 約18時間の一定保持中に消失した⁽⁴⁾。棒11/12と棒13の現象に違いのあることからギャップの効果が大きいと考えられる。
- (ii) リッジは棒11/12のみ明確に見られた。棒13には明らかなリッジの発生は見られなかった。棒11/12におけるリッジは270 W/cmで開始し約430 W/cmで出揃った。リッジの発生箇所はペレットとペレットの境界と一致した。棒11/12に見られたリッジが棒13には見られなかった。

3. リッジの観察

リッジ定量化を行なうために燃料棒を4領域に分割して“底部”，“中央部”，“頂部”，および“温度測定部”とした。Fig.4 6 最下段の図はその様子を模式的に示したものである。図には照射履歴，中性子束分布もあわせて示した。4領域中，“温度測定部”は温度測定用の中心孔付のペレットが入っていて明らかに他のペレットと条件が異なるのでリッジ等の解析に際しては対象から除外した。

燃料棒の直径の変形に対する全体的な様子は Fig.1 ~ Fig.4 2 に示した通りであるが4領域に分割したデータプロットの1例を Fig.4 7 ~ Fig.5 4 に示す。

Fig.4 7 は“底部”の8ペレットに相当する部分の直径変動の様子である。欄外にはラン番号，燃焼度，棒の仕様等必要な事項が併せてのせてある。Fig.4 8 は“中央部”，Fig.4 9 は“頂部”，Fig.5 0 は“温度測定部”についての同様なプロットである。リッジ高さ等の必要なデータはこれらを利用して定量化した。各棒の各ランに対する全データは一括して集録し別途報告する(3)。

Fig.5 1 は“底部”について8個のリッジの重ね書きを行なったものである。無作為に“底部”を基準ステップから平均ペレット長，約15mmごとに分割してその部分を重ねたものであるからこれが比較的よく揃っているのはリッジの発生箇所がペレットとペレットの境界面によく一致していることを意味する。Fig.5 2 は“中央部”，Fig.5 3 は“頂部”，Fig.4 7 は“温度測定部”の重ね書きした図である。Fig.5 2 まではリッジ位置が比較的揃っているのに対し Fig.5 3 は雑然としていることがわかる。また“温度測定部”では全くリッジの発生してない(棒11, 500W/cm 最高出力時)事がわかる。2節でリッジ発生が約270W/cm以後に棒11/12において始まることをのべたが，それ以後の出力におけるプロットを文献(3)に併せて示しておいた。

3.1 リッジの定義

本報ではすでに前節までに“リッジ”，“サブリッジ”等の言葉を使用して来たがその定義については触れておかなかった。ここであらためて本報における“リッジ”等の定義を行なう。Fig.5 5 は Fig.4 7 ~ Fig.4 9 を更に拡大して各“部”ごとに示したものである。この図より下記のこと観察される。

- (i) ペレットとペレットの境界面で被覆管は大きく半径方向に変形をおこしているのは明らかである。個々の境界面における変形の最大値は明らかに読み取れるが，しかしそれに対応する最小値が不明確で一定していない。
- (ii) “底部”では Fig.5 5 にみられる様に半径方向の変形の最大値と次のペレット-ペレット境界面の変形の最大値とがはっきりしている。しかし“頂部”ではその最大値と最大値との間にもう1つ変形による山ができていく傾向がある。

そこで変形をモデル化すれば Fig.5 6 の様になる。つまり Fig.5 6 の上に示した様に“底部”では比較的山と谷がはっきりしているのので山の最大値を D_r , 谷での最小値を D_t とできる。ところが“頂部”側ではその谷の部分にもう1つ同じ様な山がうまれるので、ペレット-ペレット境界面での山の最大値を D_r , 谷での最低値 D_t , 次のペレット-ペレット境界面での D_r にいく間に生じている山の最大値を D_s とする。以上の事からリッジ解析に対して必要な量を次の様に定義する。

D_r =リッジ ; ペレットとペレットとの境界面で生じた被覆管の径方向の最大値。その値は直径であらわす。

D_s =サブリッジ ; D_r と D_r との間に発生した被覆管の径方向変形の最大値。その値は直径であらわす。

D_t =谷の径 ; $D_r - D_t$ または $D_r - D_r$ 間に生じている被覆管変形の最小値。その値は直径であらわす。

以後本報では上記の定義に基づいた量で解析を行なった。解析に際しては D_s を含めた Fig.5 6 の“頂部”のモデルを採用した。理由は $D_s = 0$ とすることにより“底部”のモデルに簡単に移すことができるからである。

3.2 照射中のリッジの挙動

Fig.4 3 ~ Fig.5 5 で観察した様に出力の増大と共にギャップ幅の小さかった棒1 1 および棒1 2 ではペレットと被覆管が相互作用をおこし (PCI), リッジを発生していくことがわかった。PCIの発生と共に被覆管の直径は大きく変動しPCI以前の平均直径で表示することができないのは明らかである。そこで3.1節において D_r, D_s および D_t 量を定義した。そこでこれらの量を用いて出力の増減に対する被覆管の直径方向の変形を解析する。但し棒1 3 は明確な D_r, D_s 等が見られなかったので解析対象から除外した。また解析対象となった棒1 1 / 1 2 においても“温度測定部”はペレットの形態が異なるのと実際に最高出力時の一部を除いて殆んど径方向の変形が見られなかったので解析の対象からはずした。従って径方向の変形の解析を行なったのは棒1 1 および棒1 2 の“底部”, “中央部”および“頂部”の領域である。

(1) 平均的なリッジの挙動

実験に於ては出力(線出力)の最大値は 500 W/cm であった。得られたデータをもとに D_r, D_s および D_t の平均値をプロットしたのが Fig.5 7 および Fig.5 8 である。Fig.5 7 は棒1 1 に対するプロット, Fig.5 8 は棒1 2 に対するプロットである。

解析に際しては直径測定ランが上方か下方かで有意差の生じる(5)小さな可能性があるかもしれないので、これを避けるためランのデータは上方スキャン(ランの奇数番号)に統一した。

Fig.5 7 から次の様なことが観察される。

- (i) 棒1 1 は零出力から 50 W/cm の出力上昇において平均直径で $2 \mu\text{m}$ 程縮んだがそれ以後径方向にのびて 270 W/cm でPCIを開始した。そこで本報では 50 W/cm における被覆管の直径 (12.230 mm) を変形に関する初期直径 D_0 と定めた。
- (ii) PCI開始後 D_r は線出力の増加と共に増加し最高出力 500 W/cm に於ては

$$D_r - D_0 \cong 1.2246 - 1.2230 = 0.016 \text{ mm} \rightarrow 16 \mu\text{m}$$

$$\text{最大歪} = \frac{D_r^{500} - D_0}{D_0} \times 100 \cong 0.13\%$$

の変形をうけた。

- (iii) 出力の低下と共に径方向の変形のび(以下単に“のび”と略記する)は小さくなったが 400 W/cm 以下では殆んどのびは低下しなかった。出力を零にしたときの直径 D_r^{ℓ} は $D_r^{\ell} = 1.2239 \text{ mm}$ であった。従って、永久変形量は

$$D_r^{\ell} - D_0 = 1.2239 - 1.2230 = 0.009 \text{ mm} \rightarrow 9 \mu\text{m}$$

である。永久歪は

$$\frac{D_r^{\ell} - D_0}{D_0} \times 100 \cong 0.07\%$$

であった。

- (iv) サブリッジ D_s はリッジ D_r がもとの平均径 D_0 に対して増加したのに対して出力の増加と共に D_0 より低い値になりその後徐々に増加して最高出力時に D_0 と等しい値になった。出力の低下と共に再び小さくなり最終的には出力除去時の値 D_s^{ℓ} で $D_s^{\ell} = 1.2229 \text{ mm}$ となった。 50 W/cm 時被覆平均直径 D_0 よりも値の小さい所で挙動するが D_s は複雑な動きをする。出力増加と共に増加し最終的には $D_s^{500} - D_s^{\ell} = 1.2230 - 1.2229 = 0.001 \text{ mm} \rightarrow 1 \mu\text{m}$ 程度の永久変形量を生じている。 D_r に対して出力除去時に $6 \mu\text{m}$ 程度の値を有しているのだからサブリッジは除荷時でも残っている。
- (v) 谷の径 D_t は $270 \text{ W/cm} \rightarrow 430 \text{ W/cm}$ までの出力増加と共に D_0 に対して減少して(縮み)いくが 430 W/cm 以上では変動しない。そこでの値 D_t^{430} は $D_t^{430} = 1.2222 \text{ mm}$ で $D_0 = 1.2230$ に較べて

$$D_t^{430} - D_0 = -8 \mu\text{m}$$

すなわち $8 \mu\text{m}$ の直径の減少となる。出力低下によって僅かばかり(約 $1 \mu\text{m}$ 程度)増加するが 400 W/cm より下に出力がおちても以後の変化はない。つまり谷の径 D_t はある値まで縮んでしまうとそれ以後の変化に対して殆んど不変となってしまふ。

- (vi) 被覆管の変形が一番大きいのは Fig. 5.6 から容易にわかる様に出力 = 500 W/cm の所であって、このときの直径の最大変位は

$$D_r^{500} - D_t^{500} = 1.2246 - 1.2222 = 0.024 \text{ mm} \rightarrow 24 \mu\text{m}$$

である。基準直径を D_t に設定したとみればそのとき被覆管は

$$\frac{0.024}{1.2222} \times 100 \cong 0.20\%$$

の歪をうけたことになる。また出力をとり去ったあとでは

$$\frac{D_r^l - D_t^l}{D_t^l} \times 100 = 0.13\%$$

の永久歪をうけていることになる。D₀基準はD_r, D_sおよびD_tの変化をみるには都合がよいが変形に対しては被覆管に対して最も厳しい条件になっていない。最も厳しいのはD_t基準である(但しD_tはPCI開始前には生じていない)。そこでD_t基準による評価をまとめると次の様になる。

D_t基準:

棒11: 最大伸び(於: 500 W/cm)	24 μm
最大歪量(")	0.20%
永久歪量(出力除去時)	0.13%

Fig.5 8から次の様なことが観察される。

- (i) 棒12は零出力から50 W/cmの出力上昇に於て平均直径で3 μm程度縮んだがそれ以後径方向に伸びて270 W/cmでPCIを開始した。棒11に対するのと同じ様に棒12に対しても初期直径D₀をD₀=1.2240mmに設定する。
- (ii) PCI開始後D_rは線出力の増加と共に増加し出力の最大時500 W/cmに於てはD_r⁵⁰⁰=1.2254mmとなった。これは、D_r⁵⁰⁰-D₀=14 μmの変形、0.11%の最大歪に相当する(D₀基準)。
- (iii) 出力の低下と共にのびは小さくなり以後徐々に伸びは低下して出力が除去された段階でD_r^l=1.2243mmとなり変形前の被覆管の零出力時の直径と同じになった。このときの永久変形量は

$$D_r^l - D_0 = 3 \mu m$$

歪量にして0.02%であった(D₀基準)。

- (iv) サブリッジD_sは棒11と同様にリッジ開始時点の平均径よりも小さくなったがD₀よりも依然として大きい値の所で挙動しており430 W/cm→500 W/cmでは3 μm程度の増加があった。出力低下後も400 W/cmまでは殆んどD_sの値は変わらなかったがそれ以下の出力低下に対しては徐々に低下して最終的にはD_s^l=1.2237mm<D₀の値まで減少した。最高出力時に較べて約6 μm程度の動きがあった。ただし出力除去時の値がD_tと同じ値になっていることからして棒12の場合はサブリッジD_sは出力除去と共に消失したことがわかる。
- (v) 谷の径D_tは270 W/cm→430 W/cmまではD₀に対して減少していくが430 W/cm以上では変動しない。そこでの値D_t⁴³⁰=1.2237mmでD₀=1.2240mmに対して、D_t⁴³⁰-D₀=-3 μm, すなわち3 μm程度直径の減少となっている。出力を低下させると500 W/cm→400 W/cmで急激に増加(約3 μm)する——D₀の値まで戻る——がそれ以後徐々に減少し最終的にはD₀に対して3 μm低い値の所でおち着く。
- (vi) 被覆管に対して最も厳しいD_tを基準した最大伸びと歪, 永久変形について定量化す

る。最大の伸びは最高出力 500 W/cm の所で生じており

$$D_r^{500} - D_t^{500} = 1.2254 - 1.2237 = 0.017 \text{ mm} \rightarrow 17 \mu\text{m}$$

そのときの歪は

$$\frac{0.017}{1.2237} \times 100 \cong 0.14\% \text{ の歪をうけている。}$$

出力除去後では $D_r^l - D_t^l = 1.2243 - 1.2237 = 0.0006 \text{ mm} \rightarrow 6 \mu\text{m}$ で

$$\frac{0.006}{1.2237} \times 100 = 0.05\% \text{ の永久歪をうけている。}$$

これをまとめると次の様になる。

D_t 基準:

棒 1 2 : 最大伸び (於 500 W/cm)	17 μm
最大歪量 (")	0.14%
永久歪量 (出力除去時)	0.05%

まとめ: 棒 1 1 と棒 1 2 の変形挙動を比較してみると次の様な特徴が挙げられる。

- ① 零出力 → 50 W/cm の出力増加時に管径が 2 ~ 3 μm 縮少するが線出力の増加と共に 2 μm 程度直径増加する。(棒 1 1 / 1 2 共通)
- ② PCI 開始点 (最初にリッジが発生する時点) は 270 W/cm である。(棒 1 1 / 1 2 共通)

③ 変形挙動:

		D _r	D _s	D _t
出力上昇	棒 1 1	増加	< D ₀ 値 400 W/cm 以後 ↑	D ₀ に対し 400 W/cm までに 8 μm ↓, 以後一定
	棒 1 2	増加	> D ₀ 値 400 W/cm 以後 ↑	D ₀ に対し 400 W/cm までに 3 μm ↓, 以後一定
		D _r	D _s	D _t
出力下降	棒 1 1	400 W/cm まで一定, 以後かわらず	徐々に減少, 消失せず	500 → 400 W/cm 1 μm 増加後一定
	棒 1 2	零出力まで徐々に減少する	400 W/cm まで一定, 以後減少していつて消失	500 → 400 W/cm 3 μm 増加後徐々に減少

④ D_r を基準にした変形量

		D_r	D_s
最大伸び 最大歪	棒 1 1	24 μm / 0.20%	8 μm / 0.07%
	棒 1 2	17 μm / 0.14%	6 μm / 0.05%
永久変形量 永久歪	棒 1 1	16 μm / 0.13%	6 μm / 0.05%
	棒 1 2	6 μm / 0.05%	消失 : 0 μm / 0%

(2) 棒を3分割した場合のリッジの挙動とサブリッジの効果

(1)では棒全体の平均的な挙動について解析したが、棒を3分割した“底部”，“中央部”，および“頂部”でのリッジの挙動を調べるために Fig.5 9 および Fig.6 0 の様なプロットを行なった。Fig.5 9 は棒 1 1 についてのもの， Fig.6 0 は棒 1 2 についてのものである。

Fig.5 9 から棒 1 1 の直径変化について次の様なことがわかる。

- (i) 最高出力時 (500 W/cm) での底部，中央部および頂部における D_r 値をそれぞれ D_r^B ， D_r^m ， D_r^t とおくと

$$\begin{aligned} D_r^B &= 12.253 \text{ mm} \\ D_r^m &= 12.246 \text{ mm} \quad (\leftarrow D_0 = 12.230 \text{ mm}) \\ D_r^t &= 12.240 \text{ mm} \end{aligned}$$

となっており D_r^B は 500 W/cm における平均値 $D_r^{500} = 12.246 \text{ mm}$ よりも 7 μm も高い値を示している。各パートとも出力の増加と共に D_r 値が増加し高出力域では差がはっきりとつく。(各パートごとに約 6~7 μm の差が生じている)

出力除去で D_r^B ， D_r^m が 10~11 μm 急激に減少するのに対し頂部リッジ D_r^t は 3 μm 程度しか減少しない。残留リッジは D_0 基準で $D_r^m = D_r^t \leftarrow 6 \mu\text{m}$ ， $D_r^B \leftarrow 12 \mu\text{m}$ と底部側で D_r については永久歪が大きいことがわかる。

- (ii) サブリッジ D_s は 400 W/cm のところで大きさがほぼ同じ値となり以後底部のサブリッジ D_s^B が増加しないのに対して，頂部，中央部サブリッジ， D_s^t ， D_s^m は徐々に増加する。出力除去に対しても D_s^B は大きく低下するのに対して D_s^t ， D_s^m は殆んど変化しない。

Fig.6 0 から棒 1 2 の各パートの直径変化について次の様なことがわかる。

- (i) 最高出力時 (500 W/cm) での底部，中央部および頂部における D_r をそれぞれ D_r^B ， D_r^m ， D_r^t とおくと

$$\begin{aligned} D_r^B &= 12.256 \text{ mm} \\ D_r^m &= 12.255 \text{ mm} \quad (\leftarrow D_0 = 12.240 \text{ mm}) \\ D_r^t &= 12.251 \text{ mm} \end{aligned}$$

となっており D_r^B ， D_r^m は殆んど同じである。出力除去後は各パート共殆んど 10~11 μm と同じ値だけ減少する。棒 1 2 の場合 D_r の値が頂部に於て消失してしまうことがわかる。(つまり D_0 の値に戻ってしまう)

- (ii) サブリッジ D_s は底部では 350 W/cm 以後急激に減少しその後徐々に上昇して来る。しかし中央部、頂部では出力増加と共に D_0 よりも大きい所で徐々に増加している。出力除去によって各パート共 D_s は $6\text{ }\mu\text{m}$ 程度、 500 W/cm 最高出力時に比して小さくなる。頂部のサブリッジ D_s' は D_0 に復帰する。頂部では D_r' も D_0 に復帰したから棒12の頂部は出力除去後、オリジナルな変形以前の直径に戻ることがわかる。

まとめ： 棒11と棒12の底部～頂部における変形挙動を比較してみると次の様になる。

- ① 棒11と棒12を比べると底部での D_r の変形が大きく違い他は中央部、頂部のそれは殆んど同じである。
- ② 出力除去により棒11の D_r は底部、中央部が $10\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 減少したのに頂部は $3\text{ }\mu\text{m}$ 程度しか減少しなかった。それに対して棒12では各部とも均一に $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の減少がおこった。
- ③ サブリッジ D_s は 500 W/cm の最大出力時に棒11、棒12ともに頂部と中央部での値が大きく底部の値はごく小さかった。
- ④ 出力除去後棒11の D_s は底部/中央部で D_0 に戻ったが D_r が頂部=中央部<底部であるため残留リッジは底部のそれが大きい。棒12では頂部の D_r 、 D_s が D_0 に戻ったので残留リッジはないが中央部/底部では残留リッジが残っており、棒内でリッジの形状が異なっている。この様子はFig.41の棒11と棒12の様子からみて取れる。

3.3 出力保持中のリッジの緩和挙動

最高出力時(500 W/cm)に約14時間の出力保持を行ない、その間に数個の直径測定を行なった。その時のリッジの緩和挙動について述べる。Fig.61およびFig.62はそれぞれ棒11、棒12について横軸に時間軸を取って D_r 、 D_s および D_t の変化をプロットしたものである。この保持中には直径測定だけでなく軸方向の伸びについても測定を行なっている(2)。その結果についてもあわせて示しておく。図中 D_r 、 D_s および D_t の直径ゲーターは縦軸左(直径絶対値)および右(歪量)どちらでも読み取れる様にしているが軸方向伸びは縦軸右の歪量にしか対応していない。

Fig.61は棒11の D_r 、 D_s 、 D_t の緩和の模様を示したものである。図より次の様なことがわかる。

- (i) D_s 、 D_t は出力保持によって10時間程度までに僅か($2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$)減少するが以後はあまり変化せず、むしろ増加の傾向を示す。
- (ii) D_r は最初の数時間は変化がなく10時間までに $6\text{ }\mu\text{m}$ (0.06%)の直径の減少をおこすがそれ以後は変化しない。出力除去時の値と比較するとその差が $1\text{ }\mu\text{m}$ (0.01%)程度しかないことから出力保持中に相当の緩和が進行する。高出力領域で変形の弾性分が殆んど緩和してしまうと思われる(Fig.57の D_r の変形挙動で 400 W/cm 以下の出力除去では殆んど変化がない現象—参照)。
- (iii) 軸方向の緩和は時間と共に徐々に進行する。最終的には 0.07% 程度緩和する。

Fig.62は棒12の D_r 、 D_s 、 D_t の緩和の模様を示したものである。図より次の事がわかる。

- (i) D_s, D_t は出力保持中殆んど変化しない。
- (ii) D_r は最初の 5～6 時間変化なく以後徐々に緩和する。最終的に歪量にして 0.03% 緩和した。出力除去後の値は緩和の最終値よりも相当 D_r のみならず D_s, D_t もおちこむので、棒 1 2 の場合緩和がおこっても被覆管はまだまだ変形の余地がのこっている。
- (iii) 軸方向の緩和は棒 1 1 と同じ程度 (0.06%) の値である。

まとめ： 棒 1 1 と棒 1 2 の緩和挙動を比較すると次の様なことがわかる。

- ① 棒 1 1/1 2 ともに D_s, D_t の緩和中の変化は殆んどなかった。
- ② 棒 1 1 は出力保持により緩和が進行し出力除去後の値にまで近づくが棒 1 2 では緩和がおこっても被覆管の変形余地が相当残っている。
- ③ 棒 1 1 の直径緩和は軸方向の緩和量に近かったが棒 1 2 では直径緩和は軸方向の緩和量の約半分であった。軸方向緩和は棒 1 1 と棒 1 2 でほぼ同じであった。

4. 直径方向の変形と軸方向の変形との比較

同一燃料棒について径方向と軸方向の変形挙動を比較するのは興味あることと考えられる。そこで Fig. 5 7 および Fig. 5 8 に示した直径変動のデータの上に軸方向のデータ(1), (2)を歪(%)に換算したものを立ちあがりを描いてプロットした。棒 1 1 および棒 1 2 についてのプロットの結果を Fig. 6 3 にまとめて示す。図中左側が棒 1 1 についてのもの、右側が棒 1 2 についてのものである。

Fig. 6 3 左 (棒 1 1) のものより次の様なことがわかる。

- (i) 出力増加中の変形様式はよく似ているが D_r のみの比較では直径方向の変形は全体的に小さい。しかし D_r は 270 W/cm から実質的には生じているのに対し軸方向の歪は 50 W/cm 以上ですでに生じている。そこで試みに軸方向の 270 W/cm (D_r による歪の開始点) の歪を基準にしてそれ以後どうかを検討したのが図中破線で示されている。この操作を行なうと径方向と軸方向の歪量は線出力に対して非常に良い一致を示す。
- (ii) 出力増加中の D_t の (D_0 に対する) 落ちこみを考慮した $|D_r - D_t|$ による歪量と軸歪量を比較すると (図中には明示しなかったが) 径方向歪 > 軸方向歪となる。
- (iii) 出力除去後軸方向の歪は線出力の低下と共に徐々に解放されるのに対して径方向の歪は 400 W/cm 以後殆んど解放されない。

Fig. 6 3 右 (棒 1 2) のものより次の様なことがわかる。

- (i) 出力変動に対する径方向の変形様式と軸方向の変形様式はよく似ている。Fig. 5 6 左で行なった様な軸方向歪の 270 W/cm へのシフトを行なうと良い一致を示すことがわかる。
- (ii) 出力増加中の D_t の (D_0 に対する) 落ちこみを考慮した $|D_r - D_t|$ による歪量と軸歪量を比較すると (図中には明示しなかったが) 径方向歪 \sim 軸方向歪が成立する。
- (iii) 出力除去後の歪の解放は軸方向よりも径方向の方が量的に大きい但最终的な永久歪はほぼ同一値に落ち着いた。

- (i) D_s, D_t は出力保持中殆んど変化しない。
- (ii) D_r は最初の 5～6 時間変化なく以後徐々に緩和する。最終的に歪量にして 0.03% 緩和した。出力除去後の値は緩和の最終値よりも相当 D_r のみならず D_s, D_t もおちこむので、棒 12 の場合緩和がおこっても被覆管はまだまだ変形の余地がのこっている。
- (iii) 軸方向の緩和は棒 11 と同じ程度 (0.06%) の値である。

まとめ： 棒 11 と棒 12 の緩和挙動を比較すると次の様なことがわかる。

- ① 棒 11/12 とともに D_s, D_t の緩和中の変化は殆んどなかった。
- ② 棒 11 は出力保持により緩和が進行し出力除去後の値にまで近づくが棒 12 では緩和がおこっても被覆管の変形余地が相当残っている。
- ③ 棒 11 の直径緩和は軸方向の緩和量に近かったが棒 12 では直径緩和は軸方向の緩和量の約半分であった。軸方向緩和は棒 11 と棒 12 でほぼ同じであった。

4. 直径方向の変形と軸方向の変形との比較

同一燃料棒について径方向と軸方向の変形挙動を比較するのは興味あることと考えられる。そこで Fig. 5.7 および Fig. 5.8 に示した直径変動のデータの上に軸方向のデータ(1), (2)を歪(%)に換算したものを立ちあがりを描えてプロットした。棒 11 および棒 12 についてのプロットの結果を Fig. 6.3 にまとめて示す。図中左側が棒 11 についてのもの、右側が棒 12 についてのものである。

Fig. 6.3 左 (棒 11) のものより次の様なことがわかる。

- (i) 出力増加中の変形様式はよく似ているが D_r のみの比較では直径方向の変形は全体的に小さい。しかし D_r は 270 W/cm から実質的には生じているのに対し軸方向の歪は 50 W/cm 以上ですでに生じている。そこで試みに軸方向の 270 W/cm (D_r による歪の開始点) の歪を基準にしてそれ以後どうかを検討したのが図中破線で示されている。この操作を行なうと径方向と軸方向の歪量は線出力に対して非常に良い一致を示す。
- (ii) 出力増加中の D_t の (D_0 に対する) 落ちこみを考慮した $|D_r - D_t|$ による歪量と軸歪量を比較すると (図中には明示しなかったが) 径方向歪 > 軸方向歪となる。
- (iii) 出力除去後軸方向の歪は線出力の低下と共に徐々に解放されるのに対して径方向の歪は 400 W/cm 以後殆んど解放されない。

Fig. 6.3 右 (棒 12) のものより次の様なことがわかる。

- (i) 出力変動に対する径方向の変形様式と軸方向の変形様式はよく似ている。Fig. 5.6 左で行なった様な軸方向歪の 270 W/cm へのシフトを行なうと良い一致を示すことがわかる。
- (ii) 出力増加中の D_t の (D_0 に対する) 落ちこみを考慮した $|D_r - D_t|$ による歪量と軸歪量を比較すると (図中には明示しなかったが) 径方向歪 \approx 軸方向歪が成立する。
- (iii) 出力除去後の歪の解放は軸方向よりも径方向の方が量的に大きい但最终的な永久歪はほぼ同一値に落ち着いた。

まとめ： 棒 11/12 に対する径方向および軸方向の変形挙動の比較を行なうと次の様なことがわかる。

- ① 変形様式はどちらの棒に於ても径/軸方向ともよく似ていた。
- ② $|D_r - D_s|$ 歪と軸歪を比較するとリッジの出揃う 400 W/cm 以上の高出力領域では両者はほぼ同じ歪量となる (D_s の効果を考えれば径方向歪 \geq 軸方向歪と言える)。
- ③ 出力除去後の歪の解放は軸歪は線出力の低下とともに徐々に解放されるのに対し径歪は棒 11 では 400 W/cm 以前で解放が完了し、また棒 12 では軸歪より大きな解放がおこる。

5. FEMAXI による直径変形の実験結果との照合

FEMAXI コードを用いた計算結果(5)と本実験結果との比較を簡単に紹介する。FEMAXI データは文献(5)より引用した。その結果のプロットを Fig.6 3 (前出)に示す。図から次の様なことが言える。

- (i) FEMAXI コードにより PCI 開始点は $220 \sim 230 \text{ W/cm}$ で実験値よりも多少低いが比較的あっている。
- (ii) D_r に対する近似は棒 11 について図中では低目に出ているが比較的よく合っておりまた棒 12 に対する近似でも同様である。

6. 結 言

IFA-508 (I) 燃料体の直径測定データー (燃焼度 $\leq 70 \text{ MWd/t}$) のとりまとめと簡単な解析を行なった。以下に得られた結論を述べる。

- (1) ギャップの小さい棒 (棒 11 / 棒 12) では $180 \sim 430 \text{ W/cm}$ の間で棒のうねりが発生し高出力域に入っても消失しなかった。この棒 13 のうねりは高出力一定保持中に消失した。
- (2) 棒 11 / 棒 12 では 270 W/cm でリッジが発生し 430 W/cm でペレット境界部分に相当する位置に全部リッジがあらわれた。棒 13 については明らかなリッジの発生が見られなかった。
- (3) リッジの定義を行ないペレット-ペレット界面に生じるリッジ D_r の他にペレットほぼ中央部に生じるリッジ (サブリッジ D_s) も定量化した。
- (4) D_r は出力増加と共に増加した。出力除去と共に D_r は薄肉管 (棒 11) ではある程度まで減少して以後は一定になったが厚肉管 (棒 12) では零出力まで徐々に減少した。
 D_s は出力増加と共に棒 11 ではリッジ発生前の平均管径 D_0 より一時的に減少するが出力増加と共に徐々に増加する。棒 12 では平均管径 D_0 より常に大きく出力増加と共に徐々に増加した。 D_r および D_s に対する谷の径 D_t は PCI の開始と共に一時的に減少

まとめ： 棒11/12に対する径方向および軸方向の変形挙動の比較を行なうと次の様なことがわかる。

- ① 変形様式はどちらの棒に於ても径/軸方向ともよく似ていた。
- ② $|D_r - D_s|$ 歪と軸歪を比較するとリッジの出揃り 400 W/cm 以上の高出力領域では両者はほぼ同じ歪量となる (D_s の効果を考えれば径方向歪 \geq 軸方向歪と言える)。
- ③ 出力除去後の歪の解放は軸歪は線出力の低下とともに徐々に解放されるのに対し径歪は棒11では 400 W/cm 以前で解放が完了し、また棒12では軸歪より大きな解放がおこる。

5. FEMAXIによる直径変形の実験結果との照合

FEMAXIコードを用いた計算結果(5)と本実験結果との比較を簡単に紹介する。FEMAXIデータは文献(5)より引用した。その結果のプロットを Fig.6 3 (前出)に示す。図から次の様なことが言える。

- (i) FEMAXIコードによりPCI開始点は $220 \sim 230 \text{ W/cm}$ で実験値よりも多少低いが比較的あっている。
- (ii) D_r に対する近似は棒11について図中では低目に出ているが比較的よく合っておりまた棒12に対する近似でも同様である。

6. 結 言

IFA-508(1)燃料体の直径測定データー(燃焼度 $\leq 70 \text{ MWd/t}$)のとりまとめと簡単な解析を行なった。以下に得られた結論を述べる。

- (1) ギャップの小さい棒(棒11/棒12)では $180 \sim 430 \text{ W/cm}$ の間で棒のうねりが発生し高出力域に入っても消失しなかった。この棒13のうねりは高出力一定保持中に消失した。
- (2) 棒11/棒12では 270 W/cm でリッジが発生し 430 W/cm でペレット境界部分に相当する位置に全部リッジがあらわれた。棒13については明らかなリッジの発生が見られなかった。
- (3) リッジの定義を行ないペレット-ペレット界面に生じるリッジ D_r の他にペレットほぼ中央部で生じるリッジ(サブリッジ D_s)も定量化した。
- (4) D_r は出力増加と共に増加した。出力除去と共に D_r は薄肉管(棒11)ではある程度まで減少して以後は一定になったが厚肉管(棒12)では零出力まで徐々に減少した。

D_s は出力増加と共に棒11ではリッジ発生前の平均管径 D_0 より一時的に減少するが出力増加と共に徐々に増加する。棒12では平均管径 D_0 より常に大きく出力増加と共に徐々に増加した。 D_r および D_s に対する谷の径 D_t はPCIの開始と共に一時的に減少

まとめ： 棒 11/12 に対する径方向および軸方向の変形挙動の比較を行なうと次の様なことがわかる。

- ① 変形様式はどちらの棒に於ても径/軸方向ともよく似ていた。
- ② $|D_r - D_s|$ 歪と軸歪を比較するとリッジの出揃う 400 W/cm 以上の高出力領域では両者はほぼ同じ歪量となる (D_s の効果を考えれば径方向歪 \geq 軸方向歪と言える)。
- ③ 出力除去後の歪の解放は軸歪は線出力の低下とともに徐々に解放されるのに対し径歪は棒 11 では 400 W/cm 以前で解放が完了し、また棒 12 では軸歪より大きな解放がおこる。

5. FEMAXI による直径変形の実験結果との照合

FEMAXI コードを用いた計算結果(5)と本実験結果との比較を簡単に紹介する。FEMAXI データは文献(5)より引用した。その結果のプロットを Fig.6 3 (前出)に示す。図から次の様なことが言える。

- (i) FEMAXI コードにより PCI 開始点は $220 \sim 230 \text{ W/cm}$ で実験値よりも多少低いが比較的あっている。
- (ii) D_r に対する近似は棒 11 について図中では低目に出ているが比較的よく合っておりまた棒 12 に対する近似でも同様である。

6. 結 言

IFA-508 (I) 燃料体の直径測定データー (燃焼度 $\leq 70 \text{ MWd/t}$) のとりまとめと簡単な解析を行なった。以下に得られた結論を述べる。

- (1) ギャップの小さい棒 (棒 11 / 棒 12) では $180 \sim 430 \text{ W/cm}$ の間で棒のうねりが発生し高出力域に入っても消失しなかった。この棒 13 のうねりは高出力一定保持中に消失した。
- (2) 棒 11 / 棒 12 では 270 W/cm でリッジが発生し 430 W/cm でペレット境界部分に相当する位置に全部リッジがあらわれた。棒 13 については明らかなリッジの発生が見られなかった。
- (3) リッジの定義を行ないペレット-ペレット界面に生じるリッジ D_r の他にペレットほぼ中央部に生じるリッジ (サブリッジ D_s) も定量化した。
- (4) D_r は出力増加と共に増加した。出力除去と共に D_r は薄肉管 (棒 11) ではある程度まで減少して以後は一定になったが厚肉管 (棒 12) では零出力まで徐々に減少した。

D_s は出力増加と共に棒 11 ではリッジ発生前の平均管径 D_0 より一時的に減少するが出力増加と共に徐々に増加する。棒 12 では平均管径 D_0 より常に大きく出力増加と共に徐々に増加した。 D_r および D_s に対する谷の径 D_t は PCI の開始と共に一時的に減少

し以後一定のままであった。 D_s は出力除去と共に棒 1 1 (薄肉管) では徐々に減少したが永久変形がのこったのに対し棒 1 2 (厚肉管) では 400 W/cm までの高出力中不変で以後減少して行って消失した。

(5) D_r , D_s の最大歪 (最高出力時) と永久歪は次の通りである。

歪 (%)	D_r		D_s	
	棒 1 1	棒 1 2	棒 1 1	棒 1 2
最大歪	0.20	0.14	0.07	0.05
永久歪	0.13	0.05	0.05	消失

(6) D_r の変形挙動は燃料棒底部で顕著であり、中央部および頂部では棒 1 1 / 棒 1 2 でほぼ同じであった。出力除去により薄肉管 (棒 1 1) では D_r が底部 / 中央部で $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 減少したのに頂部では $3 \mu\text{m}$ 程しか減少しなかった。厚肉管 (棒 1 2) では底部 ~ 頂部各箇所均一に $10 \mu\text{m}$ 程度減少した。

D_s の値は頂部 / 中央部で大きく、 D_r の大きい底部では小さい。出力除去後 D_r と D_s の挙動に差があるため棒 1 1 / 棒 1 2 とともに底部での残留リッジが大きく頂部でのそれが小さくなっている。

- (7) 一定出力保持中薄肉管 (棒 1 1) では被覆管のクリープが大きく進行し出力除去後の D_r にまで近づいたが厚肉管 (棒 1 2) ではその効果は小さく出力除去と共に D_r が徐々に減少した。 D_s , D_r は緩和を殆んどおこななかった。
- (8) 薄肉管の緩和では径方向と軸方向とで同程度の歪量となったが厚肉管では径歪は軸歪の半分程度しか緩和されなかった。
- (9) 径方向と軸方向の変形様式は類似している。歪量はリッジの数がペレット数だけ揃う 400 W/cm 以後で両者は比較的近い値をとった。出力除去による歪の解放の仕方は径歪軸歪とでは相異がある。
- (10) 実験より求めた D_r 値と FEMAXI コードによる計算値はよく合っていた。

謝 辞

解析に際して室長である市川^述生氏には有益な助言を賜りました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) K. Yanagisawa ; Irradiation Experiment Plans of IFA-508 and-515, and Preliminary Data Report from IFA-508, JAERI-M 7530 (1978)
- (2) K. Yanagisawa ; Preliminary Analysis of Data for IFA-508 (I), No. 1

し以後一定のままであった。 D_s は出力除去と共に棒 1 1 (薄肉管) では徐々に減少したが永久変形がのこったのに対し棒 1 2 (厚肉管) では 400 W/cm までの高出力中不変で以後減少して行って消失した。

(5) D_r , D_s の最大歪 (最高出力時) と永久歪は次の通りである。

歪 (%)	D_r		D_s	
	棒 1 1	棒 1 2	棒 1 1	棒 1 2
最大歪	0.20	0.14	0.07	0.05
永久歪	0.13	0.05	0.05	消失

(6) D_r の変形挙動は燃料棒底部で顕著であり、中央部および頂部では棒 1 1 / 棒 1 2 でほぼ同じであった。出力除去により薄肉管 (棒 1 1) では D_r が底部 / 中央部で $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 減少したのに頂部では $3 \mu\text{m}$ 程しか減少しなかった。厚肉管 (棒 1 2) では底部 ~ 頂部各箇所均一に $10 \mu\text{m}$ 程度減少した。

D_s の値は頂部 / 中央部で大きく、 D_r の大きい底部では小さい。出力除去後 D_r と D_s の挙動に差があるため棒 1 1 / 棒 1 2 とともに底部での残留リッジが大きく頂部でのそれが小さくなっている。

(7) 一定出力保持中薄肉管 (棒 1 1) では被覆管のクリープが大きく進行し出力除去後の D_r にまで近づいたが厚肉管 (棒 1 2) ではその効果は小さく出力除去と共に D_r が徐々に減少した。 D_s , D_r は緩和を殆んどおこななかった。

(8) 薄肉管の緩和では径方向と軸方向とで同程度の歪量となったが厚肉管では径歪は軸歪の半分程度しか緩和されなかった。

(9) 径方向と軸方向の変形様式は類似している。歪量はリッジの数がペレット数だけ揃う 400 W/cm 以後で両者は比較的近い値をとった。出力除去による歪の解放の仕方は径歪軸歪とでは相異がある。

(10) 実験より求めた D_r 値と FEMAXI コードによる計算値はよく合っていた。

謝 辞

解析に際して室長である市川^述生氏には有益な助言を賜りました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) K. Yanagisawa ; Irradiation Experiment Plans of IFA-508 and-515, and Preliminary Data Report from IFA-508, JAERI-M 7530 (1978)
- (2) K. Yanagisawa ; Preliminary Analysis of Data for IFA-508 (I), No. 1

し以後一定のままであった。 D_s は出力除去と共に棒 1 1 (薄肉管) では徐々に減少したが永久変形がのこったのに対し棒 1 2 (厚肉管) では 400 W/cm までの高出力中不変で以後減少して行って消失した。

(5) D_r, D_s の最大歪 (最高出力時) と永久歪は次の通りである。

歪 (%)	D_r		D_s	
	棒 1 1	棒 1 2	棒 1 1	棒 1 2
最大歪	0.20	0.14	0.07	0.05
永久歪	0.13	0.05	0.05	消失

(6) D_r の変形挙動は燃料棒底部で顕著であり、中央部および頂部では棒 1 1 / 棒 1 2 でほぼ同じであった。出力除去により薄肉管 (棒 1 1) では D_r が底部 / 中央部で $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 減少したのに頂部では $3 \mu\text{m}$ 程しか減少しなかった。厚肉管 (棒 1 2) では底部 ~ 頂部各箇所均一に $10 \mu\text{m}$ 程度減少した。

D_s の値は頂部 / 中央部で大きく、 D_r の大きい底部では小さい。出力除去後 D_r と D_s の挙動に差があるため棒 1 1 / 棒 1 2 とともに底部での残留リッジが大きく頂部でのそれが小さくなっている。

(7) 一定出力保持中薄肉管 (棒 1 1) では被覆管のクリープが大きく進行し出力除去後の D_r にまで近づいたが厚肉管 (棒 1 2) ではその効果は小さく出力除去と共に D_r が徐々に減少した。 D_s, D_r は緩和を殆んどおこさなかった。

(8) 薄肉管の緩和では径方向と軸方向とで同程度の歪量となったが厚肉管では径歪は軸歪の半分程度しか緩和されなかった。

(9) 径方向と軸方向の変形様式は類似している。歪量はリッジの数がペレット数だけ揃う 400 W/cm 以後で両者は比較的近い値をとった。出力除去による歪の解放の仕方は径歪軸歪とでは相異がある。

(10) 実験より求めた D_r 値と FEMAXI コードによる計算値はよく合っていた。

謝 辞

解析に際して室長である市川^達生氏には有益な助言を賜りました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) K. Yanagisawa ; Irradiation Experiment Plans of IFA-508 and-515, and Preliminary Data Report from IFA-508, JAERI-M 7530 (1978)
- (2) K. Yanagisawa ; Preliminary Analysis of Data for IFA-508 (I), No. 1

- Elongation and Centre Temperature of Fuel -, Irradiation period :
from June to August 1977, Barnup : 1600 MWd/t UO₂, JAERI-M
7520(1978)
- (3) K. Yanagisawa ; Experimental Data of Diameter Measurement for
IFA-508(I), - Rod 11, Rod 12, and Rod 13 -, Irradiation period :
from June to July, 1977, Barnup : 70 MWd/t UO₂
- (4) K. Yanagisawa ; to be published
- (5) OECD Halden Reactor Project Quarterly Progress Report, October
to December, 1977

Table 1. Comparison with characteristics of observed diameter variation of fuel rods

rod no.	gap(μm)	cladding thickness(μm)	wavy phenomena	ridge	ridge position
			LHR(W/cm)	LHR(W/cm)	
Rod 11	100	390	50 180 270 360 430 500 bottom > mid, top homogeneous	50 180 270 360 430 500 completed pellet to pellet interface	pellet to pellet interface
Rod 12	100	690	bottom, mid > top	completed pellet to pellet interface	pellet to pellet interface
Rod 13	220	380	bottom > mid, top	not observed	-

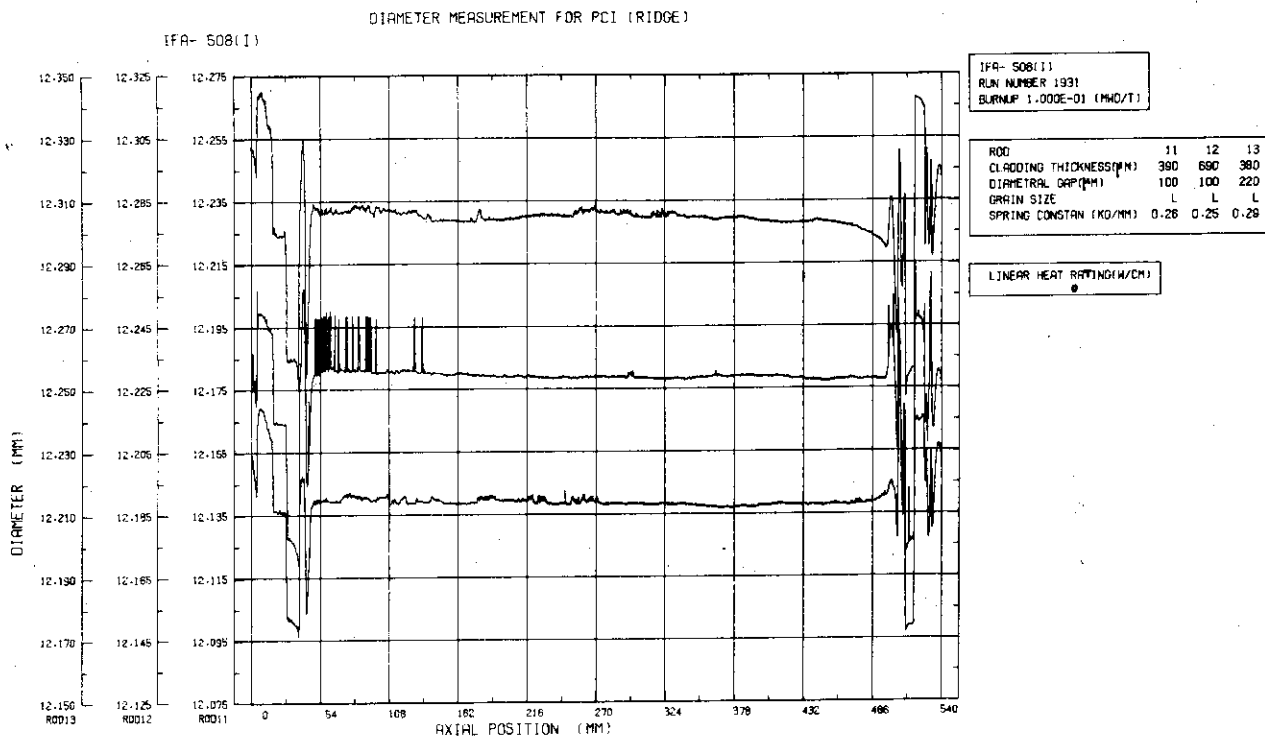


Fig. 1 Data plotting for diameter measurement at run No.1931

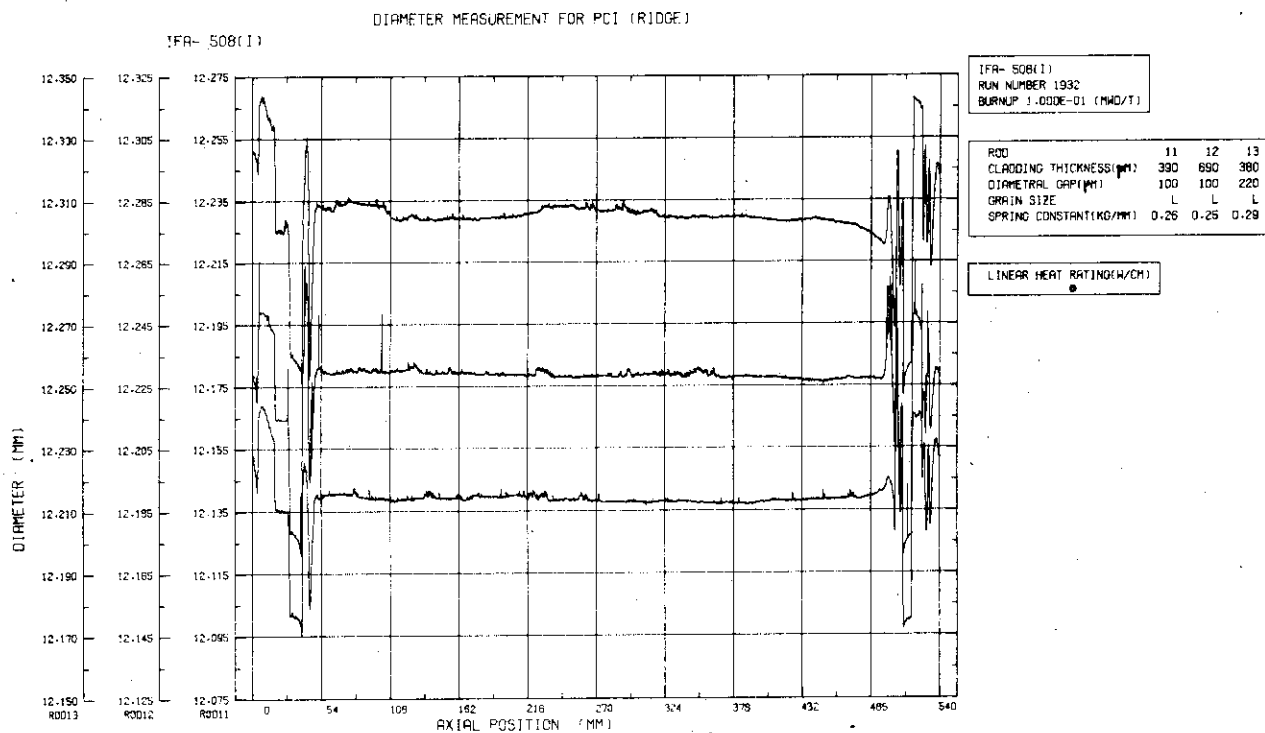


Fig. 2 Data plotting for diameter measurement at run No.1932

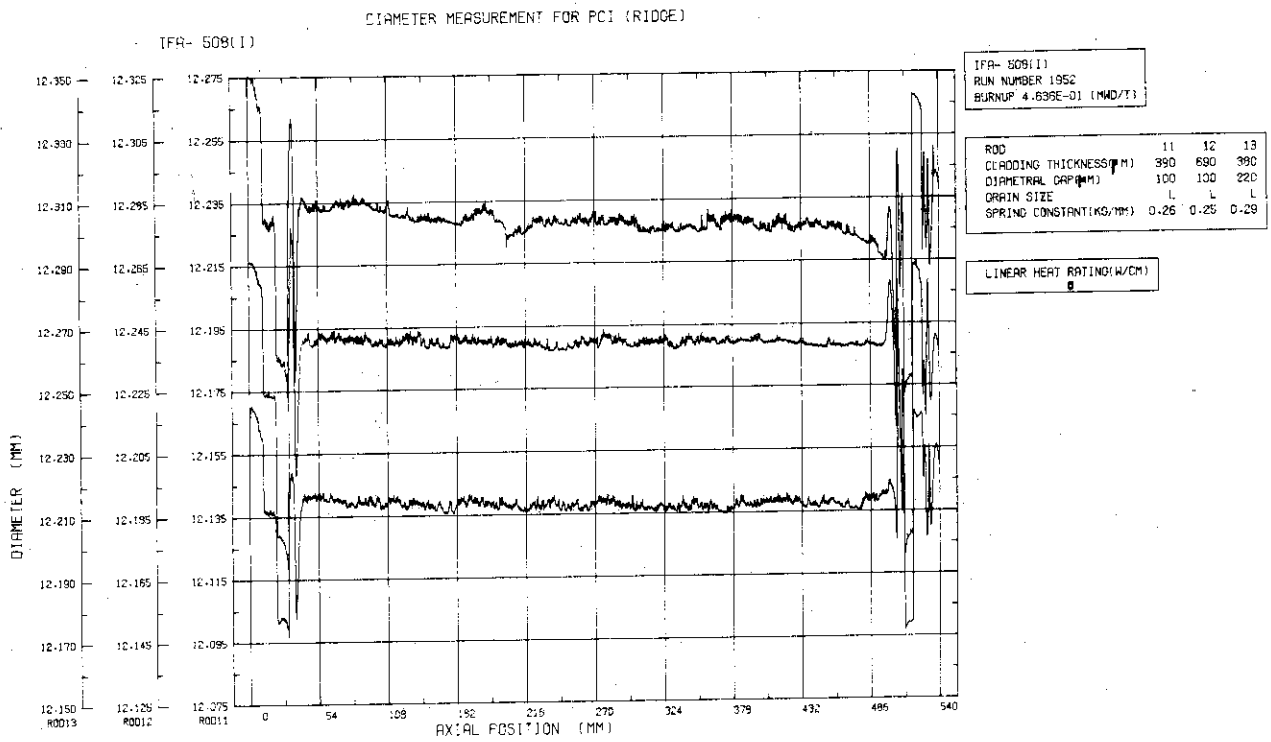


Fig. 3 Data plotting for diameter measurement at run No.1952

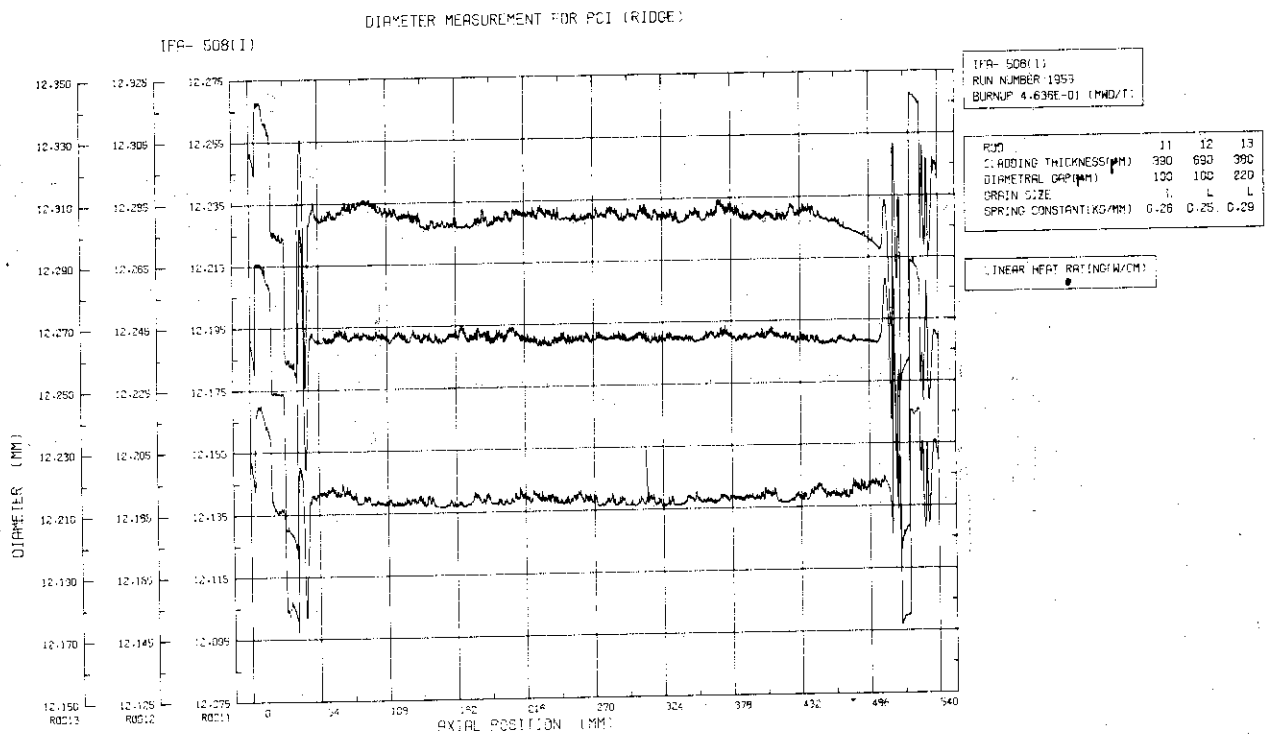


Fig. 4 Data plotting for diameter measurement at run No.1953

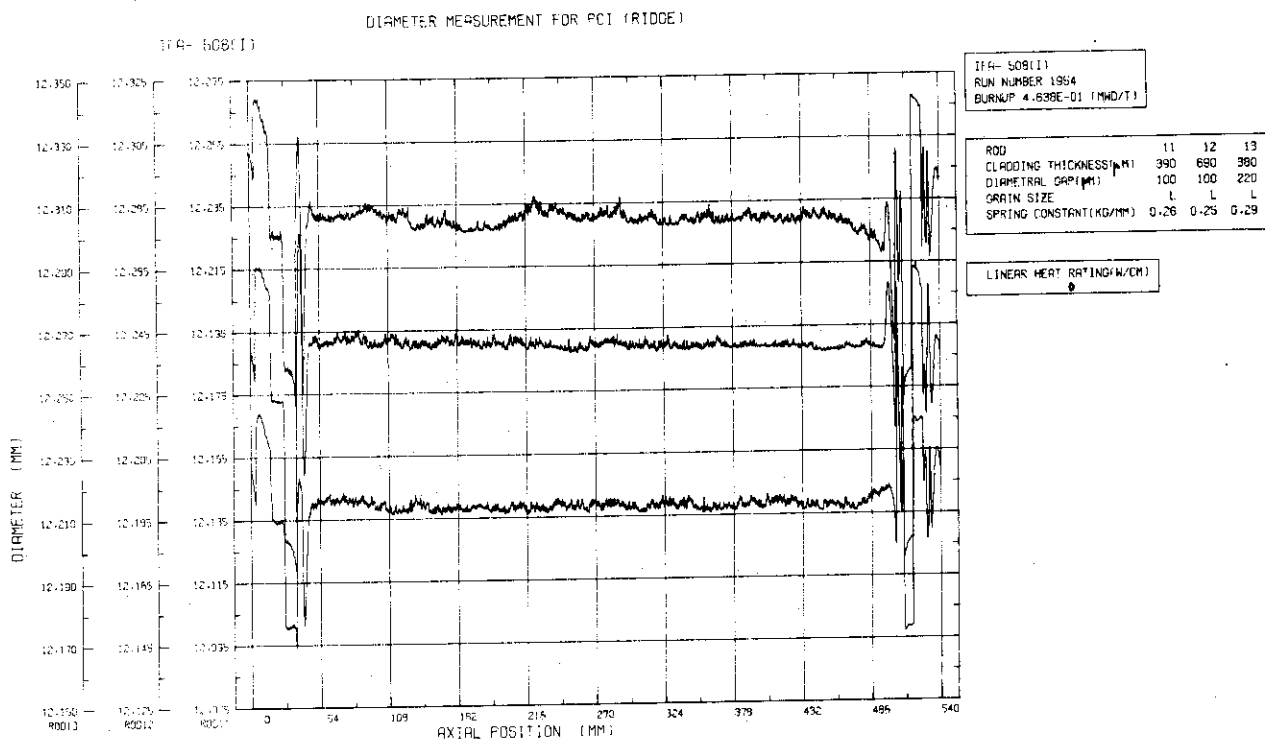


Fig. 5 Data plotting for diameter measurement at run No. 1954

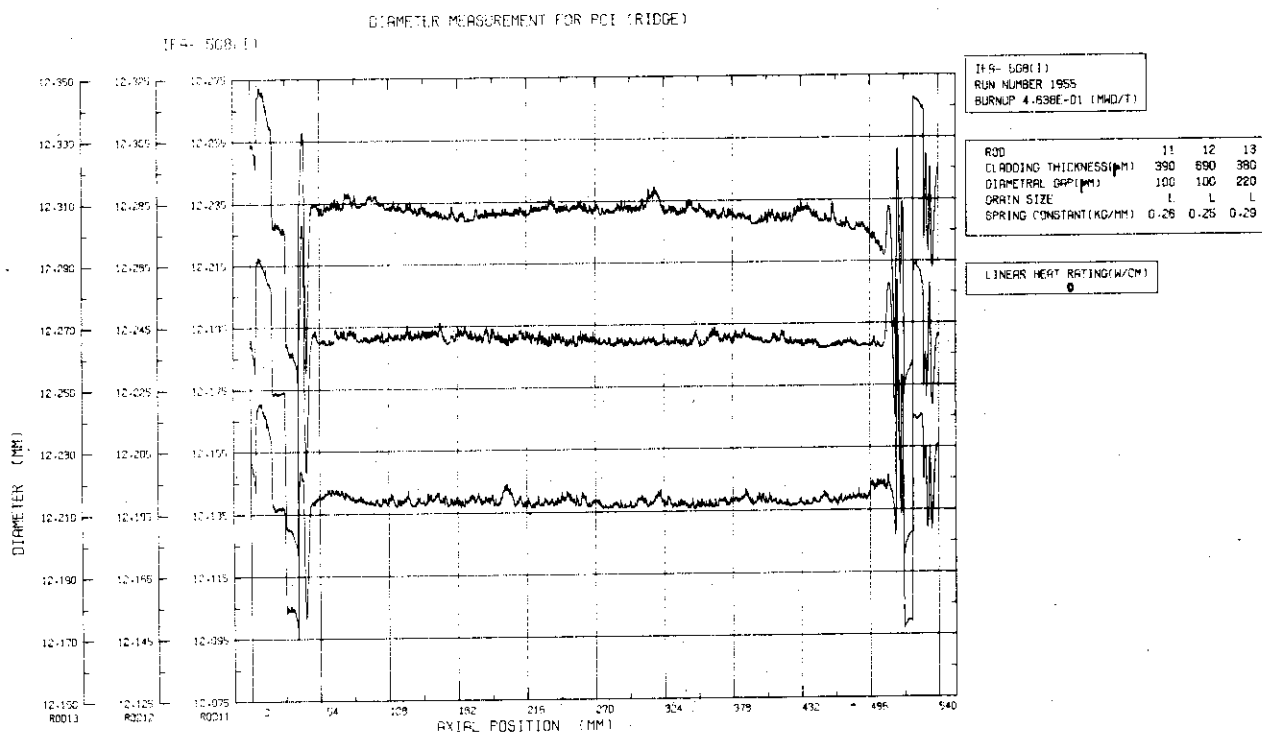


Fig. 6 Data plotting for diameter measurement at run No. 1955

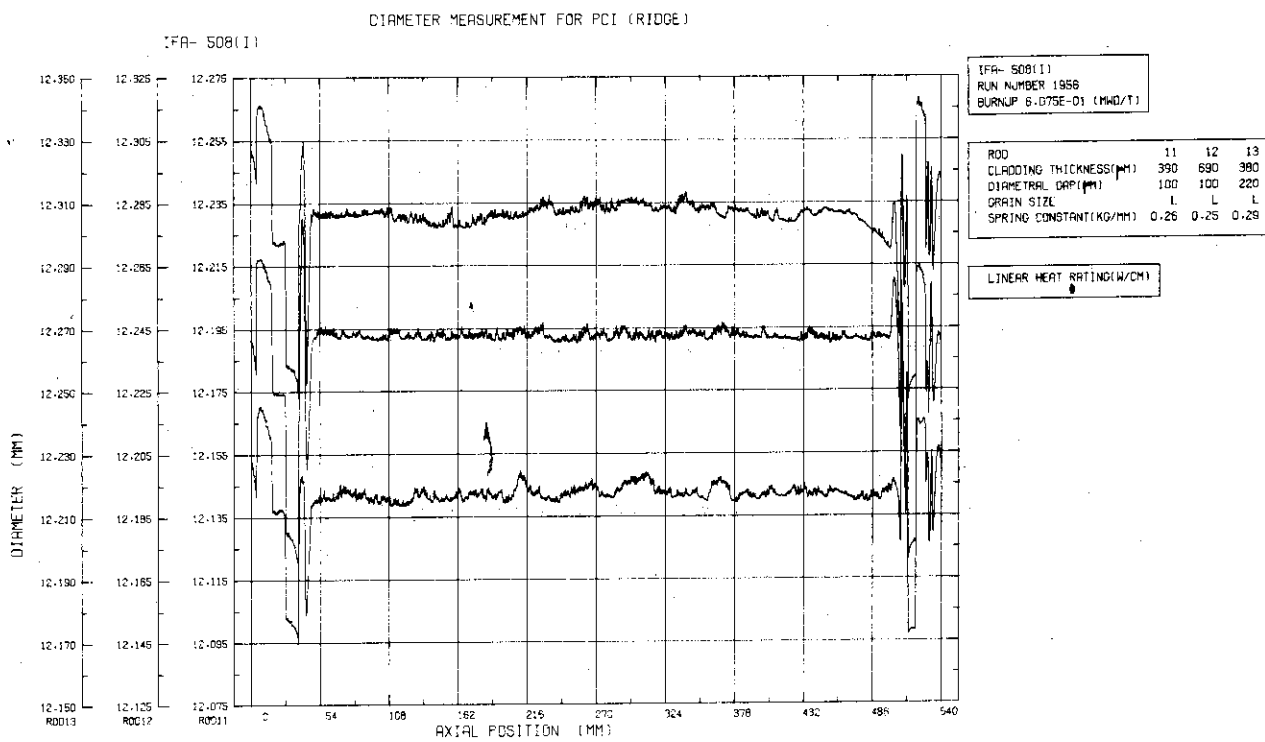


Fig. 7 Data plotting for diameter measurement at run No.1956

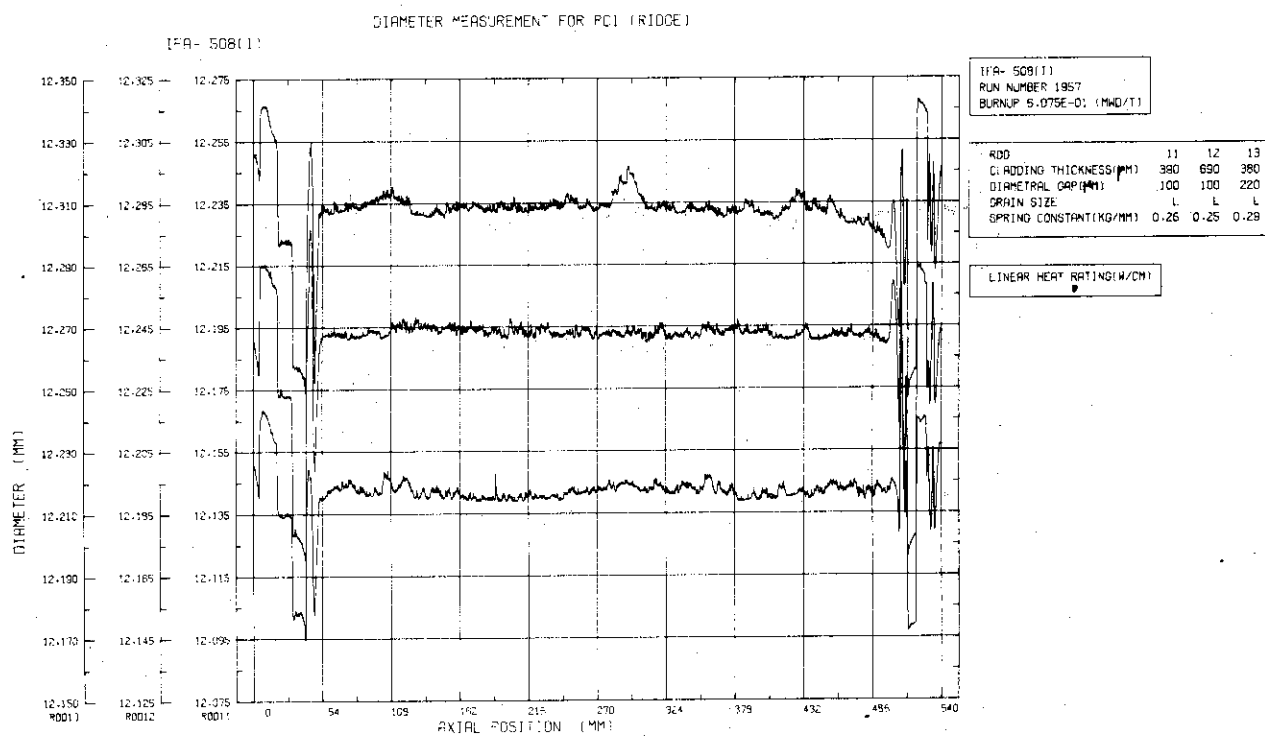


Fig. 8 Data plotting for diameter measurement at run No.1957

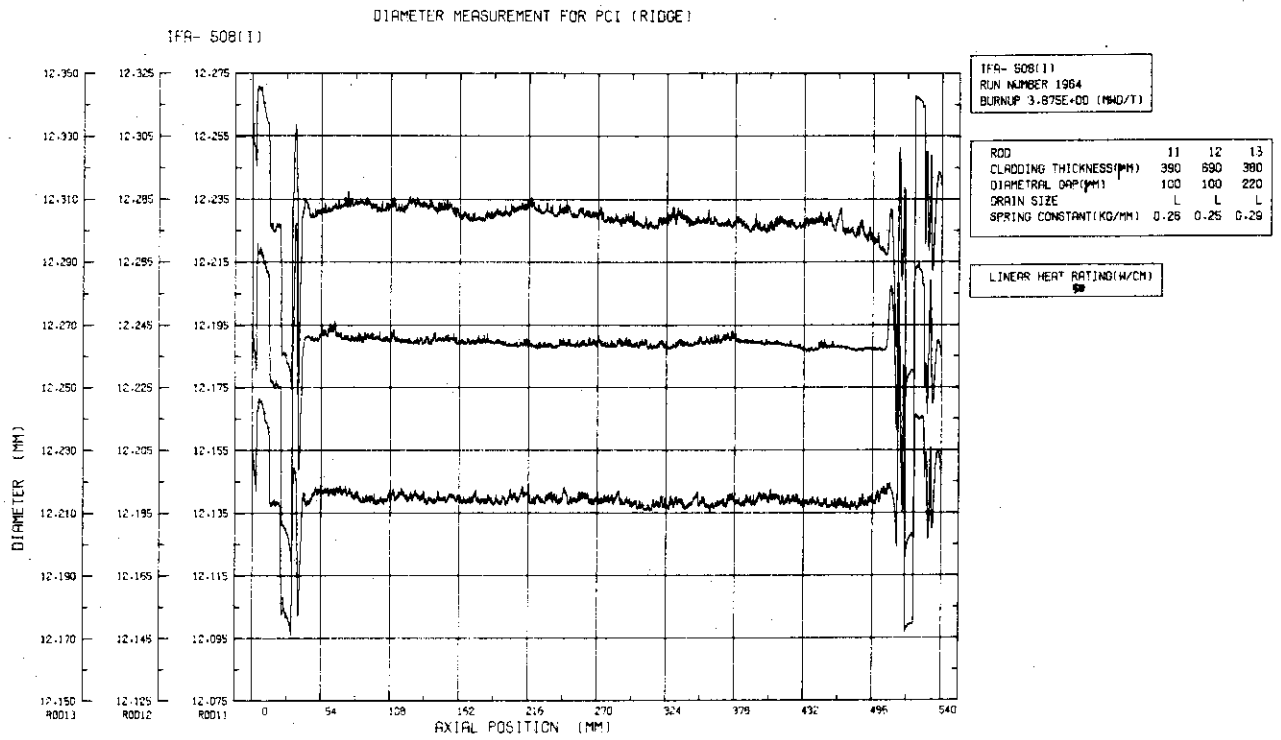


Fig. 9 Data plotting for diameter measurement at run No.1964

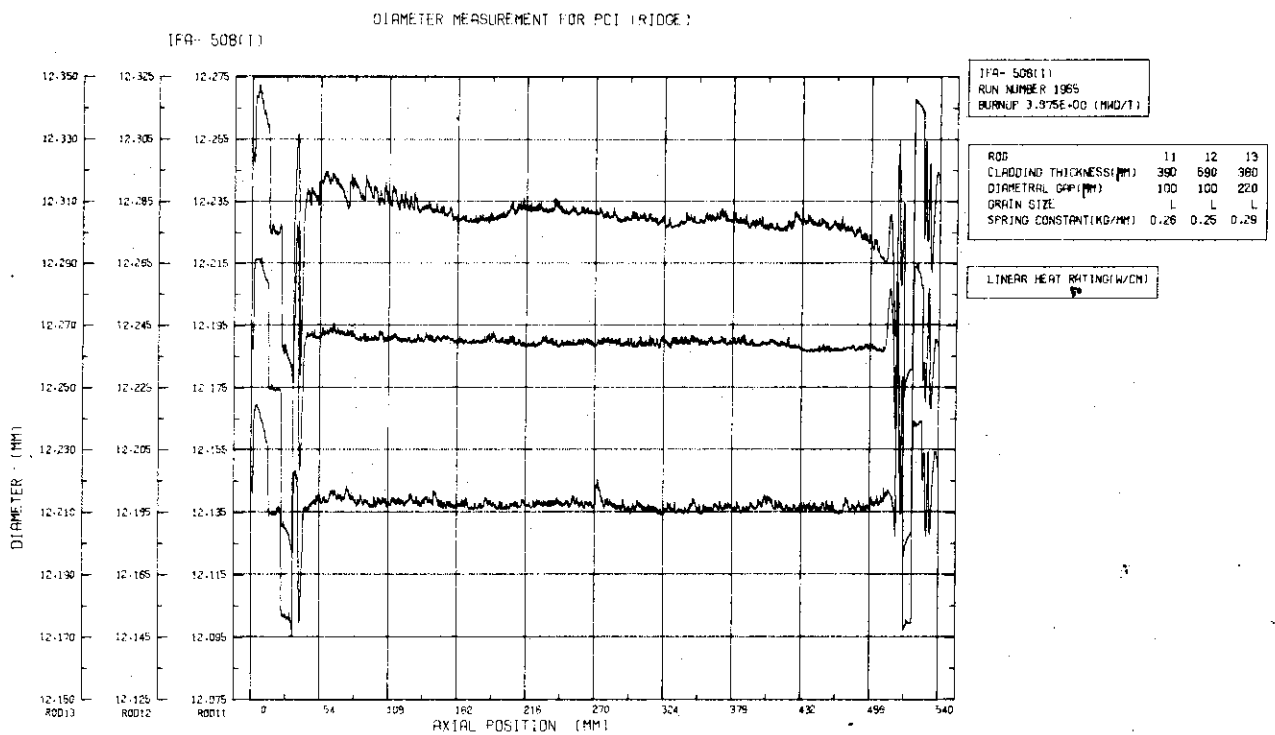


Fig. 10 Data plotting for diameter measurement at run No.1965

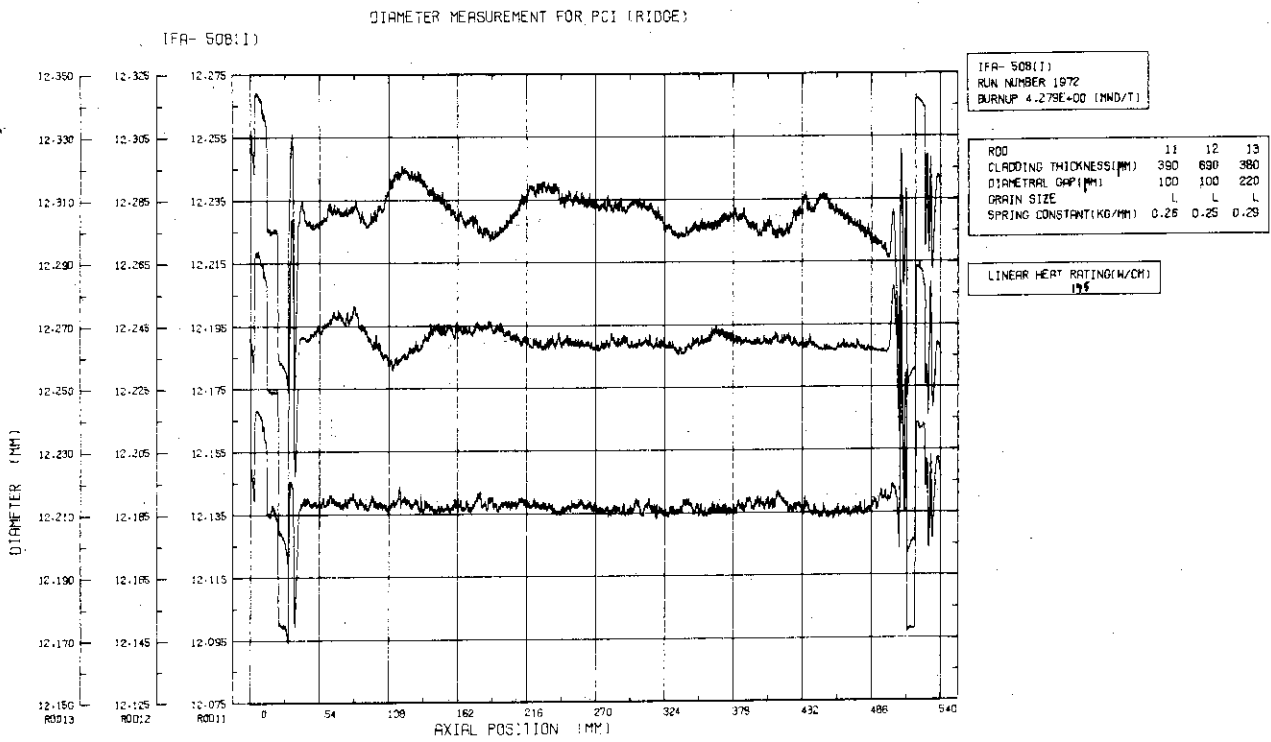


Fig. 11 Data plotting for diameter measurement at run No.1972

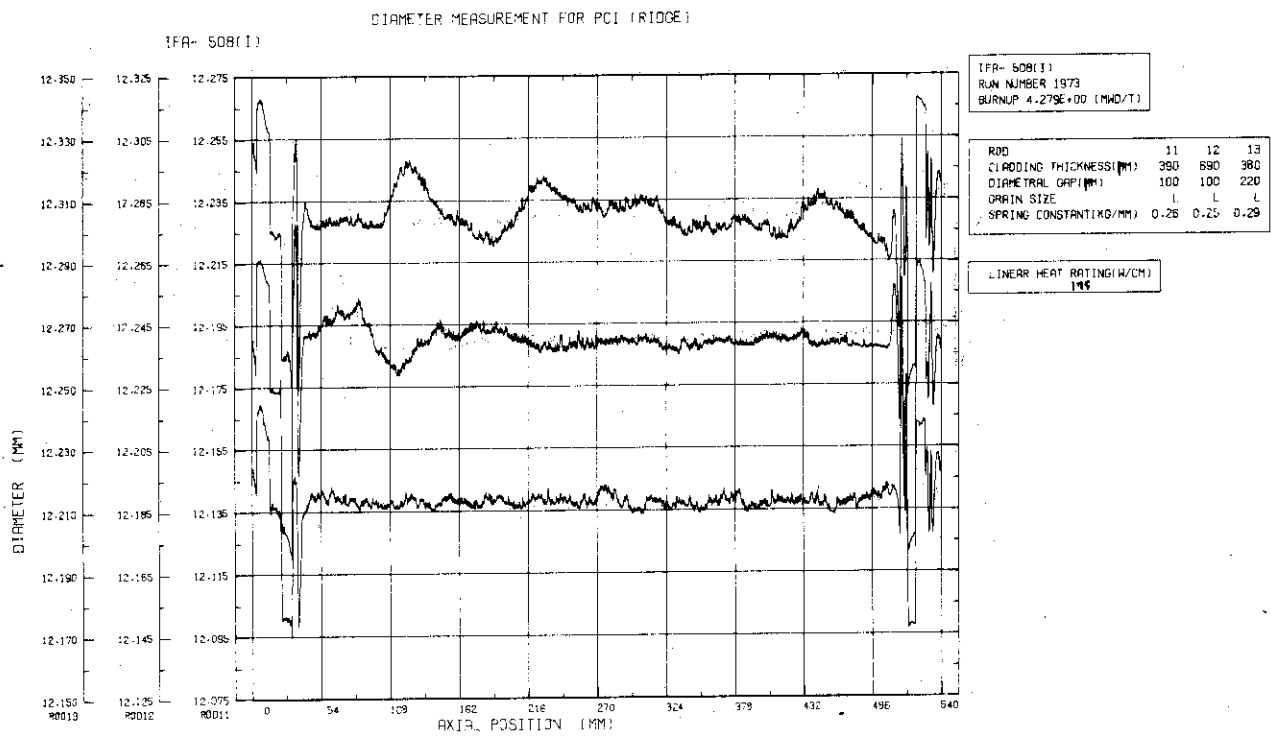


Fig. 12 Data plotting for diameter measurement at run No.1973

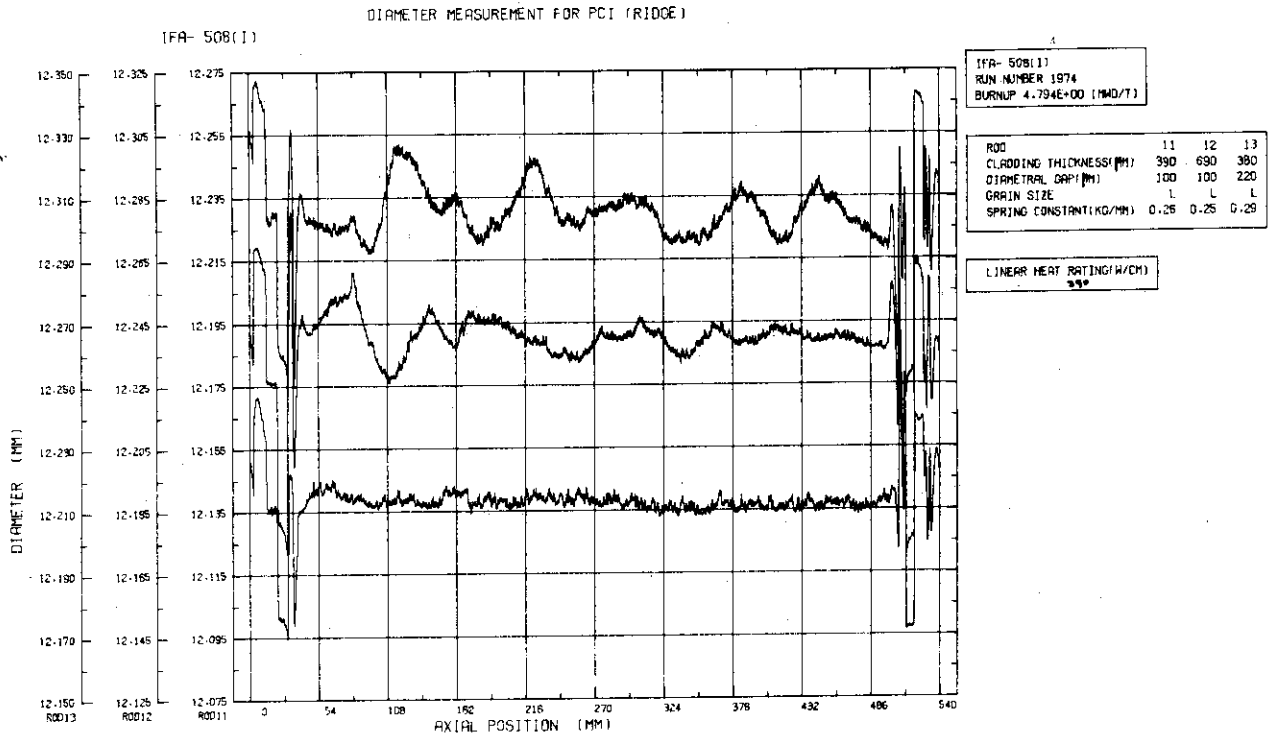


Fig. 13 Data plotting for diameter measurement at run No.1974

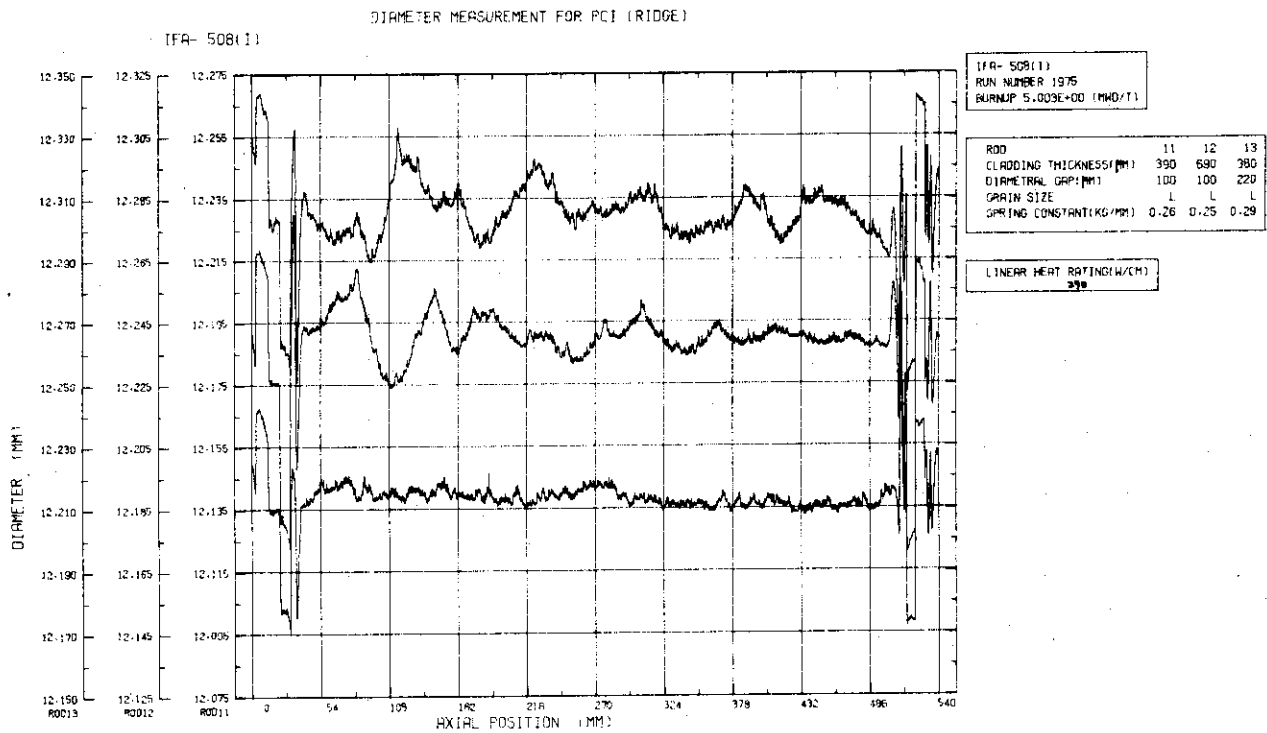


Fig. 14 Data plotting for diameter measurement at run No.1975

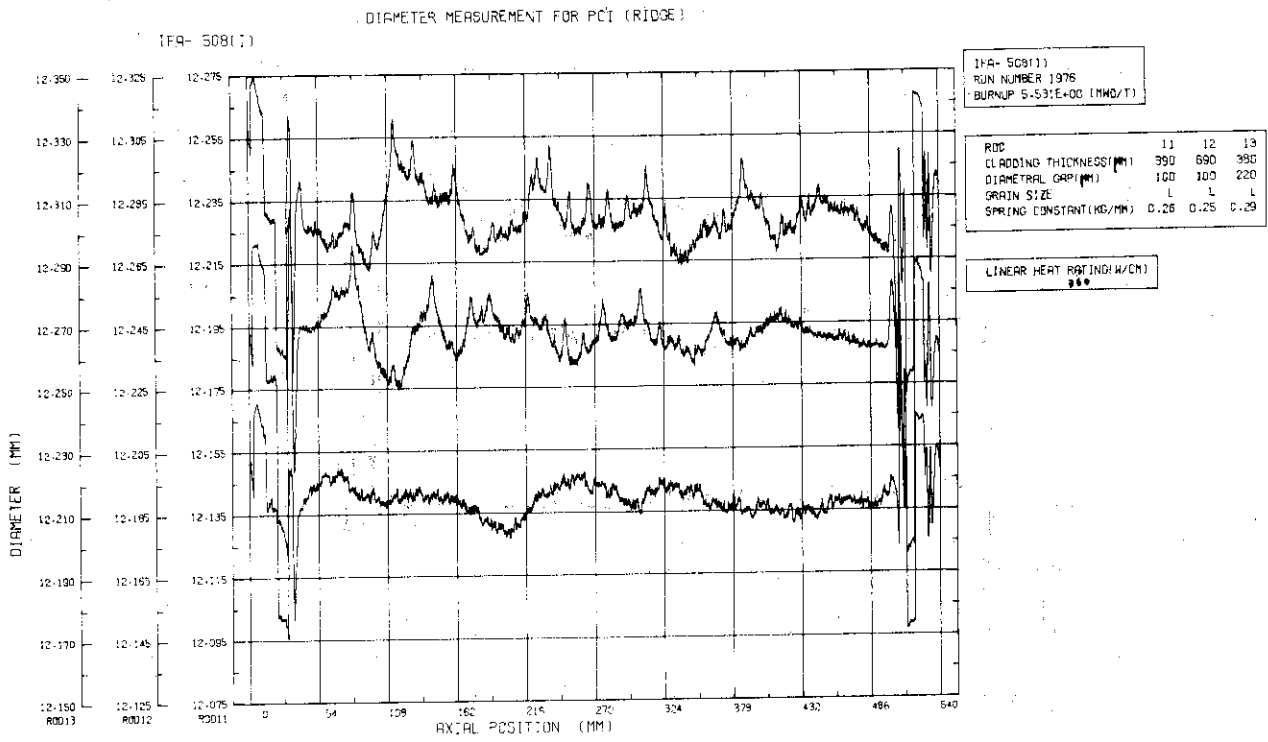


Fig. 15 Data plotting for diameter measurement at run No. 1976

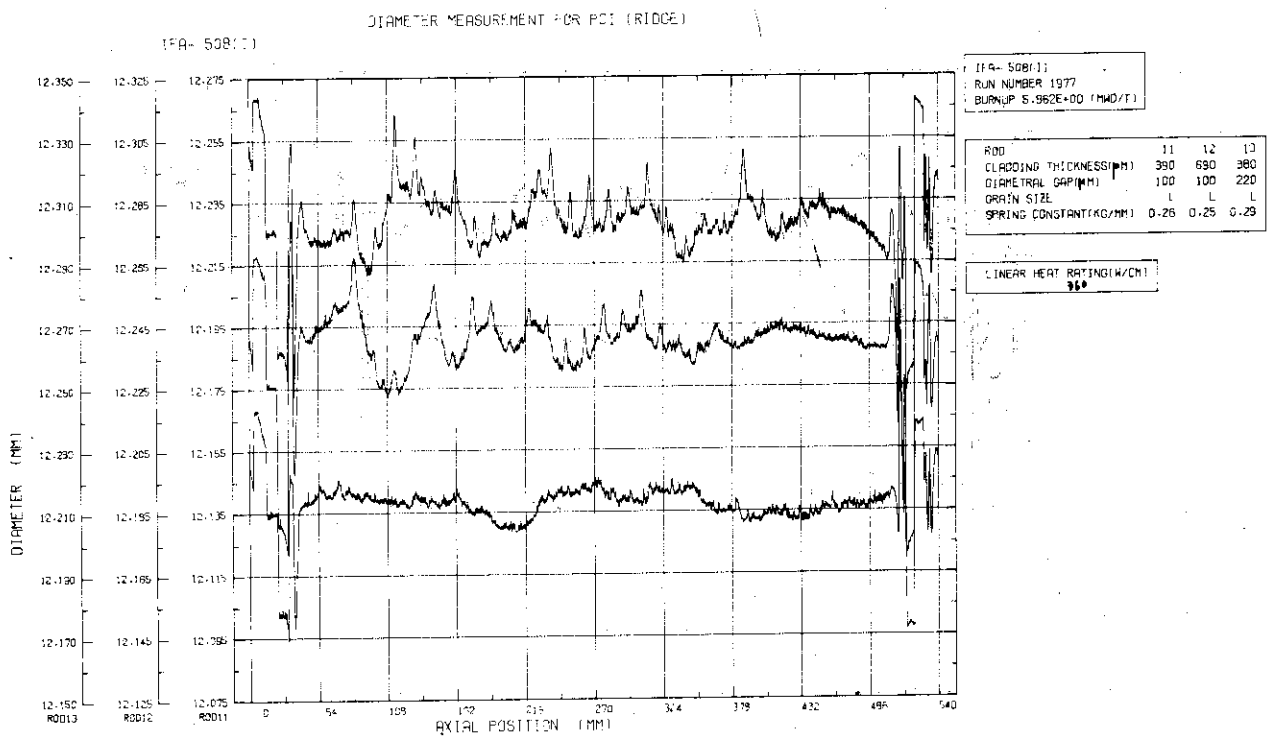


Fig. 16 Data plotting for diameter measurement at run No. 1977

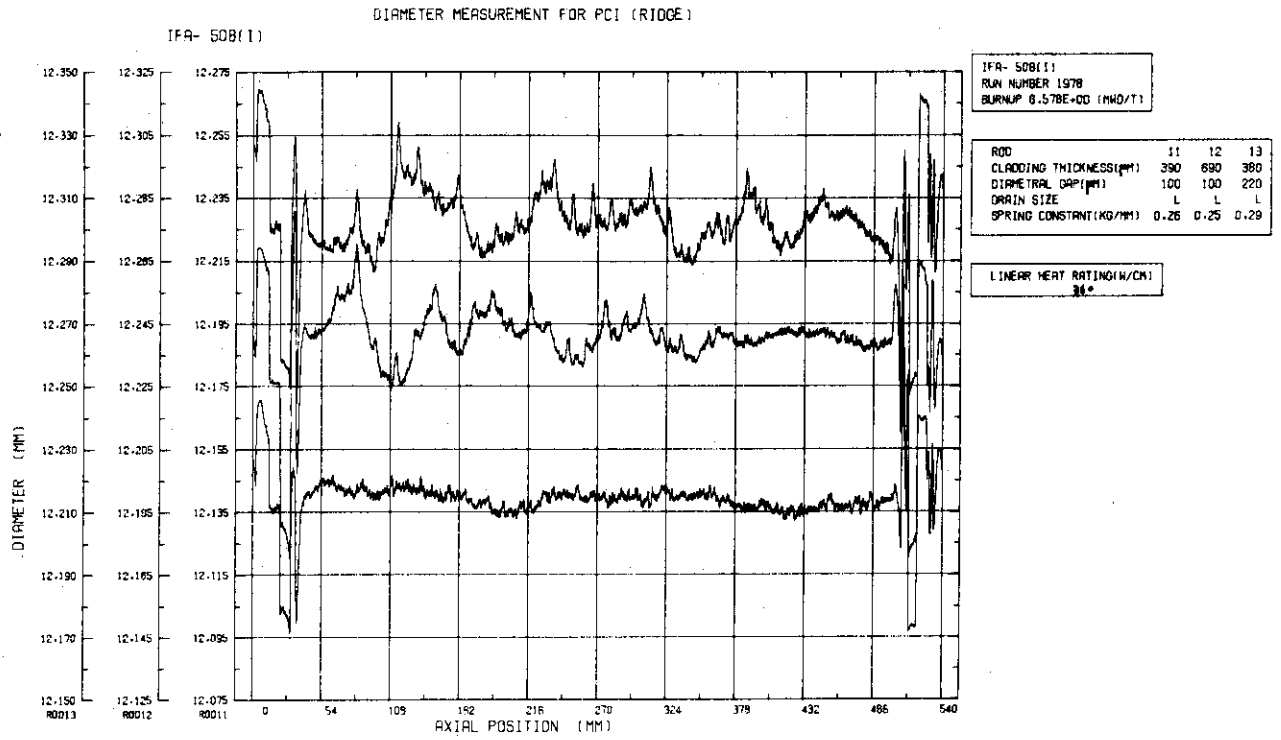


Fig. 17 Data plotting for diameter measurement at run No.1978

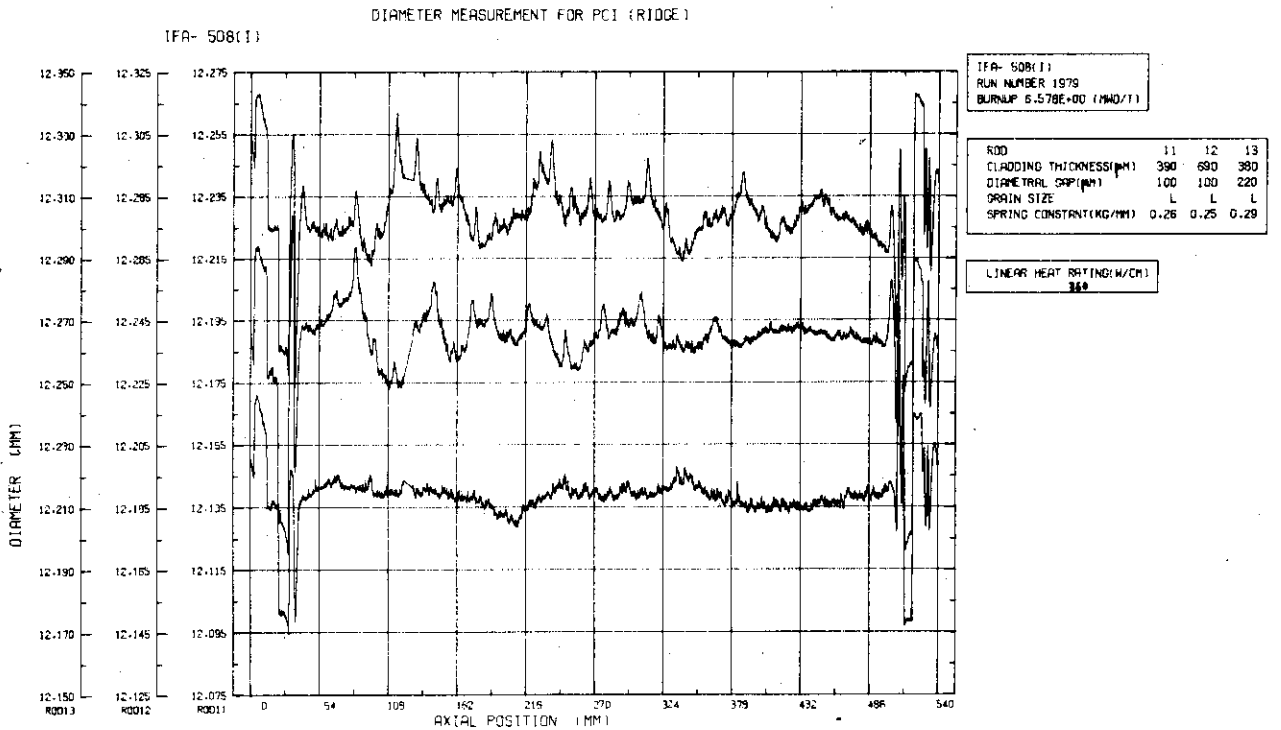


Fig. 18 Data plotting for diameter measurement at run No.1979

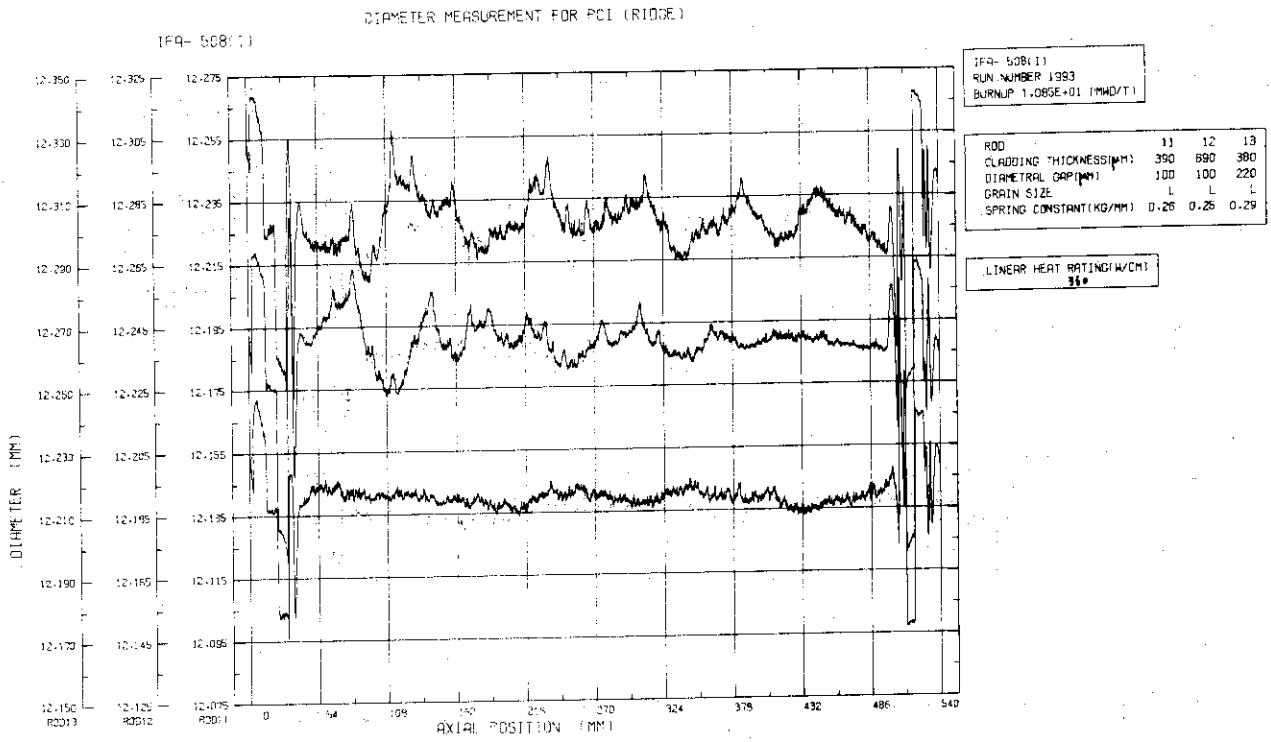


Fig. 19 Data plotting for diameter measurement at run No.1993

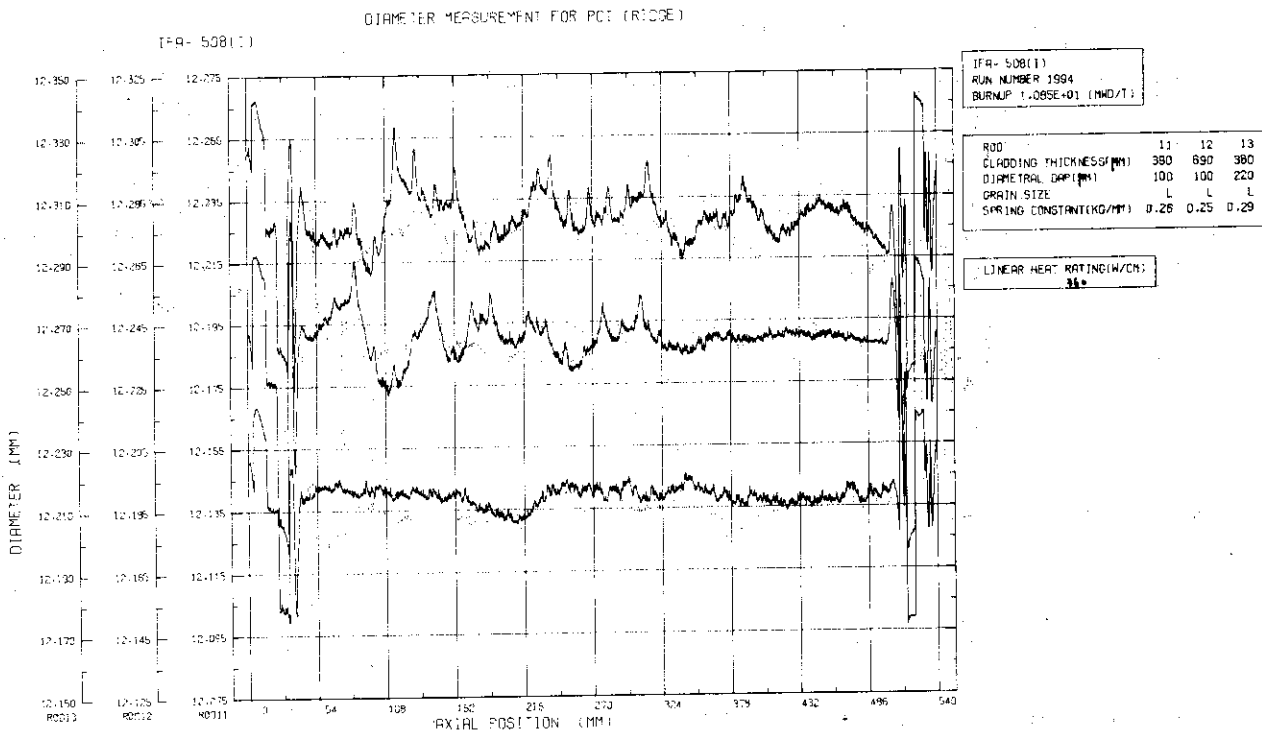


Fig. 20 Data plotting for diameter measurement at run No.1994

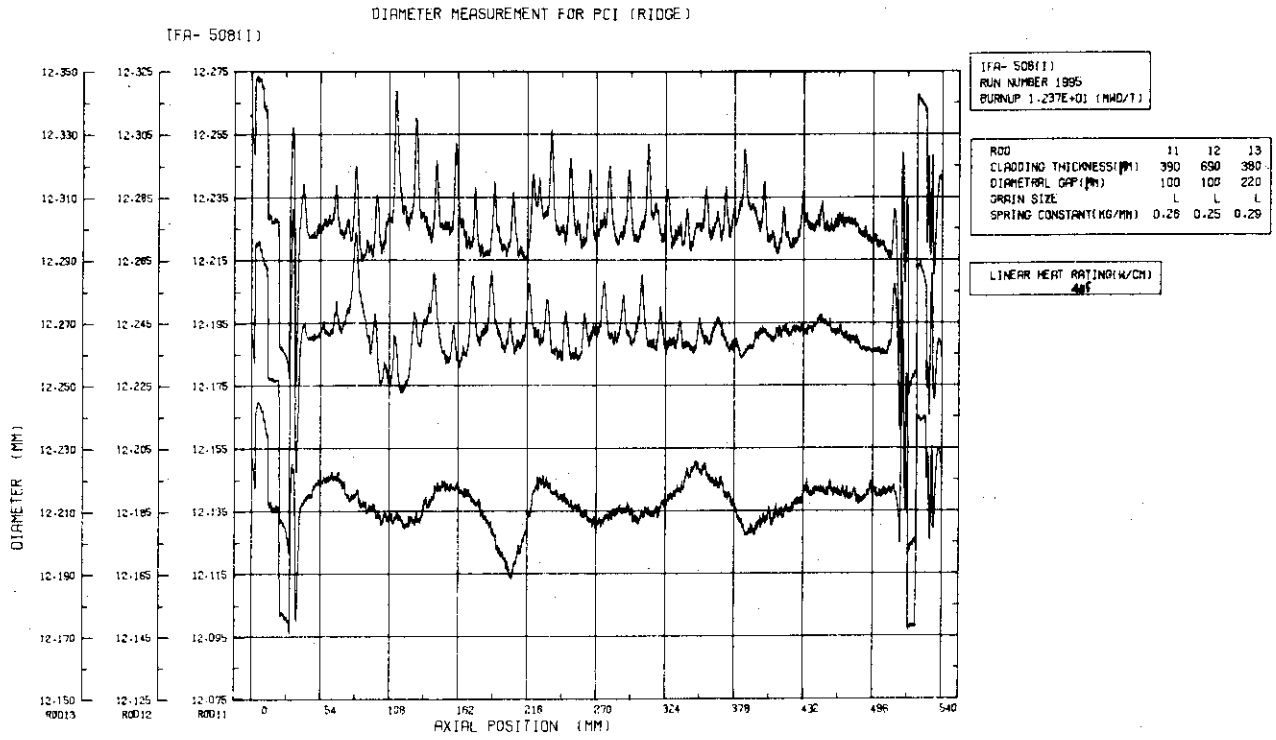


Fig. 21 Data plotting for diameter measurement at run No. 1995

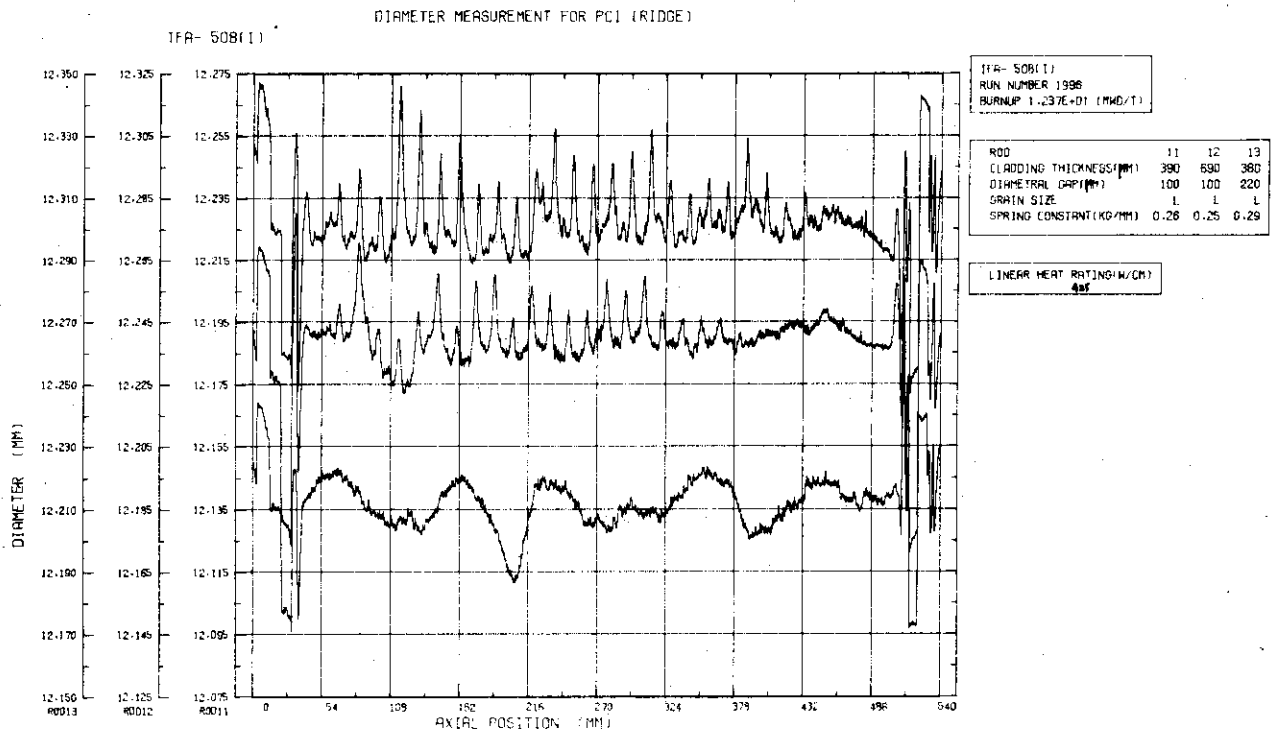


Fig. 22 Data plotting for diameter measurement at run No. 1996

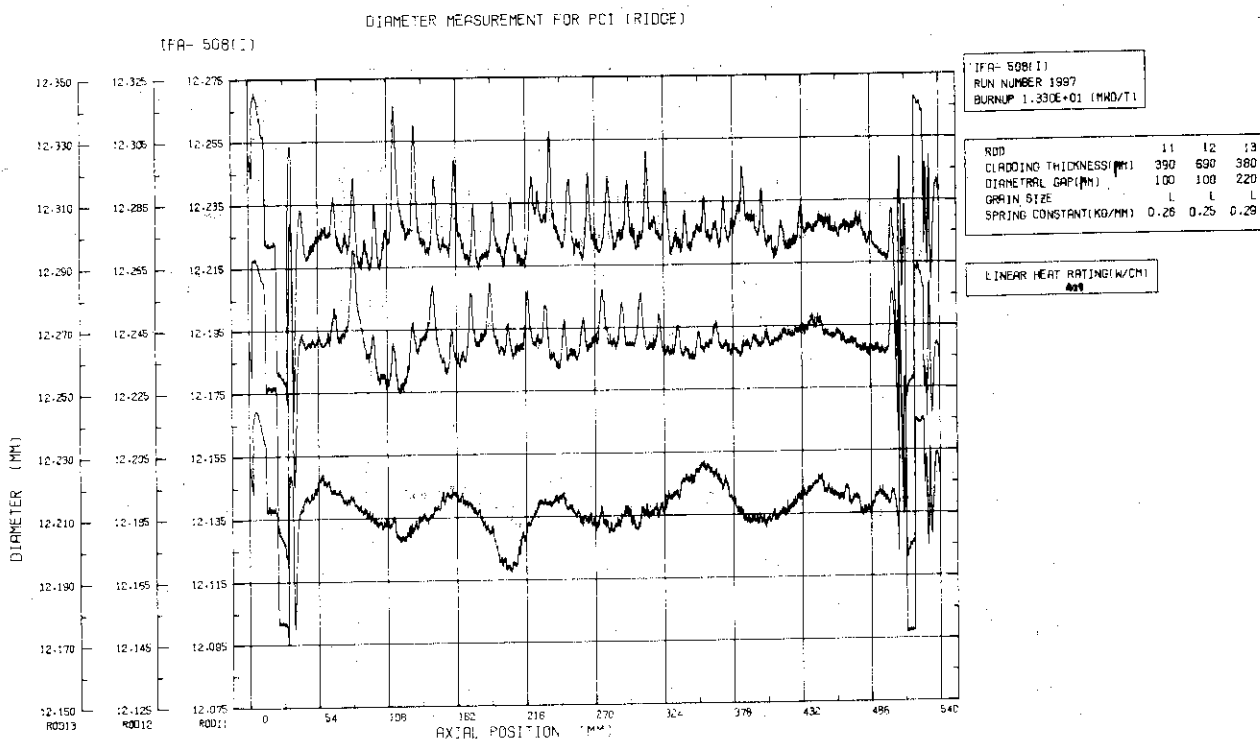


Fig. 23 Data plotting for diameter measurement at run No.1997

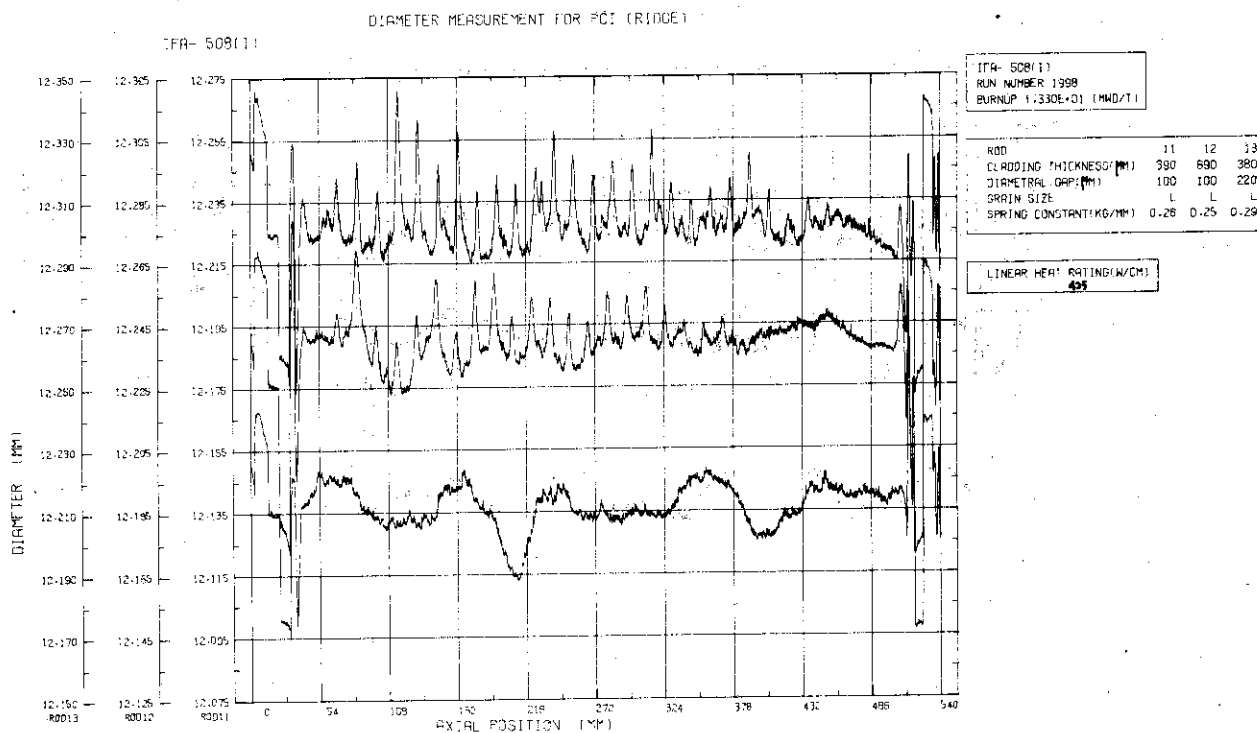


Fig. 24 Data plotting for diameter measurement at run No.1998

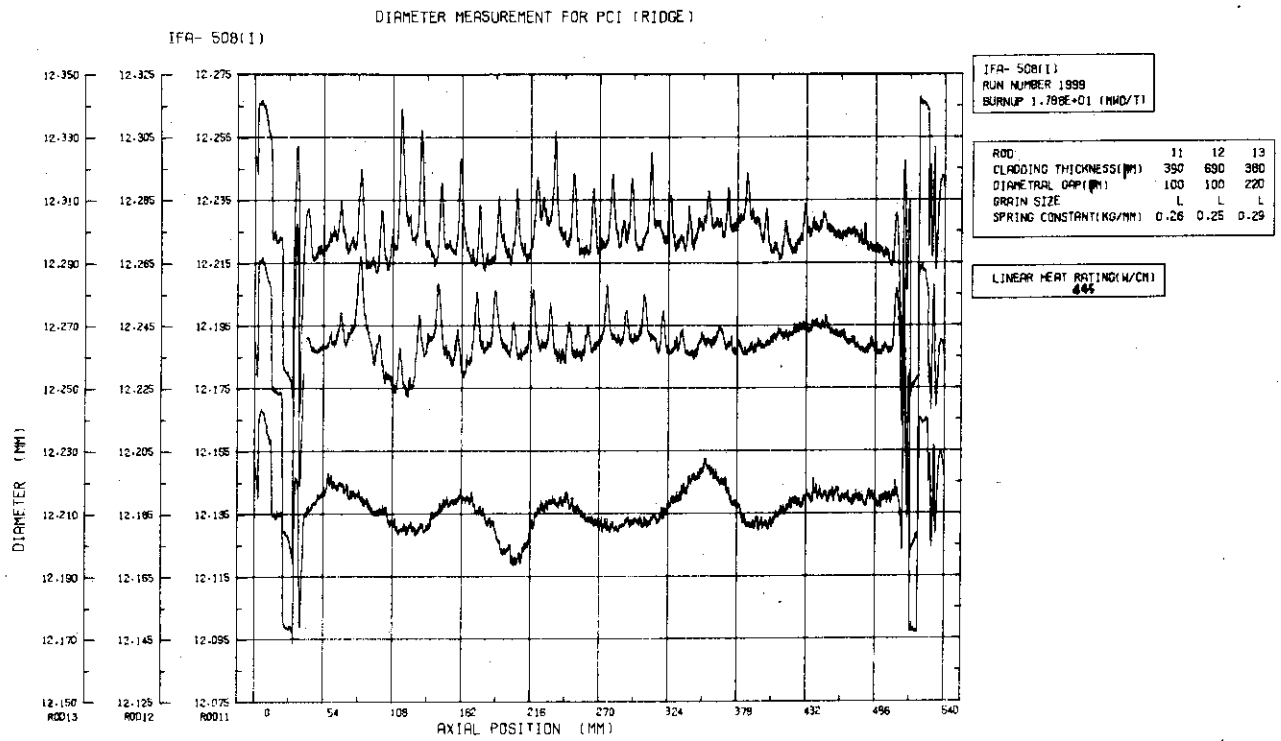


Fig. 25 Data plotting for diameter measurement at run No.1999

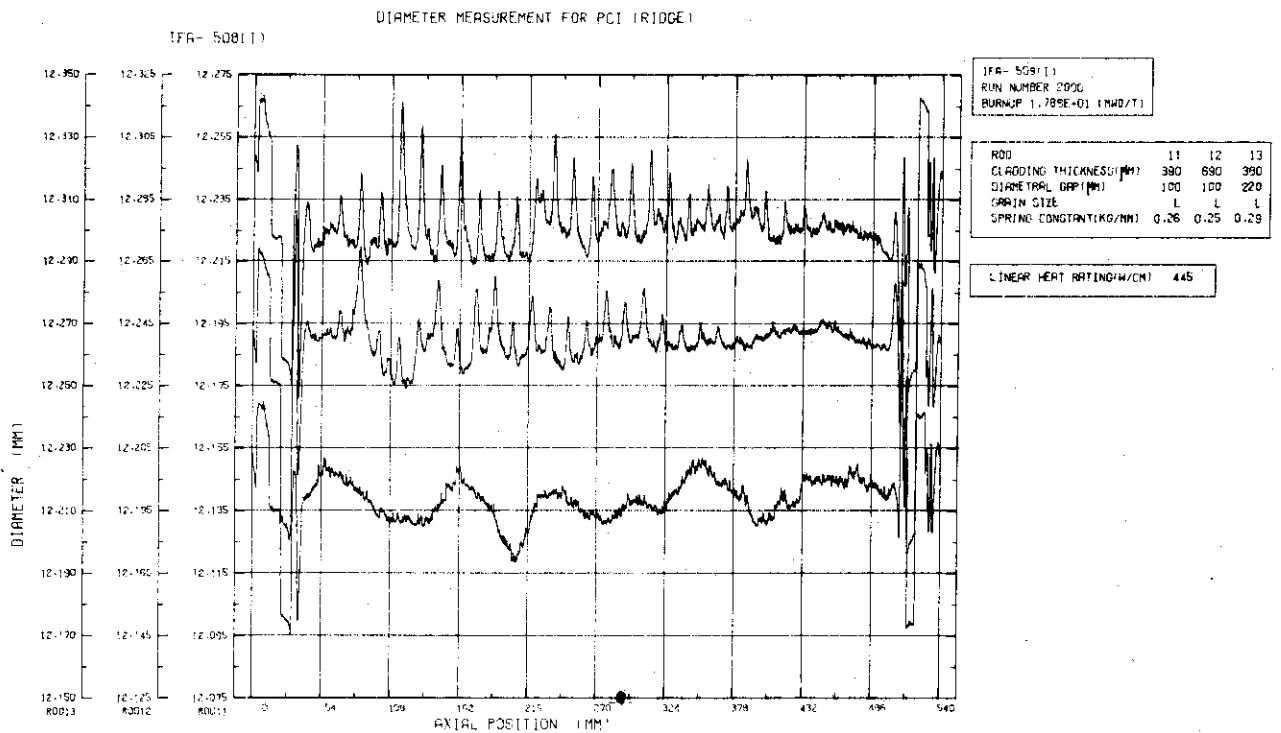


Fig. 26 Data plotting for diameter measurement at run No.2000

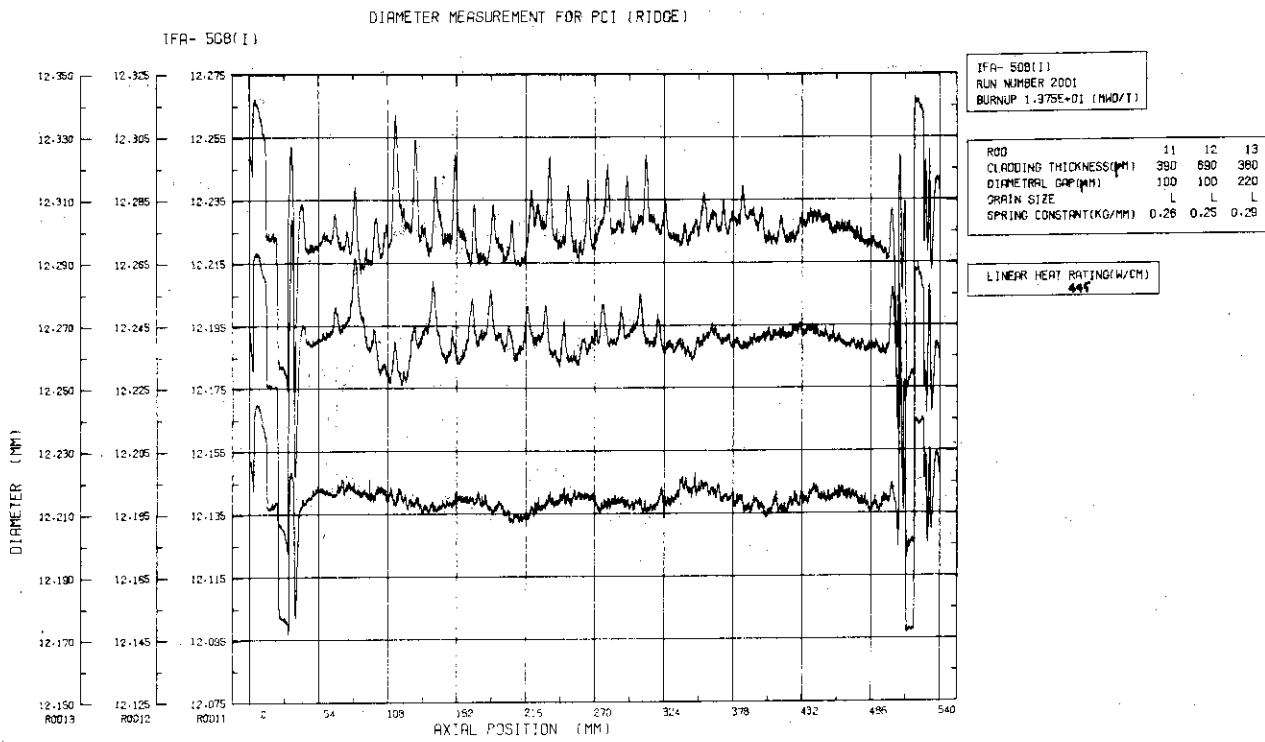


Fig. 27 Data plotting for diameter measurement at run No.2001

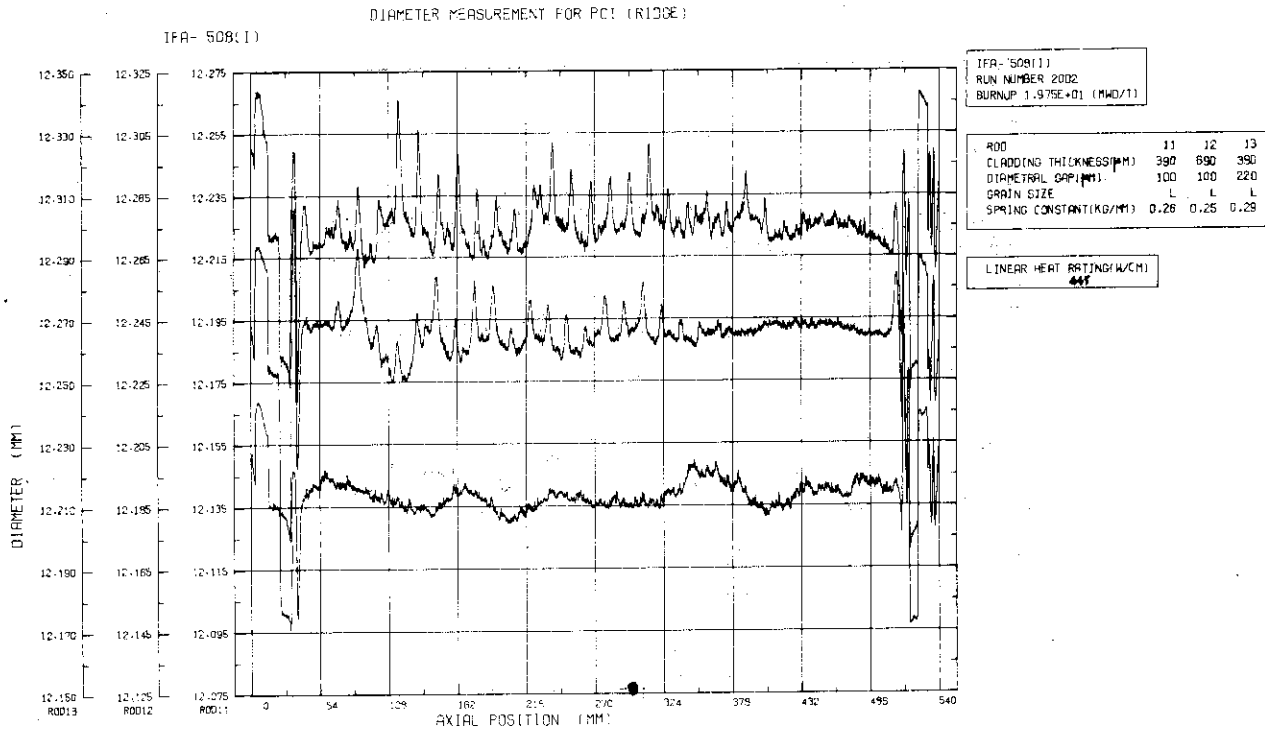


Fig. 28 Data plotting for diameter measurement at run No.2002

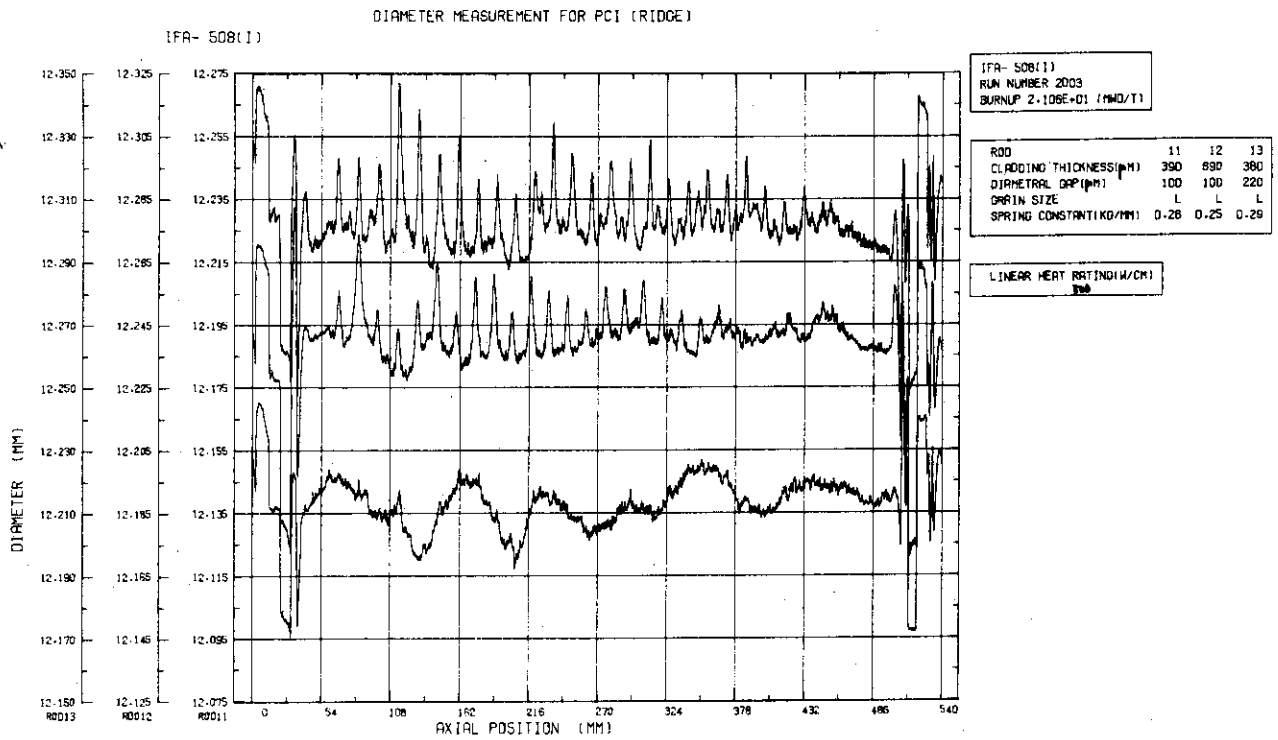


Fig. 29 Data plotting for diameter measurement at run No.2003

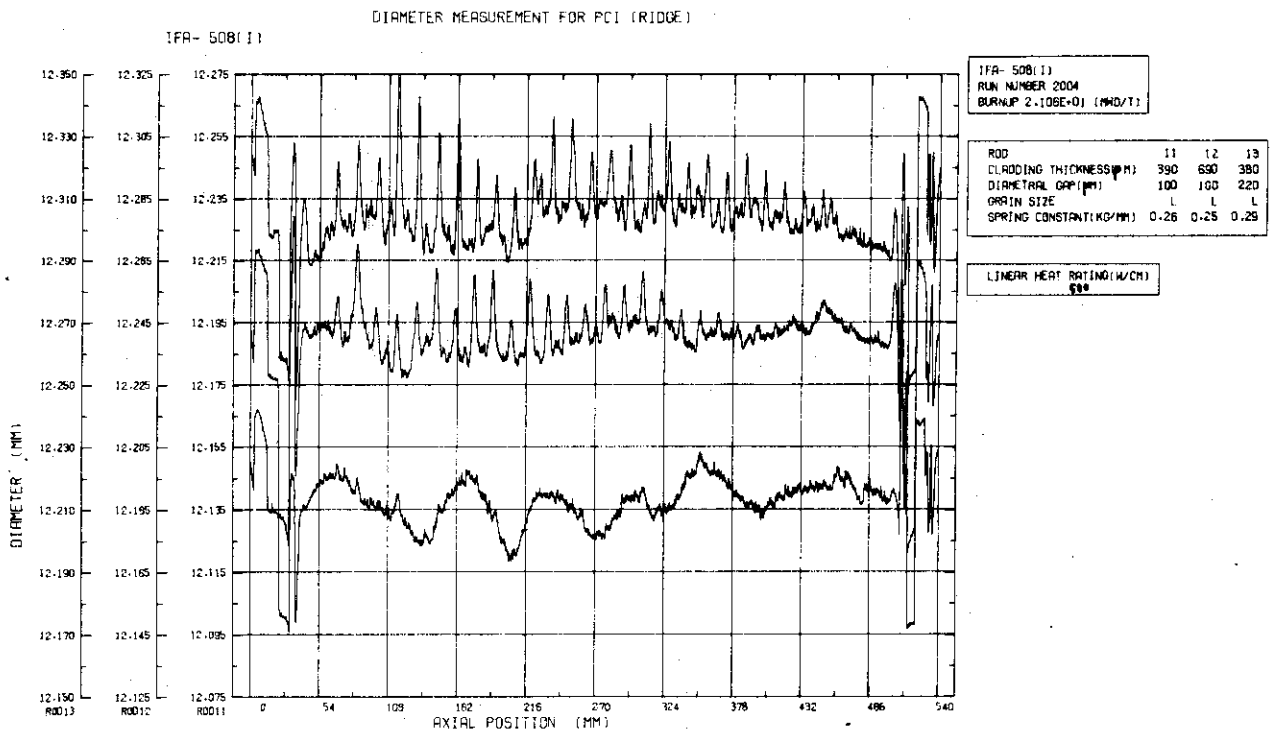


Fig. 30 Data plotting for diameter measurement at run No.2004

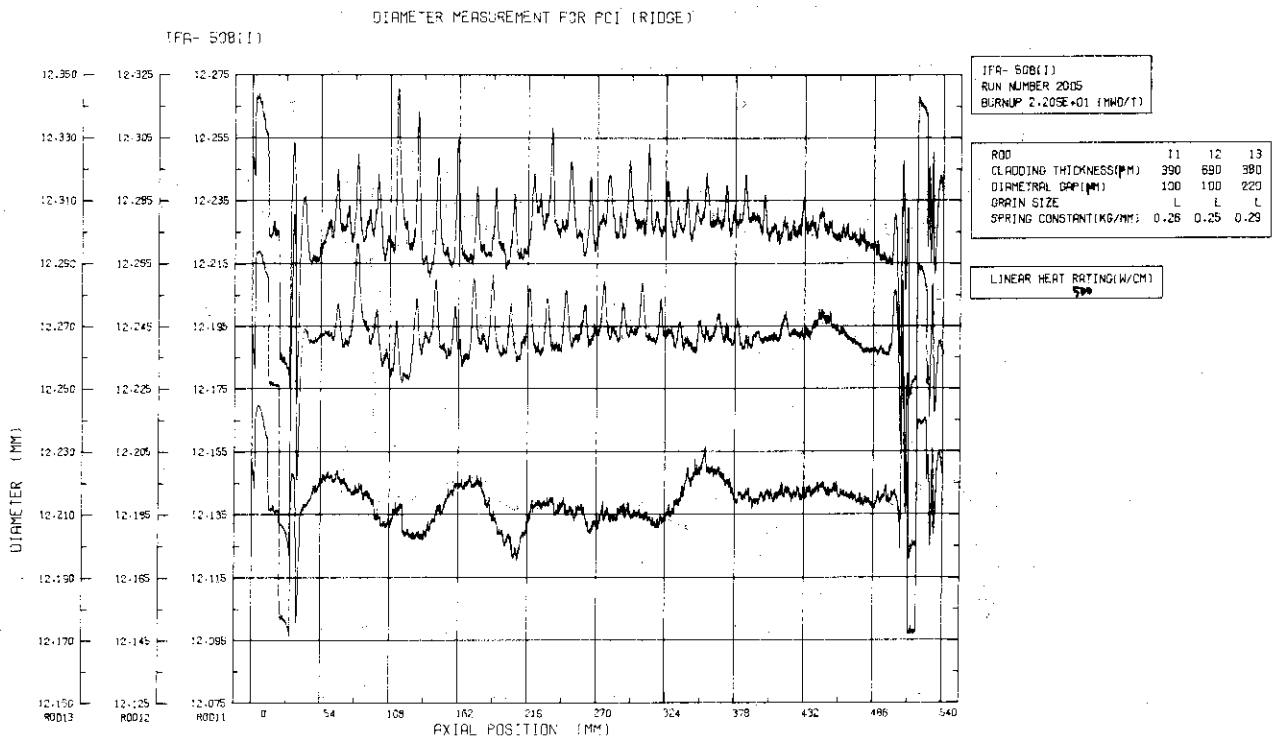


Fig. 31 Data plotting for diameter measurement at run No.2005

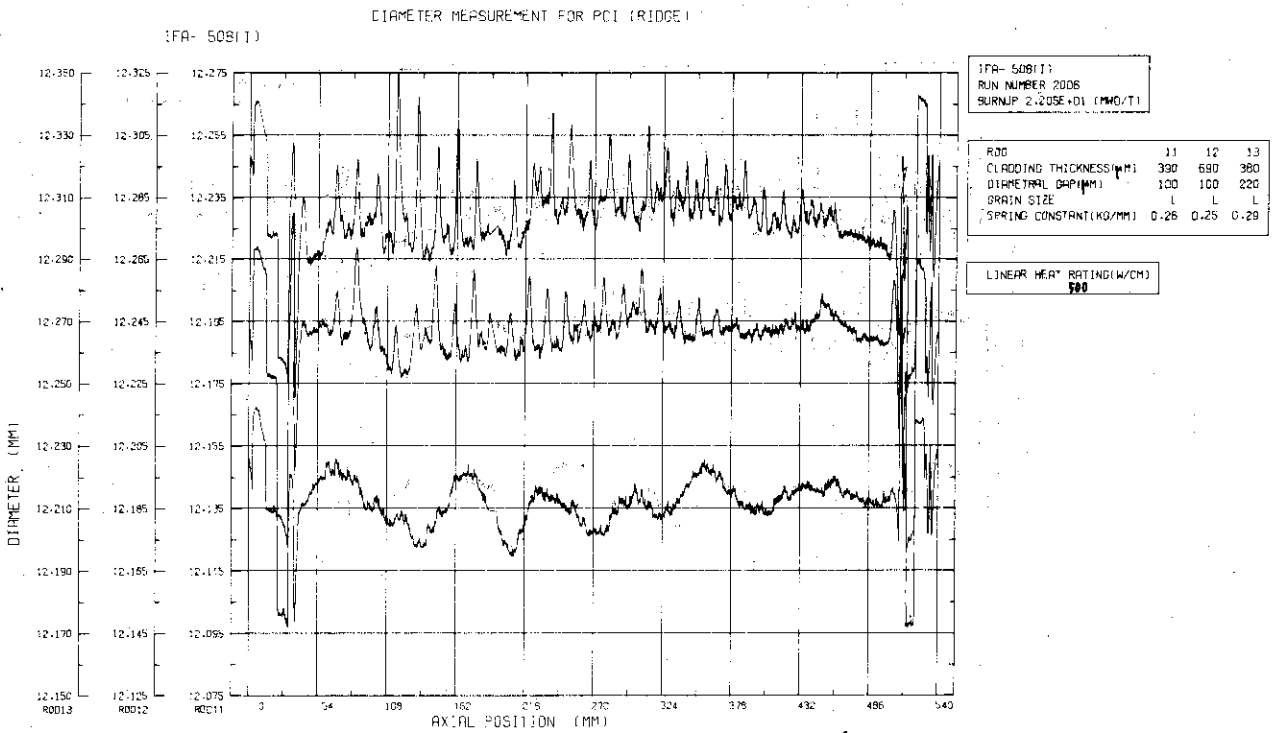


Fig. 32 Data plotting for diameter measurement at run No.2006

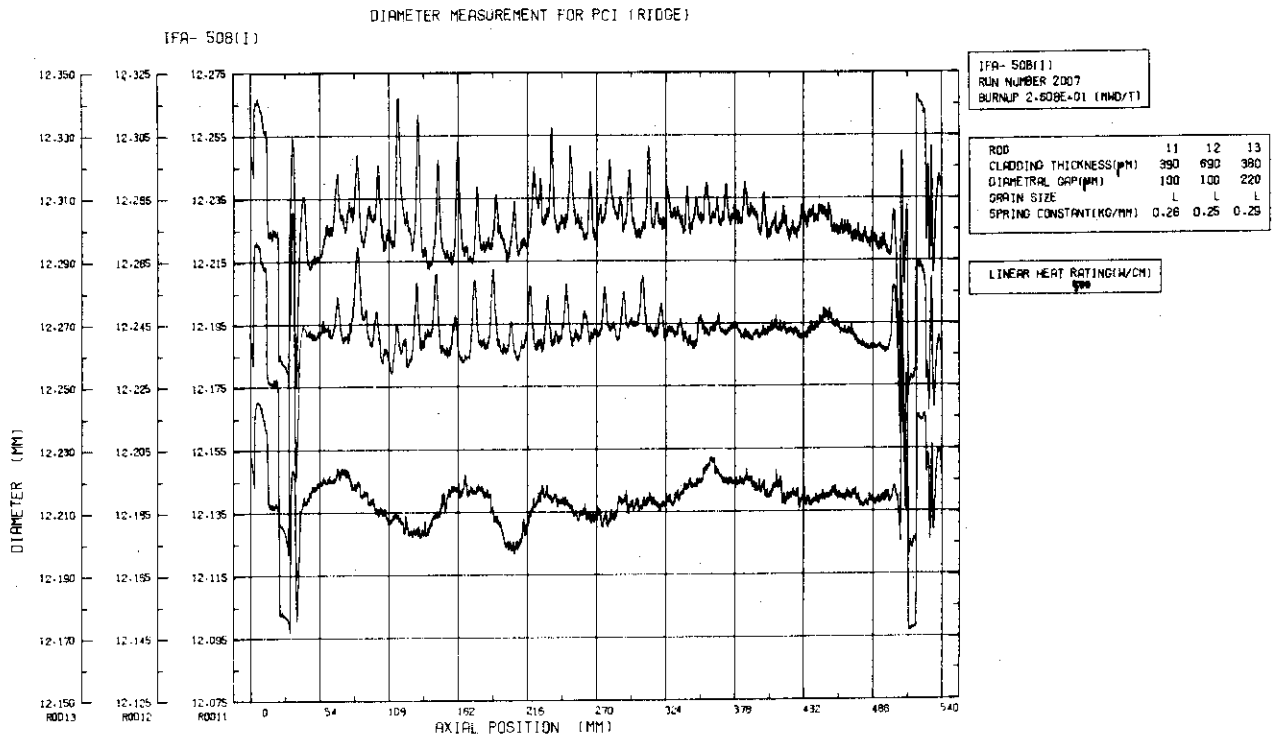


Fig. 33 Data plotting for diameter measurement at run No.2007

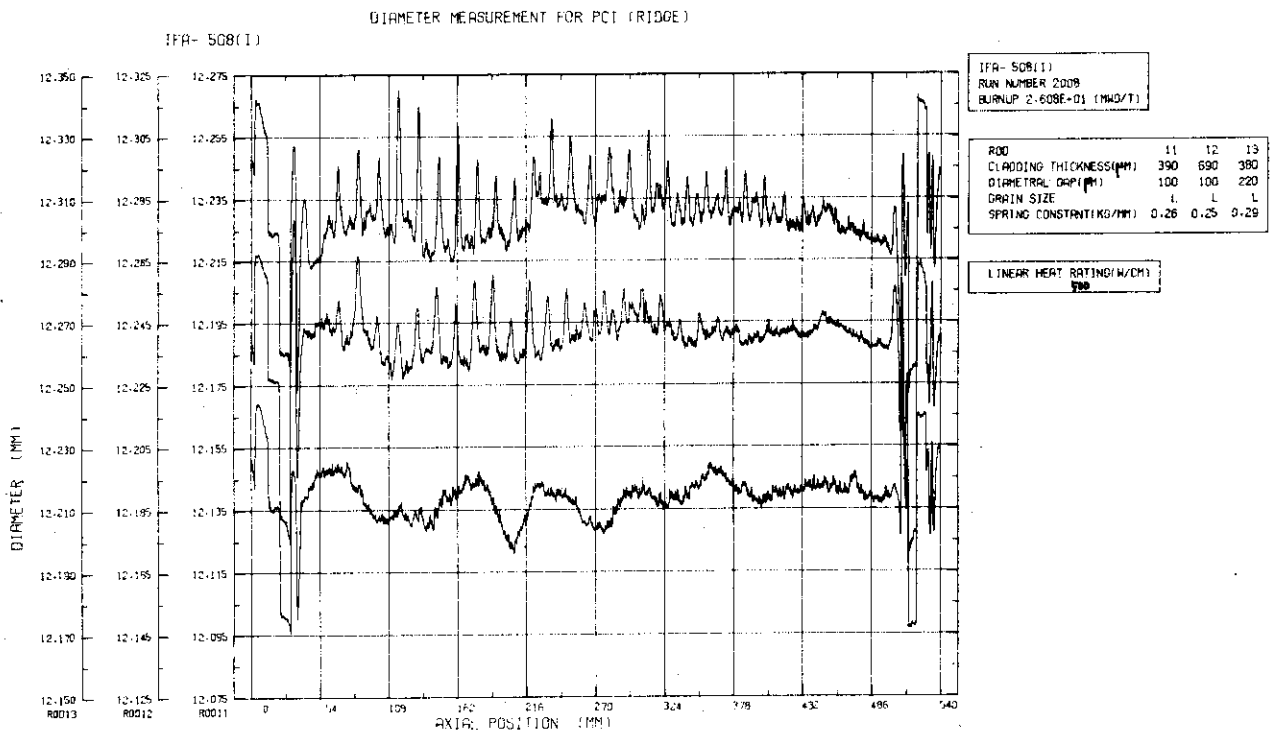


Fig. 34 Data plotting for diameter measurement at run No.2008

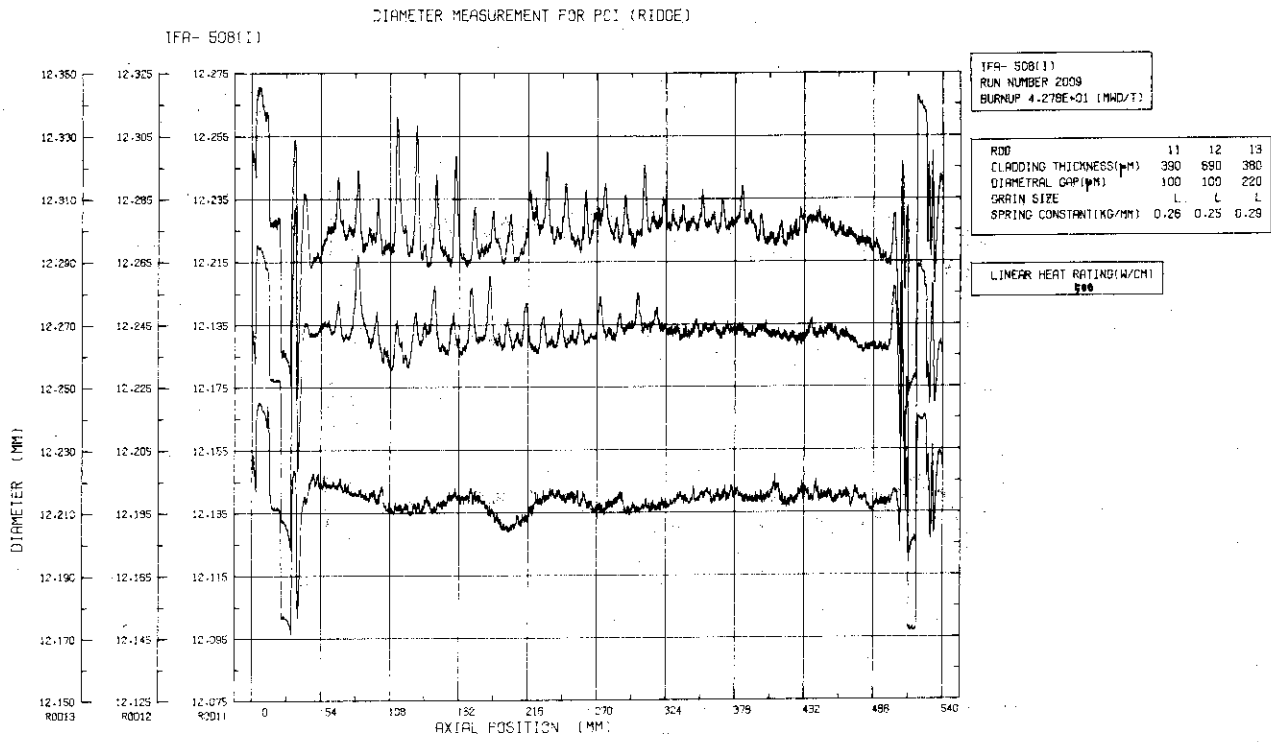


Fig. 35 Data plotting for diameter measurement at run No. 2009

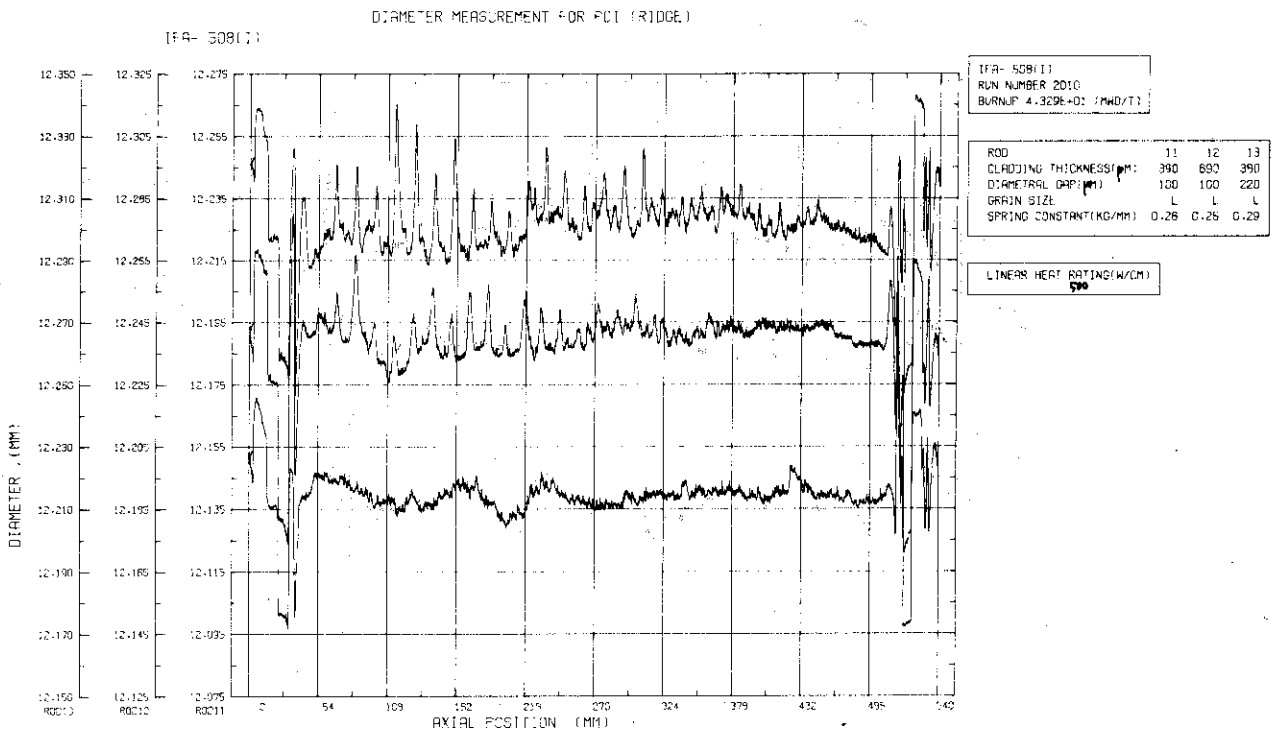


Fig. 36 Data plotting for diameter measurement at run No. 2010

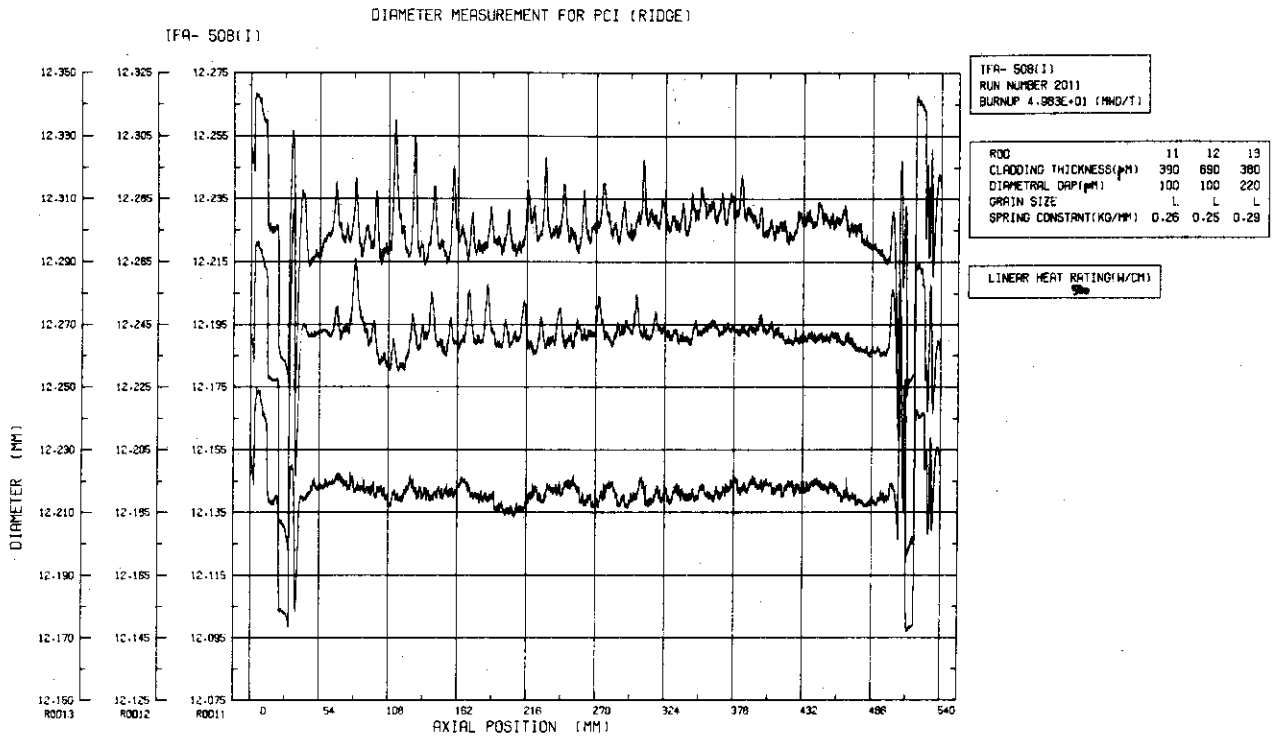


Fig. 37 Data plotting for diameter measurement at run No. 2011

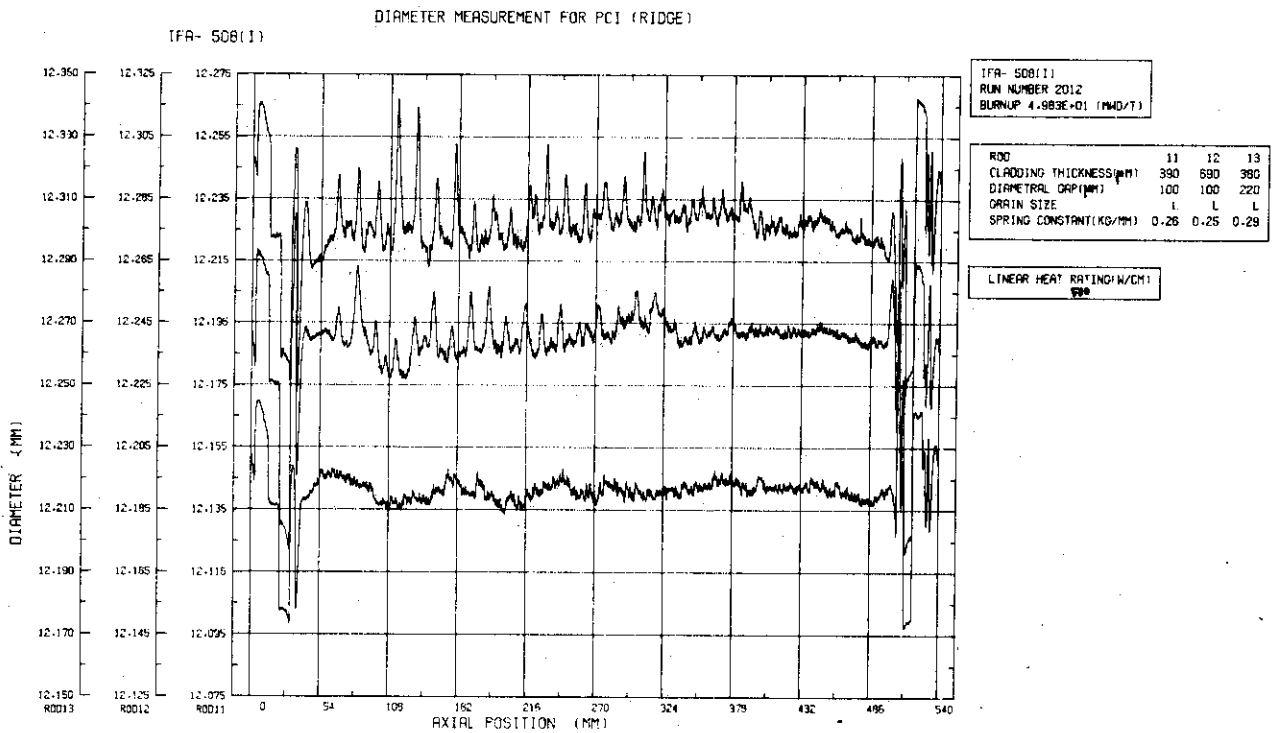


Fig. 38 Data plotting for diameter measurement at run No. 2012

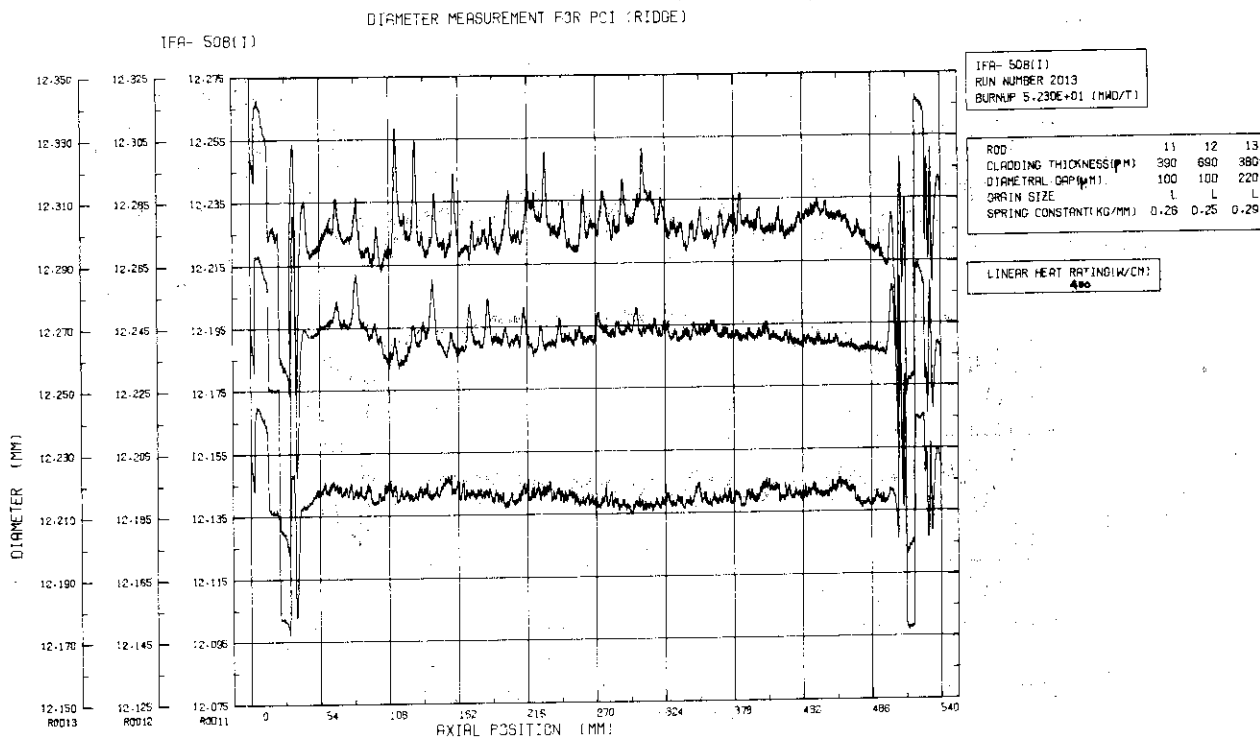


Fig. 39 Data plotting for diameter measurement at run No. 2013

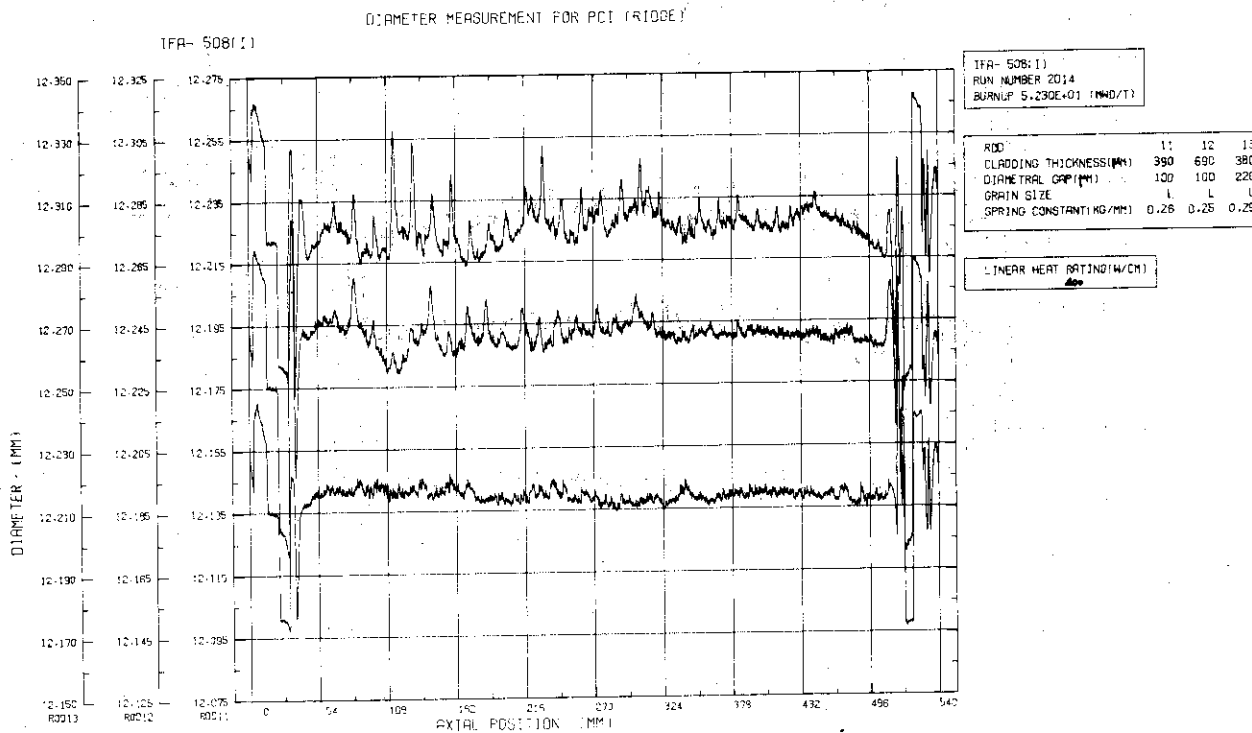


Fig. 40 Data plotting for diameter measurement at run No. 2014

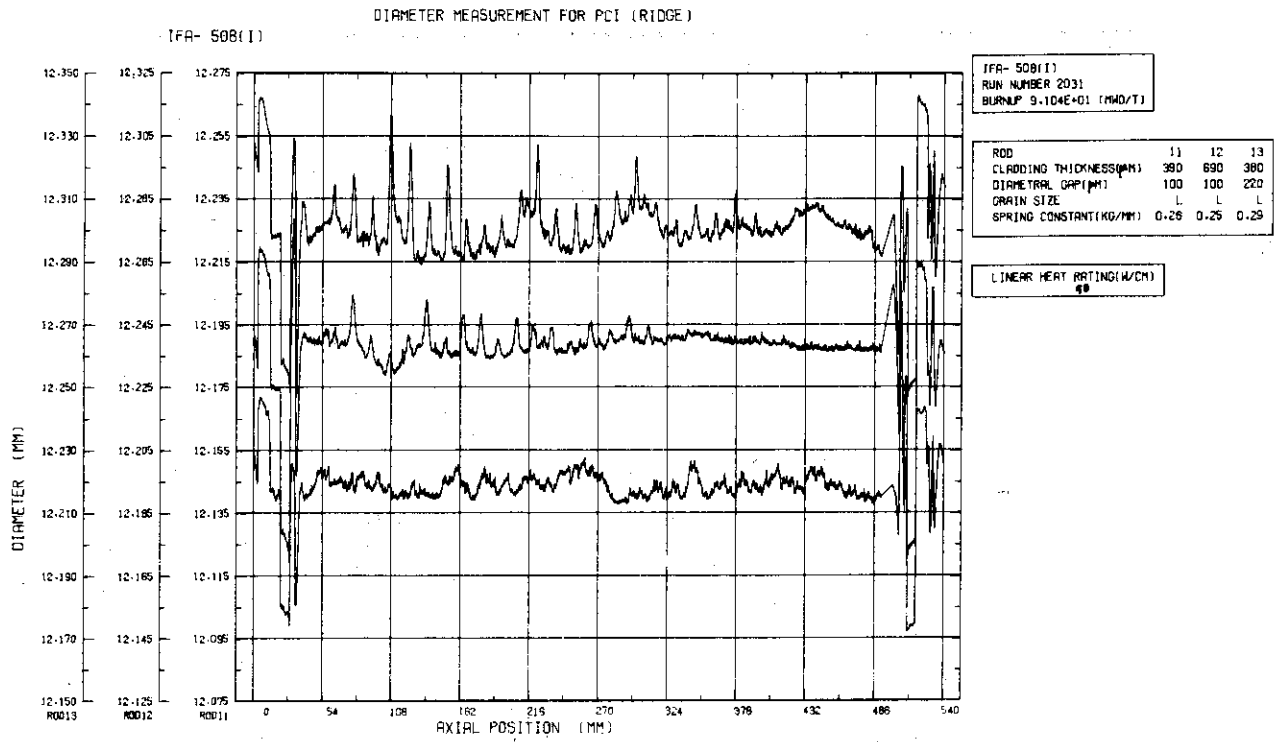


Fig. 41 Data plotting for diameter measurement at run No.2031

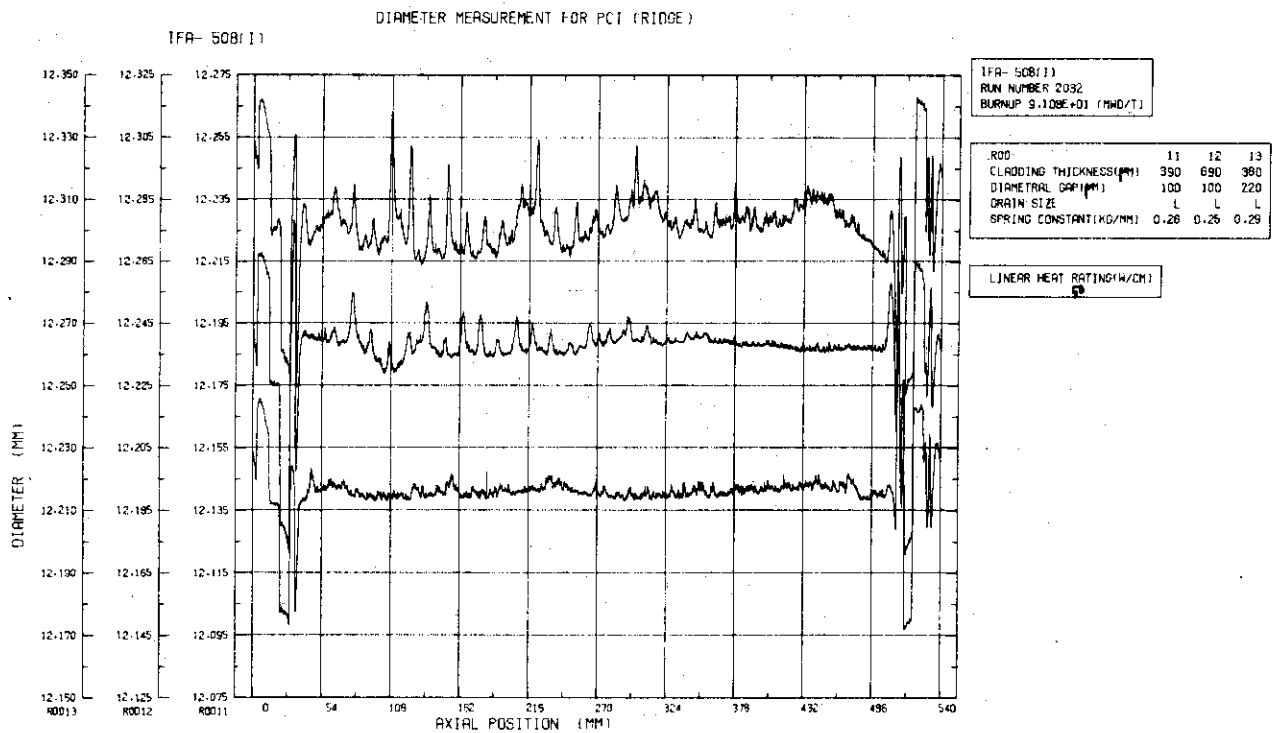


Fig. 42 Data plotting for diameter measurement at run No.2032

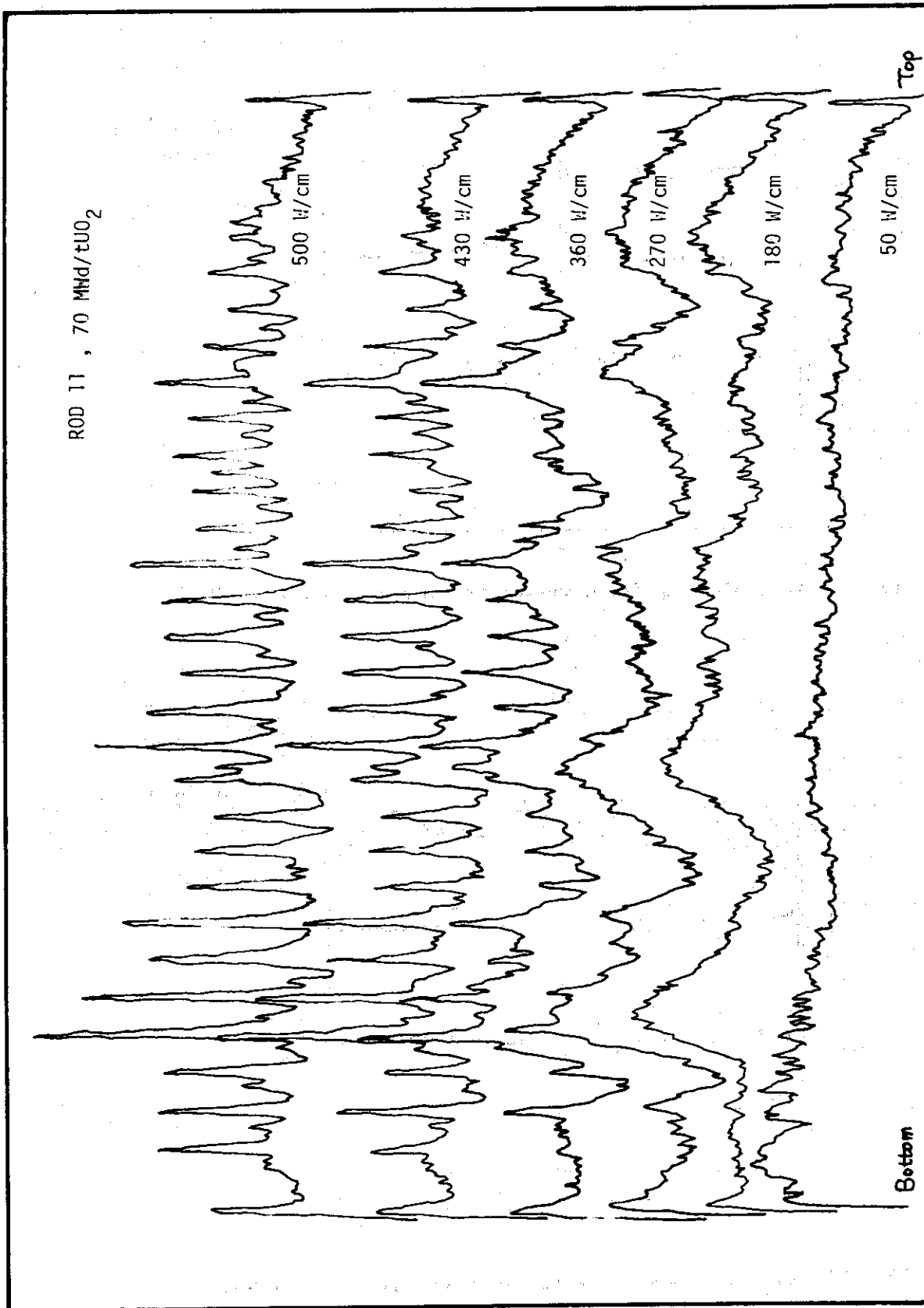


Fig. 43 Diametral deformation of rod 11 as a function of linear heat rating up to 500W/cm; burnups are 70 MWd/tUO₂

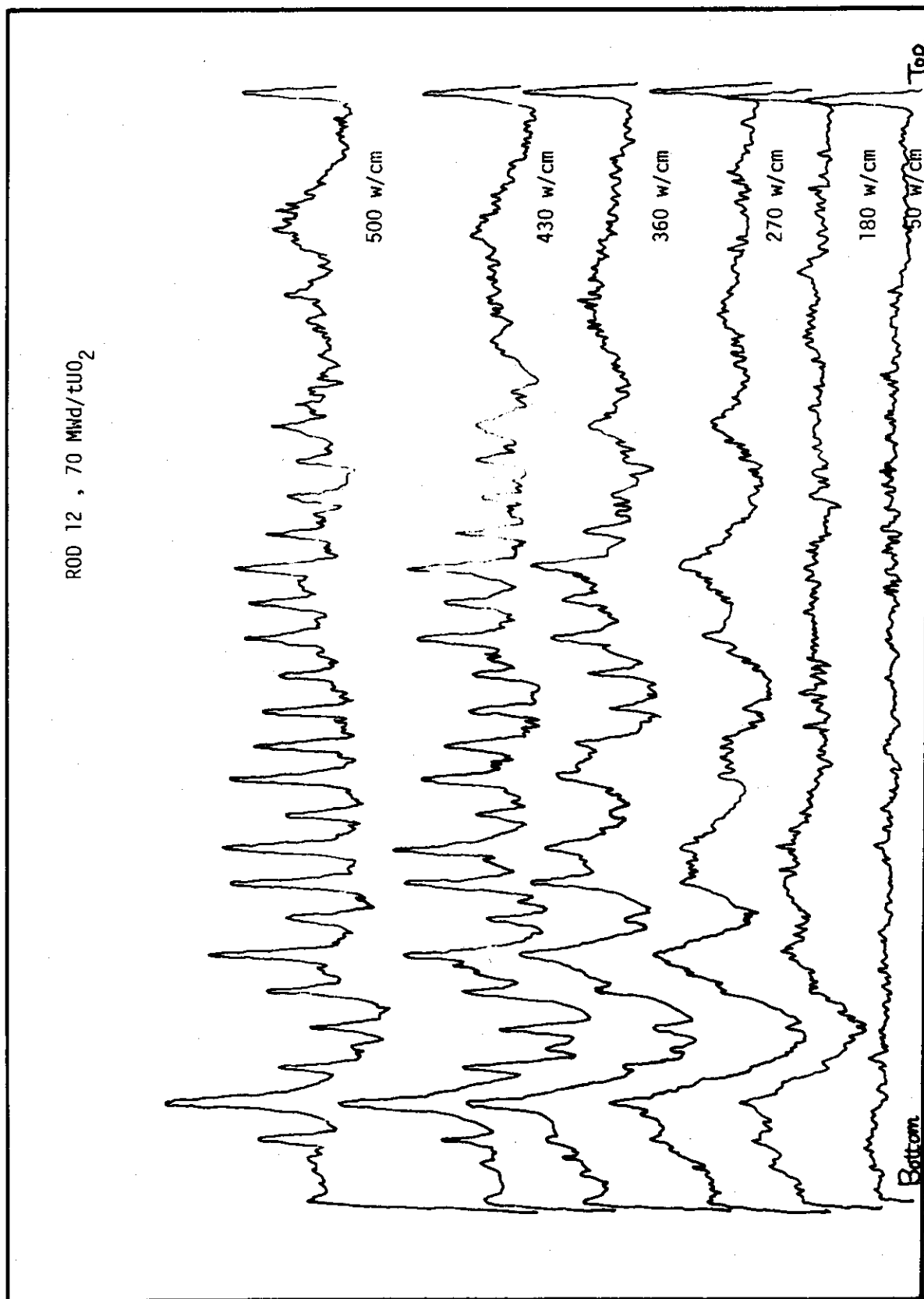


Fig. 44 Diametral deformation of rod 12 as a function of linear heat rating up to 500W/cm : burnups are 70 MWd/tUO₂

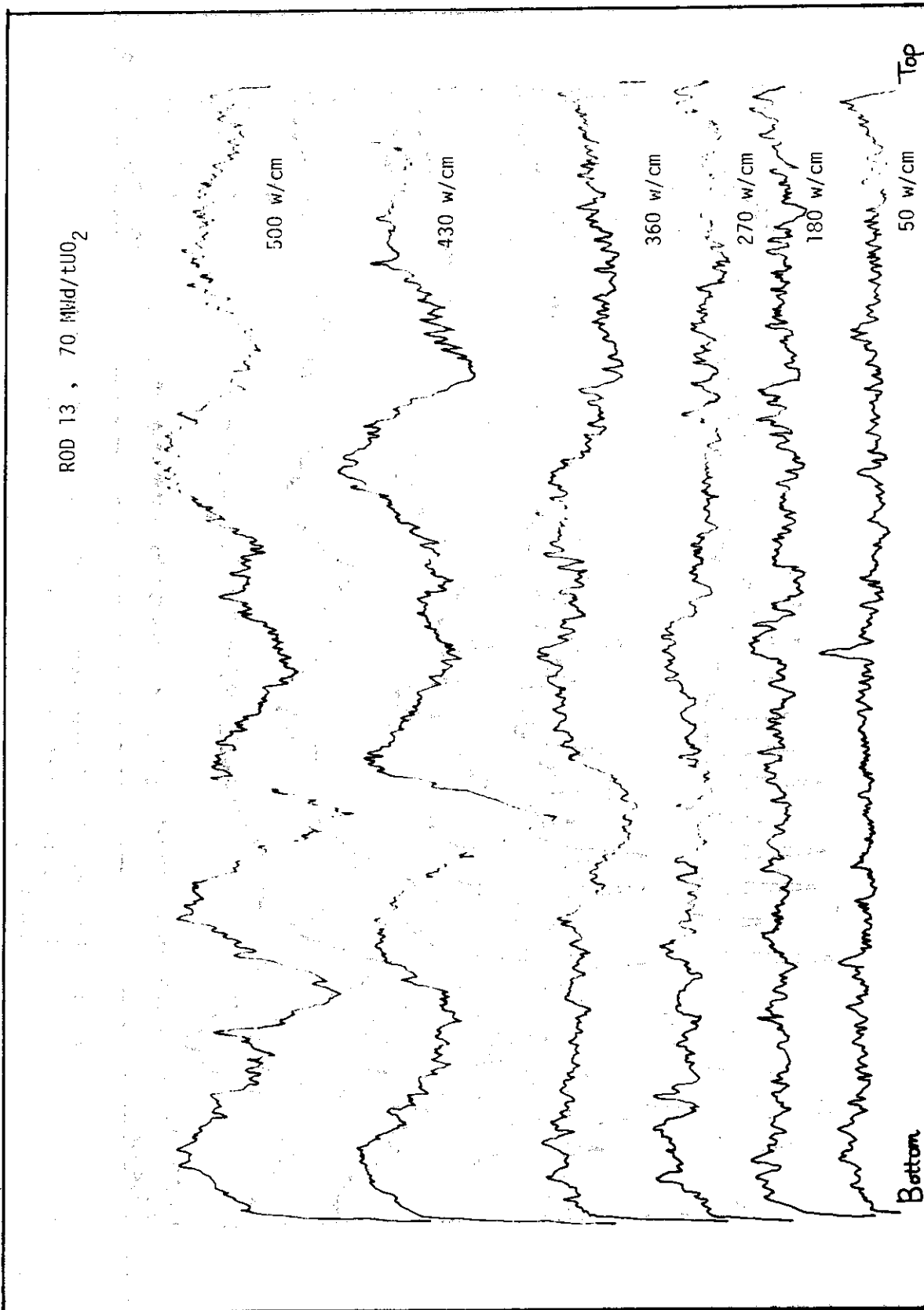


Fig. 45 Diametral deformation of rod 13 as a function of linear heat rating up to 500W/cm : burnups are 70 MWd/tUO₂

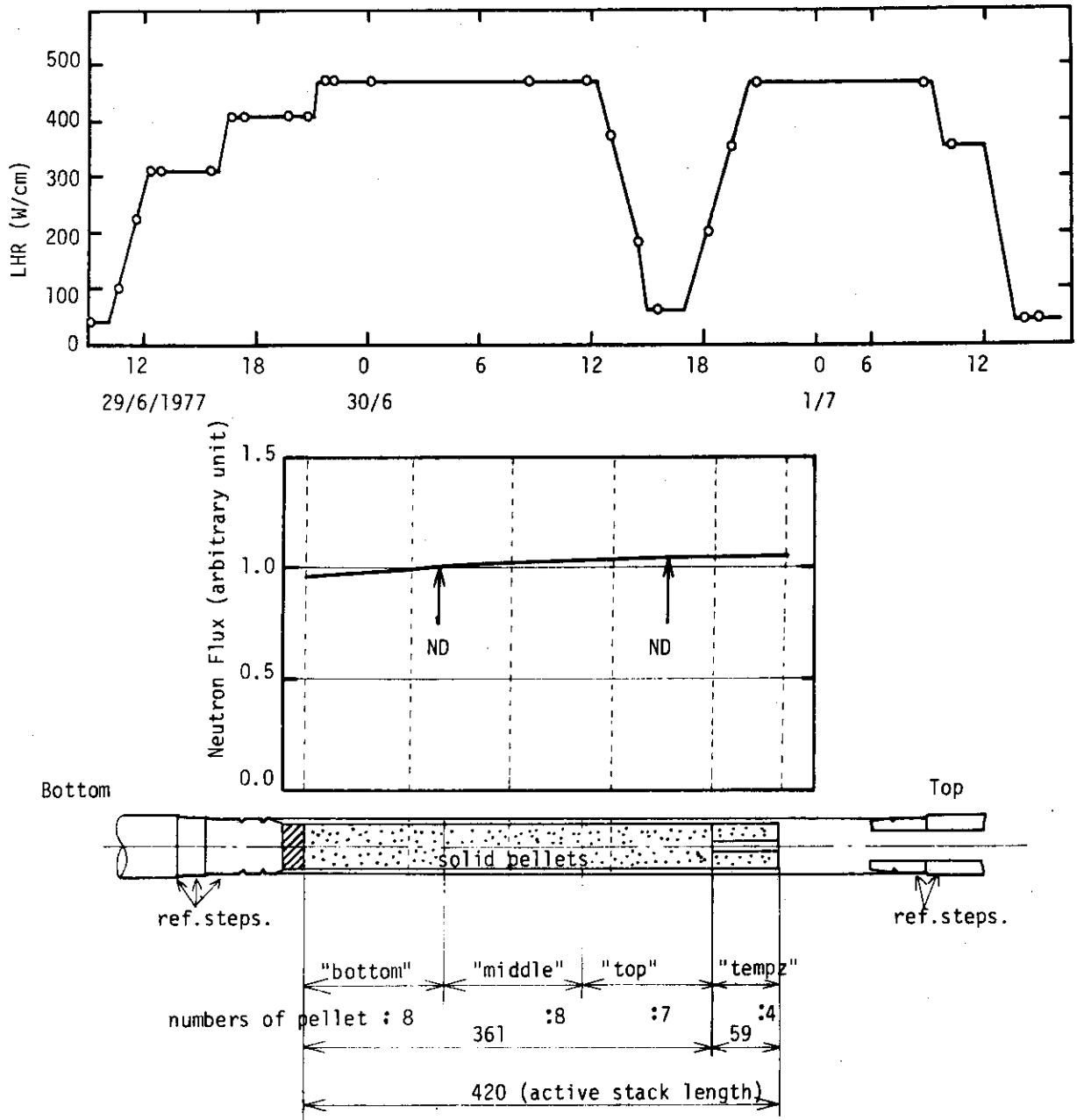


Fig. 46 upper ; power history, middle ; neutron flux distribution for the rod, lower ; partially divided fuel rod in which three regions was designated as "bottom", "middle", "top" and "tempz"

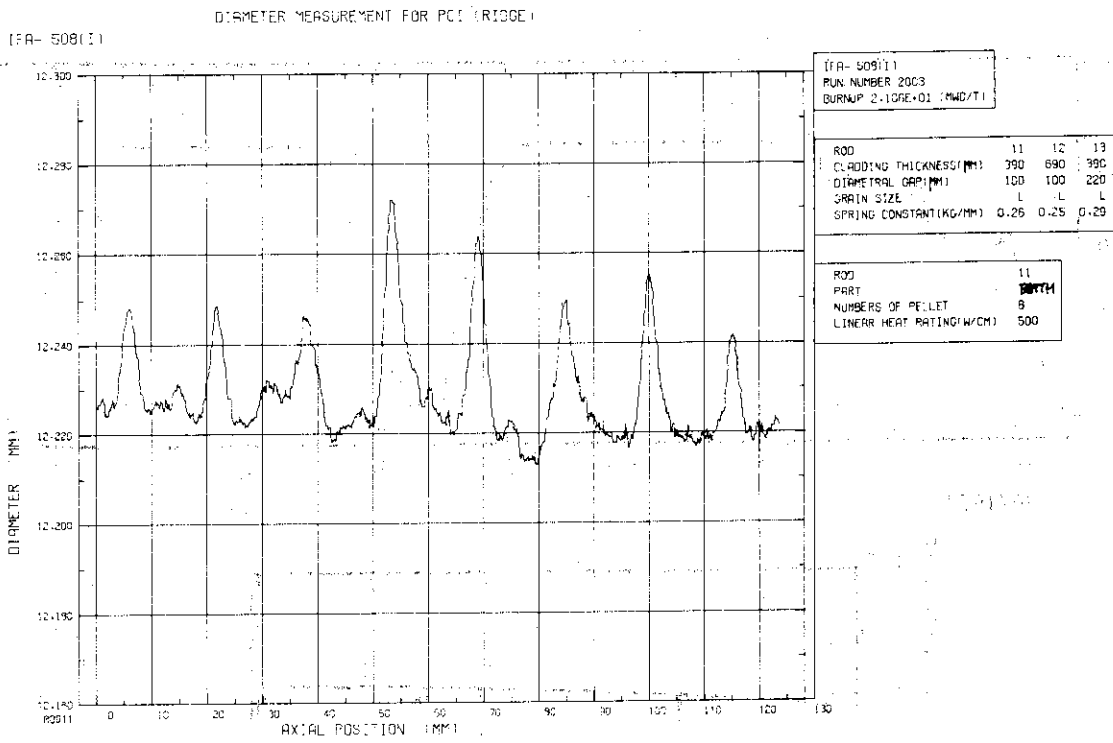


Fig. 47 Data example for diameter deformation ; rod 11, bottom part, linear heat rating 500W/cm, each divisual ridge.

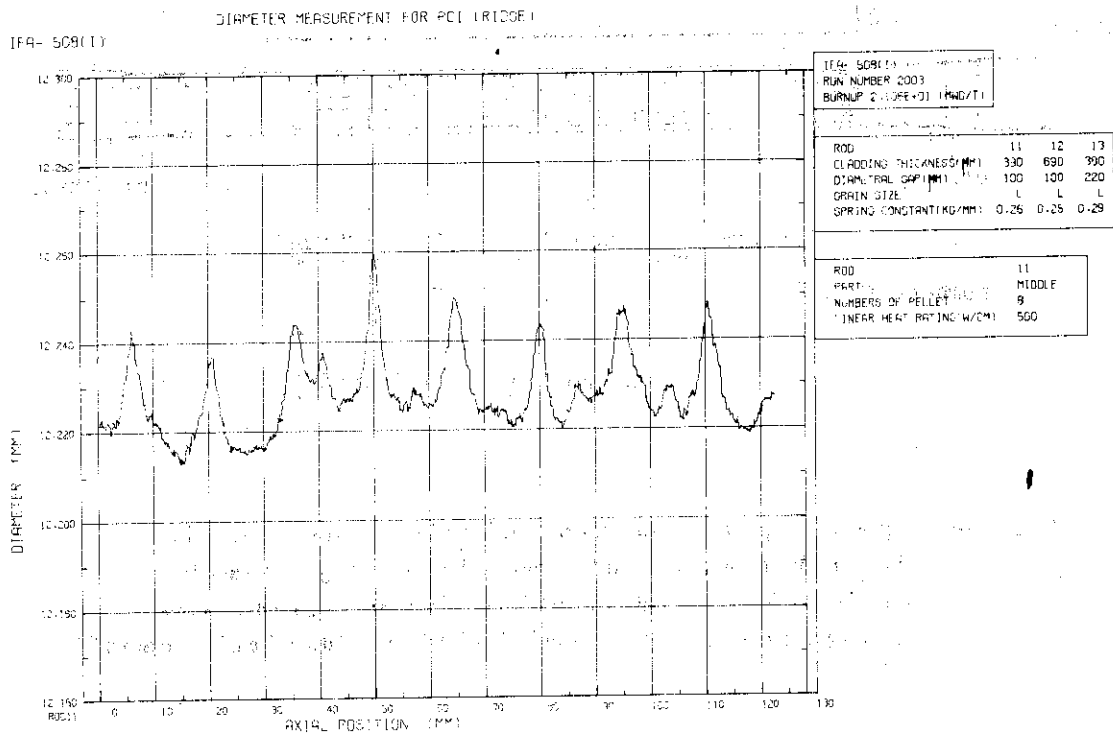


Fig. 48 Data example for diameter deformation ; rod 11, middle part, linear heat rating 500W/cm, each divisual ridge.

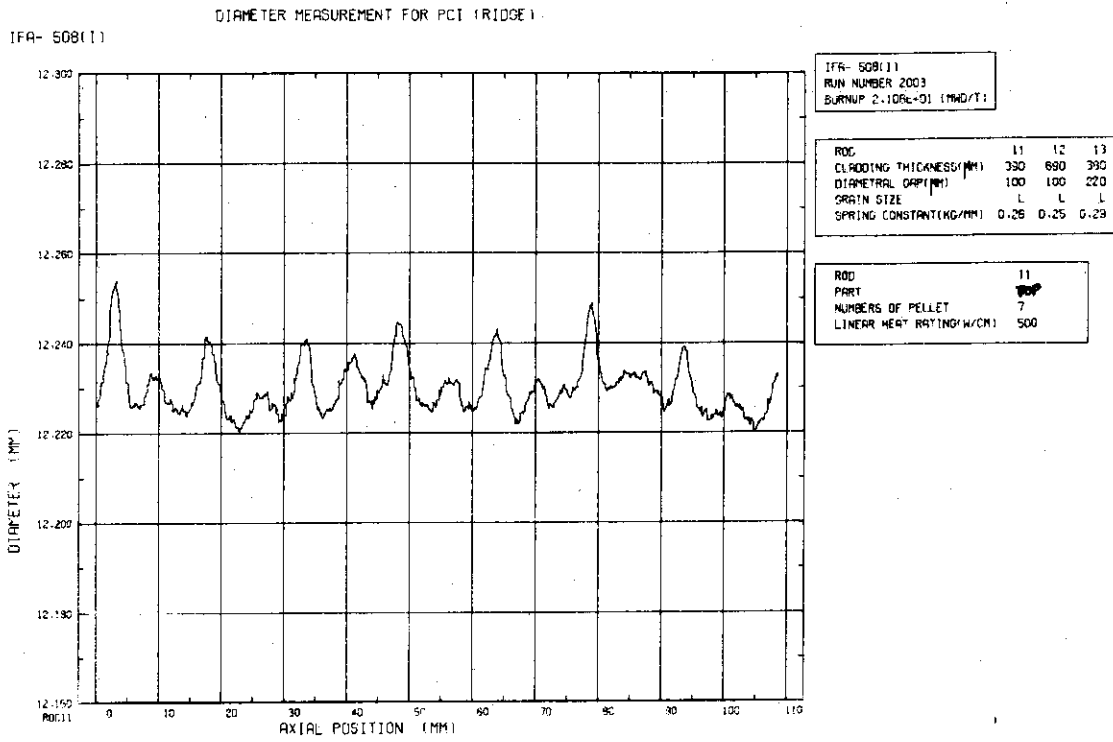


Fig. 49 Data example for diameter deformation ; rod11, top part, linear heat rating 500W/cm, each divisual ridge.

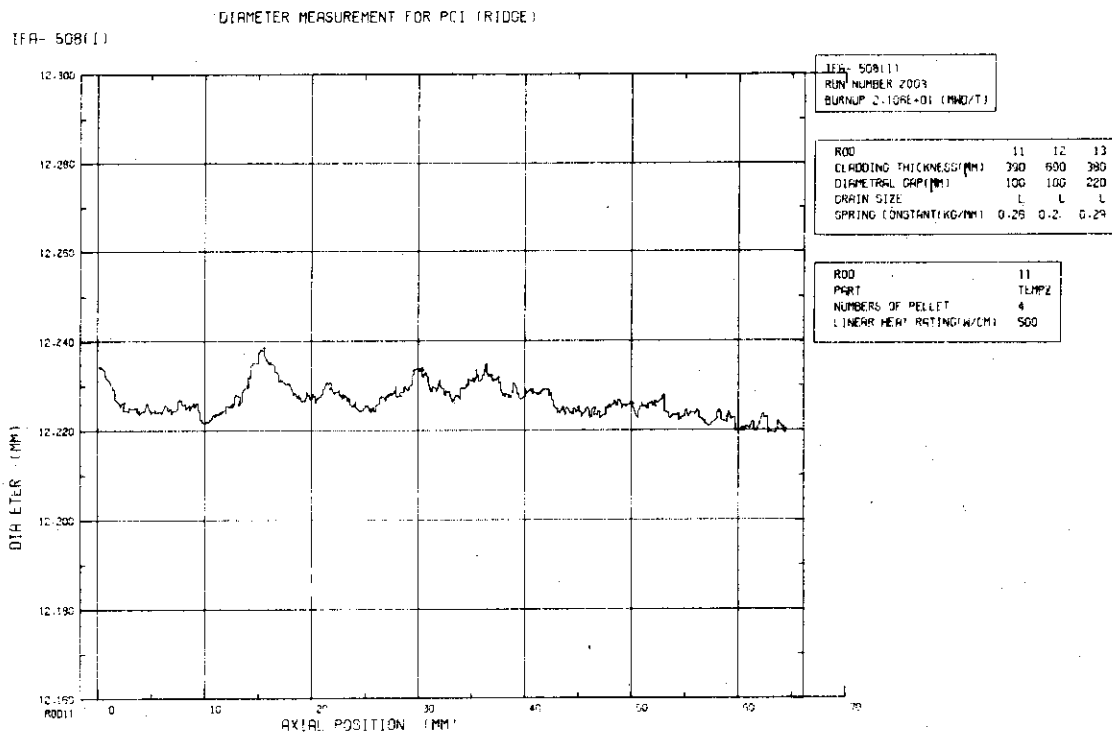


Fig. 50 Data example for diameter deformation ; rod11, tempz part, linear heat rating 500W/cm, each divisual ridge.

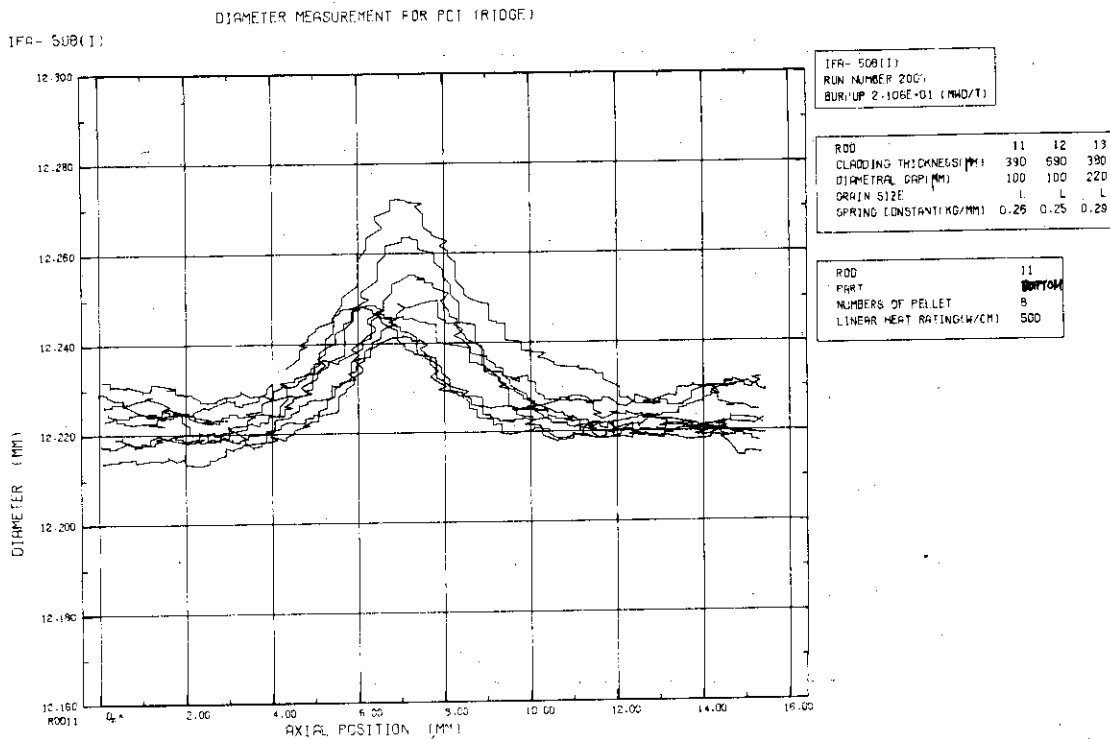


Fig. 51 one over another superposed ridges ; rod 11, bottom part, linear heat rating 500W/cm

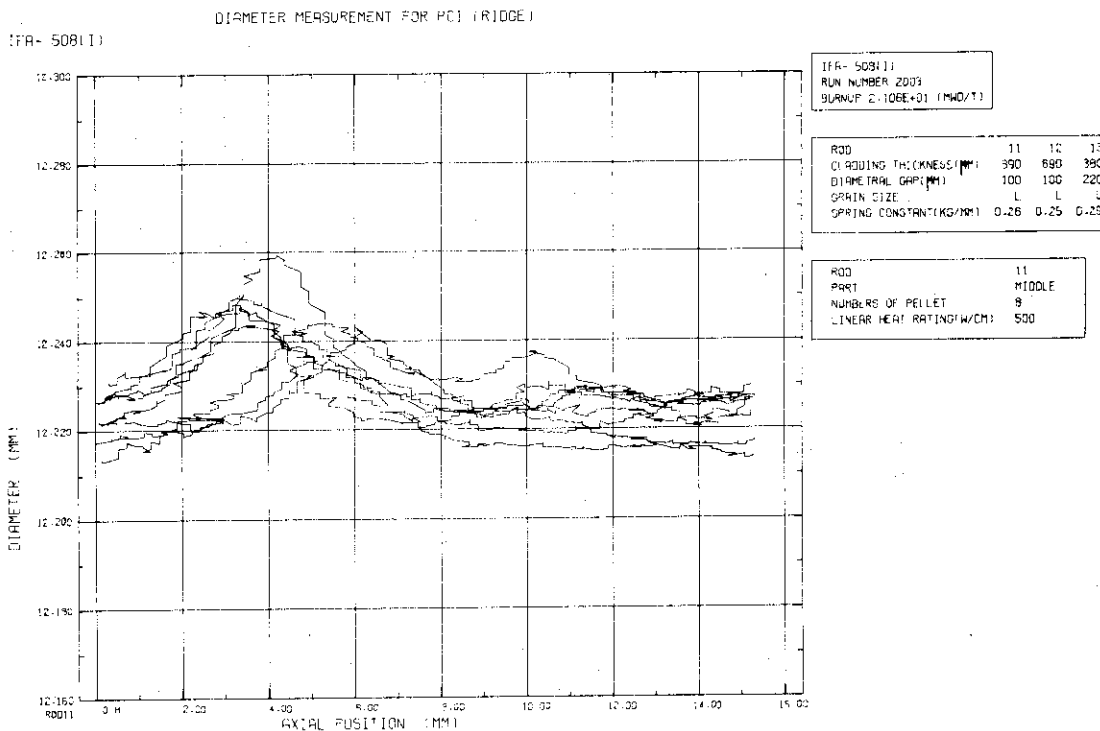


Fig. 52 one over another superposed ridges ; rod 11, middle part, linear heat rating 500W/cm

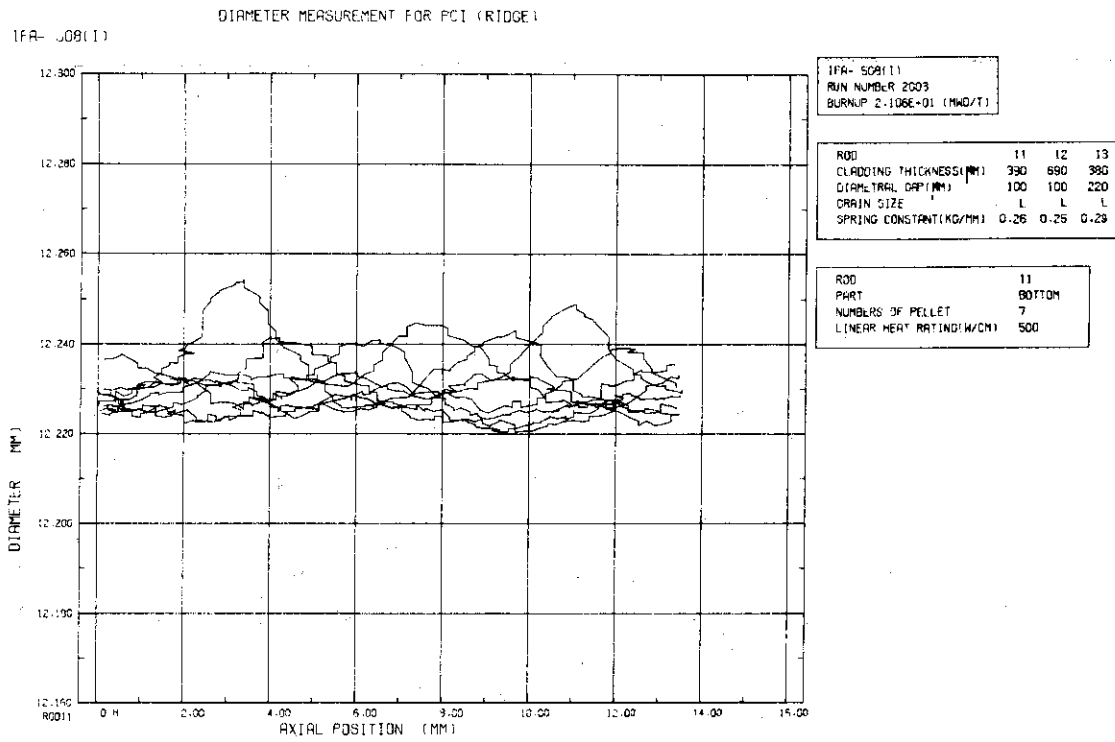


Fig. 53 one over another superposed ridges ; rod 11, top part, linear heat rating 500W/cm

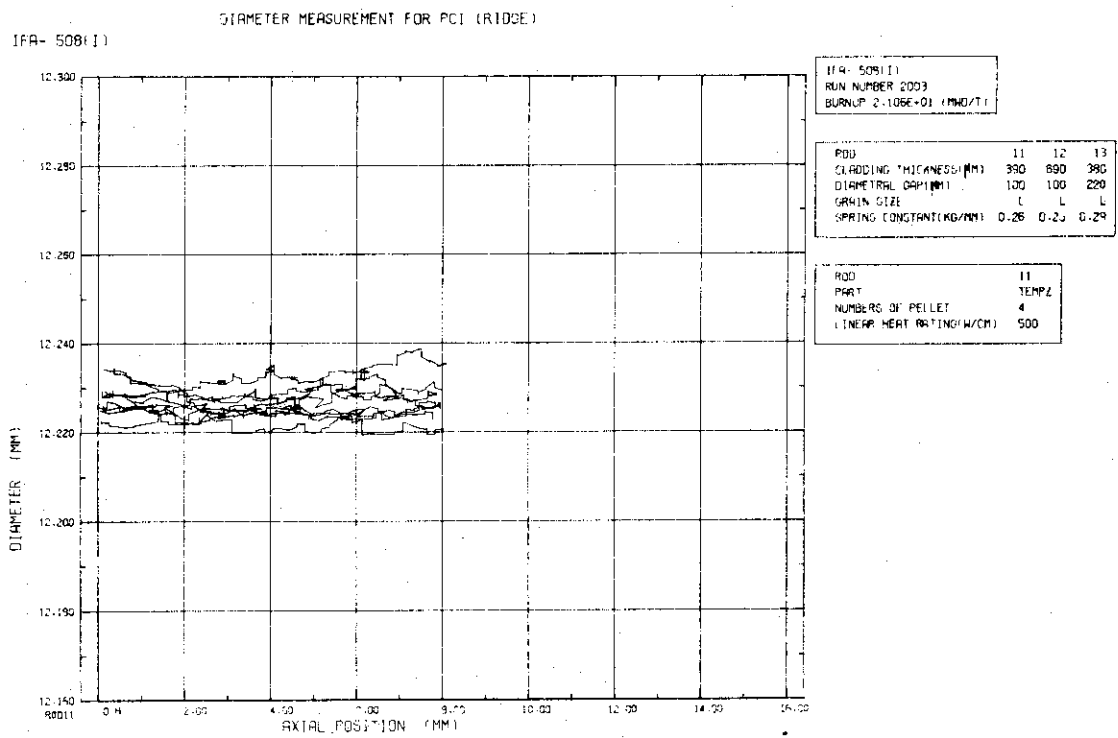


Fig. 54 one over another superposed ridges ; rod 11, tempz part, linear heat rating 500W/cm

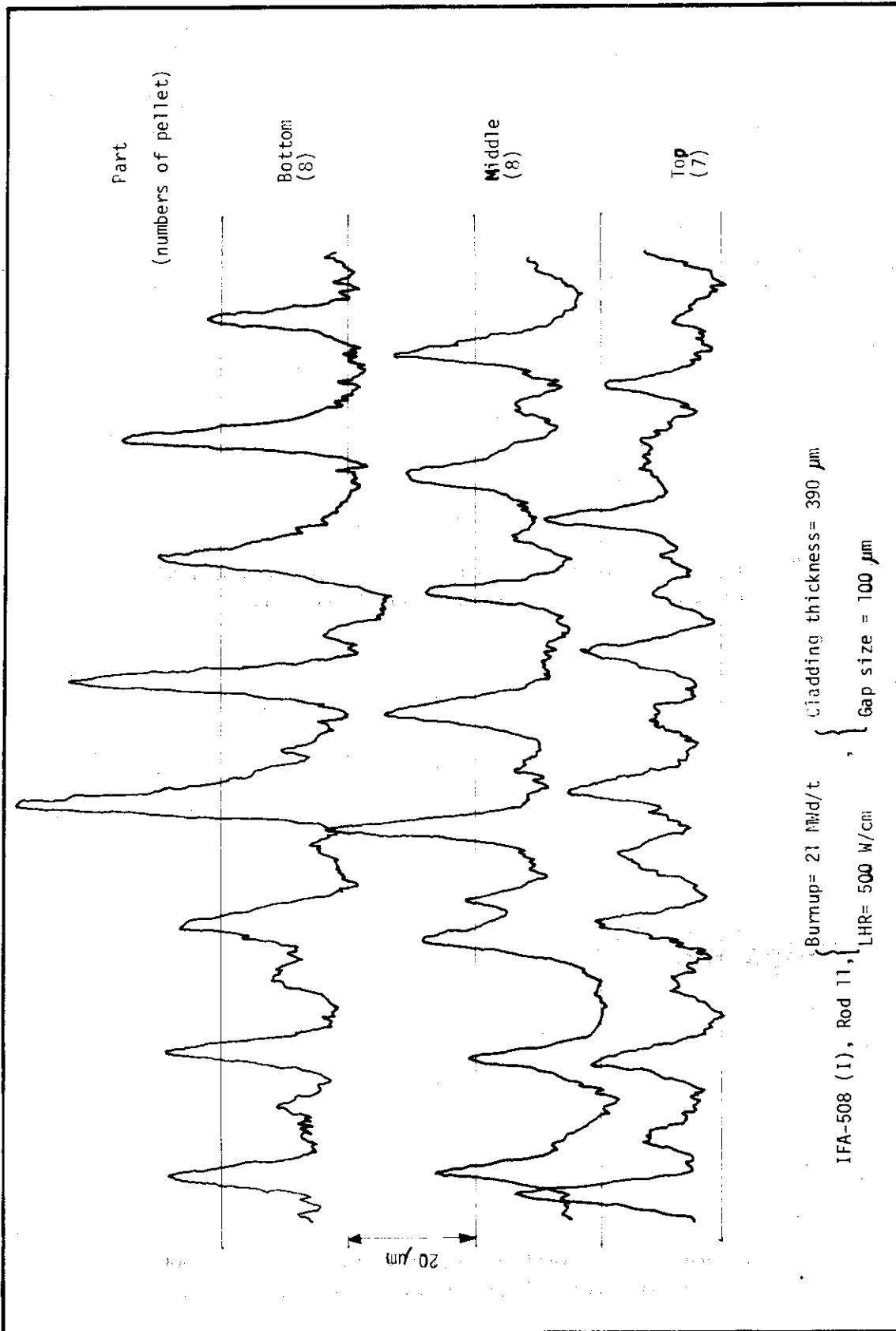


Fig. 55 Each regionally enlarged shape of ridge(rod 11)

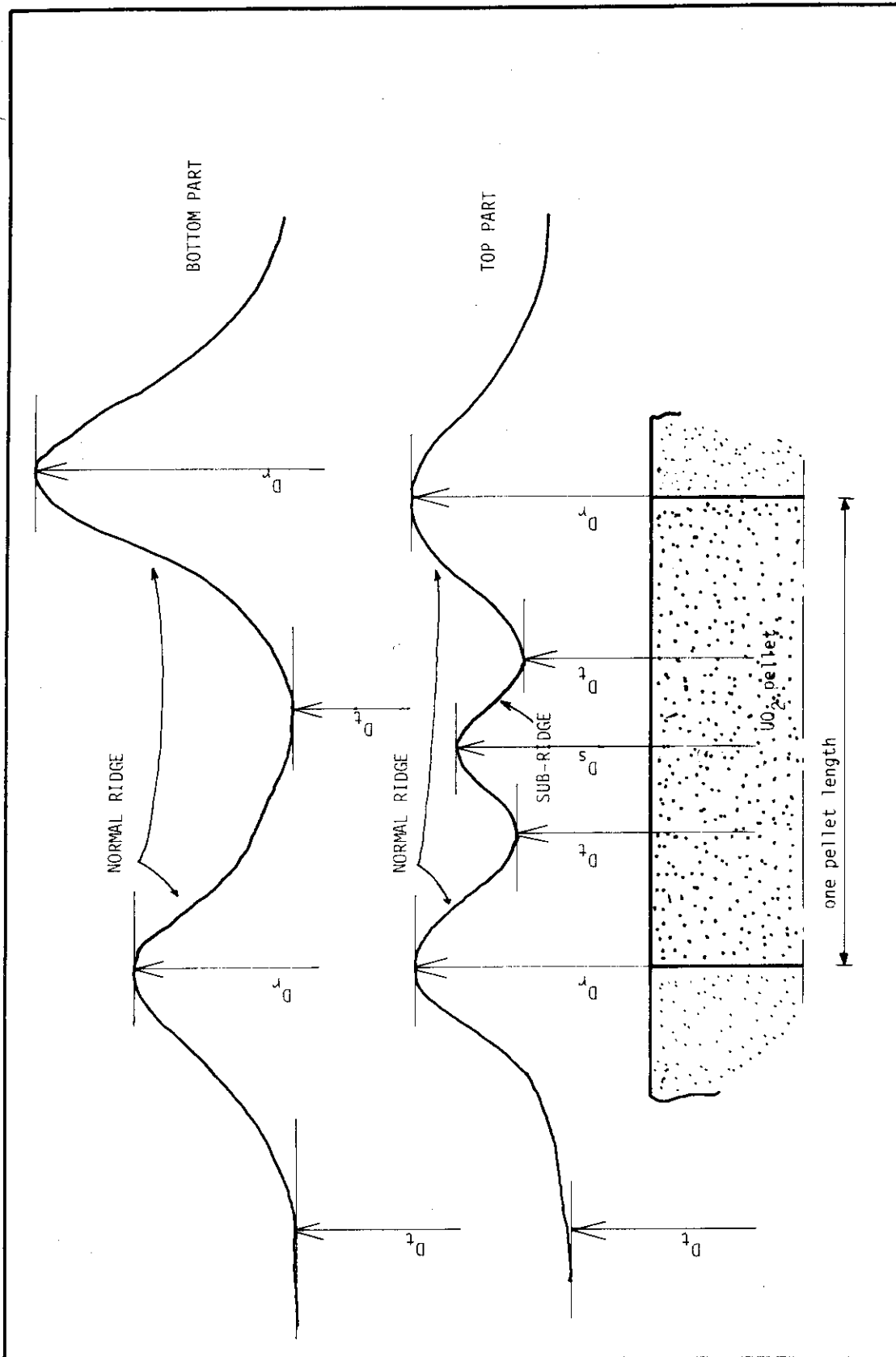


Fig. 56 Modelled ridge deformation pattern.

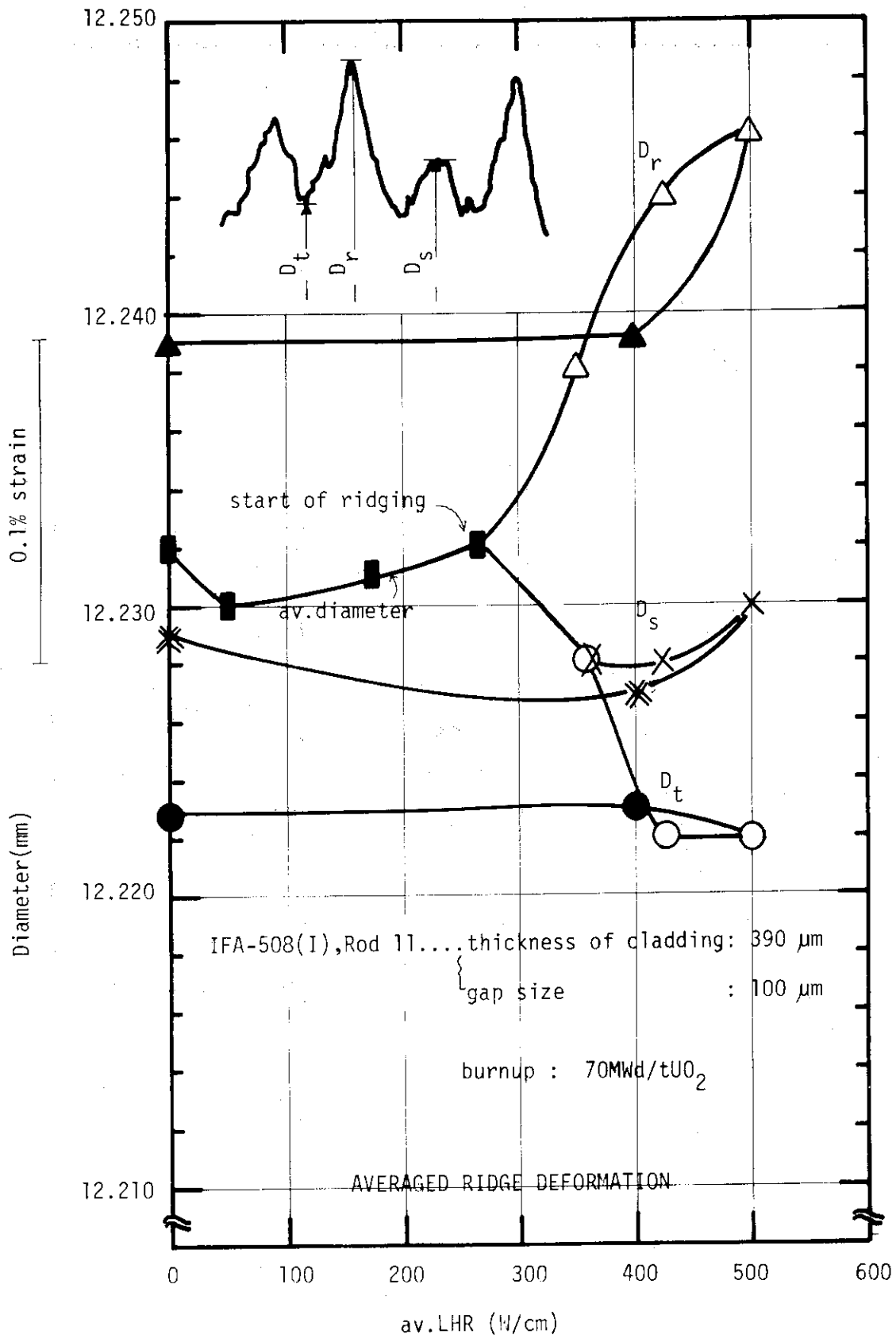


Fig. 57 Averaged diameter deformation (D_r , D_s and D_t) for rod 11 as a function of linear heating rate.

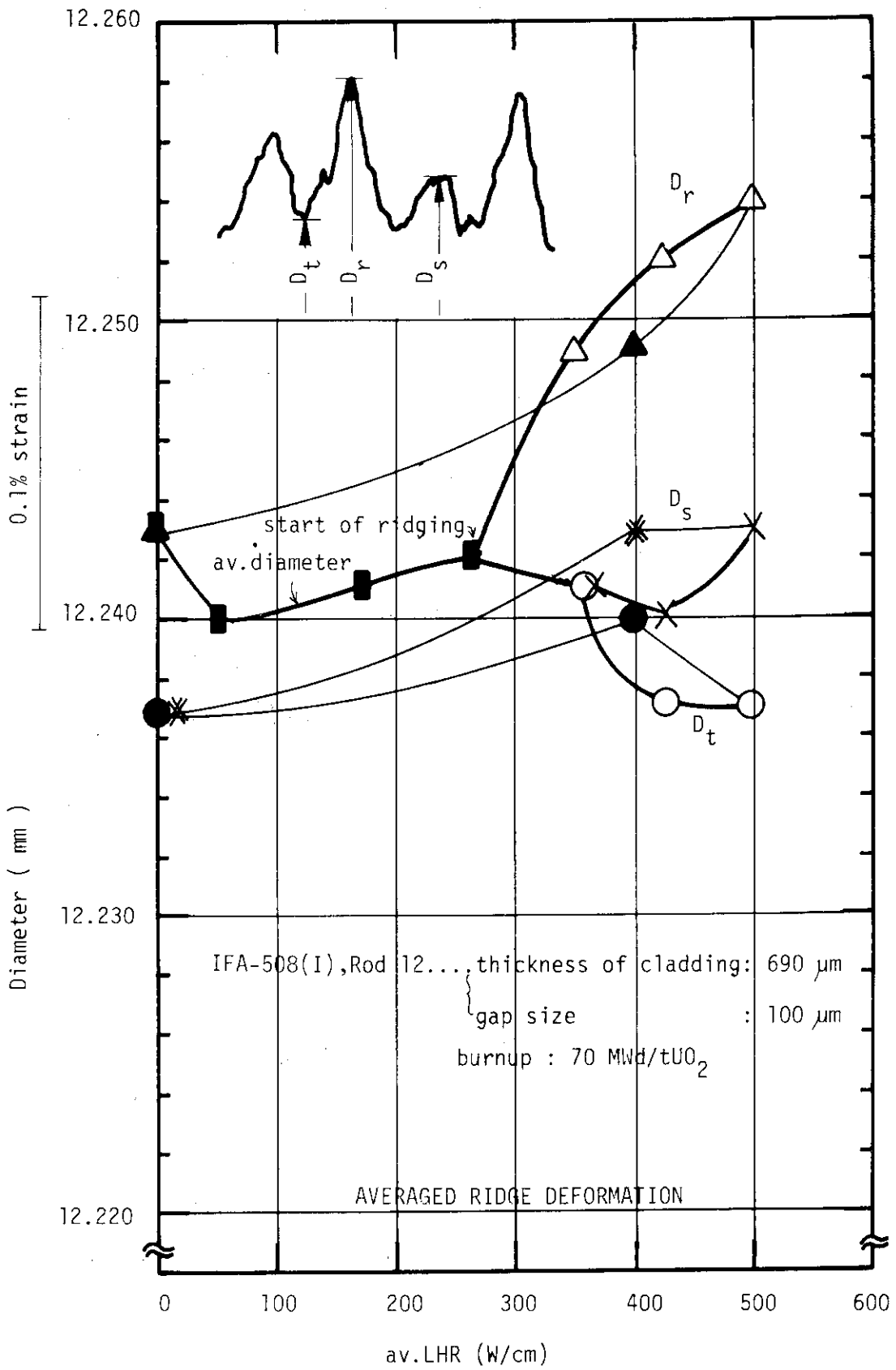


Fig. 58 Averaged diameter deformation (D_r , D_s and D_t) for rod 12 as a function of linear heat rating.

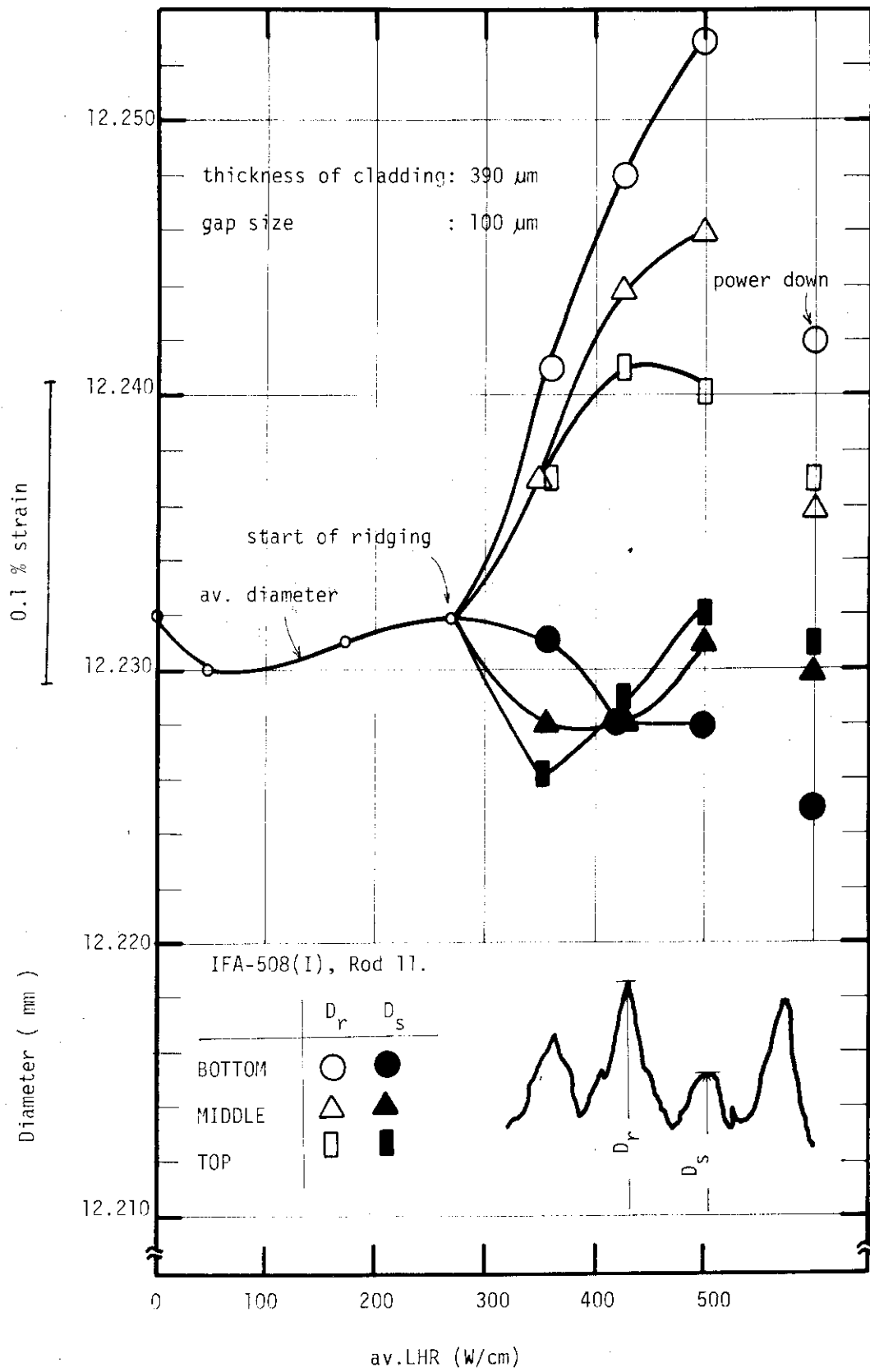


Fig. 59 Regionary divided diameter deformation (D_r , D_s and D_t) for rod 11 as a function of linear heat rating.

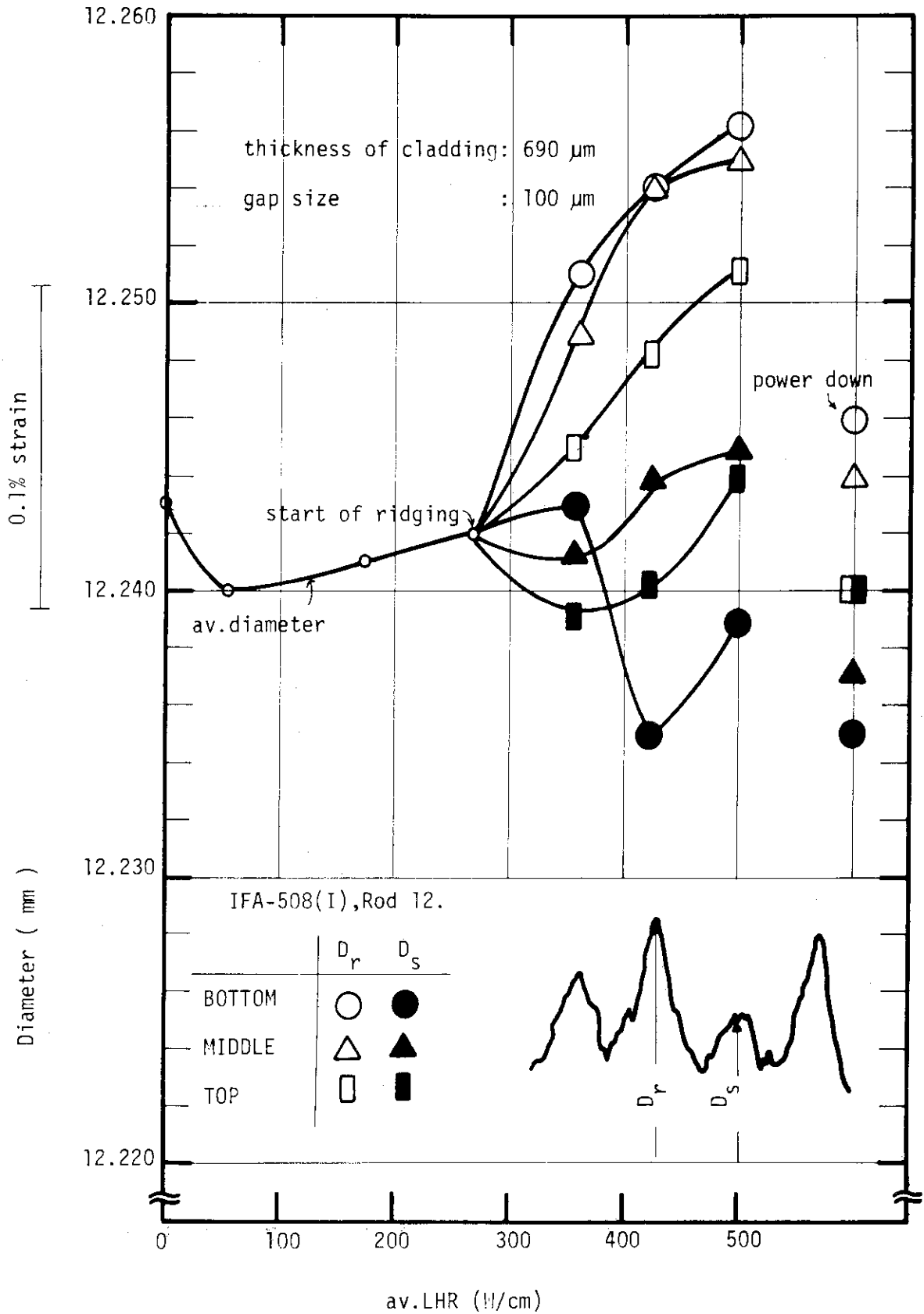


Fig. 60 Regionary divided diameter deformation (D_r , D_s and D_t) for rod 12 as a function of linear heat rating.

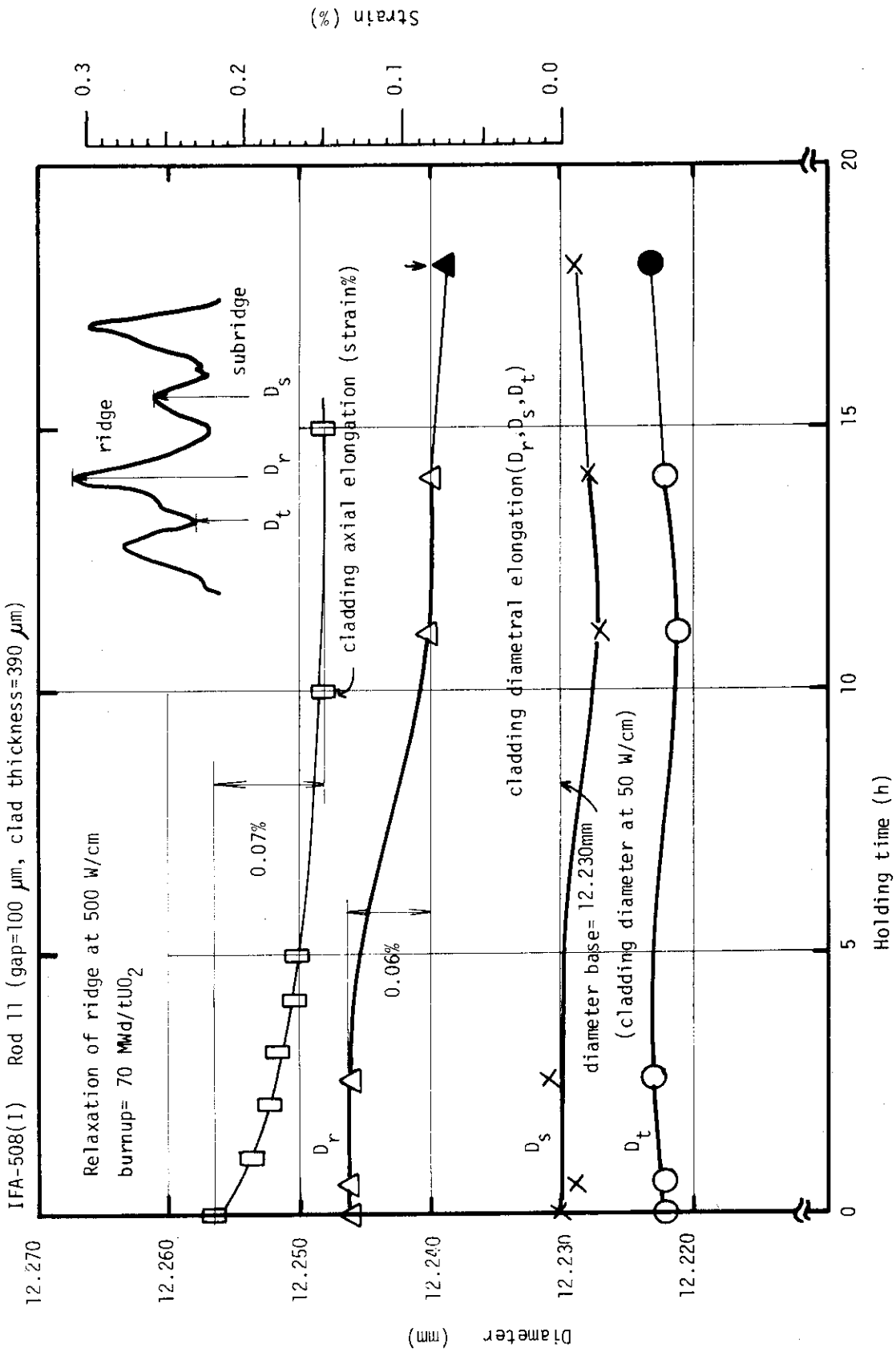


Fig. 61 Averaged ridge deformation (D_r, D_s and D_t) for rod 11 as a function of holding time (relaxation).

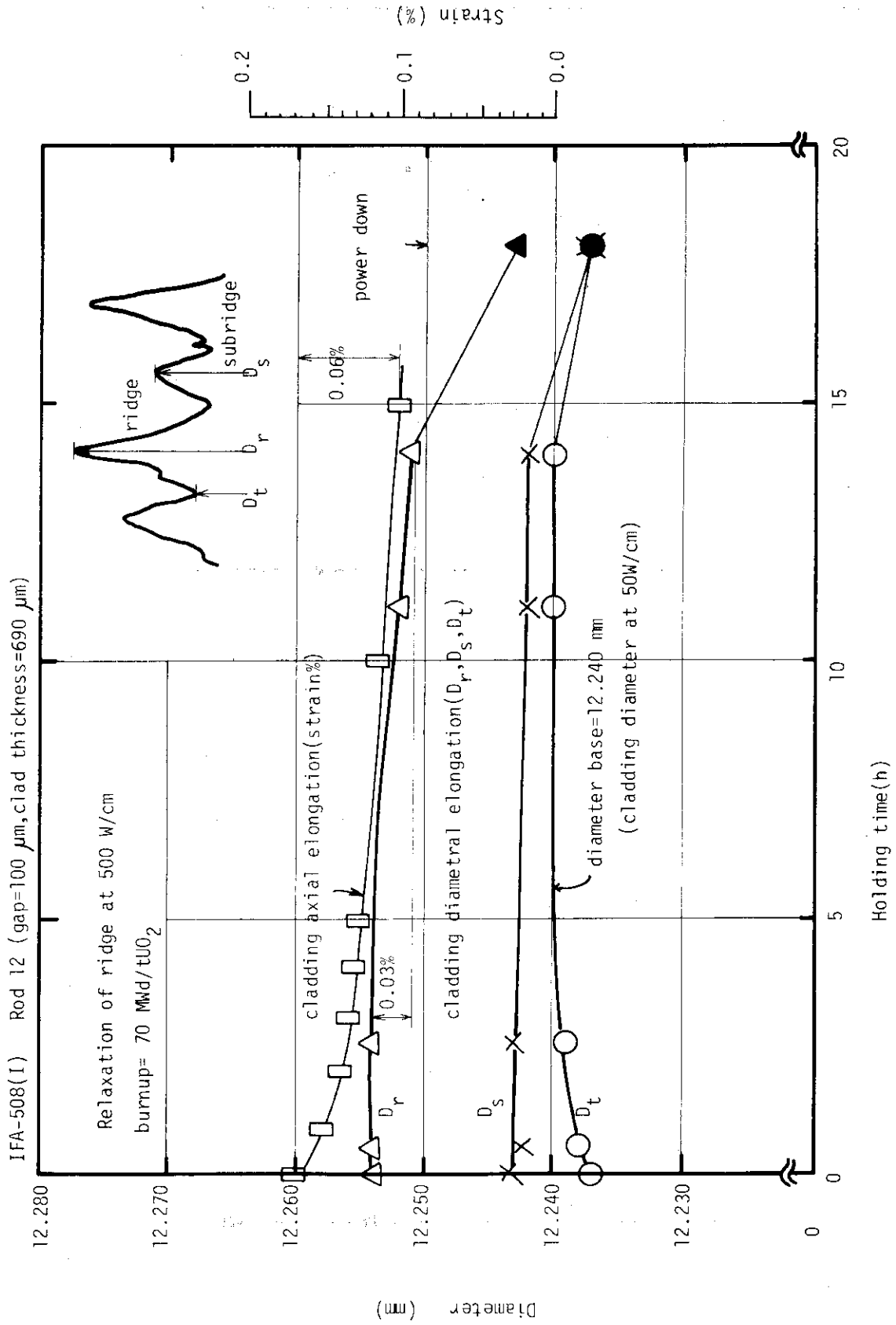


Fig. 62 Averaged ridge deformation (D_r, D_s and D_t) for rod 12 as a function of holding time (relaxation).

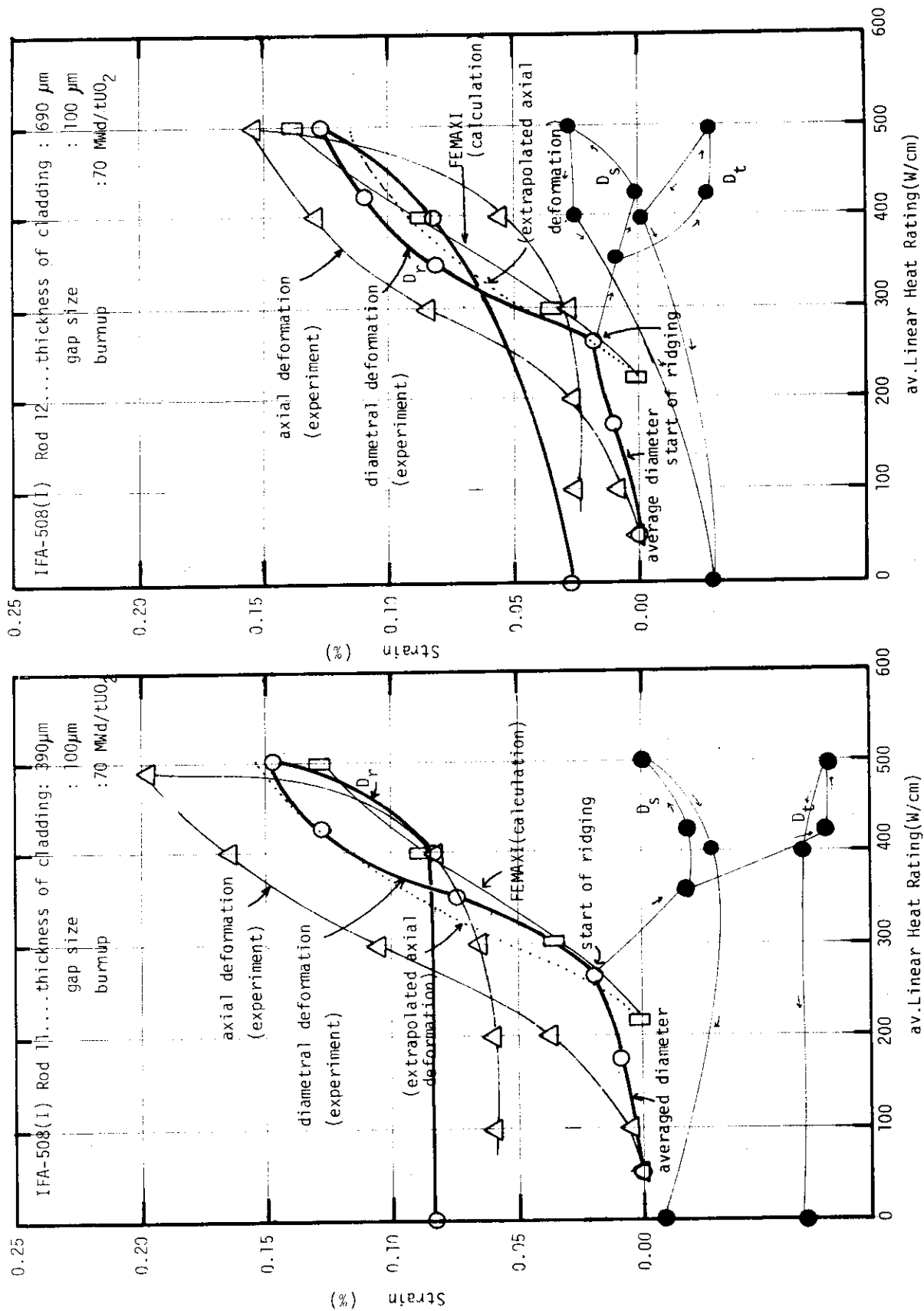


Fig. 63 Axial and diametral deformation for rod11 and rod12 (contained the calculation result by FEMAXI code) as a function of linear heat rating.