

JAERI-M

7 5 3 0

IFA-508および515の照射実験計画と
IFA-508に関するデーター速報

1978年2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 および 515 の照射実験計画と
IFA-508 に関するデータ速報

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳 澤 和 章

(1978年1月25日受理)

ハルデン炉 (HBWR) のもつ優秀な炉計装装置を利用して燃料棒中のペレット-被覆管相互作用 (PCI) の挙動解析のために直径測定用のリグ (IFA-508) を準備した。現在それを用いた照射が HBWR において進行中であるが、本報は HBWR による照射実験の実験計画についてのべるとともに、1977年6月~8月までの IFA-508 (I) についての実験データを速報したものである。

Irradiation Experiment Plans of IFA-508 and -515,
and Preliminary Data Report from IFA-508

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received, January 25, 1978)

JAERI has participated in the OECD Halden Reactor Project (in Norway) of international cooperation since 1967.

JAERI made a diameter measurement rig for studying the pellet-clad interaction (PCI) with superior instrumentation of HBWR.

Fuel irradiation with the rig in HBWR is now proceeding. Described in this report are the irradiation experiment plans and the data obtained with IFA-508(I) from June to August 1977.

Keywords: OECD Halden Reactor Project, Diameter Measurement Rig, Pellet-Clad Interaction, Experimental Plan, Irradiation, Instrumented Fuel Assemblies, Fuel Rod.

目 次

1. 実験計画	1
1.1 燃料棒の概要	1
1.2 照射計画	2
1.3 燃料棒の特徴	3
1.4 解析	4
2. IFA-508(I)の炉運転に関するデータ（1977年6月～8月）	4
2.1 炉の運転	4
2.2 TFDRへのコメント	5
2.3 機器信号	6
3. IFA-508(I)の実験データ（1977年6月～8月）	6
3.1 燃料棒の伸びのデータ	6
3.2 燃料棒中心温度のデータ	6
3.3 被覆管直径トレースのデータ	6

Contents

1. Experimental plan	1
1.1 The outline of the fuel rod	1
1.2 Irradiation plan	2
1.3 Characteristics of the fuel rod	3
1.4 Analysis of the data	4
2. Datum with reactor operation of IFA-508(I) for the period from June to August, 1977	4
2.1 Reactor operation survey for the period from June to August	5
2.2 Comments to TFDR for the period from June to August	6
2.3 Computer plots of instrumentation signals from IFA's 508 for the period from June to August	6
3. A part of experimental data of IFA-508(I) for the period June to August, 1977	6
3.1 Data for cladding elongation of fuel rod	6
3.2 Data for centre temperature of fuel rod	6
3.3 Data for diameter trace of fuel rod	6

Tables

- Table 1.1 Irradiation schedule of IFA-508/515
- Table 1.2 Table of irradiation performance and fuel number correspondence with planning and IFA'S
- Table 1.3 Characteristics of fuel and cladding prepared for IFA-508 and IFA-515
- Table 1.4 Design parameters and their relationships for IFA-508/515
- Table 1.5 List of one factor level and each rods to be compared with
- Table 1.6 IFA-508(I) Test assembly data
- Table 1.7 IFA-508(I) Operational data
- Table 1.8 IFA-515(I) Test assembly data
- Table 1.9 IFA-515(I) Operational data

Figures

- Fig. 1.1 IFA-508 installed in irradiation rig
- Fig. 1.2 IFA-508 notional drawing
- Fig. 1.3 IFA-508^I test assembly drawing
- Fig. 1.4 IFA-508 three rod diameter rig with diameter gauge (DG) instrument
- Fig. 1.5 IFA-515 test assembly drawing
- Fig. 1.6 Configuration of fuel rods and instrumentations
- Fig. 2.1 Reactor power and temperature, and start-up experiments during second quarter 1977
- Fig. 2.2 Power history of IFA-508 during second quarter on 29th, June
- Fig. 2.3 Power history of IFA-508 during second quarter on 30th, June
- Fig. 2.4 Power history of IFA-508 during second quarter on 1st, July
- Fig. 2.5 Reactor power and temperature, and start-up experiments during third quarter 1977
- Fig. 2.6 Power history of IFA-508 during third quarter in the period 9th-10th, August 1977

- Fig. 2.7 Weekly reactor operation survey for the period 13th June to 28th August, 1977
- Fig. 2.8 (continued)
- Fig. 2.9 (continued)
- Fig. 2.10 (continued)
- Fig. 2.11 (continued)
- Fig. 2.12 (continued)
- Fig. 2.13 (continued)
- Fig. 2.14 (continued)
- Fig. 2.15 (continued)
- Fig. 2.16 (continued)
- Fig. 2.17 (continued)
- Fig. 2.18 Computer plots of instrumentation signals from IFA's 508 for the period from June to August, 1977
- Fig. 2.19 (continued)
- Fig. 2.20 (continued)
- Fig. 2.21 (continued)
- Fig. 2.22 (continued)
- Fig. 2.23 (continued)
- Fig. 2.24 (continued)
- Fig. 2.25 (continued)
- Fig. 2.26 (continued)
- Fig. 2.27 (continued)
- Fig. 3.1 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.2 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂
- Fig. 3.3 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂
- Fig. 3.4 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.5 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂

- Fig. 3.6 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂
- Fig. 3.7 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.8 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂
- Fig. 3.9 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂
- Fig. 3.10 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.11 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂
- Fig. 3.12 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂
- Fig. 3.13 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.14 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂
- Fig. 3.15 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂
- Fig. 3.16 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂
- Fig. 3.17 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂
- Fig. 3.18 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400

MWd/tUO₂

Fig. 3.19 Diameter traces during first power cycle at 50 M/cm

Fig. 3.20 Diameter traces during first power cycle at 360 W/cm

Fig. 3.21 Diameter traces during first power cycle at 500 W/cm

1. 実験計画

通常運転時の燃料体の照射挙動に関して1つの大きなテーマに「ペレットと被覆管の相互作用 (Pellet-Clad Interaction, 以下略してPCI) がある。現在の通常運転時の燃料破損はこのPCIと燃料中に生成したハロゲンガスの作用による被覆管の応力腐蝕割れ (Stress Corrosion Cracking) とが組み合わされたPCI-SCC機構によるとの説が有力である。この機構を解明して燃料棒の健全性を保持するためにPCIについて正確なデータを得ることが重要である。

原研では1967年以来国際協力の一環としてOECDハルデンプロジェクト (ノルウェー) に加盟している。当研究室ではハルデン炉 (HBWR) のもつ優秀な炉計装装置を利用してPCI挙動解析の為の実験計画を立案, 実行した。現在照射は進行中でありPCIに関する有益なデータが入手されている。本論ではHBWRによる照射実験について実験計画についてのべるとともに1977年6月～8月までに入手したIFA-508(I)についてのデータを速報する。

1.1 燃料棒の概要

1.1.1 燃料棒の直径・長さを測定するリグ (IFA-508)

PCI機構を詳細に研究すること, 得た情報を使用してPCI燃料モデリングを開発するために燃料棒の直径, 長さ, 中心温度を高燃焼度の範囲まで測定することが必要である。そのために2体の照射リグを用意した。1体のリグはIFA-508と呼ばれ装荷燃料棒の直径変化, 軸方向の長さ測定が同時にできる計装設備がほどこされている。Fig. 1.1はこの燃料棒の概観を示したものである。Fig. 1.1中右側はなかに組み込まれている計装類を模式的に示したものであり, 左側は実際に組立て中の3本の燃料棒の様子を示したものである。

このリグは3本の燃料棒が同時に装荷できる (3ロッド直径リグ) が, その他燃料棒の入替が可能であって後述する様に燃焼度を蓄積した燃料棒の入れ替えがおこなえる。またハルデンプロジェクトの標準型リグ (IFA-404) 等とくらべると, Fig. 1.2にみられる直径測定素子のばね圧を軽減してより精度の高いデータを得るため素子の保持法の改良が成された。IFA-508の組立図をFig. 1.3に示す。直径測定を行なう直径ゲージが実際に燃料棒中に組みこまれている様子をFig. 1.4に示す。

以上はこの実験を通して測定を行なうものについての概説であるが, IFA-508では第1装荷燃料 {これを我々はIFA-508(I)又はIFA-508^Iと呼ぶ} 中に中心孔を持つペレットを燃料棒頂部にセットした (27ペレット中4個が中心孔付ペレット)。これは燃料棒の中心温度の測定, および直径ゲージ移動による出力変動の較正等を目的としたものである。

1.1.2 燃料棒の燃焼を蓄積するリグ (IFA-515)

照射用に用意した2体のリグのうち, 1体は前述したIFA-508であるがもう1体はいわゆるベース照射リグでIFA-508に使用する。燃料棒の燃焼度蓄積用である。このリ

グは IFA-515 と呼ばれるものでハルデンプロジェクトの標準型 PCI リグである。燃料棒は合計 6 本装荷できる。燃料棒の HBWR における軸方向位置は IFA-508 のものと合わせてあり 6 本が同一円周上に配置されている。

照射中の計装として燃料棒の出力測定、軸方向伸び、破損検出が行なえる様な設備をもっている。Fig. 1.5 に IFA-515 の組立図を示す。

1.2 照射計画

PCI 挙動解析のための照射燃料体 IFA-508 の照射期間には約 3 ケ年を計画している。Table 1.1 は照射計画表である。HBWR での運転は 1 年を 4 期 (1 月～3 月, 4 月～6 月, 7 月～9 月, 10 月～12 月) に分割し, 1 期ごとに炉運転と炉停止を行ない燃焼の進行, 燃料体の取替等の作業を行なっている。

直径測定リグ IFA-508 についての燃料体は大きく分けて 3 群に分割した。第 1 群は新燃料で計画上これを燃料 I, II とした。第 2 群はある程度燃焼の進んだものでこれを燃料 I_{irr} , II_{irr} とした。第 3 群は第 1 群の燃料の燃焼度を蓄積したもので, 燃料棒自体は第 1 群のものを使う。これを燃料 I_{reirr} , II_{reirr} とした。各燃料群の大体の照射時期は Table 1.1 に示す通りである。

ハルデンプロジェクトでは装荷した計装燃料集合体に IFA-(Instrumented Fuel Assembly) 番号を付けるので今我々の計画した燃料体番号と IFA 番号の対応表が必要である。Table 1.2 は照射実行予定と先程の計画番号-IFA 番号との対応を示す。表より計画番号 I→I, II→II, I_{irr} →III, …等に対応がはっきりつくので以下では番号は全て IFA 番号を使用する。

IFA-508 (I, II) は新燃料で装荷し, IFA-508 (II) の燃焼度が約 7 GWd/t に到達した時点で IFA-508 の照射孔から抜き出し燃焼度蓄積用の IFA-515 の方に入れる。そこで約 9 GWd/t 程度の燃焼を行なったのち再び直径測定リグ (IFA-508) の方に移しかえて { その時点での燃焼度は 16 GWd/t であるから } 16 GWd/t → 20 GWd/t の高燃焼度における燃料棒の PCI 特性について調べる様になっている。この 16 GWd/t で直径測定リグに移しかえられた時点で IFA-508 (I) は IFA-508 (V) に, IFA-508 (II) は IFA-508 (VI) という呼称になる。

IFA-508 (III, IV) は燃焼度をすでに IFA-515 で 7 GWd/t 蓄積した燃料であって, これを IFA-508 に移しかえたのち 6 GWd/t 程度の燃焼を与えて燃料棒の変形挙動を調べたのち IFA-508 より取り出すことになっている。

直径測定リグの計装類の配置の模様を Fig. 1.6 に示す { これは IFA-508 (I) の燃料棒配置図であるが他もおお旨同様なものとなる }。3 本の燃料棒は約 120° ずつ分離しておかれそれぞれに伸び計 (EC), 直径測定ゲージ (DG) が付いている。この IFA-508 (I) に限り燃料中心温度測定用の熱電対 (TF) も付いている。各燃料棒位置から 40° の位置に中性子検出器 (ND) が 5 つおかれている。ND 1 および 2 は燃料体頂部, ND 3 ~ ND 5 は燃料体の中央部の同一平面内に取り付けられて半径方向, 軸方向の中性子の測定を行なって出力表示をする様になっている。

1.3 燃料棒の特徴

HBWRで照射を行なう燃料はそれぞれ被覆管、燃料の UO_2 ペレット、押えばね等の実験因子を考慮して6種類(A, B, C_I , C_{II} , D, E)製造した。その概要をTable 1.3に示す。各種類中には2体の燃料体が含まれている。例えば種類Aは棒11と棒32から成っている如くである。Table 1.3にはA~Eの対応する各棒の番号と共にそれがIFA-508の何番に相当するかも示してある。すなわち棒11, 12, 13はIFA-508(I)および高燃焼度ではIFA-508(V)となる。また棒27, 18, 14はIFA-508(II)として3ロッド直径リグ中に装荷された測定が行なわれたのち一定期間燃焼度をかせぎ再びIFA-508(VI)として直径測定に供することになる。

Table 1.3はその他に次の様な特徴があることがわかる。

- (1) UO_2 ペレットの粒度を大と小に分けペレットの核的、熱的特性に及ぼす粒度の効果を調べる。
- (2) SiO_2 を添加してペレットのクリープ特性をかえ、被覆管に及ぼすペレットクリープの効果を調べる。
- (3) ペレットの押えばねのばね定数を大と小に変えばね強さが伸びと直径変化に及ぼす効果を調べる。
- (4) 被覆管の肉厚を変え、被覆管変形時の力学的抑制効果を調べる。
- (5) ギャップ幅を変え、これがPCIに及ぼす効果を調べる。
- (6) 一部の燃料に温度測定用の孔付ペレットを用意しペレット中心温度を測定しギャップ幅との関連からギャップコンダクタンスを評価する。

PCIに関する燃料因子効果をまとめてTable 1.4に示した。これはデータ解析の際その因子効果についてみる場合に役立つものである。表中には3因子水準のものまで示した。例えば

- (1) A(棒11と32)自身は他の設計因子が全部同一値に揃っているから燃焼度と共にその伸び(径方向と長さ方向の伸び)と直径変化がどの様にかわるかを調べることが可能である。棒11については燃料の中心温度も調べられる。
- (2) A(棒11と32)とB(棒12と31)は被覆管の厚みのみが異なっており(Bが約2倍厚い)それ以外の因子は同一であるから燃焼度の進行にしたがって各線出力値における被覆管の伸び(径および長さ方向)、直径変動を測定することができる。それによって被覆管厚みのPCIに及ぼす効果等を調べることが可能である。
- (3) A(棒11と32)と C_{II} (棒27と29)はギャップとばね力が異なるのみで他因子は揃っている。Aと C_I でPCI特性に及ぼすギャップ効果が推定できるからこれに基づいてAと C_{II} では更にばね力が加わった場合にどの様になるかという相乗効果が調べられる可能性がある。
- (4) B(棒12と31)と C_{II} (棒27と19)はギャップ、ばね力および被覆管肉厚が同じである。この比較は3因子比較なので簡単ではないが、例えば(3)でギャップとばね力の効果をはっきりしていればそれに被覆厚みの因子が加わった効果について言及できる可能性がある。

以上1~3因子の変数を持つデータ比較の例を(1)~(4)で説明して来たが他の場合も同様にいろいろな相乗効果の検討を行なう予定でいる。特に1因子しか設計因子が異なっていない場合はその効果がはっきりとするので、これについては表にまとめてTable 1.5とした。例えばA(棒

11と32)とD(棒18と21)の比較により粒度による変形挙動の変化を調べられる。比較対象となる例えばAは燃料棒2体より構成されておりそれぞれが異なる燃焼度、線出力下で実験をうけるので、データーの再現性を調べることもあわせて可能である。

1.4 解析

ハルデンプロジェクトより送付されて来たデーターは当研究室にて解析される。得たデーターの解析結果は適当な期間をまとめてレポートする予定であるが、更にその結果は当研究室で開発しているプログラムコード、

- (イ) FEMAXI ……………直径変化用プログラム
- (ロ) FREG-3 ……………燃料中心温度プログラム

等に照合用のデーターを供給する予定である。

また解析が進むに連れて明らかになった事象については燃料体の照射挙動についてモデリングを行ない新たに理論解析や計算コードを作る予定である。

2. IFA-508(I)の炉運転に関するデーター 〈1977年6月～8月〉

IFA-508の初装荷は1977年6月であった。これはTable 1.2およびTable 1.3を参照すれば明らかな様にIFA-508(I)として約7GWd/tまで燃焼が進められる予定のもので燃料棒は3本、棒11、12および13から構成されている。Table 1.6はIFA-508(I)に関する試験燃料体のデーター集を一覧表にしたもの、またTable 1.7はIFA-508(I)に関する運転データーの一覧表である。同様にIFA-515(I)についての試験燃料体データー集をTable 1.8に、運転データーをTable 1.9に示した。

2.1 炉の運転

IFA-508(I)はホットループ内での燃料棒形状テスト(全長にわたる直径プロフィールを温度を適宜かえて測定したテスト)終了後、HBWR炉心位置4-13にセットされた。

(イ) 第1回直径測定(6月29日～7月1日, 1977年)

6月29日、30日の両日に渡ってリグの熱電対較正、出力測定、ガンマ加熱(the gamma heating)較正等が実施された。同時期の炉運転の状況をFig. 2.1に示す。

また6月29日、30日および7月1日にわたって直径測定が上下1往復として合計26往復実施された。直径ゲージによる被覆管の直径測定には1回ごとに測定番号(run number)がつけられている。Fig. 2.2～Fig. 2.4は出力履歴と測定番号との対応を示すものであり奇数番は上方(燃料棒の下部から頂部に向かう)測定、偶数番は下方(燃料棒の頂部から下部に向かう)測定に対

11と32)とD(棒18と21)の比較により粒度による変形挙動の変化を調べられる。比較対象となる例えばAは燃料棒2体より構成されておりそれぞれが異なる燃焼度、線出力下で実験をうけるので、データの再現性を調べることもあわせて可能である。

1.4 解析

ハルデンプロジェクトより送付されて来たデータは当研究室にて解析される。得たデータの解析結果は適当な期間をまとめてレポートする予定であるが、更にその結果は当研究室で開発しているプログラムコード、

(イ) FEMAXI ……直径変化用プログラム

(ロ) FREG-3 ……燃料中心温度プログラム

等に照合用のデータを供給する予定である。

また解析が進むに連れて明らかになった事象については燃料体の照射挙動についてモデリングを行ない新たに理論解析や計算コードを作る予定である。

2. IFA-508 (I) の炉運転に関するデータ 〈1977年6月～8月〉

IFA-508の初装荷は1977年6月であった。これはTable 1.2およびTable 1.3を参照すれば明らかな様にIFA-508(I)として約7GWd/tまで燃焼が進められる予定のもので燃料棒は3本、棒11, 12および13から構成されている。Table 1.6はIFA-508(I)に関する試験燃料体のデータ集を一覧表にしたもの、またTable 1.7はIFA-508(I)に関する運転データの一覧表である。同様にIFA-515(I)についての試験燃料体データ集をTable 1.8に、運転データをTable 1.9に示した。

2.1 炉の運転

IFA-508(I)はホットループ内での燃料棒形状テスト(全長にわたる直径プロフィールを温度を適宜かえて測定したテスト)終了後、HBWR炉心位置4-13にセットされた。

(イ) 第1回直径測定(6月29日～7月1日, 1977年)

6月29日, 30日の両日に渡ってリグの熱電対校正, 出力測定, ガンマ加熱(the gamma heating)校正等が実施された。同時期の炉運転の状況をFig. 2.1に示す。

また6月29日, 30日および7月1日にわたって直径測定が上下1往復として合計26往復実施された。直径ゲージによる被覆管の直径測定には1回ごとに測定番号(run number)がつけられている。Fig. 2.2～Fig. 2.4は出力履歴と測定番号との対応を示すものであり奇数番は上方(燃料棒の下部から頂部に向かう)測定, 偶数番は下方(燃料棒の頂部から下部に向かう)測定に対

応している。直径測定によって得たデータの解析については別報を準備しているのでここでは単に出力履歴を示すのみにする。

(ロ) 第2回直径測定 (8月9日～10日, 1977年)

第2回の直径測定スキャンは8月9日～10日にかけて5往復行なわれた。その時点での炉出力履歴をFig. 2.5に、また直径測定番号と出力履歴の対応を示す図をFig. 2.6に示す。またFig. 2.7 - Fig. 2.17には当該期間での炉運転 (6月13日 - 8月28日) 情況を示す。

2.2 TFDR へのコメント

試験燃料データ報告 (Test Fuel Data Report ; TFDR) へのコメントがハルデンプロジェクトより出ているので当該期間に相当する部分につき記しておく。

期間 ; 1977年6月28日から8月26日まで

(i) 炉運転

5月21日の計画炉停止後6月28日起動した。IFA-508 (I)はこのサイクルより照射開始となった。

7月2日から7日にかけてIFA-508 (I)の出力低下があり62 kWから55 kWに出力が変動した。

燃焼度は次の通りである。

IFA番号	期間当初	期間末の燃焼度 (MWd/t UO ₂)	増加量
508	0	2071	2071

(ii) 計器の作動状態

今期中データ損失は生じなかった。

(iii) IFA-508 (I) 出力較正式

- NDの平均読みから燃料集合体出力への変換に用いる出力定数 (Power constant) Kgの値に0.56 kW/nAを用いる。

- 5基のNDからの読みを用いた集合体の出力と平均線出力式は次の様に定義する。

$$\bar{ND} = \frac{1}{6} (ND_3 + ND_4 + ND_5) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{ND_1}{ND_3} + \frac{ND_2}{ND_4} \right) \right\} \dots\dots\dots ①$$

- 実効スタック長420 mm (エンドペレット2つを含む) を用いた平均線出力 :

$$LHR (W/cm) = \frac{1000}{42.0 \times 3} QA (kW) \dots\dots\dots ②$$

核分裂物質量の違いを考慮して3本の燃料棒のLHRの分布は燃料中心位置、同一平面上に等間隔に並んだND-3, 4および5の読みから外挿を行なう :

$$LHR (i) = LHR \times \frac{N(i)}{ND(u)} \dots\dots\dots ③$$

(i = 11, 12, 13)

ここに

$$\begin{aligned} \overline{ND}(u) &= \frac{1}{3} (ND3 + ND4 + ND5) \\ N(11) &= 1.016 (-0.044 \times ND3 + 0.641 \times ND4 + 0.403 \times ND5) \\ N(12) &= 0.975 (0.641 \times ND3 + 0.403 \times ND4 - 0.044 \times ND5) \\ N(13) &= 0.991 (0.403 \times ND3 - 0.044 \times ND4 + 0.641 \times ND5) \end{aligned} \quad \text{④}$$

また燃料中心温度測定を行なう熱電対での局所的な線出力は次式で定義する。

$$\begin{aligned} LHR(i) &= \frac{1000 \times (Kg)}{42 \times 3} \cdot \overline{ND} \cdot \frac{\overline{ND}(u)}{\overline{ND}} \cdot \frac{N(i)}{\overline{ND}(u)} \\ &= \frac{1000}{42 \times 3} \text{ Kg} \cdot N(i) \end{aligned}$$

実際、熱電対は頂部中性子検出器の中心より軸方向に40 mm高い位置にある。しかしこの程度の差は実際の中性子分布の平坦さからみて無視しうるものである。

2.3 器機信号

炉の計装機器より得た IFA-508 (I) に関する信号のコンピュータープロットを燃料温度/出力と時間、および燃料棒伸び/出力と時間に関してとったものを Fig. 2.18 ~ Fig. 2.27 に示す。

3. IFA-508 (I) の実験データの一部分 <1977年6月~8月>

3.1 燃料棒の伸びのデータ

3本の燃料棒についての伸びのデータを3段階の燃焼度(70, 90および1400 MWd/t UO₂)についてプロットしたものを Fig. 3.1 ~ Fig. 3.9 に示す。この現象についての解析はすでに報告¹⁾したので省略する。

3.2 燃料棒中心温度のデータ

3.1と同じく3本の燃料棒についての中心温度の測定データを3段階の燃焼度(70, 90および1400 MWd/t UO₂)についてプロットしたものを Fig. 3.10 ~ Fig. 3.18 に示す。伸びのデータと共にこの現象については解析済みである¹⁾。

3.3 被覆管直径トレースのデータ

Fig. 3.19 ~ Fig. 3.21は被覆管直径トレースのデータの一部である。Fig. 3.19 ~ Fig. 3.21はそれぞれ燃焼度70 MWd/t UO₂ 付近での線出力50, 360および500 W/cmにおける被覆管の直径の変化の様子を示したものである。これについてはデータの解析が進行中である。

$$\begin{aligned}\overline{ND}(u) &= \frac{1}{3} (ND3 + ND4 + ND5) \\ N(11) &= 1.016 (-0.044 \times ND3 + 0.641 \times ND4 + 0.403 \times ND5) \\ N(12) &= 0.975 (0.641 \times ND3 + 0.403 \times ND4 - 0.044 \times ND5) \\ N(13) &= 0.991 (0.403 \times ND3 - 0.044 \times ND4 + 0.641 \times ND5)\end{aligned}\tag{4}$$

また燃料中心温度測定を行なう熱電対での局所的な線出力は次式で定義する。

$$\begin{aligned}LHR(i) &= \frac{1000 \times (Kg)}{42 \times 3} \cdot \overline{ND} \cdot \frac{\overline{ND}(u)}{\overline{ND}} \cdot \frac{N(i)}{\overline{ND}(u)} \\ &= \frac{1000}{42 \times 3} Kg \cdot N(i)\end{aligned}$$

実際、熱電対は頂部中性子検出器の中心より軸方向に40 mm高い位置にある。しかしこの程度の差は実際の中性子分布の平坦さからみて無視しうるものである。

2.3 器機信号

炉の計装機器より得た IFA-508 (I) に関する信号のコンピュータープロットを燃料温度/出力と時間、および燃料棒伸び/出力と時間に関してとったものを Fig. 2.18 ~ Fig. 2.27 に示す。

3. IFA-508 (I) の実験データの一部分 <1977年6月~8月>

3.1 燃料棒の伸びのデータ

3本の燃料棒についての伸びのデータを3段階の燃焼度(70, 90および1400 MWd/t UO₂)についてプロットしたものを Fig. 3.1 ~ Fig. 3.9 に示す。この現象についての解析はすでに報告¹⁾したので省略する。

3.2 燃料棒中心温度のデータ

3.1と同じく3本の燃料棒についての中心温度の測定データを3段階の燃焼度(70, 90および1400 MWd/t UO₂)についてプロットしたものを Fig. 3.10 ~ Fig. 3.18 に示す。伸びのデータと共にこの現象については解析済みである¹⁾。

3.3 被覆管直径トレースのデータ

Fig. 3.19 ~ Fig. 3.21は被覆管直径トレースのデータの一部である。Fig. 3.19 ~ Fig. 3.21はそれぞれ燃焼度70 MWd/t UO₂ 付近での線出力50, 360および500 W/cmにおける被覆管の直径の変化の様子を示したものである。これについてはデータの解析が進行中である。

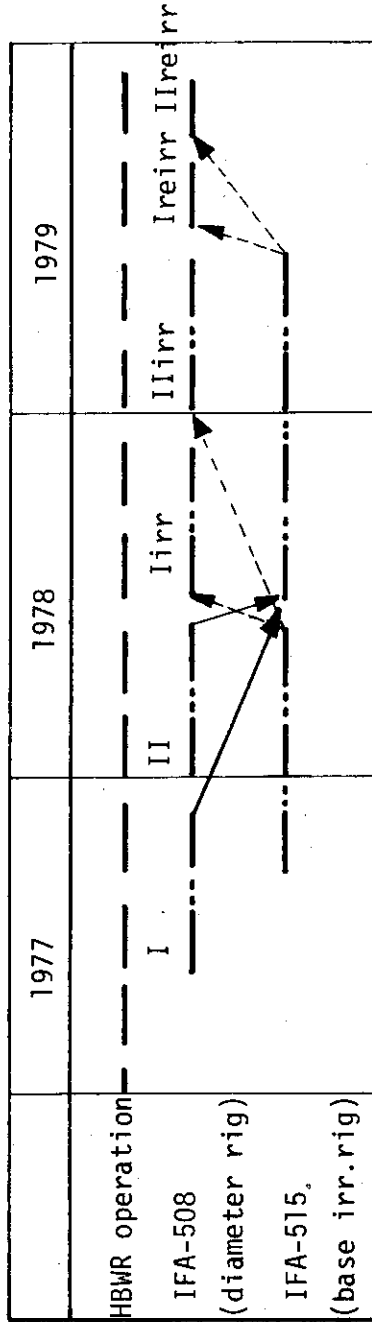
謝 辞

本文執筆に際し当研究室室長である市川達生氏に有益なる助言と御協力を戴きました。御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) K. Yanagisawa and M. Uchida, "Preliminary Analysis of Data for IFA-508(I), No.1-Elongation and Centre Temperature of Fuel-Irradiation Period: From June to August 1977, Burnups: 1600 MWd/tUO₂ , JAERI-M 7520

Table 1.1 Irradiation schedule of IFA-508/515



I, II, fuel rod set (three) NO (New fuel)

I_{irr}, II_{irr}, " (Base irradiated fuel)

I_{reirr}, II_{reirr}, " (Reirradiation fuel)

Table 1.2 Table of irradiation performance and fuel number correspondence with planning and IFA'S

Burnup	Planning number	IFA-508	IFA-515
	I	I	I
7GWd/t	II	II	II
	Iirr	III	II
13 GWd/t	IIirr	IV	II
16 GWd/t	Ireirr	V	II
20 GWd/t	IIreirr	VI	II

Table 1.3 Characteristics of fuel and cladding prepared for IFA-508 and IFA-515

Manufacturing number	A	B	C _I	C _{II}	D	E
IFA's identity number	I & V		III	II & VI		
Rod item number	11/32	12/31	13/33	27/29	18/21	14/17
Grain size	L	L	L	L	S	L
Additives	No	No	No	No	No	Yes(SiO ₂)
Spring const.(Gg/m)	0.26/0.29	0.25/0.25	0.29/0.30	0.87/0.91	0.29/0.29	0.30/0.29
Clad thickness(μm)	390/395	685/685	380/390	/385	/400	/395
Diametral gap (μm)	100/100	100/100	220/210	/210	/100	/110
Theoretical Density(%TD)	94.98					
Fuel temp.measurement	Yes/No	Yes/No	Yes/No	No/No	No/No	No/No

Table 1.4 Design parameters and their relationships for IFA-508/515

	A	B	C _I	C _{II}	D	E
A	burnup	thickness	gap	gap spring	grain	additives
B		burnup	gap thickness	gap spring thickness	grain thickness	additives thickness
C _I			burnup	spring	gap grain	additives gap
C _{II}				burnup	gap grain spring	additives gap spring
D					burnup	additives grain
E						burnup

Table 1.5 List of one factor level and each rods to be compared with

No	Effect of	Compare with
1	grain size	A and D
2	spring	C _I and C _{II}
3	additives (SiO ₂)	A and E
4	gap size	A and C _I
5	cladding thickness.....	A and B

Table 1.6 IFA-508(I) Test assembly data

DATA SHEET		ISSUE NO: 1	PAGE: 2	
IFA-508 ¹		SIGN: <i>M. U. H.</i>	DATE: 15/4-77	
TEST ASSEMBLY DATA				
DESCRIPTION				
Fuel Form	Sintered and ground UO ₂ pellets			
Pin No.	11	1-2	13	
Fuel Weight kg	0.402	0.363	0.396	1.161
End Pell ^{*1} , kg.	0.030	0.026	0.030	0.086
Fuel Density g/cm ³	10.41	Total weight: 1.247 kg		
Fuel Diameter mm	11.31	10.75	11.21	
Enrichment	10.5 wt% of U-235			
Centre Hole Dia. mm	1.8 (for nominally 45 mm from top of active stacks)			
Diam. Clearance mm	0.10	0.10	0.22	
Pellet Length mm	15			
Dishing	Spherical both ends			
Dishing Depth mm	0.4			
Lead Width mm	Approx. 2			
Cladding	Fully annealed Zr-2			
Cladding State	Autoclaved (claddings for 11 and 13 were chemically thinned from inside)			
Welding	TIG			
Clad Out. Diam. mm	12.19	12.22	12.19	
Filler Gas	Helium 1 atm.			
Clad. Int. Diam. mm	11.41	10.85	11.43	
Clad. Thickness mm ^{*2}	(0.38)	(0.70)	(0.37)	
No. Pins /Cluster	3			
Pitch Distance mm	38 (P.C.D)			
Spacers	Two end plates			
Spring Wire Dia. mm	1.21			
Fuel Length/Pin mm	420 (including end pellets), 390 (with no poison)			
Plenum	6.3 cc			
Shroud Material	Zr-2			
Shroud Int. Diam. mm	71			
No. Of Clusters	1			
<p>*1 10.5 wt% enriched UO₂ with 6.1 wt% Dy. *2 Thickness values are less reliable than I.D. values. Mechanical properties of the claddings (no difference with thickness). at R.T. YS: 36 kg/mm², UTS: 50 kg/mm², EL 30% at 343°C YS: 14 kg/mm², UTS: 24 kg/mm², EL 46%</p>				

Table 1.8 IFA-515(I) Test assembly data

DATA SHEET							
IFA-515						ISSUE NO. 1	PAGE: 2
TEST ASSEMBLY DATA						SIGN: <i>M. Voh</i>	DATE: 31/8-77
DESCRIPTION							
Fuel Form	Sintered and ground UO_2 pellets						
Pin No.	32	31	29	17	21	33	
Instrum. No./Rig Pos. No.	EC-5/5	EC-1/1	EC-4/4	EC-2/2	EC-3/3	EC-6/6	
Fuel Weight kg	0.404	0.364	0.397	0.403	0.402	0.397	2.367
End Pellets* ¹ kg	0.030	0.027	0.030	0.030	0.030	0.030	0.177
Fuel Density g/cm ³	10.41						2.544
Fuel Diameter mm	11.31	10.75	11.21	11.31	11.31	11.21	
Enrichment	10.5 wt% of U-235						
Si Content %	0	0	0	0.4	0	0	
Diam. Clearance mm	0.10	0.10	0.21	0.11	0.10	0.21	
Pellet Length mm	15						
Dishing	Spherical both ends						
Dishing Depth mm	0.4						
Land Width mm	2.2	1.9	2.1	2.2	2.2	2.1	
Cladding	Fully annealed Zr-2						
Cladding State	Autoclaved (chemically thinned from inside except pin no. 31)						
Welding	TIG						
Clad. Out. Diam. mm	12.20	12.22	12.19	12.21	12.21	12.20	
Filler Gas	Helium 1 atm						
Clad. Int. Diam. mm	11.41	10.85	11.42	11.42	11.41	11.42	
Clad. Thickness mm* ²	(0.37)	(0.67)	(0.38)	(0.39)	(0.38)	(0.39)	
No. Pins /Cluster	6						
Pitch Distance mm	46						
Spacers	Two end plates						
Spring Wire Dia. mm	1.2	1.2	1.6	1.2	1.2	1.2	
Fuel Length/Pin mm	420 (including end pellets), 390 (active stack)						
Plenum	6.3 cc						
Shroud Material	Zr-2						
Shroud Int. Diam. mm	71						
No. Of Clusters	1						
<p>*¹ 10.5 wt% enriched UO_2 with 6.1 wt% Dy.</p> <p>*² Wall thickness values are less reliable than ID values.</p>							

Table 1.9 IFA-515(I) Operational data

INSTITUTT FOR ATOMENERGI OECD Mølden Reactor Project.		DATA SHEET		ISSUE NO: 1	PAGE: 1
		IFA-515		SIGN: <i>M. Vch</i>	DATE: 31/8-77
Supplier: JAERI, Japan					
OPERATIONAL DATA					
OBJECTIVES					
IFA-515 is a single cluster, base irradiation rig built in support of the diameter measurement experiments IFA-508 (JAERI). Six out of the twelve IFA-508 fuel rods will be pre-irradiated in this rig.					
DESCRIPTION		PREDICTED		ACTUAL	
Loading Date		9/77			
Unloading Date					
Burn-Up MWd/tUO ₂		10 000			
Reactor Position					
Rel. Flux Position		1.02 (0.68)			
Channel Power kW		151 101			
Avg. Lin. Heat Rating W/cm		600 400		400 W/cm is requested	
Max. Lin. Heat Rating W/cm		664 442			
Peak Surf. Heat Flux W/cm ²		115			
Peak /kd(t) W/cm		31.1			
Peak Spec. Heat Rating W/gUO ₂		44.8		in rod 31	
Max. Centre Temp. °C		1720			
Cooling Condition		Natural circulation			
Inlet Velocity m/sec		0.40			
Inlet Throttling v ² /2g					
Hydraulic Diam. mm		20.8			
Flow area mm ²		2954			
Assembly Dwg.		07459		Parts List Dwg. 474681	
Cable Data Sheet		376873			
Experim. Procedure		EP-1515			
INSTRUMENTATION					
1	Calibration valve	1	Failure detector	4	Neutron detectors (Va-emitter)
1	Inlet flowmeter D=40, μ=32			6	Cladding elongation detectors
1	Outlet flowmeter D=55, μ=32				
2	Inlet coolant thermocouples				
2	Outlet coolant thermocouples				

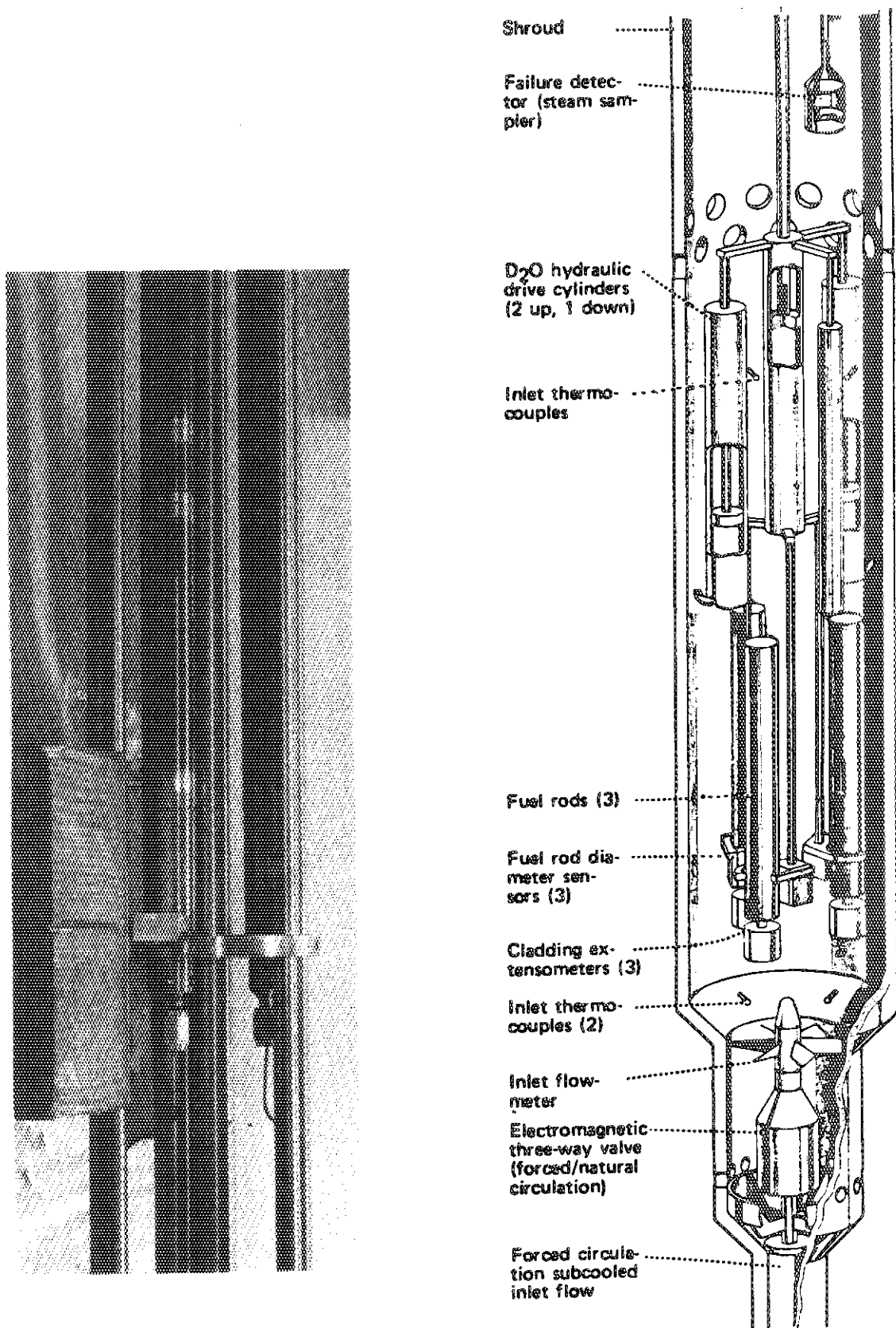


Fig. 1.1 IFA-508 installed in irradiation rig

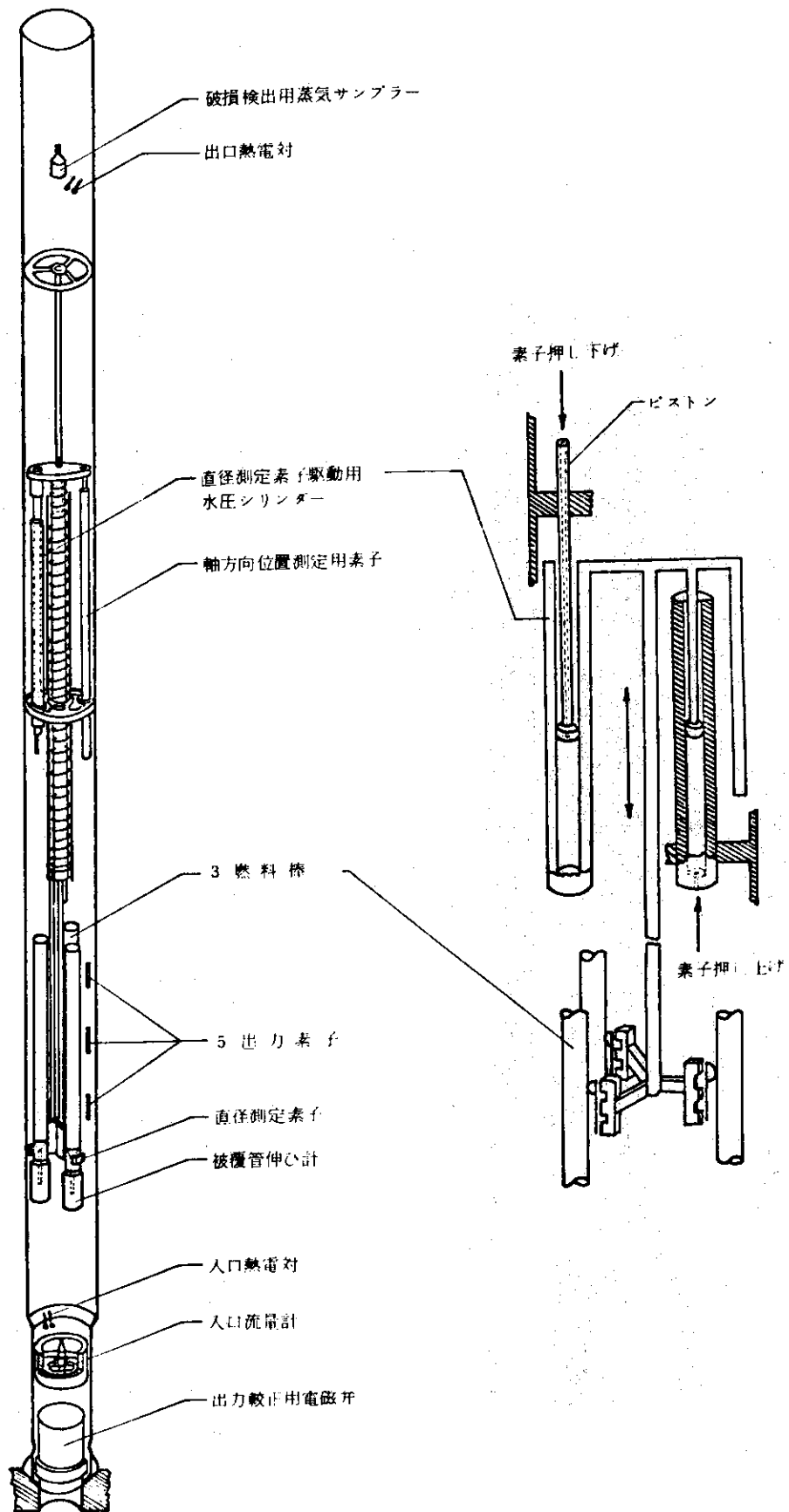


Fig. 1.2 IFA-508 notional drawing

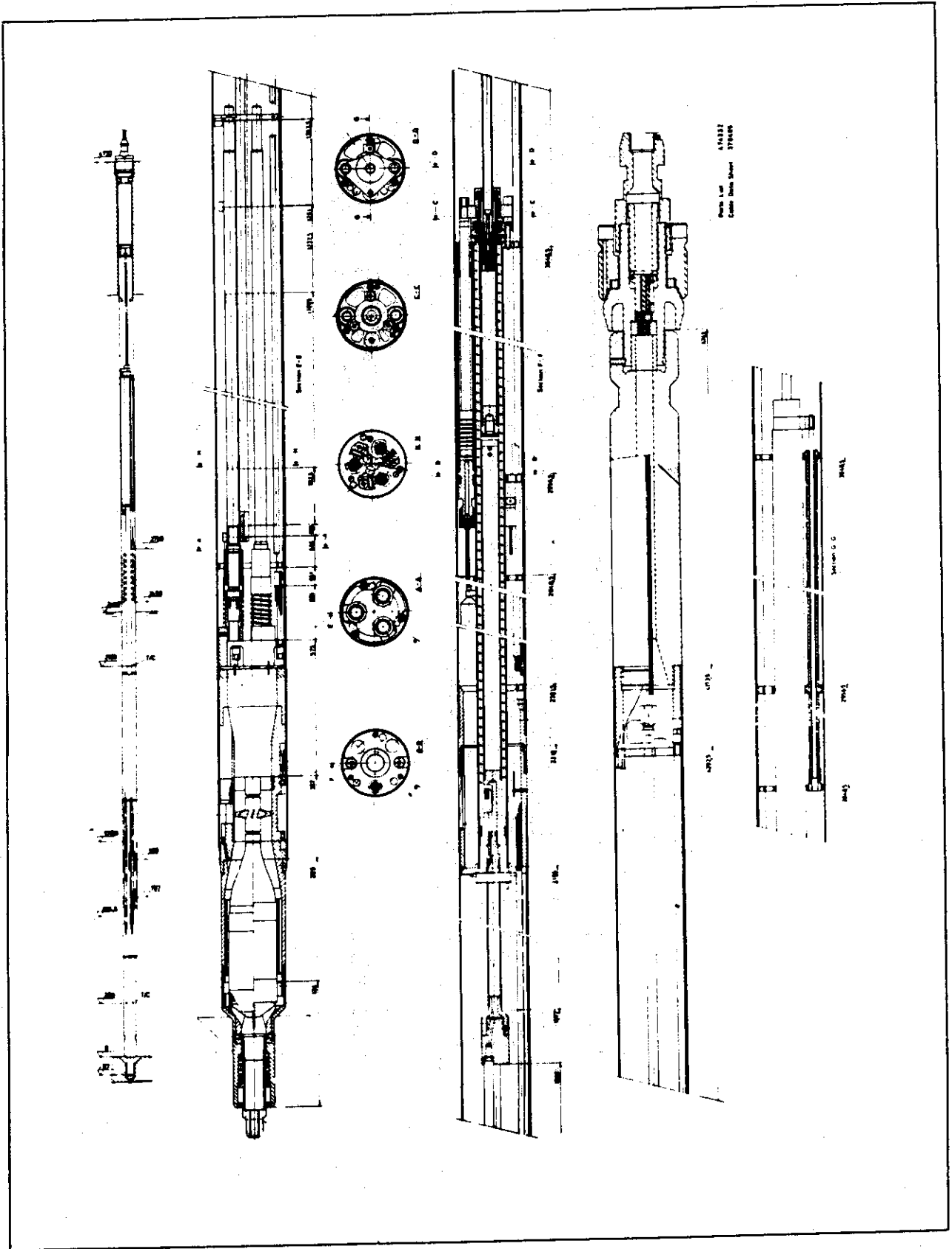


Fig. 1.3 IFA-508⁺ test assembly drawing

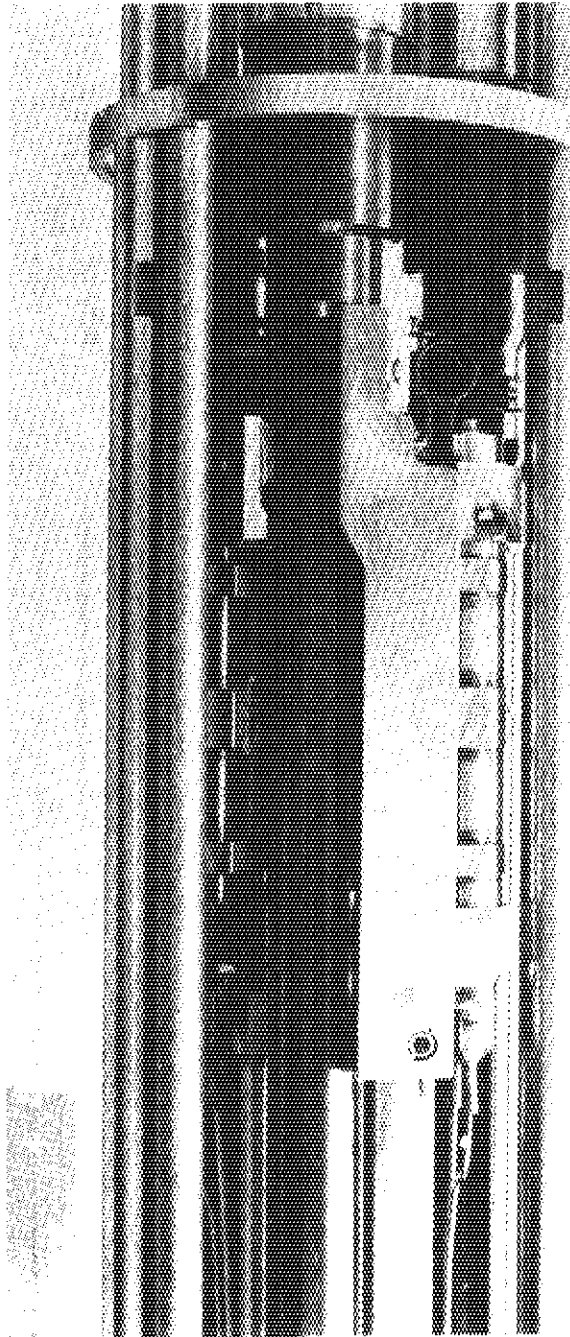


Fig. 1.4 IFA-508 three rod diameter rig with diameter gauge (DG) instrument

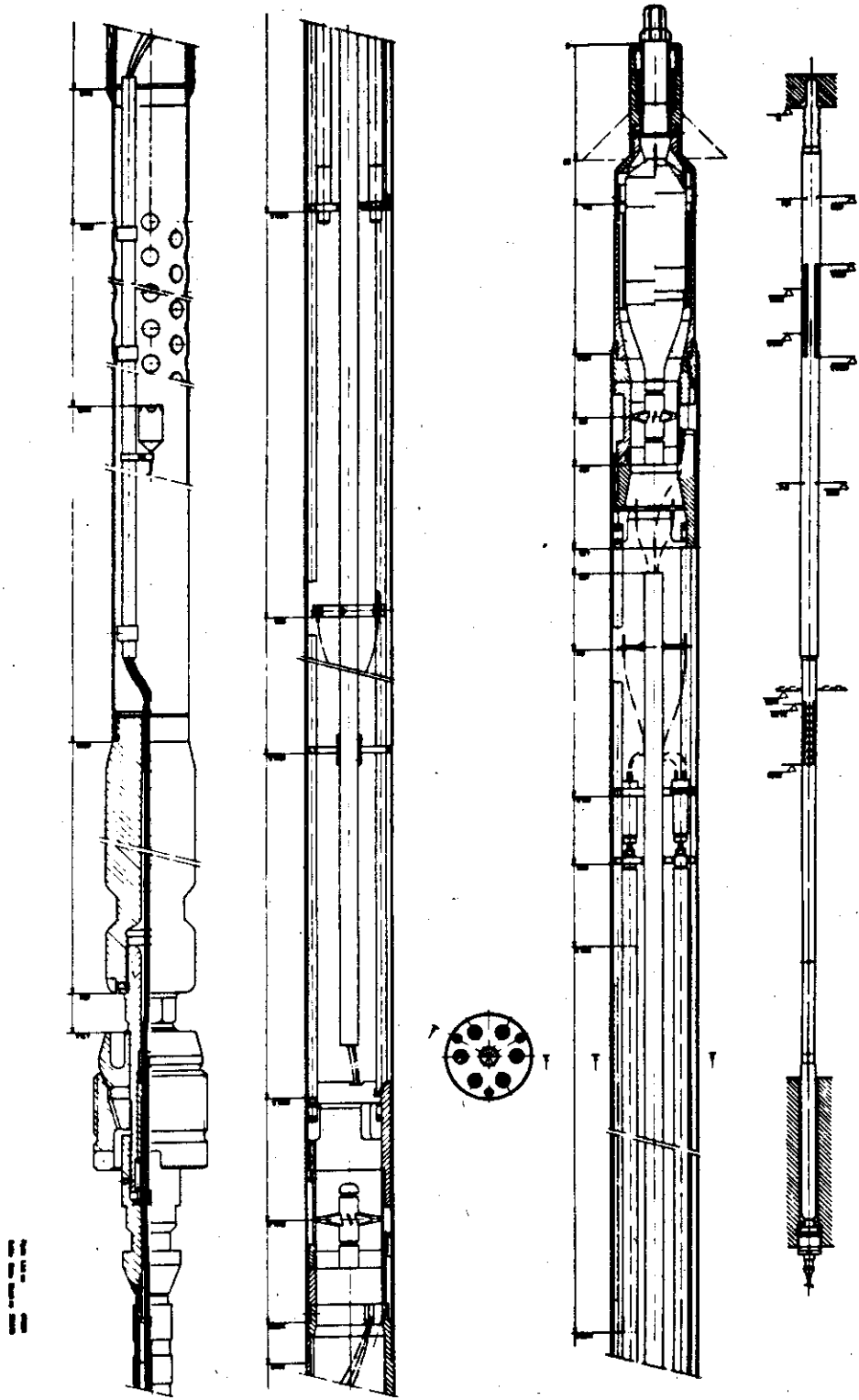


Fig. 1.5 IFA-515 test assembly drawing

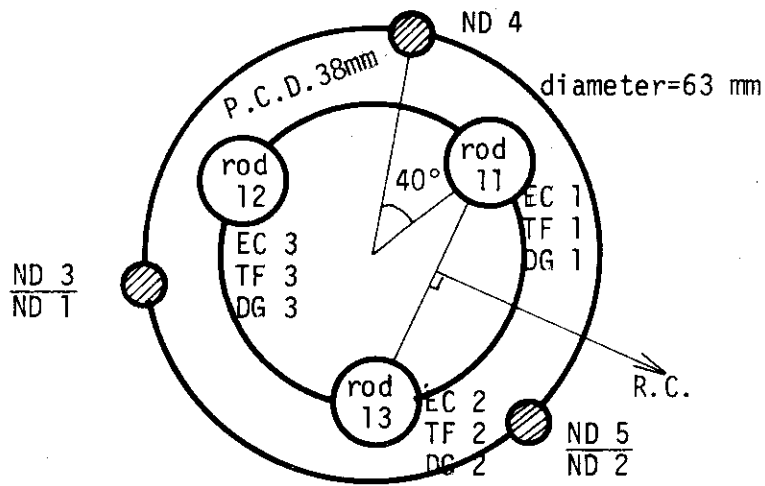


Fig. 1.6 Configuration of fuel rods and instrumentations

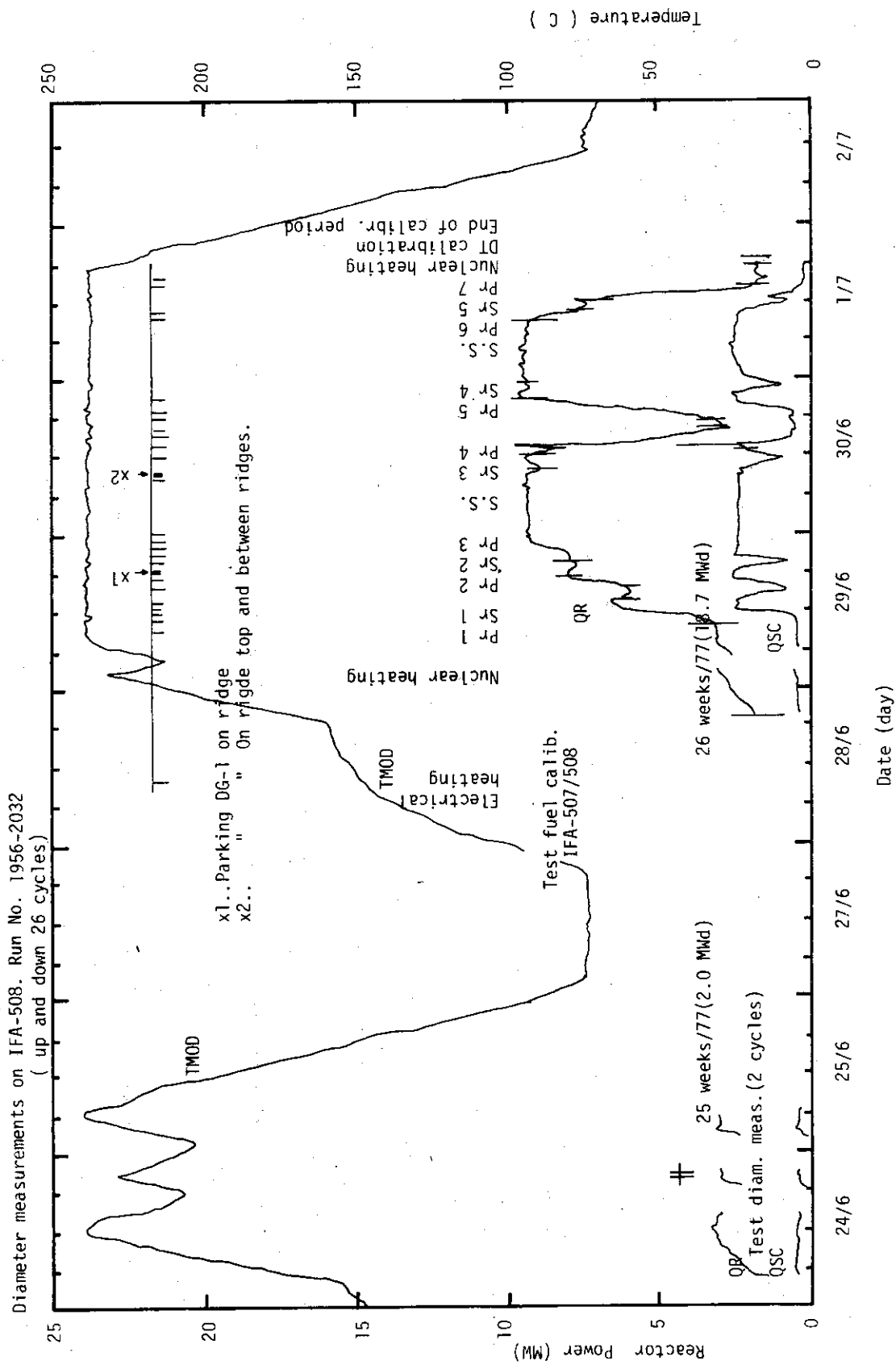


Fig. 2.1 Reactor power and temperature, and start-up experiments during second quarter 1977.

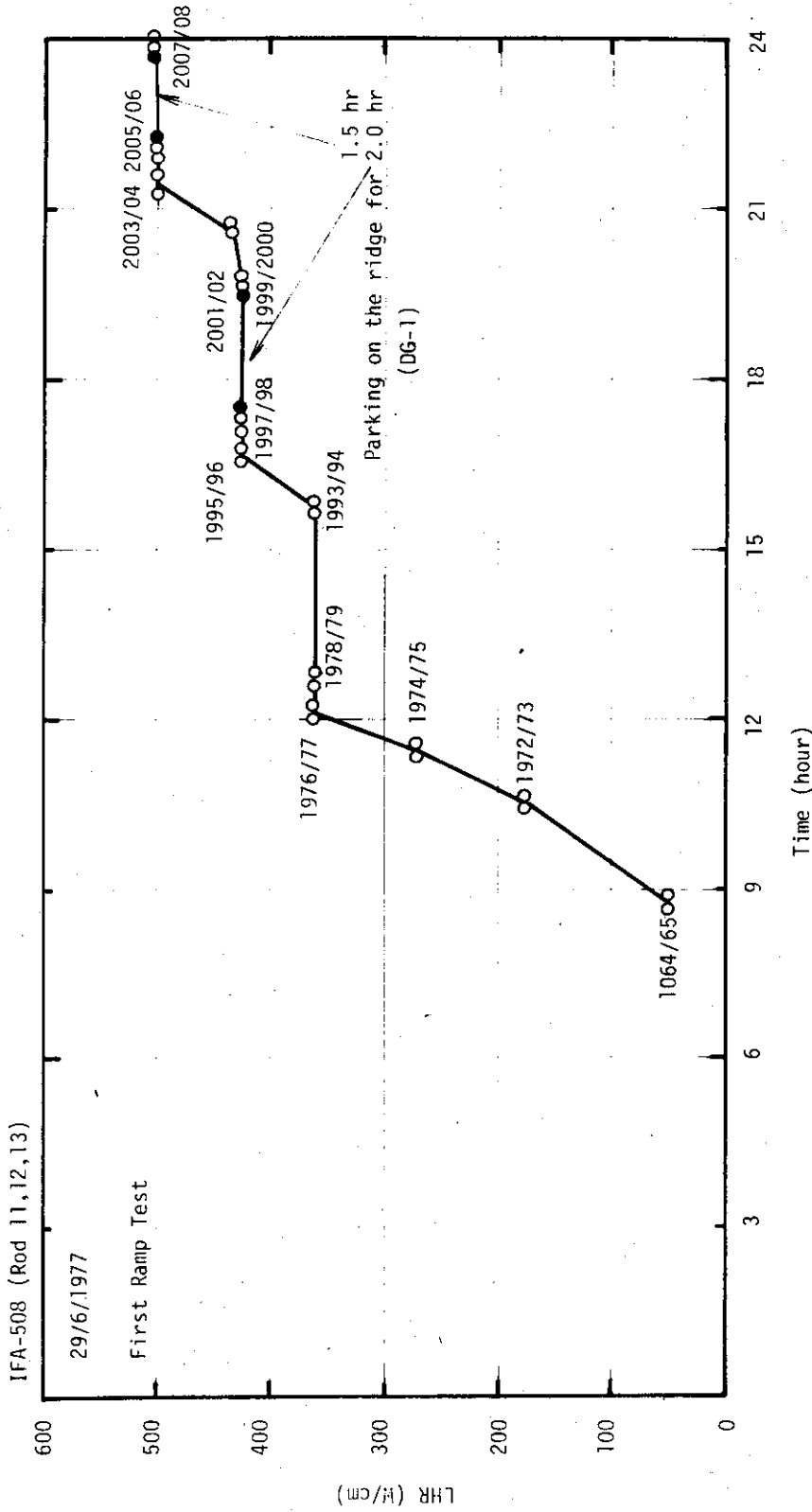


Fig. 2.2 Power history of IFA-508 during second quarter on 29th, June

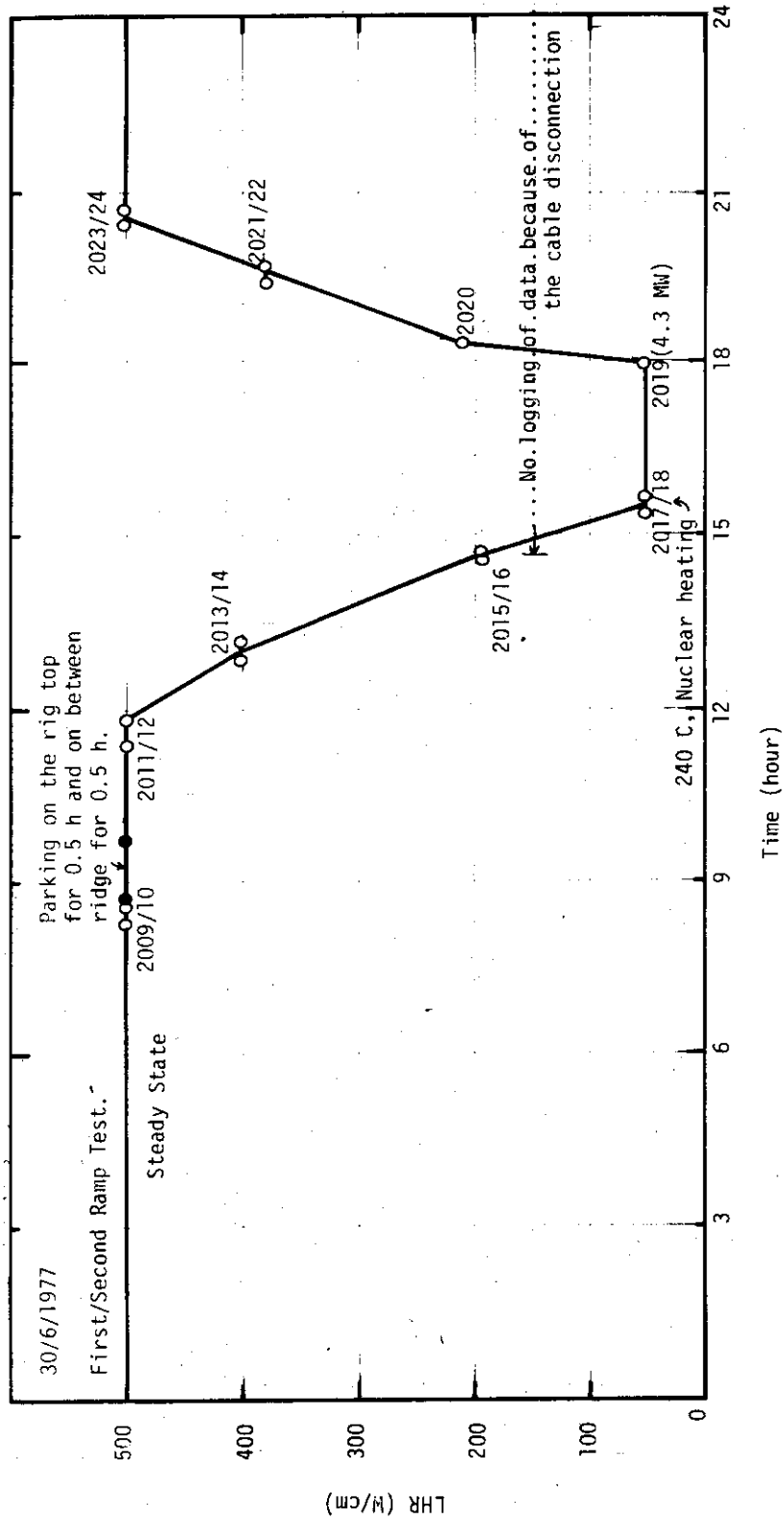


Fig. 2.3 Power history of IFA-508 during second quarter on 30th, June

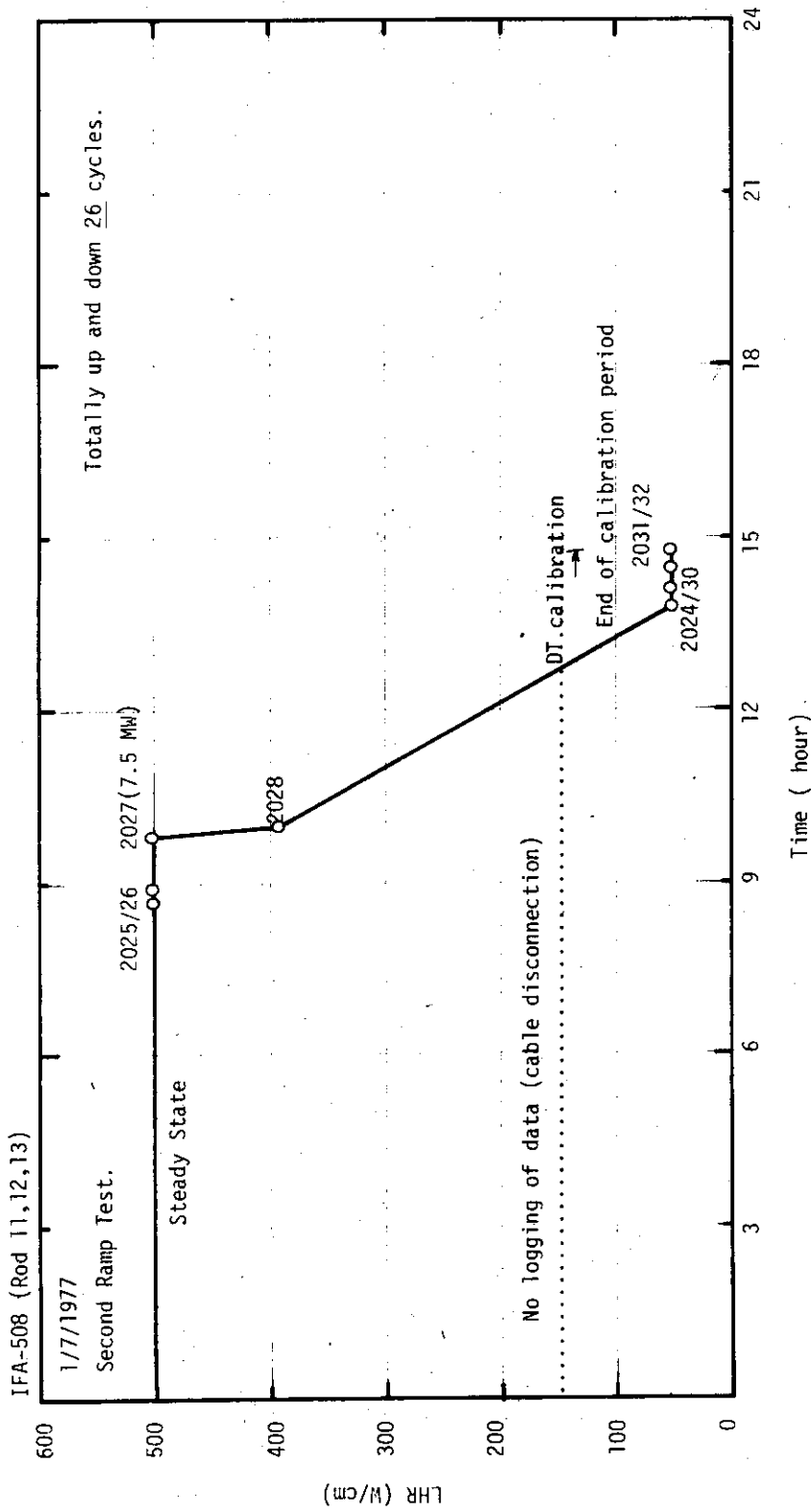


Fig. 2.4 Power history of IFA-508 during second quarter on 1st, July

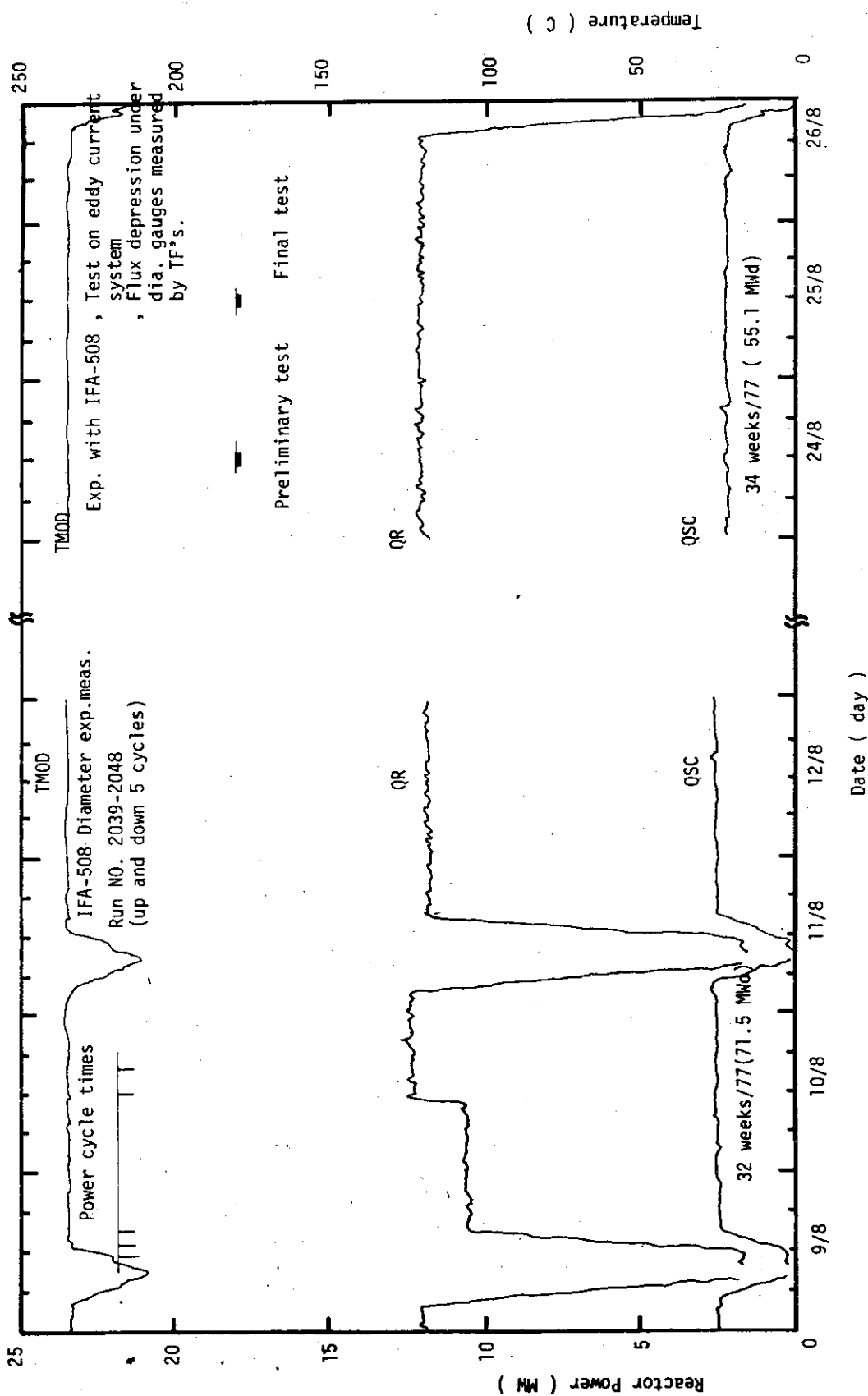


Fig. 2.5 Reactor power and temperature, and start-up experiments during third quarter 1977

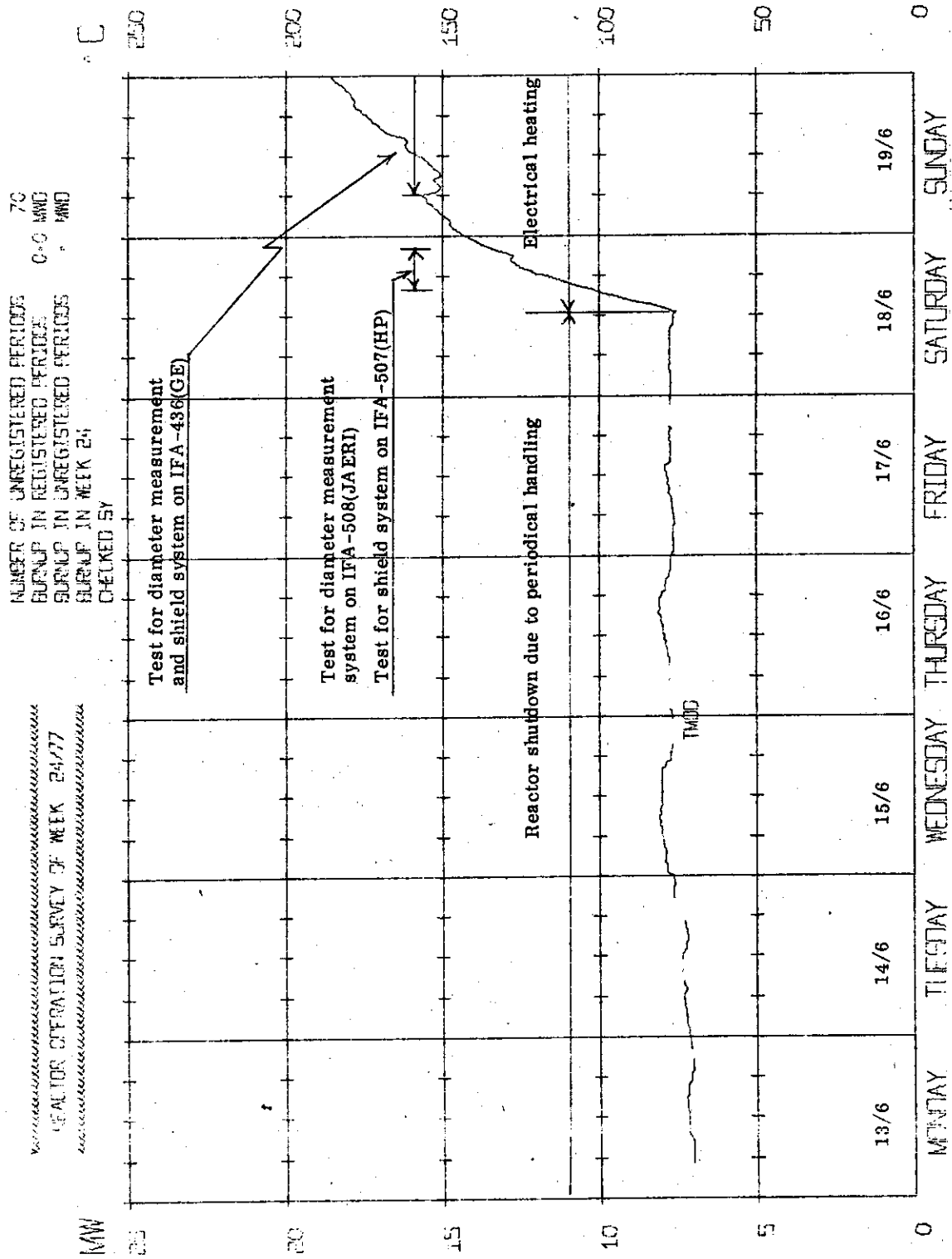


Fig. 2.7 Weekly reactor operation survey for the period 13th June to 28th August, 1977

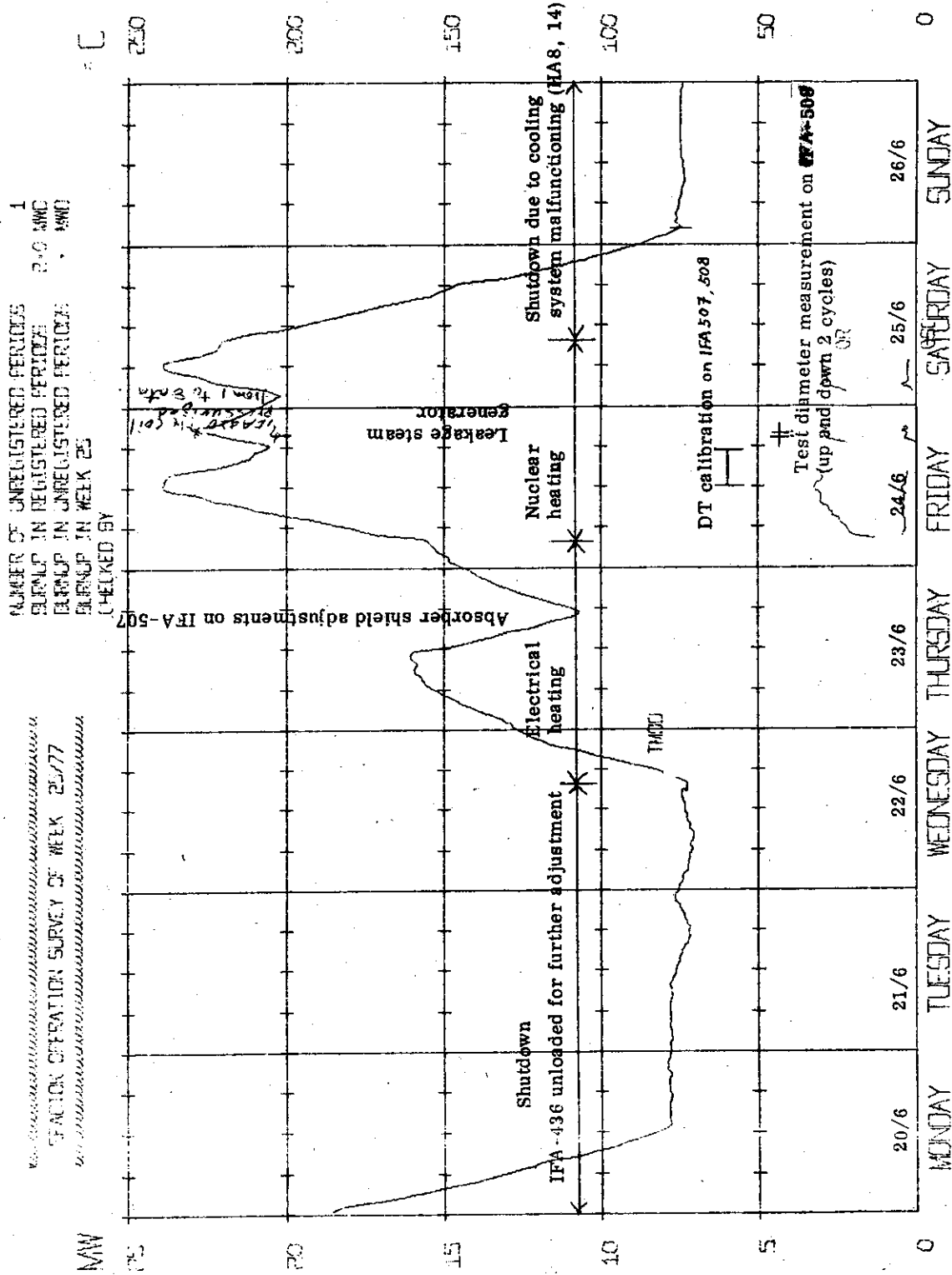


Fig. 2.8 (continued)

NUMBER OF UNREGISTERED PERIODS
 SHUTUP IN REGISTERED PERIODS 2144 MW
 SHUTUP IN UNREGISTERED PERIODS 2144 MW
 SHUTUP IN WEEK 27
 DERIVED BY

POWER OPERATION SURVEY OF WEEK 27-77

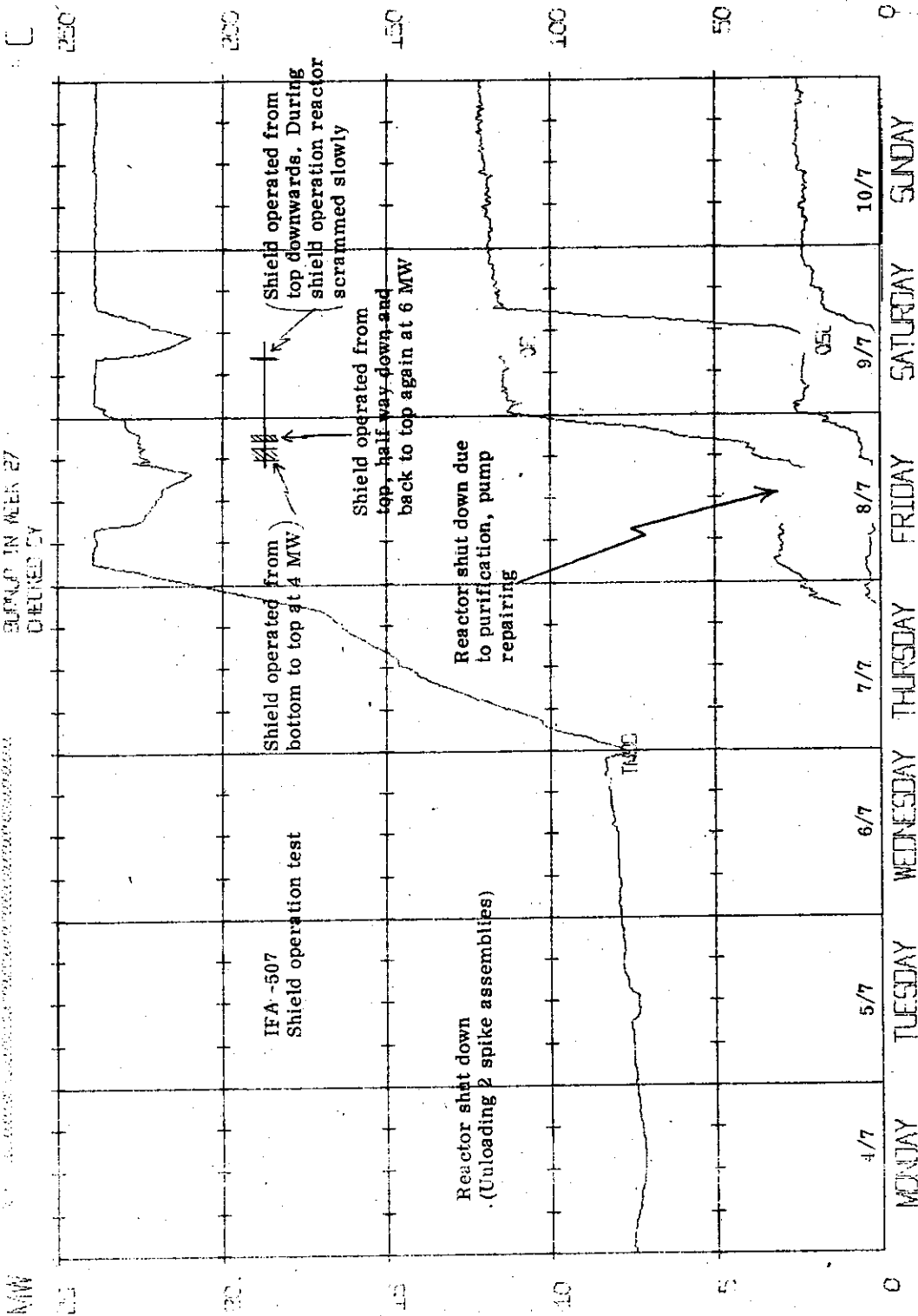


Fig. 2.10 (continued)

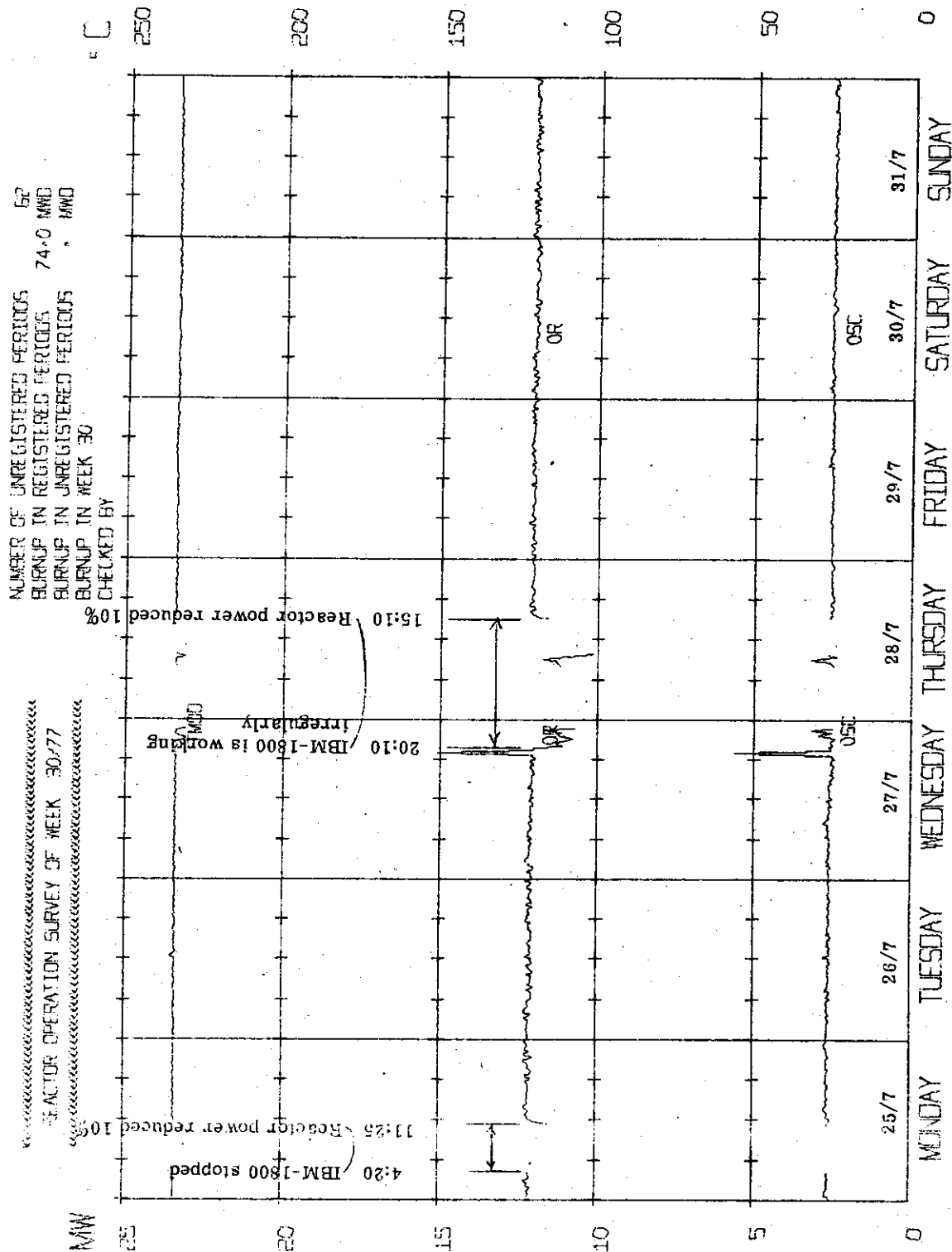


Fig. 2.13 (continued)

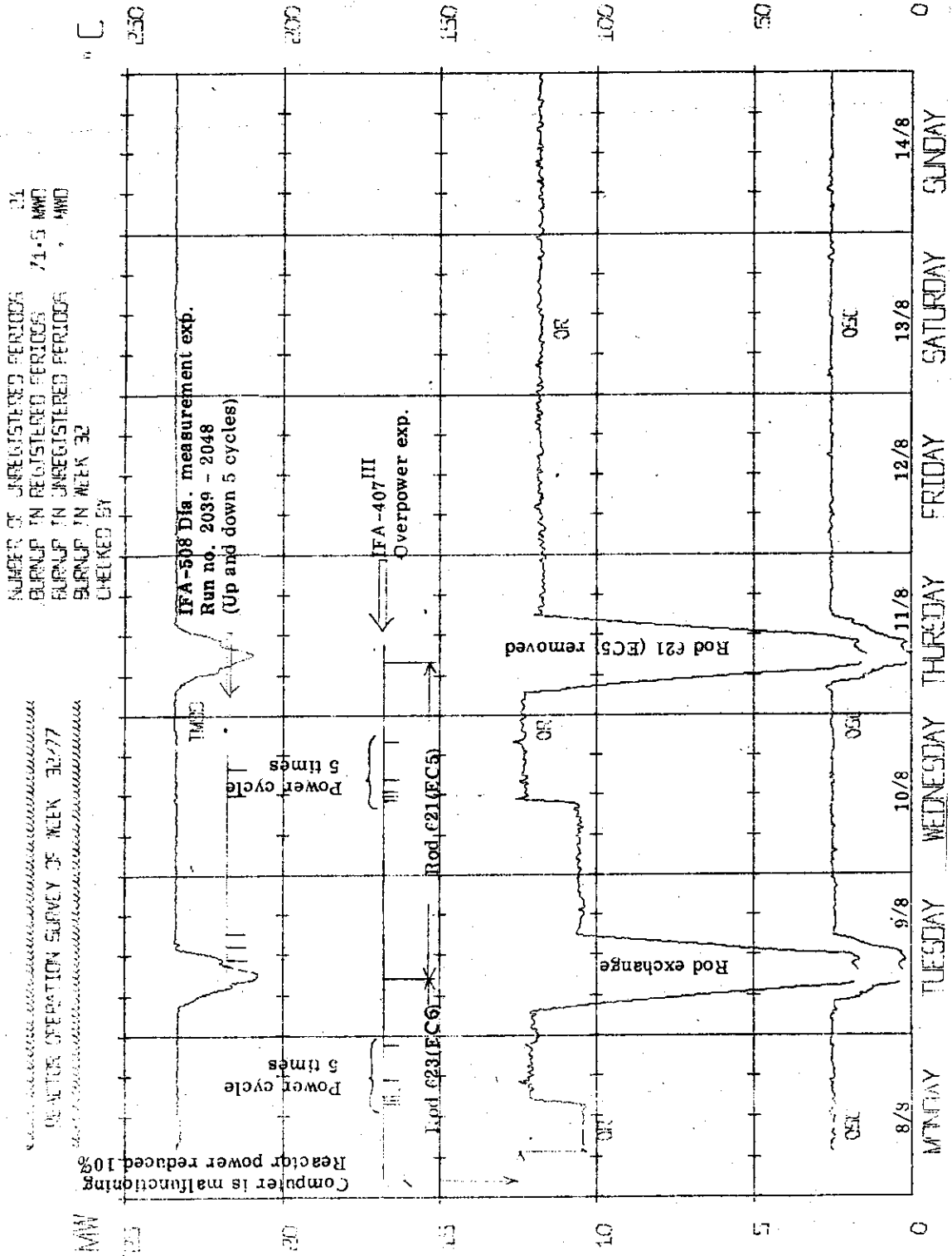


Fig. 2.15 (continued)

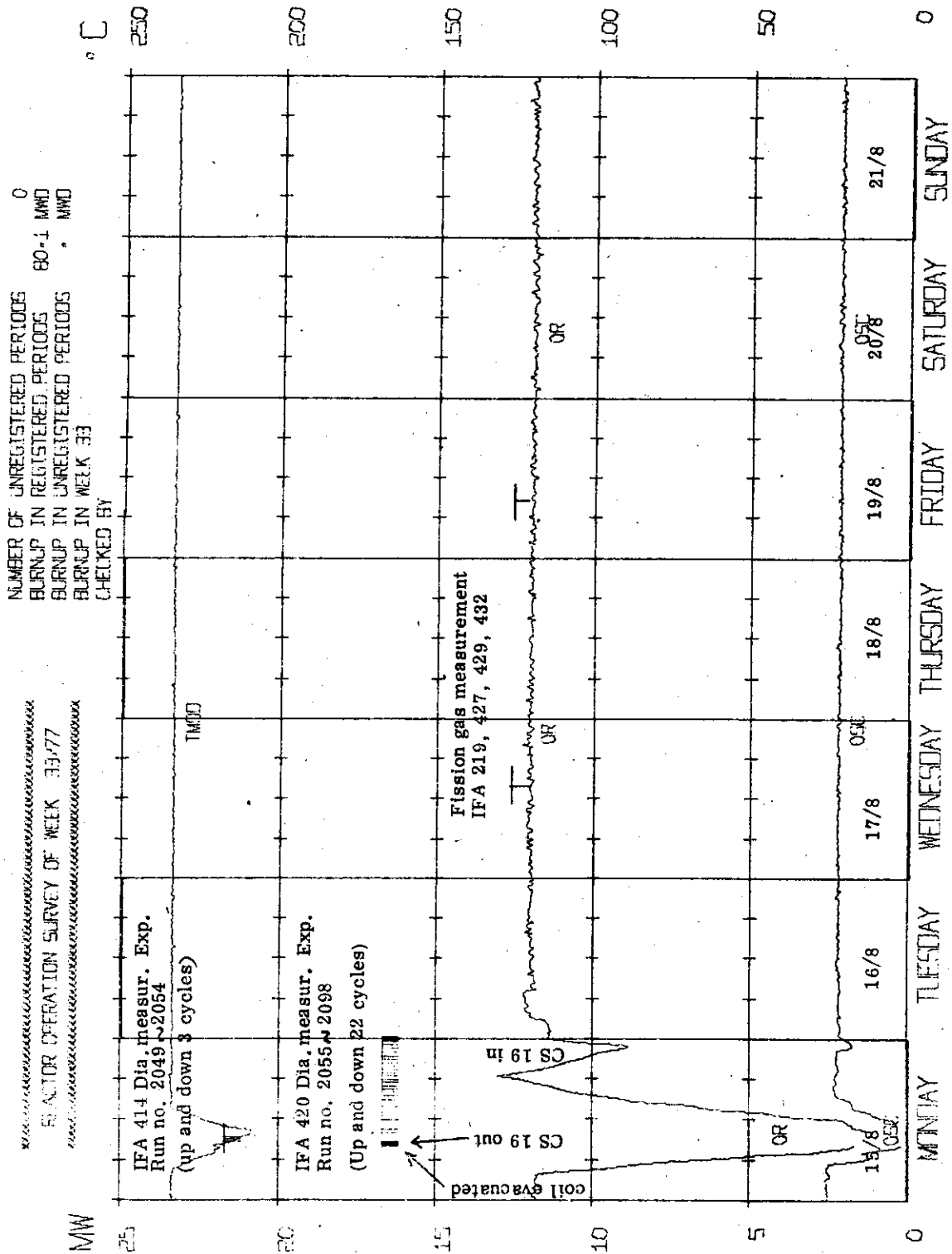


Fig. 2.16 (continued)

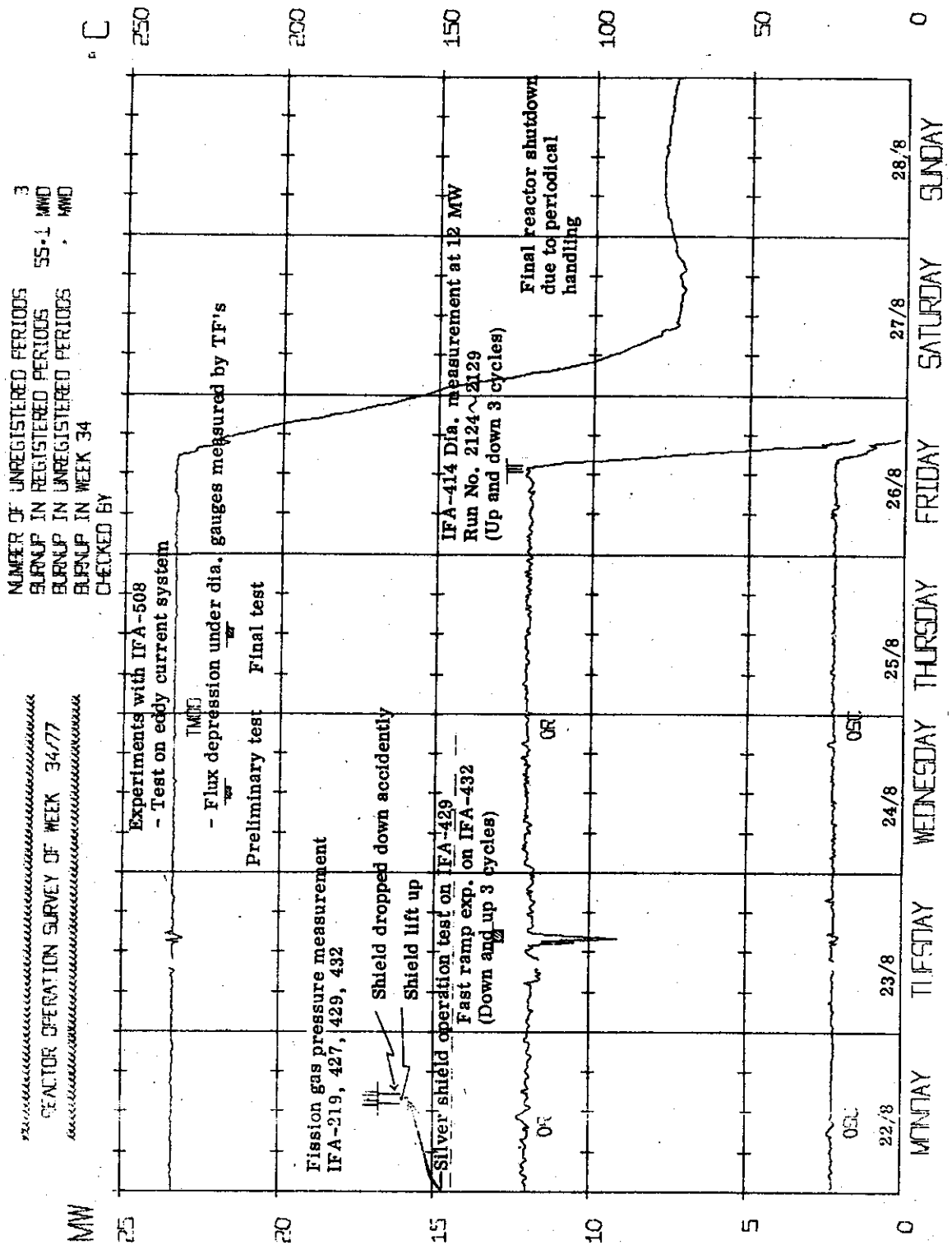


Fig. 2.17. (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLOT 41

DATA FROM 29 JUNE 77 0 HRS TO 30 JUNE 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY: 25. 66. MW/D/T UO2

IFA-508 FUEL TEMPERATURE AND POWER VS TIME

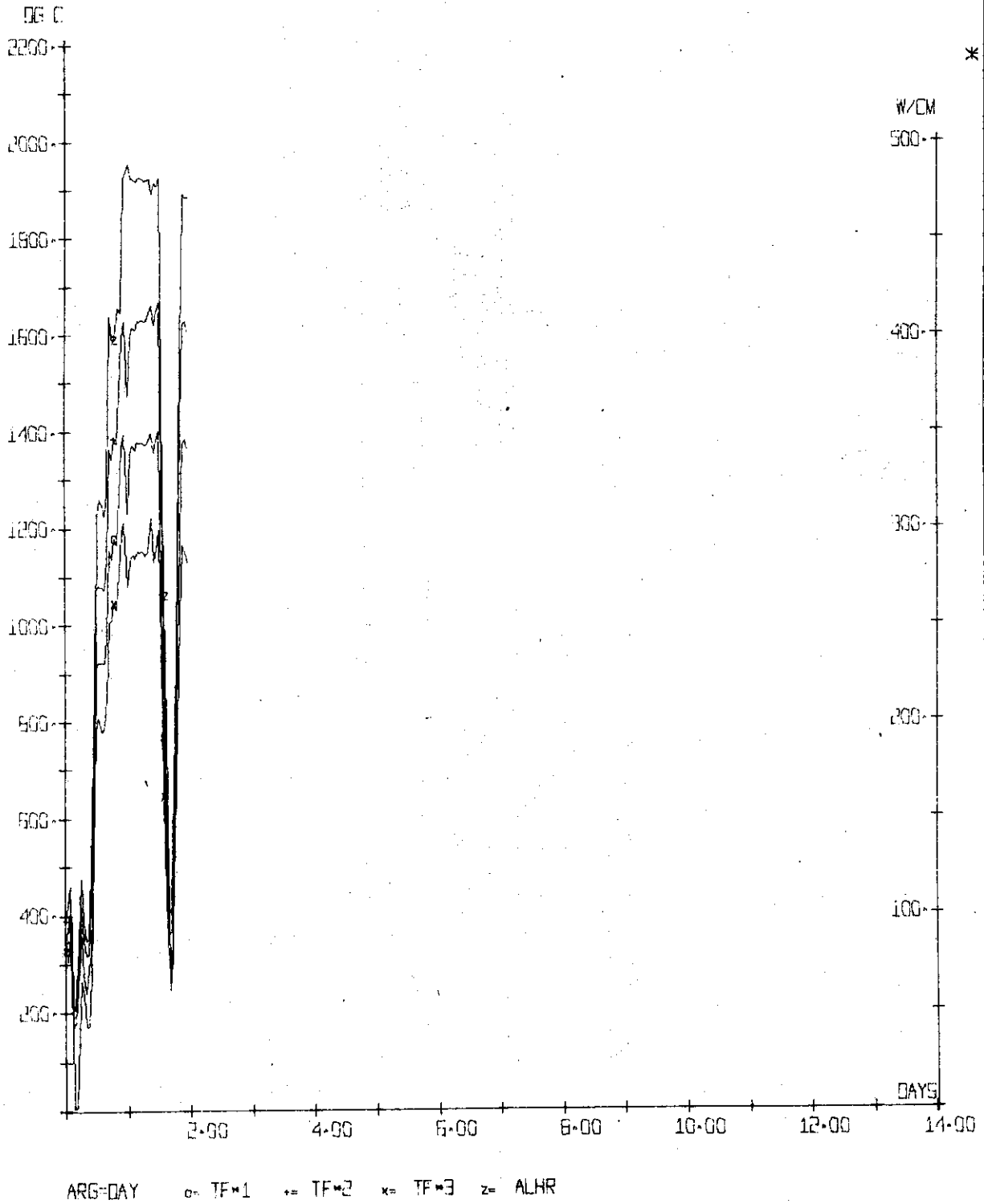


Fig. 2.18 Computer plots of instrumentation signals from IFA's 508 for the period from June to August, 1977

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLOT 42

DATA FROM 29 JUNE 77 0 HRS TO 30 JUNE 77 2345 HRS
BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 26. 66. MW/D/T UO2

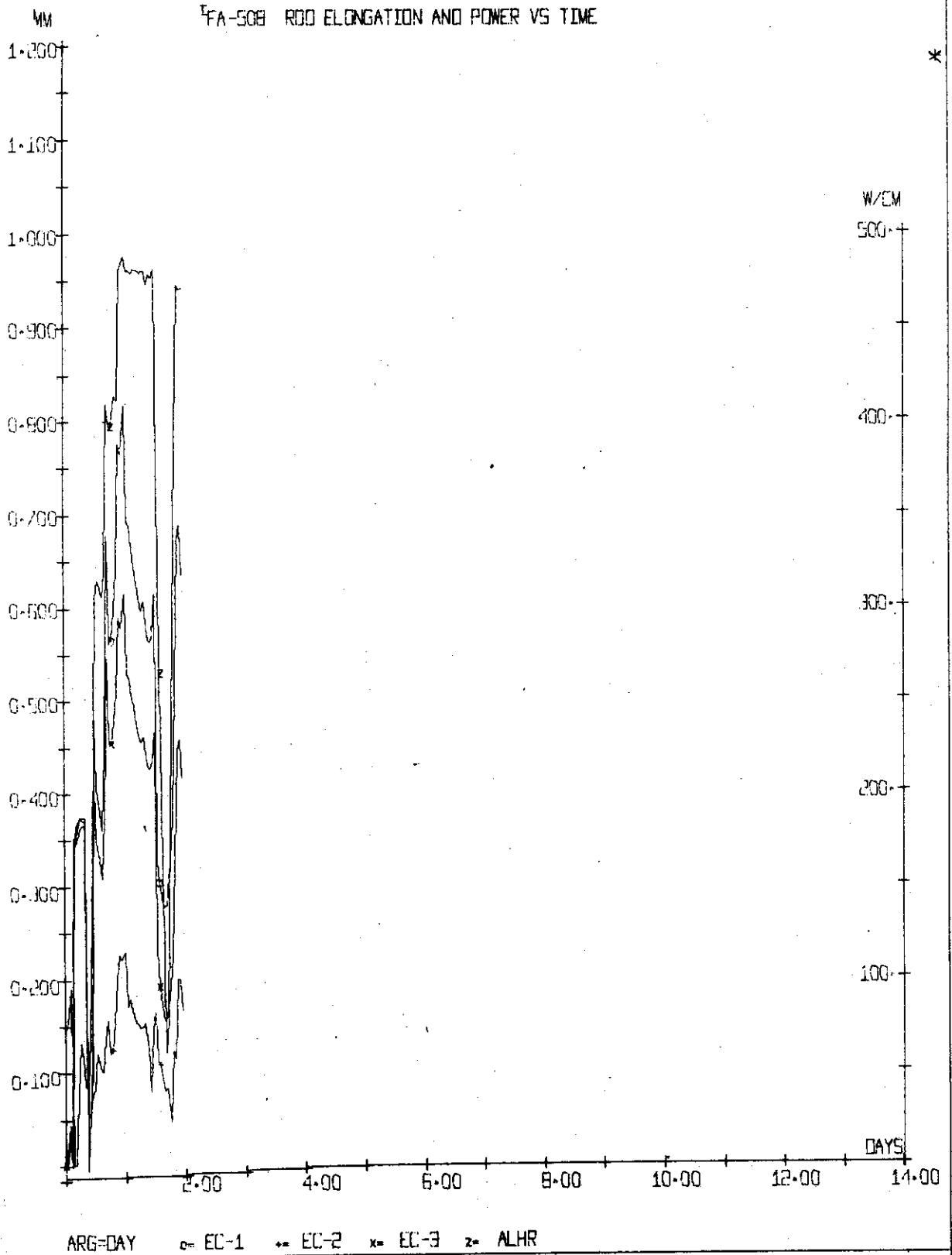


Fig. 2.19 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLOT 42

DATA FROM 1 JULY 77 0 HRS TO 14 JULY 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 91. 342. MW/D/T UO2

IFA-508 ROD ELONGATION AND POWER VS TIME

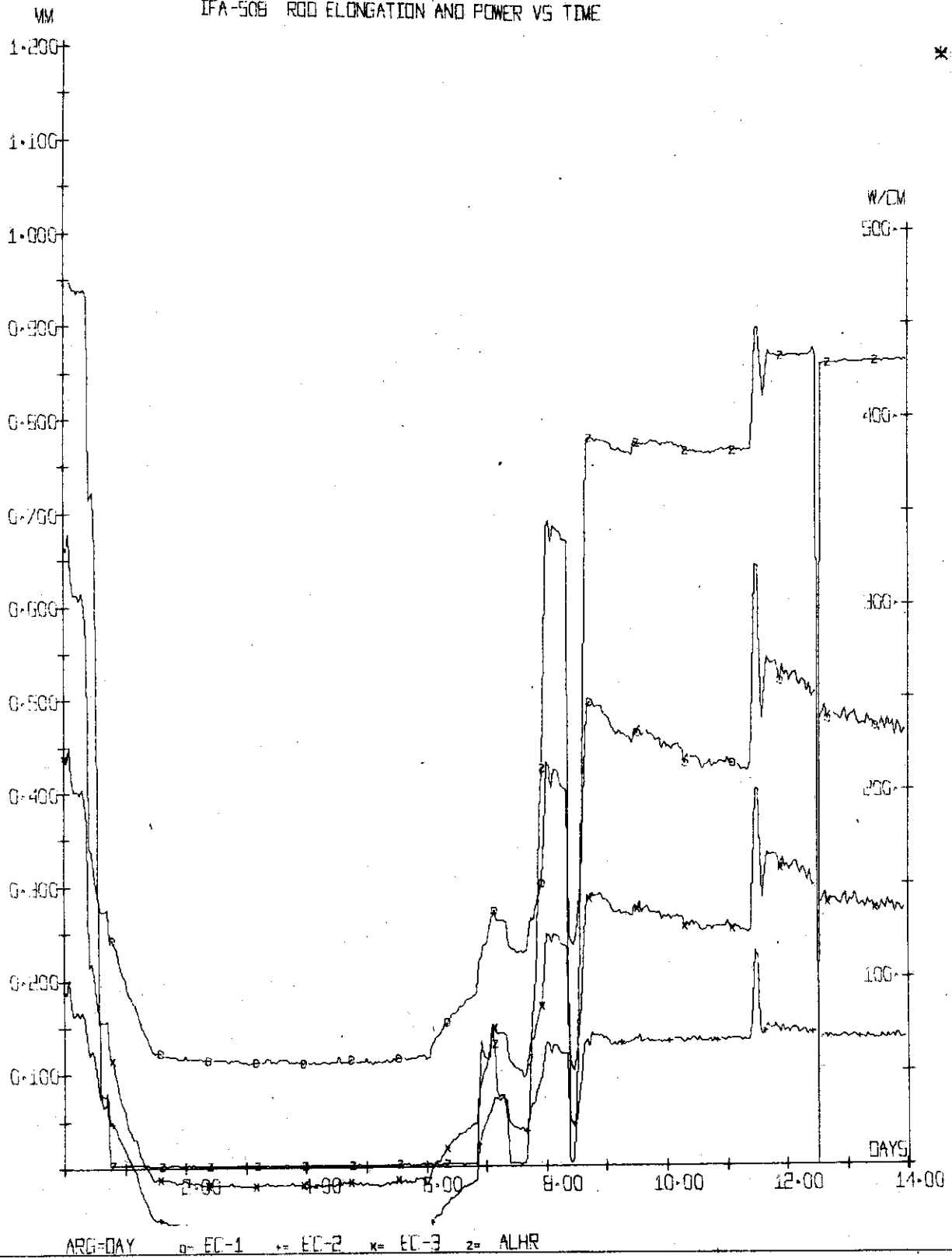


Fig. 2.20 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLOT 42

DATA FROM 15 JULY 77 0 HRS TO 28 JULY 77 2345 HRS
BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 374 937 MWDT UO2

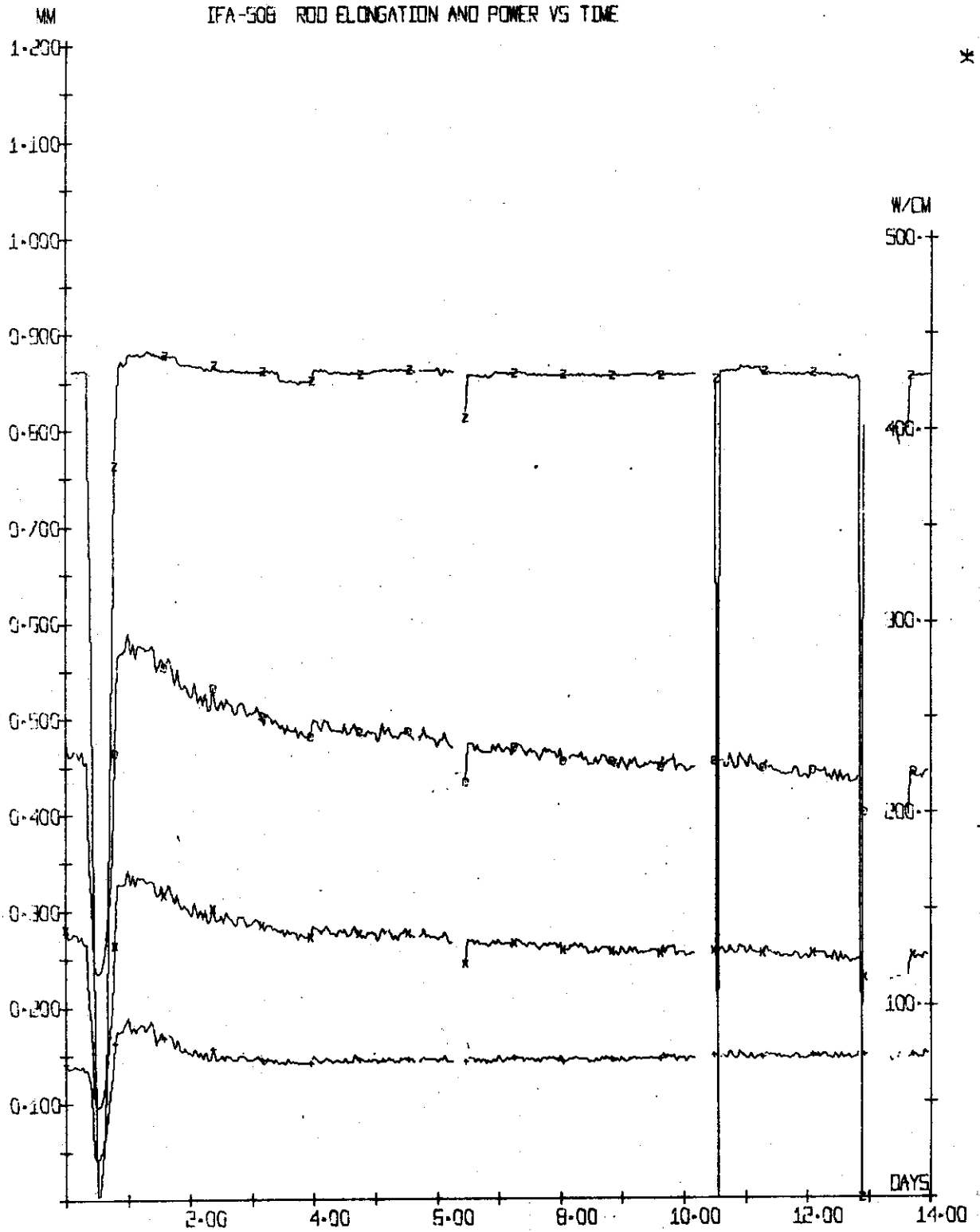


Fig. 2.21 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLOT 42

DATA FROM 23 JULY 77 0 HRS TO 11 AUG 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY: 991 1433 MWDT UO2

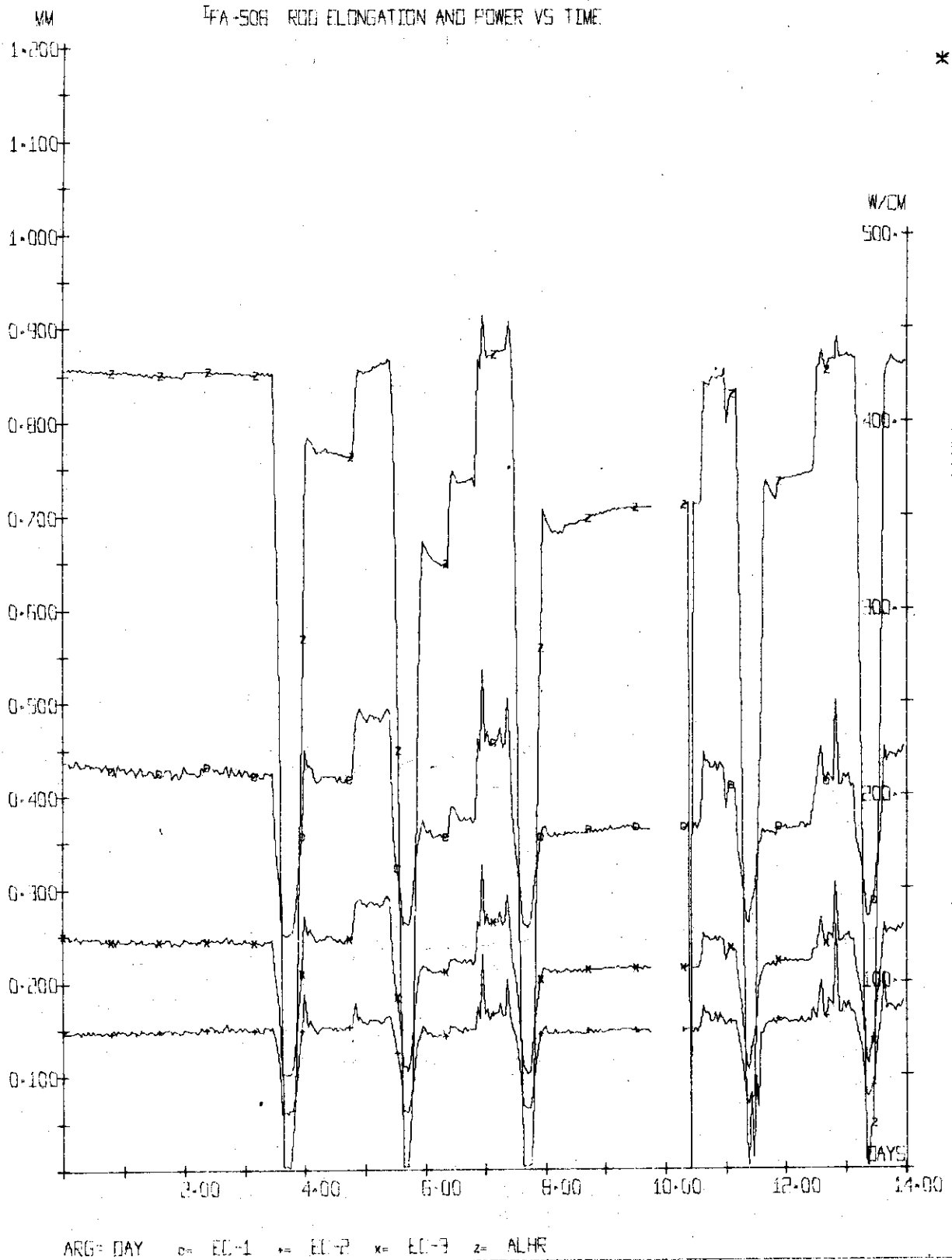


Fig. 2.22 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

PLT 42

DATA FROM 13 AUG 77 0 HRS TO 26 AUG 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 1523 2070 MWG/T UO₂

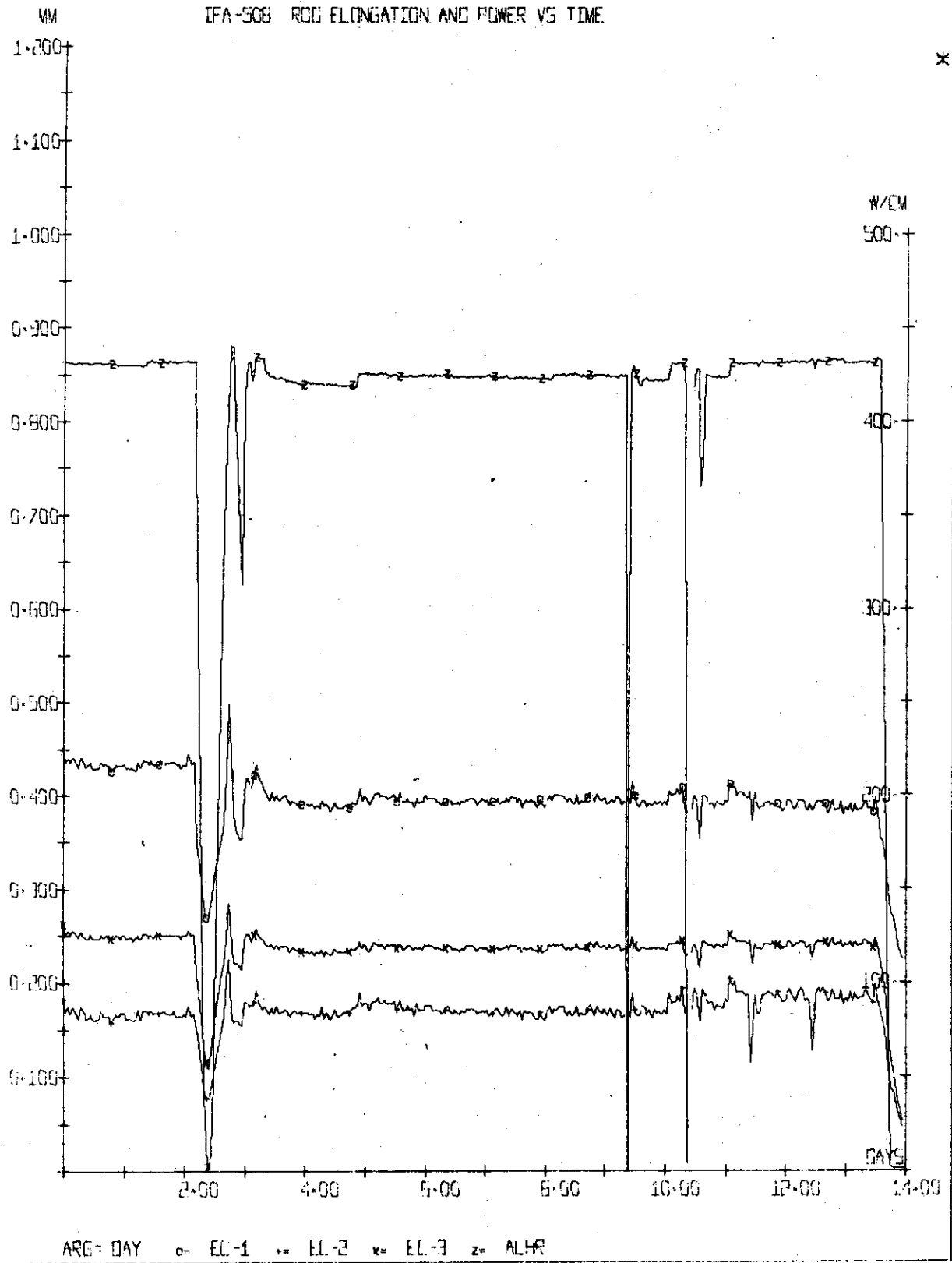


Fig. 2.23 (continued)

JAERI REACTOR PROJECT
 DATA FROM 1 JULY 77 00 HRS TO 14 JULY 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 91. 342. MW/D/T UO2

PLOT 41

IFA-508 FUEL TEMPERATURE AND POWER VS TIME

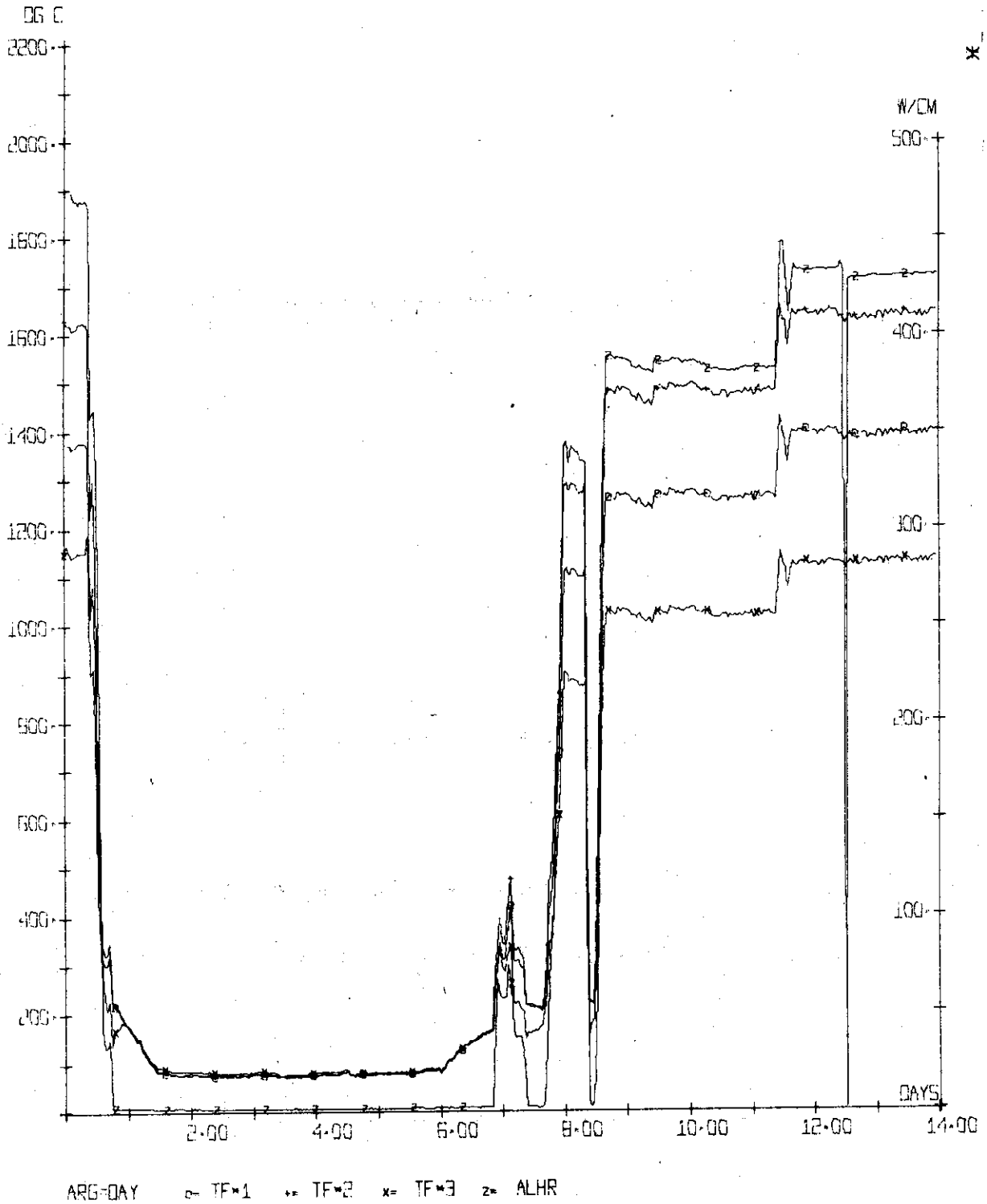


Fig. 2.24 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT
 DATA FROM 15 JULY 77 0 HRS TO 29 JULY 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 374 93% WND/T UO2

PLGT 41

IFA-506 FUEL TEMPERATURE AND POWER VS TIME

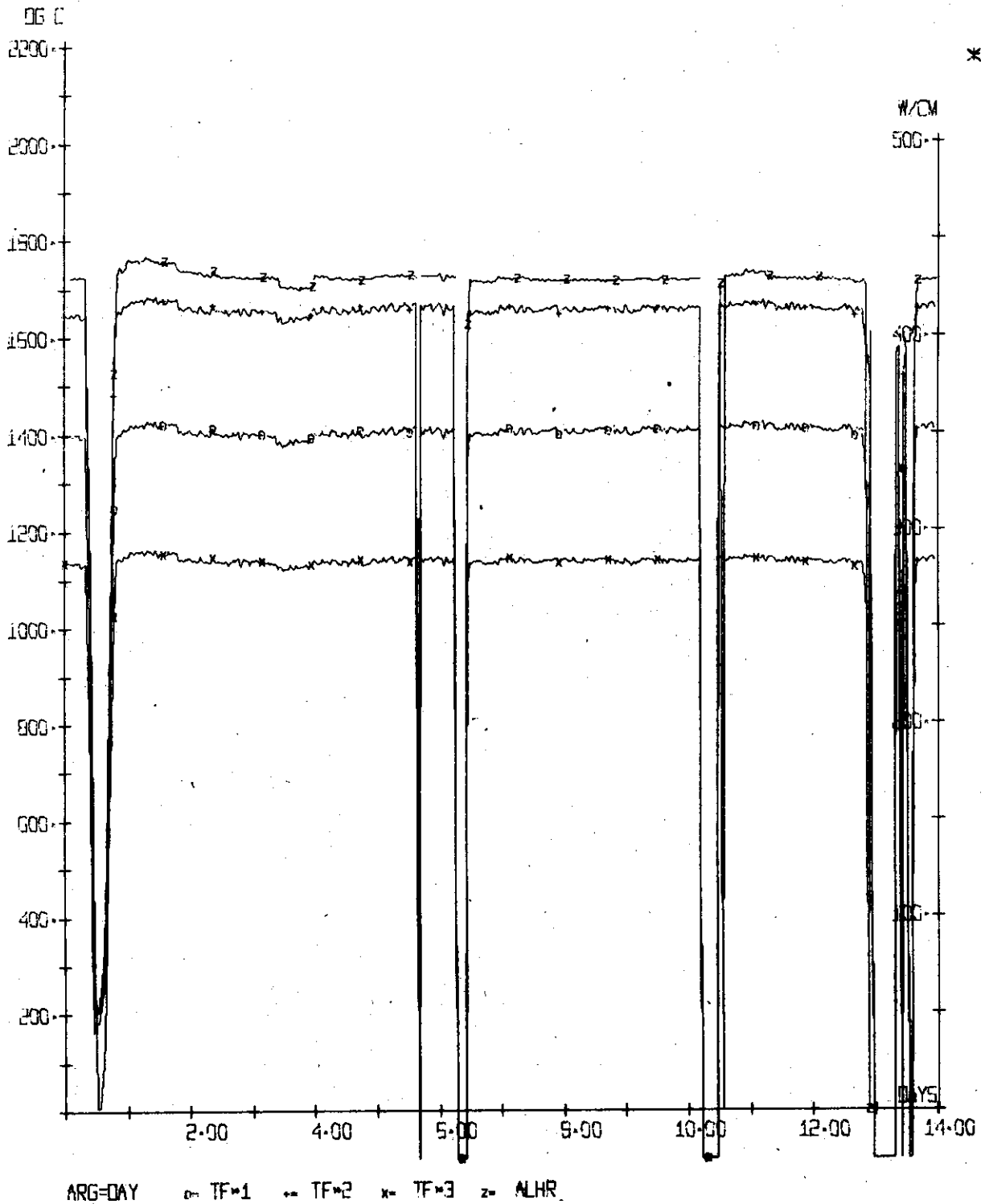


Fig. 2.25 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT

DATA FROM 29 JULY 77 0 HRS TO 11 AUG 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 981. 1433 MWG/T UO2

PLOT 41

TFA-508 FUEL TEMPERATURE AND POWER VS TIME

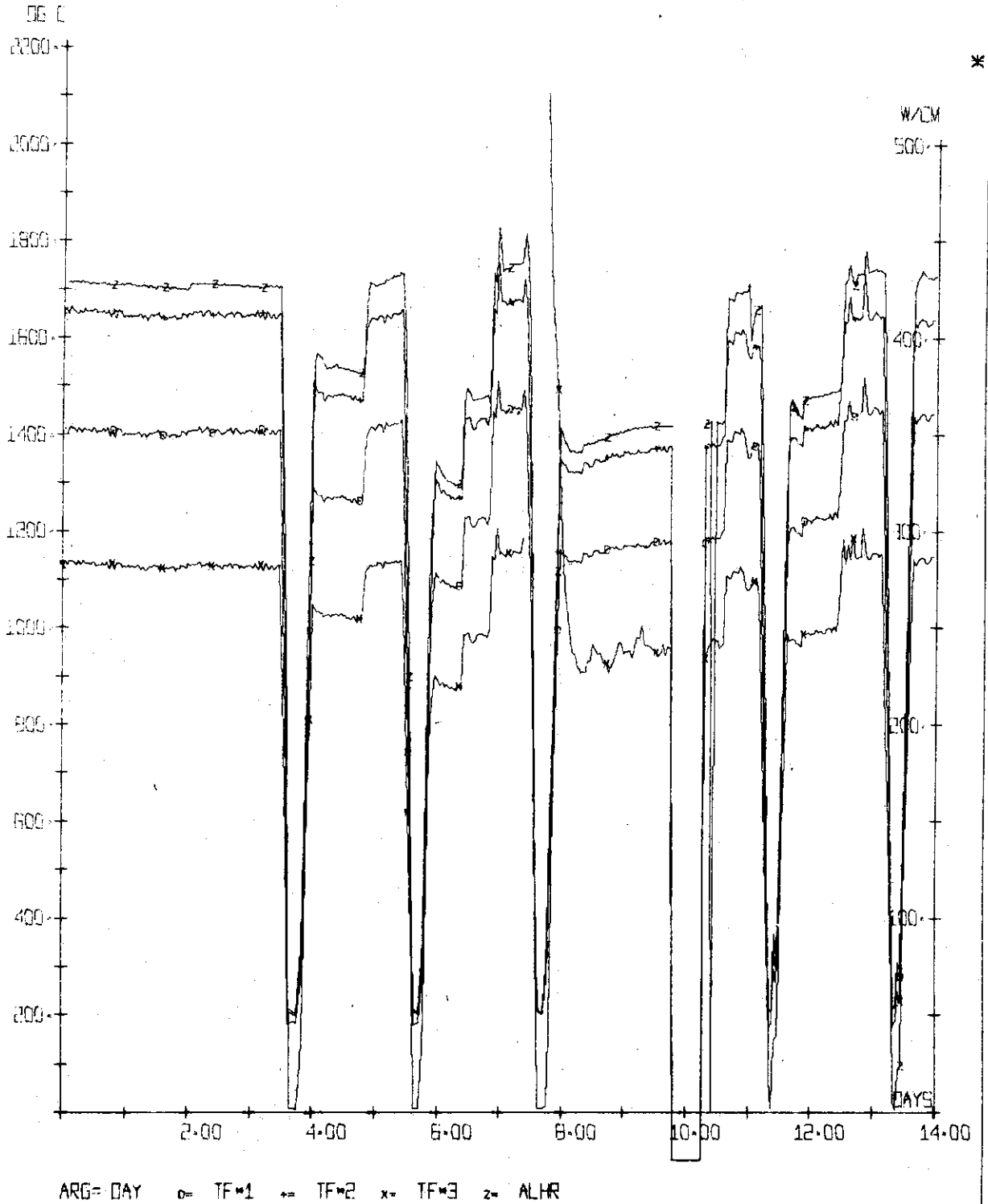


Fig. 2.26 (continued)

OECD HALDEN REACTOR PROJECT
 DATA FROM 13 AUG 77 0 HRS TO 26 AUG 77 2345 HRS
 BURN-UP AT THE END OF FIRST/LAST DAY 1523 2070 MWDT UO2

PLOT 41

IFA-508 FUEL TEMPERATURE AND POWER VS TIME

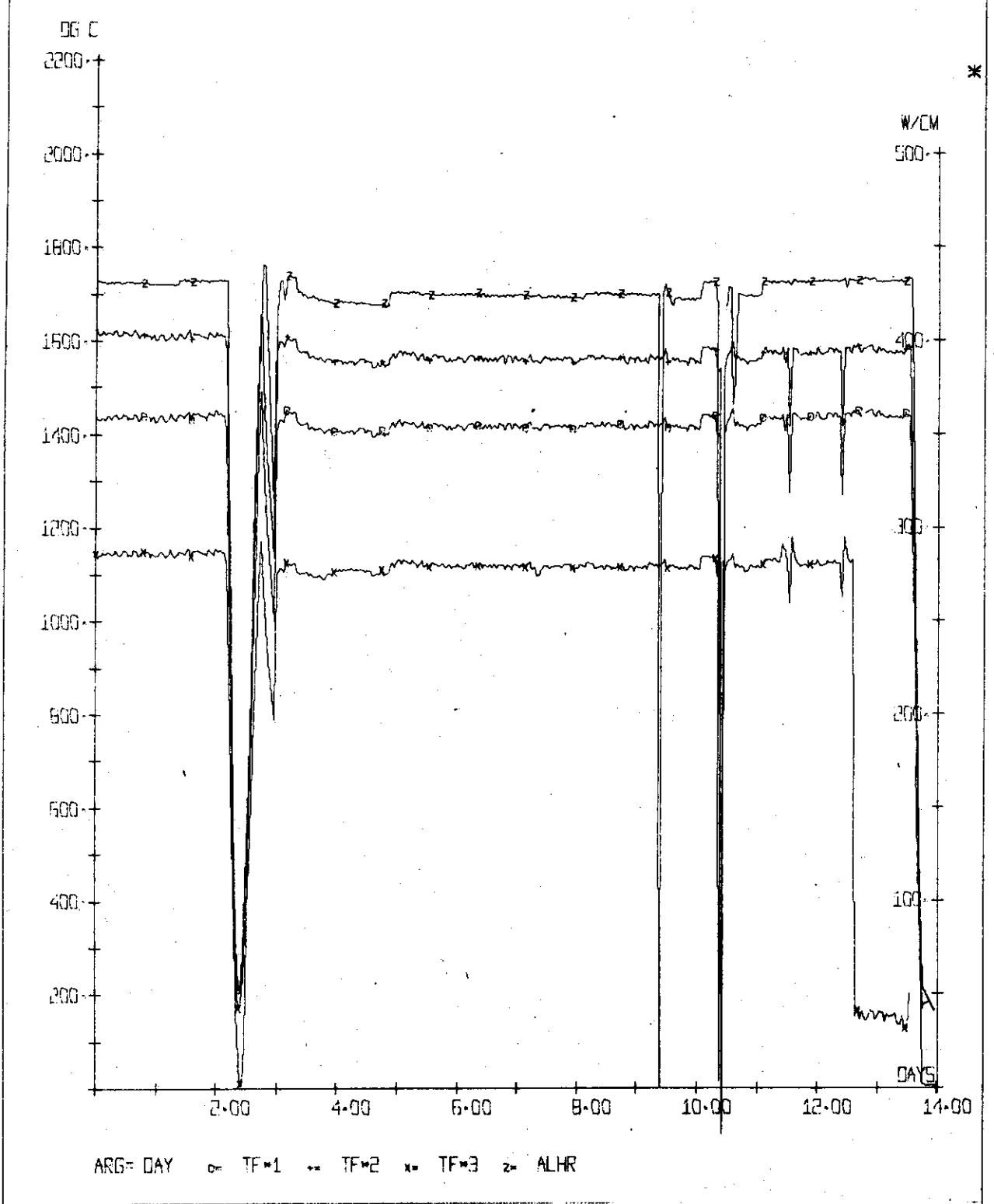


Fig. 2.27 (continued)

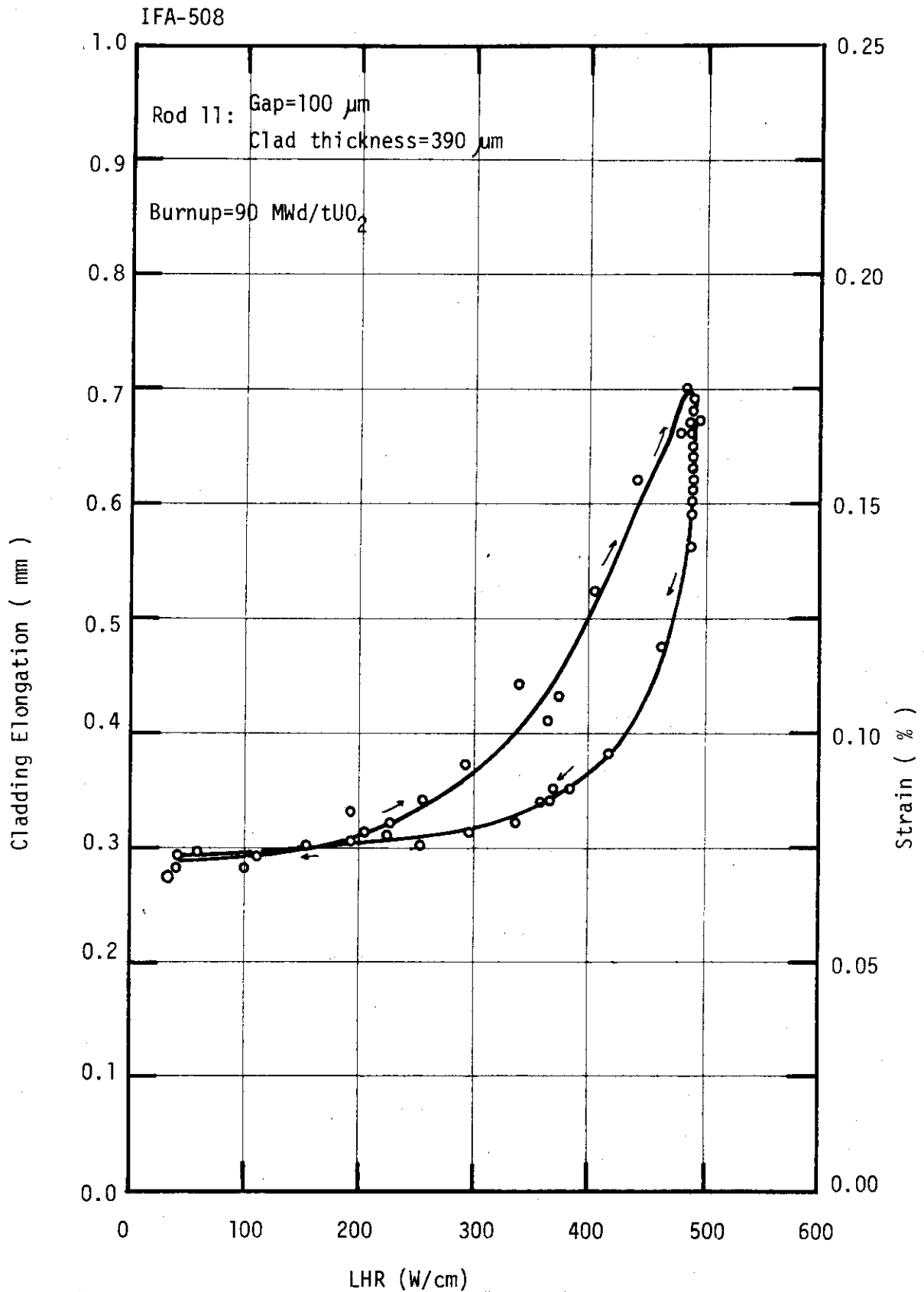


Fig. 3.1 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 70 Mwd/tUO_2

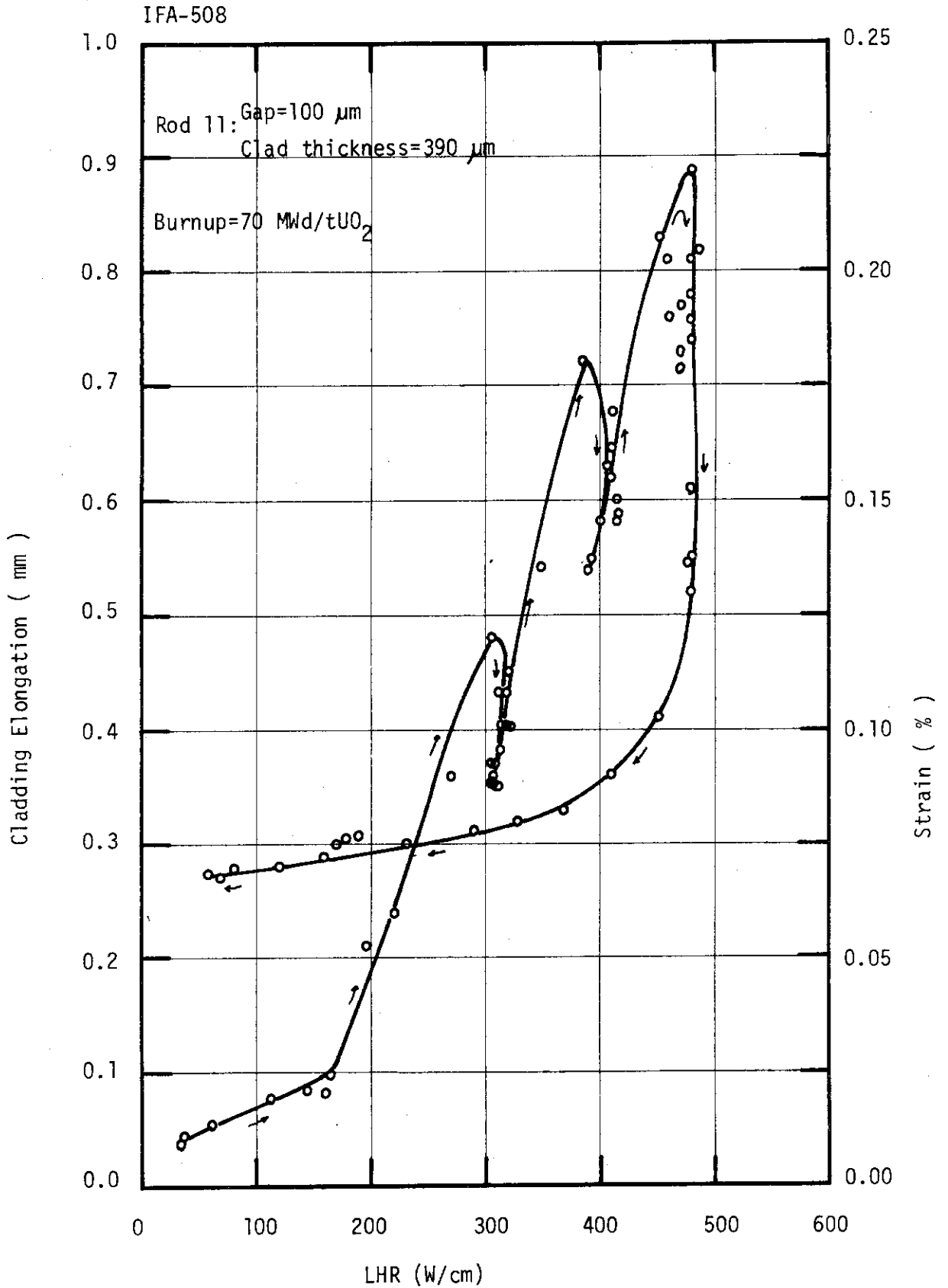


Fig. 3.2 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO_2

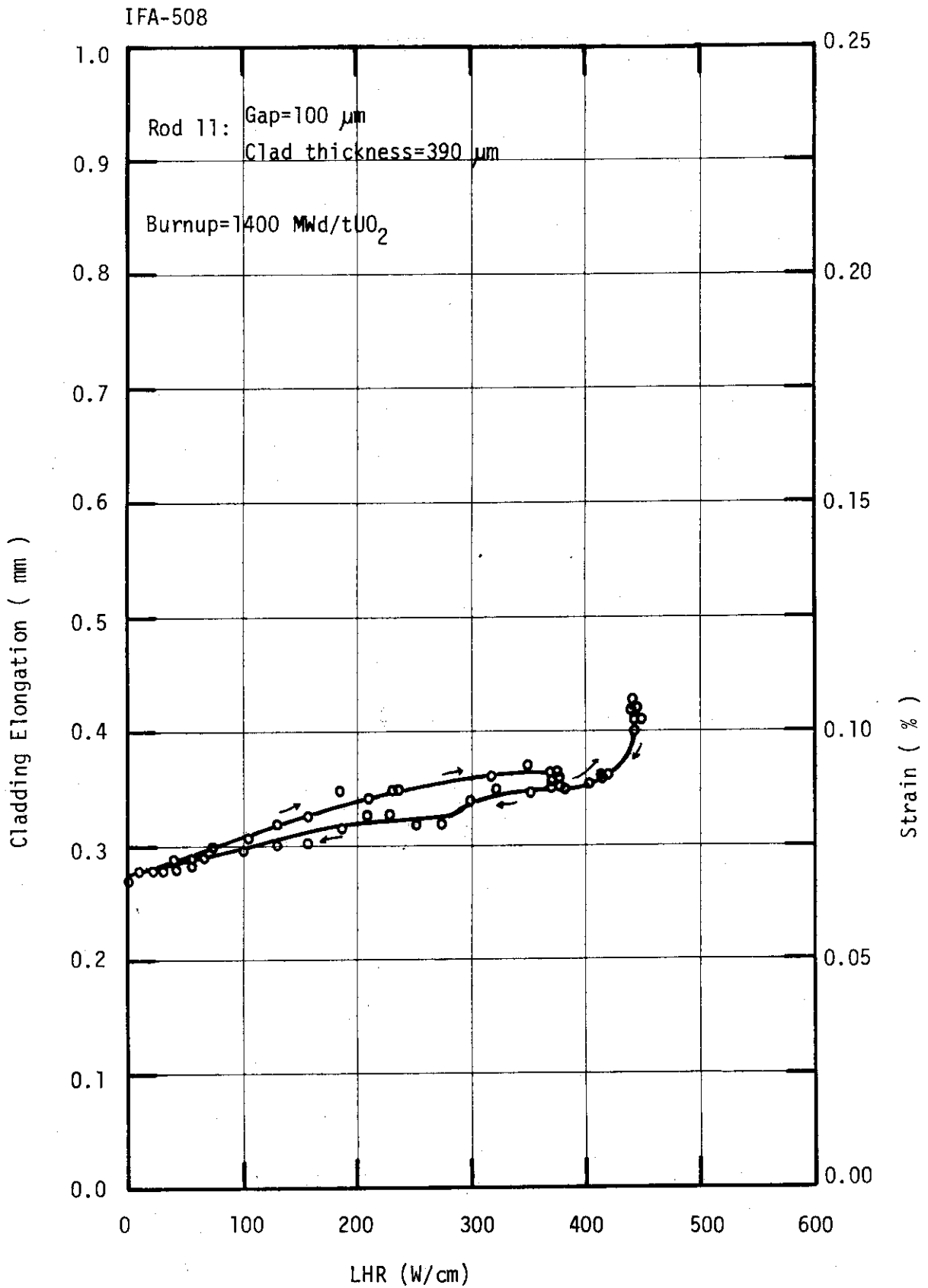


Fig. 3.3 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂

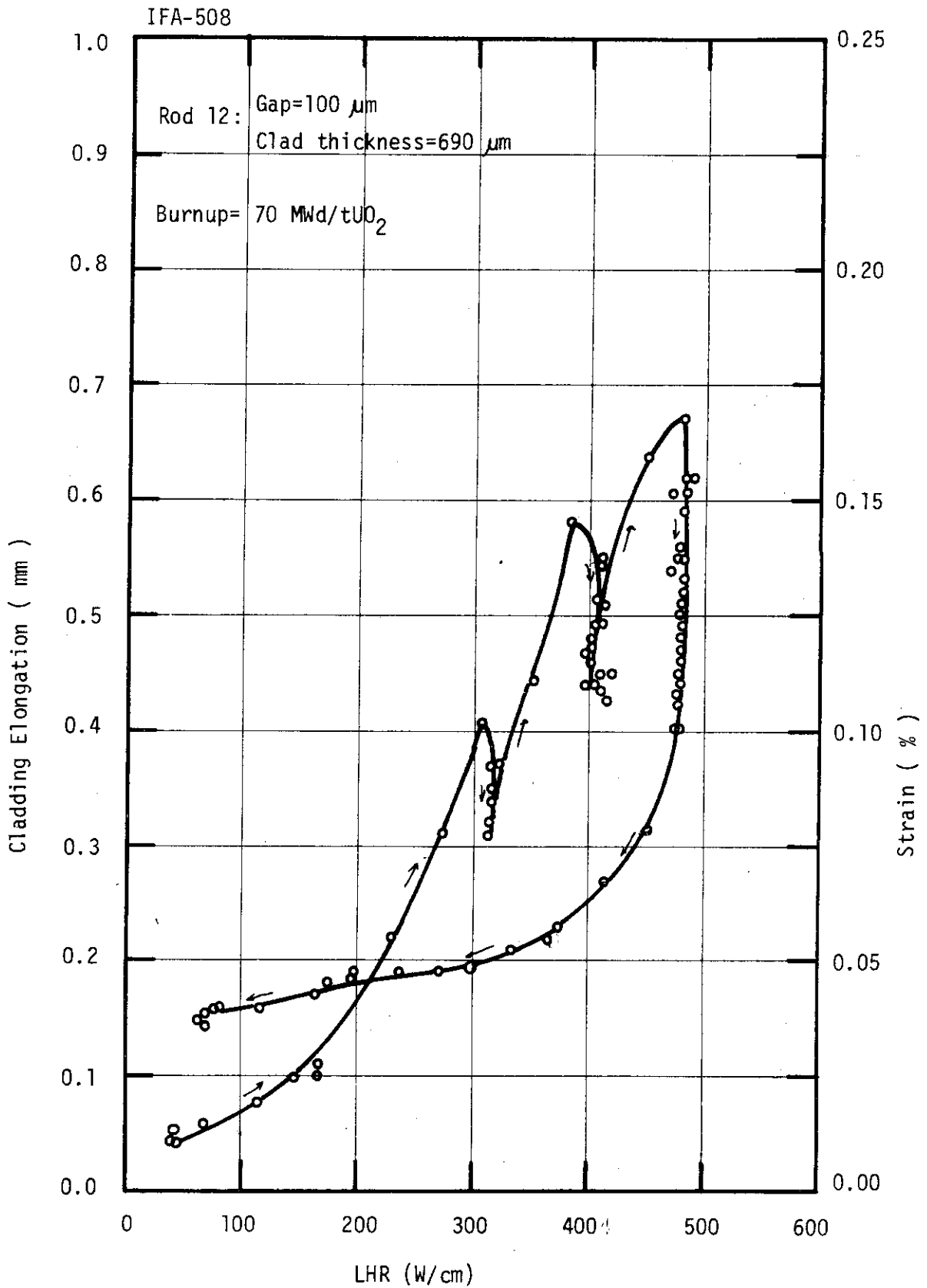


Fig. 3.4 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂

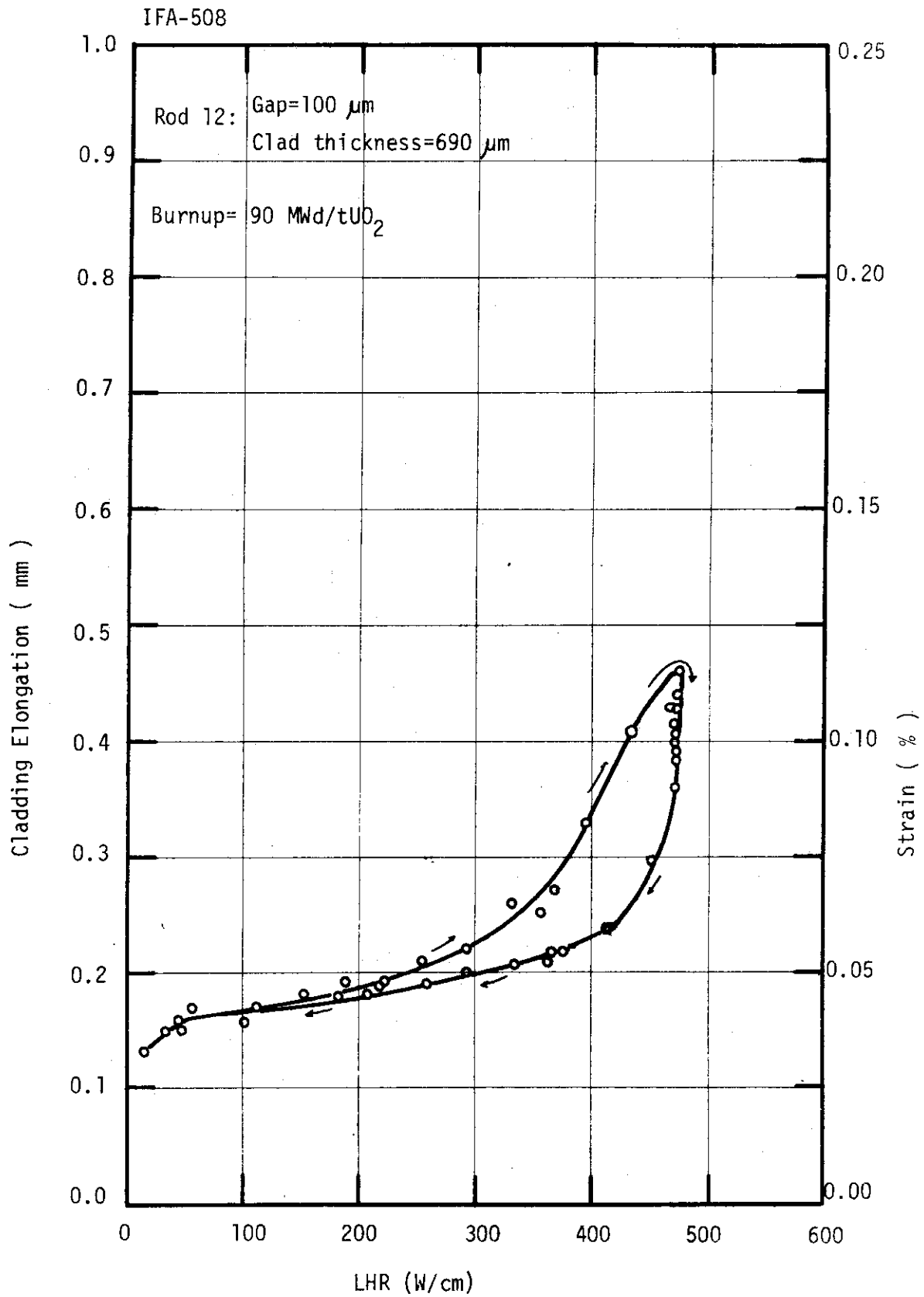


Fig. 3.5 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂

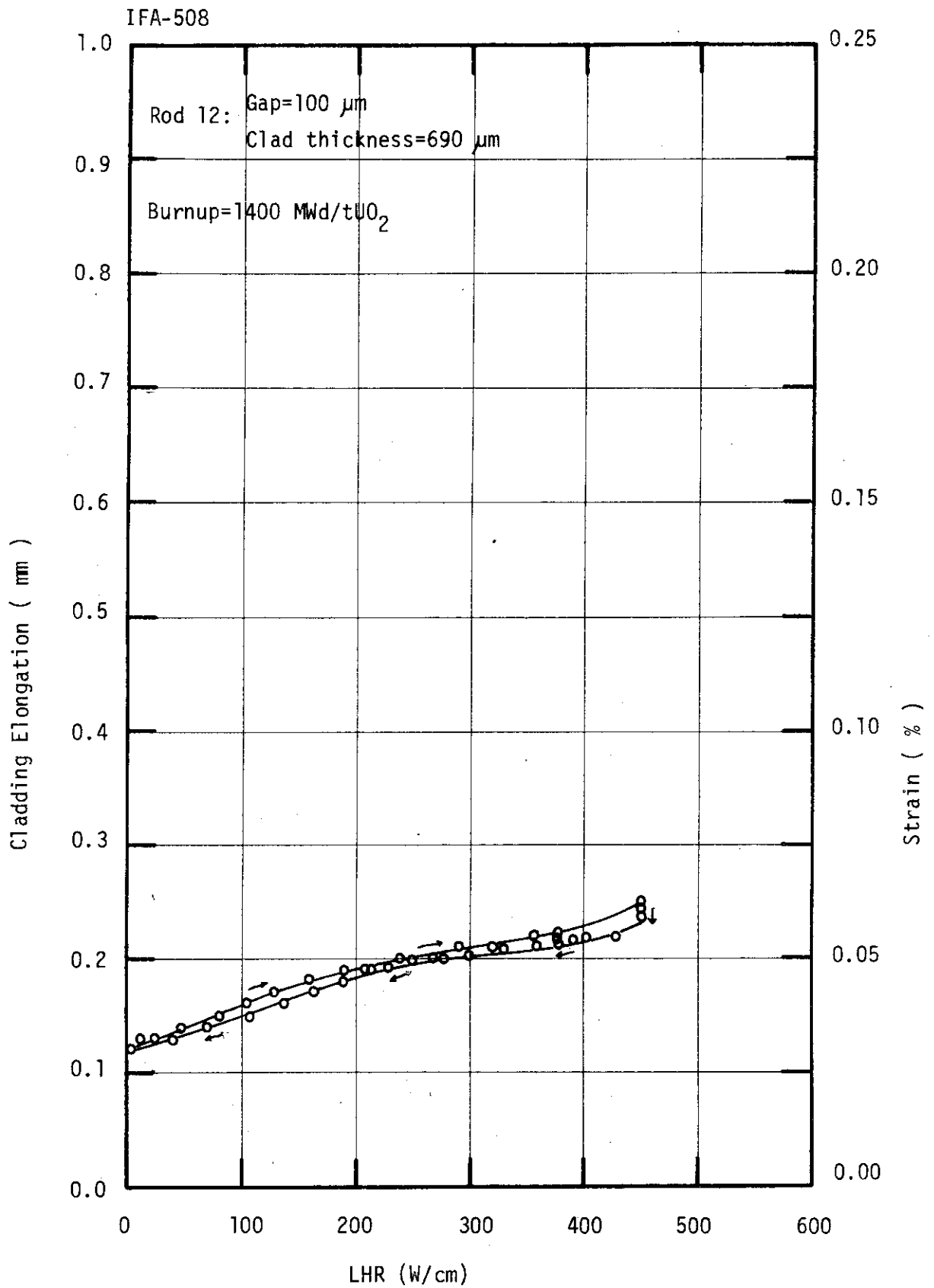


Fig. 3.6 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 Mwd/tUO_2

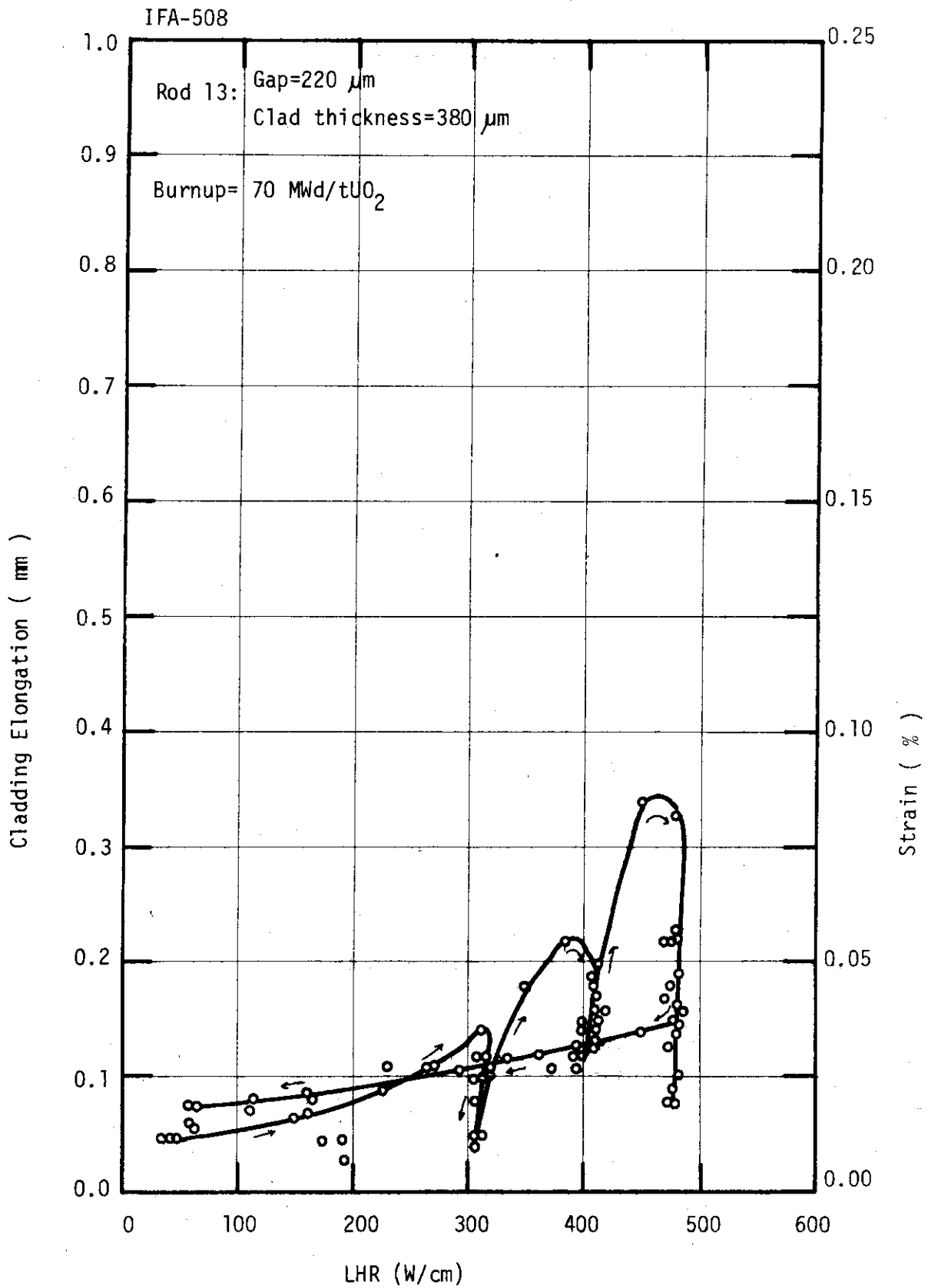


Fig. 3.7 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂

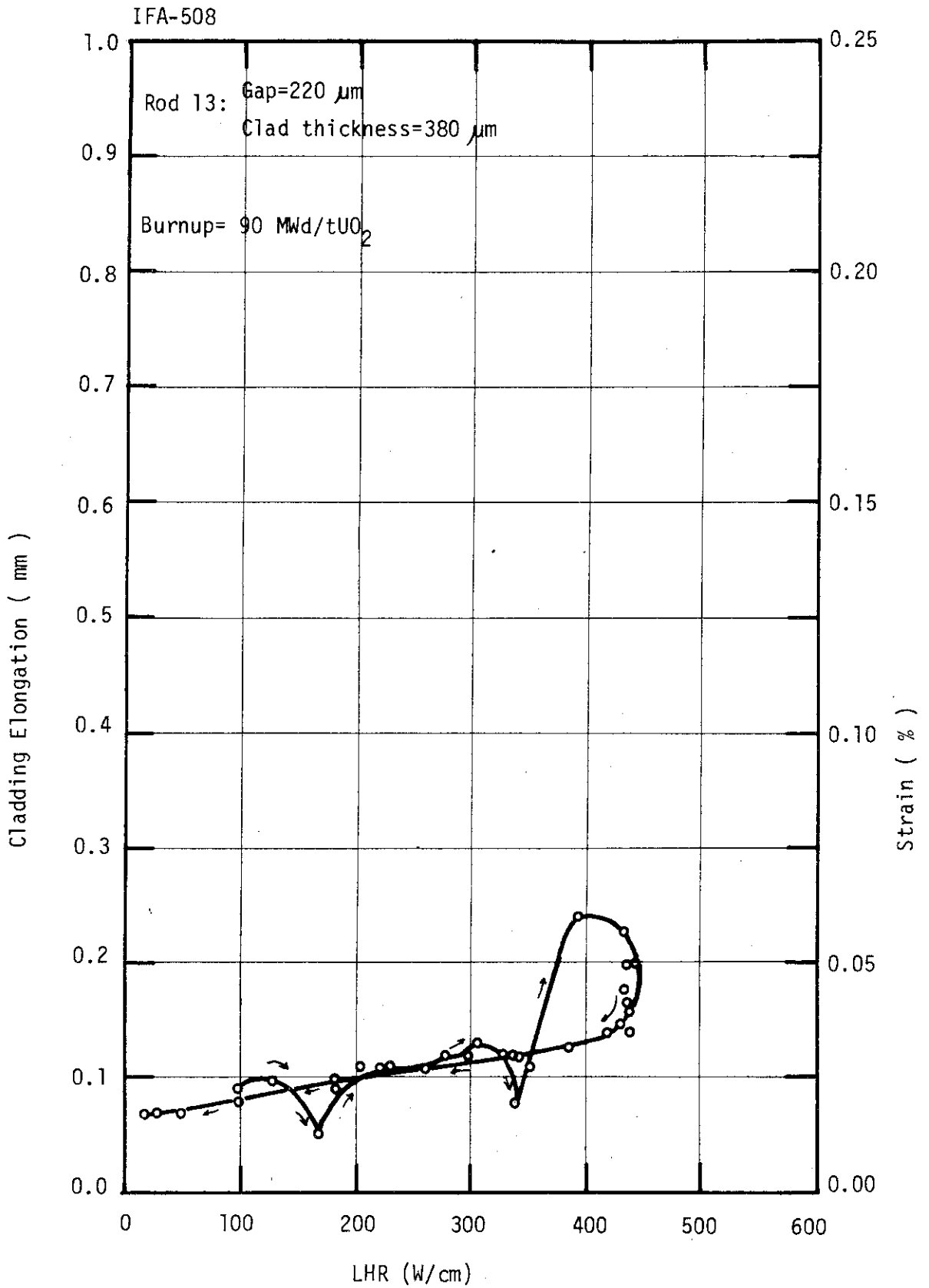


Fig. 3.8 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): Attained burnups are 90 MWd/tUO₂

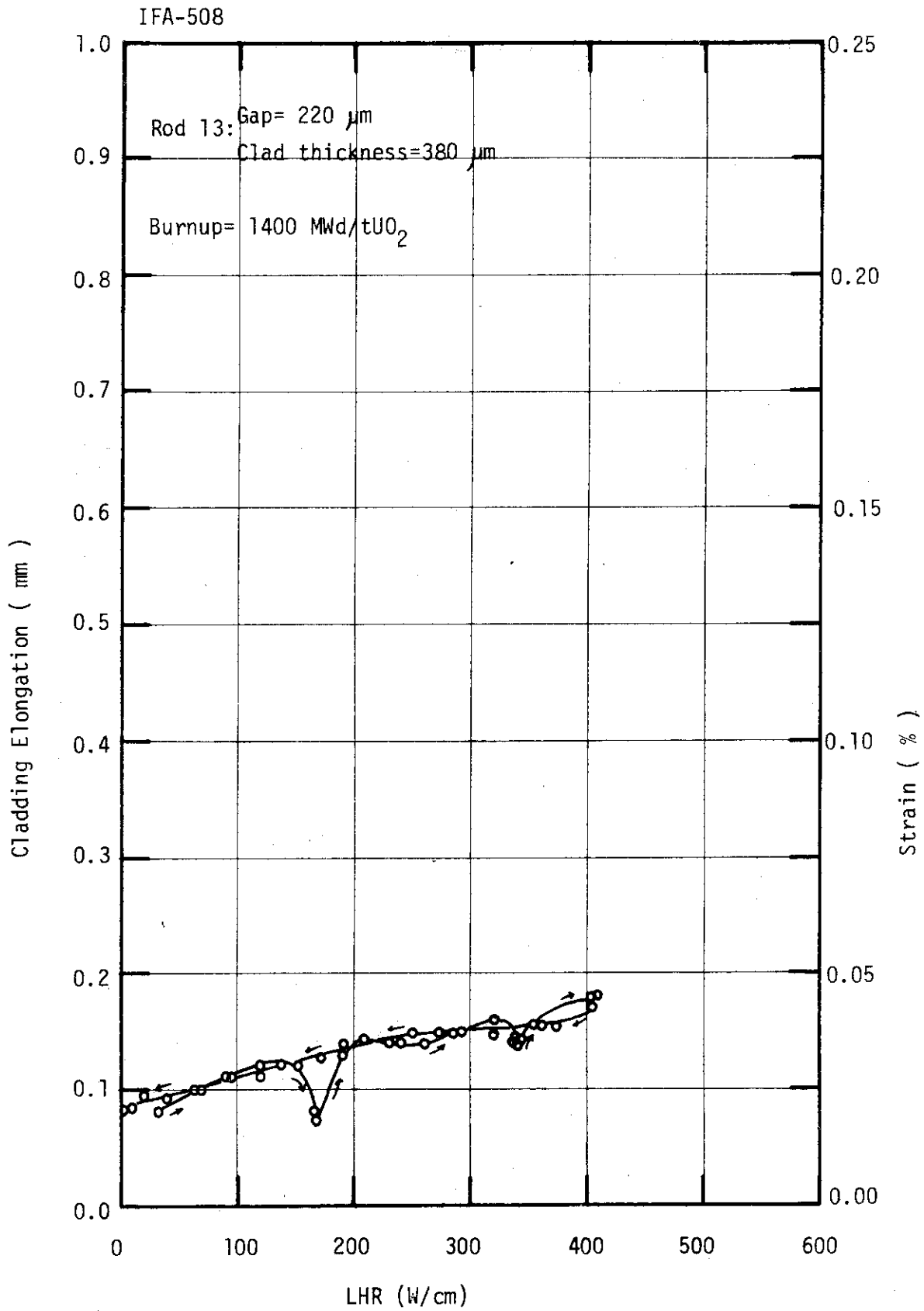


Fig. 3.9 Cladding elongation (or strain) as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂

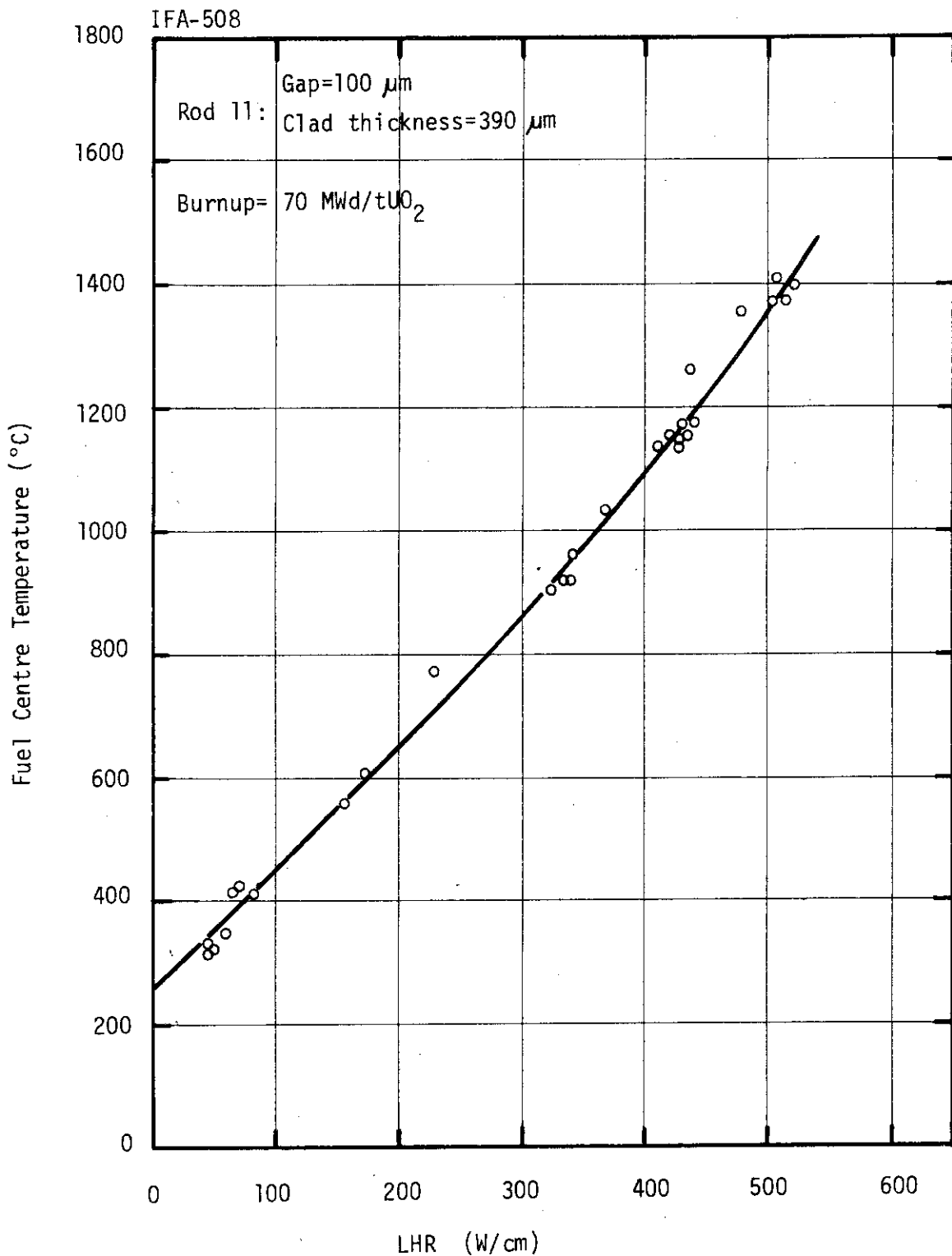


Fig. 3.10 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂

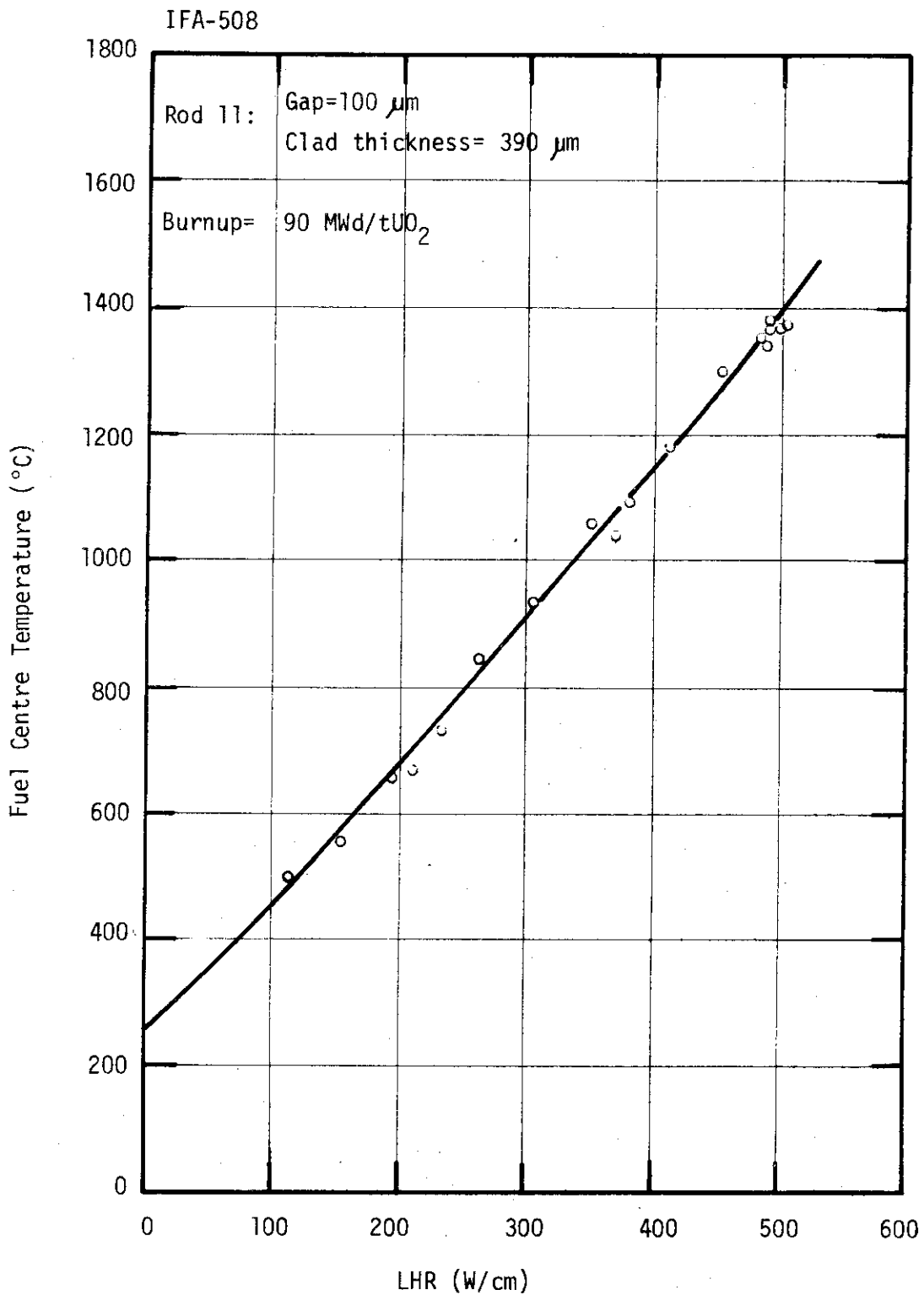


Fig. 3.11 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂

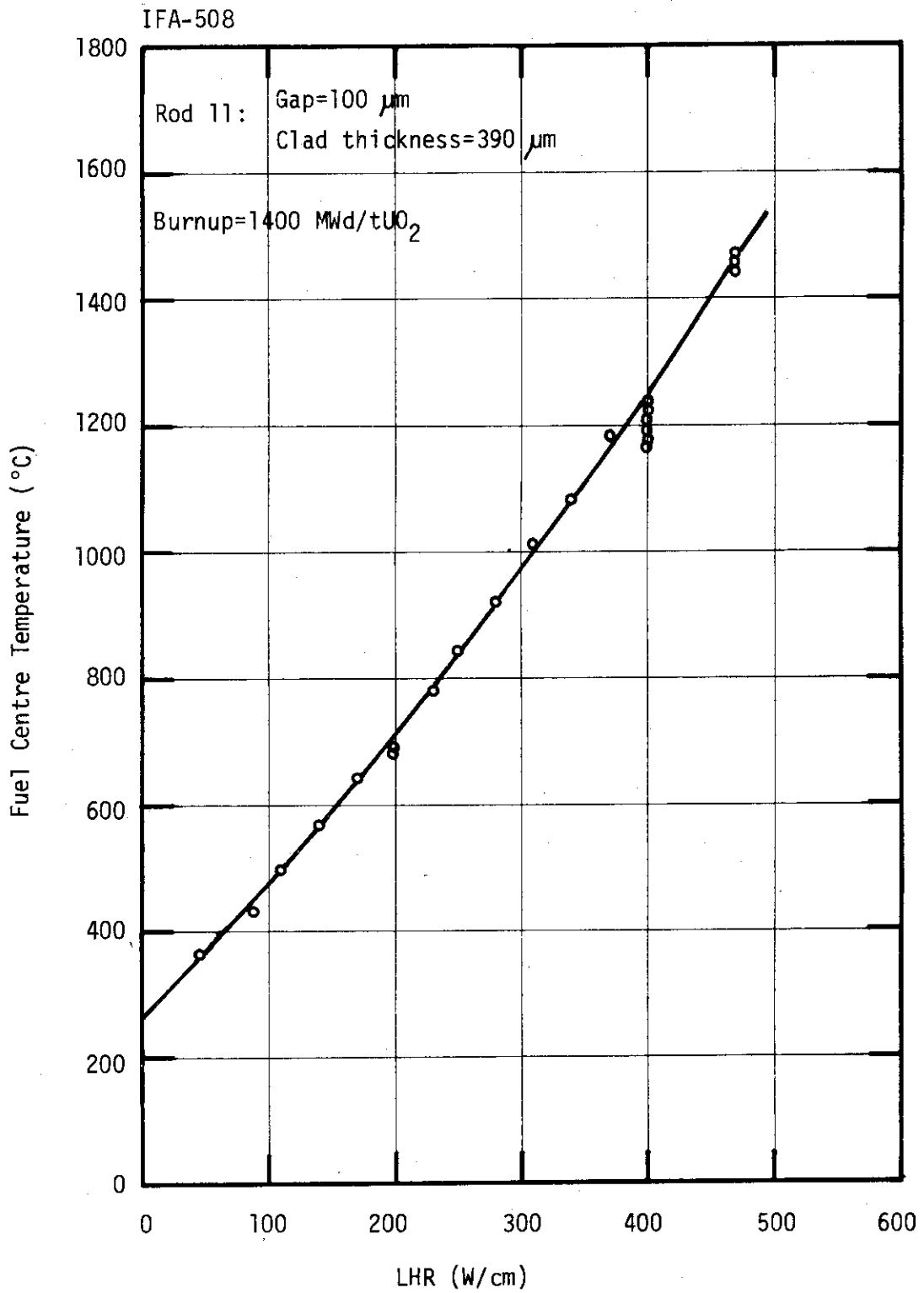


Fig. 3.12 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 11 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 Mwd/tUO_2

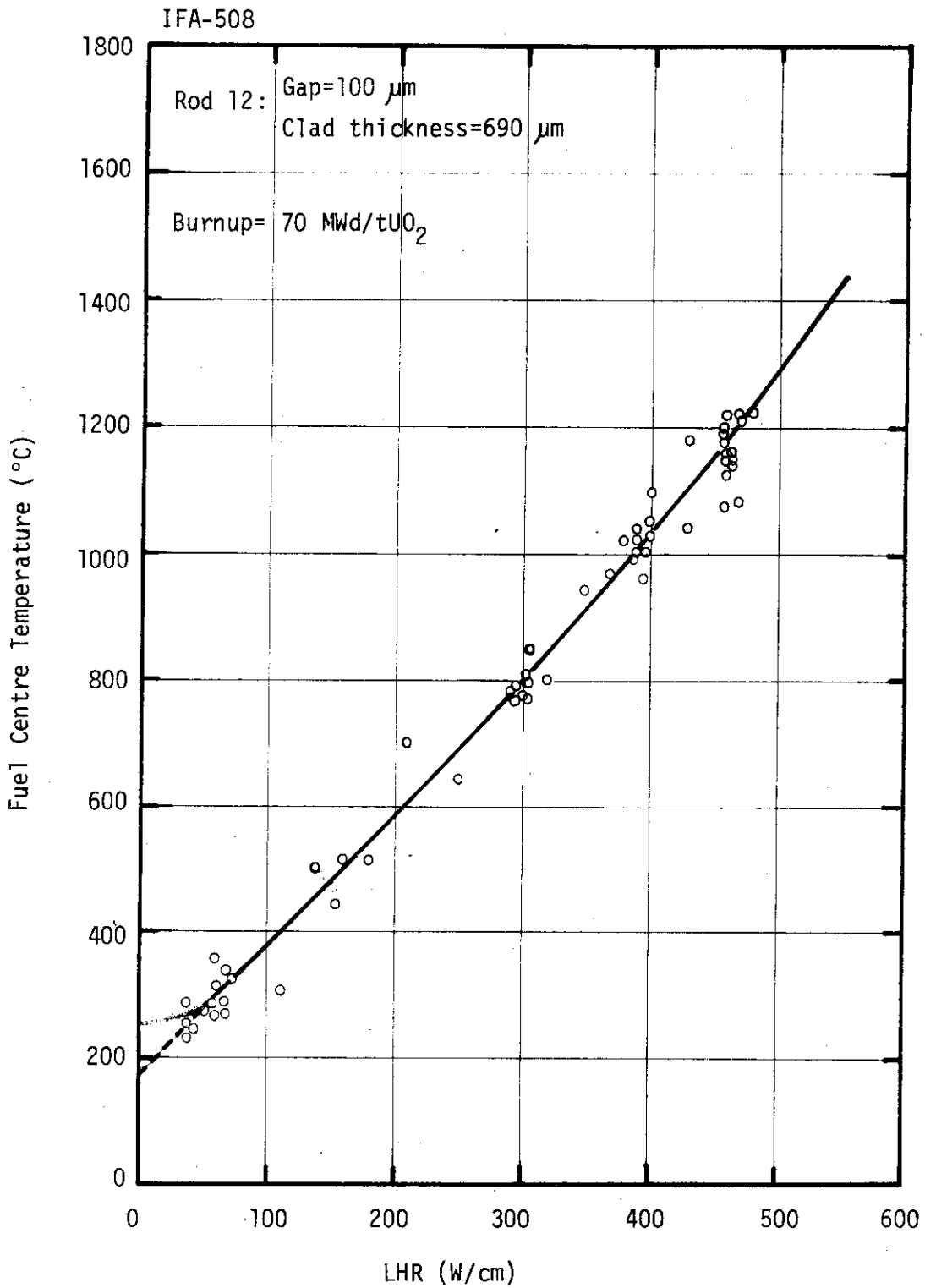


Fig. 3.13 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂

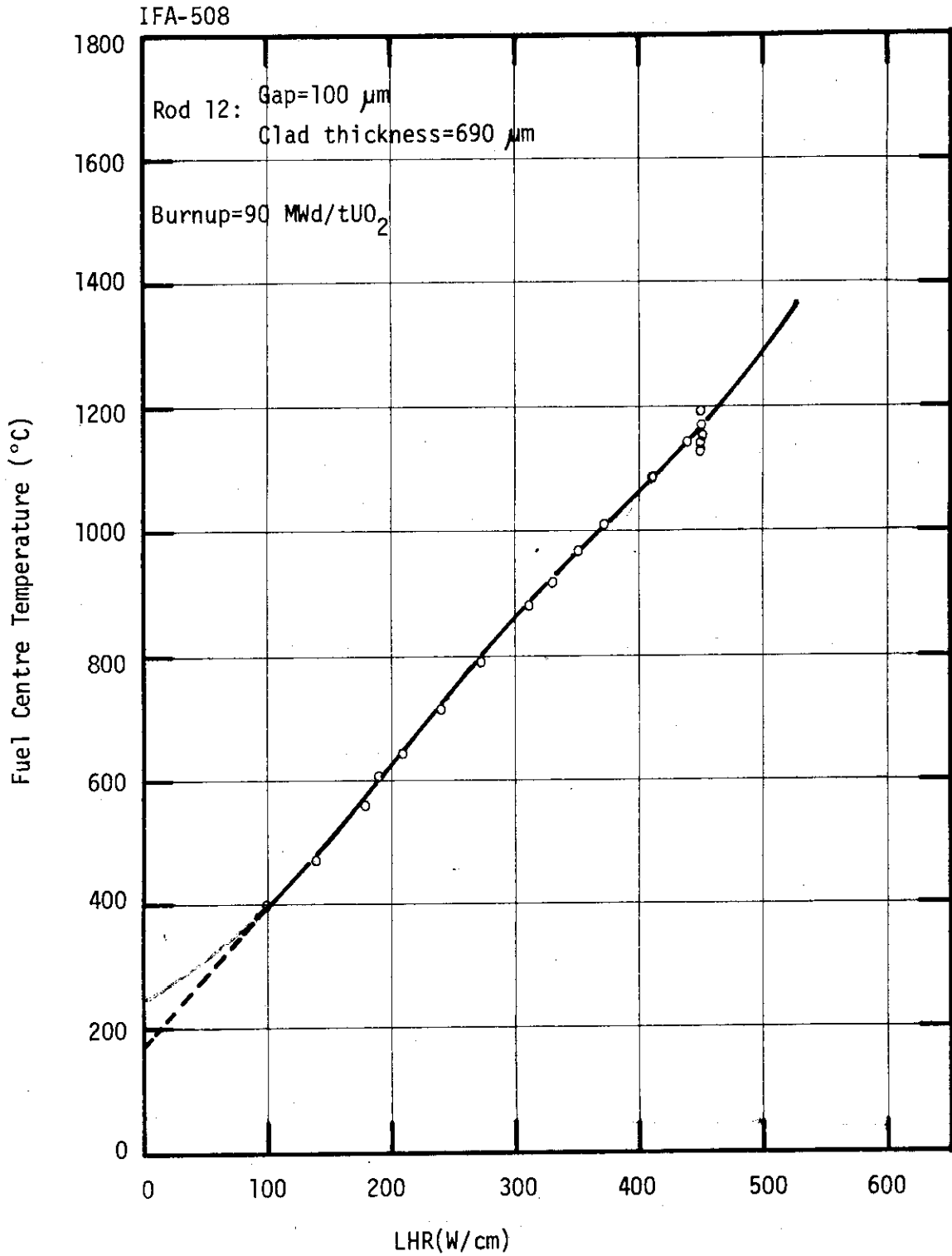


Fig. 3.14 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂

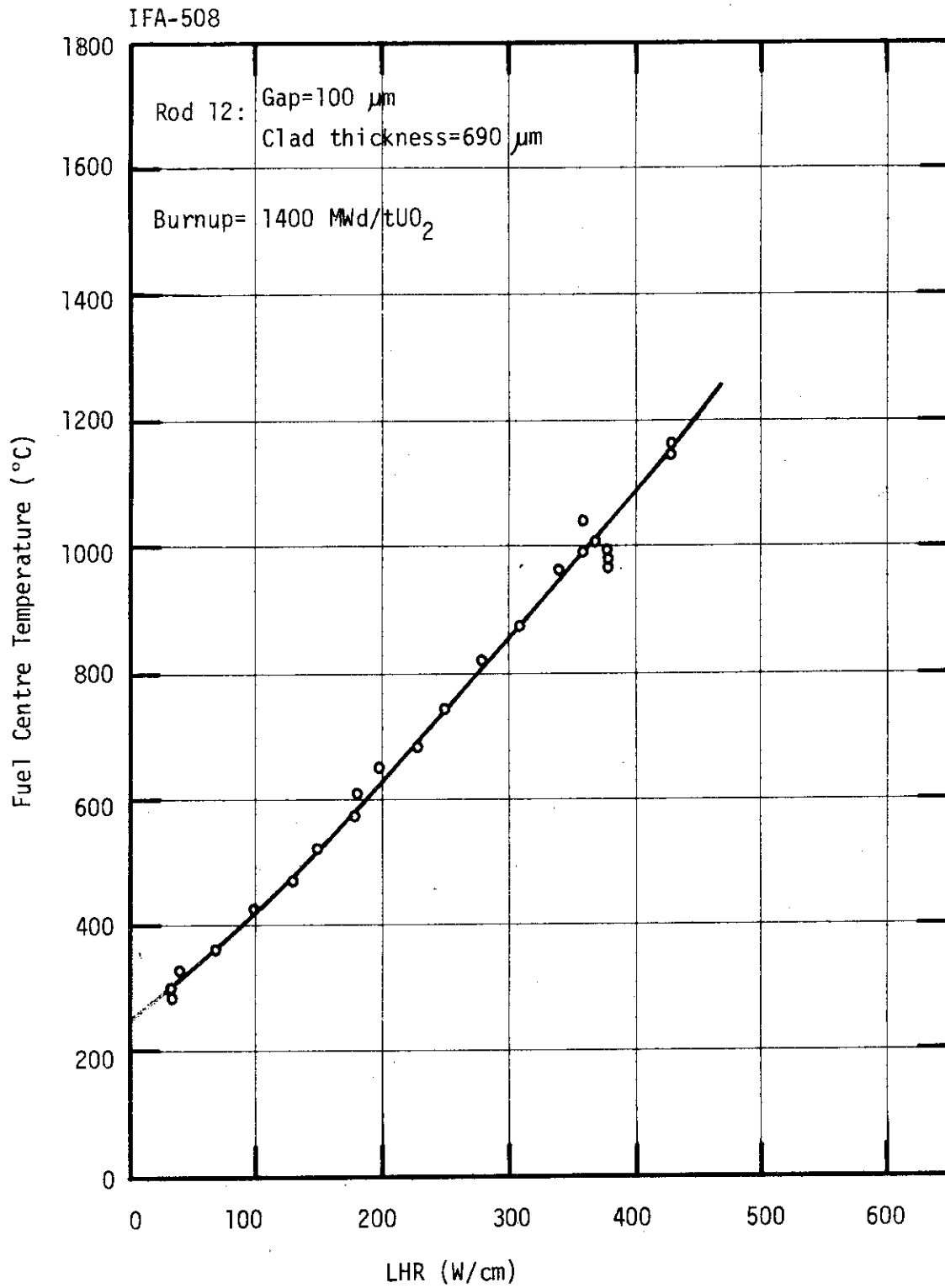


Fig. 3.15 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 12 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂

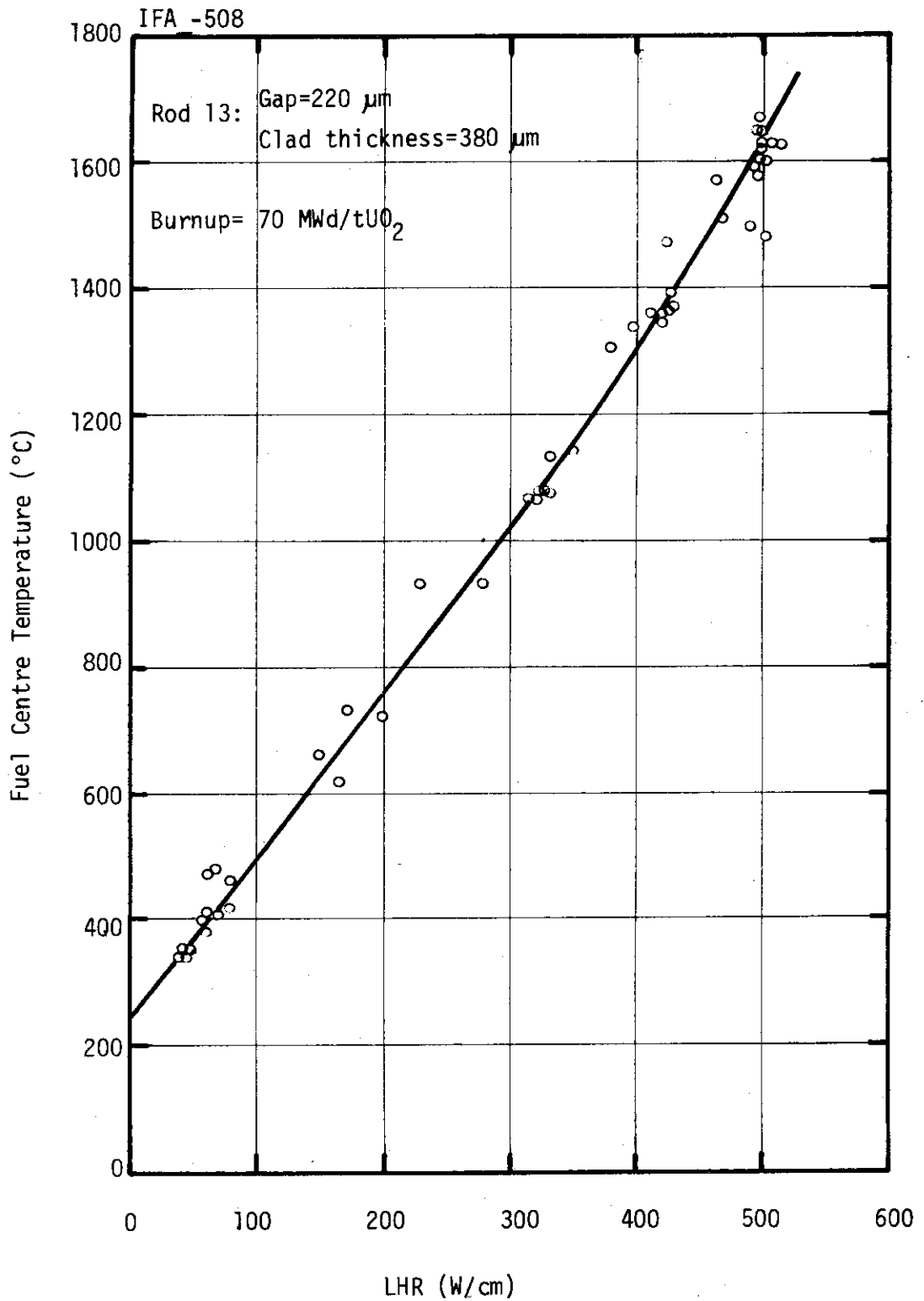


Fig. 3.16 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 70 MWd/tUO₂

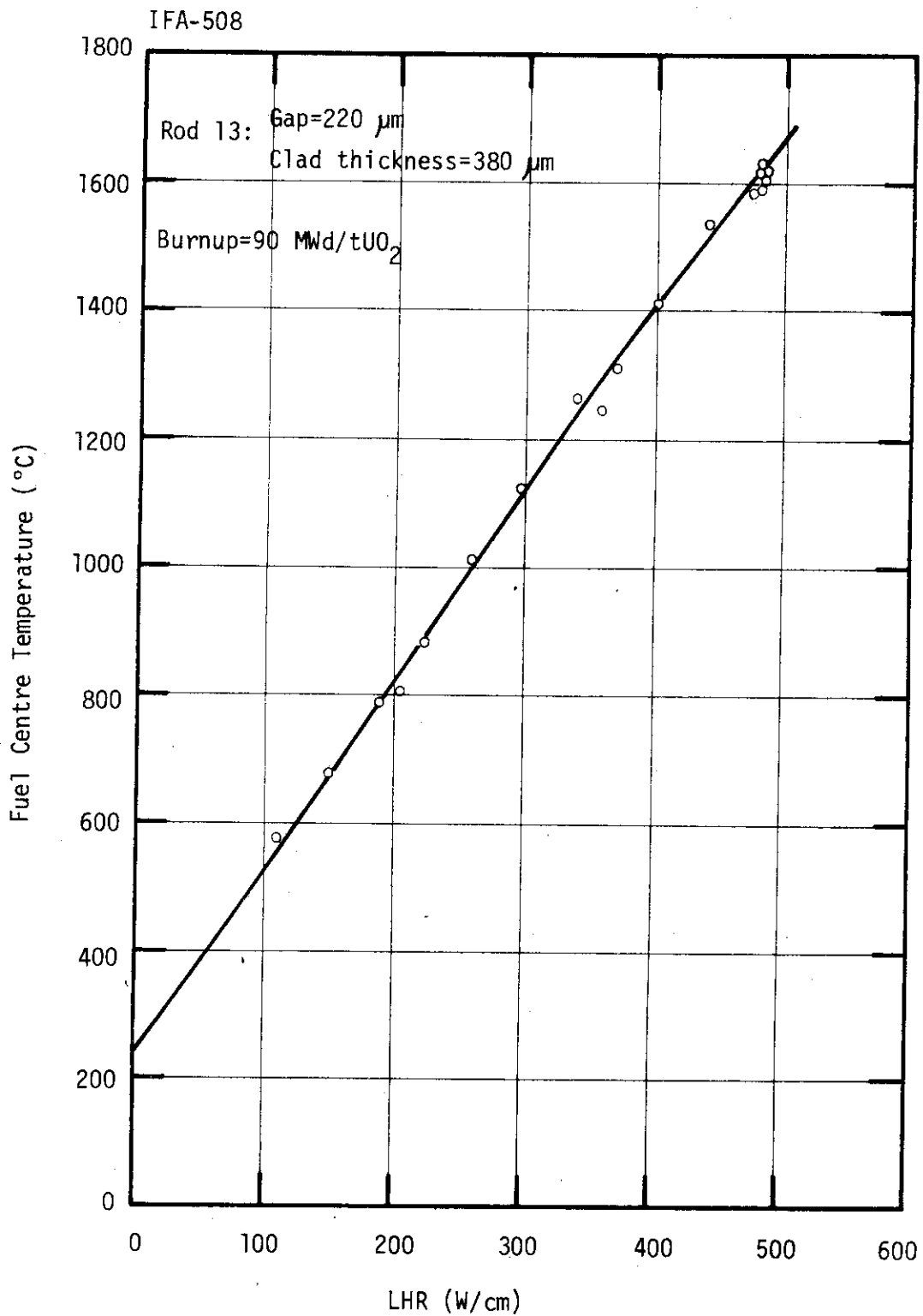


Fig. 3.17 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 90 MWd/tUO₂

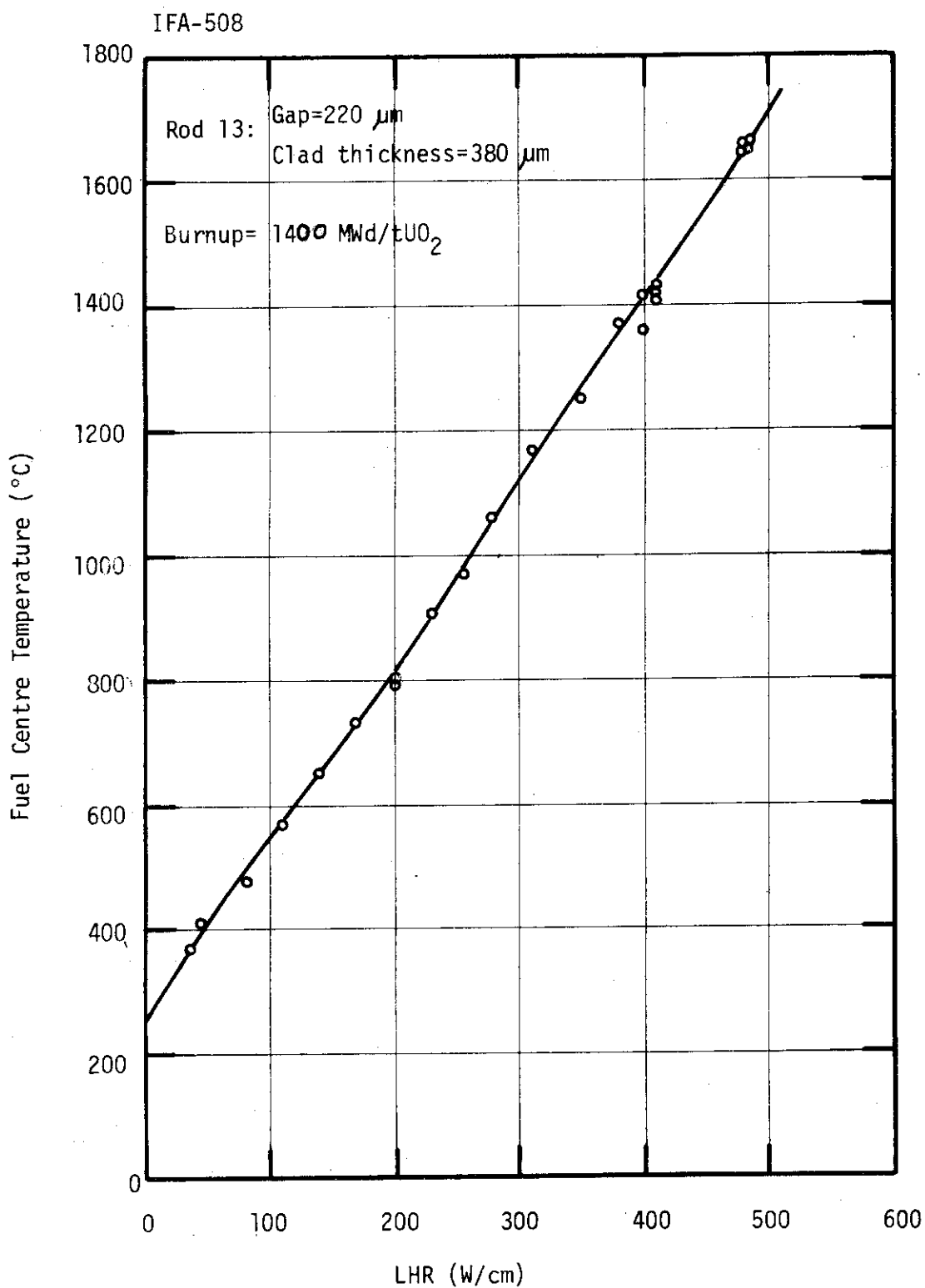


Fig. 3.18 Fuel centre temperature as a function of linear heat rating (LHR) for Rod 13 of IFA-508(I): attained burnups are 1 400 MWd/tUO₂

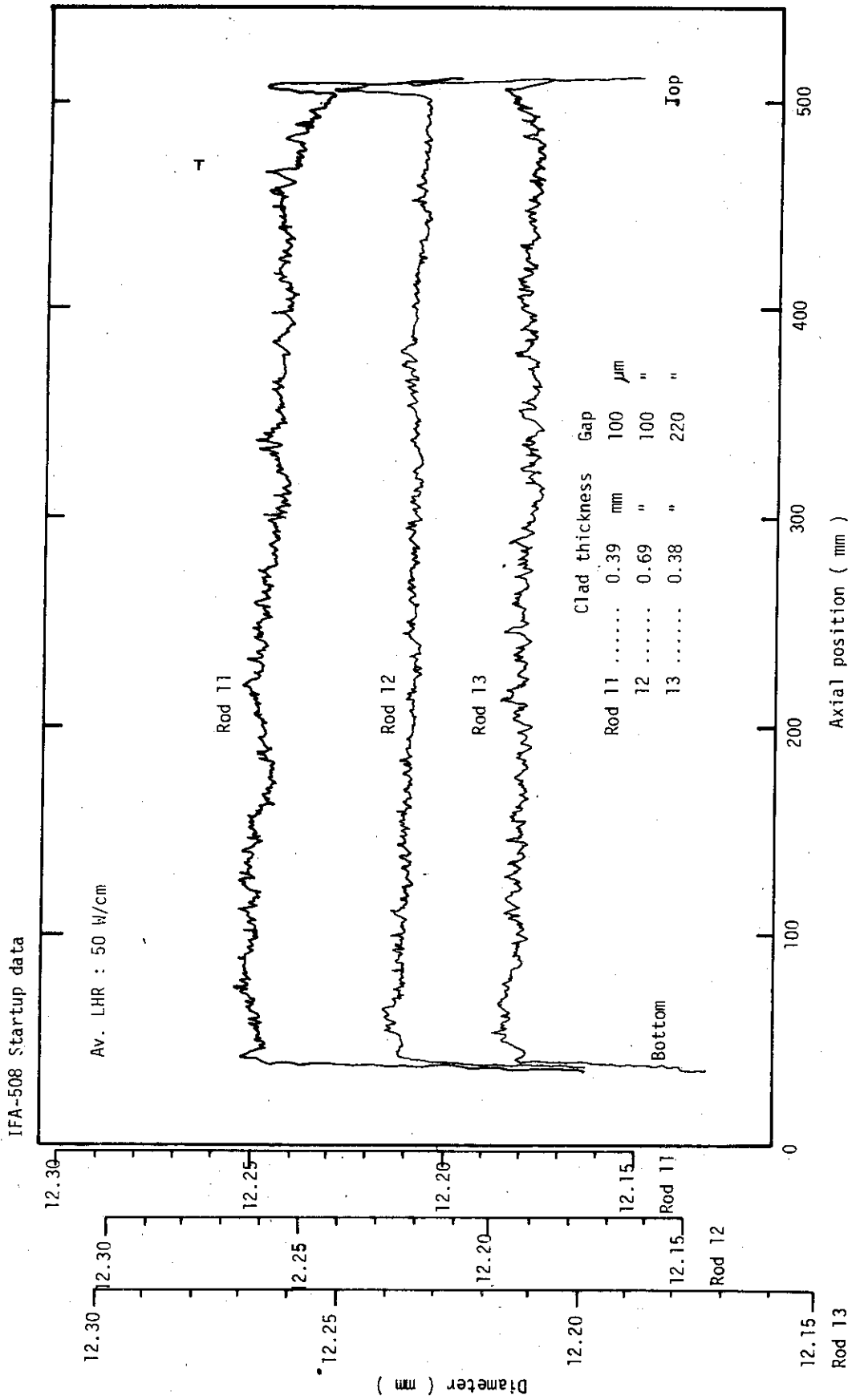


Fig. 3.19 Diameter traces during first power cycle at 50 M/cm

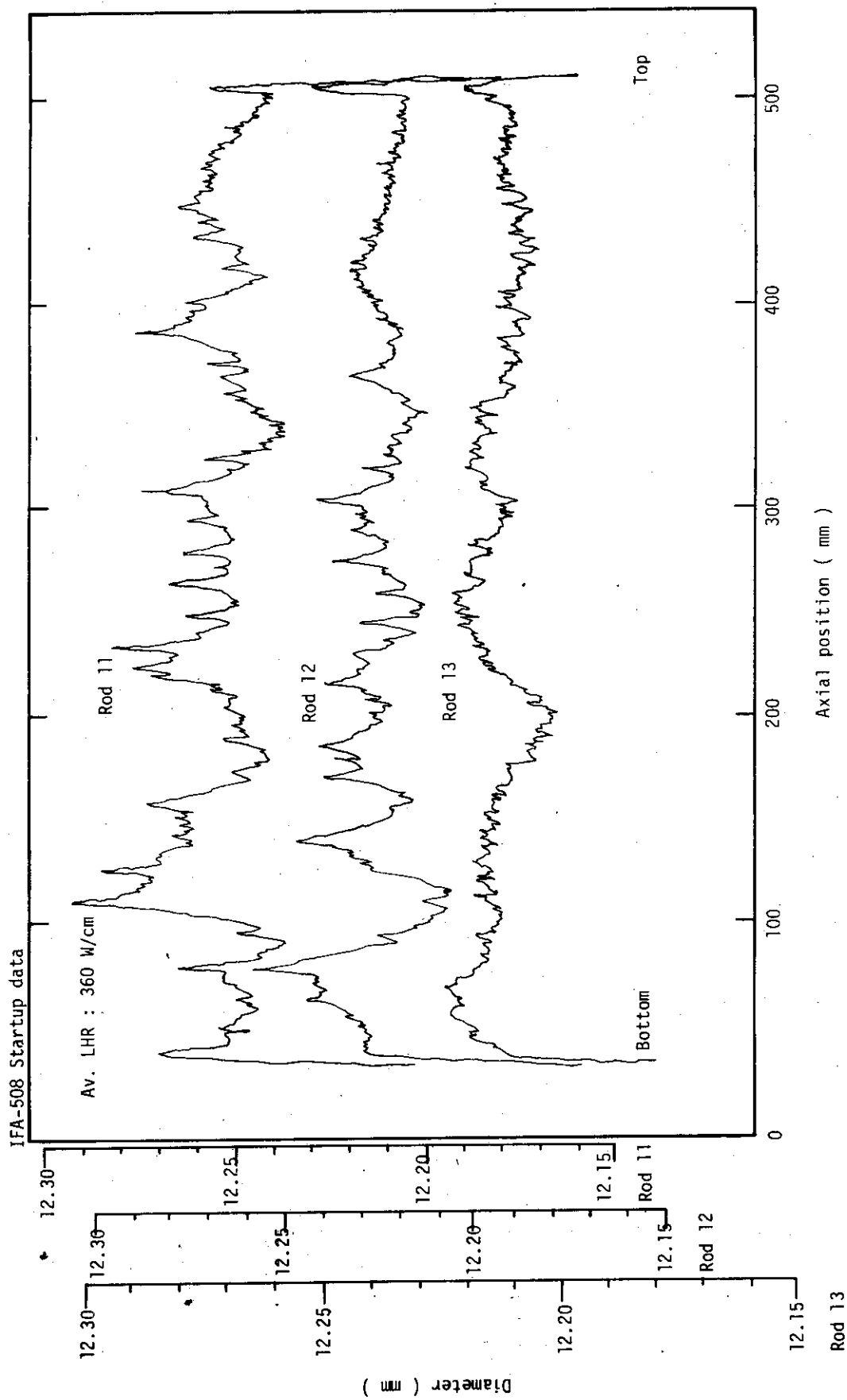


Fig. 3.20 Diameter traces during first power cycle at 360 W/cm

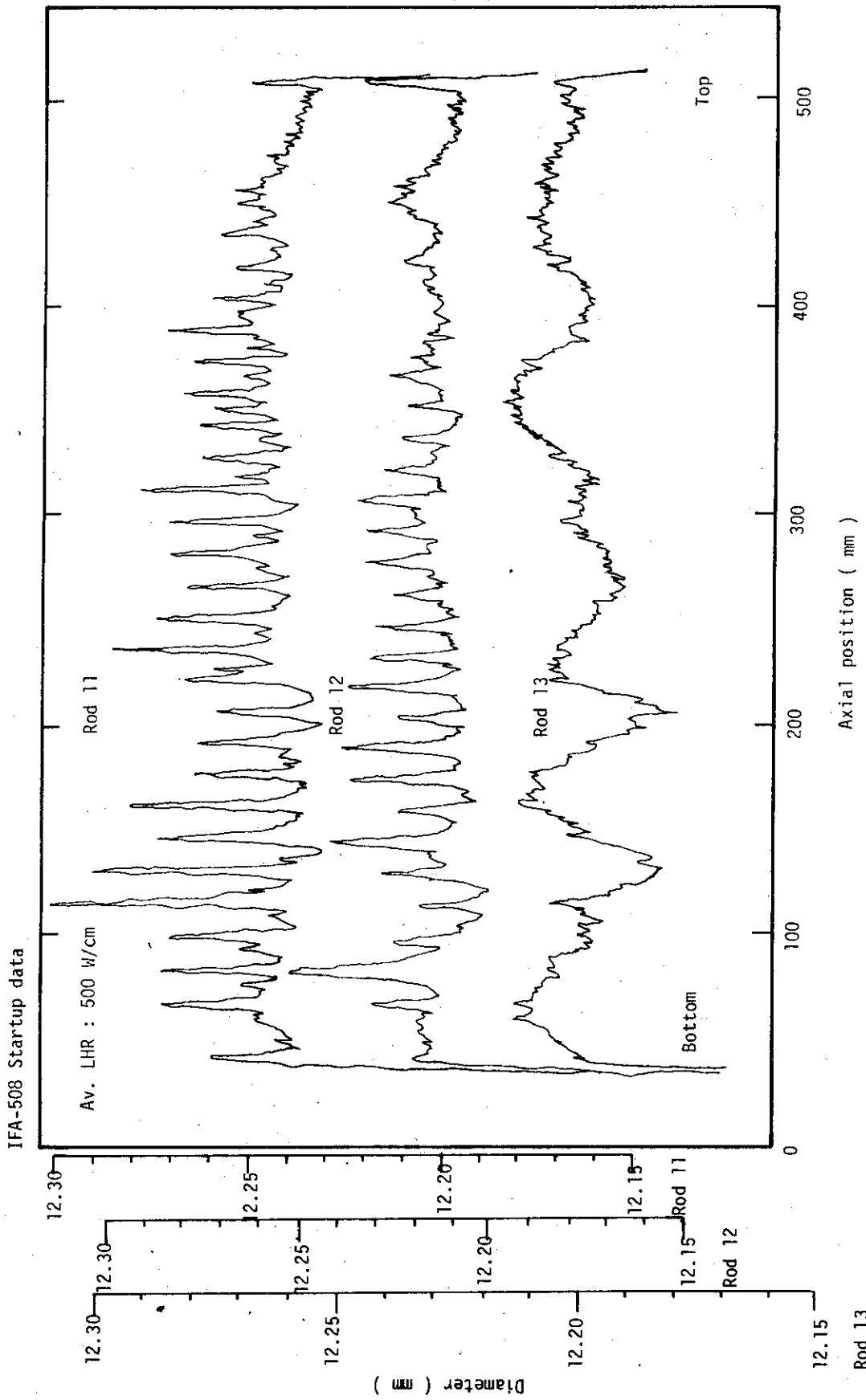


Fig. 3.21 Diameter traces during first power cycle at 500 W/cm