

JAERI-M

7520

IFA-508 ( I ) データ解析速報, No. 1

——燃料棒の伸びと中心温度——

照射期間：1977年6月——8月

到達燃焼度：1 600MWd/tUO<sub>2</sub>

1978年2月

柳澤和章・内田正明

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) データ解析速報, No 1

—燃料棒の伸びと中心温度—

照射期間 : 1977年6月~8月

到達燃焼度 : 1 600 MWd/tUO<sub>2</sub>

日本原子力研究所 東海研究所 安全工学部

柳沢和章・内田正明

(1978年1月19日受理)

国産燃料のHBWRにおける照射実験結果の解析速報である。主に燃焼度および被覆管の特性による燃料棒の伸びと中心温度について報告する。解析の対象となった照射期間は1977年6月~8月, 到達燃焼度は1 600 MWd/tUO<sub>2</sub> である。

Preliminary Analysis of Data for IFA-508(I), No. 1.

—Elongation and Centre Temperature of Fuel—

Irradiation Period: from June to August 1977

Burnup : 1 600 MWd/tUO<sub>2</sub>

Kazuaki YANAGISAWA and Masaaki UCHIDA

Division of Reactor Safety, Tokai Research

Establishment, JAERI

(Received January 19, 1978)

The present paper describes the results of irradiation experiments of JAERI's instrumented fuel assembly performed in HBWR. Preliminary analyses of the cladding elongation and fuel centre temperature as well as the data are presented. Irradiation period is covered from June to August 1977, and attained burnups are 1 600 MWd/tUO<sub>2</sub>.

Keywords: Irradiation Experiments, Halden Boiling Water Reactor, Preliminary Analysis, Cladding Elongation, Fuel Centre Temperature, Burnup.

## 目 次

1 はじめに .....	1
2 実験および解析結果(1977年6月-8月・燃焼度0-1640MWd/tUO <sub>2</sub> ) .....	1
2.1 燃料棒の伸び .....	1
2.1.1 燃焼度による燃料棒の伸び .....	1
2.1.2 被覆管の特性による燃料棒の伸び .....	3
2.2 一定出力保持中のクリープ .....	4
2.2.1 燃焼度によるクリープの変化 .....	4
2.2.2 被覆管の特性によるクリープ .....	5
2.3 燃料中心温度 .....	5
2.3.1 燃焼度による燃料中心温度の変化 .....	5
2.3.2 被覆管の特性による燃料中心温度 .....	6
2.3.3 中心温度ヒステリシス .....	7
参 考 文 献 .....	7

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Results of Experiment and Analysis (From June to August, 1977, burnups from 0 to 1 640 MWd/tUO <sub>2</sub> ) .....	1
2.1	Elongation of the fuel rod .....	1
2.1.1	Variation of fuel rod elongation with burnups .....	1
2.1.2	Variation of fuel rod elongation with the characteristics of the cladding .....	3
2.2	Fuel rod creeping during holding of a constant output power .....	4
2.2.1	Variation of the creep with burnups .....	4
2.2.2	Variation of the creep with the characteristics of the cladding .....	5
2.3	Fuel centre temperature .....	5
2.3.1	Variation of the fuel centre temperature with burnups .....	5
2.3.2	Variation of the fuel centre temperature with the character- istics of the cladding .....	6
2.3.3	Hysteresis loop of the fuel centre temperature .....	7

## 1. はじめに

IFA-508<sup>I</sup>は昭和52年6月に装荷が終了し同月下旬に照射を開始した。8月中旬に至って燃焼度が1600 MWd/tUO<sub>2</sub>に達した。その照射実験計画および6月-8月までの照射による生データ集は別報にて報告を行なった<sup>(1)</sup>。本報告書ではそのデータを利用した燃料棒の長さ方向の伸び、クリープおよび燃料中心温度についての解析をおこなったものである。IFA-508はこの伸び変形および中心温度測定の他ペレット-被覆管の相互作用を解析するうえに必要な直径方向のデータも採取している。このデータは今解析が進行中であり終了しだい報告する予定である<sup>(2)</sup>。

最後に解析結果であるが現在も照射が進行中であるのでここに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. 実験および解析結果 (1977年6月-8月, 燃焼度0-1640 MWd/tUO<sub>2</sub>)

### 2.1 燃料棒の伸び

#### 2.1.1 燃焼度による燃料棒の伸び

IFA-508(D)3ロッドリグによる被覆管の長さ方向の伸びの変化を燃焼度0 MWd/tUO<sub>2</sub>から約1600 MWd/tUO<sub>2</sub>まで調べた。今回は70, 90および1400 MWd/tUO<sub>2</sub>での燃焼度における被覆管の伸びについて報告する。

照射中の3本の燃料棒の特性については別報<sup>(1)</sup>にてのべた。各棒についての線出力(W/cm)に対して左縦軸に被覆管伸び(mm)〔右縦軸にはそれに対応する歪(%)も示す〕をプロットした結果をFig. 1~Fig. 3に示す。

Fig. 1はRod 11(ギャップ=100 μm, 被覆管厚さ=390 μm)について線出力と伸びの関係を燃焼度を変数としてプロットしたものである。燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub>における変形は第1回のランプ実験時のものである。本実験では被覆管伸びの他にPCIに密接に関係すると考えられる被覆管の直径変化についても同時に測定を行なっている。燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub>における線出力: 300, 400および480 W/cmにおける伸びの減少は線出力を一定保持した為が生じた被覆伸びの緩和による減少である。

Fig. 1によれば燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub>での線出力による伸び変化は他の90および1400 MWd/tUO<sub>2</sub>に較べて非常に著るしく、線出力約480 W/cmで約0.22% (約0.9 mm程度)もの歪を得た。出力除荷後の永久歪は約0.06% (約0.02 mm)であった。燃焼の進展とともに被覆管の変形様式は変化し同一線出力でも燃焼度の低いものに対してその伸びは小さくなる。同時に90 MWd/tUO<sub>2</sub>付近から永久変形は殆んど生ぜず出力開始前

## 1. はじめに

IFA-508<sup>I</sup> は昭和52年6月に装荷が終了し同月下旬に照射を開始した。8月中旬に至って燃焼度が1 600 MWd/tUO<sub>2</sub> に達した。その照射実験計画および6月-8月までの照射による生データ集は別報にて報告を行なった<sup>(1)</sup>。本報告書ではそのデータを利用した燃料棒の長さ方向の伸び、クリープおよび燃料中心温度についての解析をおこなったものである。IFA-508はこの伸び変形および中心温度測定の他ペレット-被覆管の相互作用を解析するうえで必要な直径方向のデータも採取している。このデータは今解析が進行中であり終了しだい報告する予定である<sup>(2)</sup>。

最後に解析結果であるが現在も照射が進行中であるのでここに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. 実験および解析結果 (1977年6月-8月, 燃焼度0-1640 MWd/tUO<sub>2</sub>)

### 2.1 燃料棒の伸び

#### 2.1.1 燃焼度による燃料棒の伸び

IFA-508 (D)3 ロッドリグによる被覆管の長さ方向の伸びの変化を燃焼度0 MWd/tUO<sub>2</sub> から約1 600 MWd/tUO<sub>2</sub> まで調べた。今回は70, 90および1 400 MWd/tUO<sub>2</sub> での燃焼度における被覆管の伸びについて報告する。

照射中の3本の燃料棒の特性については別報<sup>(1)</sup>にてのべた。各棒についての線出力 (W/cm) に対して左縦軸に被覆管伸び (mm) (右縦軸にはそれに対応する歪 (%)) も示す) をプロットした結果を Fig. 1~Fig. 3 に示す。

Fig. 1 は Rod 11 (ギャップ=100 μm, 被覆管厚さ=390 μm) について線出力と伸びの関係を燃焼度を変数としてプロットしたものである。燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub> における変形は第1回のランプ実験時のものである。本実験では被覆管伸びの他にPCIに密接に関係すると考えられる被覆管の直径変化についても同時に測定を行なっている。燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub> における線出力: 300, 400および480 W/cmにおける伸びの減少は線出力を一定保持した為が生じた被覆伸びの緩和による減少である。

Fig. 1 によれば燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub> での線出力による伸び変化は他の90および1 400 MWd/tUO<sub>2</sub> に較べて非常に著るしく、線出力約480 W/cmで約0.22% (約0.9 mm程度) もの歪を得た。出力除荷後の永久歪は約0.06% (約0.02 mm) であった。燃焼の進展とともに被覆管の変形様式は変化し同一線出力でも燃焼度の低いものに対してその伸びは小さくなる。同時に90 MWd/tUO<sub>2</sub> 付近から永久変形は殆んど生ぜず出力開始前



の値の所に戻って来る。

出力上昇時と下降時の伸びの差が描く変形ループをみても燃焼度の進行とともにそのループがつぶれて来る。これは被覆材およびペレットが塑性変形したからである。1 400 MWd / t UO<sub>2</sub> でループは殆んどつぶれ、400 W/cm では出力の上昇・下降で単一曲線になる。次節で詳しく述べるが出力上昇時の被覆管温度は下降時の被覆管温度に対して同一線出力の所でも60℃～100℃程度高目に出るのでこの温度ヒステリシス効果も考慮すれば被覆管の変形ループは実際は全体的にもっとつぶれた形になると考えられる。

Fig. 2 は Rod 12 (ギャップ=100 μm, 被覆管厚さ=690 μm) についてのものである。これも Rod 11 と同じく燃焼度の進行と共に変形ループが小さくなっていく。初期燃焼度70 MWd / t UO<sub>2</sub> での最大変形歪は0.17% (伸び: 0.67 mm) であり、永久歪は0.03% (約0.13 mm) であった。燃焼の進行と共に被覆管の延性が徐々に低下し1 400 MWd / t UO<sub>2</sub> では僅かな永久変形歪(約0.003%)は残るものの線出力に対して被覆管の伸び変形は小さい。

Fig. 3 は Rod 13 (ギャップ=220 μm, 被覆管厚さ=380 μm) についてのものである。この棒の変形様式は線出力の増加と共に徐々に被覆管の変形が増していくのは他の2本の棒と同様であるが、変形量は全体的に小さく初期燃焼度70 MWd / t UO<sub>2</sub> での最大変形量は0.09% (伸び: 0.35 mm) であり永久歪は0.0075% (0.03 mm) であった。燃焼度90および1 400 MWd / t UO<sub>2</sub> に於て他に見られないことがあった。すなわち線出力170および340 W/cm 付近で被覆管の縮みがみられた事である。実験ではこの線出力で保持を行っていない。この被覆管の特徴はギャップが大きく(他の Rod 11 および Rod 12 の2倍以上)被覆管の肉厚が薄い(Rod 11 とほぼ等しく Rod 12 の半分)という事であるから中心温度が他のものに比べてかなり高くなっている事、しかも被覆管の厚みの薄いことからペレットとの熱応力等による挙動を相当によく示している事が考えられる。以上を総合すれば燃焼度が90 MWd / t UO<sub>2</sub> をこえるとこの棒では次のような事が起こったと考えられる。

- (1) 0～130 W/cm 付近: 出力上昇と共にペレットは被覆管と任意の場所で接触し(リップの出る様な接触ではない)両者一体化して伸びる。
- (2) 130～170 W/cm 付近: ペレットのすべりと割れが発生しUO<sub>2</sub> の熱膨脹(熱膨脹率は一般に7～12×10<sup>-6</sup>/℃)によって引っ張られていたZry被覆管(熱膨脹率は一般に6～8×10<sup>-6</sup>/℃)の伸びが解放されて出力上昇による全体的な温度上昇による伸びと相殺しつつゆっくりと縮む。その量は歪にして0.025%, 伸びで0.05 mmである。
- (3) 170～320 W/cm 付近: 170 W/cm に至ってこの縮みの現象は終了し再びペレットと被覆管は接触したまま伸び始める。ただしその途中でも全体的な割合は小さいが部分的にはPCIがおこっていると考えられる。それは伸び曲線が線出力に対して単調に増加するのでなく250 W/cm 付近で再び縮みの傾向(1 400 MWd / t UO<sub>2</sub> でははっきりと縮んでいる)を示すことから推測できる。
- (4) 320～340 W/cm 付近: 高温域に入って再びペレットの配置がくずれ、縮みの現象が発生する。縮み量は燃焼度90 MWd / t UO<sub>2</sub> で第1回目(130～170 W/cm)

のものと大体同じで0.025% (0.05 mm) であるが高燃焼度1 400 MWd/tUO<sub>2</sub>に至ると延性の低下のためかその量は約半分の0.013% (0.025 mm) 程度となる。

- (5) 3.40 W/cm以上 (1200°C以上) : 線出力の上昇と共に伸びは単調に増加する。  
 (6) 出力降下 : UO<sub>2</sub>ペレットの収縮が被覆管のそれより大きく両者の接触がおこらないので伸び曲線は線出力の低下と共に単調に減少する。

## 2.1.2 被覆管の特性による燃料棒の伸び

前節では同一燃料棒の伸び変化を主に燃焼度に関して観察したが、次に燃焼度一定での被覆管の特性に基づく燃料棒の伸びの変化を観察する。

Fig. 4 は燃焼度70 MWd/tUO<sub>2</sub>での被覆管伸び～線出力曲線である。図によればRod 11 (ギャップ=100 μm, 被覆管厚み=390 μm; 薄肉小ギャップ) が一番大きな伸び変形を経験し永久歪量も一番大きい。これに対してRod 12 (ギャップ=100 μm, 被覆管厚み=690 μm; 厚肉小ギャップ) はRod 11 について大きな伸び変形を経験し、最も伸び変形が小さかったのはRod 13 (ギャップ=220 μm, 被覆管厚み=380 μm; 薄肉大ギャップ) であった。途中3ヶ所 (線出力で300 W/cm, 400 W/cm, 480 W/cm 付近) で伸びが減少しているのはこの線出力水準で3時間～18時間出力保持を行なったためであり、この落ちかたがまっすぐでなく少々斜めなのはFig. 5 でみる様に保持中に出力低下がおこった為であると考えられる。

全体的に線出力に対する棒の伸び変形の様式は同じである。

Fig. 6 は燃焼度90 MWd/tUO<sub>2</sub>での被覆管伸び～線出力曲線である。図によればRod 11 (薄肉小ギャップ) / Rod 12 (厚肉小ギャップ) は殆んど同じ変形様式を示したのに拘らずRod 13 (薄肉大ギャップ) はすでにのべた様にペレットと被覆管の間のすべりと割れに起因すると思われる伸びの減少する過程がみられた。しかも線出力400 W/cm以上ではペレットが弱まり伸びへの寄与が減少しそれまでに無理に伸びていた部分の縮小と相伴して出力を上昇しても被覆管全体では徐々に伸びが低下する現象がみられた。

Fig. 7 は燃焼度1 400 MWd/tUO<sub>2</sub>での被覆管伸び～線出力曲線である。この程度に燃焼が進行すると各棒での変形ループは相当つぶれた小さいものになる。Rod 11 (薄肉小ギャップ) では400 W/cm以上でペレットと被覆管が小ギャップのために完全に一緒になってしまったことがわかる。この為出力低下によってもペレットと被覆は簡単に分離せず300 W/cm程度になってやゝ滑らかな伸びの下降曲線を得る。Rod 12 (厚肉小ギャップ) でも様相は同じであるが薄肉のRod 11に比べて伸びの変形様式は相当滑らかである。これは燃料のUO<sub>2</sub>ペレットの複雑な動きをRod 11 に比べて2倍の厚みを持つRod 12 の被覆管が相当吸収しているものと考えられる。Rod 13 は燃焼度90 MWd/tUO<sub>2</sub>におけるのと殆んど同様な挙動を示した。

Fig. 8 は燃料棒の最大伸び (約480 W/cm線出力における値) と永久歪の値を燃焼度に対してプロットしたものである。図から最大伸び量は燃焼の進行と共に徐々に低下するが被覆管の永久歪は燃焼初期に決まった値が大体そのまま持続していることがわかる。

## 2.2 一定出力保持中のクリープ

### 2.2.1 燃焼度によるクリープの変化

3本の燃料棒は第1回の出力急昇試験に於て線出力約 $300\text{ W/cm}$ で4時間、 $400\text{ W/cm}$ で4時間、 $480\text{ W/cm}$ 付近で14時間程度の急昇後の保持を行なった(燃焼度はこの時点で $70\text{ MWd/t UO}_2$ )。その他燃焼度 $90\text{ MWd/t UO}_2$ で炉運転に伴う定常状態出力保持( $430\sim 480\text{ W/cm}$ )、燃焼度 $1400\text{ MWd/t UO}_2$ においても同様な出力保持を経験した。そこで比較的保持時間の長かったものについて被覆管の長さ方向の伸び変化を保持時間に対して各燃焼度についてのデータをプロットしたものについて解析を行なう。

Fig. 9はRod 11(薄肉小ギャップ)についてのもので燃焼度 $70\text{ MWd/t UO}_2$ 線出力 $480\text{ W/cm}$ (第1回の出力急昇試験の最高線出力保持)のもの、燃焼度 $90$ (線出力 $475\text{ W/cm}$ )、および $1400\text{ MWd/t UO}_2$ (線出力 $374\text{ W/cm}$ )についてデータがプロットしてある。これによれば被覆管の延性が高い低燃焼度 $70\text{ MWd/t UO}_2$ でのクリープは最初の1時間で歪み量にして $0.03\%$ 、伸び量にして約 $0.12\text{ mm}$ (総クリープ量の約 $40\%$ )のクリープが生じた。以後は時間の経過と共に徐々にクリープが進行し保持終了時(クリープ開始後14時間)には $0.075\%$ ( $0.3\text{ mm}$ )のクリープ量を得た。燃焼度 $90\text{ MWd/t UO}_2$ ではこのクリープは $70\text{ MWd/t UO}_2$ に比べてごくゆるやかになり保持後9時間で燃焼度 $70\text{ MWd/t UO}_2$ のものとも一致する。しかしクリープ総量は $0.033\%$ ( $0.13\text{ mm}$ )となった。燃焼の進行と被覆管の脆化が進行し燃焼度 $1400\text{ MWd/t UO}_2$ ではクリープは殆んど生じなかった(但し線出力は前二者に比べ $379\text{ W/cm}$ と低い)。

Fig. 10はRod 12(厚肉小ギャップ)に被覆管伸びと一定線出力保持時間との関係を示したものである。燃焼度 $70\text{ MWd/t UO}_2$ で14時間保持(線出力 $480\text{ W/cm}$ )したのちのクリープ総量は $0.055\%$ ( $0.22\text{ mm}$ )、燃焼度 $90\text{ MWd/t UO}_2$ で約12時間保持(線出力 $475\text{ W/cm}$ )したのちのクリープ総量は $0.02\%$ ( $0.08\text{ mm}$ )であった。燃焼度 $1400\text{ MWd/t UO}_2$ に至ってクリープが殆んど見られなくなった。この棒でのクリープ変形で特徴的なのは燃焼度 $90\text{ MWd/t UO}_2$ でのクリープ変形がRod 11の如く $70\text{ MWd/t UO}_2$ の曲線とある時間ののちに一致しないことである。Rod 11とRod 12は前者が薄肉で後者が厚肉(肉厚は約2倍)であるところが相違点である事から恐らく肉厚の差による挙動の違いであると考えられる。

Fig. 11はRod 13(薄肉大ギャップ)についての被覆管伸びと一定線出力保持時間との関係を示したものである。燃焼度 $70\text{ MWd/t UO}_2$ で14時間保持(線出力 $480\text{ W/cm}$ )したのちのクリープ総量は歪み量にして $0.035\%$ ( $0.15\text{ mm}$ )、燃焼度 $90\text{ MWd/t UO}_2$ で約12時間保持(線出力 $433\text{ W/cm}$ )したのちのクリープ総量は歪み量にして $0.0125\%$ ( $0.05\text{ mm}$ )であった。燃焼度 $1400\text{ MWd/t UO}_2$ に至ってクリープ変形が殆んど見られなくなった。この棒で特徴的であるのは燃焼度 $70$ および $90\text{ MWd/t UO}_2$ がRod 11と同じく一定線出力保持後8時間程度で一致したこと、さらに $1400\text{ MWd/t UO}_2$ の伸びが殆んど変化しないものに8~9時間保持後一致した事である。前者は薄肉のRod 11で見られた現象でありすでに触れた様に被覆肉厚の薄いことによる効果であると思われる。

以上のことから被覆管の肉厚の相違によってクリープ変形のしかたに違いが生じること、曲

線の勾配が燃焼の進行と共に徐々にゆるやかになる事から前章で解析した被覆管の伸び変形量ともあわせて考慮すると燃焼度  $1\ 400\text{ MWd}/\text{t UO}_2$  で殆んど被覆管のクリープはなくなることがわかった。

### 2.2.2 被覆管の特性によるクリープ

同一燃焼度における被覆管の伸びと一定出力保持時間との関係について述べる。

Fig. 12 は燃焼度  $70\text{ MWd}/\text{t UO}_2$  (線出力  $480\text{ W}/\text{cm}$ ) における被覆伸び～保持時間との関係図である。図によればクリープの変形形式は Rod 11, Rod 12 はほぼ同じで平均移動によってそのまま重ねる事ができる。しかし Rod 13 は似てはいるものの重ならない。これは Rod 11/Rod 12 ではペレットと被覆管がしっかり接触しており(ギャップがともに  $100\ \mu\text{m}$  と小さい)両者の被覆管のクリープをペレットのそれが加速しているのに対して Rod 13 では接触が殆んどおこらず(ギャップが  $220\ \mu\text{m}$  と大きい)被覆管のみでクリープしていった結果であると考えられる。また Rod 11 と Rod 12 が平行移動すれば重なる曲線であるのにクリープ量に違いが生じているのは被覆厚みによる効果の相違であると考えられる。

Fig. 13 は更に燃焼度が  $90\text{ MWd}/\text{t UO}_2$  と進んだときの模様であるが前述の関係がそのまま維持されている。

Fig. 14 は燃焼度  $1\ 400\text{ MWd}/\text{t UO}_2$  のときの様子で定出力保持を行なっても殆んどクリープのおこらないことがわかる(被覆管延性が低下する)。

## 2.3 燃料中心温度

### 2.3.1 燃焼度による燃料中心温度の変化

はじめに述べたように IFA-508(D)は昭和52年6月に装荷、下旬に照射を開始し8月中旬に燃焼度が  $1\ 600\text{ MWd}/\text{t UO}_2$  にまで達した。その間に数回の連続的な中心温度の測定を行なったのでその結果について報告する。各棒について燃焼の進行と共に中心温度がどの様に変化していくのかを観察した。

各棒の熱電対における線出力 ( $\text{W}/\text{cm}$ ) に対して中心温度を燃焼度に対してプロットした結果を Fig. 15～Fig. 17 に示す。

Fig. 15 は Rod 11 (ギャップ =  $100\ \mu\text{m}$ , 被覆管厚さ =  $390\ \mu\text{m}$ ) についてのもので、燃料温度は各燃焼度に於ていずれも線出力の増加と共に単調に増加している。しかし燃焼度  $1\ 400\text{ MWd}/\text{t}$  では他の  $70/90$  に対して比較的高いものにも拘らず  $70 \rightarrow 90$  に移った割には各線出力における温度の上昇度が小さい事が特徴的である。中心温度は  $500\text{ W}/\text{cm}$  付近で  $1\ 530^\circ\text{C}$  ( $1\ 400\text{ MWd}/\text{t}$ ),  $1\ 350^\circ\text{C}$  ( $70\text{ MWd}/\text{t}$ ) と約  $180^\circ\text{C}$  程度の開きがあった。

Fig. 16 は Rod 12 (ギャップ =  $100\ \mu\text{m}$ , 被覆管厚さ =  $690\ \mu\text{m}$ ) についてのもので、Fig. 15 に示した Rod 11 とギャップが  $100\ \mu\text{m}$  と等しいにも拘らず Fig. 15 のべた燃焼度による温度上昇度の差が各線出力に於て益々縮まっていく傾向を示している。

中心温度は  $450 \text{ W/cm}$  付近で  $1200^\circ\text{C}$  ( $1400 \text{ MWd/t}$ ),  $1130^\circ\text{C}$  ( $70 \text{ MWd/t}$ ) と  $70^\circ\text{C}$  程度の開きしかなかった。

Fig. 17 は Rod 13 (ギャップ =  $220 \mu\text{m}$ , 被覆管厚さ =  $380 \mu\text{m}$ ) についてのもので、前記 Rod 11 または Rod 12 のギャップ幅  $100 \mu\text{m}$  に対して約 2 倍のギャップを持ったものである。燃焼の蓄積による燃料温度の上昇は Fig. 16 で見られた如く燃焼度  $90 \text{ MWd/t}$  は  $70 \text{ MWd/t}$  よりもむしろ更に高燃焼度での  $1400 \text{ MWd/t}$  のそれに近いのが特徴的である。中心温度は線出力  $500 \text{ W/cm}$  付近で  $1720^\circ\text{C}$  ( $1400 \text{ MWd/t}$ ),  $1630^\circ\text{C}$  ( $70 \text{ MWd/t}$ ) と  $90^\circ\text{C}$  程度の温度差になっている。

### 2.3.2 被覆管の特性による燃料中心温度

Fig. 18 ~ Fig. 20 は一定燃焼度での線出力に対する燃料中心温度を設計因子 (ギャップ, 被覆管厚み) - 各燃料棒 に対してプロットしたものである。

Fig. 18 は燃焼度  $70 \text{ MWd/t}$  についてのものである。Rod 11 および Rod 12 はギャップ =  $100 \mu\text{m}$  で被覆管の厚みが Rod 11 で  $390 \mu\text{m}$ , Rod 12 で  $690 \mu\text{m}$  と 2 倍程異なるだけで他の設計因子は全く同様に作ってあるのにも拘らずこの燃焼度では各線出力に対して常に  $60 \sim 80^\circ\text{C}$  の開きを持っている。そこでデータを再び調べ直してみた所 Rod 12 には零線出力時の燃料中心温度が  $170^\circ\text{C}$  であり他の棒 Rod 11 / Rod 13 のそれが  $240^\circ\text{C}$  程度であった。この零点の温度差  $70^\circ\text{C}$  を Rod 12 に加算したところ Rod 11 および Rod 12 の曲線が非常に良い一致性を示すことがわかった。図では零点移動しないままの Rod 11 / Rod 12 の温度曲線を示してある。

Rod 11 (ギャップ =  $100 \mu\text{m}$ ) と Rod 13 (ギャップ =  $220 \mu\text{m}$ ) の比較によりギャップの中心温度に及ぼす影響が明らかである。各線出力に対して中心温度は単調に増加するがその増加の仕方はギャップの大きい Rod 13 の方が大きく高い中心温度になっている。 $500 \text{ W/cm}$  の線出力に於て温度差は約  $270^\circ\text{C}$  ぐらいである。

Fig. 19 は燃焼度  $90 \text{ MWd/t}$  についてのものである。中心温度は線出力の増加と共に増加すること、ギャップ幅の大きい Rod 13 の方が小さい Rod 11 に比較して温度勾配の高い等の現象は Fig. 12 の燃焼度  $70 \text{ MWd/t}$  のものと殆んど同じである。

Fig. 20 は燃焼度  $1400 \text{ MWd/t}$  についてのものである。中心温度と線出力の関係、ギャップが大きいことによる中心温度の増大等の事象は低燃焼度におけるのと殆んど変化はないが温度勾配がギャップの小さい、大きいに関係なくほぼ同様になっているのが特徴的である。

高線出力部 ( $500 \text{ W/cm}$ ) における Rod 11 (ギャップ =  $100 \mu\text{m}$ ) と Rod 13 (ギャップ =  $220 \mu\text{m}$ ) との燃料中心温度差は約  $165^\circ\text{C}$  と低燃焼度のものに比べて低かった。

そこでギャップによる中心温度の上昇の程度を明確にするため Rod 13 (大ギャップ) の中心温度から Rod 11 (小ギャップ) の中心温度を差し引いた値を線出力 (LHR) に対してプロットした。その結果が Fig. 21 である。

Fig. 21 によれば低燃焼度のあいだは線出力の増加と共にギャップの大きさの差による燃料中心温度差は増大するが高燃焼度になるにつれて線出力が増大しても燃料中心温度の差が一定化して来る (これは前述した様に線出力に対する温度勾配がほぼ同じになることを意味する)。

### 2.3.3 中心温度ヒステリシス

線出力を零レベルから高レベルまで上昇させていくときの燃料中心温度の測定値と高線出力レベルから零レベルに出力を下げていくときの燃料中心温度の測定値との間にはFig. 22に示す様な関係がみられた。図は燃焼度1 400 MWd/tにおけるRod 13(大ギャップ)についてのものであるが他のものにも燃焼度の大小, 燃料棒の物性に関係なく同様な現象を観察した。

図によれば出力上昇時の温度の方が出力下降時の温度よりも常に高いことがわかる。その値は300 W/cmに於て約100℃程度にもなっている。この原因として出力上昇および下降時の中性子束分布の微妙な変化, 中性子検出器の温度特性, 温度の時間依存性などの動的なものの総合作用であると考えられる。

本論では線出力に対して燃料中心温度をプロットする際, この温度ヒステリシスを考慮して常に出力上昇時の温度についてプロットをおこなった。

## 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 "Diameter Analysis of IFA-508(I) For the Irradiation Period From June to August, 1977", to be published.

### 2.3.3 中心温度ヒステリシス

線出力を零レベルから高レベルまで上昇させていくときの燃料中心温度の測定値と高線出力レベルから零レベルに出力を下げていくときの燃料中心温度の測定値との間にはFig. 22に示す様な関係がみられた。図は燃焼度1 400 MWd/tにおけるRod 13(大ギャップ)についてのものであるが他のものにも燃焼度の大小, 燃料棒の物性に関係なく同様な現象を観察した。

図によれば出力上昇時の温度の方が出力下降時の温度よりも常に高いことがわかる。その値は300 W/cmに於て約100℃程度にもなっている。この原因として出力上昇および下降時の中性子束分布の微妙な変化, 中性子検出器の温度特性, 温度の時間依存性などの動的なものの総合作用であると考えられる。

本論では線出力に対して燃料中心温度をプロットする際, この温度ヒステリシスを考慮して常に出力上昇時の温度についてプロットをおこなった。

## 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 "Diameter Analysis of IFA-508(I) For the Irradiation Period From June to August, 1977", to be published.

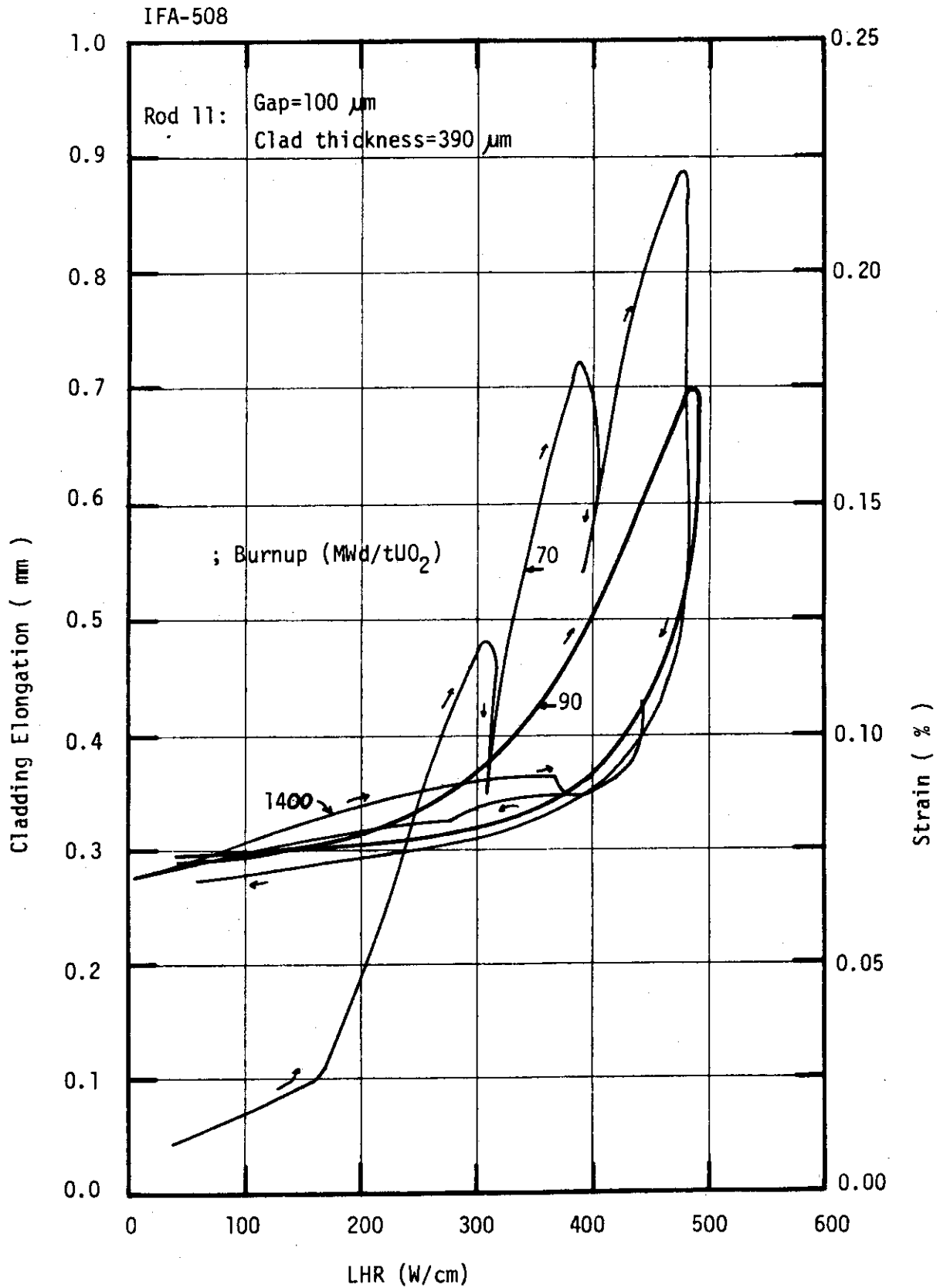


Fig. 1 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for rod 11 (variation with burnup)



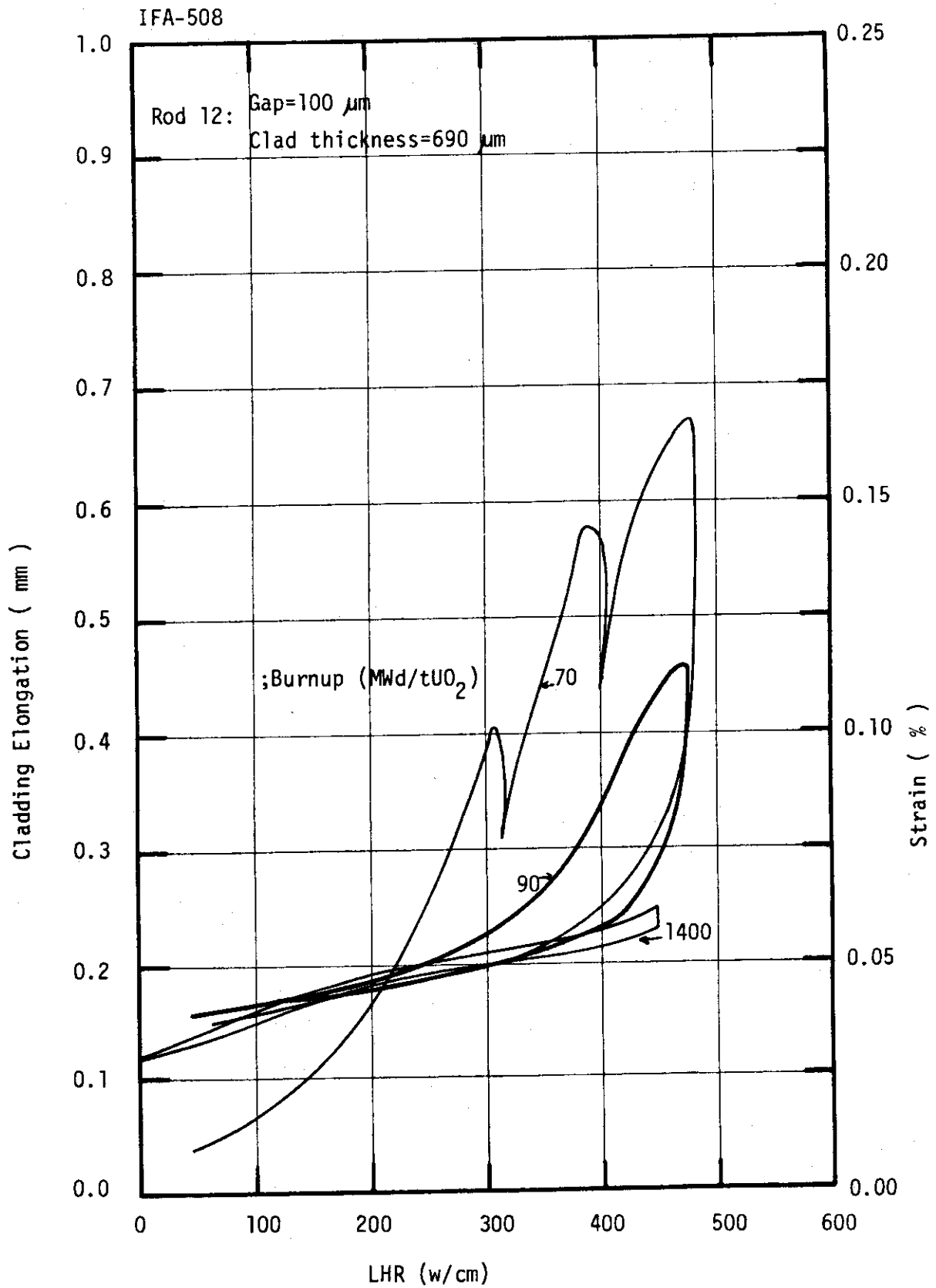


Fig. 2 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for rod 12 (variation with burnup)

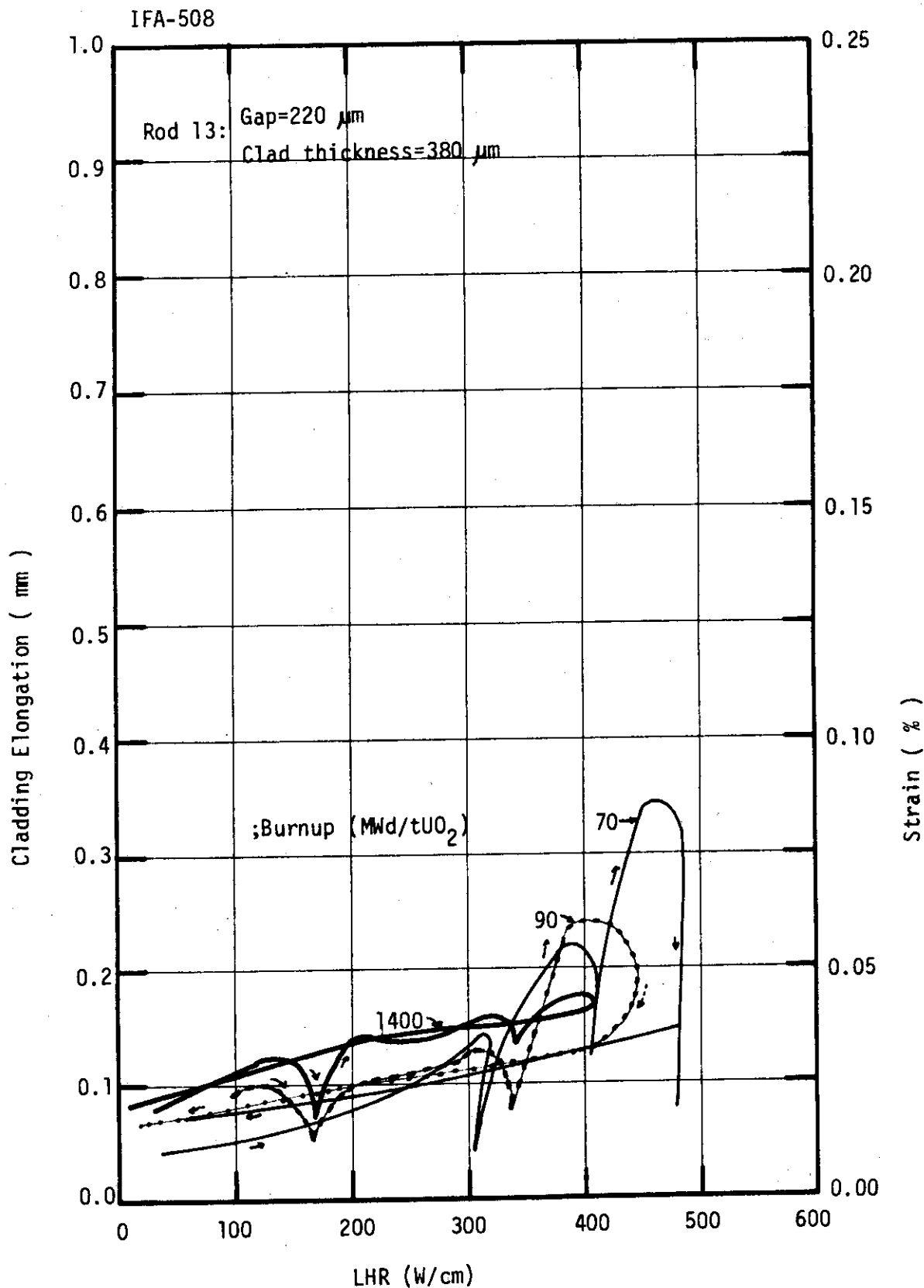


Fig. 3 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for rod 13 (variation with burnup)

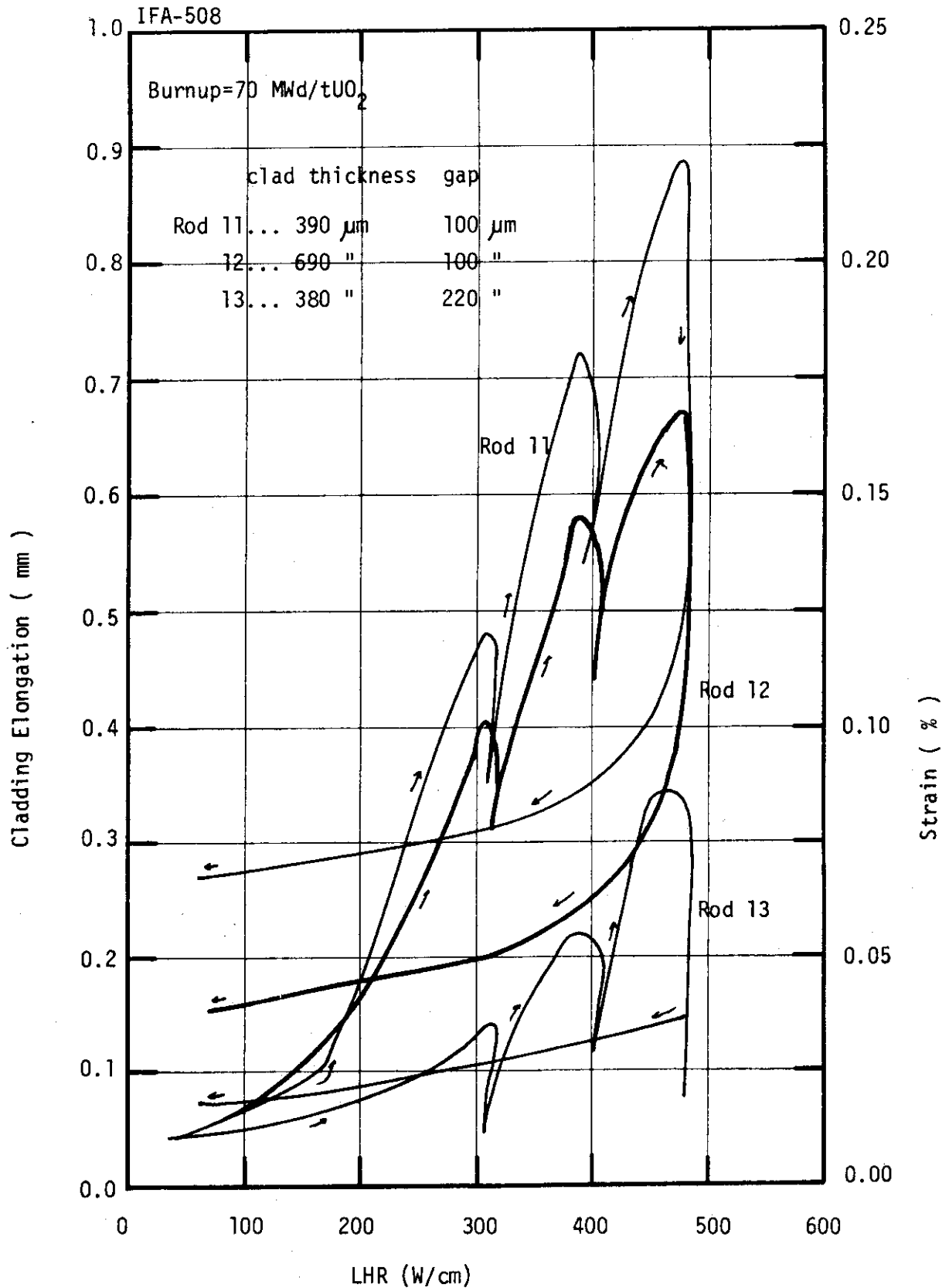


Fig. 4 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for burnups 70 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

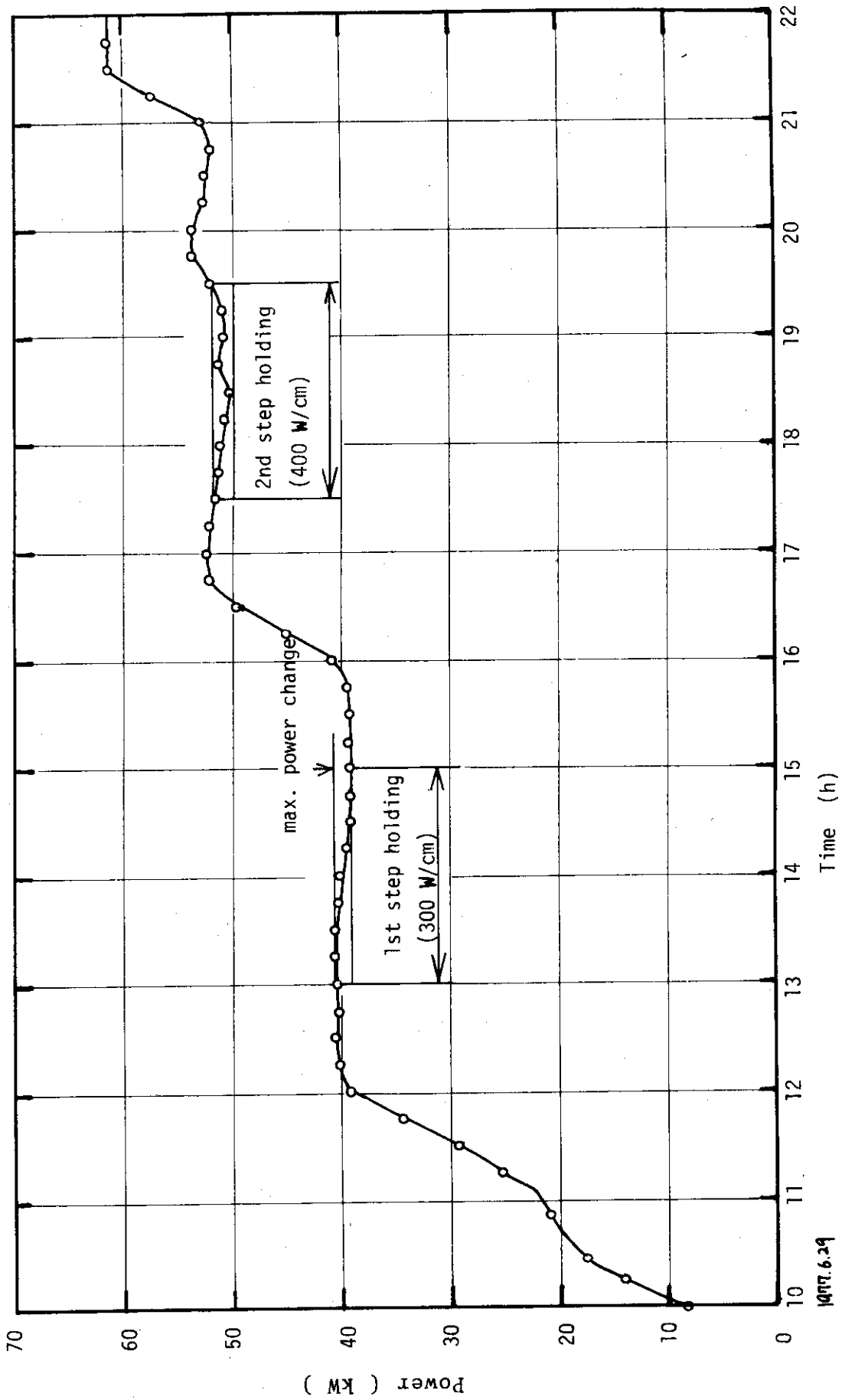


Fig. 5 Power history during first (300w/cm) and second (400w/cm) holding; day covered 29th June, 1977

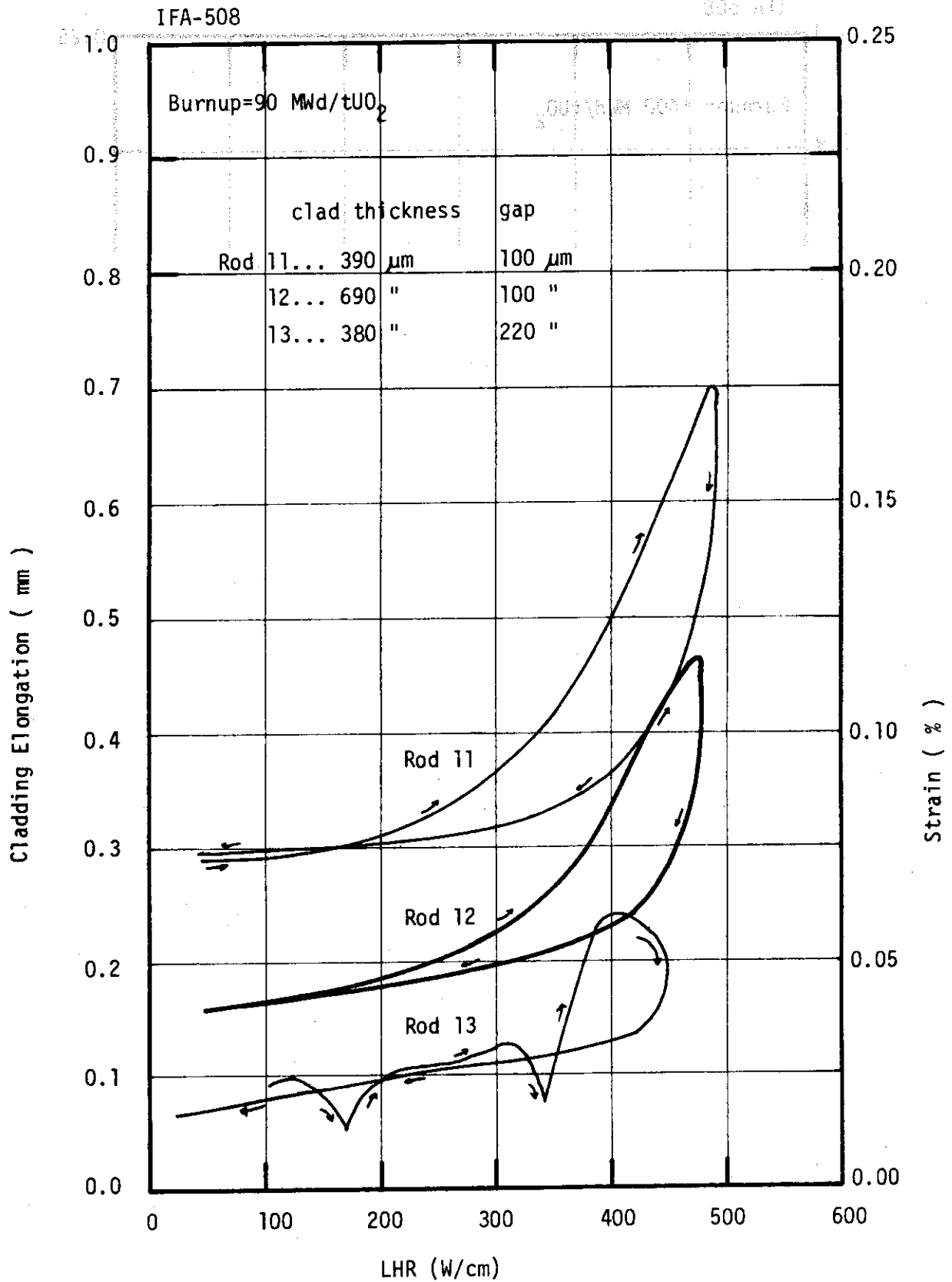


Fig. 6 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for burnups 90 MWd/tUO<sub>2</sub>. (variation with fuel rod)

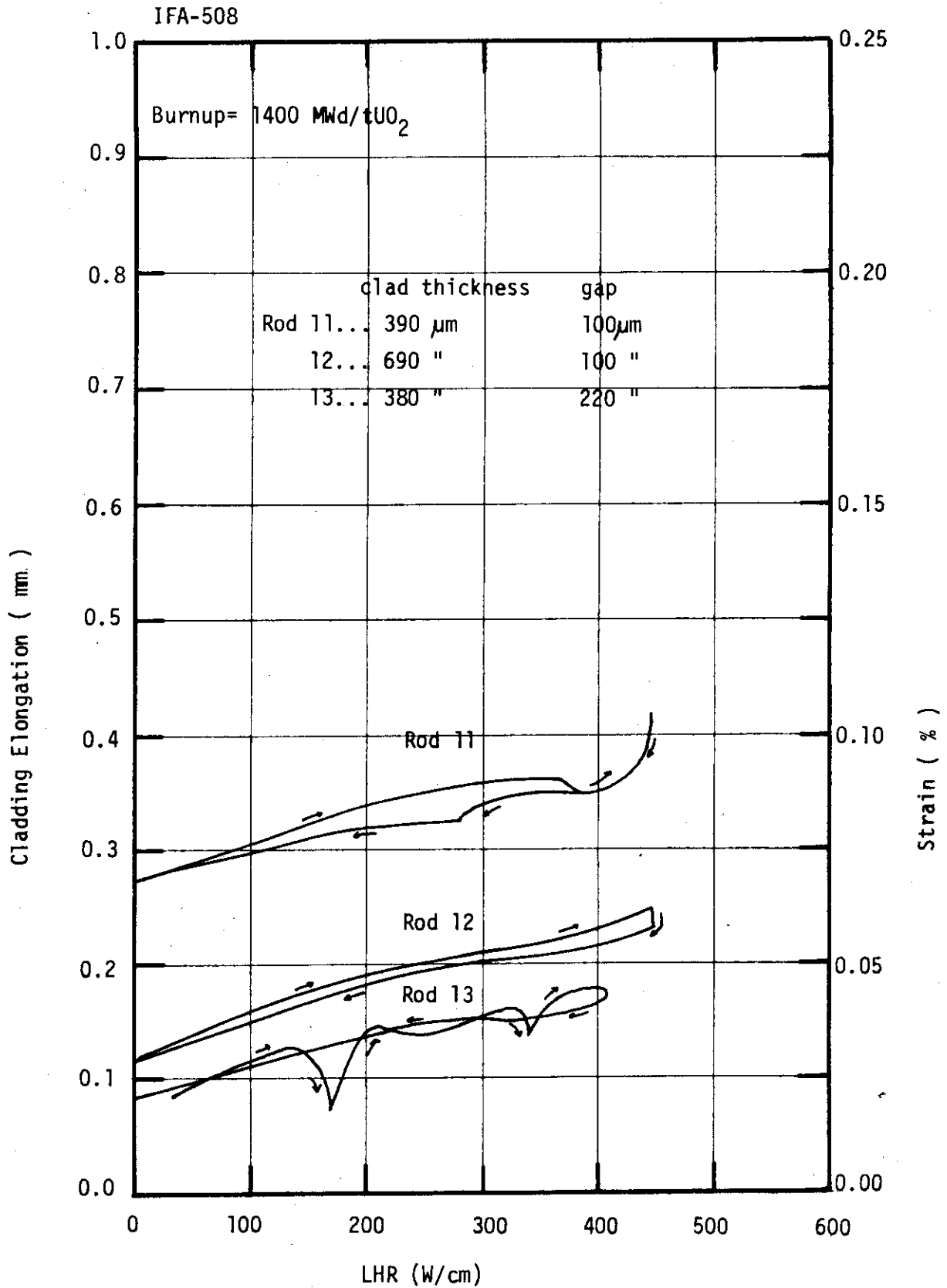


Fig. 7 Relation between cladding elongation/strain and linear heat rating for burnups 1400 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

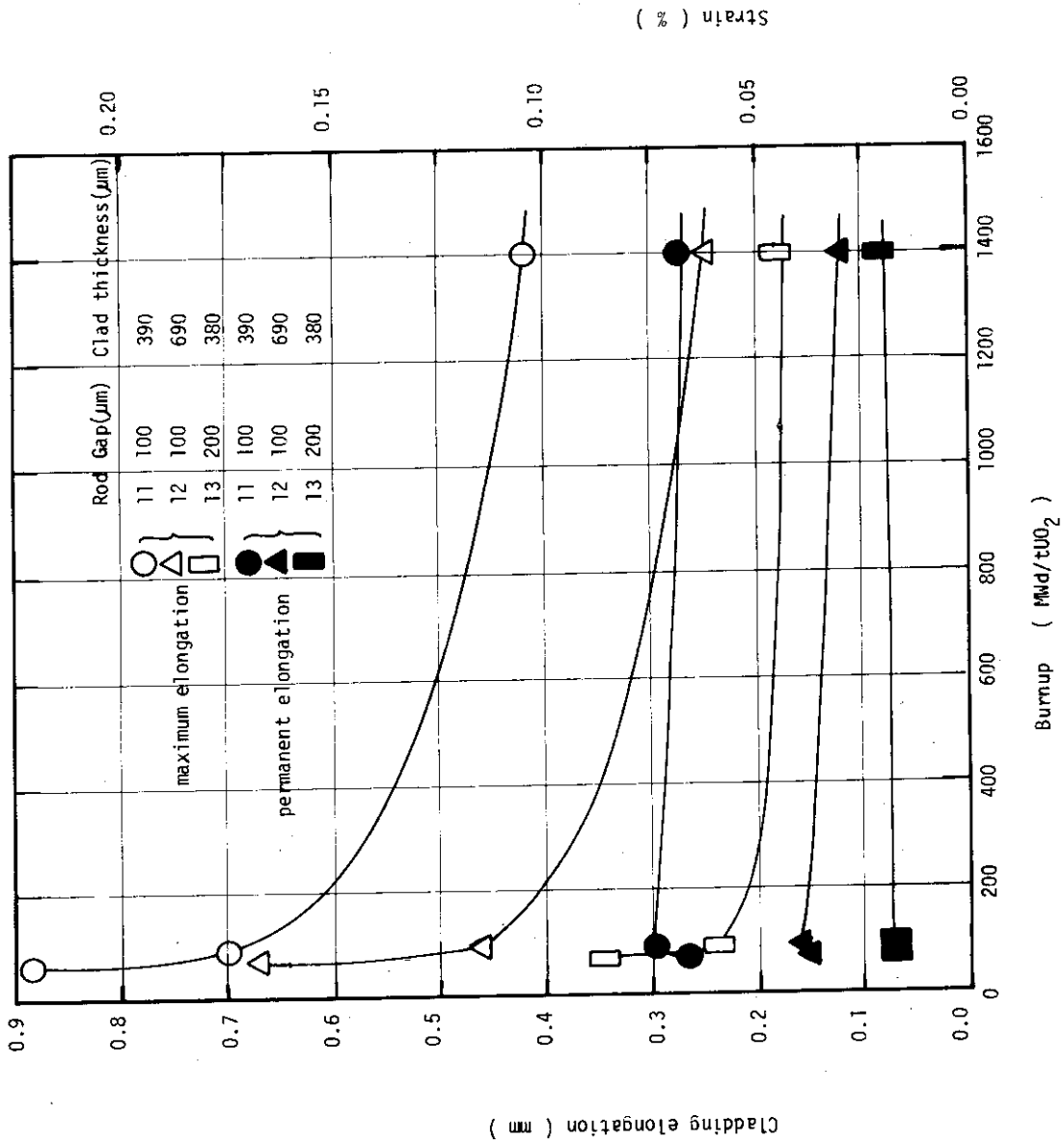


Fig. 8 Maximum elongation/strain of fuel rods at 480 w/cm<sup>2</sup> and permanent deformation vs burnups

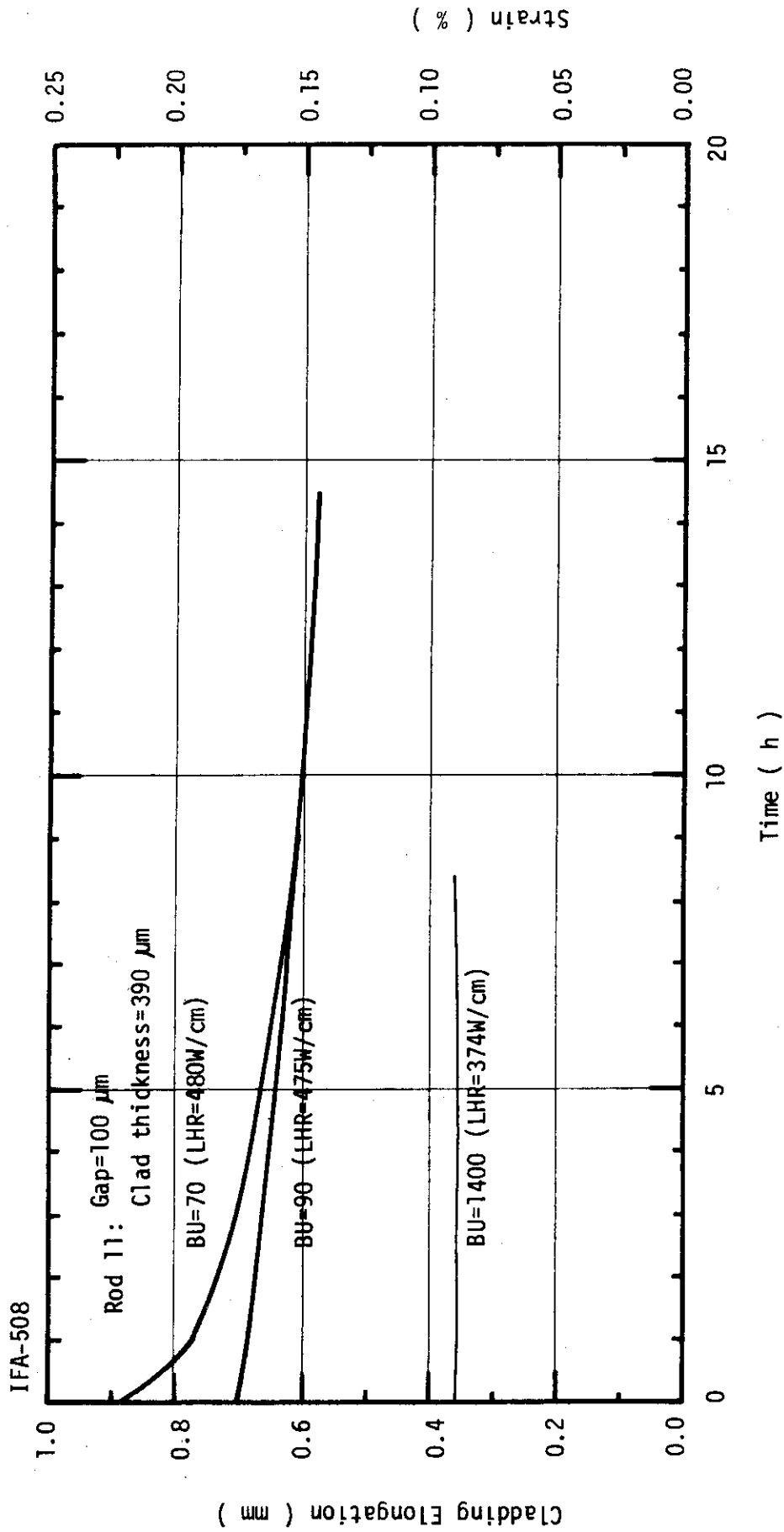


Fig. 9 Relation between cladding elongation/strain and holding time for rod 11 (variation with burnup)



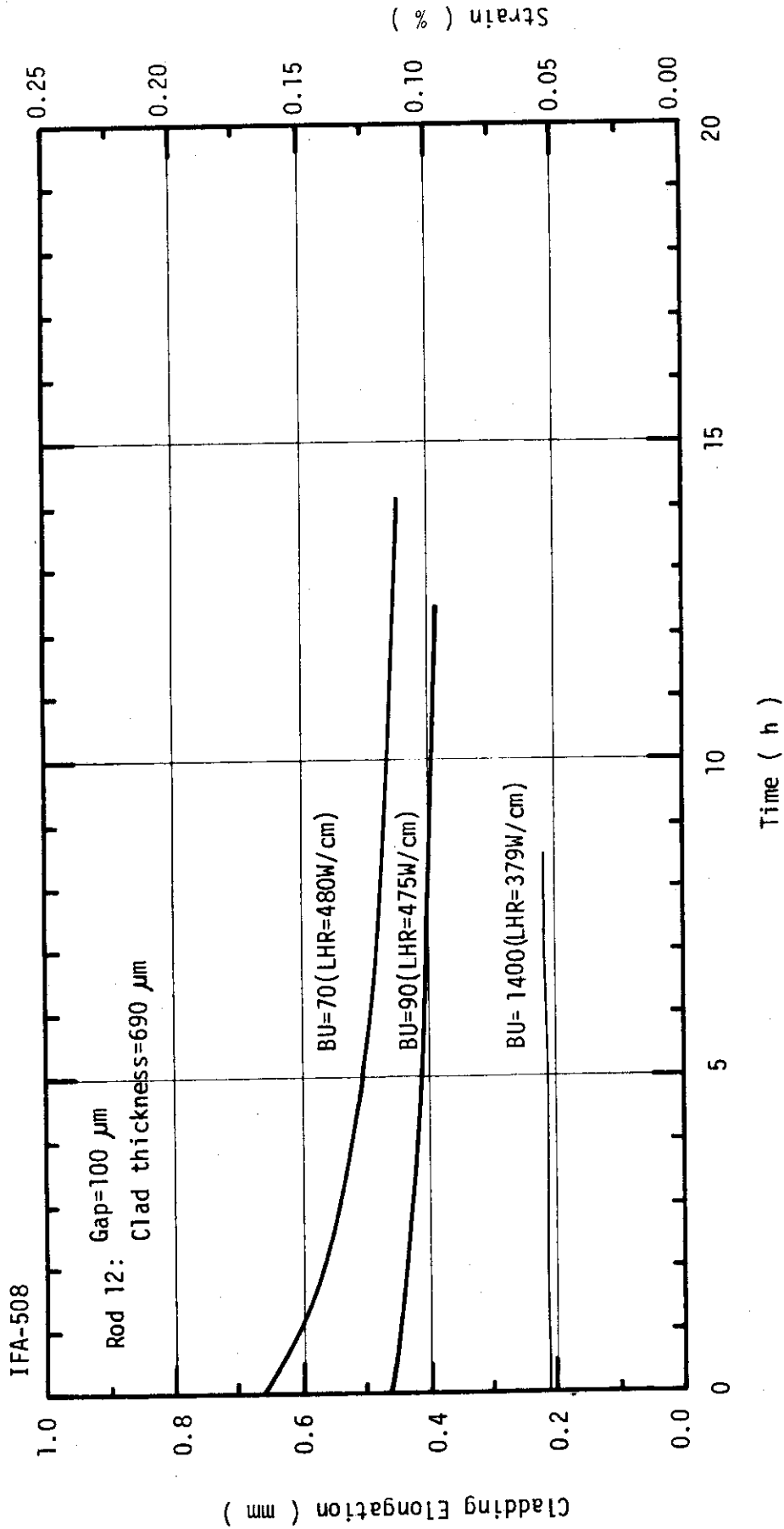


Fig. 10 Relation between cladding elongation/strain and holding time for rod 12 (variation with burnup)

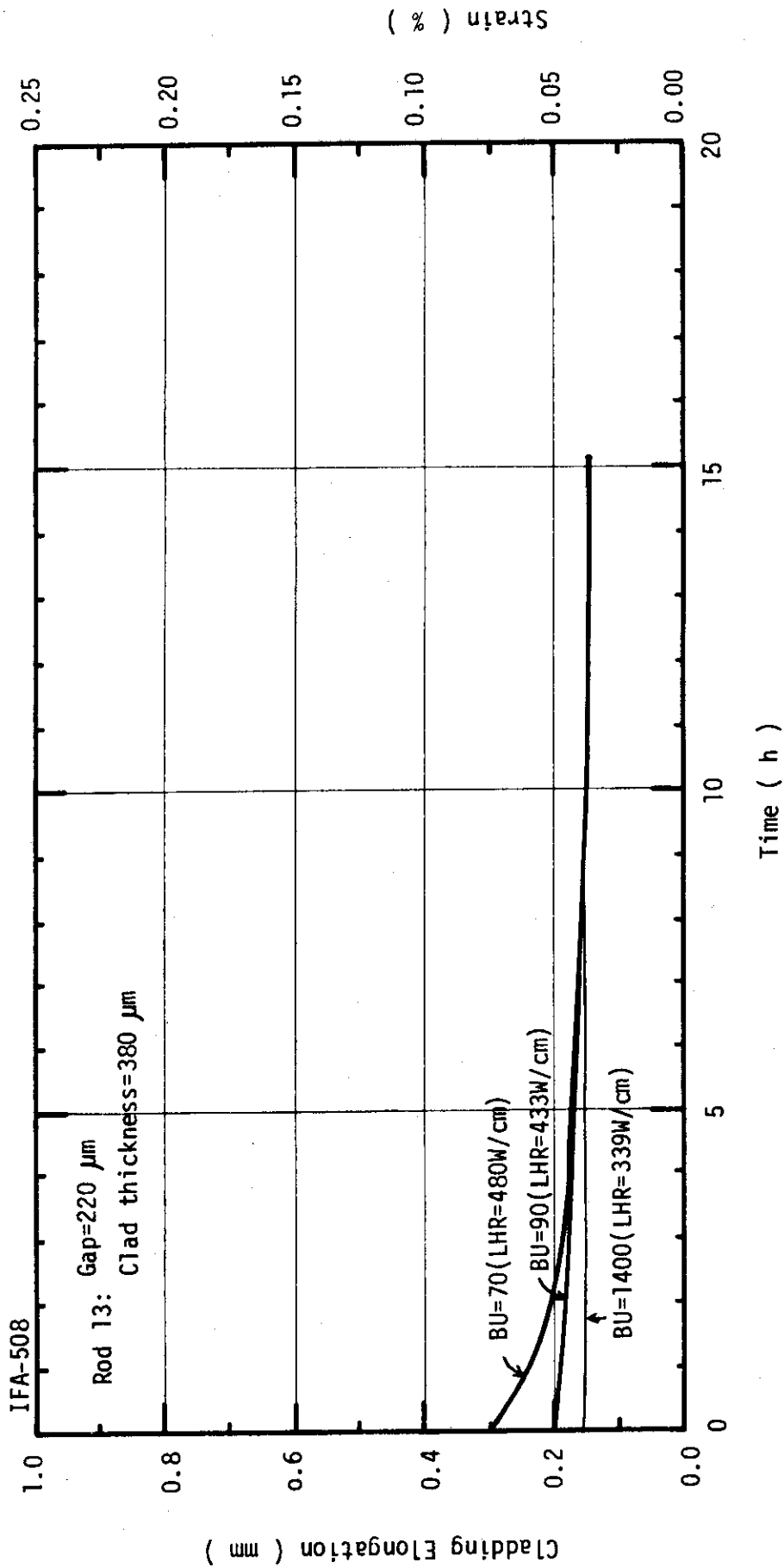


Fig. 11 Relation between cladding elongation/strain and holding time for rod 13 (variation with burnup)

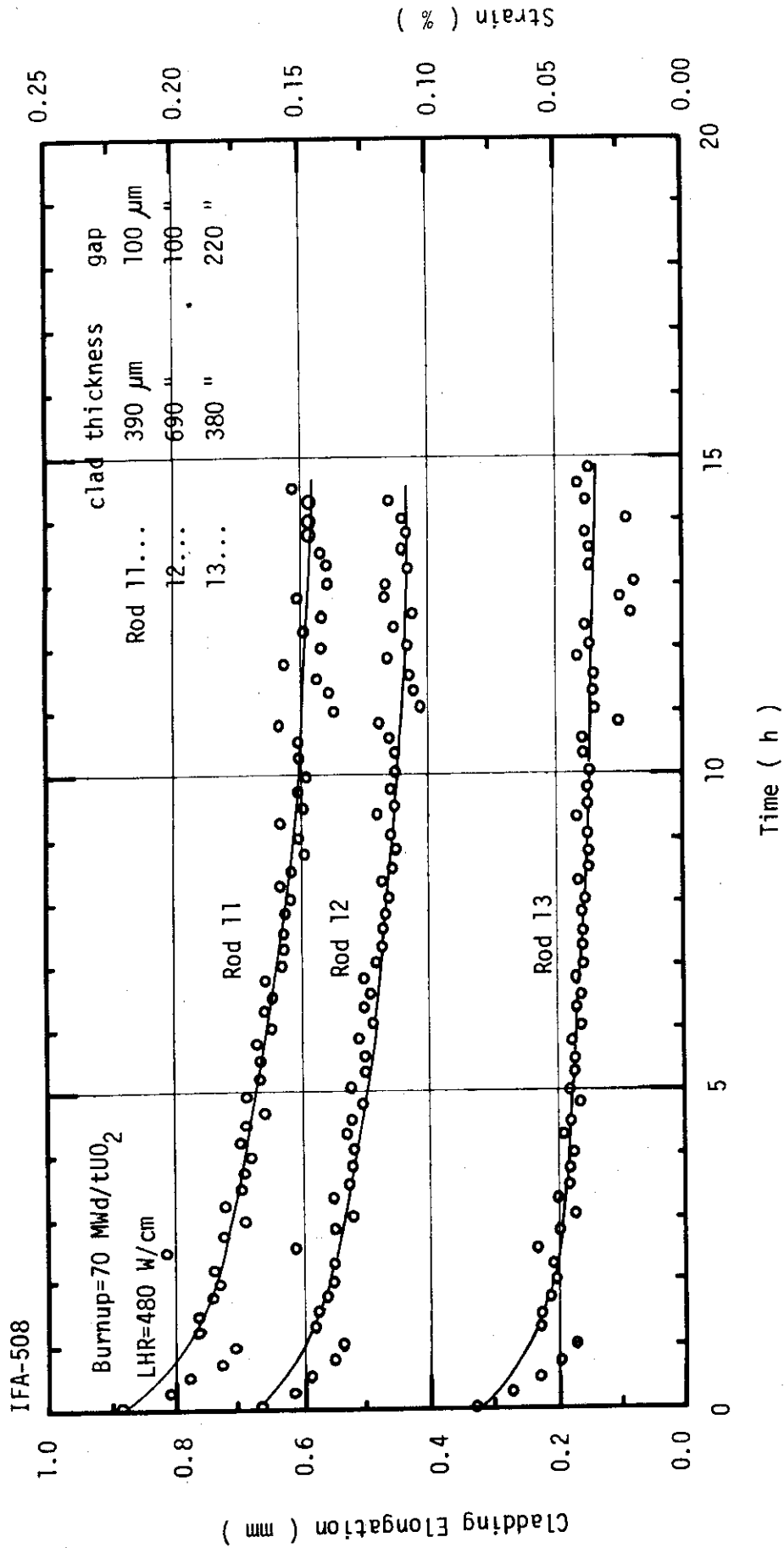


Fig. 12 Relation between cladding elongation/strain and holding time for burnups 70 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

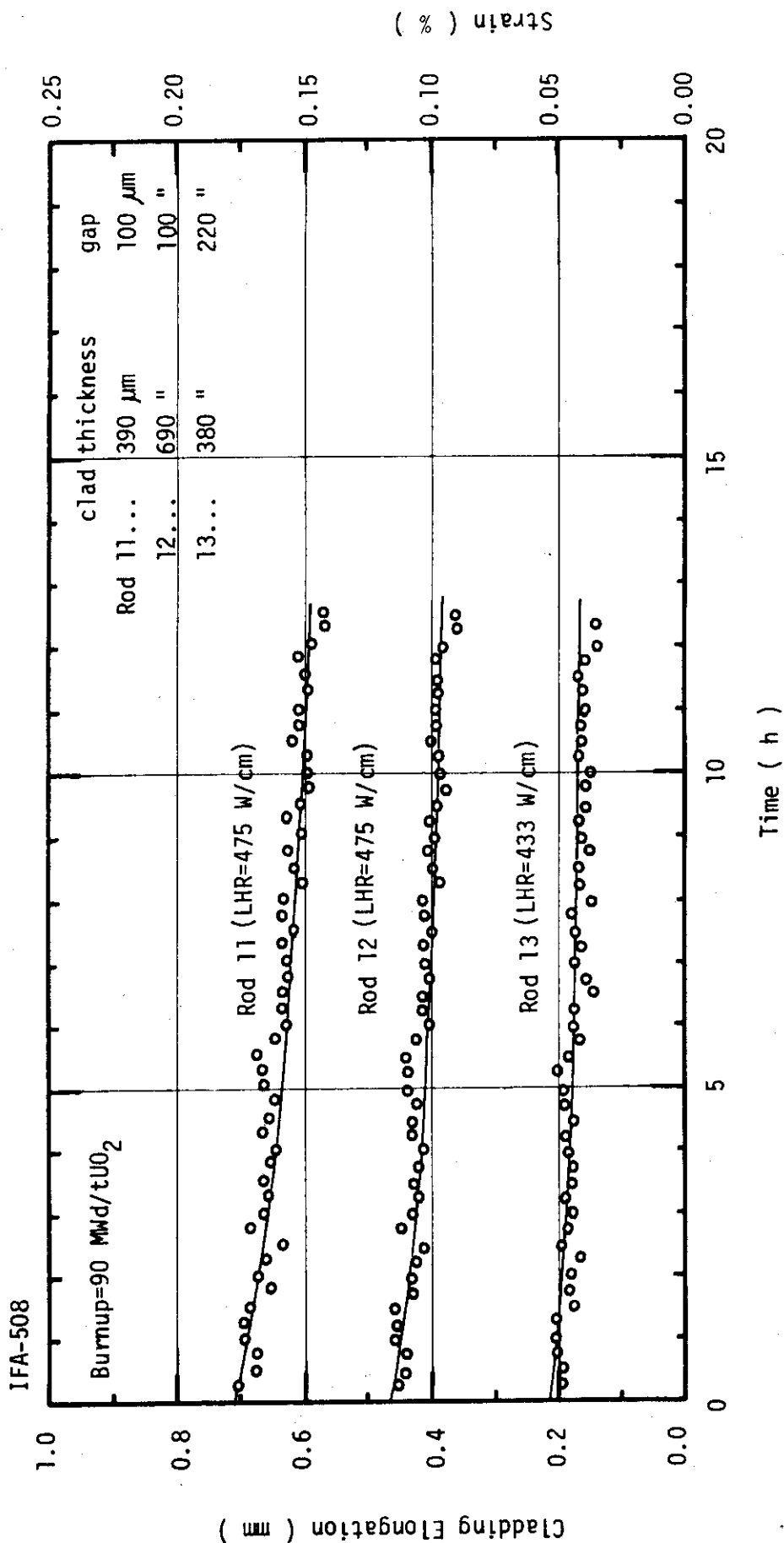


Fig. 13 Relation between cladding elongation/strain and holding time for burnups 90 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

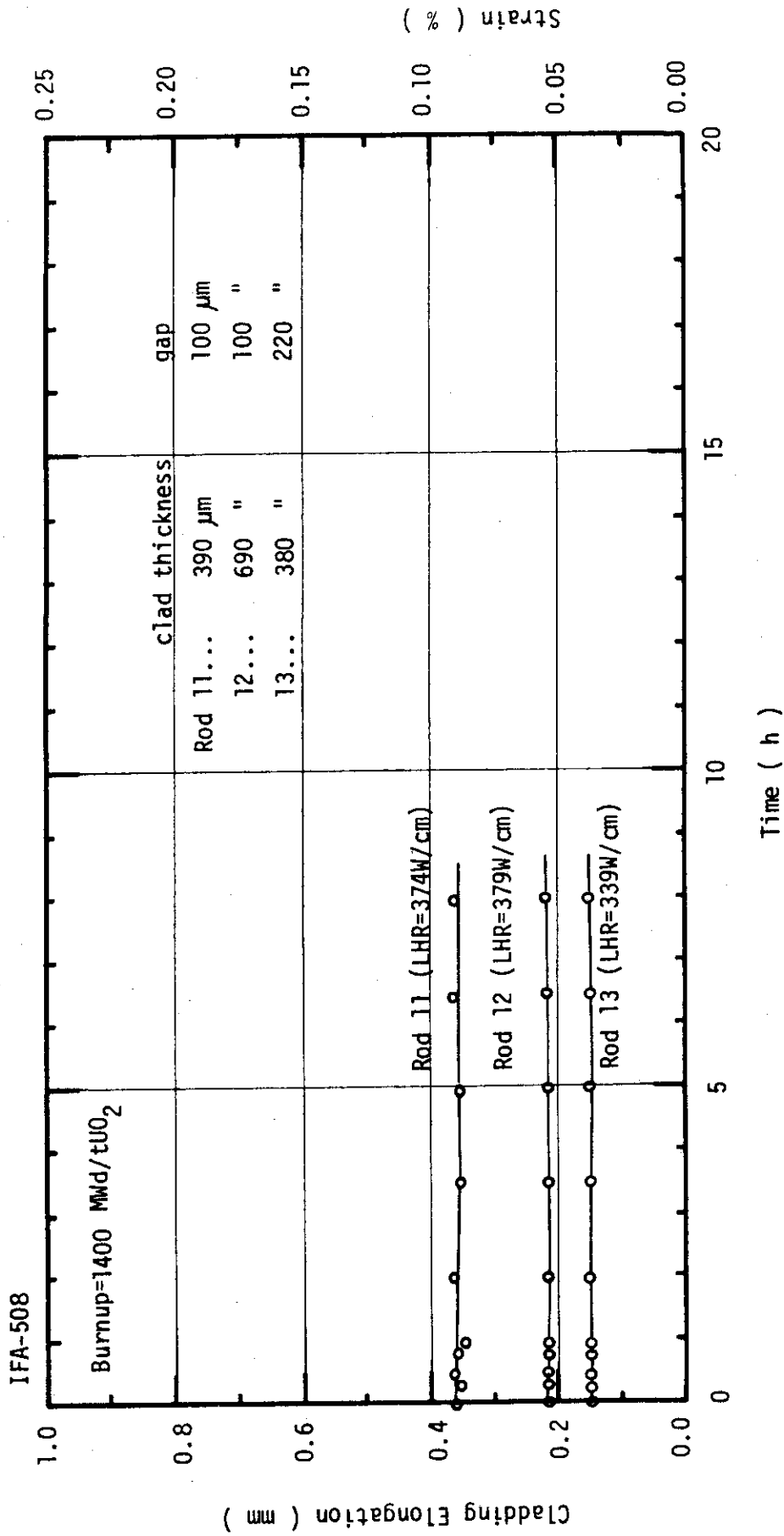


Fig. 14 Relation between cladding elongation/strain and holding time for burnups 1 400 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

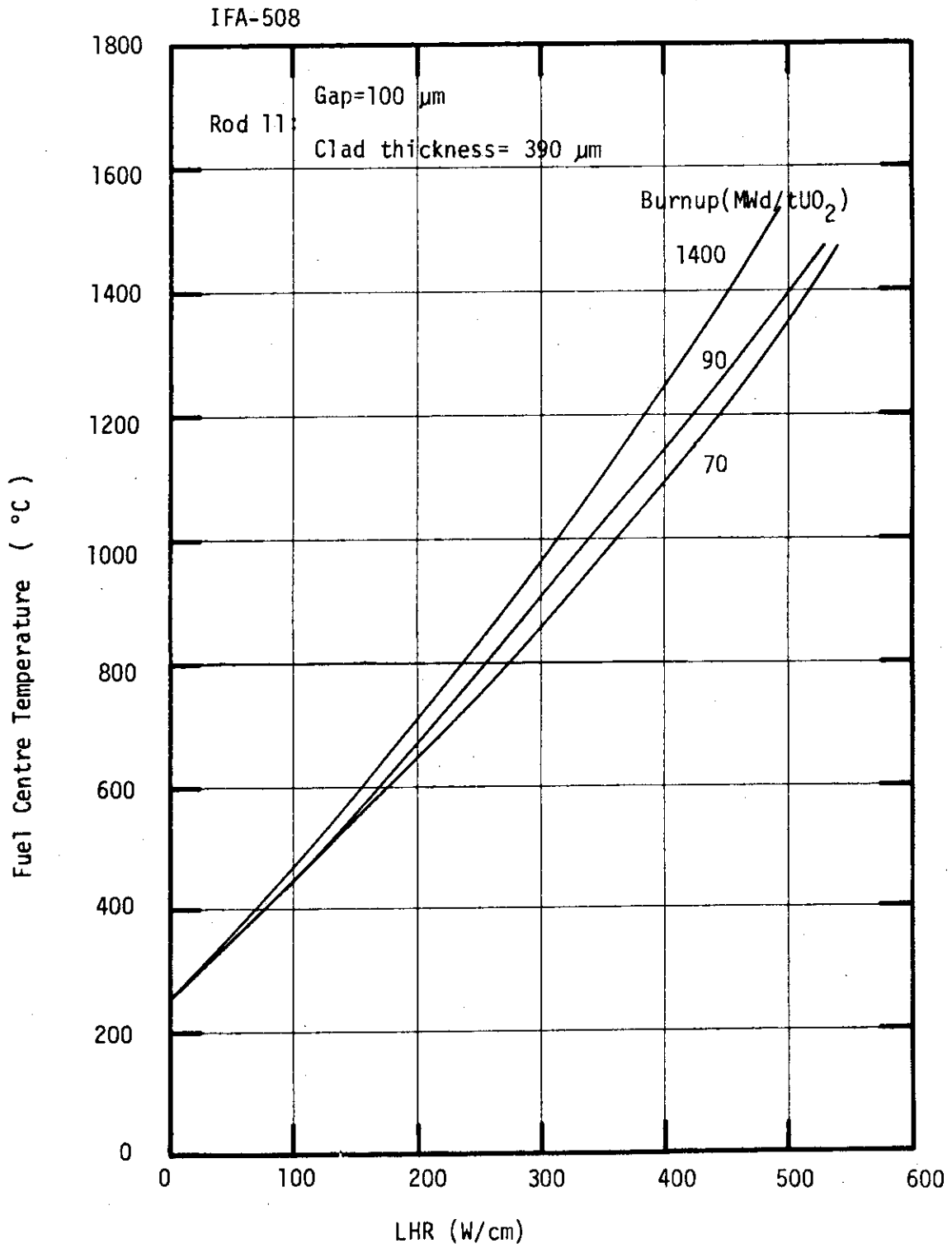


Fig. 15 Relation between fuel centre temperature and linear heat rating at thermocouple for rod 11 (variation with burnup)

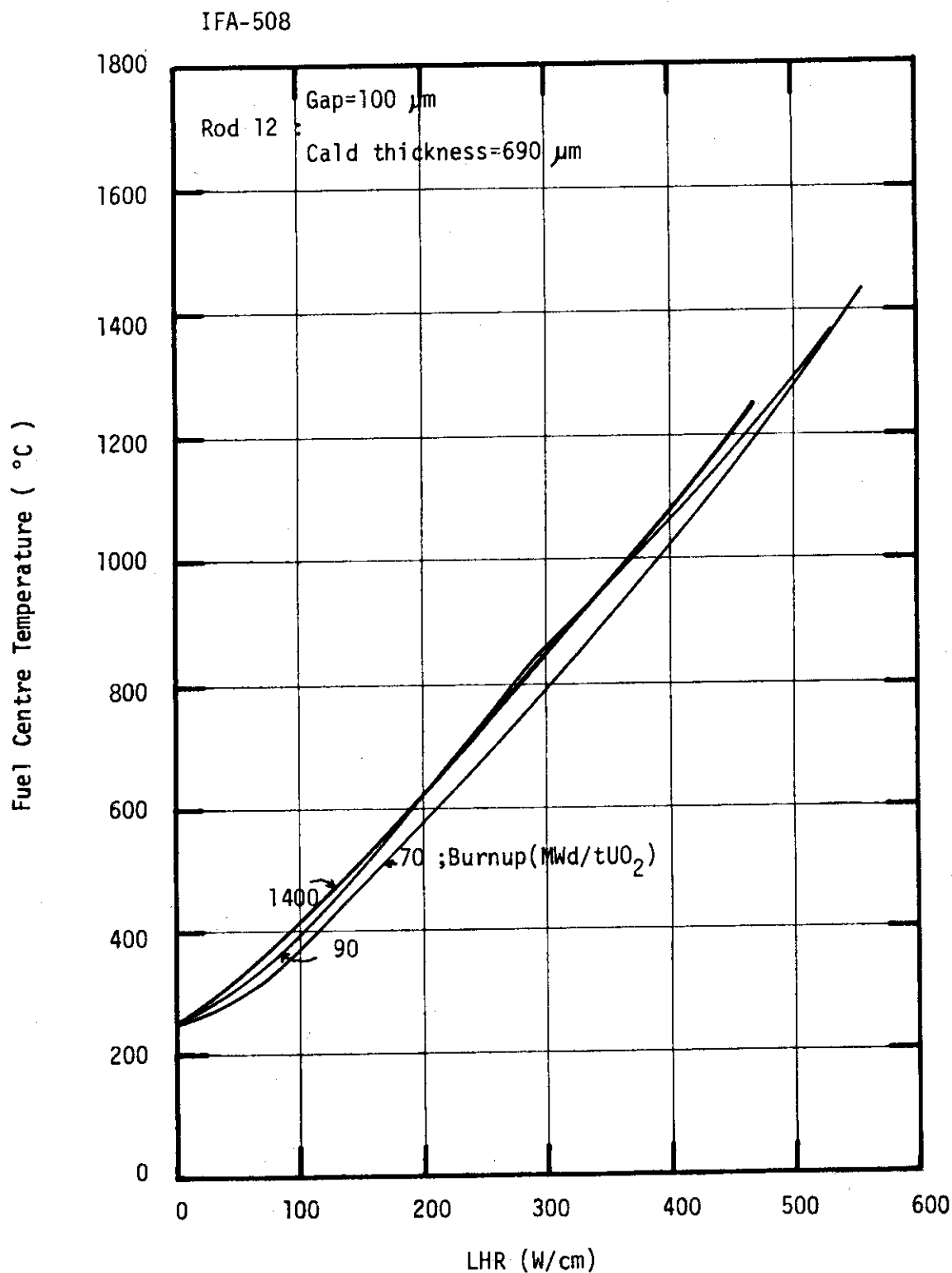


Fig. 16 Relation between fuel centre temperature and linear heat rating at thermocouple for rod 12 (variation with burnup)

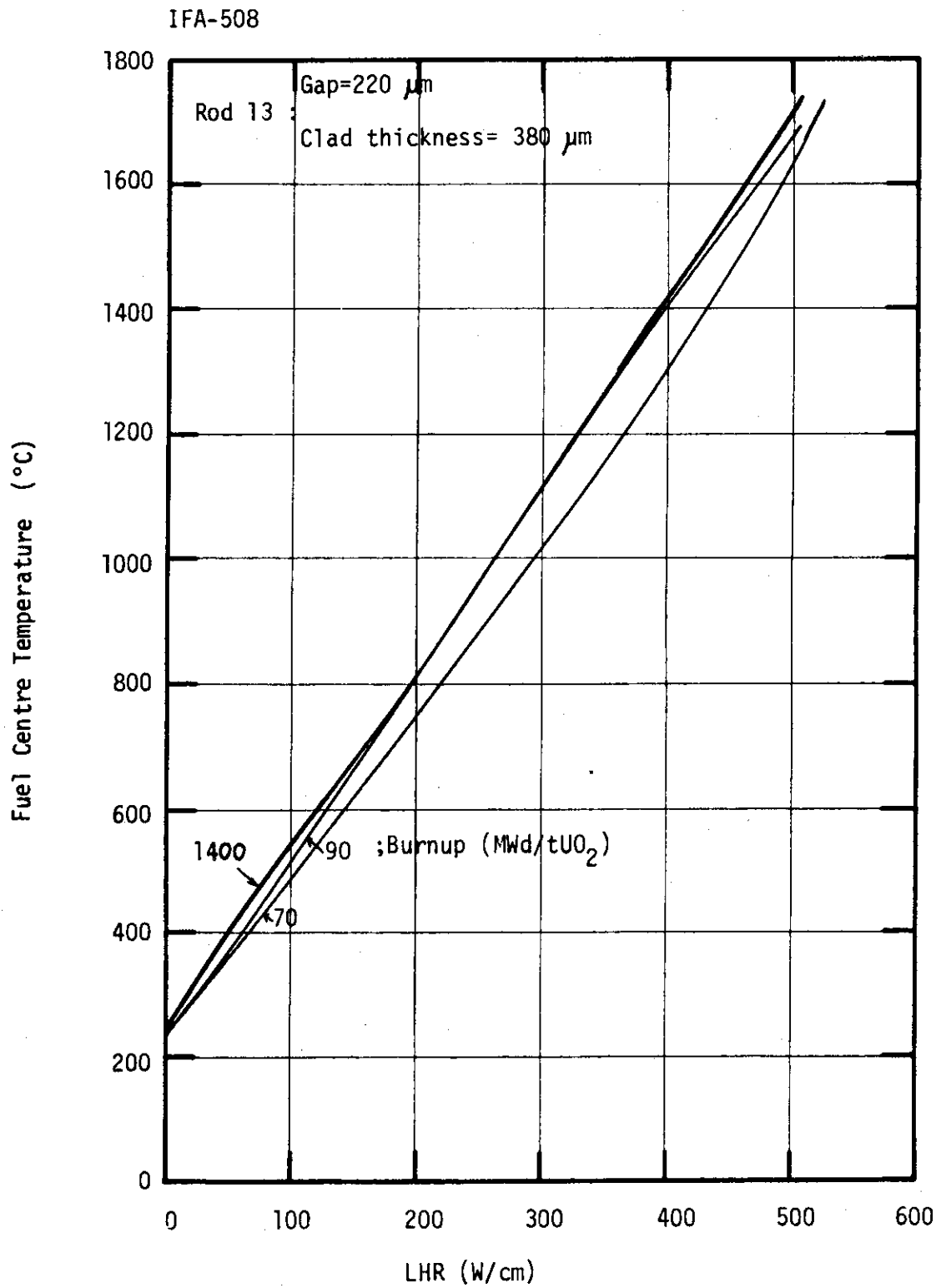


Fig 17 Relation between fuel centre temperature and linear heat rating at thermocouple for rod 13 (variation with burnup)



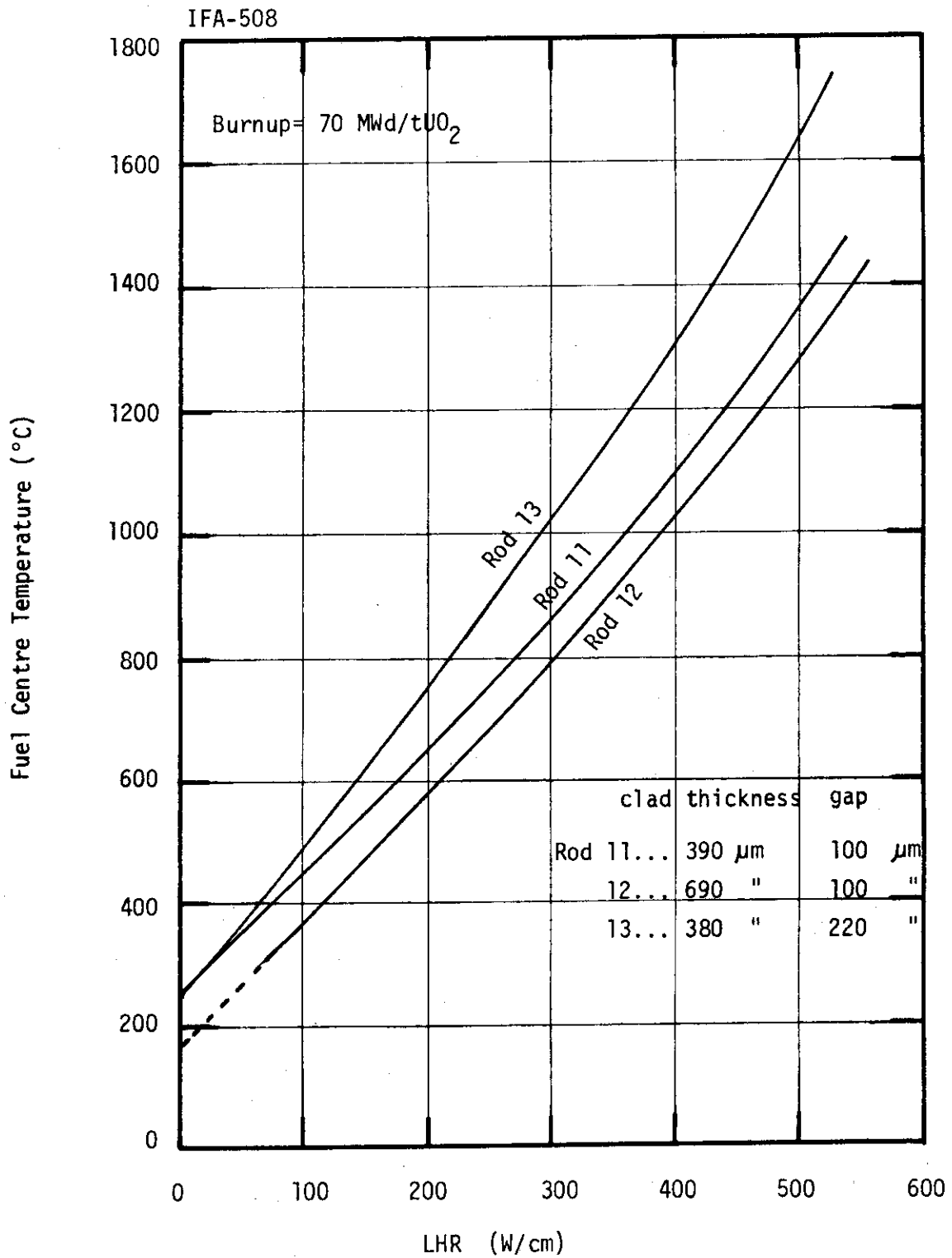


Fig. 18 Relation between fuel centre temperature and linear heat rating at thermocouple for burnups 70 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

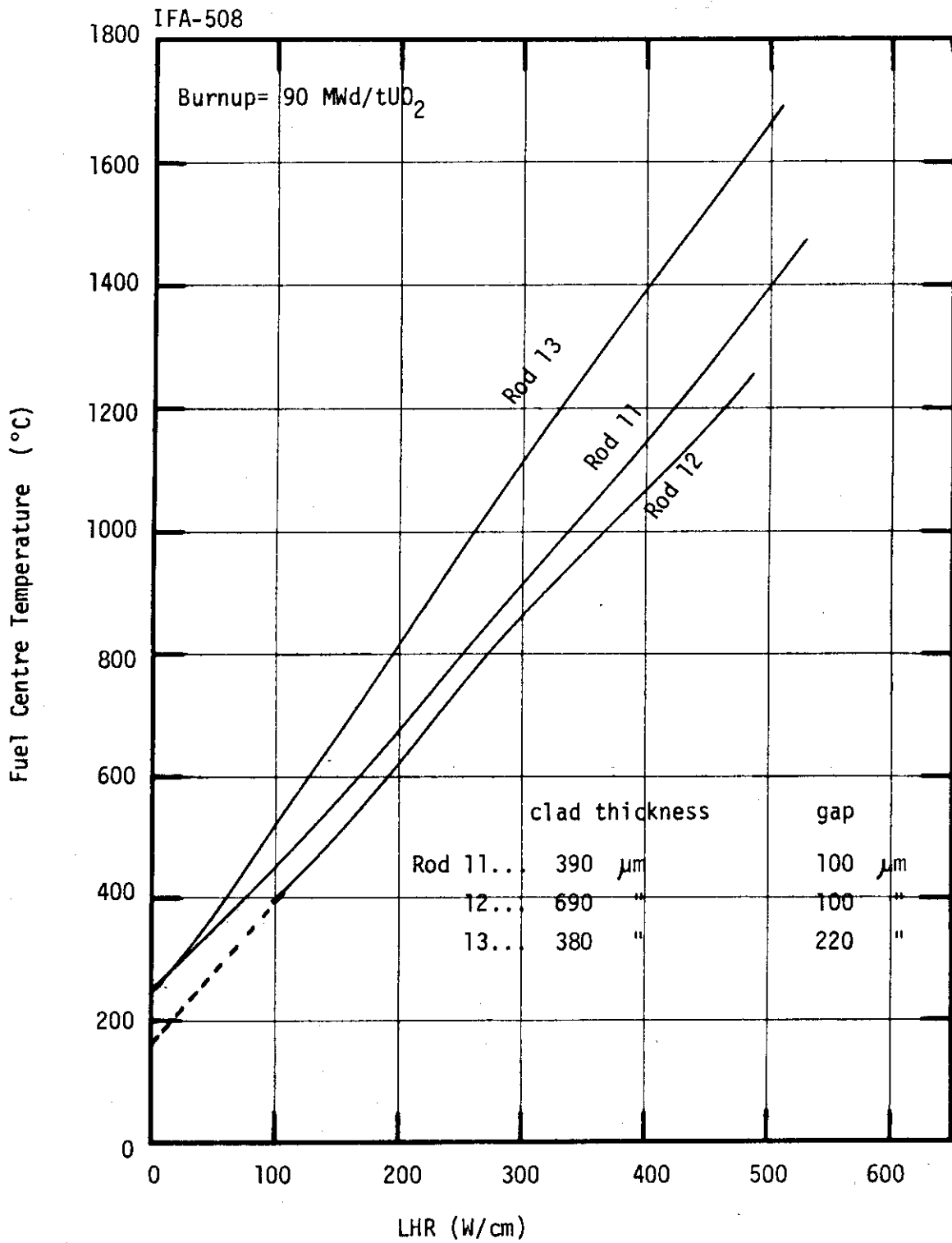


Fig. 19 Relation between fuel centre temperature and linear heat rating at thermocouple for burnups 90 MWd/tU<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

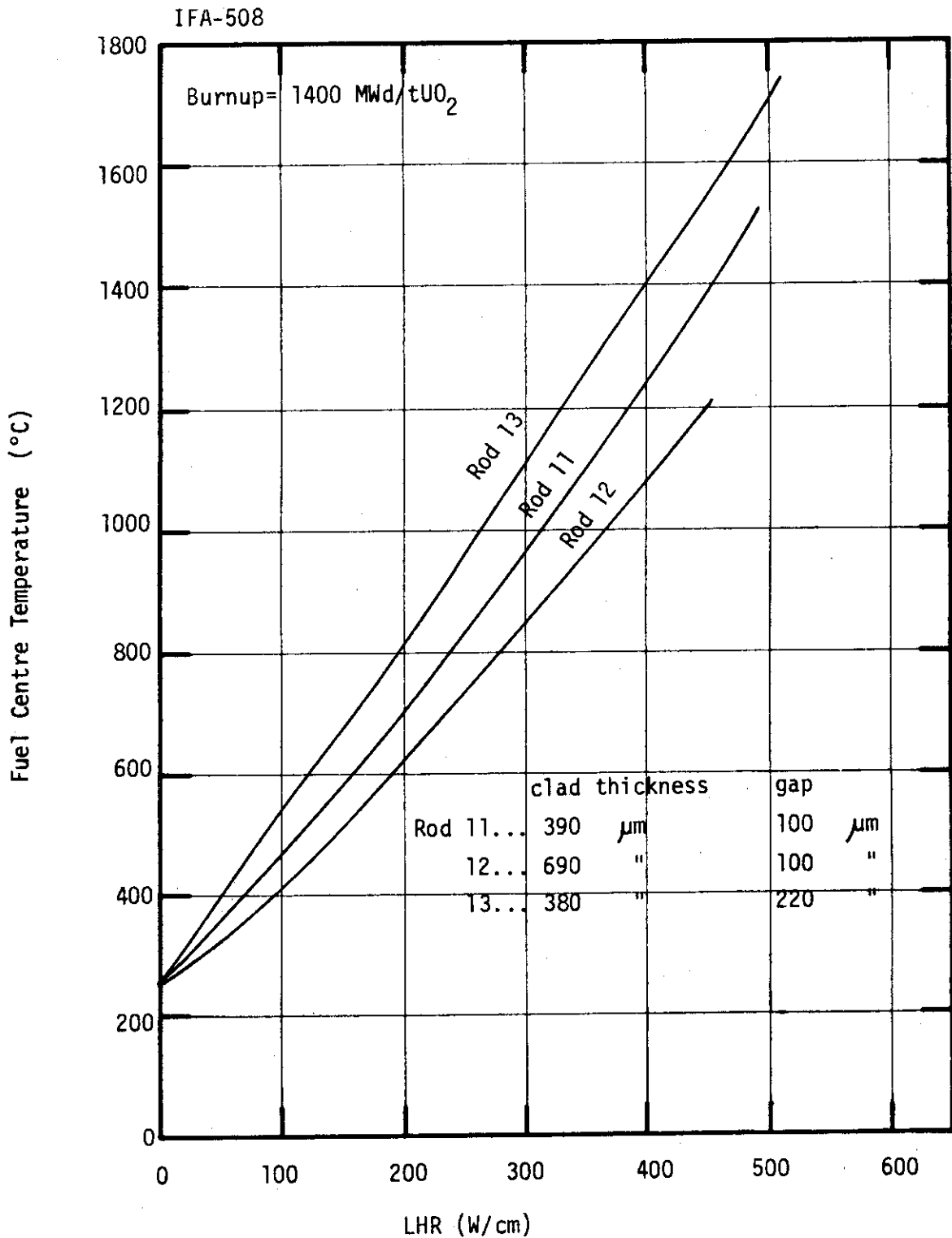


Fig. 20 Relation between fuel centre thmperature and linear heat rating at thermocouple for burnups 1 400 MWd/tUO<sub>2</sub> (variation with fuel rod)

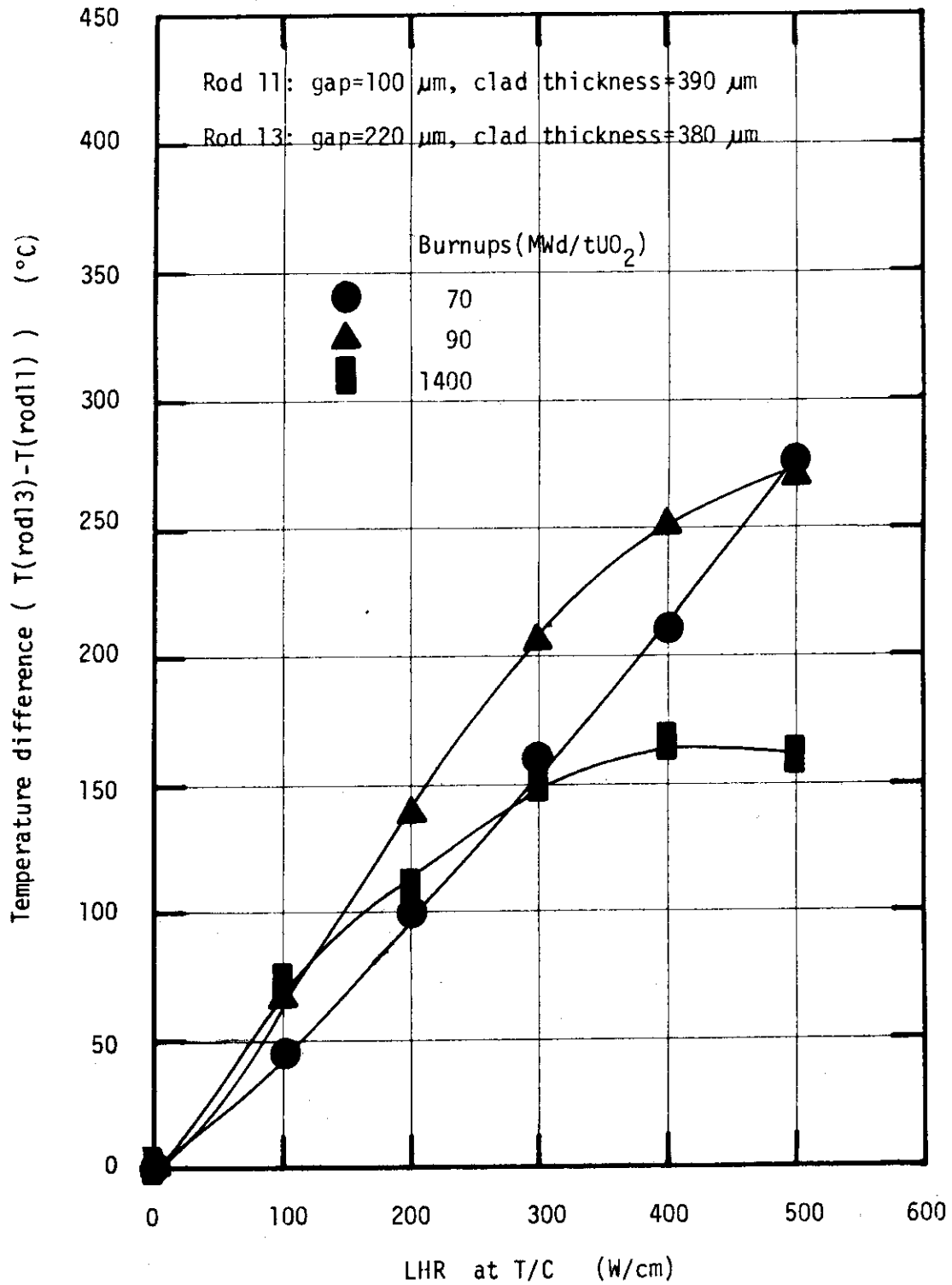


Fig. 21 Temperature difference (T(rod13)-T(rod11)) vs linear heat rating at thermocouple for burnups 70, 90 and 1400 MWd/tUO<sub>2</sub>

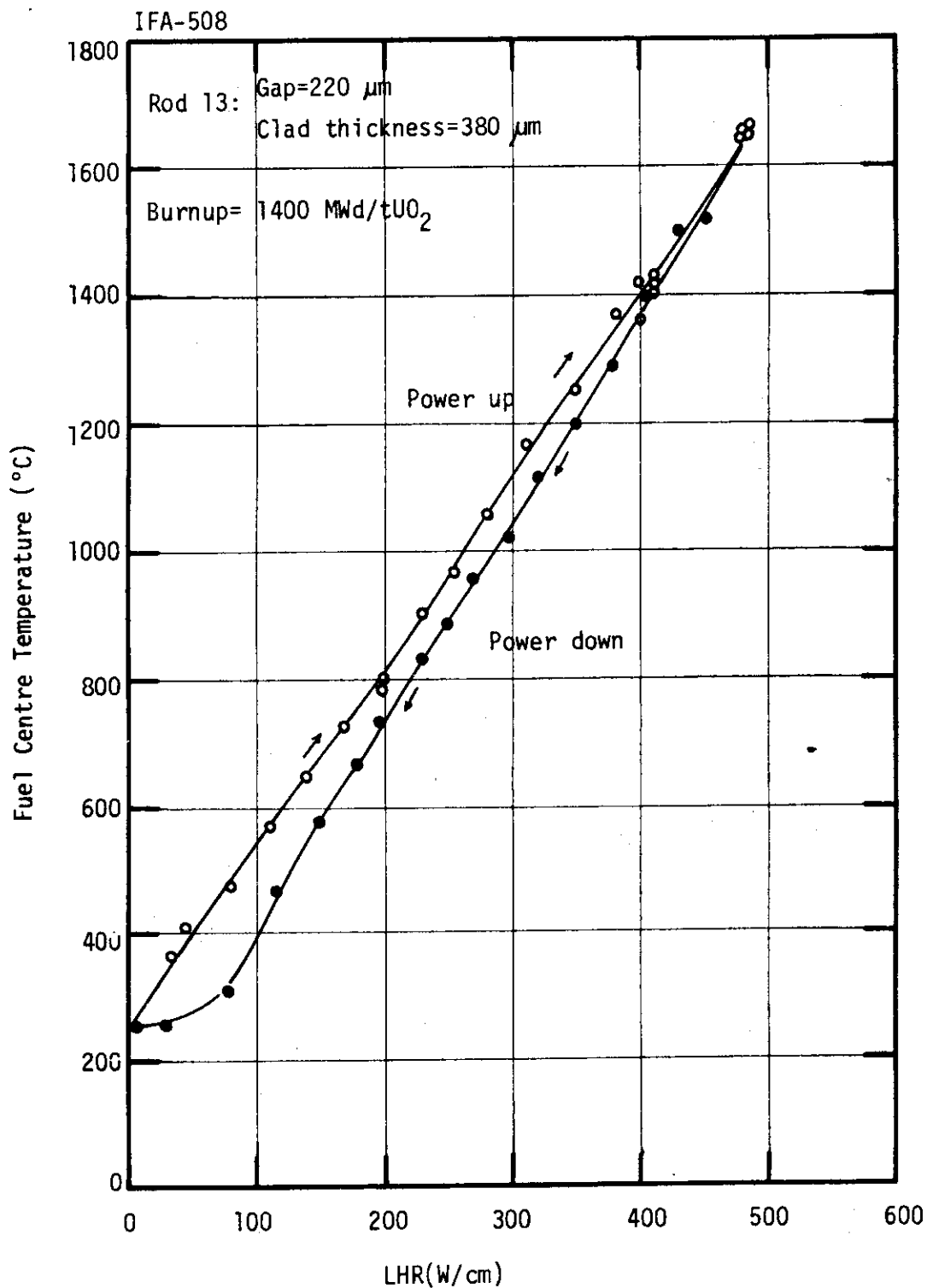


Fig. 22 Hysteresis loop of centre temperature of fuel rod