

本資料は 2011.6.6 日付で登録区分、
変更する。

[技術情報室]

NSRRによる混合酸化物燃料の 破損挙動に関する研究（Ⅱ）

Study on Fuel Failure Behaviour of Plutonium Uranium
Mixed Oxide Fuel with NSRR (II)

(第1次照射実験結果の解析・評価)

1984年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

配
こ

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

(A)



NSRRによる混合酸化物燃料の 破損挙動に関する研究（II）

Study on Fuel Failure Behaviour of Plutonium Uranium
Mixed Oxide Fuel with NSRR (II)

実施責任者 横内洋二^{*1}

報告者 上村勝一郎^{*1} 古田土和雄^{*1} 中村光延^{*4}
山口俊弘^{*2} 森田由紀夫^{*3}

期日 1983年4月～1984年4月

目的 混合酸化物燃料の反応度事故時の破損しきい値を求めるとともに、PIEデータの解析を行いATR及びプルサーマル燃料設計に反映する。

要旨 第1次照射実験として、PWR標準燃料と同一寸法で、プルトニウム富化度6.33w/oの混合酸化物燃料棒を10本、NSRRで照射を行い、PIE結果・解析により次の結論を得た。

- (1) 今回実験した混合酸化物燃料の破損しきい値は、250～256 cal/gの間にあることが確認できた。これは、標準燃料(UO_2 燃料)の破損しきい値253～264 cal/gよりやや低いが、ほぼ一致している。
- (2) 照射後試験の結果からは、特に UO_2 燃料の場合と異なる挙動は見い出せなかった。
- (3) 照射後試験の結果から、次の特性と発熱量との間には、強い相関が見られ、150～190 cal/g以上で急激に変化がはげしくなるのが観察された。

ペレット結晶粒径

被覆管結晶粒径

被覆管硬さ

被覆管外径増加量

被覆管酸化膜厚さ

- (4) 数秒程度のごく短時間のペレットの結晶粒成長開始は、燃料の発熱量が約190 cal/g以上加わり、燃料温度が約2000°C以上で始まる。
- (5) 高温、超短時間の結晶粒成長は、燃料温度と大きな相関性があり、AINS COUGHの結晶粒成長モデルを実験解析に適用することができた。

* 1 プルトニウム燃料部 設計開発課

* 2 " 品質管理課

* 3 " 現燃料製造施設建設室

* 4 原子力技術(株)

(6) ベレットの結晶粒径分布を評価することは、トランジエント時の温度分布の評価に貴重な指標となることを示した。

(7) FEAPUS-IIIコードによるベレットのトランジエント温度計算結果は、結晶粒径分布との間に、整合性がとれており、妥当と言える。

目 次

1.はじめに	1
2.目的	2
3.実験準備	2
4.試験体	2
5.照射実験	3
5.1 実験方法	3
5.2 照射実験条件	3
5.3 照射実験結果	3
6.照射後試験	4
6.1 試験項目	4
6.2 試験結果	4
7.燃料温度解析	5
7.1 目的	5
7.2 ペレット結晶粒径からの温度評価法	5
7.3 F E A P U S -Ⅲによる温度計算	6
7.4 ペレット結晶粒径の計算値と実測値の比較	9
8.被覆管酸化膜厚の評価	11
9.破損しきい値の評価	12
9.1 目的	12
9.2 実験データ	12
9.3 検討	12
9.4 評価	12
10.まとめ	14
11.謝辞	15
12.参考文献	16
附録 1 照射履歴データ集	77
附録 2 被覆管酸化膜厚の計算	143
附録 3 DANTEに登録した照射後試験データ	156
附録 4 原子力学会「昭59年会」予稿	184

1. はじめに

日本原子力研究所(以下「原研」という)のNuclear Safety Research Reactor(NSRR)では、軽水炉のUO₂燃料を対象にした反応度事故時の燃料挙動を解明するため、数多くのパルス照射実験を行ってきている。動燃では、NSRRを用いたUO₂-PuO₂混合酸化物燃料の安全性研究を立案し、昭和53年度に原研・動燃担当者による予備検討を通して、54年度より正式に共同研究としてスタートした。

実験は、大きく分けて2つのキャンペーンに分かれており、56～57年度に第1次照射実験を行い、58～60年度に第2次照射実験を行う予定である。第1次照射実験は、主として混合酸化物燃料の反応度投入下における破損しきい値が、二酸化ウラン燃料の場合と比較して差がないことを確認することを目的としたものであり、第2次照射実験は、ブルトニウムスポットの存在による破損しきい値の変化の様子を調べることを主目的としたものである。

本共同研究を遂行するに当っては、表1に示すような業務を、同表に示す作業分担のもとに実施した。

これらの業務は、これまでに図1に示すような作業スケジュールで遂行された。

本報告書では、58年度までに終了した「第1次照射実験」に関し、その全体的な作業内容の概要と、照射試験結果、照射後試験結果の解析の詳細について報告する。

2. 目的

「第1次照射実験」の目的は次に示す通りである。

- ① 混合酸化物燃料の反応度事故時の破損しきい値を求める。
- ② 混合酸化物燃料の反応度投入下の挙動に、二酸化ウラン燃料との間に差があるかどうかを調べる。
- ③ 解析コードの検証データを得るとともに、照射後試験データの解析を行う。
- ④ 「ふげん」と「プルサーマル」燃料の設計上の参考データを得る。

3. 実験準備

共同研究の発足以来の実験準備作業としては、表1にあげた項目を図1に示したスケジュールで実施した。その内容に関しては、既に前報⁽¹⁾で報告してあるのでそちらを参照していただきたい。

4. 試験体

NSRRでは、14×14型PWR燃料と同一寸法のものを標準燃料としてこれまでに数多くのデータを蓄積している。これらの実験結果と比較する上から第1次照射実験用燃料棒寸法としては、以下の通りのものとし、標準燃料と同一にした。また被覆管もジルカロイ-4を用いている。

ペレット直徑	9.29mmφ
被覆管外径	10.72mmφ
〃 肉厚	0.62mmφ
燃料有効長	110mm

表2に実験用燃料棒の主要仕様を、図2に燃料棒の設計図を示す。

なお、実験用燃料棒の設計・製造及び完成品の検査結果の詳細については、前報⁽¹⁾を参照していただきたい。

5. 照射実験

5.1 実験方法

図3に試験部の全体組立図を示す。キャップセルとしては、2重構造のものを用い、燃料棒（約207mm×11mmφ）1本を内部カプセルの所定の位置に支持・固定した後、純水を内部カプセルの内容積の80%程充填し、NSRRの標準水カプセル内に装填した。この照射カプセルを、図4に示すNSRR炉心の照射孔に装荷し、種々の出力でパルス照射した。

照射実験中は、あらかじめ取付けられた熱電対および圧力計により燃料棒表面温度、冷却水温度および内部カプセル内圧を測定した。

5.2 照射実験条件

照射実験は、全部で10回行った。試験体はすべて同じものを用い発熱量のみをかえて行った。それぞれの照射の目的と発熱量は、表3に一覧表としてまとめてある。このうち701-1と701-2については、推定発熱量の較正を目的に、701-3, 4, 5は、破損挙動の把握を目的に順次発熱量を上げていった。また701-6, 7は、破損しきい値の再現性を得る目的で、701-8, 9, 10では、DNBしきい値の確認、PIEデータの補充を目的に実験を行った。なお本実験では、燃料総発熱量は、115～284cal/g MOXの範囲で、また投入反応度は、2.35～4.40\$の範囲で照射を行った。

5.3 照射実験結果

前記条件のもとに行なった実験結果の概要をまとめて表4に示す。又、各回の照射時に測定した、炉の出力、内部キャップセル内水温、被覆管表面温度の履歴の詳細は、附録1にまとめてある。

本実験に用いた試験燃料の破損は、249～256cal/gの間の発熱量において生じている。256cal/gの発熱量（実験№701-6）で破損した燃料の被覆管下部には、溶融による変形が起きており、変形部にクラックが生じていた。

また、本実験での最大発熱量284cal/gを与えた場合（実験№701-10）にも、被覆管下部の溶融変形及び周方向クラックが生じていた。

なお、最大発熱量よりも約20cal/g低い、263cal/gの発熱量を与えた場合（実験№701-5）には、燃料棒は2つに分断していた。この燃料棒の分断は、キャスクにて燃料棒入り内部カプセルを原研から動燃まで運搬する際、あるいは内部カプセル解体作業時の衝撃力によって起きたものと推定される。

6. 照射後試験

照射後試験に関しては、参考文献(3)に詳しく記載されているので、ここではその主要項目と、主な結果についてのみ記す。

6.1 試験項目

照射済燃料は、内部カプセルに入れたまま原研NSRRより、動燃のプル燃部第2開発室まで輸送した。その後表5に示す項目に関し、照射後試験を実施した。

6.2 試験結果

上記に記した各項目の試験結果を整理して、各パラメータ間の関係として各種のグラフを作成した。又、各燃料棒の外観、断面金相写真を整理して比較・検討の便に供した。これらのグラフ、写真の一覧を表6に示す。又、これらのグラフは、生の測定データを燃料データ解析システム(DANTE)に、登録し、検索・解析を行ったものである。附録2に、 DANTEに登録してあるデータの内容を示す。

7. 燃料温度解析

7.1 目的

NSRR第1次試験の照射後試験より得られるペレット結晶粒径の測定値から燃料内温度分布の推定を粒成長に関するモデル式の設定により評価する。また、有限要素法による燃料拳動解析コード「FEAPUS-III」⁽⁴⁾を使用して、実験条件から、燃料温度の評価を行ない上記モデル式からの温度分布と比較し、検討する。

7.2 ペレット結晶粒径からの温度評価法

ペレット結晶粒の成長に関する研究は広く行なわれており、多くの文献が発表されている。

本解析では、このうち広く定常解析で採用されているAINS COUGHの式をベースモデル式とし、PIEから得られたペレット結晶粒径測定値を使ってペレット結晶粒径とペレット温度の関係を解析した。以下にその評価手法概要を示す。

(1) AINS COUGHの式

AINS COUGH等は UO_2 ペレットの等温条件でのペレット結晶粒の成長に関し⁽⁵⁾、自らの実験及び既に報告されているデータから次のモデル式を提案した。

$$\frac{dD}{dt} = K \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_m} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

K : 粒成長速度 : $5.24 \times 10^7 \exp(-2.67 \times 10^5 / R \cdot T)$ ($\mu\text{m}^2/\text{hr}$)

D_m : 限界粒径 : $2.23 \times 10^8 \exp(-7620/T)$ (μm)

D : 結晶粒径 (μm)

R : 気体定数 $8.314 (\text{J}/\text{K} \cdot \text{mol})$

T : 温度 (K)

また、(1)式の積分型は次式で表わされる。

$$D_m (D_o - D) + D_m^2 \ln \left(\frac{(D_m - D_o)}{(D_m - D)} \right) = k \times t \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

D_o : 初期粒径 (μm)

t : 時間 (hr)

ここで、このモデル式は、ある温度場と時間によって結晶粒径を定義しているため、NSRR実験に対しても、利用の可能性があることを示している。

(2) NSRR実験データへの適用

上記(1)式を差分型(3)式に表わし試験番号 701-4, 701-6, 701-10 の測定データ及

びFEAPUS-III計算温度を使いペレット結晶粒径分布を計算したものを図26に示す。この図より、計算値は測定値より非常に大きく、AINS COUGHの式そのものの適用は、適当でないことがわかる。

そこで、このモデル式の重要なパラメータである粒成長速度Kに関し、等温条件で照射されたであろうと思われるペレット中心付近の結晶粒径測定値を使って、NSRR版の粒成長速度式を作成した。

粒成長速度式の作成は、上記(2)式を使い、(4)式のAとQを最小2乗法により求めた。

$$D^{t+\Delta t} = D^t + K^t \times \left(\frac{1}{D^t} - \frac{1}{D_m^t} \right) \times \Delta t \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$K = A \exp(-Q/R \cdot T) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで求めたA、Qは以下となる。

$$A = 3.997 \times 10^9$$

$$Q = 4.398 \times 10^5 \text{ J/mol}$$

図27に上記A、Qから(2)式を使って求めた結晶粒成長の計算値と実測値を示す。

また、NSRR版粒成長速度式の特性を図28、図29に示す。

(3) ペレット結晶粒径分布の算出

上記NSRR版粒成長速度式及び(3)式とFEAPUS-III計算温度を使って、ペレット結晶粒径分布の算出を行った。

計算値と実測値の比較図を図30に示す。

7.3 FEAPUS-IIIによる温度計算

1) FEAPUS-IIIコードの概略

FEAPUS-IIIコードは、有限要素法を使用して、燃料の定常及び非定常熱伝導解析が可能であり、また、有限要素法の得意とする応力・歪解析も同様に解析可能である。又、大きな特徴として2次元 $r-\theta$ 、2次元 $r-z$ 及び三次元形状での解析が可能であることがあげられる。

NSRR実験解析に対してFEAPUS-IIIコードは総合的拳動解析コードの機能は有しているが、急激な過渡現象であるNSRR実験での冷却材一被覆管間及び燃料一被覆管間での熱伝達問題は解析不可能に近い。このため、計測している被覆管表面温度を入力とし、冷却材一被覆管熱伝達は考えず、また、燃料一被覆管熱伝達は、パラメータとして設定し計算を行っている。計算は軸方向の温度勾配よりも径方向のほうが大きいと考えられるため、スタック中心

部で2次元 $r - \theta$ 形状を使用して行った。

2) 計算条件(於 701-6)

① 計算体形

体形図を図31に示す。

体形は2次元 $r - \theta$ 形状を使用し、ペレット断面の $\frac{1}{8}$ 領域とした。

メッシュ切りは、粒径測定点と、後にPu SPOTを付けた場合を考慮して燃料を径方向に17分割、被覆管を3分割とした。

表7にメッシュ切りに対する径方向位置を示す。

② 燃料仕様

ペレット直径: 9.29mm

理論密度: 95.4%T.D

Pu富化度: 6.33w/o

O/M : 1.97

被覆管材質: ジルカロイ4

外径: 10.72mm

内径: 9.48mm

肉厚: 0.62mm

③ 出力分布

図32にパルス出力図を示す。

表8にパルス出力を線出力に換算した出力履歴を示す。

ここで総発熱量から線出力の換算過程を以下に示す。

M701-6発熱量換算

総発熱量 256cal/g

総発熱量から最大線出力を求める。

$$x (\text{w/cm}) = \frac{\text{総発熱量} \times 4.186 (\text{w} \cdot \text{s/g})}{\Delta t \times \sum R.P(S)} \times G (\text{g/cm})$$

Δt : パルス出力分布微少時間 (0.002 sec)

R.P : 相対パルス出力 (炉出力)

G : 単位重量 (g/cm)

$$\text{MOX Fuel Volume} \quad \frac{\pi}{4} (929)^2 \times 110 \times 10^{-3} = 7.46 \text{cm}^3$$

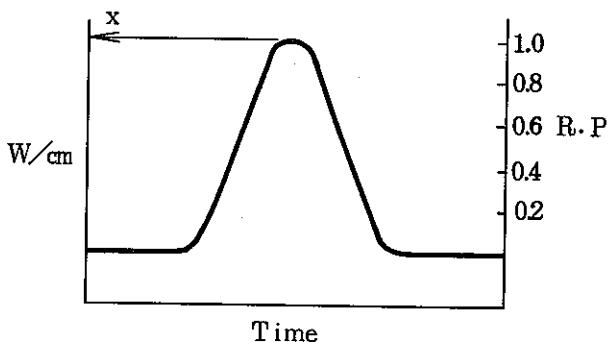
$$\begin{aligned} \text{MOX Fuel Density} &= (11.47 \times 0.0633 + 10.96 \times 0.9367) \times 0.954 \\ &= 10.49 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

MOX Fuel total weight $7.46 \times 10.49 = 7826 \text{ g}$

$$G = 7826 / 11.0 = 711 \text{ g/cm}$$

$$\Delta t \times \Sigma R.P = (0.001 + 1.0 \times 0.002 (0.8 + 0.54 + 0.3 + 0.13 + 0.06 + 0.03 + 0.016 + 0.005) \times 2 = 9.524 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$\therefore x = \frac{256 \times 4186}{9.524 \times 10^{-3}} \times 7.11 = 800000 \text{ w/cm}$$



また、図3-3にペレット内径方向出力分布を示す。

④ 被覆管表面温度

被覆管表面に取り付けられた熱電対による測定温度を表9、図3-4に示す。またNSRR実験燃料の計装図を図3-5に示す。

⑤ 圧力条件

圧力は、燃料-被覆管ギャップ、及びキャップセル内ともに1気圧とした。

⑥ 燃料-被覆管間熱伝達率

FEAPUS-IIIコードにはギャップコンダクタンス計算モデルが数種類内蔵されているが、燃料-被覆管の接触は考慮していないため、急激な接触が起こると考えられるNSRR実験では、内蔵モデルの使用は好ましくない。

NSRRの一連のLWR燃料棒の照射実験より、150 cal/g以上の発熱量になるとペレットと被覆管はhardなコンタクトを起こすことがわかっており、ギャップコンダクタンスを照射中一定 $10000 \text{ Btu/ft}^2 \text{ hr } {}^\circ\text{F}$ として与えた。

3) 計算結果

上記条件からの計算結果を図3-6、図3-7に示す。

図3-6は、図3-1の計算体形図における境界線(0°)での計算点を時間を軸として表わしたもので、この図よりペレット中心部の温度履歴は、あまり変化がなく、周辺部ほど変化が激しい。

図37は、上記図36を径方向温度分布として表わしたもので、時間変化による温度の動き方を表わしている。パルス投入後の最高出力時には、径方向ディプレッションの効果が働き周辺部が最高温度を示す。

また、図38、図39は、POWERをパラメータとした時の径方向温度分布及びペレット中心部の温度履歴を示すもので、径方向温度分布は、各POINTでの最高温度を示している。

7.4 ペレット結晶粒径の計算値と実測値の比較

(1) 照射後試験結果のデータ解析

前章において各種のグラフを作成したが、このうちペレット結晶粒径に関して検討してみる。

図40は、ペレット結晶粒径の発熱量依存性を示し、図41は径方向の結晶粒径分布、図42は、軸方向位置とパラメータとした径方向の結晶粒径分布を示すものである。

まず、図40では与えられたエネルギーが大きければ、それに従い温度も高くなり、ペレットの結晶粒径が成長することを示しており、図41から半径方向分布は、燃料スタック中心において、中心部と中間部の粒径にあまり差がないものと、中心部に大きく周辺部に小さいものの2種類のモードが見られる。これは、各照射においてどれだけの時間、粒成長する温度で照射されたかを表わしており、付録に添付している照射データから推定して701-6は約3sec 701-4は約7sec、701-10は約6.5secとなる。ここでこの時間は、被覆管表面温度測定データから得られる時間と必ずしも同一にはならない。よって、701-10は、粒成長する時間が長いため、中心に高いモードを示し、701-6は短いため、中心、中間とも同程度の成長になったものと思われる。次に、図42は、同一燃料棒の軸方向の違いによる粒径分布を示している。これより、スタック中央が低く、両端に高い分布が見られ、これは軸方向の出力分布による影響のためと思われる。図43、44は、UO₂燃料データであるが、MOX燃料も同様な現象が起こると思われるため、軸方向のピーキングにより、下端では結晶粒が大きく成長したと考えられる。

(2) ペレット結晶粒径の計算値と実測値の比較

上記データ解析を考慮しAINS COUGHのモデル式をベースとしたNSRR版粒成長速度式を作成して、ペレット結晶粒径を計算したものを図5に示す。ここで燃料温度は、ペレット結晶粒径測定位置でのFEAPUS-III計算温度履歴を使用した。

この図から、測定した粒径分布の傾向を計算値はほぼ表わしていることがわかる。ここで、計算値は測定値に比べ全体的に絶対値が小さめに表わしているが、これは計算に使用した燃料温度が、パルス照射時からの温度履歴を使っている点、また図29の粒成長速度式の特性からも、燃料温度が200°C以上でないと成長しない点、が理由としてあげられる。また、図30では、燃料スタック中心部での701-10、701-6、701-4について測定した粒径値全部を示してあるが、NSRR版粒成長速度式の作成は、等温条件と見なせる中心から2mmの所までの

データを使っているため、周辺部での計算値と実測値はあまり一致しない。周辺部では、非常に温度変化が図36からもわかる様に激しく、今回の評価の様に等温条件モデルでは難しい、と思われる。

8. 被覆管酸化膜厚の評価

N S R R 実験において被覆管の最高温度と酸化膜厚は強い相関があることが報告⁽⁷⁾されており、炉外実験から実験式が得られている。

これらは、被覆管表面の温度が円周方向により異なり、熱電対位置に比べ、円周方向でどの程度の温度差が生ずるかを評価することができる。

本評価では、混合酸化物燃料の照射により被覆管の酸化膜厚と最高温度の関係が、UO₂ 燃料に比べ特異性の有無を既に報告されている炉外実験式を使って調べてみた。

(1) 評価式

$$\text{基本式} \quad y = \sqrt{c t}$$

$$c = C_0 \exp \left(-\frac{Q}{R \cdot T} \right)$$

y : 酸化膜厚 (μm)

t : 反応時間 (sec)

T : 酸化温度 (K)

R : ガス定数 1.986 (cal/mol·K)

Q : 活性化エネルギー (cal/mol)

C_0 : 比例定数 ($\mu\text{m}^2/\text{sec}$)

$$\text{差分型} \quad y_{i+1} - y_i = \frac{C_i}{2 y_i} \Delta t_i$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{C_{i-1}}{2 y_{i-1}} \Delta t_i$$

$$\text{初期条件: } y_1 = \sqrt{C_1 \Delta t_1}$$

$$T_i \leq 1850\text{K} \quad C_i = 2.15 \times 10^6 \exp(-35860/R \cdot T_i) \quad (\mu\text{m}^2/\text{sec})$$

$$T_i > 1850\text{K} \quad C_i = 1.6 \times 10^{11} \exp(-79800/R \cdot T_i) \quad (\mu\text{m}^2/\text{sec})$$

(2) 評価条件

N S R R 第1次試験に得られている被覆管表面温度分布を関数近似として使用した。詳細を別添に示す。

(3) 評価結果

図45にUO₂ 燃料照射による被覆管最高温度と酸化膜厚の計算値と測定値、図18に混合酸化物燃料照射によるものを示す。

この2図より、燃料の違いによる特異性はなく、酸化膜厚は被覆管温度に依存する。

9. 破損しきい値の評価

9.1 目的

現在原子力安全委員会では、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」⁽⁸⁾を作成すべく作業を進めている。この中で、反応度投入事象の解析結果の判断基準の指標として、「燃料エンタルビの最大値」が用いられているが、UO₂ 燃料を用いた実験結果より得られているこの指標が、MOX燃料にも適用可能かどうかの検討を行う。

9.2 実験データ

上記検討・評価を行うためには、前章までに述べた第1次照射実験の結果を利用する他はない。

5.3節にも記したように、燃料破損のしきい値は、燃料総発熱量としては、249~256 cal/g MOX の間にあることがわかる。又、これをピーク出力部発熱量で表わすと、199~204 cal/g MOX の間にあることになる。(原研NSRR室計算値)

9.3 検討

「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」の解説に引用されている燃料被覆の破損しきい値のうち、上記実験に対応するものは、次の通りである。即ち、室温・大気圧自然対流の冷却水中における単一の標準燃料に対するNSRR実験(標準実験)の結果では、燃料被覆の破損しきい値は、212 cal/g・UO₂ から222 cal/g・UO₂の間のピーク出力部発熱量であり、212 cal/g・UO₂ 以下では、燃料被覆の破損は発生していない。又、燃料棒内外圧差による破損しきい値の変化も調べられており、図46のようになるとされている。

この図の上に、9.2に述べたMOX燃料の場合の被覆管破損しきい値前後の燃料発熱量を△、▲印でプロットすると、UO₂ の場合より若干低めの値となっていることがわかる。ただしその差は、10~20 cal/g・UO₂程度であり、UO₂ 燃料の場合と比較してそれ程大きな差ではない。この差が有意なものであるかどうかは、今後の詳細な誤差評価を待たねばならない。又、燃料の許容設計限界値170 cal/g・UO₂に対しては、29~34 cal/g・MOX の余裕があることになる。

なお、燃料内外圧差が0でない場合のMOX燃料での破損しきい値を求める実験は、行っていないが、圧力差が大きくなつた時の破損しきい値の低下は、被覆管の高温における強度低下に起因するものであり、UO₂ 燃料とMOX燃料との間には、差はないものと考えられる。

9.4 評価

最後にまとめてとして、「評価指針」の中の各判断基準がMOX燃料の場合にも適用可能かどうかの評価を以下に記す。

9.4.1 判断基準(1)-1 燃料の許容設計限界

運転時の異常な過渡変化にあたっては、燃料エンタルピーの最大値は、燃料棒内圧から冷却材圧力を差し引いた圧力に依存して決定される図4.6に示す燃料エンタルピーを超えないこと。

この基準に関しては、2.5に述べたように、MOX燃料を用いたNSRR実験結果よりほぼ適用可能と判断される。

9.4.2 判断基準(2)-1 圧力波発生限界

事故にあっては、燃料エンタルピーの最大値は、 $230 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ を超えないこと。

この制限値は、ペレットの溶融及び蒸発に起因する燃料破損によってもたらされる圧力波等の機械的エネルギーの発生に関するものである。

我々の行ったNSRRでのMOX燃料照射実験では、炉の許認可上、上記領域をカバーするほど発熱量を上げることはできなかった。従って、実験的なデータは所持していない。

本カテゴリーは、燃料の溶融や蒸発に関連すると思われる現象であり UO_2 と MOX では、同じ燃料エンタルピーでも発生する圧力波の大きさは多少異なる可能性はあるが、ただ、ATR燃料のPu富化度は、3%以下であるのでその差はほとんどないと考えられる。

9.4.3 判断基準(3) 浸水燃料の破裂限界

運転時の異常な過渡変化及び事故にあっては、浸水燃料の破裂による衝撃圧力等の発生によっても原子炉停止能力及び原子炉圧力容器の健全性を損わないこと。

本カテゴリーは、燃料内部に水がある場合に、急激な発熱量の増大により、急峻な内圧上昇が起り、被覆管の破裂、衝撃圧力及び冷却水塊の飛び上り等を問題としているものである。主として、水の高温における蒸发现象に起因するものであり、 UO_2 、MOX の差はないと思われる。

以上述べたように、「評価指針」中の3項目は、大かたMOX燃料へ適用可能と思われる。

10. ま と め

今回行ったNSRR第1次試験のPIE評価及び実験解析に関するまとめを以下に示す。

- (1) 今回実験した混合酸化物燃料の破損しきい値は、250～256 cal/gの間にあることが確認できた。これは、標準燃料(UO_2 燃料)の破損しきい値253～264 cal/gよりやや低いが、ほぼ一致している。
- (2) 照射後試験の結果からは、特に UO_2 燃料の場合と異なる挙動は見い出せなかった。
- (3) 照射後試験の結果から、次の特性と発熱量との間には、強い相関が見られ、150～190 cal/g以上で急激に変化がはげしくなるのが観察された。

ペレット結晶粒径

被覆管結晶粒径

被覆管硬さ

被覆管外径増加量

被覆管酸化膜厚さ

- (4) 数秒程度のごく短時間のペレットの結晶粒成長開始は、燃料の発熱量が約190 cal/g以上加わり、燃料温度が約2000°C以上で始まる。
- (5) 高温、超短時間の結晶粒成長は、燃料温度と大きな相関性があり、AINSCOUGHの結晶粒成長モデルを実験解析に適用することができた。
- (6) ペレットの結晶粒径分布を評価することは、トランジエント時の温度分布の評価に貴重な指標となることを示した。
- (7) FEAPUS-IIIコードによるペレットのトランジエント温度計算結果は、結晶粒径分布との間に、整合性がとれしており、妥当と言える。

11. 謝 辞

本研究は日本原子力研究所との共同研究で進めているものであり、本報をまとめるにあたり原研側より提出された資料を一部使用させていただいた、原研側担当者である反応度安全研究室の齊藤伸三室長、稻辺輝雄氏、塩沢周策氏はじめN S R R の皆様に感謝します。

又、照射前業務に多大な御苦労をいただいた、プルトニウム燃料部の管理課・計量係、旧開発課・試料係の皆様、及び八木隆雄氏（現 F B R 本部）、平林文夫氏（現 東海計算資料室）に感謝します。

12. 参考文献

- (1) 「NSRRによる混合酸化物燃料の破損挙動に関する研究(1)」
N841-81-23 1981年3月
- (2) 「NSRRによる混合酸化物燃料の破損挙動に関する研究(1)」
JAERI-M8865 1980年5月
- (3) 「NSRRによるMOX燃料の照射挙動に関する組織観察」
PNC SN 841-83-38 1983年3月
- (4) 有限要素法による燃料挙動解析コード「FEAPUS-III」
SN 841-83-82 1983年
- (5) ISOTHERMAL GRAIN GROWTH KINETICS IN SINTERED UO₂ PELLET J. B. AINSCOUGH et al. 1973. 10
- (6) 「NSRR実験における試験燃料の発熱量の評価」
JAERI-M7539 1978年2月
- (7) 「NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化膜厚さに基づく円周方向温度分布の評価」
JAERI-M8200 1979年5月
- (8) 発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針(案)
昭和58年 原子力安全委員会

表1 N S R R 照射実験における作業項目と担当部所

作業項目	作業内容	主担当
研究計画立案、検討	・ 計画、進捗状況の確認を定期的に行う。	<PNC> <JAERI>
原子炉設置変更許可申請	・ プルトニウム燃料で実験するため変更申請を行う。	<JAERI>
プルトニウム燃料の使用許可申請	・ プルトニウム燃料を使用するため申請を行う。	<JAERI>
燃料ピン部材受入	・ 原研より燃料ピン部材を受入れ、ピン加工担当者に渡す。	<PNC>Pu部設計開発課
燃料ペレット製造	・ PuO ₂ - UO ₂ ペレットを製造する。	<PNC>Pu部設計開発課
燃料ペレット検査	・ PuO ₂ - UO ₂ ペレットの分析・検査等を行う。	<PNC>Pu部品質管理課
燃料ピン組立	・ 燃料ピンの加工、熱電対の取付けを行う。	<PNC>Pu部設計開発課
内部カプセル製作	・ 内部カプセルを設計製作し、検査する。	<PNC>Pu部設計開発課
輸送容器製作	・ 実験済燃料輸送容器を設計製作し、検査する。	<PNC>Pu部設計開発課 〃 管理課
新燃料輸送	・ 熱電対取付後の新燃料を原研へ輸送する。	<PNC>Pu部設計開発課 〃 管理課
新燃料受入	・ 新燃料を受入れ保管する。	<JAERI>
試験部組立	・ 照射試験燃料とカプセルの計装を施す。	<JAERI>
照射実験	・ 照射実験する。	<JAERI>
外部キャップセル解体	・ 照射後燃料体を貯蔵し、取出し、外部キャップセルより内部カプセルを取出す。	<JAERI>
内部カプセル梱包	・ 官庁立合のもとに、内部カプセルを輸送容器に梱包する。	<JAERI>Pu部管理課 <PNC>Pu部設計開発課
実験済燃料輸送	・ 実験済燃料を動燃へ輸送する。	<JAERI>
内部カプセル受入	・ 実験済内部カプセルを受入れ保管する。	<PNC>Pu部品質管理課
内部カプセル解体	・ 内部カプセルを解体し、中の燃料を取出す。	<PNC>Pu部品質管理課
検査施設の使用施設変更申請	・ N S R R の実験済燃料を検査するため変更申請を行う。	<PNC>Pu部品質管理課
実験済燃料検査	・ 実験済燃料を検査する。	<PNC>Pu部品質管理課 <JAERI>
実験解析	・ 実験データを解析する。	<PNC> <JAERI>
報告書	・ 報告書を作成する。	<PNC> <JAERI>

表2 実験用燃料の主要仕様

プルトニウム-ウラン混合酸化物燃料ペレット	
(1) 形 状	円筒型, チャンファ(面取り程度)
(2) 尺 法	直径; 9.29 mm, 高さ; 9.88 mm
(3) 性 質	密度; 95.4% TD, 重さ; 7.07 g, 燃料組成; 6.33 w/o PuO ₂ - 9.367 w/o UO ₂ , O/(Pu+U)比; 1.97, 水分量; 5 ppm以下, 蒸発性不純物量; 10 μℓ/g MOX以下
二酸化天燃ウランペレット	
(1) 形 状	円筒型, チャンファ(面取り程度)
(2) 尺 法	直径; 9.24 mm, 高さ; 11.01 mm
(3) 性 質	密度; 93.9% TD, 重さ; 7.59 g, 水分量; < 5 ppm, 蒸発性不純物量; 16 μℓ/g UO ₂ 以下
被 履 管	
(1) 材 質	ジルカロイ-4(歪とり焼鈍し)
(2) 尺 法	内径; 9.48 mm, 外径; 10.72 mm, 肉厚; 0.62 mm
スプリング	
(1) 材 質	インコネル-X
(2) ベネ定数	0.229 kg/mm
燃 料 棒	
(1) ペレット・スタック長(132 mm)	混合酸化物部; 110 mm, 天然ウラン酸化物部; 22 mm
(2) 燃料棒全長	230 mm
(3) ギヤップガス 組成	He, 圧力; 1 kg/cm ²

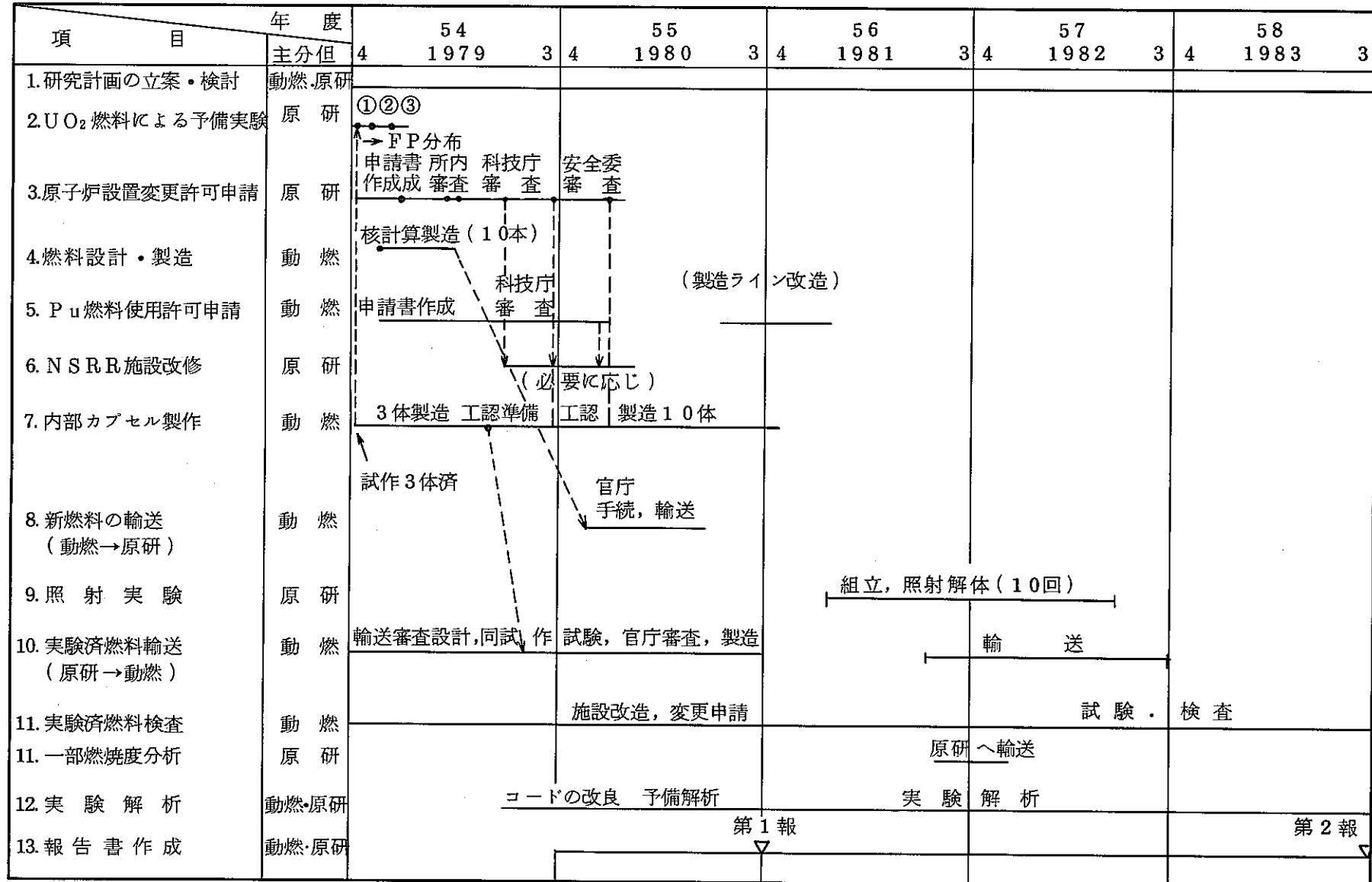


図 1 実験・研究日程

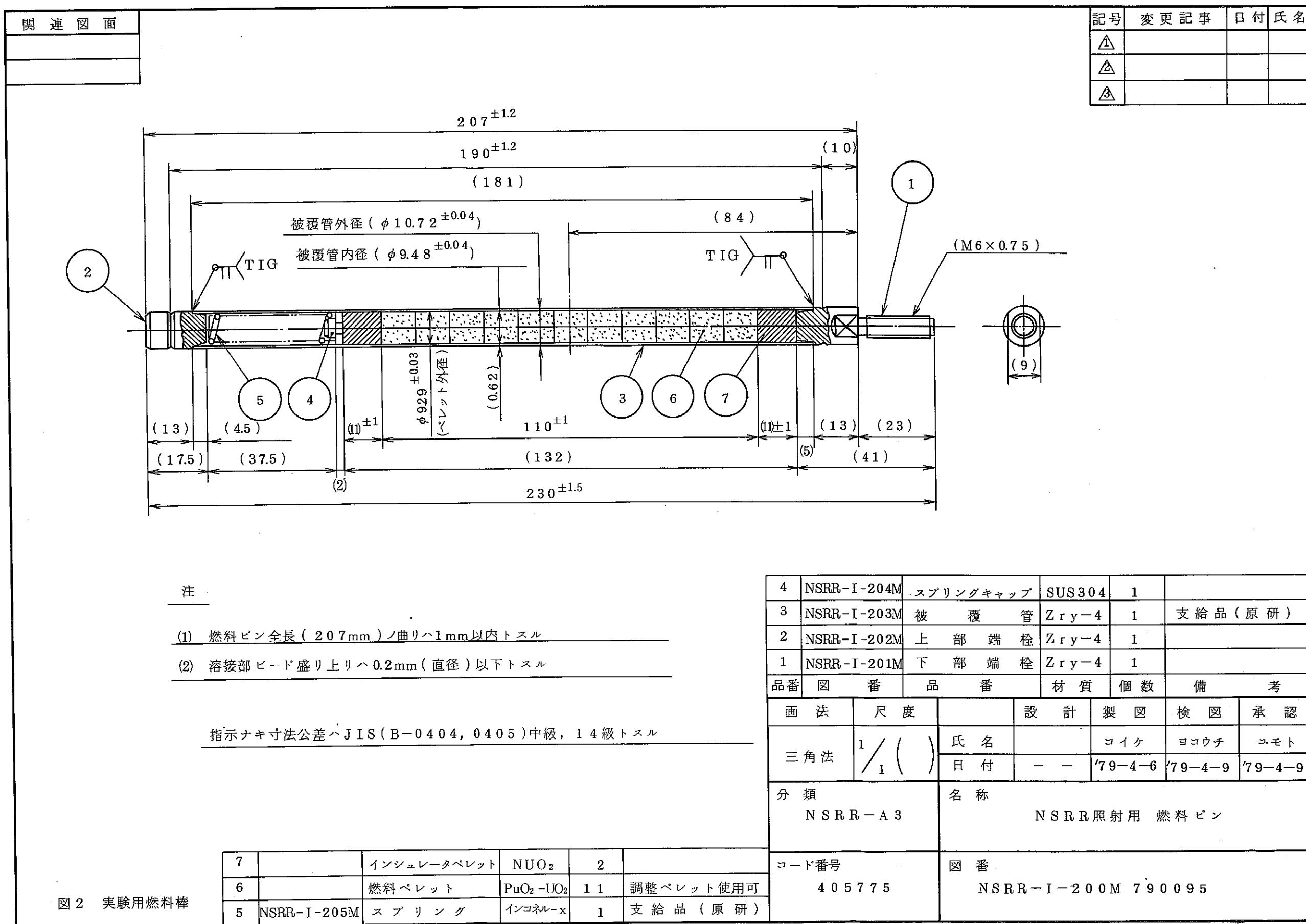
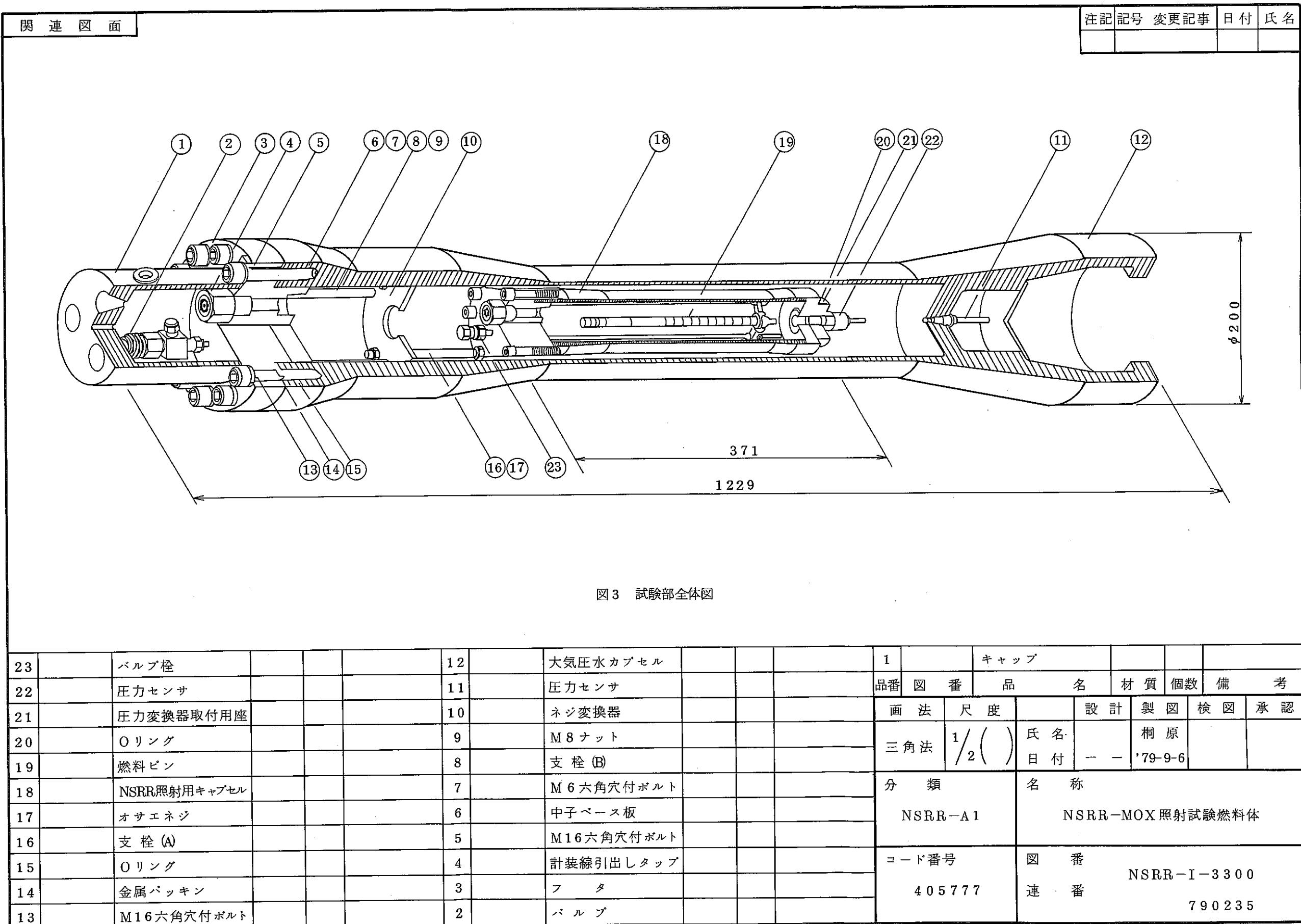


図2 実験用燃料棒



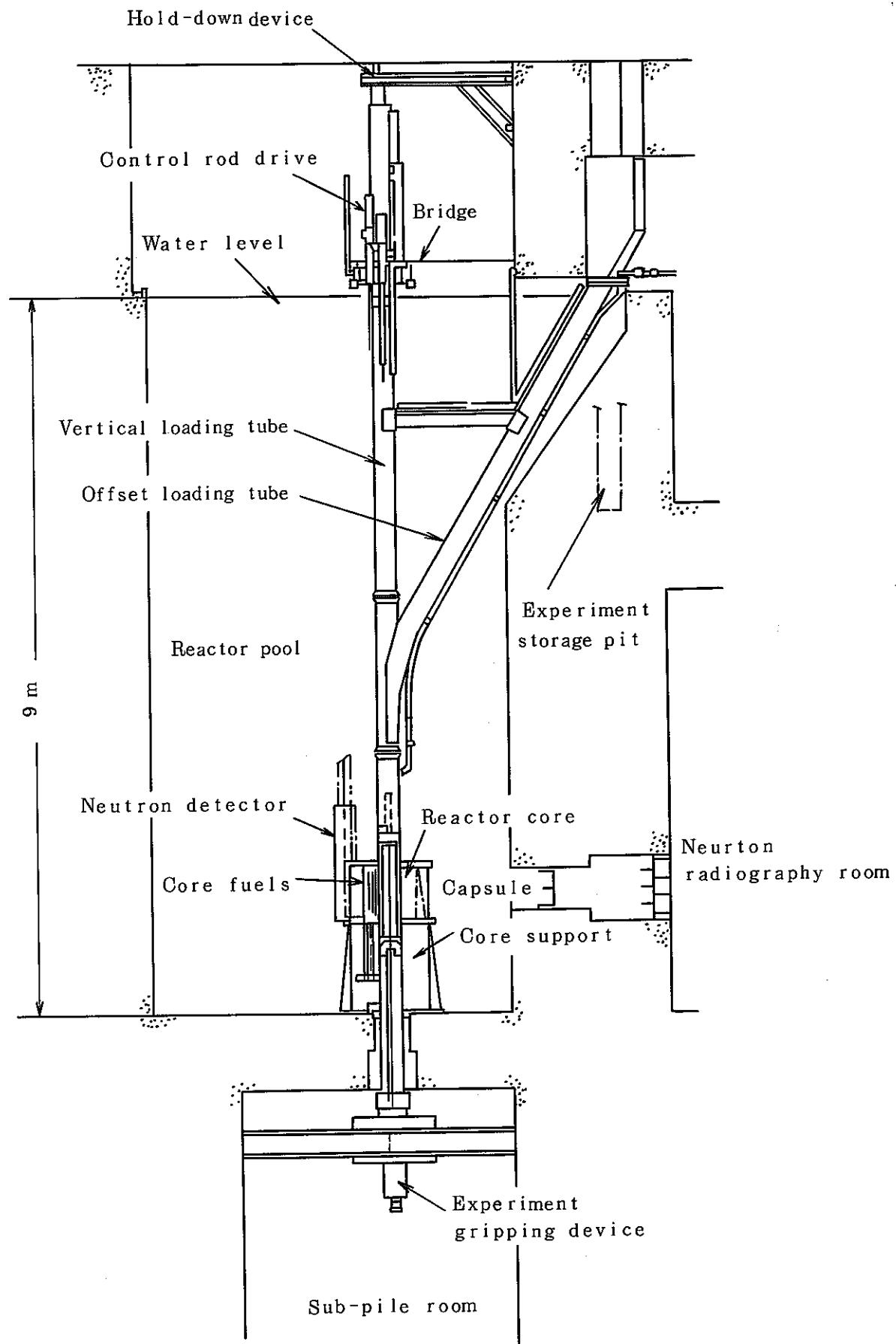


図4 General Arrangement of NSRR

表3 照射実験条件一覧

実験番号	燃料 No	照射月日	目的	計装	発熱量 (cal/g)
701-1	Pu-Ns-01	56. 9. 29	発熱量の較正 発熱分布の測定	コバルトワイヤー 被覆材表面温度 カプセル水温	115
701-2	Pu-Ns-02	56. 11. 27	発熱量の較正 破損しきい値、破損挙動の把握	"	186
701-3	Pu-Ns-06	57. 1. 08	破損しきい値、破損挙動の把握	被覆材表面温度 カプセル水温	229
701-4	Pu-Ns-07	57. 3. 10	"	"	249
701-5	Pu-Ns-08	57. 4. 09	"	"	263
701-6	Pu-Ns-03	57. 5. 07	701-5 実験の細部確認 (701-5は破損した、照射中か輸送中か不明)	"	256
701-7	Pu-Ns-09	57. 8. 27	701-6 実験の再現性の確認	"	250
701-8	Pu-Ns-04	57. 10. 21	DNBしきい値が701-1と 701-2の間に生じる様子から、180 cal/gを目標とした。	"	145
701-9	Pu-Ns-05	57. 12. 03 7.	PIEの解析上必要なデータ補充。	"	123
701-10	Pu-Ns-10	57. 12. 10	NSRRの上限発熱量(許可上) 破損挙動の把握	"	284

表4 ブルトニウム-ウラン混合酸化物燃料照射実験結果の概要

実験 No	投入 反応度 (\$)	炉心 積分出力 (MW.s)	発熱量 (cal/g)	被覆管表面 最高温度 (°C)	実験後の燃料棒外観
701-1	2.35	41.2	115	#1: 220 #2: 150 #3: 150	変化なし
701-9	2.51	44.1	123	#1: 230 #2: 230 #3: 290	被覆管下部に部分的な変色。
701-8	2.80	52.0	145	#1: 1020 #2: 1000 #3: 900	発熱部の被覆管全面変色。
701-2	3.28	66.8	186	#1: 1180 #2: 1170 #3: 1150	同上。
701-3	3.80	82.4	229	#1: — #2: — #3: 1400	発熱部の被覆管全面変色。 酸化膜の一部剝離。
701-4	4.00	89.5	249	#1: 1620 #2: — #4: 1570	同上。
701-7	4.05	89.8	250	#1: 1670 #2: — #4: —	被覆管熱電対取付部(中央部)に 貫通孔。
701-6	4.10	92.0	256	#1: 1600 #2: >1650 #3: 1600	被覆管下部に溶融変形。 変形部にクラック発生。
701-5	4.19	94.6	263	#1: — #2: 1800 #4: —	燃料棒は下部にて2つに分断。
701-10	4.40	102	284	#1: >1690 #2: — #4: >1690	被覆管下部に溶融変形。 変形部近傍に円周方向クラック。

注1) 発熱量は、実験No 701-1 及び 701-2からの試料に対する化学分析結果
(2.78 cal/g /MW.s)に基づく。

注2) 被覆管表面熱電対 #1 ~ #4 の取付位置は以下の通り。

(表面温度の値で一印は、熱電対が事前にはずれたことを意味する。)

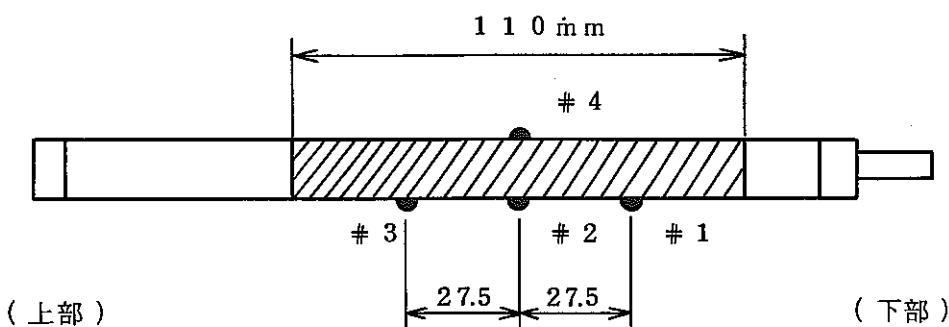
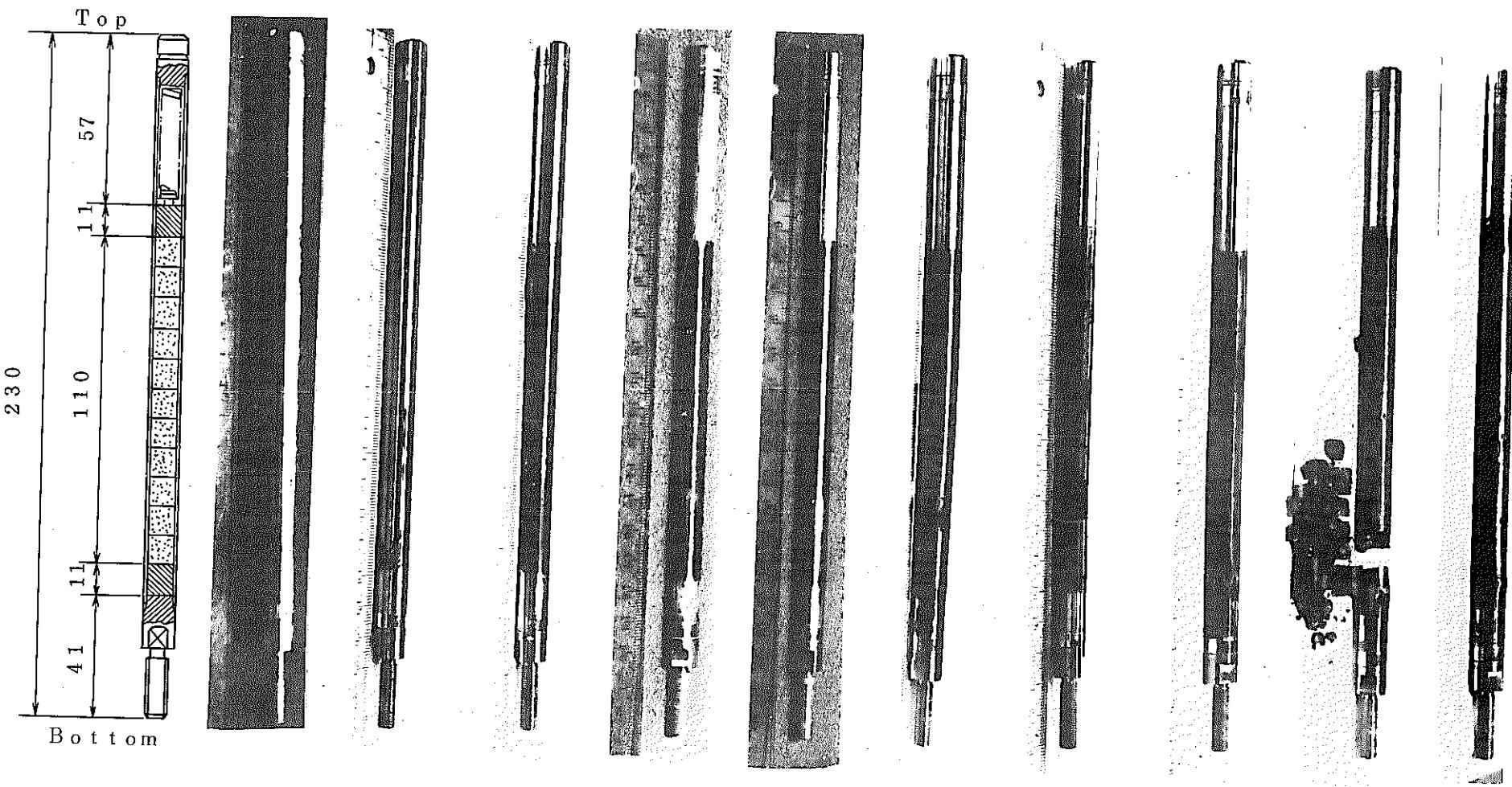


表5 照射後試験検査項目と方法

試験項目		測定装置・器具	場所	グローブボックス	破壊 非破壊	試験内容	備考
内部カプセル	(1) 目視検査	ノギス	R-134	内	非		
	(2) 外観検査		R-134	内	非		
	(3) 寸法検査		R-134	内	非		
燃料棒	(1) 目視検査	トヨ・ビュー (マクロ撮映)	R-134	内	非	外観・破損状況の観察, 写真撮映	(試験前も実施)
	(2) 外観検査		R-134	内	非	長さ, 直径, 曲り, ふくれ等の測定	
	(3) 寸法検査	プロフィロメータ, ノギス	R-134	内	非	燃料棒内部状態の観察	○外径, 長さ, 曲り(") ○ビニール(2重)を通して行なう ○破損した場合は, 集める
	(4) X線撮影		X線発生装置	A-107	外	ペレット(P_u スポットを含む)の状態	
	(5) 重量測定	天びん	C-103	内	非	観察 燃料が細分化している場合には, 回収燃料の重量を測定	
ペレット	○金相試験	研磨機・顕微鏡	C-103	内	破 破 破 破	必要に応じ, 横断面, 縦断面の金相的特徴を観察 F_P 生成量を求め, 発熱量を較正 α オートラジオグラフィによって P_u スポットを観察 被覆材元素の拡散量を評価	○数ヶ所について実施 ○必要に応じ横断面・縦断面 P_u Spot 測定
	○燃焼度						
	○ α オートラジオ グラフィ						
	○元素分布						
被覆管	○外観・目視検査	トヨ・ビュー 顕微鏡	R-134 C-103 R-134 R-134		非 破 非 破 破	破断面を観察し, 写真撮映 組織観察, 酸化膜厚の測定等 脆化度, 硬度等の測定 ペレット構成元素の拡散量を評価	
	○金相試験						
	○寸法検査						
	○肉厚測定						
	○元素分布						

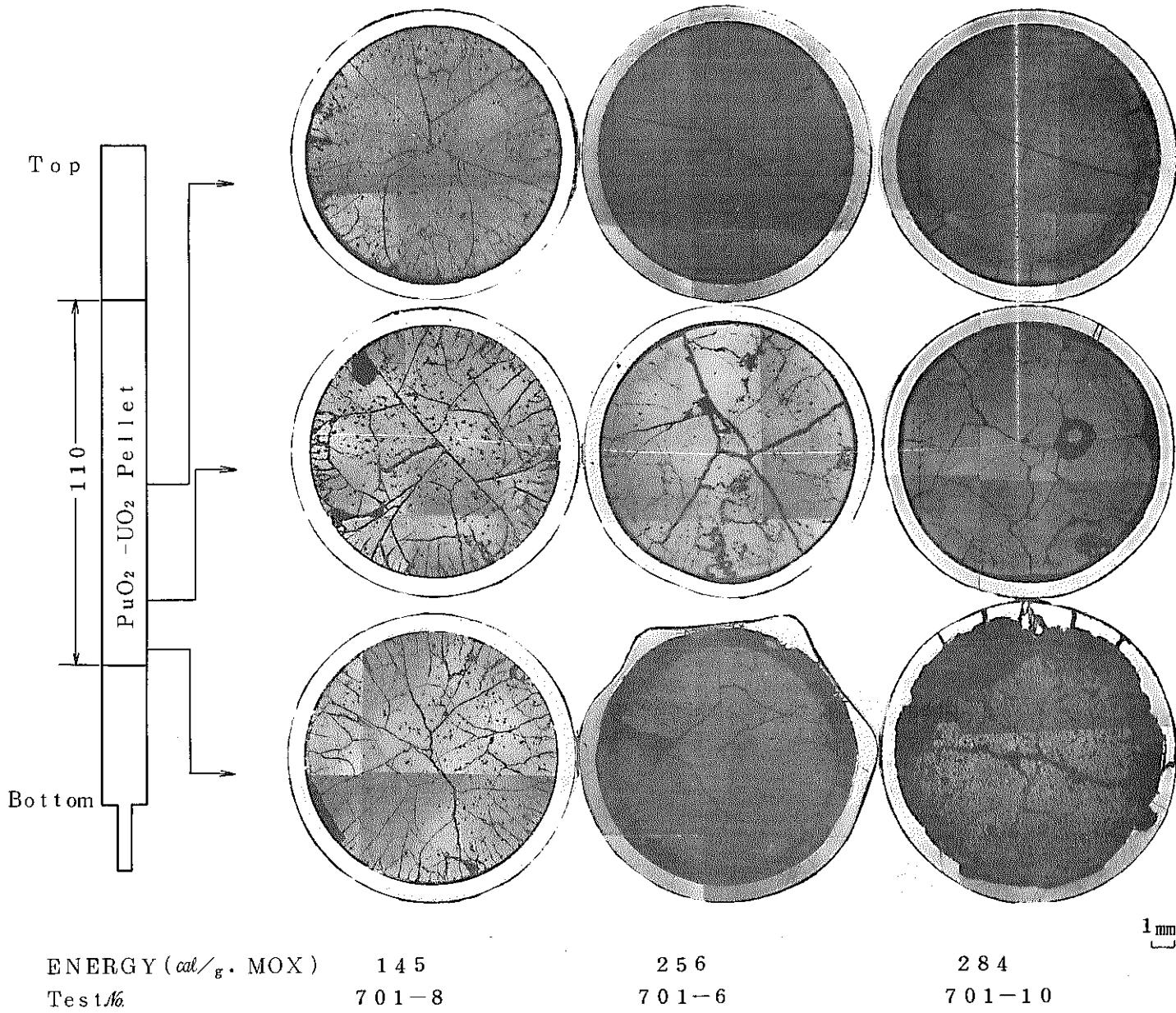
表6 照射後試験結果；写真・図一覧表

写真・図No.	表題	頁
写真 1	燃料ピン外観の発熱量依存性	
〃 2	燃料棒断面金相の発熱量依存性(マクロ)	
〃 3	ペレット結晶粒の発熱量依存性(ミクロ, 中心)	
〃 4	ペレット結晶粒の発熱量依存性(ミクロ, 外側)	
〃 5	被覆管結晶粒の発熱量依存性	
図 5	発熱量と燃料棒外径増加の関係	
〃 6	発熱量と被覆管硬度の関係	
〃 7	被覆管温度と被覆管硬度の関係	
〃 8	発熱量とピン曲り量の関係	
〃 9	燃料棒外径増加の軸方向分布	
〃 10	ペレット結晶粒径の発熱量依存性	
〃 11	ペレット結晶粒径の発熱量依存性(ペレット中心位置)	
〃 12	被覆管結晶粒径の発熱量依存性	
〃 13	被覆管測定温度と被覆管結晶粒径の関係	
〃 14	被覆管酸化膜厚の発熱量依存性	
〃 15	被覆管酸化膜厚の軸方向分布	
〃 16	被覆管酸化膜厚の周方向分布	
〃 17	発熱量と被覆管温度の関係	
〃 18	被覆管温度と被覆管酸化膜厚の関係	
〃 19	ペレット結晶粒径の半径方向分布	
〃 20	ペレット結晶粒径の半径方向分布	
〃 21	ペレット結晶粒径の半径方向分布	
〃 22	ペレット結晶粒径の半径方向分布	
〃 23	ピン外径増加率と被覆管結晶粒径の関係	
〃 24	ピン外径増加と被覆管硬度の関係	
〃 25	被覆管結晶粒径と被覆管硬度の関係	



発熱量 (cal/g · MOX)	115	123	145	186	229	249	250	256	263	284
実験 No.	701-1	701-9	701-8	701-2	701-3	701-4	701-7	701-6	701-5	701-10

写真1 燃料ピン外観の発熱量依存性



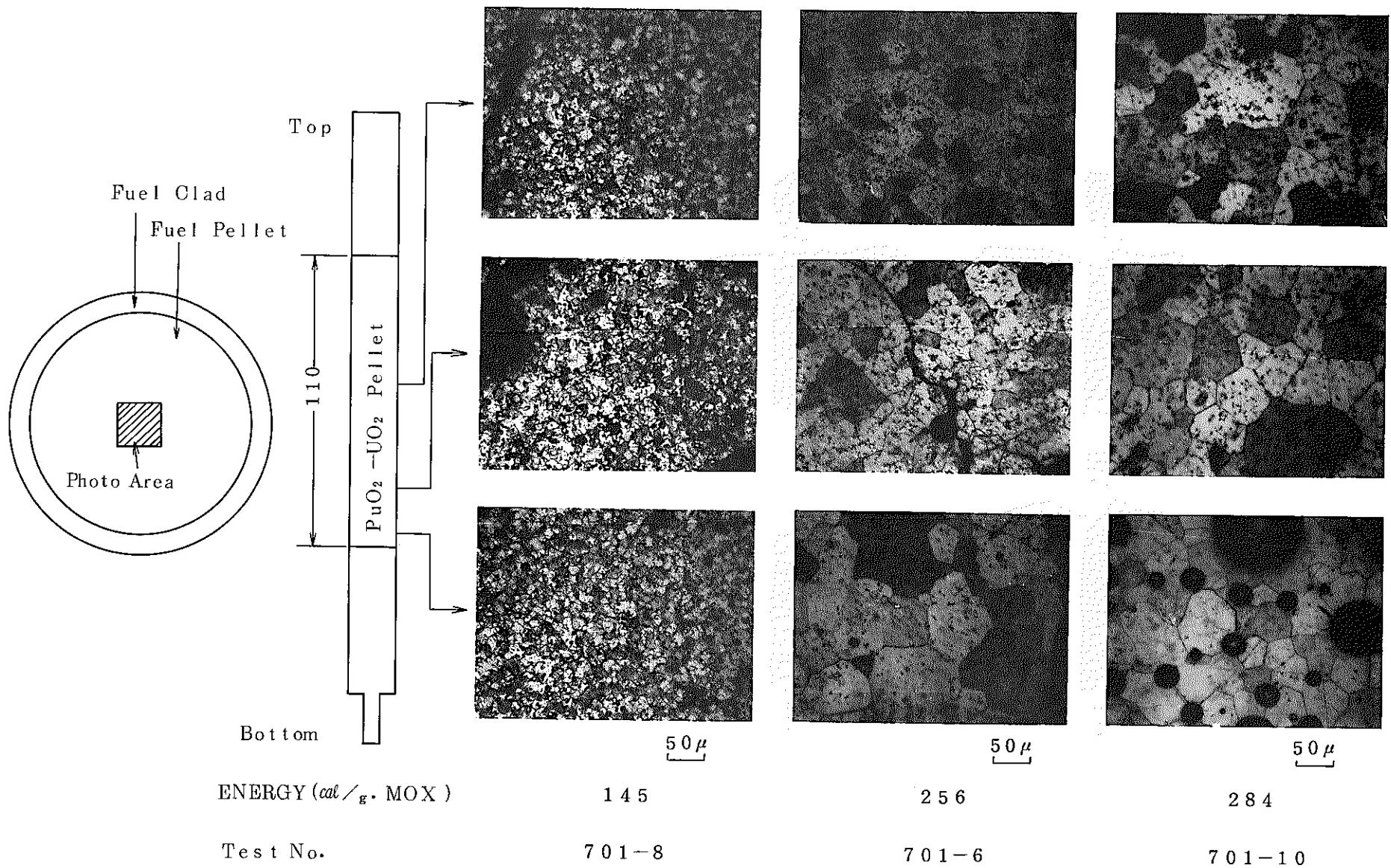


写真3 ベレット結晶粒の発熱量依存性

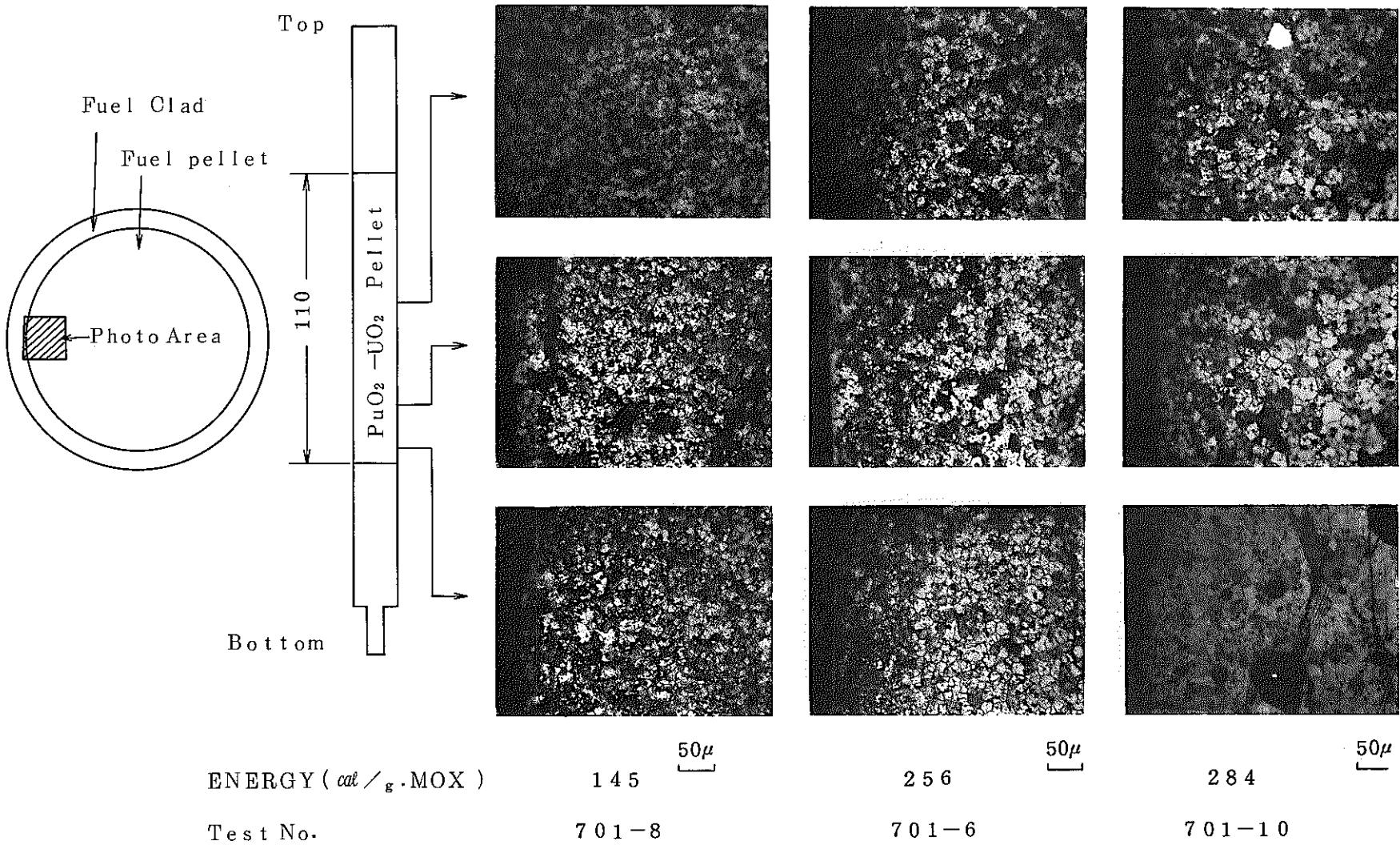


写真4 ベレット結晶粒の発熱量依存性

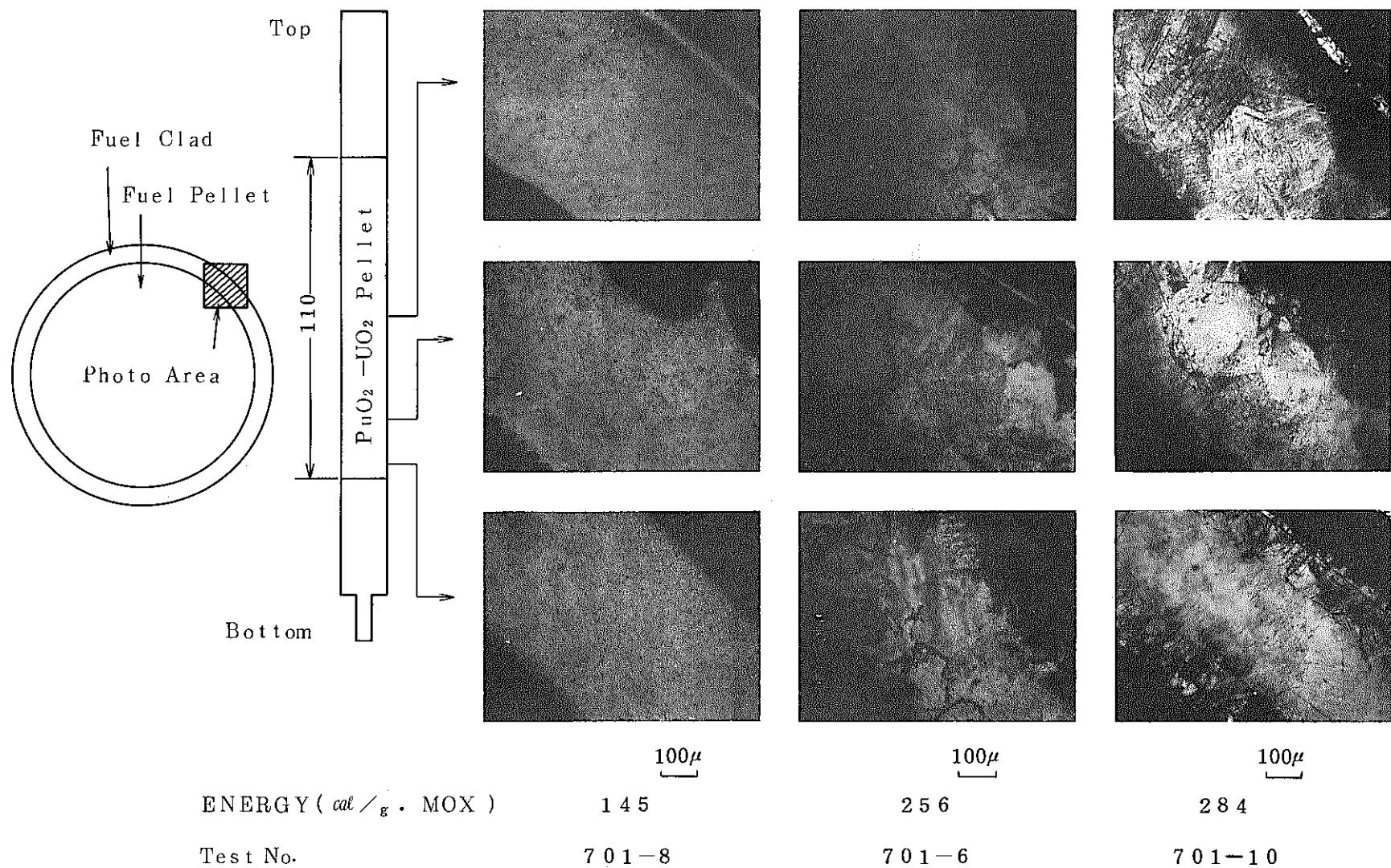


写真5 被覆管結晶粒の発熱量依存性

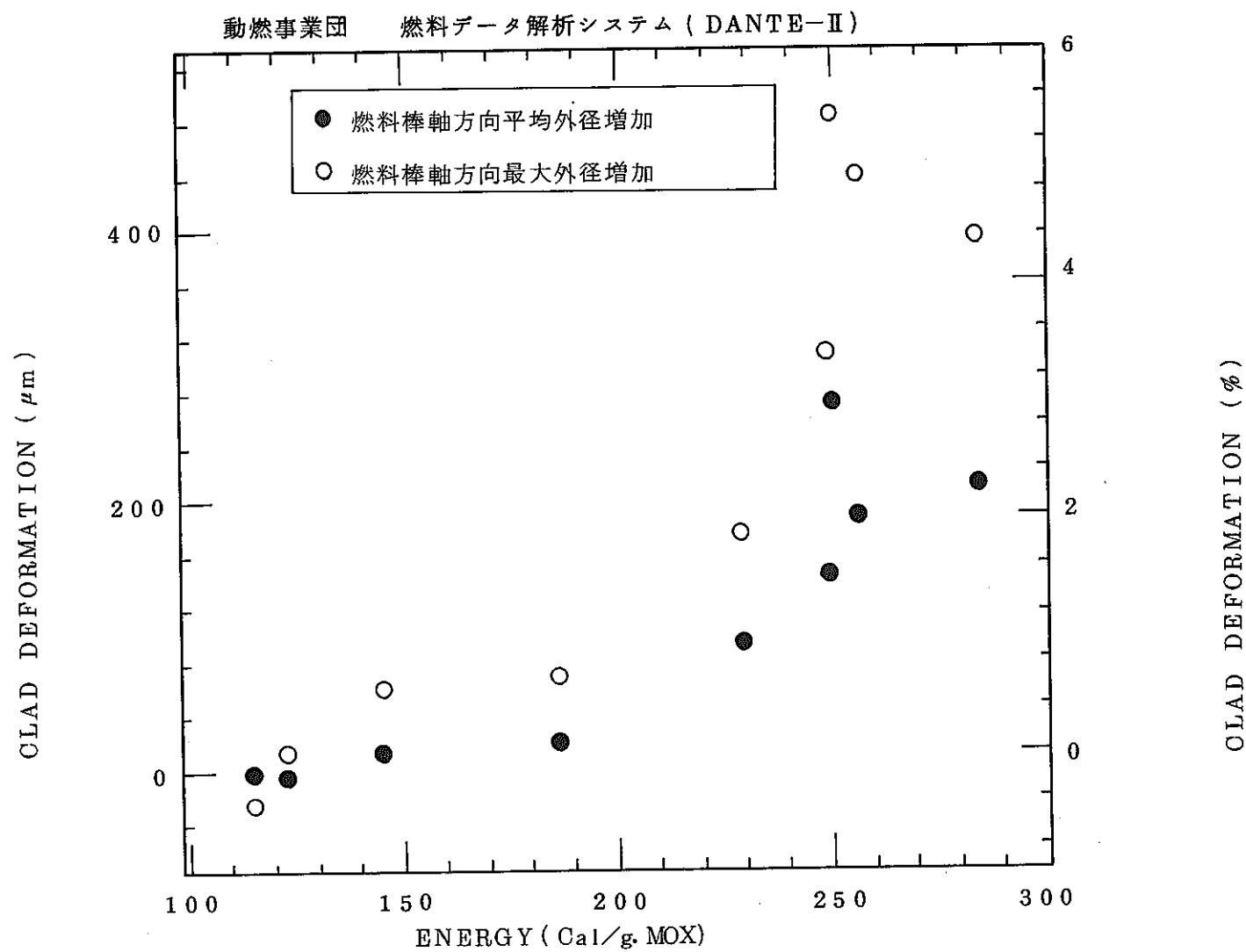


図 5 発熱量と燃料棒外径増加の関係

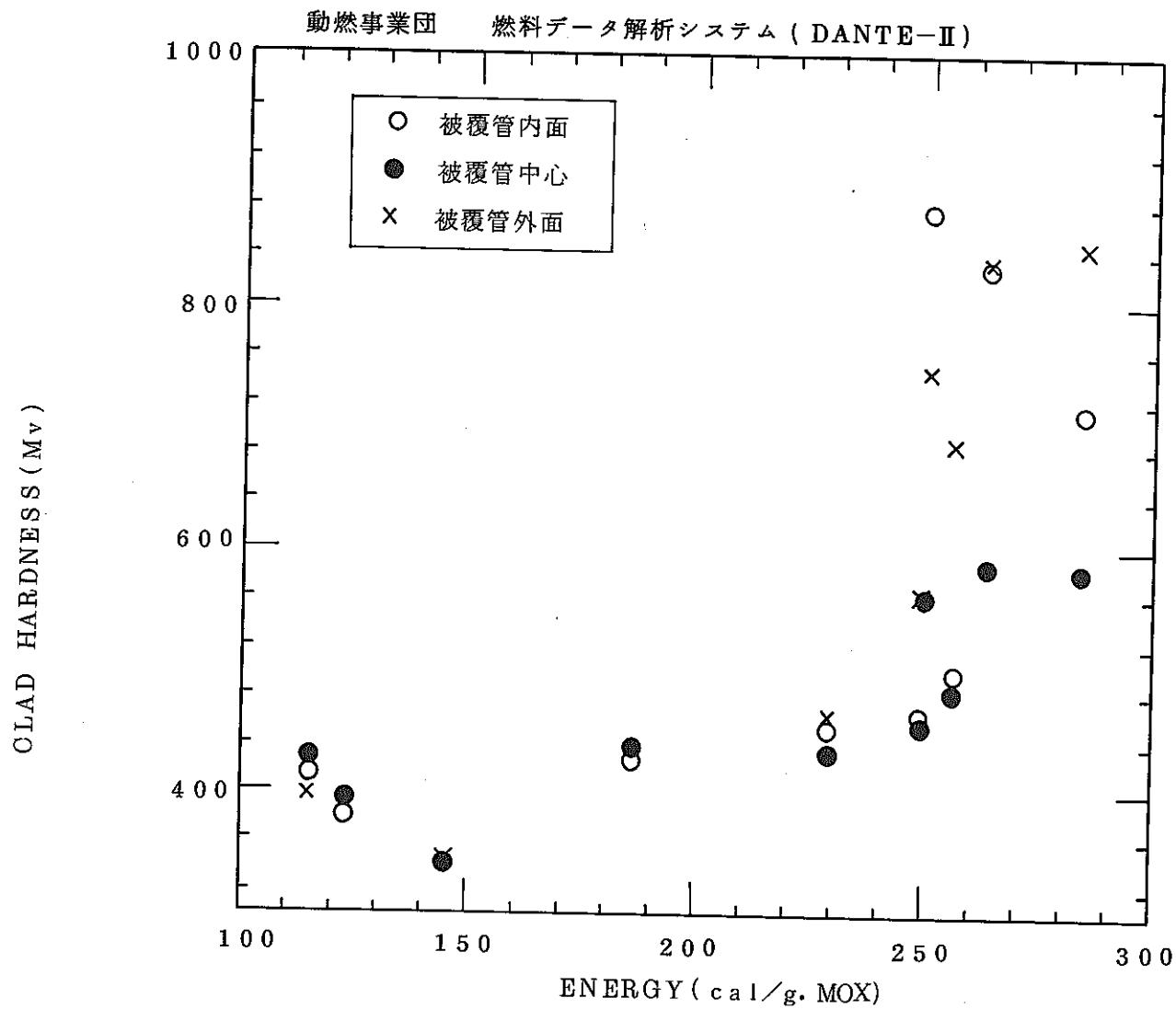


図 6 発熱量と被覆管硬度の関係

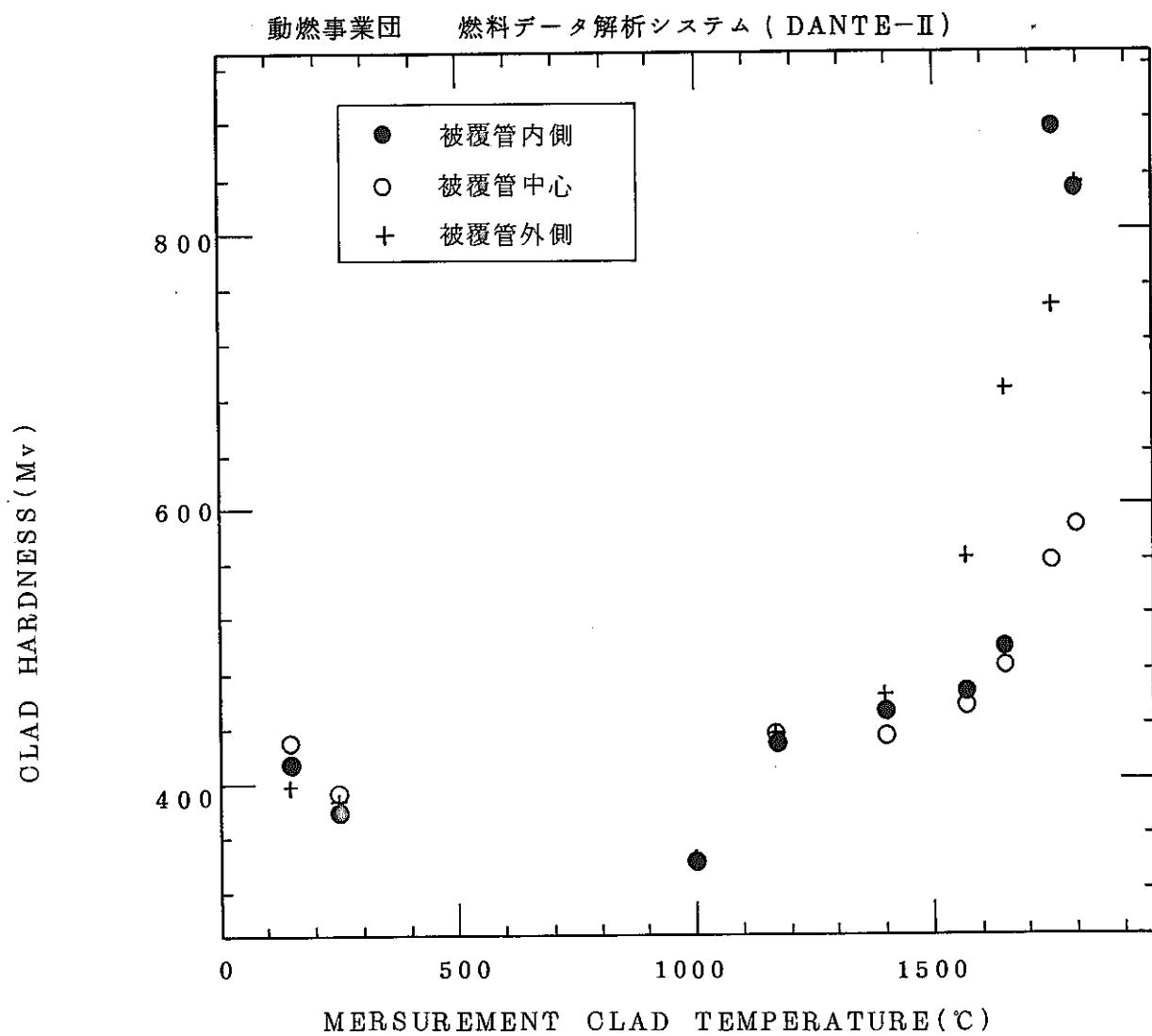


図 7 被覆管温度と被覆管硬度の関係

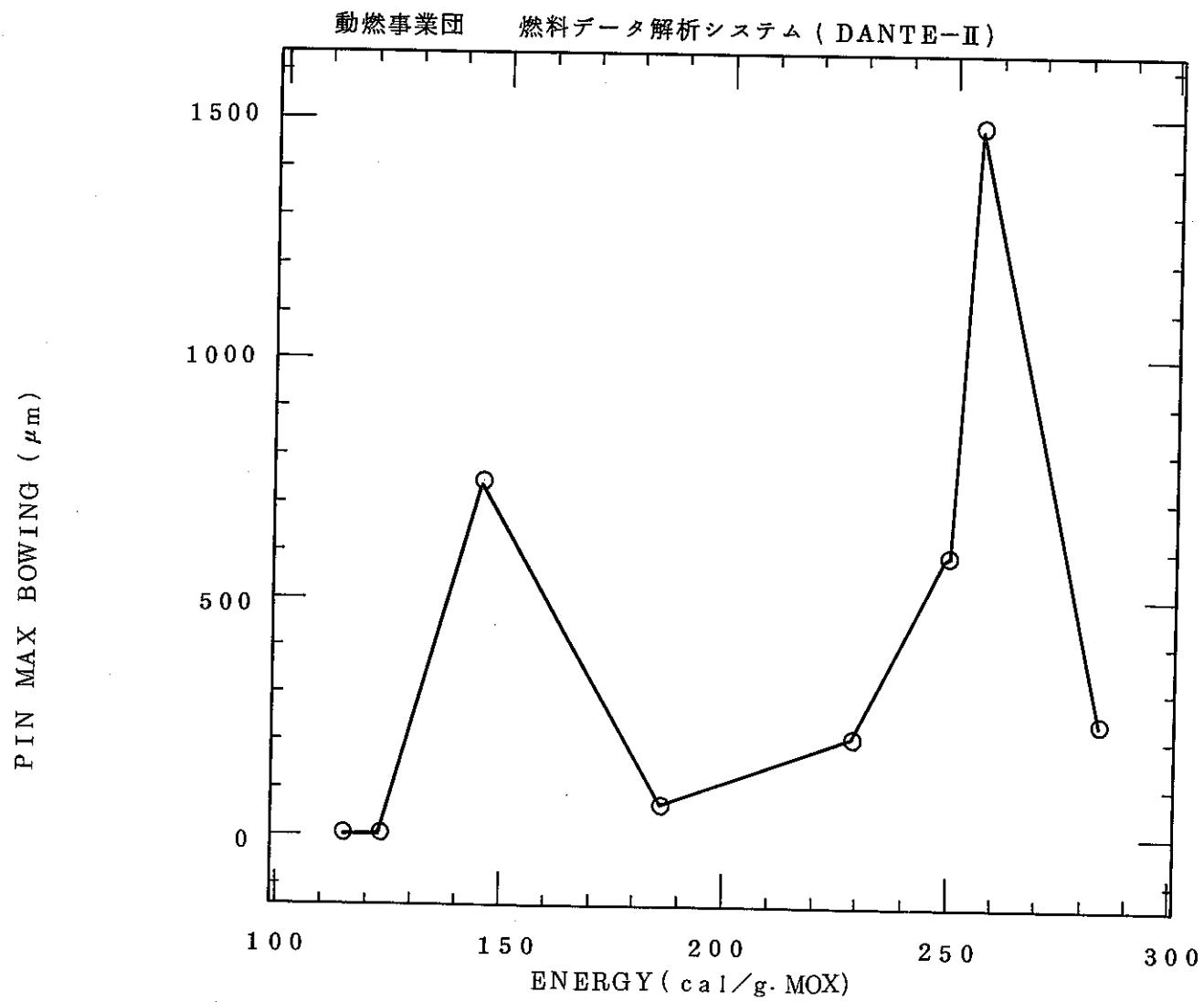


図 8 発熱量とピン曲り量の関係

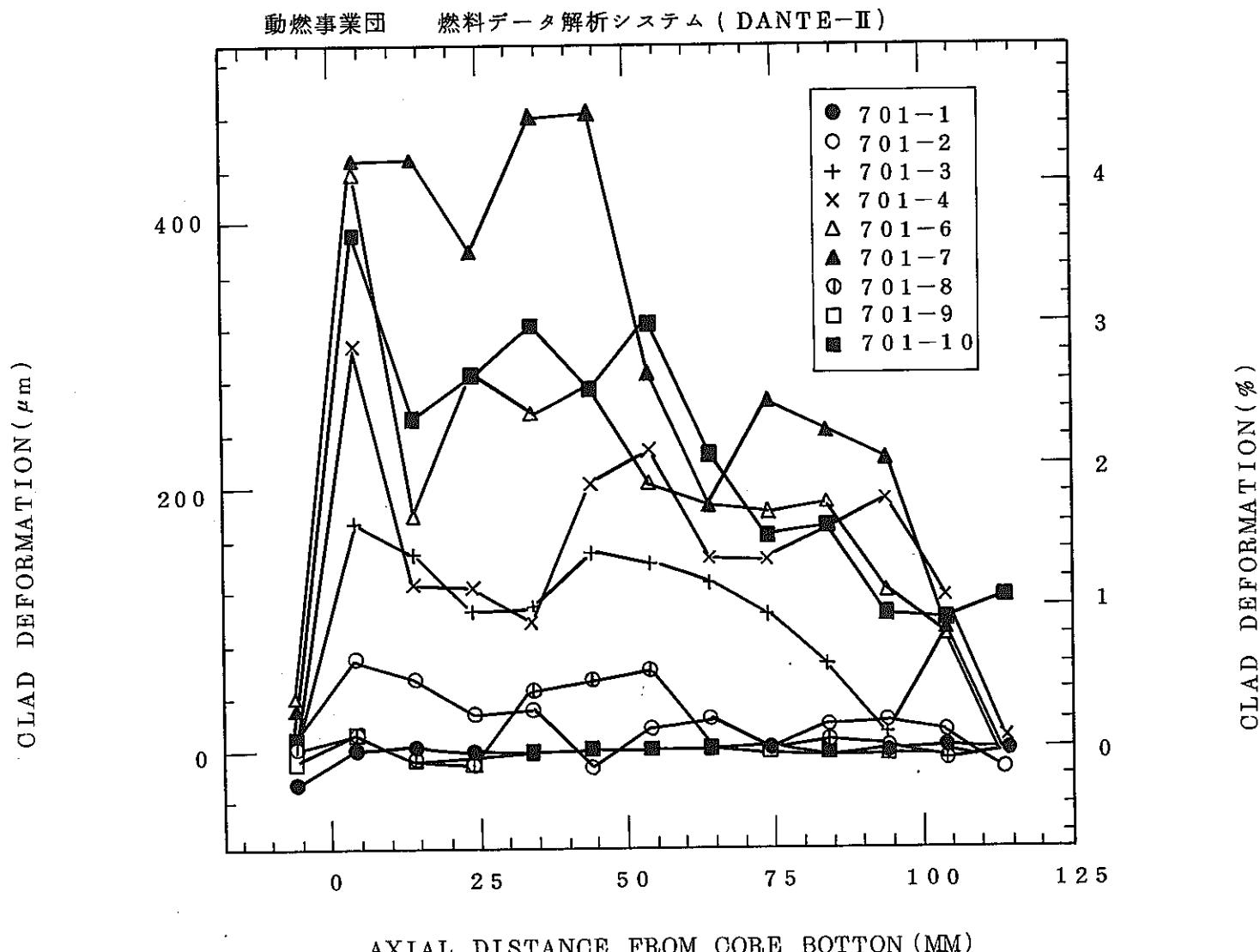


図9 燃料棒外径増加の軸方向分布

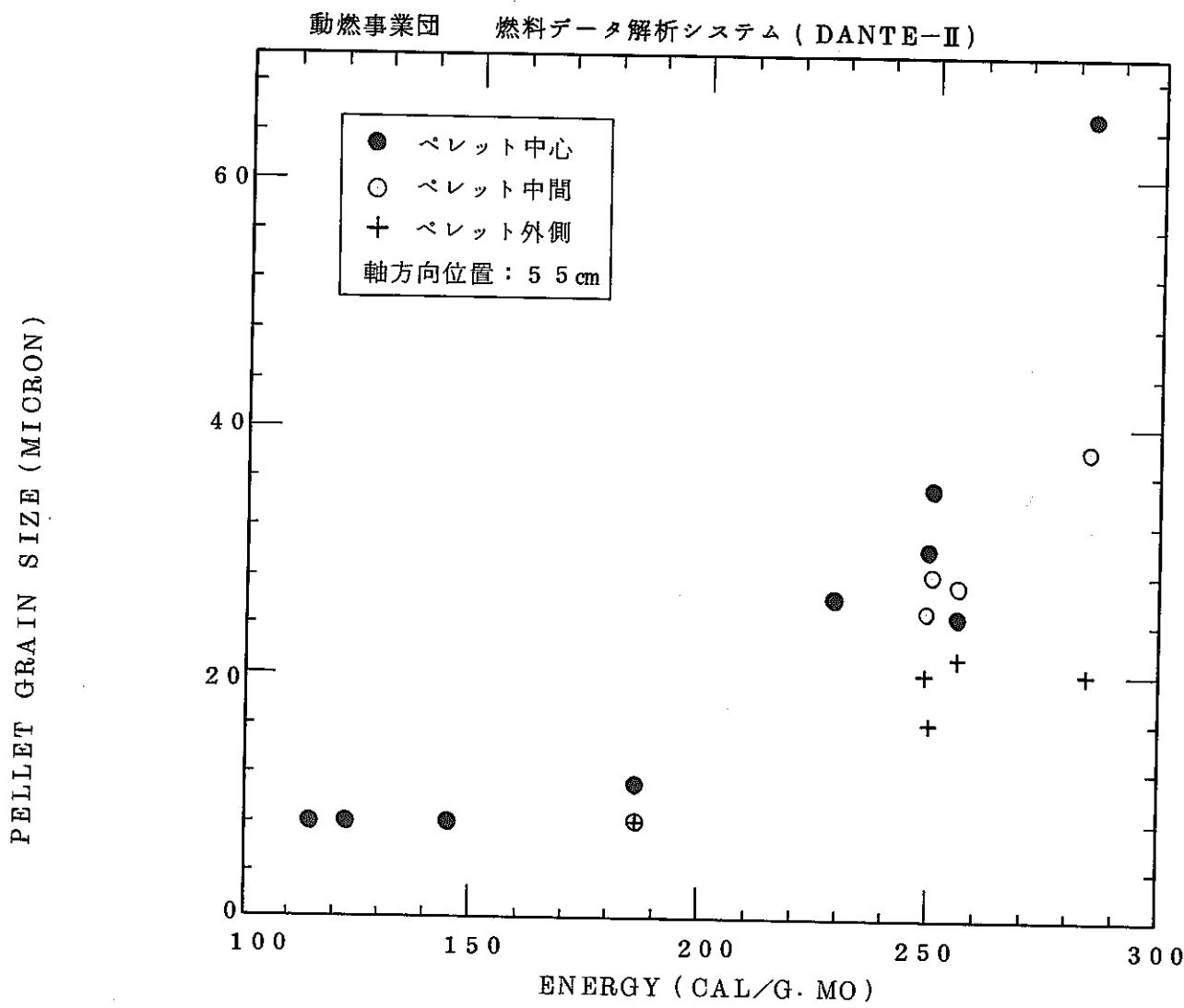


図 10 発熱量ペレット結晶粒径の依存性

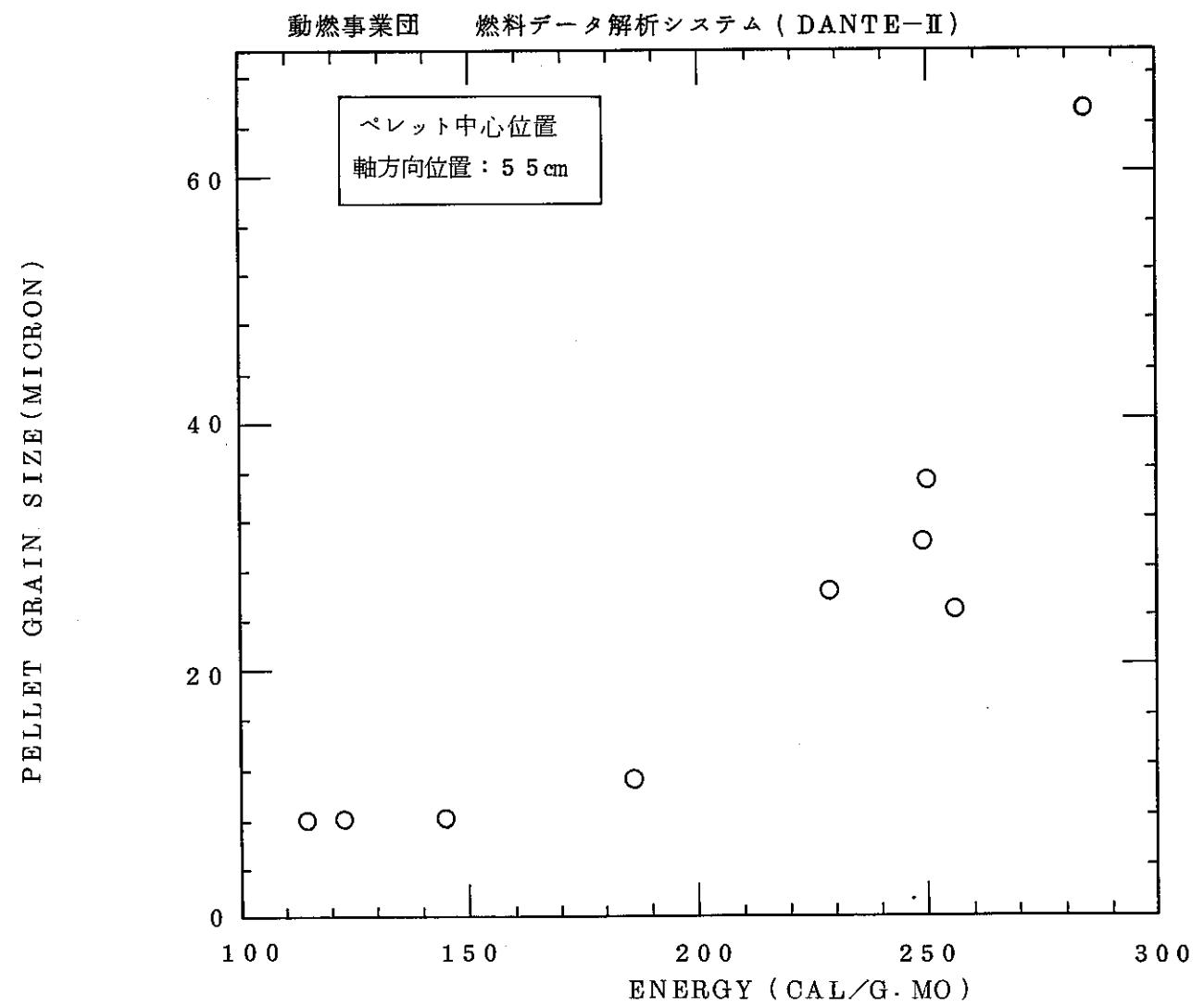


図 11 ペレット結晶粒径の発熱量依存性

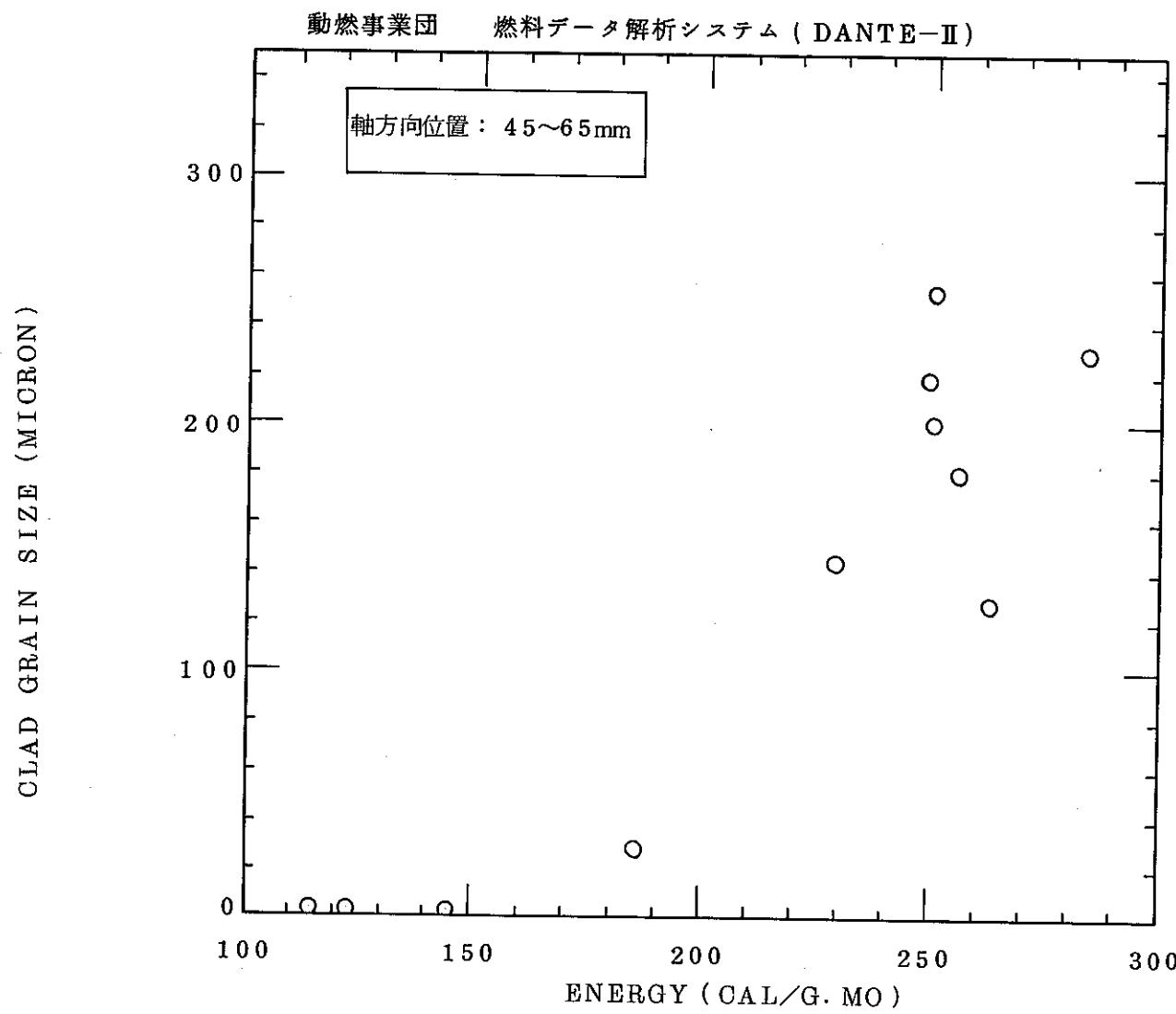


図 1 2 被覆管結晶粒径の発熱量依存性

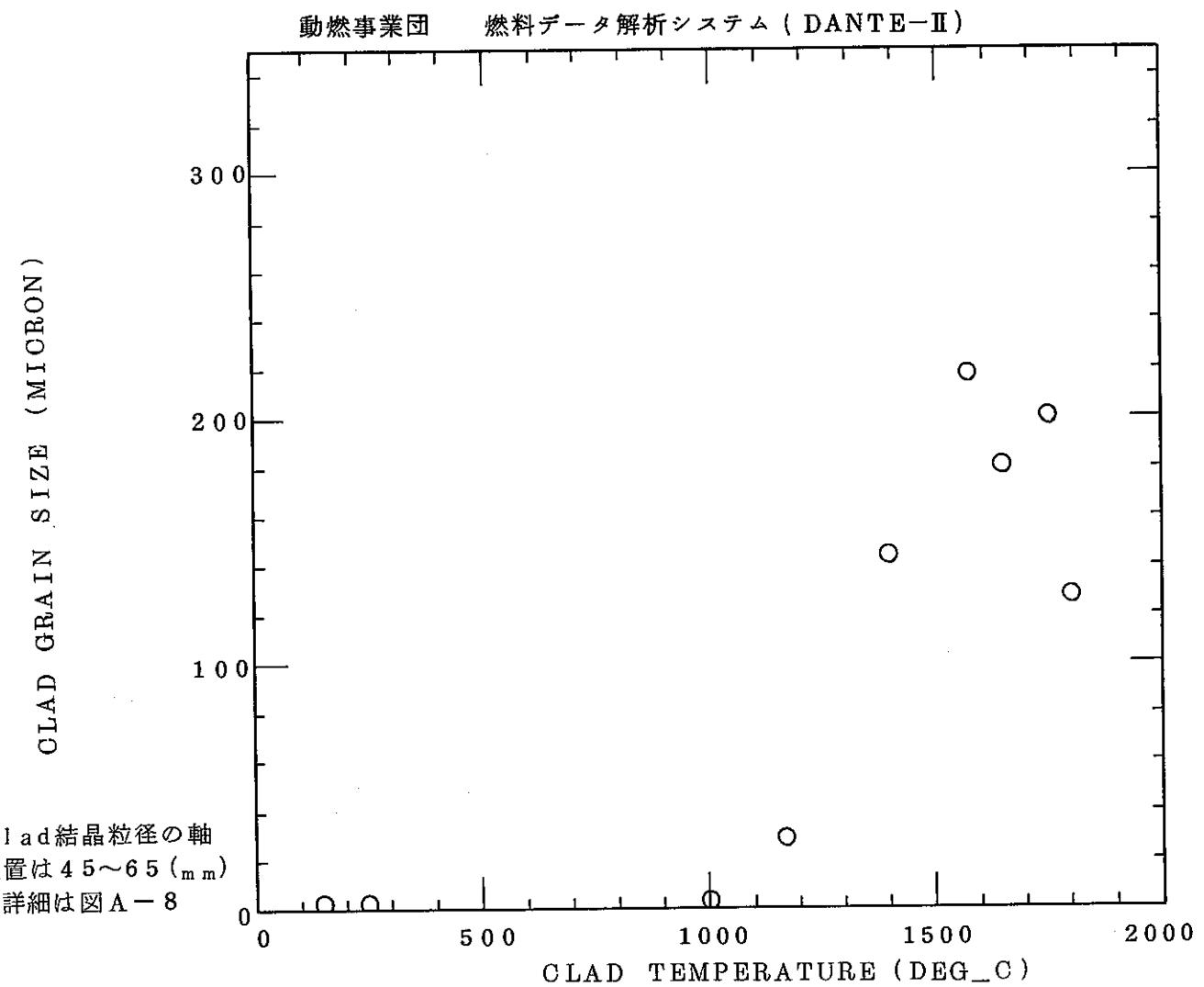


図 13 被覆管測定温度と被覆管結晶粒径の関係

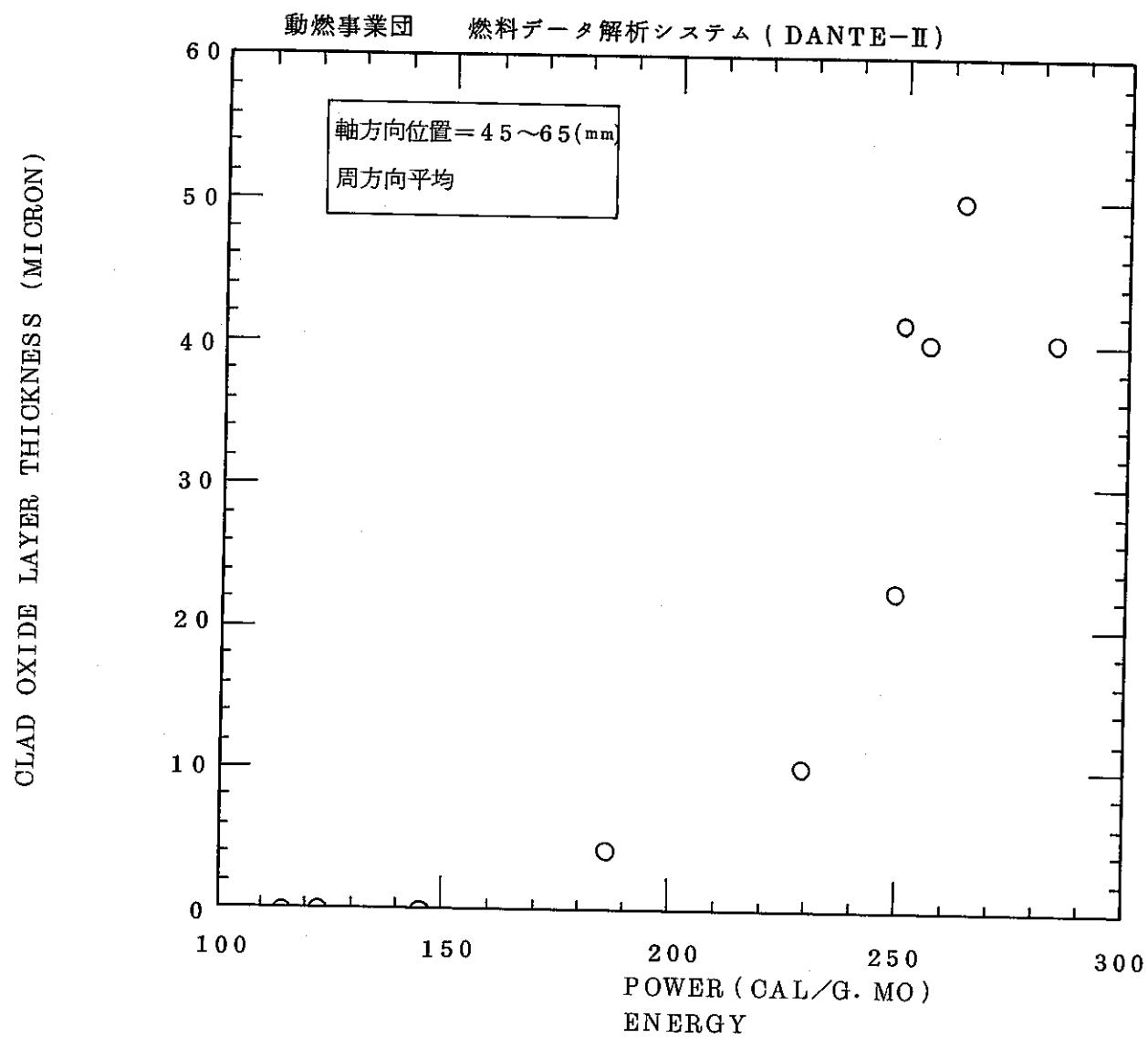


図 14 被覆管酸化膜厚の発熱量依存性

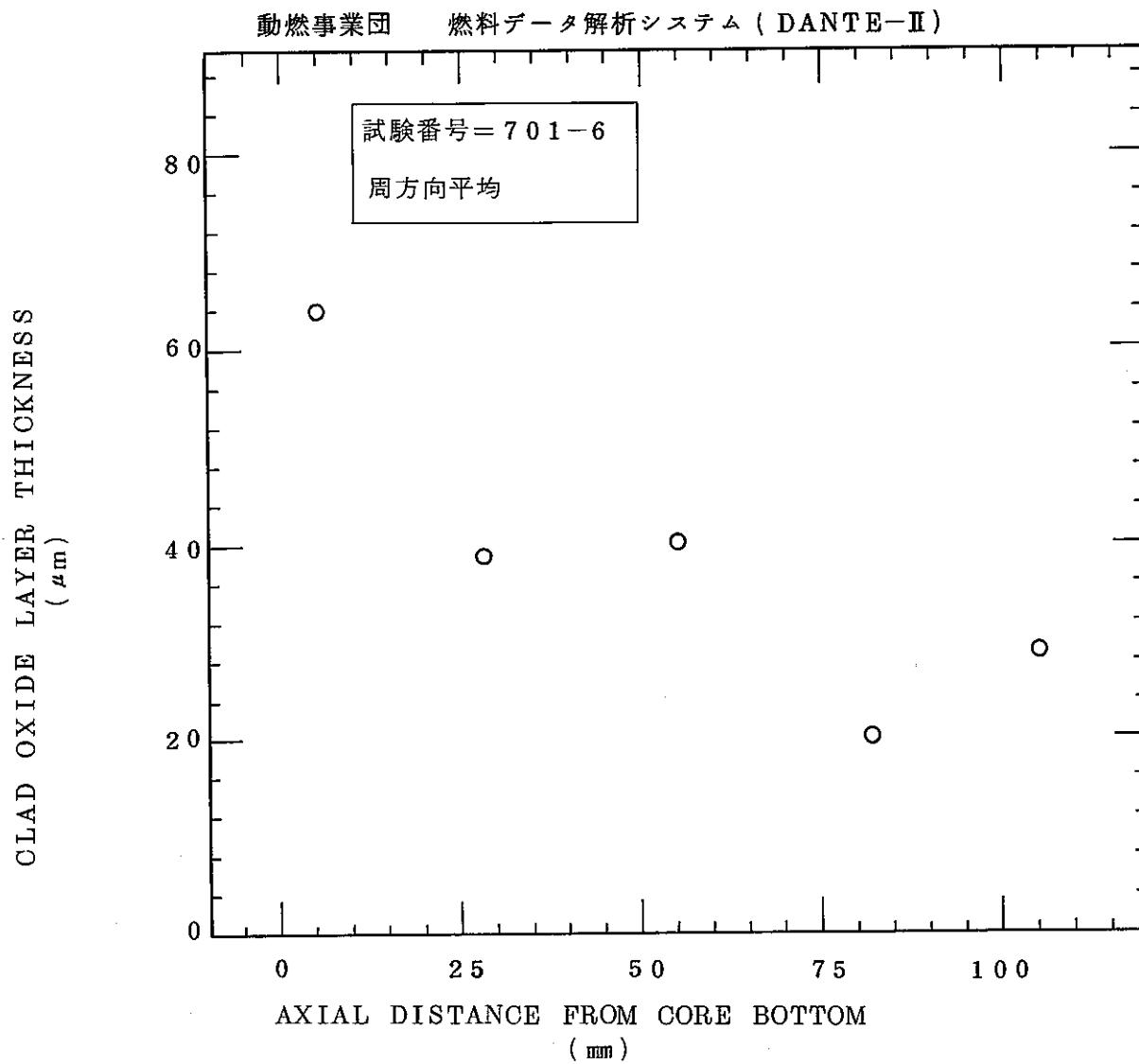


図 15 被覆管酸化膜厚の軸方向分布

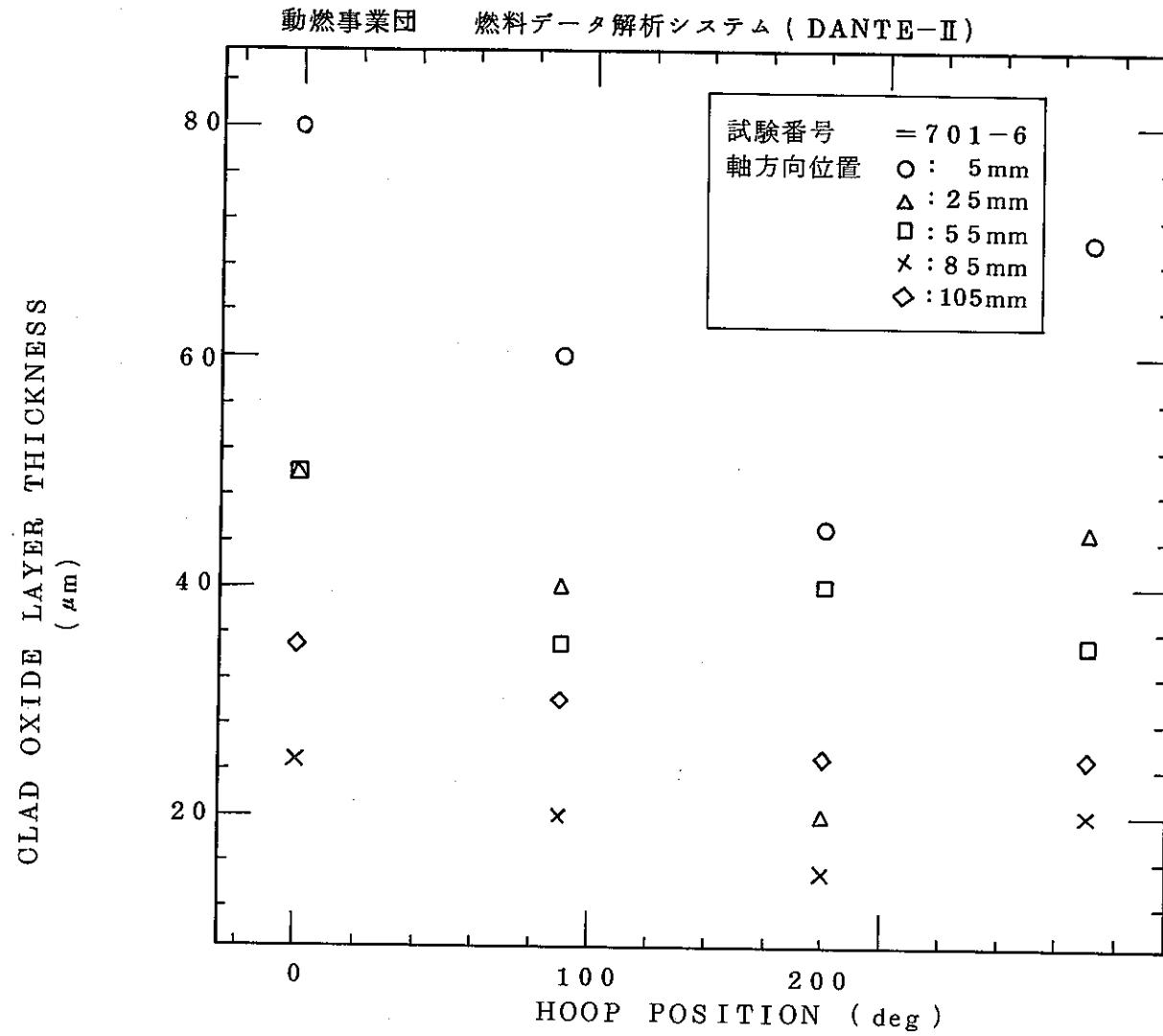


図 16 被覆管酸化膜厚の周方向分布

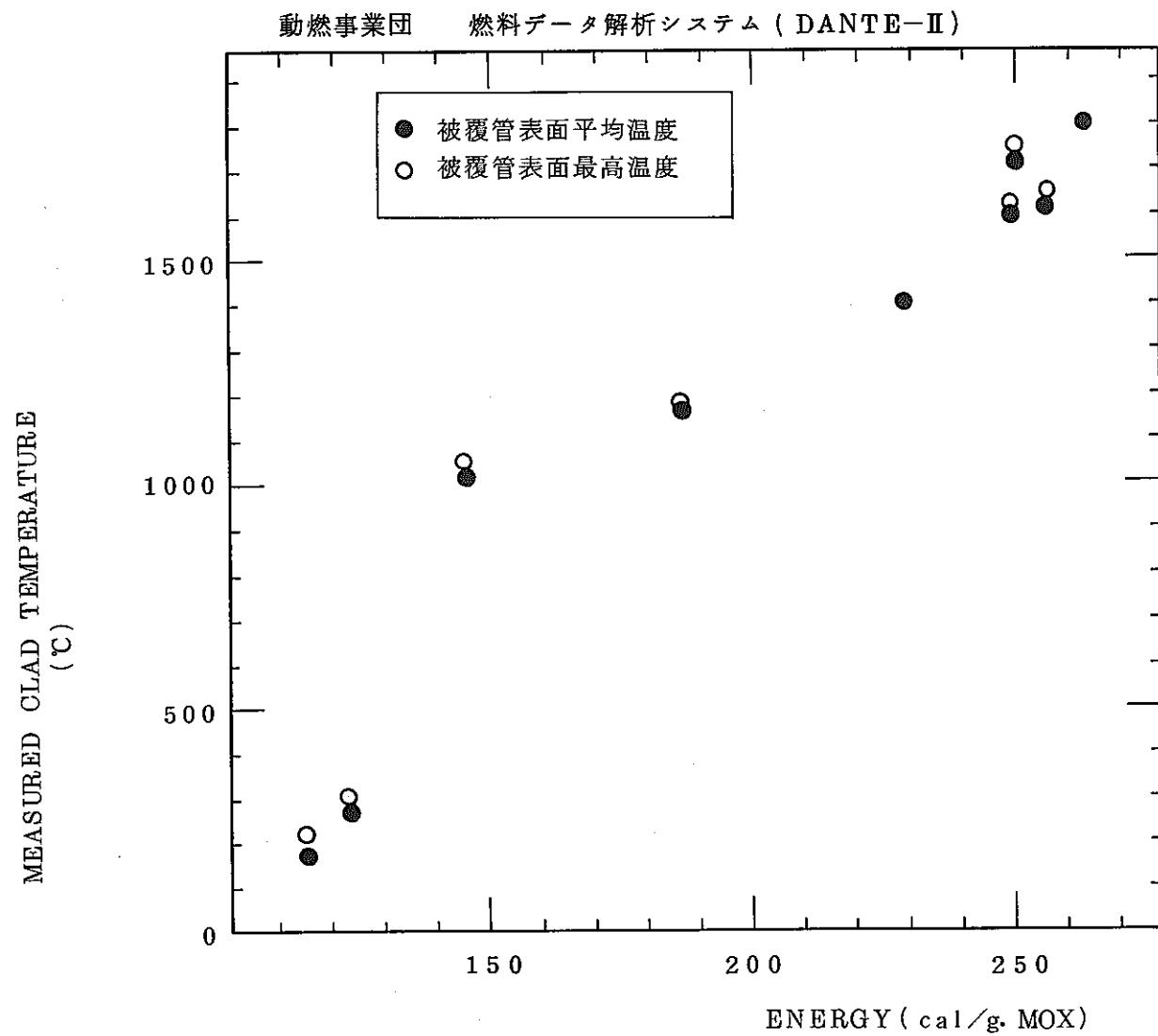


図 17 発熱量と被覆管温度の関係

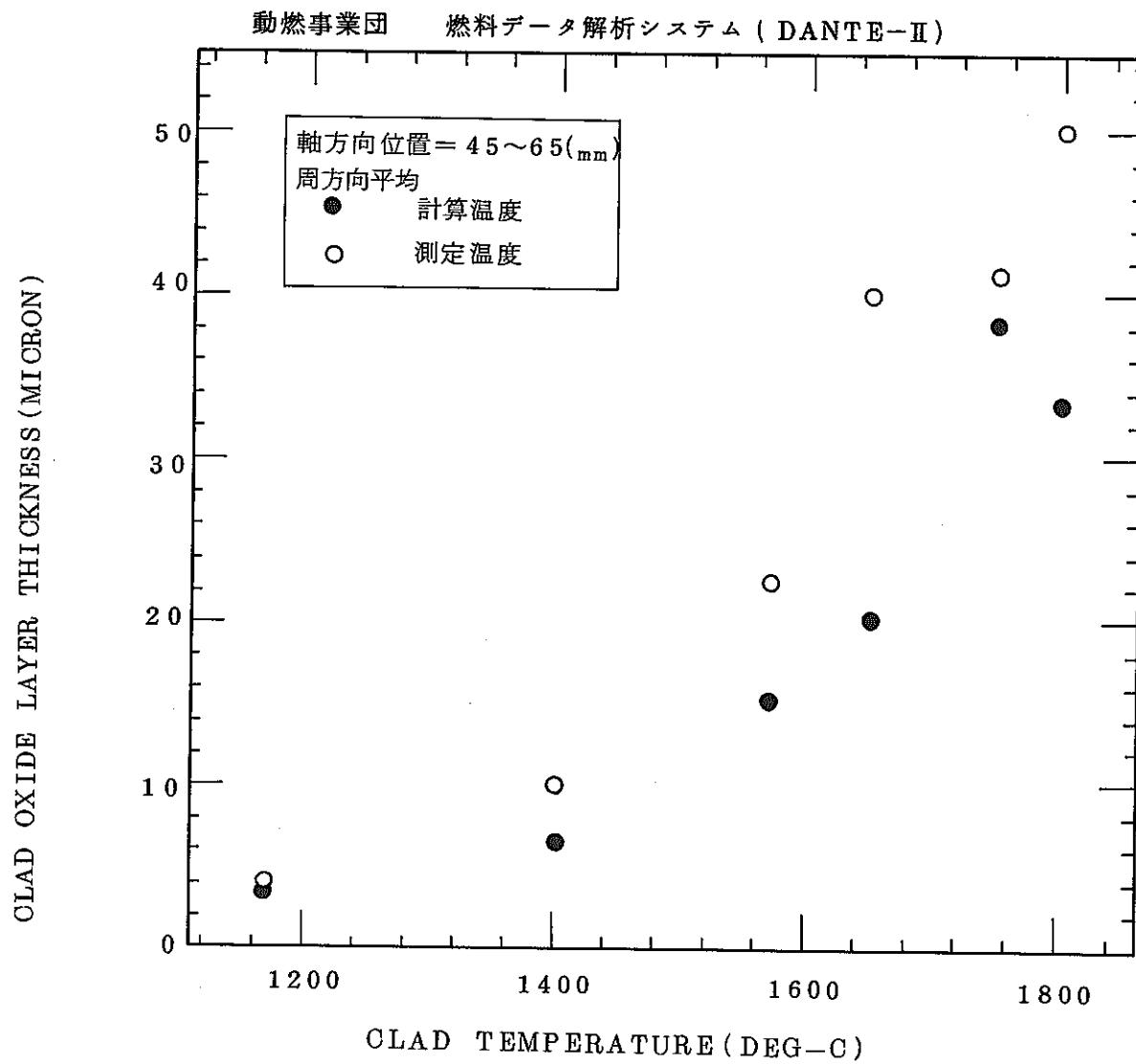


図 18 被覆管温度と被覆管酸化膜厚の関係

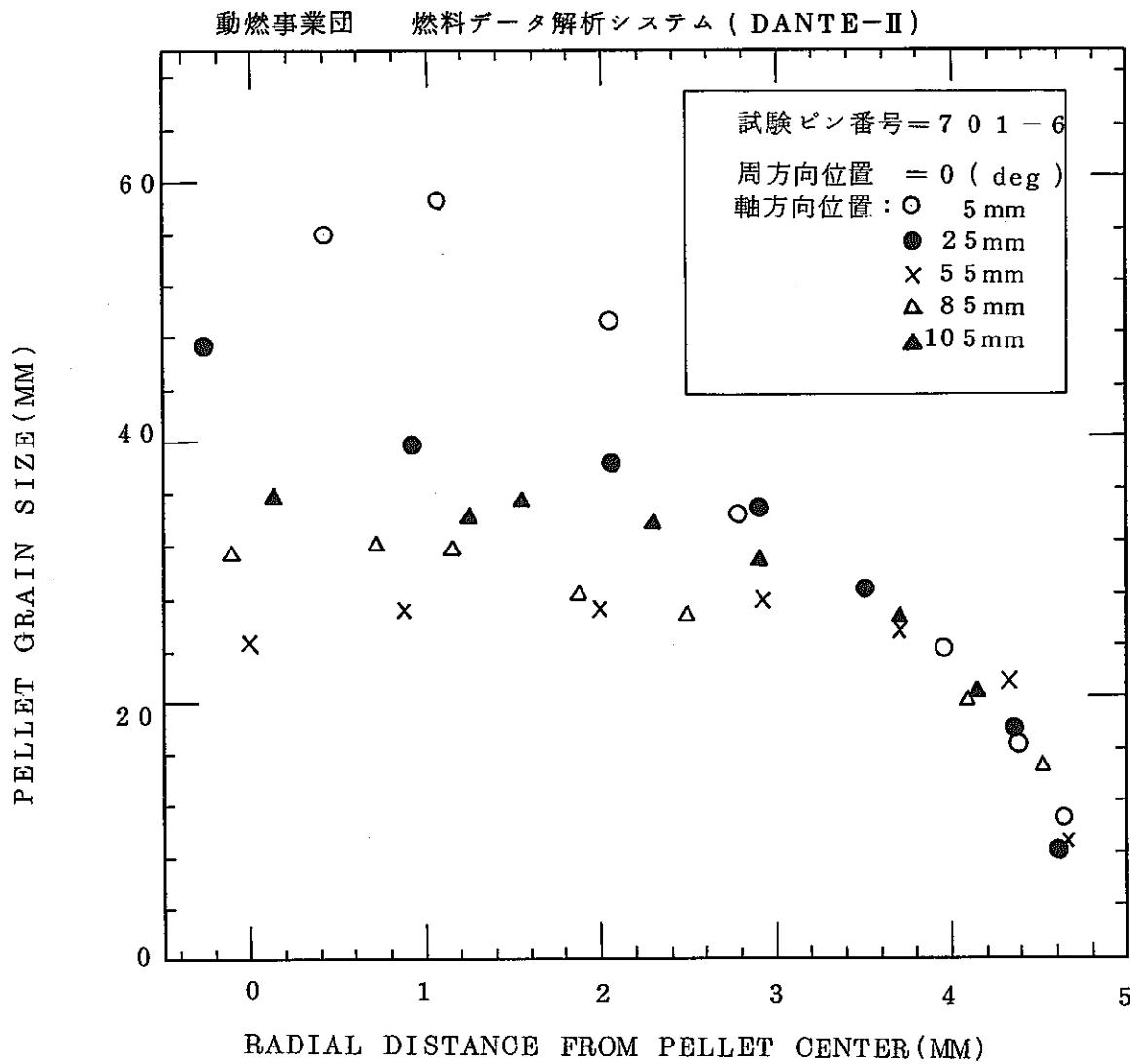


図 19 ペレット結晶粒径の半径方向分布

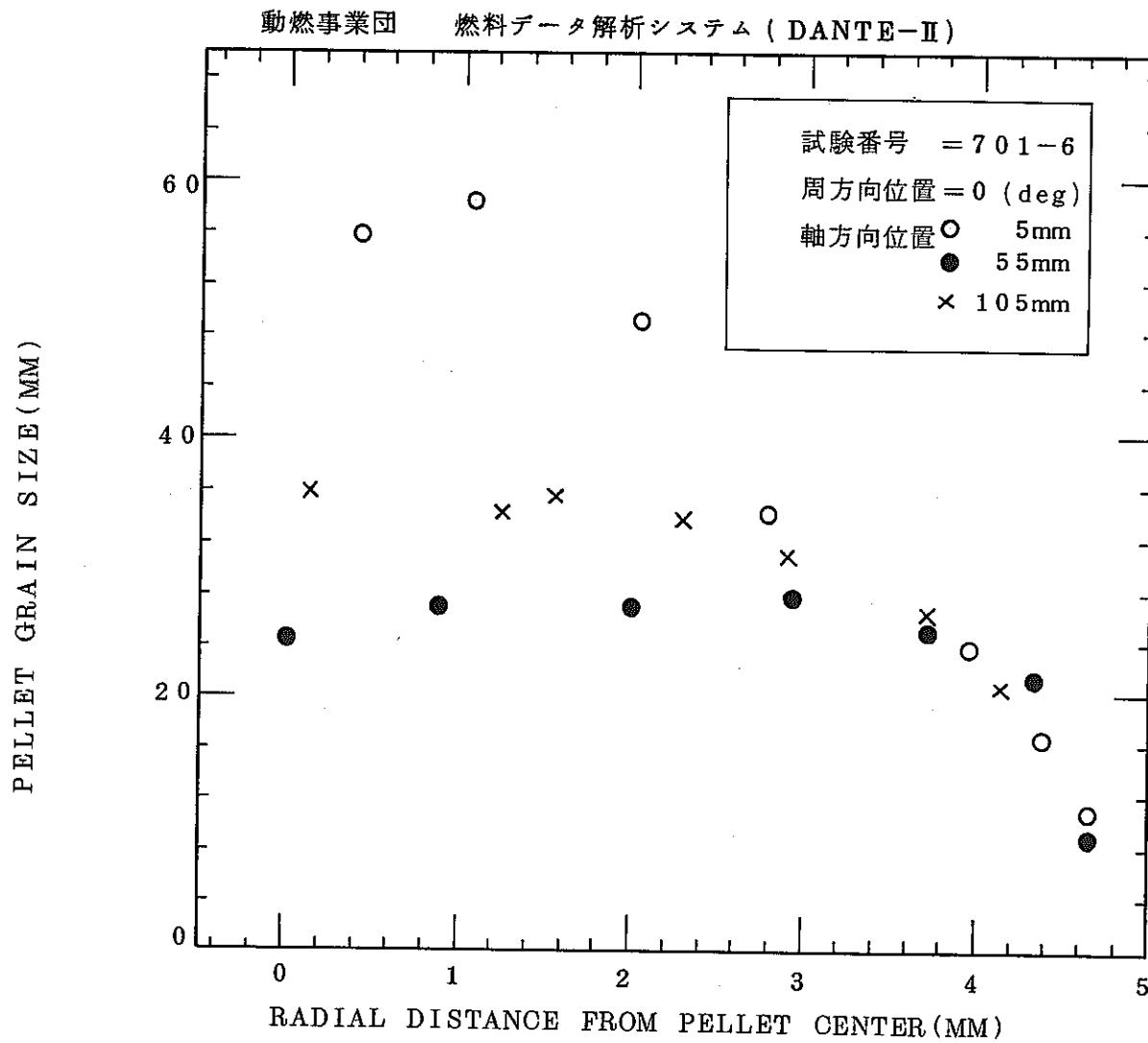


図 20 ペレット結晶粒径の半径方向分布

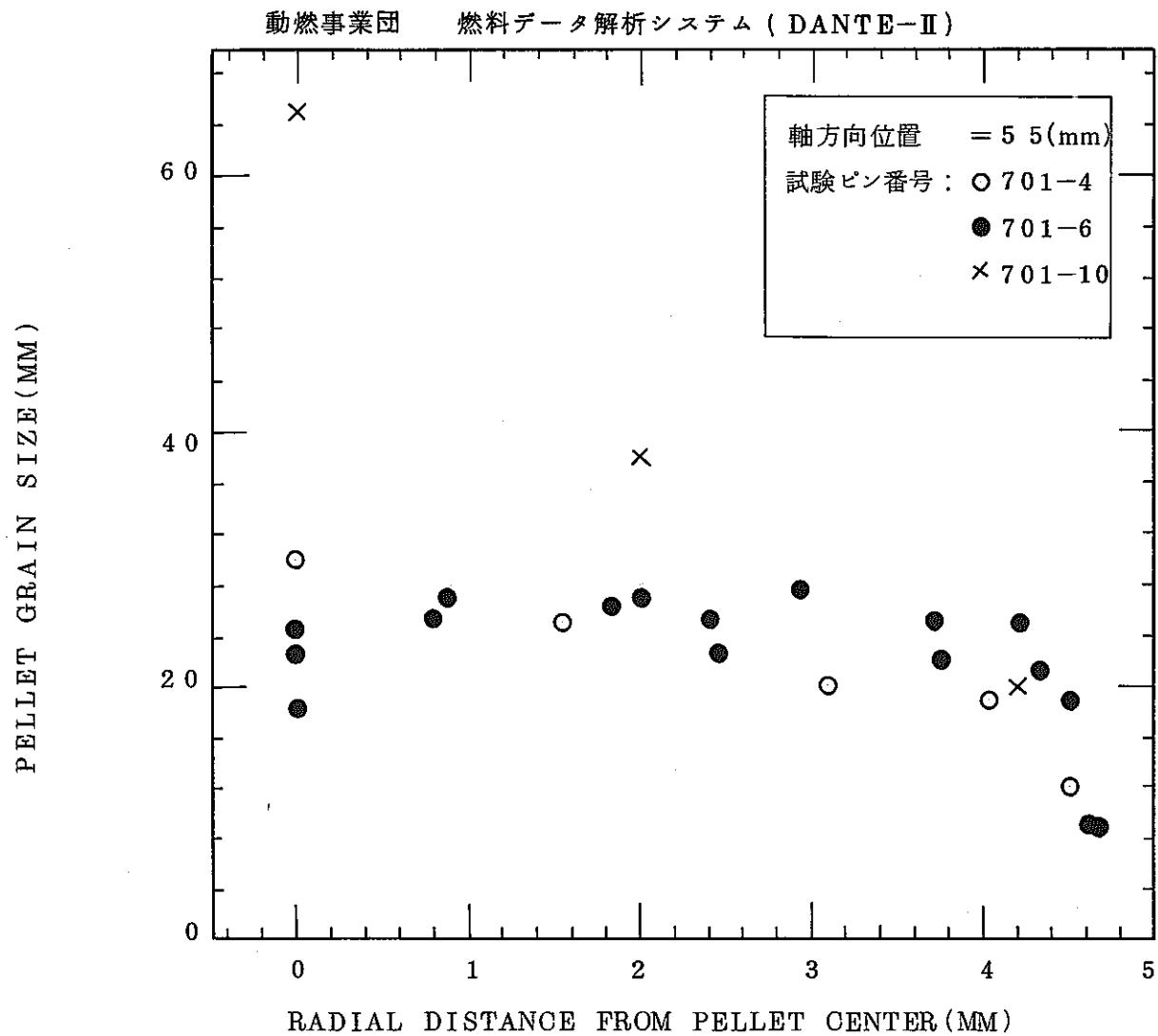


図 2.1 ペレット結晶粒径の半径方向分布

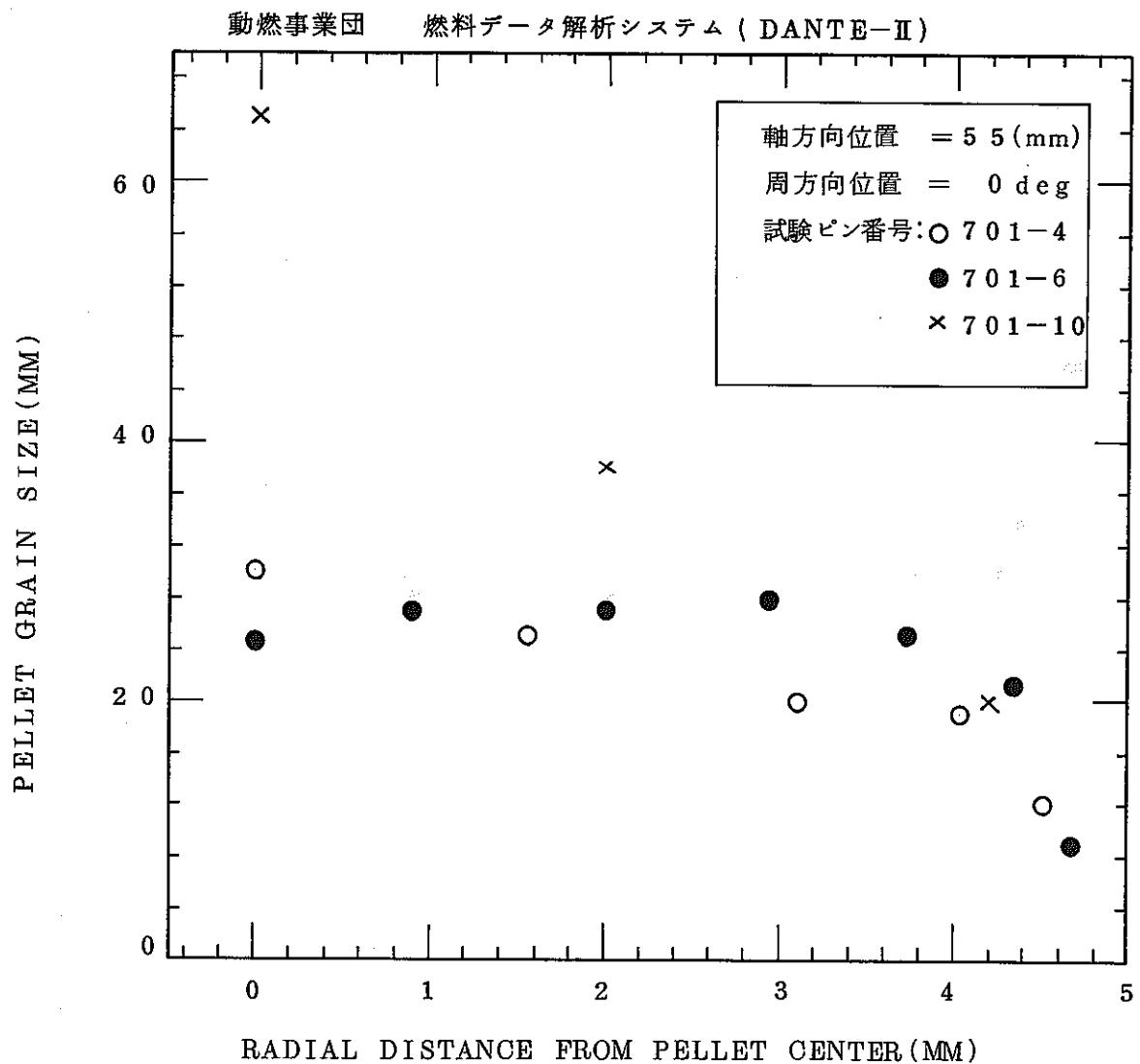


図 2 2 ペレット結晶粒径の半径方向分布

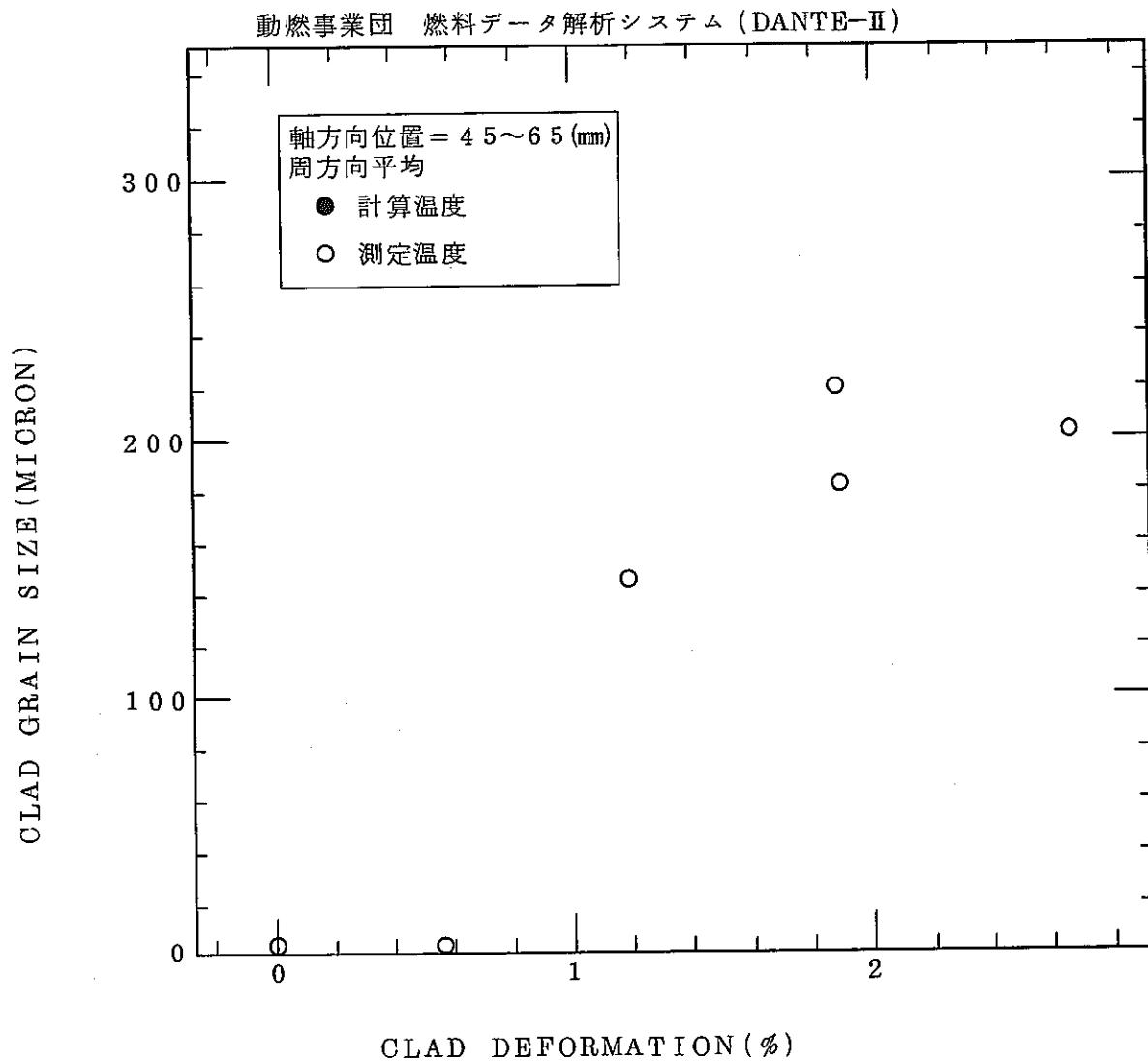


図 2 3 ピン外径増加率と被覆管結晶粒径の関係

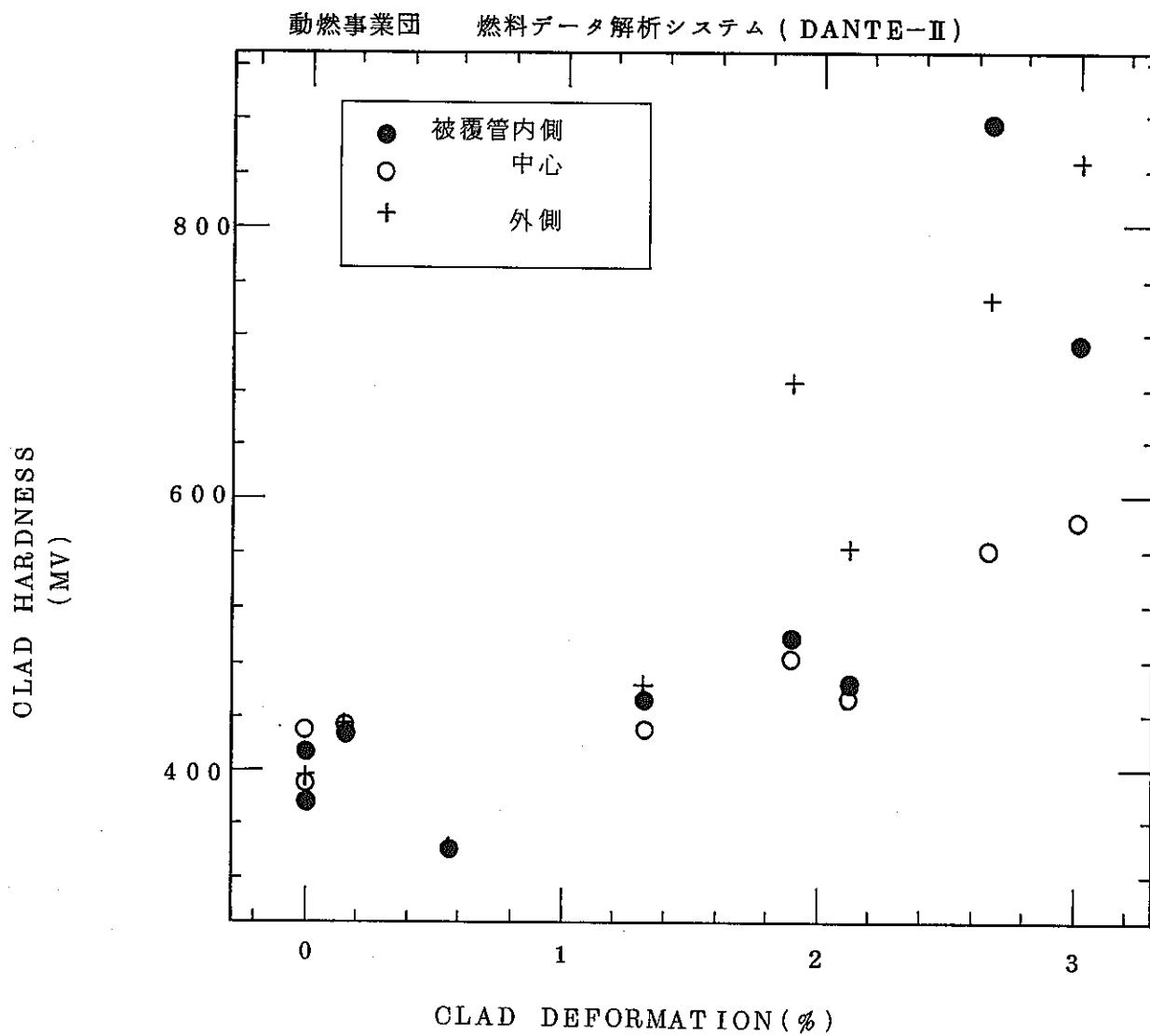


図 24 ピン外径増加 - 被覆管硬度の関係

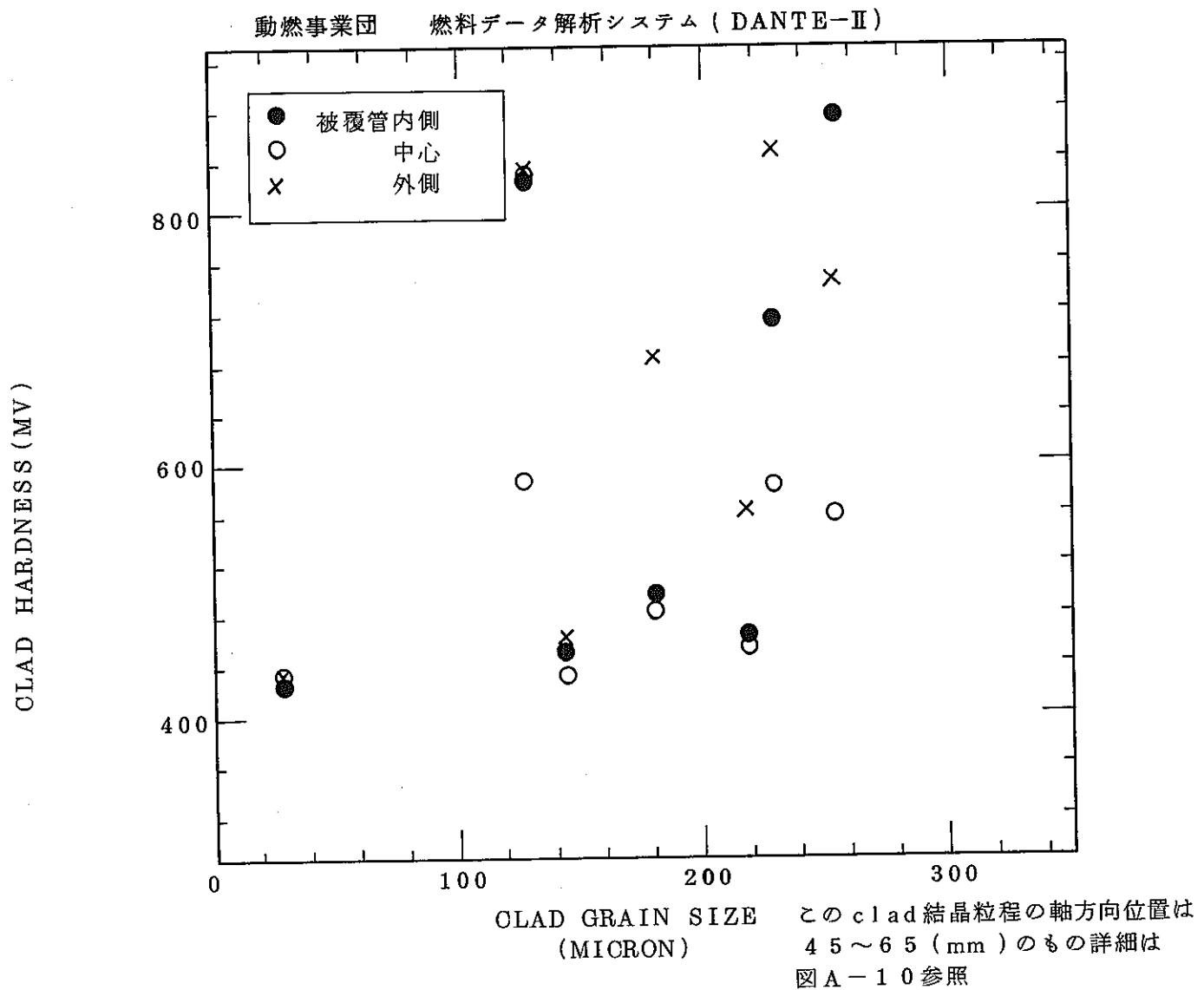


図 25 被覆管結晶粒径と被覆管硬度の関係

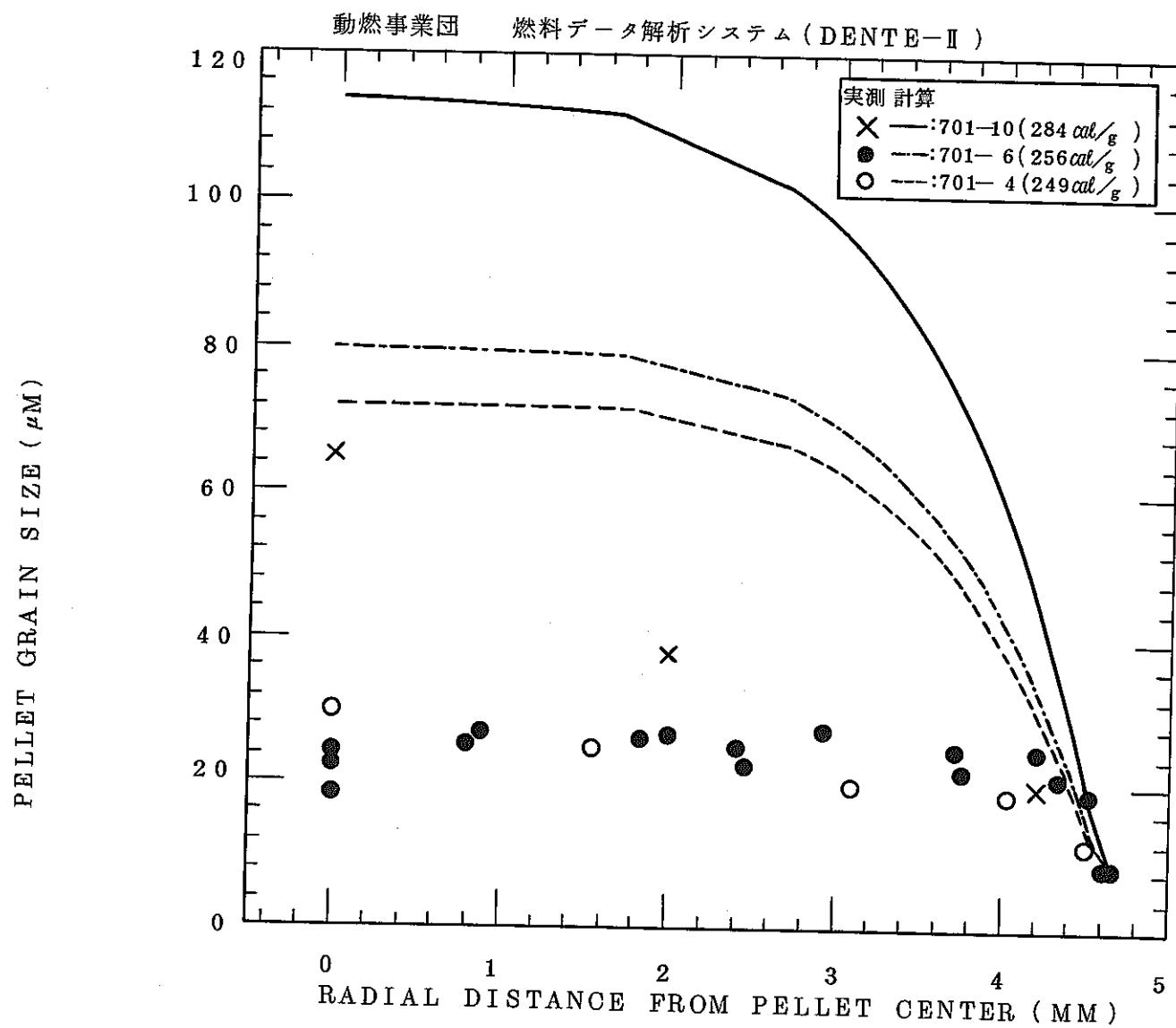
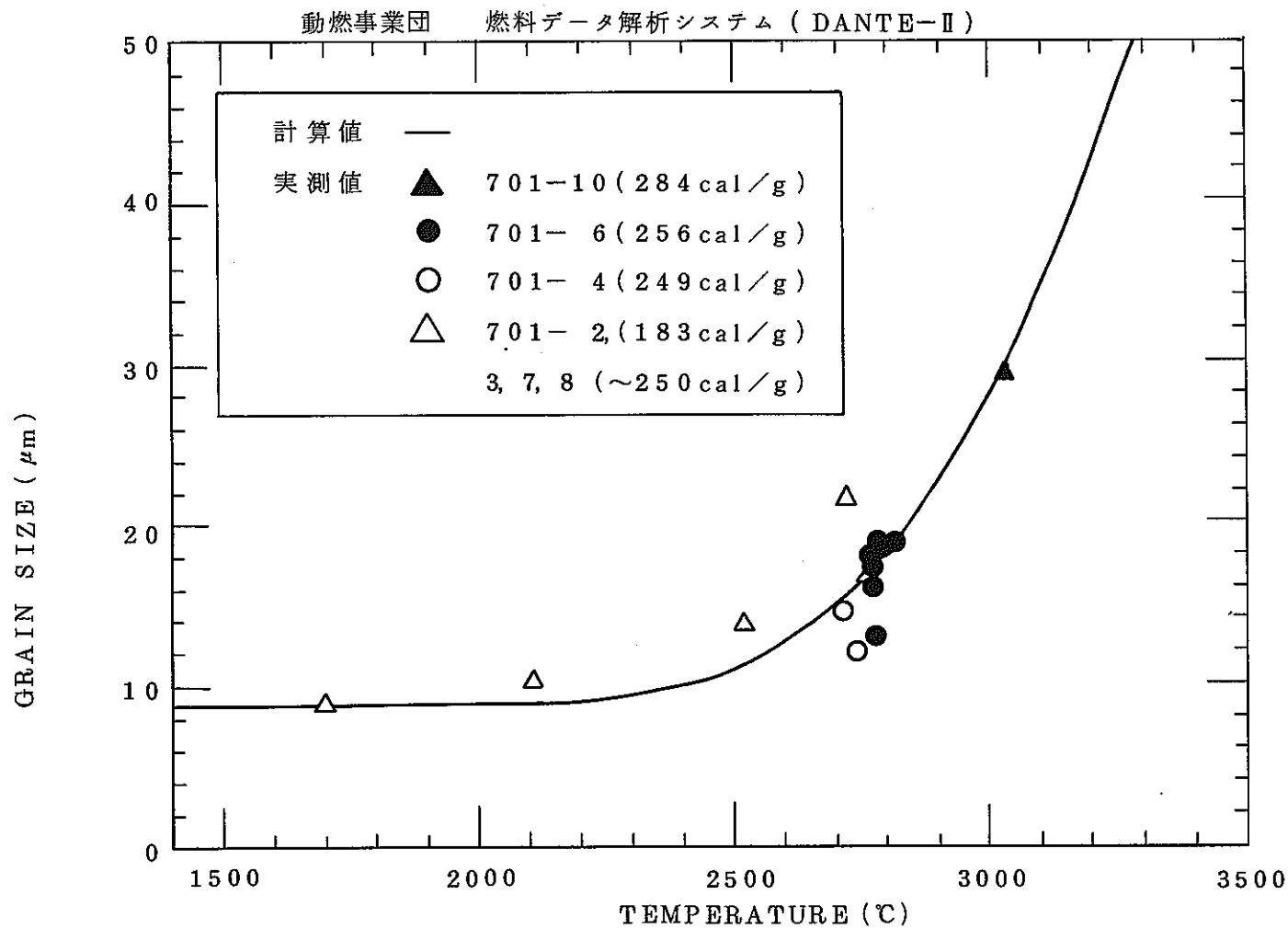


図 2.6 ペレット径方向の結晶粒径分布の計算値 (AINSCOUGHの式) と実測値の比較

図 27 結晶粒成長の計算値と実測値の比較 ($t = 1 \text{ sec}$ IC規格化)

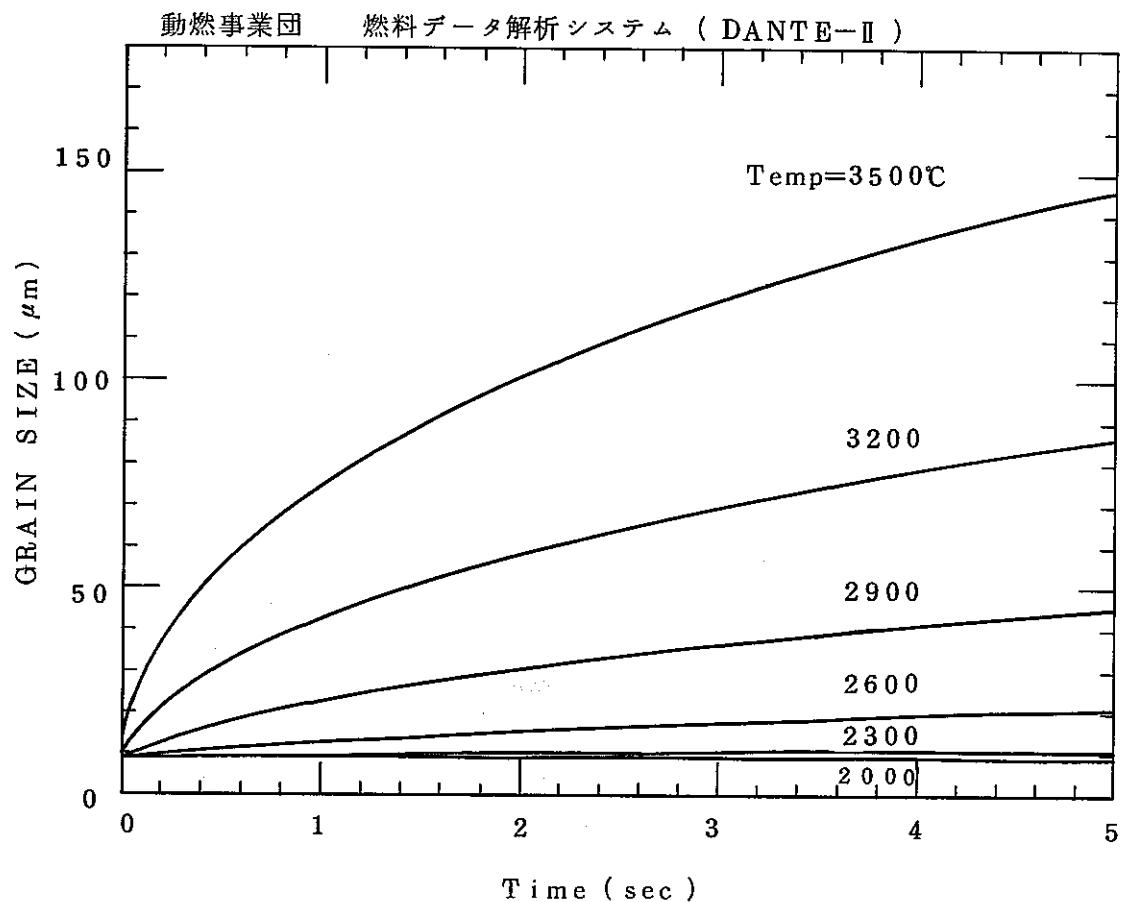


Fig. 28 ペレット結晶粒径の時間変化(モデル式)

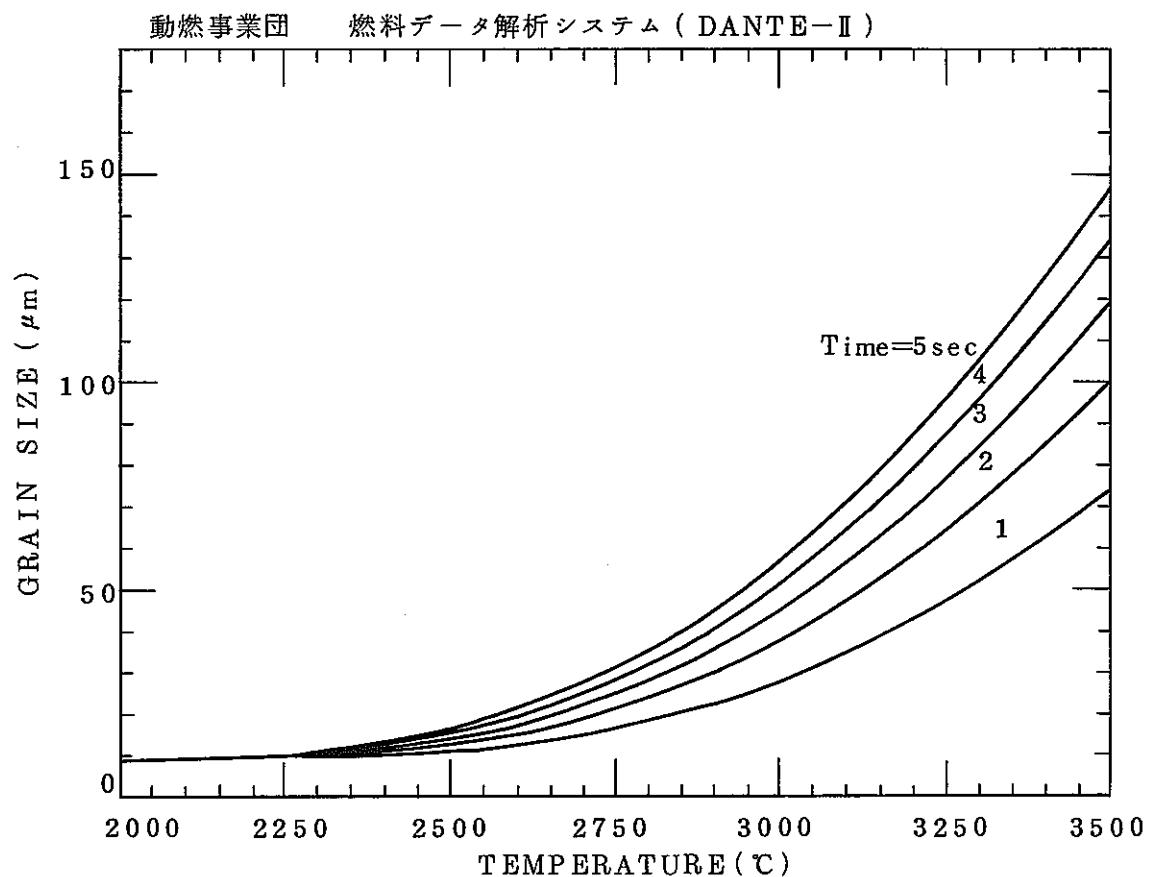


Fig. 29 ペレット結晶粒径と温度の関係(モデル式)

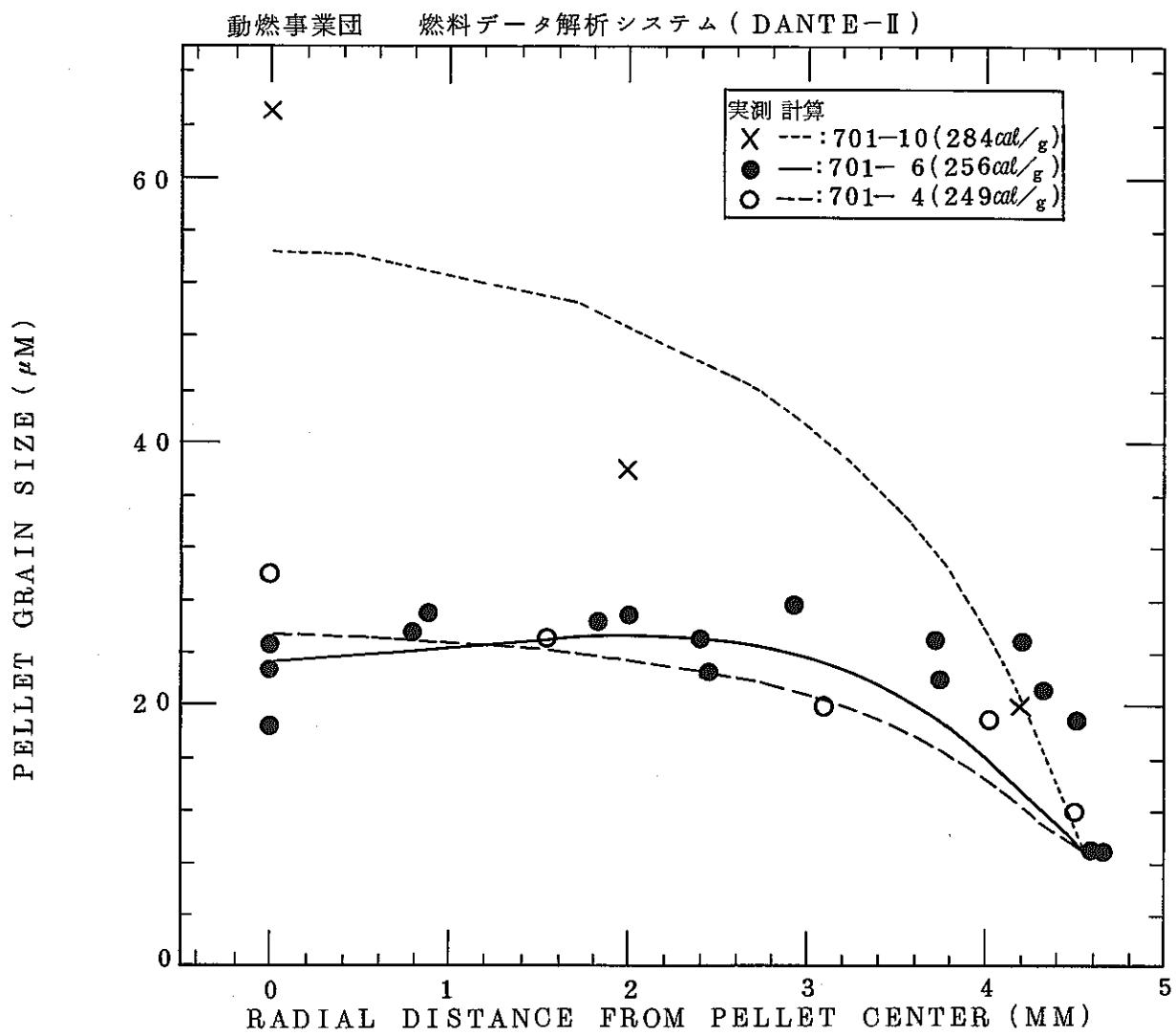
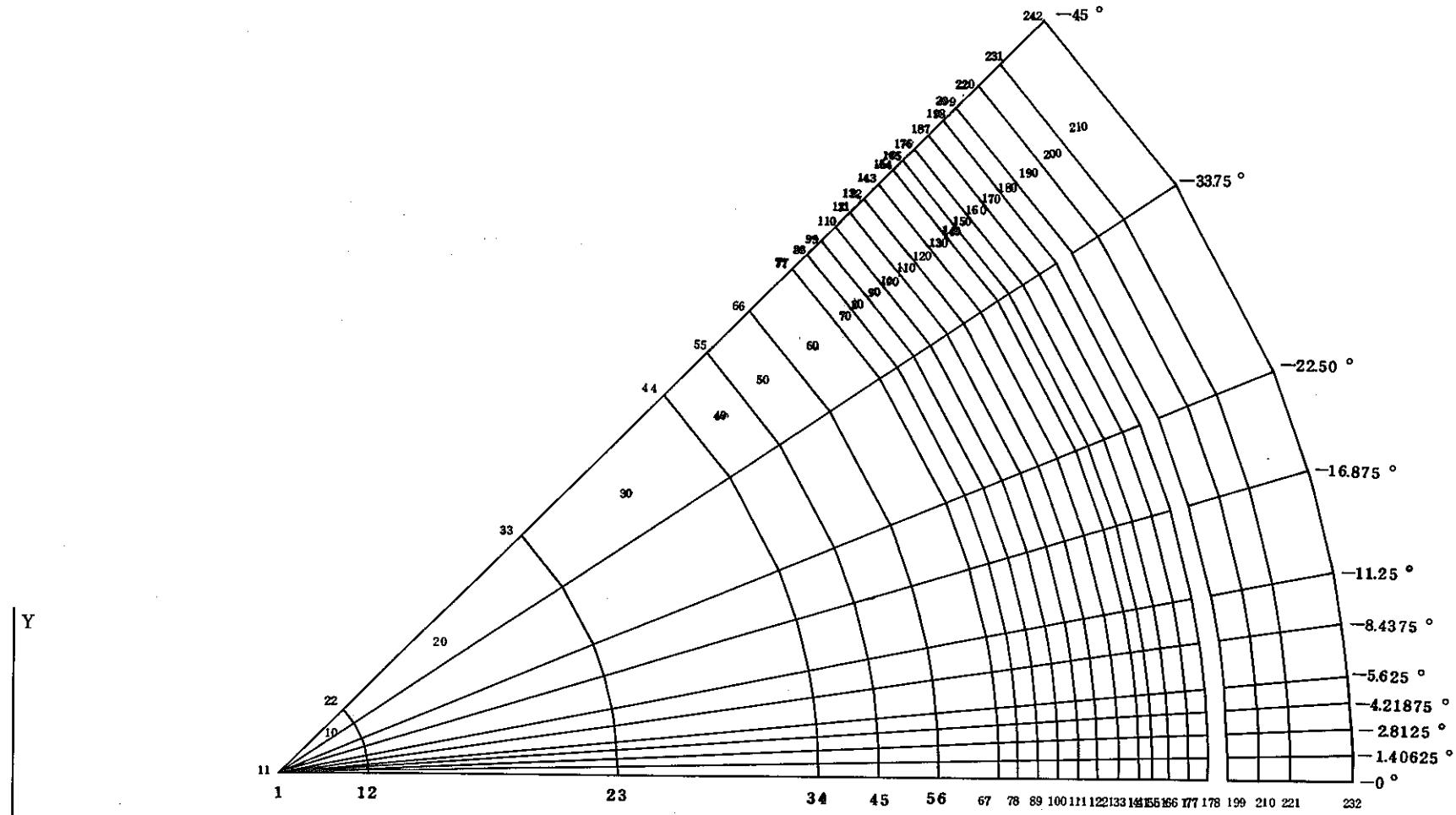


図 30 ペレット径方向の結晶粒径分布の計算値と実測値の比較

表 7 径 方 向 位 置

POINT	NODE	ペレット中心から の距離(cm)	NODE 中央点	径方向 ディプレッション
1	1	0.0	0.0 2 2 2 5	0.890
1 2	2	0.0 4 4 5	0.1 0 7	0.9025
2 3	3	0.1 6 9 5	0.2 1 9 5	0.9335
3 4	4	0.2 6 9 5	0.2 8 4 5	0.9655
4 5	5	0.2 9 9 5	0.3 1 4 5	0.9870
5 6	6	0.3 2 9 5	0.3 4 4 5	1.0105
6 7	7	0.3 5 9 5	0.3 6 4 5	1.0265
7 8	8	0.3 6 9 5	0.3 7 4 5	1.0345
8 9	9	0.3 7 9 5	0.3 8 4 5	1.0435
1 0 0	1 0	0.3 8 9 5	0.3 9 4 5	1.0520
1 1 1	1 1	0.3 9 9 5	0.4 0 4 3	1.060
1 2 2	1 2	0.4 0 9 1	0.4 1 4 5	1.070
1 3 3	1 3	0.4 1 9 5	0.4 2 4 5	1.079
1 4 4	1 4	0.4 2 9 5	0.4 3 2 7 9	1.088
1 5 5	1 5	0.4 3 6 0 7	0.4 4 0 2 9	1.096
1 6 6	1 6	0.4 4 4 5	0.4 4 9 5	1.105
1 7 7	1 7	0.4 5 4 5	0.4 5 9 5	1.116
1 8 8		0.4 6 4 5		



0 VISIBLE POINT X = 0.0
 Y = 0.0
 Z = 1.00D+07
 DISTANCE 1.00D+07
 NSRR NO=701-6 NON-STOP CAL. X-Y GEOM. AINSCOUGH EQ

図 3 1 計算体計図

EX. 110 = 1221 701-6 4,10 \$

NV#2 (ペレット, スタック中心部)

ADR-20

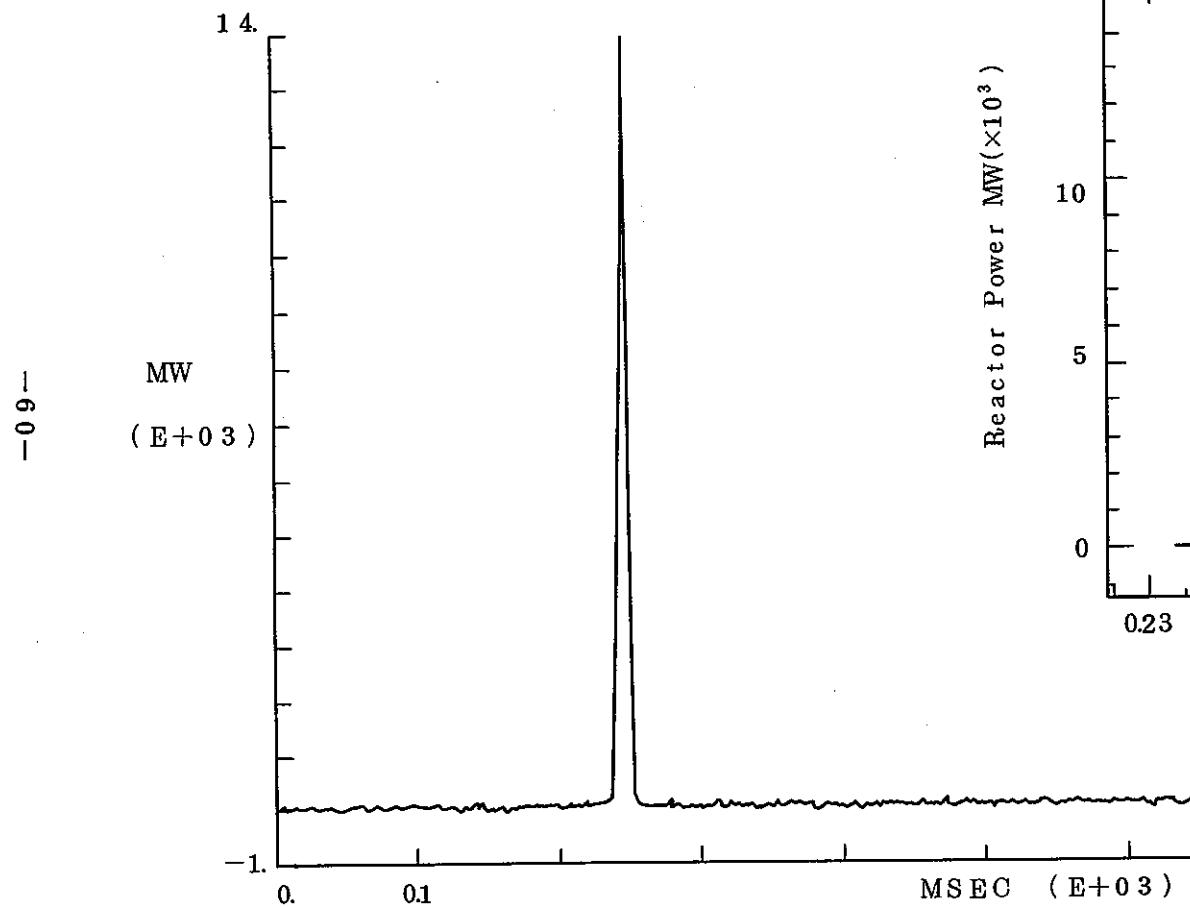


図 3 2 パルス出力図

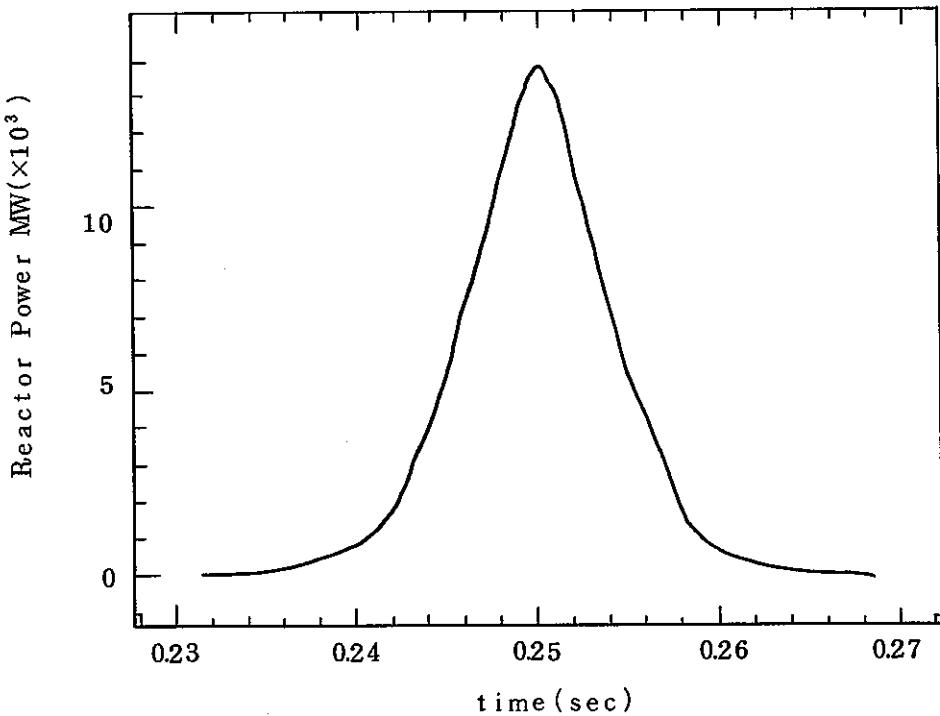


表8 NSRR 701-6 出力履歴

Time Step	Time (sec)	L. H. R (W/cm)
1	0.230	0.0
2	0.232	0.0
3	0.234	4000.
4	0.236	12800.
5	0.238	24000.
6	0.240	48000.
7	0.242	104000.
8	0.244	240000.
9	0.246	432000.
10	0.248	640000.
11	0.250	800000.
12	0.252	640000.
13	0.254	432000.
14	0.256	240000.
15	0.258	104000.
16	0.260	48000.
17	0.262	24000.
18	0.264	12800.
19	0.266	4000.
20	0.268	0.0
21	0.270	0.0
↓	↓	↓
50	3.7	0.0

総発熱量 251 cal/g

表9 被覆管表面温度履歴(測定値)

Time Step	Time (sec)	Clad Surface Temp(°C)	Time Step	Time (sec)	Clad Surface Temp(°C)
1	0.0	30	35	0.65	1475
2	0.232	30	36	0.70	1505
3	0.234	30	37	0.75	1540
4	0.236	30	38	0.80	1580
5	0.238	30	39	0.85	1591
6	0.240	30	40	0.90	1603
7	0.242	31	41	0.95	1640
8	0.244	48	42	1.00	1680
9	0.246	65	43	1.50	1680
10	0.248	82	44	2.00	1630
11	0.250	99	45	2.50	1645
12	0.252	119	46	3.0	1525
13	0.254	140	47	3.2	1350
14	0.256	159	48	3.4	1200
15	0.258	182	49	3.6	940
16	0.260	190	50	3.7	675
17	0.262	232			
18	0.264	273			
19	0.266	316			
20	0.268	358			
21	0.270	400			
22	0.280	595			
23	0.290	680			
24	0.300	750			
25	0.310	825			
26	0.320	860			
27	0.330	885			
28	0.340	890			
29	0.350	925			
30	0.400	1110			
31	0.45	1225			
32	0.50	1305			
33	0.55	1375			
34	0.60	1430			

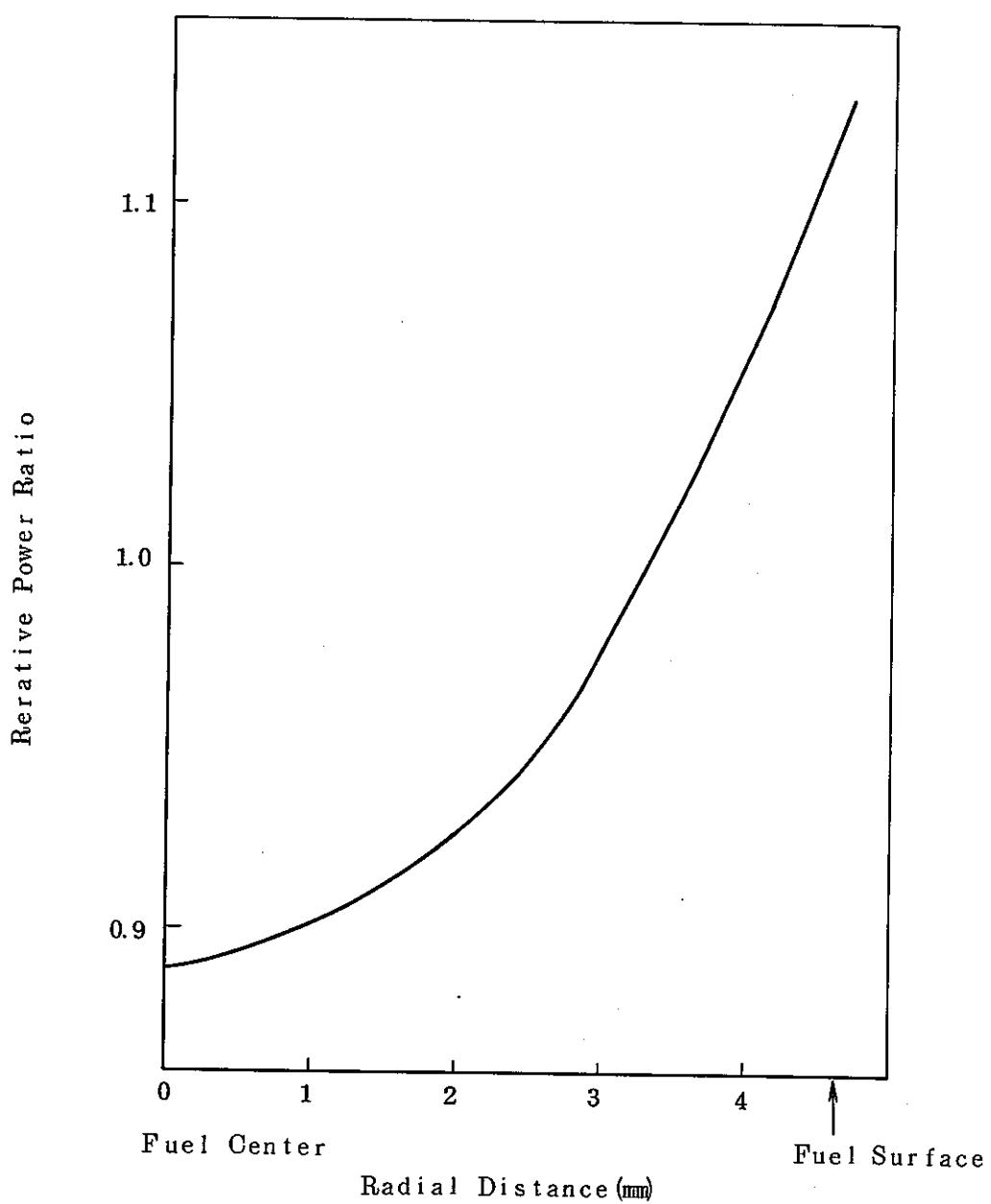


図33 Radial Power Distribution

EX. NO = 1221; 701-6 410\$

CLAD TEMP #2

ADR-09

-64-

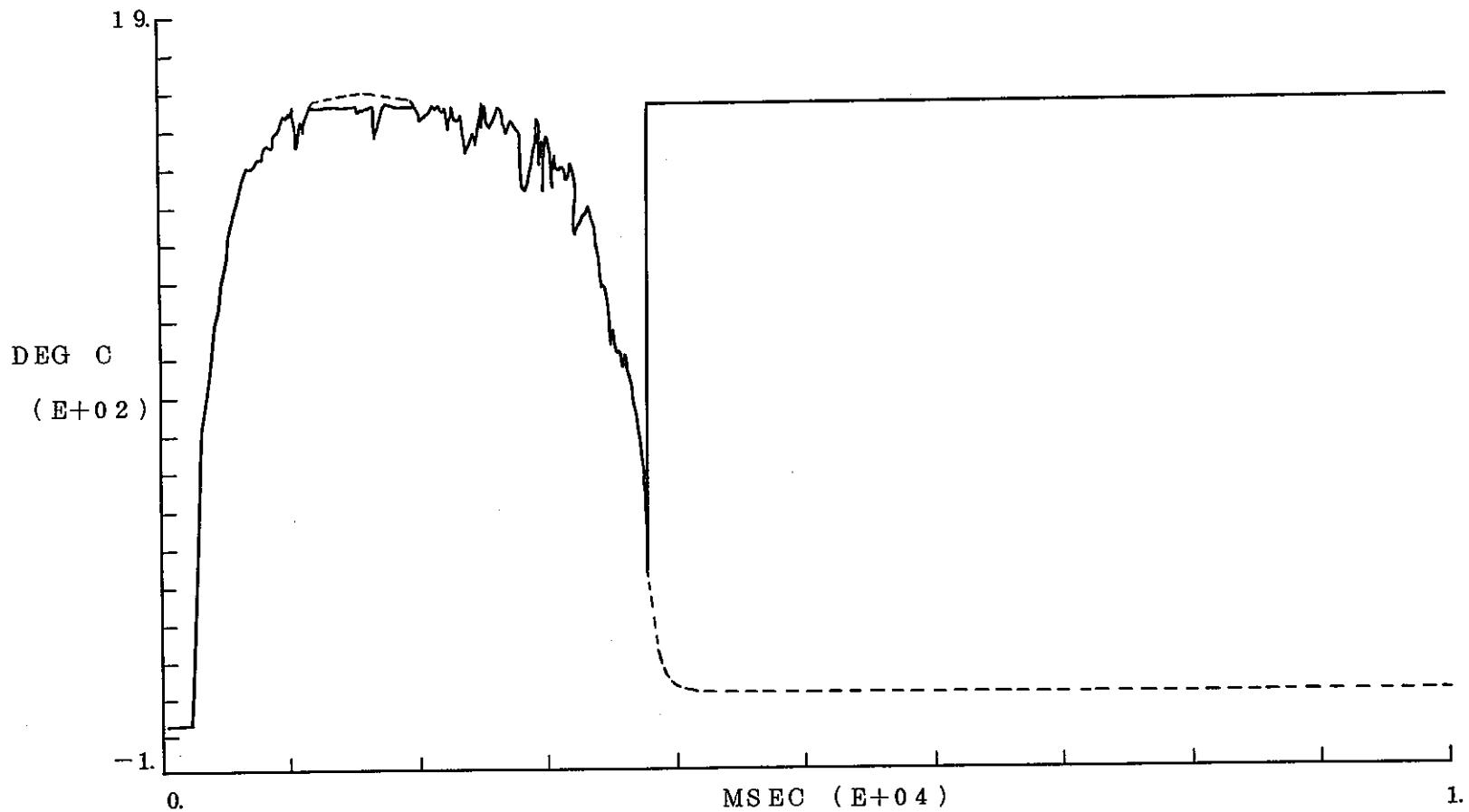


図 3 4 被覆管表面温度履歴

MEASURING INSTRUMENTS

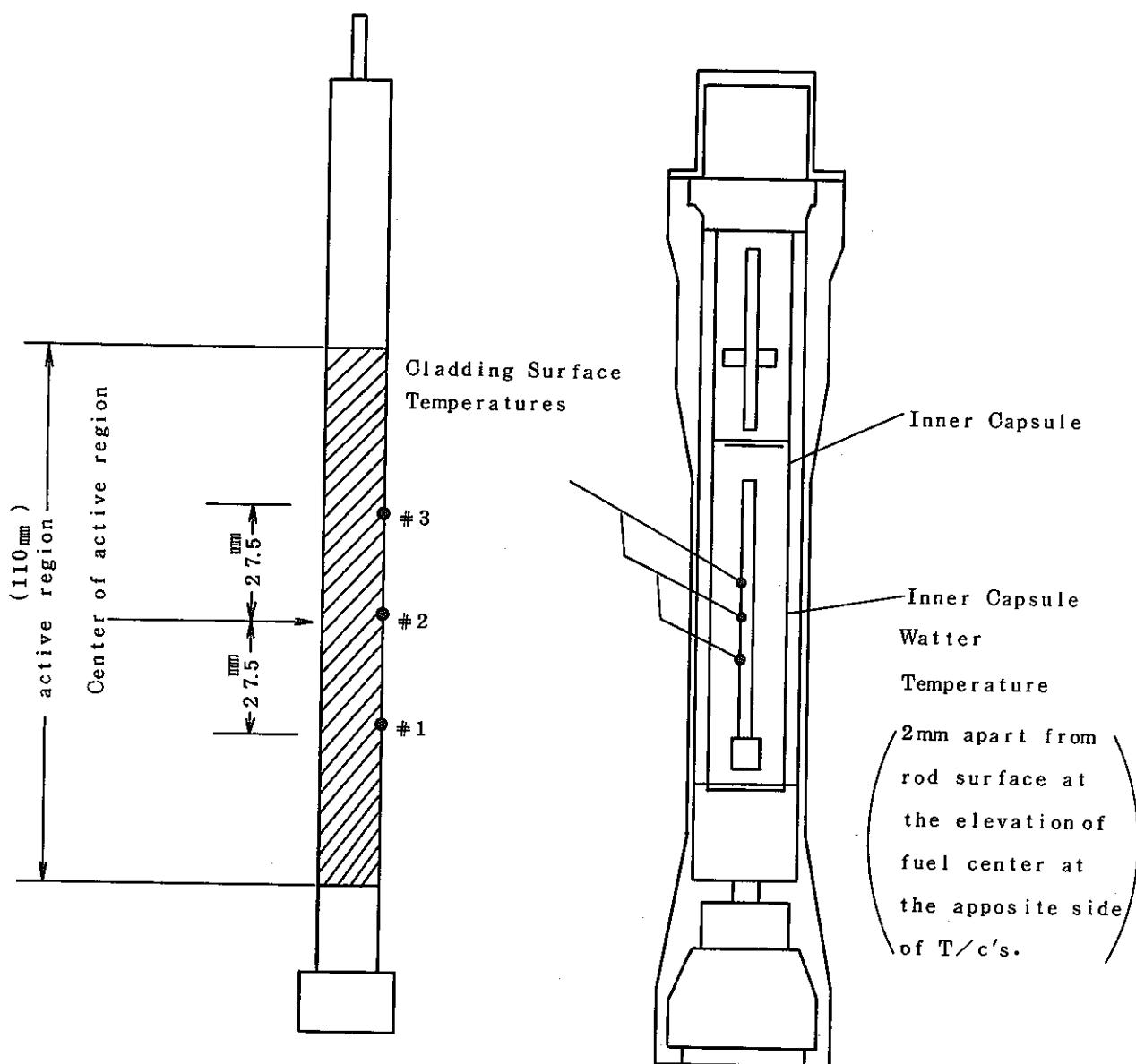


図 35 計装図

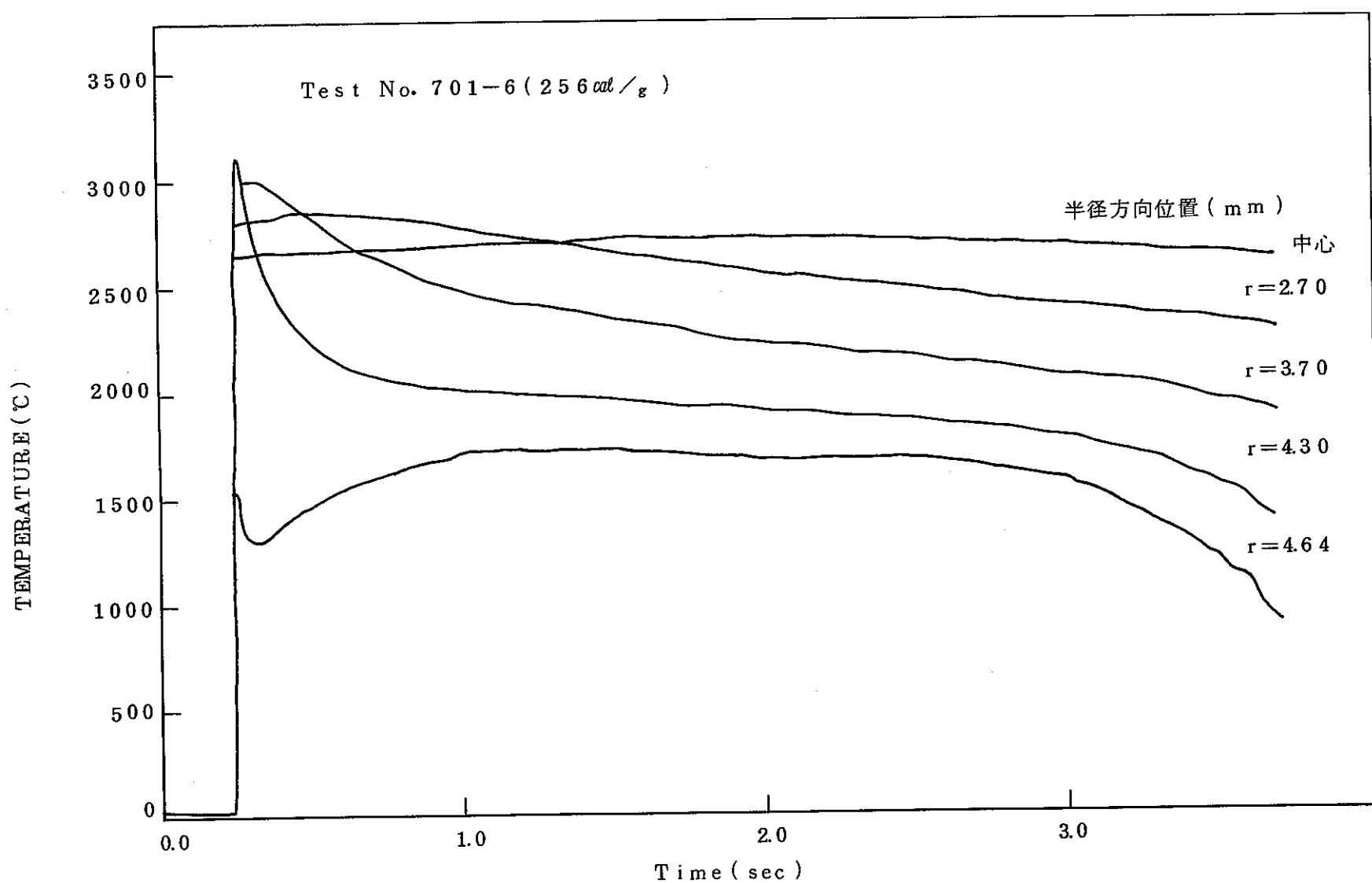


図 3.6 FEAPUS-III コード計算による燃料温度履歴 (パラメータ; 半径方向位置)

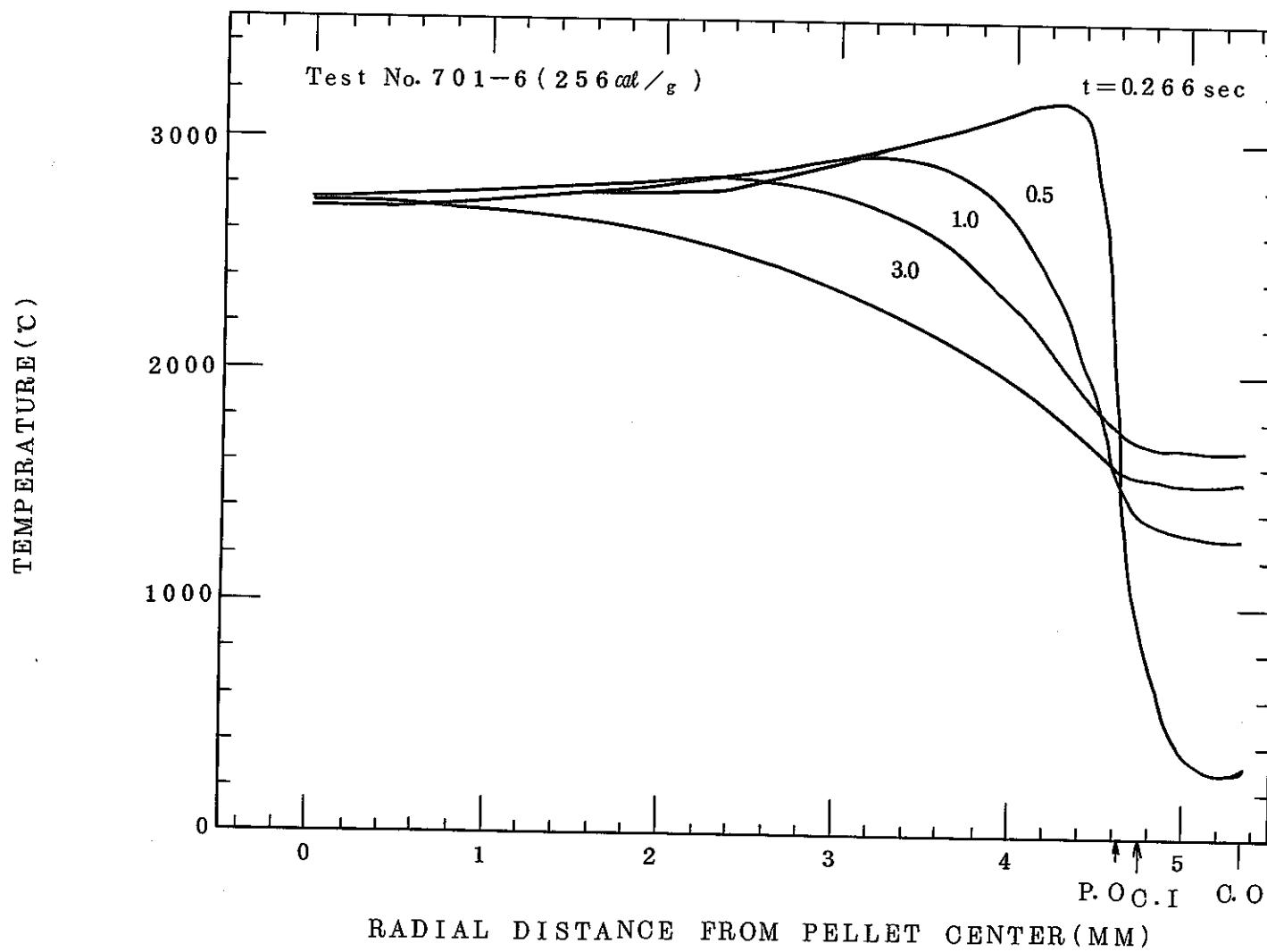


図 3 7 FEAPUS-IIIコードによるペレット径方向温度分布(パラメータ:時間)

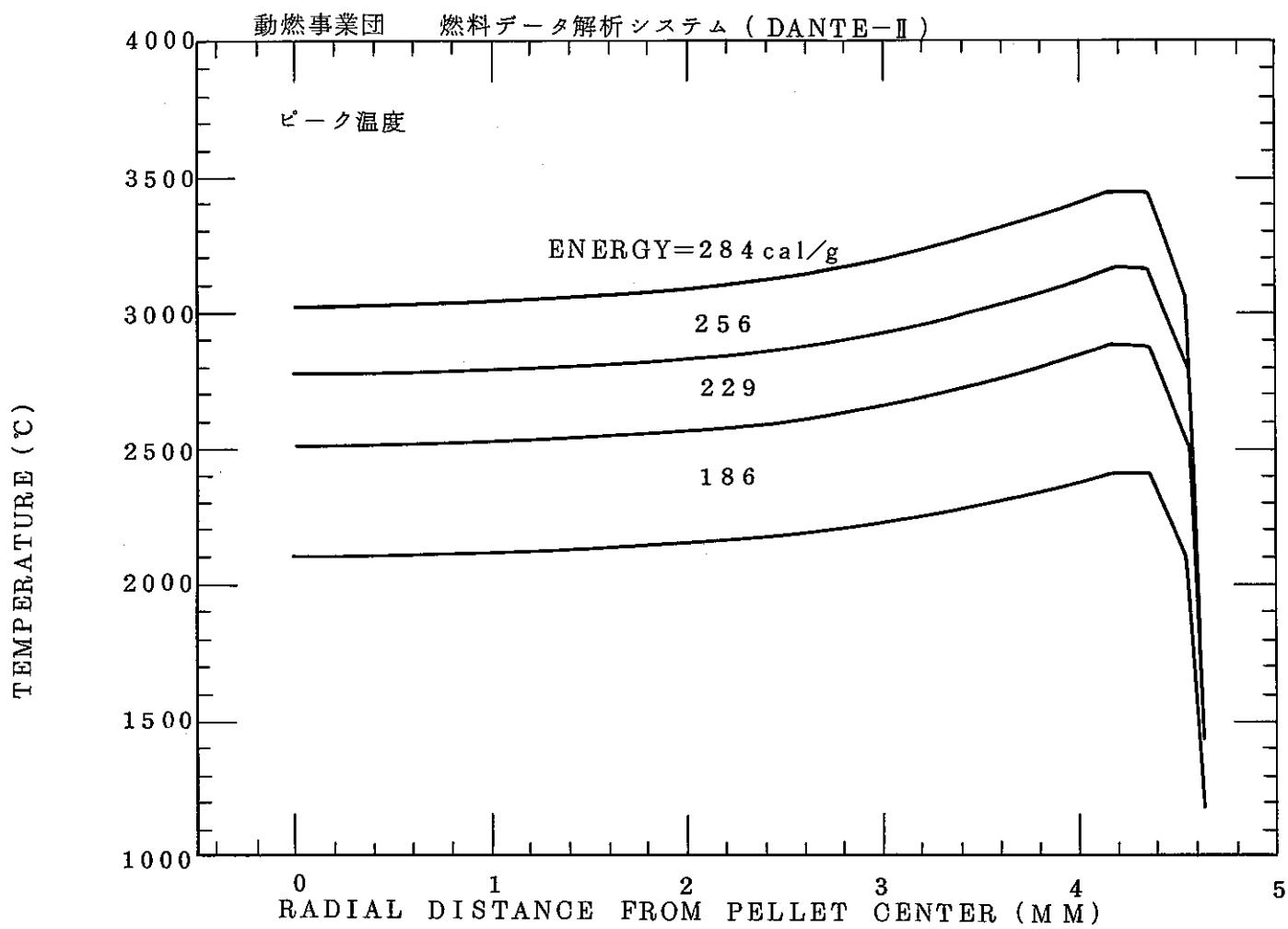


図 3.8 FEAPUS-IIIコードによるペレット径方向温度分布 (パラメータ : ENERGY)

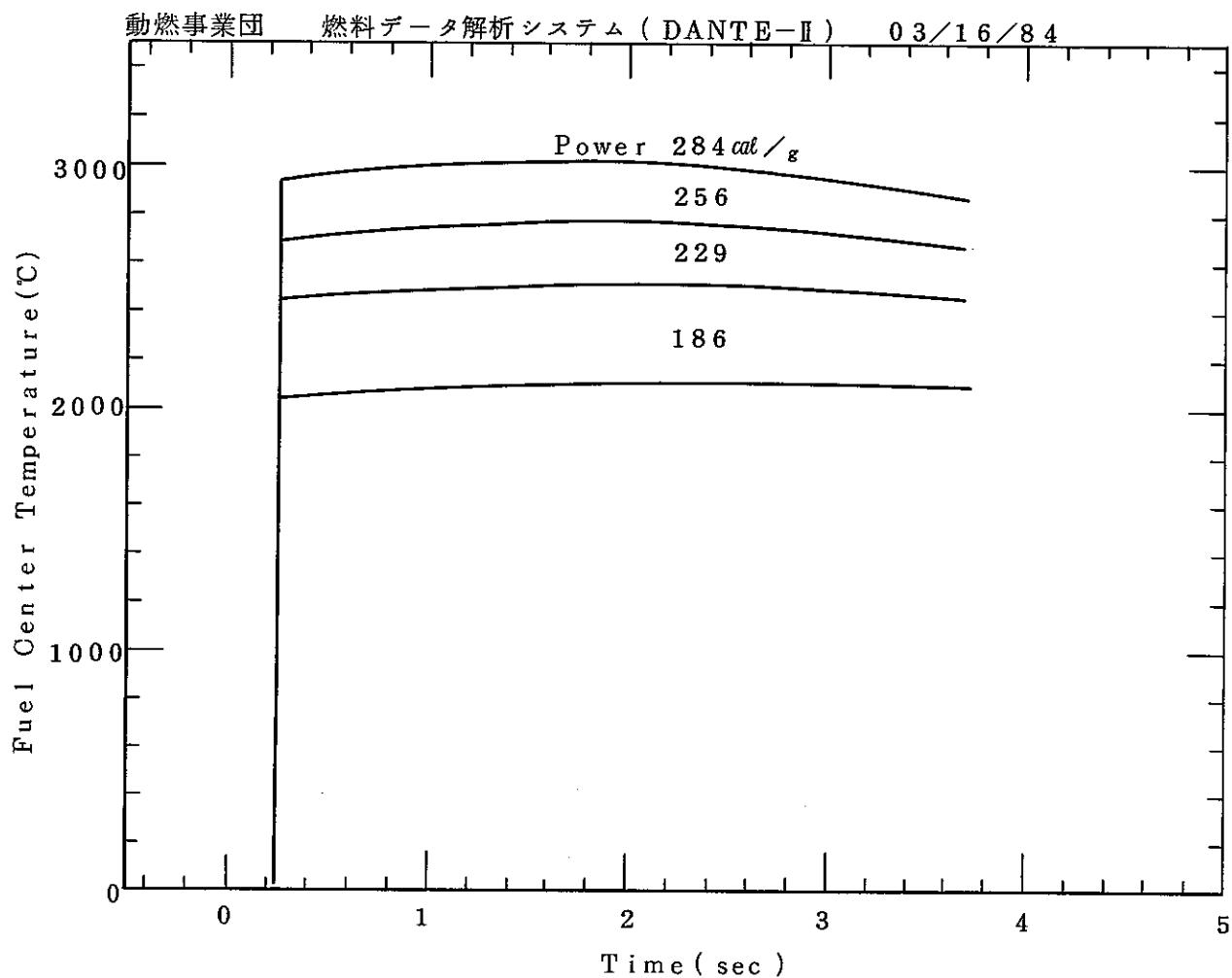


図 3 9 FEA PUS-III ペレット中心部の温度履歴(出力パラメータ)

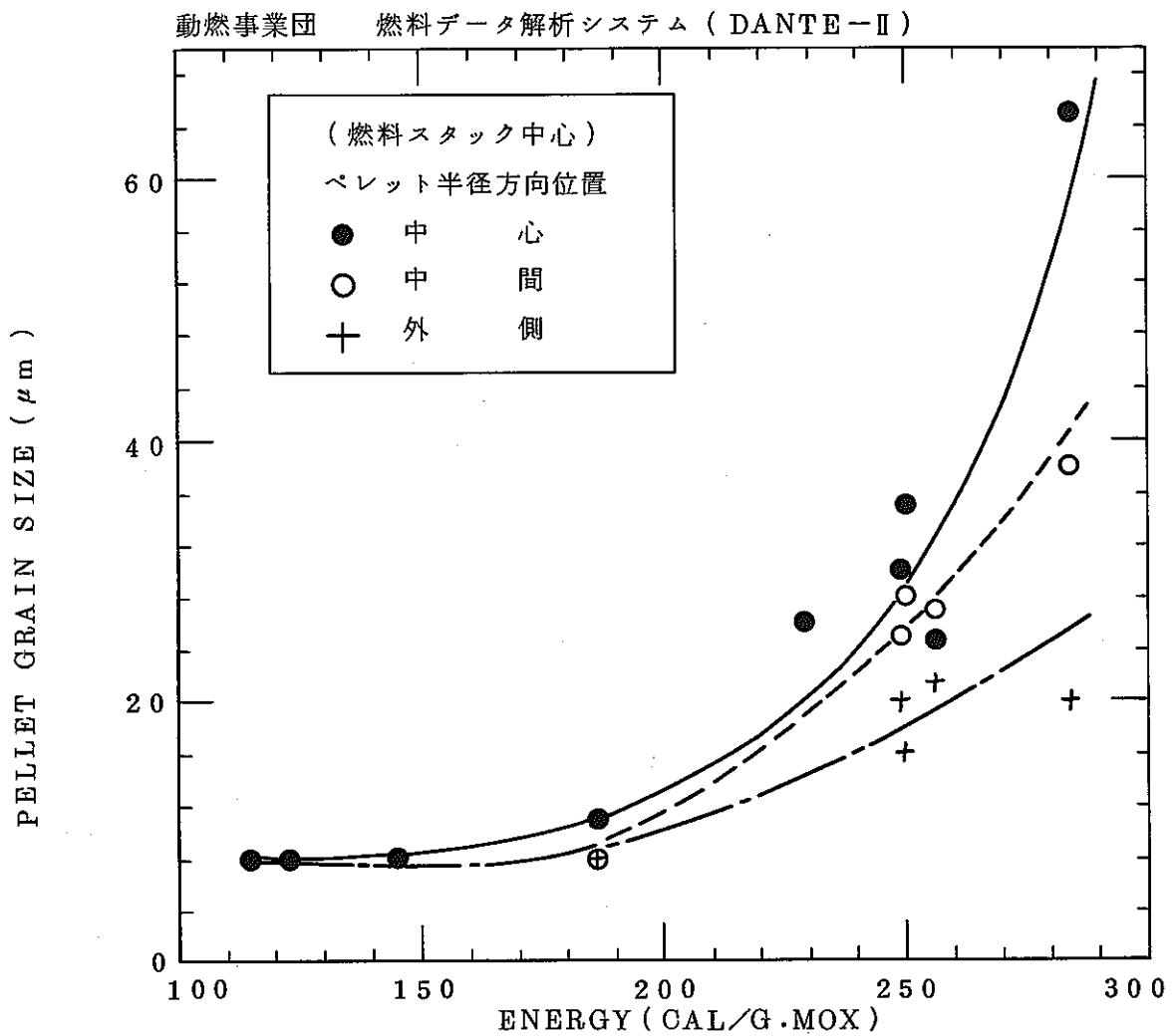


図40 ペレット結晶粒径の発熱量依存性 (パラメータ : ペレット半径方向位置)

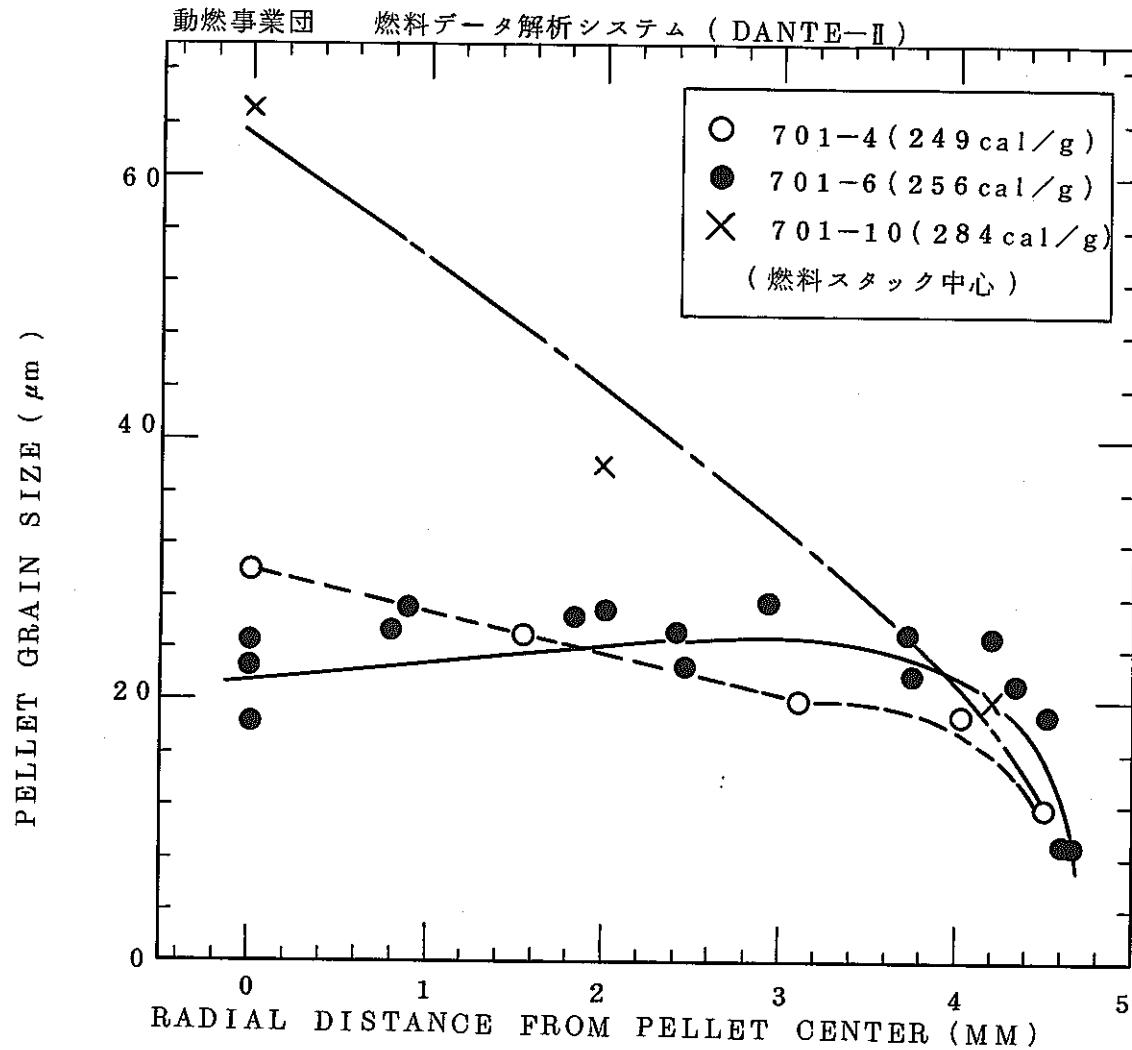


図 4.1 照射済ペレット径方向の結晶粒径分布 (パラメータ : 発熱量)

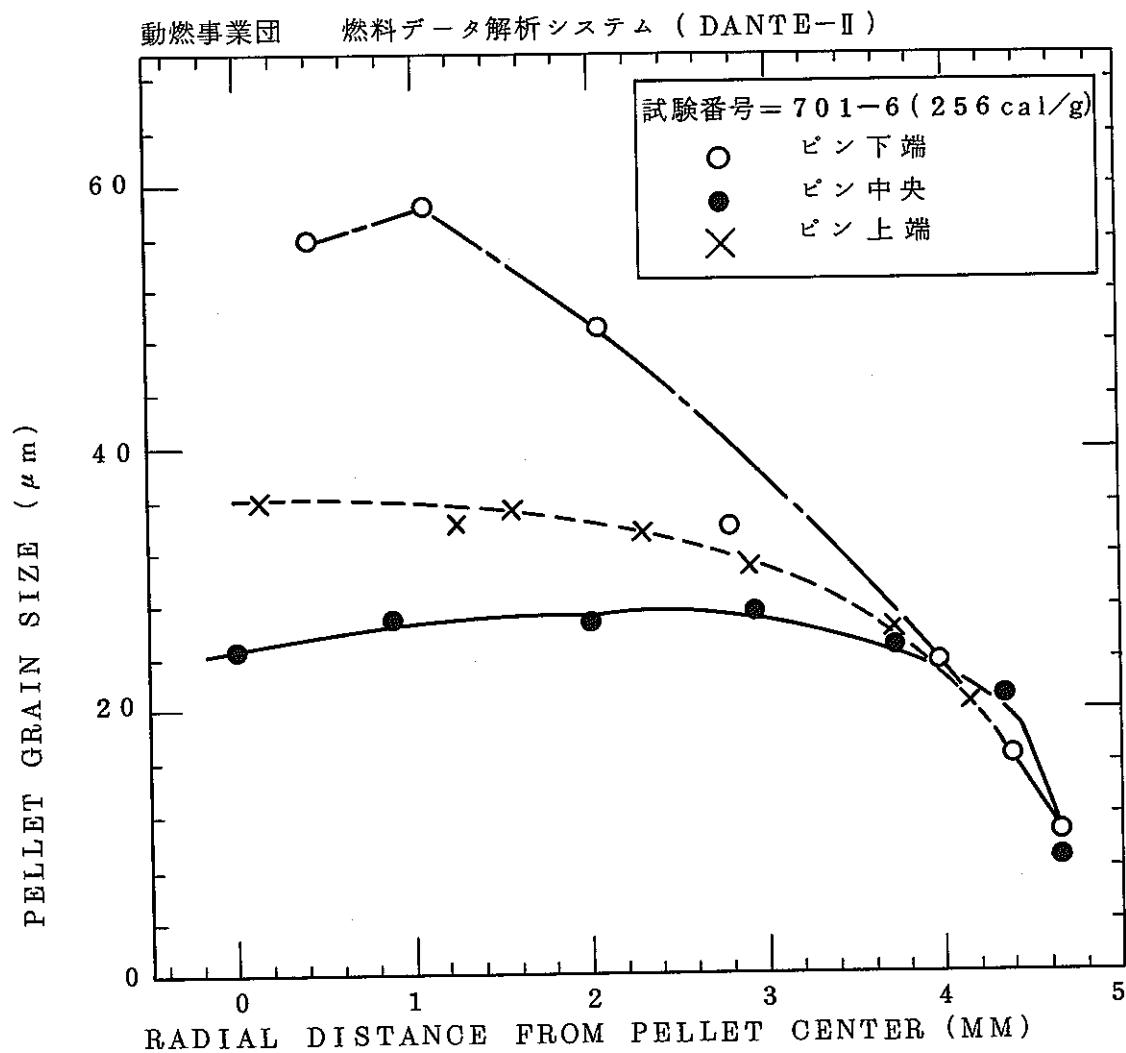


図42 照射済ペレット径方向の結晶粒径分布(パラメータ: 軸方向位置)

-73-

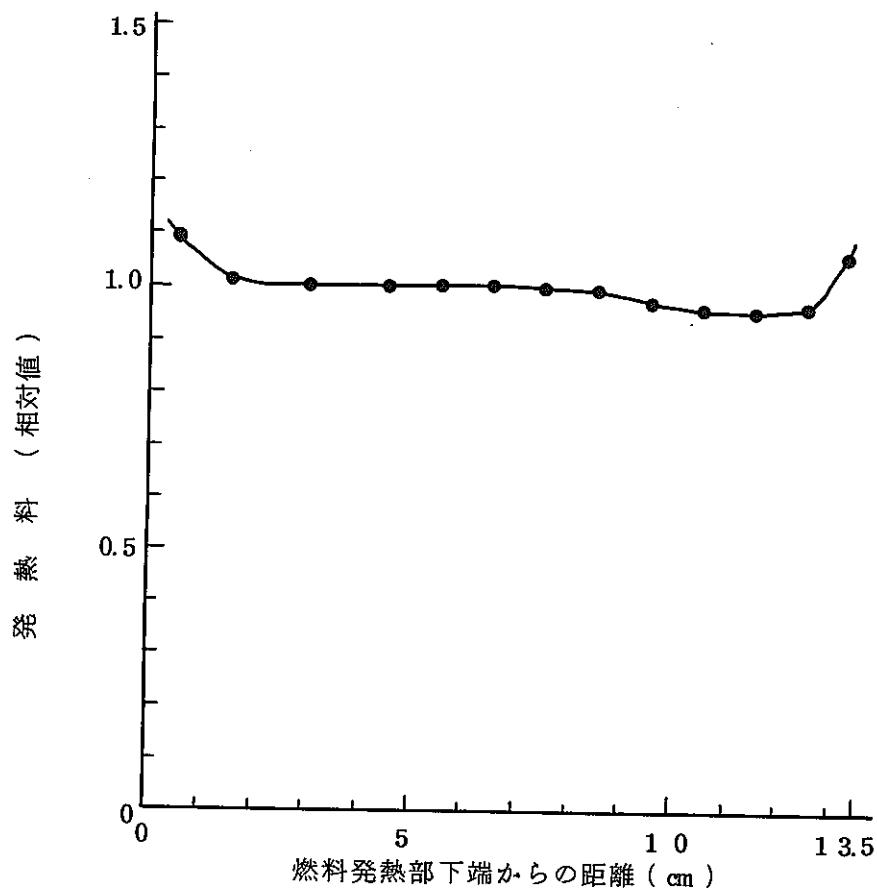


図 4.3 燃料の発熱量軸方向分布 (濃縮度 5%, Test M220-1)

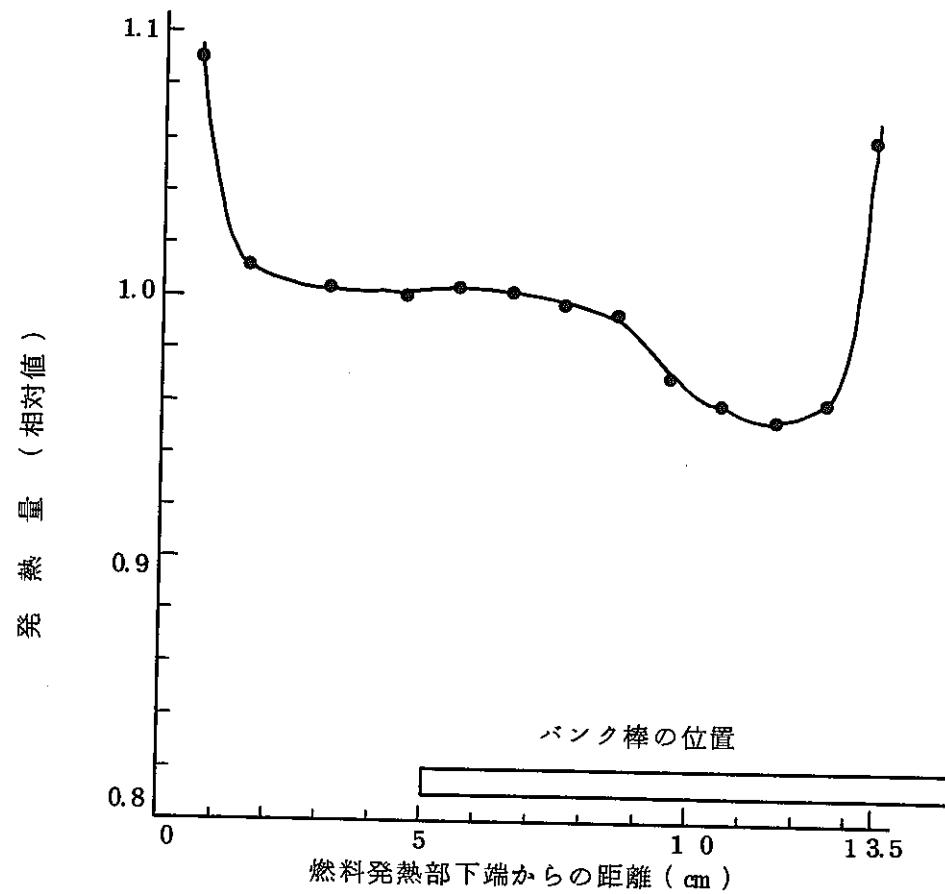


図 4.4 燃料の発熱量軸方向分布 (濃縮度 5%, Test M220-1)

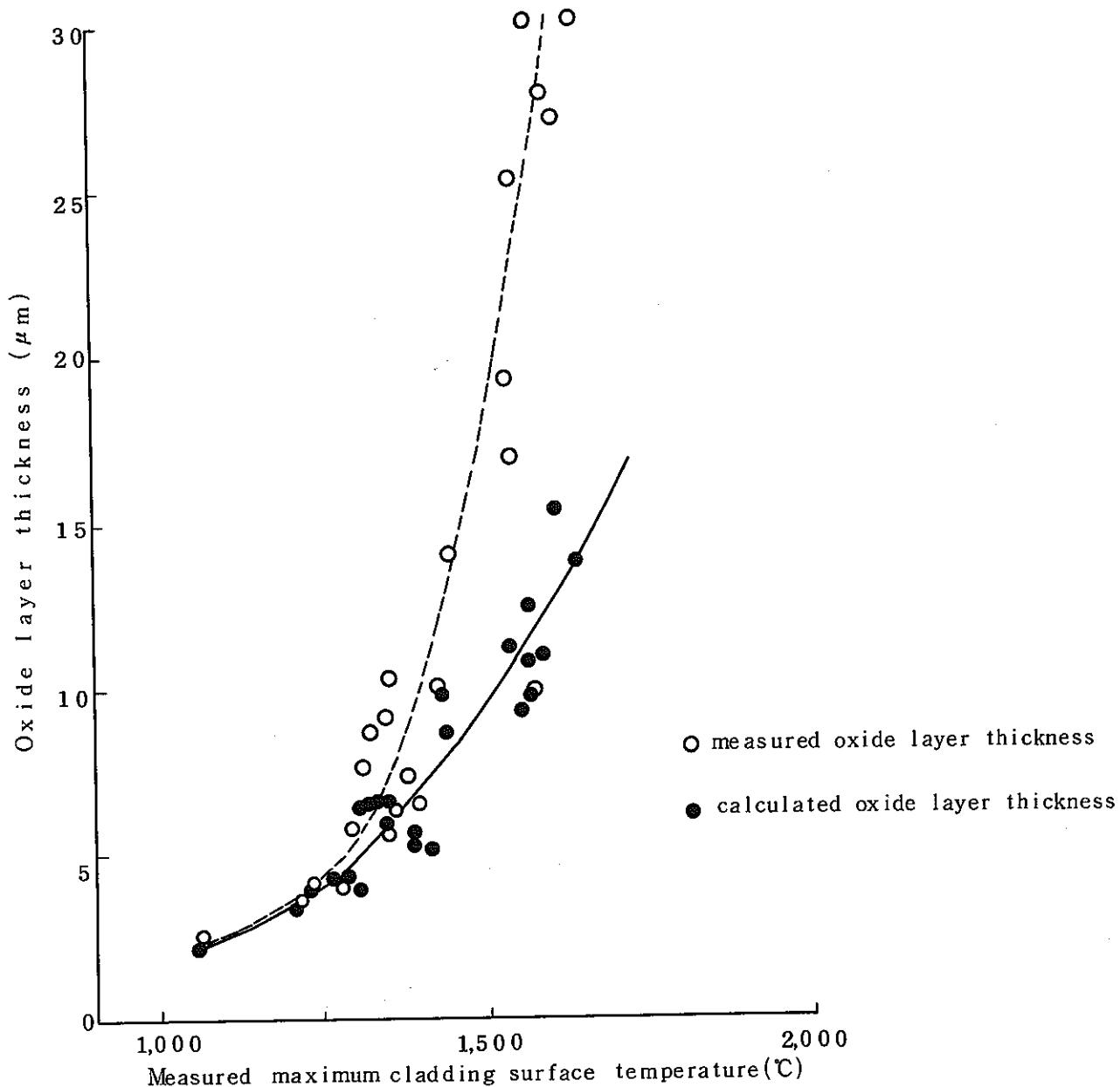


図45 Relation between maximum cladding surface
temperature and oxide layer thickness

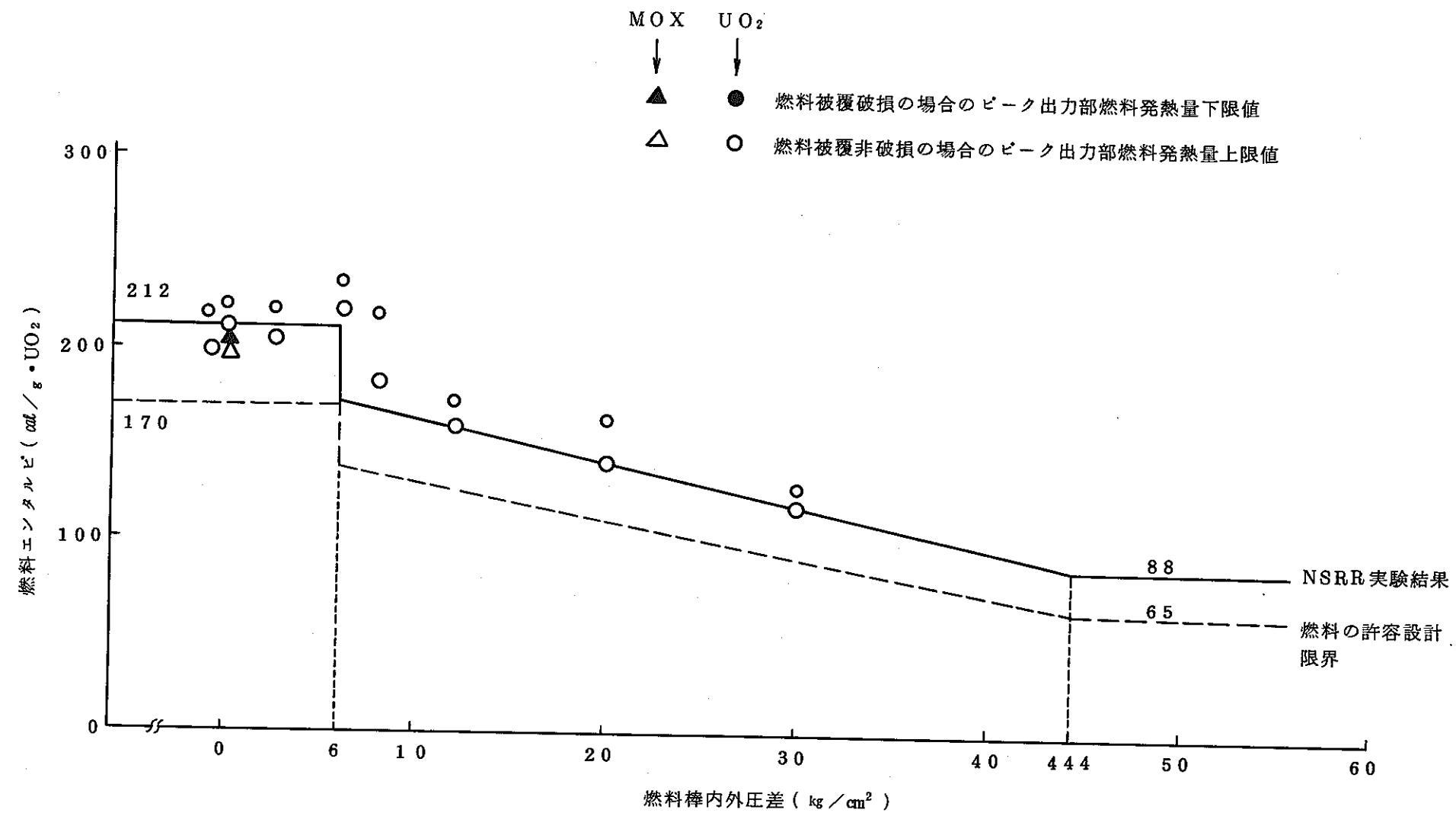


図4.6 燃料棒内外圧差に対する燃料被覆被損限界

PNC SN841-84-23

附録 1. 照射履歴データ集

T E S T D A T A

TEST NO. 701-1 (担当 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 塩沢周策)

目的

I-N-Dカプセルにおけるプルトニウム-ウラン混合酸化物燃料の発熱量較正を行う。

実験条件

プルトニウム-ウラン混合酸化物燃料 (6.33W/O PuO₂ - 93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu Fissile 74.36%)

発 熱 量 : ~ 150 cal/g.UC₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高

# 1	~ 220°C	パルス照射後, ほとんど直ちに上昇し, その後徐々に減少か ほとんど一定
# 2	~ 150°C	
# 3	~ 150°C	

(初期温度 ~ 30°C)

○カプセル水温 ~ 95°C (パルス照射後 3.7 sec)

(温度上昇 ~ 70°C)

照射後燃料検査記録

PNC SN841-84-23

Fig 398

EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

ADR-10 Cladding Surface Temperature #1

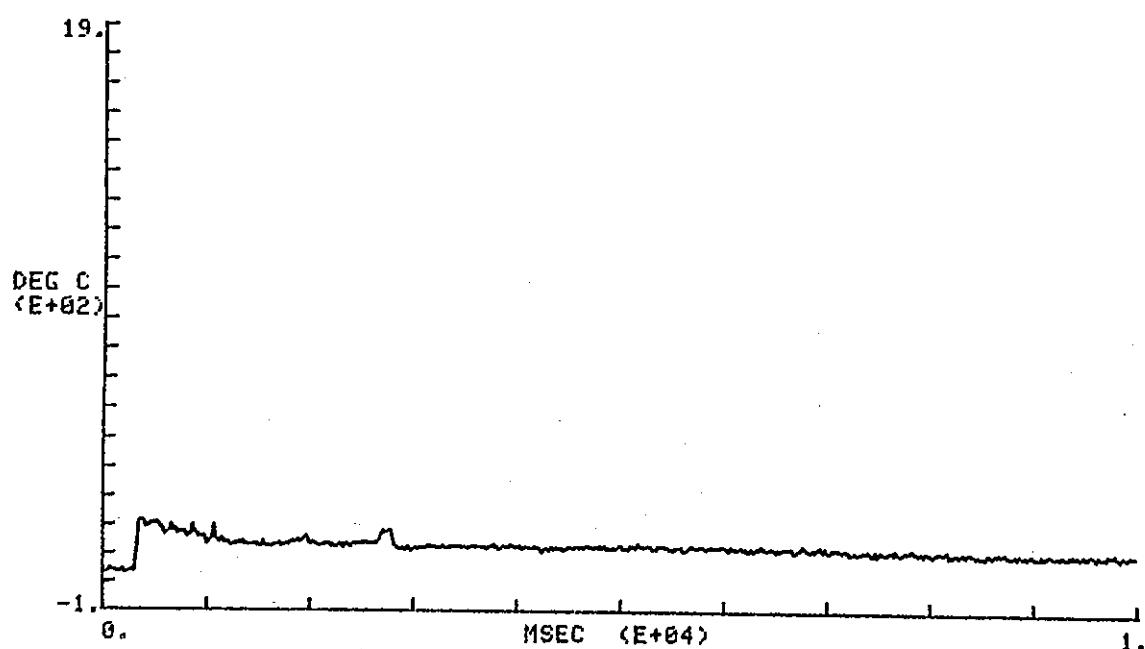
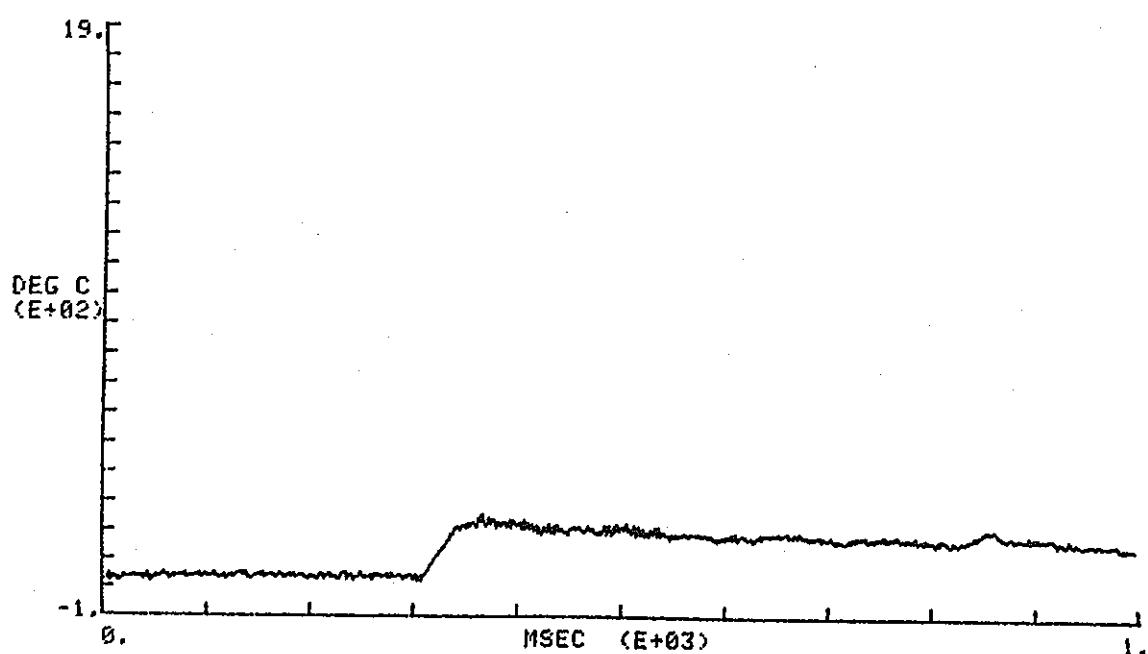


Fig 397

EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

ADR-10 Cladding Surface Temperature #1



PNC SN841-84-23

EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

ADR-11 Cladding Surface Temperature #2

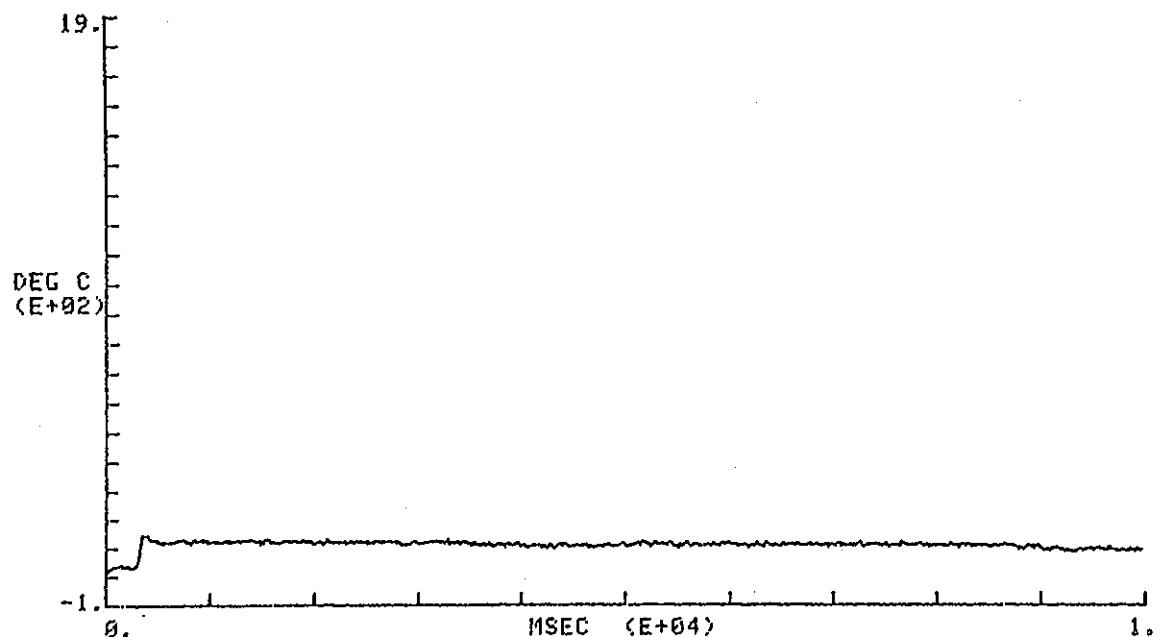
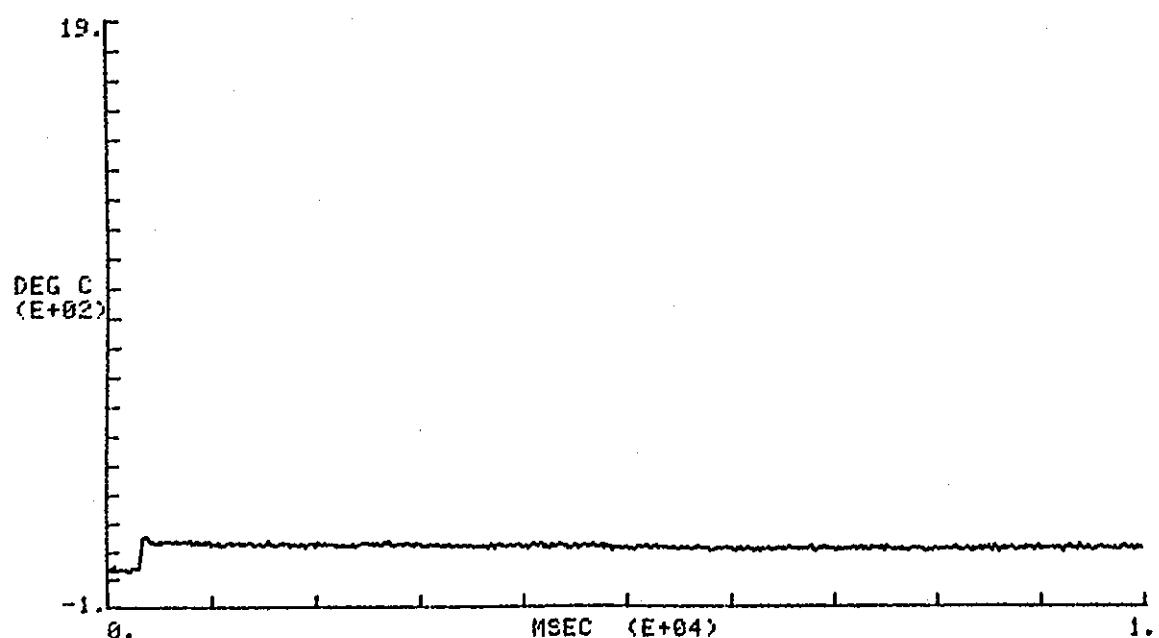


Fig 402

EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

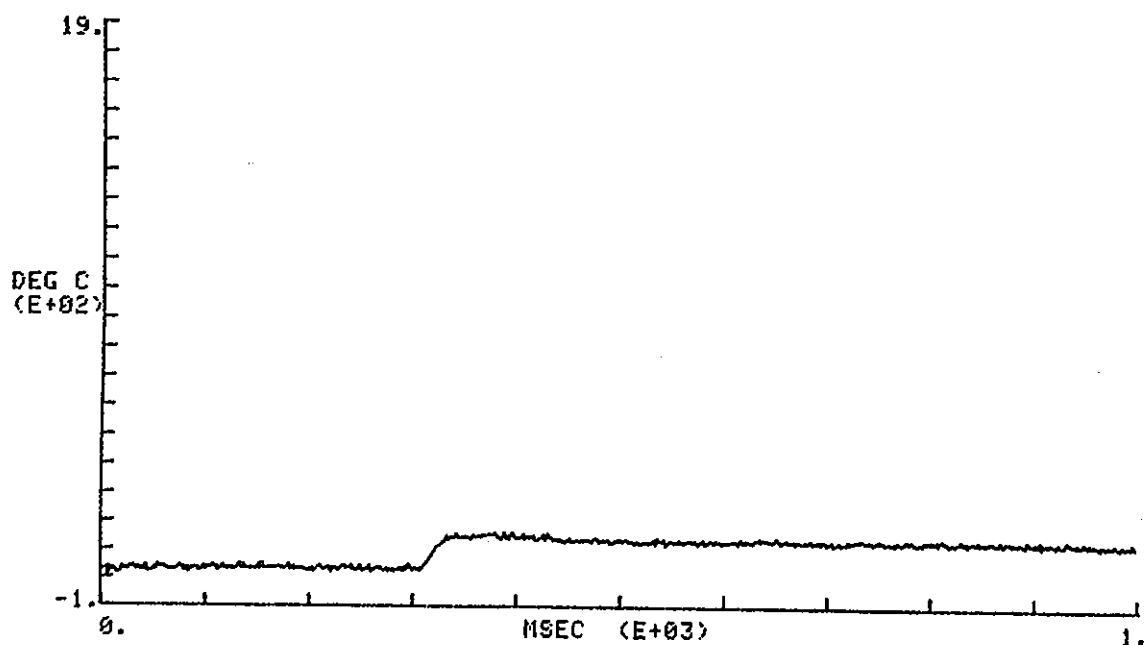
ADR-12 Cladding Surface Temperature #3



PNC SN841-84-23

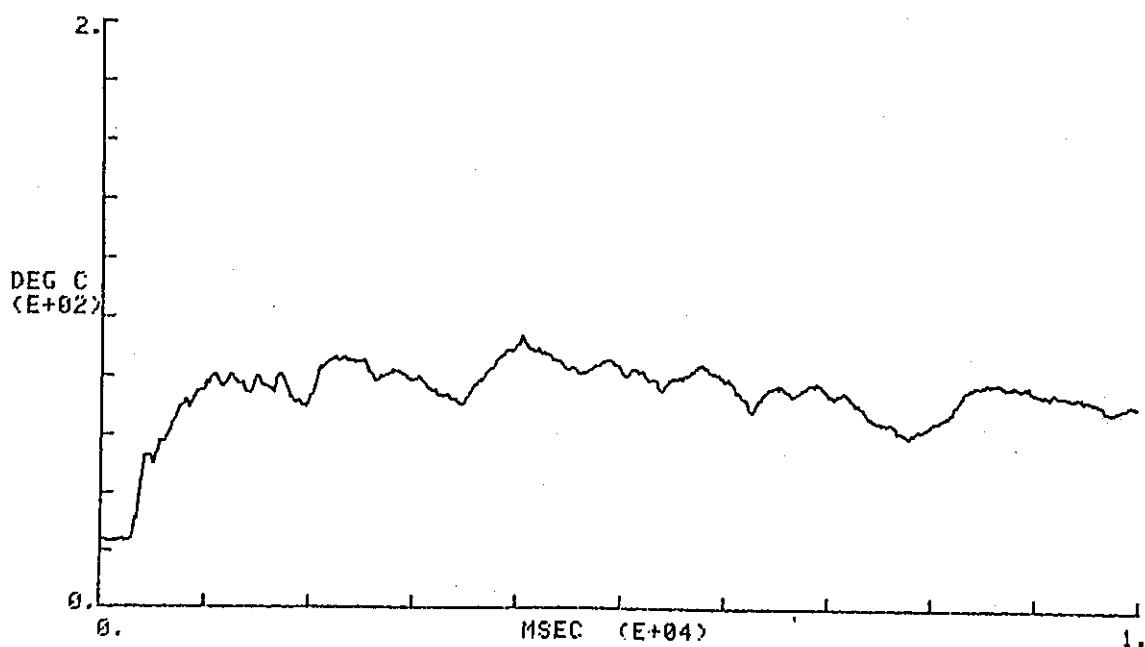
Fig 401
EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

ADR-12 Cladding Surface Temperature #3



EX.NO = 1166 ; 701-1 2.35\$

ADR-09 Capsule Water Temperature



TEST DATA

TEST NO. 701-2 (担当 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 塩沢周策)

目的

プルトニウムーウラン混合酸化物燃料の温度挙動を調べると共に発熱量の較正を行う。

実験条件

プルトニウムーウラン混合物燃料 (6.33W/O PuO₂ - 93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu富化度 74.36%)

発 熱 量: ~ 220 cal/g.UO₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高 (時刻*) 膜沸騰経続時間

#1 ~1180°C (1.0 sec) ~4.0 sec

#2 ~1170°C (1.0 sec) ~6.6 sec

#3 ~1150°C (1.2 sec) ~5.3 sec

○カプセル水温 ~80°C (7.4 sec)

(温度上昇~55°C)

被覆管温度上昇と共に直ちに~20°C上昇し、その後緩かに上昇

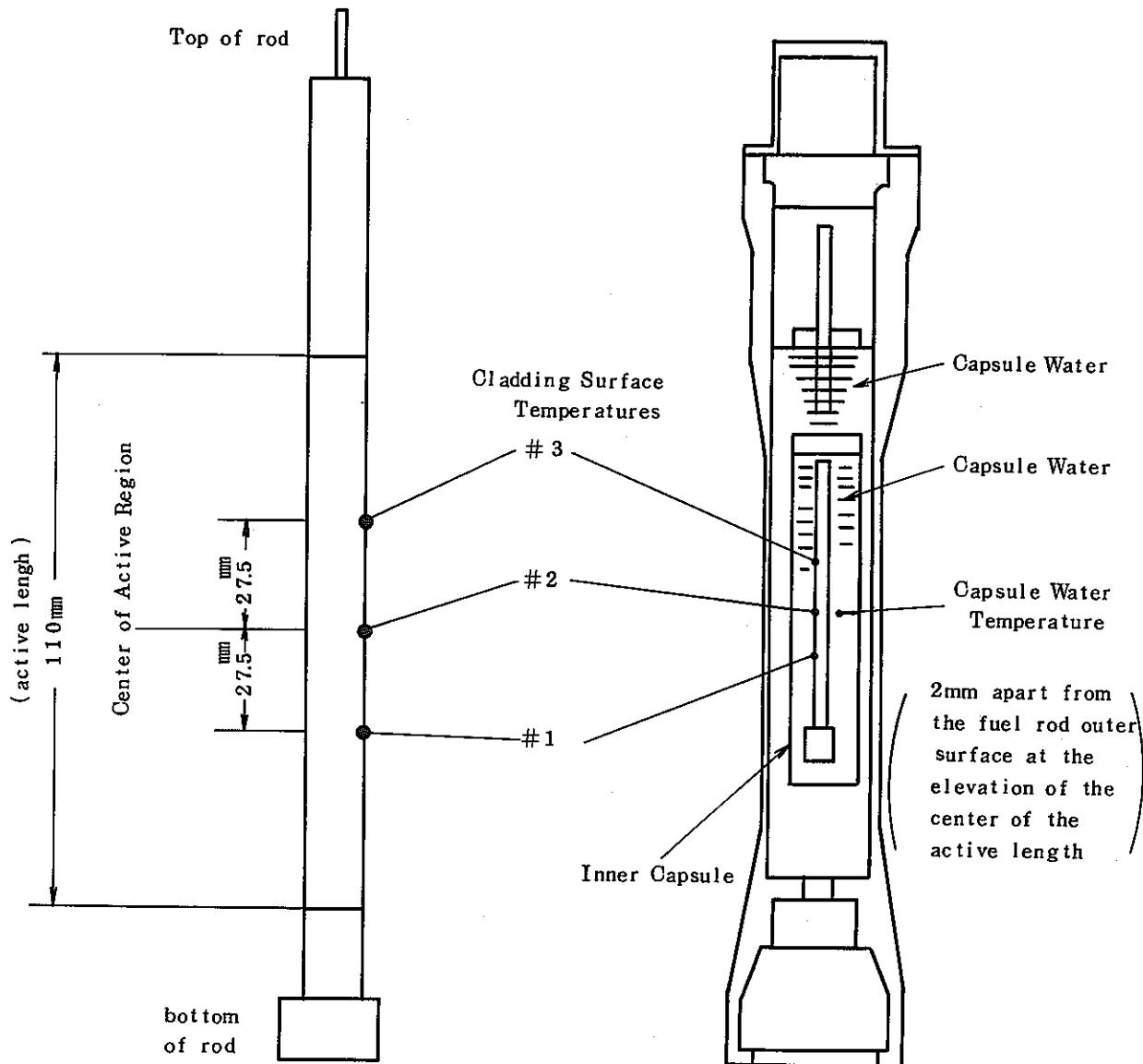
照射後燃料検査記録

* パルス出力発生後

Fuel スタック部は黒変。

MEASURING INSTRUMENTS

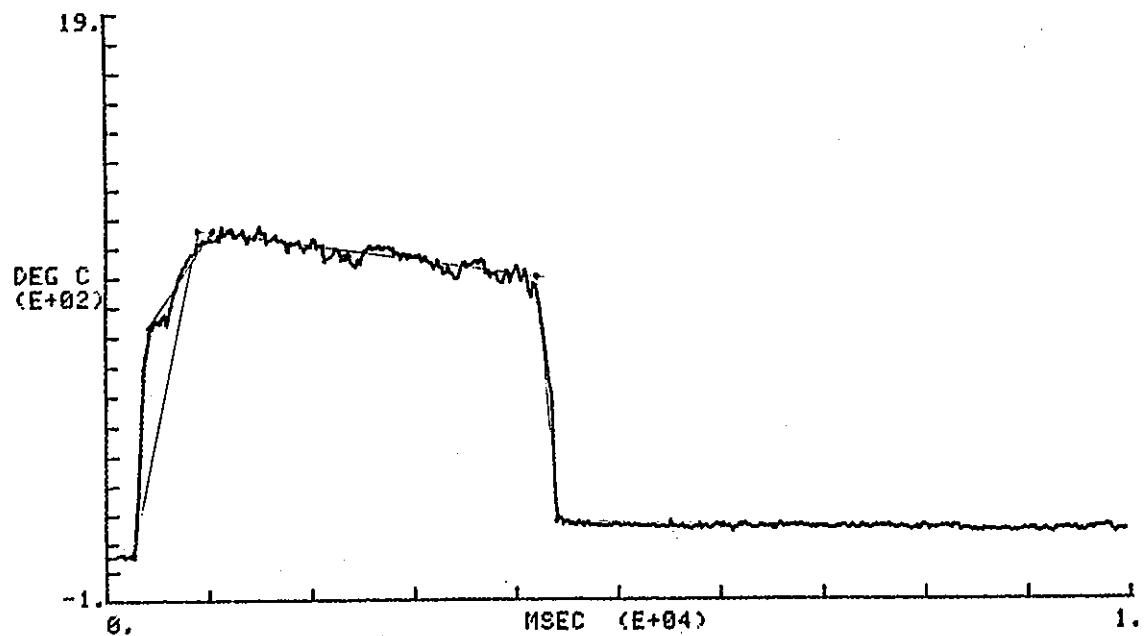
701-2



PNC SN841-84-23

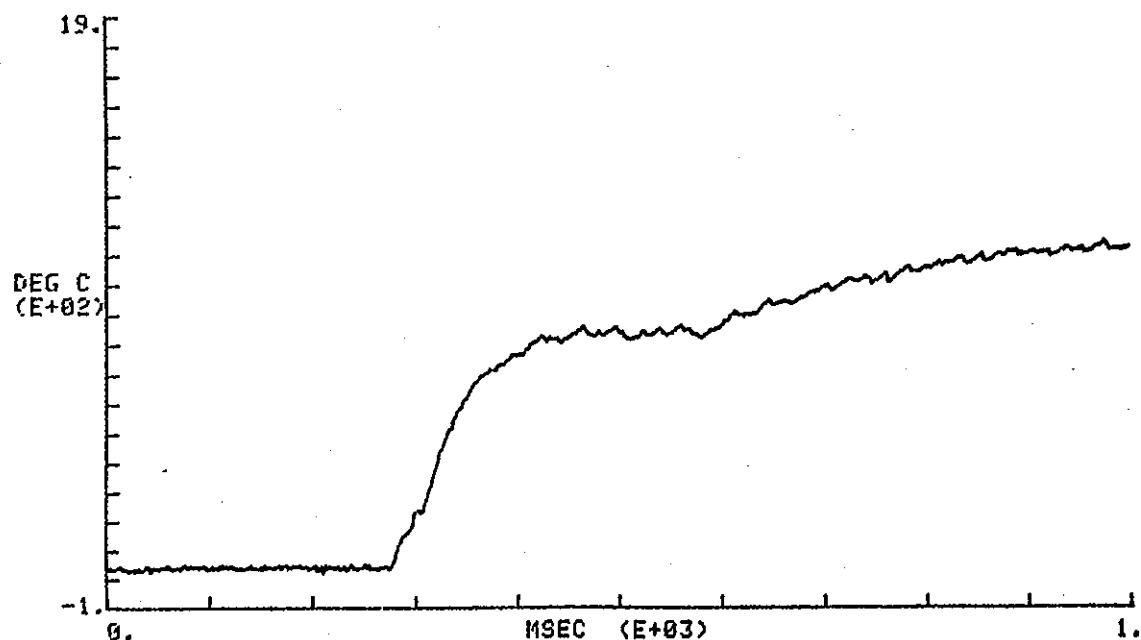
EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28*

ADR-10 Cladding Surface Temperature #1



EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28*

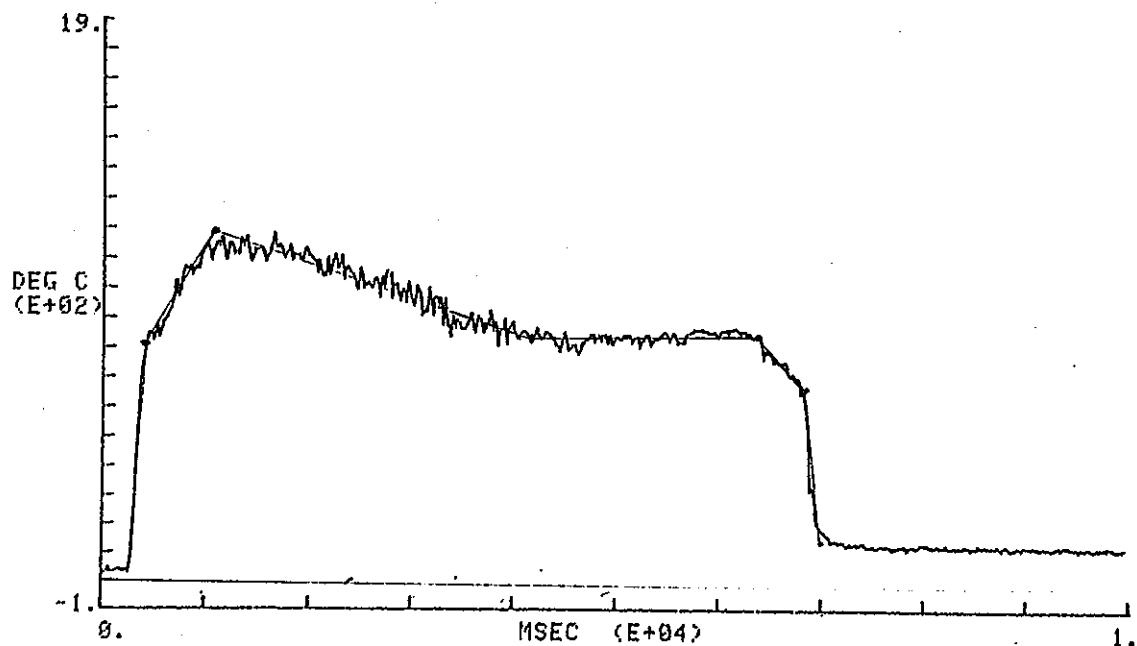
ADR-10 Cladding Surface Temperature #1



PNC SN841-84-23

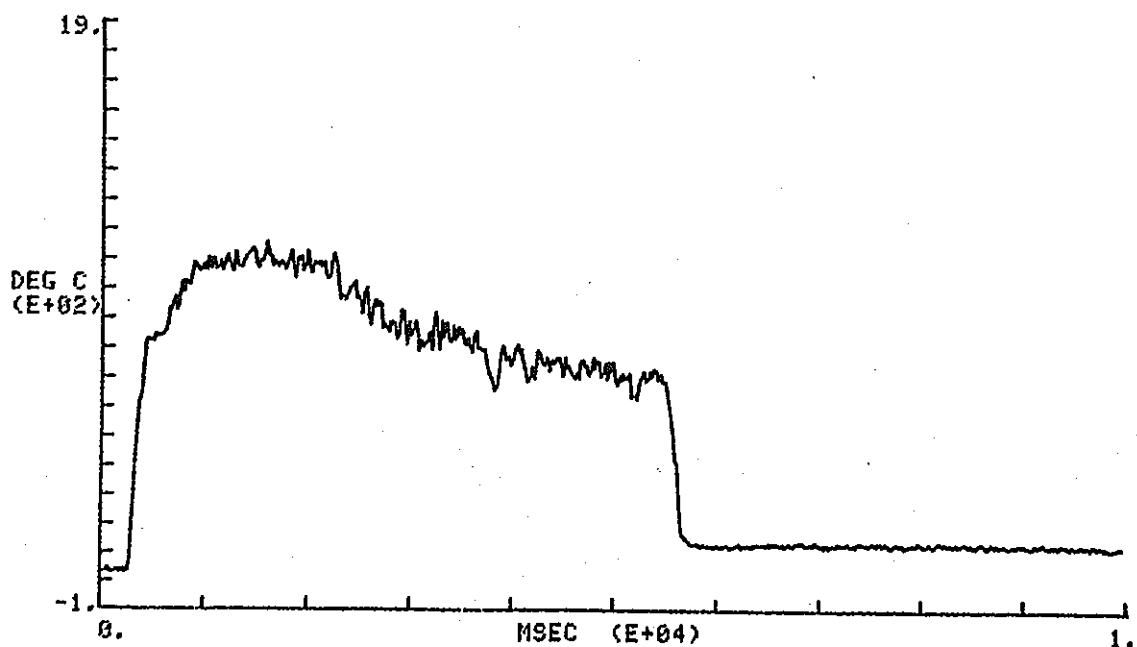
EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28\$

ADR-11 Cladding Surface Temperature #2



EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28\$

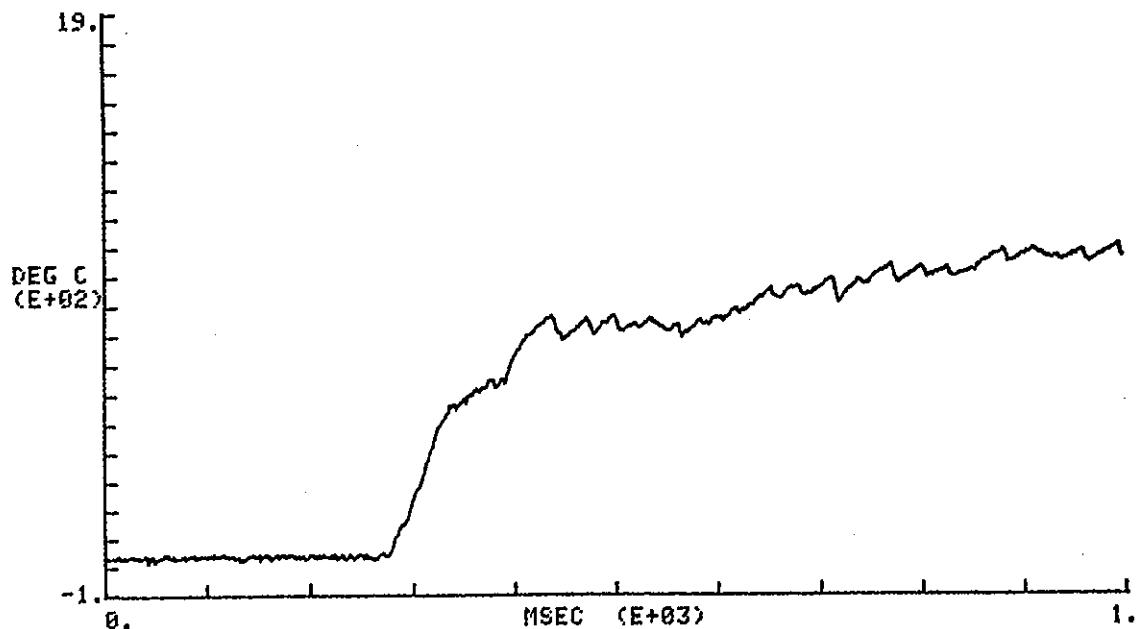
ADR-12 Cladding Surface Temperature #3



PNC SN841-84-23

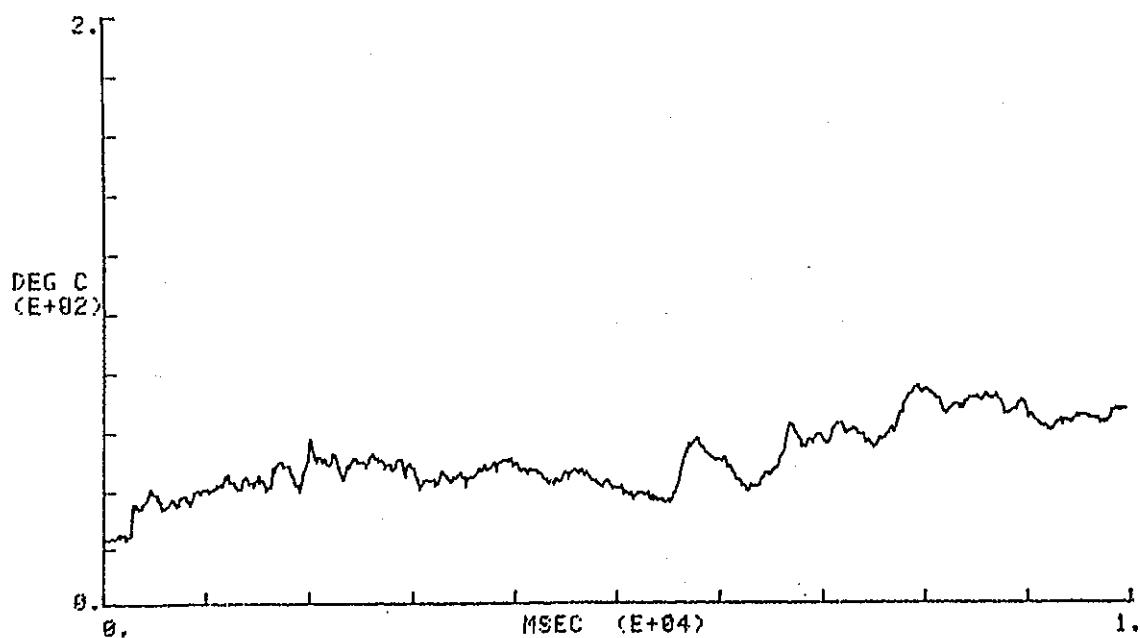
EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28\$

ADR-12 Cladding Surface Temperature #3



EX.NO = 1190 ; 701-2 3.28\$

ADR-09 Capsule Water Temperature



T E S T D A T A

TEST NO. 701-3 (担当 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 塩沢周策)

目的

プルトニウムーウラン混合酸化物燃料の破損しきい値, 破損挙動の把握

実験条件

プルトニウムーウラン混合物燃料 (6.33W/O PuO₂-93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu Fissile 74.36%)

発熱量: 270 cal/g.UO₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高

#1 ~ °C

#2 ~ °C

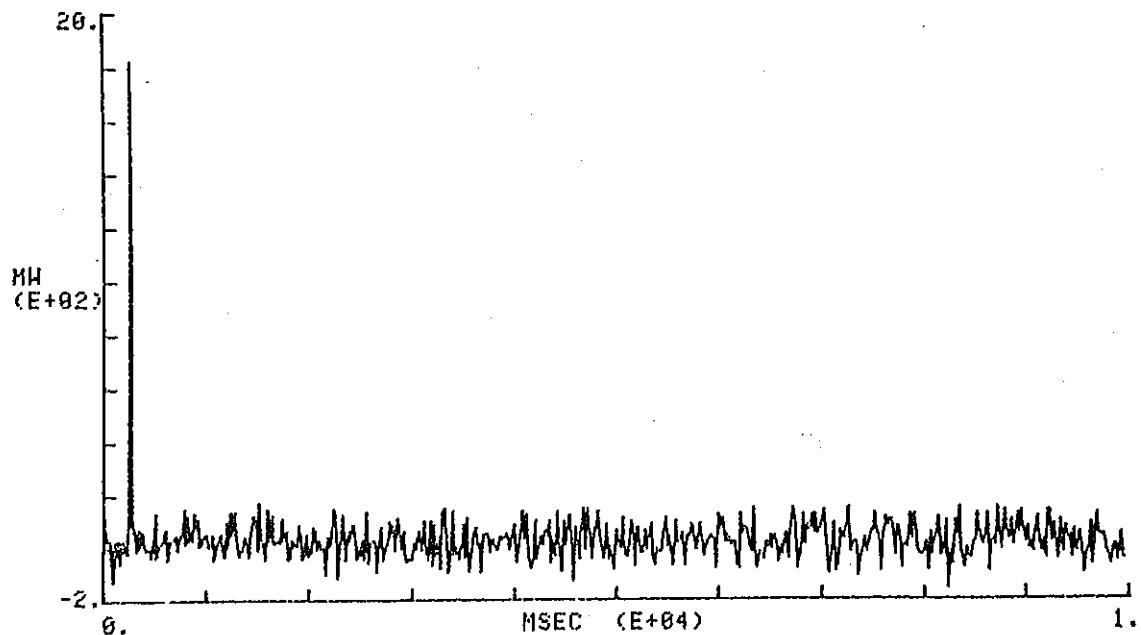
#3 ~ 1400°C

照射後燃料検査記録

PNC SN841-84-23

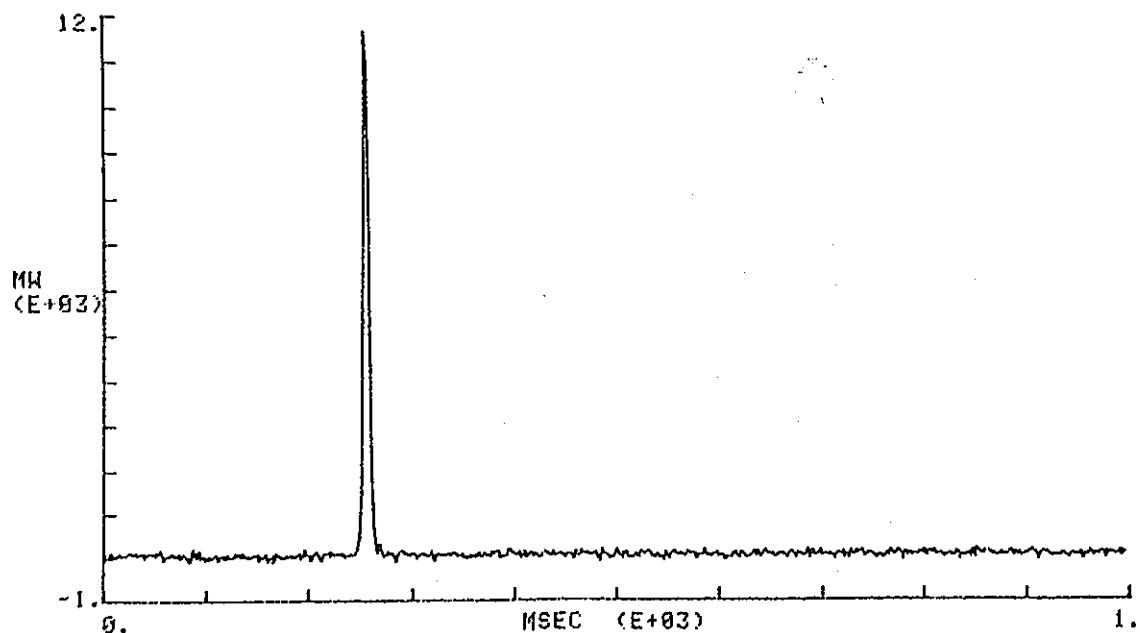
EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ NV #1

ADR-19



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ NV #1

ADR-19

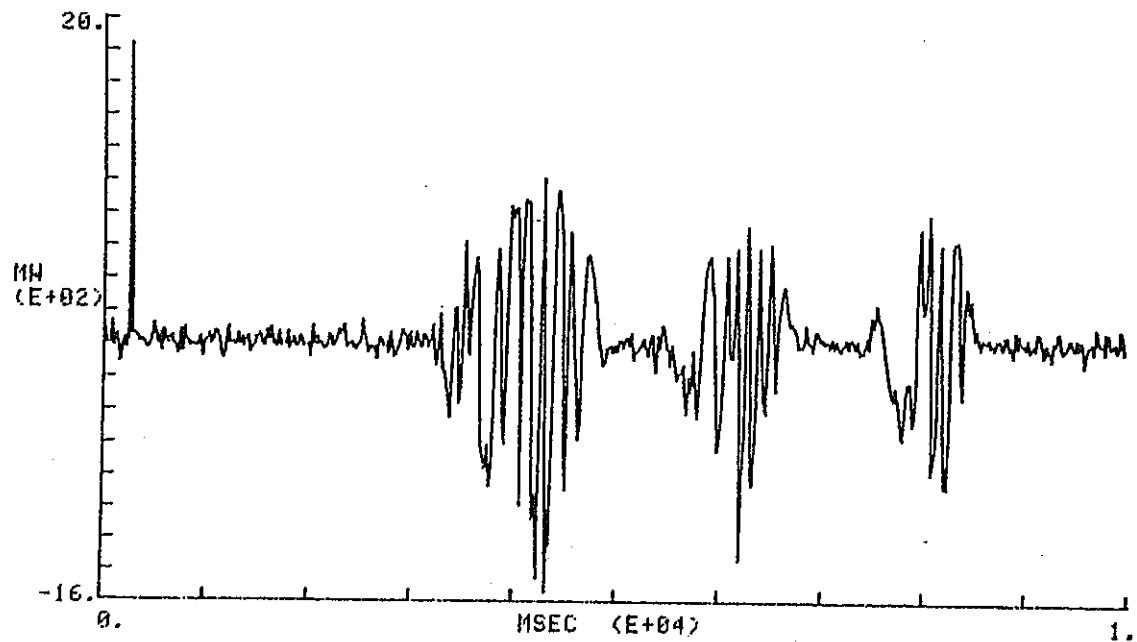


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$

NV #2

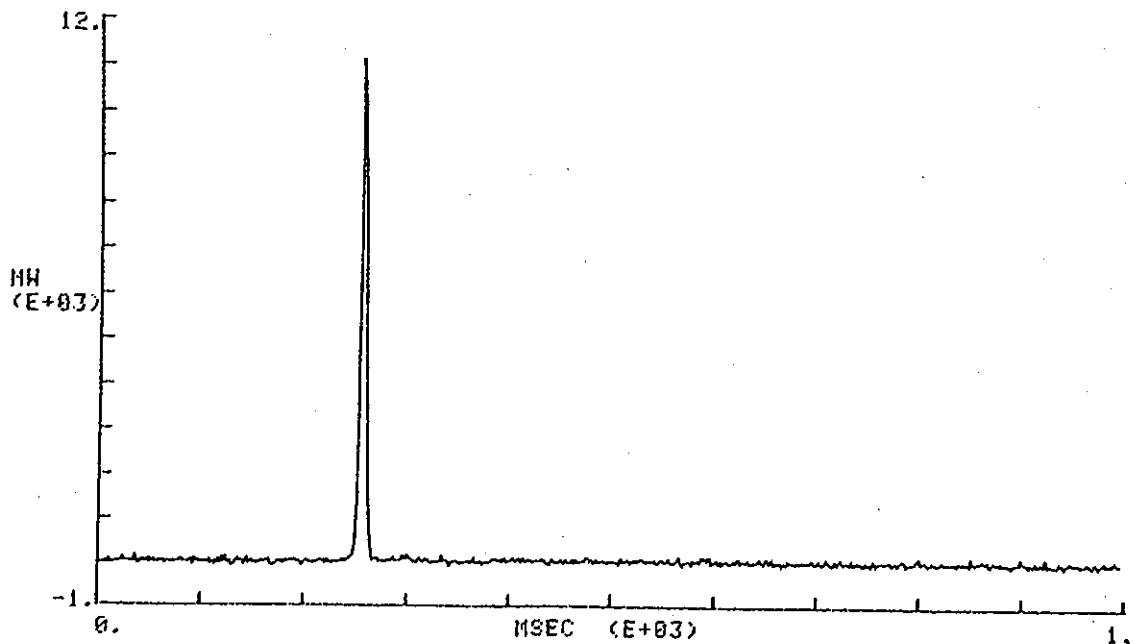
ADR-20



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$

NV #2

ADR-20

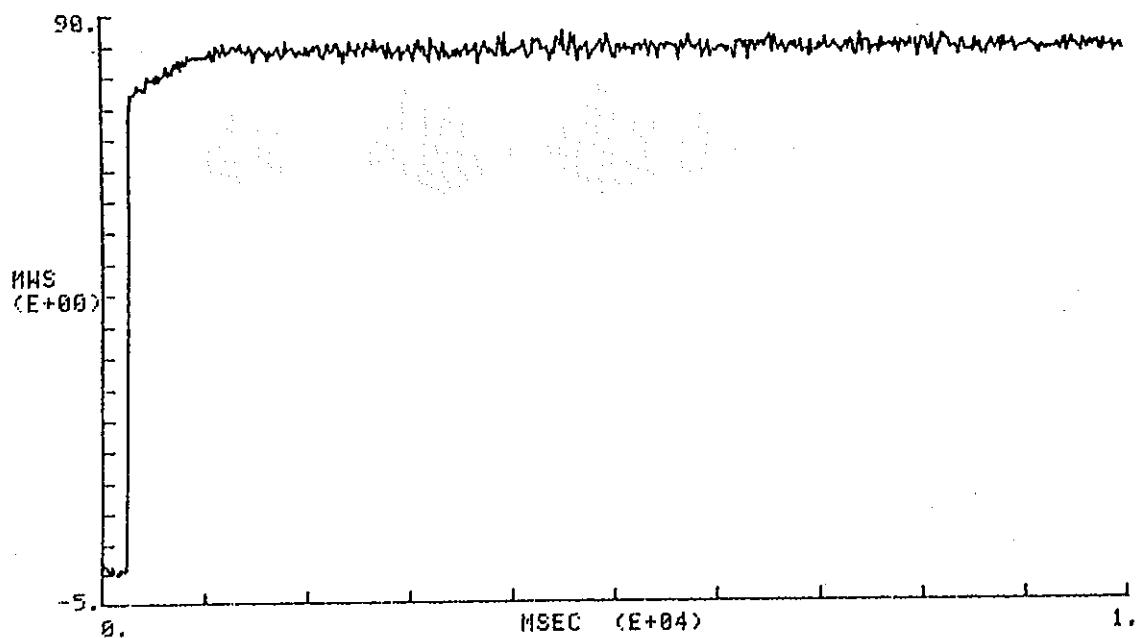


PNC SN8 41-84-23

EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$

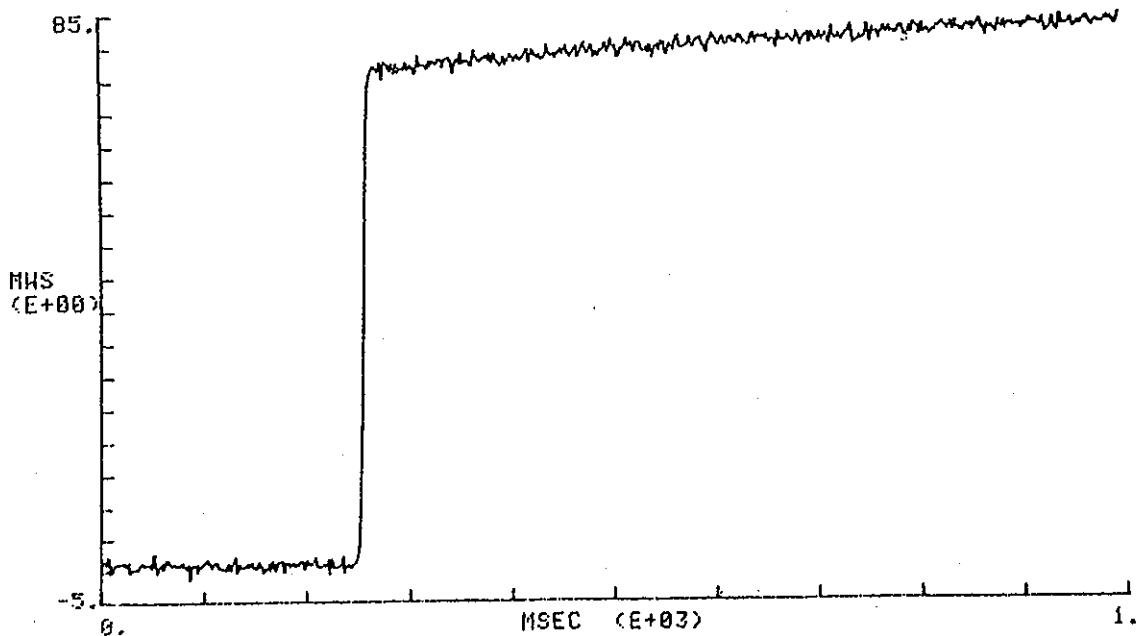
NVT #1

ADR-21



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$. NVT #1

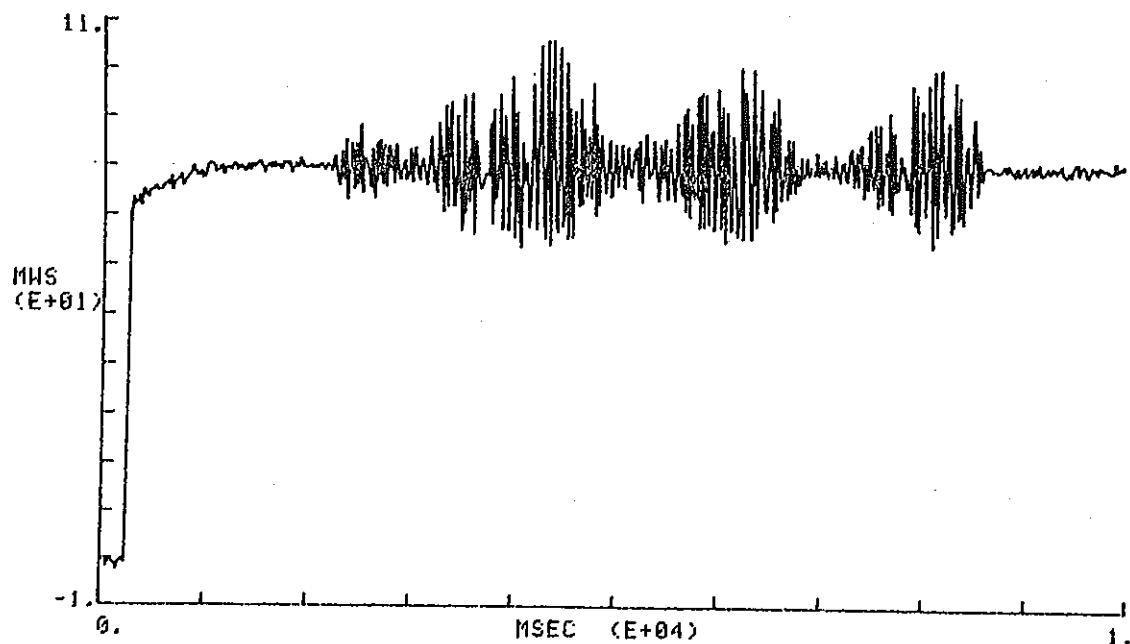
ADR-21



PNC SN841-84-23

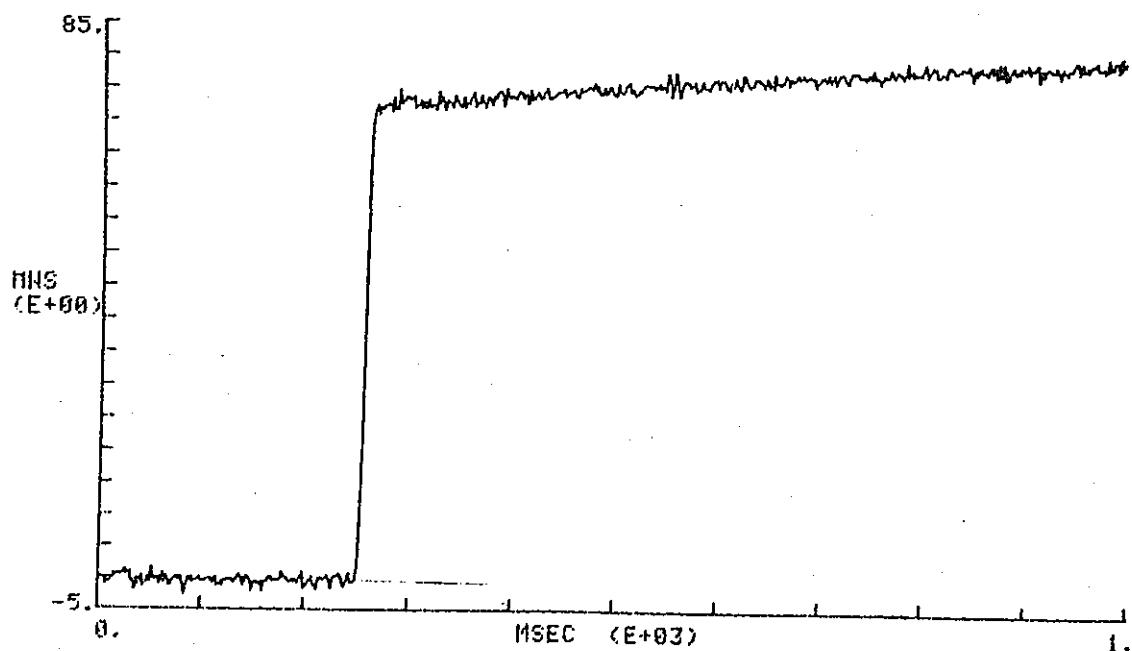
EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ NVT #2

ADR-22



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ NVT #2

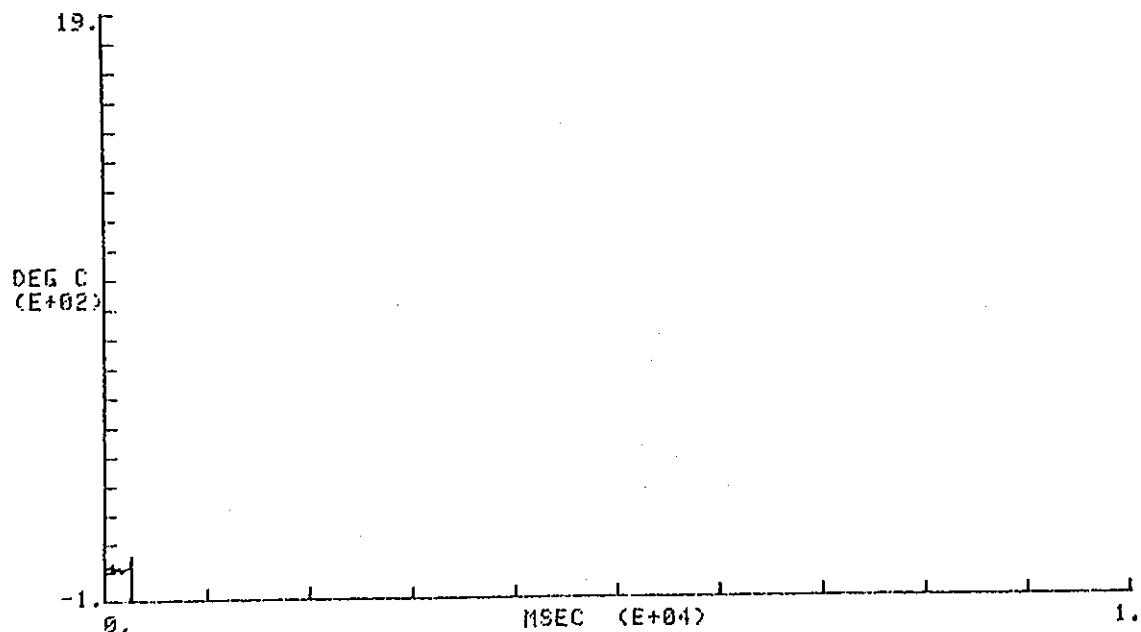
ADR-22



PNC SN841-84-23

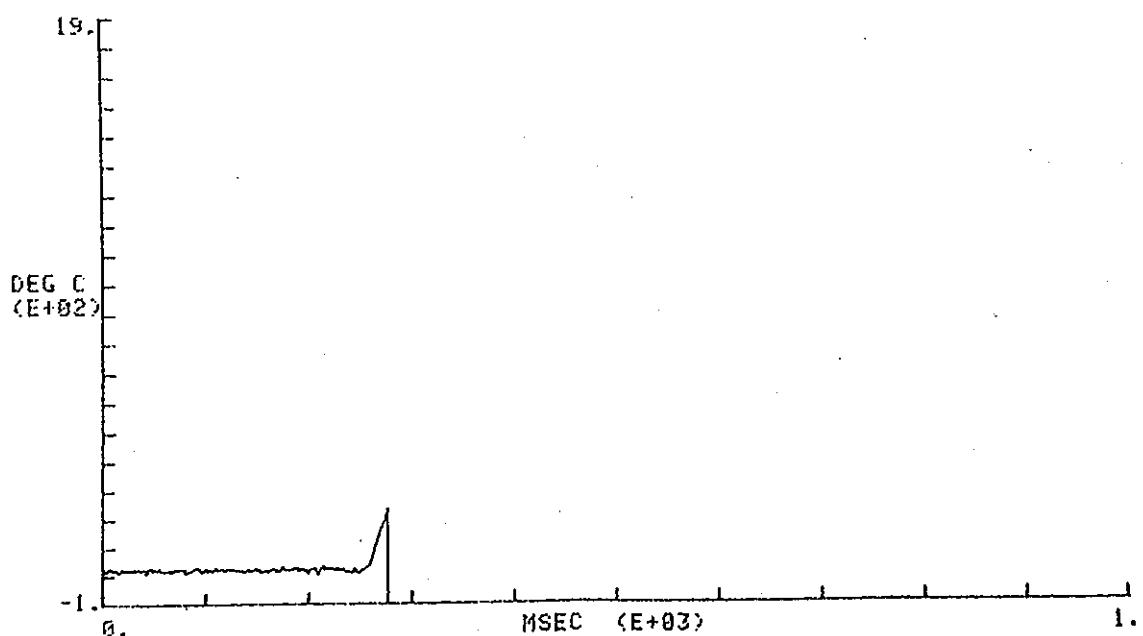
EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ CLAD TEMP #2

ADR-11



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ CLAD TEMP #2

ADR-11

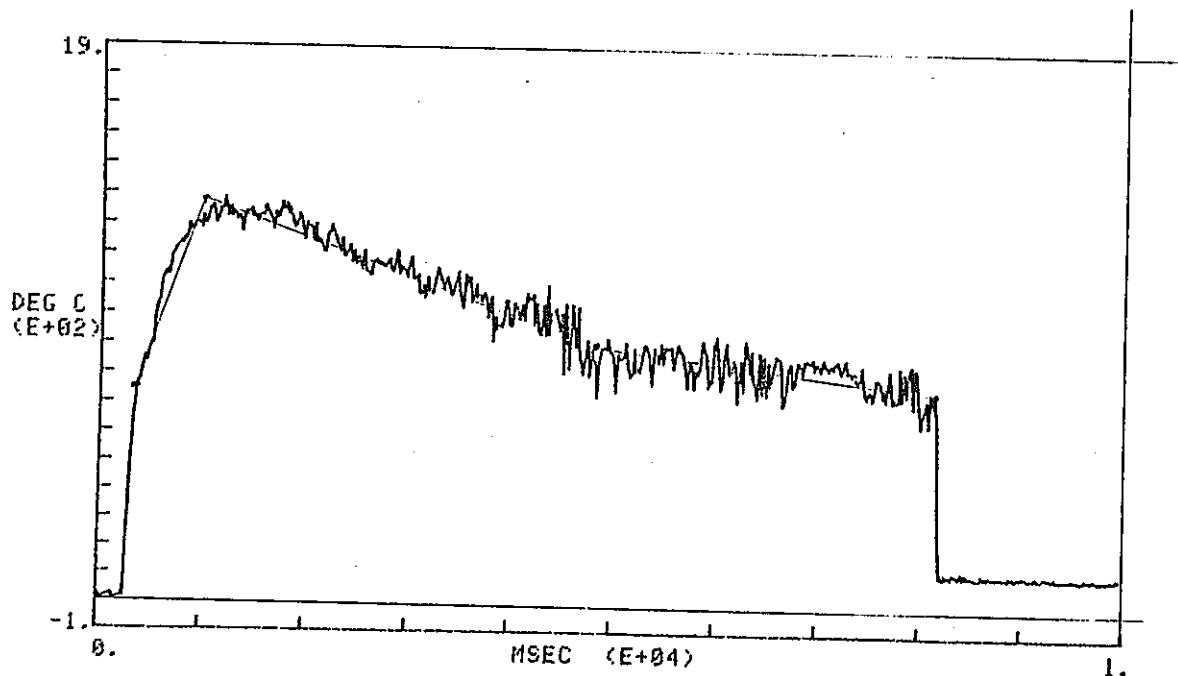


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$

CLAD TEMP #4

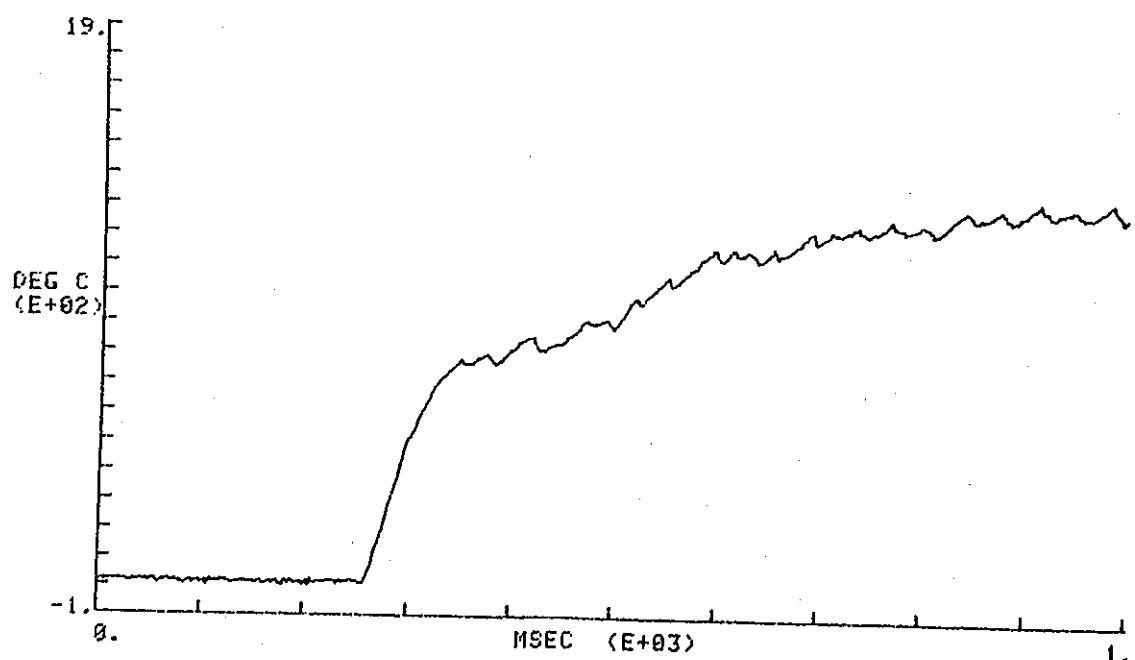
ADR-12



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$

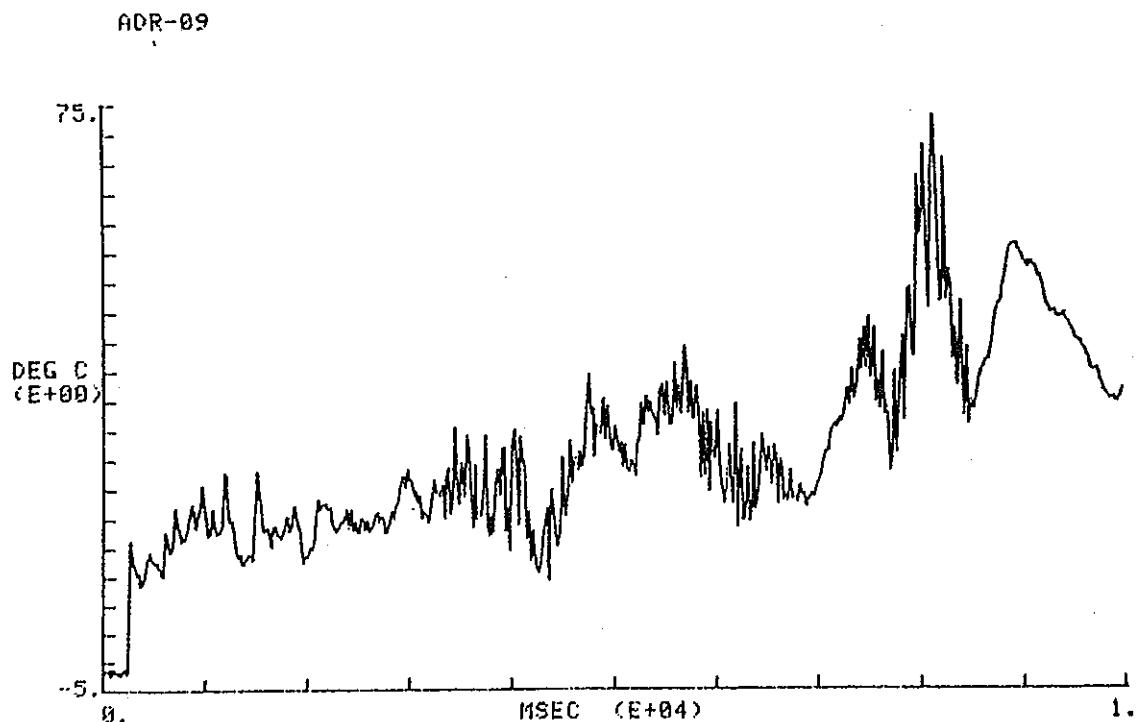
CLAD TEMP #4

ADR-12

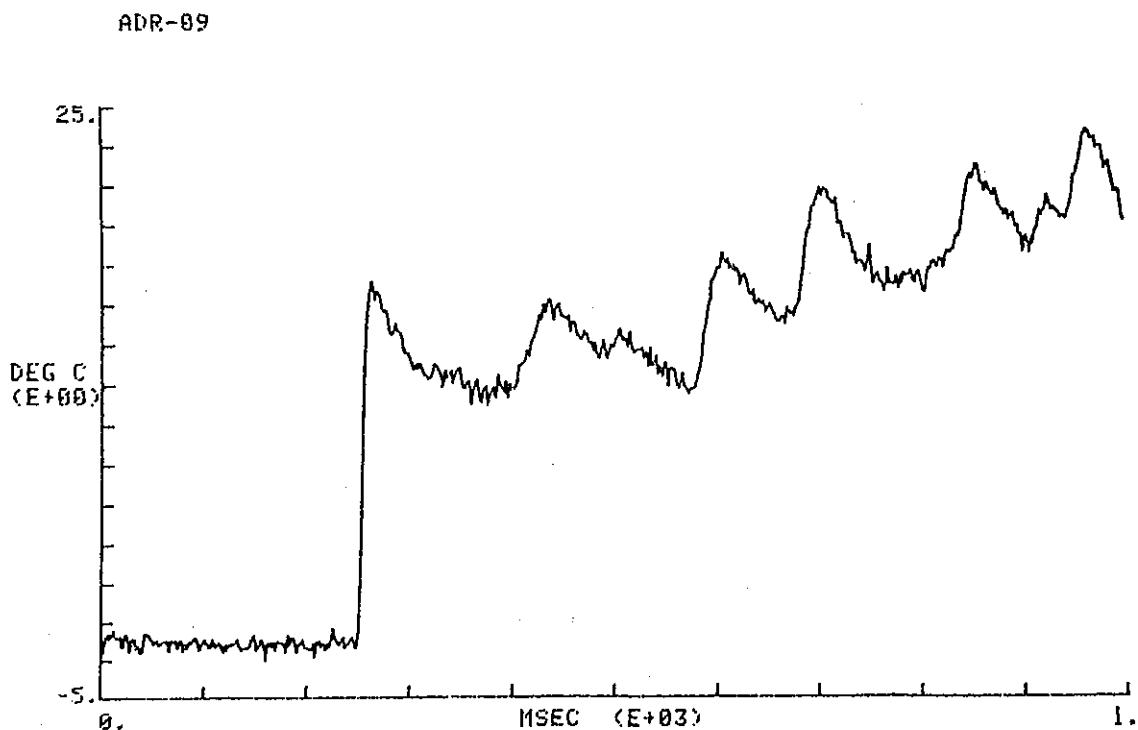


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ WATER TEMP



EX.NO = 1201 ; 701-3 3.7\$ WATER TEMP



TEST DATA

TEST NO. 701-4 (担当 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 塩沢周策)

目的

プルトニウム-ウラン混合酸化物燃料の破損しきい値, 破損挙動の把握

実験条件

プルトニウム-ウラン混合物燃料 (6.33W/O PuO₂-93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu Fissile 74.36%)

発熱量: 280 cal/g.UO₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高

#1 ~1620°C

#2 ~ °C

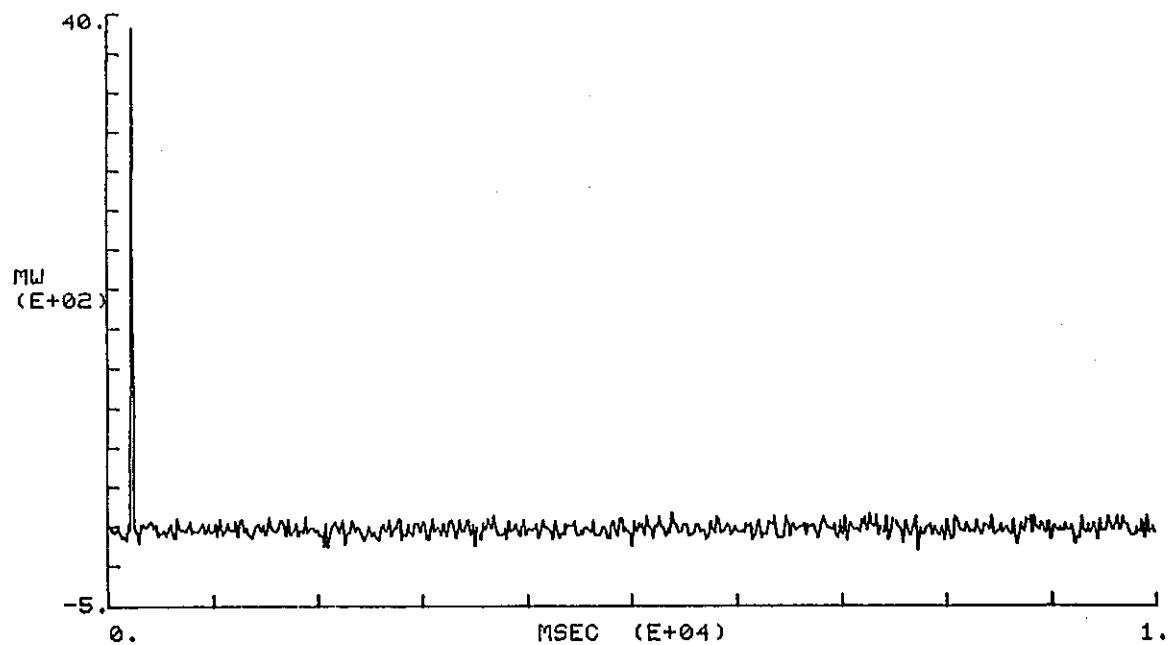
~1570°C

照射後燃料検査記録

PNC SN 841-84-23

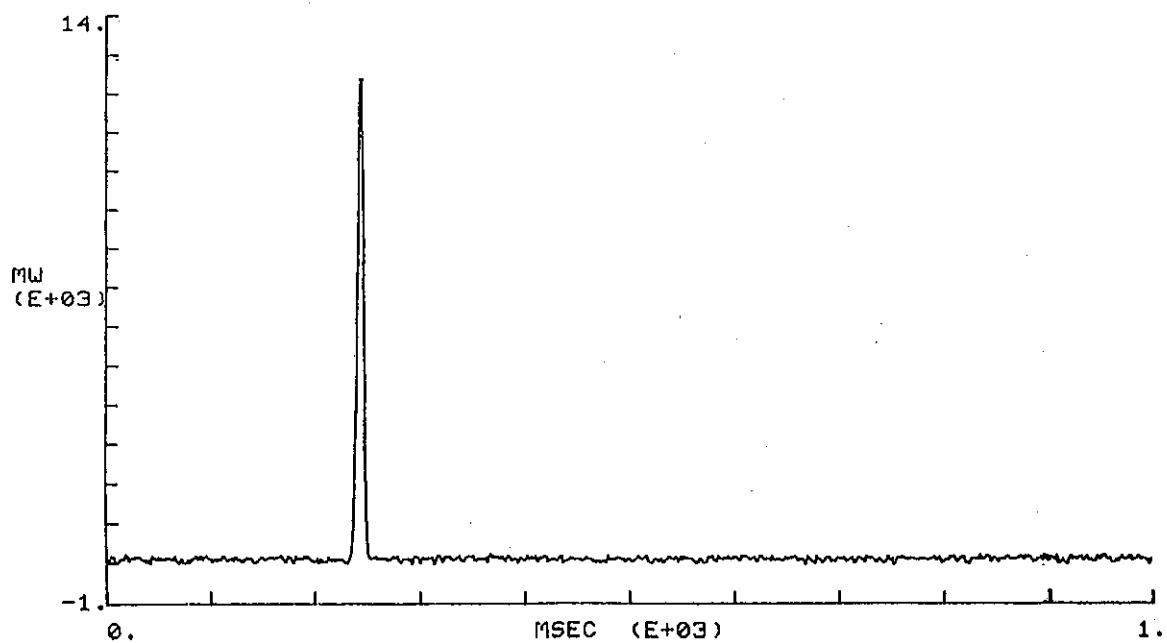
EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-19 NV #1



EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

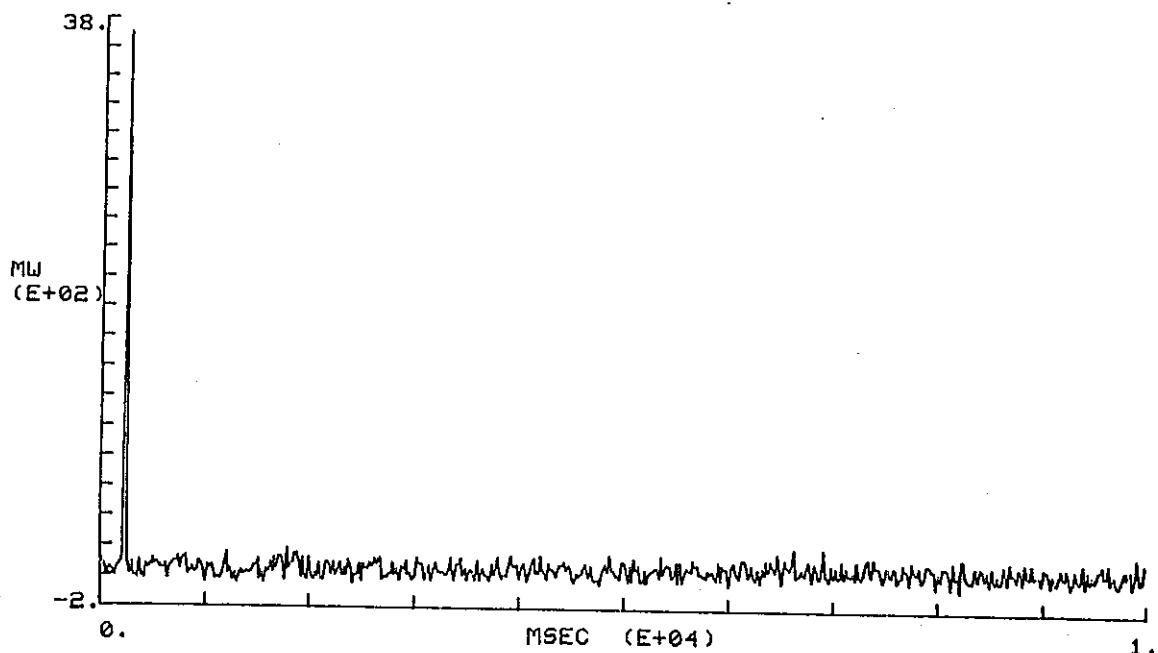
ADR-19 NV #1



PNC SN 841-84-23

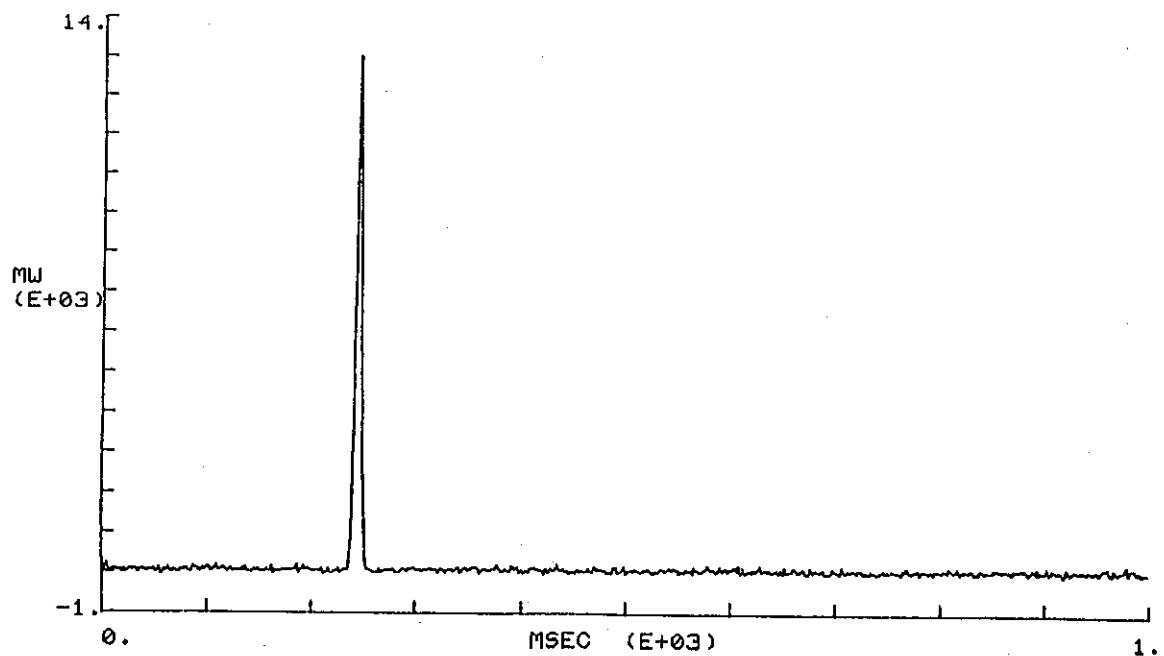
EX.NO - 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-20 NV #2



EX.NO - 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-20 NV #2

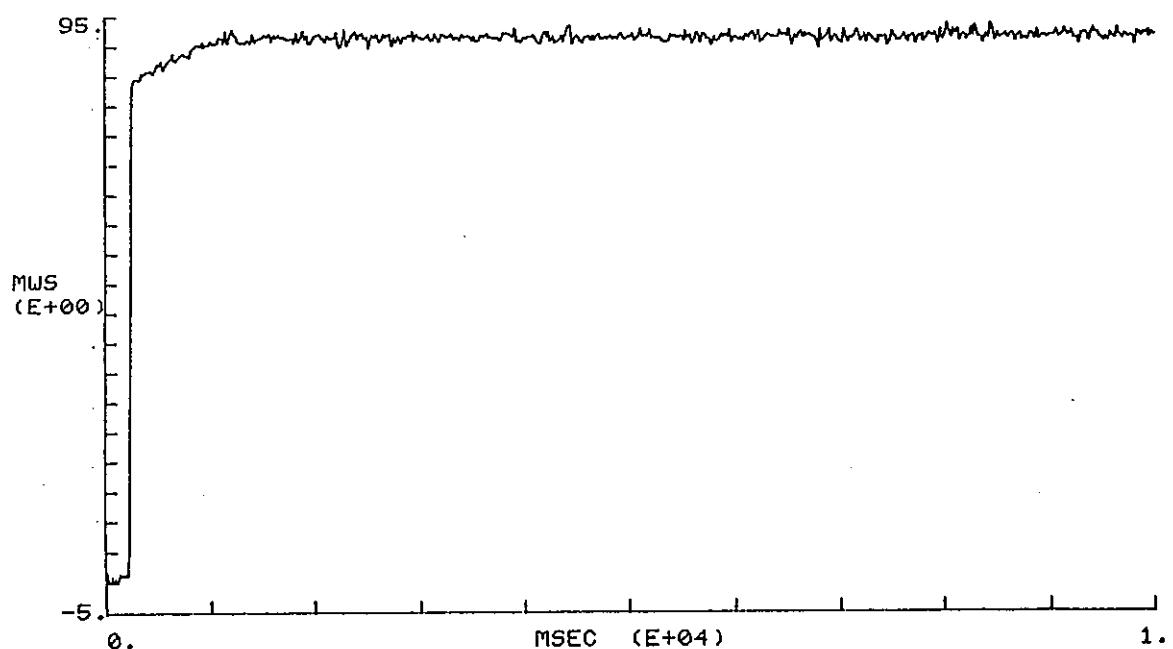


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-21

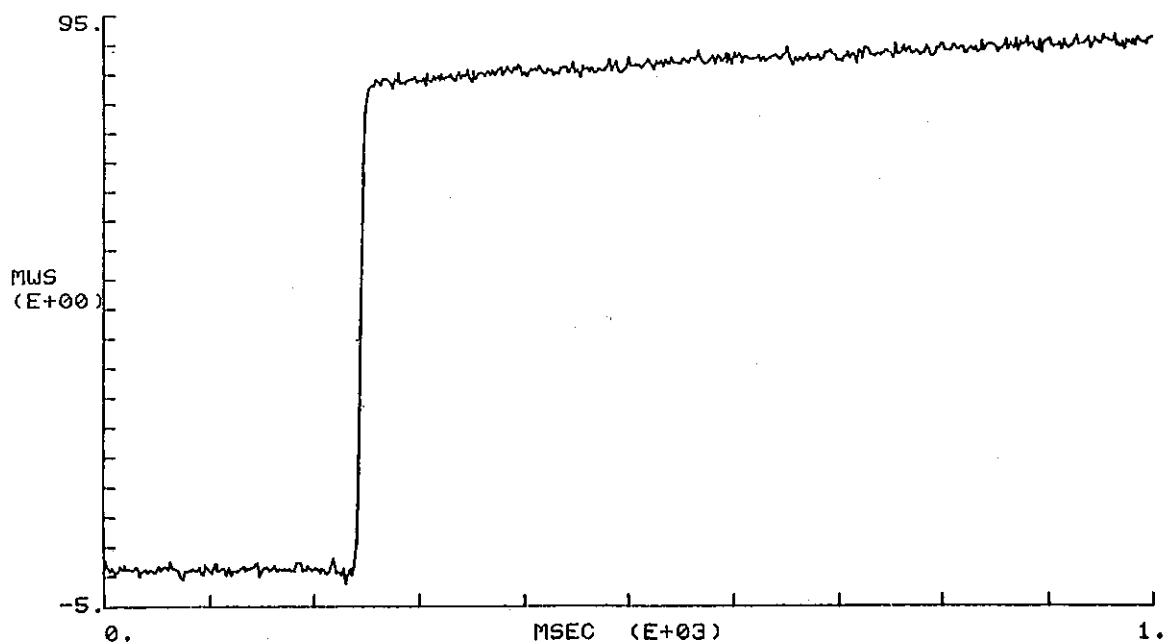
NVT #1



EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-21

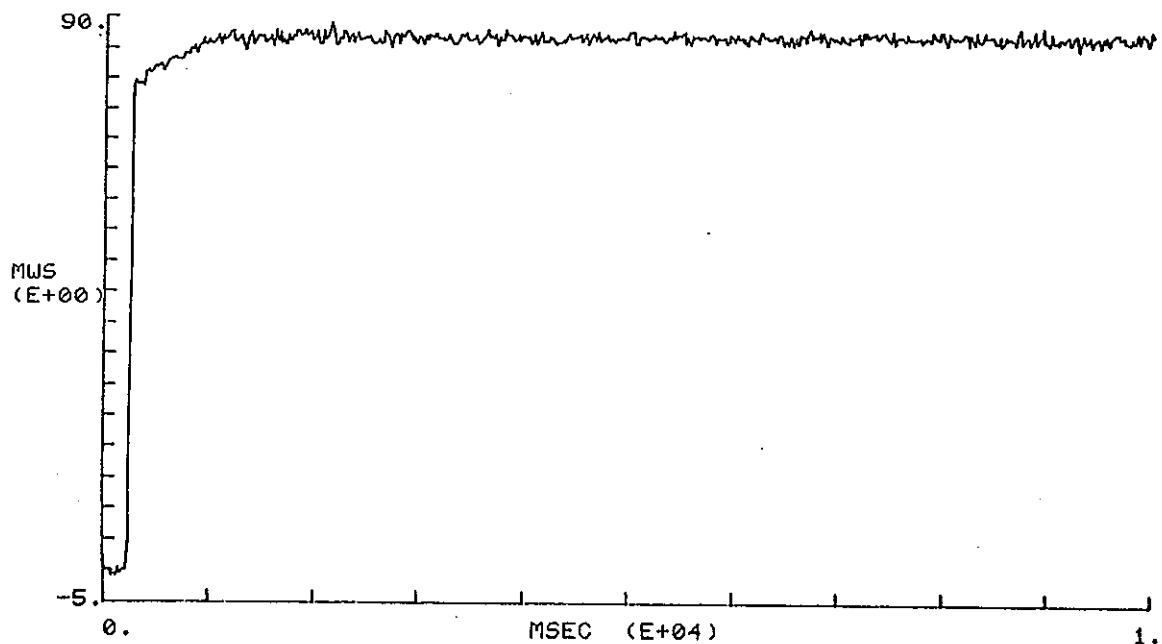
NVT #1



PNC SN841-84-23

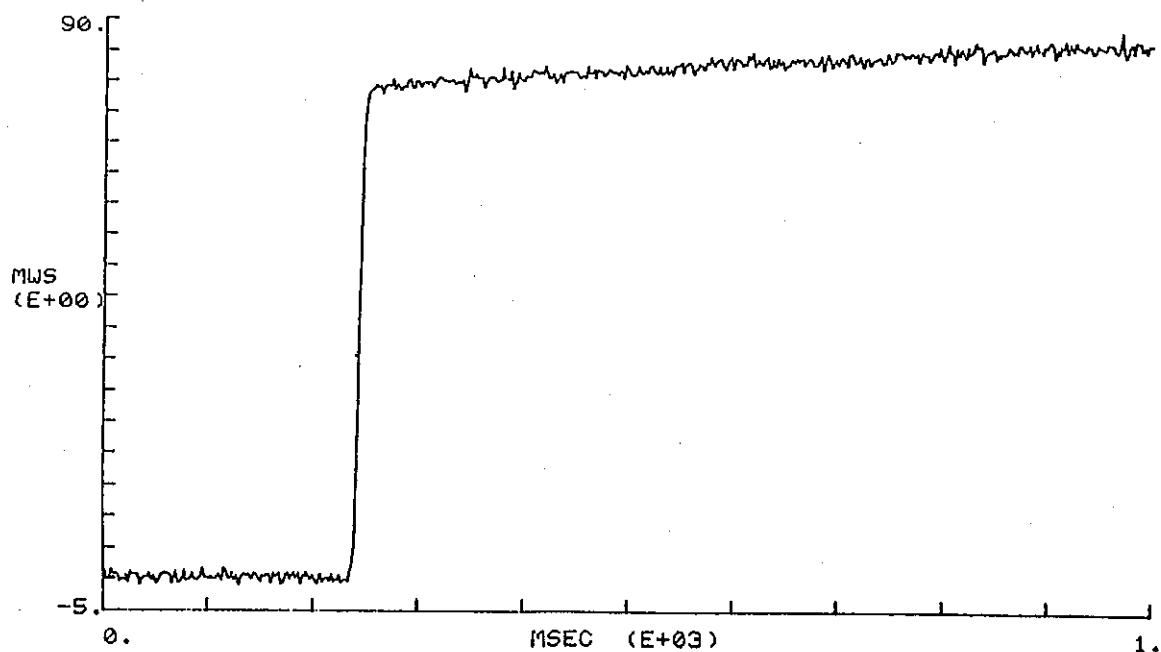
EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-22 NVT #2



EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-22 NVT #2

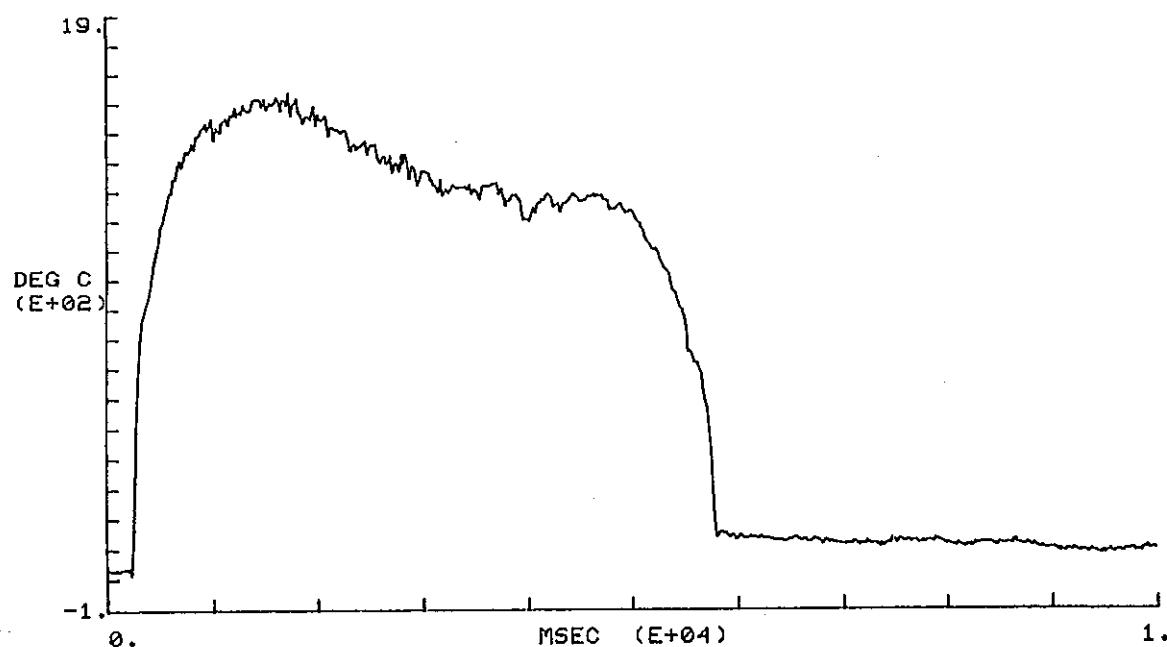


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-11

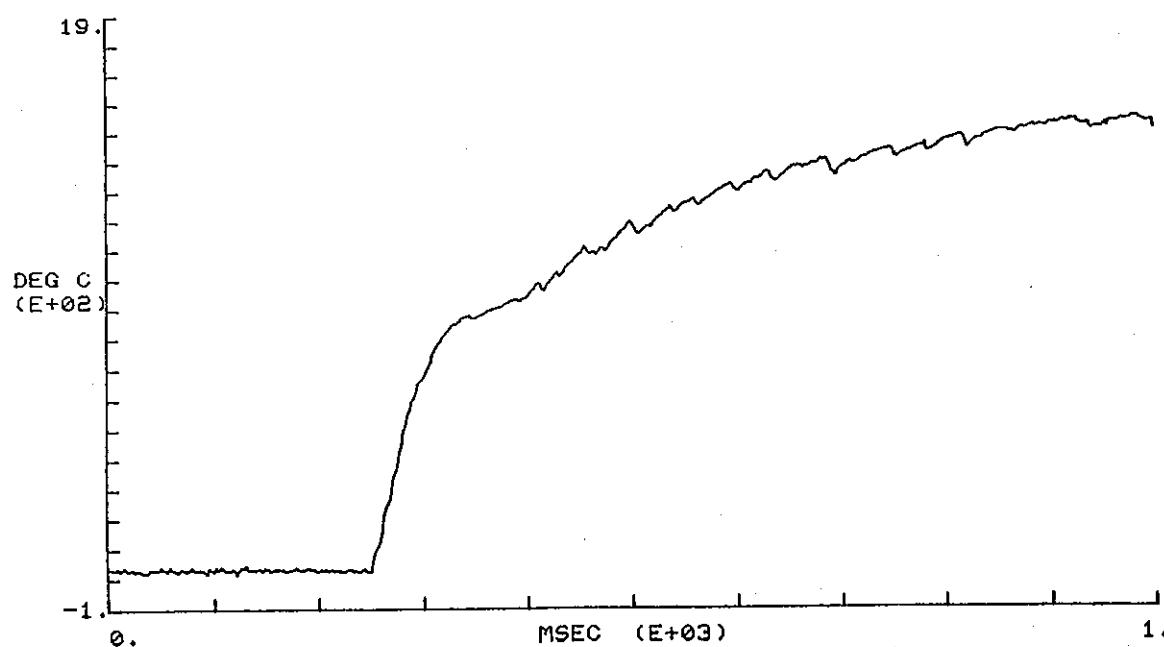
Cladding Surface Temperature #1



EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-11

Cladding Surface Temperature #1

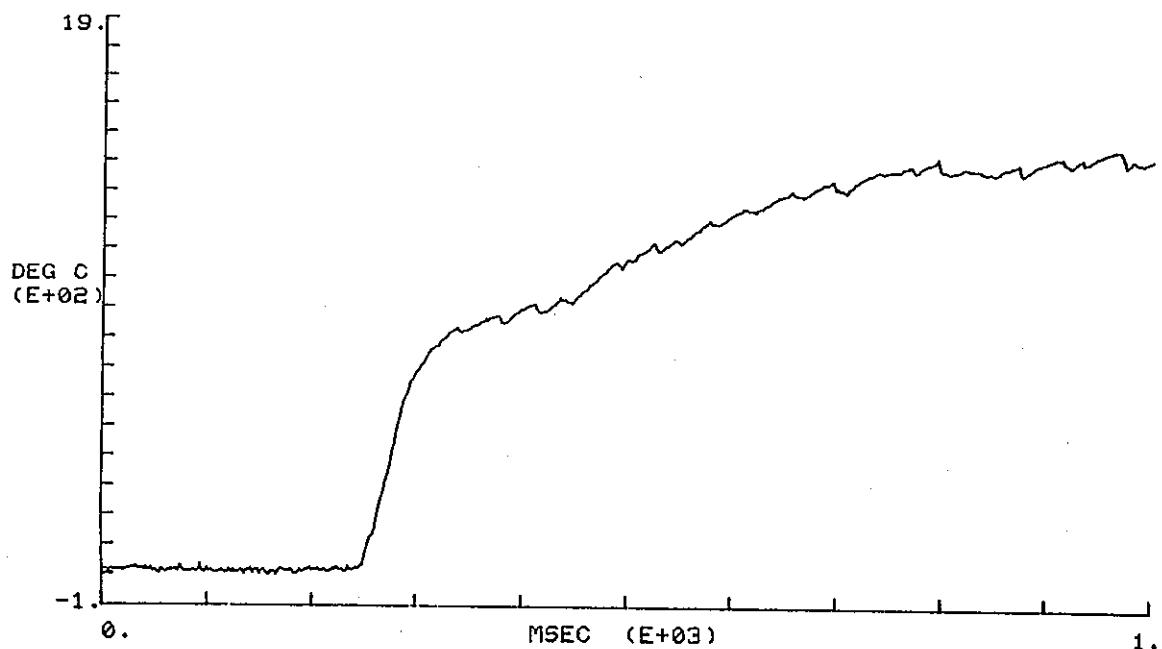


PNC SN841-84-23

EX.NO - 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-12

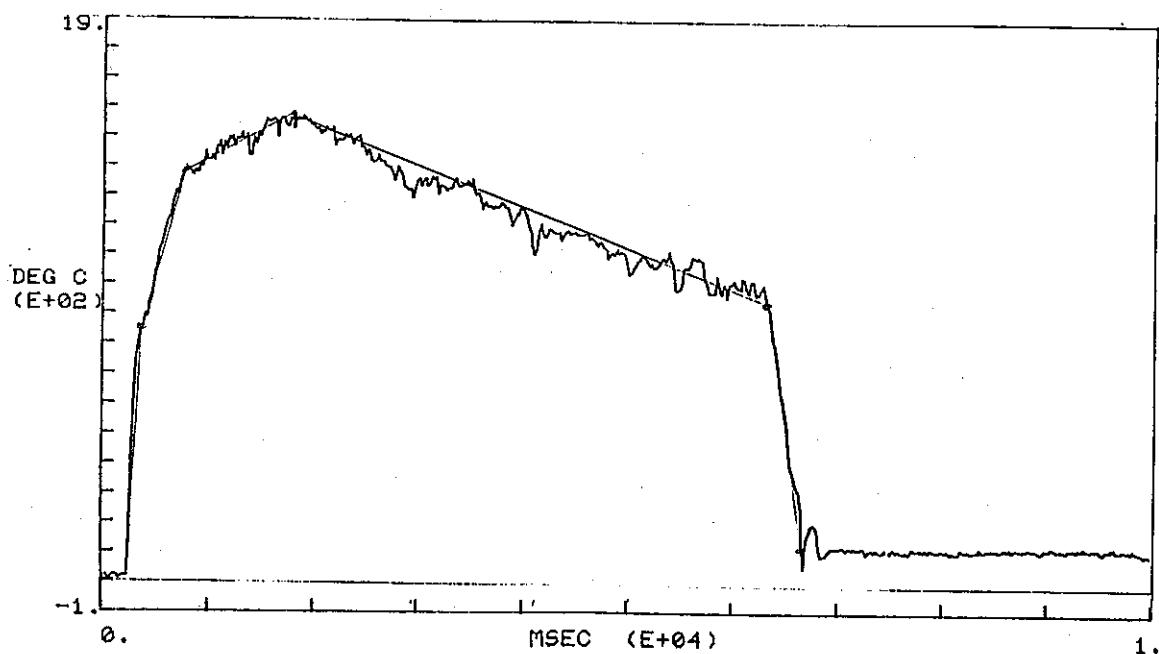
Cladding Surface Temperature #4



EX.NO - 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-12

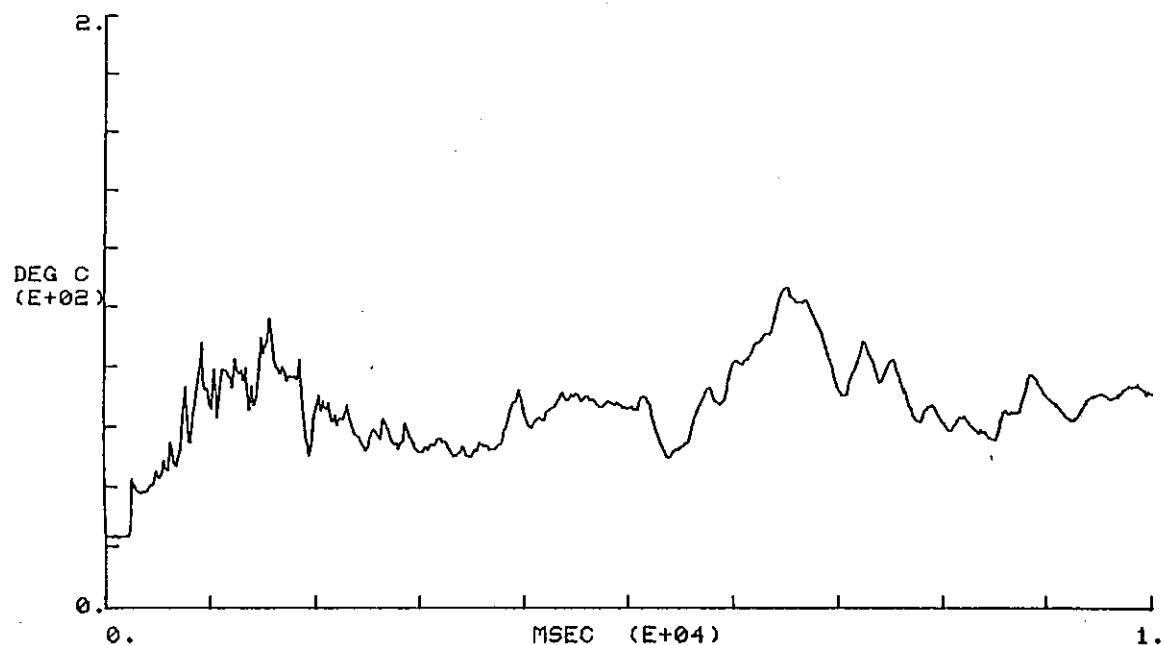
Cladding Surface Temperature #4



PNC SN841-84-23

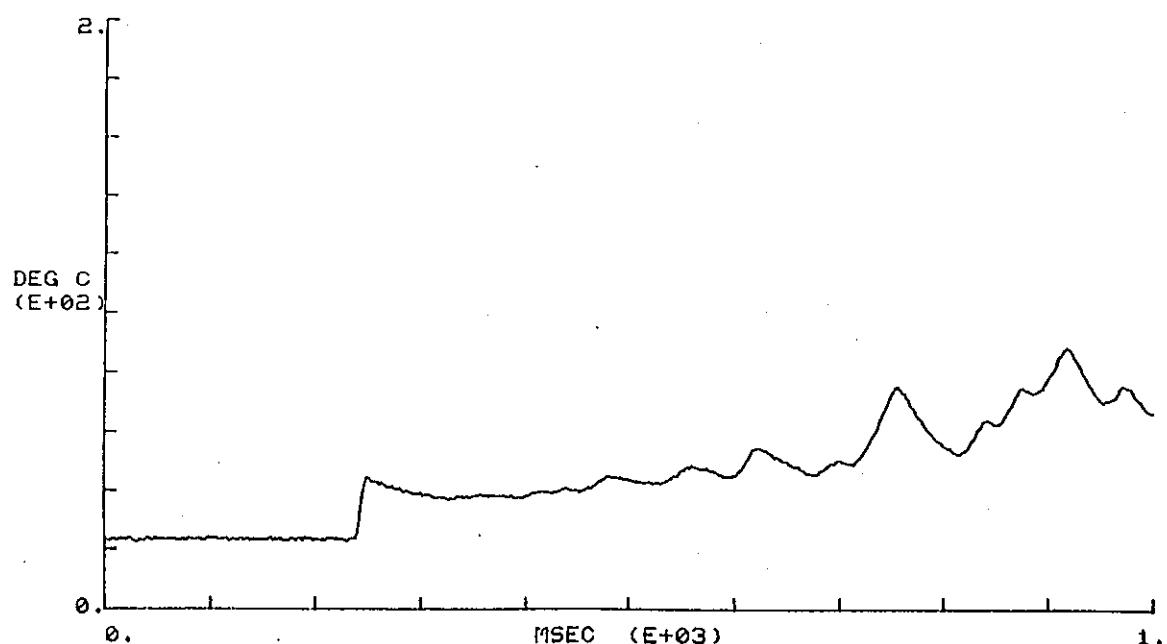
EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-10 Capsule Water Temperature



EX.NO = 1207 ; 701-4 4.0\$

ADR-10 Capsule Water Temperature



T E S T D A T A

TEST NO. 701-5 (担当 斎藤伸三, 稲刃輝雄, 塩沢周策)

目的

プルトニウムーウラン混合酸化物燃料の破損しきい値, 破損挙動の把握(分断挙動)

実験条件

プルトニウムーウラン混合物燃料 (6.33W/O PuO₂-93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu 74.36%)

発熱量: 300 cal/g.UO₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高

#1 ~ °C

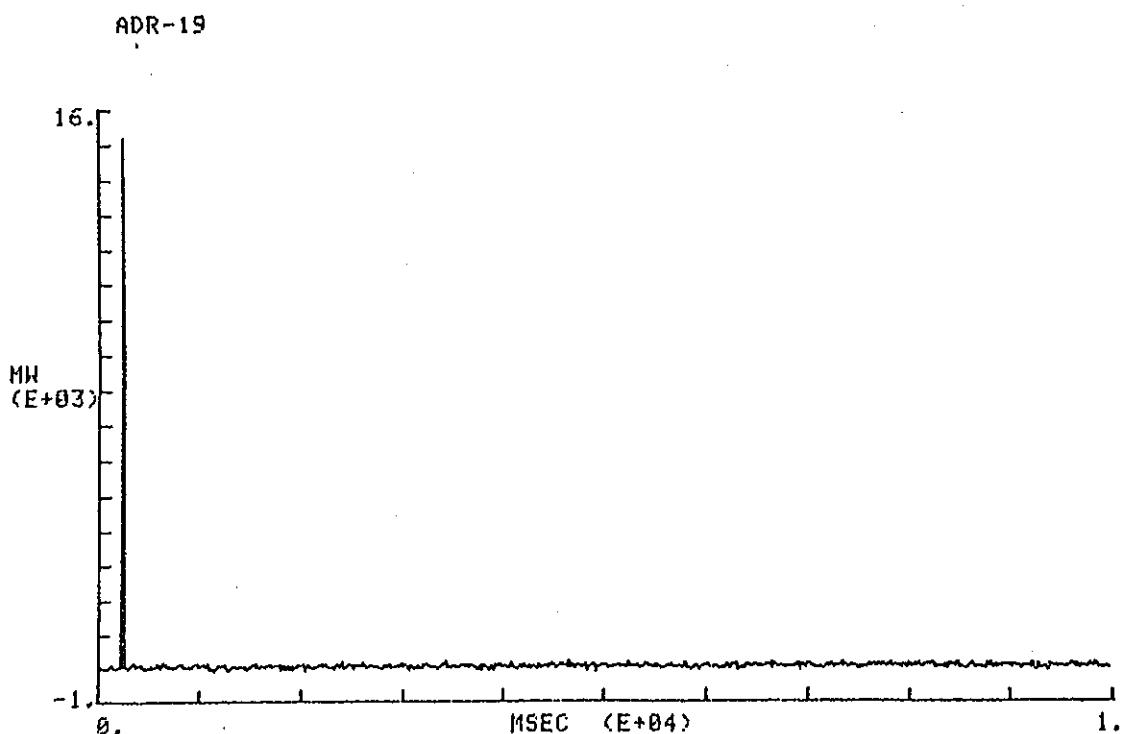
#2 ~ 1800 °C

~ °C

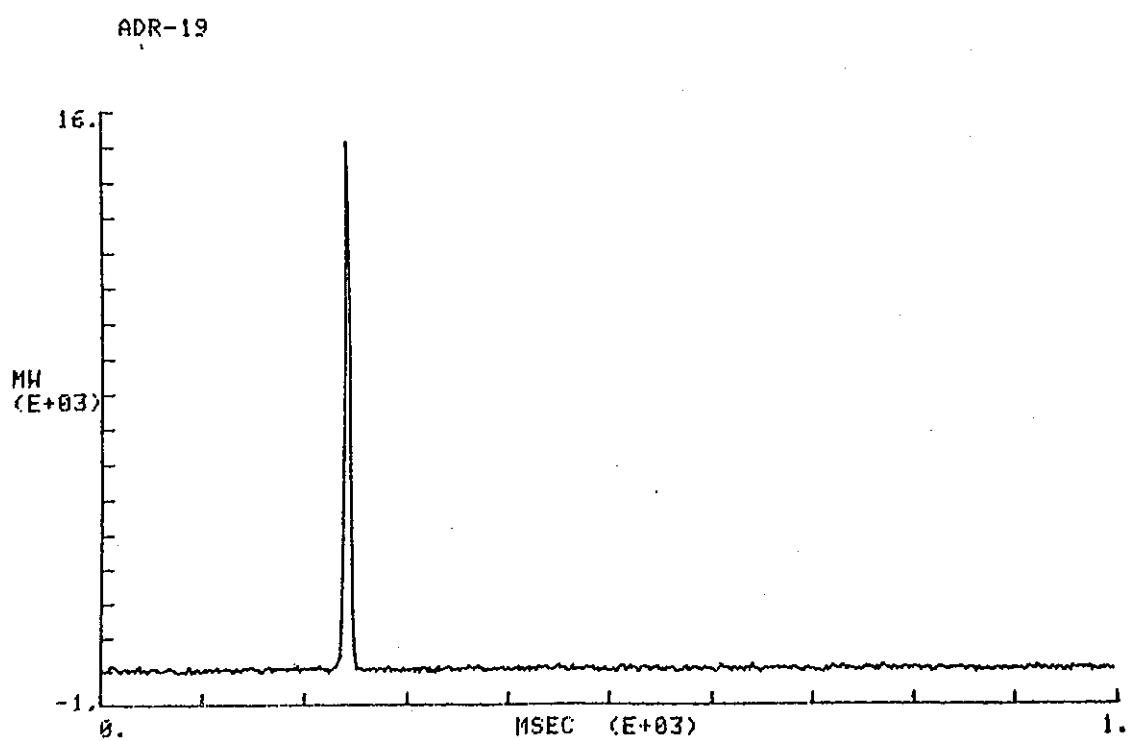
照射後燃料検査記録

PNC SN841-84-23

EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NV #1



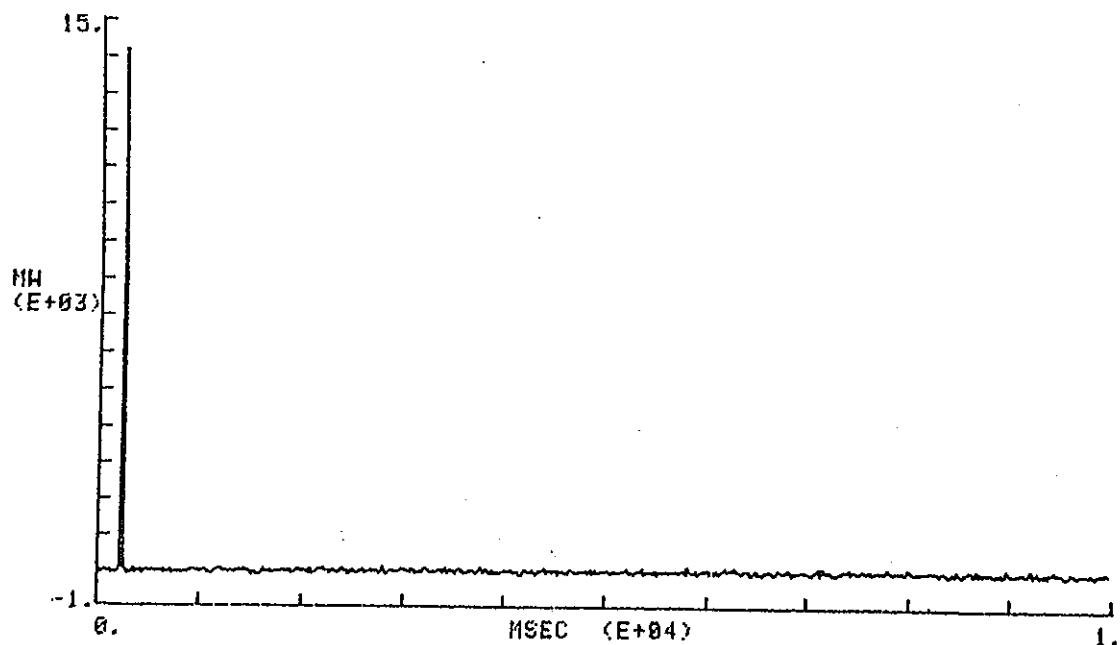
EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NV #1



PNC SN841-84-23

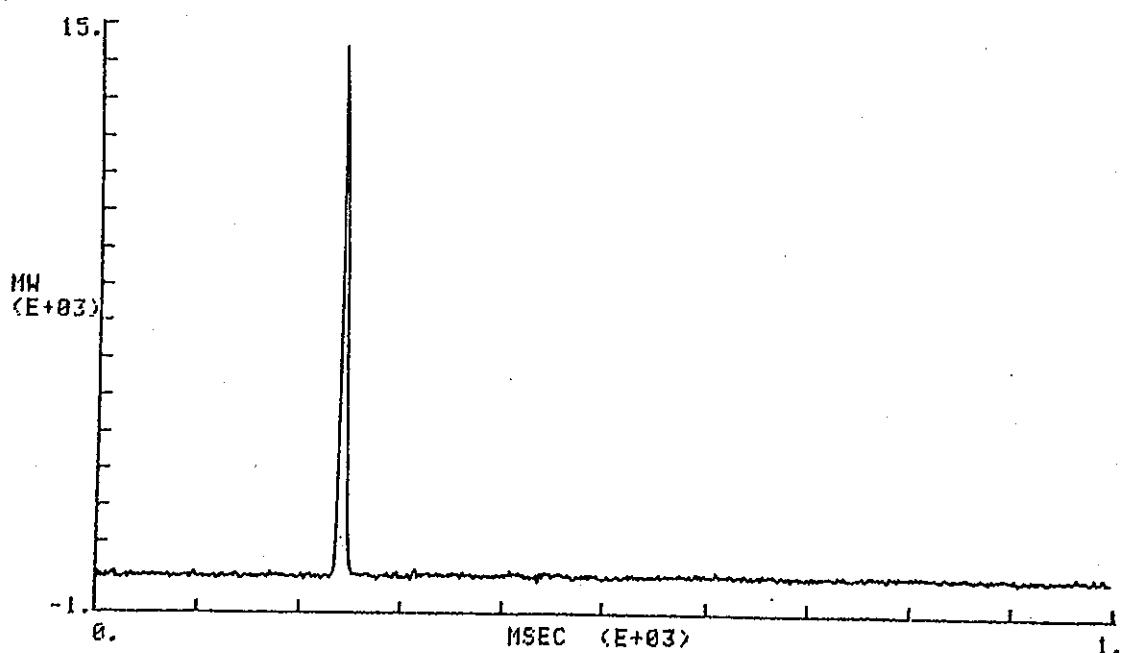
EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NV #2

ADR-20



EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NV #2

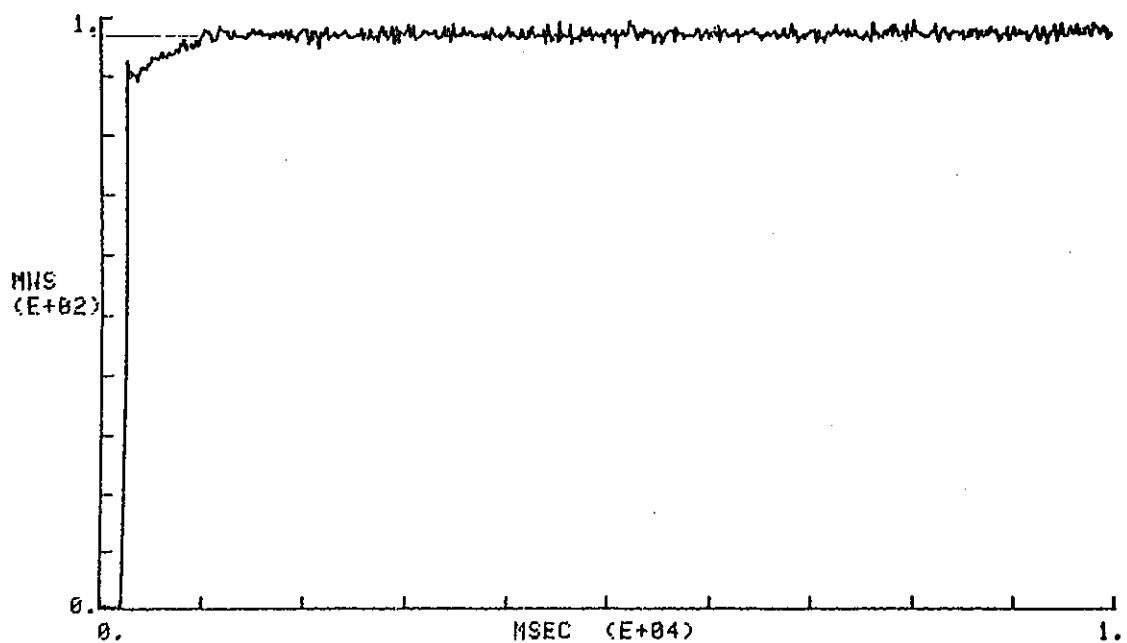
ADR-20



PNC SN8 41-84-23

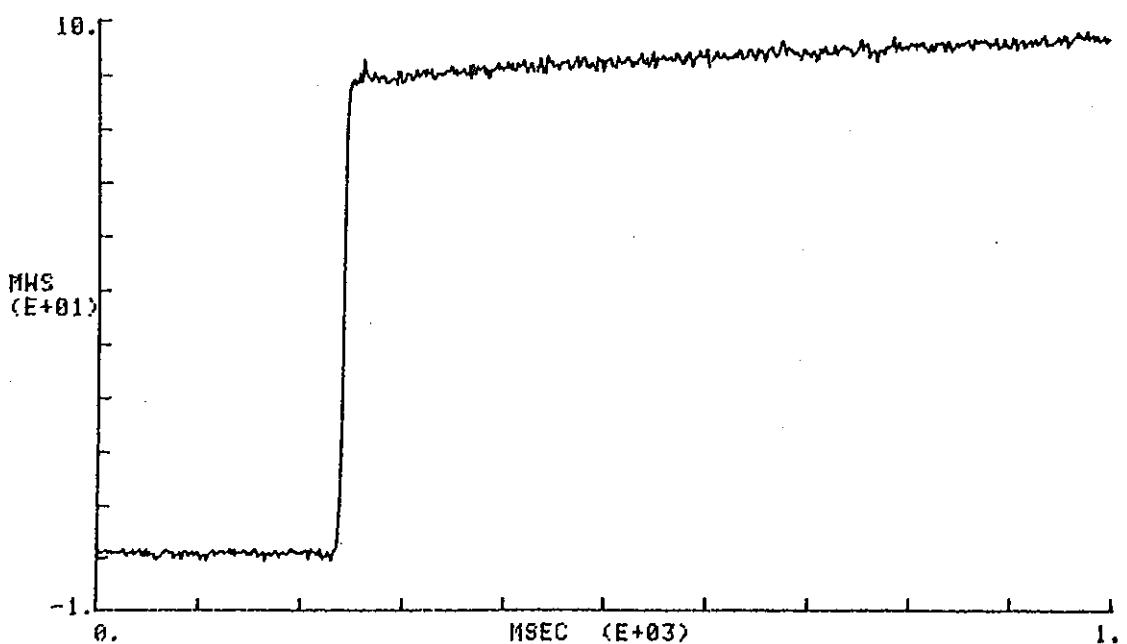
EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NVT #1

ADR-21



EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NVT #1

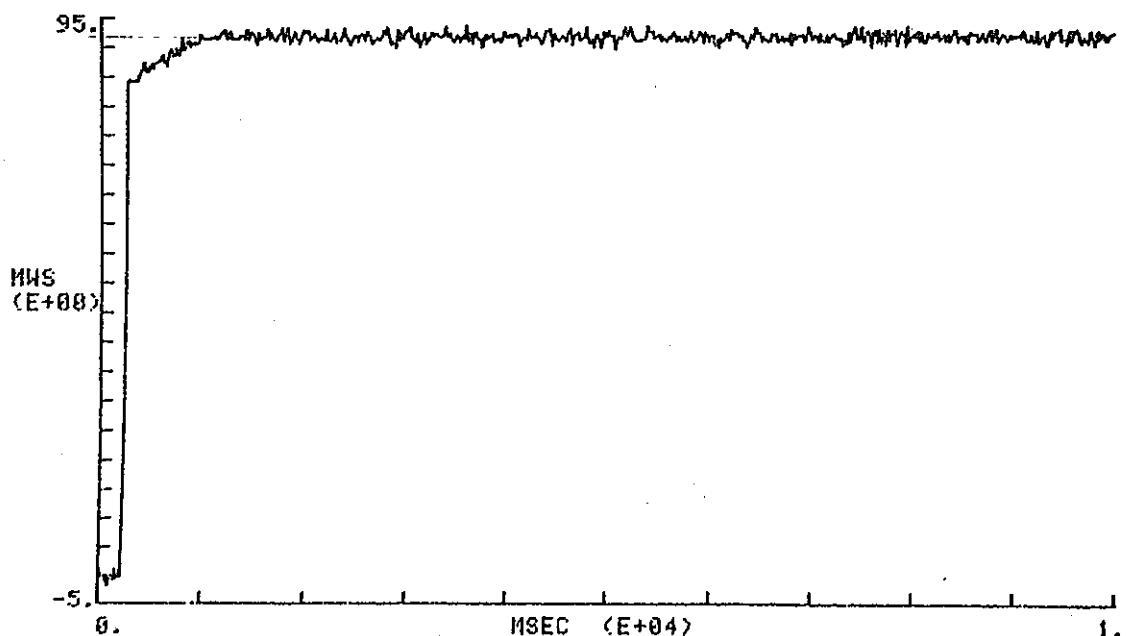
ADR-21



PNC SN841-84-23

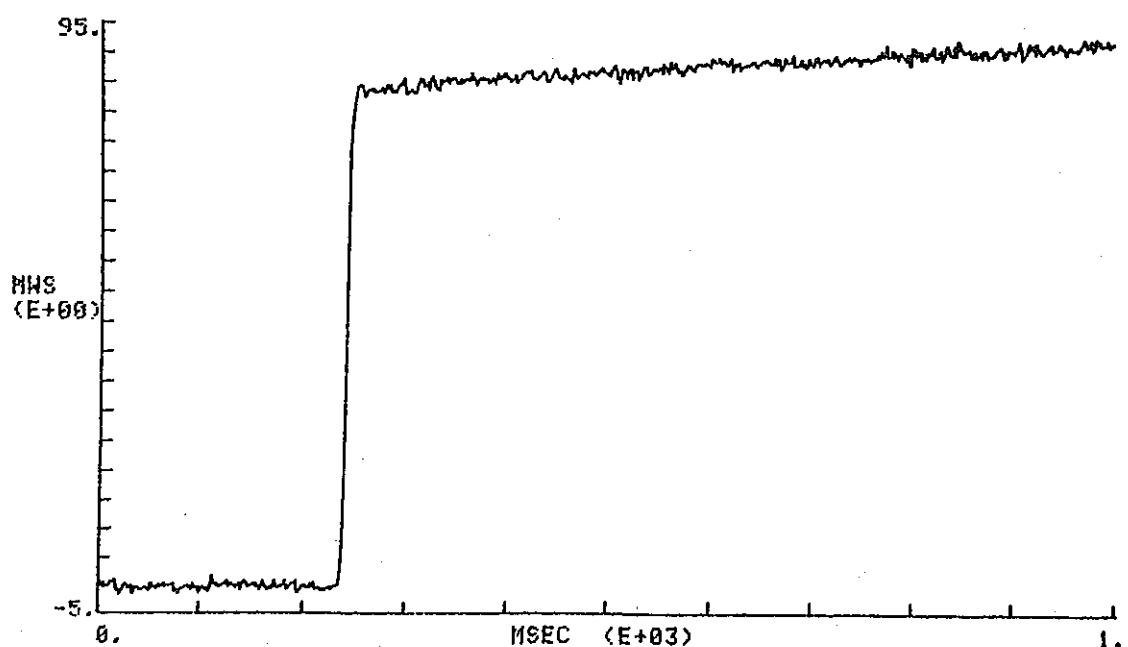
EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NVT #2

ADR-22



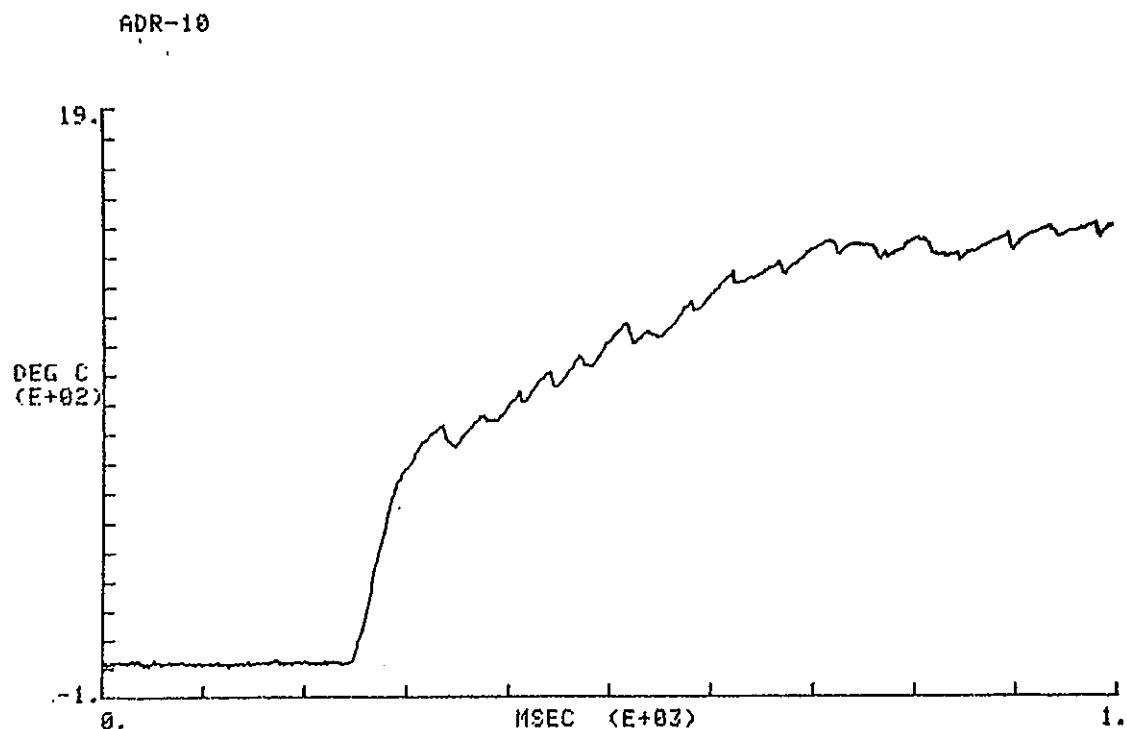
EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ NVT #2

ADR-22

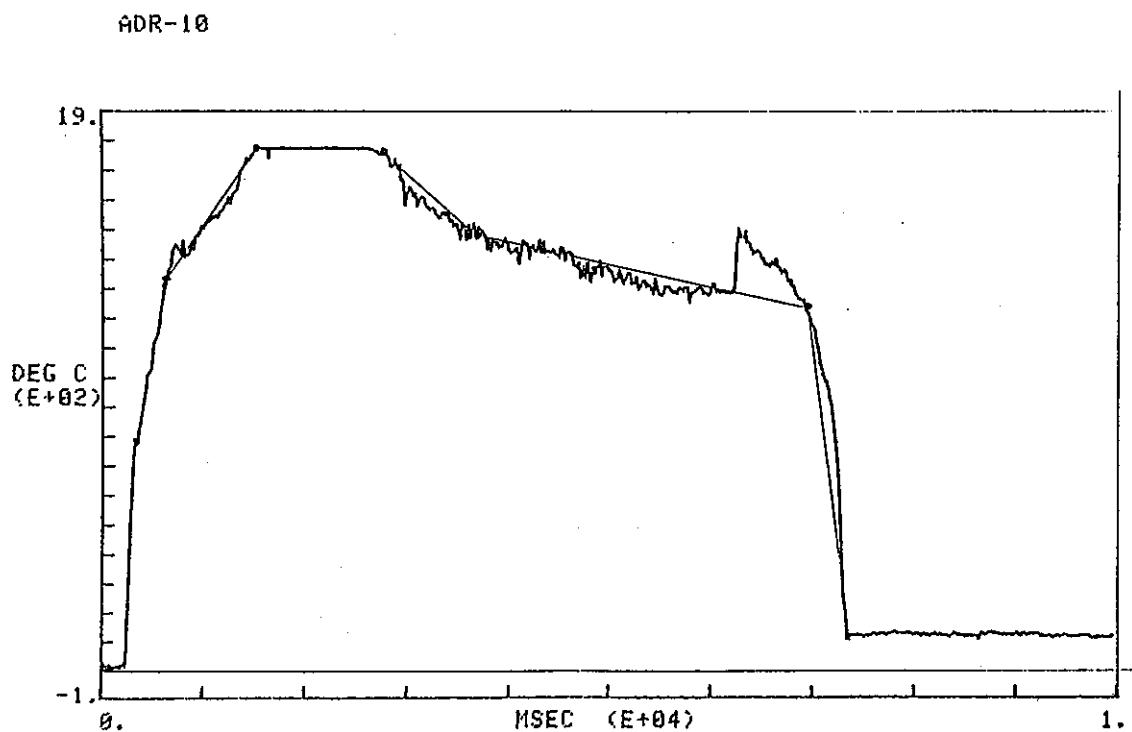


PNC SN8 41-84-23

EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ CLAD TEMP #2



EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ CLAD TEMP #2

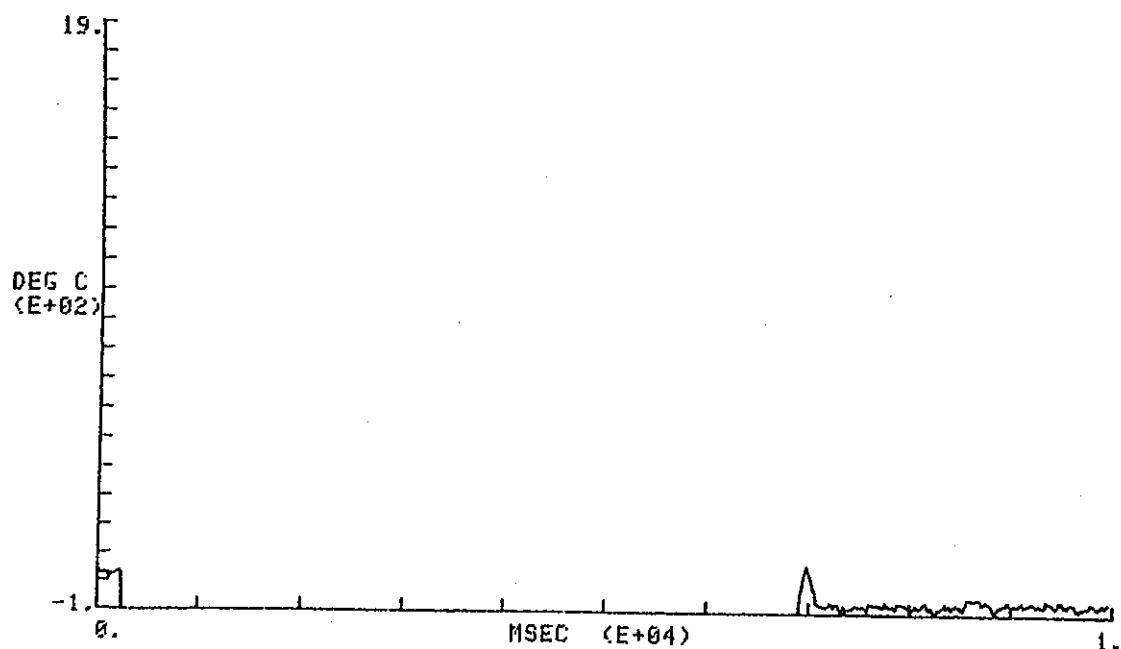


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$

CLAD TEMP #4

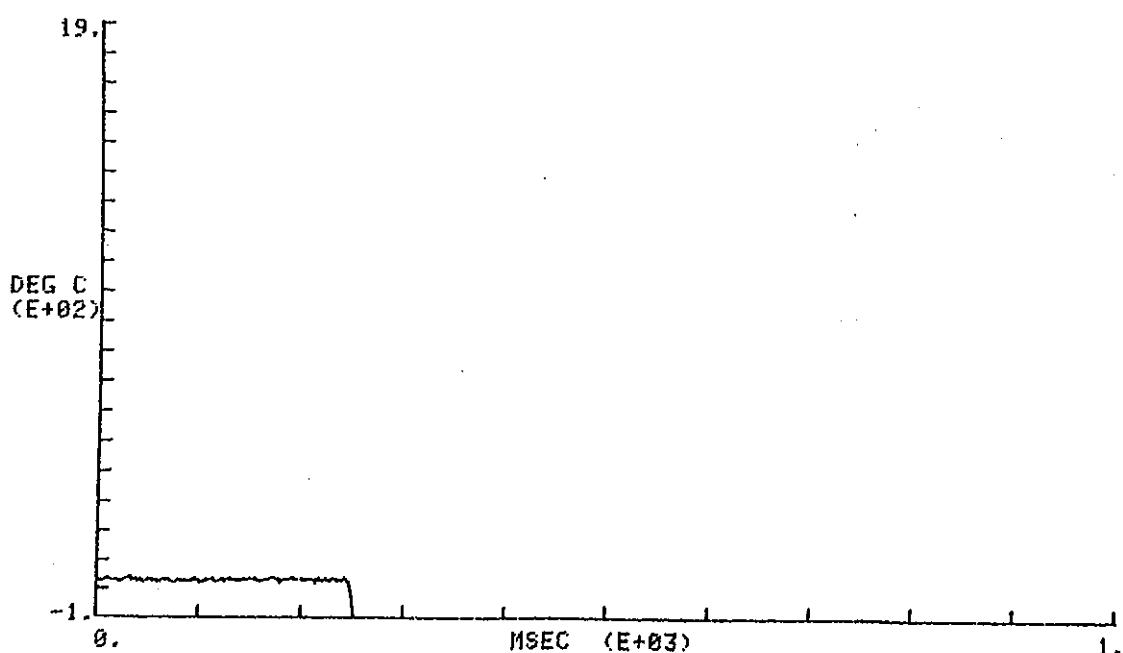
ADR-11



EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$

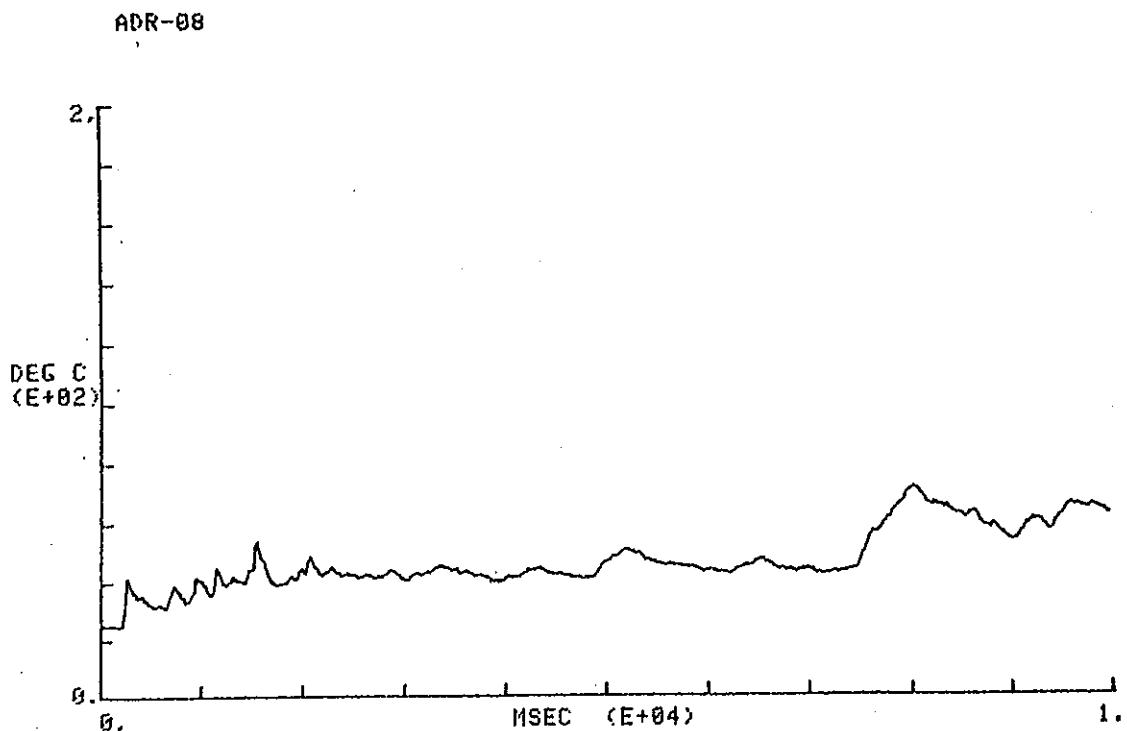
CLAD TEMP #4

ADR-11

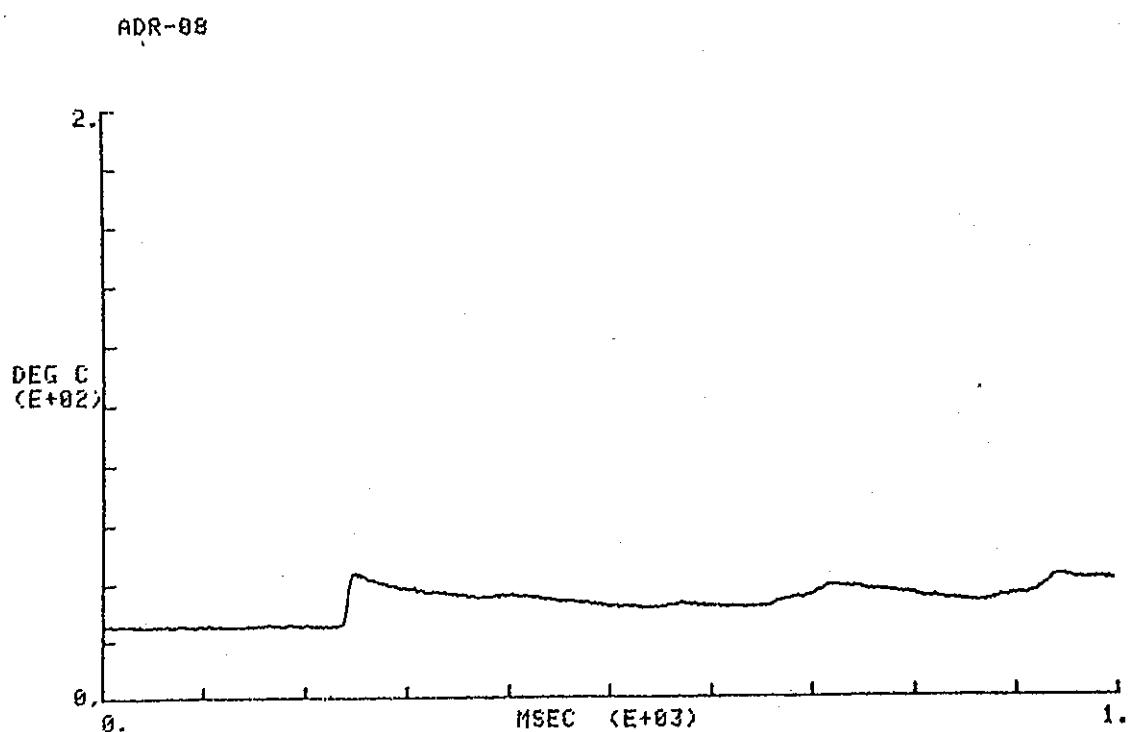


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ WATER TEMP



EX.NO = 1214 ; 701-5 4.19\$ WATER TEMP



T E S T D A T A

TEST NO. 701-6 (担当 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 塩沢周策)

目的

プルトニウム-ウラン混合酸化物燃料の破損しきい値, 破損挙動の把握
(701-5実験の細部確認)

実験条件

プルトニウム-ウラン混合物燃料 (6.33W/O PuO₂-93.67W/O UO₂)

大気圧水カプセル (Pu fissile 74.36%)

発 热 量: 260 cal/g. UO₂ (目標)

過渡記録

○被覆管表面温度 最高

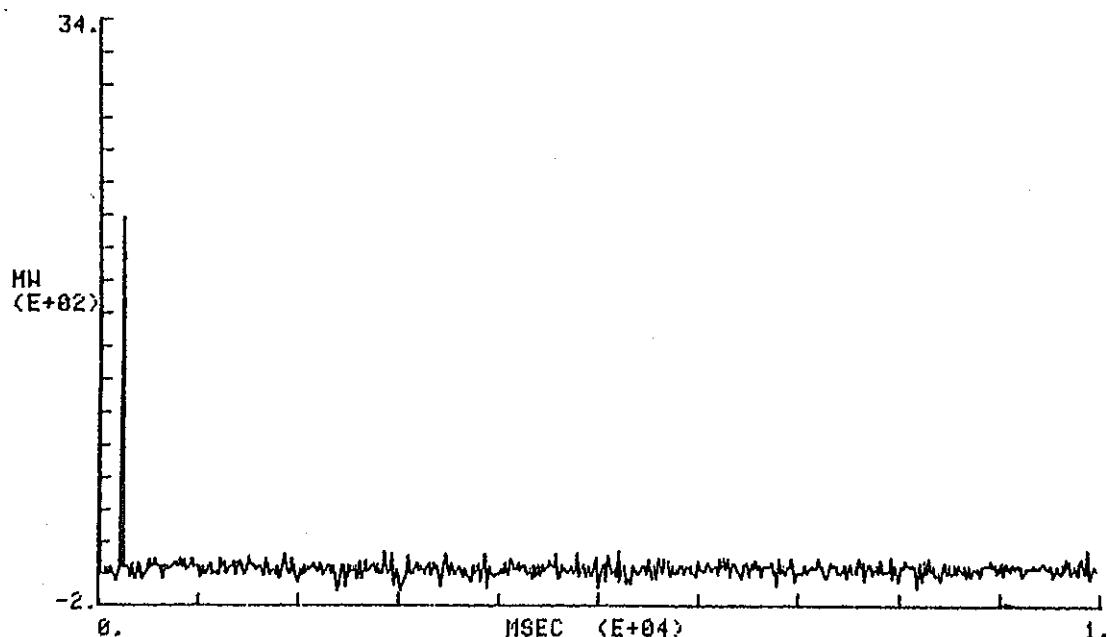
# 1	~1600°C
# 2	~1650°C
#	~1600°C

照射後燃料検査記録

PNC SN841-84-23

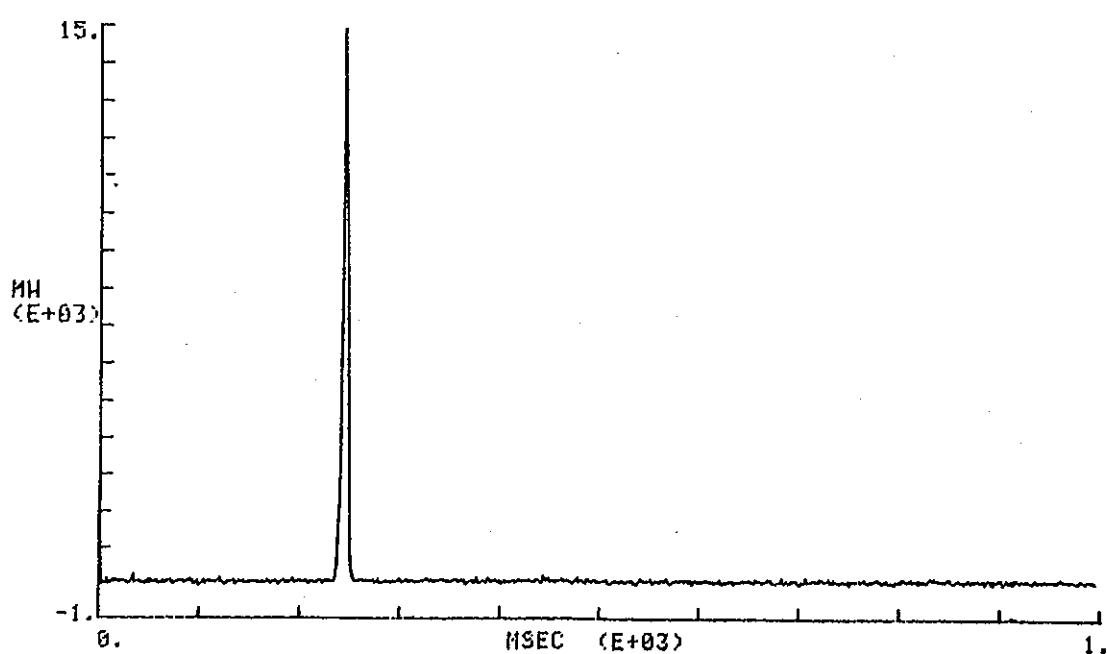
EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$ NV #1

ADR-19



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$ NV #1

ADR-19

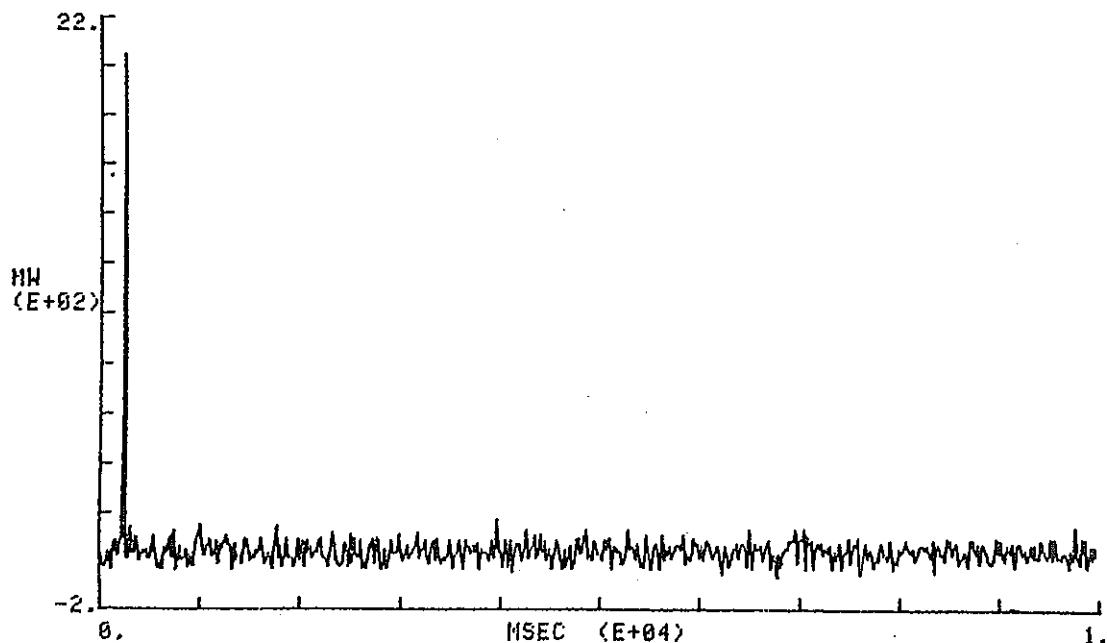


PNC SN 841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

NV #2

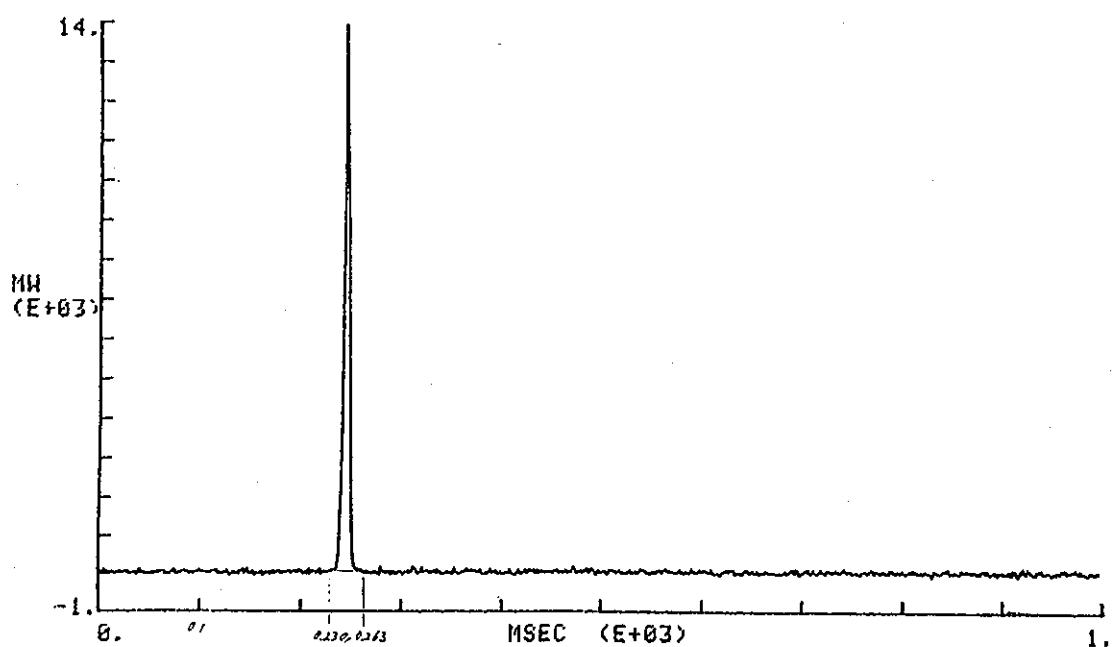
ADR-20



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

NV #2

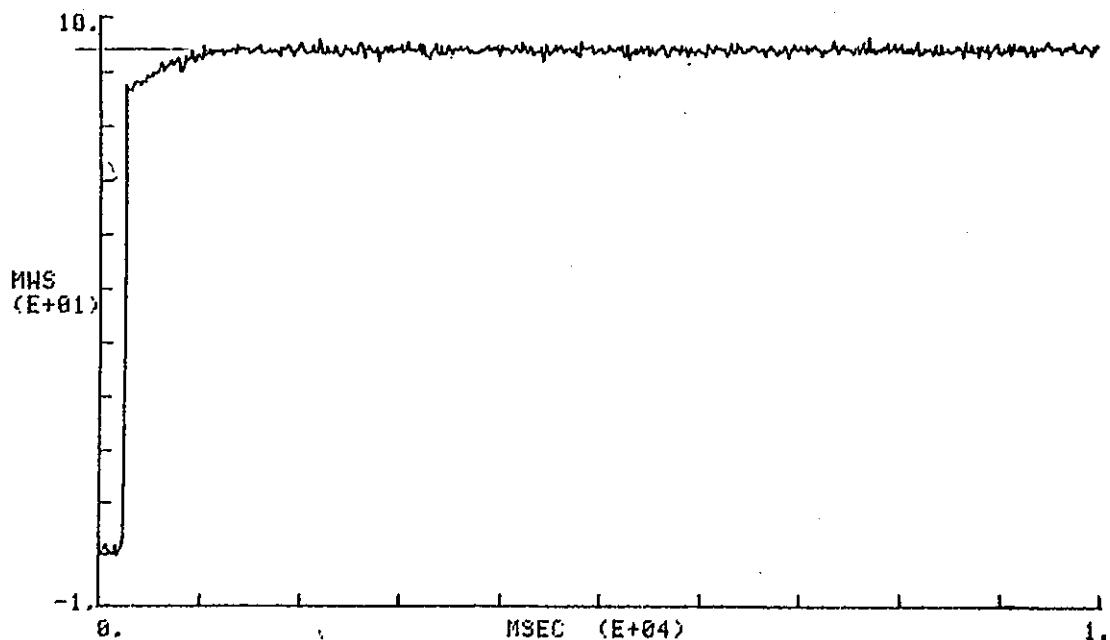
ADR-20



PNC SN841-84-23

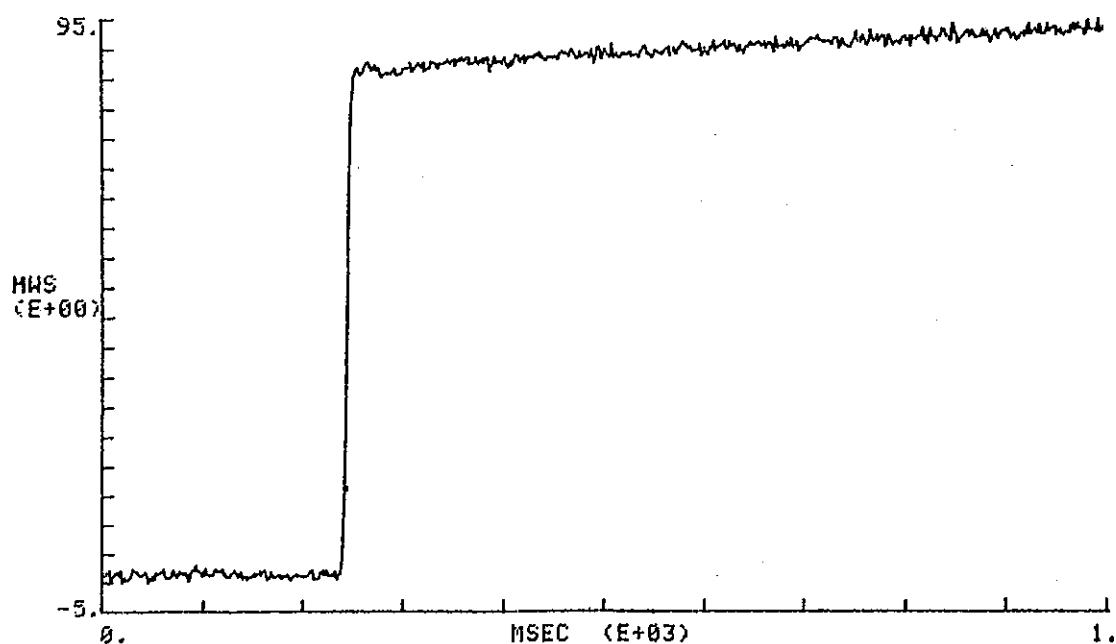
EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$ NVT #1

ADR-21



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$ NVT #1

ADR-21

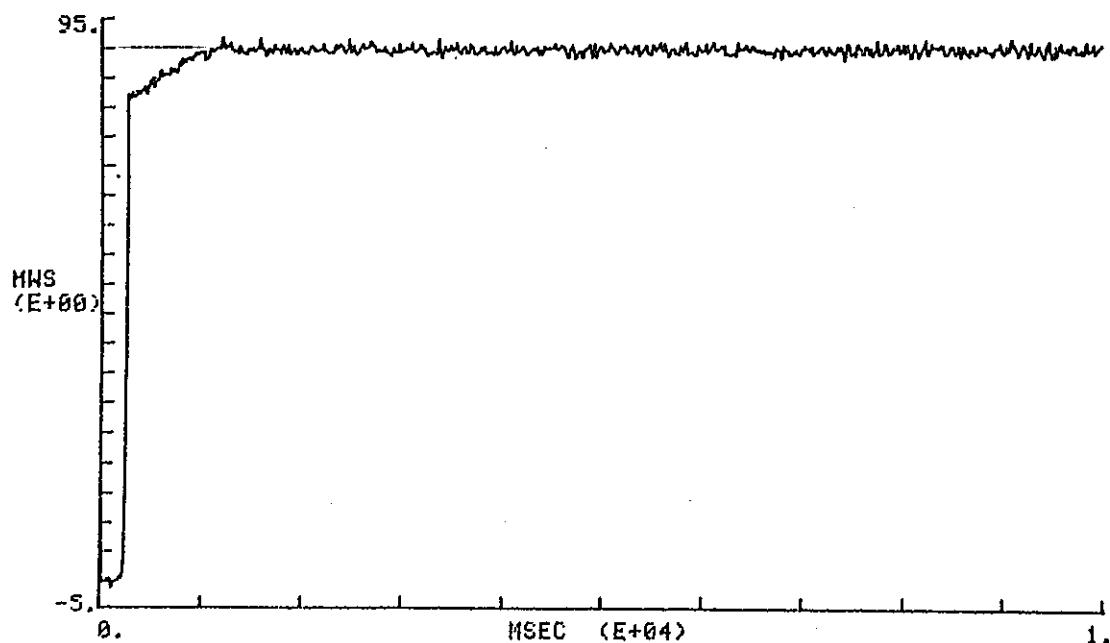


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

NVT #2

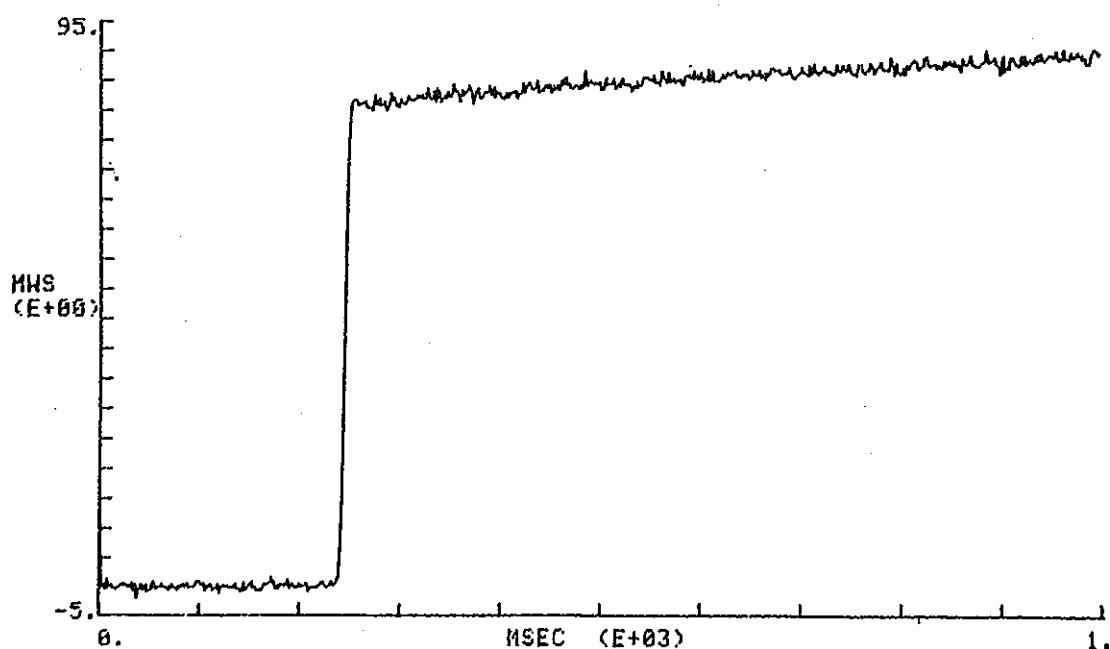
ADR-22



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

NVT #2

ADR-22

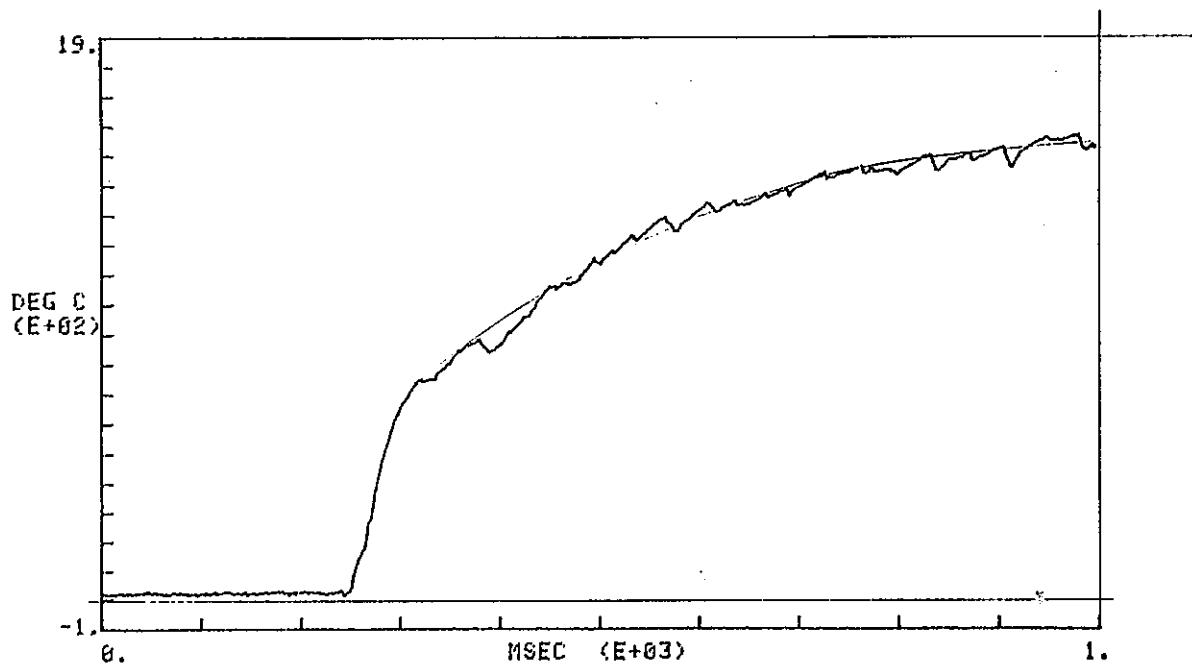


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #1

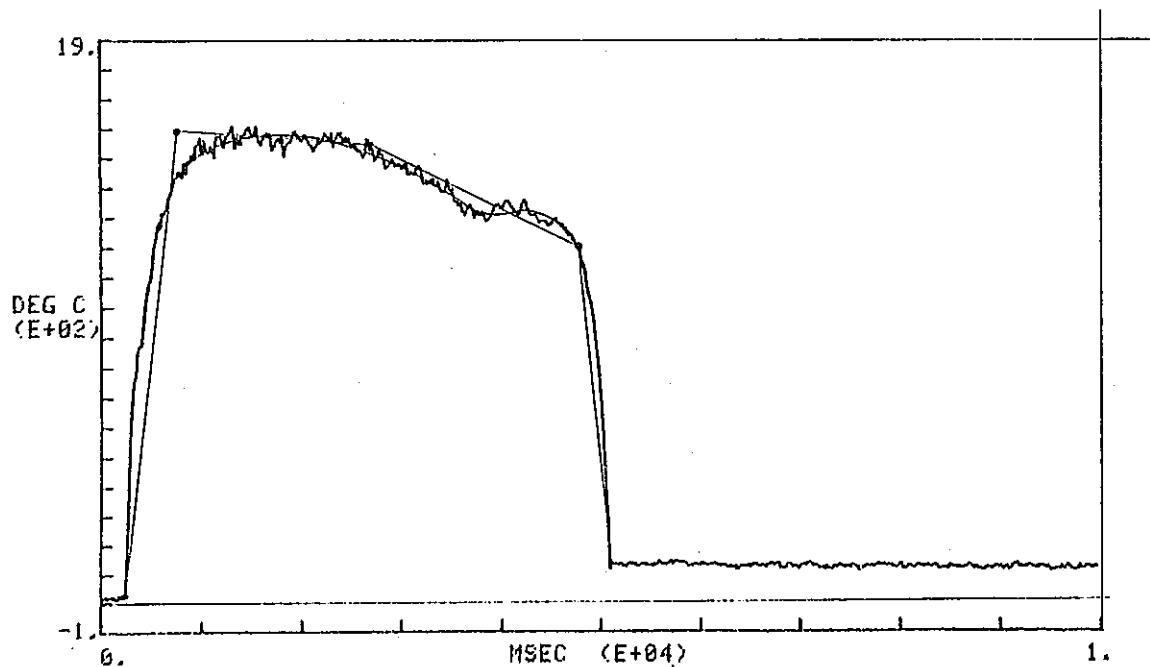
ADR-08



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #1

ADR-08

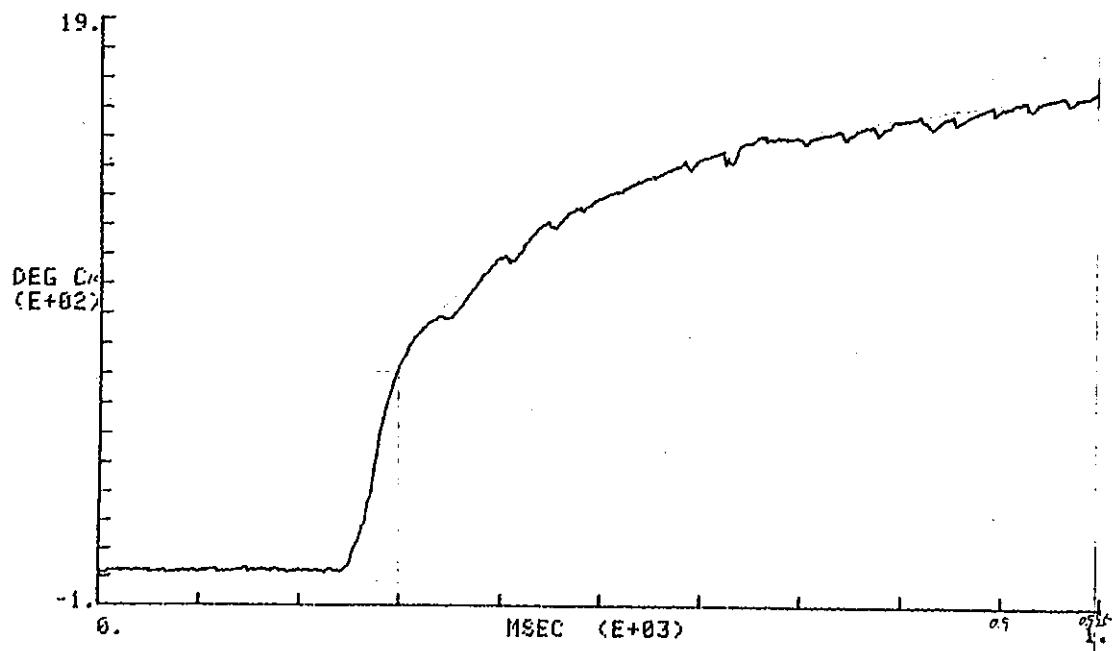


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #2

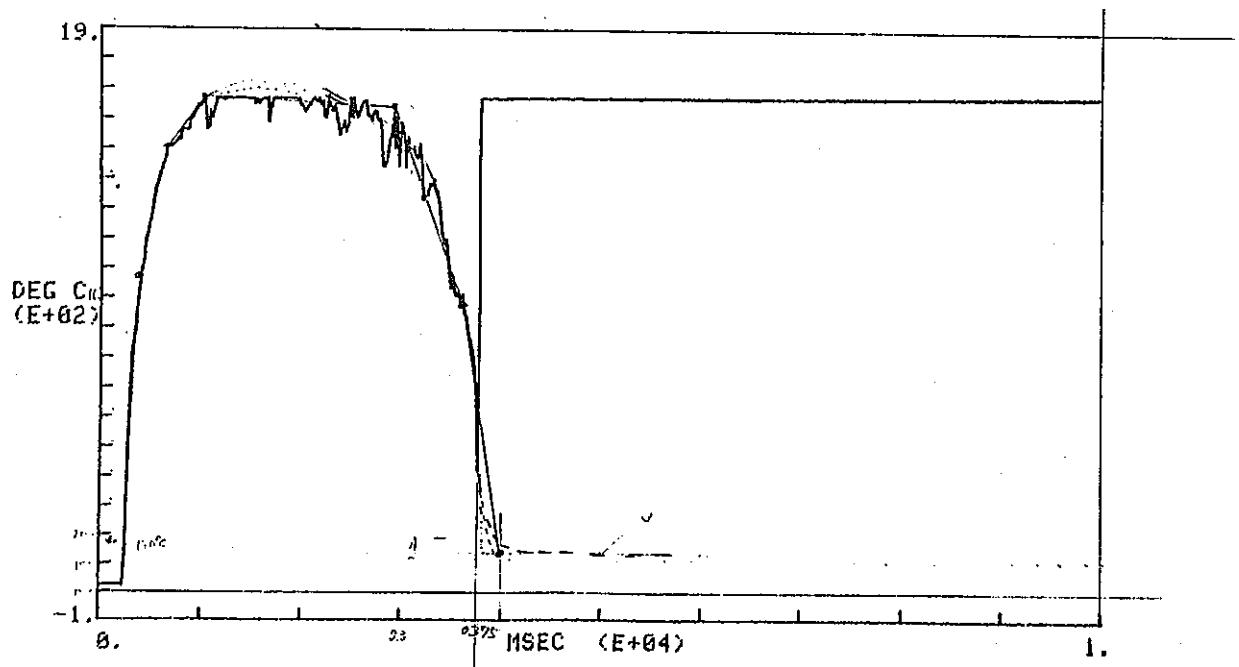
ADR-09



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #2

ADR-09

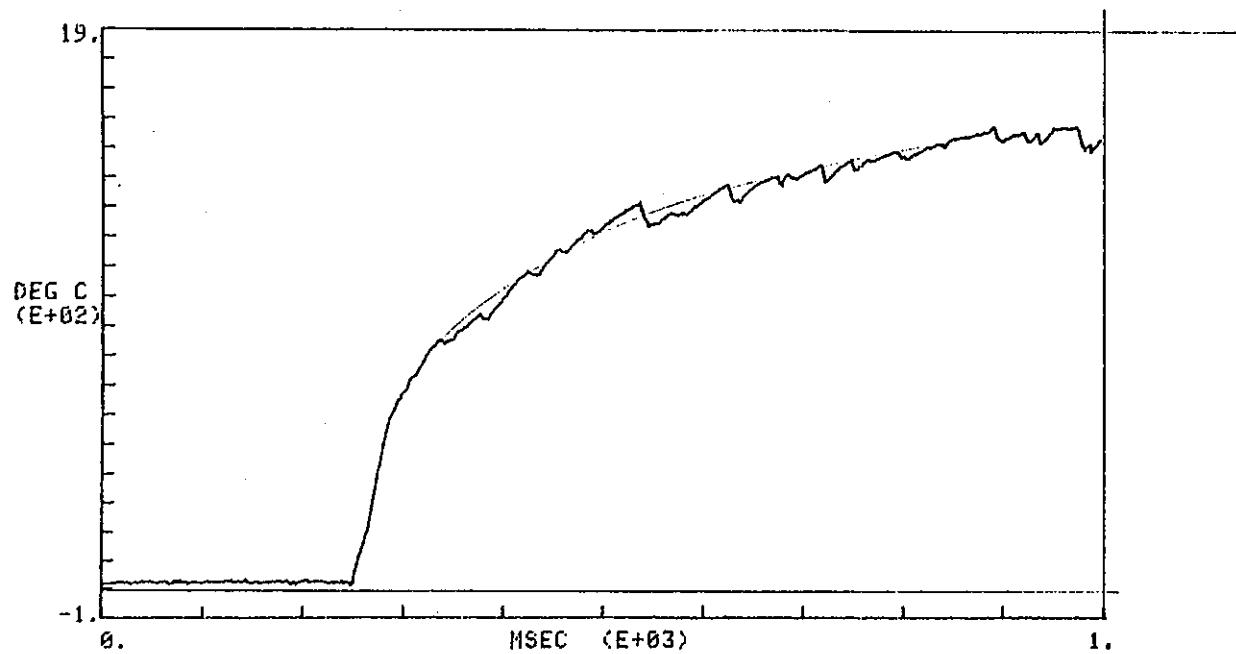


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #3

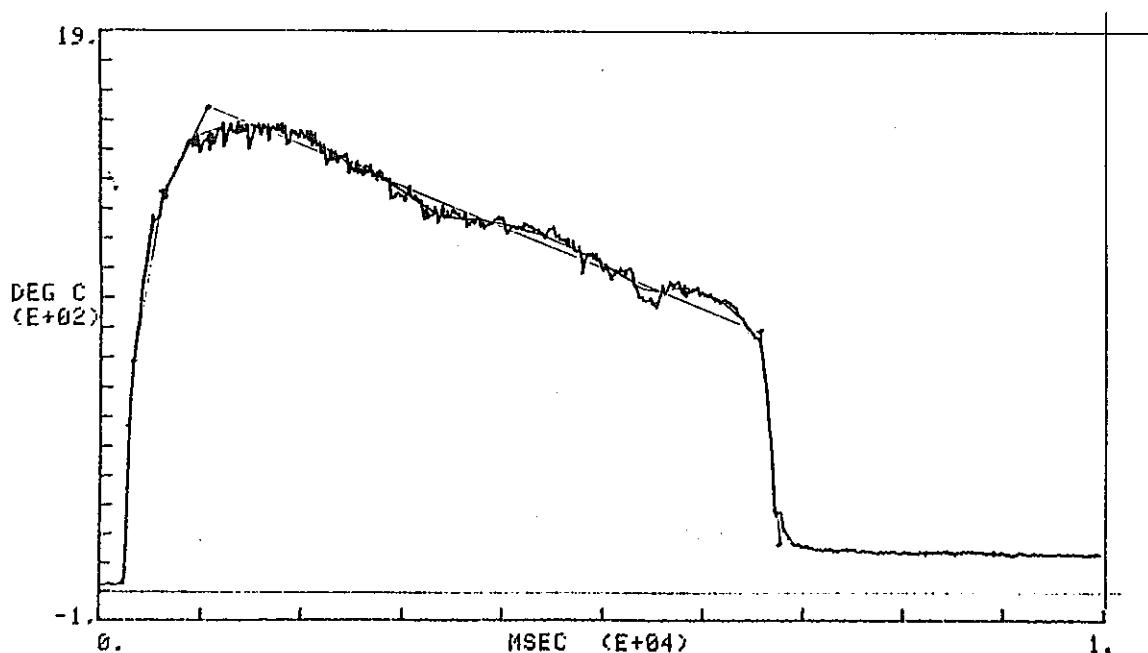
ADR-10



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

CLAD TEMP #3

ADR-10

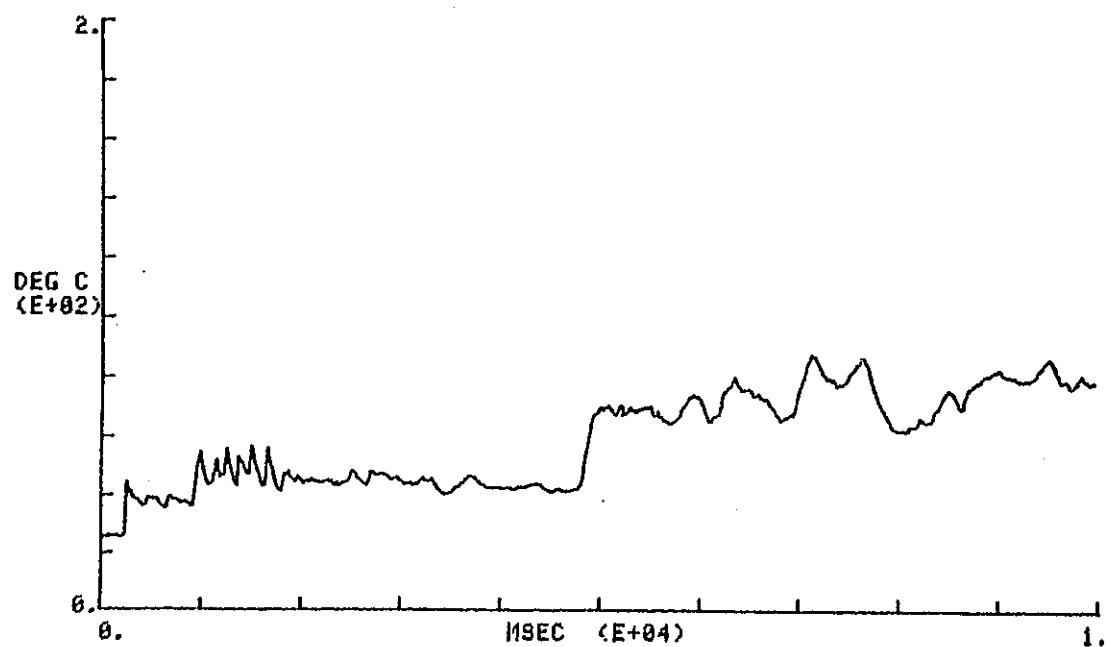


PNC SN841-84-23

EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

WATER TEMP

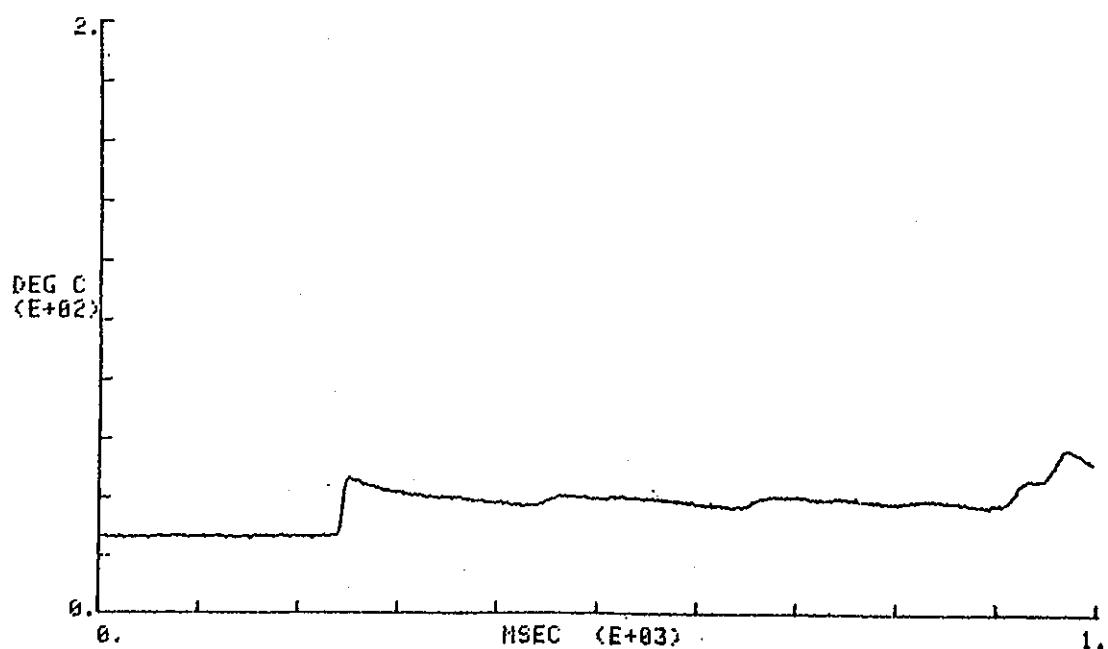
ADR-07



EX.NO = 1221 ; 701-6 4,10\$

WATER TEMP

ADR-07



1982.10.27

実験NO.701-7の実験過渡記録

原研 反応度安全研究室

1. 実験目的

混合酸化物燃料の破損しきい値の把握

2. 実験条件

- (1) 試験燃料棒番号: Pu-NS-09
- (2) 実験カプセル: I-N-Dカプセル(2重カプセル)
- (3) 実験実施日時: 昭和57年8月27日 11:28
- (4) 投入反応度: 4.05 \$
- (5) 炉心積分出力: #1 = 91.3 MW.S
: #2 = 88.2 MW.S } 平均 89.8 MW.S
- (6) 推定発熱量*: 294 cal/g・Mox

3. 実験過渡記録

別添図の通り

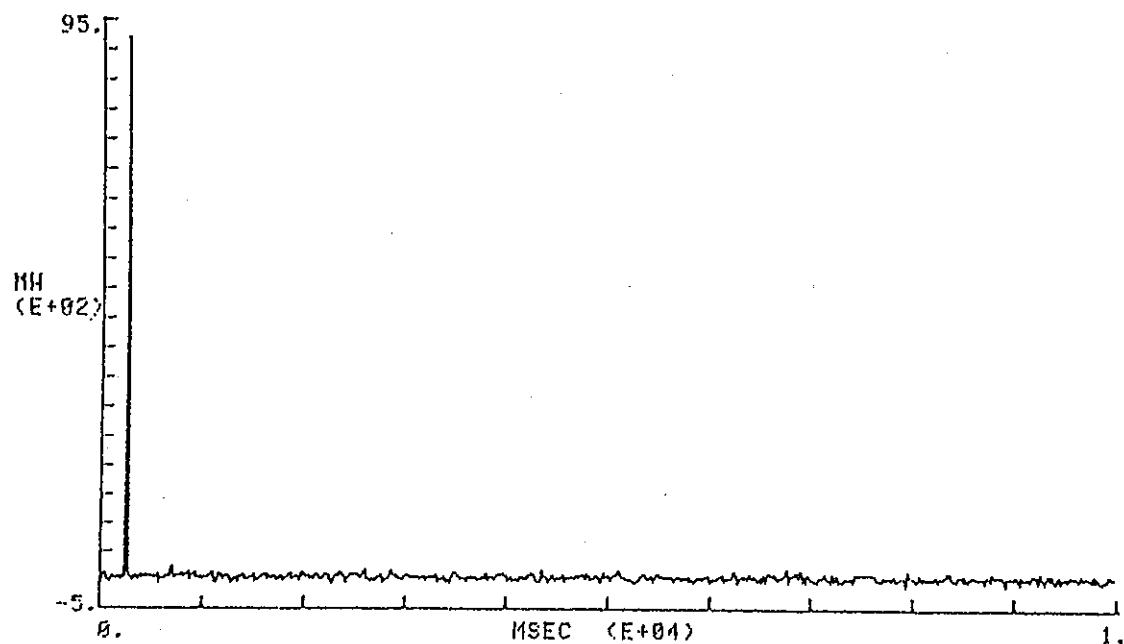
*) 3.27 cal/g・Mox/MW・Sを仮定

PNC SN841-84-23

EX.NO = 1238 ; 701-7 4.05\$

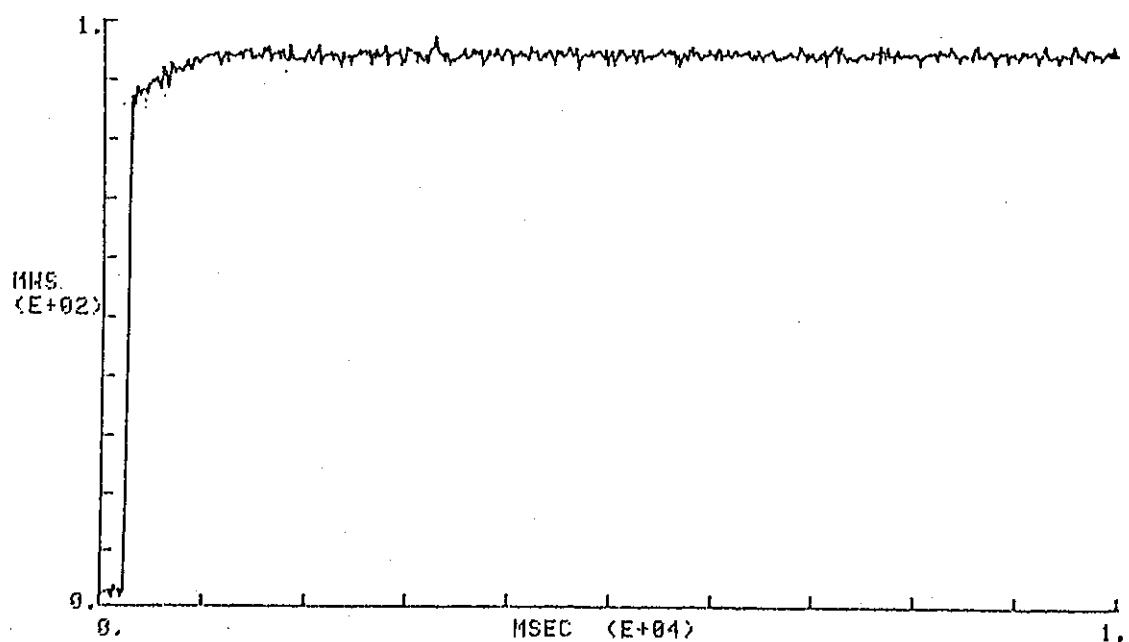
ADR-19

炉出力 #1



EX.NO = 1238 ; 701-7 4.05\$

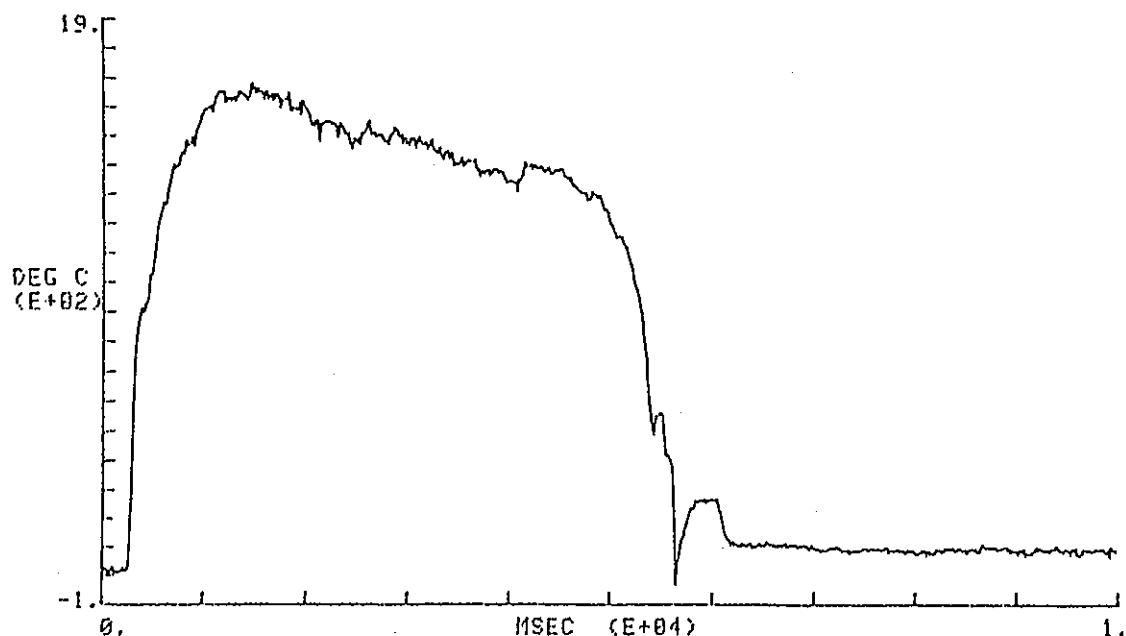
ADR-21 炉出力積分値 #1



PNC SN841-84-23

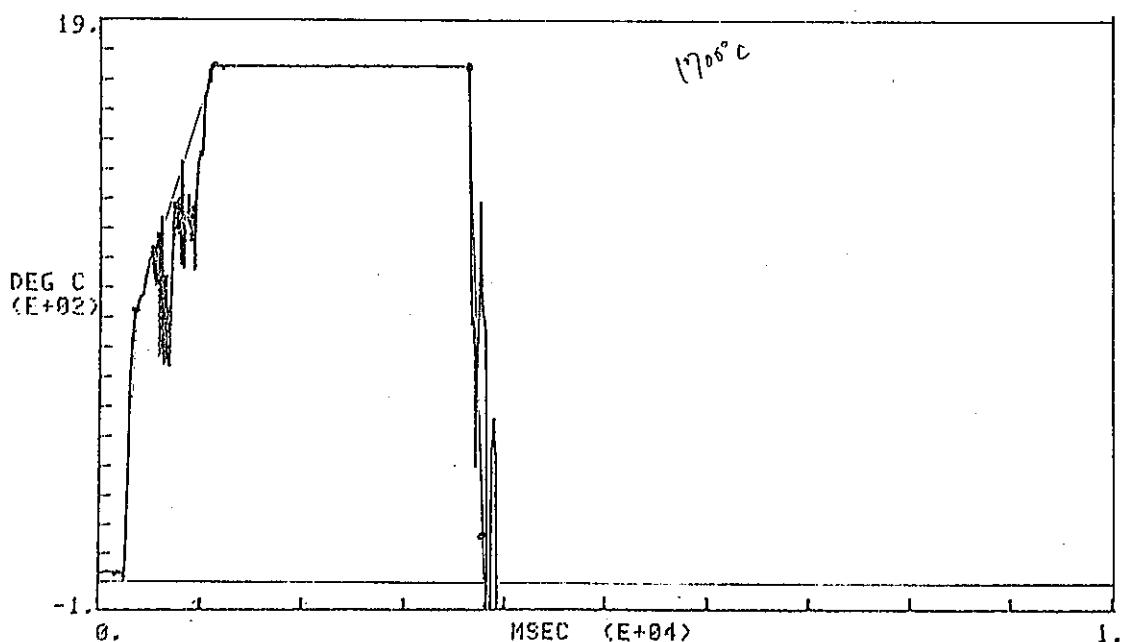
EX.NO = 1238 ; 701-7 4.054

ADR-09 被覆管表面温度#1(下部)



EX.NO = 1238 ; 701-7 4.054

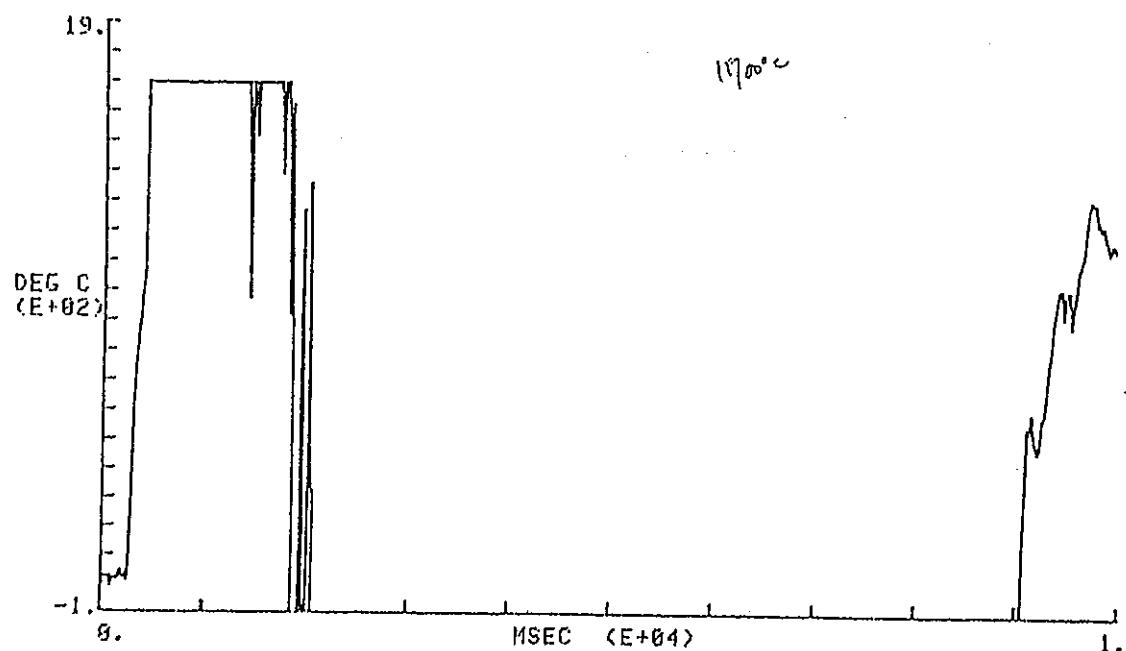
ADR-10 被覆管表面温度#2(中央部)



PNC SN841-84-23

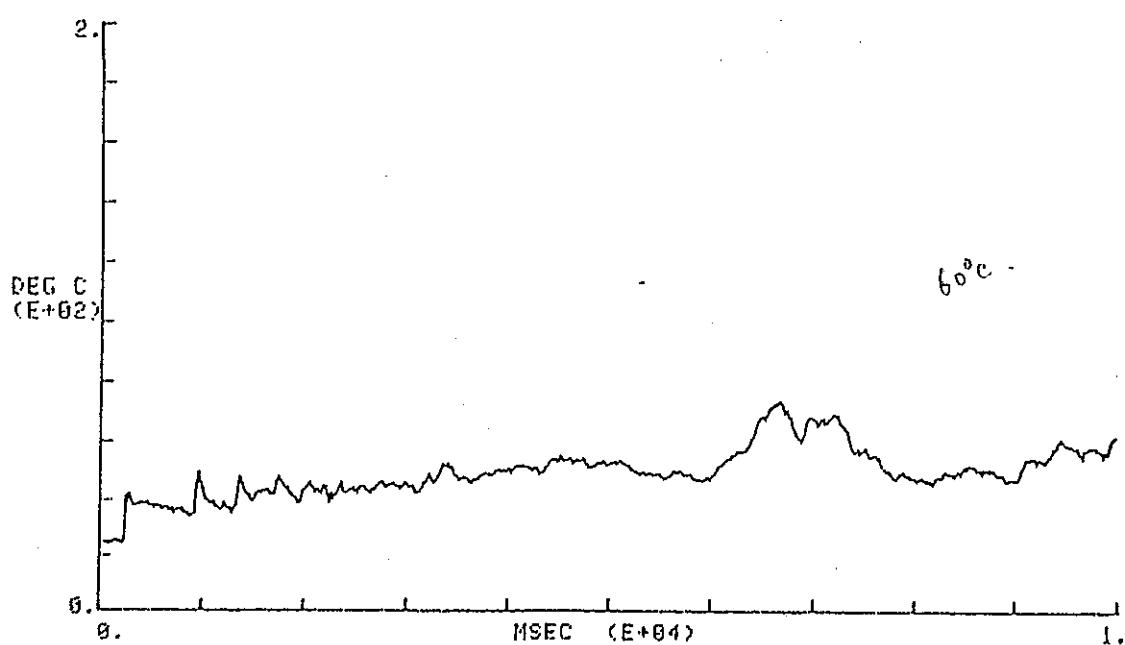
EX.NO = 1238 ; 701-7 4.05\$

ADR-11 被覆管表面温度#4(中央部)



EX.NO = 1238 ; 701-7 4.05\$

ADR-08 カプセル水温



1982.10.27

実験NO.701-8の実験過渡記録

原研 反応度安全研究室

1. 実験目的

混合酸化物燃料のDNBしきい値、温度挙動の把握

2. 実験条件

- (1) 試験燃料番号 : PU-NS-03
- (2) 実験カプセル : I-N-D カプセル (2重カプセル)
- (3) 実験実施日時 : 昭和57年10月21日 15時59分
- (4) 投入反応度 : 2.8 \$
- (5) 炉心積分出力 : #1 = 54 MW・S
#2 = 52 MW・S } 平均 53 MW・S
- (6) 推定発熱量 : 173 cal/g.MO₂
(3.27 cal/g.MO₂/MW.Sを仮定)

3. 実験過渡記録 (詳細 別添図参照)

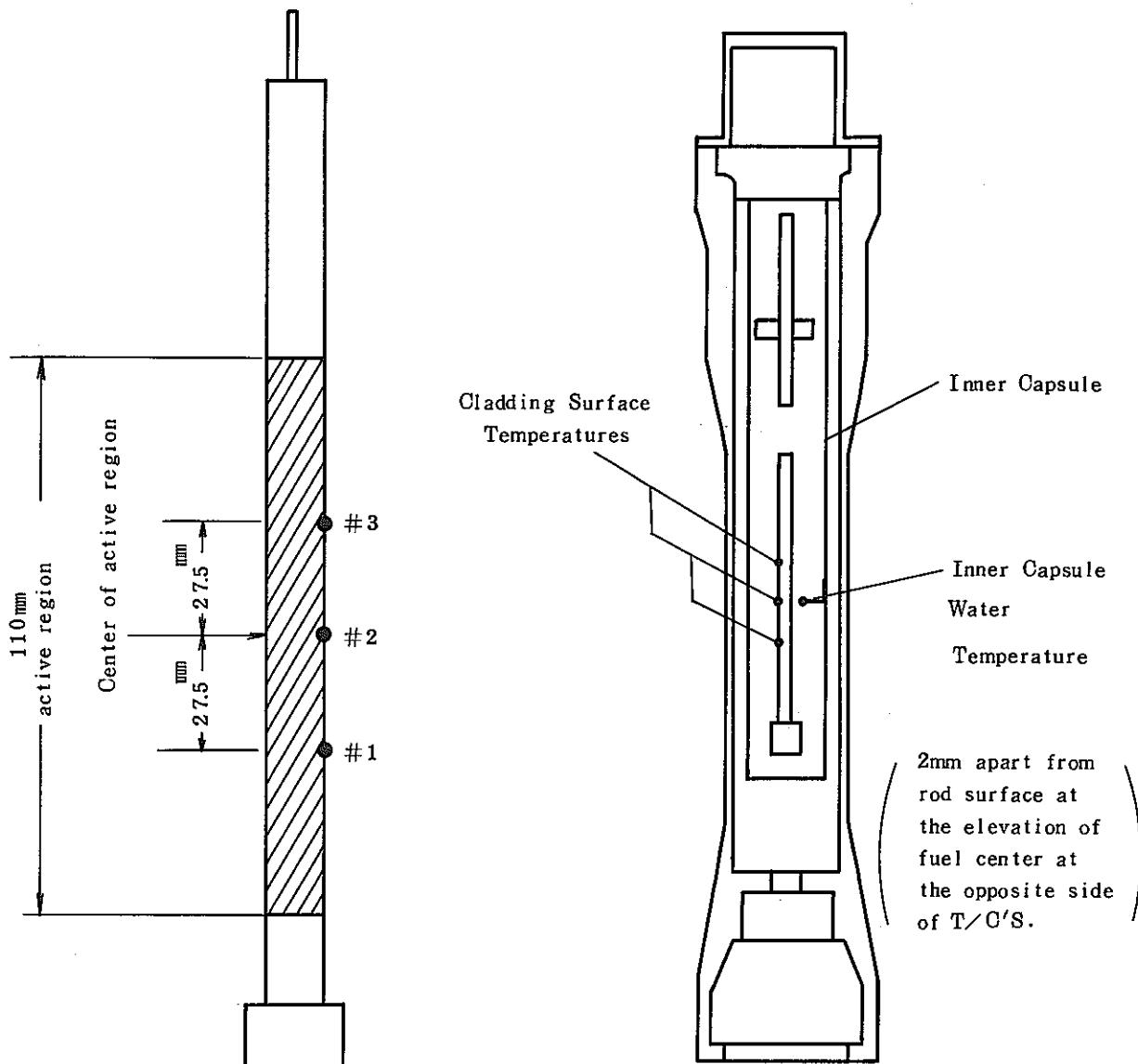
(1) 被覆管表面温度

	最高(°C)	FBD(sec)
#1 (中心より33mm下) :	~1,050	~2
#2 (燃料中心高さ) :	~1,000	~1.5
#3 (中心より33mm上) :	~1,000	~2

(2) カプセル水温 : 初期 24°C 最高 ~60°C

MEASURING INSTRUMENTS

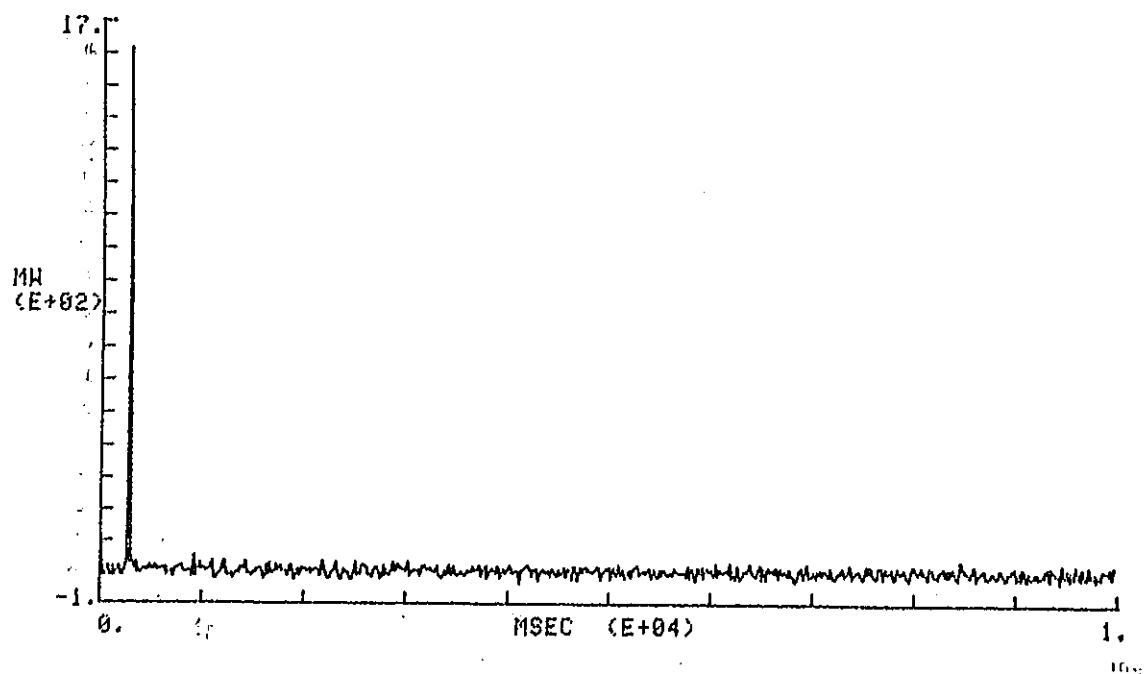
701-8



PNC SN841-84-23

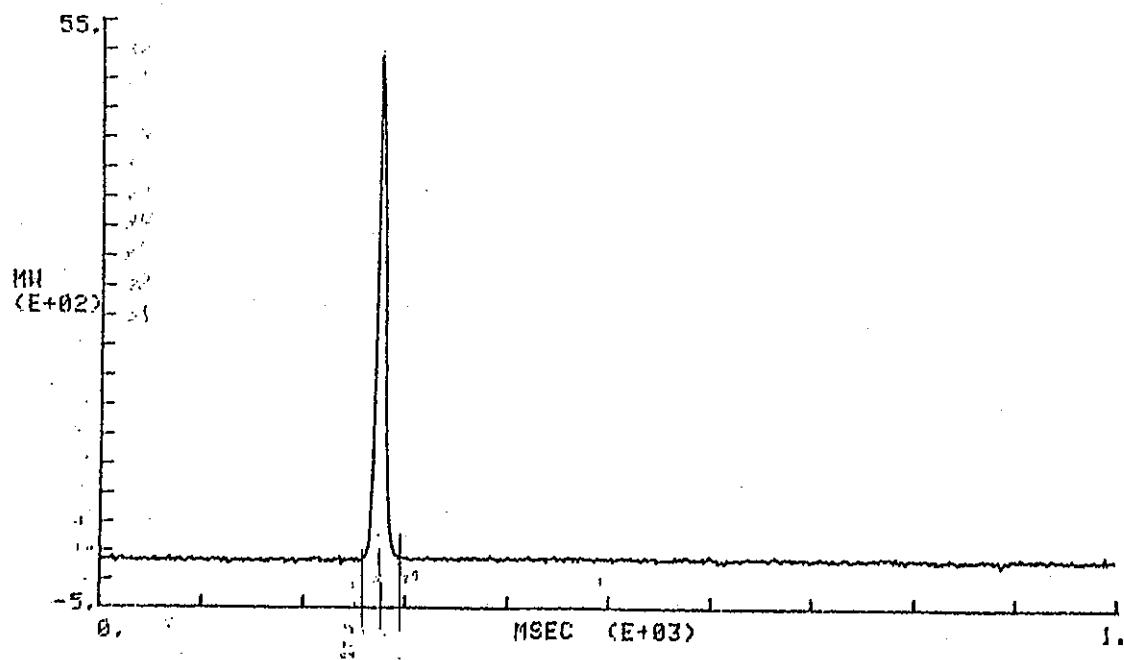
EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

ADR-19 NV #1



EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

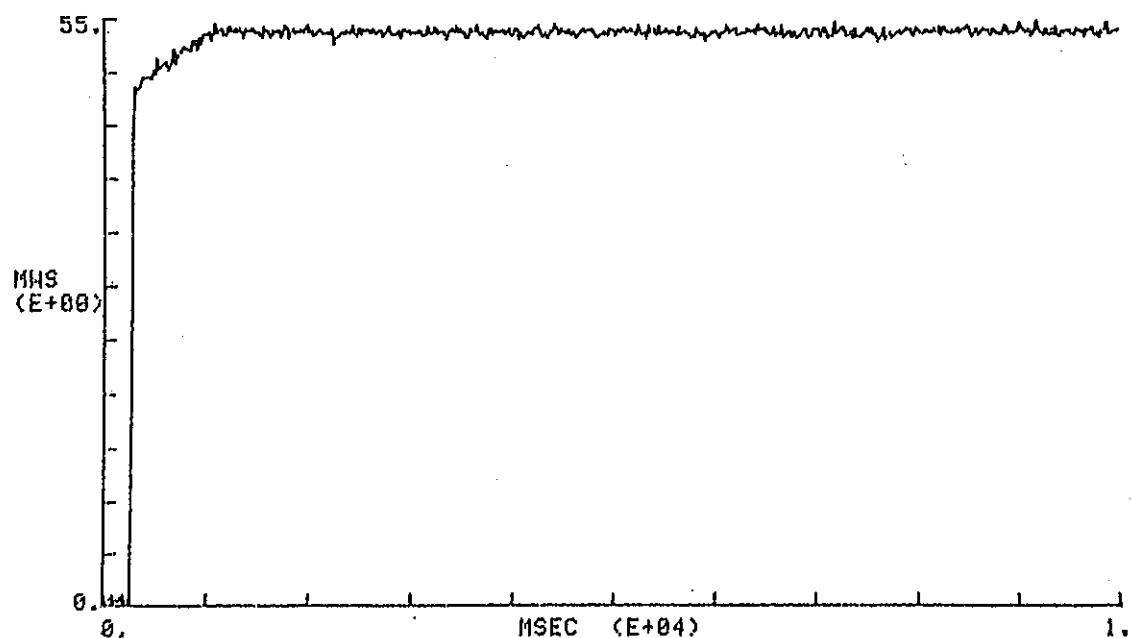
ADR-19 NV #1



PNC SN841-84-23

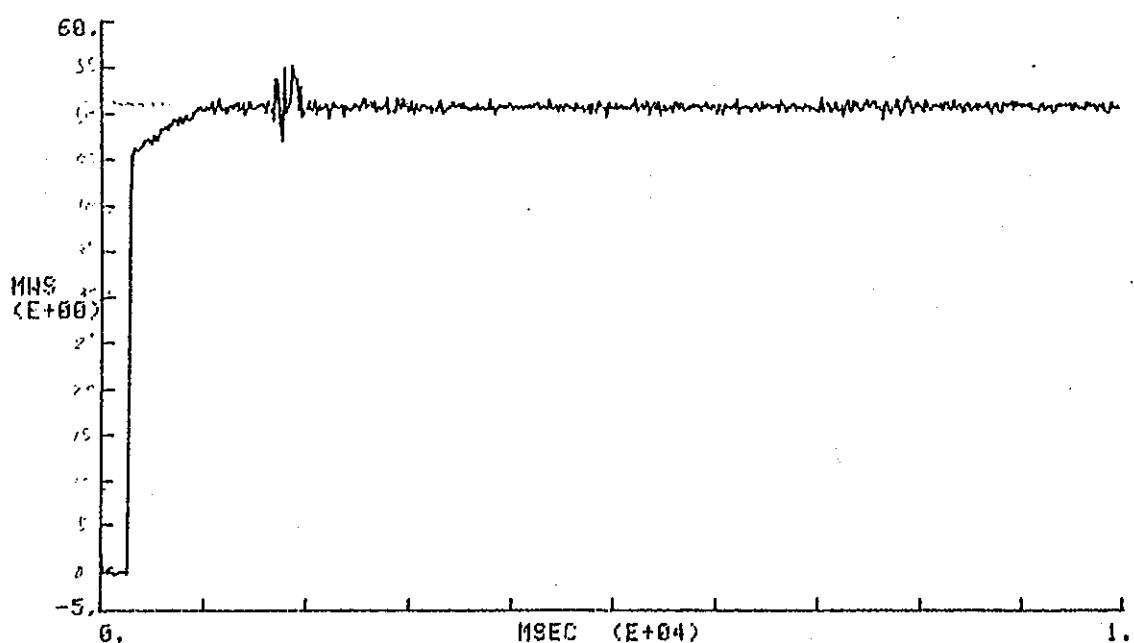
EX.NO = 1260 ; 701-B 2.8\$

ADR-21 NVT #1



EX.NO = 1260 ; 701-B 2.8\$

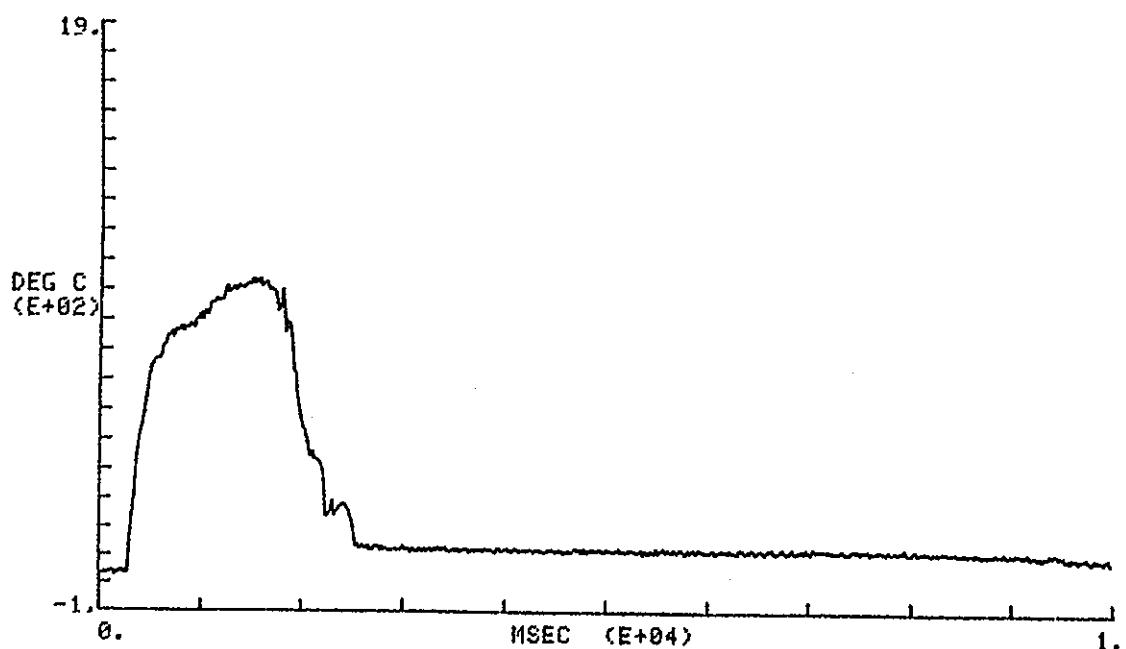
ADR-22 NVT #2



PNC SN841-84-23

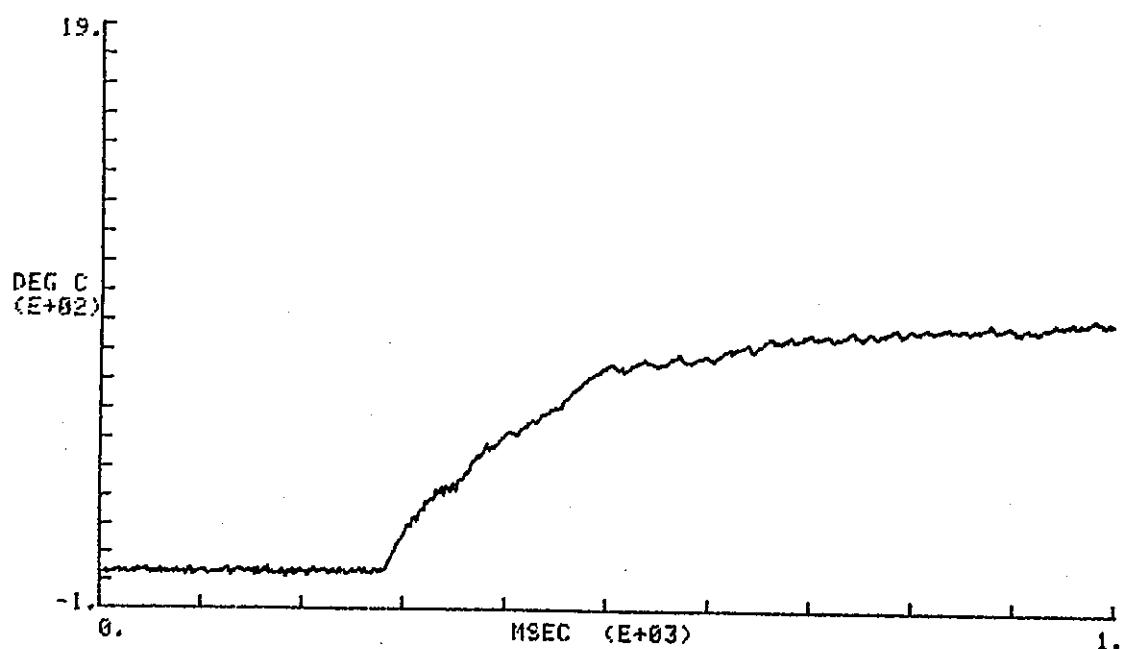
EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

ADR-89 Cladding Surface Temperature #1



EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

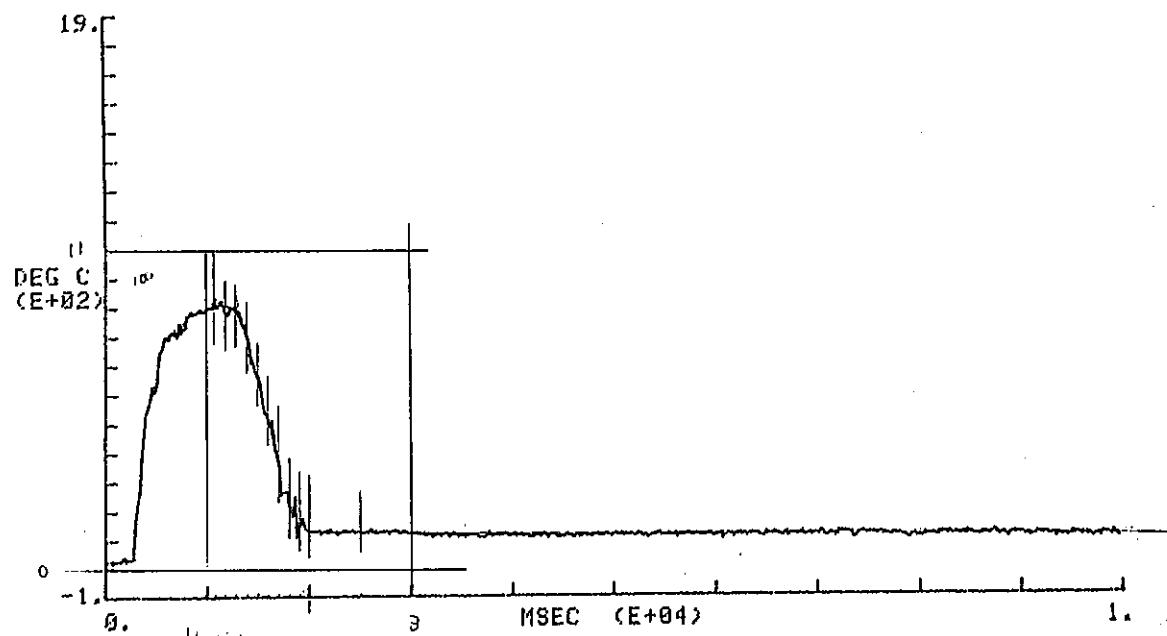
ADR-89 Cladding Surface Temperature #1



PNC SN841-84-23

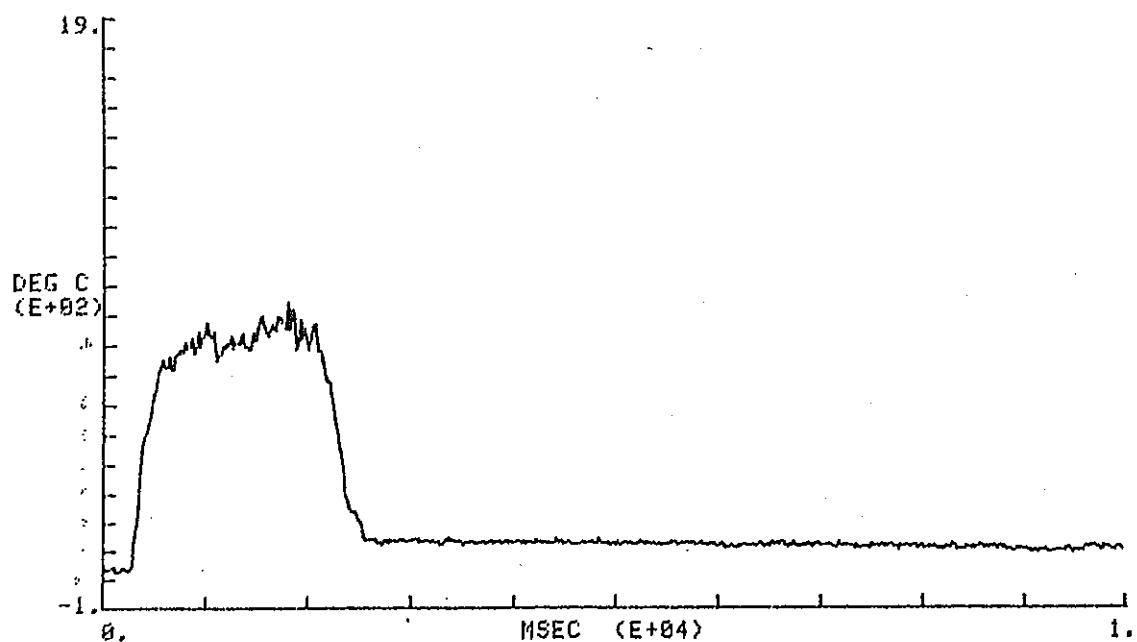
EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

ADR-10 Cladding Surface Temperature #2



EX.NO = 1260 ; 701-8 2.8\$

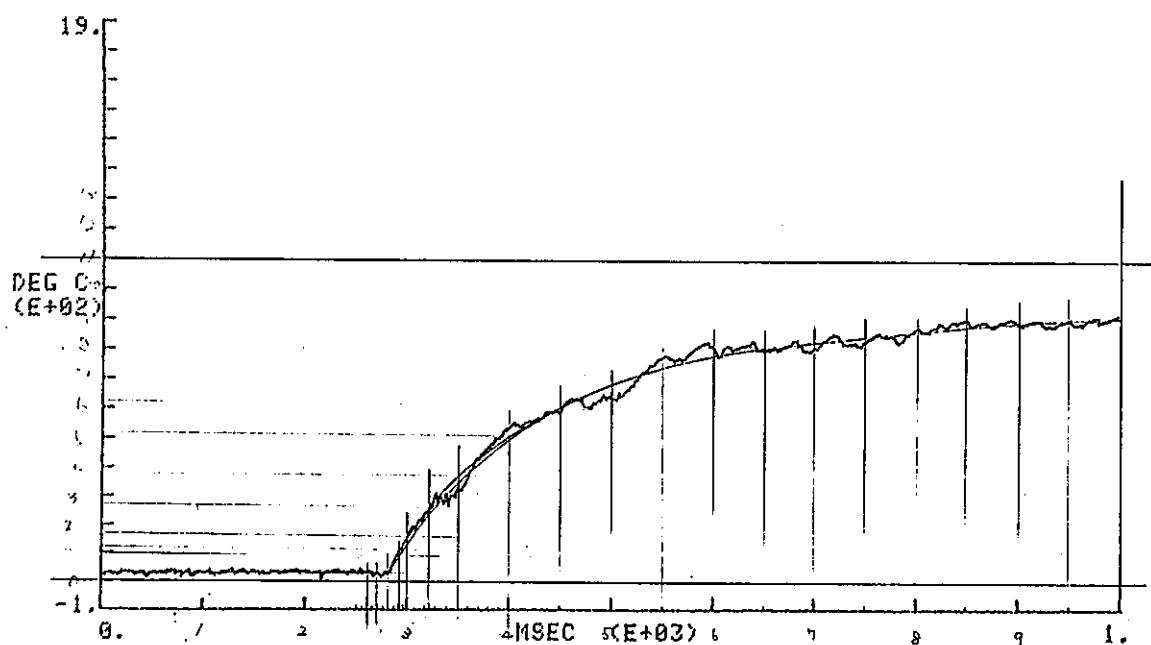
ADR-11 Cladding Surface Temperature #3



PNC SN841-84-23

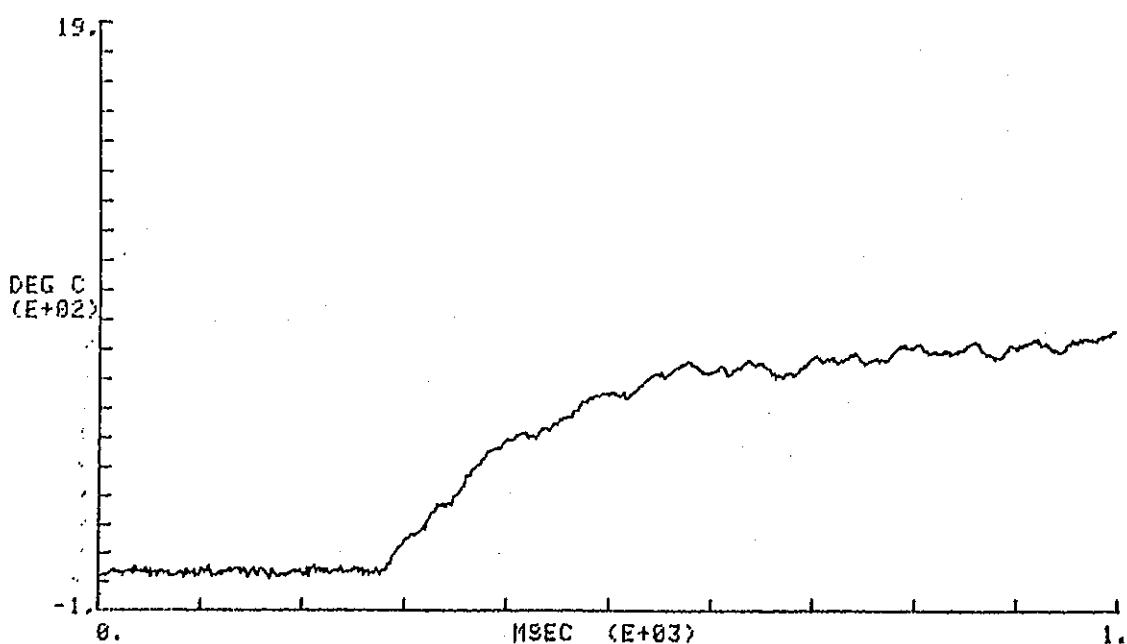
EX.HO = 1260 ; 701-8 2.8\$

ADR-10 Cladding Surface Temperature #2



EX.HO = 1260 ; 701-8 2.8\$

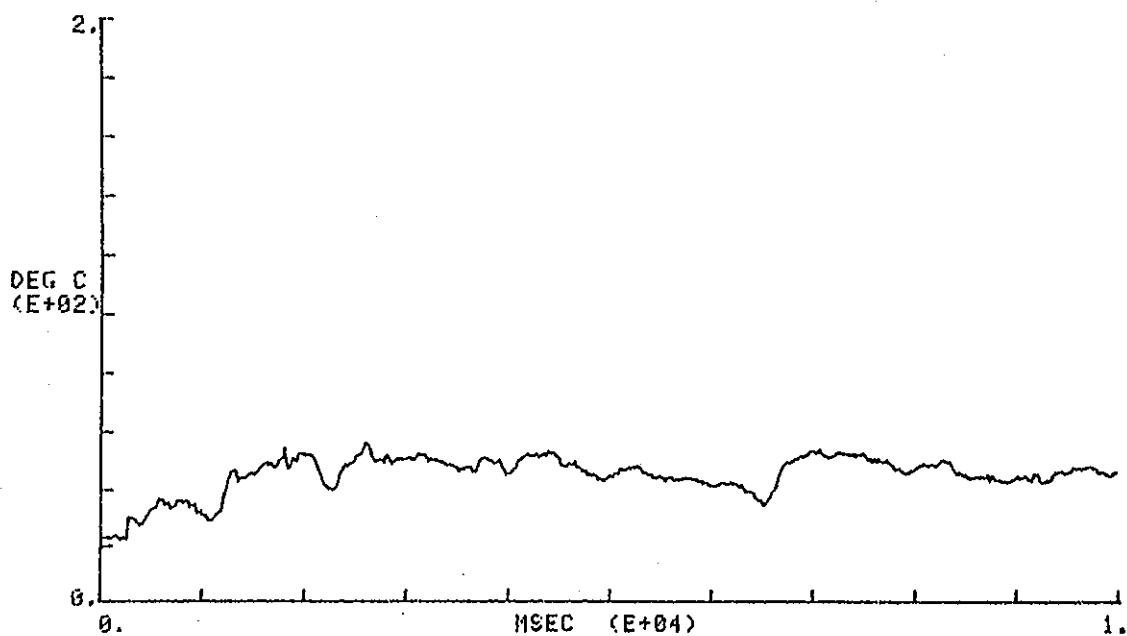
ADR-11 Cladding Surface Temperature #3



PNC SN841-84-23

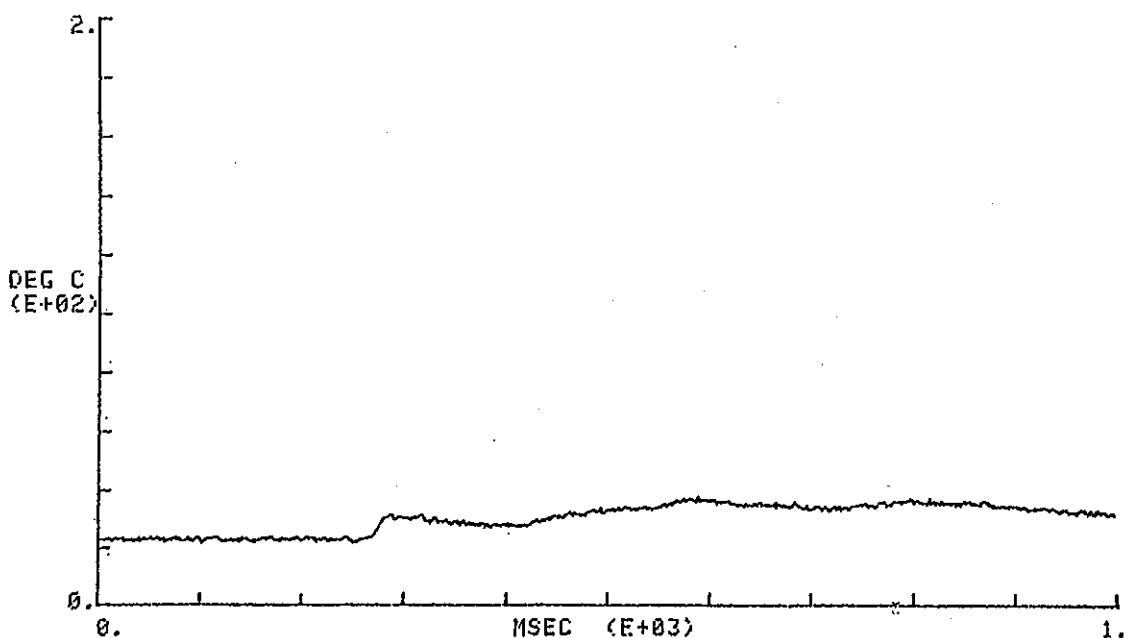
EX.NO = 1260 ; 701-B 2.8\$

ADR-08 Inner Capsule Water Temperature



EX.NO = 1260 ; 701-B 2.8\$

ADR-08 Inner Capsule Water Temperature



1983. 2. 09

実験NO.701-9の実験過渡記録

原研 反応度安全研究室

1. 実験目的

混合酸化物燃料の温度挙動の把握

2. 実験条件

- (1) 試験燃料棒番号： PU-NS-05
- (2) 実験カプセル： I-N-Dカプセル
- (3) 実験実施日時： 昭和57年12月3日 11:09
- (4) 投入反応度： 2.51%
- (5) 炉心積分出力： #1 = 4.54 MW·S #2 = 4.27 MW·S } 平均 4.41 MW·S
- (6) 推定発熱量： #1 = 123^{*1)} / 134^{*2)} cal/g.MOX (従来の計算値 145 cal/g.MOX)

3. 実験過渡記録

被覆管表面最高温度 #1 = 約 250°C

#2 = 約 250°C

#3 = 約 300°C

水温最高値 = 約 55°C (初期値約 20°C)

*1) 701-1の分析による平均値 2.80 cal/g/MW.S に基く

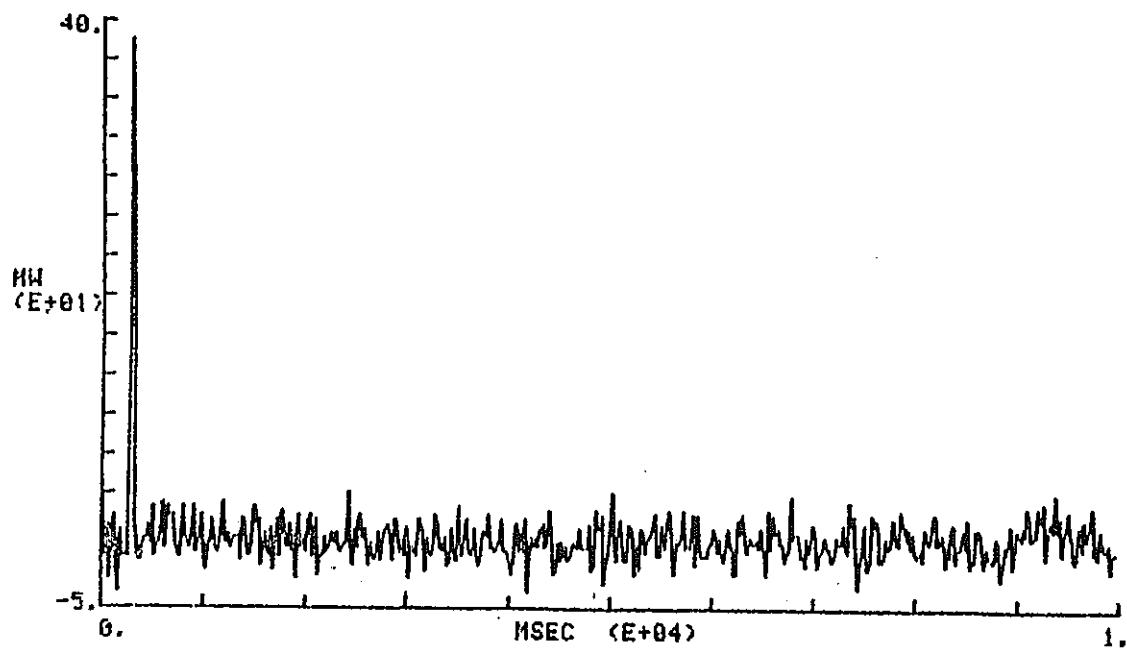
*2) // 最大値 3.03 // に基く

発熱量の算出：701-2の分析中→終了次第確定値を出す。

PNC SN841-84-23

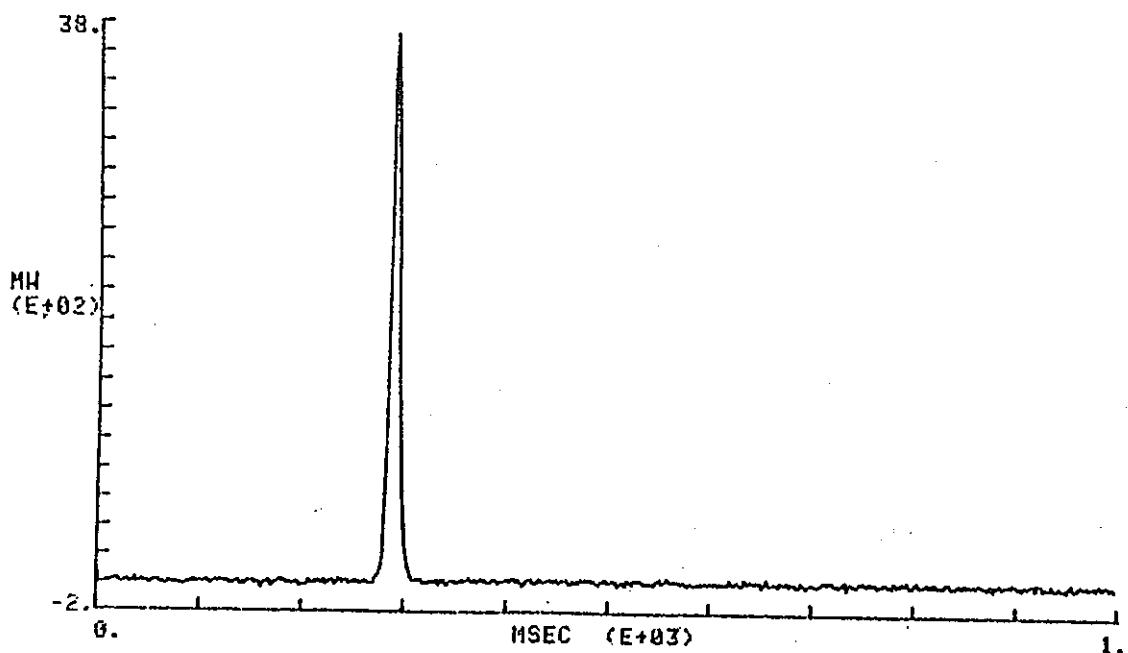
EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

ADR-19 NV #1



EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

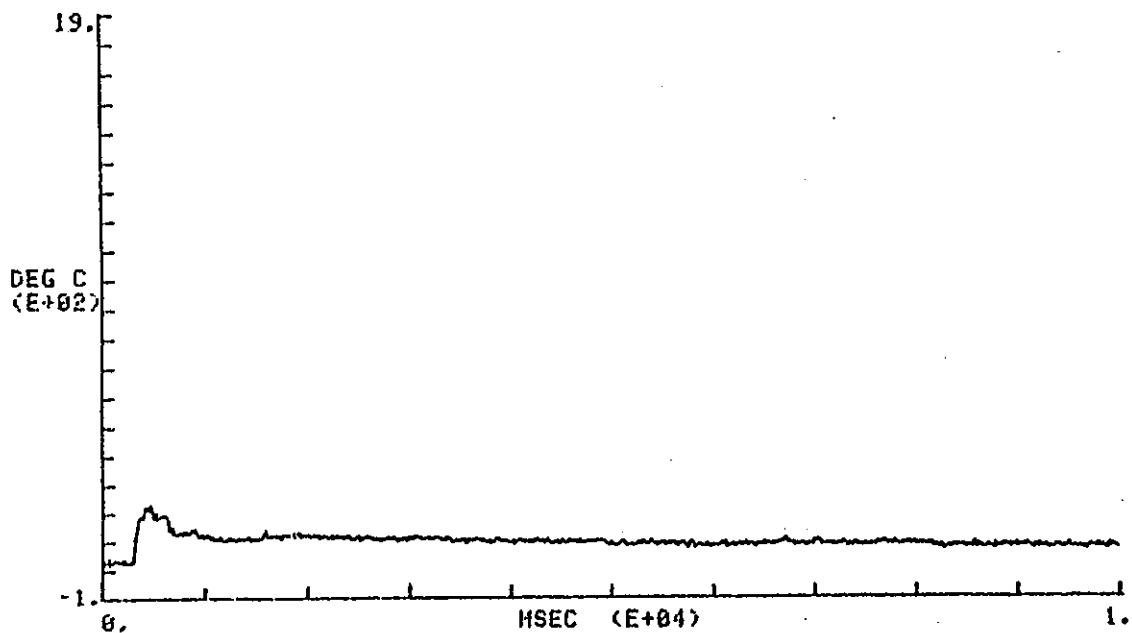
ADR-19 NV #1



PNC SN8 41-84-23

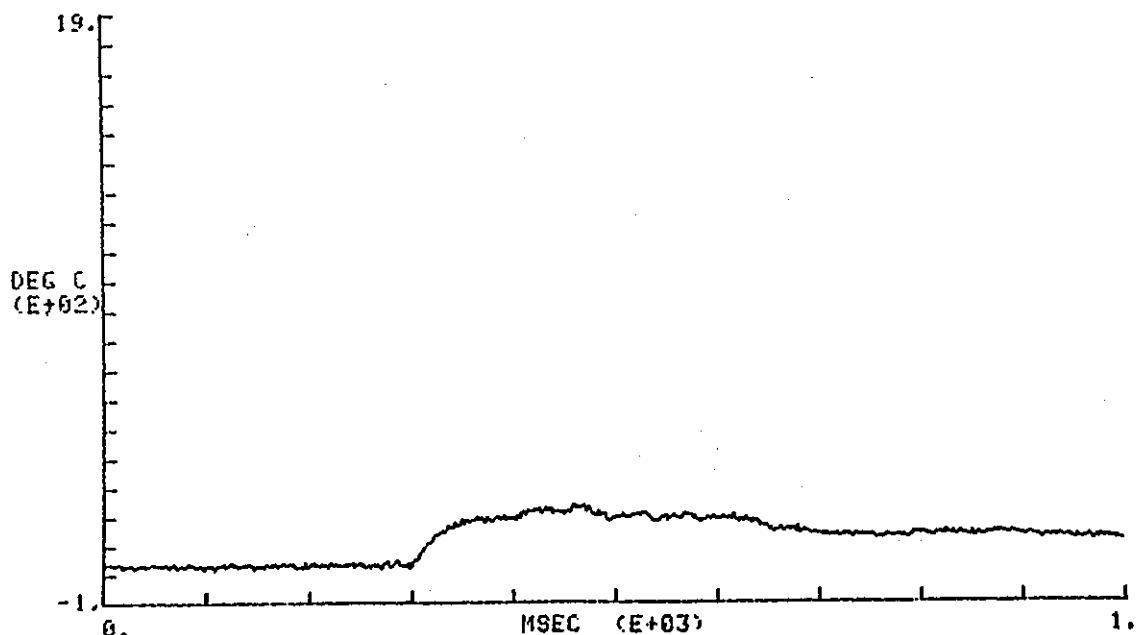
EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

ADR-10 CLAD TEMP #1



EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

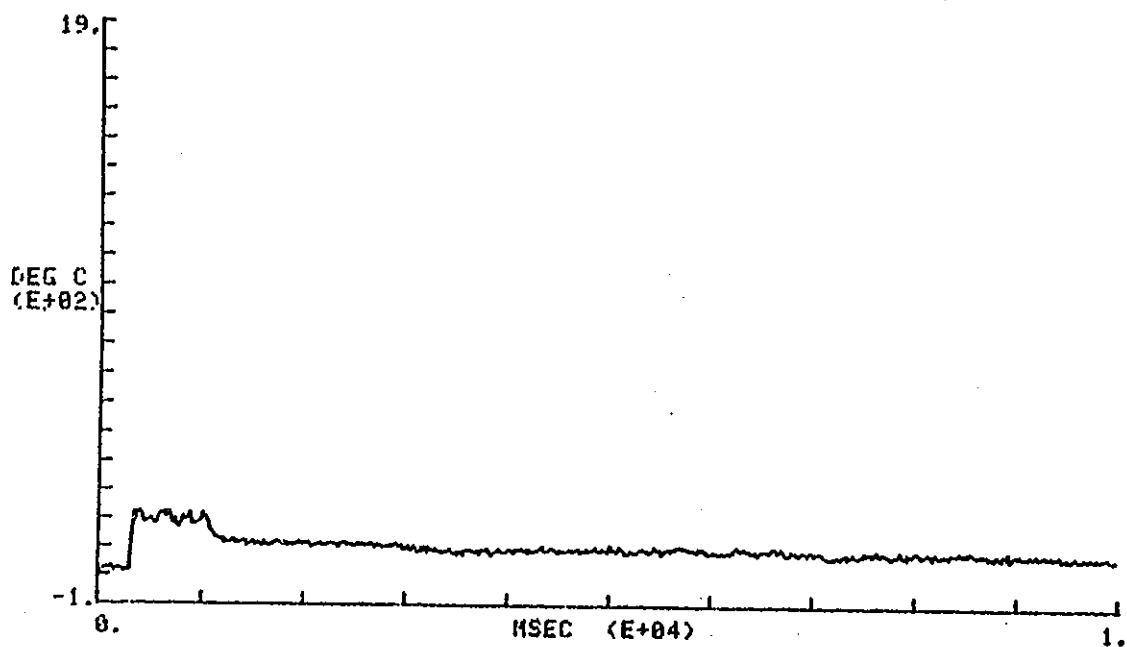
ADR-10 CLAD TEMP #1



PNC SN841-84-23

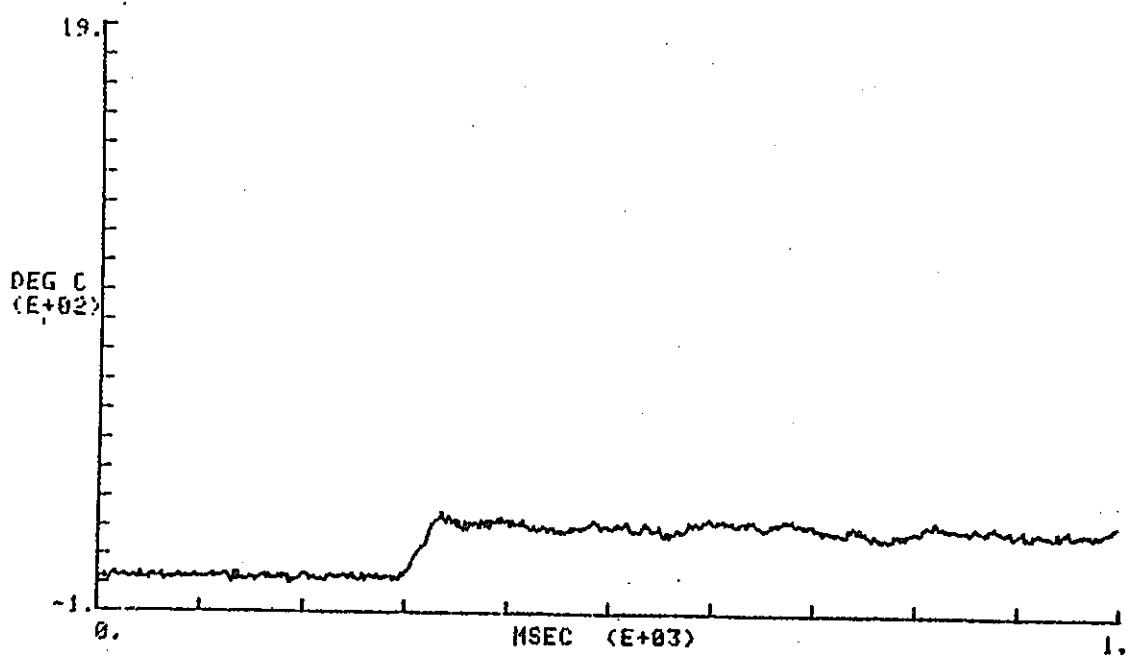
EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

ADR-11 CLAD TEMP #2



EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

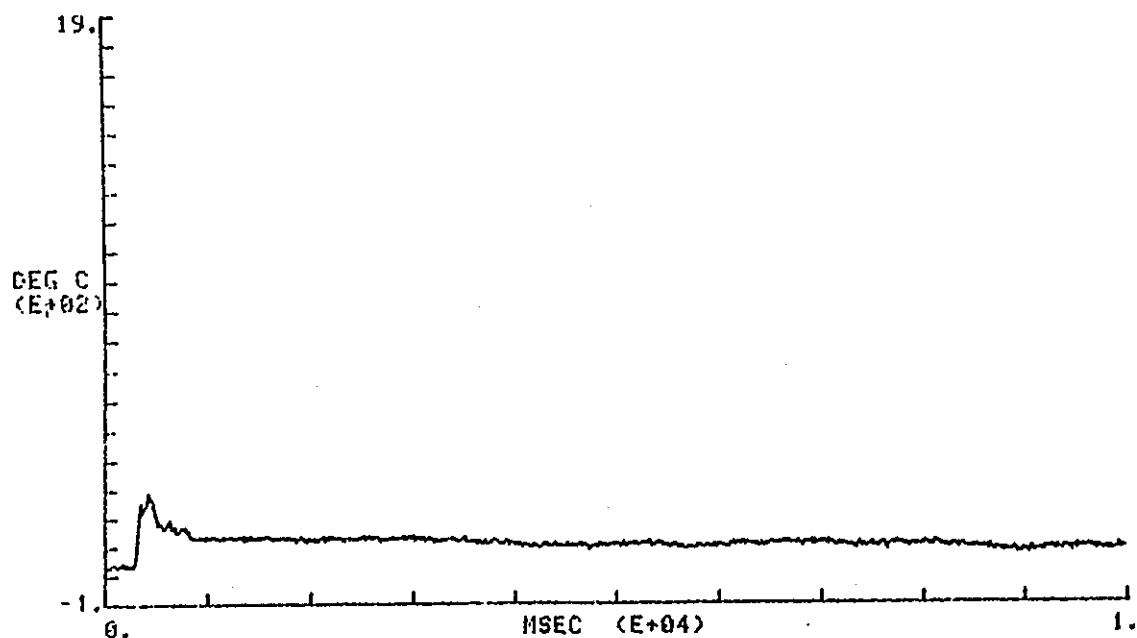
ADR-11 CLAD TEMP #2



PNC SN841-84-23

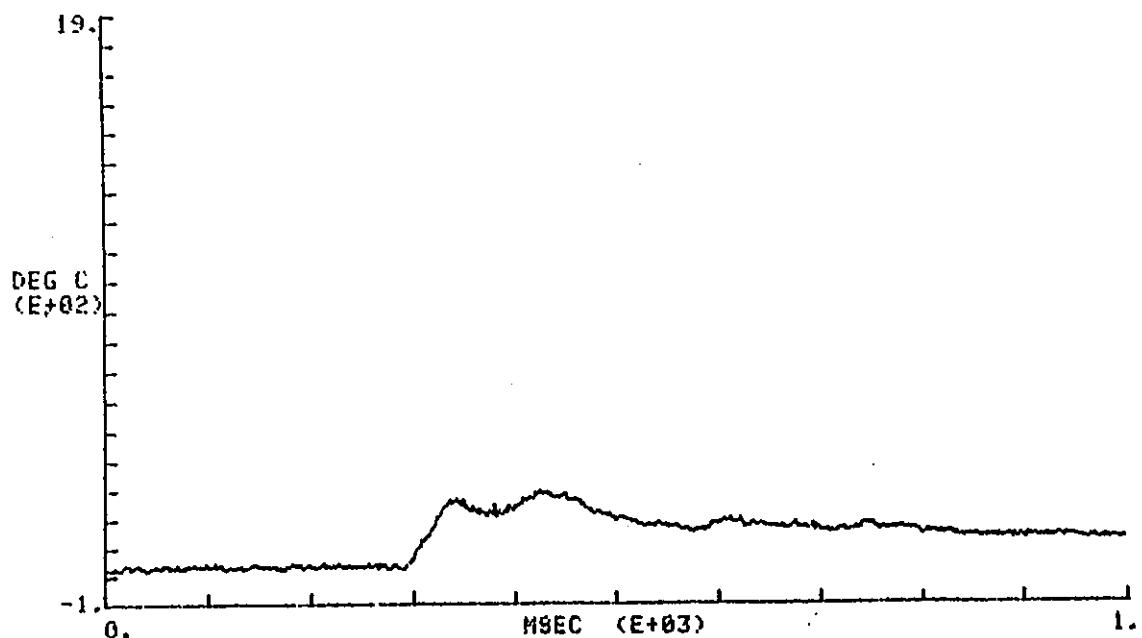
EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

ADR-12 CLAD TEMP #3



EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

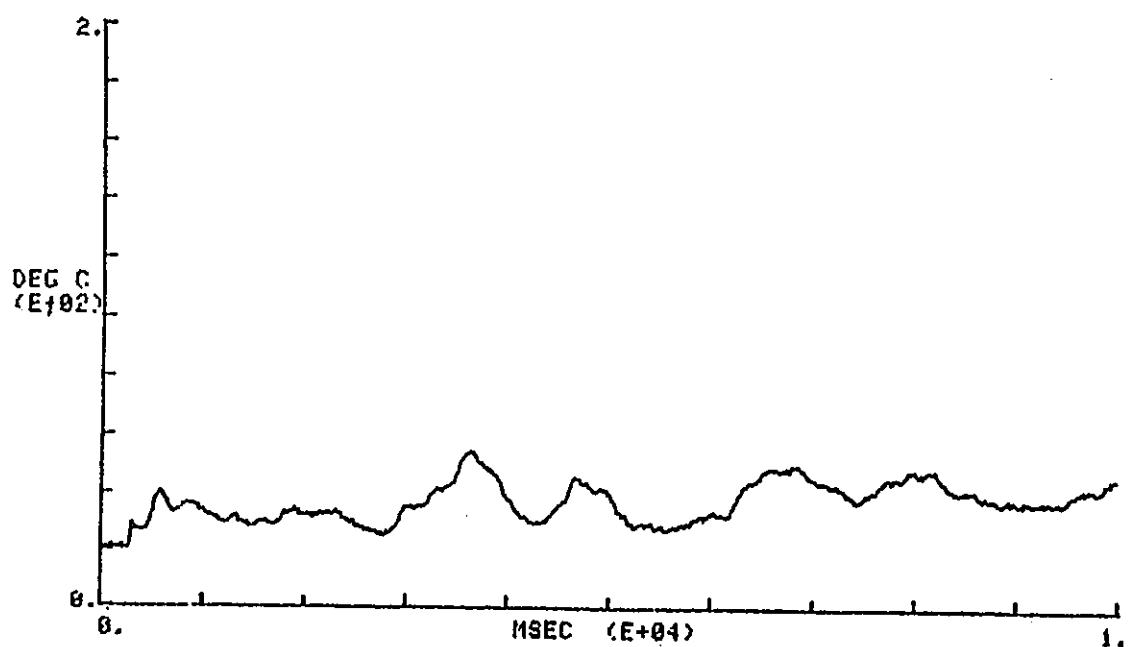
ADR-12 CLAD TEMP #3



PNC SN841-84-23

EX.NO = 1272 ; 701-9 2.51\$

ADR-89 WATER TEMP



1983. 2. 9

実験N O. 701-10の実験過渡記録

原研 反応度安全研究室

1. 実験目的

混合酸化物燃料の破損挙動の把握（最大発熱量での実験）

2. 実験条件

(1) 試験燃料番号： PU-NS-10

(2) 実験カプセル： I-N-D カプセル（2重カプセル）

(3) 実験実施日時： 昭和57年12月10日 午前11時42分00秒

(4) 投入反応度： 4.4 \$

(5) 炉心積分出力： $\#1 = 104 \text{ MW.S}$ $\#2 = 100 \text{ MW.S}$ } 平均 102 MW.S (6) 推定発熱量： 286 cal/g.MO_2 ($2.80 \text{ cal/g.MO}_2 / \text{MW.S}$ ^{*1} を仮定)
 309 cal/g.MO_2 ($3.03 \text{ cal/g.MO}_2 / \text{MW.S}$ ^{*2} を仮定)従来計算値 → 336 cal/g.MOX

3. 実験過渡記録（詳細 別添図参照）

(1) 被覆管表面温度

#1 (中心より33mm下, 0°) : 照射後0.65秒後約1690°CでT/C破損

#2 (燃料中心高さ, 0°) : 照射前にT/C破損

#4 (" 180°) : 照射後0.8秒後約1690°CでT/C破損

(2) 冷却水温 (燃料中心高さ, 燃料表面より2mm, 90°)

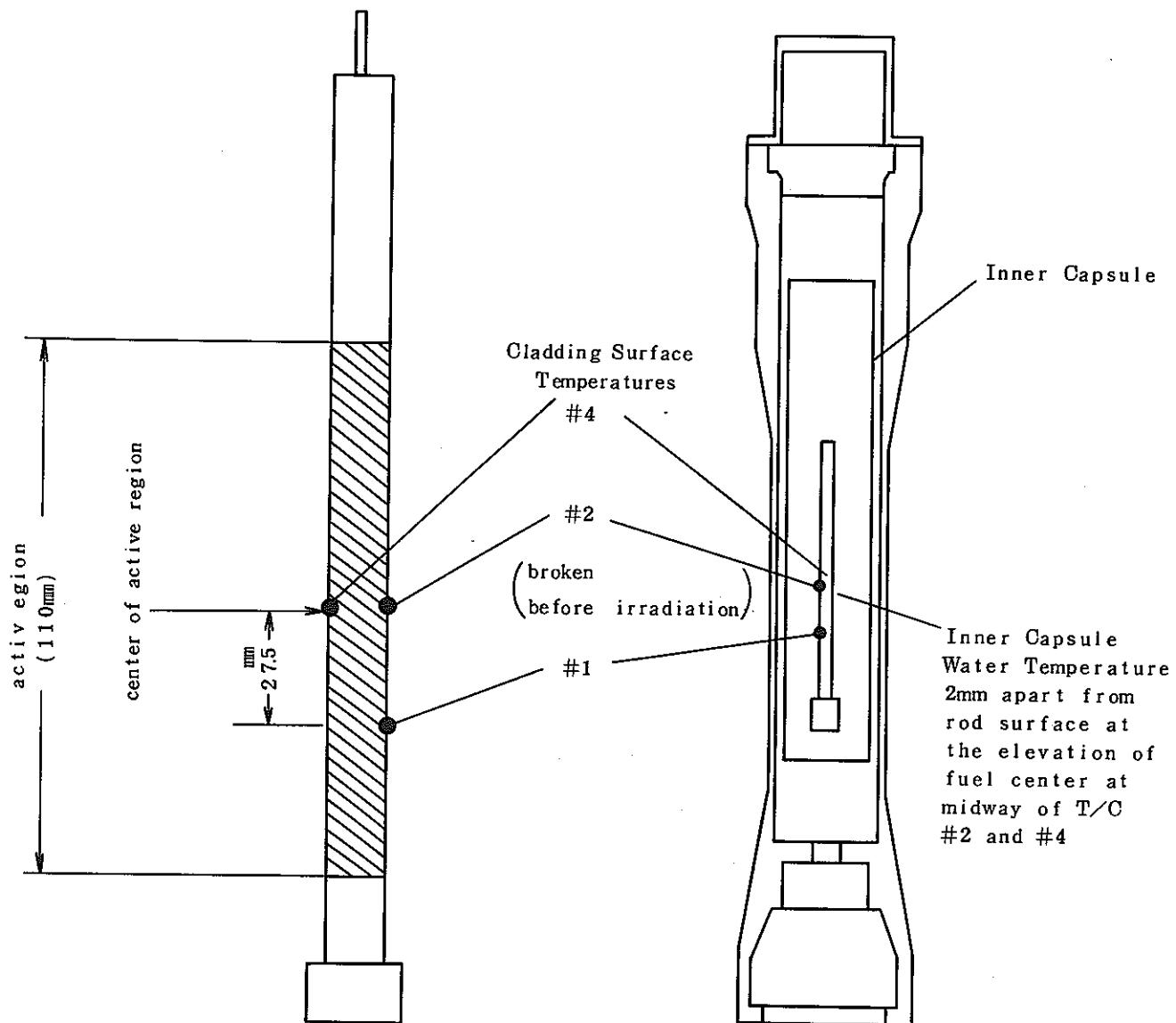
初期22°C, 徐々に増加 照射10秒後76°C

*1 701-1の分析における平均値

*2 701-1の分析における最大値

MEASURING INSTRUMENTS

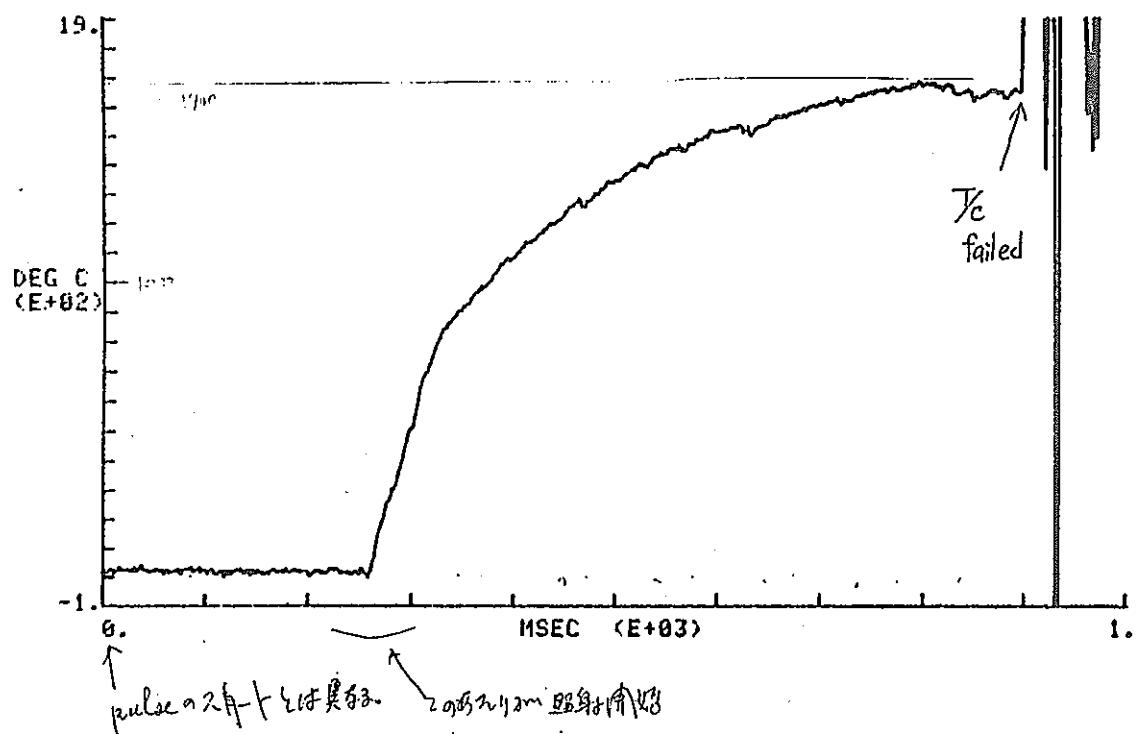
701-10



PNC SN841-84-23

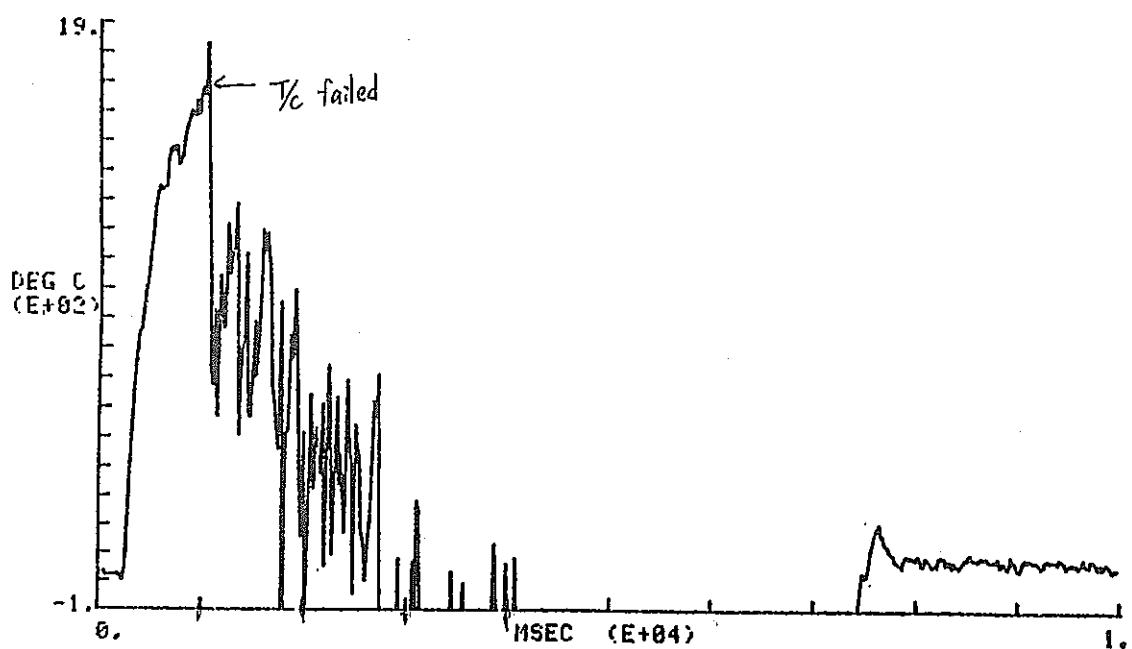
EX.NO = 1276 ; 701-10 4.4\$

ADR-10 Cladding Surface Temperature #1 (0-1sec)



EX.NO = 1276 ; 701-10 4.4\$

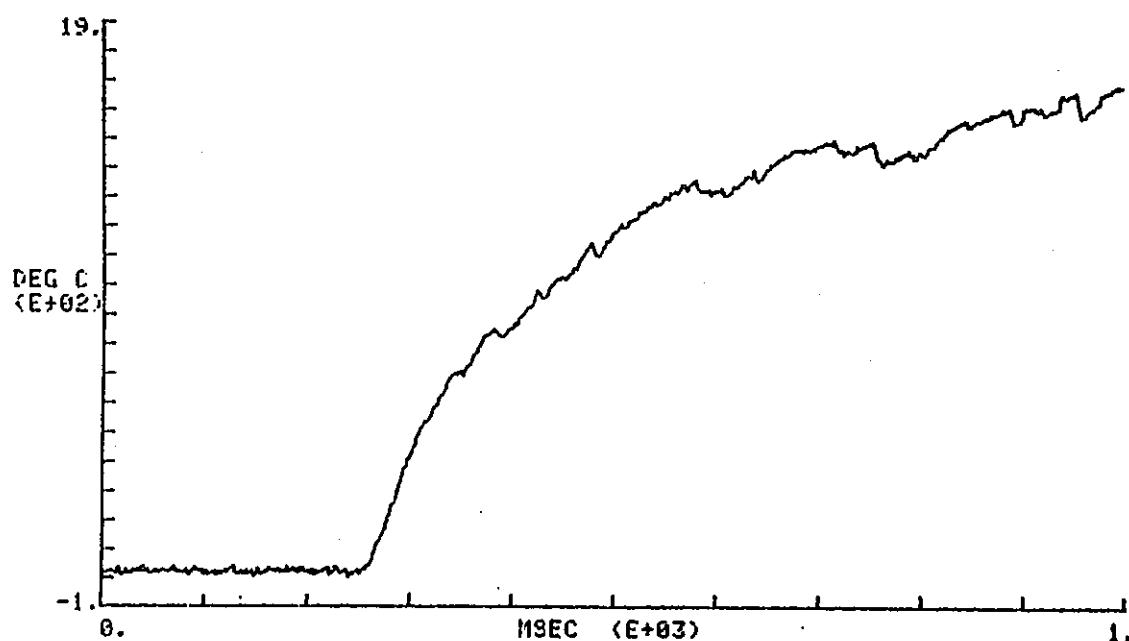
ADR-12 Cladding Surface Temperature #4 (0-10sec)



PNC SN841-84-23

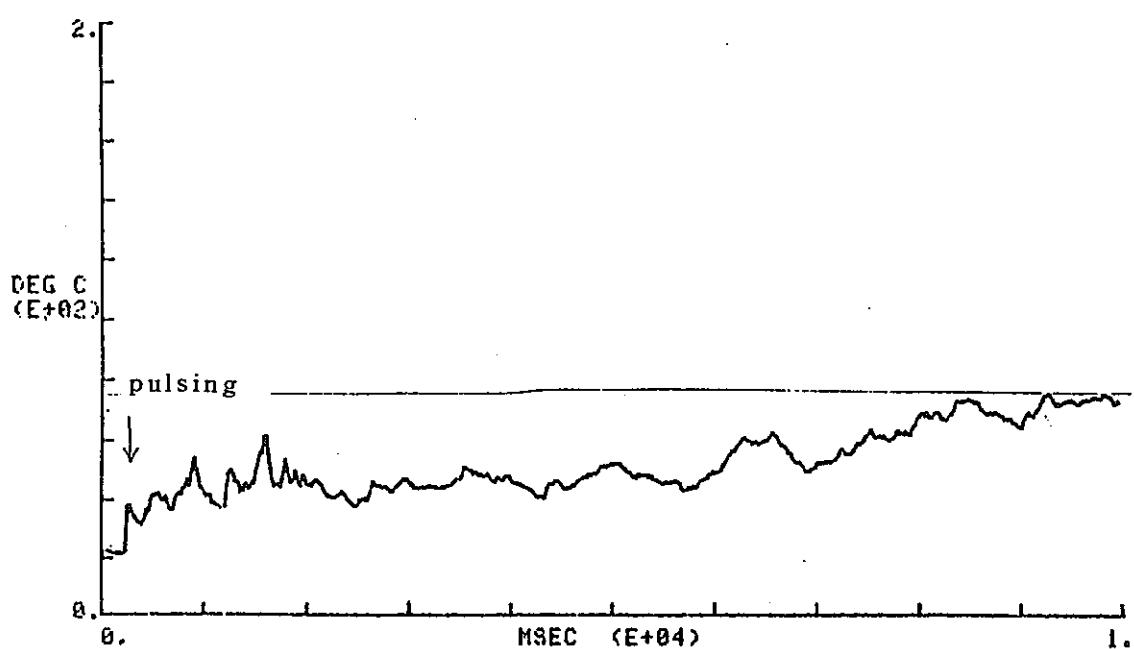
EX.NO = 1276 ; 701-10 4.4\$

ADR-12 Cladding Surface Temperature #4(0-1 sec)



EX.NO = 1276 ; 701-10 4.4\$

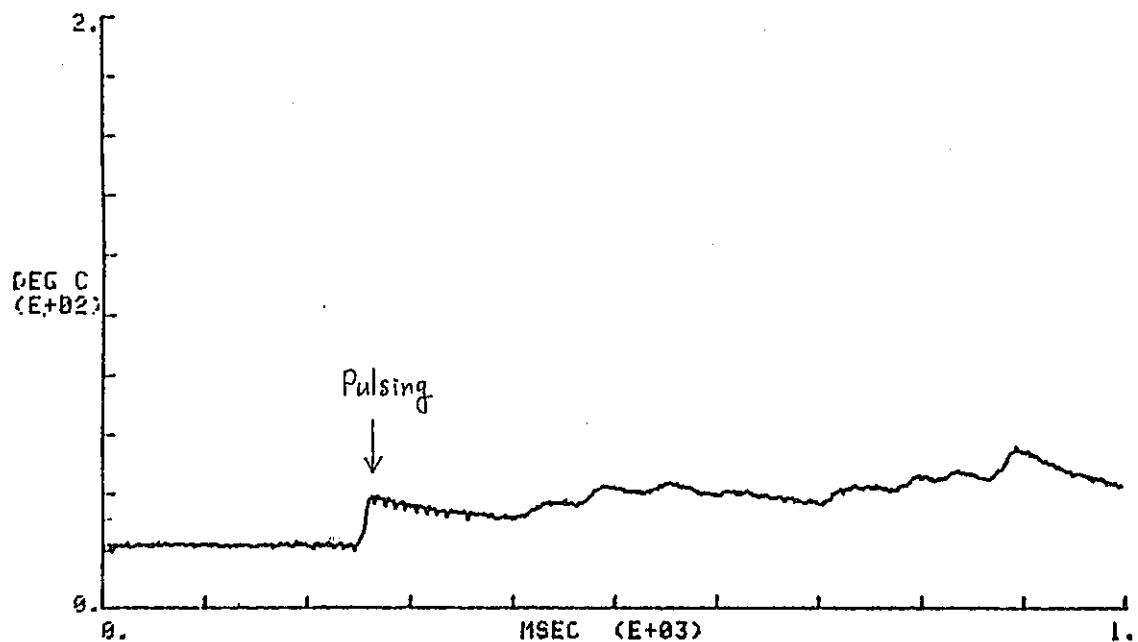
ADR-09 Inner Capsule Water Temperature (0-10 sec)



PNC SN841-84-23

EX.NO = 1276 ; 701-10 4.4\$

ADR-09 Inner Capsule Water Temperature (0-1 sec)



附録2 被覆管酸化膜厚の計算

被覆管酸化膜厚の計算

N S R R 実験で測定された被覆管表面温度から、炉外実験で得られている実験式を使い酸化膜厚を計算で求める。

基本式 $y = \sqrt{ct}$

$$c = C_0 \exp \left(-\frac{Q}{R \cdot T} \right)$$

y : 酸化膜厚 (μm)

t : 反応時間 (sec)

T : 酸化温度 (K°)

R : ガス定数 1.986 (cal/mol $\cdot K^\circ$)

Q : 活性化エネルギー (cal/mol)

C_0 : 比例定数 ($\mu m^2/sec$)

差分型
$$y_{i+1} - y_i = \frac{C_i}{2y_i} \Delta t_i$$

$$\downarrow$$

$$= y_{i-1} + \frac{C_{i-1}}{2y_{i-1}} \Delta t_i$$

初期条件 $y_1 = \sqrt{C_1 \Delta t_1}$

$$T_i \leq 1850K \quad C_i = 2.15 \times 10^6 \exp(-35860/R \cdot T_i) (\mu m^2/sec)$$

$$T_i > 1850K \quad C_i = 1.6 \times 10^{11} \exp(-79800/R \cdot T_i) (\mu m^2/sec)$$

計算プログラムを別添1、使用した被覆管表面温度を別添2、結果を別添3に示す。

別添 1 計算プログラム

```

P1954.AREAG.FORT(C0L)
00010      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
00020      DIMENSION Y(1400),DTP(1400)
00030      ET= 0.24226
00031      TIME = 3.7820
00040      DTP(1)=30.+273.
00050      R = 1.986
00070      Y(1) = 1.68E-11
00080      D0 1 I = 2,1400
00090      DTS = 0.02
00100      ET = ET + DTS
00110      BT = ET
00120          DTP(I) = 9535.00*(BT-0.24226) + 37.4+273.
00130      IF(BT.GT.0.33647) DTP(I) = 1164.7*(BT-0.33647) +935.90 +273.
00140      IF(BT.GT.1.06330) DTP(I) = 5.6000*(BT-1.06330)+1782.4+273.
00150      IF(BT.GT.3.59350) DTP(I) = -8607.4*(BT-3.59350) +1796.5+273.
00160 C     IF(BT.GT.6.44698) DTP(I) = -4047.7*(BT-6.44698)+875.90+273.
00161 C     IF(BT.GT.3.5117) DTP(I) = -2203.1*(BT-3.5117)+984.70+273.
00162 C     IF(BT.GT.7.2480) DTP(I) = -2772.6*(BT-7.2480)+1240.3+273.
00163 C     AVT = (DTP(I)+DTP(I-1))/2.
00170      EQ = 35860.
00180      IF(DTP(I-1).GT.1850.) EQ = 79800.
00190      C = 2.15E6
00200      IF(DTP(I-1).GT.1850.) C = 1.6E11
00210      CC = C*DEXP(-EQ/(R*DTP(I-1)))
00220      Y(I) = Y(I-1)+(CC/(2.*Y(I-1)))*DTS
00230      YL = Y(I)
00240 C     WRITE(6,10) YL,ET,CC,DTP(I-1)
00250      IF(ET.GE.TIME) G0 T0 99
00260      1 CONTINUE
00270      99 WRITE(6,10) YL,ET,C,CC
00280      10 FORMAT(4E12.4)
00290      STOP
00300      END
END OF DATA

```

別添2 被覆管表面温度の関数化(1次近似)

701-2 #2

Time (S) × 10 Temp.

..... X Y

1	2. 8241E-02	3. 7164E+01
2	6. 8036E-02	8. 0831E+02
3	1. 3222E-01	1. 1939E+03
4	4. 3261E-01	8. 4083E+02
5	6. 4570E-01	8. 4548E+02
6	6. 9063E-01	6. 6430E+02
7	7. 0860E-01	1. 4401E+02

1. 0.28241s ~ 0.68036s $T = 1937.8 \times (\text{Time} - 0.28241) + 37.2$
2. 0.68036 ~ 1.3222 $T = 600.8 \times (\text{Time} - 0.68036) + 808.3$
3. ~ 4.3261 $T = -117.5 \times (\text{Time} - 1.3222) + 1193.9$
4. ~ 6.457 $T = 0.77 \times (\text{Time} - 4.3261) + 840.8$
5. ~ 6.9063 $T = -403.2 \times (\text{Time} - 6.457) + 845.5$
6. 6.9063 ~ 7.0860 $T = -2895.3 \times (\text{Time} - 6.9063) + 664.3$

701-3 #4

Time (S) × 10 Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***
..... X Y

1	2. 3226E-02	37. 0
2	6. 0645E-02	7. 3220E+02
3	1. 2258E-01	1. 3763E+03
4	4. 9548E-01	8. 8512E+02
5	8. 2065E-01	7. 4146E+02
6	8. 2968E-01	1. 0659E+02

1. 0.23226s ~ 0.60645s $T = 1857.9 \times (\text{Time} - 0.23226) + 37.0$
2. 0.60645 ~ 1.2258 $T = 1040.0 \times (\text{Time} - 0.60645) + 732.2$
3. ~ 4.9548 $T = -131.7 \times (\text{Time} - 1.2258) + 1376.3$
4. ~ 8.2065 $T = -44.2 \times (\text{Time} - 4.9548) + 885.1$
5. 8.2065 ~ 10.659 $T = -7030.7 \times (\text{Time} - 8.2065) + 741.5$

701-4 #4

Time (S) Temp
 *** GRAPHIC LINE-1 ***
X.....Y.....

1	2.3107E-01	37.0
2	3.7227E-01	8.6659E+02
3	7.9589E-01	1.4041E+02
4	1.8100E+00	1.5988E+03
5	6.3158E+00	9.5463E+02
6	6.6239E+00	1.2512E+02

1. 0.23107 ~ 0.37227 $T = 5875.3 \times (\text{Time} - 0.23107) + 37.0$
2. 0.37227 ~ 0.79589 $T = 1268.8 \times (\text{Time} - 0.37227) + 866.6$
3. ~ 1.81 $T = 192.0 \times (\text{Time} - 0.79589) + 1404.1$
4. ~ 6.3158 $T = -143.0 \times (\text{Time} - 1.81) + 1598.8$
5. 6.3158 ~ 6.6239 $T = -2692.3 \times (\text{Time} - 6.624) + 954.6$

701-5 #2

Time (S) × 10 Temp
 *** GRAPHIC LINE-1 ***
X.....Y.....

1	9.5368E-03	37.0
2	2.0436E-02	7.8973E+02
3	4.0872E-02	1.3472E+03
4	1.3215E-01	1.7885E+03
5	2.5886E-01	1.7792E+03
6	3.5286E-01	1.4912E+03
7	6.8392E-01	1.2403E+03
8	7.2480E-01	1.0685E+02

1. 0.09537 ~ 0.20436 $T = 6906.3 \times (\text{Time} - 0.094) + 37.0$
2. 0.20436 ~ 0.40872 $T = 2727.9 \times (\text{Time} - 0.2044) + 789.7$
3. ~ 1.3215 $T = 483.5 \times (\text{Time} - 0.40872) + 1347.2$
4. ~ 2.5886 $T = -7.3 \times (\text{Time} - 1.3215) + 1788.5$
5. ~ 3.5286 $T = -306.4 \times (\text{Time} - 2.5886) + 1779.2$
6. ~ 6.8392 $T = -75.8 \times (\text{Time} - 3.5286) + 1491.2$
7. 6.8392 ~ 7.2480 $T = -2772.6 \times (\text{Time} - 6.8392) + 1240.3$

701-6 #1

Time (S) × 10 Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***

	X.....	Y.....
1	2. 1858 E-02	3. 2439 E+01
2	6. 5574 E-02	1. 6127 E+03
3	2. 6093 E-01	1. 5663 E+03
4	4. 6995 E-01	1. 2095 E+03
5	5. 0273 E-01	1. 2512 E+02

1. 0.21858 ~ 0.6554 $T = 3614.8 \times (\text{Time} - 0.21858) + 324$
 2. 0.65574 ~ 2.6093 $T = -23.8 \times (\text{Time} - 0.65574) + 1612.7$
 3. ~ 4.6995 $T = -1707.0 \times (\text{Time} - 2.6093) + 1566.3$
 4. 4.6995 ~ 5.0273 $T = -3308.1 \times (\text{Time} - 4.6995) + 1209.5$

701-6 #2

Time (S) × 10 Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***

	X.....	Y.....
1	2. 1948 E-02	3. 2360 E+01
2	2. 4691 E-02	1. 0818 E+03
3	5. 2126 E-02	1. 5163 E+03
4	8. 9163 E-02	1. 6827 E+03
5	2. 8258 E-01	1. 6596 E+03
6	3. 5117 E-01	9. 8467 E+02
7	3. 8957 E-01	1. 3869 E+02

1. 0.21948 ~ 0.24691 $T = 38257.4 \times (\text{Time} - 0.21948) + 324$
 2. 0.24691 ~ 0.52126 $T = 1583.7 \times (\text{Time} - 0.24691) + 1081.8$
 3. ~ 0.89163 $T = 449.3 \times (\text{Time} - 0.52126) + 1516.3$
 4. ~ 2.8258 $T = -11.9 \times (\text{Time} - 0.89163) + 1682.7$
 5. ~ 3.5117 $T = -984.0 \times (\text{Time} - 2.8258) + 1659.6$
 6. 3.5117 ~ 3.8957 $T = -2203.1 \times (\text{Time} - 3.5117) + 984.7$

701-6 #3

Time (S) × 10 Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***
.....X..... Y.....

1	1. 2363 E-02	3. 2439 E+01
2	2. 1978 E-02	7. 8780 E+02
3	4. 1209 E-02	1. 3624 E+03
4	8. 6538 E-02	1. 6451 E+03
5	6. 4698 E-01	8. 7585 E+02
6	6. 6484 E-01	1. 5293 E+02

1. 0.12363 ~ 0.21978 $T = 785.65 \times (\text{Time} - 0.12363) + 32.4$
 2. 0.21978 ~ 0.41209 $T = 2987.9 \times (\text{Time} - 0.21978) + 787.8$
 3. ~ 0.86538 $T = 623.7 \times (\text{Time} - 0.41209) + 1362.4$
 4. ~ 6.4698 $T = -137.3 \times (\text{Time} - 0.8654) + 1645.1$
 5. 6.4698 ~ 6.6484 $T = -4047.7 \times (\text{Time} - 6.4698) + 875.9$

701-7 #2

Time (S) × 10 Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***
.....X..... Y.....

1	2. 4226 E-02	3. 7624 E+01
2	3. 3647 E-02	9. 3589 E+02
3	1. 0633 E-01	1. 7824 E+03
4	3. 5935 E-01	1. 7965 E+03
5	3. 7820 E-01	1. 7401 E+02

1. 0.24226 ~ 0.33647 $T = 953.50 \times (\text{Time} - 0.24226) + 37.6$
 2. 0.33647 ~ 1.0633 $T = 1164.7 \times (\text{Time} - 0.33647) + 935.9$
 3. ~ 3.5935 $T = 5.6 \times (\text{Time} - 1.0633) + 1782.4$
 4. 3.5935 ~ 3.7820 $T = -8607.4 \times (\text{Time} - 3.5935) + 1796.5$

701-6 #3

Time (S) $\times 10$ Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***

	X.....	Y.....
1	1. 2363E-02	3. 2439E+01
2	2. 1978E-02	7. 8780E+02
3	4. 1209E-02	1. 3624E+03
4	8. 6538E-02	1. 6451E+03
5	6. 4698E-01	8. 7585E+02
6	6. 6484E-01	1. 5293E+02

1. 0.12363 ~ 0.21978 $T = 7856.5 \times (\text{Time} - 0.12363) + 32.4$
 2. 0.21978 ~ 0.41209 $T = 2987.9 \times (\text{Time} - 0.21978) + 787.8$
 3. ~ 0.86538 $T = 623.7 \times (\text{Time} - 0.41209) + 1362.4$
 4. ~ 6.4698 $T = -137.3 \times (\text{Time} - 0.8654) + 1645.1$
 5. 6.4698 ~ 6.6484 $T = -4047.7 \times (\text{Time} - 6.4698) + 875.9$

701-7 #2

Time (S) $\times 10$ Temp

*** GRAPHIC LINE-1 ***

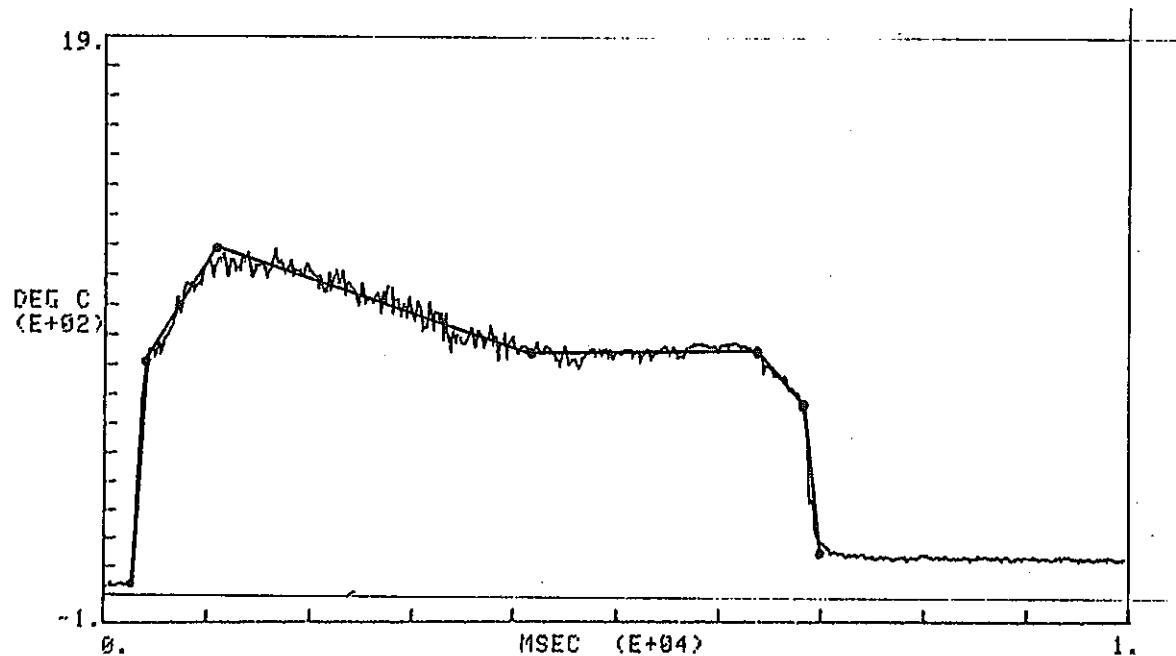
	X.....	Y.....
1	2. 4226E-02	3. 7624E+01
2	3. 3647E-02	9. 3589E+02
3	1. 0633E-01	1. 7824E+03
4	3. 5935E-01	1. 7965E+03
5	3. 7820E-01	1. 7401E+02

1. 0.24226 ~ 0.33647 $T = 9535.0 \times (\text{Time} - 0.24226) + 37.6$
 2. 0.33647 ~ 1.0633 $T = 1164.7 \times (\text{Time} - 0.33647) + 935.9$
 3. ~ 3.5935 $T = 5.6 \times (\text{Time} - 1.0633) + 1782.4$
 4. 3.5935 ~ 3.7820 $T = -8607.4 \times (\text{Time} - 3.5935) + 1796.5$

PNC SN 841-84-23

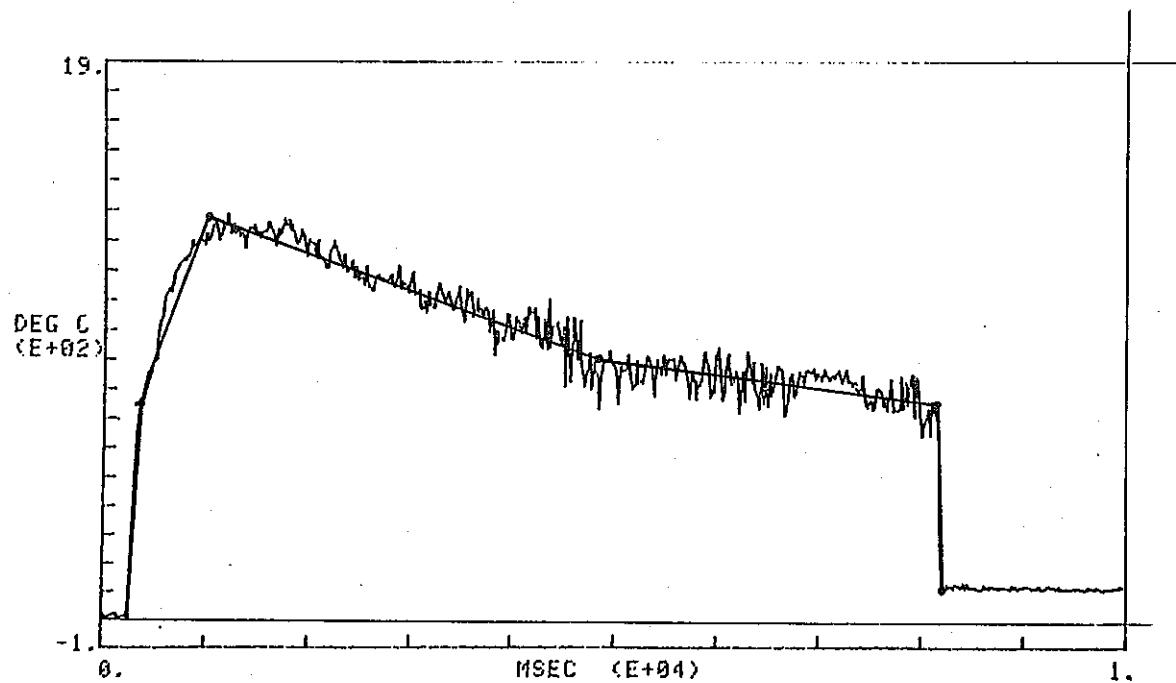
EX. # = 1190 ; 701-2 3.28 \$

ADR-11 Cladding Surface Temperature #2



EX. # = 1201 ; 701-3 3.7 \$ CLAD TEMP. #4

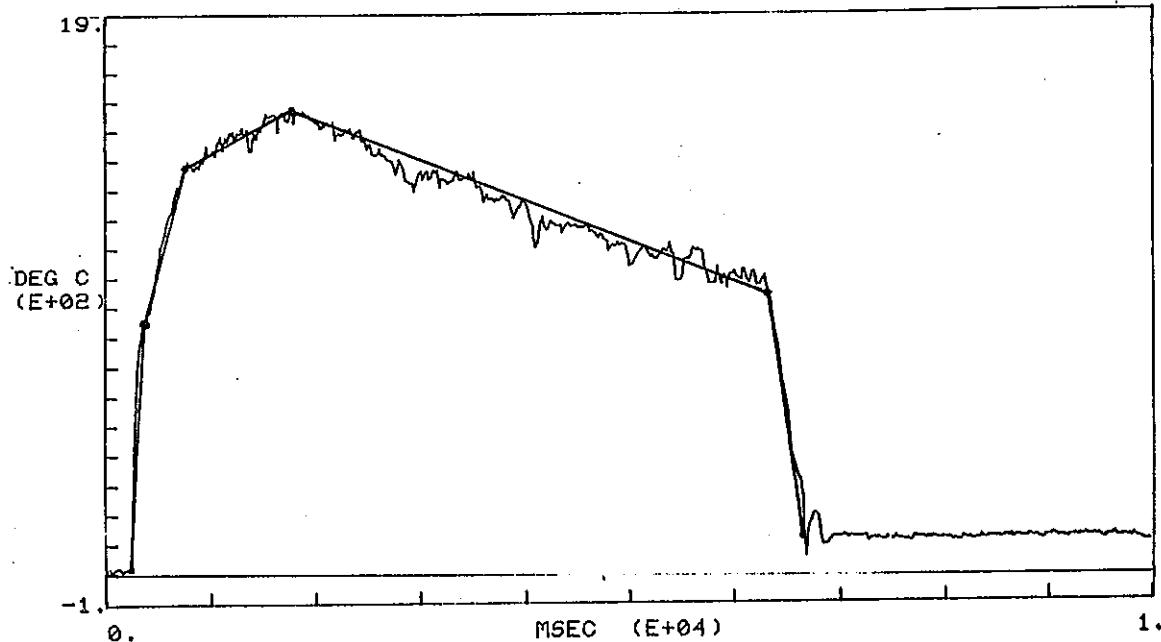
ADR-12 #4



PNC SN841-84-23

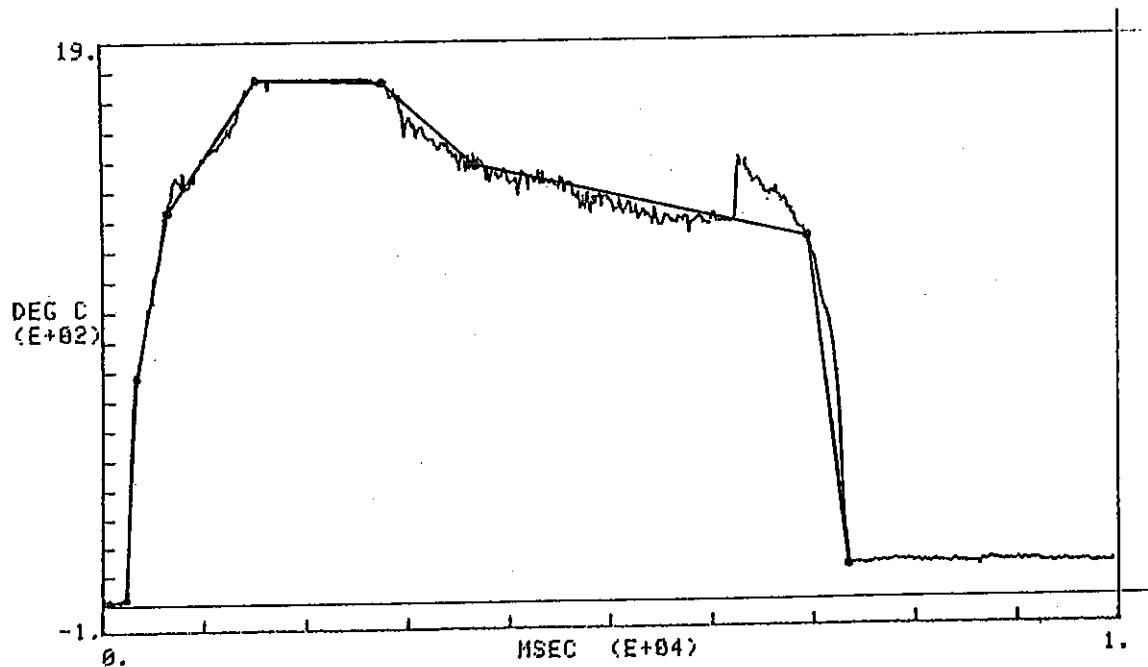
EX. # = 1207 ; 701-4 4.0 \$

ADR-12 Cladding Surface Temperature



EX. # = 1214 ; 701-5 4.19 \$ CLAD TEMP. #2

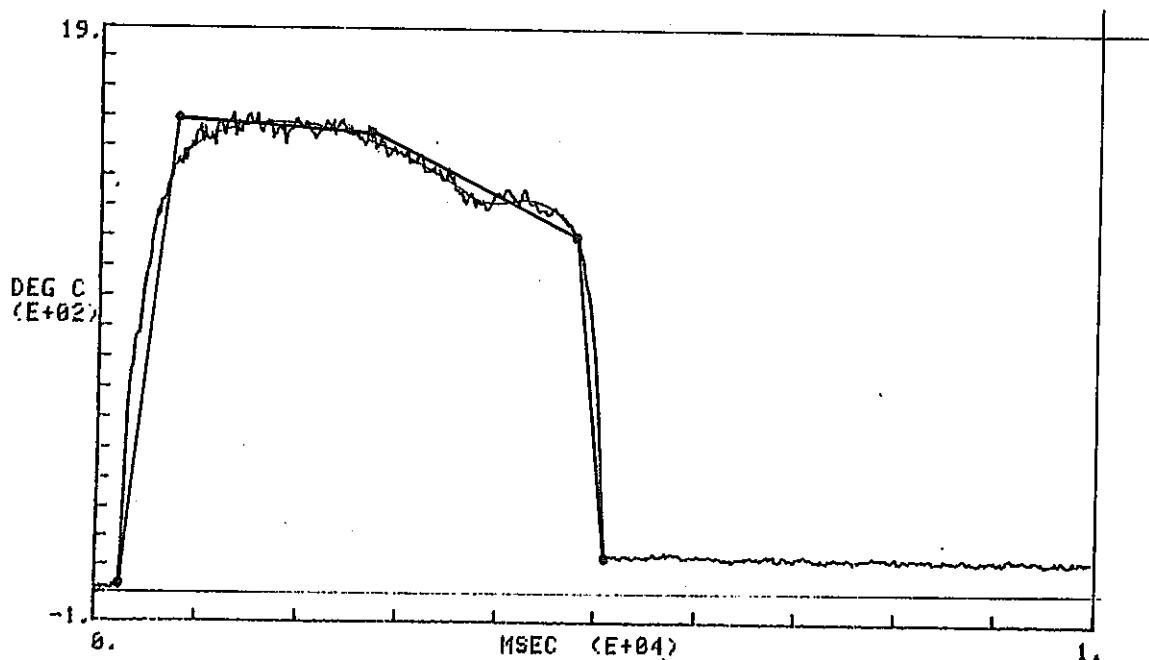
ADR-10



PNC SN841-84-23

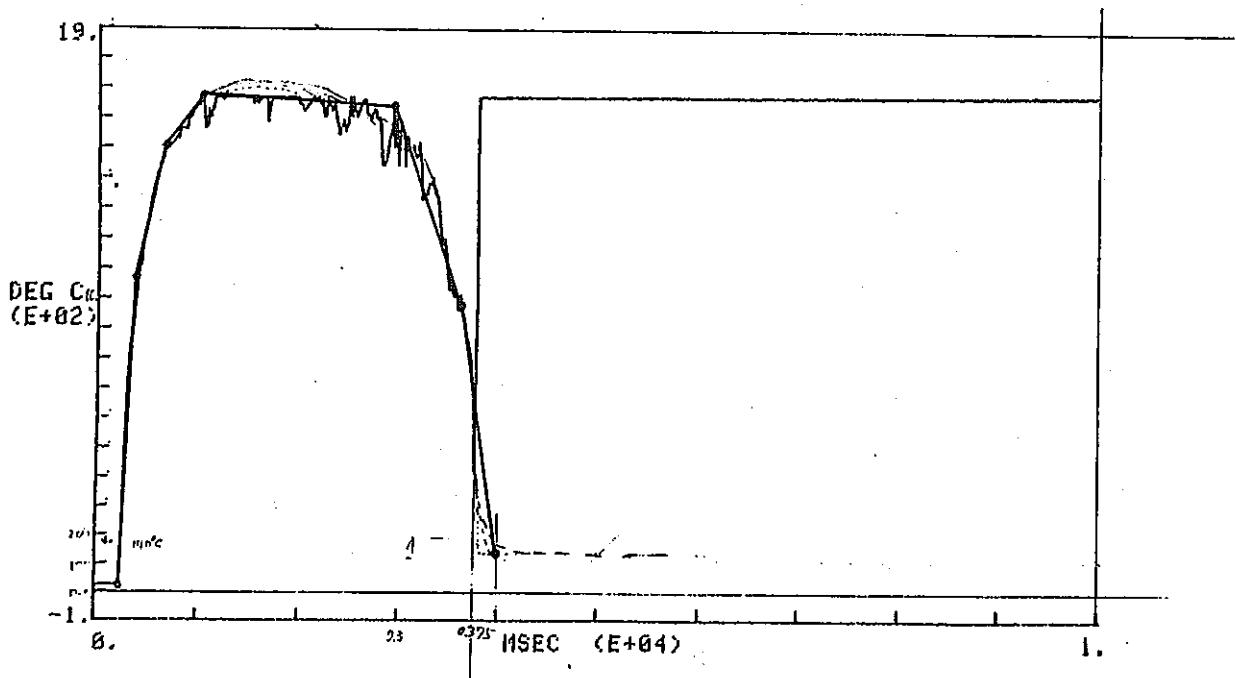
EX. # = 1221; 701-6 410\$ CLAD TEMP. #1

ADR-08



EX. # = 1221; 701-6 410\$ CLAD TEMP. #2

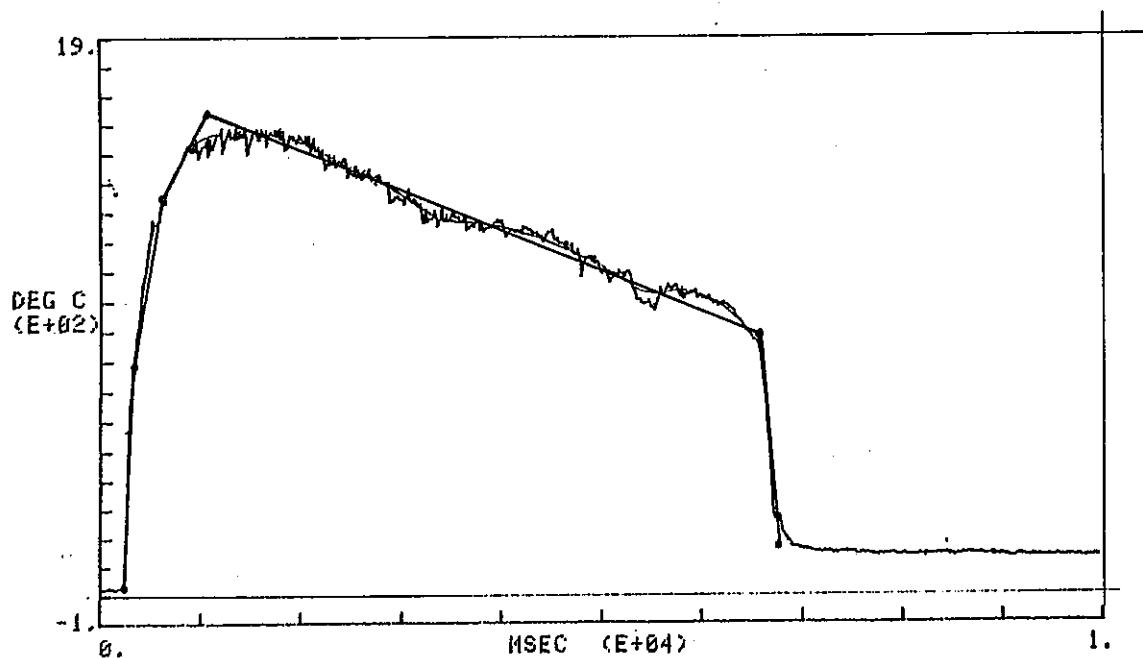
ADR-09



PNC SN841-84-23

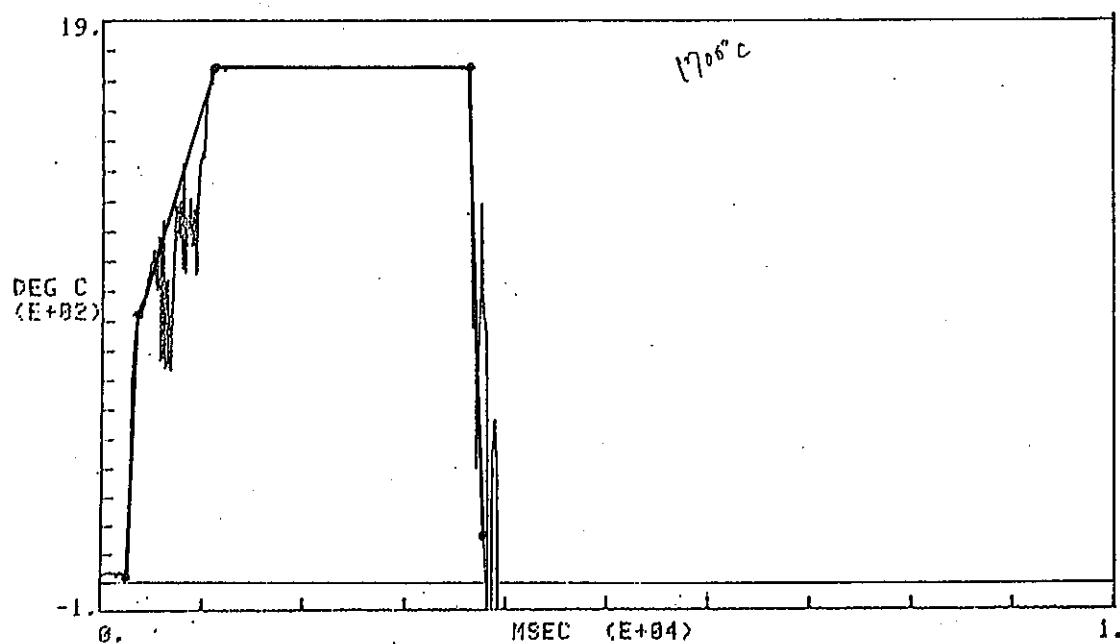
EX. # = 1221; 701-6 4.10\$ CLAD TEMP. #3

ADR-10



EX. # = 1238; 701-7 4.05\$

ADR-10 被覆管表面温度 #2 (中央部)



別添3

計算結果

実験番号	被覆管表面 最高温度	酸化膜厚(μm)		反応時間 (s)
		実測値	計算値	
701-2	1190	6	3.26	6.8
701-3	1380	31	6.5	8.1
701-4	1600	22.5	15.26	6.4
701-5	1790	50	33.25	7.2
701-6(1)	1600	38.75	16.55	4.8
701-6(2)	1680	40	20.16	3.7
701-6(3)	1650	20	15.16	6.5
701-7	1800	41.25	38.36	3.5

PNC SN841-84-23

附録3 DANTEに登録した照射後試験データ

1. 主テーブル

解析データは、以下に示す項目で大きく4つのグループ（テーブル）に分けた。

①	試験番号	発熱量	曲り変化量

②	試験番号	軸方向位置	ピン外径変化	燃料中心温度	被覆管表面温度

③	試験番号	軸方向位置	周方向位置	被覆管酸化膜厚さ	
				測定値	計算値

④	試験番号	軸方向位置	半径方向位置	周方向位置	clad硬度	clad粒径	ペレット粒径

①～④の各テーブルは、下記の名称で、DANTEに登録した。

①： NSRR-POWER

②： NSRR-TEMP

③： NSRR-HOOP

④： NSRR-RADI

2. 作業用テーブル

解析作業用として、上記①～④のテーブルより、次に示すテーブルを作成した。

⑤ テーブル「NSRR-HARD」

試験番号	データ区分	ピン外径変化	clad硬度
	A		
	B		
	C		
	}		

データ区分 = A : 最大ピン外径変化, clad 内側硬度

" = B : 平均ピン外径変化, clad 中心硬度

" = C : clad 外側硬度

⑥ テーブル「NSRR-CTEMP」

試験番号	軸方向位置	clad酸化膜厚さ周方向平均
		<div style="text-align: center;">  測定値 計算値 </div>

⑦ テーブル「NSRR-PGS」

試験番号	軸方向位置	半径方向位置	ペレット粒径	ペレット粒径半径方向の識別文字
	全て 55 (mm)			<ul style="list-style-type: none"> ◦ ペレット中心 ◦ ペレット外面 ◦ ペレット中心と外面の中間

⑧ テーブル「NSRR-MTEMP」

試験番号	被覆管表面温度
	<div style="text-align: center;">  最大値 平均値 </div>

図A-1～A-10に各々のテーブルの内容を、又、図B-1～B-8に各テーブルの項目一覧を示す。

3. 解析に用いた①～⑧の各テーブルの生データ、CREATE、LOAD コマンドは PRIME 計算機の次の UFD に登録した。

• DBS00>USER>LOAD7 ××80

TEST NO	POWER (cal/g)	PIN MAX	GROUP TEXT
		BOWING (μ m)	
701-1	115.00	0.00	POWER = 0-200
701-2	186.00	65.00	POWER = 0-200
701-3	229.00	210.00	POWER = 200-250
701-4	249.00	585.00	POWER = 200-250
701-5	263.00	-101.00	POWER = 250-300
701-6	256.00	1485.00	POWER = 250-300
701-7	250.00	585.00	POWER = 200-250
701-8	145.00	740.00	POWER = 0-200
701-9	123.00	0.00	POWER = 0-200
701-10	284.00	240.00	POWER = 250-300
<<< END OF DATA SELECTION. >>>			
< DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1) STOP			
END OF LISTING			
< DANTE? >			

図A-1 テーブル「NSRR-POWER」の内容

㊟：データがないもの、又、不明なものについては、-101, 0とした。

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μm)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATUER (°C)
701-1	-6.00	-2.50	0.00	-101.00
701-1	4.00	1.00	0.00	-101.00
701-1	14.00	2.00	0.00	-101.00
701-1	24.00	-1.00	0.00	-101.00
701-1	28.00	0.00	0.00	220.00
701-1	34.00	-1.00	0.00	-101.00
701-1	44.00	0.00	0.00	-101.00
701-1	54.00	0.00	0.00	-101.00
701-1	55.00	0.00	0.00	150.00
701-1	64.00	1.00	0.00	-101.00
701-1	74.00	2.00	0.00	-101.00
701-1	84.00	-4.00	0.00	-101.00
701-1	82.00	0.00	0.00	150.00
701-1	94.00	0.00	0.00	-101.00
701-1	104.00	2.00	0.00	-101.00
701-1	114.00	0.00	0.00	-101.00
701-2	-6.00	10.00	0.00	-101.00
701-2	4.00	69.00	0.00	-101.00
701-2	14.00	54.00	0.00	-101.00
701-2	24.00	28.00	0.00	-101.00
701-2	28.00	0.00	0.00	1180.00
701-2	34.00	31.00	0.00	-101.00
701-2	44.00	-14.00	0.00	-101.00
701-2	54.00	16.00	0.00	-101.00
701-2	55.00	0.00	0.00	1170.00
701-2	64.00	23.00	0.00	-101.00
701-2	74.00	1.00	0.00	-101.00
701-2	84.00	18.00	0.00	-101.00
701-2	82.00	0.00	0.00	1150.00
701-2	94.00	20.00	0.00	-101.00

< DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 6.1)

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (1/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μm)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATURE (°C)
701-2	104.00	12.00	0.00	-101.00
701-2	114.00	-17.00	0.00	-101.00
701-3	-6.00	-1.00	0.00	-101.00
701-3	4.00	173.00	0.00	-101.00
701-3	14.00	149.00	0.00	-101.00
701-3	24.00	106.00	0.00	-101.00
701-3	28.00	0.00	0.00	-101.00
701-3	34.00	109.00	0.00	-101.00
701-3	44.00	149.00	0.00	-101.00
701-3	54.00	141.00	0.00	-101.00
701-3	55.00	0.00	0.00	1400.00
701-3	64.00	127.00	0.00	-101.00
701-3	74.00	103.00	0.00	-101.00
701-3	84.00	64.00	0.00	-101.00
701-3	82.00	0.00	0.00	-101.00
701-3	94.00	12.00	0.00	-101.00
701-3	104.00	86.00	0.00	-101.00
701-3	114.00	-13.00	0.00	-101.00
701-4	-6.00	-4.00	0.00	-101.00
701-4	4.00	307.00	0.00	-101.00
701-4	14.00	126.00	0.00	-101.00
701-4	24.00	123.00	0.00	-101.00
701-4	28.00	0.00	0.00	1620.00
701-4	34.00	97.00	0.00	-101.00
701-4	44.00	202.00	0.00	-101.00
701-4	54.00	227.00	0.00	-101.00
701-4	55.00	0.00	0.00	1570.00
701-4	64.00	145.00	0.00	-101.00
701-4	74.00	144.00	0.00	-101.00
701-4	84.00	166.00	0.00	-101.00

< DANTE? (LIST: PAGE 2.1 OF 6.1)

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (2/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μ m)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATURE (°C)
701-4	82.00	0.00	0.00	-101.00
701-4	94.00	189.00	0.00	-101.00
701-4	104.00	115.00	0.00	-101.00
701-4	114.00	9.00	0.00	-101.00
701-5	-6.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	4.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	14.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	24.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	28.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	34.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	44.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	54.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	55.00	-101.00	0.00	1800.00
701-5	64.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	74.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	84.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	82.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	94.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	104.00	-101.00	0.00	-101.00
701-5	114.00	-101.00	0.00	-101.00
701-6	-6.00	42.00	0.00	-101.00
701-6	4.00	438.00	0.00	-101.00
701-6	14.00	179.00	0.00	-101.00
701-6	24.00	286.00	0.00	-101.00
701-6	28.00	0.00	0.00	1600.00
701-6	34.00	256.00	0.00	-101.00
701-6	44.00	277.00	0.00	-101.00
701-6	54.00	203.00	0.00	-101.00
701-6	55.00	0.00	0.00	1650.00
701-6	64.00	185.00	0.00	-101.00

< DANTE? (LIST: PAGE 3.1 OF 6.1)

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (3/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μ m)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATURE (°C)
701-6	74.00	180.00	0.00	-101.00
701-6	84.00	187.00	0.00	-101.00
701-6	82.00	0.00	0.00	1600.00
701-6	94.00	120.00	0.00	-101.00
701-6	104.00	86.00	0.00	-101.00
701-6	114.00	-15.00	0.00	-101.00
701-7	-6.00	32.00	0.00	-101.00
701-7	4.00	448.00	0.00	-101.00
701-7	14.00	449.00	0.00	-101.00
701-7	24.00	378.00	0.00	-101.00
701-7	28.00	0.00	0.00	1700.00
701-7	34.00	479.00	0.00	-101.00
701-7	44.00	482.00	0.00	-101.00
701-7	54.00	285.00	0.00	-101.00
701-7	55.00	0.00	0.00	1750.00
701-7	64.00	185.00	0.00	-101.00
701-7	74.00	264.00	0.00	-101.00
701-7	84.00	241.00	0.00	-101.00
701-7	82.00	0.00	0.00	1700.00
701-7	94.00	220.00	0.00	-101.00
701-7	104.00	91.00	0.00	-101.00
701-7	114.00	-8.00	0.00	-101.00
701-8	-6.00	1.00	0.00	-101.00
701-8	4.00	12.00	0.00	-101.00
701-8	14.00	-7.00	0.00	-101.00
701-8	24.00	-12.00	0.00	-101.00
701-8	28.00	0.00	0.00	1050.00
701-8	34.00	45.00	0.00	-101.00
701-8	44.00	53.00	0.00	-101.00
701-8	54.00	60.00	0.00	-101.00
< DANTE? (LIST: PAGE 4.1 OF 6.1)				

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (4/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE EROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μm)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATURE (°C)
701-B	55.00	0.00	0.00	1000.00
701-B	64.00	3.00	0.00	-101.00
701-B	74.00	0.00	0.00	-101.00
701-B	84.00	7.00	0.00	-101.00
701-B	82.00	0.00	0.00	1000.00
701-B	94.00	3.00	0.00	-101.00
701-B	104.00	-9.00	0.00	-101.00
701-B	114.00	-2.00	0.00	-101.00
701-9	-6.00	-9.00	0.00	-101.00
701-9	4.00	13.00	0.00	-101.00
701-9	14.00	-8.00	0.00	-101.00
701-9	24.00	-5.00	0.00	-101.00
701-9	28.00	0.00	0.00	250.00
701-9	34.00	-2.00	0.00	-101.00
701-9	44.00	1.00	0.00	-101.00
701-9	54.00	0.00	0.00	-101.00
701-9	55.00	0.00	0.00	250.00
701-9	64.00	-1.00	0.00	-101.00
701-9	74.00	-3.00	0.00	-101.00
701-9	84.00	-4.00	0.00	-101.00
701-9	82.00	0.00	0.00	300.00
701-9	94.00	-4.00	0.00	-101.00
701-9	104.00	-3.00	0.00	-101.00
701-9	114.00	-5.00	0.00	-101.00
701-10	-6.00	11.00	0.00	-101.00
701-10	4.00	392.00	0.00	-101.00
701-10	14.00	252.00	0.00	-101.00
701-10	24.00	284.00	0.00	-101.00
701-10	28.00	0.00	0.00	-101.00
701-10	34.00	321.00	0.00	-101.00

< DANTE? (LIST: PAGE 5.1 OF 6.1)

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (5/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	CLAD DEFORMATION (μ m)	PELLET CENTER TEMPERATURE (°C)	MEASURED CLAD TEMPERATURE (°C)
701-10	44.00	273.00	0.00	-101.00
701-10	54.00	322.00	0.00	-101.00
701-10	55.00	0.00	0.00	-101.00
701-10	64.00	224.00	0.00	-101.00
701-10	74.00	162.00	0.00	-101.00
701-10	84.00	169.00	0.00	-101.00
701-10	82.00	0.00	0.00	-101.00
701-10	94.00	102.00	0.00	-101.00
701-10	104.00	98.00	0.00	-101.00
701-10	114.00	115.00	0.00	-101.00
<<< END OF DATA SELECTION. >>>				
< DANTE? (LIST: PAGE 6.1 OF 6.1)				

図A-2 テーブル「NSRR-TEMP」の内容 (6/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD OXIDE LAYER THICKNESS (μ m)	CAL. CLAD OXIDE LAYER THICKNESS (μ m)
701-1	45.00	0.00	0.000	-101.000
701-2	65.00	0.00	4.000	3.260
701-3	65.00	0.00	10.000	6.500
701-4	55.00	0.00	40.000	15.260
701-4	55.00	90.00	30.000	15.260
701-4	55.00	180.00	10.000	15.260
701-4	55.00	270.00	10.000	15.260
701-5	45.00	0.00	50.000	33.250
701-6	5.00	0.00	80.000	-101.000
701-6	5.00	90.00	60.000	-101.000
701-6	5.00	180.00	45.000	-101.000
701-6	5.00	270.00	70.000	-101.000
701-6	28.00	0.00	50.000	16.550
701-6	28.00	90.00	40.000	16.550
701-6	28.00	180.00	20.000	16.550
701-6	28.00	270.00	45.000	16.550
701-6	55.00	0.00	50.000	20.160
701-6	55.00	90.00	35.000	20.160
701-6	55.00	180.00	40.000	20.160
701-6	55.00	270.00	35.000	20.160
701-6	82.00	0.00	25.000	15.160
701-6	82.00	90.00	20.000	15.160
701-6	82.00	180.00	15.000	15.160
701-6	82.00	270.00	20.000	15.160
701-6	105.00	0.00	35.000	-101.000
701-6	105.00	90.00	30.000	-101.000
701-6	105.00	180.00	25.000	-101.000
701-6	105.00	270.00	25.000	-101.000
701-7	55.00	0.00	50.000	38.360
701-7	55.00	90.00	45.000	38.360

< DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 2.1)

図A-3 テーブル「NSRR-HOOP」の内容 (1/2)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD OXIDE LAYER THICKNESS (μ m)	CAL. CLAD OXIDE LAYER THICKNESS (μ m)
701-7	55.00	180.00	30.000	38.360
701-7	55.00	270.00	40.000	38.360
701-8	55.00	0.00	0.000	-101.000
701-9	55.00	0.00	0.000	-101.000
701-10	65.00	0.00	40.000	-101.000
<<<< END OF DATA SELECTION.>>>>				
< DANTE? (LIST: PAGE 2.1 OF 2.1)				

図A-3 テーブル「NSRR-HOOP」の内容 (2/2)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (μm)	PELLET GRAIN SIZE (μm)
701-1	75.00	-101.000	-101.00	-101.00	3.00	8.000
701-1	55.00	0.000	-101.00	413.90	3.00	8.000
701-1	55.00	1.550	-101.00	428.80	3.00	8.000
701-1	55.00	3.100	-101.00	397.80	3.00	8.000
701-1	45.00	-101.000	-101.00	-101.00	3.00	8.000
701-1	25.00	-101.000	-101.00	-101.00	3.00	8.000
701-2	85.00	-101.000	-101.00	-101.00	-101.00	13.000
701-2	55.00	0.000	-101.00	428.20	-101.00	11.000
701-2	55.00	1.550	-101.00	435.20	-101.00	8.000
701-2	55.00	3.100	-101.00	435.20	-101.00	8.000
701-2	60.00	-101.000	-101.00	-101.00	28.00	-101.000
701-2	25.00	-101.000	-101.00	-101.00	-101.00	12.000
701-3	85.00	-101.000	-101.00	-101.00	-101.00	18.000
701-3	65.00	-101.000	-101.00	-101.00	144.00	-101.000
701-3	55.00	0.000	-101.00	451.70	-101.00	26.000
701-3	55.00	1.550	-101.00	431.80	-101.00	26.000
701-3	55.00	3.100	-101.00	462.80	-101.00	26.000
701-3	25.00	-101.000	-101.00	-101.00	-101.00	16.000
701-4	55.00	0.000	-101.00	463.70	-101.00	30.000
701-4	55.00	1.550	-101.00	455.50	-101.00	25.000
701-4	55.00	3.100	-101.00	562.50	-101.00	20.000
701-4	55.00	4.030	-101.00	-101.00	-101.00	18.900
701-4	55.00	4.500	-101.00	-101.00	-101.00	12.000
701-4	55.00	4.655	-101.00	-101.00	-101.00	9.000
701-4	45.00	-101.000	-101.00	-101.00	217.90	-101.000
701-4	35.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	30.000
701-4	35.00	3.100	-101.00	-101.00	-101.00	20.000
701-4	5.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	50.000
701-4	5.00	3.100	-101.00	-101.00	-101.00	20.000
701-5	95.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	30.000

< DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 6.2)

図A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (1/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN (μm)	PELLET GRAIN (μm)
701-5	95.00	3.100	-101.00	-101.00	-101.00	10.000
701-5	90.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	35.000
701-5	90.00	4.400	-101.00	-101.00	-101.00	10.000
701-5	60.00	-101.000	-101.00	-101.00	127.00	-101.000
701-5	5.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	40.000
701-5	5.00	4.400	-101.00	-101.00	-101.00	18.000
701-5	55.00	0.000	-101.00	829.80	-101.00	-101.000
701-5	55.00	1.550	-101.00	585.90	-101.00	-101.000
701-5	55.00	3.100	-101.00	834.10	-101.00	-101.000
701-6	105.00	4.138	0.00	-101.00	0.00	20.640
701-6	105.00	3.712	0.00	-101.00	0.00	26.400
701-6	105.00	2.906	0.00	-101.00	0.00	30.860
701-6	105.00	2.297	0.00	-101.00	0.00	33.700
701-6	105.00	1.552	0.00	-101.00	0.00	35.450
701-6	105.00	1.247	0.00	-101.00	0.00	34.210
701-6	105.00	0.137	0.00	-101.00	0.00	35.890
701-6	105.00	4.199	90.00	-101.00	0.00	21.020
701-6	105.00	1.902	90.00	-101.00	0.00	37.330
701-6	105.00	4.564	180.00	-101.00	0.00	9.770
701-6	105.00	4.183	180.00	-101.00	0.00	23.100
701-6	105.00	2.830	180.00	-101.00	0.00	34.080
701-6	105.00	2.525	180.00	-101.00	0.00	40.600
701-6	105.00	1.536	180.00	-101.00	0.00	33.450
701-6	105.00	1.050	180.00	-101.00	0.00	38.390
701-6	105.00	4.488	270.00	-101.00	0.00	19.780
701-6	105.00	2.480	270.00	-101.00	0.00	35.740
701-6	85.00	4.520	0.00	-101.00	0.00	14.880
701-6	85.00	4.099	0.00	-101.00	0.00	20.060
701-6	85.00	2.493	0.00	-101.00	0.00	26.640
701-6	85.00	1.877	0.00	-101.00	0.00	28.320

< DANTE? (LIST: PAGE 2.1 OF 6.2)

図A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (2/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (μm)	PELLET GRAIN SIZE (μm)
701-6	85.00	1.156	0.00	-101.00	0.00	31.760
701-6	85.00	0.721	0.00	-101.00	0.00	32.280
701-6	85.00	-0.105	0.00	-101.00	0.00	31.560
701-6	85.00	4.084	90.00	-101.00	0.00	20.030
701-6	85.00	2.132	90.00	-101.00	0.00	29.770
701-6	85.00	0.901	180.00	-101.00	0.00	23.650
701-6	85.00	1.892	180.00	-101.00	0.00	33.950
701-6	85.00	3.799	180.00	-101.00	0.00	24.280
701-6	85.00	4.129	180.00	-101.00	0.00	19.340
701-6	85.00	4.605	180.00	-101.00	0.00	13.390
701-6	85.00	2.192	270.00	-101.00	0.00	30.030
701-6	85.00	4.355	270.00	-101.00	0.00	19.430
701-6	55.00	4.650	0.00	-101.00	0.00	8.800
701-6	55.00	4.330	0.00	-101.00	0.00	21.300
701-6	55.00	3.720	0.00	-101.00	0.00	25.100
701-6	55.00	2.930	0.00	-101.00	0.00	27.600
701-6	55.00	2.000	0.00	-101.00	0.00	26.900
701-6	55.00	0.880	0.00	-101.00	0.00	27.000
701-6	55.00	0.000	0.00	-101.00	0.00	24.570
701-6	55.00	4.205	90.00	-101.00	0.00	24.960
701-6	55.00	2.403	90.00	-101.00	0.00	25.200
701-6	55.00	4.605	180.00	-101.00	0.00	9.000
701-6	55.00	4.505	180.00	-101.00	0.00	18.960
701-6	55.00	3.754	180.00	-101.00	0.00	22.060
701-6	55.00	2.463	180.00	-101.00	0.00	22.610
701-6	55.00	1.832	180.00	-101.00	0.00	26.400
701-6	55.00	0.796	180.00	-101.00	0.00	25.490
701-6	55.00	0.000	270.00	-101.00	0.00	18.400
701-6	55.00	0.000	270.00	-101.00	0.00	22.640
701-6	55.00	0.000	-101.00	496.70	180.00	0.000

< DANTE? (LIST: PAGE 3.1 OF 6.2)

図 A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (3/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (μm)	PELLET GRAIN SIZE (μm)
701-6	55.00	1.550	-101.00	482.00	-101.00	0.000
701-6	55.00	3.100	-101.00	684.00	-101.00	0.000
701-6	25.00	4.605	0.00	-101.00	0.00	8.400
701-6	25.00	4.355	0.00	-101.00	0.00	17.560
701-6	25.00	3.514	0.00	-101.00	0.00	28.330
701-6	25.00	2.898	0.00	-101.00	0.00	34.610
701-6	25.00	2.057	0.00	-101.00	0.00	38.210
701-6	25.00	0.916	0.00	-101.00	0.00	39.750
701-6	25.00	-0.270	0.00	-101.00	0.00	47.480
701-6	25.00	3.904	90.00	-101.00	0.00	21.490
701-6	25.00	2.373	90.00	-101.00	0.00	35.160
701-6	25.00	4.300	180.00	-101.00	0.00	16.340
701-6	25.00	4.205	180.00	-101.00	0.00	23.190
701-6	25.00	4.069	180.00	-101.00	0.00	26.300
701-6	25.00	3.198	180.00	-101.00	0.00	30.570
701-6	25.00	2.600	180.00	-101.00	0.00	37.160
701-6	25.00	1.306	180.00	-101.00	0.00	41.740
701-6	25.00	2.403	270.00	-101.00	0.00	44.910
701-6	25.00	4.054	270.00	-101.00	0.00	24.380
701-6	5.00	4.650	0.00	-101.00	0.00	10.700
701-6	5.00	4.380	0.00	-101.00	0.00	16.600
701-6	5.00	3.960	0.00	-101.00	0.00	23.700
701-6	5.00	2.790	0.00	-101.00	0.00	34.100
701-6	5.00	2.050	0.00	-101.00	0.00	49.100
701-6	5.00	1.070	0.00	-101.00	0.00	58.400
701-6	5.00	0.420	0.00	-101.00	0.00	55.900
701-6	5.00	1.680	90.00	-101.00	0.00	23.110
701-6	5.00	4.080	90.00	-101.00	0.00	50.970
701-6	5.00	3.450	180.00	-101.00	0.00	31.650
701-6	5.00	2.820	180.00	-101.00	0.00	38.770

< DANTE? (LIST: PAGE 4.1 OF 6.2)

図A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (4/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (μm)	PELLET GRAIN SIZE (μm)
701-6	5.00	2.000	180.00	-101.00	0.00	46.140
701-6	5.00	1.340	180.00	-101.00	0.00	51.410
701-6	5.00	0.960	180.00	-101.00	0.00	54.830
701-6	5.00	0.530	180.00	-101.00	0.00	52.790
701-6	5.00	0.980	270.00	-101.00	0.00	44.910
701-6	5.00	3.530	270.00	-101.00	0.00	26.410
701-7	50.00	0.000	-101.00	874.40	253.00-101.000	
701-7	55.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	35.000
701-7	55.00	1.550	-101.00	560.10	200.00-101.000	
701-7	55.00	2.000	-101.00	-101.00	-101.00	28.000
701-7	55.00	3.100	-101.00	745.60	200.00-101.000	
701-7	55.00	4.200	-101.00	-101.00	-101.00	16.000
701-7	25.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	47.000
701-7	25.00	2.000	-101.00	-101.00	-101.00	33.000
701-7	25.00	4.200	-101.00	-101.00	-101.00	18.000
701-7	5.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	67.000
701-7	5.00	2.000	-101.00	-101.00	-101.00	58.000
701-7	5.00	4.200	-101.00	-101.00	-101.00	20.000
701-8	55.00	0.000	-101.00	340.20	3.00	B.000
701-8	55.00	1.550	-101.00	339.80	3.00	B.000
701-8	55.00	3.100	-101.00	343.20	3.00	B.000
701-9	55.00	0.000	-101.00	379.30	3.00	B.000
701-9	55.00	1.550	-101.00	391.90	3.00	B.000
701-9	55.00	3.100	-101.00	386.60	3.00	B.000
701-10	95.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	67.000
701-10	95.00	2.000	-101.00	-101.00	-101.00	42.000
701-10	95.00	4.200	-101.00	-101.00	-101.00	20.000
701-10	55.00	0.000	-101.00	712.50	-101.00	65.000
701-10	55.00	2.000	-101.00	582.30	-101.00	38.000
701-10	55.00	4.200	-101.00	846.70	-101.00	20.000

< DANTE? (LIST: PAGE 5.1 OF 6.2)

図A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (5/6)

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET (mm)	HOOP POSITION (degree)	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (μm)	PELLET GRAIN SIZE (μm)
701-10	15.00	0.000	-101.00	-101.00	-101.00	80.000
701-10	15.00	2.000	-101.00	-101.00	-101.00	50.000
701-10	15.00	4.200	-101.00	-101.00	-101.00	20.000
701-10	50.00	-101.000	-101.00	-101.00	229.00	-101.000

<<< END OF DATA SELECTION.>>>
<DANTE? (LIST: PAGE 6.1 OF 6.2)

図A-4 テーブル「NSRR-RADI」の内容 (6/6)

データ区分=A : 最大ピン外径変化
" =B : 平均 "

データ区分=A : clad内側硬度
" =B : " 中心 "
" =C : " 外側 "

TEST NO	KUBUN	CLAD	DEFORMATION HARDNESS	
			(MICRON)	(MB)
701-1	A	-25.00	413.90	
701-1	B	-1.77	428.80	
701-1	C	-101.00	397.80	
701-2	A	69.00	428.20	
701-2	B	20.08	435.20	
701-2	C	-101.00	435.20	
701-3	A	173.00	451.70	
701-3	B	92.69	431.80	
701-3	C	-101.00	462.80	
701-4	A	307.00	463.70	
701-4	B	142.00	455.50	
701-4	C	-101.00	562.50	
701-5	A	-101.00	829.80	
701-5	B	-101.00	585.90	
701-5	C	-101.00	834.10	
701-6	A	438.00	496.70	
701-6	B	186.46	482.80	
701-6	C	-101.00	684.80	
701-7	A	482.00	874.40	
701-7	B	270.69	560.10	
701-7	C	-101.00	745.60	
701-8	A	60.00	340.20	
701-8	B	13.92	339.80	
701-8	C	-101.00	343.20	
701-9	A	13.00	379.30	
701-9	B	-2.31	391.90	
701-9	C	-101.00	386.60	
701-10	A	392.00	712.50	
701-10	B	209.62	582.30	
701-10	C	-101.00	846.70	
<<< END OF DATA SELECTION. >>>				
< DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1) STOP				

図A-5 テーブル「NSRR-HARD」の内容

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	CLAD OXIDE LAYER THICKNESS		GROUP TEXT
701-2	55.00	4.00	MEASURED	TEMP
701-3	55.00	10.00	MEASURED	TEMP
701-6	82.00	20.00	MEASURED	TEMP
701-4	55.00	22.50	MEASURED	TEMP
701-6	28.00	38.75	MEASURED	TEMP
701-6	55.00	40.00	MEASURED	TEMP
701-5	55.00	50.00	MEASURED	TEMP
701-7	55.00	41.25	MEASURED	TEMP
701-2	55.00	3.26	CALCULATE	TEMP
701-3	55.00	6.50	CALCULATE	TEMP
701-6	82.00	15.16	CALCULATE	TEMP
701-4	55.00	15.26	CALCULATE	TEMP
701-6	28.00	16.55	CALCULATE	TEMP
701-6	55.00	20.16	CALCULATE	TEMP
701-5	55.00	33.25	CALCULATE	TEMP
701-7	55.00	38.36	CALCULATE	TEMP
<<<< END OF DATA SELECTION. >>>>				
<DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1)				

周方向平均

図 A-6 テーブル「NSRR-CTEMP」の内容

TEST NO	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM (mm)	RADIAL DISTANCE FROM PELLET center (mm)	PELLET GRAIN SIZE (μ m)	GROUP TEXT
701-1	55.00	0.000	8.00	PELLET INNER
701-1	55.00	1.550	8.00	PELLET CENTER
701-1	55.00	3.100	8.00	PELLET OUTER
701-2	55.00	0.000	11.00	PELLET INNER
701-2	55.00	1.550	8.00	PELLET CENTER
701-2	55.00	3.100	8.00	PELLET OUTER
701-3	55.00	0.000	26.00	PELLET INNER
701-3	55.00	1.550	26.00	PELLET CENTER
701-3	55.00	3.100	26.00	PELLET OUTER
701-4	55.00	0.000	30.00	PELLET INNER
701-4	55.00	1.550	25.00	PELLET CENTER
701-4	55.00	3.100	20.00	PELLET OUTER
701-6	55.00	4.330	21.30	PELLET OUTER
701-6	55.00	2.000	26.90	PELLET CENTER
701-6	55.00	0.000	24.57	PELLET INNER
701-7	55.00	0.000	35.00	PELLET INNER
701-7	55.00	2.000	28.00	PELLET CENTER
701-7	55.00	4.200	16.00	PELLET OUTER
701-8	55.00	0.000	8.00	PELLET INNER
701-8	55.00	1.550	8.00	PELLET CENTER
701-8	55.00	3.100	8.00	PELLET OUTER
701-9	55.00	0.000	8.00	PELLET INNER
701-9	55.00	1.550	8.00	PELLET CENTER
701-9	55.00	3.100	8.00	PELLET OUTER
701-10	55.00	0.000	65.00	PELLET INNER
701-10	55.00	2.000	38.00	PELLET CENTER
701-10	55.00	4.200	20.00	PELLET OUTER

<<<< END OF DATA SELECTION.>>>>
<DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1) STOP
END OF LISTING
<DANTE? >

図A-7 軸方向位置=55 (mm)で見たときの
ペレット結晶粒径とペレット径方向位置の関係
テーブル名称=「NSRR-PGS」

() 内の値は、軸方向位置を示す (mm)。

TENO	CLAD GRA IN SIZE (MICRON)	CLAD TEMPERATUER (DEG _C)	この clad 測定温度は 軸方向位置 55.0 (mm) のもの
701-1	3.0(55)	150.00	
701-2	28.0(60)	1170.00	
701-3	144.0(65)	1400.00	
701-4	217.9(45)	1570.00	
701-5	127.0(60)	1800.00	
701-6	180.0(55)	1650.00	
701-7	200.0(55)	1750.00	
701-8	3.0(55)	1000.00	
701-9	3.0(55)	250.00	
701-10	229.0(50)	-101.00	
<<< END OF DATA SELECTION.>>>>			
: DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1)			

(Y 軸 , X 軸)

図 A-8 clad 測定温度と clad 結晶粒径の対応テーブル

TEST NO	MERSUREMENT CLAD TEMPERATURE	GROUP TEXT
701-1	220.00	MAX TEMP
701-2	1180.00	MAX TEMP
701-3	1400.00	MAX TEMP
701-4	1620.00	MAX TEMP
701-5	1800.00	MAX TEMP
701-6	1650.00	MAX TEMP
701-7	1750.00	MAX TEMP
701-8	1050.00	MAX TEMP
701-9	300.00	MAX TEMP
701-1	173.33	AVG TEMP
701-2	1166.67	AVG TEMP
701-3	1400.00	AVG TEMP
701-4	1595.00	AVG TEMP
701-5	1800.00	AVG TEMP
701-6	1616.67	AVG TEMP
701-7	1716.67	AVG TEMP
701-B	1016.67	AVG TEMP
701-9	266.67	AVG TEMP
<<<< END OF DATA SELECTION.>>>>		
<DANTE? (LIST: PAGE 1.1 OF 1.1) STOP		
END OF LISTING		
<DANTE? >		

図A-9 被覆管温度の最大、平均値を定義したテーブル

[NSRR-MTEMP]

TENO	CLAD HARDNESS (MB)	CLAD GRAIN SIZE (MICRON)	GROUP TEXT
701-1	413.9	3.0	CLAD INNER
701-1	428.8	3.0	CLAD MIDDLE
701-1	397.8	3.0	CLAD OUTER
702-2	428.2	28.0	CLAD INNER
701-2	435.2	28.0	CLAD MIDDLE
701-2	435.2	28.0	CLAD OUTER
701-3	451.7	144.0	CLAD INNER
701-3	431.8	144.0	CLAD MIDDLE
701-3	462.8	144.0	CLAD OUTER
701-4	463.7	217.9	CLAD INNER
701-4	455.5	217.9	CLAD MIDDLE
701-4	562.5	217.9	CLAD OUTER
701-5	829.8	127.0	CLAD INNER
701-5	585.9	127.0	CLAD MIDDLE
701-5	834.1	127.0	CLAD OUTER
701-6	496.7	180.0	CLAD INNER
701-6	482.8	180.0	CLAD MIDDLE
701-6	684.8	180.0	CLAD OUTER
701-7	874.4	253.0	CLAD INNER
701-7	560.1	253.0	CLAD MIDDLE
701-7	745.6	253.0	CLAD OUTER
701-8	340.2	3.0	CLAD INNER
701-8	339.8	3.0	CLAD MIDDLE
701-8	343.2	3.0	CLAD OUTER
701-9	379.3	3.0	CLAD INNER
701-9	391.9	3.0	CLAD MIDDLE
701-9	386.6	3.0	CLAD OUTER
701-10	712.5	229.0	CLAD INNER
701-10	582.3	229.0	CLAD MIDDLE
701-10	846.7	229.0	CLAD OUTER

<<< END OF DATA SELECTION. >>>



 (X 軸 , Y 軸)

軸方向位置 = 60 (mm) のもの

= 65 (mm) のもの

= 45 (mm) のもの

= 60 (mm) のもの

上記以外は

軸方向位置 = 55 (mm)

図 A - 10 clad 結晶粒径と clad 硬度の対応テーブル

TABLE NSRR_POWER HAS 10 RECORDS IN FILE NSRR_POWER
 ** LAST UPDATE DATE = 12/ B/83 9:43:10

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T REL	
2 POW	POWER	F REL	<i>cal/s</i>
3 PMB	PIN MAX BOWING	F REL	<i>mm</i>
4 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T REL	
<DANTE? >			

図B-1 テーブル「NSRR-POWER」のデータ項目

TABLE NSRR_TEMP HAS 160 RECORDS IN FILE NSRR_TEMP
 ** LAST UPDATE DATE = 12/14/83 11: 3:18

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T REL	
2 ADFCB	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	F REL	<i>mm</i>
3 CLDE	CLAD DEFORMATION	F REL	<i>um</i>
4 PCTE	PELLET CENTER TEMPERATURE	F REL	$^{\circ}\text{C}$
5 MCT	MEASUREMENT CLAD TEMPERATURE	F REL	$^{\circ}\text{C}$
6 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T REL	
<DANTE? >			

A

図B-2 テーブル「NSRR-TEMP」のデータ項目

TABLE NSRR_HOOP HAS 35 RECORDS IN FILE NSRR_HOOP
 ** LAST UPDATE DATE = 1/25/84 14: 7:57

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T REL	
2 ADFCB	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	F REL	
3 HOPO	HOOP POSITION	F REL	
4 COLT	CLAD OXIDE LAYER THICKNESS	F REL	
5 CCOLT	CAL. CLAD OXIDE LAYER THICKNESS	F REL	
6 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T REL	
<DANTE? >			

図B-3 テーブル「NSRR-HOOP」の項目

TABLE NSRR_RADI HAS 154 RECORDS IN FILE NSRR_RADI
 ** LAST UPDATE DATE = 3/15/84 9: 9:47

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T	REL
2 ADFCB	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	F	REL
3 RDFP	RADIAL DISTANCE FROM PELLET	F	REL
4 HOOP	HOOP POSITION	F	REL
5 CLHA	CLAD HARDNESS	F	REL
6 CLGR	CLAD GRAIN SIZE	F	REL
7 PGS	PELLET GRAIN SIZE	F	REL
8 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T	REL
<DANTE? >			

図B-4 テーブル「NSRR-RADI」のデータ項目

TABLE NSRR_HARD HAS 30 RECORDS IN FILE NSRR_HARD
 ** LAST UPDATE DATE = 12/ 9/83 22:12:41

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T	REL
2 KBN	KUBUN	T	REL
3 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T	REL
4 CLDEF	CLAD DEFORMATION	F	REL
5 CLHA	CLAD HARDNESS	F	MICRON
<DANTE? >			MB

図B-5 テーブル「NSRR-HARD」のデータ項目

TABLE NSRR_CTEMP HAS 16 RECORDS IN FILE NSRR_CTEMP
 ** LAST UPDATE DATE = 1/25/84 14:36:58

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T	REL
2 ADFCB	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	F	REL
3 CCOLT	CLAD OXIDE LAYER THICKNESS	F	REL
4 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T	REL
<DANTE? >			

図B-6 テーブル「NSRR-CTEMP」のデータ項目

TABLE NSRR_PGS HAS 27 RECORDS IN FILE NSRR_PGS
 ** LAST UPDATE DATE = 1/26/84 15:15:49

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T	REL
2 ADFCB	AXIAL DISTANCE FROM CORE BOTTOM	F	REL
3 RDFP	RADIAL DISTANCE FROM PELLET	F	REL
4 PGS	PELLET GRAIN SIZE	F	REL
5 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T	REL

<DANTE? >

図B-7 テーブル「NSRR-PGS」のデータ項目

TABLE NSRR_MTEMP HAS 18 RECORDS IN FILE NSRR_MTEMP
 ** LAST UPDATE DATE = 12/ 9/83 16:48:55

FIELD NAMES	FIELD HEADINGS	TYPES	UNITS
1 TENO(2)	TEST NO	T	REL
2 MTEMP	MERSUREMENT CLAD TEMPERATURE	F	REL
3 GPTEXT(4)	GROUP TEXT	T	REL

<DANTE? >

図B-8 テーブル「NSRR-MTEMP」のデータ項目

PNC SN841-84-23

附録4 原子力学会「昭59年会」予稿

原子力学会「昭59年会」(1984年3月29~31日, 近大)

A35

NSRRにおける混合酸化物燃料の照射実験

-(1)実験条件と破損しきい値-

斎藤 伸三^{*}, 稲辺 輝雄, 塩沢 周策, 上村勝一郎
 S. SAITO T. INABE S. SHIOZAWA K. KAMIMURA
 原研, 動燃^{*} 古田土和雄^{*}, 山口 俊弘^{*}, 森田由紀夫, 横内 洋二^{*}
 K. KODATO T. YAMAGUCHI Y. MORITA Y. YOKOUCHI

1. はじめに ; 原研NSRRにおいては、これまで軽水炉用ウラン酸化物(UO_2)燃料の破損挙動を調べるための実験研究を進めてきたが、これに加えて、熱中性子炉用プルトニウム-ウラン混合酸化物($\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$)燃料の破損挙動に関する実験研究を動燃事業団との共同研究として計画し、これまでに10回の第Ⅰ期実験を実施した。第Ⅰ期実験は、NSRRの標準試験燃料(UO_2 燃料)と同一の寸法を有する混合酸化物燃料の破損しきい値を把握して、破損しきい値に及ぼすプルトニウムの影響を確認することを目的としている。

2. 実験方法 ; 実験に用いた混合酸化物燃料の仕様を表1に示す。実験に当っては、燃料1本(被覆管表面に熱電対付)を室温・大気圧の水と共に2重構造のカプセルに装填し、パルス出力照射に供した。実験後は、燃料を内部カプセルに入れたまま動燃に輸送し、動燃側にて燃料の照射後試験を実施した。

3. 実験結果 ; 10回の実験において、試験燃料には115~284 cal/g. ($\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$) の範囲の発熱量を与えたが、発熱量の増加とともに、被覆管の表面最高温度の増加(図1)、酸化による変色の進行、変形量の増大(図2)が見られ、これらの傾向は概ね標準燃料実験の結果と一致している。本実験に用いた燃料の破損は256 cal/g 以上の発熱量において生じた(250 cal/g 以下では非破損)。これらの燃料の被覆管には、溶融による変形が起きており、変形部あるいはその近傍にはクラックが生じていた(図3)。

4. 結論 ; 今回実験した混合酸化物燃料の破損しきい値は、250~256 cal/g の間にあることが確認できた。これは、標準燃料(UO_2 燃料)の破損しきい値253~264 cal/g とほぼ一致している。また、燃料の破損の原因が、被覆管の酸化による脆化と溶融による薄肉化にあることも共通している。

表1 試験燃料の仕様

$\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ ペレット	
寸法: $9.31\text{ mm} \phi \times 110\text{ mm}$	
$\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2) : 6.33\text{ w/o}$	
$(^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}) / \text{Pu} : 73.9\text{ w/o}$	
U: 天然ウラン	
<u>Zry-4被覆管</u>	
外径: 10.72 mm, 肉厚: 0.62 mm	

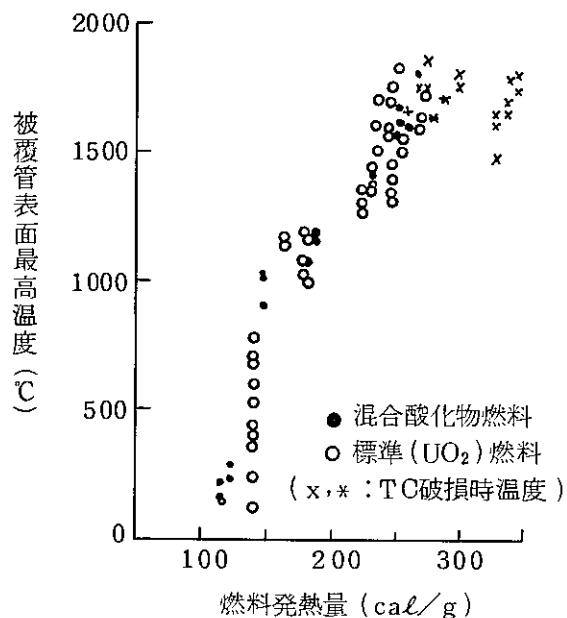


図 1 混合酸化物燃料及び標準型 UO_2 燃料の被覆管表面最高温度測定値

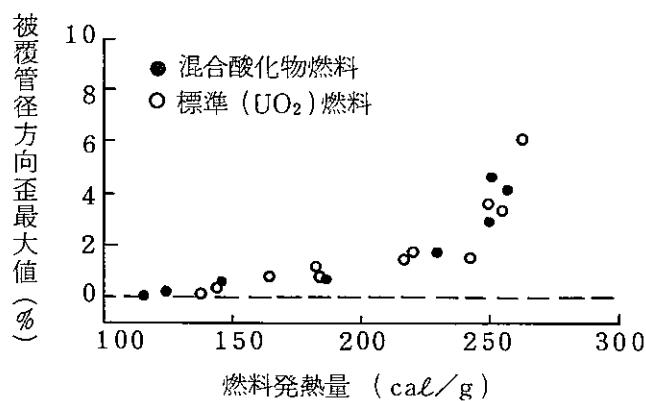


図 2 混合酸化物燃料及び標準型 UO_2 燃料の実験後被覆管径方向歪最大値

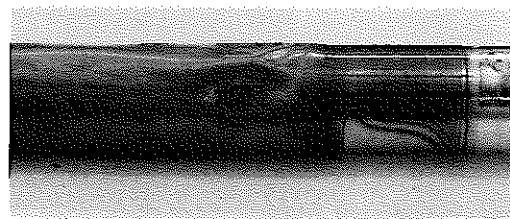


図 3 混合酸化物燃料被覆管破損部の外観写真 (燃料発熱量 25.6 cal/g)

原子力学会「昭59年会」(1984年3月29~31日, 近大)

A36

N S R R における混合酸化物燃料の照射実験

-(2) 照射後試験及び解析-

○上村 勝一郎, 古田土 和雄, 山口 俊弘, 森田 由起夫
 K. KAMIMURA K. KODATO T. YAMAGUCHI Y. MORITA *
 動燃, 原研 * 横内 洋二, 斎藤 伸三, 稲辺 輝雄, 塩沢 周策 *
 Y. YOKOUCHI S. SAITO T. INABE S. SHIOZAWA

1. 目的 ; N S R R においてパルス照射した 10 本の燃料ピンの照射後試験によって得られた, 各種特性と照射条件との相関性を調べ, 反応度投入下の燃料の挙動を明らかにするとともに, 燃料挙動解析コードによる計算結果との比較評価を行うことを目的とする。

2. 照射後試験;

(試験方法) パルス照射実験であるため比放射能は, ほとんど未照射の混合酸化物燃料と同じであり, プルトニウム燃料部のグローブボックス内で, 非破壊・破壊試験を行った。

(試験結果) 照射済燃料の各種特性の発熱量依存性を図 1 に示す。ペレット結晶粒径は, 燃料発熱量 190 cal/g 程度までは, 未照射のものと同じであり, それ以降は発熱量とともに増加する。被覆管の結晶粒径は, 150 cal/g 程度までは変化なくそれ以降発熱量とともに急激に増加する。又硬さは, 150 cal/g 程度までは, やや軟らかくなり, それ以降急激に硬くなる。被覆管外径は, 発熱量とともに増加するが, 破損しきい値 ($250 \sim 256 \text{ cal/g}$) 附近では, 平均約 2 % のふくれが見られる。

3. 解析 ; 被覆管の表面温度と酸化膜の厚さには, 強い相関があり, 廉外実験で得られている実験式がある。^{1) 2)}これを用いて, 実験で測定された被覆管表面温度から酸化膜厚さを計算し, 最高温度との関係をプロットしたのが, 図 2 の・印である。同図には, 実測した酸化膜厚さを○印で示してある。計算値は測定値より低めである。又, ペレット粒径の径方向分布の代表例を図 3 に示す。結晶粒の成長は, 温度依存性が極めて強く, 温度分布の指標と見ることができる。図の・印は, ペレットの径方向の温度分布において, 定常照射と異なり, トランジエント時には, 外側の方が高温になっていることを示す。なお, 計算コード (FEAPUS-III)との比較評価は, 発表時に示す。

4. まとめ ; 本実験の結果からは, UO_2 燃料と特に異なる挙動は認められていない。

[参考文献] 1) Kawasaki et al. J. Nuclear Science & Tech. 15 [8],

589 [1978]

2) Ianni, P.W. APED-5454

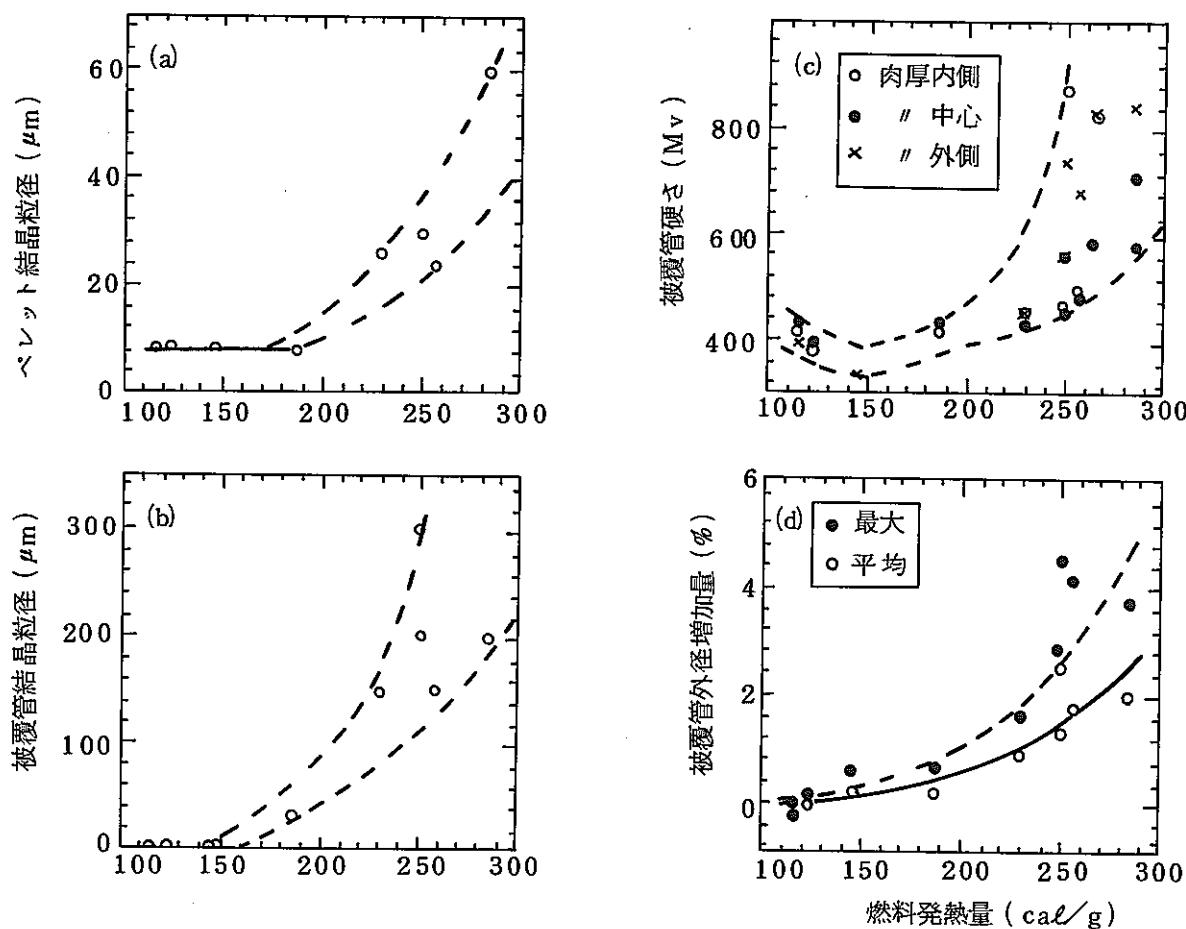


図 1 照射燃料特性の発熱量依存性

(a)ペレット結晶粒径, (b)被覆管結晶粒径

(c)被覆管硬さ, (d)被覆管外径増加量

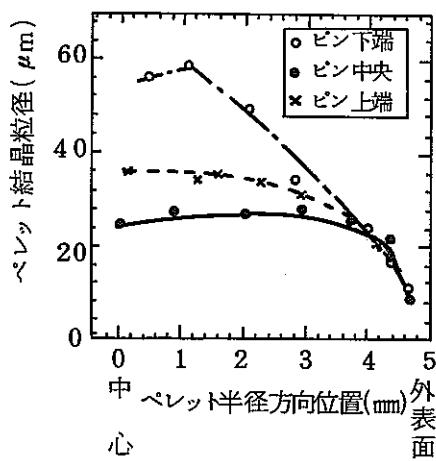


図 3 照射済ペレット径方向の結晶粒径分布

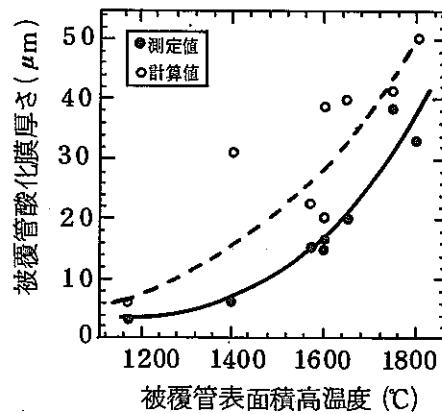


図 2 被覆管温度と酸化膜厚さとの関係