

JAERI-M  
9140

反応度事故条件下における燃料破損挙動  
におよぼすペレット形状の影響

(NSRRにおけるペレット形状効果実験)

1980年10月

細川 隆徳\*・星 蔦雄・柳原 敏・岩村 公道  
折田 義彦\*\*

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

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

反応度事故条件下における燃料破損挙動に  
およぼすペレット形状の影響  
(NSRRにおけるペレット形状効果実験)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部  
細川 隆徳\*・星 葛雄・柳原 敏・岩村 公道  
折田 義彦\*\*

(1980年9月24日受理)

反応度事故条件下での燃料挙動に及ぼすペレット形状の影響を調べるために、フラットおよびディッシュペレット型燃料棒の照射実験を実施し、その実験結果をこれまで実施されたNSRR標準型燃料棒であるチャンファペレット型燃料棒の結果と比較した。また、有限要素法により $UO_2$ ペレットの熱弾性変形解析を行い、ペレット形状の相違による変形量の差異を検討した。これらの結果により、次の結論を得た。

(1) 実験において、ペレット形状の相違による被覆管表面温度挙動、照射後燃料棒の外観、X線、中性子ラジオグラフィ、および被覆管変形量にペレット形状による差異は認められなかった。

(2) 有限要素法による $UO_2$ ペレットの熱弾性変形解析の結果、ペレット熱変形に及ぼすペレット端面形状の影響は認められなかった。

(3) 以上の結果より、従来の軽水型動力炉で使用されているペレット形状の範囲では、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動および破損しきい値に及ぼす影響はないと考えられる。

---

\* 外来研究員：日立製作所(株)

\*\* 科学技術庁

Effects of Pellet Shape on the Fuel Failure  
Behavior under a RIA Condition  
(Pellet Shape Parameter Tests in the NSRR Experiments)

Takanori HOSOKAWA\*, Tsutao HOSHI, Satoshi YANAGIHARA,  
Takamichi IWAMURA, Yoshihiko ORITA\*\*

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 24, 1980)

The two types of fuel rods with different pellet shapes, i.e. flat pellets and dished pellets, were tested in the NSRR to investigate the effects of pellet shapes on the fuel failure behavior under a RIA condition and the results were compared with those of the chamfered pellet fuel rods which are used as the reference rod in the NSRR experiments. In addition, the deformation of pellets due to thermal expansion is calculated by using a FEM computer code. Through the above results, following conclusions are obtained.

- (1) In the experiments, insignificant differences on the cladding surface temperature responses and the appearance of post-irradiated rods are observed in each type of rods.
- (2) Evident differences on the deformation of fuel pellets have not appeared in the calculation.
- (3) In the RIA conditions, it is concluded that the fuel failure behavior and threshold energy might not be affected by pellet shape of which size is in the range of the current LWR's fuel rods.

Keywords: Reactivity Initiated Accident, Fuel Failure, Failure Threshold,  
UO<sub>2</sub> Pellet, Pellet Shape, Fuel Deformation, NSRR Reactor, Fuel Rod

---

\* On leave from Hitachi Ltd.,

\*\* Science and Technology Agency

## 目 次

1. 緒 論 .....	1
2. NSRRにおける燃料照射実験 .....	2
2.1 実験方法 .....	2
2.1.1 NSRRの概要 .....	2
2.1.2 実験用カプセル .....	2
2.1.3 試験燃料 .....	2
2.1.4 計 装 .....	3
2.1.5 照射後試験 .....	3
2.2 実験結果 .....	3
2.2.1 概 要 .....	3
2.2.2 試験燃料棒の発熱量および発熱分布 .....	3
2.2.3 フラットペレットの照射結果 .....	4
2.2.4 ディッシュペレットの照射結果 .....	4
2.3 考 察 .....	5
2.3.1 燃料挙動 .....	5
2.3.2 被覆管表面温度挙動 .....	5
2.3.3 被覆管変形量 .....	6
2.3.4 燃料破損しきい値 .....	7
3. 有限要素法によるペレット熱弾性変形解析 .....	32
3.1 概 要 .....	32
3.2 解析方法 .....	32
3.3 ペレットの熱弾性変形解析結果 .....	33
4. 結 論 .....	39
謝 辞 .....	39
参考文献 .....	39

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Irradiation tests in the NSRR .....	2
2.1 Experimental method .....	2
2.1.1 NSRR test facility .....	2
2.1.2 Test capsule .....	2
2.1.3 Test fuel .....	2
2.1.4 Instrumentation .....	3
2.1.5 Post irradiation examination .....	3
2.2 Test results .....	3
2.2.1 Summary .....	3
2.2.2 Energy deposition and power distribution in the fuel rod .....	3
2.2.3 Test results of flat pellet rods .....	4
2.2.4 Test results of dished pellet rods .....	4
2.3 Discussion .....	5
2.3.1 Fuel behavior .....	5
2.3.2 Cladding surface temperature .....	5
2.3.3 Cladding deformation .....	6
2.3.4 Failure threshold .....	7
3. Analysis of thermal elastic deformation of fuel pellet by a finite element method .....	32
3.1 Introduction .....	32
3.2 Analytical method .....	32
3.3 Results of analysis .....	33
4. Conclusion .....	39
Acknowledgements .....	39
Reference .....	39

## 1. 緒 論

原子炉の安全性を評価する際に想定される事故の一つに反応度事故がある。これは何らかの原因によって原子炉に大きな反応度が添加され、原子炉出力が異常に上昇することによって、燃料が破損あるいは溶融するに至る可能性のある事故をいう。

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) 実験では、この反応度事故時の急激な出力上昇をパルス炉を用いて模擬し、実験孔に挿入したカプセルまたはループ内の試験燃料を照射して、反応度事故時の燃料挙動、すなわち反応度事故の大きさと燃料挙動の関係、破損しきいと破損機構、破壊力の大きさとその発生機構等について、実験的に解明することを目的としている<sup>(1)</sup>。

NSRR実験は1975年10月に実験を開始して以来、これまでに300回以上の実験を実施してきた。このうち、未照射燃料ではあるが反応度事故時の燃料挙動の基本的なデータを収集することを目的とした標準燃料実験の結果、燃料の破損は、被覆材であるジルカロイと冷却水との反応により被覆材が脆化し、クエンチ時に生じる熱応力によって被覆管にクラックが入り生じることが明らかになった<sup>(2)</sup>。

ところで、このクラックの発生状況を見ると、クラックは被覆管に円周方向に入っており、破損の位置はペレットとペレットの境界付近に現われ易いことが判った。クラック発生部の断面観察の結果によると、この部分ではペレットの偏心等によってペレットの端面が被覆管と強く接触していることが認められている。即ち、ペレット境界近傍でクラックの発生し易い原因は、ペレットと被覆管の接触が強いことによってその部分での被覆管温度の上昇が大きくなり、被覆管の酸化量は大きくなりかつ被覆管の溶融も生じ易いことによるものと考えられた。

NSRR標準型燃料ペレットはチャンファ型ペレットを使用している。しかし、上述のようにペレットの端面がクラックの発生に何らかの影響を与えるのではないかと考えられることから、ここではフラットペレットおよびディッシュペレットを用いた実験を実施し、ペレット端面形状が燃料挙動すなわち燃料の破損しきい値、被覆管温度挙動あるいは変形に及ぼす影響を調べた。また、有限要素法による変形量の解析を行い、ペレット形状の相違によるペレット変形量の差異を検討した。

## 2. NSRRにおける燃料照射実験

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 NSRRの概要

NSRRは米国GA社によって開発された大型パルス炉TRIGA-ACPRを改良した原子炉である。原子炉はFig. 2.1に示すようにスイミングプール型の原子炉で、炉心本体は水深9mのプール内に設置されており、燃料照射実験のために内径約22cmの実験孔が炉心中央を貫通して設けられている。

炉心燃料は直径約3.6cm、有効長約38cmの20%濃縮ウラン-水素化ジルコニウム( $U-ZrH_{1.6}$ )をステンレス鋼で被覆したもので、この燃料をFig. 2.2に示すように実験孔の囲りに円環状に配して炉心を構成している。炉心内には原子炉の制御とパルス運転のために8本の燃料フォロア型制御棒と3本のトランジェント棒を有する。

パルス出力の発生はトランジェント棒の急速引抜によって行い、3本のトランジェント棒の組合せによって最大4.7ドルまでの任意の反応度を投入することができる。Fig. 2.3に投入反応度4.67ドルに対するパルス出力と積分出力の時間変化を示す。この場合の最大ピーク出力と積分出力はそれぞれ約21,000MWと117MW-secである。また、パルス出力の最短炉周期およびパルス半値幅はそれぞれ1.1msecおよび4.4msecである。

#### 2.1.2 実験用カプセル<sup>(3)</sup>

炉内で照射する試験燃料はFig. 2.4に示すカプセルに封入して照射する。カプセルは内径12cmのステンレス鋼製の密封容器であり、冷却水(常温、常圧)をカプセルフランジ下部約25cmまで注入する。

#### 2.1.3 試験燃料

本試験で用いた試験燃料棒は、Fig. 2.5に示すようにジルカロイ-4被覆管に10%濃縮 $UO_2$ ペレットを装填し、両端を端栓で密封溶接した全長279mmのPWR型燃料棒である。構造はNSRR標準試験燃料棒と比較してペレットを除いた他はすべて同一である。燃料棒内には、14個の $UO_2$ 焼結ペレットが長さ約135mmに渡って積み重ねるようにして装填されており、燃料スタック上部には長さ30mmの電磁軟鉄製変位測定用鉄心を、下部には長さ20mmのステンレス鋼製スペーサが配されている。また、燃料棒上部にあるブレナム部にはインコネル製のつる巻スプリングが収納されている。

本試験で使用したフラットおよびディッシュ・ペレットの形状および寸法をFig. 2.6に示す。NSRR標準燃料として用いられているチャンファ・ペレットはペレット端面の角を面取りしたものであるのに対して、フラット・ペレットはその角を有したものである。またディッシュ



・ペレットはペレット端面に直径5 mm、深さ0.2 mmの球状のくばみを有したものである。なお、本試験に用いたフラットおよびディッシュ・ペレットの直径および長さはそれぞれ9.29 mmおよび10 mmでNSRR標準燃料と同一であり、また、ペレットの焼結密度も約95%対理論密度比でNSRR標準燃料の焼結密度と同じである。Table 2.1に燃料の主要仕様をまとめて示す。

#### 2.1.4 計 装<sup>(3)</sup>

燃料照射中においては、燃料被覆管表面に熱電対(Pt/Pt-13%Rh素線、素線径0.2 mm $\phi$ )を取付けて温度測定を行った。測定位置はFig. 2.7に示すようにペレットの腹部および端部に数ヶ所取り付けた。Test No 226-2 および-6の実験で多数の熱電対を取付けた理由は、ペレットの形状の違いによってペレットの熱変形の程度に差異が生じると考えると、ペレットの腹部と端部でギャップ幅に違いが出て被覆管温度挙動に差異が現われると予測できるので、これを計測することを目的としたものである。

#### 2.1.5 照射後試験

照射後燃料試験として燃料棒外観目視検査の他、プロフィロメータによる軸方向の被覆管外径測定、X線写真撮影、NRG( Neutron-Radiography )撮影、燃料棒軸方向出力分布測定を実施した。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 概 要

実験は、フラット・ペレット型燃料棒について2回( Test No 226-1 および226-2 )、ディッシュ・ペレット型燃料棒について3回( Test No 226-5, 226-6 および226-7 )の合計5回実施した。Test No 226-1 および226-5は試験燃料の発熱量を約210 cal/g $\cdot$ UO<sub>2</sub>としたもので、これらは特に変形量に関するデータを得る目的で実施したものである。他の実験は発熱量を約240 cal/g $\cdot$ UO<sub>2</sub>としたもので、これらは特に燃料の破損しきい値の評価を目的に実験を行ったものである。Table 2.2に実験条件を、またTable 2.3に実験結果の概要をNSRR標準型燃料であるチャファペレット燃料の結果と合せて示す。

### 2.2.2 試験燃料棒の発熱量および発熱分布

試験燃料棒の発熱量は、すでに求められた10%濃縮標準型燃料棒の炉心出力に対する較正值( 4.36 cal/g $\cdot$ UO<sub>2</sub>/MW-S )を用いて<sup>(4)</sup>炉心積分出力より評価した。しかし、約240 cal/g $\cdot$ UO<sub>2</sub>の照射燃料についてはGe(Li)検出器を用いてZr<sup>95</sup>およびLa<sup>140</sup>の放射線強度を測定して再確認を行った。Ge(Li)検出器による測定結果をTable 2.4に載せる。この結果に示されるように、各燃料棒はほぼ等しい条件で照射されたものと言える。

また、Fig. 2.8および2.9に試験燃料の軸方向および径方向の出力分布を示す。Fig. 2.8でTest No 226-2 および226-5の実験の場合に、軸方向の出力ピーク位置が標準の場合に比

らべて上方に移っているのはカプセル内での燃料の取付位置を下方へ4 cm 程ずらしたことによる。

### 2.2.3 フラットペレットの照射結果

#### (1) Test No 226-1 (208 cal/g·UO<sub>2</sub>)

本実験は原子炉への投入反応度量2.5ドル(ペリオド2.77msec)で照射したものであり、試験燃料棒の発熱量は208 cal/g·UO<sub>2</sub>であった。Table 2.3に示すように、被覆管表面最高温度は1140℃~1250℃であった。照射後燃料の外観、X線、NRG写真をFig. 2.10に示す。まず、照射後燃料の外観についてみると発熱部に面した被覆管表面は長さ138.8mmに渡って黒色の酸化被膜で覆われ、燃料下部においては点状の酸化被膜の剝離が観察された。また、NRGおよびX線写真をみるとUO<sub>2</sub>ペレットに割れが観察されるが、ペレットの端部に特別な割れや欠け等の異状は認められなかった。燃料の破損はなかった。

#### (2) Test No 226-2 (239 cal/g·UO<sub>2</sub>)

本実験は原子炉への投入反応度量2.78ドル(ペリオド2.33msec)で照射したものであり、試験燃料棒の発熱量は239 cal/g·UO<sub>2</sub>であった。

被覆管表面最高温度は1250~1430℃であった。Fig. 2.11は照射後燃料の外観、X線およびNRG写真である。燃料棒外観についてみると発熱部に面した被覆管表面では燃料スタック長(135mm)よりも長い軸方向長139.3mmの酸化被膜が形成され、酸化膜には剝離がみられた。剝離の状態はTest No 226-1の場合よりも若干激しいものであった。酸化被膜の色彩は燃料棒中央から上部にかけて灰色を示し、ジルコニウムの酸化がTest No 226-1の場合よりも進んでいることを示していた。X線およびNRG写真からUO<sub>2</sub>ペレットの割れが観察された他、ペレット-ペレット境界でのすき間も観察され、大きいものでは1mm程度のすき間が認められた。燃料破損はなかった。

### 2.2.4 ディッシュ・ペレットの照射結果

#### (1) Test No 226-5 (207 cal/g·UO<sub>2</sub>)

これはTest No 226-1(フラット・ペレット型燃料棒)と同じ条件でパルス照射を行ったもので、燃料棒の発熱量は207 cal/g·UO<sub>2</sub>であった。被覆管最高表面温度はTable 2.3に示すように1160~1240℃であった。Fig. 2.12に照射後燃料棒の外観、X線およびNRGの写真を示す。外観についてみると、被覆管は発熱部に長さ138.8mmにわたって酸化被膜の形成が認められ、燃料下部の一部で酸化被膜の剝離がみられた。X線写真ならびに中性子ラジオグラフィからはペレットの異常な割れ、欠けは認められない。燃料の破損は認められなかった。

#### (2) Test No 226-6 (238 cal/g·UO<sub>2</sub>)

これはTest No 226-2(フラット・ペレット型燃料棒)と同じ条件でパルス照射を行ったもので、発熱量は238 cal/g·UO<sub>2</sub>であった。被覆管表面に取り付けた10対の熱電対から得られた被覆管表面最高温度は1280~1400℃であった。

Fig. 2.13に照射後燃料棒の外観、X線およびNRG写真を示す。全般的にはTest No 226

—2のと同様で、外観についてみると発熱部の被覆管全面に酸化膜が形成されその一部では剝離がみられた。目視検査では燃料棒の破損は見い出されなかったが、カプセル水のFP測定の結果から燃料破損が生じていると認められた。

### (3) Test No 226-7 (238 cal/g·UO<sub>2</sub>)

前実験 (Test No 226-6) では約240 cal/g·UO<sub>2</sub> で破損が認められ、この値は標準型燃料の破損しきい値約260 cal/g·UO<sub>2</sub> に対してやや低いので、本実験は再確認のための実験である。但し、燃料の装荷位置は標準取付とした。

試験燃料の発熱量は238 cal/g·UO<sub>2</sub> であった。被覆管表面最高温度は1340~1540℃でTest No 226-6 に比べて若干高かった。照射後燃料棒の外観およびX線写真をFig. 2.14に示すが、これらの結果はTest No 226-6 と同様であった。本実験では燃料破損は認められなかった。

## 2.3 考 察

### 2.3.1 燃料挙動

Fig. 2.15 および 2.16 は、チャンファ型 (NSRR標準型燃料棒)、フラット型およびディッシュ型燃料棒について照射後燃料棒の外観を比較して示した写真である。また、Fig. 2.17 および Fig. 2.18 は、X線の撮影結果を比較した写真である。

燃料棒の外観についてみると、発熱量約210 cal/g·UO<sub>2</sub> および約240 cal/g·UO<sub>2</sub> いずれの結果でも被覆管表面の酸化の状況 (変色や酸化膜の剝離の程度) にペレット形状による差異は表われていない。また、X線の結果 (または中性子ラジオグラフィの結果) においても、ペレットの割れや再配置の状況に大きな差異は認められない。なお、Test No 226-6 (ディッシュペレット, 238 cal/g·UO<sub>2</sub>) で燃料の破損が認められた。詳細に観察すると、これはFig. 2.18のX線写真にみられるように被覆管の内部に小さな貫通孔がみられる。すなわち、この部分からFPの放出が生じたものと考えられる。ところで、この貫通孔の発生がディッシュペレット特有に発生したものでどうかについてみると、同程度の発熱量の標準型燃料でも、被覆管を貫通しないが被覆管内部に溶融によって生じたと考えられる小さな気泡がみられる例がある。Test No 226-6の燃料棒では、上部から2個目のペレットのずれが大きく、破損部分でペレットの端部が強く接触している様子が認められるので、被覆管温度の上昇が若干大きくなり、被覆管溶融の程度がわずかではあるが増加して貫通するに至ったものと思われる。

### 2.3.2 被覆管表面温度挙動

Fig. 2.19 は、軸方向中心位置の被覆管表面最高温度を標準型燃料棒の実験結果と比較して示した図である。この図に示されるように、ペレット形状による被覆管表面最高温度の顕著な差異は認められない。

一方、Fig. 2.20 および Fig. 2.21 は、フラットペレットおよびディッシュペレットについて被覆管表面温度の過渡挙動を比較した図である。本図ではとくに計測位置近傍のペレット端面と腹面位置の被覆管表面温度の挙動を比較している。本図から明らかなことは、ペレットの

端面ならびに腹面位置で、またペレット形状の相違によっても被覆管表面温度挙動に大きな差異がない点である。

ペレットの熱変形がペレット形状によって変わってくると考えると、ペレットークラッドギャップ幅が変わってくるのでペレット端面および腹部における被覆管表面温度の過渡挙動ならびに最高温度は変わってくるものと予想される。従って、ペレット位置ならびにペレット形状で温度挙動に差が出なかった上記の実験結果は、ペレット形状によるペレットの変形の差異は小さいものであることを示唆している。

### 2.3.3 被覆管変形量

Fig. 2.22 および Fig. 2.23 は、プロファイルメータにより計測した照射後燃料棒の被覆管外径の軸方向の変形量を比較した図である。図はそれぞれ同発熱量の実験結果を比較している。これらの図をみると、変形の全般的な挙動はほぼ同じであり、特にペレット形状の影響を受け易いと考えられるペレット端面でも特別な変化は認められない。

一方、Fig. 2.24 は、被覆管外径の平均変形量と最大変形量を発熱量をパラメータに比較した図である。本図をみると、ペレットの形状の相違による変形量の顕著な差異は認められない。図中の実線および破線は、次章に述べる有限要素法によるチャンファペレットの熱変形計算結果による被覆管の予測変形量を示したものである。実線はペレット中央部での変形量を、また破線はペレット端面部での変形量である。なお、ここでは、計算に用いたペレット温度はペレットを完全断熱材と仮定し、次式<sup>(5)</sup>により求めた。

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = 0.06833 T + 0.45015 \times 10^{-5} T^2 + 0.845 \times 10^3 T^{-1} \Big|_{T_1=273}^{T_2}$$

ここで、

$q$  : 発熱量 (cal/g·UO<sub>2</sub>)

$C_p$  : 比熱 (cal/g·UO<sub>2</sub>·°K)

$T$  : 温度 (°K)

なお、ペレット内の温度分布計算にはペレット径方向発熱分布を考慮した。すなわち、有限要素法によるペレット変形量解析結果と被覆管外径変形量実測値を比較すると、有限要素法による解析結果は発熱量約 140 cal/g·UO<sub>2</sub> でペレット中央部と被覆管の間のギャップ幅が無くなり、これ以上の発熱量では、被覆管がペレットによって軸方向および径方向に変形させられることを示している。なお、最大変形量実測値と解析結果（または、平均変形量）との間に差が生じているのはペレットの偏心に起因しているものと考えられている。また、発熱量が 250 cal/g·UO<sub>2</sub> 以上になると急に変形量が増大するものは、被覆管の溶融によるものである。

以上被覆管変形に及ぼすペレット端面形状の影響についてまとめると、フラットおよびディッシュペレット型燃料棒の変形量はチャンファペレット型燃料棒の変形量と変わらないものであった。また、次章で述べるように、有限要素法による解析結果でもペレット径方向の変形量はペレット端面形状の影響をほとんど受けずほぼ等しい値を示している。これら実測値および解析結果を考え合わせると、被覆管変形挙動に及ぼすペレット端面形状の影響はほとんど無い

ものと考えられる。

#### 2.3.4 燃料破損しきい値

Test No 226-6 (ディッシュペレット,  $238 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ) でカプセル水のFP分析の結果から燃料破損が認められた例が出たが, 上述してきたように, 燃料の外観, X線およびNRG観察にもとづく照射後燃料棒の観察結果ならびに被覆管表面温度挙動, 被覆管の変形挙動にペレット形状の相違による差異は認められなかった。また, 次章に述べるように, ペレットの熱変形解析でもペレット形状により熱変形量に大きな差異は現われない。以上の結果からチャンファ型, ディッシュ型およびフラット型ペレット燃料棒で燃料破損しきい値に差異はないものと考えられる。

Table 2.1 Design Summary of Test Fuel Rod

Fuel Type	Dimension
UO <sub>2</sub> pellets	
Diameter	9.29 mm
Length	10 mm
Density	95% T. D.
Enrichment	10%
Shape	See Fig. 2.6
Cladding	
Material	Zircaloy-4
Wall Thickness	0.62 mm
Pin	
Diameter	10.72 mm
Pellet-cladding Gap	0.095 mm
Element	
Overall Length	265 mm
Fuelled Length	135 mm
Weight of Fuel Pellets	95.3 g
Number of Pellets	14
Plenum Gas	He 1 atm

Table 2.2 Summary of test conditions

Type of fuel rod	Test No	Pulse No	Inserted reactivity ( $\beta$ )	Reactor period (msec)	Core energy release (MW-s)	Estimated energy deposition	Remarks
Flat pellet	226-1	581	2.50	2.77	47.8	208	
	226-2	613	2.78	2.33	54.8	239	The fuel rod was installed at 4cm lower position in the capsule. <sup>(1)</sup>
Dished pellet	226-5	583	2.50	2.77	47.4	207	
	226-6	620	2.78	2.33	54.6	238	The fuel rod was installed at 4cm lower position in the capsule. <sup>(1)</sup>
	226-7	690	2.78	2.33	54.6	238	
Chamfered pellet (STD fuel)	200-4	181	2.72	2.36	53.4	233	
	202-4	353	2.79	2.32	57.8	252	

(1) Axial power peaking position was changed to the upper position of rod from the lower position in the standard installation as shown in Fig.2.8.

Table 2.3 Summary of results on fuel pellet shape parameter tests

Category	Pellet type	Test No	Energy deposition (cal/g·UO <sub>2</sub> )	Max. cladding surface temperature (°C)			Post-test observation
				35mm lower 0°/180°	Middle 0°/180°	35mm upper 0°/180°	
210 ~ 230 cal/g·UO <sub>2</sub>	flat	226-1	208	1200/1250	1230/1250	1140/1210	Cladding surface discolored in black over the entire fuel region. Fuel rod did not fail.
		226-5	207	1230/1160	1240/1170	1180/1160	
	chamfered (STD fuel)	111-16	221	1100/1100	1250/1300	1200/1300	Ditto
		111-17	229	1380/1400	1350/1350	1150/1100	Ditto and oxidized zircaloy film flaked away.
	flat	226-2	239	1250/-	1330/1300	1430/-	Cladding surface discolored in black over the entire fuel region and oxidized zircaloy film flaked away. Fuel did not fail.
		226-6	238	1320/-	1280/1400	1350/-	Cladding surface was similar as that of the above. Fuel failure was detected by FP analysis in capsule water.
				1340/1520	1540/1360	1460/1510	
200-4	233	1625/-	1505/1345	-/-	Ditto		
chamfered (STD fuel)	202-4	252	1500/-	1450/1450	1300/-	Ditto	

Table 2.4 Energy deposition measurements in test fuel rods

Test No	Type of fuel rod	Energy deposition in fuel rod (cal/g·UO <sub>2</sub> )		
		Calculated from reactor power	measured by Ge(Li) detector <sup>(*)</sup>	
			Zr <sup>95</sup>	La <sup>140</sup>
226-2	Flat	239	230	232
226-6	Dished	238	237	234
226-7	Dished	238	236	234

(\*) Axial center

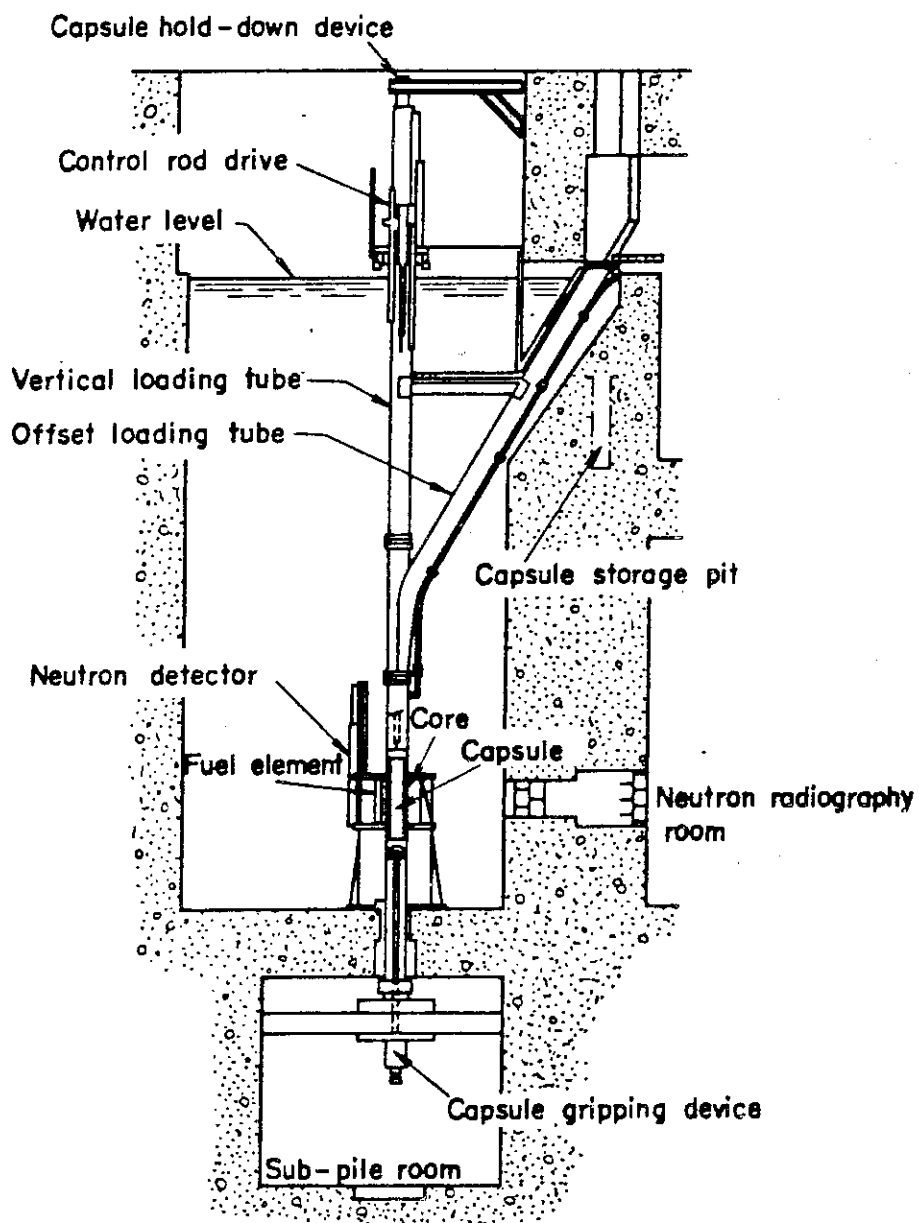


Fig. 2.1 Vertical cross-section of the NSRR



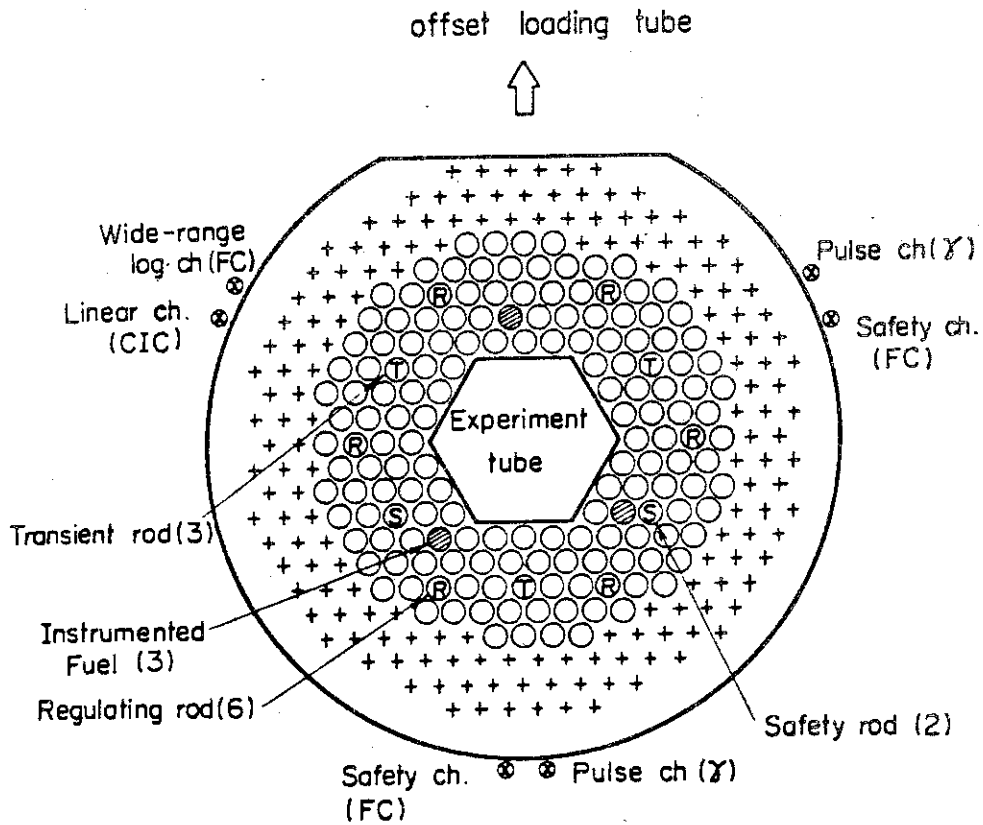


Fig. 2.2 Standard operating core configuration

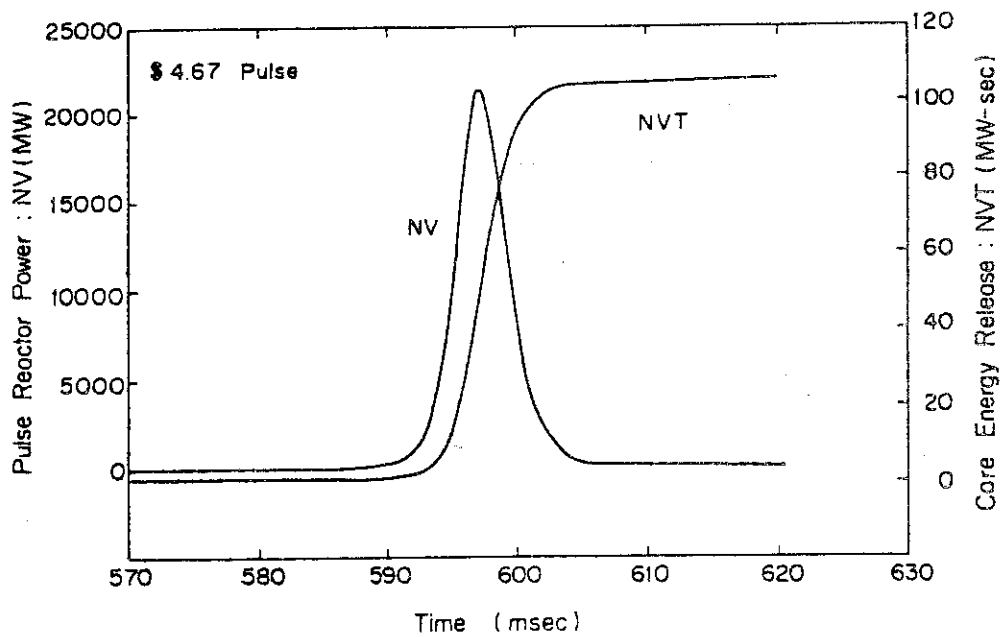


Fig. 2.3 Pulse reactor power and core energy release for 4.67 pulse

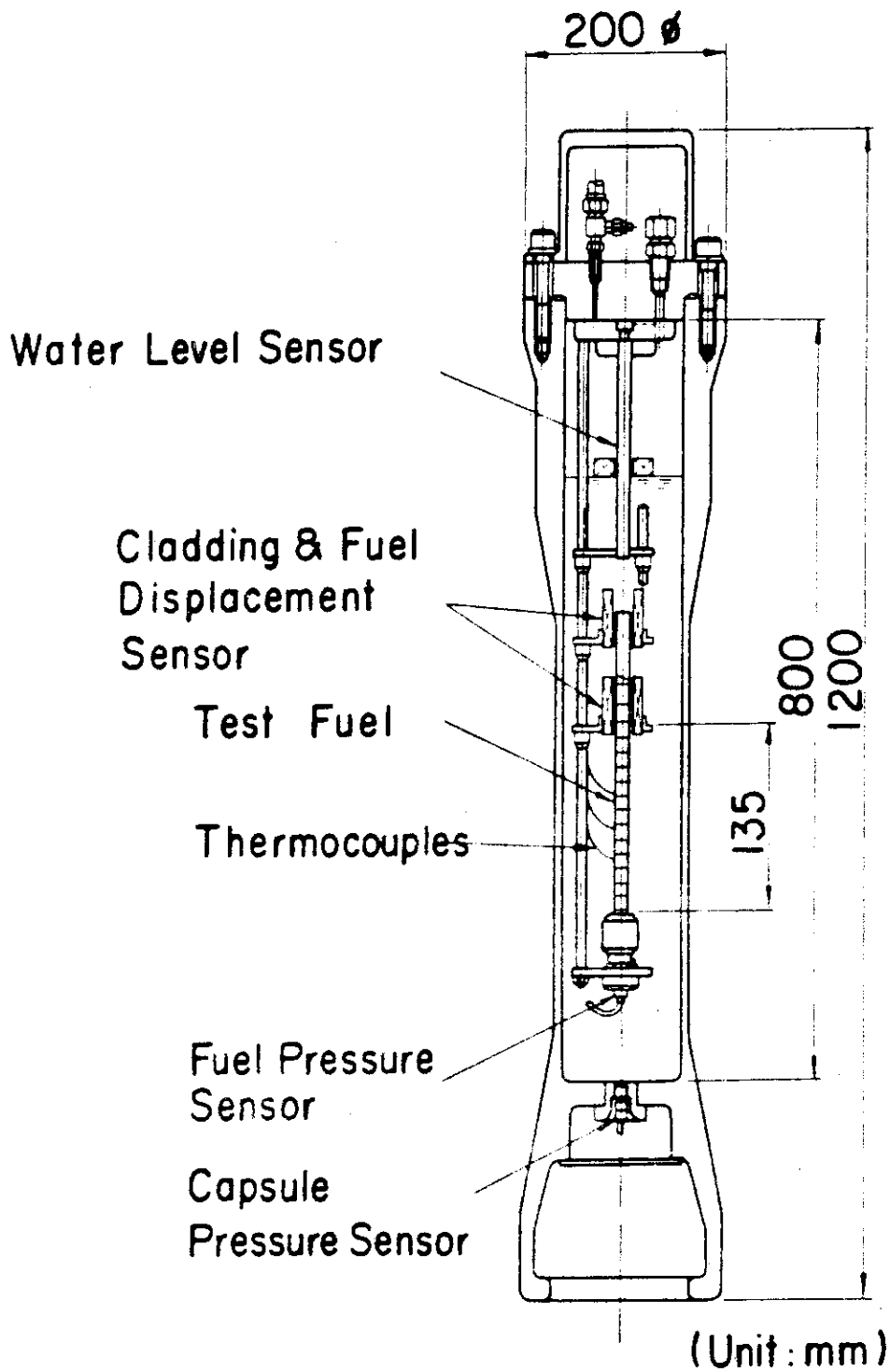


Fig. 2.4 Standard Water Capsule

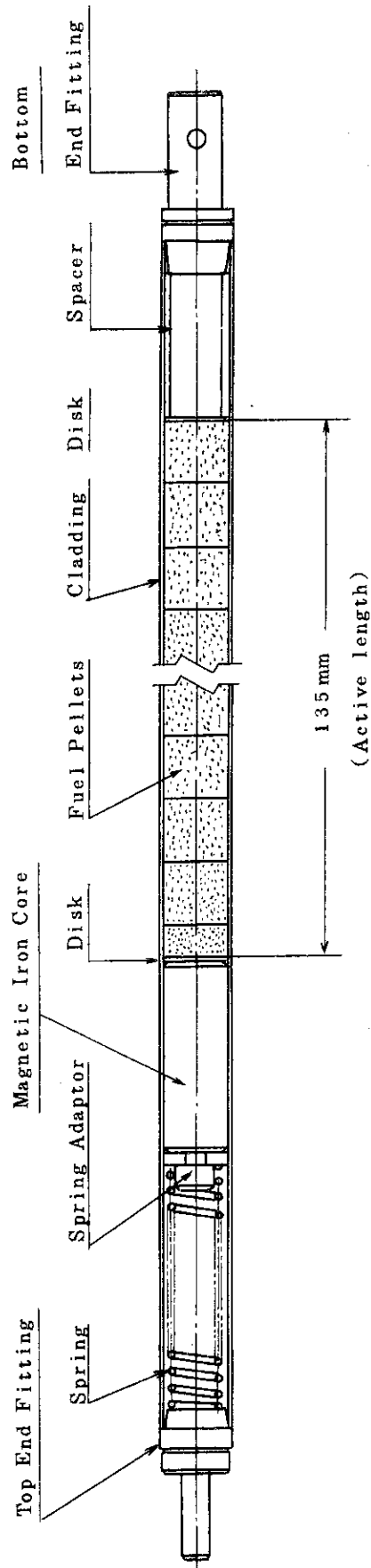


Fig. 2.5 Standard Test Fuel

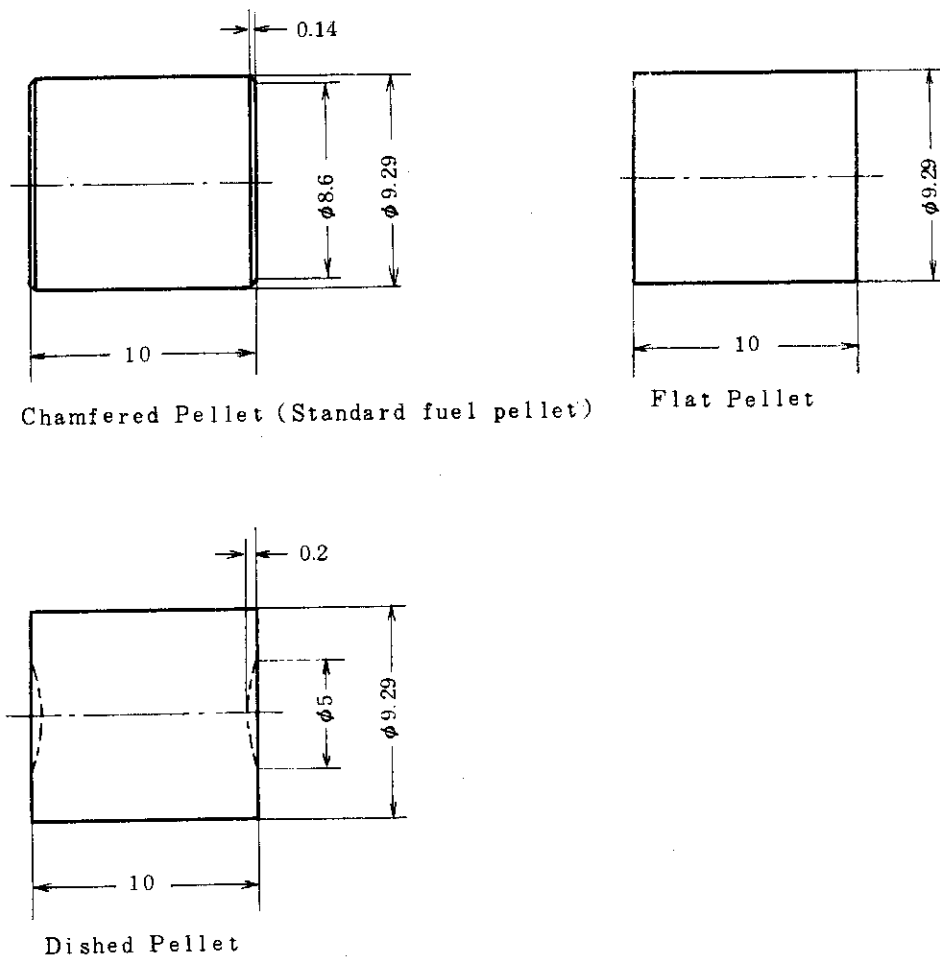


Fig. 2.6 Shape and Dimension of Pellets  
( unit : mm )

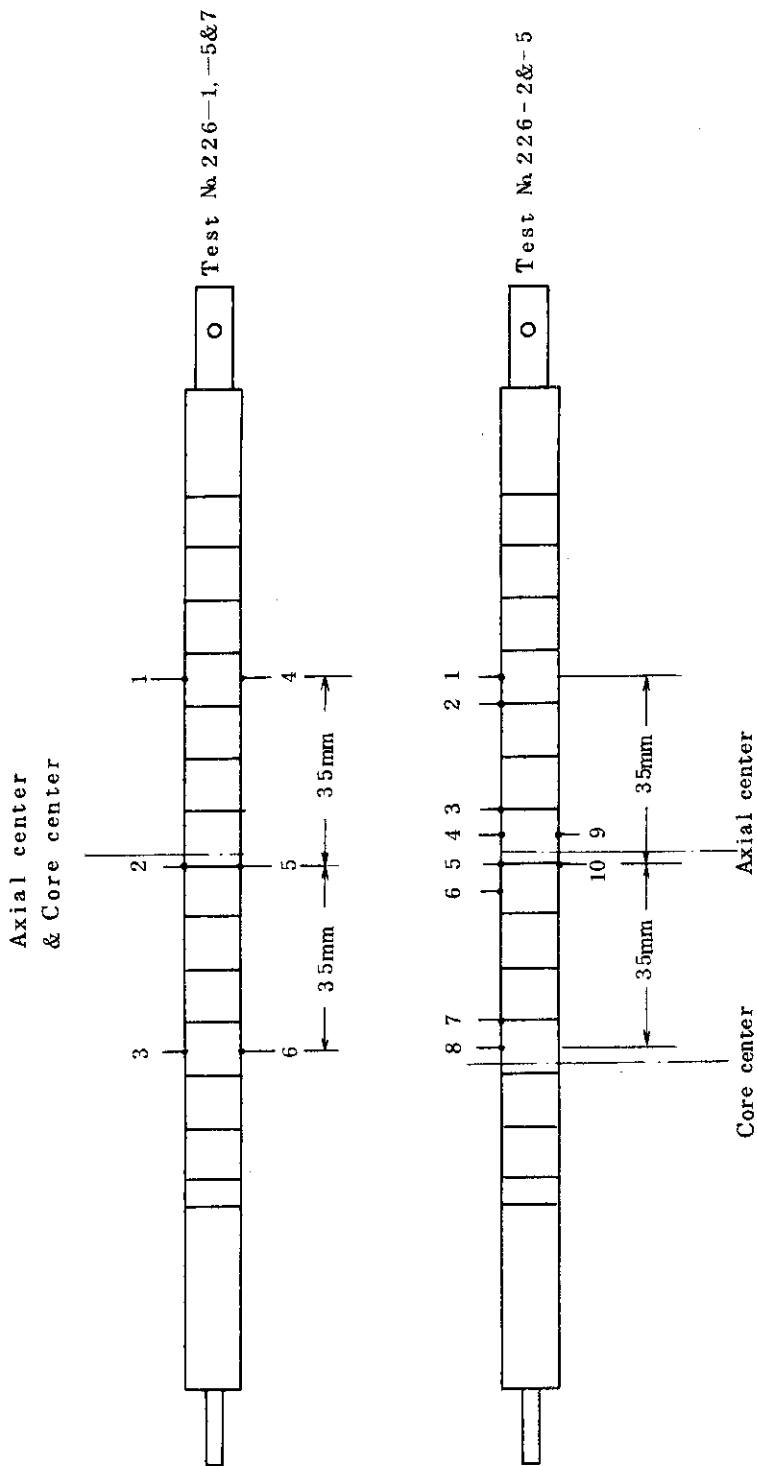


Fig. 2.7 Location of Thermocouples for Cladding Surface Temperature Measurement

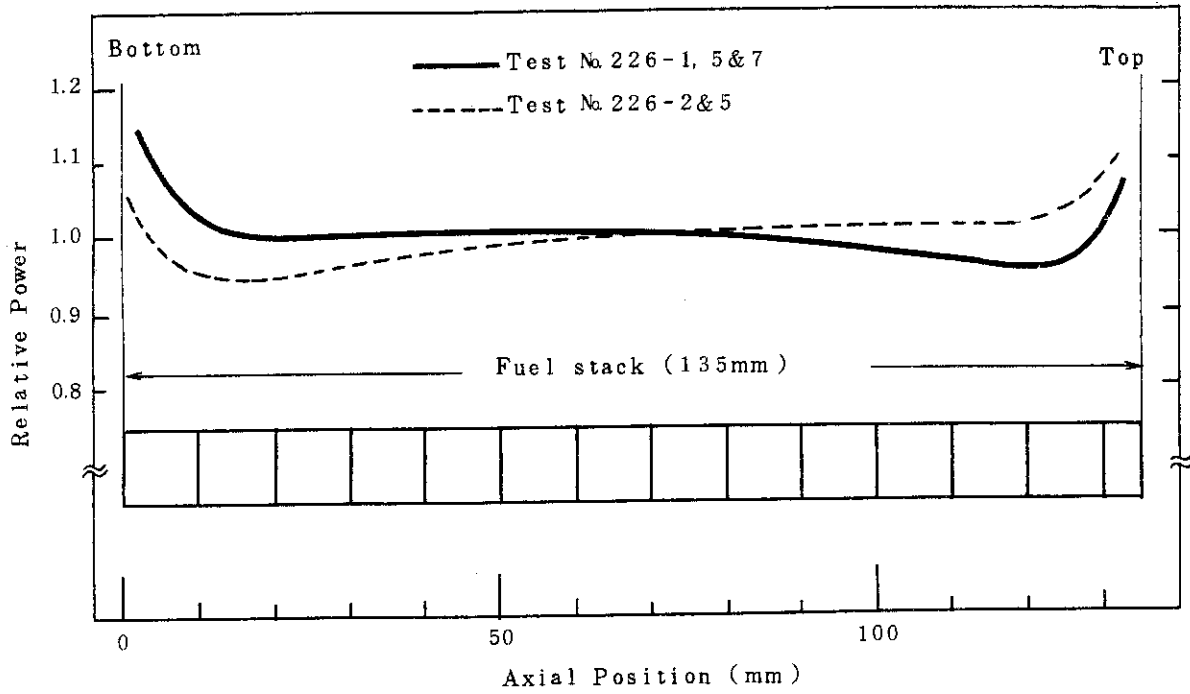


Fig. 2.8 Axial Power Distribution of Test Fuel Rods

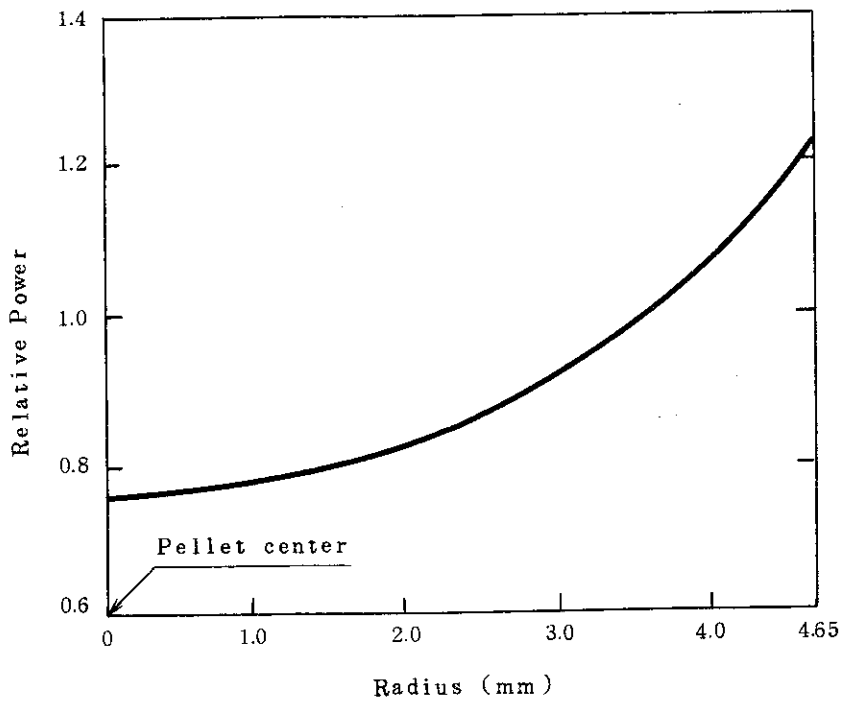


Fig. 2.9 Radial Power Distribution of Test Fuel Rod

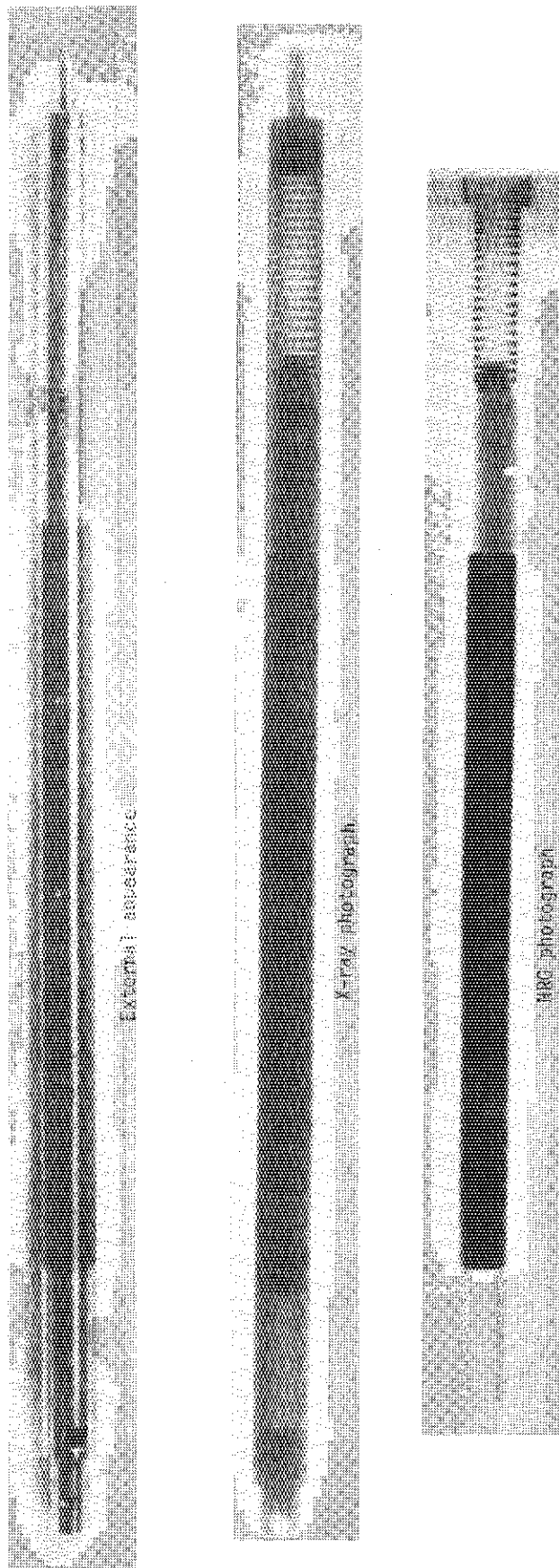


Fig. 2.10 PIE photographs of Test No. 226-1 fuel rod (Flat pellet rod, 208 cal/g.  $UO_2$ )

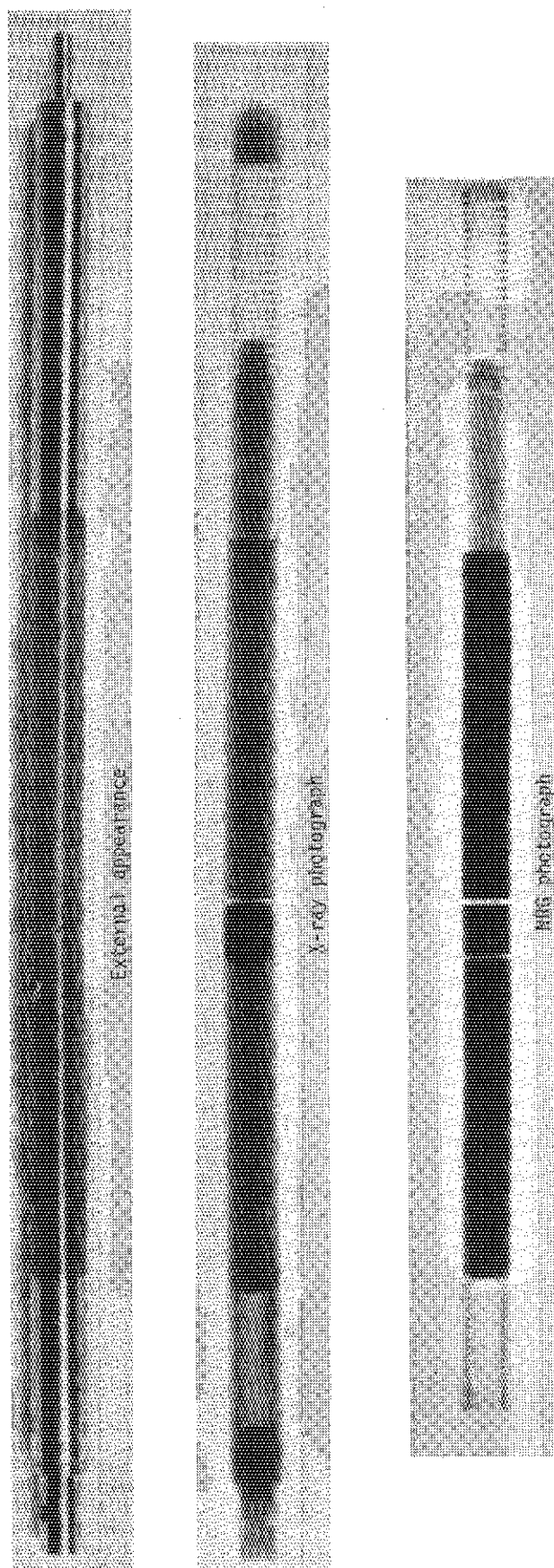


Fig. 2.11 PIE photographs of Test No. 226-2 fuel rod (Flat pellet rod, 239cal/g. UO<sub>2</sub>)





Fig. 2.12 PIE photographs of Test No. 226—5 fuel rod (Dished pellet rod, 207cal/g. UO<sub>2</sub>)

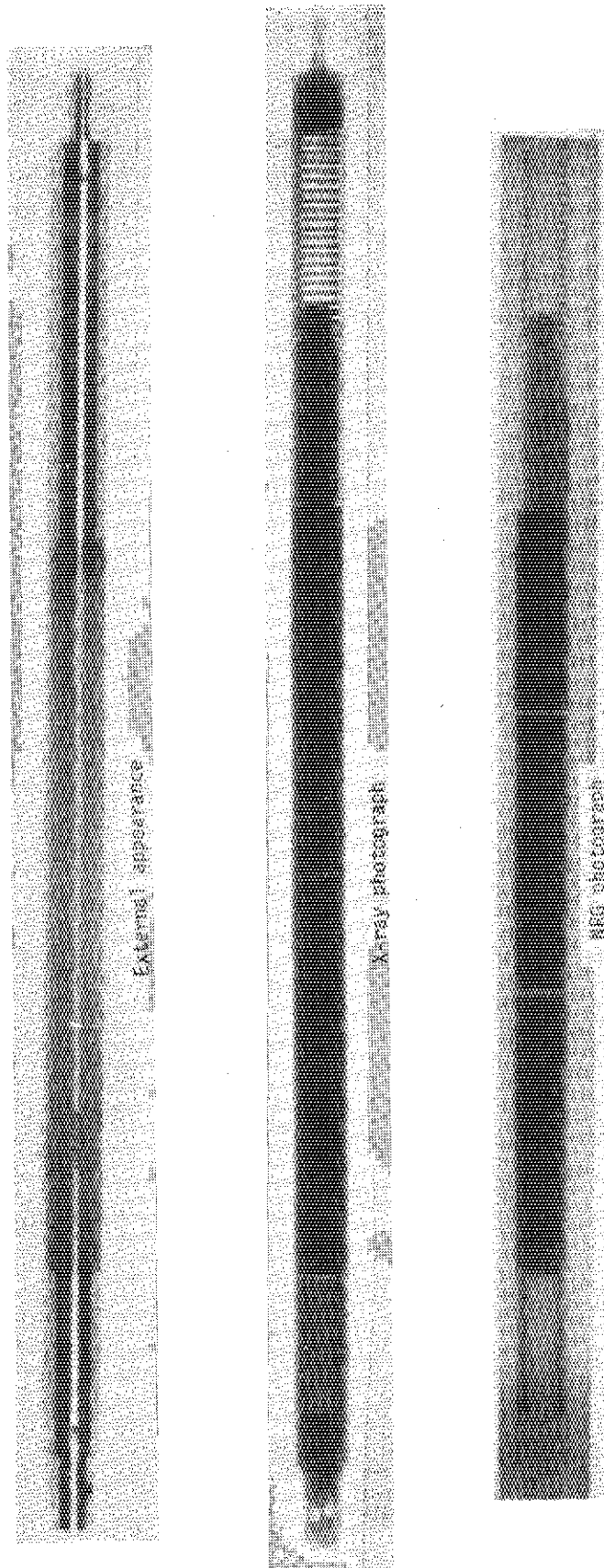


Fig. 2.13 PIE photographs of Test No. 226-6 fuel rod (Dished pellet rod, 238cal/g.  $\text{UO}_2$ )

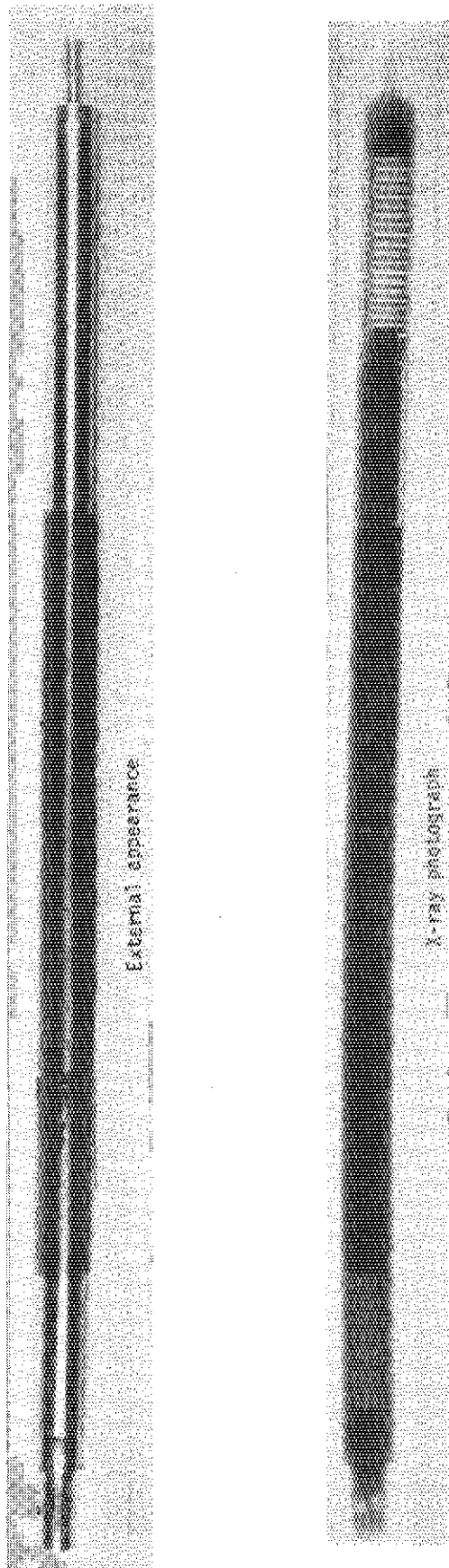


Fig. 2.14 PIE photographs of Test No. 226-7 fuel rod (Dished pellet rod, 238cal/g. UO<sub>2</sub>)

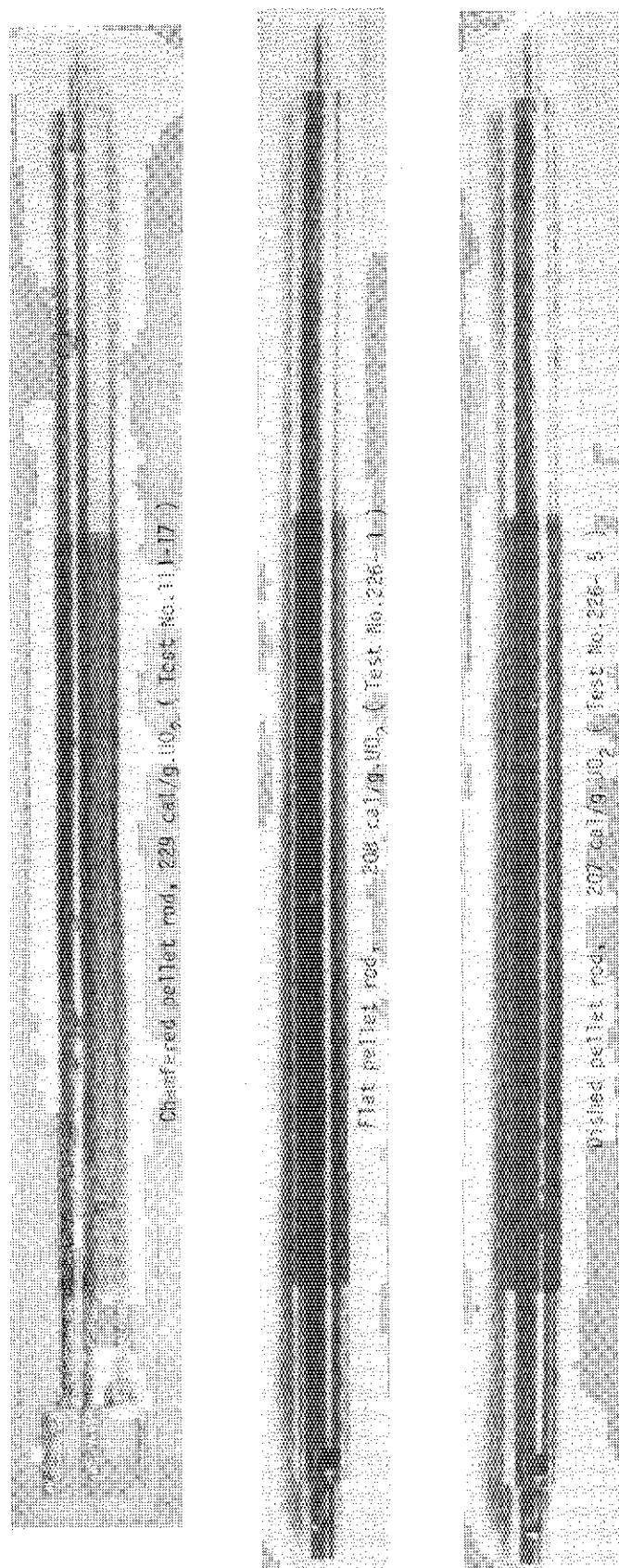


Fig. 2.15 Comparison of external appearance of fuel rods irradiated at 210-230 cal/g.UO<sub>2</sub> in pellet shape parameter tests

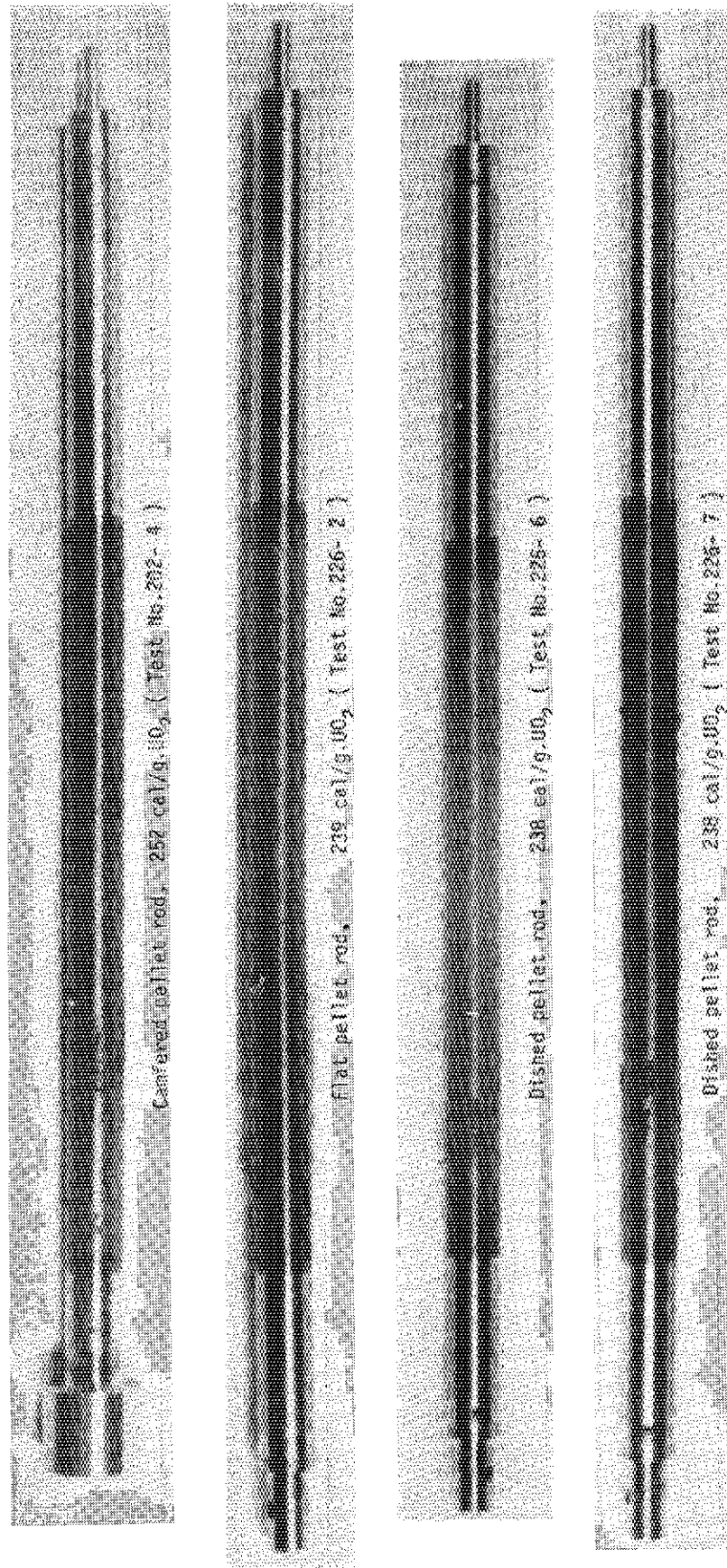


Fig. 2.16 Comparison of external appearance of fuel rods irradiated at 240-250 cal/g.UO<sub>2</sub> in pellet shape parameter tests

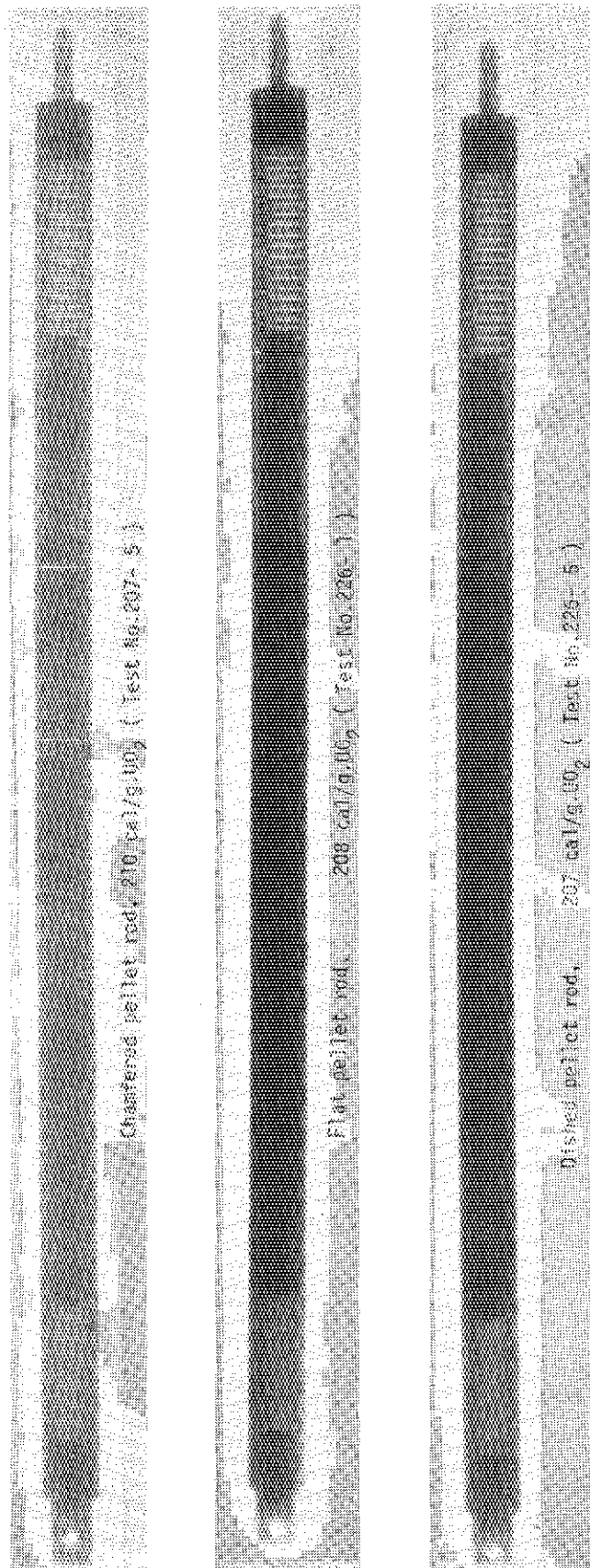


Fig. 2.17 Comparison of X-ray photographs of fuel rods irradiated at 210-230 cal/g. UO<sub>2</sub> in pellet shape parameter tests

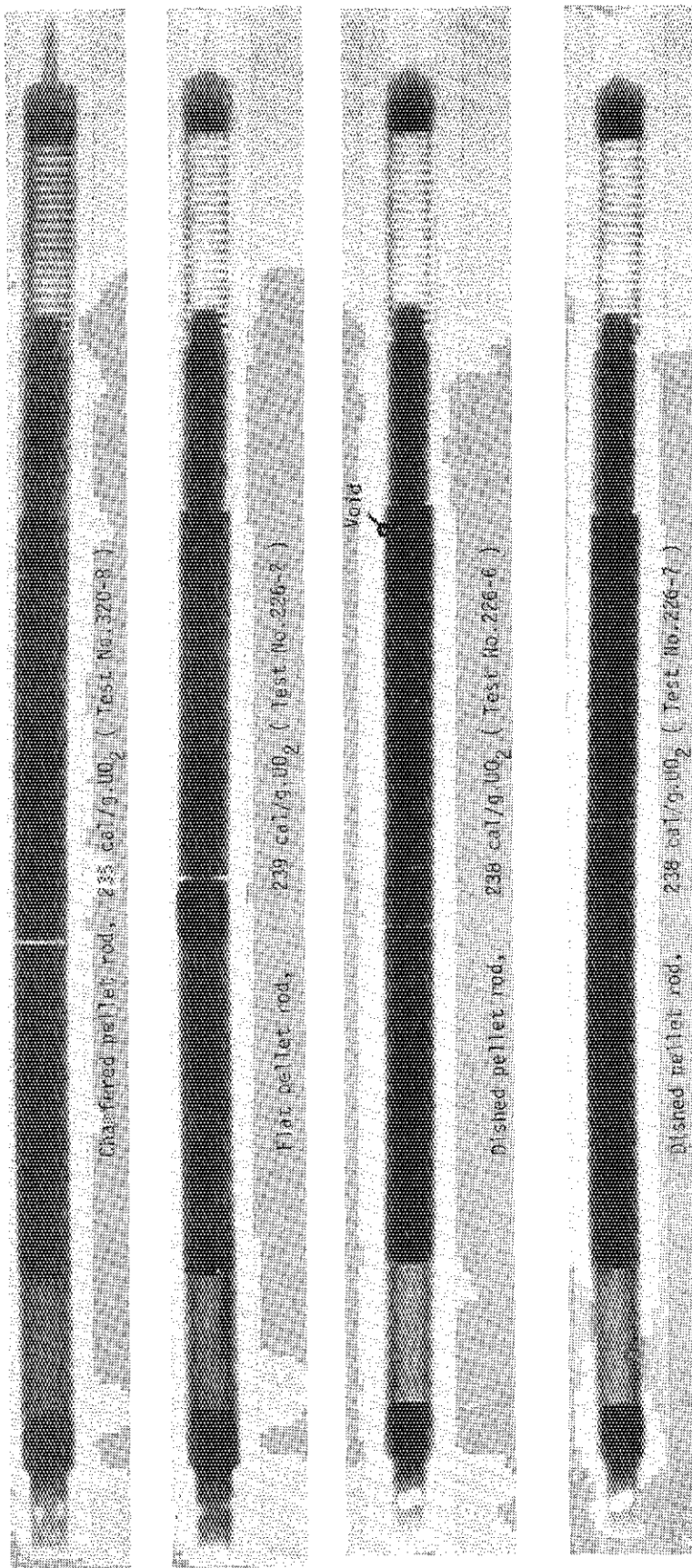


Fig. 2.18 Comparison of X-ray photographs of fuel rods irradiated at 240-250 cal/g. UO<sub>2</sub> in pellet shape parameter tests

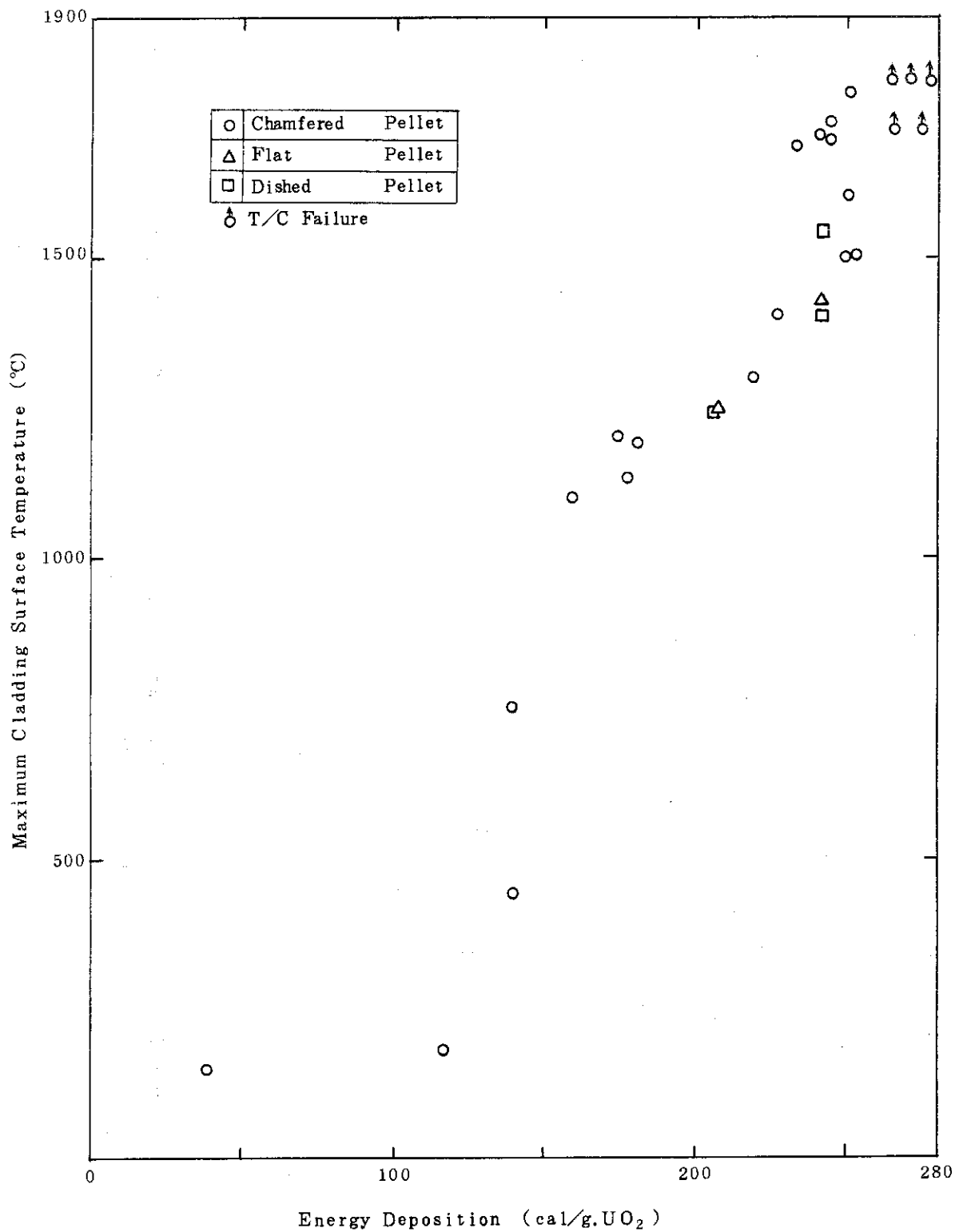


Fig. 2.19 Comparison of Maximum Cladding Surface Temperature at Axial Center position



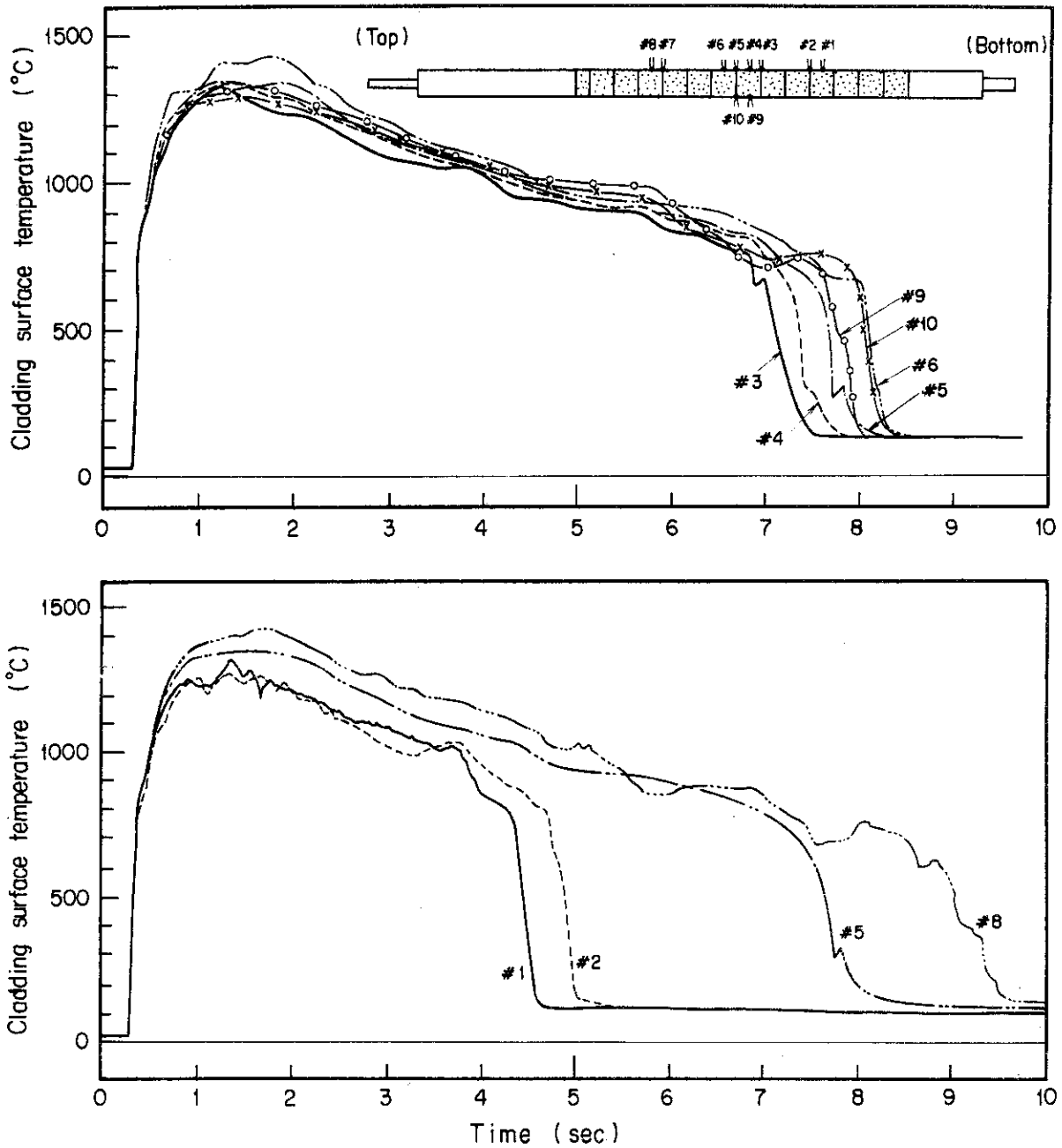


Fig. 2.20 Comparison of transient responses of cladding surface temperature in Test No.226-2 (Flat pellet rod, 239 cal/g · UO<sub>2</sub>)

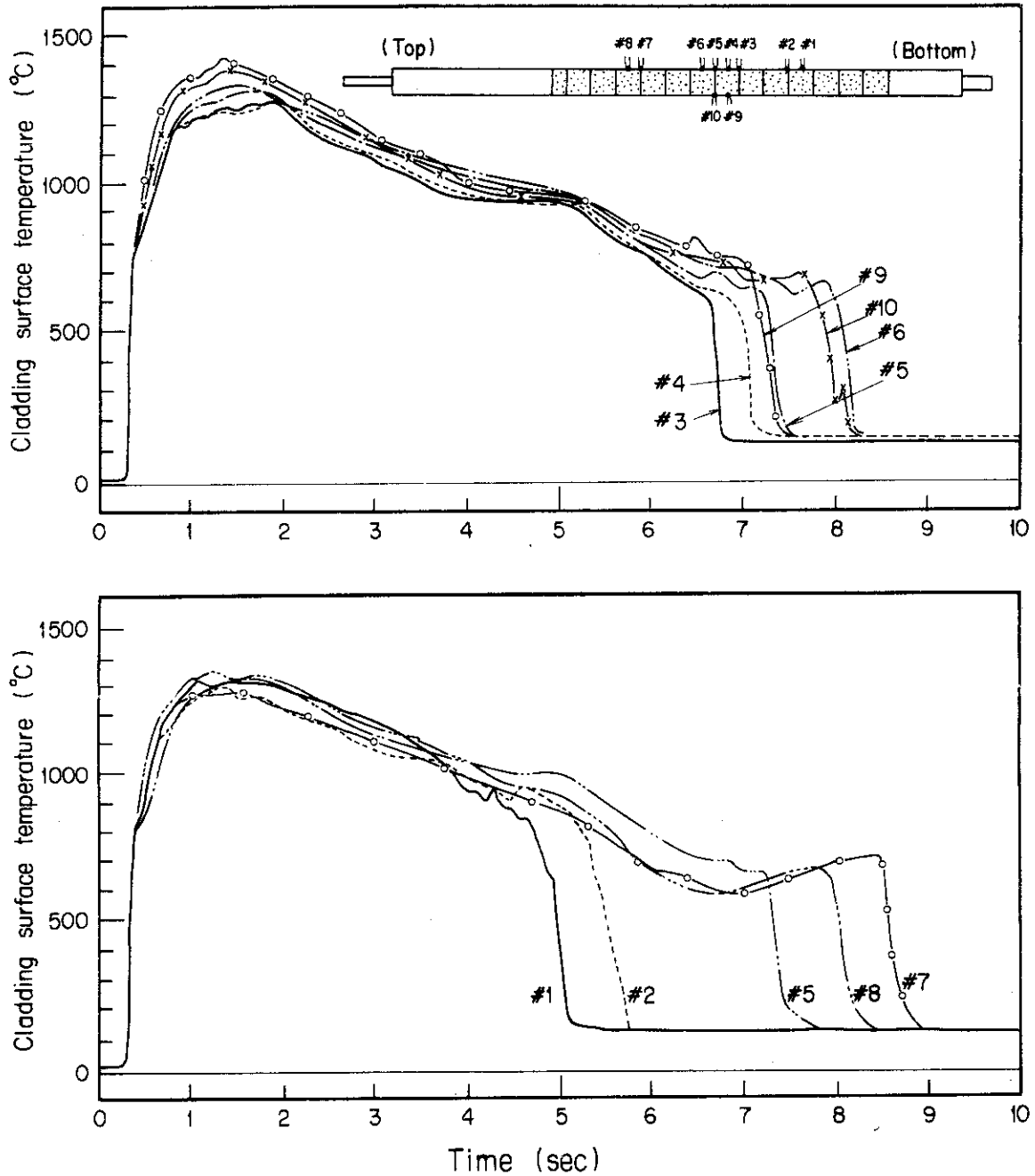


Fig. 2.21 Comparison of transient responses of cladding surface temperature in Test No. 226-6 (Dished pellet rod, 238 cal/g · UO<sub>2</sub>)

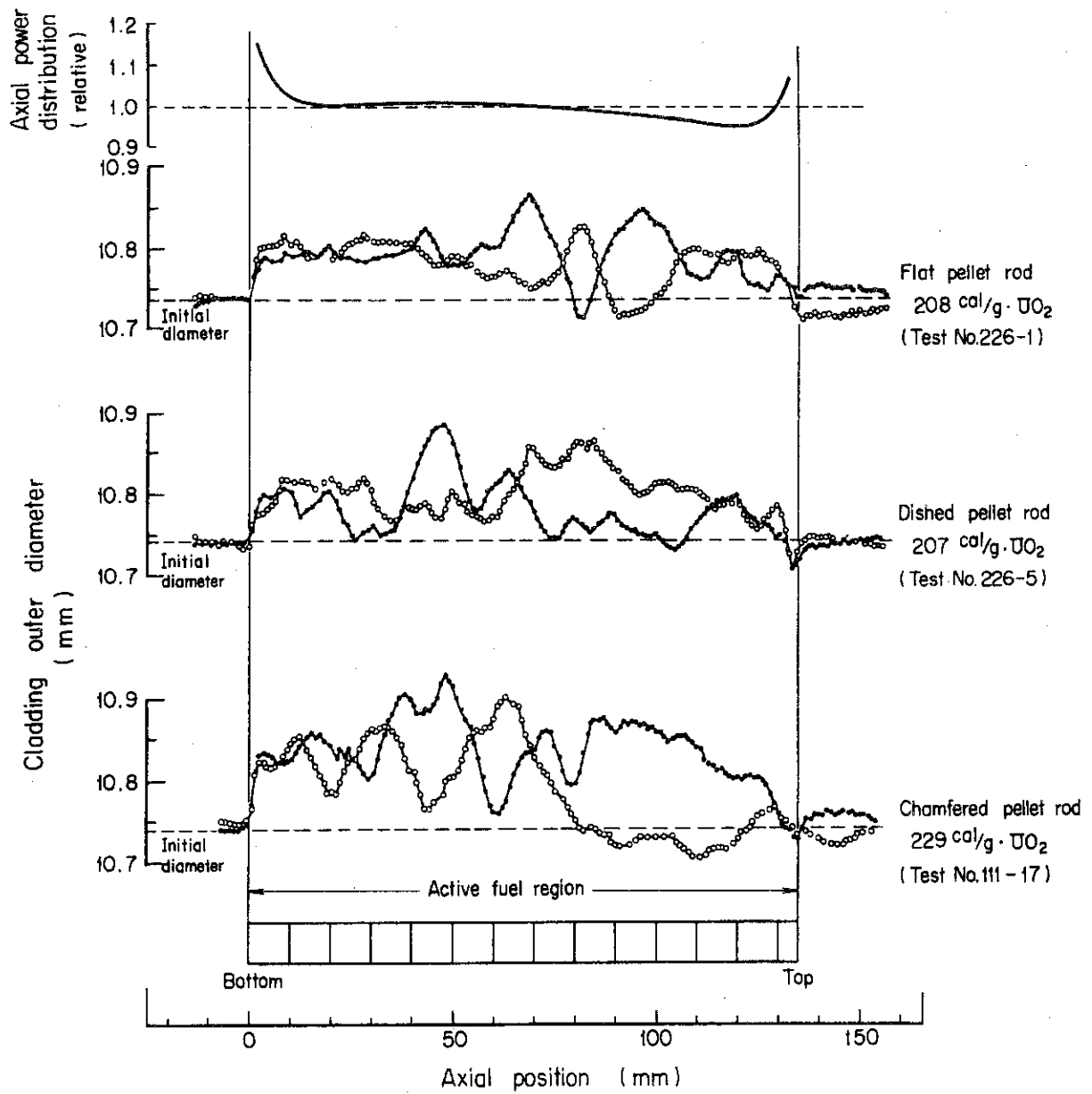


Fig. 2.22 Comparison of Permanent Growth of cladding Diameter in Pellet Shape Parameter Tests ( $\sim 210 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ )

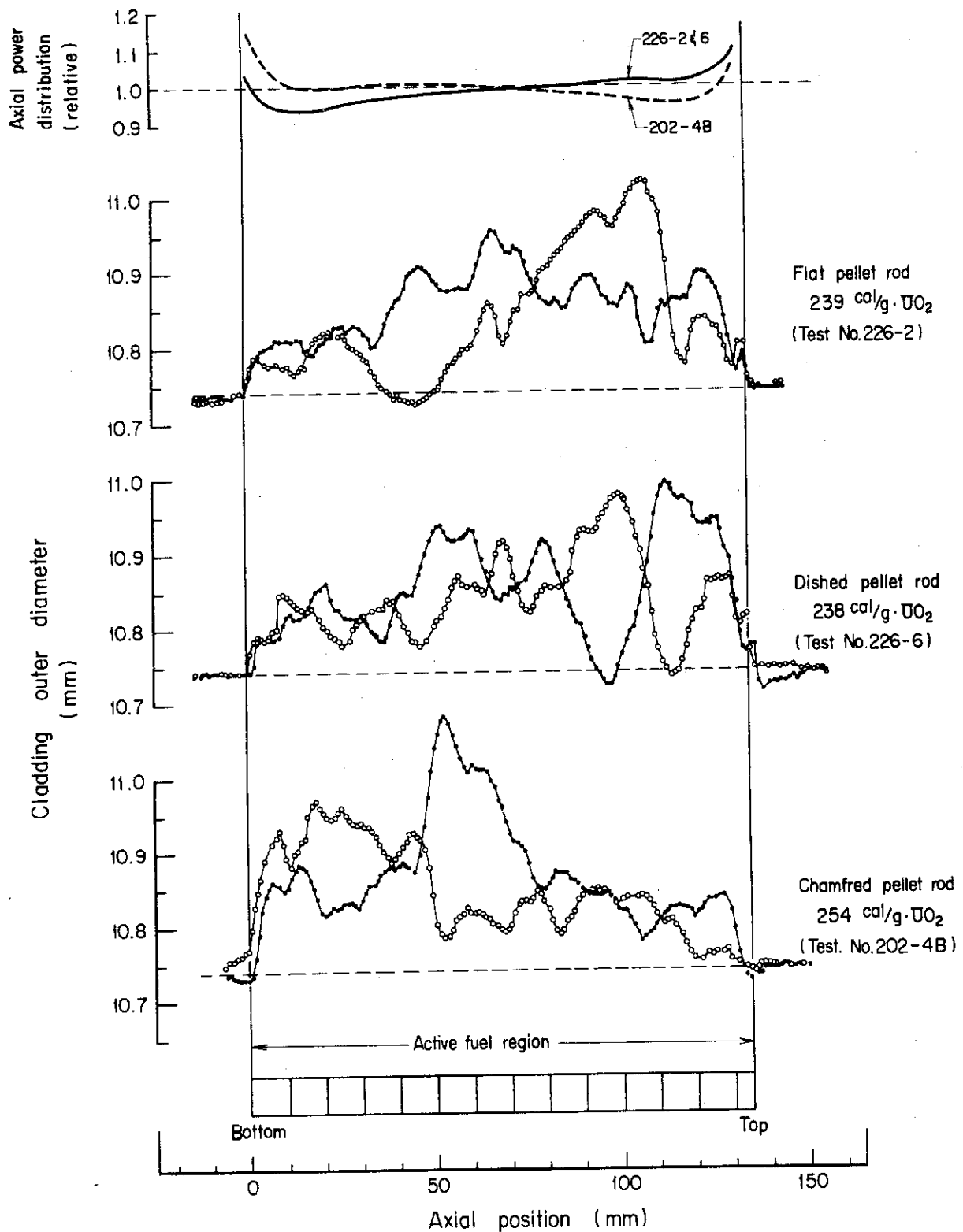


Fig. 2.23 Comparison of Permanent Growth of Cladding Diameter in Pellet Shape Parameter Tests ( $\sim 240 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ )

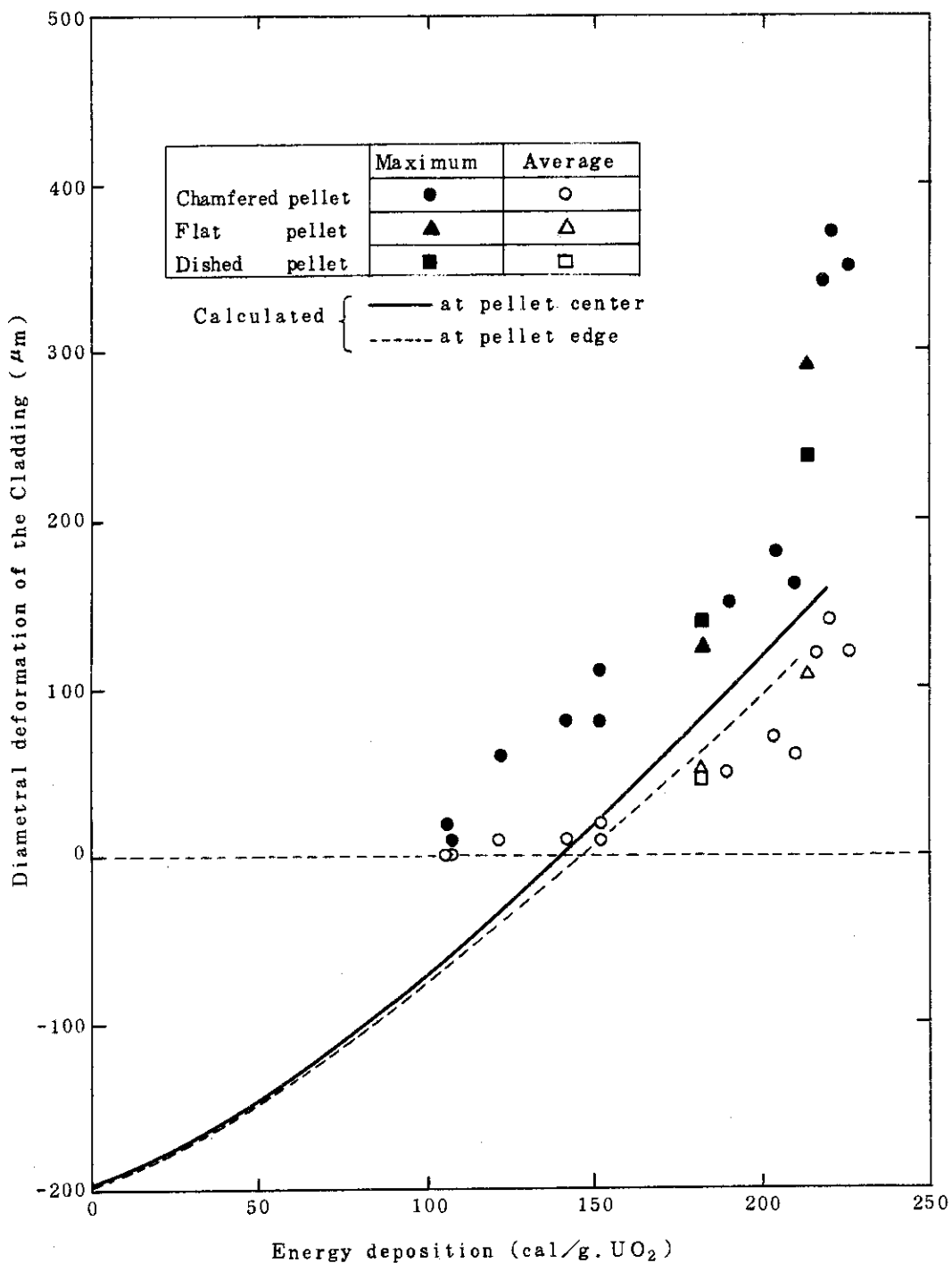


Fig. 2.2 4 Comparison of Diametral Deformation of the Cladding Between 226 Series Test Fuels and Standard Test Fuels

### 3. 有限要素法によるペレット熱弾性変形解析

#### 3.1 概 要

前章に述べたように被覆管の変形はペレットの熱膨脹によって影響を受ける。すなわち、ペレットの熱膨脹によりペレットと被覆管が接触して被覆管が変形する。この場合に、もしペレットの形状の相違によってペレットの変形量に差異が生じてくると、被覆管の変形挙動並びにギャップ幅にも相違が出るので被覆管の温度挙動に差が出てくると考えられる。しかし、実験の結果ではこれらに顕著な差は現われなかった。従って、この確認のために有限要素法を用いて、チャンファ、フラットおよびディッシュペレットについて熱弾性解析を実施し、ペレットの変形量について比較した。本章ではこの結果について述べる。

#### 3.2 解析方法

解析には2次元軸対称R-Z有限要素法計算コード<sup>(6)</sup>を用いた。Fig. 3.1に示すように、ペレットはペレットの回転対称性と面对称性を考慮して、約200の三角形リング要素に分割した。ディッシュペレットにおいて、本試験に用いられたペレットは球状のディッシュ部を有したものであったが、解析では要素分割の都合上、外径5.0 mm、ディッシュ底部直径2.8 mm、深さ0.2 mmのくぼみを有する皿型ディッシュペレットとした。またフラットペレットの要素分割は体積が等しくなるように分割したが、フラットおよびディッシュペレットの要素分割はペレット端面の構造によりこの部分の軸方向分割長さを小さくし、要素体積変化が極端に不連続にならないように配慮した。

なお、解析で使用した $\text{UO}_2$ の物性値は以下の通りである。

$\text{UO}_2$ ヤング率<sup>2)</sup> ( $E$ :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ );

$$E = 19250 - 0.247 \cdot T - 0.00254 \cdot T^2, \quad \text{ここで, } T: \text{温度 } (^\circ\text{C})$$

$\text{UO}_2$ のポアソン比( $\nu$ )<sup>(7)</sup>; 0.296(一定値)

$\text{UO}_2$ の熱膨張係数<sup>(8)</sup> ( $\alpha$ :  $^\circ\text{C}^{-1}$ );

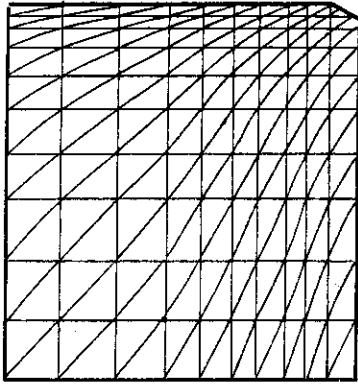
$$\alpha = 6.7991 \cdot 10^{-6} + 5.7996 \cdot 10^{-9} \cdot T$$

また、ペレットの熱弾性解析で最も重要な入力データであるペレット内の温度分布には、NSRR標準燃料棒に発熱量 $202 \text{ cal}/\text{g} \cdot \text{UO}_2$ を投入させた条件で計算したMCDRANコードによる計算結果を用いた。

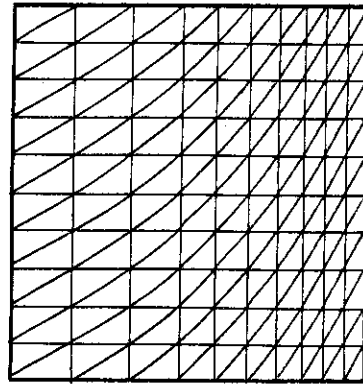
### 3.3 ペレットの熱弾性変形解析結果

Fig. 3.2~3.5 にペレット内の温度分布に基づいて解析したペレットの熱変形結果を示す。Fig. 3.2 は制御棒引き抜き後 0.105 秒経過した時点でのペレット熱変形解析結果を示したものである。この時点では全発熱量の約半分程度の発熱量しか投入されていないため、ペレットの熱変形量も小さい。ペレットの径方向変形量は、ペレット端面形状による差は認められず、ペレット中央部分で  $62\sim 63\ \mu\text{m}$ 、端面部分で  $55\sim 56\ \mu\text{m}$  であった。Fig. 3.3 は制御棒引き抜き後 0.11 秒経過した時での解析結果を示したものである。この時点では全発熱量に近い発熱量がペレットに投入されて、ペレット表面で融点近くの  $2780\text{C}$  といった温度になる。この時点においても、ペレット端面形状によるペレットの径方向変形量の差は生ぜず、ペレット中央位置で  $158\sim 159\ \mu\text{m}$ 、端面位置で  $142\sim 144\ \mu\text{m}$  であった。この時点までのペレットの熱変形はペレット内の温度分布に基づいた変形を示し、ペレット中央部の径方向変形量が端面部よりも若干大きい“太鼓”状の変形を示す。Fig. 3.4 は制御棒引き抜き後 0.15 秒経過した時点での解析結果を示す。この図に示したように、ペレット内の温度分布は、断熱挙動を示した後、ペレット外周部の温度が低下し、逆にペレット中心部の温度が上昇するためほぼ平坦な温度分布を示す。このため、ペレットの径方向変形量は軸方向位置でほとんど変わらない変形量を示す。Fig. 3.5 は制御棒引き抜き後 1.0 秒経過した時のペレットの熱変形解析結果を示す。この様に、ペレット外周部の温度低下に伴って、ペレットの熱変形は“太鼓”状の変形からペレット端面での径方向変形量がペレット中央部よりも大きいといった“つづみ”状の変形を示すようになる。ペレット端面での変形量とペレット中央部での変形量の差で表わされるペレット・リッジ高さはチャンファペレットで  $10\ \mu\text{m}$ 、フラットおよびディッシュペレットで  $14\ \mu\text{m}$  であった。しかしながら、この時点においても、ペレット端面形状によるペレットの径方向変形量の差は若干チャンファペレットが小さい程度で、それほど顕著な差は認められない。

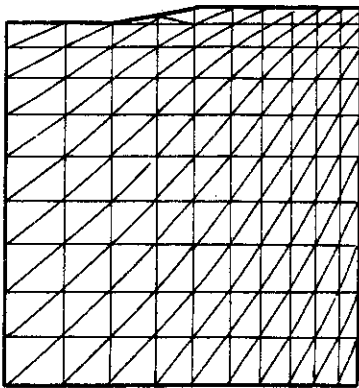
以上述べたように、ペレット端面形状の異なったフラット、チャンファおよびディッシュペレットの有限要素法による熱弾性変形解析を行った結果、ペレット端面形状がペレット径方向変形量に及ぼす影響はほとんど認められないものであった。



Chamfered pellet



Flat pellet



Dished pellet

Fig. 3.1 Division into triangular elements



(Unit:  $\mu\text{m}$ )

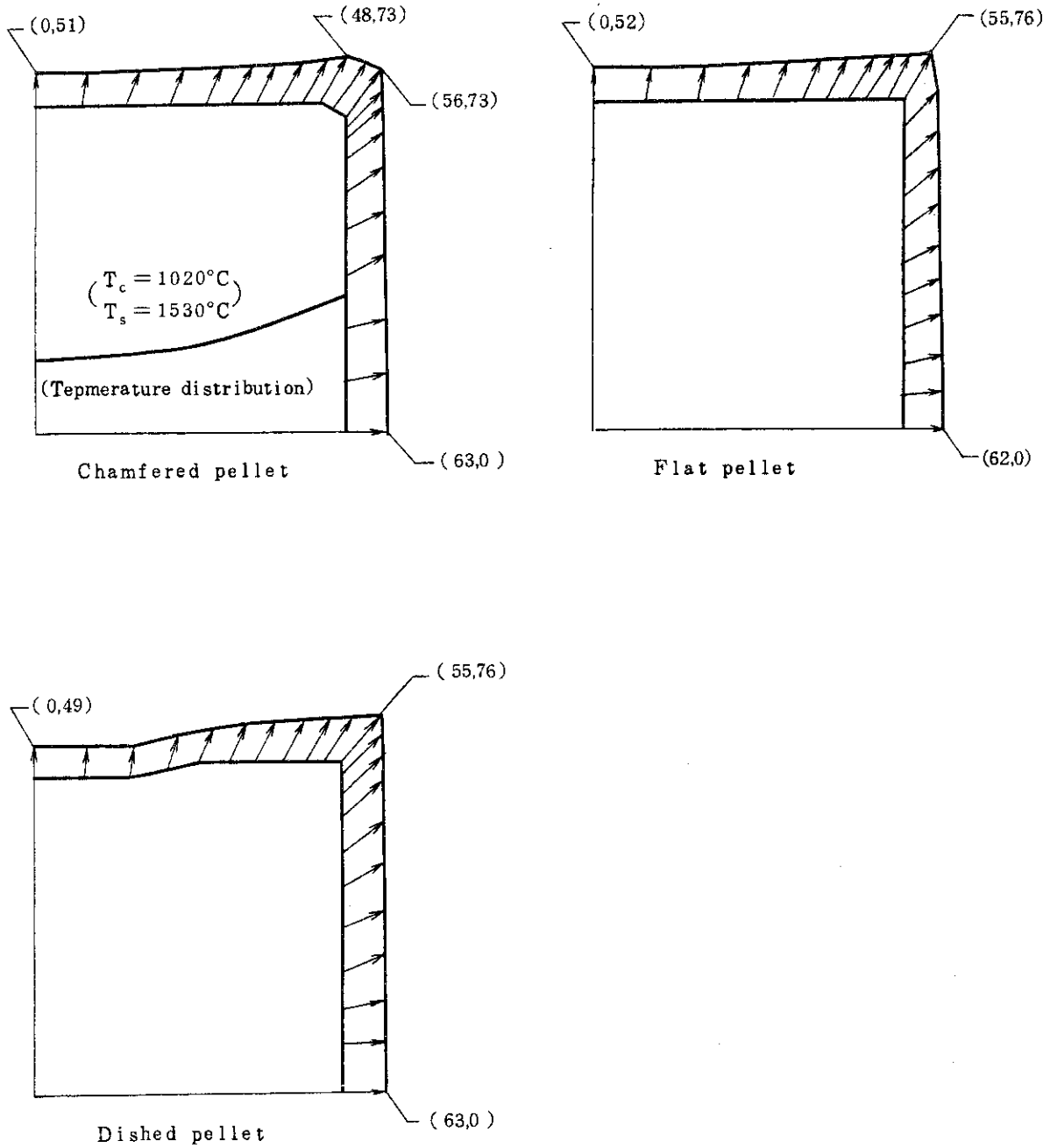


Fig. 3.2 Thermo-elastic deformation of various pellet shapes (at 0.105sec after the withdrawal of the transient rod)

(Unit:  $\mu\text{m}$ )

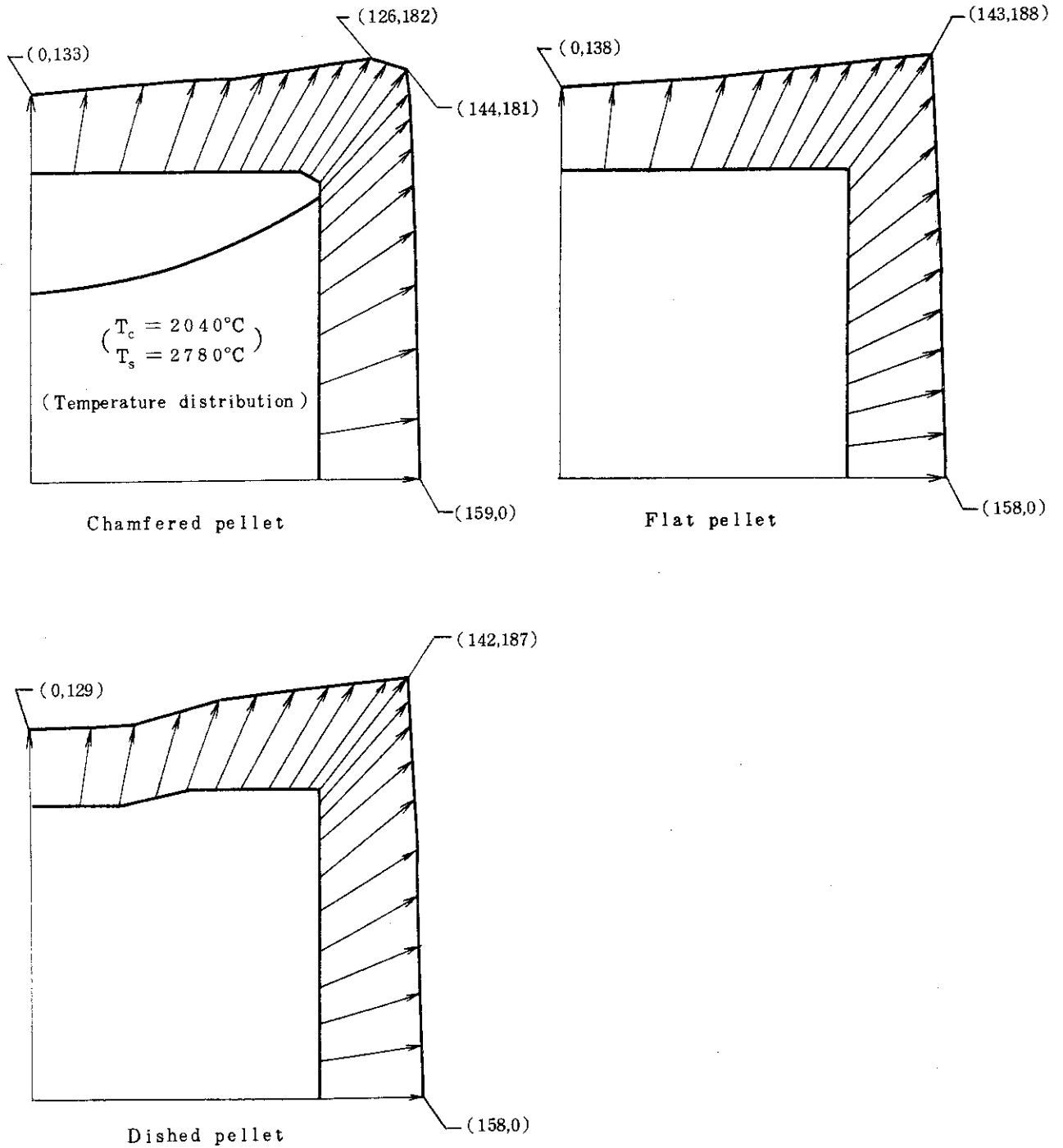


Fig. 3.3 Thermo-elastic deformation of various pellet shapes (at 0.11sec after the withdrawal of the transient rod)

(Unit :  $\mu\text{m}$ )

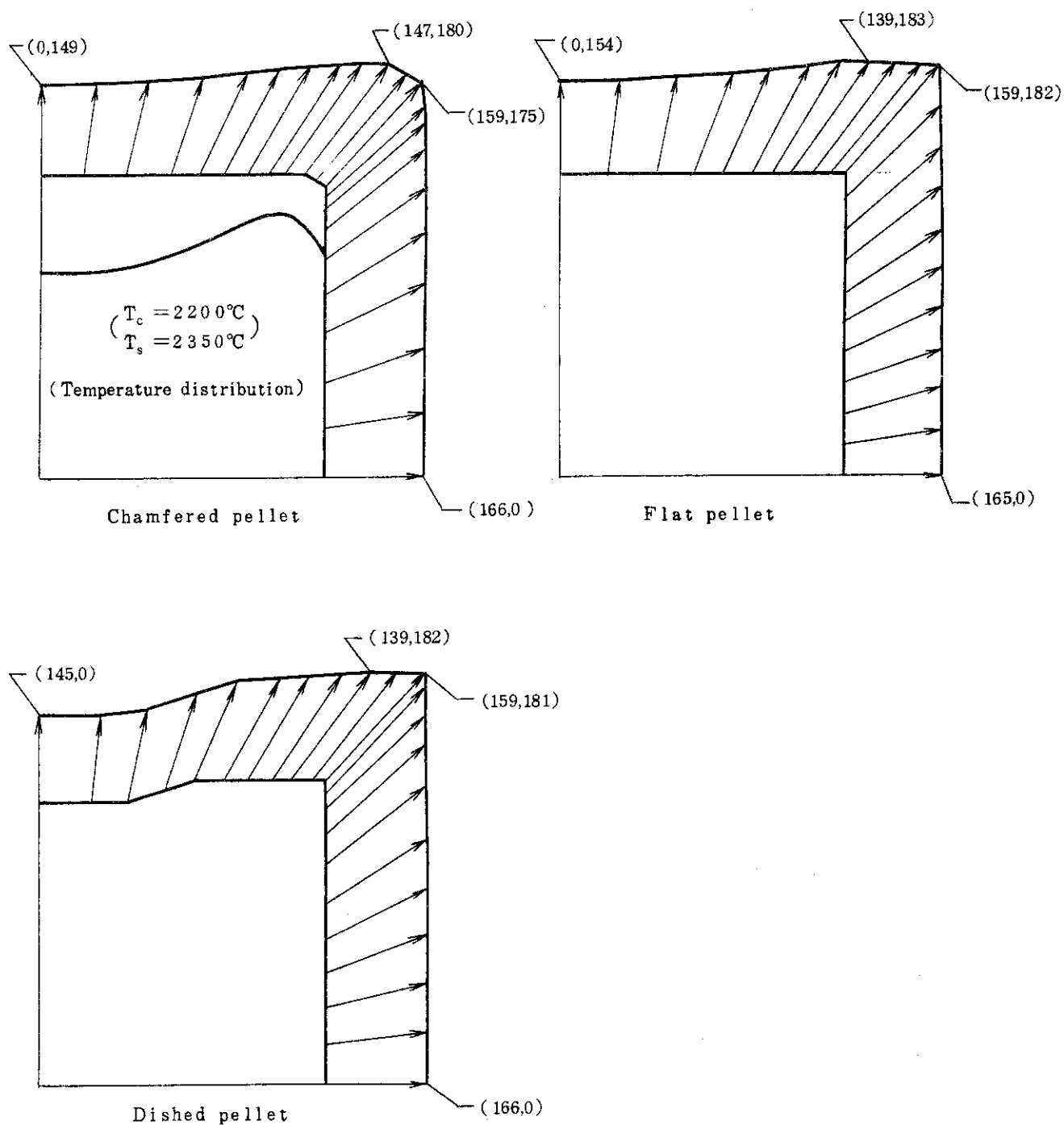


Fig. 3.4 Thermo-elastic deformation of various pellet shapes (at 0.15sec after the withdrawal of the transient rod)

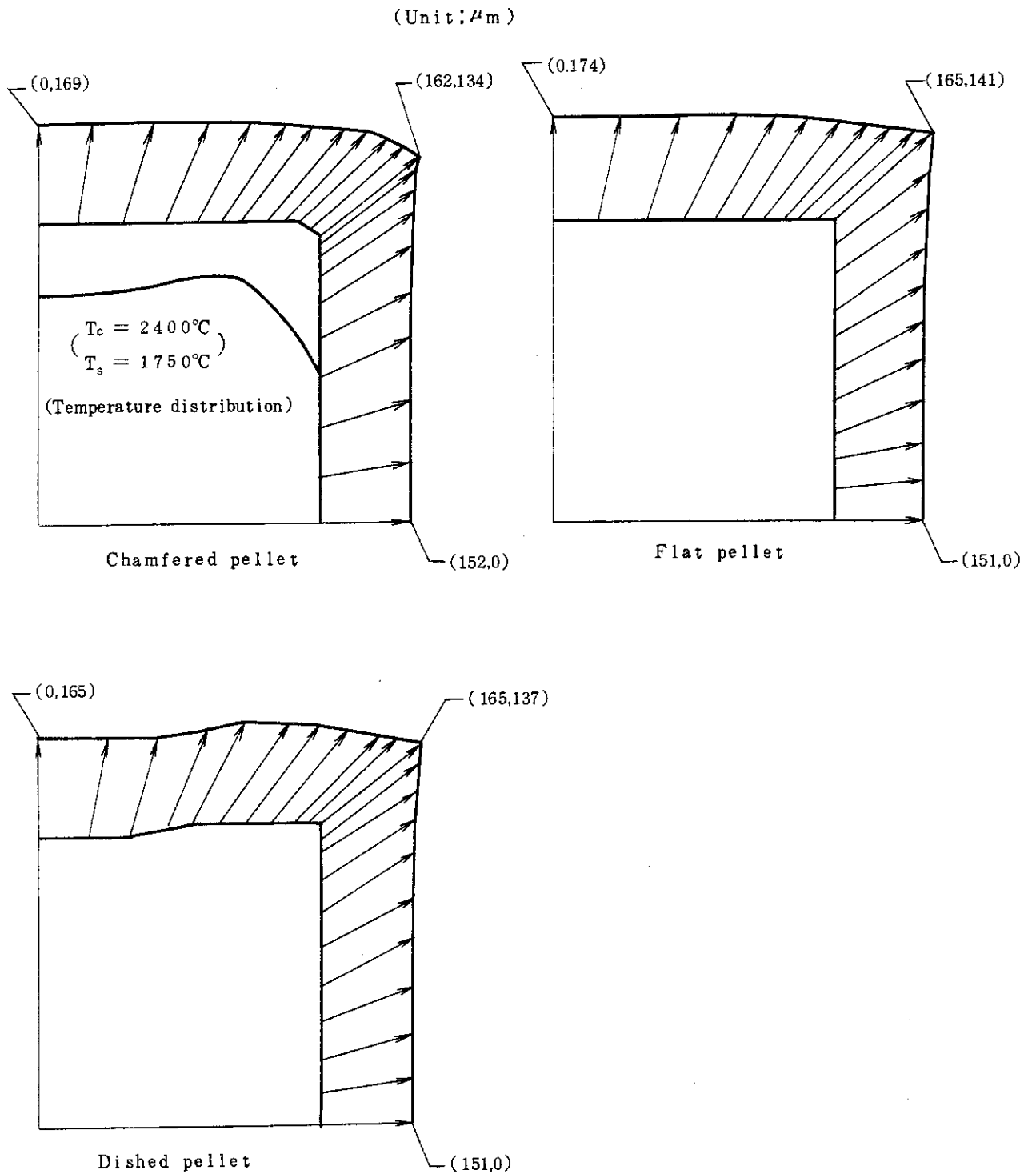


Fig. 3.5 Thermo-elastic deformation of various pellet shapes (at 1.0 sec after the withdrawal of the transient rod)

## 4. 結 論

フラットおよびディッシュペレット型燃料棒の照射実験を実施し、これまで実施された NSRR 標準燃料であるチャンファペレット型燃料棒の実験結果と比較して、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動に及ぼす影響を調べた。また、有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析を行い、ペレット形状の相違による変形量の差異を検討した。これらの結果により、以下の点が明らかになった。

(1) 実験においては、フラットペレット、ディッシュペレットおよびチャンファペレット燃料棒照射実験の結果、被覆管表面温度挙動（過渡挙動および最高温度）、照射後燃料棒の外観、X線および中性子ラジオグラフィならびに被覆管変形量に有意な差異は認められなかった。

(2) 有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析の結果、ペレットの熱変形に及ぼすペレット端面形状の影響は認められなかった。

(3) 以上の結果より、従来軽水動力炉で使用されているペレット形状の範囲では、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動および破損しきい値に及ぼす影響は極めて小さいことが判った。

## 謝 辞

本試験を遂行し、結果をまとめるに際し、適切な御教示を下された反応度安全研究室石川迪夫室長および、同研究室員の方々、および本試験を担当していただいた NSRR 管理室の皆様へ深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 石川迪夫：“反応度事故に対する安全性研究”，日本原子力学会誌 Vol. 12, No 5 (1970)
- (2) 星 蔦雄，他：“反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”，同上，Vol. 20, No 9 (1978)
- (3) 山崎 利，他：“NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状” JAERI-M 7105 (1977)
- (4) 大西信秋，他：“NSRR 実験における試験燃料の発熱量の評価”，JAERI-M 7539 (1978)
- (5) J. Bell：“Uranium Dioxide : Properties and Nuclear Applications”，USAEC (1961)

## 4. 結 論

フラットおよびディッシュペレット型燃料棒の照射実験を実施し、これまで実施された NSRR 標準燃料であるチャンファペレット型燃料棒の実験結果と比較して、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動に及ぼす影響を調べた。また、有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析を行い、ペレット形状の相違による変形量の差異を検討した。これらの結果により、以下の点が明らかになった。

(1) 実験においては、フラットペレット、ディッシュペレットおよびチャンファペレット燃料棒照射実験の結果、被覆管表面温度挙動（過渡挙動および最高温度）、照射後燃料棒の外観、X線および中性子ラジオグラフィならびに被覆管変形量に有意な差異は認められなかった。

(2) 有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析の結果、ペレットの熱変形に及ぼすペレット端面形状の影響は認められなかった。

(3) 以上の結果より、従来軽水動力炉で使用されているペレット形状の範囲では、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動および破損しきい値に及ぼす影響は極めて小さいことが判った。

## 謝 辞

本試験を遂行し、結果をまとめるに際し、適切な御教示を下された反応度安全研究室石川迪夫室長および、同研究室員の方々、および本試験を担当していただいた NSRR 管理室の皆様へ深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 石川迪夫：“反応度事故に対する安全性研究”，日本原子力学会誌 Vol. 12, No 5 (1970)
- (2) 星 蔦雄，他：“反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”，同上，Vol. 20, No 9 (1978)
- (3) 山崎 利，他：“NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状” JAERI-M 7105 (1977)
- (4) 大西信秋，他：“NSRR 実験における試験燃料の発熱量の評価”，JAERI-M 7539 (1978)
- (5) J. Bell：“Uranium Dioxide : Properties and Nuclear Applications”，USAEC (1961)

## 4. 結 論

フラットおよびディッシュペレット型燃料棒の照射実験を実施し、これまで実施された NSRR 標準燃料であるチャンファペレット型燃料棒の実験結果と比較して、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動に及ぼす影響を調べた。また、有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析を行い、ペレット形状の相違による変形量の差異を検討した。これらの結果により、以下の点が明らかになった。

(1) 実験においては、フラットペレット、ディッシュペレットおよびチャンファペレット燃料棒照射実験の結果、被覆管表面温度挙動（過渡挙動および最高温度）、照射後燃料棒の外観、X線および中性子ラジオグラフィならびに被覆管変形量に有意な差異は認められなかった。

(2) 有限要素法による  $UO_2$  ペレットの熱弾性変形解析の結果、ペレットの熱変形に及ぼすペレット端面形状の影響は認められなかった。

(3) 以上の結果より、従来軽水動力炉で使用されているペレット形状の範囲では、ペレット形状の反応度事故条件下における燃料挙動および破損しきい値に及ぼす影響は極めて小さいことが判った。

## 謝 辞

本試験を遂行し、結果をまとめるに際し、適切な御教示を下された反応度安全研究室石川迪夫室長および、同研究室員の方々、および本試験を担当していただいた NSRR 管理室の皆様へ深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 石川迪夫：“反応度事故に対する安全性研究”，日本原子力学会誌 Vol. 12, No. 5 (1970)
- (2) 星 蔦雄，他：“反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”，同上，Vol. 20, No. 9 (1978)
- (3) 山崎 利，他：“NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状” JAERI-M 7105 (1977)
- (4) 大西信秋，他：“NSRR 実験における試験燃料の発熱量の評価”，JAERI-M 7539 (1978)
- (5) J. Bell：“Uranium Dioxide：Properties and Nuclear Applications”，USAEC (1961)

- (6) 伊東, 他: “有限要素法による燃料棒の局所変形解析(I)”, 日本原子力学会—昭和52年, 年会要旨集, G15 (1977)
- (7) WAPD-TM-652
- (8) Conway & Fincel, ANS Vol. 6 No1 p153 (1963)