

JAERI-M

9927

反応度事故時燃料挙動に及ぼす
燃料棒支持条件の影響

1982年2月

岩田耕司・星 蔦雄・吉村富雄*

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株式会社高野高速印刷

反応度事故時燃料挙動に及ぼす燃料棒支持条件の影響

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

岩田耕司・星 蔦雄・吉村富雄*

(1982年1月6日受理)

燃料棒支持条件が反応度事故における燃料挙動に及ぼす影響を調べるためにN S R R (Nuclear Safety Research Reactor)において燃料照射実験を実施した。燃料棒の支持条件として、(1)試験燃料棒の両端を固定し過渡時の温度変化に伴う長手方向の伸縮を拘束する支持条件（両端固定）および、(2) N S R R 実験における通常の支持方法一下端固定・上端自由（下端固定）一とは逆に、上端を固定し下端を自由とする支持条件（上端固定）を考慮した。これら2つの支持条件下で得られた実験結果を、既に行われている下端固定支持条件下における実験結果と比較検討することにより、以下の結論を得た。

(1)両端固定支持条件下においては、一端固定の場合と比較すると、温度上昇時の長手方向伸びが拘束されるために燃料棒が弯曲し易くなる。弯曲が大きい場合には、燃料棒に大きな曲げモーメントが作用し、その結果、被覆管の脆化層にクラックが入り易くなるが、被覆管に延性が残存しているとクラックは延性層で進展が阻止されるために、クラックは被覆管を貫通しない。したがって、クラックが被覆管を貫通することにより燃料破損が生じる発熱量は、被覆管の延性が殆んど喪失する $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 以上であり、下端固定の場合と変わらない。

(2)下端固定支持条件下では、初期燃料破損（被覆管のクラック貫通による脆性破損）は燃料発熱長の下部において生じることが多い。この説明として、下端固定・上端自由支持構造であるために、冷却水の沸騰による振動に起因する曲げモーメントが燃料棒に作用し、それが下端に近づくにつれて大きくなるために下部で破損が起き易いと考えられた。これを確認るために、上端固定・下端自由の支持条件で燃料棒を照射したところ、燃料破損は下端固定・上端自由の場合と同様に発熱長下部で起こり、上記のような曲げモーメントは燃料破損の原因でないことが判明した。

* 船舶技術研究所

EFFECTS OF FUEL ROD SUPPORT CONDITIONS ON FUEL BEHAVIOR
DURING A REACTIVITY INITIATED ACCIDENT

Koji IWATA, Tsutao HOSHI and Tomio YOSHIMURA*

Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 6, 1982)

Irradiation experiments were conducted at the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) to examine the effects of fuel rod support conditions on light water reactor fuel behavior during a reactivity initiated accident (RIA). Two rod-support conditions, (1) both-end fixing condition and (2) top-end fixing (bottom-end free) condition, were employed in the experiments.

Comparison of the results between these experiments and the standard experiments (bottom-end fixing top-end free condition) led to the following conclusions.

(1) Compared to one-end fixing condition, a fuel rod may bend significantly and consequently may become vulnerable to cracking of the cladding at lower energy deposition under both-end fixing condition, because longitudinal displacement of a fuel rod due to temperature change during transient is restrained. However, cracks do not penetrate the cladding wall if the cladding has residual ductility because cracks are stopped at ductile layer. Fuel failure caused by through-wall cracks in the cladding is not likely to occur until the cladding loses ductility, which occurs at around 260 cal/g.UO₂. Fuel failure threshold under both-end fixing condition is identical with that under one-end fixing condition.

(2) Concerning the cause of incipient fuel failure (brittle fracture of cladding by through-wall cracks) under one-end fixing condition, bending moment which may act on the cladding due to the vibration of a fuel rod during transient does not cause fuel failure.

Keywords : NSRR Reactor, Reactivity Initiated Accident, LWR Fuel Safety
Fuel Rod Support, Fuel Failure, Brittle Fracture, Fuel Bending

* Ship Research Institute

目 次

1.はじめに	1
2.実験方法	2
2.1 実験装置	2
2.1.1 試験燃料棒	2
2.1.2 照射用カプセル	2
2.1.3 計装	2
2.2 実験条件	2
3.実験結果および考察	7
3.1 実験結果	7
3.1.1 燃料棒両端固定の場合	7
3.1.2 燃料棒上端固定の場合	8
3.2 考察	9
3.2.1 燃料棒熱伸縮拘束の効果	9
3.2.2 下端固定支持条件下での燃料破損における曲げモーメントの効果	11
4.結論	20
謝辞	20
参考文献	21

Contents

1. Introduction	1
2. Test method	2
2.1 Test equipment.....	2
2.1.1 Test fuel rods	2
2.1.2 Test capsule.....	2
2.1.3 Instrumentation	2
2.2 Test conditions	2
3. Test results and discussion	7
3.1 Test results	7
3.1.1 Results for both-end fixed fuel rods.....	7
3.1.2 Results for top-end fixed fuel rods	8
3.2 Discussion.....	9
3.2.1 Effects of the restraint of fuel rod axial thermal expansion	9
3.2.2 Effects of rod bending moment on fuel failure	11
4. Conclusion	20
Acknowledgement	20
References	21

1. はじめに

軽水動力炉の安全審査においては、原子炉の安全性を評価するためにいくつかの仮想的事故が想定されるが、その一つに反応度事故がある。反応度事故とは、何らかの原因（例えば、PWRでは制御棒飛出し、BWRでは制御棒落下）により原子炉に過大な反応度が投入され、原子炉出力が短時間で異常に上昇し、その結果燃料が破損に至る可能性のある事故をいう。

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) 計画においては、反応度事故を模擬する燃料パルス照射実験を実施し、燃料の事故時の挙動、破損しきい値および破損機構等を解明する努力がなされている。^{(1)～(10)} 1975年10月に最初の実験を開始して以来今日まで、燃料仕様および燃料周辺の冷却材条件等をパラメータとして既に500回を超える照射実験を実施している。本報告書で報告される実験は、考慮した数多くのパラメータの一つである燃料棒支持条件について取り扱ったものである。

NSRR実験において、試験燃料棒は、通常下端のみで固定され上端は拘束されない方法により支持される。したがって、温度変化による燃料棒の長手方向の熱伸縮は自由である。これに対し、実炉においては、燃料棒は長手方向にある間隔でスペーサグリッドにより保持されているので、燃料棒の熱伸縮は完全に自由ではなくスペーサの保持力によりある力で拘束されることになり、実験における支持条件とは異なる。支持条件の相違のために、実験条件と実炉条件との間に燃料挙動の違いがあることも予想される。そこで、支持条件の燃料挙動に及ぼす影響について検討するために支持条件を変えて燃料照射を行った。

本実験で検討した燃料棒支持方法は、(1)両端固定および(2)上端固定（下端自由）の2通りである。(1)は、燃料棒の熱伸縮を完全に拘束する支持条件である。燃料棒の両端を完全に固定した状態で燃料照射を行い、燃料棒の変形挙動および破損挙動について調べた。(2)は、NSRRにおいて通常採用されている下端固定（上端自由）とは逆の支持条件である。支持位置を逆にして、過渡中の燃料棒振動に起因する曲げモーメントと燃料破損位置の関係について調べた。

なお、実炉で使用されているものと同じスペーサグリッドを用いたより現実的な燃料棒支持条件を考慮した実験も実施したが、その結果については別報で報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 試験燃料棒

実験に供した試験燃料棒は 10% 濃縮度の UO_2 ペレット 14 個を Zry-4 管で被覆したものであり、ペレット形状寸法、被覆管径・肉厚およびギャップ幅等の主要諸元は PWR 型燃料棒と同じである。

試験燃料棒の仕様および構造を、それぞれ Table 2.1 および Fig. 2.1 に示す。

2.1.2 照射用カプセル

試験燃料棒を Fig. 2.2 に示すように、内径 12 cm のステンレス鋼製カプセル内に常温・常圧の水と共に封入して照射実験を行った。

2.1.3 計装

照射実験中の過渡的な温度挙動を測定するために、燃料被覆管表面のペレットスタック長中心およびその上下 3 mm 離れた位置に熱電対 ($0.2 \text{ mm} \phi$ の Pt/Pt-13%Rh 素線) を点溶接により取りつけた。

2.2 実験条件

Table 2.2 に示すように、両端固定条件について 4 回、上端固定条件について 2 回、発熱量 235~304 cal/g・ UO_2 の範囲でパルス照射実験を実施した。燃料棒の支持方法は、Fig. 2.3 に示す通りである。両端固定条件の場合、燃料棒は上下端で支持板に固定される。支持板は 3 本の支柱に固定されているために、燃料棒の長手方向の伸縮は拘束される。一方、上端固定の場合、上端のみ支持板に固定され、下端は縦方向にも横方向にも拘束されない。したがって、燃料棒の伸縮は自由である。

Table 2.1 Test fuel design summary

UO ₂ Pellets		
Diameter	9.29 mm	
Length	10 mm	
Density	9.5% T.D.	
Enrichment	10%	
Shape	Chamfered	
Cladding		
Material	Zircaloy-4	
Wall Thickness	0.62 mm	
Pin		
Diameter	10.72 mm	
Pellet-Cladding Gap	0.095 mm	
Element		
Overall Length	279 mm	
Fuelled Length	135 mm	
Weight of Fuel Pellets	~95 g	
Number of Pellets	14	
Plenum Gas	He 1 atm	

Table 2.2 Test conditions

Test No	Test Fuel	Energy Deposition (cal/g·UO ₂)	Fuel Rod Support Condition
320-1	10% E Standard Fuel	237	Both-end fixing
320-3	"	260	Top-end fixing bottom-end free
320-4	"	235	Both-end fixing
320-5	"	270	Both-end fixing
320-6	"	304	Both-end fixing
320-7	"	266	Top-end fixing bottom-end free

unit : mm

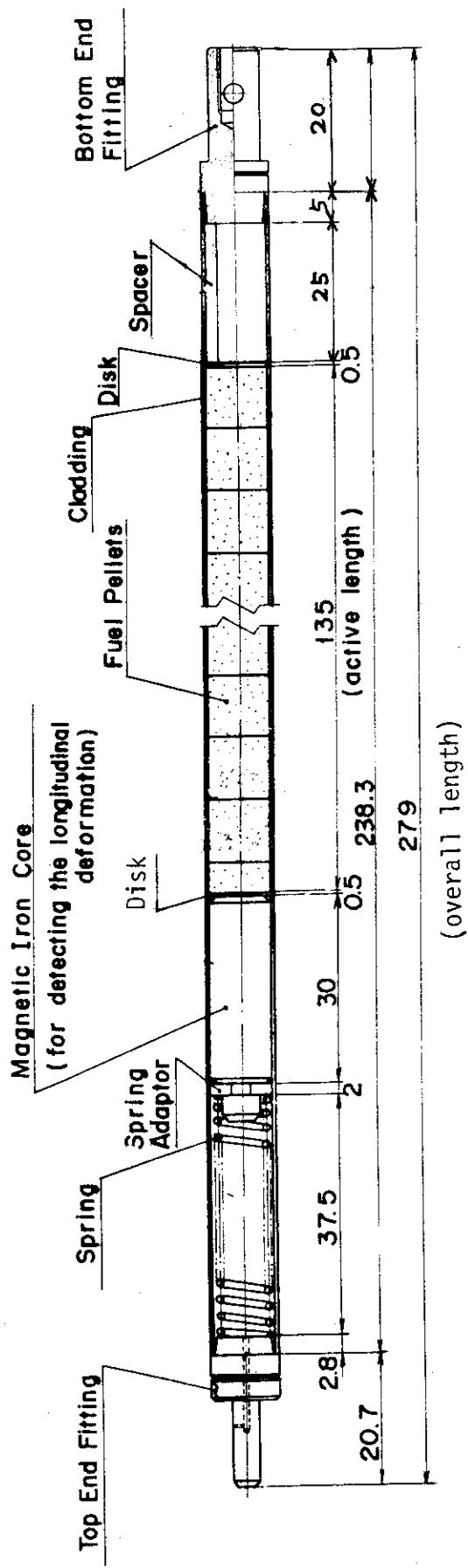


Fig. 2.1 Test fuel rod

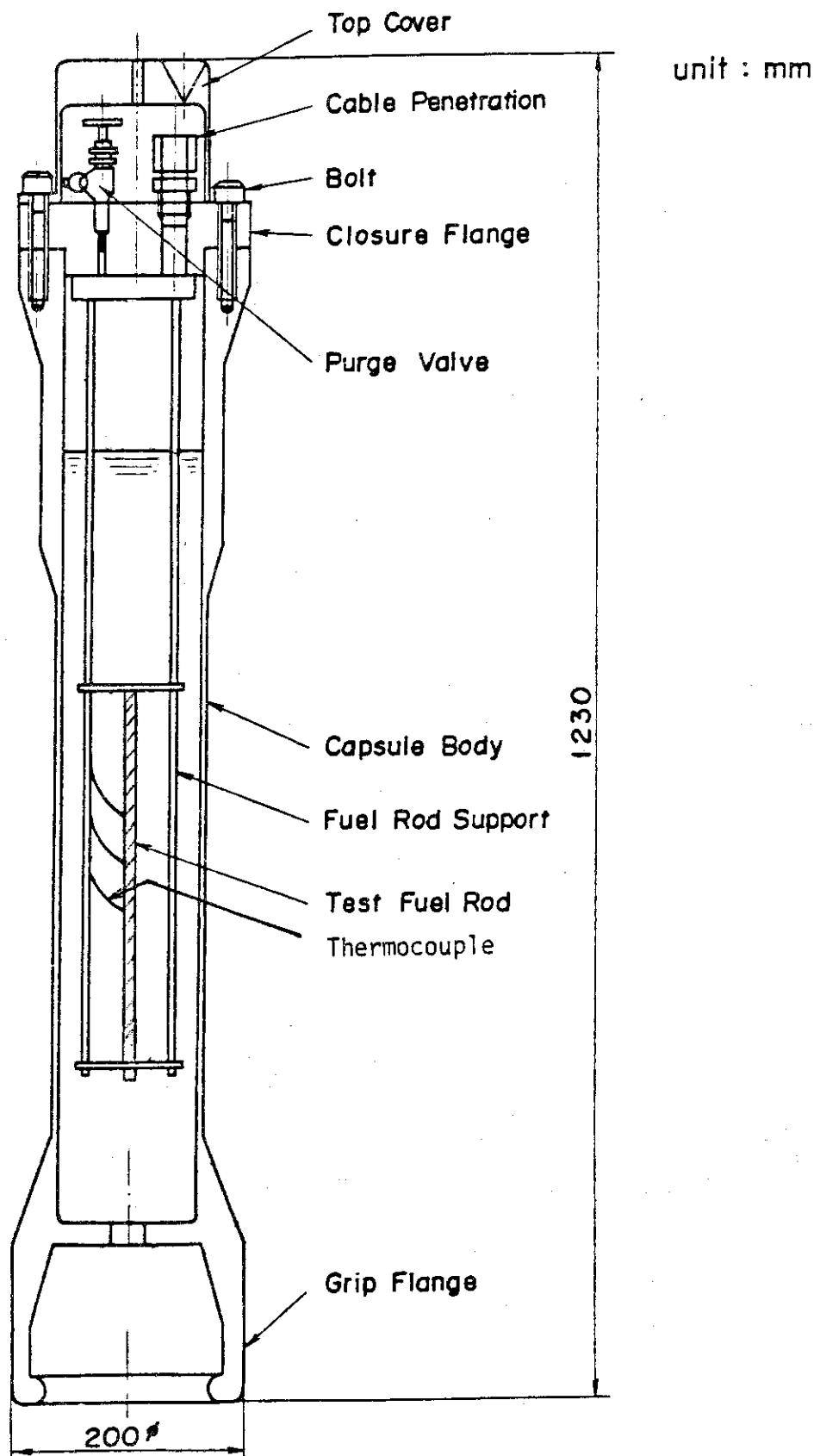


Fig. 2.2 Test capsule

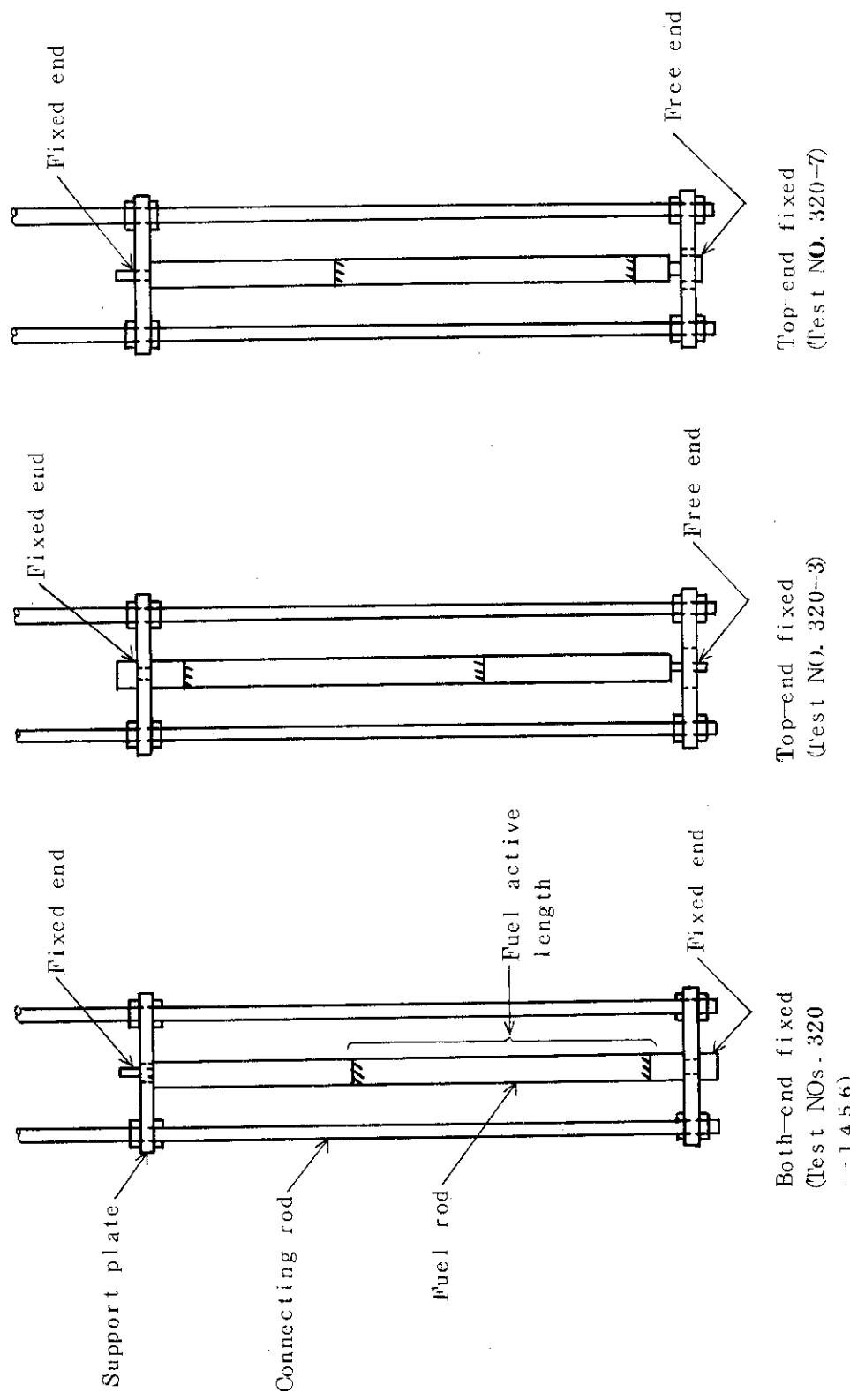


Fig. 2.3 Fuel rod support conditions

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

以下に、個々の実験結果について詳述する。

3.1.1 燃料棒両端固定の場合

通常、NSRR実験においては、試験燃料は下端固定、上端自由の支持条件で照射されるため、過渡時の熱膨張・収縮が自由に行える。しかし、実炉の拘束条件を考えると、燃料棒は、長手方向数箇所でスペーサ・グリッドにより支持されているために、熱伸縮は完全に自由ではなく、何らかの軸方向拘束を受けるものと言える。したがって、熱伸縮が自由の場合とは異なる燃料挙動を示すことが考えられる。そこで、極端な場合として、燃料棒の熱伸縮が完全に拘束される場合を想定し、試験燃料棒の両端を固定する支持条件で照射を行い、伸縮の拘束が燃料棒の変形、破損等に与える影響について調べた。

(1) Test No 320-1

発熱量 $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した結果、Fig.3.1(1)に示すように、発熱部中央において被覆管にクラックが生じた。全てのクラックは明らかに円周方向に生じており、そのうち2本の大きなクラックは、半周に亘っている。大きなクラックの拡大写真を見ると、開口幅が広く、クラックは表面から入り、被覆管を貫通しているような様相を呈しているが、被覆管断面を顕微鏡で観察したところ (Fig.3.1(2))、クラックは被覆管を貫通していない事が判明した。したがって、燃料は破損しなかった。しかしながら、燃料棒の弯曲は顕著であり、スキマゲージで測定したところ弓形に近い状態で約 2.5 mm 曲がっていた。また、膨れは最大で約 2.7% であった。外観上の変化としては、発熱領域全面が黒色に酸化し、部分的に酸化膜の剥離が生じていた。これは、下端固定の標準実験結果と変わらない。

被覆管表面温度は、Fig.3.3(1)に示すように、上昇開始直後にDNBを超え、約1秒後に最高温度に達している。その後、冷却過程に入り、徐々に降下し、6~7秒後にクエンチにより急速に核沸騰温度まで降下している。

(2) Test No 320-4

$237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で被覆管にクラックが生じ、燃料棒の弯曲も著しかったので、さらに低い発熱量での燃料挙動を調べるために、 $220 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ を目標として照射したが、結果的には、 $235 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量が燃料に与えられた。照射後の燃料棒外観 (Fig.3.1(1)) を見ると、被覆管に円周方向クラックが入っているが、このクラックは、熱電対取り付けのために入れたケガキ線に沿って酸化膜の表層にできた単なるひび割れ程度のものである。燃料棒の曲がりは、前節のTest No 320-1と違い、一方向の曲がりでなく、最大で 0.4 mm 程度と小さい。しかし、膨れは最大約 2.1% で320-1と同程度であった。

被覆管表面最高温度は、約 1500°C であり、320-1と同じである。Fig.3.3(2)に被覆

管表面温度履歴を示す。

(3) Test No 320-5

本実験では、燃料棒伸縮を拘束しない場合分断を起こす発熱量である $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ を与え、伸縮拘束が破損挙動に及ぼす効果について調べた。

燃料棒は Fig. 3.1 (3) に示すように、発熱上下部の 2箇所で分断した。被覆管は発熱部に亘って著しく変形し、特に下部の分断位置では、軸方向に圧潰されたような様相を呈している。この潰れは、昇温中に伸びが拘束されたために生じたものと考えられる。同発熱量の伸びを拘束しない実験の結果と比べると、燃料損傷の程度は若干大きいようであるが、破損モードに相違はない。被覆管表面温度については、熱電対破損のため途中までしか計測できなかったが、破損時点では約 1600°C であった。

(4) Test No 320-6

高発熱量条件下における破損挙動を調べるために、 $304 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で燃料を照射した。燃料棒は Fig. 3.1 (3) に示すように、発熱上下部および中央付近の 3箇所で分断した。被覆管は溶融し、一部が溶け落ちて下部端栓に固着していた。燃料損傷は、伸びを拘束しない場合と同程度であり、特に伸び拘束に起因すると思われる変化は観察されなかった。

3.1.2 燃料棒上端固定の場合

燃料棒下端を固定し上端を拘束しない通常の支持条件下では、発熱下部において被覆管にクラックが入り燃料初期破損が起きることが多い。この理由は、Fig. 3.4 に示すように発熱部下端に軸方向発熱ピークがあるために、下端部において他の場所より被覆管温度が高くなる。その結果、被覆管の酸化したがって脆化、および溶融の程度が大きくなり、下端部において機械的強度が最も弱くなることによると考えられている。ところで、過渡中には、燃料棒が冷却水の沸騰により振動するために、燃料棒に曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントは、片端固定の場合、支持点に近づくにつれて大きく作用することになる。その結果、温度上昇が最も高いため機械的強度の最も弱くなる発熱下部で曲げモーメントの作用によってクラックが発生しやすくなることが考えられた。

そこで、破損に対する曲げモーメントの影響を調べるために、燃料棒の支持方法を逆、すなわち、上端を固定、下端を自由とすることにより、発熱下部に作用する曲げモーメントが小さくなるようにして燃料照射を行った。

(1) Test No 320-3

下端固定条件の場合の破損しきい値である $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で燃料を照射した結果、Fig. 3.2 に示すように、発熱下部付近において被覆管にクラックが入り燃料は破損した。クラックの形状、その発生位置および被覆管の内面溶融を示唆する被覆管の変色（光沢を失った灰黒色）、不均一な変形等の外観上の特徴は、下端固定の場合と同様であった。

(2) Test No 320-7

曲げモーメントの効果がより出やすくするために、燃料強度の低下が著しくなる $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 付近で照射を行った。 $266 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ が与えられた結果、Fig. 3.2 に示すように、燃料棒は発熱下部で 2つに分断した。被覆管は、発熱部上端から約 3 cm 下の位置から発熱部下

端に亘って不均一に、しわ状に変形していた。特に、分断位置付近において変形が著しかった。この結果は、下端固定の場合と変わらない。

3.2 考察

3.2.1 燃料棒熱伸縮拘束の効果

昇温時の熱伸びが拘束されると、拘束される分は被覆管の縮み、もしくは、曲がりとして吸収されるものと考えられる、縮みが、被覆管の直径、肉厚の変化に転換され、被覆管一ペレット間のギャップ幅に影響を及ぼせば、その影響は被覆管温度にも現れることが考えられる。一方、冷却時の縮みが拘束されれば、被覆管に熱応力が発生するので、これによる影響が破損挙動に現れることも予想される。以下において、熱伸縮を拘束する場合（両端固定）と拘束しない場合（下端固定）の結果を比較することにより、燃料棒の変形、曲がり、被覆管表面温度および燃料破損挙動等への熱伸縮拘束の影響について検討する。

(1) 燃料棒の径方向変形

両端固定支持条件において、 $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した燃料棒の軸方向に沿った外径のプロフィールをFig.3.5に示す。まづ、変形の傾向についてみると、発熱中央部で燃料棒の膨れが大きく、また、直角2方向の変形が相互に逆転している、すなわち、橢円状に変形している。これらの傾向は、下端固定の場合と変わらない。膨れの大きさについても、Fig.3.6に示されるように、最大膨れは、下端固定の場合と差がない。このように、燃料棒の軸方向熱伸びが拘束されても径方向変形は影響を受けない。

(2) 燃料棒の曲がり

Fig.3.7に、両端固定の場合と下端固定の場合の燃料棒曲がりを比較する。発熱量 $235 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した両端固定燃料棒（Test No 320-4）の曲がりは、下端固定の場合と比べて同程度であるが、 $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した燃料棒（Test No 320-1）の曲がりは3倍程度大きい。曲がり量は、被覆管温度上昇時の熱伸び量に依存するので、同じ発熱量に対しては同程度の曲がりが予想されるが、ほぼ同じ発熱量で照射したにも拘らず両者に上記のように大きな差が生じた。このような差は、曲がり方の相異に起因するものと考えられる。すなわち、 $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した場合、熱伸びが、概ね弓形に弯曲することにより吸収されたために、燃料は大きく曲がり、一方、 $235 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した場合は、弓形でなくいくつかの方向に弯曲したために、小さな曲がりしか生じなかったものと言える。何故曲がり方に差異ができたのか明確な理由は判からないが、燃料棒の曲がりは強度低下が著しい高温状態における座屈により生じたものであり、この座屈現象が不安定なものであるために曲がりに差異が生じたことも考えられる。

(3) 被覆管表面温度

種々の燃料棒支持条件における被覆管表面最高温度をFig.3.8に示す。両端固定条件下においても最高温度は、下端固定および上端固定の場合と差がない。このように、被覆管表面温度は拘束条件の影響を受けない。これは、前節で述べたように、燃料温度挙動に影響を与える燃料棒の径方向変形が拘束条件によって影響されないためである。

(4) 破損挙動

発熱量 $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ および $304 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した燃料棒は共に分断して破損した。破損モードは、下端固定の場合と同じであるが、燃料損傷の程度は、 $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ においては、両端固定燃料棒の方が下端固定燃料棒と比べて若干大きかった。しかし、 $304 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ においては、損傷の程度に差はみられない。発熱量が高くなると、燃料の破損は、被覆管の溶融によりひき起こされるために、外的な拘束条件の燃料破損に及ぼす影響は現れなくなるものと言える。

235 および $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で照射した燃料棒については、共に破損しなかった。しかし、 $237 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射した場合、被覆管にクラックが発生した。このクラックは被覆管を貫通していないが、相当発熱条件の下端固定実験では発生しなかったクラックであり、さらに、今まで観察されなかった形態のクラックである。このクラックの発生原因について、以下に考察する。

Fig. 3.1(2)に示すクラック部の断面写真から、クラックは幅約 0.2 mm 、深さ約 0.16 mm （肉厚の約 30% ）で、被覆管外面から入り未貫通であることが判かる。また、クラックが生じているのは ZrO_2 層、 $\alpha-\text{Zry}$ 層および $\alpha-\text{Zry}$ 層に隣接する層 (α -incursion 層) であり、酸素吸収により脆化した部分である。クラックの入らなかった残りの肉厚部は、図に見られるように塑性変形により薄くなっていることから、十分な延性を有しているものと考えられる。これらの事から、クラックは、被覆管表面から発生し、脆化した層を貫通し、延性のある層に至って停止したクラックであると考えられる。

ここで、クラック発生の状況を観察すると、(1) Fig. 3.1(1)に示されるように、クラックは、円周方向にのみ生じていること、および(2)数本のクラックが同じ面内で半周に亘って生じていることが特徴的である。さらに、Fig. 3.1(2)に示すクラック部の断面写真から、クラック開口が広くなっていること、また、クラックを境として被覆管が両側に曲がっていることが観察される。以上の特徴は、被覆管がクラック発生側に軸方向引張の作用を受けたこと、すなわち、クラック発生側に引張りとなるような曲げモーメントの作用を受けたことを示唆している。この曲げモーメントは、昇温過程で弯曲した燃料棒が急冷される際、燃料棒両端からの拘束により収縮が阻止された結果発生したものである。曲げモーメントの分布を考えると、弯曲の大きい発熱部中央付近に大きい曲げモーメントが作用したために、発熱部中央でクラックが発生したと考えられる。クラックは、酸化により被覆管外面にできた脆化層表面で発生し内部へ進展して行ったが、延性層に達して停止した。その後は、収縮の拘束状態が緩和されるまで延性層が塑性変形したものと考えられる。

以上をまとめると、両端固定された場合の被覆管クラックの発生および燃料破損について次のような結論を導くことができる。

燃料棒の両端が固定されると、先づ昇温過程において長手方向伸びが拘束するために燃料棒は弯曲し易くなる。その後訪れる急冷過程においては、収縮が拘束されるために弯曲した燃料棒に曲げモーメントが作用する。燃料棒の弯曲が大きい場合には、被覆管の脆化層を破損に至らしめる程の曲げモーメントが作用し、脆化層表面に円周方向クラックが発生する。収縮拘束が続く間、クラックは内部へ向って進展して行くが、延性層が残存していると、クラックは

延性層で進展が阻止され被覆管を貫通することができない。したがって、クラックが被覆管を貫通するためには、被覆管が肉厚に亘って殆んど脆化することが必要条件となる。被覆管が延性を失い貫通クラックにより燃料破損が生じる発熱量は、下端固定支持条件下では $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ⁽¹¹⁾ であり、また、被覆管脆化の程度を決定する要因である被覆管温度挙動が下端固定の場合と変わらないことから、両端固定の支持条件下においても燃料の破損しきい値は $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 近傍にあると考えられる。

3.2.2 片端固定支持条件下での燃料破損における曲げモーメントの効果

冷却水の沸騰による燃料棒の振動がもたらす曲げモーメントが下端固定条件下での燃料破損を引き起こす力であるとすれば、上端固定条件下における燃料破損は固定端であり、そのために曲げモーメントが大きくなる上端側で起きるはずであるが、 260 および $266 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で照射した燃料は共に自由端である下端側の発熱下部で破損した。特に、被覆管の酸化、溶融の程度が著しく、強度低下が大きい $266 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 照射の場合でも、発熱部上部には損傷は認められず、下部で燃料破損が生じたことから、上記のような曲げモーメントは発生するとしてもその大きさは小さく、燃料破損を生じさせる程のものではないと言うことができる。

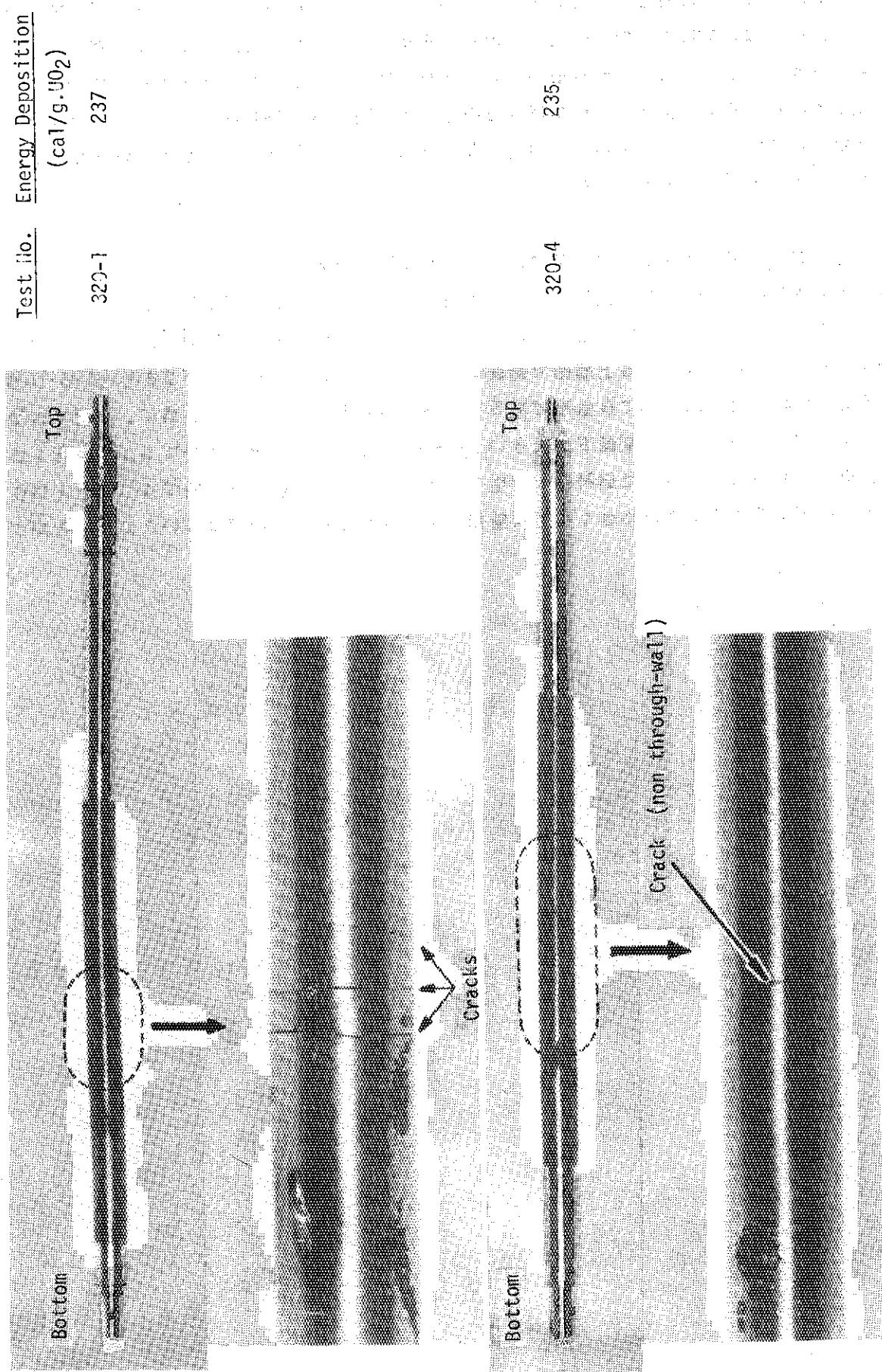


Fig. 3.1(1) Photographs of post-test fuel rods with the both ends fixed

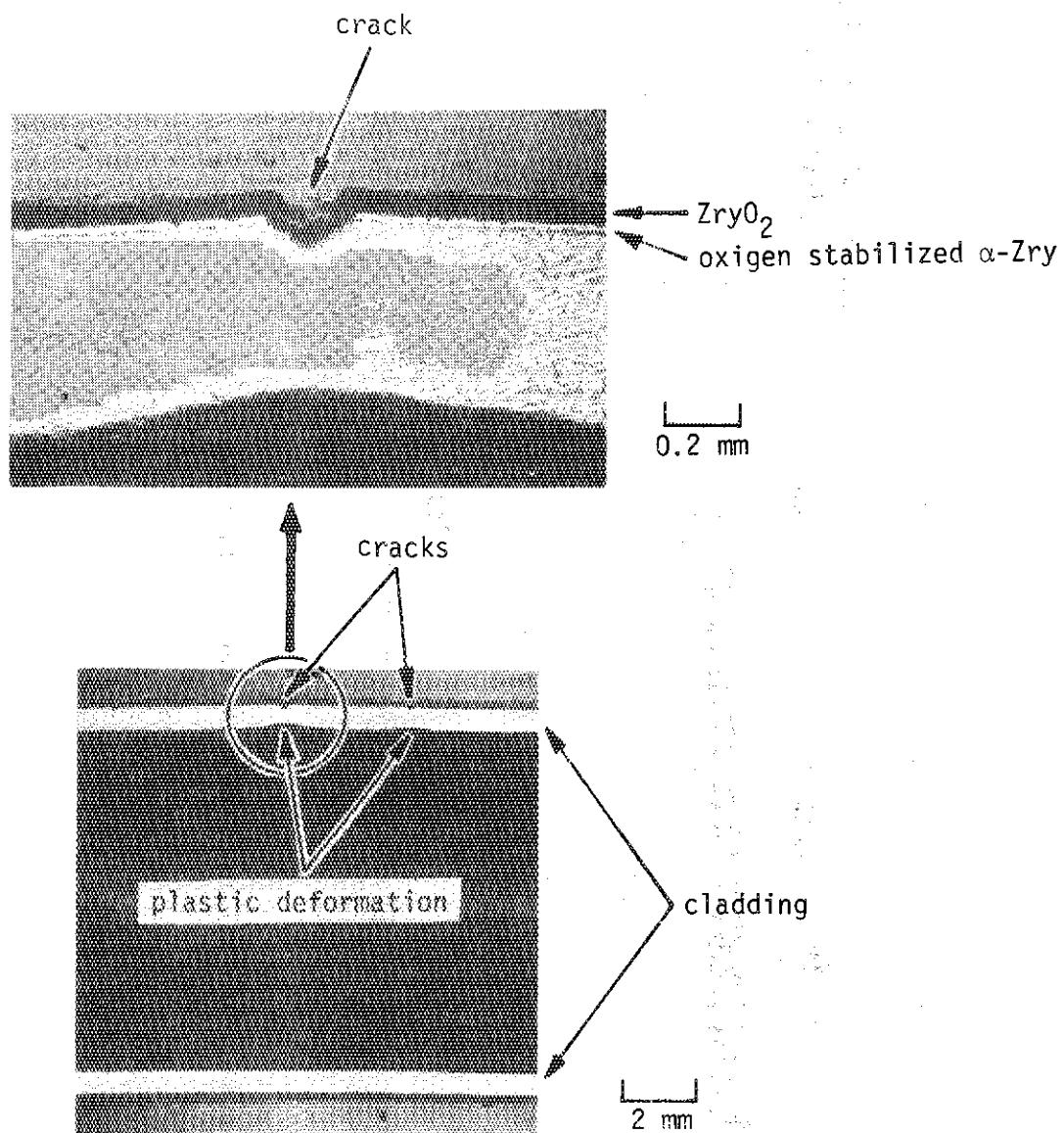


Fig. 3.1(2) Transverse section of cracked region (Test NO. 320-1)

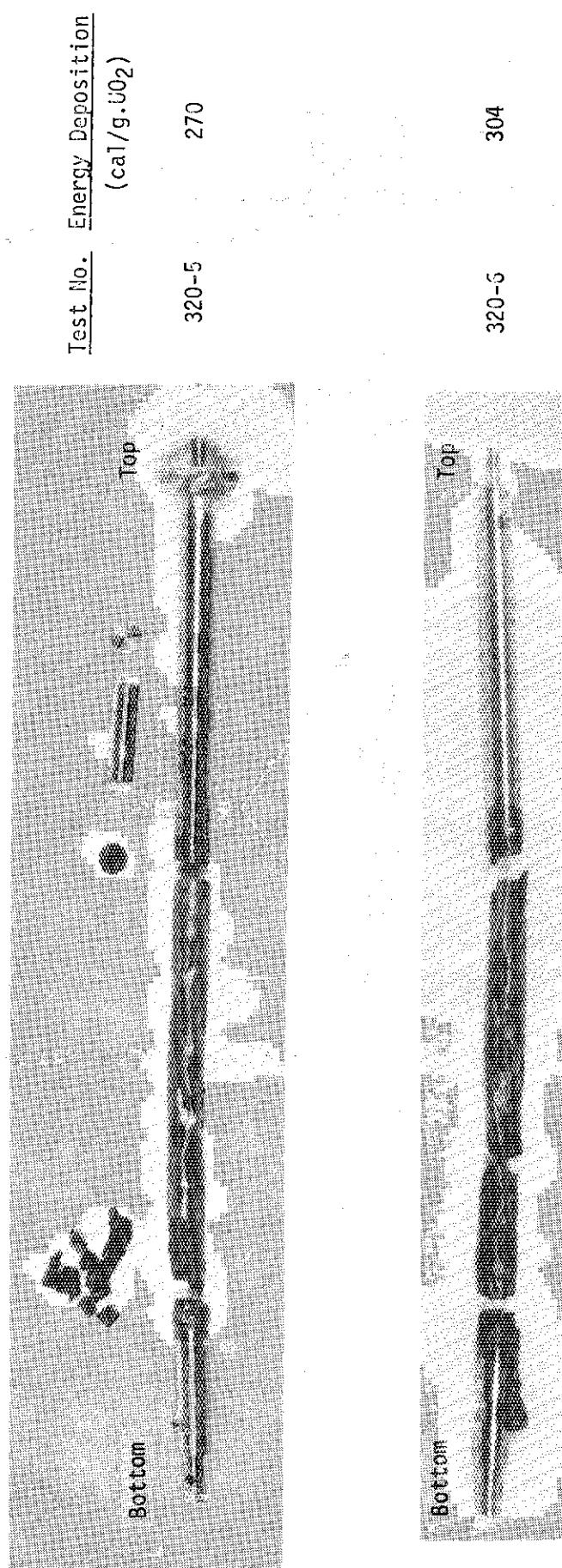


Fig. 3.1(3) Photographs of post-test fuel rods with the both ends fixed

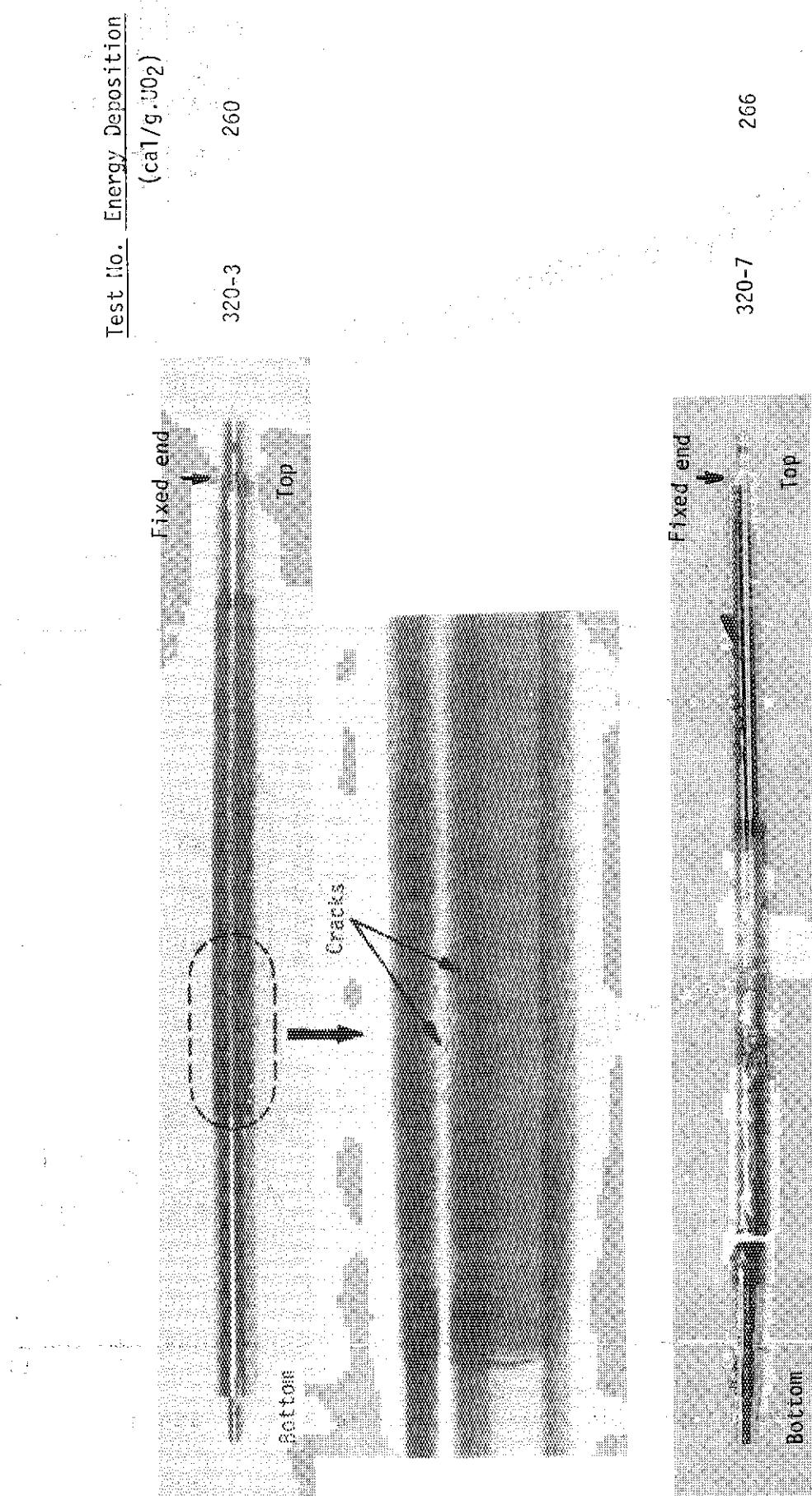


Fig. 3.2 Photographs of post-test fuel rods with the top end fixed

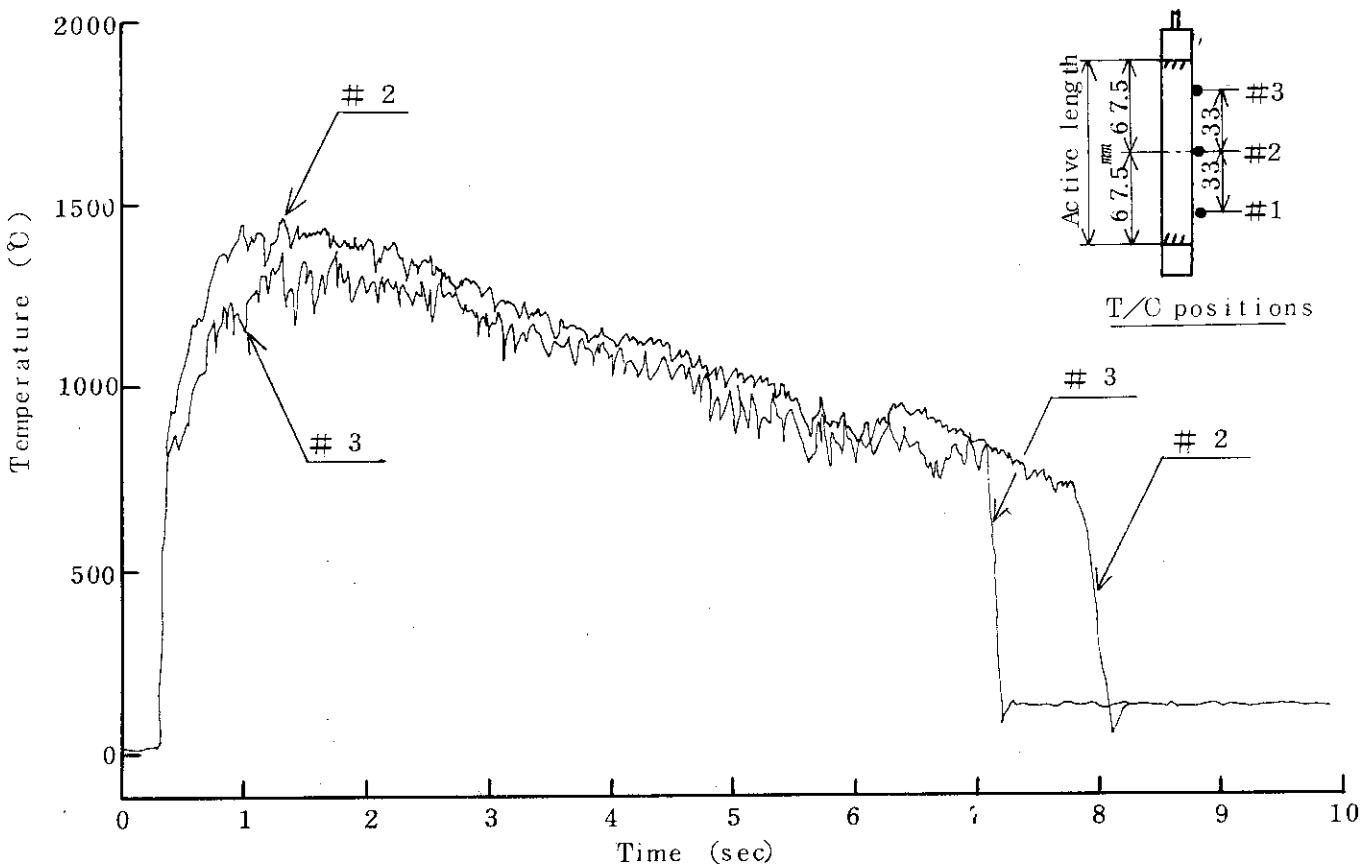


Fig. 3.3(1) Cladding surface temperature histories in Test NO. 320-1

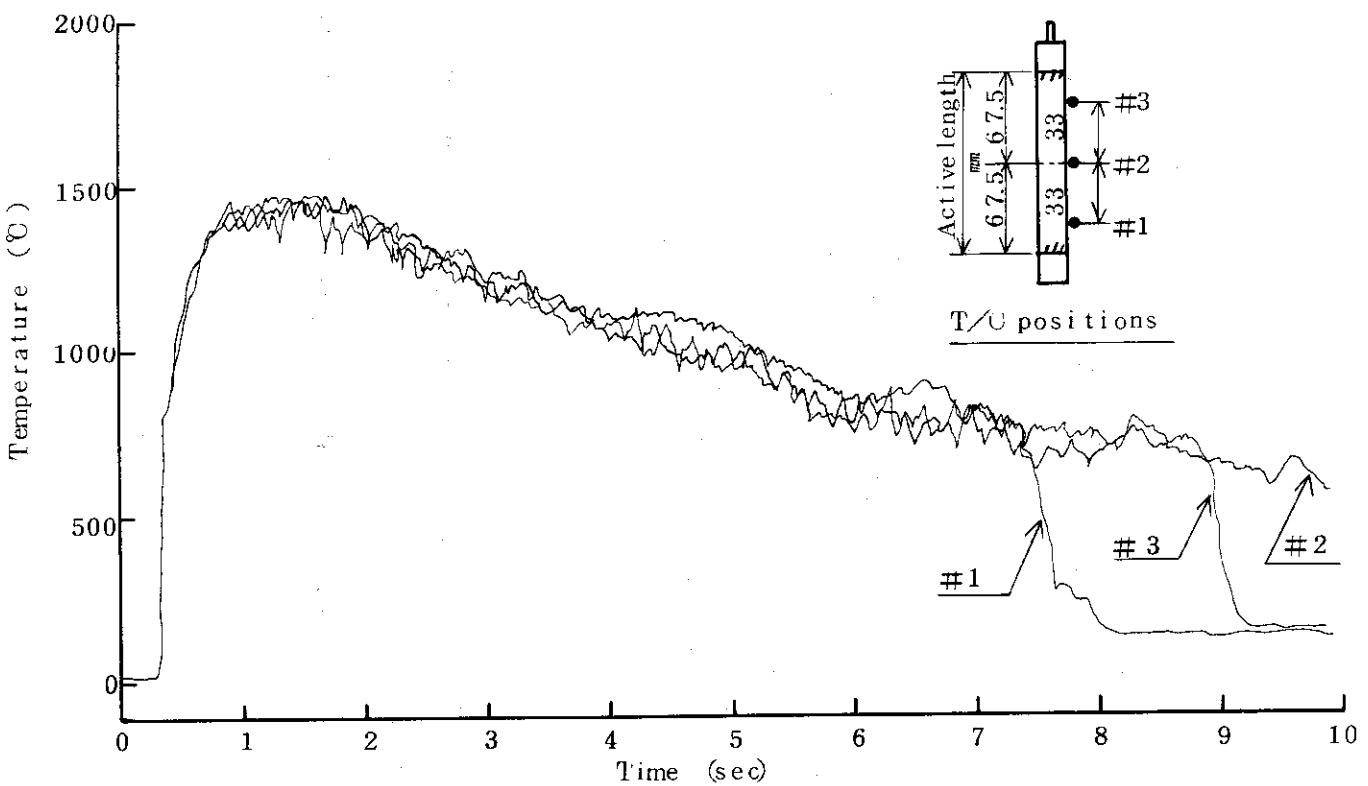


Fig. 3.3(2) Cladding surface temperature histories in Test NO. 320-4

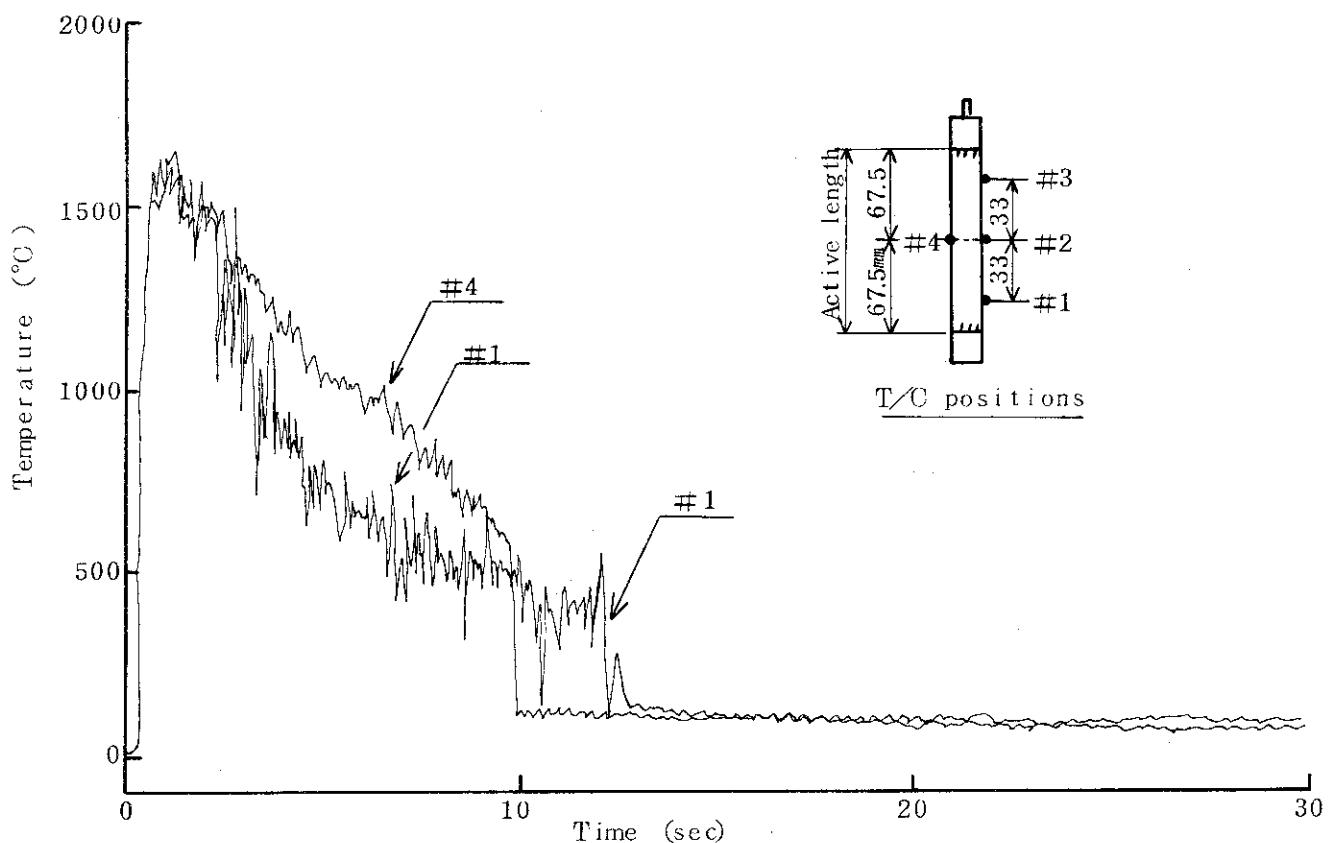


Fig. 3.3(3) Cladding surface temperature histories in test NO. 320-3

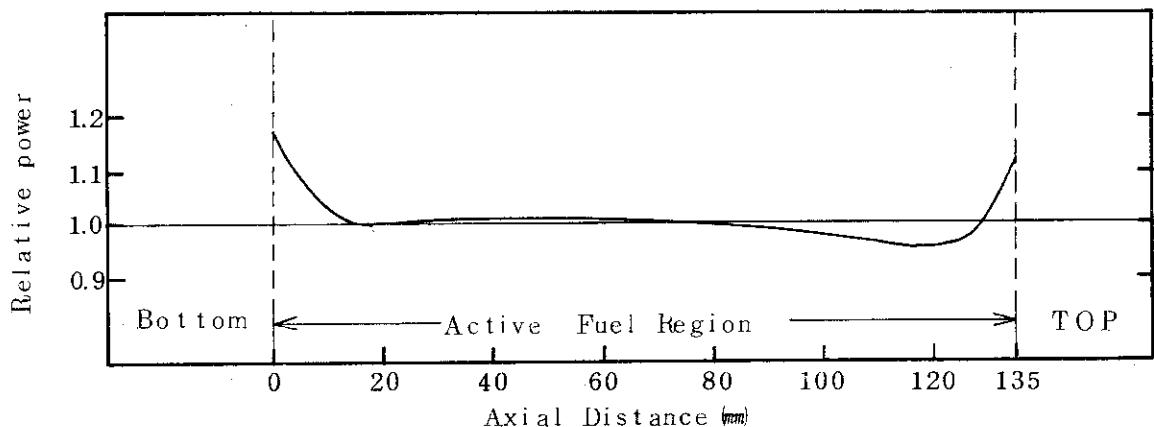


Fig. 3.4 Axial power profile

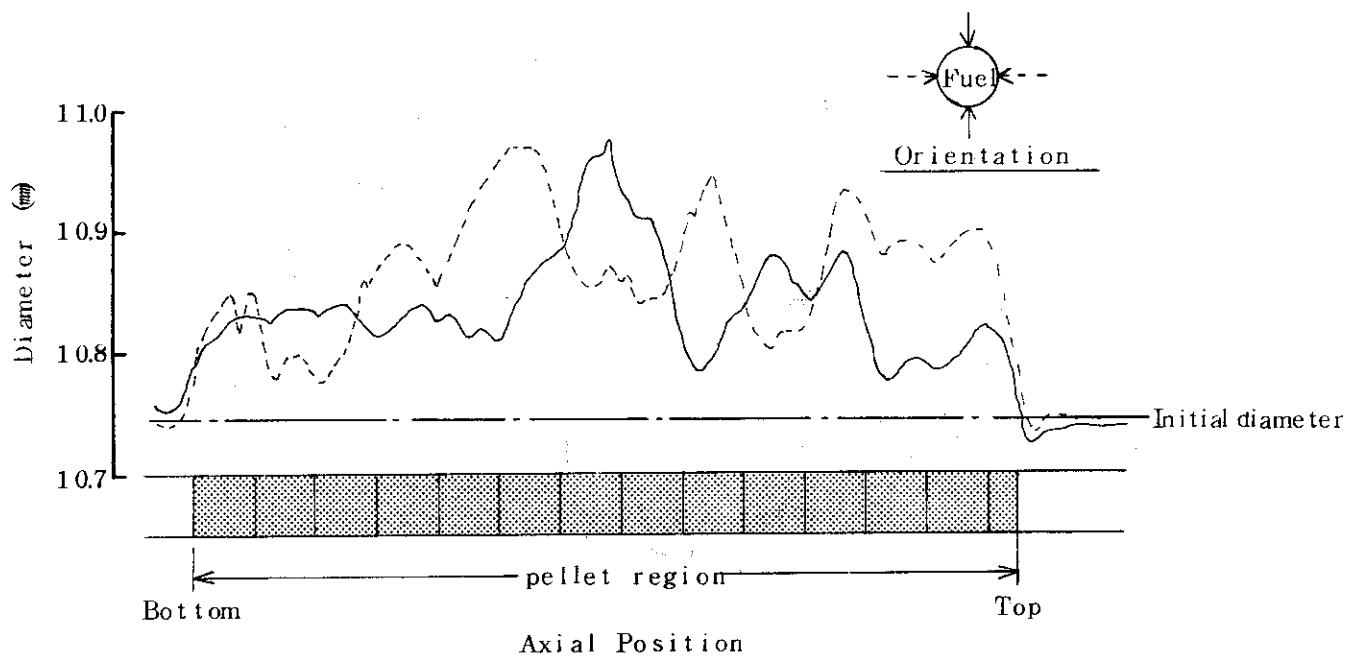


Fig. 3.5 Diameter profile of fuel rod in Test NO. 320-1

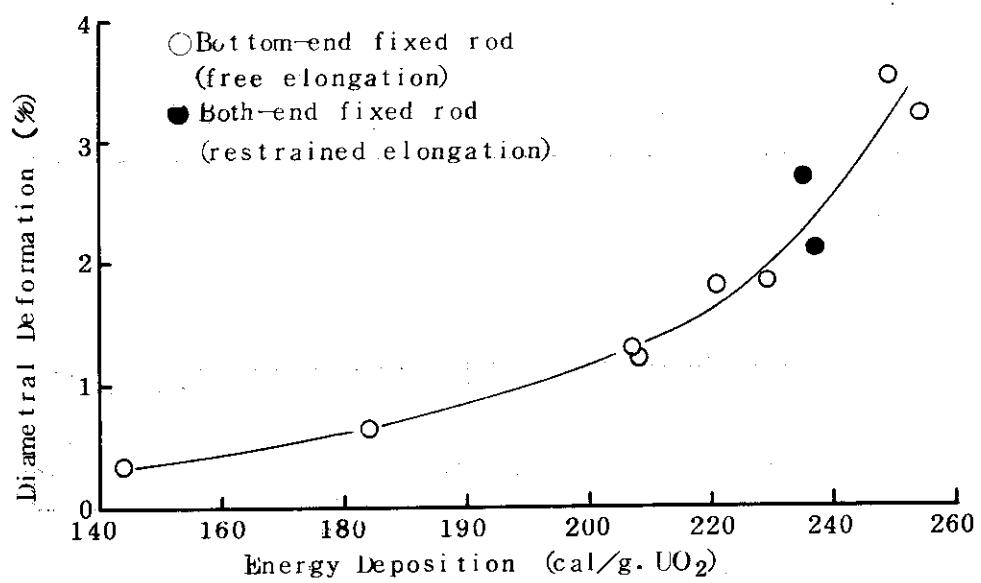


Fig. 3.6 Comparison of diametral deformation of cladding between bottom-end fixed rod and both-end fixed rod

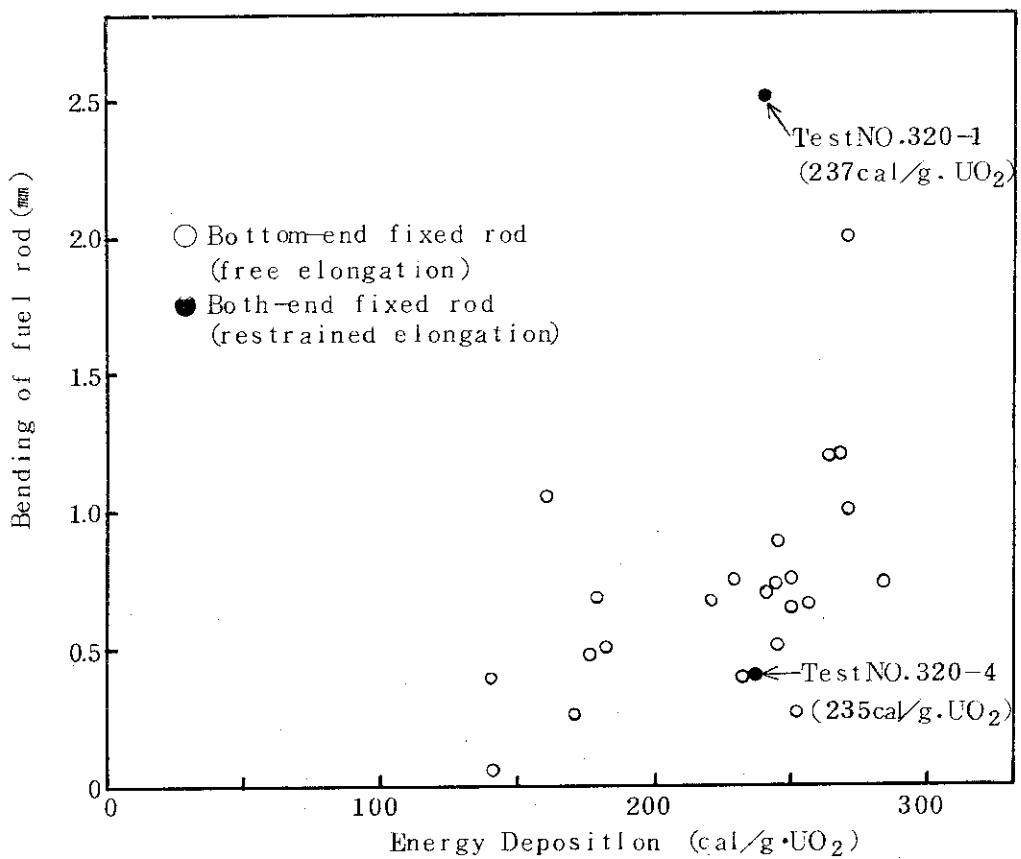


Fig. 3.7 Comparison of fuel rod bending between bottom-end fixed rod and both-end fixed rod

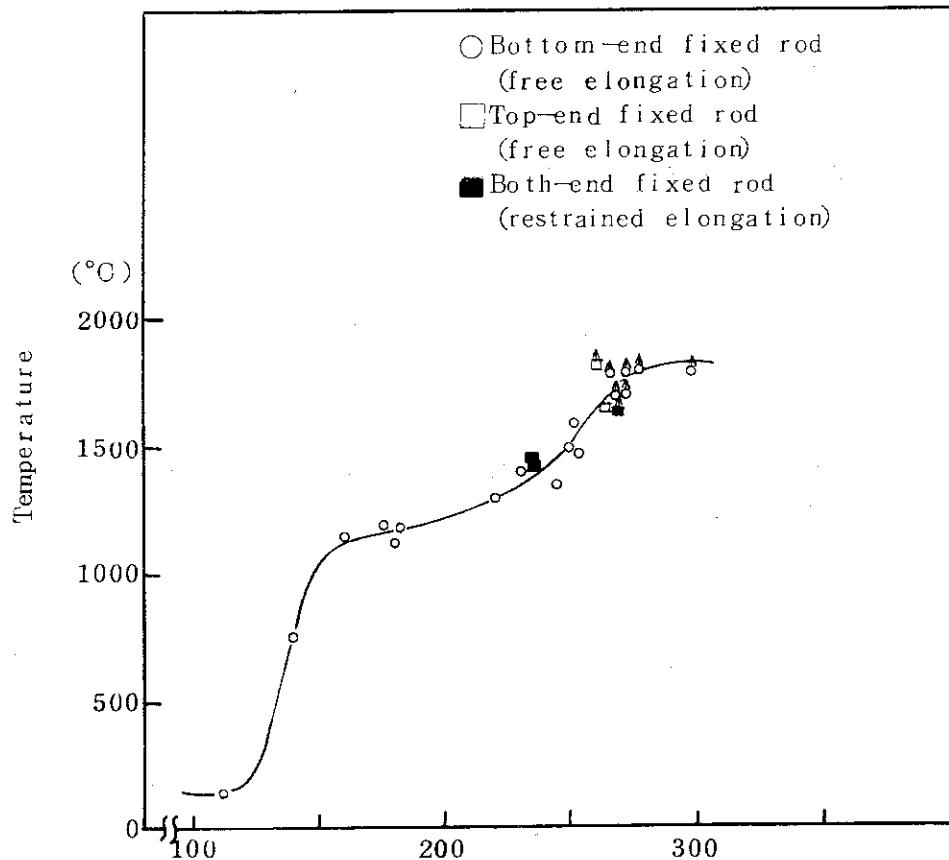


Fig. 3.8 Comparison of maximum cladding surface temperatures at axial center for various rod support conditions

4. 結 論

燃料棒の支持条件を、通常NSRR実験で採用している支持条件と変えて燃料照射を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 燃料棒の両端を固定し過渡時の温度変化に伴う熱伸縮を拘束すると、昇温過程においては伸びが阻止されるために一端固定の場合に比べて燃料棒が弯曲し易くなる。急冷過程においては、燃料棒が収縮しようとするが、両端からの拘束により収縮が阻止されるために、弯曲した燃料棒は曲げモーメントの作用を受ける。この曲げモーメントは弯曲が大きい場合には、酸化脆化した被覆管を破損させる程大きくなり、その結果、被覆管にクラックが発生する。しかし、被覆管に延性が残存している場合には、クラックは延性層で進展を阻止するために、被覆管全体を貫通することはない。したがって、クラックの被覆管貫通による燃料破損は、被覆管が殆んど延性を喪失しなければ生じない。下端固定支持条件下において、被覆管が延性を失ないクラックの貫通による燃料破損が生じる発熱量は $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ であり、この被覆管脆化の程度を決定する要因である被覆管温度挙動が下端固定の場合と変わらないことから、両端固定条件下でも破損しきい値は $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 近傍にあると考えられる。両端拘束により燃料棒の曲がりは影響を受けるが、燃料棒の半径方向変形、温度挙動および破損しきい値は、拘束の影響を受けない。
- (2) 片端固定支持条件下における初期燃料破損（被覆管のクラック貫通による脆性破損）に関して、一端固定・一端自由の支持構造であるために過渡中の振動により燃料棒に作用する曲げモーメントは、燃料破損を生じさせる程のものではなく、破損の原因とはならない。

謝 辞

本実験を遂行し、結果をまとめに当り御協力を頂きました反応度安全研究室およびNSRR管理室の皆様に深く感謝致します。

4. 結論

燃料棒の支持条件を、通常NSRR実験で採用している支持条件と変えて燃料照射を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 燃料棒の両端を固定し過渡時の温度変化に伴う熱伸縮を拘束すると、昇温過程においては伸びが阻止されるために一端固定の場合に比べて燃料棒が弯曲し易くなる。急冷過程においては、燃料棒が収縮しようとするが、両端からの拘束により収縮が阻止されるために、弯曲した燃料棒は曲げモーメントの作用を受ける。この曲げモーメントは弯曲が大きい場合には、酸化脆化した被覆管を破損させる程大きくなり、その結果、被覆管にクラックが発生する。しかし、被覆管に延性が残存している場合には、クラックは延性層で進展を阻止するために、被覆管全体を貫通することはない。したがって、クラックの被覆管貫通による燃料破損は、被覆管が殆んど延性を喪失しなければ生じない。下端固定支持条件下において、被覆管が延性を失ないクラックの貫通による燃料破損が生じる発熱量は $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ であり、この被覆管脆化の程度を決定する要因である被覆管温度挙動が下端固定の場合と変わらないことから、両端固定条件下でも破損しきい値は $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 近傍にあると考えられる。両端拘束により燃料棒の曲がりは影響を受けるが、燃料棒の半径方向変形、温度挙動および破損しきい値は、拘束の影響を受けない。
- (2) 片端固定支持条件下における初期燃料破損（被覆管のクラック貫通による脆性破損）に関して、一端固定・一端自由の支持構造であるために過渡中の振動により燃料棒に作用する曲げモーメントは、燃料破損を生じさせる程のものではなく、破損の原因とはならない。

謝辞

本実験を遂行し、結果をまとめに当り御協力を頂きました反応度安全研究室およびNSRR管理室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

1. 石川, 富井監修: “NSRR実験プログレス・レポート・1 (1975年10月～1976年3月)”, JAERI-M 6635 (1976)
2. 石川, 富井監修: “NSRR実験プログレス・レポート・2 (1976年4月～1976年6月)”, JAERI-M 6790 (1976)
3. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・3 (1976年7月～1976年12月)”, JAERI-M 7051 (1977)
4. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・4 (1977年1月～1977年6月)”, JAERI-M 7304 (1977)
5. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・5 (1977年7月～1977年12月)”, JAERI-M 7554 (1978)
6. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・6 (1978年1月～1978年6月)”, JAERI-M 7977 (1978)
7. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・7 (1978年7月～1978年12月)”, JAERI-M 8259 (1979)
8. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・8 (1979年1月～1979年6月)”, JAERI-M 8779 (1979)
9. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・9 (1979年7月～1979年12月)”, JAERI-M 9011 (1980)
10. 反応度安全研究室, 他: “NSRR実験プログレス・レポート・10 (1980年1月～1980年6月)”, JAERI-M 9319 (1981)
11. 星薦雄, 他: “反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動”, 原子力誌, 20[9] 651～661 (1978)