

JAERI - M
84-058

NSRR実験における燃料棒軸方向出力分布
の燃料挙動に及ぼす影響

1984年3月

柳原 敏

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開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、このほかに関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, Nakagun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 俣高野高速印刷

NSRR 実験における燃料棒軸方向出力分布の燃料挙動に及ぼす影響

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

御 原 敏

(1984年2月6日受理)

原子炉の反応度事故時における燃料棒の挙動を調べる実験が、日本原子力研究所 Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) で行なわれている。今まで、この NSRR 実験では、標準試験燃料棒の有効長は NSRR の炉心高さに比べ約 $1/3$ と短いため、試験燃料棒の軸方向出力分布はほぼ均一と考えられてきた。しかし、炉心の制御棒位置や試験燃料スタック部の反射効果（エッジ効果）のため、実際には軸方向出力分布はある程度不均一であり、そのための影響が燃料挙動にも現われている。そこで、試験燃料棒の軸方向出力分布を詳細に評価し、かつ、燃料挙動に及ぼす影響について検討した。

試験燃料棒の軸方向出力分布を評価した結果によると、燃料スタック部の下方程その値が高くなる傾向を示し、燃料スタック部の両端近傍では、エッジ効果のため顕著な出力ピーキングが認められた。燃料スタック部下部における、燃料挙動に影響を及ぼす有効な出力ピーキングは $1.04 \sim 1.06$ である。又、燃料スタック部両端に 5 彩濃縮 UO_2 ペレットを入れて出力ピーキングを抑えた場合、従来の破損しきい発熱量では燃料棒の破損は認められなかった。これらの事から、出力ピーキングが燃料棒の破損にも影響を及ぼしているといえる。他方、軸方向出力分布の変化を著しくした場合、燃料挙動とその局所的な発熱量との間に相関関係があることから、燃料棒の破損についても局所的な発熱量による評価が妥当であると考えられる。そこで、今までに行なわれた破損しきい値近傍の発熱量での実験の結果を整理すると、その破損は、発熱量 $274 \text{ cal/g} \cdot UO_2$ の発熱部で生じていることが分った。

Effect of Axial Power Distribution on the
Fuel Rod Behavior in NSRR Experiments

Satoshi YANAGIHARA

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 6, 1984)

Fuel rod behavior under RIA conditions has been studied by utilizing Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) in Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Japan. In the NSRR experiments, it has been generally believed that an axial power distribution in a test fuel rod is almost flat due to the core length three times longer than a fuel stack region in a test fuel rod. However, the axial power distribution in a test rod is possible to change because of the effects of both control rod position and reflection of neutrons at edge regions of the fuel stack. Therefore, we measured the detailed axial distribution of γ -ray intensity in test fuel rods to characterize the power profile and to evaluate the effect of the power peaking on the fuel rod behavior.

Based on the measurement of the γ -ray distribution in a fuel rod, the power was observed to be higher at the lower portion of a test fuel rod, and the effective power peaking was estimated to be 1.04-1.06 compared with the average in a fuel stack region. In the NSRR experiments, a fuel failure occurred usually at the lower portion when the fuel rod was subjected to the energy deposition of 260 cal/g UO_2 in axial average. On the other hand, reducing the peaking by insurting 5 % enriched UO_2 pellets at both edges of the fuel stack, a fuel failure did not occur even if the fuel rod was subjected to 260 cal/g UO_2 in axial average. This must indicate the strong effect of the peaking on the fuel rod failure behavior.

As the relation was observed between fuel rod behavior and a local energy deposition in a fuel rod having a widely deviated power profile in axial direction, it must be better to evaluate the fuel rod failure behavior based on the local energy deposition.

Researching the failed position among the test fuel rods subjected to around failure threshold energy of 260 cal/g UO₂, the local energy deposition was estimated to be around 274 cal/g UO₂ at failed position.

Keywords: RIA, NSRR Experiments, Power Peaking, Fuel Failure, Energy Deposition, Failure Threshold, Fuel Rod Behavior

目 次

1. 序 言	1
2. 実験装置と実験方法	2
2.1 NSRR 実験の概要	2
2.2 実験方法	3
3. 実験結果	5
3.1 試験燃料棒の軸方向出力分布	5
3.2 試験燃料棒の軸方向出力分布を変化させた実験	6
3.3 照射後燃料検査	8
4. 考 察	10
4.1 試験燃料棒の軸方向出力分布の評価	10
4.2 軸方向出力分布を考慮した燃料挙動の検討	12
4.3 試験燃料棒の破損挙動の検討	13
5. 結 言	15
謝 辞	15
参考文献	15

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Experimental apparatus and method	2
2.1 General description about NSRR experiments	2
2.2 Experimental method	3
3. Experimental results	5
3.1 Measurements of axial power distribution in test fuel rods	5
3.2 Results of altered power profile tests	6
3.3 Post-irradiation examination	8
4. Discussion	10
4.1 Evaluation of axial power distribution in a test fuel rod	10
4.2 A study of fuel rod behavior related to axial power distribution	12
4.3 Evaluation of threshold energy for incipient fuel rod failure.	13
5. Conclusions	15
Acknowledgements	15
References	15

1. 序 言

原子炉の安全性を評価する上で、事故時における燃料の挙動を把握し、様々な条件下で燃料棒の破損の有無や損傷の程度を詳細に究明することは重要な課題である。ゆえに、冷却材喪失事故（LOCA）、出力-冷却不整合事故（PCM）、反応度事故（RIA）等における燃料棒の挙動が実験、解析の上から究明され、原子炉の安全性評価に役立っている。これらについての研究は、炉外および炉内の双方での実験が実施されているが、 UO_2 燃料の発熱条件等を考慮すると、炉内実験の方がより現実的であり、炉内実験の果たす役割は重要である。この炉内実験の一つに、Nuclear Safety Research Reactor（NSRR）実験がある。^{(1) (2)}

NSRR は原子炉の反応度事故時の安全性研究のために設置されたパルス炉である。NSRR 実験では、試験燃料棒をカプセルに封入し、これを実験孔内に挿入して、反応度事故を模擬したパルス出力を試験燃料棒に与え、その破損挙動についての究明を行っている。反応度事故時においては、多大のエネルギーが極めて短時間に UO_2 ペレット中に発生する。ゆえに、燃料棒の挙動は発生エネルギーの大きさ、すなわち UO_2 ペレットの発熱量に大きく依存する。このことから、反応度事故に関する実験結果の整理や、原子炉安全評価についての判定基準には UO_2 の単位重量当りの発熱量 ($cal/g \cdot UO_2$) 単位が用いられている。NSRR 実験においても、この発熱量により実験結果の整理を行っており、一本の試験燃料棒については軸方向および半径方向の平均発熱量をその燃料棒に投入された積と定義している。⁽³⁾ところが、炉心内において、軸方向の出力分布は制御棒位置の影響を受けて変化することが知られている。また、試験燃料棒の燃料スタック部両端において出力増加が生じることもよく知られている。これらの点から、試験燃料棒の軸方向出力分布は必ずしも一様ではない。事実、NSRR 実験においては、試験燃料棒の破損位置がほぼ特定の部分に集中しており、この出力分布の影響が燃料棒の損傷挙動にも現われているものと考えられている。さらに、約 $260 cal/g \cdot UO_2$ の発熱量実験において、破損した試験燃料棒の金相観察を行なった結果では、試験燃料棒の破損部の極く近傍においてジルカロイ被覆管の酸化量がかなり増加する等、損傷の程度が極めて顕著に局所的に現われることも分っている。これらの現象は、燃料棒の破損機構を考察する上で非常に大切である。つまり、燃料棒の酸化、変形、破損等、燃料棒の損傷の程度は、試験燃料棒の軸方向および半径方向の平均値をその実験の発熱量として整理されていた。しかし、一本の燃料棒の軸方向において、損傷の程度が異なり、出力分布と強い対応を示しているとするならば、出力分布を詳細に評価して、燃料棒の損傷の程度との関係を定量的に検討する必要がある。

このため、本実験では、試験燃料棒の表面の γ 線測定を行ない、軸方向の出力分布を評価した。さらに、評価した出力分布に対して、燃料棒の破損位置や損傷の程度との対応を検討すると共に、軸方向出力分布を変えた実験を行ない、出力分布が燃料挙動に及ぼす影響についての考察も行なった。

なお、半径方向における出力分布の影響については、すでに詳細な検討がなされている。⁽⁴⁾

2. 実験装置と実験方法

2.1 NSRR実験の概要

a. NSRR

NSRRは、TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) を改造した大型のパルス炉である。原子炉は Fig. 1 に示すようにスイミングプール型であり、炉心本体は原子炉プール下部に設置されている。NSRRの大きな特徴は、炉心中央を貫通する内径約20 cmの実験孔を有することであり、この実験孔内に実験用カプセルを挿入して試験燃料の照射が行なわれる。Fig. 2 に炉心の断面図を示す。炉心内には原子炉の制御のために制御棒8本(調整棒6本、安全棒2本)とパルス運転のためのトランジェント棒3本が組み込まれている。パルス出力の発生は、このトランジェント棒の急速引抜によって行われ、中性子エネルギースペクトルの硬化現象による大きな負の温度係数によって、安全にパルス出力を制御することが可能である。Table 1 に NSRRの主要特性を、また、Fig. 3 に最大許容反応度(4.7%)投入時におけるパルス出力の時間履歴を示す。

b. パルス運転

試験燃料に与えられる発熱量は、試験燃料の濃縮度、寸法、被覆管の材質、冷却材密度(温度、圧力)ならびに実験カプセルの特性等、実験体系が変わらなければ、原則的にはパルス時の積出力に比例する。また、NSRRでは投入反応度量が決めれば、炉のピーク出力および放出エネルギー量が一義的に定まるため、試験燃料の発熱量は投入反応度量を変えることにより所定の値に設定することが出来る。

投入反応度量はトランジェント棒の引抜き位置を変えることにより調節する。しかし、反応度の投入は原子炉が15 W臨界の状態から行なわれるので、トランジェント棒の引抜き位置が変化することに伴い、調整棒位置が変化する。Fig. 4 はカプセル実験におけるトランジェント棒の引抜き位置と投入反応度量の関係を示したものである。反応度はTAの引抜き位置を調整して変化させるが、約1.4ドル以上ではTBが、約3.1ドル以上ではTBとTCのトランジェント棒が完全に挿入された状態(unit 900)から引抜かれる。このようにして、反応度が投入されるが、既に述べたように、反応度量の相違により調整棒位置が変わるため、炉心軸方向における中性子束の空間分布が変化することになる。

c. 炉心軸方向の出力分布

上述した傾向については、NSRR建設時における、臨界および特性試験においても、すでに明らかにされている。Fig. 5は、炉心に燃料棒を装荷した各時点において、軸方向の出力分布をカプセルの装荷有無の両条件で測定した結果である。¹⁸本図に示されている様に、軸方向出力分布は、カプセル装荷時と無装荷時で最大ピーキングの位置に変化を生じている。即ち、カプセル無装荷時の最大ピーキングは炉心中央部に近い位置であるのに対し、装荷の場合には炉心下部に移動する。これは、カプセル無装荷の場合には、調整棒の引抜き距離が小さくほぼ炉心下端まで挿入されているのに対して、カプセル装荷の場合には、調整棒が炉心中央附近まで引抜かれているために、炉心下部に中性子束が歪んだためと考えられる。この中性子束の歪は、パルス運転時においても生ずるものと考えられ、こ

の影響がパルス運転時における試験燃料棒の挙動にも現われることが予想される。

d. 試験燃料

NSRR 実験では、燃料棒の仕様や冷却条件を変えた幅広いパラメータ実験を実施しているが、これらのパラメータ実験に対して、燃料棒破損挙動についての最も基本的なデータを得ることを目的として標準型燃料棒を定めている。標準型燃料棒は、現在 PWR (14 × 14 型) で使用している燃料棒仕様をもとに、NSRR 実験に適するよう寸法、構造等を定めたものである。標準型燃料棒の構造と仕様を各々 Fig. 6 と Table 2 に示す。本図表に示したように、ペレット寸法や被覆管外径、肉厚等は PWR 型に等しいが、燃料の有効長は 135 mm であり実炉に比べて短い寸法である。燃料ペレットとしては U^{235} 10% 濃縮燃料を使用している。なお、出力エッジ効果を減少させるため UO_2 スタック部両端のペレットを天然又は低濃縮のものと取り換えた燃料も実験によっては使用している。また燃料棒の内部は大気圧であるが、これは、大気圧カプセル実験において被覆管の内外圧差を無くし、燃料棒破損における基本的現象を解明しようとしたことによる。

e. 実験カプセル

Fig. 7 に、常温・大気圧条件下での実験に使用する標準実験カプセルの断面図を示す。本カプセルは内径 12 cm のステンレス鋼製耐圧容器であり、炉心に位置する容器の内厚は 7 mm である。

試験燃料棒はカプセルのフランジ部より吊り下げた支持具に固定している。試験燃料棒やカプセルには、実験目的に応じて種々の計測器を取付け、照射実験中における燃料挙動を調べている。なお、カプセル内には純水を注入しているが、この純水は試験燃料棒の冷却水および中性子の減速材としての役割を持っている。

f. 実験の手順

一回の実験は、試験燃料棒のカプセルへの取付けから照射実験後の放射能冷却期間を含めて照射後燃料検査が可能になるまで、約 1 ヶ月を要する。これらの手順については、まず、実験の目的に応じた試験燃料棒の選定から始まる。選定された試験燃料棒は、熱電対等の計測器を取付けた後、カプセル内に装荷される。カプセルは、計測器の設置、計装線の引出し等の処置を行った後、注水され、測洩試験後、NSRR 実験孔内に挿入される。照射実験は NSRR を 15 W 臨界の定常状態にしてから行なう。照射後、実験孔よりカプセルを取り出して貯留用ビッドに一時的に保管し、カプセルの放射線強度が減衰するのを待ってから、カプセルを解体して試験燃料棒を取り出す。この後、試験燃料棒表面の放射線強度が低下してから、試験燃料棒の外観検査や写真撮影および寸法検査等を行う。さらに、必要な場合には、X 線写真の撮影、プロファイルメータによる燃料棒直径の測定、金相検査等を実施する。また、照射実験中に測定した被覆管表面温度、燃料中心温度、燃料棒内圧、カプセル内圧等の温度記録は、一旦レコーダに納めた後、任意に取り出して測定結果の整理を行っている。

2.2 実験方法

a. 試験の概要

NSRR 実験においては、試験燃料棒の軸方向における出力分布は必ずしも一様でなく、実験孔内の軸方向の中性子束分布の影響を受けて変化すると共に、燃料スタック部の両端では中性子束分布が変化する(エッジ効果)。このため、この部分で局所的に出力が増大する現象が認められている。従って、試験燃料棒軸方向の出力分布を正確に見積り、上述した影響が UO_2 燃料の発熱に寄与する量

を評価して、燃料棒の破損挙動に及ぼす影響についても検討する必要がある。そこで、以下の項目について、実験および照射後試験を行い、試験燃料棒の軸方向出力分布が、反応度事故を想定した NSRR 実験の燃料挙動に及ぼす影響を検討した。

実験

- 燃料スタック部両端に5%濃縮 UO_2 ペレットを入れた実験
- 試験燃料棒の装荷位置を炉心軸方向に変えた実験

照射後燃料試験 (PIE)

- 軸方向出力分布の測定
- 被覆管の酸化膜厚の測定
- 被覆管の半径方向変形量の測定
- 試験燃料棒のX線写真撮影

なお、上述した実験および PIE を行った試験燃料棒の照射条件を Table 3 に示す。

b. 試験の方法

本試験では、試験燃料棒の軸方向における出力分布を正しく評価することが重要な課題の一つである。そこで、照射後における燃料棒表面の γ 線強度が照射時の燃料の出力分布に対応していると考えられることから、Table 3 に示した各燃料棒について、燃料棒表面の軸方向 γ 線強度の測定を行い、出力分布を評価した。 γ 線強度の測定器としては $NaI(Tl)$ シンチレーションカウンターを用い、燃料棒軸方向に対して2~5 mm 間隔で γ 線強度を計測した。計測系の概要を Fig. 8 に示す。コリメータは2 mm 巾の矩形スリットを鉛塊にあげたものを使用した。また測定した γ 線のエネルギー範囲は0.3 MeV~0.87 MeV である。計測機器の仕様及び計測における設定条件を Table 4 に示す。

また、試験燃料棒の軸方向出力分布は炉心の軸方向中性子束分布と強い相関がある。このため、Co ワイヤーを実験カプセル内に取付け、放射化した Co ワイヤーの γ 線強度を測定することにより、炉心の相対的な軸方向中性子束分布を求めた。Co ワイヤーは試験燃料棒の支持具であるアルミニウム棒に取付けた。実験後、カプセルの解体時に試験燃料棒と共に Co ワイヤーを取り出し、約1 cm 間隔に切断して、 Co^{60} における1.17 MeV、1.33 MeVの γ 線エネルギーの強度測定を行った。測定値については、切断した Co ワイヤーの重量補正を行ない、中性子束の相対分布を求めた。

なお、上述したような試験燃料棒の出力分布を求める試験検査の他に、試験燃料棒の出力分布と、損傷の程度との関係を求めるため、X線写真撮影および顕微鏡による金相観察も実施した。金相観察用の試料は、試験燃料棒を適当な部分で切断し、樹脂に埋め込んだ後研磨して作成した。

3. 実験結果

3.1 試験燃料棒の軸方向出力分布

前章で示した様に、Test No 200-4C、-5Dの試験燃料棒について、照射実験後1~2ヶ月を経てから、燃料棒表面の γ 線強度を軸方向に沿って測定した。測定値は、10%濃縮 UO_2 燃料スタック部両端で出力が増加する部分を除いた値の平均値を基準に規格化した。この平均値は、燃料スタック部の中心、すなわち、炉心軸方向の中心位置の値にほぼ一致している。結果をFigs. 9, 10に示す。なお、双方の試験燃料棒共、燃料スタック部両端には天然 UO_2 ペレットが各々1ヶ入れられているが、この部分の出力分布は考慮していない。以下に、測定結果について述べる。

Fig. 9はTest No 200-4C(発熱量 $227 \text{ cal/g} \cdot UO_2$)の試験燃料棒についての軸方向 γ 線強度分布の測定結果である。本試験では、10%濃縮 UO_2 ペレットのスタック部において被覆管が酸化していたが、破損は生じていない。またFig. 10はTest No 200-5D(発熱量 $258 \text{ cal/g} \cdot UO_2$)の試験燃料棒についての軸方向 γ 線強度分布の測定結果である。本試験では、燃料棒の発熱部下方において被覆管に円周方向のクラックが生じていた。双方の試験燃料棒の出力分布(Figs. 9, 10)についてみると、10%濃縮 UO_2 ペレットのスタック部両端において、出力が急激に増加していることが顕著に認められる。さらに、この部分を除いて、全体的な出力分布についてみると、燃料棒の下部になる程出力が増加する傾向も認められる。また、詳細に測定結果を見ると、約10mm間隔で出力が弱くなる部分が現われることが分る。この部分は、 UO_2 ペレット間の境界部であることがX線による撮影結果から分っており、 UO_2 ペレットのチャンファ部の影響か又は、 UO_2 ペレット間に隙間が生じていることによるものと考えられる。また、燃料棒の下部において、極度に出力が低下している部分が認められる。この部分においても、X線写真から、 UO_2 ペレット間の大きな隙間が生じていることが分った。

以上の γ 線強度測定結果より、出力分布の回帰曲線を求めた。曲線の当てはめは、燃料棒の両端と、中央部周辺の3領域に分けて行ない、両端部ではべき乗関数の、又中央部周辺では一次関数の回帰を求めた。2つの測定結果より求めた回帰曲線はほぼ等しく、以下にTest No 200-5Dについて、その結果を示す。

Test No 200-5Dの出力分布の回帰曲線

$$a) \quad y = 1.0 - 4.9 \times 10^{-4} x \quad (-4.75 \text{ mm} < x < 4.75 \text{ mm}) \quad (1)$$

$$b) \quad y = 0.0098 \times (x - 4.75)^{1.12} + 0.977 \quad (4.75 \text{ mm} \leq x \leq 5.75 \text{ mm}) \quad (2)$$

$$c) \quad y = 0.0045 \times (1x - 4.75)^{1.57} + 1.024 \quad (-5.75 \text{ mm} \leq x \leq -4.75 \text{ mm}) \quad (3)$$

ここで

y : 燃料スタック部中心で規格化した出力分布

x : 燃料スタック部中心からの距離 (mm)

以上述べたように、燃料棒の軸方向出力分布はa), b), c)の領域に分けることが出来る。ここで、b), c)は、燃料スタック部のエッチ効果であり、試験燃料棒が持つ特性と見なすことが出来る。このため調整棒位置が大きく変わったり又燃料棒の仕様に変化がない限りこのエッチ効果の程度はあま

り大巾には変わらないものといえる。他方、a)は、制御棒位置が炉心の中性子束分布に及ぼす影響の結果生じるものであり、調整棒位置によって影響の程度が変化すると考えられる。

そこで、調整棒位置つまり投入反応度が異なる3回の実験に対して、試験燃料棒の軸方向出力分布を測定し、直線近似した出力分布の傾きと調整棒位置との関係を検討した。Fig. 11は、各試験燃料棒について、軸方向の出力分布（燃料スタックの両端を除く）を直線近似し、出力分布と調整棒位置との関係について示したものである。本図では、調整棒が炉心の下方へ深く挿入されている程、燃料棒の軸方向における出力分布の傾きが大きくなる傾向がある。これは Fig. 5 に示した結果とも一致する。つまり NSRR 実験では、投入反応度が小さい程、調整棒は深い位置におかれるため、試験燃料棒に与えられる免熱量が小さい程、調整棒位置の影響を受けて軸方向の出力ピーキングが下方へ移動する傾向があることを示している。さらに、軸方向の出力分布は、その平均値を表わす点が炉心の軸方向中央部と一致しておらず、反応度が小さい程下方へズレる傾向も認められる。しかし、標準燃料棒の破損しきい値に近い免熱量（約 $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ）では、このズレの傾向は少くなる。

3.2 試験燃料棒の軸方向出力分布を変化させた実験

3.1 で示した実験結果より、調整棒位置の影響のため、試験燃料棒の軸方向において出力分布が変化し、燃料スタック部の下方出力が増しており、さらに、燃料スタック部両端において、エッジ効果により、出力の急激な増加が認められることが判明した。そこで、これらの効果が、試験燃料棒の挙動（破損の位置や、損傷を受ける程度）にどのように影響を及ぼしているかについて検討するため、試験燃料棒の軸方向出力分布を変化させた照射実験を行なった。試験燃料棒の軸方向出力分布は、燃料スタック部の両端に5%濃縮の UO_2 ペレットを各々1ケづつ入れることと、試験燃料棒を実験カプセルに固定する際の位置をずらすことにより変化させた。実験後の燃料棒の外観写真を Photo. 1 に示し、実験結果を以下に述べる。

a. Test No 207-1

Test No 207-1 は、燃料スタック部のエッジ効果をなくすため、燃料スタック部両端に5%濃縮の UO_2 ペレットを各々1ケづつ入れて照射し、軸方向出力分布を測定した実験である。試験燃料棒の照射は、30Wで10分間の定常出力により行ない、照射後直ちに、試験燃料棒の軸方向出力分布を測定すると共に、実験カプセル内に取り付けた金箔の放射線強度の測定を行なって、実験カプセル内の軸方向における熱中性子束分布を評価した。Fig. 12 は、燃料棒の軸方向出力分布と、実験カプセル内の熱中性子束分布の測定結果を示したものである。本図を見ると、5%濃縮ペレットを燃料スタック部両端に入れた場合でも、燃料スタック部のエッジ効果が認められ、5%濃縮ペレットより一つ内側の UO_2 ペレット部で出力ピークが認められる。しかし、本図で認められるピーク値は燃料スタック部中央の値に対して約1.08であり、5%濃縮ではなく天然 UO_2 ペレットを挿入している燃料棒と比較して、出力エッジ効果は少ない。

b. Test No 207-2, -3

次に、Test No 207-2 では、燃料スタック部両端に5%濃縮 UO_2 ペレットを入れた試験燃料棒を用いて、免熱量 $264 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ のパルス照射実験を行った。本実験では、試験燃料棒の破損は認められなかった。Fig. 13 は、試験燃料棒の軸方向出力分布を測定した結果である。本図からは、上述した定常運転で照射した燃料棒と同様に、エッジ効果による出力ピーキングは抑えられて

いることが分る。燃料棒下部における出力ピーキングは、中央部に対して約 1.05 である。一般に、標準燃料棒（スタック部両端の UO_2 ペレットの濃縮度が 10% 又は天然 UO_2 ）では、上述した発熱量の実験において、燃料スタック部下部で被覆管にクラックを生じて破損することが認められている。そこで、Test No 207-2 と同一構成の試験燃料棒に、投入発熱量を $282 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ とした実験（Test No 207-3）を実施した。本実験では、Photo. 1 に示すように、燃料スタック部の下方の被覆管にクラックが生じて破損が確認された。本試験燃料の破損部を詳しく観察した結果、被覆管の破損は 10% 濃縮 UO_2 ペレットスタック部の下端より 1 ケ目と 2 ケ目のペレット-ペレット境界部で生じており、破損位置や破損の様子は標準燃料実験と変わりなかった。

c. Test No 207-4, -5

Test No 207-4, -5 は、炉心軸方向において下方にずれている熱中性子束分布のピーク位置（金箔を用いて測定した値）が、試験燃料棒の燃料スタック部のほぼ中央に相当するよう、試験燃料棒の固定位置を標準燃料実験より 4 cm 下方にずらして照射実験を行ったものである。これは、試験燃料棒の軸方向出力分布において、炉心の熱中性子束分布と燃料スタック部のエッジ効果による双方の影響を分離して、主に前者の影響をより詳しく検討するために実施したものである。なお、Test No 207-4, -5 も全て 10% 濃縮 UO_2 ペレットを用いている。

Test No 207-5 においては、発熱量 $210 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射実験を行ない、試験燃料棒の軸方向出力分布を測定した。Fig. 14 に、試験燃料棒の軸方向出力分布の測定結果と炉心の軸方向出力分布の測定結果を示す。本図においては、炉心の軸方向出力分布は、炉心中央よりわずかに下方にずれていることが分るが、燃料スタックの出力分布についてみると、炉心出力分布とのある程度の対応が認められる。また、燃料スタック部下方では、炉心出力が低くなるため、エッジ効果が認められていない。

Test No 207-4 においては、発熱量 $274 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の照射実験を行った。実験の結果、試験燃料棒は燃料スタック部の下端より約 8 cm 上方、すなわち、燃料スタック部の中央近傍にて破損した。破損の状態は、標準燃料実験のそれと同様であり、単に破損位置のみが異っていた。Fig. 15 に、本実験における試験燃料棒の破損位置と、炉心の軸方向出力分布を示す。本実験では燃料棒が分断したため燃料棒の γ 線強度を測定することが出来ず、このため、Fig. 15 はコバルトワイヤを試験燃料棒の脇に取り付け、実験終了後 γ 線強度を 1 cm おきに測定して得たものである。標準燃料実験では、一般に燃料スタック部下端より約 1 cm 上方、つまり下端の UO_2 ペレットとその上の UO_2 ペレットの境界部で破損が生じているのに対し、本実験では出力の高い上方部で破損が生じた。このことは、燃料棒の破損位置が燃料棒の出力分布に強く支配されていることを示している。

なお、本実験シリーズ (Test No 207-2~5) では、被覆管表面に熱電対を取り付けて温度履歴の測定を実施した。Table 5 に、各実験における温度測定位置および測定した最高温度を示す。既に述べたように、Test No 207-2, -3 では、試験燃料棒は標準位置に取り付け、Test No 207-4, -5 では、4 cm 下方へずらして取り付けである。まず、Test No 207-2 の温度測定結果についてみると、最高温度は燃料棒の下方の方がより高い値を示し、各々下方より、 1650°C (#1)、 1600°C (#2)、 1560°C (#3) であった。又、Test No 207-3 では、5% 濃縮の UO_2 ペレットを入れたエッジ部においては、他の部分に比較して温度の上昇が押えられていることが分る。他方、Test No 207-5 についてみると、両端エッジ部を除いて、試験燃料棒の中心部近傍では、 1270°C (#2)、 1290°C (#3)、 1280°C (#4) とほぼ均一な温度分布をしているこ

とが分る。

3.3 照射後燃料検査

NSRR 実験においては、試験燃料棒の軸方向において出力分布に相違が生じていることが分った。そこで、本節では、この出力分布の影響が燃料棒の破損挙動にどのように現われているかについて、照射後燃料検査の結果をまとめた。

a. 破損した燃料棒の外観検査

Photo. 2 は発熱量 $258 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射実験を行った試験燃料棒 (Test No 200-5D) について照射後外観の写真撮影の結果を示したものである。燃料棒は燃料スタック部の全面において酸化している。また、燃料棒の下部において、被覆管表面が被打った様に変形しており、この部分に円周方向に生じたクラックが認められるのに対して、上部では顕著な変形は認められていない。燃料棒が破損した部分は、10%濃縮 UO_2 ペレットが挿入されている下端から約 10 mm 上方であり、 UO_2 ペレット間の境界部である。この破損部を含めて、ここより上方へ約 20 mm ぐらいまでの間により激しい被覆管表面の変形が認められ、また細かなクラックもみられる。また、本写真では少し分りにくいが、破損部より約 5 mm 下方にもクラックが伝播している。

Fig. 16 は上述した燃料棒の X 線写真と出力分布の測定結果を並べて示し、かつ、X 線写真を分りやすくスケッチしたものである。本 X 線写真についてみると、燃料棒の下方部において、被覆管と UO_2 ペレットとの境界が曖昧となり区別しにくい部分が認められる。この部分は、 UO_2 とジルカロイの間で化学反応が生じたために現われたものである。また、被覆管にクラックを生じた部分は、 UO_2 ペレット間の境界部であることが分る。この部分では UO_2 ペレット間に大きな隙間が生じている。この隙間のために、燃料棒からの線強度がこの部分で減少していることが推察出来る。また、クラック部近傍の燃料棒外周、つまり被覆管部で像が不鮮明な部分が認められるが、この部分は、被覆管が溶融して、ほとんど酸化膜のみが残っているにすぎない領域である。この領域はクラック部の近傍で顕著に認められる。上述した破損の様子は、本実験のみに限らず、発熱量が破損しきい値 ($260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$) に近い実験では、全ての燃料棒に認められている。

以上の結果についてまとめると、試験燃料棒の損傷の程度はその軸方向下部において著しく、出力分布とはほぼ対応していると考えることが出来る。そして、被覆管の破損は、下部に限られた部分、つまり、10%濃縮燃料スタック部の下部よりペレット 1 個目と 2 個目の間に生じ、この近傍で被覆管の損傷の程度が著しいことが分る。

b. 金相観察

試験燃料棒の軸方向において、損傷の程度と位置の関係について、さらに詳細に検討するため、金相検査を実施した。

Photo. 3 は発熱量 $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で照射実験を行なった燃料棒の横断面のマクロ写真を示したものである。燃料棒の中および上方部 (c, d) では、 UO_2 ペレットにクラックが入ってはいないものの、 UO_2 ペレットと被覆管との間のギャップが認められており、 UO_2 -ジルカロイ反応が生じてはいない。また、被覆管も元の形状を保っていることが分る。これに対して、燃料棒の下方部 (a, b) では、 UO_2 ペレットの外周部に黒くなった部分があり、この部分では UO_2 ペレットが粉状になっていることから、温度上昇が、上方部の UO_2 ペレットよりも高かったことが分る。さら

に、 UO_2 、ペレットと被覆管とのギャップ部には UO_2 -ジルカロイ反応が生じており、このため被覆管には、所々、部分的に溶融した痕跡が認められる。また、燃料棒の中および上方部では被覆管肉厚の顕著な変化は認められないのに対して、下方部では、明らかに被覆管の肉厚が認められる。

このように、燃料棒の軸方向において、被覆管および UO_2 、ペレットの損傷の程度が明らかに異なることが判明した。そこで、燃料棒の損傷の程度を定量的に推定するために、損傷の程度を最も良く代表するものとして、被覆管表面の酸化膜厚さを測定した。測定は、酸化膜を、光学顕微鏡のスクリーンに投影し、その像をノギスで測定する方法を用いた。酸化膜の厚さは1つのサンプルにおいても円周方向で異なるため、1つのサンプルにつき、36点の測定を行ない、その値を平均した。Fig. 17は、燃料棒の軸方向について数個の金相サンプルを作製し、酸化膜厚さを測定した結果である。本図においても、燃料棒の下方部で酸化膜が厚く、燃料棒の軸方向に温度分布が出来ていることが分る。さらに、燃料スタック部の下端近傍で、酸化膜厚さが急激に増加しており、エッジ効果による出力ピーキングの影響が被覆管温度に顕著に現われていることが分る。

c. 燃料棒半径方向の変形量測定

照射後燃料棒の直径の変化も、燃料棒の損傷挙動の一つとして得られる有用なデータである。そこで、試験燃料棒の軸方向出力分布を変化させた実験の中から、2本の試験燃料棒 (Test No 207-2, -5) について、プロファイルメータにより、燃料棒半径方向の変形量を測定した。測定は、 90° 方向に測定位置を変化させて、2方向について行った。プロファイルメータによる測定結果を、燃料棒の出力分布の測定値と共に、Figs. 18, 19 に示す。Fig. 18は Test No 207-2 (発熱量 $264 \text{ cal/g} \cdot UO_2$) の燃料棒について、半径方向の変形量測定結果である。本燃料棒では、炉心出力分布と対応して、変形量は軸方向においてその下方部の方がより大きい傾向がある。しかし、変形量は燃料棒の軸方向に一様に変化しているのではなく、極大と極小の点が繰り返して現われている。これは、被覆管内における UO_2 、ペレットの位置が必ずしも一様でなく、偏心や傾きの影響が現われているものと考えられる。なお、本燃料棒には、燃料スタック部両端に5本濃縮 UO_2 、ペレットを挿入している。このため、出力分布に及ぼすエッジ効果はかなりおさえられているが、燃料棒軸方向の出力分布を測った結果によると、10本濃縮 UO_2 、ペレットのスタック部両端で出力がやや高くなっている傾向が認められる。燃料棒の半径方向における変形の要因については、詳細な検討が必要と思われるが、発熱量投入時における UO_2 、ペレットの熱膨張はその一因であると考えることが出来る。この場合、 UO_2 、ペレットの熱膨張量は、発熱量と対応していると考えられるため、燃料棒の半径方向の変形量は、軸方向出力分布とある程度の関係を持つはずである。このような観点から、Fig. 18を見ると、多少ではあるが10本濃縮 UO_2 、ペレット・スタックのエッジ部での変形も増加しており、かつ、上述した様に、出力分布とある程度の対応も認められる。

又、Fig. 19は Test No 207-5 (発熱量 $210 \text{ cal/g} \cdot UO_2$) の燃料棒について、半径方向の変形量を測定した結果である。本実験では、試験燃料棒の取付け位置を標準実験より4 cm 下方へずらしてあり、このため、出力分布に大きな相違が出来ている。本図においても、燃料棒の変形量と出力分布がある程度の相関を持っていることが分る。

以上、2本の燃料棒 (Test No 207-2, -5) について、半径方向の変形量を測定した結果では、一本の燃料棒においても、軸方向に出力分布が生じている場合は、その出力分布に対応した変形がある程度認められる。

4. 考 察

4.1 試験燃料棒の軸方向出力分布の評価

既に議論し、Figs. 9, 10 で示したように、NSRR 実験においては試験燃料棒の軸方向で出力分布が生じている。この出力分布については、NSRR が臨界に達し、特性試験が行なわれた時点より認められており⁽¹⁾、実験を実施する過程において、あるものはその都度考慮してきている。例えば、投入した反応度と試験燃料棒の発熱量との関係を求める際には、軸方向の出力分布とエッジ部のピーキングについて多少の検討を行っている⁽³⁾。また、浸水燃料実験においても、エッジ部のピーキングが破損挙動に及ぼす影響について十分な検討を行った⁽⁴⁾。

しかし、標準燃料実験においては、これらの燃料挙動に及ぼす影響は少ないものと考え、十分に考慮していない。つまり、標準燃料実験では、試験燃料棒の軸方向及び半径方向の平均発熱量を持ってその実験における発熱量を定義し、一本の燃料棒に現われた損傷現象を総てこの発熱量に基づいて整理してきた。ところが、既に述べたように、試験燃料棒の軸方向において発熱分布が顕著に存在し、このために、場所によっては、被覆管表面温度や被覆管の損傷挙動に相違が生じていることが認められた。特に、燃料棒の破損しきい値について検討する場合、破損しきい値である $260 \text{ cal/g}\cdot\text{UO}_2$ の発熱量実験については、試験燃料棒の破損位置について検討してみる必要がある。この場合、破損位置は常に一定であり、 UO_2 ペレットスタック部の下端より約 1 cm 、最下端のペレットと次のペレットとの境界部に位置している。被覆管の損傷現象について検討する際、必ずしも総てを UO_2 ペレットの発熱量とのみ関係付けて考えることは出来ないが、発熱量が重要なパラメータであることは明らかであるので、局所的にはあっても、発熱量が異なる部分が存在する場合、この発熱分布の影響について十分に考慮する必要があると思われる。

この軸方向の発熱分布については、既に述べたように

(I) 制御棒位置に拠る中性子束分布の影響

(II) 燃料スタック部両端のエッジ効果の影響

の2つに分けて考えることが出来る。ここで、(I)はNSRRに備わっている特性であり、その効果を取り除くことは容易ではない。これに対し、(II)は試験燃料棒が持つ特性であり、燃料スタック部の両端に低濃縮 UO_2 ペレットを入れる等により、その効果を低減することが出来る。

そこで、まず始めに、(I)の効果により燃料棒の軸方向でどの程度の発熱量の相違が生じているのか、Figs. 9, 10, 11 の結果に基づいて評価を試みた。Fig. 20 に結果を示す。本図では、Figs. 9, 10, 11 に示した試験燃料棒の発熱分布に対して、10%濃縮 UO_2 ペレットのスタック部両端より 1 cm 内側での発熱量を求め、軸方向における平均値との相違を評価した。図に示した実線は、5つのデータに対して、その最適値を直線で近似したものである。この近似が直線でよいのか、あるいは曲線なのかという問題はあるが、本図からも分るように、平均の発熱量に対する相違が±数 $\text{cal/g}\cdot\text{UO}_2$ の範囲であり、上述した(I)の効果による発熱分布の相違の概要については知る事が出来る。なお、本図には、燃料スタック部両端に天然 UO_2 ペレットが入っている燃料(発熱量 $227, 258 \text{ cal/g}\cdot\text{UO}_2$)と、総てが10%濃縮 UO_2 ペレットである燃料(発熱量 $112, 221, 260$

cal/g·UO₂)を区別せずに示してあるが、双方に大きな相違は認められない。また、NSRR実験では、燃料スタック部中心より上下3.3.5 mmの被覆管表面に熱電対を取付けて温度測定を行なっている。このため、この部分と燃料スタック部との発熱量の相違は Fig. 20 で評価した値よりさらに少なくなる。ゆえに、温度測定に関してみると、上述した標準位置に熱電対が取付けられている限り、軸方向出力分布の影響は少ないものと考えられる。

次に(4)の影響について検討する。前章の Figs. 9, 10 で示したように、試験燃料棒の燃料スタック部両端近傍では、その端より約10 mm 内側から出力が高くなり始め、スタック部両端で最高に達している。このエッジ効果によるピーキングは試験燃料棒の下部が大きい。又、この傾向は発熱量が変わってもあまり変化せず、スタック部下端の出力ピーキングは、スタック部中心に対して約1.2倍である。なお、スタック部中心の出力はエッジ効果を除いて、スタック部出力の平均値とほぼ等しいことが分っている。⁽¹⁾このようなエッジ効果による発熱分布については、軸方向における熱の移動も在るため、必ずしも直接的に、上述した分布と燃料挙動とを結びつけて考えることは出来ないが、燃料スタック部下端近傍における発熱量の増加については十分に考慮する必要がある。

そこで、燃料スタック部下端近傍における発熱分布について詳しく検討する。Photo. 2および Figs. 16, 17 に示した試験燃料棒の破損の状況を見ると、スタック部下端より10 mm 上方の近傍約±5 mm において損傷の程度が著しいことが分る。そこで、この近傍における部分的な発熱量を評価してみる。燃料スタック部における軸方向の発熱分布については Figs. 9, 10 に示したが、ここでは、破損しきい値近傍の発熱量で実験を行った Test No 200-5D の出力分布 (Fig. 10) を用いて、5 mm 間隔で局所的発熱量を求めた。試験燃料棒のγ線強度より評価した出力分布によると、燃料スタック部下端より約10 mm 内側から下端にかけて出力が著しく上昇する。しかし、燃料棒の損傷の程度は必ずしも厳密には出力分布と対応しておらず、ある程度出力分布が緩和されて損傷の程度に反映している傾向がある。このため、出力分布を約5 mm ごとの平均値として評価を試みた。結果を Fig. 21 に示す。本図に示されているように、最も損傷の程度が著しいと考えられる燃料スタック部下端より10 mm 内側の近傍±5 mm の範囲では、燃料スタック部中央に対して2.2, 5.2%の出力増加が在る。この平均は約4%であり、ゆえに、一本の試験燃料棒について、最大4%の増加に相当する発熱分布の寄与があると考えられる。また、上述した結果は、燃料スタック部両端に天然UO₂ペレットが装荷されている場合であるが、燃料スタック部総てが10%濃縮UO₂ペレットの場合には、出力エッジ効果が更に著しくなる傾向がある。このため、この場合についても同様な評価を行い、Fig. 21 に点線で示した。燃料スタック部総てが10%濃縮UO₂ペレットの場合、燃料スタック部下端より10 mm 内側の近傍±5 mm の範囲で、中心部に対して、8.0, 4.0%の出力増加があり平均6%の増加とみなすことが出来る。なお、燃料スタック部下端より5 mm 内側までの領域では、発熱ピーキングは最大値を示すが、この部分で発生した熱の逃げがあるため、このピーキングが直接に燃料損傷に寄与することはないと考え、この部分の発熱を無視した。事実、照射後の燃料検査では、この領域の損傷の程度は燃料スタック部下端より約10 mm 内側ほど著しくないことが分っている。

すでに述べたが、Fig. 21 に評価したエッジ効果は、試験燃料棒が持つ特性であり、炉心出力が変化しても、その出力分布が大きく変わらなければ、燃料スタック部中心に対するスタック部両端近傍の出力ピーキングの比はほぼ同じであると考えられる。また、Fig. 20 で示したように、軸方向出力分布の影響も少ないことから、NSRR標準実験では、ほぼ総ての発熱量についてこのエッジ効

果により、燃料スタック部下方で約 1.04 (総てが 10%濃縮UO₂ペレットの場合:約 1.06) の出力ピーキングが、燃料棒の損傷挙動に影響を与えていると考えられる。

4.2 軸方向出力分布を考慮した燃料挙動の検討

NSRR 実験では、UO₂ペレットの発熱量と燃料棒の損傷挙動との間に明確な対応が付けられており、発熱量は燃料挙動に影響を及ぼす最も基本的な因子であることは言うまでもない。ところが、今までは、平均の発熱量により損傷挙動を評価してきたため、例えば破損挙動等、一般には、平均発熱量と最も損傷の著しい部分との関係、いわゆる前節で評価したピーキングを持つ部分との関係について求めてきたことになる。そこで、本節では、被覆管表面温度と燃料棒半径方向の変形量を例にとり、1本の試験燃料棒において部分的発熱量の相違が上述した現象にどのように寄与しているのかについて検討を行う。また、被覆管の破損に関しても、部分的発熱のピーキングが寄与していることが十分に考えられるので、この点についても定性的な考察を行う。

前章では、試験燃料棒の取付け位置を標準よりも 4 cm 下方にずらして照射した実験 (Test No 207-4 and 5) について述べた。これらの実験では、試験燃料棒が原子炉において中性子束分布の傾きが大きな領域に位置していたため、軸方向における発熱分布は大きな巾を持っている。そこで、Test No 207-4、-5 および本実験シリーズである Test No 207-2、-3 について、熱電対の取付け部の発熱量を評価し、この発熱量と被覆管の最高温度との関係を求めた。部分的な発熱量は Figs. 13, 14 に基づいて評価した。求めた結果を Table 6 と Fig. 22 に示す。Fig. 22 には標準燃料実験より得られている被覆管最高温度と発熱量との関係を突線にて併記した。Test No 207 シリーズにて得られた被覆管の最高温度であっても、部分的な発熱量を評価することにより、今までに実施された標準燃料実験で得られている被覆管最高温度 (中心より ± 3.5 mm の位置) と平均発熱量との関係とはほぼ同等に評価出来ることが分る。このことは、本実験で生じた発熱分布の範囲では、UO₂ペレットが発熱して被覆管温度が最高に達する約 1~2 秒の間では、UO₂ペレット内の熱の移動が少ないことを示している。また、このため、発熱分布を十分に評価する必要があることも示している。

次に、発熱量と被覆管の半径方向の変形量との関係について述べる。被覆管半径方向の変形は、UO₂ペレットが熱膨張して被覆管と接触することにより生ずるものであると考えられている。このため、この変形量は UO₂ペレット中へ投入される発熱量と強い相関が存することが予想される。Fig. 23 は Test No 207-5 について、被覆管半径方向の平均の変形量 (90°方向における 2 測定値の平均) を、発熱分布と比較して示した結果である。なお、本図には、UO₂ペレットの熱膨張量に基づいて算出した被覆管半径方向の変形量も示してある。本図についてみると、ある程度は、発熱分布に比例した被覆管の半径方向の変形が認められるが、顕著ではない。本図では、UO₂ペレットの発熱量の相違よりも、UO₂ペレットの偏心や被覆管内壁に対して傾いて位置していることにより、部分的に変形量の極大、極小点が出来ている点が顕著に認められる。つまり、一本の燃料棒における変形分布を見る限りでは、部分的発熱量と変形量との関係は明確ではない。

しかし、被覆管に破損が生じる局所的な発熱量 270 cal/g・UO₂近傍については、被覆管の変形に関して注目しておく必要がある。何故なら、NSRR 実験では UO₂ペレットの半径方向においても、平均値に対して最大 1.23 のピーキングを持つ発熱分布があり、半径方向の平均値により発熱

量を定義しており、このため、 $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量に近づくと、 UO_2 ペレットには部分的に溶融する領域が存在するようになると考えられるからである。つまり、溶融までに $300 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ のエンタルピーが必要な場合、 $244 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 以上の発熱量より部分的な溶融が生じる。但し、この場合の発熱量は、炉心出力の即発エネルギーによるものと考えべきである。NSRR 実験では即発とランアウト出力を合計した発熱量により、燃料挙動を整理しているため、上記した発熱量にランアウト出力を加えると、約 $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ となる。つまり、この $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量においては、 UO_2 ペレットが部分的に溶融し、このために被覆管の変形量が増加する可能性がある。

そこで、このような観点から、被覆管軸方向に沿った半径方向変形量の分布を見ると、一般に破損しきい値近傍の発熱量で照射実験を行なった場合、試験燃料棒の下部で大きな変形が生じている傾向が多い。また、10%濃縮 UO_2 燃料の下から1ケ目と2ケ目のペレット間に比較的大きな隙間が認められることが多い。これは、この部分において UO_2 ペレットの膨張量が大きかったことによるものと考えることが出来る。このように、 UO_2 ペレットの膨張量が大きい部分では、ペレット-被覆管間の機械的相互作用 (PCMI) を生じやすい。この PCMI は被覆管に靱性変形を起こさせる原因にもなる。靱性変形により肉厚が減少した被覆管は、その部分で熱容量が減少し、より高い温度にまで上昇し易い。

このように試験燃料棒の損傷挙動を考えると、約 $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量を投入して破損した燃料棒では、その破損部近傍の発熱量 $270 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ が、試験燃料棒全体の平均発熱量よりも、破損挙動を検討する際に意味を持つ値となる。

4.3 試験燃料棒の破損挙動の検討

前節までに述べた様に、NSRR 実験では試験燃料棒の軸方向に出力分布が生じている。この出力分布が大きい場合には、被覆管温度や被覆管径方向の変形にもその影響が現われるため、部分的な発熱量により損傷現象を評価した方が良い場合もある。しかし、一般には、破損しきい発熱量以下では、 UO_2 燃料スタック部の中心近傍 (中心より約 $\pm 4.5 \text{ mm}$ 以内) では出力分布も顕著に変化してはならず、又、照射実験後の燃料棒をみても、外観上の損傷が特に際立って変化している部分は認められない。このため、燃料スタック部平均の発熱量をもってその燃料棒全体の損傷現象を評価しても矛盾はなかった。ところが、破損しきい値近傍の発熱量実験において、既に述べてきた様な出力分布に対応した損傷現象が著しくなることが判明した。つまり、現在までに実施した NSRR 標準実験によると、破損しきい値の発熱量を投入した場合、ほとんど全ての試験燃料棒は燃料スタック部の下部において損傷の程度が著しく、被覆管のクラックはこの部分で生じている。

そこで、現在までに実施した NSRR 標準実験について、試験燃料棒の破損位置を Table 7 に示す。本表からは、被覆管の破損は常に燃料棒の下部に存在していることが分る。また、詳細に燃料棒を観察した結果によると、本表に示した燃料棒の中1本を除いて、その破損位置は、10%濃縮燃料スタック部の最下端より1ケ目と2ケ目の間であった。このことは、この近傍で被覆管の損傷の程度が最も激しかったことを示している。すなわち、現在までに調べられている破損挙動に基づいて判断すると、この近傍で被覆管温度がより高くまで上昇し、冷却水と反応するとともに、 UO_2 ペレットとも化学反応を生じて、被覆管の内・外両面より酸化が進行したものと考えられる。また、この破損

部では被覆管の肉厚が減少していることも分っている。これらの現象は被覆管の上昇温度と強い関係があることが分っており、ゆえに、被覆管の破損部近傍にて温度が最高に上昇したものと考えられる。さらに、発熱量が破損しきい値よりも僅か高くなると、この破損部が燃料スタック部の上方へも広がる傾向がある。これは、燃料棒の損傷と発熱量との対応関係を示しているとみなすことが出来る。

そこで、前節 4.1 で述べた評価手法により、破損部近傍の UO_2 、ペレットの部分的な発熱量を評価した。発熱量は破損部を中心として軸方向に $\pm 5 \text{ mm}$ の範囲の平均値である。Table 8 に試験燃料棒の軸方向における平均発熱量と破損部の部分的発熱量を示す。ここで No.1 より No.7 までは、トランジェント棒の引抜き位置は等しく、故に、プールおよびカプセル水温度等の環境が変化しなければ、試験燃料棒に投入される発熱量は等しいと考えられる。また表の No.8 から No.13 までは、上記 No.1 ~ No.7 よりも僅かに高い発熱量が投入されるようにトランジェント棒位置を決めた実験である。このため No.8 ~ No.13 では、平均の発熱量が No.1 ~ No.7 よりも高く、かつ、破損部分が燃料スタック部の上方にまで広がる傾向がみられた。各実験において、トランジェント棒の引抜き位置が等しくても、平均発熱量に多少の相違が認められるが、これは、NSRR 実験において、プールおよびカプセル水温度等の環境や検出器の変化等、避けられないものである。

本表に基づいて、破損部近傍の発熱量の平均を求めると、No.1 ~ No.7 を用いた場合 $274 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ (σ (標準偏差) $= \pm 6 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$)、No.1 ~ No.13 を用いた場合 $278 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ($\sigma = \pm 8 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$) である。本表 No.8 ~ No.13 では、燃料棒の析出や被覆管の溶解等、その破損が顕著な部分において、破損部の発熱量を評価したが、外観では分りにくい破損部 (例えば、 ZrO_2 相のみを残したジルカロイの溶解部) が、より低い発熱量に存在している可能性がある。このために、破損部の発熱量の平均値が No.1 ~ No.7 のみを用いた時よりも、No.8 ~ No.13 を加えて評価した時の方が高くなると考えられる。なお、No.1 ~ No.7 の実験では、そのほとんどが燃料棒に細かなクラックを生じているのみである。

そこで、照射条件がほとんど等しい No.1 ~ No.7 のみの実験についてみると、燃料スタック部の平均発熱量の平均値は $261 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ($\sigma = \pm 4 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$) であり、上述した破損部の部分的発熱量の平均 $274 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ より $13 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 少ない。

さらに、燃料スタック部両端に 5%濃縮 UO_2 ペレットを入れてエッジ効果をおさえた実験では、燃料スタック部平均発熱量 $264 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ (この場合燃料スタック部下近傍の発熱量はエッジ効果を考慮しなくても Fig. 20 より $5 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 高く $269 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ となる) の実験では燃料棒は破損しなかったことに注目する必要がある。つまり、部分的発熱量で燃料挙動を評価した場合、 $269 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ でも破損しないことを示している。又、NSRR 標準実験では、Test No.200-4 においてスタック部平均発熱量 $254 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ (燃料スタック部下近傍: $264 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$) で燃料棒は破損していない。これら 269 、 $264 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ は既に評価した破損部の発熱量の平均値 $274 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ よりも少なく、局部的に発熱量を評価した場合、 $274 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ を破損しきい値と考える事が妥当であるといえる。

5. 結 言

NSRR 実験において、以前から指摘されていた試験燃料棒の軸方向出力分布の変化を詳細に評価すると共に、この出力分布が試験燃料棒の損傷挙動に及ぼす影響について検討した結果、以下の事が明らかになった。

(1) NSRR 実験では、制御棒位置と試験燃料棒の燃料スタック部両端のエッジ効果の影響により、試験燃料棒軸方向に一様でない出力分布が生じている。この出力分布は、燃料スタック部の下方になる程高く、燃料スタック部下端では約 1.2 のピーキングを生じている。

(2) 燃料スタック部両端に 5%濃縮 UO_2 ペレットを入れてエッジ効果を抑えた場合、従来の破損しきい値の発熱量すなわち燃料スタック平均 $260 \text{ cal/g} \cdot UO_2$ では試験燃料棒は破損せず、エッジ効果が破損に影響していることが分った。

(3) 試験燃料棒の装荷位置を変えて、軸方向出力分布を大きくすると、被覆管の温度挙動や破損挙動にもその影響が現れる。この場合、その挙動と局所的な発熱量との間に密接な対応関係が認められる。

(4) 燃料棒の破損しきい値である $260 \text{ cal/g} \cdot UO_2$ 近傍の発熱量を投入した実験の試験燃料棒は、ほとんど全て、10%濃縮ペレットスタック部の下端より 10 mm 上側近傍でクラックを生じており、この部分における損傷の程度が著しい。この部分における局所的な発熱量を評価すると、 $274 \text{ cal/g} \cdot UO_2$ となる。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、御指導を賜った、安全工学部・反応度安全研究室・齋藤伸三室長及び柳田輝雄副主任研究員に深く感謝の意を表します。また、実験の運行に関しては、反応度安全研究室、NSRR 管理室の皆様にも多大な御協力を仰ぎました。謹んでここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) ISHIKAWA, M., et al : "A study of Fuel Behavior under Reactivity Initiated Accident Conditions - Review ", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- (2) 星 篤 雄, 他 : " 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動 ", 日本原子力学会誌, vol. 20, No. 9 (1978)
- (3) 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)
- (4) 大西信秋, 他 : " 反応度事故条件下における燃料破損挙動に及ぼす発熱分布の影響 ", JAERI-M 6990 (1978)

- (5) NSRR 管理室, 反応度安全研究室: "NSRR 臨界および特性試験報告", JAERI-M 6791 (1976)
- (6) 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~1980年6月)", JAERI-M 8799 (1980)

Table 1 Characteristics of the NSRR

(1) <u>Reactor Type:</u>	Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)
(2) <u>Reactor Vessel:</u>	3.6 ^m (wide) x 4.5 ^m (long) x 9 ^m (deep) open pool
(3) <u>Fuel:</u>	
Fuel type	12 wt% U-ZrH fuel
Fuel enrichment	20 wt% U-235
Clad material	Stainless steel
Fuel diameter	3.56cm
Clad diameter	3.76cm O.D.
Length of fuel section	38cm
Number of fuel rods	157 (including 8 fuel-followered control rods)
Equivalent core diameter	62cm
(4) <u>Control Rods:</u>	
Number	8 (including 2 safety rods)
Type	Fuel followed type
Poison material	Natural B ₁ C
Rod drive	Rack and pinion drive
(5) <u>Transient Rods:</u>	
Number	2 fast transient rods and 1 adjustable transient rod
Type	Air followed type
Poison material	92% enriched B ₁ C
Rod drive	Fast : Pneumatic Adjustable : Rack and pinion & Pneumatic
(6) <u>Core Performance:</u>	
a) Steady state operation	
Steady state power	300KW
b) Pulse operation	
Max. peak power	21,100MW
Max. burst energy	117MJ-sec
Max. reactivity insertion	3.4% Δk (\$4.67)
Min. period	1.17 msec
Pulse width	4.4 msec (1/2 peak power)
Neutron life time	30 μ sec
(7) <u>Experiment Tube:</u>	
Inside diameter	22cm

Table 2 Characteristics of test fuel rod

<u>UO₂ Pellets</u>	
Diameter	9.29 mm
Length	10 mm
Density	95% T.D.
Enrichment	10%
Shape	Chamfered
<u>Cladding</u>	
Material	Zircaloy-4
Outer diameter	10.72 mm
Wall thickness	0.62 mm
<u>Fuel Rod</u>	
Pellet-cladding gap	0.095 mm
Overall length	265 mm
Fuel length	135 mm
Weight of fuel pellets	94g
Number of pellets	14-15
Plenum gas	He 1 ata.

Table 3 Summary of test conditions

Test No.	Reactivity (%)	Energy deposition (cal/g.UO ₂)	Objectives	Remarks
200 - 4C	2.76	227	•to measure an axial power distribution	
200 - 5D	3.05	258		
232 - 12	1.70	112	•to obtain the relation between control rod position and axial power profile	
115 - 7	2.56	221		
232 - 15	3.05	260		
207 - 1	steady state (18 kws)		•to obtain the relation between axial power profile and fuel rod failure behavior	Test fuel rod contained 5% enriched UO ₂ pellets at both ends of fuel stack.
207 - 2	3.05	264		
207 - 3	3.22	282		Test fuel rod was installed at 4 cm lower position from the core center
207 - 4	3.22	274		
207 - 5	2.50	210		
218 - 1	3.06	261	•PIE	

Table 4 Instruments of γ -ray scanning system

measuring instruments	type	remarks
Detector	Harshaw NaI (Tl) Type 12S 12 / 3	
High voltage supply	ORTEC model 456	H.V. ; 1200
Pre. amplifier	ORTEC model 113	Input capacitance ; 500 PF
Linear amplifier	ORTEC model 452	Gain ; 200 x 0.6 Output range ; 10V Shaping time ; 1.0 μ sec
Pulse height analyzer	ORTEC model 455	Fraction ; norm L.L. ; 3.5 U.L. ; 10.0.
Counter	ORTEC model 1776	
Timer	dual-counter - timer	

Table 5 Maximum cladding surface temperatures measured by thermocouples for Test Nos. 207-2, -3, -4 and -5

Test No.	Energy deposition (cal/g-UO ₂)	Maximum cladding surface temperature (°C)							Fuel rod position
		# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	
207-2	264	1650	1600	1560	T/C failed	/	/	/	STD position
207-3	282	/	1800	/	1800	1100	1200	/	ditto
207-4	274	/	1540	/	/	1500	T/C failed	1580	40mm lower
207-5	210	1210	1270	1290	1280	980	1330	/	ditto

Measured position

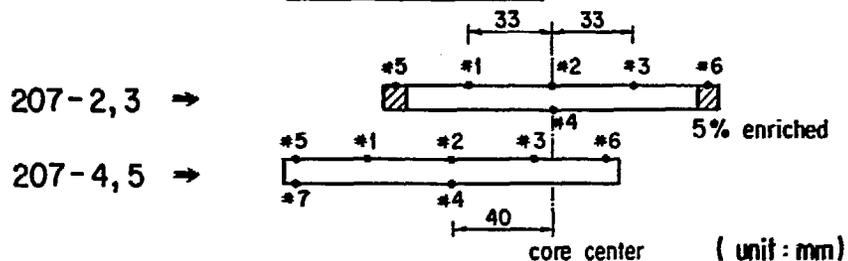


Table 6 Maximum cladding surface temperature and local energy deposition measured for Test Nos. 207-2, -3, -4 and -5.

No.	Local energy deposition		Temperature (°C)	Test No
	col/g- UO_2	ratio to average		
1	271	1.03	1650	207-2
2	263	1.0	1600	
3	262	9.97	1560	
4	282	1.0	1800	207-3
5	282	1.0	1800	
6	169	0.6	1100	
7	183	0.65	1200	
8	266	0.97	1540	207-4
9	238	0.87	1500	
10	238	0.87	1580	207-5
11	193	0.92	1210	
12	204	0.97	1270	
13	210	1.0	1290	
14	204	0.97	1280	
15	189	0.82	980	
16	214	1.02	1330	

Table 7 Crack position in the test fuel rods irradiated at around failure threshold energy.

Test No.	Energy deposition (col/g- UO_2)	Cracked position and the distance from core center (mm)
		core center
200-5	264	53.6
200-5B	267	54.6
200-5C	258	noted UO_2 47.0
200-5D	258	45.5
207-12	258	47.5
217-2	260	57.5
218-1	262	57.5
200-2-2	271	57.0
200-6	271	54.7
200-6B	276	melted 36.6
200-6C	261	crack melted 22.5
207-3	282	5% UO_2 47.5
207-4	274	27.5

Table 8 Average and local energy deposition in the test fuel rods irradiated at around failure threshold energy.

No.	Test No.	Energy deposition (cal/g-UO ₂)	
		Average	Local at failure
1	200-5	264	280
2	200-5B	267	283
3	200-5C	258	268
4	200-5D	258	268
5	207-12	258	268
6	217-2	260	276
7	218-1	262	278
8	200-2-2	271	287
9	200-6	271	287
10	200-6B	276	281
11	200-6C	261	264
12	207-3	282	287
13	207-4	274	282

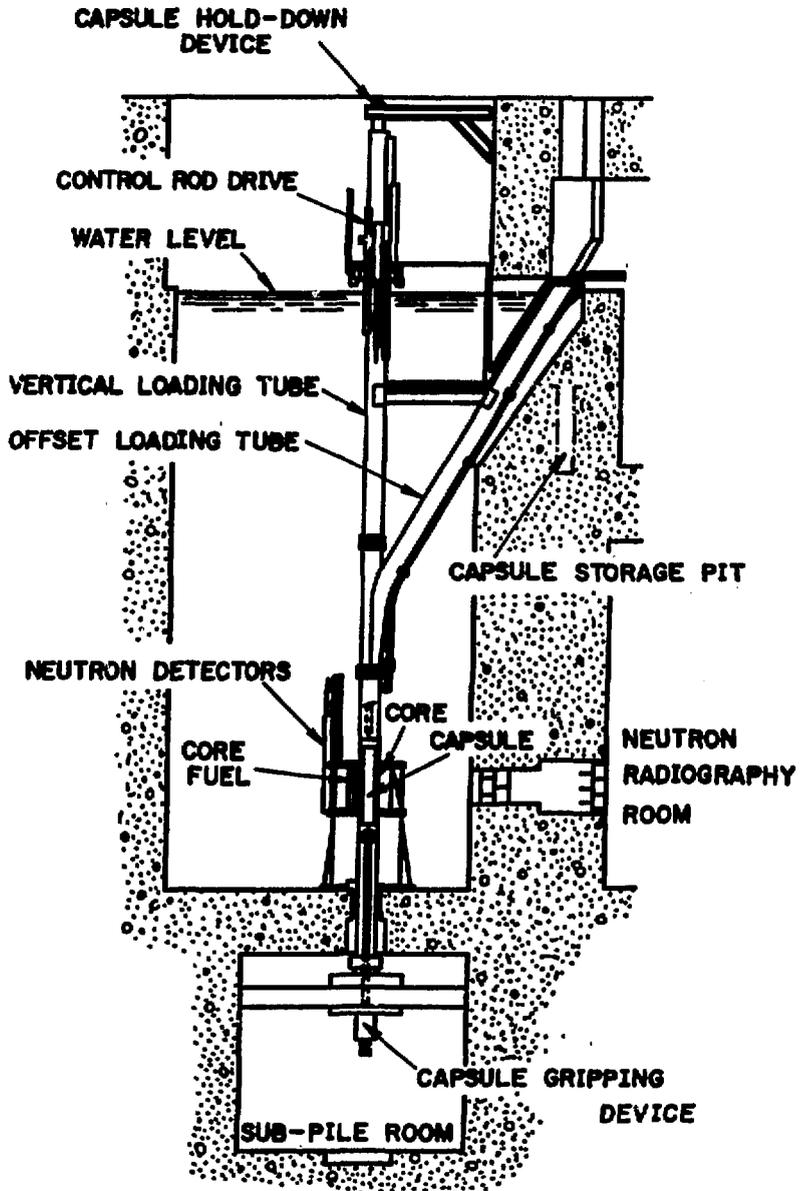


Fig. 1 Vertical cross section of the NSRR

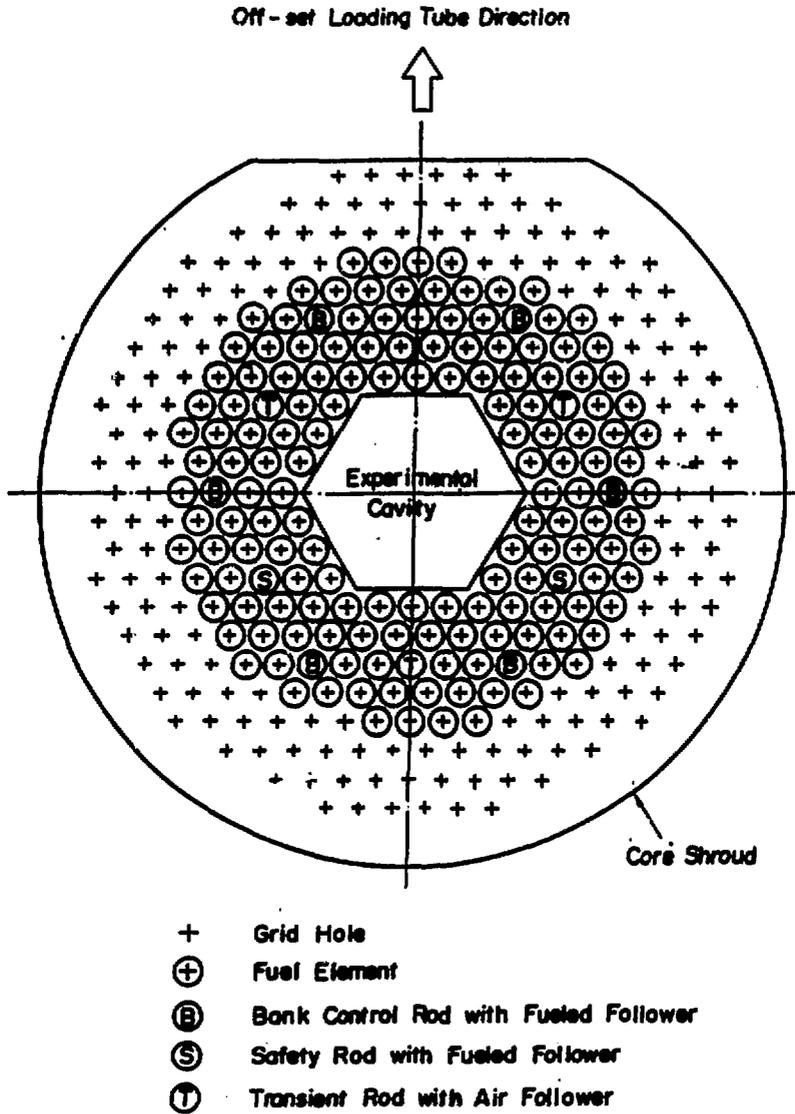


Fig. 2 Operational core configuration

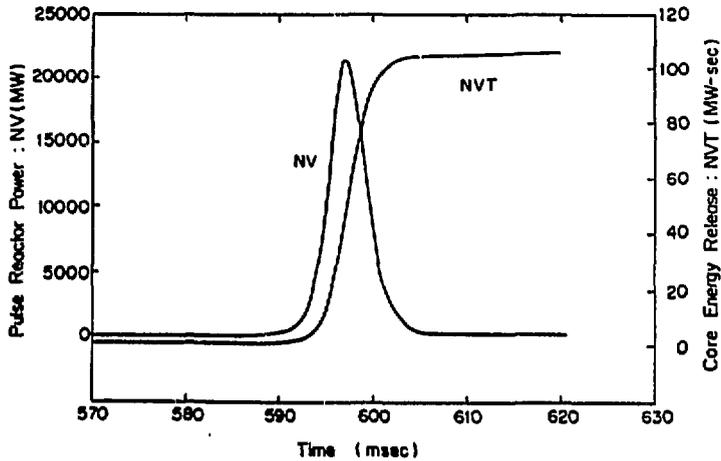


Fig. 3 Reactor power and energy release recorded in the data acquisition system for \$4.7 pulse

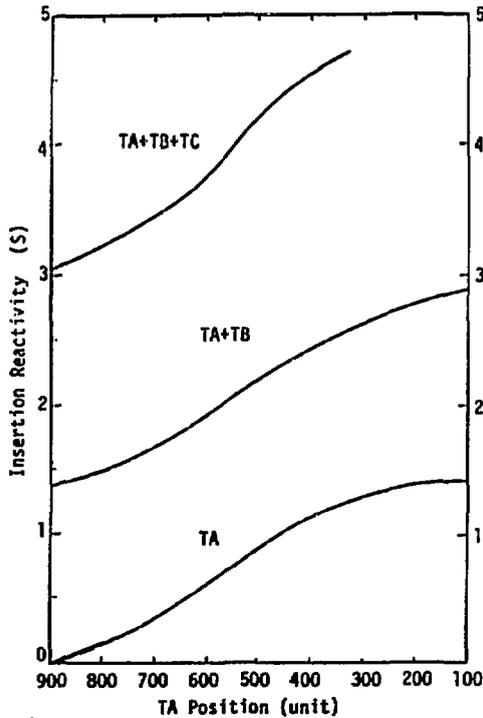


Fig. 4 Insertion reactivity versus transient rod position in the NSRR

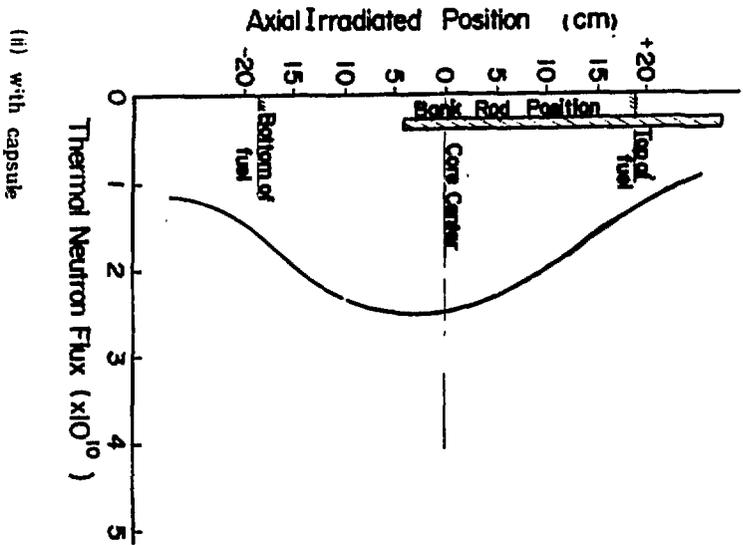
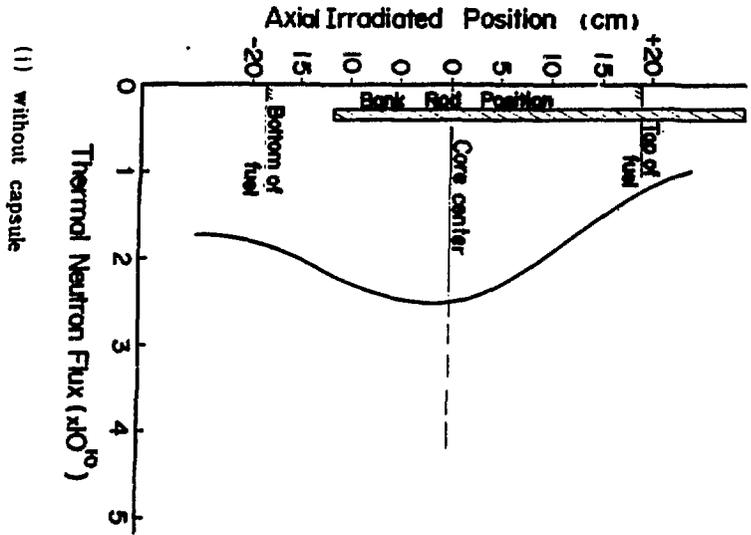


Fig. 5 Axial thermal neutron flux distribution in the NSRR

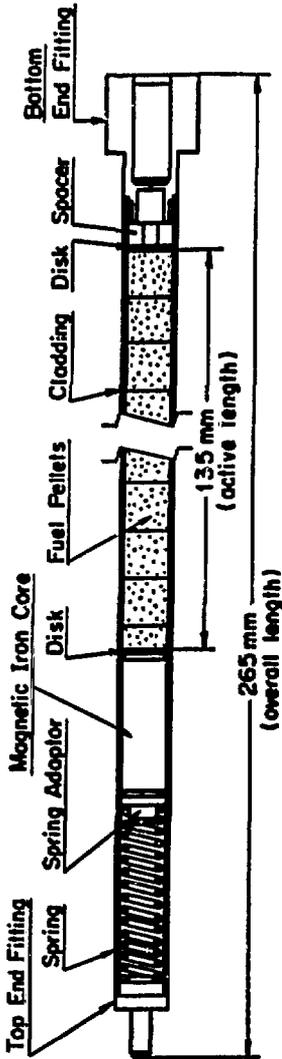


Fig. 6 Standard test fuel rod

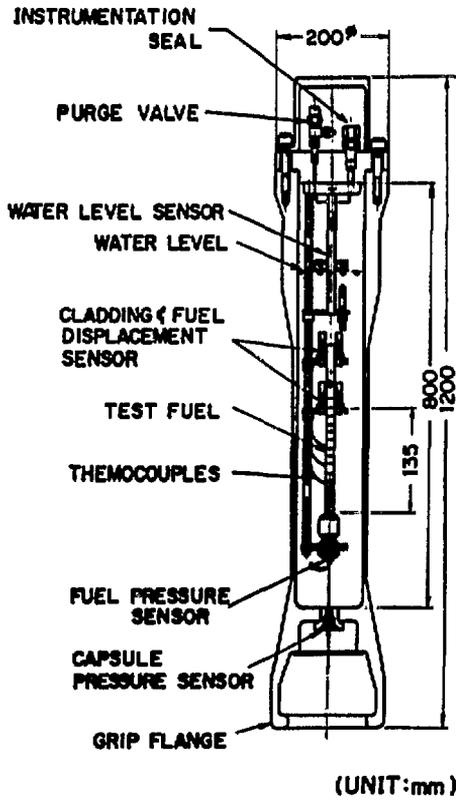
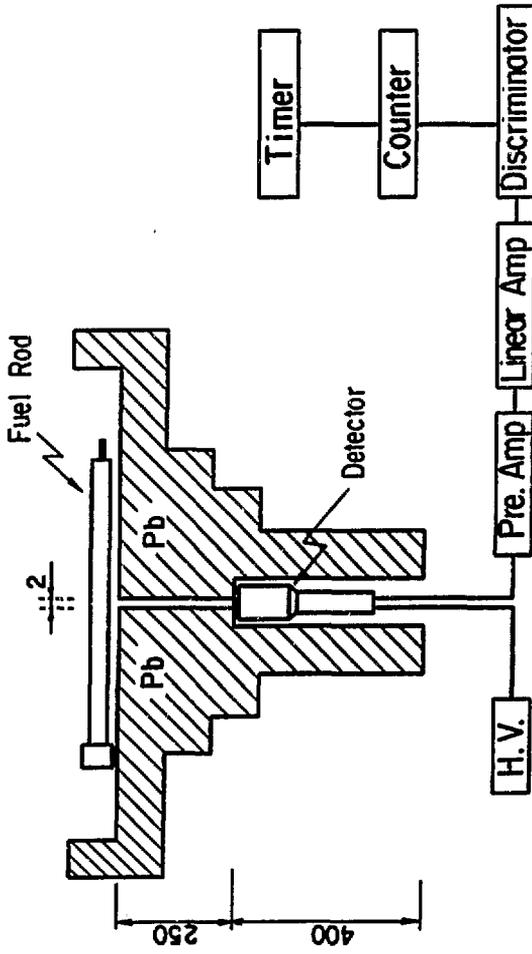


Fig. 7 Standard water capsule



(unit : mm)

Fig. 8 Schematic diagram of γ -ray scanning system

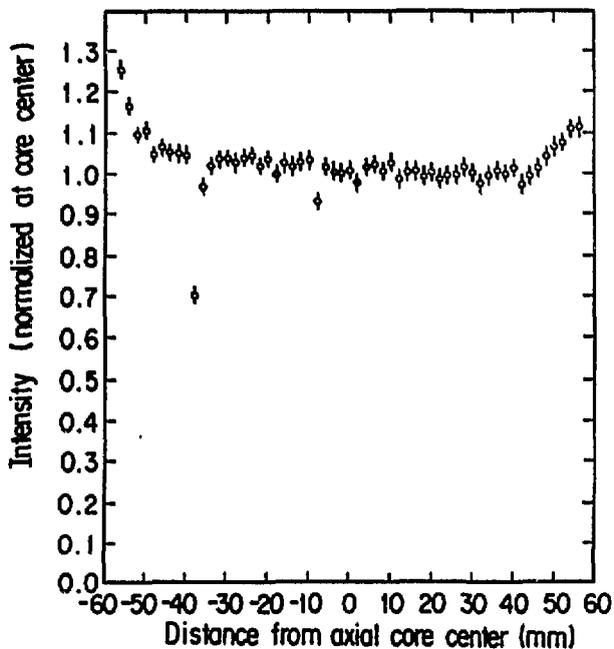


Fig. 9 Axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 200-4C

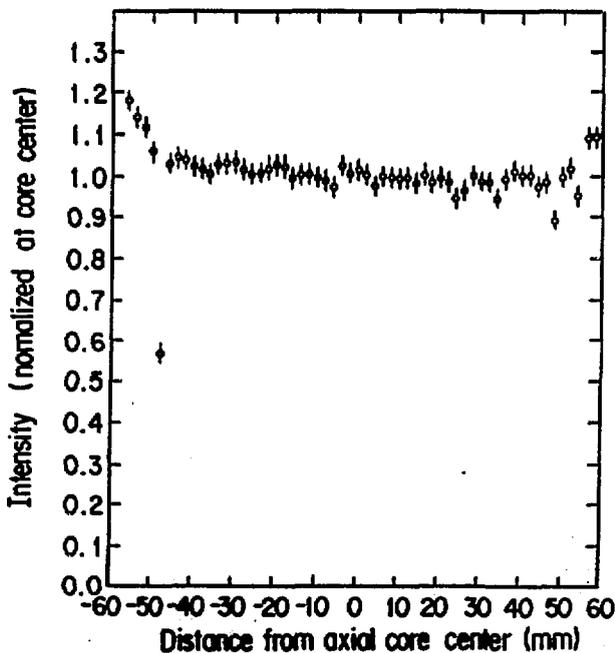


Fig. 10 Axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 200-5D

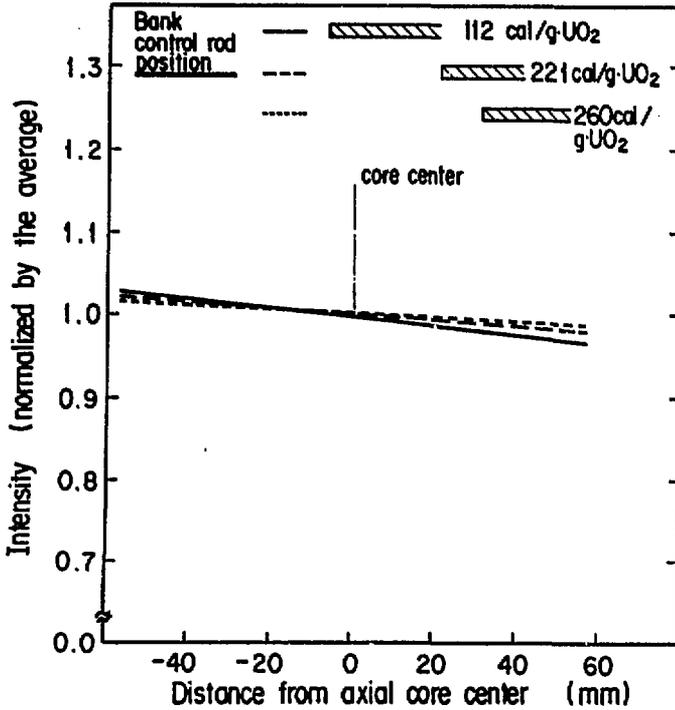


Fig. 11 Gradients of axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rods irradiated at 112, 221 and 260 cal/g \cdot UO₂

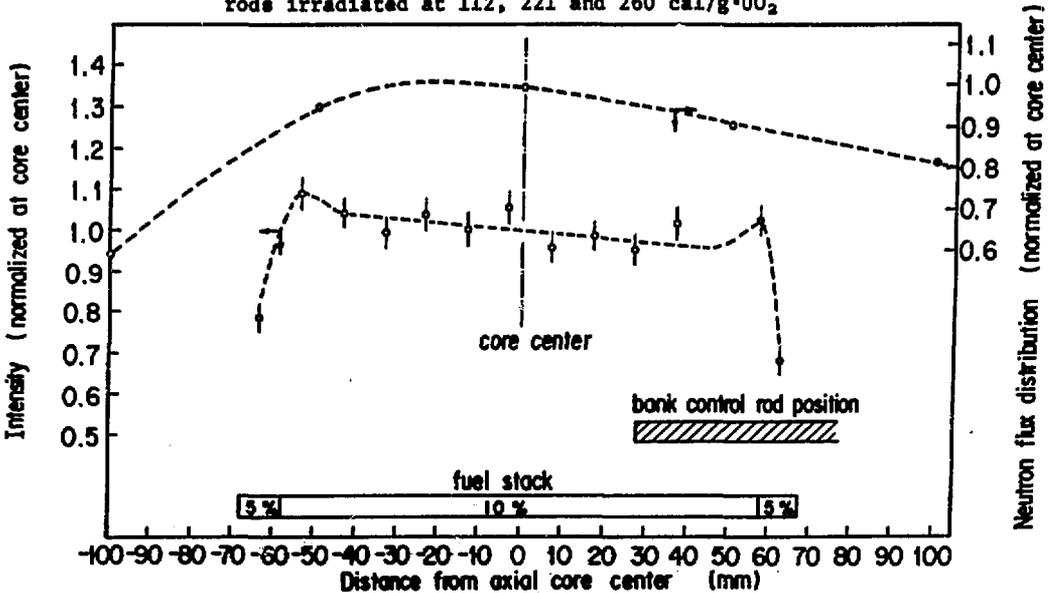


Fig. 12 Axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rod together with neutron flux distribution measured with Au foils in the core under the condition of 30 W steady state operation for 10 minutes.

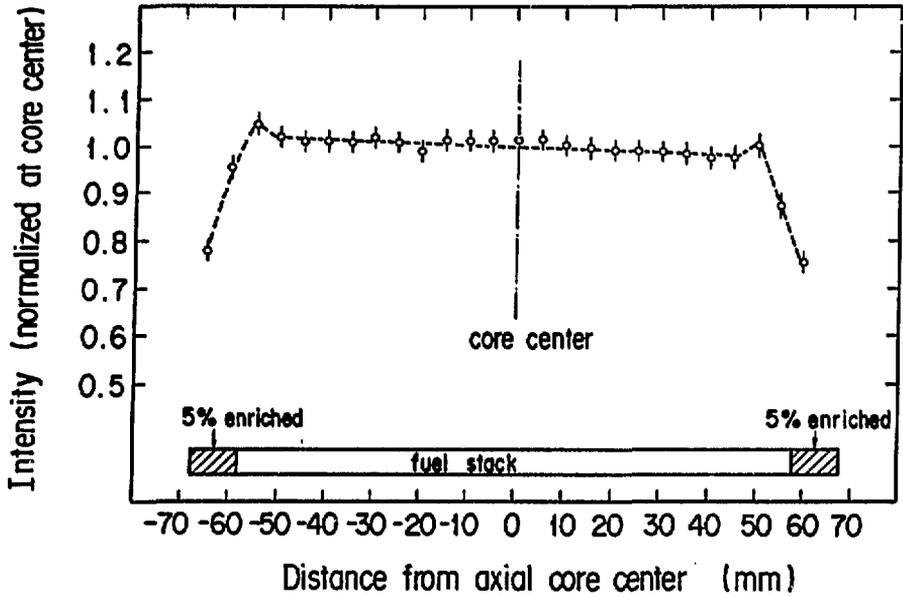


Fig. 13 Axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 207-2

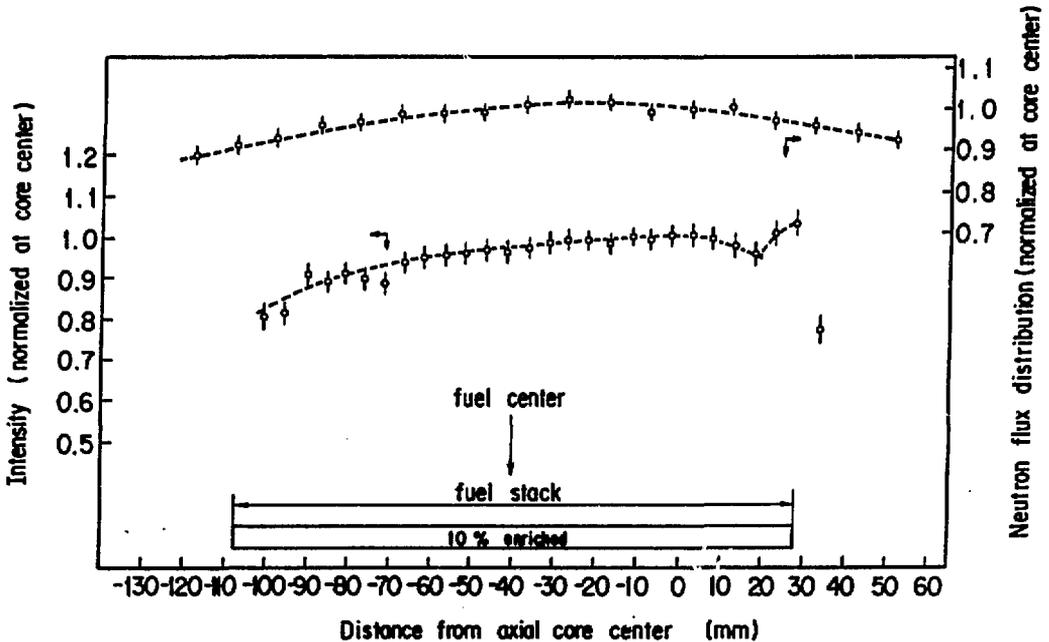


Fig. 14 Axial distribution of γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 207-5 together with neutron flux distribution measured with Co wire in the core

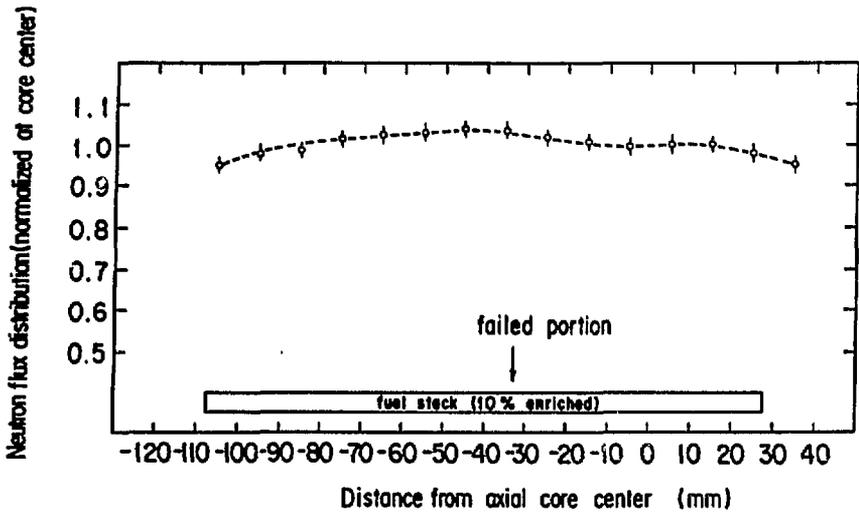


Fig. 15 Neutron flux distribution measured with Co wire in Test No. 207-4

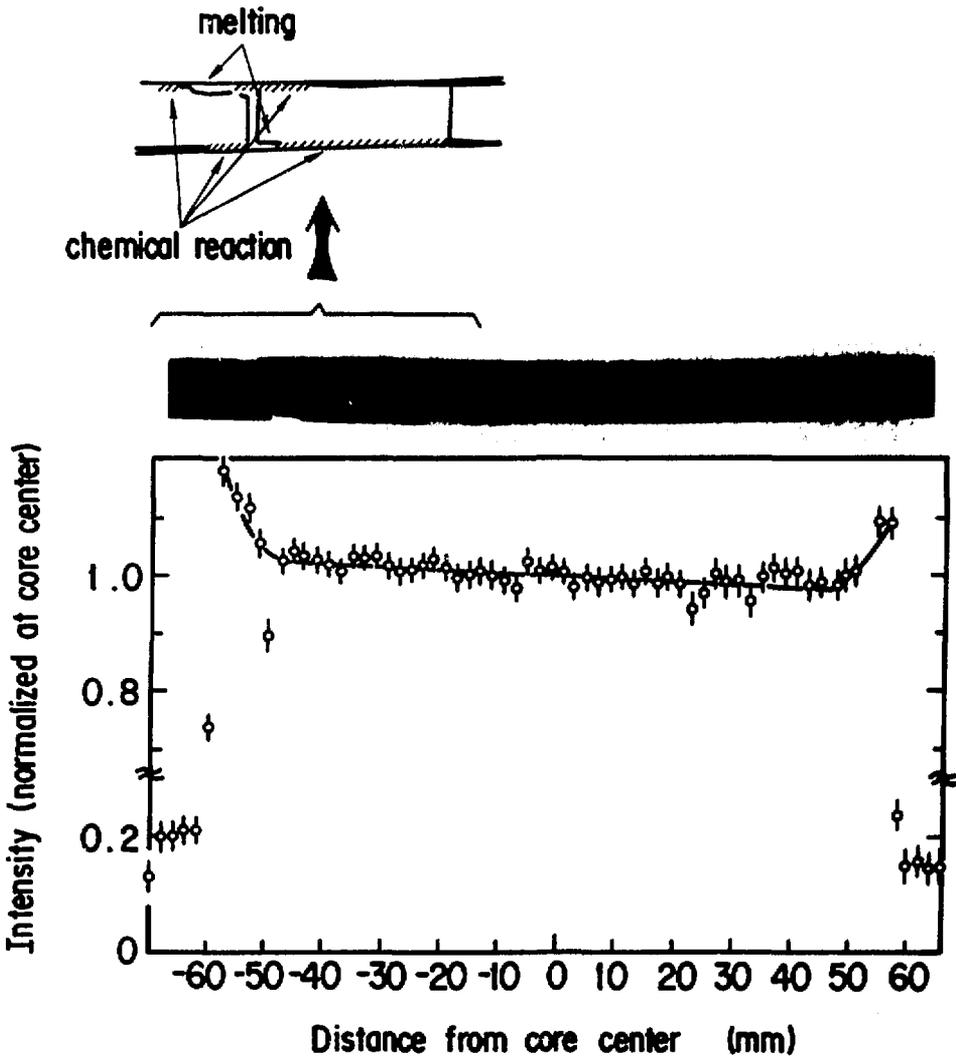


Fig. 16 X-ray photograph and γ -ray intensity along with axial direction of the fuel rod of Test No. 200-5D

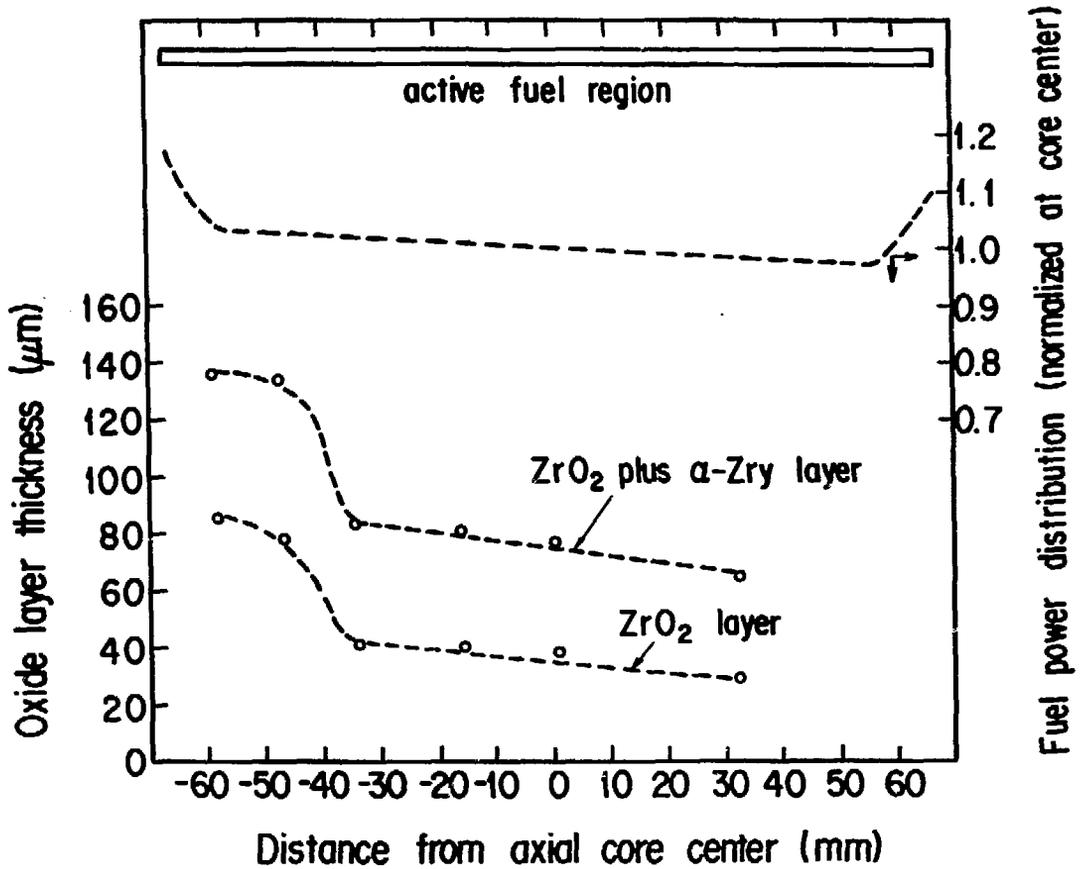


Fig. 17 Oxide layer thickness in the fuel rod irradiated at failure threshold energy

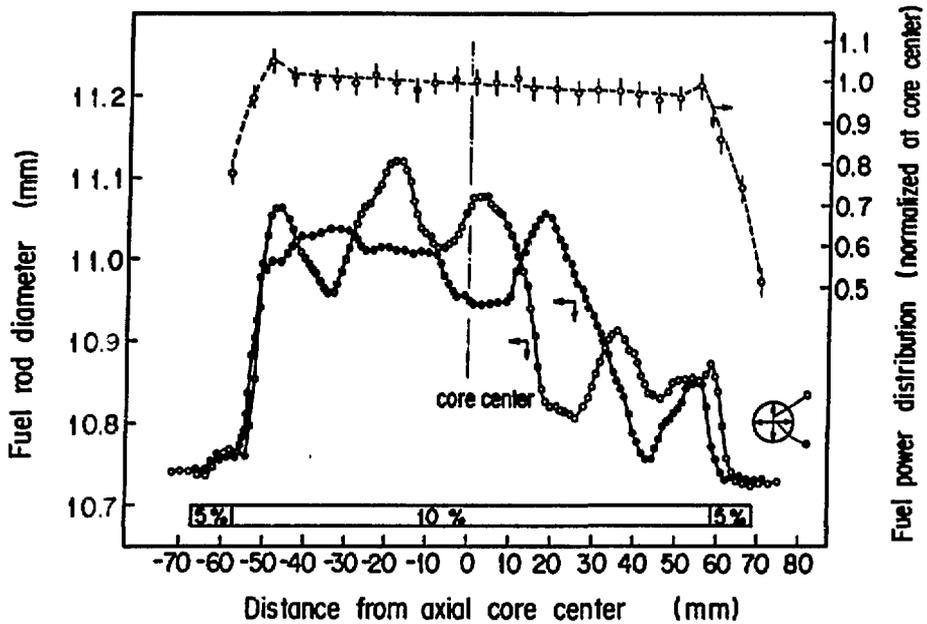


Fig. 18 Axial distribution of diametral deformation and γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 207-2

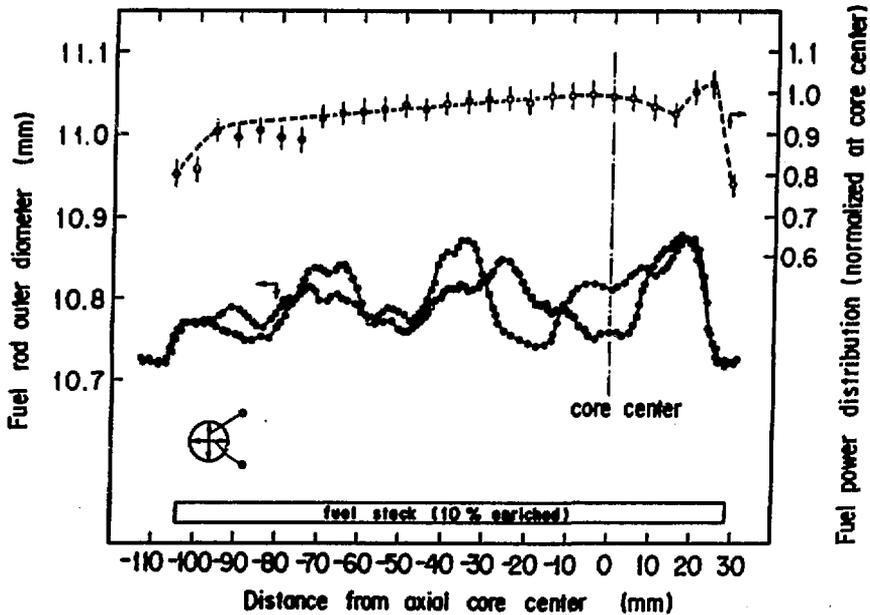


Fig. 19 Axial distribution of diametral deformation and γ -ray intensity in the fuel rod of Test No. 207-5

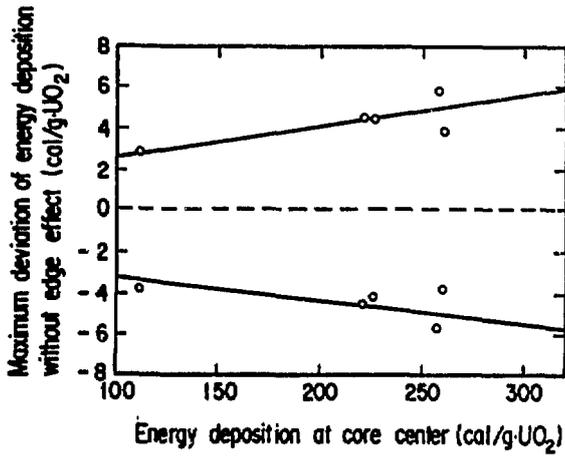


Fig. 20 Maximum deviation of energy deposition along axial direction without edge effect as a function of energy deposition

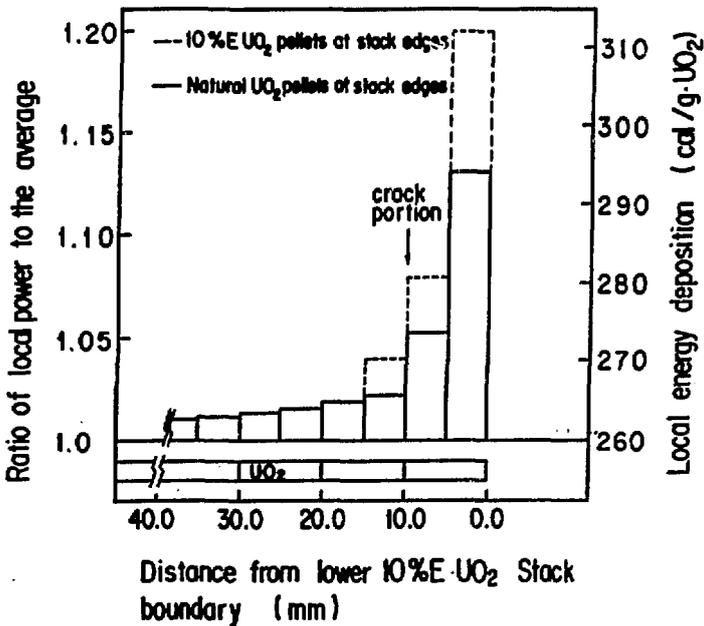


Fig. 21 Axial power distribution of a fuel rod around the crack portion

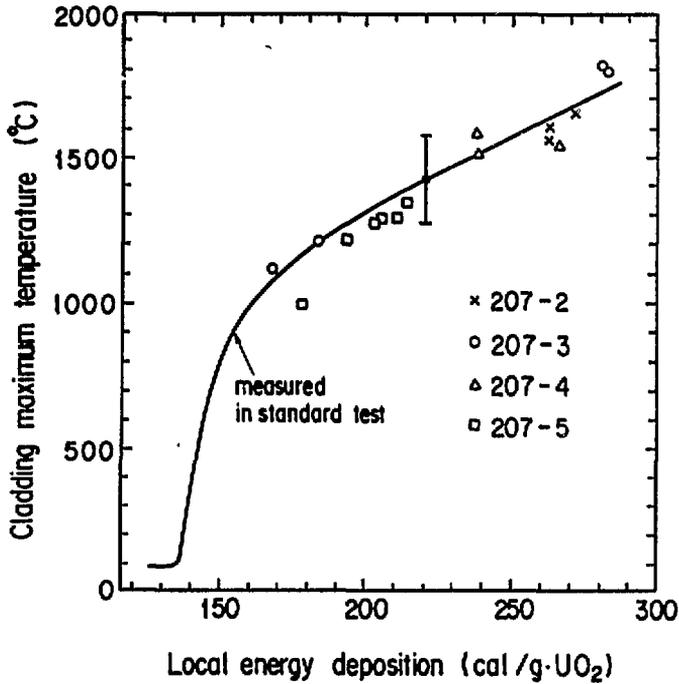


Fig. 22 Cladding maximum temperature versus local energy deposition measured for Test Nos. 207-2, -3, -4 and -5

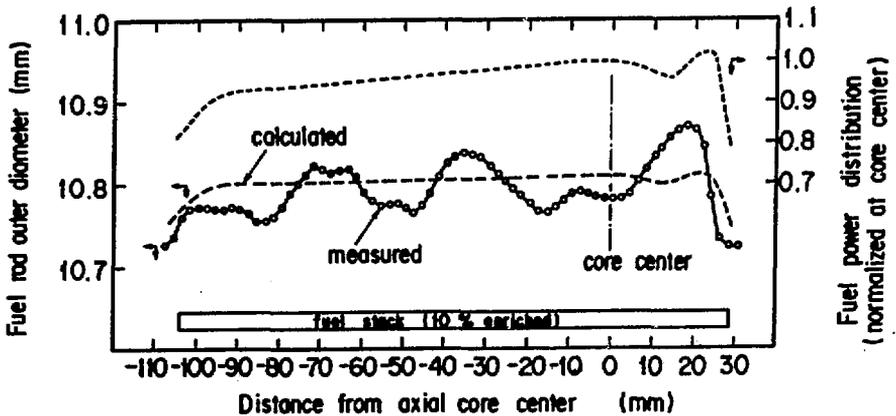


Fig. 23 Axial distribution of both measured and calculated diametral deformation of the fuel rod in Test No. 207-5

Photo. 1 Summary of test results for Test Nos. 207-2, -3, -4 and -5

<u>Test No.</u> Energy deposition (cal/g-UO ₂)	Post-test appearance
<u>207-2</u> 264	
<u>207-3</u> 282	
<u>207-4</u> 274	
<u>207-5</u> 210	

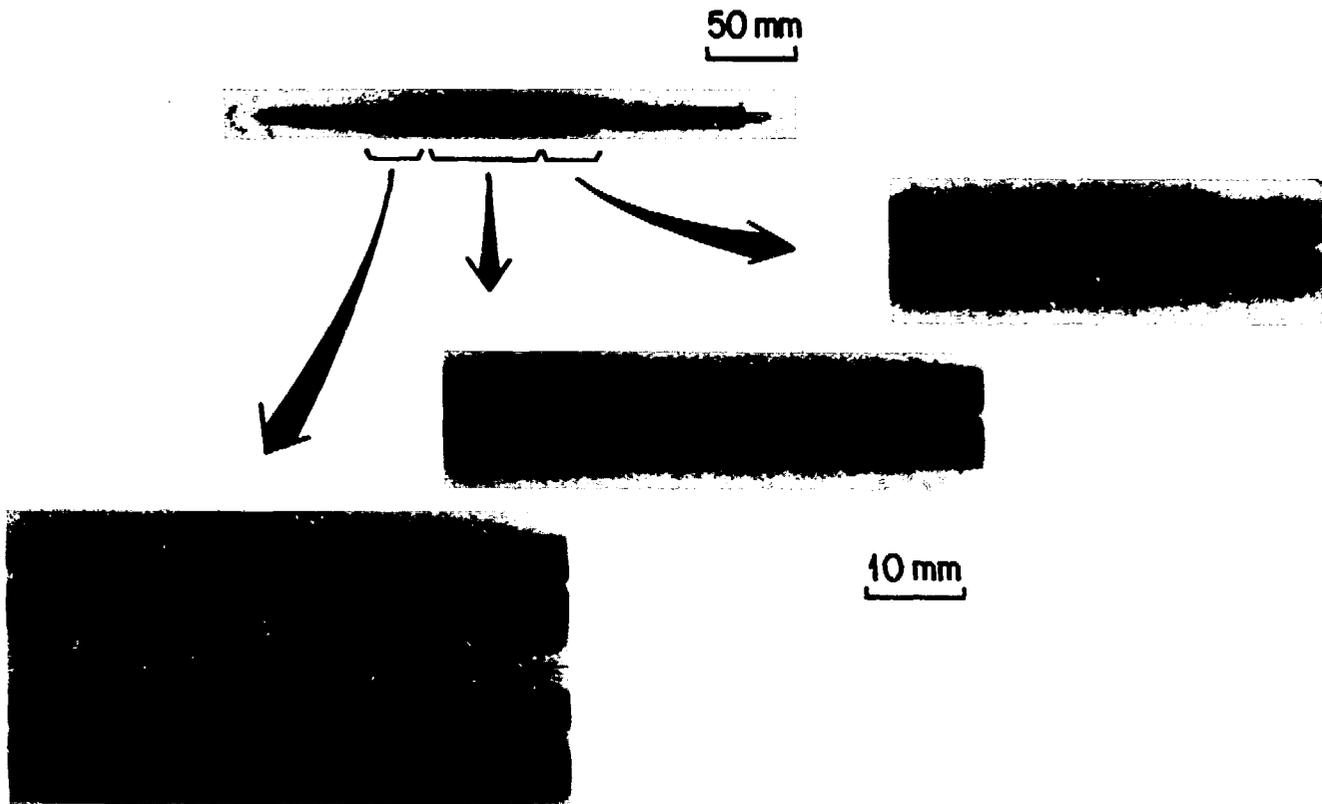


Photo. 2 Post-test appearance of the fuel rod irradiated at $258 \text{ cal/g}\cdot\text{UO}_2$
(Test No. 200-5D)

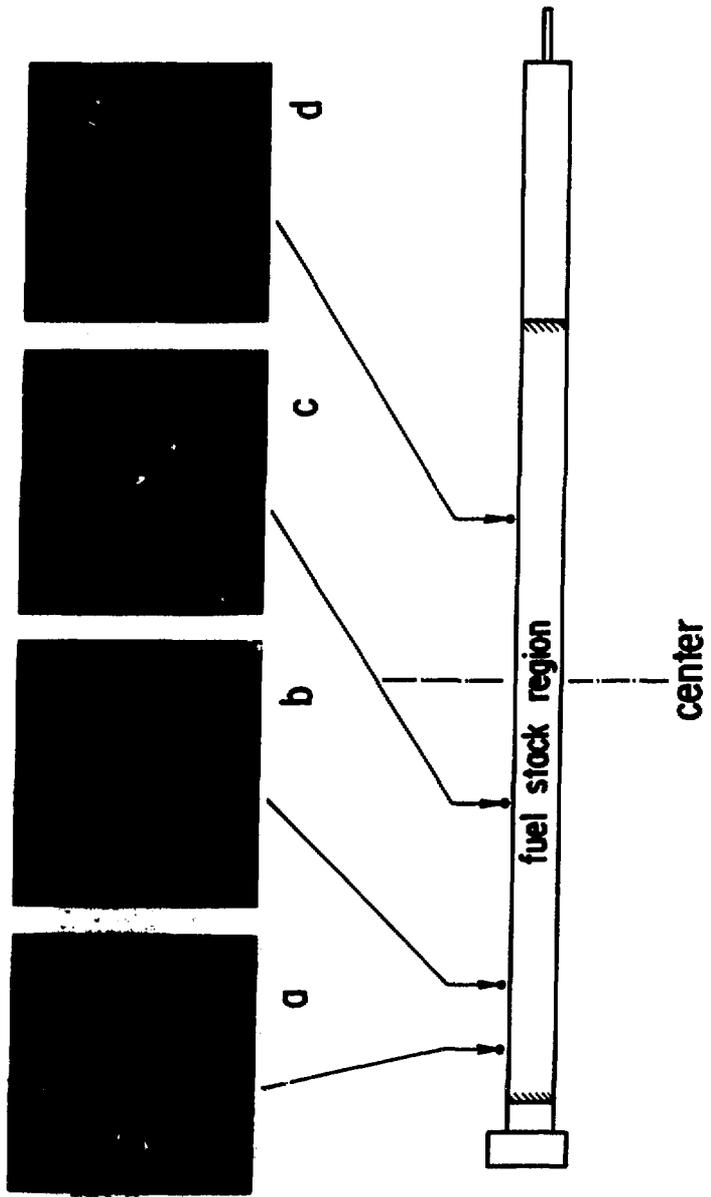


Photo. 3 Cross sections of a post-test fuel rod for Test No. 218-1