

JAERI - M  
93-068

NSRR 可視カプセル実験における  
燃料発熱色からの温度評価

1993年3月

中村 武彦・斎藤 伸三・江森 康文<sup>\*</sup>  
難波 久男<sup>\*\*</sup>・吉永真希夫

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。  
入手の問合せは、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 Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

N S R R 可視カプセル実験における  
燃料発熱色からの温度評価

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

中村 武彦・斎藤 伸三<sup>+</sup>・江森 康文\*

難波 久男\*\*・吉永真希夫

(1993年2月25日受理)

N S R R では、反応度事故及び炉心損傷事故時の燃料挙動を調べる実験が続けられている。その際、燃料被覆管の温度は熱電対により測定されている。しかし、2,000Kを超える温度域では、熱電対が破損するために、実験の全過程に渡る被覆管の温度履歴を測定する事が困難であった。この問題に対処するため、可視カプセル実験で得られた燃料棒の過渡挙動の撮影カラーフィルムを使って燃料棒の表面温度を評価する方法を開発した。この方法により、燃料の損傷が起こる高温域での被覆管温度を知り、さらに数点の熱電対からでは知る事の困難な詳細な温度分布を評価する事が出来た。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

+ 大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

\* 千葉大学（現在、東京情報大学に所属）

\*\* 千葉大学（現在、富士通システム総合研究所に所属）

Color Temperature Evaluation  
in Fuel Behavior Observation Tests in NSRR

Takehiko NAKAMURA, Sinzo SAITO<sup>+</sup>, Yasubumi EMORI<sup>\*</sup>  
Hisao NANBA<sup>\*\*</sup> and Makio YOSHINAGA

Department of Fuel Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 25, 1993)

Fuel behavior under reactivity initiated accident and severe accident conditions have been studied in the NSRR. The cladding surface temperature is measured by thermocouples as an important indicator of the fuel behavior in the tests. However, when the cladding temperature exceeds 2,000K, the thermocouples generally fail and the subsequent temperature histories are not able to be measured. A color temperature evaluation method was successfully applied to the NSRR tests in which fuel behavior was recorded on color films. The temperature distributions on the cladding surface of the fuel rods which were hardly known by a few sets of thermocouples were obtained, as well as the temperature histories after the thermocouple failure by the evaluation.

Keywords: NSRR, Color Temperature, Fuel Failure, Severe Accident

---

+ Department of HTTR Project, Oarai Research Establishment

\* Chiba University (Present Occupation: Tokyo University of Information Sciences).

\*\* Chiba University (Present Occupation: Fujitsu Co., System Research Laboratory).

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.実験の概要 .....	1
2.1 NSRR炉の概要 .....	2
2.2 可視カプセル実験の概要 .....	2
3.発熱色からの温度評価の原理 .....	3
4.可視カプセル実験への色温度評価法の適用 .....	6
5.結果 .....	8
5.1 水冷却条件における燃料挙動（実験600-15, 19） .....	8
5.2 ヘリウムガス雰囲気における燃料の挙動（実験600-21） .....	10
6.結論 .....	11
謝辞 .....	12
参考文献 .....	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experiment .....	1
2.1 NSRR .....	2
2.2 Fuel Behavior Observation Capsule .....	2
3. Evaluation of Color Temperature .....	3
4. Application of Color Temperature Evaluation .....	6
5. Results .....	8
5.1 Water Cooled Fuel Behavior (Test No. 600-15, 16) .....	8
5.2 Helium Gas Cooled Fuel Behavior (Test No. 600-21) .....	10
6. Conclusions .....	11
Acknowledgement .....	12
References .....	13

## 1. はじめに

原研NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)では、原子炉事故時の燃料挙動の研究を行っている。実験を大別すると、出力暴走事故である反応度事故(RIA : Reactivity Initiated Accident)模擬実験と冷却材の喪失に起因するシビアアクシデント(SA : Severe Accident)模擬実験に分けられる。それぞれの目的に応じた実験カプセルを用いて事故時を模擬した環境を作り実験燃料棒を炉内照射し、破損挙動を調べている。

反応度事故実験では、燃料棒を冷却水条件において、パルス照射により核加熱し、その挙動を調べている。また、シビアアクシデント実験では、燃料棒を水蒸気等のガス雰囲気でパルスあるいは定常照射により加熱し、燃料の崩壊挙動や冷却性について研究を行っている。こうした実験における燃料挙動は、被覆管表面温度、燃料中心温度、燃料内圧、冷却水温度等を測定することによって把握している。また、燃料の挙動を直接映像にして高速度カメラにより記録する燃料挙動可視カプセル<sup>1)</sup>も開発され実用化されている。

こうした装置を用いた実験により、燃料挙動はかなり詳しく究明されてきた。燃料挙動評価上重要な項目の1つである被覆管温度は、白金-白金／ロジウム(Pt-Pt/Rh)熱電対を被覆管表面に溶接する事により得られている。しかし、燃料の破損が生じる条件では被覆管表面温度は約2,000K(1,727°C)を超え、これらの熱電対は破損してしまう。したがって、燃料破損が生じる実験条件では、被覆管の最高温度を知る事が困難であった。そこで、燃料挙動可視カプセルを用いて得られた燃料撮影フィルムに光学式の温度評価手法を適用し、燃料表面温度を推定した。本報告書は、この手法及びNSRR実験から得た結果をまとめたものである。本研究は、日本原子力研究所と千葉大学工学部の共同研究として行われたものである。

光学式温度評価法には、輝度による評価法(単色法)と色あいによる方法/2波長比を用いた分布色温度法(2色法)があるが、本研究では、2色式温度評価法を採用した。水冷却条件の2実験及び、ガス冷却条件の1実験に同手法を適用した結果、2色法による光学式温度評価手法が炉内実験に適用可能である事が判明した。ガス冷却条件で行った実験結果については、熱電対破損後についても温度分布を含む詳しい温度評価結果が得られた。水冷却条件での実験については、過渡加熱時の気泡の発生による外乱や較正実験時の標準光源の光量不足等のために満足のいく評価結果は得られなかった。

## 2. 実験の概要

NSRRは実験燃料を実験カプセルに封入し、これをNSRR炉心中央の実験孔の中で照射することにより実施している。本章ではNSRRの概要および燃料挙動可視カプセル実験の概要を示す。

## 1. はじめに

原研NSRR(Nuclear Safety Research Reactor)では、原子炉事故時の燃料挙動の研究を行っている。実験を大別すると、出力暴走事故である反応度事故(RIA : Reactivity Initiated Accident)模擬実験と冷却材の喪失に起因するシビアアクシデント(SA : Severe Accident)模擬実験に分けられる。それぞれの目的に応じた実験カプセルを用いて事故時を模擬した環境を作り実験燃料棒を炉内照射し、破損挙動を調べている。

反応度事故実験では、燃料棒を冷却水条件において、パルス照射により核加熱し、その挙動を調べている。また、シビアアクシデント実験では、燃料棒を水蒸気等のガス雰囲気でパルスあるいは定常照射により加熱し、燃料の崩壊挙動や冷却性について研究を行っている。こうした実験における燃料挙動は、被覆管表面温度、燃料中心温度、燃料内圧、冷却水温度等を測定することによって把握している。また、燃料の挙動を直接映像にして高速度カメラにより記録する燃料挙動可視カプセル<sup>1)</sup>も開発され実用化されている。

こうした装置を用いた実験により、燃料挙動はかなり詳しく究明されてきた。燃料挙動評価上重要な項目の1つである被覆管温度は、白金-白金／ロジウム(Pt-Pt/Rh)熱電対を被覆管表面に溶接する事により得られている。しかし、燃料の破損が生じる条件では被覆管表面温度は約2,000K(1,727°C)を超え、これらの熱電対は破損してしまう。したがって、燃料破損が生じる実験条件では、被覆管の最高温度を知る事が困難であった。そこで、燃料挙動可視カプセルを用いて得られた燃料撮影フィルムに光学式の温度評価手法を適用し、燃料表面温度を推定した。本報告書は、この手法及びNSRR実験から得た結果をまとめたものである。本研究は、日本原子力研究所と千葉大学工学部の共同研究として行われたものである。

光学式温度評価法には、輝度による評価法(単色法)と色あいによる方法/2波長比を用いた分布色温度法(2色法)があるが、本研究では、2色式温度評価法を採用した。水冷却条件の2実験及び、ガス冷却条件の1実験に同手法を適用した結果、2色法による光学式温度評価手法が炉内実験に適用可能である事が判明した。ガス冷却条件で行った実験結果については、熱電対破損後についても温度分布を含む詳しい温度評価結果が得られた。水冷却条件での実験については、過渡加熱時の気泡の発生による外乱や較正実験時の標準光源の光量不足等のために満足のいく評価結果は得られなかった。

## 2. 実験の概要

NSRRは実験燃料を実験カプセルに封入し、これをNSRR炉心中央の実験孔の中で照射することにより実施している。本章ではNSRRの概要および燃料挙動可視カプセル実験の概要を示す。

## 2.1 NSRR炉の概要

NSRRは、高いパルス性能を有するTRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) タイプのスイミングプール型原子炉に実験上必要な改良を加えた炉<sup>2</sup>である。NSRR燃料実験は、この原子炉の特性を活かし、主として反応度事故(RIA)時の過渡的発熱状態を模擬した条件下で行なっている。

Fig. 2.1に原子炉の概要を示す。炉心は、内径約20cmの六角形状の中空実験孔を中心には157本のドライバー燃料棒を円筒形状に配列している。炉心長は、約38cmである。炉心内には安全棒2本、調整棒6本(いずれも燃料フォロア型制御棒)の制御棒の他に、パルス出力発生のために用いるトランジェント棒3本がある。トランジェント棒はB<sub>4</sub>Cの中性子吸収体に空気フォロアがついた制御棒で、3本のトランジェント棒の内2本は圧縮空気により駆動し、他の1本は圧縮駆動系に加えて電動モータ駆動系を備えており任意に挿入位置を設定でき、パルス運転の際、投入反応度量を調整することが可能である。パルス運転時には、各トランジェント棒全てを圧縮空気系により急速な引き抜きを行う。

NSRRでは、即発臨界1ドルに対して最大4.7ドルまでの反応度を数msの間に炉心に加える事ができる。この反応度付加によって、原子炉出力はFig. 2.2に示すようにパルス状に急上升し、10%濃縮燃料で約450cal/g·UO<sub>2</sub> (1.88MJ/kg·UO<sub>2</sub>)、20%濃縮燃料で約500cal/g·UO<sub>2</sub> (2.30MJ/kg·UO<sub>2</sub>)のエネルギーを実験燃料中に投入できる。これは燃料を瞬時に溶融させるのに十分なエネルギー量である。反応度事故を模擬した実験は、主としてこの単一パルス運転モードで行われる。また、定出力及び台形パルスを用いて主に冷却材喪失によるシビアアクシデント条件等の比較的低い出力での実験が行われる。

## 2.2 可視カプセル実験の概要

NSRR実験では、燃料破損にともなうFP等の飛散を防ぐために実験用密閉容器を作成し、その中に燃料棒を装架してパルス照射を行っている。この実験用密閉容器は、大きく分けて2種類がある。1つは静止水条件で実験を行うためのカプセルであり、他方は流動水条件で実験を行うためのループと呼ばれる種類である。主な例としてはカプセルには、室温大気圧条件の実験に用いる大気圧カプセル、動力炉の冷却条件を模擬する実験に用いる高温高圧カプセルがある。またループには、流動条件を含めて動力炉の冷却条件を模擬する実験に用いる高温高圧ループがある。

燃料挙動可視カプセルは大気圧カプセルの1種であり室温大気圧条件下における燃料挙動を直接観察するものである。Fig. 2.3に可視カプセルの概要を示す。図に示すように、カプセル試験部には、実験燃料破損時に生じる衝撃圧に耐えられる保護管に封入されたペリスコープが導入されている。保護管には実験燃料前方に衝撃圧に耐えられる石英窓を取り付け、実験燃料からの発熱光をペリスコープ内に取り込んでいる。入射光はペリスコープ内部で2枚の鏡により2度光路を変え、約257cm上方の高速度カメラのレンズに導かれ、燃料挙動

がカラーフィルムに撮影される仕組みとなっている。ペリスコープの周囲には、撮影用フィルムへの放射線の影響を避けるためにボロン入りパラフィン及び鉛による遮蔽を行っている。また、ペリスコープの光路には放射線による変質が比較的少ないノンブラウニングBK7ガラス製の特殊レンズを22個使用している。

燃料挙動可視カプセルの試験部にはこの他に照明用ランプ、燃料位置調整機構が装備されている。また、ガス雰囲気の実験を行う場合にはFig. 2.4に示すように、実験燃料棒の周囲を石英管で囲み石英管の内部をガス雰囲気とした。この可視カプセルを使用した実験により得られたデータ及び撮影フィルムによって温度評価を行った。なお、燃料棒の発熱色により温度を評価する実験では、外乱を少なくするために照明用ランプは点灯せずに実験を行った。

### 3. 発熱色からの温度評価の原理

全ての物体は、絶体零度でない限り熱放射線を発散している。それは、いろいろな波長成分からなっている。各波長の放射線を単色放射線(monochromatic radiating ray)と呼び、すべての波長の単色放射線をまとめたものを全放射線(total radiating ray)という。また、それぞれの放射線のもつエネルギーについても単色放射エネルギーおよび全放射エネルギーとよぶ。単色放射エネルギーの波長による変化(スペクトル分布)及び全放射エネルギーは、物体の性質と温度に関係する。

物体の単位表面積から単位時間に放射される波長 $\lambda$ の単色放射エネルギー(放射熱流束) $E_\lambda$ を放射能(emissive power)と呼び、これを全波長について積分したのが全放射能 $E$ である。

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda \quad (3.1)$$

放射能 $E$ は、その物体の温度と表面の性質によって定まり、周囲の物体の性質には左右されない。

物体の温度が一定に保たれていることは、その物体が一定時間内に吸収するエネルギーとそれ自体から放射するエネルギーとが等しいということであるから、すべての波長の放射線を吸収する完全黒体はその温度において、すべての波長の放射線を同一の割合で放射することになる。黒体の単位表面積から単位時間に放射される全エネルギー、すなわち、全放射能 $E$ は、その温度にのみ関係する。絶体温度が $T$ の黒体の単色放射能 $E_\lambda$ は次式で与えられる。

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.2)$$

この式は、Planckが量子仮説を導入して、理論的に導いたもので、一般にプランクの法則(Planck's law)と呼ばれている。式中の $C_1$ および $C_2$ は普遍定数で、物理定数を用いて表せば、次のように表される。

がカラーフィルムに撮影される仕組みとなっている。ペリスコープの周囲には、撮影用フィルムへの放射線の影響を避けるためにボロン入りパラフィン及び鉛による遮蔽を行っている。また、ペリスコープの光路には放射線による変質が比較的少ないノンブラウニングBK7ガラス製の特殊レンズを22個使用している。

燃料挙動可視カプセルの試験部にはこの他に照明用ランプ、燃料位置調整機構が装備されている。また、ガス雰囲気の実験を行う場合にはFig. 2.4に示すように、実験燃料棒の周囲を石英管で囲み石英管の内部をガス雰囲気とした。この可視カプセルを使用した実験により得られたデータ及び撮影フィルムによって温度評価を行った。なお、燃料棒の発熱色により温度を評価する実験では、外乱を少なくするために照明用ランプは点灯せずに実験を行った。

### 3. 発熱色からの温度評価の原理

全ての物体は、絶体零度でない限り熱放射線を発散している。それは、いろいろな波長成分からなっている。各波長の放射線を単色放射線(monochromatic radiating ray)とよび、すべての波長の単色放射線をまとめたものを全放射線(total radiating ray)という。また、それぞれの放射線のもつエネルギーについても単色放射エネルギーおよび全放射エネルギーとよぶ。単色放射エネルギーの波長による変化(スペクトル分布)及び全放射エネルギーは、物体の性質と温度に関係する。

物体の単位表面積から単位時間に放射される波長 $\lambda$ の単色放射エネルギー(放射熱流束) $E_\lambda$ を放射能(emissive power)と呼び、これを全波長について積分したのが全放射能 $E$ である。

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda \quad (3.1)$$

放射能 $E$ は、その物体の温度と表面の性質によって定まり、周囲の物体の性質には左右されない。

物体の温度が一定に保たれていることは、その物体が一定時間内に吸収するエネルギーとそれ自体から放射するエネルギーとが等しいということであるから、すべての波長の放射線を吸収する完全黒体はその温度において、すべての波長の放射線を同一の割合で放射することになる。黒体の単位表面積から単位時間に放射される全エネルギー、すなわち、全放射能 $E$ は、その温度にのみ関係する。絶体温度が $T$ の黒体の単色放射能 $E_\lambda$ は次式で与えられる。

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.2)$$

この式は、Planckが量子仮説を導入して、理論的に導いたもので、一般にプランクの法則(Planck's law)と呼ばれている。式中の $C_1$ および $C_2$ は普遍定数で、物理定数を用いて表せば、次のように表される。

$$C_1 = 2\pi c_0^2 h = 3.74041 \times 10^{-16} \quad [\text{Wm}^2]$$

$$C_2 = c_0 h / k = 1.4368 \times 10^{-2} \quad [\text{mK}]$$

ここに、 $c_0$ ：真空中の光の速度、 $h$ ：プランクの定数、 $k$ ：ボルツマン定数である<sup>③</sup>。

温度を測定する際、対象物の温度が高温である場合については光学的方法によることが一般的である。光学的方法として、1つの波長での輝度温度(Brightness Temperature)ならびに、2波長での輝度比を用いて分布色温度(Distribution Temperature)とがよく用いられる。

熱せられた物質の発光現象で発生した発熱光の波長(色)は、プランクの法則に示されるように温度によって定まる。つまり、温度に対して波長は、1対1に対応をしている。光学的温度測定方法の基本原理は、このことから、黒体の単色放射能のスペクトル分布曲線上で極大値を与える波長が放射体の絶体温度に逆比例するというヴィーンの変位則(Wien's displacement law)より黒体の単色放射能のスペクトル分布の波長から黒体の温度が計算できるということを基にしている。

光源を直接眼で見る場合の明るさの感じに対応する温度つまり光源の正射影の単位当りの光度に対応する温度を輝度温度というが、この輝度温度の原理について説明する。先に述べたように、ある温度Tの黒体の輝度、つまり波長λに於けるエネルギー量Eλはプランクの法則(Planck's law)より(3.2)式となるが、黒体でない物体からの放射エネルギーは、同じ温度にある黒体の輝度Eλに物体の放射率εを乗じた量に等しいので、

$$E_\lambda = \frac{\varepsilon C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.3)$$

となる。また、測定装置で受ける放射エネルギーは、測定装置から物体までの空間の透過率τを真温度Tの物体からの放射エネルギーに乗じた量に等しいので、

$$E_\lambda = \frac{\tau \varepsilon C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.4)$$

となる。可視波長領域は400~760×10<sup>-9</sup>mであり、τ ≈ 1であるので以下の近似式が成り立つ。

$$E_\lambda = \frac{\tau \varepsilon C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} \quad (3.5)$$

ここで、 $C_1$ 、 $C_2$  は定数、

$\varepsilon$  : 物体の放射率

$\tau$  : 測定装置から物体までの空間に於ける透過率で

空間中に吸収物体がある時にはその透過率

である。

式(3.5)により真温度は求められるが、この式を見てみるとε、τの値によって得られる

真温度は大きく変化する。一般に  $\varepsilon$  は物体によって不明であることが多く、また測定空間中に蒸気、水流などの吸収物体があるときは  $\tau$  の値も変化するので、得られる輝度温度も大きく変動する。このため実用的には輝度が既知の光源を同時に撮影し、その値から輝度温度の測定を行う。

次に、分布色温度の原理について説明する。黒体からの放射エネルギー分布は波長に対して連続に変化するのでその分布の形状は、2つの波長帯での放射エネルギーの比（2波長比）で規定される。いま、波長  $\lambda_0$ を中心とした幅  $\Delta\lambda$  の狭い波長帯域での放射エネルギーを  $E_0$  とすると、

$$E_0 = \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} E_\lambda d\lambda \quad (3.6)$$

黒体でない物体からの可視光による放射エネルギー  $E_0$  は、(3.5)式より、

$$E_0 = \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} \frac{\tau \varepsilon C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} d\lambda = \frac{\beta_0 \tau_0 \varepsilon_0}{\lambda_0^5 e^{\frac{C_2}{\lambda_0 T}}} \quad (3.7)$$

となる。ここで、  
 $\beta_0$  : 比例係数

$\varepsilon_0$  : 波長  $\lambda_0$  での物体の放射率(Emissivity)

$\tau_0$  : 波長  $\lambda_0$  での測定点から物体までの空間の透過率

である。波長  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  における放射エネルギーを  $E_1$ 、 $E_2$  とすると2波長比( $R$ )は、次式で表される。

$$R = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\beta_1 \tau_1 \varepsilon_1}{\beta_2 \tau_2 \varepsilon_2} \cdot \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \cdot \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda_2 T}}}{e^{\frac{C_2}{\lambda_1 T}}}$$

$$\therefore \log R = \log\left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) + \log\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) + \log\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) + 5\log\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \quad (3.8)$$

ただし、  
 $C_2' = C_2 \log(e)$

である。ここで、 $\Delta\lambda$  が十分に小さい単色光  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  であれば  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  は、ほぼ等しく  $\beta_1/\beta_2=1$  となる。発熱物体の放射率が波長に対して独立であるような灰色物体(Gray Body)については、 $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1$  となる。また、冷却材及び観測光学機器の透過率が波長に対してあまり変動しないとき  $\tau_1/\tau_2=1$  となる。

以上の条件下で式(3.8)をまとめると、次のようになる。

$$\log R = C_3 + \frac{C_4}{T} \quad (3.9)$$

ここで、定数  $C_3$ 、 $C_4$  は

$$C_3 = 5\log\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right), \quad C_4 = C_2' \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \log e$$

である。式(3.9)からわかるように、2波長比は温度の逆数に比例する。しかも、測定物体の放射率に無関係であり、かつレンズ及び冷却材の透過率にも影響されることはない<sup>2)3)</sup>。

Fig.3.1 は、R(660nm)、G(560nm)、B(440nm) の単色光を用いた時の2波長比、R/G、B/R、B/Gを温度に対して表示したもので、いずれも温度に対して線形性を示す。この中で、B/Rの傾度(Gradient)が最も大きいので色温度測定には、BとRを用いることとする。

#### 4. 可視カプセル実験への色温度評価法の適用

可視カプセル実験において燃料挙動の撮影に使用しているカラーフィルムは、赤(R)、緑(G)、青(B)の3つの波長帯に感度を持つ積分検知器といえるので、2波長比を用いて温度を計測できる可能性がある。光はカラーフィルムにR、G、Bの3つの波長帯に反応する3つの発色層の濃度(カラー濃度)として記録される。しかし、各発色層の分光感度はFig. 4.1 に示すように、各層の感度帯域に拡がりがあり、互いにオーバーラップしている(①感度帯域の効果)。さらに、カラー濃度と露光量との関係は線形ではなく、Fig. 4.2 に示すように露光量の対数に対してカラー濃度はS字形となり非線形特性を示す(②感度の非線形性の効果)。従って、カラーフィルムを用いた温度評価を行うに当たっては、これらの効果を考慮して、カラー濃度比が2波長比と同様に温度の逆数に比例するかどうかを確かめる必要がある。

まず、①の感度帯域の効果については、Fig. 4.1 で示したカラーフィルムのR、G、B各層の分光感度を  $S_R$ 、 $S_G$ 、 $S_B$  とすると、色温度Tの物体のフィルム各層に記録された放射エネルギーEは、次式で表される<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} E_R(T) &= \int S_R(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \\ E_G(T) &= \int S_G(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \\ E_B(T) &= \int S_B(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、 $N(T, \lambda)$ は色温度(T)の物体から波長 $\lambda$ について放射されるエネルギーでウィーンの変位則によって与えられる。

各感度域について、Fig. 4.1の分光感度曲線を用いて(4.1)式の積分を実行し、比を取ると、各感度域での入射エネルギー比と温度の関係(Fig. 4.3)が得られる。図からわかるように  $\log(G/R)$ 、 $\log(B/G)$ 、 $\log(B/R)$  に対しては、ほぼ線形性を示しており、カラーフィルムによる温度計測が可能であることが分かる。また、 $\log(B/R)$ が $1/T$ に対しても最も傾度が大きいため、RとBの比を用いることにより高い測定精度で温度の計測が可能となる。

カラーフィルムに入射したエネルギーは、各発色層の濃度(カラー濃度)として記録される。そこで逆にカラー濃度からフィルムに入射した放射エネルギー量(露光量)を求める必要

である。式(3.9)からわかるように、2波長比は温度の逆数に比例する。しかも、測定物体の放射率に無関係であり、かつレンズ及び冷却材の透過率にも影響されることはない<sup>23)</sup>。

Fig.3.1 は、R(660nm)、G(560nm)、B(440nm) の単色光を用いた時の2波長比、R/G、B/R、B/Gを温度に対して表示したもので、いずれも温度に対して線形性を示す。この中で、B/Rの傾度(Gradient)が最も大きいので色温度測定には、BとRを用いることとする。

#### 4. 可視カプセル実験への色温度評価法の適用

可視カプセル実験において燃料挙動の撮影に使用しているカラーフィルムは、赤(R)、緑(G)、青(B)の3つの波長帯に感度を持つ積分検知器といえるので、2波長比を用いて温度を計測できる可能性がある。光はカラーフィルムにR、G、Bの3つの波長帯に反応する3つの発色層の濃度(カラー濃度)として記録される。しかし、各発色層の分光感度はFig. 4.1 に示すように、各層の感度帯域に拡がりがあり、互いにオーバーラップしている(①感度帯域の効果)。さらに、カラー濃度と露光量との関係は線形ではなく、Fig. 4.2 に示すように露光量の対数に対してカラー濃度はS字形となり非線形特性を示す(②感度の非線形性の効果)。従って、カラーフィルムを用いた温度評価を行うに当たっては、これらの効果を考慮して、カラー濃度比が2波長比と同様に温度の逆数に比例するかどうかを確かめる必要がある。

まず、①の感度帯域の効果については、Fig. 4.1 で示したカラーフィルムのR、G、B各層の分光感度を  $S_R$ 、 $S_G$ 、 $S_B$  とすると、色温度Tの物体のフィルム各層に記録された放射エネルギーEは、次式で表される<sup>6)</sup>。

$$\begin{aligned} E_R(T) &= \int S_R(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \\ E_G(T) &= \int S_G(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \\ E_B(T) &= \int S_B(\lambda)N(T, \lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、 $N(T, \lambda)$ は色温度(T)の物体から波長 $\lambda$ について放射されるエネルギーでウィーンの変位則によって与えられる。

各感度域について、Fig. 4.1の分光感度曲線を用いて(4.1)式の積分を実行し、比を取ると、各感度域での入射エネルギー比と温度の関係(Fig. 4.3)が得られる。図からわかるように  $\log(G/R)$ 、 $\log(B/G)$ 、 $\log(B/R)$  に対しては、ほぼ線形性を示しており、カラーフィルムによる温度計測が可能であることが分かる。また、 $\log(B/R)$ が $1/T$ に対しても最も傾度が大きいため、RとBの比を用いることにより高い測定精度で温度の計測が可能となる。

カラーフィルムに入射したエネルギーは、各発色層の濃度(カラー濃度)として記録される。そこで逆にカラー濃度からフィルムに入射した放射エネルギー量(露光量)を求める必要

がある。しかし、②感度の非線形性の効果のため、カラー濃度は露光量の対数に対してS字形となり非線形の関係にある。しかも、この特性曲線はフィルムの種類、現像条件及び実験条件によって異なるため、予め実験状態に合わせた特性曲線を求める必要がある。

そこで、可視カプセル実験では1,500Wのハロゲンランプ及びステップウェッジ(Step Wedge：光量をステップ状に変化させるために濃度をステップ状に変化させたND(Neutral Density)フィルタ)をもった較正用標準光源装置(Fig. 4.4)を作り、実験前及び実験後において可視カプセル用ペリスコープを用い、実験と同一種類同一ロットのカラーフィルムを装填して、標準光源を撮影して露光量とカラー濃度の特性曲線を求めた。なお、現像条件を揃えるため、実験の撮影フィルムと標準光源の撮影フィルムは同一ロットで現像を行った。

以上まとめると、カラーフィルムは積分型検出器であり、①感度帯域の効果②感度の非線形性の効果を考慮し、補正を行う必要があるが、基本的には前章で示した2波長比と温度の関係を用いてカラー濃度から被写体の温度を評価することが出来る。以下に、実際の評価作業における手法について、具体的に記す。

カラーフィルムの色による温度評価作業の流れをFig. 4.5に示す。まず、可視カプセル実験に前後して、標準光源を用いた特性試験を行う。得られた撮影フィルムを同時に現像し、機械式スキャナーによりカラー濃度を求めA/D変換を行ってデジタルのカラー濃度を得る。特性試験結果から、露光量とカラー濃度の関係を示す特性曲線を作る。この特性曲線から可視カプセル実験での露光量を評価し、カラーフィルム各感度域での入射エネルギー比を得る。また、別にカラーフィルムの分光感度曲線より、各感度域での入射エネルギー比と温度の関係を求め、これを可視カプセル実験の撮影フィルムに適応することで燃料温度を評価する。この時、可視カプセル実験において熱電対により測定された温度を用いて評価結果を較正する。温度の評価結果は温度分布としてCRT画面上に表示出来るようにした。

標準光源装置により露光量とカラー濃度の特性曲線を求める実験では、Fig. 4.4に示す装置を用いて露光量が既知の光源の撮影を行った。可視カプセル実験における広範囲の露光量領域に対応するために、ステップウェッジによる光量の変化に加えて、シャッタースピードおよび光源出力を変化させて撮影した。フィルムのカラー濃度を評価する際には、100ftのフィルムのほぼ中間付近の、撮影速度が一定の部分から5コマを抜き出し、スキャナーでA/D変換を行い、平均化してカラー濃度とした。変換は8bitで行い、カラー濃度の最低値0.0のときカラー濃度カウンターの表示が255になるように設定した。Fig. 4.6は相対入射エネルギーとカラー濃度カウンターのカウントとの関係を示した特性曲線の例である。これらの特性曲線を用いて試験カラー画像の濃度を入射エネルギー値に変換して処理した。

可視カプセル実験における燃料挙動は高速度カメラによって毎秒約220コマで約15秒間撮影される。温度は、被覆管表面に取り付けられた熱電対で測定される。熱電対の取り付け位置は、実験により多少異なるが5章で示すように、撮影視野内の4~6点で測定されている。熱電対は通常パルス照射後約0.2~0.3s後に2,000K程度を記録し切断している。色温度を評価する際には、長く破損しなかった熱電対による測定温度を基準として温度を較正し、評価した。通常、可視カプセル実験ではパルス照射後0.2sまでは、照射に伴う光学系レンズ

の瞬間的な透過率の低下と発熱光不足のために、肉眼ではかろうじて観察できるが、スキャナーで濃度測定を行うと、露光量不足のため充分な精度でA/D変換ができないので、照射後約0.2s経過した画像から処理を開始している。このため、カラーフィルムの各感度域での入射エネルギー比と温度の関係を、熱電対による測温結果により補正するための画像データは、パルス照射後約0.2~0.3sの短時間のものに限られる。処理画像は、1実験当たり合計約30枚で0.2~8.0s程度までの比較的画質の良い画像を選んで処理を行った。

画像のA/D変換は機械式ドラムスキャナーにより、スキャニングピッチ $50\mu\text{m}$ 、スキャニングアパートチャ $-50\mu\text{m}$ で走査し、8bitデジタルデータとして磁気テープ(MT)に記録した。画像処理のフローは、可視カプセル実験フィルム画像の走査と同時にステップウェッジによる特性試験フィルムを同様に走査し、Fig. 4.6に示すような入射エネルギーを算出するための特性曲線を作成し、この特性曲線を用いて、カラーフィルムのR、G、B層に入射したエネルギー量及び $\log(B/R)$ の値を各ピクセル毎に計算し、温度データを求める。この場合、 $\log(B/R)$ と $1/T$ との間に直線関係があることから、較正用熱電対の位置のピクセルについて得られた $\log(B/R)$ の値を通り、Fig. 4.3に示す $\log(B/R)$ と $1/T$ の直線に平行な直線をこの画像に於ける温度較正曲線として、温度を計算し温度パターンを作成した。その温度パターンをMTに記録し、その後スマージング及びレベルスライス法により等温曲線を求めX-Yプロッターにより記録した。熱電対切断後は、最終温度画像の較正曲線を外挿して使用した。

## 5. 結 果

色温度の評価手法を3回の炉内実験に適用した。2回の実験は実験燃料を静止水中で核加熱したものであり、最後の実験ではヘリウムガス雰囲気中で核加熱した。実験の主要な条件をTable 5.1にまとめた。これら3実験において得られた評価結果、問題点等を以下にまとめる。

### 5.1 水冷却条件における燃料挙動

#### 実験600-15

実験600-15では10%濃縮の標準型実験燃料棒に燃料1g当り256calの発熱量を与えた。この実験では、パルス照射後約1秒で被覆管表面温度は1,873K(1,600°C)を超え、被覆管表面温度測定用の熱電対は全て破損した。Fig. 5.1<sup>7)</sup>に同実験における被覆管温度の測定記録を示す。実験燃料はFig. 5.2に示す様にパルス直後から全面に渡って膜沸騰に覆われ、被覆管は酸化すると共に大きく波打つ様に変形した。被覆管の脆化は著しく、実験燃料棒はカプセル解体中に分断し10体程度になった(Fig. 5.3)。

同実験に色温度評価法を適用して得られた温度分布を時間を追ってFig. 5.4に示す。実験

の瞬間的な透過率の低下と発熱光不足のために、肉眼ではかろうじて観察できるが、スキャナーで濃度測定を行うと、露光量不足のため充分な精度でA/D変換ができないので、照射後約0.2s経過した画像から処理を開始している。このため、カラーフィルムの各感度域での入射エネルギー比と温度の関係を、熱電対による測温結果により補正するための画像データは、パルス照射後約0.2~0.3sの短時間のものに限られる。処理画像は、1実験当たり合計約30枚で0.2~8.0s程度までの比較的画質の良い画像を選んで処理を行った。

画像のA/D変換は機械式ドラムスキャナーにより、スキャニングピッチ $50\mu\text{m}$ 、スキャニングアパートチャ $50\mu\text{m}$ で走査し、8bitデジタルデータとして磁気テープ(MT)に記録した。画像処理のフローは、可視カプセル実験フィルム画像の走査と同時にステップウェッジによる特性試験フィルムを同様に走査し、Fig. 4.6に示すような入射エネルギーを算出するための特性曲線を作成し、この特性曲線を用いて、カラーフィルムのR、G、B層に入射したエネルギー量及び $\log(B/R)$ の値を各ピクセル毎に計算し、温度データを求める。この場合、 $\log(B/R)$ と $1/T$ との間に直線関係があることから、較正用熱電対の位置のピクセルについて得られた $\log(B/R)$ の値を通り、Fig. 4.3に示す $\log(B/R)$ と $1/T$ の直線に平行な直線をこの画像に於ける温度較正曲線として、温度を計算し温度パターンを作成した。その温度パターンをMTに記録し、その後スムージング及びレベルスライス法により等温度曲線を求めX-Yプロッターにより記録した。熱電対切断後は、最終温度画像の較正曲線を外挿して使用した。

## 5. 結 果

色温度の評価手法を3回の炉内実験に適用した。2回の実験は実験燃料を静止水中で核加熱したものであり、最後の実験ではヘリウムガス雰囲気中で核加熱した。実験の主要な条件をTable 5.1にまとめた。これら3実験において得られた評価結果、問題点等を以下にまとめる。

### 5.1 水冷却条件における燃料挙動

#### 実験600-15

実験600-15では10%濃縮の標準型実験燃料棒に燃料1g当り256calの発熱量を与えた。この実験では、パルス照射後約1秒で被覆管表面温度は1,873K(1,600°C)を超え、被覆管表面温度測定用の熱電対は全て破損した。Fig. 5.1<sup>7)</sup>に同実験における被覆管温度の測定記録を示す。実験燃料はFig. 5.2に示す様にパルス直後から全面に渡って膜沸騰に覆われ、被覆管は酸化すると共に大きく波打つ様に変形した。被覆管の脆化は著しく、実験燃料棒はカプセル解体中に分断し10体程度になった(Fig. 5.3)。

同実験に色温度評価法を適用して得られた温度分布を時間を追ってFig. 5.4に示す。実験

燃料はそれぞれの画面の左下から右上に伸び傾いて見えるが、実際には直立している。右下より燃料棒表面に向かって伸びる線状の低温部は、水温測定用の熱電対である。同図に見られる様に、燃料棒の映像は膜沸騰によって大きく歪み、カプセル内壁による反射光と見られる高温部が実際の燃料棒の右下方に見られる。燃料棒中央付近の温度は最高2,400K(2,127°C)を超えた。燃料棒中央付近の色温度評価結果の時間変化を以下にまとめた。なお、時刻はパルス照射時を0とした。なお、パルスの半値幅は10ms以下であり、実質的に時刻0でエネルギーの全てが燃料に投入されると考えてよい。被覆管表面温度は、燃料ペレットと被覆管のギャップ熱伝達、被覆管の熱容量、さらに被覆管の熱伝導によってやや遅れて上昇する。

時刻(s)	被覆管表面温度(K)	出来事
0		パルス照射
0.28	1,600	
0.33	1,700	
1.0	1,900	ほぼ均一な温度分布
2.0	2,200	
3.0	2,200	最高温度
3.6	2,000	色温度再び上昇を始める
4.8	2,400	2回目の最高温度

色温度の評価結果は、4.8秒に2度目のピークを迎え被覆管表面温度は最高となっている。実際の燃料挙動を示したFig. 5.2では燃料表面の輝度は3秒以後明らかに減少しており、4.8秒における最高温度は明らかに後評価と考えられる。この実験においては、フィルムの露光特性を求める較正実験時に光量が不足したため、較正曲線を外挿して評価した。このため高温域の評価精度は悪い。また、気泡の発生により燃料棒の像が歪んでいる。また実験カプセルの内壁による反射光により、燃料棒周辺の温度が燃料棒自体と同等に評価された。

### 実験600-19

実験600-19では10%濃縮の標準型実験燃料棒に燃料1g当たり280calの発熱量を与えた。実験600-15に比べてやや大きい発熱量が与えられたため、被覆管表面温度はより速く(パルス後0.2s程度)で1,873K(1,600°C)以上を記録し、測定用の熱電対は全て破損した<sup>④</sup>。また燃料棒周辺の水温を測定するための熱電対は一時的に気泡に包まれ、温度は473K(200°C)を越えた(Fig. 5.5)。高速度カメラにより測定された燃料棒の過渡挙動をFig. 5.6に示す。本実験では、実験カプセル内壁を黒色処理し、実験燃料の発熱光が反射するのを防いだ。この効果により燃料棒以外の部分の反射光はかなり抑えられている。実験終了後の燃料の様子をFig. 5.7に示す。実験600-15と同様に被覆管は酸化し、大きく変形しており、燃料棒は6つに分断していた。燃料下部には、1度溶融した被覆管が固化しているのが分かる。

本実験では、照射実験時に撮影フィルムに入射した光量が過多となり、フィルムが飽和してしまったため、温度評価はパルス後約0.55sまで打切った。燃料棒中央付近の色温度の

評価値の時間変化を以下にまとめた。

時刻(s)	被覆管表面温度(K)	出来事
0		パルス照射
0.26	2,200	
0.336	2,000	最高温度
0.55	2,000	気泡による外乱大

中心付近の評価温度分布は時間の経過に伴い、むしろ低下している。これらの時刻における燃料の写真及び温度分布の評価結果をFig. 5.8に示す。撮影されたフィルム写真そのものでは、燃料表面からの発熱光の輝度は増しており、時間経過につれ温度が低下していったという評価結果は信じ難い。また、中央部に比べて周辺部の温度が高く評価されており、気泡による外乱が非常に大きい事が分かる。

## 5.2 ヘリウムガス雰囲気における燃料の挙動

### 実験600-21

実験600-21では、前述の水冷却条件における実験での気泡による外乱を避けるためにヘリウムガス雰囲気で燃料を加熱した。実験燃料には燃料1g当たり約190calの発熱量を与えた。Fig. 5.9に実験燃料周辺の構造を示す。実験燃料は直径約30mmの石英管に囲まれており、石英管内は実験時にはヘリウムガスで満たされた。また、石英管はペリスコープの視野部は4角柱形状に処理し、映像及び発熱光の歪を避けた。実験燃料に隣接して、ペリスコープの照明用ランプが位置している。照明用のランプは他の色温度評価実験と同様に焦点設定及び照射実験前後の写真撮影に用い、照射実験中には使用しなかった。また、石英管を貫通して燃料棒表面に達している細線は白金／白金ロジウム熱電対であり、他にヘリウムガス雰囲気温度測定用熱電対(クロメルーアルメル)1対も設置した。Fig. 5.10に熱電対の取付け位置と燃料挙動撮影時の視野の関係を示す。また前回の実験600-19では、燃料挙動撮影時に露光量が過多となりフィルムの発色層の濃度(カラー濃度)が飽和してしまった撮影上の問題を避けるため、今回は高速度カメラにNo.5のNDフィルタ(Neutral Density Filter: 光量を全スペクトルに渡り均一に低下させるための灰色のフィルタ)を装着して、露光過多となるないように工夫した。Fig. 5.11にNDフィルム装着後の高速度カメラを示す。

露光量とカラー濃度の関係を求める特性試験データをTable 5.2にまとめた。今回の実験では、実験での露光量が較正範囲を越える事のないように、NDフィルタを用いた低露光領域からフィルムの撮影速度を遅くし、シャッタースピードを長くとった高露光領域までの7段階の較正実験を行った。各較正実験では、4.2章に示した様にステップウェッジを介して標準光源を、出力約300W、450W、600Wの3段階でそれぞれ撮影した。(3.9)式により純粹に理論値として2波長比 $\log(B/R)$ と温度Tの関係は得られるが、放射率や透過率について行っ

た近似による誤差を較正するために、温度評価に当っては被覆管温度測定熱電対#4の測定値を用いてFig. 4.3の $\log(B/R)$ とTの関係を補正(平行移動)して用いた。また、Table 5.3にこの実験における温度評価における2波長比と温度の関係を示す。

実験の結果得られた燃料棒の映像をFig. 5.12に示す。燃料はパルス照射により赤熱し、被覆管は溶融し流れ落ちた。色温度の評価結果を対比して同じFig. 5.12に示す。パルス照射直後の0.24sで、燃料棒は赤熱し始め見え始めた。表面温度分布は不均一で、ペレット一ペレット境界部に相当する位置に暗く見える低温部が見られた。1.2sでは被覆管は溶融し筋状に移動し始めた。このため被覆管の厚い部分と薄い部分が現れ燃料表面は場所によって300K程度の違いが見られる。2.8sでは被覆管はほとんど流れ落ちてしまい、表面温度はほぼ均一で2,400K以上に達した。表面温度はこの時点でピークとして徐々に低下して行き、7.6sでは約2,000K程度となった。ペリスコープ視野の中心部に取付けた被覆管温度測定用熱電対#2の測定結果とその位置での色温度評価結果による温度の時間履歴をFig. 5.13及びFig. 5.14に示す。色温度の評価結果は、破損直前の熱電対による測定結果を50~100K程度低く評価しているがほぼ妥当な値を示している。実験600-15や600-19の評価結果に現れた温度の一時的な低下も見られず、温度分布も輝度分布とよく対応している。

Table 5.4に実験600-21で観察された主な出来事と温度評価結果をまとめて示す。被覆管表面温度は、0.3sから0.4sの間にジルカロイの融点である2,110Kを超えた。実験による映像ではこの時点では被覆管の溶融移動によると考えられる偏肉が始まっている。この約1s後、1.5sより被覆管の溶融落下が始まった。その時点では被覆管温度は2,250~2,400Kに達したものと評価された。被覆管の落下速度は約0.1m/sであった。Fig. 5.15に実験終了後の燃料の外観を示す。被覆管は広い範囲で溶融流れ落ち、燃料ペレット表面に薄い膜が残っているのである。燃料ペレット下部には再固化した被覆管が見られる。

## 6. 結 論

2色の光の強度比による温度評価法を炉内実験における燃料表面温度の測定に応用した。具体的には、NSRR可視カプセル実験によって得られた事故時の燃料挙動を撮影した16mmカラーフィルムを解析し、燃料の表面温度を評価した。その結果、水冷却条件の燃料挙動は水の沸騰により像が乱れるため正確な評価は行えなかったが、ガス冷却条件の燃料の温度評価には成功した。以下に得られた主な知見をまとめると。

1) NSRRにおける炉内燃料挙動可視実験に2色式色温度評価法を適用し手法を確立した。燃料の発熱光の輝度は、通常の標準光源の輝度に比べて大きいため、NDフィルターを用いて実験時の輝度を落としておく事が、実験技術上重要である。また、フィルムによる評価の場合にはフィルム特性に加え、現像条件を合わせる事が重要であり、標準光源を用いた較正実験は、あらかじめ広い輝度範囲(NDフィルターを用いたり、撮影スピードを変えたりする)で行っておき、実際撮影フィルムと同時に現像する必要がある。

た近似による誤差を較正するために、温度評価に当っては被覆管温度測定熱電対#4の測定値を用いてFig. 4.3の $\log(B/R)$ とTの関係を補正(平行移動)して用いた。また、Table 5.3にこの実験における温度評価における2波長比と温度の関係を示す。

実験の結果得られた燃料棒の映像をFig. 5.12に示す。燃料はパルス照射により赤熱し、被覆管は溶融し流れ落ちた。色温度の評価結果を対比して同じFig. 5.12に示す。パルス照射直後の0.24sで、燃料棒は赤熱し始め見え始めた。表面温度分布は不均一で、ペレット一ペレット境界部に相当する位置に暗く見える低温部が見られた。1.2sでは被覆管は溶融し筋状に移動し始めた。このため被覆管の厚い部分と薄い部分が現れ燃料表面は場所によって300K程度の違いが見られる。2.8sでは被覆管はほとんど流れ落ちてしまい、表面温度はほぼ均一で2,400K以上に達した。表面温度はこの時点でピークとして徐々に低下して行き、7.6sでは約2,000K程度となった。ペリスコープ視野の中心部に取付けた被覆管温度測定用熱電対#2の測定結果とその位置での色温度評価結果による温度の時間履歴をFig. 5.13及びFig. 5.14に示す。色温度の評価結果は、破損直前の熱電対による測定結果を50~100K程度低く評価しているがほぼ妥当な値を示している。実験600-15や600-19の評価結果に現れた温度の一時的な低下も見られず、温度分布も輝度分布とよく対応している。

Table 5.4に実験600-21で観察された主な出来事と温度評価結果をまとめて示す。被覆管表面温度は、0.3sから0.4sの間にジルカロイの融点である2,110Kを超えた。実験による映像ではこの時点で被覆管の溶融移動によると考えられる偏肉が始まっている。この約1s後、1.5sより被覆管の溶融落下が始まった。その時点では被覆管温度は2,250~2,400Kに達したものと評価された。被覆管の落下速度は約0.1m/sであった。Fig. 5.15に実験終了後の燃料の外観を示す。被覆管は広い範囲で溶融流れ落ち、燃料ペレット表面に薄い膜が残っているのである。燃料ペレット下部には再固化した被覆管が見られる。

## 6. 結 論

2色の光の強度比による温度評価法を炉内実験における燃料表面温度の測定に応用した。具体的には、NSRR可視カプセル実験によって得られた事故時の燃料挙動を撮影した16mmカラーフィルムを解析し、燃料の表面温度を評価した。その結果、水冷却条件の燃料挙動は水の沸騰により像が乱れるため正確な評価は行えなかったが、ガス冷却条件の燃料の温度評価には成功した。以下に得られた主な知見をまとめると。

1) NSRRにおける炉内燃料挙動可視実験に2色式色温度評価法を適用し手法を確立した。燃料の発熱光の輝度は、通常の標準光源の輝度に比べて大きいため、NDフィルターを用いて実験時の輝度を落としておく事が、実験技術上重要である。また、フィルムによる評価の場合にはフィルム特性に加え、現像条件を合わせる事が重要であり、標準光源を用いた較正実験は、あらかじめ広い輝度範囲(NDフィルターを用いたり、撮影スピードを変えたりする)で行っておき、実際撮影フィルムと同時に現像する必要がある。

2)ヘリウムガス冷却で行った実験の解析により、熱電対破損後の温度の時間履歴、温度分布が初めて評価出来た。

3)ヘリウムガス雰囲気で行った実験の解析により、被覆管の移動は被覆管が融点に達した直後に始まるものの、大規模な被覆管の流れ落ちが始まったのは約1s後で、その時点では温度は融点より約100~200K高くなっていた事が分かった。

4)水冷却条件の実験の温度評価は、気泡の発生による像の乱れが大きく、気泡によるプリズム効果等のために適正な評価が出来なかった。

今後の課題として改善すべく点を挙げるとすれば、フィルムを使わないビデオ方式への変更がまず第1に考えられる。画像処理による温度評価を行う上では、これによりデータ入力が容易になるばかりでなく、位置の同定がより正確に行え、かつ現像処理が不要になるため較正実験を後から何度も行える利点がある。実用化に際しては、ビデオ入力による露光量-色濃度特性を中心に、経時変化、放射線による影響等を評価検討する必要がある。

### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、指導頂いた反応度安全研究室の藤城俊夫室長に感謝の意を表します。また、実験の遂行に協力下さった堀木欧一郎NSRR主任技術者ならびに小林晋昇NSRR管理室長をはじめとするNSRR管理室の皆さんに感謝の意を表します。

2)ヘリウムガス冷却で行った実験の解析により、熱電対破損後の温度の時間履歴、温度分布が初めて評価出来た。

3)ヘリウムガス雰囲気で行った実験の解析により、被覆管の移動は被覆管が融点に達した直後に始まるものの、大規模な被覆管の流れ落ちが始まったのは約1s後で、その時点では温度は融点より約100~200K高くなっていた事が分かった。

4)水冷却条件の実験の温度評価は、気泡の発生による像の乱れが大きく、気泡によるプリズム効果等のために適正な評価が出来なかった。

今後の課題として改善すべく点を挙げるとすれば、フィルムを使わないビデオ方式への変更がまず第1に考えられる。画像処理による温度評価を行う上では、これによりデータ入力が容易になるばかりでなく、位置の同定がより正確に行え、かつ現像処理が不要になるため較正実験を後から何度も行える利点がある。実用化に際しては、ビデオ入力による露光量-色濃度特性を中心に、経時変化、放射線による影響等を評価検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、指導頂いた反応度安全研究室の藤城俊夫室長に感謝の意を表します。また、実験の遂行に協力下さった堀木欧一郎NSRR主任技術者ならびに小林晋昇NSRR管理室長をはじめとするNSRR管理室の皆さんに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) S. Saito et al., "Development of In-reactor Fuel Behavior Observation Facility", J. Nucl. Sci. Tech. Vol.18, No.16, June 1981.
- 2) S. Saito et al., "Measurement and Evaluation on Pulsing Characteristics and Experimental Capability", J. of Nucl. Sci. Tech. Vol.14, No.3, 1977.
- 3) 西川兼康, 藤田恭伸, "伝熱学", 理工学社, 1982.
- 4) 電気学会通信教育会, "光と画像の基礎工学", オーム社, 1984.
- 5) 福田 保, "色の測定と応用", 日刊工業新聞社, 1962.
- 6) 久保田広, 漢田祐吉, 會田軍太夫, "光学技術ハンドブック 増補版", 朝倉書店, 1975.
- 7) 反応度安全研究室, NSRR管理室, "NSRR実験プログレスレポート15", JAERI-M 84-168  
1984.
- 8) 反応度安全研究室, NSRR管理室, "NSRR実験プログレスレポート16", JAERI-M 86-012  
1986.
- 9) 反応度安全研究室, NSRR管理室, "NSRR実験プログレスレポート17", JAERI-M 89-097  
1989.

Table 5.1 Major test conditions in color temperature evaluation tests

Test No.	600-15 <sup>1)</sup>	600-19 <sup>2)</sup>	600-21 <sup>3)</sup>
Test fuel Rod	10% Enriched UO <sub>2</sub> Standard Type (14x14 PWR)		
Cooling Condition	Stagnant water		He gas
Estimated Energy Deposition (cal/g·UO <sub>2</sub> )	256	280	190
Inserted Reactivity (\$)	4.5	4.0	3.6
Film Speed (FPS)	217	216	216
Test Capsule	Type 1-N-V	Type V-2	
Diameter of View Field (mm)	~ 30	~ 60	

Table 5.2 Calibration conditions in Test 600-21

Calibration No.	ND Filter No.	Camera Speed		Lamp Power		Duration (s)		
		(fps)	Driving Voltage (V)	(V)	(A)			
1	13	216	20	60.2	4.55	5		
				81.2	5.4	5		
				100.6	6.1	5		
2	10			60	4.55	5		
				80	5.3	5		
				100	5.9	5		
3	4			60.3	4.55	5		
				80.6	5.35	5		
				100.5	6.05	5		
4	No	130	15	60.2	4.55	5		
				80.6	5.35	5		
				100.7	6.05	5		
5	No	80	12	60	4.6	10		
				80	5.4	10		
				100	6.1	10		
6	No			60	4.6	10		
				80	5.4	10		
				100	6.1	10		
7	No	50	10	60.3	4.6	10		
				80	5.4	10		
				100	6.1	10		

Color films used: Fuji color Reversal Film RT500

Step wedges used: Kodak, Photographic Step Tablet No. 2

Table 5.3 Temperature and color ratio obtained for Test No.600-21

T(K)	Blue	Green	Red	log(B/R)	I/T
1000	0.8203E-05	0.1281E-02	0.4346E-01	-0.3724E+01	0.1000E-02
1040	0.2059E-04	0.2818E-02	0.8530E-01	-0.3617E+01	0.9615E-03
1080	0.4952E-04	0.5976E-02	0.1621E+00	-0.3515E+01	0.9259E-03
1120	0.1144E-03	0.1224E-01	0.2992E+00	-0.3417E+01	0.8929E-03
1160	0.2546E-03	0.2427E-01	0.5369E+00	-0.3324E+01	0.8621E-03
1200	0.5470E-03	0.4668E-01	0.9390E+00	-0.3235E+01	0.8333E-03
1240	0.1138E-02	0.8732E-01	0.1603E+01	-0.3149E+01	0.8065E-03
1280	0.2295E-02	0.1591E+00	0.2675E+01	-0.3067E+01	0.7813E-03
1320	0.4497E-02	0.2826E+00	0.4370E+01	-0.2988E+01	0.7576E-03
1360	0.8579E-02	0.4906E+00	0.6997E+01	-0.2912E+01	0.7353E-03
1400	0.1595E-01	0.8333E+00	0.1100E+02	-0.2838E+01	0.7143E-03
1440	0.2897E-01	0.1386E+01	0.1699E+02	-0.2768E+01	0.6944E-03
1480	0.5143E-01	0.2262E+01	0.2579E+02	-0.2700E+01	0.6757E-03
1520	0.8939E-01	0.3625E+01	0.3855E+02	-0.2635E+01	0.6579E-03
1560	0.1523E+00	0.5707E+01	0.5679E+02	-0.2572E+01	0.6410E-03
1600	0.2545E+00	0.8841E+01	0.8248E+02	-0.2511E+01	0.6250E-03
1640	0.4177E+00	0.1348E+02	0.1182E+03	-0.2452E+01	0.6038E-03
1680	0.6740E+00	0.2026E+02	0.1673E+03	-0.2395E+01	0.5952E-03
1720	0.1070E+01	0.3003E+02	0.2340E+03	-0.2340E+01	0.5814E-03
1760	0.1673E+01	0.4393E+02	0.3236E+03	-0.2287E+01	0.5682E-03
1800	0.2577E+01	0.6344E+02	0.4427E+03	-0.2235E+01	0.5556E-03
1840	0.3916E+01	0.9054E+02	0.5994E+03	-0.2185E+01	0.5435E-03
1880	0.5817E+01	0.1277E+03	0.8038E+03	-0.2136E+01	0.5319E-03
1920	0.8692E+01	0.1783E+03	0.1068E+04	-0.2089E+01	0.5208E-03
1960	0.1272E+02	0.2463E+03	0.1406E+04	-0.2044E+01	0.5120E-03
2000	0.1839E+02	0.3369E+03	0.1836E+04	-0.1999E+01	0.5000E-03
2040	0.2630E+02	0.4565E+03	0.2379E+04	-0.1956E+01	0.4902E-03
2080	0.3722E+02	0.6129E+03	0.3057E+04	-0.1915E+01	0.4808E-03
2120	0.5216E+02	0.8160E+03	0.3901E+04	-0.1874E+01	0.4717E-03
2126	0.7239E+02	0.1077E+04	0.4943E+04	-0.1834E+01	0.4630E-03
2200	0.9954E+02	0.1411E+04	0.6220E+04	-0.1796E+01	0.4545E-03
2240	0.1357E+03	0.1835E+04	0.7778E+04	-0.1758E+01	0.4464E-03
2280	0.1834E+03	0.2369E+04	0.9666E+04	-0.1722E+01	0.4386E-03
2320	0.2459E+03	0.3036E+04	0.1134E+05	-0.1686E+01	0.4310E-03
2360	0.3271E+03	0.3866E+04	0.1467E+05	-0.1652E+01	0.4237E-03
2400	0.4319E+03	0.4891E+04	0.1792E+05	-0.1618E+01	0.4167E-03
2440	0.5661E+03	0.6150E+04	0.2177E+05	-0.1585E+01	0.4098E-03
2480	0.7371E+03	0.7687E+04	0.2633E+05	-0.1553E+01	0.4032E-03
2520	0.9532E+03	0.9555E+04	0.3168E+05	-0.1522E+01	0.3968E-03
2560	0.1225E+04	0.1181E+05	0.3794E+05	-0.1491E+01	0.3906E-03
2600	0.1564E+04	0.1452E+05	0.4524E+05	-0.1461E+01	0.3846E-03
2640	0.1986E+04	0.1777E+05	0.5370E+05	-0.1432E+01	0.3788E-03
2680	0.2507E+04	0.2163E+05	0.6349E+05	-0.1403E+01	0.3731E-03
2720	0.3148E+04	0.2621E+05	0.7475E+05	-0.1376E+01	0.3676E-03
2760	0.3931E+04	0.3162E+05	0.8768E+05	-0.1348E+01	0.3623E-03
2800	0.4883E+04	0.3797E+05	0.1025E+06	-0.1322E+01	0.3571E-03
2840	0.6037E+04	0.4541E+05	0.1193E+06	-0.1296E+01	0.3521E-03
2880	0.7427E+04	0.5408E+05	0.1384E+06	-0.1270E+01	0.3472E-03
2920	0.9096E+04	0.6416E+05	0.1600E+06	-0.1245E+01	0.3425E-03
2960	0.1109E+05	0.7583E+05	0.1845E+06	-0.1221E+01	0.3378E-03
3000	0.1346E+05	0.8928E+05	0.2120E+06	-0.1197E+01	0.3333E-03

Table 5.4 Fuel rod performance in He gas environment in Test 600-21

Time(s)	Fuel Rod Surface Temperature(K)	Events
0		Pulse irradiation
0.17	1700-1900	Measured by thermocouples
0.24	1850-1950	Evaluated from color
0.3	2050	Flat temperature distribution Relocation starts. (Melting temperature of Zry=2110K)
0.4	2200	
1.2	max. 2400	Non-uniform cladding thickness
	thinner part ave. 2300	
	thicker part ave. 2250	
1.6	max. 2400	Cladding melt down (1.5-1.8 s) ( relocation velocity 0.1 m/s)
	thinner part ave. 2300	
	thicker part ave. 2250	
2.8	2400	Flat temperature distribution Peak average temperature
7.6	2000	

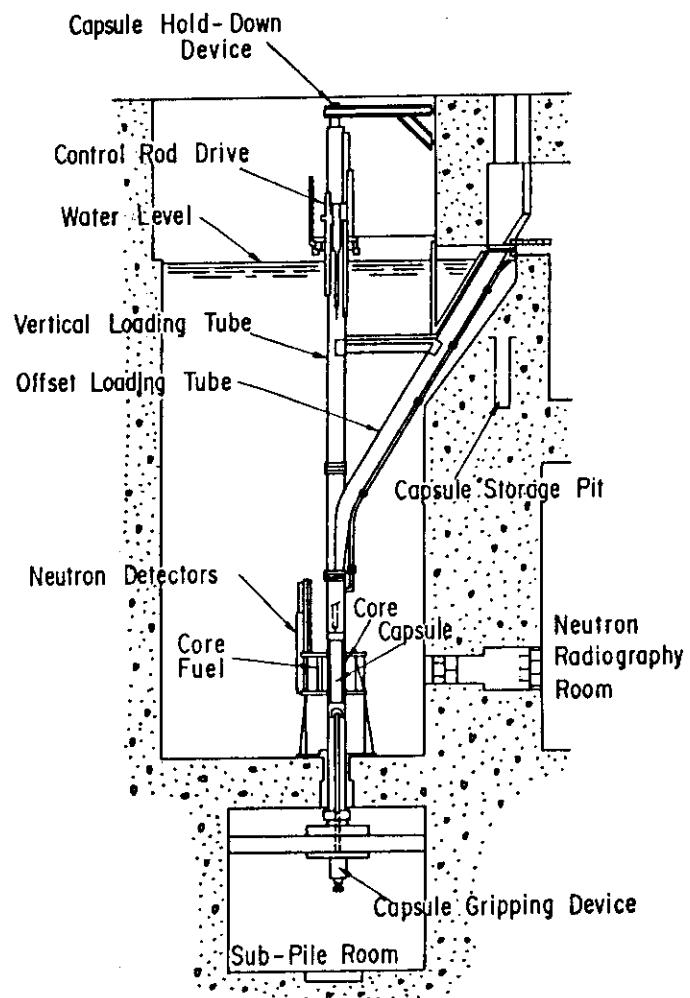


Fig. 2.1 General arrangement of NSRR

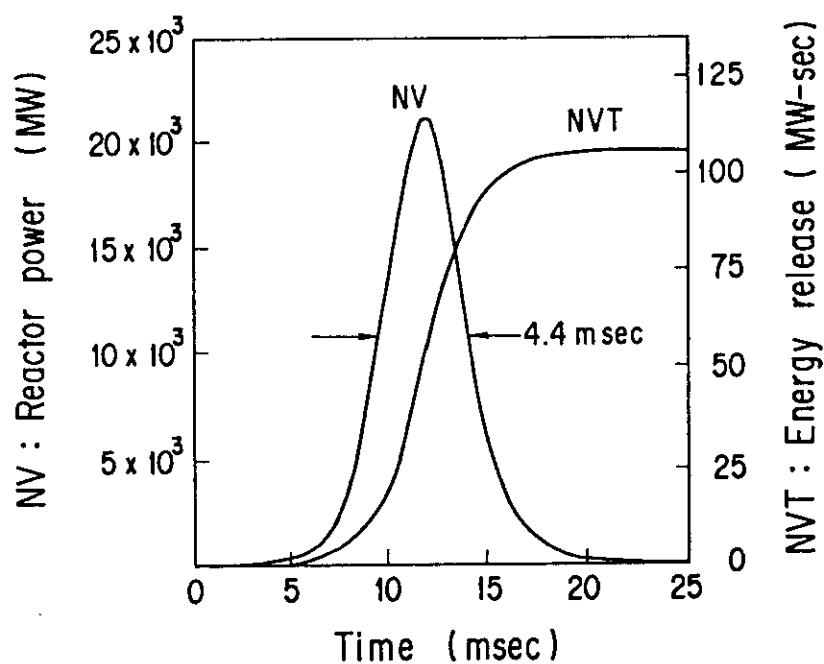


Fig. 2.2 Reactor power and core energy release given by \$4.67 pulse

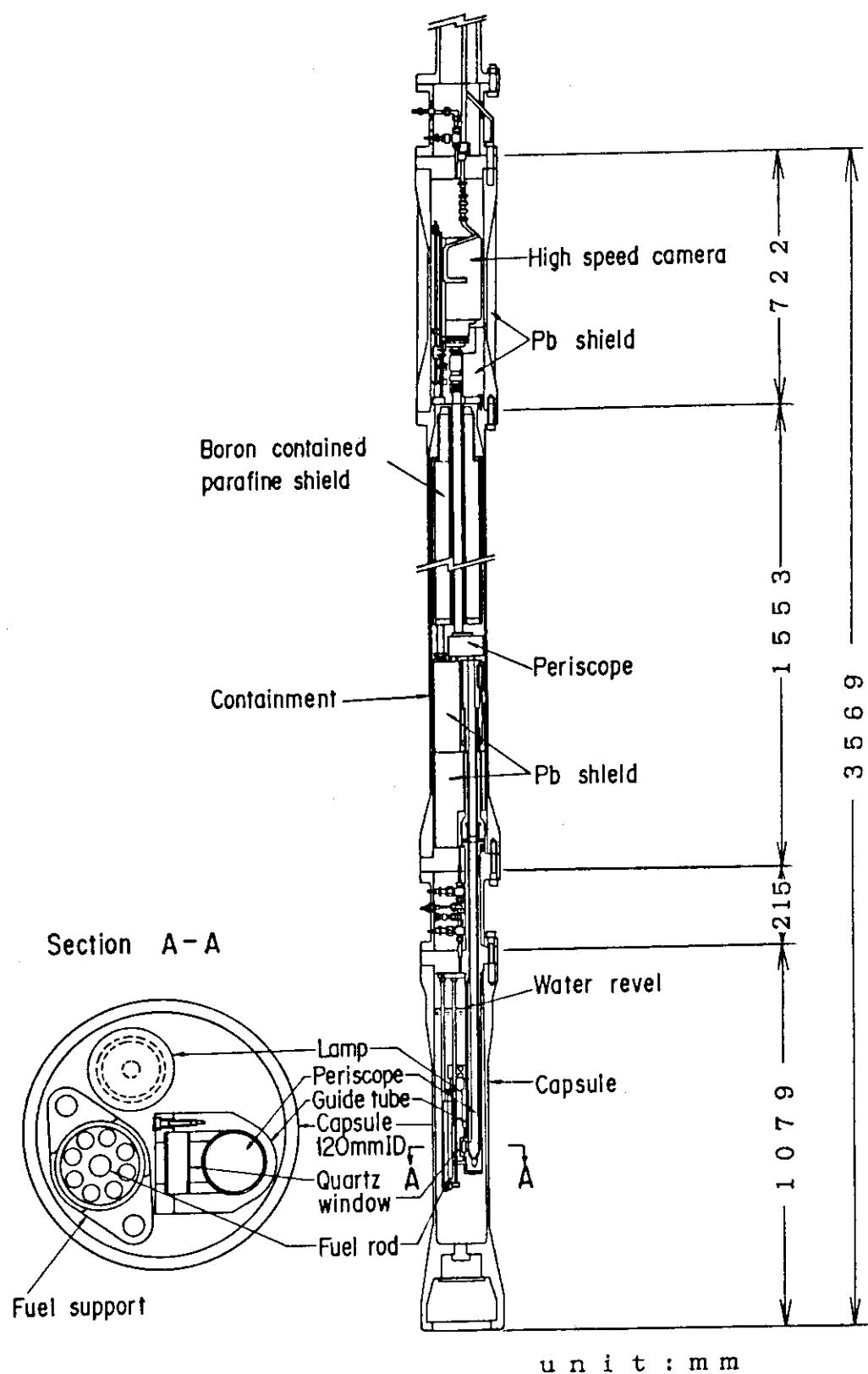


Fig. 2.3 Schematic configuration of in-reactor fuel behaviour observation capsule

TEST ARRANGEMENT

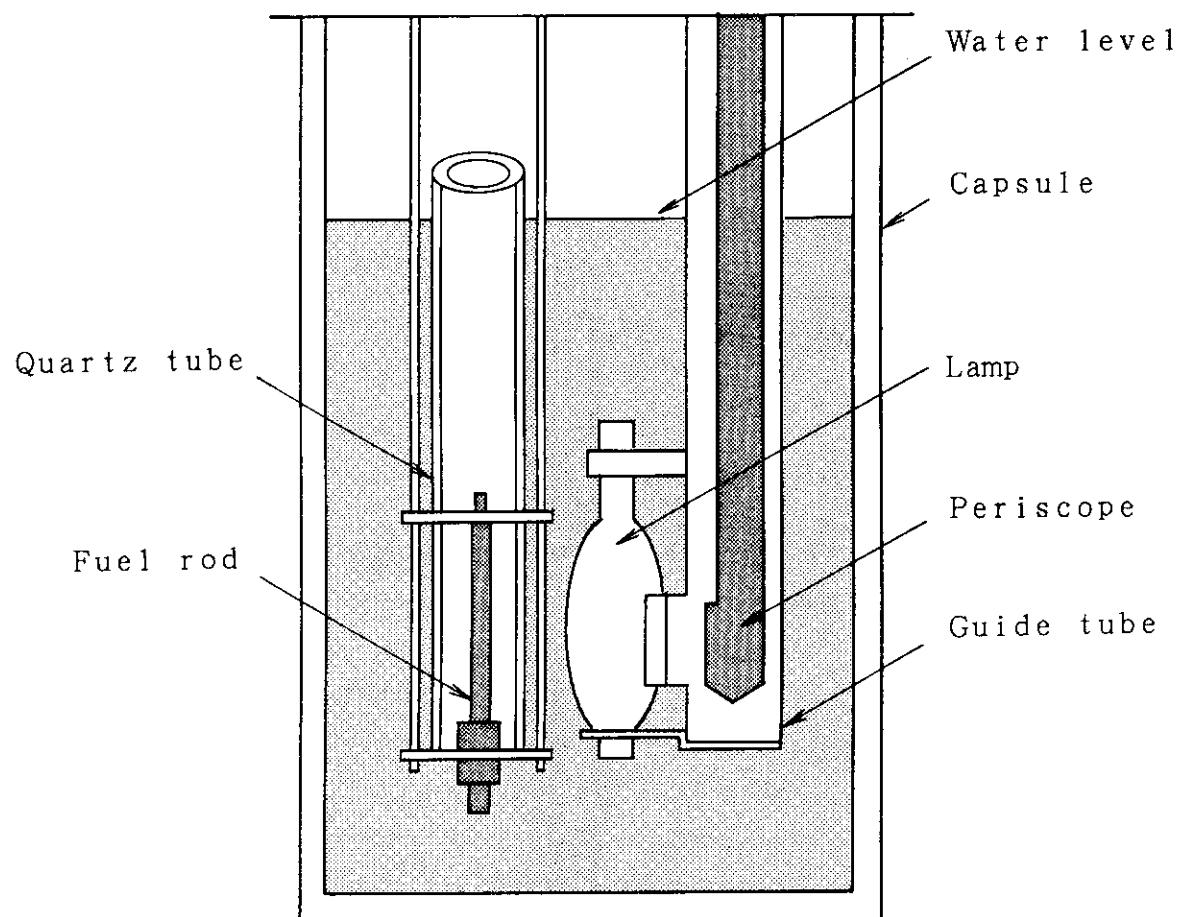


Fig. 2.4 Fuel behavior observation test arrangement

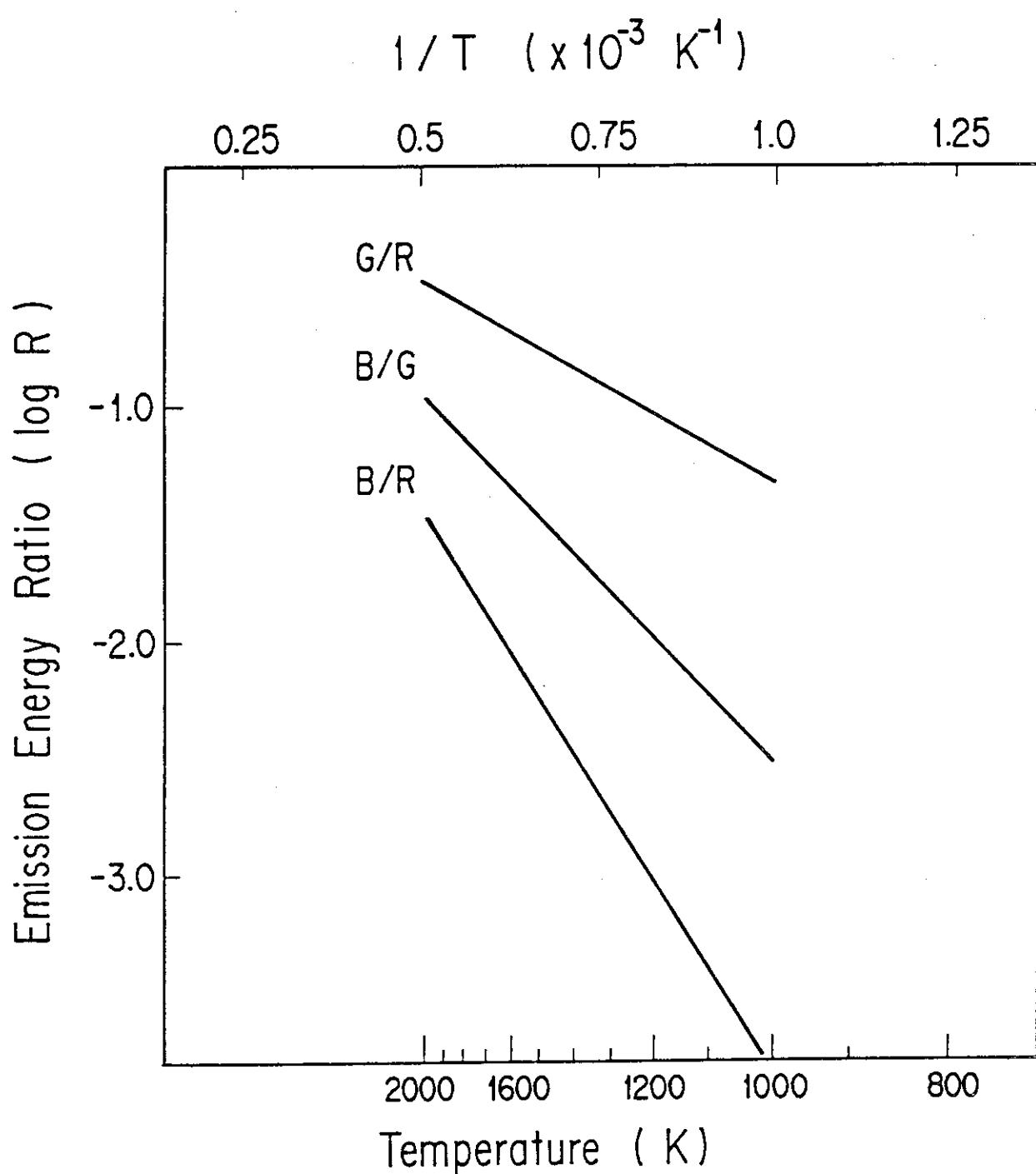


Fig. 3.1 Relations between temperature and emission energy ratio ( $\log R$ )  
R ( $\lambda=660 \text{ nm}$ ), G ( $\lambda=560 \text{ nm}$ ), B ( $\lambda=440 \text{ nm}$ )

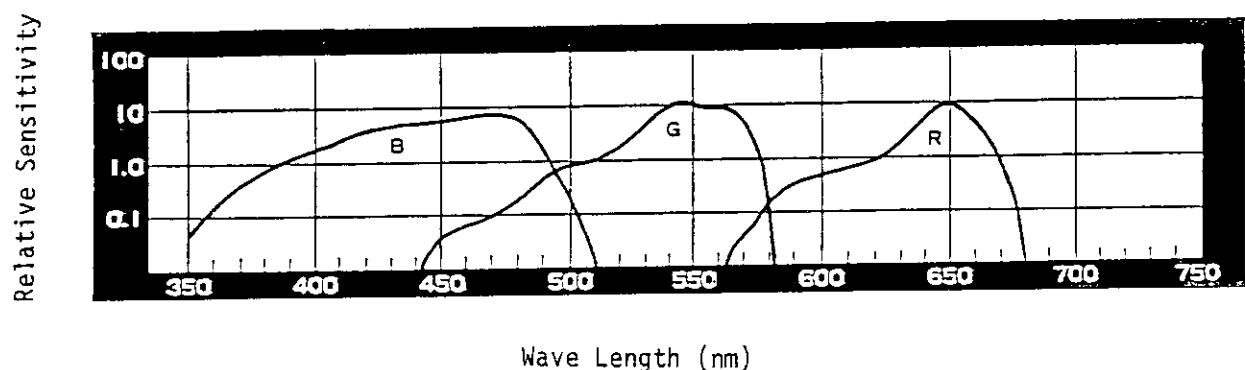


Fig. 4.1 Relative sensitivity curves of a color film

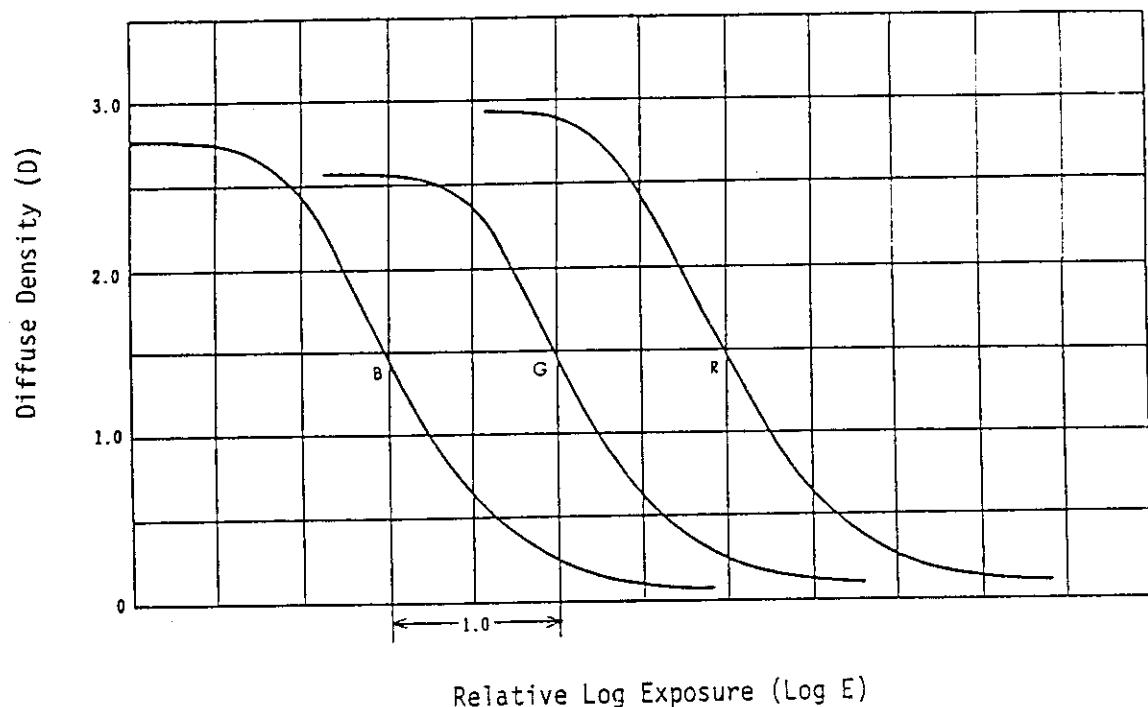


Fig. 4.2 Characteristic curves of a color film

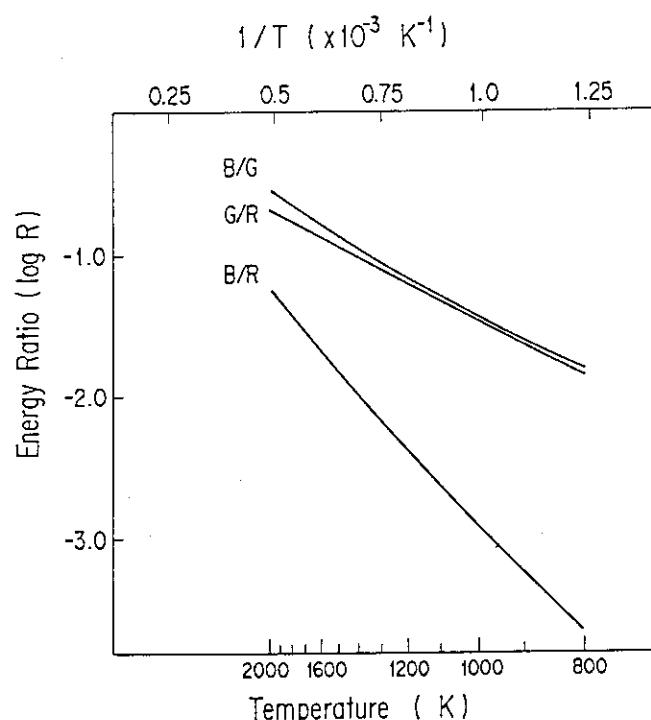


Fig. 4.3 Relations between temperature and deposited energy ratio in R, G and B layer of a color film

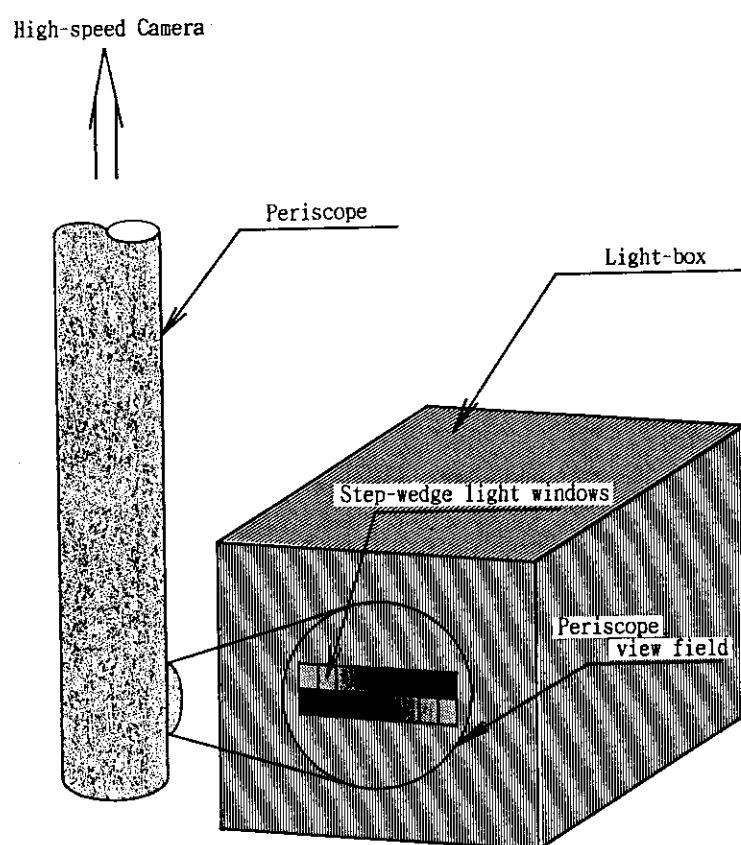


Fig. 4.4 Standard lighting box with a step-wedge window for calibration tests

Flow of Color Temperature Evaluation

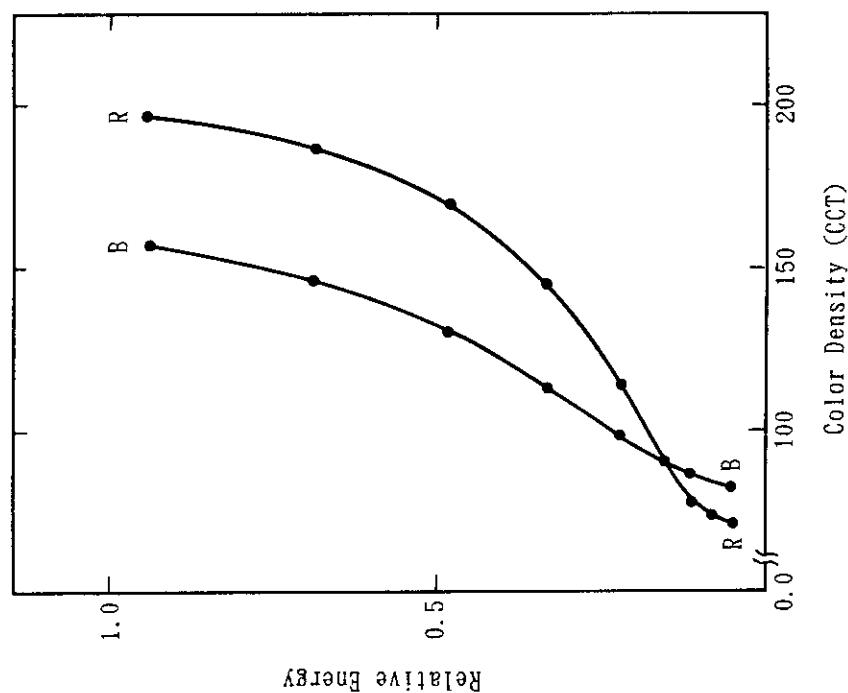
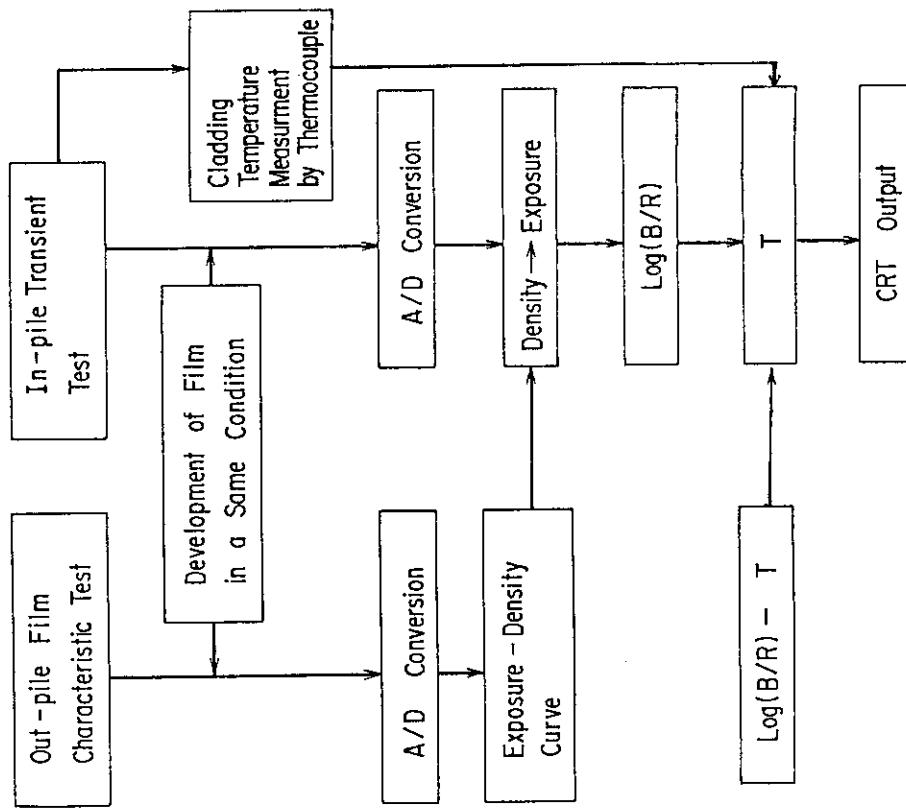


Fig. 4.6 Relation between deposited energy and color density  
 Fig. 4.5 Flow of color temperature evaluation

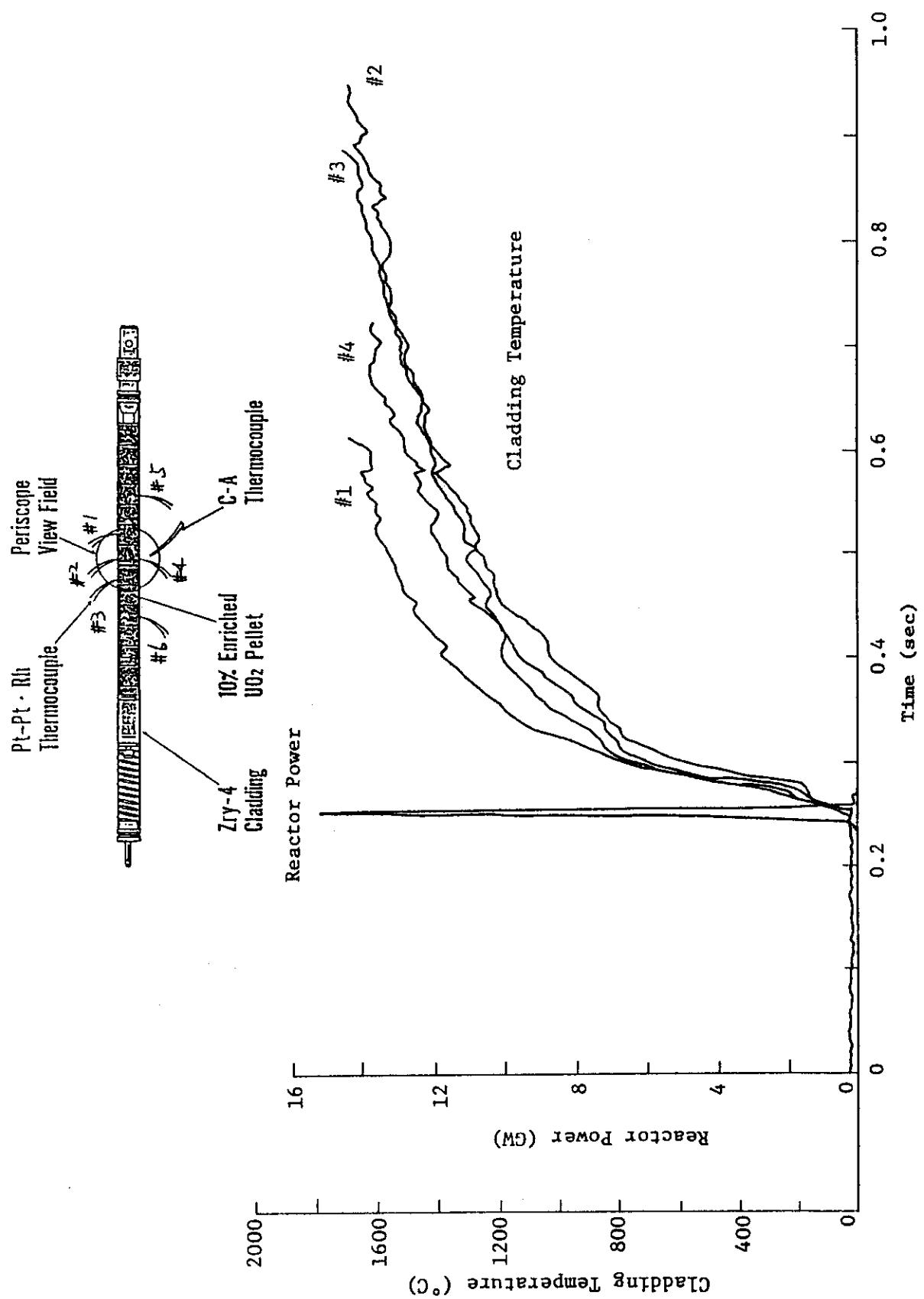


Fig. 5.1 Transient histories of reactor power and cladding surface temperature in Test No. 600-157)

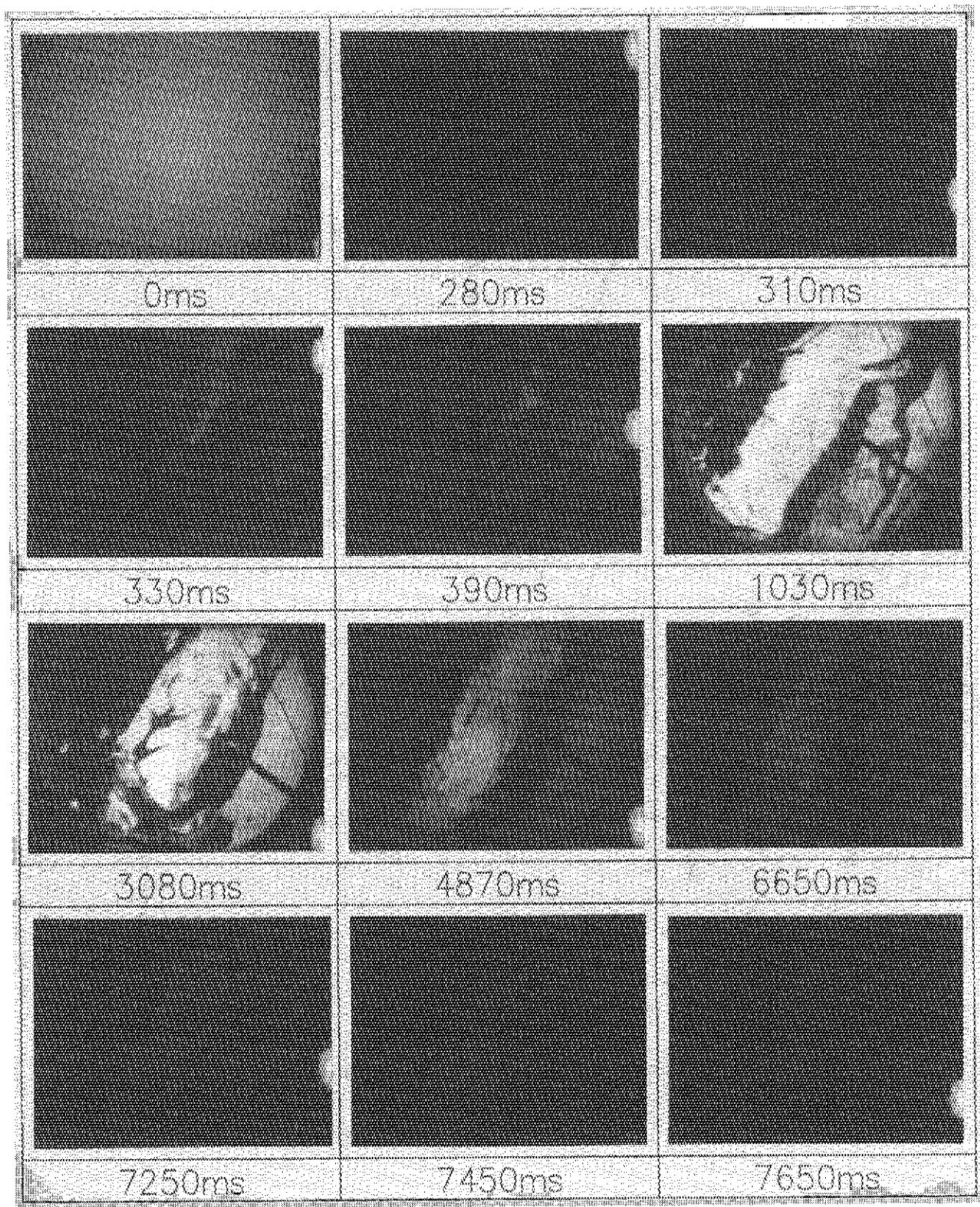


Fig. 5.2 Pictures printed from motion film taken in Test No. 600-15

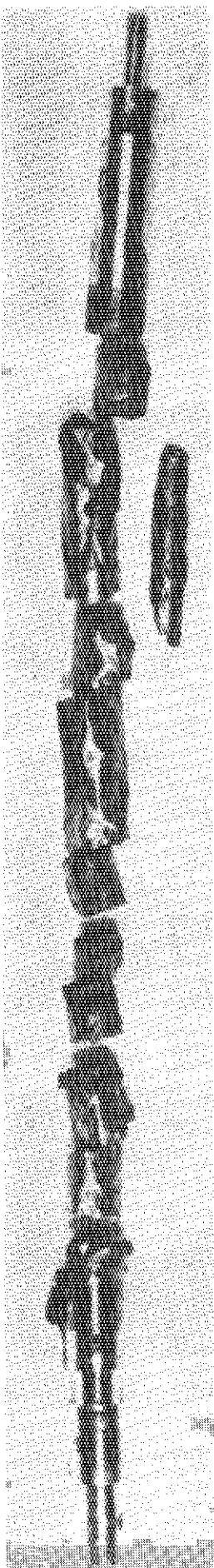


Fig. 5.3 Appearance of post test fuel rod in Test No. 600-157)

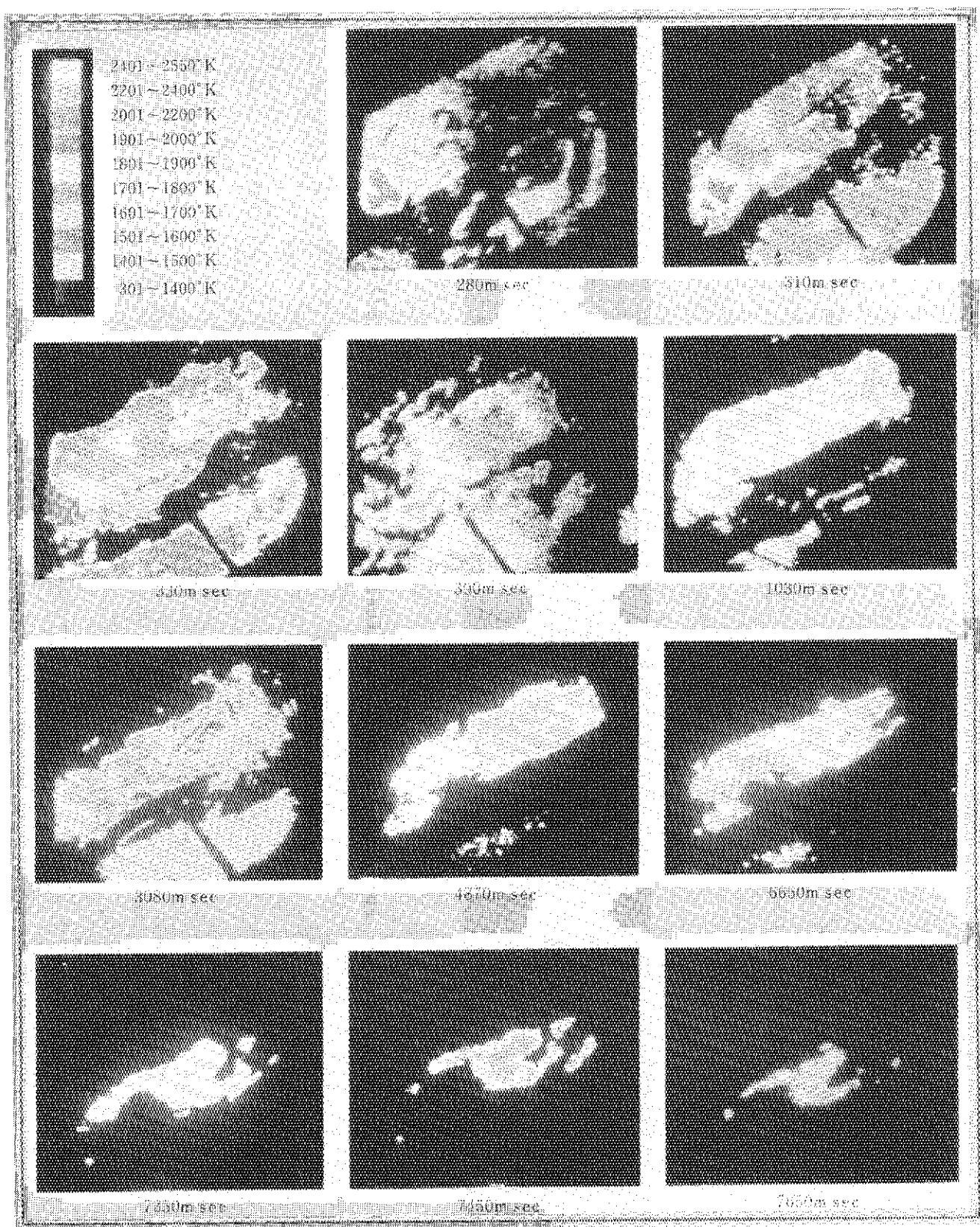


Fig. 5.4 Evaluated temperature distribution from motion pictures obtained in Test No. 600-15 shown in fig. 5.2

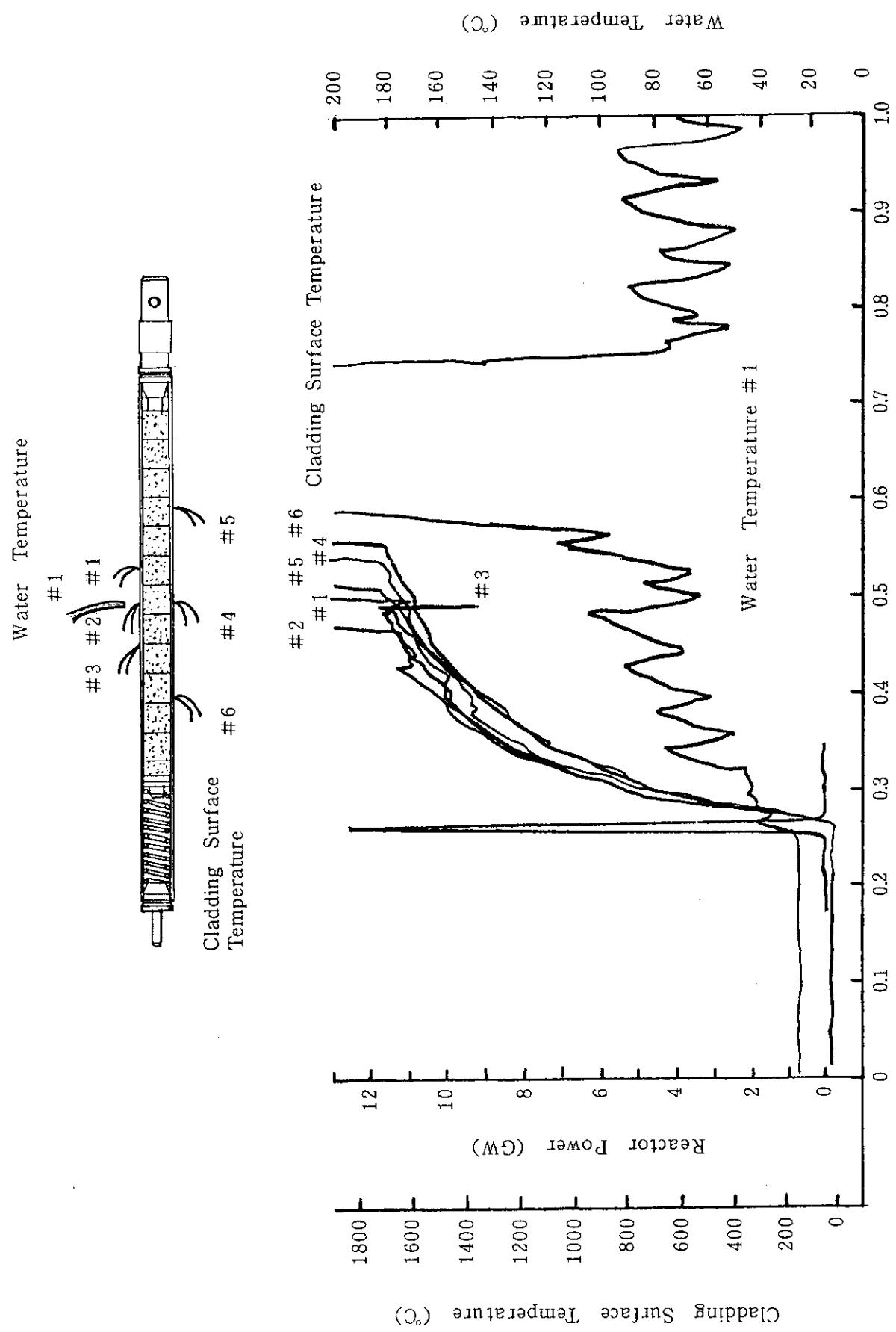


Fig. 5.5 Transfer histories of reactor power, cladding temperature and water temperature in Test No. 600-198

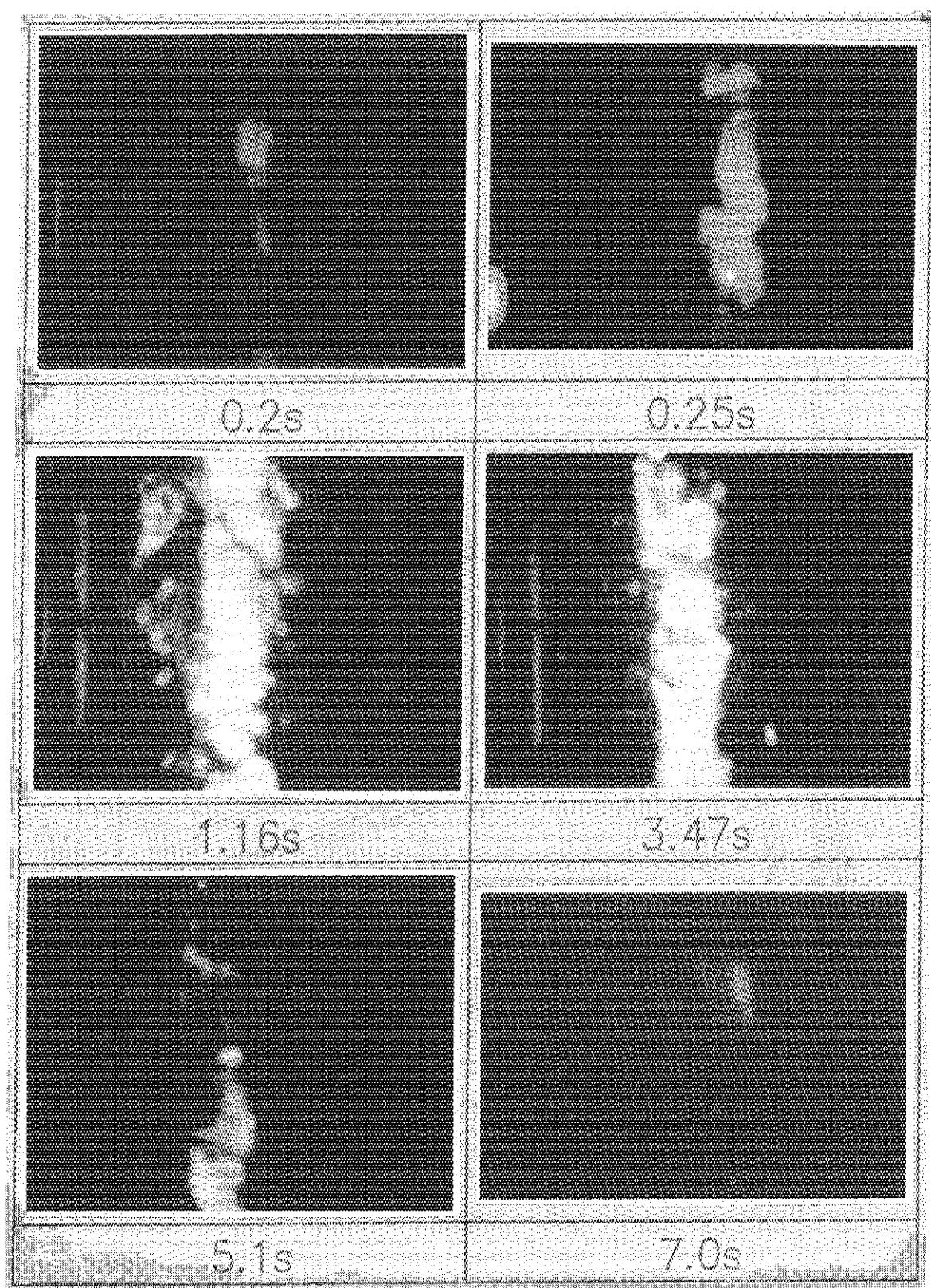
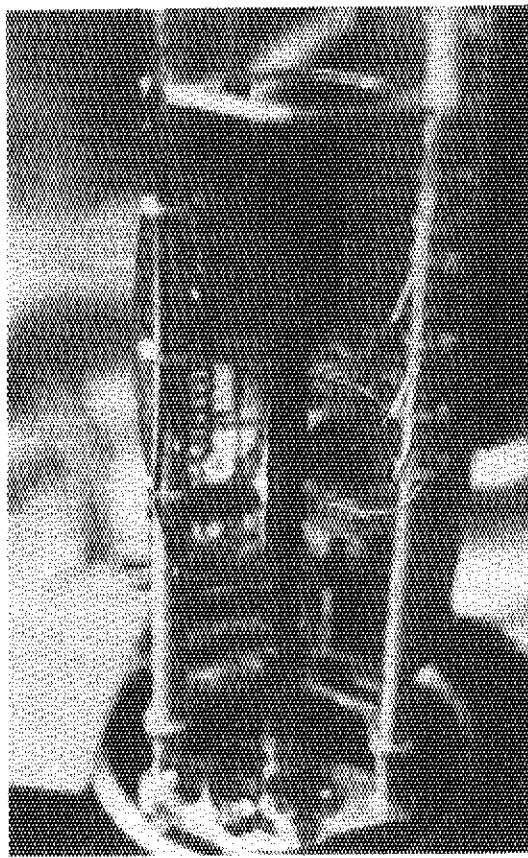
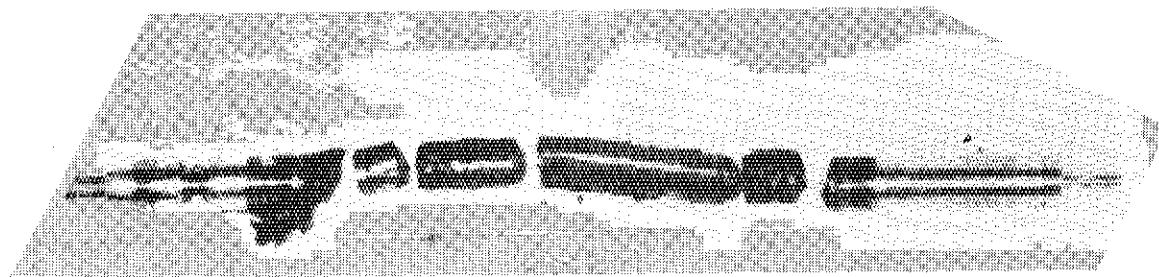


Fig. 5.6 Pictures printed from motion film taken  
in Test No. 600-19



(a) Photo of the fuel rod during disassembling the capsule



(b) Photo of fuel the fuel rod after disassembling the capsule

Fig. 5.7 Appearance of post test fuel rod in Test No. 600-19<sup>8)</sup>

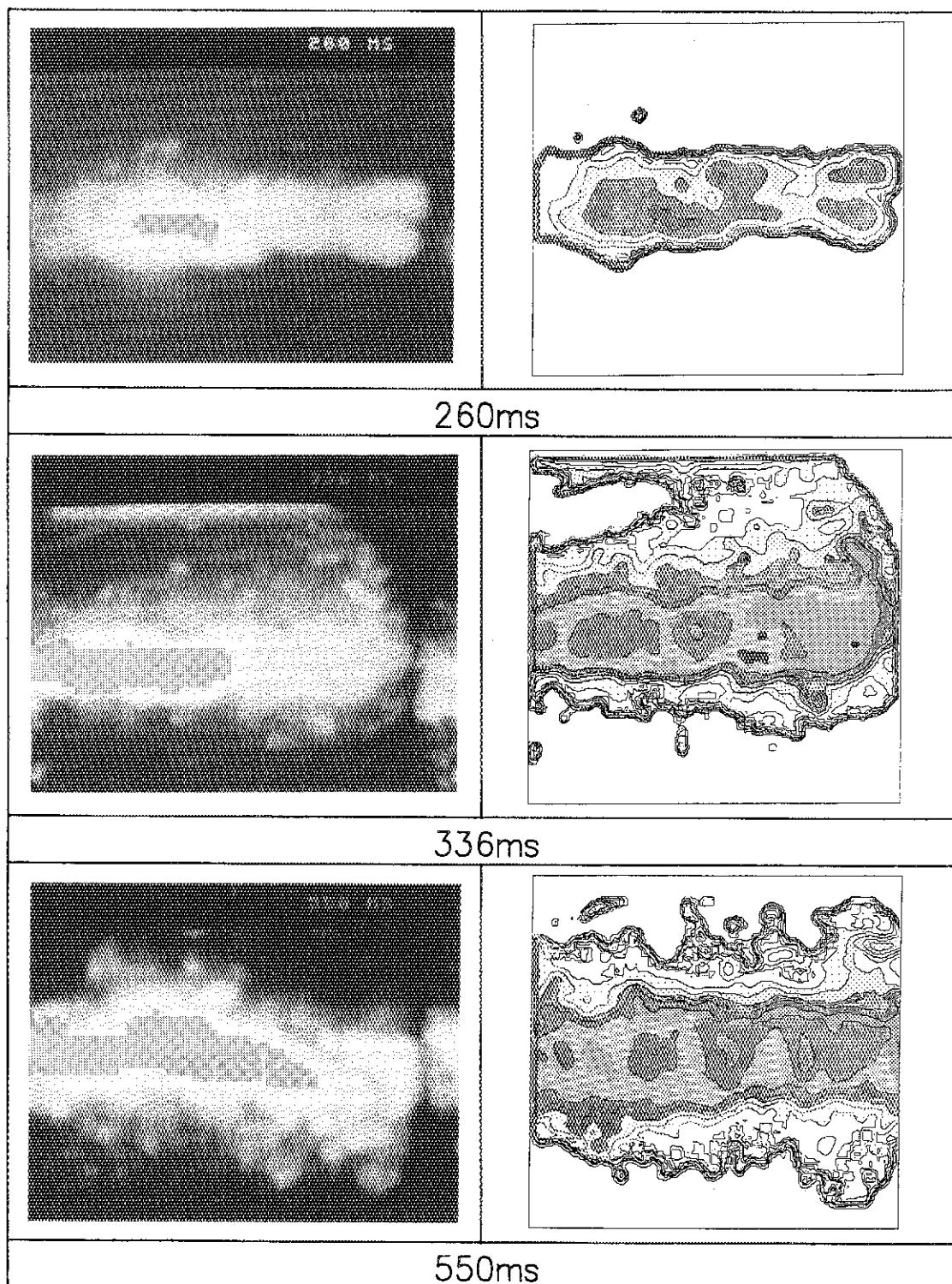
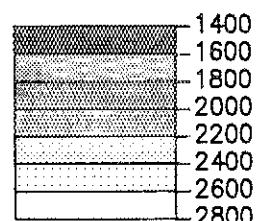


Fig. 5.8 Evaluated temperature distribution from motion pictures obtained in Test No. 600-19



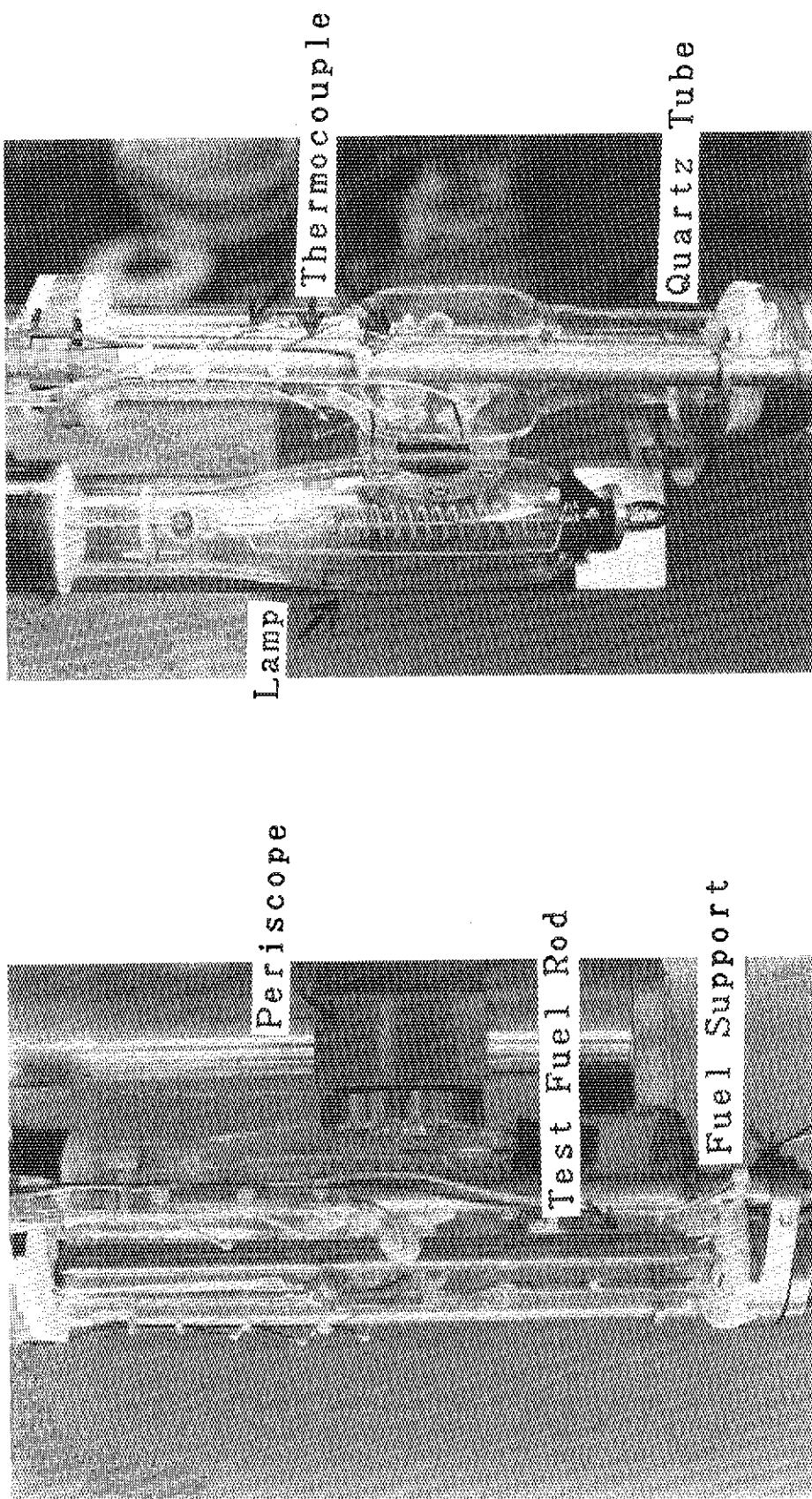


Fig. 5.9 Experimental setup in Test No. 600-21

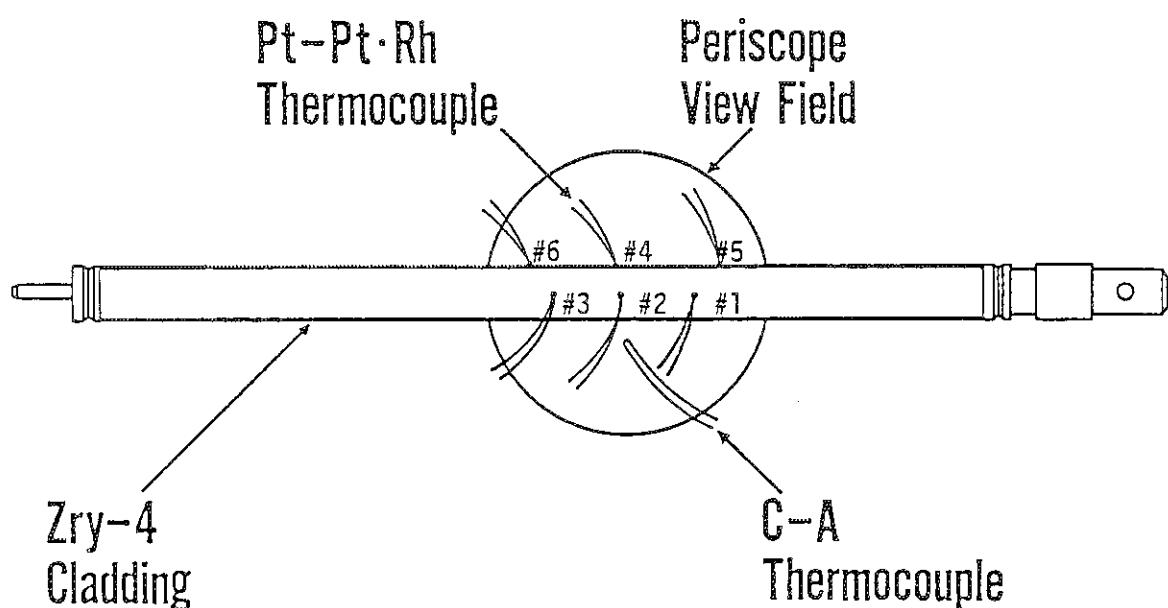


Fig. 5.10 Test fuel rod and instrumentation in Test No. 600-21

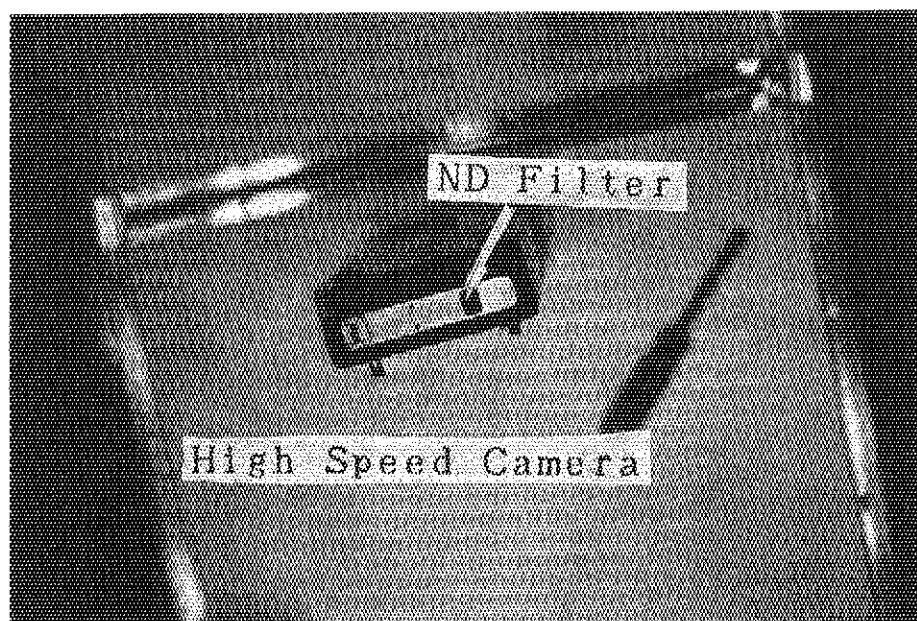


Fig. 5.11 High speed camera and neutral density filter  
for fuel behavior observation test  
(Test No. 600-21)

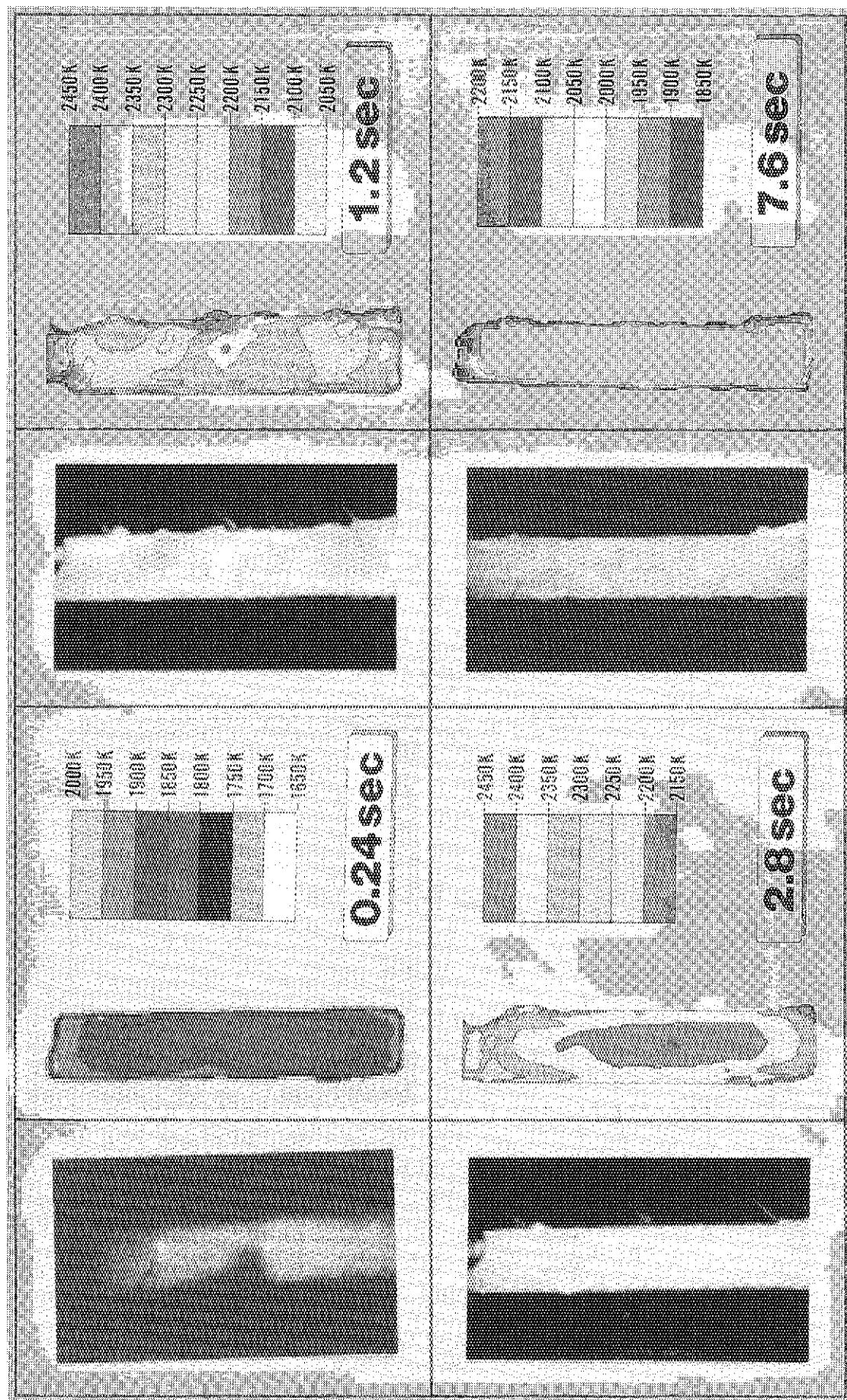


Fig. 5.12 Evaluated temperature distribution from motion pictures  
obtained in Test No. 600-21

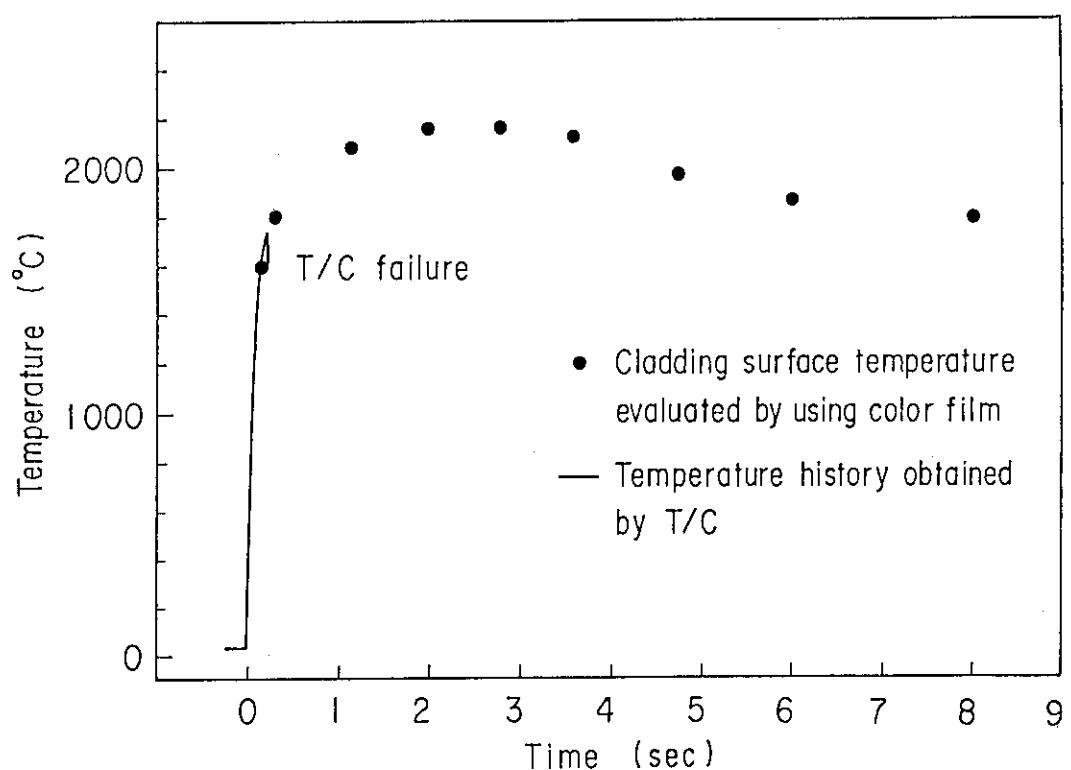


Fig. 5.13 Cladding surface temperature history at the location of T/C #2

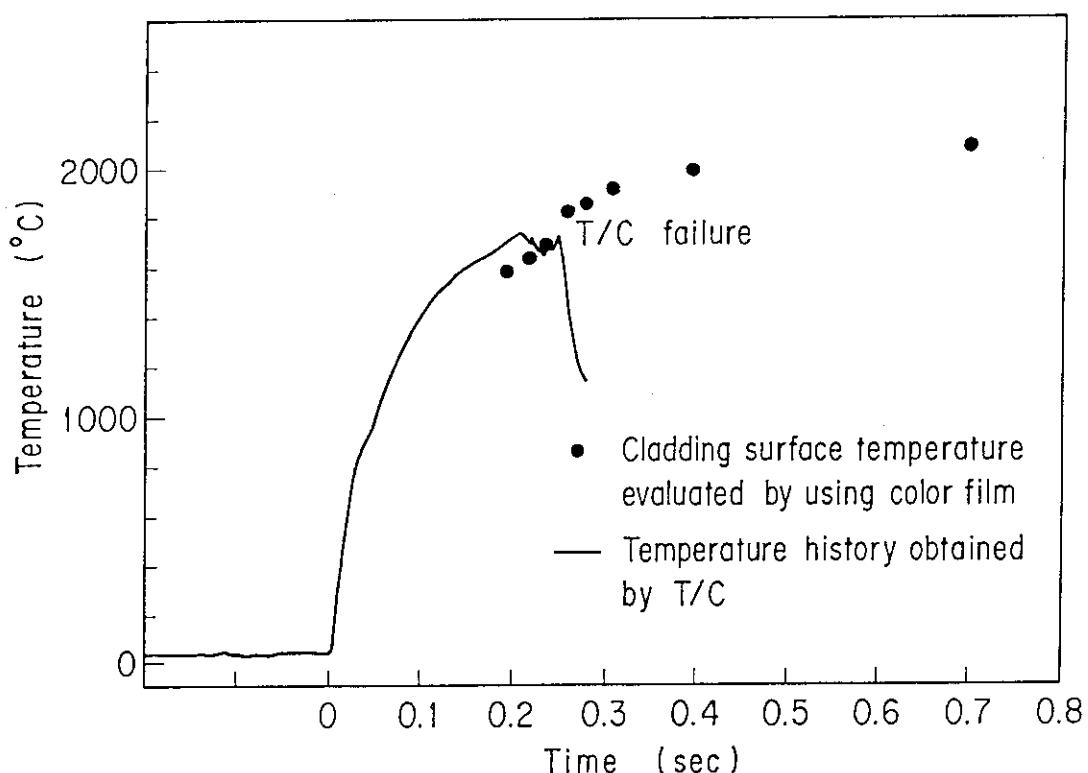


Fig. 5.14 Cladding surface temperature history at the location of T/C #2

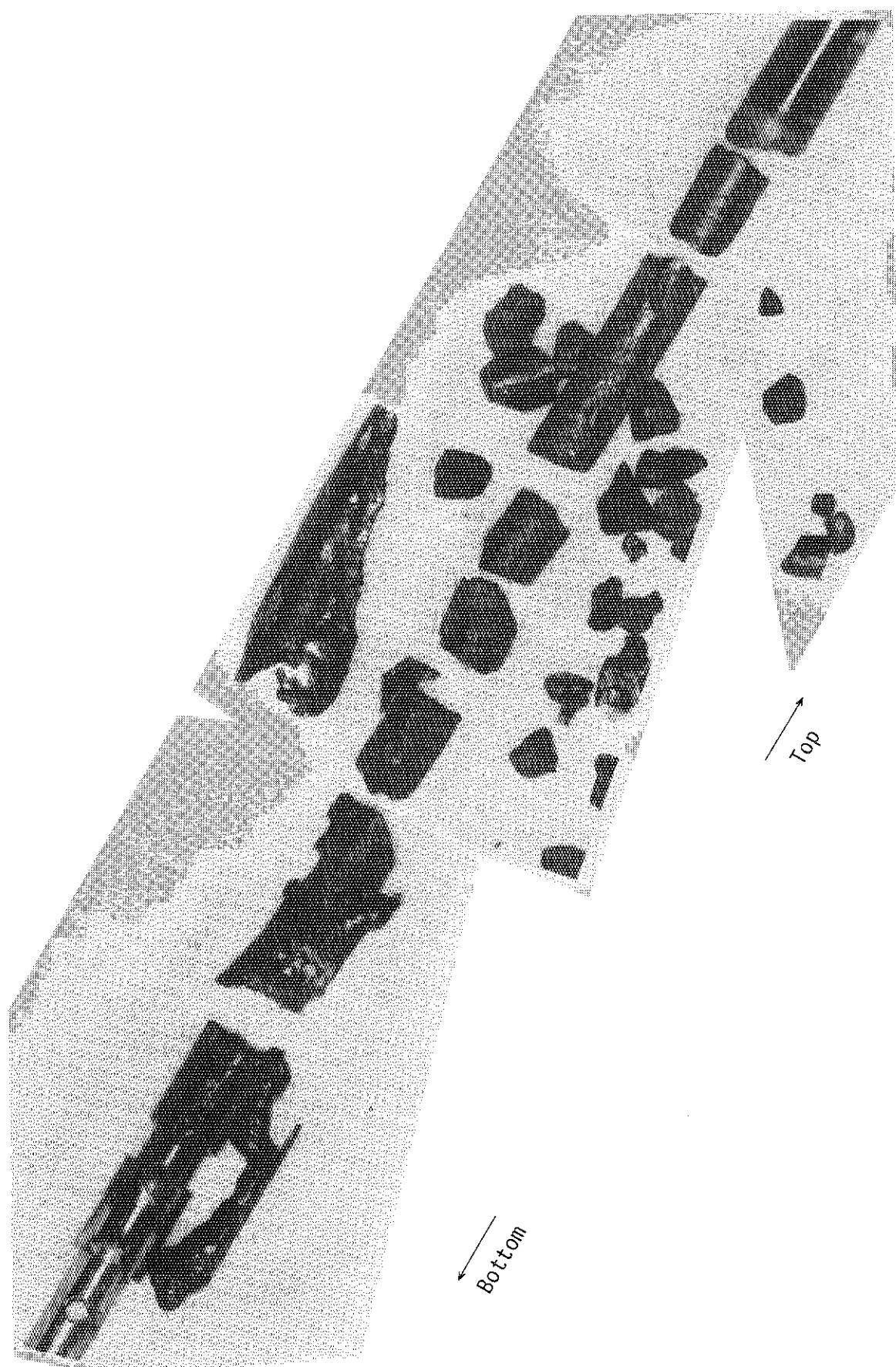


Fig. 5.15 Appearance of post test fuel rod in Test No. 600-219)