

J A E R I - M
91-215

反応度事故条件下の燃料挙動に及ぼす
冷却材／燃料比の影響
(N S R R における冷却材流路模擬実験)

1992年1月

丹沢 貞光・小林 晋昇・藤城 俊夫

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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

反応度事故条件下の燃料挙動に及ぼす冷却材／燃料比の影響

(N S R R における冷却材流路模擬実験)

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

丹沢 貞光・小林 晋昇・藤城 俊夫

(1991年12月3日受理)

本報告書は、反応度事故条件下の燃料挙動に及ぼす冷却材／燃料比の影響を調べるために、大気圧室温及び静水条件下で試験燃料のまわりに冷却材の流路を設けて行なった燃料照射実験の結果をまとめたものである。

実験は、大気圧カプセルを使用し、単一試験燃料棒のまわりに円形または四角形の流路管を取り付け、試験燃料と接触する冷却材を制限することにより行なった。実験条件としては、冷却材／燃料比を変えるために内径14mm，16mm 及び20mm の円筒形あるいは対面距離14mm の四角筒形の流路管を取り付け、発熱量は約150cal/g・UO₂から400cal/g・UO₂まで変化させた。

この結果、試験燃料に流路管を取り付けた場合、流路管を取り付けない標準条件における実験の場合と比較して、被覆管表面の最高温度はあまり変わらないが下流側では膜沸騰持続時間が長くなり、また、破損しきい値が約30cal/g・UO₂低くなる等、冷却材／燃料比が反応度事故条件下の燃料挙動に大きな影響を与えることが判明した。

The Effects of Coolant/Fuel Ratio on Fuel Behavior
under Reactivity Initiated Accident Conditions
(Flow Shroud Parameter Tests in the NSRR Experiments)

Sadamitsu TANZAWA, Shinsho KOBAYASHI and Toshio FUJISHIRO

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

(Received December 3, 1991)

This report describes the test results to study the effects of coolant/fuel ratio on the fuel behavior under reactivity initiated accident (RIA) conditions conducted in the NSRR.

The tests were conducted under atmospheric pressure, room temperature and stagnant condition using a NSRR standard capsule, in which a single test fuel rod with flow shroud was irradiated.

In order to study the effects of coolant/fuel ratio, various types of flow shrouds, cylindrical of 14mm, 16mm and 20mm in diameter and square of 14mm in side length, were used. The energies deposited in the test fuel rods were changed from 150 cal/g·UO₂ to 300 cal/g·UO₂.

It was found from the test results that the coolant/fuel ratio had large effects on RIA fuel behavior. Though the maximum cladding surface temperatures of the shrouded fuel rods were not much different from those of the non-shrouded fuel rods, the duration of film boiling became longer in the downstream region, and the failure threshold decreased by about 30 cal/g·UO₂.

Keywords: Reactivity Initiated Accident, Fuel Behavior, Fuel Failure, Fuel Safety, In-pile Experiment, Coolant/Fuel Ratio, NSRR, Flow Shroud, Film Boiling, Coolant Hydrodynamics

目 次

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. 実験装置と実験方法 | 2 |
| 2.1 N S R R の概要 | 2 |
| 2.2 試験燃料 | 2 |
| 2.3 試験部の構成及び実験用カプセル | 2 |
| 2.4 実験計測 | 3 |
| 2.5 実験パラメータ | 3 |
| 3. 実験結果 | 14 |
| 3.1 直径 14mm の円筒形流路管実験 | 14 |
| 3.2 内面距離 14 mm の四角筒形流路管実験 | 15 |
| 3.3 直径 16mm の円筒形流路管実験 | 16 |
| 3.4 直径 20mm の円筒形流路管実験 | 17 |
| 4. 考 察 | 24 |
| 4.1 被覆管表面温度挙動 | 24 |
| 4.2 燃料破損挙動及び破損しきい値 | 25 |
| 4.3 機械的エネルギーの発生 | 26 |
| 5. 結 論 | 39 |
| 謝 辞 | 39 |
| 参考文献 | 40 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Experimental Method | 2 |
| 2.1 Outline of NSRR | 2 |
| 2.2 Test Fuel Rod | 2 |
| 2.3 Test Train Assembly and Test Capsule | 2 |
| 2.4 Instrumentation | 3 |
| 2.5 Test Parameters | 3 |
| 3. Experimental Results | 14 |
| 3.1 Experiments Using Cylindrical Flow Shroud of 14mm in Diameter | 14 |
| 3.2 Experiments Using Square Flow Shroud of 14mm in Side Length | 15 |
| 3.3 Experiments Using Cylindrical Flow Shroud of 16mm in Diameter | 16 |
| 3.4 Experiments Using Cylindrical Flow Shroud of 20mm in Diameter | 17 |
| 4. Discussion | 24 |
| 4.1 Behavior of Cladding Surface Temperature | 24 |
| 4.2 Behavior of Fuel Failure and Failure Threshold | 25 |
| 4.3 Generation of Mechanical Energy | 26 |
| 5. Conclusions | 39 |
| Acknowledgement | 39 |
| References | 40 |

1 . 序 論

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

NSRR実験⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾では、この反応度事故時の急激な出力上昇をパルス炉を用いて模擬し、実験孔に挿入したカプセルまたはループ内の試験燃料をパルス照射して、事故時の燃料挙動を解明することを目的としている。具体的には、反応度事故の大きさと燃料挙動の関係、燃料破損しきい値とその機構、破損の伝播、破壊力の大きさとその発生機構等に関して実験的に究明することである。

NSRR実験は1975年10月に開始して以来、現在までに約900回に及ぶ大気圧水カプセル実験を行なった。これらは、標準試験燃料(10%濃縮、Zry-4被覆)を用いて広範囲に発熱量を変え燃料のふるまいを調べた標準燃料試験、ギャップ幅、燃料棒内圧、燃料濃縮度、ペレット形状等燃料設計のパラメータを変えた試験⁽⁶⁾⁽⁷⁾、冷却材温度、流速、流路断面積(流路壁付、バンドル)等冷却条件を変えた試験⁽⁸⁾、及び浸水燃料、フレッティング腐蝕燃料等欠陥燃料に関する試験⁽⁹⁾である。このうち、本報告書で述べるべきは、冷却材流路を取り付け冷却材/燃料比を変化させた実験の結果である。

NSRR実験では、すでに実施した標準燃料試験^{(2), (4), (5)}の結果から、反応度事故時の燃料挙動に関する基本的な知見を得、未照射燃料の破損しきい値、破損機構について明らかにしてきた。それによれば、燃料の破損はUO₂ペレットや被覆管の溶融あるいは被覆管の酸化に伴う脆化等と深く関係している。

これらの現象は、程度の差こそあれ過渡時の温度挙動に依存するのは当然のことである。過渡温度挙動を考えるうえで、冷却材/燃料比は重要な因子である。何故ならば冷却材/燃料比が小さくなると冷却材は沸騰しやすくなり、極端な場合には燃料のバーンアウトが発生する。その結果被覆管の最高到達温度、過渡時の被覆管の内外面温度差、燃料温度等が影響を受けると考えられるからである。

従って、本パラメータ実験では、種々の内径の異なった流路管を用いて、

- (1) 冷却材/燃料比の相違が過渡時の燃料の温度挙動及び燃料破損に及ぼす影響を究明すること、
- (2) 冷却材/燃料比の相違が破壊力の発生に及ぼす影響を究明することを目的として行なったものである。

本実験で得られた冷却材/燃料比の影響に関するデータは動力炉の反応度事故時の燃料挙動を評価するうえで重要なものとなろう。

2. 実験装置と実験方法

2.1 NSRRの概要⁽¹⁾

NSRRは米国GA社によって開発された大型パルス炉TRIGA-ACPR(Annular Core Pulse Reactor)を若干改良したものである。NSRRの特性をTable 2.1に、また、概要をFig. 2.1に示す。NSRRの炉心はFig. 2.2に示すように、炉心中心部の実験孔と、それを取り囲む149本の燃料要素、8本の燃料フォロワー型制御棒及び3本のトランジエント棒より構成されている。炉心は直径約63cm、有効長約38cmの円筒形状である。炉心燃料は直径約3.6cm、有効長約38cmの20%濃縮ウラン-水素化ジルコニウム(U-ZrH_{1.8})をステンレス鋼で被覆したものである。

パルス出力の発生は3本のトランジエント棒の急速引き抜きによって行なう。3本のトランジエント棒の組み合せによって最大4.7ドルまでの任意の反応度を投入することができる。パルス出力はNSRRのもつ自己制御性、すなわち、燃料体に含まれる減速材(ZrH)の大きな負の温度係数によるフィードバック効果により抑制される。

Fig. 2.3に投入反応度量4.67ドルに対するパルス出力と積分出力の時間変化を示す。この場合の最大ピーク出力と積分出力は、それぞれ約21,000MWと約117MW-sである。また、パルス出力の最短炉周期とパルス半値幅はそれぞれ1.1msと4.4msで、これらはいずれも熱中性子パルス炉としては最も速く、かつ狭い部類に属する。Fig. 2.4にパルス出力と積分出力を投入反応度で整理した図を示す。

2.2 試験燃料

試験燃料には、濃縮度を10%としたNSRRの標準燃料を使用した。試験燃料棒の主要な仕様をTable 2.2に、また、構造の概要をFig. 2.5に示す。この標準燃料は、外径9.29mm、長さ10mmのUO₂ペレットを14個、ジルカロイ-4被覆管に収めたPWR型の試験燃料である。濃縮度が高いことのほかに、全長が短いこと及び燃料内圧が大気圧であることが、実際のPWR燃料と大きく異なる点であるが、被覆管肉厚、ペレット・被覆管間のギャップ幅等の主要寸法、形状は実際の14×14タイプのPWR燃料と同じ仕様で作製したものである。

2.3 試験部の構成及び実験用カプセル

冷却材／燃料比を変化させるために、試験燃料のまわりに流路管を取り付けた。流路管は基本的に両端を開口とし内部の冷却材の温度が上昇した際には自然対流が可能な構造としている。また、高発熱量実験の場合には、流路出口部に浮き子

を取り付け、冷却材の急激な吹き上がりによるエネルギーを測定できるようにした。

実験に使用したカプセル発熱量、標準条件における実験に使用したものと同じ大気圧水カプセルであり、内径 120 mm、深さ 800 mm の容器内に上述の試験部を収め、水面が上端より 25 cm になるまで純水を注入した。Fig. 2.6 に実験用カプセル及び試験部の構成を示す。

2.4 実験計測

本パラメータ実験で行なった過渡現象の計測は、流路管入口、出口及び内部の冷却材温度、被覆管表面温度及び冷却材の吹き上がり速度である。冷却材温度の測定には外径 1 mm のシース型クロメル・アルメル (C/A) 熱電対を使用し、また、被覆管表面温度の測定には、応答性を良くするために、直径 0.3 mm の白金-白金・ロジウム (Pt/Pt-13%Rh) 熱電対の素線を直接被覆管表面にスポット溶接して使用した。Fig. 2.7 に温度計測位置を示す。また、冷却材の吹き上がりの測定には Fig. 2.8 に示す浮き子型の変位計を用いた。

計測時の過渡信号は、実験孔付近に設置したプリアンプにより増幅した後、データ収録室に送られ、最高 80 kHz までの応答性能を持つ多チャンネル・アナログ・データレコーダに収録し、実験終了後にデータ処理された。

2.5 実験パラメータ

本パラメータ実験においては、試験燃料及び冷却材条件は標準条件における実験の場合と同一にして、冷却材／燃料比及び発熱量をパラメータとして行なった。流路管の形状としては、Fig. 2.9 に示す用に、PWR 燃料の有効流路断面の近接円を模擬した直径 14 mm の円筒形、有効流路断面形状を模擬した内面間距離 14 mm の四角筒形、これとほぼ同等の有効流路断面積を持つ直径 16 mm の円筒形及び有効流路断面積の 2 倍の流路断面積を持つ直径 20 mm の円筒形の 4 種類とした。また、発熱量は約 180 cal/g·UO₂ から約 500 cal/g·UO₂ まで変化させた。

Table 2.3 に実験条件及び実験目的の概要を示す。

Table 2.1 Characteristics of NSRR

| | |
|---------------------------|--|
| Reactor Type | Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor) |
| Reactor Vessel | 3.6" (wide) x 4.5" (long) x 9" (deep) Open Pool |
| Fuel | |
| Fuel Type | 12 wt% U-ZrH Fuel |
| Fuel Enrichment | 20 wt% U-235 |
| Cladding Material | Stainless Steel |
| Fuel Diameter | 3.56 cm |
| Cladding Diameter | 3.76 cm O.D. |
| Length of Fuel Section | 38 cm |
| Number of Fuel Rods | 157 (Including 8 Fuel-followed Control Rods) |
| Equivalent Core Diameter | 62 cm |
| Control Rods | |
| Number | 8 (Including 2 Safety Rods) |
| Type | Fuel Followered Type |
| Poison Material | Natural B ₄ C |
| Rod Drive System | Rack and Pinion Drive |
| Transient Rods | |
| Number | 2 Fast Transient Rods 1 Adjustable Transient Rod |
| Type | Air Followered Type |
| Poison Material | 92 % Enriched B ₄ C |
| Rod Drive System | Fast : Pneumatic Adjustable : Rack & Pinion and Pneumatic |
| Core Performance | |
| Steady State Operation | |
| Steady State Power | 300 kW |
| Pulse Operation | |
| Max. Peak Power | 21,100 MW |
| Max. Core Energy Release | 117 MW-s |
| Max. Reactivity Insertion | 3.4 % ik (\$4.67) |
| Min. Period | 1.17 ms |
| Pulse Width | 4.4 ms (1/2 Peak Power) |
| Neutron Life Time | 30 μ s |
| Experimental Tube | |
| Inside Diameter | 22 cm |

Table 2.2 Test fuel rod design summary

| | |
|-----------------------------------|------------|
| UO₂ Pellets | |
| Diameter | 9.29 mm |
| Length | 10 mm |
| Density | 95 % T.D. |
| Enrichment | 10 % |
| End Shape | Chamfered |
| Cladding | |
| Material | Zircaloy-4 |
| Wall Thickness | 0.62 mm |
| Fuel Rod | |
| Overall Length | 265 mm |
| Diameter | 10.72 mm |
| Fuelled Length | 135 mm |
| Pellet-Cladding Gap | 0.095 mm |
| Weight of UO ₂ Pellets | 95.3 g |
| Number of UO ₂ Pellets | 14 |
| Plenum Gas | He 1 atm |

Table 2.3 Test conditions

| Flow Shroud Shape | Coolant/ Fuel Ratio | Flow Shroud Material | Test No. | Energy Deposition (cal/g·UO ₂) | Objective |
|------------------------|------------------------|----------------------|----------|---|---------------------------------------|
| Cylindrical (14 mm) | 0.69 | Al | 233- 1 | 179 | Fuel Thermal Behavior |
| | | | 233- 6 | 211 | |
| | | | 233- 9 | 234 | Fuel Failure Threshold |
| | | | 233- 4 | 247 | |
| | | | 233- 2 | 271 | |
| | | | 233-10 | 371 | Destructive Energy at Fuel Failure |
| | | | 233-11A | 391 | |
| | | | 233-11 | 421 | |
| Square (14 mm) | 1.16 | Al | 233- 3 | 180 | Fuel Thermal Behavior |
| | | | 233-14 | 237 | Fuel Failure Threshold |
| | | | 233- 5 | 251 | |
| | | | 233-12 | 266 | Destructive Energy at Fuel Failure |
| | | Stainless Steel | 233-13 | 410 | |
| Cylindrical (16 mm) | 1.21 | Al | 233-15 | 184 | Fuel Thermal Behavior |
| | | | 233- 7 | 237 | Fuel Failure Threshold |
| | | | 233-19 | 238 | |
| | | | 233-16 | 243 | |
| | | | 233-17 | 254 | Destructive Energy at Fuel Failure |
| | | Zircaloy | 233-18 | 487 | |
| Cylindrical (20 mm) | 2.45 | Al | 233-20 | 239 | Fuel Failure Threshold |
| | | | 233- 8 | 240 | |

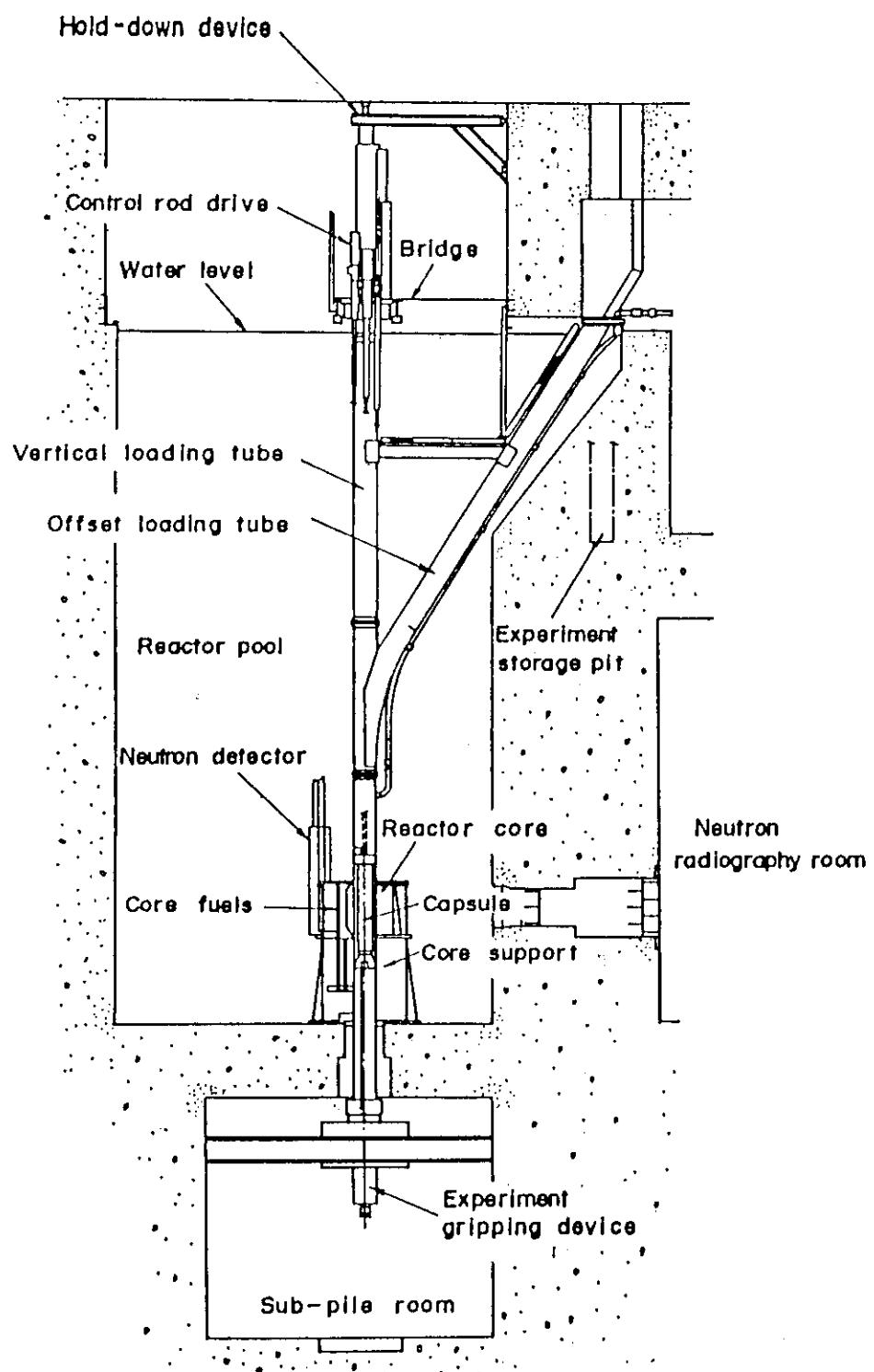


Fig. 2.1 General arrangement of NSRR

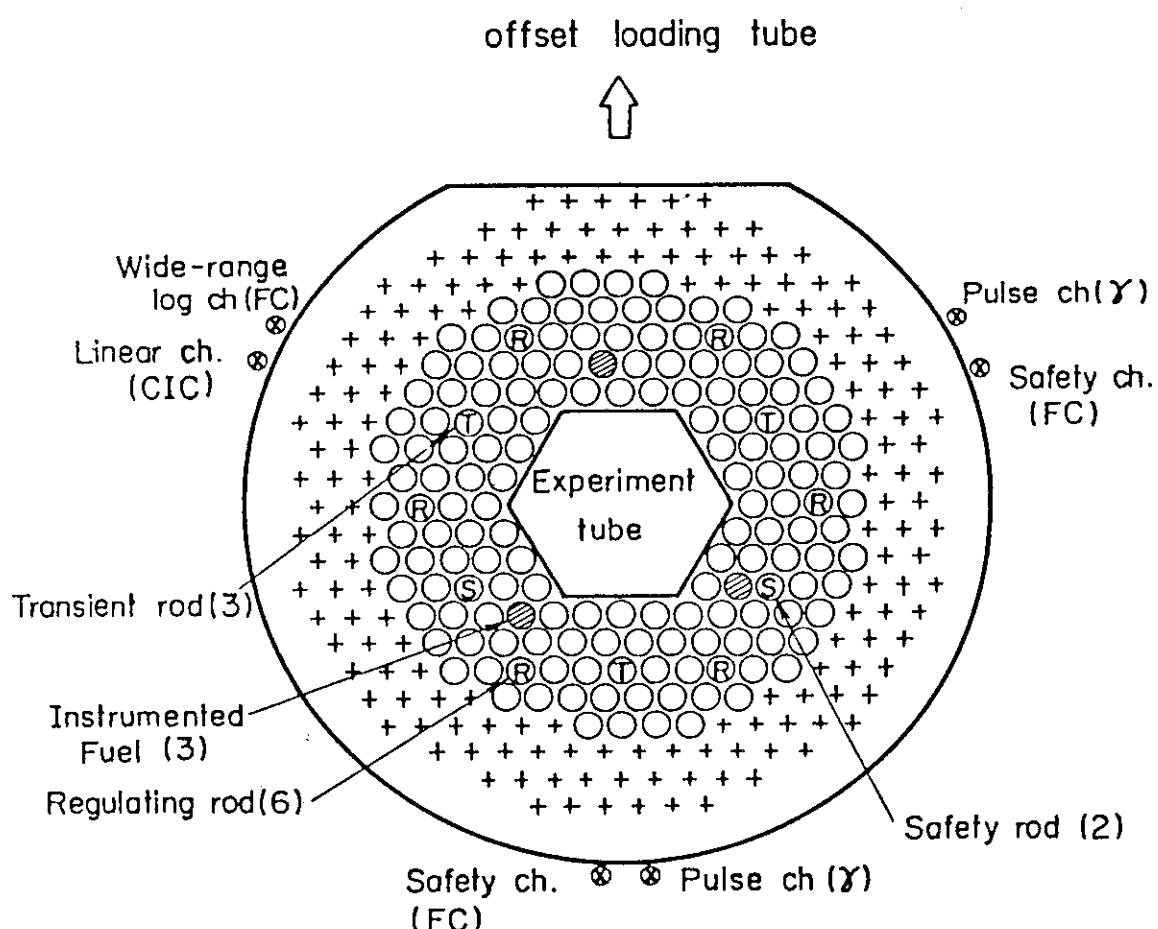


Fig. 2.2 Standard operating core configuration

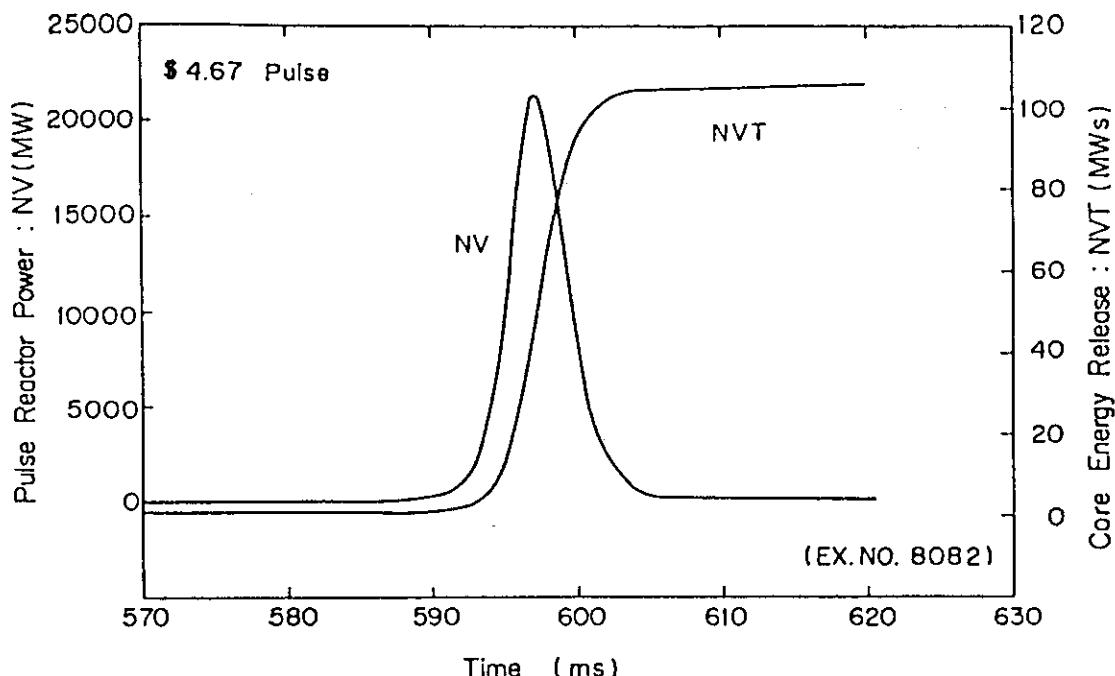


Fig. 2.3 Pulse reactor power and core energy release for 4.67 \$ pulse

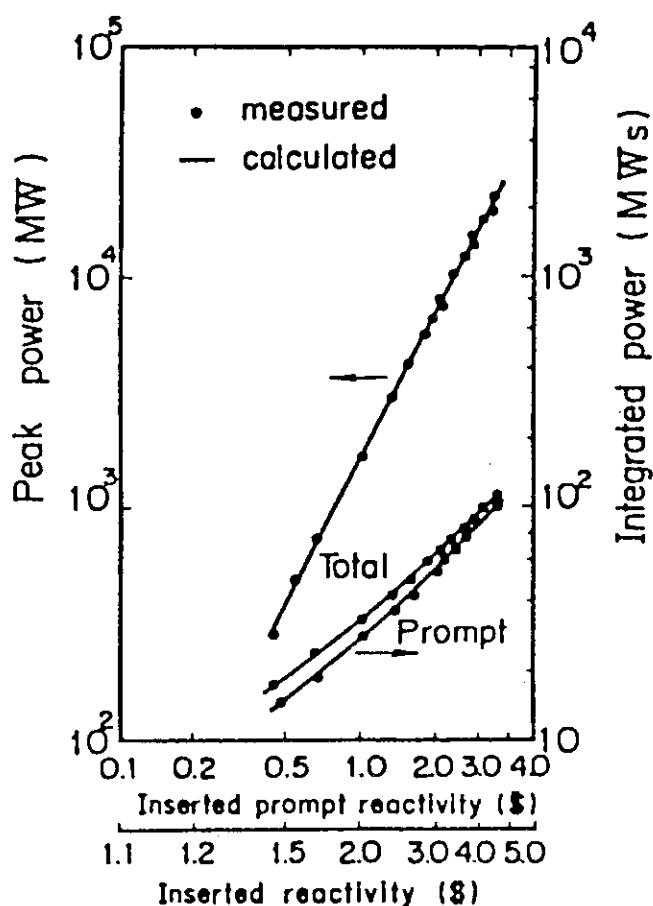


Fig. 2.4 Peak reactor power and integrated power against inserted reactivity ($1.0 \$ = 0.73 \% k$)

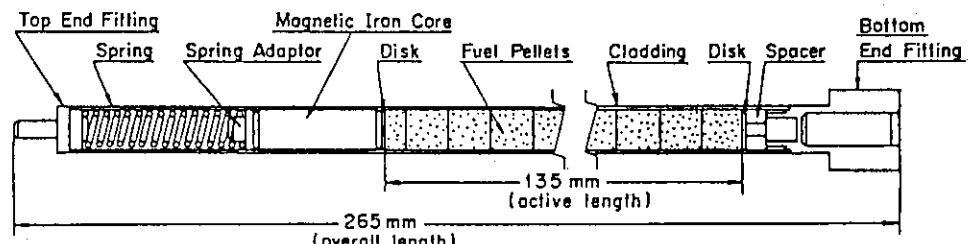


Fig. 2.5 Schematic of standard test fuel rod

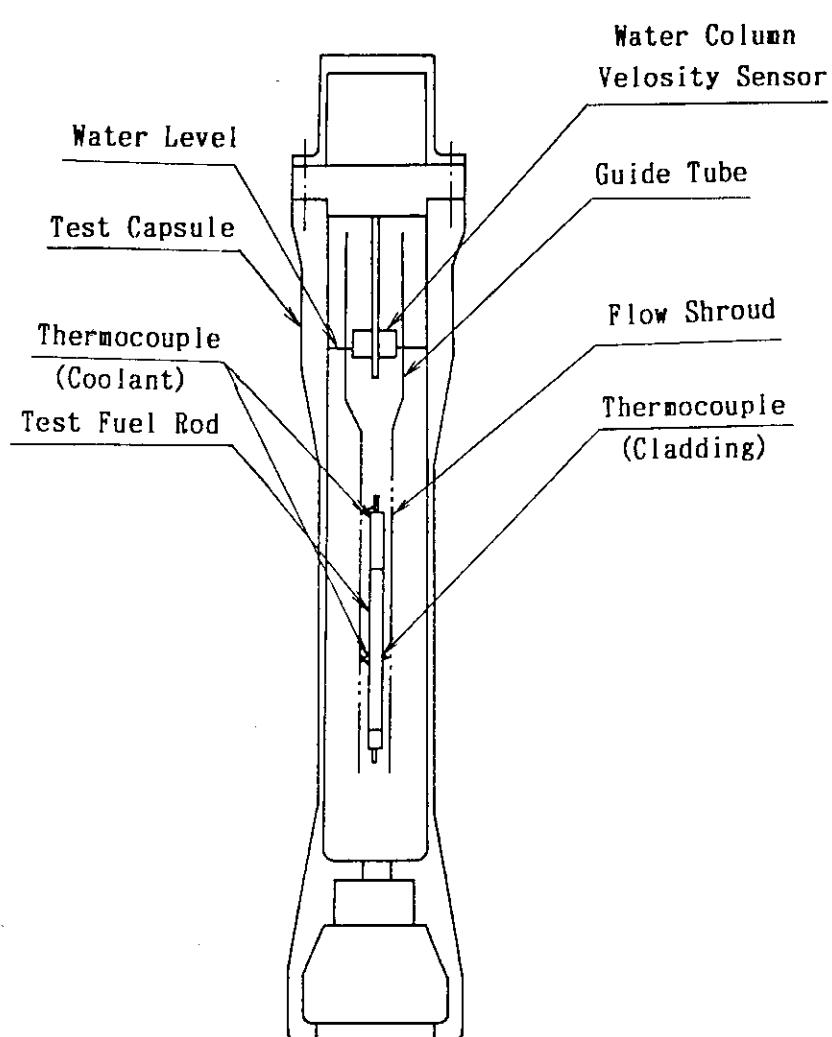


Fig. 2.6 Configuration of test capsule

| Test No. | Cladding Surface Temperature | | | | | | | | | | | | Coolant Temperature | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l | m | n | o | | |
| 233- 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | 1 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | |
| 233- 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | 1 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | | | |
| 233- 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | 1 | 4 | 5 | 6 | 2 | | | | | | | | | | | 3 | |
| 233- 4 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 | 2 | | | | | | | | | | 6 | |
| 233- 5 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 1 | 5 | 6 | 7 | 2 | | | | | | | | | | | 3 4 | |
| 233- 6 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 233- 7 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | |
| 233- 8 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | |
| 233- 9 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | |
| 233-10 | 2 | 1 | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | 4 | 6 | | | | | | | | | | 5 7 | |
| 233-11 | 2 | 1 | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | 6 7 | |
| 233-11A | 2 | 1 | | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | |
| 233-12 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | |
| 233-13 | | | | | | | | | | | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 233-14 | | 2 | | | | | | | | | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| 233-15 | | 2 | | | | | | | | | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| 233-16 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | | 1 | 4 | | 3 | | | | | | | | | | | |
| 233-17 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 4 | | 2 | 1 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 233-18 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | 2 |
| 233-19 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | 5 | 4 | | 6 | 2 | 3 | 4 | | 1 | | | | | | | 5 | |
| 233-20 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | 4 | 2 | 4 | | 1 | 3 | | | | | | | | | | |

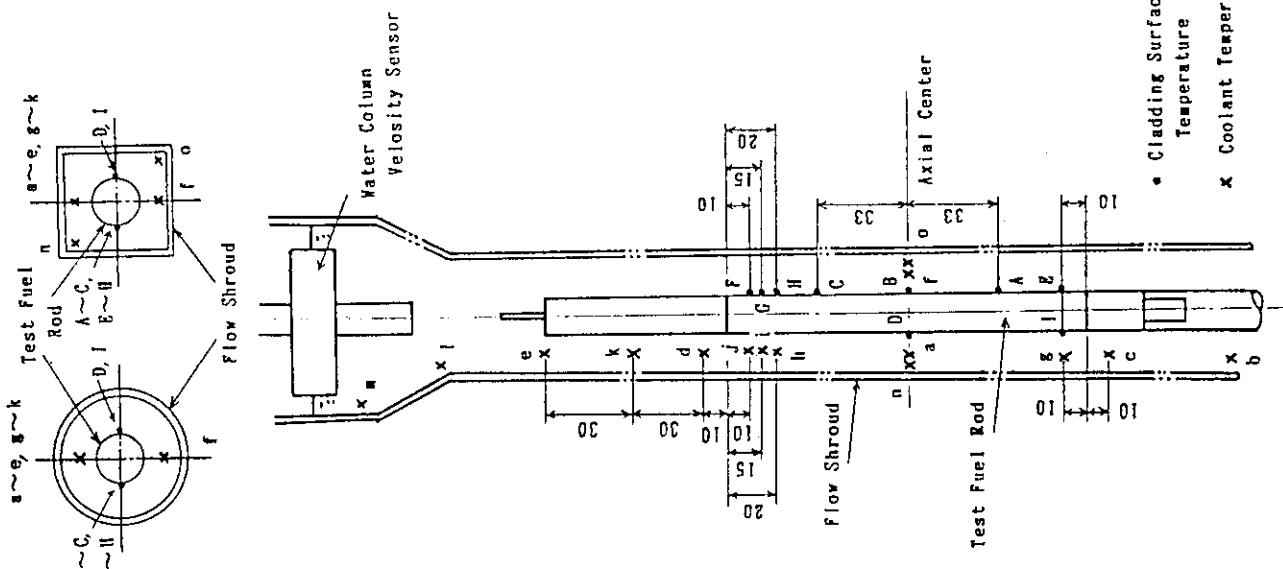


Fig. 2.7 Thermocouple position for cladding surface temperature and coolant temperature

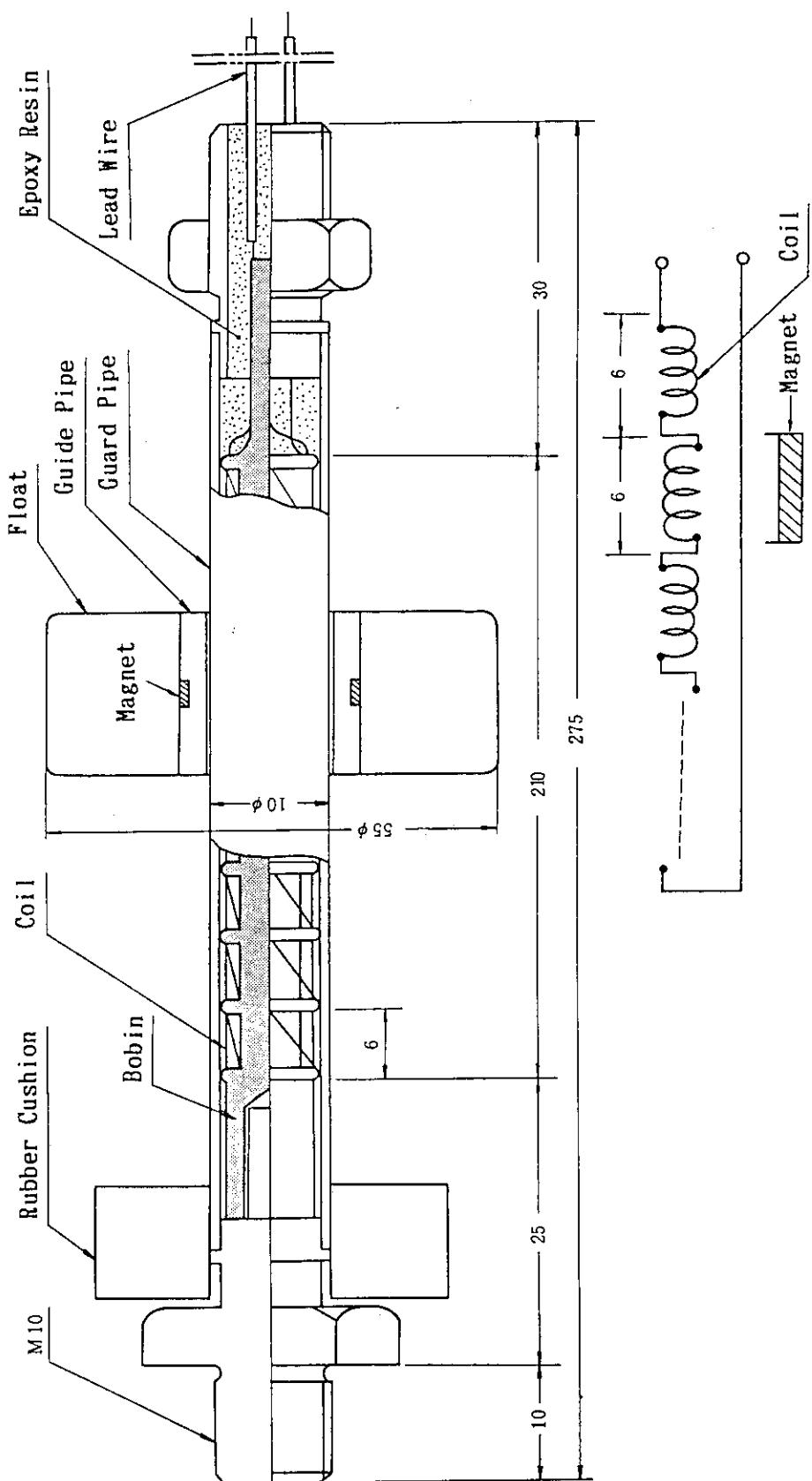


Fig. 2.8 Schematic of water column velocity sensor

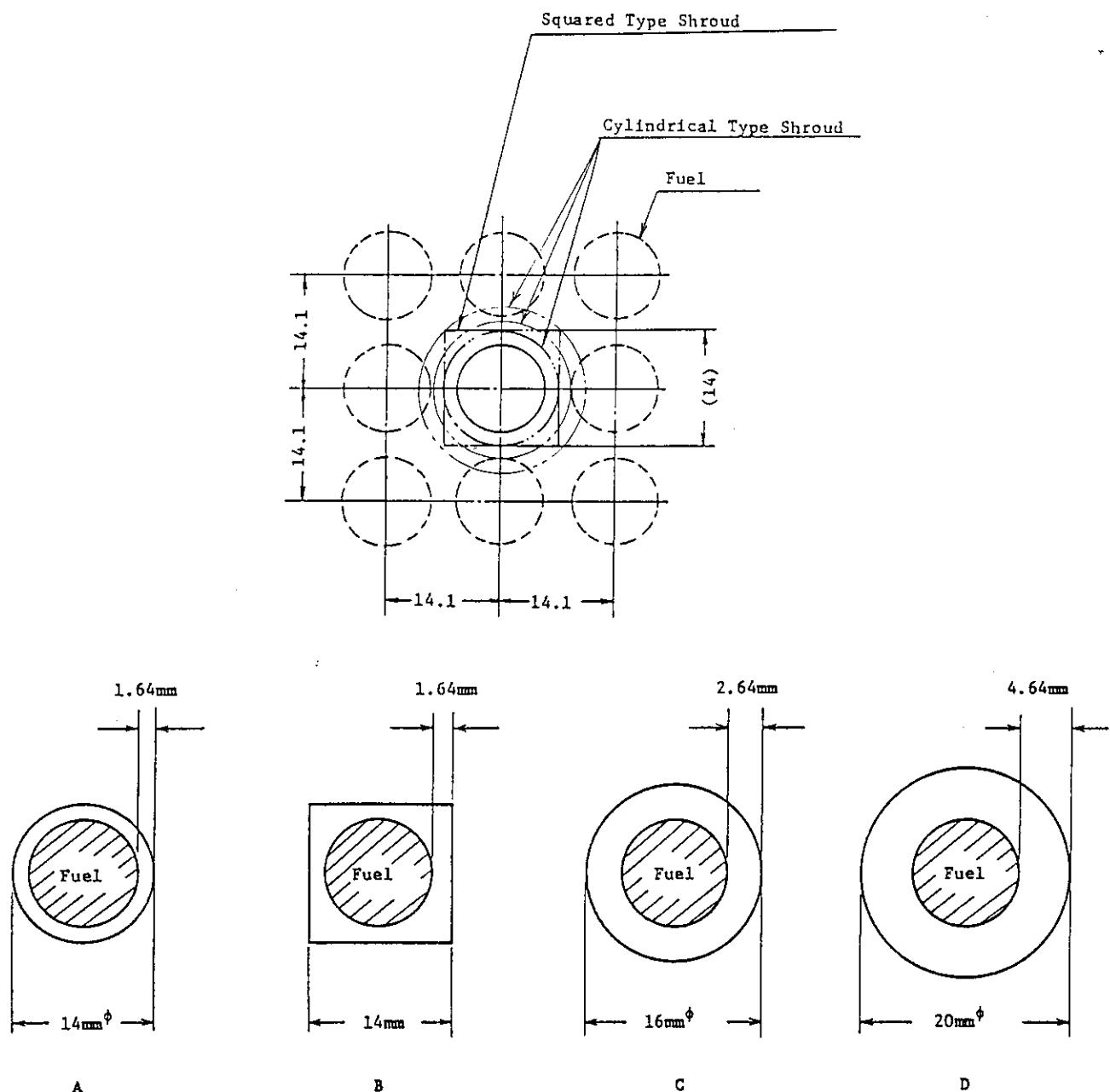


Fig. 2.9 Cross section of flow shroud

3. 実験結果

Table 2.3 に示す実験条件で、全部で 21 回の実験を実施した。実験結果の概要を Table 3.1 に示す。また、照射後の試験燃料の外観写真を流路管毎に Fig. 3.1 ~ Fig. 3.4 に示す。各実験における結果の詳細は以下のとおりである。

3.1 直径 14 mm の円筒形流路管実験

本形状の流路管を用いて 8 回の実験を行なった。

179 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-1) では、試験燃料の発熱部表面全域にわたって均一な酸化が見られ、ほぼ中央部に曲がりが見られたが、破損は生じなかった。被覆管表面の最高温度は約 1100 °C、クウェンチング開始温度は約 300 °C、また、膜沸騰持続時間は約 10 秒であった。この結果は、同発熱量の標準条件における実験の結果と比較すると、最高温度では大差はないがクウェンチング開始温度では約 900 °C に対しはるかに低く、膜沸騰持続時間では約 5 秒に対し 2 倍であった。

続いて発熱量を 211 cal/g·UO₂ に上昇して行なった実験 (Test No. 233-6) でも、試験燃料には酸化及び若干の変形が生じただけで、破損は生じなかった。この時の被覆管表面の最高温度、クウェンチング開始温度及び膜沸騰持続時間はそれぞれ約 1500 °C、約 600 °C 及び約 10 秒であり、Test No. 233-1 の結果と同様の傾向を示した。

234 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-9) では、試験燃料を実験用カプセルから取り出した時には、発熱部下部にクラックが発生しているのが認められたが、試験燃料を支持具から取り外し作業中にクラック発生部分で 2 つに分断した。被覆管温度は最高約 1800 °C に達したが、その後に熱電対温度計が破損してしまったため、クウェンチング開始温度及び膜沸騰持続時間は測定できなかった。

247 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-4) では、試験燃料は発熱部の両端で 3 つに分断した。破損の程度は上部の破断部の方が激しく破断部の UO₂ ベレットの表面が若干溶融していたが、中央部では溶融していないかった。また、試験燃料の中央部では、被覆管の内面溶融に起因すると考えられるしわが発生しており、しわの突起部分には幅 2 mm、長さ 10 mm の穴があいていた。しかしながら、破断部の被覆管には、溶融した形跡はなく破断面は金属光沢を呈していたので、試験燃料の分断は高温時ではなくクウェンチング時の熱衝撃によって生じたものであると考えられる。

Test No. 233-10 の実験は標準実験条件における試験燃料の破損しきい値 (発熱量 260 cal/g·UO₂) をめざした実験であり、実際に投入された発熱量は 260 cal/g·UO₂ であった。試験燃料は流路管内で固着していたために、取り出しが不可能な状態であった。このため流路管を中央部で切断して試験燃料を取り出した。取

り出し後の UO_2 ベレットは細かく壊れていたが、これは切断及び取り出し時に壊れたものである。 UO_2 ベレットの原型を留めていた比較的大きな燃料片には、中心部に割れがみられ、また、表面は溶融していた。本試験では、試験燃料棒と流路管が固着していたために被覆管表面の状況は詳細には観察できなかった。

Test No. 233-10 の実験（発熱量 371 cal/g· UO_2 ）は、燃料破損時に発生する破壊力を測定するための実験である。試験燃料は発熱部上端近傍で分断し、破断した上部の燃料棒は流路管上部に取り付けた水塊速度計の近くまで飛び上がっていた。流路管は試験燃料の分断位置を中心として、幅約 3 cm 程度円周状に溶融しており、溶融した流路壁は試験燃料にはりついていた。また、試験燃料破損時の水塊の飛び上がり速度は約 6.8 m/s と計測されたが、カプセル内での圧力上昇はなかった。水塊の飛び上がり速度から、熱エネルギーより機械的エネルギーへの転換率を評価すると約 0.006 % となる。ただし、ここでは流路管の変形に消費されたエネルギー、流路管下方に向かって吹き出す冷却材の運動エネルギー等は考慮していないため、実際のエネルギー転換率はこの値よりは大きいものと考えられる。

さらに発熱量を上昇して行なった実験（Test No. 233-11 及び Test No. 233-11A）では、試験燃料はいずれも Test No. 233-10 の場合と同様に発熱部上端近傍で分断し、上部は流路管外に飛び出していた。流路管は、Test No. 233-11 では試験燃料の破損部で若干膨れていたが、Test No. 233-11A ではほとんど変形していなかった。水塊の飛び上がり速度は、Test No. 233-11 ではデータ収録システムが故障したために測定できなかったが、Test No. 233-11A では 3.4 m/s であった。この値は、Test No. 233-10 の場合と比較すると発熱量が大きくなつたにもかかわらず小さくなっている。この実験では、 UO_2 燃料が微粒子化して流路管内を下向きに吹き出した痕跡が流路管内に残されていることから、流路管内での蒸気発生が少なくなり水塊の飛び上がり速度が小さくなつたのであろうと考えられる。

3.2 内面距離 14 mm の四角筒形流路管実験

本形状の流路管では 5 回の実験を行なった。

Test No. 233-1 の場合とほぼ同じ発熱量である 180 cal/g· UO_2 で行なった実験（Test No. 233-3）では、試験燃料の発熱部は全域で一様に酸化していたが、破損は生じていなかった。また、試験燃料及び流路管はほとんど変形していなかった。被覆管表面の最高温度は約 1200 °C、クウェンチング開始温度は約 450 °C、また、膜沸騰持続時間は約 11 秒であり、Test No. 233-1 の場合とほぼ同様であった。

237 cal/g· UO_2 の発熱量で行なった実験（Test No. 233-14）では、試験燃料の発熱部の広い領域で酸化膜の剥離が見られ、また、発熱部上部に長さ約 1 cm の軸方向のクラックが発生していた。被覆管表面の最高温度は、発熱部下部で約 1400 °C に達していたが、膜沸騰持続時間は約 3 秒と短かった。また、他の位置での被覆管表面温度挙動は、熱電対温度計が最高温度に達する前に破損してしまったため測定できなかった。

251 cal/g· UO_2 の発熱量で行なった実験（Test No. 233-5）では、試験燃料には

発熱部下端に周方向のクラックが発生していた。被覆管には内面溶融に起因する大きなしわが発生しており、中央部で大きく曲がっていた。被覆管表面の最高温度は上部にいくほど高くなり約 1550 °C、クウェンチング開始温度は約 860 °C、また、膜沸騰持続時間も上部で最も長く約 13 秒であった。

Test No. 233-12 では 266 cal/g·UO₂ の発熱量で実験を行なった結果、試験燃料は発熱部の下方約 1/3 の位置で 2 つに分断していた。また、被覆管のしわは発熱部全体にわたって激しくなっており、特に発熱部下端では被覆管の貫通孔から内部の溶融した被覆材が吹き出した様相を呈していた。さらに、試験燃料は発熱部全域にわたって流路管にそってやや四角形に変形していた。

高発熱量 (410 cal/g·UO₂) で行なった Test No. 233-13 の実験では、試験燃料の発熱部はほぼ全体が溶融しており、下端で 2 つに分断していた。また、溶融した燃料は流路管内面に付着しており、流路管も下部及び中央部で長さ 10 ~ 15 mm 程度溶融していた。水塊速度計は激しく応答したが、作動がスムースではなかったため水塊速度の評価はできなかった。また、カプセル内の圧力は原子炉出力によるノイズのため判読できなかった。

3.3 直径 16 mm の円筒形流路管実験

本形状の流路管では 6 回の実験を行なった。

180 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-15) では、試験燃料の発熱部は全域で一様に酸化していたが、その他特に変化は見られず、破損も生じていなかつた。被覆管表面の最高温度は約 1350 °C であり、標準条件における実験の場合と比較して高めとなっているが、さらに流路断面積の小さい Test No. 233-1 の場合と比較しても若干高めとなっていた。

Test No. 233-7 及び Test No. 233-19 の実験はそれぞれ 237 cal/g·UO₂ 及び 238 cal/g·UO₂ のほぼ同じ発熱量で行われた。実験の結果、試験燃料は両者とも破損が生じたが、破損の形態は異なっていた。すなわち、Test No. 233-7 では発熱部の下方の被覆管にクラックが発生したのに対し、Test No. 233-19 では被覆管のほぼ同位置に直径 3 mm の貫通孔が発生していた。また、被覆管には両者とも内面溶融に起因するしわが発生していた。被覆管表面の最高温度は Test No. 233-7 の場合には約 1500 °C 出若干低めであったのに対し、Test No. 233-19 の場合には燃料下部で約 1700 °C に達していた。

243 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-16) では、試験燃料は発熱部中央及び下部で 3 個に分断し、被覆管の一部が欠落し UO₂ ペレットが露出していた。露出した UO₂ ペレットの表面は溶融した様相を呈していた。また、被覆管の表面にはたくさんの細かなクラックが見られた。被覆管表面温度は熱電対温度計が最高 1700 °C を示した時点ですべて破損してしまったため、最高温度は測定することができなかった。

254 cal/g·UO₂ の発熱量で行なった実験 (Test No. 233-17) では、試験燃料は実験用カプセルから取り出した時点では発熱部上部及び下部で 3 個に分断してい

たが、支持具から燃料を取り外す作業中に中央部がさらに分断し結局 5 個になった。また、発熱部中央には貫通孔が発生し内部の溶融した被覆材が噴出していた。被覆管表面の最高温度は熱電対温度計が破損してしまったため測定できなかったが、1750 °C 以上に達していた。

発熱量を本パラメータ実験で最高に高めた 487 cal/g·UO₂ の実験 (Test No. 233-18) では、試験燃料は溶融し、下部端栓及び被覆管上部の一部を流路管内に残すだけで、他はすべて外に飛び出していた。また、流路管は中央部付近で 2 つに分断し、上側は溶融していた。さらに、本実験では、燃料破損時の破壊エネルギーを正確に測定するために、発生した機械的エネルギーがすべて水塊の飛び上がりとして消費されるように、流路管の入口を板でふさいで水塊飛び上がり速度の測定を行なった。測定された水塊飛び上がり速度の最大値は約 11 m/s であり、また、この時のカプセル内での圧力上昇は約 0.9 MPa であった。

3.4 直径 20 mm の円筒形流路管実験

本実験は、PWR 燃料の有効流路断面積の 2 倍の流路断面積を持つ流路管を用いて、冷却材／燃料比を大きくした場合の燃料挙動を調べるためのもので、ほぼ同じ発熱量である 239 cal/g·UO₂ 及び 240 cal/g·UO₂ で 2 回の実験 (Test No. 233-20 及び 233-8) を行なった。その結果、Test No. 233-20 の実験では発熱部で酸化膜の剥離が見られただけで破損は生じなかつたが、Test No. 233-8 の実験では発熱部下部にクラックが発生した。被覆管表面の温度挙動は両者とも熱電対温度計が破損してしまったため最高温度は測定できなかつたが、Test No. 233-20 の実験では 1700 °C 以上に達していた。

Table 3.1 Summary of experimental results (1/3)

| Shroud Type | Test No. | Energy Deposition (cal/g·UO ₂) | Cladding Surface Temperature | | | Max. Coolant Temp. (°C) | Fuel Behavior |
|------------------------|----------|--|------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | Max. Temp. (°C) | Quenching Temp. (°C) | Duration of Film Boiling (s) | | |
| Cylindrical (14 mm) | 233-1 | 179 | #1 - | - | - | #1 22 | Oxidation |
| | | | #2 1080 | 380 | 10.3 | #2 60 | |
| | | | #3 1160 | - | >10 | #3 68 | |
| | | | #4 1090 | 300 | 10.5 | #4 90 | |
| | 233-6 | 211 | #1 1450 | 610 | 5.6 | #1 70 | Oxidation |
| | | | #2 1480 | 490 | 10.7 | #2 22 | |
| | | | #3 1490 | 390 | 16.4 | #3 68 | |
| | | | #4 1370 | 520 | 19.2 | #4 85 | |
| | 233-9 | 234 | #1 >1700 | - | - | #1 20 | Broken into 2 pieces |
| | | | #2 >1450 | - | - | #2 36 | |
| | | | #3 >1660 | - | - | #3 83 | |
| | | | #4 >1360 | - | - | #4 94 | |
| | 233-4 | 247 | #1 >1100 | - | - | #1 55 | Broken into 3 pieces |
| | | | #2 >1070 | - | - | #2 100 | |
| | | | #3 1690 | 830 | 10.5 | #3 85 | |
| | | | #4 - | - | - | #4 122 | |
| | | | #5 - | - | - | #5 98 | |
| | 233-2 | 271 | #1 >1640 | - | - | #1 98 | Melting |
| | | | #2 >1750 | - | - | #2 116 | |
| | | | #3 >1690 | - | - | #3 108 | |
| | | | #4 >1750 | - | - | #4 111 | |
| | 233-10 | 371 | #1 >510 | - | - | #1 >200 | Fragmentation |
| | | | #2 >580 | - | - | #2 135 | |
| | | | #3 >200 | - | - | #3 174 | |
| | | | #4 >200 | - | - | #4 >200 | |
| | | | #5 >200 | - | - | #5 >200 | |
| | | | #6 >200 | - | - | #6 >200 | |
| | 233-11A | 391 | #1 >980 | - | - | #1 >200 | Fragmentation |
| | | | #2 >960 | - | - | #2 >200 | |
| | | | #3 >200 | - | - | #3 132 | |
| | | | #4 >200 | - | - | #4 >200 | |
| | | | #5 129 | - | - | #5 129 | |
| | 233-11 | (421) | #1 - | - | - | #1 - | Fragmentation |
| | | | #2 - | - | - | #2 - | |
| | | | #3 - | - | - | #3 - | |
| | | | #4 - | - | - | #4 - | |
| | | | #5 - | - | - | #5 - | |

Table 3.1 Summary of experimental results (2/3)

| Shroud Type | Test No. | Energy Deposition (cal/g·UO ₂) | Cladding Surface Temperature | | | Max. Coolant Temp. (°C) | Fuel Behavior |
|-------------------|----------|--|------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | Max. Temp. (°C) | Quenching Temp. (°C) | Duration of Film Boiling (s) | | |
| Square (14 mm) | 233-3 | 180 | #1 1140 | 690 | 4.8 | #1 24 | Oxidation |
| | | | #2 1210 | 600 | 8.0 | #2 50 | |
| | | | #3 1190 | 450 | 11.2 | #3 76 | |
| | | | #4 1180 | 600 | 8.5 | #4 50 | |
| | 233-14 | 237 | #1 1640 | 610 | 3.6 | #1 22 | Oxidation |
| | | | #2 >1270 | - | - | #2 83 | |
| | | | #3 >1070 | - | - | #3 107 | |
| | 233-5 | 251 | #1 1490 | 550 | 8.2 | #1 25 | Cracking |
| | | | #2 1490 | 550 | 8.1 | #2 135 | |
| | | | #3 1550 | 680 | 12.3 | #3 73 | |
| | | | #4 - | - | - | #4 87 | |
| (16 mm) | 233-12 | 266 | #1 >1690 | - | - | #1 22 | Broken into 2 pieces |
| | | | #2 >1590 | - | - | #2 22 | |
| | | | #3 >1700 | - | - | #3 72 | |
| | 233-13 | 410 | - | - | - | #4 77 | Melting |
| | | | - | - | - | #5 83 | |
| | | | - | - | - | #1 43 | |
| | | | - | - | - | #2 >200 | |
| | | | - | - | - | #3 83 | |
| | 233-15 | 184 | #1 1330 | 850 | 2.4 | #1 20 | Oxidation |
| | | | #2 1330 | 570 | 10.0 | #2 20 | |
| | | | #3 1380 | 470 | 15.8 | #3 53 | |
| | | | #4 - | - | - | #4 74 | |
| | | 237 | #1 1500 | 590 | 7.4 | #1 20 | Cracking |
| | | | #2 1530 | 440 | 9.9 | #2 30 | |
| | | | #3 1600 | 420 | 12.5 | #3 50 | |
| | | | #4 1630 | - | - | #4 74 | |
| | 233-19 | 238 | #1 >1610 | - | - | #5 65 | Hole (Penetrated) |
| | | | #2 1660 | 700 | 6.4 | #1 57 | |
| | | | #3 >170 | - | - | #2 60 | |
| | | | #4 >1450 | - | - | #3 64 | |
| | | | #5 >1530 | - | - | #4 119 | |
| | | | #6 >1660 | - | - | #5 117 | |

Table 3.1 Summary of experimental results (3/3)

| Shroud Type | Test No. | Energy Deposition (cal/g·UO ₂) | Cladding Surface Temperature | | | Max. Coolant Temp. (°C) | Fuel Behavior |
|------------------------|----------|--|------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | Max. Temp. (°C) | Quenching Temp. (°C) | Duration of Film Boiling (s) | | |
| Cylindrical (16 mm) | 233-16 | 243 | #1 >1640 | - | - | #1 - | Broken into 3 pieces |
| | | | #2 >1560 | - | - | #2 72 | |
| | | | #3 >1560 | - | - | #3 83 | |
| | | | #4 >1600 | - | - | #4 91 | |
| | 233-17 | 254 | #1 >1760 | - | - | #1 90 | Broken into 3 pieces |
| | | | #2 >1570 | - | - | #2 20 | |
| | | | #3 >1040 | - | - | #3 83 | |
| | | | #4 >1430 | - | - | #4 90 | |
| | 233-18 | 487 | #1 >2000 | - | - | #1 >200 | Fragmentation |
| Cylindrical (20 mm) | 233-20 | 239 | #1 >1690 | - | - | #1 30 | Oxidation |
| | | | #2 >1550 | - | - | #2 38 | |
| | | | #3 1460 | 490 | 11.6 | #3 40 | |
| | | | #4 1560 | 320 | 11.1 | #4 43 | |
| | 233-8 | 240 | #1 1290 | 690 | 7.1 | #1 22 | Cracking |
| | | | #2 >1110 | - | - | #2 22 | |
| | | | #3 >1070 | - | - | #3 36 | |
| | | | #4 >1030 | - | - | #4 55 | |
| | | | | | | #5 61 | |

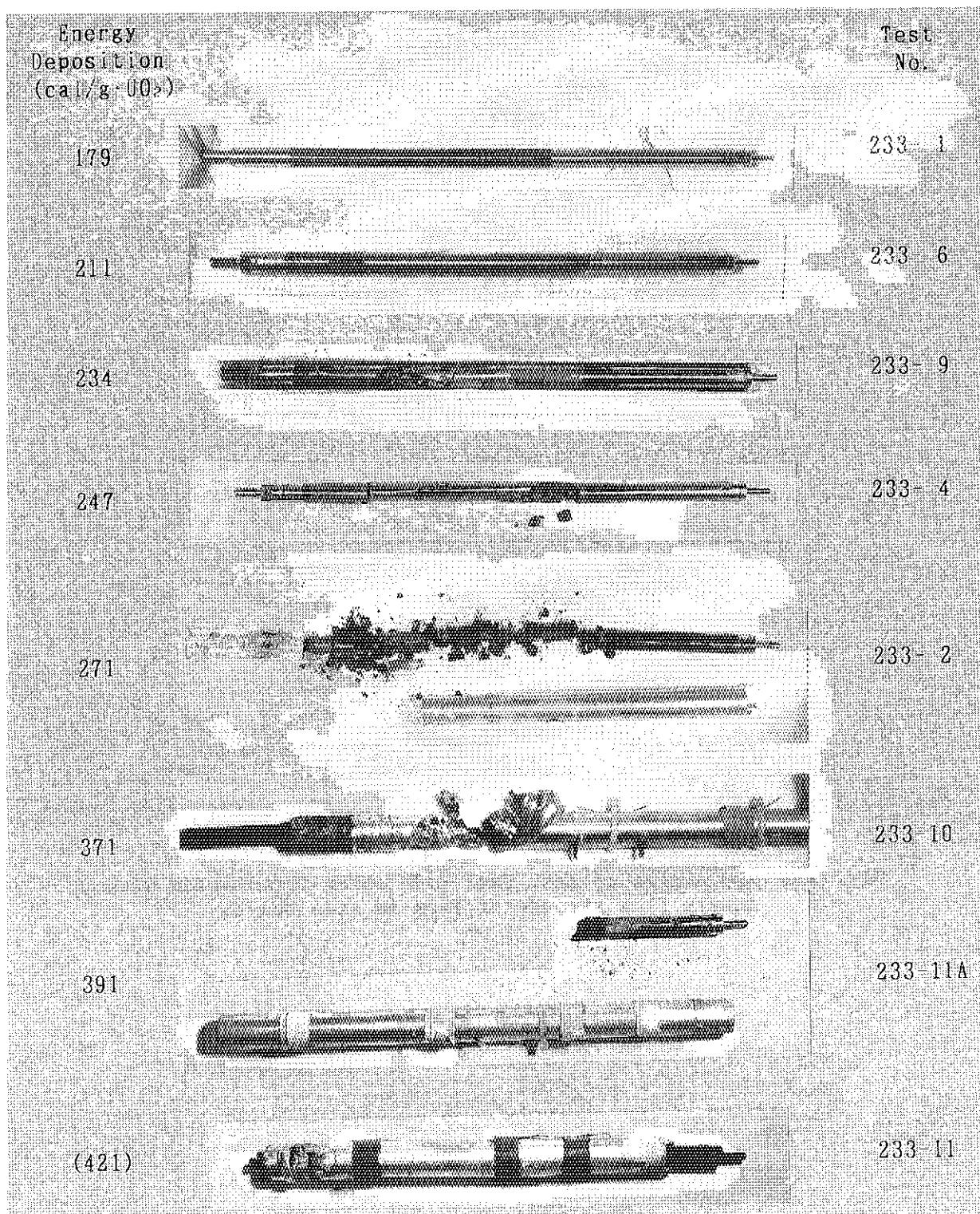


Fig. 3.1 Appearance of test fuel rods after irradiation with cylindrical flow shrouds of 14mm in diameter

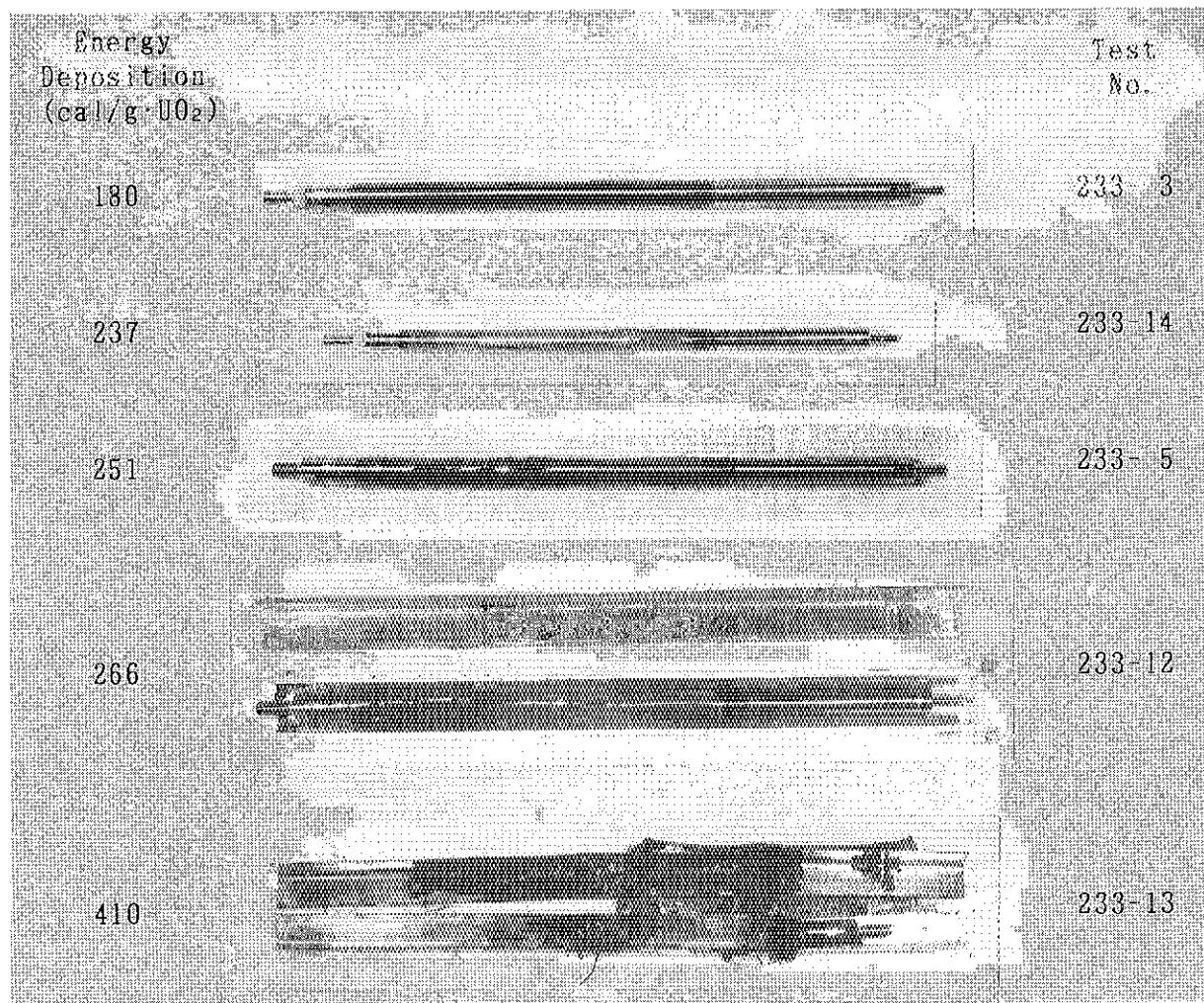


Fig. 3.2 Appearance of test fuel rods after irradiation with square flow shrouds of 14mm in side length

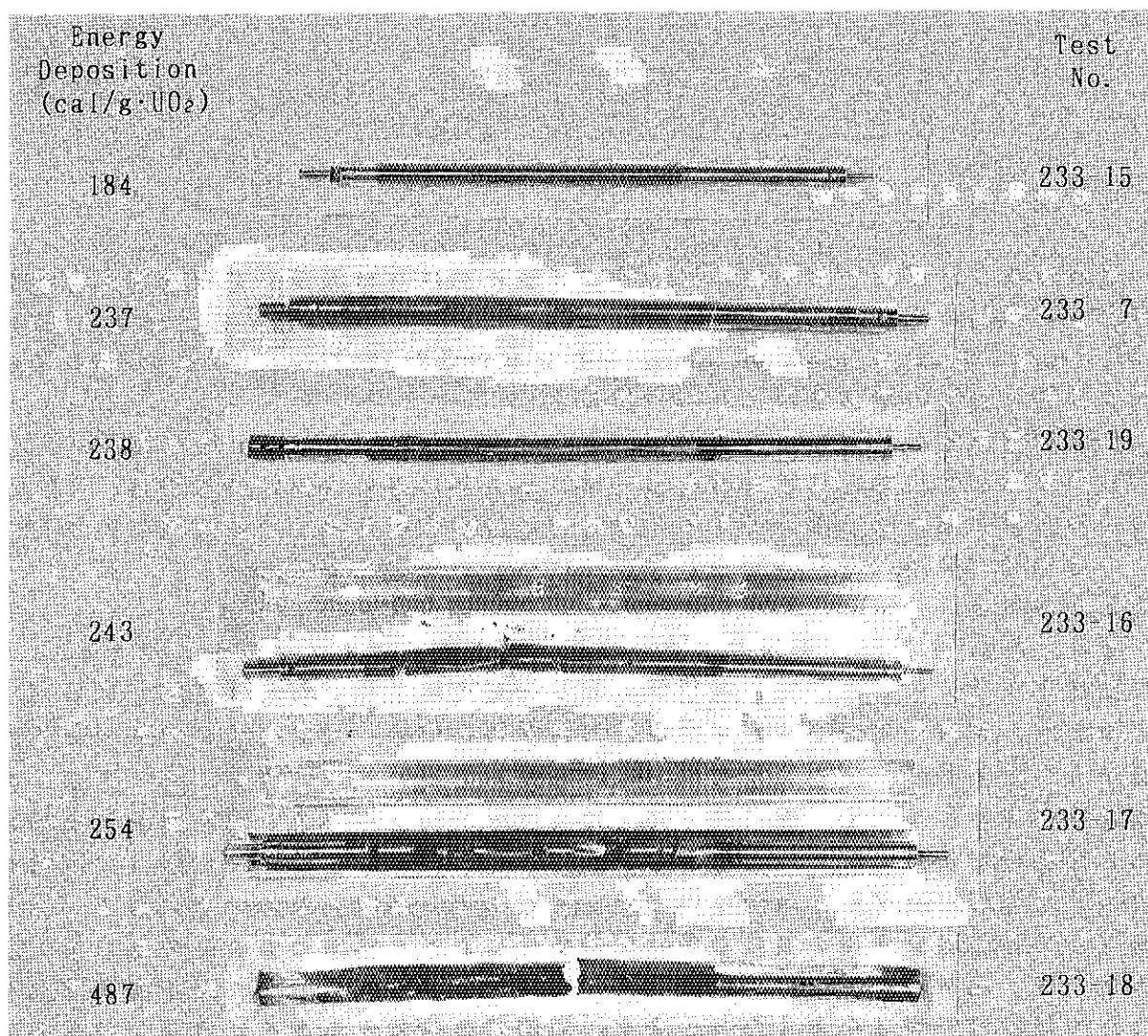


Fig. 3.3 Appearance of test fuel rods after irradiation with cylindrical flow shrouds of 16mm in diameter

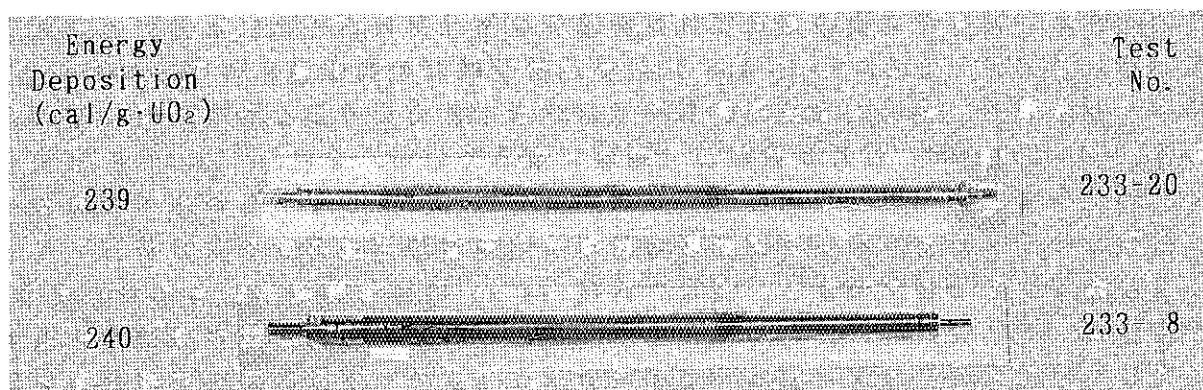


Fig. 3.4 Appearance of test fuel rods after irradiation with cylindrical flow shrouds of 20mm in diameter

4. 考 察

4.1 被覆管表面温度挙動

本パラメータ実験と標準条件における実験における発熱部中央位置での被覆管表面温度挙動の比較を Fig. 4.1 及び Fig. 4.2 に示す。Fig. 4.1 は発熱量約 180 cal/g·UO₂ の場合、また、Fig. 4.2 は発熱量約 240 cal/g·UO₂ の場合の結果を比較したものである。これらの図から、

- (1) 被覆管表面の最高温度は流路管の有無にかかわらずほぼ同じである、
- (2) 膜沸騰の持続時間は流路管を取り付けることにより大幅に長くなる、
- (3) 冷却材／燃料比を小さくすると膜沸騰の持続時間は長くなる傾向にあるが、その差は流路管無しの場合との差に比べて小さいことがわかる。

また、Fig. 4.3 は、被覆管表面の温度挙動を軸方向で比較したものである。この図は本パラメータ実験での被覆管表面での温度挙動の特徴をよく表している。すなわち、被覆管表面温度が最高温度に達するまでは、流路管内の冷却材の温度はそれほど上昇していないため軸方向の各位置で違いが現れない。ところが、時間が経過するにつれて、燃料棒下部では自然対流によって冷たい冷却材が供給されるためほぼ初期温度で一定であるのに対し、燃料棒上部にいくに従って流路管内の冷却材は試験燃料からの伝熱によって暖められ高温となる。その結果、燃料棒下部での被覆管表面の温度挙動は標準条件における実験の場合とそれほど変わらないが、燃料棒上部にいくに従って被覆管表面から冷却材への熱伝達が悪化するため温度降下率は小さくなり、また、膜沸騰を維持するために必要な最小熱流束が小さくなるためクウェンチング開始時の被覆管表面温度は低くなり、かつ、膜沸騰の持続時間は長くなる。特に極端な場合には、図に見られるように、いったん下がった温度が再度上昇することもある。

Fig. 4.4 は被覆管表面の最高温度を発熱量に対してプロットしたものである。この図からも被覆管表面の最高温度は流路管を取り付けたことによりほとんど変化しないことがわかる。Fig. 4.5 に膜沸騰持続時間の発熱量に対するプロットを示す。膜沸騰の持続時間は流路管を取り付けることにより長くなり、特にその影響は 210 cal/g·UO₂ 付近の発熱量で顕著に現れている。また、Fig. 4.6 はクウェンチング開始時の被覆管表面温度を発熱量に対してプロットしたものである。この図より、クウェンチング開始時の被覆管表面温度も流路管を取り付けることにより低下することがわかる。特に、内径 14 mm の円筒形流路管を用いた実験の場合には、流路管内の冷却材の量が少ないため、上部では冷却材がほぼ飽和温度に達していたものと考えられる。この時のクウェンチング開始時の被覆管表面温度 300 °C は、飽和温度の水に対する沸騰曲線における極小熱負荷温度約 250 °C、また、炉外においてジルカロイの棒を用いて行なった急冷実験でのサブクール度の小さい場合のクウェンチング開始温度⁽¹⁰⁾とも極めてよい一致を示している。

Fig. 4.7 は、冷却材／燃料比の影響を明確にするために、同一発熱量（約 240 cal/g·UO₂）で流路管寸法及び形状を変えた場合の結果を比較したものである。この図からも、流路断面積が減少し、冷却材／燃料比が小さくなるのにともなって、膜沸騰持続時間は長くなり、クウェンチング開始時の被覆管表面温度は低下し、流路管内の冷却材温度は上昇するが、被覆管表面の最高温度はあまり変化しないことがわかる。

また、NSRRでは、冷却材のサブクール度の相違が燃料挙動に及ぼす影響を調べるために、冷却材の初期温度を変えた実験（冷却材温度パラメータ実験）を実施している。この実験では、初めから冷却材のサブクール度を小さくしているため、被覆管表面の最高温度は標準条件における実験あるいは本パラメータ実験の場合と比較して高くなっているが、過渡現象の末期の事象である膜沸騰の持続時間及びクウェンチング開始時の被覆管表面温度は、Fig. 4.8 に示すように、よい一致を示している。

4.2 燃料破損挙動及び破損しきい値

流路管を取り付けた場合の試験燃料の破損形態は、初期破損である被覆管のクラックあるいは貫通孔に始まって、発熱量の増大に従って分断、溶融、微粒子化と、流路管なしである標準条件における実験の場合と同様に変化している。しかしながら、各破損形態の現れる発熱量は、流路管を取り付けることにより、標準条件における実験の場合と比較して低下している。Fig. 4.9 は各流路管を取り付けた場合に破損の発生する発熱量を冷却材／燃料比に対してプロットしたものである。図からも明らかのように、流路管付きの実験の場合には流路管なしの場合と比べ約 30 cal/g·UO₂ 破損のしきい値は低下している。また、同図には冷却材温度が 90 °C の場合の冷却材温度パラメータ実験の結果も併せてプロットしている。この実験の場合には、初めから冷却材のサブクール度が小さいため、被覆管表面の最高温度は標準条件における実験の場合と比較して高く、また、膜沸騰持続時間も長くなることから、破損しきい値の低下は約 50 cal/g·UO₂ となっている。このため、流路管付きの実験の場合には、実験開始直後は標準条件における実験の冷却材条件であり、一定時間が経過し流路管内の冷却材の温度が上昇した後には低サブクール度の冷却材温度パラメータ実験の冷却条件となることから、試験燃料の破損しきい値も両実験の中間に位置している。

また、冷却材／燃料比が 3 以上あるいは 0.6 以下の実験は実施していないため確実ではないが、今回の実験条件の冷却材／燃料比の範囲では、冷却材／燃料比の相違による影響は顕著ではなくなることがあることがわかる。このことは、破損を引き起こすような発熱量が試験燃料に与えられた場合、流路断面積が極端に大きくなり、かつ、ある程度の流路断面積が存在すれば、流路管内の冷却材の温度は短時間で飽和温度まで上昇してしまい、冷却条件に大きな相違が生じないためと考えられる。

次に試験燃料の破損機構について考える。初期破損の形態については、流路管

の有無にかかわらずクラックの発生ということで同様ではあるが、破損機構については若干の相違がある。Fig. 4.10 は、標準条件における実験と本パラメータ実験で初期破損を起こした試験燃料の破損部を拡大して比較したものである。図に見られるように、標準条件における実験の場合には被覆管の内面溶融に起因するしわが多いのに対し、流路管付き実験の場合にはしわはあまり発生していない。すなわち、標準条件における実験の場合には、初期破損の発生する発熱量である 260 cal/g·UO₂ では、UO₂ ペレットと被覆管が周方向の一部で接触している場所で共晶反応を起こし固着するが、他の場所ではギャップが残存している。このため、急冷時には、被覆管は急激に収縮しようとするが UO₂ ペレットは高温状態を維持して収縮は起こらない。したがって、被覆管は周方向には被覆管が UO₂ ペレットに接触するまでは収縮できるため熱応力の発生は小さいが、軸方向では被覆管の収縮が UO₂ ペレットによって拘束されるため、大きな熱応力が発生して周方向のクラックの発生に至っている。これに対し、流路管付き実験の場合には、初期破損の発生する発熱量は約 230 cal/g·UO₂ であり標準条件における実験の場合と比較して低いため、UO₂ ペレットと被覆管との共晶反応による固着はわずかである。しかしながら、流路管内の冷却材の温度上昇により被覆管表面から冷却材への熱伝達が悪化するために、被覆管の外面は長時間高温状態にさらされることになり酸化が進み脆化は激しくなる。このため、急冷時には被覆管の拘束による大きな熱応力の発生はないが、被覆管と UO₂ ペレットとの接触時の熱応力によって被覆管が脆化しているためににクラックが発生する。このように、試験燃料の初期破損は急冷時に被覆管に作用する熱応力に起因するという点では両者とも同じであるが、急冷時までの過程が異なるため、標準条件における実験の場合には周方向のみのクラックであるのに対し、流路管付き実験の場合には周・軸の両方向にクラックが発生するという相違が生じる。また、UO₂ ペレットの溶融が起こるような発熱量領域では破損機構に大きな相違はないものと考えられる。

4.3 機械的エネルギーの発生

燃料の溶融エンタルピを超える高発熱量が与えられ、溶融した燃料が冷却材中に放出、分散する状態に至ると、冷却材は急激に加熱され蒸気塊が発生する。その結果、蒸気塊が発生した上部の冷却材が飛び上がって圧力容器上部に衝突し水撃現象が起こる。圧力容器の健全性を評価する上からも、燃料が発熱した総エネルギーのうち何パーセントが飛び上がった水塊の運動エネルギーに転換するのか（機械的エネルギー転換率）を知っておくことは重要である。NSRRでは、高発熱量での実験を行なう場合には、カプセル内に浮き子式の水塊速度計を取り付けて水塊の飛び上がり速度を測定し、その運動エネルギーから機械的エネルギー転換率を求めてきた。Fig. 4.11 に高発熱量での標準条件における実験及び本パラメータ実験で求めた機械的エネルギー転換率を示す。図に見られるように、機械的エネルギー転換率は流路管がある場合の方がない場合の数倍高い値を示している。一般的には、冷却材の量が制限されている方が、蒸気の発生量は少なく機械的エネルギー転

換率は小さくなると考えられる。今回、求められた機械的エネルギー転換率に逆の傾向が現れたのは、流路管なしの実験では水塊速度計の浮き子がカプセルの内径に比べて小さいため水塊飛び上がり時に一部回り込みがあって浮き子が水塊の動きに十分追隨しなかったこと、また、水塊はカプセル内をピストン状に上昇する際に水塊上部に存在するガスの圧縮にエネルギーを消費するが、機械的エネルギー転換率の算出にあたっては水塊の運動エネルギーのみを用いて行なったこと等の理由が考えられる。

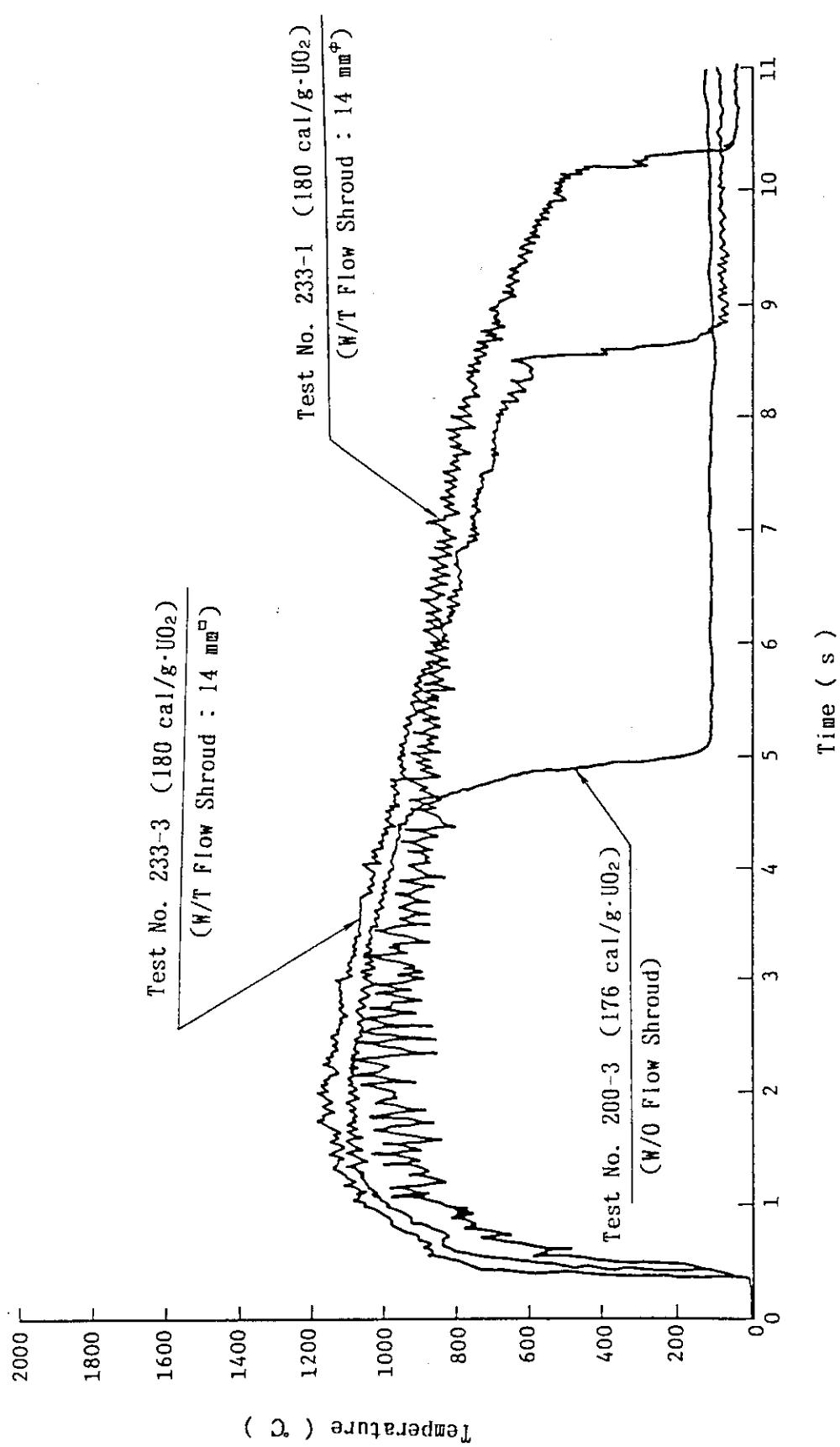


Fig. 4.1 Comparison of transient histories of cladding surface temperatures at the energy deposition of approximately 180 cal/g·UO₂ between the cases with and without flow shroud

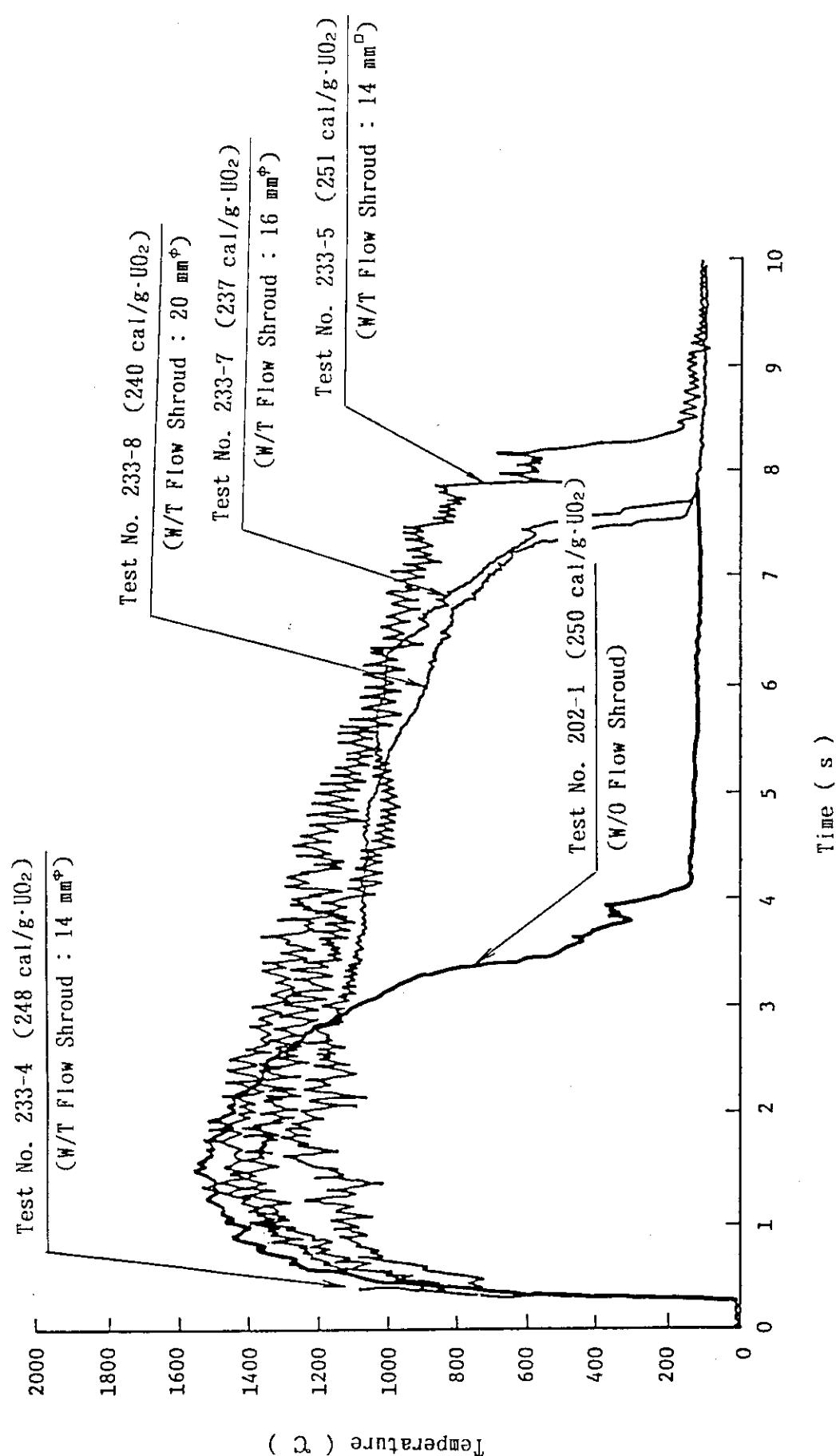


Fig. 4.2 Comparison of transient histories of cladding surface temperatures at the energy deposition of approximately 240 cal/g·UO₂ between the cases with and without flow shroud

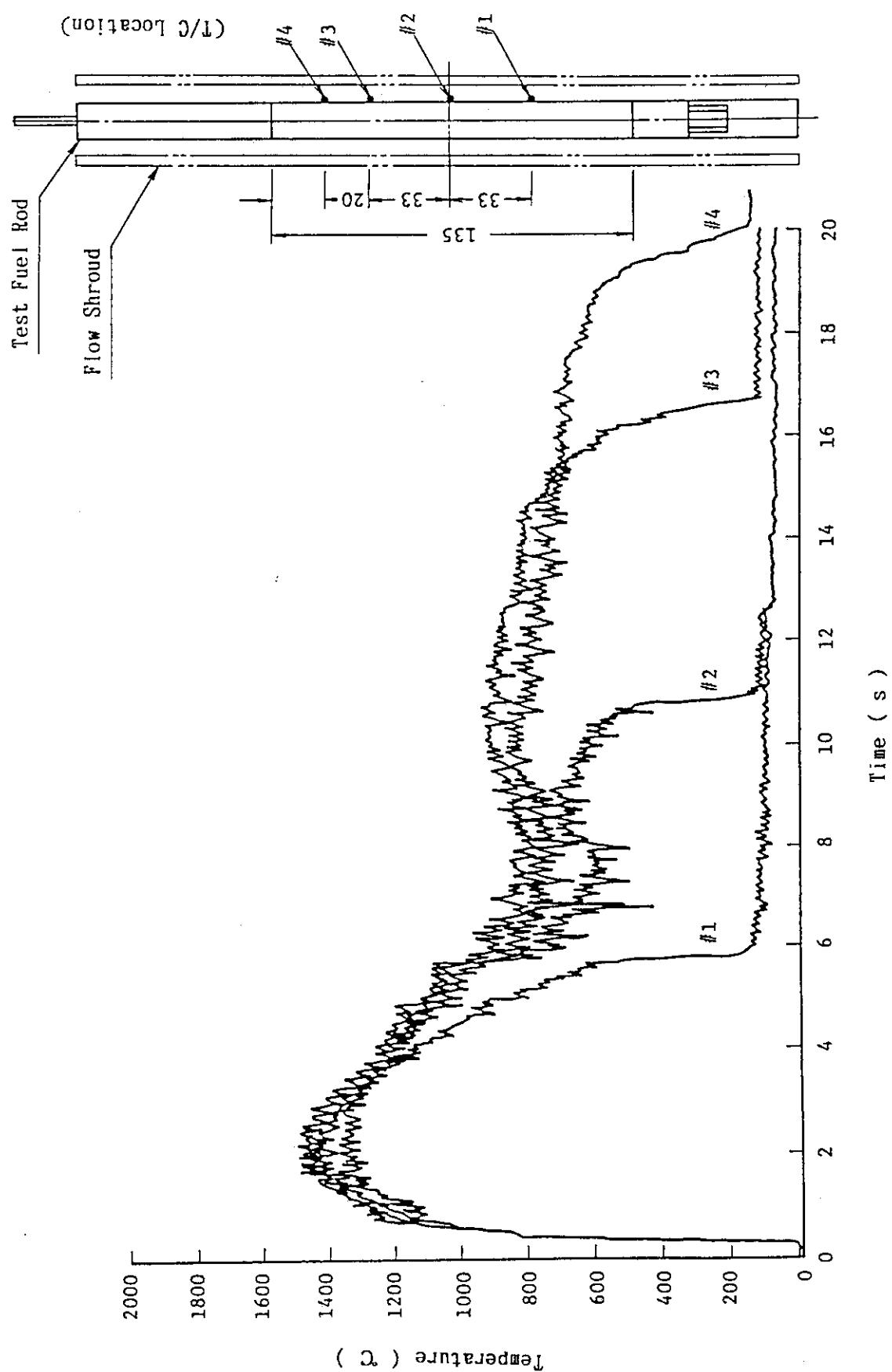


Fig. 4.3 Comparison of transient histories of cladding surface temperatures at the locations of thermocouples in the cases of test No. 233-6

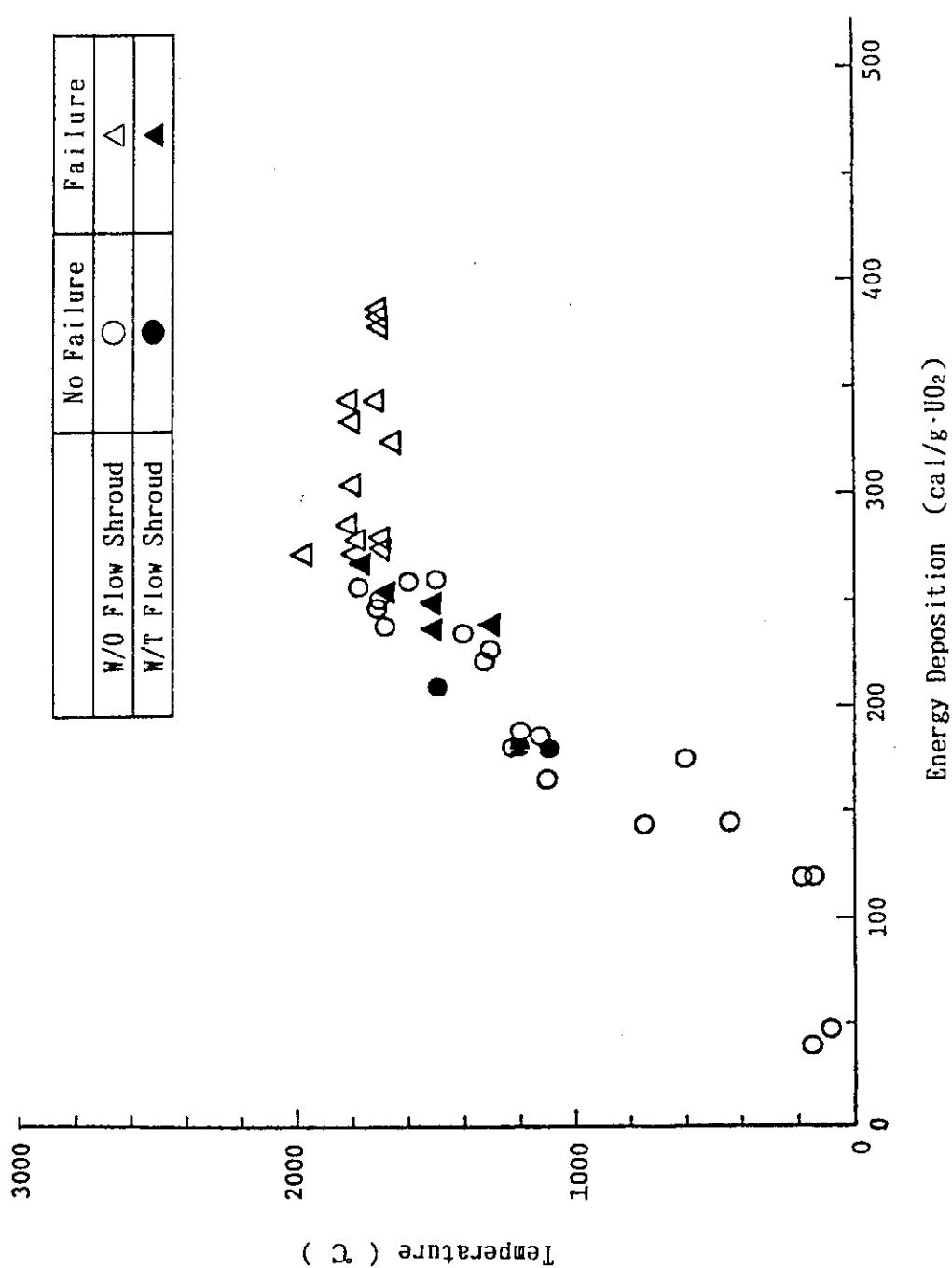


Fig. 4.4 Comparison of maximum cladding surface temperatures between the cases with and without flow shroud

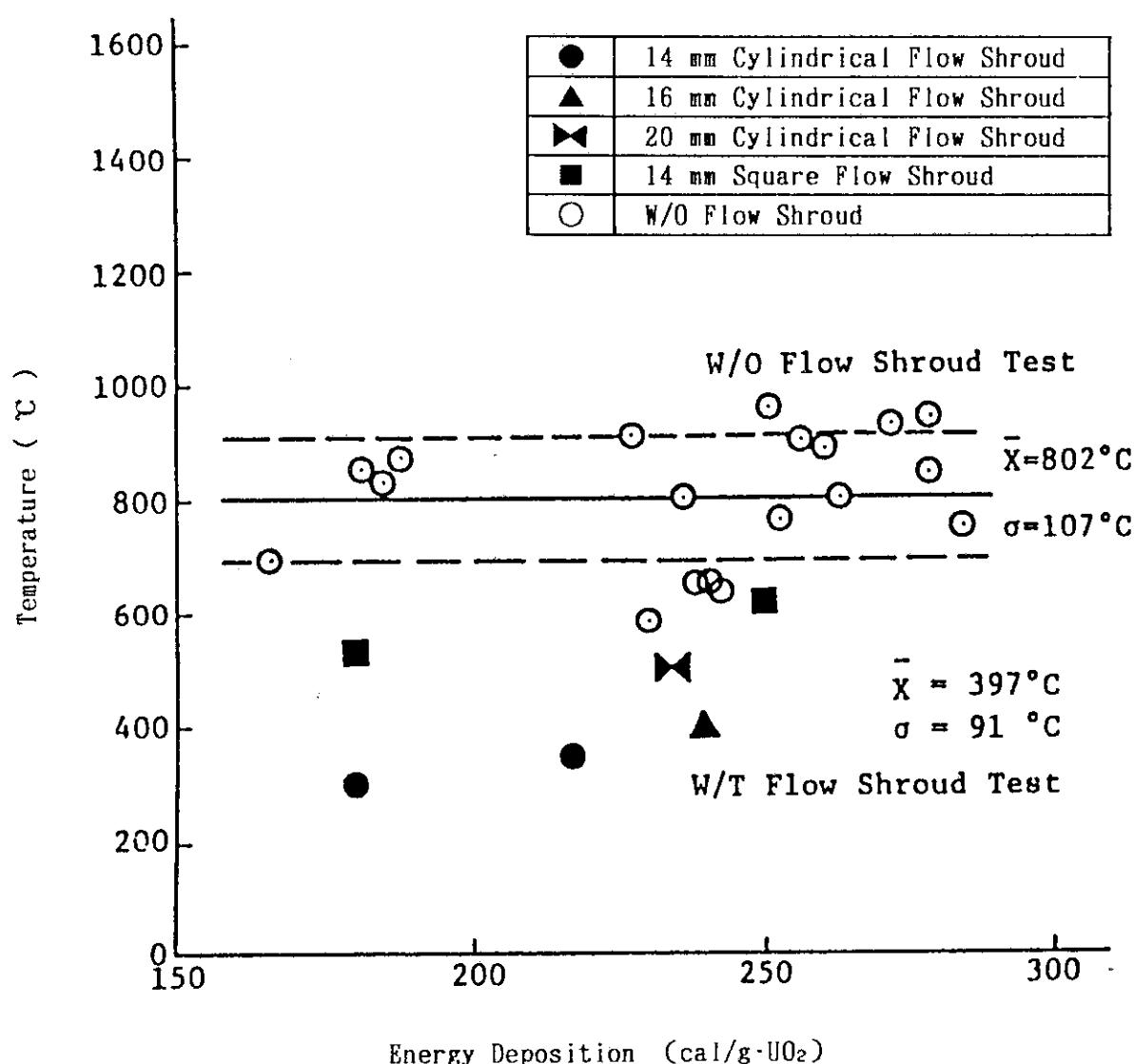


Fig. 4.5 Comparison of starting temperatures of quenching between the cases with and without flow shroud

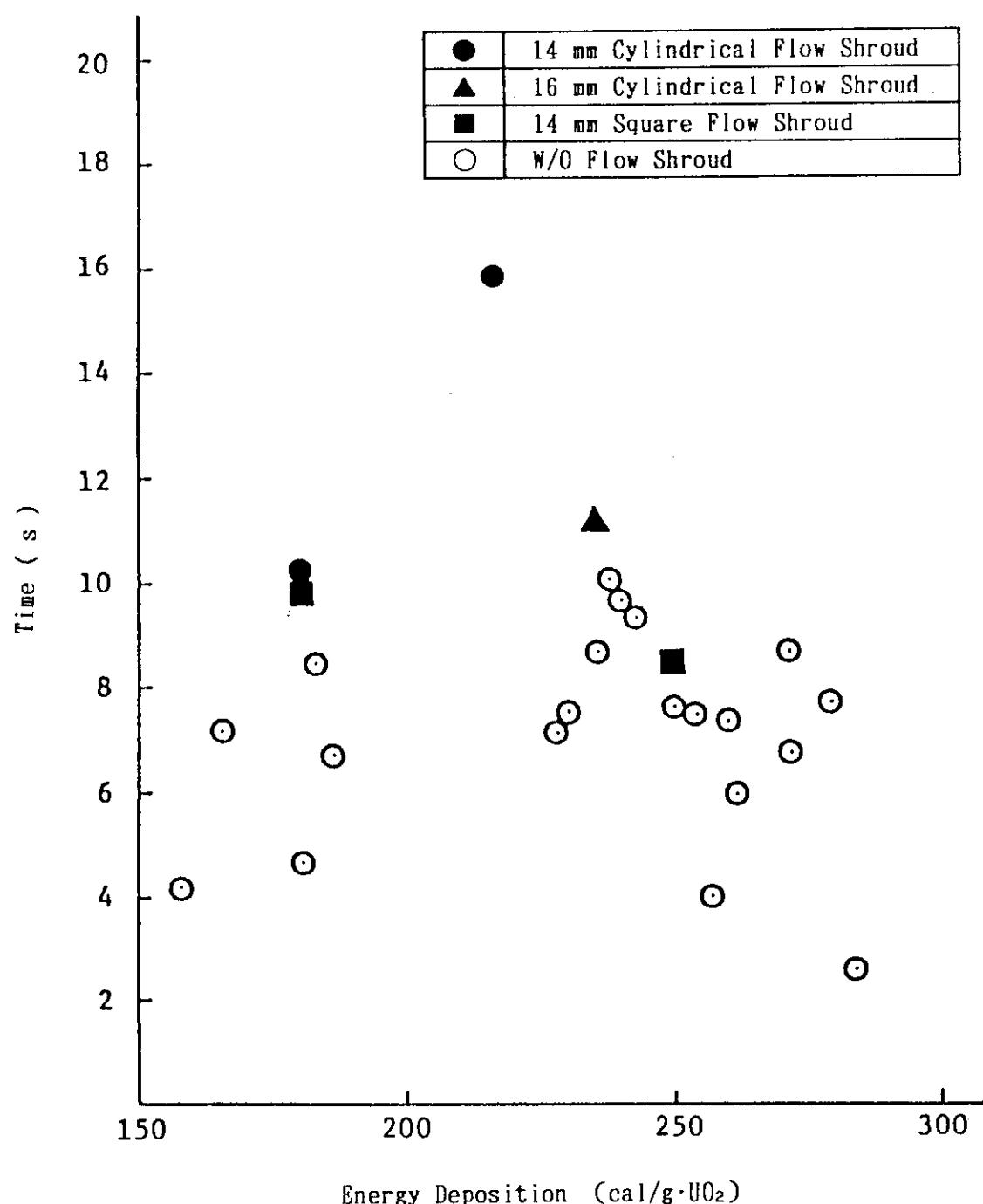


Fig. 4.6 Comparison of duration of film boiling between the cases with and without flow shroud

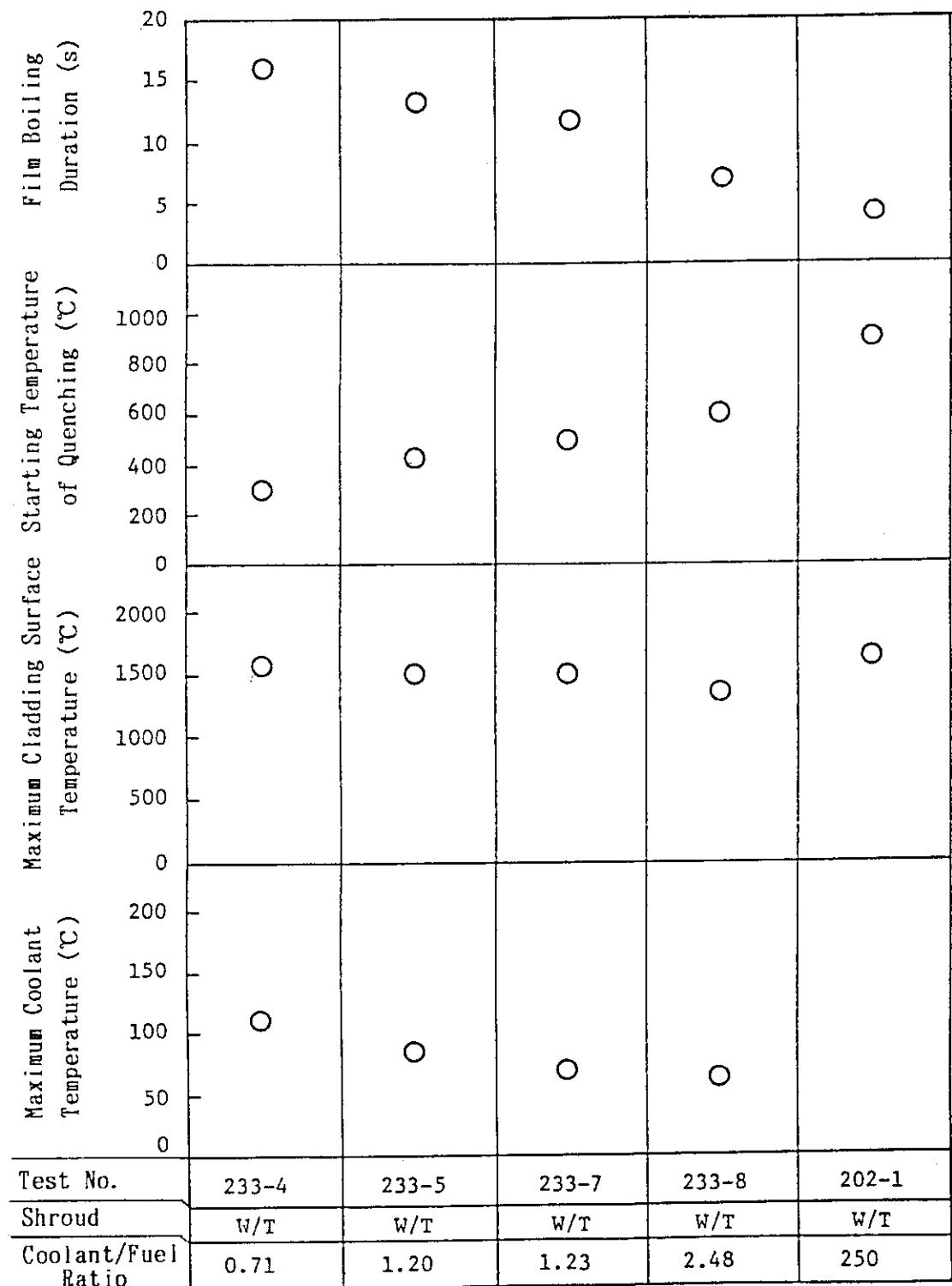


Fig. 4.7 Comparison of maximum coolant temperature, maximum cladding surface temperature, starting temperature of quenching and film boiling duration time against coolant/fuel ratio

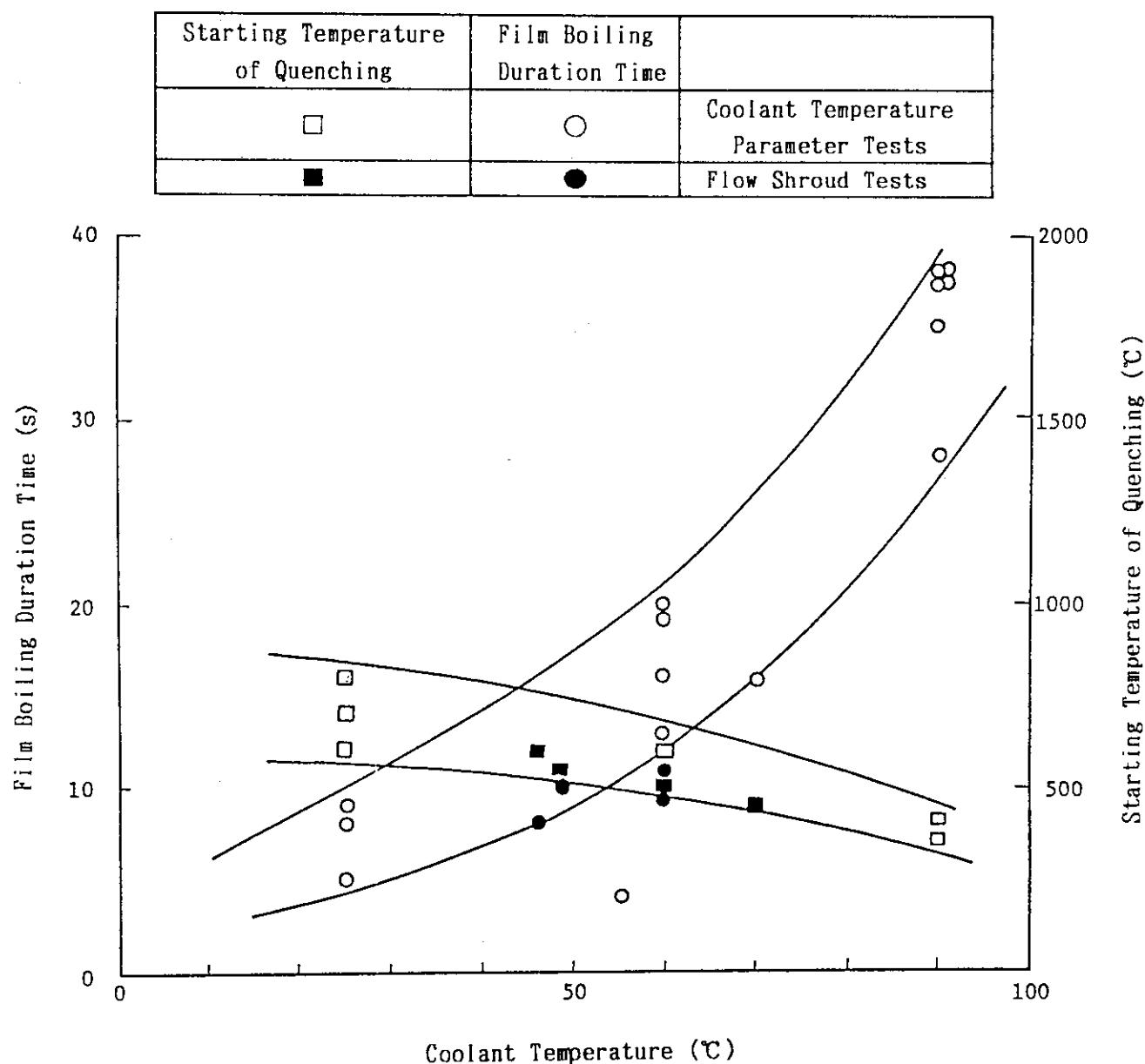


Fig. 4.8 Comparison of starting temperature of quenching and film boiling duration time against coolant temperature

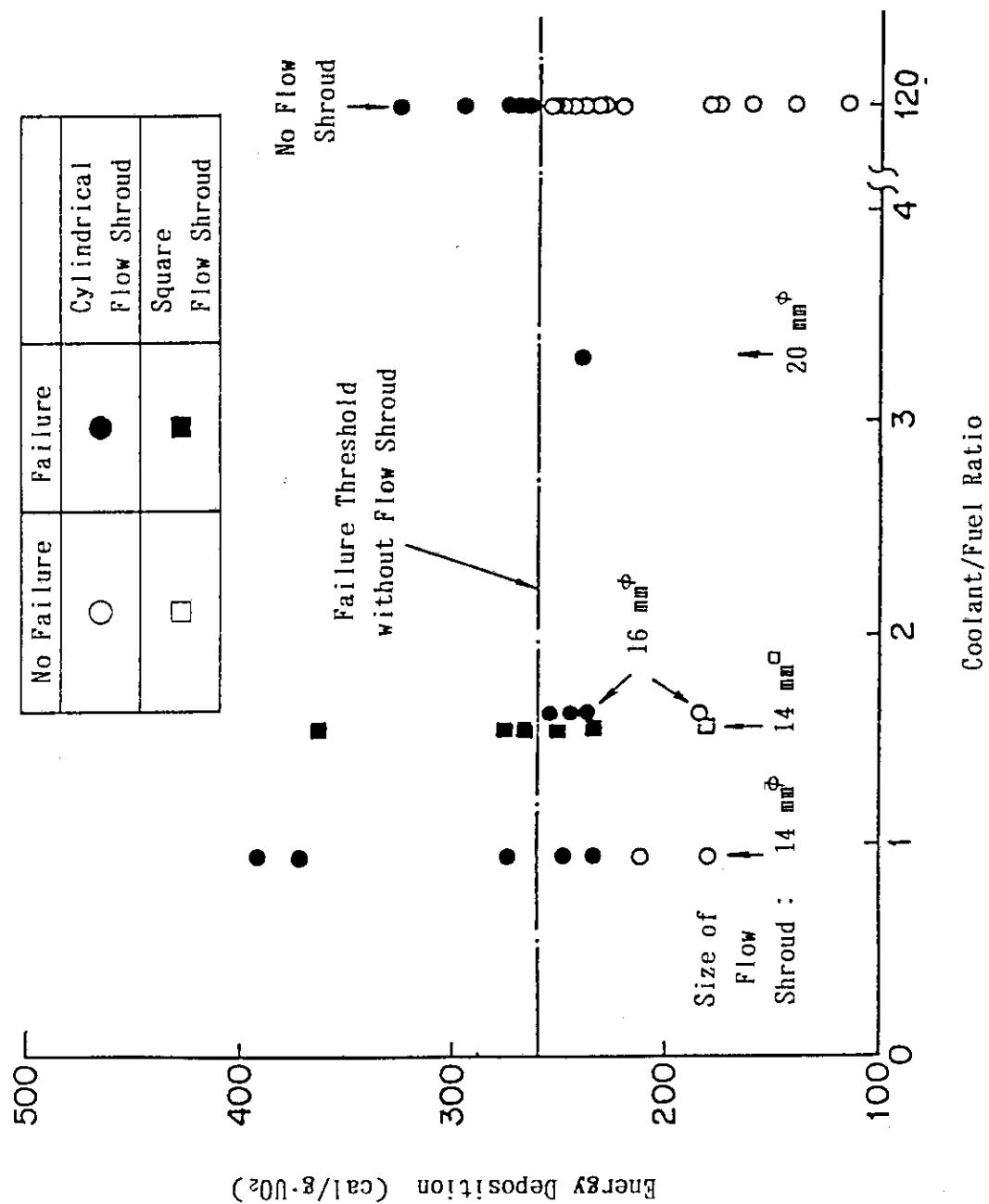
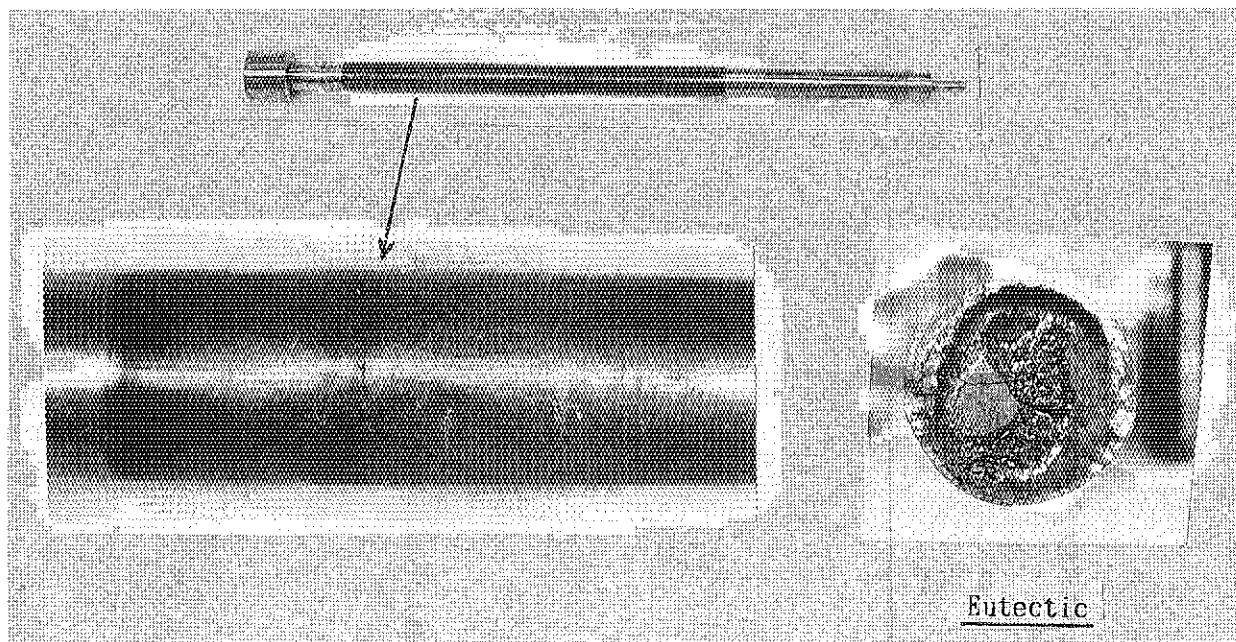
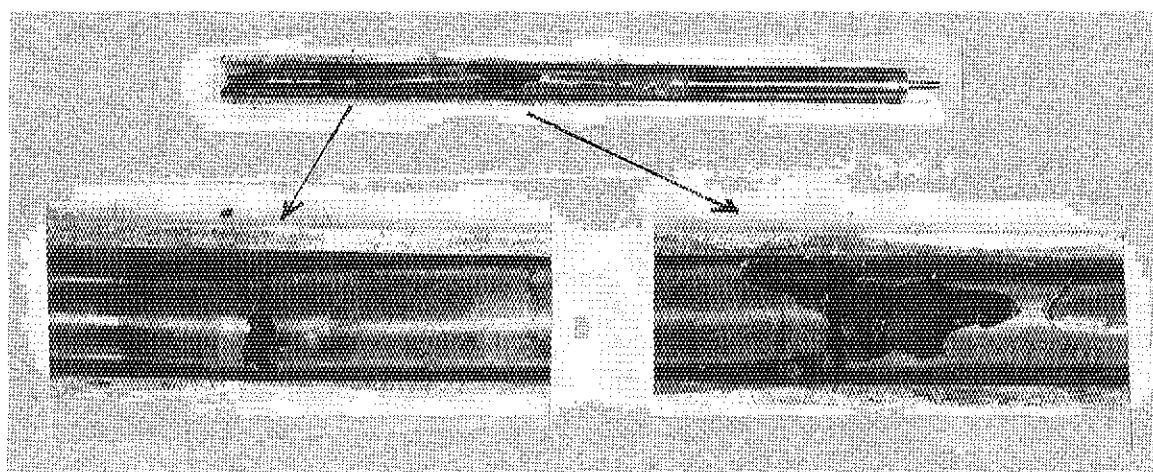


Fig. 4.9 Summary of test results in flow shroud tests



W/O Flow Shroud (Test No. 220-5B, 267 cal/g·UO₂)



W/T Flow Shroud (Test No. 233-9, 234 cal/g·UO₂)

Fig. 4.10 Enlarged view of failure region of the test fuel rods at energy depositions near failure thresholds

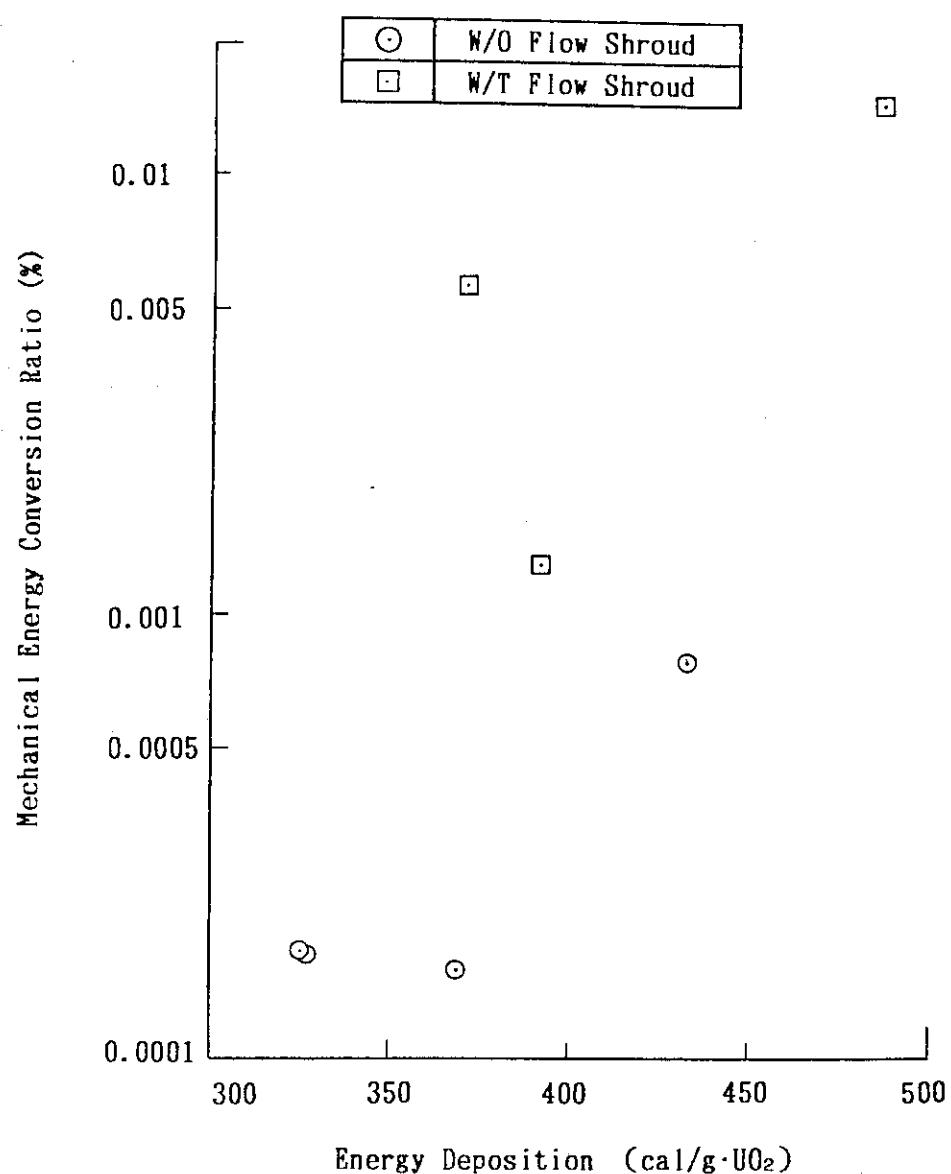


Fig. 4.11 Comparison of mechanical energy conversion ratio between cases with and without flow shroud

5 . 結 論

冷却材／燃料比の相違が燃料挙動に与える影響を調べるために、実際のPWRの冷却材／燃料比を模擬した流路管を試験燃料のまわりに取り付けて実験を実施した結果、以下の結論を得た。

- (1) 流路管を取り付けて冷却材／燃料比を小さくすると、内部の冷却材の温度上昇により、被覆管表面の最高温度はほとんど変わらないが、クウェンチング開始温度は低下し、膜沸騰持続時間は長くなる。
- (2) 試験燃料の破損しきい値は、 $30 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 程度低下して約 $230 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ になる。この値は標準条件における実験及び低サブクール度の冷却材温度パラメータ実験での破損しきい値の中間に位置する。
- (3) 試験燃料の温度挙動及び破損しきい値は流路管の有無により大きな影響を受けるが、今回の冷却材／燃料比である $0.7 \sim 2.5$ の範囲では顕著な相違は現れない。
- (4) 燃料の破損形態は標準条件における実験の場合と相違はないが、初期破損の破損機構に若干の違いがある。

謝 言

本報告書をまとめるにあたって、有益な討論に参加していただいた反応度安全研究室の皆様方及び実験に際し御協力をいただいたNSRR管理室の皆様方に深く謝意を表します。

5 . 結 論

冷却材／燃料比の相違が燃料挙動に与える影響を調べるために、実際のPWRの冷却材／燃料比を模擬した流路管を試験燃料のまわりに取り付けて実験を実施した結果、以下の結論を得た。

- (1) 流路管を取り付けて冷却材／燃料比を小さくすると、内部の冷却材の温度上昇により、被覆管表面の最高温度はほとんど変わらないが、クウェンチング開始温度は低下し、膜沸騰持続時間は長くなる。
- (2) 試験燃料の破損しきい値は、 $30 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 程度低下して約 $230 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ になる。この値は標準条件における実験及び低サブクール度の冷却材温度パラメータ実験での破損しきい値の中間に位置する。
- (3) 試験燃料の温度挙動及び破損しきい値は流路管の有無により大きな影響を受けるが、今回の冷却材／燃料比である $0.7 \sim 2.5$ の範囲では顕著な相違は現れない。
- (4) 燃料の破損形態は標準条件における実験の場合と相違はないが、初期破損の破損機構に若干の違いがある。

謝 謝

本報告書をまとめるにあたって、有益な討論に参加していただいた反応度安全研究室の皆様方及び実験に際し御協力をいただいたNSRR管理室の皆様方に深く謝意を表します。

参考文献

- (1) N S R R 管理室・反応度安全研究室、「N S R R 臨界および特性試験報告」
1976年、JAERI-M 6791
- (2) 山崎 利、他、「N S R R 大気圧カプセル及び実験軽装の現状」1977年
JAERI-M 7105
- (3) 塩沢周作、他、「N S R R 実験における標準燃料の振舞いに関する一考察」
1977年、JAERI-M 7267
- (4) 星 薫雄、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)
- (5) M. Ishikawa, et al, "A Study of Fuel Behavior under Reactivity Ini-
tiated Accident Conditions - Review", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- (6) 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」1978年、JAERI-M 6990
- (7) 斎藤伸三、他、「反応度事故条件下における燃料破損挙動に及ぼす初期ギャ
ップ幅の影響 (1)」1979年、JAERI-M 8087
- (8) 藤城俊夫、他、「反応度事故条件下の燃料挙動に及ぼす冷却材の流動の影響
(1)」1980年、JAERI-M 9104
- (9) 大西信秋、他、「軽水動力炉の反応度事故条件下における浸水燃料の破損挙
動」日本原子力学会誌 Vol. 24, No. 4 (1982)
- (10) 斎藤伸三、他、「サブクール水中におけるクウェンチング現象と熱伝達」、
1979年、JAERI-M 8570