

JAERI-M

86-012

NSRR 実験プログレス・レポート・16

(1984年1月～1984年12月)

1986年2月

反応度安全研究室・NSRR管理室

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, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 高野高速印刷

N S R R 実験プログレス・レポート・16  
(1984年1月～1984年12月)

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部  
反応度安全研究室・N S R R 管理室

(1986年1月24日受理)

本報告書は、1984年1月から同年12月までにN S R Rにおいて実施した燃料破損実験の結果およびその考察についてまとめたものである。

今期実施した試験は、6回の燃料設計パラメータ実験（長尺燃料実験2回、照射済被覆燃料実験4回）、3回の冷却条件パラメータ実験（強制対流実験2回、バンドル燃料実験1回）、4回の欠陥燃料実験（擦過腐食燃料実験4回）、3回の燃料損傷実験、18回の特殊燃料実験（HTGR燃料実験2回、混合酸化物燃料実験5回、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加燃料実験11回）、その他の実験18回（破壊力測定実験、変形量測定実験等）、4回の高温高圧カプセル実験、2回の高温高圧ループ実験、および4回の燃料挙動可視実験の総計62回である。

執筆者

斎藤 伸三・堀木政一郎・藤城 俊夫・稻辺 輝雄・塩沢 周策・石島 清見<sup>\*1</sup>・丹沢 貞光  
柳原 敏・鶴田 隆治<sup>\*2</sup>・片西 昌司・中村 武彦・吉村 富雄<sup>\*3</sup>・落合 政昭<sup>+</sup>

---

東海研究所：茨城県那珂郡東海村白方字白根2の4

+ 現在、原子力船技術部

\* 1 現在、科学技術庁

\* 2 現在、九州工業大学機械工学科

\* 3 協力研究員：船舶技術研究所

Annual Progress Report on the NSRR Experiments (16)  
(January 1984 through December 1984)

Reactivity Accident Laboratory  
and NSRR Operation Division

Department of Fuel Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken  
(Received January 24, 1986)

Fuel behavior studies in simulated reactivity initiated accident (RIA) conditions have been performed by utilizing Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) since October, 1975.

This report describes the results obtained from January through December, 1984. A total of 62 tests were carried out during this period; those are 6 fuel design parameter tests (2 long-sized fuel rod tests, 4 pre-irradiated clad fuel rod tests), 3 cooling condition parameter tests (2 forced convection tests and 1 bundle rod test), 4 defected fuel rod tests (4 fretting corroded clad fuel rod tests), 3 severe fuel damage tests, 18 special fuel rod tests (2 HTGR fuel tests, 5 mixed oxide fuel rod tests, 11  $Gd_2O_3-UO_2$  fuel rod tests), 18 miscellaneous atmospheric pressure capsule tests (mechanical energy measurement tests, fuel rod deformation measurement tests, etc), 4 high temperature high pressure capsule tests, 2 high temperature high pressure loop tests and 4 fuel behavior observation tests.

Keywords: Fuel Failure, Reactivity Initiated Accident, Fuel Behavior, Cladding Strain Measurement, Forced Convection, Fretting Corroded Fuel Rod, Fuel Behavior Observation Capsule, Slow Motion Film, High Temperature High Pressure Capsule, NSRR Progress Report

Authors : S. SAITO, O. HORIKI, T. FUJISHIRO, T. INABE, S. SHIOZAWA,  
K. ISHIJIMA<sup>\*1</sup>, S. TANZAWA, S. YANAGIHARA, T. TSURUTA<sup>\*2</sup>,  
S. KATANISHI, T. NAKAMURA, T. YOSIMURA<sup>\*3</sup>, M. OCHIAI<sup>+</sup>

---

+ Now, Department of Ship Engineering

\*1 Now, Science and Technology Agency

\*2 Now, Kyusyu Institute of Technology, Mechanical Engineering Department

\*3 On leave from Ship Research Institute

## 目 次

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 1. 今期の進捗                    | 1   |
| 2. 大気圧カプセル実験                | 7   |
| 2.1 燃料設計パラメータ実験             | 7   |
| 2.1.1 長尺燃料実験                | 7   |
| 2.1.2 照射済被覆管燃料実験            | 14  |
| 2.2 冷却条件パラメータ実験             | 18  |
| 2.2.1 強制対流実験                | 18  |
| 2.2.2 バンドル実験                | 20  |
| 2.3 欠陥燃料実験                  | 30  |
| 2.3.1 擦過腐食燃料実験              | 30  |
| 2.4 燃料損傷実験                  | 33  |
| 2.5 特殊燃料実験                  | 37  |
| 2.5.1 多目的高温ガス炉燃料実験          | 37  |
| 2.5.2 混合酸化物燃料実験             | 44  |
| 2.6 その他                     | 49  |
| 2.6.1 破壊力測定実験               | 49  |
| 2.6.2 変形量測定実験               | 57  |
| 3. 高温高压カプセル実験               | 71  |
| 3.1 加圧燃料実験                  | 71  |
| 3.2 伸び測定実験                  | 79  |
| 4. 高圧ループ実験                  | 85  |
| 5. 燃料挙動可視実験                 | 93  |
| 6. 解析コードの開発                 | 111 |
| 6.1 NSR-77コードの改良            | 111 |
| 6.2 STEALTHコードによる実験カプセル応答解析 | 115 |
| 7. 今後の実験計画                  | 124 |
| 参考文献                        | 125 |
| 付 錄                         | 133 |

## CONTENTS

|  |     |
|--|-----|
| 1. Progress in this period .....   | 1   |
| 2. Atmospheric pressure capsule tests .....  | 7   |
| 2.1 Fuel design parameter tests .....  | 7   |
| 2.1.1 Long-sized fuel rod tests .....  | 7   |
| 2.1.2 Pre-irradiated clad fuel rod tests .....   | 14  |
| 2.2 Cooling condition parameter tests .....  | 18  |
| 2.2.1 Forced convection tests .....  | 18  |
| 2.2.2 Bundle rod tests .....   | 20  |
| 2.3 Defected fuel rod tests .....  | 30  |
| 2.3.1 Fretting corroded clad fuel rod tests .....  | 30  |
| 2.4 Severe fuel damage tests .....   | 33  |
| 2.5 Special fuel rod tests .....   | 37  |
| 2.5.1 HTGR fuel tests .....  | 37  |
| 2.5.2 Mixed oxide fuel rod tests .....   | 44  |
| 2.6 Miscellaneous tests .....  | 49  |
| 2.6.1 Mechanical energy measurement tests .....  | 49  |
| 2.6.2 Fuel rod deformation measurement tests .....   | 57  |
| 3. High temperature high pressure capsule tests .....  | 71  |
| 3.1 Pre-pressurized fuel rod tests .....   | 71  |
| 3.2 Fuel rod elongation measurement tests .....  | 79  |
| 4. High temperature high pressure loop tests .....   | 85  |
| 5. Fuel behavior observation tests .....   | 93  |
| 6. Development of analytical codes .....   | 111 |
| 6.1 Improvement of NSR-77 code .....   | 111 |
| 6.2 Analysis of capsule response at fuel failure<br>with STEALTH code .....  | 115 |
| 7. Future plan of the NSRR experiments .....   | 124 |
| References .....   | 125 |
| Appendices .....   | 133 |
| A. Description of NSRR facility .....  | 133 |
| B. Description of atmospheric pressure capsule, fuel behavior<br>observation capsule, high temperature high pressure capsule,<br>loop and standard test fuel rod ..... | 140 |
| C. Summary of NSRR experiments .....   | 144 |
| D. Summary of NSRR pulsing operation data .....  | 173 |

Summary of the progress of this period  
(S. Saito and O. Horiki)

This report summarizes the progress and major results of the NSRR experiments and the development of analysis codes conducted in the period from January through December, 1984. A total of 62 tests, consisting of 52 atmospheric pressure capsule tests, 4 high temperature high pressure capsule tests, 2 high pressure loop tests and 4 transient fuel behavior observation tests, were performed in this period.

(1) Fuel Design Parameter Tests

(1.1) Long-sized Fuel Rod Test

Two tests were performed with the fuel rods 38 cm in active length to study the behavior of fuel rods with chopped cosine axial power profile. The measured peak cladding surface temperatures corresponded to the axial power profile with the highest temperature at the middle of the fuel stack, where the damage of the fuel rods was the most severe. The fuel failure threshold obtained from these tests with the cooling water at 90°C was higher than 223 cal/g•UO<sub>2</sub>.

(1.2) Pre-irradiated Clad Fuel Tests

Four tests were performed with the fuel rods consisting of fresh UO<sub>2</sub> pellets and pre-irradiated zircaloy cladding, with the radial gap width of 0.095 mm (three rods) and 0.050 mm (one rod), to study the effect of fast neutron irradiation-induced cladding embrittlement on fuel failure. The cladding of the test fuel rods has been pre-irradiated in JMTR (Japan Materials Testing Reactor, JAERI) with fast neutron fluence of about  $1.1 \sim 1.8 \times 10^{21}$  nvt. The test fuel rods with the radial gap width of 0.095 mm did not fail at the energy depositions of up to 261 cal/g•UO<sub>2</sub>, indicating that the failure threshold is almost identical with that of the standard fuel rods. On the other hand, the test fuel rod with the smaller gap width (0.050 mm) failed at 260 cal/g•UO<sub>2</sub>. The rod broke into two at its lower portion with melting of the cladding. There was no indication of PCMI (Pellet-Cladding Mechanical Interaction) type cladding failure of this rod. Through these tests, the effect of radiation-induced cladding embrittlement on fuel failure has not been observed in the fast neutron fluence range of up to  $1.8 \times 10^{21}$  nvt.

## (2) Cooling Condition Parameter Tests

Two tests were performed with the fuel rods 40 cm in active length under the forced convection of the water at 20°C and 80°C, respectively. The water flow velocity was 1.0 m/s in both tests. The comparison of the test results with those from previous tests with standard fuel rods under the same forced flow condition at a room temperature indicates that the increase in fuel active length increases the amounts of steam and hydrogen gas generated by Zircaloy-water reaction and that the decrease in water subcooling enhances further more these effects. Thus the damage of the fuel rods tested in this reporting period was much more severe than those previously tested with the fuel rods of shorter active length at the identical energy depositions.

In addition, a five-rod bundle test was performed with standard-sized fuel rods (the enrichment of the center rod was 20% and that of the surrounding rods was 10%) under the small subcooling (water temperature at 80°C) and natural convection cooling condition. The center rod was subjected to an energy deposition of 156 cal/g•UO<sub>2</sub> and failed at its lower portion, indicating that the effect of small subcooling on the fuel failure threshold in a bundle geometry is much larger than that in a single rod geometry.

## (3) Defected Fuel Tests

Four tests were performed with pressurized fuel rods whose cladding has artificially made defects simulating fretting corrosion. The test results have indicated that the failure thresholds of the 0.7 MPa-pressurized fuel rods having defects 0.3 and 0.5 mm in depth reduce to about 230 and 180 cal/g•UO<sub>2</sub>, respectively, from 260 cal/g•UO<sub>2</sub> that is the failure threshold of the intact fuel rods having the rod pressure of 0.1 to 0.7 MPa. It has been also confirmed that the rod pressurization of up to 0.35 MPa does not change the failure threshold of the fuel rods having defects of up to 0.5 mm in depth.

## (4) Severe Fuel Damage Tests

This test series is aimed at studying the fuel damage in a core uncovering severe accident. From the previous tests under oxidizing and nonoxidizing gaseous environment, it has been confirmed that the melt-down of the cladding does not take place even after partial melting of the cladding occurs if the solid oxide layer thickness on the cladding outside surface exceeds a certain amount.

In this reporting period, three tests were conducted with non-pressurized and pressurized fuel rods to determine the limiting oxide layer thickness that prevents the cladding melt-down and observe the effect of cladding rupture on melt-down behavior. The test results indicate that the melt-down of the cladding is prevented by the oxide layer about 100  $\mu\text{m}$  in thickness and that the rupture opening of the cladding does not necessarily contribute to melt-down.

#### (5) Special Fuel Rod Tests

##### (5.1) VHTGR Fuel Tests

Two tests were conducted with very high temperature gas-cooled reactor (VHTGR) type fuels consisting of coated fuel particles scattered in graphite cylinders (18 mm in O.D., 9 mm in I.D.) with stainless steel cladding. The average energy depositions given by the tests were 460 and 570 cal/g $\cdot$ UO<sub>2</sub>, and the maximum temperatures measured at the inside surface of the graphite cylinder were 285 and 331°C, respectively. The X-ray photography of the fuel rods after the tests did not indicate any failure of the coated fuel particles.

##### (5.2) Mixed Oxide Fuel Tests

This test series is aimed at studying the behavior of plutonium-uranium mixed oxide fuel rods developed for thermal reactors. In the previous phase-1 tests, mixed oxide fuel rods whose dimensions were identical with the NSRR standard test fuel rods were employed, and their failure threshold was found to be almost identical with that of the standard fuel rods.

In this reporting period, phase-2 tests were initiated with specific objectives to obtain the failure threshold of advanced thermal reactor (ATR) type mixed oxide fuel rods and to confirm the effect of plutonium spots on the failure thresholds. The first five tests were conducted during this period with the ATR type fuel without plutonium spots at expected energy depositions of 144 to 263 cal/g $\cdot$ fuel. The test fuels are now under detailed metallurgical examinations and also chemical analyses to determine the energy deposition values.

##### (5.3) Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-UO<sub>2</sub> Fuel Tests

Introduction of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as burnable posion into UO<sub>2</sub> fuels is now under planning for the use in commercial PWRs. In order to study the behavior of such fuels during an RIA, five tests were conducted with UO<sub>2</sub> fuels containing Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Six supporting tests were also conducted with UO<sub>2</sub> fuels for comparison purpose.

## (6) Other Atmospheric Pressure Capsule Tests

## (6.1) Mechanical Energy Measurement Tests

This test series is aimed at establishing the mechanical design criteria to be applied to the test capsules for the future preirradiated fuel tests in the NSRR. The tests employed fresh fuel rods prepressurized with helium up to 5 MPa to simulate the effect of gaseous fission products accumulation.

The test results indicate that the peak capsule pressures resulting from the failure of pressurized fuel rods are generally close to, and sometimes higher than, the maximum boundary of those resulting from the failure of non-pressurized fuel rods at the corresponding energy depositions. The mechanical energy conversion factors resulting from the failure of pressurized and non-pressurized fuel rods are almost identical.

The final capsule design curves have been established enveloping these test data and the data from SPERT-CDC preirradiated fuel tests.

## (6.2) Fuel Rod Deformation Measurement Tests

This test series is aimed at developing the technique to measure the transient diametral deformation of the cladding. In this period, ten tests were conducted: one for large deformation measurement and nine for small deformation measurements.

In the large deformation measurement test, a sensor consisting of an extension rod and a strain gauge type transformer was employed. The output from this sensor during the test included oscillating signals, which must have been caused by a spring effect of the strain gauge.

In one of the small deformation measurement tests, an LVDT type sensor was employed. The output from this sensor indicated a reasonable time history of relative deformation, but its absolute value was much larger than predicted.

In the other small deformation measurement tests, strain gauges developed for use in temperature range of up to 250°C were directly attached on the cladding surface. The output from the strain gauges indicated reasonable transient hoop strains of the cladding. The comparison of the measured strains with the calculated values using the NSR-77 code indicates that the application of the GAPCON model to the analysis of pellet thermal expansion gives a good agreement with the measured data.

## (7) High Temperature High Pressure Capsule Tests

## (7.1) Pressurized Fuel Tests

The basic characteristics concerning the cladding rupture of pressurized fuel rods during an RIA from cold-startup condition has been already clarified through the previous tests with atmospheric pressure capsules. In this period, three pressurized fuel tests were conducted with high temperature high pressure capsules to study the cladding rupture behavior under hot-startup conditions.

The test results indicate that the occurrence of cladding collapse enhances the heat transfer from the pellets to the cladding and thus makes the cladding temperature higher than the case without the occurrence of cladding collapse, and that the cladding can swell even if the initial rod pressure is a little lower than the system pressure because of a relatively large rod pressure rise during a transient from a high temperature condition. The observed cladding rupture threshold under the elevated system conditions was consistent with that under the atmospheric pressure conditions. The calculated fuel behavior using the NSR-77 code agreed well with the test results unless the extent of cladding swelling is large.

## (7.2) Fuel Elongation Measurement Test

Two tests were conducted to study the pellet and cladding elongation behavior using LVDT type sensors newly developed for high temperature and high pressure conditions. The sensors worked well and provided data useful for interpreting the deformation behavior. It was understood that the pellets and the active region of the cladding deform axially in unison throughout the transient immediately after the pellets come into contact with the cladding by thermal expansion but that the change in the total cladding length during an early stage of the transient becomes different from that of the total pellet length because of the occurrence of cladding axial collapse.

## (8) High Temperature High Pressure Loop Tests

Previous high temperature high pressure loop tests had been conducted with the clustered rods geometry consisting of an actual center fuel rod and eight surrounding dummy fuel rods. In this period, two tests were conducted with the test geometry consisting of three independently-shrouded single fuel rods (shroud I.D. 16 mm) located at 23.5 mm from the capsule centerline 120° apart from one another. This test geometry was chosen for efficient parametric test purpose. The specific objectives of

the tests in this period were to calibrate the energy deposition and observe the effect of coolant flow velocities in the range between 1 to 4 m/s in this test geometry. The fuel rods after the tests have bent slightly toward the capsule centerline probably due to an asymmetric azimuthal power distribution in a fuel rod. The effect of coolant flow on the cladding temperature was much larger in the present independently-shrouded single rod geometry than in the previous clustered rods geometry.

#### (9) Fuel Behavior Observation Tests

Four tests were conducted using fuel behavior observation capsules. These tests were directed to the study of severe fuel damage, cooling state in a bundled rods geometry, fuel temperature evaluation based on the observed color, and fuel rod constraint effect.

In the severe fuel damage test, a fuel rod was pulse-irradiated in an air environment. Because of a limited volume of air in the test section, the cladding was not sufficiently oxidized, and the cladding flowed down at a speed of about 0.2 m/s, which was about 1/3 of the flowing-down speed observed in the previous test with non-oxidizing environment.

In the bundled rods test, three fuel rods were placed in a triangular position with a pitch of 14.3 mm. During the transient, each fuel rod was surrounded with a thick vapor film. But there remained the water layer between the vapor films throughout the transient. Thus the bundle was not completely dried out.

In the color temperature measurement test, a fuel rod was subjected to an energy deposition of about 280 cal/g·UO<sub>2</sub>. After the test, the temperatures of the fuel rod at various times were evaluated based on the colors in the film.

In the fuel rod constraint test, the both ends (top and bottom) of a fuel rod were fixed to the supporting plates so that the rod could not expand freely in axial direction. During the transient, the rod failed by many axial cracks, and local detachment of the cladding was observed.

#### (10) Development of Analysis Codes

The fuel behavior analysis code NSR-77 had been developed with an emphasis on detailed thermal and mechanical fuel response analysis with a relatively simplified coolant behavior model. In this period, the code was modified by introducing the algorithms based on the law of conservation of

mass, energy and momentum of the coolant.

In addition, analyses of capsule response to the mechanical energy generation during NSRR experiments were conducted by using a modified version of a dynamic deformation analysis code STEALTH to confirm the applicability of the code to the experiment analysis and the mechanical design of the capsule.

Table Classification and Number of NSRR Experiments  
(until Dec. 1984)

|  | Test Item   | Number of Tests     |                     |       |
|--|---|---------------------|---------------------|-------|
|  |   | Oct.'75<br>~Dec.'83 | Jan.'84<br>~Dec.'84 | Total |
| Atmos-<br>pheric<br>Pressure<br>Capsule<br>Tests | 1. Standard Fuel Rod Tests                              |                     |                     |       |
|  | (i) Scoping tests                                       | 46                  | 0                   | 46    |
|  | (ii) Detailed tests                                     | 28                  | 0                   | 28    |
|  | (iii) Others  | 13                  | 0                   | 13    |
|  | 2. Fuel Design Parameter Tests                          |                     |                     |       |
|  | (i) Gap width parameter tests                           | 16                  | 0                   | 16    |
|  | (ii) Enrichment parameter tests                         | 17                  | 0                   | 17    |
|  | (iii) Pre-pressurized fuel rod tests                    | 58                  | 0                   | 58    |
|  | (iv) Cladding parameter tests                           | 47                  | 0                   | 47    |
|  | (v) Gap-gas composition parameter tests                 | 20                  | 0                   | 20    |
| Atmos-<br>pheric<br>Pressure<br>Capsule<br>Tests | (vi) Pre-irradiated clad fuel rod tests                 | 1                   | 4                   | 5     |
|  | (vii) Others  | 11                  | 2                   | 13    |
|  | 3. Cooling Condition Parameter Tests                    |                     |                     |       |
|  | (i) Coolant temperature parameter tests                 | 22                  | 0                   | 22    |
|  | (ii) Flow area simulation tests                         | 22                  | 0                   | 22    |
|  | (iii) Rod bundle tests                                  | 15                  | 1                   | 16    |
|  | (iv) Forced convection tests                            | 29                  | 2                   | 31    |
| Atmos-<br>pheric<br>Pressure<br>Capsule<br>Tests | 4. Defected Fuel Rod Tests                              |                     |                     |       |
|  | (i) Waterlogged fuel rod tests                          | 91                  | 0                   | 91    |
|  | (ii) Fretting corroded clad fuel rod tests              | 36                  | 4                   | 40    |
|  | 5. Severe Fuel Damage Tests                             | 18                  | 3                   | 21    |
| Atmos-<br>pheric<br>Pressure<br>Capsule<br>Tests | 6. Special Fuel Rod Tests                               |                     |                     |       |
|  | (i) USNRC fuel rod tests                                | 21                  | 0                   | 21    |
|  | (ii) HTGR fuel tests                                    | 5                   | 2                   | 7     |
|  | (iii) Mixed oxide fuel rod tests                        | 12                  | 5                   | 17    |
|  | (iv) $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ fuel rod tests | 0                   | 11                  | 11    |
| Atmos-<br>pheric<br>Pressure<br>Capsule<br>Tests | 7. Miscellaneous Tests                                  | 77                  | 18                  | 95    |
|  | High Temperature/High Pressure Capsule Test             | 16                  | 4                   | 20    |
|  | High Temperature/High Pressure Loop Tests               | 11                  | 2                   | 13    |
|  | Fuel Behavior Observation Tests                         | 17                  | 4                   | 21    |
|  | Total   | 649                 | 62                  | 711   |

## 1. 今期の進捗

(斎藤 伸三, 堀木欧一郎)

本報告書は、1984年1月から12月までの間に実施したNSRR実験及び解析コードの開発について、その進捗と主な成果についてまとめたものである。この期間に実施した実験は、大気圧カプセル実験52回、高温高圧カプセル実験4回、高温ループ実験2回、可視カプセル実験4回の合計62回である。

### (1) 燃料設計パラメータ実験

#### (1.1) 長尺燃料実験

燃料有効長380mmの長尺燃料実験は、発熱量を変えて2回実施し、被覆管表面温度はcosine状の出力分布に対応した値を示すこと、従って損傷状態も中央部近傍で最も厳しくなること、冷却材温度90°Cにおける破損しきい値は223cal/g・UO<sub>2</sub>以上であること等が明らかとなった。

#### (1.2) 照射済被覆管燃料実験

本実験はバーンアップ燃料実験のための基礎実験として、JMT-Rにおいて長期間の照射を行った被覆管に未照射UO<sub>2</sub>ペレットを封入した試験燃料を用いて、被覆管の照射脆化が燃料破損に及ぼす影響を調べる実験である。本期は破損しきい値を求めるための3回の実験と、ギャップ幅の影響を調べる実験1回、計4回の実験を実施した。標準ギャップ幅(0.095mm)の試験燃料は発熱量256cal/g・UO<sub>2</sub>と261cal/g・UO<sub>2</sub>で破損しなかったので、破損しきい値は標準燃料と同程度の約260cal/g・UO<sub>2</sub>と見なすことができる。またギャップ幅0.05mmの狭幅ギャップ燃料は発熱量260cal/g・UO<sub>2</sub>で下部分断を生じたが、破損部の外観検査では破損機構はペレット-被覆管の機械的相互作用によるものではなく、未照射被覆管狭幅ギャップ燃料の場合と同様の被覆管内面溶融によるものと判断された。これらの結果から、高速中性子照射量1.1～1.8×10<sup>21</sup>nvt程度の被覆管では照射脆化の影響はほとんどないことがわかった。

### (2) 冷却条件パラメータ実験

強制対流実験は長尺燃料を用いて冷却材初期流速を1.0m/secの条件として、冷却材温度20°Cで破損しきい値付近における燃料挙動を調べる実験と、冷却材80°Cで冷却材サブクール度の影響を調べる実験の計2回の実験を実施した。その結果、発熱部の長い燃料の場合には、蒸気発生量及びジルカロイ-水反応による水素ガスの発生量が増大して流路管内の冷却条件を低下させ、サブクール度が低くなるとこれらの効果がさらに促進され、燃料損傷に大きな影響を及ぼすことがわかった。

バンドル実験は5本バンドル体系(中心20%E、外側10%E)の試験燃料を用い、低サブクール、自然対流冷却の下で、破損しきい値と予想される発熱量156cal/g・UO<sub>2</sub>(中心燃料)の条件で1回実施した。照射後燃料は発熱部中央では燃料破損は生じなかったものの、下端部では分断しており、破損しきい値は156cal/g・UO<sub>2</sub>をさらに下まわることが判明した。バンドル体系でのサブクール度低下による破損しきい値への影響は、単一燃料棒の場合に比べかなり大きいものと考えられる。

### (3) 欠陥燃料実験

摩耗欠陥を持つ加圧燃料の破損しきい値を求める実験を4回行った。これまでの実験から、欠陥の

深さが 0.5 mm の場合、燃料初期内圧が 0.6 MPa では破損しきい値は無欠陥燃料の 260 cal/g・UO<sub>2</sub> に対し約 180 cal/g・UO<sub>2</sub> に低下するものと予想されていた。今期はこの確認実験を行うとともに、燃料初期内圧を 0.25 MPa とした加圧燃料実験を行い、欠陥深さ 0.5 mm の摩耗欠陥燃料では 0.25 MPa 程度の燃料初期内圧は破損しきい値に影響を及ぼさないことを確認した。また欠陥深さ 0.3 mm の試験燃料の場合は、燃料初期内圧 0.6 MPa で破損しきい値は約 230 cal/g・UO<sub>2</sub> となることが明らかとなった。

#### (4) 燃料損傷実験

燃料損傷実験は、炉心露出のような苛酷な事故条件下における燃料損傷挙動を究明することを目的として、これまでに燃料棒の初期条件（被覆管外表面の酸化膜厚）、雰囲気条件（酸化性または非酸化性雰囲気）及び発熱量をパラメータとした実験を行っている。その結果、被覆管の一部が溶融しても、外側に非溶融の酸化相がある厚さ以上あれば、被覆材は溶融落下しないことが確かめられている。今期はこの溶融落下を生じない酸化膜厚の限界を求める実験と、被覆管に破裂口がある場合にその破裂口からの溶融落下はどうなるかを調べる実験を 2 回、計 3 回の実験を行った。実験の結果、酸化膜厚が約 100 μm の場合には被覆材の溶融落下は生じないこと、及び被覆管に内圧破裂による破裂口が生じても溶融被覆材は必ずしも落下しないこと等が明らかとなった。

#### (5) 特殊燃料実験

##### (5.1) 多目的高温ガス炉燃料実験

被覆燃料粒子を黒鉛マトリックス中に分散させた VHTGR 型燃料（外径 18 mm、内径 9 mm の内筒形）をステンレス鋼被覆管に収めたものを試験燃料として、発熱量を変えて 2 回の実験を行った。平均発熱量は 460 及び 570 cal/g・UO<sub>2</sub> と前期より高くしたので、燃料マトリックス内表面（濃縮度 8 %）の最高温度もこれまでの 244 °C に対して 285 °C 及び 331 °C と高くなつたが、燃料棒の外観には何の変化もみられず、又 X 線写真でも燃料粒子の異常らしきものは認められなかった。

##### (5.2) 混合酸化物燃料実験

熱中性子炉用プルトニウムーウラン混合酸化物燃料については、今期より第 2 次実験を開始し 5 回の実験を実施した。第 1 次実験においては、NSRR 標準燃料と同一寸法の混合酸化物燃料の破損しきい値が標準燃料の場合とほど一致することを確かめた。第 2 次実験の目的は、新型転換炉型燃料と同一寸法の混合酸化物燃料の破損しきい値を求ること、及びプルトニウム・スポットの燃料破損に及ぼす影響を調べることである。今期はプルトニウム・スポットのない燃料について、発熱量 144 ~ 263 cal/g（推定値）の範囲で実験し、現在詳細な金相検査及び化学分析による発熱量較正を進めているところである。

##### (5.3) ガドリニア入り燃料実験

現在 PWR では、可燃性毒物として Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を直接 UO<sub>2</sub> ペレット中に混入した燃料の使用が計画されている。そのような Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 入り燃料の反応度事故時における燃料挙動を調べるために、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - UO<sub>2</sub> 燃料の実験を 5 回、また同実験のための比較用実験を UO<sub>2</sub> 燃料を用いて 6 回実施した。

#### (6) その他の大気圧カプセル実験

##### (6.1) 破壊力測定実験

NSRR 実験では、次期計画として燃焼の進んだ燃料（バーンアップ燃料）についての実験を予定している。現在このための施設改造を始めとする各種の準備を進めており、その 1 つに実験カプセル

の開発がある。しかし、カプセル設計の基礎とすべきバーンアップ燃料破損時の機械力に関するデータは極めて不足している。このため、バーンアップ燃料破損時の機械力を評価し、機械力によって生ずる実験カプセルの動的な変形挙動を調べることを目的として、破壊力測定実験を実施した。

本実験においては、試験燃料内の封入ガス（ヘリウム）を予め加圧しておくことにより、バーンアップ燃料の燃料棒内に蓄積されたF P ガスの効果を模擬した。実験カプセルは二重カプセル構造とし、内部カプセルにはバーンアップ実験用カプセルの第1次設計の寸法仕様で製作したものを用いた。

実験の結果、加圧燃料の破損で生じる衝撃圧力ピーク値は非加圧燃料の場合の上限値近くか、又はそれを超える値もあり、燃料初期内圧を高めたための影響が明瞭に認められた。また機械的エネルギー転換率に関しては、加圧燃料も従来の評価曲線を下回っており、非加圧燃料の結果と差がないことが判明した。これらの結果を照射済燃料についての S P E R T 実験結果と併せて考慮し、カプセル設計用の評価曲線を作成した。

#### （6.2）変形量測定実験

被覆管のふくれ挙動を観察する大変形測定センサ開発のための実験（大変形測定実験）を1回、P C M I による被覆管の微小変形を測定する小変形測定センサ開発のための実験（小変形測定実験）を2回、そして歪ゲージを用いた被覆管の微少変形測定実験（被覆管過渡歪測定実験）を7回実施した。

大変形測定実験では歪ゲージタイプのセンサを利用して加圧燃料のふくれ挙動の測定を行った。センサ出力はほぼ被覆管のふくれに対応するものであったが、幾つかの問題点が明らかとなった。

小変形測定実験では、試作センサの炉内テストを行った。測定結果は予想される変形に比べ、時間変化は類似しているものの絶対値がかなり大きく、現在検討を進めている。

被覆管過渡歪測定実験では、高温用箔ゲージを用いて被覆管のP C M I による周方向の歪を測定した。実験は標準ギャップ燃料について4回、狭幅ギャップ燃料について2回、広幅ギャップ燃料について1回を行い、ギャップ幅及び発熱量に依存する被覆管の変形について多くのデータを得た。また、これらの結果は、過渡時のペレットの熱膨張を G A P C O N モデルを用いて評価することにより、N S R - 7 7 コードで良好に解析できることが明らかとなった。

#### （7）高温高圧カプセル実験

##### （7.1）加圧燃料実験

反応度事故時の加圧燃料棒の破損挙動については、これまで冷態起動条件に対する室温・大気圧条件で実験を実施してきた。これに対して、温態起動条件下における加圧燃料棒の破損挙動についても評価する必要があり、高温高圧カプセルを用いた加圧燃料棒実験を実施した。

実験の結果、被覆管のコラプス発生の有無は被覆管温度挙動に大きく影響すること、高温高圧条件下ではパルス出力発生後の燃料棒内圧上昇が大きいため、燃料棒初期内圧が外圧をやや下回っていても、被覆管のふくれを生ずること、被覆管の破裂は、本実験条件の範囲では、従来の加圧燃料の破損しきい値を超えた条件でのみ生じること、が判明した。またこれらの実験結果を N S R - 7 7 コードによる解析値と比較した結果、被覆管の変形が小さい範囲では、N S R - 7 7 による解析結果が実験結果と良く一致することが分った。

##### （7.2）伸び測定実験

高温高圧条件下での燃料ペレット及び被覆管の伸び挙動測定のためのセンサーを開発し、炉内実験を行い伸びを測定した。センサは良好に働き、ペレット及び被覆管の伸びについて有用なデータが得

られた。燃料ペレットと被覆管は過渡変化のほぼ全域で互いに拘束しており、特に出力上昇直後には未だ被覆管の温度が上昇しないうちに、ペレットは被覆管を拘束し急激に伸ばした。この時点でのペレット伸びは、その平均エンタルピにほぼ比例していた。その後、ペレットと被覆管の発熱部は一体のまま、熱膨張・収縮した。しかし、被覆管は発熱部上端で外圧により軸方向につぶれたため、見かけ上ペレットとは異なる伸び挙動を示した。

#### (8) 高温高圧ループ実験

高温高圧ループ実験は、これまでに1本の試験燃料を8本の模擬燃料棒で囲んだ単一燃料棒体系でBWRの高温待機条件を模擬した実験を5回行い、破損しきい値、及び冷却材流速とサブクール度の影響等を調べた。これらの実験を通して高温高圧ループの特性を把握し基礎的データを得たので、今期は効率的なパラメータ実験を目指し、3本の試験燃料を夫々独立な流路管内に収めた3単一燃料棒体系での実験を2回実施した。この体系では試験燃料はカプセル中心から直径4.7mmの円周上に120度間隙で配置されるので、各燃料棒では中心側と外側との水層厚の違いによる発熱差を生じ、リッジング部等に多少の曲りを生じた。また今回の体系では、単一燃料棒体系と比較して冷却材の層が薄くなるため冷却性は悪くなっている、被覆管表面温度に及ぼす流速の影響が顕著にみられた。

#### (9) 燃料挙動可視実験

燃料損傷実験、バンドル実験、色温度測定実験、及び燃料棒支持条件の効果を見る実験（両端固定）を各1回の計4回の実験を行った。燃料損傷実験では空気雰囲気中の燃料棒損傷挙動の観察を行った。空気量が制限されているので、被覆管は充分には酸化されず、非酸化雰囲気中の実験と同様に被覆管は溶融して流れ落ちたが、流れ落ち速度は約0.2m/secであり非酸化雰囲気で行ったTest No.600-14に比べて3分の1程度であった。バンドル実験では、3本バンドルに組んだ試験燃料間の相互作用の観察を行った。試験燃料は激しく膜沸騰したが、燃料棒間には水の層が残っており、流路での冷却水のドライアウトは見られなかった。色温度測定実験では、水中に固定した試験燃料棒の色温度の測定を行った。解析は終了しているが、燃料棒をとり巻く気泡のために発熱光が乱反射し像が歪むなどの問題がある。燃料棒支持条件の効果を見るために行った実験では、試験燃料の両端を固定して実験を行った。被覆管は熱膨張により部分的にふくらんでおり、縦方向のクラックが多数入り破損した。

#### (10) 解析コードの開発

NSR-77コードに関しては、これまで主として燃料棒自身の熱的、機械的挙動の詳細解析に重点を置き、冷却材挙動に関しては簡略化したモデルにより解析を行ってきた。今期は冷却材挙動計算に質量、エネルギー及びモーメンタムの3保存則を基本としたアルゴリズムを導入し、解析モデルの改良を行った。またSTEALTHコードによりNSRR実験カプセルの応答解析を行った。

Table 1.1 NSRR 実験の分類と実験回数

| 実験項目          | 目的                 | 実験回数                                 |                |       |
|---------------|--------------------|--------------------------------------|----------------|-------|
|               |                    | 50.10~<br>58.12                      | 59.1~<br>59.12 | 合計    |
| 大気圧<br>カプセル実験 | 1. 標準燃料実験          |                                      |                |       |
|               | (i) スコーピング実験       | 未照射健全燃料に関する全般的な燃料挙動の究明               | 4 6            | 0 4 6 |
|               | (ii) 詳細実験          | 酸化, 変形, しきい値等の詳細な情報を得る               | 2 8            | 0 2 8 |
|               | (iii) その他          |                                      | 1 3            | 0 1 3 |
|               | 2. 燃料パラメータ実験       |                                      |                |       |
|               | (i) ギャップ燃料実験       | 初期ギャップ幅が燃料の過渡温度挙動, 破損に及ぼす影響の究明       | 1 6            | 0 1 6 |
|               | (ii) 濃縮度燃料実験       | 燃料内発熱密度の歪と破損しきい値との関係の究明              | 1 7            | 0 1 7 |
|               | (iii) 加圧燃料実験       | 燃料棒内圧と燃料破損挙動との関係の究明                  | 5 8            | 0 5 8 |
|               | (iv) 特殊被覆材燃料実験     | 被覆材質, 肉厚, 熱処理条件等の燃料破損挙動に及ぼす影響の究明     | 4 7            | 0 4 7 |
|               | (v) ギャップガス・パラメータ実験 | ギャップガスが燃料の過渡温度挙動, 破損に及ぼす影響の究明        | 2 0            | 0 2 0 |
|               | (vi) 照射済被覆燃料実験     |                                      | 1              | 4 5   |
|               | (vii) その他          |                                      | 1 1            | 2 1 3 |
| 冷却水循環実験       | 3. 冷却条件パラメータ実験     |                                      |                |       |
|               | (i) 冷却水温パラメータ実験    | 冷却水温度の燃料破損挙動に及ぼす影響の究明                | 2 2            | 0 2 2 |
|               | (ii) 流路模擬燃料実験      | 流路条件が燃料破損に及ぼす影響の究明                   | 2 2            | 0 2 2 |
|               | (iii) バンドル燃料実験     | バンドル(4~5本)体系での燃料破損しきい値, 破損の伝播についての究明 | 1 5            | 1 1 6 |
|               | (iv) 強制対流実験        | 冷却水の流動が燃料破損挙動に及ぼす影響の究明               | 2 9            | 2 3 1 |
| 燃料腐食実験        | 4. 欠陥燃料実験          |                                      |                |       |
|               | (i) 浸水燃料実験         | 欠陥燃料の破損しきい値, 破壊エネルギーの把握              | 9 1            | 0 9 1 |
|               | (ii) 擦過腐食燃料実験      | 擦過腐食の燃料破損挙動に及ぼす影響の究明                 | 3 6            | 4 4 0 |
| 燃料損傷実験        | 5. 燃料損傷実験          | 気体雰囲気中での燃料挙動の究明                      | 1 8            | 3 2 1 |

| 実験項目          | 目的   | 実験回数                           |                |       |
|---------------|--|--------------------------------|----------------|-------|
|               |  | 50.10~<br>58.12                | 59.1~<br>59.12 | 合計    |
| 大気圧<br>カプセル実験 | 6. 特殊燃料実験<br>(i) USNRC燃料実験                 | BWR型PCI対策燃料の燃料挙動の究明            | 21             | 0 21  |
|               | (ii) HTGR燃料実験                              | HTGR用粒子状燃料の燃料挙動の究明             | 5              | 2 7   |
|               | (iii) 混合酸化物燃料実験                            | 熱中性子炉用混合酸化物燃料の燃料挙動の究明          | 12             | 5 17  |
|               | (iv) Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加燃料実験 | PWR型PCI対策燃料の燃料挙動の究明            | 0              | 11 11 |
|               | 7. その他<br>(i) 計測実験                         | 燃料中心温度、伸び、変形量、加速度、音響等の測定       | 41             | 10 51 |
|               | (ii) 支持効果実験                                | 燃料の固定法、グリッドスペーサ等が燃料挙動に及ぼす影響の究明 | 13             | 0 13  |
|               | (iii) 水素発生量測定                              | ジルカロイ-水反応により生じる水素量の測定          | 8              | 0 8   |
|               | (iv) 破壊力測定実験                               | 燃料破損時の破壊力及びカプセル応答測定            | 0              | 8 8   |
|               | (v) その他                                    |                                | 15             | 0 15  |
|               | 高温高圧カプセル実験                                 | 実炉の運転温度・圧力条件下における燃料挙動の究明       | 16             | 4 20  |
| 高温高圧ループ実験     | 流動条件下における燃料挙動の究明                           | 11                             | 2 13           |       |
| 燃料挙動可視実験      | 高速度写真撮影による燃料挙動の可視化                         | 17                             | 4 21           |       |
|               | 合 計  | 649                            | 62             | 711   |

## 2. 大気圧カプセル実験

### 2.1 燃料設計パラメータ実験

#### 2.1.1 長尺燃料実験 (柳原 敏, 藤城 俊夫)

##### (1) はじめに

NSRR 実験では、発熱長 135 mm の標準燃料棒について多くの照射実験を行い、その破損挙動を詳細に調べている。これらの実験より、全て同一の濃縮度を持つ UO<sub>2</sub> ペレットを使用した照射実験では、軸方向の両端に出力ピークが生じ、この近傍で燃料棒の破損が生じやすいことから、軸方向の出力分布が燃料挙動に影響を及ぼしていることが明らかになってきた。NSRR 標準燃料実験では、両端の出力ピークを除くと出力分布はほぼ平坦であるが、通常原子炉内における燃料棒は軸方向に対して cosine 状の分布を持っている。このため、このような出力分布の相違が燃料挙動に及ぼす影響を評価する必要がある。そこで、NSRR の炉心燃料と等しい長さを持つ試験燃料（長尺燃料、燃料有効長：380 mm）を作成して、照射実験を行い、cosine 状の出力分布を持つ場合の燃料棒の挙動を究明した。

なお、本実験は冷却材温度を 90 °C (サブクール度 10 °C) として実施したが、これは、強制対流条件下における長尺燃料の破損挙動に及ぼす冷却条件の影響を究明するための実験 (テストシリーズ : 242) と同一のサブクール度条件で実験を行うことを目的として実施したものである。

##### (2) 実験条件

今回実施した長尺燃料実験の実験条件を以前に実施した実験 (Test No. 234-6) と共に Table 2.1.1 に記す。本表に示すように、今回実施した実験は Test No. 234-7, -8 の 2 回であり、いずれも冷却材温度が 90 °C である。又、発熱量は 211, 223 cal/g・UO<sub>2</sub> である。Test No. 234-7 の目的は、燃料棒の非破損条件下において、軸方向の出力分布と被覆管表面温度及び燃料棒の損傷挙動との関係を究明することであり、Test No. 234-8 の目的は、長尺燃料の局所的な破損しきい値を評価することである。

長尺燃料実験における実験体系及び熱電対の取付け位置を Fig. 2.1.1 に示す。

##### (3) 実験結果及び考察

長尺燃料 (燃料有効長：380 mm) 実験の主な特徴としてはその発熱分布が燃料棒の中央で高い cosine 状をしていることである。このため、標準燃料棒実験でみられるような発熱部両端における出力ピーキングも生じないため、燃料挙動に及ぼす発熱部両端の急峻な出力ピーキングの影響をなくすことが出来、より現実的に、動力炉燃料のゆるやかな cosine 状の出力分布を模擬した実験が可能である。

Fig. 2.1.2 は、長尺燃料棒の出力分布の測定結果と、軸方向の各位置での被覆管表面温度を測定した結果よりその最高温度を示したものである。本図には、燃料棒の外観および測定温度より、軸方向の温度分布を推定した結果も示した。各実験により発熱量が異なるため各実験間における最高温度の比較は出来ないが、軸方向出力分布の被覆管表面温度への影響について評価出来る。本図に認められるように、燃料棒の軸方向において出力密度の高い中央領域程、被覆管温度が高くなる傾向がある。

燃料棒の円周方向において温度差があるため、必ずしも測定値が円周方向の代表的な値として評価することは出来ないが、図中に示したように、出力に対応した温度分布が出来ていると考えられる。Fig. 2.1.3 は Test No. 234-7について、軸方向の4点における被覆管表面の温度履歴を示したものである。本図では、熱電対番号#5, 6, 7については、最高温度に達した後の冷却期間では、ほぼ等しい温度差を保ちながら冷却されているのに対し、1500°C以上に達した#3の熱電対は早い降温速度で温度が低下している。被覆管表面温度が1600°C近くに達した場合、 $\text{UO}_2$ とZryの反応が生じる可能性が大きく、このため、 $\text{UO}_2$ -Zryの反応相が生じた部分において被覆管と $\text{UO}_2$ のギャップ熱伝達が良くなっていることが考えられる。このような点についても、出力分布が局所的な燃料挙動に及ぼす影響について評価出来る。

Fig. 2.1.4 は、これまでに実施した長尺燃料棒試験について、照射後の外観写真を示したものである。Test No. 234-6では燃料棒の中央部領域にて被覆管の溶融、クラックが認められる。又、Test No. 234-8においても、燃料棒の中央部近傍にて被覆管の変形が認められ、Test No. 234-7では、燃料棒中央を中心とした大きな曲りが認められる等、長尺燃料実験では燃料棒の中央部近傍で大きな損傷が認められる。NSRR実験では、試験燃料の発熱量は燃料棒の中央部近傍で評価しているため、燃料棒の最も激しい損傷状態と発熱量とを直接に対応づけて評価することが出来る。

#### (4) まとめ

長尺燃料実験の結果以下の事が明らかになった。

- i. 長尺燃料実験では燃料棒の軸方向において cosine 状の出力分布が生じ、被覆管表面温度は出力分布に対応した値を示す。
- ii. 長尺燃料棒中央部近傍で最も激しい損傷が生じるため、発熱量と最も激しい損傷状態とを直接に対応づけて評価することが出来る。
- iii. 冷却材温度が90°Cにおける燃料棒の破損しきい値は 223 cal/g・ $\text{UO}_2$  以上である。

Table 2.1.1. Summary of long sized fuel tests

|           | Reactivity<br>(%) | Reactor Power<br>(MW · S) | Energy Deposition<br>(caVg · UO <sub>2</sub> ) | Coolant Temp<br>(°C) | Max Temp (°C)                       | Test Results              | Appearance           |
|-----------|-------------------|---------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 2 3 4 - 6 | 3.1 5             | 6 1.7                     | 2 6 9  | 2 0                  | #1: 880 #2: 1340 #3: / #4: /        | #5: 1400 #6: 1280 #7: 980 | Cracks               |
| 2 3 4 - 7 | 2.6               | 4 8.4                     | 2 1 1  | 9 0                  | #1: 1160 #2: 1380 #3: 1590 #4: 1420 | #5: 1410 #6: 1240 #7: 990 | Oxidation            |
| 2 3 4 - 8 | 2.7 5             | 5 1.1                     | 2 2 3  | 9 0                  | #1: 1260 #2: 1020 #3: 1650 #4: 1600 | #5: 300 #6: 1670 #7: 1080 | Cladding Deformation |

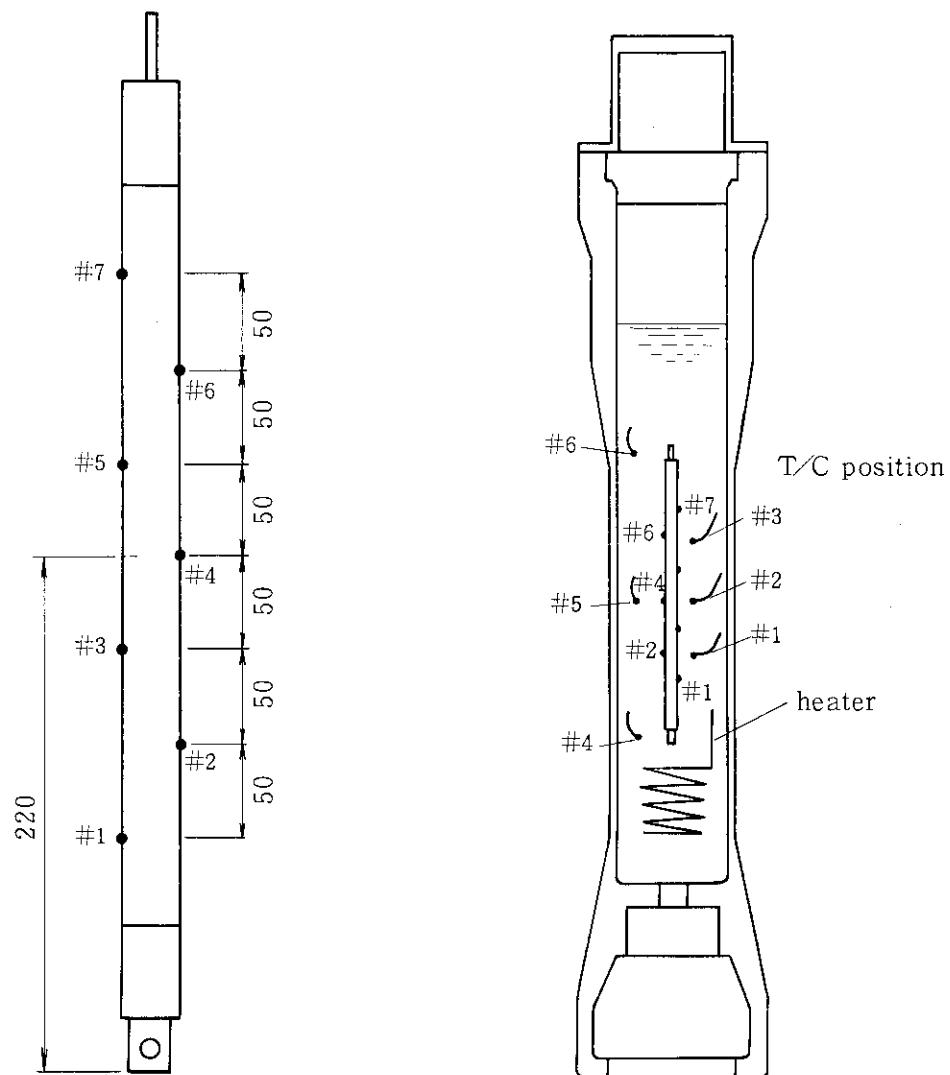


Fig. 2.1.1 Test conditions and measuring instruments for test Nos. 234-7 and -8

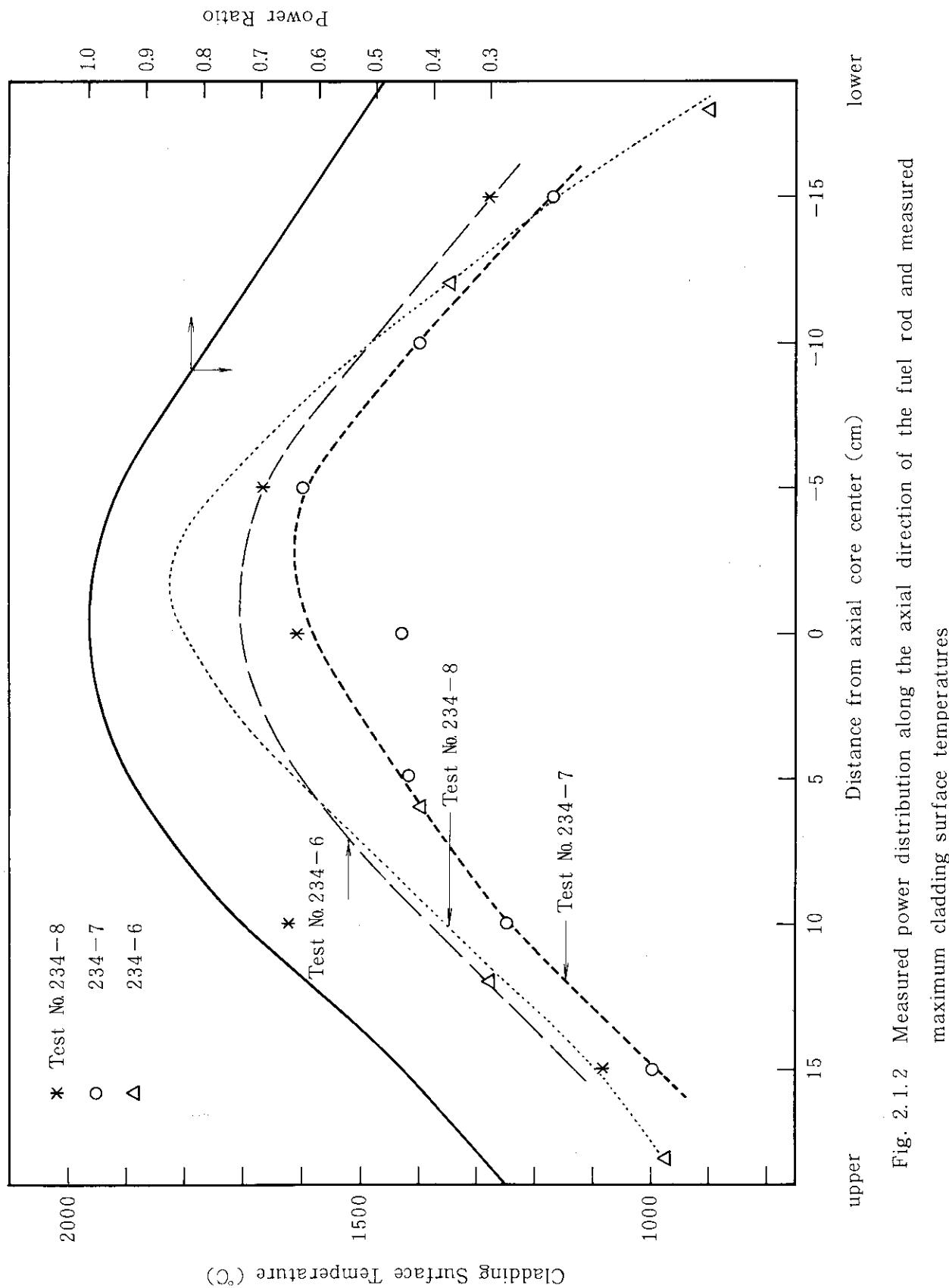


Fig. 2.1.2 Measured power distribution along the axial direction of the fuel rod and measured maximum cladding surface temperatures

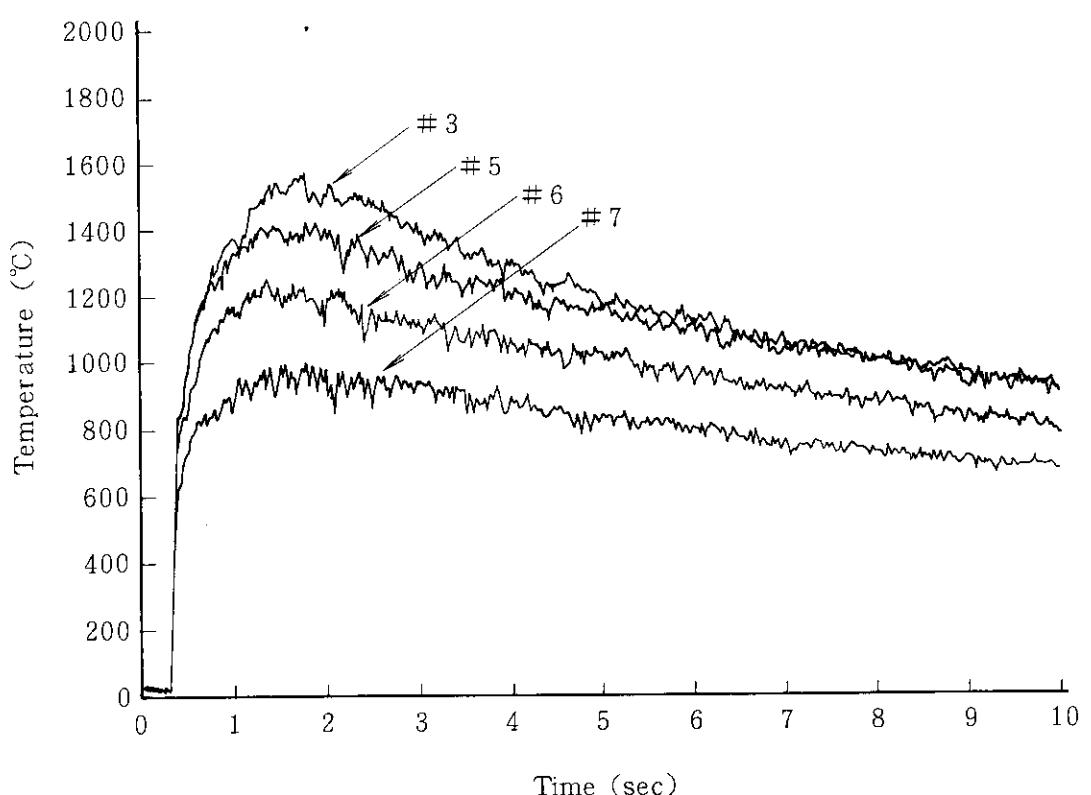


Fig. 2.1.3 Measured cladding surface temperature histories Test No 234-7

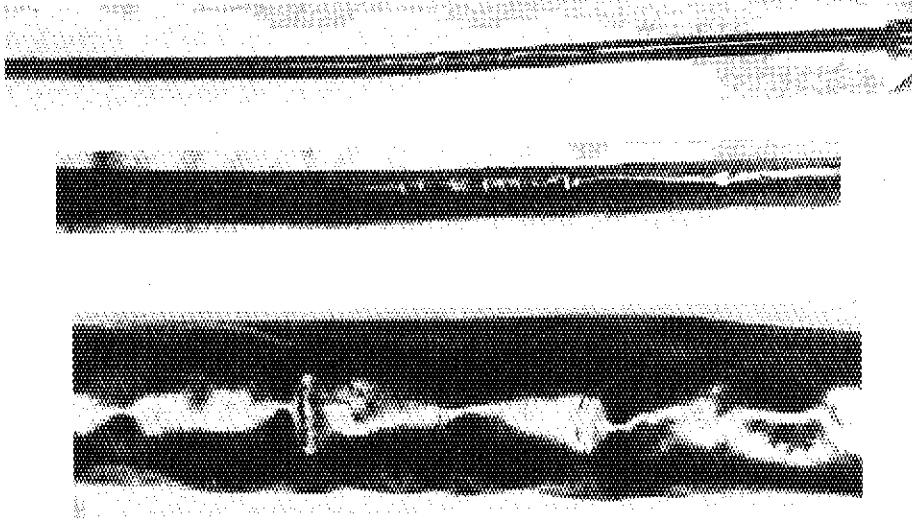
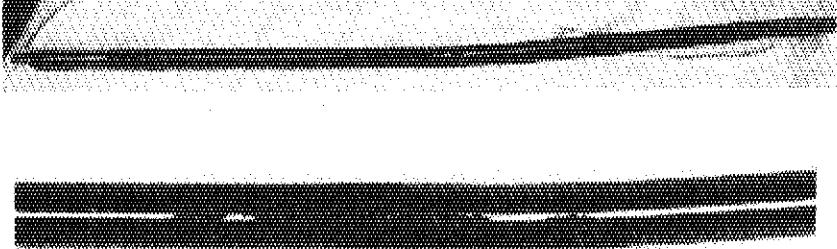
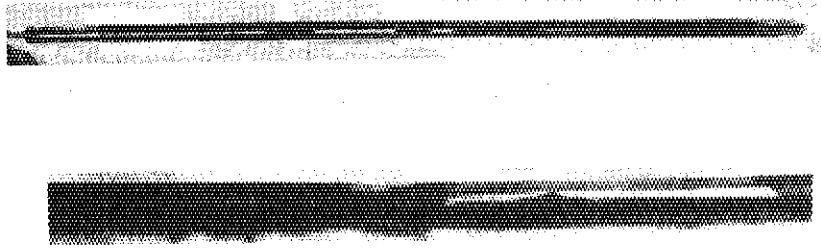
| Test No | Appearance   |
|---------|--|
| 234-6   |    |
| 234-7   |   |
| 234-8   |  |

Fig. 2.1.4 Post test appearance of the test fuel rods in Test Nos. 234-6, 7 and -8

## 2.1.2 照射済被覆管燃料実験

(稻辺 輝雄, 石島 清見, 片西 昌司)

## (1) 概要

本実験シリーズは、照射済被覆管に未照射燃料ペレットを封入した試験燃料棒の破損挙動を調べるために実施しているものである。これは、現在計画中の照射済燃料（バーンアップ燃料）実験の予備実験として、被覆管の照射脆化の燃料破損挙動に与える影響を調べることを目的としている。前期には、その第1回の実験 (Test No.255-1) として、 $146 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  の発熱量を与える実験を実施したが、試験燃料の破損は生じなかった。今期は、破損しきい値を求めるための実験3回

(Test No.255-2~4), 及びギャップ幅の影響を調べる実験1回 (Test No.255-5) を実施した。

## (2) 実験方法及び実験条件

本実験シリーズのために準備した試験燃料は、前報<sup>(\*)</sup>に示したように、JMT-Rで長期間炉内照射したジルカロイ-4被覆管 (1.4 × 1.4型 PWR サイズ) に、未照射の 10% 濃縮  $\text{UO}_2$  ペレットを封入したものである。今期の実験には、高速中性子照射量が約  $1.1 \sim 1.8 \times 10^{21} \text{ nvt}$  の範囲の被覆管付試験燃料棒を用いた。被覆管と  $\text{UO}_2$  ペレットとの間のギャップ幅は、3回の実験 (Test No. 255-2~4) では NSRR 標準試験燃料棒と同じ 0.095 mm であり、他の1回の実験 (Test No. 255-5) ではギャップ幅の影響を調べるために 0.05 mm とした。試験燃料棒の形状を Fig. 2.1.5 に示す。なお、試験燃料の被覆管は  $\gamma$  線の線量率が高いため ( $1 \sim 2 \text{ R/hr}$ )、熱電対等の計装の取付は行わなかった。

各実験とも、大気圧水カプセルを用いて室温、大気圧の冷却条件下で NSRR によるパルス出力照射を行い、 $195 \sim 261 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  の発熱量を与えた。実験条件を Table 2.1.2 に示す。

## (3) 実験結果

Table 2.1.3 に、実験後の試験燃料棒の状態を前期に行った実験 (Test No.255-1) の結果とあわせて示す。

ギャップ幅 0.095 mm の試験燃料棒は発熱量  $146 \sim 261 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  の範囲では破損しなかった。このことから、照射済被覆管燃料 (照射量約  $1.1 \sim 1.8 \times 10^{21} \text{ nvt}$ ) の破損しきい値は、NSRR 標準試験燃料の破損しきい値約  $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  と同程度と見なすことができる。照射済被覆管の場合、照射脆化により被覆管の伸びが低下し、その結果、ペレットと被覆管の機械的相互作用 (PCMI) によって破損する可能性が考えられる。しかし、本実験の条件下ではペレットの熱膨張による PCMI を十分吸収できるだけの伸びを未だ保持しており破損しきい値の低下に至らなかつたものと考えられる。

本実験のうちギャップ幅 0.05 mm の燃料棒を用いた実験 (Test No.255-5, 発熱量 260  $\text{cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ) では有効発熱部下部で分断していた。狭幅ギャップ燃料の場合、標準のギャップ幅 (0.095 mm) の燃料に比べて PCMI が起り易い条件となっているが、外観を観察したところ分断箇所には被覆管の溶融が認められ、未照射被覆管燃料の場合と同様に被覆管の溶融に起因する破損であることがわかった。過去に行った未照射被覆管燃料におけるギャップ幅の影響を調べた実験

(\*) 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

では、狭幅ギャップ燃料の破損は標準ギャップ幅燃料と比べて被覆管の溶融の程度は激しいが、破損しきい値には顕著な差は認められていない。<sup>(\*\*)</sup>今期行った照射済被覆管燃料実験の場合もこれと同様の結果であったことから、今回の実験条件下では被覆管の照射脆化の影響が現われていないと言える。

次期には、さらに中性子照射量の大きな（約  $3.3 \times 10^{21}$  nvt）被覆管を用いた燃料に対する実験を実施し、照射脆化の影響を確認する予定である。

---

(\*\*) 反応度安全研究室・NSRR管理室：「NSRR実験プログレスレポート・6」，JAERI-M

7977 (1978)

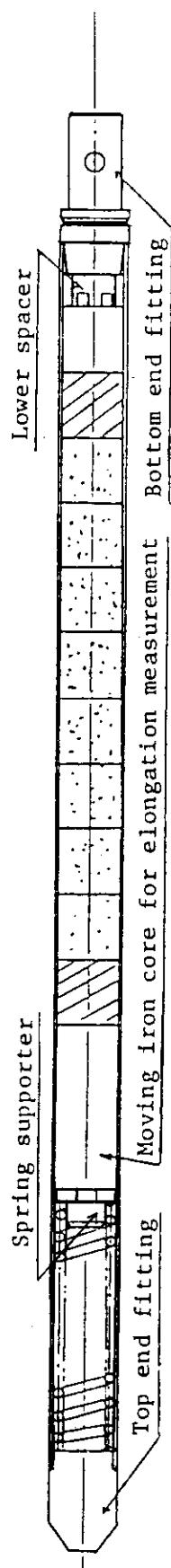
Table 2.1.2 Test conditions in pre-irradiated cladding fuel rod tests

| Test No             | Average Neutron Fluence ( $\times 10^{21}$ nvt) <sup>*1</sup> | Gap Width between Cladding and Pellet (mm) | Reactivity Insertion (\$) | Core Energy Release (MW·s) | Energy Deposition (cal/g·UO <sub>2</sub> ) |
|---------------------|---|--|---------------------------|----------------------------|--|
| 255-1 <sup>*2</sup> | 1.08  | 0.095                                      | 2.10                      | 3.35                       | 146  |
| 255-2               | 1.08  | 0.095                                      | 2.47                      | 4.47                       | 195  |
| 255-3               | 1.76  | 0.095                                      | 2.97                      | 5.98                       | 261  |
| 255-4               | 1.76  | 0.095                                      | 3.07                      | 5.87                       | 256  |
| 255-5               | 1.28  | 0.05                                       | 3.06                      | 5.97                       | 260  |

<sup>\*1</sup> Neutrons with energy above 1 MeV.<sup>\*2</sup> Test No 255-1 was conducted in the previous year.

Table 2.1.3 Summary of pre-irradiated fuel rod tests

| Energy Deposition (cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Test No | Post-irradiation Appearance of Test Fuel                           | Fuel Failure |
|--|---------|--|--------------|
| 146  | 255-1   | ◦ Partial discoloration.   | No           |
| 195  | 255-2   | ◦ Discoloration due to oxidation (partly not oxidized).            | No           |
| 256  | 255-4   | ◦ Discoloration due to oxidation (oxidation flakes at lower part). | No           |
| 261  | 255-3   | ◦ Discoloration due to oxidation.                                  | No           |
| 260  | 255-5   | ◦ Discoloration due to oxidation.<br>◦ Broken into two pieces.     | Yes          |



- 10%-enriched UO<sub>2</sub> pellet. (Diameter : 9.29 mm (Test No. 255-2~4)  
9.38 mm (Test No. 255-5))
- Non- or low-enriched UO<sub>2</sub> pellet. (Natural U (Test No. 255-4)  
2.6% E•U (Test No. 255-2, 3, 5))
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellet.

Fig. 2.1.5 Assembled fuel rod with pre-irradiated cladding

## 2.2 冷却条件パラメータ実験

### 2.2.1 強制対流実験 (藤城 俊夫, 柳原 敏)

#### (1) 概要

本実験シリーズでは、大気圧カプセル中に冷却材の強制循環装置を組込み、強制対流条件の下での燃料挙動の究明を目的として実験を実施してきた。本期は、前期に引き続き、燃料スタック長40cmの長尺燃料を用いた実験を実施し、発熱長が長く、かつ軸方向に cosine 状の出力分布が存在する場合の燃料挙動を、低サブクール条件および破損しきい値付近の比較的高い発熱量条件の下で究明した。また、燃料流路出口に密度計を取り付け、過渡的なボイド率変化の測定も実施した。

#### (2) 実験方法

大気圧カプセル中に組み込んだ強制循環装置の概要と温度測定点の位置を Fig. 2.2.1 に示す。カプセル内の約 7 ℥ の冷却水は、小型の小中ポンプにより燃料流路の下端に送られ、燃料流路内の環状流路を上向して試験燃料を冷却した後、密度計を通じてカプセル内の冷却水と混合する。また、低サブクール実験 (Test No. 242-2) では、カプセル内に入れたシーズヒータにより冷却水を加熱した。カプセル内の計測は、ドラッグ・ディスク型流量計による冷却材入口流量、Type K 熱電対による冷却材温度、 $P_t / P_{t-1} - 13\% \text{ Rh}$  熱電対 (素線のスポット溶接) による被覆管表面温度、および、上述の燃料流路出口に取付けた振動板型密度計による出口ボイド率等である。試験燃料の燃料スタック長40cmは NSRR の炉心長38.1cmをやゝ上まわる長さであり、この燃料棒を燃料中央が炉心中央と同じ高さになるように位置を決めて実験を行ったため、試験燃料の軸方向温度分布は、Fig. 2.2.2 に示すような cosine 状分布となる。

本期の実験としては、冷却材サブクール度の影響を調べる事を目的とした、冷却材温度80°C、発熱量231 cal/g・UO<sub>2</sub>の実験、および、破損しきい値付近における燃料挙動を調べるための、冷却材温度20°C、発熱量275 cal/g・UO<sub>2</sub>の実験の計2回の実験を実施した。冷却材初期流速はいずれの場合も 1.0 m/s とした。

#### (3) 実験結果および考察

##### (i) 冷却材サブクール度の影響

Fig. 2.2.3 に冷却材サブクール度を20°Cとして実施した Test No. 242-2 における冷却材出口温度、流路管出口ボイド率および被覆管温度の過渡変化を、サブクール度が87°Cと大きい事以外は全く同一条件で行った Test No. 242-1 の結果と比較した。この結果から、冷却材サブクール度の違いによる影響は極めて大きく、サブクール度20°Cの場合には、流路管出口ボイド率が90%以上の状態が数秒間継続し、被覆管最高温度も同一場所で高サブクール条件 (サブクール度80°C) に比べて300~400°Cも高くなった。Fig. 2.2.3 の被覆管温度は燃料棒発熱部の上端に近い発熱量142 cal/g・UO<sub>2</sub>の場所であるため、最高温度は1460°Cであったがより発熱量の高い燃料中央部分はより高温に達し熱電対は昇温の途中の1600~1800°Cで破損した。

Fig. 2.2.4 は照射燃料の外観を比較したものである。サブクール度87°Cの場合には被覆管は殆んど変形をしていないのに対し、サブクール度20°Cでは中央部分の被覆管が溶融し3個に分断し、分断点から約2cmの範囲には被覆管にクラックが生じている。クラックは発熱量が約200 cal/g・UO<sub>2</sub>以上の範囲で、又、分断は約220 cal/g・UO<sub>2</sub> (下流側) で生じている。標準燃料を

用い、サブクール度 10 °C の自然対流条件で行った実験では、発熱量  $216 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ <sup>(1)</sup> でクラック発生、 $239 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  で分断する結果となっており、この自然対流条件の結果と比べて、今回実施した強制対流実験では破損しきいがより低下したと言える。これは、単なるサブクール度の効果に併せて流路管内のポイディングによる効果も加わった結果と考えられる。これらの結果から、低サブクール条件の下では、燃料部で発生する蒸気および水素ボイドによる流路管内のドライアウトの効果が重要であることが判明した。

#### (ii) 破損しきい値付近の燃料挙動

高サブクール条件下においても、発熱量が破損しきい値に近くなり、被覆管温度が融点近くの高温になると、ジルカロイ・水反応による水素発生が盛んになるため、流路内のポイディングが生じる。Fig. 2.2.5 はサブクール度 80 °C で発熱量  $275 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を与えた Test No. 242-3 において測定した流路管出口のボイド率の結果である。同図に示した発熱量  $232 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  の場合に比べボイド率は 2 倍以上になり、約 80 % のボイド率が数秒間続いた。この流路のポイディングは流路全長にわたる発生水素量に依存するので、燃料の発熱長が大きい程厳しいポイディングとなる。Fig. 2.2.4 の下段には Test No. 242-3、およびこれと同じ冷却材サブクール度、流速の下で、発熱長 135 mm の標準燃料に発熱  $269 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を与えた場合の照射後燃料の外観を比較して示している。発熱量はほぼ等しいにもかかわらず、短尺の燃料は破損していないのに對し長尺の燃料は細かく分断しており、流路管内のポイディングによる冷却条件劣化の影響が少くない事を示している。

## 2.2.2 バンドル実験 (藤城 俊夫, 柳原 敏)

## (1) 概要

これまで実施してきたバンドル実験によって、バンドル体系における冷却材サブクール度および流速の燃料挙動に及ぼす影響が明らかになりつつある。今期実施した実験は、このバンドル実験の一環として、低サブクール度条件の下での燃料破損しきい値を調べる事を目的として行ったものである。実験は、従来実施してきたバンドル実験と同じ5本バンドル体系の試験燃料を用い、低サブクール、自然対流冷却の下で破損しきい値と予想された発熱量を与える条件で1回実施した。

## (2) 実験方法

Fig. 2.2.6 に本バンドル実験の体系および温度計測点を示す。バンドルは従来のものと同じく、PWR型の標準燃料を燃料棒ピッチ14 mm の5本組とし、これを内法34 mm の正方形断面の流路管に納めた。燃料の濃縮度は、中心燃料20%，外側燃料10%とし、中心燃料と外側燃料の平均発熱量が等しくなるようにした。また、冷却水温を上げるために、図に示すようにカプセル内に1 kWのシーズヒータを装着し、カプセル内の冷却水全体を昇温した。

計測は、同図中に示すように、被覆管表面表面温度を中心燃料5点、外側燃料1点に0.3 mm φの白金・白金ロジウム熱電対をスポット溶接して測定し、シーズ型Type K熱電対で流路管内の冷却水温を、又、自然循環流量を流路下部に取付けたドラッグディスク式流量計により測定した。

実施したのは Test No.312-45 の1回のみであり、冷却材温度80°C (サブクール度20°C) の下で、パルス照射により中心燃料に156 cal/g・UO<sub>2</sub>、外側燃料に166 cal/g・UO<sub>2</sub> の発熱量を与えた。

## (3) 実験結果および考察

これまで行ってきたバンドル実験の結果、冷却材のサブクール度が小さくなるとバンドル内のボイド率の増大によって燃料の冷却材の供給が不足し、同じサブクール条件の単一燃料棒実験に比べて被覆管最高温度が増大することが分っている。この結果、燃料破損しきい値も低下し、サブクール度80°Cの場合には発熱量188 cal/g・UO<sub>2</sub> (中心燃料) で燃料破損は生じないが (Test No.312-2)，サブクール度20°Cにすると、同じ発熱量で、中心燃料は発熱部の上・下両端部で被覆管が溶融し分断した。 (Test No.312-44) このため、今回の実験では、発熱量をさらに約30 cal/g・UO<sub>2</sub> 下げた156 cal/g・UO<sub>2</sub> で、サブクール度20°Cでの燃料破損の有無を調べたわけである。

この結果、被覆管温度は Fig. 2.2.7 に示すようになった。この図は、中心燃料棒の発熱部中央部での測定結果を比較したものであるが、発熱量156 cal/g・UO<sub>2</sub> の今回の実験では、同じサブクール度20°Cの185 cal/g・UO<sub>2</sub> の場合に比べて最高温度が約400°C低くなり、サブクール度80°C、発熱量188 cal/g・UO<sub>2</sub> で燃料破損を生じなかった場合に最高温度がほぼ一致した。この比較から、少くとも中心燃料棒の発熱部中央付近では、今回の実験が、サブクール80°Cの188 cal/g・UO<sub>2</sub> の条件に近い冷却条件になっているものと言える。しかしながら、Fig. 2.2.8 の最下段に示すように、発熱部中央では燃料破損は生じなかったものの、上・下端の出力ピーキングが生じている所では被覆管の溶融が生じ、下端部では分断し破損しきい値は156 cal/g・UO<sub>2</sub> をさらに下まわることが判明した。この図では、冷却材サブクール度の違いによる燃料の損傷程度の違いを示すために、上述の発熱量約185 cal/g・UO<sub>2</sub> の場合の他に、高サブクール条件で発熱量228 cal/g・UO<sub>2</sub> を与えた場合の結果も比較した。この照射後燃料棒外観の比較から、今回の Test No.

312-45の燃料損傷の程度は、高サブクール度条件の Test No.312-4の場合にほぼ相当することが分る。すなわち、出力ピーキングが生ずる発熱部端部で比較すると、初期サブクール度が20°Cになった事によって、発熱量が約70 cal/g・UO<sub>2</sub>も異なる場合に相当する影響が現れている事になる。流路管入口に取付けた流量計の指示によると、パルス照射直後にボイド発生によるものと思われる最大流速0.12 m/sの逆流がごく短時間生ずるが、その後すぐに自然循環が起つて、燃料流路平均で1.0~2.0 cm/sの流速が30 s近く保持される。この事から、サブクール度が低くなつたための被覆管の過熱は、ボイド量の増大とともに流路の平均的な冷却材供給不足によるよりも、むしろ、局所的なドライアウトによるものである事が想像される。

本実験は、サブクール度が小さく、かつ自然循環条件という、冷却条件が最も悪くなる場合を設定して実施したものであり、より現実的に、冷却材を強制循環させた場合には、破損しきい値は本実験の結果ほどには低下はしないであろう。しかし、前期に実施したサブクール度20°C流速1.0 m/sの実験では、発熱量185 cal/g・UO<sub>2</sub>で本実験の場合とほとんど同様に発熱部下部で分断が生じており、バンドル条件でのサブクール度低下による破損しきい値への影響は、単一燃料棒の場合に比べかなり大きいものと考えられる。

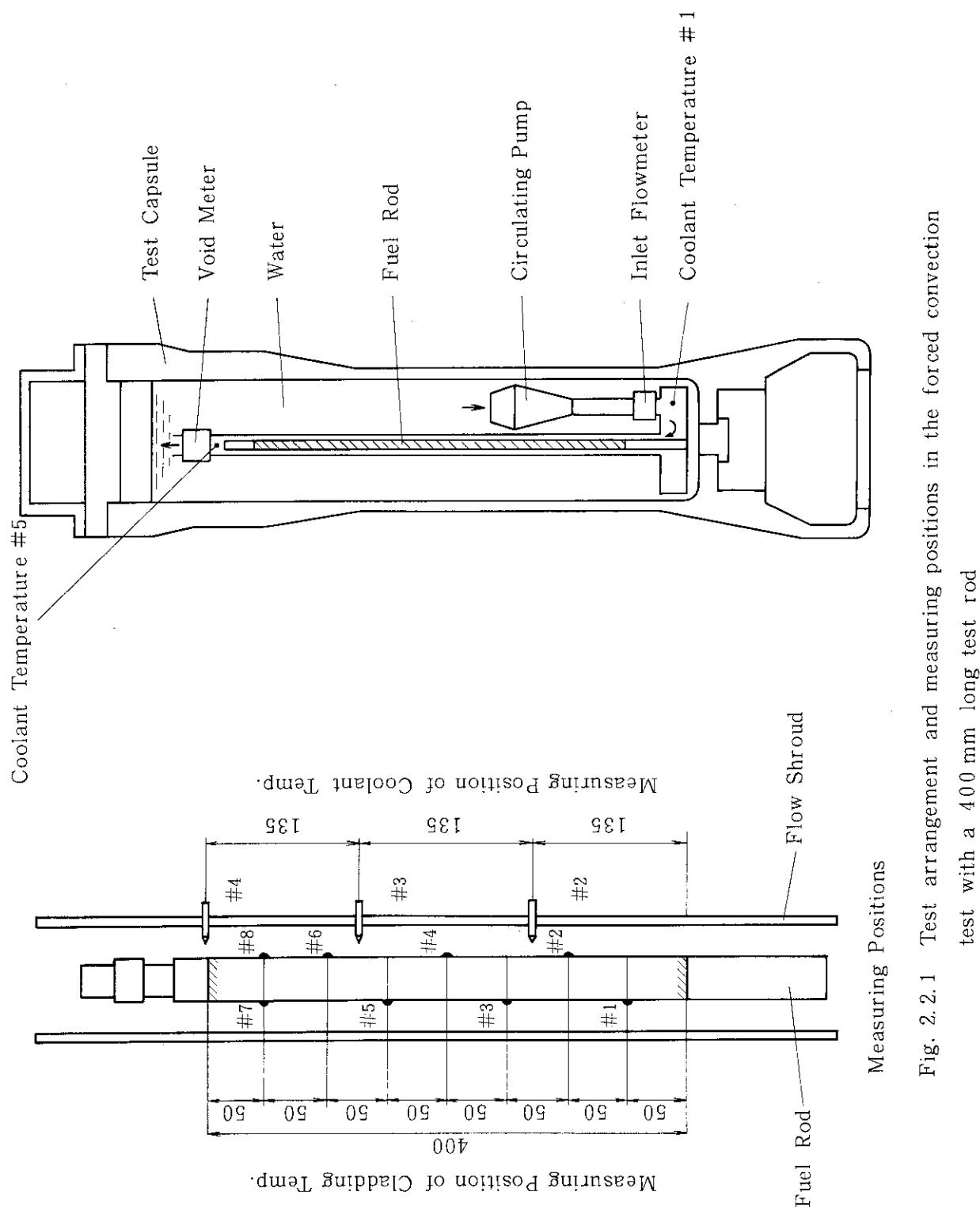


Fig. 2.2.1 Test arrangement and measuring positions in the forced convection test with a 400 mm long test rod

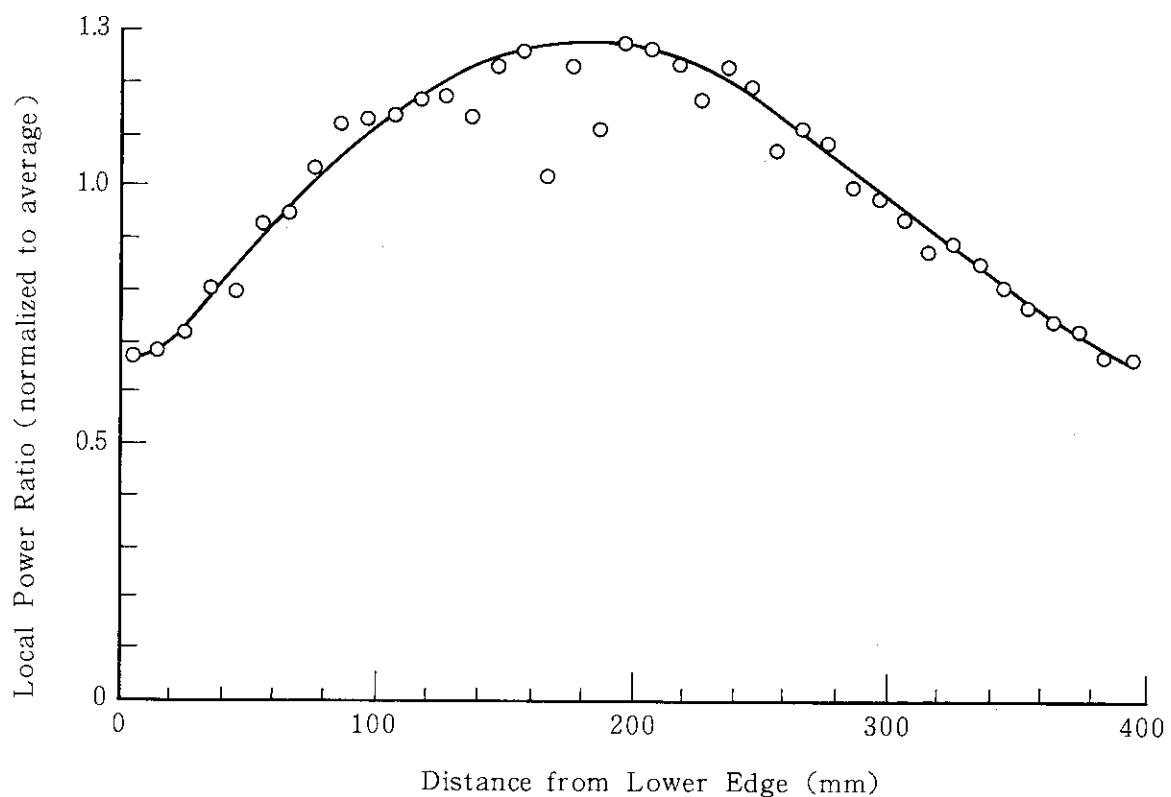


Fig. 2.2.2 Axial power distribution of a 400 mm long test fuel rod obtained by gamma-ray measurement

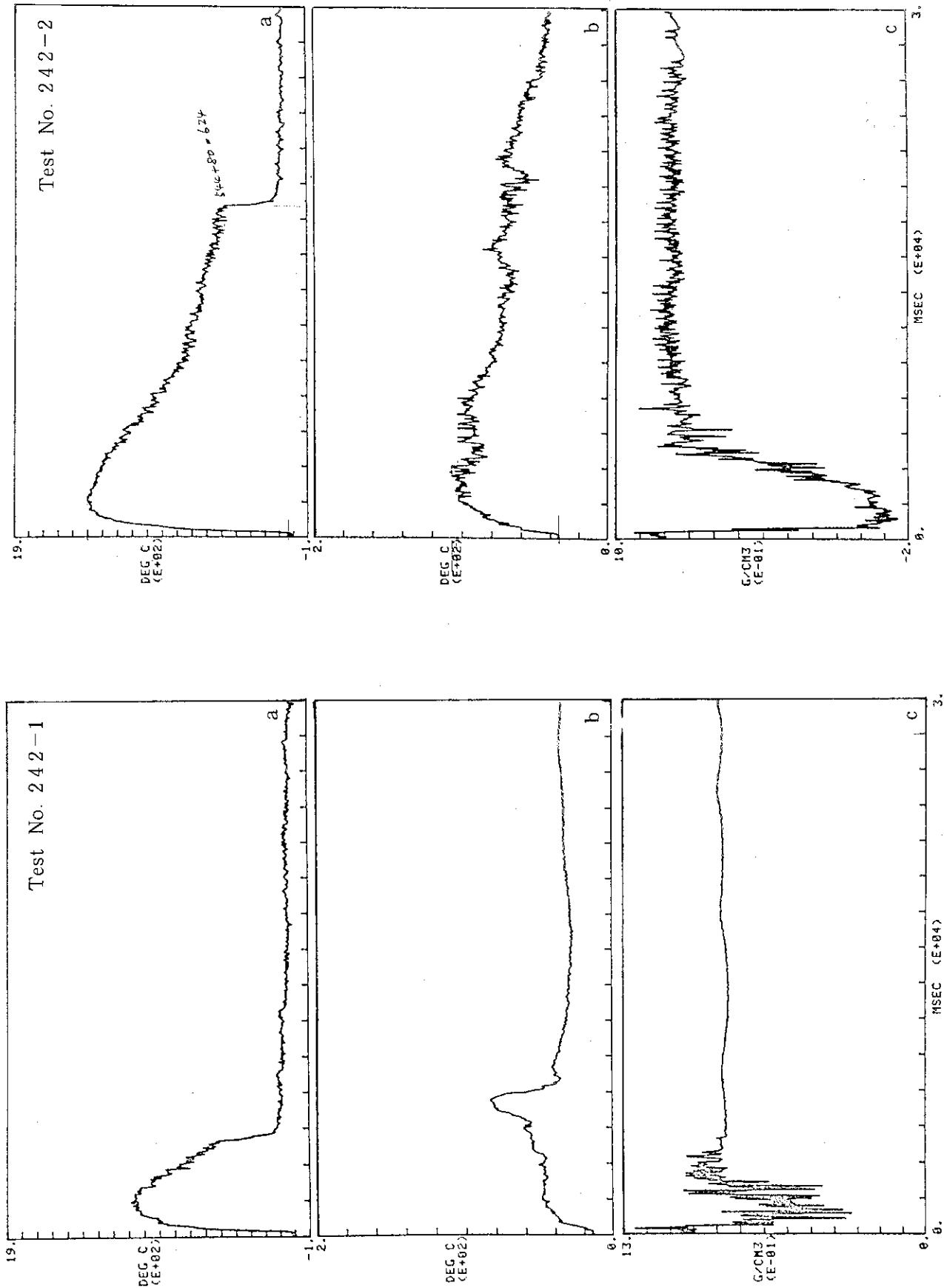


Fig. 2.2.3 Measured transient of cladding surface temperature(a) coolant outlet temperature(b) and void fraction(c) in Test No. 241-1 and 2

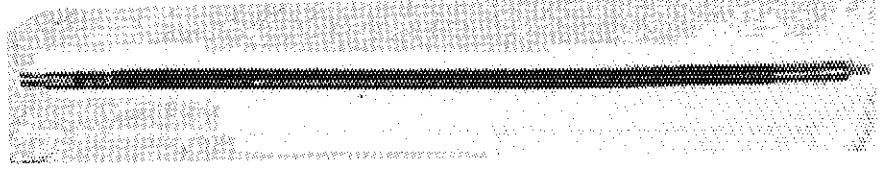
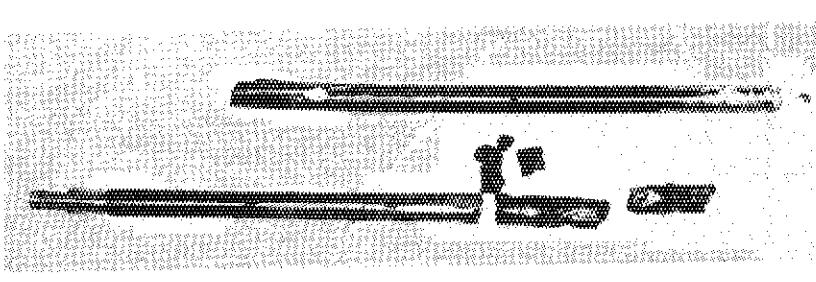
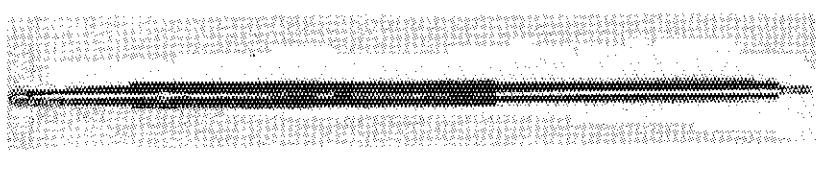
| Test No.<br>and<br>conditions                            | Appearance of post test fuel rod   |
|--|--|
| 2 4 2 - 1  |  |
| a. 232 cal/g • UO <sub>2</sub><br>b. 13 °C<br>c. 1.0 m/s |    |
| 2 4 2 - 2  |  |
| a. 231 cal/g • UO <sub>2</sub><br>b. 80 °C<br>c. 1.0 m/s |   |
| 2 4 2 - 3  |  |
| a. 275 cal/g • UO <sub>2</sub><br>b. 20 °C<br>c. 1.0 m/s |  |
| 2 4 0 - 2  |  |
| a. 269 cal/g • UO <sub>2</sub><br>b. 20 °C<br>c. 1.0 m/s |  |

Fig. 2.2.4 Appearance of post test fuel rod

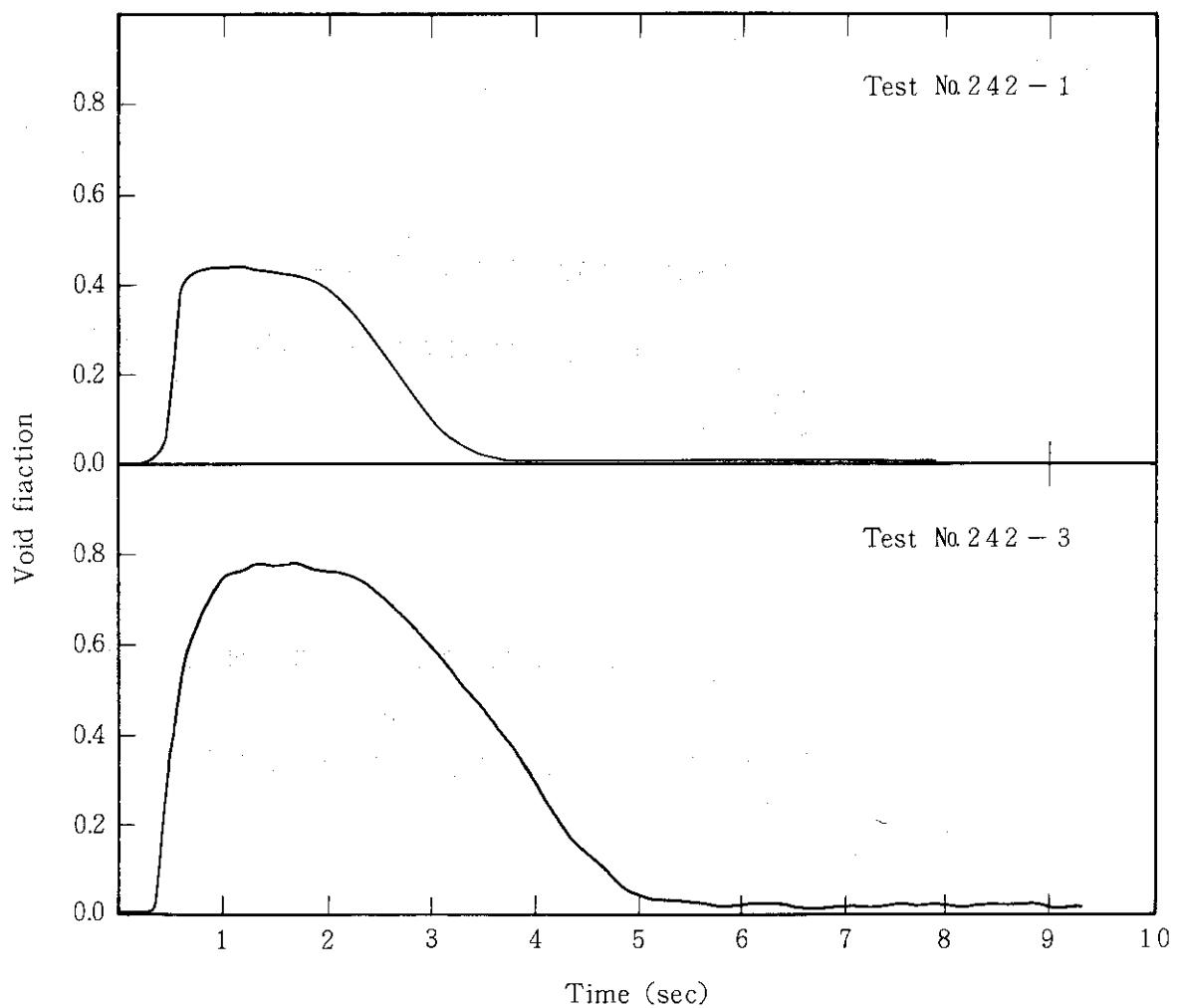


Fig. 2.2.5 Measured void fractions in Test Nos. 242-1 and - 3

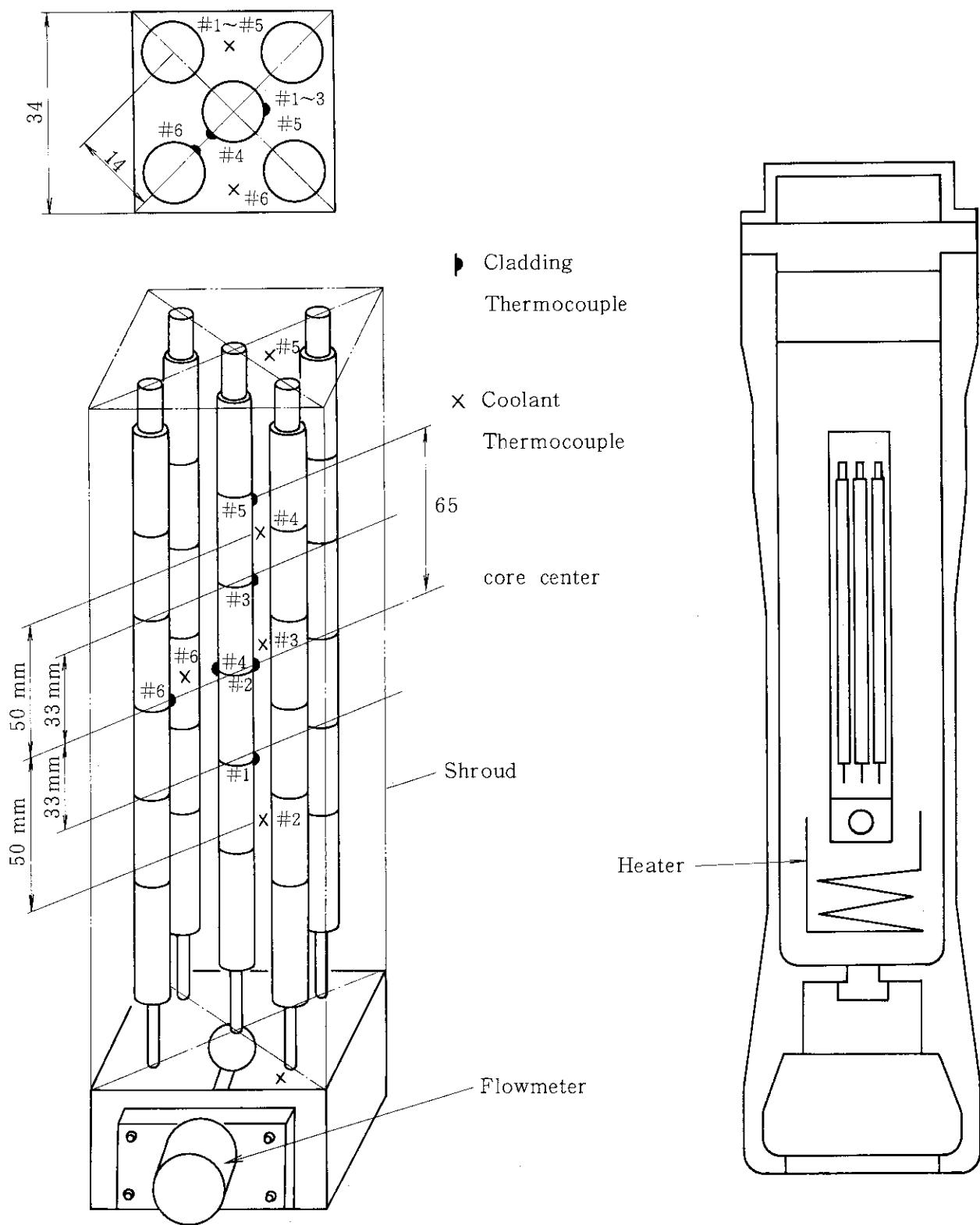


Fig. 2.2.6 Test arrangement and major instrumentations of the bundled rod test No. 312-45

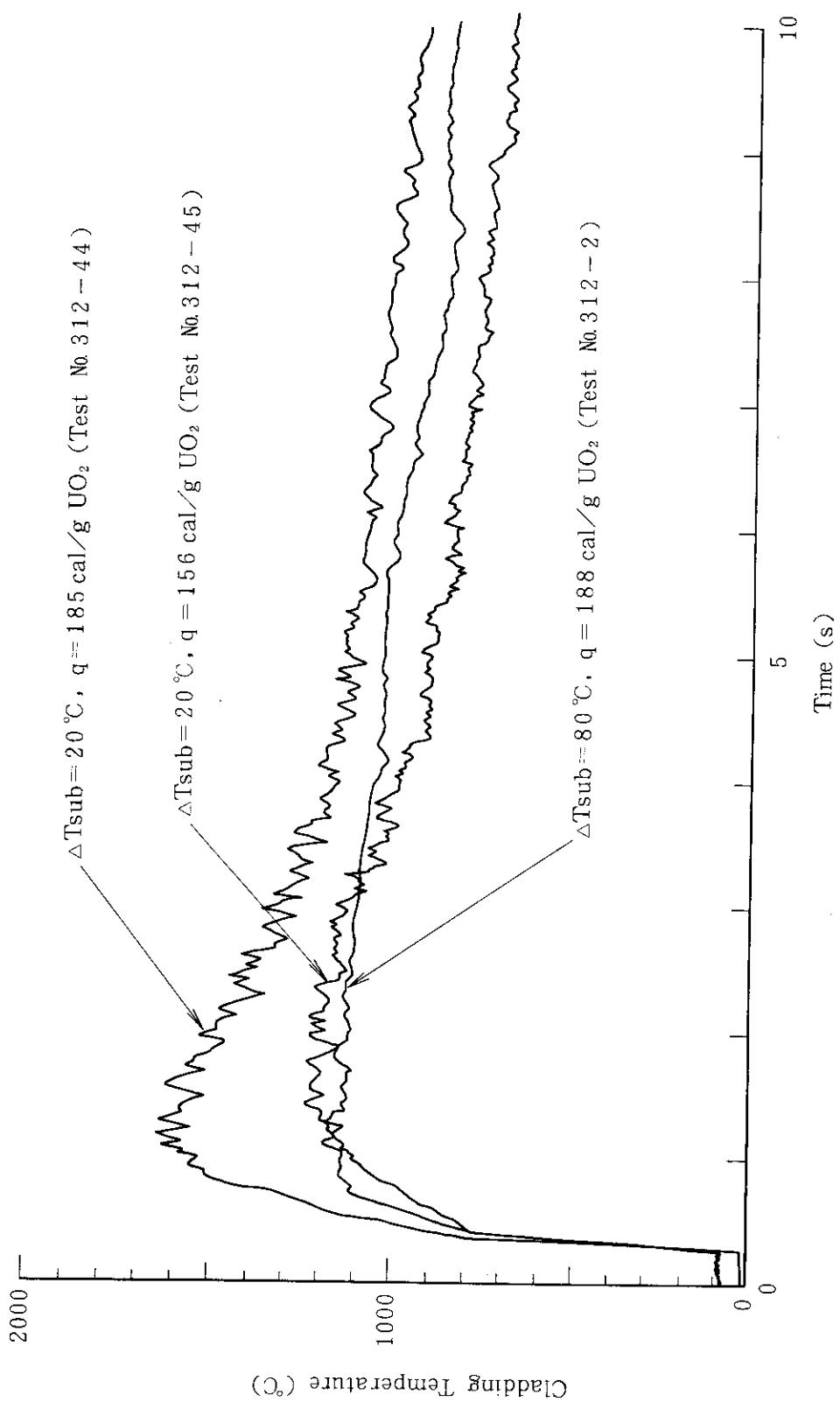


Fig. 2.2.7 Comparison of cladding temperature histories of center rod in 5-rod bundle tests

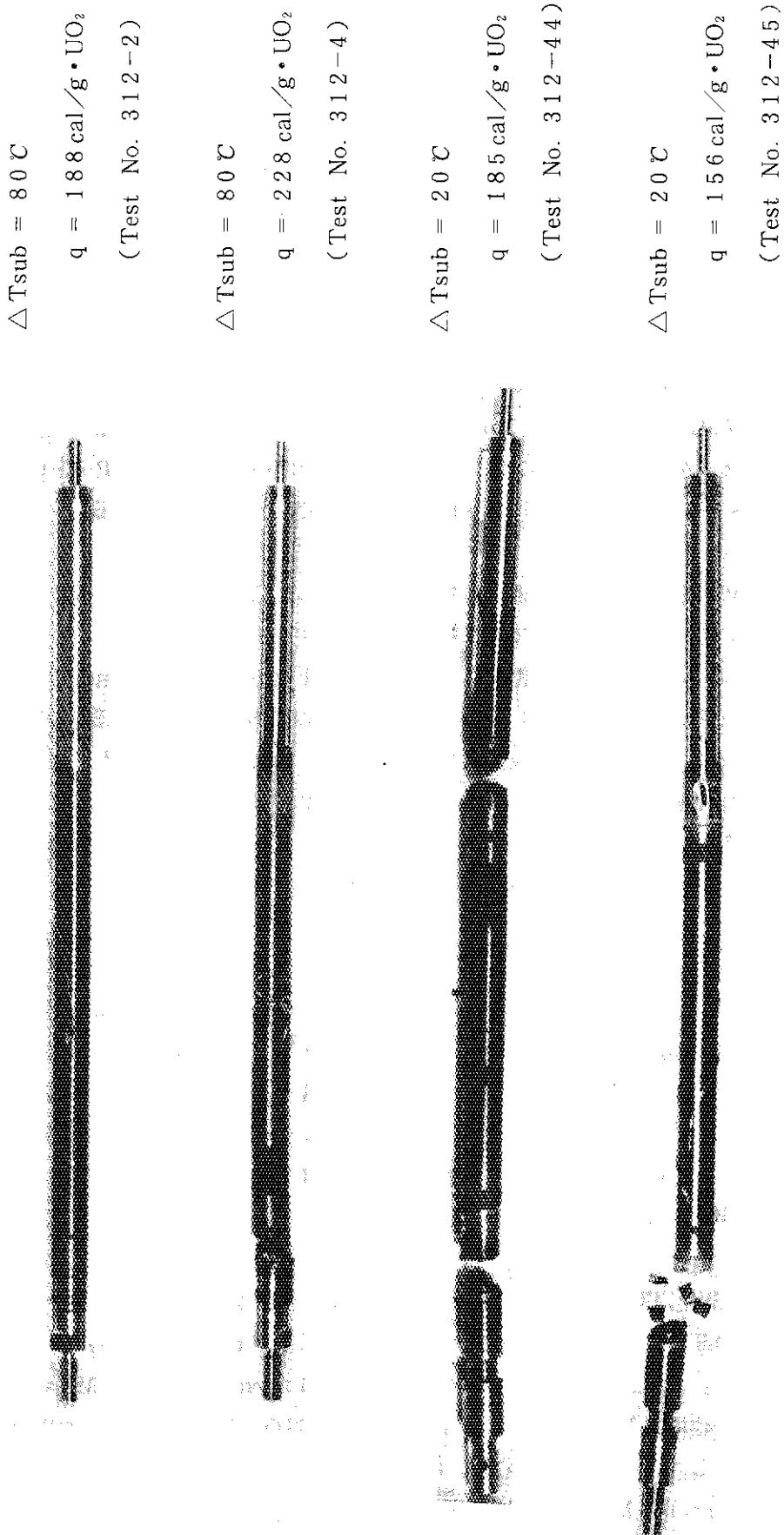


Fig. 2.2.8 Post-test appearance of the center rods in bundled rod experiments

## 2.3 欠陥燃料実験

### 2.3.1 摩擦腐食燃料実験 (吉村 富雄, 落合 政昭)

#### (1) 概要

本実験の目的は、被覆管にフレッティング腐食等の摩耗欠陥をもつ燃料棒の破損しきい値や破損挙動が、健全被覆管燃料の場合とどのように異なるかを明らかにすることである。本期は燃料初期内圧を0.35 MPaと0.7 MPaに加圧した摩耗被覆管加圧燃料の大気圧水カプセル実験を4回（Test No. 115-45, 46, 47 & 48）実施した。

#### (2) 実験方法

Test No. 115-45と48の2つの実験は、被覆管に小型ヤスリで最大深さ： $d = 0.5 \text{ mm}$  の摩耗欠陥を作りて試験燃料とし、前者は燃料初期内圧： $P_0 = 0.35 \text{ MPa}$ 、発熱量を $214 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 、後者は $P_0 = 0.7 \text{ MPa}$ 、発熱量を $175 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ とした加圧燃料実験である。またTest No. 115-46と47の実験は同様の方法で $d = 0.3 \text{ mm}$  の摩耗欠陥を作り、 $P_0 = 0.7 \text{ MPa}$ 、発熱量は $243 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ と $224 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の条件で照射した実験である。

#### (3) 実験結果と考察

Test No. 115-45の実験では、被覆管表面温度は $1380^\circ\text{C}$ 、燃料内圧は $0.38 \text{ MPa}$ に上昇したが燃料破損は生じていない。照射後燃料では欠陥部中央が小さくふくれていた。

本実験における発熱量は、 $d = 0.5 \text{ mm}$  の摩耗欠陥をもつ非加圧燃料の破損しきい値 $230 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ より若干低い $220 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 程度を目指したものであるが、計測記録では $214 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ と更に低かった。しかし照射後燃料の状況からは、これまでの低加圧燃料の破損しきい値近傍でみられた欠陥部の軸方向クラックの発生もなく、破損までに予裕もみられるので、 $d = 0.5 \text{ mm}$  の摩耗欠陥燃料では、燃料初期内圧を $0.35 \text{ MPa}$ に加圧しても非加圧の場合との破損しきい値の差は小さいといえる。即ち、 $0.35 \text{ MPa}$ 程度の燃料初期内圧は破損しきい値に影響を及ぼさないといみなすことができる。

Test No. 115-46と47の2つの実験は、 $d = 0.3 \text{ mm}$  の摩耗欠陥燃料で燃料初期内圧を $0.7 \text{ MPa}$ とした場合の破損しきい値を求める目的としている。前者の発熱量 $243 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の実験では燃料は破損したが、後者の発熱量 $224 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の場合には燃料破損は生じなかった。被覆管表面温度は夫々最高 $1380^\circ\text{C}$ と $1320^\circ\text{C}$ と高く、照射後燃料では両者とも酸化脆化による軸方向の長いクラック（約 $30 \text{ mm}$ ）が多数みられた。全体的なクラック数は後者の方が多かったのは、前者ではパルス照射の約1秒後に欠陥部に貫通クラックを生じて燃料内圧が降下したためそれ以後のクラック発生がなかったためと考えられる。変形量は両者とも $1.14 \sim 1.19 \text{ mm}$ とほど等しかった。

健全被覆管の $0.7 \text{ MPa}$ 加圧燃料の破損しきい値は非加圧の場合と同じく $260 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ であったが、 $d = 0.5 \text{ mm}$  の摩耗欠陥燃料は非加圧の場合より低い $187 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で破損した（Test No. 115-43）。Test No. 115-48の実験は $d = 0.5 \text{ mm}$ 、 $P_0 = 0.7 \text{ MPa}$ の摩耗被覆管加圧燃料の健全限界を確認するために発熱量 $175 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の条件で照射した実験である。被覆管表面温度は $1100^\circ\text{C}$ 、燃料内圧は $0.8 \text{ MPa}$ に上昇したが燃料破損は生じなかった。本実験により、 $d = 0.5 \text{ mm}$ 、 $P_0 = 0.7 \text{ MPa}$ の摩耗被覆管加圧燃料の破損しきい値は約 $180 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ とみなし得ることがわかった。

摩耗被覆管加圧燃料に関するこれまでの実験結果を総合して、欠陥部最大深さが 0.5 mm と 0.3 mm の場合の破損しきい値を、健全被覆管燃料の場合と合せて Fig. 2.3.1 に示す。d = 0.5 mm の摩耗欠陥加圧燃料の破損しきい値は、健全被覆管加圧燃料のそれと比較して、 $P_o = 1.3 \text{ MPa}$  の場合約 40 cal/g・UO<sub>2</sub> 低く、 $P_o = 0.7 \text{ MPa}$  では約 80 cal/g・UO<sub>2</sub> 低い 180 cal/g・UO<sub>2</sub> となること、同様にして d = 0.3 mm の場合は  $P_o = 1.3 \text{ MPa}$  で 20 cal/g・UO<sub>2</sub>、 $P_o = 0.7 \text{ MPa}$  では約 30 cal/g・UO<sub>2</sub> 低くなること等が明らかとなった。また破損機構は  $P_o = 1.3 \text{ MPa}$  の場合はいわゆる高温バースト型であるのに対し、 $P_o = 0.7 \text{ MPa}$  では酸化脆化による軸方向クラックの発生という違いがあることも明らかとなった。

今後は照射後燃料の金相検査および炉外での摩耗被覆管の高温バースト試験等を行い摩耗被覆管加圧燃料の破損特性をより明確にするとともに、実用炉の熱流動条件下で 28,000 時間の長時間耐久試験を終了し、実際的な疲れや摩耗をもつ被覆管を用いた実用摩耗被覆管燃料について確認実験を行う。

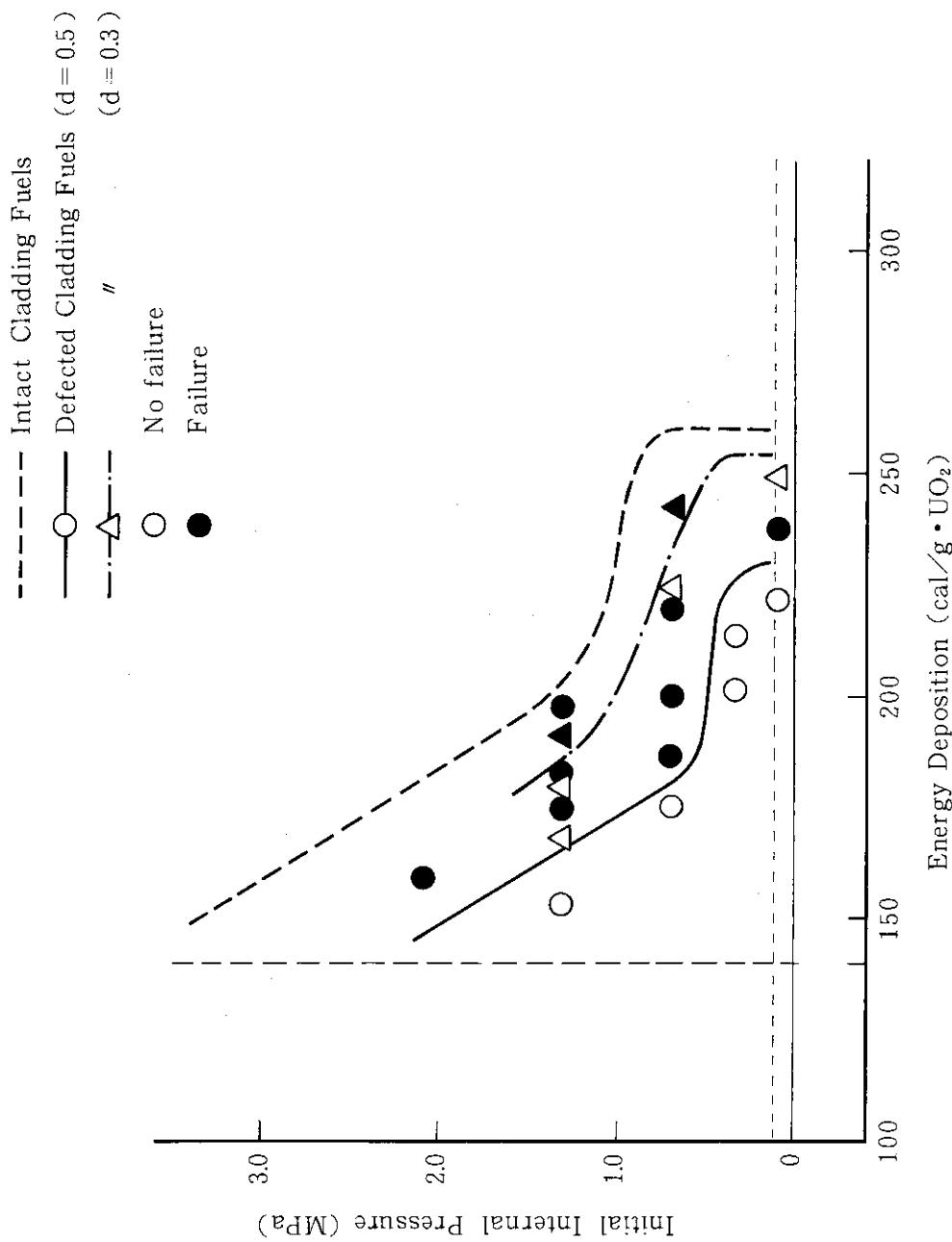


Fig. 2.3.1 Fuel Failure Threshold in Pre-pressurized Fuel Rods

## 2.4 燃料損傷実験（塩沢周策）

### (1) 概要

燃料損傷実験は、シビアアクシデント（Severe Accident）条件下での燃料損傷挙動を究明するための実験であり、事故の初期条件としてはTMI事故に見られたような炉心露出事故を想定している。従って、燃料棒の雰囲気としては気体であり、反応度事故条件下での水中の実験と異なることが大きな特徴の一つである。

これまで、燃料棒の溶融挙動を調べる目的で発熱量、燃料棒の初期条件（被覆管外表面の酸化膜厚）及び雰囲気条件（酸化性及び非酸化性雰囲気）をパラメータとして計10回の実験を実施してきた。その結果、被覆管の一部が溶融しても、外側に非溶融の安定化 $\alpha$ -相又は $ZrO_2$ 相がある厚さ以上あれば、被覆材は溶融落下せず、被覆管の偏肉のみが生じることが分った（A-15）。

そこで、今期は、溶融落下が生じない限界の酸化膜厚さを求めるための実験を1回（Test No.810-5）及び被覆管に破裂口が存在した場合にその破裂口からの溶融落下が生じるか否かを調べるための実験を2回（Test No.810-6及び810-7）実施した。

### (2) 実験条件及び詳細目的

実験は、いずれも、 $14 \times 14$  PWR寸法、10%濃縮燃料1本を内部カプセル内に封入した体系で行った。内部カプセル内は実験の目的に応じてヘリウム又は空気の気体雰囲気とした。過渡計測としては、Test No.810-6及び810-7において被覆管外表面温度測定を実施した。Test No.810-5においては、本実験に用いた燃料棒は予備酸化しているため、熱電対の取付が困難であることの理由により、特に計装は行わなかった。実験体系を示す実験カプセル及び計装の概略図をFig. 2.4.1に示す。

また、発熱量、雰囲気、燃料棒の初期状態を示す実験条件をTable 2.4.1に掲げる。

Test No.810-5では、被覆管の温度を安定化 $\alpha$ -相（oxygen-stabilized  $\alpha$ -phase）の融点約1,950°C以上にした場合、外側の $ZrO_2$ 相（融点約2,700°C）がどの程度の厚さであれば被覆材の溶融落下が防げるかを調べることを目的として、270 cal/g・ $UO_2$ で予備照射した（Test No.240-12）燃料を用いた。本実験前の被覆管酸化膜厚さは約100 μmと推定される。なお、本実験では雰囲気はヘリウムの非酸化性雰囲気を目標としたが、後述するように僅かな空気が混入していたものと評価できる。発熱量は被覆管温度が1,950°C～2,400°Cになる約250 cal/g・ $UO_2$ とした。

これまでの燃料損傷実験より、酸化性雰囲気では被覆管外表面に形成される酸化膜が「るつぼ」の役割をして内面の金属被覆管部が溶融しても被覆管に貫通孔或は破裂口が存在する場合は、これらの開口部より溶融被覆材が流れ落ちる可能性がある。このため、Test No.810-6及び810-7では、燃料棒を予備加圧し、トランジエント初期において被覆管を内圧破裂させることを計画した。初期内圧は7.1 MPaとしたが、被覆管が内圧破裂する温度は800°C以下と推定できる。発熱量は、Test No.810-6では、 $\beta$ -ジルカロイの融点（約1,800°C）と安定化 $\alpha$ 相の融点（約1,950°C）の間に被覆材温度が達すると予想される210 cal/g・ $UO_2$ とし、Test No.810-7では被覆管温度が1,950°C～2,400°Cに達する250 cal/g・ $UO_2$ とした。両実験において、雰囲気は十分に酸化が生じる空気とし、被覆管の予備酸化は特にを行わなかった。

## (3) 結果及び考察

## (i) Test № 810-5

照射後燃料棒は、Fig. 2.4.2 に示すように 5 つに分断し、著しい被覆材の偏肉が認められたが、被覆材の溶融落下は無かった。被覆管の温度は厚肉部を除き、安定化  $\alpha$  相の融点以上に達していることが金相観察より明らかとなった。被覆管外表面の酸化膜厚は約  $100 \mu\text{m}$  であった。一般に、ヘリウム（非酸化雰囲気）中で昇温すると、酸化相 ( $\text{ZrO}_2$  相) 中の酸素は、安定化  $\alpha$  相又は  $\beta$  相中に拡散し、 $\text{ZrO}_2$  相は全く無くなるか、薄くなるが本実験ではほど初期厚のまゝであった。このことは、内部カプセル中に僅かな空気が存在していたためと考えられ、照射中に新たに形成される  $\text{ZrO}_2$  量と、安定化  $\alpha$  相中に拡散して失われる  $\text{ZrO}_2$  量とが結果的にはバランスしていたと判断できる。内部カプセル中に空気が存在していた事は、Fig. 2.4.2 からも明らかである。同図において、上部プレナム部において被覆管外表面は僅かに酸化して黒色に変色している。照射前は、このプレナム部は変色しておらず金属光沢をしていた。これらの事実は、内部プレナム部に酸素（空気）が存在していたことを示している。なお、プレナム部の温度は高々  $1,000^\circ\text{C}$  程度である。

本実験の結果としていえることは、本実験の条件では、被覆管の金属部が完全に溶融しても外側に  $100 \mu\text{m}$  以上の酸化膜があれば、酸化膜が「るつぼ」の役割をして被覆材の溶融落下は無いということである。

## (ii) Test № 810-6 及び 810-7

両実験において被覆管は内圧破裂して、破裂口が認められたが、被覆材の溶融落下は無かった。

Test № 810-6 では、破裂口の大きさは  $8.65 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$  の楕円形であり、被覆管最大外径は破裂部で  $13.45 \text{ mm}$  であり、その他の部分では最大でも  $12.0 \text{ mm}$  であった。被覆管の有意な溶融を示す偏肉は認められなかった。一方、Test № 810-7 では、燃料棒は 2 つに分断し被覆管の偏肉を示す表面の波打ちが認められた。外観上表面の損傷は著しく、随所にクラックが存在していた。特に、金相観察は行っていないが、少くとも Test № 810-7 では被覆管の金属部の大部分は溶融していたものと外観から判断できる。

以上のことより、本実験に関する限り、被覆管の金属部が溶融し、破裂口が存在しても被覆材の溶融落下は無いといえる。理由としては、破裂口付近では被覆管が膨らみ燃料ペレットとのギャップ幅が大きくなり被覆管が溶融しなかったあるいは仮に多少流れ落ちたとしてもすぐに冷却されてしまい（本実験条件では、被覆管が融点以上の高温を保つ時間は高々 2 ~ 3 秒である）固化してしまうためと考えられる。今後、破裂口付近を中心に金相試験を行う予定である。また、電気ヒーターを補助的に使用して、高温維持時間を長期化させる実験を計画している。

なお、被覆管の表面温度は、両実験とも最高  $1,800 \sim 1,850^\circ\text{C}$  を記録して熱電対が破損している。破裂時間、温度を示す信号は熱電対記録からは求められなかった。

Table 2.4.1 Test conditions in severe fuel damage experiments

| Test No. | Energy depositions<br>(cal/g • UO <sub>2</sub> ) | Environmental gas | Pre-condition of test fuel rod   |
|----------|--|-------------------|--|
| 810-5    | 250  | He + (Air)        | Pre-irradiated in water at 27.0 cal/g • UO <sub>2</sub> in RIA test (Test No. 240-12). Oxide thickness of cladding outer surface presumed to be ~100 μm. No fuel rod failed. |
| 810-6    | 210  | Air               | Pre-pressurized to 7.1 MPa in order to produce burst split during early stage of transient.  |
| 810-7    | 250  | Air               | ditto.   |

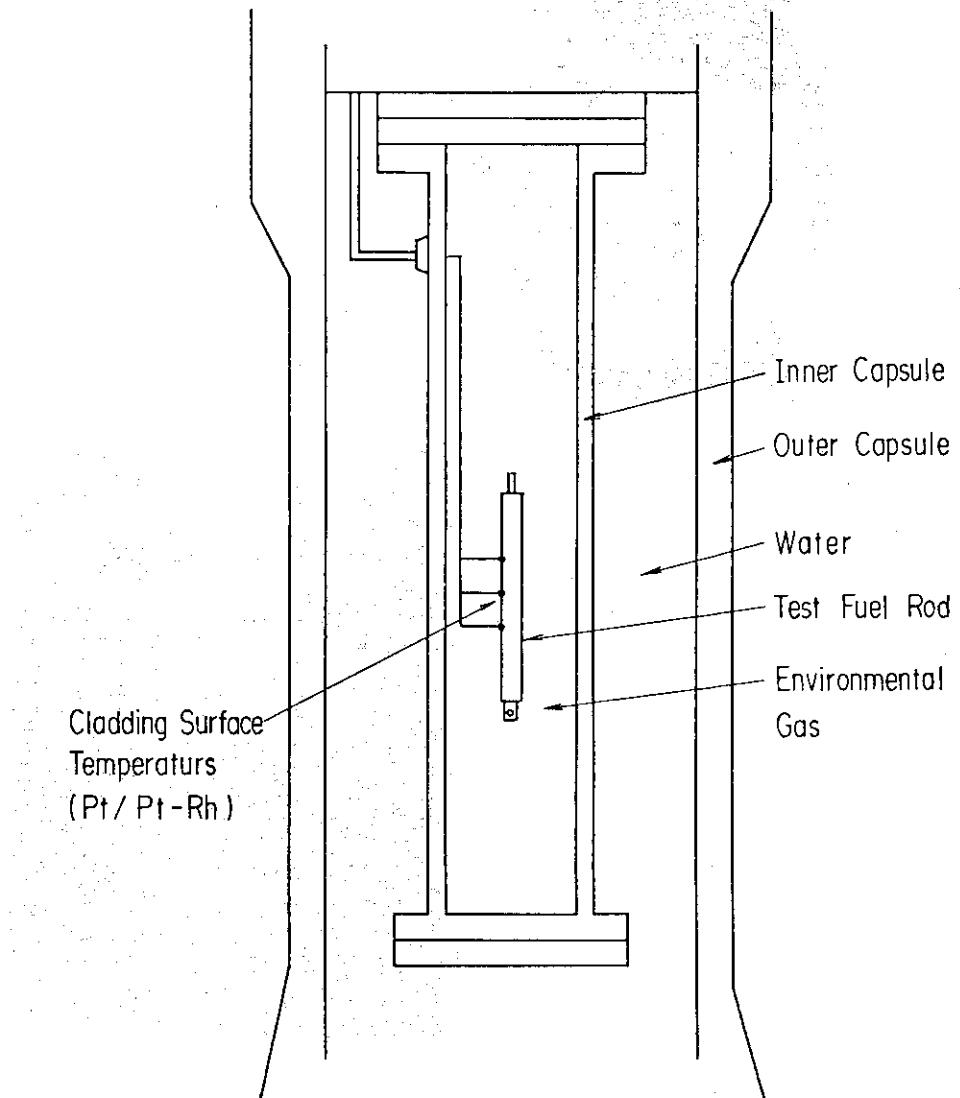


Fig. 2.4.1 Schematic of test capsule and instrument

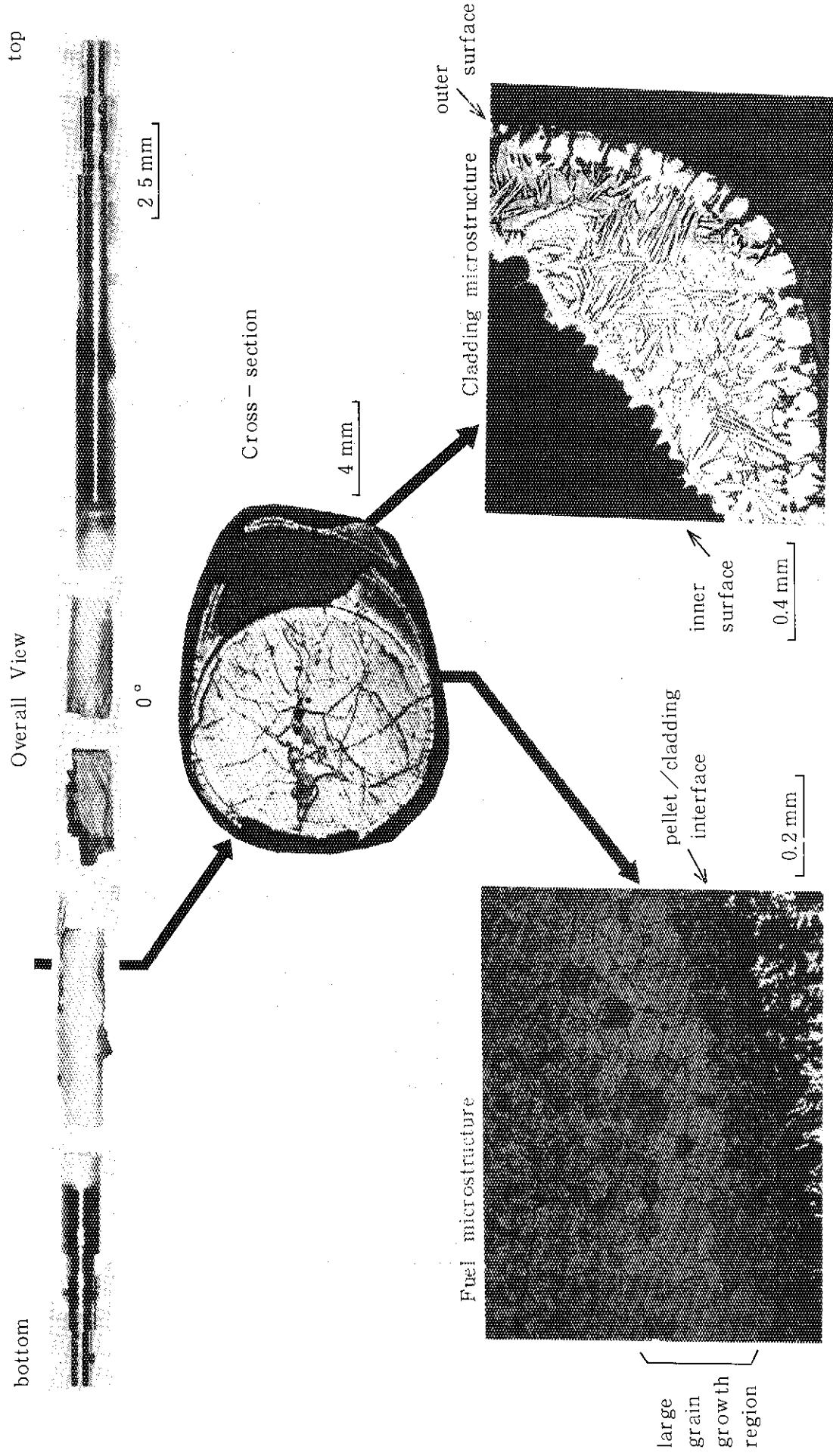


Fig. 2.4.2 Post-test fuel rod appearance, cross-section and metalographies in Test No. 810-5

## 2.5 特殊燃料実験

### 2.5.1 多目的高温ガス炉燃料実験 (稻辺 輝雄, 柳原 敏)

#### (1) 概要

本実験は、多目的高温ガス炉用燃料の反応度事故条件下における破損挙動を解明することを目的としている。多目的高温ガス炉用燃料は、多数の被覆燃料粒子を円筒状の黒鉛マトリックス内に分散させた構造となっており、特に実験上は、被覆燃料粒子の破損しきい値を把握すると共に、破損による黒鉛マトリックスへの影響を調べることを目的としている。実験回数は全部で4回を予定し、このうち初めの2回（実験No.520-4及び520-5）を前期実施し、今期は残りの2回（実験No.520-6及び520-7）を実施した。

#### (2) 実験方法及び実験条件

多目的高温ガス炉型実験燃料の概要を、Table 2.5.1 及び Fig. 2.5.1 に示す。燃料は、外径 21.7 mm (肉厚 1.65 mm) の SUS 被覆管内部に、5 個の円筒状燃料コンパクトを装填したものである。燃料コンパクトは、外径 18 mm、内径 9 mm、高さ 18 mm の黒鉛マトリックス中に、被覆燃料粒子（直径 600  $\mu\text{m}$  の球状  $\text{UO}_2$  を炭素及び炭化ケイ素で4重に被覆）約 2600 個を分散させたものである。5 個の燃料コンパクトには、それぞれ上から順に、濃縮度が 4%, 4%, 8%, 8%, 20% の  $\text{UO}_2$  が用いられている。Fig. 2.5.1 に示すように、上部及び中央部の燃料コンパクトの内面には、それぞれ 1 本ずつ CA 熱電対 (1.0 mm  $\phi$  SUS 316 シース付) を取り付けた。

この実験燃料 1 本を、室温・大気圧の純水とともに大気圧水カプセルに入れ、パルス照射実験に供した。今期実施した 2 回の実験（実験No.520-6 及び 520-7）における炉心の積分出力は、それぞれ 3.8 MW $\cdot$ s 及び 4.8 MW $\cdot$ s であった。これによる実験燃料の発熱量は、各燃料コンパクト中の U-235 濃縮度により異なるが、実験No.520-6においては平均約 460 cal/g $\cdot$  $\text{UO}_2$ 、実験 No.520-7においては平均約 570 cal/g $\cdot$  $\text{UO}_2$  であったと推定される。実験時には、燃料コンパクトの内面に取り付けた熱電対の指示値を記録するとともに、実験後には、燃料棒の外観・寸法検査及び X 線写真撮影を行った。

#### (3) 実験結果

実験No.520-6 及び 520-7 の結果を、前期行った実験の結果と合わせて、Table 2.5.2 に整理して示す。又、今期の実験で測定した燃料コンパクト内面温度の時間的変化を、Fig. 2.5.2 に示す。4% 濃縮燃料コンパクトにおける温度 (TC #1) は、パルス出力発生後約 2 秒で最高値に達し、その値は約 180 °C ~ 210 °C であった。又、8% 濃縮燃料コンパクトにおける温度 (TC #2) は、パルス出力発生後約 5 秒で最高値に達し、その値は約 290 °C ~ 330 °C であった。Fig. 2.5.3 には、これまでの 4 回の実験で測定した燃料コンパクト内面最高温度を、燃料発熱量に対して整理したグラフを示す。この図より、コンパクト内面最高温度は、燃料発熱量に対してほぼ比例していることが分かる。

今期実施した実験を含め、これまでの 4 回の実験において、燃料棒の外観には何の変化も認められず、又被覆管の変形等も見られなかった。Fig. 2.5.4 には、4 回の実験の中で最大の発熱量を与えた実験No.520-7 の照射後の燃料棒 X 線写真を示す。X 線写真では、どのコンパクトにおいても被覆燃料粒子は球状を保っているように見え、燃料粒子の破損の有無を識別することは出来ない。実験後の燃料棒については、燃料工学部・燃料照射研究室において、現在破壊検査等を進めている。

Table 2.5.1 Design characteristics of the test fuel.  
for test series 520.

Fuel Compact

Composition of a compact:

Fuel particles scattered in a graphite cylinder.

Outside diameter: 18 mm

Inside diameter: 9 mm

Height per piece: 18 mm

Number of fuel particles per piece: ~2600

Fuel Particle

Composition of a particle:

UO<sub>2</sub> particle coated with carbon and silicon carbide.

Diameter of a UO<sub>2</sub> particle: 600 μm

Enrichment in U-235: 4%, 8%, 20%

Thickness of coating layers:

1st layer (C): 60μm, 2nd layer (C): 30μm,

3rd layer (SiC): 25μm, 4th layer (C): 45μm.

Diameter of a coated particle: 920 μm

Cladding

Material: Type 304 stainless steel

Outside diameter: 21.7 mm

Wall thickness: 1.65 mm

Fuel Rod

Total length: 265 mm

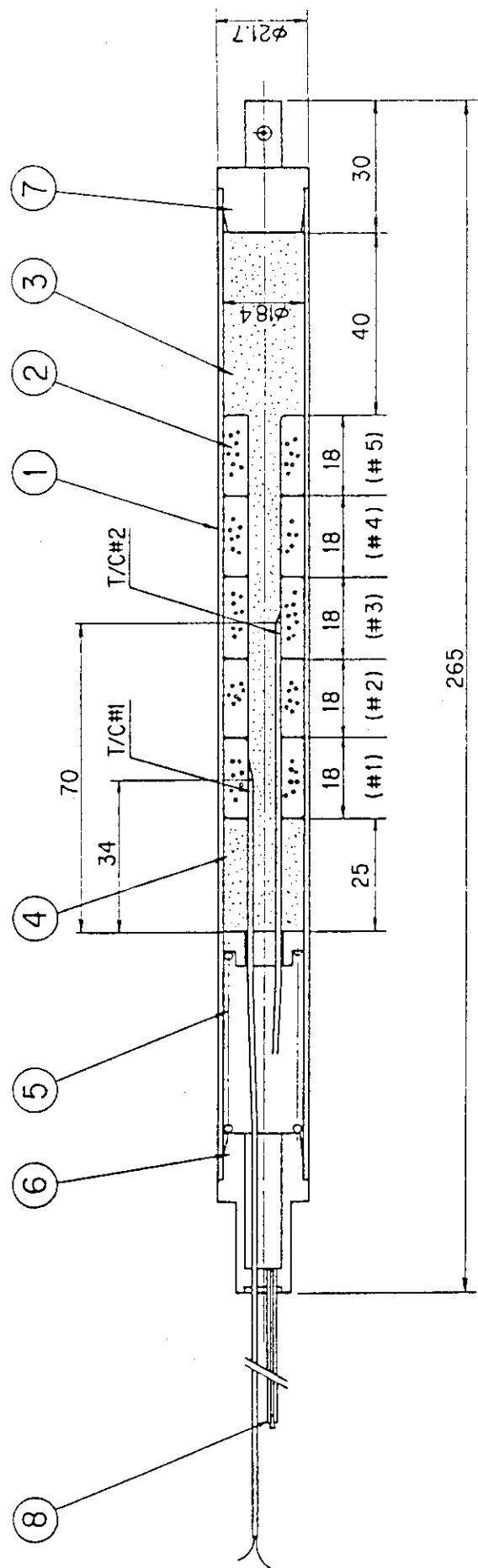
Number of fuel compacts: 5

Filler gas: Helium at 1 atmosphere

Table 2.5.2 Test conditions and major results of Tests  
520-4 through 520-7.

| Test No. | Core Energy Release (MW·s) | Expected Energy Deposition in Fuel* |  | Maximum Fuel Compact Inside Surface Temperature (°C) | Post-test Fuel Rod Appearance |
|----------|----------------------------|-------------------------------------|--|--|-------------------------------|
|          |                            | Enrichment (%)                      | Energy Deposition (cal/g·UO <sub>2</sub> ) |  |                               |
| 520-4    | 21                         | 4                                   | 121  | 106  | No visible change.            |
|          |                            | 8                                   | 243  | 186  |                               |
|          |                            | 20                                  | 560  |  |                               |
| 520-5    | 29                         | 4                                   | 162  | 137  | No visible change.            |
|          |                            | 8                                   | 326  | 244  |                               |
|          |                            | 20                                  | 752  |  |                               |
| 520-6    | 38                         | 4                                   | 214  | 178  | No visible change.            |
|          |                            | 8                                   | 430  | 285  |                               |
|          |                            | 20                                  | 992  |  |                               |
| 520-7    | 48                         | 4                                   | 269  | 208  | No visible change.            |
|          |                            | 8                                   | 542  | 331  |                               |
|          |                            | 20                                  | 1249                                       |  |                               |

\* The ratios of the energy deposition in the test fuel to the core energy release were assumed to be : 5.67 cal/g·UO<sub>2</sub>/MW·s (4% - enriched fuel), 11.4 cal/g·UO<sub>2</sub>/MW·s (8% - enriched fuel), and 26.3 cal/g·UO<sub>2</sub>/MW·s (20% - enriched fuel).



- ① Cladding (SST 304)
- ② Fuel Compact \*
- ③ Spacer (Graphite)
- ④ Spacer (Graphite)
- ⑤ Spring (Inconel 600)
- ⑥ Top End Fitting (SST 304)
- ⑦ Bottom End Fitting (SST 304)
- ⑧ Helium Filler Tube (SST 304)

\* Fuel compacts #1 to #5 contain enriched  $\text{UO}_2$  particles. Enrichment in U-235 in each compact is : 4% (#1, #2), 8% (#3, #4), 20% (#5).

Fig. 2.5.1 Test fuel rod for test series 520

Notes : TC # 1 at 4 % - enriched fuel compact.  
 TC # 2 at 8 % - enriched fuel compact.

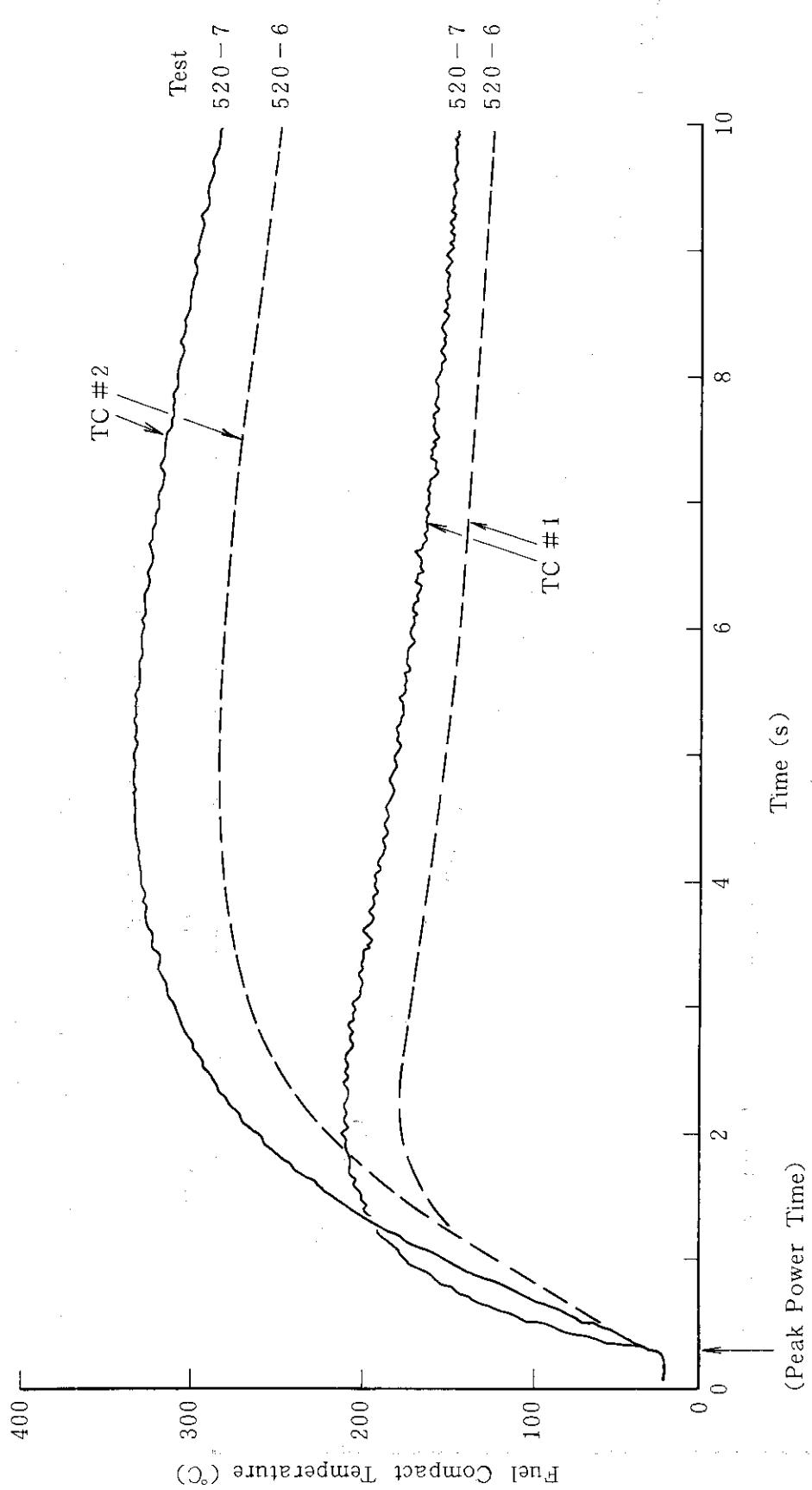


Fig. 2.5.2 Fuel compact inside surface temperature measured during Tests 520-6 and 520-7

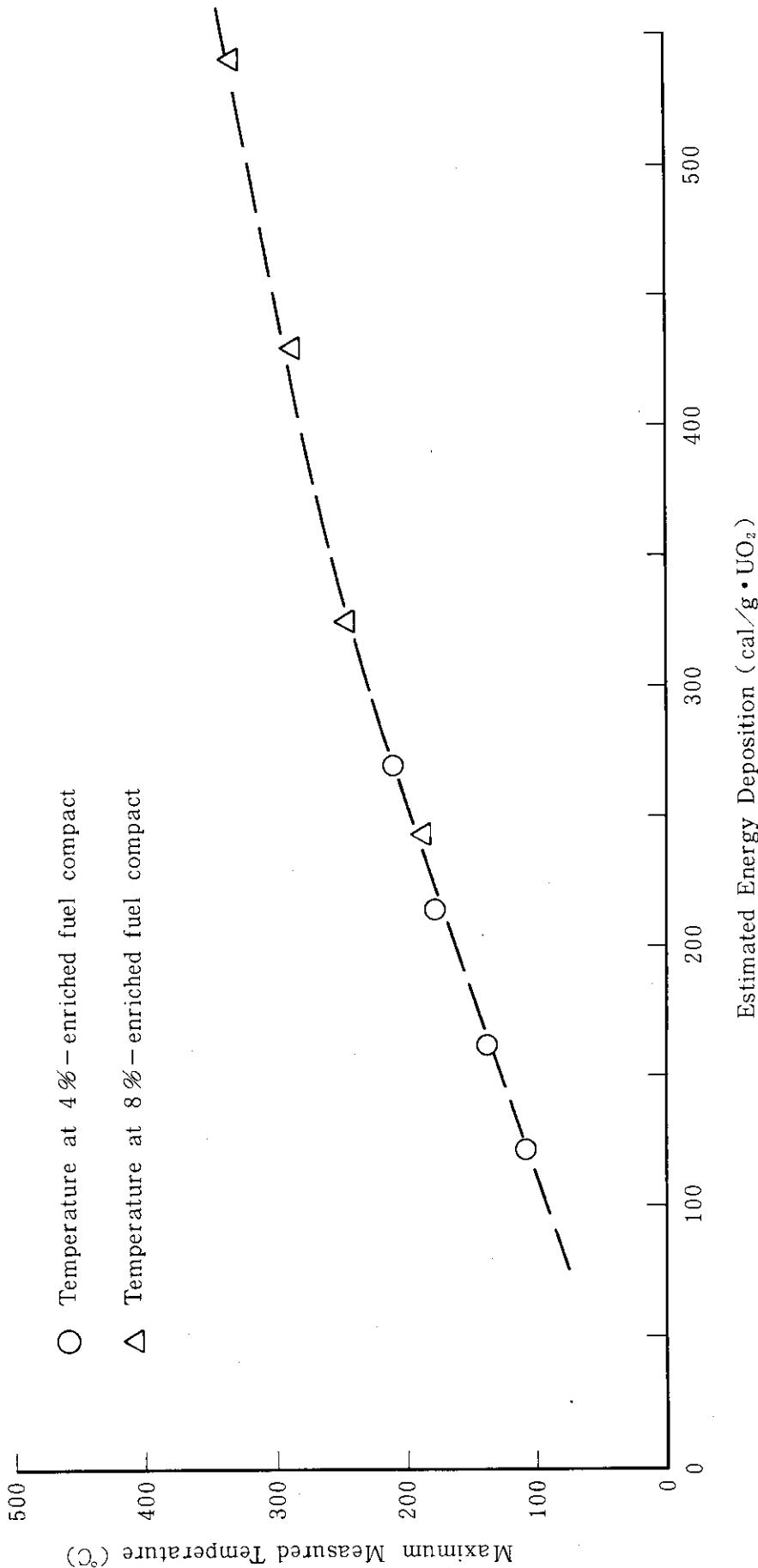


Fig. 2.5.3 Maximum measured temperature at fuel compact inside surface as a function of energy deposition

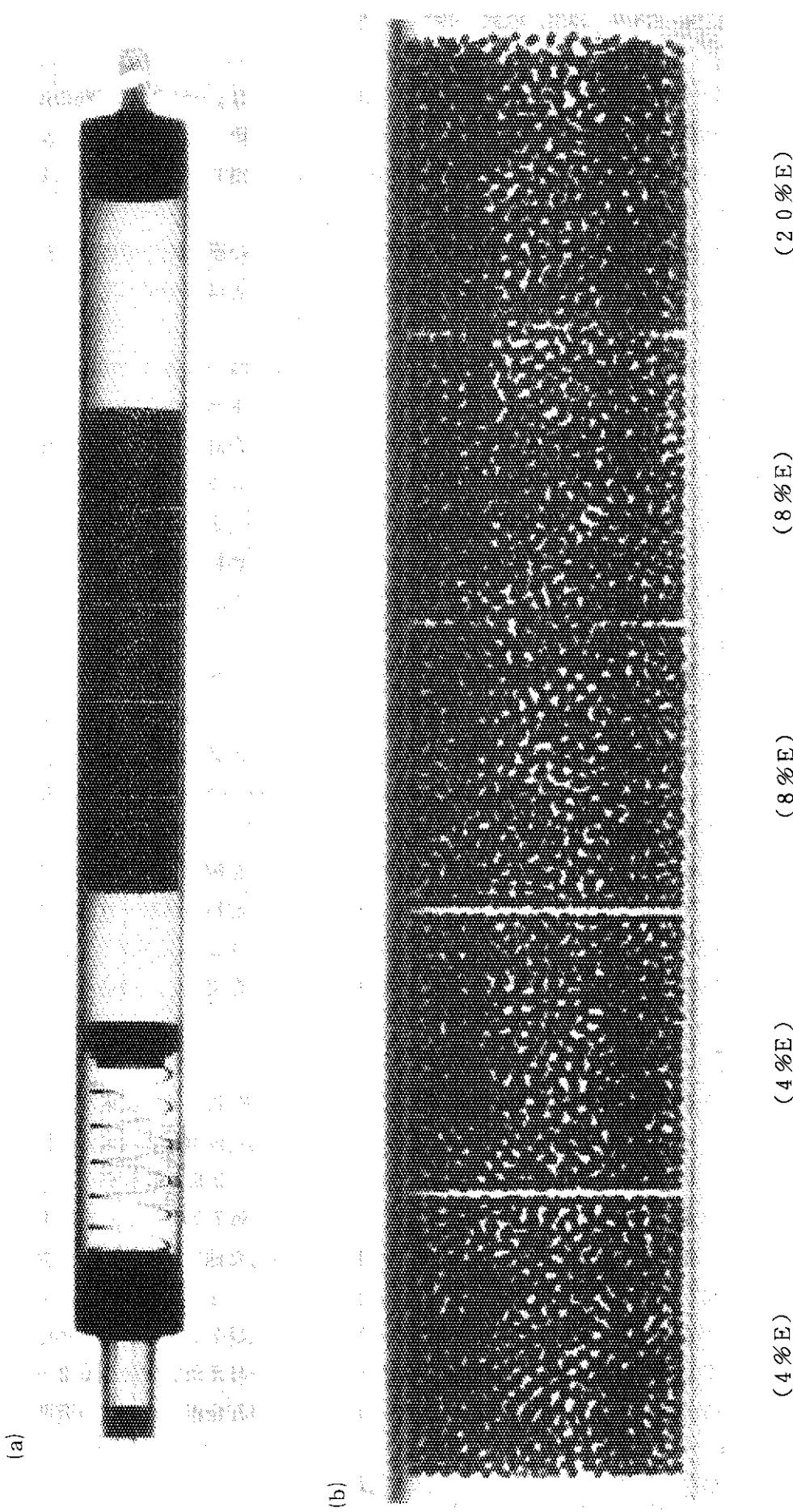


Fig. 2.5.4 X-ray photographs of the test fuel rod after Test 520-7 : (a) overall view, and (b) enlarged view of the fuel compacts

## 2.5.2 混合酸化物燃料実験 (稻辺 輝雄, 塩沢 周策, 斎藤 伸三)

### (1) 概要

本実験シリーズは、熱中性子炉用プルトニウムーウラン混合酸化物 ( $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ ) 燃料の反応度事故条件下における破損挙動を解明することを目的に、動燃事業団との共同研究として進めているものであり、第1次実験及び第2次実験から成る。第1次実験は昭和57年度に終了し、今期より第2次実験に着手した。

第1次実験においては、NSRR標準試験燃料 ( $\text{UO}_2$  燃料) と同一寸法の混合酸化物燃料に対し、合計10回の実験を実施して、同燃料の破損しきい値が標準試験燃料の場合とほぼ一致していることを確認した。

今期から開始した第2次実験においては、新型転換炉 (ATR) 型燃料と同一の径方向寸法を有する混合酸化物燃料を用いて、同燃料の破損しきい値を調べるとともに、プルトニウム・スポットの燃料破損に及ぼす影響を調べることを目的としている。第2次実験としては、合計12回の実験を予定しており、初めの5回の実験 (実験No.702-1～702-5) ではプルトニウム・スポット無しの燃料を用い、他の7回の実験では直径約 $400\text{ }\mu\text{m}$  (実験No.702-6～702-9) 及び約 $1100\text{ }\mu\text{m}$  (実験No.702-10～702-12) のプルトニウム・スポット付き燃料を用いる。今期は、このうち、プルトニウム・スポット無しの燃料に対する5回の実験を実施した。

### (2) 実験方法

第2次実験用の混合酸化物燃料の仕様を、Table 2.5.3に示す。今期行った実験においては、このうち、プルトニウム・スポット無しの燃料を用いている。実験に当っては、燃料1本を、内部カプセル及び外部カプセルから成る2重構造の大気圧水カプセル (I-N-D型カプセル) に装填し、パルス照射に供した。実験用計装は、被覆管表面温度測定用熱電対 ( $\text{Pt}/\text{Pt}-13\% \text{Rh}$ ) 3対及び水温測定用熱電対 (CA) 1対のみとした。

実験後は、NSRR施設において、2重カプセルのうち外部カプセルのみを解体し、燃料入り内部カプセルを動燃に搬出した。動燃側では、内部カプセル解体・燃料回収後、燃料の外観・寸法検査を実施し、又現在詳細な金相観察を進めている。なお、一部の燃料 (実験No.702-1及び702-2の燃料) については、再度原研に搬入し、発熱量較正のための放射化学分析を実施し、現在データの解析を進めている。

### (3) 実験結果

今期の5回の実験における燃料推定発熱量 (核計算に基づく推定値)、被覆管表面温度最高値及び燃料棒の変化の概要を、Table 2.5.4に示す。又、今期の実験で測定された被覆管表面最高温度を推定発熱量に対してプロットした図を、第1次実験の結果と合わせて、Fig. 2.5.5に示す。

今期の実験で最も低い発熱量 (推定発熱量 $144\text{ cal/g}$ ) を与えた実験No.702-2の燃料棒は、被覆管の一部が酸化によって変色していたが、これよりも高い発熱量を与えた他の燃料は、有効発熱部の被覆管表面が全面黒色化していた。又、 $235\text{ cal/g}$ 以上の推定発熱量を与えた燃料においては、被覆管の下部に貫通孔が生じており破損していた (実験No.702-3及び702-4)。Fig. 2.5.6には、今期の実験の中で最大の発熱量 (推定発熱 $263\text{ cal/g}$ ) を与えた実験No.702-3で破損した燃料の外観写真を示す。これらの燃料の破損原因については、現在金相観察により究明中である。

なお、本報に用いた発熱量は、予備解析として実施した核計算に基づく推定値であり、今後化学分析結果に基づく較正值が得られた時点で修正する可能性がある。

Table 2.5.3 Design characteristics of the test fuels  
for test series 702

PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> Pellet

|  |   |
|--|---|
| Diameter :   | 1 2.4 0 mm                              |
| Length :   | 1 3.0 0 mm                              |
| Density :  | 9 5 % T. D.                             |
| PuO <sub>2</sub> /(PuO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub> ) :                   | 1 0 w/o                                 |
| ( <sup>239</sup> Pu + <sup>241</sup> Pu)/Pu :                              | 8 0 %                                   |
| <sup>235</sup> U/U :   | 1 0 %                                   |
| Diameter of an artificially made plutonium spot on<br>the pellet surface : |   |
|  | none (for Tests 702-1 ~702-5)           |
|  | 4 00 $\mu$ m (for Tests 702-6 ~702-9)   |
|  | 1 100 $\mu$ m (for Tests 702-10~702-12) |

Zircaloy-2 Cladding

|                  |            |
|------------------|------------|
| Outer diameter : | 1 4.5 0 mm |
| Wall thickness : | 0.9 mm     |

Fuel Rod

Fuel stack length :  
117mm of PuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> pellets (9 pieces) with a 10mm  
natural-uranium oxide (UO<sub>2</sub>) pellet at each end.

Filler gas :

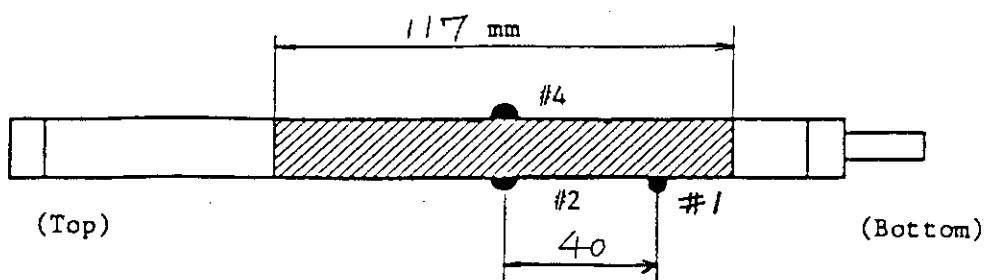
Helium at 0.1 MPa

Table 2.5.4 Test conditions and major results of  
Test 702-1 through 702-5.

| Test No. | Reactivity Insertion (\$) | Core Energy Release (MW·s) | Estimated Energy Deposition <sup>1)</sup> (cal/g·fuel) | Maximum Cladding Surface Temperature <sup>2)</sup> (°C) | Appearance of Post-test Fuel Rods            |
|----------|---------------------------|----------------------------|--|---|--|
| 702-1    | 3.26                      | 64                         | 192  | #1 : 1350<br>#2 : 1270<br>#4 : 1280                     | Discoloration of the cladding active region. |
| 702-2    | 2.65                      | 48                         | 144  | #1 : 820<br>#2 : 470<br>#4 : 300                        | Partial cladding discoloration.              |
| 702-3    | 4.00                      | 87                         | 263  | #1 : 1540<br>#2 : 1740<br>#4 : >1300                    | Cladding failure at lower part.              |
| 702-4    | 3.71                      | 78                         | 235  | #1 : 1500<br>#2 : 1550<br>#4 : 1460                     | Cladding failure at lower part.              |
| 702-5    | 3.42                      | 69                         | 208  | #1 : 1260<br>#2 : 1300<br>#4 : 1220                     | Discoloration of the cladding active region. |

Notes : (1) Energy depositions are preliminary values based on the physics calculations (3.02 cal/g/MW·s), and may be refined or revised after precise chemical analysis.

(2) The locations on the thermocouples #1~#4 are shown below.



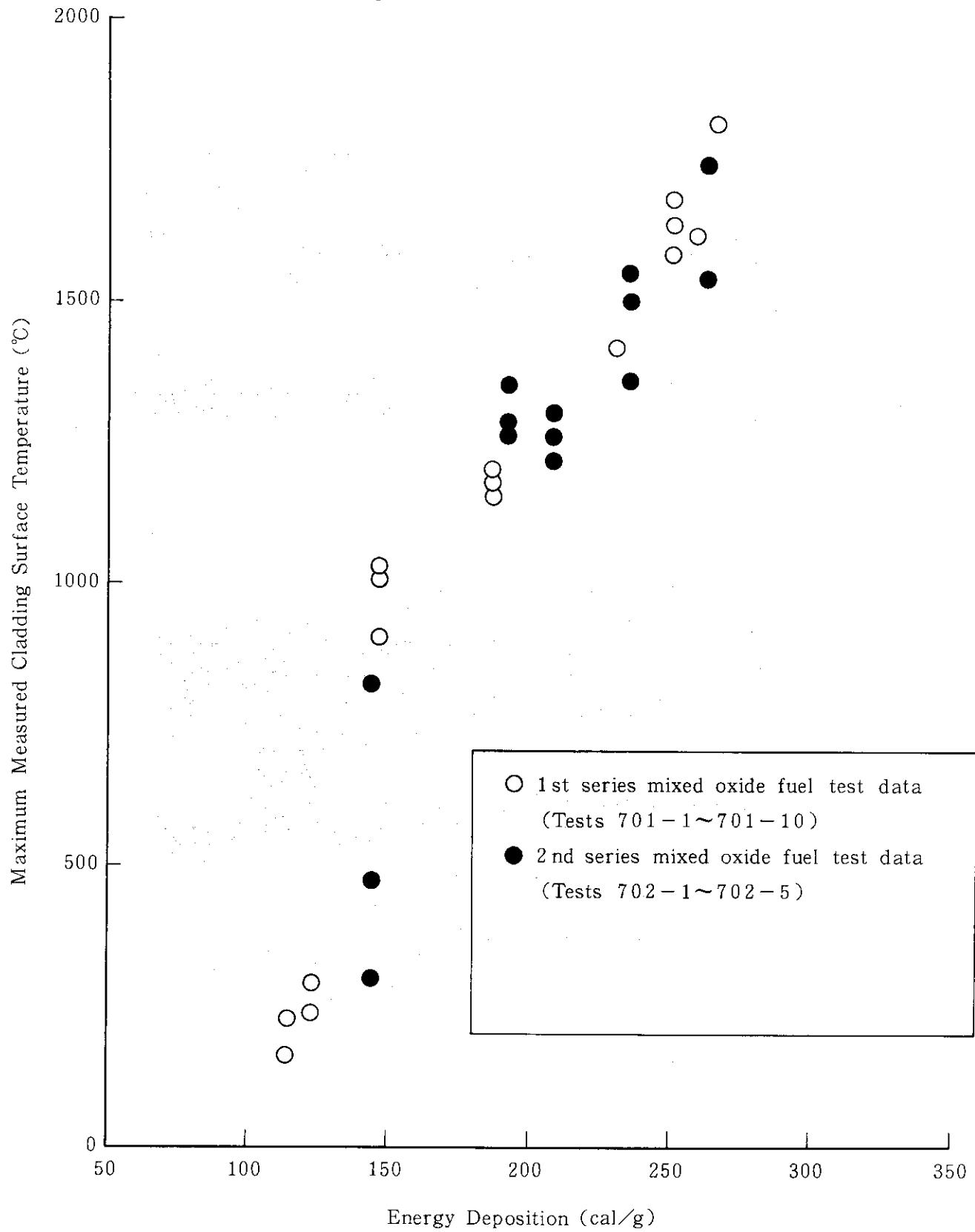


Fig. 2.5.5 Maximum cladding surface temperatures measured during the second series mixed oxide fuel tests (Tests 702-1~702-5) compared with those from the first series mixed oxide fuel tests (Tests 701-1~701-10)

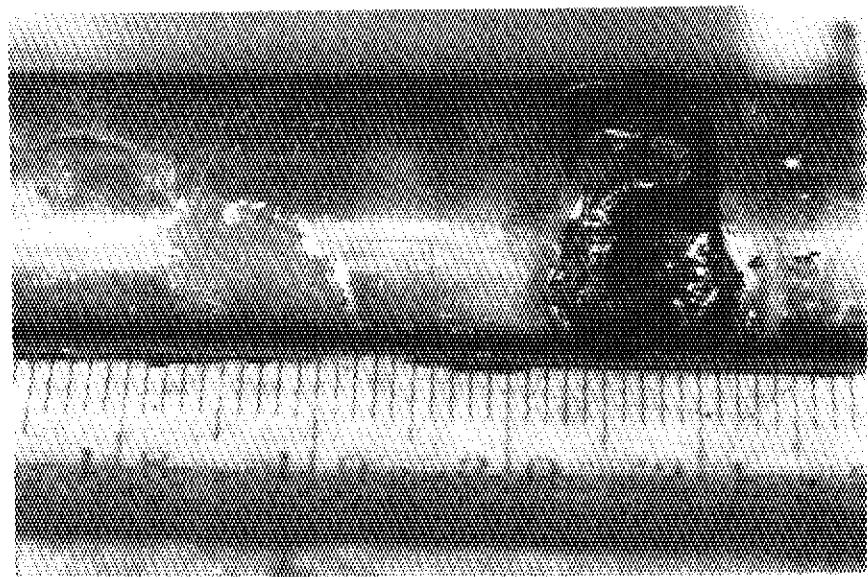
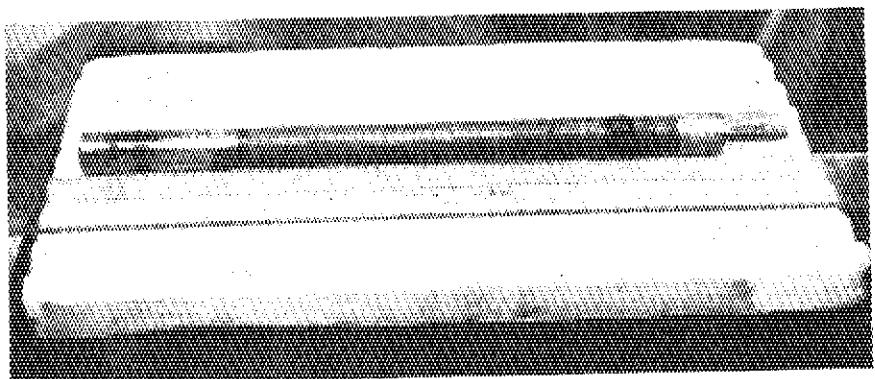


Fig. 2.5.6 Test fuel after irradiation in Test 702-3

## 2.6 その他

### 2.6.1 破壊力測定実験 (藤城 俊夫, 柳原 敏)

#### (1) 概要

NSRR 実験では、次期計画として燃焼の進んだ燃料（バーンアップ燃料）による実験を予定している。現在、このための施設改造を始めとする各種の準備が進められているが、その1つとして実験カプセルの開発がある。

このバーンアップ燃料実験に使用する実験カプセルは、高放射能レベルの破損燃料を格納するため、万一の漏洩に対して二重カプセル構造とし、かつ、内部カプセルはバーンアップ燃料の破損により生じる機械的な力に十分に耐えるように設計する必要がある。ところが、これまでに行われたバーンアップ燃料による反応度事故実験は非常に少なく、特に燃料破損で機械力を発生するような実験は米国 SPERT 実験の数例しかないので、上記のカプセル設計の基礎とするべきバーンアップ燃料破損時の機械力に関するデータは極めて不足している。このため、バーンアップ燃料破損時の機械力を評価し、併せて、この機械力によって生ずる実験カプセルの動的な変形挙動を調べる事を目的として本シリーズの実験が計画された。

燃料破損時の機械力を評価する場合に、バーンアップ燃料が新燃料と最も異っている点として考えられるのは、燃料棒内の FP 蓄積と被覆管の脆化である。前者は、FP ガス自身の噴出および FP ガス圧による溶融燃料噴出によって、共に機械力を増大させる効果を持つ。一方、後者は、被覆管が早期に破損すれば、燃料中に与えられたエネルギーが徐々に開放される事になるので、機械力発生を緩和する方向に働き、逆に、被覆管の耐力上昇によって破損時点が遅れば、機械力発生を助長するよう作用するが、いずれも破壊力発生に直接関与する因子ではないので、この後者の影響は前者に比べてさほど大きくはないものと考えられる。

このため、本実験においては、試験燃料内の封入ガス（ヘリウム）を予め加圧しておく事により、燃料棒内に蓄積された FP ガスの効果を模擬した。又、機械力の発生に対するカプセル形状、寸法の影響を考慮し、かつ、カプセルの変形応答を実機に近い条件で調べるため、実験に用いたカプセルは、内部カプセルとしてバーンアップ実験用カプセルの第1次設計の寸法に等しく製作したものを使い、これを従来から使用している大気圧カプセル内に収めて二重カプセル構造とした。

#### (2) 実験方法

Fig. 2.6.1 に本実験に使用した実験カプセルおよび実験計装の概要を示す。内部カプセルは、内径 72 mm、内り高さ 480 mm の円筒容器で、胴部の肉厚は 2.4 mm とした。試験燃料は、この内部カプセルの中央に燃料中心が NSRR 炉心中心と一致させるように固定した。外部カプセルには従来の大気圧カプセルを用い、内径は 120 mm、内り高さは 800 mm であり、この中で、内部カプセルは上蓋の下面から 3 本の支持棒により吊り下げる形に固定した。

実験計装としては、内部カプセル底および上蓋に圧力変換器を取り付け、これによって燃料破損時に発生する衝撃圧力および内部カプセル内の水塊が吹上げられ、カプセル上部のガスを急速に圧縮して生ずる水撃圧力を測定した。又、カプセルの変形応答を知るために、内部カプセルおよび外部カプセルの各所に歪ゲージを取り付け、動的な歪を測定した。又、参考データとして、カプセル内各部の水温も測定している。

#### (3) 実験結果および考察

Table 2.6.1 に今期実施した実験結果の概要を示す。実験は、発熱量較正のための実験1回、加圧燃料による実験5回、浸水燃料による実験2回の計8回実施した。実験パラメータとして、加圧燃料については初期加圧量と発熱量を変え、又、浸水燃料については満水燃料に対し与える発熱量を変え、これらの影響を調べた。

Fig. 2.6.2 a および Fig. 2.6.2 b に初期加圧量 3 MPa および 5 MPa の試験燃料に約 500 cal/g・UO<sub>2</sub> の発熱量を与えた場合に内部カプセル内で測定された圧力の時刻歴を示す。カプセル底の圧力  $P_1$  は、溶融燃料・冷却材相互作用 (FCI) により発生する衝撃圧力であり、又、カプセル蓋下面での圧力  $P_2$  は、蒸気の膨張力によってピストン状に吹上げられたカプセル内の冷却水塊が、カプセル上部の空気を急速に圧縮して生ずる水撃圧力パルスで、 $P_1$  から約 1 ~ 20 ms 遅れて発生する。これらの圧力パルス  $P_1$  および  $P_2$  の発生は、燃料初期圧力が 3 MPa の場合と 5 MPa の場合とで少し異なる挙動を示した。すなわち、燃料初期内圧 3 MPa の場合にはパルス照射の後半において燃料破損が生じ、同時に約 4 MPa<sup>\*</sup> の衝撃圧力と約 1.5 MPa の水撃圧力パルスが生じ、これで圧力発生は終了しているが、燃料初期内圧 5 MPa の場合にはこれら燃料破損と同時に生ずる圧力パルス以外に、これから約 3.2 ms 後に第2のより大きな圧力パルスの発生が観測された。この第2の圧力パルスの発生が、燃料内圧が高い事による影響であると断定するには、まだ根拠が十分ではないが、少くとも、従来実施してきた非加圧燃料や 5 MPa より低い初期内圧の燃料による実験では観察されず、今回、初期内圧を高くして始めて認められた現象ではある。この原因としては、①燃料内圧上昇によって被覆管の破損モードが変り、溶融燃料が2回に分れて冷却材中に放出された、②溶融燃料の放出は一度であるが、冷却材との予混合状態が形成され、それが何らかの衝撃圧が働いて爆轟的な FCI を生じた等が考えられるがこれらを証拠立てるデータは得られていない。

一方、浸水燃料については、発熱量 206 cal/g・UO<sub>2</sub> では破損せず、314 cal/g・UO<sub>2</sub> を与えた場合には破損して 3.8 MPa の衝撃圧力を発生した。従来の標準燃料に比べ、破損しきい値が高く、又、破損した場合の衝撃圧力が小さかったのは、本実験に使用した試験燃料が、バーンアップ燃料実験用として現在 JMT-R で予備照射を行っているものと同仕様で作製されており、燃料ペレット・スタックの両端に濃縮度 5% のペレット及び天然ウランのペレットを配置して出力ピーキングを抑制する構造であったためであると考えられる。

NSRR 実験カプセルは、燃料破損と共に発生する衝撃圧力および水撃力の2つの機械力に耐えるように強度設計が行われる。バーンアップ燃料実験カプセルに対しても、従来と同じく、衝撃圧力に対してはピーク圧力を設計条件とし、一方、水撃力に対しては、水塊に与えられる機械的エネルギーから負荷荷重を決定する。そこで、本実験の結果をカプセル設計に適用するために、衝撃圧力ピーク値および機械的エネルギー転換率を発熱量に対してプロットする整理を行ったのが Fig. 2.6.3 および Fig. 2.6.4 である。Fig. 2.7.3 には、本実験の結果の他に一重カプセルで実施した加圧燃料実験結果および本章の初めに述べた SPERT 実験の結果をプロットし比較し、さらに、従来の未照射燃料実験に対する設計評価曲線と、本シリーズの実験と SPERT 実験結果にもとづき作成した照射済燃料に対する評価曲線とを示した。この図のように、加圧燃料破損で生じる衝撃圧力ピーク値は非加圧燃料の場合のデータの上限値近くか、又はそれを超えるデータもあり、燃料初期内圧を高めたため

\* 図中の時刻歴は、計測器からの信号の記録であり、パルス照射による擬似信号が重畠しているため、より高い圧力値を示している。

の影響が明瞭に認められる。又、参考としてプロットした照射済燃料による S P E R T 実験結果は、今回の実験結果をさらに上まわる傾向を示しており、評価曲線はこの S P E R T 実験データも包絡する曲線として定められている。

一方、機械的エネルギー転換率は、水撃エネルギーを試験燃料に与えられた熱量で除したものとして定義される量である。本実験では、内部カプセル中に水塊の移動速度を測定するセンサを取り付ける事が出来なかったため、カプセル上蓋下面で測定した水撃圧力パルスにもとづき、空気部の断熱圧縮モデルにより水撃エネルギーの評価を行った。Fig. 2.6.4 はこの結果をプロットしたものであり、比較のため照射済燃料による S P E R T 実験の結果、および従来の非加圧燃料に対する評価曲線を示した。この結果から、機械的エネルギー転換率に関しては、加圧燃料も従来の評価曲線を下まわっており、非加圧燃料による結果と差が無いことが判明した。ただし、S P E R T 実験結果のプロットが示すように、照射済燃料では、未照射燃料の破損では機械的エネルギーが発生しない  $320 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  以下の発熱量でも機械的エネルギー発生が認められているので、カプセル設計用の評価曲線はこれを考慮して定められている。

Table 2.6.1 Summary of major test conditions and results

| Test<br>No. | Fuel Rod<br>Pressure<br>(MPa) | Energy<br>Deposition<br>(cal/g · UO <sub>2</sub> ) | Capsule Pressure<br>(MPa) |      |      | Mechanical<br>Energy Conversion<br>Ratio (%) | Comments         |
|-------------|-------------------------------|--|---------------------------|------|------|--|------------------|
|             |                               |  | P 1                       | P 2  | P 3  |  |                  |
| 260-1       | 0.1                           | 140  | --                        | --   | --   | --   | calibration test |
| 260-2       | 3.0                           | 363  | 0.66                      | 0.44 | 0.35 | 0.04   |                  |
| 260-3       | 3.0                           | 454  | 3.83                      | 1.24 | 6.8  | 0.18   |                  |
| 260-4       | 3.0                           | 499  | 4.61                      | 1.48 | 4.85 | 0.17   |                  |
| 260-5       | 5.0                           | 456  | 3.38                      | 4.22 | 2.05 | 0.11   |                  |
| 260-6       | 5.0                           | 493  | 21.0                      | 58.5 | --   | 0.28   |                  |
| 261-1       | (1)                           | 206  | --                        | --   | --   | --   | no failure       |
| 261-2       | (1)                           | 314  | 3.80                      | 0.6  | 0.3  | 0.05   |                  |

(1) Fully Waterlogged Rod

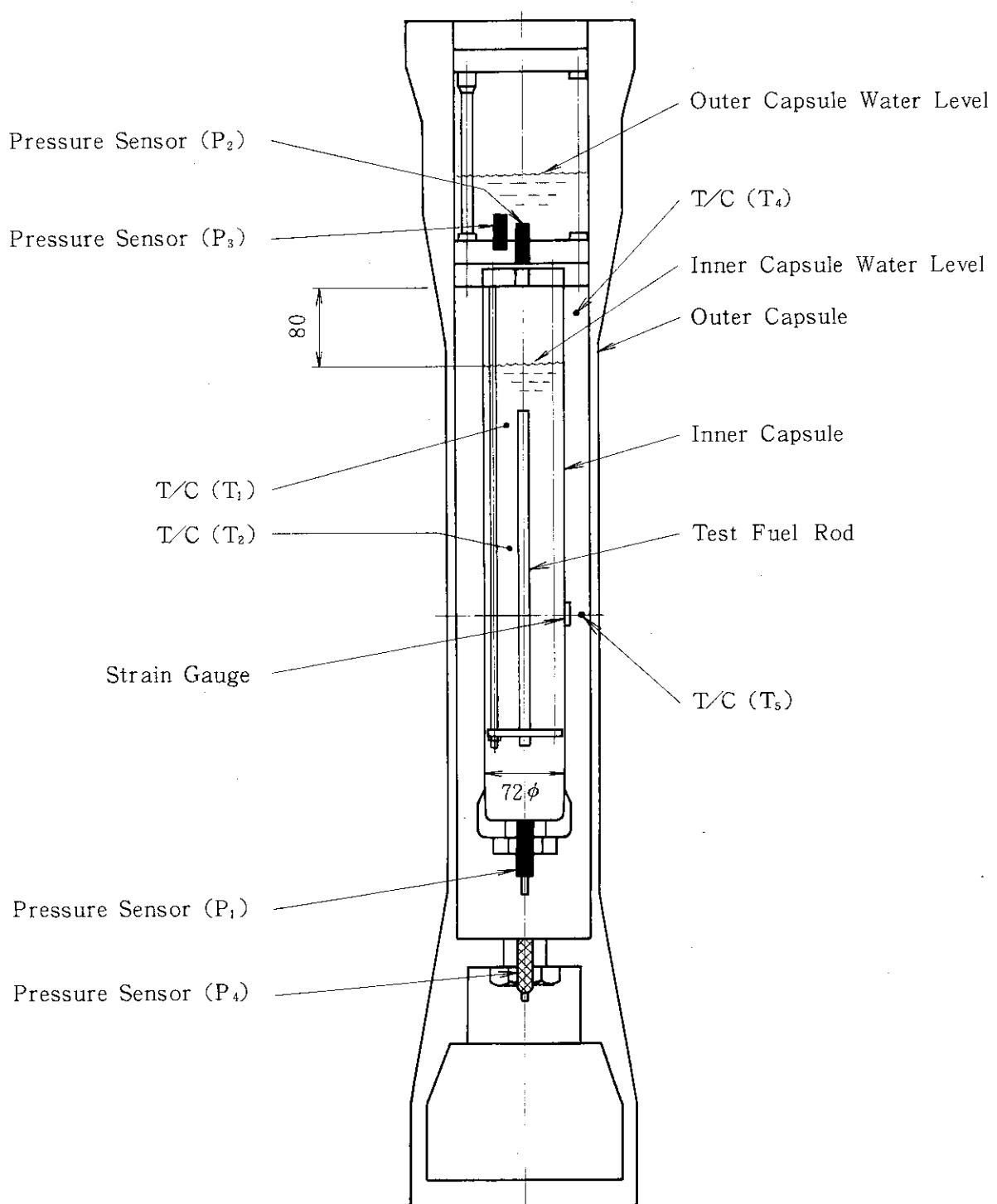


Fig. 2.6.1 Test capsule arrangement and instrumentations

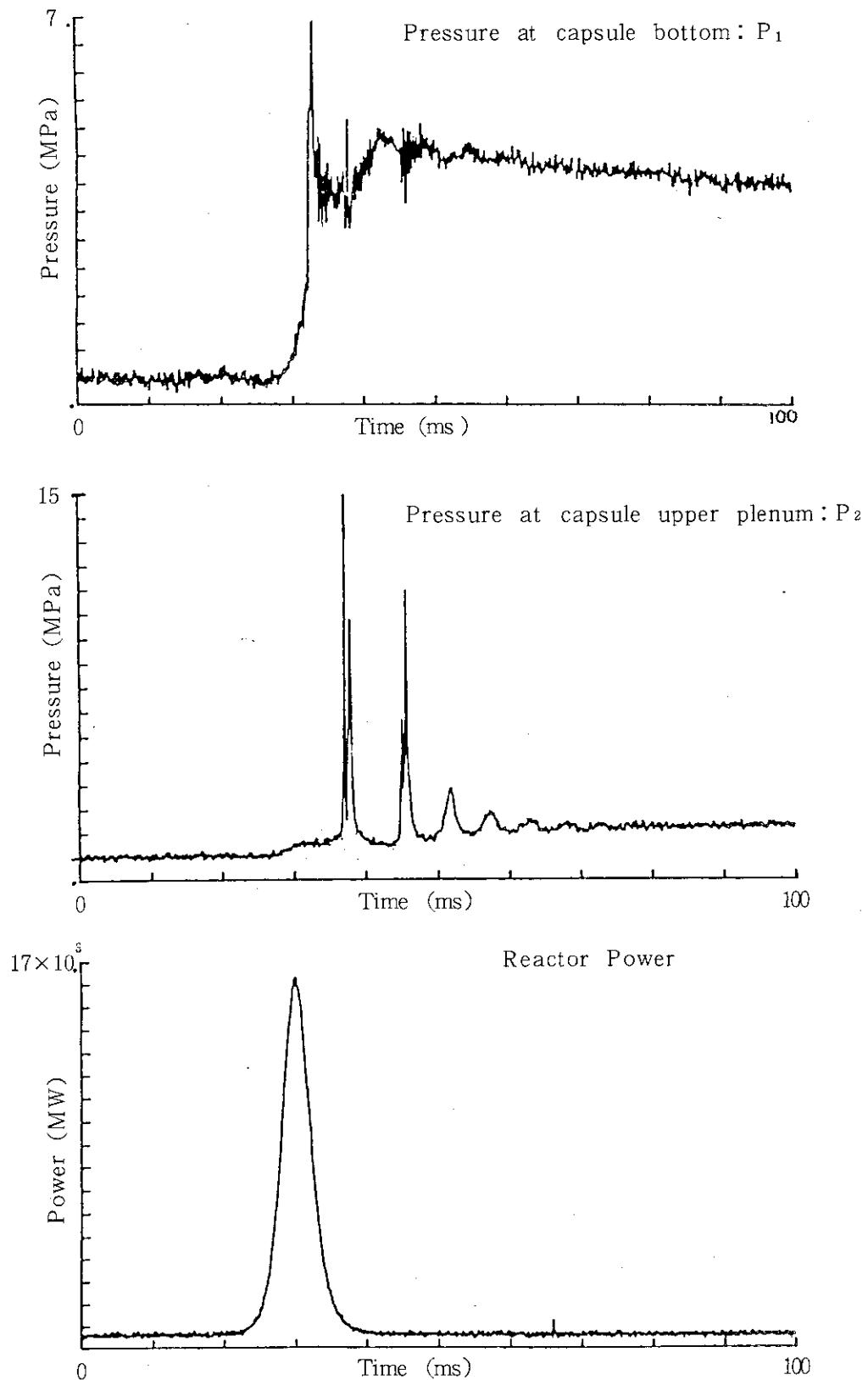


Fig. 2.6.2 - a Pressure histories at the bottom and top of the inner capsule measured at the rupture of a 3 MPa-prepressurized rod at 500 cal/g • UO<sub>2</sub>

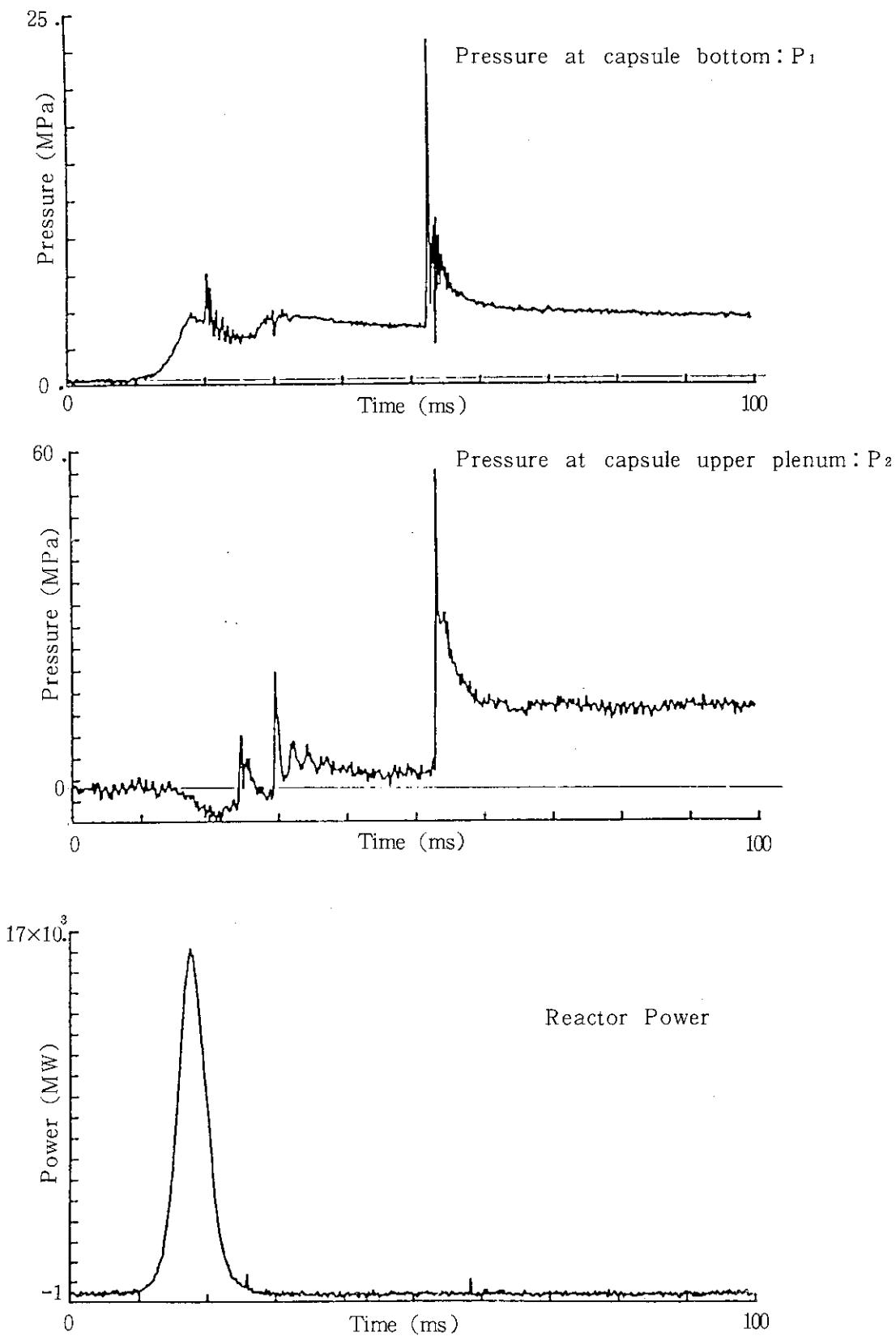


Fig. 2.6.2 - b Pressure histories at the bottom and top of the inner capsule measured at the rupture of a 5 MPa-prepressurized rod at 500 cal/g•UO<sub>2</sub>

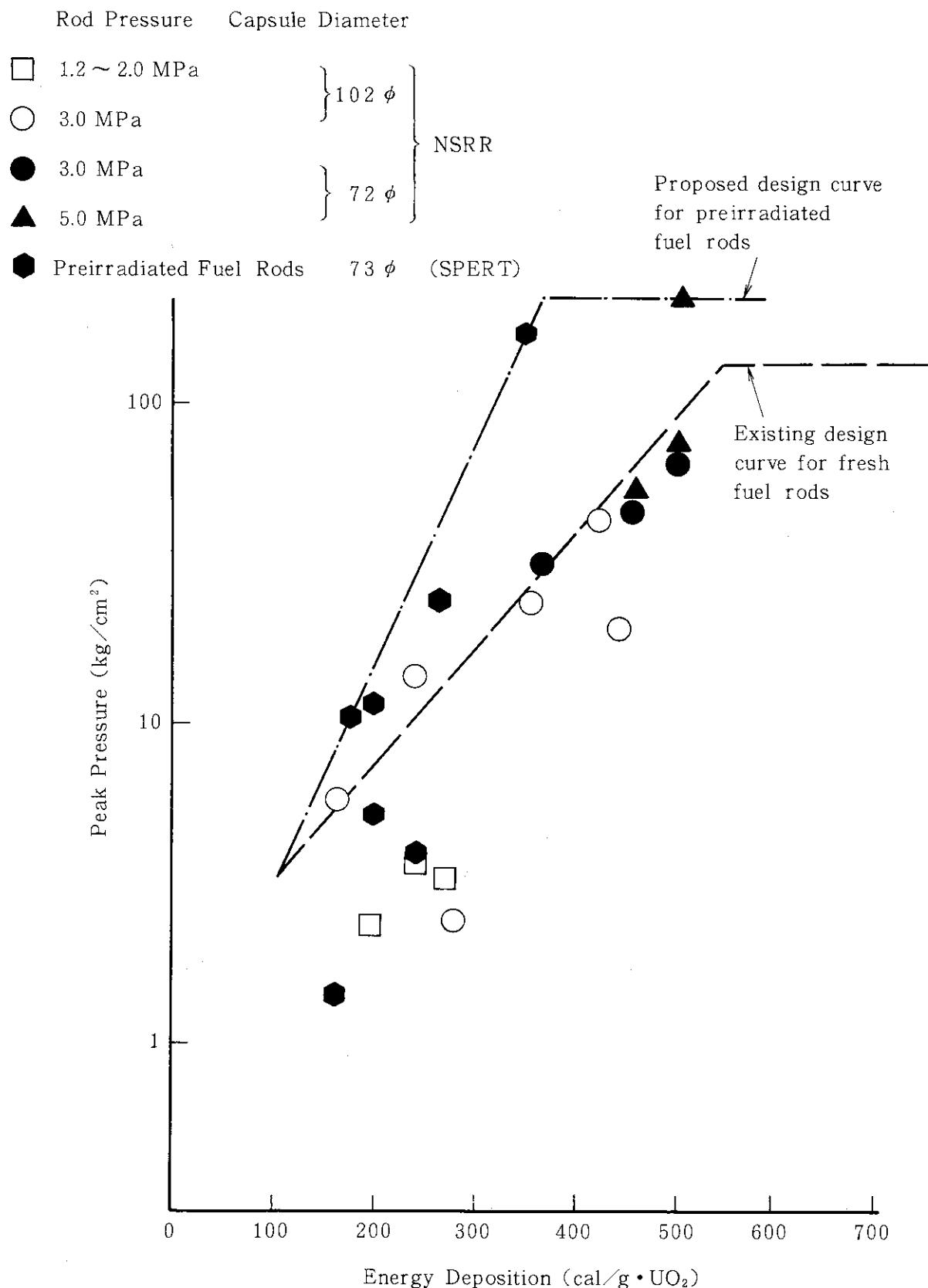


Fig. 2.6.3 Design curves for peak pressure and measured data plotted as a function of energy deposition

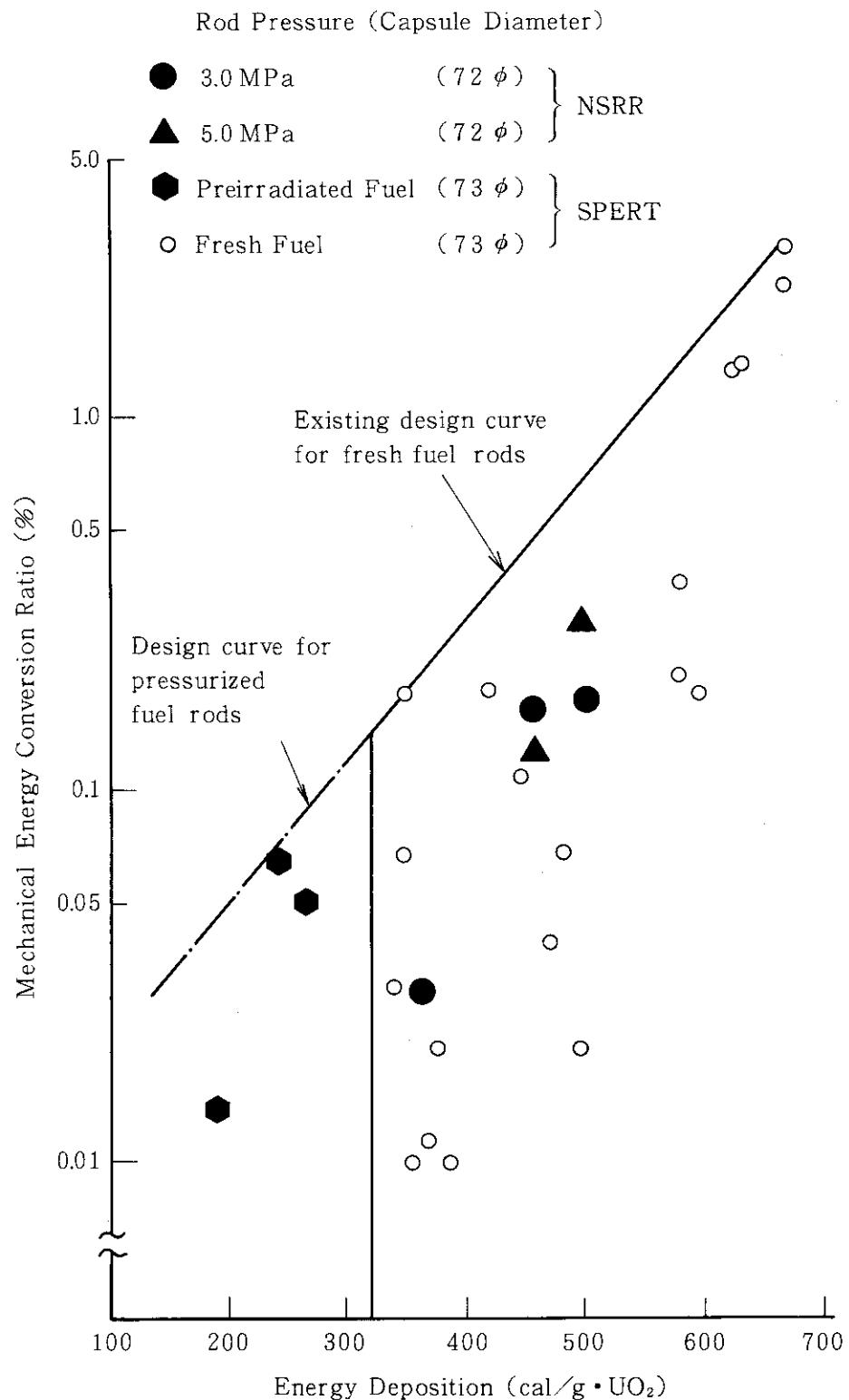


Fig. 2.6.4 Design curves for mechanical energy conversion ratio and measured data plotted as a function of energy deposition

## 2.6.2 変形量測定実験 (石島 清見, 中村 武彦)

本実験シリーズは、燃料棒変形をモデル化する目的で行われており、バルーニングによる被覆管の大変形測定用センサ開発実験 (Test No.251シリーズ), P C M I による被覆管の小変形測定用センサ開発実験 (Test No.252シリーズ), 及び, 歪ゲージを直接被覆管にはり付けて行う被覆管歪測定実験 (Test No.253シリーズ) に分類される。

### (1) 大変形測定実験 (251シリーズ)

#### (i) 概要

本実験シリーズは、炉内実験で被覆管ふくれの過渡挙動が測定可能な大変形測定センサの開発を目的としている。先期に統いて、歪ゲージを利用したセンサの炉内試験を行った。 (Test No.251-4)

#### (ii) 実験方法

予め  $12 \text{ kg/cm}^2$  に加圧した 10 %濃縮の標準実験燃料に被覆管温度測定用の熱電対 3 対と燃料内圧計、さらに大変形測定センサを 3 個、Fig. 2.6.5 に示すとおり、試験燃料の有効発熱部下端に取付けた。この部分は前回の実験 (Test No.251-3) で最も大きい膨張を生じた部分である。また、試験燃料には発熱量  $182 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を与えた。

#### (iii) 実験結果

Table 2.6.2 及び Fig. 2.6.5 に実験結果の要約と大変形測定センサの応答を示す。被覆管表面温度は最高  $980^\circ\text{C}$  に達し、被覆管変形量は最大  $0.6 \text{ mm}$ 、平均  $0.34 \text{ mm}$  となっている。照射後に行った寸法検査の結果、大変形測定センサ部での変形は、半径で平均  $0.36 \text{ mm}$  となっており、センサーの表示値とよく一致している。また試験燃料の照射後外観写真を Fig. 2.6.6 に示す。

#### (iv) 考察

Fig. 2.6.5 の大変形測定センサの過渡応答を見ると、センサ出力がパルス出力の直後大きく振動していることが分かる。これは主にセンサのはねの振動によるものと思われ、被覆管の変形の過渡変化を正確にとらえる為にはバネ定数の検討、或いはバネを使わない方式の検討が必要である。

また、照射後の外観写真に見られる様に、センサ取付け部では、試験燃料の膨張が小さくなっている。これは、センサ取付けにより局所的に冷却効率が改善されたことと、センサの接触圧力に起因していると考えられ、センサ取付け位置で膨張させる為には、有効長の短い燃料を使うなどの工夫が必要であると思われる。

Table 2.6.2 Summary of Test Results

| Test No.                                |         | 251-4                       |
|---|---------|-----------------------------|
| Energy deposition                       |         | 182 cal/g • UO <sub>2</sub> |
| Rod pressure                            | Initial | 12 kg/cm <sup>2</sup> g     |
|   | Maximum | 13.7 kg/cm <sup>2</sup> g   |
| Max. cladding<br>surface<br>temperature | # 1     | 910 °C                      |
|   | # 2     | 980 °C                      |
|   | # 3     | 840 °C                      |
| Cladding<br>deformation                 | # 1     | 0.43 mm                     |
|   | # 2     | 0 mm                        |
|   | # 3     | 0.6 mm                      |
| Max. diametral strain                   |         | 28 %*)                      |

Note \*) Measured after irradiation.

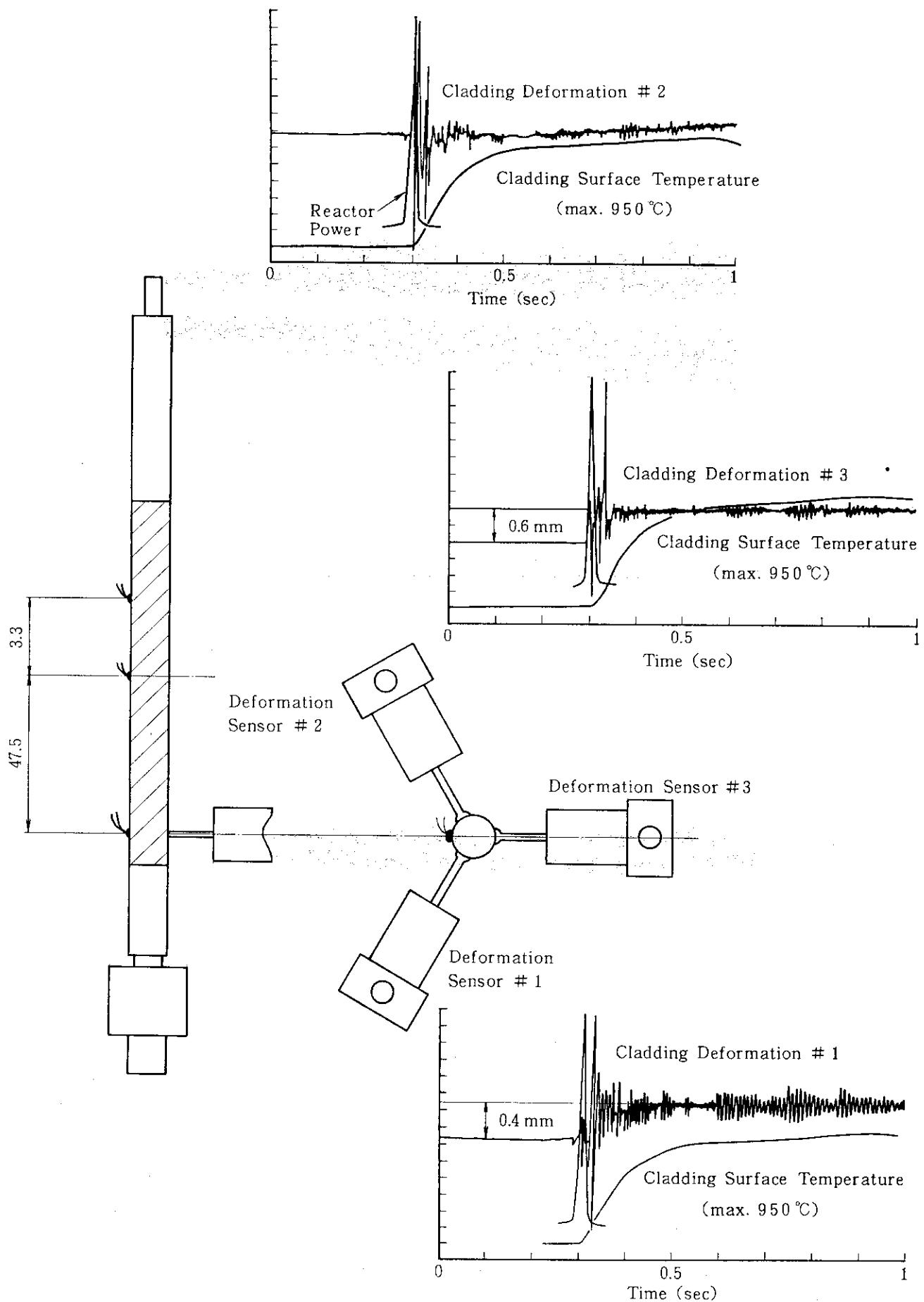


Fig. 2.6.5 Summary of the Results in Test No. 251-4

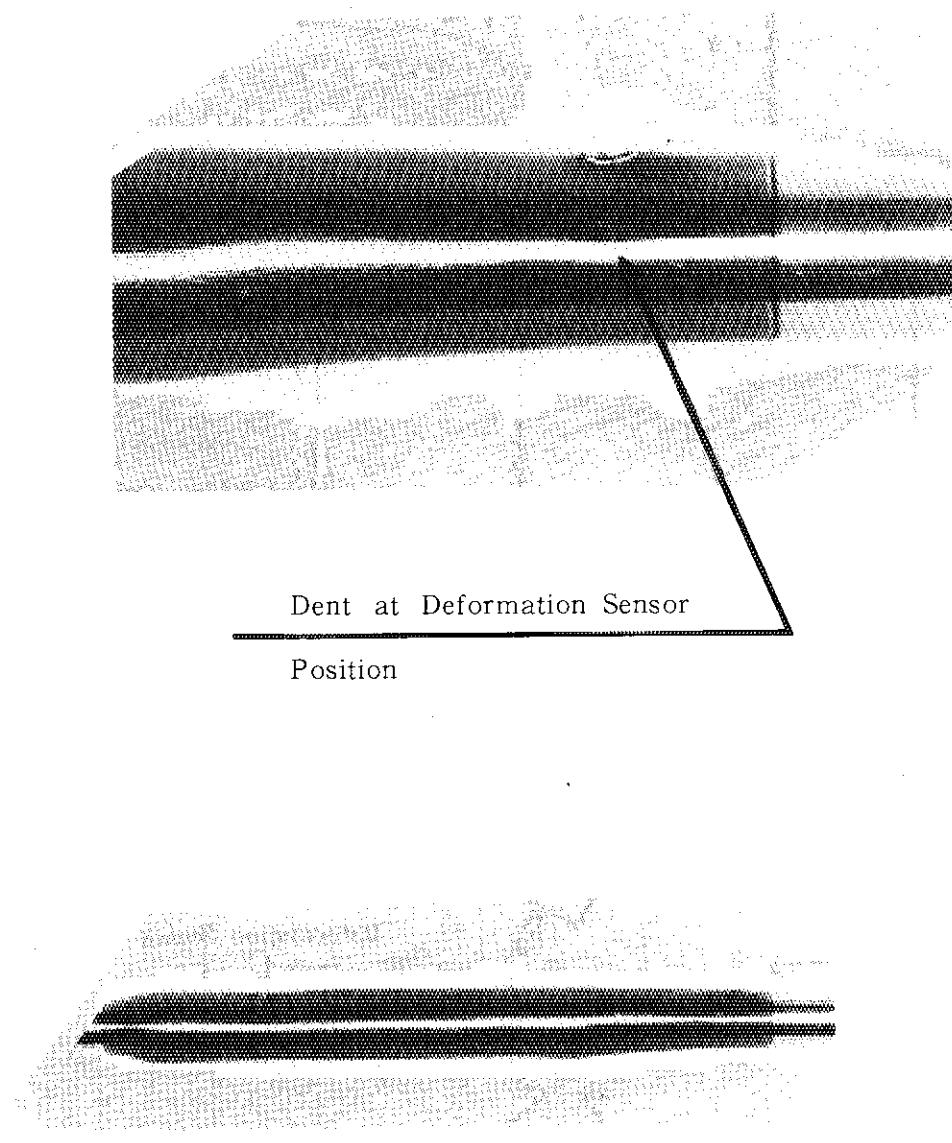


Fig. 2.6.6 Post-test fuel rod appearance in Test No. 251-4

## (2) 小変形測定実験 (252シリーズ)

## (i) 概要

この実験シリーズは、PCMによる被覆管の微少な変形の過渡挙動を測定するセンサの開発を目的としている。被覆管の微少変形は253シリーズで行なわれている様に、これまで歪ゲージで行なわれて来ている。しかし歪ゲージは、250°Cまでの温度域でしか使えないため、過渡挙動の初期の測定しか出来ない。このシリーズでは、被覆管温度上昇後も変形の測定が出来、取付け及び取扱いの容易な微少変形の測定用センサの開発を目的としている。

今期は、設計・試作した小変形測定センサの照射実験を2回 (Test No. 252-1, 2) 行った。

## (ii) 実験方法

小変形測定センサはLVDTタイプのもので、被覆管の変形と連動して働くコアの変位を、差動変圧器を用いて検出するものである。Fig. 2.6.7にその動作原理図を示す。また、Fig. 2.6.8に取付け要領を示す。Test No. 252-1では、120°毎に3方向から変形を測定したがこの実験で、3つのセンサ間に干渉が起った為、Test No. 252-2では、小変形測定センサ1つのみで実験を行った。比較のために小変形測定センサの上下33mm位置の被覆管歪を歪ゲージを用いて測定した。

試験燃料に与えた発熱量は、Test No. 252-1では129 cal/g・UO<sub>2</sub>, Test No. 252-2では192 cal/g・UO<sub>2</sub>であった。

## (iii) 実験結果及び考察

Table 2.6.3に実験結果の概略を示す。Test No. 252-1では計装回路の不調により、小変形測定センサ間に干渉が現われており、測定結果は有意なものとは言えない。続いて行ったTest No. 252-2では、干渉を避けるため、小変形測定センサは1つだけ取付けて、実験を行った。歪ゲージによる被覆管の周方向歪の測定値は被覆管の熱膨張による歪を含まない値であり、熱膨張を考慮すると、6800 μstつまり半径方向で0.036 mmの変形となる。小変形測定センサの測定値はこれに比べ、約6倍の0.22 mmの変形を示している。燃料ペレットの熱膨張モデルにGAPCON-THERMALを用いた燃料挙動計算コードNSR-77により解析した被覆管の変形挙動と併せて、変形センサの測定結果をFig. 2.6.9に示す。図中のギャップ幅は解析による値である。

小変形測定センサの出力は、絶対値としては大き過ぎる値を示しているものの、変化の経過は解析結果と似た様子を示しており、このタイプの小変形測定センサによる測定の可能性を示している。測定値が大き過ぎる点については、燃料棒の曲り、センサのゲインの問題等が考えられ、改善が必要である。

Table 2.6.3 Summary of Test Results

| Test No.                          | 252-1                             | 252-2                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Energy Deposition                 | 129 cal/g • UO <sub>2</sub>       | 192 cal/g • UO <sub>2</sub>     |
| Max. Cladding Surface Temperature | #1 850 °C                         | #1 1190 °C                      |
|                                   | #3 800 °C                         | #3 1160 °C                      |
| Cladding Strain                   | #1 420 $\mu$ st                   | #1 4080 $\mu$ st                |
|                                   | #3 2350 $\mu$ st                  | #3 4450 $\mu$ st                |
| Cladding Surface Displacement     | #1 0.0788 mm<br>(14,700 $\mu$ st) | #3 0.22 mm<br>(41,000 $\mu$ st) |
|                                   | #2 0.121 mm<br>(22,500 $\mu$ st)  |                                 |
|                                   | #3 0.0263 mm<br>(4,995 $\mu$ st)  |                                 |

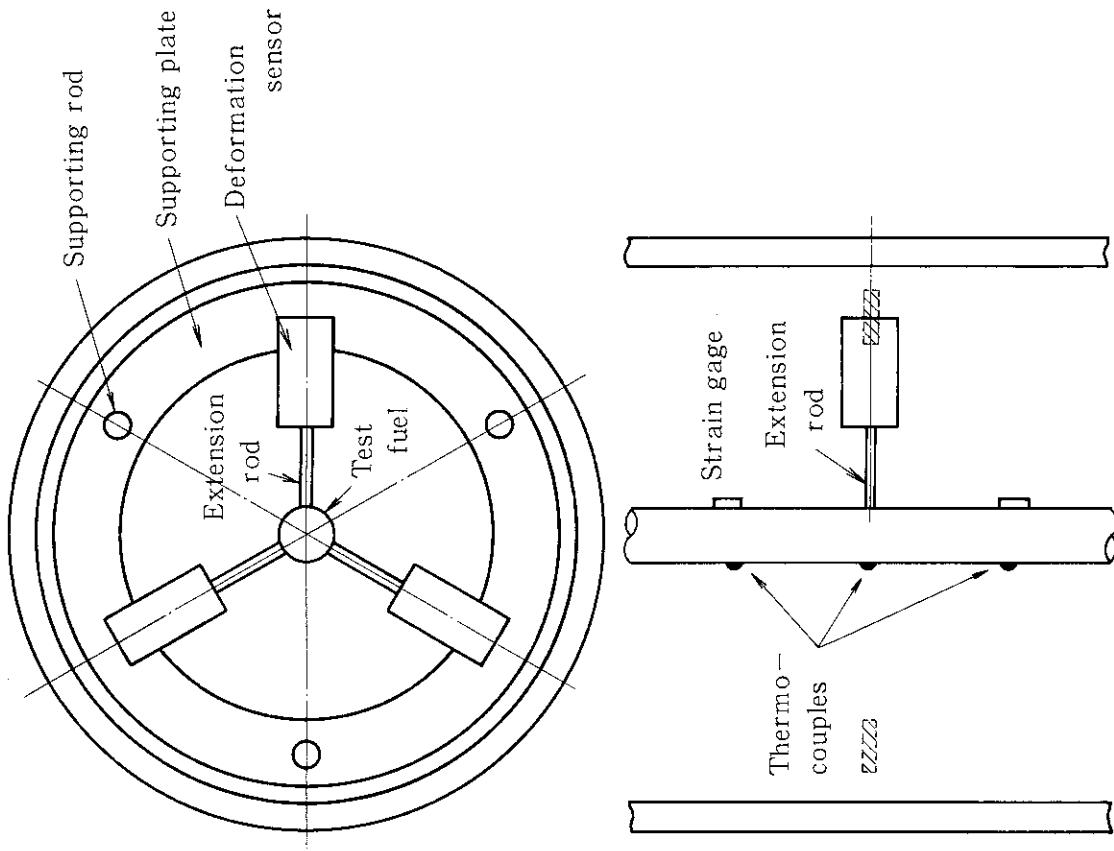


Fig. 2.6.8 Schematic diagram of test arrangement

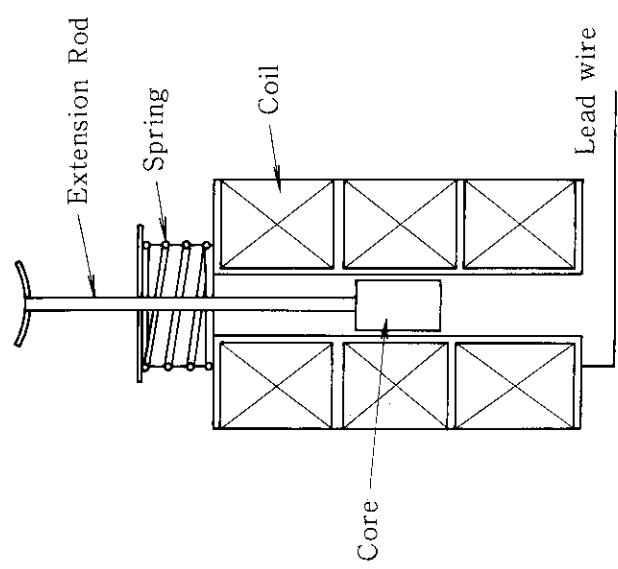


Fig. 2.6.7 Operating principle of deformation sensors

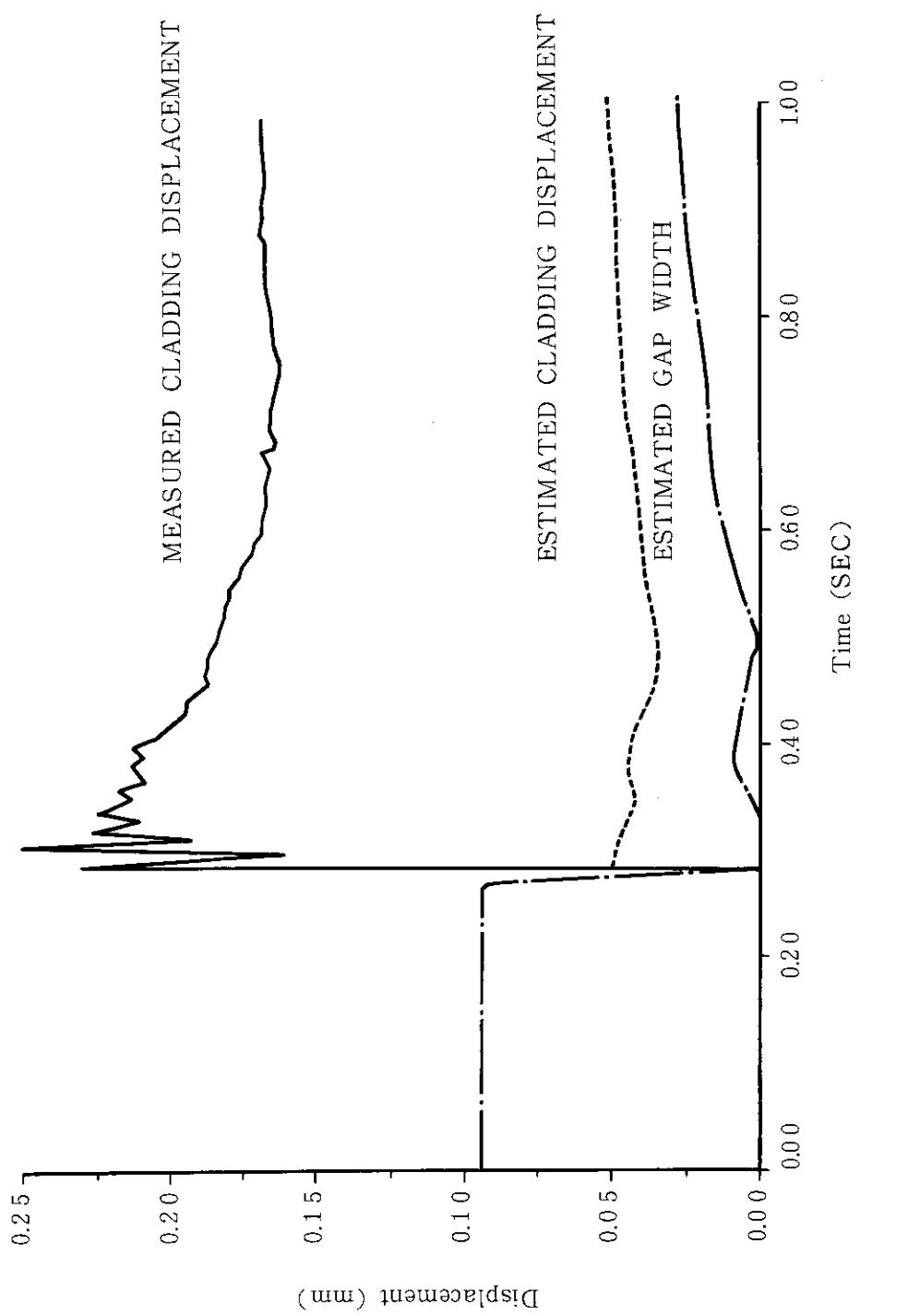


Fig. 2.6.9 Measured and calculated cladding surface displacement in Test No. 252-2

## (3) 被覆管過渡歪測定実験 (253シリーズ)

## (i) 概要

本実験シリーズは、PCM Iによって生ずる被覆管の過渡変形を歪ゲージを用いて測定し、その機構を解明しようとするものである。今期は発熱量を種々に変えた標準ギャップ燃料の実験 (Test No. 253-5, 6, 7, 10), 狹幅ギャップ燃料実験 (Test No. 253-4, 9), 広幅ギャップ燃料実験 (Test No. 253-8) を行った。

## (ii) 実験方法

実験は、Fig. 2.6.1.0 に示すように、10%もしくは20%濃縮の実験燃料（ギャップ幅、標準 0.095 mm, 狹幅 0.050 mm, 広幅 0.195 mm）に歪ゲージ4枚（発熱部に3枚、非発熱部に1枚），および被覆管温度測定用の Pt/Pt-13%Rh 熱電対3対を取り付け，常温・常圧水を満たした大気圧カプセルに装填し，NSRR でパルス照射を行った。

使用した歪ゲージは、250°Cまでの温度で使用出来、最大2%の歪測定が出来る高温用箔ゲージである。

## (iii) 実験結果

Table 2.6.4 に実験結果の概略を示す。

標準ギャップ幅の燃料実験では、DNB 発生しきい値近傍の発熱量 ( $110 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  ~  $120 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ) を与える実験を3回行った。(Test No. 253-5, 6, 7) 3回全ての実験で、DNB は発生し、最も発熱量の小さい実験 (Test No. 253-5,  $110 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ )においても、被覆管表面温度は最大  $640^\circ\text{C}$  に達し、被覆管最大過渡歪は、 $1020 \mu\text{st}$  を記録した。また、発熱量  $146 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  で行った実験では、被覆管表面温度は最大  $990^\circ\text{C}$ 、最大過渡歪は、 $2400 \mu\text{st}$  に達した。

狭幅ギャップ燃料の実験では、DNB しきい値近傍の発熱量  $112 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を与えた実験 (Test No. 253-9) を行った。被覆管の最高温度は  $730^\circ\text{C}$ 、最大過渡歪は  $1400 \mu\text{st}$  であり、標準ギャップ幅での実験よりは大きい歪を示しているがさほど差は顕著ではない。

広幅ギャップ燃料を使用して行った実験での被覆管の過渡歪を、標準ギャップ、狭幅ギャップの結果と併せて Fig. 2.6.1.1 に示す。試験燃料の発熱量は全て約  $200 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  である。ギャップが広まる程被覆管の歪は小さくなっているが、PCM I の大きさが、ギャップ幅に依存することをよく表している。

また、測定された歪挙動に対しては、 $\gamma$ 線の影響の補正、歪ゲージの温度補正を行った。 $\gamma$ 線の影響の補正是非発熱部で測定した歪ゲージの応答を符号を反転して加える方法で行った。温度補正は、照射前に温度特性を測定し、過渡歪履歴に符号を反転して加える方法を探った。

## (iv) 考察

燃料挙動の解析は、NSR-77 で行った。RIA の様に急速に温度が上昇する場合、ペレットの変形を評価するのには、単なる熱膨張を考えるだけでは、変形を過小評価することになることが実験的に分っている。そこでペレットの変形モデルとして Fig. 2.6.1.2 に示す2つを考えた。Crack モデルと GAPCON モデルである。Crack モデルでは、熱応力を計算し、これをペレットの降伏応力と比較し、越える前までは、単なる熱膨張のみによる変形とし、熱応力が降伏応力を越えるとペレットにクラックが入るものとする。即ち、そこで熱膨張に、クラックによる変形（ペレット半径にクラック・ファクターを乗じた値）を加える。一方、GAPCON モデルでは、ペレット内半

径方向の温度分布中、最高温度  $T_m$  を示す半径  $r_m$  より内側は全て、 $T_m$  に対応する熱膨張係数で膨張するものとし、 $r_m$  より外側は普通の自由熱膨張で変形すると考える。

2つのモデルを使って計算した燃料棒の過渡挙動を実験での実測値と併せて、狭幅ギャップ燃料・標準ギャップ幅の燃料の2つの場合について Fig. 2.6.1 3, Fig. 2.6.1 4 に示す。Crack モデルでの解析に使用したクラック・ファクターの値は、狭幅ギャップ、標準ギャップ幅の場合とも同一の値を使用した。その結果、狭幅ギャップ燃料の挙動はよく表わしているが、標準ギャップ幅燃料については、変形を過大に評価している。この点はクラック・ファクターを小さくすることで改善可能ではあるが、燃料棒の種類によって異なるクラック・ファクターを用いなければならず、あまり一般的とは言えない。他方 GAPCON モデルでの解析結果は、ギャップ幅によらず良い一致を見せていく。

標準ギャップ幅燃料での、発熱量と被覆管の周方向最大歪の関係を Fig. 2.6.1 5 に示す。白丸が実測値である。GAPCON・モデルでの解析結果は、 $170 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  以上でよく実験結果と一致している。しかし、 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  以下では、PCMI の発生を予測出来ない。一方、CRACK モデルでは全体的に PCMI を過大評価している。

以上、今期の実験により、PCMI による被覆管周方向歪のデータが蓄積され、GAPCON モデルを用いた NSR-77 の解析により、よく実験結果を予測出来ることが明らかとなった。

Table 2.6.4 Summary of Test Results

| Test No.                         | 2 5 3 - 4                 | 2 5 3 - 5                 | 2 5 3 - 6                 | 2 5 3 - 7                 | 2 5 3 - 8                 | 2 5 3 - 9                 | 2 5 3 - 1 0               |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Gap width                        | 0.0 5 0 mm                | 0.0 9 5 mm                | 0.0 9 5 mm                | 0.0 9 5 mm                | 0.1 9 5 mm                | 0.0 5 0 mm                | 0.0 9 5 mm                |
| Energy deposition                | 196 cal/g•UO <sub>2</sub> | 110 cal/g•UO <sub>2</sub> | 115 cal/g•UO <sub>2</sub> | 119 cal/g•UO <sub>2</sub> | 183 cal/g•UO <sub>2</sub> | 112 cal/g•UO <sub>2</sub> | 146 cal/g•UO <sub>2</sub> |
| Max Cladding surface temperature | # 1<br>1,220°C            | 3 1 5°C                   | 5 2 0°C                   | 7 8 0°C                   | 1,3 2 0°C                 | 4 6 0°C                   | 8 1 0°C                   |
|                                  | # 2<br>1,235°C            | 4 8 0°C                   | 6 8 5°C                   | 8 1 0°C                   | 1,2 7 0°C                 | 7 3 0°C                   | 9 5 0°C                   |
|                                  | # 3<br>1,185°C            | 6 4 0°C                   | 7 2 0°C                   | 5 9 0°C                   | 1,2 8 0°C                 | 6 7 0°C                   | 9 9 0°C                   |
| Max cladding hoop strain         | # 1<br>1 3 4 1 0 $\mu$ st | 9 9 0 $\mu$ st            | 3 5 0 $\mu$ st            | 5 9 0 $\mu$ st            | 2,2 6 0 $\mu$ st          | 1,1 0 0 $\mu$ st          | 1,7 4 0 $\mu$ st          |
|                                  | # 2<br>1 0 7 7 0 $\mu$ st | 1,0 2 0 $\mu$ st          | 1,1 7 0 $\mu$ st          | 6 1 0 $\mu$ st            | 1,0 8 0 $\mu$ st          | failure                   | 6 5 0 $\mu$ st            |
|                                  | # 3<br>1 1,6 0 0 $\mu$ st | 7 7 0 $\mu$ st            | 1,3 0 0 $\mu$ st          | 8 9 0 $\mu$ st            | 7 8 0 $\mu$ st            | 1,4 0 0 $\mu$ st          | 2,4 0 0 $\mu$ st          |
|                                  | # 4<br>- 7 8 0 $\mu$ st   | failure                   | - 1 7 0 $\mu$ st          | - 1 7 5 $\mu$ st          | - 3 6 3 $\mu$ st          | - 1 1 0 $\mu$ st          | - 4 4 0 $\mu$ st          |

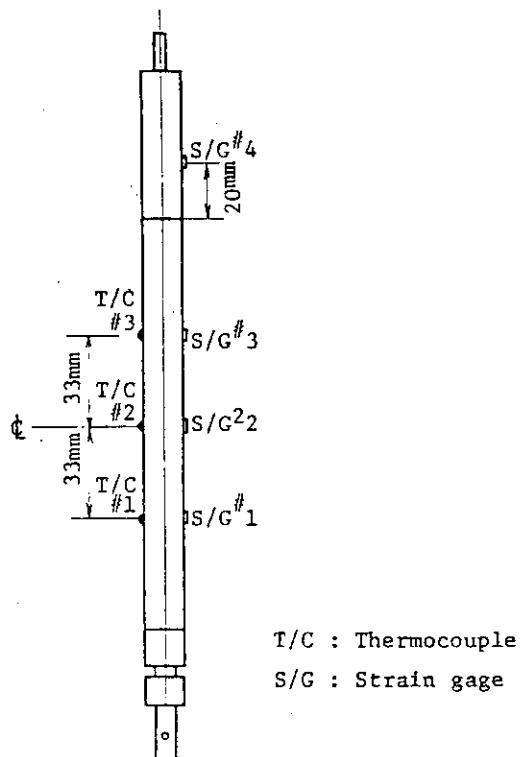


Fig. 2.6.10 Instrumentation for strain measurement test

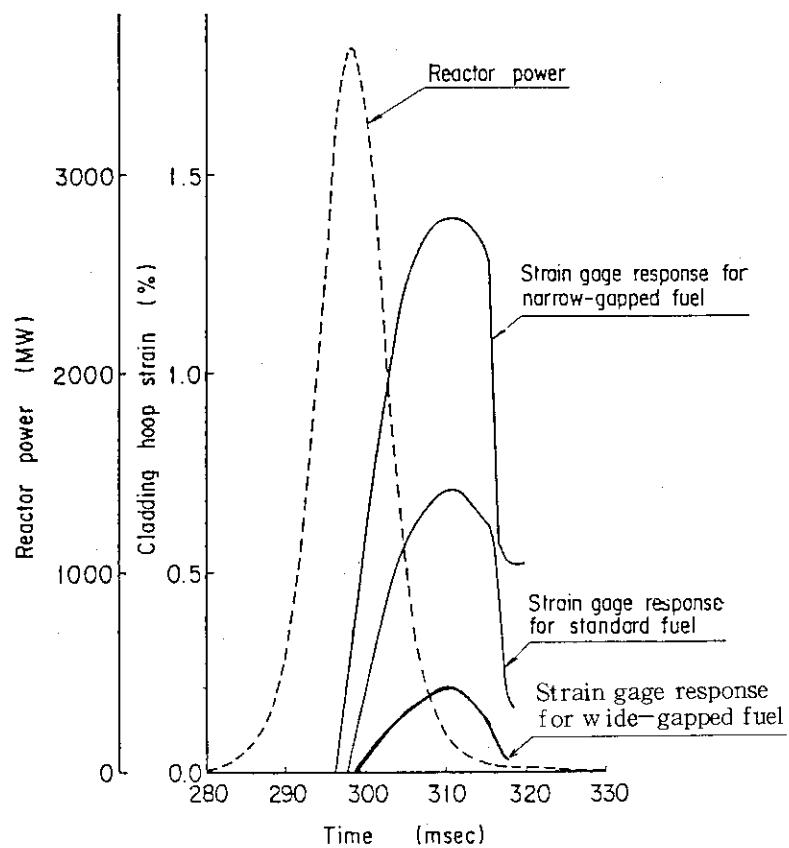


Fig. 2.6.11 Comparison of strain gage responses for wide-gapped, standard and narrow-gapped fuels irradiated at about 200 cal/g · UO<sub>2</sub>

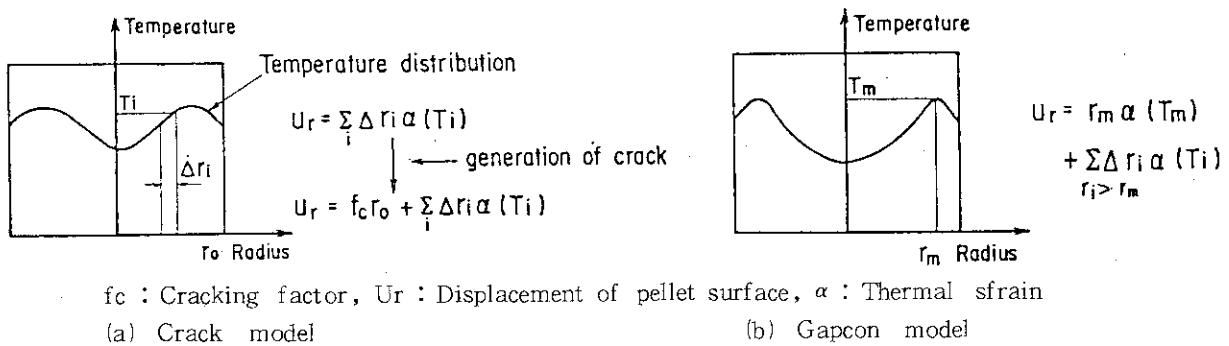
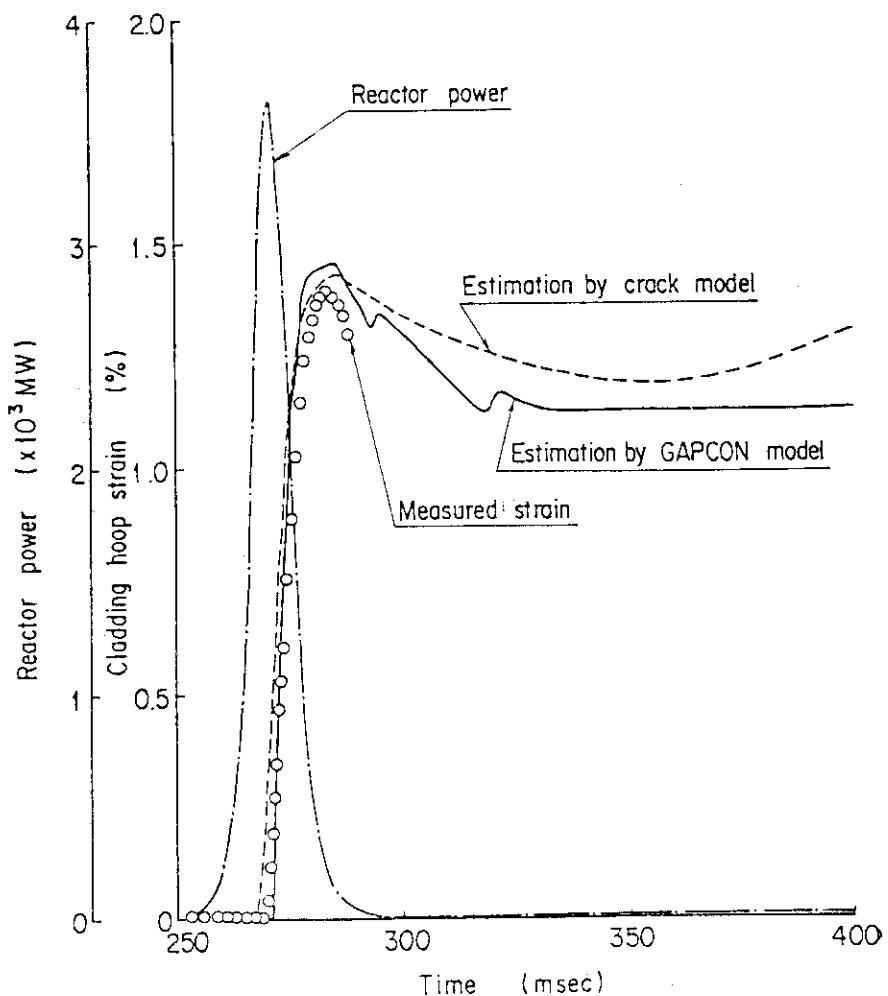


Fig. 2.6.1.2 (a), (b) Pellet deformation models used in experimental analysis

Fig. 2.6.1.3 Comparison of measured strain and those estimated with Crack and GAPCON models for narrow-gapped fuel tested at an energy deposition of 196 cal/g·UO<sub>2</sub>

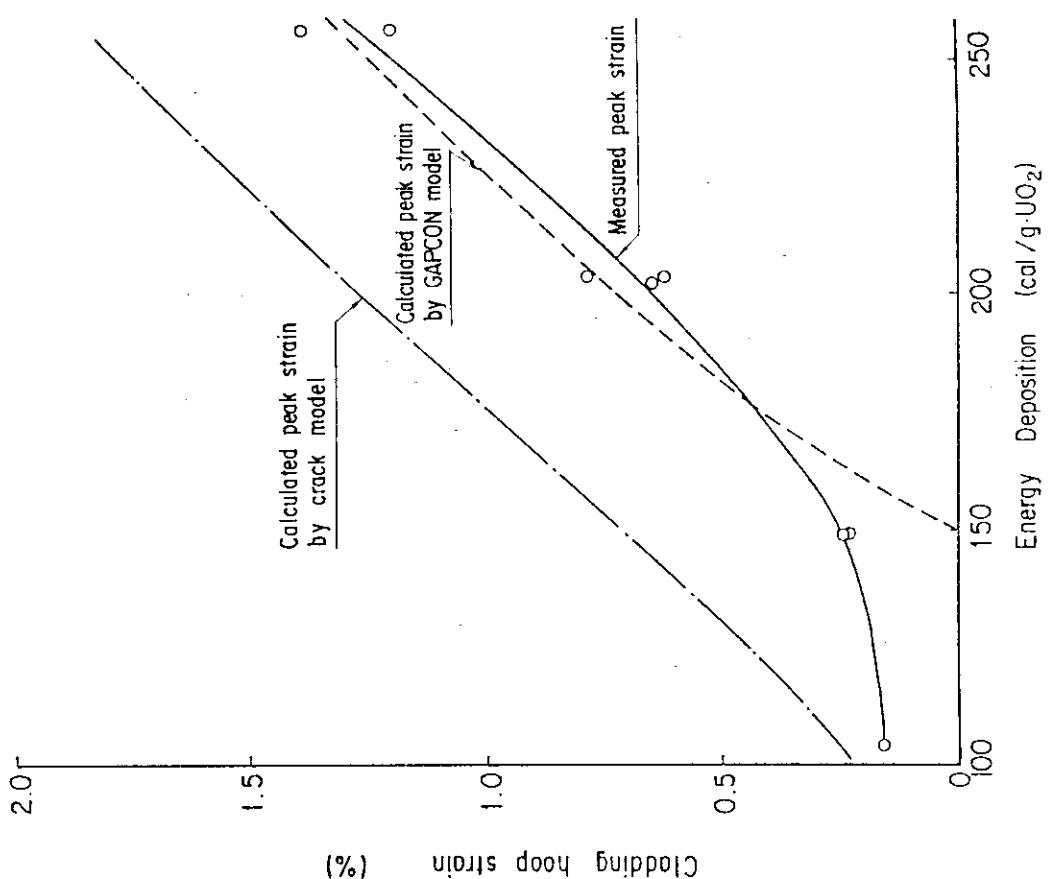


Fig. 2.6.1 5 Comparison of measured peak strain and those estimated with Crack and GAPCON models for standard fuel tested at an energy deposition of 19.8 cal/g UO<sub>2</sub>

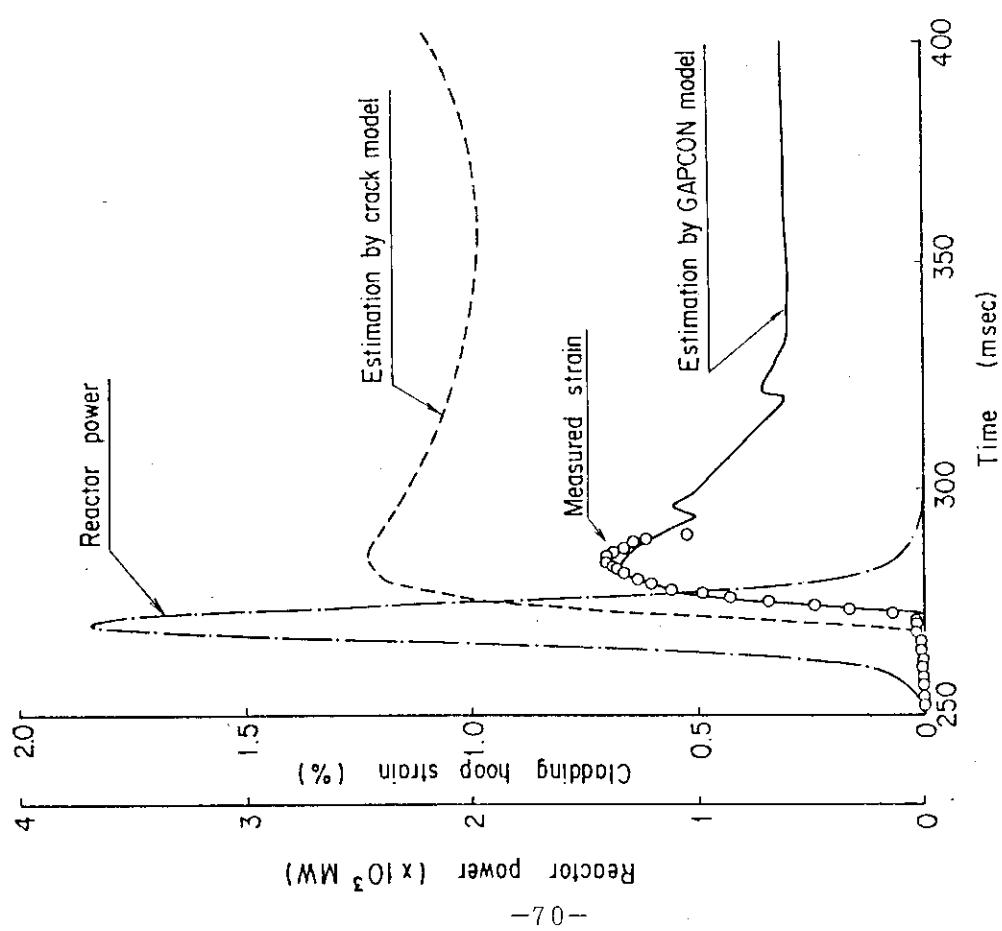


Fig. 2.6.1 4 Comparison of measured strain and those estimated with Crack and GAPCON models for standard fuel tested at an energy deposition of 19.8 cal/g UO<sub>2</sub>

### 3. 高温高圧カプセル実験

#### 3.1 加圧燃料実験 (藤城 俊夫, 柳原 敏)

##### (1) 目的

反応度事故時の加圧燃料棒の破損挙動については、これまで冷態起動条件に対する室温・大気圧条件で実験を実施してきた。<sup>(1)</sup>これに対して、温態起動条件下における加圧燃料棒の破損挙動についても評価する必要があり、高温高圧カプセルを用いた加圧燃料棒実験を実施した。なお、軽水炉燃料は、一般に通常運転下では内圧が外圧を下回るように設計されているが、燃料挙動をより詳細に把握する見地から、高温高圧下で内圧が外圧を上回る場合に対しても実験を行った。

##### (2) 実験方法

高温高圧カプセルを用い、冷却材圧力を $1.2 \sim 1.6 \text{ MPa}$ 、又、冷却材温度を $283 \sim 305^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて、 $220 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量を投入する実験を3回実施した。各実験では、非加圧燃料棒を含め内圧を変えた3本の燃料棒をカプセル中に配して同時に照射を行った。実験における燃料棒の配置と被覆管表面温度測定のための、熱電対の位置、および高温高圧カプセルの概要を Fig. 3.1.1 に示す。又、3回の実験における、各燃料棒の室温における加圧量、冷却材の圧力、温度等の実験条件を Table 3.1.1 に示す。

##### (3) 実験結果および考察

照射実験を行った燃料のうち、実験初期条件での燃料内圧（以後「初期燃料内圧」と呼ぶ）が異なる5本の燃料棒について、照射後の外観を Table 3.1.2 に示す。本表の写真に示したように、初期燃料内圧の相違により燃料棒の挙動が異なる。すなわち、初期燃料内圧が外圧より $1.1.9 \sim 1.5.9 \text{ MPa}$ 低い非加圧燃料の場合には被覆管のコラップスが生じるのに対して、加圧燃料で初期燃料内圧が外圧より $1.2 \sim 2.2 \text{ MPa}$ 低い場合には、被覆管のコラップスではなく、微かな膨張が生じた。ただし、これらの燃料棒は破損しなかった。これに対して、加圧量をより大きくした加圧燃料で初期燃料内圧が外圧より大きい場合には、被覆管が膨張してバースト破損が生じた。以下に、これらの実験により得られた燃料棒の挙動について記す。

###### a. 被覆管表面温度

Test №1208 実験において測定した被覆管表面の温度履歴を Fig. 3.1.2 に示す。本図には、同時に照射した3本の燃料棒について各々の測定結果を示したが、初期燃料内圧の相違により、被覆管表面温度が大きく異なることが分る。つまり、被覆管温度が高温になると、燃料棒の外圧が内圧を上回る場合には被覆管がコラップスして  $\text{UO}_2$  ペレットと被覆管の間のギャップがなくなるため、ギャップ熱伝達率が良くなつて被覆管温度が上昇する。本図においては、コラップスが生じた燃料棒（初期圧力差： $-1.4.9 \text{ MPa}$ ）と被覆管が膨れた燃料棒（初期圧力差： $1.8 \text{ MPa}$ ）の最高温度の相違が約 $200^\circ\text{C}$ あることが分る。

###### b. 燃料棒内圧

Fig. 3.1.3 は燃料棒内圧の過渡変化を測定した代表例である。燃料棒の破壊が生じた Fuel rod №7 (Test №1209) についてみると、燃料棒内圧はパルス照射直後に $13.0 \text{ MPa}$ から $15.6$

MPa まで約 2.6 MPa の急激な上昇を示し、その後、ゆるやかに減少した後、被覆管の破裂による圧力低下が認められる。最初の燃料棒内圧の急上昇は燃料ペレット熱膨張時の被覆管内のガス体積減少によるものであり、本実験の燃料棒の場合初期内圧の約 20 %の上昇が生じている。内圧の急上昇に続くゆるやかな減少は、被覆管の熱膨張によるガス部分の体積増加のためと考えられる。

### c. 燃料棒の破壊条件

Fig. 3.1.4 は燃料棒内外圧力差に対する、被覆管の最高温度とふくれの関係を示した結果である。高温高圧条件下においては、パルス照射直後の比較的大きな内圧上昇により、初期燃料棒内外圧力差が -2.2 MPa 以上の場合にふくれが生じ、この結果、被覆管最高温度の低下が認められた。ただし、被覆管の破裂については、燃料棒の初期内圧が外圧を上回った場合にのみ発生した。本図には、NSR-77 コードによる解析結果も示してある。解析モデルには、燃料ペレットの膨張等による燃料内圧上昇を考慮しており、被覆管の変形が小さい範囲の燃料挙動については比較的良好な一致が得られていることが分る。

Fig. 3.1.5 は本実験の結果より得られた燃料棒の破壊の有無を大気圧カプセル実験から得られた結果と比較して示したものである。本図からは、高温高圧条件下においても、従来の加圧燃料の破損しきい値を超えた条件でのみ破壊が生じていることが分る。

### (4) まとめ

高温高圧条件下において 1.2 ~ 1.6 MPa の範囲で加圧した燃料棒について照射実験を実施した結果、以下の事実が判明した。

- (1) 被覆管のコラップス発生の有無は被覆管温度挙動に大きく影響する。
- (2) 高温高圧条件ではパルス出力発生時の燃料棒内圧上昇が大きいため、燃料棒初期内圧が外圧をやや下回っていても、被覆管のふくれを生ずる。
- (3) 被覆管の破裂は、本実験条件の範囲では、従来の加圧燃料の破損しきい値を超えた条件でのみ生じた。
- (4) 被覆管の変形が小さい範囲では、NSR-77 コードによる良好な解析結果を得た。

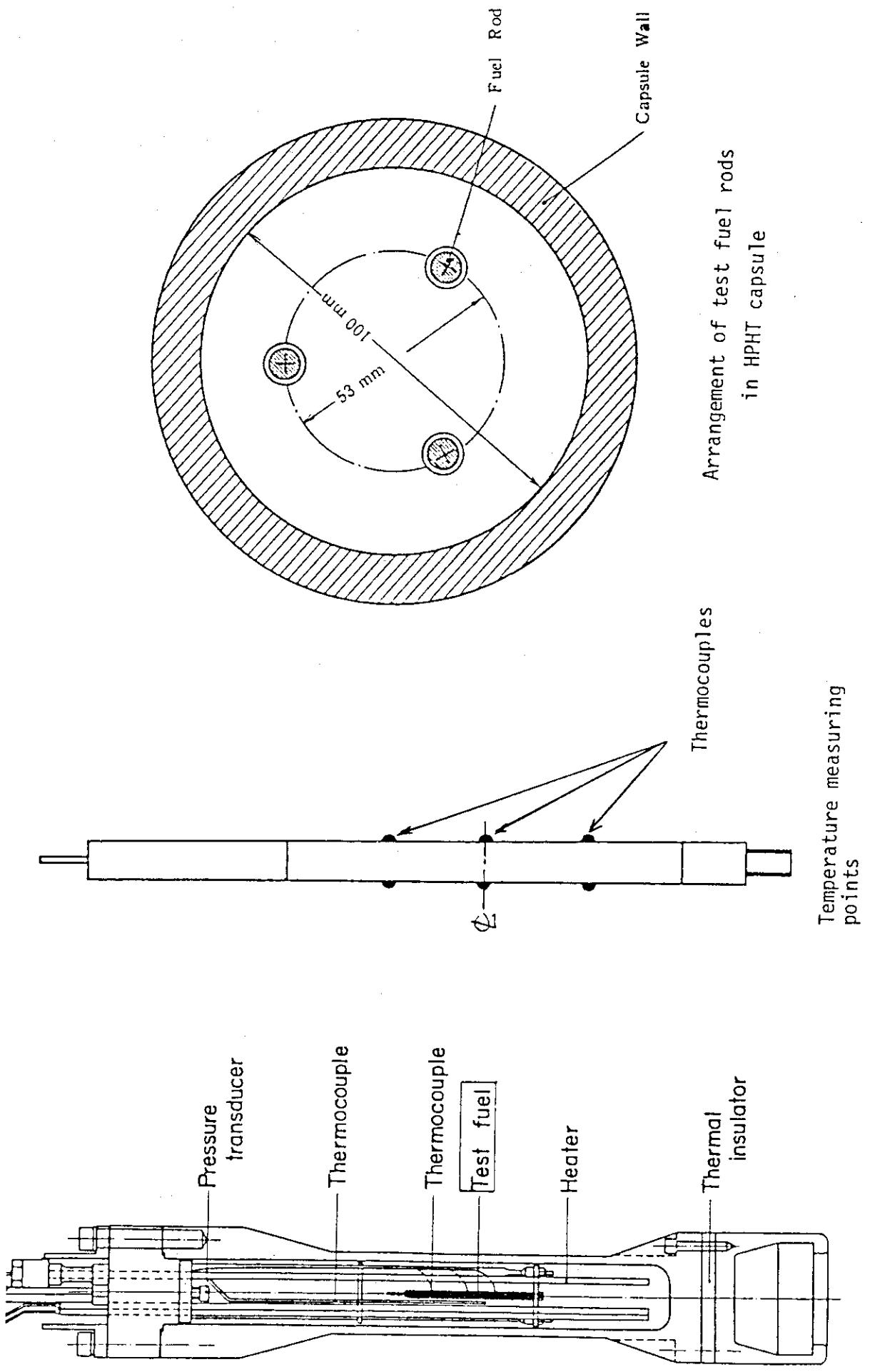
Table 3.1.1 Test conditions of the pre-pressurized fuel rod tests with high pressure, high temperature capsule

| Test No. | Energy deposition (cal/g · UO <sub>2</sub> ) | Coolant conditions |                  | Test fuel rod     | Pressure difference across cladding (MPa) *1 | Fuel rod No. |
|----------|--|--------------------|------------------|-------------------|--|--------------|
|          |  | Pressure (MPa)     | Temperature (°C) |                   |  |              |
| 1202     | 220  | 16.1               | 305              | He, 0.1 MPa (STD) | -15.9  | 1            |
|          |  |                    |                  | Xe, 0.1 MPa       | -15.9  | 1'           |
|          |  |                    |                  | He, 7.1 MPa       | -2.2   | 2            |
| 1208     | 220  | 15.1               | 300              | He, 0.1 MPa (STD) | -14.9  | 3            |
|          |  |                    |                  | He, 7.1 MPa       | -1.2   | 4            |
|          |  |                    |                  | He, 8.6 MPa       | 1.8  | 5            |
| 1209     | 220  | 12.1               | 283              | He, 0.1 MPa (STD) | -11.9  | 6            |
|          |  |                    |                  | He, 7.1 MPa       | 1.15   | 7            |
|          |  |                    |                  | He, 8.6 MPa       | 4.0  | 8            |

\*1 at initial condition (estimated)  
 \*2 with pressure sensor

Table 3.1.2 post-test fuel rod appearances

| Initial pressure difference<br>(MPa) | Fuel rod No. 6 |  |  | Fuel rod No. 4  |  |  | Fuel rod No. 7 |  |  | Fuel rod No. 5 |  |  | Fuel rod No. 8 |  |  |
|--------------------------------------|----------------|--|--|-----------------|--|--|----------------|--|--|----------------|--|--|----------------|--|--|
|                                      | (overall view) |  |  | (enlarged view) |  |  |                |  |  |                |  |  |                |  |  |
| -1.20                                |                |  |  |                 |  |  |                |  |  |                |  |  |                |  |  |
| 1.15                                 |                |  |  |                 |  |  |                |  |  |                |  |  |                |  |  |
| 1.8                                  |                |  |  |                 |  |  |                |  |  |                |  |  |                |  |  |
| 4.0                                  |                |  |  |                 |  |  |                |  |  |                |  |  |                |  |  |



Test section of HPHT capsule

Temperature measuring points

Arrangement of test fuel rods in HPHT capsule

Fig. 3. 1. 1 Arrangement of test fuel rods and temperature measuring points in HPHT capsule

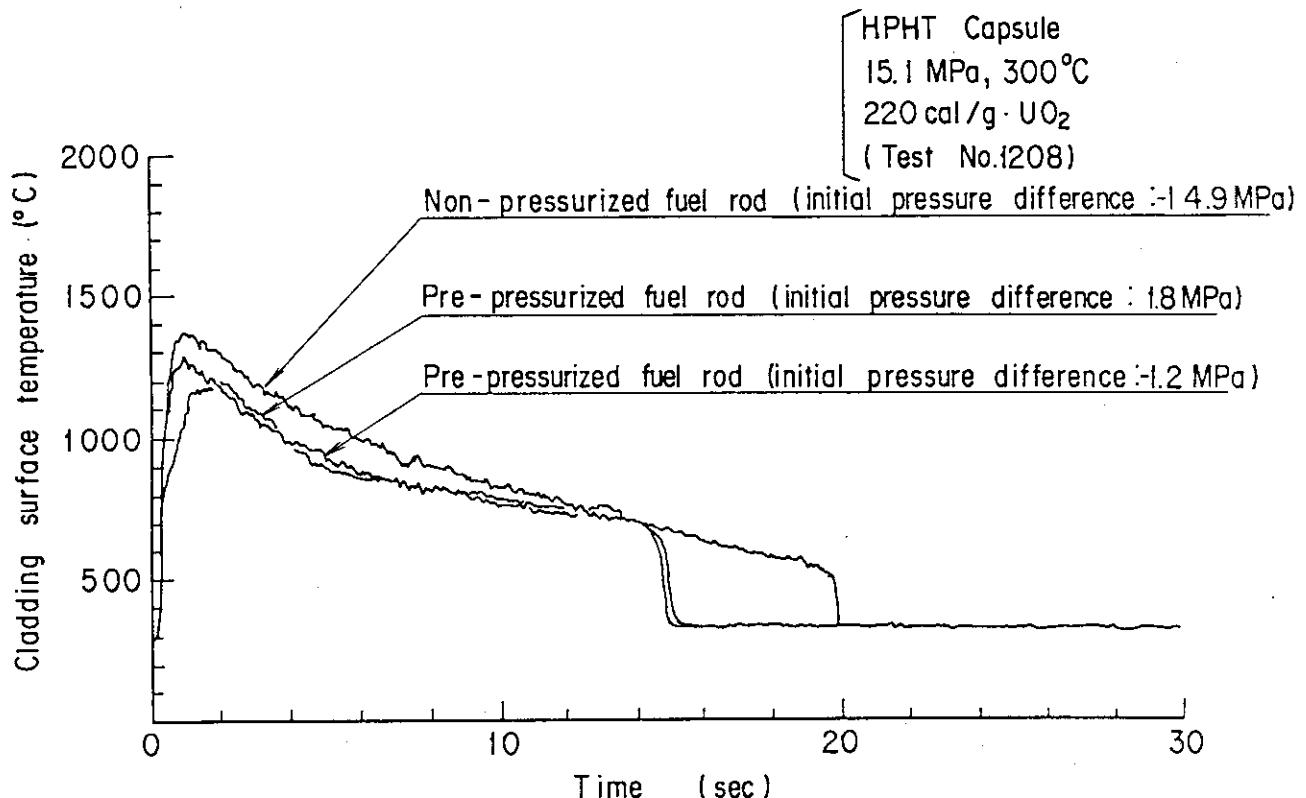


Fig. 3.1.2 Comparison of the cladding surface temperature histories

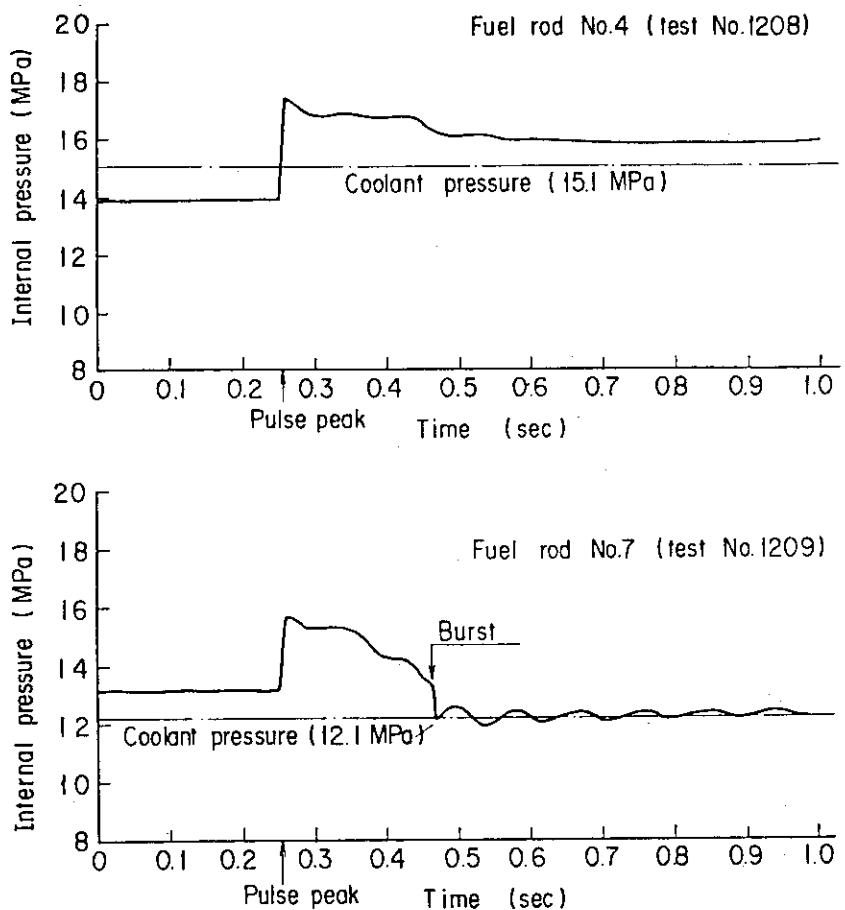


Fig. 3.1.3 Histories of fuel rod internal pressure, showing increase by about 20%

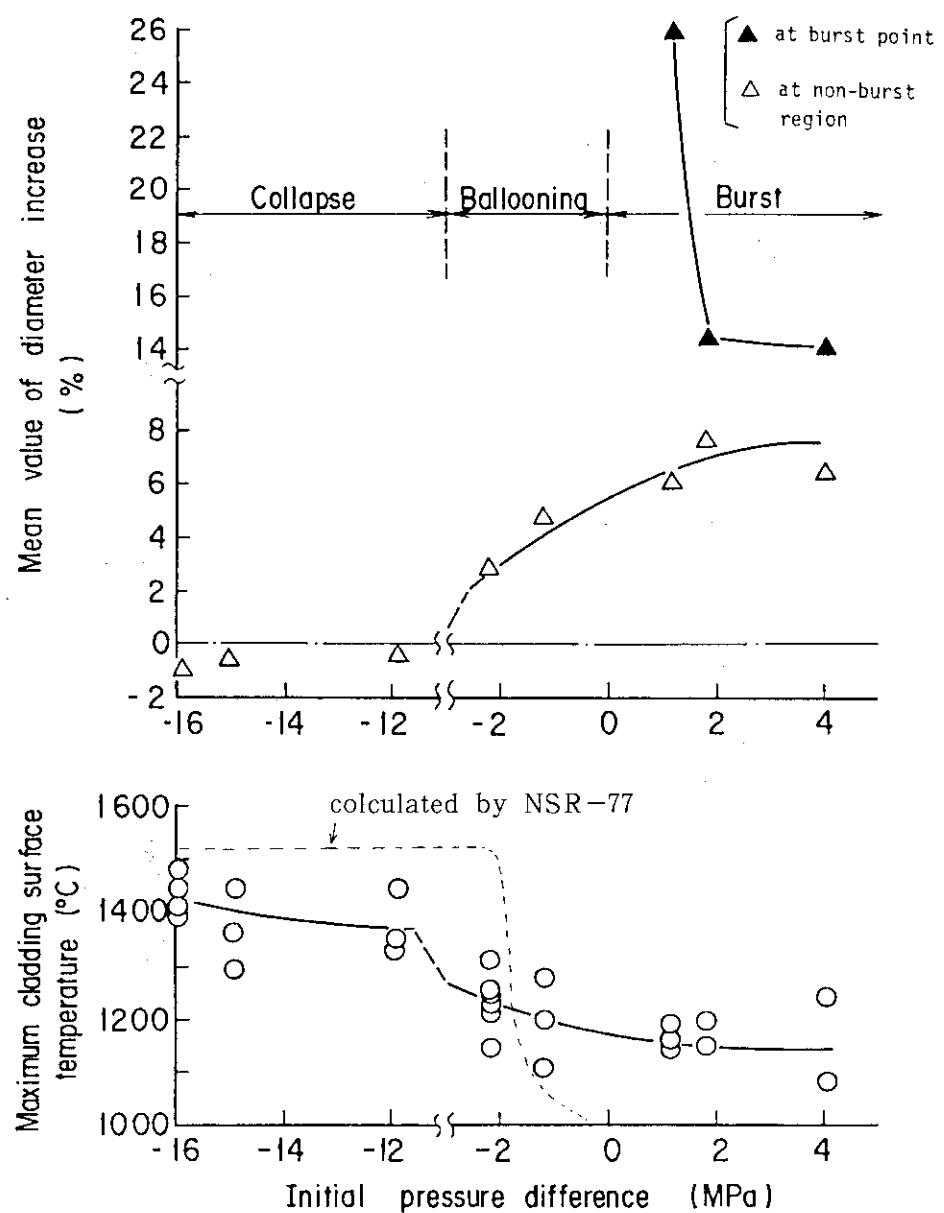


Fig. 3.1.4 Diameter increase of cladding and maximum cladding surface temperatures as a function of initial pressure difference between rod internal and coolant pressures

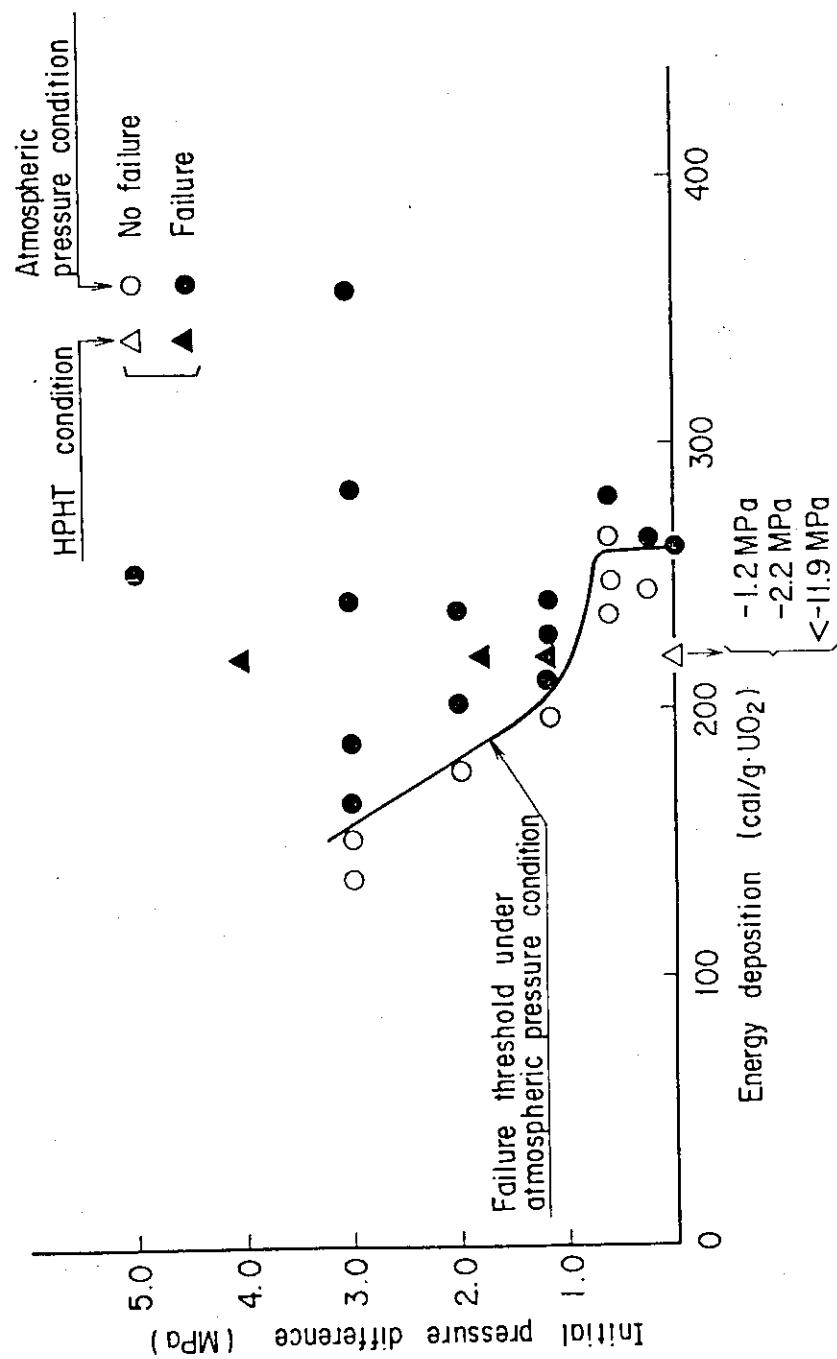


Fig. 3.1.5 Comparison of failure thresholds under atmospheric pressure and HPHT conditions

### 3.2 伸び測定実験 (Test No.1212, 1213) (石島 清見, 中村 武彦)

#### (1) 目的及び概要

NSRRでは、これまでに大気圧水カプセルを用いて燃料ペレットおよび被覆管の伸び測定実験を行ってきた。今回、高温高圧条件で燃料ペレットと被覆管の伸びを同時に測定出来る計装を開発し、これを用いて流れなしのBWR条件下での試験燃料棒の伸び挙動を測定した。

#### (2) 実験条件及び計装

Test No.1212およびTest No.1213の実験条件をTable 3.2.1にまとめる。このTableに示すとおり、2つの実験はほぼ同じ条件で行った。また計装としては伸び計の他に、被覆管表面温度測定用熱電対3対、カプセル内冷却水温度測定用熱電対3対を取り付けた。

燃料ペレット・被覆管伸び計の原理図をFig. 3.2.1に示す。この測定器はLVDTタイプのもので、燃料ペレットもしくは被覆管と連動する同軸2連の2つコアの動きを、差動変圧器を用いて独立に検出するものである。

#### (3) 結果及び考察

##### (i) Test No.1212

この実験では、燃料ペレット伸び計は予定通り動作したもの、被覆管伸び計からは、計装回路不調により有意な信号は得られなかった。

燃料ペレットはパルス出力上昇とともに伸び始め、原子炉出力がピークに達した時刻から1.4秒後に最大伸び2.5mmを記録し、その後徐々に縮み、初期長より0.86mm伸びて落ちついている。この実験燃料は照射後検査の結果、被覆管長さが1.1mm縮んでいた。燃料ペレット伸びの過渡記録をFig. 3.2.2に示す。

##### (ii) Test No.1213

この実験は、Test No.1212の再実験としてほとんど同じ実験条件で行い、燃料ペレット・被覆管伸びの同時測定に成功した。Fig. 3.2.3, Fig. 3.2.4に燃料ペレット・被覆管伸びと被覆管表面温度の過渡記録を時間スケールを変えて示す。燃料ペレットは原子炉出力の上昇とともに伸び始め、出力がピークに達した後1.45秒で最大の伸び2.4mmを記録した後徐々に縮み、初期長より0.9mm伸びた状態で止まっている。一方、被覆管は、ペレット伸びにやや遅れて伸び始め、0.4秒後に最大の伸び0.51mmを示した後縮み始め、初期長に比べて1.2mm縮んで落ちついている。この試験燃料棒は照射後検査の結果、全長で1.1mm縮んでおり、伸び計の結果とよく一致していた。試験燃料の照射後の外観写真をFig. 3.2.5に示す。

この結果は、燃料挙動解析コード(NSR-77)によるギャップ幅、燃料ペレット温度の変化等の解析結果と考え合わせることにより、次のように説明できる。

1. 炉出力上昇につれ、燃料ペレットが伸び始める。この過程ではペレットは自由熱膨張をしている。
2. ペレットと被覆管の間のギャップが閉じ、被覆管はペレットに引張られて一体となって伸びてゆく。ペレットの被覆管に対する拘束力は非常に大きく、ペレットと被覆管の間にすべりは全く見られない。この過程の初期の被覆管の伸びが、被覆管の温度上昇による熱膨張でないことは、被覆管の温度がほとんどその時点では上っていないことからも明らかである。

また、Fig. 3.2.5に示すとおりこの過程の初期のペレット及び被覆管の伸びは、NSR-77で計算されたペレットの平均エンタルピにほぼ比例している。

3. 被覆管温度が、850°Cを越えると被覆管の伸びはペレット伸びに比べて小さくなり始める。これは発熱部と非発熱部の境界部で起る被覆管の軸方向の潰れに起因していると思われる。実験終了後の試験燃料の潰れを Fig. 3.2.6 に示す。この過程ではペレットの平均エンタルピは既に下がり始めているにも拘らず、ペレットはゆっくり被覆管温度の上昇と共に伸び続けている。被覆管は発熱部において、ペレットをはさみ込んだまま熱膨張をしており、その伸びがペレット伸びとして検出されていると考えられる。

4. 被覆管の温度が下がり始めると、ペレットと被覆管は一体のまま縮んでゆく。

この結果、高温高圧条件下での反応度事故を模擬した条件での燃料ペレット及び被覆管の伸びの過程を知ることが出来た。この条件では、燃料棒の変形のほぼ全ての過程で、ペレットと被覆管の間に大きな拘束力が働いており、特に変形初期には、ペレットが被覆管を全くずれが見られない程大きな拘束力で引き伸ばしていることがわかった。

Table 3.2.1 Test Conditions

| Test No.           | 1212  | 1213                        |
|--------------------|---|-----------------------------|
| Test Fuel Rod      | 10% Enriched Standard Type  |                             |
| Energy Deposition  | 194 cal/g · UO <sub>2</sub>   | 196 cal/g · UO <sub>2</sub> |
| Cooling Conditions | Temperature 276°C<br>Pressure 7.2 MPa<br>Flow Rate 0 m/s  |                             |
| Instruments        | Pellet Elongation<br>Cladding Elongation<br>Cladding Surface Temperature (3)<br>Water Temperature (3) |                             |

## Elongation Sensor

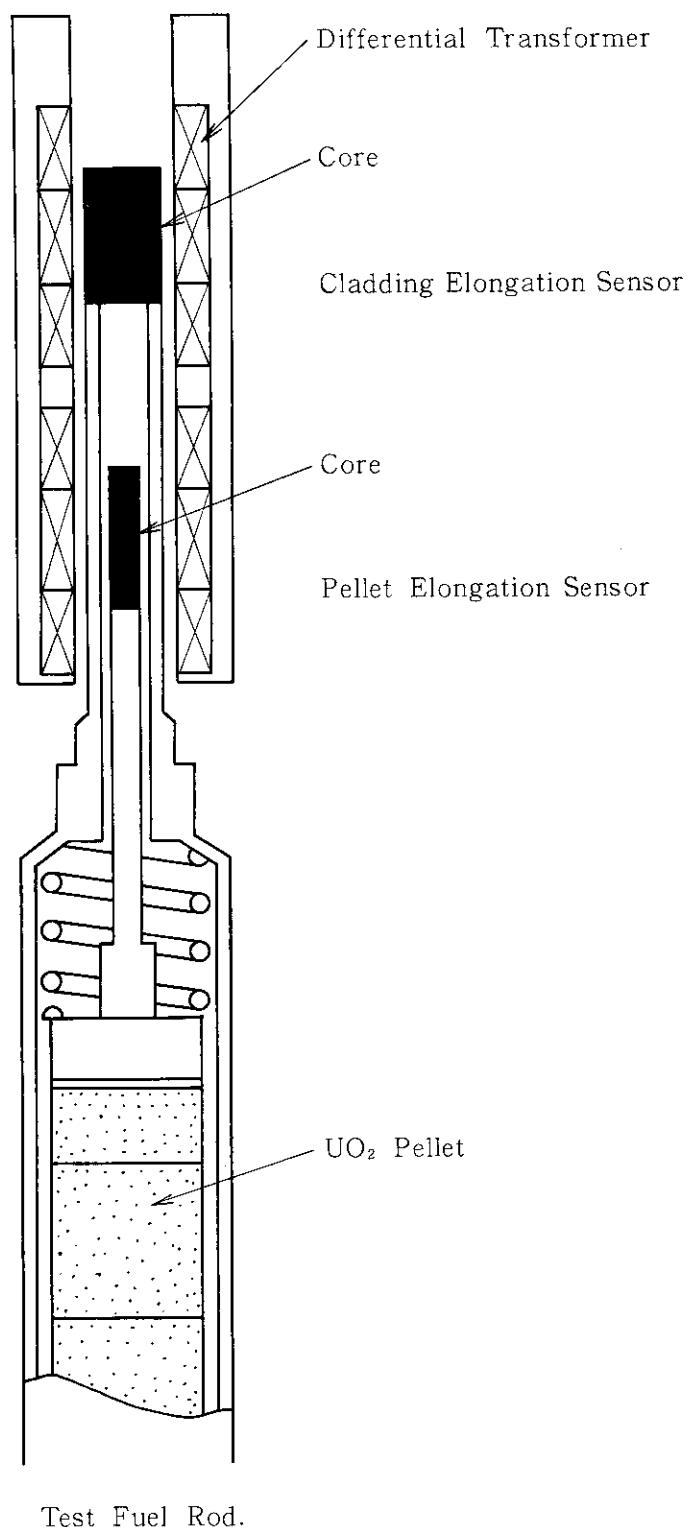


Fig. 3.2.1 Conceptional design of fuel pellet and Cladding elongation sensor

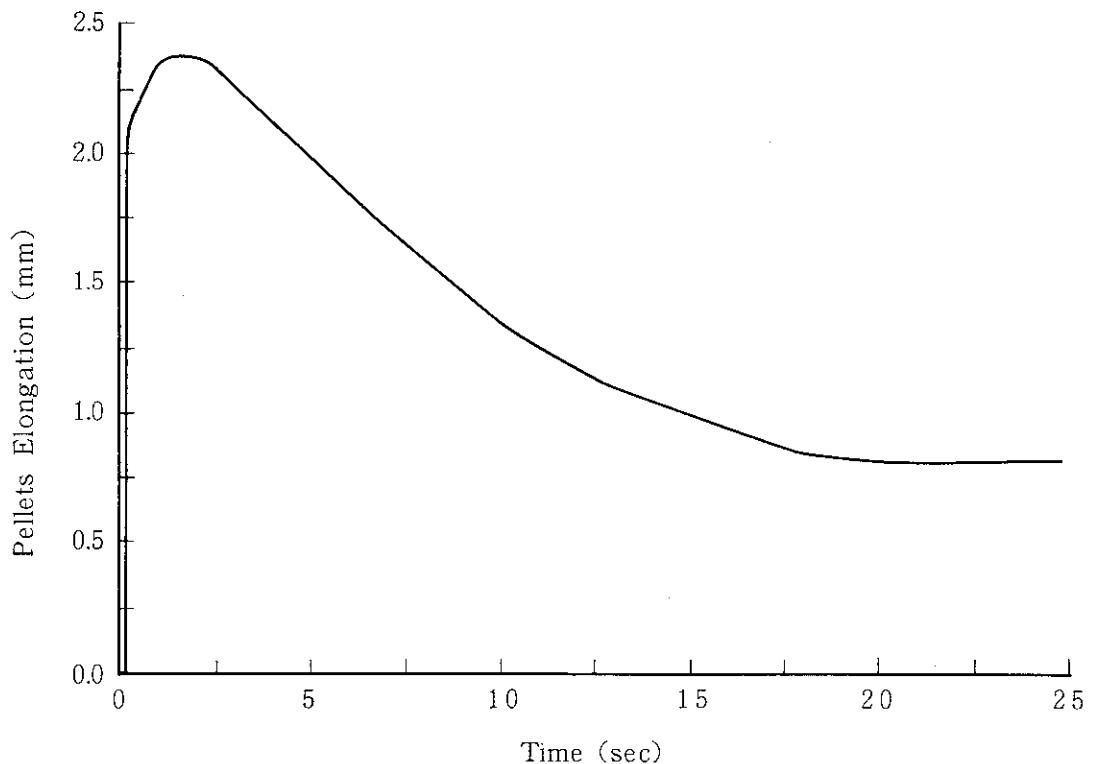


Fig. 3.2.2 Transient history of fuel pellets elongation in Test No 1212

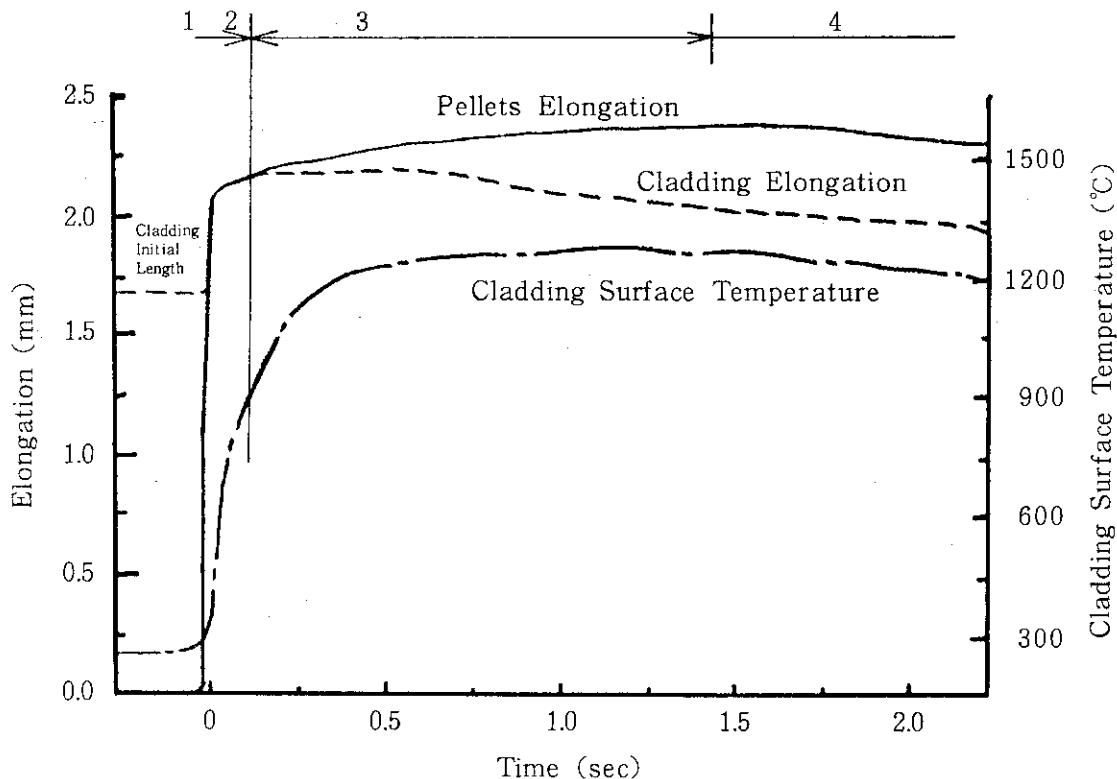


Fig. 3.2.3 Transient histories in Test No. 1213

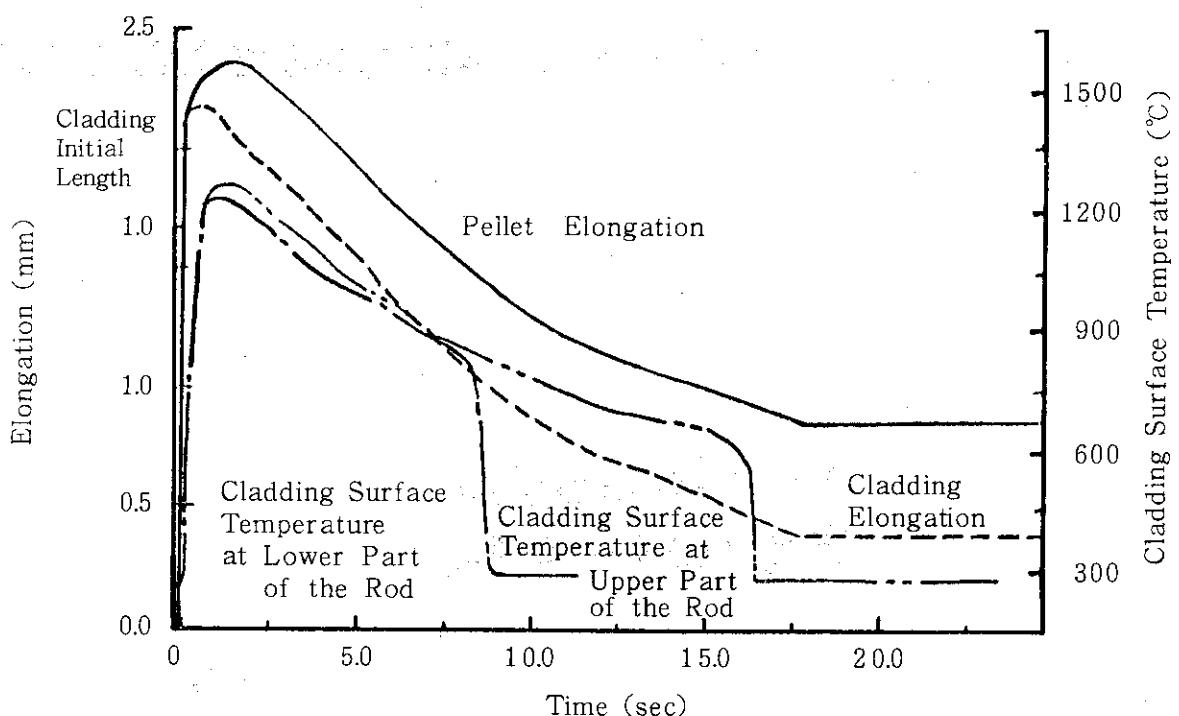


Fig. 3.2.4 Transient histories in Test No. 1213

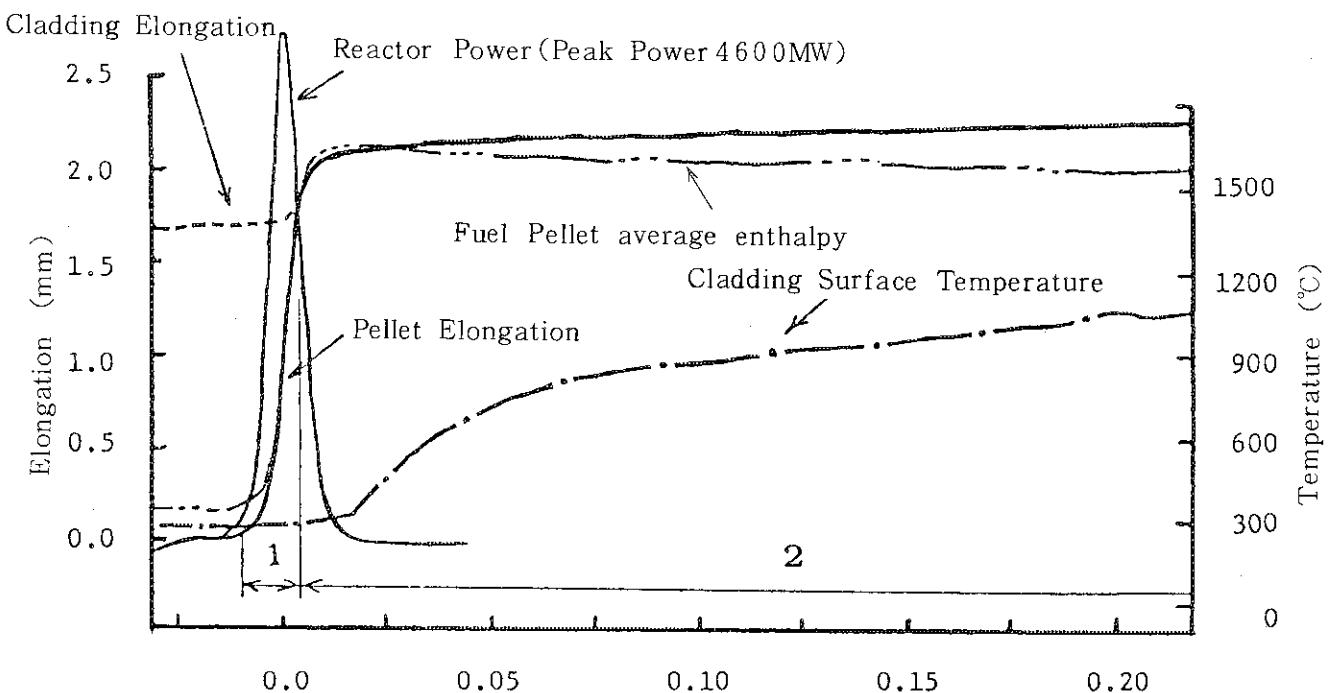


Fig. 3.2.5 Calculated fuel enthalpy and measured elongations at the early stage of the transient

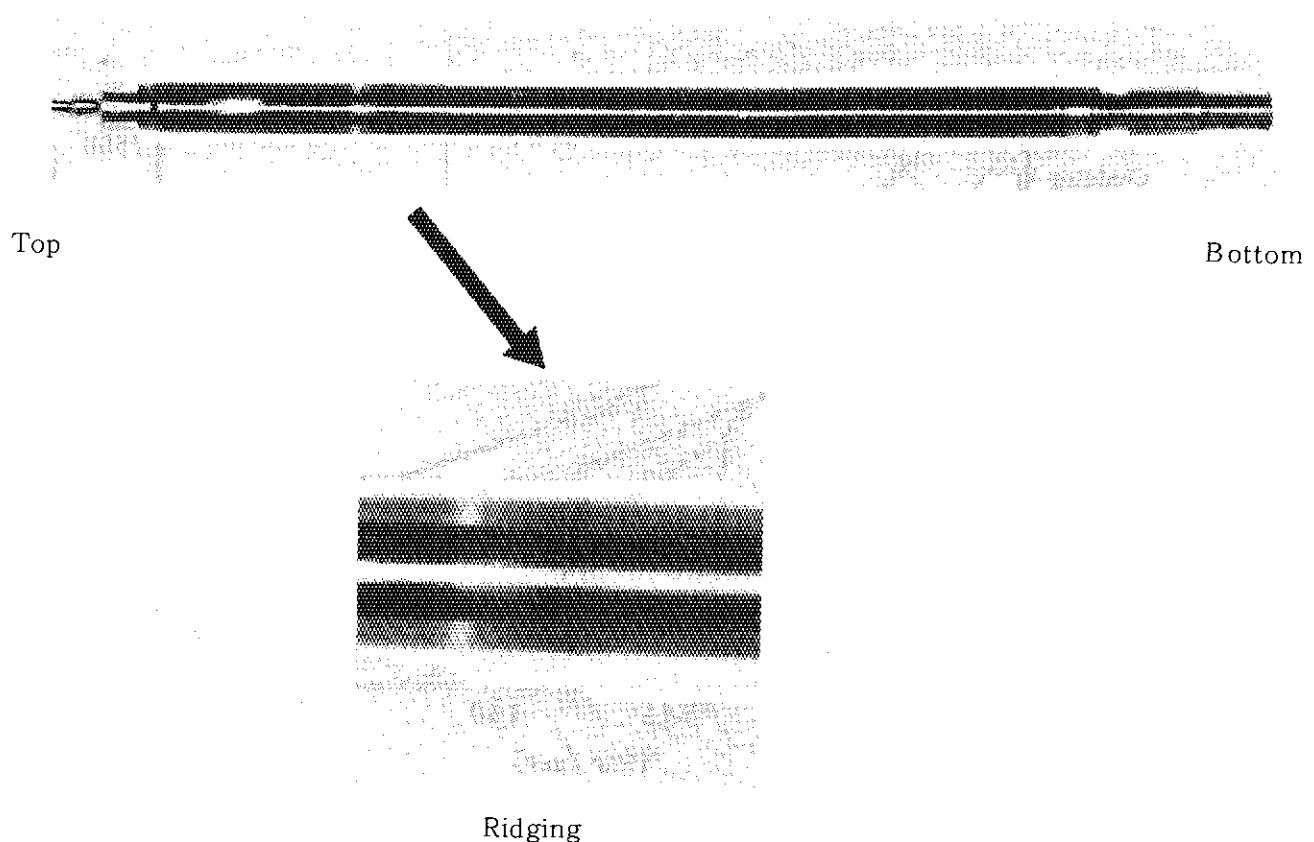


Fig. 3.2.6 Post - test fuel rod appearance in Test No. 1213

## 4. 高圧ループ実験

(片西 昌司, 藤城 俊夫)

### (1) 概要

高圧ループ実験は、前期までに単一燃料棒の実験（2211シリーズ）を5回実施しBWR高温待機状態の冷却条件を模擬して冷却材流速（3 m/s以下）とサブクール度の影響及び破損しきい値を調べた。今期は、独立した流路管を持つ3本の実験燃料の同時照射実験（2311シリーズ）を開始した。この実験シリーズは試験部内に相互に与える影響が少なくなるように3本の流路管を配置し、同時に3ケースのパラメータ試験を行う事を目的としている。今期は、発熱量の較正と本実験体系の特性、燃料の被覆管とペレットの間のギャップ幅の影響及び冷却材流速の影響を調べるために2回の実験（Test No 2311-1及びTest No 2311-2）を実施した。

### (2) 実験方法及び実験条件

Fig. 4.1.1に2311シリーズの試験部の概要を示す。3本の流路管内に実験燃料を固定し、流路管入口に設けたオリフィスの径により各流路管及び中央に位置するバイパス管の流量を調節した。冷却材（軽水）はカプセル内の流路管の外側を下降し、下部で反転して各流路管及びバイパス管に入りその中を上昇しながら実験燃料棒の冷却を行うようになっている。各流路管の入口及び出口には実験目的に応じ流量計、圧力計及び密度計を取付けることができる。

今期行った実験のうち第1回の実験（Test No 2311-1）では、NSRR標準実験燃料棒2本と狭幅ギャップ燃料棒（ギャップ幅0.05 mm, 燃料ペレットの直径以外は標準燃料棒と同一仕様）1本を装荷してパルス照射し、平均 $181 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量を与えた。冷却条件は、冷却材温度266°C、圧力7.2 MPaとし、各流路管内の流速は、狭幅ギャップ燃料に対しては1.8 m/s、他の2本に対しては1.0 m/s及び2.6 m/sとした。過渡時の計測は被覆管表面温度（Pt-Pt-Rh熱電対）、冷却材温度（CA熱電対）、流路管入口流量（ドラッグディスク型流量計）等である。第2回の実験（Test No 2311-2）では同じ体系でNSRR標準実験燃料棒3本を装荷し、冷却材温度273°C、圧力7.2 MPaの下で、流速をパラメータとして1.6, 2.6, 4.0 m/sとし、平均 $210 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量を与えた。過渡時の計測は第1回の実験（Test No 2311-1）と同様とした。

実験条件をまとめたものをTable 4.1.1に示す。

### (3) 実験結果

#### (i) 発熱量較正及び実験体系の特性

Test No 2311-1は、本実験体系の下での実験燃料の発熱量較正が第1の目的である。照射後の3本の実験燃料棒について、実験時に生成したFPのγ線強度測定を行い、それを他の較正済の実験燃料のγ線強度測定結果と比較するという方法で発熱量較正を行った。γ線強度は3本の燃料棒についてそれぞれ軸方向の2点で測定し、その結果全6点の測定点のうち最大 $173 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 、最小 $159 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 、平均 $166 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量がパルス照射によって与えられ

たことがわかった。高温高圧条件下の場合、パルス照射前に  $15 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  のエンタルピが与えられており、この初期エンタルピを加算すると実験燃料棒のエンタルピは平均  $181 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  になる。

本実験の体系は、カプセル中心軸直径  $4.7 \text{ mm}$  の同一円周上に実験燃料棒を配置している。大気圧カプセル実験で複数の燃料棒をバンドル体系に組んで同時照射した場合、カプセル径方向の中性子束分布に従って外周の燃料棒内で発熱量に差が生じその結果外周に配置された燃料棒はカプセル径方向に曲がりを生じた。それに対して本実験では燃料棒の間隔を広くしてあり、バンドルの場合のような核的な干渉が発生しないようとしてある。しかし、Fig. 4.1.2 及び Fig. 4.1.3 に示す照射後の外観からわかるように、2回の実験で用いた6本の燃料棒のうち Test No. 2311-1 の狭幅ギャップ燃料及び Test No. 2311-2 の高冷却材流速の標準燃料1本はカプセル中心方向への曲がりが生じていた。これは、燃料棒の位置から見てカプセル中心側は外側よりも減速材の水の層が厚いため燃料中で発熱量に差が生じた結果であると考えられる。同様の現象は高温高圧カプセルを用いた3本同時照射実験でも現われている。<sup>(\*1, \*2)</sup>

カプセル径方向の曲がりとは別に、冷却材流速の低い4本の燃料棒において熱電対を背にした向きへの曲がりが有効発熱部で生じていた。また、すべての燃料棒において有効発熱部は黒色に酸化していたが、熱電対取付箇所の上部即ち冷却材の下流側に局所的に青色の光沢のある部分がありここでは過渡時の被覆管温度が低く抑えられていたことがわかる。特にこの現象は冷却材流速の低いものについて顕著に現われていた。本実験体系の場合、流路管内面と燃料棒表面との間隔は約  $2.6 \text{ mm}$  であり、他の実験体系に比べ冷却材の層の厚さが小さいことになる。そのため、熱電対による流れの乱れにより下流側に熱伝達率の大きい部分が生じ、その結果熱電対を取付けた側とその反対側との温度差によって熱電対を背にした曲がりが生じたものと考えられる。

#### (ii) ギャップ幅の影響

これまでに行った大気圧条件下におけるギャップ幅の影響を調べる実験によって、狭幅ギャップの場合は破損しきい値には影響がないものの被覆管の溶融の程度が激しくなることが確かめられている。それに対し高温高圧条件下では被覆管のコラプスが生じるためギャップ幅の影響は少ないものと考えられる。しかし、Test No. 2311-1においては、狭幅ギャップ燃料は Fig. 4.1.3 に示すとおり、有効発熱部上部のリッジングの部分でカプセル中心に向かって曲がりが生じているのに対し、2本の標準ギャップ幅燃料は冷却材流速の大小にかかわらずそのような曲がりは生じていなかった。リッジングという現象は発熱部において軟化した被覆管が、強度を保っている非発熱部との境界付近で外圧による軸方向の力によってつぶされた結果生じるものであり、その際燃料棒のカプセル中心側の発熱量が高いと中心側に向かって曲がりを生ずる。本実験における狭幅ギャップ燃料は標準ギャップ幅燃料に比べて被覆管の軟化の程度が激しいために曲がりを生じたものと考えられる。

#### (iii) 冷却材流速の影響

前期までに行った単一燃料棒を用いた高圧ループ実験によって高温高圧条件下で冷却材流速  $3 \text{ m/s}$

(\*1) 反応度安全研究室、他：「NSRR 実験プログレス・レポート・13」、JAERI-M 83-193

(1983)

(\*2) " " " 14 , JAERI-M 84-046

(1984)

以下では冷却材の流動の影響は大気圧条件下と比べて少ないことがわかった。そこで今期は  $3 \text{ m/s}$  を超える範囲での冷却材流速の影響を調べるために実験を行った。但し、最大  $6 \text{ m/s}$  の流速を与える予定であったが流路管入口のドラッグディスク型流量計の流動抵抗が予想以上に大きかったため最大で  $4.0 \text{ m/s}$  の流速しか得られなかった。

Fig. 4.1.4 に被覆管表面最高温度及び膜沸騰継続時間を、既に得られていた 2211 シリーズ（発熱量  $184 \sim 188 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ）の結果と合わせて示す。発熱量の違いを考慮すると、2211 シリーズの結果と比べて流速の変化による被覆表面最高温度の違いは大きくなっている。これは  $3 \text{ m/s}$  以下の範囲でも現われており、流速によってその影響の大きさが変わるものではなく、試験部の体系の違いによるものと考えられる。2211 シリーズでは流路管を使用していないのに対し、2311 シリーズでは流路管があり冷却材の層が薄いことから冷却性は比較的悪くなっている、それが流速の影響を大きくしている要因になっていると考えられる。

Table 4.1.1 Test conditions in HTHP loop tests

| Test No. | Fuel No. | Fuel Type                         | Energy Deposition (*1)<br>(cal/g • UO <sub>2</sub> ) | Coolant Condition |                |                     |
|----------|----------|-----------------------------------|--|-------------------|----------------|---------------------|
|          |          |                                   |  | Temperature (°C)  | Pressure (MPa) | Flow Velocity (m/s) |
| 2311-1   | 1        | S T D                             | 18 1   | 2 6 6             | 7.2            | 1.0 (*2)            |
|          | 2        | S T D                             |  |                   |                | 2.6 (*2)            |
|          | 3        | Narrow Gap<br>(Gap Width: 0.05mm) |  |                   |                | 1.8 (*2)            |
| 2311-2   | 1        | S T D                             | 210  | 2 7 3             | 7.2            | 1.6                 |
|          | 2        | S T D                             |  |                   |                | 2.6 (*3)            |
|          | 3        | S T D                             |  |                   |                | 4.0                 |

(\*1) including initial enthalpy ( about 15 cal/g • UO<sub>2</sub> )

(\*2) estimated from flow velocity measured at room temperature

(\*3) Flow meter failed and this value was estimated from the diameter of the orifice at the inlet of flow shroud

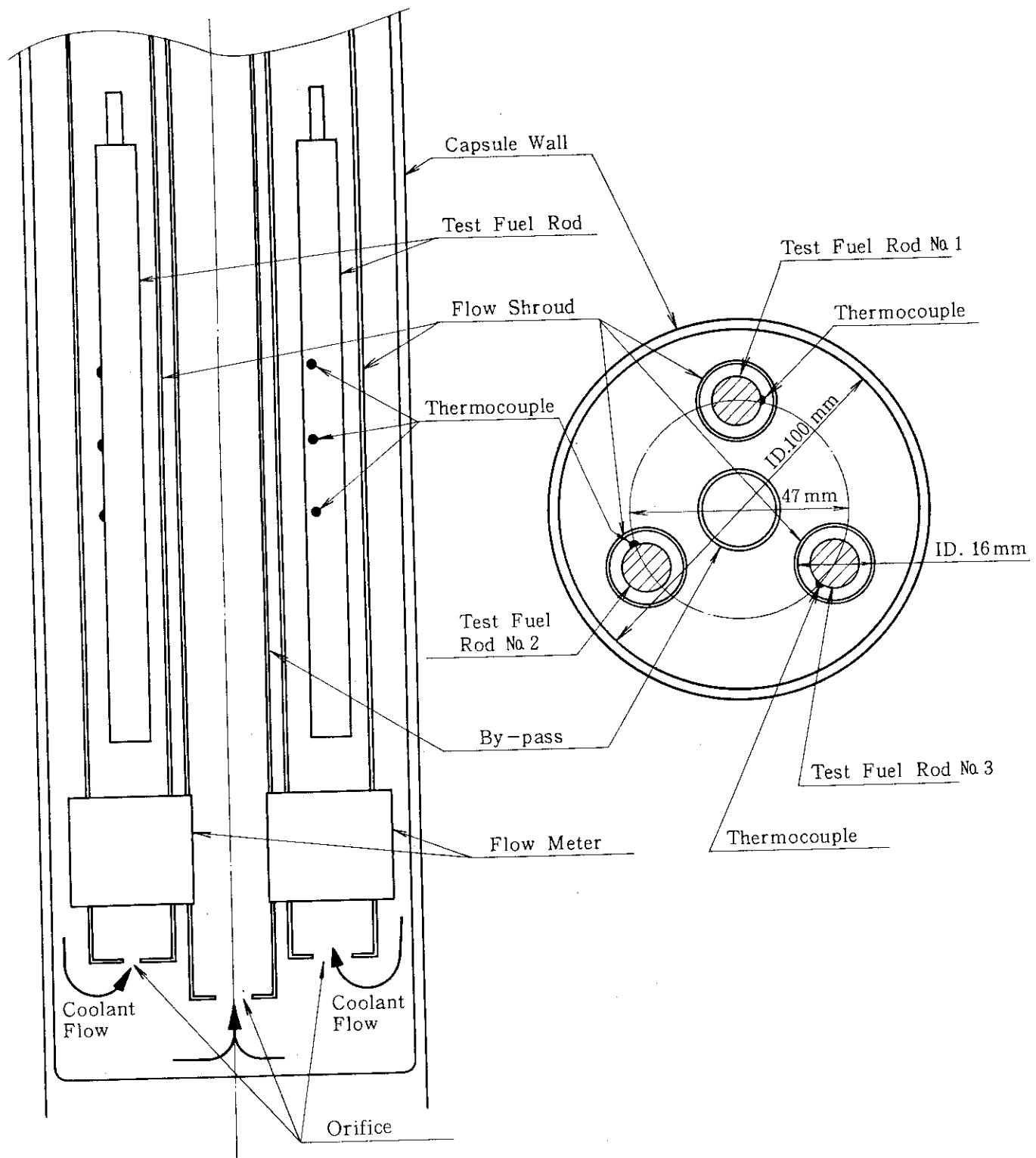
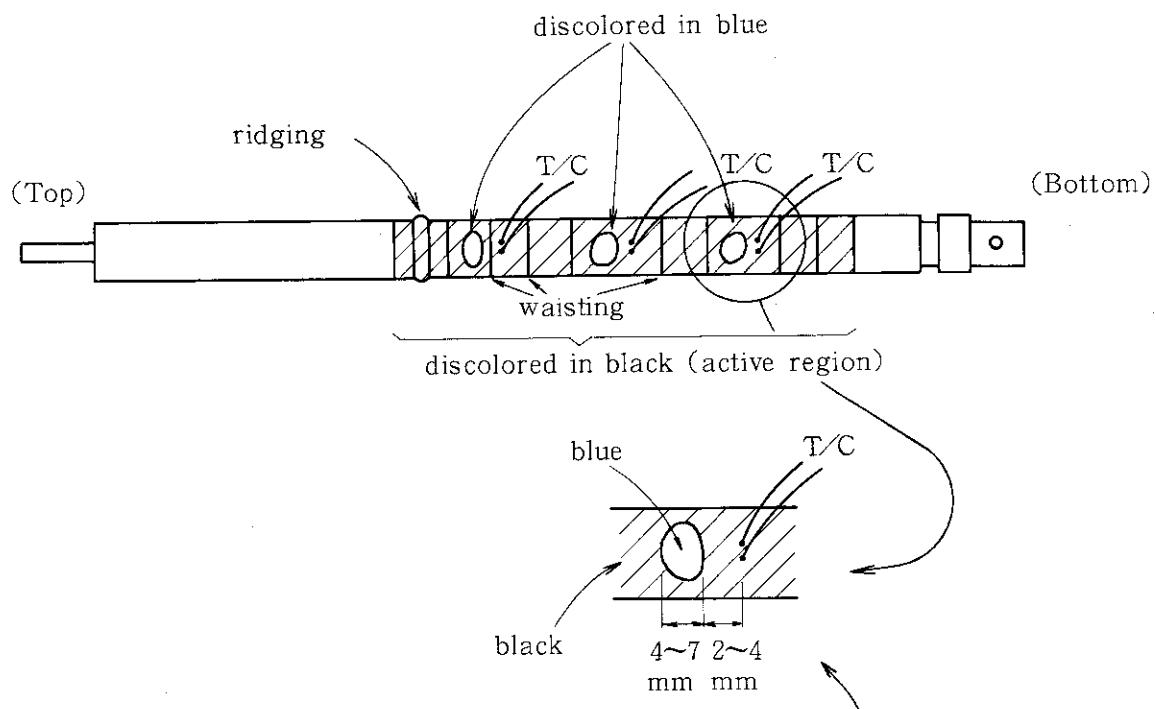
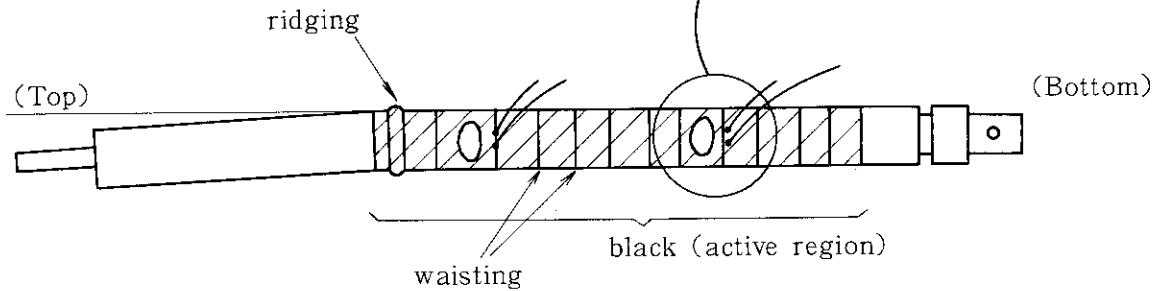


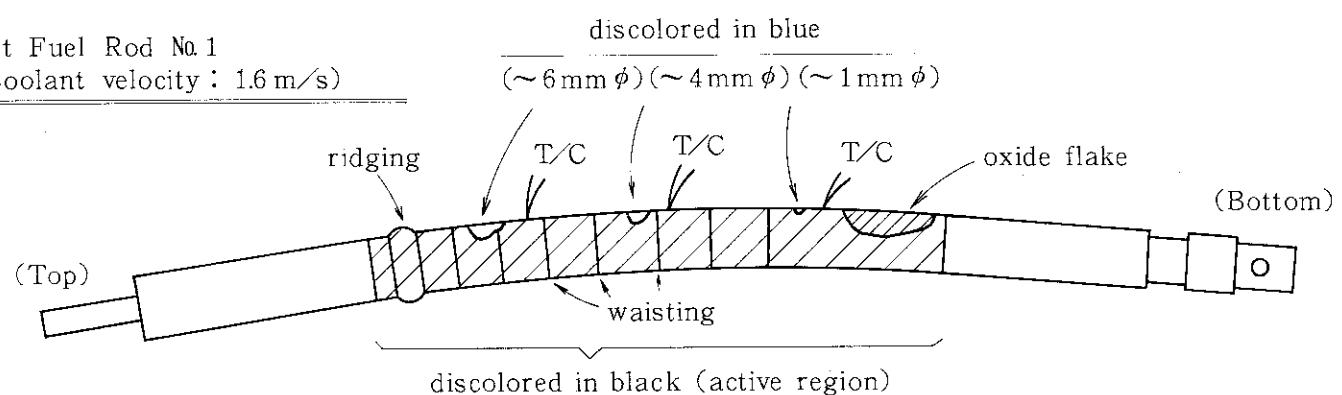
Fig. 4.1.1 Schematic of test train for 3 independent fuel rod test

Test Fuel Rod No.1 and No.2 (STP)Test Fuel Rod No.3 (Narrow Gap)

- All test fuel rods bent to the opposite direction of the thermocouples.
- Test fuel rod No.3 (Narrow gap) bent to the center axis of the capsule at the upper edge of the active region.
- No failure.

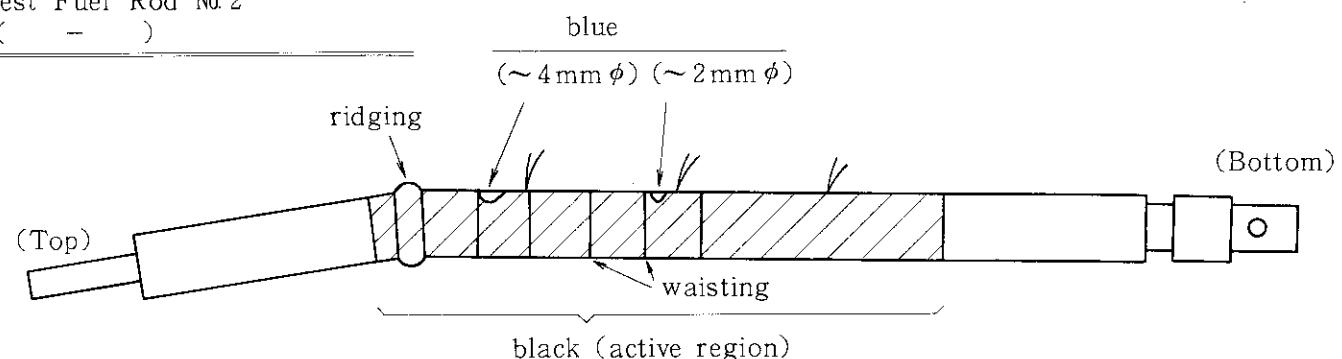
Fig. 4.1.2 Test fuel rod appearance after irradiation  
(Test No.2311-1)

Test Fuel Rod No.1  
(Coolant velocity : 1.6 m/s)



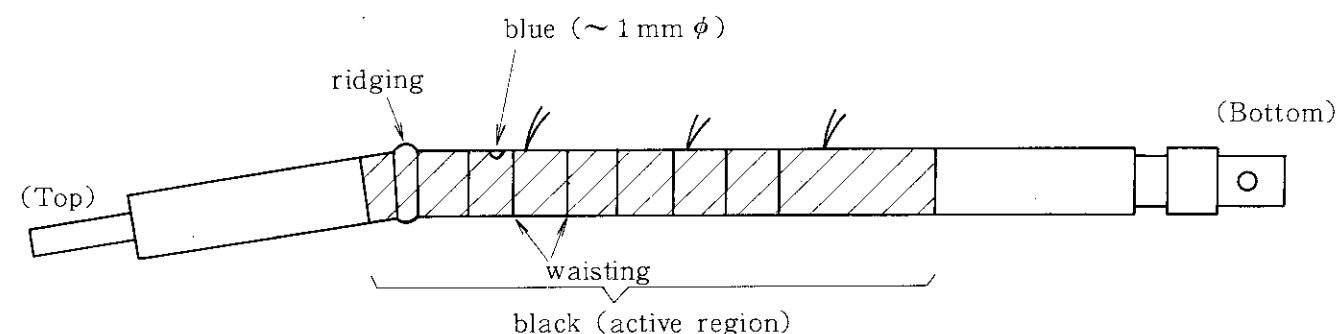
Test Fuel Rod No.2

( - )



Test Fuel Rod No.3

(Coolant velocity : 4.0 m/s)



- Test fuel rod No.1 bent to the opposite direction of the thermocouples at the active region.
- Test fuel rods No.2 and No.3 bent to the opposite direction of the T/Cs at the upper edge of the active region.
- Test fuel rod No.3 bent also to the center of the capsule at the upper edge of the active region.
- No failure.

Fig. 4.1.3 Test fuel rod appearance after irradiation  
(Test No. 2311-2)

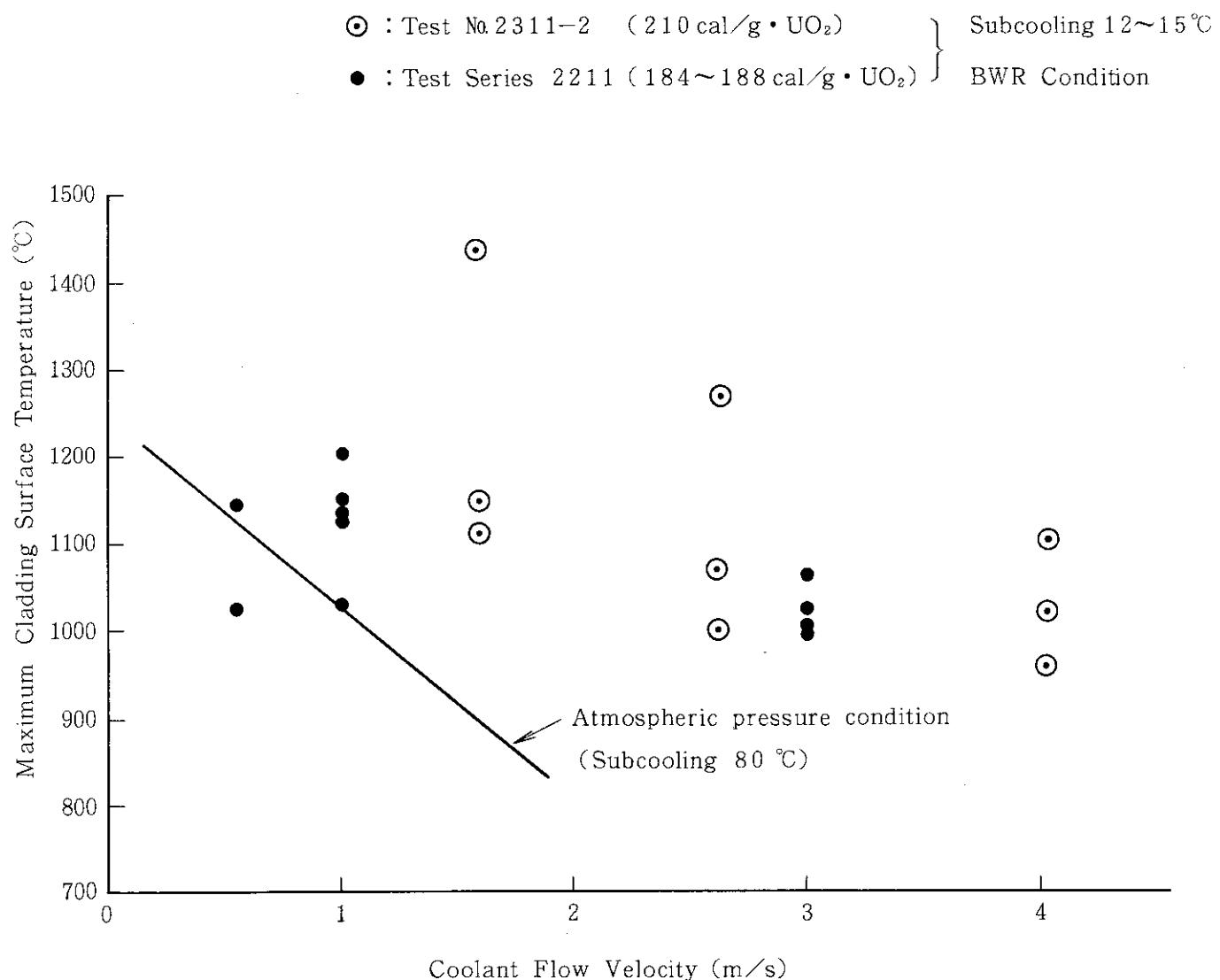


Fig. 4.1.4 Effect of the coolant flow on the maximum cladding surface temperature

## 5. 燃料挙動可視実験

(斎藤 伸三, 鶴田 隆治, 中村 武彦)

### (1) 概 要

NSRR 実験において、試験燃料が急速に加熱され、核沸騰離脱 (DNB) を起こし、或いは破損する様子を光学的に捉え高速度写真に収める実験、いわゆる可視カプセル実験をこれまでに 15 回行って来ている。今期は更に以下の 4 つの実験を行った。酸化雰囲気(空気) 中での燃料棒の破損挙動を調べる実験 (Test No. 600-17), 3 本バンドル体系に組まれた燃料棒間の相互作用を調べるための実験 (Test No. 600-18), 燃料棒からの放射光の色あいから被覆管の表面温度を測る実験 (Test No. 600-19) ならびに、両端を拘束した燃料の破損挙動を調べる実験 (Test No. 600-20) である。Table 5.1 に今期実施した実験の目的と条件をまとめて示す。

### (2) 実験条件および方法

実験には昨年度行った実験 (Test No. 600-16) に引き続き、改良型の可視カプセル (V 型) を用いた。

Test No. 600-19 および 20 は Figs. 5.1, 5.2 に示す静水中での標準的な体系であるが、Test No. 600-20 では燃料棒下端ばかりでなく上端をも固定して、燃料棒の熱膨張を拘束した。また、Test No. 600-19 では照射実験前に同じ撮影装置を用いて、フィルム感度の較正を行い、炉内実験の際にはランプは点灯させず、燃料棒自身の発熱光のみで撮影した。Test No. 600-17 の実験体系を Fig. 5.3 に示す。この図に示す様に、試験燃料を水面上部の空気中に開口した石英ガラス管に收め、酸化雰囲気で照射した。Test No. 600-18 では、試験燃料を 14.3 mm のピッチで 3 本バンドル体系に組み、燃料棒間の冷却水の流路部に水温測定用の熱電対を取付けた。Fig. 5.4 に実験体系を示す。

各実験で使用した試験燃料棒はすべて濃縮度 10 % の標準的なものである。実験計装としては、被覆管表面温度測定用熱電対、冷却水もしくは雰囲気ガス温度測定用熱電対を取り付けた。

### (3) 実験結果

#### (i) Test No. 600-17

本実験では、酸化雰囲気中での燃料棒の破損挙動を調べるために、標準燃料を石英ガラス管に收めその内部を空気として照射した。発熱量は約 220 cal/g・UO<sub>2</sub> で、高速度カメラの撮影速度は 205 コマ／秒であった。

Fig. 5.5 に原子炉出力、被覆管表面温度および試験燃料近くの空気温度の過渡記録を示す。被覆管温度はパルス出力発生後約 0.1 ~ 0.3 秒で 1200 °C 以上を記録し、熱電対は全て破損した。石英ガラス管内に取り付けた空気温度測定用の熱電対は、パルス約 3 秒後には 500 °C に達した。この実験では、酸化雰囲気であるにもかかわらず被覆管の酸化が十分進まず、被覆管は溶けて流れ落ちた。これは石英ガラス管の容積が小さいために生じた酸素不足による。しかし、被覆管の溶融挙動は非酸化雰囲気で行った実験 Test No. 600-14 の結果と明らかに異っており、被覆管の流れ落ち速度は

3分の1と小さく、 $0.2 \text{ m/sec}$  であった。この実験で酸化が制限された雰囲気での燃料棒の挙動を得ることが出来た。Fig. 5.6に実験中の燃料棒の過渡挙動を示す。

- |              |                  |
|--------------|------------------|
| (A) パルス出力発生前 | 中央に試験燃料棒が見えている。  |
| (B) 0.1秒     | 燃料棒が赤熱し始める。      |
| (C) 0.3秒     | 熱電対がはがれる。        |
| (D) 0.5秒     | 被覆管が溶けて、一部でふき出す。 |
| (E) 1.0秒     | 溶融した被覆管が流れ落ち始める。 |

照射実験終了後、実験カプセルから取り出した試験燃料の外観写真を Fig. 5.7 に示す。被覆管はキャンドリングし、燃料ペレットは、薄く残った被覆管の膜でつつまればらにはなっていないが、解体時に数個に分断した。

#### (ii) Test No. 600-18

この実験は、燃料棒をバンドルに組み燃料棒間相互作用による燃料表面温度履歴の変化、冷却水挙動の変化等を調べる目的で行った。試験燃料3本を燃料棒間ピッチ  $14.3 \text{ mm}$  の  $14 \times 14$  PWR 体系に組み、内径  $36 \text{ mm}$  の石英ガラス管内に取付けた。与えた発熱量は約  $250 \sim 280 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  で、試験燃料の位置によって異なる。3本の試験燃料の中央部の対応する位置に取付けた熱電対とその  $25 \text{ mm}$  上方の燃料棒間の冷却水流路に取付けた熱電対の過渡記録を、原子炉出力と併せて Fig. 5.8 に示す。これに見られる様に試験燃料3本間に大きな温度差が見られる。この発熱分布・温度分布の問題については、現在計算と金相検査により解析を進めている。また、撮影されたフィルムでは、試験燃料棒各々は厚い膜沸騰に覆われているものの、蒸気膜間には水の層が見られ、燃料棒間が完全にドライアウトする現象は見られない。Fig. 5.8 に示される冷却水温度は  $100^\circ\text{C}$  を越えることが無く、ドライアウトが起っていないことを裏付けている。

撮影した  $16 \text{ mm}$  フィルムから得られた燃料棒の過渡挙動の様子を Fig. 5.9 に代表して示す。その概略を説明すると以下のとおりである。

- |              |  |
|--------------|--|
| (A) パルス出力発生前 | 試験燃料のうち手前の2本が並んで見える。残る一本は中央奥に位置するが、ランプの光が届いておらず見えない。 |
| (B) 0.1秒     | 手前の2本の燃料棒が赤白く見えて来る。                                  |
| (C) 1.0秒     | 隣り合った燃料棒表面の蒸気膜は激しく動搖し、互いにぶつかり合っているが、完全にドライアウトはしていない。 |
| (D) 3.0秒     | 燃料棒が冷え始め暗赤色になってゆく。                                   |
| (E) 5.0秒     | 画面右の燃料棒は右側面からクエンチが起こっている。                            |
| (F) 8.0秒     | 画面左の燃料棒も、上部よりクエンチして来ている。                             |

Fig. 5.10 にカプセル解体時に燃料をペリスコープを通して撮った写真を示す。被覆管は黒色に酸化し大きく波打っている。その下に、カプセルから取出した燃料の写真を示す。上から順に画面右側に見えたもの、中央奥のもの、左側のものである。被覆管の変形の度合いが燃料棒それぞれ異っていることがわかる。

#### (iii) Test No. 600-19

本実験は、Test No. 600-11, 15 の実験と同様に試験燃料棒の色から温度を評価する目的で行った色温度測定用実験である。10%濃縮の NSRR 標準型燃料棒に約  $280 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  の発熱量を与え、照明用ランプは使用せず、燃料棒の発熱光のみで  $216 \text{ コマ/秒}$  の速度で撮影した。そ

の時の原子炉出力及び被覆管表面温度測定用熱電対の過渡記録を Fig. 5.1 1 に示す。熱電対は 0.21 ~ 0.29 秒で 1650 °C ~ 1760 °C を記録して、全て破損した。また、過渡時の燃料棒の挙動を撮影した 16 mm フィルムから抜粋して Fig. 5.1 2 に示す。

- (A) 0.20 秒 試験燃料棒が赤く見え始める。
- (B) 0.25 秒 中央下部で熱電対が破損し、この時点で被覆管温度は 1600 °C を越えている。
- (C) 1.2 秒 燃料表面に暗い部分が現われ部分的に温度が低下して来ている。  
燃料表面は膜沸騰で覆われ蒸気膜は激しく上昇しており、この膜が燃料棒の像を歪ませている。
- (D) 3.5 秒 被覆管の部分的黒色化が進み、こうした部分で被覆管が大きく変形しペレットから浮き上がっていることがうかがわれる。
- (E) 5.1 秒 全体に温度が下がり、黒い部分がはっきりして来る。
- (F) 7.0 秒 燃料棒は徐々に冷え見えなくなってゆく。

カプセル解体中の試験燃料棒の写真を Fig. 5.1 3 に示す。被覆管は酸化、薄肉化し、ふくらみ、ところどころはげ落ちている。

#### (iv) Test No. 600-20

本実験は、両端が拘束された燃料棒が反応度事故時にどのような挙動を示して破損するかを調べるために行った。標準型（10%濃縮）の試験燃料に大気圧静水条件で約 280 cal/g・UO<sub>2</sub> の発熱量を与えた。高速度カメラの撮影速度は約 225 コマ/秒であった。被覆管表面に取付けた熱電対（6 対）と試験燃料棒近くの水温および原子炉出力の過渡記録を Fig. 5.1 4 に示す。被覆管表面温度測定用熱電対は、0.27 ~ 0.60 秒で 1650 ~ 1740 °C を記録して全て破損した。

撮影した 16 mm フィルムから得られた燃料棒の過渡挙動の様子を Fig. 5.1 5 に代表して示す。その概略を以下に説明する。

- (A) パルス出力発生前 中央に試験燃料、それを囲んで石英ガラス管が見える。
- (B) 0.48 秒 燃料棒が赤く浮き上がり冷却水が膜沸騰を始めている。
- (C) 1.7 秒 左側面が冷え、暗くなり始めている。
- (D) 3.2 秒 燃料棒中央に縦にクラックが発生している。
- (E) 5.3 秒 一部でクエンチが始った。
- (F) 8.3 秒 クラック内部より気泡が発生している。
- (G) 10.4 秒 ほとんどクエンチして、気泡はクラックから発生している。
- (H) 15.6 秒 燃料棒左側面の被覆管がクラックからの気泡の発生により振動し、はく離し始めた。

照射終了後、カプセル解体時にペリスコープを通して見た試験燃料棒の写真を Fig. 5.1 6(a) に示す。被覆管左側面の振動していた部分は、かろうじてはげ落ちず残っている。この試験燃料は解体中に(b)に示すとおり分断した。

Table 5.1 Conditions and objectives in the fuel behavior observation tests

| Test № | Fuel Rod                       | Ambient condition   | Energy Deposition                              | Recording Speed | Objective  |
|--------|--------------------------------|---|--|-----------------|--|
| 600-17 | Standard type fuel rod of 10%E | Air   | $\sim 220 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$     | 205 f.p.s.      | Observation of fuel damage behavior in the air environment               |
| 600-18 | ditto                          | Atmospheric<br>Stagnant water<br>3 rod bundle arrangement | $250 \sim 280 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ | 225 f.p.s.      | Observation of fuel rods interaction in a bundle arrangement             |
| 600-19 | ditto                          | Atmospheric<br>stagnant water                             | $\sim 280 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$     | 216 f.p.s.      | Temperature estimation from the color of recorded film                   |
| 600-20 | ditto                          | ditto   | $\sim 280 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$     | 225 f.p.s.      | Observation of fuel rod behavior which was attached at both ends tightly |

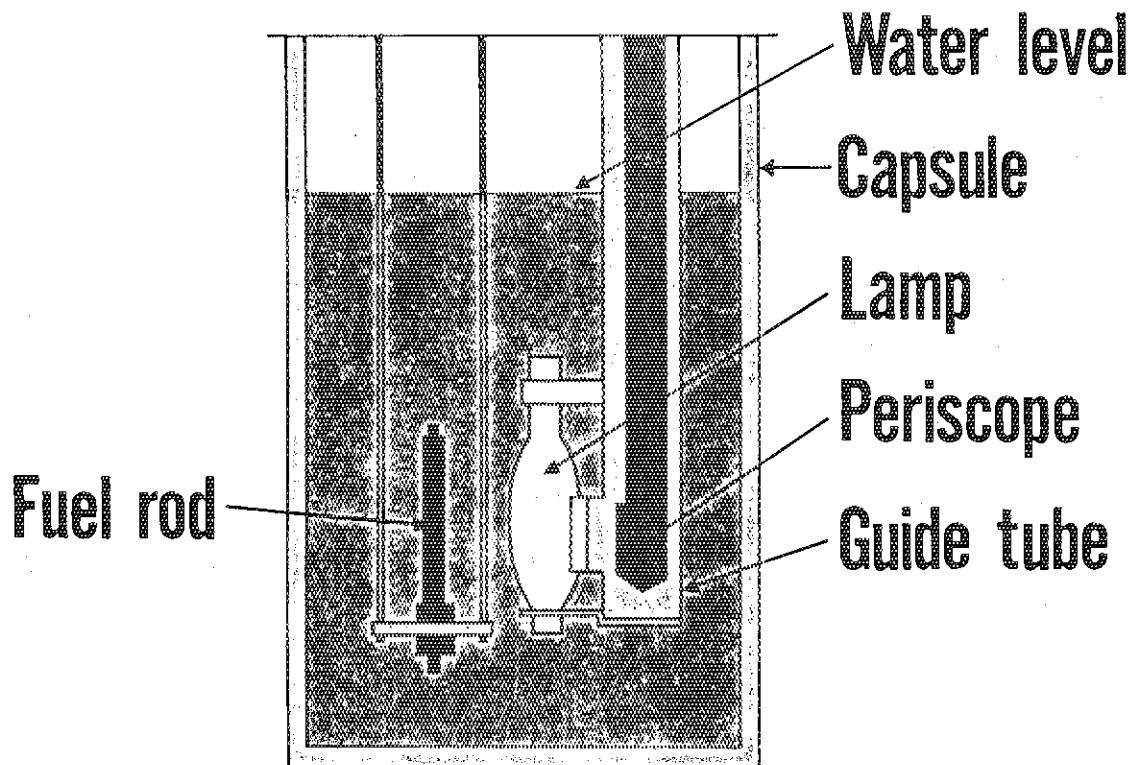


Fig. 5.1 Test arrangement in Test No 600-19

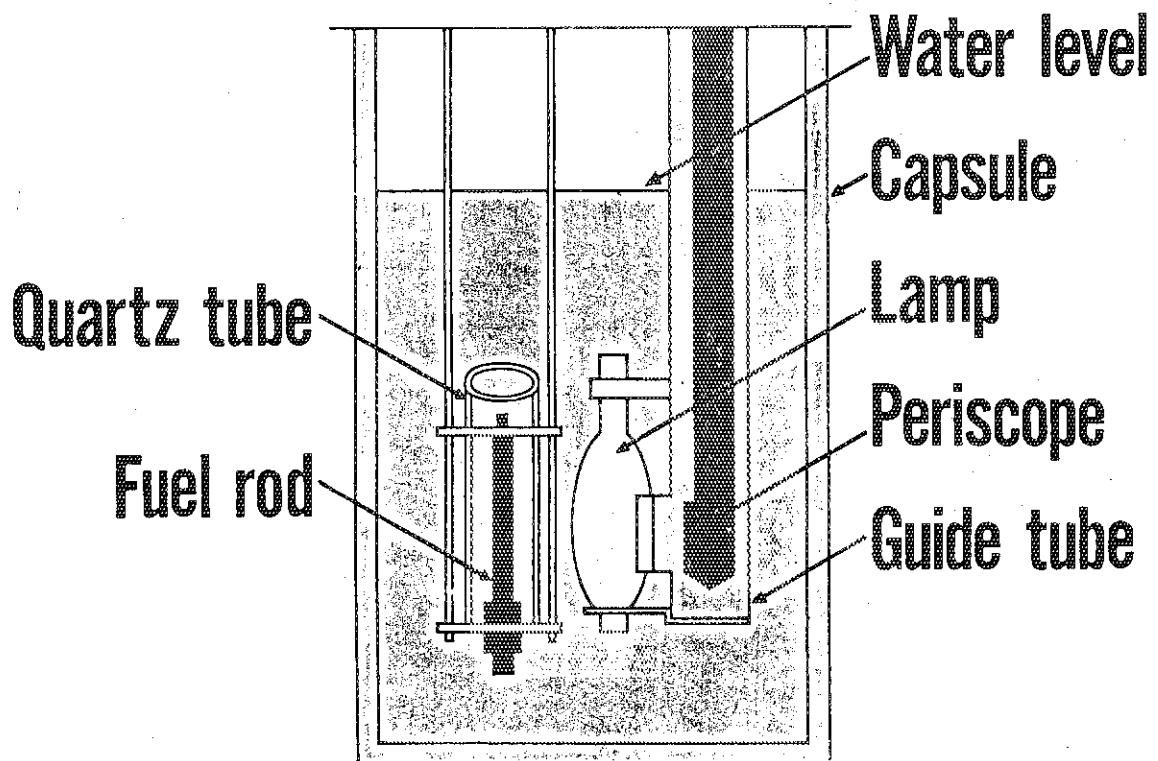


Fig. 5.2 Test arrangement in Test No 600-20

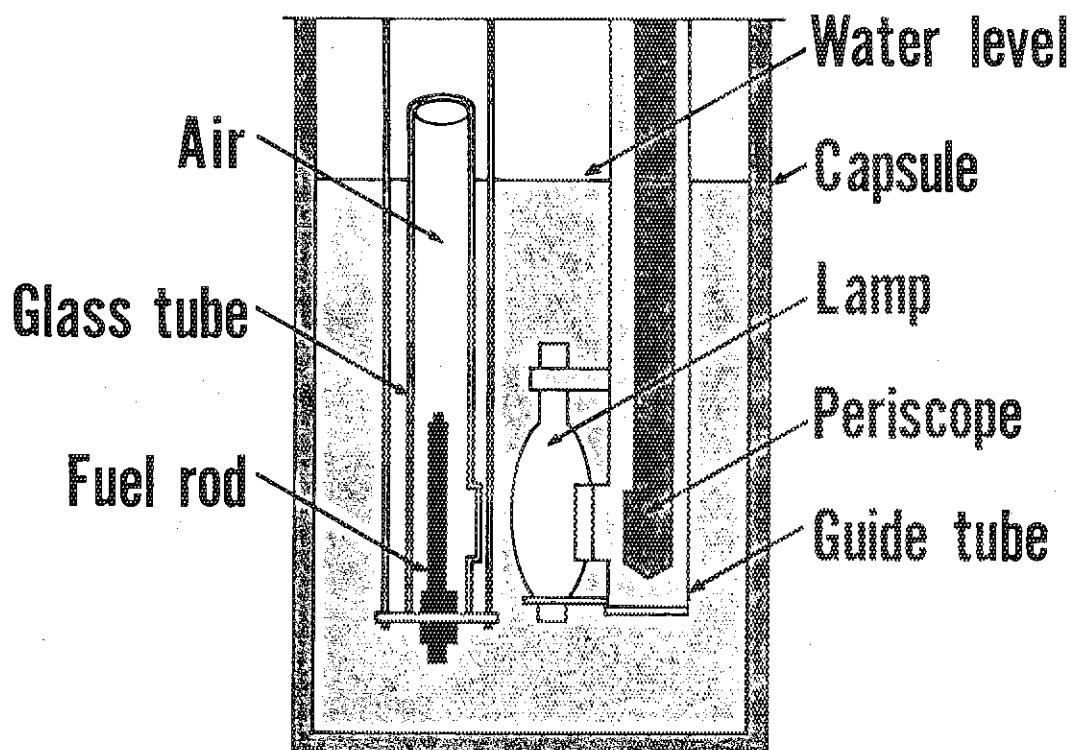


Fig. 5.3 Test arrangement in Test No. 600-17

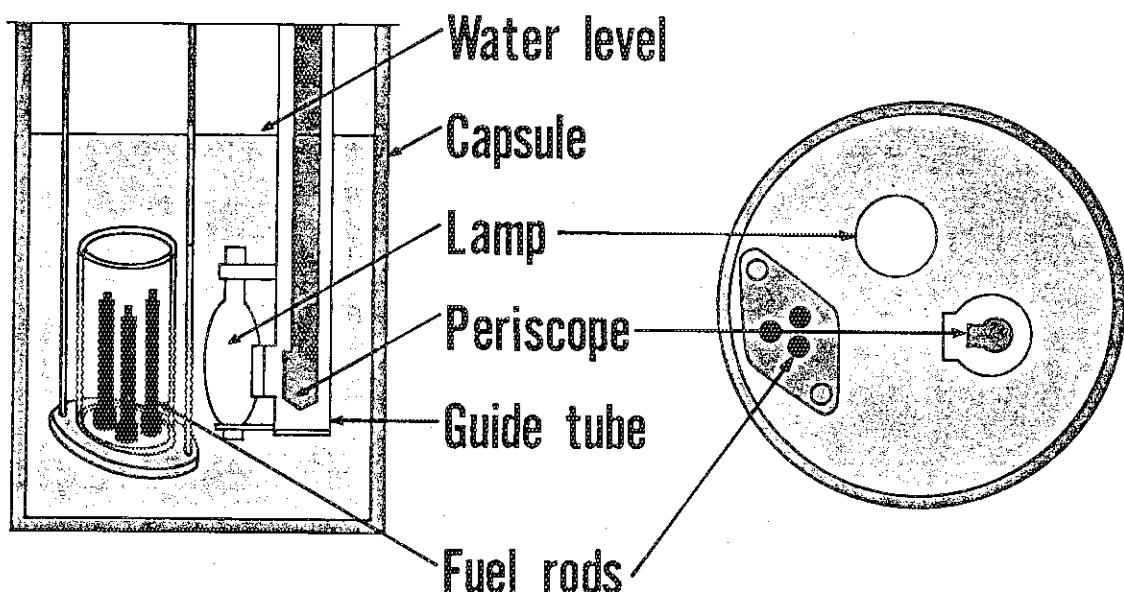


Fig. 5.4 Test arrangement in Test No. 600-18

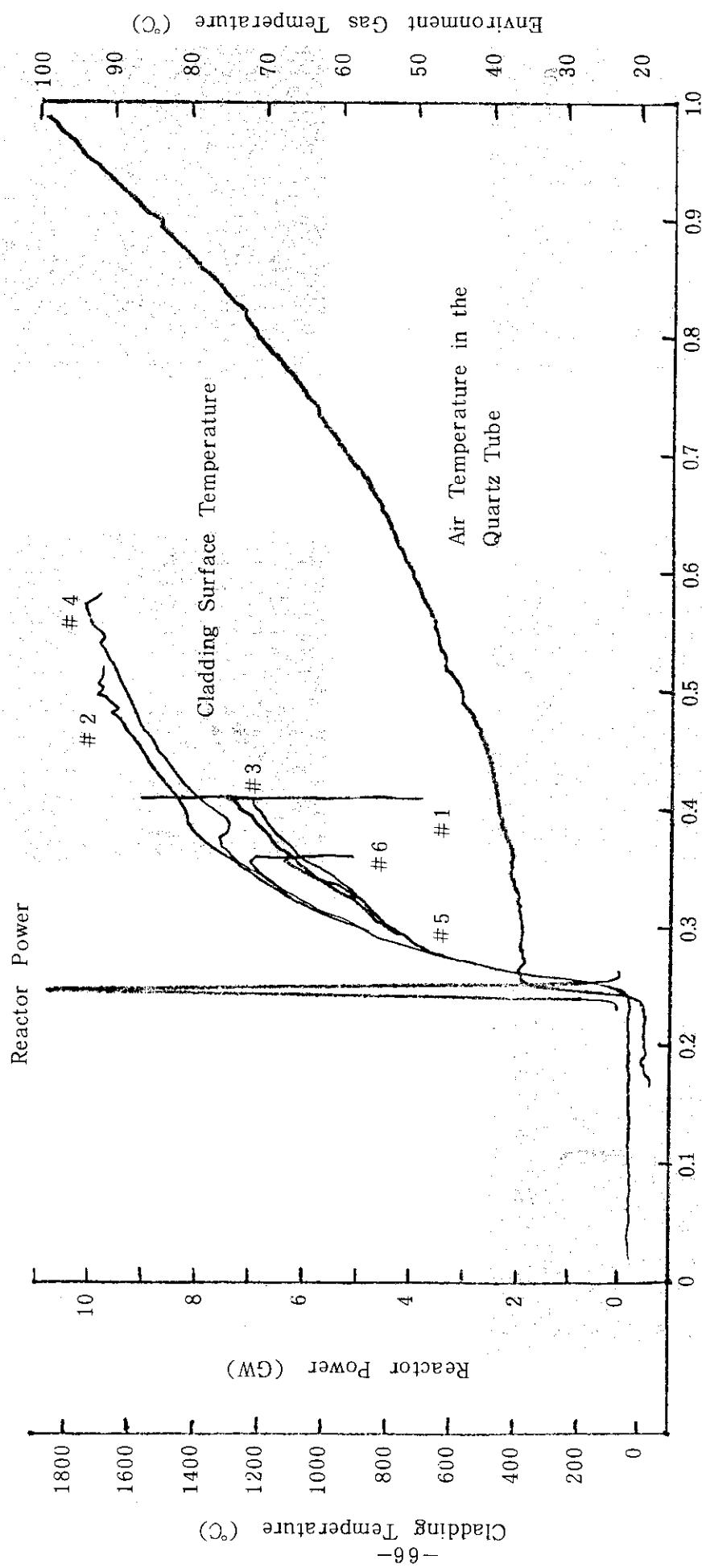


Fig. 5.5 Transient histories of reactor power, cladding temperature and environment gas temperature in Test No 600-17

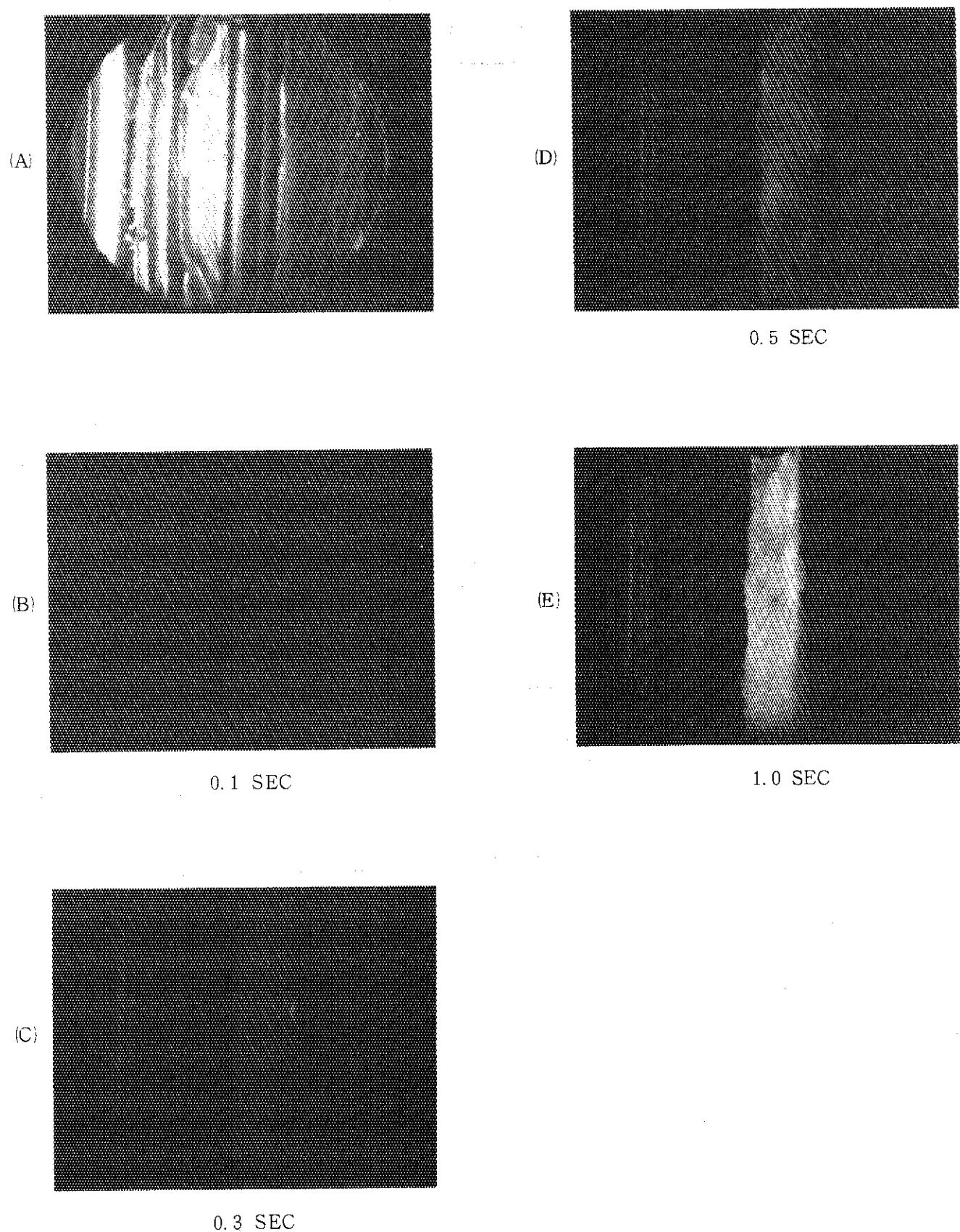
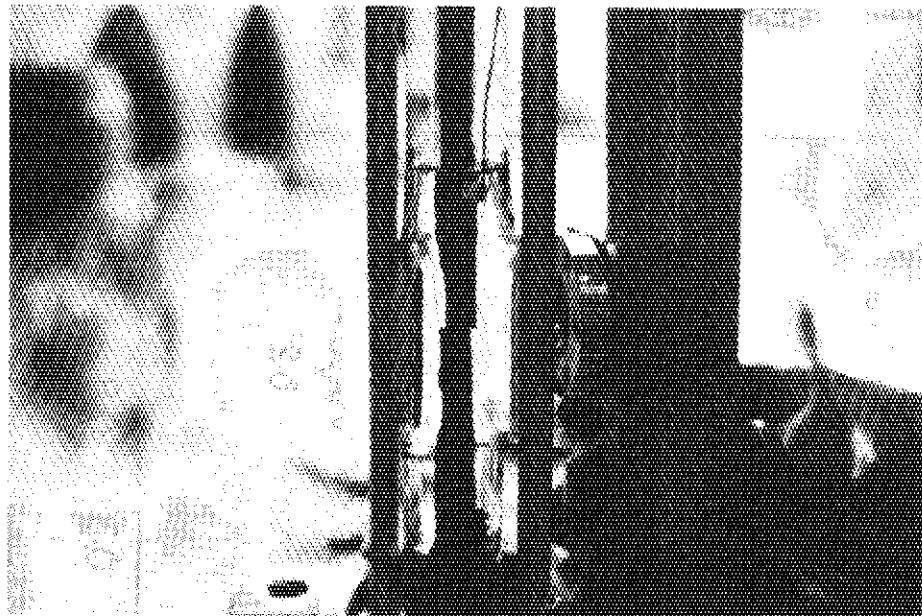
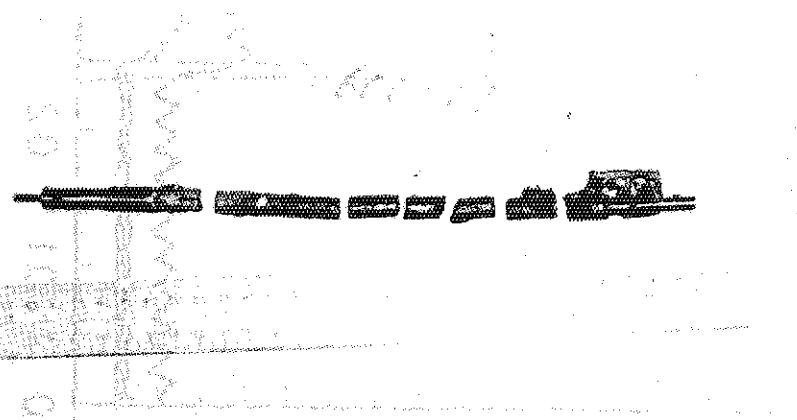


Fig. 5.6 Pictures printed from motion film taken in Test No 600-17



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



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

Fig. 5.7 Appearance of post test fuel rod in Test No. 600-17

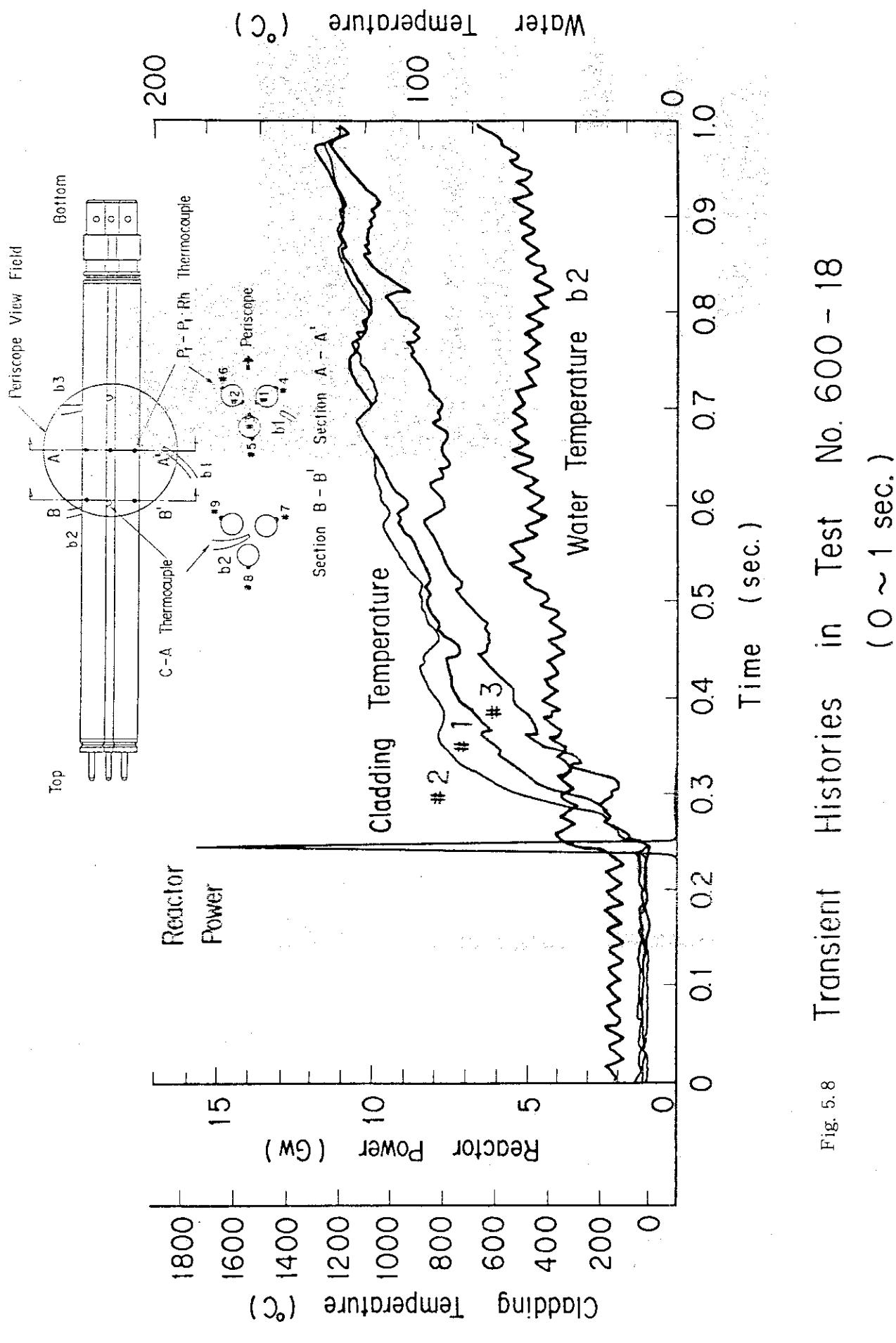


Fig. 5.8 Transient Histories in Test No. 600 - 18  
(0 ~ 1 sec.)

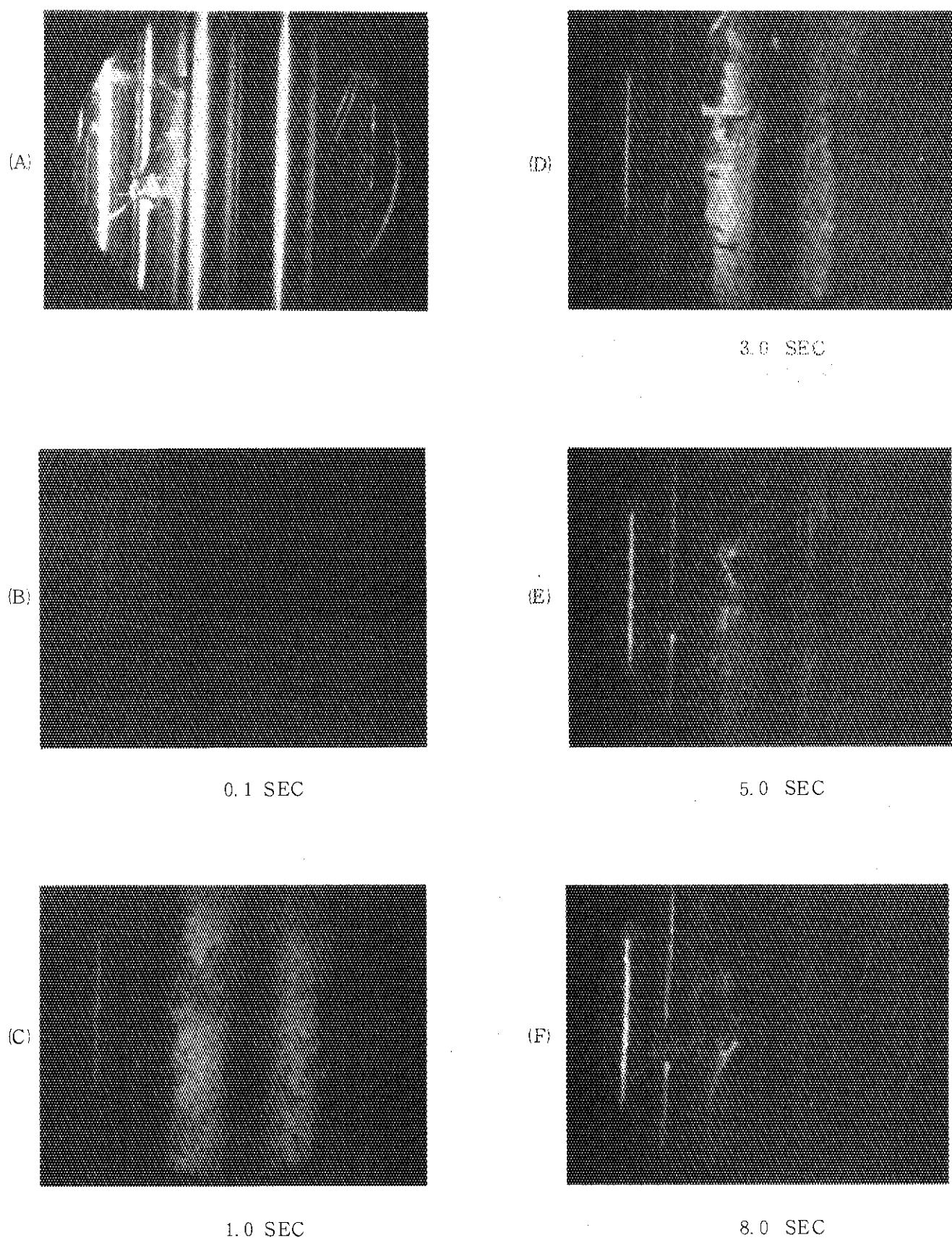
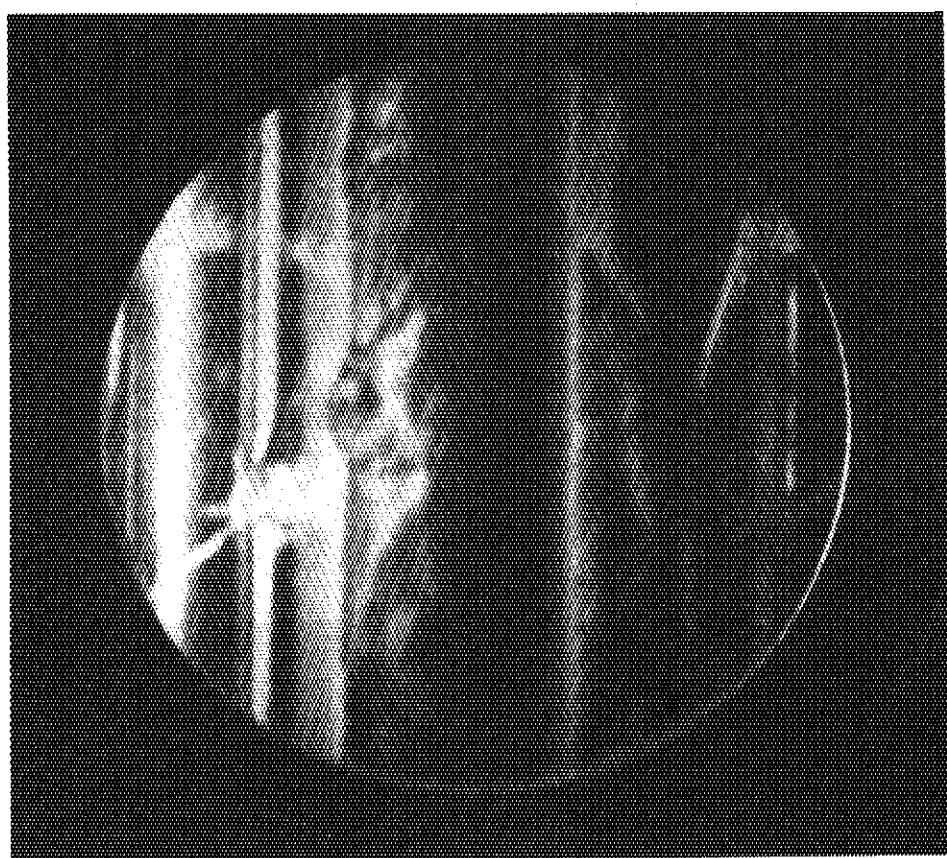
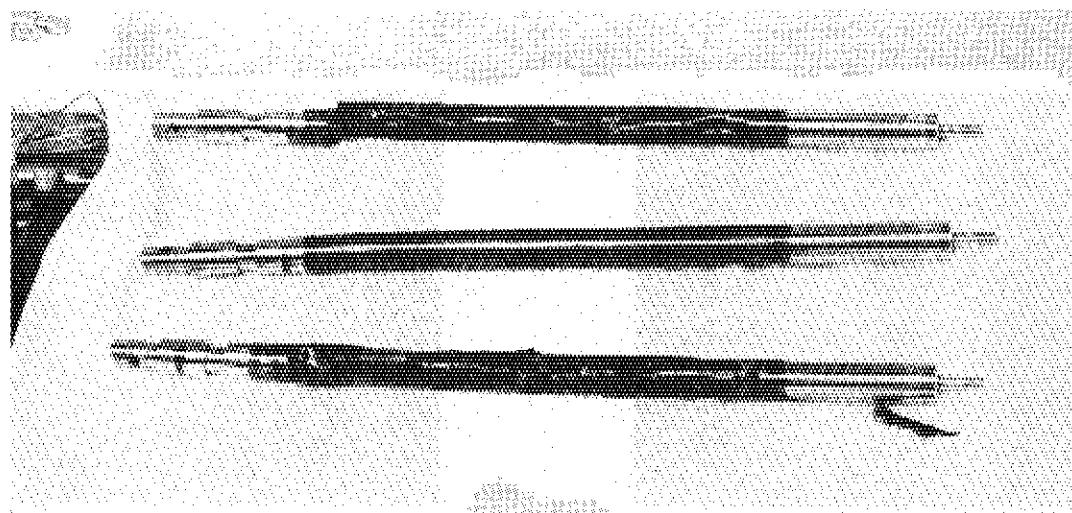


Fig. 5.9 Pictures printed from motion film taken in Test No 600-18



(a) Picture through a periscope after the transient



(b) Photo of fuel rods after disassembling the capsule

Fig. 5.10 Appearance of post test fuel rods in Test № 600-18

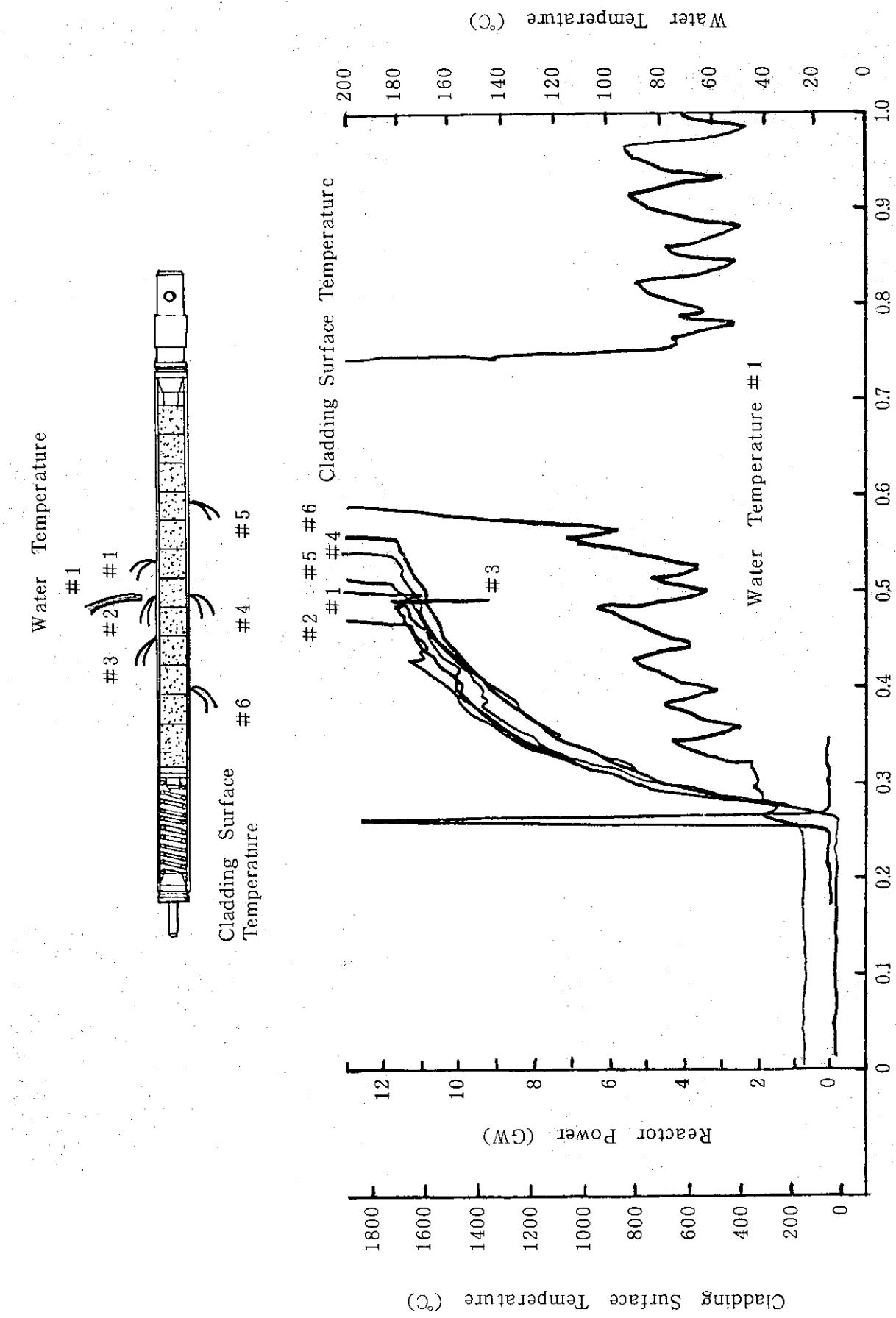


Fig. 5.11 Transient histories of reactor power, cladding temperature and water temperature in Test No. 600-19

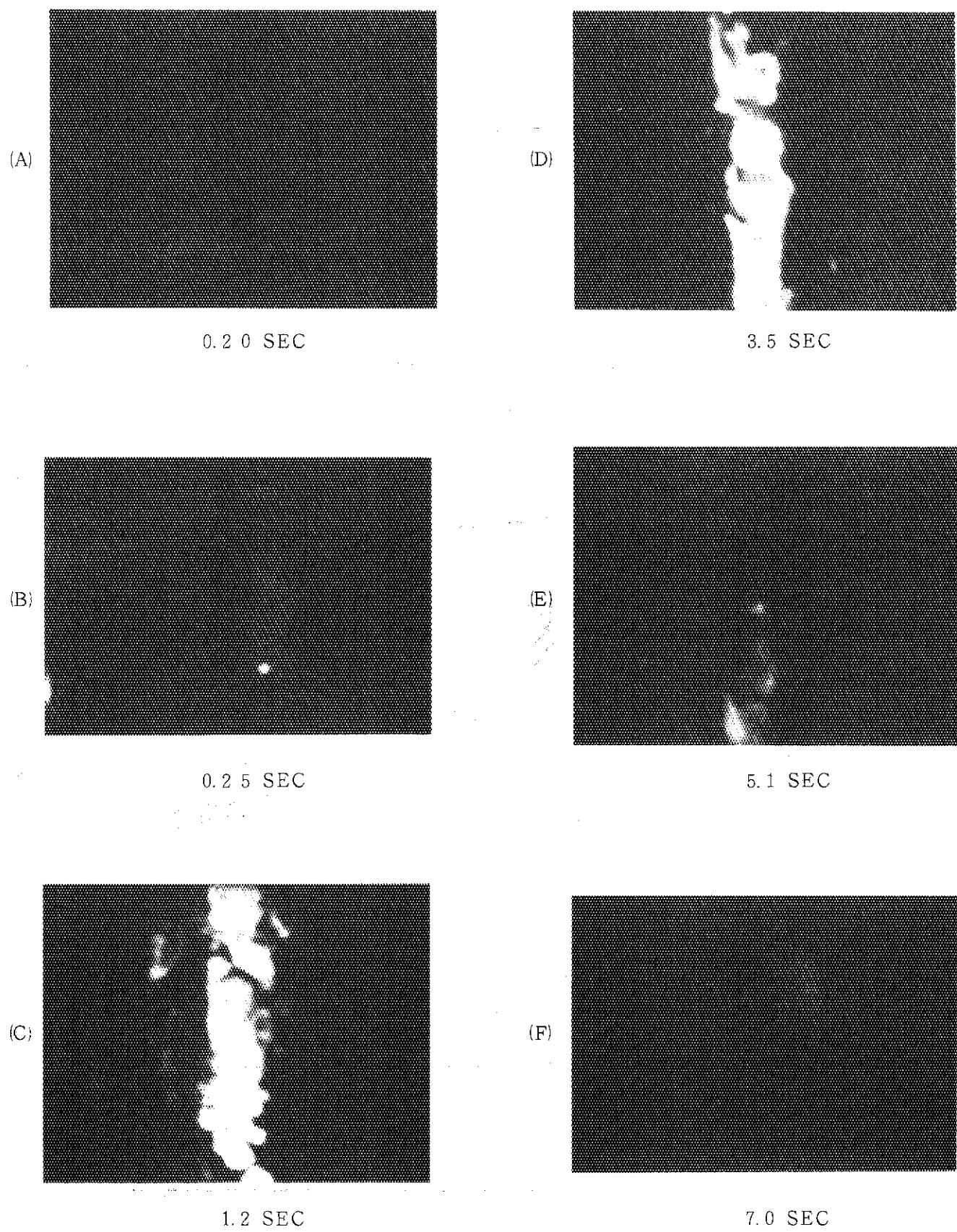
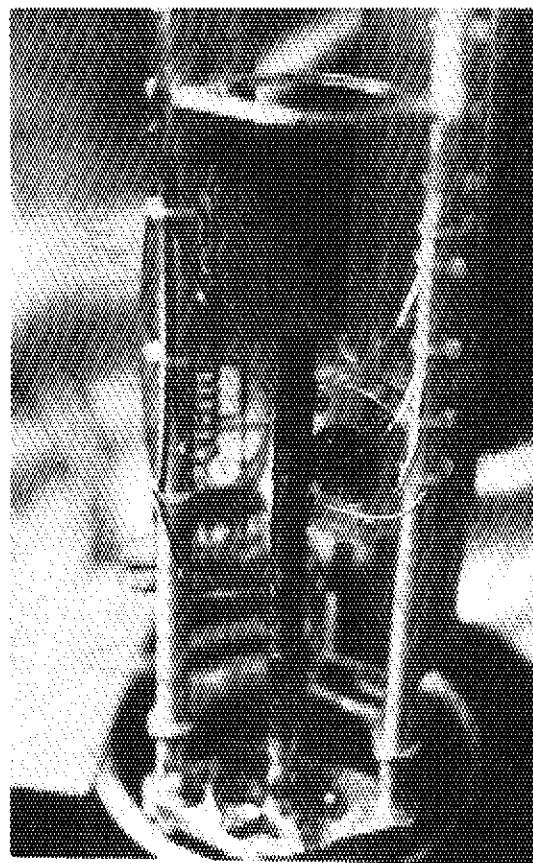
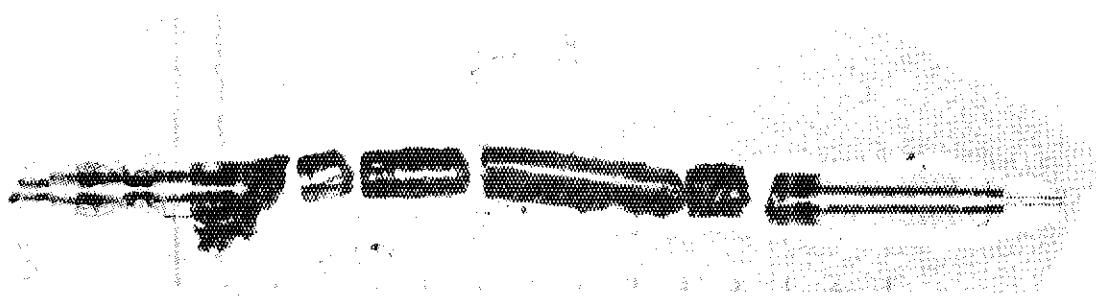


Fig. 5.1.2 Pictures printed from motion film taken in Test No. 600-19



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



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

Fig. 5.1.3 Appearance of post test fuel rod in Test No. 600-19

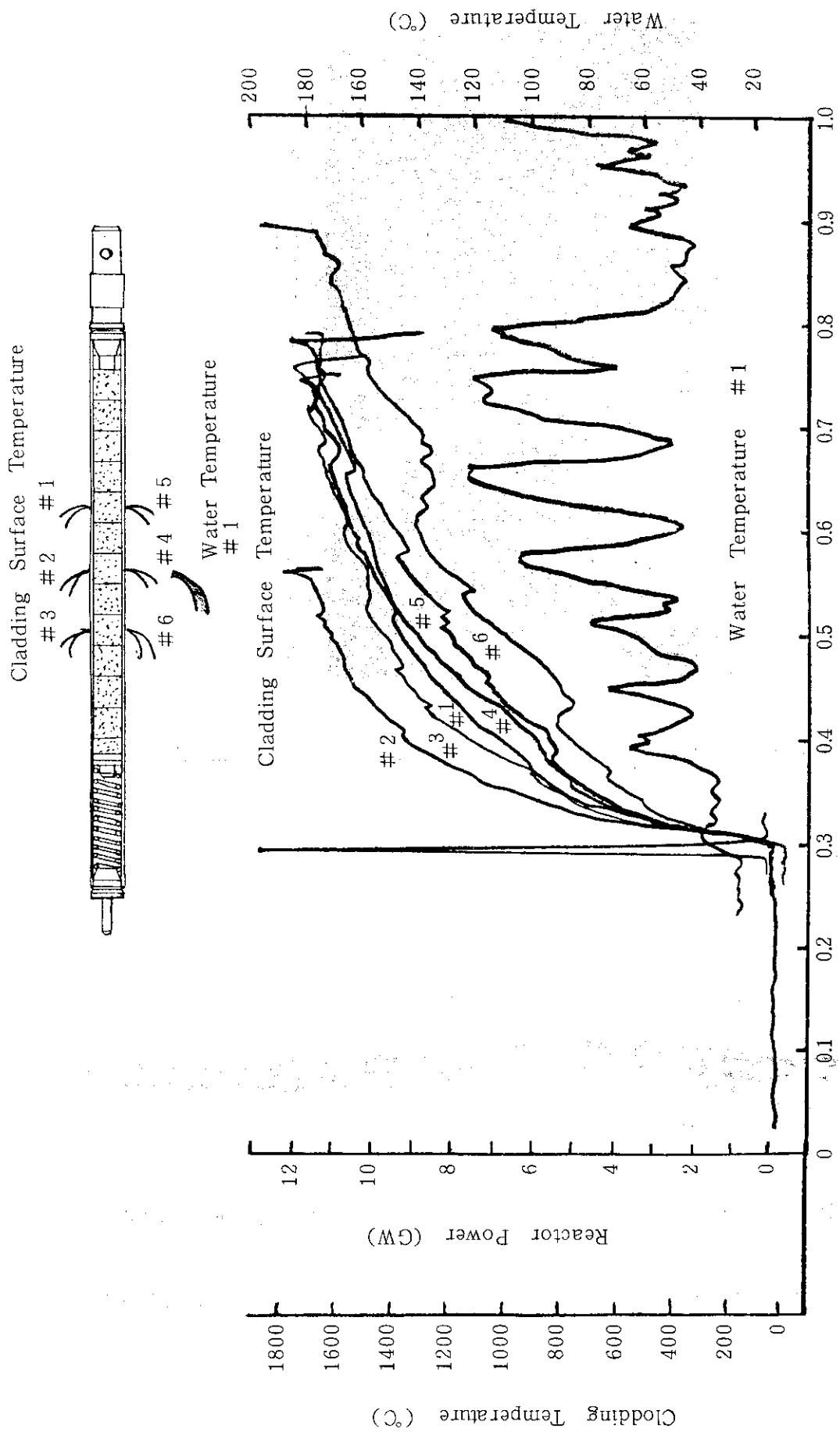


Fig. 5.14 Transient histories of reactor power, cladding temperature and environmental gas temperature in Test No. 600-20

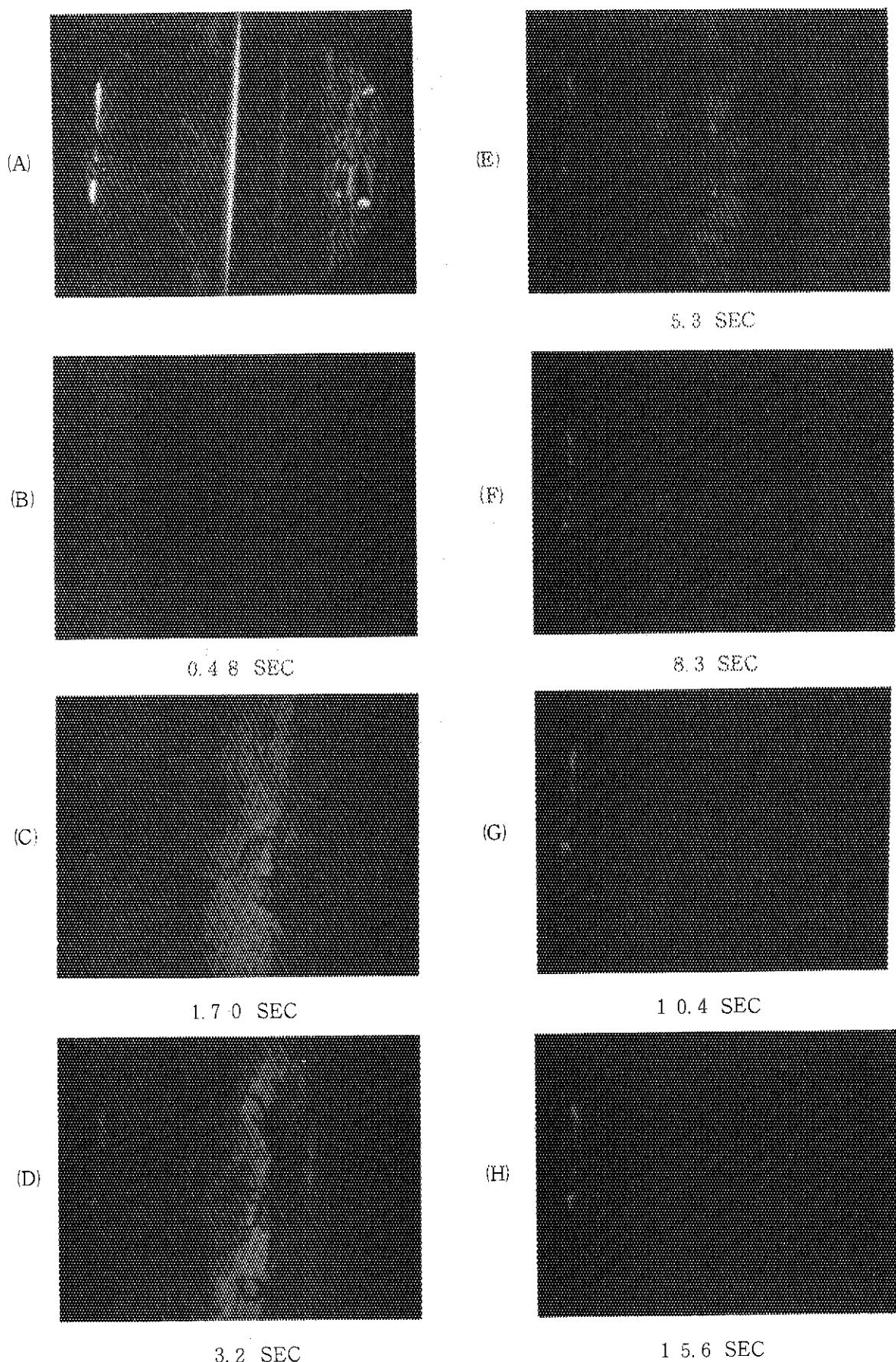
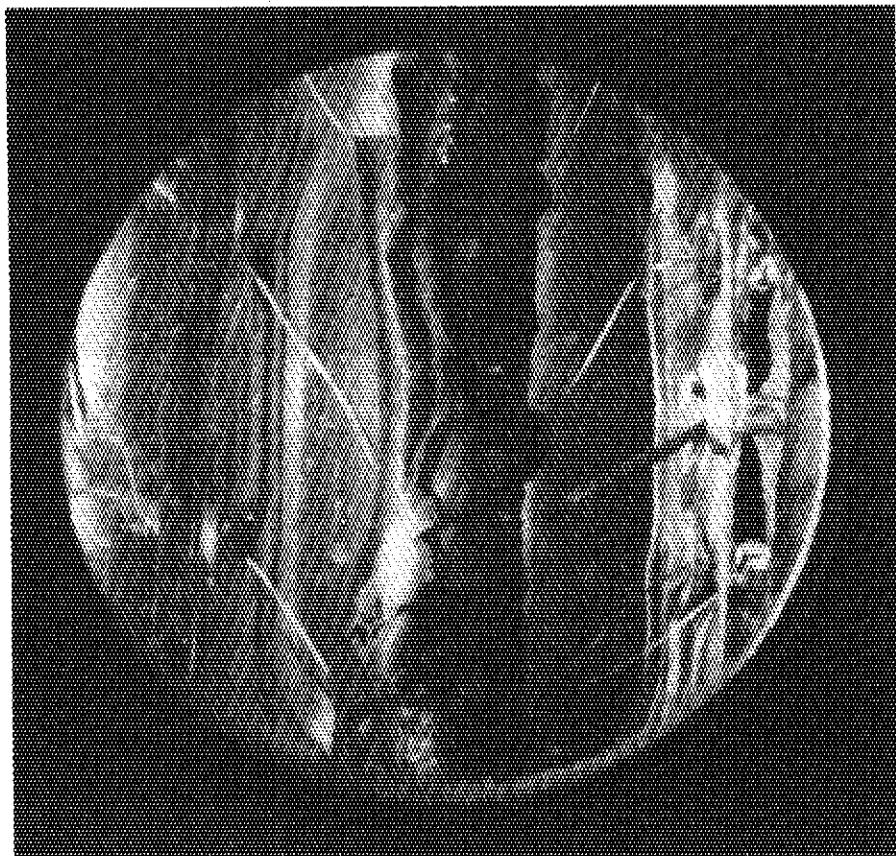
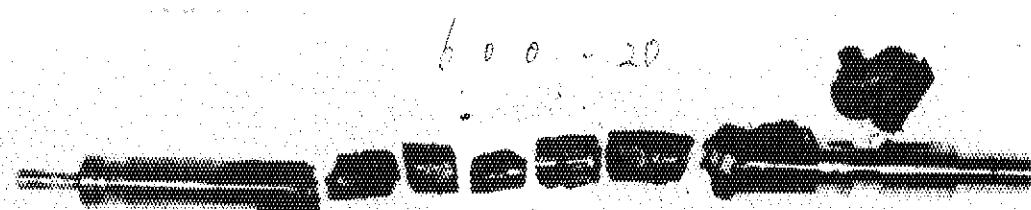


Fig. 5.15 Pictures printed from motion film taken in Test № 600-20



(a) Picture through a periscope after the transient



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

Fig. 5.1 6 Appearance of post test fuel rod in Test No 6 0 0 - 2 0

## 6. 解析コードの開発

### 6.1 NSR-77コードの改良（藤城俊夫）

NSR-77コードは、反応度事故およびその他の事故時における燃料棒の過渡挙動解析を対象として開発されてきたコードである。同コードに対するこれまでの改良は、主に燃料棒自身の熱的、機械的挙動の詳細解析に力点が置かれていた。このため、冷却材挙動に関する解析モデルは簡略化され、質量保存およびエネルギー保存のみを考慮し、冷却材の流量は一定とするが、あるいは流路入口流量を時間の関数として入力で与える事となっていた。従って、NSRR実験において観察される冷却材の過渡的な自然対流や急激なボイド発生による逆流、加速等の現象およびこれら冷却材流動条件の影響の解析は行う事ができなかった。このため、冷却材挙動計算に質量、エネルギーおよびモーメンタムの3保存則を基本としたアルゴリズムを導入し、冷却材側の解析モデルの改良を行った。

本改良においては、Volume-Junction法を用い、次の仮定のもとに3保存則を解いた。

- 1) 各要素内での状態は均一かつ熱平衡にある。
- 2) 流動は軸方向一次元流である。

数値計算においては物理量を全て前タイムステップのものを用い、3保存則は各々独立に陽解法で解くこととした。ただし、安定化を図るため、未飽和条件の下では、各要素の圧力は一定とし、密度の変化はエンタルピのみに依存するものとの近似を行った。

Fig. 6.1.1～Fig. 6.1.3に、本改良モデルによる解析例として、自然対流条件の下における冷却材の流速、温度および被覆管温度の計算結果の一例を示す。この計算例は、単一燃料棒を内径1.6 mmの流路管内に入れ、20°C静水の初期条件の下で試験燃料に240 cal/g・UO<sub>2</sub>の発熱量を与えた場合のものである。実験結果との比較のため流路管出口水温および被覆管表面温度の測定結果をFig. 6.1.2および6.1.3に示した。これらの結果から、被覆管表面温度では良好な一致が得られ、又、冷却材の過渡自然対流挙動も定性的には妥当な解析結果を与えたが、冷却材温度との定量的な一致は不充分であった。この冷却材挙動に関する不一致の原因は、解析モデルおよび数値解法の簡略化に起因するものであるが、その中でも特に大きな原因是サブクール条件下でのボイド発生、特に、被覆管のジルコニウム・水反応で生ずる非凝縮性の水素ボイド発生を無視した事による所が大きいと考えられる。従って、今後は今期の改良作業で得られた経験をもとに、水素ボイド発生をも考慮したモデルによって改良を進める予定である。

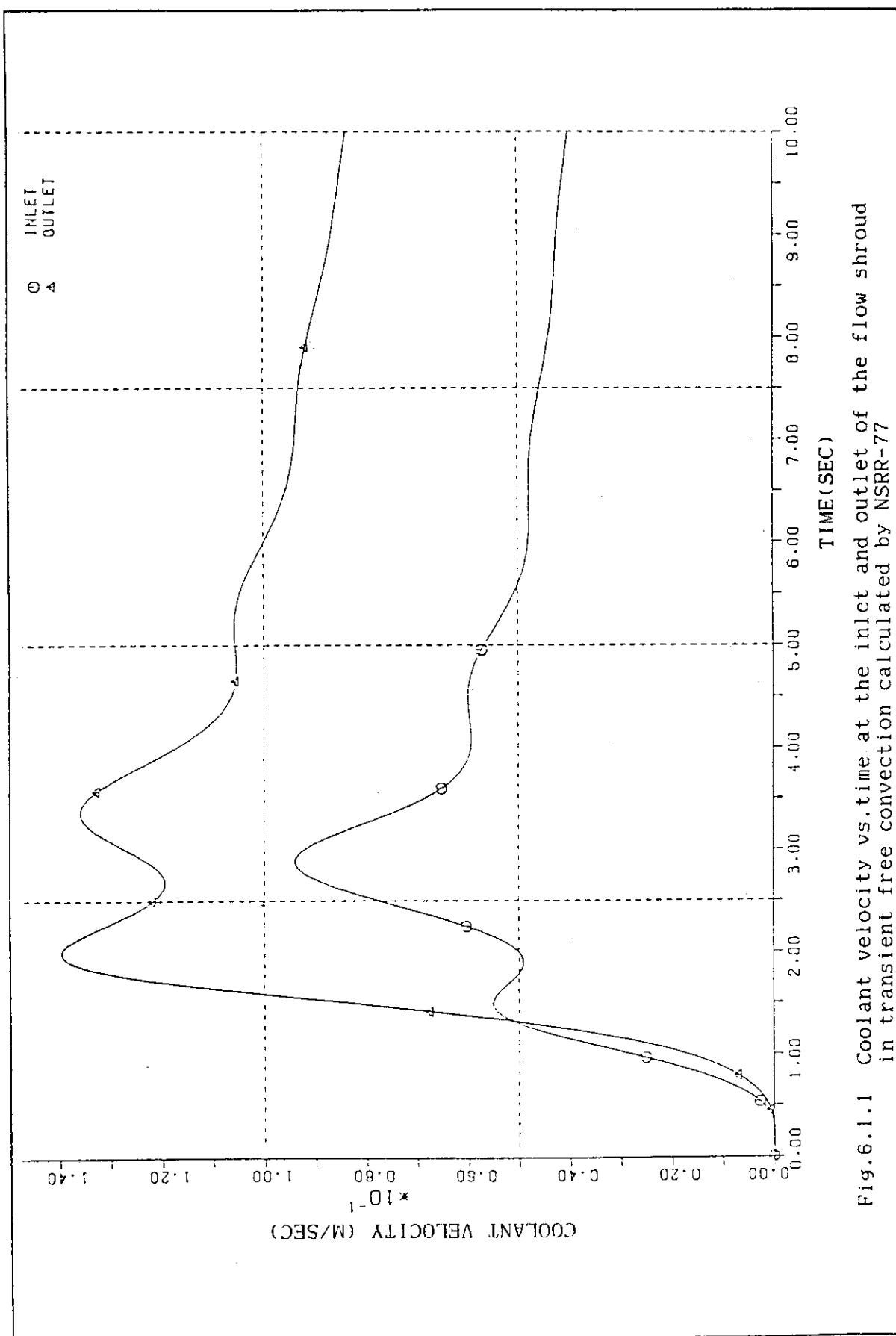


Fig.6.1.1 Coolant velocity vs. time at the inlet and outlet of the flow shroud  
in transient free convection calculated by NSRR-77

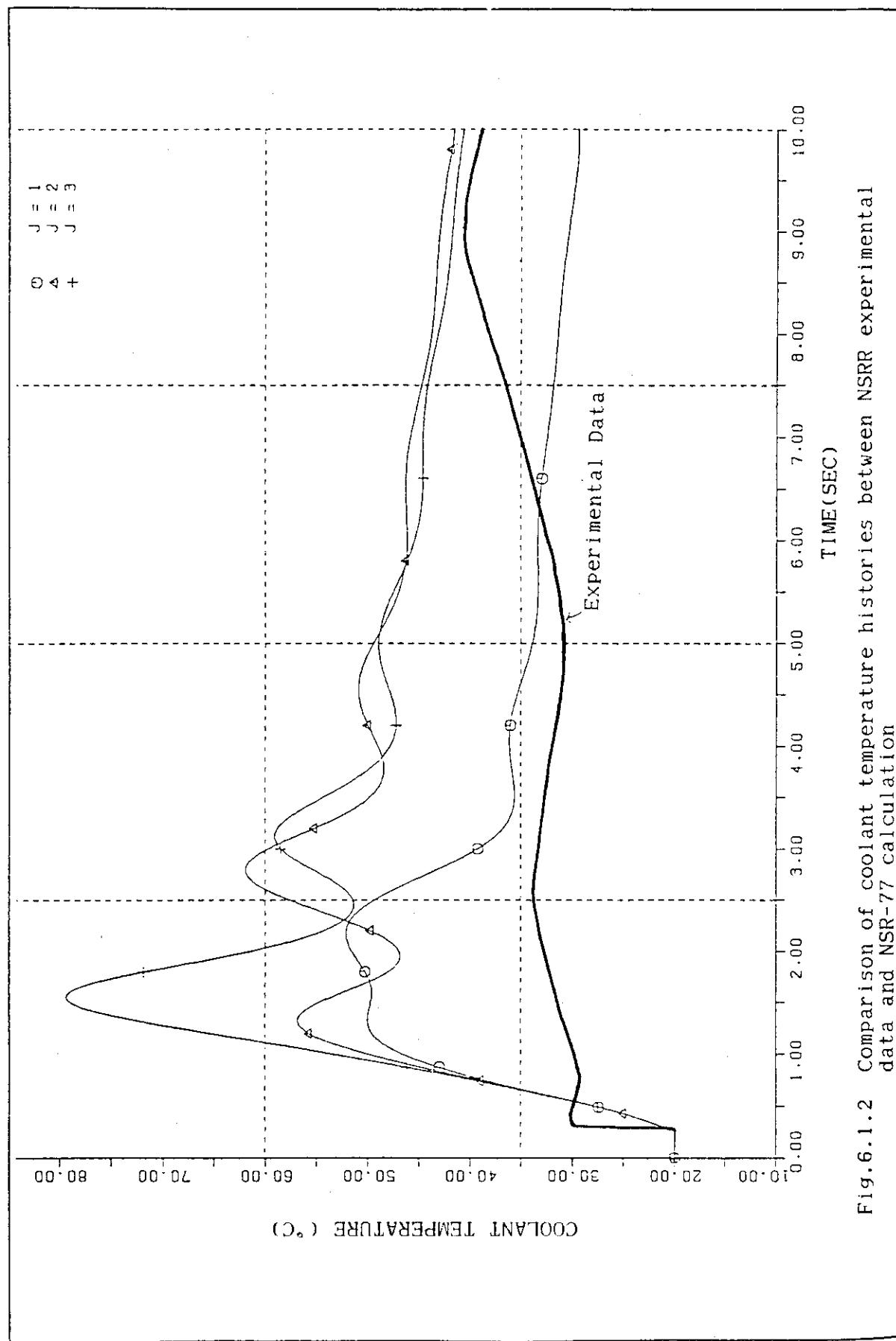


Fig. 6.1.2 Comparison of coolant temperature histories between NSRR experimental data and NSR-77 calculation

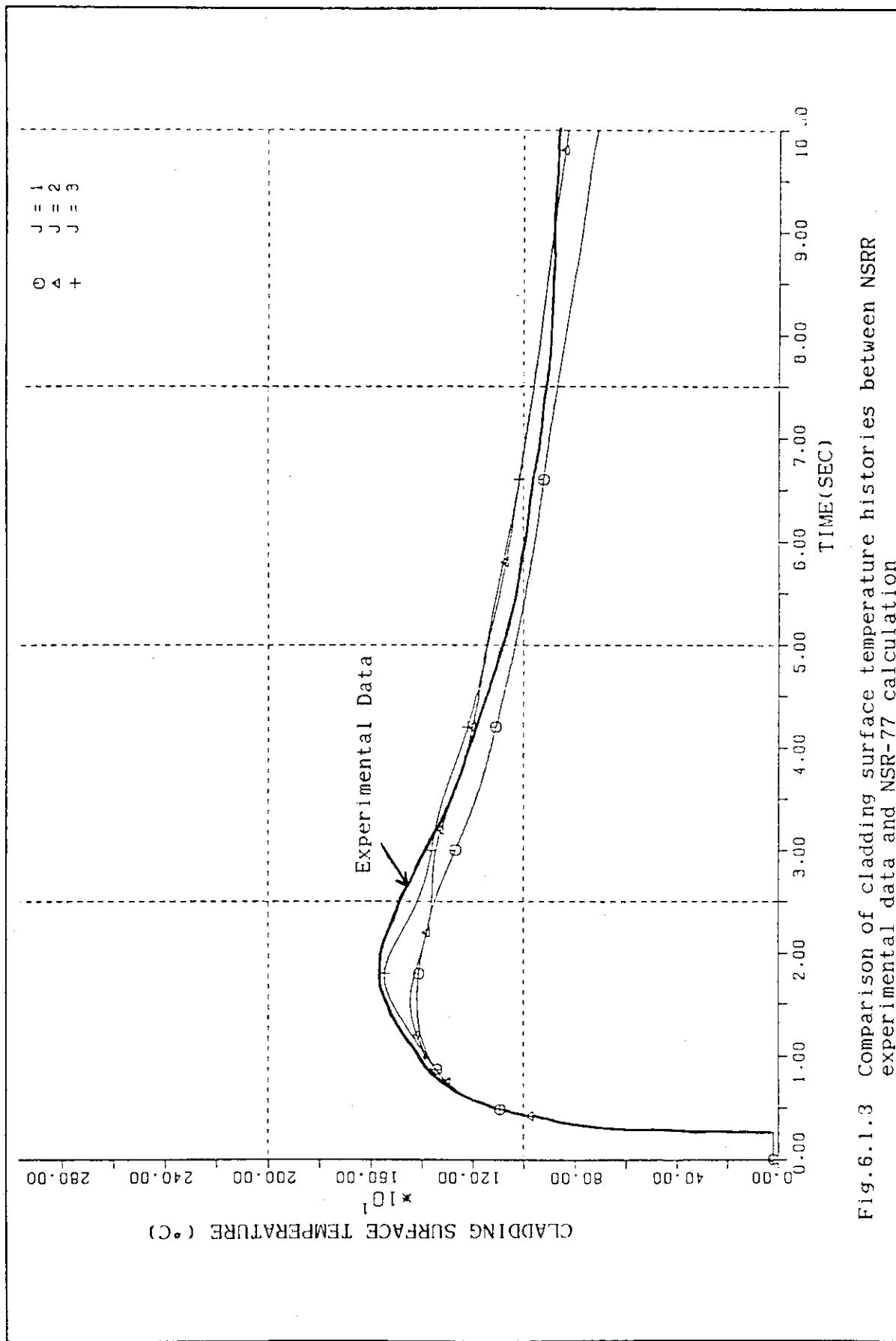


Fig. 6.1.3 Comparison of cladding surface temperature histories between NSRR experimental data and NSR-77 calculation

## 6.2 STEALTH コードによる実験カプセル応答解析（藤城俊夫）

### (1) 概 要

NSRR 実験に使用する実験カプセルは、カプセルに収納した燃料が破損した際に発生する衝撃圧力や水撃力等に耐えるように十分な強度を持った設計としなければならない。ところが、単に強度だけを確保すれば良いのであれば、耐圧壁の肉厚を必要に応じて厚くするだけで済むわけであるが、これと相反するもう 1 つの条件を考慮しなければならない。すなわち、照射容器としての性能を確保し、中に収納する試験燃料にできるだけ多くの中性子束を与えるためには、容器壁による中性子吸収を低減するために壁厚を可能な限り薄くする必要がある。特に、現在準備を進めている照射済燃料実験用カプセルの設計においては、二重容器構造とする必要から、各容器の壁厚をできる限り薄くする事が要求される。

以上の条件を満足するため、NSRR 実験カプセルの設計においては、これまで、弾塑性設計を導入し、燃料破損に伴って生じる動的な荷重に対し最大 2 % あるいは破断伸びの 1 / 10 のいずれか小さい値までの塑性変形を許容する条件で設計を行ってきた。しかしながら、これまでの設計においては信頼性の高い動的弾塑性解析コードが無かったために、動的荷重を相当静圧荷重に変換し、静的な弾塑性解析コードにより設計を行ってきた。このため、カプセル応答評価の誤差を見込んで或る程度の安全余裕をとらざるを得ず、より合理的な設計を行うためには、負荷荷重の時間履歴を入力として動的に弾塑性解析を実施することが必要となっていた。そこで、以上の要求を満すための準備の一つとして、従来 NSRR 実験解析用として整備してきた汎用の連続体動的挙動解析コード STEALTH-J を NSRR 実験カプセル解析用にモデリングし、代表ケースについて解析を実施して、STEALTH-J コードが目的とする実験カプセルの動的弾塑性解析に適用可能かどうかの検討を行った。

### (2) 解析対象および解析結果例

解析は次の 3 つの場合を対象とした。

- ① 大気圧水カプセルモデル
- ② バーンアップ燃料実験カプセルを模擬した二重カプセルモデル
- ③ 水撃力解析モデル

以上の 3 つの場合のうち、解析結果の代表例として②の二重カプセルモデル及び③の水撃力解析モデルに対する解析結果の概要を以下に述べる。

まず、Fig. 6.2.1 に二重カプセルに対する解析モデルを示す。このように、外部カプセルのグリッピング装置結合部（下端）を除いたカプセル全長をモデル化の対象とし、内部および外部カプセル内の冷却材および空気の部分も包括して軸対称の二次元としてモデル化した。負荷荷重を直接受けける内部カプセルについては、カプセルの曲げが表現できるように 3 ゾーンでメッシュ分割し、耐圧上の役割が少ない外部カプセルについては 2 ゾーンでのメッシュ分割とした。又、内部カプセルを上方から吊り下げている 3 本の支持柱は、軸対称条件のため円筒形状のモデル化とせざるを得ず、このため、支持柱の外側の水及び空気は、実際の条件とは異なり支持柱の部分で分割される事になるが、冷却材及び空気の移動はあまり大きくないので、結果への影響は殆んど生じない。

衝撃圧力は、中心軸上の燃料中心位置に発生源を仮定し、実験燃料の外径に等しい直径を持つ球形を圧力源の初期境界とし、この境界条件として、Fig. 6.2.2 に示す三角波の時刻歴を与えた。従っ

て、衝撃圧力は、まず内部カプセル中の冷却材を伝播して内部カプセル壁に達し、さらにカプセル壁を通過した圧力波が外部カプセルの冷却材を経て外部カプセル内壁に作用するというように、極めて実際に近い条件の動的負荷としてカプセル壁に作用する事になる。

Fig. 6.2.3に $200\mu s$ 後における二重カプセルモデルの変形図および速度ベクトル図を示す。変形については圧力源付近のメッシュが少し拡大している事以外は目立った変化は認められないが、速度ベクトル分布から圧力波の伝播の様子を知る事ができる。即ち、この $200\mu s$ の時点は圧力源の圧力がピーク値に近くなり、又、カプセル上下に伝播した圧力波がカプセル底あるいは水面に達し反射波が戻り始めた時点である。速度ベクトルは圧力源を最大値として、圧力源から離れるに従って漸減し、又、上下に進行する速度ベクトルは対称軸に平行にそろっており、圧力波がほぼ平面波として上下に伝播している事が分る。又、内部カプセルの外側では速度ベクトルは小さくなっている、内部カプセル壁を通過する時の圧力波の減衰が大きい事が分る。

Fig. 6.2.4は内部カプセル内面の代表個所における圧力の時刻歴を示したものである。圧力源のすぐ横の $J=31$ のメッシュ点では、圧力源の圧力と殆んど同じ時刻歴となっているが、カプセル底部の $J=15$ のメッシュ点では、圧力波の伝播に要する時間だけ遅れ、かつ、底部は肉厚が大きく剛になっているため、底面での反射波が重畠して圧力源よりも高いピーク圧力となっている。又、 $J=48$ の冷却材表面の位置では、上側が空気でほぼ自由端の境界条件となっているので、他とは異なった不規則な圧力波形を示している。

Fig. 6.2.5は内部カプセル胴部の周方向応力の時刻歴である。圧力源に近い $J=26, 31, 36$ の3点を比べてみると、ほぼ三角波に近い圧力波が作用している $500\mu s$ 位までは、大体同じような形の引張応力が生じているが、負荷が殆んど無くなった $500\mu s$ 以後は、場所により異なった時刻歴となり、高次振動が生じている事が分る。又、カプセルの上・下端に近い $J=51$ および $J=15$ の場所では厚肉部及び端部での拘束があるため、圧縮応力状態が現れている。

次に、水撃力解析のモデルおよび解析結果を Fig. 6.2.6に示す。衝撃圧力に対する解析に比べ、約10倍の時刻までの計算が必要になるので、計算時間節約のため内部カプセル内の冷却水および空気に相当する部分だけをモデル化した。従ってカプセル壁は全て剛壁として取扱い、冷却水下端のみ自由境界として、ここに冷却水飛上りの原因となる圧力パルスの時刻歴を与えた。圧力パルスは上述の二重カプセル解析の場合と同様の三角波とし、冷却水塊に $30\text{ m/s}$ の初速を与えるに必要な力積となるようにピーク圧力 $240\text{ kg/cm}^2$ 、時間幅 $1\text{ ms}$ とした。

解析結果として、水面の変位および速度、冷却水中の上・下端および中央における圧力の時刻歴を示した。この結果から、冷却水塊は圧力パルスにより急速に加速された後、ほぼ一定速度でカプセル上端近くまで上昇し、上端近くになってプレナム部の空気の圧縮による急速な圧力上昇が生じる事が分る。又、圧力パルスとしては最初に与えたものと、プレナム部の圧縮による水撃パルスの2つの圧力パルスが時間を置いて生じ、冷却水塊の下端では第1の圧力パルス、上端では第2の圧力パルス、中央では2つの圧力パルスが観測される事になる。このような事象の推移はNSRR実験で測定される結果と良く一致しており、本解析の比較的簡単なモデルでNSRR実験条件を良好に模擬し得る事が分った。

### (3) まとめ

以上に述べた STEALTH-J による解析の結果から、本コードが NSRR 実験カプセルの応答

解析に十分適用可能である事が確認された。特に、冷却水部分も解析モデルの中に組み込み、冷却水中の圧力波の伝播や冷却水と容器壁との相互作用をも加味した解析が可能であることは本コードの優れた点である。今後は、本コードによる解析を実験結果と照合し、解析精度についての定量的な評価を進めてゆく予定である。

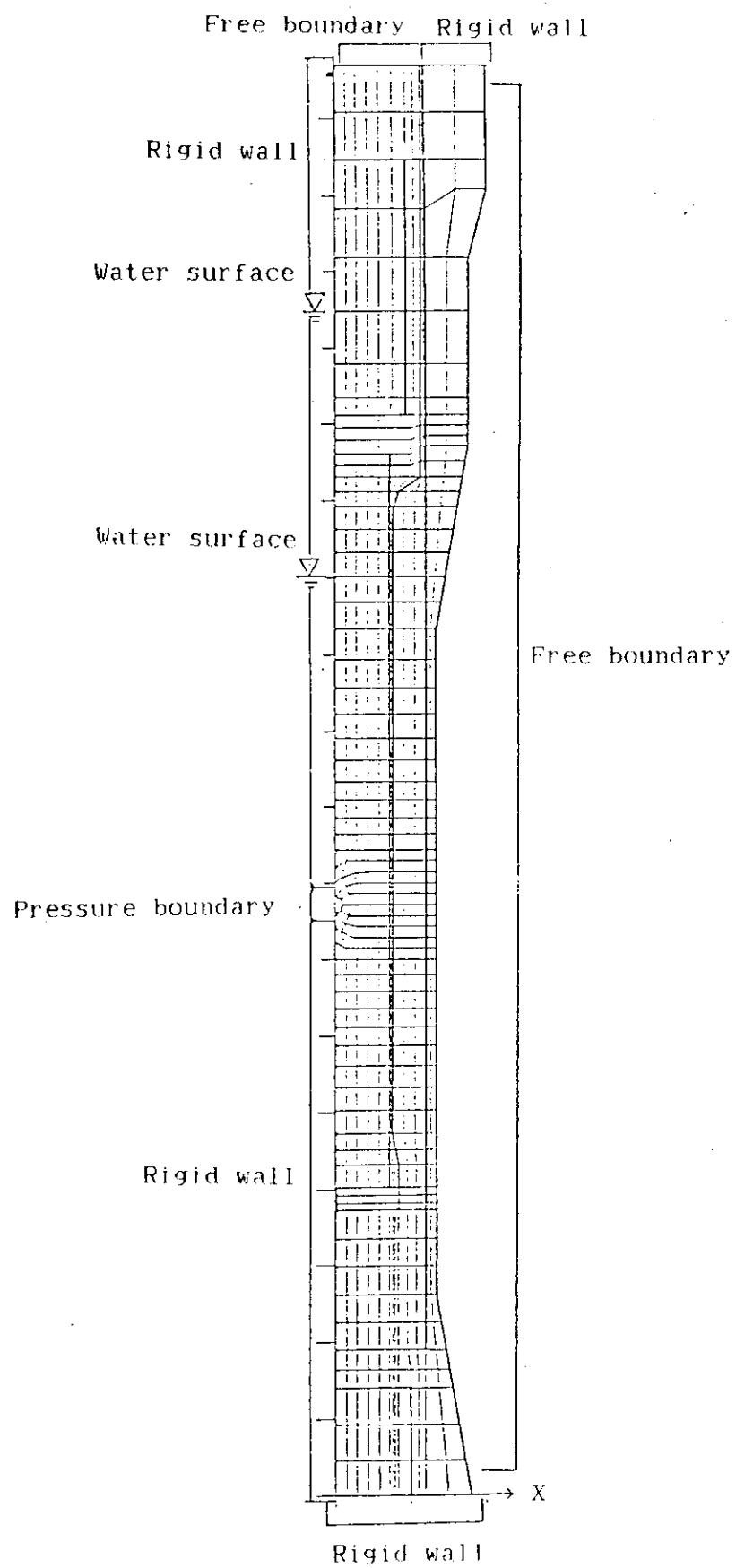


Fig.6.2.1 Calculation model for a double capsule arrangement  
in STEALT-J calculation

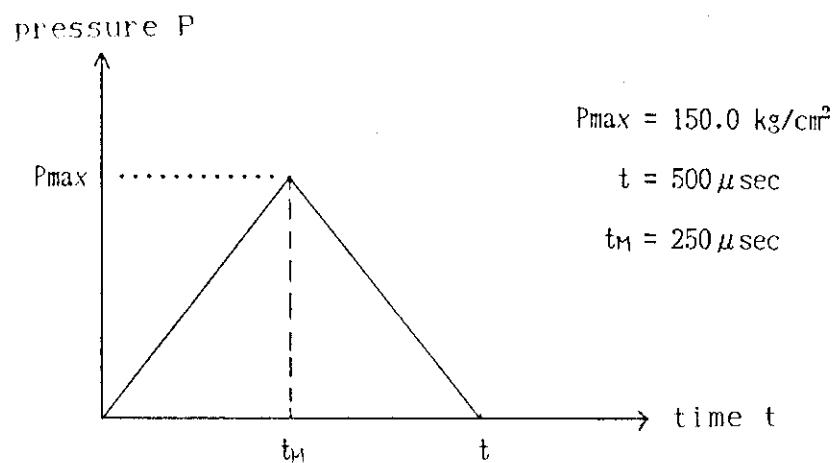


Fig.6.2.2 Pressure history given at the pressure source boundary

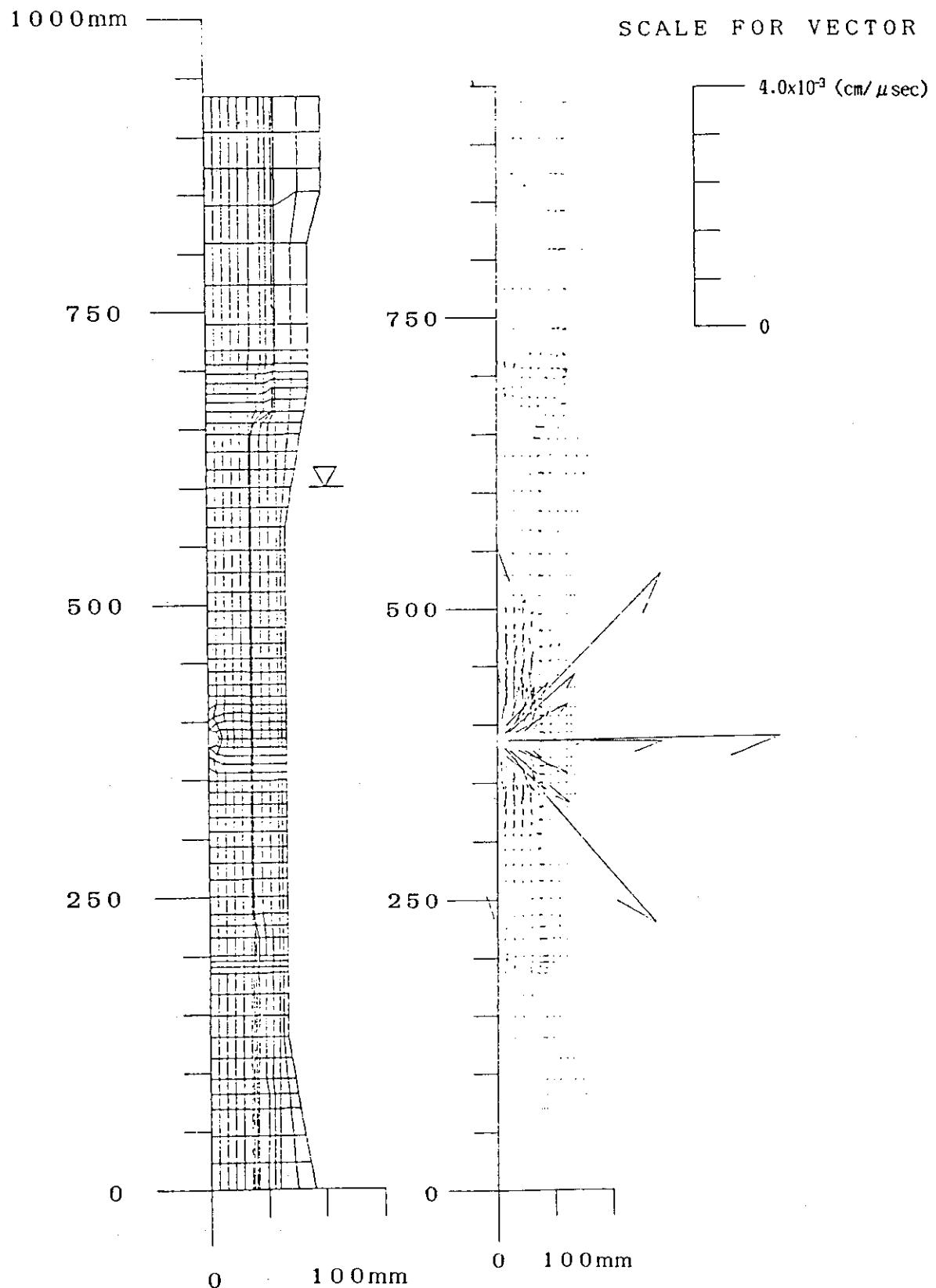


Fig.6.2.3 Deformation and velocity vector distribution at 200 $\mu$ s into the transient

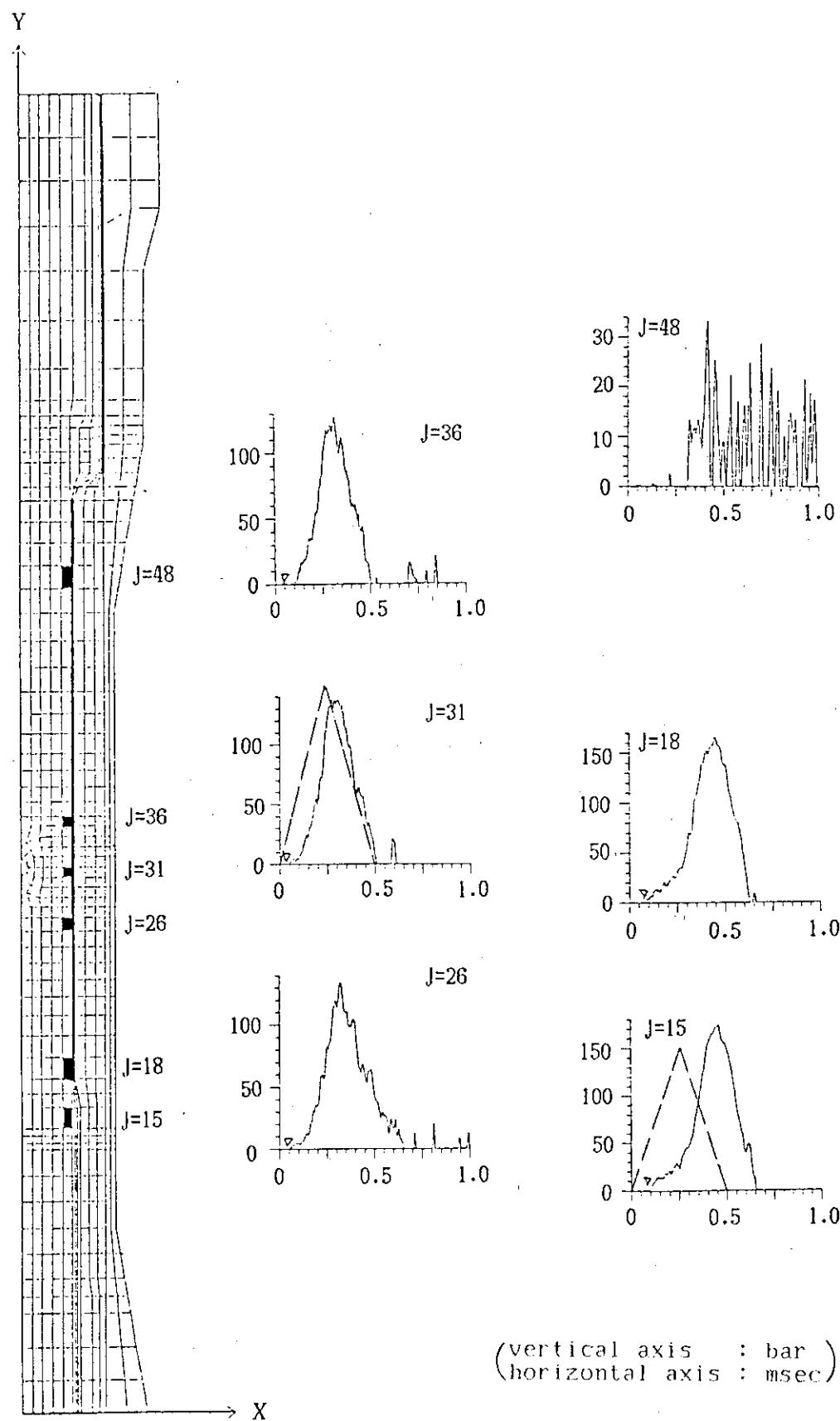


Fig.6.2.4 Pressure histories at inner surface of the inner capsule

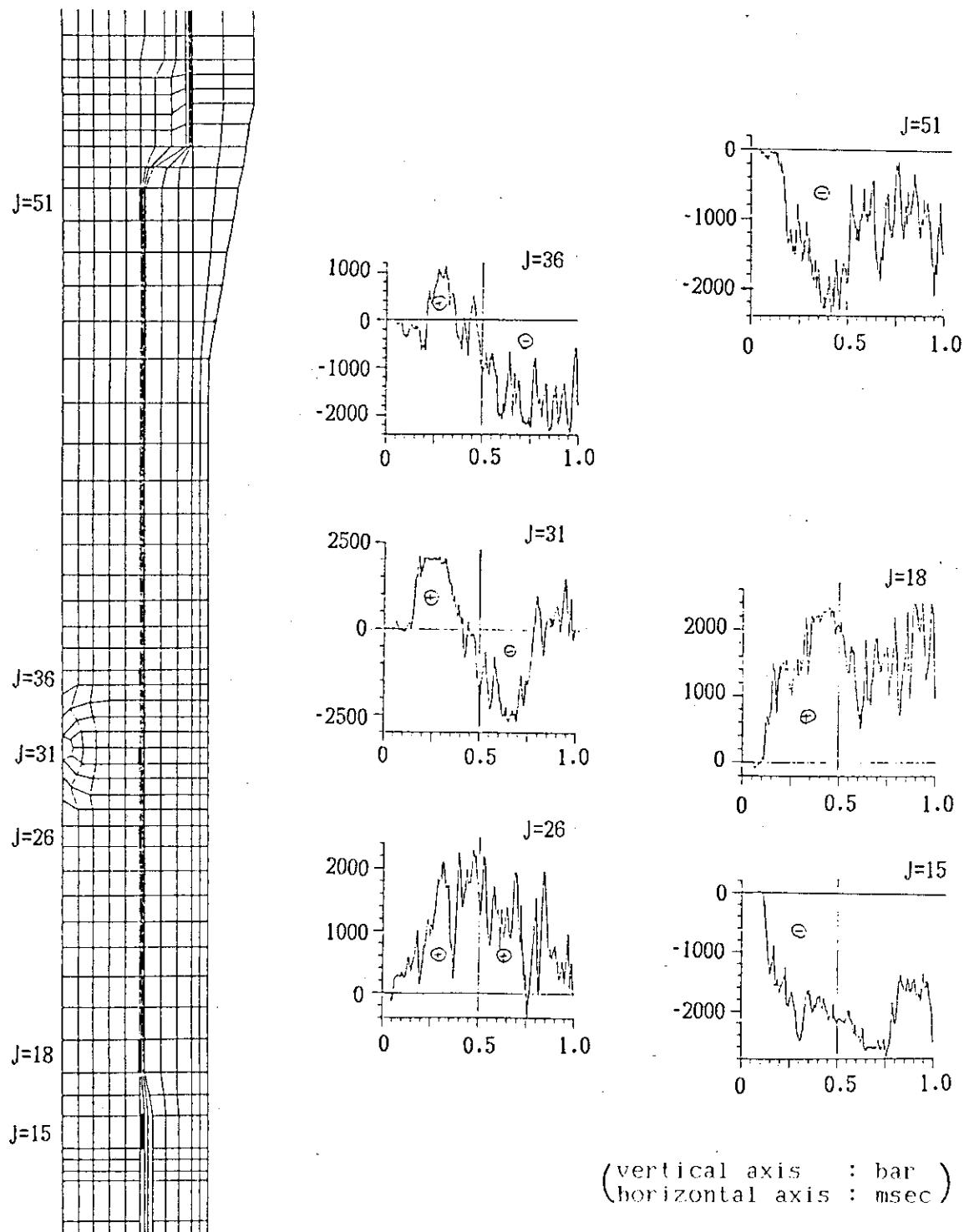


Fig.6.2.5 Circumferential stresses at defferent points of the inner capsule wall

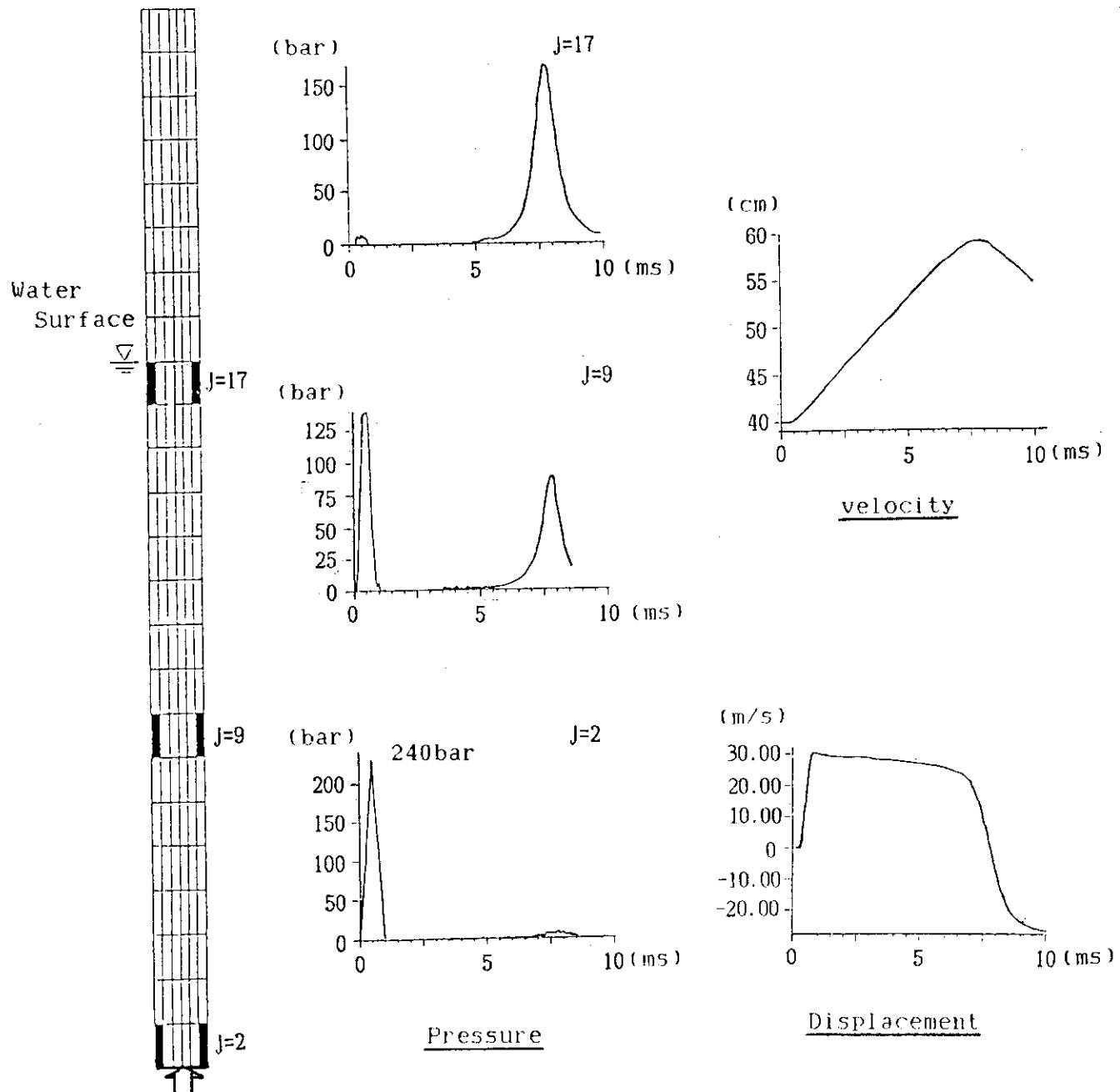


Fig.6.2.6 Calculation results for a water hammer model by STEALTH-J

## 7. 今後の実験計画

NSRRにおける実験は、その主体が大気圧カプセルを用いた標準実験から、高温高圧カプセルを用いた燃料パラメータ実験、高温高圧水ループ実験、可視カプセル実験、及び燃料損傷実験に移りつつある。

次期以降は、上記大型カプセル、ループを用いた実験を中心として、大気圧カプセル実験による特殊燃料実験、計装開発実験、及び燃料損傷実験等を実施する予定である。この内、特殊燃料実験としては、ガドリニア入り燃料、混合酸化物燃料実験、計装開発実験としては、ペレット加速度測定、被覆管歪量測定実験等、又、燃料損傷実験としては、燃料溶融実験、デブリ形成実験、冷却性実験、FP測定実験がある。そして、バーンアップ燃料実験用のカプセル設計条件を決めるために、加圧燃料棒の高発熱量実験も行う。

燃料挙動解析コードNSR-77による実験解析は、今まで実施してきた大気圧カプセル・高温高圧カプセル実験の解析を引き続き進めて、総合的なコードの整備をはかる。

なお、今後の大きな研究課題は、バーンアップ実験である。このため、実験に必要な諸設備の整備や炉改造等の安全審査に備え、パルス特性改良に関する計測制御系の概念設計、燃料取扱設備の遮蔽計算、炉特性改良に係る核計算、制御棒駆動機構モックアップ装置等を用いた制御系のシミュレーション解析等を進める。

## 参 考 文 献

## A. プログレス・レポート等

- A-1 石川, 富井監修：“NSRR 実験プログレス・レポート・1（1975年10月～1976年3月）”JAERI-M 6635 (1976)
- A-2 石川, 富井監修：“NSRR 実験プログレス・レポート・2（1976年4月～1976年6月）”JAERI-M 6790 (1976)
- A-3 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・3（1976年7月～1976年12月）”, JAERI-M 7051 (1977)
- A-4 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・4（1977年1月～1977年6月）”, JAERI-M 7304 (1977)
- A-5 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・5（1977年7月～1977年12月）”, JAERI-M 7554 (1978)
- A-6 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・6（1978年1月～1978年6月）”, JAERI-M 7977 (1978)
- A-7 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・7（1978年7月～1978年12月）”, JAERI-M 8259 (1979)
- A-8 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・8（1979年1月～1979年6月）”, JAERI-M 8799 (1980)
- A-9 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・9（1979年7月～1979年12月）”, JAERI-M 9011 (1980)
- A-10 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・10（1980年1月～1980年6月）”, JAERI-M 9319 (1981)
- A-11 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・11（1980年7月～1980年12月）”, JAERI-M 9755 (1981)
- A-12 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・12（1981年1月～1981年6月）”, JAERI-M 82-012 (1982)
- A-13 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・13（1981年7月～1981年12月）”, JAERI-M 83-193 (1983)
- A-14 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・14（1982年1月～1982年12月）”, JAERI-M 84-046 (1984)
- A-15 反応度安全研究室, 他：“NSRR 実験プログレス・レポート・15（1983年1月～1983年12月）”, JAERI-M 84-168 (1984)
- その他, NSRR 実験結果速報 (1)～(81)

## B. 実験結果に関するトピカル・レポート, 学会誌, 国際会議提出論文等

- B-1 M. Ishikawa, S. Saito, T. Fujishiro et al. : "Some Experiences and

Plans on Reactor Safety Research by NSRR", 1st US/  
 Japan Seminar on Fast Pulse Reactors, Tokai, Japan  
 (1976)

- B-2 M. Ishikawa : "First Progress Report of the Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) Experiments", 4th LWR Safety Information Meeting, Washington. (1976)
- B-3 S. Saito, T. Fujishiro, T. Inabe, et al : "Some Experiences and Inpile Experimental Programme on Fuel Coolant Interaction in NSRR", Proceedings of 3rd Specialists' Meeting on the Sodium Fuel Interaction in Fast Reactors (NEA - CSNI), Tokyo, (1976)
- B-4 石川迪夫 : "NSRR実験に現われた燃料破損挙動", 火力原子力発電, vol. 28, №5 (1976)
- B-5 A. Morishima, et al. : "Safety of Light Water Reactor Fuel", Nuclear Power and its Fuel Cycle vol. 2, International Atomic Energy Agency, Vienna (1977)
- B-6 M. Ishikawa, et al. : "NSRR Experiments on LWR Fuel Behaviors under Reactivity Initiated Accident Conditions", Proceedings of Topical Meeting on Thermal Reactivity, CONF-770708, Sun Valley, Idaho (1977)
- B-7 塩沢周策 : "NSRR実験における標準燃料の振舞いに関する一考察", JAERI-M 7267 (1977)
- B-8 石川迪夫, 他 : "NSRR実験報告, (I)軽水炉燃料の常温・常圧下での破損実験", 日本原子力学会誌, vol. 19, №7 (1977)
- B-9 石川迪夫, 斎藤伸三, 他 : "NSRR実験報告, (II)軽水燃料の常温・常圧下での破損実験", 日本原子力学会誌, vol. 20, №10 (1978)
- B-10 大西信秋, 丹沢貞光, 他 : "NSRR実験における試験燃料の発熱量の評価" JAERI-M 7539 (1978)
- B-11 星 蔦雄, 柳原 敏, 他 : "NSRR実験における燃料中心温度測定", JAERI-M 7796 (1978)
- B-12 星 蔦雄, 斎藤伸三, 塩沢周策, 稲辺輝雄, 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, №9 (1978)
- B-13 S. Kobayashi, et al. : "Experiment Results of Some Cluster Tests in NSRR", Journal of Nuclear Science and Technology vol. 15, №6 (1978)
- B-14 M. Nozawa, S. Saito, et al. : "Fast Reactor Fuel Test Program in the NSRR", For Presentation at NRC/RSR-Japan FBR Safety Research and Development Meeting, in Tokyo, Japan (1978)

- B-15 S. Suguri, M. Ishikawa, S. Saito, et al. :"Results of In-pile Experiments in the NSRR on Reactivity Initiated Accidents", 6th PNS-Kolloquium at Karlsruhe, KfK-2770 (1978)
- B-16 大西信秋, 丹沢貞光, 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)
- B-17 T. Fujishiro, et al. :"Light Water Reactor Fuel Response during Reactivity Initiated Accident Experiments", NUREG/CR-0269, TREE-1237 (1978)
- B-18 斎藤伸三, 石島清見, 丹沢貞光, 塩沢周策, 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), JAERI-M 8087 (1979)
- B-19 吉村富雄, 落合政昭, 藤城俊夫, 他:“NSRR実験における損耗被覆管燃料実験結果”, JAERI-M 8152 (1979)
- B-20 塩沢周策, 柳原 敏, 斎藤伸三:“NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化量に関する評価”, JAERI-M 8178 (1979)
- B-21 柳原 敏, 塩沢周策, 斎藤伸三:“NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の円周方向の酸化膜厚さに基づく温度分布の評価”, JAERI-M 8200 (1979)
- B-22 T. Fujishiro, et al. :"A Study on Pressure Generation Caused by Actual Fuel Failure in the NSRR Experiment", Fourth CSNI Specialist Meeting on Fuel-Coolant Interaction in Nuclear Reactor Safety, Bournemouth, UK (1979)
- B-23 M. Ishikawa, S. Saito, S. Shiozawa, K. Ishijima : "A Study on Fuel Failure Mechanism for Unirradiated Fuel Rods under a Reactivity Initiated Accident Condition", International Colloquim on Irradiation Tests for Reactor Safety Programme, Petten, Netherland (1979)
- B-24 塩沢周策, 斎藤伸三, 柳原 敏:“NSRR実験における  $\text{UO}_2$ -ジルカロイ反応” JAERI-M 8267 (1979)
- B-25 M. Mori, S. Saito, et al. :"Study on the Transient Cooling Process of a Fuel Rod in a Reactivity Initiated Accident", J. of Nuclear Science and Technology, vol. 17, № 6 June, 1980
- B-26 M. Ishikawa, et al. :"Recent Results From the NSRR Experiments", Seventh Reactor Safety Research Information Meeting, Gaithersburg, USA (1979)
- B-27 斎藤伸三, 他:“サブクール水中におけるクエンチング現象と熱伝達” JAERI-M 8570 (1979)
- B-28 斎藤伸三, 塩沢周策, 柳原 敏, 他:“冷間加工および完全焼鈍被覆材の燃料破損挙動に及ぼす影響” JAERI-M 8586 (1979)
- B-29 落合政昭, 稲辺輝雄, 石島清見, 斎藤伸三, 他:“反応度事故条件下における燃料挙動に

## 及ぼすラン・アウト出力の影響” JAERI-M 8285 (1979)

- B-30 T. Hoshi, et al. : "Fuel Failure Behavior of PCI-Remedy Fuels under the Reactivity Initiated Accident Conditions", JAERI-M 8836 (1980)
- B-31 斎藤伸三, 稲辺輝雄, 他：“NSRRによる混合酸化物燃料の破損挙動に関する研究(I), JAERI-M 8865 (1980)
- B-32 藤城俊夫, 丹沢貞光, 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), JAERI-M 9104 (1980)
- B-33 細川隆徳, 柳原 敏, 他:反応度事故条件下における燃料破損挙動に及ぼすペレット形状の影響”, JAERI-M 9140 (1980)
- B-34 稲辺輝雄, 斎藤伸三, 柳原 敏：“NSRRにおける混合酸化物燃料予備実験の結果”, JAERI-M 9178 (1980)
- B-35 M. Ishikawa, S. Shiozawa : "A study of Fuel Behavior under Reactivity Initiated Accident Conditions -Review", J. Nucl. Mater. 95 (1980)
- B-36 T. Fujishiro, S. Tanzawa, et al. : "The Effects of Coolant Flow on Light Water Reactor Fuel Behavior during a Reactivity Initiated Accident", J. Nucl. Sci. Tech. 18-3 (1981)
- B-37 大西信秋, 石島清見, 落合政昭, 丹沢貞光, 他：“TREATにおける反応度事故条件を模擬した燃料破損実験に関する検討”, JAERI-M 9488 (1981)
- B-38 藤城俊夫, 他：“NSRR強制対流実験リグのボイド発生時の流動特性”, JAERI-M 9630 (1981)
- B-39 床井博見, 他：“反応度事故に伴う破壊エネルギー発生機構の研究, 炉外可視実験報告”, JAERI-M 9840 (1981)
- B-40 斎藤伸三：燃料棒急速加熱条件下における燃料過渡挙動の可視的研究”, JAERI-M 9756 (1981)
- B-41 藤城俊夫, 丹沢貞光, 他：“NSRR強制対流実験におけるボイド挙動の測定”, JAERI-M 9825 (1981)
- B-42 S. Saito, et al. : "Development of In-reactor Fuel Behavior Observation Facility", J. Nucl. Sci. Tech. vol. 18, No. 6, June 1981
- B-43 石川迪夫, 他：“軽水炉における事故時の燃料破損と炉心の冷却性”, 日本原子力学会誌, vol. 23, No. 12 (1981年12月)
- B-44 斎藤伸三：“原子炉内燃料棒急速加熱時の燃料挙動”, 流れの可視化, vol. 2, No. 5 (1982)
- B-45 岩田耕司, 他：“反応度事故時燃料挙動に及ぼす燃料棒支持条件の影響” JAERI-M 9927 (1982)
- B-46 大西信秋, 落合政昭, 石島清見, 丹沢貞光：“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)

- B-47 S. Saito, K. Ishijima, S. Shiozawa, K. Iwata : "Effects of Rod Pre-Pressurization on Light Water Reactor Fuel Behavior during Reactivity Initiated Accident Conditions", J. Nucl. Sci. Tech. vol. 19, № 4 (1982)
- B-48 S. Shiozawa, S. Saito, S. Yanakihara : "Zircaloy-UO<sub>2</sub> and - Water Reactions and Cladding Temperature Estimation for Rapidly Heated Fuel Rods under on RIA Condition", J. Nucl. Sci. Tech. vol. 19, № 5 (1982)
- B-49 S. Yanagihara, S. Shiozawa, S. Saito : "Effect of Fuel Pellet Eccentricity with the Cladding on Fuel Rod Thermal Behavior under a Reactivity Initiated Accident Condition", J. Nucl. Sci. Tech. vol. 19, № 5 (1982)
- B-50 岩田耕司, 藤城俊夫, 他 : "反応度事故条件下的燃料挙動に及ぼす冷却材流動の影響(2) - NSRR インパイル水ループ実験結果 - ", JAERI-M 82-137 (1982)
- B-51 床井博見, 他 : "反応度事故条件下における高発熱量照射時の燃料微粒子化の形態 - 微粒子化燃料の粒度分布測定および粒子の観察 - ", JAERI-M 82-141 (1982)
- B-52 T. Fujishiro, S. Tanzawa : "Effects of Gap Heat Transfer on LWR Fuel Behaviors during an RIA Transient : In-pile Experimental Results with Helium and Xenon Filled Rods", Nuclear Engineering and Design, vol. 73, № 3 (1982)
- B-53 M. Ishikawa, et al. : "Post-Accident Core Coolability of Light Water Reactors", Energy Developments in Japan, vol. 5 (1983)
- B-54 T. Tsuruta, T. Fujishiro : "Evaluation of Thermocouple Fin Effect in Cladding Surface Temperature Measurement during Film Boiling", J. of Nuclear Science and Technology, vol. 21, № 7 (1984)
- B-55 柳原 敏 : "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" JAERI-M 84-058 (1984)
- B-56 藤城俊夫 : "反応度事故条件下における軽水炉燃料のギャップ熱伝達の研究" JAERI-M 84-063 (1984)
- B-57 鶴田隆治, 斎藤伸三, 落合政昭 : "反応度事故条件下における高発熱量負荷時の機械エネルギーと燃料の微粒子化", JAERI-M 84-235 (1984)
- B-58 S. Saito, S. Shiozawa : "Severe Fuel Damage in Steam and Helium Environments Observed in In-reactor Experiments", Fifth International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety, Karlsruhe, September, 1984
- B-59 K. Ishijima : "Measurement and Preliminary Analysis on Transient

Cladding Deformation during Reactivity Initiated  
Accident Conditions ", J. of Nuclear Science and  
Technology , vol. 22 , №2 (1985)

- B - 60 T. Tsuruta, M. Ochiai, S. Saito : " Study on Fuel Fragmentation and Mechanical Energy Conversion Ratio at Rapid Deposition of High Energy in LWR Fuels ", J. of Nuclear Science and Technology , vol. 22 , №9 (1985)
- B - 61 S. Kawasaki, S. Saito, et al., "Review of the JAERI's Studies on the Fuel Behavior during LOCA", IAEA Specialist's Meeting on Fuel Behavior , Sept. , 1985

## C. 計算コード, 解析結果等

- C - 1 石川迪夫, 他 : " 軽水動力炉の動特性解析 (核熱水力結合動特性解析コード EUREKAによる解析) ", JAERI-1201 (1971)
- C - 2 石川迪夫, 他 : " 軽水動力炉の反応度事故時に現れる減速材温度効果 " 日本原子力学会誌, vol. 13 , №6 (1971)
- C - 3 石川迪夫, 他 : " 即発性減速材加熱 (PMH) 効果がもたらすフィードバック挙動 ", 日本原子力学会誌, vol. 13 , №6 (1971)
- C - 4 石川迪夫, 他 : " 暴走出力により誘起される即発性減速材加熱 (PMH) 効果 " JAERI - 1214 (1971)
- C - 5 M. Ishikawa, et al. : " EUREKA :A Computer Code for Uranium-Oxide Fueled, Water Cooled Reactor Kinetics Analysis ", JAERI - 1235 (1974)
- C - 6 大西信秋 : " 重みつき残査法を用いた有限要素非定常 2 次元熱伝導計算コード (HEATRN-FEM) ", JAERI-M 6665 (1976)
- C - 7 S. Saito : " Evaluation of Effects of Finite Mixing Time and Non-Condensable Gas on Fuel Sodium Interactions ", Journal of Nuclear Science and Technology , 14[6] (1977)
- C - 8 稲辺輝雄, 他 : " 準静的多元空間依炉心動特性解析コード EUREKA-SPACE ", JAERI-M 7183 (1977)
- C - 9 S. Saito : " EXCURS-A Computing Programme for Analysis of Transient Behavior in a Sodium Cooled Fast Reactor ", JAERI-M 7280 (1977)
- C - 10 藤城俊夫 : " 燃料破損にともなう破壊力発生挙動の解析コード : PULSE - 2 ", JAERI-M 7583 (1978)
- C - 11 大西信秋 : " 軽水動力炉の事故時の燃料挙動解析コード MCDRAN-1 ", JAERI -M 8634 (1979)
- C - 12 石島清見, 他 : " NSRR 実験データ・バンク・システムの開発 (その1) ", JAERI -M 9261 (1981)

- C - 13 T. Fujishiro, S. Saito : "A Computer Code for Fuel/Coolant Interaction Analysis under LWR and LMFBR Conditions", JAERI-M 9306 (1981)
- C - 14 大西信秋, 石島清見, 斎藤伸三 : " 軽水炉の事故時燃料挙動解析コード, NSR-77 ", JAERI-M 82-050 (1982)
- C - 15 植村 駿, 石島清見, 他 : " NSRR 実験データ・バンク・システムの開発 (その2) ", JAERI-M 82-121 (1982)
- C - 16 藤城俊夫, 鶴田隆治, 他 : " 燃料ペレット偏心時の二次元燃料挙動解析コード NSR-EXENT の開発 (解析モデルおよびサンプル計算結果) ", JAERI-M 83-187 (1983)
- C - 17 石島清見, 稲辺輝雄 : " NSRR ディジタル・シミュレータの開発 ", JAERI-M 84-203 (1984)

## D. NSRR 炉特性, カプセル, 実験計装等

- D - 1 伊勢武治, 他 : " NSRR の制御棒効果の解析 (NSRR の炉物理と核設計・3) ", JAERI-M 5361 (1973)
- D - 2 伊勢武治, 他 : " NSRR の試験燃料 1 本ピンの発熱計算 (NSRR の炉物理と核設計・4) ", JAERI-M 5613 (1974)
- D - 3 伊勢武治, 他 : " NSRR の熱中性子スペクトラム, 温度係数および動特性パラメータ (NSRR の炉物理と核設計・1) ", JAERI-M 5730 (1974)
- D - 4 藤城俊夫, 他 : " NSRR カプセルの耐爆実験 ", JAERI-M 5861 (1974)
- D - 5 斎藤伸三, 他 : " NSRR 炉心燃料の機械的および熱的健全性確認試験 ", JAERI-M 6021 (1975)
- D - 6 藤城俊夫, 他 : " 溶融金属の水中落下実験 (溶融金属, 水相互作用における金属の微粒子化発生条件) ", JAERI-M 6281 (1975)
- D - 7 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)
- D - 8 S. Saito, T. Inabe, T. Fujishiro, et al. : " Measurement and Evaluation on Pulsing Characteristics and Experimental Capability ", Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 14, No. 3 (1977)
- D - 9 山崎 利, 他 : " NSRR 大気圧カプセルおよび実験計装の現状 ", JAERI-M 7105 (1977)
- D - 10 S. Saito, T. Fujishiro, et al. : " An Optical Approach for the Observation of Nuclear Fuel Failure Phenomenon in a Water Environment ", Proceedings of the 13th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Tokyo (1978)
- D - 11 NSRR 研究委員会実験計装開発専門部会 : " 放射線による燃料移動測定の現状 ",

## JAERI-M 7683 (1978)

- D-12 柳原 敏, 塩沢周策, 他：“カロリメトリ法によるNSRR試験燃料の発熱量の較正”, JAERI-M 8457 (1979)
- D-13 斎藤伸三, 他：“NSRR実験孔内中性子束および $\gamma$ 線量率の評価”, JAERI-M 8474 (1979)
- D-14 小林晋昇, 他：“NSRR高温高圧水カプセルの試作開発”, JAERI-M 8274 (1979)
- D-15 橋倉宏行, 斎藤伸三：“NSRR実験孔内中性子束及び $\gamma$ 線量率の評価(II)”, JAERI-M 9142 (1980)
- D-16 斎藤伸三, 他：“NSRR実験用ナトリウムループの試作と特性試験”, JAERI-M 9114 (1980)
- D-17 丹沢貞光, 他：“NSRR高温高圧ループの開発”, JAERI-M 83-039 (1983)
- D-18 山崎 利 : “NSRRカプセル強度確認試験における評価方法の検討”, JAERI-M 85-015 (1985)

## E. NSRR計画, 解説等

- E-1 石川迪夫 : “反応度事故に対する安全性研究”, 日本原子力学会誌 vol. 12, No.5 (1970)
- E-2 原子炉安全性研究炉委員会：“反応度事故研究の概要と安全性研究炉(NSRR)計画”, JAERI-memo 4031公開 (1970)
- E-3 石川迪夫, 他：“反応度事故に関する安全性研究計画”, 火力原子力発電, vol. 26, No. 4 (1974)
- E-4 斎藤伸三 : “反応度事故時の燃料のふるまい”, 原子力工業 22 [6] (1976)
- E-5 星 薫雄, 他：“PCM研究の現状” JAERI-M 6927 (1977)
- E-6 石川迪夫, 斎藤伸三, 他：“軽水炉事故時燃料挙動に関する炉内実験の現状と将来計画”, 日本原子力学会誌 20 [12] (1978)
- E-7 M.Ishikawa, S.Saito, et al. : “Present Status and Future Plan of In-Reactor Experiments on Fuel Behavior under Accidental Conditions of Light Water Reactor”, Energy Development in Japan, vol. 2 (1979)
- E-8 M.Ishikawa, et al. : “In Reactor Experiments in Japan”, Seventh Reactor Safety Research Information Meeting, Geithersburg, USA (1979)
- E-9 大西信秋 : “NSRRの概要と制御棒較正について”, 炉物理の研究
- E-10 S.Saito : “Activities on Fuel-Coolant Interaction in JAERI”, OECD-NEA Fuel-Coolant Interaction Newsletter SINDO (82) 1, No.2 (1982)

## F. その他の

## 付録A NSRR 炉の概要

### (1) NSRR の構成

NSRR による燃料破損実験では、試験燃料にパルス状の高い中性子束を与えることによって、実際の原子炉における反応度事故時の厳しい過渡的挙動を模擬した発熱状態を起こし、試験燃料を破損に至らしめるものである。この実験の母体となる NSRR は、高いパルス性能を有する TRIGA 型原子炉に実験上の便宜を考慮して改良を加えた熱中性子パルス炉である。原子炉は Fig. A - 1 に示すように、水深 9 m を有するスイミング・プール型の炉である。炉心はプール底部に位置しており、炉心燃料の冷却はプール水の自然循環によって行う。

試験燃料は、実験用カプセルあるいはループ中に収納固定して中央の実験孔に挿入する。

実験孔は、炉心中央を貫通し、プールの中程で Y 字状に分岐してプール上面の床面まで伸びた構造である。このうちの 1 本は垂直装填管、他方はオフセット装填管と呼ぶ。オフセット装填管は、管が傾斜しているため放射線のストリーミングが減少するので、シールドプラグが不要であり、実験物の挿入、取出しが容易に行える特徴がある。このため、オフセット装填管は標準サイズの実験物を用いた数多いパラメータ実験に便利である。一方、垂直装填管は、ループ実験や燃料集合体実験のような大形の実験部を用いる場合に使用する。

実験孔の下部にはカプセル・グリッピング装置があり、カプセルの下部をしっかりと固定する。これは、カプセル内部で燃料が破壊した際に、冷却水を急速に加熱し大きな水撃力を発生して、カプセルを飛び上らせる作用を及ぼすことが予想されるために、これを防止することを目的としたものである。カプセル・グリッピング装置の下端は、原子炉プール下部のサブパイル室の壁に埋め込まれた I 字鋼によって固定され、70 t までの衝撃圧に耐えることができる。また、垂直装填管内部にはカプセル・ホールドダウン機構がある。これは、実験孔に装荷したカプセルの上部を抑えるためのもので、カプセル・グリッピング装置とともに、カプセル飛び上り防止のための装置である。

### (2) 炉心構成

NSRR の燃料は、濃縮ウラン-水素化ジルコニウム (U-ZrH) を発熱体とし、上下に黒鉛反射体を配して、これをステンレス鋼製被覆材で覆ったものである。

U-ZrH 燃料は、炉心に大きな正の反応度を印加しても、速かに炉出力の上昇を抑える強い即発性の負の温度係数 (約  $-9.3 \times 10^{-5} \text{ } \Delta\text{K}/\text{K}/^\circ\text{C}$ ) を有する。これは、燃料中に減速材 (ZrH) が均一に混合しており、減速材の温度上昇が燃料温度の上昇と同時に起こって、中性子のスペクトル硬化が即発的に生じ、熱中性子の利用率を著しく減少するためである。

燃料は、Fig. A - 2 に示すように、内径 22 cm の六角形の中空実験孔の周囲に稠密に配列され炉心を構成する。炉心内の燃料本数は 149 本であり、炉心は約 \$ 8.5 の余剰反応度を有する。また、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）の制御棒のほかに、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のついた制御棒で、3 本のトランジェント棒のうち 2 本は、圧縮空気によって駆動し、他の 1 本は圧縮空気駆動系に加えて電動モータ駆動系を備えており、任意に挿入位置を加減することができて、パルス運転の際の投入反応度量を調節しうる。

パルス運転時には、各トランジエント棒は全て圧縮空気系で急速引き抜きする。トランジエント棒の反応度変化上有効なストロークの引き抜き時間は約 5.0 msec である。NSRR のパルス運転上許された最大投入反応度は \$4.70 であり、この場合の反応度変化率は約 \$100/sec になる。

### (3) パルス特性

現在までに実施したパルス運転における最大投入反応度は \$4.67 であるが、この最大パルス時ににおける炉出力のピーク値は 21,100 MW であり、1 パルス当たりに放出される炉出力の時間積分値（放出エネルギー）117 MW・sec、パルス半値幅 4.4 msec、最短炉周期 1.13 msec であった。Fig. A-3 には、この最大パルス時に測定したパルス出力波形および積分出力の実測値を示す。

また、Fig. A-4 には、投入反応度を変えた場合のピーク出力および積分出力の測定データを示す。

### (4) 実験能力

実験孔はフランクス・トラップとなっており、ここに置かれた水カプセルの内部では、水の中性子減速作用によって熱中性子束が炉心における平均値よりも数段高くなっている (Fig. A-5)。このため、実験時には炉心燃料の健全性を損うことなく試験燃料を効率的に溶融せしめることができる。

Fig. A-6 は、各投入反応度のパルス運転によって試験燃料に与える断熱的な最大発熱量を示す。同図から分るように、例えば最大投入反応度によるパルスが 5% 濃縮の PWR 型試験燃料に与え発熱量は約 340 cal/g・UO<sub>2</sub> でこれは UO<sub>2</sub> の溶融エンタルピを十分に上まわるものである。

Table A-1 Characteristics of NSRR

|                              |   |
|------------------------------|---|
| (1) <u>Reactor Type;</u>     | Modified TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor)                                    |
| (2) <u>Reactor Vessel;</u>   | 3.6 <sup>m</sup> (wide) x 4.5 <sup>m</sup> (long) x 9 <sup>m</sup> (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-followed 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 <sub>4</sub> 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 <sub>4</sub> C   |
| Rod drive                    | Fast : Pneumatic<br>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            | 117MW-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 μsec   |
| (7) <u>Experiment Tube;</u>  |   |
| Inside diameter              | 22cm  |

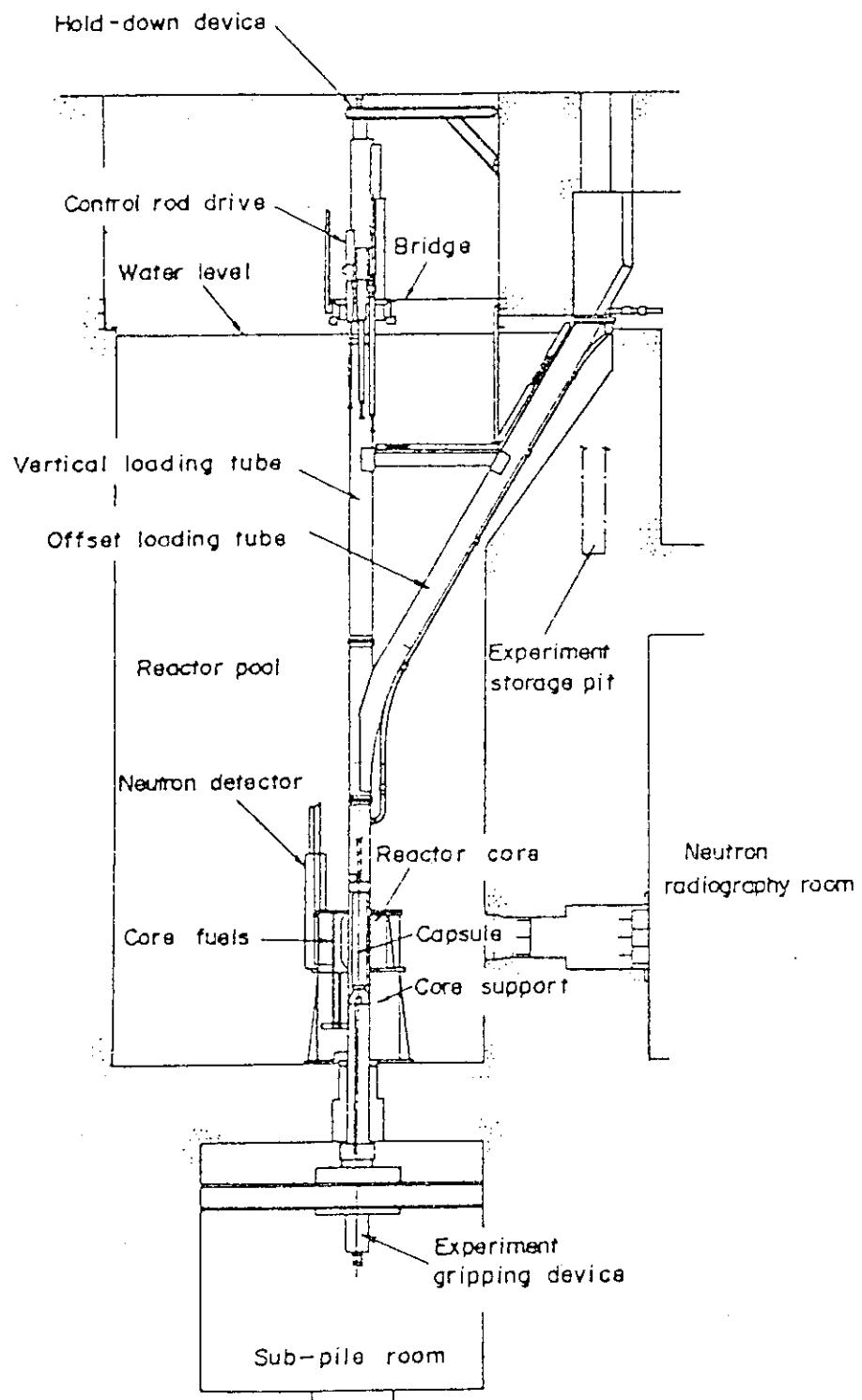


Fig. A-1 General Arrangement of NSRR

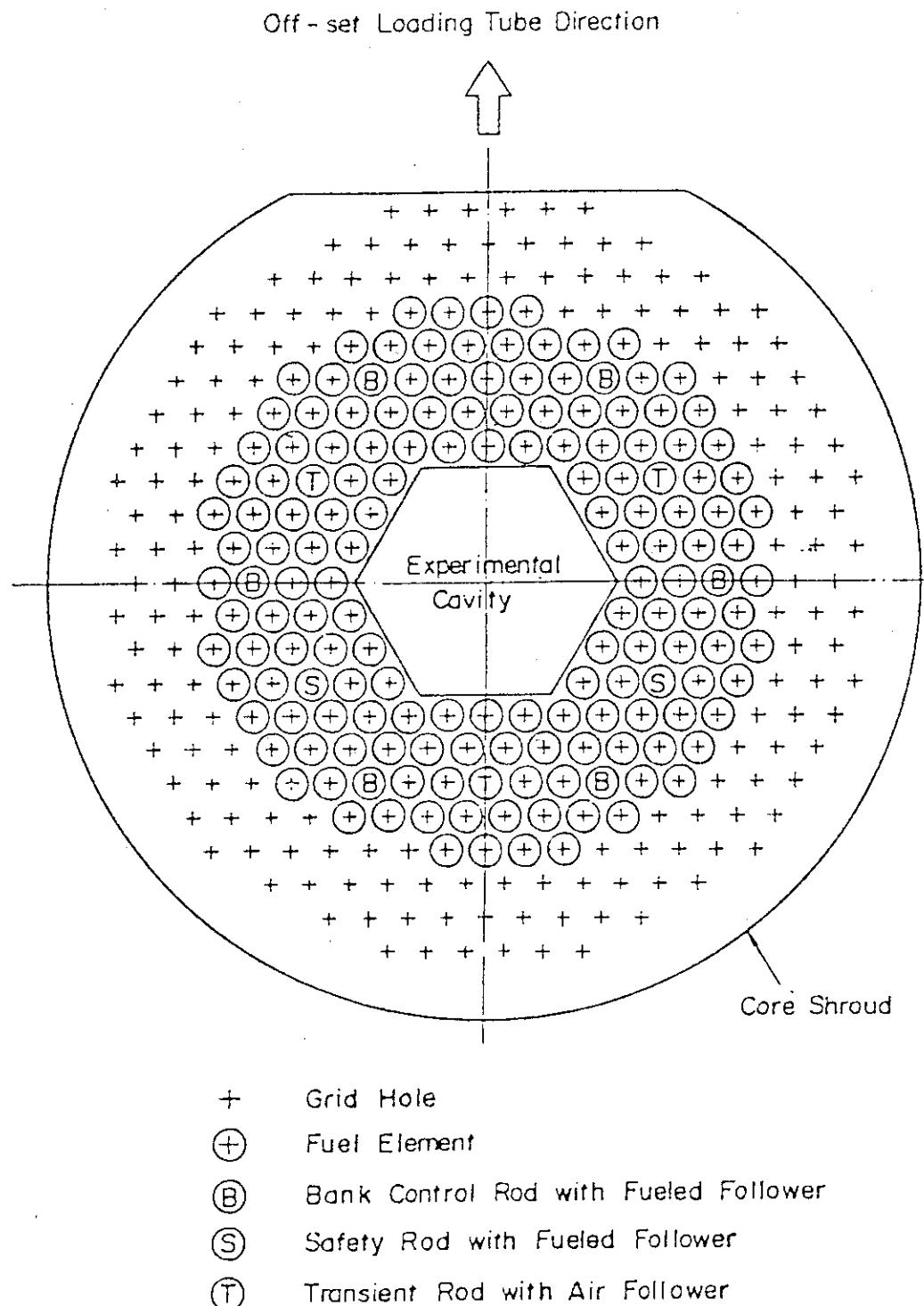


Fig. A - 2 Operational Core Configuration

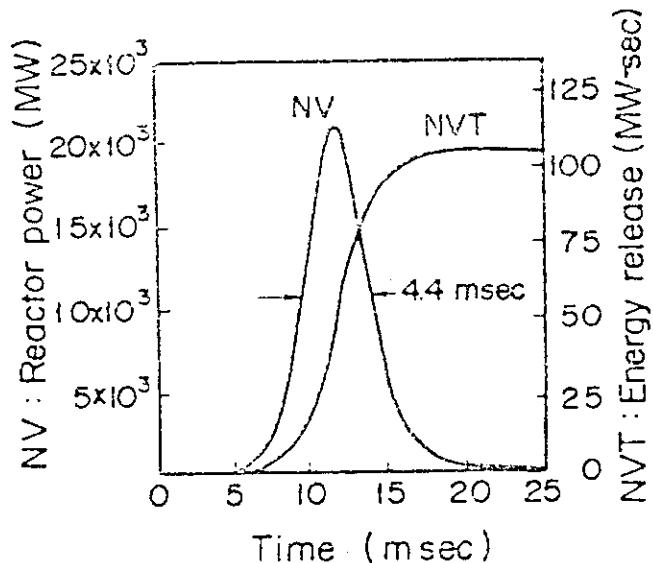


Fig. A-3 Reactor Power and Core Energy Release given by \$4.67 Pulse

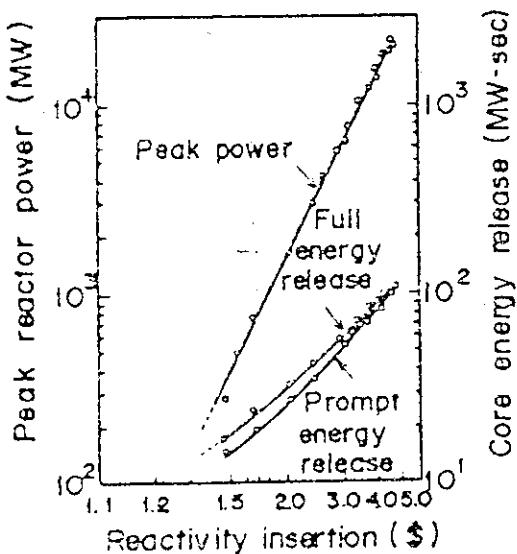


Fig. A-4 Peak Reactor Power and Core Energy Release Versus Reactivity Insertion

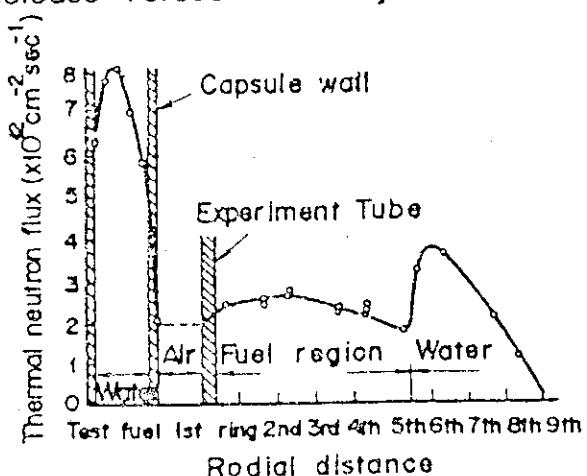


Fig. A-5 Radial Thermal Neutron Flux Distribution in the Core and Capsule

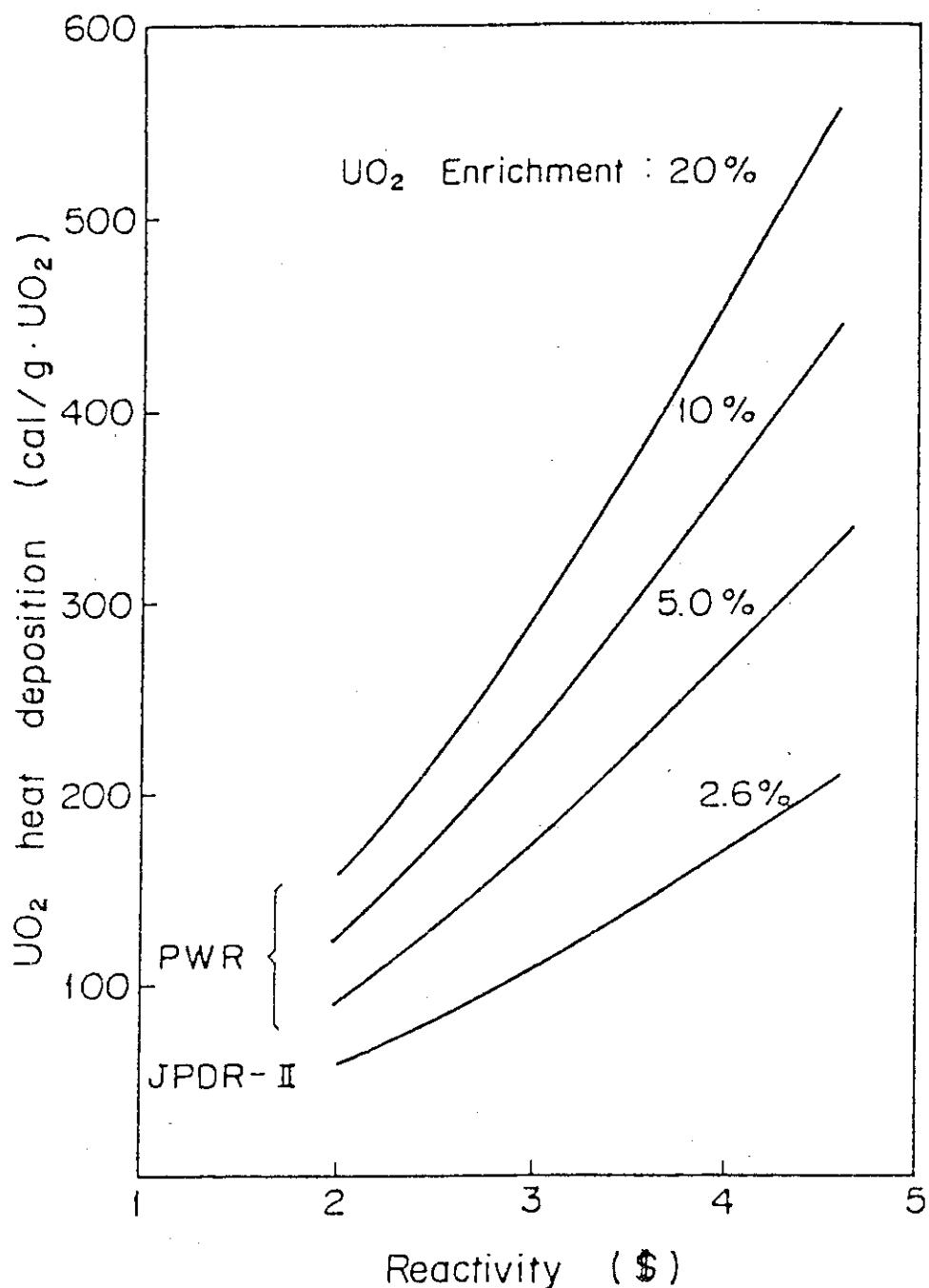


Fig. A-6 Heat Deposition in a LWR Size Test Fuel Rod Contained in a Capsule with Water as a Function of Inserted Reactivity in Pulsing Operation

付録 B. 大気圧カプセル, 燃料挙動可視カプセル,  
高温高压カプセル, 水ループ, および標  
準試験燃料

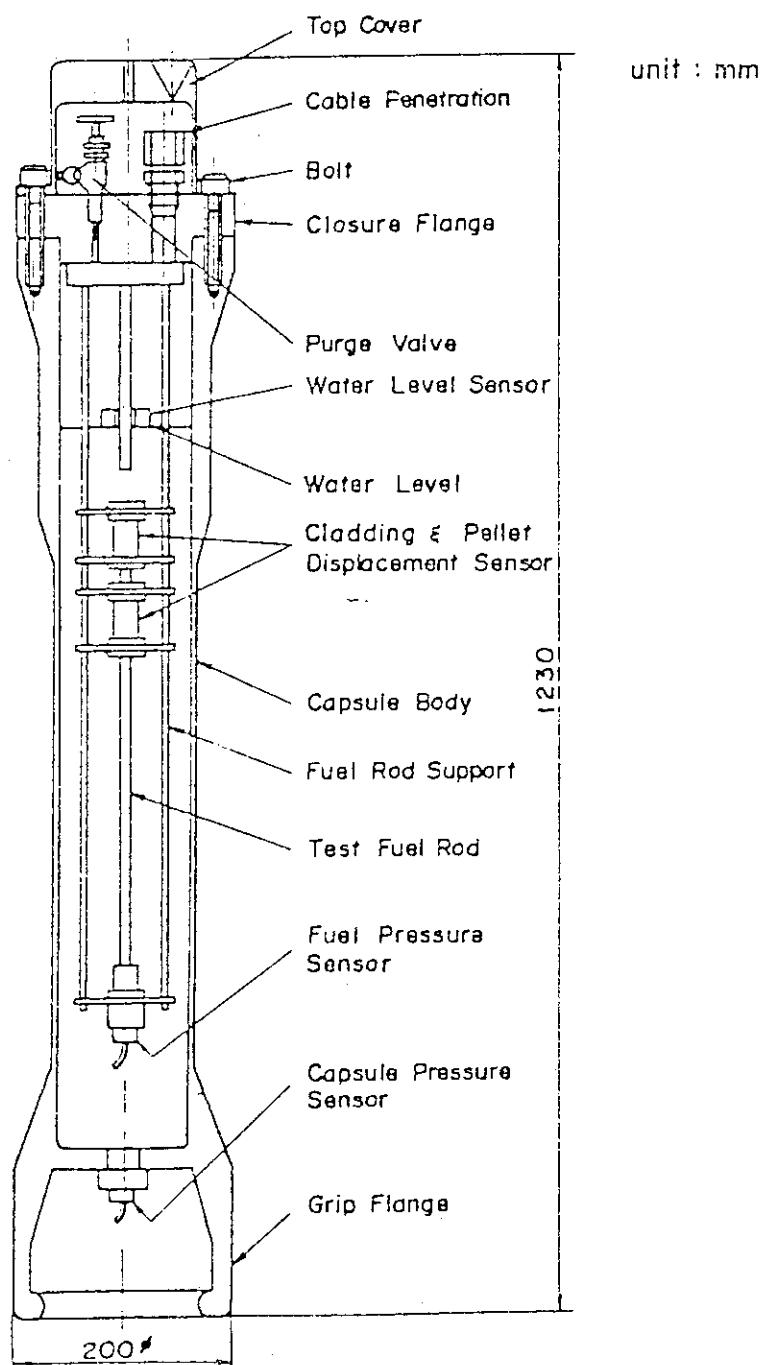


Fig. B-1 Standard Water Capsule

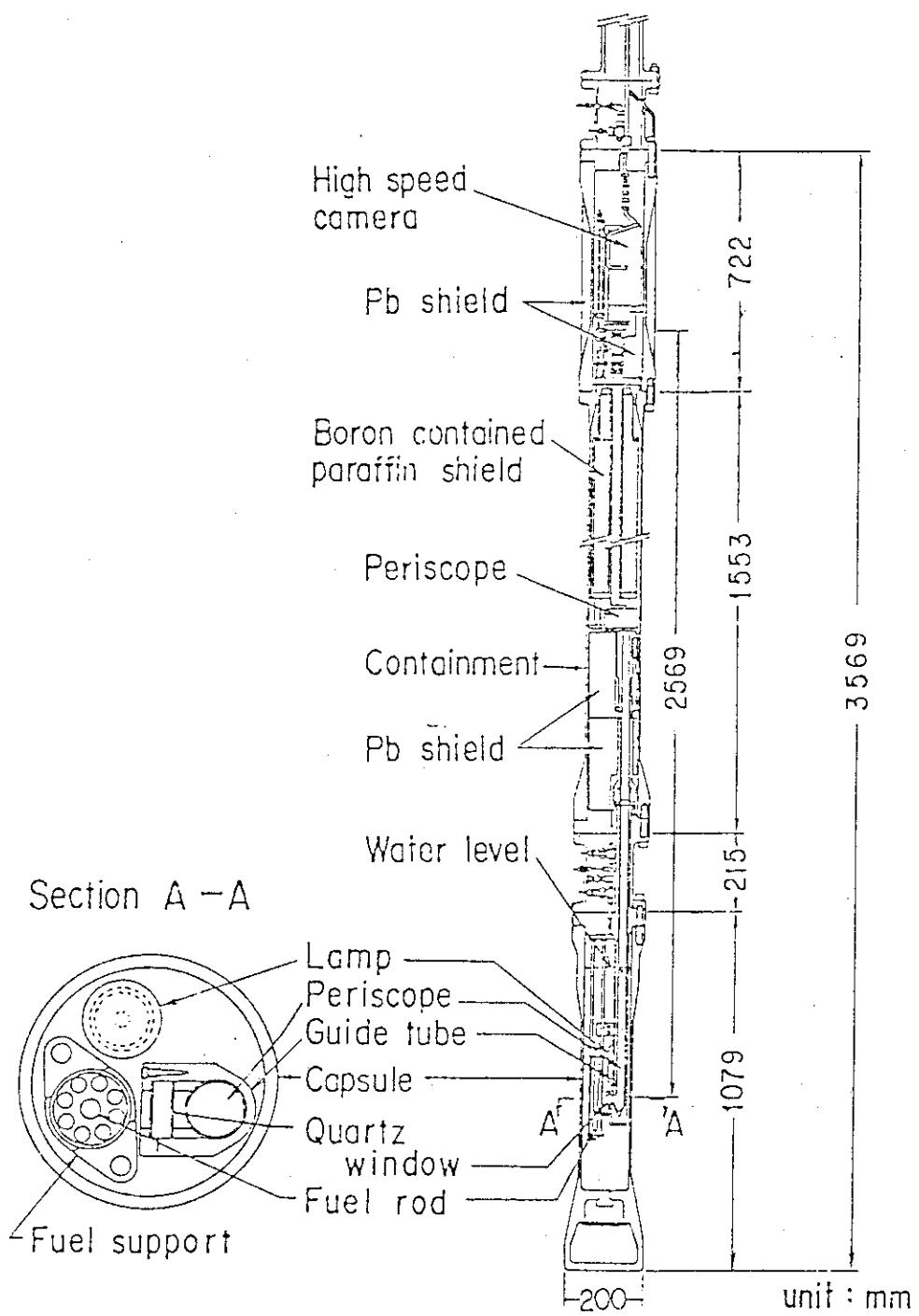


Fig. B-2 Schematic Configuration of In-reactor Fuel Behavior Observation System

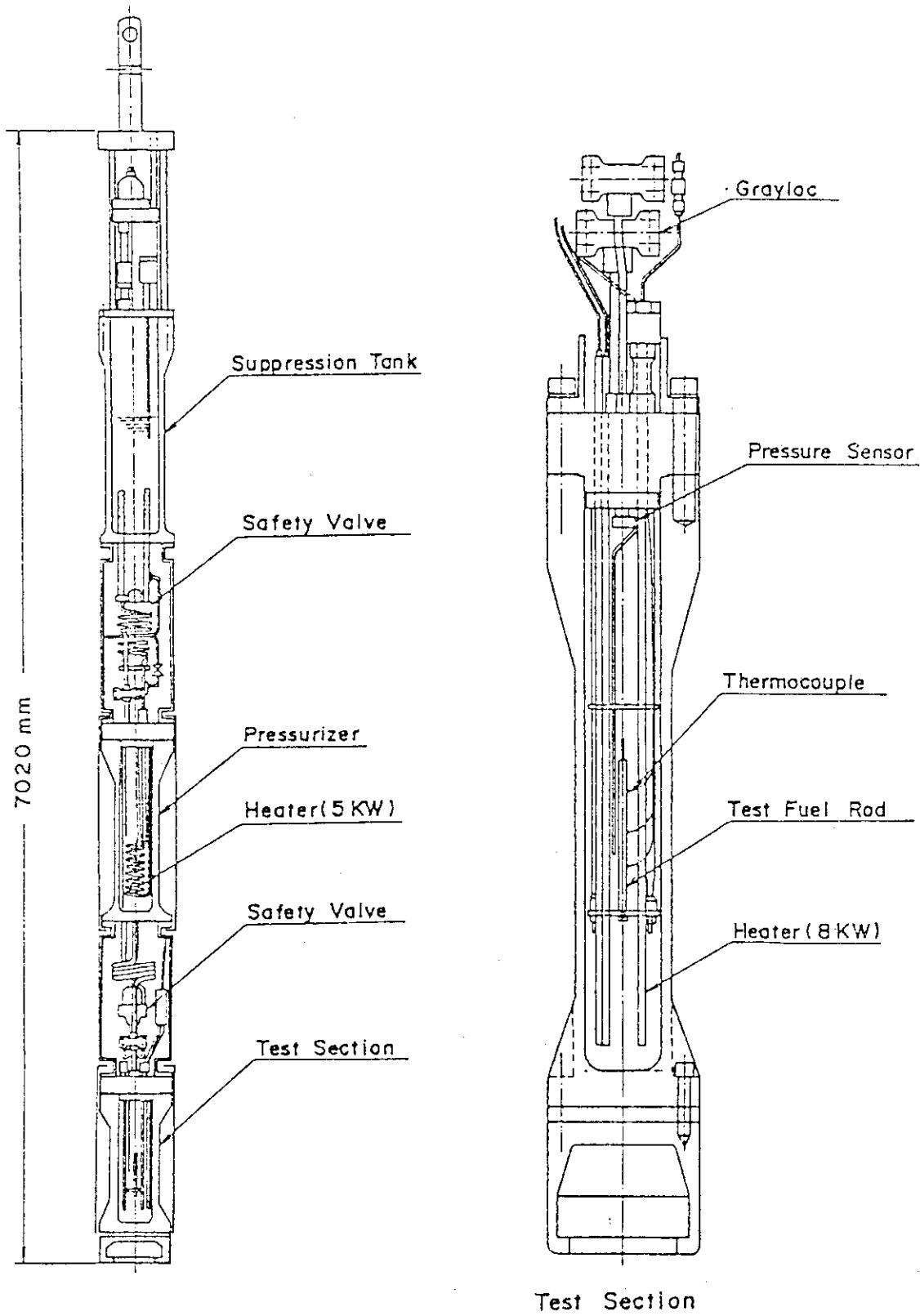


Fig. B-3 Schematic of high pressure capsule

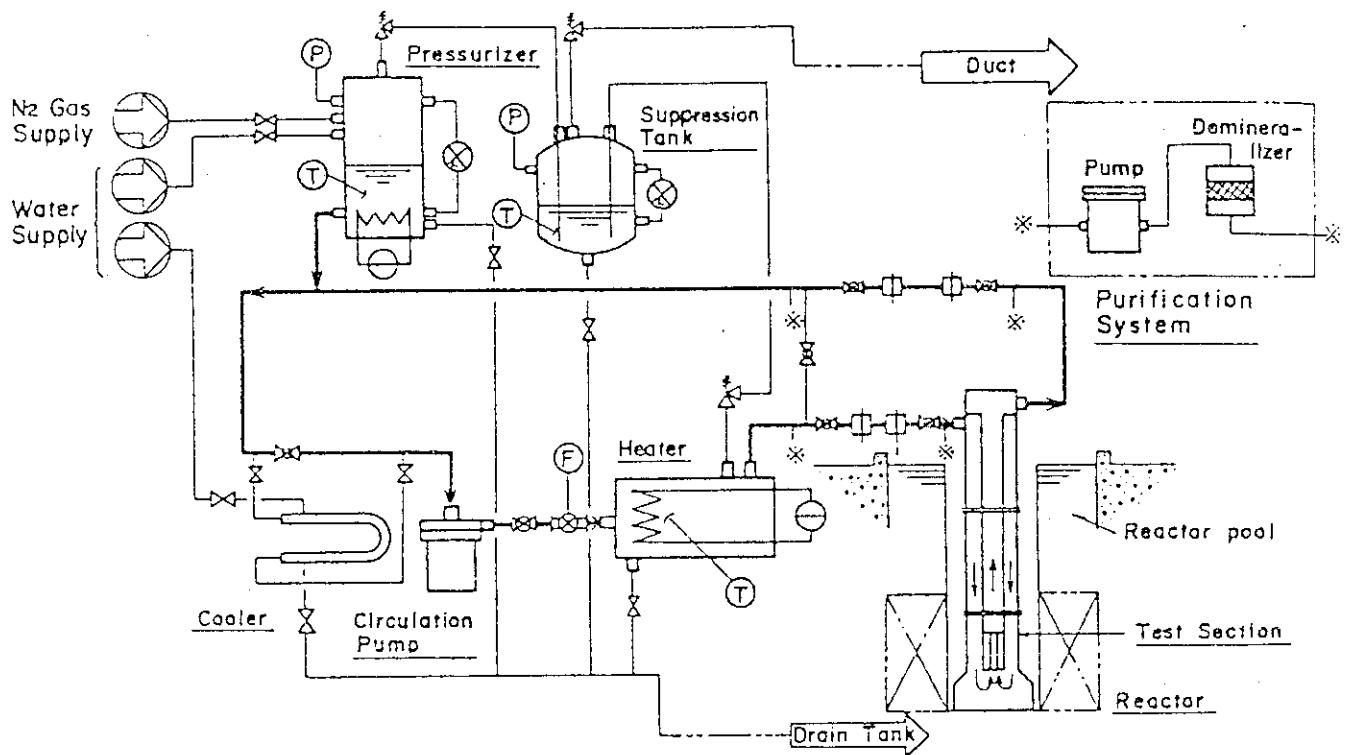


Fig. B-4 LP LT Loop

unit : mm

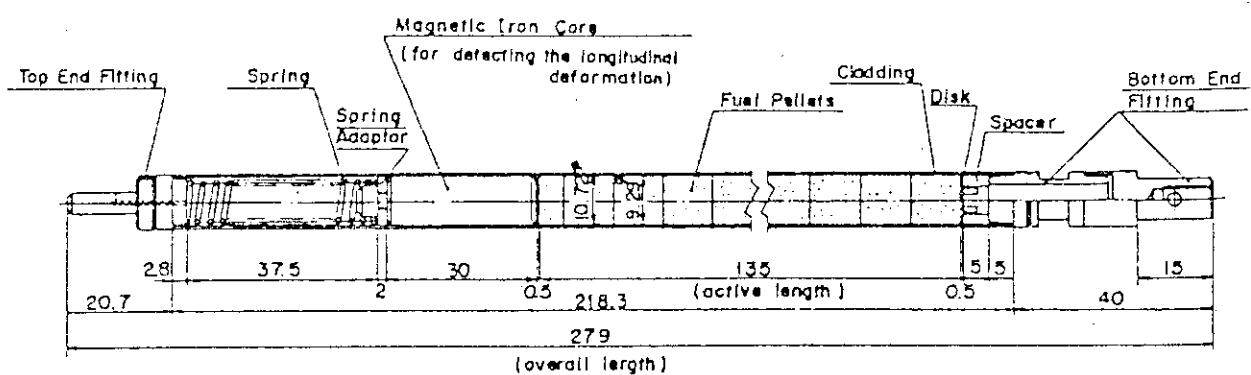


Fig. B-5 Standard Type Test Fuel

## 付録 C N S R R 実験概要一覧

Table C に今期までに行った実験の概要の一覧表を示す。これは、今後も実験毎に累積的に記録してゆくもので、N S R Rにおいて初回からどのような実験を行ってきたか把握しうるようにするためにとりまとめたものである。

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g.UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel |                   |                   | Fuel<br>Failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|------------|---|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |
| 103-1    | 441        | 267   | 2.16             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-2    | 455        | 180   | 3.36             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-3    | 467        | 219   | 2.72             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-4    | 482        | 364   | 1.48             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-5    | 532        | 239   | 2.26             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-6    | 704        | 230   | 2.31             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-7    | 727        | 205   | 2.61             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-9    | 573        | 573   | 2.10             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 103-10   | 587        | 587   | 3.15             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-1 | 624        | 179   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-2 | 625        | 178   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-3 | 626        | 175   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-4 | 627        | 174   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-5 | 628        | 173   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-11-6 | 629        | 170   | 3.53             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-1 | 650        | 229   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-2 | 651        | 232   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-3 | 652        | 232   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-4 | 653        | 232   | 2.31             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-5 | 654        | 260   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-12-6 | 655        | 230   | 2.03             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 103-14   | 520        | 175   | 2.33             | Standard  | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 103-15   | 759        | 215   | 1.73             | Standard  | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 103-16   | 784        | 234   | 1.54             | Standard  | 5.0               | S                 | ○               |                                    |
| 103-20   | 679        | 178   | 4.04             | Standard  | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-21   | 736        | 206   | 3.33             | Standard  | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 103-22   | 748        | 192   | 3.78             | Standard  | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-23   | 956        | 204   | 2.72             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 103-24   | 955        | 198   | 2.83             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel    |                   |                   | Fuel failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|------------|---|------------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type    | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |              |                                    |
| 103-31-1 | 1277       | 122   | 5.41             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 103-31-2 | 1278       | 112   | 6.52             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 103-31-3 | 1279       | 95  | 9.28             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 103-32   | 1295       | 99  | 9.49             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 103-33   | 1302       | 95  | 9.49             | Pressurized  | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 104-1    | 831        | 112   | 6.13             | Short-sized  | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 104-2    | 848        | 376   | 1.34             | Short-sized  | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-3    | 861        | 380   | 1.34             | Short-sized  | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-4    | 893        | 299   | 1.69             | Short-sized  | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-5    | 951        | 420   | 1.24             | Special      | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-6    | 1005       | 200   | 2.63             | Special      | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-7    | 1035       | 170   | 3.18             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 104-8    |            | 205   | —                | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-10   | 1258       | 210   | 2.31             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 104-11   | 1293       | 180   | 3.18             | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-12   | 1300       | 210   | 2.49             | Pre-oxidized | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 104-13   | 1315       | 210   | 2.49             | Pre-oxidized | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 105-1    | 1191       | 306   | 2.08             | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 105-2-1  | 1287       | 80  | 7.45             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 105-2-2  | 1288       | 150   | 3.56             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 105-2-3  | 1289       | 200   | 2.52             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 111-1    | 123        | 44  | 9.14             | JP-II        | 2.6               | S                 |              |                                    |
| 111-2    | 126        | 112   | 2.29             | JP-II        | 2.6               | S                 |              |                                    |
| 111-3    | 127        | 181   | 3.29             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 111-4    | 135        | 244   | 2.41             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 111-5    | 136        | 270   | 1.91             | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 111-6    | 140        | 333   | 1.61             | Standard     | 10.0              | S                 |              |                                    |
| 111-7    | 175        | 376   | 1.43             | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 111-8    | 268        | 433   | 1.32             | Standard     | 10.0              | S                 | ○            |                                    |
| 111-9    | 236        | 158   | 1.59             | JP-II        | 2.6               | S                 |              |                                    |
| 111-10   | 237        | 204   | 1.23             | JP-II        | 2.6               | S                 |              |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 111-12   | 299        | 179   | 2.23             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-12B  | 1027       | 165   | 3.59             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-13   | 340        | 140   | 4.48             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-14   | 362        | 161   | 3.82             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-16   | 351        | 221   | 2.77             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-17   | 363        | 229   | 2.57             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-18   | 547        | 485   | 1.39             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-19   | 553        | 526   | 1.28             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-20   | 671        | 402   | 1.28             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-20B  | 681        | 388   | 1.28             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-21   | 675        | 441   | 1.15             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-22   | 708        | 170   | 2.31             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-23   | 980        | 393   | 1.34             | Short-sized | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-24   | 965        | 486   | 1.39             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-25   | 1001       | 475   | 1.40             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-26   | 1020       | 528   | 1.35             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-27   | 1057       | 529   | 1.37             | Standard    | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-28   | 1080       | 474   | 1.40             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-29   | 1090       | 432   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-30   | 1108       | 508   | 1.30             | Standard    | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-31   | 1117       | 508   | 1.30             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-32   | 1158       | 436   | 1.19             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-33   | 1163       | 432   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-34   | 1165       | 430   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-35   | 1179       | 428   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 111-36   | 1189       | 414   | 1.38             | Standard    | 20.0              | B                 | O               |                                    |
| 111-37   | 1188       | 432   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-38   | 1192       | 424   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-39   | 1195       | 432   | 1.34             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 111-40   | 1202       | 395   | 1.14             | Standard    | 20.0              | B                 | O               |                                    |
| 111-41   | 1196       | 152.2   | 3.20             | Standard    | 20.0              | B                 | O               |                                    |
| 111-42   | 1334       | 386   | 1.69             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |              |
| 111-43   | 1267       | 439   | 1.23             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 111-44   | 1342       | 423   | 1.31             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 111-45   | 1348       | 392   | 1.36             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 111-46   | 1368       | 422   | 1.26             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 113-1    | 303        | 245   | 2.22             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 113-2    | 304        | 264   | 2.06             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 113-3    | 305        | 481(*1)                                       | 1.41             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-1    | 439        | 214   | 2.81             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-2    | 440        | 210   | 2.77             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-3    | 450        | 240   | 2.42             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-4    | 503        | 262   | 2.05             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-5    | 514        | 239   | 2.42             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-6    | 527        | 342   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-7    | 521        | 221   | 2.66             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-8    | 641        | 197   | 2.89             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-9    | 631        | 157   | 3.62             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-10   | 594        | 153   | 3.82             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-11   | 669        | 214   | 2.44             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-12   | 678        | 248   | 2.03             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-22   | 889        | 342   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-23   | 894        | 331   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-24   | 900        | 249   | 2.13             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |              |
| 115-25   | 903        | 343   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-26   | 939        | 366   | 1.43             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-27   | 924        | 366   | 1.43             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-27B  | 1162       | 379   | 1.43             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-28   | 940        | 293   | 1.72             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-29   | 942        | 338   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-31   | 982        | 342   | 1.56             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-31B  | 1068       | 327   | 1.63             | Standard    | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-32   | 1041       | 190   | 2.91             | Pressurized | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |
| 115-33   | 1075       | 175   | 2.85             | Pressurized | 10.0              | S                 | O               |                                    |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Test fuel<br>Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
|          |            |   |                  |             |                   |                                |                 |              |
| 115-34   | 1085       | 168   | 3.30             | Pressurized | 10.0              | S                              |                 |              |
| 115-35   | 1109       | 190   | 2.91             | Pressurized | 10.0              | S                              | O               |              |
| 115-36   | 1157       | 192   | 2.77             | Standard    | 10.0              | S                              | O               |              |
| 115-27   | 1218       | 203   | 2.47             | Standard    | 10.0              | B(3)                           |                 |              |
| 115-38   | 1255       | 175   | 3.25             | Standard    | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 115-39   | 1259       | 180   | 3.06             | Standard    | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 115-40   | 1263       | 159   | 3.59             | Standard    | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 115-42   | 1339       | 200   | 2.63             | Pressurized | 10.0              | S                              | O               |              |
| 115-43   | 1346       | 187   | 2.91             | Pressurized | 10.0              | S                              | O               |              |
| 115-44   | 1349       | 201   | 2.63             | Pressurized | 10.0              | S                              |                 |              |
| 115-45 * | 1372       | 214   | 2.44             | Pressurized | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 115-46 * | 1392       | 243   | 2.13             | Pressurized | 10.0, 0.71        | S                              | O               |              |
| 115-47 * | 1447       | 224   | 2.33             | Pressurized | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 115-48 * | 1481       | 175   | 3.25             | Pressurized | 10.0, 0.71        | S                              |                 |              |
| 120-1    | 1206       | 130   | 3.22             | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-2    | 1213       | 42  | 14.86            | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-3-1  | 1285       | 42  | 15.98            | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-3-2  | 1286       | 130   | 3.59             | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-4-1  | 1312       | 45  | 20.62            | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-4-2  | 1313       | 140   | 4.00             | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-5-1  | 1350       | 138   | 4.00             | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 120-5-2  | 1351       | 179   | 2.97             | Wide gap    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 200-1-1  | 182        | 39  | 28.63            | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 200-1-2  | 183        | 241   | 2.36             | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 200-2-1  | 179        | 116   | 5.96             | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 200-2-2  | 180        | 271   | 2.04             | Standard    | 10.0              | S                              | O               |              |
| 200-3    | 148        | 176   | 3.33             | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |
| 200-4    | 181        | 233   | 2.36             | Standard    | 10.0              | S                              |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel |                   |                   | Fuel<br>failure | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |              |
| 200-4B   | 1028       | 232   | 2.33             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 200-4C   | 1176       | 227   | 2.42             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 200-5    | 189        | 264   | 2.09             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-5B   | 246        | 267   | 2.03             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-5C   | 1029       | 258   | 2.15             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-5D   | 1115       | 261   | 2.06             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 200-6    | 187        | 271   | 2.00             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-6B   | 247        | 276   | 1.95             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-6C   | 1030       | 261   | 2.06             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-7    | 191        | 295   | 1.83             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 200-8    | 1047       | 197   | 2.73             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 201-1    | 243        | 244 + 39                                      | 2.25             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 201-2    | 390        | 140   | 4.96             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 201-3    | 438        | 171   | 4.96             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 202-1    | 298        | 250   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 202-2    | 300        | 254   | 2.21             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 202-3    | 341        | 252   | 2.30             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 202-4    | 353        | 252   | 2.32             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 202-4B   | 397        | 254   | 2.42             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 203-1    | 316        | 325   | 1.72             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 203-2    | 318        | 336   | 1.67             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 203-3    | 320        | 367   | 1.56             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 203-4    | 341        | 380   | 1.50             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 203-5    | 367        | 241   | 1.62             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 205-1-1  | 533        | 36  | 20.62            | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 205-1-2  | 534        | 36  | 20.62            | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 205-1-3  | 535        | 70  | 10.98            | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 205-1-4  | 536        | 148   | 4.00             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 205-1-5  | 537        | 209   | 2.77             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |
| 205-1-6  | 538        | 231   | 2.52             | Standard  | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 205-2-1  | 558        | 151   | 4.00             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(caJ/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel                      |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type                      | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 205-2-2  | 559        | 154   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-2-3  | 560        | 155   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-2-4  | 561        | 234   | 2.31             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-5-1  | 601        | 147   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-5-2  | 602        | 177   | 3.25             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-5-3  | 603        | 208   | 2.77             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-5-4  | 604        | 228   | 2.44             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 205-5-5  | 605        | 242   | 2.19             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-1  | 566        | 36  | 20.62            | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-2  | 567        | 34  | 20.62            | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-3  | 568        | 66  | 10.98            | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-4  | 569        | 157   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-5  | 570        | 216   | 3.82             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-1-6  | 571        | 247   | 3.82             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-2-1  | 597        | 157   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-2-2  | 598        | 160   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-2-3  | 599        | 160   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-2-4  | 600        | 238   | 2.31             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-3    | 677        | 322   | 1.67             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-4-1  | 685        | 149   | 4.00             | Special                        | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-4-2  | 686        | 240   | 2.31             | Special                        | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-4-3  | 687        | 286   | 1.78             | Special                        | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-5-1  | 635        | 146   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-5-2  | 636        | 178   | 3.25             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-5-3  | 637        | 219   | 2.77             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-5-4  | 638        | 235   | 2.44             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-5-5  | 639        | 259   | 2.08             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-6-1  | 699        | -   | 4.00             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                 | S                 |                 |                                    |
| 206-6-2  | 700        | -   | 2.31             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                 | S                 |                 |                                    |
| 206-6-3  | 701        | -   | 1.67             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                 | S                 |                 |                                    |
| 206-7-1  | 711        | 148   | 4.00             | Standard                       | 10.0              | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments.

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel  |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type  | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 206-7-2  | 712        | 233   | 2.31             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-8-1  | 732        | 71  | 10.98            | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-8-2  | 733        | 178   | 3.25             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-8-3  | 734        | 230   | 2.44             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-9-1  | 760        | 150   | 4.00             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-9-2  | 761        | 150   | 4.00             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-9-3  | 762        | 150   | 4.00             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-9-4  | 763        | 241   | 2.31             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-10-1 | 768        | 240   | 2.31             | Standard   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 206-10-2 | 769        | 150   | 4.00             | Standard   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 206-10-3 | 770        | 284   | 1.91             | Standard   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 206-11-1 | 779        | 147   | 4.00             | Special    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-11-2 | 780        | 150   | 4.00             | Special    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-11-3 | 781        | 239   | 2.31             | Special    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-11-4 | 782        | 287   | 1.78             | Special    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-12-1 | 798        | 146   | 4.00             | Standard   | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 206-12-2 | 799        | 146   | 4.00             | Standard   | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 206-12-3 | 800        | 150   | 4.00             | Standard   | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 206-12-4 | 801        | 238   | 2.30             | Standard   | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 206-13-1 | 853        | 37  | 20.62            | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-13-2 | 854        | 74  | 9.07             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-13-3 | 855        | 111   | 6.04             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-13-4 | 856        | 158   | 3.78             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-13-5 | 857        | 241   | 2.25             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-31   | 914        | 204   | 2.61             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-32   | 941        | 257   | 2.08             | Standard   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 206-33   | 947        | 149   | 3.65             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-34   | 960        | 104   | 6.13             | Standard   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-35   | 1156       | 200   | 2.83             | Wide-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-36   | 1161       | 255   | 2.08             | Wide-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-37   | 1186       | 201   | 2.83             | Narrow-Gap | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 206-38   | 1187       | 254   | 2.08             | Narrow-Gap | 10.0              | S                 | ○               |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|------------|---|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |
| 206-39   | 1200       | 202   | 2.83             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 207-1    |            | 0   | -                | Standard  | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 207-2    | 507        | 263   | 2.02             | Standard  | 5.0, 10.0         | S                 |                 |                                    |
| 207-3    | 523        | 282   | 1.87             | Standard  | 5.0, 10.0         | S                 | O               |                                    |
| 207-4    | 574        | 274   | 1.87             | Standard  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 207-5    | 592        | 210   | 2.77             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 207-11   | 1048       | 162   | 3.59             | Standard  | 10.0, 0.71        | S                 |                 |                                    |
| 207-12   | 1067       | 258   | 2.15             | Standard  | 10.0, 0.71        | S                 | O               |                                    |
| 207-13   | 1081       | 233   | 2.33             | Standard  | 10.0, 0.71        | S                 |                 |                                    |
| 209-1-1  | 238        | 155   | 3.38             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-1-2  | 239        | 157   | 3.38             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-1-3  | 240        | 157   | 3.38             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-1-4  | 241        | 158   | 3.38             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-1-5  | 242        | 160   | 3.38             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-1  | 407        | 183   | 3.41             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-2  | 408        | 178   | 3.41             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-3  | 465        | 180   | 3.41             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-4  | 524        | 176   | 3.28             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-5  | 668        | 180   | 3.20             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-2-6  | 738        | 180   | 3.26             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 209-7    | 911        | 173   | 3.41             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 212-1    | 529        | 107(*3)                                       | 5.79             | SUS       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 212-2    | 548        | 207   | 2.47             | SUS       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 212-3    | 577        | 269   | 1.73             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 212-4    | 585        | 388   | 1.22             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 212-5    | 557        | 240   | 1.98             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 212-6    | 621        | 236   | 2.08             | SUS       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 212-7    | 705        | 157   | 3.33             | SUS       | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 212-8    | 750        | 457   | 1.13             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 212-9    | 1038       | 330   | 1.48             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 212-10   | 1083       | 300   | 1.62             | SUS       | 10.0              | S                 | O               |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                |                   |                 | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment (%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure |              |
| 212-51   | 829        | 90  | 27.01            | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-52   | 882        | 254   | 4.43             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-53   | 906        | 277   | 3.93             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-54   | 948        | 293   | 3.08             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-55   | 967        | 373   | 2.13             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-56   | 1002       | 341   | 2.68             | SUS         | 10.0           | S                 | ○               |              |
| 212-57   | 1082       | 290   | 3.08             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-58   | 1104       | 317   | 2.77             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-59   | 1112       | 317   | 2.77             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-60   | 1209       | 160   | 5.96             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-61   | 1222       | 225   | 4.08             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-62   | 1237       | 268   | 3.30             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-63   | 1254       | 286   | 3.13             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-64   | 1265       | 209   | 4.68             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-65   | 1268       | 247   | 3.62             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-66   | 1309       | 208   | 4.73             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-67   | 1311       | 229   | 4.16             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-68-1 | 1316       | 197   | 5.28             | SUS         | 10.0           | S                 |                 |              |
| 212-68-2 | 1317       | 286   | 2.28             | SUS         | 10.0           | S                 | ○               |              |
| 214-1    | 859        | 240   | 2.31             | Oxidized    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 214-2    | 862        | 259   | 2.31             | Oxidized    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 214-2B   | 891        | 239   | 2.31             | Oxidized    | 10.0           | S                 | ○               |              |
| 214-3    | 899        | 235   | 2.31             | Oxidized    | 10.0           | S                 | ○               |              |
| 214-4    | 905        | 188   | 2.91             | Oxidized    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 214-5    | 1087       | 240   | 1.87             | Oxidized    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 216-1    | 646        | 200   | 2.68             | Thin-Wall   | 10.0           | S                 |                 |              |
| 216-2    | 582        | 255   | 2.00             | Thin-Wall   | 10.0           | S                 |                 |              |
| 216-3    | 593        | 231   | 2.35             | Thin-Wall   | 10.0           | S                 |                 |              |
| 216-4    | 630        | 220   | 2.35             | Thin-Wall   | 10.0           | S                 | ○               |              |
| 216-5    | 752        | 449   | 1.21             | Thin-Wall   | 10.0           | S                 |                 |              |
| 217-1    | 612        | 185   | 2.73             | Cold-worked | 10.0           | S                 |                 |              |
| 217-2    | 730        | 260   | 2.10             | Cold-worked | 10.0           | S                 |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pules No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel     |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|-----------|---|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |           |   |                  | Fuel type     | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |
| 217-3    | 778       | 243   | 2.27             | Cold-worked   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 218-1    | 682       | 262   | 2.02             | Full-annealed | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 218-2    | 728       | 240   | 2.30             | Full-annealed | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 218-3    | 755       | 237   | 2.27             | Full-annealed | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 219-1    | 834       | 234   | 2.43             | Autoclaved    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 219-2    | 860       | 264   | 2.03             | Autoclaved    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 219-3    | 881       | 271   | 1.98             | Autoclaved    | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 220-1    | 293       | 53  | 13.44            | Standard      | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 220-2    | 294       | 110   | 3.96             | Standard      | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 220-3    | 295       | 49  | 62.46            | Standard      | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 220-4    | 296       | 113   | 8.35             | Standard      | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 220-5    | 322       | 66  | 15.98            | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 221-1    | 349       | 239   | 1.58             | Standard      | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 221-2    | 372       | 245   | 1.48             | Standard      | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 221-3    | 384       | 242   | 1.44             | Standard      | 5.0               | S                 |                 |                                    |
| 221-4    | 350       | 274   | 2.50             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 221-5    | 373       | 189   | 3.89             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 221-6    | 391       | 232   | 3.25             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 222-1    | 396       | 264   | 1.39             | Standard      | 5.0               | S                 | ○               |                                    |
| 222-2    | 409       | 286   | 1.33             | Standard      | 5.0               | S                 | ○               |                                    |
| 222-3    | 418       | 276   | 1.36             | Standard      | 5.0               | S                 | ○               |                                    |
| 222-4    | 399       | 248   | 2.91             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 222-5    | 410       | 245   | 3.06             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 222-6    | 431       | 253   | 2.77             | Standard      | 20.0              | S                 | ○               |                                    |
| 226-1    | 589       | 208   | 2.77             | Flat          | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 226-2    | 613       | 226   | 2.26             | Flat          | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 226-5    | 583       | 207   | 2.77             | Dished        | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 226-6    | 620       | 238   | 2.19             | Dished        | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 226-7    | 690       | 238   | 2.28             | Dished        | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 231-1    | 324       | 240   | 2.27             | Pressurized   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |
| 231-2    | 315       | 249   | 2.27             | Pressurized   | 10.0              | S                 | ○               |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pules No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Fuel<br>failure | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |           |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |              |
| 231-3    | 325       | 184   | 3.13             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-4    | 339       | 136   | 4.38             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-5    | 437       | 240   | 2.42             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-6    | 477       | 227   | 2.37             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-7    | 464       | 278   | 1.94             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-8    | 443       | 235   | 2.26             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-9    | 461       | 246   | 2.13             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-10   | 480       | 250   | 2.03             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-11   | 634       | 219   | 2.44             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-12   | 415       | 243   | 2.19             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-13   | 448       | 262   | 2.04             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-14   | 579       | 238   | 2.19             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-15   | 526       | 259   | 2.00             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-16   | 419       | 162   | 3.59             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-17   | 449       | 150   | 3.89             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-18   | 479       | 237   | 2.31             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-19   | 508       | 177   | 3.28             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-20   | 517       | 200   | 2.77             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-21   | 623       | 270   | 1.98             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-22   | 456       | 279   | 1.89             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-23   | 471       | 353   | 1.43             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-24   | 515       | 195   | 2.81             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-25   | 518       | 209   | 2.70             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-26   | 522       | 260   | 1.98             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○               |              |
| 231-27   | 649       | 193   | 3.01             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-28   | 695       | 195   | 2.87             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-29   | 698       | 195   | 2.77             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-30   | 710       | 204   | 2.66             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-31   | 936       | 195   | 2.97             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-32   | 953       | 190   | 2.97             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |
| 231-33   | 980       | 205   | 2.63             | Pressurized | 10.0              | S                 |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |              |
| 231-34   | 1006       | 227   | 2.37             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-35   | 743        | 221   | 2.57             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-36   | 765        | 232   | 2.43             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-37   | 786        | 263   | 2.10             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-38   | 939        | 197   | 2.97             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-39   | 985        | 441   | 1.21             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-44   | 1034       | 200   | 2.83             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-45   | 1074       | 160   | 3.72             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-46   | 1049       | 200   | 2.83             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-47   | 1078       | 216   | 2.57             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-48   | 1093       | 200   | 2.83             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-49   | 1096       | 225   | 1.66             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-51   | 1212       | 216   | 2.35             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-52   | 1215       | 200   | 2.63             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-53   | 1219       | 199   | 2.60             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-54   | 1244       | 177   | 3.18             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-55   | 1250       | 184   | 3.01             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-56   | 1257       | 144   | 4.00             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-57   | 1262       | 169   | 3.33             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-58   | 1266       | 143   | 4.04             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-59   | 1294       | 152   | 3.96             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-71   | 657        | 195   | 2.77             | Pressurized | 10.0              | S                 |              |
| 231-72   | 676        | 203   | 2.81             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-81   | 672        | 219   | 2.19             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 231-82   | 691        | 238   | 2.19             | Pressurized | 10.0              | S                 | ○            |
| 232-1    | 155        | 181   | 3.46             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 |              |
| 232-2    | 186        | 236   | 2.50             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 |              |
| 232-3    | 188        | 261   | 2.22             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 |              |
| 232-4    | 184        | 274   | 2.00             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 |              |
| 232-5    | 194        | 326   | 1.68             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 | ○            |
| 232-6    | 195        | 294   | 1.83             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 | ○            |
| 232-7    | 329        | 218   | 2.60             | Wide-Gap    | 10.0              | S                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g.UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel    |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|------------|---|------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type    | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |
| 232-8    | 364        | 198   | 2.93             | Wide-Gap     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-11   | 741        | 140   | 4.48             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-12   | 581        | 112   | 5.96             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-14   | 619        | 237   | 2.13             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-15   | 572        | 257   | 2.03             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 232-16   | 551        | 219(*4)                                       | 2.13             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-17-1 | 607        | 171   | 3.41             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-17-2 | 683        | 180   | 4.16             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-17-3 | 696        | 171   | 3.20             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-17-4 | 895        | 170   | 3.41             | Narrow-Gap   | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-21   | 746        | 171   | 3.41             | Integral-Gap | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 232-22   | 766        | 135   | 4.48             | Integral-Gap | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-1    | 327        | 180   | 3.41             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-2    | 328        | 271   | 2.08             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-3    | 378        | 180   | 3.41             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-4    | 352        | 247   | 2.31             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-5    | 379        | 251   | 2.31             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-6    | 385        | 211   | 2.52             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-7    | 404        | 237   | 2.31             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-8    | 412        | 239   | 2.33             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-9    | 446        | 234   | 2.40             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-10   | 356        | 371   | 1.45             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-11   | 357        | 421   | 1.35             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-11A  | 366        | 391   | 1.34             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-12   | 460        | 266   | 2.03             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-13   | 473        | 410   | 1.44             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-14   | 504        | 237   | 2.40             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-15   | 516        | 184   | 3.15             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-16   | 530        | 243   | 2.19             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 233-17   | 552        | 254   | 2.01             | Standard     | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 233-18   | 575        | 487   | 1.40             | Standard     | 10.0              | S                 | O               |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulse No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel        |                   |                   | Fuel<br>failure | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |           |   |                  | Fuel type        | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |              |
| 233-19   | 622       | 238   | 2.13             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 233-20   | 731       | 240   | 2.19             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 233-30-1 | 706       | 185   | 2.97             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 233-30-2 | 707       | 185   | 2.97             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 234-1    | (*)2      | 0.1   | —                | Short Sized      | 10.0              | S                 |                 |              |
| 234-2    | (*)2      | 0.1   | —                | Short Sized      | 10.0              | S                 |                 |              |
| 234-3    | 511       | 288   | 1.87             | Short Sized      | 10.0              | S                 | O               |              |
| 234-4    | 525       | 280   | 1.87             | Short Sized      | 10.0              | S                 | O               |              |
| 234-5    | 658       | 272   | 1.89             | Short Sized      | 10.0              | S                 | O               |              |
| 234-6    | 745       | 269   | 1.93             | Long Sized       | 10.0              | S                 |                 |              |
| 234-7 *  | 1439      | 211   | 2.60             | Long Sized       | 10.0              | S                 |                 |              |
| 234-8 *  | 1470      | 223   | 2.37             | Long Sized       | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-1    | 586       | 167   | 3.56             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-2    | 591       | 274   | 1.83             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 235-3    | 645       | 273   | 1.85             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-4    | 680       | 165   | 3.62             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-5    | 694       | 270   | 1.85             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-6    | 729       | 275   | 1.99             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 235-7    | 744       | 258   | 2.06             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-8    | 772       | 260   | 1.92             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-9    | 832       | 153   | 3.36             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-10   | 852       | 232   | 2.44             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 235-11   | 890       | 175   | 3.36             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-12   | 902       | 227   | 2.44             | Standard         | 10.0              | S                 | O               |              |
| 235-13   | 954       | 239   | 2.05             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-14   | 1032      | 220   | 2.35             | Standard(Xe-gas) | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-15   | 1070      | 170   | 3.41             | Standard(Xe-gas) | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-16   | 1060      | 150   | 4.29             | Standard(Xe-gas) | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-17   | 1110      | 175   | 3.18             | Standard(Xe-gas) | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-18   | 1160      | 145   | 4.00             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-21   | 1193      | 194   | 3.06             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 235-22   | 1194      | 195   | 3.06             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |
| 240-1    | 742       | 190   | 2.97             | Standard         | 10.0              | S                 |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Fules No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel        |                |                   | Test results    |                                    |
|----------|-----------|---|------------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |           |   |                  | Fuel type        | Enrichment (%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 240-2    | 749       | 270   | 2.00             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-3    | 753       | 180   | 2.97             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-4    | 758       | 260   | 2.06             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-5    | 774       | 194   | 2.97             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-6    | 789       | 230   | 2.31             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-7    | 826       | 290   | 1.77             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-8    | 907       | 310   | 1.69             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-9    | 937       | 290   | 1.77             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-10   | 943       | 290   | 1.75             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-11   | 981       | 290   | 1.77             | Standard         | 10.0           | S                 | O               |                                    |
| 240-12   | 1077      | 275   | 1.94             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-13-1 | 1239      | 147   | 3.89             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-13-2 | 1240      | 144   | 3.89             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-13-3 | 1241      | 230   | 2.30             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-14-1 | 1097      | 242   | 2.23             | Standard         | 10.0           | S                 | O               |                                    |
| 240-14-2 | 1098      | 276   | 1.94             | Standard         | 10.0           | S                 | O               |                                    |
| 240-15   | 1116      | 262   | 2.05             | Standard(Xe-gas) | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 240-16-1 | 1251      | 149   | 3.85             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-16-2 | 1252      | 147   | 3.85             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-16-3 | 1253      | 233   | 2.26             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-17-1 | 1273      | 150   | 4.38             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-17-2 | 1274      | 144   | 4.38             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-17-3 | 1275      | 231   | 2.25             | Standard         | 10.0, N.U.     | S                 |                 |                                    |
| 240-20   | 1084      | 400   | 1.33             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 241-1    | 839       | 183   | 3.20             | Standard         | 10.0           | S                 | O               |                                    |
| 241-2    | 862       | 180   | 2.91             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 241-3    | 1003      | 198   | 3.15             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 241-4    | 1050      | 252   | 2.13             | Standard         | 10.0           | S                 | O               |                                    |
| 241-4B   | 1113      | 252   | 2.12             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 241-5    | 1058      | 252   | 2.13             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |
| 241-5B   | 1159      | 255   | 2.13             | Standard         | 10.0           | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulse No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel                               |                   |                   |                                    | Fuel<br>failure | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|---|-------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------|--------------|
|          |           |   |                  | Fuel type                               | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Loss of<br>structural<br>integrity |                 |              |
| 242-1    | 1379      | 232   | 2.19             | Long-sized                              | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 242-2 *  | 1400      | 231   | 2.19             | Long-sized                              | 10.0              | S                 | O                                  |                 |              |
| 242-3 *  | 1442      | 275   | 1.89             | Long-sized                              | 10.0              | S                 | O                                  |                 |              |
| 245-2    | 1167      | 228   | 2.49             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 245-3    | 1177      | 182   | 3.15             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 245-4    | 1208      | 230   | 2.25             | Standard(Xe-gas)                        | 10.0,N.U.         | S                 |                                    |                 |              |
| 251-1    | 1361      | 189   | 2.81             | Pressurized                             | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 251-2    | 1362      | 167   | 3.25             | Pressurized                             | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 251-4 *  | 1440      | 181   | 2.93             | Pressurized                             | 10.0,N.U.         | S                 |                                    |                 |              |
| 252-1 *  | 1394      | 129   | 1.96             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 252-2 *  | 1397      | 192   | 2.73             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-1    | 1333      | 198   | 283              | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-2    | 1347      | 194   | 2.83             | Narrow-Gapped                           | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-3    | 1366      | 118   | 5.08             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-4 *  | 1376      | 196   | 2.83             | Narrow-gapped                           | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-5 *  | 1390      | 110   | 5.34             | Standard                                | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-6 *  | 1391      | 115   | 5.08             | Standard                                | 10.0,N.U.         | S                 |                                    |                 |              |
| 253-7 *  | 1395      | 119   | 4.84             | Stnaddard                               | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-8 *  | 1398      | 187   | 3.53             | Wide-gapped                             | 20.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-9 *  | 1402      | 112   | 5.41             | Narrow-gapped                           | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 253-10*  | 1432      | 146   | 3.78             | Standard                                | 10.0,N.U.         | S                 |                                    |                 |              |
| 255-1    | 1340      | 146   | 3.78             | Pre-irradiated<br>clad                  | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 255-2 *  | 1377      | 195   | 2.83             | Pre-irradiated<br>clad                  | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 255-3 *  | 1386      | 261   | 2.14             | Pre-irradiated<br>clad                  | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 255-4 *  | 1399      | 256   | 2.03             | Pre-irradiated<br>clad                  | 10.0              | S                 |                                    |                 |              |
| 255-5 *  | 1431      | 260   | 2.03             | Pre-irradiated<br>narrow-gapped<br>clad | 10.0              | S                 | O                                  |                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 260-1 *  | 1446       | 149   | 4.79             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 260-2 *  | 1454       | 363   | 1.64             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 260-3 *  | 1455       | 454   | 1.30             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 260-4 *  | 1456       | 499   | 1.22             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 260-5 *  | 1457       | 456   | 1.34             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 260-6 *  | 1460       | 493   | 1.22             | Standard  | 20.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 261-1 *  | 1459       | 206   | 2.37             | Standard  | 10.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 261-2 *  | 1461       | 314   | 1.54             | Standard  | 10.0, 5.0, N.U.   | S                 | O               | O                                  |
| 311-1    | 197        | 44(55)(*)5                                    | 5.37             | JP-II     | 2.6               | B(5)              |                 |                                    |
| 312-1    | 348        | 1.77(188)(*)5                                 | 1.72             | Standard  | 10, 20            | B(5)              |                 |                                    |
| 312-2    | 419        | 1.88(220)(*)%                                 | 1.71             | Standard  | 10, 20            | BB(5)             |                 |                                    |
| 312-3    | 451        | 225(240)(*)5                                  | 1.46             | Standard  | 10, 20            | B(5)              | O               |                                    |
| 312-4    | 576        | 228   | 1.46             | Standard  | 10, 20            | B(5)              | O               |                                    |
| 312-10-1 | 633        | 50  | 5.96             | Standard  | 5, 10             | B(5)              |                 |                                    |
| 312-10-2 | 740        | 210(170)(*)5                                  | 1.52             | Standard  | 5, 10             | B(5)              |                 |                                    |
| 312-11   | 797        | 250(215)(*)5                                  | 1.24             | Standard  | 5, 10             | B(5)              |                 |                                    |
| 312-20   | 647        | 1.80((90)(*)5                                 | 2.03             | Standard  | 5, 20             | B(5)              |                 |                                    |
| 312-21   | 756        | 225(145)(*)5                                  | 1.69             | Standard  | 5, 20             | B                 |                 |                                    |
| 312-40   | 1007       | 223(中心)-238(周)                                | 1.45             | Standard  | 10, 20            | B                 | O               |                                    |
| 312-41   | 1092       | 225(中心)-240(周)                                | 1.45             | Standard  | 10, 20            | B                 |                 |                                    |
| 312-42   | 1303       | 181(中)-194(周)                                 | 1.69             | Standard  | 10, 20            | B(5)              |                 |                                    |
| 312-43   | 1306       | 186(中)-198(周)                                 | 1.67             | Standard  | 10, 20            | B(5)              | O               |                                    |
| 312-44   | 1319       | 185(中)-198(周)                                 | 1.81             | Standard  | 10, 20            | B(5)              | O               |                                    |
| 312-45*  | 1388       | 156(中)-166(周)                                 | 2.06             | Standard  | 10, 20            | B(5)              | O               |                                    |
| 313-1-1  | 584        | —   | 12.63            | Standard  | 20.0              | B(4)              |                 |                                    |
| 320-1    | 648        | 237   | 2.31             | Standard  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 320-2-1  | 692        | 126   | 4.63             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 320-2-2  | 693        | 237   | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 320-3    | 726        | 260   | 1.93             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 320-4    | 735        | 235   | 2.46             | Standard  | 10.0              | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pules No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Fuel type      | Test fuel      |                   |                 | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|----------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |           |   |                  |                | Enrichment (%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure |              |
| 320-5    | 737       | 270   | 1.87             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 320-6    | 747       | 304   | 1.70             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 320-7    | 754       | 266   | 1.93             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 320-8    | 836       | 236   | 2.33             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 320-9    | 912       | 253   | 2.03             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 320-10   | 928       | 261   | 2.03             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 320-11   | 959       | 237   | 2.33             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 320-12   | 966       | 250   | 1.81             | Standard       | 10.0           | B(4)              | O(2)            |              |
| 320-13   | 1039      | 265   | 2.03             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 330-1    | 785       | 154   | 3.82             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 332-2    | 916       | 151   | 3.82             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 330-3    | 920       | 256   | 1.98             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 330-4    | 962       | 254   | 1.98             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 330-11   | 1021      | 206 (C)                                       | 1.57             | Standard       | 20.0 (C)       | B                 |                 |              |
| 332-12   | 1089      | 243 (中C) - 260 (周)                            | 1.34             | Standard       | 20, 10         | B                 | O               |              |
| 400-1    | 485       | 155   | 6.32             | Only pellet    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 400-2    | 459       | 155   | 6.42             | Only pellet    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 400-3    | 674       | 157   | 3.78             | Only pellet    | 10.0           | S                 |                 |              |
| 400-4    | 751       | 152   | 3.82             | Only pellet    | 10.0           | S                 | O               |              |
| 400-5    | 783       | 150   | 3.82             | Only pellet    | 5, 10, 20      | -                 | O               |              |
| 400-6    | 828       | 153   | 3.82             | Only pellet    | 10.0           | S                 | O               |              |
| 400-7    | 1072      | 150   | 3.82             | Pellet and Rod | 10.0           | S                 | O               |              |
| 400-8    | 1094      | 150   | 3.82             | Special        | 10.0           | S                 |                 |              |
| 401-1    | 159       | 53  | 5.24             | JP-II          | 2.6            | S                 |                 |              |
| 401-2    | 160       | 106   | 2.32             | JP-II          | 2.6            | S                 |                 |              |
| 401-3    | 171       | 154(115)                                      | 1.56             | JP-II          | 2.6            | S                 | O               |              |
| 401-3B   | 251       | 150(142)                                      | 1.53             | JP-II          | 2.6            | S                 | O               |              |
| 401-4    | 313       | 166(136)                                      | 3.62             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 401-4B   | 317       | 168(125)                                      | 3.78             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 401-4C   | 394       | 155(129)                                      | 3.78             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |
| 401-5    | 319       | 131   | 4.90             | Standard       | 10.0           | S                 |                 |              |
| 401-6    | 342       | 246(103)                                      | 2.28             | Standard       | 10.0           | S                 | O               |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel |                   |                   |                 | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure |              |
| 401-7    | 549        | 291   | 1.85             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-1    | 168        | 47  | 5.58             | JP-II     | 2.6               | S                 | S               |              |
| 402-2    | 169        | 104   | 2.27             | JP-II     | 2.6               | S                 | S               |              |
| 402-3    | 174        | 154   | 1.56             | JP-II     | 2.6               | S                 | S               |              |
| 402-4    | 343        | 1.65(109)                                     | 3.72             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-4B   | 615        | 160(105)                                      | 3.82             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-5    | 355        | 219( 81)                                      | 2.32             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-5B   | 659        | 238( 85)                                      | 2.19             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-6    | 414        | 131( 90)                                      | 5.41             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-7    | 472        | 118   | 5.21             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-8    | 644        | 159(118)                                      | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-9    | 667        | 157( 96)                                      | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-10   | 670        | 156   | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-11   | 688        | 153(132)                                      | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-12   | 697        | 158(103)                                      | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-13   | 709        | 157(131)                                      | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-23   | 757        | 152   | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-24   | 764        | 152   | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-25   | 777        | 152   | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-26   | 788        | 151   | 3.78             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-27   | 833        | 155   | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-28   | 851        | 151   | 3.62             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-29   | 864        | 213   | 2.55             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-30   | 858        | 199   | 2.52             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-31   | 896        | 155   | 3.96             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-32   | 901        | 217   | 2.60             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-33   | 913        | 190   | 3.08             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-34   | 925        | 210   | 2.77             | Standard  | 10.0              | S                 | S               |              |
| 402-35   | 914        | 200   | 2.77             | Standard  | 10.0(2.6)         | B(2)              | S               |              |
| 402-36   | 886        | 155   | 3.72             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |
| 402-37   | 892        | 157   | 4.04             | Standard  | 10.0              | S                 | S               | O            |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulse No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel    |                |                   | Fuel Failure | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|--------------|----------------|-------------------|--------------|--------------|
|          |           |   |                  | Fuel type    | Enrichment (%) | Single/<br>bundle |              |              |
| 402-28   | 1037      | 157   | 3.82             | Water logged | 10.0           | S                 | O            |              |
| 402-39   | 1073      | 200   | 2.77             | Water logged | 10.0           | S                 | O            |              |
| 402-40   | 1076      | 200   | 2.70             | Water logged | 10.0           | S                 | O            |              |
| 402-41   | 1091      | 200   | 2.77             | Water logged | 10.0           | S                 | O            |              |
| 403-1    | 365       | 161(128)                                      | 3.93             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 403-2    | 381       | 247(111)                                      | 2.42             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 403-3    | 383       | 153(116)                                      | 1.44             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 404-1    | 400       | 129   | 3.65             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 404-2    | 405       | 243(138)                                      | 2.39             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 404-2B   | 481       | 236(134)                                      | 2.28             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 411-3    | 265       | 152(123)                                      | 1.53             | JP-II        | 2.6            | S                 | O            |              |
| 412-1    | 393       | 155   | 3.78             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 413-1    | 454       | 154(108)                                      | 3.89             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 413-2    | 466       | 158( 99)                                      | 3.62             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 413-10   | 927       | 213   | 2.60             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 413-11   | 952       | 200   | 2.77             | Special      | 10.0(2.6)      | B(2)              | O            |              |
| 413-12   | 984       | 200   | 2.77             | Special      | 10.0(2.6)      | B(2)              |              |              |
| 413-13   | 1040      | 200   | 2.77             | Water logged | 10.0, 2.6      | S                 |              |              |
| 421-3    | 264       | 152   | 1.53             | JP-II        | 2.6            | S                 |              |              |
| 431-1    | 470       | 155(115)                                      | 3.78             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 432-1    | 402       | 160( 92)                                      | 3.93             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 432-1B   | 457       | 165   | 3.82             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 432-2    | 442       | 233(143)                                      | 2.44             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 433-1    | 406       | 155   | 4.00             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 433-2    | 445       | 237(172)                                      | 2.42             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 441-1    | 484       | 161( 98)                                      | 3.62             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 452-1    | 417       | 154(107)                                      | 4.00             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 462-1    | 550       | 103(*4)                                       | 3.82             | Narrow-Cap   | 10.0           | S                 | O            |              |
| 465-3-1  | 519       | 84  | 8.35             | Standard     | 10.0           | S                 |              |              |
| 465-3-2  | 528       | 164   | 3.82             | Standard     | 10.0           | S                 | O            |              |
| 472-1    | 505       | 139   | 2.68             | Standard     | 5.0            | S                 | O            |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pules No. | Energy deposition<br>(cal/g·UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel    |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity | Test results |
|----------|-----------|---|------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|--------------|
|          |           |   |                  | Fuel type    | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |              |
| 480-1    | 979       | 200   | 2.77             | Special      | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 480-2    | 1000      | 180   | 3.08             | Special      | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 480-3    | 1019      | 250   | 2.13             | Water Logged | 10.0, 2.6         | S                 |                 | O                                  |              |
| 480-4    | 1031      | 300   | 1.79             | Water Logged | 10.0              | S                 | O               | O                                  |              |
| 480-5    | 1086      | 200   | 2.77             | Water Logged | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 480-6    | 1095      | 200   | 2.70             | Water Logged | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 480-7    | 1102      | 200   | 2.77             | Water Logged | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 481-1    | 1111      | 180   | 3.08             | Water Logged | 10.0              | S                 | O               | O                                  |              |
| 482-1    | 689       | 180( 65)                                      | 3.01             | SUS          | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 482-2    | 606       | 165   | 3.82             | Thin-Wall    | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 482-3    | 578       | 167   | 3.82             | Cold-worked  | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 490-1-1  | 837       | 166   | 3.20             | Standard     | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 490-1-2  | 838       | 237   | 2.01             | Standard     | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 490-2    | 926       | 189   | 3.08             | Standard     | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 490-3    | 983       | 200   | 3.08             | Standard     | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 490-4    | 1004      | 200   | 3.08             | Standard     | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-1    | 768       | 205   | 2.50             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-2    | 802       | 169   | 3.25             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-3    | 806       | 257   | 1.90             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-4    | 816       | 284   | 1.80             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-7    | 807       | 305   | 1.63             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-8    | 821       | 393   | 1.28             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-9    | 849       | 394   | 1.28             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 501-10   | 884       | 277   | 1.77             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-1    | 804       | 208   | 2.63             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-2    | 817       | 171   | 3.25             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-3    | 819       | 313   | 1.61             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-4    | 808       | 304   | 1.63             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-4B   | 909       | 308   | 1.63             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-5    | 822       | 386   | 1.28             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 502-6    | 885       | 287   | 1.80             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |
| 503-1    | 805       | 201   | 2.63             | GE           | 10.0              | S                 |                 | O                                  |              |

## Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel                                       |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type                                       | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 503-2    | 818        | 169   | 3.08             | GE  | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 503-3    | 823        | 283   | 1.80             | GE  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 503-3B   | 910        | 280   | 1.80             | GE  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 503-4    | 809        | 304   | 1.63             | GE  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 503-5    | 824        | 392   | 1.28             | GE  | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 510-1 *  | 1381       | 252   | 3.53             | PWR 17×17 UO <sub>2</sub>                       | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 510-2 *  | 1401       | 276   | 3.15             | PWR 17×17 UO <sub>2</sub>                       | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 510-3 *  | 1427       | 264   | 3.33             | PWR 17×17 UO <sub>2</sub>                       | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 511-1 *  | 1426       | 232   | 2.89             | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -UO <sub>2</sub> | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 511-2 *  | 1450       | 293   | 2.27             | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -UO <sub>2</sub> | 20.0              | S                 | O               | O                                  |
| 511-3 *  | 1479       | 265   | 2.50             | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -UO <sub>2</sub> | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 511-5 *  | 1451       | 275   | 1.48             | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -UO <sub>2</sub> | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 511-6 *  | 1480       | 443   | 1.69             | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -UO <sub>2</sub> | 20.0              | S                 | O               | O                                  |
| 512-1 *  | 1428       | 246   | 3.08             | Standard  | 20.0,3.4          | S                 | O               |                                    |
| 512-2 *  | 1443       | 217   | 3.15             | Standard  | 20.0,3.4          | S                 |                 |                                    |
| 512-3 *  | 1452       | 232   | 2.93             | Standard  | 20.0,3.4          | S                 |                 |                                    |
| 520-1    | 786        | 101   | 10.43            | HTR   | 4,8,12,20         | S                 |                 |                                    |
| 520-2    | 837        |   | 1.98             | HTR   | 4,8,12,20         | S                 | O               |                                    |
| 520-3    | 1118       | 110   | 10.43            | HTR   | 8.0               | S                 |                 |                                    |
| 520-4    | 1345       | 119,239,552                                   |                  | HTR   | 4,8,20            | S                 |                 |                                    |
| 520-5    | 1364       | 162,326,752                                   |                  | HTR   | 4,8,20            | S                 |                 |                                    |
| 520-6 *  | 1378       | 214,430,992                                   | 3.2              | HTR   | 4,8,20            | S                 |                 |                                    |
| 520-7 *  | 1396       | 269,542,1249                                  | 2.5              | HTR   | 4,8,20            | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 530-4    | 1341       |   | 1.69             | Special     | 5.87, 19.97       | (2 pellets)       |                 |                                    |
| 600-1    | 773        | 232   | 2.42             | Cold-worked | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-2    | 796        | 518   | 1.28             | Standard    | 20.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-3    | 1024       | 270   | 1.48             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-4    | 1059       | 300   | 1.25             | Short-Sized | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-5    | 1099       | 220   | 1.48             | Short-Sized | 20.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-6    | 1153       | ~330  | 1.25             | Short-Sized | 5.0, 20.0         | S                 | O               | O                                  |
| 600-7    | 1175       | 200   | 1.25             | Short-Sized | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-8    | 1197       | 250   | 1.25             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 600-9    | 1220       | ~240  | 1.24             | SUS         | 10.0, 5.0         | S                 |                 |                                    |
| 600-9B   | 1261       |   | 1.22             | SUS         | 10.0, 5.0         | S                 |                 |                                    |
| 600-10   | 1243       | ~300  | 1.21             | Standard    | 10.0, 0.71        | S                 |                 |                                    |
| 600-11   | 1296       | 265   | 1.25             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-12   | 1314       | 220   | 1.63             | Pressurized | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-13   | 1318       | 258   | 1.25             | Standard    | 10.0, 0.71        | S                 | O               | O                                  |
| 600-14   | 1336       | 250   | 1.33             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-15   | 1343       | 256   |                  | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-16   | 1372       | 250   |                  | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-17*  | 1382       | ~220  | 1.46             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-18*  | 1404       | 250~280                                       | 1.19             | Standard    | 10.0              | B                 | O               | O                                  |
| 600-19*  | 1429       | ~280  | 1.38             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 600-20*  | 1438       | ~280  | 1.38             | Standard    | 10.0              | S                 | O               | O                                  |
| 700-1    | (*)2       | —   | —                | —           | —                 | S                 |                 |                                    |
| 700-2    | 825        | 140   | 3.85             | Standard    | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 700-3    | 883        | 341   | 1.72             | Standard    | 20.0              | S                 | O               | O                                  |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Test results    |                                    |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
| 700-4    | 983        | 253   | 2.19             | Standard    | 20.0              | S                 |                 |                                    |
| 700-5    | 1021       | 190   | 2.43             | Standard    | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 700-6    | 1042       | 280   | 2.03             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 700-7    | 1168       | 320   | 1.77             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 700-8    | 1178       | 198   | 2.93             | Standard    | 20.0              | S                 | O               |                                    |
| 701-1    | 1168       | ~150  | 3.08             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-2    | 1190       | ~220  |                  | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-3    | 1201       | 268   | 1.45             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-4    | 1207       | 293   | 1.37             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-5    | 1214       |   | 1.27             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-6    | 1221       |   | 1.31             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-7    | 1238       |   | 1.34             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-8    | 1260       |   | 2.30             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-9    | 1272       |   | 2.70             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 701-10   | 1276       |   | 1.21             | Mixed Oxide | S                 |                   |                 |                                    |
| 702-1 *  | 1380       | 192   | 1.84             | Mixed Oxide | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 702-2 *  | 1387       | 144   | 2.52             | Mixed Oxide | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 703-3 *  | 1425       | 263   | 1.38             | Mixed Oxide | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 702-4 *  | 1448       | 235   | 1.53             | Mixed Oxide | 10.0              | S                 | O               |                                    |
| 702-5 *  | 1482       | 208   | 1.72             | Mixed Oxide | 10.0              | S                 |                 |                                    |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel   |                   |                   | Test results |
|----------|------------|---|------------------|-------------|-------------------|-------------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type   | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |              |
| 710-1    | 850        | 344   | 1.41             | Short-sized | 20.0              | S                 |              |
| 710-2    | 915        |   | 1.34             | Short-sized | 20.0              | S                 |              |
| 710-3    | 961        | 380   | 1.34             | Special     | 20.0              | S                 |              |
| 810-1    | —          | 270kW Steady<br>Power 6.5 min.                | —                | Standard    | 10.0              | S                 |              |
| 810-2    | 1344       | 250   | 2.06             | Standard    | 10.0              | S                 | O            |
| 810-3    | 1365       | 250   | 2.06             | Standard    | 10.0              | S                 | O            |
| 810-4    | 1367       | 250   | 2.06             | Standard    | 10.0              | S                 | O            |
| 810-5 *  | 1375       | 250   | 2.06             | Standard    | 10.0              | S                 | O            |
| 810-6 *  | 1393       | 210   | 2.63             | Pressurized | 10.0              | S                 | O            |
| 810-7 *  | 1471       | 250   | 2.06             | Pressurized | 10.0              | S                 | O            |
| 820-1    | 1335       | 160   | 2.02             | Standard    | 10.0              | S                 |              |
| 900-1    | 775        | (*6)  | 4.16             |             |                   |                   |              |
| 900-2    | 776        | (*6)  | 4.63             |             |                   |                   |              |
| 900-3-1  | 840        | (*6)  | 62.46            |             |                   |                   |              |
| 900-3-2  | 841        | (*6)  | 14.86            |             |                   |                   |              |
| 900-3-3  | 842        | (*6)  | 10.98            |             |                   |                   |              |
| 900-3-4  | 843        | (*6)  | 9.28             |             |                   |                   |              |
| 900-3-5  | 844        | (*6)  | 3.47             |             |                   |                   |              |
| 900-3-6  | 845        | (*6)  | 1.98             |             |                   |                   |              |
| 900-3-7  | 947        | (*6)  | 1.95             |             |                   |                   |              |
| 9900-3-8 | 847        | (*6)  | 1.69             |             |                   |                   |              |
| 901-1-1  | 1304       | —   | 8.35             | —           | —                 | —                 |              |
| 901-1-2  | 1305       | —   | 2.77             | —           | —                 | —                 |              |
| 901-2-1  | 1370       | —   | 8.35             | —           | —                 | —                 |              |
| 901-2-2  | 1371       | —   | 2.77             | —           | —                 | —                 |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel     |                   |                   | Fuel failure | Test results |
|----------|------------|---|------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
|          |            |   |                  | Fuel type     | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |              |              |
| 1111-1   | (*)2       | —   | —                | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-2   | 835        | 101   | 4.48             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-3   | 888        | 177   | 2.09             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-4   | 949        | 205   | 1.95             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-5   | 908        | 160   | 2.14             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-6   | 958        | 230   | 1.95             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-7   | 987        | 271   | 1.66             | Standard      | 10.0              | S                 | O            |              |
| 1111-8   | 1036       | 270   | 1.48             | Standard      | 10.0              | S                 | O            |              |
| 1111-9-1 | 1051       | 196   | 2.31             | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-9-2 | 1052       | 196   | 2.31             | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-9-3 | 1053       | 195   | 2.31             | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-9-4 | 1054       | 194   | 2.31             | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1111-9-5 | 1055       | 192   | 2.31             | Full-Annealed | 10.0              | S                 |              |              |
| 1201     | 1169       | 200   | GE               |               | B(3)              |                   |              |              |
| 1202     | 1211       | 200   | 1.35             | Standard      | 10.0              | B(3)              |              |              |
| 1203     | 1245       | 1.64  | Water Logged     | 10.0, 0.17    | S                 |                   |              |              |
| 1204     | 1283       | 270   | 1.10             | GE            | 10.0              | B(3)              |              |              |
| 1205     | 1281       | 1.64  | Water Logged     | 10.0          | S                 |                   |              |              |
| 1206     | 1338       | 445   | 1.17             | Standard      | 20.0              | S                 |              |              |
| 1207     | 1363       | 315   | 1.2              | Water Logged  | 10.0              | S                 | O            |              |
| 1208 *   | 1389       | 220   | 1.47             | Pressurized   | 10.0              | B(3)              | O            |              |
| 1209 *   | 1403       | 220   | 1.44             | Pressurized   | 10.0              | B(3)              | O            |              |
| 1212 *   | 1449       | 194   | 2.36             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 1213 *   | 1483       | 196   | 2.36             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 2111-1   | 923        | 139   | 5.21             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 2111-2-1 | 944        | 174   | 3.68             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 2111-2-2 | 945        | 174   | 3.68             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 2111-2-3 | 946        | 174   | 3.68             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |
| 2111-3   | 957        | 257   | 2.47             | Standard      | 10.0              | S                 |              |              |

Table C Summary of the NSRR experiments

| Test No. | Pulses No. | Energy deposition<br>(cal/g•UO <sub>2</sub> ) | Period<br>(msec) | Test fuel     |                   |                   | Fuel<br>failure | Loss of<br>structural<br>integrity |
|----------|------------|---|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
|          |            |   |                  | Fuel type     | Enrichment<br>(%) | Single/<br>bundle |                 |                                    |
| 2111-4   | 986        | 257   | 2.47             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2111-5   | 1056       | 280   | 2.12             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2111-6-1 | 1105       | 240   | 2.47             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2111-6-2 | 1106       | 240   | 2.47             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2111-6-3 | 1107       | 240   | 2.47             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2211-4   | 1307       | 271   | 1.19             | Standard      | 10.0              | S                 |                 | O                                  |
| 2211-5   | 1337       | 241   | 1.26             | Standard      | 10.0              | S                 |                 |                                    |
| 2311-1   | 1379       | 181   | 1.61             | Std. (×2)     | 10.0              | B(3)              |                 |                                    |
| 2311-2   | 1478       | 210   | 1.47             | Narrow-gapped | 10.0              |                   |                 |                                    |
|          |            |   |                  | Standard      | 10.0              | B(3)              |                 |                                    |

( \* ) 今期（5.9.1～5.9.12）照射したTest No.である。

( \* 1 ) 授入反応度から評価すると約400 cal/g•UO<sub>2</sub>である。

( \* 2 ) 出力較正実験

( \* 3 ) ADRのデータが得られず、発熱量はConsole Dataより評価した。

( \* 4 ) NVのピーケク付近で原子炉のスクラムが発生した。

( \* 5 ) 標準燃料寸法、形状が異なるため計算により補正した値である。

( \* 6 ) SUS、アルミカプセルの特性実験である。

## 付録D N SRR パルス運転記録

Table D に今期行ったパルス運転の記録を示す。表中, N V はパルス出力を示し, N V T は積分出力を示す。なお, これらの値は制御盤の記録計およびメータに指示された値に基づいており, データ集録装置に記録された値とわずかに異なる (N V T で約  $\pm 3\%$ )。また, N S R R 実験においてデータ解析のために用いた積分出力はデータ集録装置の記録に基づいており, 本運転記録とはわずかに相違する。

Table D Summary data of pulsing operation (1)

| Pulse No. | Date    | Capsule | D *2 |     | E *3    |       | F  |    | G     |      | H *4    |                           | I |
|-----------|---------|---------|------|-----|---------|-------|----|----|-------|------|---------|---------------------------|---|
|           |         |         | Yes  | No  | Initial | Pulse | TA | TB | TC    | (MW) | Peak NW | NVT till 1.0 sec (MW·sec) |   |
| 1373      | Jan. 11 | ○       | 3.06 | 224 | 458     | 101   | DN | UP | 6586  | 60.5 | 特性試験    |                           |   |
| 1374      | 12      | ○       | 2.7  | 225 | 549     | 315   | DN | UP | 4234  | 47.9 | 115-45  |                           |   |
| 1375      | 12      | ○       | 3.02 | 225 | 534     | 840   | DN | DN | 6552  | 60.5 | 810-5   |                           |   |
| 1376      | 13      | ○       | 2.47 | 225 | 537     | 386   | DN | UP | 3553  | 44.1 | 253-4   |                           |   |
| 1377      | 13      | ○       | 2.47 | 225 | 541     | 386   | DN | UP | 3553  | 45.4 | 255-2   |                           |   |
| 1378      | 20      | ○       | 2.3  | 223 | 528     | 485   | DN | UP | 2449  | 35.3 | 520-6   |                           |   |
| 1379      | 26      | ○       | 3.52 | 224 | 695     | 695   | DN | DN | 8618  | 66.8 | 2311-1  |                           |   |
| 1380      | Feb. 3  | ○       | 3.26 | 225 | 580     | 735   | DN | DN | 7459  | 60.5 | 702-1   |                           |   |
| 1381      | 3       | ○       | 2.18 | 225 | 516     | 525   | DN | DN | 2054  | 35.3 | 510-1   |                           |   |
| 1382      | 6       | ○       | 3.85 | 225 | 639     | 570   | DN | DN | 11340 | 74.3 | 600-17  |                           |   |
| 1383      | 24      | ○       | 3.06 | 225 | 457     | 100   | DN | UP | 6586  | 60.5 | 特性試験    |                           |   |
| 1384      | 27      | ○       | 3.06 | 223 | 456     | 100   | DN | UP | 6586  | 59.6 | 見<br>学  |                           |   |
| 1385      | 29      | ○       | 3.06 | 223 | 457     | 100   | DN | UP | 6602  | 59.6 | 見<br>学  |                           |   |
| 1386      | Mar. 1  | ○       | 2.94 | 223 | 569     | 900   | DN | DN | 5695  | 55.4 | 255-3   |                           |   |
| 1387      | 1       | ○       | 2.65 | 223 | 541     | 340   | DN | UP | 4060  | 45.4 | 702-2   |                           |   |

Table D Summary data of pulsing operation (2)

| A         | B       | C       | *1                      | D                 | *2    | E   | *3            | F       | G                               | H        | *4     | I |
|-----------|---------|---------|-------------------------|-------------------|-------|-----|---------------|---------|---------------------------------|----------|--------|---|
| Pulse No. | Date    | Capsule | $\Delta K/\beta$<br>(%) | Bank rod position |       |     | Transient rod | Peak NW | NVT till<br>1.0 sec<br>(MW·sec) | Test No. |        |   |
|           |         | Yes     | No                      | Initial           | Pulse | TA  | TB            | TC      | (MW)                            |          |        |   |
| 1388      | Mar. 2  | ○       |                         | 3.02              | 223   | 536 | 845           | DN      | 6300                            | 58.0     | 312-45 |   |
| 1389      | 8       | ○       |                         | 3.82              | 223   | 540 | 590           | DN      | 10408                           | 71.8     | 1208   |   |
| 1390      | 15      | ○       |                         | 1.78              | 223   | 488 | 665           | DN      | 958                             | 25.2     | 253-5  |   |
| 1391      | 16      | ○       |                         | 1.82              | 223   | 491 | 650           | DN      | 1527                            | 26.5     | 253-6  |   |
| 1392      | 16      | ○       |                         | 2.95              | 223   | 568 | 900           | DN      | 5761                            | 54.9     | 115-46 |   |
| 1393      | 22      | ○       |                         | 2.58              | 223   | 508 | 330           | DN      | 4355                            | 47.9     | 810-6  |   |
| 1394      | 22      | ○       |                         | 1.96              | 223   | 499 | 600           | DN      | 1389                            | 30.2     | 252-1  |   |
| 1395      | 23      | ○       |                         | 1.86              | 223   | 494 | 636           | DN      | 1142                            | 27.7     | 253-7  |   |
| 1396      | 23      | ○       |                         | 2.66              | 223   | 553 | 335           | DN      | 4029                            | 47.9     | 520-7  |   |
| 1397      | Apr. 11 | ○       |                         | 2.52              | 223   | 533 | 400           | DN      | 3326                            | 42.8     | 252-2  |   |
| 1398      | 12      | ○       |                         | 2.16              | 224   | 510 | 525           | DN      | 2079                            | 35.3     | 253-8  |   |
| 1399      | 13      | ○       |                         | 3.05              | 223   | 574 | 825           | DN      | 6099                            | 58.0     | 255-4  |   |
| 1400      | 13      | ○       |                         | 2.90              | 223   | 539 | 100           | DN      | 5163                            | 52.9     | 242-2  |   |
| 1401      | 17      | ○       |                         | 2.32              | 223   | 523 | 478           | DN      | 2480                            | 37.0     | 510-2  |   |
| 1402      | 17      | ○       |                         | 1.77              | 223   | 487 | 670           | DN      | 930                             | 26.5     | 253-9  |   |
| 1403      | 20      | ○       |                         | 3.88              | 223   | 543 | 590           | DN      | 10760                           | 74.3     | 1209   |   |
| 1404      | 27      | ○       |                         | 4.50              | 223   | 688 | 410           | DN      | 16254                           | 97.0     | 600-18 |   |
| 1405      | Jul. 6  | ○       |                         | 3.06              | 226   | 468 | 100           | DN      | 6619                            | 63.0     |        |   |
| 1406      | 9       | ○       |                         | 2.0               | 226   | 384 | 660           | DN      | 1512                            | 31.9     |        |   |
| 1407      | 9       | ○       | 3.06                    | 226               | 548   | 100 | DN            | UP      | 6636                            | 62.2     |        |   |

特性試験

Table D Summary data of pulsing operation (3)

| A         | B       | C   | *1      | D                | *2                | E     | *3      | F  |       |       | G       | H                         | *4       | I |
|-----------|---------|-----|---------|------------------|-------------------|-------|---------|----|-------|-------|---------|---------------------------|----------|---|
|           |         |     | Capsule | $\Delta K/\beta$ | Bank rod position | Pulse | Initial | TA | TB    | TC    | Peak NV | NVT till 1.0 sec (MW•sec) | Test No. |   |
| Pulse No. | Date    | Yes | No      | (\\$)            |                   |       |         |    |       |       |         |                           |          |   |
| 1408      | Jul. 9  | o   | 4.50    | 226              | 546               | 440   | DN      | DN | 17287 | 101.6 |         |                           |          |   |
| 1409      | 9       | o   | 3.00    | 226              | 580               | 850   | DN      | DN | 6071  | 58.0  |         |                           |          |   |
| 1410      | 10      | o   | 2.50    | 227              | 417               | 475   | DN      | UP | 3360  | 45.4  |         |                           |          |   |
| 1411      | 10      | o   | 3.50    | 227              | 485               | 725   | DN      | DN | 9274  | 73.1  |         |                           |          |   |
| 1412      | 10      | o   | 3.00    | 227              | 582               | 850   | DN      | DN | 6086  | 58.0  |         |                           |          |   |
| 1413      | 10      | o   | 3.00    | 227              | 582               | 850   | DN      | DN | 6093  | 58.0  |         |                           |          |   |
| 1414      | 11      | o   | 3.00    | 228              | 582               | 850   | DN      | DN | 6056  | 58.0  |         |                           |          |   |
| 1415      | 11      | o   | 3.06    | 228              | 459               | 100   | DN      | UP | 6619  | 62.2  |         |                           |          |   |
| 1416      | 11      | o   | 4.50    | 228              | 549               | 435   | DN      | DN | 17438 | 101.6 |         |                           |          |   |
| 1417      | 17      | o   | 4.50    | 230              | 549               | 432   | DN      | DN | 17388 | 101.6 |         |                           |          |   |
| 1418      | 17      | o   | 4.00    | 230              | 518               | 570   | DN      | DN | 13104 | 87.4  |         |                           |          |   |
| 1419      | 17      | o   | 4.00    | 230              | 518               | 570   | DN      | DN | 12902 | 87.4  |         |                           |          |   |
| 1420      | 17      | o   | 4.00    | 230              | 518               | 570   | DN      | DN | 12751 | 87.4  |         |                           |          |   |
| 1421      | 19      | o   | 3.06    | 229              | 458               | 100   | DN      | UP | 6720  | 62.2  |         |                           |          |   |
| 1422      | 26      | o   | 2.00    | 227              | 385               | 660   | DN      | UP | 1562  | 31.9  |         |                           |          |   |
| 1423      | 26      | o   | 4.50    | 227              | 547               | 440   | DN      | DN | 17237 | 100.8 |         |                           |          |   |
| 1424      | 26      | o   | 3.06    | 227              | 458               | 100   | DN      | UP | 6586  | 61.3  |         |                           |          |   |
| 1425      | Aug. 22 | o   | 4.0     | 233              | 635               | 535   | DN      | DN | 12953 | 85.7  | 702-3   |                           |          |   |
| 1426      | 22      | o   | 2.44    | 233              | 535               | 435   | DN      | UP | 3032  | 41.6  | 511-1   |                           |          |   |
| 1427      | 23      | o   | 2.25    | 230              | 520               | 500   | DN      | UP | 2344  | 37.8  | 510-3   |                           |          |   |

Table D Summary data of pulsing operation (4)

| Pulse No. | Date    | Capsule | *1   | *2      | Bank rod position | Transient rod | Peak NV (MW) | NVT till 1.0 sec (MW sec) | Test No. |      |        |
|-----------|---------|---------|------|---------|-------------------|---------------|--------------|---------------------------|----------|------|--------|
|           |         |         | C    | D       |                   |               |              |                           |          |      |        |
|           |         | Yes     | No   | Initial | Pulse             | TA            | TB           | TC                        |          |      |        |
|           |         | \$      |      |         |                   |               |              |                           |          |      |        |
| 1428      | Aug. 23 | ○       | 2.53 | 230     | 538               | 395           | DN           | UP                        | 3478     | 44.1 | 512-1  |
| 1429      | 24      | ○       | 4.0  | 229     | 662               | 530           | DN           | DN                        | 12474    | 81.9 | 600-19 |
| 1430      | Sep. 4  | ○       | 3.06 | 228     | 458               | 100           | DN           | UP                        | 6586     | 60.5 | 見 学    |
| 1431      | 6       | ○       | 3.05 | 228     | 577               | 825           | DN           | DN                        | 6300     | 63.0 | 255-5  |
| 1432      | 7       | ○       | 2.10 | 228     | 508               | 552           | DN           | UP                        | 1840     | 32.8 | 253-10 |
| 1433      | 12      | ○       | 2.0  | 226     | 388               | 660           | DN           | UP                        | 1583     | 31.9 | 特性試験   |
| 1434      | 12      | ○       | 3.8  | 226     | 508               | 625           | DN           | DN                        | 11995    | 82.3 |        |
| 1435      | 13      | ○       | 3.06 | 229     | 454               | 100           | DN           | UP                        | 6384     | 58.8 |        |
| 1436      | 13      | ○       | 3.06 | 229     | 586               | 818           | DN           | DN                        | 6552     | 58.0 | カブセル照射 |
| 1437      | 14      | ○       | 3.06 | 228     | 584               | 818           | DN           | DN                        | 6476     | 60.5 |        |
| 1438      | 14      | ○       | 3.06 | 228     | 458               | 100           | DN           | UP                        | 6787     | 62.2 | 実験物照射  |
| 1439      | 20      | ○       | 2.60 | 227     | 521               | 365           | DN           | UP                        | 3901     | 46.6 | 234-7  |
| 1440      | 21      | ○       | 2.42 | 228     | 531               | 442           | DN           | UP                        | 3016     | 41.6 | 251-4  |
| 1441      | 26      | ○       | 3.06 | 227     | 453               | 100           | DN           | UP                        | 6300     | 60.5 | 見 学    |
| 1442      | 28      | ○       | 3.20 | 228     | 572               | 755           | DN           | DN                        | 7258     | 68.0 | 242-3  |
| 1443      | 28      | ○       | 2.32 | 228     | 525               | 475           | DN           | UP                        | 2646     | 39.1 | 512-2  |
| 1444      | Oct. 1  | ○       | 4.0  | 228     | 660               | 535           | DN           | DN                        | 12978    | 83.2 | 600-20 |
| 1445      | 8       | ○       | 3.06 | 228     | 459               | 100           | DN           | UP                        | 6720     | 59.6 | 見 学    |
| 1446      | 8       | ○       | 1.87 | 228     | 499               | 630           | DN           | UP                        | 1227     | 27.7 | 260-1  |
| 1447      | 11      | ○       | 2.78 | 228     | 556               | 240           | DN           | UP                        | 4846     | 50.4 | 115-47 |

Table D Summary data of pulsing operation (5)

| A         | B       | C *1    | D *2                     | E *3              | F             | G       | H *4                            | I        |
|-----------|---------|---------|--------------------------|-------------------|---------------|---------|---------------------------------|----------|
| Pulse No. | Date    | Capsule | $\Delta K/\beta$<br>(\$) | Bank rod position | Transient rod | Peak NV | NVT till<br>1.0 sec<br>(MW.sec) | Test No. |
|           |         | Yes     | No                       | Initial           | Pulse         | TA      | TB                              | TC       |
| 1448      | Oct. 11 | o       | 3.71                     | 228               | 612           | 607     | DN                              | 10760    |
| 1449      | 17      | o       | 2.76                     | 229               | 492           | 294     | UP                              | 4695     |
| 1450      | 25      | o       | 2.83                     | 228               | 563           | 100     | DN                              | 5307     |
| 1451      | 25      | o       | 3.81                     | 228               | 628           | 585     | DN                              | 11365    |
| 1452      | 26      | o       | 2.42                     | 228               | 531           | 435     | DN                              | 3024     |
| 1453      | 29      | o       | 3.06                     | 228               | 461           | 100     | DN                              | 6905     |
| 1454      | Nov. 1  | o       | 3.53                     | 232               | 609           | 655     | DN                              | 9500     |
| 1455      | 1       | o       | 4.20                     | 232               | 654           | 510     | DN                              | 14188    |
| 1456      | 2       | o       | 4.40                     | 230               | 678           | 435     | DN                              | 16960    |
| 1457      | 2       | o       | 4.10                     | 230               | 652           | 510     | DN                              | 14288    |
| 1458      | 7       | o       | 3.06                     | 228               | 457           | 100     | DN                              | 6804     |
| 1459      | 8       | o       | 2.75                     | 229               | 558           | 270     | DN                              | 4649     |
| 1460      | 8       | o       | 4.40                     | 229               | 676           | 435     | DN                              | 16808    |
| 1461      | 9       | o       | 3.70                     | 229               | 620           | 610     | DN                              | 10634    |
| 1462      | 14      | o       | 1.53                     | 230               | 357           | 100     | UP                              | 531      |
| 1463      | 15      | o       | 3.06                     | 230               | 465           | 100     | DN                              | 6888     |
| 1464      | 16      | o       | 3.06                     | 230               | 454           | 100     | DN                              | 6350     |
| 1465      | 20      | o       | 3.06                     | 229               | 458           | 100     | DN                              | 6720     |
| 1466      | 20      | o       | 3.06                     | 229               | 459           | 100     | DN                              | 6770     |
| 1467      | 20      | o       | 3.06                     | 229               | 459           | 100     | DN                              | 6720     |

特性試験  
臨界モニタ  
特性

Table D Summary data of pulsing operation (6)

| A         | B       | C *1        | D *2                  | E *3                      | F                   | G            | H *4                      | I                      |
|-----------|---------|-------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------------|------------------------|
| Pulse No. | Date    | Capsule Yes | $\Delta K/\beta$ (\$) | Bank rod position Initial | Transient rod Pulse | Peak NV (MW) | NVT till 1.0 sec (MN•sec) | Test No.               |
| 1468      | Nov. 21 | ○           | 3.06                  | 230                       | 453                 | 100          | DN UP                     | 6367 60.5              |
| 1469      | 21      | ○           | 3.06                  | 230                       | 453                 | 100          | DN UP                     | 6317 57.1 } 脇界モニタ<br>性 |
| 1470      | 21      | ○           | 2.75                  | 230                       | 531                 | 275          | DN UP                     | 4695 49.1 } 234-8      |
| 1471      | 22      | ○           | 3.02                  | 230                       | 534                 | 840          | DN DN                     | 6754 65.5 } 810-7      |
| 1472      | 28      | ○           | 3.06                  | 231                       | 455                 | 100          | DN UP                     | 6350 63.0 } 見          |
| 1473      | 29      | ○           | 3.06                  | 231                       | 455                 | 100          | DN UP                     | 6350 60.5 } 学          |
| 1474      | 29      | ○           | 3.06                  | 231                       | 460                 | 100          | DN UP                     | 6720 62.2 } 特性試験       |
| 1475      | 30      | ○           | 1.30                  | 230                       | 337                 | 355          | UP UP                     | 213 13.4 }             |
| 1476      | 30      | ○           | 1.30                  | 230                       | 338                 | 355          | UP UP                     | 675 14.7 }             |
| 1477      | 30      | ○           | 1.30                  | 230                       | 338                 | 355          | UP UP                     | 670 14.3 }             |
| 1478      | Dec. 6  | ○           | 3.82                  | 227                       | 539                 | 605          | DN DN                     | 11113 78.1 } 2311-2    |
| 1479      | 13      | ○           | 2.66                  | 229                       | 548                 | 335          | DN UP                     | 4128 47.9 } 511-3      |
| 1480      | 13      | ○           | 3.45                  | 229                       | 602                 | 685          | DN DN                     | 8618 73.1 } 511-6      |
| 1481      | 14      | ○           | 2.28                  | 229                       | 522                 | 490          | DN UP                     | 2457 40.3 } 115-48     |
| 1482      | 14      | ○           | 3.42                  | 229                       | 593                 | 685          | DN DN                     | 8795 69.3 } 702-5      |
| 1483      | 19      | ○           | 2.76                  | 228                       | 492                 | 294          | DN UP                     | 4612 49.1 } 1213       |

Note:

(\*1) Column C shows existence or non existence of capsule.

(\*2) Column D shows reactivity insertion decided from the transient rod position.

(\*3) Column E shows critical bank rod position with transient rods either up (Initial) or at specified positions in column F (Pulse).

(\*4) Column G and H show corrected values of peak reactor power (NV) and burst energy (NVT), measured by gamma chamber #2, which were indicated on the control console. The initiation of scram action is 1.0 seconds after the withdrawal of the transient rods.