

JAERI-M  
8152

NSRR実験における損耗被覆管  
燃料実験結果

1979年3月

吉村 富雄\*・落合 政昭\*・藤城 俊夫・石川 迪夫

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

NSRR 実験における損耗被覆管燃料実験結果

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

吉村 富雄\*・落合 政昭\*・藤城 俊夫

石川 迪夫

(1979年2月5日受理)

NSRR 実験における欠陥燃料シリーズの一つとして、被覆管にフレッティング腐食による損耗欠陥をもった燃料棒について実験を行い、燃料破損のしきい値、破損機構および燃料破損の結果生ずる機械的エネルギー等を調べた。これらの結果を健全被覆管の標準燃料についての結果と比較検討し、次の点を明らかにした。

- 1) 燃料破損のしきい値は、損耗の度合いが小さな場合は標準燃料と変わらないが、損耗度が大きくなると若干低くなる。この時の破損機構は、標準燃料が被覆管内面の溶融に起因するクラックの発生であるのに対し、損耗被覆管燃料では損耗部の内圧破損である。
- 2) 損耗被覆管燃料では、圧力パルスおよび水塊上昇等の機械的エネルギーの発生を伴なう激しい壊れ方が標準燃料より低い発熱量で生ずる。

損耗被覆管の加圧燃料と浸水燃料、および切削欠陥燃料についても実験結果の概要を報告する。

---

\*) 船舶技術研究所

本報告書は、日本原子力研究所と船舶技術研究所との共同研究により行った研究の成果である。

Fretting Corroded Cladding Fuel Rod Tests  
in NSRR Experiments

Tomio YOSHIMURA<sup>\*</sup>, Masaaki OCHIAI<sup>\*</sup>, Toshio FUJISHIRO  
and Michio ISHIKAWA

Division of Reactor Safety,  
Tokai Research Establishment, JAERI  
(Received February 5, 1979)

Fretting corroded cladding fuel rod tests have been performed as a part of the defective fuel rod test series in NSRR experiments. Fuel failure behavior and failure threshold energy of the fuel rod with such defective cladding were compared with those of the standard cladding fuel rod. Following are the primary results.

- 1) The fuel rods with small fretting defect exhibit a behavior typical of the standard cladding fuel rod. In the case of severely defected rods, however, the fuel failure threshold energy is slightly lower.
- 2) In the fretting corroded cladding fuel rod, violent failure accompanied with capsule pressure generation and mechanical energy production occurs at lower energy deposition than in the standard cladding fuel rod.

Keywords : NSRR Experiment, Reactor Safety,  
Reactivity Initiated Accident, Fuel Failure,  
Defective Fuel Rod, Fretting Corroded Cladding,  
Failure Threshold Energy.

---

This work performed in collaboration with Ship Research Institute and JAERI.

\*) Ship Research Institute

## 目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 振動実験	2
2.2 NSRR 燃料破損実験	6
3. 実験結果と考察	12
3.1 燃料破損のしきい値と破損状況	12
3.2 高発熱量実験	15
3.3 加圧燃料実験	18
3.4 浸水燃料実験	20
3.5 切削欠陥燃料実験	20
3.6 欠陥被覆管の応力解析	22
4. 結 論	25
謝 辞	25
参考文献	26

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Experimental method -----	2
2.1 Fuel rod vibration test -----	2
2.2 NSRR experiment -----	6
3. Experimental results and discussion -----	12
3.1 Fuel failure threshold and failure appearance -----	12
3.2 High energy deposition test -----	15
3.3 Pre-pressurized fuel rod tests -----	18
3.4 Water-logged fuel rod test -----	20
3.5 Machinely made defect cladding fuel rod tests -----	20
3.6 Stress analysis for defected cladding -----	22
4. Conclusions -----	25
Acknowledgments -----	25
References -----	26

# 1. 緒 言

動力炉燃料体は高温・高圧かつ高放射線の環境下という厳しい条件のもとに長期間おかれるため、種々の原因によりその幾分か欠陥を生ずることがある。原子炉の健全性および信頼性の向上をはかる上では、これら欠陥燃料について、定常運転時のもとより、異常過渡時および事故時におけるふるまいを十分に把握しておくことが重要である。そのためNSRR計画では、各種の燃料パラメータ実験と並行して、欠陥燃料についての燃料破損実験を計画し、これまでに燃料棒の中に水の入った浸水燃料と被覆管に傷のついた燃料棒について実験を行っている。本報告は、後者の損耗被覆管燃料に関する実験結果をまとめたものである。

実験炉における燃料被覆管の損耗欠陥の一例としては、フレットング腐食による損耗欠陥が考えられる。軽水動力炉の燃料棒は冷却水の流に励起されて小さな振動を繰返しており、この微小振動は燃料棒と支持格子との接点で被覆管にフレットング腐食を生じさせる原因となることがある。船用炉燃料の場合はこのような水力学的振動に加えて、船体の振動・動揺および波浪衝撃等による繰返し加速度も作用する。燃料棒被覆管は、一般的には耐食性に優れた材質で作られており、通常運転時の腐食減量は燃料設計時に予め考慮されているが、何等かの理由で冷却水の流に乱れが生じたり、スパーサーの接触圧のバランスが崩れたりするとフレットング腐食損耗がひどくなり、極端な場合は被覆管を貫通して浸水燃料を生ずることになる。

このような損耗被覆管燃料は、健全燃料と比較して当然のことながら破損限界が低下すると考えられるが、異常過渡時や事故時にどのような壊れ方をするかに関しては未だ明らかでない。本研究では、NSRR 実験用燃料棒にスパーサーを組合せて振動を加え、被覆管にフレットング腐食による損耗部をもった供試燃料棒を作製し、それらについてNSRR 燃料破損実験を行い、反応度事故条件下における破損しきい値と破損機構、および燃料破損の結果生ずる機械的エネルギーの大きさ等についての概括的な知見を得る。

次章に実験の方法を示し、第3章に実験結果とそれらについての考察を、健全被覆管の標準燃料の場合との相異に重点をおいて述べる。

## 2. 実験方法

本研究は大別すると、供試燃料棒を作製するための振動実験と、損耗燃料についてのNSRR燃料破損実験の2項目に分けることができる。

### 2.1 振動実験

振動実験は、NSRR実験用の標準型燃料棒4本に、スペーサーと上下支持板を組合せて集合体を作り、それを振動実験用圧力容器中にセットして、250°C飽和圧の純水中に保ち、振動台により圧力容器ごと振動させて行った。スペーサーの位置は燃料有効部の中央とした。

振動条件は次の通りである：

振動数	600回/分
振巾	±1mm
加速度	±0.4G

パラメータとして振動方向と振動回数を選び、垂直振動の場合 $10^7$ 回、水平振動の場合は $10^7$ 回と $5 \times 10^6$ 回の合計3ケースの振動実験を行った。

水平振動時の振動台（容器底部を固定した場所）と燃料棒（中央より3cm上部）およびスペーサー部の加速度波形をFig. 1に示す。振動台は10サイクルのきれいな正弦波を描いているが、燃料棒およびスペーサー部では夫々の振動特性による高周波成分が加わって多少歪んだ波形となっている。そして振動台と燃料棒とでは位相に若干のズレがみられるが、燃料棒とスペーサー部はほぼ同期しているので、振動波形の僅かな違いによる両者の衝突がフレット腐食をもたらしたものと考えられる。

燃料棒の被覆管表面に生じたフレット腐食による損耗部の大きさをTable 1に、損耗部の拡大写真をFig. 2に示す。垂直振動実験で生じた損耗部は各燃料棒に1～2ヶ所で、最大大きさは長径3.1mm、短径2.3mm、中央深さ0.49mmであったが、これ以外は比較的小さかった。しかし水平振動実験の場合は、スペーサーの凸部も損耗したために、被覆管との接触面が拡がり、最大大きさは長径7mm、短径3mm、深さ0.68mmとより大きくなった。被覆管の設計厚さは $0.62 \pm 0.04$ mm、ギャップ巾は0.09mmであるが、損耗部は貫通していなかったことから、被覆管はギャップ部にまでくぼんで、僅かな肉厚を保っていたものと思われる。

損耗の度合は、損耗部の（長径×短径×深さ）の和を比較して、大・中・小の3段階に区分した。垂直振動の結果は中と小、水平振動の場合は全振動回数 $10^7$ 回と $5 \times 10^6$ 回の違いによるフレット腐食量の差は明らかではなかったので、両者を区別せずに損耗度：大とした。

また、長時間の振動によるペレットのワレやカケの発生も危惧されたことではあったが、X線撮影および中性子ラジオグラフィ撮影の結果では、特に異常は認められなかった。



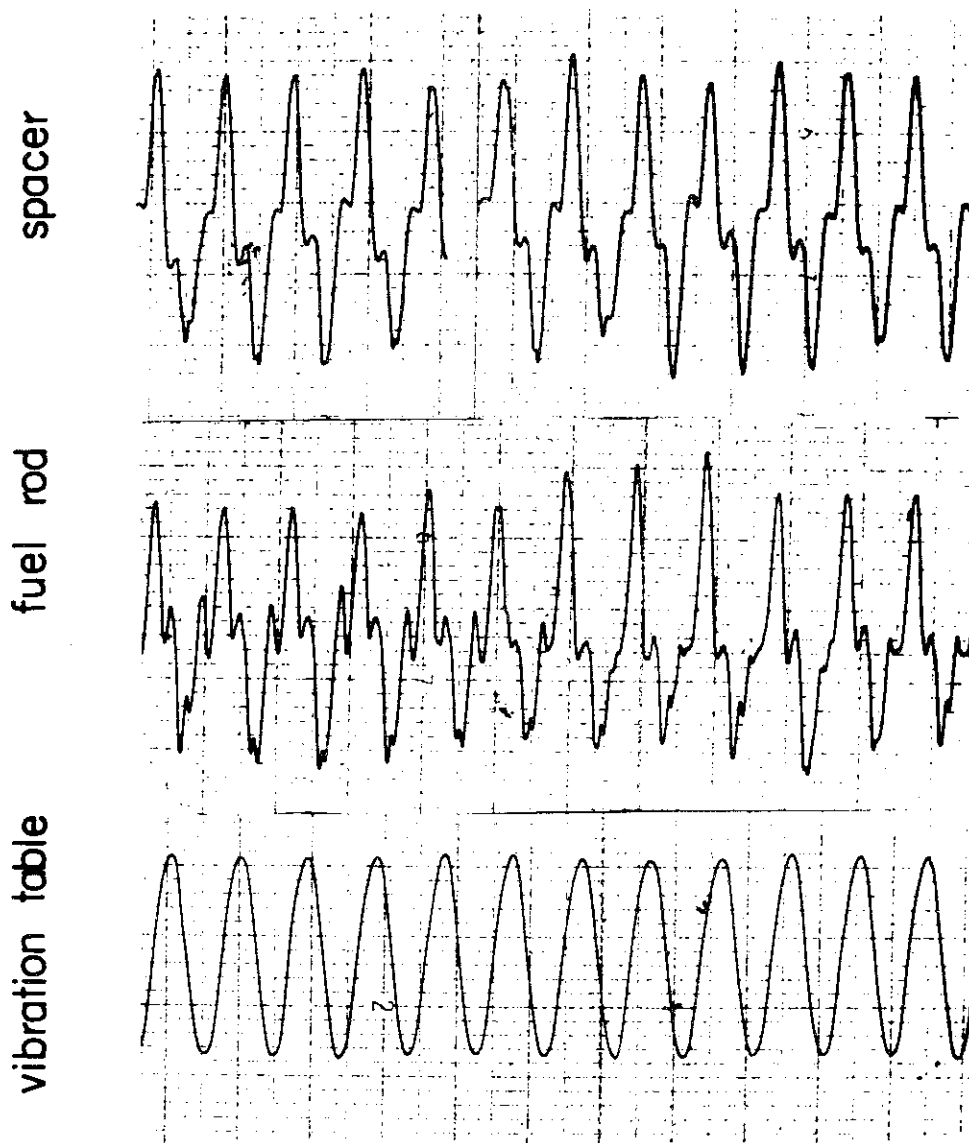
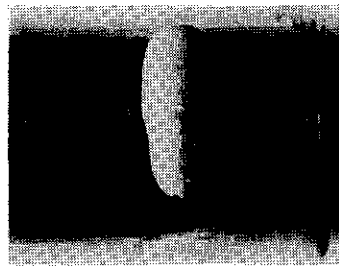
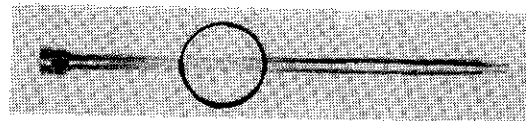
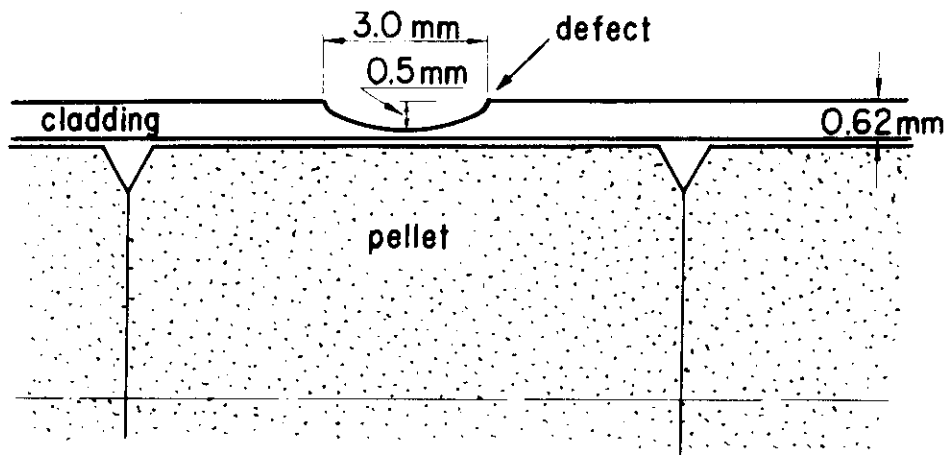


Fig.1 Wave Profile of Acceleration at Horizontal Vibration Test  
( $\pm 0.4G$ , 600 rpm)



0.5 cm

Fig. 2 Fretting Corrosion Produced by Vibration

Table 1 Fretting Corroded Cladding Fuel Rod Tests

Test No.	Cladding Defects				Energy Deposition (cal/g.UO <sub>2</sub> )	Fuel Failure	Remarks
	grade	diameter(mm)		depth (mm)			
		long	short				
115-2	small	1.6	1.2	0.11	210		
3	small	2.1	1.7	0.33	241		
		1.7	1.4	0.19			
1	medium	3.1	2.3	0.49	214		
11	medium	○	3.0	0.3	214		grooved defect
12	medium	6.0	3.5	0.28	248		pitting defects
		6.5	4.0	0.27			
		6.3	3.5	0.30			
		6.0	3.5	0.34			
7	large	7.0	3.0	0.53	221		
		"	"	0.38			
		"	"	0.59			
		"	"	0.30			
5	large	5.0	2.3	0.48	239	●	penetrated at corroded defects
		4.9	2.8	0.68			
		4.7	2.8	0.63			
		4.2	2.6	0.36			
4	large	3.3	2.2	0.46	262	●	broken in two pieces at corroded defects
		5.5	2.5	0.46			
		5.5	3.0	0.33			
		4.0	2.5	0.06			
6	large	7.0	3.0	0.59	342	●	fragmented
		"	"	0.54			
		"	"	0.39			
		"	"	0.38			
9	large	6.5	3.0	0.55	153		pressurized fuel
		4.0	2.8	0.32			
		4.5	2.5	0.56			
		6.0	2.5	0.53			
8	large	2.8	2.5	0.53	197	●	pressurized fuel
		6.5	2.0	0.39			
		7.0	3.0	0.21			
		7.0	2.0	0.20			
10	penetd	6.0	3.0	penetd.	153 (111)	●	waterlogged fuel
		4.5	2.5	0.27			
		3.5	3.0	0.33			
		3.0	2.0	0.44			

## 2.2 NSRR燃料破損実験

試験燃料は前項に述べたように濃縮度10%の標準型燃料である。燃料棒の主なる仕様をTable 2に、構造図をFig. 3に示す。

実験に当っては、燃料挙動観測系として被覆管表面温度測定用熱電対をスポット溶接方式で取付けた。そして高発熱量実験や浸水燃料実験では、その他にカプセル内圧や水面移動速度の検出器を、また加圧燃料実験では燃料棒内圧とカプセル内圧の検出器を取付けた。これらの計

Table 2 Test Fuel Design Summary

UO <sub>2</sub> Pellets	
Diameter	9.29 mm
Length	10 mm
Density	95 %TD
Enrichment	10 %
Shape	Chamfered
Cladding	
Material	Zircaloy-4
Wall thickness	0.62 mm
Outer diameter	10.72 mm
Gap	
Pellet-cladding	0.095 mm
Element	
Overall length	265 mm
Active fuel length	135 mm
Weight of fuel pellets	95.5 g
Number of pellets	14
Fill gas	He
Volume of upper plenum and gap	3.55 cm <sup>3</sup>
Volume of lower plenum when pressure sensor is attached	4 cm <sup>3</sup>

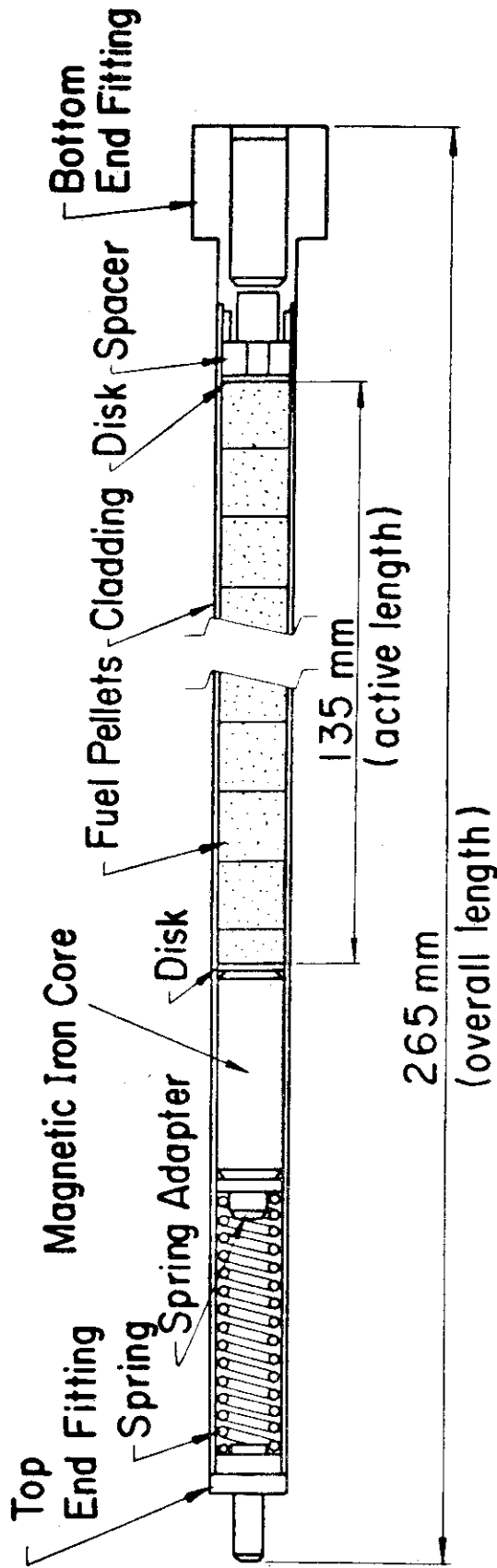


Fig. 3 Standard Test Fuel Rod

装系の特性をTable 3に示す。計装を取付けた試験燃料をSUS製大気圧水カプセル中に組立てた状態をFig. 4に示す。

Table 3 計装系特性

計測項目	計測器	仕様
被覆管表面温度	熱電対	0.3mm $\phi$ , Pt/Pt-13%Rh
燃料棒内圧	圧力変換器	新興通信製歪ゲージ型圧力変換器 測定レンジ: 50 kg/cm <sup>2</sup> ・g 固有振動数: 約 56 kHz
カプセル内圧	圧力変換器	新興通信製歪ゲージ型圧力変換器 測定レンジ: 50 kg/cm <sup>2</sup> ・g 固有振動数: 約 56 kHz
水面移動速度	水塊速度計	浮子式 12mm移動毎に1Hzの電気信号を発生する。

パルス照射は、試験燃料を収納したカプセルを、NSRR実験孔内の炉心位置まで吊り下げ、試験燃料に予定の発熱量を与えるべくあらかじめ所定の位置に設定しておいたトランジェント棒を未臨界状態から急速に引抜くことにより行った。合計12回の照射実験の制御棒位置、投入反応度、炉周期、発熱量等の照射条件と実験結果の概要をTable 4に示す。

照射時の検出器信号は必要に応じて直流増巾器で増巾し、一旦応答周波数 80 kHz の磁気テープレコーダーに集録し、これを再生して過度挙動データとする。データ集録系のブロック図をFig. 5に示す。

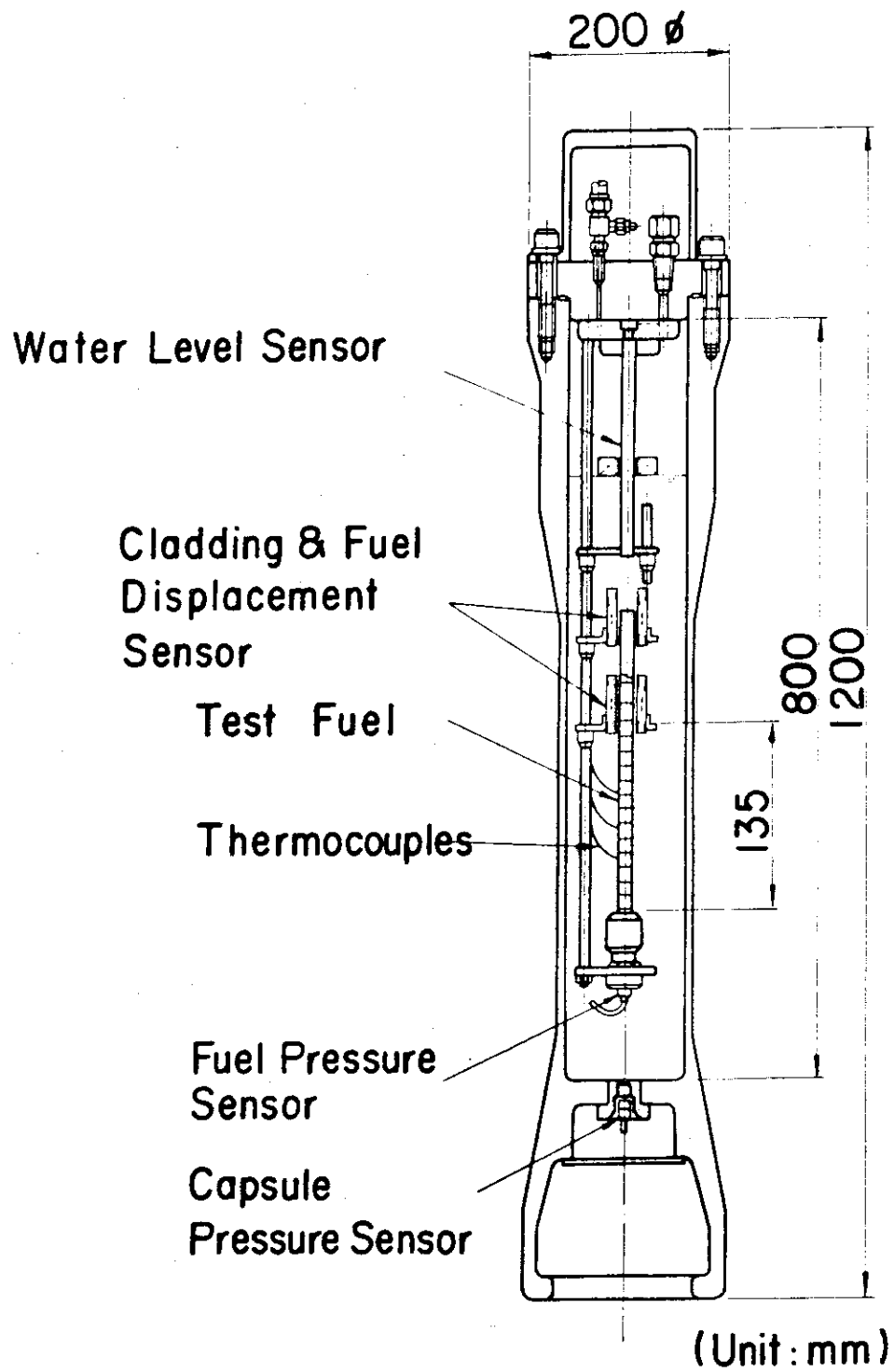


Fig.4 Standard Water Capsule

Table 4. Summary of Test Conditions and Results

Test No	Cladding Defect (grade)	Rod Position				Water Temperature (°C)	Reactivity (\$)	Period (msec)	Core Energy Release (MW-sec)	Estimated Energy Deposition (cal/g.UO <sub>2</sub> )	Maximum Cladding Surface Temperature (°C)	Fuel Failure	Remarks
		Bank	TA	TB	TC								
115-1	medium	536	370	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	19.5	2.50	2.77	48.8	214	1260		
2	small	537	370	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	20.0	2.50	2.77	47.9	210	1280		
3	small	550	240	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	22.0	2.72	2.42	55.0	241	1500		
4	large	560	899	D <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	27.5	3.03	2.05	60.0	262	1700	●	broken in two pieces
5	large	550	240	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	27.8	2.72	2.42	54.8	239	1530	●	penetrated at corroded defects
6	large	610	628	D <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	28.3	3.66	1.56	78.3	342	> 1700	●	fragmented
7	large	545	340	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	27.7	2.56	2.66	50.8	221	1400		
8	large	534	420	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	18.7	2.40	2.97	45.1	197	> 1150	●	pressurized
9	large	509	534	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	18.3	2.12	3.72	35.2	153	950		"
10	penetd	511	545	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	23.2	2.09	3.82	35.1	153	> 620	●	waterlogged
11	medium	543	340	D <sub>n</sub>	U <sub>p</sub>	18.8	2.56	2.66	49.1	214	1340		grooved defect
12	medium	562	896	D <sub>n</sub>	D <sub>n</sub>	19.2	2.95	2.13	56.9	248	1530		pitting defects



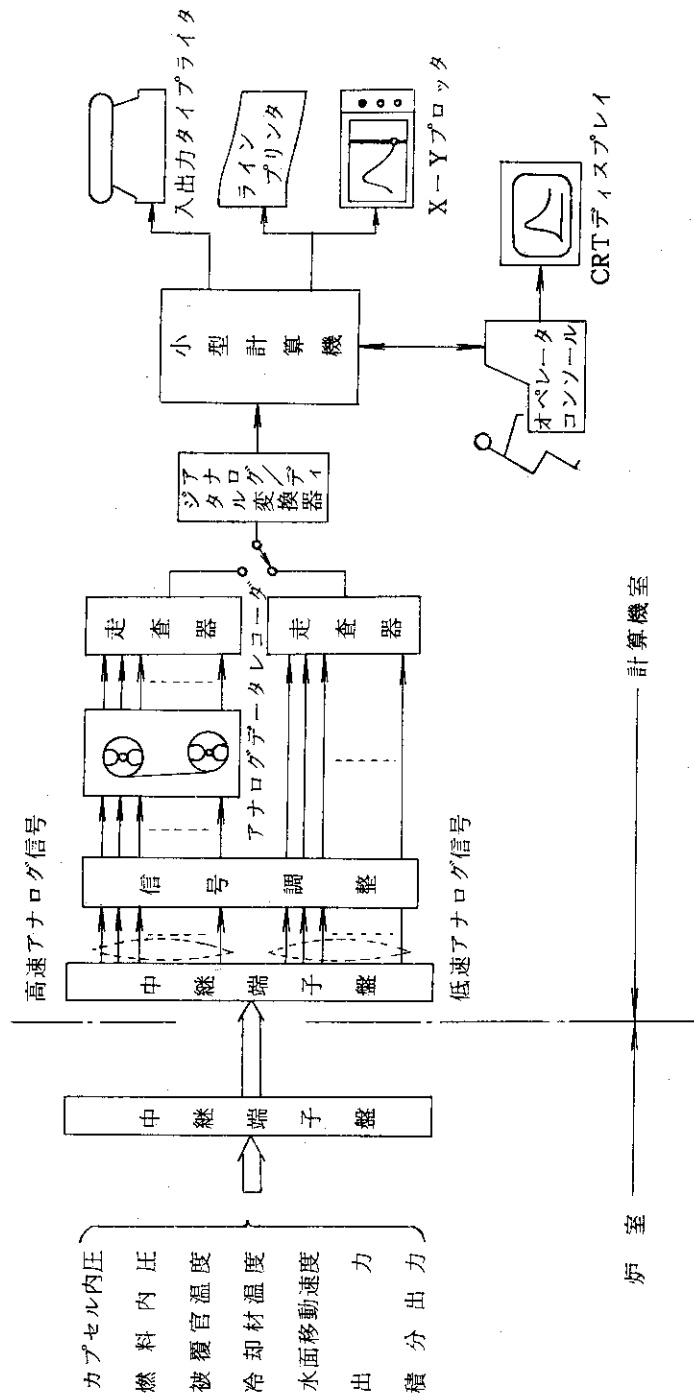


Fig. 5 Flow chart of Data processing system in NSRR experiment

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 燃料破損のしきい値と破損状況

健全被覆管の標準燃料に関しては、スコーピング試験および詳細試験の結果、発熱量約 260 cal/g・UO<sub>2</sub>において被覆管の内面溶融に起因する初期破損を生ずることが確かめられている<sup>(17)</sup>。

損耗被覆管燃料についてこの発熱量を目指したTest No 115-4の実験では、燃料棒は発熱部中央で2つに分断していた。照射後写真をFig. 6に示す。図にみられるように、分断した被覆管部の半周は損耗部、あとの半周はそれより3~4 mm上部のペレット-ペレット境界部であった。この発熱量では、ペレット外周部と被覆管内面の溶融が始まり、ペレットと被覆管の一部結合、被覆管の酸化および脆化が進み、被覆管急冷時の収縮力、熱衝撃力等<sup>(9,11)</sup>によって、健全被覆管燃料の場合は貫通クラックは生ずるが破断には至っていないのに対して、被覆管に損耗欠陥をもった燃料では、損耗部が薄肉となり弱体化しているために分断されたものと考えられる。

Test No. 115-5の実験は、発熱量を239 cal/g・UO<sub>2</sub>と低くした場合の実験である。燃料棒は4ヶ所の損耗部のうちの2ヶ所の中央部に貫通破損を生じた。照射後写真をFig. 7に示す。破損した損耗部の被覆管肉厚は0.12 mm程度以下と推定されることから、温度上昇にしたがってこの部分の強度が低下し、小さな内圧の上昇で貫通破損を生じたものと考えられる。損耗部以外の被覆管表面は部分的に酸化膜剥離を生じていたが、変形は少なく、健全性も保たれていた。

このような損耗部の内圧破損は、当然のことながら、損耗の割合によって変る筈である。Test No. 115-3の実験では、損耗の割合が小さければ、前者と同程度の発熱量241 cal/g・UO<sub>2</sub>でも燃料破損は生じないことが確かめられた。この実験に用いた燃料棒の損耗欠陥は1ヶ所のみで、最大深さは0.33 mmであり、従って被覆管の最も薄い部分の厚さは0.38 mm程度と推定される。これは設計肉厚の約2/3に相当するが、それでも燃料は破損しなかった。

発熱量を更に低くして、220 cal/g・UO<sub>2</sub>以下とした実験では、損耗度が大(115-7)、中(115-2)、小(115-1)何れの場合も燃料は破損せず、被覆管表面温度挙動および照射後の燃料棒外観も標準燃料の場合と変らなかった。

未破損燃料(損耗度大)についての照射後燃料の詳細試験では、被覆管損耗部の内側に、青紫色に変色した部分がみられた。前述したように、損耗の割合が大きい場合は損耗部被覆管は薄肉となってキャップ部にまで凹むので、その部分がより高温になって酸化し変色したものと考えられる。損耗部の断面拡大写真をFig. 8に示す。損耗部の中央部分が、照射時の内圧の上昇によって外側にわずかに押し返された様子がみられる。

以上の実験結果により、被覆管に損耗欠陥をもった燃料棒の破損しきい値は、損耗の割合が小さい場合は標準燃料と変わらないが、損耗度が大きくなると若干低くなることが確かめられた。低下度は損耗部深さが0.5 mm程度の場合に約20 cal/g・UO<sub>2</sub>と小さい。この時の破損機構は、

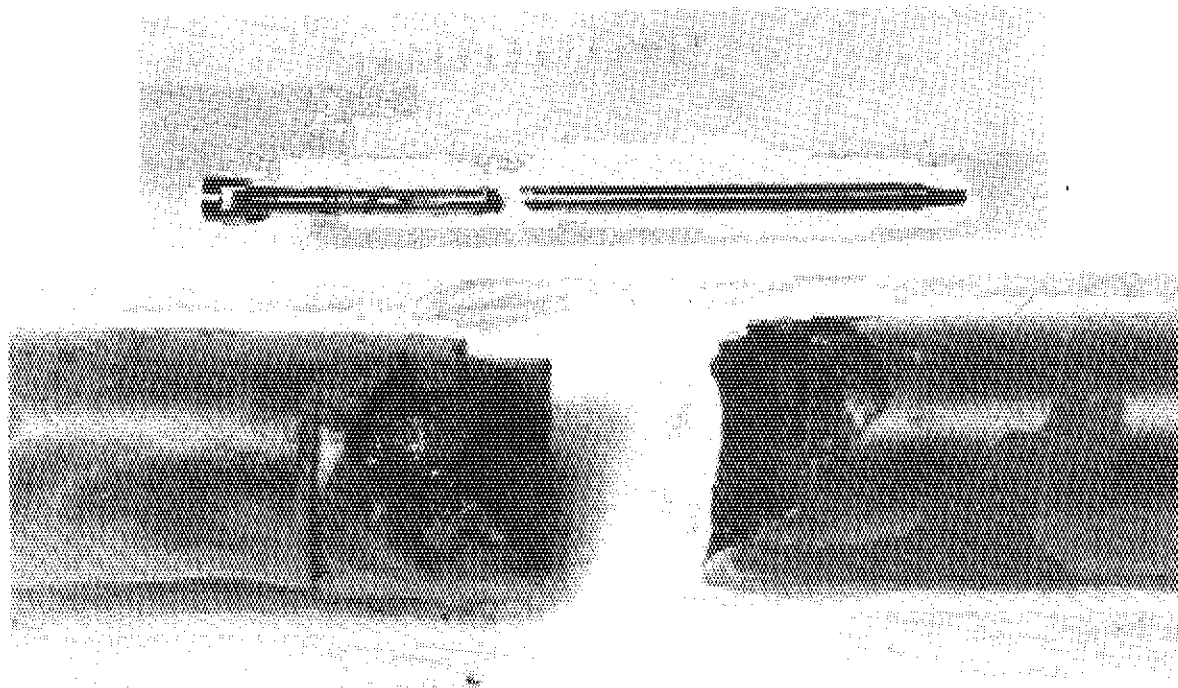


Fig. 6 Post-Test Fuel at 262 cal/g·UO<sub>2</sub> Test

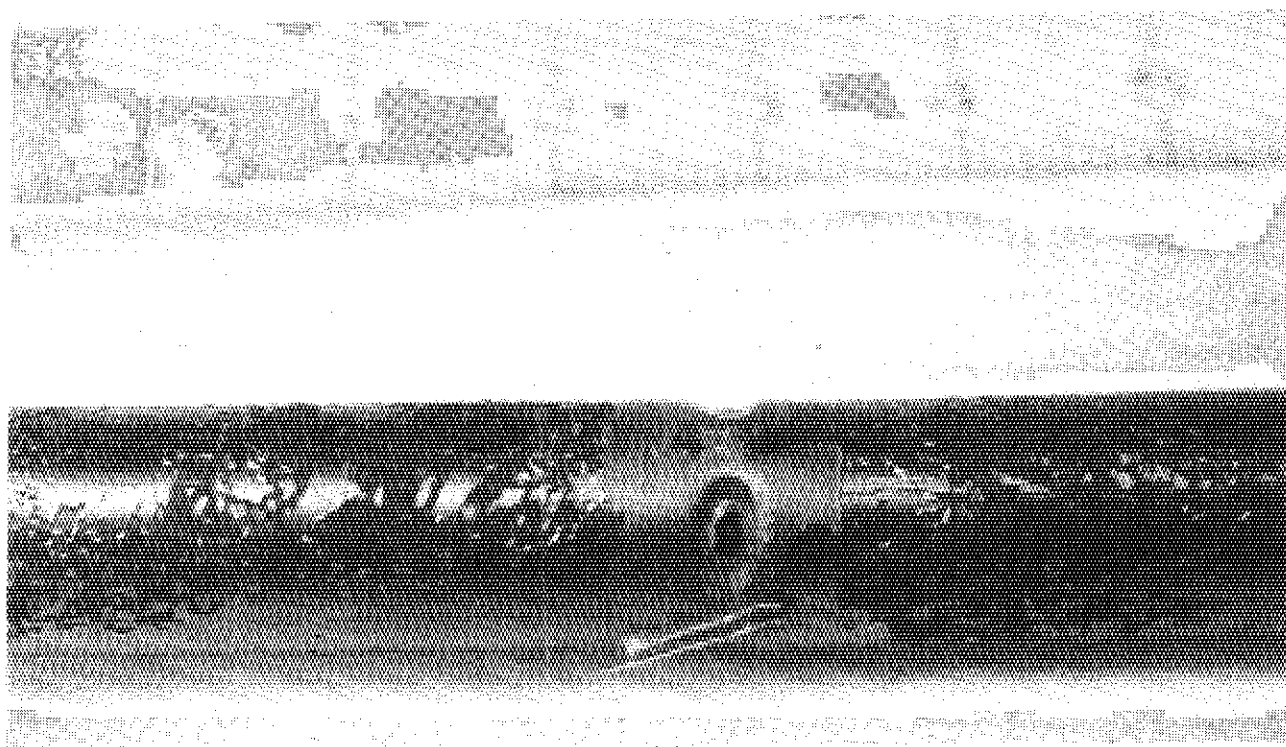


Fig. 7 Post-Test Fuel Rod at 239 cal/g·UO<sub>2</sub> Test

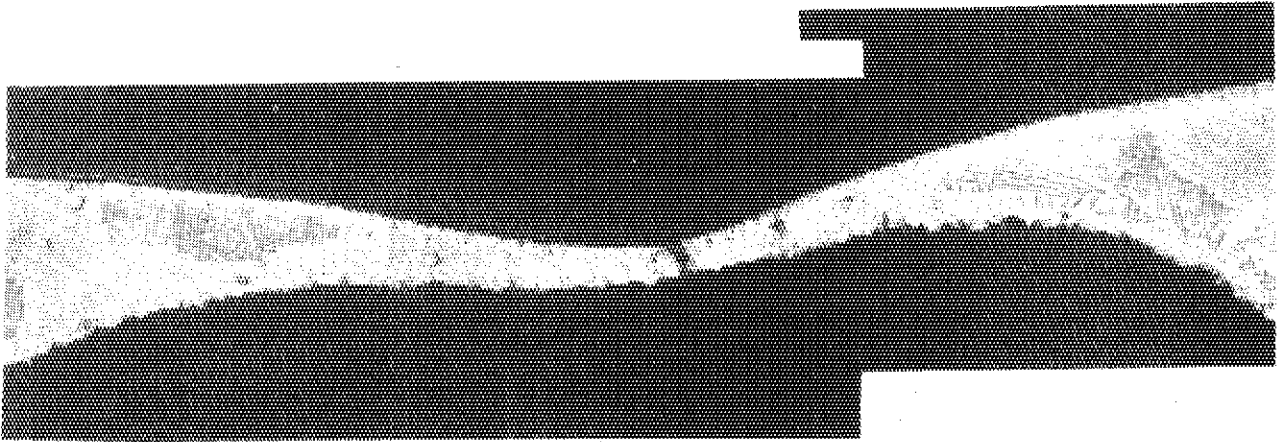


Fig.8 Transverse Sectional Macrophotograph of Corroded Defect

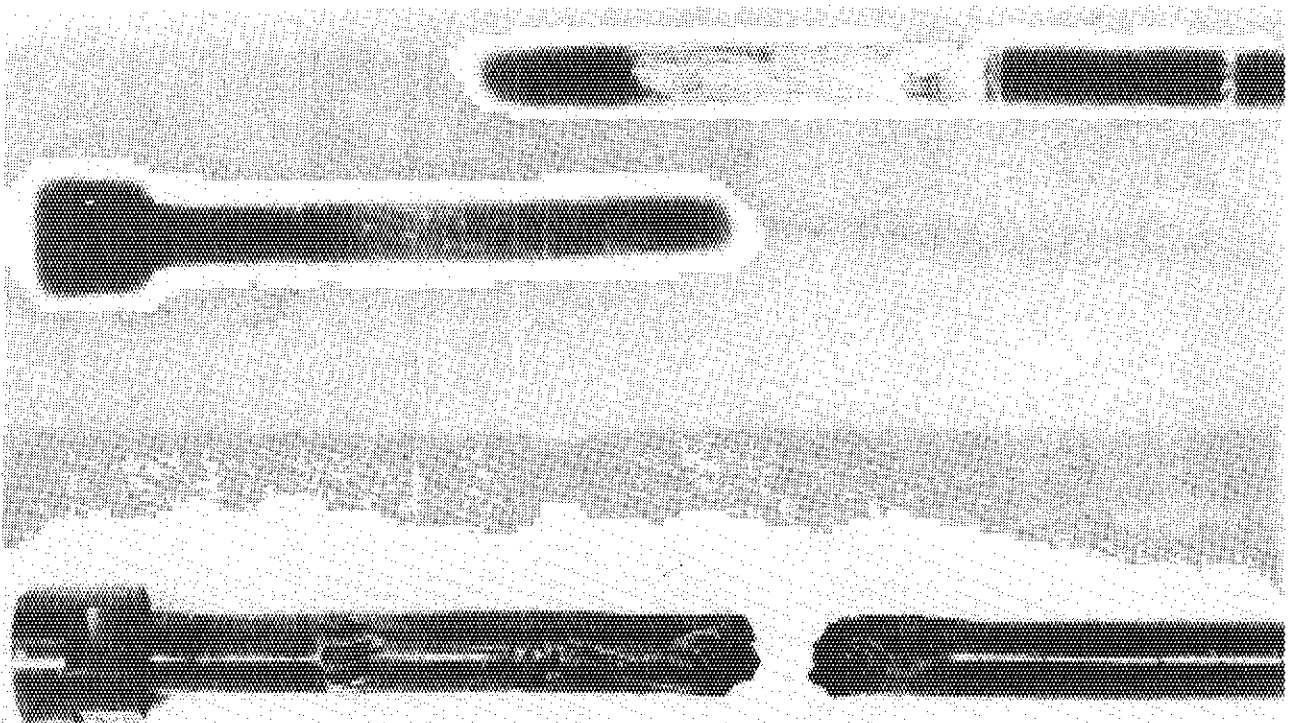


Fig.9 Post-Test Fuel Rod at High Energy Deposition Test (342 cal/g·UO<sub>2</sub>)

標準燃料が被覆管内面の溶融に起因するクラックの発生であるのに対して、損耗被覆管燃料では損耗部の内圧破損である。

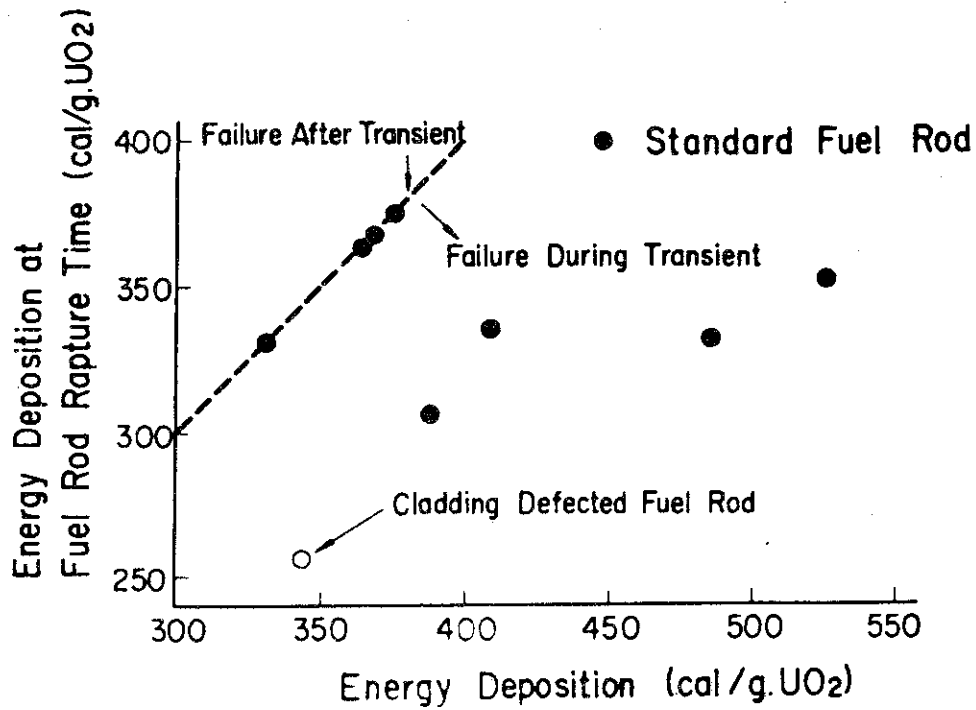
### 3.2 高発熱量実験

標準燃料では、発熱量が約 $330 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ を過ぎると、 $\text{UO}_2$ ペレットおよび被覆管の溶融が進み、被覆管外側の $\text{ZrO}_2$ の薄膜あるいは残っているかもしれない非溶融の金属ジルカロイ層の存在により、溶融金属と冷却水との直接反応はさまたげられているが、被覆管急冷時の熱応力、熱衝撃力、収縮力などによって燃料は幾つかの破片に分断される。発熱量が約 $380 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 以上になると、ペレットの溶融あるいは蒸発、封入ガスの体積膨脹などに伴う内圧上昇に被覆管が拡張しきれなくなり、溶融した燃料および被覆管は冷却水と激しく反応して水面急上昇や圧カパルスなどの機械的エネルギーを発生し、燃料発熱部全体が微細な粒子状になって破損する<sup>(5,6,11)</sup>。

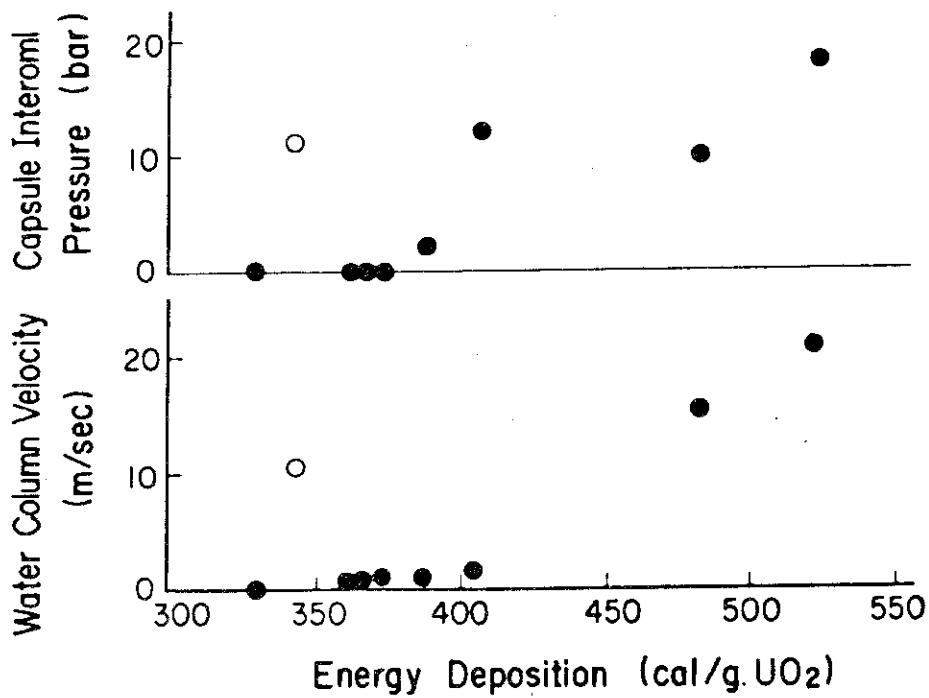
Test No. 115 - 6の実験は、損耗被覆管燃料がこのような高発熱量領域でどのような破損挙動を示すか、をみることを目的として行った実験である。投入反応度量 $3.66 \text{ g}$ でパルス照射し、全発熱量（燃料棒は破損しないと仮定した場合に生ずる筈の発熱量）は $342 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ であった。燃料棒は発熱量 $253 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の時点で破損し、 $11 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ のカプセル内圧と、約 $10 \text{ m/sec}$ の水塊移動速度が計測された。照射後の燃料写真をFig. 9に示す。

損耗被覆管燃料のこのような破損挙動は、前述した標準燃料の場合と比較して大きく異なっている。高発熱量領域における燃料破損時の発熱量、カプセル内圧および水塊移動速度をFig. 10に示す。図から明らかなように、標準燃料では全発熱量が $330 \sim 375 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の範囲にある場合、燃料破損は発熱量が全発熱量に達した後に生じており、ペレットは1部微粒子化しているが、カプセル内圧の上昇はなく、水塊移動速度も小さい。これに対して本実験では、燃料棒は出力上昇途中の $253 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で破損し、カプセル内圧上昇や水面急上昇が生じており、このような挙動は標準燃料では全発熱量が $388 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 以上になった場合にみられるものである。本実験の場合は、発熱量 $253 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の時点で、 $\text{UO}_2$ ペレットの熱膨脹、一部溶融により燃料内圧が上昇し、その結果被覆管強度の劣化した損耗部から内圧破損が生じ、高温の $\text{UO}_2$ が急激に飛出して機械的エネルギーを発生させたものと考えられる。破損した $\text{UO}_2$ ペレットの飛散を防ぐために燃料棒の周りに取付けた金網が、燃料棒の中央の位置で90度方向に2ヶ所破れていたことは、この時の破損が2ヶ所の損耗部で生じたことを示している。被覆管表面温度は下部（中央より33 cm下）で $1500^\circ\text{C}$ 、中央は $1800^\circ\text{C}$ まで上昇しているのに対し、上部（中央より33 cm上）は約 $800^\circ\text{C}$ と低く、照射後燃料の被覆管上半分に変形やシワが少なかったのは、この時点の $\text{UO}_2$ 飛出しが上部で多かったためと考えられる。このことはFig. 9に示した照射後燃料のX線写真からも裏付けられる。

カプセル水温の変動をFig. 11に示す。パルス照射後0.3秒近くで変動が急に激しくなっているのは、この時点で中央及び下部の被覆管表面の熱電対が最高温度（中央はZry - 4の融点に近い $1800^\circ\text{C}$ ）を記録して断線していることと、考えあわせて、この時点で燃料中央部の溶融・分断が生じ、 $\text{UO}_2$ が再び水中に飛出したためと考えることができる。飛出した $\text{UO}_2$ の全量は、装荷量の約70%であった。



(b) Energy Deposition at Fuel Rod Rapture Time



(a) Water Column Velocity and Capsule Internal Pressure

Fig. 10 High Energy Deposition Tests

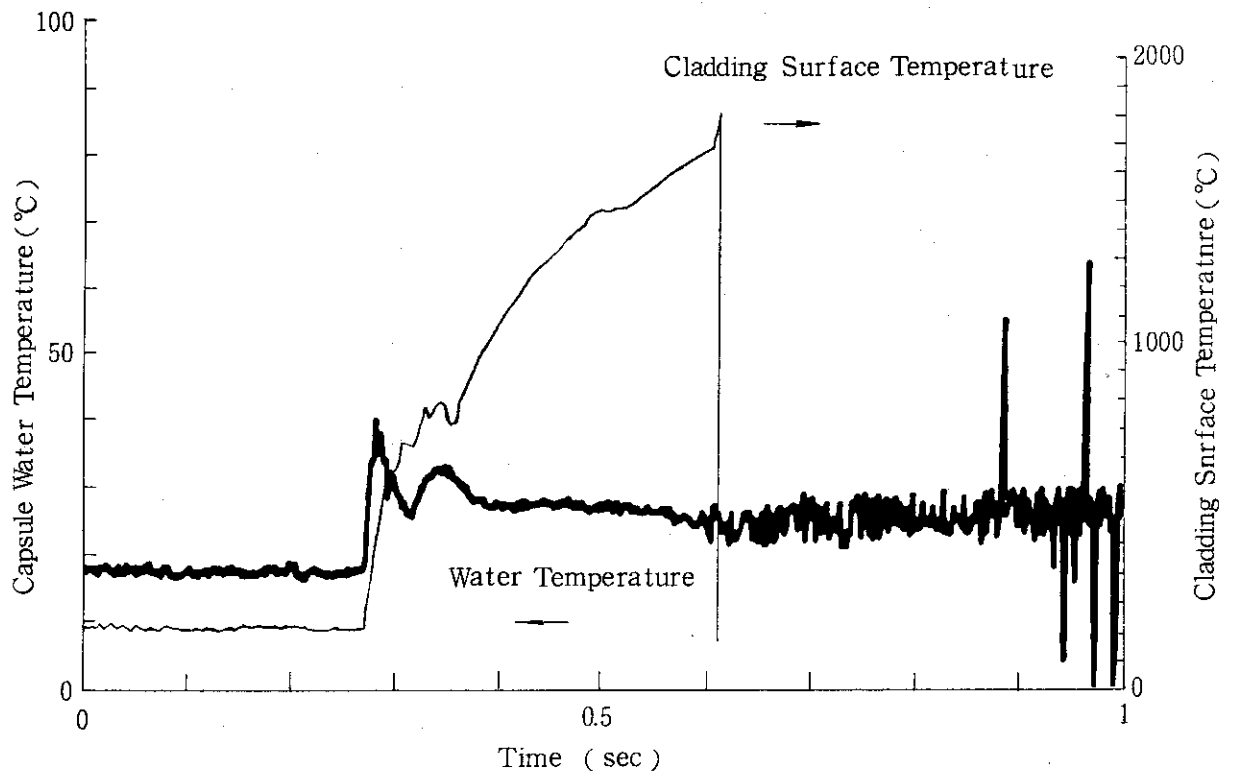


Fig.11 Capsule Water Temperature and Cladding Surface Temperature

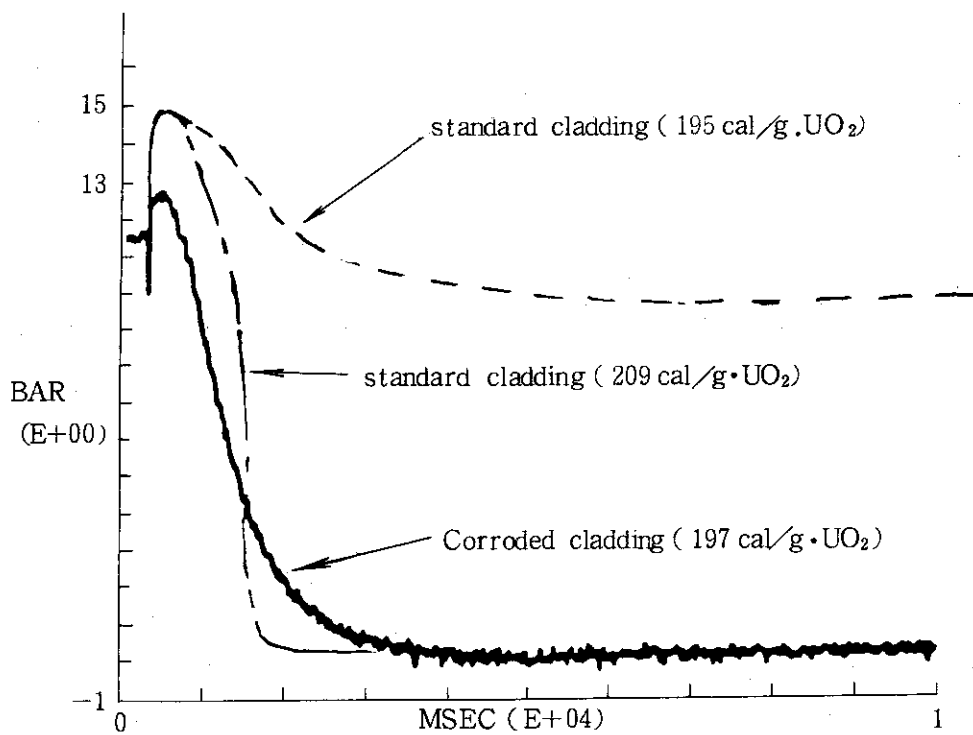


Fig.12 Fuel Internal Pressure (initial pressure 12kg/cm<sup>2</sup>·g)

以上の実験結果から、被覆管に損耗欠陥をもった燃料棒は、高発熱量領域で損耗部の内圧破損により標準燃料と異なる破損挙動を示し、圧力パルスを伴う激しい壊れ方が、標準燃料の場合より低い発熱量で生ずることが明らかとなった。

### 3.3 加圧燃料実験

これまでの実験により、被覆管に損耗欠陥をもった燃料棒の破損挙動を特徴づけている要因は、局部的に薄肉となった損耗部の耐圧強度の低下であることが明らかとなった。一方、動力炉燃料のバーン・アップの進行に伴うF・Pガスの畜積の効果を模擬した健全被覆管の加圧燃料実験<sup>(3~6)</sup>においては、燃料棒初期内圧は破損挙動に影響を及ぼすことが明らかにされた。これらのことから、損耗被覆管燃料の破損挙動は燃料棒初期内圧に大きく影響されることが予想され、本実験シリーズでは、次の段階の実験として被覆管に損耗欠陥をもった加圧燃料の破損実験を計画している。本節ではそのための予備的な実験として行った2回の加圧燃料実験について報告する。

Test No. 115 - 8の実験は、健全被覆管の加圧燃料（初期内圧  $12 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ ）の場合に破損しなかった発熱量  $195 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を目指した実験である。燃料棒は損耗部（1ヶ所）の中央がわずかに膨れ、小さな破裂口を生じて破損した。燃料棒内圧の時間変化を Fig. 12 に示す。燃料棒内圧はパルス照射の約 0.1 秒後に最高  $13.2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  に達してからゆるやかに降下し、約 3 秒後に常圧に戻っている。燃料棒内圧のこのような下り方は、初期内圧  $12 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  以下の加圧燃料実験で燃料破損を生じた場合の何れのケースよりもゆるやかであった。照射後の燃料棒写真を Fig. 13 に示す。健全被覆管の加圧燃料実験では被覆管に著しい膨れ (ballooning) が残っていたが、本実験の場合は、4ヶ所の損耗部のうちの1ヶ所の中央がわずかに膨れているだけで、それ以外の被覆管部の膨れは非常に小さい。そのため被覆管表面温度挙動は、健全被覆管の加圧燃料の場合とは異なり、むしろ標準燃料の温度挙動に近い変化を示した。

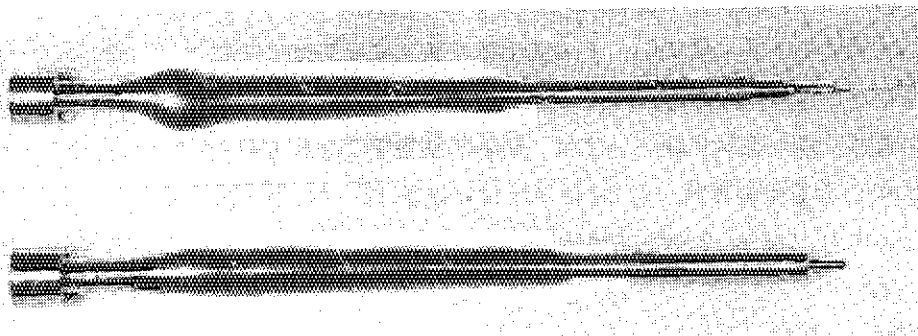
Test No. 115 - 9の実験は、発熱量を  $153 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  と低くした場合の実験である。1ヶ所の損耗部の中央が小さく膨らんでいただけで、燃料破損は生じなかった。

これらの実験により、被覆管に損耗欠陥をもった加圧燃料の破損形態は、健全被覆管の加圧燃料の場合と異なって損耗部の内圧破損であり、当然のことながら破損しきい値も低下することが確かめられた。

初めに述べたように、被覆管のフレットング腐食による損耗欠陥は一つの仮想的な事故ではあるけれども、実際との対応で考えれば燃料装荷初期よりも終期の方により多い現象と考えられ、従ってF・Pガスの畜積による燃料内圧上昇の効果は損耗被覆管燃料にとっては従属的な要素でもある。次の段階では、被覆管に損耗欠陥をもった加圧燃料について損耗度と破損しきい値の低下度の関係、また健全被覆管の加圧燃料では常圧燃料と異なる破損挙動を示した最小初期内圧が  $8 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  であったが、損耗度が大きくなった場合にこの値はどう変るか等の点の検討を進める。



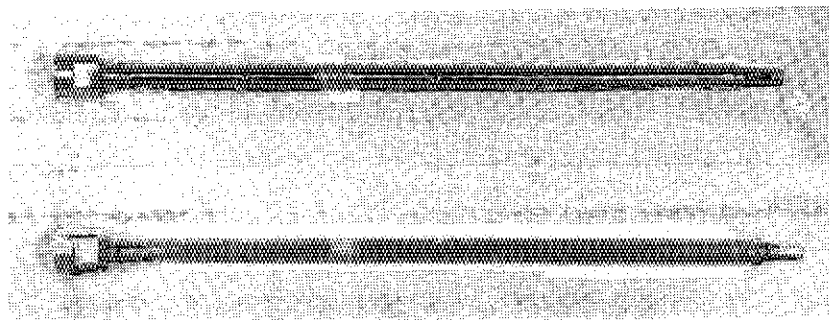
Energy Deposition  
(cal/g·UO<sub>2</sub>)



209  
( failure )

195  
( no failure )

( extensive ballooning )  
b. standard cladding fuel rods



197  
( failure )

153  
( no failure )

( small swelling and rupture at defect )  
a. corroded cladding fuel rods

Fig.13 Post-Test Appearance of Pre-pressurized Fuel Rod Tests  
( initial pressure 12 kg/cm<sup>2</sup>·g )

### 3.4 浸水燃料実験

Test No. 115-10の実験は、被覆管損耗部の中央に直径約2.5mmの貫通孔をもった燃料を純水中で加熱して気体を十分に排気し、その後全体を徐々に冷やすことによって燃料棒中に水を注入し、貫通孔浸水燃料（浸水量85%）として実験したものである。

これまでの貫通孔浸水燃料実験としては、発熱部被覆管に直径0.4mmの貫通孔のある場合と、直径1.0mmの場合の2つの実験がある。前者では発熱量 $123 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の時点で貫通孔の反対側に裂け口を生じ、 $65 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の圧カパルス<sup>(2)</sup>を発生した。また後者では発熱量 $113 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で $75 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の圧カパルス<sup>(4)</sup>を生じ、開口部は縦方向に裂けて長さ5 cm以上の大きな裂け口となった。

これに対して本実験では、直径2.5mmの開口部が薄肉部（長径5mm×短径3mm）に拡大されただけで、圧カパルスも約 $9 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ （発熱量 $111 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ ）と小さかった。大きな傷口と薄肉となった損耗部が緩衝材として働き、大きな機械的エネルギーの発生をおさえたものと考えられる。

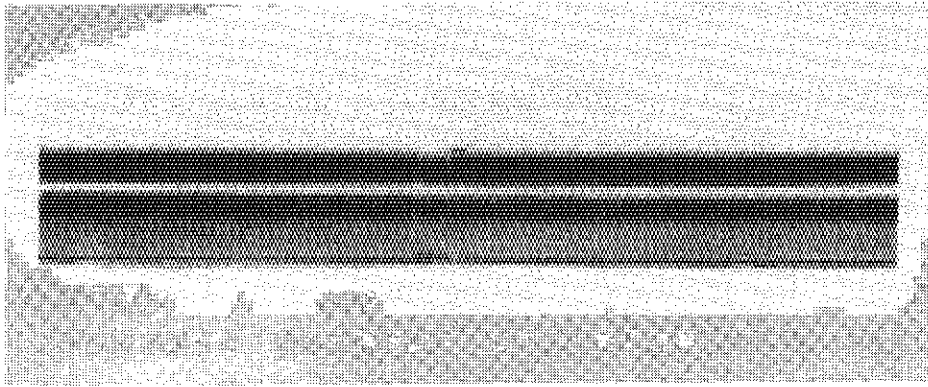
燃料棒破損時に発生する機械的エネルギーの大きさは、原子炉の安全性評価上の重要な要素の一つである。浸水燃料の場合の機械的エネルギー発生機構については未だ不明な点はあるが、被覆管に開口部をもった損耗燃料の場合、この点で安全側の傾向が示されたことは興味深い。

### 3.5 切削欠陥燃料実験

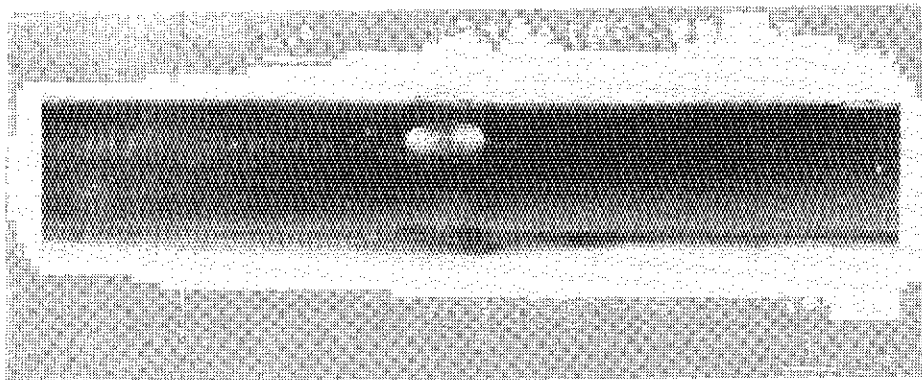
前章に述べたように、これまで破損実験を行ってきた燃料棒のフレットング腐食による損耗欠陥は、長時間の振動実験によって生じさせたものである。従ってこれらの欠陥部は実用炉で生じる腐食損耗と同質のものではあるが、スペーサーとの接触圧の関連等で腐食損耗量はかなり不均一となる。破損しきい値の低下度等、健全被覆管燃料との破損挙動の違いを定量的に評価するためには、予定した損耗度の試験燃料が必要であり、それには機械加工により計画量の切削欠陥を作って試験する方法が考えられる。

最初の試みとして、旋盤加工による溝状の切削欠陥と、グラインダー加工による凹み状のピッチング欠陥をもった燃料棒について実験を行った。照射後写真をFig.14に示す。前者では切削欠陥が全周にわたっているので、肉厚0.3mmの薄肉被覆管燃料の破損しきい値 $220 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 程度としたが燃料棒は破損しなかった。薄肉被覆管燃料の場合の破損位置は熱的に最も厳しいと考えられている最下位ペレットの上面近くであったのに対し、本実験の場合は損耗部が燃料中央部にあつたので、軸方向発熱分布のわずかの差が影響したものと考えられる。後者では損耗度が大きくないところから、発熱量を $250 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 程度としたが、この場合も燃料破損は生じなかった。

今後は切削方法を更に検討し、種々の損耗度の試験燃料を作製して実験を行う。



a. grooved defect



b. pitting defect

Fig.14 Machinely made Defect Fuel Rods

### 3.6 欠陥被覆管の応力解析

これまで述べてきたように、被覆管に損耗欠陥をもった燃料棒の破損挙動は減肉した損耗部の耐圧強度の低下と密接な関連のあることが明らかになった。こゝでは被覆管の欠陥部の程度とこの耐圧強度の低下との関係を定量的に評価することを目的として行った応力解析例について述べる。

欠陥部の形は、Fig. 15 に示すような矩形溝型欠陥とし、計算は有限要素法応力解析コード：SSAPを用いて行った。解析条件としては、欠陥部残存肉厚： $a$ と欠陥部長さ： $b$ をパラメータとし、被覆管の1/2部を163個の微小要素に分割して、両端閉じ、内圧負荷の境界条件で解析した。

残存肉厚： $a$ を0.1~0.4mmとし、欠陥部長さ： $b$ を1mmと3mmにとった場合の、残存肉厚比： $\eta$ と応力増倍比： $f$ の関係をFig. 16に示す。こゝで $\eta$ と $f$ は夫々次の通りである：

$$\eta = \frac{\text{欠陥部残存肉厚}}{\text{健全な被覆管の肉厚}} = \frac{a}{0.62} \quad (1)$$

$$f = \frac{\text{欠陥被覆管に作用する最大応力}}{\text{健全な被覆管に作用する周方向応力}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (2)$$

最大応力は全ての場合において欠陥底部中央 (Fig. 15, A点) の周方向応力であった。図にみられるように、欠陥が深くなって残存肉厚比が小さくなる程、当然のことながら最大応力は大きくなる。また欠陥部の長さ： $b$ が3mmと比較的長い場合は、最大応力の増大の様相はほぼ次式に一致する。

$$f = \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

一方、欠陥部の長さが1mmと短くなると、欠陥が浅い場合は上式に従うものの、欠陥が深くなるにつれて上式より低い応力増倍比を示す傾向にある。

(3)式の右辺は健全部と欠陥部の肉厚の比であって、厚さ $a$ mmの薄肉被覆管に作用する周方向応力と、厚さ0.62mmの健全な被覆管に作用する周方向応力との比に等しい。従って、矩形溝型欠陥の場合は、欠陥の長さが短かくかつ深い場合をのぞけば、すなわち、

$$\frac{b}{0.62-a} \geq 5 \quad (4)$$

ならば、欠陥部の耐圧強度は、減肉部の肉厚と等しい薄肉被覆管の耐圧強度と同程度まで低下することがわかる。また、

$$\frac{b}{0.62-a} \leq 2.5 \quad (5)$$

の場合は、周囲の健全な被覆管によって補強され、その耐圧強度の低下の程度は比較的小さくなることが示された。

今後は、凹部のピッチング欠陥部等の応力解析を進め、被覆管に損耗欠陥をもった加圧燃料

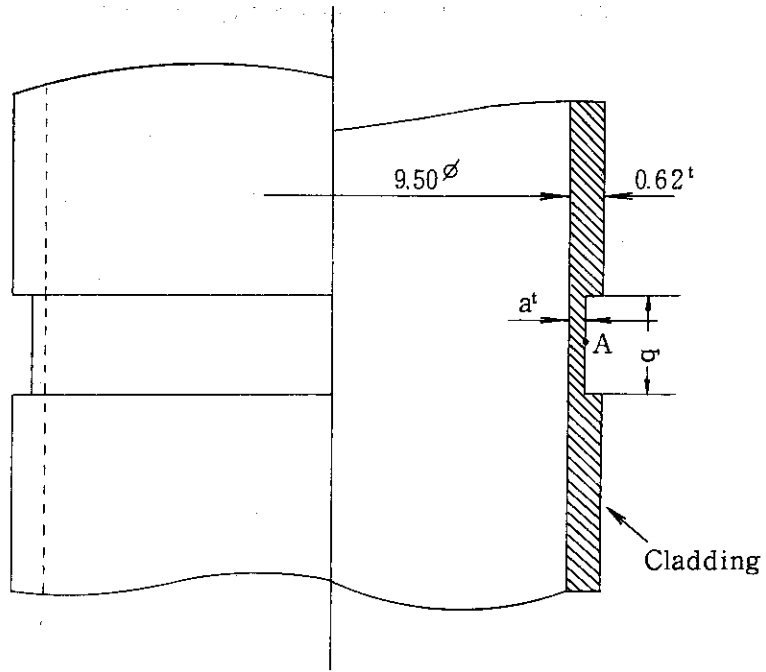


Fig. 15 Vertical Section of Grooved Defect

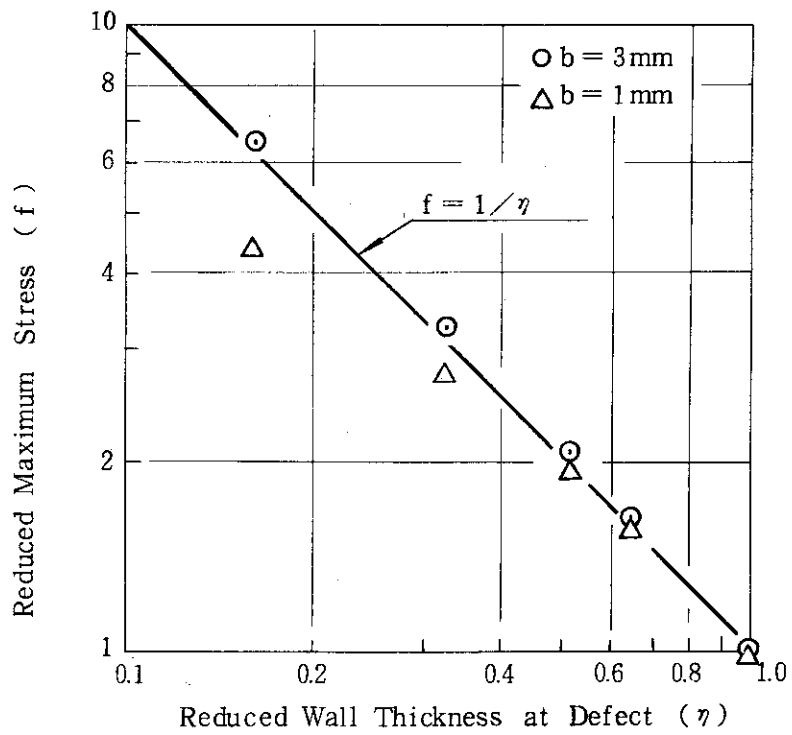


Fig. 16 Relationship between Maximum Stress and Wall Thickness at Defect

における、損耗度と破損しきい値の低下度の関係評価等に役立つ。

## 4. 結 論

被覆管にフレッテング腐食による損耗欠陥をもった燃料棒についてNSRR燃料破損実験を行い、燃料破損のしきい値、破損機構および燃料破損の結果生ずる機械的エネルギーの大きさ等を調べた。これらの結果を、健全被覆管の標準燃料についての結果と比較検討し、下記の点を明らかにした。

- 1) 燃料破損のしきい値は、損耗の度合いが小さい場合は標準燃料と変わらないが、損耗度が大きくなると若干低くなる。低下度は損耗部深さが0.5mm程度の場合に約20 cal/g·UO<sub>2</sub>と小さい。この時の破損機構は、標準燃料が被覆管内面の溶融に起因するクラックの発生であるのに対し、損耗被覆管燃料では、損耗部の内圧破損である。
- 2) 損耗被覆管燃料では、圧力パルスおよび水塊上昇等の機械的エネルギーの発生を伴う激しい壊れ方が標準燃料より低い発熱量で生ずる。
- 3) 燃料棒初期圧力を12 kg/cm<sup>2</sup>・gと高くした場合の破損しきい値は、健全被覆管の加圧燃料の破損しきい値より低くなる。この場合は、損耗部の内圧破損が速い時刻に生ずるため、健全被覆管の加圧燃料にみられたような被覆管の著しい膨れは残らなかった。
- 4) 損耗部の中央に貫通孔のある燃料棒に水を注入した浸水燃料実験では、大きな開口部と薄肉となった損耗部が緩衝材として働き、小さな貫通口浸水燃料の場合よりも安全側の傾向が示された。

今後は、機械加工による切削欠陥燃料の方法等を更に検討し、損耗度と破損しきい値の低下度および破損挙動の相異等との関連を調べる。また、被覆管に縦方向の欠陥をもった燃料棒についての実験および損耗度と燃料内圧をパラメータとして損耗被覆管加圧燃料実験等を行い、原子炉の安全性を評価する際の安全基準のための基礎的なデータとして活用をはかる。

## 謝 辞

本研究は日本原子力研究所と船舶技術研究所との共同研究として実施したものである。共同研究の遂行に御協力をいただいた村主進東海研究所副所長および能沢正雄安全工学部長に感謝の意を表します。また、本研究に関して有意義を討論と助言をいただいて反応度安全研究室員の方々、およびNSRR実験を担当していただいたNSRR管理室の方々に感謝します。

## 4. 結 論

被覆管にフレッテング腐食による損耗欠陥をもった燃料棒について NSRR 燃料破損実験を行い、燃料破損のしきい値、破損機構および燃料破損の結果生ずる機械的エネルギーの大きさ等を調べた。これらの結果を、健全被覆管の標準燃料についての結果と比較検討し、下記の点を明らかにした。

- 1) 燃料破損のしきい値は、損耗の度合いが小さい場合は標準燃料と変わらないが、損耗度が大きくなると若干低くなる。低下度は損耗部深さが 0.5mm 程度の場合に約  $20 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$  と小さい。この時の破損機構は、標準燃料が被覆管内面の溶融に起因するクラックの発生であるのに対し、損耗被覆管燃料では、損耗部の内圧破損である。
- 2) 損耗被覆管燃料では、圧力パルスおよび水塊上昇等の機械的エネルギーの発生を伴う激しい壊れ方が標準燃料より低い発熱量で生ずる。
- 3) 燃料棒初期圧力を  $12 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \text{g}$  と高くした場合の破損しきい値は、健全被覆管の加圧燃料の破損しきい値より低くなる。この場合は、損耗部の内圧破損が早い時刻に生ずるため、健全被覆管の加圧燃料にみられたような被覆管の著しい膨れは残らなかった。
- 4) 損耗部の中央に貫通孔のある燃料棒に水を注入した浸水燃料実験では、大きな開口部と薄肉となった損耗部が緩衝材として働き、小さな貫通口浸水燃料の場合よりも安全側の傾向が示された。

今後は、機械加工による切削欠陥燃料の方法等を更に検討し、損耗度と破損しきい値の低下度および破損挙動の相異等との関連を調べる。また、被覆管に縦方向の欠陥をもった燃料棒についての実験および損耗度と燃料内圧をパラメータとして損耗被覆管加圧燃料実験等を行い、原子炉の安全性を評価する際の安全基準のための基礎的なデータとして活用をはかる。

## 謝 辞

本研究は日本原子力研究所と船舶技術研究所との共同研究として実施したものである。共同研究の遂行に御協力をいただいた村主進東海研究所副所長および能沢正雄安全工学部長に感謝の意を表します。また、本研究に関して有意義を討論と助言をいただいて反応度安全研究室員の方々、および NSRR 実験を担当していただいた NSRR 管理室の方々に感謝します。



## 参 考 文 献

- (1) "NSRR実験プログレス・レポート・1", JAERI-M 6635, 1976年7月
- (2) "NSRR実験プログレス・レポート・2", JAERI-M 6790, 1976年11月
- (3) "NSRR実験プログレス・レポート・3", JAERI-M 7051, 1977年4月
- (4) "NSRR実験プログレス・レポート・4", JAERI-M 7304, 1977年10月
- (5) "NSRR実験プログレス・レポート・5", JAERI-M 7554, 1978年3月
- (6) "NSRR実験プログレス・レポート・6", JAERI-M 7977, 1978年12月
- (7) 石川迪夫, 他: NSRR実験報告, (I), 原子力誌, 19 [7], 473, 1977年7月
- (8) 石川迪夫, 他: NSRR実験報告, (II), 原子力誌, 20 [10], 710, 1978年10月
- (9) 星 蔦雄, 他: 反応度事故条件下における未照射燃料の破損挙動, 原子力誌, 20 [9], 651, 1978年9月
- (10) 原子力安全研究協会 "軽水炉用ジルカロイ被覆管の健全性" 原安協報告-18, 1969年9月
- (11) 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年9月
- (12) 未公開資料, 1975年3月