

JAERI - M
89-055

反応度事故条件下における燃料棒内圧及び
伸び測定による破損検出

1989年5月

柳澤 和章・山崎 利・間 修三*

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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。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, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 榊高野高速印刷

反応度事故条件下における燃料棒内圧及び伸び測定による破損検出

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

柳澤 和章・山崎 利・間 修三*

(1989年4月18日受理)

原子炉安全性研究炉(N S R R)にて従来使用されて来た燃料棒内圧検出器に改良を加えた。その結果、従来と同一の燃料棒内圧リーク率を保持しながら、燃料組立作業の単純化に成功し、かつその作業量を従来の1/24に短縮することにも成功した。

また、改良を行った内圧検出器に差動トランス型軸方向伸び検出器を併用しR I Aの様な急激な過渡運転下でもそれらが破損検出器として使用可能かどうかを実験的に検証した。その結果、燃料の破損に伴う燃料棒内の圧力の急激な減少及び破損に伴う軸伸びの急激な減少を同一燃料棒の同一時刻において検出できた。すなわち、本実験の範囲内においては、改良を行った内圧検出器及び燃料被覆の軸伸び検出器は燃料破損モニタとしてR I A条件下でも十分に利用可能であることを明らかにした。

Use of Rod Internal Pressure Sensor and Cladding Extensometer
as Failure Detection Monitors during Reactivity
Initiated Accident Conditions

Kazuaki YANAGISAWA, Satoshi YAMAZAKI and Syuuzou AIDA*

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

(Received April 18, 1989)

A sealing component of rod internal pressure detector which has been used in past NSRR experiments was modified. Without degrading a pressure leak rate, detector assembling time was saved up to one twenty-fourth of the previous.

To check an in-core performance, the detector was provided for experiments carried out under reactivity initiated accident (RIA) conditions.

It is well known that the defected fuel rod will accompany not only a rapid decrease of rod internal pressure but also a sudden shrinkage of accumulated axial elongations (latter is known to ONCHI effect). During experiments, both phenomena could be detected by the provided pressure detector and by the provided cladding extensometer. Consequently, it was demonstrated that the modified pressure sensor was applicable as the failure monitor of fuel rod during RIA conditions.

Keywords: Performance, Cladding Extensometer, Rod Internal Pressure, Detector, In-core Fuel Failure, RIA

* Nuclear Engineering, Co, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良及び燃料被覆伸び検出器の基本構造	2
2.1 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良	2
2.2 燃料被覆伸び検出器の基本構造	3
3. 実 験	3
3.1 照射装置	3
3.2 パルス照射	4
4. 実験結果及び考察	4
5. 結 言	6
謝 辞	7
参考文献	7

Content

1. Introduction	1
2. Fundamental Structure and Structural Modification of a Pressure Detector and Fundamental Structure of a Cladding Extensometer	2
2.1 Fundamental structure and structural modification of the rod internal pressure detector	2
2.2 Fundamental structure of fuel cladding extensometer	3
3. Experiment	3
3.1 Irradiation devices	3
3.2 Pulse irradiation	4
4. Results and Discussion	4
5. Conclusion	6
Acknowledgment	7
References	7

1. は じ め に

差動トランスの原理を用いた燃料被覆伸び検出器⁽¹⁾は、ペレット-被覆管相互作用 (Pellet-Cladding Interaction ; PCI) によって破損する可能性のある軽水型原子炉 (LWR) 燃料棒の破損モニターとして使用できることが、数多くの試験炉での使用経験から明らかにされている⁽²⁻⁶⁾。

Fig.1は燃料被覆伸び検出器がPCIによる炉内破損を検出した例⁽²⁾である。この炉内実験に用いられた軽水型原子炉燃料棒は、ノルウェーのハルデン炉 (HBWR) で、燃焼度 18.7MWd/kgUまで線出力密度40kW/mをもって定常照射された。引き続いて3kW/mhの上昇速度で同燃料棒は出力上昇にかけられた。図は出力上昇実験中の長手方向の燃料棒被覆の伸びデータを示したものである。燃料被覆伸び検出器から得た図中のデータ各点は、5分毎にコンピュータに収録されたものである。出力上昇途中の線出力密度48kW/mで燃料破損が生じたとされているが、このときの様子に着目すると、破損が生じた時点で燃料被覆の伸び(歪)量が急激に減少した(0.26%から0.21%歪)事が分かる。同時に、同燃料棒から冷却材中へI-131の放出がおこったことが、冷却材放射能モニタリングから確認されている。また、照射後試験においてもPCIによる割れキズの存在が確認されている⁽²⁾。通常運転下で、燃料棒に破損が生じた場合、その伸び量が急激に減少する現象は、HBWRでは数多く観察されており、一般に"ONCHI"効果⁽³⁾と呼ばれている。

図示したHBWRの他にも、このONCHI効果が観察されている。すなわち、出力急昇実験中の燃料棒に生じたPCI破損のため、燃料被覆長手方向伸びに急激な減少が観察され、それが破損時刻に一致したという報告例が幾つかある⁽³⁻⁶⁾。この様に、燃料被覆伸び検出器は燃料ふるまいを知る炉内機器として有用だけでなく、通常運転条件下でのPCI破損等を検出する破損検出器としても幅広く利用されている。

一方、PCI破損が生ずれば、燃料プレナム中に蓄積されていたFP (Fission Products) ガスは冷却材中に放出される。筆者らはHBWRで開発された差動トランスの原理を応用したベロー型の内圧検出器⁽¹⁾を用い、燃料破損時の燃料棒内FPガスの挙動を追跡した経験がある⁽⁶⁾。その結果、PCI破損が生じると放出FPガスの蓄積により高まっていた燃料棒内圧もただちに減少すること、また、その圧力減少過程は燃料棒内に取り付けた内圧検出器で検出できる事を実験的に確認した。また、その実験では渦電流探傷試験装置も併用したが、同装置によってPCI破損から生じた被覆管の割れ傷も検出できる事を確認した⁽⁷⁾。

このように、通常運転条件下では燃料破損研究に内圧検出器及び被覆伸び検出器等が燃料破損モニターとして有効である事が明らかにされている。しかし、反応度事故 (Reactivity Initiated Accident ; RIA) の様な急激な出力過渡においても、これら検出器が燃料破損モニターとして機能を発揮できるかどうかについては、それを判断するに足りる十分なデータベースがこれまでのところ得られていない。

上記目的に沿った検出器の性能実験に入る前に、著者らは従来NSRR (Nuclear Safety

Research Reactor) で用いられてきた内圧検出器に改良を施した。続いて、この改良型内圧検出器に従来から NSRR で用いられて来た燃料被覆伸び検出器を併用し、RIA の様な急激な出力過渡下でもそれら検出器が燃料破損モニターとして使用可能かどうかを検証する実験を行った。本報はこれらの結果について報告するものである。

2. 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良 及び燃料被覆伸び検出器の基本構造

2.1 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良

燃料棒内圧検出器の基本仕様を、Table 1 に、また、その構造図を Fig. 2 に示した。過去の NSRR 実験 (以下、過去実験) に用いられていた圧力検出器と本実験に用いた圧力検出器の構造は基本的には同じである。過去実験では、Fig. 2 に示すアダプタと圧力検出器の中間に銅製のパッキングを機械的に挿入していた。これに対し、その銅製パッキンのかわりに O リングを用い、内圧リークの防止をより強化したこと及び圧力検出器組立時の作業の効率化を図ったことが本実験での主な改良点である。以下にその改良の過程とその結果について言及する。

改良内圧検出器は、20℃状態で 2.9~3.6 MPa (1本だけは 1.3 MPa) の範囲で加圧充填を行った燃料棒の底部に、1ヶずつ取り付けられた。加圧終了後時間的には約 70~300 時間の範囲で燃料棒は、パルス照射実験に供した。このパルス実験までの燃料棒内圧変化は経時的にチェックを行い、このチェックデータから内圧検出器のリーク率を評価した。すなわち、内圧加圧時刻 t_0 (h) における燃料棒の平衡圧力値 P_0 (MPa) とパルス照射直前におけるチェック時刻 t_ℓ (h) での燃料棒内圧 P_ℓ (MPa) から、内圧測定センサのリーク率 ℓ ($\%h^{-1}$) を次式により得た。

$$\ell = (P_0 - P_\ell) / P_0 \times 1 / (t_\ell - t_0) \times 100 \quad (1)$$

この一連の評価過程で使用された内圧検出器校正用のアンプリファイアーの仕様は、以下の通りである。

Measuring range	; 22,000 × 10 ⁻⁶ strain (120 Ω gauge)
Measuring method	; balance-unbalance detection
Bridged voltage	; D. C. 25 mA
Applied voltage	; 3 V (120 Ω gauge)
Responded frequency	; within DC~10 [KHz], ±1 [dB]
SN ratio	; above 54 [dB]

このようにして評価された燃料棒内圧リーク率に関する結果を Fig. 3 に示す。図には、同様な評価方法を用いて求めた改良前の圧力検出器のリーク率も比較のために含めた。それらは NSRR

Research Reactor) で用いられてきた内圧検出器に改良を施した。続いて、この改良型内圧検出器に従来から NSRR で用いられて来た燃料被覆伸び検出器を併用し、RIA の様な急激な出力過渡下でもそれら検出器が燃料破損モニターとして使用可能かどうかを検証する実験を行った。本報はこれらの結果について報告するものである。

2. 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良 及び燃料被覆伸び検出器の基本構造

2.1 燃料棒内圧検出器の基本構造と構造改良

燃料棒内圧検出器の基本仕様を、Table 1 に、また、その構造図を Fig. 2 に示した。過去の NSRR 実験 (以下、過去実験) に用いられていた圧力検出器と本実験に用いた圧力検出器の構造は基本的には同じである。過去実験では、Fig. 2 に示すアダプタと圧力検出器の間に銅製のパッキングを機械的に挿入していた。これに対し、その銅製パッキンのかわりに O リングを用い、内圧リークの防止をより強化したこと及び圧力検出器組立時の作業の効率化を図ったことが本実験での主な改良点である。以下にその改良の過程とその結果について言及する。

改良内圧検出器は、20℃状態で 2.9~3.6 MPa (1本だけは 1.3 MPa) の範囲で加圧充填を行った燃料棒の底部に、1ヶずつ取り付けられた。加圧終了後時間的には約 70~300 時間の範囲で燃料棒は、パルス照射実験に供した。このパルス実験までの燃料棒内圧変化は経時的にチェックを行い、このチェックデータから内圧検出器のリーク率を評価した。すなわち、内圧加圧時刻 t_0 (h) における燃料棒の平衡圧力値 P_0 (MPa) とパルス照射直前におけるチェック時刻 t_ℓ (h) での燃料棒内圧 P_ℓ (MPa) から、内圧測定センサのリーク率 ℓ (%h⁻¹) を次式により得た。

$$\ell = (P_0 - P_\ell) / P_0 \times 1 / (t_\ell - t_0) \times 100 \quad (1)$$

この一連の評価過程で使用された内圧検出器校正用のアンプリファイアーの仕様は、以下の通りである。

Measuring range	; 22,000 × 10 ⁻⁶ strain (120 Ω gauge)
Measuring method	; balance-unbalance detection
Bridged voltage	; D. C. 25 mA
Applied voltage	; 3 V (120 Ω gauge)
Response frequency	; within DC~10 [KHz], ±1 [dB]
SN ratio	; above 54 [dB]

このようにして評価された燃料棒内圧リーク率に関する結果を Fig. 3 に示す。図には、同様な評価方法を用いて求めた改良前の圧力検出器のリーク率も比較のために含めた。それらは NSRR

過去実験⁽⁸⁾に供試されたものである。

改良を行った圧力検出器のリーク率は、Fig.3から分かる様に、加圧後の燃料棒内平衡圧力1.5～3.8MPaに対し、ほぼ $10^{-3} \sim 10^{-1} \% h^{-1}$ の範囲にあった。加圧後の燃料棒内平衡圧力に関してリーク率が大幅に変動しない事から考えて、得られたリーク率の最大値 $10^{-1} \% h^{-1}$ は改良型圧力検出器の使用限界に近いと思われる。

一方、過去実験に使用された圧力検出器のリーク率は、加圧後の燃料棒内平衡圧力1.2～3.2MPaに対し、ほぼ $10^{-4} \sim 10^{-1} \% h^{-1}$ の範囲にあった。極めてリーク率の低かった1データ点を除けば、過去実験に使用されていた圧力検出器は改良を行った圧力検出器とほぼ同様のリーク率を持っていた事が分かる。しかし、改良の利点としては、Oリングの採用により同一工程に対する作業時間が過去の1/24以下に短縮されたこと、かつ銅製パッキンの機械的締めつけ力を微妙にコントロールして、圧力検出器のリーク率の向上を図っていた過去の特許技術が不要になったことである。すなわち、今回の圧力検出器の改良で組立作業の効率化と単純化が大幅に増進された。

2.2 燃料被覆伸び検出器の基本構造

燃料被覆伸び検出器は、従来よりNSRR実験に用いられて来たものである。その基本仕様を、Table 2に、またその構造図をFig.4に示す。本実験で用いた燃料被覆伸び検出器は、燃料棒上部端栓に取付けたフェライト製の棒状鉄芯を差動トランスの中心に挿入し、燃料棒の伸縮より発生する二次側電圧変化をアナログ的に読みとれるようにしたものである。

Fig.5は、供試燃料棒(燃料棒番号P19)の頂部に検出器をとりつけた後、実験前に行った差動トランス部分の較正試験結果例である。較正に用いた増巾器の仕様測定範囲は $0 \sim \pm 10 \text{ mm}$ また、出力幅は $\pm 10 \text{ Volt}$ であった。また差動トランス用電源として周波数3kHz、電圧5Vを設定した。図から分かるように、差動トランスの出力電圧と燃料被覆の軸方向移動距離の間には良い直線性が得られた。

3. 実 験

3.1 照射装置

改良を行った内圧検出器及び燃料被覆伸び検出器は、Fig.6に示す様に、PWR型燃料棒の底部及び頂部にそれぞれ取り付けた。供試燃料棒には、この他に燃料スタック伸び計(ムーブメントマーカー)や被覆表面温度測定用熱電対(Pt/Pt-13%Rhを使用)も取り付けた。

燃料は焼結研磨した円筒状 UO_2 ペレットで、その初期密度は 10.42 Mg/m^3 (95%理論密度)、外径は 8.19 mm 、高さは 1.35 mm であった。また、燃料被覆材は応力除去ジルカロイ-4材で、その外径は 9.50 mm 、肉厚は 0.5 mm であった。詳細な供試燃料棒の仕様はTable 3に示した。燃

過去実験⁽⁸⁾に供試されたものである。

改良を行った圧力検出器のリーク率は、Fig.3から分かる様に、加圧後の燃料棒内平衡圧力1.5～3.8MPaに対し、ほぼ $10^{-3} \sim 10^{-1} \% h^{-1}$ の範囲にあった。加圧後の燃料棒内平衡圧力に関してリーク率が大幅に変動しない事から考えて、得られたリーク率の最大値 $10^{-1} \% h^{-1}$ は改良型圧力検出器の使用限界に近いと思われる。

一方、過去実験に使用された圧力検出器のリーク率は、加圧後の燃料棒内平衡圧力1.2～3.2MPaに対し、ほぼ $10^{-4} \sim 10^{-1} \% h^{-1}$ の範囲にあった。極めてリーク率の低かった1データ点を除けば、過去実験に使用されていた圧力検出器は改良を行った圧力検出器とほぼ同様のリーク率を持っていた事が分かる。しかし、改良の利点としては、Oリングの採用により同一工程に対する作業時間が過去の1/24以下に短縮されたこと、かつ銅製パッキンの機械的締めつけ力を微妙にコントロールして、圧力検出器のリーク率の向上を図っていた過去の特許技術が不要になったことである。すなわち、今回の圧力検出器の改良で組立作業の効率化と単純化が大幅に増進された。

2.2 燃料被覆伸び検出器の基本構造

燃料被覆伸び検出器は、従来よりNSRR実験に用いられて来たものである。その基本仕様を、Table 2に、またその構造図をFig.4に示す。本実験で用いた燃料被覆伸び検出器は、燃料棒上部端栓に取付けたフェライト製の棒状鉄芯を差動トランスの中心に挿入し、燃料棒の伸縮より発生する二次側電圧変化をアナログ的に読みとれるようにしたものである。

Fig.5は、供試燃料棒(燃料棒番号P19)の頂部に検出器をとりつけた後、実験前に行った差動トランス部分の較正試験結果例である。較正に用いた増巾器の仕様測定範囲は $0 \sim \pm 10 \text{ mm}$ また、出力幅は $\pm 10 \text{ Volt}$ であった。また差動トランス用電源として周波数3kHz、電圧5Vを設定した。図から分かるように、差動トランスの出力電圧と燃料被覆の軸方向移動距離の間には良い直線性が得られた。

3. 実 験

3.1 照射装置

改良を行った内圧検出器及び燃料被覆伸び検出器は、Fig.6に示す様に、PWR型燃料棒の底部及び頂部にそれぞれ取り付けた。供試燃料棒には、この他に燃料スタック伸び計(ムーブメントマーカー)や被覆表面温度測定用熱電対(Pt/Pt-13%Rhを使用)も取り付けた。

燃料は焼結研磨した円筒状 UO_2 ペレットで、その初期密度は 10.42 Mg/m^3 (95%理論密度)、外径は 8.19 mm 、高さは 13.5 mm であった。また、燃料被覆材は応力除去ジルカロイ-4材で、その外径は 9.50 mm 、肉厚は 0.5 mm であった。詳細な供試燃料棒の仕様はTable 3に示した。燃

料棒の有効発熱長は10%濃縮ウランよりなる116mm長と3.4%濃縮ウランよりなる19mm長の合計135mmであった。また、燃料棒は体積比にして95%He+1%Kr+4%Xeの混合ガスで充填加圧を行った。さらに燃料棒のうち、Table 3に示す燃料棒番号P17、P19の2本に関しては、均一な酸化膜(ZrO_2)を30 μ m及び40 μ mの厚みまで炉外にて付加した。これは酸化膜厚さが燃料破損に及ぼす影響を調べるために行ったものであるが、そのパルス照射による挙動等への言及は本報の報告範囲を超えるのでここでは行わない。

パルス照射実験を行うため、Table 3に示す3本の燃料棒をFig.7に模式的に示したステンレス鋼製の照射カプセル⁽⁹⁾中に収納した。各々の燃料棒に取り付けた炉内計装機器類の種類はTable 4に一覧した。燃料棒全てに被覆伸び検出器と内圧検出器を同時に取り付ける事ができなかったのは、カプセルからの引出し計装線容量に制限があったためである。

3.2 パルス照射

燃料棒をカプセル中に収納後、計装類の導通試験等を行い、不具合のない事を確認した。続いて6.5 l の冷却材純水をカプセル中に注水した。さらにカプセルの上部空間部にHeガスを充填し、リーク試験にてカプセル上部の充填ガスに漏れない事(燃料棒を収納したカプセル自体のリーク率は 1×10^{-5} atms.cc/sec以下であった)を確認した。

照射カプセルはNSRR炉心中央部に装荷した。続いて、燃料棒に取り付けた改良型内圧検出器を用いて、パルス直前の燃料棒内圧を測定した。その後、2.4ドル(燃料単位重量当りの発熱量では174calに相当)のパルスを3本の供試燃料棒に対して同時に投入した。改良型内圧検出器等の燃料計装機器から得られた信号は、照射カプセルから計装コードを介して制御室のコンピュータに約10秒間自動収録された。

パルス照射後、照射カプセルは約3週間空冷(燃料棒は水冷)状態におかれたのち、炉室内の解体セルにて解体された。解体時に燃料棒の内圧測定を行ったが、燃料棒の曲がりのため内圧検出器と燃料棒の間に隙間ができ殆んど供試燃料棒で圧力値が大気圧になっていた。その他、外観目視検査、寸法検査、ガンマスキニング、金相観察等の照射後試験を実施した。

4. 実験結果及び考察

供試燃料棒はパルス照射によって急速に加熱された。計装類より得られた各燃料棒の瞬間到達最高内圧値、圧力増加幅(瞬間到達最高内圧値とパルス直前の内圧値との差)、被覆管最高表面温度、軸(長手)方向の最大歪量、直径残留歪量、燃料スタックの最大伸び歪量及び照射後試験の外観等から判定した燃料棒の非破損・破損の有無に関するデータは、まとめてTable 5に示した。

Fig. 8は、改良型内圧検出器から得た3本の燃料棒の内圧に関する経時変化データである。図のY軸は、圧力Pa〔MPa〕で表示されているが、これはコンピュータ中に収録された生データ

料棒の有効発熱長は10%濃縮ウランよりなる116mm長と3.4%濃縮ウランよりなる19mm長の合計135mmであった。また、燃料棒は体積比にして95%He+1%Kr+4%Xeの混合ガスで充填加圧を行った。さらに燃料棒のうち、Table 3に示す燃料棒番号P17、P19の2本に関しては、均一な酸化膜(ZrO_2)を30 μ m及び40 μ mの厚みまで炉外にて付加した。これは酸化膜厚さが燃料破損に及ぼす影響を調べるために行ったものであるが、そのパルス照射による挙動等への言及は本報の報告範囲を超えるのでここでは行わない。

パルス照射実験を行うため、Table 3に示す3本の燃料棒をFig.7に模式的に示したステンレス鋼製の照射カプセル⁽⁹⁾中に収納した。各々の燃料棒に取り付けた炉内計装機器類の種類はTable 4に一覧した。燃料棒全てに被覆伸び検出器と内圧検出器を同時に取り付ける事ができなかったのは、カプセルからの引出し計装線容量に制限があったためである。

3.2 パルス照射

燃料棒をカプセル中に収納後、計装類の導通試験等を行い、不具合のない事を確認した。続いて6.5 l の冷却材純水をカプセル中に注水した。さらにカプセルの上部空間部にHeガスを充填し、リーク試験にてカプセル上部の充填ガスに漏れのない事(燃料棒を収納したカプセル自体のリーク率は 1×10^{-5} atms.cc/sec以下であった)を確認した。

照射カプセルはNSRR炉心中央部に装荷した。続いて、燃料棒に取り付けた改良型内圧検出器を用いて、パルス直前の燃料棒内圧を測定した。その後、2.4ドル(燃料単位重量当りの発熱量では174calに相当)のパルスを3本の供試燃料棒に対して同時に投入した。改良型内圧検出器等の燃料計装機器から得られた信号は、照射カプセルから計装コードを介して制御室のコンピュータに約10秒間自動収録された。

パルス照射後、照射カプセルは約3週間空冷(燃料棒は水冷)状態におかれたのち、炉室内の解体セルにて解体された。解体時に燃料棒の内圧測定を行ったが、燃料棒の曲がりのため内圧検出器と燃料棒の間に隙間ができ殆んど供試燃料棒で圧力値が大気圧になっていた。その他、外観目視検査、寸法検査、ガンマスキニング、金相観察等の照射後試験を実施した。

4. 実験結果及び考察

供試燃料棒はパルス照射によって急速に加熱された。計装類より得られた各燃料棒の瞬間到達最高内圧値、圧力増加幅(瞬間到達最高内圧値とパルス直前の内圧値との差)、被覆管最高表面温度、軸(長手)方向の最大歪量、直径残留歪量、燃料スタックの最大伸び歪量及び照射後試験の外観等から判定した燃料棒の非破損・破損の有無に関するデータは、まとめてTable 5に示した。

Fig. 8は、改良型内圧検出器から得た3本の燃料棒の内圧に関する経時変化データである。図のY軸は、圧力Pa〔MPa〕で表示されているが、これはコンピュータ中に収録された生データ

E_a [mV] を次式で換算したものである。

$$P_a = 0.098 (E_a - E_b) \cdot P_0 / E_0 \quad (2)$$

ここに、 P_a : 換算後の燃料棒最終絶対圧力 (MPa)

P_0 : 圧力計の定格容量 (kg/cm^2)、ここでは $50 kg/cm^2$

E_a : コンピュータにロギングされた出力電圧 (mV)

E_b : 無負荷出力 (バイアス) 電圧 (mV)

E_0 : 電圧計の定格容量に相当する出力電圧で、使用した圧力計に固有の値 (mV)

定数 : 単位 [kg/cm^2] を [MPa] に変換するための定数

である。

また、図には照射後試験から得られた燃料棒の外観写真もあわせて示した。

この図から以下のことが分かる。

- (1) 燃料棒 P 19 はパルス照射直後内圧が $0.47 MPa$ 程度急激に増加したが、それ以後圧力の増減は殆どなかった。また、照射後試験から得た外観写真からは破損を示す何らの兆候も観られなかった。
- (2) 燃料棒 P 19 及び P 17 は、パルス照射直後内圧が 0.48 及び $0.25 MPa$ 程度急激に増加した。パルス照射後約 $0.30 \sim 0.35$ 秒後にその内圧が急激に減少した。そしてパルス照射後約 1.8 秒で、ほぼ冷却材圧力レベルである $0.1 MPa$ に達し、以後その値に落ち着いた。照射後試験で P19 及び P 17 燃料棒の外観を観察したところ、燃料底部においてふくれを伴った破裂破損が生じていた。

この観察の結果から、燃料棒 P 19 に冷却材レベルまでの燃料棒内圧降下が生じなかったのは、破損しなかった為であり、また、燃料棒 P 19 と P 17 に冷却材レベルまでの燃料棒内圧降下が生じたのは、破裂破損が生じた為であることが分かる。図中、圧力データに雑音ののっているが、これは改良型内圧検出器とともに取り付けられた燃料被覆伸び検出器 (差動トランス) から発した励起信号によるものである。

Fig.9 は、パルス照射中の燃料棒 P 19 及び P 17 に関する軸伸びデータである。図の Y 軸は燃料棒軸歪 ϵ_a (%) を表しているが、これは差動トランスからの生データ電圧 V_a (mV) を次式で換算したものである。

$$\epsilon_a = \left\{ V_a \times K - L_0 \right\} / L_0 \times 100 \quad (3)$$

ここに、 ϵ_a : 燃料棒の軸歪 (%)

V_a : 差動トランスから得られた軸伸び相当の電圧 (mV)

K : 較正用ダミー燃料による換算値 (mm/mV)

L_0 : 燃料棒初期有効長 (mm)

である。

この図から以下のことが分かる。

- (1) 燃料棒 P 17 はパルス照射直後軸歪量が約 3.5% 程急激に増加した。パルス照射後約 0.35 秒までは伸びの増加が観られたが、すぐに約 0.69% の急激な軸歪の減少が生じ、それ以後

はゆるやかな歪緩和挙動を示した。

- (2) 燃料棒 P 1 9 はパルス照射直後軸歪量が約 3.5 %程急激に増加した。パルス照射後約 0.35 秒までは伸びの増加が観られたが、その後全体的に緩やかな歪緩和挙動を示した。1.0 秒後には P 1 7 とほぼ同じ程度の軸歪レベルにまで緩和した。

この結果で特に注目すべきことは、パルス照射後 0.35 秒の時点における破損燃料 P 1 7 の挙動である。すなわち、Fig.8の圧力データからこの時点で燃料破損を示す急激な内圧減少が発生している。一方、Fig.9の伸びデータからこの時点で急激な軸歪量の減少も生じている。即ち、燃料の破裂破損によって生じた内圧の急激な減少と軸伸び量の急激な減少が同時に検出されたことが分かる。

一方、排破損棒である P 1 9 では、このようなことが観られなかった。この R I A 条件下での被覆伸びの急激な減少は、Fig.1に示した通常運転下での燃料破損時の急激な被覆伸びの急激な減少 (ONCHI 効果) と良く似ていた。

Fig.9には、通常運転時及び出力急昇時の燃料棒が到達し得ると推測される最大の歪レベルを、文献(2)より引用した。これから分かる様に、出力急昇時の燃料棒の軸伸び歪最大値は約 0.5 %程度である。これに対して、R I A 条件下での燃料棒の伸び歪最大値は約 4.0 %もあった。R I A 時に生じる燃料棒の軸伸び歪量は出力急昇時のそれに較べ約 8 倍にもなることが分かった。

5. 結 言

N S R R が従来使用してきた燃料内圧検出器に改良を加えたその結果、以下の知見を得た。

- (1) 従来の内圧検出器とほぼ同じレベルのリーク率を改良型検出器で保持できた。
- (2) 改良により、燃料棒や計装機器に関する組立作業の効率化と単純化が促進され、作業時間は従来の 1/24 程度にまで短縮可能となった。
- (3) 改良型内圧検出器に従来から N S R R で用いられてきた被覆伸び検出器を併用し、R I A の様な極めて早い過渡変化時においても、破損検出器としてそれらが機能を発揮するかどうかの実験的検証を行った。その結果、燃料破損にともなう ONCHI 効果 (燃料棒軸歪の急激な減少) と急激な内圧減少が、反応度事故のような急激な過渡変化時においても発生し、その両方とも取り付けられた検出器により検出された。これは改良型の内圧検出器及び従来型の被覆伸び検出器が破損モニターとして十分に活用可能である事を示唆するものである。

はゆるやかな歪緩和挙動を示した。

- (2) 燃料棒 P 19 はパルス照射直後軸歪量が約 3.5%程急激に増加した。パルス照射後約 0.35 秒までは伸びの増加が観られたが、その後全体的に緩やかな歪緩和挙動を示した。1.0 秒後には P 17 とほぼ同じ程度の軸歪レベルにまで緩和した。

この結果で特に注目すべきことは、パルス照射後 0.35 秒の時点における破損燃料 P 17 の挙動である。すなわち、Fig.8 の圧力データからこの時点で燃料破損を示す急激な内圧減少が発生している。一方、Fig.9 の伸びデータからこの時点で急激な軸歪量の減少も生じている。即ち、燃料の破裂破損によって生じた内圧の急激な減少と軸伸び量の急激な減少が同時に検出されたことが分かる。

一方、排破損棒である P 19 では、このようなことが観られなかった。この R I A 条件下での被覆伸びの急激な減少は、Fig.1 に示した通常運転下での燃料破損時の急激な被覆伸びの急激な減少 (ONCHI 効果) と良く似ていた。

Fig.9 には、通常運転時及び出力急昇時の燃料棒が到達し得ると推測される最大の歪レベルを、文献(2)より引用した。これから分かる様に、出力急昇時の燃料棒の軸伸び歪最大値は約 0.5%程度である。これに対して、R I A 条件下での燃料棒の伸び歪最大値は約 4.0%もあった。R I A 時に生じる燃料棒の軸伸び歪量は出力急昇時のそれに較べ約 8 倍にもなることが分かった。

5. 結 言

N S R R が従来使用してきた燃料内圧検出器に改良を加えたその結果、以下の知見を得た。

- (1) 従来の内圧検出器とほぼ同じレベルのリーク率を改良型検出器で保持できた。
- (2) 改良により、燃料棒や計装機器に関する組立作業の効率化と単純化が促進され、作業時間は従来の 1/24 程度にまで短縮可能となった。
- (3) 改良型内圧検出器に従来から N S R R で用いられてきた被覆伸び検出器を併用し、R I A の様な極めて早い過渡変化時においても、破損検出器としてそれらが機能を発揮するかどうかの実験的検証を行った。その結果、燃料破損にともなう ONCHI 効果 (燃料棒軸歪の急激な減少) と急激な内圧減少が、反応度事故のような急激な過渡変化時においても発生し、その両方とも取り付けられた検出器により検出された。これは改良型の内圧検出器及び従来型の被覆伸び検出器が破損モニターとして十分に活用可能である事を示唆するものである。

謝 辞

本実験に使用した燃料棒内圧測定用検出器は、NSRRにて過去に開発された内圧検出器に一部改良を加えたものであるが、この改良の過程において同開発グループから数多くの技術的支援を賜りました。

また、本論文の内容については、反応度安全研究室室長の藤城俊夫氏から有益な御助言を賜りました。

パルス照射した燃料棒に関する照射後試験に関しては、反応度安全研究室の笹島栄夫研究員、千代田メンテナンス㈱の吉田敏幸及び辻田善之の両氏に御協力をいただきました。また、財原子力データセンタの加藤浩子さんにはデータの整理等を行っていただきました。ここに御礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- [1] B. Aarset et al.,:Qualification and Aquisition of HBWR Experimental Data, HPR-229 (1979)
- [2] K. Yanagisawa; Nucl. Technol. 73 (1986) 361
- [3] T. Onchi, :Elongation Behaviour of Fuel Rods with Various Design Parameter during Overpower Ramps, HPR-221 (1978)
- [4] A. Kikuchi, M. Ichikawa, :J.A. Energy Soc. Japan, 23[7] (1981) 507
- [5] H. Mogard, H. Heckermann, :The International Super-Ramp Project at Stüdsvic, ANS Topl. Mtg. on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida (1985)
- [6] M. Ichikawa, K. Yanagisawa, :Studies of Pellet Cladding Mechanical Interactions and Verifications of FEMAXI code, Nuclear Fuel Performance, BENS, London, P63, (1985)
- [7] K. Yanagisawa, T. Johnsen, :J. Nucl. Sci. Technol., 23[8] (1986) 752
- [8] S. Saito et al, :J. Nucl. Sci. Technol, 19[4] (1982) 289
- [9] T. Fujishiro et al, :Inpile Test Rods for RIA Experiments in the NSRR, International Topl. Mtg. on Irrad. Technol., Grenoble, France (1982)

謝 辞

本実験に使用した燃料棒内圧測定用検出器は、NSRRにて過去に開発された内圧検出器に一部改良を加えたものであるが、この改良の過程において同開発グループから数多くの技術的支援を賜りました。

また、本論文の内容については、反応度安全研究室室長の藤城俊夫氏から有益な御助言を賜りました。

パルス照射した燃料棒に関する照射後試験に関しては、反応度安全研究室の笹島栄夫研究員、千代田メンテナンス㈱の吉田敏幸及び辻田善之の両氏に御協力をいただきました。また、財原子力データセンタの加藤浩子さんにはデータの整理等を行っていただきました。ここに御礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- [1] B. Aarset et al, :Qualification and Aquisition of HBWR Experimental Data, HPR-229 (1979)
- [2] K. Yanagisawa; Nucl. Technol. 73 (1986) 361
- [3] T. Onchi, :Elongation Behaviour of Fuel Rods with Various Design Parameter during Overpower Ramps, HPR-221 (1978)
- [4] A. Kikuchi, M. Ichikawa, :J.A. Energy Soc. Japan, 23[7] (1981) 507
- [5] H. Mogard, H. Heckermann, :The International Super-Ramp Project at Stüdsvic, ANS Topl. Mtg. on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida (1985)
- [6] M. Ichikawa, K. Yanagisawa, :Studies of Pellet Cladding Mechanical Interactions and Verifications of FEMAXI code, Nuclear Fuel Performance, BENS, London, P63, (1985)
- [7] K. Yanagisawa, T. Johnsen, :J. Nucl. Sci. Technol., 23[8] (1986) 752
- [8] S. Saito et al, :J. Nucl. Sci. Technol, 19[4] (1982) 289
- [9] T. Fujishiro et al, :Inpile Test Rods for RIA Experiments in the NSRR, International Topl. Mtg. on Irrad. Technol., Grenoble, France (1982)

Table 1 Characteristics of pressure sensor and its attachments.

Rated pressure	5.0 MPa
Rated currency	1 mV/V
Permissible overpower	150 %
Permissible non-linearity	0.5 %
Reproducibility	0.2 %
Temperature dependency	0.05 %/°C
Input and Output resistancee	120±3 ohms
Insulation resistance	> 109 ohms
Temperature range in use	-15~80°C

Table 2 Fundamental characteristics of cladding extensometer.

Type	Linear, Waterproof
Detecting range	± 8 mm
Linearity	< ± 2.5 %
Exciting Frequency	< 30 kHz
Exciting voltage	ca. 5V
Output voltage	max 10 V at full scale
Dimensions	Total length: 76±1 mm Outer diameter: 30 ⁰ _{-0.5} mm Inner diameter : 13 ^{+0.5} ₀ mm
Cables	5 mmφ, Shielded multilead, 1m length
Maximum temperature	< 40°C

Table 3 Characteristics of fuel rods used.

Fuel Rod Type Fuel rod No.	Standard P9	Oxidation/Hydridding	
		P17	P19
1. Fuel Pellet Enrichment(w/o) Density (% TD) Outer diameter(mm) Length (mm) End form Grain size (μm)	10.0, 3.4(end pellet only) 95.10 8.19 13.5 Double Dishing (diameter = 5.97mm, depth = 0.3mm) 8.0		
2. Cladding Outer diameter(mm) Inner diameter(mm) Wall thickness(mm) Oxide thickness(μm) Absorbed hydrogen(ppm)	Stress relieved Zircaloy-4 9.50 8.36 0.57 — —	30 140	40 70
3. Fuel Rod Diametral gap(mm) Prepressurization(20°C) Fill gas composition Plenum volume(ml) Fuel column(mm)	0.170 3.0~3.6 MPa 95%He + 1%Kr + 4%Xe (volumetric) 2.7 116mm (10.0 [*]) + 19mm (3.4 [*]) * Enrichment		

Table 4 Outline of experiment.

Fuel rod no.	P9	P17	P19
Oxide thickness (μm)	0	30	40
Hydrogen absorption (ppm)	—	140	70
Fill gas pressure at 20°C immediately before pulse (MPa)	3.51	3.58	3.30
Fill gas composition (volume %)	95%He + 1%Kr + 4%Xe		
Instrumentation PF ⁽¹⁾ equipped	○	○	○
EC ⁽²⁾	—	○	○
EF ⁽³⁾	○	○	○
T/C ⁽⁴⁾	○	—	—

- Note: (1) PF: Strain gauge type pressure sensor
(2) Cladding elongation sensor
(3) Movement marker to measure fuel column maximum expansion
(4) Pt/Pt-13%Rh thermocouples to measure cladding outer surface temperature

Table 5 Summary of fuel behavior based on PIE and In-core instrumentations.

Deposited Energy (cal/g fuel)	174		
Peak Enthalpy (cal/g fuel)	142		
Fuel rod no.	P9	P17	P19
Oxidation (μm)	-	30	40
Filler gas pressure immediately before pulse (MPa, 20°C)	3.51	3.58	3.30
Peak pressure reached during pulse (MPa)	3.98	4.06	3.82
Pressure increase (MPa)	0.47	0.48	0.52
Peak cladding surface temperature (°C)	-	952	-
Peak elongation reached during pulse (%)	-	3.93	3.67
Residued diametral strain (%)	6.6	9.3	3.0
Maximum fuel column movement (%)	2.6	4.0	2.5
Failure(F)/ no failure (NF)	F	F	NF

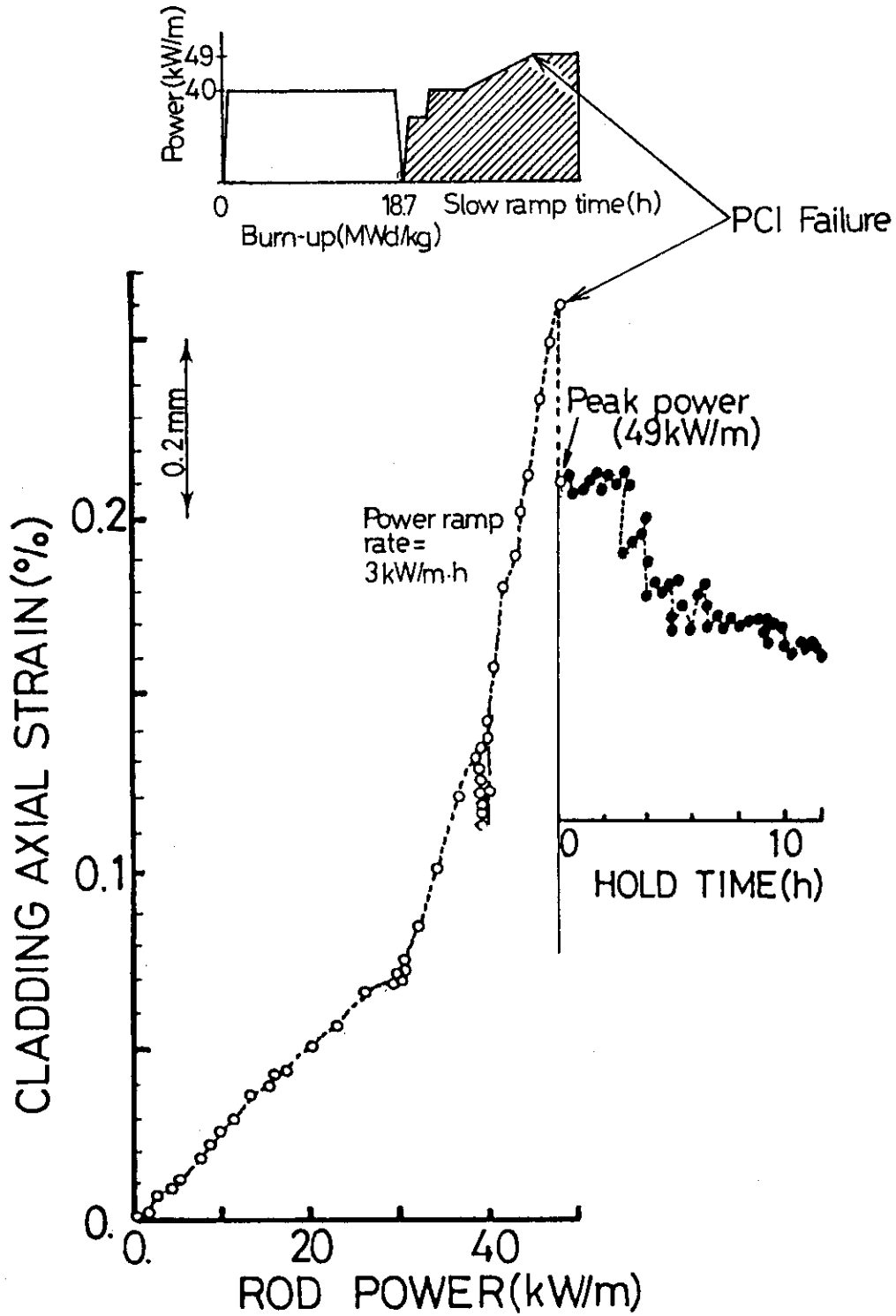


Fig. 1 Cladding axial strain vs rod power obtained at HBWR(1) experiment; Rod power at burn-up of 18.7 MWd/kgU was increased from 40 kW/m to 49 kW/m. Time span of each data point was 5 minutes. Sudden decrease of axial strain at 49 kW/m was attributed to PCI failure at peak power level. Power history used was shown in top.

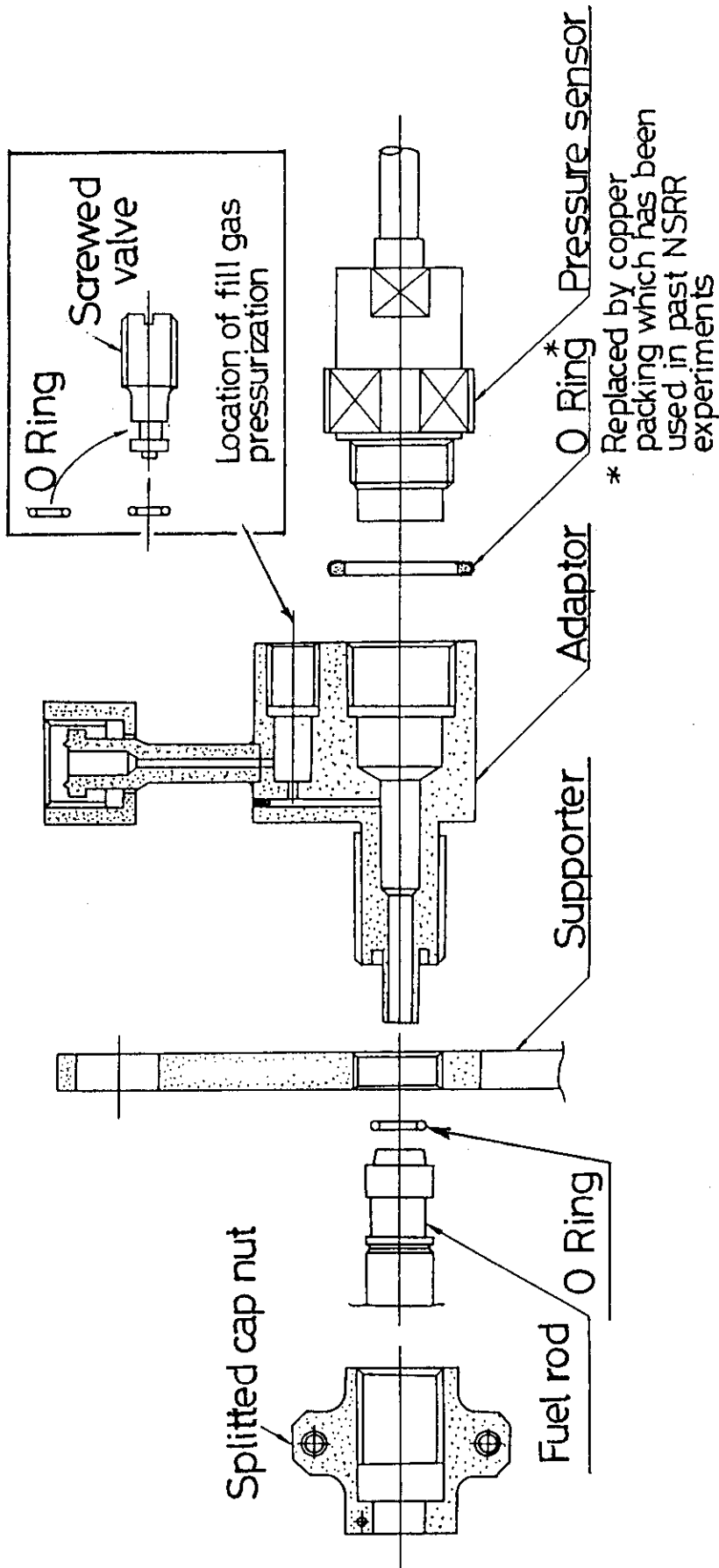


Fig. 2 Cross section of pressure sensor and relevant instruments.

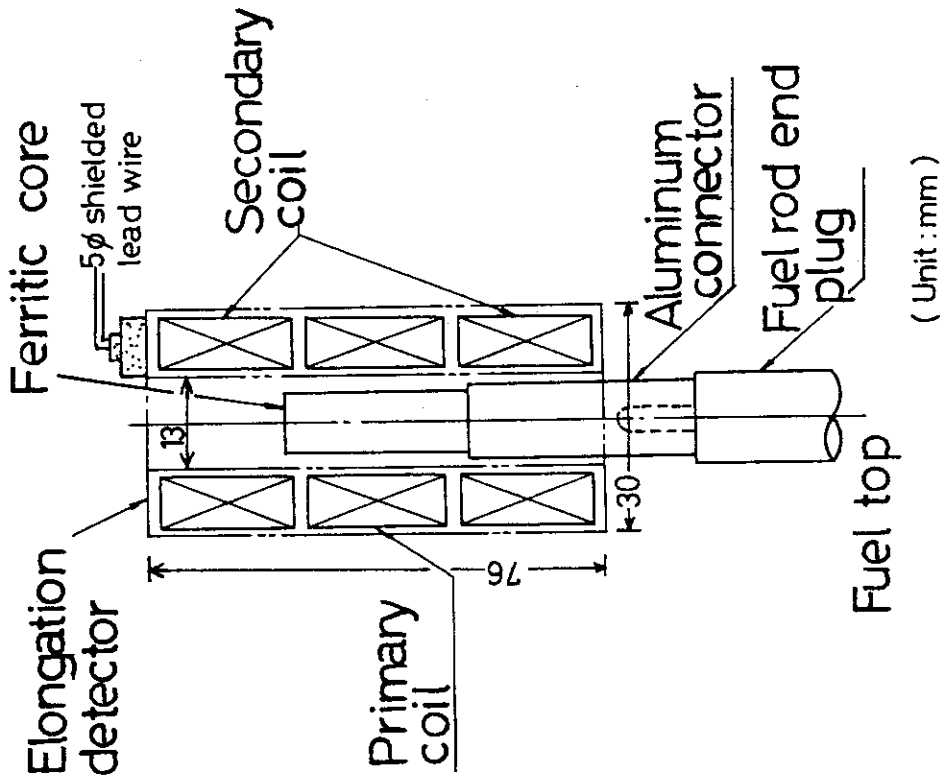


Fig. 4 Cross section of cladding extensometer attached to the top end of fuel rod.

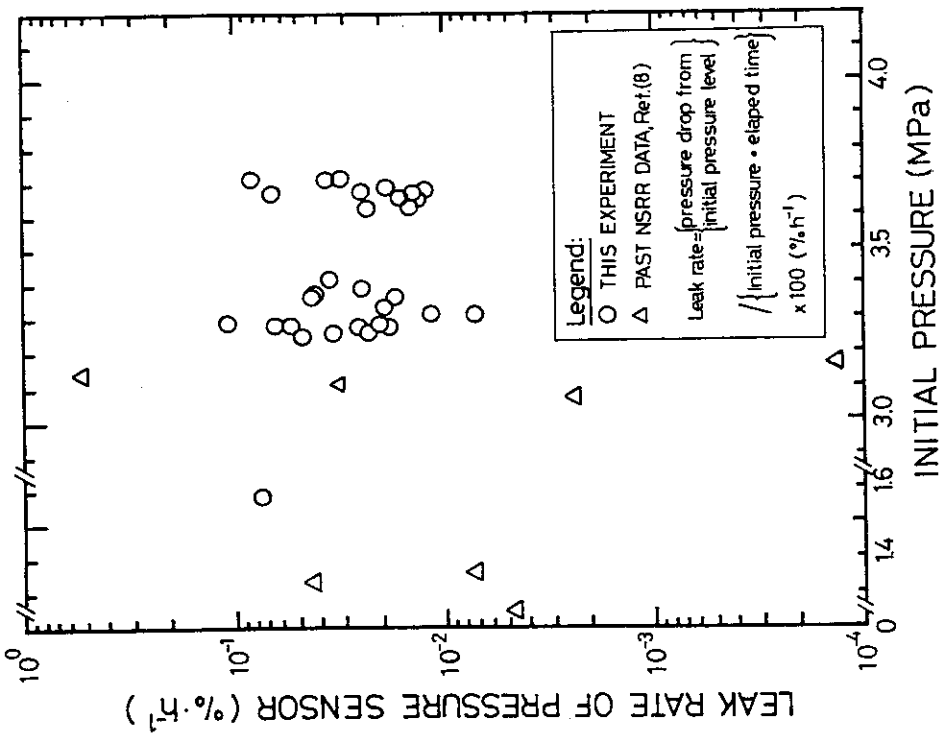


Fig. 3 Leak rate of pressure sensor vs initial pressure between fuel rods used in this experiment and those used in past NSRR experiments.

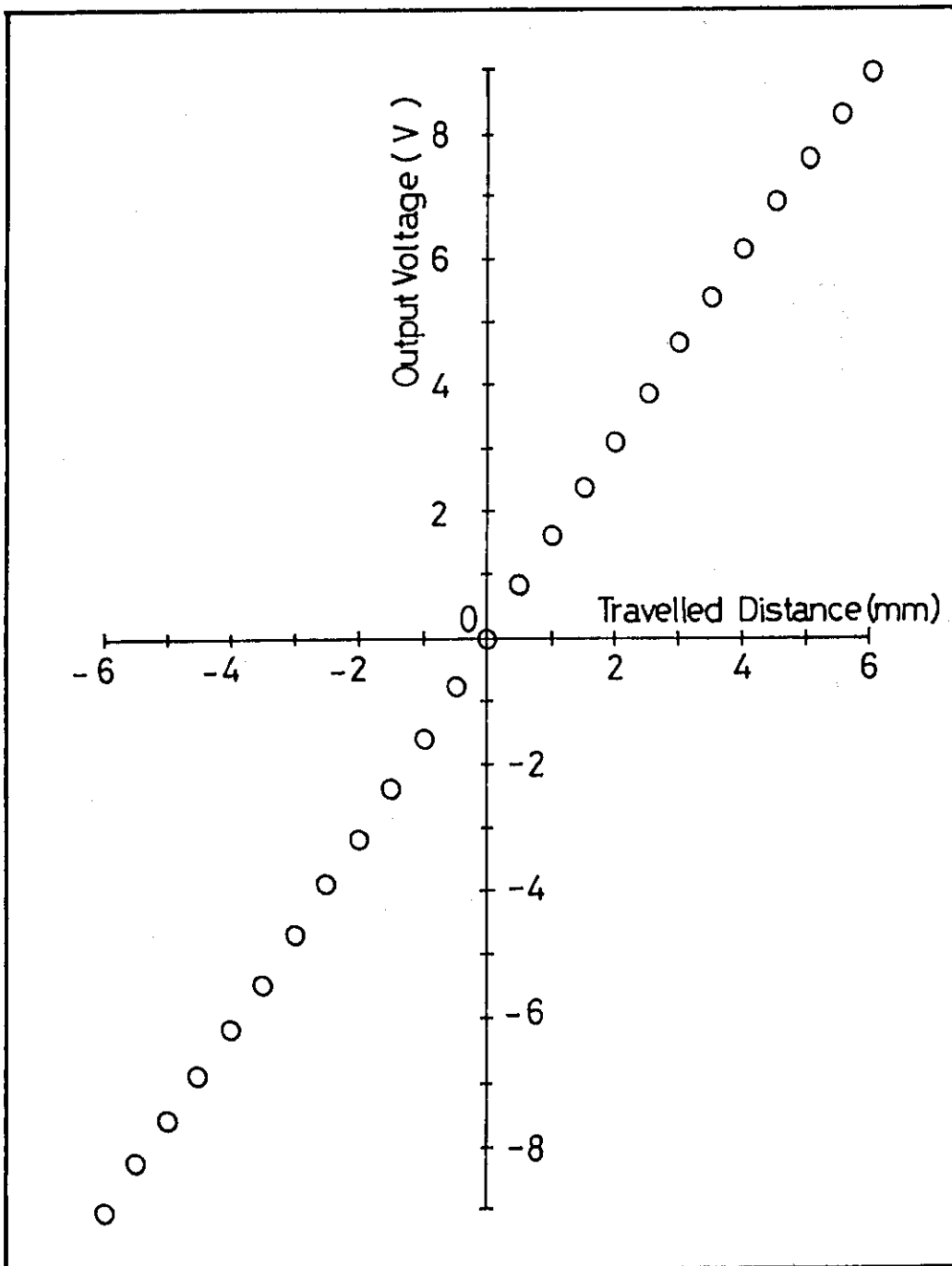


Fig. 5 Calibration curve of a linear voltage differential transformer (LVDT) on fuel rod no.19. Measurable range of amplifier was within ± 10 mm.

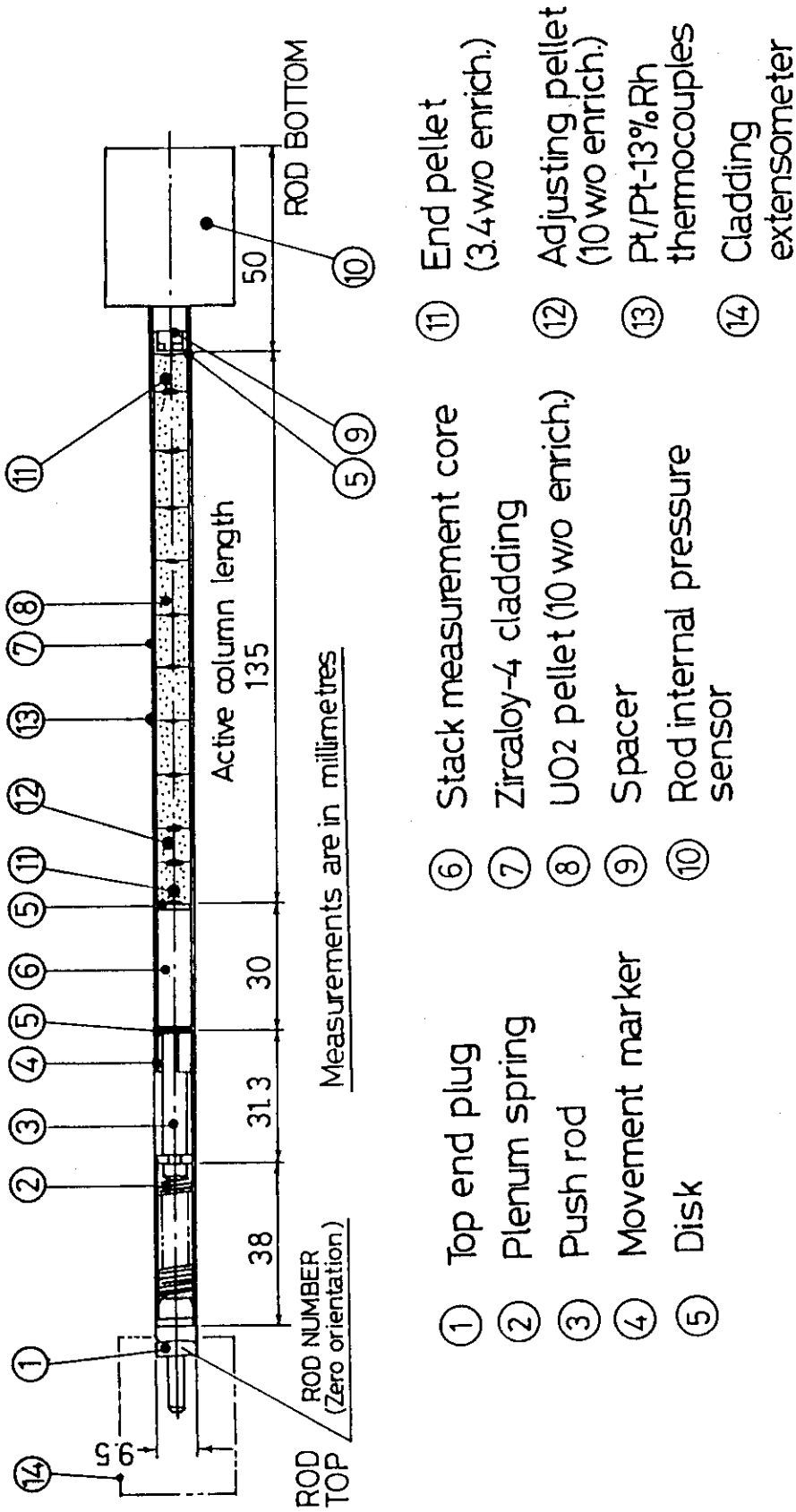


Fig. 6 Longitudinal cross section of fuel rod.

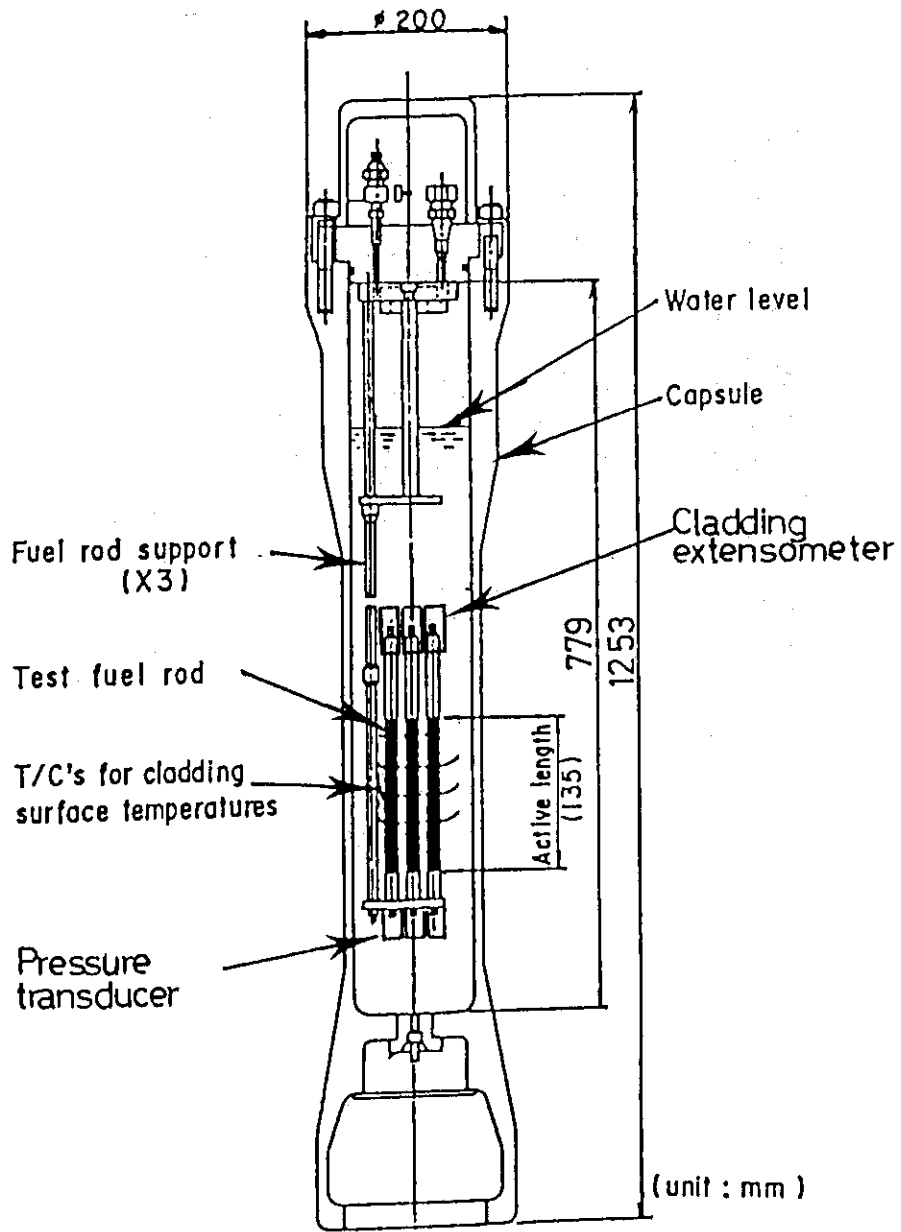


Fig. 7 Irradiation capsule for the triplet rod configuration and attached in-core instrumentations.

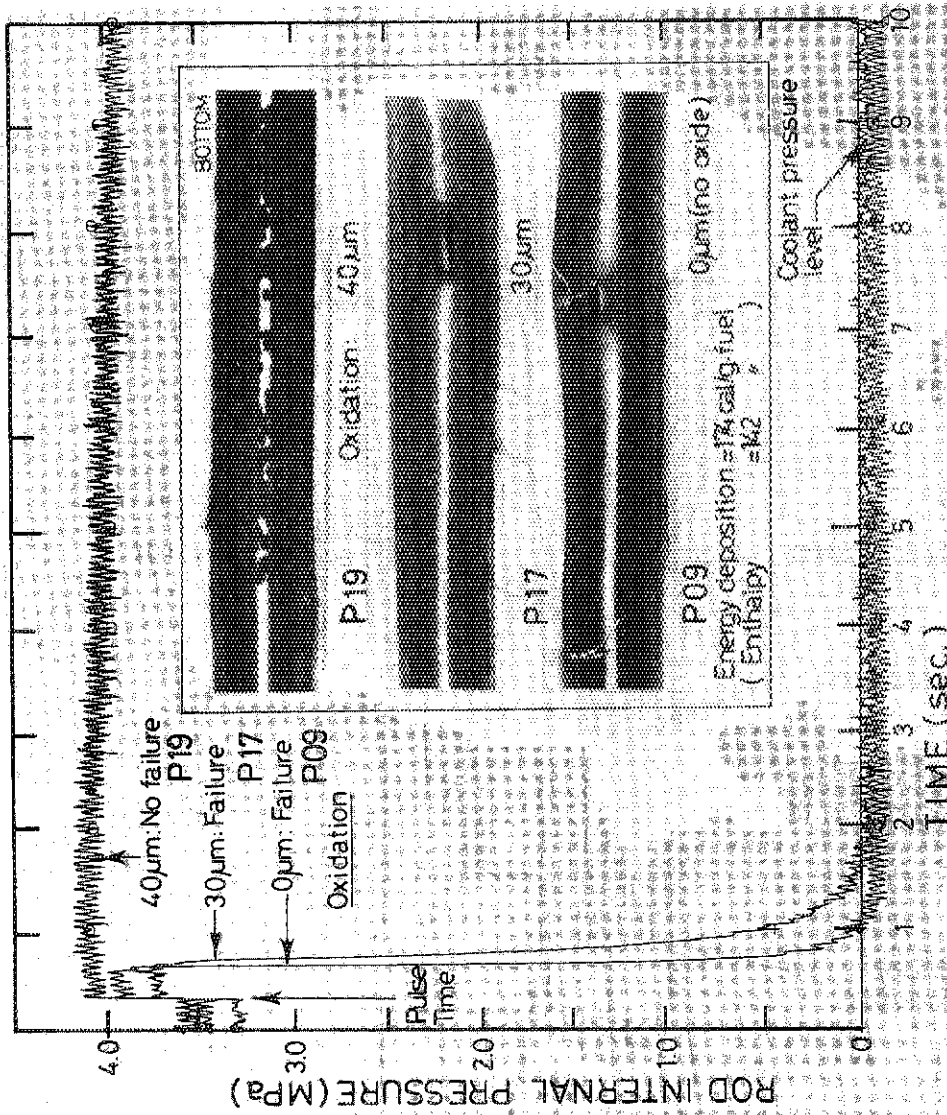


Fig. 8 Change of rod internal pressures vs time as a function of initial amounts of oxidation, in which rod outer view from post-irradiation examination is included.

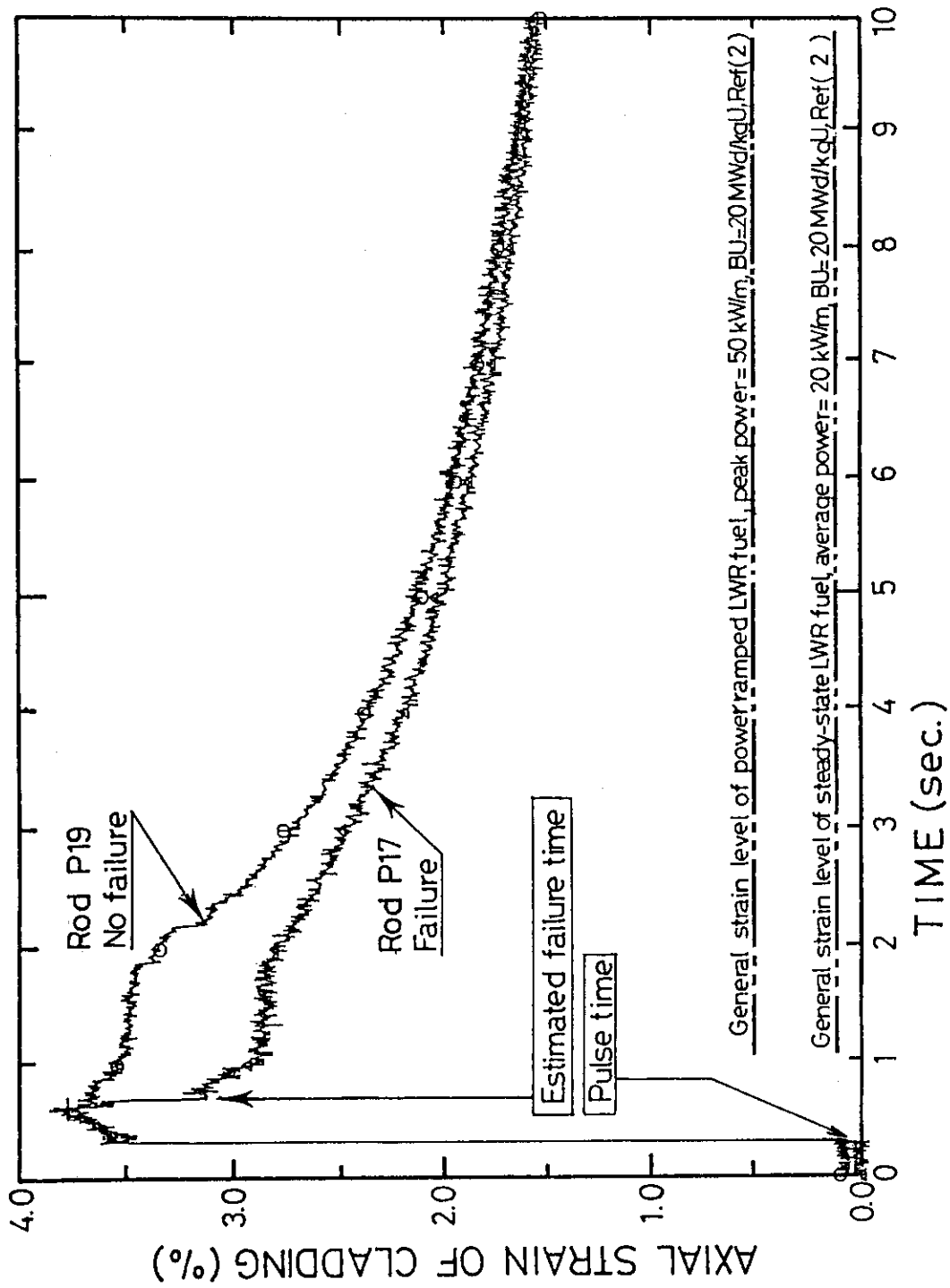


Fig. 9 Axial strains of cladding vs time as a function of oxidation, where general strain levels of LWR fuels at steady-state and at power ramp conditions are shown.