

JAERI-Tech
99-071



JP9950660



被覆管高速加圧バースト試験装置の設計と製作

1999年10月

大友 隆・永瀬文久・上塙 寛

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

被覆管高速加圧バースト試験装置の設計と製作

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部
大友 隆・永瀬 文久・上塙 寛

(1999年9月2日受理)

軽水炉高燃焼度燃料棒の反応度事故時破損挙動に関する基礎的な知見を得るために、燃料被覆管内圧を急速に加圧できる試験装置を考案し製作した。本装置はパルス照射時に高燃焼度燃料棒で生じる急激なペレット／被覆管機械的相互作用（PCMI）を模擬するためのものである。 UO_2 ペレット中の核分裂ガスの急激な膨張が PCMI に強く影響するという NSRR パルス照射実験の結果を踏まえ、本装置では油圧を用いて被覆管に均一な負荷を与えることとした。また、NSRR 実験でのパルス幅に相当する短い時間で被覆管を加圧し破裂させるために、最大 170MPa まで予加圧した高圧系と被覆管試料とを電磁弁を用いて瞬時に接続する加圧方法を考案した。製作した装置は、室温で最大 3.4MPa/ms の昇圧速度を達成し、未照射 PWR 用ジルカロイ被覆管が 70ms で破裂した。また、加圧経路にバイパスや流量調節弁を付加することによって、0.002 ~ 3.4MPa/ms の広い範囲で加圧速度を調整することができた。本装置で試験した水素添加被覆管試料は、NSRR 実験で破損した高燃焼度燃料棒と類似の破損形態を呈したことから、本装置によりパルス照射時の PCMI 破損を十分に模擬できると考えられる。この他、加圧速度、温度、軸方向拘束条件を変えた予備試験を実施し、設計通りに装置が動作することを確認した。

Design and Fabrication of Cladding Tube Burst Test Apparatus
with High Pressurization Rates

Takashi OTOMO, Fumihisa NAGASE and Hiroshi UETSUKA

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

(Received September 2, 1999)

A test apparatus which can rapidly increase the internal pressure of a LWR fuel cladding was designed and fabricated to obtain the basic information on failure behavior of the high burnup fuel rod under a reactivity initiated accident (RIA) condition. The apparatus aims to simulate rapid pellet-cladding mechanical interaction (PCMI) which occurs in the high burnup fuel rod during a pulse irradiation. Oil pressure was selected to expand the fuel cladding uniformly in the present apparatus, taking account of the results from the NSRR pulse-irradiation experiments suggesting strong influence of fission gas in the UO₂ pellet on the PCMI. In order to pressurize and burst the fuel cladding in a very short period corresponding to the pulse width in the NSRR experiments, the authors adopted a pressurization method that a high-pressure line pre-pressurized up to 170 MPa was instantaneously connected with the fuel cladding by opening a solenoid valve. The fabricated apparatus achieved the maximum pressurization rate of 3.4 MPa/ms at room temperature and the unirradiated PWR-type Zircaloy-4 cladding failed in 70 ms. The pressurization rate could be successfully controlled in a wide range of 0.002 to 3.4 MPa/ms by equipping a bypass line and a flow control valve in the pressurization system. Since the hydrided fuel cladding tested by the present apparatus exhibited the same failure morphology as the high burnup fuel failed in the NSRR pulse irradiation, it is considered that the present apparatus can satisfactorily simulate the PCMI during the pulse irradiation. Preliminary tests were conducted changing parameters such as pressurization rate, test temperature, and axial constraint condition. The results confirmed that the apparatus worked as designed.

Keywords : LWR, Fuel Cladding, Zircaloy, RIA, Failure Behavior, NSRR, Pulse Irradiation,
PCMI, Burst Test, Test Apparatus

目 次

| | | | |
|----|-------------------|--|---|
| 1. | はじめに | | 1 |
| 2. | 試験装置の設計と製作 | | 2 |
| | 2. 1 装置概略 | | 2 |
| | 2. 2 詳細設計と装置製作 | | 2 |
| 3. | 特性試験結果 | | 4 |
| | 3. 1 室温での加圧 | | 4 |
| | 3. 2 620Kでの加圧 | | 5 |
| | 3. 3 軸方向拘束条件下での加圧 | | 7 |
| 4. | おわりに | | 7 |
| | 参考文献 | | 8 |

Content

| | | | |
|----|----------------------------------------------------------|--|---|
| 1. | Introduction | | 1 |
| 2. | Design and Fabrication of Test Apparatus | | 2 |
| | 2. 1 Outline of Test Apparatus | | 2 |
| | 2. 2 Detailed Design and Manufacturing of Test Apparatus | | 2 |
| 3. | Results of Characterization Tests | | 4 |
| | 3. 1 Pressurization at Room Temperature | | 4 |
| | 3. 2 Pressurization at 620 K | | 5 |
| | 3. 3 Pressurization under Axial Restraint Condition | | 7 |
| 4. | Summary | | 7 |
| | Reference | | 8 |

This is a blank page.

1. はじめに

燃料サイクルコストの低減化等を目的とし軽水炉燃料の高燃焼度化が進められている。しかし、高燃焼度化に伴うジルカロイ製燃料被覆管の機械的性質の劣化、特に延性の低下が検討課題となっている。このような被覆管機械特性の劣化は、通常運転時における燃料の健全性のみならず事故条件下での被覆管挙動にも影響を及ぼす。高燃焼度燃料の反応度事故（RIA）時挙動に関する、フランス・カダラッシュ研究所の CABRI-Rep Na 実験計画と原研の NSRR 実験計画において、高燃焼度 PWR 燃料を用いたパルス照射実験が行われた[1-5]。これらの実験で、50 ~ 60GWd/t 程度まで燃焼の進んだ燃料棒が予想されたより低い投入エネルギーで破損する例が示された。パルス照射時に急激に膨張した燃料ペレットと延性の低下したジルカロイ被覆管が、機械的相互作用（Pellet-Cladding Mechanical Interaction : PCMI）を起こし、燃料棒が破損したものと考えられる。また、照射後試験の結果は、水素吸収や水素化物の局所的な偏析がジルカロイ被覆管の破損挙動に強く関連していることを示唆している[1-3]。

高燃焼度燃料の反応度事故時における破損挙動を明らかにするには、NSRR のような原子炉を用いた実験は不可欠である。しかし、原子炉を利用した実験には試験回数が限られる等の多くの制約があり、発電炉から取り出される高燃焼度燃料を試料とする場合、水素吸収量をはじめとする様々な影響因子をパラメトリックに選択することは実際的には不可能である。さらに、現時点では NSRR 実験には、商用炉の反応度事故を模擬するという点で限界がある。例えば、NSRR 実験ではパルス照射前の燃料温度は室温であり、パルス照射中に高燃焼度燃料が破損した例では被覆管外表面温度は高々 370K であった。これに対して商用炉で反応度事故が生じると想定される条件には、通常運転時温度（550K 以上）の場合もある。また、NSRR 実験で燃料が破損した場合のパルス幅は 4 ~ 15ms であり、これは商用炉で予想されるパルス幅（PWR で 20 ~ 70ms、BWR で 100 ~ 200ms）よりも短い。低い燃料被覆管温度と短いパルス幅に起因する変形速度は、何れもパルス照射時における被覆管の破損挙動に影響を及ぼす可能性があり、NSRR 実験データを実炉へ適用することの限界が指摘されている。

RIA 時の燃料破損挙動を解明する基礎データを取得し、かつ NSRR 実験データを補完するためには、炉外における分離効果試験が必要である。そこで、報告者らは、脆化した被覆管のパルス照射時破損挙動に関する基礎的な知見を得るために水素添加処理等を行った模擬高燃焼度燃料被覆管に対する高速加圧バースト試験を計画した。この試験は、高燃焼度燃料のパルス照射時の破損が、急激に膨張したペレットと脆化した被覆管の間の PCMI により起こった点に着目しており、水素濃度、水素化物分布、試験温度、変形速度等がジルカロイ被覆管の破裂挙動に及ぼす影響を調べるものである。本報告書は、高速加圧バースト試験に用いる試験装置の設計、製作、特性試験の結果をとりまとめたものである。

2. 試験装置の設計と製作

2.1 装置概略

高速加圧バースト試験機の概念図を **Fig. 1** に示す。電動ポンプ、増圧器、電磁バルブ、及びこれらを接続する高圧配管が、主要な構成機器である。パルス照射時、高燃焼度燃料棒においてはペレットが急激に膨張し被覆管に過大な負荷を及ぼすが、ペレットの急激な膨張はペレットの熱膨張によるだけではなく、ペレット結晶粒界に蓄積していたガス状核分裂生成物 (FP: Fission Product) の膨張が強く関与することが NSRR 実験により示唆されている[1-3]。ペレットの熱膨張によって PCMI が起こる場合は、被覆管への負荷はペレット端部等で起こる局所的なものであるが、パルス照射により破損した高燃焼度燃料棒の観察では負荷が局所的であった形跡は特に認められない。また、PCMI に FP ガスが強く関与したのであれば被覆管内面への負荷はほぼ均一であると考えて良く、パルス照射時に高燃焼度燃料棒で起こる PCMI による被覆管への負荷は、被覆管を液体や気体で均一に加圧することでも模擬できると考えられる。管材料の内圧試験では空気圧、水圧、あるいは油圧を用いることが一般的であるが、原研・燃料試験施設での経験[6]、さらに取り扱いの容易さと最高 700K での試験実施を考慮し、本装置については油を加圧媒体として選択した。

被覆管から切り出した試験片に対する引張り試験で得られた引張り強さから、PWR 及び BWR 被覆管のバースト圧力は室温で 130 ~ 150MPa と予想される。そこで、試験機の設計最大圧力は 196MPa (約 2000kgf/cm²) とした。高燃焼度燃料に対する NSRR パルス照射実験では、パルス幅は 4 ~ 15ms である。破損した燃料棒では被覆管の周方向変形量は高々数%であるから、周方向ひずみ速度は 100 %/s 程度であると予想される。ポンプによる試料の直接加圧によって、このような高速変形を再現することは不可能である。そこで、高圧タンク等、被覆管試料内容積より大きな体積内に一旦蓄圧し、電磁弁の瞬時の開放を利用し高圧を一気に被覆管試料に導入する方法を採ることにした。

2.2 詳細設計と装置製作

2.2.1 高速加圧装置

Fig. 2 に高速加圧を達成するために設計した試験装置の加圧系統図を示す。蓄圧系は、電動ポンプ、増圧器、蓄圧用高圧ホースからなり、電磁弁を介し試料側に接続した。本装置では、最大 196MPa の高圧を発生するために、電動ポンプと増圧器を組合せた。増圧器の受圧面積の大きいシリンダに、電動ポンプから作動油を媒体として圧力を供給し、ピストンを介して受圧面積の小さなシリンダに圧力を伝達する。増圧器の 2 つのシリンダの受圧面積は、それぞれ約 0.0147 と約 0.00283m² であり、電動ポンプが 38MPa を発生すると

高圧側の圧力が設計最高圧力の 196MPa に到達する。高圧タンクの働きをする蓄圧用高圧ホース（理研精機社製）は 2 系統、各 10m の長さであり、容量は合計 $4.0 \times 10^5 \text{ mm}^3$ である。被覆管試料の容積は $8.8 \times 10^3 \text{ mm}^3$ (PWR 被覆管、内径 8.36mm、試料長 160mm) であるから、試料に比べ蓄圧用高圧ホースは約 4.5 倍の容積を持つ。

試験時には、電磁弁以降の配管及び試料中にあらかじめ大気圧の作動油を充填しておく。高圧ポンプと増圧器により蓄圧用高圧ホース内の圧力を所定の圧力まで高めた後、電磁弁を開放し試料側に短時間に圧力を導入する。なお、加圧速度の調節を行うために、電磁弁の下流には流量調節バルブ（ニードルバルブ）を加えた。製作した加圧系（電動ポンプ、増圧器、蓄圧用高圧ホース）及び電磁弁・流量調整バルブの写真を Fig. 3 及び 4 に示す。

室温試験においては、すべての加圧経路（電動ポンプ～増圧器低圧側、増圧器高圧側～電磁弁～試料）において耐摩耗性油圧作動油（昭和シェル石油社製・テラス K32）を用いた。一方、高温試験（600K 以上）においては、安全性を考慮し、増圧器高圧側から試料までの加圧経路には高い発火点（885K）を持つフェニルエーテル型合成油（松村石油研究所製、モレスコハイラッド RP-54）を使用した。この合成油の各種特性を Table 1 にまとめた。

2. 2. 2 試料固定具

被覆管試料は試料固定具を用い、材料試験機（島津製作所製、油圧式試験機 EHF-EB5KN）に固定した。Fig. 5 および 6 に試験機及び試料固定具の外観を、Fig. 7 に試料固定具の模式図を示す。

試料の下端は下部固定具を用いて試験機クロスヘッドに固定されるとともに、電磁弁、高圧ポンプ、増圧器、蓄圧ホースからなる加圧系に接続されている。試料上端は上部固定具に固定されるが、加圧経路は試料接続部を末端とせず上部固定具内を貫通し固定具上部まで延長した。試料上端で生じる反射圧力波が試料内で進行波に干渉し、試料変形に影響するのを軽減するためである。なお、加圧経路末端には空気抜き治具を付け、試料セット時に混入した空気を小型真空ポンプにより除去した。試験時には、シール付きプラグにより空気抜き治具は密閉され、加圧系の末端となる。

下部固定具が留めてあるクロスヘッドは油圧によって支えられており、荷重変化に対し高い応答性を持つので荷重変化をフィードバックさせてクロスヘッド位置を調節することにより、試料に働く荷重を一定にすることができる。また、クロスヘッドを支える油圧を十分に大きくし位置を固定すれば、軸方向拘束条件での加圧試験が行える。Fig. 7 では、上部固定具は材料試験機のロードセルに固定されているが、ロードセルに固定せず試料の軸方向伸縮を許容する上部固定具も製作した。この上部固定具を用いることで、軸方向非拘束の加圧試験が実施できる。正確には、治具の重量約 3kg を圧縮力として考慮する必要があるが、この程度の加重は加圧及び破裂時に、試料に働く荷重に比べると無視できる。

試料と上下固定具の接続には、着脱が容易でかつ確実な固定ができるスウェージロック社製パイプ継ぎ手を用いた。Fig. 7 に示すように、パイプ継ぎ手を用いて試料を十字ニップルに接続した後、袋ナットで十字ニップルを上下部固定具に固定した。試料加圧による軸方向引張り荷重はパイプ継ぎ手にも作用することから、パイプ継ぎ手から試料や十字ニ

ップルが外れるのを防ぐために、十字ニップル外径の負の公差を小さくし、被覆管試料と継ぎ手との接続部分にステンレス鋼製の中子を入れた。中子の形状を Fig. 8 に示す。

なお、被覆管試料が破裂したときの油の飛散を防ぐために、石英製保護管を設置した。

2. 2. 3 圧力測定系

試料内圧を測定するために、上下部固定具にひずみゲージ式圧力変換器（共和電業製、PG-H2TH 型、容量 196.1MPa、固有振動数約 250MHz）を各 1 台取り付けた (Fig. 7)。圧力変換器からの信号は、増幅器（共和電業製、シグナルコンディショナ CDV-700A、応答周波数 500kHz）により増幅・処理し、ディジタル・データレコーダー（岩崎通信機器製、DS-9121、サンプリング速度 20M サンプル/s、10 ビット A/D コンバータ、4ch 同時測定）に収録する。圧力変換器は、電磁弁より上流側（ポンプ側）にも 1 台取り付け、蓄圧用高圧ホース内の圧力変化も測定できる。

2. 2. 4 試料加熱装置

試料の加熱には、赤外線イメージ炉（真空理工社製、RHL-E45N）を用いた。赤外線イメージ炉は、棒状赤外線ランプを熱源とし、反射板により赤外線を反射・集光し炉の中心軸近傍にある試料を加熱する。使用した赤外線イメージ炉は長さ 140mm の赤外線ランプ 4 本を有する。Fig. 6 に示すように、赤外線イメージ炉は高温試験実施時以外は試料セット位置より後方にあり、高温試験時には前方にスライドさせ石英製保護管の外から試料の加熱を行う。耐衝撃性に優れた石英管を用いるのは、試料破裂時に放出される油が赤外線ランプと接触し発火する可能性をなくすためである。万一石英製保護管が破損した場合でも、加圧媒体（高温試験用フェニルエーテル型合成油、発火点 885K）が発火する可能性は低い。高温試験における被覆管試料の軸方向及び円周方向の温度分布については、3. 2. 1 に述べる。

3. 特性試験結果

3. 1 室温での加圧

我が国の PWR で使用されている内径 8.36mm、外径 9.50mm のジルカロイ-4 管を用いて室温での加圧特性を調べた。用いた被覆管は、耐食性を改善するために規格の範囲内でスズの添加量を抑えたいわゆる低スズ・ジルカロイ-4（スズ含有量：1.2wt%）である。試料の長さは 160mm とした。加圧特性試験で測定した圧力変化を Fig. 9 に示す。このデータは、電磁弁を開放し試料加圧を行う前段の蓄圧ホース内圧力を 70 ~ 170MPa まで変化させた 4 試験の結果である。なお、試料の軸方向変形については拘束のない条件で試験

した。高圧条件で実施した 2 試験（蓄圧値 140 及び 170MPa）で試料が破損した。これらの試験では試料内圧がまず直線的に増大し、その後圧力上昇速度が減少しピーク値に至った。ピーク到達後に圧力は僅かに低下し、試料破損により圧力は大気圧まで急激に低下した。蓄圧ホース内圧力を 170MPa とした試験では 40ms 以内に、140MPa とした試験では 70ms 以内に圧力上昇はほぼ飽和した。したがって、高圧タンク内の圧力を高めることでより高い加圧速度が得られることになる。圧力上昇の飽和までの平均加圧速度は、それぞれの試験で 3.4 及び 1.9MPa/ms であった。また、試料が破損するまでの時間も、高圧タンク圧力が増大するにつれて短くなり、タンク圧力を 170MPa とした試験では、試料の加圧開始から破損までに要した時間は約 70ms であった。**Fig. 1 0 (a)** に加圧速度 1.9MPa/ms で加圧し破裂した試料の外観写真を示す。

蓄圧値を 70 及び 110MPa とした試験では、試料の塑性変形はほとんど見られなかった。しかし、試料加圧開始から圧力上昇速度の飽和までの圧力変化は、試料が破損した場合とほとんど相似であった。したがって、圧力の直線的增加から飽和に至る圧力変化は、本試験体系における固有の圧力応答と考えることができる。

水素を添加した被覆管試料を用いた高速加圧試験も行った。試料の水素濃度は 312wtppm であり、加圧速度は 1.9MPa/ms であった。**Fig. 1 0 (b)** に試験後の外観写真を示す。クラックが軸方向に伝播し、水素を添加しない試料に比べて長い破損開口が生じた。**Fig. 1 0 (c)** に NSRR パルス照射実験で破損した PWR 高燃焼度燃料棒の外観写真を示すが、水素添加試料の破損形態は高燃焼度燃料棒のパルス照射時破損形態に酷似したものである。このことは、本装置がパルス照射時の PCMI 破損を模擬できることを示すものである。

3. 2 620K での加圧

3. 2. 1 温度特性

被覆管試料の軸方向 4 位置に K タイプ熱電対をスポット溶接し試料温度の軸方向分布を調べた。**Fig. 1 1** に、熱電対の位置と温度の時間変化を測定した例を示す。4 本の熱電対のうち、熱電対 A 及び B は試料上端よりそれぞれ 30 及び 55mm、C は 80mm（試料長中間）、D は試料下端より 30mm の位置にある。**Fig. 1 1** に示した温度変化は、昇温速度を 1K/s とし 623K まで昇温した際に測定された 4 位置における温度である。なお、温度制御は C 位置にある熱電対を用いて行った。試料上半分にある A ~ C ではほぼ同じ速度で温度が上昇したが、試料の下方にある D では温度上昇速度は比較的小さい。C での温度がほぼ設定温度（623K）に達した時点で、B での温度が最も高く（635K）、A と C ではそれより約 10K 低く、D では約 50K 低い。A での温度の変動は、熱電対位置が流水を用いて冷却されている上部固定具に近いためと考えられる。設定温度到達後、A 及び B で温度がわずかに低下し逆に D で上昇するが、約 300s 後にはほぼ定常となった。このときの温度は、A: 618、B: 628、C: 623、D: 582K であった。これらの測定値から推定される試料温度の軸方向分布を **Fig. 1 2** に示す。軸方向温度分布は、熱電対 B を付けた位置近傍をピークとする分布である。試料上半分での温度差は 10K 程度であるが、試料下端では温

度が低く、最高温度部との差は約 50K である。

2. 2. 4 で記述したように、赤外線イメージ炉では、周方向 90 度おきに取り付けられた棒状赤外線ランプを熱源とし、反射板により赤外線を反射・集光し炉の中心軸近傍にある試料を加熱する。試料が比較的大きな場合には周方向に温度分布が生じる可能性がある。そこで、Fig. 1 1 に示した熱電対付き被覆管試料を回転させ固定方向を変えながら周方向の温度分布を測定した。その結果、赤外線ランプと正対する位置とこれより 45 度ずれる位置で被覆管試料の表面温度に最大 2K の温度差が認められた。

ジルカロイの強度は温度の上昇とともに低下することから、本試験装置の軸方向及び周方向温度分布の下で被覆管試料に対するバースト試験を行うと、赤外線ランプと正対する方向でかつ軸方向最高温度部（軸方向位置 B）で破裂が起こると予想される。各バースト試験で精度良く試料温度を測定し温度コントロールをするためには、位置 B に熱電対を固定するのが好ましい。しかし、熱電対の固定がバースト挙動に影響を及ぼす可能性がある。そこで、各バースト試験では軸方向位置 C（中間高さ）に熱電対を固定し温度コントロールを行い、Fig. 1 2 に示した軸方向温度分布より破裂位置の温度評価を行うこととする。

3. 2. 2 加圧特性

高温試験では増圧器の高圧側から試料までの加圧経路に高い発火点を持つフェニルエーテル型合成油を用いた。この油は一般の作動油に比べて動粘性が高く、体積弾性率が大きいために圧縮性が低い。本試験機の電動ポンプと増圧器を用いて加圧した場合、蓄圧ホース内に生じた圧力は 130 ~ 140 MPa であった（室温では 170 MPa 以上）。この蓄圧条件で、PWR 用低スズ・ジルカロイ-4 燃料被覆管に対する 620K でのバースト試験（軸方向無拘束）を行った。Fig. 1 3 に測定された試料内圧変化を示す。室温での特性試験から予想されるように、蓄圧ホース内の圧力が低い場合には試料内圧上昇速度が比較的小さい。さらに、圧力伝播速度は室温で使用した作動油（テラス K32）中よりも低いと考えられ、加圧開始からピーク圧力までの平均加圧速度は 0.2 MPa/ms（室温では最高 3.4 MPa/ms）であった。

Fig. 1 3 に示すように、電磁弁開放前の初期試料内圧を大気圧とした 3 回の試験では、加圧開始からバーストまでに要する時間は 400 ~ 800 ms までばらついた。バーストまでの時間をできるだけ短くまた安定させるために、試験前に試料を弾性変形の範囲で予加圧することとした。PWR 用ジルカロイ-4 被覆管に対するリング引張り試験で、降伏応力は引張り強さの 80 ~ 90% であることが示されている[7]。高速加圧バースト試験で測定されるピーク圧力を引張り試験での引張り強さに相当すると考えれば、この圧力の 80% 以下までの加圧であれば被覆管試料は塑性変形を生じないはずである。そこで、予加圧はピーク圧力（約 80 MPa）の 1/2 以下である約 30 MPa とした。30 ~ 35 MPa の予加圧をした後に高速加圧を行った結果を Fig. 1 4 に示す。得られた圧力変化は、大気圧より加圧した試験で得られた圧力変化の 30 MPa 以上の部分と一致した。すなわち、圧力応答において予加圧の影響は見られない。さらに、バーストまでの時間は 400 ~ 500 ms の範囲で安定した。Fig. 1 5 にバースト試験後の試料外観写真の例を示す。

3. 3 軸方向拘束条件下での加圧

上部試料固定具をロードセルに固定し、下部試料固定具（クロスヘッド）を支えるアクチュエータの圧力を十分大きな 20MPa として、軸方向拘束条件下での高速加圧バースト試験を行った。試料は PWR 用低スズ・ジルカロイ-4 燃料被覆管であり、試験温度は 620K である。**Fig. 1 6** に試験時に測定された試料内圧とロードセルで検出した軸方向荷重の時間変化を示す。本装置では、下部固定具を接続したクロスヘッドの位置も検出することができるが、加圧及び破裂時にクロスヘッド位置が変化しなかったこと、すなわち、本試験は軸方向に完全に拘束された条件で行われたことを確認した。

試料内圧は電磁弁開放後、平均約 0.2MPa/ms で上昇し、約 900s 後に破裂した。無拘束条件での試験 (**Fig. 1 4**) に比べて破裂までの時間が長くなった。ロードセルに働く荷重は、試験開始後まず圧縮側（試料にとっては引張側）に増大する。これは圧力増大に伴う軸方向荷重である。その後、ロードセルに働く荷重は引張り側に転じるが、これは試料の膨らみに対応するものである。破裂直後には、引張り荷重は急激に増大するが、これは破裂部が大きく開口するためであると考えられる。

4. おわりに

NSRR パルス照射実験を補完し軽水炉高燃焼度燃料棒の反応度事故時破損挙動に関する基礎的な知見を得るために、燃料被覆管内圧を急速に加圧できる試験装置を考案し製作した。

- UO_2 ペレット中の核分裂ガスの膨張が PCMI に強く関与することを考慮し、本装置では油圧を用いて被覆管に均一な負荷を与えることとした。
- また、NSRR 実験でのパルス幅に相当する短い時間で被覆管を加圧し破裂させるために、最大 170MPa まで予加圧した高圧系と被覆管試料とを電磁弁を用いて瞬時に接続する加圧方法を考案した。
- 製作した装置は、室温で最大 3.4MPa/ms の昇圧速度を達成し、未照射 PWR 用ジルカロイ被覆管が 70ms で破裂した。また、加圧経路にバイパスや流量調節弁を付加することによって、0.002 ~ 3.4MPa/ms の広い範囲で加圧速度を調整することができた。
- 本装置で試験した水素添加被覆管試料は、NSRR 実験で破損した高燃焼度燃料棒と類似の破損形態を呈したことから、本装置によりパルス照射時の PCMI 破損を十分に模擬できると考えられる。
- 加圧速度、温度、軸方向拘束条件を変えた予備試験を実施し、設計通りに装置が動作することを確認した。

参考文献

- [1] T. Fuketa, Y. Mori, H. Sasajima, K. Ishijima, and T. Fujishiro; Proc. CSNI Specialist Mtg. on Transient Behavior of High Burnup Fuel, Cadarache, France, Sept. 12-14, 1995, NEA/CSNI/R(95)22, 1996, pp. 59-85.
- [2] T. Fuketa, H. Sasajima, Y. Mori, and K. Ishijima; J.Nucl.Mater. 248(1997)249-256.
- [3] T. Fuketa, H. Sasajima, Y. Tsuchiuchi, Y. Mori, T. Nakamura, and K.Ishijima; Proc. 1997 Int. Topical Mtg. LWR fuel Performance, Portland, Oregon, Mar. 2-6, 1997, pp. 669-676.
- [4] F. Schmitz, Ch. Gonnier, and J. Papin; Proc. 24th Water Reactor Safety Information Mtg., Bethesda, Maryland, Oct. 21-23, 1996, NUREG/CP-0157, Vol.1, 1997, pp.107-130.
- [5] J.M. Frizonnet, J.P. Breton, H. Rigat, and J. Papin; Proc. 1997 Int. Topical Mtg. LWR fuel Performance, Portland, Oregon, Mar. 2-6, 1997, pp. 685-692.
- [6] Annual report of Hot Laboratory of JAERI, report JAERI-M 93-237 (1993)
- [7] K. Kitano, private communication

Table 1 Properties of penta-phenyl-ether (RP-54, Matsumura oil research corp.)

| Temp. (K) | Viscosity (cSt) | Temp. (K) | Density (g/ml) |
|-----------|-----------------|-----------|----------------|
| 275.5 | pour point | 313 | 1.18 |
| 313 | 294 | 373 | 1.14 |
| 373 | 12.8 | 477 | 1.06 |
| 477 | 2.1 | 644 | 0.93 |
| 644 | 0.65 | | |

| Temp. (K) | Vapor pressure (Torr) | Temp. (K) | Cubical expansion (1/°C) |
|-----------|-----------------------|-----------|--------------------------|
| 552 | 1.33E+2 | 288 | 6.6E-6 |
| 602 | 1.33E+3 | 373 | 7.1E-4 |
| 660 | 1.33E+4 | 477.4 | 8.0E-4 |
| 723 | 1.01E+5 | | |

| Temp. (K) | Compression modulus (MPa) |
|-----------|---------------------------|
| 323 | 2.55E+3 |
| 373 | 2.21E+3 |
| 473 | 1.59E+3 |
| 573 | 1.03E+3 |
| 673 | 6.90E+2 |

| Ignition temperature (K) |
|--------------------------|
| 885 |

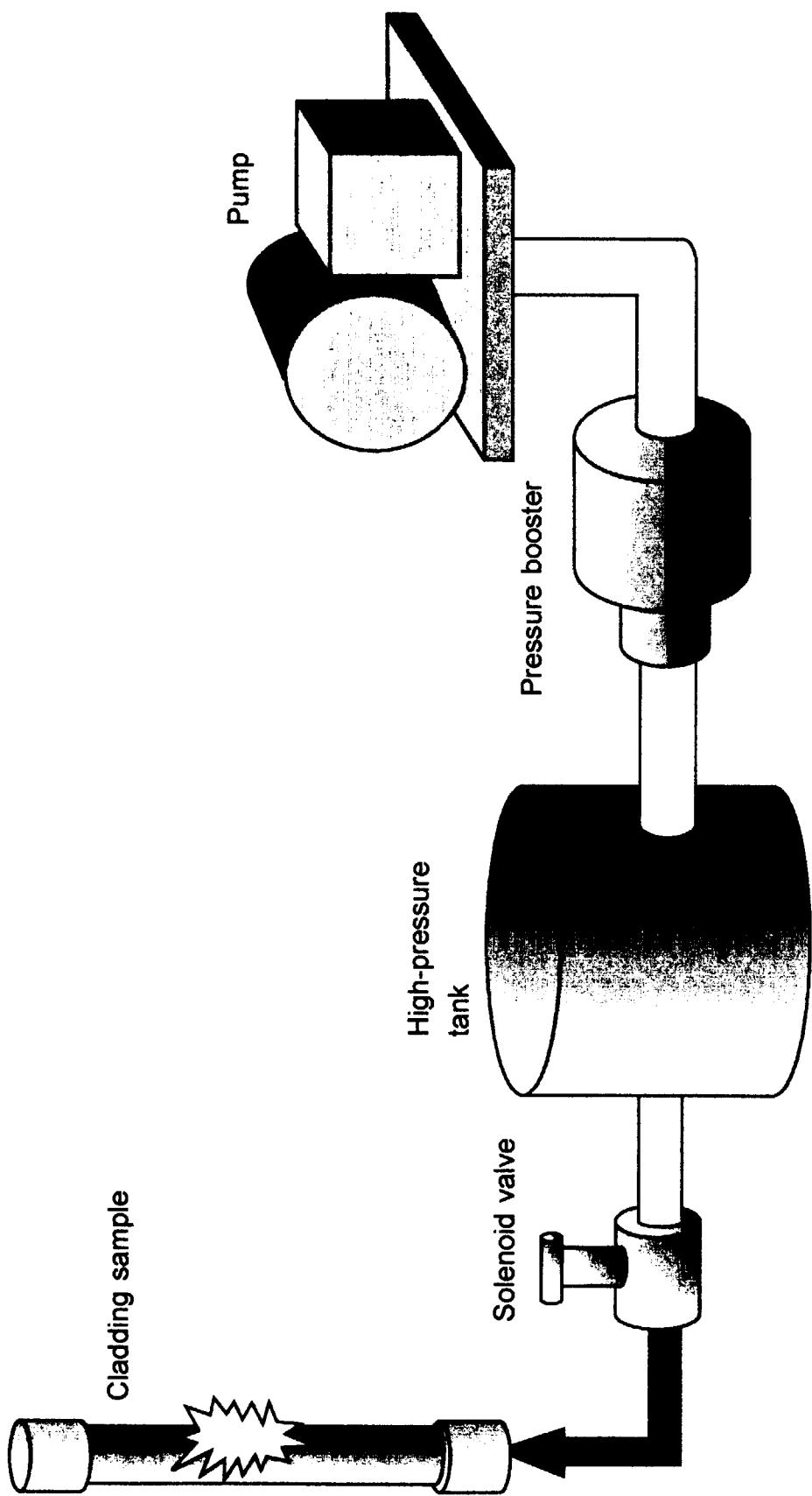


Fig.1 Design concept of test apparatus to achieve high pressure and high pressurization rate

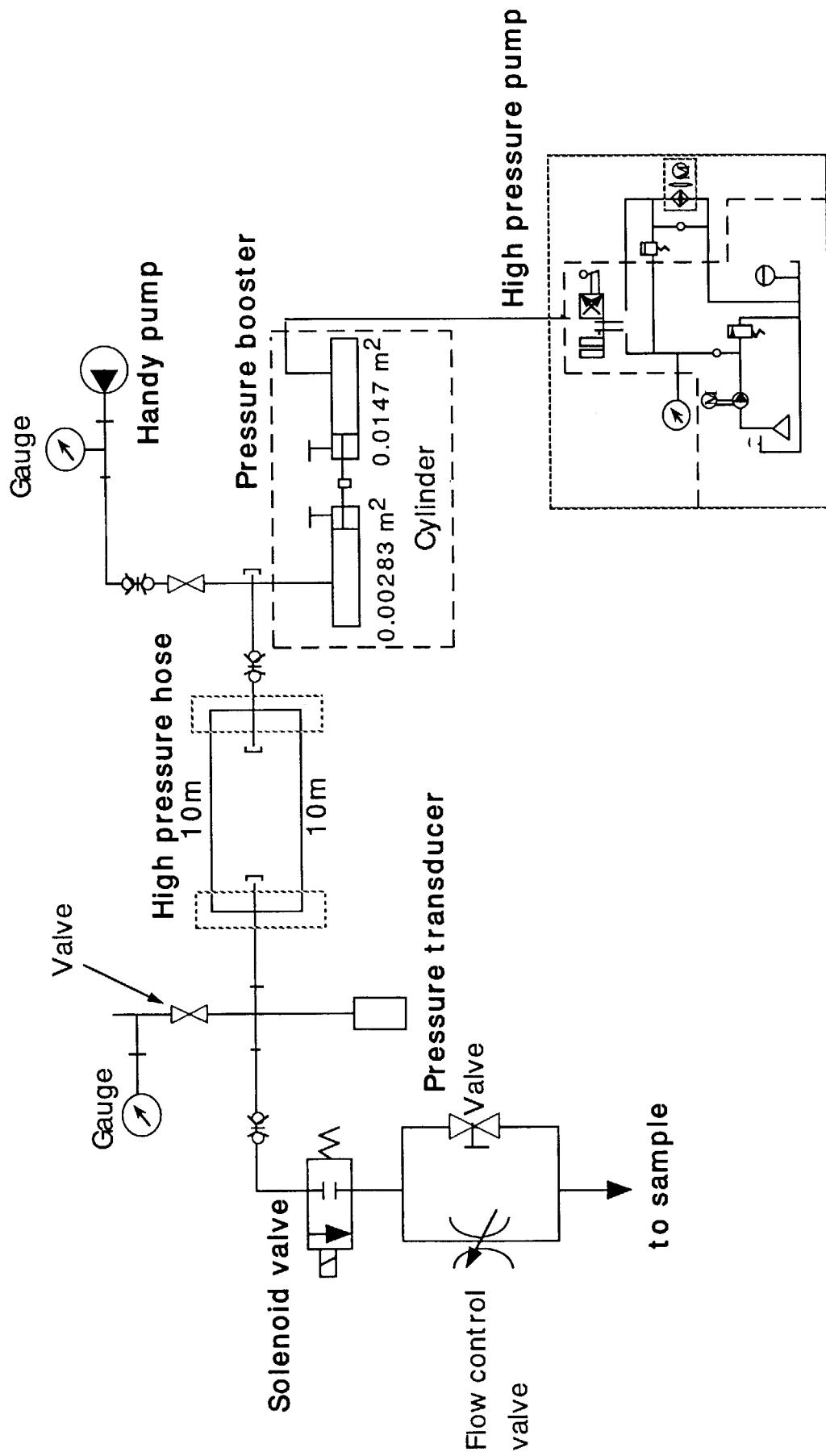


Fig.2 Systematic diagram of high pressure system

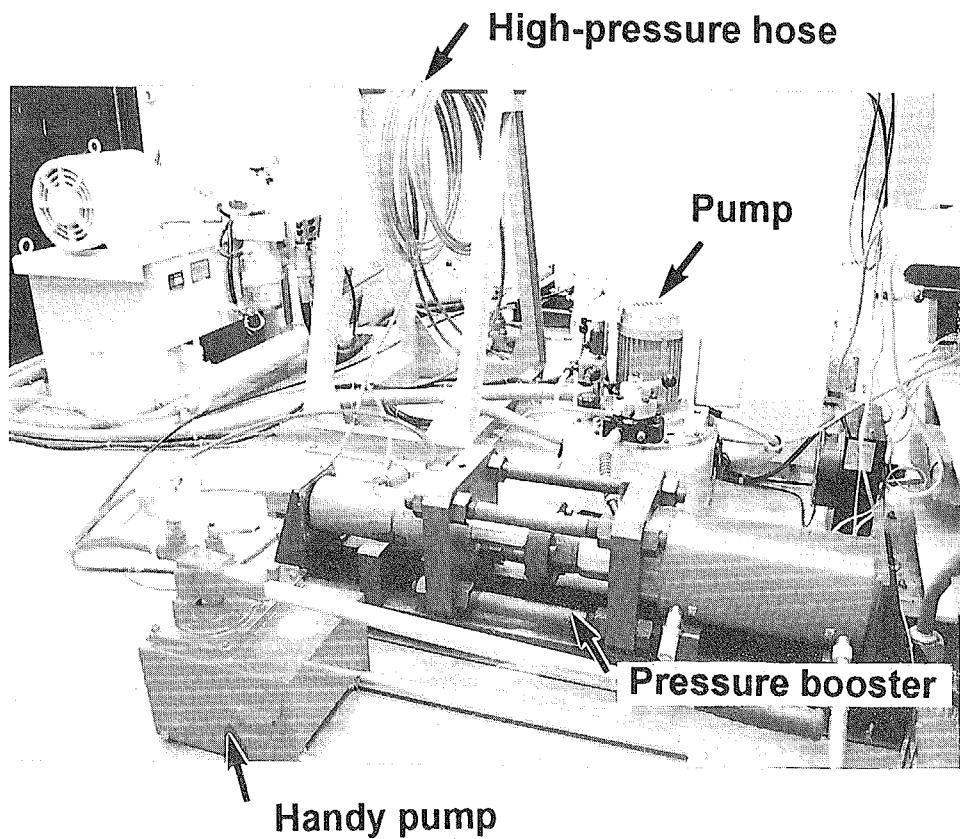


Fig.3 pressurization system consisted of pump, pressure booster, and high-pressure hose.

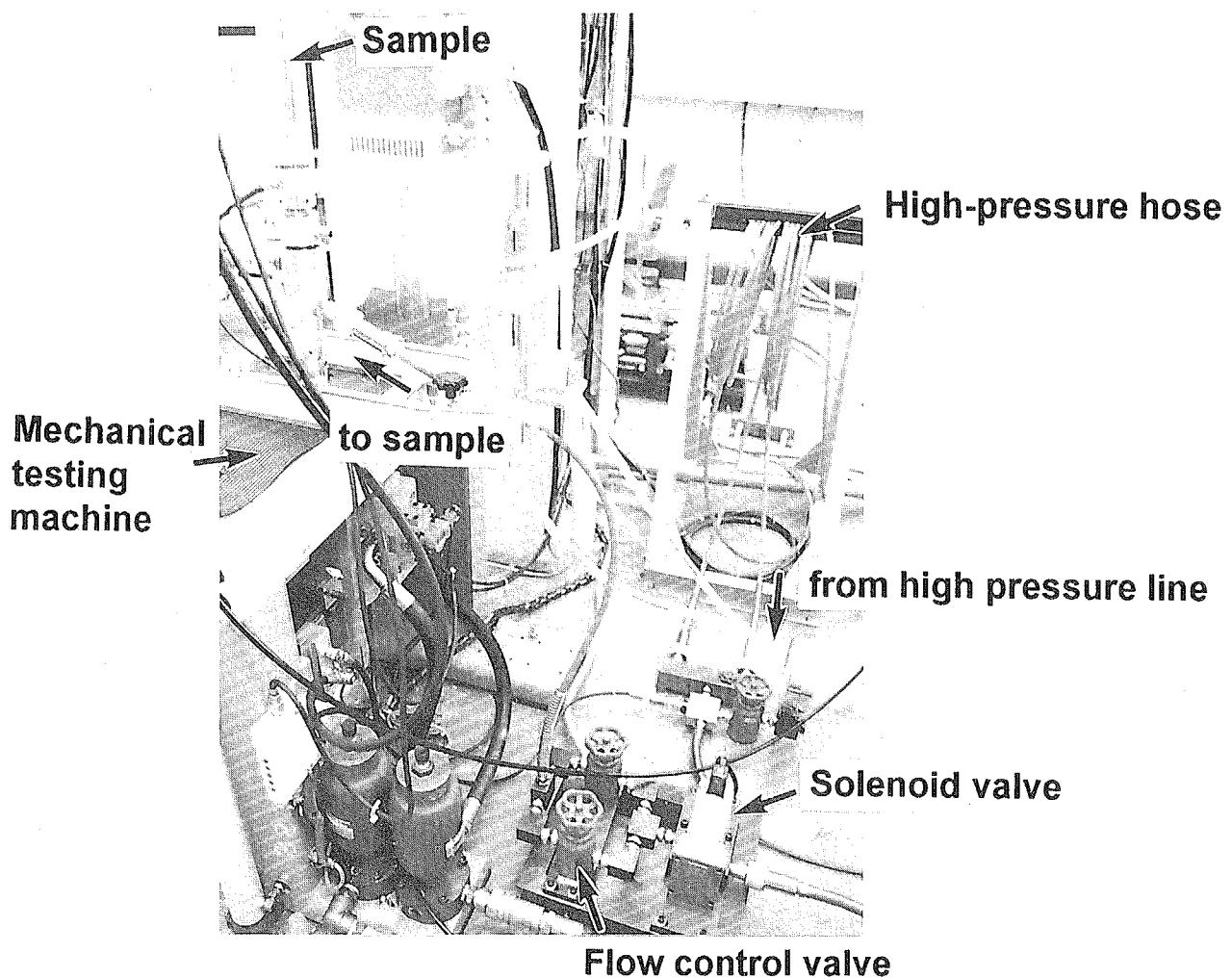


Fig.4 Solenoid valve and flow control valve equipped between high pressure line and sample.

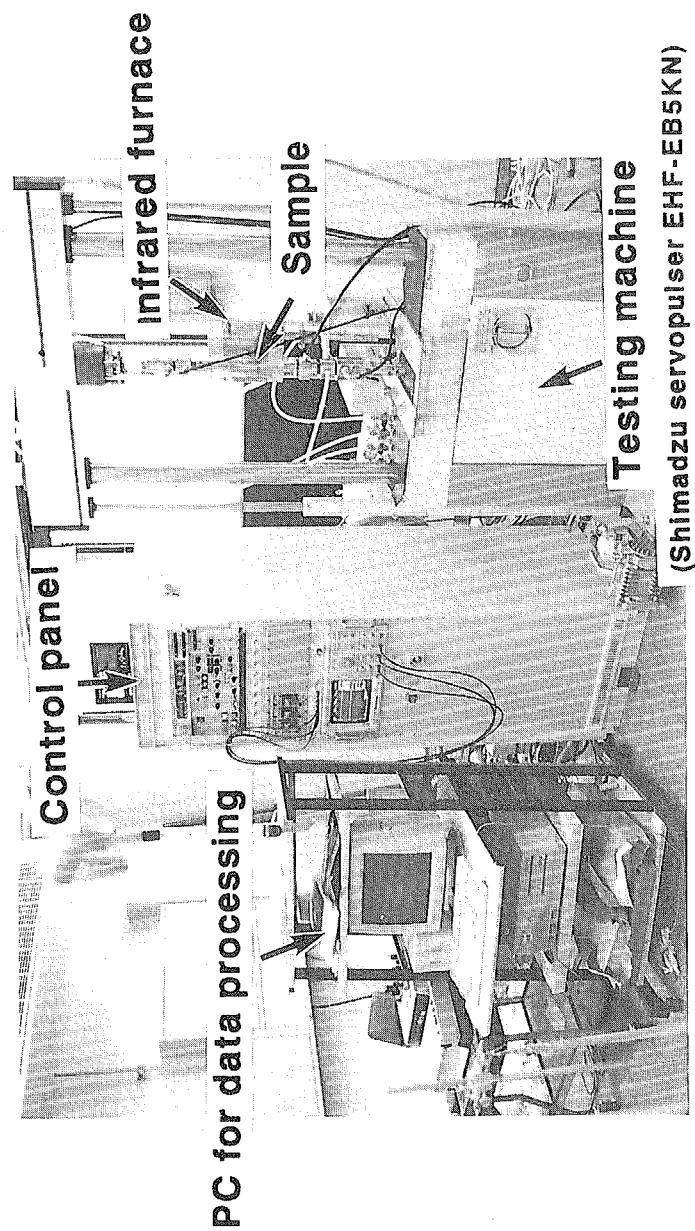


Fig.5 Whole view of the burst test apparatus

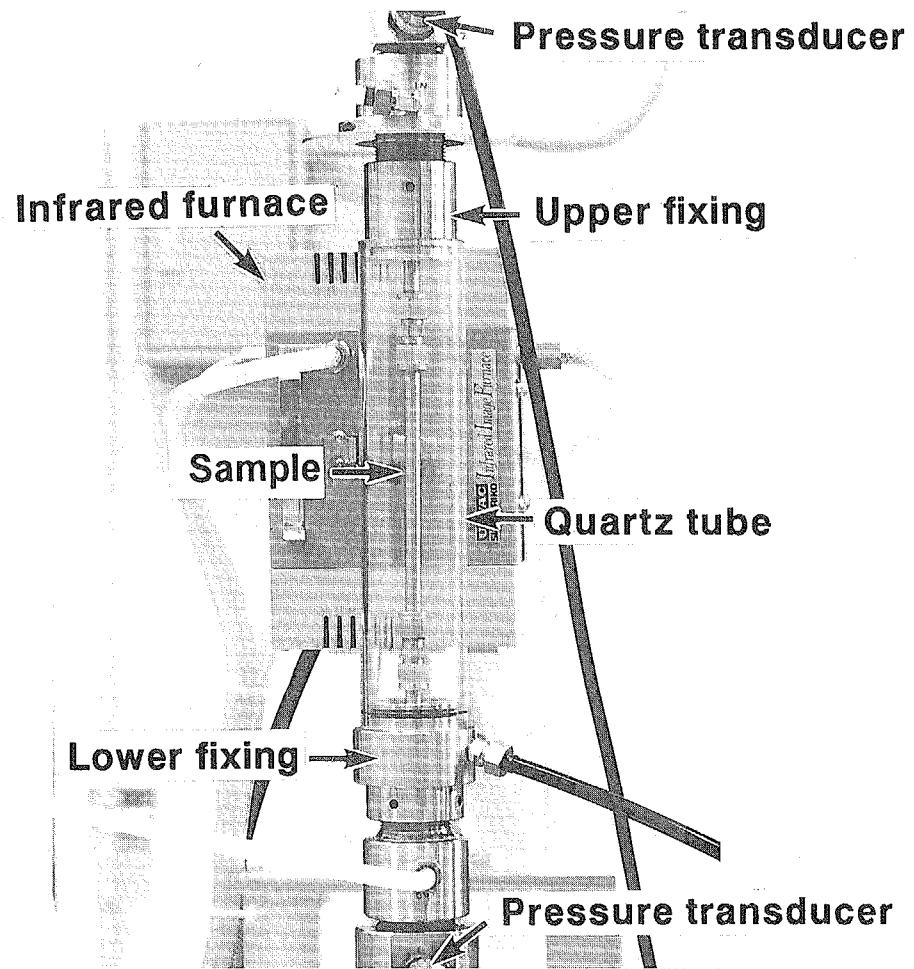


Fig.6 Sample setup.

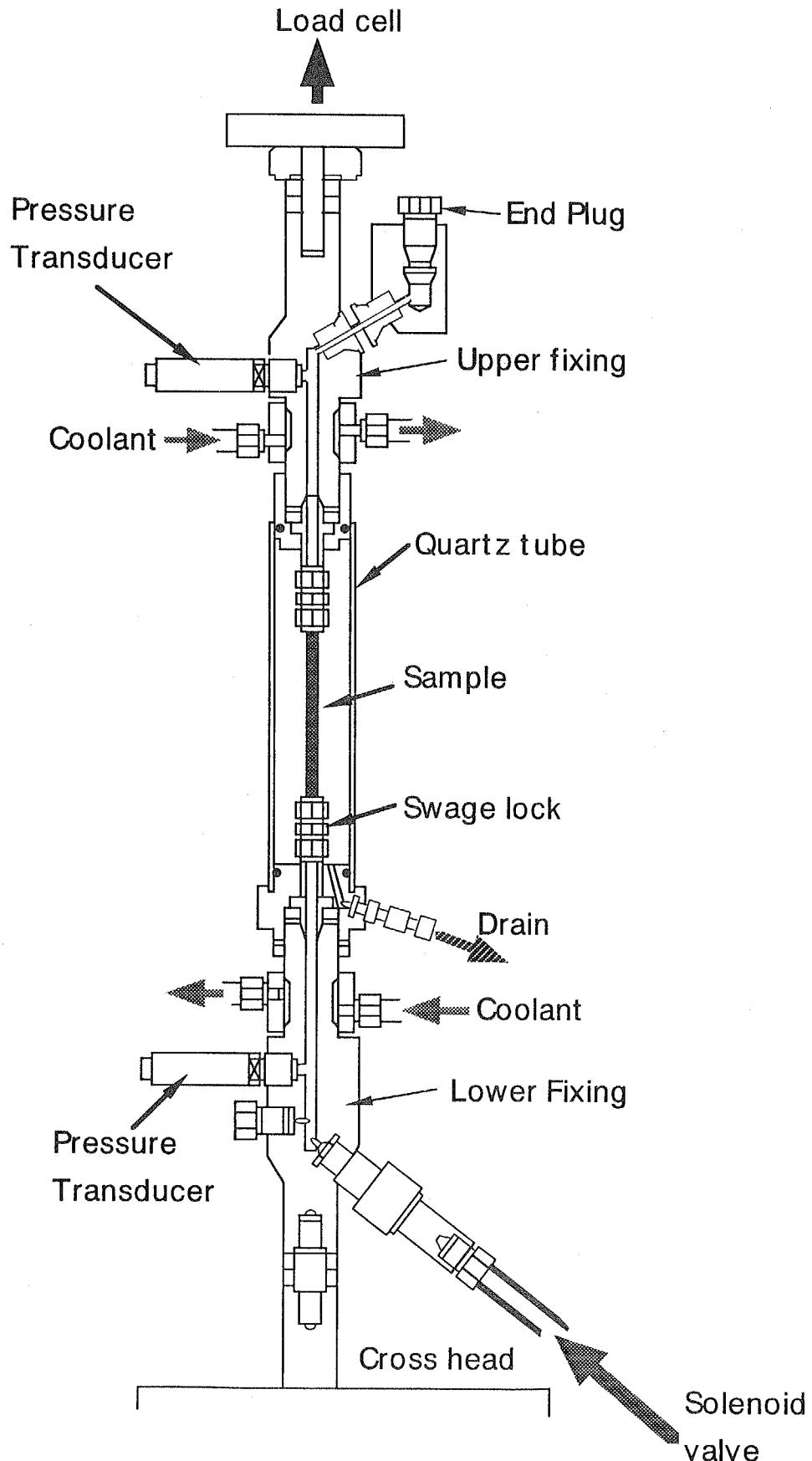


Fig.7 Cross section of sample fixing.

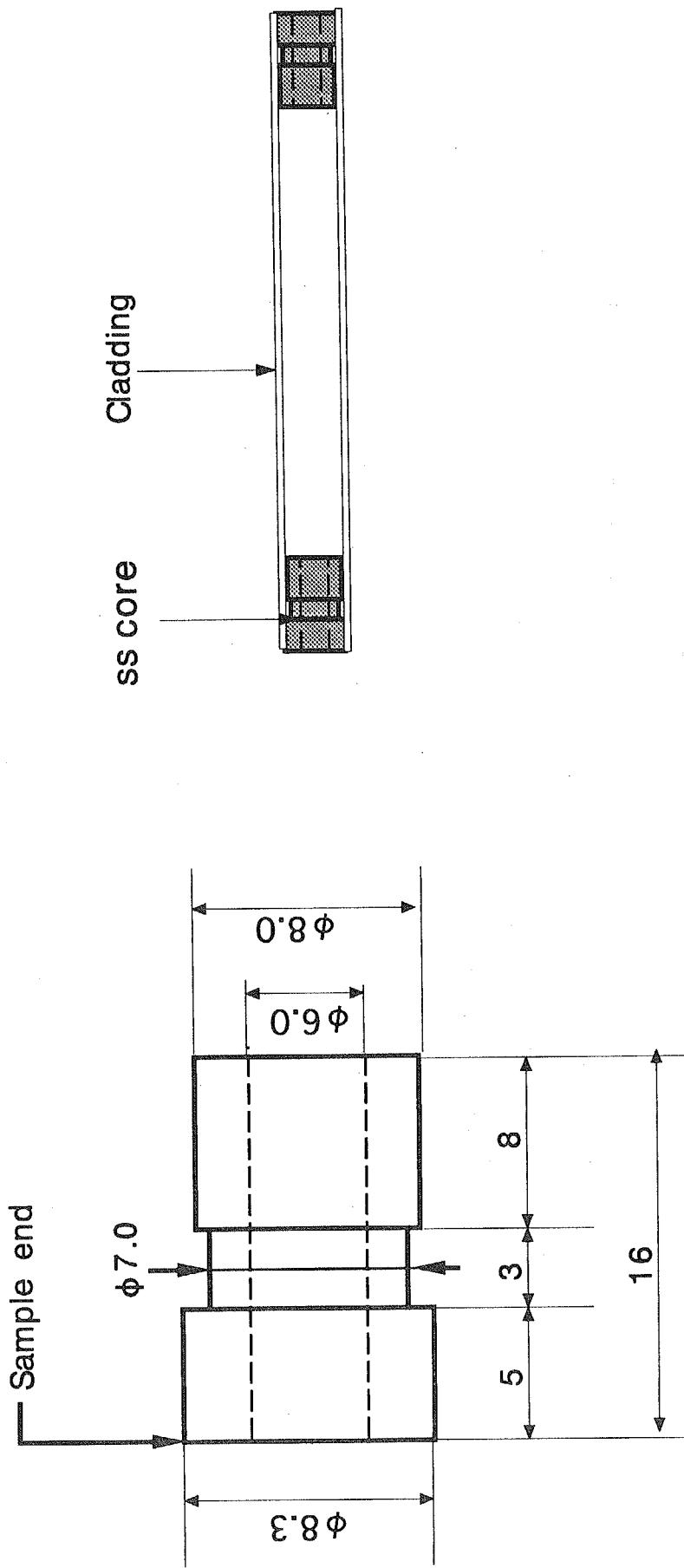


Fig.8 ss core for tight connecting between cladding sample and swage lock.

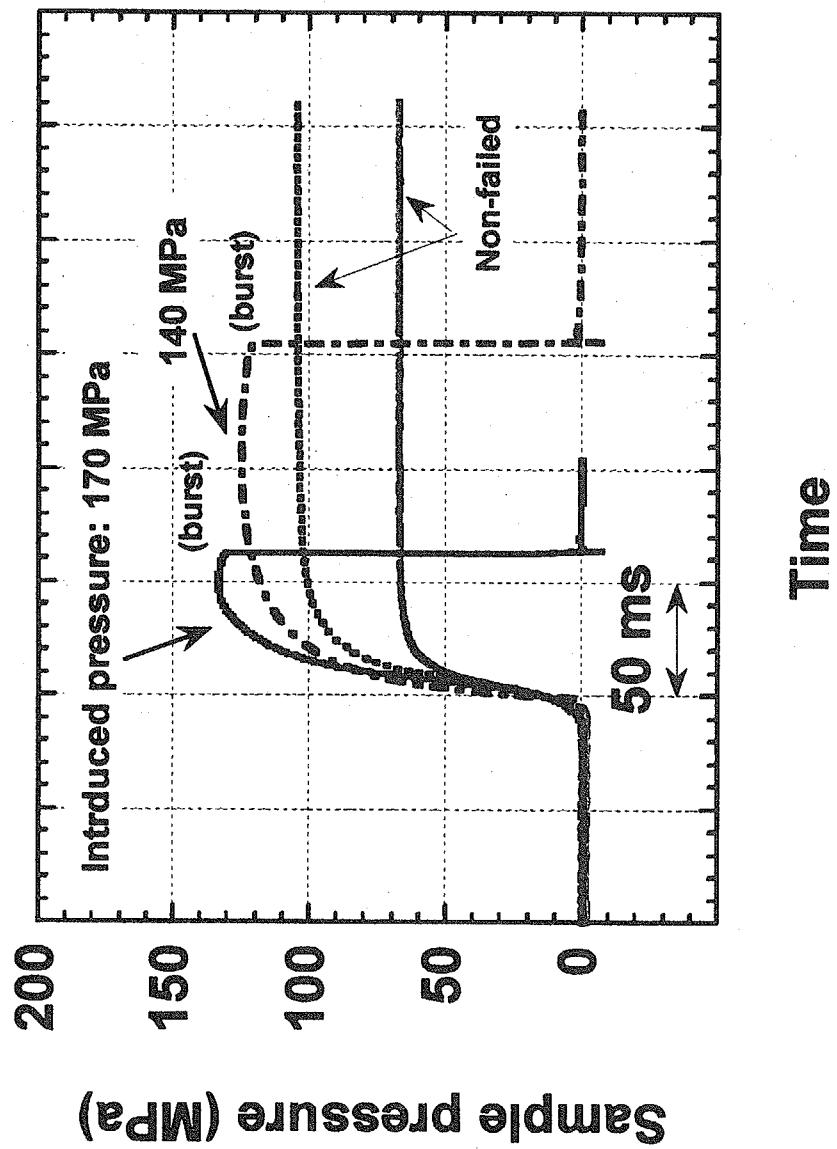
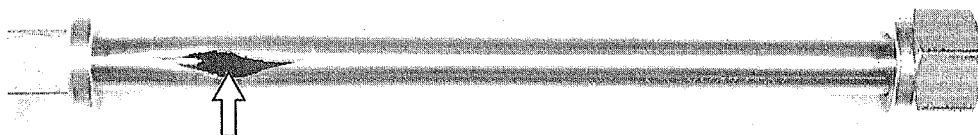


Fig.9 Pressure changes measured in the burst tests on non-hydrided PWR cladding samples.
Accumulated pressure of 70 to 170 MPa was introduced to the samples for a very short time.

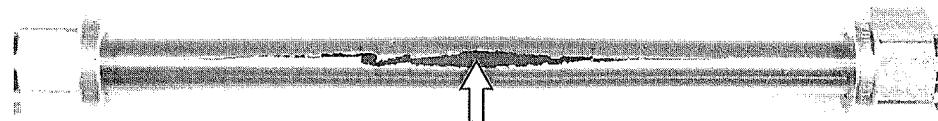
Burst test

(a) non-hydrided sample



Failure opening

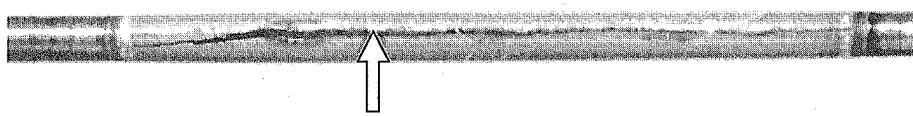
(b) hydrided sample (312 wt.ppm)



Failure opening

NSRR experiment

(c) pulse-irradiated PWR high burnup fuel rod



Failure opening

Fig.10 Post-test appearances of (a) non-hydrided and (b) hydrided PWR cladding samples failed in the room temperature burst tests (pressurization rate : 1.9 MPa/ms) and (c) high burnup fuel rod failed the NSRR pulse-irradiation experiment [1-3]

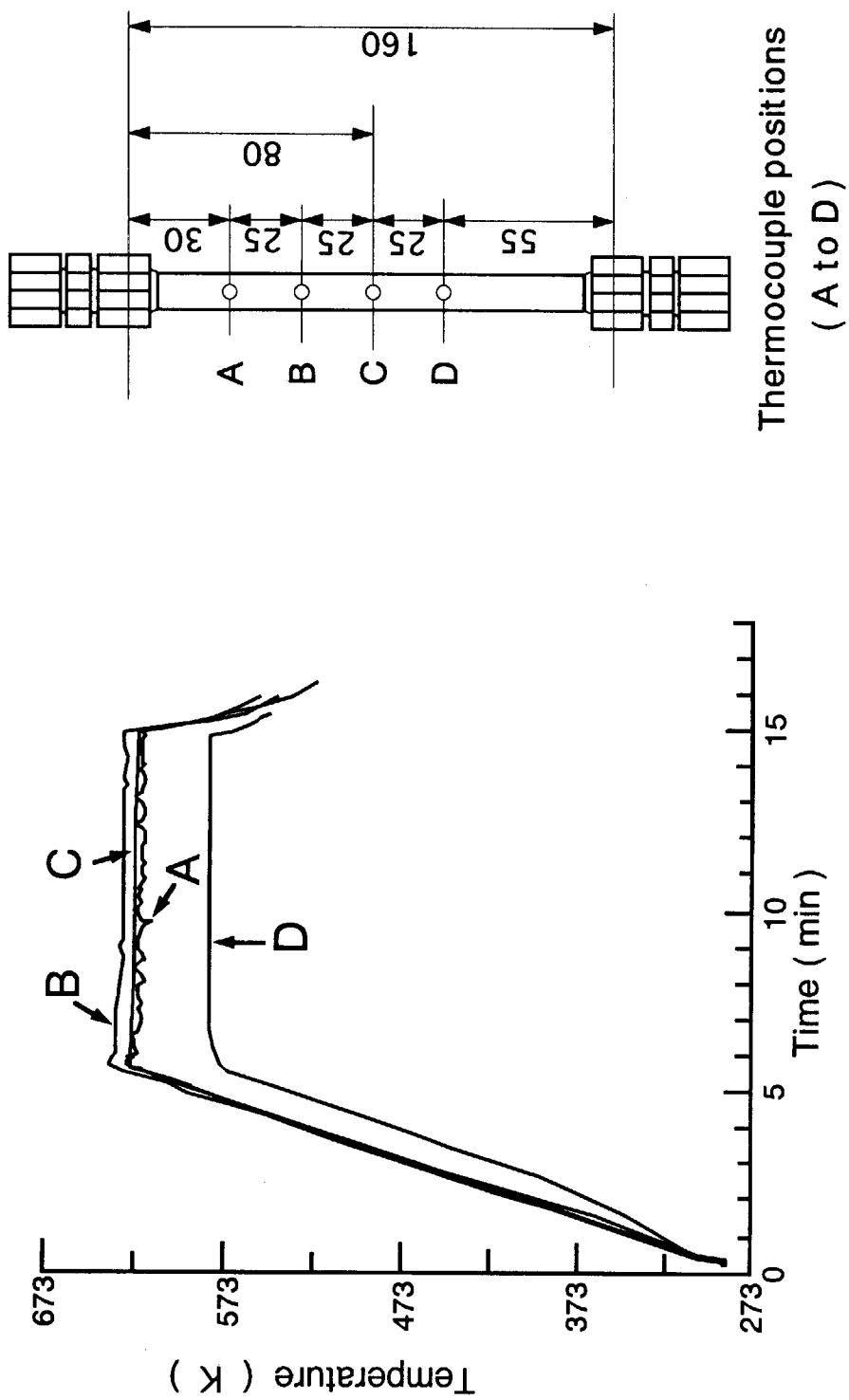


Fig.11 Temperature changes measured at different axial position during heating to 620 K.

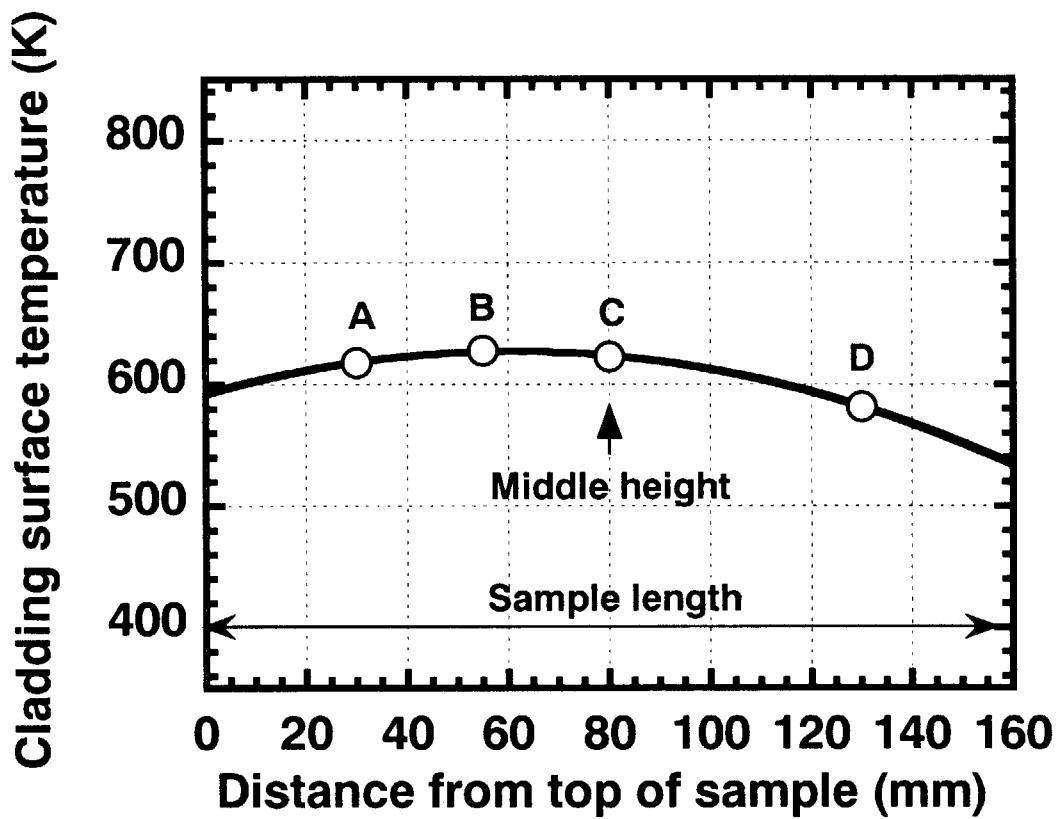


Fig.12 Axial distribution of cladding surface temperature
(The temperature at the position "C" was controlled at 623 K.)

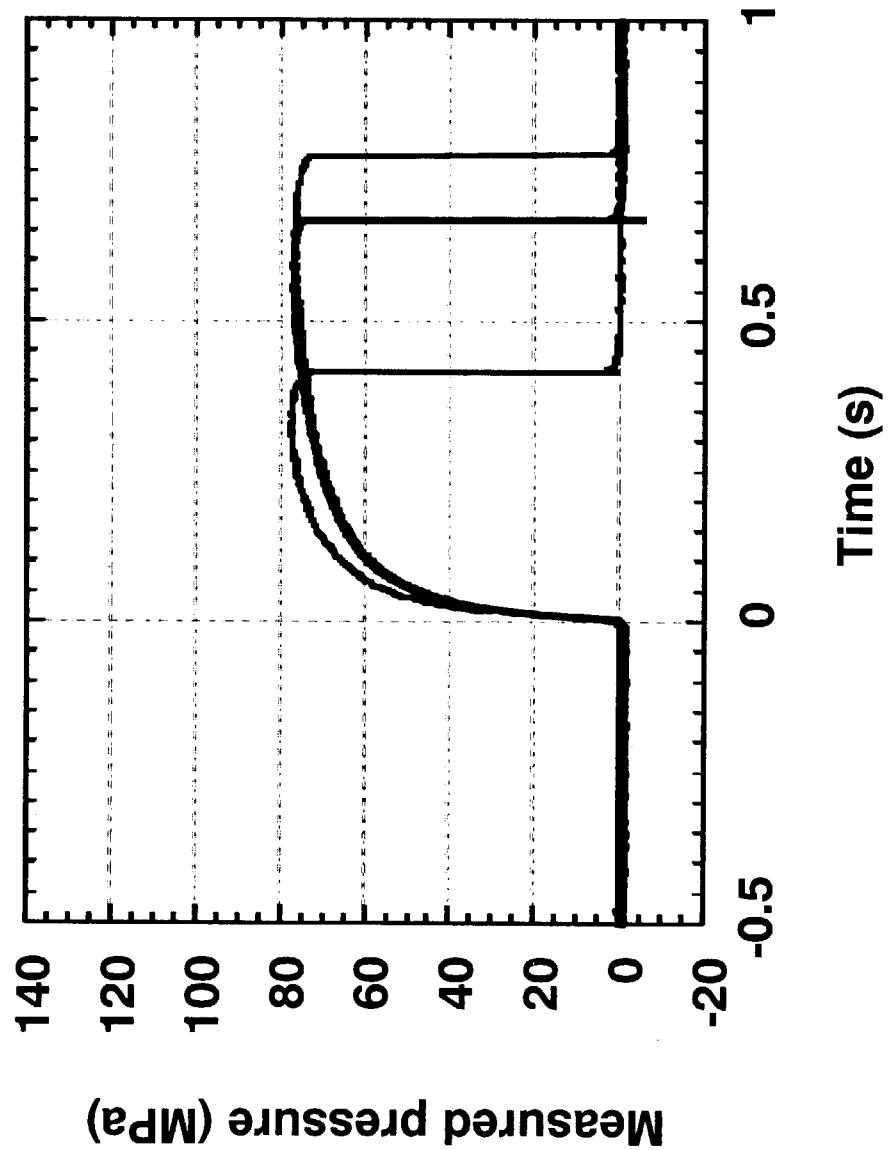


Fig.13 Different pressure responses in 620 K burst tests on non-hydrided PWR cladding samples
(Initial internal pressure of samples = 0.1 MPa)

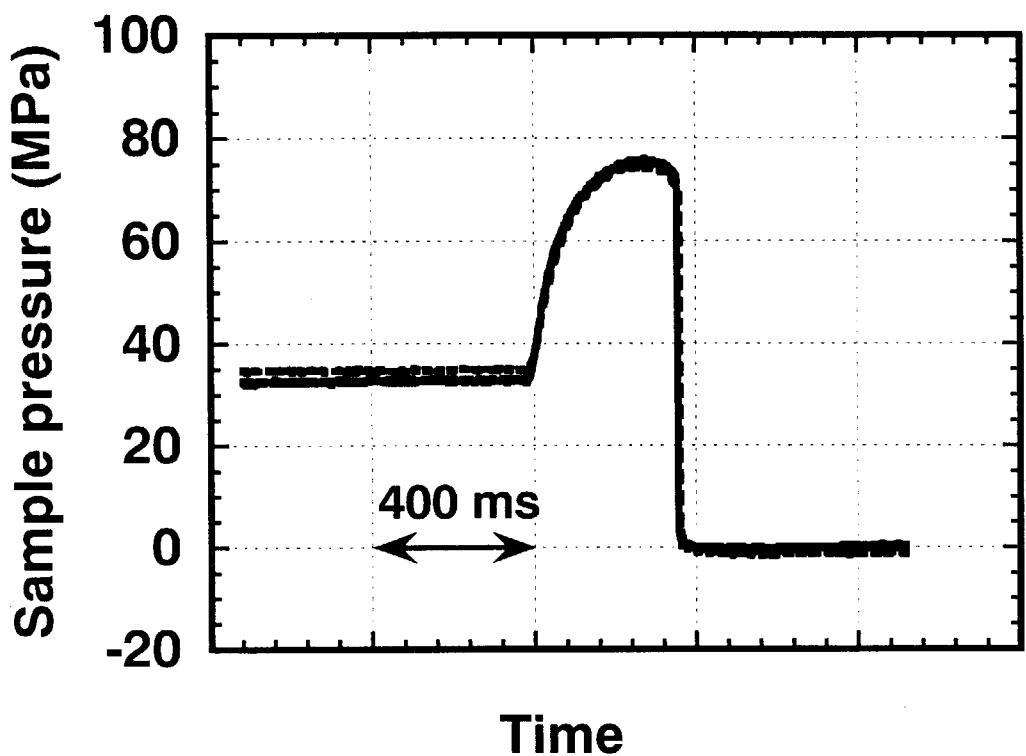
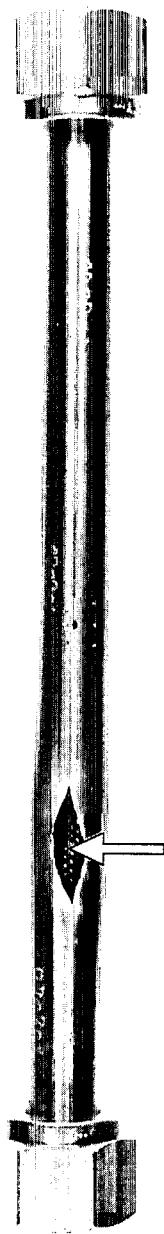


Fig.14 Pressure changes in 620 K burst tests on two non-hydrided PWR cladding samples
(Initial internal pressure of samples = 30 to 35 MPa)



Failure opening

Fig.15 Post-test appearance of non-hydrided PWR cladding failed in 620 K burst test
(Pressurization rate : 0.2 MPa/ms)

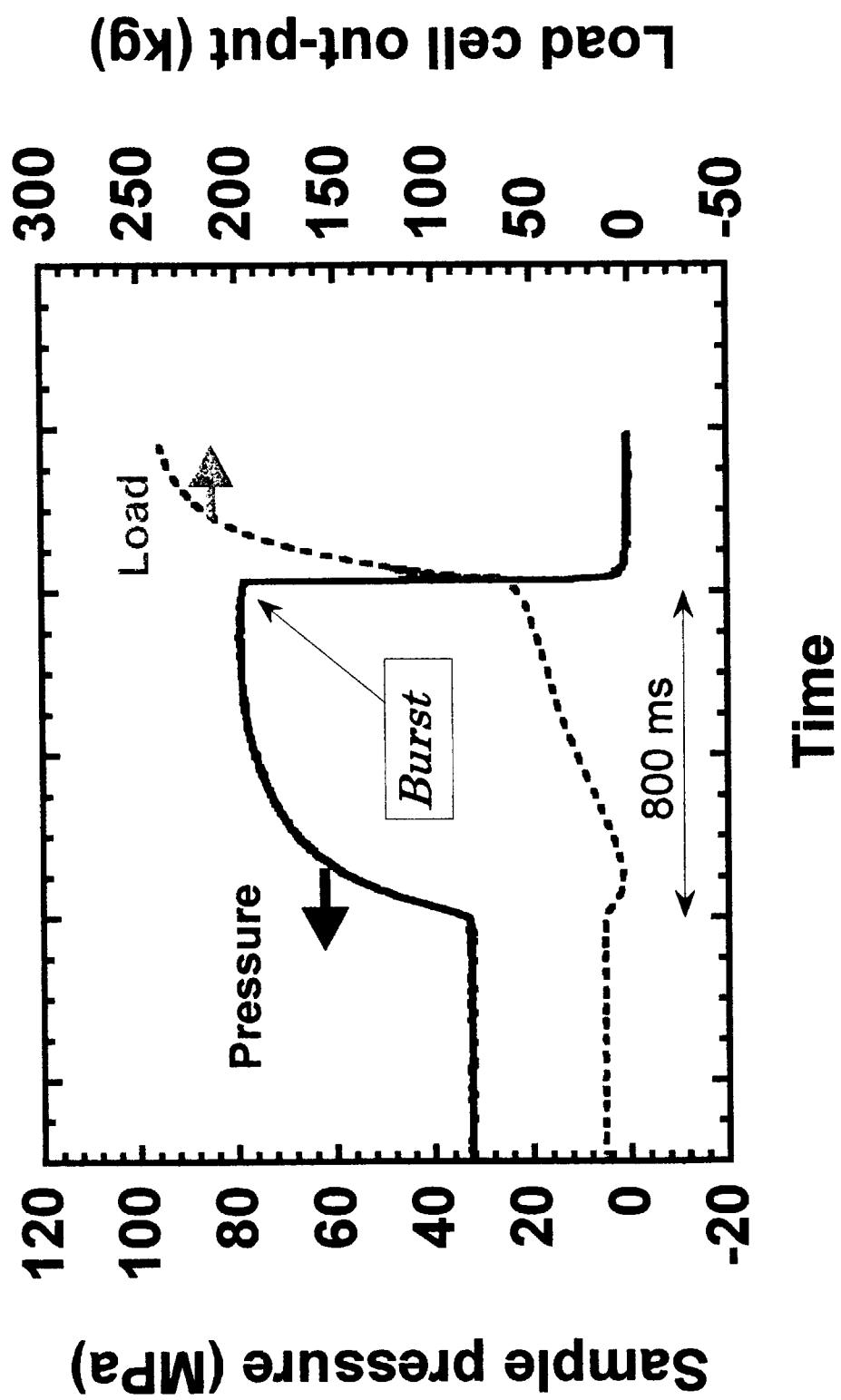


Fig.16 Transient history of sample pressure and load cell out-put in 620 K burst test under axially restraint condition (Sample : Non-hydrided PWR cladding tube)

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 名称 | 記号 |
|-------|--------|-----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質量 | モル | mol |
| 光度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|-------------|--------|----|---------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s ⁻¹ |
| 圧力、応力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| エネルギー、仕事、熱量 | パスカル | Pa | N/m ² |
| 上率、放熱束 | ジュール | J | N·m |
| 電気量、電荷 | ワット | W | J/s |
| 電位、電圧、起電力 | クーロン | C | A·s |
| 静電容量 | ボルト | V | W/A |
| 電気抵抗 | アーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V·s |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束照度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 放射能 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 吸収線量 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 線量当量 | グレイ | Gy | J/kg |
| | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名 称 | 記 号 |
|--------|-----------|
| 分、時、日 | min, h, d |
| 度、分、秒 | °, ', " |
| リットル | l, L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

1. 表1—5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

| 力 | N(=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---------|-------------------------|----------|-----|
| 1 | 0.101972 | 0.224809 | |
| 9.80665 | 1 | 2.20462 | |
| 4.44822 | 0.453592 | 1 | |

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

| 圧力 | MPa(=10 bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | | | | |
| 力 | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322 × 10 ⁻⁴ | 1.35951 × 10 ⁻³ | 1.31579 × 10 ⁻³ | 1 | 1.93368 × 10 ⁻² |
| | 6.89476 × 10 ⁻³ | 7.03070 × 10 ⁻² | 6.80460 × 10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J(=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal(計量法) | Btu | ft · lbf | eV | 1 cal = 4.18605 J(計量法) | |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|--|
| | | | | | | | | = 4.184 J(熱化学) | |
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ | | |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ | | |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ | | |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS(ボアズ) | |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ | = 75 kgf·m/s | |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ | = 735.499 W | |
| | 1.60218 × 10 ⁻¹⁹ | 1.63377 × 10 ⁻²⁰ | 4.45050 × 10 ⁻²⁶ | 3.82743 × 10 ⁻²⁰ | 1.51857 × 10 ⁻²² | 1.18171 × 10 ⁻¹⁹ | 1 | | |

| 放射能 | Bq | Ci | 吸収線量 | Gy | rad | 照射線量 | C/kg | R | 線量当量 | Sv | rem |
|-----|------------------------|-----------------------------|------|------|-----|------|-------------------------|---|------|----|-----|
| | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ | | 0.01 | 1 | | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 | | 1 | |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 | | | | | | | | | |

被覆管高速加圧バースト試験装置の設計と製作