



JP0150002

JAERI-Research

2000-046



水素添加ジルカロイー4 燃料被覆管の 620Kにおける高速加圧バースト試験

2000年12月

永瀬 文久・大友 隆・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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

水素添加ジルカロイー4燃料被覆管の620Kにおける高速加圧バースト試験

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

永瀬 文久・大友 隆・上塙 寛

(2000年 9月12日受理)

反応度事故条件下における高燃焼度軽水炉燃料棒の破損挙動を調べるために、水素を添加した被覆管に対する高速加圧バースト試験を620Kで実施した。本試験は、NSRRパルス照射時に高燃焼度燃料棒で生じるペレットと被覆管との間の急激な機械的相互作用（PCMI）を模擬するものである。水素濃度と半径方向の水素化物分布の異なる非照射ジルカロイー4被覆管の内圧を、最大加圧速度0.2MPa/msで上昇させ破裂させた。試験の結果、被覆管は昇圧開始後400ms以内に破裂した。水素化物が肉厚中に均一に分布する水素添加被覆管では、水素添加が破損挙動に及ぼす影響は小さかった。一方、高燃焼度燃料被覆管を模擬し被覆管外周部に層状に水素化物を集積させた場合には、被覆管は試験の比較的早い段階に破裂し、破裂圧力は相対的に低下した。また、水素化物が集積する層の厚さが100μmを超える被覆管では、周方向残留ひずみ量は非常に小さく1.1～2.8%であった。本試験の結果は、620Kにおいても、被覆管外面への水素化物集積がパルス照射時の破損挙動に重要な役割を果たすことを示している。

High pressurization rate Burst Test of Hydrided Zircaloy-4 Fuel
Cladding at 620 K

Fumihisa NAGASE, Takashi OTOMO 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 12, 2000)

High pressurization rate burst tests of artificially hydrided fuel claddings have been performed at 620 K in order to investigate failure behavior of the high burnup fuel rod under a reactivity initiated accident condition. The present test simulates rapid pellet/cladding mechanical interaction that occurs in the high burnup fuel rod during a pulse irradiation in the NSRR. Non-irradiated Zircaloy-4 cladding with various hydrogen concentrations and radial hydride distributions were pressurized to rupture with pressurization rate up to 0.2 MPa/ms. As a result of the tests, the claddings failed in 400 ms after the pressure increase initiated. The small influence of hydriding on the failure behavior was seen in the cladding in which hydrides distributed uniformly through the cladding thickness. On the other hand, the cladding ruptured in the earlier stage of the test and the burst pressure was relatively low, when hydrides were accumulated in cladding peripheral region as observed in high burnup cladding. Residual hoop strain was as low as 1 to 3% in the cladding with the hydride layer of 100 μm or thicker. Accordingly, the present test results indicate a significant role of hydride layer on the failure behavior of the high burnup fuel during a pulse irradiation even at an elevated temperature of 620 K.

Keywords : High Burnup, Zircaloy-4, Fuel Cladding, RIA, NSRR, Pulse Irradiation, PCMI, Failure Behavior, Hydride, Burst Test

目次

| | | |
|----|-------------------|----|
| 1. | はじめ | 1 |
| 2. | 試験方法 | 2 |
| | 2. 1 試料 | 2 |
| | 2. 2 試験装置と試験方法 | 4 |
| | 2. 3 加熱特性 | 4 |
| | 2. 4 加圧特性 | 5 |
| 3. | 試験結果と考察 | 5 |
| | 3. 1 高速加圧試験 | 5 |
| | 3. 2 低速加圧試験 | 8 |
| | 3. 3 周方向残留ひずみ量の測定 | 8 |
| 4. | まとめ | 11 |
| | 参考文献 | 12 |

Contents

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Introduction | 1 |
| 2. | Experimental Procedure | 2 |
| | 2. 1 Sample | 2 |
| | 2. 2 Test Apparatus and Test Procedure | 4 |
| | 2. 3 Heating Characteristic | 4 |
| | 2. 4 Pressurization Characteristic | 5 |
| 3. | Result and Discussion | 5 |
| | 3. 1 High Pressurization Rate Test | 5 |
| | 3. 2 Low Pressurization Rate Test | 8 |
| | 3. 3 Measurement of Residual Hoop Strain | 8 |
| 4. | Summary | 11 |
| | Reference | 12 |

This is a blank page.

1. はじめに

燃料サイクルコストの低減化などのために軽水炉燃料の高燃焼度化が進められている。高燃焼度化は燃料の健全性を確認した上で段階的に認可されているが、安全審査においては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。これは、高燃焼度化すなわち炉内滞在期間の長期化によって、被覆管の水側腐食量が増大し、腐食に伴って発生する水素の一定割合（10～20%）が被覆管中に吸収されるので水素吸収量も増加し、さらに中性子照射量も増加し脆化が進むためである。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する可能性がある。

高燃焼度燃料の反応度事故（RIA）時挙動に関する実験として、フランス・カダラッシュ研究所のCABRI-Rep Na 実験計画[1-3]と原研の NSRR 実験計画[4-6]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。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。この結果は、RIA 指針における燃焼の進んだ燃料に対する暫定的な破損しきい値を再検討する必要性を示唆するものであった。NSRR/HBO 実験で破損した高燃焼 PWR 燃料では、発熱部（燃料有効長）全長に渡る長い破裂開口が生じた[4-6]。また、破損位置の径方向断面では、被覆管外面（酸化膜直下）の水素化物密度の高い領域で脆性的破損が観察された[4-6]。このような破損形態はパルス照射で破損した高燃焼度燃料に特徴的な形態であり、未照射燃料や低燃焼度燃料においては見られなかつたものである。パルス照射時に破損した燃料では被覆管の延性低下が著しく、水素化物密度が高い被覆管外面近傍を起点とし被覆管が破損し、発生したクラックが停止せず軸方向に伸びたものと予想される。また、NSRR パルス照射により破損した燃料棒（約 130mm のセグメント）は、全長約 4m の燃料棒の上部、すなわち被覆管の水側腐食量と水素吸収量が相対的に大きい軸方向位置から採取されたものである[7]。このこともパルス照射による燃料棒破損が水側腐食量や水素吸収量に強く関連付けられることを示している。

高燃焼度燃料の RIA 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などの多くの制約がある。また、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（600K 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ることか

ら、NSRR 実験データの実炉適用性についての限界が指摘されている。

そこで、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 実験結果を補完することを目的とした炉外分離効果試験として、ジルカロイ被覆管の高速加圧バースト試験を実施している。高速加圧バースト試験は、高燃焼度燃料のパルス照射時の破損が、急激なペレットの膨張に起因するペレット／被覆管機械的相互作用 (PCMI) による点に着目した試験である。この試験では、水素吸収量、試験温度、加圧速度などを試験パラメータとし、これらの因子が被覆管の破損挙動に及ぼす影響を明らかにする。最初の実験として、室温で水素吸収ジルカロイー 4 被覆管（非照射）に最大 1.9MPa/ms の高速で内圧を負荷する高速バースト試験を実施した[8,9]。この室温試験により、

- 水素吸収被覆管では、破裂開始部から軸方向にクラックが進展し、長い破裂開口が形成される。このような破損形態は、NSRR パルス照射実験で破損した高燃焼度 PWR 燃料の破損形態に非常に近い。
- 高濃度の水素吸収と被覆管外面への水素化物偏析は、破損形態、バースト圧力、破損部の周方向残留ひずみなどの室温バースト特性に影響を及ぼし、特に被覆管外面への水素化物偏析はバースト圧力と周方向残留ひずみ量を明確に低下させる。したがって、破損時の被覆管温度が低かった NSRR/HBO 試験でも、高濃度の水素吸収と被覆管外面への水素化物偏析が被覆管破損に関与した可能性が高い。
- 一方、加圧速度が破損挙動に及ぼす影響は比較的小さい。

ことを明らかにした。

一般に、水素吸収がジルカロイの機械特性に及ぼす影響は温度の上昇に伴い低減し、原子炉運転時の温度では高い水素濃度を有する被覆管でもその延性の低下は小さいとされる[10]。したがって、被覆管温度上昇により、NSRR パルス照射実験や室温での高速加圧バースト試験で見られた被覆管破損挙動に及ぼす水素吸収の影響も変化することが十分に考えられる。そこで、原子炉運転時の被覆管温度に近い 620K において、水素吸収被覆管試料に対する高速加圧バースト試験を実施した。

2. 試験方法

2. 1 試 料

試験に用いた被覆管はわが国の PWR で使用されている内径 8.36mm、外径 9.50mm のジルカロイー 4 管で、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・ジルカロイー 4 (スズ含有量 : 1.3wt%) である。初期の水素濃度は約 10wtppm である。長さ 160mm に切出した管に、水素－アルゴン混合気中で水素添加処理を施した。処理温度

及び時間は、水素濃度と水素化物分布によって異なり、それぞれ 570~670K 及び 1~6h の範囲にあった。後述するように、本研究では破裂により生じた周方向最大変形位置で得られた情報を基に被覆管試料の破損挙動についての議論を行う。そこで、バースト試験後に周方向最大変形位置近傍から採取した被覆管試料に対してガス分析法を用いた水素濃度測定を実施し、この水素濃度を被覆管試料の水素濃度（代表値）とした。作製した水素添加試料の水素濃度範囲は、200~1050wtppm であった。なお、バースト試験に用いた被覆管試料と同一バッチで処理した比較試料を詳細に水素分析した結果では、水素濃度の被覆管軸方向における変化は±30%以内に収まっている。

本研究では、水素化物の半径方向分布が破損挙動に及ぼす影響を調べるために 2 種類の水素添加被覆管試料を作製した。一つは水素化物を被覆管肉厚中に均一に分布させた被覆管試料であり、他は高燃焼度 PWR 燃料被覆管において一般に見られる水素化物の析出状態[7]、すなわち外表面の酸化膜直下に偏析した状態を模擬した被覆管試料である。2 種類の被覆管試料の径方向切断面における水素化物析出形態を Fig.1 に比較して示す。Fig.1(a) に示す試料では肉厚中に概ね均一に水素化物が分布しているが、Fig.1(b) に示す高燃焼度 PWR 燃料被覆管を模擬した試料では外表面から約 100μm の範囲に水素化物が集積している。水素化物が集積した領域を、以下では「水素化物リム」と呼び、水素化物リムを有する試料を「水素化物リム試料」と呼ぶことにする。また、水素化物が均一に分布する試料を「均一水素化試料」と呼ぶ。

以下の方法で水素化物リムの局所濃度を評価した。

- (1) 被覆管試料の外面から水素化物リムを機械的に除去する。
- (2) 水素化物リムを有したままの被覆管試料及び水素化物リムを除去した被覆管試料の水素濃度をガス分析法により測定する。すなわち、水素化物リムを含む被覆管試料の平均水素濃度と、内側の水素化物密度の低い領域の水素濃度を測定する。
- (3) 断面組織写真から測定しておいた水素化物リム部の厚さと (2) で測定した 2 つの水素濃度から水素化物リム部の局所水素濃度を評価する。

8 試料に対して行った水素分析と評価結果を Table 1 にまとめた。表には、試料の平均水素濃度、水素化物除去後の被覆管内側の水素濃度、水素化物リムの厚さ及び評価した水素化物リムの局所水素濃度を示す。試料の平均水素濃度は 232~978wtppm まで約 4 倍に変化しても、被覆管内側の水素濃度は 120~209wtppm の範囲にありその変化は比較的小さかった。評価した水素化物リムの局所濃度及び水素化物リム厚さと、試料の平均水素濃度の関係を Fig.2 にプロットした。水素化物リムの厚さ (○) は試料の平均水素濃度の増大に伴い厚くなるが、高い水素濃度範囲では厚さの増大は 150~170 μm 程度で飽和している。水素化物リムでの局所水素濃度 (●) も、試料平均水素濃度の増大に伴い増大する。ただし、試料中平均水素濃度が最も高い試料 (1033wtppm) を除けば、大部分の試料での水素化物リムの局所水素濃度は 1000~2000wtppm の範囲にある。水素化物リムでの水素濃度は、試料平均の約 3 倍であるが、水素化物密度の低い被覆管内側領域 (100~200wtppm) の約 10 倍に達する。

2. 2 試験装置と試験方法

試験に用いたバースト試験装置については別報[8,11]において詳しく報告したので、ここでは試験装置の概略のみを示す。**Fig.3**に示すように、試験装置は、被覆管試料を保持するための試料固定具及び材料試験機、高圧ポンプ、増圧器、高圧ホース及び電磁弁から構成される加圧系、赤外線加熱炉などからなる。被覆管試料の下端は、下部固定具により材料試験機に固定するとともに加圧系に接続した。これに対し、被覆管試料上端側は上部固定具に接続することで圧力系の閉じた末端となっている。試験では、作動油を増圧器下流側から被覆管試料まで充填した後、まず電磁弁を閉じたまま加圧系の圧力を高め（最高 196MPa）、その後電磁弁を開放することで、短時間のうちに被覆管試料内圧を上昇させることができる。試験中の被覆管試料内圧の変化は、被覆管試料の上下端近傍に取り付けた周波数 250kHz の圧力セルを用いて測定した。なお、電磁弁を通らず被覆管試料と増圧器・ポンプを直接結ぶバイパス系や電磁弁の下流に設けた流量調整バルブにより、被覆管試料加圧速度を調整することが可能である。室温での試験[8,9]には圧力媒体として一般の耐摩耗性作動油（ISO32）を用いたが、620K 試験においては安全性を考慮し高い発火点（885K）を持つフェニルエーテル系合成油（松村石油研究所製、RP-54）を用いた。

Fig.4に被覆管試料取り付け部を示す。スウェージロックを用いて被覆管試料を上下固定具に接続する。下部固定具は試験機クロスヘッドに固定されるが、上部固定具は軸方向について固定・非固定が選択できる。今回の試験では被覆管試料上端部を固定しない非拘束条件を選択した。ただし、被覆管試料には上部固定具の重量約 3kg が軸方向に対する圧縮力として作用する。被覆管破裂時の作動油の飛散を防ぐための覆いとして、被覆管試料外周位置に透明石英製保護管を設置した。620K 試験においては、図の被覆管試料後方に見える縦2分割型の赤外線加熱炉を前方にスライドさせ石英製保護管の外側から被覆管試料を加熱した。加熱速度は 1 K/s であり、試料中の軸方向温度分布が定常となる[11]のに必要な約 900 秒間保持した後、バースト試験を実施した。

バースト試験後に被覆管試料の外観を観察・写真撮影した後、膨れ破裂により被覆管直径の増大が最大となった軸方向位置で試料を軸方向に垂直（径方向）に切断し、断面のミクロ組織観察や画像解析処理による周方向残留ひずみの測定を行った。

2. 3 加熱特性

Fig.5に被覆管試料表面での軸方向温度分布の例を示す。軸方向温度分布は被覆管試料上端より 50mm の位置にピークを持つ。被覆管試料の中間高さでの温度を 620K とした場合、被覆管試料上半分の温度差は比較的小さい（図中 A～C 点の温度差は 10K 以下）。一方、試料の下半分では急激に温度は下降し、ピーク温度部と被覆管試料下端近く（D 点）の温度差は約 50K である。試験装置の加熱特性の詳細は別報[11]を参照されたい。ジルカロイの強度は温度上昇に伴い低下するので、ピーク温度位置でバーストが起こると予想される。そこで、被覆管試料のバースト挙動に影響を与えないよう、予想されるバースト位置から離れた被覆

管試料の中間高さに熱電対をセットし、バースト部の温度は予備試験から得られた軸方向温度分布 (Fig. 5) から評価した。被覆管試料温度測定にはシースタイプK熱電対を用いたが、熱電対先端部をタンタル箔 ($5 \times 5\text{mm}$ 、 0.05mm 厚) で覆い、タンタル箔を被覆管試料表面にスポット溶接し熱電対先端部を被覆管試料上に密着させた。本試験に用いた赤外線加熱炉は、周方向 90 度おきに取付けられた 4 本の棒状ハロゲンランプを光源とし、炉の中心に集光し加熱を行う。非常に小さな試料であれば周方向の均温性は良好であるが、試料が大きくなるにつれて若干の周方向温度変化が生じる。予備試験で測定された被覆管試料表面での周方向温度変化は約 2 K であり、4 本のハロゲンランプと正対する位置で相対的に高くなる傾向があった。

2. 4 加圧特性

耐摩耗性作動油 (ISO32) を加圧媒体として用いた場合、加圧系に蓄えられる圧力は 196 MPa に達したが、フェニエーテル系合成油を用いた場合には、加圧系の蓄圧は約 130 MPa にとどまった。フェニエーテル系合成油の体積弾性率が一般の耐摩耗性作動油に比べ大きいためであると考えられる。

加圧系の蓄圧を 130 MPa とし、水素添加処理を施していない被覆管試料（以下では非水素添加試料と記述する）を用い試料内の圧力応答を調べる予備試験を行った[11]。初期試料内圧を 0.1 MPa (大気圧) とした場合、加圧開始からバーストまでの時間に最大 2 倍程度のばらつきが生じた。一方、被覆管強度に影響を与えないジルカロイの弾性変形の範囲 (約 30 MPa) で予加圧を行った結果、Fig. 6 に示すようにバーストまでの時間が比較的短く約 350 ms で安定した。そこで、本試験では、被覆管試料の初期内圧を約 30 MPa まで予め高めた後、高圧 (130 MPa) を導入し被覆管試料をバーストさせた。高速加圧試験開始から最高圧力までの平均加圧速度は約 0.2 MPa/ms であり、室温試験での最高加圧速度約 3.4 MPa/ms より小さい。

3. 試験結果と考察

3. 1 高速加圧試験

水素濃度と水素化物分布の異なる被覆管試料のバースト特性を、高速加圧試験（加圧速度 約 0.2 MPa/ms）により調べた。試験に供した被覆管試料の試料番号、水素濃度、水素化物分布を Table 2 に示す。後述するように、バースト時の圧力は 65～73 MPa の範囲にあり、昇圧開始からバーストまでの時間は 150～500 ms であった。Fig. 7 に破裂した被覆管試料の外観写真を示す。Fig. 7 (a)～(c) は、それぞれ、非水素添加試料、均一水素化試料（水素濃度 364 wtppm）、水素化物リム試料（同 455 wtppm）の外観写真である。また、比較のために、

室温試験で破裂した均一水素化試料（水素濃度 312wtppm）の外観写真[8]も図中 (Fig.7(d)) に示す。620K で破裂した非水素添加試料では、長さ 15~20mm の開口が生じた。破損開口が生じた軸方向位置近傍では、明確な膨れが観察された。2 種類の水素添加試料においても、破損開口の形状は非水素添加試料のものと類似しており、外観上、水素吸収の影響は小さい。Fig.7 (d) に見られるように、水素添加試料を室温で破裂させた場合、破裂位置で生じたクラックが瞬時に軸方向に伝播し、軸方向に長い破損開口が生じた。620K においてはジルカロイの延性増大により、軸方向クラック伝播距離が短くなったと考えられる。ただし、水素化物リム試料では破損開口部の両端で 10mm 以下の軸方向クラック伝播が認められ、開口部の軸方向長さも 25mm 程度と非水素添加試料に比べて長かった。

Fig.8 に水素添加試料に対する高速加圧試験で測定された試料内圧の時間変化を示す。Fig.8 (a) では、水素濃度 194~355wtppm の均一水素化試料に対する試験で得られた圧力変化（実線及び一点鎖線）を示す。図には、比較のために、非水素添加試料に対する試験で得られた圧力変化（点線）も加えた。試料内圧は一旦ピーク値に達した後わずかに低下し、破損に伴って急激に減少した。昇圧開始から破損までの時間は 350~500ms であった。非水素添加試料を含む全試料で圧力カーブはほぼ一致した。Fig.8 (b) に、3 本の水素化物リム試料に対する試験で測定された圧力変化を示す。これらの水素化物リム試料の水素濃度は、455、602、1033wtppm であった。3 本の試料は、均一水素化試料に比べ、いずれも短い時間（加圧開始後 150~280ms）で破損した。室温試験においても、水素化物リムを有する試料が加圧開始後比較的短い時間で破損するのが観察されている[8,9]。本測定結果は、620K においても水素化物リムが破損挙動に影響を及ぼすことを示している。なお、均一水素化試料に比べ水素化物リム試料の水素濃度が高いが、Fig.2 に示すように、被覆管内面の水素濃度は 120~210wtppm であり、本実験の結果には試料の平均水素濃度ではなく水素化物リムが影響を与えていていると考えるべきである。

Fig.8 に示したように、一般に試料内圧は一旦ピーク値に達した後わずかに低下し、破損に伴って急激に減少する。ピーク後の圧力低下は、主に試料の変形に伴う肉厚減少に起因すると考えられる。したがって、被覆管の耐破損強度に関する比較は、破損直前の圧力ではなく、測定された最高圧力を用いて行うべきであろう。Table 2 中に、高速加圧試験（加圧速度約 0.2MPa/ms）で得られた破損直前の試料内圧（バースト圧力）、最高内圧、最高内圧から計算した周方向応力をまとめて示す。周方向応力の計算には、薄肉管の円周方向応力算出に適用される次式を用いた。

$$\sigma_h [\text{MPa}] = P [\text{MPa}] \cdot R_i [\text{mm}] / t [\text{mm}]$$

ここで、 σ_h は周方向応力、 P は内圧、 R_i は被覆管内半径、 t は被覆管肉厚である。非水素添加試料の最高内圧は 74.3~76.1MPa であるのに対し、均一水素化試料の最高内圧は 71.9~73.7MPa であった。対応する周方向応力はそれぞれ、545~558MPa、527~540MPa であった。したがって、均一水素化試料の最高内圧と最大周方向応力は、非水素添加試料に比べ、最大で約 4% 小さかった。また、水素化物リム試料の最高内圧も非水素添加試料に比べ小さく、最も高い水素濃度を有する試料で約 8% の低下が見られた。Fig.9 に最高内圧を水

素濃度の関数としてプロットした。図には、後述する低速加圧試験(加圧速度約0.002MPa/ms)の結果も含めた。図中、均一水素化試料で測定された最高内圧を○(低速加圧)と●(高速加圧)で、水素化物リム試料で測定された最高内圧を△(低速加圧)と▲(高速加圧)で示している。全ての水素添加試料で測定された最高内圧は、非水素添加試料の値よりわずかに小さかった。水素化物が均一に分布する場合は、水素濃度に依存せず最高内圧は一定であるが、水素化物リムを有する場合は、水素濃度の増大に伴い最高内圧が徐々に低下することがわかる。

室温試験[8,9]においては、均一水素化試料の最高内圧は、非水素添加試料に比べ増加した。一般に、析出した水素化物は転位のすべり運動の抵抗となるため、水素化物を含むジルカロイの強度は含まない場合に比べ上昇すると考えられる。室温試験で、均一水素化試料の最高内圧が上昇したのはこのためであろう。室温から620Kへの温度上昇に伴い、ジルカロイ中の水素の固溶度が増大し(室温:<0.1wtppm→620K:約120wtppm[12])水素化物の析出量が減少するとともに、熱エネルギーの増大により転位が析出物を乗り越える頻度が増えることから、非水素添加試料に比較した水素添加試料での強度増大量の減少は容易に予想される。また、620K程度の温度では、1000wtppm程度まで水素を添加してもジルカロイの強度は影響を受けないとされ[10]、著しく脆化した場合を除き、本研究結果(Fig.9)に見られるような水素添加(均一)によって600K付近での強度が低下したという報告は見あたらない。

ところで、620Kにおけるジルカロイ中の水素の固溶度は約120wtppmであることから、水素濃度200wtppmの試料では80wtppm分の水素が、400wtppmの試料では280wtppm分の水素が水素化物として析出していると考えられ、析出量の差は大きい。しかし、Fig.9に見られるように、均一水素化試料での最高内圧は水素濃度(水素化物量)に依存しないことから、最高内圧の低下と水素化物析出との間に直接の関連はないと考えられる。水素添加によるジルカロイ母相の強度の低下も確認する必要がある。そこで、非水素添加試料と均一水素化試料(水素濃度約400wtppm)について、径方向断面で微小硬さを測定した。圧子はヌープ圧子を選択し、負荷は100gf、負荷時間は30sとした。Fig.10に示すように、ヌープ圧子は菱形角錐であり、正面頂角は172°30'、縦横比は7.11:1、側面頂角は130°である。正方角錐圧子を用いるビックカース硬さに比べ、縦横比が大きいために圧痕の長手方向の機械特性を強く反映する。また、長手方向の圧痕に弾性回復影響がないことが特徴である。まず、均一水素化試料及び非水素添加被覆管の径方向断面において、ヌープ圧子の長手方向が周方向あるいは肉厚(径)方向それぞれに平行になるよう圧子を押込み、それぞれの方向に関する微小硬さを測定した(Fig.10(b))。なお、測定は、90°おき4方位、1方位につき3点、計12点で行った。その結果をFig.10(c)に示すが、肉厚方向の硬さの平均値は、非水素添加試料と均一水素化試料で、1%の範囲で一致した。これに対し、周方向の硬さの平均値は、均一水素化試料で非水素添加試料より3%程度小さかった。被覆管の径方向断面では、硬さ試験は水素化物析出に対し鈍感であり、水素化物析出による硬さの変化は非常に小さい[7]。したがって、上の周方向硬さの差は、ジルカロイ母相の硬さの差と考えられる。差は非常に小さく、この試験結果から水素添加によるジルカロイ母相の硬さの低下を結論付けるのは難

しいが、硬さの大小関係及びその差はバースト試験で得られた最高内圧測定結果と一致している。硬さは降伏応力や強度と直線的な関係を持っており、水素添加による硬さの低下は強度の低下を示唆している可能性がある。このジルカロイ母相の強度の低下が、固溶した水素の影響であるのか、水素添加処理時の加熱による組織変化などによるものかは、本試験の範囲では不明である。

室温においても、水素化物リムを有する試料の最高内圧は、620K 試験と同様に水素濃度の増大に伴い低下した[8,9]。圧力上昇過程の比較的早い時期に低延性の水素化物リムでクラックが発生し、応力集中により短時間のうちに被覆管肉厚を貫通するクラック伝播が起こったためである。620Kにおいても水素化物リムを有する試料は、高速加圧時に比較的早い段階で破損することは Fig.8 において示した。後述するが、620Kにおいても水素化物リム部の延性が低く比較的早い段階でクラックの発生が起こる。620Kで測定された水素化物リム試料での最高内圧の低下もこのためであると考えられる。

3. 2 低速加圧試験

加圧速度が破損挙動に及ぼす影響を調べる目的で、低速加圧試験も実施した。本試験装置では、高圧ポンプと増圧器により直接試料を加圧した場合、加圧速度約 0.002MPa/ms という条件を作り出すことができる。これらの試験では大気圧から試験を開始し、バースト（約 70MPa）までに要する時間は 30~40s であった。

低速加圧試験で破損した非水素添加試料、均一水素化試料、水素化物リム試料の試験後外観の例を Fig.11 に示す。いずれの試料でも、20~30mm の破裂開口が形成された。破裂開口部の形状について、非水素添加試料と均一水素化試料の間に、差はほとんど見られなかつた。水素化物リム試料にのみ、開口部両端で 10mm 以下の軸方向クラック伝播が見られた。このような破損形態は、高速加圧試験でも観察されており (Fig.7)、加圧速度が約 100 倍異なることによる破損形態の変化は生じなかつたことになる。

低速試験においては、試料破損（バースト）直前の圧力と最高内圧の差は検出できなかつた。得られた最高（バースト）圧力を Table 3 に示す。非水素添加試料の最高内圧は 74.5 ~ 75.0 MPa の範囲にあり、これは周方向応力 546~550 MPa に相当する。また、均一水素化試料及び水素化物リムを有する試料の最高内圧は 71.4~73.0 MPa であり、周方向応力 524~535 MPa に相当する。Fig.9 にも示したように、2種類の水素添加試料では最高内圧が非水素添加試料に比べわずかに低下した。一方、Table 2 と 3 及び Fig.9 中に示すように、加圧速度が 0.002 から 0.2 MPa/ms と 100 倍増加しても最高内圧に有意差は見られなかつた。したがつて、調べた範囲で最高内圧の加圧速度依存性はないと言える。

3. 3 周方向残留ひずみ量の測定

最大の直径増大を示した軸方向位置で破損試料を軸方向に垂直に切断し、断面を写真撮影（倍率 10 倍）した。この写真から、画像解析装置を用いて被覆管内周及び外周長さを測定し

た。非変形試料と破損試料での内周及び外周を比較し、破損後の増分を被覆管内面及び外面での周方向残留ひずみとした。破損試料断面のマクロ写真と測定例を Fig.12 に、また低速及び高速加圧試験で破損した試料の周方向ひずみ量測定結果をそれぞれ Table 2 及び 3 中に示す。測定したすべての試料で、内面及び外面での残留ひずみ量は同一値ではなく、常に内面での残留ひずみ量の方が大きい値となった。Fig.13 に、測定した残留ひずみ量を試料の水素濃度を関数として示す。得られた残留ひずみ量は最大値（内面での測定値）と最小値（外面での測定値）を幅（エラーバー）で表示し、最大値及び最小値の単純平均値を試験条件（加圧速度と水素化物分布）に対応した記号で示している。水素濃度は残留ひずみを測定した位置の直近の位置から採取した試験片を分析した値である。比較のために、室温試験で破損した試料で測定した残留ひずみ量と水素濃度の関係[8,9]を Fig.14 に示す。

3. 3. 1 水素濃度及び加圧速度増大の影響

Fig.13 中では、低速加圧試験（0.002MPa/ms）で破損した均一水素化試料の残留ひずみ量を白丸（○）で示している。非水素添加試料のひずみ量は約 13%である。これに対して、均一水素化試料の残留ひずみ量は、調べた水素濃度範囲（194～612wtppm）で 6.6～13.7% の範囲にあった。ばらつきが大きいが、水素添加により残留ひずみ量は低下する傾向にあるようと思われる。Fig.14 に示した室温試験の結果と比較すれば、残留ひずみ量の低下の割合は小さい。高速加圧試験（0.2MPa/ms）で破損した均一水素化試料で測定した残留ひずみを黒丸（●）で示す。非水素添加試料の残留ひずみ量は低速試験で破損した試料とほぼ同等であるが、水素添加試料のひずみ量は水素濃度の増大に伴い増加した。最も大きなひずみ量を示した試料（水素濃度 364wtppm）のひずみ量は 22.5%であり、非水素添加試料の平均ひずみ量より 50%程度大きい。Fig.15 に、この最大ひずみ量を示した試料の破損部径方向断面写真を示す。図中のマクロ断面写真から、破損部を含む周方向 4 位置において局所的な肉厚減少が生じていることがわかる。このような複数位置での肉厚減少は、非水素添加試料では見られず、水素濃度が高くなるに伴いより多くの位置でより明確な肉厚減少量を示す傾向があった。破損部や肉厚減少部を隣接部と比べても、水素化物密度や析出方向に特に違いは見られない。したがって、被覆管の強度に影響を及ぼす他の何らかの因子が周方向において不均一であり、高速加圧時に比較的強度の低い複数箇所で同時にかつ独立に肉厚減少が進行し、結果的に残留ひずみ量が増加したと考えられる。

3. 3. 2 水素化物リムの影響

620K における低速及び高速加圧試験で破損した水素化物リム試料で測定された周方向残留ひずみ量を、それぞれ白三角（△）と黒三角（▲）で Fig.13 に示す。なお、断面で測定した各試料の水素化物リムの厚さを、データ点の横に記した。水素濃度 250wtppm を有し低速加圧試験で破損した水素化物リム試料の周方向残留ひずみ量は平均で 11.9%であり、均一水素化試料と同等である。これに対して、400wtppm 以上の水素濃度を有する水素化物リム

試料の残留ひずみ量は、加圧速度にかかわらず、きわめて低い値である。低速及び高速加圧試験で破損したこれら試料の平均残留ひずみ量は 1.1~2.8% の範囲にある。水素化物リムを有する被覆管外周での残留ひずみ量は特に低く、高々 1% 程度である (Table 2 と 3 参照)。一方、室温でバースト試験した水素化物リム試料 (水素濃度 300~305wtppm) での残留ひずみ量が平均約 1% 程度であった (Fig. 14)。したがって、水素濃度 400wtppm 以上を有する水素化物リム試料のバースト変形量 (残留ひずみ量) については、620Kまで昇温した効果がほとんどないと言える。

Fig. 16 に低速加圧試験で破裂した水素化物リム試料の破損部近傍における径方向断面ミクロ組織を示す。図では、水素濃度が 250wtppm であり比較的大きな残留ひずみ量 (11.9%) を示した試料(a)と、水素濃度が 504wtppm であり小さな残留ひずみ量 (1.3%) を示した試料(b)を比較している。試料(a)では水素化物リムは薄く (約 50 μm)、破断部において水素化物リムの影響は特に見られない。変形による断面の絞りは大きく試料の延性が十分に大きかったことを示しており、残留ひずみ量が大きかったことと一致する。一方、試料(b)では、水素化物リムの厚さは 140 μm と厚く、水素化物の密度も高い。水素化物密度が低い内側では延性的な破断形態が見られるものの、被覆管肉厚の約 25% を占める水素化物リムで低延性破断形態 (周方向に垂直なクラック進展) が見られる。試料(b)に見られる破断形態は、室温試験で破損した水素化物リム試料[8,9]、さらに NSRR パルス照射時に破損した PWR 高燃焼度燃料[4-6] のものときわめて良く類似している。水素化物密度の非常に高い水素化物リム領域は、試験温度 (620K) においても延性は低く、圧力上昇の比較的早い段階に水素化物リム領域でクラックが発生し、短時間のうちにクラックが内面まで貫通したと考えられる。水素化物リム試料での早期破損は、バースト試験中の圧力変化を調べた Fig. 8 中でも確認できる。一方、水素化物リムの成長が十分でない場合には、水素化物リムでの局所水素濃度が低く厚さも薄いために、クラックが発生しづらく早期破損につながらない。水素化物リムでの水素濃度が高くなりある程度の厚さ以上になると、上述のような早期のクラック発生と内面側への伝播が生じる結果、残留ひずみ量は著しく低下する。Fig. 13 中には、水素化物リム試料のリム部の厚さも示しているが、低い残留ひずみを示した試料の水素化物リム厚さは、110~170 μm である。したがって、本試験条件における残留ひずみ量低下のしきい値は約 100 μm である。

ジルカロイの延性に及ぼす水素吸収の影響は、温度の上昇に伴って低減する。水素化物の延性は昇温に伴いある程度高まる[13]が、ジルカロイと比較した場合 620Kにおいてもその延性は低いと考えられる。したがって、温度上昇に伴って水素吸収の影響が低減するのは、主にジルカロイ母相の延性が増大するためであろう[14]。Fig. 16 (b) に示す試料では、水素化物リムでは水素化物が高密度に存在しジルカロイ母相の占める割合は著しく減少している。水素化物リム試料に対する水素分析結果 (Fig. 2) を用いて、リム部での水素化物密度を推定してみる。平均水素濃度約 500wtppm を有する本試料の水素化物リムでの局所水素濃度は、2000wtppm に近いと考えられる (Fig. 2)。ジルカロイ中の添加元素を無視すると、水素濃度 2000wppm は約 15at% に相当し、Zr 原子のうち 11% が水素と共に水素化物 (組成を ZrH_{1.6} と仮定) を形成する。水素化に伴う体積膨張 (約 17%) を考慮すると、Zr 体積のうち約 20%

が水素化物ということになる。したがって、リム部における水素化物の析出密度は非常に高く、ジルカロイ母相の延性増大にもかかわらず、620Kにおいてもリム部が低延性をしたものと考えられる。

本試験では、試験機の構造や安全上の制約から、最高温度は620Kとした。PWRにおいては、RIA時の被覆管温度は運転時の温度（外表面約620K）より高くなる可能性がある。著者らは、本試験で用いた水素化物リム試料と同様の試料を用いて、昇温に伴う水素化物の再分布を調べている[7]。この試験により、3600sまでの時間範囲では、水素化物リムの消失（水素化物分布の均一化）は、873K以上の温度でのみ起こることが示されている。水素濃度1000wtppm以上を有する水素化物リムでは、850K以上で $\alpha + \beta$ 相への変態が起り、水素の固溶度が飛躍的に増大するためである（Fig.17[15]）。ジルカロイ中に固溶した水素は急速にジルカロイ中を拡散し、一定時間後に試料中の水素化物密度は均一になる。さらに、1173Kまで昇温した場合、ジルカロイは β 相に変態し水素化物リムは非常に短い時間で消失した。逆に、850K以下の温度範囲では水素化物リムは消失せず、被覆管の機械特性に影響を及ぼす可能性がある。ただし、ジルカロイの延性増大や水素化物の一部再溶解によって、水素化物リムの影響は低下していくと考えられる。

4.まとめ

パルス照射時に高燃焼度燃料棒で起こる急激なペレットー被覆管機械的相互作用（PCMI）を模擬することのできる高速加圧バースト試験装置を用いて、水素添加ジルカロイ-4被覆管に対する620Kでの試験を実施した。水素濃度範囲は、200～1050wtppmであった。その結果、以下のことが明らかになった。

- 室温では軸方向に長い破裂開口が水素添加試料に生じたが、620Kにおいては破裂開口は小さく、外観に見られる水素吸収の影響は非常に小さかった。
- 水素化物が被覆管肉厚中に均一に分布する試料を、低加圧速度（0.002MPa/ms）で破裂させると、周方向残留ひずみ量は、水素濃度の増大に伴い減少した。ただし、低下の割合は室温よりも明らかに小さかった。一方、高加圧速度（0.2MPa/ms）で破裂させると、周方向残留ひずみ量は水素濃度の増大に伴い増加した。破損部以外の複数の周方向位置においても、同時に肉厚減少が起こったためである。
- 被覆管外面に水素化物集積領域（水素化物リム）を有する試料は、試験の比較的早い段階に破裂し、破裂圧力は相対的に低下した。また、リム部厚さが100μm以上になると、加圧速度に関わらず周方向残留ひずみ量は1.1～2.8%という低い値であった。圧力上昇過程の比較的早い時期に低延性の水素化物リムでクラックが発生し、

短時間のうちに被覆管肉厚を貫通するクラック伝播が起こったためである。本試験の結果は、原子炉運転温度においても、被覆管外面への水素化物集積がパルス照射時の破損挙動に重要な役割を果たすことを示している。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] F. Schmitz and J. Papin, J.Nucl.Mater. 270(1999)55-64.
- [4] 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.
- [5] T. Fuketa, H. Sasajima, Y. Mori, and K. Ishijima, J.Nucl.Mater. 248(1997)249-256.
- [6] 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.
- [7] F. Nagase and H. Uetsuka, Proc. 1997 Int. Topical Mtg. LWR fuel Performance, Portland, Oregon, Mar. 2-6, 1997, pp.677-684
- [8] F. Nagase, T. Otomo and H. Uetsuka, report JAERI-Research 98-064(1998).
- [9] T. Fuketa, F. Nagase, T. Nakamura, H. Uetsuka and K. Ishijima, Proc. 26th Water reactor safety information meeting, Bethesda, Maryland, USA, Oct. 26-28, 1998.
- [10] J.B. Bai, C. Prioul and D. Francois, Proc. International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, France, April, 1991.
- [11] T. Otomo, F. Nagase and H. Uetsuka, report JAERI-Tech 99-071(1999).
- [12] J.J. Kearns, J.Nucl.Mater. 22(1967)292.
- [13] K.G. Barraclough and C.J. Beevers, J.Mater.Sci. 4(1969)518-525.
- [14] J.-H. Huang and S.-P. Huang, J.Nucl.Mater. 208(1994)166.
- [15] R.L. Beck, Trans.ASM, 55(1962)542-555.

Table 1 Results of hydrogen analysis for cladding samples with hydride rim

| Hydrogen concentration of sample with hydride rim : Co (wt.ppm) | Hydrogen concentration after removing hydride rim : Ci (wt.ppm) | Thickness of hydride rim : th (mm) | Estimated hydrogen concentration in hydride rim : CH (wt.ppm) * |
|---|---|------------------------------------|---|
| 232 | 146 | 0.050 | 1126 |
| 334 | 198 | 0.115 | 872 |
| 454 | 209 | 0.140 | 1207 |
| 471 | 145 | 0.110 | 1834 |
| 510 | 186 | 0.140 | 1505 |
| 533 | 120 | 0.155 | 1639 |
| 670 | 195 | 0.170 | 1788 |
| 978 | 199 | 0.170 | 2811 |

* $CH = (Co - Ci) \times 0.57 / th + Ci$ 0.57 : cladding thickness

Table 2 Test summary of 620 K burst test with pressurization rates of 0.2 MPa/ms

| Sample No. | Hydrogen concentration (wppm) | Hydride distribution | Burst pressure (MPa) | Maximum pressure (MPa) | Hoop stress estimated from maximum pressure(MPa) | Residual hoop strain (%) | |
|------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--|--------------------------|---------------|
| | | | | | | Outer surface | Inner surface |
| HT-F3 | 10 | Non | 71.6 | 76.1 | 558 | 15.1 | 10.7 |
| HT-F4 | 10 | Non | 72.2 | 74.3 | 545 | 12.7 | 8.3 |
| HT-F5 | 10 | Non | 69.1 | 74.6 | 547 | 10.2 | 7.0 |
| HT-F6 | 10 | Non | | | | 17.9 | 12.8 |
| HT-F7 | 154 | Uniform | 67.0 | 71.9 | 527 | 16.7 | 12.2 |
| HT-F11 | 171 | Uniform | 65.8 | 72.2 | 529 | 23.9 | 17.8 |
| HT-F8 | 284 | Uniform | 67.0 | 73.7 | 540 | 21.2 | 15.9 |
| HT-F9 | 364 | Uniform | 65.5 | 72.8 | 534 | 25.6 | 19.3 |
| HT-F12 | 380 | Uniform | 66.7 | 71.9 | 527 | 21.8 | 16.3 |
| HT-F10 | 455 | With hydride rim | 71.3 | 71.6 | 525 | 4.1 | 1.5 |
| HT-F14 | 602 | With hydride rim | 71.0 | 71.3 | 523 | 2.0 | 0.2 |
| HT-F13 | 1033 | With hydride rim | 69.7 | 70.1 | 514 | 2.4 | 0.8 |
| | | | | | | | 1.1 |
| | | | | | | | 1.6 |

Table 3 Test summary of 620 K burst test with pressurization rates of 0.002 MPa/ms

| Sample No. | Hydrogen concentration (wtppm) | Hydride distribution | Burst pressure (MPa) | Maximum pressure (MPa) | Hoop stress estimated from maximum pressure(MPa) | Residual hoop strain (%) | |
|------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--|--------------------------|---------------|
| | | | | | | Outer surface | Inner surface |
| HT-S1 | 10 | Non | 75.0 | (75.0) | 550 | 15.4 | 10.9 |
| HT-S2 | 10 | Non | 74.5 | (74.5) | 546 | 15.5 | 10.9 |
| HT-S8 | 194 | Uniform | 71.9 | (71.9) | 527 | 16.1 | 11.4 |
| HT-S7 | 236 | Uniform | 72.4 | (72.4) | 531 | 8.4 | 4.9 |
| HT-S3 | 355 | Uniform | 73.0 | (73.0) | 535 | 11.3 | 7.2 |
| HT-S6 | 612 | Uniform | 72.4 | (72.4) | 531 | 15.1 | 9.9 |
| HT-S5 | 250 | With hydride rim | 73.0 | (73.0) | 535 | 14.0 | 9.8 |
| HT-S4 | 504 | With hydride rim | 71.4 | (71.4) | 524 | 2.5 | 0.0 |
| | | | | | | | 1.3 |

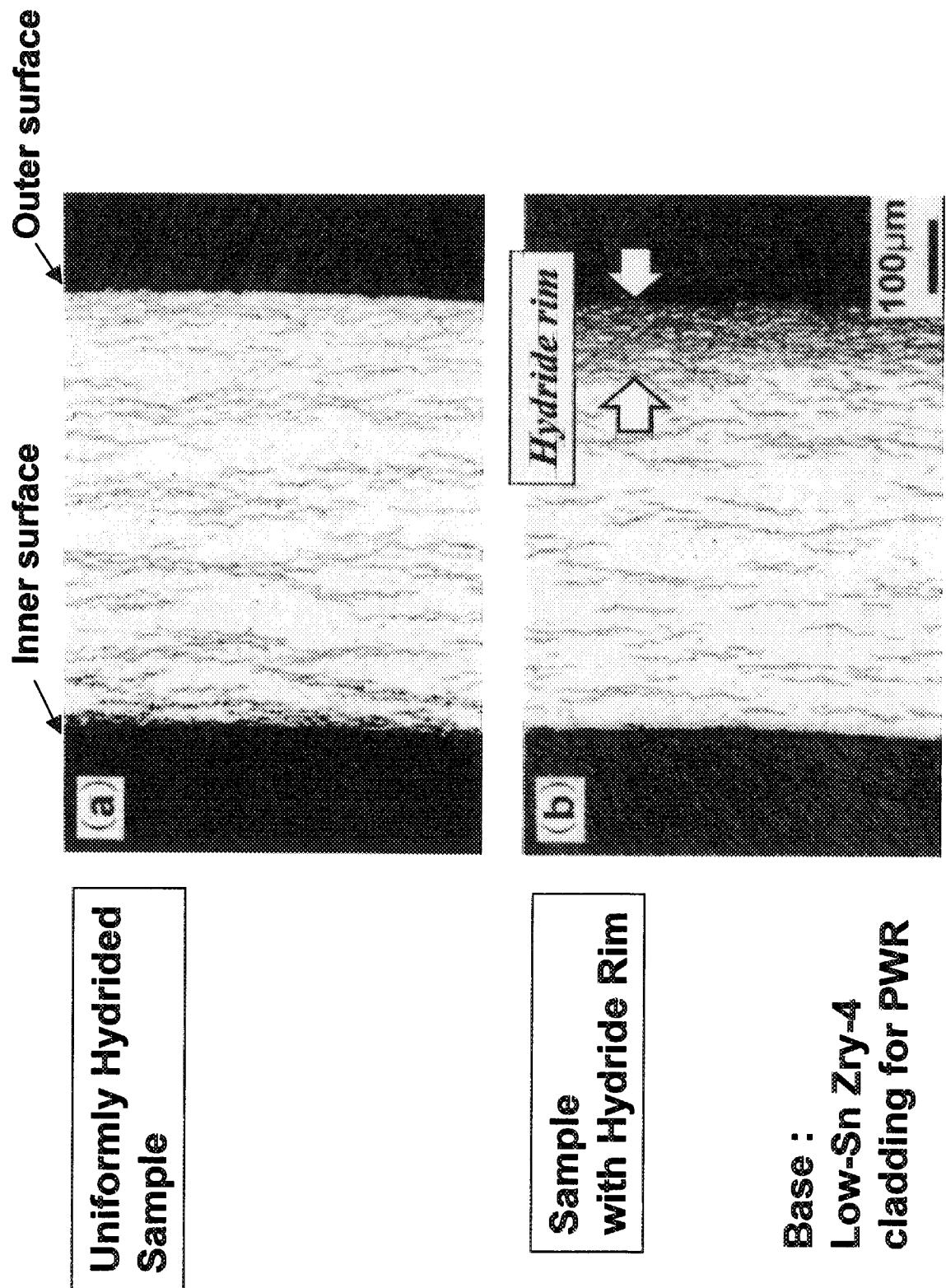


Fig. 1 Hydrides morphology in the radial cross sections of hydrided cladding samples;
(a) uniformly hydrided sample, (b) sample with hydride rim

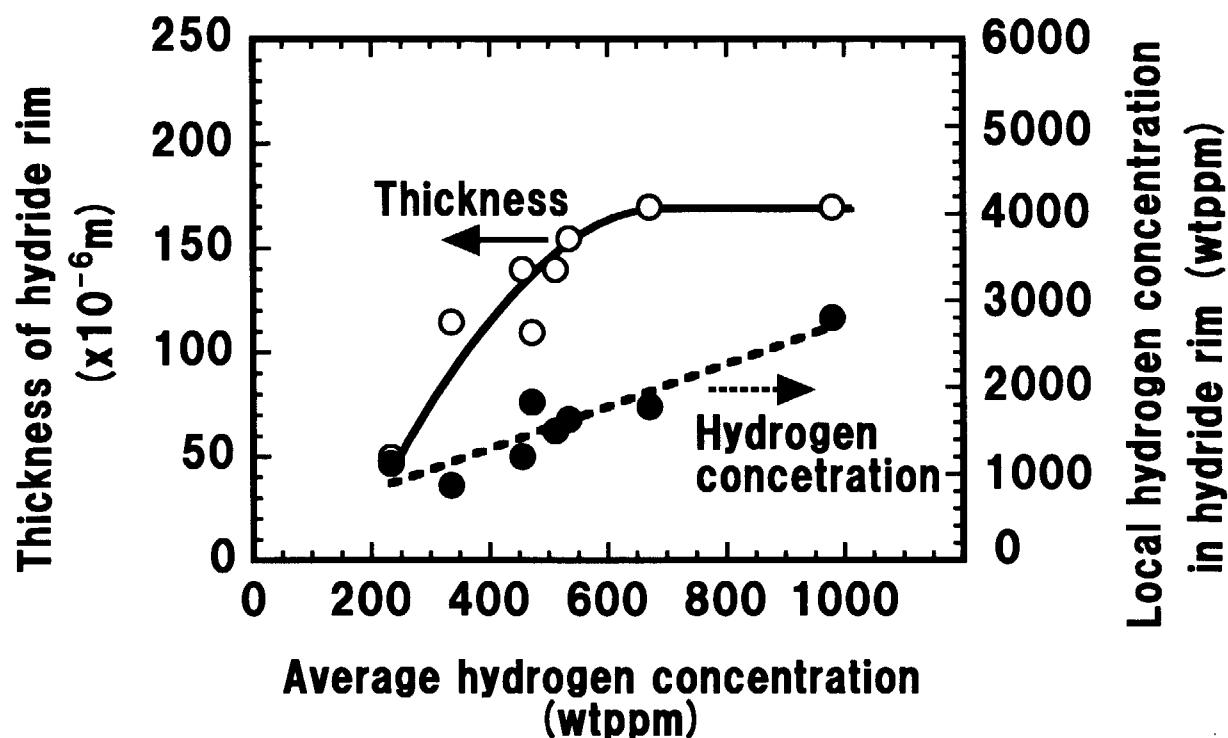


Fig.2 Thickness and local hydrogen concentration of hydride rim
as a function of average hydrogen concentration
(Hydrogen analysis method : high-temperature extraction and gas chromatography)

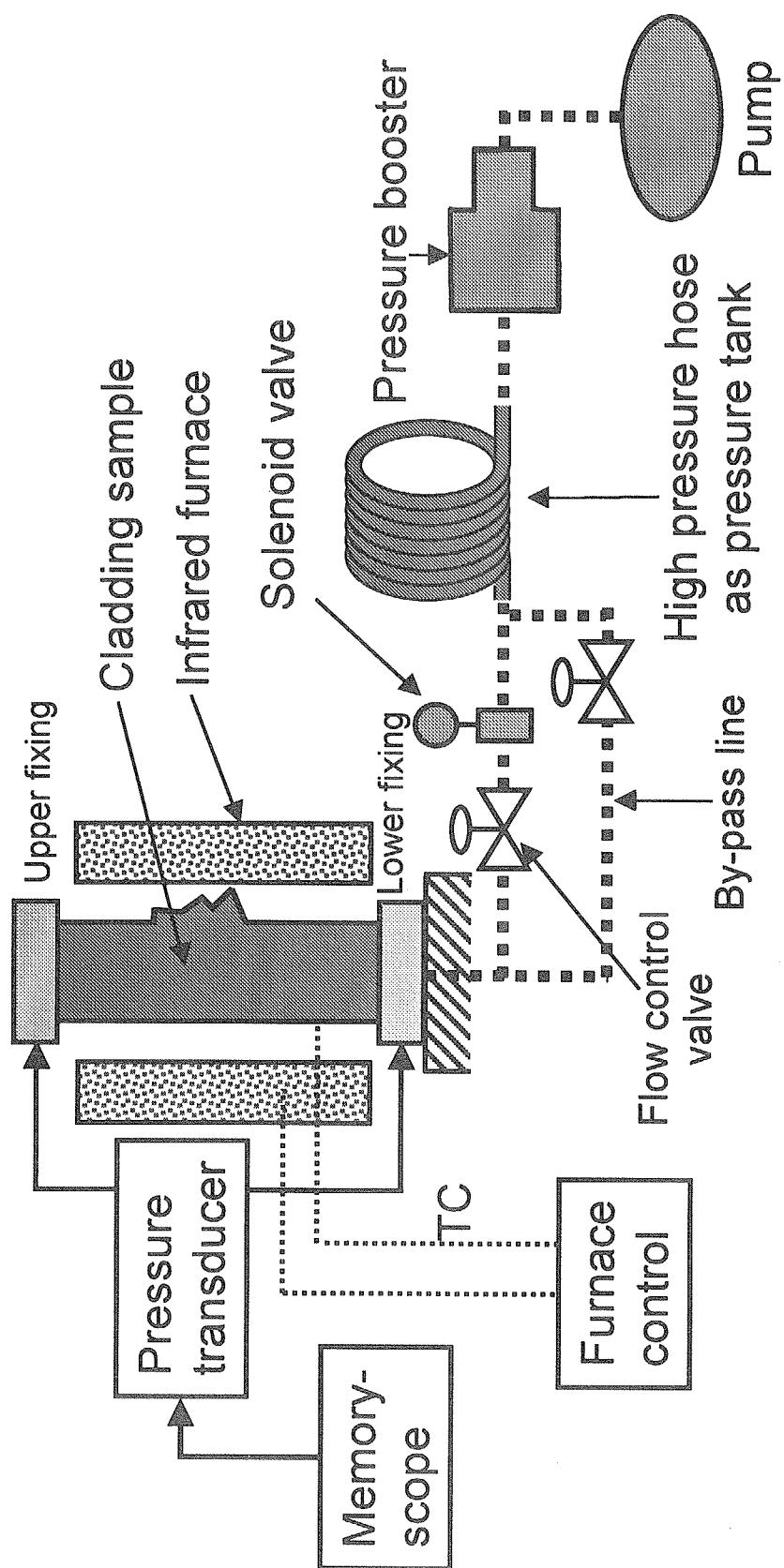


Fig.3 Schematic drawing of burst apparatus (Upper end of the sample was axially free in the present test.)

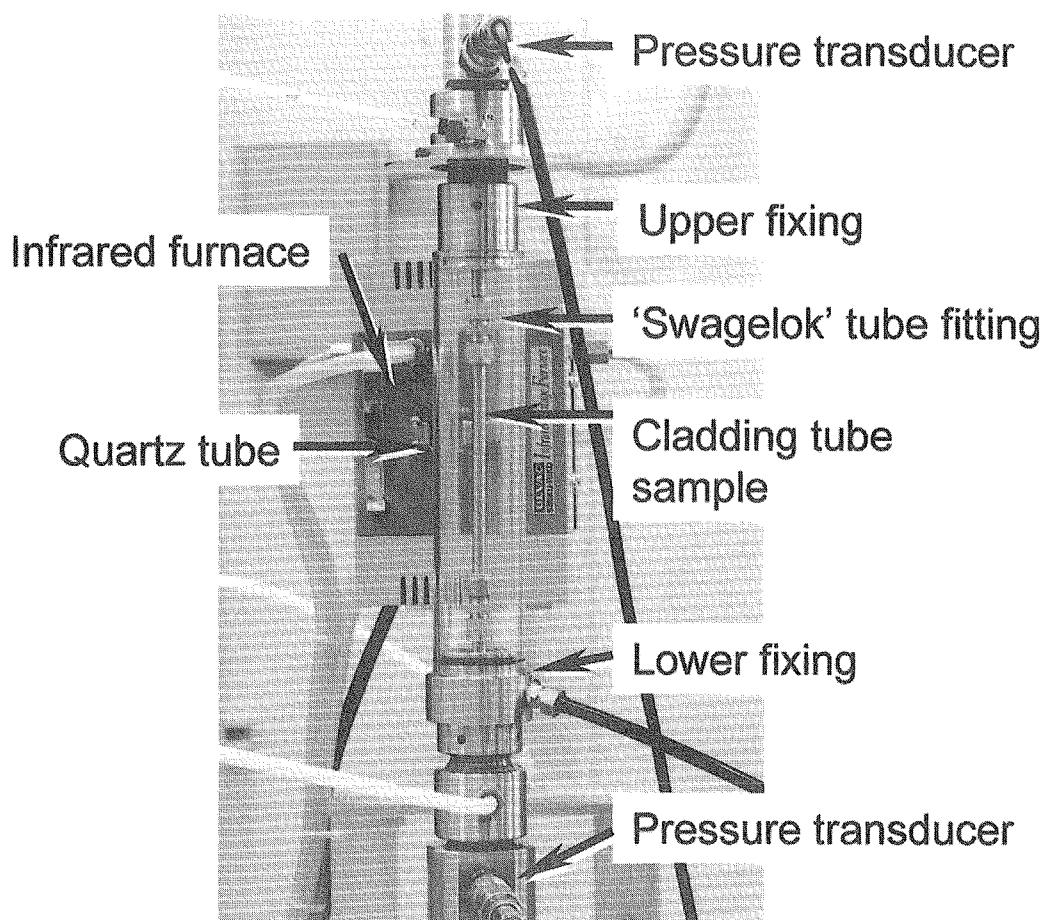


Fig. 4 Sample setup and infrared furnace

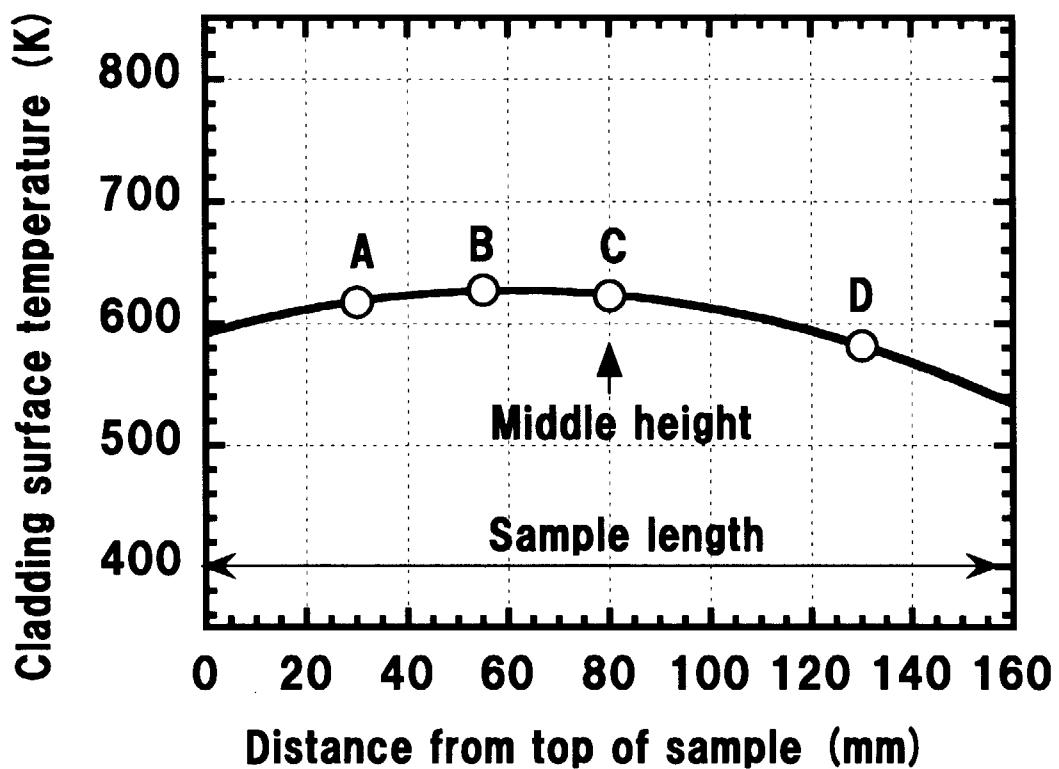


Fig.5 Axial distribution of cladding surface temperature

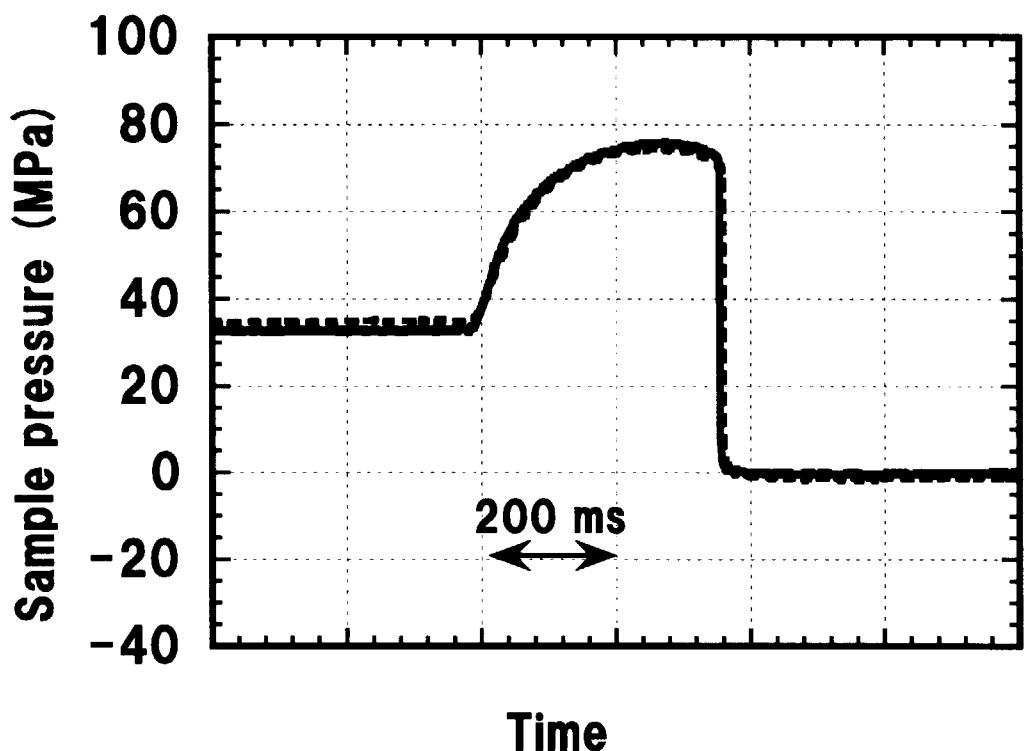
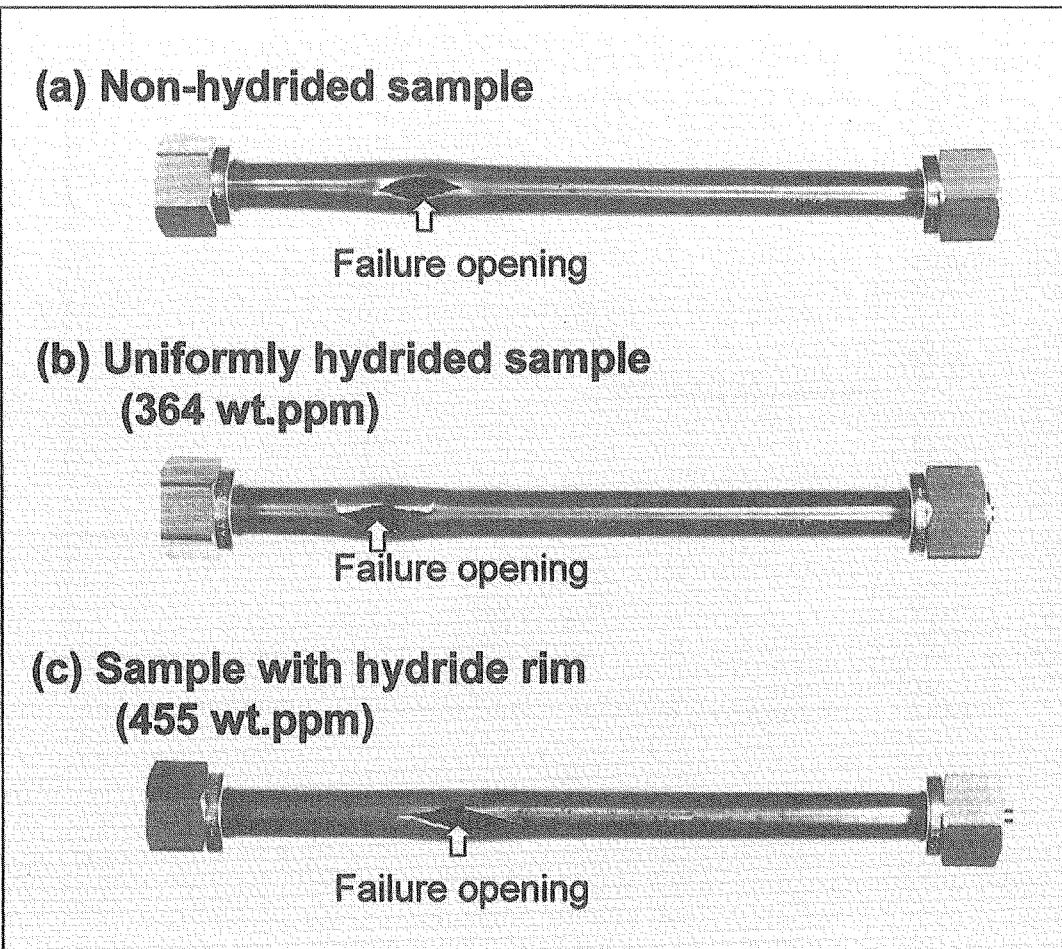


Fig.6 Pressure changes in 620 K burst tests on non-hydrided PWR cladding samples
(Initial internal pressure of samples = 30 to 35 MPa)

620 K, 0.2 MPa/ms



Room temperature, 3.4 MPa/ms

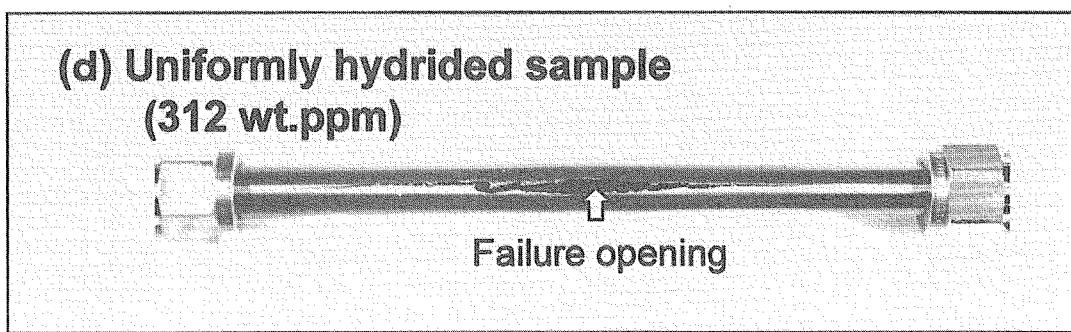


Fig. 7 Post-test appearances of (a) non-hydrided, (b) uniformly hydrided cladding samples, and (c) sample with hydride rim failed in the 620 K burst tests with pressurization rate of 0.2 MPa/ms.

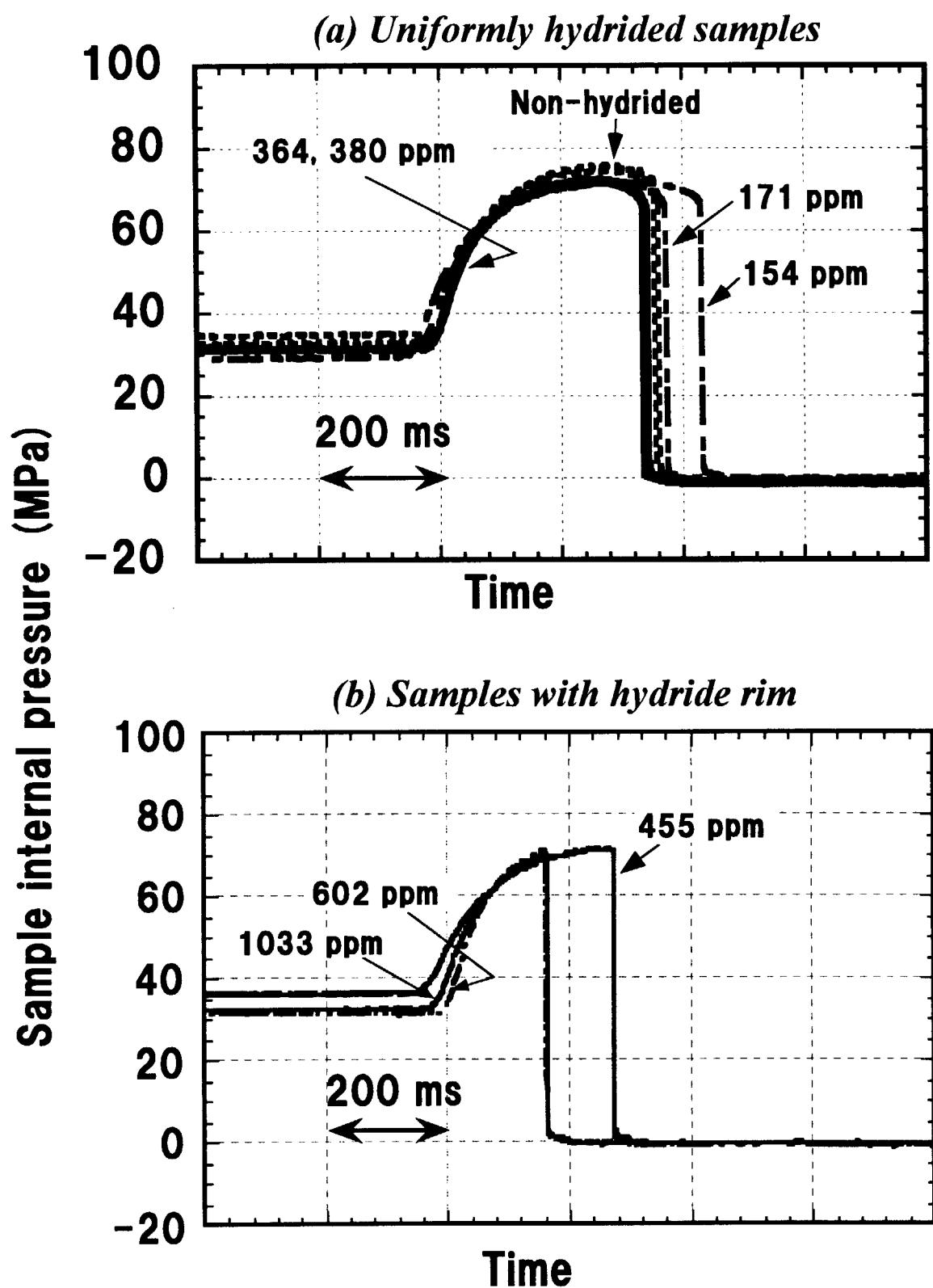


Fig.8 Pressure changes in 620 K burst tests with pressurization rate of 0.2 MPa/ms on hydrided samples having different hydrogen concentrations and distributions; (a) uniformly hydrided samples, (b) samples with hydride rim

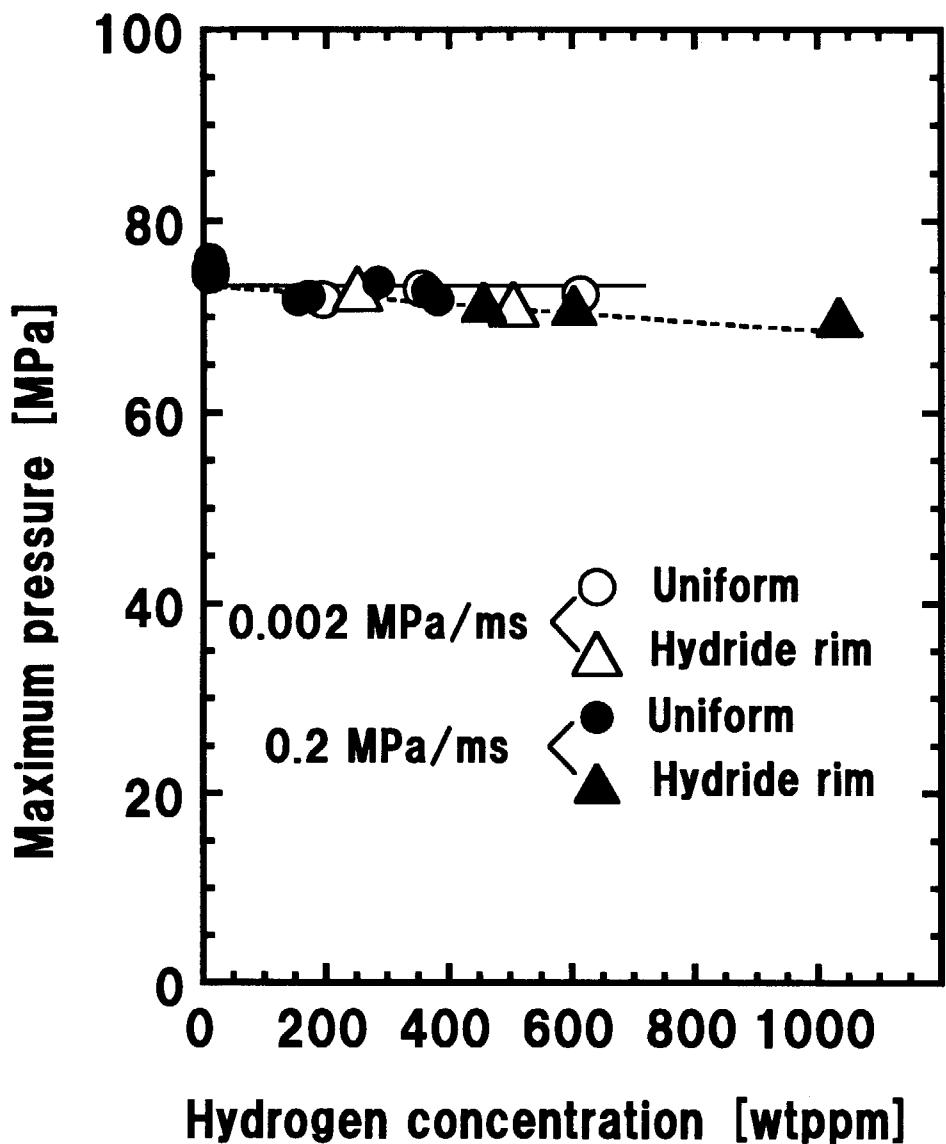
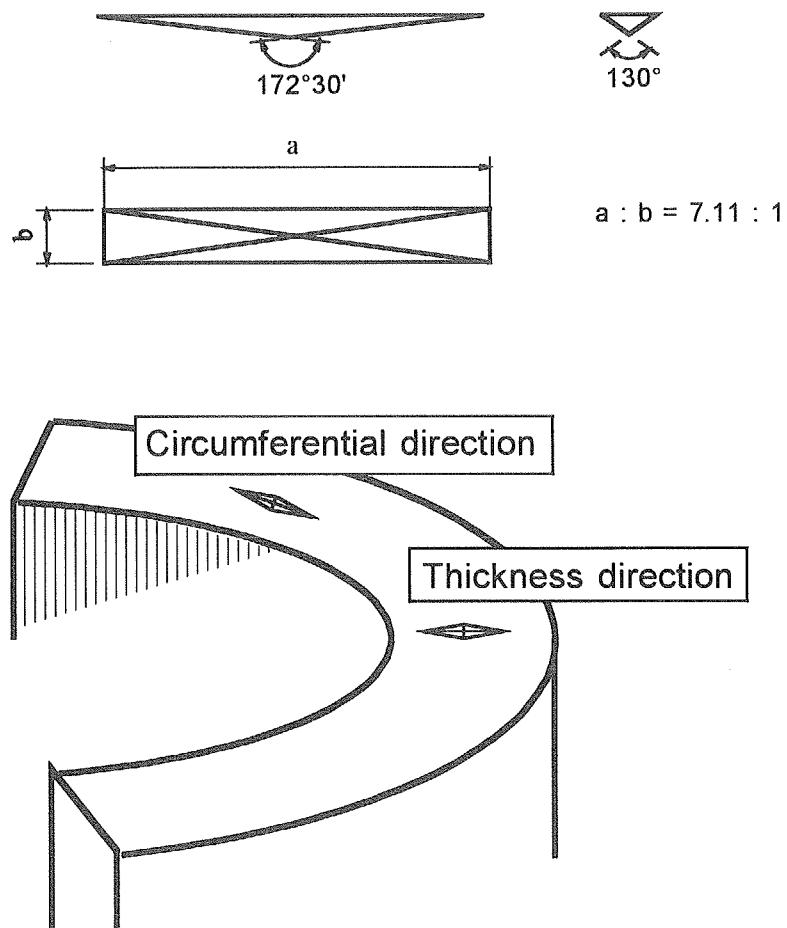


Fig.9 Maximum pressure measured in 620 K burst tests of hydrided claddings as a function of hydrogen concentration

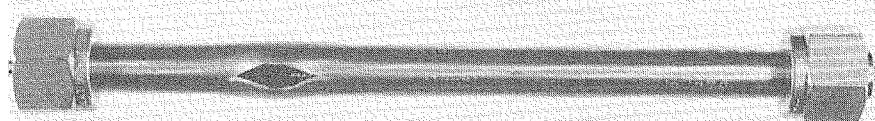


| | Hydrogen concentration | Knoop hardness | | |
|---------------------------|------------------------|----------------|------|---------|
| | | min. | max. | average |
| Thickness direction | Non-hydrided | 206 | 229 | 218 |
| | 400 wt.ppm | 209 | 231 | 220 |
| Circumferential direction | Non-hydrided | 227 | 258 | 241 |
| | 400 wt.ppm | 220 | 249 | 234 |

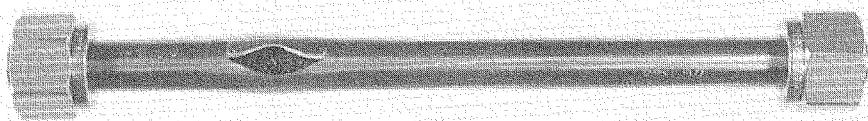
Fig.10 Knoop hardness measurement in radial cross section of non-hydrided and uniformly hydride samples

620 K, 0.002 MPa/ms

(a) Non-hydrided sample



**(b) Uniformly hydrided sample
(355 wt.ppm)**



**(c) Sample with hydride rim
(504 wt.ppm)**



Fig. 11 Post-test appearances of (a) non-hydrided, (b) uniformly hydrided cladding samples, and (c) sample with hydride rim failed in the 620 K burst tests with pressurization rate of 0.002 MPa/ms.

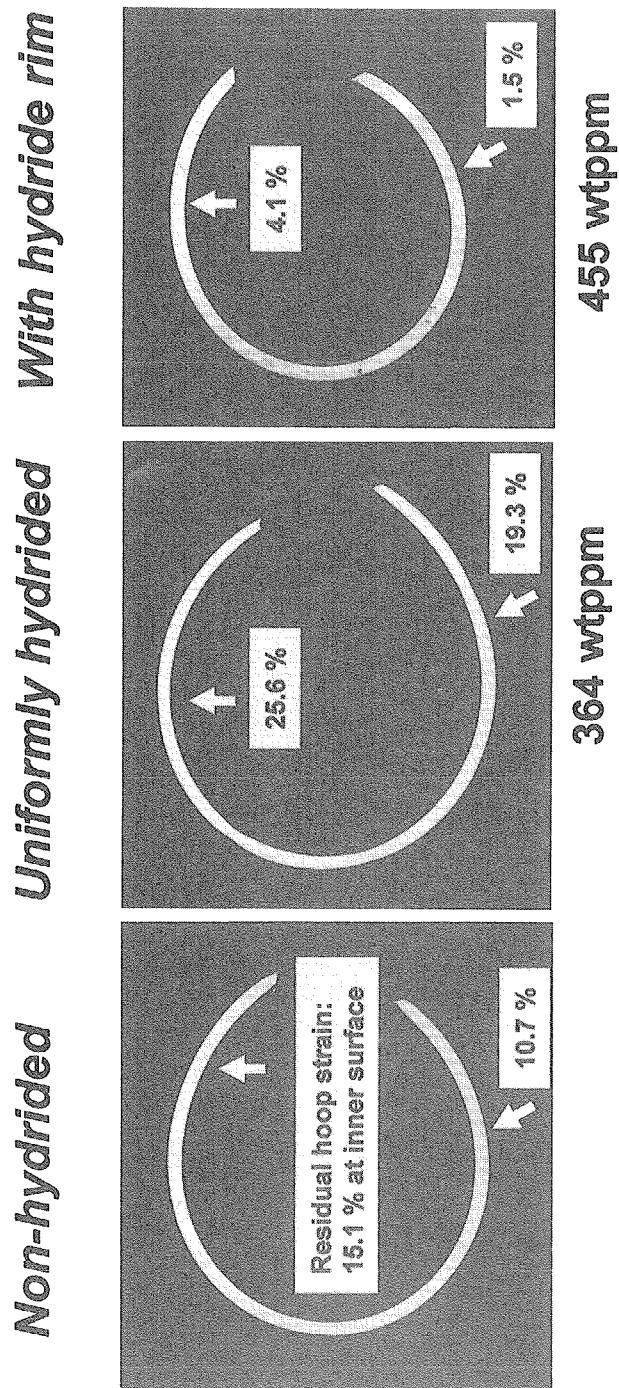


Fig. 12 Radial cross sections of samples failed in 620 K burst test with pressurization rate of 0.2 MPa/ms.
(Residual hoop strain at inner and outer surface are also indicated.)

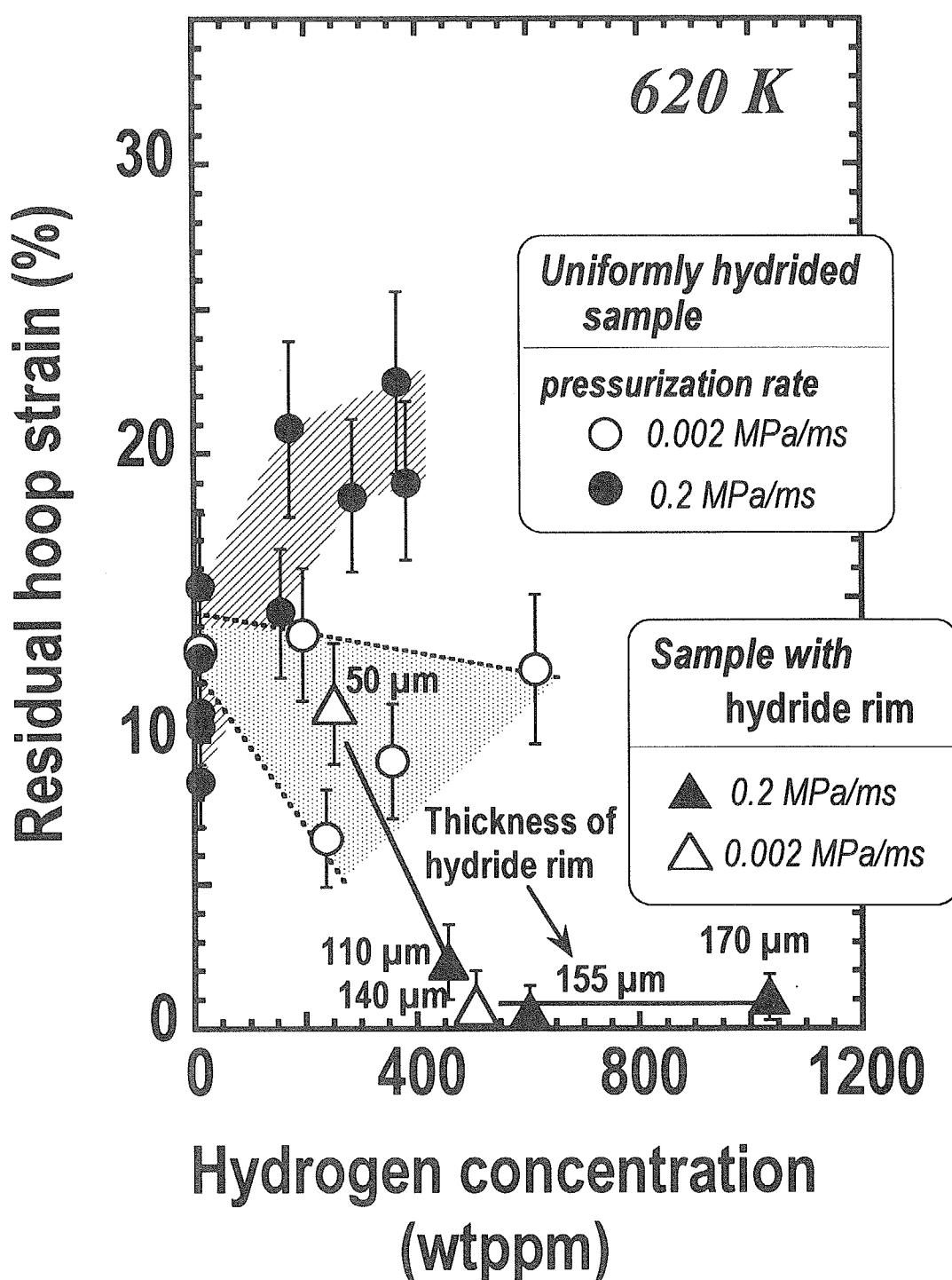


Fig.13 Residual hoop strain as a function of hydrogen concentration.
Test results from 620 K burst tests with different pressurization rates.

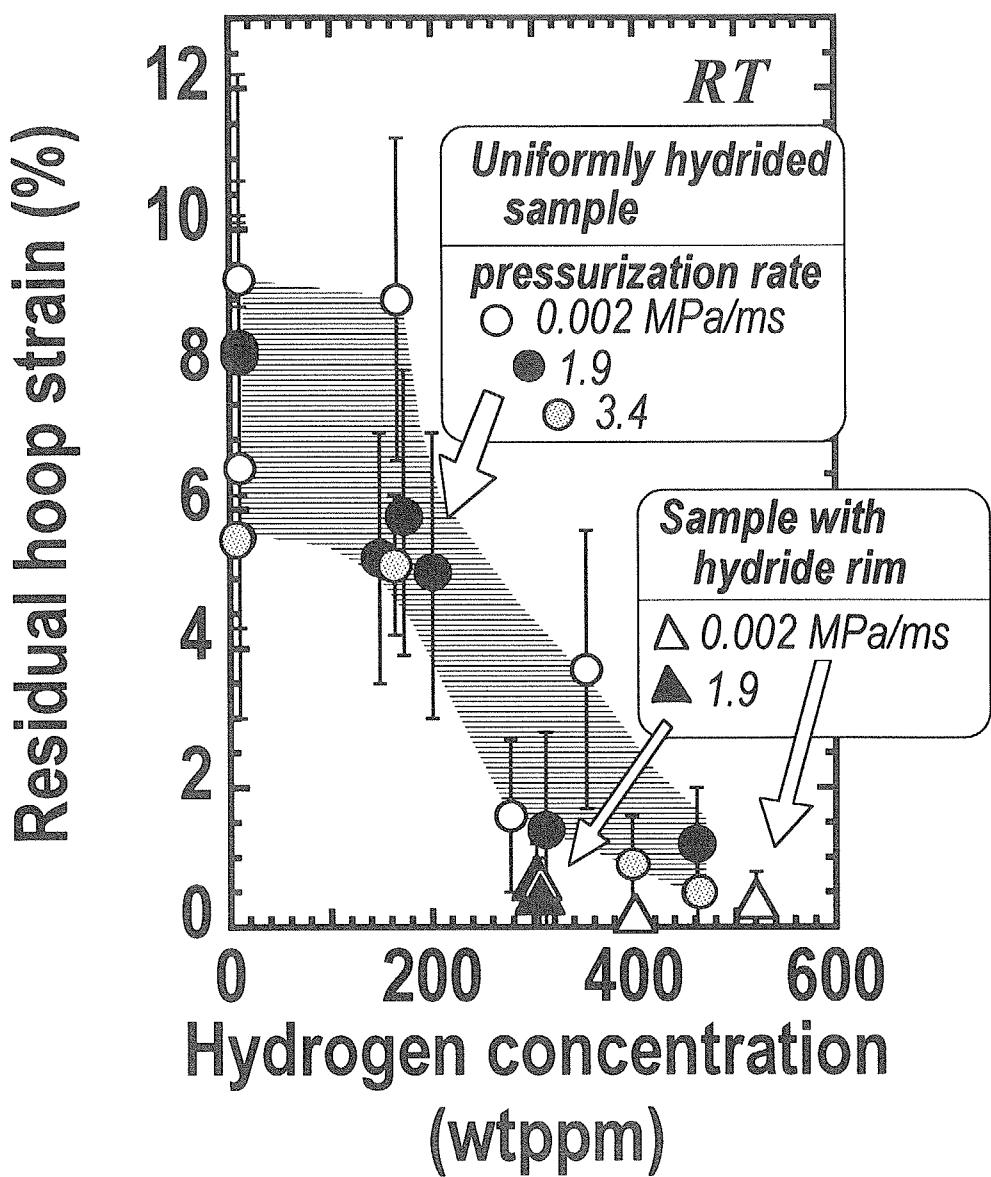


Fig. 14 Residual hoop strain as a function of hydrogen concentration.
Test results from room temperature burst tests with variou pressurization rates.

364 wtppm
Hydride distribution : uniform

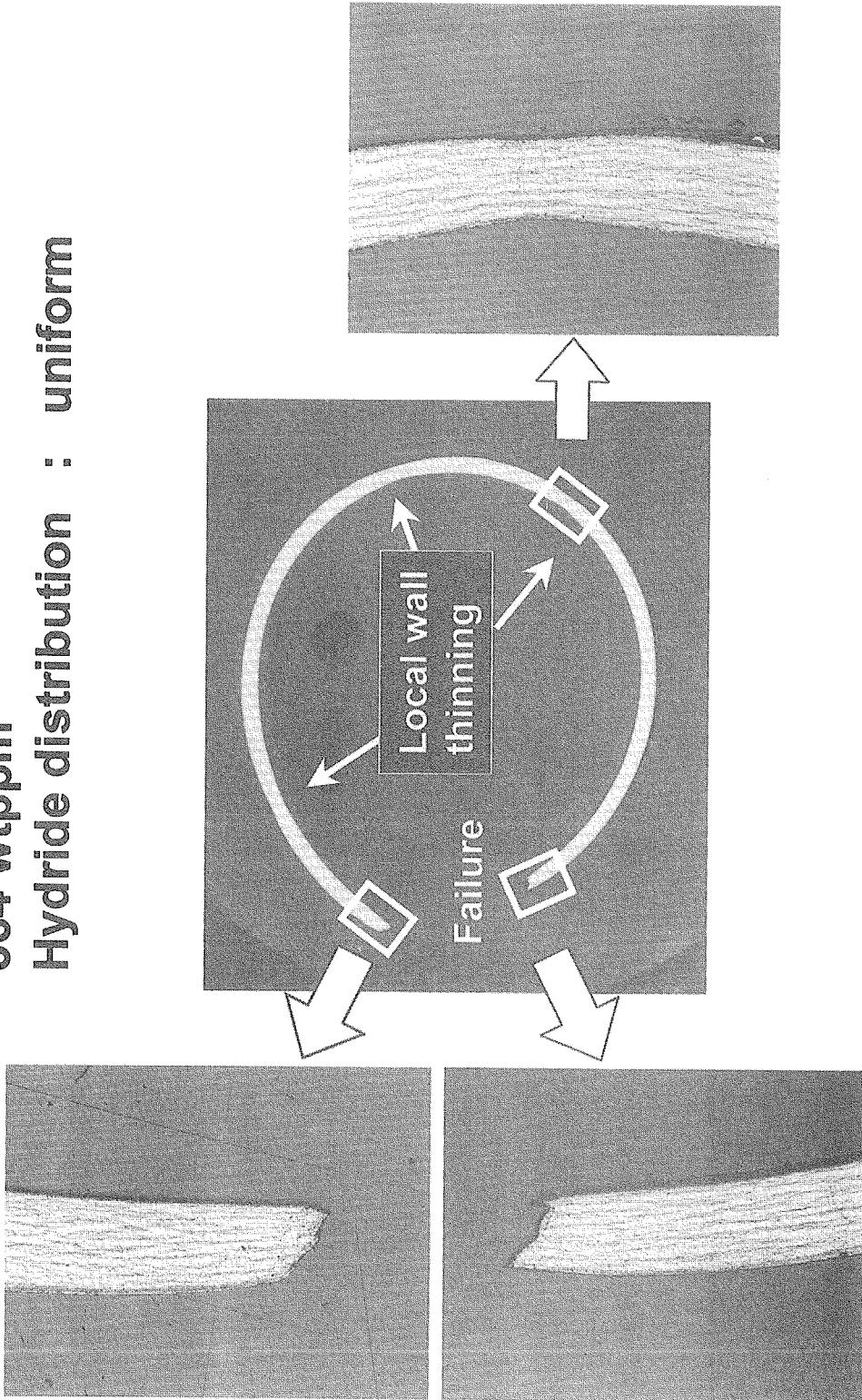
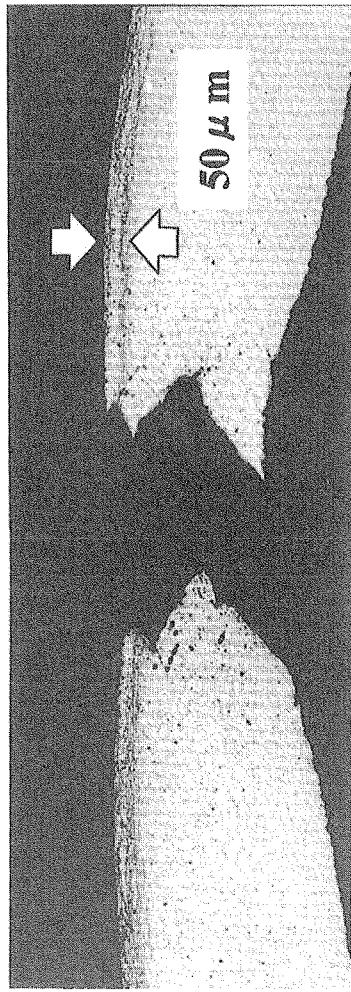
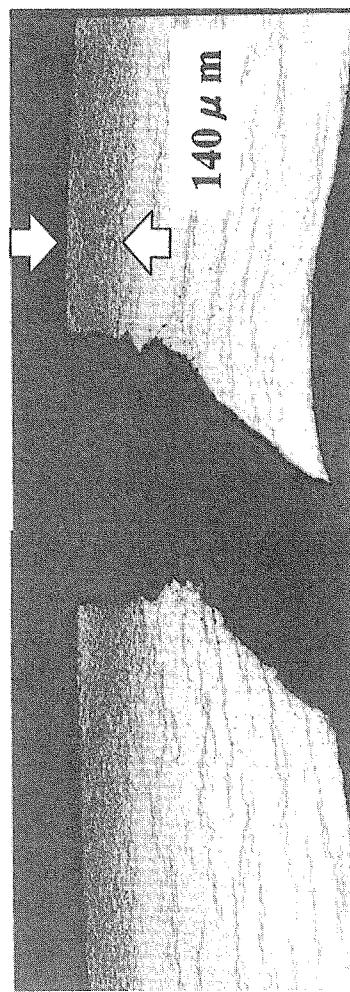


Fig.15 Radial cross section of a uniformly hydrided sample which failed in 620 K burst test with pressurization rate of 0.2 MPa/ms.



Sample (a) : 250 wtppm H, Hoop strain = 9.3%



Sample (b) : 504 wtppm H, Hoop strain = 0.8%

Fig.16 Radial cross sections of samples with hydride rim which failed in the 620 K burst tests with pressurization of 0.002 MPa/ms. The sample (b) has a higher hydrogen concentration and a thicker hydride rim than the sample (a).

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 |
| 力 | ニュートン | N | m·kg/s ² |
| 圧力、応力 | パスカル | Pa | N/m ² |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール | J | N·m |
| 功率、放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量、電荷 | クーロン | C | A·s |
| 電位、電圧、起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラード | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | 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 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量等量 | 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)

- 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。
- 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。
- 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。
- EC開催理事会指令では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 | MPa(=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|-----|-----------------------------|---|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 0.224809 | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062×10 ³ | 145.038 |
| | 9.80665 | 1 | 2.20462 | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 4.44822 | 0.453592 | 1 | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| 粘度 | 1 Pa·s(N·s/m ²) | 10 P(ボアズ)(g/(cm·s)) | | 1.33322×10 ⁻⁴ | 1.35951×10 ⁻³ | 1.31579×10 ⁻³ | 1 | 1.93368×10 ⁻² |
| 動粘度 | 1 m ² /s | 10 ¹ St(ストークス)(cm ² /s) | | 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 | 0.101972 | 2.77778×10 ⁻⁷ | 0.238889 | | | | |
| | 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 | | |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072×10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515×10 ²¹ | | |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616×10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506×10 ⁻³ | 1 | 8.46233×10 ¹⁸ | | |
| | 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 | | |

1 cal = 4.18605J (計量法)
= 4.184J (熱化学)
= 4.1855J (15°C)
= 4.1868J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS(仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499W

| 放射能 | Bq | Ci | 吸収線量 | Gy | rad | 照射線量 | C/kg | R | 線量当量 |
|-----|----------------------|---------------------------|------|----|-----|------|-----------------------|------|------|
| | 1 | 2.70270×10 ⁻¹¹ | | 1 | 100 | | 1 | 3876 | |
| | 3.7×10^{10} | 1 | 0.01 | 1 | | | 2.58×10^{-1} | 1 | |

(86年12月26日現在)

水素添加ジルカロイ-4 燃料被覆管の620OKにおける高速加圧バースト試験