

JAERI - M
88-058

ジルコニウム・ライナ管における局所変形

1988年3月

永瀬 文久・内田 正明

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。

入手の間合わせは、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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田 軽 印 刷 所

ジルコニウム・ライナ管における局所変形

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

永瀬 文久・内田 正明

(1988年2月4日受理)

BWRにおいて用いられているジルコニウム・ライナ管は、ペレット・被覆管相互作用(PCI)による局所的な機械応力を緩和する。本研究では応力緩和を調べ定量的な把握を行うために、リッジングを模擬してBWR用ジルコニウム・ライナ管とジルカロイ-2管の内側から局所変形を加え、ジルコニウム・ライナのふるまいとその効果を調べた。試験の結果、局所応力の加えられた領域の「ふち」の部分で大きな応力が集中し、ライナ管ではその部分のジルコニウムが大きく変形した。このジルコニウムの変形により、かなり大きな応力が与えられてもジルカロイの変形は緩やかであり、十分な応力緩和効果があったことが示された。また、燃料ふるまいコードFEMAXI-IIIの一部を修正したコードを用いて、試料断面に生じる応力やひずみ分布を求め、実験結果と対照させることにも、さらに詳しい応力緩和効果の解析を試みた。その結果、実験結果同様にジルカロイに働く応力は緩和されていることが示された。しかし、その範囲はジルコニウムとの境界の近傍に限られている。

Localized Deformation of Zirconium-liner Tube

Fumihisa NAGASE and Masaaki UCHIDA

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

(Received February 4, 1988)

Zirconium-liner tube has come to be used in BWR. Zirconium liner mitigates the localized stress produced by the pellet-cladding interaction (PCI). In this study, simulating the ridging, stresses were applied to the inner surfaces of zirconium-liner tubes and Zircaloy-2 tubes, and, to investigate the mechanism and the extent of the effect, the behavior of zirconium liner was examined. As the result of examination, stress was concentrated especially at the edge of the deformed region, where zirconium liner was highly deformed. Even after high stress was applied, the deformation of Zircaloy part was small, since almost the concentrated stress was mitigated by the deformation of zirconium liner. In addition, stress and strain distributions in the cross section of specimen were calculated with a computer code FEMAXI-III. The results also showed that zirconium liner mitigated the localized stress in Zircaloy, although the affected zone was restricted to the region near the boundary between zirconium liner and Zircaloy.

Keywords: Zirconium-liner, Zircaloy, PCI, Ridging, Localized Stress,
Computer Code

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 試料	2
2.2 試験治具	2
2.3 変形試験	2
2.4 変形後試験	3
2.5 応力とひずみ分布の計算	3
3. 実験結果	3
3.1 変形試験結果	3
3.2 変形後試験結果	3
3.3 計算結果	5
4. 考 察	5
5. 結 論	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Methods	2
2.1 Samples	2
2.2 Test Jig	2
2.3 Test	2
2.4 Examination after Deformation	3
2.5 Calculation of Stress and Strain	3
3. Results	3
3.1 Results of Test	3
3.2 Results of Examination	3
3.3 Results of Calculation	5
4. Discussions	5
5. Conclusions	7
References	8

1. 緒 言

出力急昇による燃料棒破損を防ぐために、沸騰水型軽水炉（BWR）においては改良被覆管としてジルコニウム・ライナ管が用いられるようになってきている。ジルコニウム・ライナは応力腐食割れ（SCC）の原因となるFPガスとジルカロイの直接接触を防ぐとともに、ペレットとの相互作用によって生じる内面からの機械的応力を緩和する目的により採用されている。ジルコニウムは以下の理由により、ライナの材料として選定されている。

- ① ジルカロイに比べて軟らかく、クラックが伝播しにくい。また、照射硬化も飽和する傾向をもつ⁽¹⁾⁽²⁾。
- ② 熱中性子経済が良い。
- ③ 熱的特性が良好である。（融点：1853°C、熱伝導度：300°Cにおいて0.19 W/cm·k⁽³⁾）
- ④ SCC感受性が低い⁽¹⁾。

ライナ管に関する研究として、これまでに非照射あるいは中性子照射した試料に対してヨウ素等の腐食性ガス雰囲気下でのバースト試験等が行われている。それらの結果からも、ジルコニウム・ライナのSCCに対する有効性が確められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

BWRにおける出力急昇時の燃料破損問題は、このジルコニウム・ライナ管の採用により、工学的には一応解決されていると言えるが、ライナ層の機械的応力の緩和効果についての定量的な把握や機構は明らかにされているとは言えない。そこで本研究では、ジルコニウムによる応力緩和効果の詳細を明らかにするために、ジルコニウム・ライナの振るまいとその効果を調べた。実際は炉外において突起を付けたリング引張用治具を用い、BWR用ジルコニウム・ライナ管と比較用のライナのないジルカロイ-2管の内面から幅0.5及び1mmで局所応力を加えた。組織観察などの変形後試験を行った。また、燃料ふるまいコードFEMAXI-Ⅲの一部を修正したコードを用いて、実験と同じ条件下で被覆管試料内に生じる応力、ひずみ分布を求め、組織観察等の試験結果と比較検討した。

2. 実験方法

2.1 試料

試料は、BWR用のジルコニウム・ライナ被覆管（以後、単にライナ管と称する）と、比較用の従来BWRに用いられているジルカロイ-2被覆管（以後、Zry-2管と称する）の2種類である。Table 1に各々の被覆管の主な仕様を示す。これらの管材から、まずリング状試験片を数種類の長さ（5～20 mm）にファインカッターを用いて切り出した。しかし、長さが10mm以下では変形試験中、試験片全体が楕円状につぶれやすく、それ以上では長さ依存性が見られなかった。従って、試験片長さは10mmとして、以後試験を行った。

2.2 試験治具

本試験で用いた治具及び試料のセット方法をFig. 1に示す。通常のリング引張用治具に、幅0.5あるいは1mm、高さ1mmのSUS 304製の局所変形用突起を組み合わせた治具を用いた。治具本体には高い強度が求められるため、Cr-Mo鋼のひとつであるSCM-440⁽⁶⁾を用いた。治具本体と突起は変形試験ごとに、瞬間接着剤を用いて接着した。昇温により接着剤は気化してしまうが、一度試料をセットしてしまえば、試験中に突起が移動したり、はずれることはなかった。ライナ管とZry-2管では内径に差があるので、それぞれの内径に合った突起を用いた。実炉内での燃料ペレットと被覆管との相互作用を仮定した場合、極端にせまい接触領域（<0.5mm）で内側から局所応力に加わることは考え難い。むしろ、ペレットがスウェリングによりつぶみ型に変形し、ペレット端からペレットの長さの半分程度の広い領域で接触が起こるか、または傾いたペレット片の接触が起こると考える方が実際的である。一方、本実験のような模擬実験では、単純化した条件で変形を与え、局所効果を把握することが望ましい。従って、本実験では局所変形が顕著となる変形領域幅の上限として、局所変形を加える幅を0.5あるいは1mmとした。

2.3 変形試験

前項で述べた治具に試料をセットし、インストロン引張試験機を用いて変形試験を行った。高温における試験では電気炉を用いた。試験条件として、クロスヘッド速度を1mm/min（全周にわたる均一変形を仮定すると、歪速度は 9×10^{-4} /secに相当する）、試験温度を室温あるいは300～350°Cとした。あらかじめ試料の温度との対比を求めておいた治具本体の試料に近い位置にスポット溶接したP-R熱電対を用いて測温を行った。設定温度到達後、5分間保持し変形試験を行った。変形は目標とする変形量に達した時点で止めた。試験中の変形量は、チャート移動量や最大荷重を目安とし、変形試験後に行った断面観察により、正確に決定した。

2.4 変形後試験

まず燃料棒形状測定装置（プロフィロメータ）を用いて、変形試料の外表面の模擬リッジ形状を測定した。

その後、Fig. 2に示す概略図のように、試験片をファインカッターを用いて縦割りにした。これらの試料を樹脂に埋め込み、機械研磨及びエッチングを行い、変形部分近傍の変形組織を、干渉型光学顕微鏡を用いて観察した。また、変形で生じた応力、ひずみ分布の概略を調べるために、組織観察で用いた断面において、マイクロビッカース硬さ試験を行った。

2.5 応力とひずみ分布の計算

試験断面における応力、ひずみ分布を、燃料ふるまいコードFEMAXI-Ⅲの被覆管応力解析サブコードを修正したコードを用いて求めた。本コードは、強度等の物性の異なる2層からなる被覆管の応力、ひずみ分布を取り扱える。ただし、熱膨張、弾塑性のみを考慮し、クリープや照射成長等は影響が小さいと考え除外してある。境界条件としては、実験と同じ条件を与え、幅0.5あるいは1mmで被覆管内面から適当な変位を与えた。用いたジルコニウム及びジルカロイの物性値を、それぞれTable 2とTable 3に示した。

3. 実験結果

3.1 変形試験結果

変形試験により得られた荷重-変位曲線の例として、Fig. 3にライナ管とZry-2管を室温、300、350°Cで変形させた場合を示した。いずれも、目標とした変形量に達した時点で、変形を止めた。ライナ管において、ジルコニウムの変形による特徴的な変化は、これらの曲線上には現れていない。これは、ライナ管におけるジルコニウムの変形が局所的なものであり、全体としてはジルコニウムとジルカロイが一体となって変形したためと考えられる。荷重-変位曲線に見られる2種類の被覆管の強度の差は、主にジルカロイ部分の肉厚の差である。

単軸引張荷重を用いた変形であるため、試験片に生じた変形は模擬リッジ形成だけでなく、試料全体の引張方向への変形（つぶれ）も生じた。従って、模擬リッジの大きさの周方向分布は複雑となり、最大の変形は引張方向より40~45°C傾いたところに生じた。この変形の複雑さのため、純粹に模擬リッジ生成に要した応力の算出等は不可能であった。

3.2 変形後試験結果

局所変形を加えたライナ管とZry-2管の外表面形状を測定した結果の例を、Fig. 4とFig.5

に示す。ほぼ同等の変形量を与えた2種類の被覆管の変形部分近傍を、試料を 20° おきに回転させながら、軸方向の変形部形状変化をチャート上に表わした。前項の結果で述べたように、角度に依存して模擬リッジの大きさが変化していることがわかる。これらのチャートを用いて、外表面に生じる変形の大きさや範囲(模擬リッジの高さや幅、あるいはそれらの関係)を比較した。しかし、変形量を変えた場合でも、被覆管外表面の変形部分の形状に関しては、ライナ管とZry-2管の間ではほとんど差は見出せなかった。

次に、変形試料を、引張方向からある決った角度において縦割りにし、その断面を観察した。Fig. 6に断面の全体像を示す。さらに、局所応力の加わった部分を拡大し観察した例をFig. 7(a)と(b)に示す。即ち、 300°C で内側から幅0.5mmで局所変形させたライナ管の場合(a)と、Zry-2管(b)の場合である。まず、ライナ管に注目すると、全体的にはライナの厚さは変化していない。しかし、変形部分の両端(断面においては「端」であり、三次元的には突起の「ふち」の当る部分である。)でジルコニウムは大きな変形を起こし、明確な段差が生じている。このように、ジルコニウムには変形部の両端で大きな応力が集中していると考えられるが、ジルコニウムとジルカロイの境界線はゆるやかな曲率変化をしており、ジルカロイにはこの応力集中が及んでいない。Zry-2管においては、ジルカロイに直接、急激な段差が生じており、この部分で大きな応力が生じていることは明らかである。従って、ジルコニウムによる応力緩和効果は、この変形部の両端で顕著に現れている。また、室温やさらに高温の 350°C で変形させた場合や変位を与える幅を1mmと変えた場合でも、得られた結果は上で述べた結果と差がなかった。これまでの多くのデータから実炉内で起こり得る内面の変位量は、最大でも片側 $20\mu\text{m}$ 程度であると考えられる。従って、Fig. 7に見られる変形量は実際燃料棒内で生じる変形に比べて十分大きなものであるが、ジルコニウムのふるまいや効果を強調させるために、Fig. 8のようにさらに変形を進めてみた。Fig. 8は、温度 350°C 、幅1mmで内側から約 $100\mu\text{m}$ の変位を与えた時の組織である。食い込みの起った端の部分で、ジルコニウム結晶粒のさらに大きな変形が見られる。しかし、このように変形が非常に大きな場合でも、ジルコニウムとジルカロイの境界はなめらかな曲線を描いており、ジルカロイへの応力緩和効果は保たれている。

変形幅を0.5及び1mmと変えた時に、ライナ管とZry-2管において、内面に生じた食い込みの深さと試料全体の変形量の目安となるその断面の外径変化率の関係を調べた(Fig. 9)。この結果、試料に同じだけ変形量を与えた時に、0.5と1mm幅の変形では食い込み深さに差が生じるが、ライナ管とZry-2管の間ではその深さに差がない。即ち、一見ライナ管では内面により大きな食い込みが生じるように思われるが、実際はZry-2管でもライナ管と同等の変形が起こり、突起の食い込む両端に応力が集中する。

試料断面において行った、マイクロピッカース硬さ試験の結果をFig. 10に示す。各図の右下に示した変形前の硬さに比べると、ライナ管においては、ジルコニウムの突起の食い込んだ領域で明らかに、硬さが増加している。組織観察の結果から、突起の食い込んだ両端付近で応力が集中していると考えられ、硬さの増加も予想されるが、ライナ管のジルカロイ部分やZry-2管においても、硬さが特に大きく増加している領域はない。このような結果が得られた理由として、ジルカロイにおける応力集中が、ジルコニウムとの境界や内面にごく近い位置に限られることが、考えられる。硬さ試験は境界あるいは内面に近い位置($< \sim 100\mu\text{m}$)では測定が行えない。

3.3 計算結果

まず、被覆管内面に変位を与えた時、外面に現われる変位を計算した。幅1mmで内面から10, 30, 100 μm の変位を与えた時、被覆管外面に生じる変位をFig. 11に示す。外表面に生じる変位の形状や大きさは、変形量が大きくなっても、被覆管の種類に依らない。これは表面形状測定の結果と一致している。

次に、300°Cにおいて幅1mmで内側から20 μm の変位を与えた時、ライナ管とZry-2管の試料断面内に生じる等価応力分布をそれぞれFig. 12とFig. 13に示す。Zry-2管においては、最も内側で非常に高い応力が生じている。肉厚の中間部で再びピークを持つが、外面では応力は減少している。これに対してライナ管では、Zry-2管で応力の高かった内側の部分がそっくりジルコニウムにより吸収されている。このジルコニウムの肉厚分を除いたジルカロイの部分の等価応力は2種類の被覆管において差はない。さらに詳しく応力分布を調べるために、ライナ管のジルカロイの最も内側の層とZry-2管のいくつかの位置における層に働く、半径方向及び周方向応力をそれぞれFig. 14とFig. 15において比較した。縦軸には、幅1mmで内側から20 μm の変位を与えた時の応力を、横軸には、変形試料に対応する軸方向位置をとり、プロットを行った。ジルカロイの最も内側の層における応力は、SCCが起こる際には重要なパラメータである。ジルカロイの最も内側の層での半径方向及び周方向応力を2種類の被覆管で比較すると、組織観察の結果で示されたように、Zry-2管では変位を与えた領域の端の部分で大きな応力が集中している。それに比べてライナ管ではジルカロイの最も内側の層に働く応力は、非常に小さい。さらに、ライナ管のジルカロイの最も内側に働く半径方向は、Zry-2管のライナ厚に相当する深さにおける半径方向応力と比べても $2/3$ 程度である。このように、被覆管内側のライナ厚程度の部分（全肉厚の約一割）に関しては、ジルコニウム・ライナ管の応力緩和効果が存在する。しかし、被覆管の他の大部分の領域では、応力分布はライナ管とZry-2管の間で差はみられない。

4. 考 察

本実験における突起付きリング引張変形は、燃料棒に生じるリッジングを模擬することを目的に行ったものである。しかし、この方法は以下のような点で、実際の現象を十分に模擬することはできない。第一に燃料棒内でのリッジングは軸対称性が高いが、本研究の変形方法では軸対称性は得られない。第二に、燃料棒においては、ペレット端部との接触により円周歪が大きい場合でも、軸方向の引張応力が存在し二軸応力条件下にあるのに対して、本実験では突起が接触している部分を除けば、軸方向応力は存在しない。2個以上の突起を同時にセットすることで、軸方向の拘束を模擬することが可能だが、変形荷重が用いた治具の強度に比べて過大となるため行えなかった。従って、行われた突起付きリング引張変形は、マクロには燃料棒における変形をそのまま再現するものではない。そこで本研究においては、被覆管内面から突起の食い込みによるミクロ的な変形の周辺への影響をある断面において調べることに重点を置いて、被覆管のふるまいを調べた。

本実験では、突起の幅は0.5及び1mmを選択した。この幅あるいはその周辺を含む範囲で起こる変形を考えるために、まず仮想的に十分長いペレットが、ライナ管の内面に半径方向変位を与える場合を考える。ジルコニウム・ライナの塑性変形は、非圧縮性であり逃げ場を持たないので、ペレットから与えられた変位をそのままジルカロイに伝える。従って、この場合、変形が塑性領域に入れば、ジルコニウムの存在は、外側のジルカロイ部の変形に影響を与えないのは明らかである。本実験で用いた突起幅0.5あるいは1mmは、ライナ肉厚(100 μ m程度)に比べれば5倍あるいは10倍の大きさであり、中心付近(むしろ大部分)での応力状態は、上で述べた十分に長いペレットによって変位を与えられた場合と同じである。言い換えれば、本実験の場合でも、実際の燃料棒中でペレットが被覆管を押し場合でも、ライナの応力緩和効果は、突起物(あるいはペレット)端部付近で圧縮されたジルコニウムが横に逃げることでのみ起こり得る。1mm以上の幅の突起を用いなかったのも、この理由による。

実験結果から得られる変形部分のミクロ的観察から応力緩和を調べるためには、局所応力に対して大変形を起こす領域が、ジルコニウムにおいて半径方向にも軸方向にもどの程度局在化されているか、それがどの程度ジルカロイまで届いているのかを、調べなければならない。理想的な応力緩和効果とは、ジルカロイには局所変形の影響が全く及ばず、かつ軸方向にはできるだけ遠くまで塑性流動-応力緩和が及ぶという場合である。しかし、これはジルコニウムがジルカロイに近い強度を持っている以上有り得ない。従って、突起の食い込む両端における局所変形に対して、大変形を起こす領域が、半径方向にも軸方向にも局在化されていなければならず、「応力緩和効果がある」としなければならない。

変形の局在化に関する情報は、次の3つから得られる。

- ① ジルコニウム-ジルカロイ境界面の形状
- ② 結晶粒の変形分布
- ③ マイクロ・ピッカース硬さ分布

①に関しては、ライナ管においては、ジルコニウムとジルカロイの境界が断面の組織写真において明瞭に現われる。突起の端部における被覆管への応力は、せん断応力が支配的であるので、応力の集中したジルコニウムの大変形領域が境界に及べば、組織写真においても境界線の不連続や急激な変化が見えるはずである。しかし、Fig. 8に見られるように食い込み量が100 μ mに及ぶ場合でも、境界線は滑らかな曲線である。従って、大きな変形、応力集中はこの境界まで及んでいないことがわかる。

②に関する結晶粒の変形は、大きな塑性流動があったことを示すものである。(しかし逆に、明らかに現れていない場合でも、必ずしも大きな変形や塑性変形がなかったことを意味しない。)しかし、Fig. 8のように変形が大きい場合でも、ジルコニウムの結晶粒の変形は突起の食い込んだ両端付近にきわめて局在しており、大応力の及んだ範囲が小さかったことを示している。

③に関しては変形試料の断面において硬さ試験を行い、もしジルカロイ部分に応力の及んだ跡があれば、それは局所的な硬さの増加とし現れる可能性がある。大きな変形を与えたライナ管における硬さ試験の結果(Fig. 10)において、ジルコニウムは食い込みの幅で硬さが明らかに増加しているが、ジルカロイ部分では特に硬さの増加している領域は見られない。

以上の3つの実験結果から、本実験で変形を加えたライナ試料においては、ジルコニウムの変

形は局在化しており、塑性流動によってジルカロイに及ぶ応力は十分に緩和されていると言える。

残る問題は、この試料に与えられた変形量が、実際の燃料挙動を考慮したときに十分なものであったかということと、その変形や応力に関してライナのない Zry-2 管と比較して差があったかどうか、またどのように比較するかということである。前者について実際の燃料棒では、外周の増加が変形量の目安となるが、本実験では非対称性が大きいために目安とはできない。被覆管内面に生じた食い込み量（深さ）は、半径方向歪のみでなく軸方向成分を持っているが、これを半径方向への変形量の目安とすることは可能である。Fig. 7 の食い込み量、片側で約 $20\ \mu\text{m}$ は、たとえ半径方向成分のみを考えこれより小さなものとなっても、燃料棒の片側の変形量としては十分に大きなものである。

ライナ管と Zry-2 管の比較については、2つの立場での比較が考えられる。ひとつは、ジルカロイの最も内側における応力、変形状態の比較であり、ライナ管においてはライナ層との境界部、Zry-2 管においては内表面そのものが比較の対象となる。この場合、Zry-2 管におけるジルカロイの方が、それ自体に食い込みを生じ大きな変形を受けていることは明らかである。もうひとつは、被覆管の一定の位置、例えばライナとの境界部分に相当する位置での比較である。しかし、Zry-2 管においてはライナ管における境界部分のようなマーカが存在せず、組織観察の観察から比較するのは困難である。硬さ試験の結果もそれほど明確なものではない。しかし、計算結果においては正確な位置での応力の比較が可能である。ライナ管のライナとの境界部のジルカロイ層と、Zry-2 管のそれに相当する位置での応力を比較すると、まず、相当応力と周方向応力は両者の間で差はない。この2つの応力は、ジルカロイの最も内側の領域を除いて、ライナの有無を問わず、ほぼ同じ分布をする。半径方向応力を同じ位置で比較すると (Fig. 14)、食い込みの両端の領域において Zry-2 管ではライナ管の約 1.3 倍の応力が生じている。従って、このライナ厚に相当する位置での比較では、まだジルコニウムによる応力緩和効果が存在すると考えられる。また、この差は外面に近づくにつれて少なくなる。

ただし、有限要素法による応力解析は、塑性変形モデルを入れても、適用範囲は微小変形領域に限られ、圧縮されたジルコニウムが、塑性流動により横に逃げるような現象は全く扱えない。従って、ここで示した応力分布は、変形のごく初期段階に対応するものであり、最終変形段階におけるライナ管と Zry-2 管の差は、片側 $20\ \mu\text{m}$ の変形の場合でもこれよりはるかに大きかったはずである。

5. 結 論

BWRにおけるジルコニウム・ライナ管の採用目的のひとつである、ジルコニウムによるジルカロイへの応力緩和効果の機構を調べ定量的把握を行うために、リッジングを模擬して、ジルコニウム・ライナ被覆管と比較用のライナのないジルカロイ-2被覆管の内面から局所応力を加えた。変形後、形状測定、組織観察、硬さ試験を行ない、ジルコニウムやジルカロイのふるまいを調べた。

局所変形が加えられた領域の「ふち」の部分（実際の燃料棒中ではペレット端の当る部分）で大きな応力が集中する。しかし、ライナ管ではジルコニウムが大きく変形し、かなり大きな変形を与えた場合でも、ジルカロイの変形は緩やかであり、集中応力はジルカロイまで達していないことが示された。これに対して、Zry-2管では直接ジルカロイに変形が起こり、大きな応力が生じることは明らかである。ただし、被覆管の内外面に生じる変形の大きさや形状（内面の食い込み深さ、外面の模擬リッジの大きさや形状）は、二種類の被覆管の間で差は見られなかった。

また、燃料ふるまいコード FEMAXI-IIIの一部を修正したコードを用いて、被覆管内に生じる応力、ひずみ分布等を求めた。実験と同じ条件で被覆管内面から変位を与え、組織観察等の試験結果と比較検討した。

計算により求められた試料断面での応力分布においても、実験結果と同様に局所変形を加えた領域のふちで大きな応力が生じる。しかし、ライナ管では、ジルコニウムとの境界付近のジルカロイ層に働く半径方向及び周方向応力は、Zry-2管の内面と比較すると非常に小さい。なかでも、ライナ管のジルカロイ最内面に働く半径方向応力は、Zry-2管のライナとの境界に相当する位置におけるものと比べても $2/3$ 以下である。しかし、ジルコニウムによる応力緩和効果が認められるのは、被覆管内面に近い一部の領域だけであり、大部分では二種類の被覆管の間に大きな差はない。

参 考 文 献

- (1) Shimada S., Nagai M. : J. Nucl. Mater. 114, 305 (1983)
- (2) 島田ら : 1987年日本原子力学会秋期大会予稿集, J 49
- (3) Tomalin D. S., Adamson R. B., Gangloff R. P. : "Zirconium in the Nuclear Industry", ASTM STP-681, 122 (1979)
- (4) 島田ら : 1984年日本原子力学会秋期大会予稿集, E 2
- (5) Shimada S., Nagai M. : J. Nucl. Mater. 114, 222 (1983)
- (6) 例えば金属データブック (金属学会編), 122 (1984)
- (7) Rosinger H. E. et al. : J. Nucl. Mater. 79, 170 (1979)
- (8) Fisher E. S. et al. : Phys. Rev. PA 482-A494 (1954)
- (9) Murabayashi M. et al. : J. Nucl. Sci. Technol. 12, 661 (1975)
- (10) MATPRO-V 09, USNRC TREE-NUREG-1005 (1976)
- (11) Nakajima, T. et al., JAERI 1298 (Dec. 1985)
- (12) N. Nakatsuka et al., J. Nucl. Sci. Technol. 19, 336 (1982)

Table 1 Major Properties of Zirconium-Liner Tube and Zircaloy-2 Tube

Zirconium-Liner Tube

Dimension : 10.550^{1D} × 0.860^t
 Yield Strength (Room Temp.) * : 36.35 kg/mm²
 U.T.S. (Room Temp.) * : 51.86 kg/mm²
 Elongation (Room Temp.) * : 35.2 %
 * Results Including Zirconium-Liner
 Grain Size (ASTM. No.)
 Zr y - 2 (T/L) : 12.5
 Zr (T/L) : 11.5
 F n : 0.13
 Ingot Hardness (BHN)
 Zr y - 2 : 178
 Zr : 97
 Annealing Temp. : 577°C × 2.5 Hr

Zircaloy-2 Tube

Dimension : 10.795^{1D} × 0.864^t
 Yield Stress (Room Temp.) : 41.79 kg/mm²
 U.T.S. (Room Temp.) : 56.53 kg/mm²
 Elongation (Room Temp.) : 33.9 %
 Grain Size (ASTM. No.) : 12.5
 F n : 0.15
 Ingot Hardness (BHN) : 178
 Annealing Temp. : 577°C × 2.5 Hr

Table 2 Physical Properties of Unalloyed Zirconium
Used in Calculation

Properties	Equation	Ref.
Young's Modulus	$E[\text{Pa}] = (96.90 - 0.0673 \times (T[\text{K}] - 273.15)) \times 10^9$	(7)
Poisson's Ratio	$\nu = 0.3303 + 8.376 \times 10^{-5} \times (T[\text{K}] - 273.15)$	(8)
Thermal Conductivity	$k[\text{W/cm-K}] = 0.246 - 2.208 \times 10^{-4} T[\text{K}] + 2.083 \times 10^{-7} T^2$	(9)
Thermal Expansion	Axial $\Delta L/L_0 = -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6} T[^\circ\text{C}]$ Radial $\Delta D/D_0 = -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6} T[^\circ\text{C}]$	(10)
Plasticity	Out-of-Pile 0.2% Yield Stress $\sigma_y[\text{MPa}] = 16.5 + 3.2 \times 10^{-2} X_0[\text{ppm}]$ X_0 : Oxygen Content	(11)
Friction Coefficient	0.6 ± 0.1 at 400°C (Valid for Zirconium and Zircaloy)	(12)

Table 3 Physical Properties of Zircaloy-2 Used in Calculation

Properties	Equation	Ref.
Young's Modulus	$E[\text{Pa}] = (9.900 \times 10^5 - 566.9 \times (T[\text{K}] - 273.15)) \times 9.8067 \times 10^4$	(8)
Poisson's Ratio	$\nu = 0.3303 + 8.376 \times 10^{-5} \times (T[\text{K}] - 273.15)$	(8)
Thermal Conductivity	$k[\text{W/cm-K}] = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T[\text{K}] - 1.45 \times 10^{-5} T^2[\text{K}] + 7.67 \times 10^{-9} T^3[\text{K}]$	(10)
Thermal Expansion	Axial $\Delta L/L_0 = -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6} T[^\circ\text{C}]$ Radial $\Delta D/D_0 = -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6} T[^\circ\text{C}]$	(10)
Plasticity	Out-of-Pile 0.2% Yield Stress $\sigma_y[\text{MPa}] = 31.32 - 0.0213 \times T[\text{K}]$	(11)

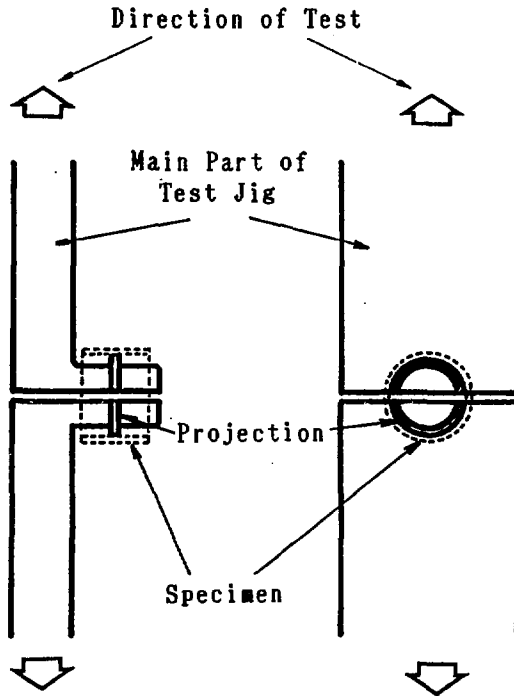


Fig. 1 Schematic Illustration of The Test

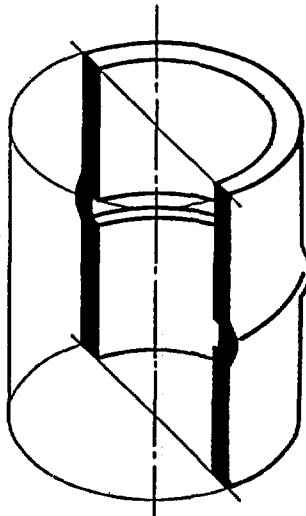


Fig. 2 Schematic Illustration of Longitudinally Cutted Specimen

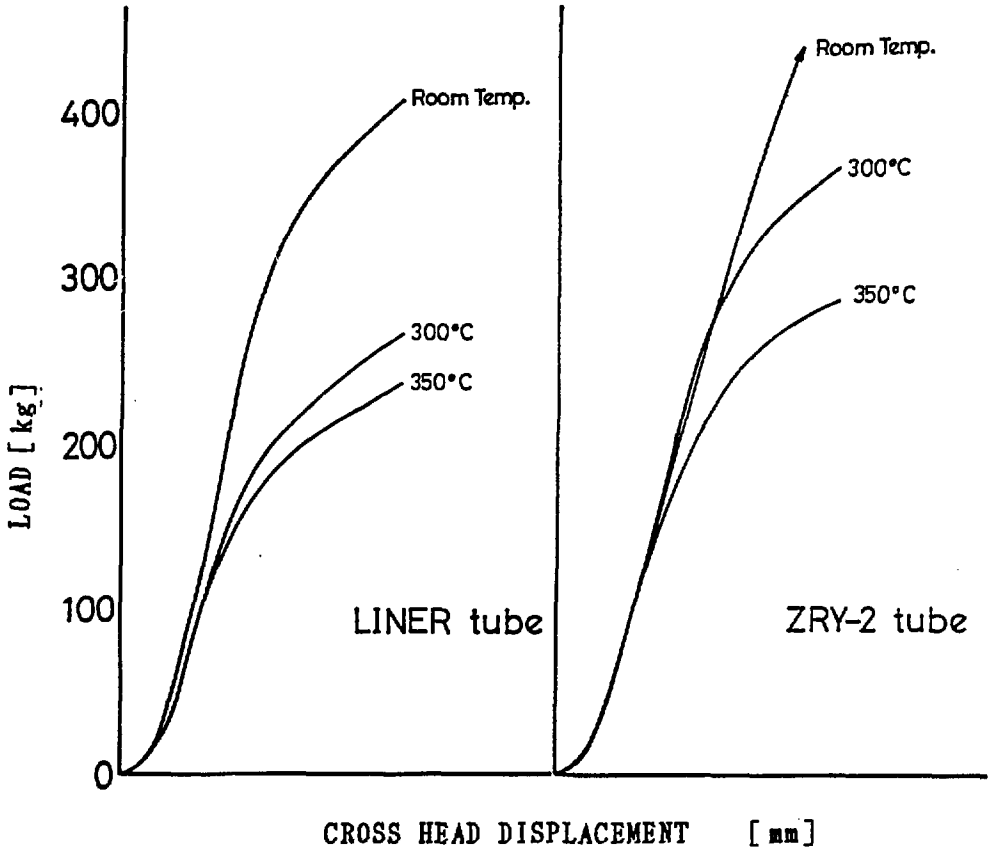


Fig. 3 Examples of Load-Cross Head Displacement Curve

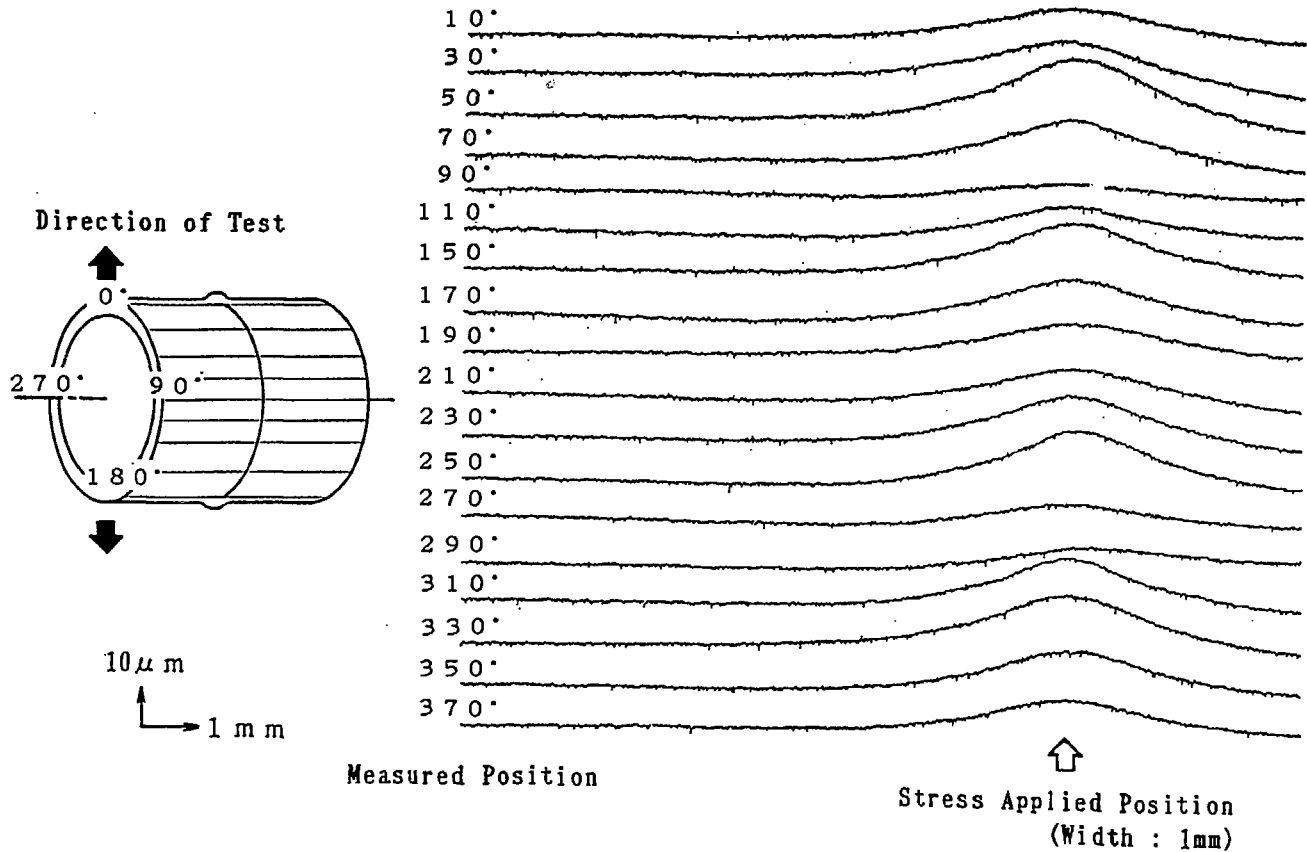


Fig. 4 Shape of Simulated Ridge in Deformed Zirconium-Liner Tube

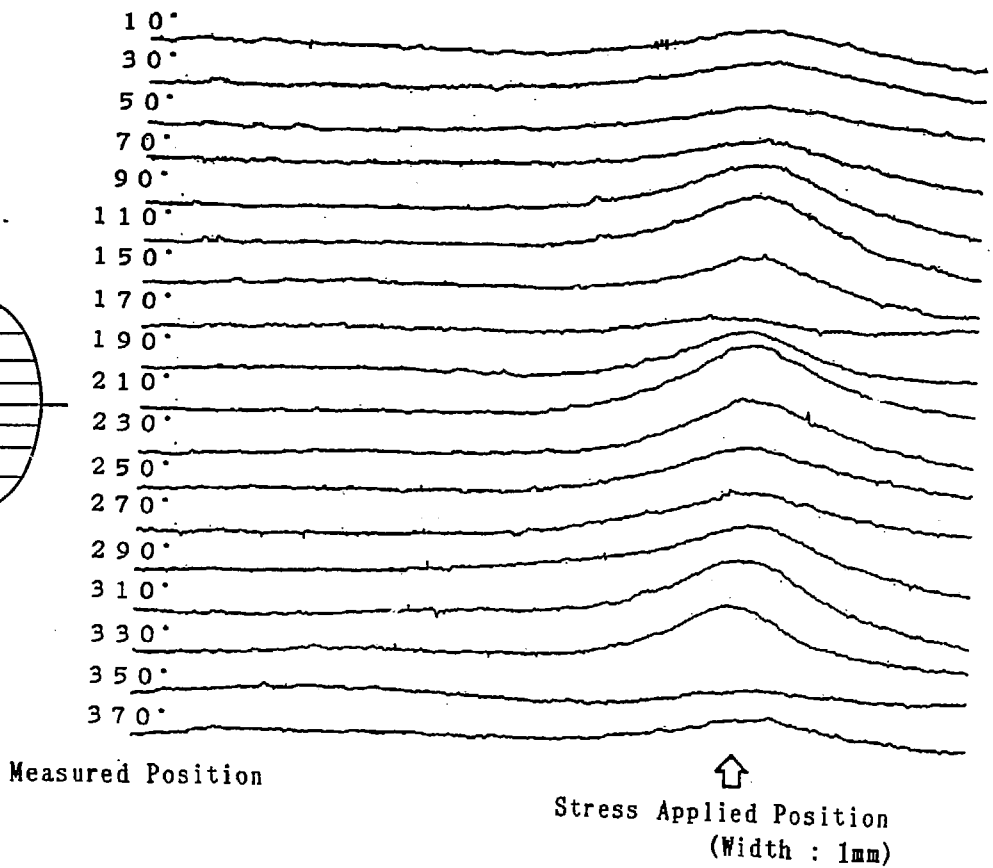
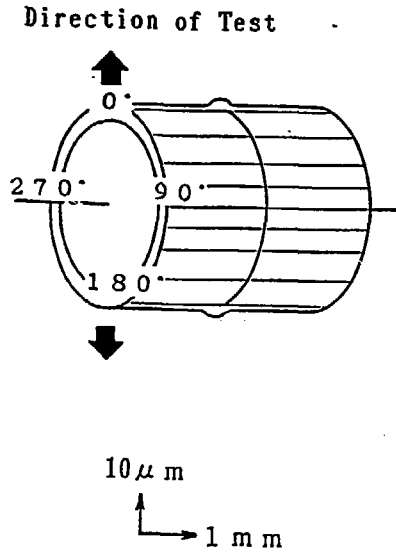


Fig. 5 Shape of Simulated Ridge in Deformed Zircaloy-2 Tube

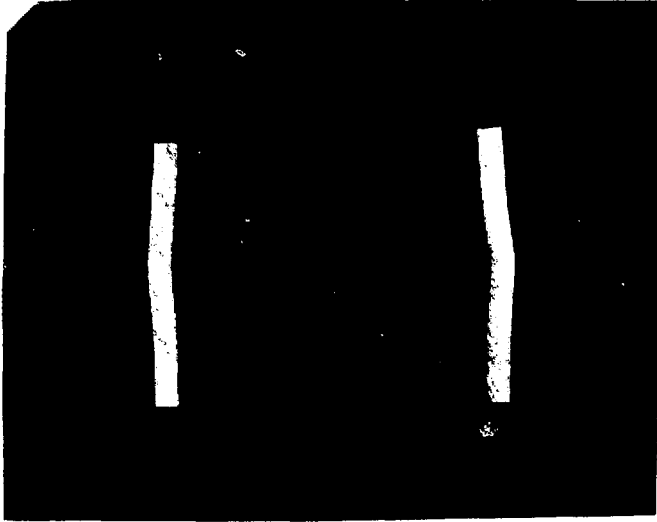
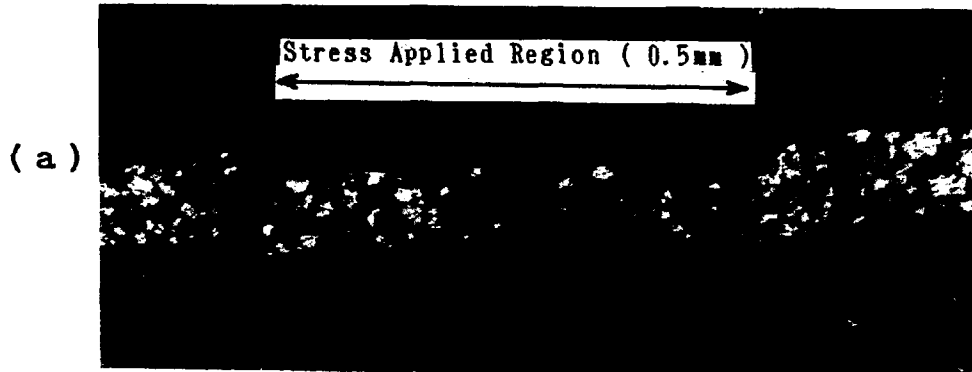


Fig. 6 Whole View of Longitudinal Cross Section of Deformed Sample

Zr-LINER Tube



Zry-2 Tube

Deformed at 300°C

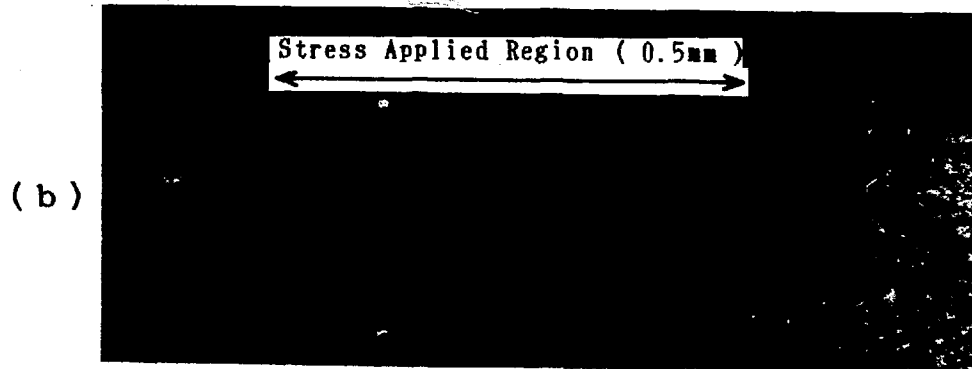
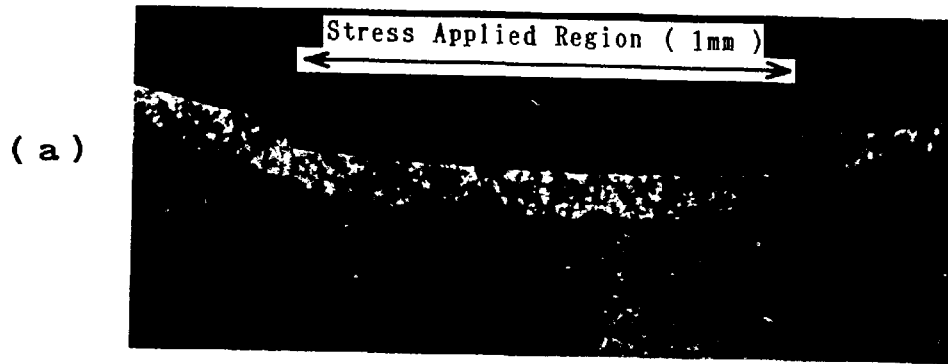


Fig. 7 Metallographic Cross Section of Stress Applied Region
(a) Zirconium Liner Tube, (b) Zircaloy-2 Tube



Zr-LINER Tube

Deformed at 350°C

Fig. 8 Metallographic Cross Section of Stress Applied Region
(a) Whole View, (b) Enlarged View of the Edge of Deformed Region

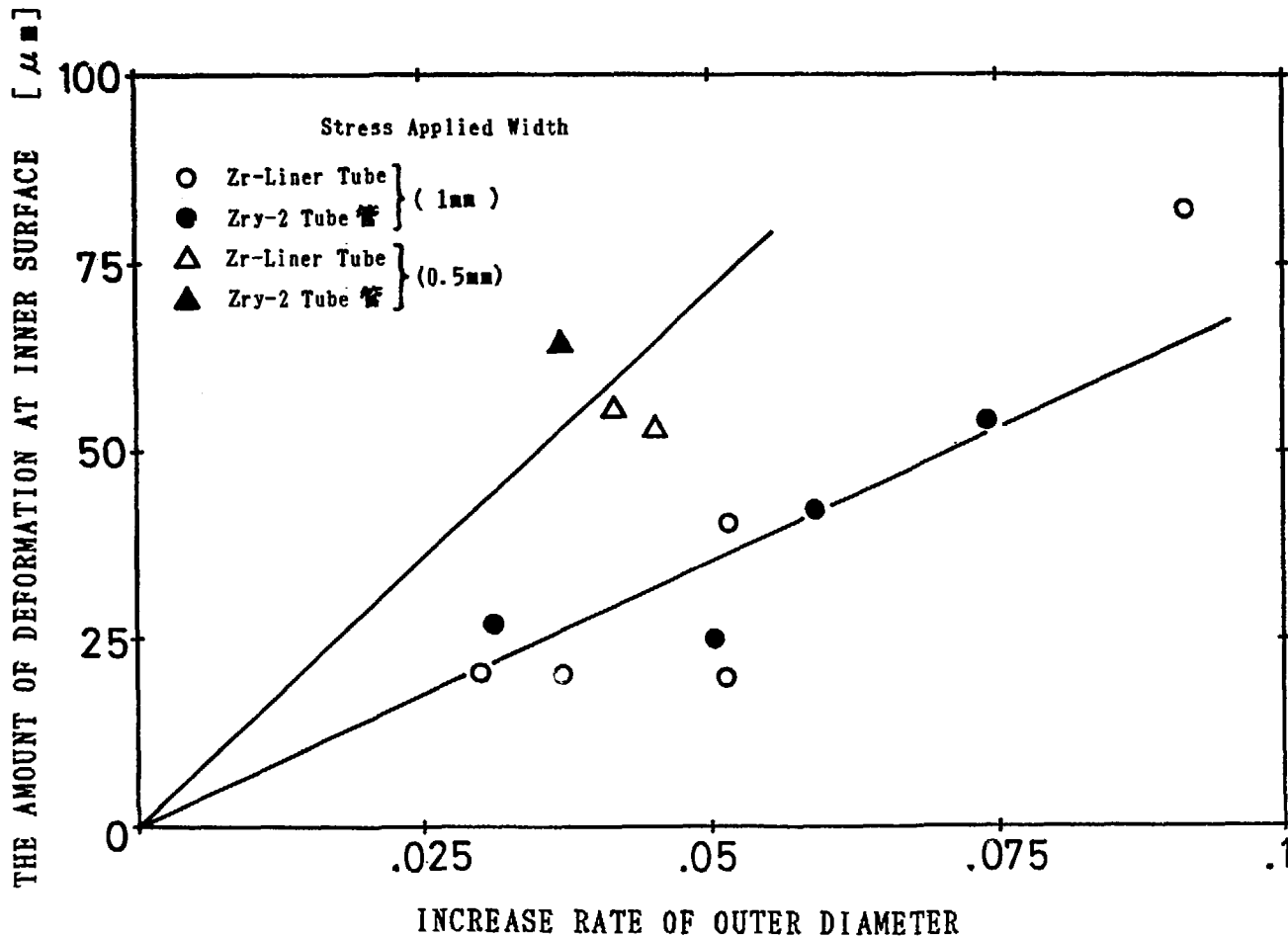


Fig. 9 Relation between the Amount of Deformation at Inner Surface and Increase of Outer Diameter of the Tube

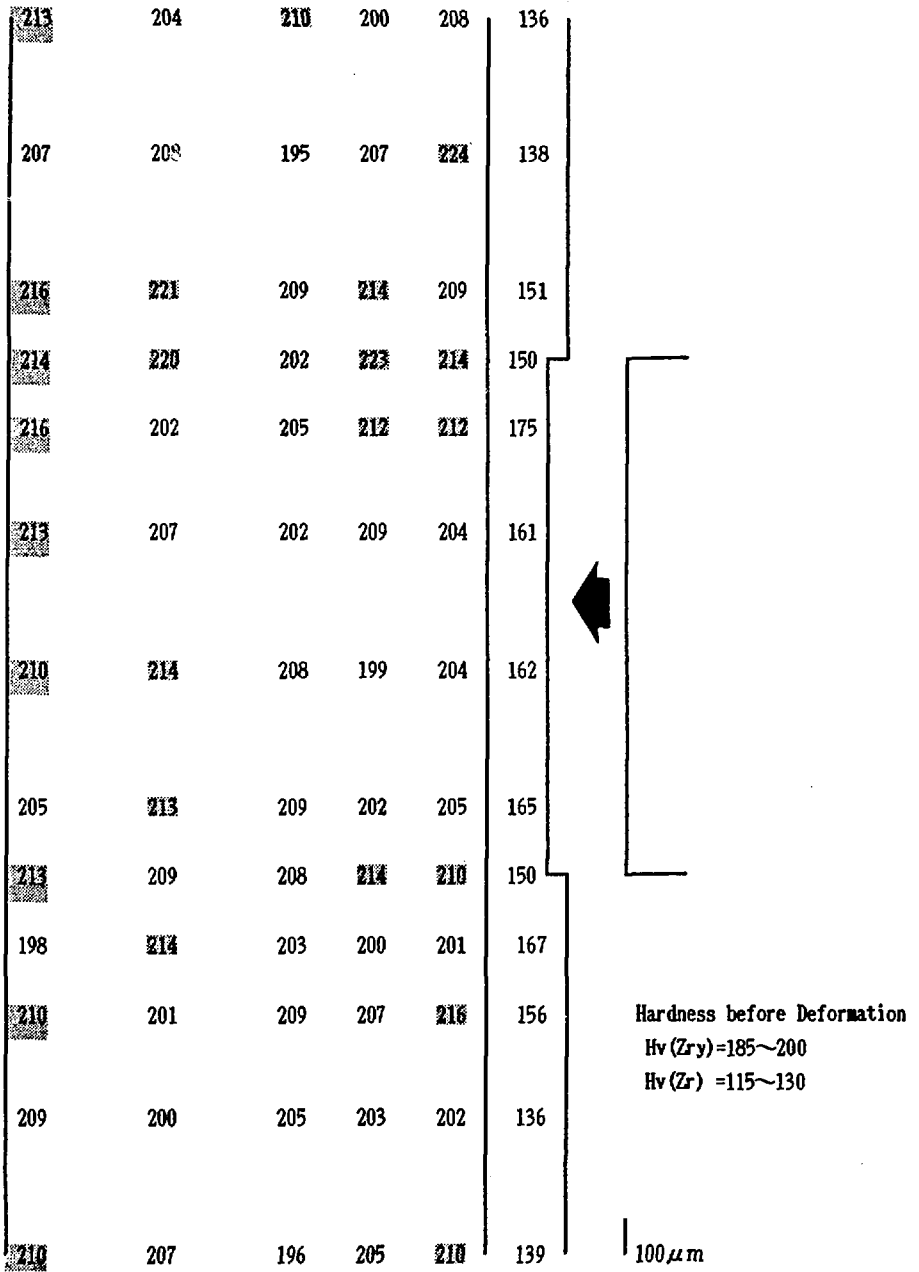


Fig. 1 O (a) Distribution of Micro-Vickers Hardness in Cross Section (Zirconium-Liner Tube, Load=50gf)

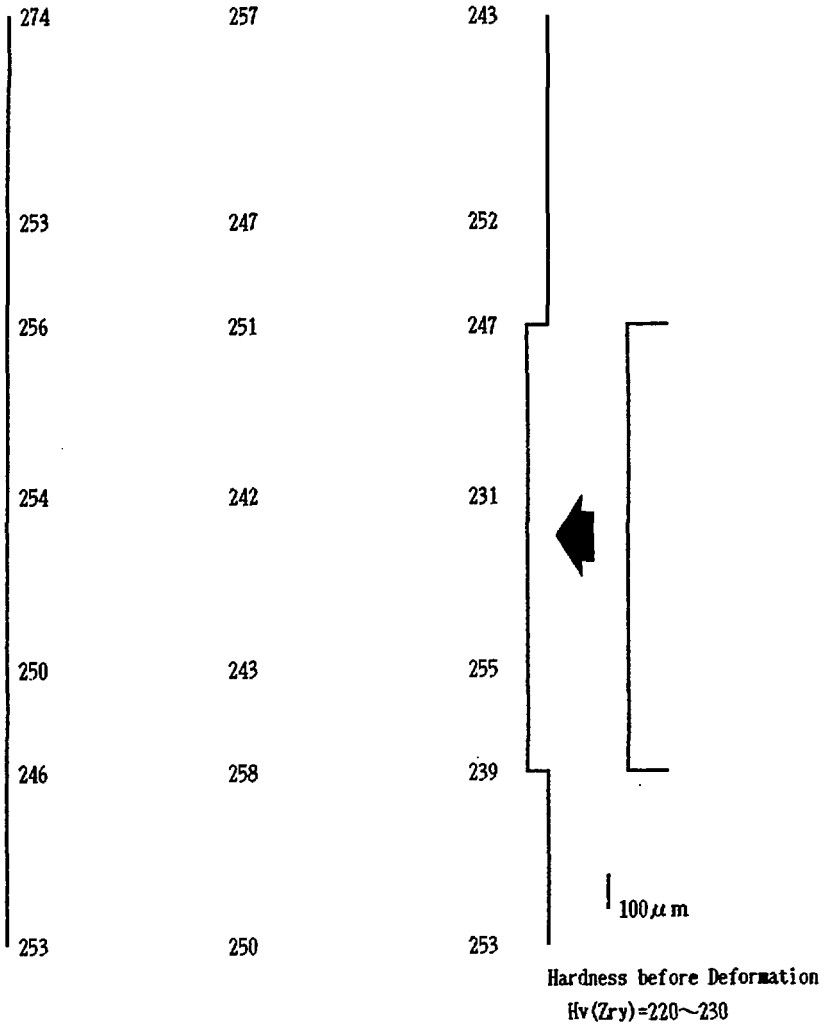


Fig. 1 O (b) Distribution of Micro-Vickers Hardness in Cross Section (Zircaloy-2 Tube, Load=50gf)

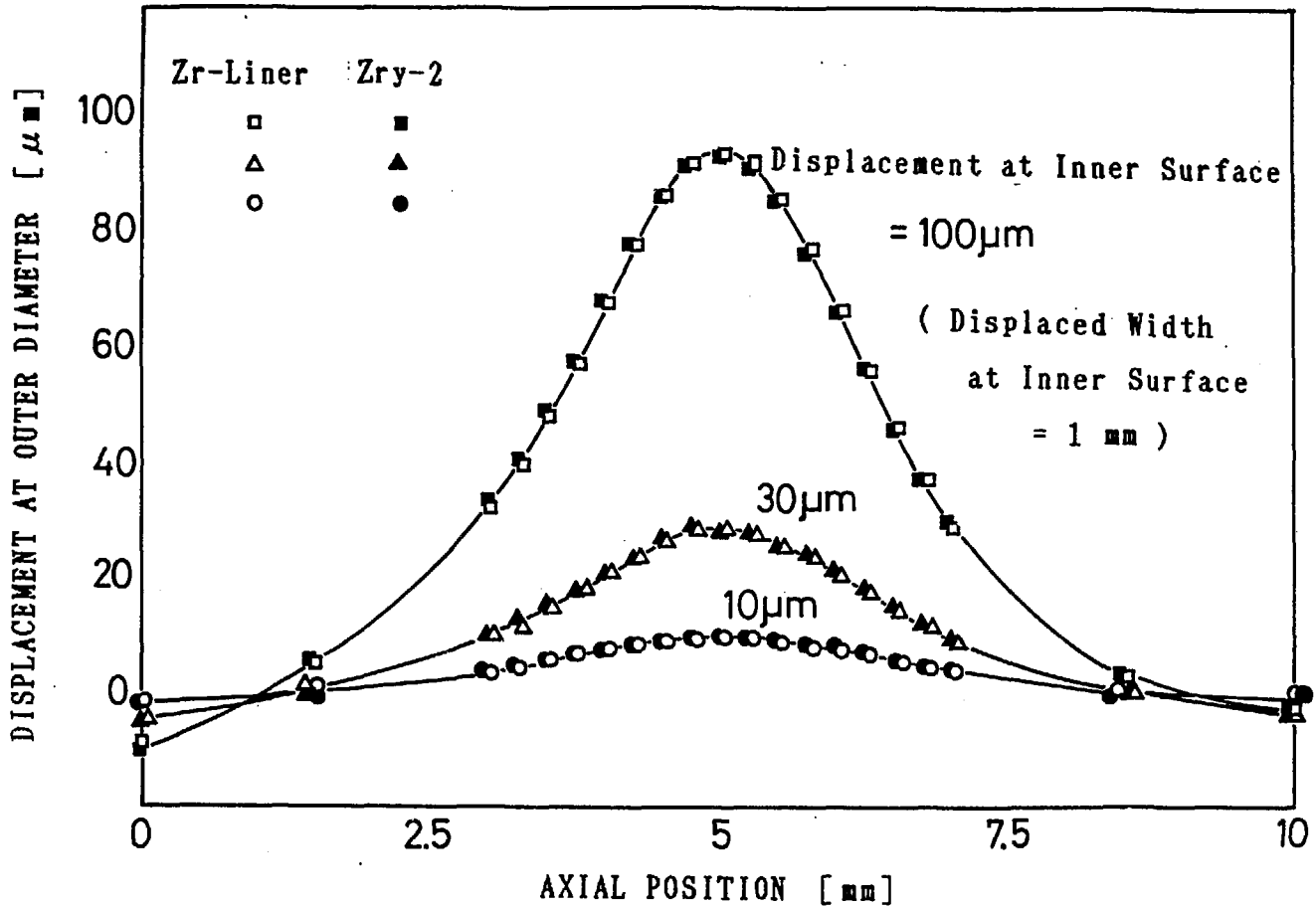


Fig. 1 1 Comparison of Calculated Displacement at Outer Surface between Zirconium-Liner Tube and Zircaloy-2 Tube

EQUIVALENT STRESS

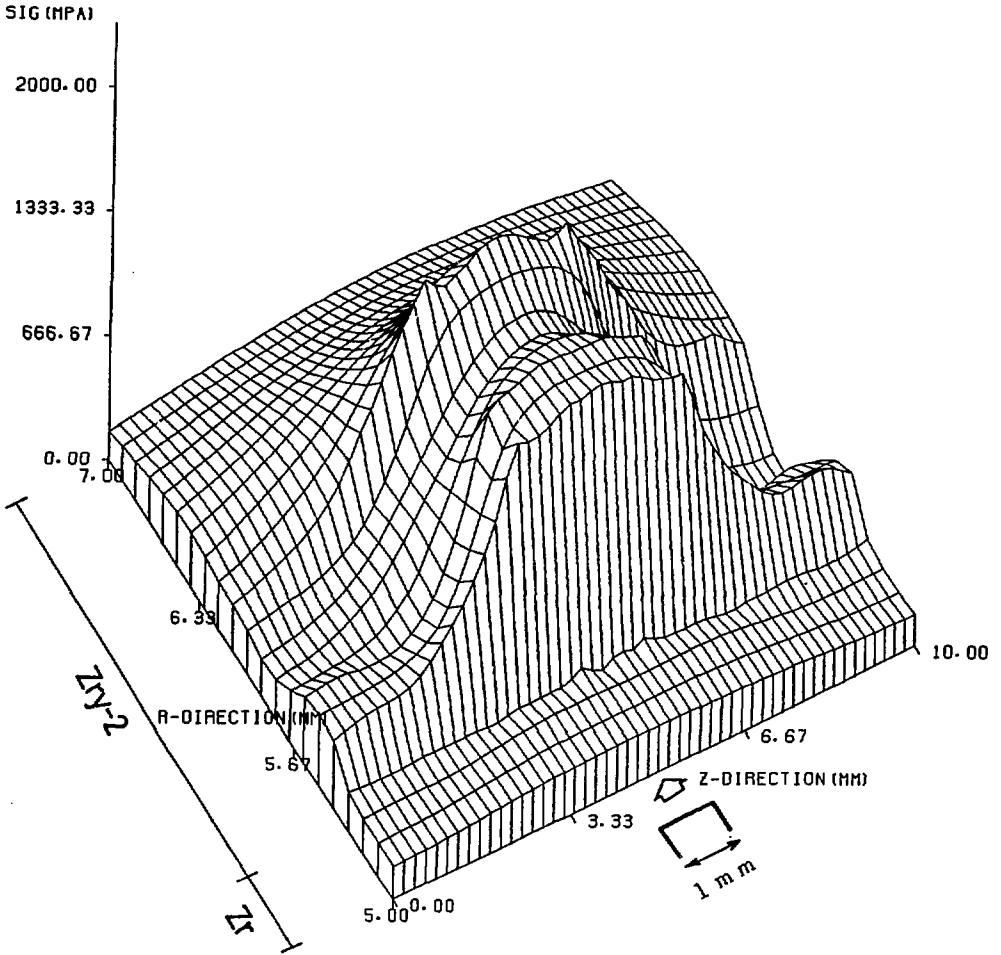


Fig. 1 2 Calculated Equivalent Stress in Cross Section (Zirconium-Liner Tube)

EQUIVALENT STRESS

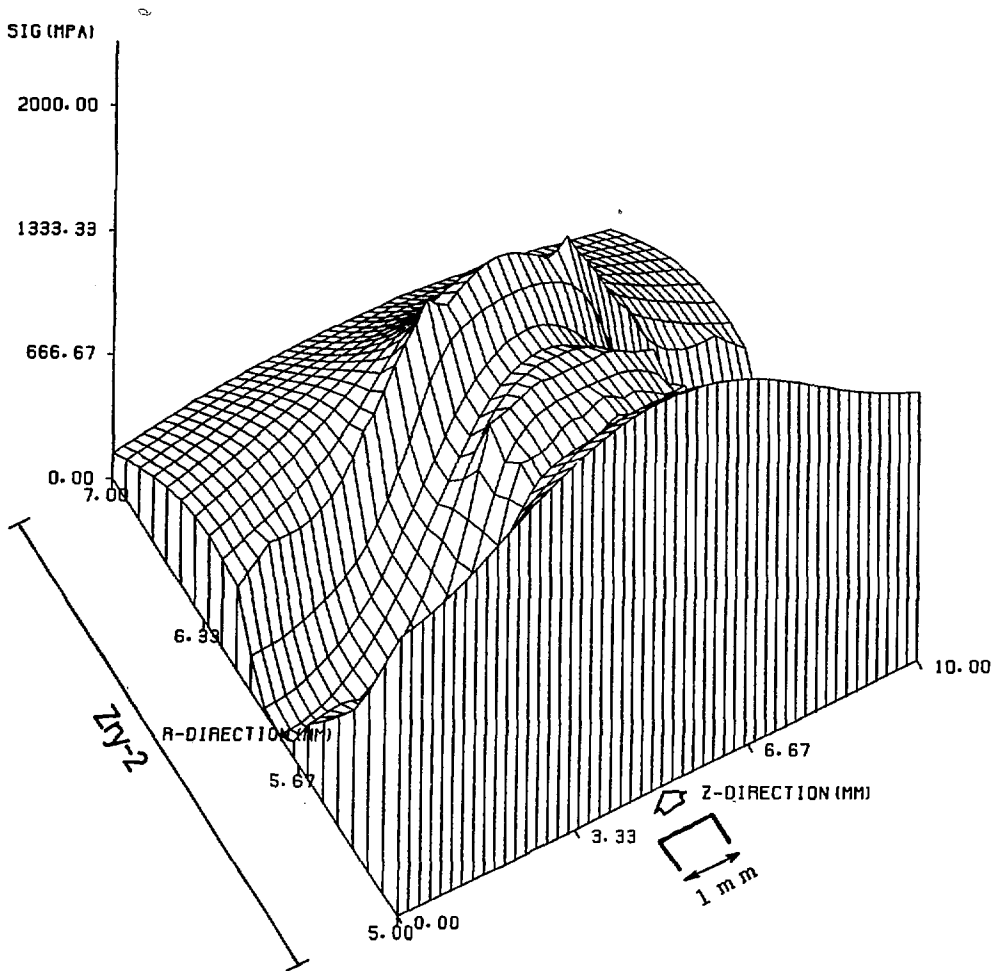


Fig. 1 3 Calculated Equivalent Stress in Cross Section
(Zircaloy-2 Tube)

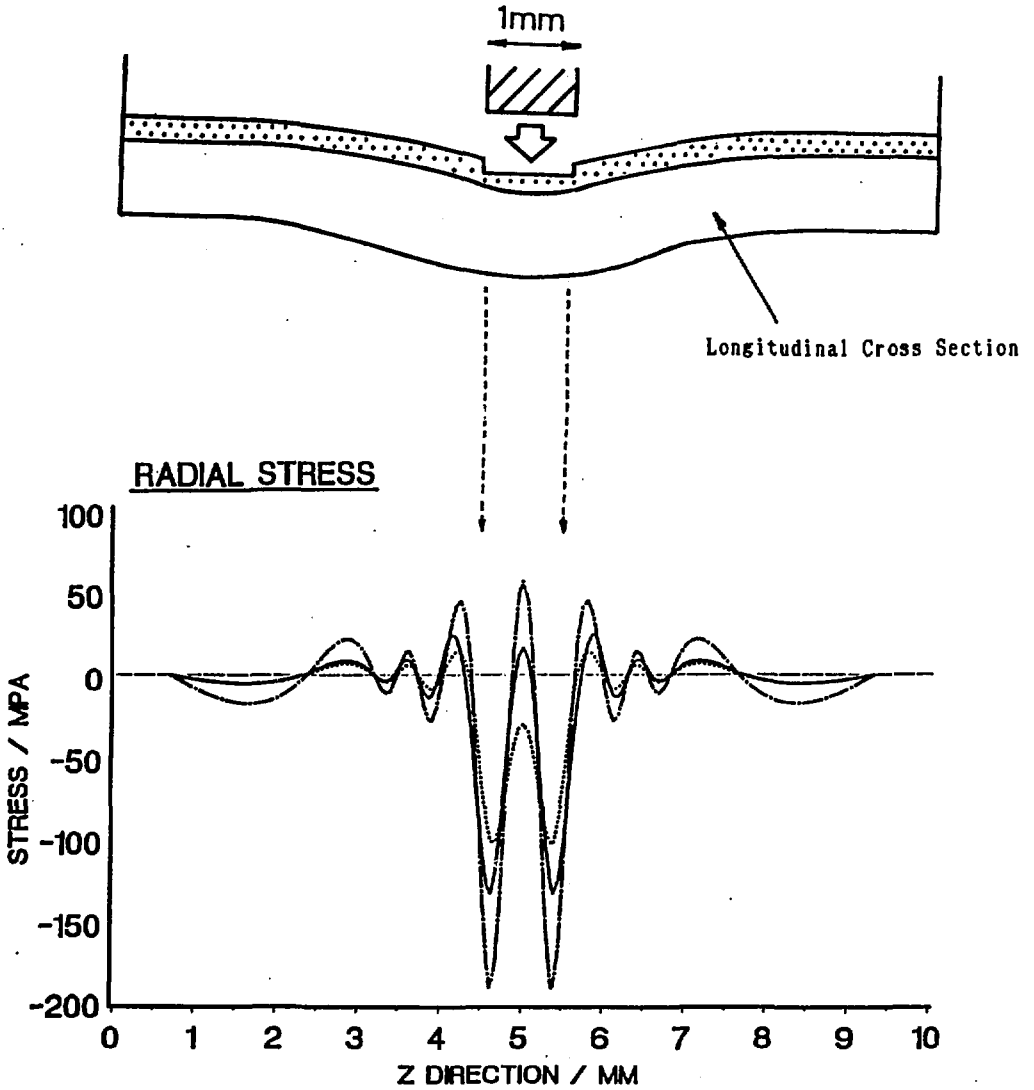


Fig. 1 4 Comparison of Radical Stress in Zircaloy Region of Zirconium-Liner Tube and Zircaloy-2 Tube

- Zr-Liner Tube : Inner Surface of Zircaloy
- Zry-2 Tube : Inner Surface
- - - Zry-2 Tube : Same Position as Zry-Zr Boundary in Zr-Liner Tube

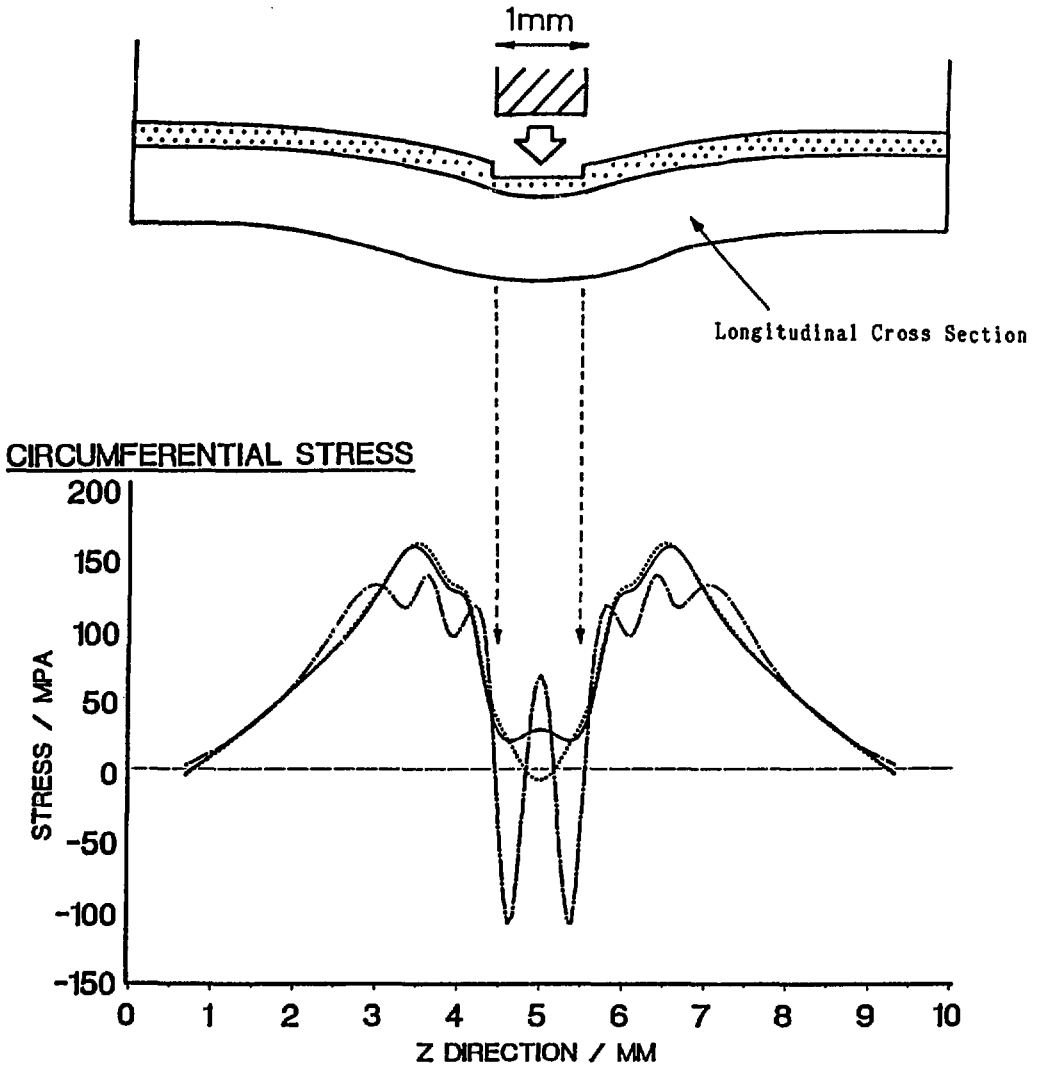


Fig. 1 5 Comparison of Circumferential Stress in Zircaloy Region of Zirconium-Liner Tube and Zircaloy-2 Tube

- Zr-Liner Tube : Inner Surface of Zircaloy
- Zry-2 Tube : Inner Surface
- Zry-2 Tube : Same Position as Zry-Zr Boundary in Zr-Liner Tube