

JAERI-Tech
2004-035



JP0450397



燃料被覆管の
熱変形挙動評価試験技術の開発
(受託研究)

2004年3月

金子 哲治・塚谷 一郎・木内 清

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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

燃料被覆管の熱変形挙動評価試験技術の開発
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
金子 哲治*・塙谷 一郎・木内 清

(2004年1月30日受理)

低減速軽水炉用燃料は、高転換比と高燃焼度化を同時に達成するために、MOX 燃料と UO₂ ブランケットの各ペレット燃料域の積層構造を有している。当該燃料棒は、現用 ABWR 燃料と比較して、長手方向における不均一な線出力密度分布に伴う熱応力が加わることが特徴である。そのため MOX 燃料と UO₂ ブランケットに起因した異なる温度分布を持った被覆管の局所的変形挙動の評価が最も重要となる。そのような力学的特性評価試験法として、短尺の被覆管試験片を用いて、実用条件で想定される当該燃料棒の一段の積層部における 2 軸応力下での熱疲労挙動が再現できる力学的特性評価試験装置を設計した。本装置は、温度分布制御用加熱部、軸方向疲労要素負荷用低サイクル疲労制御部及び内圧疲労要素用の内圧負荷部から構成され、局所的な変形挙動が高精度で測定できる。また、本装置により、炉の起動停止や制御等の運転モードが関係した負荷変動、燃料棒の拘束条件、燃焼度に伴う FP 内圧変化の試験を行うことが可能である。

本研究は、文部科学省の公募型特別会計研究「超高燃焼水冷却増殖炉用燃料集合体に関する技術開発」の平成 15 年度の研究成果の一部である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*博士研究員

Development of Testing Techniques to Evaluate Thermal Deformation Behavior of
Fuel Cladding Tubes
(Contract Research)

Tetsuji KANEKO*, Ichiro TSUKATANI and Kiyoshi KIUCHI

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

(Received January 30, 2004)

Fuel elements used in the Reduced-Moderation Water Reactor (RMWR) have the stacking structure consisting of MOX pellets and UO₂ blankets in a fuel rod in order to attain the high breeding ratio and high burn-up simultaneously. It is a characteristic of the fuel elements that there is high thermal stress caused by inhomogeneous linear power density along the longitudinal direction of the fuel rod in comparison with the present LWR fuels. For this reason, it is important to estimate local deformation behavior of the fuel cladding tube with temperature difference caused by MOX pellet and UO₂ blanket. The testing machine was designed to investigate thermal-fatigue behavior under biaxial stress condition. The testing machine consists of the temperature distribution control unit, low cycle fatigue testing unit and internal pressure loading unit, it is also possible to conduct the simulation tests to investigate effects of pressure change with burn-up, and longitudinal load change due to operation modes and restriction of fuel rods.

Keywords: Reduced-moderation Water Reactor, Fuel Rod, Cladding Tube, Thermal-fatigue, Low Cycle Fatigue, Internal Pressure

Present study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan.

*Post-Doctoral Fellow

目次

1.	緒言	1
2.	燃料被覆管の力学的特性評価試験	2
3.	燃料被覆管熱変形挙動評価試験装置	3
3. 1.	温度分布制御用加熱部	3
3. 2.	低サイクル疲労制御部	4
3. 3.	内圧負荷部	4
4.	まとめ	5
	謝辞	6
	参考文献	6

Contents

1.	Introduction	1
2.	Evaluation Tests for Mechanical Characteristics of Fuel Cladding Tubes	2
3.	Evaluation Testing Machine for Thermal Deformation Behavior of Fuel Cladding Tubes...	3
3.1.	Heating Unit for Temperature Distribution Control	3
3.2.	Low Cycle Fatigue Testing Machine	4
3.3.	Internal Pressure Loading Unit	4
4.	Summary	5
	Acknowledgment	6
	References	6

This is a blank page.

1. 緒言

現行軽水炉は、その更新時期を 2030 年頃に迎えるために、安全性・経済性の向上、廃棄物低減、Pu の有効利用等の総合的観点から一層優れた革新的軽水炉の開発が望まれている。現行軽水炉用 UO₂ 燃料では、²³⁵U の濃縮度が核不拡散上の制約から 5%以内に制限されており、超高燃焼度化や高転換比を達成するには燃料上の制約が非常に大きい。将来の革新的軽水炉には、その制約を受けない MOX 燃料を使用するので、現行 LMFBR と同等の Pu 30% (Puf 20%) 級の高 Pu 富化度燃料が使用可能であり、再臨界の問題を除けば、炉心設計の自由度が大きく、上記の目的に対応した革新的軽水炉の開発が可能となる。一方、六ヶ所再処理施設は平成 18 年度中旬に運転開始予定となっているが、核燃料サイクルの中核として再処理 Pu を有効に利用する LMFBR の開発が国際的に遅延状況にある。また、現行軽水炉を用いたプルサーマルでは、Pu の劣化が起こるので、多重リサイクルが成立しない¹⁾。

上記の観点から、原研では、Pu の有効利用を含めた核燃料サイクルの観点から最も有用性の高い革新的軽水炉として、低減速軽水炉 RMWR(Reduced Modulation Water Reactor) を選定して、燃料集合体を含めた基盤技術開発を進めている^{1) ~ 5)}。RMWR は、増殖比が 1.0 以上で、超高燃焼度化を達成するために、ほぼ LMFBR と同様の中性子エネルギースペクトルを持ち、熱中性子域よりも 100KeV 以上の共鳴吸収域での核分裂支配となる。そのために、被覆管材料には、熱中性子経済性よりも、優れた耐照射性が要求される。RMWR では、中性子スペクトルを硬くするために MOX 燃料と UO₂ ブランケットの各ペレット領域を持つ多段の積層型燃料構造と軽水による減速能を低めるために 70% 近い高ボイド率を採用している。そのために、燃料集合体の被覆管は、稠密な三角格子状に配置されており、構造間の隙間は 1.0~1.3mm と狭い。線出力密度は MOX 燃料部に集中しており、また、増殖炉であるために従来の軽水炉のように燃焼度と共に線出力密度が低下する傾向を持たず、寿命末期まで 300~400W/cm の高い燃焼条件で使用される。その結果として、高速中性子照射による弾き出し損傷量は同一燃焼度であっても ABWR よりも 5 倍程度大きく、優れた耐照射性が要求される。また、圧力損失を小さくするために、現設計では燃料棒の全長が ABWR の約半分と小さいが、燃料棒長手方向における不均一な線出力密度分布に伴う熱応力を生じることから、積層燃料境界における局所的変形挙動の評価が重要となる。燃料要素は 300~400°C の温度で封入圧と外圧の差圧による応力が燃焼度と共に変化することに伴う内圧変動を受ける。燃焼度の低い短時間側では、重元素 FP 希ガス放出に伴う焼き絞まりを生じるので、照射クリープ強度の低い材料ではコラプスが重要となる。高燃焼度側では、燃料温度の上昇と FP 希ガスの蓄積により燃料のボイドスウェーリングによる体積膨張が

生じる⁶⁾。特にリム層の形成が重要となるが、MOX 燃料では燃焼度と共に Pu が被覆管側に質量移行するので、リム層の形成や体積膨張が一層重要となる。燃料の体積変化は被覆管の塑性変形の要因となる。特に、照射クリープ強度の低い材料では、燃料とのボンディングが生じやすく、それにより燃料の体積変化が拘束されるので、燃料棒の周方向に大きな塑性歪を生じることとなる。併せて、現行炉の照射量の低い燃料集合体では重要な課題とされていなかったボウイングが、LMFBR と同様に重要な評価項目となる。従って、RMWR 用の燃料集合体には、一次冷却材の高温水や燃料との両立性のほかに、炉心からの引き抜き性が確保できる形状安定性の観点から、優れた耐照射性が要求される。

軽水炉被覆管では、従来炉に SUS304 系ステンレス鋼、現行炉に熱中性子吸収断面積の低い Zr 系合金のジルカロイが使用されてきた⁶⁾。一方、LMFBR 燃料被覆管には、高温構造用材料としての使用実績が豊富で耐照射性の優れた SUS316 系のステンレス鋼が選定・改良されてきた。原研では、これまで平均燃焼度 100GWd/t 級の ABWR 超高燃焼度 MOX 燃料に対応した被覆管材料開発として、中性子経済性、耐照射性、機械的性質及び放射化等の総合的観点から実用耐食合金間の特性比較を行い、要求仕様を満足し得る可能性の高い候補材に 25Cr-35Ni-0.2Ti 系ステンレス鋼を選定・開発してきた²⁾。最新の核データを用いた評価では、高強度のステンレス鋼では薄肉に出来ることと、Pu 核分裂の中性子スペクトルが U よりも硬いこともあり、両者の材料間の中性子経済性の違いは非常に小さい。

本研究では、RMWR 特有の積層型燃料棒の長手方向に生ずる熱出力の不均一に伴う疲労ークリープ相互作用の模擬評価に必要な 3 次元応力場での熱変形挙動評価試験装置を開発した。さらに、燃料棒の変形要因として、炉の起動停止や制御等の運転モードが関係した負荷変動、燃料棒の拘束条件、燃焼度に伴う FP 内圧変化等の PCI を検討し、力学的特性評価に必要な試験条件を選定した。RMWR では、炉の詳細はまだ決定おらず、燃料被覆管に作用する応力や温度条件については現在、別途解析が行われていることから、当該試験機は応力及び温度条件に広く対応できるものとした。

2. 燃料被覆管の力学的特性評価試験

上記のように、現設計の RMWR は、高増殖比と高燃焼度を同時に実現するため、MOX 燃料と UO₂ ブランケットの各ペレット領域を持つ多段の積層構造を有しており、線出力密度が 2 力所に位置された高 Pu 富化度の MOX 燃料部に集中するので、燃料棒の長手方向に沿って、局所的な熱応力分布が生じる。さらに、燃料棒の変形に関わる応力要因としては、炉の起動停止や制御等の運転モードが関係した負荷変動、燃料棒の拘

束条件、燃焼度に伴う FP 内圧変化等が考えられる。Fig.1 に燃料棒に加わると考えられる変形要因の概念図を示す。ここに示すように、燃焼条件が大きく異なる MOX 燃料と UO₂ ブランケットの積層型燃料構造を持つ低減速軽水炉用燃料棒には、炉の起動・運転・停止や定常運転時の負荷変動等の炉制御条件、燃料集合体がスペーサーに拘束されることに起因する軸方向の拘束応力、燃料ペレットの体積変化や FP ガス放出に伴う周方向の内外圧差応力、さらに積層型燃料構造を含めた熱出力変動が加わると考えられる。現用炉では、Table 1 に示すように⁷⁾ 過去の運転実績に基づいて定めた運転モードに従った試験及びそれらをベースにした累積疲労損傷係数解析を実施している。また、FEMAXI-RM などによる解析結果から、積層型燃料棒には Fig.2 に示すような温度分布が生じることが分かっている⁸⁾。そこで、これら燃料被覆管に加わる特殊かつ微少な応力変動におけるクリープ疲労相互作用の力学的特性を評価するために燃料被覆管熱変形挙動評価試験装置を開発した。試験対象材料は、現用材であるジルカロイ及び 25Cr-35Ni-0.2Ti 系ステンレス鋼とし、両材料の力学的特性を比較する。さらに、応力変動の発生要因を評価し、積層型燃料構造の特異性を含めて供用期間中に想定される熱出力変動及びクリープ疲労相互作用の力学的要因を解析する。実炉被覆管で想定される熱・照射クリープを基に、コールド試験模擬のための試験管軸方向の温度制御条件を選定した。

3. 燃料被覆管熱変形挙動評価試験装置

燃料被覆管熱変形挙動評価試験装置の全体図を Fig.3 に示す。当該試験装置は、積層型燃料の温度遷移部の変形挙動の定量的評価を念頭に、短尺の被覆管試験片を用いた疲労-クリープ評価試験仕様とし、積層型燃料の一段の積層部だけを模擬した温度分布制御用加熱部、軸方向疲労要素の低サイクル疲労制御部及び内圧疲労要素を再現する内圧負荷部から構成される。温度分布制御用加熱部は主に高周波発生器及び温度コントローラーから、低サイクル疲労制御部は低サイクル疲労試験機、試験機コントローラー及びパソコンから、さらに内圧負荷部は油圧源、内圧発生装置及びパソコンからそれぞれ構成されている。当該試験装置では、炉の起動・停止等の出力変動に伴い想定される、軸方向拘束応力、周方向の内外圧差応力及び出力変動に伴う熱変動を模擬することができる。

3.1. 温度分布制御用加熱部

当該試験装置では、Fig.4 に示すように積層型燃料の一段の積層部だけを模擬した温度分布でなおかつ高・低温部において Table2 に示す温度条件が得られることを目標と

している。本研究での試験対象材料は、現用材であるジルカロイ及び 25Cr-35Ni-0.2Ti 系ステンレス鋼であり、クリープ強度に及ぼす照射の効果を温度として考慮することから、広い温度範囲での試験が可能となっている。

Fig.5 に温度分布制御用加熱部の構成図を示す。Fig.5 に示すように、試験片の中央部が MOX 燃料部に相当し、その両端が UO₂ ブランケット部に相当する温度分布が得られるように、高周波コイルで試験片中央部を加熱し、両端部を雰囲気炉による加熱とグリップ部からの除熱を組み合わせた構造とし、温度コントローラーにより制御することにより、所定の温度分布が得られるようにした。その他の方法として、温度の異なる 3 ゾーンの接触タイプの炉から構成する方法、3 個の高周波コイルで個々のゾーンを加熱する方法が考えられるが、伸び計装着のための空間確保の観点や目標とする温度プロファイルが得られないことから除外した。なお、周方向変位は、歪みゲージにより測定する。加熱可能な温度範囲は 250~600°C とし、低・高温部では 30~100°C の範囲で温度差を付けることが可能である。また、試験片温度を変動させることも可能であり、これにより被覆管試験片の熱疲労特性を評価することができる。

3.2. 低サイクル疲労制御部

低サイクル疲労制御部には、油圧サーボ方式やリードスクリュー方式と比較して、クリープのための長時間保持時の安定に優れるなどの理由から電気機械式アクチュエータ方式の低サイクル疲労試験機を採用した。Fig.6 に低サイクル疲労試験機の概要図を、Table3 に試験機の主な仕様を示す。荷重制御範囲を ±100kN、ストローク範囲を ±50mm とした。

疲労要素は、10⁻³~10³Hz のサイクル範囲に対応できるものとし、その波形はサイン、三角、矩形、ハーバーサイン及び指定状態での荷重一定保持など、種々のパターンが可能なものとした。なお、保持時間は 0.001 秒~5.7 年である。また、軸方向圧縮応力時の試験片の座屈を防止するために、軸心調整が可能な構造とした。軸方向変位精度は、位置トランスデューサフルスケールの ±0.5%、荷重精度はロードセルフルスケールの 1/100 までの読み値の ±0.5%、及び歪み精度はトランスデューサ容量の ±0.005% である。試験は、一旦真空排気した後、窒素を導入し、窒素雰囲気としたチャンバー内で行うことが可能である。

3.3. 内圧負荷部

Fig.7 及び Fig.8 に内圧負荷部の概略図を示す。内圧負荷方式は、サーボアクチュエータ方式とし、被覆管試験片に圧縮窒素ガスを導入することで被覆管試験片に周方向

内外圧差応力を与える。高速増殖炉の被覆管の材料特性評価における内圧クリープ試験では、内圧は 50MPa 程度まで負荷されていることから、当該内圧負荷部では、一定保持時の最高圧力を 50MPa、圧力変動は±5%以内とした。また、疲労サイクルは 1Hz 以下の低サイクルで、波形制御としては台形波が可能である。応力制御様式は、アクチュエータ内に所定内圧のガスを蓄圧しておき、必要な時期に放出し、不足分を加圧器などで調整する。加圧に要する時間は、例えば、最高圧力の 50MPa から 80%間の場合に 10 秒、最高圧力から 50%の場合に 25 秒である。通常の試験条件である最高圧力が低い場合においては、これらより数段短時間で加圧可能である。

上述の温度分布制御用加熱部、低サイクル疲労制御部及び内圧負荷部から構成される燃料被覆管熱変形挙動評価試験装置を用いて、低減速軽水炉用燃料被覆管の力学的特性評価を行うことができる。Fig.9 に試験条件の一例を示す。この場合は、スペーサーによる拘束に起因する拘束応力、炉の起動・運転・停止による内圧及び温度の変化と定常運転時の出力変動に伴う温度変動を模擬しており、全体として被覆管には熱的及び力学的負荷が加わることになる。このように軸方向拘束応力、内圧及び温度変動を組み合わせることで、炉の起動・運転・停止や定常運転時の負荷変動や燃焼度に伴う FP 内圧変化等の PCI を再現し、低減速軽水炉用燃料被覆管の力学的特性を評価することが可能である。Fig.10 には多軸応力クリープ試験結果の一例を示す⁹⁾。この場合は軸方向及び周方向の 2 軸応力を加えた場合の結果であり、試験時間に対する周方向及び軸方向のクリープ歪の変化が得られる。当該試験機では、軸方向拘束力、内圧及び温度をパラメータとしたクリープ-疲労試験を行うことができ、疲労特性とクリープ特性の相互作用を定量的に評価することができる。

4.まとめ

現行軽水炉と異なり、低減速軽水炉に使用する燃料要素は、MOX 燃料と UO₂ ブランケットの各積層部からなる多層構造を有することから、線出力密度の変移域となる異種燃料の境界域を中心とした形状安定性が重要となる。その力学的特性評価に必要な試験方案を検討して、被覆管軸方向の温度分布、拘束条件及び内圧の各条件を制御して力学的特性を評価する熱変形挙動評価試験装置を設計・開発した。

当該装置では、積層燃料の一段のトランジエント部を模擬することとし、各燃料部位の温度分布制御用の高周波加熱部、軸方向の疲労要素負荷用の低サイクル疲労制御部及び内圧疲労要素を再現する内圧負荷部により構成して、実用燃料棒の熱変形挙動が再現出来るようにした。併せて、軽水炉燃料被覆管に想定される疲労-クリープ相互作用の支配因子に関する基礎検討を行い、模擬試験方案を検討した。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご協力を頂いたエネルギーシステム研究部 耐食材料研究グループの井岡郁夫氏、橘 勝美氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 岩村公道、他：“低減速スペクトル炉の研究”、JAERI-Research 99-058(1999).
- 2) 木内 清、他：“高性能被覆管材質の研究”、JAERI-Research 2002-008(2002).
- 3) K. Kiuchi, I. Ioka, M. Takizawa and S. Wada : IAEA-TECDOC-1229, 112 (2002).
- 4) 岩村公道、他：日本原子力学会誌, 45(3), 184 (2003).
- 5) H. Ogawa and K. Kiuchi : JAERI-Conf 2003-001(2003).
- 6) (財) 原子力安全研究会編：“軽水炉燃料のふるまい” (1998).
- 7) 原子炉安全専門審査会：“沸騰水型原子炉に用いられる 8 行 8 列型の燃料集合体について” (1974).
- 8) 私信（日本原子力研究所）
- 9) 私信（神戸製鋼）

Table 1 Anticipated operating mode.

Cycle condition		Anticipated cycle
R. T.	100% power	~4/ year
High temperature holding state	100% power	~12/ year
50% power	100% power	~60/ year
70% power	100% power	~250/ year
100% power	Maximum over power	~0.5/ year

Table 2 Specification of temperature control range.

	Temperature difference between high temperature area and low temperature area			
	0°C	30°C	60°C	100°C
High temperature area ↓ MOX temperature	300°C	300°C	270°C	
	330°C	330°C	300°C	270°C
	360°C	360°C	330°C	300°C
	400°C	400°C	370°C	340°C
	500°C	500°C	470°C	440°C
	600°C	600°C	570°C	540°C

Table 3 Specification of low cycle fatigue testing machine.

Load frame	
Type	Bottom actuator
Rated load	±100 kN
Electromechanical actuator	
Rated load	±100 kN
Stroke	±50 mm
Rate range	0.0001 mm/ min~120 mm/ min
Load cell	
Rated load	±100 kN
Controller	
Waveform	sine, triangular, square, ramp, trapezoidal

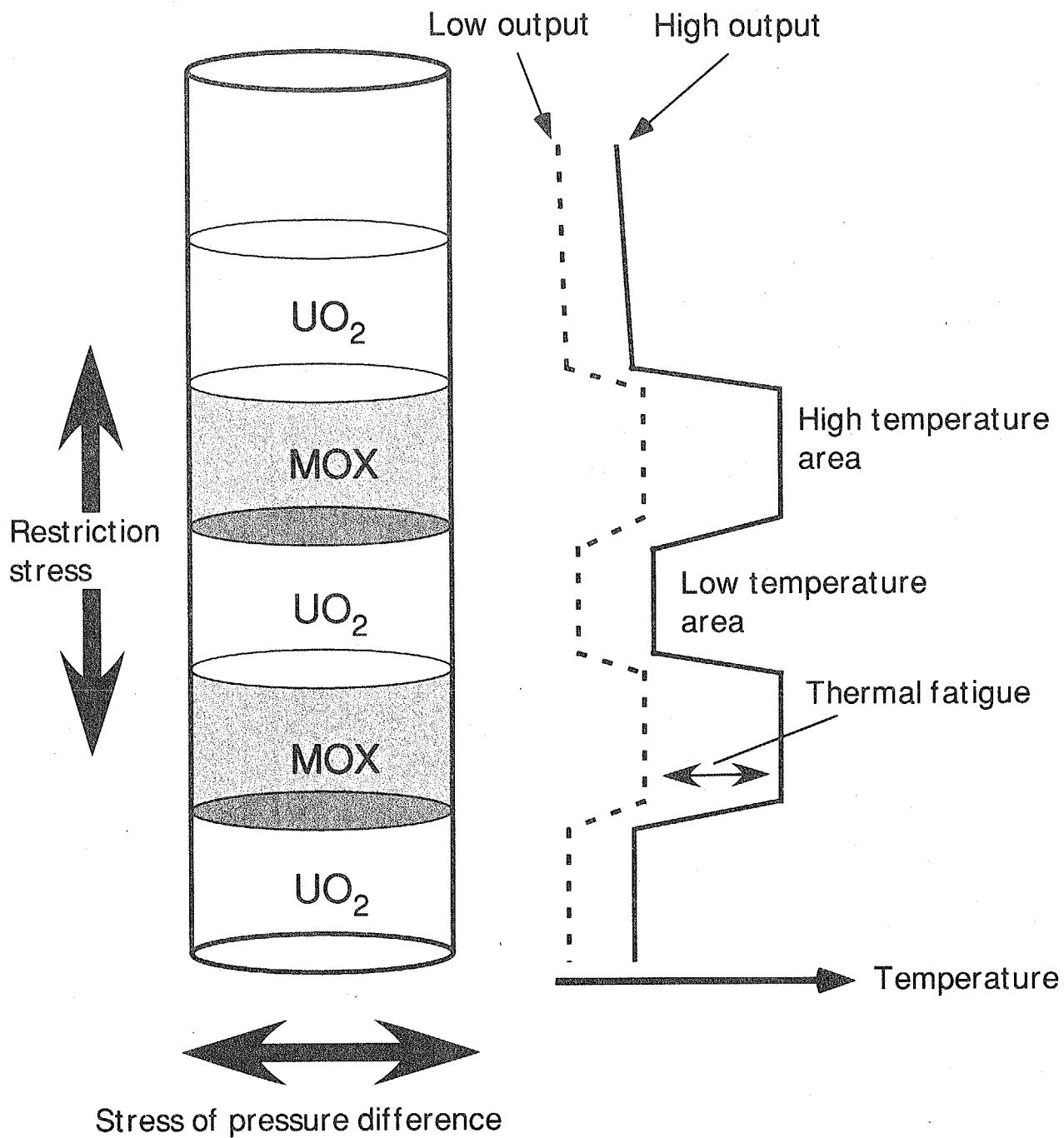


Fig.1 Schematic of the deformation factor which act on a fuel rod.

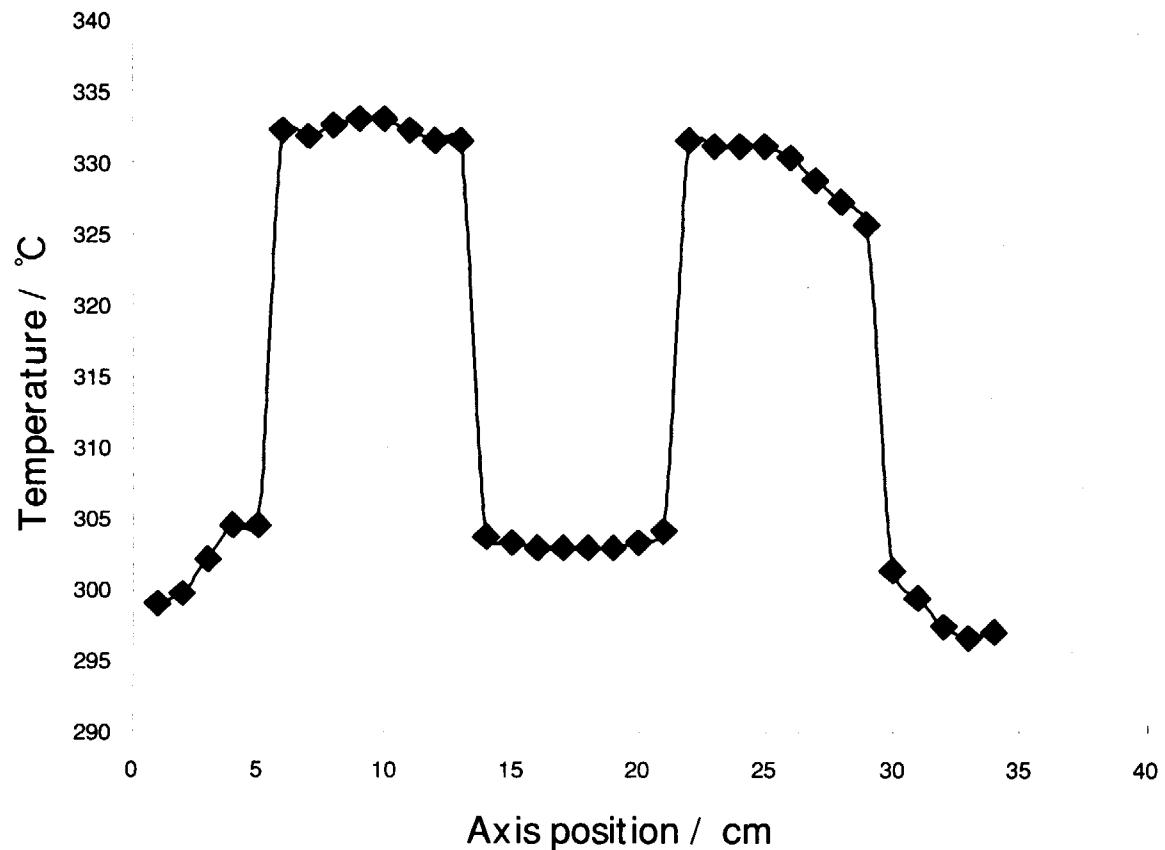


Fig.2 Relationship between fuel cladding tube temperature and axis position.

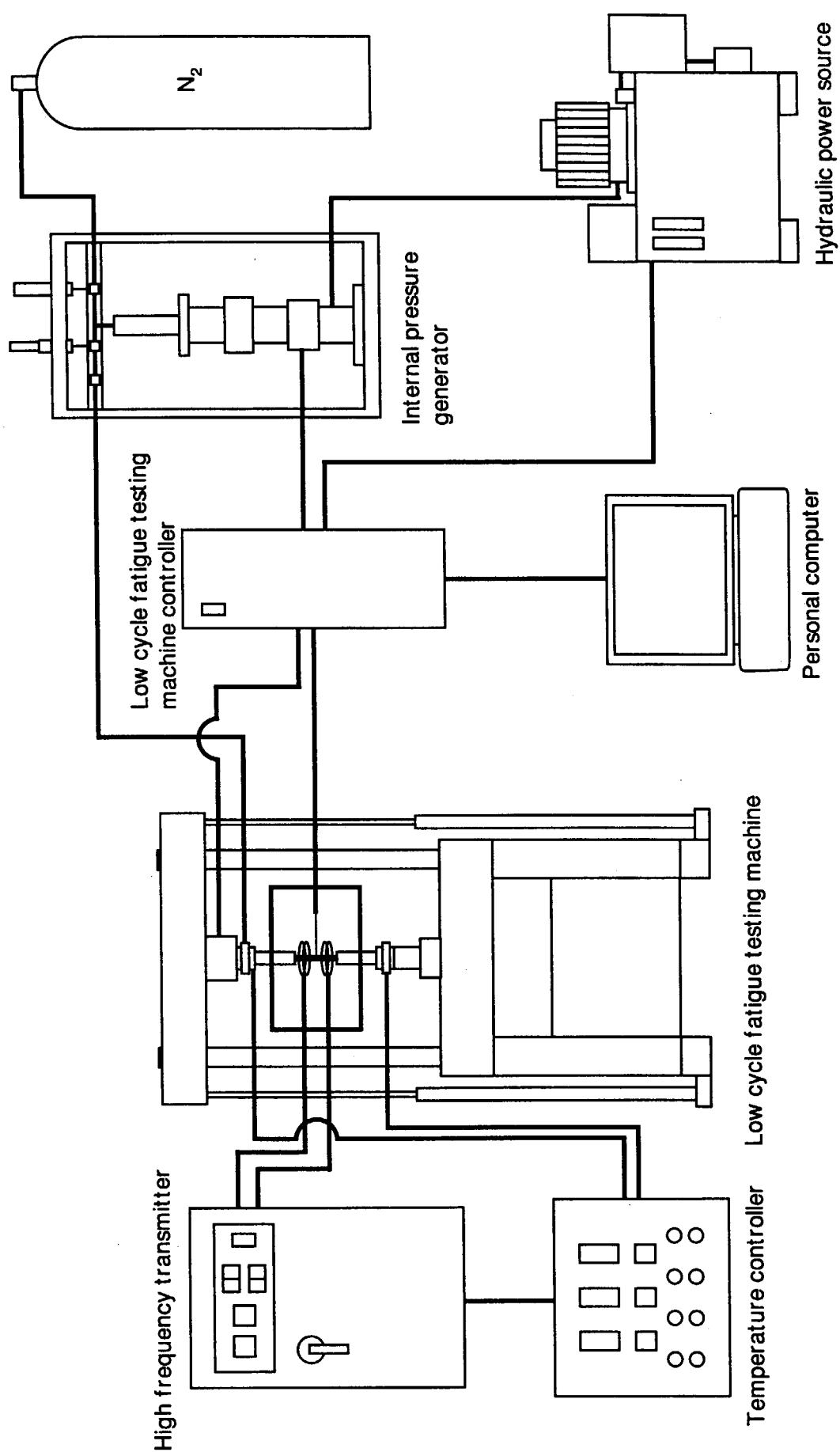


Fig.3 General drawing of testing machine for thermal deformation behavior of fuel rods.

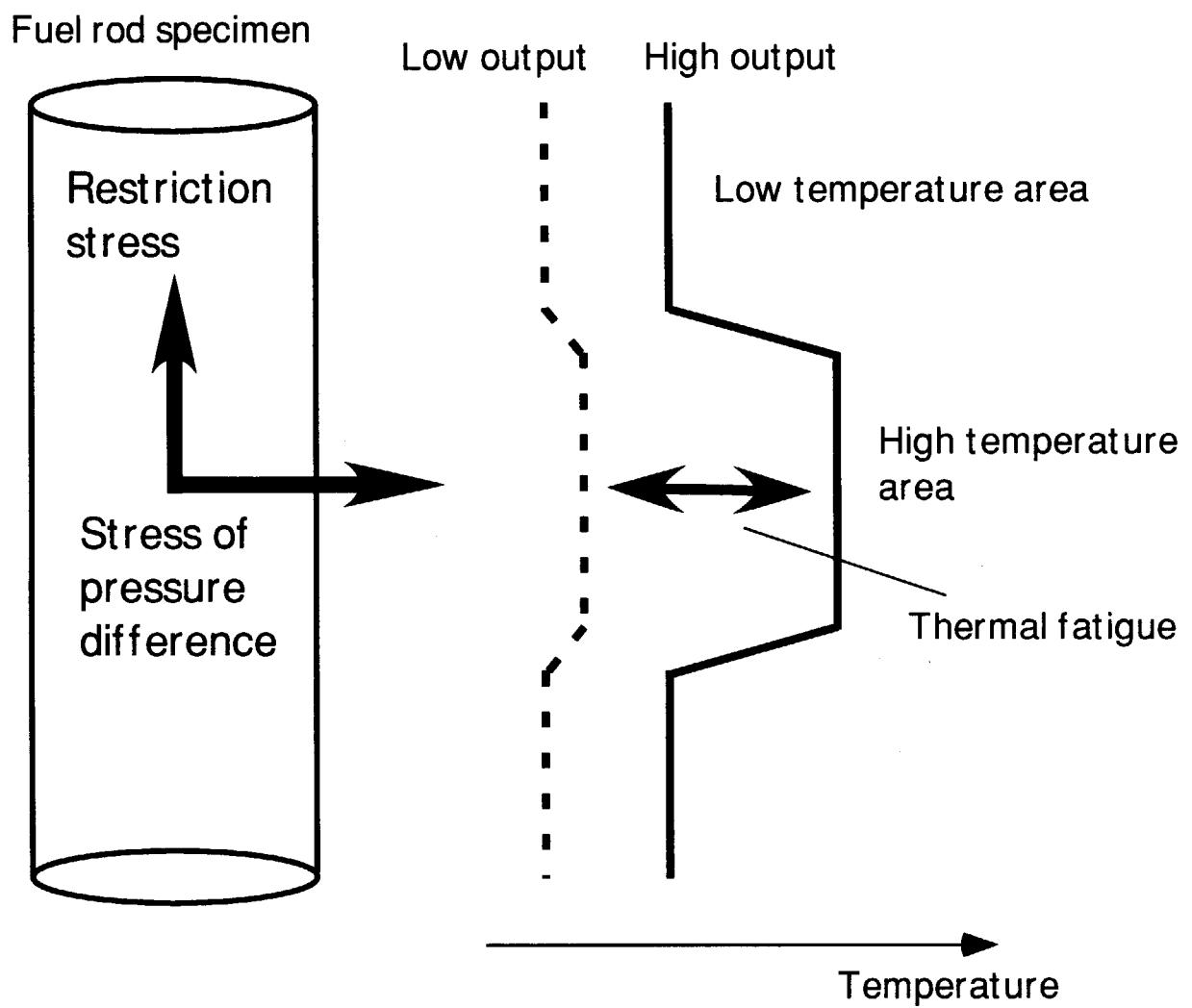


Fig.4 Temperature distribution of fuel cladding tube specimen.

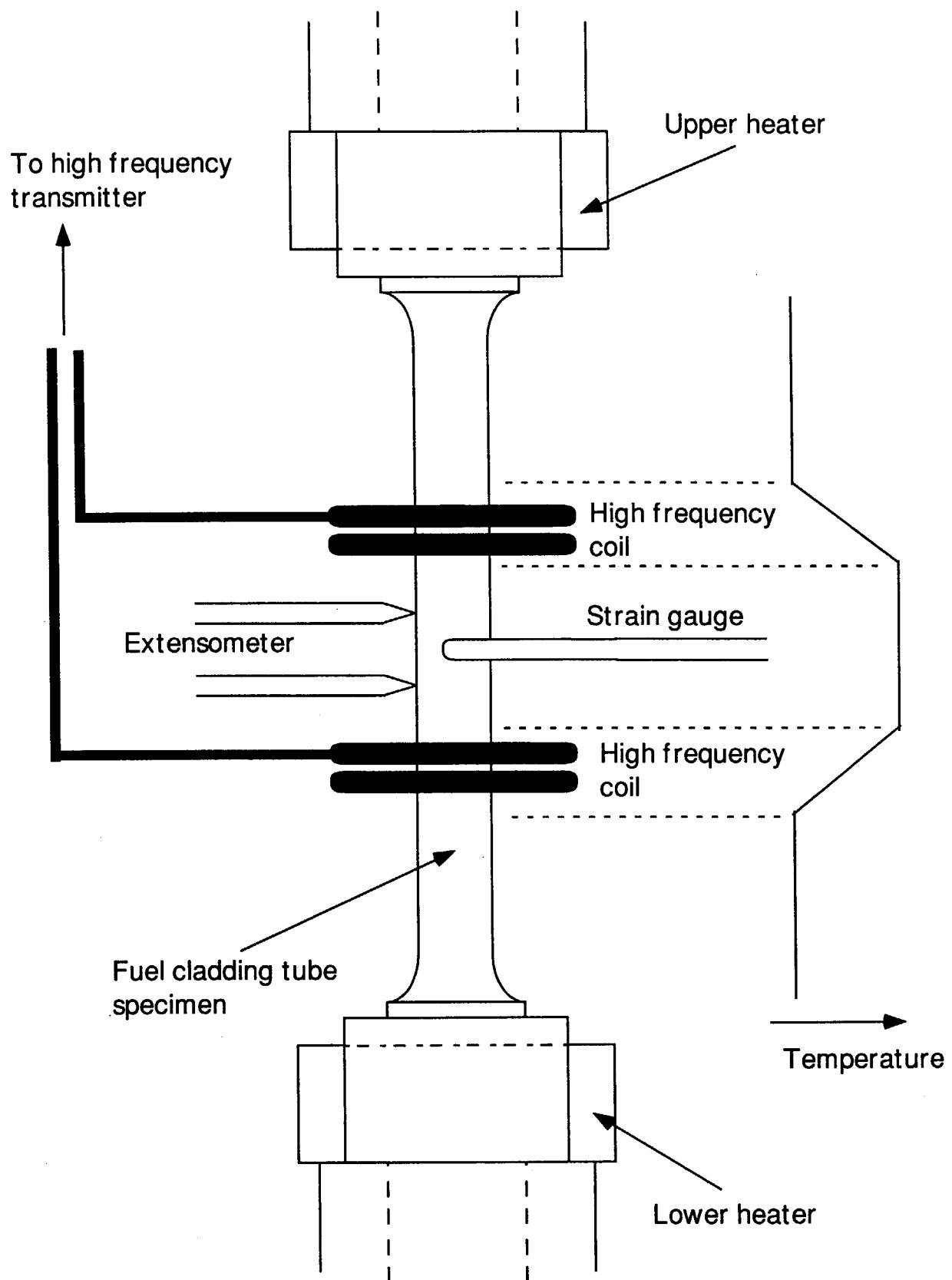


Fig.5 Block diagram of heating unit.

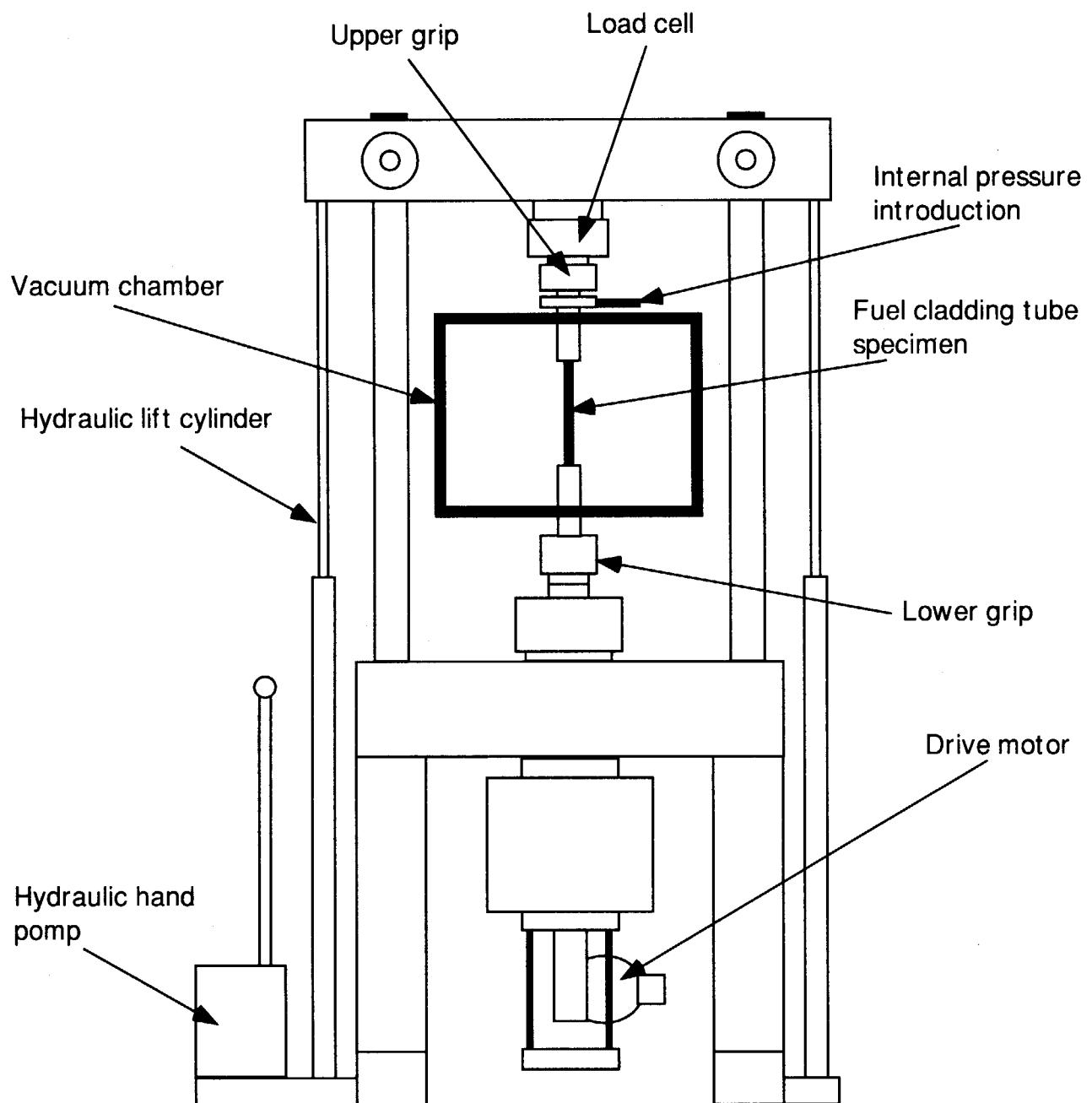


Fig.6 Schematic of low cycle fatigue testing machine.

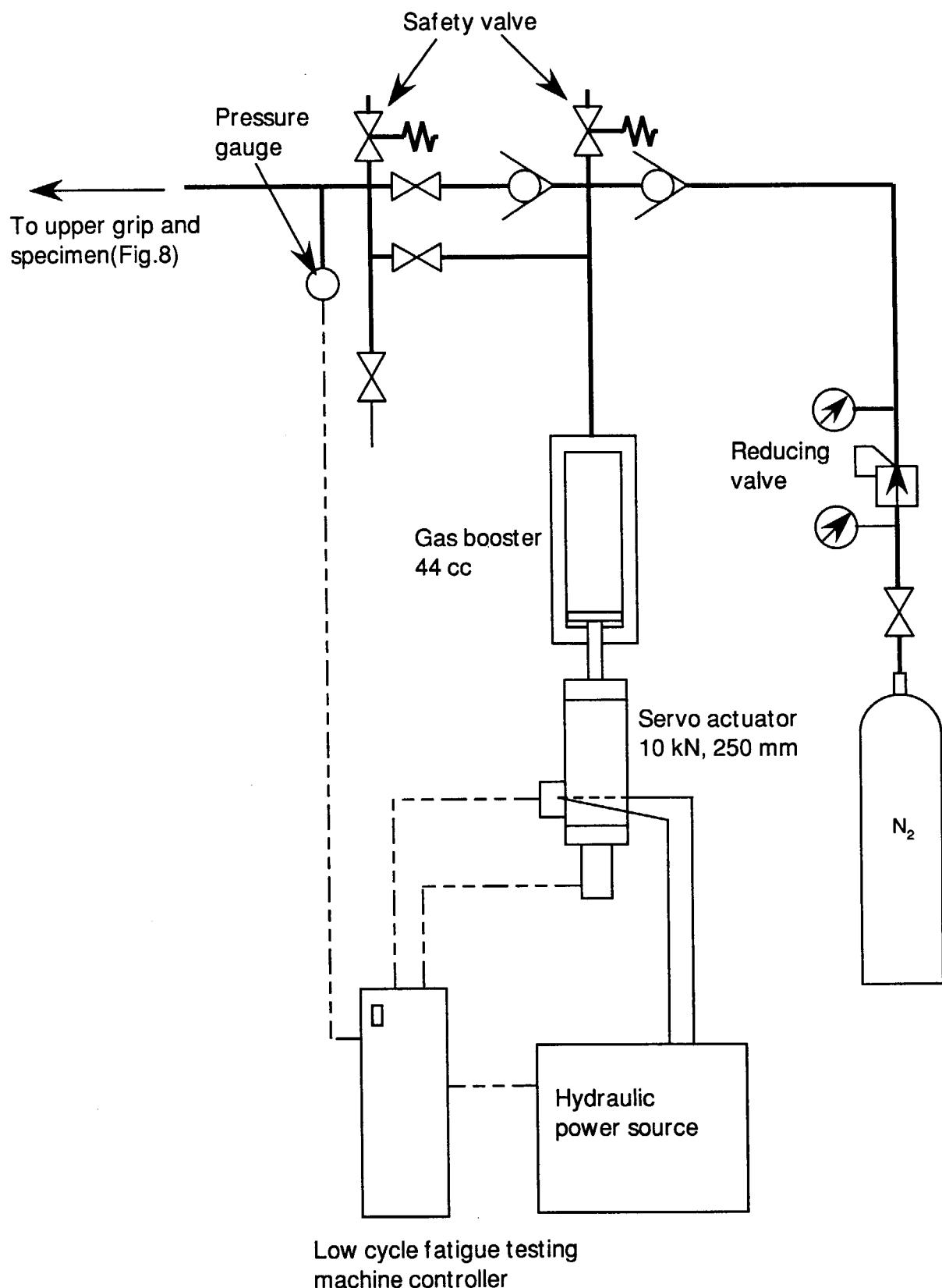


Fig.7 Schematic of pipe arrangement for internal pressure load unit.

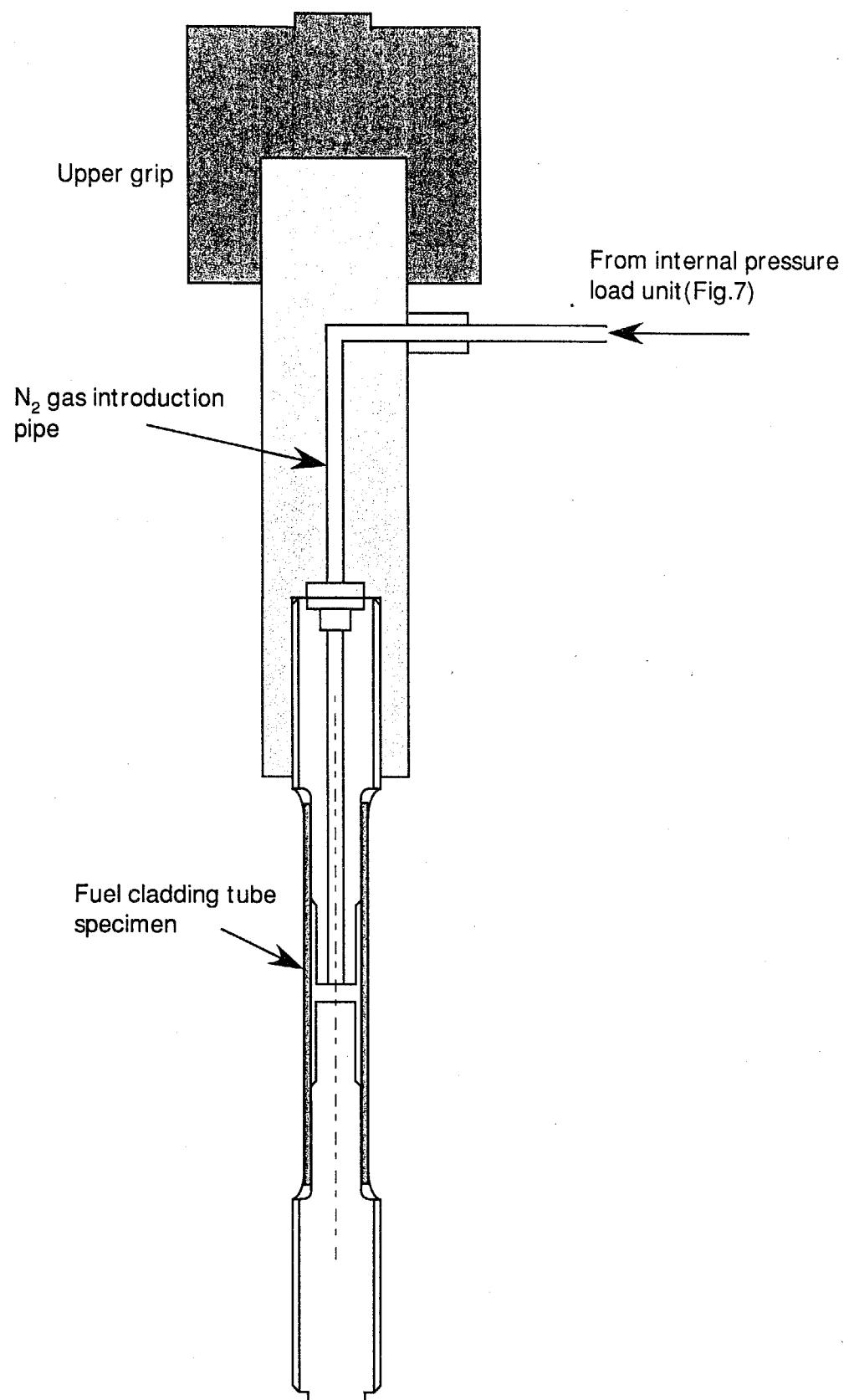


Fig.8 Schematic of upper grip and fuel cladding tube specimen.

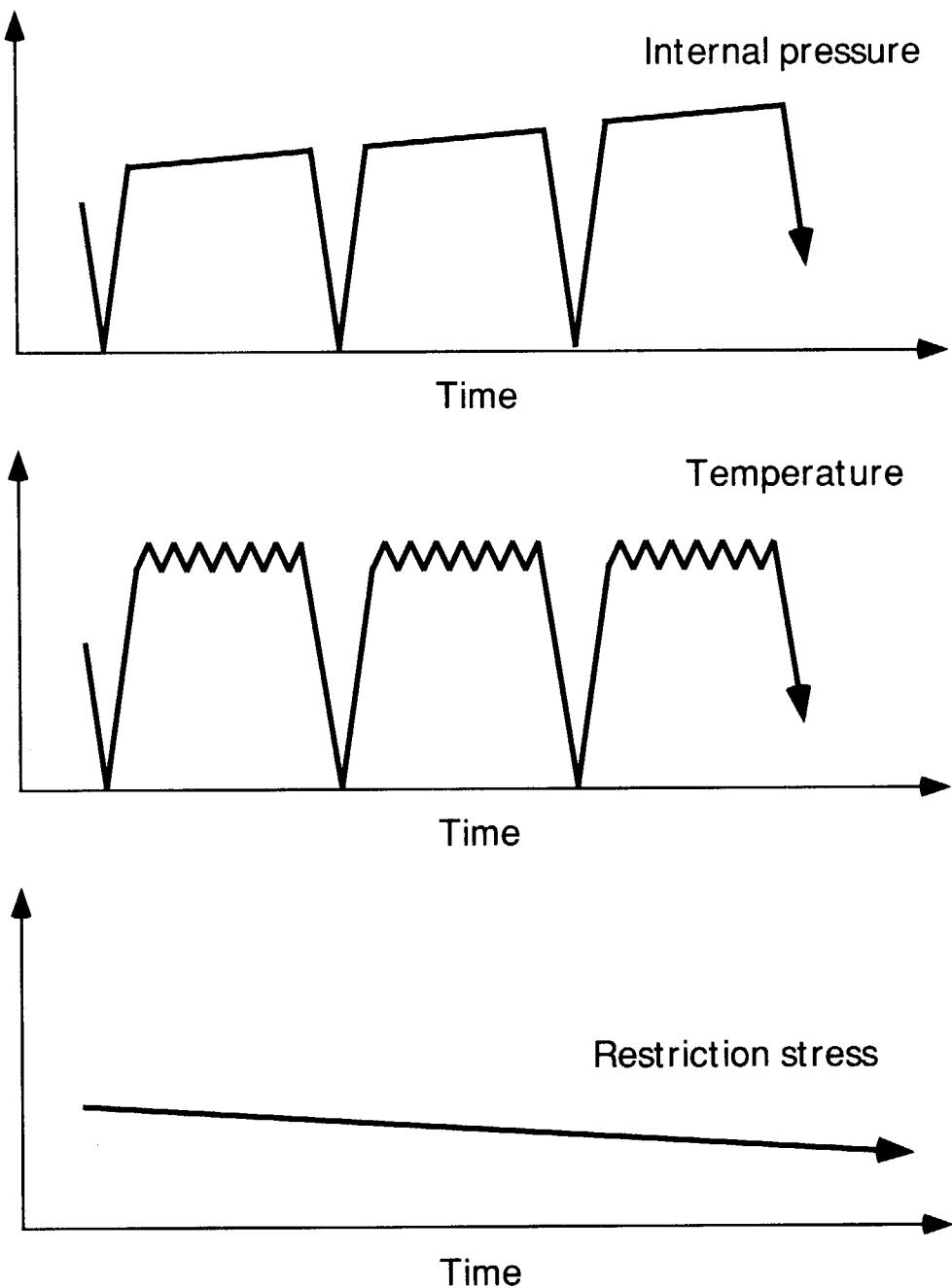


Fig.9 Example of test condition.

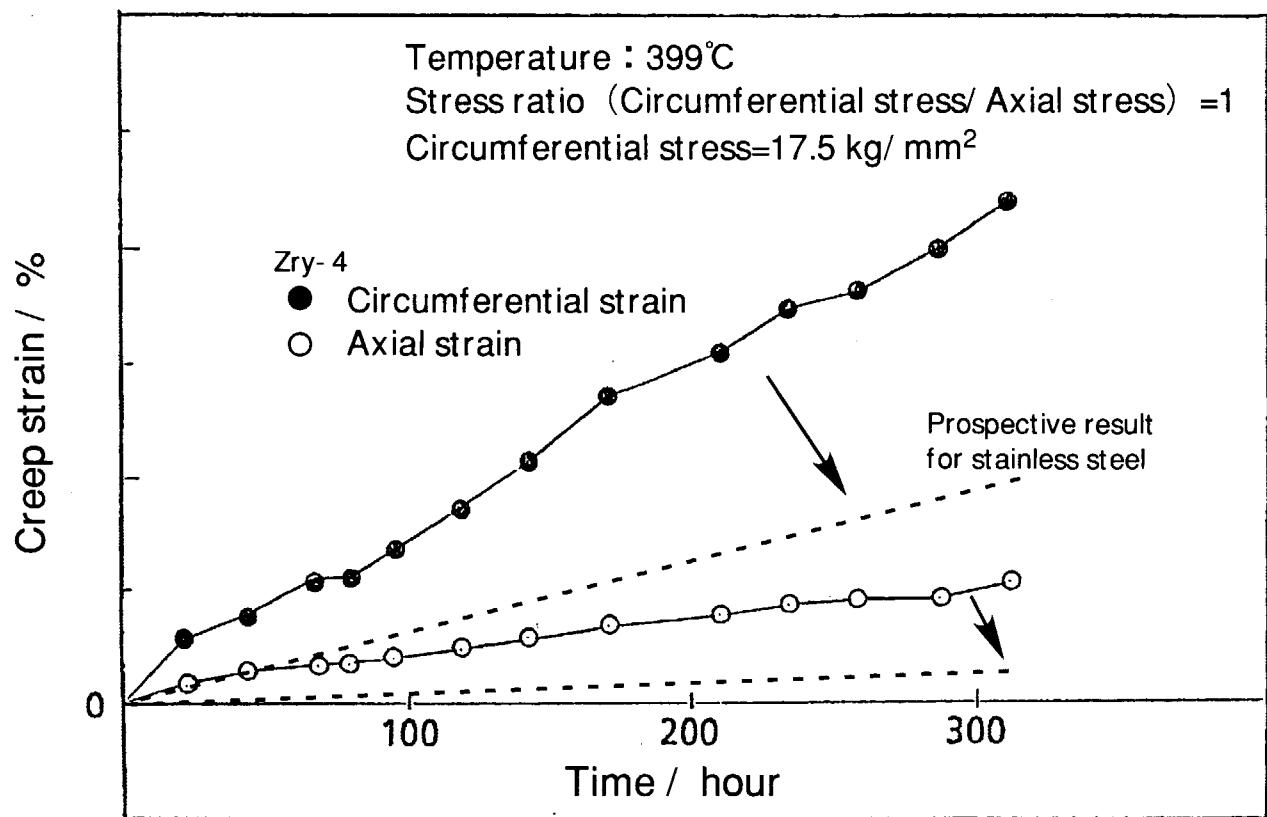


Fig.10 Result of multi axial stress creep test.

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	ジユール	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	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閣僚理事会指令では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。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バイン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

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	

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

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

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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	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	= 4.184J (熱化学)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁴	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ³⁵	= 4.1855J (15°C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	= 4.1868J (国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	仕事率 1 PS(仏馬力)
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 75 kgf·m/s
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	= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照 射 線 量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

燃料被覆管の熱変形挙動評価試験技術の開発（受託研究）



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています