

JAERI - M
82-082

多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中
高温疲労試験装置の開発

1982年7月

辻 宏和・近藤 達男

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試験装置の開発

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

辻 宏和・近藤 達男

(1982年6月12日受理)

多目的高温ガス炉の高温構造設計の対象温度が既存の設計コードの範囲を上まわることから、構造材料のクリープ特性、高温疲労特性に関する詳細な知見と豊富な試験データが要求される。疲労およびクリープは高温では雰囲気の影響を強く受けるので、構造の長期の信頼性を前提にした材料データ取得のための試験は、実環境を適切に近似した状態で行なう方法がとられるようになった。このような要求に正しく応えるため、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の微量不純物組成を厳密に制御した環境で高温疲労試験の行なえる装置を開発した。この試験装置の主要な特徴は次の通りである。

- ① 高周波誘導加熱方式を採用することにより、試験片のみを高温とし、試験片以外の部分が高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の微量不純物と表面反応を起こすことを防ぐとともに、チャック部の焼き付きも回避した。
- ② ひずみ検出器はステンレス鋼でシールディングし、また接合部のシールには無酸素銅ガスケットを使用して、放出ガスを最小限に押えた。さらに、真空排気用の主ポンプとしてターボモレキュラーポンプを使用することにより、環境効果定量化のための標準データ取得に必要な 10^{-9} Torr オーダー（室温、 1000°C では 10^{-8} Torr オーダー）の超高真空条件下でも試験が行なえるようにした。
- ③ 電子計算機（CPU容量 24 kW）を装備することにより、試験の制御、データ取得およびデータ処理を自動化した。

Development of an apparatus for testing fatigue of metals at elevated temperatures in controlled environments

Hirokazu TSUJI and Tatsuo KONDO

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 12, 1982)

A new fatigue test apparatus was developed for the purpose of performing well-defined tests in the application of structural materials at very high temperatures in precisely controlled chemical environments. Reviewing critically the two earlier exploratory attempts of designing, constructing and testing in simulated VHTR coolant environment, a modified design philosophy was established. In the latter particular care was taken to avoid unnecessary reactions of the machine's structural components and/or outgassing from any of the instruments or sealing. To fulfill such requirements, the apparatus was given the following features;

- 1) Hot portion is limited to the specimen only by employing induction heating with properly designed coils so that unexpected consumption of the impurities in the helium environment is prevented.
- 2) LVDT (Linear Variable Differential Transformer) is sealed with stainless steel and all gaskets used are of OFHC copper so that any undesirable outgassing is avoided.
- 3) Through those modifications tests both in vacuum of 10^{-9} Torr and in helium with very closely controlled impurity chemistry have been made possible.
- 4) An automatic data acquisition system with a computer is attached for accumulation of data throughout the test period, their analysis and display.

Some preliminary test results are demonstrated to justify the design methodology employed.

Keywords: Fatigue Test Apparatus, Fatigue Test, Elevated Temperatures, VHTR, Helium, Impurity, Environmental Effect

目 次

1. 緒 言	1
2. 多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試作試験装置	1
2.1 外熱式高温疲労試験装置	1
2.2 抵抗加熱ヒーター内蔵式高温疲労試験装置	2
3. 高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置	2
3.1 疲労試験機本体	3
3.2 真空系統（試験雰囲気制御系統）	4
3.3 加熱系統	4
3.4 電子計算機	5
4. ハステロイ XR の高温低サイクル疲労	6
4.1 実験方法	6
4.2 実験結果	6
5. まとめ	7
謝 辞	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Pilot fatigue test apparatus in simulated VHTR helium coolant environment at elevated temperatures	1
2.1 Fatigue test apparatus with an external heater	1
2.2 Fatigue test apparatus with internal resistance heaters	2
3. Fatigue test apparatus with an induction heater in simulated VHTR helium coolant environment at elevated temperatures	2
3.1 Fatigue test machine	3
3.2 Vacuum pump system (control system of test environments)	4
3.3 Heating system	4
3.4 Computer system	5
4. Low cycle fatigue of Hastelloy XR at elevated temperatures	6
4.1 Experimental procedure	6
4.2 Results	6
5. Summary	7
Acknowledgements	8
References	8

1. 緒 言

多目的高温ガス炉の高温構造設計の対象温度が既存の設計コード⁽¹⁾⁽²⁾の範囲を上まわることから、構造材料のクリープ特性、高温疲労特性に関する詳細な知見と豊富な試験データが要求される。疲労およびクリープは高温では雰囲気の影響を強く受けるので、構造の長期の信頼性を前提にした材料データ取得のための試験は、実環境を適切に近似した状態で行なう方法がとられるようになった。このような要求に正しく応えるため、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の微量不純物組成を厳密に制御した環境で高温疲労試験の行なえる装置を開発した。高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中クリープ試験機については、すでにその開発経緯に関する報告書⁽³⁾が出されている。本報告は、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での高温疲労試験装置の開発経緯をまとめたものである。

2. 多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試作試験装置

本報の主題である、次章で述べる高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置に先立って、著者らの研究グループが過去に試作した2台の高温疲労試験装置の概要とその問題点について述べる。これらはいずれも限定された費用により、試験技術上の問題点抽出を兼ねて試作された先駆的なものであった。

2.1 外熱式高温疲労試験装置

昭和47年度に、既存の疲労試験機の一部の改良により、ステンレス製雰囲気槽の外部から、電気炉で加熱する方式の外熱式高温疲労試験装置が菊山らによって試作された⁽⁴⁾。その構造概略図をFig. 1に示す。ひずみの測定は内蔵式差動トランスによって行ない、雰囲気槽には外部より試験片を観察するための窓が設けられている。荷重容量は動的5トン、最大ストロークは±25mm、最高使用温度は750℃である。

この試験装置の運転によって初期の試験データを取得しヘリウム中試験の重要性が認識されたが⁽⁵⁾、その過程で次のようなことが明らかとなった。

まず第1に、構造上ステンレス製雰囲気槽が高温となる。高温の雰囲気槽内壁や、713℃耐熱合金製のチャック部、荷重軸等の表面では、ヘリウム中微量不純物との反応は避けられない。

第2には、内蔵したひずみ検出器の温度の上昇がある。この場合、微量の水分や有機物質の放出があるため、やはり厳密に雰囲気を制御する上で障害となる。

このほか、荷重軸が長いため、圧縮に対する剛性不足から圧縮荷重をかけることができなかった。従って、試験は引張側でのみ行なわれた。

1. 緒 言

多目的高温ガス炉の高温構造設計の対象温度が既存の設計コード⁽¹⁾⁽²⁾の範囲を上まわることから、構造材料のクリープ特性、高温疲労特性に関する詳細な知見と豊富な試験データが要求される。疲労およびクリープは高温では雰囲気の影響を強く受けるので、構造の長期の信頼性を前提にした材料データ取得のための試験は、実環境を適切に近似した状態で行なう方法がとられるようになった。このような要求に正しく応えるため、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の微量不純物組成を厳密に制御した環境で高温疲労試験の行なえる装置を開発した。高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中クリープ試験機については、すでにその開発経緯に関する報告書⁽³⁾が出されている。本報告は、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での高温疲労試験装置の開発経緯をまとめたものである。

2. 多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中高温疲労試作試験装置

本報の主題である、次章で述べる高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置に先立って、著者らの研究グループが過去に試作した2台の高温疲労試験装置の概要とその問題点について述べる。これらはいずれも限定された費用により、試験技術上の問題点抽出を兼ねて試作された先駆的なものであった。

2.1 外熱式高温疲労試験装置

昭和47年度に、既存の疲労試験機の一部の改良により、ステンレス製雰囲気槽の外部から、電気炉で加熱する方式の外熱式高温疲労試験装置が菊山らによって試作された⁽⁴⁾。その構造概略図をFig. 1に示す。ひずみの測定は内蔵式差動トランスによって行ない、雰囲気槽には外部より試験片を観察するための窓が設けられている。荷重容量は動的5トン、最大ストロークは±25mm、最高使用温度は750℃である。

この試験装置の運転によって初期の試験データを取得しヘリウム中試験の重要性が認識されたが⁽⁵⁾、その過程で次のようなことが明らかとなった。

まず第1に、構造上ステンレス製雰囲気槽が高温となる。高温の雰囲気槽内壁や、713℃耐熱合金製のチャック部、荷重軸等の表面では、ヘリウム中微量不純物との反応は避けられない。

第2には、内蔵したひずみ検出器の温度の上昇がある。この場合、微量の水分や有機物質の放出があるため、やはり厳密に雰囲気を制御する上で障害となる。

このほか、荷重軸が長いため、圧縮に対する剛性不足から圧縮荷重をかけることができなかった。従って、試験は引張側でのみ行なわれた。

2.2 抵抗加熱ヒーター内蔵式高温疲労試験装置

昭和48年度には、新たに抵抗加熱ヒーター内蔵式高温疲労試験装置が試作された⁽⁴⁾。前の経験を生かして、ステンレス製雰囲気槽の内部にモリブデン製の抵抗加熱ヒーターおよび高温部モリブデン、低温部ニッケルから成る多層反射板を収納した構造の高温疲労試験装置とした。その構造概略図をFig. 2に示す。荷重容量は動的2トン、静的2.3トン、最大ストロークは±30mm、最高使用温度は1000℃である。

この試験装置では、ステンレス製雰囲気槽は冷却されているので、雰囲気槽内壁とヘリウム中微量不純物との不要な反応を避けることができる。また、抵抗加熱ヒーター、反射板の一部、チャック部等をモリブデン製としたが、これは、この材料が高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中微量不純物の持つ酸化ポテンシャル下ではほとんど反応しないために事実上不活性物体とみなしうるためである。さらに、ヘリウム中に仮に微量の分子状酸素が混入した場合に、酸化ポテンシャルが著しく上昇することから、一般に分子状酸素の存在を防ぐことが重視されているが、モリブデンヒーターはそれに対するGetterとしての作用を期待できる。このようにして、この試験装置で、所定の雰囲気（その一例をTable 1に示しておいた。）を厳密に制御した疲労試験が可能となった⁽⁶⁾。

この試験装置の運転経験から指摘された問題点は主に次の二点であった。

① ひずみ検出

雰囲気槽内は高温になっているので、微量の水分や有機物質の放出もなく、しかも高温で使用可能なひずみ検出器が要求されるわけであるが、現在のところこの要求を満たす測定器は開発されていない。そこで、ひずみ検出棒のみを雰囲気槽内に収納し、測定器は雰囲気槽外に置く方式が考えられるが、この方式では、ひずみ測定精度および変動ひずみへの追従性が極端に低下する。（試験機製作メーカーの試作品では0.01 Hz程度の追従性であった。）

② 焼き付き

高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の試験では、金属材料表面での酸化膜形成が不十分なことも一因となって、接触面における焼き付きがおこりやすい。モリブデン製のチャックは900℃×10hr程度の試験で、試験片である Hastelloy X と焼き付きを生じる。そこで、試験片とチェックの間にはモリブデンの薄板を介することによってチェックと試験片との焼き付きを防止している。（モリブデンの薄板と試験片は焼き付きをおこすが、モリブデンの薄板とモリブデン製チェックとは焼き付きを生じない。）しかし、圧縮荷重に対しては、チャックの構造上、焼き付きの防止は困難である。また荷重軸の剛性に対する考慮も含めて、引張荷重下でのみの疲労試験にとどまっている。

3. 高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置

高周波誘導加熱方式の利点は当初より認識されていたが、設備が高価であることのほか

① 試験片のみが加熱され、気体が低温であること。

2.2 抵抗加熱ヒーター内蔵式高温疲労試験装置

昭和48年度には、新たに抵抗加熱ヒーター内蔵式高温疲労試験装置が試作された⁽⁴⁾。前の経験を生かして、ステンレス製雰囲気槽の内部にモリブデン製の抵抗加熱ヒーターおよび高温部モリブデン、低温部ニッケルから成る多層反射板を収納した構造の高温疲労試験装置とした。その構造概略図をFig. 2に示す。荷重容量は動的2トン、静的2.3トン、最大ストロークは±30mm、最高使用温度は1000℃である。

この試験装置では、ステンレス製雰囲気槽は冷却されているので、雰囲気槽内壁とヘリウム中微量不純物との不要な反応を避けることができる。また、抵抗加熱ヒーター、反射板の一部、チャック部等をモリブデン製としたが、これは、この材料が高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中微量不純物の持つ酸化ポテンシャル下ではほとんど反応しないために事実上不活性物体とみなしうるためである。さらに、ヘリウム中に仮に微量の分子状酸素が混入した場合に、酸化ポテンシャルが著しく上昇することから、一般に分子状酸素の存在を防ぐことが重視されているが、モリブデンヒーターはそれに対するGetterとしての作用を期待できる。このようにして、この試験装置で、所定の雰囲気（その一例をTable 1に示しておいた。）を厳密に制御した疲労試験が可能となった⁽⁶⁾。

この試験装置の運転経験から指摘された問題点は主に次の二点であった。

① ひずみ検出

雰囲気槽内は高温になっているので、微量の水分や有機物質の放出もなく、しかも高温で使用可能なひずみ検出器が要求されるわけであるが、現在のところこの要求を満たす測定器は開発されていない。そこで、ひずみ検出棒のみを雰囲気槽内に収納し、測定器は雰囲気槽外に置く方式が考えられるが、この方式では、ひずみ測定精度および変動ひずみへの追従性が極端に低下する。（試験機製作メーカーの試作品では0.01 Hz程度の追従性であった。）

② 焼き付き

高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の試験では、金属材料表面での酸化膜形成が不十分なことも一因となって、接触面における焼き付きがおこりやすい。モリブデン製のチャックは900℃×10hr程度の試験で、試験片である Hastelloy X と焼き付きを生じる。そこで、試験片とチェックの間にはモリブデンの薄板を介することによってチェックと試験片との焼き付きを防止している。（モリブデンの薄板と試験片は焼き付きをおこすが、モリブデンの薄板とモリブデン製チェックとは焼き付きを生じない。）しかし、圧縮荷重に対しては、チャックの構造上、焼き付きの防止は困難である。また荷重軸の剛性に対する考慮も含めて、引張荷重下でのみの疲労試験にとどまっている。

3. 高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置

高周波誘導加熱方式の利点は当初より認識されていたが、設備が高価であることのほか

① 試験片のみが加熱され、気体が低温であること。

- ② き裂発生後の温度均一性。
- ③ ヘリウム中での放電現象の発生。

などの問題点があり、慎重を期して前記の試作が先行された。これらの問題点を吟味しつつ、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での高温疲労試験装置として最終的に開発したものが本装置である。装置の概観写真をFig. 3～Fig. 5に、装置のブロック線図をFig. 6に示す。

本装置は次の各部より構成されている。

- 疲労試験機本体
- 真空系統（試験雰囲気制御系統）
- 加熱系統
- 電子計算機

以下に各部の概要を性能データと併せて紹介する。

3.1 疲労試験機本体

荷重容量は動的±5トン、静的±7.5トン、最大ストロークは±50mmである。

雰囲気槽を装着した状態での荷重精度試験結果をTable 2にまとめて示す。いずれの測定値も誤差は指示値の±1%以内（最大誤差0.76%）であり、日本工業規格⁽⁷⁾で要求されている荷重精度を十分に満足している。

ストロークに関する無負荷状態における限界性能試験結果をTable 3に示す。本装置は定格流量の異なる二種類のサーボ弁（定格流量3.8ℓ/minと38ℓ/min）を有しており、大振幅低繰返し速度試験、小振幅高繰返し速度試験のいずれにも十分な性能を発揮できる。また、最大ストロークの±50mmは一般の疲労試験機と比較して大きくとってあり、次のような利点がある。

- 高周波誘導加熱用コイルの着脱を行わずに試験片がセットできる。
- 静的引張試験への応用も可能である。

本装置の適合試験片は次の3種類である。

- 平滑丸棒型試験片

Fig. 7に示すような平行部20mm、標点間距離15mm、直径10mmで、両端がM20×2のネジエンド式の高周波誘導加熱用試験片。

- 砂時計型試験片

Fig. 8に示すような最小部直径10mmで、両端がM20×2のネジエンド式の高周波誘導加熱用試験片。

以上の2種類の高周波誘導加熱用試験片はいずれもASTM E 606⁽⁸⁾および日本材料学会の推奨方法⁽⁹⁾に適合させてある。

- Compact - Tension 型試験片

Fig. 9に示すような板厚12.7mmの高周波誘導加熱用試験片。

この試験片は、高周波誘導加熱用に考案した特殊形状の試験片である。

いずれの試験片においても、ひずみの検出は、雰囲気槽内に収納したLVDT（Linear Variable Differential Transformer）を用いて行なうが、試験雰囲気の清浄性を損うことを防ぐ

ため、いずれもステンレス鋼シールド型にしてある。ひずみ検出器の性能は Table 4 にまとめて示す通りである。

3.2 真空系統（試験雰囲気制御系統）

本装置の真空系統のブロック線図を Fig. 10 に示す。この図に示した通り、表面反応がほとんど無視できる不活性な超高真空環境（ $\sim 10^{-9}$ Torr）を得るため、主ポンプとしてはターボモレキュラーポンプ（ N_2 に対する排気速度は $1450 \ell/\text{sec}$ ）を用い、フォアポンプとして油拡散ポンプおよび油回転ポンプを用いる構造となっている。ここで目標としているような超高真空下における真空度は、真空壁内面および雰囲気槽内収納部品からのガス放出と排気速度の平衡によって決定される。したがって、ここで採用したような排気速度の大きな真空ポンプを用いるとともに放出ガスを低減する必要がある。⁽¹⁰⁾ そのため荷重軸の貫通部はベローズを用いてシールし、フランジ、観察窓、ベローズ取り付け部、真空計取り付け部等の全ての接合部のシールには無酸素銅ガスケットを用いて 250°C までベーキング可能とした。また、すでに述べたように、雰囲気槽内に収納したひずみ検出器は、ステンレス鋼シールド型で、放出ガスを最小限に押えるよう配慮した。

この真空排気装置における到達真空度試験結果を Fig. 11 に示す。ベーキング後、約 4～5 時間で 10^{-9} Torr オーダーの真空度を得ることができる。本装置の真空排気系統をこのように高性能な仕様としておいた理由は、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での疲労試験における環境効果を抽出するための標準データの取得が重要な意義をもっと考えたからである。実際に、Ni-Cr-W 系耐熱合金では、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中における疲労試験結果と、超高真空中での疲労試験結果には、明らかな環境効果による差が認められた。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾

高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での疲労試験を行なう時には、雰囲気槽を 10^{-7} Torr オーダーまで真空掃引しておいてから、ヘリウムガスを循環式ループで供給する。本装置の雰囲気槽に直結してあるヘリウムガスループのフローシートを Fig. 12 に示す。このループは、循環系、精製系および不純物添加系から構成されており、その詳細はすでに報告されている。⁽³⁾⁽¹⁴⁾ 現在使用しているヘリウムガスは一般に原研 B 型ヘリウムと呼ばれているもので、その不純物組成はすでに Table 1 に示した通りである。試験片加熱時には、ステンレス製雰囲気槽を冷却している上に、後で述べるように局部加熱方式を採用したので、雰囲気槽内壁やチャック部、荷重軸等の表面でヘリウム中微量不純物との反応を防止でき、所定の雰囲気を厳密に制御した疲労試験が可能である。

雰囲気槽には直径 152 mm の観察窓を 5ヶ所設けて、試験片の観察を容易にしてあること、また残留ガス分析用のマススペクトロメーターを装備していることなども本装置の特徴といえる。

3.3 加熱系統

試験片の加熱は高周波誘導加熱方式（出力容量 15 kW，発振周波数 100 kHz，最高温度 1100°C ，常用温度 1000°C ）とした。この方式は局部加熱方式であるから、試験温度である 1000°C 付

近の高温となるのは、試験片標点部に限られる。したがって、チャック部の焼き付きを防ぐことができ、また試験片以外の部分がヘリウム中の微量不純物と表面反応をおこすことを防ぐことができる。さらに、すでに述べたように直径 152 mm もの大きさの観察窓を 5ヶ所も設けることができたわけであるが、これも局部加熱方式の特徴を生かしたものである。(他の加熱方式でこういうことをすれば、温度分布の均一性が極度に低下する。)

以上のように、本装置で採用した高周波誘導加熱方式は、多くの利点を有している反面、加熱を局所化する当然の結果として、温度分布の均一性を保つことが他の加熱方式(内熱ヒーター方式や外熱方式)と比較してやや困難とされている。⁽¹⁵⁾そこで、本装置では、3.1で述べた三種類の適合試験片のそれぞれに専用の加熱コイルを装備して、十分な調整を行なった。Fig. 13は、平滑丸棒型試験片の標点間内温度分布の測定例であるが、試験片標点間内±3℃に保つことが可能であった。この温度分布は、日本工業規格のクリープ試験法⁽¹⁶⁾および日本材料学会の推奨方法⁽⁹⁾で要求している値を十分に満足するものである。また、高周波誘導加熱方式は、測定器や電子計算機に電氣的ノイズを発生させるという懸念があるので、本装置では電氣的ノイズの対策として、高周波電源専用のキュービクル式高圧受電設備の設置、専用第1種接地工事を行なった。

なお、前述した高周波誘導加熱方式に関する問題点については、次のような検討結果を得て解決した。

- ① 試験片と気体の熱容量、熱伝達の関係から、試験片表面温度を厳密に制御すれば、実質的には問題ない。
- ② 温度制御用熱電対のスポット溶接部に、たまたまき裂が発生した場合に、温度分布の乱れが生じたので、温度制御用熱電対のみは標点外にスポット溶接し、標点間内の熱電対は温度測定用に用い、き裂発生前に、この標点間内を所定の温度に保てるような条件で、温度制御用熱電対のスポット溶接位置の温度を一定に保つようにした。
- ③ 10^{-1} Torr 程度の弱真空中で、放電現象が観察されることがあるが、高温ガス炉冷却材近似条件では問題ない。

3.4 電子計算機

本装置は、試験装置の制御とデータ取得およびデータ処理のための電子計算機を装備している。本装置の電子計算機システムの構成は、Fig. 5の概観写真およびFig. 6のブロック線図に示したように、CPU (Central Processing Unit, 中央処理装置)、補助記憶装置(フロッピディスク)、CRT ディスプレイユニット (Cathode Ray Tube Display Unit)、ハードコピーユニットから成っている。記憶容量はCPUが24 kW (コアメモリ 16 kW, ICメモリ 8 kW)、フロッピディスクが128 kW × 2 = 256 kWとなっている。プログラミング方式は、BASIC 言語を基本としたBICOMS (Built-In Computation and Monitoring System) を用いる。

本電子計算機システムで、高温低サイクル疲労試験における各サイクルのヒステリシスループ(1サイクル当り、最大160データ点で構成)、各サイクルの応力およびひずみの経時変化、試験終了までの最大最小応力、最大最小ひずみの経時変化等を、また疲労き裂成長試験時におけるき裂成長曲線、 $da/dN - \Delta K$ 線図等をCRT ディスプレイユニットに表示でき、また必要に依

じてそのハードコピーを得ることができる。このようなデータ取得およびデータ処理以外に、関数発生装置としても使用するため、任意の演算制御（例えばK値制御等）が可能となる。

4. ハステロイXRの高温低サイクル疲労

本章では、完成した高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置を用いて得られたハステロイXRの高温低サイクル疲労試験データの一部を紹介する。

4.1 実験方法

供試材料は、Ni基耐熱合金のハステロイXRで、その化学組成をTable 5に、900℃における機械的性質をTable 6にそれぞれ示す。試験片はFig. 7にその形状を示したような平滑丸棒型試験片である。試験条件は900℃一定、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$ の完全両振りの軸ひずみ制御疲労試験とした。試験雰囲気はTable 1に示したような不純物組成を有する原研B型ヘリウム中であり、ヘリウムガス流量は不純物の反応による消耗が実質的なガス組成の変化を生じないように配慮し、毎分2ℓとした。この場合、試験セクションにおける気体のみかけの全量置換時間は約20分となる。

4.2 実験結果

試験結果の一覧表をまとめてTable 7に示す。破損繰返し数 N_f としては、引張側最大応力が定常値から25%減少時を採用した⁽⁹⁾この表に示すように、破断位置はいずれも標点間内であり⁽¹⁷⁾温度分布の均一性が悪いときに生じるといわれる⁽¹⁵⁾バルジングやネッキングの不安定変形、および標点外破断は起こらず、正しく高温低サイクル疲労試験が行なえた。

Fig. 14, Fig. 15にそれぞれ全ひずみ範囲と破損繰返し数の関係、塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係を示す。なお塑性ひずみ範囲としては $1/2 N_f$ 時のものを採用した。塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の間にはManson-Coffinの関係式⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C \quad (1)$$

$\Delta \epsilon_p$: 塑性ひずみ範囲, N_f : 破損繰返し数

α, C : 定数であり、本実験結果では $\alpha = 0.616$, $C = 0.505$

が成立している。

Fig. 16, Fig. 17にそれぞれ、本試験装置の電子計算機で取得した、 $\Delta \epsilon = 0.8\%$ の場合の $1/2 N_f$ 時におけるヒステリシスループの例と引張側最大応力の変化の様子を示す。

以上に示したように、最終的に開発した高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置で、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での900℃における高温低サイクル疲労試験を、軸ひずみ制御の完全両振りの条件で行ない、電子計算機によって、疲労試験データを取得することが可能であった。

じてそのハードコピーを得ることができる。このようなデータ取得およびデータ処理以外に、関数発生装置としても使用するため、任意の演算制御（例えばK値制御等）が可能となる。

4. ハステロイXRの高温低サイクル疲労

本章では、完成した高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置を用いて得られたハステロイXRの高温低サイクル疲労試験データの一部を紹介する。

4.1 実験方法

供試材料は、Ni基耐熱合金のハステロイXRで、その化学組成をTable 5に、900℃における機械的性質をTable 6にそれぞれ示す。試験片はFig. 7にその形状を示したような平滑丸棒型試験片である。試験条件は900℃一定、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$ の完全両振りの軸ひずみ制御疲労試験とした。試験雰囲気はTable 1に示したような不純物組成を有する原研B型ヘリウム中であり、ヘリウムガス流量は不純物の反応による消耗が実質的なガス組成の変化を生じないように配慮し、毎分2ℓとした。この場合、試験セクションにおける気体のみかけの全量置換時間は約20分となる。

4.2 実験結果

試験結果の一覧表をまとめてTable 7に示す。破損繰返し数 N_f としては、引張側最大応力が定常値から25%減少時を採用した⁽⁹⁾この表に示すように、破断位置はいずれも標点間内であり⁽¹⁷⁾温度分布の均一性が悪いときに生じるといわれる⁽¹⁵⁾バルジングやネッキングの不安定変形、および標点外破断は起こらず、正しく高温低サイクル疲労試験が行なえた。

Fig. 14, Fig. 15にそれぞれ全ひずみ範囲と破損繰返し数の関係、塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の関係を示す。なお塑性ひずみ範囲としては $1/2 N_f$ 時のものを採用した。塑性ひずみ範囲と破損繰返し数の間にはManson-Coffinの関係式⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C \quad (1)$$

$\Delta \epsilon_p$: 塑性ひずみ範囲, N_f : 破損繰返し数

α, C : 定数であり、本実験結果では $\alpha = 0.616$, $C = 0.505$

が成立している。

Fig. 16, Fig. 17にそれぞれ、本試験装置の電子計算機で取得した、 $\Delta \epsilon = 0.8\%$ の場合の $1/2 N_f$ 時におけるヒステリシスループの例と引張側最大応力の変化の様子を示す。

以上に示したように、最終的に開発した高周波誘導加熱方式高温疲労試験装置で、高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中での900℃における高温低サイクル疲労試験を、軸ひずみ制御の完全両振りの条件で行ない、電子計算機によって、疲労試験データを取得することが可能であった。

5. ま と め

1000 °Cに近い高温で、多目的高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の不純物組成を厳密に制御した条件下での耐熱合金の疲労試験を行なう装置を開発してきた。その結果、次のような知見を得るとともに、最終的に所定の目標を達成した高温疲労試験装置を開発することができた。

外熱式の場合は次のような問題があった。

- 疲労試験機ではクリープ試験機と比較して、荷重軸、チャック等が大きくなり、クリープ試験機の開発で成功をみている石英管の内径 77.5 mm に対して少くとも内径 150 mm を要し、石英管製雰囲気槽は現実的でなくなる。また、ひずみ測定もクリープに比べて疲労の場合は、信頼性や動的追従性の要求がきびしく、石英管製の雰囲気槽の場合、困難が多い。
- 試験雰囲気槽を金属製にすることは、すでに高温ガス炉関連試験ではほとんど実用性が無いことが明らかであり、耐熱性の限界のみならず、ヘリウム中微量不純物との反応が制約となる。抵抗加熱ヒーター内蔵式の場合には次のような特徴があった。
- 試験雰囲気槽を冷却し、抵抗加熱ヒーター、反射板の一部、チャック部等をモリブデン製とすることによって、不活性化できる上、分子状酸素のゲッターともなるために、厳密に雰囲気を制御できる。
- 温度分布均一性は高周波誘導加熱方式と比較して良好であり、また特殊形状の試験片に対しても均一温度が得られる。
- 一方、試験雰囲気槽内では、試験片以外の部分もかなりの高温となっているので、ひずみ検出および試験片とチャック部の焼き付き防止に課題が残る。このため、ひずみ制御の疲労試験、圧縮荷重のかかる疲労試験は困難である。

現在は温度均一性の特徴を生かして、Fig. 18 に示したような特殊試験片を用いて、引張り-引張りモードの荷重制御の高温疲労試験を行なっている。

以上のような知見を生かして、最終的に開発した高温疲労試験装置の主要な特徴は次の通りである。

- 高周波誘導加熱方式を採用することにより、試験片のみを高温とし、試験片以外の部分が高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中の微量不純物と表面反応を起こすことを防ぐとともに、チャック部の焼き付きも回避した。
- ひずみ検出器はステンレス鋼でシールディングし、また接合部のシールには無酸素銅ガスケットを使用して、放出ガスを最小限に押えた。さらに、真空排気用の主ポンプとしてターボモレキュラーポンプを使用することにより、環境効果定量化のための標準データ取得に必要な 10^{-9} Torr オーダー（室温、1000 °Cでは 10^{-8} Torr オーダー）の超高真空条件下でも試験が行なえるようにした。
- 電子計算機（CPU 容量 24 kW）を装備することにより、試験の制御、データ取得およびデータ処理を自動化し、疲労試験データの情報をより厳密にかつ詳細にすることができるようになった。

本装置を用いて、ハステロイ XR の 900 °C 一定、完全両振りの軸ひずみ制御の高温低サイクル疲労試験を高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中に行ない、本装置が所定の目標を達成した性能を有していることを確認した。

謝 辞

試作装置の製作を担当されました、高温工学部高温材料強度研究室、菊山紀彦副主任研究員に感謝の意を表します。また、本装置の製作に当り、多くの御助言を賜りました、燃料工学部材料工学研究室、中島甫副主任研究員およびヘリウムガスループの運転を担当されている材料工学研究室、新藤雅美氏、鈴木富男氏に感謝の意を表します。

本装置を用いて、ハステロイ XR の 900 °C 一定、完全両振りの軸ひずみ制御の高温低サイクル疲労試験を高温ガス炉冷却材近似ヘリウム中に行ない、本装置が所定の目標を達成した性能を有していることを確認した。

謝 辞

試作装置の製作を担当されました、高温工学部高温材料強度研究室、菊山紀彦副主任研究員に感謝の意を表します。また、本装置の製作に当り、多くの御助言を賜りました、燃料工学部材料工学研究室、中島甫副主任研究員およびヘリウムガスループの運転を担当されている材料工学研究室、新藤雅美氏、鈴木富男氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(May, 1980)
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Section III, Division 1 (1978)
- (3) 小川 豊, 近藤達男; 日本原子力研究所レポート JAERI-M 8801 (1980)
- (4) 菊山紀彦, 新藤雅美, 中島 甫; 第 15 回高温強度シンポジウム前刷集 (1977), 40
- (5) 菊山紀彦, 近藤達男; 日本材料学会講演前刷集 (1973)
- (6) 辻 宏和, 近藤達男; 鉄と鋼, 66, 4 (1980), S 468
- (7) JIS Z 3103 (1976)
- (8) Annual Book of ASTM Standards E 606 (1980), 694
- (9) 日本材料学会高温強度部門委員会報告「熱疲労共通試験結果報告」; 材料, 24, 258 (1975), 254
- (10) 菊山紀彦, 奥 達雄, 近藤達男; 材料, 29, 319 (1980), 340
- (11) M. Tamura, Y. Ogawa, H. Tsuji and T. Kondo; to be presented at BNES Conference, Gas Cooled Reactors Today (Bristol, 1982)
- (12) T. Kondo, M. Shindo, M. Tamura, H. Tsuji, Y. Kurata and T. Tsukada; Proceedings of the 3rd Japan-US Seminar on HTGR Safety Technology (1982)
- (13) 辻 宏和, 近藤達男; 鉄と鋼, 68, 5 (1982), S 655
- (14) 新藤雅美, 近藤達男; 日本原子力研究所レポート JAERI-M 8770 (1980)
- (15) 平 修二 編 “熱応力と熱疲労” (日刊工業新聞社) (1974), 87
- (16) JIS Z 2271, Z 2272 (1978)
- (17) JIS Z 2241 (1980)
- (18) S. S. Manson; NACA TN 2933 (1953)
- (19) L. F. Coffin Jr.; Proc. 4th Sagamore Conf. (1957), 219

Table 1 Impurity levels in the test environment (μatm).

H_2	H_2O	CO	CO_2	CH_4
200 - 210	0.8 - 1.2	100 - 110	2 - 3	5 - 6

Table 2 Summary of the load cell's accuracy.

測定レンジ (ton)	測定荷重 (ton)	検力器定数	測定値		誤差 (%)	
			往	復	往	復
7.5	1.5	791	797	793	+ 0.76	+ 0.25
	3.0	1581	1579	1584	- 0.13	+ 0.19
	4.5	2373	2373	2378	0	+ 0.21
	6.0	3163	3160	3166	- 0.09	+ 0.09
	7.5	3958	3955		- 0.08	
5	1.0	994	991	993	- 0.30	- 0.10
	2.0	1993	1991	1996	- 0.10	+ 0.15
	3.0	2992	2994	2996	+ 0.07	+ 0.13
	4.0	3989	3990	3993	+ 0.03	+ 0.10
	5.0	4991	4989		- 0.04	
2.5	0.5	498	496	497	- 0.40	- 0.20
	1.0	994	993	995	- 0.10	+ 0.10
	1.5	1497	1496	1499	- 0.07	+ 0.13
	2.0	1993	1993	1998	0	+ 0.25
	2.5	2494	2494		0	
1	0.2	650	646	647	- 0.62	- 0.46
	0.4	1295	1300	1302	+ 0.39	+ 0.54
	0.6	1949	1948	1953	- 0.05	+ 0.21
	0.8	2605	2604	2607	- 0.04	+ 0.08
	1.0	3265	3260		- 0.15	
0.5	0.1	1469	1464	1467	- 0.34	- 0.14
	0.2	2950	2944	2943	- 0.20	- 0.24
	0.3	4412	4407	4409	- 0.11	- 0.07
	0.4	5889	5882	5882	- 0.12	- 0.12
	0.5	7379	7372		- 0.09	

Table 3 Performance test results of the piston stroke.

サーボ弁定格流量	最大ストローク	周波数
3.8 ℓ / min	± 50 mm	0.3 Hz
	± 20 mm	1 Hz
38 ℓ / min	± 2 mm	10 Hz
	± 0.3 mm	30 Hz

Table 4 Summary of the strain meters' performance.

ひずみ検出器	測定レンジ	応答性能
軸ひずみ検出器	± 1.0, ± 0.5, ± 0.2, ± 0.1 mm	$\Delta \epsilon_{total} = 1\%$ の時 $\dot{\epsilon} = 1\% / \text{sec}$
径ひずみ検出器	± 0.5, ± 0.2, ± 0.1, ± 0.05 mm	$\Delta \epsilon_{total} = 0.4\%$ の時 $\dot{\epsilon} = 0.2\% / \text{sec}$
CT型試験片用 ピン間変位検出器	± 2.5, ± 1.25, ± 0.5, ± 0.25 mm	1 Hz

上記, いずれも測定精度 ± 0.5%

(各レンジフルスケールに対して)

制御精度 ± 1%

(各レンジフルスケールに対して)

Table 5 Chemical composition of Hastelloy XR (wt%).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	B	Ni	Al	Ti	Nb	N
0.07	0.83	0.32	<0.005	0.006	21.84	0.19	9.06	0.53	18.20	<0.001	Ba1.	<0.05	<0.05		0.007

Table 6 Tensile properties of Hastelloy XR at 900°C.

$\sigma_{0.2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	Elongation %	Reduction of area %
17.5	21.6	96.2	83.6

Table 7 Low cycle fatigue test results of Hastelloy XR at 900°C.

Specimen number	Total strain range $\Delta\varepsilon$, %	Plastic strain range $\Delta\varepsilon_p$, %	Number of cycles to failure, N_f	Position of fracture *
1	0.80	0.617	1326	B
2	0.40	0.182	9978	A
3	1.20	0.983	511	A
4	0.28	0.079	32238	A
5	0.80	0.574	1664	A

* JIS Z 2241

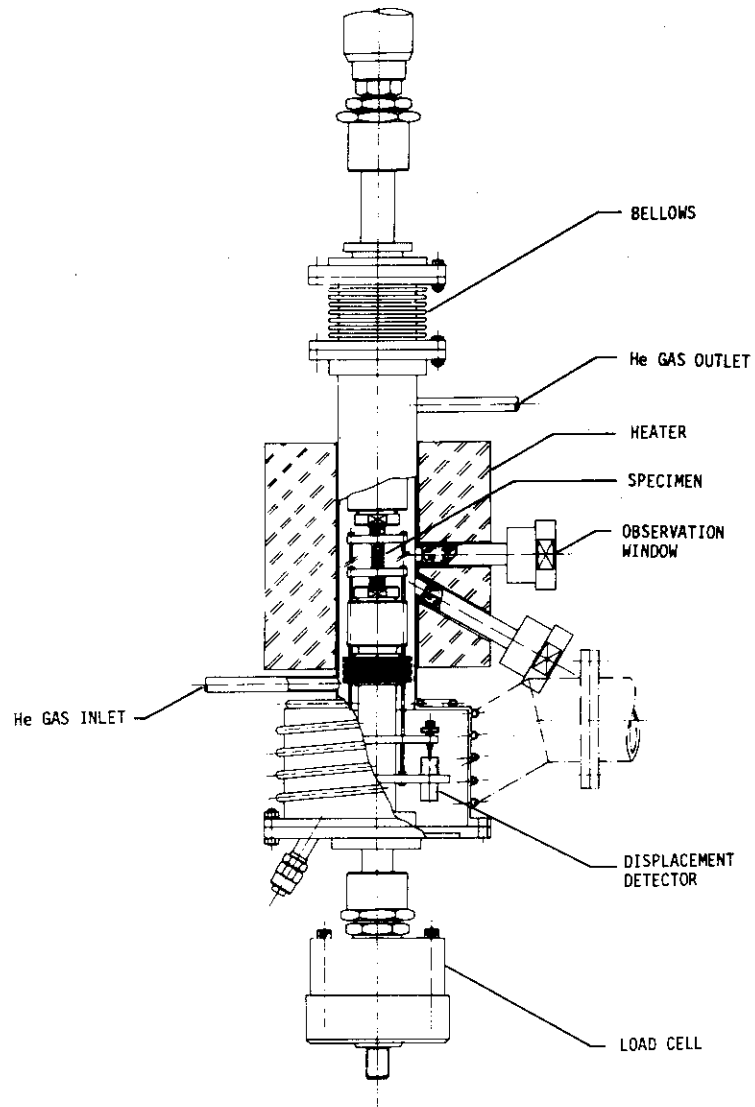


Fig. 1 Fatigue test apparatus with an external heater.

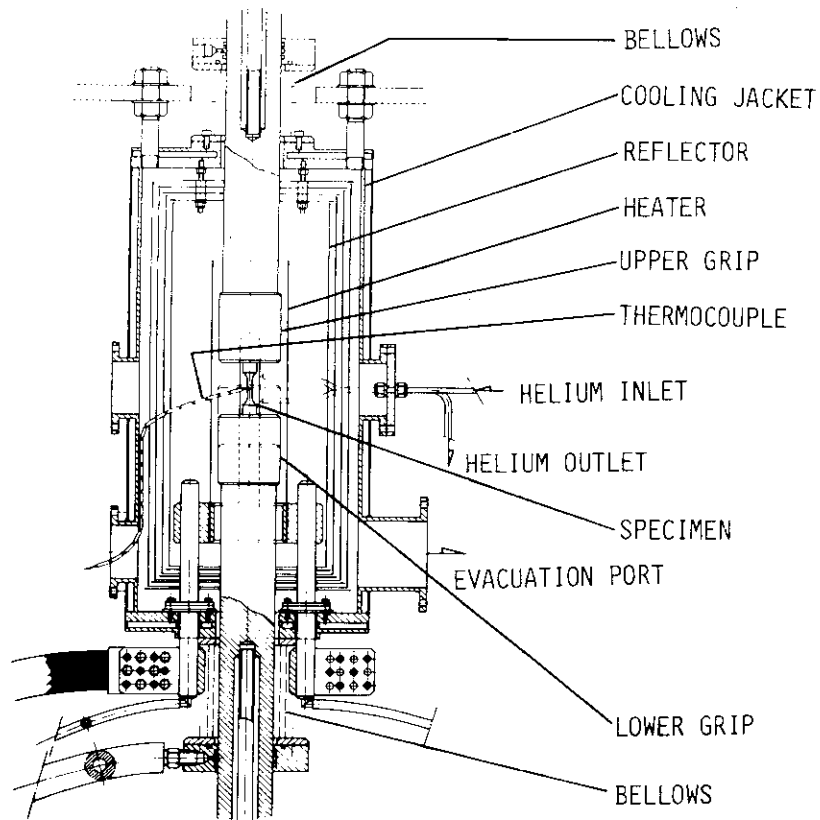


Fig. 2 Fatigue test apparatus with internal resistance heaters.

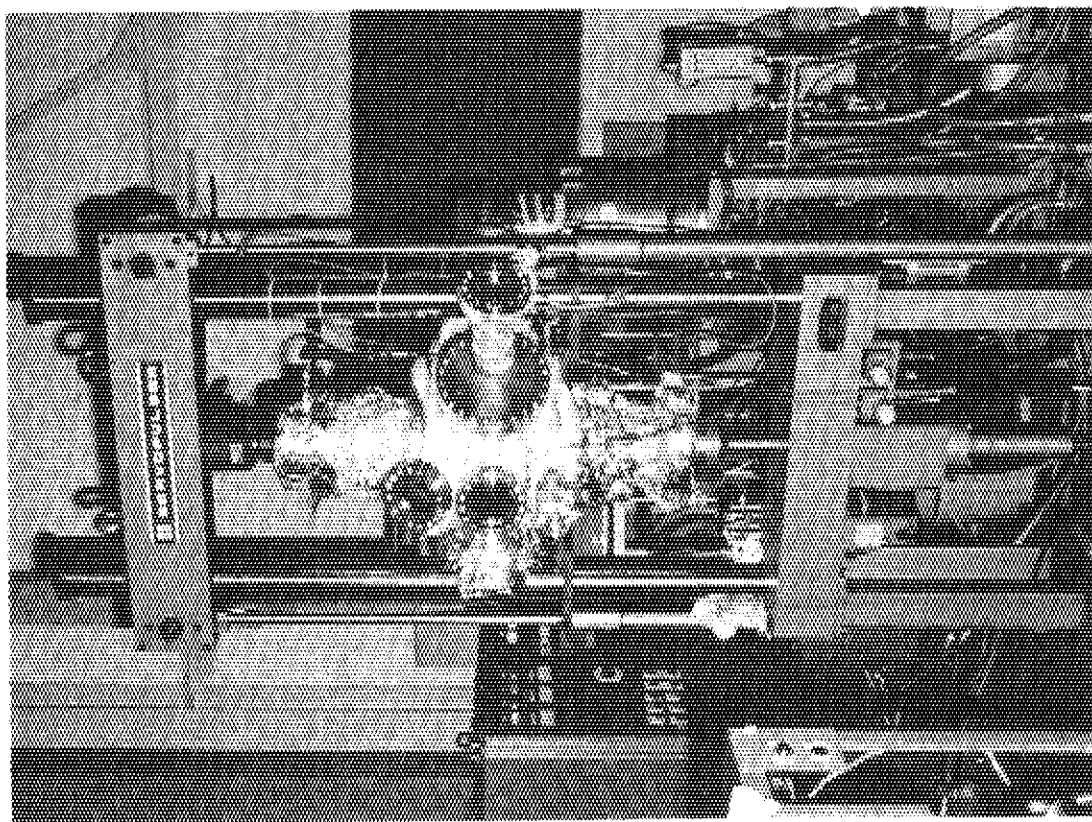


Fig. 3 Fatigue test apparatus with an induction heater.

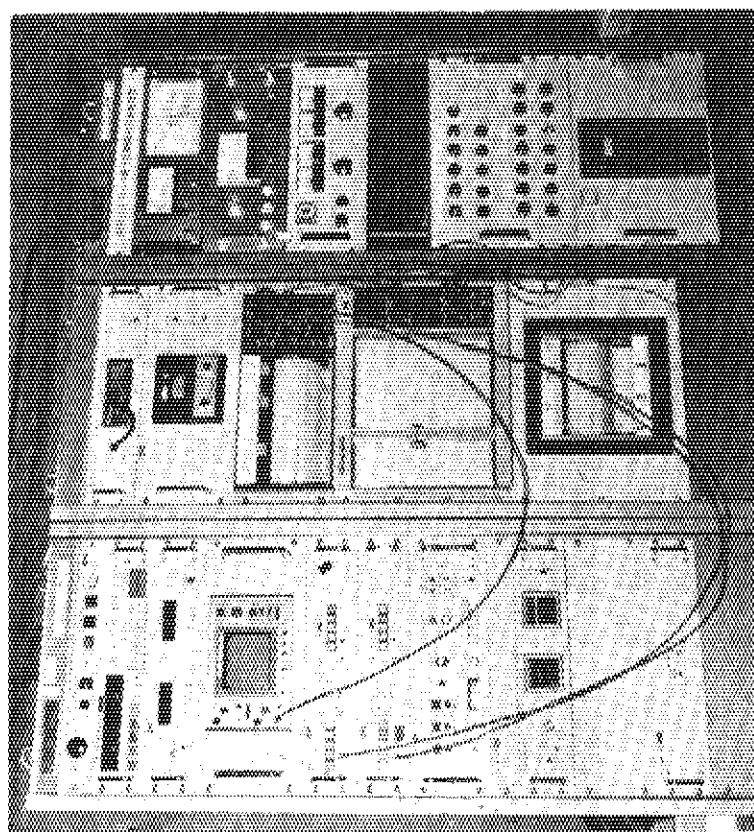


Fig. 4 Control unit of the fatigue test apparatus.

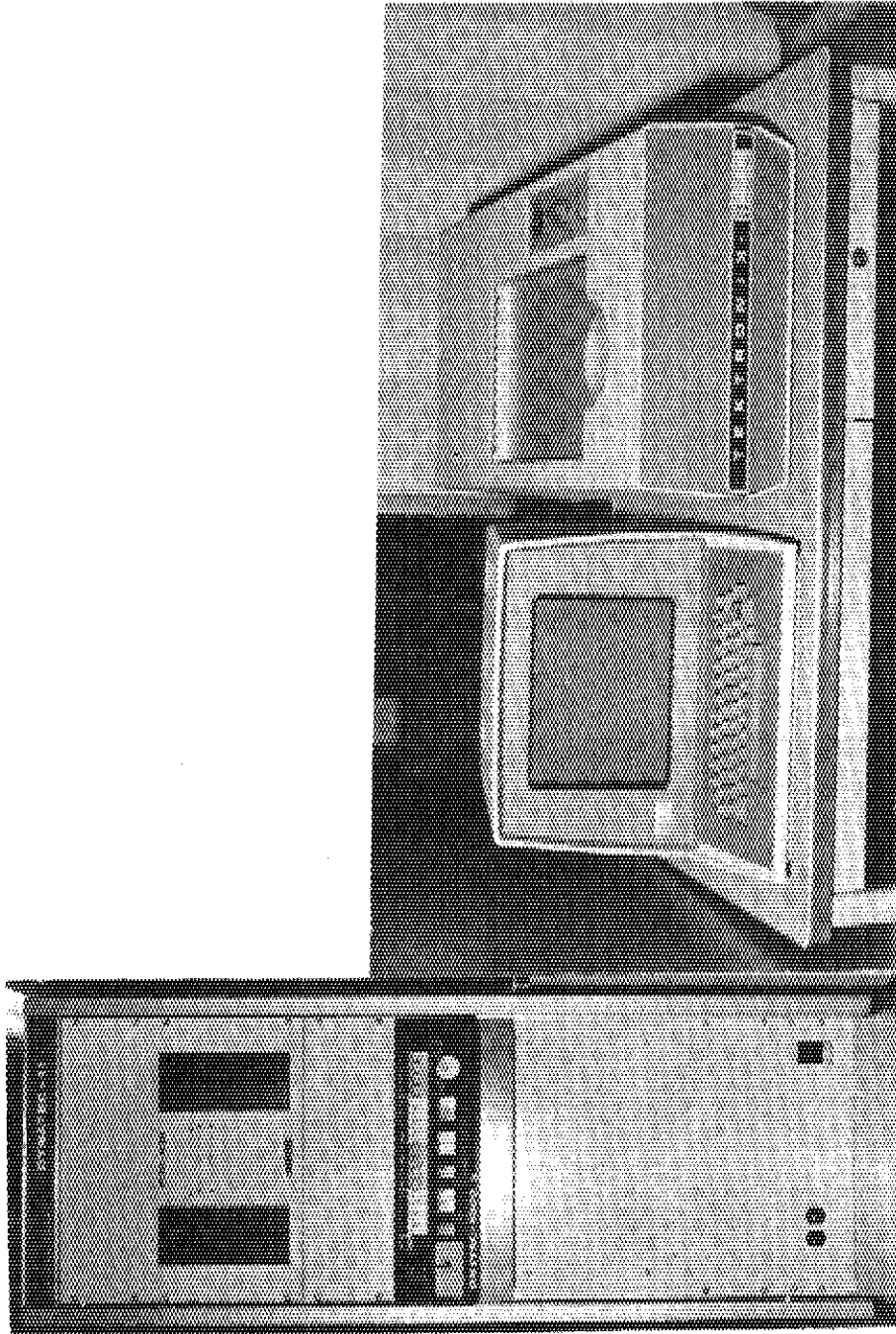


Fig. 5 Computer system of the fatigue test apparatus.

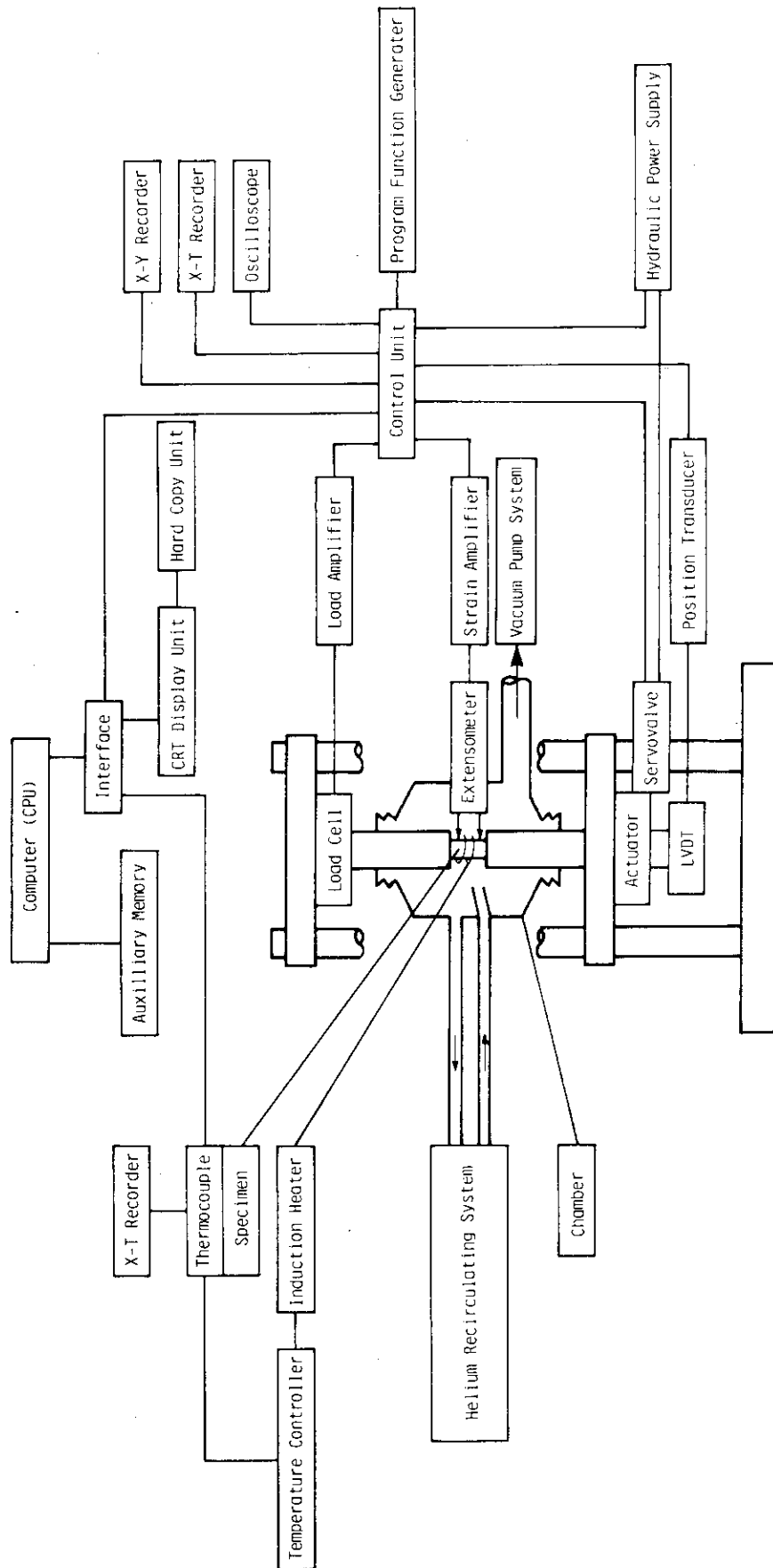


Fig. 6 Block diagram of the fatigue test apparatus.

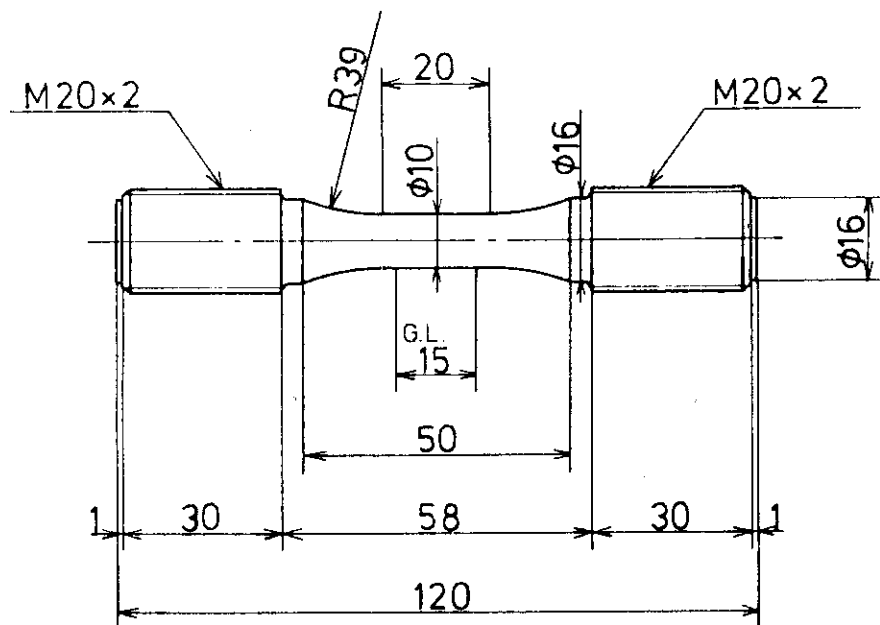


Fig. 7 Geometry of specimen.
(smooth surface cylindrical specimen, unit : mm)

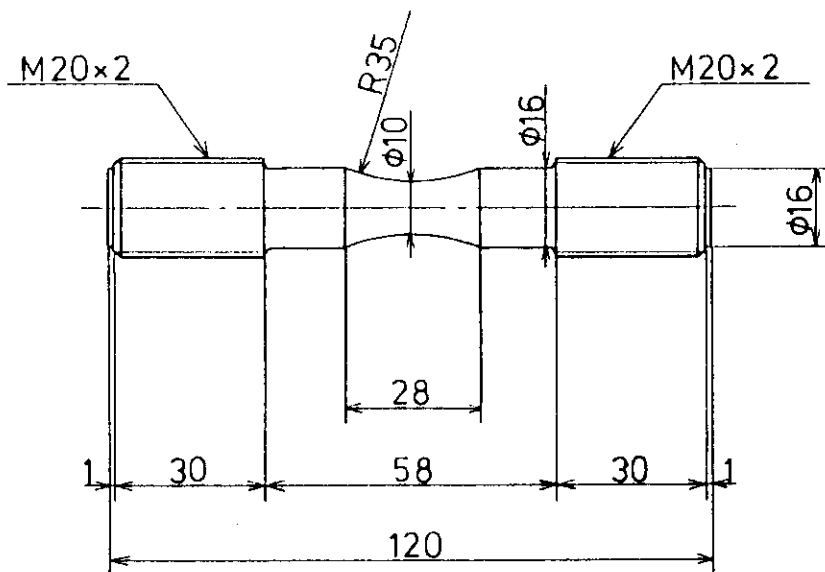


Fig. 8 Geometry of specimen.
(smooth surface hour glass type specimen, unit : mm)

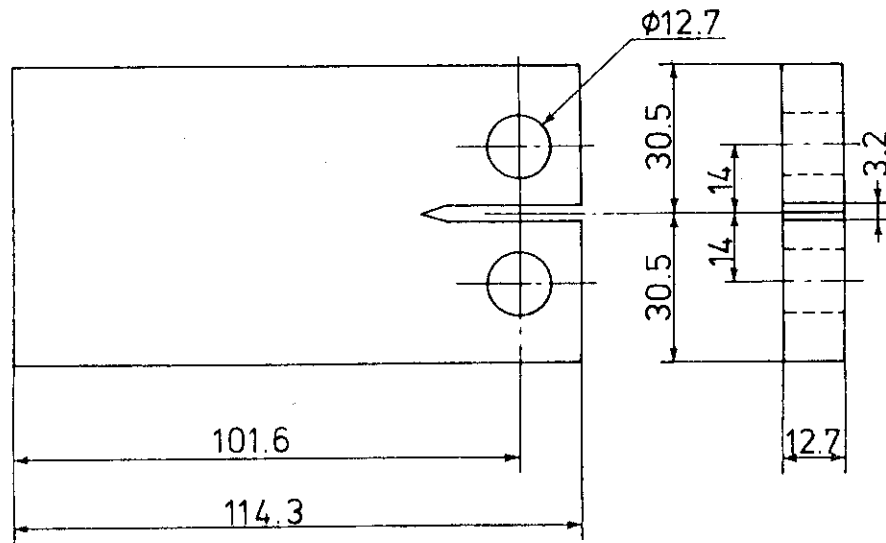


Fig. 9 Geometry of specimen.
(Compact-tension type specimen, unit : mm)

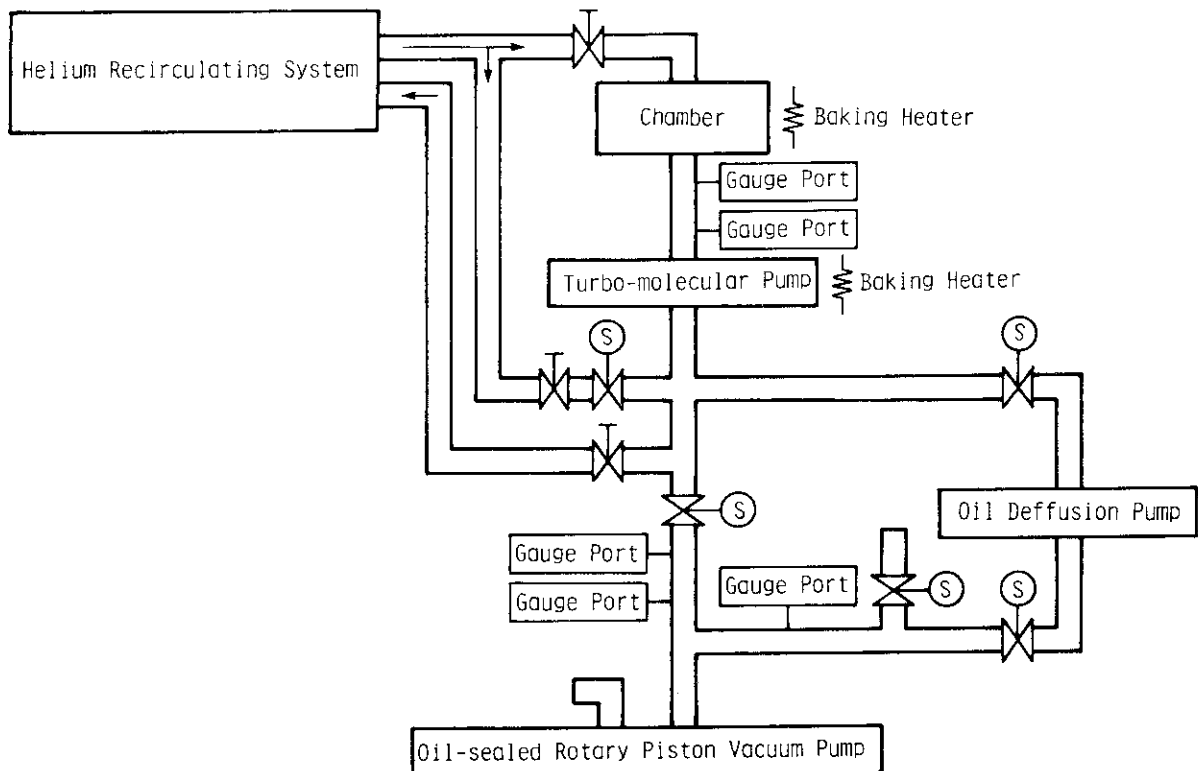


Fig. 10 Block diagram of vacuum pump system.

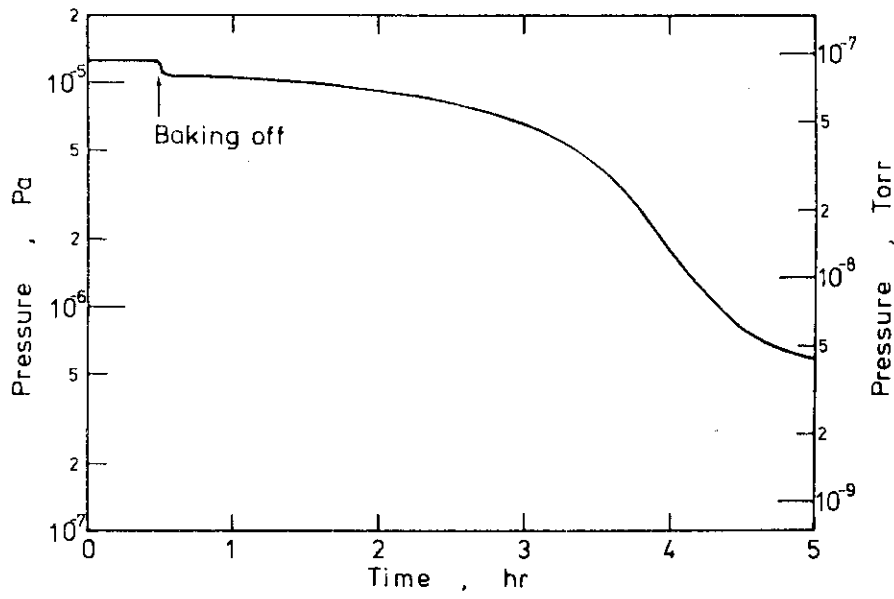


Fig. 11 Pressure versus time for the chamber in high vacuum range.

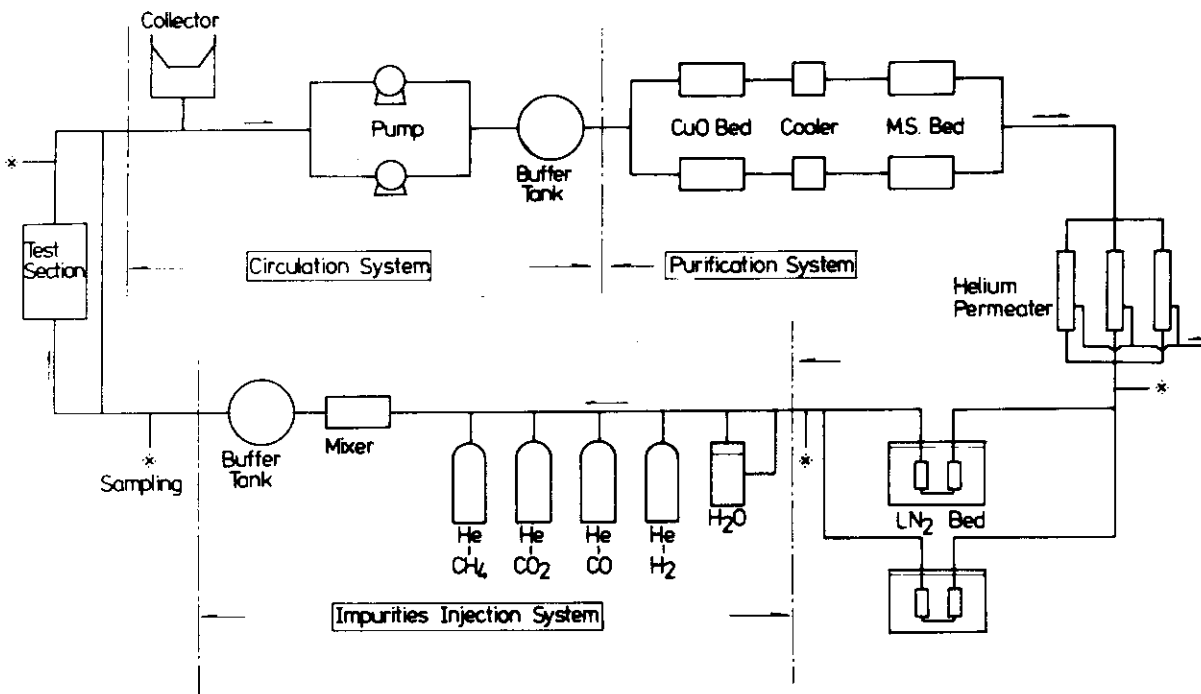


Fig. 12 Flow-sheet of helium gas loop.

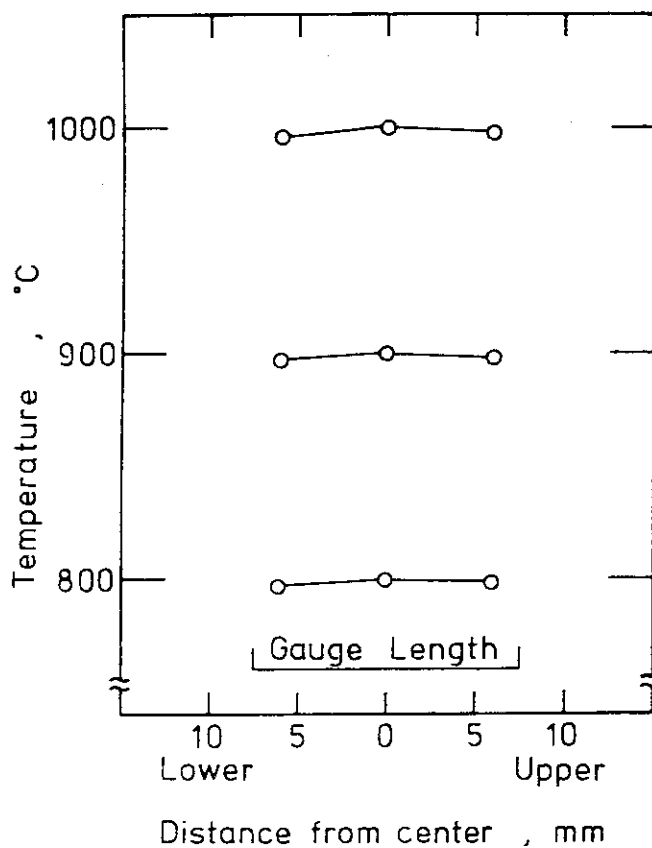


Fig. 13 Profiles of temperature on the surface of specimen along the axial direction

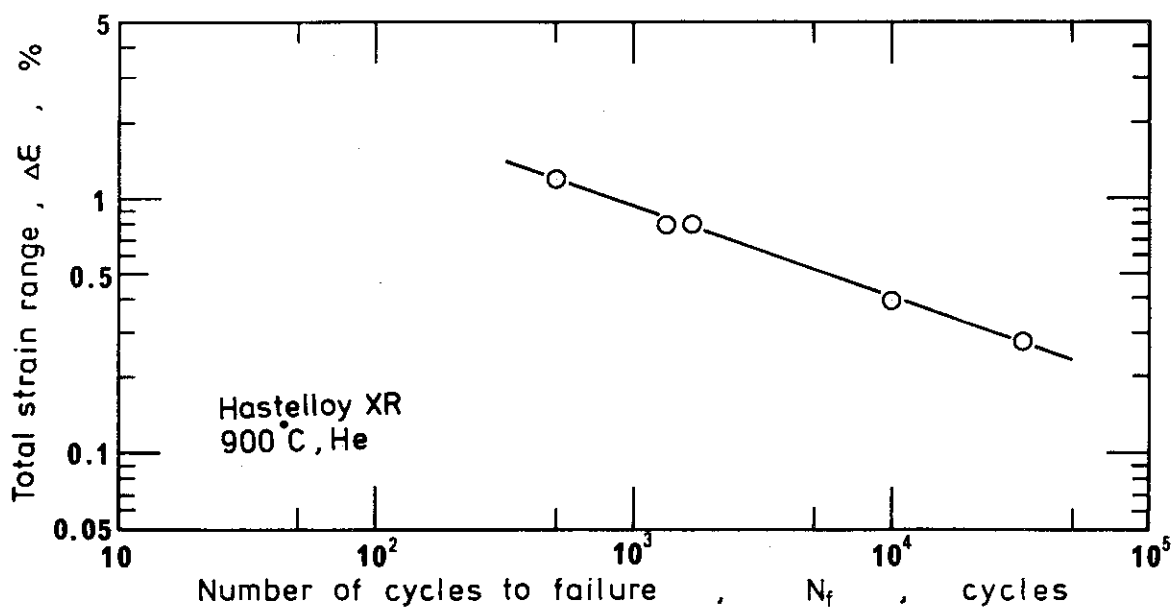


Fig. 14 Relation between total strain range and the number of cycles to failure.

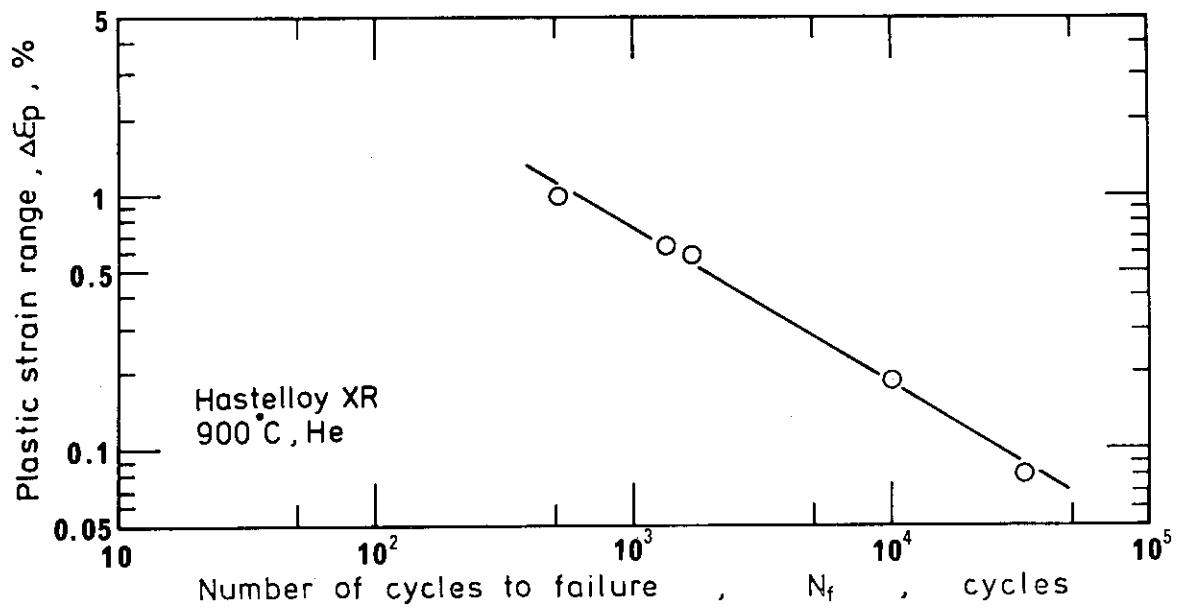


Fig. 15 Relation between plastic strain range and the number of cycles to failure.

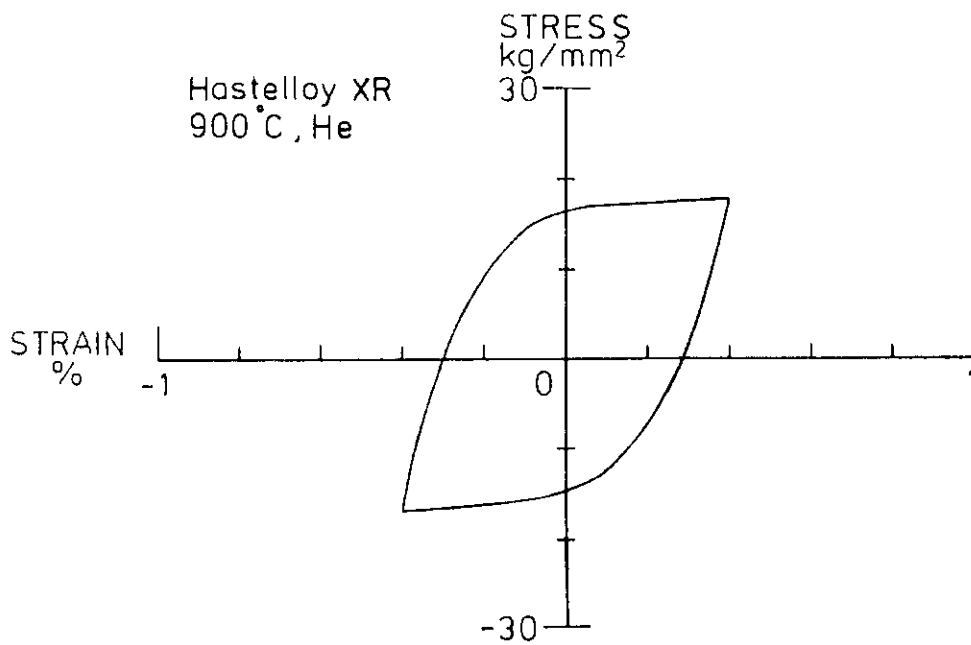


Fig. 16 Recorded hysteresis loop during fatigue test.

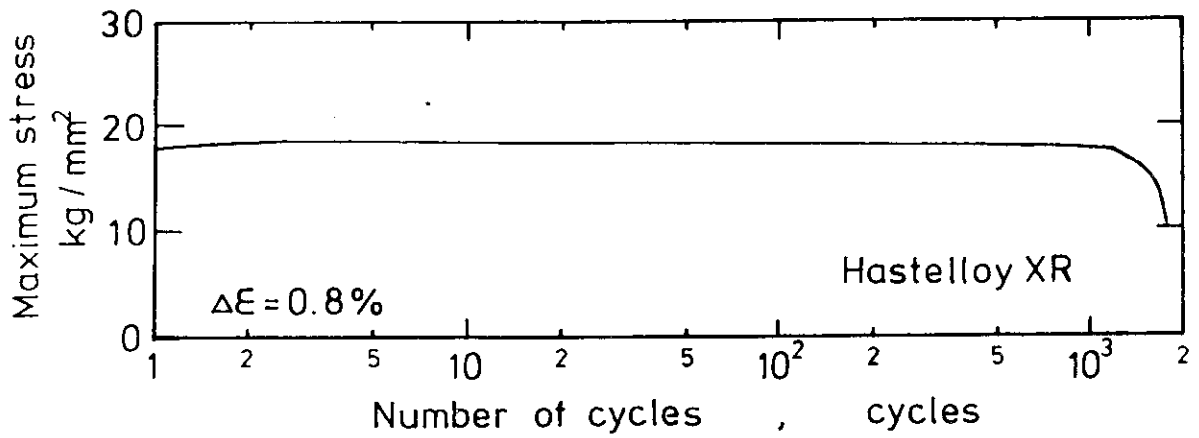


Fig. 17 Stress response during low cycle fatigue test.

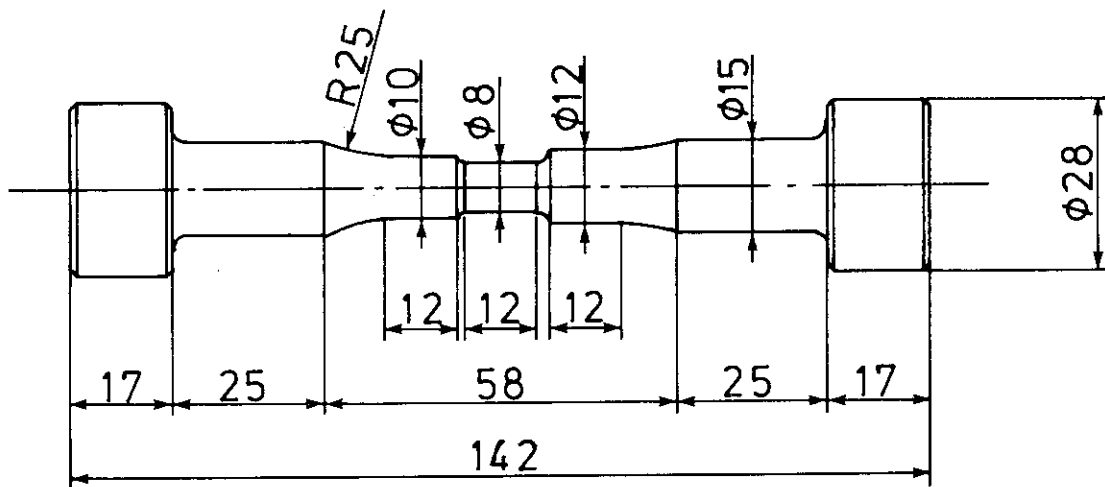


Fig. 18 Geometry of specimen. (special multiple diameter type specimen, unit : mm)